平成30年度林業成長産業化総合対策補助金等
(CLT等新たな木質建築部材利用促進・定着事業)

燃えしろ設計を考慮した
軸組併用型CLTパネル工法の開発

平成31年3月

木構造振興株式会社

平成30年度　林業成長産業化総合対策補助金等
（CLT等新たな木質建築部材利用促進・定着事業）

燃えしろ設計を考慮した軸組併用型CLTパネル工法の開発

報告書　目次

＊委員名簿

＊はじめに

第1章　本事業の概要
1.1　本事業の目的　・・・・・・・・・・・・　1
1.2　本年度事業実施に向けての課題整理　・・・・・・・・・・・・　2
1.3　実施内容　・・・・・・・・・・・・　5
1.4　委員会、ワーキングの開催　・・・・・・・・・・・・　7

第2章　モデル建物の概要
2.1　設計条件　・・・・・・・・・・・・　9
2.2　壁の鉛直荷重の検討　・・・・・・・・・・・・　18
2.3　特定避難時間倒壊等防止建築物の要求性能への対応　・・・・・・・・・・・・　20
2.4　耐震フレームが受ける水平力の整理　・・・・・・・・・・・・　22

第3章　CLTと構造用集成材のめり込み試験
3.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・　25
3.2　試験体概要　・・・・・・・・・・・・　25
3.3　試験用集成材及びCLTの製造について　・・・・・・・・・・・・　26
3.4　試験方法　・・・・・・・・・・・・　29
3.5　試験結果　・・・・・・・・・・・・　29
3.6　CLTと集成材の接触面の形状の変化　・・・・・・・・・・・・　46
3.7　既往のめり込み推定式との比較　・・・・・・・・・・・・　51

第4章　耐震フレーム：２層の構面せん断実験
4.1　実験概要　・・・・・・・・・・・・ 67
4.2　試験体詳細・計測計画　・・・・・・・・・・・・ 69
4.3　試験結果の評価方法　・・・・・・・・・・・・ 77
4.4　試験結果：荷重変形関係・特性値・破壊の進行　・・・・・・・・・・・・ 82
4.5　破壊性状の詳細　・・・・・・・・・・・・ 90
4.6　接合部等の変位および鋼製柱軸力の測定結果　・・・・・・・・・・・・113

第5章　CLT－集成材間のめり込み現象の数値解析
5.1　解析モデル　・・・・・・・・・・・・131
5.2　材料定数の設定　・・・・・・・・・・・・132
5.3　ヤング係数の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・134
5.4　降伏応力の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・135
5.5　接線係数の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・136
5.6　試験体寸法が異なる場合の解析結果　・・・・・・・・・・・・137
5.7　集成材の幅と試験体の剛性・耐力との関係性について　・・・・・・・・・・・・140
5.8　まとめ　・・・・・・・・・・・・143

第6章　耐震フレームの解析
6.1　解析の概要　・・・・・・・・・・・・145
6.2　事前解析　・・・・・・・・・・・・145
6.3　事後解析　・・・・・・・・・・・・149
6.4　3層構造体での解析　・・・・・・・・・・・・151
6.5　まとめ　・・・・・・・・・・・・153

第7章　まとめ
7.1　実験を踏まえての評価　・・・・・・・・・・・・155
7.2　構造解析を踏まえての評価　・・・・・・・・・・・・156
7.3　実用化に向けた今後の課題　・・・・・・・・・・・・157

委員名簿

委員長　腰原幹雄　東京大学生産技術研究所　教授

委　員　荒木康弘　国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部
基準認証システム研究室　主任研究官

田中　圭　大分大学理工学部創生工学科　准教授

中川貴文　京都大学生存圏研究所生活圏構造機能分野　准教授

光井周平　呉工業高等専門学校建築学分野　准教授

森　拓郎　広島大学大学院工学研究科　准教授

事務局：原田浩司　木構造振興　客員研究員

はじめに

CLT の耐震壁への利用方法として、次ページの表に示すような、6 種類の方法が考えられる。日本農林規格の対象となった平成 25 年から、CLT の基準強度、及び CLT パネル工法の仕様規定が示される平成 28 年までに設計された、CLT を壁に使用した建築物は、長期荷重を軸組工法に負担させ、地震時・暴風時に短期に生じる水平力のみ CLT に負担させる方法が主流（TYPE　A、TYPE　B）であった。しかし平成 28 年 4 月以降は、時刻歴応答解析以外の構造設計での建物の安全性の検証が可能になったため、平成 29 年以降は、CLT パネル工法による建築物（TYPE　C、TYPE　D、TYPE E）が急増することになった。

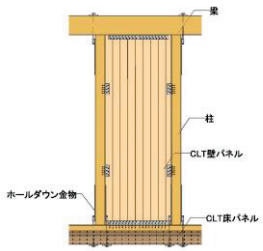
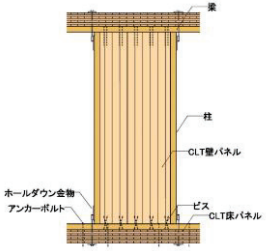
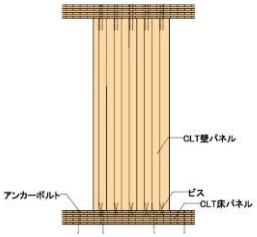
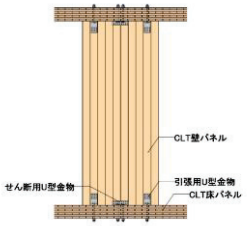
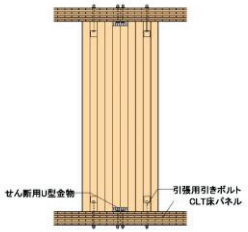
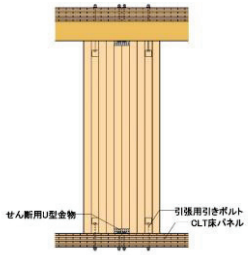
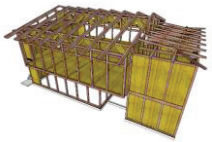
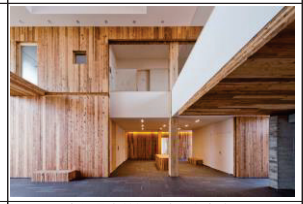
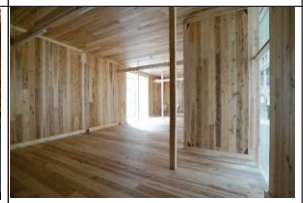
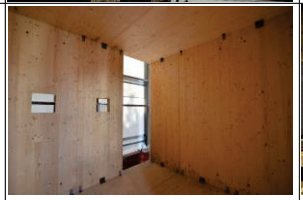
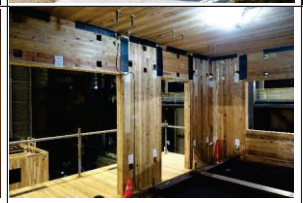
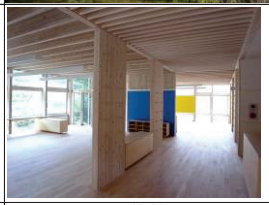
一方、平成 27 年の基準法改正で、従来、耐火建築物でなければならなかった 3 階建て学校校舎を準耐火建築物で建築可能になったが、木造での 3 階建て学校校舎の事例は希少で、平成 26 年に学校校舎の標準設計 JISA3301 が改正されたものの、2 階建ての事例も、未だ数少ない状況にある。理由として、教室空間が広いため、耐力線の配置が制限されると共に、採光への配慮から広い開口部が必要になるため、耐力壁が負担する水平力が多層階になると増えるため、従来の筋交い式や、面材仕様の耐力壁では対応しにくい点があげられる。そこで筋交い式、面材仕様の耐力壁に代えて、高耐力が期待される CLT を使用する、TYPE　F のシステムの実用化が期待される。床や屋根の軸部材による構成は、木造で課題となる、クリープ等による変形性能、振動障害防止、遮音性能向上等に対し、CLT のような面材を主体とした構成よりも、対策を講じやすく、合理性も高いと考えられる。

また平成 28 年の基準法改正により、軸部材だけが対象であった燃えしろ設計が、面材である CLT でも対象となり、CLT の表面を、仕上げとして見せることも可能になった。

一方、CLT を用いたさまざまな建築が実現するなかで壁式構造を基本とする CLT パネル工法では開放的な大空間を実現する限界も感じられるようになり、従来の柱梁の軸組構造と CLT の耐震壁という混構造の提案が増えるようになっている。

これらを踏まえ、構造用集成材と構造用製材で床、屋根を構成し、壁に面内せん断耐力が高いと期待される CLT を、表面を見せる型で利用する 3 階建て学校校舎用の耐力壁システムを開発目標にした。使用方法、適用範囲、目標性能を明確にした軸組併用型の CLT パネル工法の実用化により、3 階建て学校校舎が、実現しやすい環境が整えられることを期待している。

表　CLT を壁に使った軸組工法と CLT パネル工法の分類

	Type A	Type B	Type C	Type D	Type E	Type F
工法	軸組工法＋CLT耐力壁		CLT工法			
概要図						
接合具・金物	L型金物、ホールダウン金物 （片面からは見える）	長ビス、ホールダウン金物 （見えない）	長ビス （見えない）	U型・L型金物 （見える）	引きボルト、U型・L型金物 （見えない・内蔵可能）	
特徴	柱梁の軸組が鉛直荷重を支持し、CLT壁が水平力抵抗要素となる。 土台、梁との接合は、片面からL型金物を用いて接合するため、片面は金物が見える。 せん断力に対する引き抜き力は、柱頭・柱脚金物で対応する。	柱梁の軸組が鉛直荷重を支持し、CLT壁が水平力抵抗要素となる。 土台、梁との接合は、長ビスを斜め打ち、脳天打ちする。斜め打ちの場合には、ビス頭が見える。 せん断力に対する引き抜き力は、柱頭・柱脚金物で対応する。	CLT壁が、鉛直荷重支持、水平力抵抗要素の両要素となる。TypeBの軸組を省略したもの。 CLT壁、床を長ビスを斜め打ち、脳天打ち接合する。斜め打ちの場合には、ビス頭が見える。 せん断力、せん断力に対する引き抜き力ともに、ビスで抵抗する。	CLT壁が、鉛直荷重支持、水平力抵抗要素の両要素となる。 CLT壁、床をU型L型金物で接合する。 せん断力に対しては横長のU型、L型金物、せん断力に対する引き抜き力に対しては縦長のU型、L型金物で抵抗する。	CLT壁が、鉛直荷重支持、水平力抵抗要素の両要素となる。 CLT壁、床を引きボルト、LSB、GIRとU型金物などで接合する。せん断力に対しては、U型、L型金物で抵抗、せん断力に対する引き抜き力を引きボルト、LSB、GIRなどで抵抗する。	シアプレート
耐震性能	低	低	低	中	高	高
燃えしろ設計	2016大臣認定	ー	2016告示	2016告示	2016告示	2016告示
建物イメージ	低層、大空間	低層、大空間	低層	低層	中高層	中高層
建物イメージ						
内観イメージ						
実例	高知県森林組合連合会事務所	長谷萬実験棟 窪津漁業協同組合事務所		2015年震動台実験3階建て試験体	高知おおとよ製材社員寮 慶應型共進化住宅 2015年震動台実験5階建て試験体 ハウステンボス？	木構造振興 写真は、集成材パネル
設計法	許容応力度計算		許容応力度計算（2016）			

2017　東京大学生産技術研究所　腰原研究室

平成30年度　林業成長産業化総合対策補助金等
（CLT等新たな木質建築部材利用促進・定着事業）

燃えしろ設計を考慮した軸組併用型CLTパネル工法の開発

報告書　目次

＊委員名簿

＊はじめに

第1章　本事業の概要
1.1　本事業の目的　・・・・・・・・・・・・　1
1.2　本年度事業実施に向けての課題整理　・・・・・・・・・・・・　2
1.3　実施内容　・・・・・・・・・・・・　5
1.4　委員会、ワーキングの開催　・・・・・・・・・・・・　7

第2章　モデル建物の概要
2.1　設計条件　・・・・・・・・・・・・　9
2.2　壁の鉛直荷重の検討　・・・・・・・・・・・・　18
2.3　特定避難時間倒壊等防止建築物の要求性能への対応　・・・・・・・・・・・・　20
2.4　耐震フレームが受ける水平力の整理　・・・・・・・・・・・・　22

第3章　CLTと構造用集成材のめり込み試験
3.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・　25
3.2　試験体概要　・・・・・・・・・・・・　25
3.3　試験用集成材及びCLTの製造について　・・・・・・・・・・・・　26
3.4　試験方法　・・・・・・・・・・・・　29
3.5　試験結果　・・・・・・・・・・・・　29
3.6　CLTと集成材の接触面の形状の変化　・・・・・・・・・・・・　46
3.7　既往のめり込み推定式との比較　・・・・・・・・・・・・　51

第4章　耐震フレーム：２層の構面せん断実験
4.1　実験概要　・・・・・・・・・・・・ 67
4.2　試験体詳細・計測計画　・・・・・・・・・・・・ 69
4.3　試験結果の評価方法　・・・・・・・・・・・・ 77
4.4　試験結果：荷重変形関係・特性値・破壊の進行　・・・・・・・・・・・・ 82
4.5　破壊性状の詳細　・・・・・・・・・・・・ 90
4.6　接合部等の変位および鋼製柱軸力の測定結果　・・・・・・・・・・・・113

第5章　CLT－集成材間のめり込み現象の数値解析
5.1　解析モデル　・・・・・・・・・・・・131
5.2　材料定数の設定　・・・・・・・・・・・・132
5.3　ヤング係数の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・134
5.4　降伏応力の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・135
5.5　接線係数の相違が解析結果に及ぼす影響　・・・・・・・・・・・・136
5.6　試験体寸法が異なる場合の解析結果　・・・・・・・・・・・・137
5.7　集成材の幅と試験体の剛性・耐力との関係性について　・・・・・・・・・・・・140
5.8　まとめ　・・・・・・・・・・・・143

第6章　耐震フレームの解析
6.1　解析の概要　・・・・・・・・・・・・145
6.2　事前解析　・・・・・・・・・・・・145
6.3　事後解析　・・・・・・・・・・・・149
6.4　3層構造体での解析　・・・・・・・・・・・・151
6.5　まとめ　・・・・・・・・・・・・153

第7章　まとめ
7.1　実験を踏まえての評価　・・・・・・・・・・・・155
7.2　構造解析を踏まえての評価　・・・・・・・・・・・・156
7.3　実用化に向けた今後の課題　・・・・・・・・・・・・157

第 1 章　本事業の概要

1.1　本事業の目的

平成 26 年、学校校舎の標準設計である JISA3301 が改正され、学校校舎の木造化促進が期待されたが、現段階ではまだ採用事例が無い状況にある。理由として、屋根のトラス構造等は汎用性が高く、この標準仕様を利用することは容易であるが、耐力壁に関しては、2 階建てになると、1 階の耐力壁に求められる短期水平せん断耐力は、約 30kN/m 程度（壁倍率に換算すると 15）となり、これに対し、JISA3301 では、筋交い仕様と構造用合板を使った面材仕様を提案しているが、建築現場での工数が多くなる仕様であるため、作業性とコスト面において課題を残していることがあげられる。また平成 27 年の基準法改正により、耐火建築物でなければ設計できなかった 3 階建て学校校舎を、特定避難時間倒壊等防止建築物とすることで建設が可能になったが、3 階建ての 1 階の耐力壁には、上記以上の水平耐力を負担させる必要が生じ、従来型の仕様の耐力壁では、対応できない状況になる。そこで木構造振興では、平成 27 年度の林野庁委託事業、および平成 28 年度の林野庁委託事業により「高耐力の水平荷重を負担できる CLT と横架材で構成する工法の開発」に取り組み、床と屋根は軸組工法で構成するが、柱を取り除き、鉛直荷重と、地震時・暴風時に発生する水平荷重の双方を、CLT に負担させる工法（図 1.1 参照）の開発を進めてきた。

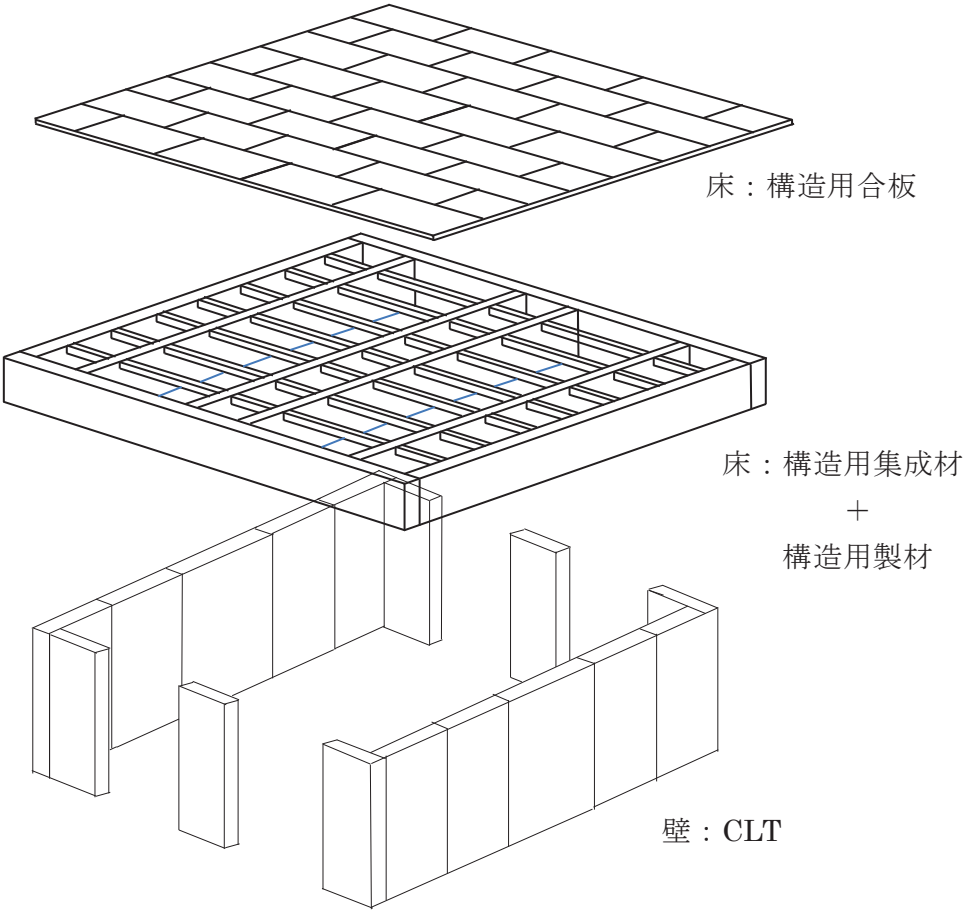


図 1.1　軸組併用型 CLT パネル工法の概要

一方、特定避難時間倒壊等防止建築物にするためには、3 階建て学校校舎の場合、耐力壁は 1 時間の準耐火構造の要求性能を満たさなければいけない。従来であれば、石膏ボード等によるメンブレン仕様にする必要があったが、平成 28 年の基準法関連告示の改正により、これまで軸部材だけに認められていた燃えしろ設計が、面材である CLT でも採用可能になり写真 1.1 のように、CLT の表面を現しとする仕様も可能となった。

そこで写真 1.2 に採用された、軸組併用型 CLT パネル工法による 3 階建て特殊建築物の木造化促進を目標に、燃えしろ設計により CLT の表面がそのまま仕上げとできる設計仕様の提案と、構造設計に必要なモデル化と入力データの集積を目的に、事業を実施することにした。

写真 1.1　構造用集成材で壁を構成し、
木材表面を現しとした事例

写真 1.2　床を軸組工法、
壁は CLT で構成した建物の事例

1.2　本年度事業実施に向けての課題整理

1.2.1　平成 28 年度事業での課題抽出と対応策

平成 28 年度の林野庁委託事業「都市の木質化等に向けた新たな製品・技術の開発・普及委託事業」の内、CLT 等接合部データ収集での取り組みを経て、本事業での実用化に向けて課題となった点を振り返ると、以下のような項目があげられる。

①　1 階の耐力壁については、必要水平耐力を満たす見込みがたったが、2 階の耐力壁は層間変形角 1/150 ラジアン時の耐力が、要求性能を満足していない。

②　端部仕様（図 1.2 参照）は、剛性が中央仕様よりは低く、PC 鋼棒が梁端から抜けると終局耐力が上がらず、脆性的な破壊をする。

③　梁のめり込み剛性がバラツキもあり曖昧で、フレームの解析結果と実大試験の結果の整合性がとれていない。

④　図 1.3 に示す、オープンスクール型式、および中廊下型式の中通り（図 1.3　B、C 通り）の壁は、床の負担面積が広くなるため、固定荷重＋積載荷重が大きくなる。

今年度はこの課題に対し、次のような改善を図る。

a　CLT および梁幅を 150mm→210mm にすることで、上記①、④の改善を見込む。

b　CLT と構造用集成材のめり込み試験を実施し、構造解析に必要なデータの集積を行い、上記③の改善を図る。

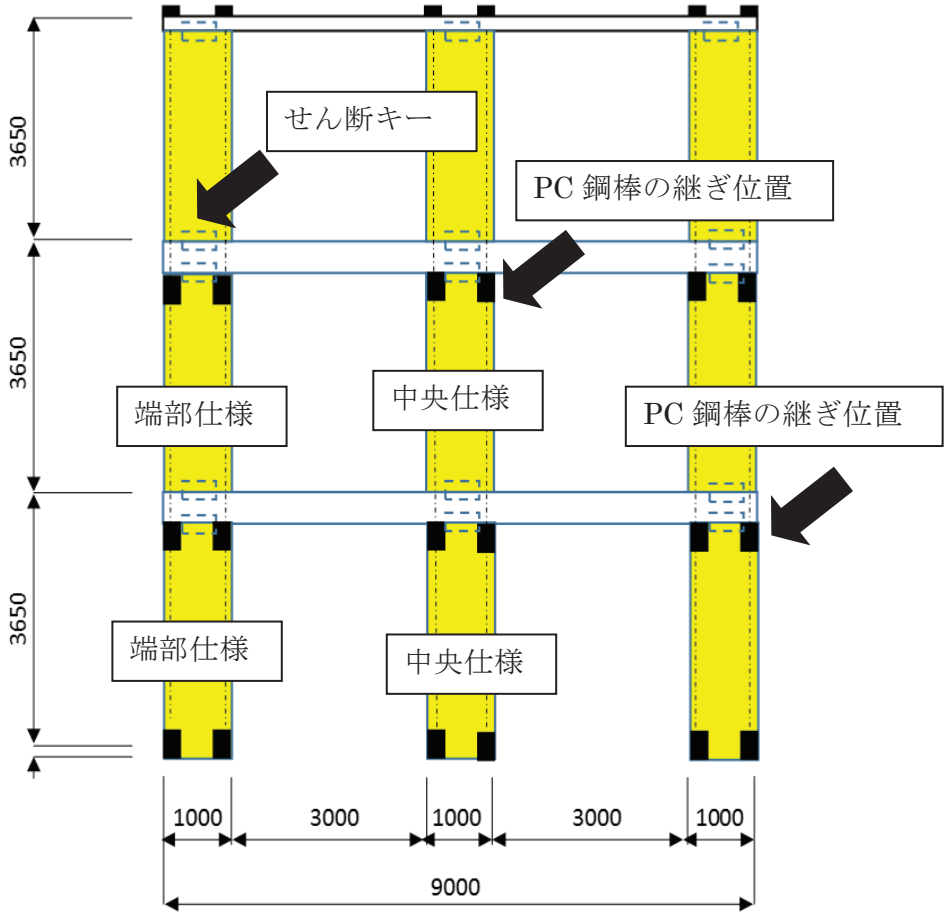


図 1.2　平成 28 年度に想定した 3 階建て学校校舎基本ユニットプランの軸組図

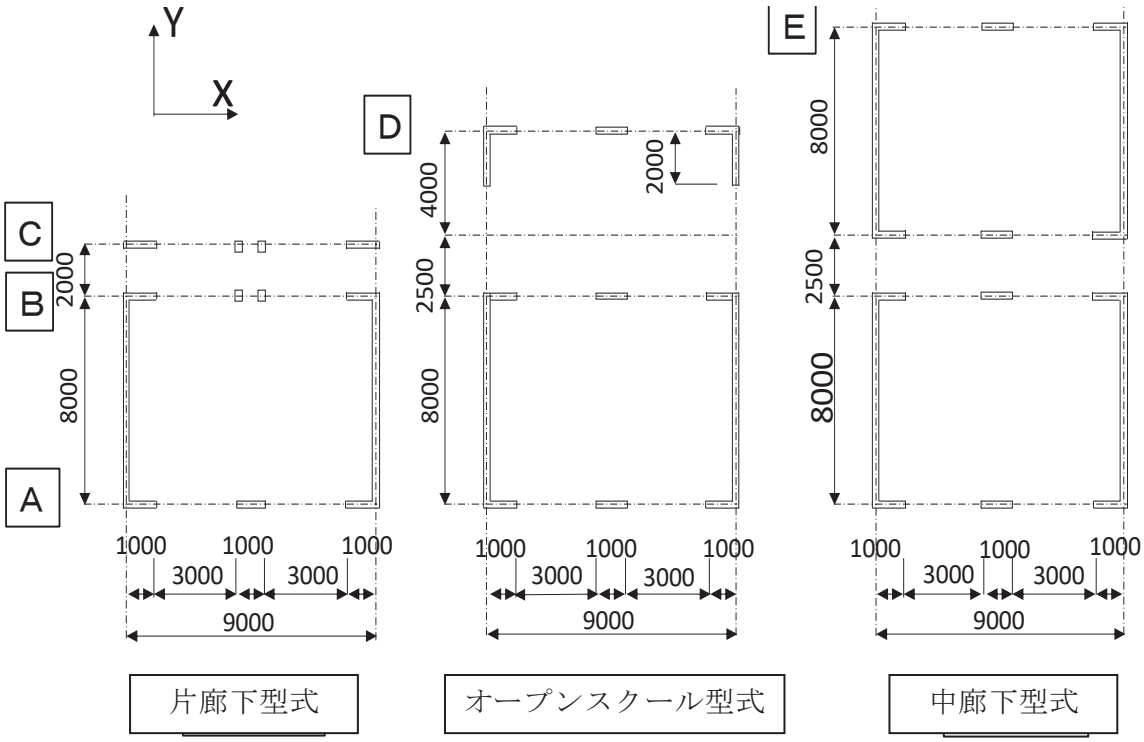


図 1.3　平成 28 年度事業で想定した学校校舎の基本プラン（案）

尚、課題②については、納まりを検討することに今年度は止める。

1.2.2　特定避難時間倒壊等防止建築物への対応

特定避難時間等倒壊防止建築物にするため、次のような対応を図る。

①　1 時間の準耐火建築物とする。

②　内装制限をかけ、初期火災時の延焼抑制を図る。

1.2.3　耐久性能に対する配慮

耐久性能を維持するためには、結露に対する配慮が必要で、内部から外部への通風の防止と、熱橋が起こらない対策が必要になる。前者については、CLT 間に隙間ができると、通風が生じるが、桁行きの外壁に関しては図 1.2 のように、基本プランの 1 ユニット間で CLT が 2 枚並ぶことが無く、一方、2 つのユニットの取り合い部では CLT が横並びになるが、直交壁が配置されると考えられるため、CLT 間の隙間は考慮しなくてよい。構造用集成材と CLT 間については、鉛直荷重が常に作用しているため、加工精度が高ければ、隙間は生じないものと推察される。

金物の結露に対する配慮は、内部から外部への空気が流れないように、内部側で空気の遮断をする必要がある。CLT の幅を 210mm とすることで、内部側の木材を 45mm 残すような仕様にすれば、通風および熱橋の懸念は解除される。ただし基礎上に金物を直接乗せることになるが、基礎と箱型金物、CLT と箱型金物の隙間を埋めることは難しく、また鉛直荷重の支持を考えると、基礎断熱は回避し、床下断熱を前提に納まり案を提示する。

1.2.4　CLT 利用のメリット、デメリットの考慮

木構造振興は、平成 25 年に高知県に設立された CLT 建築推進協議会の設計支援や実験を通じて、次のようなコストにも影響を与える、実際に建築物に CLT を利用した場合のメリットおよびデメリットを、学ぶことができた。

（メリット）

M-①　取り付ける部材数が少なくなるので、他の木造の工法と比較すると、建築現場での建て方に要する工期を短くできる。

M-②　表面をそのまま仕上げに使えば、内装工事の価格が低減できる。

M-③　CLT の壁に鉛直荷重も水平荷重も支持させれば、軸組工法では必要な柱－面材、柱—筋交い等の接合箇所を減らすことができる。

M-④　ある程度の厚さがあれば、遮熱性、遮炎性が高く、準耐火性能を確保できる。

（内装の仕上げ工事を、省略できる）

（デメリット）

D-①　1 棟あたりに使用する木材使用量が、他の木造の工法と比較すると多くなり、建築コストが膨らむ要因になる。

D-②　材料単価が m^3 当たりのため、厚みが厚くなると、コストが急上昇する。

D-③　露出型の接合金物の既製品化は進んでいるが、内蔵型は建物個別対応になっている傾向にある。また壁に高耐力の水平力を期待すると、接合金物費が高くなる傾向にある。

D-④　コンクリート基礎に埋め込まれたアンカーボルトは、既存の金物だと、非常に高い施工精度が求められ、現状は台直し等に時間がかかり、M-①のメリットが巧く活かせない状況にある。

そこで下記の項目を考慮し、本事業に望むことにする。
E-①　床を軸組みで構成すれば、特に CLT を床に使う必要がなく、床面積当たりの構造部材の利用量を 0.3m³／m² 程度に抑えることが可能。
（写真 1.2 の軸組併用 CLT パネル工法は、床を耐火構造としなければならなかったことと価格の問題で、床への CLT の利用は見送られた。また床の遮音性能、振動性能の向上策は、軸組みとしたほうが対応しやすい。）
E-②　燃えしろ設計には、厚い CLT の利用が必要となり材料費は上がるが、不燃材料による被覆等の作業が必要なく、工期と仕上げの削減によるコストダウンが見込める。（初期火災時において、フラッシュオーバーに至る時間は、天井の不燃化を図れば、壁を木質化しても、避難に必要な時間は確保できる。また難燃処理の必要もない。）
E-③　壁の浮き上がりを拘束する金物は、既製の PC 鋼棒で対応し、図 1.2 に示す PC 鋼棒の継ぎ位置に配置する金物は、同じ形状で統一する。
E-④ 図 1.2 に示す横臥材と CLT 間のせん断力を伝達する接合には、安価な構造用合板を挿入、建築ビスを側面から打つ、2 面せん断型とすれば、施工精度を問わず、施工が速い。
E-⑤　CLT は、マザーボードからの切り出しのロスを少なくすることでコストが軽減される。よって CLT の利用にあたり、マザーボードの寸法を考慮する。
E-⑥　PC 鋼棒に関与する、アンカーボルト用の箱型金物の穴径は、アンカーボルトの径に対し、5mm 程度クリアランスが見込めるため、D-④の懸念材料が払拭できる。

1.3　事業内容

平成 27 年度、平成 28 年度は 3 階建て学校校舎を睨み、JASA3301 の改正により示されたユニットプランを参考に、図 1.3 の改良型ユニットプランを基に、必要水平耐力を算出し、これに耐える耐力システムを Mx60-5-5（ｔ＝150mm）で設定し、研究開発を進めてきた。しかし写真 1.3、写真 1.4 の建築物は、燃えしろ設計を導入した国内初の CLT パネル工法の建築物で、Mx60-5-5 の CLT で壁が構成されているが、学校校舎等の特殊建築物では、壁が負担する鉛直力や階高さの関係から、壁には Mx60-7-7 を使用する必要がある。そこで今年度は、以下の仕様を基本に、図 1.1 に示す軸組併用型 CLT パネル工法による 3 階建て特殊建築物の実用化に向け、下記の実験及び解析を進める。
①　CLT と構造用集成材のめり込み試験（写真 1.5、写真 1.6 参照）
②　上記①に対し、有限要素法による解析を実施
③　図 1.4 の 2 層の構面せん断試験の実施（写真 1.7 参照）
④　図 1.4 の試験体のモデル化を実施し、構造解析を実施
⑤　上記③と④を比較し、整合性の検討

上記①～⑤を踏まえ、以下の項目を整理する。
①　保有水平耐力計算による構造設計が可能なように、構造特性係数の推奨値の見解を示す。
②　保有水平設計による構造設計が可能になるように解析モデルの提案と、入力データの整理を行う。

写真 1.3　燃えしろ設計で
建てられた商業施設（外観）

写真 1.4　燃えしろ設計で
建てられた商業施設（内観）

写真 1.5　めり込み試験（遠景）

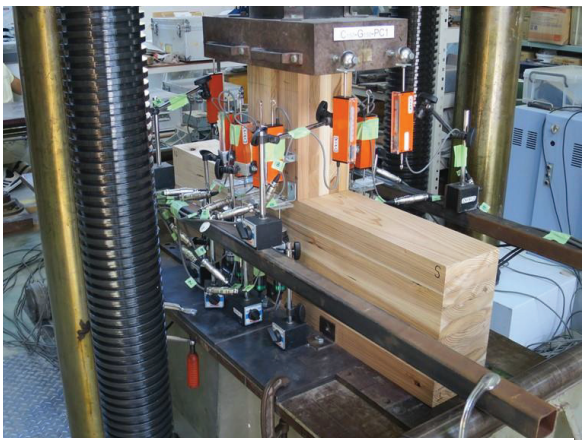


写真 1.6　めり込み試験（近景）

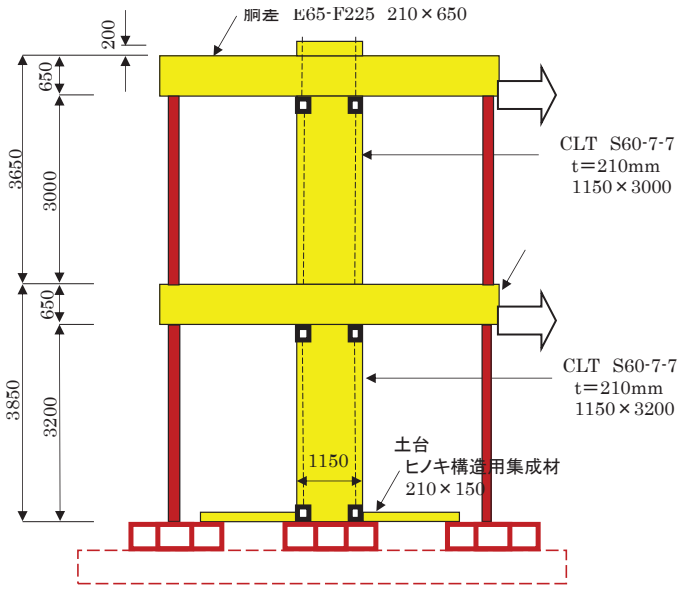


図 1.4　2 層の構面せん断試験

写真 1.7　2 層の構面せん断試験風景

1.4　委員会、ワーキングの開催

委員会、及びワーキング活動の状況を、表 1.1 に示す。

表 1.1　委員会、ワーキング活動の状況

	開催日	参加者		主な議題内容
		出席	SKYPE	
委員会	5月26日	腰原、荒木、中川	田中、森、光井	本事業の計画
第1回ワーキング	10月16日	森、光井	中川、田中	めりこみ試験結果の速報と解析状況
第2回ワーキング	3月18日	森、中川、光井	松本（腰原研）、姚（腰原研）	めりこみ試験、実大試験、解析の状況確認及び　報告書の打ち合わせ
第1回SWG	10月25日	SKYPEにて：森、田中、山田（田中研）		めり込み試験の検討
第2回SWG	11月6日	SKYPEにて：森、田中、山田（田中研）		めり込み試験の検討
第3回SWG	11月13日	SKYPEにて：森、田中、山田（田中研）		めり込み試験の検討
第4回SWG	11月20日	SKYPEにて：森、田中、山田（田中研）		めり込み試験の検討
第5回SWG	2月8日	森、光井、井上（森研）、難波（光井研）		めり込み試験の分析
第6回SWG	3月5日	SKYPEにて：森、光井		めりこみ試験を踏まえためり込み解析の状況
第1回2層試験WG	9月14日	腰原、森、田中、松本（腰原研）、姚（腰原研）		柏の葉キャンパス実験棟の視察
第2回2層試験WG	10月22日	松本（腰原研）、姚（腰原研）		2層鉛直構面試験実施計画、スケジュール確認

第 2 章　モデル建物の概要

2.1　設計条件

本事業で目標とする、図 1.1 に示す軸組併用型 CLT パネル工法による、3 階建て特殊建築物の木造化推進に向け、特定避難時間倒壊等防止建築物の要件を満たすことで、耐火建築物以外での木造化が可能になった、3 階建て学校校舎をモデルに、必要要件等を考慮し、構造計画を立て、実験および解析を進めていく。

2.1.1　平面計画

「木造校舎の構造設計規準 JISA 3301」を参考に、図 2.1 に示す、基本ユニットプランによる総 3 階建ての学校の校舎を想定する。基本プランは、A タイプ（片廊下式）、B タイプ（オープンスクール式）、C タイプ（中廊下式）の 3 タイプ、モジュールは 1000mm とした。

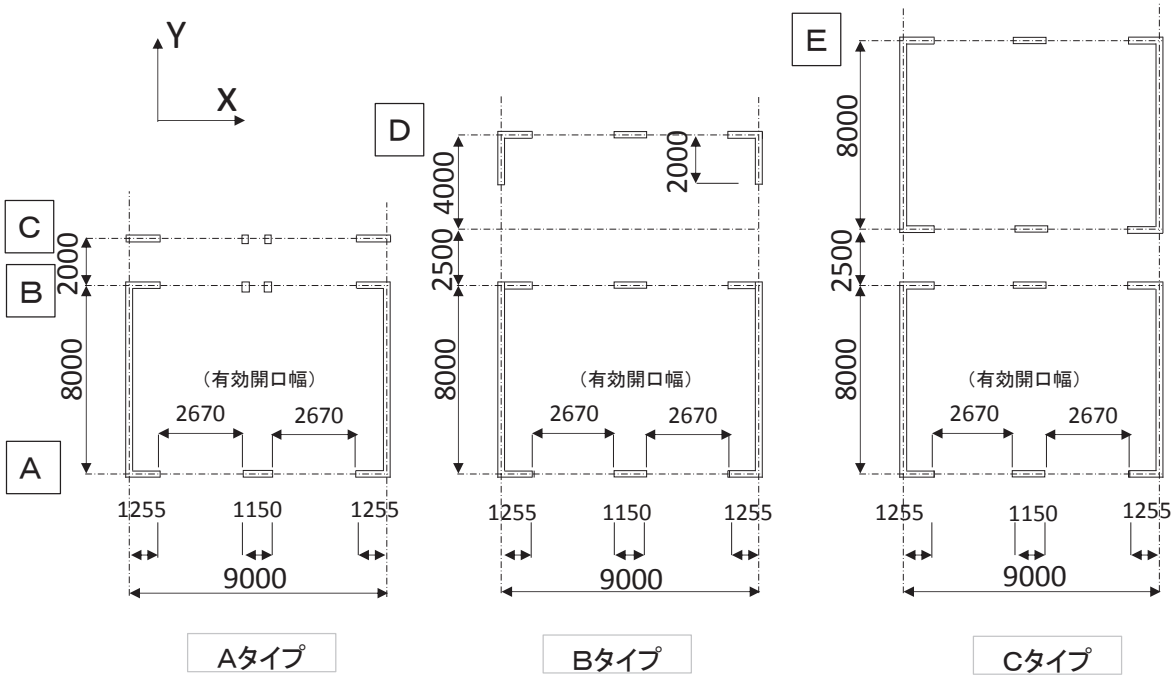


図 2.1　学校校舎を想定した基本ユニットプラン

2.1.2　壁の CLT パネルの配置

桁行方向の CLT は、S60-7-7、厚み 210mm とし、図 2.2 のように配置する。幅は 1150mm で統一し、2 階と 3 階の CLT の高さは、国内で製造可能な CLT の最大寸法 3m×12m のマザーボードから効率的に切り出せるように 3m とする（図 2.3 参照）。強軸のラミナを 3m に抑えることで、フィンガージョイント無しで製造可能にもなる。

両端配置の CLT は、張間方向の直交する壁の CLT（厚さ 210mm）勝ちの納まり（図 2.4）とした。これは、平成 28 年度の事業にて実施した 1 層の構面せん断試験（図 2.6 参照）では、胴差しの端部から PC 鋼棒までの端距離が 75mm と短かったため、PC 鋼棒が端抜け（写真 2.1 参照）してしまった現象を改善することを意図したものである（図 2.5 参照）。

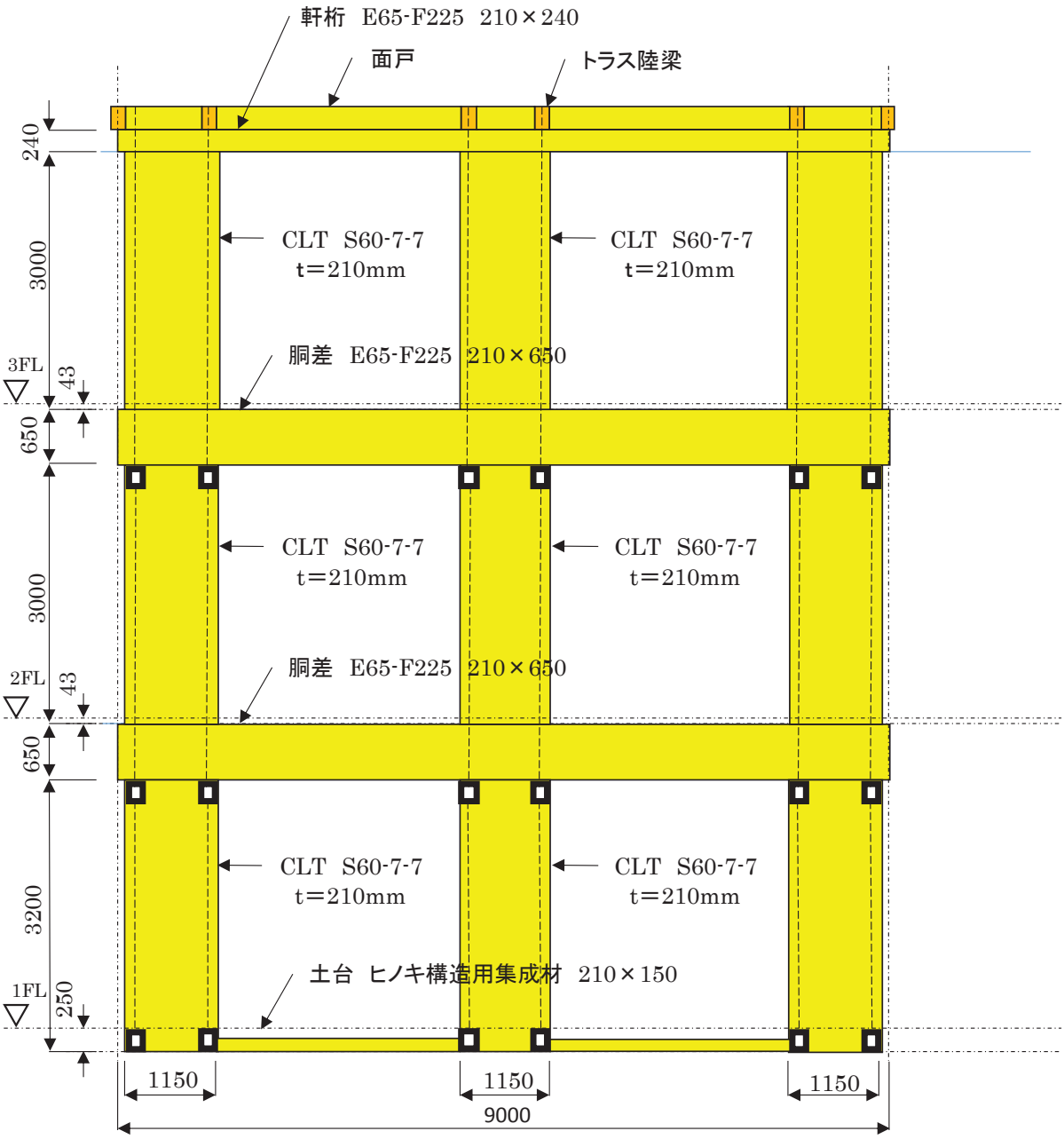


図 2.2　桁行方向の CLT の配置

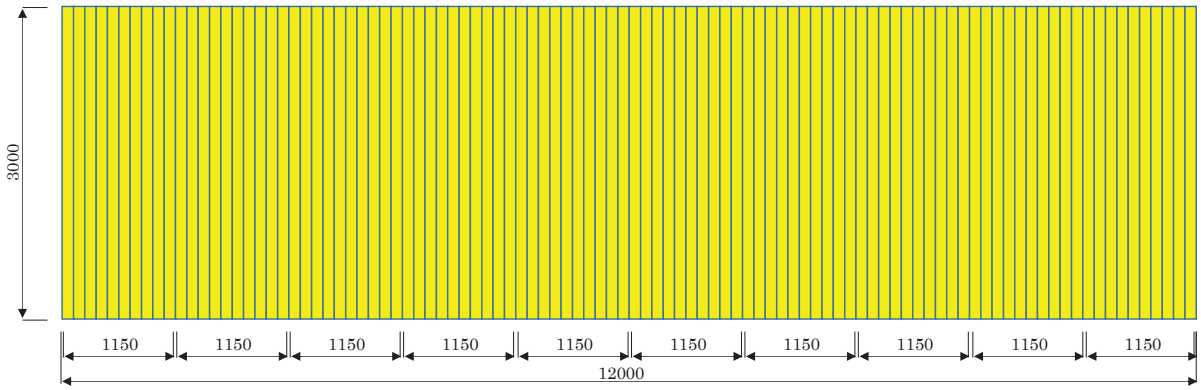


図 2.3　2 階、3 階用壁のマザーボードから切り出し時の CLT の割り付け図

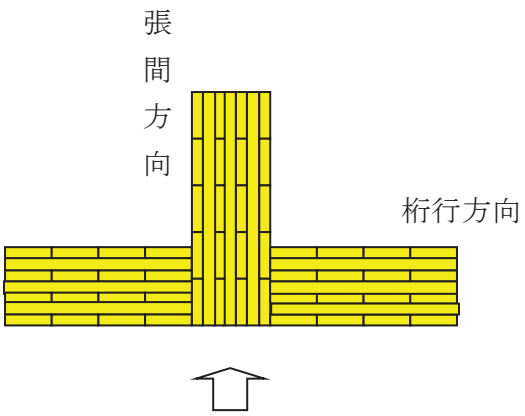


図 2.4　桁行方向と張間方向の
CLT の納まり図

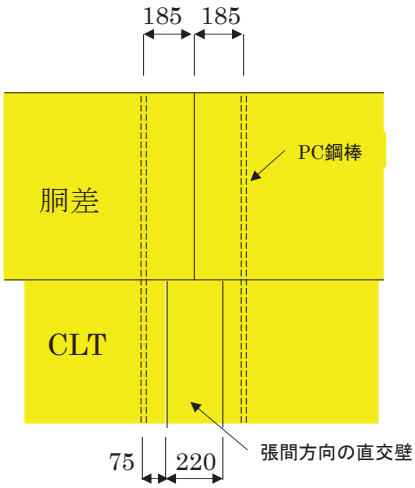


図 2.5　図 2.3 の⇧方向の側面図

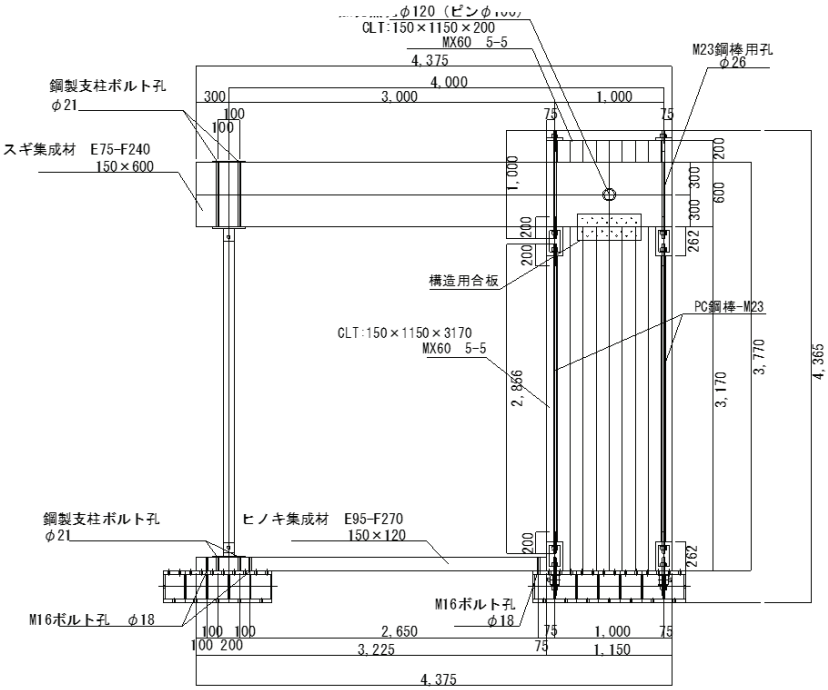


図 2.6　平成 28 年度に実施した構面せん断試験　端部タイプの試験体図

写真 2.1　胴差木口方向への PC 鋼棒の
端抜けした状況

写真 2.2　胴差木口方向への PC 鋼棒の
端抜けによる木口の割れ

2.1.3　接合方法

（1）壁の浮き上がりの拘束

CLT 壁の浮き上がりの拘束は、PC 鋼棒を CLT の側面から 75mm の位置に孔を貫通させ、全長にわたり PC 鋼棒を挿入（写真 2.3 参照）する、タイダウン方式とした。ただし、2 階、3 階の胴差の下に図 2.7 に示す接合金物（写真 2.4）を設け、この位置で PC 鋼棒を繋ぐことにした。また 1 階脚部にも同じ箱形金物を設け、アンカーボルトへの接合はこの金物を介して、壁浮き上がり時の引張に負担させることにした。箱形金物の位置は、図 2.2 に示す。

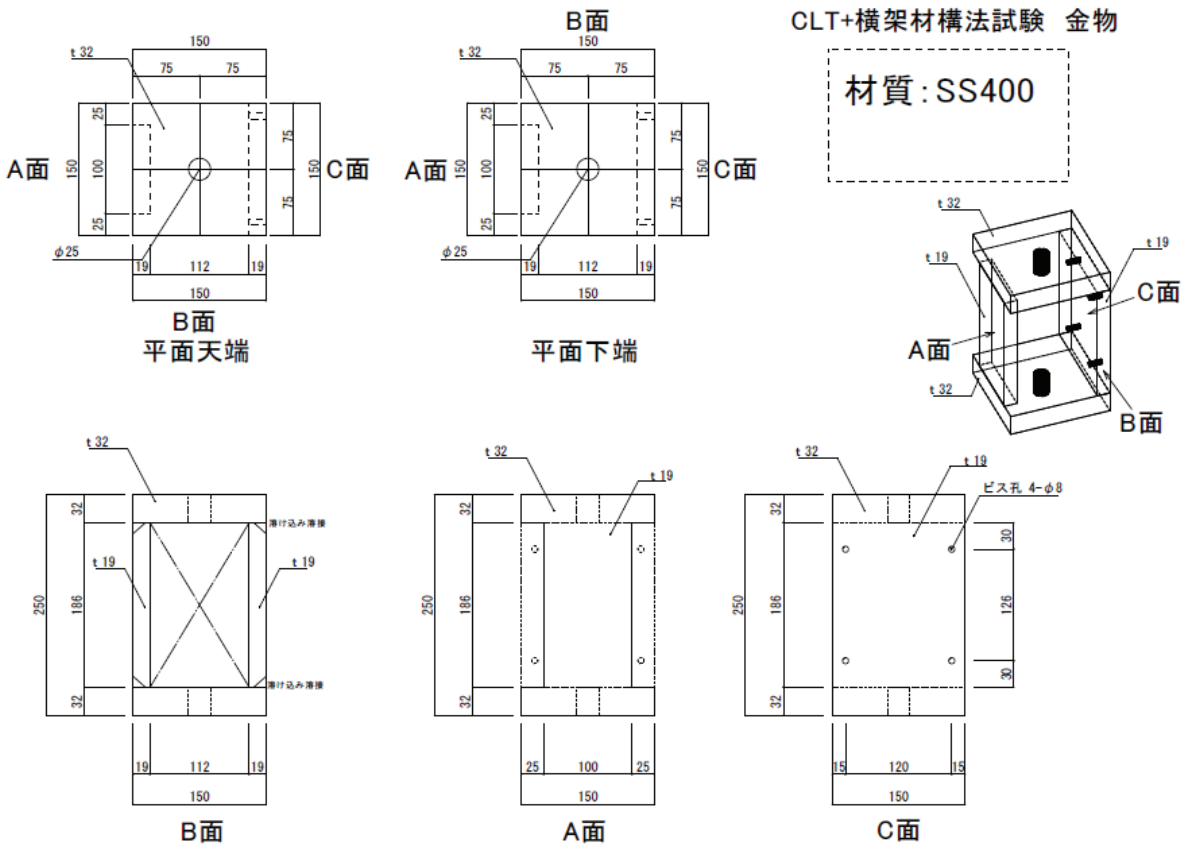


図 2.7　PC 鋼棒を繋ぐ箱形金物図

写真 2.3　PC 鋼棒の挿入状況

写真 2.4　2 階胴差下の箱形金物

（2）せん断力の伝達

2 階胴差と CLT 間、3 階胴差と CLT 間、及び軒桁と CLT 間のせん断力の伝達は、写真 2.5、写真 2.6 に示すように、構造用合板（28mm）を挿入し、写真 2.5 の建築用ビスを CLT の側面から打つ、挿入式 2 面せん断接合とした。ビスの打ち込み状況を写真 2.7 に、打ち込み後の状況を写真 2.8 に示す。

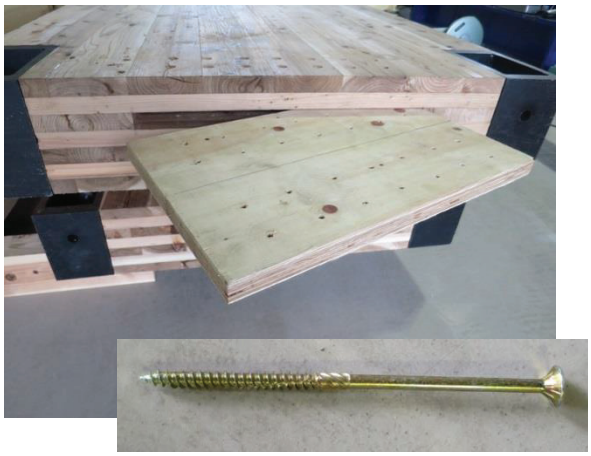


写真 2.5　構造用合板の挿入と建築用ビス

写真 2.6　構造用合板の挿入状況

写真 2.7　建築用ビスの打ち込み

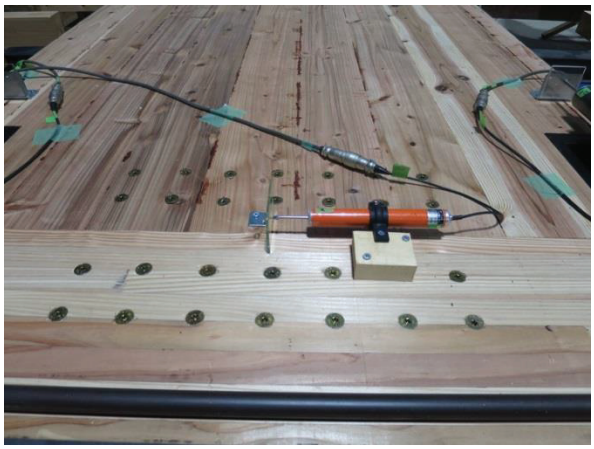


写真 2.8　建築用ビス打ち込み終了

写真 2.5 の建築用ビスは、実用例が増えてきているパネリード S　PS8-170（呼び径 8mm、全長 170mm、ネジ長さ 70mm、皿径 18mm）を採用することにした。材幅が 210mm、構造用合板を、燃焼時を踏まえ、材幅の中心から 15mm～30mm 芯ずれさせて挿入するため、側材の厚さが 75mm～90mm となる長さの製品を選択した。

CLT 等新たな木質部材・工法の開発等支援事業（林野庁平成 26 年度補正予算事業）の内、「高耐力の水平荷重を負担できる CLT と横架材で構成する工法の開発」では、四角穴付きタッピングねじ STS6.5・F（呼び径 6.5mm、軸径 5.5mm、首下長さ 130mm、ネジ長さ 40mm、皿径 15mm）、及びパネリード X　PX8-140（呼び径 7.925mm、谷径 5.3mm、首下長さ 130.5mm、全ネジタイプ、皿の六角幅 9.85mm）を使って実験を実施し、前者の降伏耐力は 4.05kN／本、後者の降伏耐力は 4.40kN／本という結果を得ている。パネリード S　PS8-170 は呼び径から、降伏耐力が同等以上であると推察されるが、コスト・パフォーマンスが期待されるため、この建築ビスを選択した。

1 階 CLT 壁脚部のせん断力のコンクリート基礎への伝達は、写真 2.9 に示す、CLT に挿入したシアプレートに負担させる。シアプレートの直径は 100mm、高さは 35mm で設定すると、CLT の弱軸層（シアプレートに対し、木材繊維方向で接触する）2 層（ラミナの厚さ　30mm）とシアプレートとの接地面積で、コンクリート基礎と CLT のせん断力の伝達ができると考えるならば、下記の短期せん断力の負担が可能になる。

スギの圧縮基準強度：17.7 N／mm²（無等級）

負担可能な接地圧（短期）：17.7 N／mm²×35 mm×30 mm×2 枚×2／3＝24.78 kN

このとき、基礎コンクリートとシアプレートを仲介するボルトについては、下式より、M20 の使用により、力の伝達は可能である。

ボルト径：20mm（断面積　314mm²）　SS400

ボルトのせん断耐力：135　N/mm²×314mm²＝42.60kN

尚、スギのめり込み耐力が繊維直角方向し、脚部の浮き上がり時に、CLT と追随すると引張力が CLT 側に発生し、CLT の割裂を招くため、シアプレートが CLT の木口から抜けるように配慮している。ただし、30mm 程度抜けても、水平力の伝達が失われないように、高さ方向に 2 枚挿入している（写真 2.10 参照）。

尚、浮き上がりを拘束する、PC 鋼棒用の箱形金物に接合するアンカーボルト用の孔は、アンカーボルトの径に対して、5mm 程度のクリアランスを設けても、構造上支障はないが、このシアプレートに挿入されるアンカーボルトとシアプレートの孔のクリアランスは、1mm 程度の精度があることが望まれる。しかしこの精度をコンクリート打設後も維持することは、極めて困難なため、建て方の施工効率を考慮すると、コンクリート側にシース管を挿入し、アンカーボルトを後打ちにするか、図 2.8 に示すような、親子フィラー式に改良を加える必要がある。

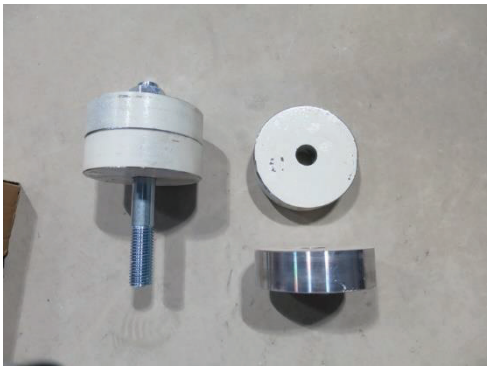


写真 2.9　シアプレート

写真 2.10　シアプレートの挿入

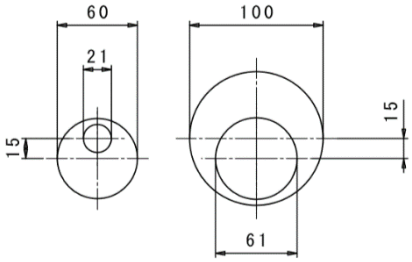


図 2.8　親子フィラー式のシアプレート

2.1.4　仮定荷重

仮定荷重は、学校校舎の標準設計（JISA3301）を参考に、次のように設定する。

（1）固定荷重

屋根：	瓦	470
	アスファルトルーフィング	20
	構造用合板　t=12	80
	ポリエチレンフォーム　ｔ＝75	30
	垂木　60×105　@455	70
	構造用合板　t=24	150
	トラス	240
	小梁　105×105　@910	70
	グラスウール　t=100	30
	野縁　40×40　@303	60
	強化石膏ボード　ｔ＝12.5	120
	合計	1340
	屋根勾配　4寸	
	水平投影面に対して	1443.224
		↓
		1500 N/m^2
床：	フローリング　t=15	80
	乾式二重床　t=50	200
	構造用合板　ｔ＝9	60
	ALC　t=50	300
	構造用合板　ｔ＝24	150
	小梁　105×105　@910	400
	甲乙梁　105×105　@910	70
	野縁　40×40　@303	60
	強化石膏ボード　ｔ＝12.5×2	230
		1550
		↓
		1600 N/m^2
外壁：	ラスモルタル	640
	構造用合板　ｔ＝12	80
	胴縁　18×45　@455	10
	透湿防水シート	10
	グラスウール　t=100	30
	CLT	1000
		1770
		↓
		1800 N/m^2

内壁：	スギ板　t=12	60
	石膏ボード　t=9.5	70
	強化石膏ボード　t=12.5	120
	CLT	1000
		1250
		↓
		1300 N/m^2

（2）積載荷重

表 2.1　積載荷重

単位：N/m

区分	床用	大はり、柱、基礎用	地震用 たわみ用
屋根	490	300	200
教室	2300	2100	1100
廊下	3500	3200	2100

（3）積雪荷重

級別 1 級（一般区域、垂直積雪量　30cm 以下）とする。

2.1.4　床組

床組は図 2.9 のように、構造用集成材と構造用製材で構成する。小梁の間隔は、構造用合板の既製寸法に合わせ、配置するものとする。

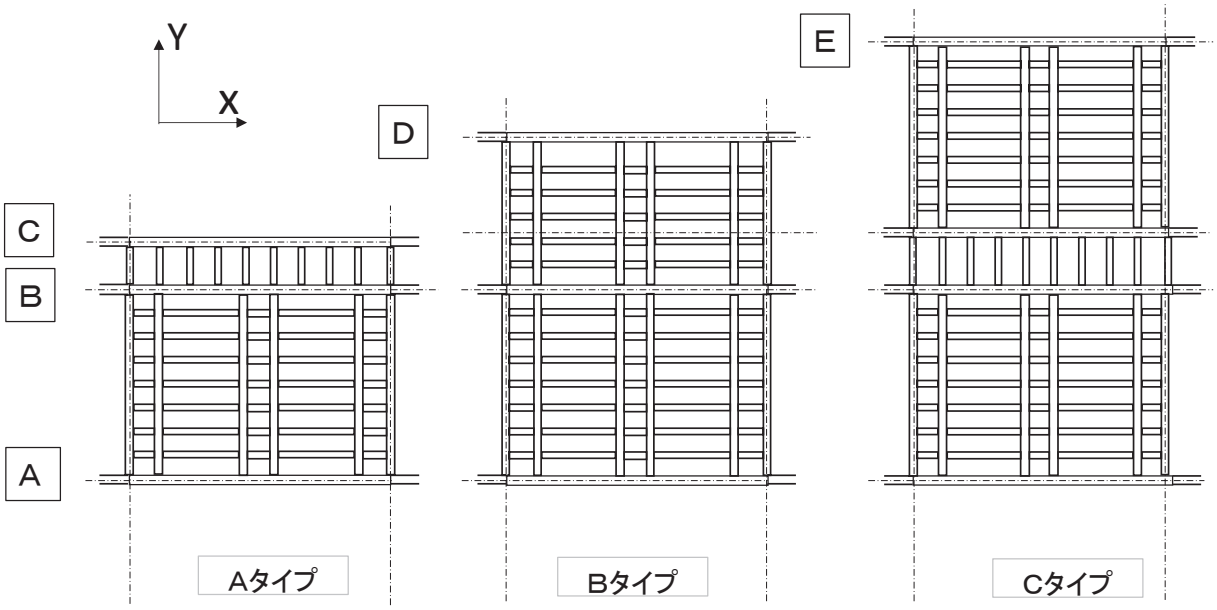


図 2.9　各階床伏図

（１）小梁の寸法

固定荷重　1600
積載荷重（教室・床用）　2300 N／m^2
間隔　1 m
スパン　300 cm
w＝　39 N/cm

使用部材　構造用製材　スギ　機械等級区分　E70
E=　7000 N/mm^2
F_b=　29.4 N/mm^2　f_b=　10.78 N/mm^2
B=　12 cm　D=　18 cm
A：断面積＝　216 cm^2
Z：断面係数＝　648 cm^3
I:断面二次モーメント＝　5832 cm^4

M=　438750 N･cm　σ_b＝　6.77 N/mm^2　＜f_b
このときのたわみ
δ＝　1.01 cm

よって　スギの構造用製材　E70　120mm×210mm を採用する。

（２）床梁の寸法

固定荷重　1600
積載荷重（教室・梁用）　2100
（教室･たわみ用）　1100 N／m^2
間隔　2 m
スパン　800 cm
w＝　74 N/cm　（応力検定用）
54 N/cm　（たわみ検定用）

使用部材　構造用製材　スギ　機械等級区分　E70
E=　7500 N/mm^2
F_b=　24 N/mm^2　f_b=　8.8 N/mm^2
B=　20 cm　D=　63 cm
A:断面積＝　1260 cm^2
Z:断面係数＝　13230 cm^3
C_f: 寸法効果係数=　0.93
I:断面二次モーメント＝　416745 cm^4

M=　5920000 N･cm　σ_b＝　4.47 N/mm^2　＜C_b･f_b
このときのたわみ
δ＝　0.92 cm　＜1cm

よって　スギの構造用集成材　E75－F240　200mm×630mm を採用する。

2.2　壁の鉛直荷重の検討

2.2.1　鉛直荷重の算出

表 2.2　耐力壁線が負担する鉛直荷重（A プラン）

Aプラン

通り	階	部位	単位荷重 N/m^2	L or H m	荷重 kN／m	合計 kN／m		
A	3	屋根	1800	5	9			
		外壁	1800	3.65	6.57	15.57		
	2	床	3700	2	7.4			
		外壁	1800	3.65	6.57	13.97	29.54	
	1	床	3700	2	7.4			
		外壁	1800	3.65	6.57	13.97		43.51
B	3	屋根	1800	5	9			
		内壁	1300	3.35	4.355			
		小屋裏	1300	0.8	1.04	14.395		
	2	床	3700	4	14.8			
			4800	1	4.8			
		内壁	1300	3.35	4.355	23.955	38.35	
	1	床	3700	4	14.8			
			4800	1	4.8			
		内壁	1300	3.35	4.355	23.955		62.305
C	3	屋根	1800	2	3.6			
		外壁	1800	3.65	6.57	10.17		
	2	床	4800	1	4.8			
		外壁	1800	3.65	6.57	11.37	21.54	
	1	床	4800	1	4.8			
		外壁	1800	3.65	6.57	11.37		32.91

表 2.3　耐力壁線が負担する鉛直荷重（B プラン）

Bプラン

通り	階	部位	単位荷重 N/m^2	L or H m	荷重 kN／m	合計 kN／m		
A	3	屋根	1800	5	9			
		外壁	1800	3.65	6.57	15.57		
	2	床	3700	4	14.8			
		外壁	1800	3.65	6.57	21.37	36.94	
	1	床	3700	4	14.8			
		外壁	3700	3.65	13.505	28.31		65.25
B	3	屋根	1800	7.25	13.05			
		内壁	1300	3.35	4.355			
		小屋裏	1300	2.6	3.38	20.79		
	2	床	3700	4	14.8			
			4800	2.019231	9.692308			
			3700	1.230769	4.553846			
		内壁	1300	3.35	4.355	33.40	54.19	
	1	床	3700	4	14.8			
			4800	2.019231	9.692308			
			3700	1.230769	4.553846			
		内壁	1300	3.35	4.355	33.40		87.59
D	3	屋根	1800	3	5.4			
		外壁	1800	3.65	6.57	11.97		
	2	床	4800	0.480769	2.307692			
			3700	2.769231	10.24615			
		内壁	1300	3.35	4.355	16.91	28.88	
	1	床	4800	0.480769	2.307692			
			3700	2.769231	10.24615			
		内壁	1300	3.35	4.355	16.91		45.79

表 2.4　耐力壁線が負担する鉛直荷重（C プラン）

Cプラン

通り	階	部位	単位荷重 N/m^2	L or H m	荷重 kN／m	合計 kN／m		
A,E	3	屋根	1800	5	9			
		外壁	1800	3.65	6.57	15.57		
	2	床	3700	4	14.8			
		外壁	1800	3.65	6.57	21.37	36.94	
	1	床	3700	4	14.8			
		外壁	1800	3.65	6.57	21.37		58.31
B,C	3	屋根	1800	5.25	9.45			
		内壁	1300	3.35	4.355			
		小屋裏	1300	3.2	4.16	17.97		
	2	床	3700	4	14.8			
			4800	1.25	6			
		内壁	1300	3.35	4.355	25.16	43.12	
	1	床	3700	4	14.8			
			4800	1.25	6			
		内壁	1300	3.35	4.355	25.16		68.28

2.2.2　CLT の圧縮基準強度の算定

壁の CLT は、S60-7-7、厚み 210mm、樹種はスギとする。圧縮の基準強度は表 2.5 で算出する。

表 2.5　S60-7-7 の基準圧縮強度の算定表

層構成	ラミナ方向	等級	幅 mm	厚さ mm	E_i kN/mm^2	σ_{coml} kN/mm^2	A_i mm	Ei・Ai ×10^{3}kNmm3	A_A mm	A_0 mm	F c N/mm^2
7層 7プライ	平行層	M60	1000	30	6.0	21.6	30	180	120	210	9.26
	直交層	M60	1000	30	0.0		30	0			
	平行層	M60	1000	30	6.0		30	180			
	直交層	M60	1000	30	0.0		30	0			
	平行層	M60	1000	30	6.0		30	180			
	直交層	M60	1000	30	0.0		30	0			
	平行層	M60	1000	30	6.0		30	180			

2.2.3　1 階壁の検討

B プランの B 通りの壁が最大の鉛直荷重を負担するため、この位置での壁の検討を実施する。

i ：断面二次半径　61 mm
lb：壁長さ　3200 mm
λ：細長比　53
η：座屈低減係数　0.77
長期許容応力　f_c＝　3.40 N/mm^2
η・f_c＝　2.62 N/mm^2

1階、B通り耐力壁線が負担する荷重　87.59 kN/m
B通り中央の壁が負担する、耐力壁線方向の長さ　3.82 m
B通り中央の壁が負担する荷重　335 kN
壁の受ける単位面積あたりの荷重　σ_c＝　1.39　N/mm^2
（壁長さ　1.15m）

$\sigma_c < \eta \cdot f_c$　OK

2.2.4　2 階胴差へのめり込みの検討

スギのめり込み基準強度　$F_{\perp}$＝　6.00　N/mm^2
長期めり込み許容応力　$f_{\perp}$＝　2.2　N/mm^2

$\sigma_c < f_{\perp}$　OK

2.3　特定避難時間倒壊等防止建築物の要求性能への対応

2.3.1　対応の方法

対象とする建物は 3 階建て学校校舎のため、特定避難時間倒壊等防止建築物の要求性能を満足させる必要がある。そこで次のような対応で、要求性能への対応を図ることにする（図 2.10 参照）。

① 壁は、燃えしろ設計により 1 時間の準耐火構造の性能を確保。ただし、両面が現しとなる内壁は、片面を石膏ボード等によるメンブレン工法とする。

② CLT は、レゾルシノールーフェノール共縮合接着剤で製造する。よって 1 時間の燃えしろは 45mm として計算する。

③ 床は、石膏ボードによるメンブレン構造で 1 時間の準耐火構造の性能を確保

④ 屋根は、石膏ボードによるメンブレン工法で 30 分の準耐火構造の性能を確保

⑤ 接合金物は、原則として天井裏、床下に治めるが、加熱面側に燃えしろ層を設ける（写真 2.11 参照）。

⑥ 天井は、上記③、④により準不燃性能を確保

⑦ 壁は、平 12 建告 1459 号により、内装制限に対する要求性能を確保

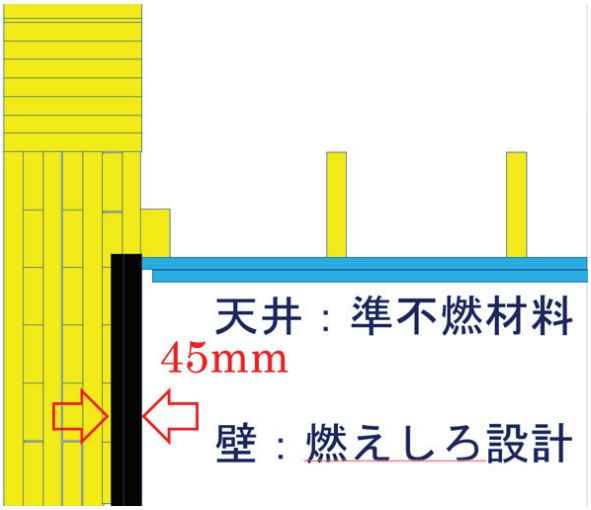


図 2.10　特定避難時間倒壊等防止建築物への対応

写真 2.11　燃えしろを考慮した箱形金物の取り付け状況

（2）燃えしろ設計

2.2 で検討した、B プランの B 通りの壁を対象に、火災時の壁の安全性を確認する。

壁厚は、1 時間の片面加熱により 45mm 消失（図 2.11 参照）するが、外側から 2 層目のラミナは、弱軸方向であるため、2 層目すべてのラミナが失われるとして、5 層 5 プライ、厚さ 150mm の CLT に対し、耐力の検討を実施する。

まず残存断面の圧縮基準強度は、表 2.6 にて算定される。

表 2.6　S60-7-7 の、1 時間の燃焼後の残存断面に対する基準圧縮強度の算定表

層構成	ラミナ方向	等級	幅	厚さ	E_i	σ_{coml}	A_i	Ei・Ai	A_A	A_0	F c
			mm	mm	kN/mm^2	kN/mm^2	mm	×10^{3}kNmm3	mm	mm	N/mm^2
5層 5プライ	平行層	M60	1000	30	6.0	21.6	30	180	90	150	9.72
	直交層	M60	1000	30	0.0		30	0			
	平行層	M60	1000	30	6.0		30	180			
	直交層	M60	1000	30	0.0		30	0			
	平行層	M60	1000	30	6.0		30	180			

B プランの B 通りの壁が最大の鉛直荷重を負担するため、この位置での壁の検討を実施する

i ：断面二次半径　43 mm
lb：壁長さ　3200 mm
λ：細長比　74
η：座屈低減係数　0.56
短期許容応力　f_c＝　6.17 N/mm^2
η・f_c＝　3.47 N/mm^2
1階、B通り耐力壁線が負担する荷重　87.59 kN/m
B通り中央の壁が負担する、耐力壁線方向の長さ　3.82 m
B通り中央の壁が負担する荷重　335 kN
耐力壁の長さ　1060 mm
（両端から　45mm　燃焼すると考える）
壁の受ける単位面積あたりの荷重　σ_c＝　2.10　N/mm^2
（壁長さ　1.15m）
σ_c＜η・f_c　OK

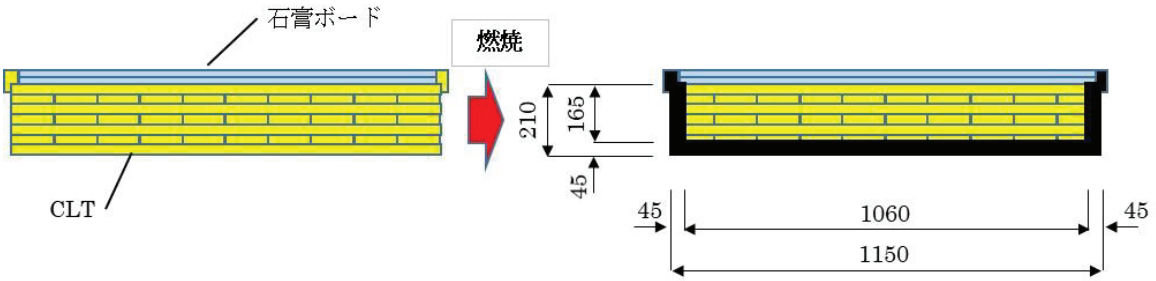


図 2.11　CLT 壁の燃焼後の状況

2.4　耐震フレームが受ける水平力の整理

A タイプ、B タイプ、C タイプに対し、それぞれ地震時に生ずる桁行方向の短期必要水平耐力を算出する。地震力の計算は、標準せん断力係数 0.2、建物の用途が学校校舎のため、重要度係数を 1.25 とした。各プランの地震力の算定表を表 2.7、表 2.9、表 2.11 に、各プランの CLT パネル 1 箇所あたりの短期時の必要水平耐力を表 2.8、表 2.10、表 2.12 に示す。

表 2.7　地震荷重の計算表（A プラン）

Aプラン

階	部位	単位荷重 N/m^2	L x or Ly m	Ly or H m	分担	形状	数量	荷重 kN	合計 kN
3	屋根	1700	9	12	1	1	1	183.60	
	外壁	1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	
	小屋裏	1300	10	2	0.5	0.5	2	13.00	
		1300	9	0.8	1	1	1	9.36	302.1075
2	床	2700	9	8	1	1	1	194.40	
		3700	9	2	1	1	1	66.60	
	外壁	3階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	3階内壁						17.42	
		3階内壁						19.60	
		1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	453.30
1	床	2700	9	8	1	1	1	194.40	
		3700	9	2	1	1	1	66.60	
	外壁	2階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	2階内壁						17.42	
		2階内壁						19.60	
		1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	453.30

表 2.8　地震力及び CLT パネル 1 箇所あたりの短期必要水平耐力の計算表（A プラン）

Aプラン

階	各階質量 m_i（kN）	当該階より上部の質量 Σm_i(kN)	α_i	Ai	Qe kN	耐力壁の数	1耐力壁の負担力(kN)
3	302.1075	302.11	0.250	1.64	123.95	7	17.71
2	453.295	755.40	0.625	1.23	233.12	7	33.30
1	453.295	1208.70	1.000	1.00	302.17	7	43.17

h＝　13.55 m
T＝　0.41 sec
C_0＝　0.2
重要度係数　1.25

表 2.9　地震荷重の計算表（B プラン）

Bプラン

階	部位	単位荷重 N/m^2	L x or Ly m	Ly or H m			数量	荷重 kN	合計 kN
3	屋根	1700	9	16.5	1	1	1	252.45	
	外壁	1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	2	1.675	0.5	1	2	4.36	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	
	小屋裏	1300	14.5	2.9	0.5	0.5	2	27.33	
		1300	9	2.6	1	1	1	30.42	410.705
2	床	2700	9	8	1	1	1	194.40	
		2700	9	4	1	1	1	97.20	
		3700	9	2.5	1	1	1	83.25	
	外壁	3階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	3階内壁						17.42	
		3階内壁						4.36	
		3階内壁						19.60	
		1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	2	1.675	0.5	1	2	4.36	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	575.86
1	床	2700	9	8	1	1	1	194.40	
		2700	9	4	1	1	1	97.20	
		3700	9	2.5	1	1	1	83.25	
	外壁	2階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	2階内壁						17.42	
		2階内壁						4.36	
		2階内壁						19.60	
		1300	8	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	2	1.675	0.5	1	2	17.42	
		1300	9	1.675	1	1	1	19.60	588.92

表 2.10　地震力及び CLT パネル 1 箇所あたりの短期必要水平耐力の計算表（B プラン）

Bプラン

階	各階質量 m_i（kN）	当該階より上部の質量 Σm_i(kN)	α_i	Ai	Qe kN	耐力壁の数	1耐力壁の負担力(kN)
3	410.705	410.71	0.261	1.64	168.38	9	18.71
2	575.86	986.56	0.626	1.24	305.90	9	33.99
1	588.92	1575.48	1.000	1.00	393.87	9	43.76

h＝　14.45 m

T＝　0.4335 sec

C_0＝　0.2

重要度係数　1.25

表 2.11　地震荷重の計算表（C プラン）

Cプラン

階	部位	単位荷重 N/m^2	L x or Ly m	Ly or H m	分担	形状	数量	荷重 kN	合計 kN
3	屋根	1700	9	20.5	1	1	1	313.65	
	外壁	1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	1300	8	1.675	0.5	1	4	34.84	
		1300	9	1.675	1	1	2	39.20	
	小屋裏	1300	18.5	3.7	0.5	0.5	2	44.49	
		1300	9	3.2	1	1	2	74.88	566.1875
2	床	2700	9	8	1	1	2	388.80	
		3700	9	2.5	1	1	1	83.25	
	外壁	3階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	3階内壁						34.84	
		3階内壁						39.20	
		1300	8	1.675	0.5	1	4	34.84	
		1300	9	1.675	1	1	2	39.20	738.38
1	床	2700	9	8	1	1	2	388.80	
		3700	9	2.5	1	1	1	83.25	
	外壁	2階外壁						59.13	
		1800	9	1.825	1	1	2	59.13	
	内壁	2階内壁						34.84	
		2階内壁						39.20	
		1300	8	1.675	0.5	1	4	34.84	
		1300	9	1.675	1	1	2	39.20	738.38

表 2.12　地震力及び CLT パネル 1 箇所あたりの短期必要水平耐力の計算表（C プラン）

Cプラン

階	各階質量 m_i（kN）	当該階より上部の質量 Σm_i(kN)	α_i	Ai	Qe kN	耐力壁の数	1耐力壁の負担力(kN)
3	566.1875	566.19	0.277	1.63	230.11	12	19.18
2	738.38	1304.57	0.639	1.24	403.22	12	33.60
1	738.38	2042.95	1.000	1.00	510.74	12	42.56

h＝　15.25 m

T＝　0.4575 sec

C_0＝　0.2

重要度係数　1.25

表 2.8、表 2.10、表 2.12 より、CLT パネル 1 箇所あたりの短期必要水平耐力は、表 2.13 に示す数値となる。

表 2.13　各プランの CLT パネル 1 箇所あたりの短期必要水平耐力

プラン名	Aプラン	Bプラン	Cプラン
3階	17.71	18.71	19.18
2階	33.30	33.99	33.60
1階	43.17	43.76	42.56

第 3 章　CLT と構造用集成材のめり込み試験

3.1　はじめに

CLT 耐力壁と大断面集成材梁の接合部分の圧縮時のめり込みによる荷重変形挙動を明確にし、構造解析に用いるバネ定数の数値の決定方法を検討するため、集成材梁への CLT 及び箱型金物のめり込み挙動を把握するために部分圧縮試験を行った。

3.2　試験体概要

表 3.2-1 に試験体リスト、図 3.2-1 に試験体形状及び寸法を示す。

部分圧縮試験は、耐力壁相当の部材に CLT（スギ：5 層 5 プライ S60）または CLT（スギ：7 層 7 プライ S60）、箱型金物を想定した鋼板（SS400）を用いた。CLT は表層のラミナの繊維方向が加力方向となるようにした。梁相当の部材には、CLT（スギ：5 層 5 プライ S60 または 7 層 7 プライ S60）、梁せいが 600mm の異等級構成集成材（スギ：E75-F240）の上半分の部分（300mm）のめり込み挙動を再現できるように調整した集成材を用いた。

壁部材に CLT、梁部材に集成材を用いた試験体は各 7 体とし、そのうちの各 1 体を後述の CLT と集成材の接触面の表面形状を測定する試験に用いた。壁部材・梁部材ともに CLT を用いた試験体は、各 5 体とした。

鋼板で加圧する試験体に関しては、集成材の幅が 150mm の試験体は各 5 体、集成材の幅が 210mm の試験体は各 6 体とした。

表 3.2-1　試験体リスト

試験体名	壁部材	梁部材	試験体数
C150-G150-PC	CLT(5層5プライS60) 幅：150mm	スギ集成材(E75-F240) 幅：150mm	各7体
C150-G210-PC	CLT(5層5プライS60) 幅：150mm	スギ集成材(E75-F240) 幅：210mm	
C210-G210-PC	CLT(7層7プライS60) 幅：210mm	スギ集成材(E75-F240) 幅：210mm	
C150-C150-PC	CLT(5層5プライS60) 幅：150mm	CLT(5層5プライS60) 幅：150mm	各5体
C210-C210-PC	CLT(7層7プライS60) 幅：210mm	CLT(7層7プライS60) 幅：210mm	
S-G150-PC	鋼板（SS400）	スギ集成材(E75-F240) 幅：150mm	各5体
S-G210-PC	鋼板（SS400）	スギ集成材(E75-F240) 幅：210mm	各6体

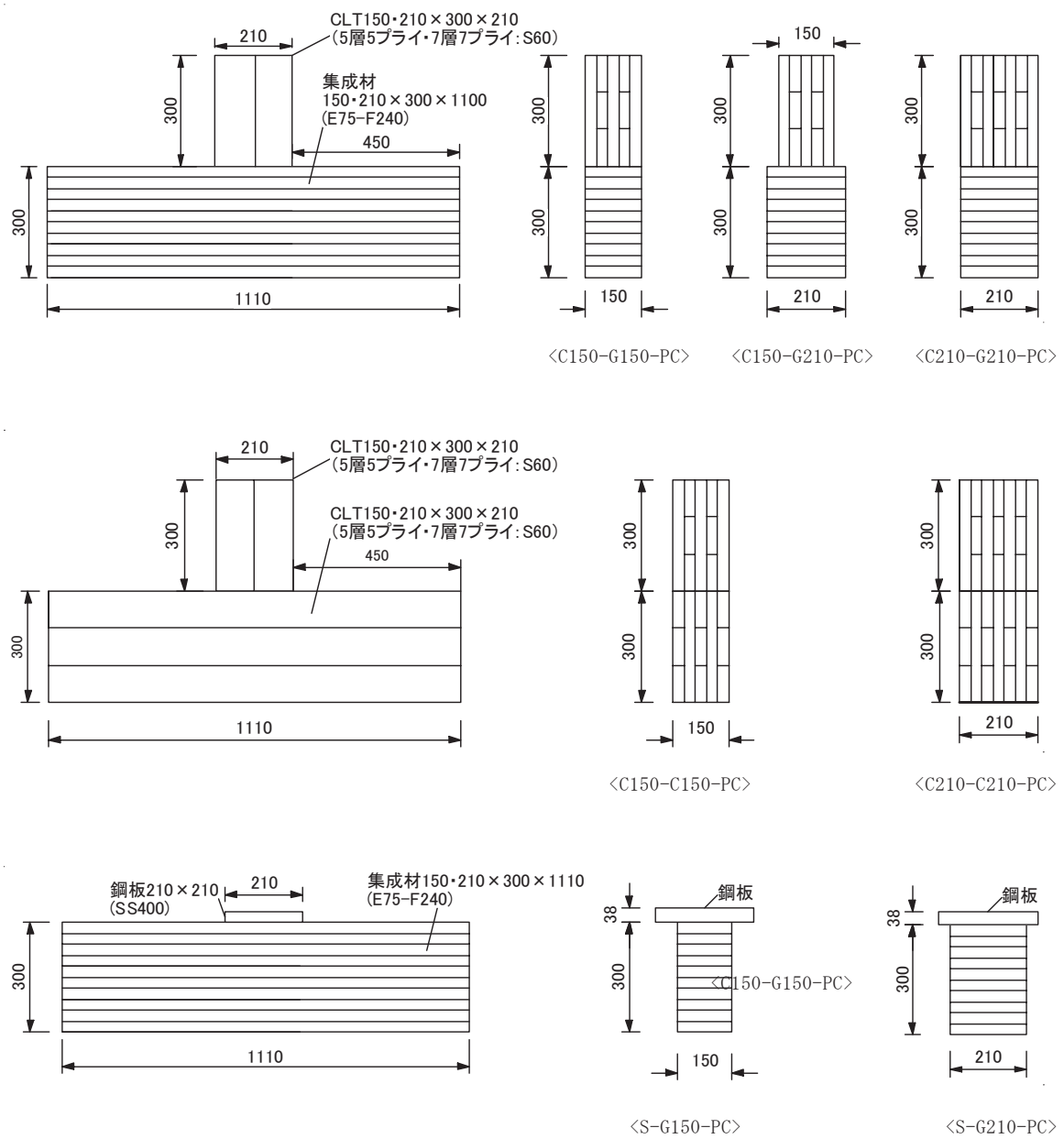


図 3.2-1　試験体形状及び寸法（単位：mm）

3.3　試験用集成材及び CLT の製造について

試験用集成材及び CLT の製造においては、グレーディングマシンでヤング係数を計測したラミナを用いた。樹種はスギであり、集成材の製造については幅 150mm 用ラミナ 293 枚、幅 210mm 用ラミナ 237 枚より、それぞれの集成材において構成しているラミナのヤング係数がほぼ同じとなるように、またできる限り節の影響が出にくいように木目も重視してラミナ構成を実施した。なお、縦継ぎによる影響を排除するため、4m 強のラミナを用いることで縦継ぎ無しとし、幅 150mm の集成材は 4 体、幅 210mm の集成材は 7 体、製造した。また、CLT については、幅 120mm 用ラミナ 279 枚より、強軸方向となるラミナのヤング係数によるばらつきを減らすようにラミナを選択し、配置を決定した。なお、CLT については 5 層 5 プライを 1 体、7 層 7 プライを 1 体、製造した。ちなみに、グレー

ディングマシンによる計測は、ラミナ幅に関わらず 51mm 間隔であり、投入から 351mm と最終の 455mm は計測できない。ここで、集成材及び CLT におけるラミナ配置の決定に用いたヤング係数は、グレーディングマシンで得られたラミナ 1 枚内でのヤング係数の平均値とした。ただし、ラミナ 1 枚内でのヤング係数による標準偏差の比較的大きな材料については、刻んだ際に長さ方向の位置によるヤング係数差が大きくなるために今回の製造からは除外することとし、ラミナを選定した。

製造した集成材の各層ラミナのヤング係数の平均値を表 3.3-1、3.3-2 に示す。なお、集成材については、梁せい 600mm を想定したものであるため、最外層から徐々にヤング係数が下がる配置としている。次に、表 3-3-3 に CLT の強軸層(平行層)のラミナ配置を層ごとに 5 層用 3 層分、7 層用 4 層分として示す。

表 3.3-1　150mm 幅集成材のラミナ配置

	1体目	2体目	3体目	4体目
1層目	7.64	7.79	7.78	7.75
2層目	7.60	7.69	7.70	7.71
3層目	7.83	7.59	7.57	7.56
4層目	7.42	7.49	7.52	7.55
5層目	7.36	7.36	4.62	7.35
6層目	7.27	7.29	7.31	7.32
7層目	7.24	7.22	7.21	7.19
8層目	7.16	7.17	7.17	7.19
9層目	7.11	7.10	7.09	7.08
10層目	7.04	7.04	7.05	7.07
			単位：kN/mm^2	

Note:1 体目の 3 層目のラミナは、ヤング係数は高いが節が多かったために、1 層目から 3 層目に変更した。加えて、3 体目の 5 層目のラミナは欠損があったため急遽番号割をして材料の残っているものを用いたためヤング係数が低い材料となっている。

表 3.3-2　210mm 幅集成材のラミナ配置

	1体目	2体目	3体目	4体目	5体目	6体目	7体目
1層目	8.09	8.04	8.02	8.01	8.01	8.01	8.00
2層目	7.78	7.83	7.87	7.88	7.88	7.90	7.94
3層目	7.76	7.74	7.74	7.73	7.72	7.71	7.71
4層目	7.47	7.49	7.52	7.58	7.60	7.61	7.68
5層目	7.47	7.45	7.45	7.42	7.39	7.39	7.38
6層目	7.24	7.26	7.28	7.29	7.30	7.32	7.36
7層目	7.22	7.19	7.18	7.16	7.13	7.13	7.11
8層目	6.98	7.00	7.01	7.04	7.05	7.08	7.11
9層目	6.94	6.90	6.90	6.90	6.88	6.87	6.86
10層目	6.75	6.75	6.76	6.81	6.82	6.85	6.85
						単位：kN/mm^2	

表 3.3-3　CLT の強軸(平行層)ラミナ（左：5 層 5 プライ、右：7 層 7 プライ）

	1層目	3層目	5層目		1層目	3層目	5層目	7層目
1	6.78	6.80	6.84	1	6.85	6.85	6.86	6.87
2	6.91	6.90	6.90	2	6.89	6.89	6.88	6.87
3	6.93	6.93	6.95	3	6.97	6.97	6.97	6.98
4	7.05	7.04	7.03	4	7.02	7.02	7.02	7.01
5	7.05	7.06	7.09	5	7.12	7.12	7.13	7.14
6	7.22	7.21	7.21	6	7.20	7.18	7.15	7.14
7	7.23	7.24	7.25	7	7.27	7.28	7.29	7.32
8	7.36	7.36	7.35	8	7.34	7.34	7.33	7.32
9	7.37	7.37	7.38	9	7.38	7.41	7.41	7.42
10	7.46	7.46	7.45	10	7.45	7.44	7.44	7.43
11	7.50	7.51	7.53	11	7.54	7.55	7.58	7.61
12	7.67	7.66	7.66	12	7.65	7.63	7.63	7.61
13	7.67	7.68	7.68	13	7.68	7.69	7.71	7.73
14	7.78	7.78	7.76	14	7.76	7.75	7.74	7.73
15	7.78	7.79	7.81	15	7.82	7.83	7.84	7.85
16	7.89	7.88	7.87	16	7.86	7.86	7.86	7.85
17	7.89	7.94	7.94	17	7.96	7.97	7.98	7.98
		単位：kN/mm^2					単位：kN/mm^2	

3.4　試験方法

図 3.4-1 に変位計の取り付け位置及び加力位置を示す。

加力は 2000kN 万能試験機（島津製作所：UH-2000kNC）により試験体中央を加力した。また、加力速度は 2.0mm/min とした。変位の計測は、ストレインゲージ式変位計（東京測器研究所：CDP-50、SDP-50）を用いて CLT の全長の差（CLT の変位）、集成材の梁せいの差（集成材の変位）、加圧盤から試験機土台までの長さの差（全体変位）を測定した。試験は、最大耐力の 80%まで荷重が低下するか、試験機の変位が 30mm に達した時点で加力を終了した。

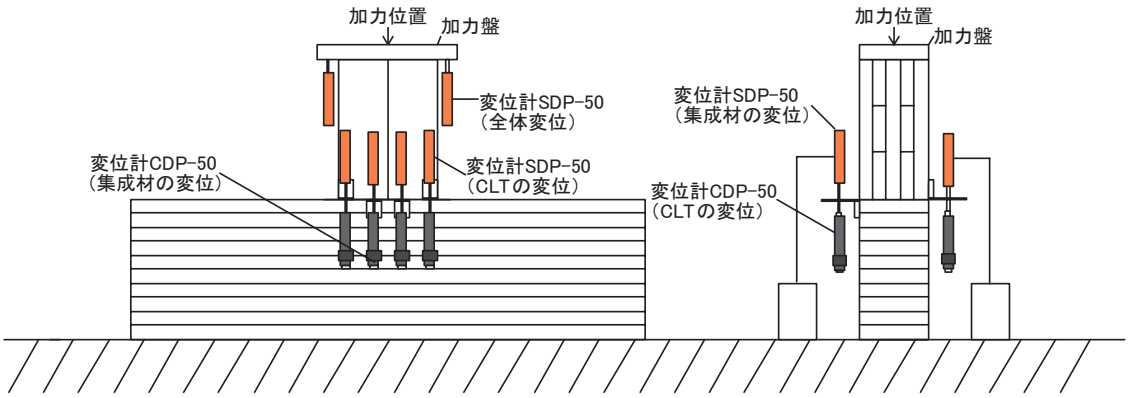


図 3.4-1　変位計位置及び加力位置（単位：mm）

3.5　試験結果

3.5.1　荷重変位関係と破壊性状

C150-G150 シリーズ（CLT 幅 150 ㎜　集成材幅 150 ㎜）

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-1～6 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-1～5 に示す。

めり込み変位が進むにしたがって、CLT のラミナの接着面付近から年輪に沿って割裂が生じ始め、その後、割裂が進行した（写真 3.5-2）。また、試験終了直前に、集成材の端部に割裂が生じた（写真 3.5-5）。その後、試験機の変位が 30mm に達したため、試験を終了した。

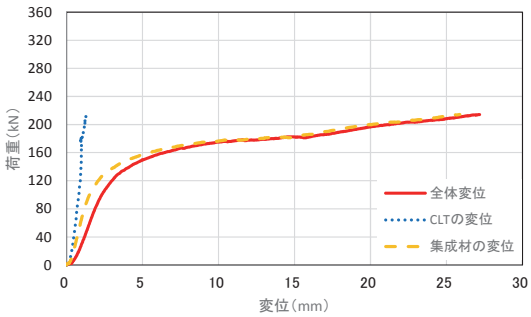


図 3.5-1　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC1）

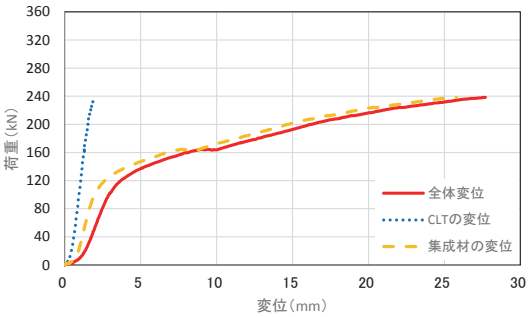


図 3.5-2　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC2）

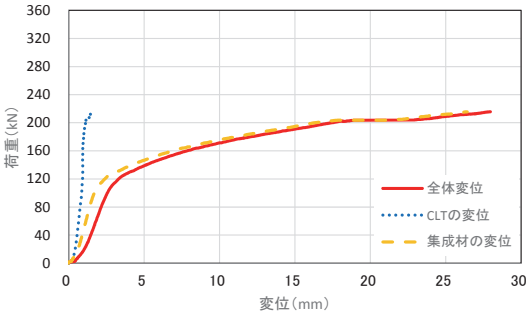


図 3.5-3　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC3）

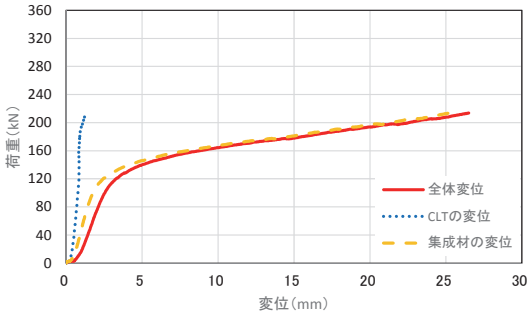


図 3.5-4　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC4）

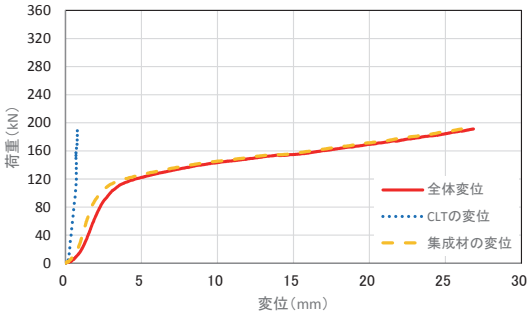


図 3.5-5　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC5）

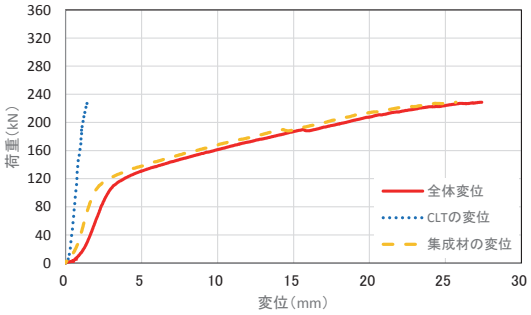


図 3.5-6　荷重-変位曲線
（C150-G150-PC6）

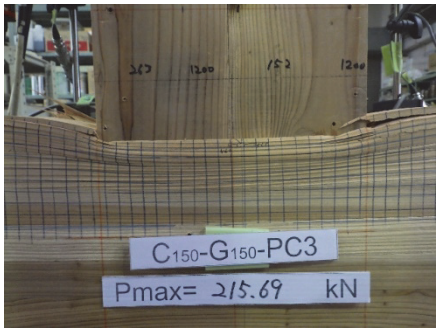


写真 3.5-1　試験終了時のめり込み

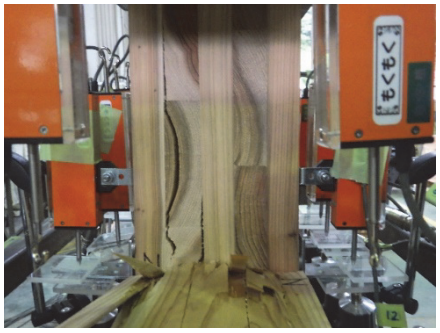


写真 3.5-2　CLT のラミナの年輪に沿った割裂

写真 3.5-3　CLT 接触面の変形状況

写真 3.5-4　集成材の接触面の変形状況

写真 3.5-5　集成材端部の割裂

C150-G210 シリーズ（CLT 幅 150 ㎜　集成材幅 210 ㎜）

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-7～12 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-6～9 に示す。

変位が進むにしたがって CLT と集成材が接触していた部分はめり込んでいったが、加圧面以外に変化はなかった。その後、試験機の変位が 30mm に達したため、試験を終了した。

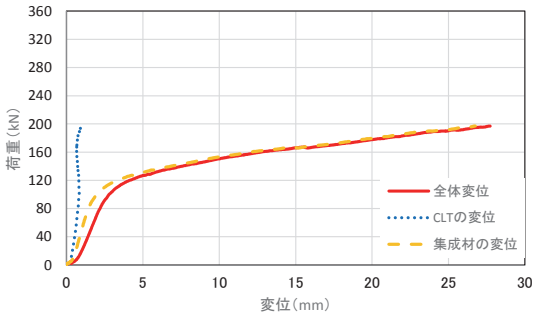


図 3.5-7　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC1）

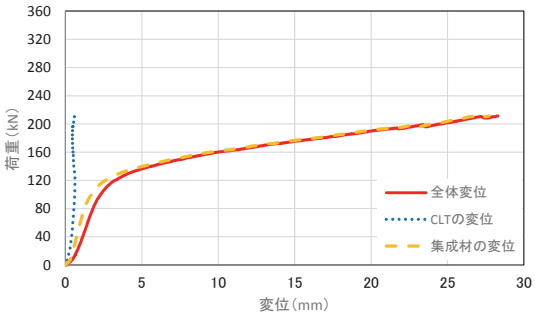


図 3.5-8　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC2）

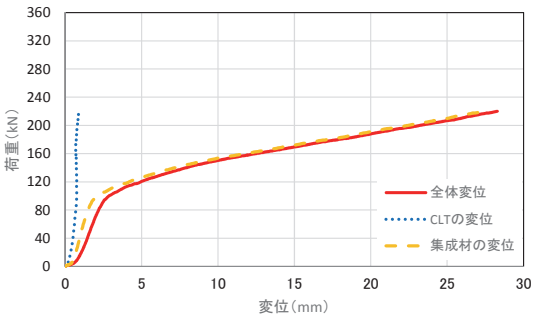


図 3.5-9　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC3）

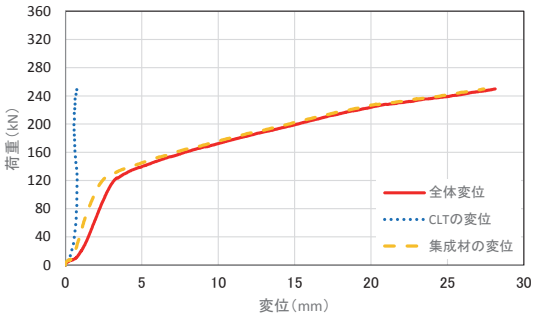


図 3.5-10　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC4）

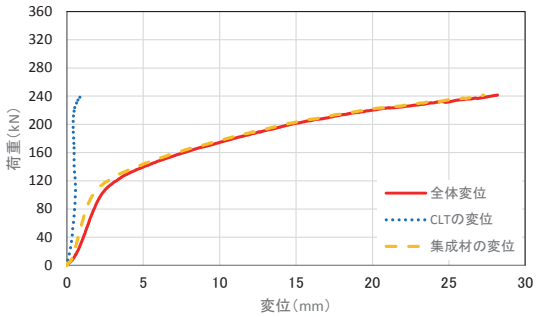


図 3.5-11　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC5）

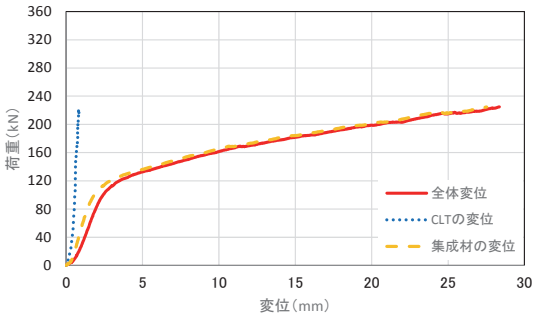


図 3.5-12　荷重-変位曲線
（C150-G210-PC6）

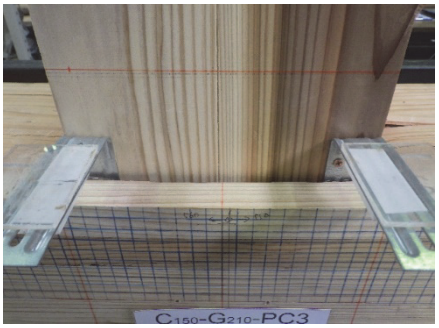


写真 3.5-6　試験終了時のめり込み

写真 3.5-7　試験終了時のめり込み

写真 3.5-8　CLT 接触面の変形状況

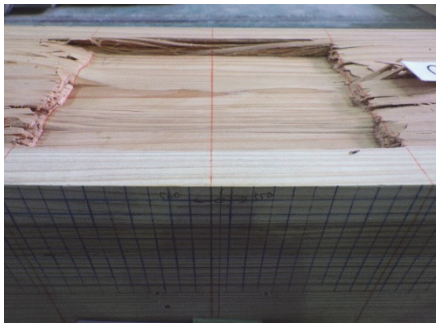


写真 3.5-9　集成材の接触面の変形状況

<u>C210-G210 シリーズ（CLT 幅 210 ㎜　集成材幅 210 ㎜）</u>

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-13～18 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-10～13 に示す。

変位が進行しても CLT と集成材ともに割裂は生じなかった。その後、試験機の変位が 30mm に達したため、試験を終了した。

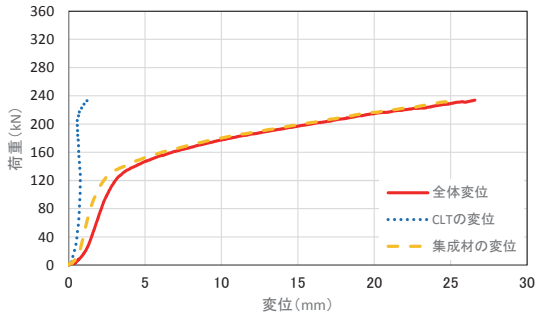


図 3.5-13　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC1）

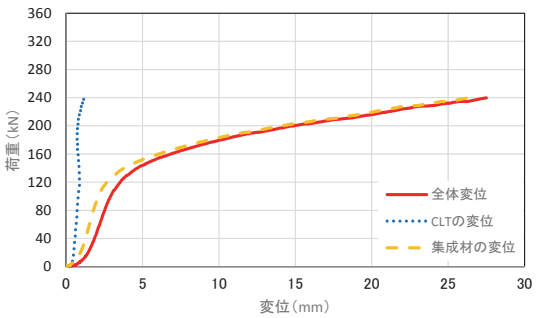


図 3.5-14　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC2）

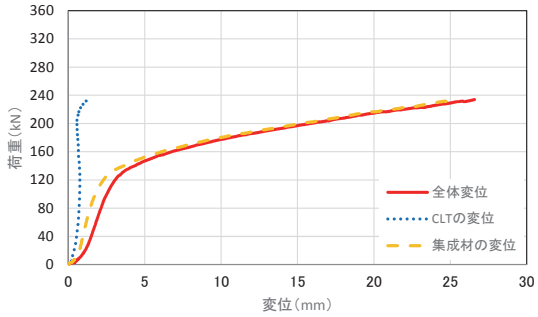


図 3.5-15　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC3）

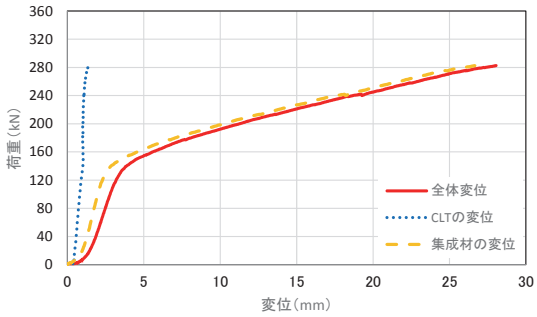


図 3.5-16　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC4）

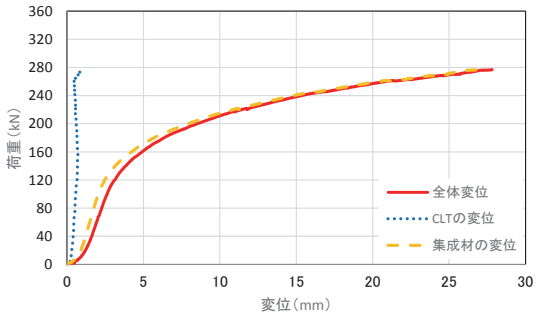


図 3.5-17　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC5）

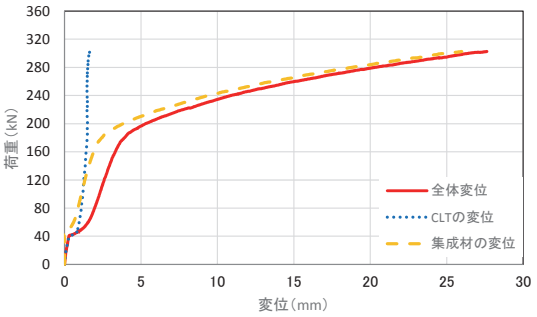


図 3.5-18　荷重-変位曲線
（C210-G210-PC6）

写真 3.5-10　試験終了時のめり込み

写真 3.5-11　試験終了時のめり込み

写真 3-5-12　CLT 接触面の変形状況

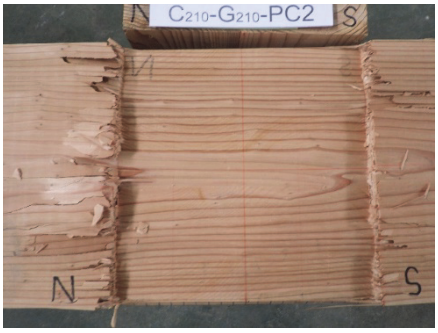


写真 3-5-13　集成材の接触面の変形状況

C150-C150 シリーズ（CLT 幅 150 ㎜　CLT 幅 150 ㎜）

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-19～23 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-14～17 に示す。

荷重が 200kN 程度となったところで CLT（壁側）のラミナの接着面付近に割裂が生じた（写真 3.5-15）。最大耐力に達した後に荷重が徐々に低下し、CLT（梁側）のラミナの接触面付近に割裂が生じた（写真 3.5-17）。その後、荷重が最大耐力の 80%まで低下したため、試験を終了した。

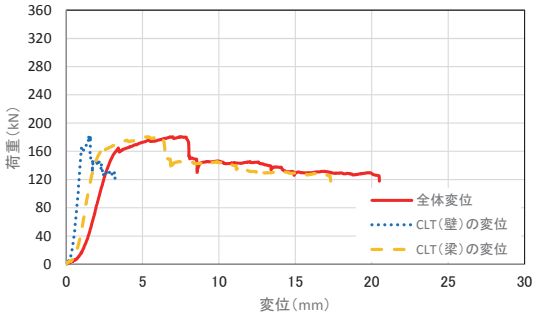


図 3.5-19　荷重-変位曲線
（C150-C150-PC1）

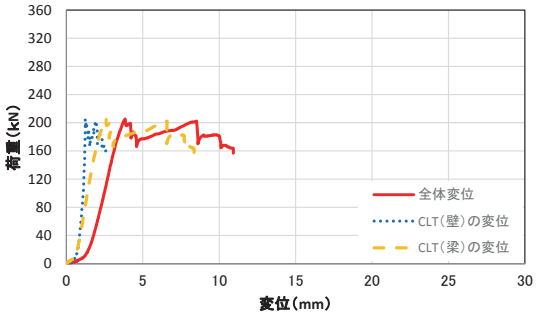


図 3.5-20　荷重-変位曲線
（C150-C150-PC2）

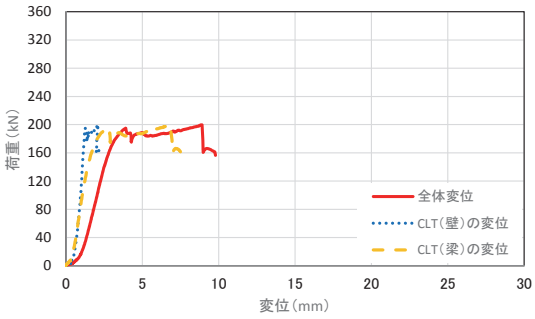


図 3.5-21　荷重-変位曲線
（C150-C150-PC3）

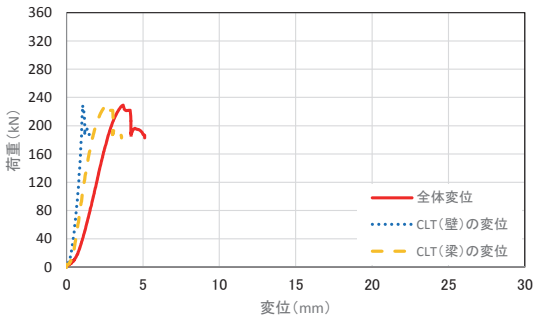


図 3.5-22　荷重-変位曲線
（C150-C150-PC4）

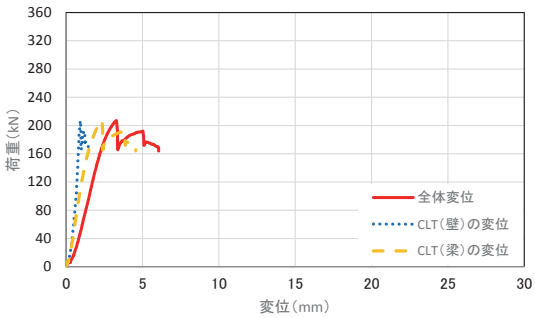


図 3-5-23　荷重-変位曲線
（C150-C150-PC5）

写真 3.5-14　試験終了時のめり込み

写真 3.5-15　CLT（壁側）のめり込み

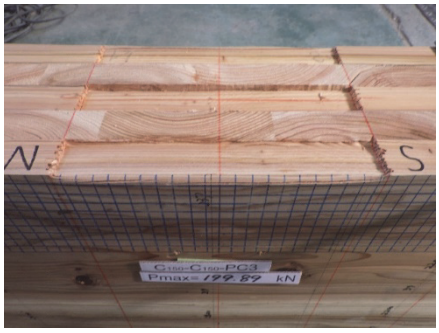


写真 3.5-16　CLT（梁側）のめり込み

写真 3.5-17　CLT の割裂

<u>C150-C210 シリーズ（CLT 幅 150 ㎜　CLT 幅 210 ㎜）</u>

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-24～28 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-18～21 に示す。

荷重が 300kN 程度となったところで CLT（壁側）のラミナの接着面付近に割裂が生じ始め、その後、割裂が進行した（図 3.5-19）。その後、荷重が徐々に低下し CLT（梁）のラミナの接触面付近に割裂が生じ始め、割裂が進行した（図 3.5-21）。その後、荷重が最大耐力の 80%まで低下したため、試験を終了した。

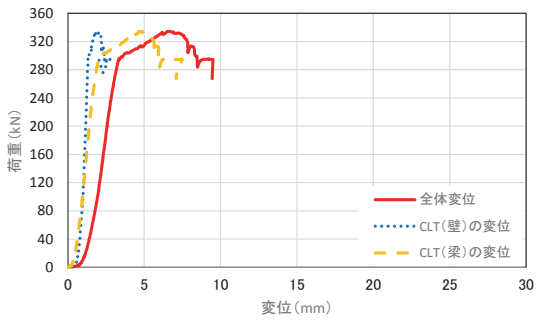


図 3-5-24　荷重-変位曲線
（C150-C210-PC1）

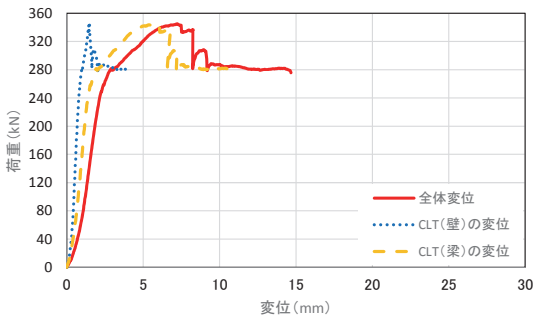


図 3-5-25　荷重-変位曲線
（C150-C210-PC2）

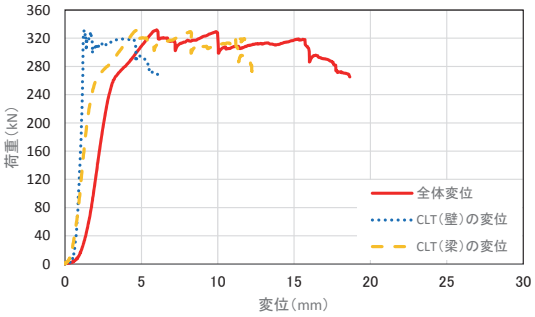


図 3.5-26　荷重-変位曲線
（C1500-C210-PC3）

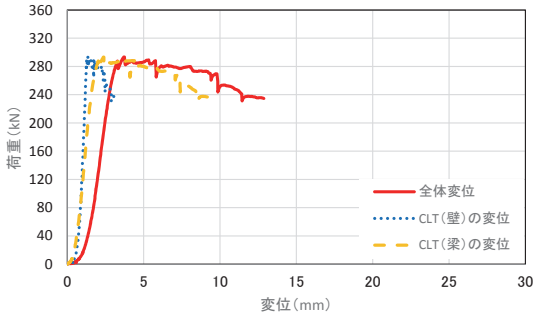


図 3.5-27　荷重-変位曲線
（C150-C210-PC4）

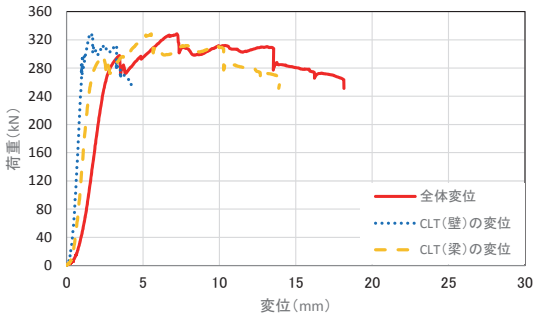


図 3.5-28　荷重-変位曲線
（C150-C210-PC5）

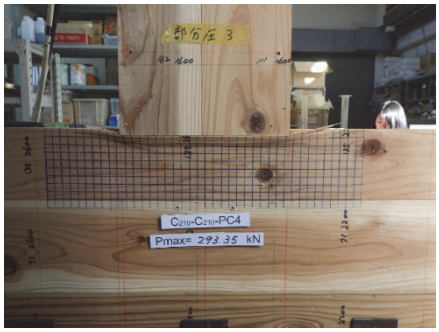


写真 3.5-18　試験終了時のめり込み

写真 3.5-19　CLT（壁側）のめり込み

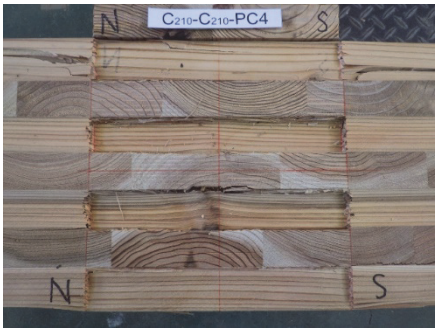


写真 3.5-20　CLT（梁側）のめり込み

写真 3.5-21　CLT の割裂

S-G150 シリーズ（鋼板　集成材幅 150 ㎜）

各試験体の荷重-変位曲線を図 3.5-29～33 に、代表的な破壊性状を写真 3.5-18～21 に示す。

変位が 25 ㎜を超えたところで集成材端部に割裂が生じた（図 3.5-25）が大きな荷重低下は起こさなかった。その後、試験機の変位が 30mm に達したため、試験を終了した。

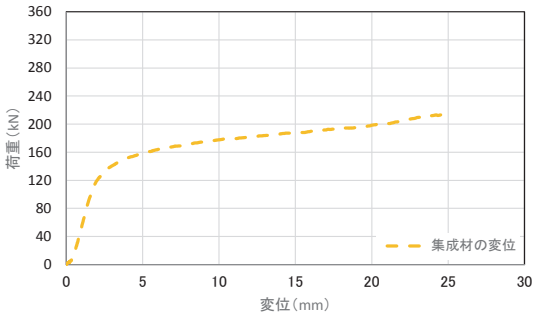


図 3.5-29　荷重-変位曲線
（S-G150-PC1）

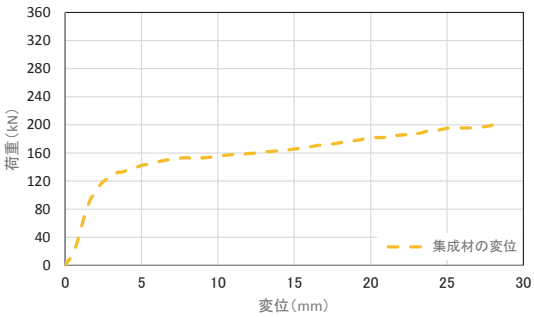


図 3.5-30　荷重-変位曲線
（S-G150-PC2）

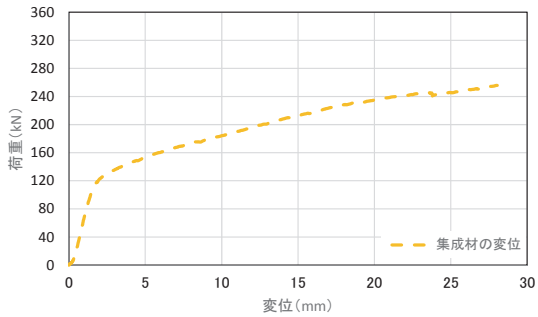


図 3.5-31　荷重-変位曲線
（S-G150-PC3）

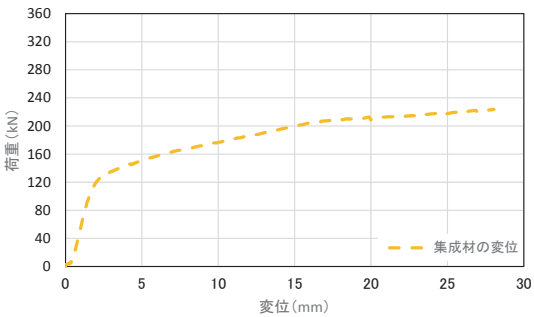


図 3.5-32　荷重-変位曲線
（S-G150-PC4）

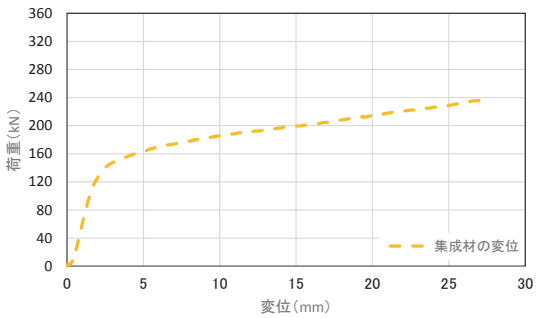


図 3.5-33　荷重-変位曲線
（S-G150-PC5）

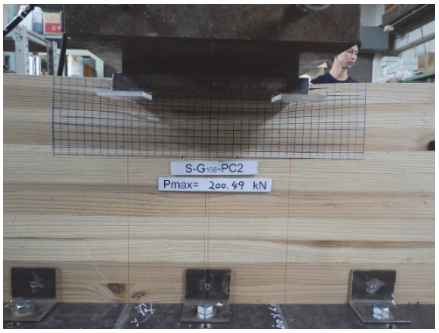


写真 3.5-22　試験終了時のめり込み

写真 3.5-23　試験終了時のめり込み

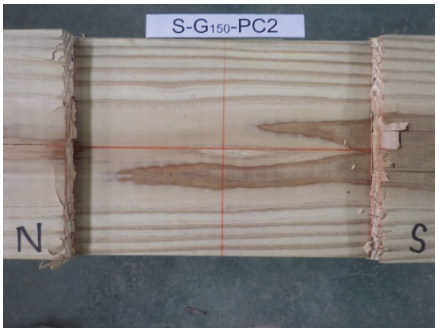


写真 3.5-25　集成材の割裂

写真 3.5-24　集成材のめり込み

<u>S-G210 シリーズ（鋼板　集成材幅 210 ㎜）</u>

各試験体の荷重-変位曲線を図 3-5-34～39 に、代表的な破壊性状を写真 3-5-26～29 に示す。

変位が 25 ㎜を超えたところで集成材端部に割裂が生じた（図 3-5-29）が大きな荷重低下は起こさなかった。その後、試験機の変位が 30mm に達したため、試験を終了した。

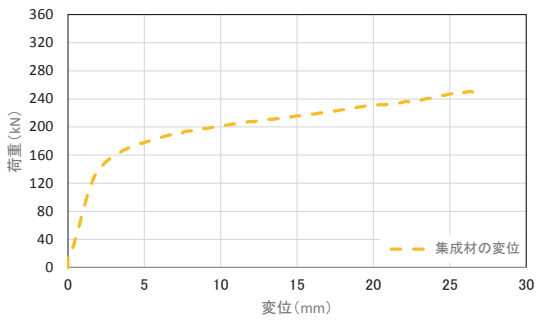


図 3.5-34　荷重-変位曲線
(S-G210-PC1)

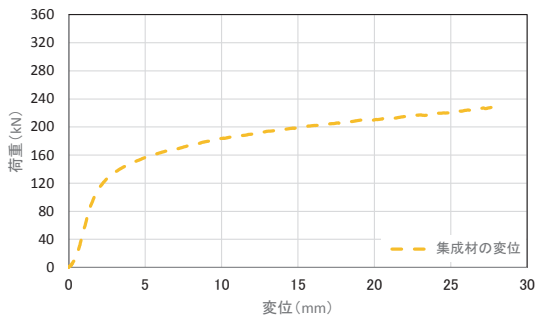


図 3.5-35　荷重-変位曲線
(S-G210-PC2)

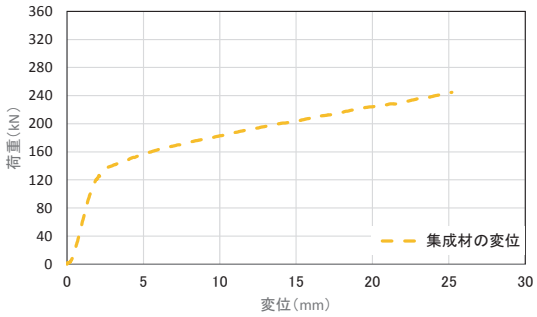


図 3.5-36　荷重-変位曲線
(S-G210-PC3)

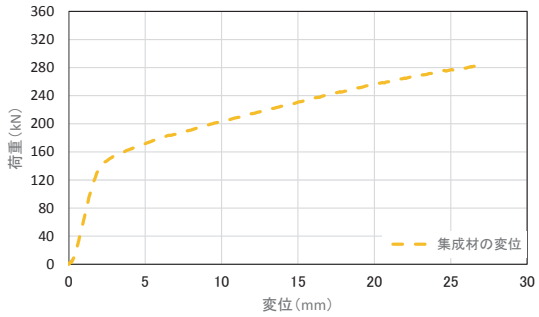


図 3.5-37　荷重-変位曲線
(S-G210-PC4)

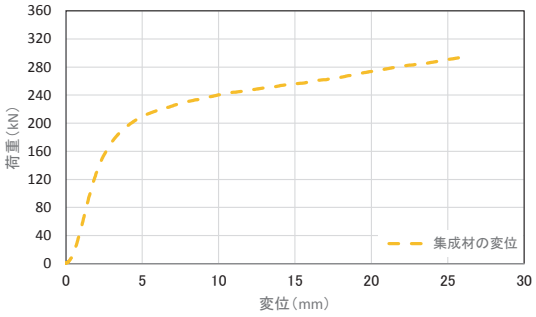


図 3.5-38　荷重-変位曲線
(S-G210-PC3)

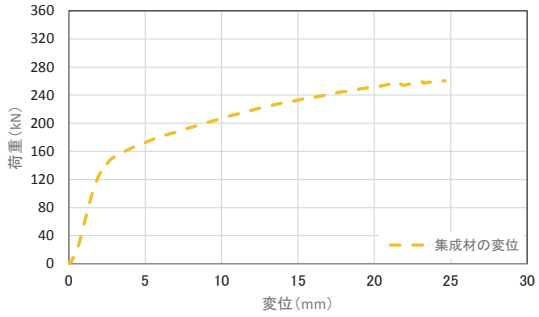


図 3.5-39　荷重-変位曲線
(S-G210-PC4)

写真 3.5-26　試験終了時のめり込み

写真 3.5-27　試験終了時のめり込み

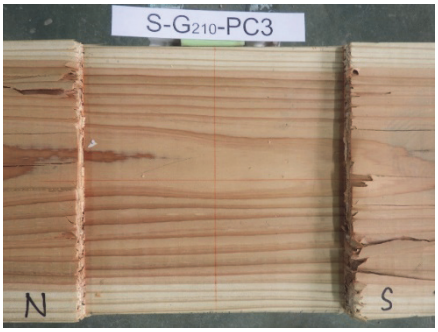


写真 3.-5-28　集成材のめり込み

写真 3.5-29　集成材の割裂

3.5.2　めり込み剛性と降伏耐力

めり込み剛性については、弾性域の剛性（以下、1 次剛性とする）と降伏後の剛性（以下、2 次剛性とする）を算出した。なお、1 次剛性は、0.1Pmax 時と 0.4Pmax 時の荷重と変位の点を基準にその点から周辺の 4 点を含めて平均値をとった。その後、それぞれの平均値の差を算出し、荷重を変位で除して算出した。同様に、2 次剛性は、0.8Pmax 時と Pmax 時の荷重と変位を用いて算出した。また、降伏後の剛性は、降伏耐力付近の点を使って算出すると各試験体の値にばらつきが大きくなるため、0.8Pmax 時と Pmax 時の荷重と変位を用いて算出した。

また、降伏耐力は完全弾塑性モデル置換法により算出した。

1 次剛性

＜壁部材側の CLT＞

壁部材側の CLT の 1 次剛性を表 3,5-1、図 3.5-40 に示す。CLT の幅が 150mm の試験体の平均値は、C150-G150 シリーズは 192kN/mm、C150-G210 シリーズは 219kN/mm、C150-C150 シリーズは 193kN/mm となった。CLT の幅が 210mm の試験体の平均値は、梁部材が集成材の試験体は 240kN/mm 程度となり、梁部材が CLT の試験体は 345kN/mm 程度となり、CLT の方が約 1.4 倍高い値となった。梁部材の種類が異なる加圧面積が同じ試験体を比較すると、C150-G150 シリーズと C150-C150 シリーズでは、梁部材が CLT と集成材であっても 1 次剛性に大きな差異は生じなかった。

また、梁部材の幅が同じ C150-G150-PC と C150-C150-PC は、梁部材が CLT と集成材であっても 1 次剛性に大きな差異は生じなかった。梁部材の幅が異なる C150-G210 シリーズと C150-G150 シリーズは、集成材の幅が大きい C150-G210-PC のほうが、1 次剛性が大きくなる傾向を示したが、加圧面積の比とは一致しない。

表 3.5-1　壁部材側の CLT の一次剛性（単位：kN/mm）

試験体名	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	平均
C150−G150	169.70	159.34	183.92	210.24	218.57	215.71	192.91
C150−G210	168.64	216.67	187.78	252.86	237.52	251.01	219.08
C210−G210	181.99	268.10	223.14	243.37	333.05	193.64	240.55
C150−C150	187.44	210.34	185.17	187.45	199.29		193.56
C210−C210	335.52	382.99	375.64	324.55	316.65		345.96

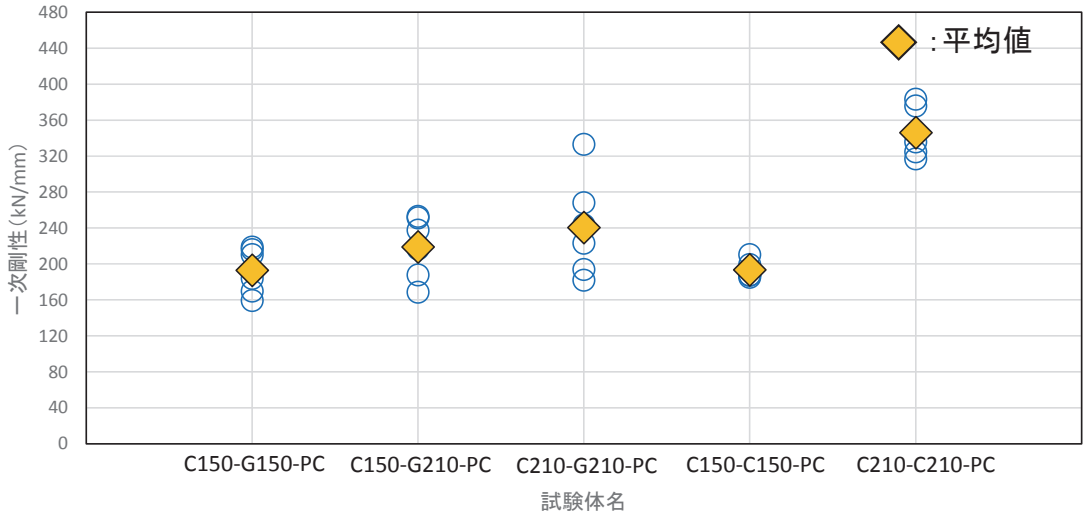


図 3.5-40　壁部材側の CLT の一次剛性

＜梁部材側＞

梁部材側の CLT の 1 次剛性を表 3.5-1、図 3.5-40 に示す。梁部材に集成材を用いた試験体の 1 次剛性の平均値は、C150-G150 シリーズは 75kN/mm、C150-G210 シリーズは 70kN/mm 程度、C210-G210 シリーズは 75kN/mm 程度となり、鋼板を用いた S-G150 シリーズは 82kN/mm 程度、S-G210 シリーズは 80kN/mm 程度となった。

梁部材に CLT を用いた試験体の 1 次剛性の平均値は、CLT の幅が 150mm の試験体は 125kN/mm 程度となり、CLT の幅が 210mm の試験体は 190kN/mm 程度となった。

部材の組み合わせが同じ（CLT-集成材）シリーズの 1 次剛性を比較すると、C210-G210 シリーズ、C150-G150 シリーズ、C150-G210 シリーズの平均値とほぼ同じ値となった。鋼板を押し付けた S-G210-PC シリーズ、S-G150 シリーズも平均値に差は生じなかった。

また、加圧面積が同じシリーズで比較すると、梁部材に CLT を用いた C150-C150 シリーズ、C210-C210 シリーズのほうが梁部材に集成材を用いた C150-G150 シリーズ、C210-G210 シリーズよりもそれぞれ 1.68 倍程度、2.58 倍程度高い値となった。

表 3.5-2　梁部材側の一次剛性（単位：kN/mm）

試験体名	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	平均
C150−G150	82.53	77.84	76.62	77.69	65.01	68.26	74.66
C150−G210	73.17	77.81	70.71	63.35	67.91	68.12	70.18
C210−G210	80.11	70.13	79.34	80.87	68.60	68.55	74.60
C150−C150	101.84	117.37	133.51	135.90	139.41		125.60
C210−C210	185.99	191.50	182.85	186.51	215.88		192.55
S−G150	80.51	73.17	82.13	87.43	87.25		82.10
S−G210	75.13	76.05	81.49	86.92	80.91	80.39	80.15

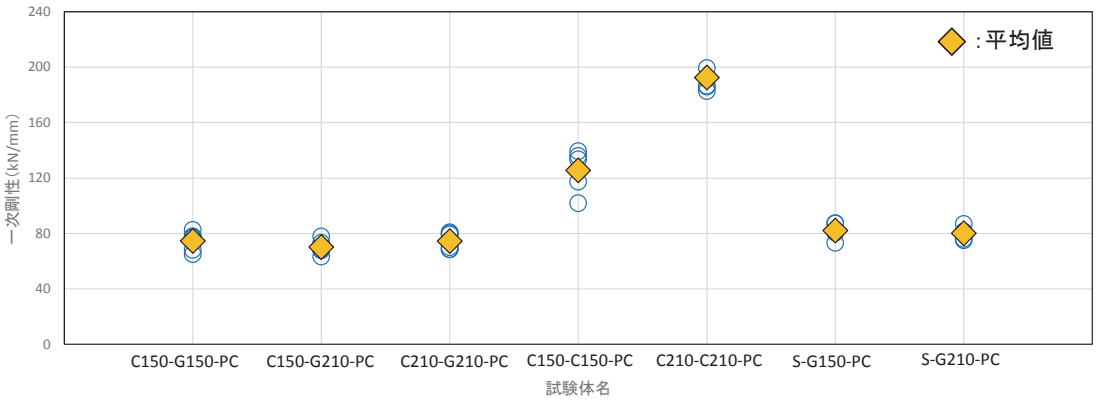


図 3.5-41　梁部材側の一次剛性

2 次剛性

表 3.5-3、図 3.5-42 に 2 次剛性を示す。なお、壁部材側の CLT については、計測した表層ラミナでは降伏性状が確認されなかったため、考察から除外する。

CLT の幅が 150mm の試験体の 2 次剛性の平均値は 3.0kN/mm 程度となり、CLT の幅が 210mm の試験体の二次剛性の平均値は 3.5kN/mm 程度となった。

部材が同じ試験体の 2 次剛性を比較すると、C210-G210 シリーズはそれぞれ C150-G150 シリーズや C150-G210 シリーズの 1.19 倍、1.10 倍程度となり、S-G210 シリーズは S-G150 シリーズの 1.24 倍程度となった。それぞれの試験体の加圧面積の比は 1.4 倍であり、加圧面積の比とは一致しなかった。

また、加圧面積が同じ試験体の 2 次剛性の平均値を比較すると、壁部材に CLT を用いたシリーズの平均値のほうが鋼板を用いたシリーズの平均値よりも大きくなった。

表 3.5-3　梁部材側の 2 次剛性（単位：kN/mm）

試験体名	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	平均
C150−G150	2.37	3.78	2.53	3.05	2.91	3.59	3.04
C150−G210	2.56	2.76	3.86	3.91	3.39	3.25	3.29
C210−G210	2.89	3.37	3.45	4.80	3.55	3.75	3.63
S−G150	2.57	2.57	3.53	2.54	2.95		2.83
S−G210	2.95	2.54	3.97	4.57	3.36	3.62	3.50

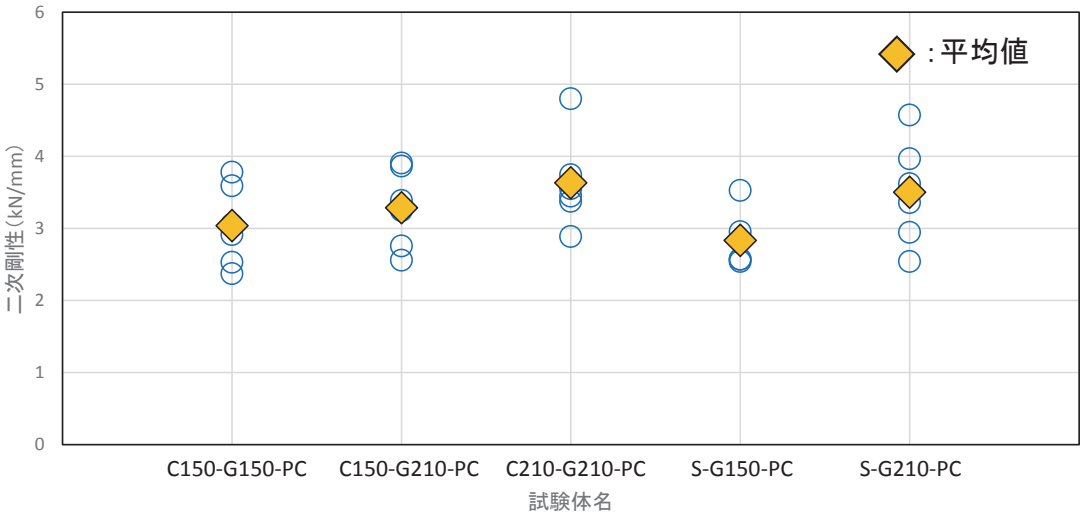


図 3.5-42　梁部材側の 2 次剛性

降伏耐力

表 3.5-4、図 3.5-43 に各試験体の降伏耐力を示す。

加圧面積が同じシリーズの降伏耐力の平均値を比較すると、S-G150 シリーズはそれぞれ C150-G150 シリーズや C150-G210 シリーズの 1.07 倍、1.10 倍程度となり、S-G210 シリーズは C210-G210 シリーズの 1.03 倍程度と大きな違いが生じなかった。

部材の組み合わせが同じ試験体の降伏耐力の平均値を比較すると、C210-G210 シリーズ C はそれぞれ C150-G150 シリーズや C150-G210 シリーズの 1.19 倍、1.22 倍程度となり、S-G210 シリーズは S-G150 シリーズの 1.14 倍程度となった。それぞれの試験体の加圧面積の比は 1.4 倍であり、加圧面積の比とは一致しなかった。

表 3.5-4　降伏耐力：(kN)

試験体名	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	平均
C150-G150	138.29	128.00	123.20	128.18	111.85	118.48	124.67
C150-G210	115.45	122.37	113.18	127.84	124.95	119.21	120.50
C210-G210	134.85	137.19	134.20	146.90	156.13	178.42	147.95
S-G150	139.30	126.19	129.92	126.88	144.93		133.45
S-G210	157.34	136.50	135.47	148.72	189.51	146.32	152.31

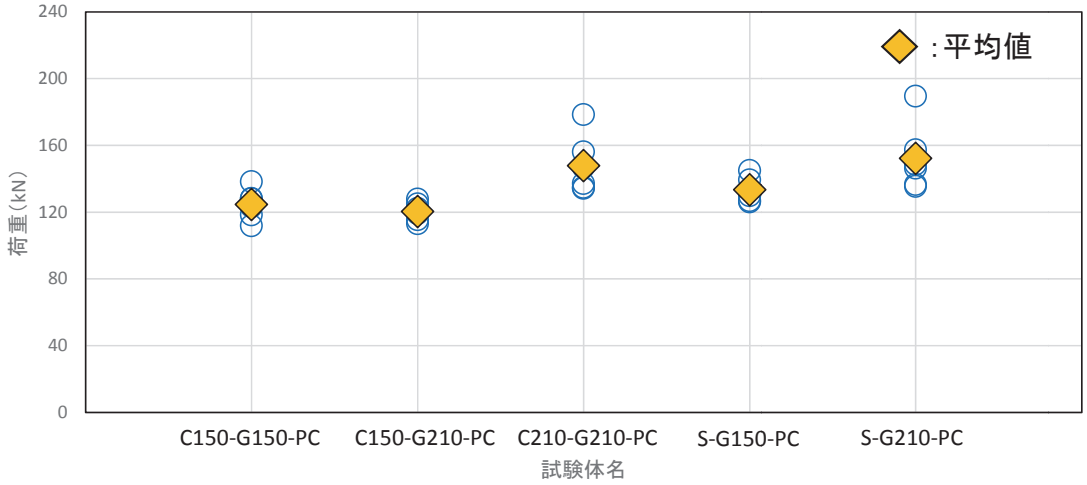


図 3.5-43　降伏耐力

3.5.3　集成材のラミナのヤング係数と 1 次剛性および 2 次剛性の関係

集成材における 1 次剛性および 2 次剛性と集成材のラミナのヤング係数についての関係を調べるために、集成材の表層ラミナのみのヤング係数、めり込み時に大きく変形をした 2 層目までのヤング係数の平均値、全層ラミナのヤング係数の平均値を用いて、それぞれとどのような関係があるかについて検討した。図 3.5-44～46 に、それぞれのヤング係数と 1 次剛性および 2 次剛性との比較を示す。

図 3.5-44 より、表層のヤング係数と 1 次剛性及び 2 次剛性ともに若干の正の相関があるように見えるが、2 層目まで、全層となるにしたがって、その傾向はほぼなくなり、ヤング係数と 1 次剛性、2 次剛性にはほとんど関係が無いように看取される。なぜなら、ヤング係数がほぼ同じ試験体について比較しているにもかかわらず、剛性に大きな差がみられるからである。もう少し大きくヤング係数が異なる試験体を含めれば、ヤング係数との傾向がはっきりしたかもしれない。それよりは、木目などの影響があるように考えられる。

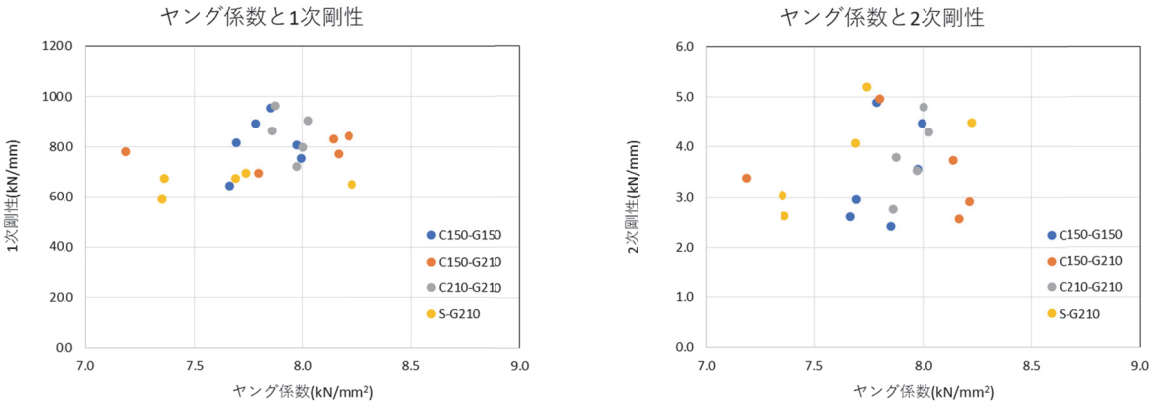


図 3.5-44　表層のヤング係数と 1 次剛性(左)と 2 次剛性(右)

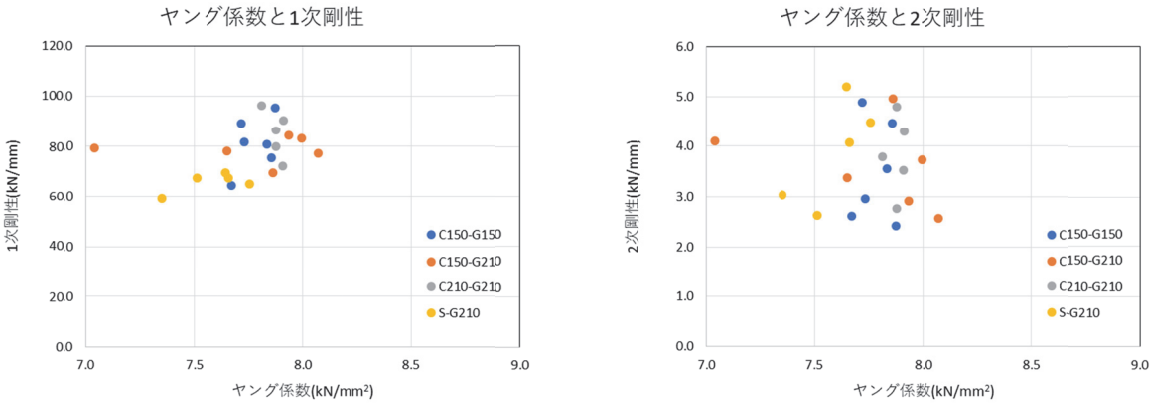


図 3.5-45　表層と 2 層目のヤング係数と 1 次剛性(左)と 2 次剛性(右)

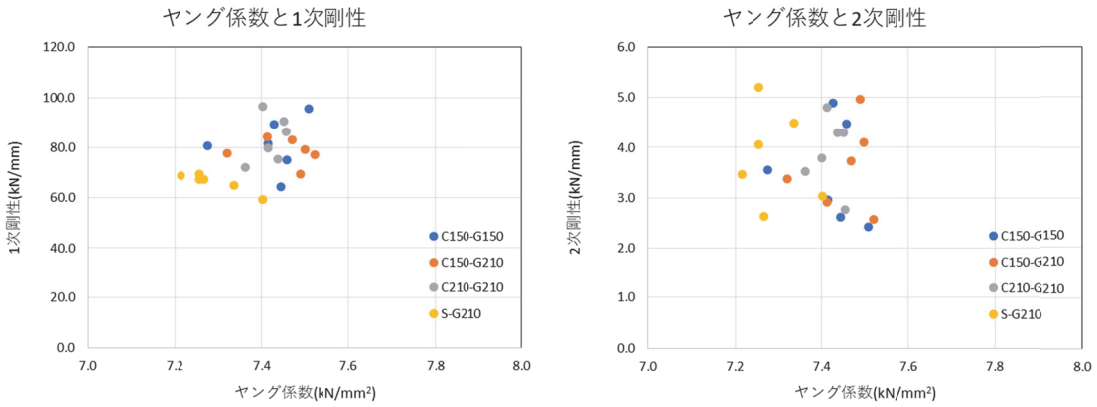


図 3.5-46　全層のヤング係数の平均値と 1 次剛性(左)と 2 次剛性(右)

また、一昨年度に実施した同様の試験と今年度の試験の CLT を含む全体の圧縮剛性について比較したものを表 1 に示す。今年度と同様の幅はぎありの試験体と比較すると、ほぼ同じ値を示していることから、特に 1 次剛性については変わらないと判断できる。ただし、2 次剛性は若干異なるため、1 次と 2 次の比も若干異なっており、今年度の方がその差が大きいことが挙げられる。なお、集成材のみについては、表 3-5-6 に示すように、150mm 幅で約 1/25、210mm 幅で約 1/22 となった。

表 3.5-5　一昨年度と今年度の圧縮試験体の剛性の比較

	剛性(kN/mm)		
一昨年度	1次	2次	1次/2次
幅はぎなし	60.48	4.64	13.03
幅はぎあり	54.34	3.93	13.83
今年度			
幅はぎあり	54.18	3.37	16.09

表 3.5-6　試験体種類と剛性と降伏荷重の平均値

	剛性(kN/mm)		1次/2次	降伏荷重
	1次	2次		kN
C150-G150	81.11	3.48	24.91	124.67
C150-G210	78.51	3.61	22.94	120.50
C210-G210	83.40	3.91	22.07	147.95
S-G210	66.20	3.81	18.23	152.31

3.6　CLT と集成材の接触面の形状の変化

各シリーズのめり込み変位毎の CLT と集成材の接触面の形状の変化を測定した。図 3.6-1 に表面形状測定の流れと写真 3.6-1 に表面形状測定の全景を示す。

変位の計測は、ストレインゲージ式変位計（東京測器研究所：CDP-50）の先端部にローラー測定子（東京測器研究所：DF-14）を取り付けて CLT 及び集成材表面上を一定の速度で滑らせることで表面の凹凸を測定した。試験機の変位がそれぞれ 5mm、10mm、20mm、30mm となった際に CLT と集成材を分離し、CLT と集成材の接触面の表面形状を測定した。

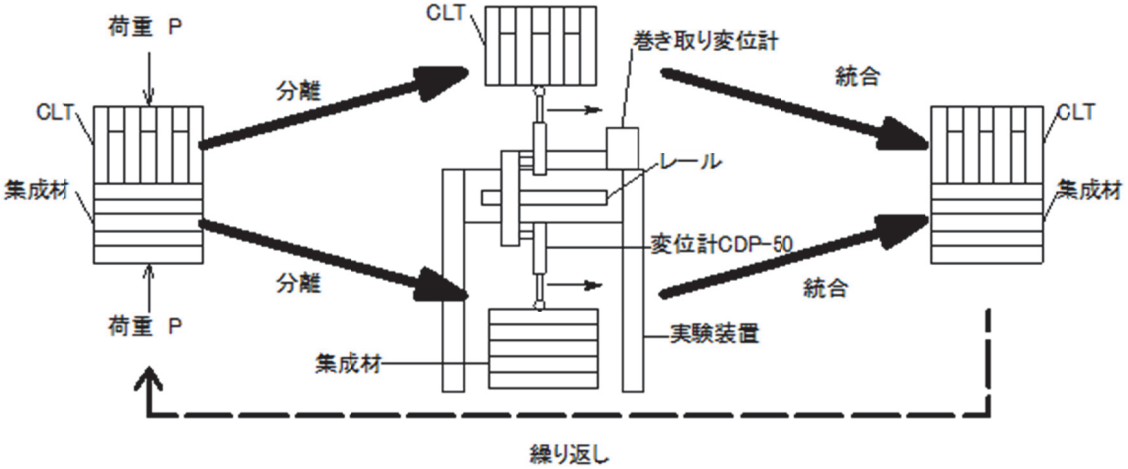
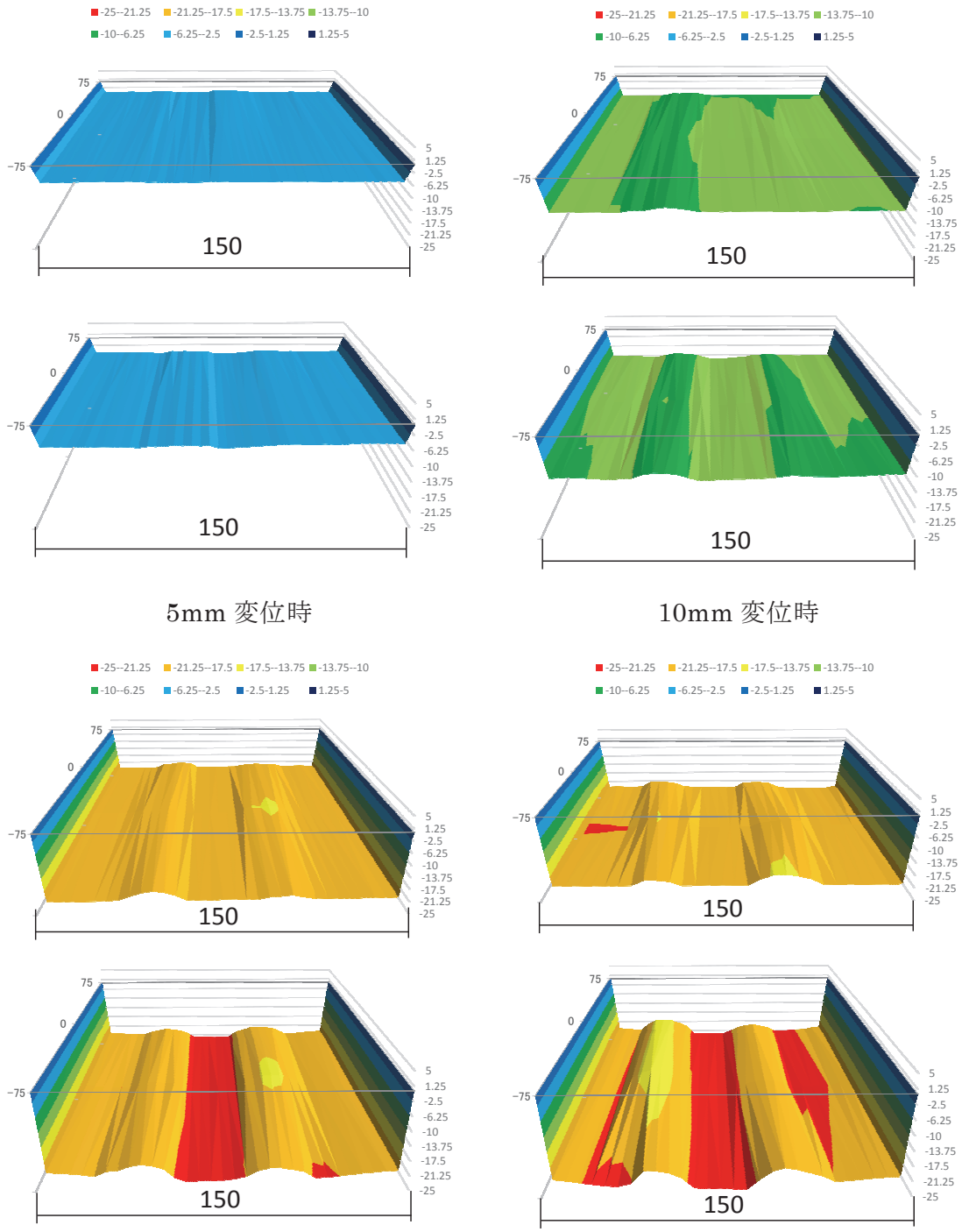


図 3.6-1　表面形状測定の流れ

写真 3.6-1　表面形状測定の様子

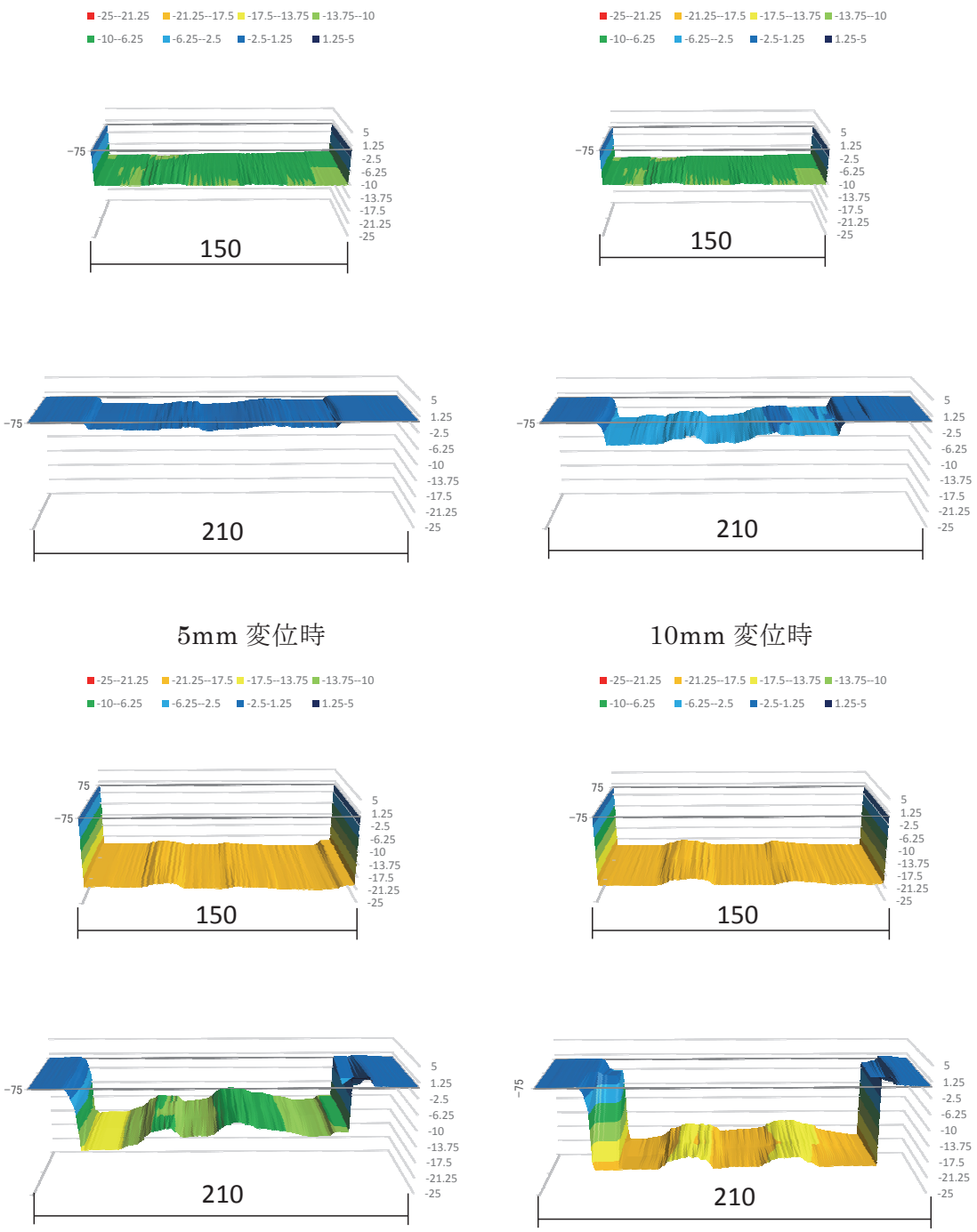
クロスヘッドの変位がそれぞれ 5mm、10mm、20mm、30mm となった際の CLT と集成材の表面形状を図 3.6-2～4 に示す。CLT を構成するラミナの繊維方向によって集成材の接触面の形状が異なった。CLT の表面形状では、繊維方向のラミナの変形量は小さく、繊維直交方向のラミナは変形量が大きかった。また、集成材に関しては、CLT の繊維方向のラミナに加圧される部分は変位量が大きく、CLT の繊維直交方向のラミナに加圧される部分は変位量が小さかった。



5mm 変位時　　10mm 変位時

20mm 変位時　　30mm 変位時

図 3.6-2　C150-G150 シリーズの接触面の形状の変化



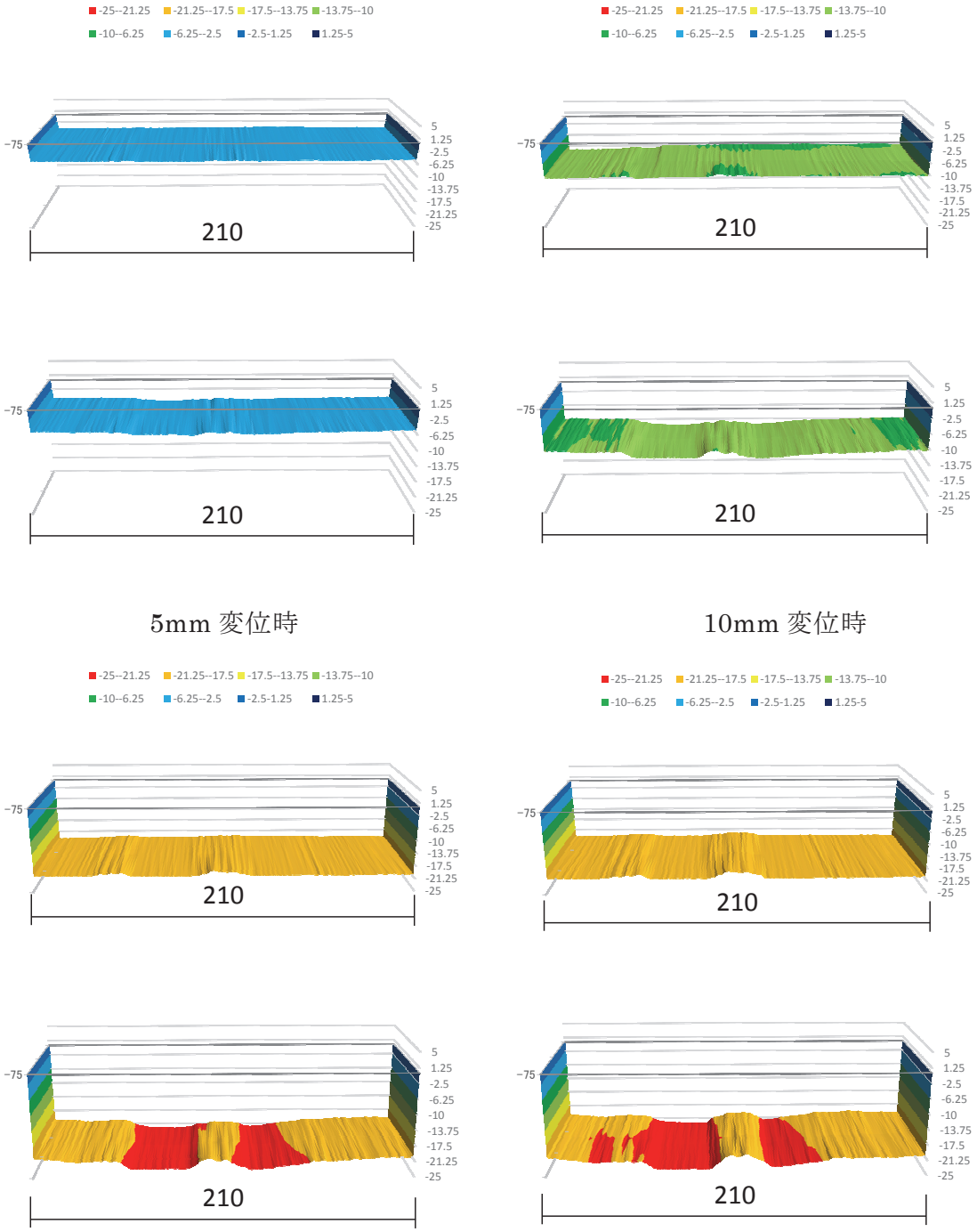
5mm 変位時

10mm 変位時

20mm 変位時

30mm 変位時

図 3.6-3　C150-G210 シリーズの接触面の形状の変化



5mm 変位時　　10mm 変位時

20mm 変位時　　30mm 変位時

図 3.6-4　C210-G210 シリーズの接触面の形状の変化

試験終了後の写真で変形状態を確認すると、C150-G150 シリーズと C150-G210 シリーズの試験体は、CLT の表面形状では、繊維方向のラミナの変形量は小さく、繊維直交方向のラミナは変位量が大きかった。また、集成材に関しては、CLT の繊維方向のラミナに加圧される部分は変位量が大きく、CLT の繊維直交方向のラミナに加圧される部分は変位量が小さかった（写真 3.6-2、3.6-3 参照）。

C210-G210 シリーズに関しては、その他の試験体と同様の傾向を示すと思われたが、CLT の繊維直交方向のラミナの変形量は、左側の層は変位量が大きいのに対して、右側の層は変位量が小さかった（写真 3.6-4 参照）。これは同じ繊維直交方向のラミナでも接触面の年輪の方向によって変位差が生じたと考えられる。

写真 3.6-2　試験終了時の CLT めり込み（C150-G150）

写真 3.6-3　試験終了時の CLT めり込み（C150-G210）

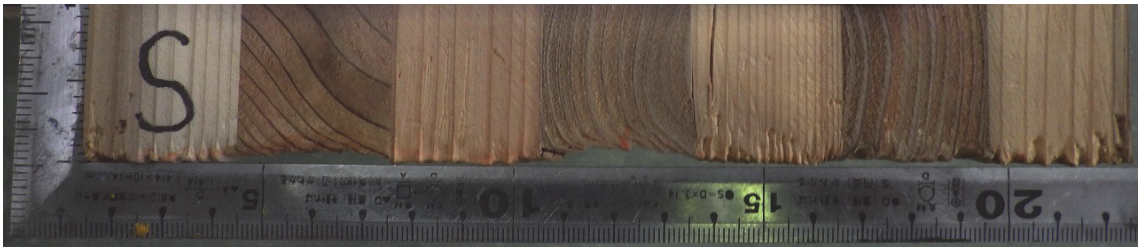


写真 3.6-4　試験終了時の CLT めり込み（C210-G210）

3.7　既往のめり込み推定式との比較

めり込み剛性の推定方法としては、「木質構造基礎理論」4.4.3 に記載されている「等変位めり込み基準式」や「木質構造接合部設計マニュアル」5.1.4.1 めり込み係数（剛性）に記載されている「木材のめり込み剛性式（いわゆる、小松・平井式）などが一般的に使用されている。また、「CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル」3.1.2（3）には、接合部のモデル化の手法として、壁パネル-土台・床パネルのモデル化のための式が示されている。

本節では、本実験によって得られた集成材の一次剛性が、これら３つの既往のめり込み剛性の推定方法によって推定が可能であるかの検討を行う。また、併せて推定精度を改善する適当な調整係数についても検討する。

3.7.1　「めり込み基準式」との比較

「木質構造基礎理論」の「等変位めり込み基準式」（式 3.7.1.1）のうち、弾性域の剛性に相当する（式 3.7.1.2）の部分を用いて検討を行った。

各寸法は、それぞれ表 3.7-1 の値とした。また、CLT によって加圧された試験体（C150-G150-PC、C150-G210-PC、C210-G210-PC）は、加圧面が全て均等に加圧されたと仮定した。繊維方向曲げヤング係数（E_0）は、集成材の全層のラミナの繊維方向曲げヤング係数を平均した値（E_L）と集成材の規格値（E_S=7.50kN/mm²）を用いて算出した。

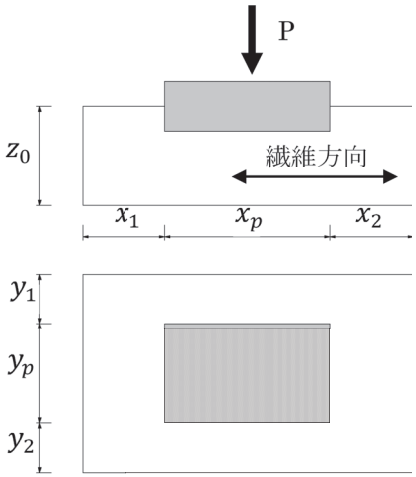
なお、同式では、E_{c90}=1/50E_0 と規定しているが、本項では、この比を調整係数として実験値との精度調整を試みる。

$$P=\frac{x_p y_p C_x C_y E_{c90}}{z_0}\delta \qquad \text{(N)・・・(3.7.1.1)}$$

$$K=\frac{x_p y_p C_x C_y E_{c90}}{z_0} \qquad \text{(N/mm)・・・(3.7.1.2)}$$

$$\delta_y=\frac{z_0 F_E}{E_{c90}\sqrt{C_x C_y C_{xm} C_{ym}}} \qquad \text{(mm)・・・(3.7.1.3)}$$

$x_1, x_2, x_p, y_1, y_2, y_p, z_0$：各寸法（mm）



縁距離効果係数：$C_{xm} = 1 + \frac{4z_0}{3x_p}$

縁距離効果係数：$C_{ym} = 1 + \frac{4z_0}{3ny_p}$

$$C_x = 1 + \frac{2z_0}{3x_p}\left\{2 - 2exp\left(\frac{-3x_1}{2z_0}\right)\right\}$$

$$C_y = 1 + \frac{2z_0}{3ny_p}\left\{2 - exp\left(\frac{-3ny_1}{2z_0}\right) - exp\left(\frac{-3ny_2}{2z_0}\right)\right\}$$

n：繊維方向に対する繊維直交方向の置換係数（スギ：n = 5）

F_E：縁端距離を無限大としたときのめり込み降伏応力度

$F_E = 0.8 \times F_{c90}$ (N/mm^2)

F_{c90}：基準支圧強度　　（ここでは J3 の樹種群の規準支圧強度：$F_{c90} = 9.7$ (N/mm^2)）

E_{c90}：全面横圧縮ヤング係数（N/mm^2）、

E_0：繊維方向曲げヤング係数（N/mm^2）

表 3.7-1　式（3.7.1.2）に代入する各寸法（単位：mm）

試験体名	x_1	x_2	x_p	y_1	y_2	y_p	Z_0
C150-G150-PC	450	450	210	0	0	150	300
C150-G210-PC	450	450	210	30	30	150	300
C210-G210-PC	450	450	210	0	0	210	300
S-G150-PC	450	450	210	0	0	150	300
S-G210-PC	450	450	210	0	0	210	300

（E_{C90}=1/50E_0 の場合）

表 3.7-2、図 3.7-1 に実験値とめり込み基準式による推定値の比較を示す。表 3.7-2 は、各試験体を構成するラミナの繊維方向曲げヤング係数の実測値の平均値（E_L）、1 次剛性の実験値（K）、ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値から算出した E_{C90} を式（3.7.1.2）に代入した推定値（K_L）と集成材のヤング係数の規格値（E_S=7.50kN/mm^2）を式（3.7.1.2）に代入した推定値（K_S）を示している。また、K_{L50}、K_{S50} 等の数字は E_{C90} と E_0 の比の逆数を表している。

集成材を CLT または鋼板で加圧した場合、すべての試験体において推定値が実験値を下回り、実験値の下限値であっても推定値が実験値よりも小さい値を示した。「木質構造基礎理論」のめり込み基準式に定義されているように、繊維方向曲げヤング係数を 1/50 倍して剛性を算出した場合、すべての試験体で推定値が実験値を下回る結果となった。

表 3.7-2　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（EC90=1/50E0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 K(kN/mm)	実験値　平均 K (kN/mm)	理論値 K_L50 (kN/mm)	理論値　平均 K_L50 (kN/mm)	理論値 K_S50 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	45.56	45.21	45.75
	PC2	7.43		77.84		45.31		
	PC3	7.28		76.62		44.39		
	PC4	7.41		77.69		45.23		
	PC5	7.42		65.01		45.26		
	PC6	7.46		68.26		45.49	K_L50/K=0.61	K_S50/K=0.61
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	58.22	58.01	58.62
	PC2	7.32		77.81		57.24		
	PC3	7.39		70.71		57.80		
	PC4	7.45		63.35		58.26		
	PC5	7.57		67.91		59.17		
	PC6	7.34		68.12		57.35	K_L50/K=0.83	K_S50/K=0.84
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	63.28	63.03	64.05
	PC2	7.29		70.13		62.30		
	PC3	7.35		79.34		62.76		
	PC4	7.35		80.87		62.75		
	PC5	7.50		68.60		64.03		
	PC6	7.39		68.55		63.09	K_L50/K=0.84	K_S50/K=0.86
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	45.76	43.82	45.75
	PC2	7.15		73.17		43.59		
	PC3	7.21		82.13		43.98		
	PC4	6.90		87.43		42.06		
	PC5	7.17		87.25		43.72	K_L50/K=0.53	K_S50/K=0.56
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	61.03	61.89	64.05
	PC2	7.27		76.05		62.07		
	PC3	7.26		81.49		61.98		
	PC4	7.26		86.92		61.98		
	PC5	7.22		80.91		61.62		
	PC6	7.34		80.39		62.65	K_L50/K=0.77	K_S50/K=0.80

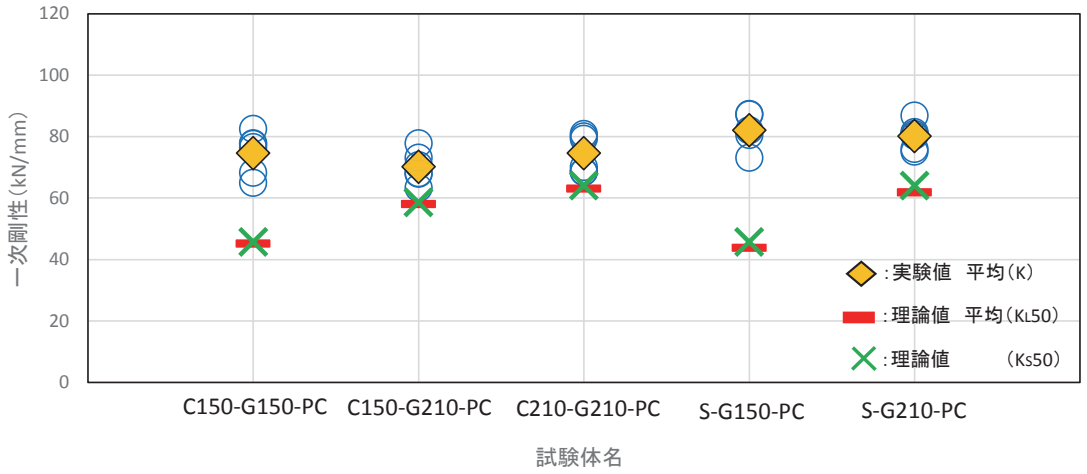


図 3.7-1　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（E_{C90}=1/50E_0 の場合）

（E_{C90}=1/40E_0 の場合）

表 3.7-3、図 3.7-2 に実験値とめり込み基準式による推定値の比較を示す。

集成材の幅が 210mm の試験体（C150-G150、C210-G210、S-G210）は、推定値と実験値の剛性の平均の比（K_L/K）がそれぞれ 1.04、1.06、0.97 となり、精度よく実験値を推定できる結果となった。しかし、集成材の幅が 150mm の試験体（C150-G150、S-G150）は、推定値が実験値を下回り、比（K_L/K）がそれぞれ 0.76、0.67 となった。

表 3.7-3　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（E_{C90}=1/40E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 K (kN/mm)	実験値 平均 K (kN/mm)	理論値 K_L40 (kN/mm)	理論値 平均 K_L40 (kN/mm)	理論値 K_S40 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	56.95	56.51	57.19
	PC2	7.43		77.84		56.63		
	PC3	7.28		76.62		55.49		
	PC4	7.41		77.69		56.54		
	PC5	7.42		65.01		56.57		
	PC6	7.46		68.26		56.86	K_L40/K=0.76	K_S40/K=0.77
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	72.77	73.28	73.28
	PC2	7.32		77.81		71.56		
	PC3	7.39		70.71		72.25		
	PC4	7.45		63.35		72.83		
	PC5	7.57		67.91		73.96		
	PC6	7.34		68.12		71.68	K_L40/K=1.04	K_S40/K=1.04
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	79.10	78.79	80.06
	PC2	7.29		70.13		77.87		
	PC3	7.35		79.34		78.45		
	PC4	7.35		80.87		78.44		
	PC5	7.50		68.60		80.03		
	PC6	7.39		68.55		78.86	K_L40/K=1.06	K_S40/K=1.07
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	57.20	54.78	57.19
	PC2	7.15		73.17		54.49		
	PC3	7.21		82.13		54.98		
	PC4	6.90		87.43		52.58		
	PC5	7.17		87.25		54.65	K_L40/K=0.67	K_S40/K=0.70
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	76.29	77.36	80.06
	PC2	7.27		76.05		77.58		
	PC3	7.26		81.49		77.47		
	PC4	7.26		86.92		77.47		
	PC5	7.22		80.91		77.02		
	PC6	7.34		80.39		78.32	K_L40/K=0.97	K_S40/K=1.00

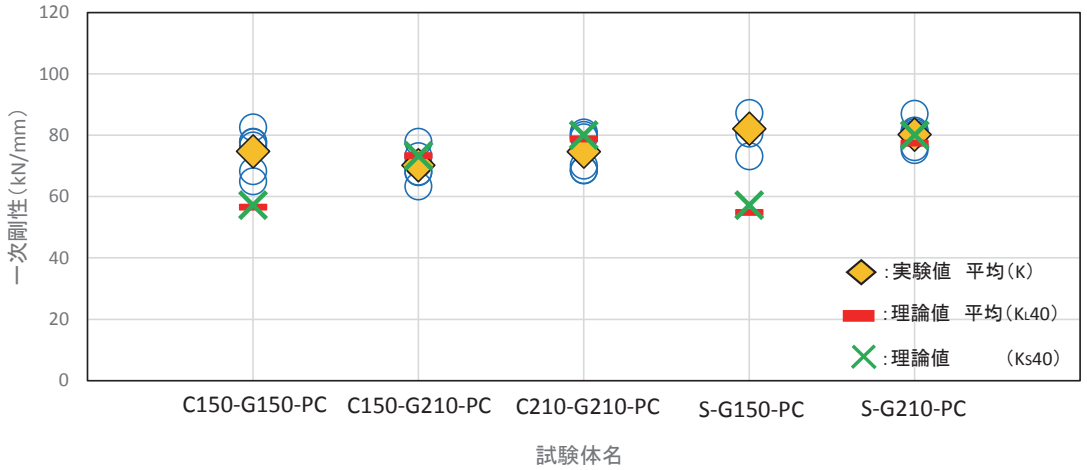


図 3.7-2　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（E_{C90}=1/40E_0 の場合）

（E_{C90}=1/30E_0 の場合）

表 3.7-4、図 3.7-3 に実験値とめり込み基準式による推定値の比較を示す。

集成材の幅が 150mm の試験体（C150-G150、S-G150）は、推定値と実験値の剛性の平均の比（K_L/K）がそれぞれ 1.01、0.89 となり、比較的精度よく実験値を推定できる結果となった。しかし、集成材の幅が 210mm の試験体（C150-G150、C210-G210、S-G210）は、推定値が実験値を上回り、比（K_L/K）がそれぞれ 1.38 倍、1.40 倍、1.29 倍と過大評価なった。

表 3.7-4　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（E_{C90}=1/30E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 K (kN/mm)	実験値 平均 K (kN/mm)	理論値 K_L30 (kN/mm)	理論値 平均 K_L30 (kN/mm)	理論値 K_S30 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	75.93	75.34	76.25
	PC2	7.43		77.84		75.51		
	PC3	7.28		76.62		73.98		
	PC4	7.41		77.69		75.38		
	PC5	7.42		65.01		75.43		
	PC6	7.46		68.26		75.81	K_L30/K=1.01	K_S30/K=1.02
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	97.03	96.68	97.71
	PC2	7.32		77.81		95.41		
	PC3	7.39		70.71		96.33		
	PC4	7.45		63.35		97.11		
	PC5	7.57		67.91		98.61		
	PC6	7.34		68.12		95.58	K_L30/K=1.38	K_S30/K=1.39
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	105.47	105.06	106.75
	PC2	7.29		70.13		103.83		
	PC3	7.35		79.34		104.61		
	PC4	7.35		80.87		104.59		
	PC5	7.50		68.60		106.71		
	PC6	7.39		68.55		105.15	K_L30/K=1.40	K_S30/K=1.43
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	76.26	73.04	76.25
	PC2	7.15		73.17		72.66		
	PC3	7.21		82.13		73.31		
	PC4	6.90		87.43		70.10		
	PC5	7.17		87.25		72.87	K_L30/K=0.89	K_S30/K=0.93
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	101.71	103.15	106.75
	PC2	7.27		76.05		103.45		
	PC3	7.26		81.49		103.29		
	PC4	7.26		86.92		103.29		
	PC5	7.22		80.91		102.70		
	PC6	7.34		80.39		104.42	K_L30/K=1.29	K_S30/K=1.33

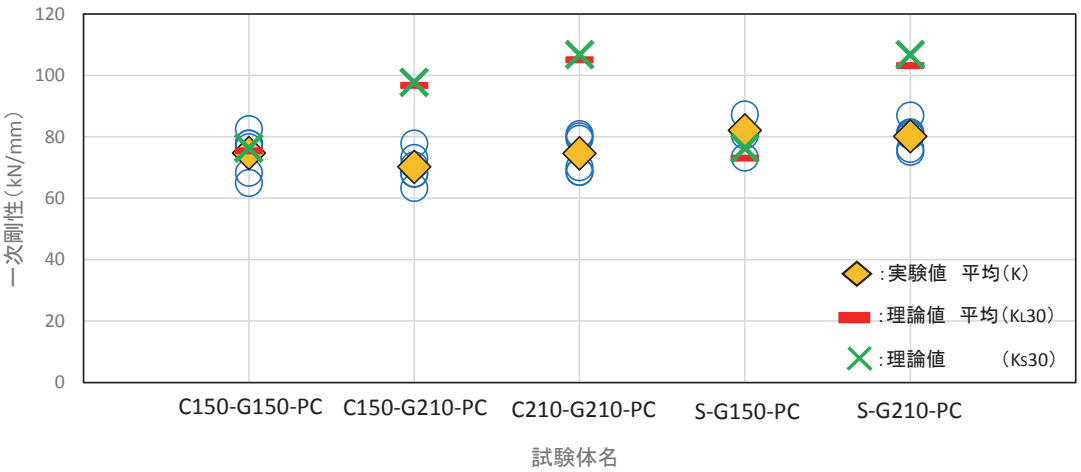


図 3.7-3　1 次剛性の実験値とめり込み基準式による推定値（E_{C90}=1/30E_0 の場合）

以上の検討により、「めり込み基準式」を利用する場合、集成材の幅が 150mm の試験体（C150-G150、S-G150）は、E_{C90} と E_0 の比が 1/30 の場合に 1 次剛性を精度よく推定でき、集成材の幅が 210mm の試験体（C150-G150、C210-G210、S-G210）は、E_{C90} と E_0 の比が 1/40 の場合に、比較的精度よく実験値を推定できることが示された。

3.7.2 「平井・小松式」との比較

集成材の剛性について「平井・小松式」を用いて推定値と試験結果の比較・検討を行う。木質構造接合部設計マニュアルに基づき以下の式（3.7.2.1、3.7.2.22）によって集成材の剛性を算出する。　なお、CLT によって加圧された試験体（C150-G150、C150-G210、C210-G210）は、加圧面が全て均等に加圧されたと仮定した。接合具径 d は、すべての試験体において繊維方向の加圧幅の 210mm とした。繊維方向曲げヤング係数（E_0）は、集成材の全層のラミナの繊維方向曲げヤング係数を平均した値（E_L）と集成材の規格値（E_S=7.50kN/mm²）を用いて算出した。

＜木材の単位面積当たりのめり込み剛性＞

繊維方向加力：$K_{E0} = \frac{E_0}{31.6+10.9d}$　　(N/mm³)・・・(3.7.2.1)

繊維直角方向加力：$K_{E90} = \frac{K_{E0}}{3.4}$　　(N/mm³)・・・(3.7.2.2)

E_0：木材の繊維方向のヤング係数（N/mm²）
d：接合具径（接合具の投影長さ）　　(mm)

表 3.7-5、図 3.7-4 に 1 次剛性の実験値と「平井・小松式」による推定値を示す。

表 3.7-5 は、各試験体を構成するラミナの繊維方向曲げヤング係数の実測値の平均値（E_L）、1 次剛性の実験値（K）、ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値から算出した E_{90} を式(3.7.1.2)に代入した推定値(K_L)と集成材のヤング係数の規格値(E_S=7.50kN/mm²)を式（3.7.1.2）に代入した推定値（K_S）を示している。また、K_{L30}、K_{S30} 等の数字は、E_{90} と E_0 の比の逆数を表している。

すべての試験体において、集成材のラミナの繊維方向ヤング係数を平均した値（E_L）で算出した剛性（K_L）及び集成材の規格値(E_S=7.50kN/mm²）を用いて算出した剛性（K_S）は同等の値を示し、推定値が実験値よりも下回る結果となった。

加圧面の幅が 150mm の試験体（C150-G150、C150-G210、S-G150）に比べ、加圧面の幅が 210mm の試験体（C210-G210、S-G210）は、実験値と推定値の差は小さくなった。しかし、最も実験値と理論値の値が近い C210-G210 であっても実験値が推定値の 1.80 倍程度の値を示した。「平井・小松式」は、円形断面の接合具のめり込み挙動を仮定しているため、本試験体のような比較的大きい面積の平板による実験値と推定値に大きな差が生じたと考えられる。

表 3.7-5　1 次剛性の実験値と「平井・小松式」による推定値

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (N/mm^2)	規格値 E_S (N/mm2)	実験値 K (N/mm^3)	実験値 平均 K (N/mm3)	理論値 K_L (N/mm3)	理論値 平均 K_L (N/mm3)	理論値 K_S (N/mm3)
C150-G150	PC1	7507.09	7500	2.62	2.37	0.95	0.94	0.95
	PC2	7427.36		2.47		0.94		
	PC3	7276.91		2.43		0.92		
	PC4	7414.45		2.47		0.94		
	PC5	7444.09		2.06		0.94		
	PC6	7456.91		2.17		0.95	K_L/K=0.40	K_S/K=0.40
C150-G210	PC1	7520.00	7500	2.32	2.23	0.95	0.94	0.95
	PC2	7412.55		2.47		0.94		
	PC3	7468.73		2.24		0.95		
	PC4	7488.18		2.01		0.95		
	PC5	7497.64		2.16		0.95		
	PC6	7321.45		2.16		0.93	K_L/K=0.42	K_S/K=0.43
C210-G210	PC1	7455.00	7500	1.82	1.69	0.94	0.94	0.95
	PC2	7362.30		1.59		0.93		
	PC3	7401.70		1.80		0.94		
	PC4	7413.48		1.83		0.94		
	PC5	7436.57		1.56		0.94		
	PC6	7451.04		1.55		0.94	K_L/K=0.56	K_S/K=0.56
S-G150	PC1	7501.09	7500	2.56	2.61	0.95	0.91	0.95
	PC2	7146.69		2.32		0.91		
	PC3	7210.56		2.61		0.91		
	PC4	6895.53		2.78		0.87		
	PC5	7167.80		2.77		0.91	K_L/K=0.34	K_S/K=0.36
S-G210	PC1	7146.18	7500	1.70	1.82	0.91	0.92	0.95
	PC2	7267.87		1.72		0.92		
	PC3	7257.23		1.85		0.92		
	PC4	7257.23		1.97		0.92		
	PC5	7215.38		1.83		0.91		
	PC6	7336.53		1.82		0.93	K_L/K=0.51	K_S/K=0.52

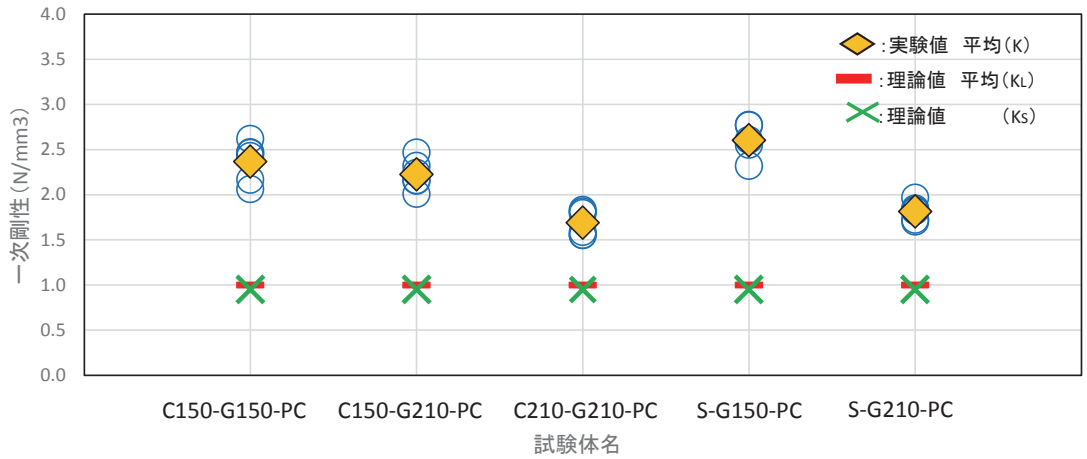


図 3.7-4　1 次剛性の実験値と「平井・小松式」による推定値

3.7.3　CLT マニュアルの式との比較

集成材の剛性について「CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル」に接合部のバネモデル算定用に示されている式（3.7.3.1～3.7.3.3）によって 1 次剛性（k_1）及び 2 次剛性性（k_2)を算出した。繊維平行方向のヤング係数は集成材の全層のラミナの繊維方向曲げヤング係数を平均した値（E_L）と集成材の規格値（E_S=7.50kN/mm^2）を用いて算出した。

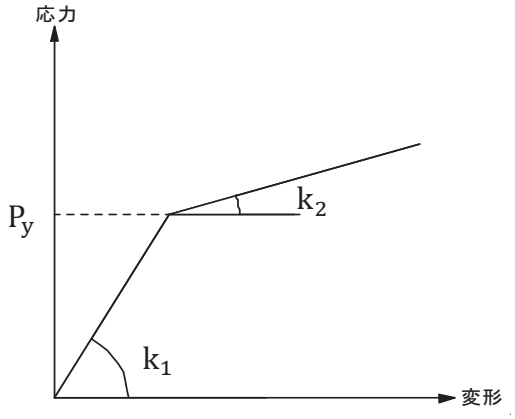
ここで、A_e は各試験体の加圧面積とし、F_{cv} はスギのめり込み基準強度（部分圧縮　材中間部：6.0N/mm²）を用いて算出した。代入する値は表 3.7-6 の値を用いた。

なお、同マニュアルでは、E_{90}=1/30E_0 とすると規定しているが、本項では、この比を調整係数として実験値との精度調整を試みる。

$$P_y = F_{cv} \cdot A_e \quad \cdots (3.7.3.1)$$

$$k_1 = \frac{E_{90} \cdot A_e}{Z_0} \quad \cdots (3.7.3.2)$$

$$k_2 = k_1 / 8 \quad \cdots (3.7.3.3)$$



A_e：有効支圧面積、有効めり込み面積
F_{cv}：土台または床パネルラミナのめり込み基準強度
E_{90}：土台または床パネルラミナの繊維直交方向のヤング係数
Z_0：土台または床パネルの厚さ

表 3.7-6　式に代入する各値

試験体名	Ae (mm²)	Fcv (N/mm²)	Z_0 (mm)
C150−G150−PC	150×210	6.0	300
C150−G210−PC	150×210		
C210−G210−PC	210×210		
S−G150−PC	150×210		
S−G210−PC	210×210		

（E_{90}=1/30E_0 **の場合**）

＜1 次剛性＞

表 3.7-7、図 3.7-5 に 1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

表 3.7-5 は、各試験体を構成するラミナの繊維方向曲げヤング係数の実測値の平均値（E_L）、1 次剛性の実験値（K）、ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値から算出した E_{90} を式（3.7.1.2）に代入した推定値（K_L）と集成材のヤング係数の規格値（E_S=7.50kN/mm²）を式（3.7.1.2）に代入した推定値（K_S）を示している。また、K_{L30}、K_{S30} 等の数字は、E_{90} と E_0 の比の逆数を表している。

すべての試験体において、推定値が実験値を大きく下回り、E_{90} と E_0 の比が 1/30 の場合、推定値と実験値の整合性が取れなかった。

表 3.7-7　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/30E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 K (kN/mm)	実験値 平均 K (kN/mm)	理論値 K_L30 (kN/mm)	理論値 K_L30 (kN/mm)	理論値 K_S30 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	26.27	25.97	26.25
	PC2	7.43		77.84		26.00		
	PC3	7.28		76.62		25.47		
	PC4	7.41		77.69		25.95		
	PC5	7.42		65.01		26.05		
	PC6	7.46		68.26		26.10	K_L30/K=0.35	K_S30/K=0.35
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	26.32	26.08	26.25
	PC2	7.32		77.81		25.94		
	PC3	7.39		70.71		26.14		
	PC4	7.45		63.35		26.21		
	PC5	7.57		67.91		26.24		
	PC6	7.34		68.12		25.63	K_L30/K=0.37	K_S30/K=0.37
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	36.85	36.51	36.75
	PC2	7.29		70.13		36.32		
	PC3	7.35		79.34		36.60		
	PC4	7.35		80.87		36.69		
	PC5	7.50		68.60		36.74		
	PC6	7.39		68.55		35.88	K_L30/K=0.49	K_S30/K=0.49
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	26.25	25.15	26.25
	PC2	7.15		73.17		25.01		
	PC3	7.21		82.13		25.24		
	PC4	6.90		87.43		24.14		
	PC5	7.17		87.25		25.10	K_L30/K=0.31	K_S30/K=0.32
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	35.04	35.51	36.75
	PC2	7.27		76.05		35.57		
	PC3	7.26		81.49		35.55		
	PC4	7.26		86.92		35.57		
	PC5	7.22		80.91		35.35		
	PC6	7.34		80.39		35.99	K_L30/K=0.44	K_S30/K=0.46

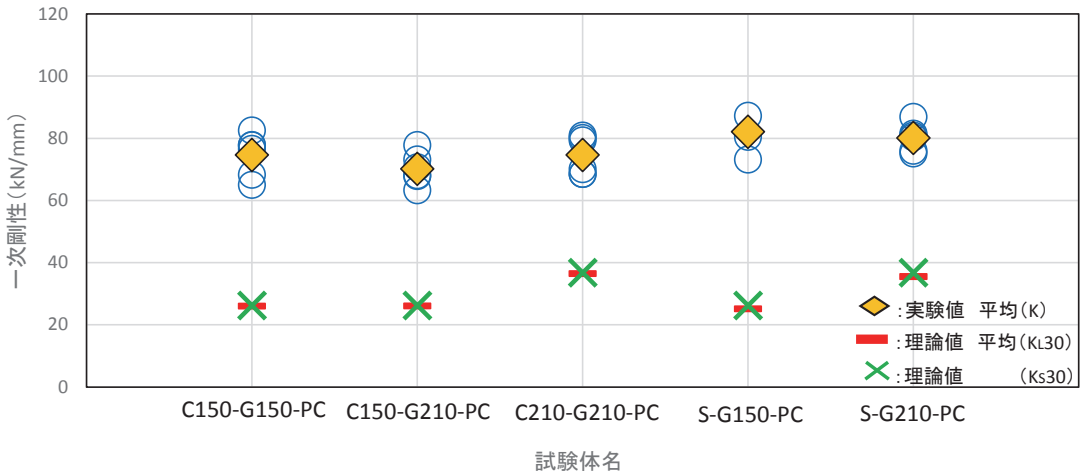


図 3.7-5　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/30E_0 の場合）

＜2 次剛性＞

表 3.7-8、図 3.7-6 に 2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

各シリーズ（C150-G150、C150-G210、C210-G210、S-G150、 S-G210）の推定値と実験値の比（K_L/K）がそれぞれ 1.01、1.01、1.30、1.04、1.27 となった。推定値は実験値の 2 次剛性を比較的高い精度で推定することになったものの、この推定値は、前述した 1 次剛性の推定値（表 3.7-7、図 3.7-5）に 1/8 を乗じたものであり、1 次剛性では整合性が取れていないため、適切な評価とは言い難い。

表 3.7-8　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/30E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 k (kN/mm)	実験値 平均 k (kN/mm)	理論値 k_L30 (kN/mm)	理論値 平均 k_L30 (kN/mm)	理論値 k_S30 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.51	7.50	2.33	2.96	3.28	3.25	3.28
	PC2	7.43		3.65		3.25		
	PC3	7.28		2.45		3.18		
	PC4	7.41		2.96		3.24		
	PC5	7.44		2.89		3.26		
	PC6	7.46		3.48		3.26	k_L30/K=1.01	k_S30/K=1.11
C150-G210	PC1	7.52	7.50	2.51	3.23	3.29	3.26	3.28
	PC2	7.41		2.74		3.24		
	PC3	7.47		3.80		3.27		
	PC4	7.49		3.85		3.28		
	PC5	7.50		3.27		3.28		
	PC6	7.32		3.23		3.20	kL30/K=1.01	k_S30/K=1.02
C210-G210	PC1	7.46	7.50	2.69	3.48	4.57	4.54	4.59
	PC2	7.36		3.27		4.51		
	PC3	7.40		3.30		4.53		
	PC4	7.41		4.66		4.54		
	PC5	7.44		3.46		4.55		
	PC6	7.45		3.71		4.56	k_L30/K=1.30	k_S30/K=1.32
S-G150	PC1	7.50	7.50	3.51	3.01	3.28	3.14	3.28
	PC2	7.15		2.57		3.13		
	PC3	7.21		3.53		3.15		
	PC4	6.90		2.54		3.02		
	PC5	7.17		2.95		3.14	k_L30/K=1.04	k_S30/K=0.98
S-G210	PC1	7.15	7.50	2.94	3.49	4.38	4.44	4.59
	PC2	7.27		2.55		4.45		
	PC3	7.26		3.96		4.45		
	PC4	7.26		4.51		4.45		
	PC5	7.22		3.37		4.42		
	PC6	7.34		3.63		4.49	k_L30/K=1.27	k_S30/K=1.32

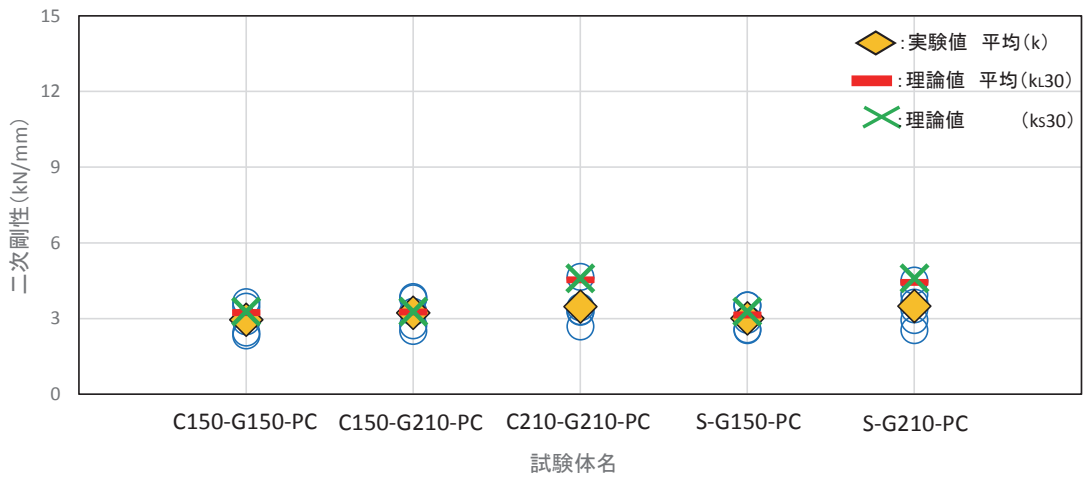


図 3.7-6　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/30E_0 の場合）

（E_{90}=1/15E_0 **の場合**）

＜1 次剛性＞

表 3.7-9、図 3.7-7 に 1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

加圧面の幅が 210mm の試験体（C210-G210、S-G210）は、推定値と実験値の比（K_L/K）がそれぞれ 0.97、0.89 となり、比較的精度よく実験値を推定できる結果となった。しかし、加圧面の幅が 150mm の試験体（C150-G150、C150-G210、S-G150）は、推定値が実験

値をすべて下回っており、理論値と実験値の剛性の平均の比（K_L/K）がそれぞれ 0.70、0.74、0.61 と過小評価となった。

表 3.7-9　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（$E_{90}=1/15E_0$ の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm²)	規格値 E_S (kN/mm²)	実験値 K (kN/mm)	実験値 平均 K (kN/mm)	理論値 K_L15 (kN/mm)	理論値 平均 K_L15 (kN/mm)	理論値 K_S15 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	52.55	51.95	52.50
	PC2	7.43		77.84		51.99		
	PC3	7.28		76.62		50.94		
	PC4	7.41		77.69		51.90		
	PC5	7.42		65.01		52.11		
	PC6	7.46		68.26		52.20	$K_L15/K=0.70$	$K_S15/K=0.70$
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	52.64	52.16	52.50
	PC2	7.32		77.81		51.89		
	PC3	7.39		70.71		52.28		
	PC4	7.45		63.35		52.42		
	PC5	7.57		67.91		52.48		
	PC6	7.34		68.12		51.25	$K_L15/K=0.74$	$K_S15/K=0.75$
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	73.06	72.72	73.50
	PC2	7.29		70.13		72.15		
	PC3	7.35		79.34		72.54		
	PC4	7.35		80.87		72.65		
	PC5	7.50		68.60		72.88		
	PC6	7.39		68.55		73.02	$K_L15/K=0.97$	$K_S15/K=0.99$
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	52.51	50.30	52.50
	PC2	7.15		73.17		50.03		
	PC3	7.21		82.13		50.47		
	PC4	6.90		87.43		48.29		
	PC5	7.17		87.25		50.19	$K_L15/K=0.61$	$K_S15/K=0.64$
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	70.08	71.02	73.50
	PC2	7.27		76.05		71.14		
	PC3	7.26		81.49		71.10		
	PC4	7.26		86.92		71.14		
	PC5	7.22		80.91		70.71		
	PC6	7.34		80.39		71.98	$K_L15/K=0.89$	$K_S15/K=0.92$

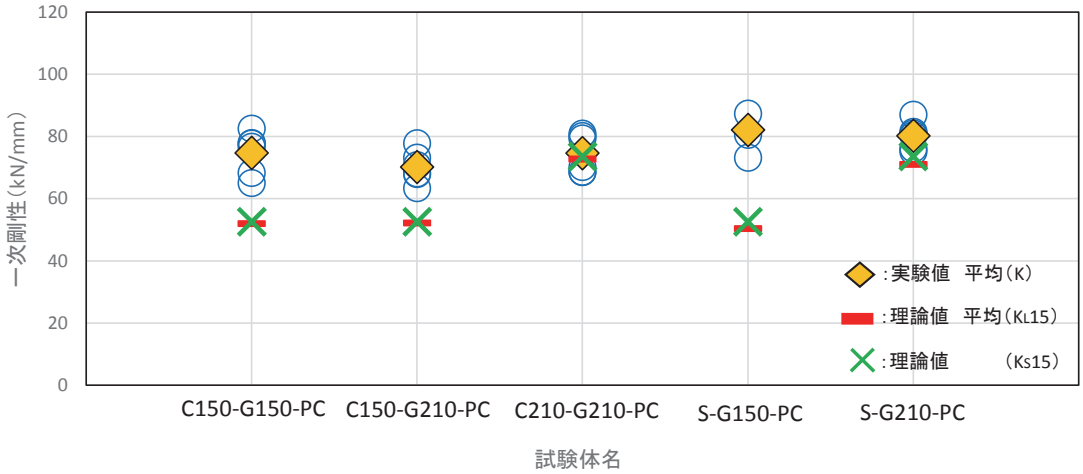


図 3.7-7　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（$E_{90}=1/15E_0$ の場合）

＜2 次剛性＞

表 3.7-10、図 3.7-8 に 2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

各シリーズ（C150-G150、C150-G210、C210-G210、S-G150、 S-G210）の推定値と実験値の比（K_L/K）がそれぞれ 2.19、2.02、2.61、2.09、2.54 となった。

1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）を 1/8 とした場合、推定値が実験値を大きく上回った。1 次剛性が精度よく推定できた幅 210 ㎜のシリーズに着目すると推定値と実験値の比はおよそ 2.0 であることから、1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）に 1/2 を乗じ 1/16 とすることで 2 次剛性を比較的精度よく推定できると考えられる。

表 3.7-10　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/15E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 k (kN/mm)	実験値 平均 k (kN/mm)	理論値 k_L15 (kN/mm)	理論値 平均 k_L15 (kN/mm)	理論値 k_S15 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.51	7.50	2.33	2.96	6.57	6.49	6.56
	PC2	7.43		3.65		6.50		
	PC3	7.28		2.45		6.37		
	PC4	7.41		2.96		6.49		
	PC5	7.44		2.89		6.51		
	PC6	7.46		3.48		6.52	k_L15/K=2.19	k_S15/K=2.22
C150-G210	PC1	7.52	7.50	2.51	3.23	6.58	6.52	6.56
	PC2	7.41		2.74		6.49		
	PC3	7.47		3.80		6.54		
	PC4	7.49		3.85		6.55		
	PC5	7.50		3.27		6.56		
	PC6	7.32		3.23		6.41	k_L15/K=2.02	k_S15/K=2.03
C210-G210	PC1	7.46	7.50	2.69	3.48	9.13	9.09	9.19
	PC2	7.36		3.27		9.02		
	PC3	7.40		3.30		9.07		
	PC4	7.41		4.66		9.08		
	PC5	7.44		3.46		9.11		
	PC6	7.45		3.71		9.13	k_L15/K=2.61	k_S15/K=2.64
S-G150	PC1	7.50	7.50	3.51	3.01	6.56	6.29	6.56
	PC2	7.15		2.57		6.25		
	PC3	7.21		3.53		6.31		
	PC4	6.90		2.54		6.03		
	PC5	7.17		2.95		6.27	k_L15/K=2.09	k_S15/K=2.18
S-G210	PC1	7.15	7.50	2.94	3.49	8.75	8.88	9.19
	PC2	7.27		2.55		8.90		
	PC3	7.26		3.96		8.89		
	PC4	7.26		4.51		8.89		
	PC5	7.22		3.37		8.84		
	PC6	7.34		3.63		8.99	k_L15/K=2.54	k_S15/K=2.63

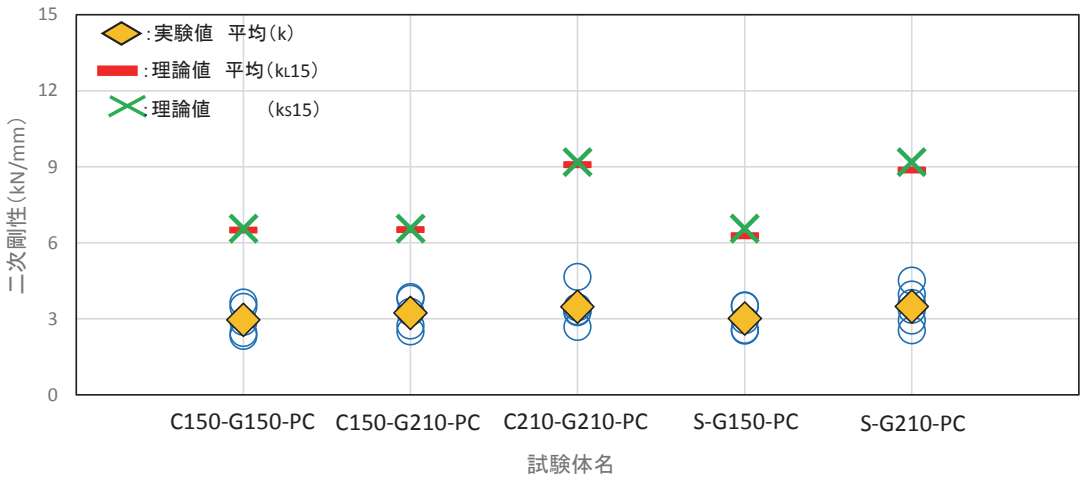


図 3.7-8　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/15E_0 の場合）

（E_{90}=1/10E_0 の場合）

＜1 次剛性＞

表 3.7-11、図 3.7-7 に 1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

加圧面の幅が 150mm のシリーズ（C150-G150、C150-G210、S-G150）は、推定値と実験値の比（K_L/K）がそれぞれ 1.04、1.11、0.92 となり、比較的精度よく推定できる結果となった。しかし、集成材の幅が 210mm のシリーズ（C210-G210、S-G210）は、推定値が実験値を上回り、その比（K_L/K）がそれぞれ 1.46、1.33 となった。

表 3.7-11　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/10E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 K (kN/mm)	実験値 平均 K (kN/mm)	理論値 K_L10 (kN/mm)	理論値 平均 K_L10 (kN/mm)	理論値 K_S10 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.47	7.50	82.53	74.66	78.82	77.92	78.75
	PC2	7.43		77.84		77.99		
	PC3	7.28		76.62		76.41		
	PC4	7.41		77.69		77.85		
	PC5	7.42		65.01		78.16		
	PC6	7.46		68.26		78.30	K_L10/K=1.04	K_S10/K=1.05
C150-G210	PC1	7.45	7.50	73.17	70.18	78.96	78.24	78.75
	PC2	7.32		77.81		77.83		
	PC3	7.39		70.71		78.42		
	PC4	7.45		63.35		78.63		
	PC5	7.57		67.91		78.73		
	PC6	7.34		68.12		76.88	K_L10/K=1.11	K_S10/K=1.12
C210-G210	PC1	7.41	7.50	80.11	74.60	109.59	109.07	110.25
	PC2	7.29		70.13		108.23		
	PC3	7.35		79.34		108.80		
	PC4	7.35		80.87		108.98		
	PC5	7.50		68.60		109.32		
	PC6	7.39		68.55		109.53	K_L10/K=1.46	K_S10/K=1.48
S-G150	PC1	7.50	7.50	80.51	82.10	78.76	75.45	78.75
	PC2	7.15		73.17		75.04		
	PC3	7.21		82.13		75.71		
	PC4	6.90		87.43		72.43		
	PC5	7.17		87.25		75.29	K_L10/K=0.92	K_S10/K=0.96
S-G210	PC1	7.15	7.50	75.13	80.15	105.12	106.54	110.25
	PC2	7.27		76.05		106.72		
	PC3	7.26		81.49		106.65		
	PC4	7.26		86.92		106.70		
	PC5	7.22		80.91		106.06		
	PC6	7.34		80.39		107.97	K_L10/K=1.33	K_S10/K=1.38

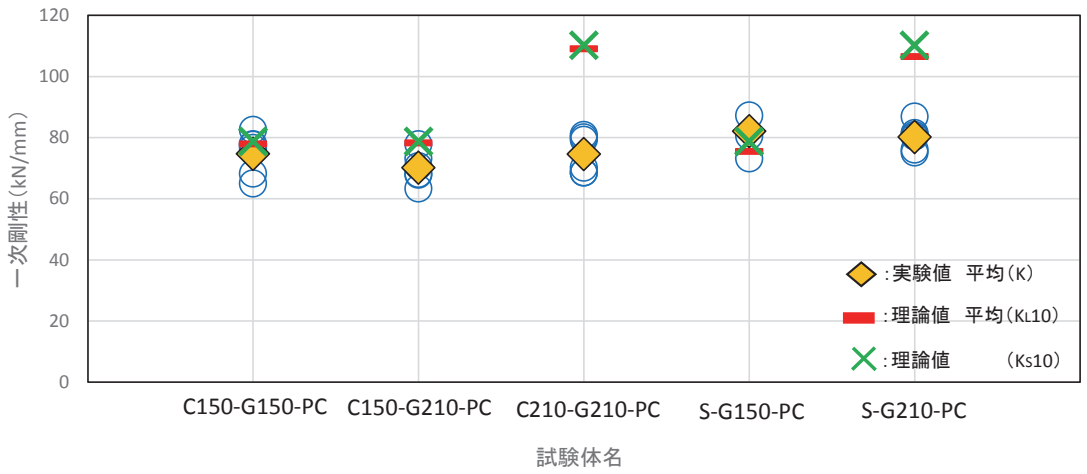


図 3.7-9　1 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/10E_0 の場合）

＜2 次剛性＞

表 3.7-12、図 3.7-8 に 2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値を示す。

各シリーズ（C150-G150、C150-G210、C210-G210、S-G150、 S-G210）の推定値と実験値の比（K_L/K）がそれぞれ 3.28、3.02、3.92、3.13、3.81 となった。

1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）を 1/8 とした場合、理論値が実験値を大きく上回った。1 次剛性が精度よく推定できた幅 150 ㎜のシリーズに着目すると推定値と実験値の比はおよそ 3.0 であることから、1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）に 1/3 を乗じ 1/24 とすることで 2 次剛性を比較的精度よく推定できると考えられる。

表 3.7-12　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/15E_0 の場合）

試験体名		ラミナの繊維方向曲げヤング係数の平均値 E_L (kN/mm^2)	規格値 E_S (kN/mm^2)	実験値 k (kN/mm)	実験値 平均 k (kN/mm)	理論値 k_L10 (kN/mm)	理論値 平均 k_L10 (kN/mm)	理論値 k_S10 (kN/mm)
C150-G150	PC1	7.51	7.50	2.33	2.96	9.85	9.74	9.84
	PC2	7.43		3.65		9.75		
	PC3	7.28		2.45		9.55		
	PC4	7.41		2.96		9.73		
	PC5	7.44		2.89		9.77		
	PC6	7.46		3.48		9.79	k_L10/K=3.28	k_S10/K=3.32
C150-G210	PC1	7.52	7.50	2.51	3.23	9.87	9.78	9.84
	PC2	7.41		2.74		9.73		
	PC3	7.47		3.80		9.80		
	PC4	7.49		3.85		9.83		
	PC5	7.50		3.27		9.84		
	PC6	7.32		3.23		9.61	k_L10/K=3.02	k_S10/K=3.04
C210-G210	PC1	7.46	7.50	2.69	3.48	13.70	13.63	13.78
	PC2	7.36		3.27		13.53		
	PC3	7.40		3.30		13.60		
	PC4	7.41		4.66		13.62		
	PC5	7.44		3.46		13.66		
	PC6	7.45		3.71		13.69	k_L10/K=3.92	k_S10/K=3.96
S-G150	PC1	7.50	7.50	3.51	3.01	9.85	9.43	9.84
	PC2	7.15		2.57		9.38		
	PC3	7.21		3.53		9.46		
	PC4	6.90		2.54		9.05		
	PC5	7.17		2.95		9.41	k_L10/K=3.13	k_S10/K=3.27
S-G210	PC1	7.15	7.50	2.94	3.49	13.13	13.32	13.78
	PC2	7.27		2.55		13.35		
	PC3	7.26		3.96		13.34		
	PC4	7.26		4.51		13.34		
	PC5	7.22		3.37		13.26		
	PC6	7.34		3.63		13.48	k_L10/K=3.81	k_S10/K=3.95

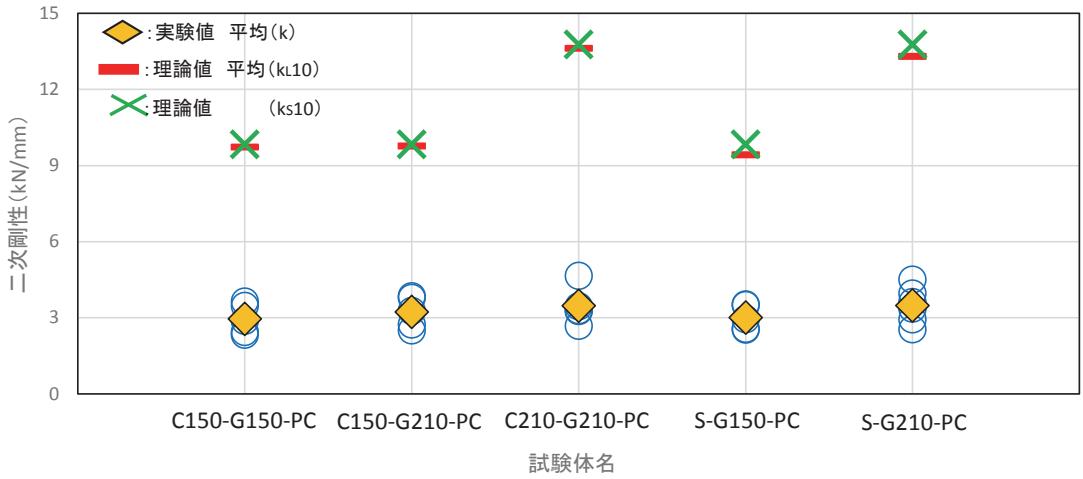


図 3.7-10　2 次剛性の実験値と「CLT マニュアル式」による推定値（E_{90}=1/15E_0 の場合）

以上の検討により、「CLT マニュアル式」を利用する場合、集成材の幅が 150mm の試験体（C150-G150、S-G150）は、E_{90} と E_0 の比が 1/10 の場合に 1 次剛性を精度よく推定でき、その場合、1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）を 1/24 とすることで、2 次剛性も精度よく推定可能である。

また、集成材の幅が 210mm の試験体（C150-G150、C210-G210、S-G210）は、E_{90} と E_0 の比が 1/15 の場合に 1 次剛性を精度よく推定でき、その場合、1 次剛性と 2 次剛性の比（k_2/k_1）を 1/16 とすることで、2 次剛性も精度よく推定可能であることが示された。

第 4 章　耐震フレーム：２層の構面せん断実験

4.1　実験概要

本章では、図 4.1-1 に示す軸組図における下部２層を想定したせん断試験を実施した結果を報告する。各試験体は２層の CLT および構造用集成材の梁によって構成される。

CLT の壁体（杉、厚さ 210 ㎜、S60-7-7）、および、構造用集成材の梁（E65-F225）を使用し、CLT と梁は箱型金物と PC 鋼棒、また構造用合板によるせん断キーによって接合される。曲げ戻しの計測を目的として、１F、２F とも上下梁間に鋼製柱を設置し軸力を計測した。

CLT の壁と梁間のせん断力の伝達は、厚さ 28 ㎜の構造用合板を挿入し、パネリード S（170 ㎜）を計 28 本打ち込んでいる（２面せん断）。

壁の浮き上がり防止として、PC 鋼棒（φ23）が CLT の端部から 75 ㎜の位置に高さ方向全長に挿入されている。PC 鋼棒の留め付けは、２層脚部を除く CLT の四隅に設置された箱型鋼製金物（木ビス４か所で CLT と接合）の位置で長さを調節し固定した。

なお、１層 CLT 脚部は鉄骨土台に直接 PC 鋼棒を固定して設置し、左右の木土台および鋼製柱も同じ鉄骨土台にボルトで固定した。鋼製柱のみ高力ボルト（F10T）を使用した。

試験は、同仕様の試験体を３体作成し実施した。詳細な寸法は図面を参照。

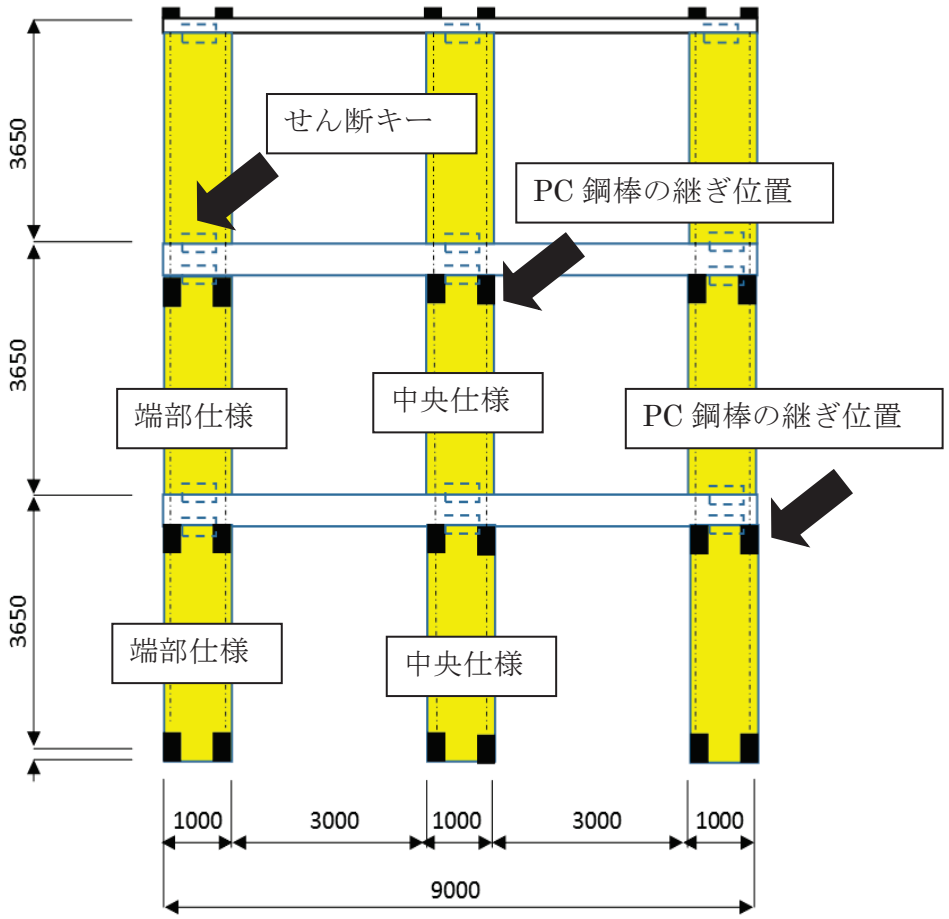


図 4.1-1　平成 28 年度に想定した３階建て学校校舎基本ユニットプランの軸組図（図 1.2 再掲）

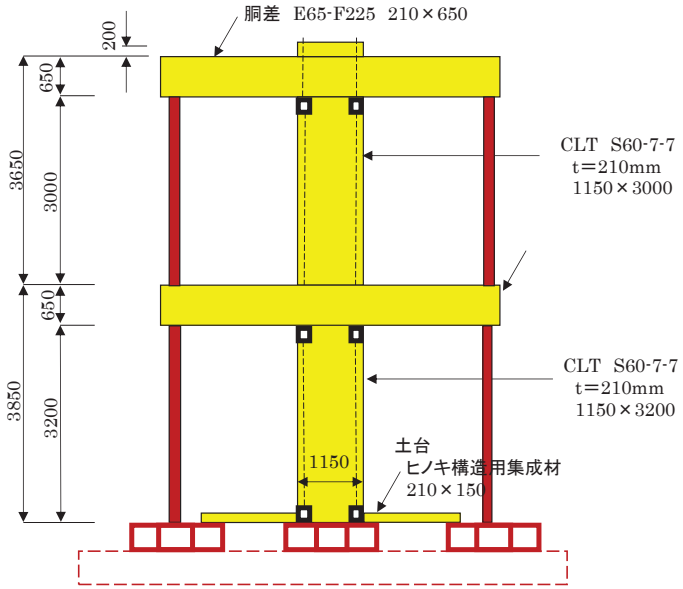


図 4.1-2　２層の構面せん断試験（図 1.4 再掲）

（２）実験実施体制・日時

本実験は、東京大学生産技術研究所附属千葉実験所実験棟 I で実施した。

実施日時：2019 年 2 月 1 日～2 月 25 日

参加者：

東京大学生産技術研究所腰原研究室

腰原幹雄　教授

松本直之　助教

大塚日出夫　技術職員

姚至謙　研究生

内田早紀、國江悠介、矢尾彩夏、冨士本学、Xu Yiling（修士課程）Firas Hawasly（研究生）、Maximilian Holl、Fabrizio Schillani（特別聴講学生）

木構造振興株式会社

原田浩司

大分大学　田中研究室

田中圭　准教授

田中研究室　学生

広島大学　森研究室

森研究室　学生

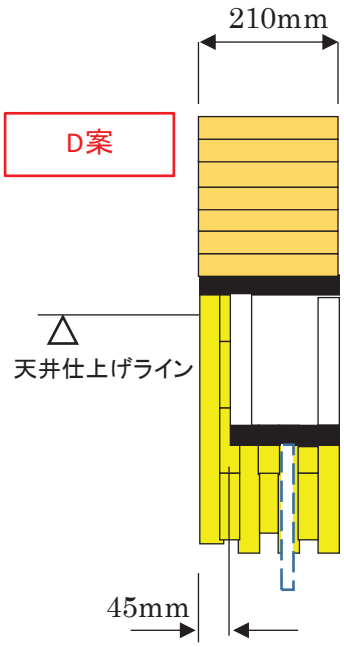
4.2　試験体詳細・計測計画

（１）　試験体詳細

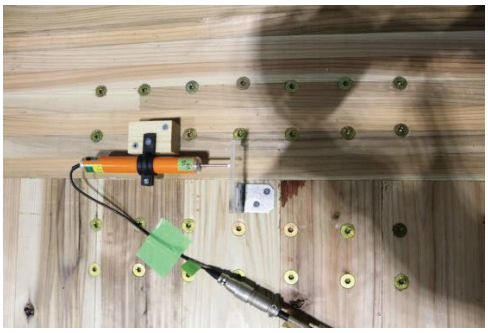
試験体の部材種類及び寸法を示す。また図に PC 鋼棒、箱金物の位置を示す。45 ㎜の厚さは燃え代設計を考慮したものであり、CLT の接着剤は PRF である。また、２層部分の鋼製柱の長さ調整のため上下各 75 ㎜の調整木材を接着およびビスで固定した。

表 4.2-1　試験体詳細

部位	材種・規格等	寸法（mm）
壁	CLT S60-7-7 ×２	210*1150*3000 及 3200
梁	スギ構造用集成材　E65-F225 ×２	210*650*4800
土台	ヒノキ構造用集成材	210*150*1800
PC 鋼棒	B 種１号	φ23
鋼製支柱	鋼管	φ200 他
同　梁部	PC 鋼棒（２，３体目１F 梁位置　他全ねじ）	φ17・1m　各２本
同　底部	F10t	φ24
せん断キー	構造用合板	330*594*28
同上　ビス	パネリード S（28 本/枚）	長さ 170
シアプレート	円形（一か所当たり２枚重ね）	φ100*30
調整用木材	パイン材（試験体１）	t 約 20*210*600　４枚重ね
調整用木材	スギ構造用集成材（試験体２，３）	75*250*600
その他	箱金物	各６個



箱金物位置・PC 鋼棒位置



せん断キー（設置・ビス止め後）

調整用木材

図 4.2-1　試験体詳細

（２）　計測計画

計測計画を図に示す。荷重は各梁および底部での PC 鋼棒の引き抜き荷重、曲げ戻しを計測するための２F の鋼製柱ロードセルで計測した。変位はジャッキ、および巻き取り式変位計による各梁端部の変位、梁および CLT の左右移動、CLT と梁および土台の接合箇所でのめり込みおよび浮き上がりを計測した。また、１F の鋼製柱はひずみ度を計測し荷重に換算した。

浮き上がりは、試験体の梁を、梁上に設置した鋼材と梁設置用の土台鉄骨を鋼棒で繋いだフレームによって梁の浮き上がりを拘束した（但し、試験体２，３ではそこまで変形が発生しなかった)。

計測チャンネル一覧を以下に示す。

表 4.2-2　計測チャンネル

CH. No.	計測器型番	計測内容	CH. No.	計測器型番	計測内容
CH. 000	Load 2F	アクチュエータ荷重(2F)	CH. 032	CDP50	1FCLTと土台の水平変位(裏)
CH. 001	Load 1F	アクチュエータ荷重(1F)	CH. 034	SDP100C	1FCLTと1F梁の水平変位(裏)
CH. 002	KC-50B	底部PC鋼棒引張荷重(左)	CH. 035	SDP100C	2FCLTと1F梁の水平変位(裏)
CH. 003	KC-50B	底部PC鋼棒引張荷重(右)	CH. 036	CDP50	2FCLTと2F梁の水平変位(裏)
CH. 004	TCLP-20BS	2F鋼製柱ロードセル(左)	CH. 038	SDP100R	1FCLT脚部　変位(右・裏)
CH. 005	TCLP-20BS	2F鋼製柱ロードセル(右)	CH. 039	SDP100R	1FCLT脚部　変位(左・裏)
CH. 006	DP2000E	2F梁　変位	CH. 040	SDP100C	1FCLT頭部と1F梁　変位(右・裏)
CH. 007	DP1000C	1F梁　変位	CH. 041	SDP100C	1FCLT頭部と1F梁　変位(左・裏)
CH. 008	CDP50	1FCLTと土台の水平変位(表)	CH. 042	SDP100C	2FCLT脚部と1F梁　変位(右・裏)
CH. 009	CDP50M	1FCLTと1F梁の水平変位(表)	CH. 043	SDP100C	2FCLT脚部と1F梁　変位(左・裏)
CH. 010	CDP50M	2FCLTと1F梁の水平変位(表)	CH. 044	SDP100C	2FCLT脚部と2F梁　変位(右・裏)
CH. 011	CDP50M	2FCLTと2F梁の水平変位(表)	CH. 045	SDP100C	2FCLT脚部と2F梁　変位(左・裏)
CH. 012	CDP100	1FCLT脚部と金物　変位(左・表)	CH. 048	CDP50M	2F梁上押え材と梁　変位(右・裏)
CH. 013	SDP100C	1FCLT脚部と金物　変位(右・表)	CH. 049	CDP50M	2F梁上押え材と梁　変位(左・裏)
CH. 014	CDP100	1FCLT頭部に金物　変位(左・表)	CH. 050	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　左・表・上
CH. 015	CDP100	1FCLT頭部に金物　変位(右・表)	CH. 051	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　左・表・下
CH. 016	CDP100	1FCLT頭部金物・1F梁　変位(左・表)	CH. 052	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　右・表・上
CH. 017	CDP100	1FCLT頭部金物・1F梁　変位(右・表)	CH. 053	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　右・表・下
CH. 018	SDP100C	2FCLTと1F梁　変位(左・表)	CH. 054	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　右・裏・上
CH. 019	SDP100C	2FCLTと1F梁　変位(右・表)	CH. 055	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　右・裏・下
CH. 026	CDP100	2FCLT頭部に金物　変位(左・表)	CH. 056	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　左・裏・上
CH. 027	CDP100	2FCLT頭部に金物　変位(右・表)	CH. 057	LFLA10-11	1F鋼製柱ひずみゲージ　左・裏・下
CH. 028	CDP100	2FCLT頭部金物・2F梁　変位(左・表)	CH. 062	Load_2F act	アクチュエータ荷重　2F(予備)
CH. 029	CDP100	2FCLT頭部金物・2F梁　変位(右・表)	CH. 063	Load_1F act	アクチュエータ荷重　1F(予備)
CH. 030	CDP50M	2F梁上押え材と梁　変位(左・表)	CH. 064	Disp_2F act	アクチュエータ変位　2F
CH. 031	CDP50M	2F梁上押え材と梁　変位(右・表)	CH. 065	Disp_1F act	アクチュエータ変位　1F

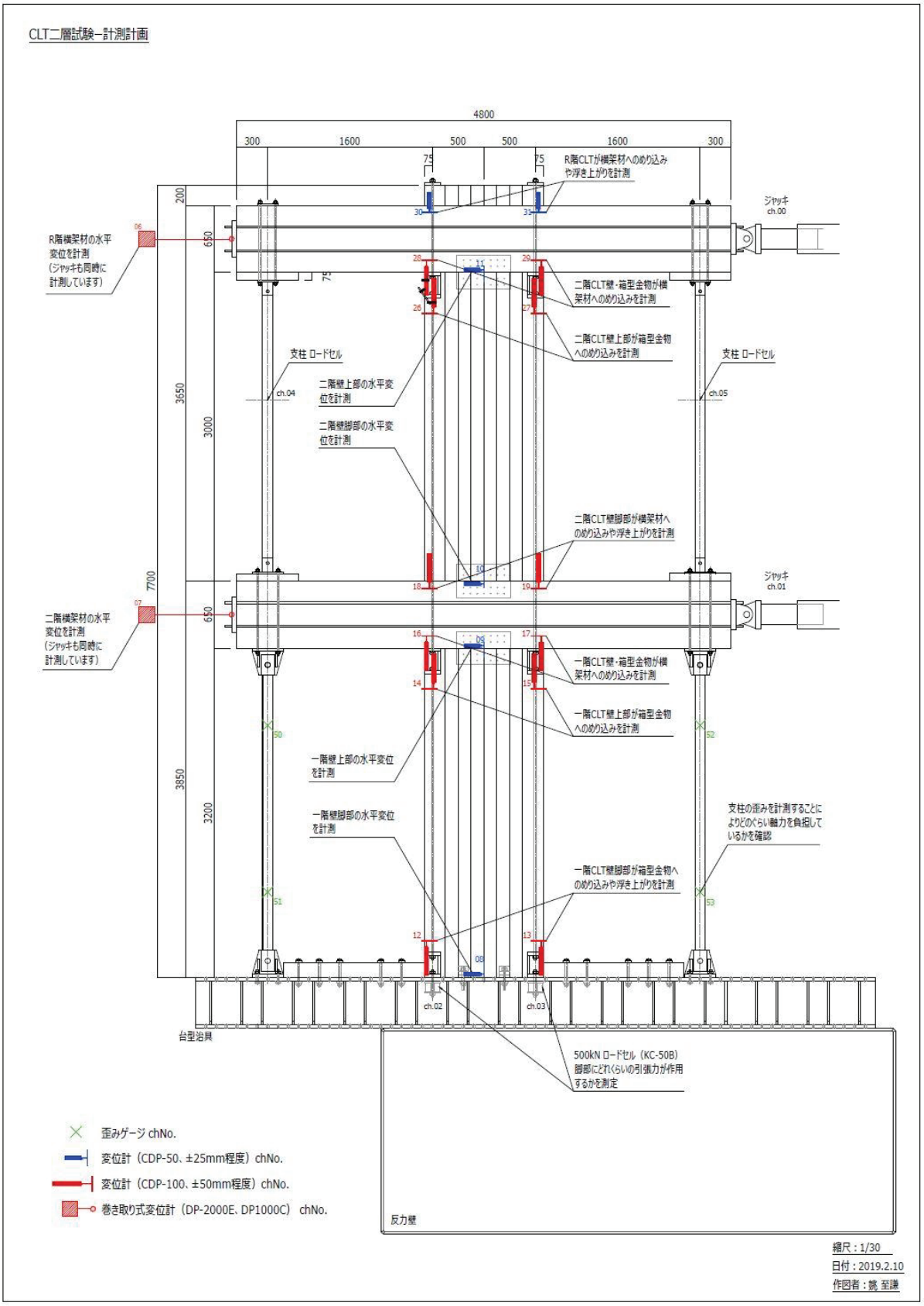

CLT二層試験ー計測計画
4800
300
1600
500
500
1600
300
75
75
R階CLTが横架材へのめり込み
や浮き上がりを計測
ジャッキ
ch.00
R階横架材の水平
変位を計測
(ジャッキも同時に
計測しています)
二階CLT壁・箱型金物が横
架材へのめり込みを計測
二階CLT壁上部が箱型金物
へのめり込みを計測
支柱 ロードセル
ch.04
ch.05
二階壁上部の水平変
位を計測
二階壁脚部の水平変
位を計測
二階CLT壁脚部が横架材へ
のめり込みや浮き上がりを計測
ジャッキ
ch.01
二階横架材の水平
変位を計測
(ジャッキも同時に
計測しています)
一階CLT壁・箱型金物が横
架材へのめり込みを計測
一階CLT壁上部が箱型金物
へのめり込みを計測
一階壁上部の水平変位
を計測
一階壁脚部の水平変位
を計測
支柱の歪みを計測することに
よりどのくらい軸力を負担して
いるかを確認
一階CLT壁脚部が箱型金物へ
のめり込みや浮き上がりを計測
ch.02
ch.03
台型治具
500kN ロードセル（KC-50B）
脚部にどれくらいの引張力が作用
するかを測定
歪みゲージ chNo.
変位計（CDP-50、±25mm程度）chNo.
変位計（CDP-100、±50mm程度）chNo.
巻き取り式変位計（DP-2000E、DP1000C） chNo.
反力壁
縮尺：1/30
日付：2019.2.10
作図者：姚 至謙

図 4.2-2　計測計画（表）

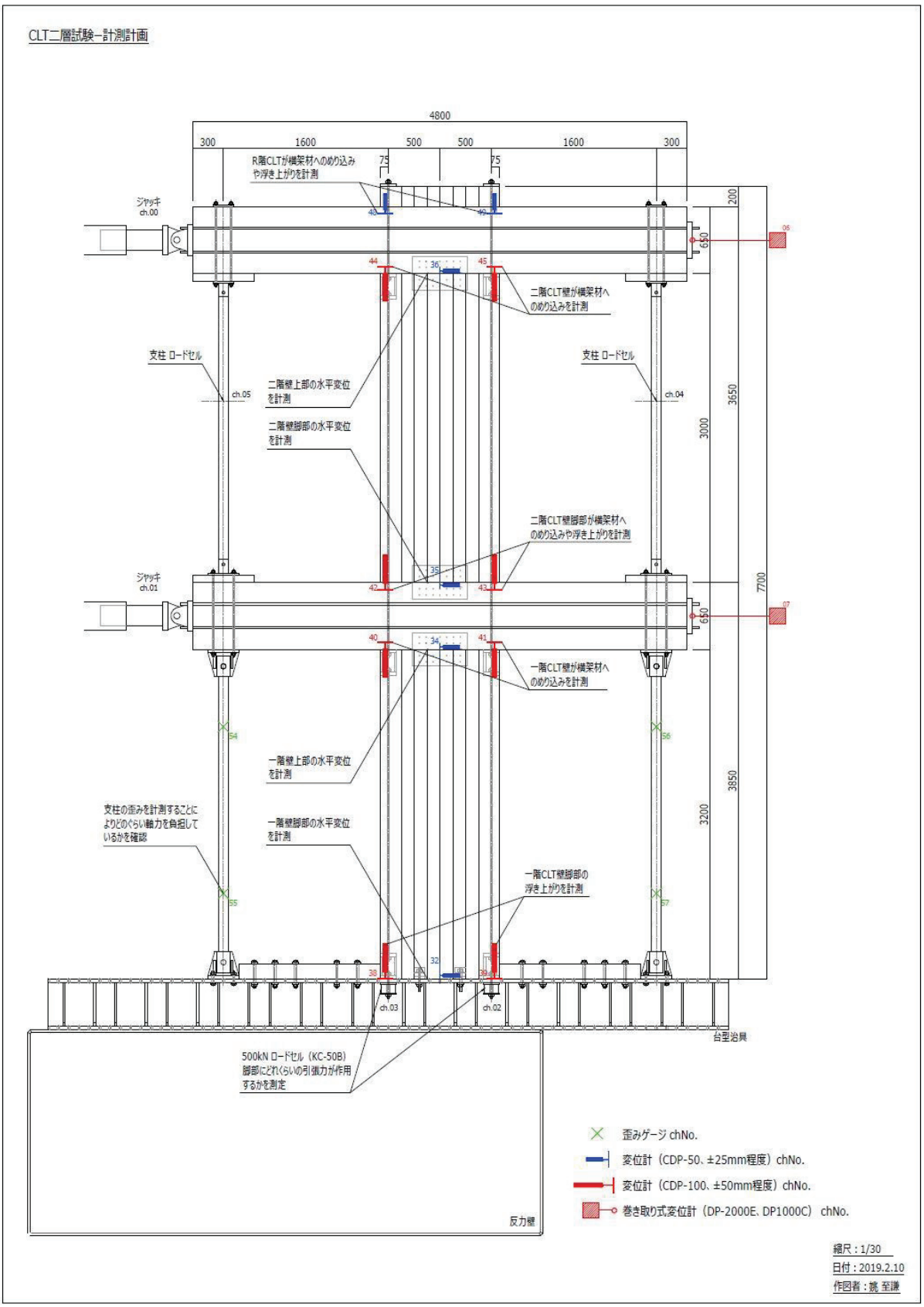

CLT二層試験−計測計画
4800
300
1600
500
500
1600
300
75
75
R階CLTが横架材へのめり込み
や浮き上がりを計測
ジャッキ
ch.00
200
650
06
二階CLT壁が横架材へ
のめり込みを計測
支柱 ロードセル
支柱 ロードセル
ch.05
ch.04
二階壁上部の水平変位
を計測
二階壁脚部の水平変位
を計測
3650
3000
二階CLT壁脚部が横架材へ
のめり込みや浮き上がりを計測
ジャッキ
ch.01
7700
650
07
一階CLT壁が横架材へ
のめり込みを計測
一階壁上部の水平変位
を計測
3850
3200
支柱の歪みを計測することに
よりどのくらい軸力を負担して
いるかを確認
一階壁脚部の水平変位
を計測
一階CLT壁脚部の
浮き上がりを計測
ch.03
ch.02
台型治具
500kN ロードセル（KC-50B）
脚部にどれくらいの引張力が作用
するかを測定
反力壁
歪みゲージ chNo.
変位計（CDP-50、±25mm程度）chNo.
変位計（CDP-100、±50mm程度）chNo.
巻き取り式変位計（DP-2000E、DP1000C） chNo.
縮尺：1/30
日付：2019.2.10
作図者：姚 至謙

図 4.2-3　計測計画（裏）

図 4.2-4　試験体および計測器配置（試験体２　計測前）

図 4.2-5　試験体および計測器配置（試験体３　計測前）

（３）　加力計画

本実験では、二層試験体を水平に寝かせた状態で、反力壁に固定した鉄骨土台に設置し、１F 梁と２F 梁の各右端部に取り付けたアクチュエータによって正負交番加力を行った。アクチュエータは島津製作所製アクチュエータ（最大圧縮 500kN、引張 300kN、ストローク±300mm）を２台使用しサーボパルサー4830 で変位制御によって加力した。

加力計画は、1/450rad.から 1/50rad.まで正負交番に同一履歴３回ずつ加力し、以降は押切りとし 1/30rad. 1/20rad., 1/15rad.を目標変形角とした。試験体１のみ 1/600rad.でも正負交番加力を行っている。なお、アクチュエータの試験体引き方向を正方向加力、押し方向を負方向加力とした。

また、入力荷重は、想定地震力（図 4.2-7,8）から算出した A_i 分布に基づき、1F 梁の入力荷重（P_1）と 2F 梁の入力荷重（P_2）の比は約 1：3.5 とした。試験実施に当たっては、1F 梁のアクチュエータを自動変位制御（0.1mm/s 初回加力時）で作動させ、2F 梁は荷重が 3.5 倍となるように手動制御で作動させた。なお、目標変形角までの変形状態において、常に２F 梁の荷重は１F 梁荷重の 3.5 倍とすることは困難であった。目標変形角到達後、２F 梁の変位を適宜調整し、荷重の負担率を調整している。

CLT2層試験加力計画

押し側	負（－）
引き側	正（＋）

層間高さ	1F梁	2F梁
mm	3525	7175

変形角 [rad.]	1/600*	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
2F梁 [mm]	12	16	24	36	48	72	96	144	239	359	478
1F梁 [mm]	6	8	12	18	24	36	48	72	120	179	239

*1/600rad.は1体目のみ実施。　　＊引き最大　　＊押し最大

・正負交番繰り返し。
・1/50rad.までは各変形角3回繰り返し加力を行った。
・引き1/50rad.後、2F梁ジャッキを盛替え、押し1/15rad.まで加力を行った。
・1F梁は上記表に示す変位制御。2F梁は荷重が、1F梁荷重のAi分布の比（約3.5倍）となるように手動制御を行った。

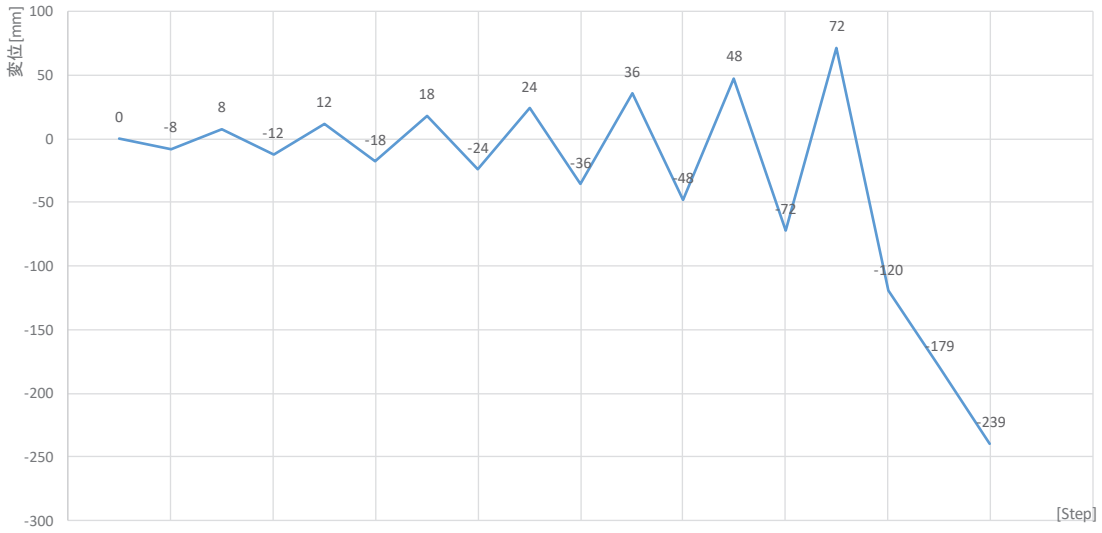


図 4.2-6　加力計画

Aプラン

階	各階質量 mi(kN)	当該階より上部の質量 Σmi(kN)	αi	Ai	Qe kN	
3	302.1075	302.11	0.250	1.64	123.95	
2	453.295	755.40	0.625	1.23	233.12	109.17
1	453.295	1208.70	1.000	1.00	302.17	69.05

h＝ 13.55 m
T＝ 0.4065 sec
C_0＝ 0.2
重要度係数 1.25

各通りの地震負担力 単位:kN

通り	3階	2階	1階
A通りの負担	61.97	116.56	151.09
BとC通りの負担	61.97	116.56	151.09

耐力壁1ヶ処あたりの地震負担力 単位:kN

通り	耐力壁数	3階	2階	1階
A通りの負担	3	20.66	38.85	50.36
BとC通りの負担	4	15.49	29.14	37.77

Bプラン

階	各階質量 mi(kN)	当該階より上部の質量 Σmi(kN)	αi	Ai	Qe kN	
3	410.705	410.71	0.261	1.64	168.38	
2	575.86	986.56	0.626	1.24	305.90	
1	588.92	1575.48	1.000	1.00	393.87	87.97

h＝ 14.45 m
T＝ 0.4335 sec
C_0＝ 0.2
重要度係数 1.25

各通りの地震負担力 単位:kN

通り	3階	2階	1階
A通りの負担	56.13	101.97	131.29
B通りの負担	56.13	101.97	131.29
D通りの負担	56.13	101.97	131.29

耐力壁1ヶ処あたりの地震負担力 単位:kN

通り	耐力壁数	3階	2階	1階
A通りの負担	3	18.71	33.99	43.76
B通りの負担	3	18.71	33.99	43.76
D通りの負担	3	18.71	33.99	43.76

図 4.2-7　地震力算定　検討資料抜粋（1）

Cプラン

階	各階質量 mi(kN)	当該階より上部の質量 Σmi(kN)	αi	Ai	Qe kN	
3	566.1875	566.19	0.277	1.63	230.11	
2	738.38	1304.57	0.639	1.24	403.22	
1	738.38	2042.95	1.000	1.00	510.74	107.51

h＝ 15.25 m
T＝ 0.4575 sec
C_0＝ 0.2
重要度係数 1.25

各通りの地震負担力　　単位:kN

通り	3階	2階	1階
A通りの負担	76.70	134.41	170.25
B、C通りの負担	76.70	134.41	170.25
E通りの負担	76.70	134.41	170.25

耐力壁1ヶ処あたりの地震負担力　　単位:kN

通り	耐力壁数	3階	2階	1階
A通りの負担	3	25.57	44.80	56.75
B、C通りの負担	4	19.18	33.60	42.56
E通りの負担	3	25.57	44.80	56.75

図 4.2-8　地震力算定　検討資料抜粋（2）

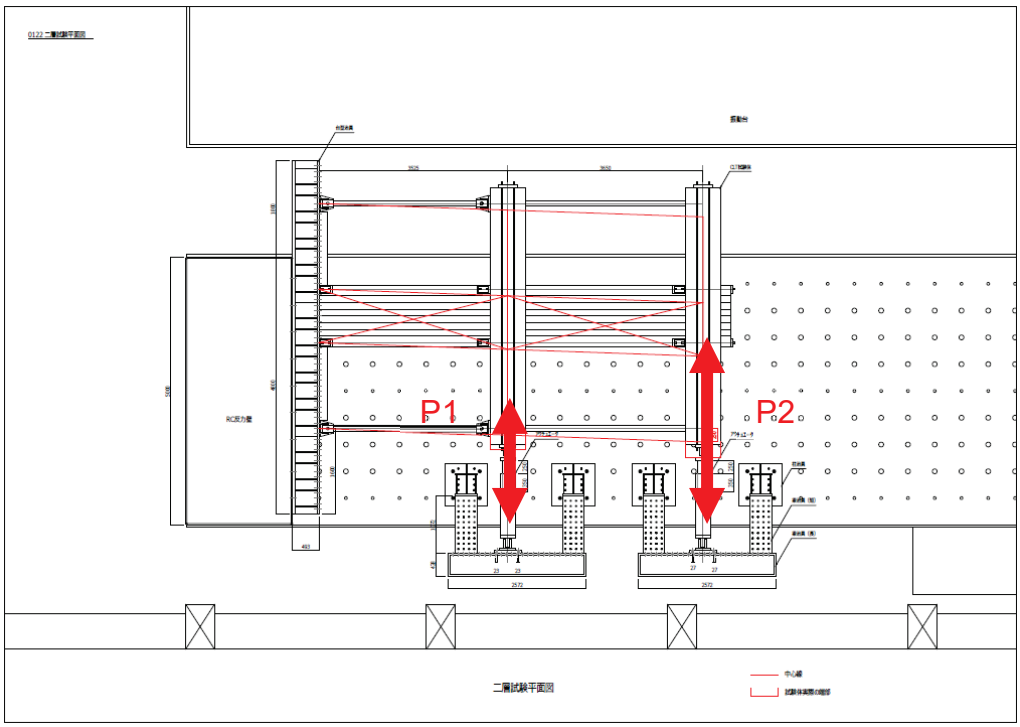


図 4.2-9　加力方法模式図（見下ろし）

4.3　試験結果の評価方法

（1）各層の荷重

実験の評価にあたっては、各梁に入力された荷重をもとに１層の CLT、２層の CLT それぞれに入力されるせん断力を算出した。１F 梁の荷重を P_1、２F 梁の荷重を P_2 とすると、１層の CLT に入力されるせん断力は、P_1+P_2、２層の CLT に入力されるせん断力は P_2 である。

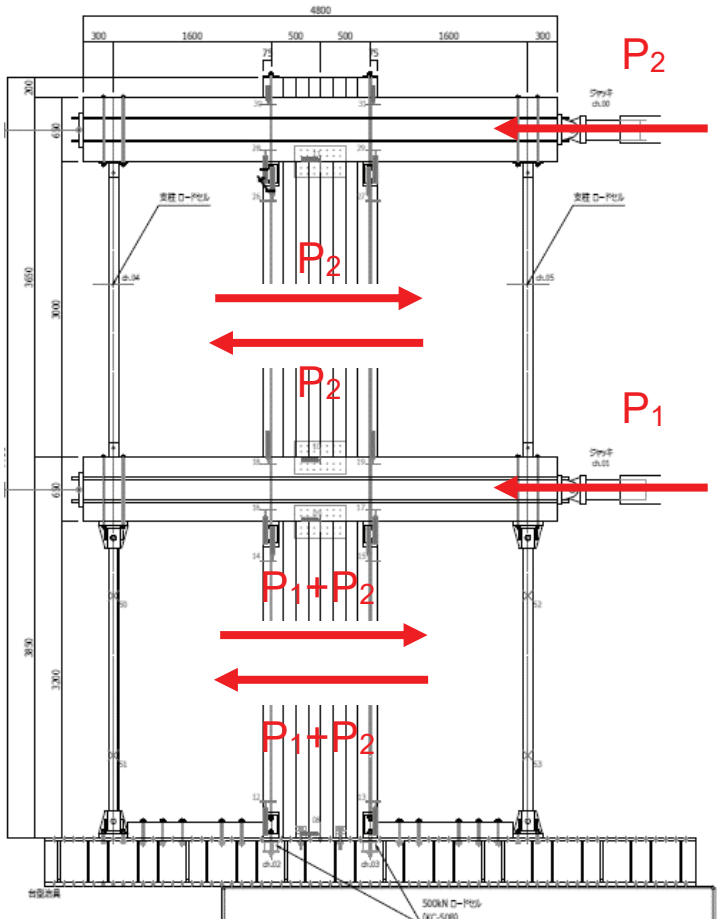


図 4.3-1　計測した各梁の荷重と CLT 壁に入力されるせん断力の関係

（２）試験結果の評価

特性値は完全弾塑性モデルによって降伏耐力および終局耐力等を算出する。

・せん断変形角

CLT のめり込み・浮き上がりも壁の性能の一部として評価するため、各層の見かけのせん断変形角によって評価した。

見かけのせん断変形角は、

１層：$\gamma_1 = (\delta_1 - \delta_2)/H_1$

２層：$\gamma_2 = (\delta_3 - \delta_1)/H_2$

であらわされる。なお、記号は以下の通りである。

δ_1：１F 梁の水平方向変位（㎜）

δ_2：土台と CLT の水平変位（㎜）

δ_3：２F 梁の水平方向変位（mm）

H_1：１層高さ（㎜）〔1F 梁芯～土台上端〕

H_2：２層１層層間の高さ〔1F 梁芯～2F 梁芯〕

・耐力壁一枚あたりの短期基準せん断耐力の算定

耐力壁１枚あたりの短期基準せん断耐力は、下記の(a)～(d)の値のうち、最小値とした。なお、降伏耐力 P_y、終局耐力 P_u、および構造特性係数 D_s は、完全弾塑性モデルによる降伏耐力及び終局耐力等の求め方による。

(a) 降伏耐力 P_y

(b) 終局耐力 $P_u \times (0.2/D_s)$

(c) 最大耐力 P_{max} の 2/3

(d) 特定変形時の耐力

CLT は材料自体の剛性が高いため、CLT の浮き上がりと沈み込みを性能の一部として把握するため、せん断変形角は見かけのせん断変形角を用いた。また、耐力壁一枚当たりの短期基準せん断耐力の算定では、準耐火建築物への使用を想定し、建築基準法施行令第 109 条２の２に基づき、(d)特定変形時の耐力、は見かけのせん断変形角 1/150rad.時の耐力と定めた。

完全弾塑性モデルによる降伏耐力及終局耐力等の求め方は、木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）記載の方法に準拠した。

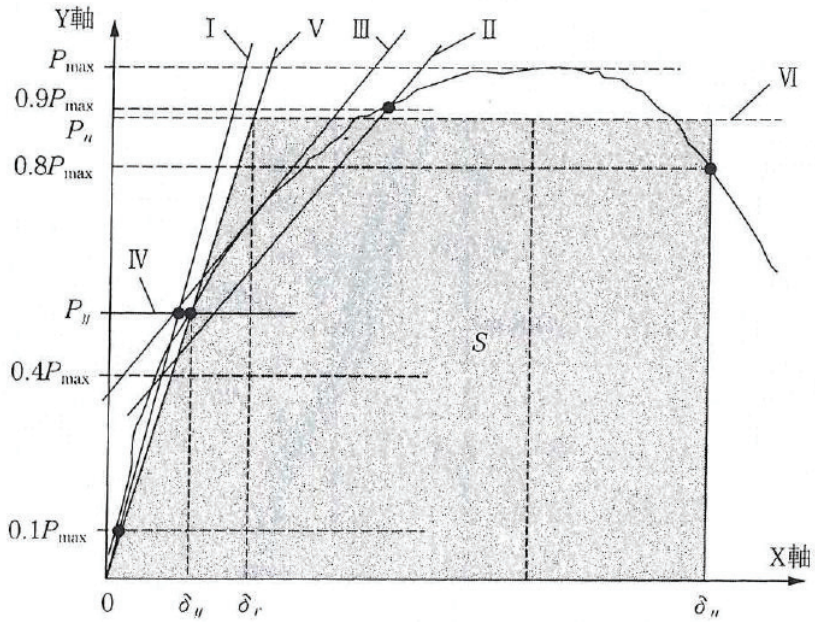


図 4.3-2　完全弾塑性モデルによる降伏耐力及び終局耐力等の求め方〔平成 28 年度林野庁委託事業　高耐力の水平荷重を負担できる CLT と横架材で構成する構法の開発 P3-5 より引用〕

（３）変形の概要

接合部における計測変形量のイメージ図を示す。

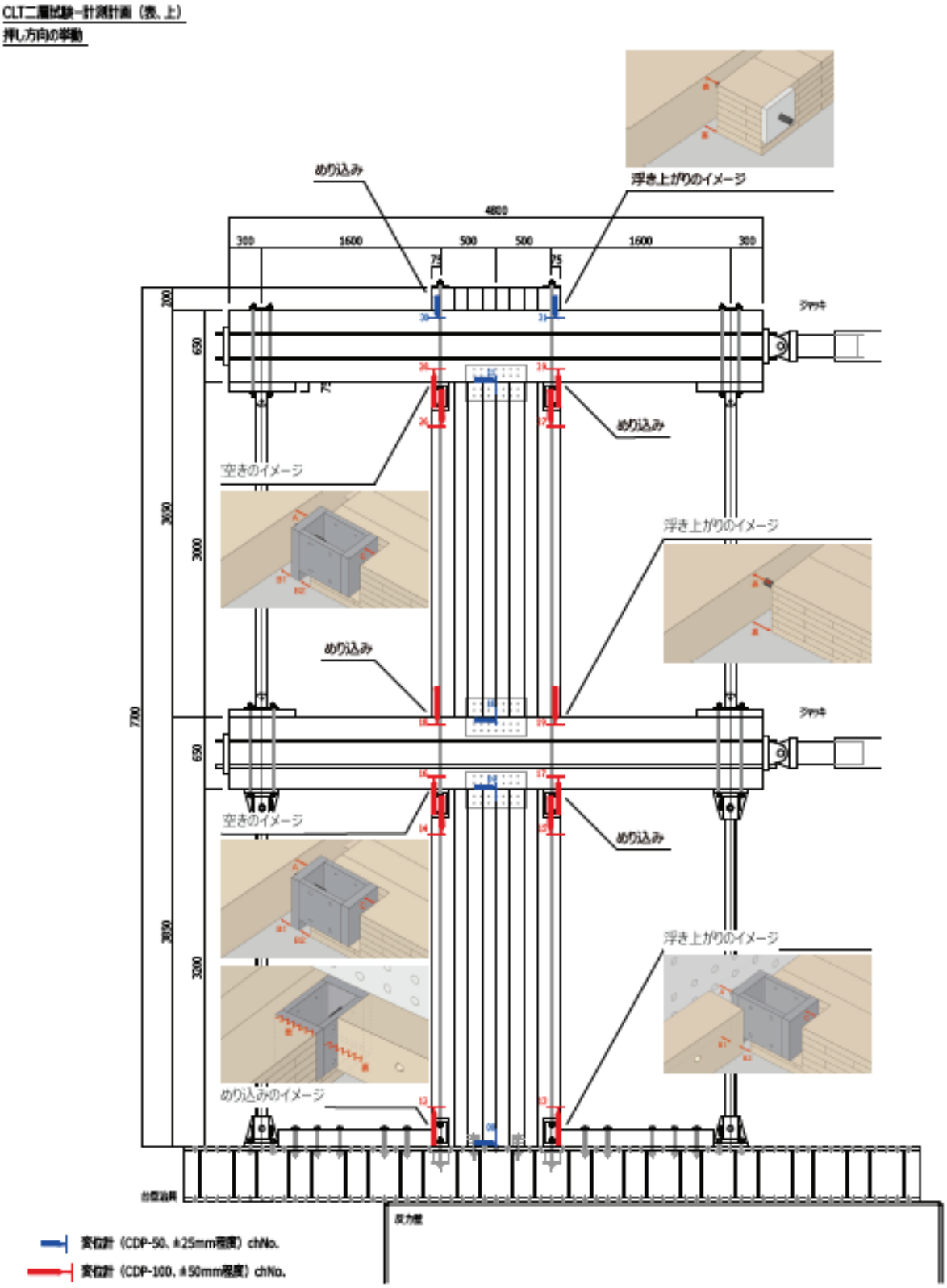


図 4.3-3　接合部計測箇所の変形イメージ（押し側）

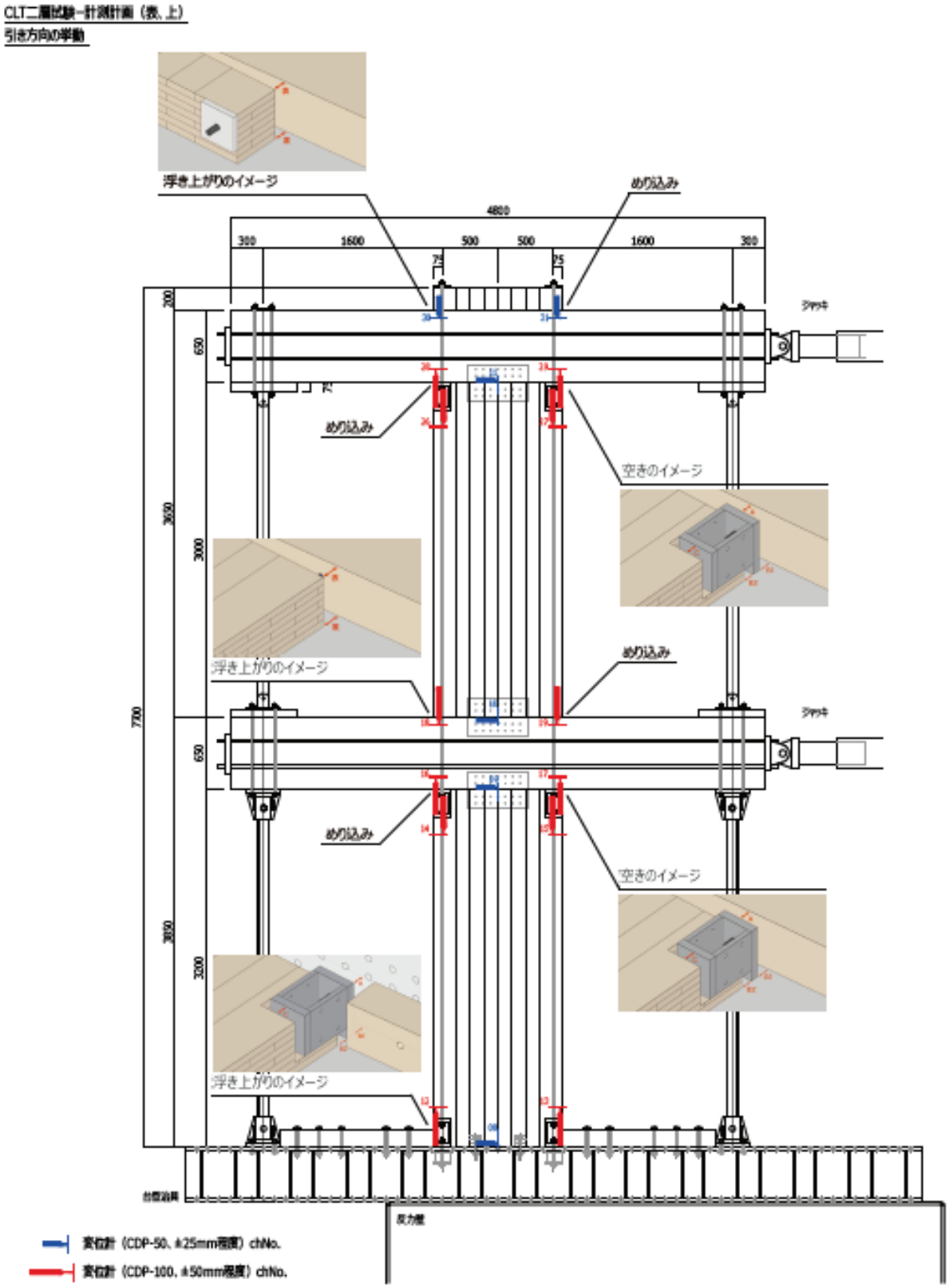


図 4.3-4　接合部計測箇所の変形イメージ（引き側）

4.4　試験結果：荷重変形関係・特性値・破壊の進行

試験結果のうち、各層の梁の荷重より算出した（4.3 参照）各層の負担せん断力と層間変形角（土台から１F 梁：１層、および１F 梁から２F 梁：２層）の関係、および各試験体の破壊の進行をまとめた。押し方向が変形角・荷重とも負の値、引き方向が変形角・荷重とも正の値としている。

また、各試験体の各層荷重と相関変形角の履歴曲線と併せて、各目標変形角時点での値（１F 梁荷重 P_1:２F 梁荷重 P_2 の比が約 1：3.5 となるように調整）をピーク値、として抜粋したものを掲載した。詳細は表に示す。ただし、値は各変形角３回の平均値を用いている。特性値は、押側のピーク値に対して完全弾塑性モデルを作成して算出した。ただし値は正に変換している。

（１）試験体１

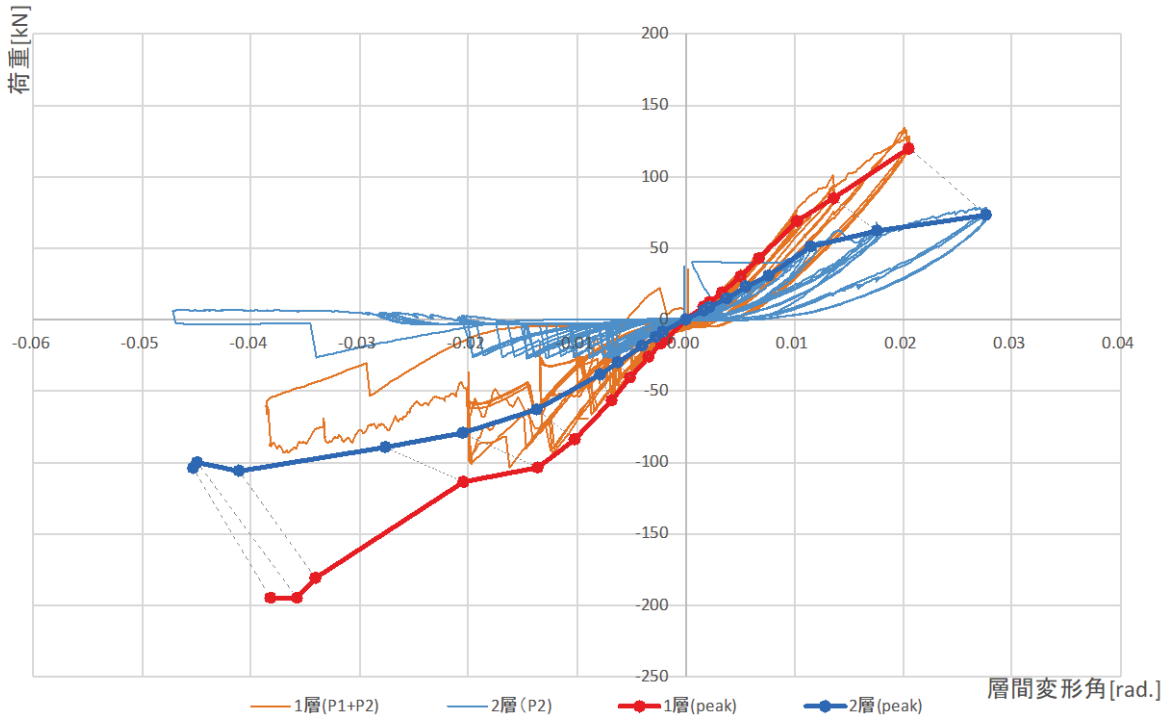


図 4.4-1　試験体１　各層負担荷重－層間変形角関係

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

表 4.4-1　試験体１　各層間変形角における各層の負担荷重

1F層間:3525mm		データロガー 計測値*							
2F層間:3650mm		押し				引き			
		2層（P2）		1層(P1+P2)		2層（P2）		1層(P1+P2)	
		荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角
rad.		kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.
0		0	0	0	0	0	0	0	0
1/600	ave.	-8.5	0	-13.6	-0.0017	6.3	0	9.0	0
1/450	ave.	-12.3	-0.0021	-16.8	-0.0023	8.7	0.0022	12.3	0.0022
1/300	ave.	-18.6	-0.0028	-26.0	-0.0034	14.7	0.0038	18.7	0.0033
1/200	ave.	-30.0	-0.0040	-40.7	-0.0051	23.0	0.0055	30.3	0.0050
1/150	ave.	-38.5	-0.0063	-56.8	-0.0068	30.8	0.0076	42.9	0.0067
1/100	ave.	-62.9	-0.0079	-84.0	-0.0102	51.2	0.0115	68.9	0.0102
1/75	ave.	-79.5	-0.0137	-103.7	-0.0136	62.2	0.0176	84.8	0.0136
1/50	ave.	-89.5	-0.0205	-113.8	-0.0204	73.2	0.0276	119.8	0.0205
1/30	ave.	-106.0	-0.0276	-181.0	-0.0340				
～破壊	ave.	-100.0	-0.0411	-195.0	-0.0357				
破断直前	ave.	-104.0	-0.0449	-195.0	-0.0382				
最大値		-106.0	0.0	-195.0	0.0	73.2	0.0	119.8	0.0

*ロードセル不調のため、押側の荷重はジャッキシステムの読み取り値をピーク値として示している。グラフも同様。

試験体１の特性値

特性値は押し側のピーク値（変形角・荷重）を正にして算出した。短期基準せん断耐力 P_0 には評価項目の内最小値を示した（ばらつき係数を乗じていない）。

表 4.4-2　試験体１　特性値

		P_{max}	$D(P_{max})$	K	P_u	D_s	評価項目				短期基準せん断耐力P_0[kN]*
							P_y	P_u*(0.2/D_s)	2/3*P_{max}	P(1/150rad.)	
	unit	kN	rad.	kN/rad.	kN	–	kN	kN	kN	kN	kN
2層目	試験体1	106.0	0.041	4594.2	93.2	0.54	62.1	34.7	70.7	38.5	34.7
1層目		195.0	0.036	7855.9	149.5	0.58	94.4	51.9	130.0	56.8	51.9

*灰色セルで決定

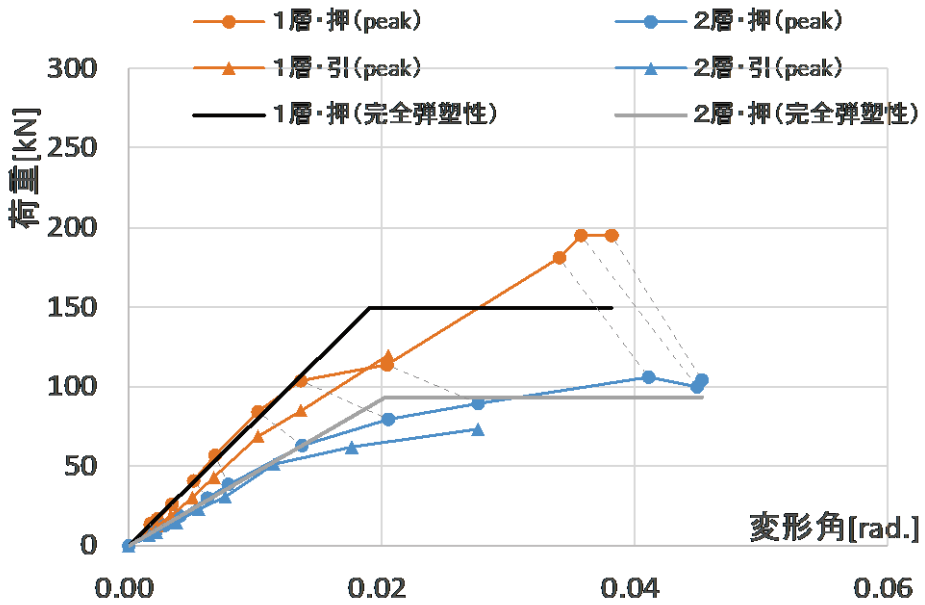


図 4.4-2　各変形角ピーク値および完全弾塑性モデル

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

試験体１では、1/100rad.以降１，２F 梁への CLT および箱金物のめり込みが目視で確認された。1/75rad.以降、めり込みに伴う亀裂が梁に確認され、変形の進行に伴って損傷が伸展した。1/30rad.以降は押側のみの変形であるが、1/30rad.時点で１FCLT 脚部への金物のめり込み、１F 梁の上面への亀裂が顕著になった。ただし、本実験においては、１F 鋼製柱頭部と２F 鋼製柱脚部を繋ぐボルトの伸びが顕著に見られ（1/50rad.で９㎜、1/30rad.で 23 ㎜）、試験体２，３と比較して 1/50rad.以降の荷重が小さい。また、1/30rad.から 1/20rad.への変形途中で当該部分のボルトが破断し、ここで加力終了とした。

最大荷重は１層で 195kN、２層で 106kN であり、完全弾塑性モデルで評価すると、Pu は１層目 149.5kN、２層目 93.2kN、Ds は 0.58、0.54 である。短期基準せん断耐力は 51.9kN、34.7kN であり、共に Pu*(0.2/Ds)の項で決定した。

押し引きでの荷重の差は徐々に増加し、最大約 20kN 程度見られた。１，２層共に押しの方が荷重が大きくなっているが、理由については明確ではない。

（２）試験体２

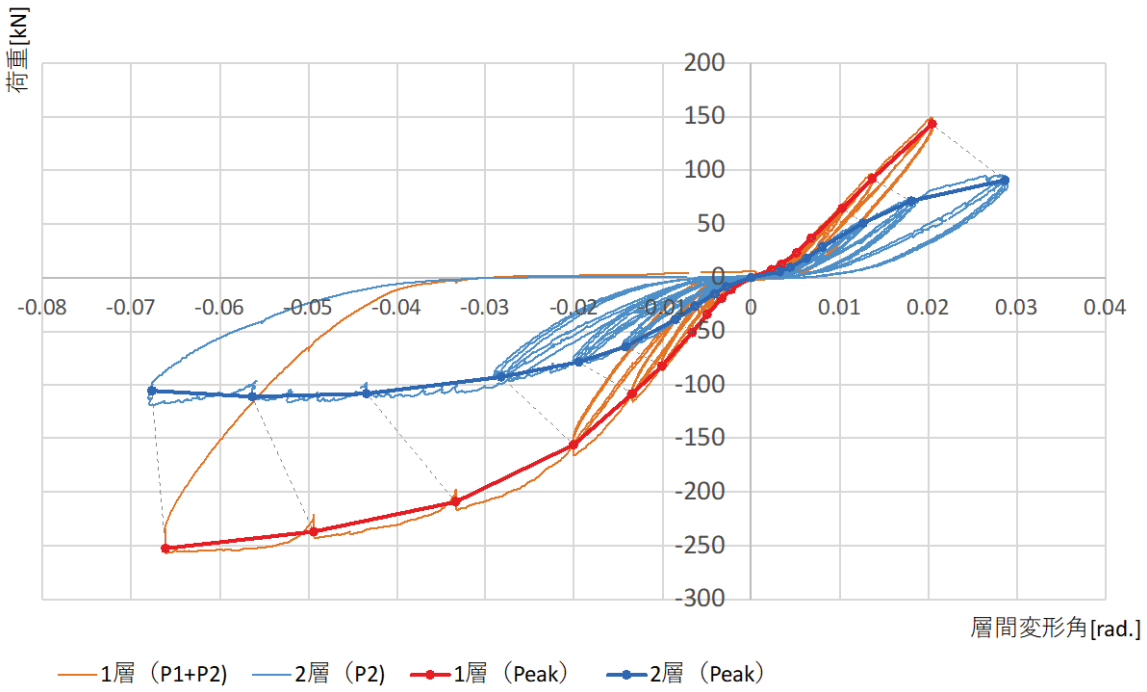


図 4.4-3　試験体２　各層負担荷重－層間変形角関係

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

表 4.4-3　試験体２　各層間変形角における各層の負担荷重

1F層間：3525mm	データロガー計測値							
2F層間:3650mm	押し				引き			
	2層（P2）		1層(P1+P2)		2層（P2）		1層(P1+P2)	
	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角
rad.	kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/450 ave.	-8.4	-0.0028	-11.1	-0.0022	5.6	0.0032	7.3	0.0023
1/300 ave.	-15.2	-0.0041	-19.5	-0.0033	9.4	0.0044	12.4	0.0034
1/200 ave.	-26.7	-0.0064	-34.7	-0.0050	18.0	0.0062	22.9	0.0051
1/150 ave.	-39.3	-0.0085	-51.4	-0.0067	28.5	0.0080	36.6	0.0068
1/100 ave.	-64.4	-0.0142	-82.3	-0.0101	50.7	0.0126	64.6	0.0103
1/75 ave.	-78.9	-0.0195	-108.2	-0.0135	71.2	0.0181	92.0	0.0137
1/50 ave.	-92.6	-0.0282	-156.1	-0.0201	90.6	0.0287	143.1	0.0204
1/30 ave.	-108.3	-0.0435	-209.1	-0.0334				
1/20 ave.	-111.0	-0.0563	-237.1	-0.0494				
1/15 ave.	-105.6	-0.0677	-252.8	-0.0662				
最大値	-111.0	-0.0677	-258.2	-0.0662	90.6	0.0287	143.1	0.0204

試験体２の特性値

特性値は押し側のピーク値（変形角・荷重）を正にして算出した。短期基準せん断耐力 P_0 には評価項目の内最小値を示した（ばらつき係数を乗じていない）。

表 4.4-4　試験体２　特性値

		P_{max}	$D(P_{max})$	K	P_u	D_s	評価項目				短期基準せん断耐力P_0[kN]*
							P_y	$P_u*(0.2/D_s)$	$2/3*P_{max}$	P(1/150rad.)	
	unit	kN	rad.	kN/rad.	kN	–	kN	kN	kN	kN	kN
2層目	試験体2	111.0	0.056	4417.3	102.3	0.45	67.2	45.0	74.0	39.3	39.3
1層目		252.8	0.066	7818.2	225.8	0.53	146.4	85.5	168.5	51.4	51.4

*灰色セルで決定

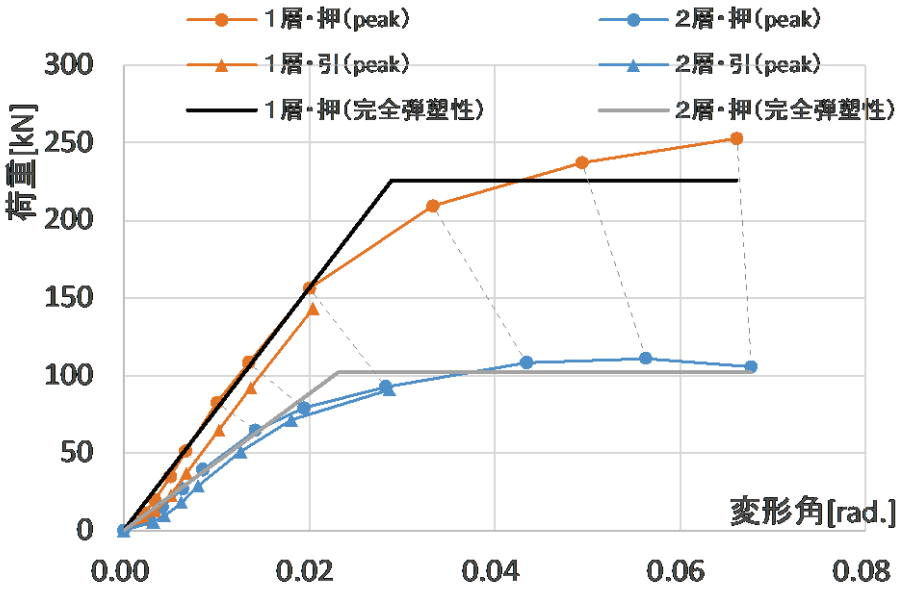


図 4.4-4　各変形角ピーク値および完全弾塑性モデル

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

試験体２以降は、試験体１で発生した１F 梁位置の全ねじボルトの引張破壊を防ぐため、φ17 の PC 鋼棒を使用した。また調整木材はパイン材からスギ集成材に変更した。

試験体２では、1/150rad.付近から梁への金物、CLT のめり込みが確認され、1/100rad.以降では梁側面の亀裂も確認された。変形の進行と共に、亀裂、めり込みも進行した。1/20rad.以降はめり込みを受ける面のみならず表面にも亀裂が発生し、梁上面、１層 CLT 右の PC 鋼棒の上付近などに亀裂が確認された。1/15rad.の時点で、２層右上の鋼製柱の長さ調整用の材が引張で破壊していた他、解体後に、１層梁の中央部上面付近（２層 CLT の脚部中央付近）にあったフィンガージョイントの部分で曲げ破壊していた。１，２層の荷重については、1/50rad.以降は２層の荷重が伸びず、P_1:P_2 は１：１程度となった。

最大荷重は１層で 252.8kN、２層で 111kN であり、完全弾塑性モデルで評価すると、Pu は１層目 225.8kN、２層目 102.3kN、Ds は 0.53、0.45 である。短期基準せん断耐力は 51.4kN、39.3kN であり、共に 1/150rad.時点の荷重 $P_{150rad.}$ で決定した。

押し引きでの荷重の差は、最大約 10kN 程度見られた。１，２層共に押しの方が荷重が大きくなっているが、理由については明確ではない。

（３） 試験体３

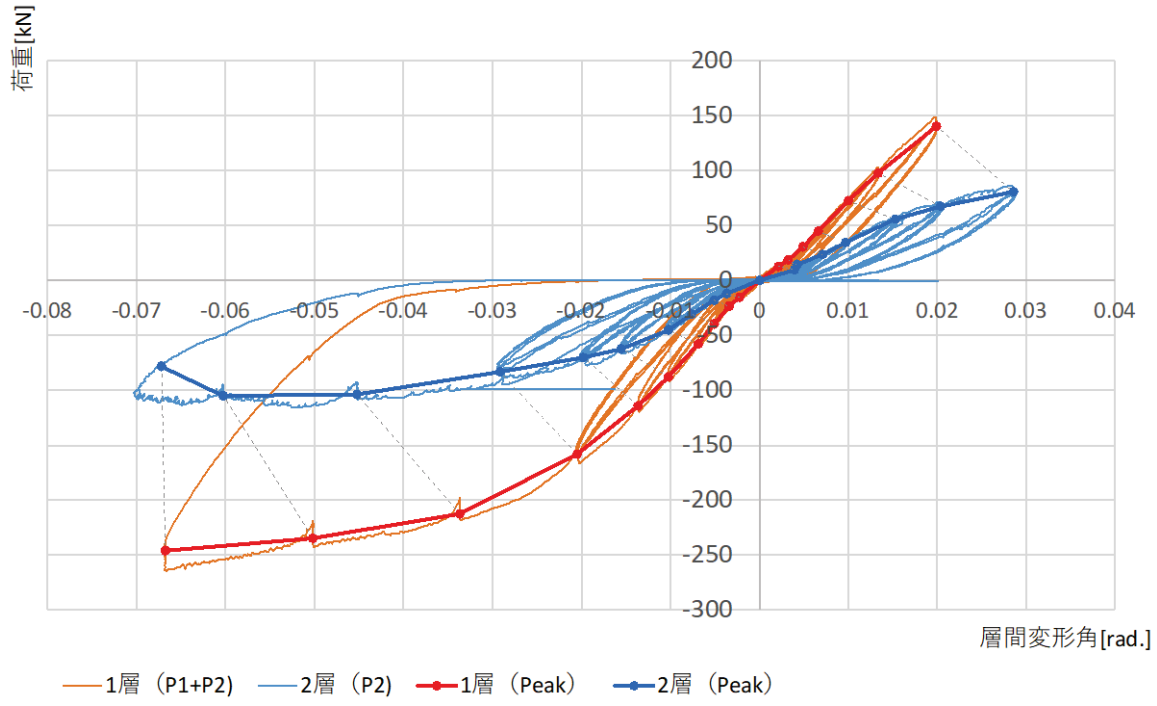


図 4.4-5　試験体３　各層負担荷重－層間変形角関係

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

表 4.4-5　試験体３　各層間変形角における各層の負担荷重

1F層間:3525mm	データロガー計測値							
2F層間:3650mm	押し				引き			
	2層(P2)		1層(P1+P2)		2層(P2)		1層(P1+P2)	
	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角	荷重	層間変形角
rad.	kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.	kN	rad.
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1/450 ave.	-11.9	-0.0037	-15.2	-0.0023	9.9	0.0039	12.7	0.0021
1/300 ave.	-18.0	-0.0051	-23.4	-0.0034	14.4	0.0042	18.5	0.0032
1/200 ave.	-30.6	-0.0076	-39.6	-0.0051	23.6	0.0071	30.6	0.0049
1/150 ave.	-45.0	-0.0102	-58.0	-0.0069	34.5	0.0097	44.9	0.0066
1/100 ave.	-62.3	-0.0155	-87.7	-0.0103	55.8	0.0153	72.5	0.0100
1/75 ave.	-69.9	-0.0198	-114.2	-0.0136	67.5	0.0203	97.7	0.0134
1/50 ave.	-83.1	-0.0292	-157.9	-0.0205	80.8	0.0286	140.4	0.0199
1/30 ave.	-103.6	-0.0453	-212.4	-0.0337				
1/20 ave.	-104.9	-0.0603	-234.5	-0.0502				
1/15 ave.	-78.0	-0.0672	-245.9	-0.0668				
最大値	-104.9	-0.0672	-272.7	-0.0668	80.8	0.0286	140.4	0.0199

試験体３の特性値

特性値は押し側のピーク値（変形角・荷重）を正にして算出した。短期基準せん断耐力 P_0 には評価項目の内最小値を示した（ばらつき係数を乗じていない）。

表 4.4-6　試験体３　特性値

		P_{max}	$D(P_{max})$	K	P_u	D_s	評価項目				短期基準せん断耐力P_0[kN]*
							P_y	P_u*(0.2/D_s)	2/3*P_{max}	P(1/150rad.)	
	unit	kN	rad.	kN/rad.	kN	−	kN	kN	kN	kN	kN
2層目	試験体3	104.9	0.060	4090.3	93.1	0.48	57.2	38.6	69.9	45.0	38.6
1層目		245.9	0.067	7932.6	224.5	0.52	139.1	86.6	163.9	58.0	58.0

*灰色セルで決定

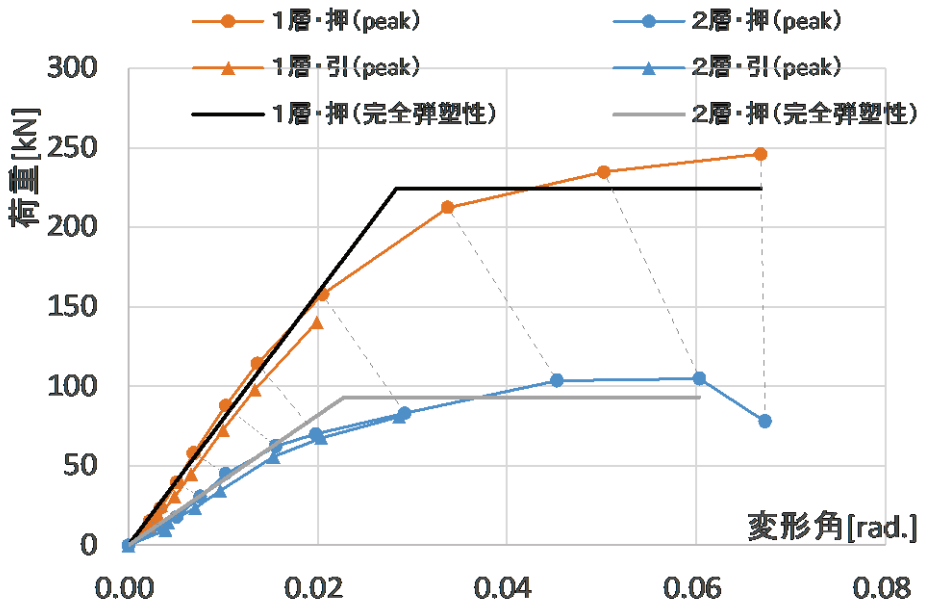


図 4.4-6　各変形角ピーク値および完全弾塑性モデル

〔点線は同時点のピークを示す。押し方向のみ示した〕

試験体３でも、1/150rad.付近から梁への金物、CLT のめり込みが確認され、1/100rad.以降に梁側面の亀裂も確認された。変形の進行と共に、亀裂、めり込みも進行した。1/30rad.以降、２層梁のせん断キーのビス位置で横引張による割裂が発生し、以降伸展した。また、1/20rad.付近では１層梁の上部（２層 CLT 脚部）中央付近のフィンガージョイントが曲げ破壊したのち、続いて最外層のラミナが剥離するように破壊した。また、２層右上の長さ調整用集成材にも引張力により亀裂が発生した。破壊が進行し荷重の上昇が見込めなくなったため、1/15rad.で加力を修了した。１，２層の荷重分担については、1/50rad.以降は２層の荷重が伸びず、最終的には １ 層の梁の曲げ破壊等の影響から、２層の荷重は低下し、最終的には P_2 より P_1 が大となった。

最大荷重は１層で 246kN、２層で 105kN であり、完全弾塑性モデルで評価すると、Pu は１層目 225kN、２層目 96kN、Ds は 0.52、0.48 である。短期基準せん断耐力は 58kN、39kN であり、１層目は 1/150rad.時点の荷重 $P_{150rad.}$ で、２層目は Pu*(0.2/Ds)で決定した。

（４）試験結果の比較

３体の試験結果の特性値を以下に示す。ただし、押し側の値を正として算出した。ただし、試験体１は 1/20rad.前に破壊したため平均値から除外し、同一変形角（1/15rad.)まで変形した試験体２，３の値から平均値を算出した。

表 4.4-7：試験結果　特性値のまとめ

		P_{max} 最大荷重	$D(P_{max})$ 最大荷重時変位	K 初期剛性	P_u 終局耐力	D_s 構造特性係数	評価項目				短期基準せん断耐力 P_0[kN]
							P_y	$P_u*(0.2/D_s)$	$2/3*P_{max}$	P(1/150rad.)	
	unit	kN	rad.	kN/rad.	kN	−	kN	kN	kN	kN	kN
2層目	試験体1	106.0	0.041	4594.2	93.2	0.54	62.1	34.7	70.7	38.5	34.7
	試験体2	111.0	0.056	4417.3	102.3	0.45	67.2	45.0	74.0	39.3	39.3
	試験体3	104.9	0.060	4090.3	93.1	0.48	57.2	38.6	69.9	45.0	38.6
	平均値**	108.0	0.058	4253.8	97.7	0.47	62.2	41.8	72.0	42.1	38.9
1層目	試験体1	195.0	0.036	7855.9	149.5	0.58	94.4	51.9	130.0	56.8	51.9
	試験体2	252.8	0.066	7818.2	225.8	0.53	146.4	85.5	168.5	51.4	51.4
	試験体3	245.9	0.067	7932.6	224.5	0.52	139.1	86.6	163.9	58.0	58.0
	平均値**	249.3	0.066	7875.4	225.1	0.52	142.8	86.0	166.2	54.7	54.7

*灰色セルで決定 **平均値は試験体2，3から算出

表に、二層 CLT せん断試験から得られた、150rad.時の水平力（$P_{150rad.}$）、最大荷重の 2/3(
2/3*P_{max})、降伏耐力（P_y）、および靭性を考慮した水平耐力（$P_u/(0.2D_s)$）の値を整理し、その最小値である短期基準せん断力を求めた。ただし、P_u：最大変形時の水平力、D_sは構造特性係数を表す。

試験体２，３の平均値として、１層目の最大荷重が 249.3kN（1/15kN)、２層目の最大荷重が 108kN（1/17rad.)、D_s 値は１層目 0.52、２層目 0.47、終局耐力 Pu は１層目で 225.1kN，２層目で 97.7kN であった。短期基準せん断耐力 P_0 は１層目で 54.7kN、２層目で 38.9kN であった。決定要因は特定変形角(1/150rad.)と終局耐力と靭性指標であった。試験体２，３については概ね前者で決定している。

目標とした変形角 1/15rad.まで実験を実施できた試験体２，３については、概ね必要せん断耐力（表 2.13 参照）を満たしていることが確認された。また、木造建築物で想定されている限界耐力計算の安全限界変形角である 1/30rad.を超える変形性能を有しており、耐力壁の構造特性係数 Ds については、約 0.5 であることが確認された。

（５）今後の課題

本実験以降の開発に向けて、実験内容を更に考察・改良すべき点として、

・せん断キーの回転による梁の横引張破壊の防止と剛性増加
・押し引きの荷重の差の原因
・シアプレートの効果
・大変形時の梁のねじれ（PC 鋼棒の位置と部材の芯位置のズレによる）

等が挙げられる。

4.5　破壊性状の詳細

4.4 で概要をのべた各試験体の破壊性状の詳細をまとめた。変形が目視され始める 1/200rad., 破壊の進行が見られる 1/50rad.,終局状態の 1/15rad.を例に写真を抜粋掲載し、主要接合部の変形性状を以下に示した。

（１）試験体１　破壊の進行（押・引）

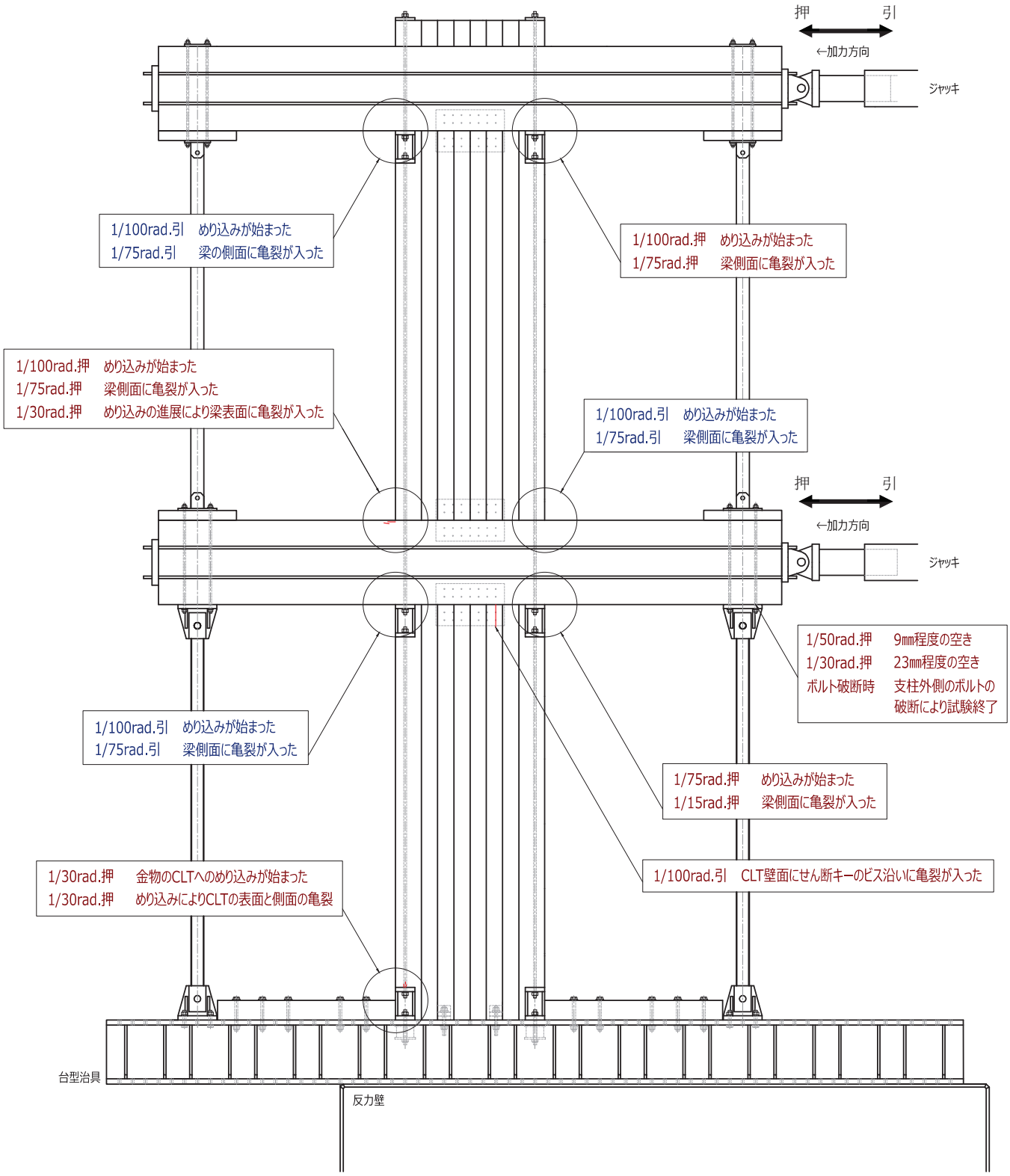


図 4.5-1　試験体１　破壊の進行

1/200rad.押し

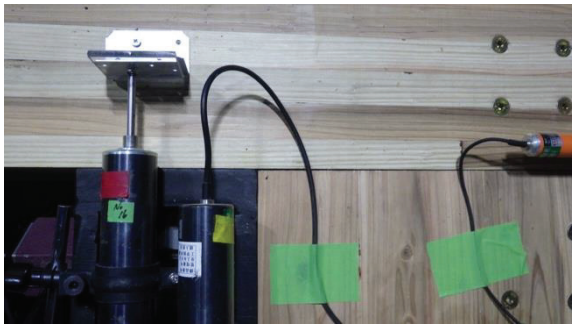
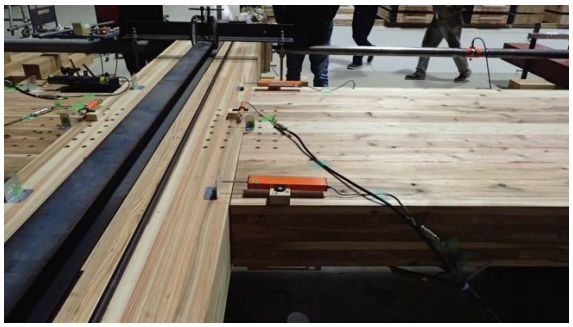
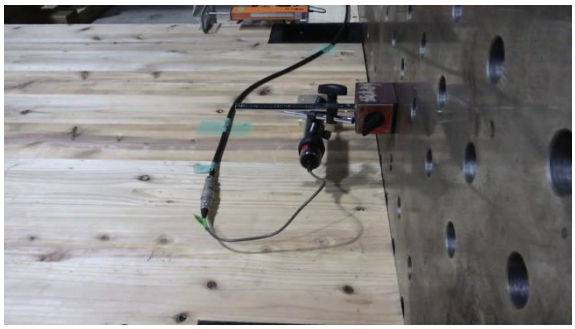
	
二層頭部（左）接合部の周辺	一層頭部（左）接合部の周辺
二層脚部（右）の浮き上がり	一層脚部（右）の浮き上がり
	
一層梁と二層 CLT 壁の接合部分	一層脚部の様子

図 4.5-2　試験体 1　破壊の進行　1/200rad. 押

1/200rad.引き

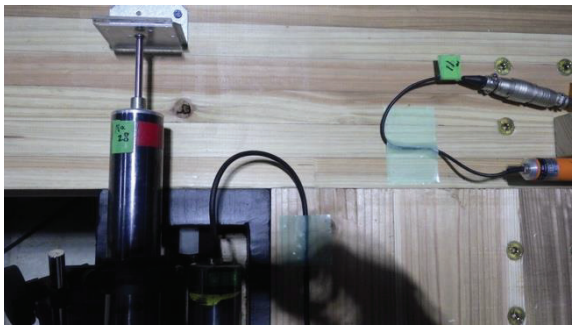
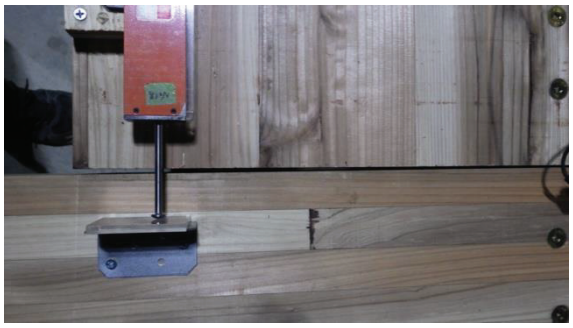
	
二層頭部（左）接合部の周辺	二層頭部（右）接合部の周辺
	
二層脚部（左）の浮き上がり	二層脚部の様子
一層脚部（左）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-3　試験体 1　破壊の進行　1/200rad. 引

1/50rad.押し

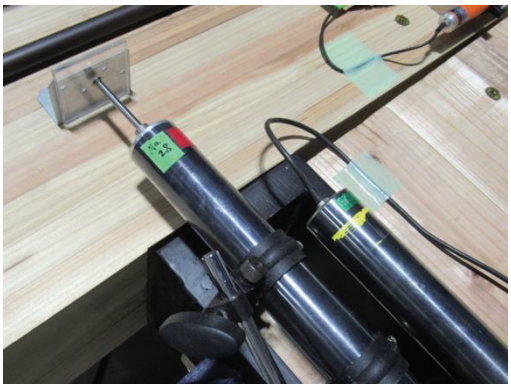
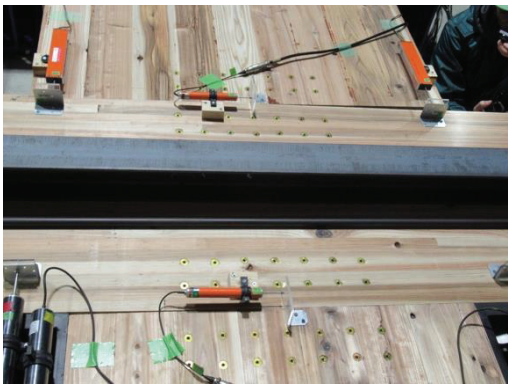
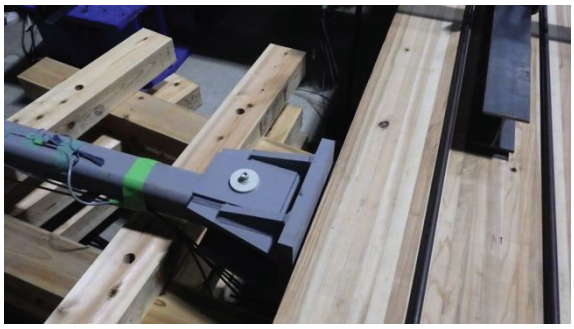
	
二層頭部（左）接合部の周辺	一層梁のせん断キーの周辺
二層脚部（左）めり込み	梁側にめり込みによる亀裂
	
一層右支柱と梁との空き	一層右支柱と梁との空き

図 4.5-4　試験体１　破壊の進行　1/50rad. 押

1/50rad.引き

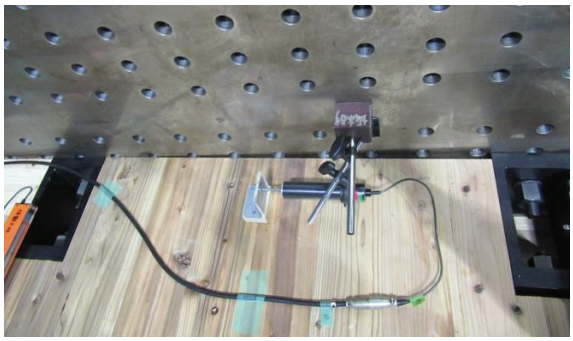
二層頭部（左）の梁へのめり込み	二層頭部の様子
二層脚部（左）の浮き上がり	二層脚部（右）のめりこみ
	
一層脚部（左）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-5　試験体１　破壊の進行　1/50rad. 引

1/30rad.押し

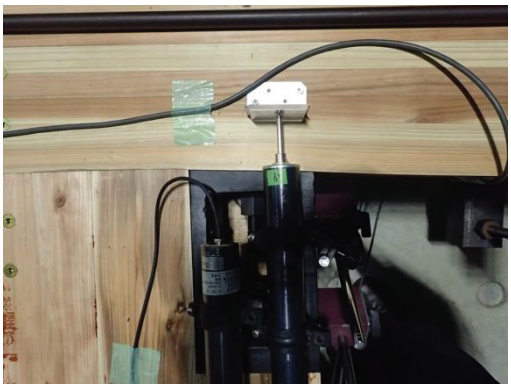
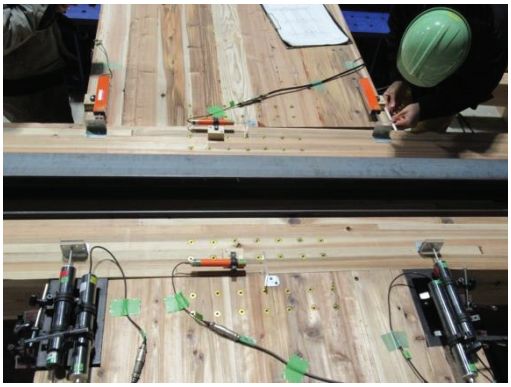
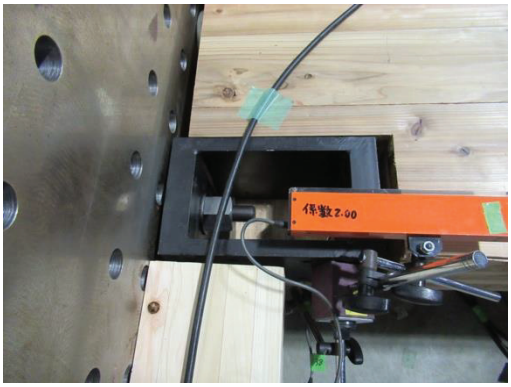
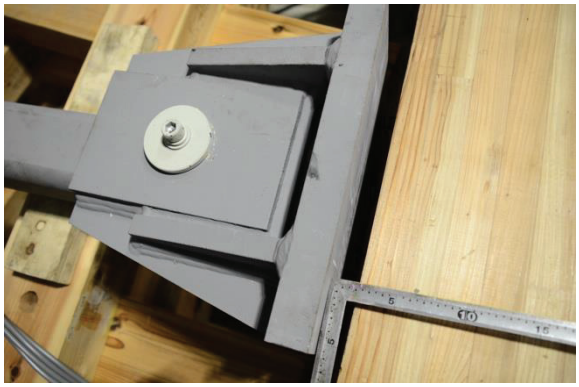
	
二層頭部（右）の梁へのめり込み	二層頭部の様子
	
二層脚部（左）のめりこみと亀裂	一層梁のせん断キーの周辺
	
一層脚部（右）の浮き上がり	一層右支柱と梁との空き

図 4.5-6　試験体１　破壊の進行　1/30rad. 押

試験終了時（1/20rad.に行く途中で一層目支柱のボルトが破断）

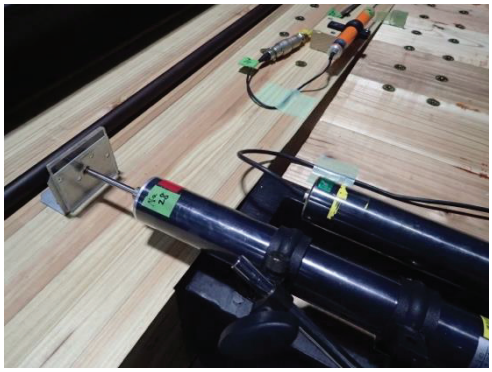
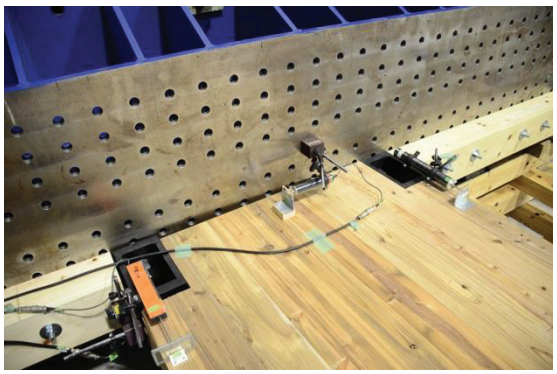
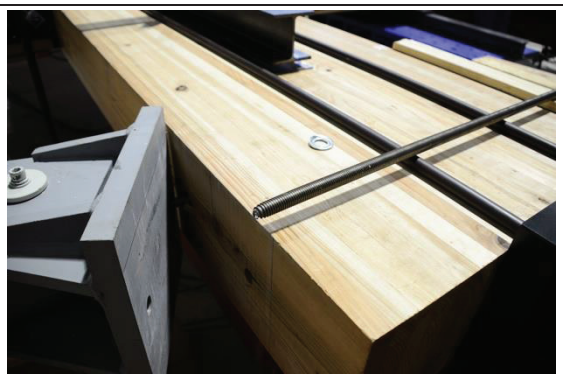
	
二層頭部（左）の空き	二層頭部の様子
二層脚部（左）のめりこみと亀裂	一層梁のせん断キーの周辺
	
一層脚部の（右）浮き上がり	一層脚部の様子
	
支柱ボルトの破断により試験終了	破断したボルト

図 4.5-7　試験体１　破壊の進行　終局（1/30～1/20rad.）

（２）　試験体２

試験体２　破壊の進行（押・引）

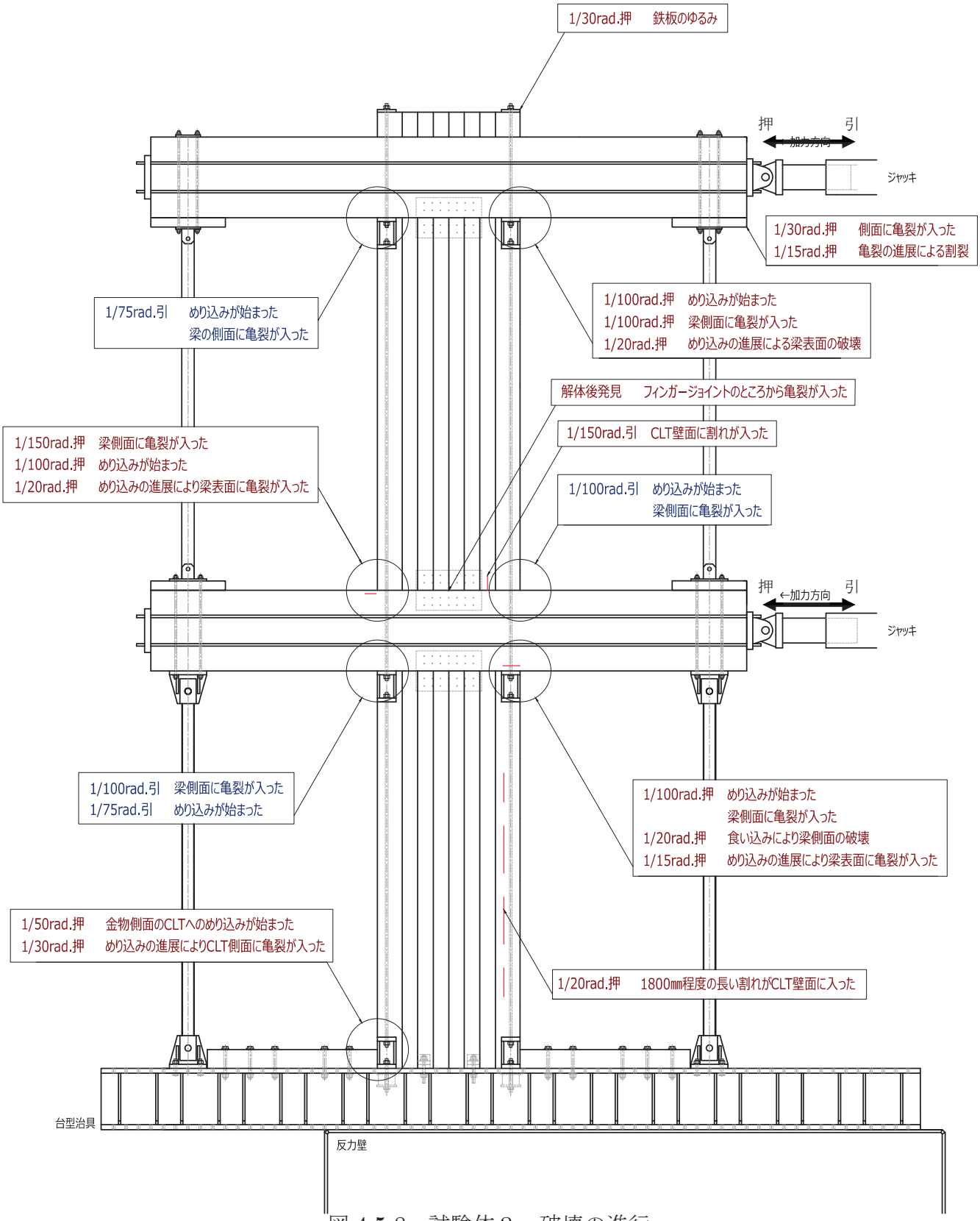


図 4.5-8　試験体２　破壊の進行

1/200rad.押し

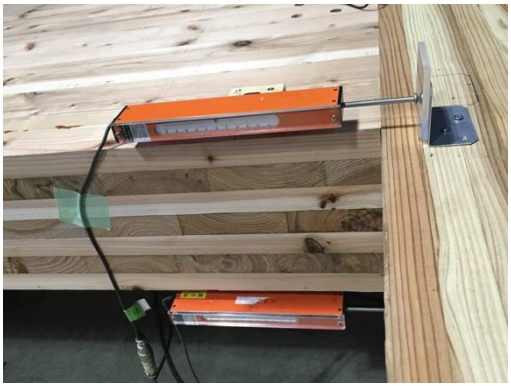
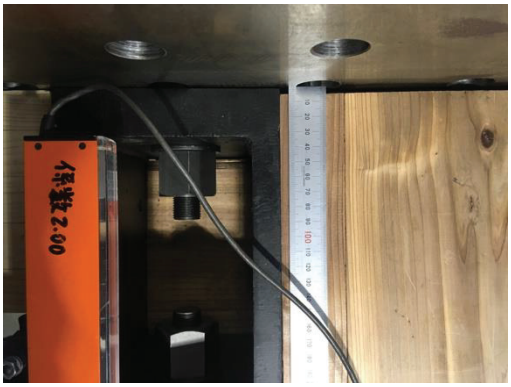
二層頭部（左）接合部の周辺	二層頭部の様子
	
二層脚部（左）の様子	二層脚部（右）の浮き上がり
	
一層脚部（右）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-9　試験体２　破壊の進行　1/200rad.押

1/200rad.引き

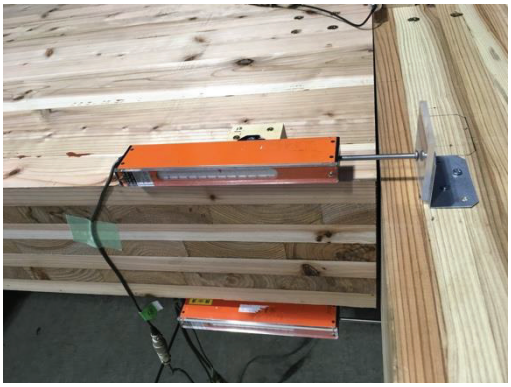
二層頭部（左）接合部の周辺	二層頭部（右）接合部の周辺
	
二層脚部（左）の浮き上がり	二層脚部の様子
一層脚部（左）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-10　試験体２　破壊の進行　1/200rad.引

1/50rad.押し

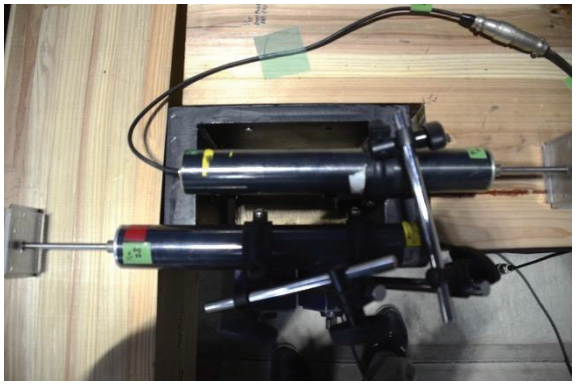
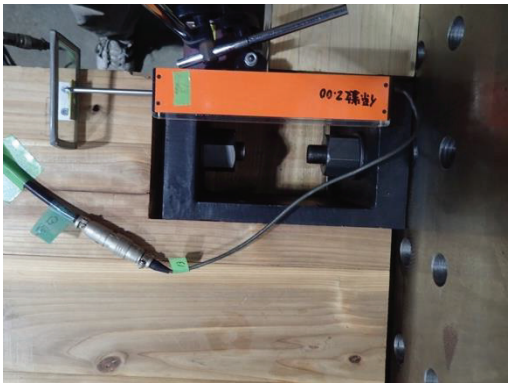
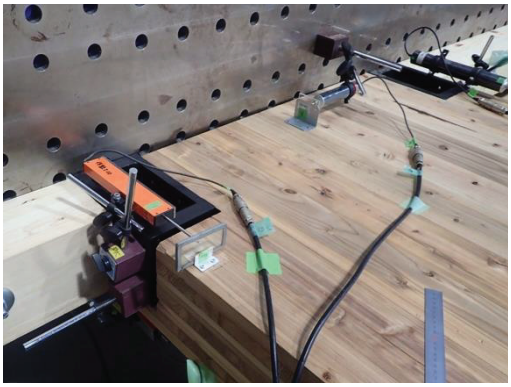
	
二層頭部（左）接合部の周辺	一層頭部（右）接合部の周辺
二層脚部（左）のめり込みと亀裂	二層脚部（右）の浮き上がり
	
一層脚部（右）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-11　試験体２　破壊の進行　1/50rad.押

1/50rad.引き

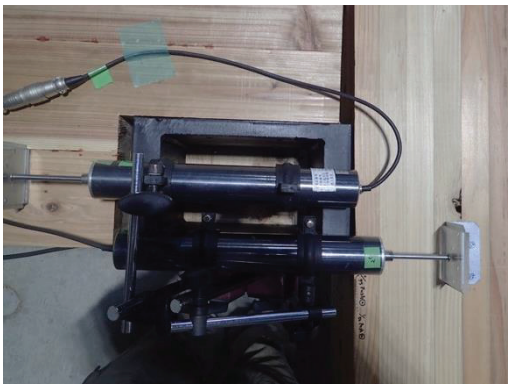
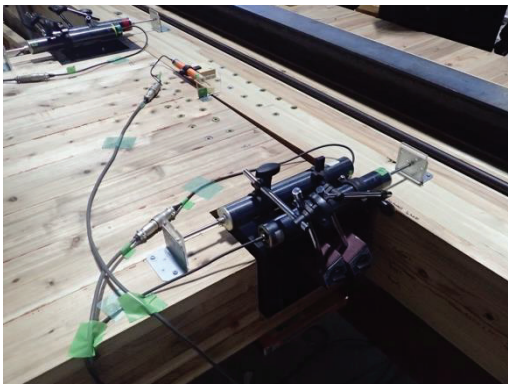
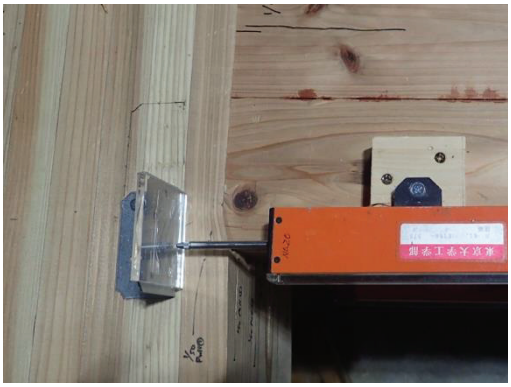
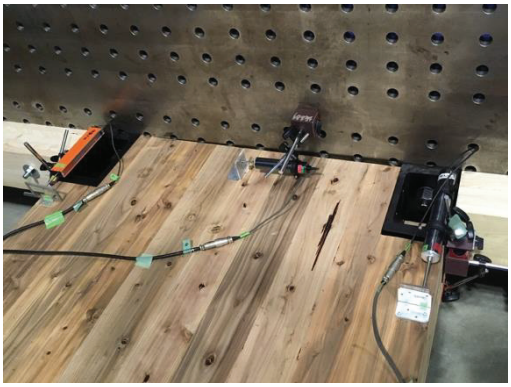
	
二層頭部（右）金物と木材の空き	二層頭部（右）の様子
	
二層脚部（右）のめり込み	二層脚部（右）のめり込み
	
一層脚部（左）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-12　試験体２　破壊の進行　1/50rad.引

1/30rad.押し

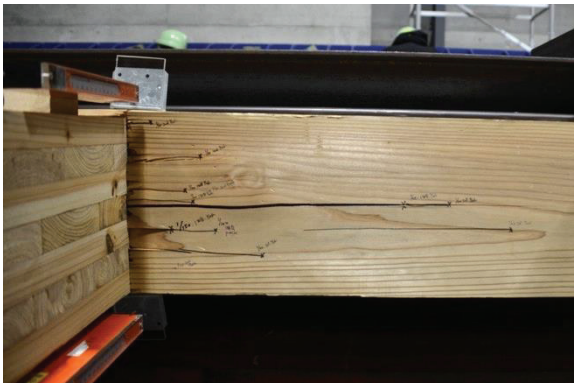
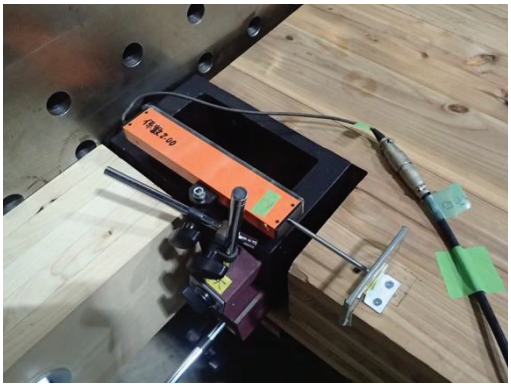
二層頭部金物（右）の梁へのめり込み	二層頭部の様子
	
二層脚部（左）の亀裂	二層脚部（右）の浮き上がり
	
一層 CLT の金物へのめり込み	一層脚部（右）の浮き上がり

図 4.5-13　試験体２　破壊の進行　1/30rad.押

1/15rad.押し

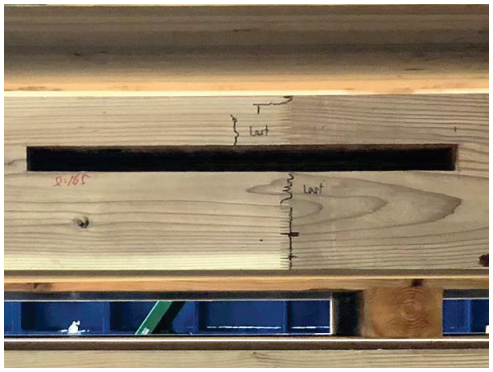
二層梁がねじれている	二層頭部金物（右）の梁へのめり込み
二層頭部の様子	長さ調整用集成材の損傷
	
一層梁の様子	一層梁フィンガージョイントの割れ（解体後）
一層脚部（右）の浮き上がり	一層壁に高さ方向の長い割れ

図 4.5-14　試験体２　破壊の進行　1/15rad.押（終局）

（３）　試験体３

試験体３　破壊の進行（押・引）

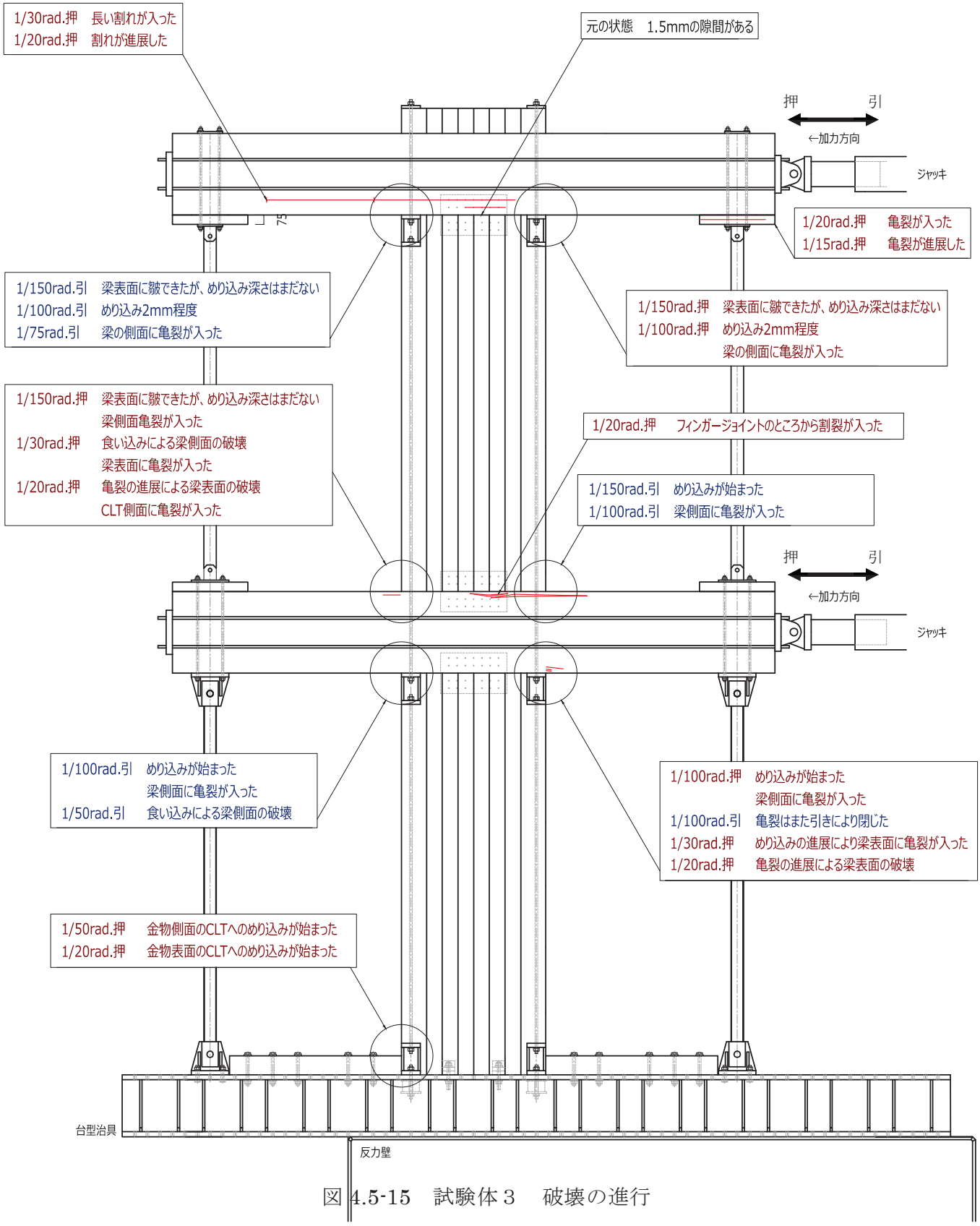


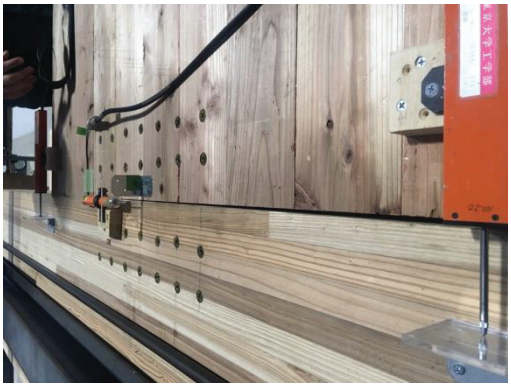
図 4.5-15　試験体３　破壊の進行

1/200rad.押し

二層頭部（左）接合部の周辺

二層脚部（右）の浮き上がり

一層頭部（左）接合部の周辺



二層脚部の様子

一層脚部（右）の浮き上がり

図 4.5-16　試験体３　破壊の進行　1/200rad.押

1/200rad.引き

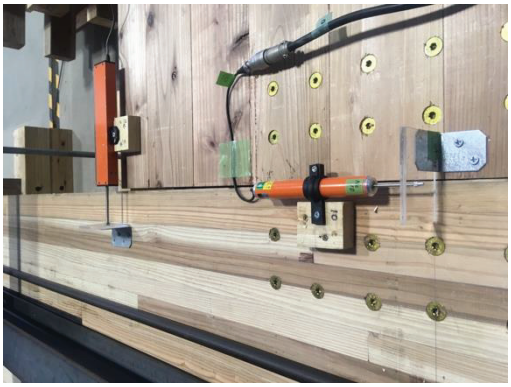
二層脚部（左）の浮き上がり	二層頭部（右）接合部の周辺
	
二層脚部の様子	一層頭部（右）接合部の周辺
一層脚部（左）の様子	一層脚部（右）の様子

図 4.5-17　試験体３　破壊の進行　1/200rad.引

1/50rad.押し

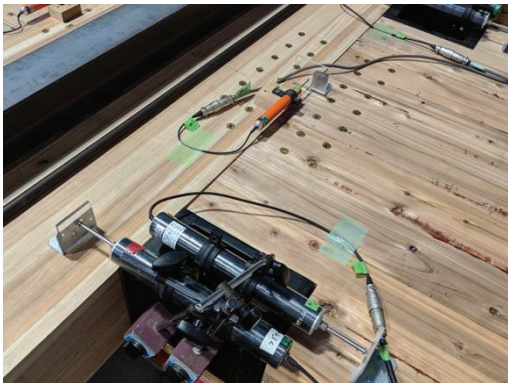
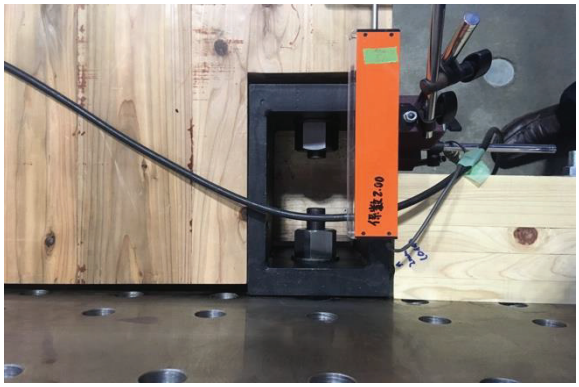
二層頭部（左）の空き	二層頭部（右）のめり込み
二層脚部（左）のめり込み	二層脚部（左）の亀裂
	
一層頭部の様子	一層脚部（右）の様子

図 4.5-18　試験体３　破壊の進行　1/50rad.押

1/50rad.引き

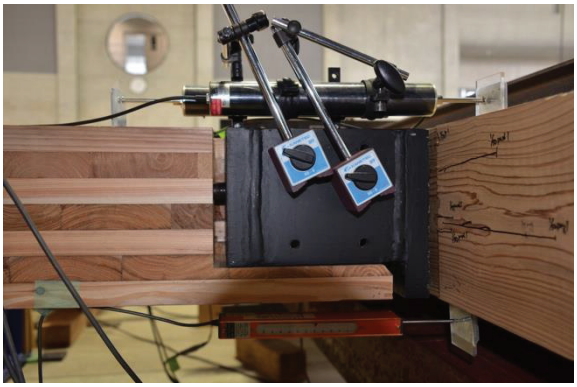
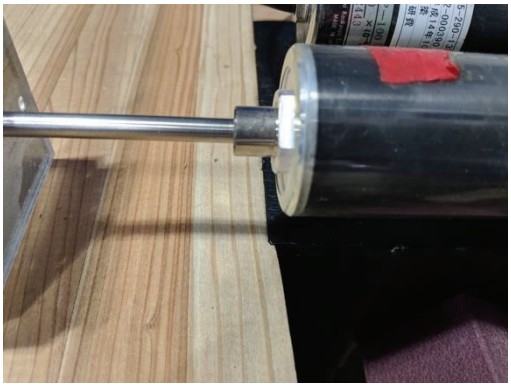
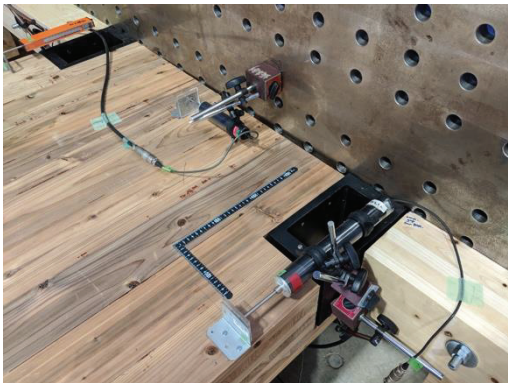
三層脚部の浮き上がり	二層頭部の様子
	
二層頭部（右）の金物の空き	一層頭部（左）金物の梁へのめり込み
	
一層脚部（左）の浮き上がり	一層脚部の様子

図 4.5-19　試験体３　破壊の進行　1/50rad.引

1/30rad.押し

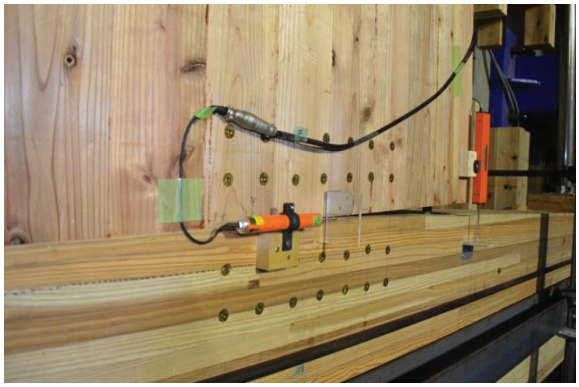
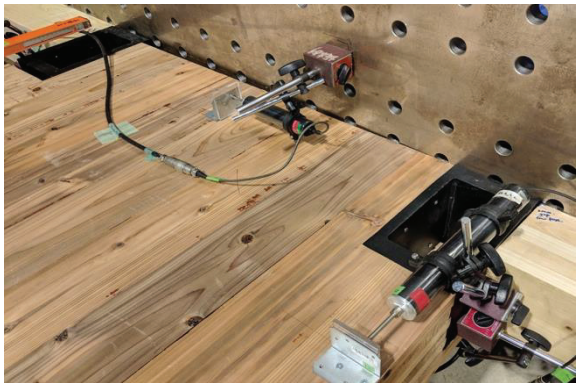
二層梁の長い割れ	二層梁せん断キー位置から入った割れ
	
二層脚部（左）のめり込み	二層脚部の様子
	
一層脚部（左）のめり込み	一層脚部（右）の様子

図 4.5-20　試験体３　破壊の進行　1/30rad.押

1/15rad.押し

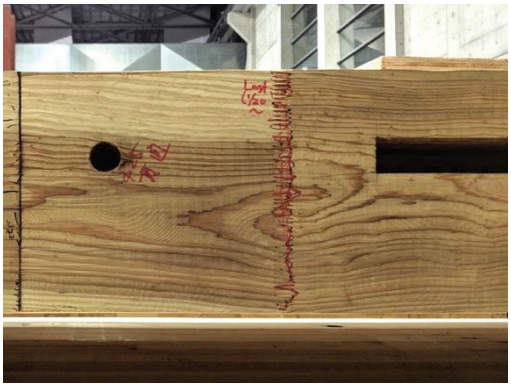
二層梁の曲がりとねじれ	2F 梁　せん断キーのビスでの割裂の進展
長さ調整用集成材の損傷	二層（上）と一層（下）のめり込み跡（解体後）
	
2F 梁フィンガージョイント破壊後　割裂の進展	フィンガージョイントの割れ（解体後）

図 4.5-21　試験体３　破壊の進行　1/15rad.押（終局）

一層頭部（右）のめり込み	二層脚部に CLT の割れ
一層 CLT 脚部（左）のめり込み	一層 CLT 脚部（左）の側面のめり込み

図 4.5-22　試験体３　破壊の進行　1/15rad.押（終局）

4.6　接合部等の変位および鋼製柱軸力の測定結果

その他の変位および荷重の計測結果を示す。試験体２，３についてはグラフも示した。

（１）試験体１

・試験体１　押し側

表 4.6-1　試験体１（押し）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	関連変位計No	変形角／下位分類	押	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	ボルト破断時
三層目脚部	3F脚部右	浮き上がり	31	表		0.19	0.30	0.49	0.94	1.32	2.21	2.56	3.19	6.14	5.16
			48	裏		0.28	0.40	0.63	1.18	1.70	2.99	3.60	4.77	9.70	9.22
	3F脚部左	めり込み	30	表		0.14	0.16	0.17	0.22	0.32	0.48	0.66	0.95	2.01	2.36
			49	裏		0.09	0.10	0.11	0.12	0.16	0.11	0.19	0.13	-0.35	-0.54
二層目頭部	2F頭部右	めり込み	29	表		0.21	0.29	0.51	0.94	1.24	2.90	4.64	6.91	11.42	10.64
			44	裏		0.86	1.04	1.26	1.61	2.35	2.95	5.21	6.52	7.28	6.66
	2F頭部左	空き	28	A		0.61	0.74	0.85	1.11	1.38	1.79	2.74	2.86	2.87	2.85
			45	B(B1+B2)		0.94	1.40	2.23	3.49	4.01	8.37	12.46	17.18	25.64	25.38
			26	C		0.58	0.98	1.70	2.74	3.37	6.43	10.00	13.71	20.02	18.13
二層目脚部	2F脚部右	浮き上がり	19	表		1.02	1.48	2.15	3.35	4.05	7.39	10.56	14.11	19.68	18.72
			42	裏		1.31	1.73	2.42	3.59	4.45	7.79	11.15	14.66	20.32	18.54
	2F脚部左	めり込み	18	表		0.61	0.65	0.75	0.96	1.45	2.65	5.09	7.40	10.84	10.90
			43	裏		0.19	0.23	0.29	0.50	0.78	2.28	5.34	8.08	12.28	12.62
一層目頭部	1F頭部右	めり込み	17	表		0.21	0.31	0.43	0.67	0.62	1.40	1.90	2.92	5.72	5.10
			40	裏		0.13	0.15	0.23	0.38	0.53	0.97	1.59	2.85	4.38	3.94
	1F頭部左	空き	16	A		0.78	0.73	0.30	0.04	0.32	0.13	0.07	0.95	2.58	4.96
			41	B(B1+B2)		0.38	0.45	0.72	1.18	1.91	2.94	3.72	6.02	10.18	12.04
			14	C		0.00	0.10	0.81	1.45	1.98	2.96	3.50	5.06	8.03	9.37
一層目脚部	1F脚部右	浮き上がり		A		--	--	--	--	2.00	2.50	3.00	4.00	10.00	14.00
			38	B		0.66	0.94	1.15	1.28	1.36	1.84	2.36	3.29	6.88	8.85
			13	C		0.59	0.95	1.57	2.49	3.21	5.33	8.11	12.97	19.94	23.88
	1F脚部左	めり込み	12	表		0.14	0.25	0.35	0.47	1.01	1.31	1.42	2.07	3.58	3.92
			39	裏		計測器不調									

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	関連変位計No	変形角／下位分類	押	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	ボルト破断時
二層目頭部	横移動（左）	11	表		0.21	0.39	0.59	0.88	0.75	1.21	1.81	2.88	3.59	4.73
		36	裏		0.34	0.47	0.68	1.05	1.34	1.88	2.76	4.10	5.07	6.10
二層目脚部	横移動（左）	10	表		0.13	0.17	0.19	0.22	0.27	0.33	0.35	0.39	0.44	0.35
		35	裏		0.26	0.41	0.55	0.73	0.51	0.85	1.00	1.14	1.46	0.66
一層目頭部	横移動（左）	09	表		0.01	-0.05	-0.09	-0.18	0.47	1.26	2.52	3.74	4.94	6.05
		34	裏		-0.11	-0.21	-0.24	-0.40	0.39	1.24	2.57	3.92	5.12	5.96
一層目脚部	横移動（左）	08	表		0.33	1.11	1.89	2.45	1.89	2.55	4.16	5.50	6.41	6.81
		32	裏		0.41	1.21	1.90	2.45	1.72	2.28	3.94	5.17	5.91	6.09

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	ボルト破断時
試験体脚部PC鋼棒	右	引張力（+）圧縮力（−）	03			6.2	9.7	20.5	39.4	60.1	106.9	157.2	247.6	349.8	374.2
	左		02			-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-0.6	-0.3	0.7	2.2	3.2	4.0
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			15.7	22.1	38.0	65.1	88.2	130.9	153.3	167.1	178.8	2.9
	左		50,51,56,57			-8.5	-10.3	-11.6	-14.2	-12.6	-23.0	-32.8	-46.4	-79.6	-150.1
二層鋼製支柱	右		05			5.3	8.2	14.3	27.1	37.5	61.2	73.7	80.1	88.1	20.5
	左		04			-0.1	0.3	2.2	6.2	9.2	14.1	14.4	11.3	3.9	-36.1

単位：kN

歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	ボルト破断時
一層鋼製支柱	右	引張力（+）圧縮力（−）	52	表１		-2.7	1.1	20.3	64.9	112.2	171.8	199.6	226.4	250.7	6.6
			53	表２		-4.1	-5.8	16.5	72.0	118.5	196.3	232.3	263.5	299.4	1.6
			表平均値			-3.4	-2.3	18.4	68.4	115.3	184.0	215.9	244.9	275.0	4.1
			54	裏１		34.1	42.3	53.9	61.6	63.0	87.7	104.5	106.2	107.2	0.8
			55	裏２		35.5	50.9	61.3	61.9	59.4	67.6	76.7	72.4	57.7	2.5
			裏平均値			34.8	46.6	57.6	61.7	61.2	77.7	90.6	89.3	82.5	1.6
			右支柱平均値			15.7	22.1	38.0	65.1	88.2	130.9	153.3	167.1	178.8	2.9
	左		50	表１		-9.3	-11.3	-12.4	-10.2	-8.8	-18.4	-20.6	-32.2	-75.0	-174.8
			51	表２		2.7	3.8	3.0	-1.9	-2.7	-17.0	-32.4	-37.7	-72.6	-164.1
			表平均値			-3.3	-3.7	-4.7	-6.0	-5.8	-17.7	-26.5	-34.9	-73.8	-169.5
			56	裏１		-7.1	-10.4	-14.0	-22.5	-16.8	-27.2	-43.4	-55.9	-71.7	-110.5
			57	裏２		-20.1	-23.4	-23.1	-22.0	-22.3	-29.4	-34.9	-60.0	-99.0	-150.9
			裏平均値			-13.6	-16.9	-18.6	-22.3	-19.5	-28.3	-39.2	-57.9	-85.4	-130.7
			左支柱平均値			-8.5	-10.3	-11.6	-14.2	-12.6	-23.0	-32.8	-46.4	-79.6	-150.1

単位：kN

・試験体１　引き側

表 4.6-2　試験体１（引き）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	関連変位計No	変形角 下位分類	引	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
三層目脚部	3F脚部右	めり込み	31	表		0.08	0.10	0.14	0.19	0.27	0.43	0.53	0.75
			48	裏		0.02	0.02	0.01	-0.01	0.02	-0.03	-0.08	-0.16
	3F脚部左	浮き上がり	30	表		0.30	0.38	0.51	0.73	1.01	1.46	1.69	2.12
			49	裏		0.45	0.58	0.82	1.19	1.62	2.52	3.02	3.97
二層目頭部	2F頭部右	空き	29	A		0.33	0.42	0.63	0.85	1.17	1.43	2.10	2.49
			44	B(B1+B2)		0.88	1.37	2.38	3.60	4.29	7.51	10.60	17.98
			27	C		0.34	0.52	1.08	1.81	2.80	5.39	8.36	13.38
	2F頭部左	めり込み	28	表		0.37	0.45	0.63	0.84	1.11	2.19	3.62	7.37
			45	裏		0.53	0.59	0.71	0.89	1.65	2.45	4.67	6.48
二層目脚部	2F脚部右	めり込み	19	表		0.04	0.05	0.15	0.30	0.71	1.52	3.58	6.52
			42	裏		0.10	0.16	0.25	0.38	0.56	1.43	3.08	6.96
	2F脚部左	浮き上がり	18	表		1.22	1.65	2.33	3.21	3.83	6.39	9.00	13.73
			43	裏		1.23	1.60	2.35	3.45	4.52	7.61	10.83	15.57
一層目頭部	1F頭部右	空き	17	A		-0.04	-0.15	-0.37	-0.34	0.01	0.24	0.80	1.82
			40	B(B1+B2)		0.28	0.41	0.53	1.01	1.55	2.60	3.63	6.10
			15	C		0.41	0.63	1.12	1.82	2.17	3.27	3.84	5.40
	1F頭部左	めり込み	16	表		0.03	0.10	0.21	0.34	0.38	0.92	1.72	3.08
			41	裏		0.21	0.26	0.43	0.69	0.93	1.81	3.05	5.09
一層目脚部	1F脚部右	めり込み	13	表		0.05	0.10	0.27	0.44	0.75	0.99	0.88	1.17
			38	裏		-0.02	0.00	0.00	-0.11	-0.11	-0.18	-0.04	0.10
	1F脚部左	浮き上がり		A		--	--	--	--	--	3.00	4.00	4.00
			39	B		0.66	0.87	1.18	1.60	1.58			
			12	C		0.94	1.18	1.67	2.77	3.45	5.58	7.98	12.87

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	関連変位計No	変形角 下位分類	引	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
二層目頭部	横移動（右）	11	表		-0.18	-0.26	-0.25	-0.23	0.28	0.37	0.53	1.05
		36	裏		0.13	0.15	0.26	0.38	0.45	0.77	1.18	1.74
二層目脚部	横移動（右）	10	表		0.04	0.07	0.14	0.24	0.28	0.43	0.51	0.54
		35	裏		-0.14	-0.18	-0.19	-0.19	0.22	0.31	0.57	0.85
一層目頭部	横移動（右）	9	表		0.06	0.15	0.24	0.55	0.38	1.10	1.49	2.57
		34	裏		0.13	0.19	0.23	0.53	0.23	0.99	1.45	2.79
一層目脚部	横移動（右）	8	表		1.67	2.10	2.59	2.87	3.98	4.21	3.50	3.38
		32	裏		1.49	1.92	2.51	2.87	2.57	3.02	3.44	3.89

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角 下位分類	引	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
試験体脚部PC鋼棒	右	引張力（＋）圧縮力（−）	03			0.0	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.5	0.6	0.5
	左		02			7.3	11.2	19.9	36.3	57.1	99.1	144.1	242.4
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			-6.3	-8.1	-9.3	-13.1	-17.4	-28.6	-36.5	-55.3
	左		50,51,56,57			13.1	19.0	34.4	55.0	77.8	112.2	140.2	155.8
二層鋼製支柱	右		05			-0.1	0.6	2.0	4.3	6.2	8.6	9.1	7.7
	左		04			5.6	9.1	16.9	27.8	37.9	56.4	69.5	77.7

単位：kN

歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角 下位分類	引	1/600	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
一層鋼製支柱	右	引張力（＋）圧縮力（−）	52	表１		2.1	5.8	3.8	-9.1	-7.4	-32.7	-57.5	-86.6
			53	表２		5.2	9.6	10.7	7.4	8.2	-10.4	-18.7	-44.5
			表平均値			3.6	7.7	7.3	-0.8	0.4	-21.6	-38.1	-65.6
			54	裏１		-15.1	-23.1	-24.7	-20.3	-27.2	-24.2	-15.1	-21.7
			55	裏２		-17.5	-24.7	-27.2	-30.2	-43.2	-47.0	-54.7	-68.2
			裏平均値			-16.3	-23.9	-26.0	-25.3	-35.2	-35.6	-34.9	-44.9
			右支柱平均値			-6.3	-8.1	-9.3	-13.1	-17.4	-28.6	-36.5	-55.3
	左		50	表１		8.5	13.2	31.3	56.6	78.1	124.0	165.5	196.8
			51	表２		-7.0	-6.3	14.3	50.6	90.2	165.2	214.1	252.9
			表平均値			0.7	3.4	22.8	53.6	84.1	144.6	189.8	224.9
			56	裏１		16.9	22.0	32.2	46.2	75.0	97.0	112.7	113.5
			57	裏２		34.0	47.0	59.7	66.8	67.9	62.7	68.4	59.9
			裏平均値			25.5	34.5	45.9	56.5	71.5	79.9	90.6	86.7
			左支柱平均値			13.1	19.0	34.4	55.0	77.8	112.2	140.2	155.8

単位：kN

（２）試験体２

・試験体２　押し側

表 4.6-3　試験体２（押し）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	関連変位計No	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
三層目脚部	3F脚部右	浮き上がり	31	表		0.10	0.27	0.45	0.67	1.30	2.30	2.40	3.80	5.70	7.40
			48	裏		0.40	0.58	0.85	1.24	2.20	2.75	3.67	4.99	7.09	9.04
	3F脚部左	めり込み	30	表		0.20	0.22	0.27	0.37	0.58	0.68	0.84	0.89	1.11	1.20
			49	裏		0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.06	0.01	0.02	0.12
二層目頭部	2F頭部右	めり込み	29	表		0.01	0.18	0.60	1.20	3.10	5.10	9.11	18.33	26.84	34.39
			44	裏		1.00	1.30	1.75	2.10	3.00	4.14	6.16	11.98	16.36	19.34
	2F頭部左	空き	28	A		0.50	0.80	1.00	1.30	1.70	2.20	3.50	6.50	10.60	15.10
			45	B(B1+B2)		1.15	1.88	3.20	4.95	9.60	14.40	22.10	32.44	40.68	47.26
			26	C		1.00	1.50	2.60	3.90	7.90	11.40	16.30	21.88	24.91	25.86
二層目脚部	2F脚部右	浮き上がり	19	表		1.50	2.20	3.40	4.80	8.30	11.80	17.00	30.00	38.50	47.00
			42	裏		1.30	2.10	3.43	4.90	8.50	11.90	17.58	25.72	35.18	43.64
	2F脚部左	めり込み	18	表		0.70	0.90	1.20	1.66	3.40	5.50	9.52	16.64	22.02	26.32
			43	裏		0.57	0.70	0.98	1.39	3.10	5.04	8.35	13.46	16.52	18.92
一層目頭部	1F頭部右	めり込み	17	表		0.08	0.25	0.62	1.07	2.30	3.55	6.52	12.92	19.73	23.97
			40	裏		0.34	0.58	1.05	1.64	2.86	4.30	7.94	16.66	26.56	34.80
	1F頭部左	空き	16	A		0.53	0.45	0.24	0.26	-0.02	-0.10	0.76	3.03	8.15	13.70
			41	B(B1+B2)		0.99	1.37	1.90	2.46	3.52	4.61	7.17	12.72	19.48	27.18
			14	C		0.11	0.50	1.30	1.90	3.20	4.40	6.32	9.98	12.89	16.04
一層目脚部	1F脚部右	浮き上がり		A		1.00	1.50	1.50	2.00	2.00	3.00	5.00	9.50	15.00	15.00
			38	B		1.20	1.44	1.70	2.04	2.56	3.08	4.05	6.93	10.39	11.75
			13	C		1.75	2.60	3.70	4.84	7.00	9.10	13.40	21.08	32.70	46.26
	1F脚部左	めり込み	12	表		0.15	0.28	0.46	0.65	1.02	1.39	2.80	5.42	8.66	12.14
			39	裏		計測器不調									

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	関連変位計No	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
二層目頭部	横移動（左）	11	表		0.28	0.52	0.82	1.15	1.61	2.24	3.08	5.11	5.56	6.07
		36	裏		0.19	0.33	0.65	0.96	1.43	2.14				
二層目脚部	横移動（左）	10	表		0.09	0.16	0.24	0.33	0.42	0.46	0.63	0.95	1.23	1.56
		35	裏		0.07	0.13	0.22	0.29	0.39	0.37	0.52	0.98	2.22	3.58
一層目頭部	横移動（左）	9	表		0.18	0.33	0.66	1.00	1.45	1.99	2.68	3.26	4.37	5.98
		34	裏		0.08	0.24	0.64	1.02	1.47	2.01	2.74	3.18	4.44	5.60
一層目脚部	横移動（左）	8	表		0.49	0.77	1.06	1.28	2.29	3.53	4.81	3.99	4.99	5.72
		32	裏		0.55	0.87	1.04	1.20	2.13	3.38	4.74	4.61	5.85	6.75

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
試験体脚部 PC鋼棒	右	引張力（＋）圧縮力（－）	03			19.5	31.1	52.5	76.3	124.5	170.1	257.1	356.6	371.2	375.8
	左		02			-0.5	0.5	2.1	2.8	4.7	4.8	-0.1	1.4	1.6	1.6
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			8.7	22.7	46.0	71.8	120.8	152.9	196.6	259.2	313.4	338.1
	左		50,51,56,57			-11.8	-15.3	-20.5	-25.8	-37.0	-42.2	-42.3	-30.3	-4.5	11.1
二層鋼製支柱	右		05			2.6	9.0	20.3	32.3	58.0	74.3	95.9	130.6	157.5	171.1
	左		04			-3.7	-2.3	0.5	1.9	6.6	11.7	19.6	36.9	53.6	63.9

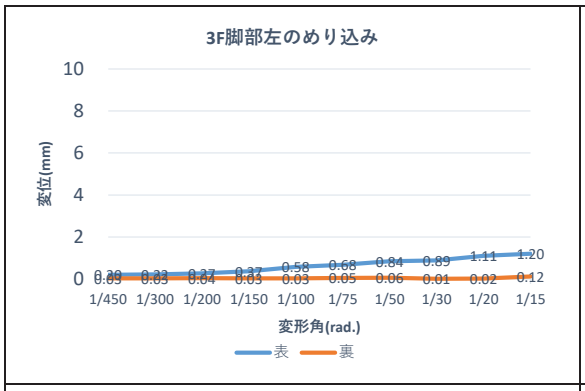
単位：kN

歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

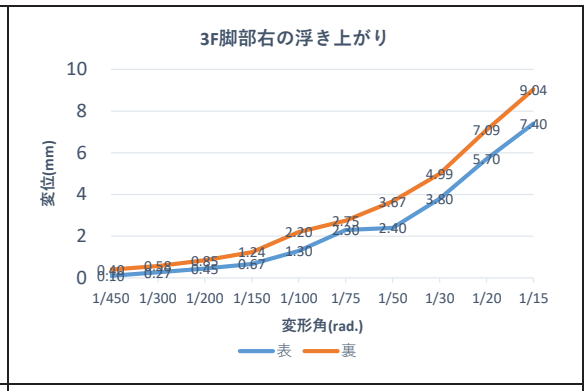
分類	部位	性質	関連変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
一層鋼製支柱	右	引張力（＋）圧縮力（－）	52	表１		0.5	7.4	30.8	67.6	136.6	181.2	243.3	337.3	408.2	439.6
			53	表２		-7.4	-11.5	6.6	52.0	140.7	200.7	285.9	407.4	504.7	545.1
			表平均値			-3.4	-2.1	18.7	59.8	138.7	190.9	264.6	372.3	456.5	492.3
			54	裏１		16.2	34.6	57.5	73.4	101.4	117.7	141.8	179.8	216.1	234.2
			55	裏２		25.6	60.5	89.3	94.3	104.5	112.2	115.5	112.2	124.5	133.6
			裏平均値			20.9	47.6	73.4	83.8	102.9	114.9	128.7	146.0	170.3	183.9
			右支柱平均値			8.7	22.7	46.0	71.8	120.8	152.9	196.6	259.2	313.4	338.1
	左		50	表１		-6.3	-9.1	-12.6	-17.0	-29.4	-34.6	-32.2	-9.9	4.1	19.8
			51	表２		-3.3	-5.2	-8.0	-12.4	-23.6	-30.2	-36.0	-27.2	-3.3	-3.3
			表平均値			-4.8	-7.1	-10.3	-14.7	-26.5	-32.4	-34.1	-18.6	0.4	8.2
			56	裏１		-17.3	-21.4	-28.9	-35.2	-44.8	-49.5	-52.2	-52.0	-14.8	0.8
			57	裏２		-20.3	-25.6	-32.4	-38.5	-50.0	-54.4	-48.7	-32.2	-4.1	27.2
			裏平均値			-18.8	-23.5	-30.7	-36.8	-47.4	-52.0	-50.4	-42.1	-9.5	14.0
			左支柱平均値			-11.8	-15.3	-20.5	-25.8	-37.0	-42.2	-42.3	-30.3	-4.5	11.1

単位：kN

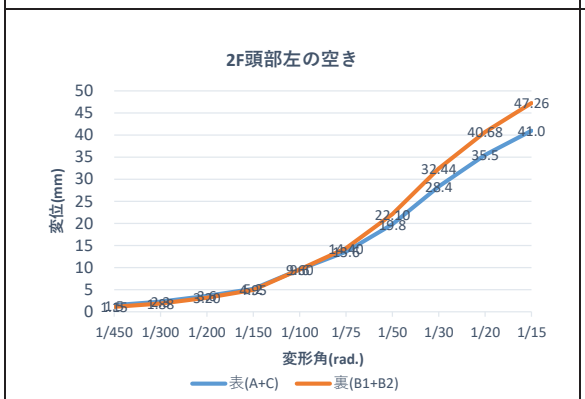
以下に各接合部の計測結果を示す（表・裏）。



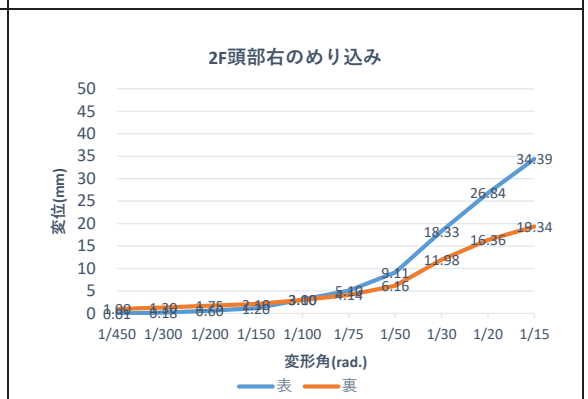
３Ｆ脚部左のめり込み



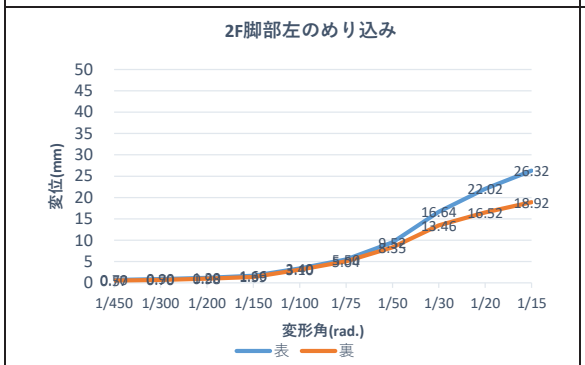
３Ｆ脚部右の浮き上がり



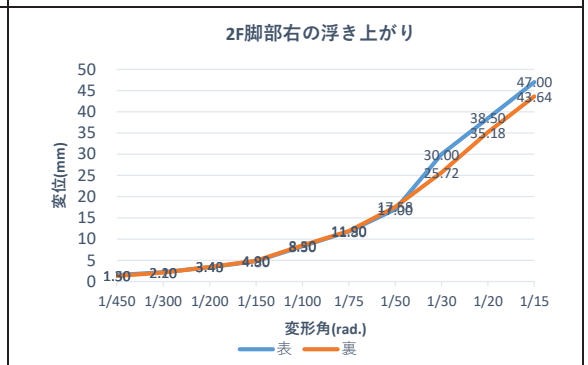
２Ｆ頭部左の空き



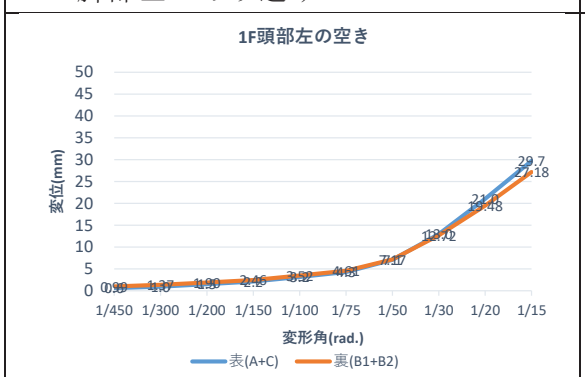
２Ｆ頭部右のめり込み



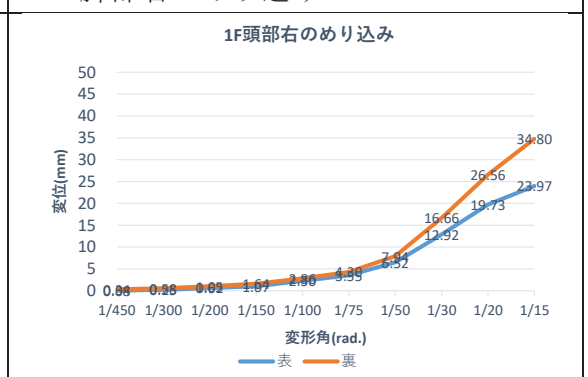
２Ｆ脚部左のめり込み



２Ｆ脚部右のめり込み



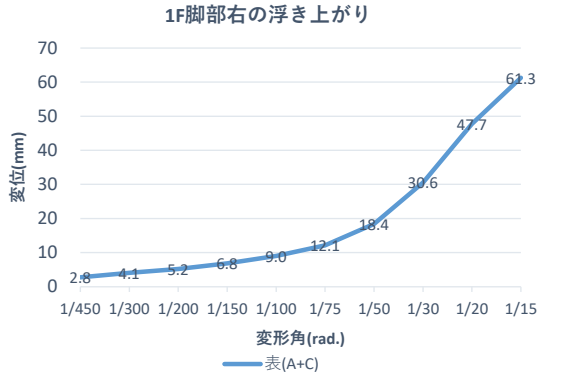
１Ｆ頭部左の空き



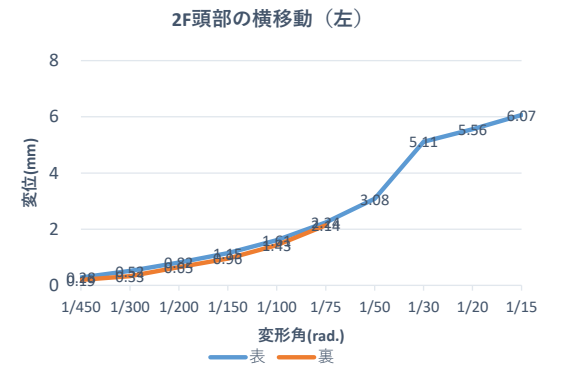
１Ｆ頭部右のめり込み

図 4.6-1　試験体２　押し側　変位・荷重計測

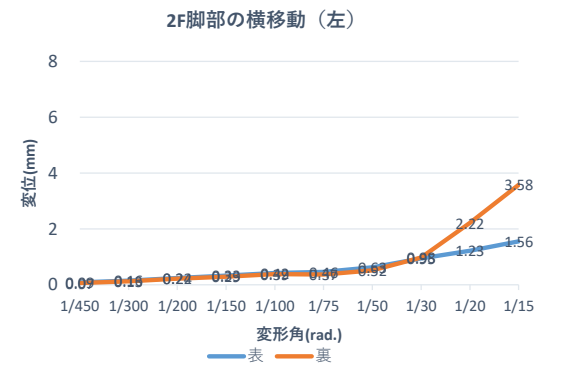
１Ｆ脚部左のめり込み



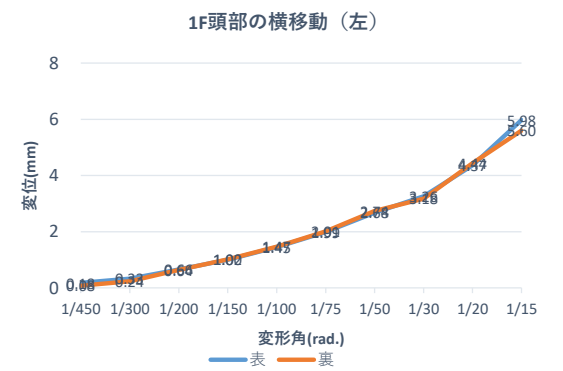
１Ｆ脚部右の浮き上がり



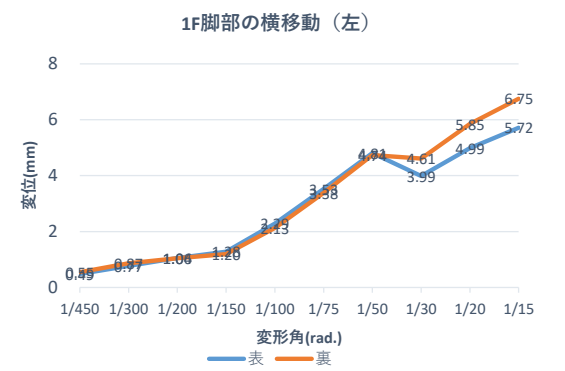
２Ｆ頭部の横移動（左）



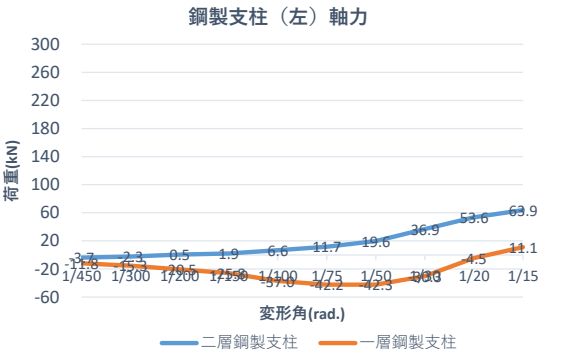
２Ｆ脚部の横移動（左）



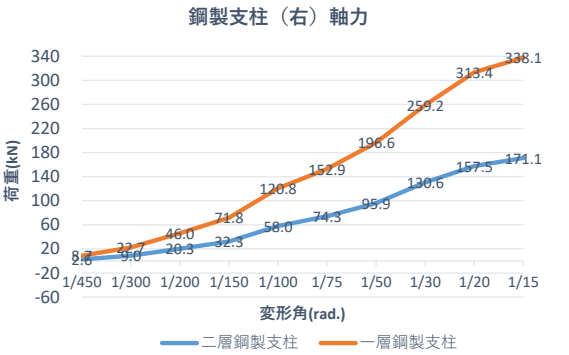
１Ｆ頭部の横移動（左）



１Ｆ脚部の横移動（左）

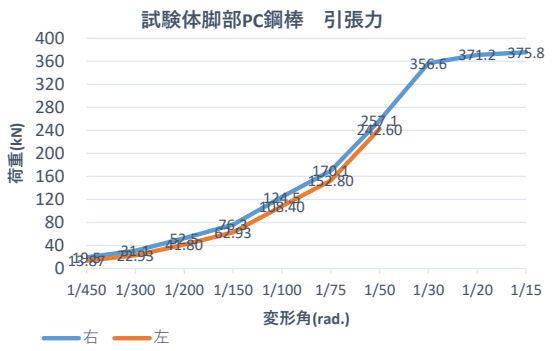


鋼製支柱（左）軸力



鋼製支柱（右）軸力

図 4.6-2　試験体２　押し側　変位・荷重計測



試験体脚部の PC 鋼棒の引張力

図 4.6-3　試験体２　押し側　変位・荷重計測

１F 脚部の浮き上がり量は最大 60 ㎜程度、水平移動量は 6 ㎜程度であった。鋼製支柱の軸力については、左側（圧縮側）１層の鋼製支柱のみ圧縮荷重で、それ以外は引張荷重が発生していた。１層左側も大変形で引張になるのは変形量の増大、梁の変形の影響があると推定される。右側（引張側）については１層目が２層目の２倍程度になっていた。また、試験体脚部の PC 鋼棒の引張力は、押しの時右側、引きの時左側に引張が発生するが、最大は押しの時 370kN 程度であった。

・試験体２　引き側

表 4.6-4　試験体２（引き）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	変位計No.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
三層目脚部	3F脚部右	めり込み	31	表		0.31	0.38	0.40	0.47	0.66	0.82	1.00
			48	裏		0.13	0.12	0.11	0.10	0.06	0.04	0.01
	3F脚部左	浮き上がり	30	表		0.67	0.80	0.90	1.10	1.50	1.95	2.68
			49	裏		0.83	1.05	1.28	1.61	2.54	3.39	4.55
二層目頭部	2F頭部右	空き	29	A		0.90	1.35	1.48	1.75	2.07	1.96	3.10
			44	B(B1+B2)		0.44	0.65	1.73	2.94	6.93	12.01	22.40
			27	C		0.38	0.70	1.68	2.51	5.40	9.46	16.34
	2F頭部左	めり込み	28	表		0.40	0.51	0.92	1.23	2.40	4.30	9.39
			45	裏		2.10	2.90	3.40	3.70	4.30	5.30	7.60
二層目脚部	2F脚部右	めり込み	19	表		1.12	1.44	1.71	2.03	3.21	5.43	11.02
			42	裏		0.12	0.13	0.24	0.39	1.29	3.28	7.60
	2F脚部左	浮き上がり	18	表		1.30	1.93	2.90	3.90	6.60	10.00	16.20
			43	裏		1.95	2.86	4.10	5.30	8.21	11.78	18.70
一層目頭部	1F頭部右	空き	17	A		0.82	1.19	0.60	0.30	0.20	0.23	1.16
			40	B(B1+B2)		0.10	0.40	0.98	1.50	2.50	3.61	6.06
			15	C		-0.20	0.03	1.30	2.25	3.60	4.82	6.74
	1F頭部左	めり込み	16	表		0.20	0.54	0.89	1.20	1.97	2.93	5.50
			41	裏		0.68	1.27	1.90	2.43	3.57	5.00	8.48
一層目脚部	1F脚部右	めり込み	13	表		0.30	0.79	1.27	1.41	1.58	1.79	2.40
			38	裏		0.04	0.08	0.15	0.15	0.15	0.15	0.36
	1F脚部左	浮き上がり		A		0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.00	5.00
			39	B		0.00	0.10	0.30	0.40	0.95	1.67	4.32
			12	C		1.23	1.96	2.96	3.98	6.07	8.14	12.40

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	変位計No.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
二層目頭部	横移動（右）	11	表		0.48	0.78	1.07	1.28	1.61	2.23	3.12
		36	裏		0.81	1.21	1.49	1.72	1.96	2.46	
二層目脚部	横移動（右）	10	表		0.17	0.19	0.22	0.24	0.35	0.48	0.75
		35	裏		0.01	0.02	0.02	0.05	0.14	0.27	0.43
一層目頭部	横移動（右）	9	表		0.09	0.06	0.27	0.55	0.93	1.17	1.66
		34	裏		0.09	0.18	0.25	0.47	0.85	1.17	1.53
一層目脚部	横移動（右）	8	表		0.84	0.99	1.15	1.33	1.78	2.19	2.88
		32	裏		0.97	1.10	1.35	1.65	2.23	2.66	3.36

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

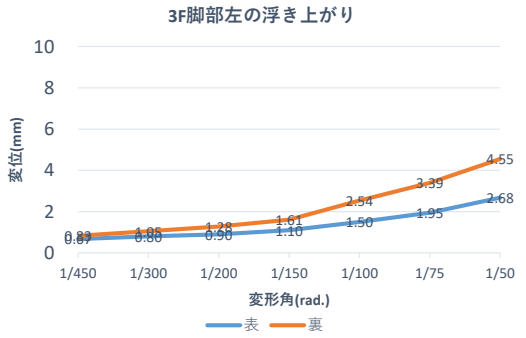
分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
試験体脚部 PC鋼棒	右	引張力（＋）圧縮力（－）	03			-0.27	-0.13	0.00	0.40	1.20	2.07	2.07
	左		02			13.87	22.93	41.80	62.93	108.40	152.80	242.60
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			-5.98	-10.31	-16.01	-21.24	-35.19	-46.11	-50.99
	左		50,51,56,57			4.95	11.48	27.21	47.90	88.65	125.21	172.15
二層鋼製支柱	右		05			-0.78	-2.25	-0.82	1.14	3.82	8.66	16.89
	左		04			1.40	2.29	8.92	20.09	42.24	63.71	88.15

単位：kN

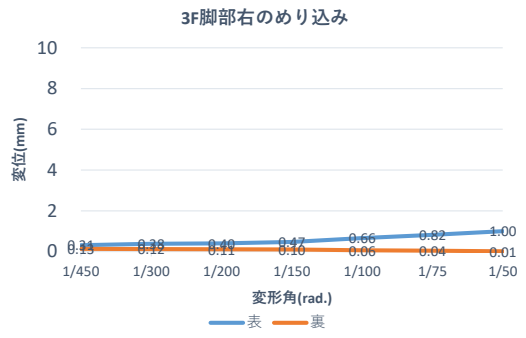
歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
一層鋼製支柱	右	引張力(＋) 圧縮力(－)	52	表 1		-16.2	-28.0	-43.4	-56.6	-83.0	-97.6	-96.5
			53	表 2		-15.1	-26.7	-37.7	-47.8	-68.4	-79.4	-88.8
			表平均値			-15.7	-27.4	-40.5	-52.2	-75.7	-88.5	-92.6
			54	裏 1		2.5	4.4	8.0	10.7	9.1	-0.8	-11.5
			55	裏 2		4.9	9.1	9.1	8.8	1.6	-6.6	-7.1
			裏平均値			3.7	6.7	8.5	9.8	5.4	-3.7	-9.3
			右支柱平均値			-6.0	-10.3	-16.0	-21.2	-35.2	-46.1	-51.0
	左		50	表 1		1.1	5.2	13.5	42.1	105.8	163.3	233.4
			51	表 2		-3.6	-6.6	-14.3	21.4	110.5	192.2	296.3
			表平均値			-1.2	-0.7	-0.4	31.8	108.2	177.7	264.9
			56	裏 1		8.2	17.9	40.4	53.1	71.7	88.0	112.7
			57	裏 2		14.0	29.4	69.3	75.0	66.5	57.5	46.2
			裏平均値			11.1	23.6	54.8	64.1	69.1	72.7	79.4
			左支柱平均値			4.9	11.5	27.2	47.9	88.7	125.2	172.2

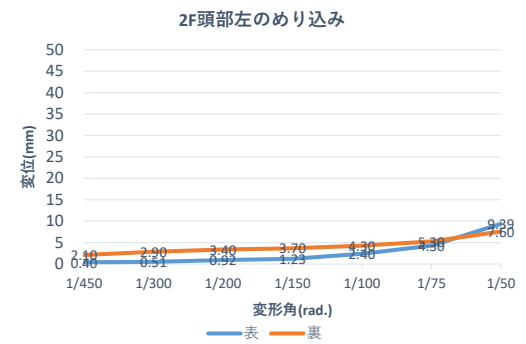
単位：kN



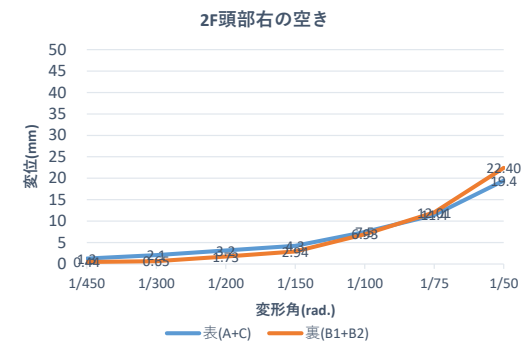
３Ｆ脚部左の浮き上がり



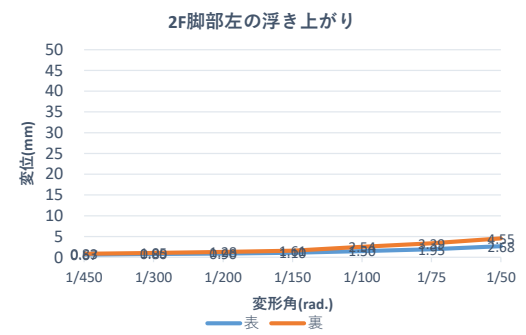
３Ｆ脚部右のめり込み



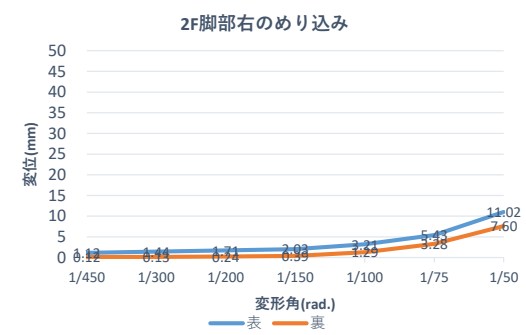
２Ｆ頭部左のめり込み



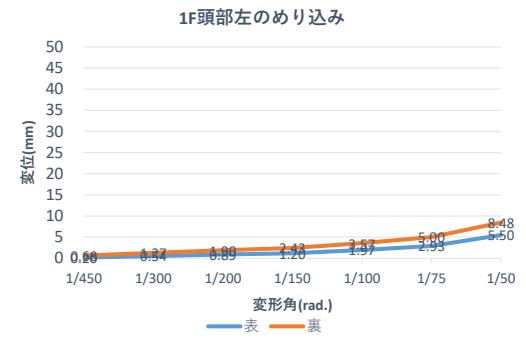
２Ｆ頭部右の空き



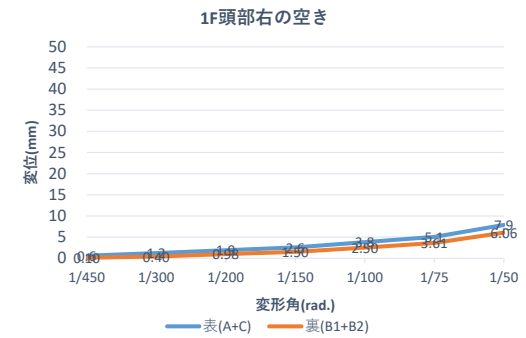
２Ｆ脚部左の浮き上がり



２Ｆ脚部右のめり込み

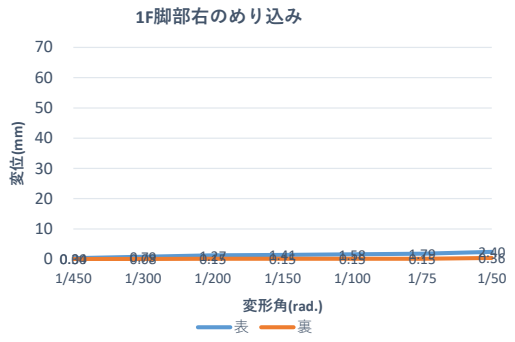


１Ｆ頭部左のめり込み

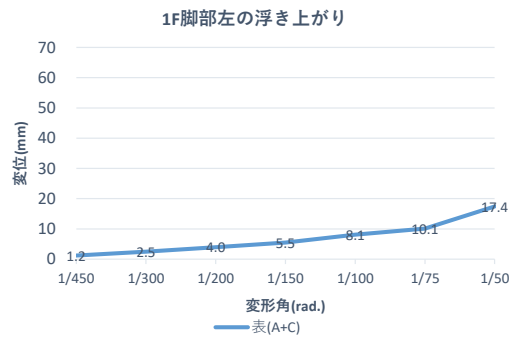


１Ｆ頭部右の空き

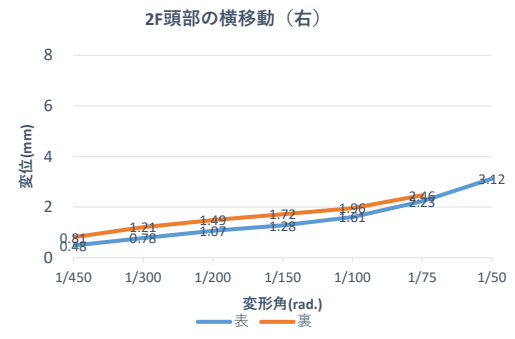
図 4.6-4　試験体２　引き側　変位・荷重計測



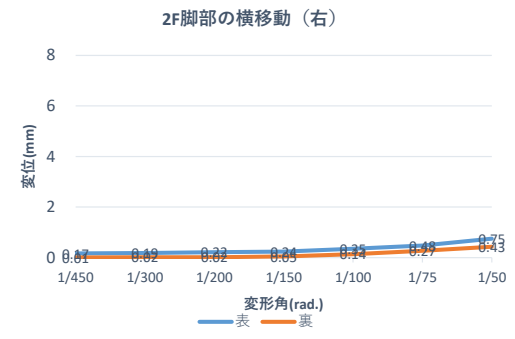
1Ｆ脚部右のめり込み



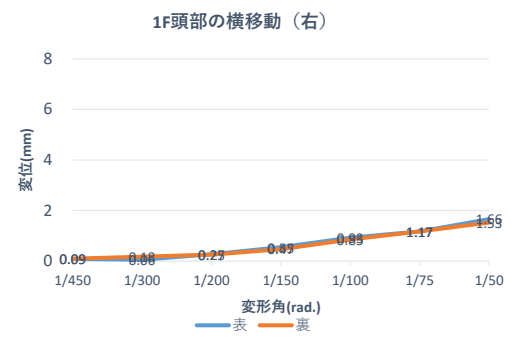
1Ｆ脚部左の浮き上がり



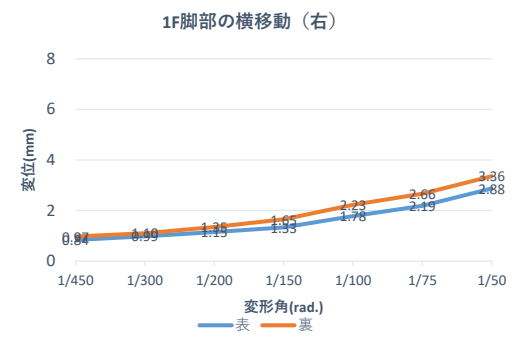
2Ｆ頭部の横移動（右）



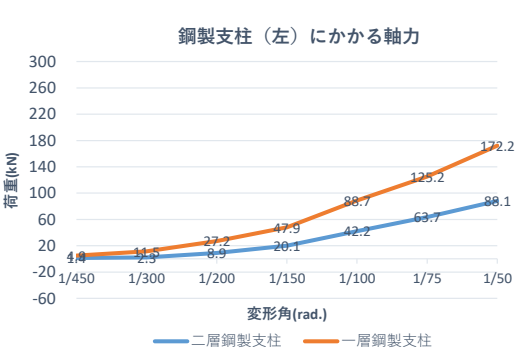
2Ｆ脚部の横移動（右）



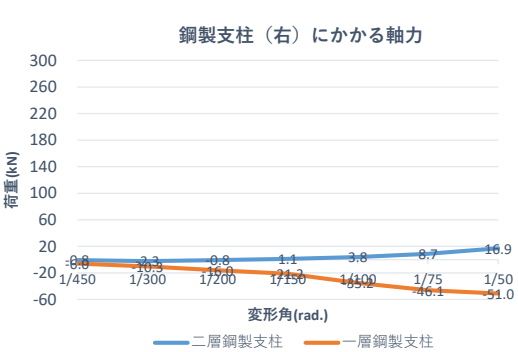
1Ｆ頭部の横移動（右）



1Ｆ脚部の横移動（右）



鋼製支柱（左）軸力



鋼製支柱（右）軸力

図 4.6-5　試験体２　引き側　変位・荷重計測

１F 脚部の浮き上がり量は最大 20 ㎜程度、水平移動量は 3 ㎜程度であった。鋼製支柱の軸力については、右側（圧縮側）１層の鋼製支柱のみ圧縮荷重で、それ以外は引張荷重が発生していた。左側（引張側）については１層目が２層目の２倍程度になっていた。

（３）試験体３

・試験体３　押し側

表 4.6-5　試験体３（押し）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	変位計No.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
三層目脚部	3F脚部右	浮き上がり	31	表		0.04	0.10	0.30	0.55	1.05	1.40	2.07	3.40	5.10	6.20
			48	裏		0.12	0.28	0.63	1.10	1.90	2.50	3.56	5.43	7.66	8.83
	3F脚部左	めり込み	30	表		0.09	0.12	0.19	0.29	0.43	0.54	0.73	0.97	1.30	1.47
			49	裏		-0.03	-0.03	-0.02	0.00	0.03	0.04	0.08	0.13	0.19	0.20
二層目頭部	2F頭部右	めり込み	29	表		1.32	1.52	1.98	2.73	4.64	6.42	10.72	18.87	25.71	31.10
			44	裏		3.35	4.21	4.71	5.17	6.57	7.94	11.01	18.06	23.68	27.04
	2F頭部左	空き	28	A		1.00	1.37	1.78	1.96	2.49	2.83	3.58	7.93	13.77	16.80
			45	B(B1+B2)		1.13	1.45	3.23	5.42	9.96	13.70	21.62	37.00	41.74	42.16
			26	C		0.83	1.28	2.56	4.14	7.51	10.40	16.60	28.81	32.89	31.62
二層目脚部	2F脚部右	浮き上がり	19	表		2.62	3.48	4.91	6.63	10.02	12.70	18.05	29.78	39.70	45.34
			42	裏		2.78	3.77	5.30	6.99	10.53	13.46	19.86	32.18	38.82	41.90
	2F脚部左	めり込み	18	表		1.12	1.38	1.93	2.75	5.14	7.44	12.76	25.28	32.46	35.30
			43	裏		0.95	1.11	1.58	2.39	4.69	6.77	11.43	22.62	28.42	29.58
一層目頭部	1F頭部右	めり込み	17	表		0.39	0.64	1.06	1.63	2.98	4.32	7.64	15.45	23.25	29.14
			40	裏		0.35	0.61	1.18	1.83	3.48	5.43	9.95	19.94	29.44	35.98
	1F頭部左	空き	16	A		0.39	0.61	0.25	0.03	0.15	0.43	1.16	2.81	7.63	12.90
			41	B(B1+B2)		0.82	1.29	1.43	1.94	3.17	4.42	7.01	11.38	18.90	26.26
			14	C		0.50	0.76	1.26	1.77	2.73	3.66	5.45	8.70	11.57	14.55
一層目脚部	1F脚部右	浮き上がり		A		1.50	1.00	1.50	2.50	3.00	3.00	4.00	10.00	14.00	15.00
			38	B		1.63	2.67	3.02	3.25	3.92	4.47	5.45	10.73	15.13	16.28
			13	C		0.76	1.63	2.83	4.08	6.75	9.31	14.01	21.66	33.16	46.86
	1F脚部左	めり込み	12	表		0.25	0.35	0.54	0.73	1.09	1.50	2.96	5.84	9.01	12.78
			39	裏		計測不良									

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	変位計No.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
二層目頭部	横移動（左）	11	表		0.89	1.07	1.15	1.27	1.40	1.49	1.63	2.64	2.85	2.89
		36	裏		1.18	1.46	1.64	1.84	2.07	2.24	2.34	3.59	4.12	4.58
二層目脚部	横移動（左）	10	表		0.14	0.17	0.27	0.40	0.56	0.67	0.93	1.70	1.96	1.71
		35	裏		0.11	0.16	0.28	0.35	0.47	0.58	0.83	1.64	3.36	3.34
一層目頭部	横移動（左）	09	表		0.02	-0.05	-0.13	-0.11	0.12	0.64	2.41	3.53	5.00	7.03
		34	裏		-0.07	-0.15	-0.18	-0.14	0.11	0.65	2.56	3.42	4.46	5.72
一層目脚部	横移動（左）	08	表		0.65	1.00	1.35	1.69	2.14	2.60	3.10	3.92	4.83	5.52
		32	裏		0.50	0.68	1.10	1.40	1.68	1.94	2.30	2.87	3.10	3.08

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

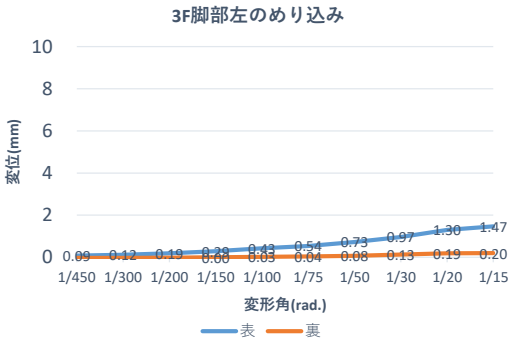
分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
試験体脚部PC鋼棒	右	引張力（＋）圧縮力（－）	03			0.5	9.5	28.5	53.7	106.5	156.4	248.3	356.2	367.6	359.2
	左		02			0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.2	-0.4	0.0
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			22.2	37.2	67.3	91.4	127.6	138.3	175.5	235.0	278.1	284.1
	左		50,51,56,57			-6.9	-8.2	-7.4	-9.9	-14.7	-17.4	-20.1	-12.0	1.9	38.6
二層鋼製支柱	右		05						36.0	57.2	70.9	90.5	127.5	152.2	150.3
	左		04			-0.5	0.0	2.4	4.7	10.3	15.1	21.5	39.2	54.7	63.9

単位：kN

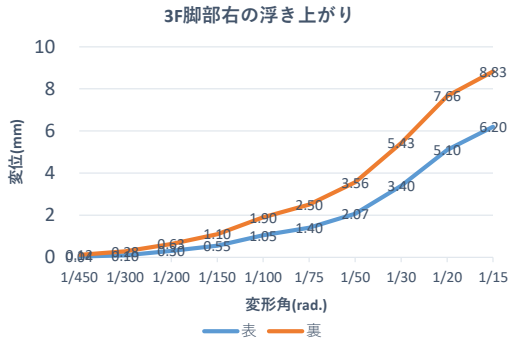
歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角／下位分類	押	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50	1/30	1/20	1/15
一層鋼製支柱	右	引張力（＋）圧縮力（－）	52	表１		18.7	38.5	92.1	138.8	196.0	231.5	281.8	370.3	417.3	414.8
			53	表２		2.7	23.6	87.1	139.9	208.9	252.6	315.9	423.9	473.4	452.8
			表平均値			10.7	31.1	89.6	139.4	202.5	242.0	298.8	397.1	445.3	433.8
			54	裏１		23.9	33.3	42.1	49.5	69.0	80.8	101.2	143.5	174.0	183.9
			55	裏２		43.4	53.6	47.8	37.4	36.3	-11.5	3.0	2.5	47.8	84.9
			裏平均値			33.7	43.4	44.9	43.4	52.6	34.6	52.1	73.0	110.9	134.4
			右支柱平均値			22.2	37.2	67.3	91.4	127.6	138.3	175.5	235.0	278.1	284.1
	左		50	表１		-18.7	-22.3	-19.2	-12.1	-12.6	-20.1	-15.4	-15.7	6.6	54.4
			51	表２		-10.2	-12.4	-12.1	-8.5	-6.0	-3.0	-10.4	-15.7	9.1	74.2
			表平均値			-14.4	-17.3	-15.7	-10.3	-9.3	-11.5	-12.9	-15.7	7.8	64.3
			56	裏１		2.2	3.8	3.8	-7.4	-16.8	-19.5	-24.2	-6.6	-2.5	21.4
			57	裏２		-1.1	-2.2	-1.9	-11.5	-23.4	-26.9	-30.2	-9.9	-5.8	4.1
			裏平均値			0.5	0.8	1.0	-9.5	-20.1	-23.2	-27.2	-8.2	-4.1	12.8
			左支柱平均値			-6.9	-8.2	-7.4	-9.9	-14.7	-17.4	-20.1	-12.0	1.9	38.6

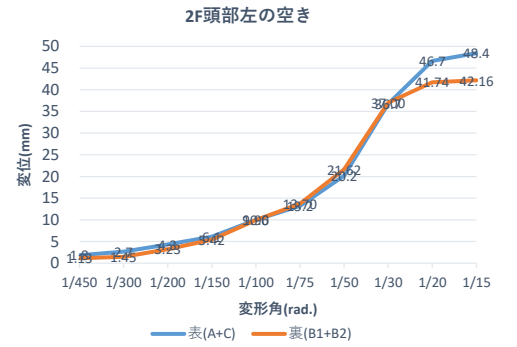
単位：kN



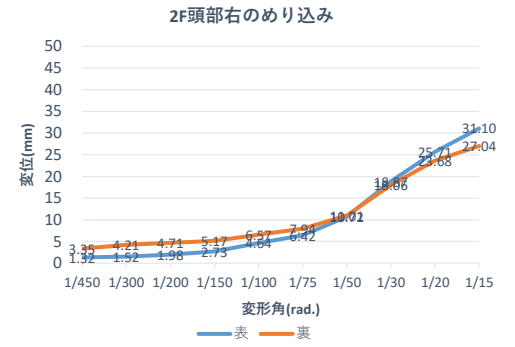
3Ｆ脚部左のめり込み



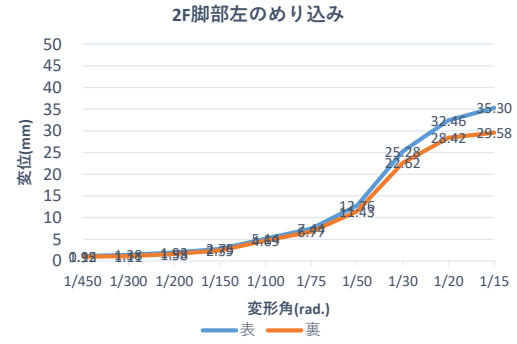
3Ｆ脚部右の浮き上がり



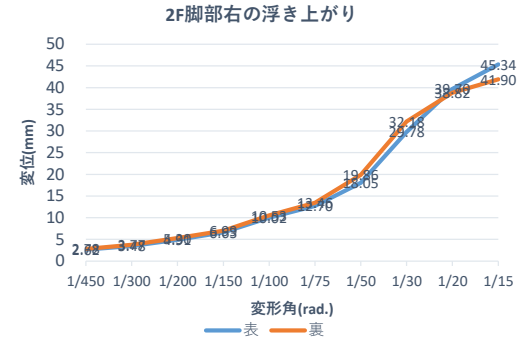
2Ｆ頭部左の空き



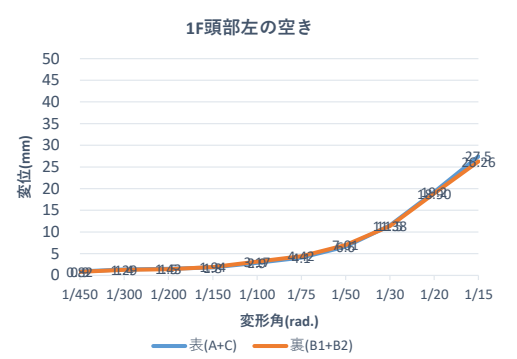
2Ｆ頭部右のめり込み



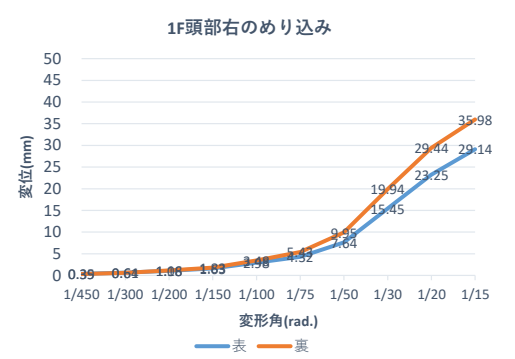
2Ｆ脚部左のめり込み



2Ｆ脚部右のめり込み

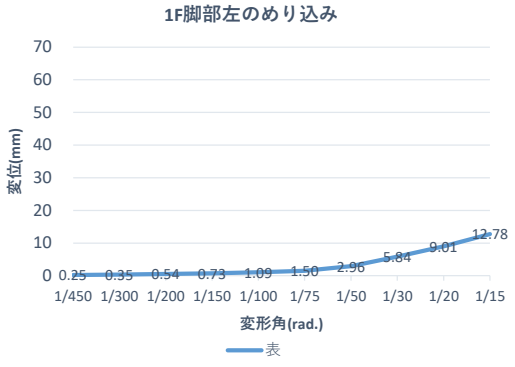


1Ｆ頭部左の空き

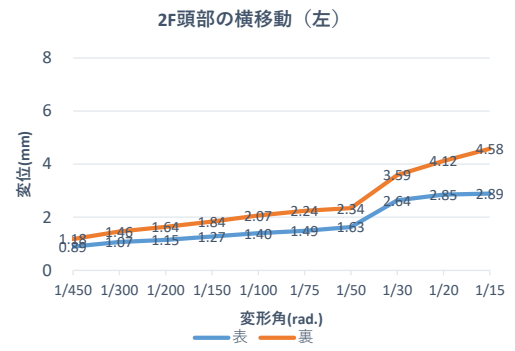


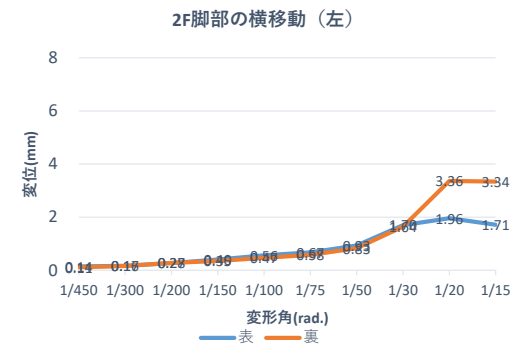
1Ｆ頭部右のめり込み

図 4.6-6　試験体３　押し側　変位・荷重計測

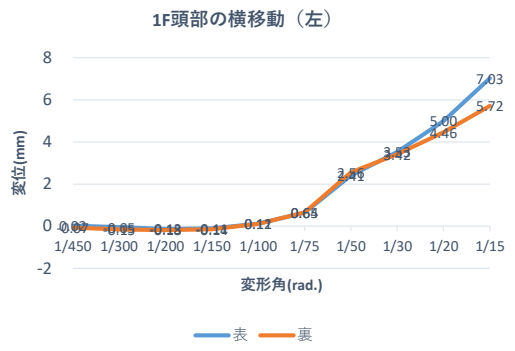


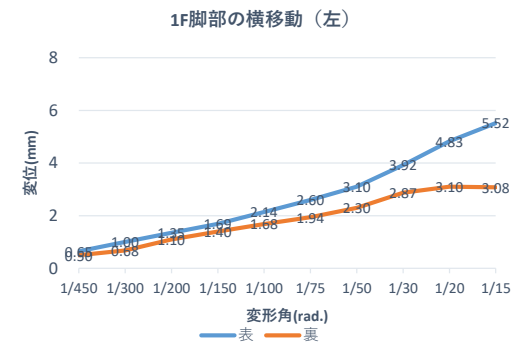
１Ｆ脚部左のめり込み	１Ｆ脚部右の浮き上がり



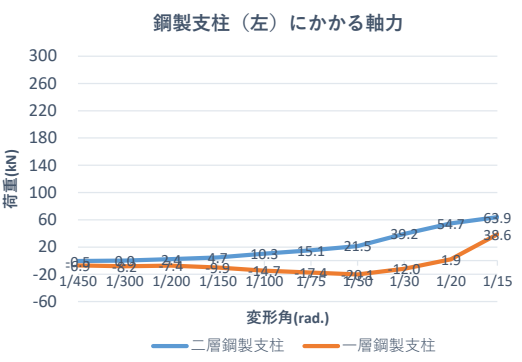


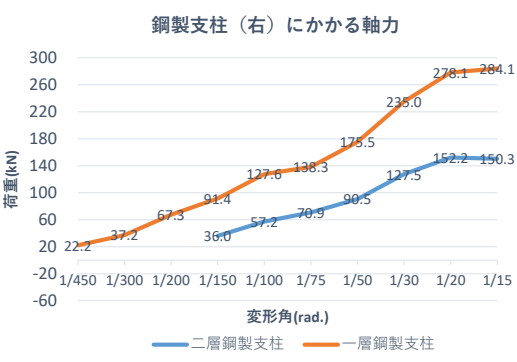
２Ｆ頭部の横移動（左）	２Ｆ脚部の横移動（左）





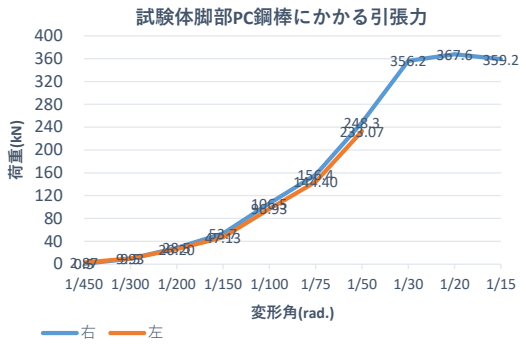
１Ｆ頭部の横移動（左）	１Ｆ脚部の横移動（左）





鋼製支柱（左）軸力	鋼製支柱（右）軸力

図 4.6-7　試験体３　押し側　変位・荷重計測



試験体脚部の PC 鋼棒の引張力

図 4.6-8　試験体３　押し側　変位・荷重計測

１F 脚部の浮き上がり量は最大 60 ㎜程度、水平移動量は 5.5 ㎜程度であった。鋼製支柱の軸力については、左側（圧縮側）１層の鋼製支柱のみ圧縮荷重で、それ以外は引張荷重が発生していた。大変形で１層左側も引張になるのは変形量の増大と梁の変形などの影響があると推定される。右側（引張側）については１層目が２層目の２倍程度になっていた。また、試験体脚部の PC 鋼棒の引張力は、押しの時右側、引きの時左側に引張が発生するが、最大は押しの時 360kN 程度であった。

・試験体３　引き側

表 4.6-6　試験体３（引き）　接合部、水平変位、底部 PC 鋼棒引き抜き、左右鋼製柱軸力

めり込み／空きのピーク値

分類	部位	性質	変位計No.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
三層目脚部	3F脚部右	めり込み	31	表		0.21	0.25	0.30	0.39	0.58	0.69	0.90
			48	裏		-0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.03	0.03	0.07
	3F脚部左	浮き上がり	30	表		0.10	0.13	0.28	0.48	0.96	1.35	2.03
			49	裏		0.31	0.43	0.67	1.04	1.96	2.60	3.70
二層目頭部	2F頭部右	空き	29	A		0.84	1.00	1.17	1.44	2.02	2.94	3.77
			44	B(B1+B2)		1.61	2.15	3.20	5.05	9.11	13.13	20.69
			27	C		0.98	1.42	2.27	3.45	6.31	8.84	14.09
	2F頭部左	めり込み	28	表		1.84	1.92	2.29	3.00	4.89	6.86	10.77
			45	裏		2.60	2.98	3.43	3.75	4.71	5.91	8.30
二層目脚部	2F脚部右	めり込み	19	表		1.23	1.43	1.85	2.47	4.52	6.98	12.03
			42	裏		1.06	1.15	1.37	1.75	3.00	4.63	7.81
	2F脚部左	浮き上がり	18	表		2.47	3.23	4.26	5.57	8.77	11.63	16.59
			43	裏		2.48	3.26	4.43	5.88	9.41	12.53	17.90
一層目頭部	1F頭部右	空き	17	A		0.20	0.00	-0.20	-0.45	-0.23	0.23	1.08
			40	B(B1+B2)		0.48	0.90	1.30	1.50	2.49	3.40	5.55
			15	C		0.33	0.75	1.29	1.78	2.90	3.90	5.55
	1F頭部左	めり込み	16	表		0.50	0.55	0.76	1.07	1.87	2.92	5.49
			41	裏		0.40	0.65	1.07	1.50	2.63	3.99	7.05
一層目脚部	1F脚部右	めり込み	13	表		0.33	0.40	0.55	0.66	0.85	1.03	1.69
			38	裏		-0.10	-0.10	0.06	0.00	0.00	-0.10	-0.10
	1F脚部左	浮き上がり		A		0.00	0.00	3.00	3.00	3.00	3.00	4.50
			39	B		2.08	2.60	3.02	3.23	3.65	3.97	4.80
			12	C		0.59	1.36	2.39	3.34	5.53	7.56	11.38

単位：mm

水平変位のピーク値

分類／部位	性質	変位計No.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
二層目頭部	横移動（右）	11	表		0.96	1.24	1.43	1.74	2.32	2.84	3.40
		36	裏		1.24	1.59	1.87	2.18	2.92	3.63	4.47
二層目脚部	横移動（右）	10	表		0.26	0.34	0.42	0.55	0.68	0.77	1.00
		35	裏		0.17	0.24	0.32	0.43	0.55	0.61	0.86
一層目頭部	横移動（右）	09	表		0.07	0.20	0.35	0.37	0.35	0.52	2.12
		34	裏		0.03	0.09	0.14	0.12	0.03	0.21	1.75
一層目脚部	横移動（右）	08	表		0.61	1.12	1.66	1.82	2.08	2.73	3.33
		32	裏		0.56	1.02	1.49	1.61	1.90	2.52	3.11

単位：mm

ロードセル／歪みゲージから得た荷重のピーク値

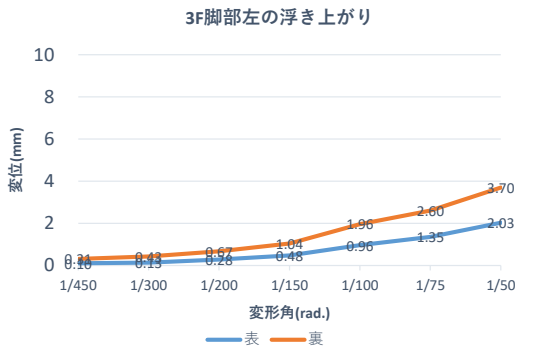
分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
試験体脚部 PC鋼棒	右	引張力（＋）圧縮力（－）	03			0.20	0.13	0.27	0.27	0.27	0.33	0.27
	左		02			2.87	9.93	26.20	47.13	96.93	144.40	233.07
一層鋼製支柱	右		52,53,54,55			-9.00	-11.48	-15.26	-20.55	-31.89	-34.57	-53.74
	左		50,51,56,57			22.20	32.51	53.74	77.66	113.05	137.52	167.34
二層鋼製支柱	右		05			-0.13	-1.03	1.97	3.90	7.97	12.50	17.97
	左		04			2.37	4.24	14.41	25.68	46.66	60.60	78.37

単位：kN

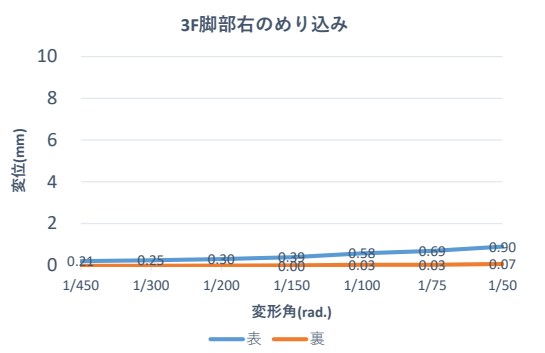
歪みゲージから軸力の計算　　•E(SS440)=205000N/mm^2／A=4224mm^2

分類	部位	性質	変位計、歪みゲージNo.	変形角 / 下位分類	引	1/450	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75	1/50
一層鋼製支柱	右	引張力（＋）圧縮力（－）	52	表１		4.1	6.9	8.8	3.6	-29.7	-38.5	-36.8
			53	表２		10.7	15.1	16.8	12.4	-22.3	-34.9	-41.5
			表平均値			7.4	11.0	12.8	8.0	-26.0	-36.7	-39.2
			54	裏１		-23.9	-32.4	-35.7	-34.6	-25.6	-28.3	-36.0
			55	裏２		-26.9	-35.5	-50.9	-63.5	-50.0	-36.6	-100.6
			裏平均値			-25.4	-33.9	-43.3	-49.1	-37.8	-32.4	-68.3
			右支柱平均値			-9.0	-11.5	-15.3	-20.5	-31.9	-34.6	-53.7
	左		50	表１		28.6	39.0	62.4	92.4	145.7	176.5	220.7
			51	表２		34.4	49.8	80.3	126.7	203.7	261.2	305.7
			表平均値			31.5	44.4	71.3	109.5	174.7	218.8	263.2
			56	裏１		14.8	23.9	44.0	63.0	80.8	93.2	116.3
			57	裏２		11.0	17.3	28.3	28.6	22.0	19.2	26.7
			裏平均値			12.9	20.6	36.1	45.8	51.4	56.2	71.5
			左支柱平均値			22.2	32.5	53.7	77.7	113.1	137.5	167.3

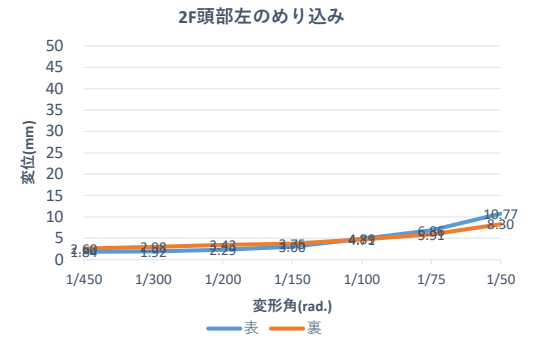
単位：kN



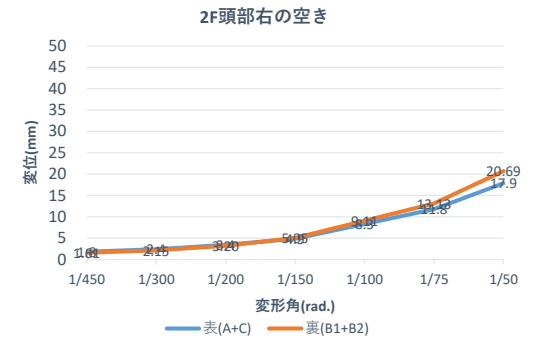
３Ｆ脚部左の浮き上がり



３Ｆ脚部右のめり込み

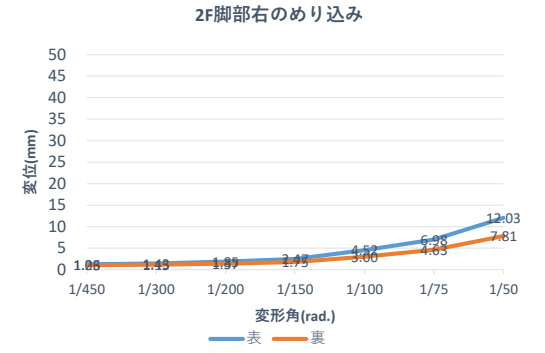


２Ｆ頭部左のめり込み

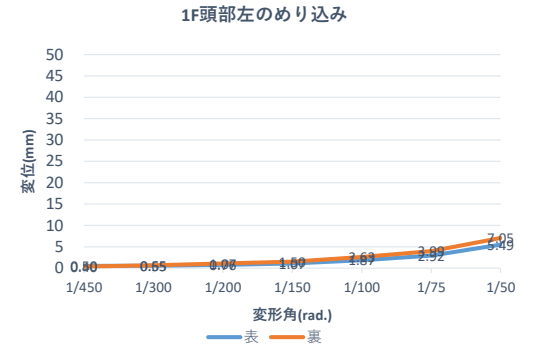


２Ｆ頭部右の空き

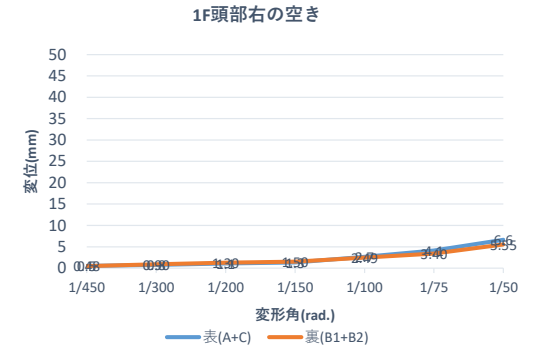
２Ｆ脚部左の浮き上がり



２Ｆ脚部右のめり込み

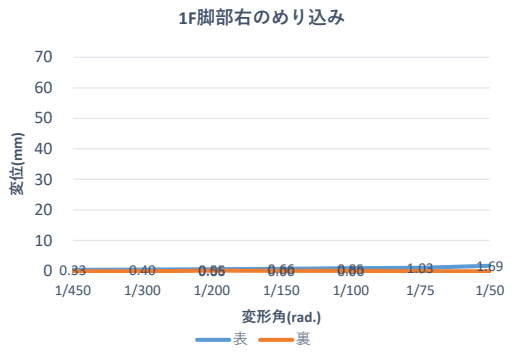


１Ｆ頭部左のめり込み

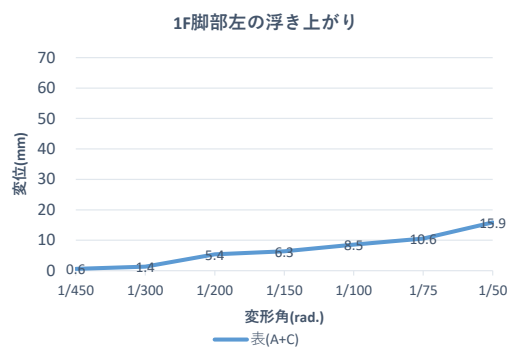


１Ｆ頭部右の空き

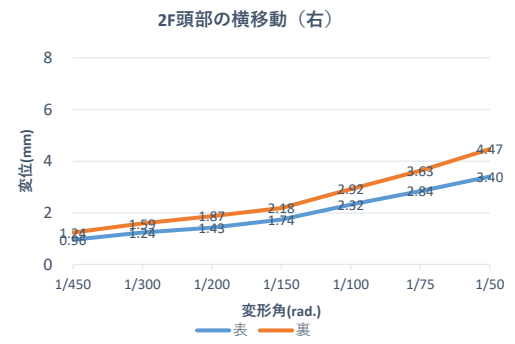
図 4.6-9　試験体３　引き側　変位・荷重計測



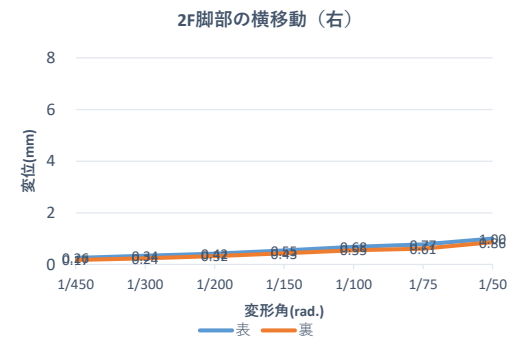
1Ｆ脚部右のめり込み



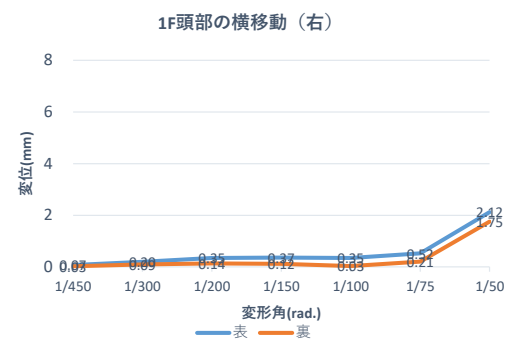
1Ｆ脚部左の浮き上がり



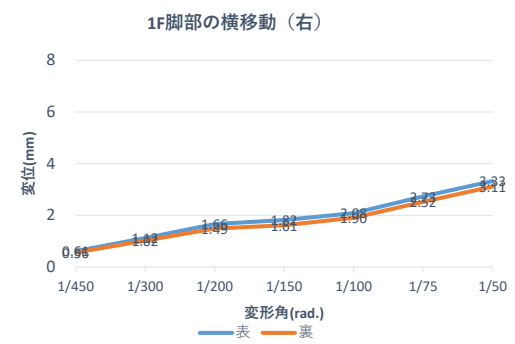
2Ｆ頭部の横移動（右）



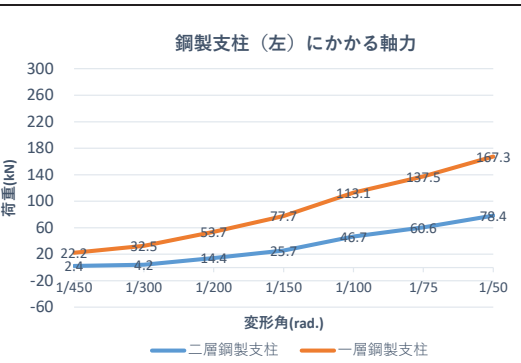
2Ｆ脚部の横移動（右）



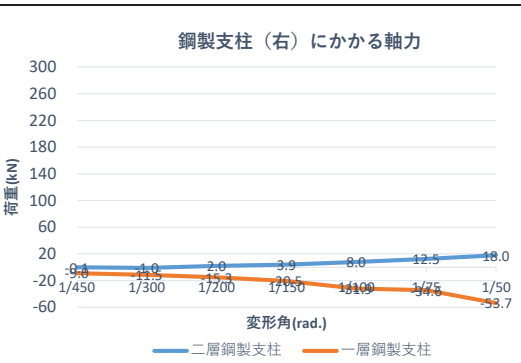
1Ｆ頭部の横移動（右）



1Ｆ脚部の横移動（右）



鋼製支柱（左）軸力



鋼製支柱（右）軸力

図 4.6-10　試験体３　引き側　変位・荷重計測

１F 脚部の浮き上がり量は最大 16 ㎜程度、水平移動量は 3 ㎜程度であった。鋼製支柱の軸力については、右側（圧縮側）１層の鋼製支柱のみ圧縮荷重で、それ以外は引張荷重が発生していた。左側（引張側）については１層目が２層目の２倍程度になっていた。

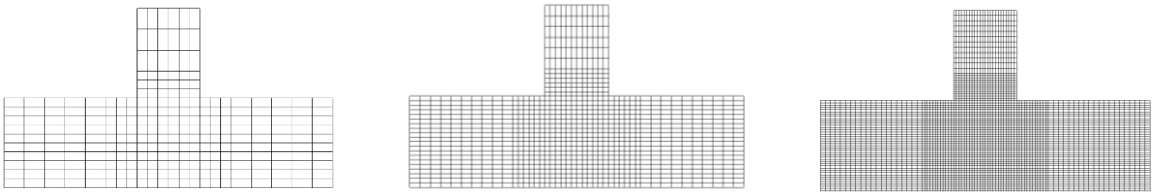
以上、試験体２，３を比較すると、浮き上がり量、水平移動量、支柱の軸力に関しては同様の傾向であることが確認された。

第 5 章　CLT－集成材間のめり込み現象の数値解析

本章では、第 3 章で示された CLT－集成材のめり込み実験結果を踏まえ、めり込み現象を数値解析により評価する際に材料定数の設定をどのように行うべきか検討した結果について述べる。

5.1　解析モデル

第 3 章で示した試験体を図 5.1-1 に示すような解析モデルを採用して数値解析行う。解析は平面応力状態を仮定した 2 次元解析とし、要素には 9 節点四角形要素を用いる。なお、実際の解析では試験体の対称性を利用して集成材の材軸方向の 1/2 について計算を行う。載荷は、加圧側の材の上端全面に均等に強制変位を加えることにより行う。図 5.1-1 には、収束性試験に用いた各解析モデルの要素数：N_{ele}及び全自由度数：N_{dof}を合わせて示している。



(a) $N_{ele} = 128,\ N_{dof} = 1076$　(b) $N_{ele} = 512,\ N_{dof} = 4202$　(c) $N_{ele} = 2048,\ N_{dof} = 16598$

図 5.1-1　収束性試験に用いた解析モデル

収束性試験結果を図 5.1-2 及び表 5.1-1 に示す。表 5.1-1 に示すように、最も細かい要素分割である mesh(c)においても、最も粗い mesh(a)と比較して初期剛性の差は 1 %以下であり、耐力が若干高めとなるものの、概ね mesh(a)で変形挙動の追跡が可能であると考えられる。したがって、次節以降に示す数値解析においては、要素分割として mesh(a)を採用するものとする。

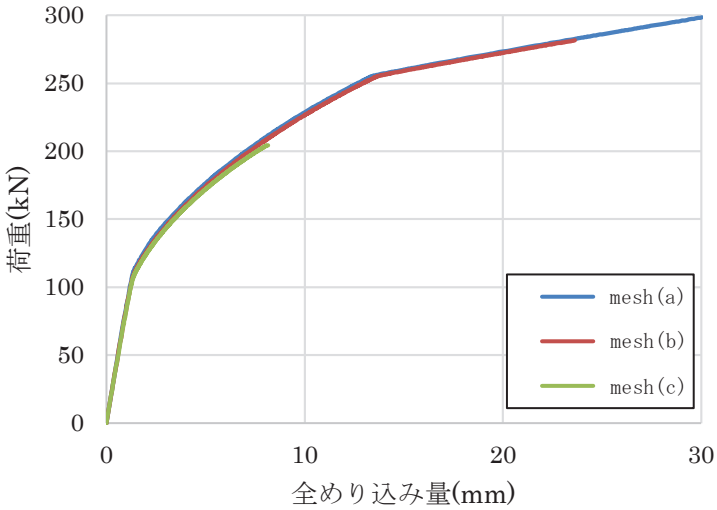


図 5.1-2　収束性試験で得られた荷重－全めり込み量関係

表 5.1-1　収束性試験結果

	初期剛性 (kN/mm)	剛性比
mesh(a)	86.835	1.000
mesh(b)	86.190	0.993
mesh(c)	86.075	0.991

5.2　材料定数の設定

CLT－集成材間のめり込み現象を数値解析により評価する際には、当然のことながら各部材の材料定数の設定が重要となる。本章では、CLT 及び集成材の材料定数として以下のような値を採用して解析を行う。

【CLT】

CLT の材料定数としては、『CLT 設計施工マニュアル』[1)]に示されている方法に準じて算出した表 5.2-1 の(1)、文献 1)では無視される直交層の特性を考慮した(2)及び直交層の特性を平行層と同等として算定した(3)の３つのケースについて解析を行った。結果的に、いずれの場合も解析結果に有意な差は生じなかった。したがって、以降の解析では CLT 側の材料定数としては表 5.2-1 の(1)の値を採用するものとする。

表 5.2-1　CLT 側の材料定数として採用した値

	弱軸	強軸	面内	弱軸	強軸	面内	
	E_x	E_y	G_{xy}	F_x	F_y	F_{xy}	
(1)	1200	3000	500	4.68	8.10	2.70	『CLT 設計施工マニュアル』
(2)	1326	3050	500	7.63	14.36	2.70	直交層の特性を考慮
(3)	3000	6000	500	15.6	21.60	2.70	直交層を平行層と同一とみなす

※単位はいずれも(N/mm²)

【集成材】

集成材の材料定数（繊維方向ヤング係数）として表 5.2-2 に示す値の組合せを採用した計７ケースについて解析を実施した。表 5.2-2 において、「２層」は１層目と２層目のラミナの平均値、「全層」は全１０層の平均値、「文献値」は文献 2)に掲載された値を、それぞれ表している。採用した加力方向（繊維直交方向）の材料定数を表 5.2-3 に示す。繊維方向以外やせん断に関する材料定数には文献 3)に示した方法により算定した値を採用した。材料特性はバイリニア型を仮定している。降伏後の接線係数は、繊維直交方向は実験結果を踏まえてヤング係数の 1/150 を標準とし、その他は０（完全弾塑性型）とした。なお、これらの数値は、第３章で得られた表 5.2-4 に示す実験結果をもとに算出した。

表 5.2-2　集成材側の材料定数の組合せ

	１層目	他層
Case1	実験_全層	実験_全層
Case2	実験_１層	実験_１層
Case3	実験_２層	実験_２層
Case4	実験_１層	実験_各層
Case5	実験_１層	実験_全層
Case6	実験_１層	文献値
Case7	文献値	文献値

表 5.2-3　繊維直交方向の材料定数

	ヤング係数 (N/mm²)	降伏応力 (N/mm²)
実験値（１層）	328.99	2.80
実験値（２層）	326.90	2.80
実験値（全層）	313.03	2.80
文献値	252.12	2.10

※降伏応力値は『木質構造設計規準』[2)]の値を採用

表 5.2-4　実験により得られた集成材の各ラミナの材料特性

試験体名	ヤング係数 (kN/mm²)			剛性 (kN/mm)		1次と2次の比	降伏荷重 (kN)	降伏応力 (N/mm²)
	1層	2層	全層平均	1次	2次			
C150-G150	7.85	7.87	7.51	95.44	2.42	39.45	138.29	4.39
C150-G150	7.79	7.72	7.43	89.40	4.89	18.30	128.00	4.06
C150-G150	7.97	7.83	7.28	80.61	3.55	22.70	123.20	3.91
C150-G150	7.69	7.73	7.41	81.63	2.96	27.58	128.18	4.07
C150-G150	7.66	7.67	7.44	64.41	2.61	24.65	111.85	3.55
C150-G150	7.99	7.86	7.46	75.20	4.47	16.80	118.48	3.76
平均	7.83	7.78	7.42	81.11	3.48	24.91	124.67	3.96
C150-G210	8.17	8.07	7.52	77.05	2.57	29.96	115.45	2.62
C150-G210	8.21	7.93	7.41	84.33	2.91	28.96	122.37	2.77
C150-G210	8.14	7.99	7.47	83.14	3.73	22.30	113.18	2.57
C150-G210	7.80	7.86	7.49	69.41	4.97	13.97	127.84	2.90
C150-G210	6.85	7.04	7.50	79.26	4.10	19.34	124.95	2.83
C150-G210	7.18	7.65	7.32	77.88	3.37	23.08	119.21	2.70
平均	7.73	7.76	7.45	78.51	3.61	22.94	120.50	2.73
C210-G210	7.86	7.88	7.46	86.36	2.76	31.26	134.85	3.06
C210-G210	7.97	7.91	7.36	72.07	3.52	20.49	137.19	3.11
C210-G210	7.87	7.81	7.40	96.39	3.79	25.44	134.20	3.04
C210-G210	8.00	7.88	7.41	79.79	4.80	16.64	146.90	3.33
C210-G210	6.89	6.95	7.44	75.41	4.29	17.57	156.13	3.54
C210-G210	8.03	7.91	7.45	90.39	4.29	21.05	178.42	4.05
平均	7.77	7.72	7.42	83.40	3.91	22.07	147.95	3.35
S-G210	7.35	7.35	7.40	59.29	3.03	19.56	157.34	3.57
S-G210	7.36	7.51	7.27	67.38	2.63	25.58	136.50	3.10
S-G210	7.69	7.66	7.26	67.30	4.07	16.55	135.47	3.07
S-G210	7.74	7.65	7.26	69.49	5.20	13.36	148.72	3.37
S-G210	6.70	6.57	7.22	68.72	3.47	19.83	189.51	4.30
S-G210	8.23	7.76	7.34	65.01	4.49	14.49	146.32	3.32
平均	7.51	7.42	7.29	66.20	3.81	18.23	152.31	3.45
全体平均	7.71	7.67	7.40	77.31	3.70	22.04	136.36	3.37

5.3　ヤング係数の相違が解析結果に及ぼす影響

表 5.3-1 に示した 7 ケースについて解析を行った結果を図 5.3-1 及び表 5.3-2 に示す。降伏応力が同じ値となる case1 から case5 については、ヤング係数が変化しているものの荷重－変形関係においてはその差はほとんど生じないことが分かる。表 5.3-2 からも、各ラミナのヤング係数として実験により得られたヤング係数の値をそれぞれ設定した case4 を基準として、最も差が大きい文献値を用いた場合においてもその差は 1 割強であり、実用上は実験により各ラミナの代表的な値が得られればその値を採用すればよいものと考える。図 5.3-2 には、case1 の場合の降伏域の進展状況を示す。加圧側の材の直下部分で降伏域が徐々に拡大していくことが分かる。

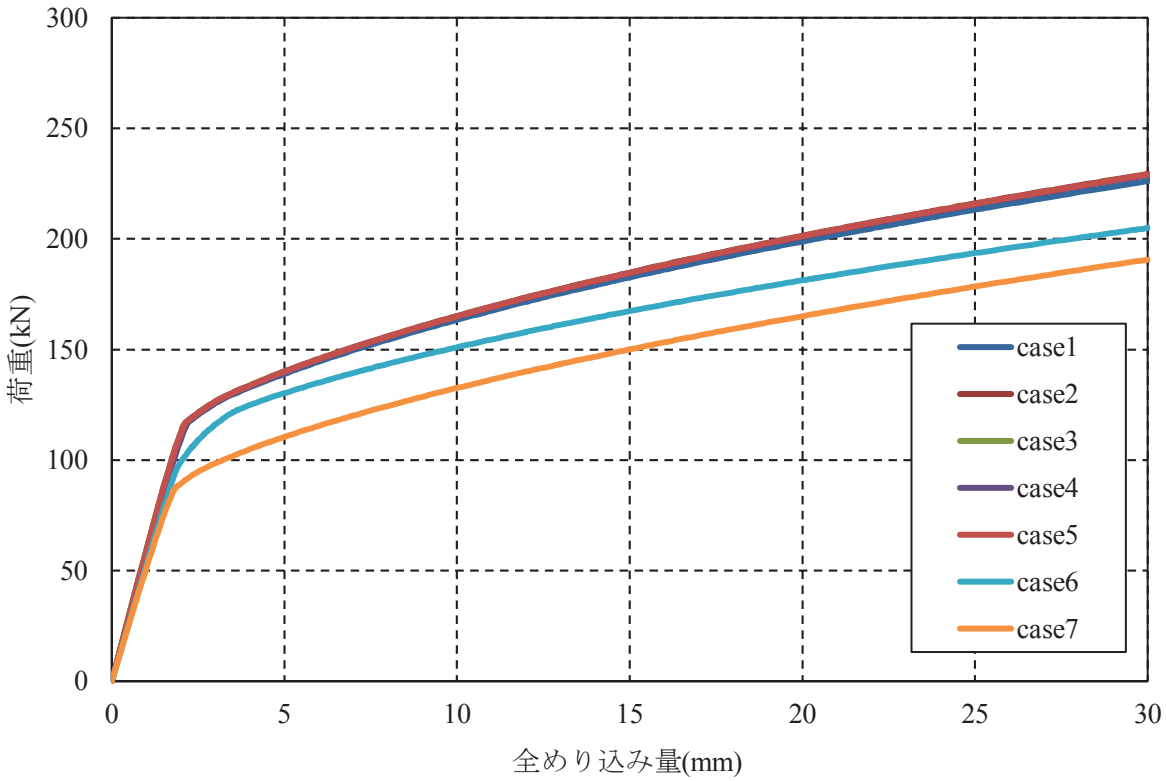
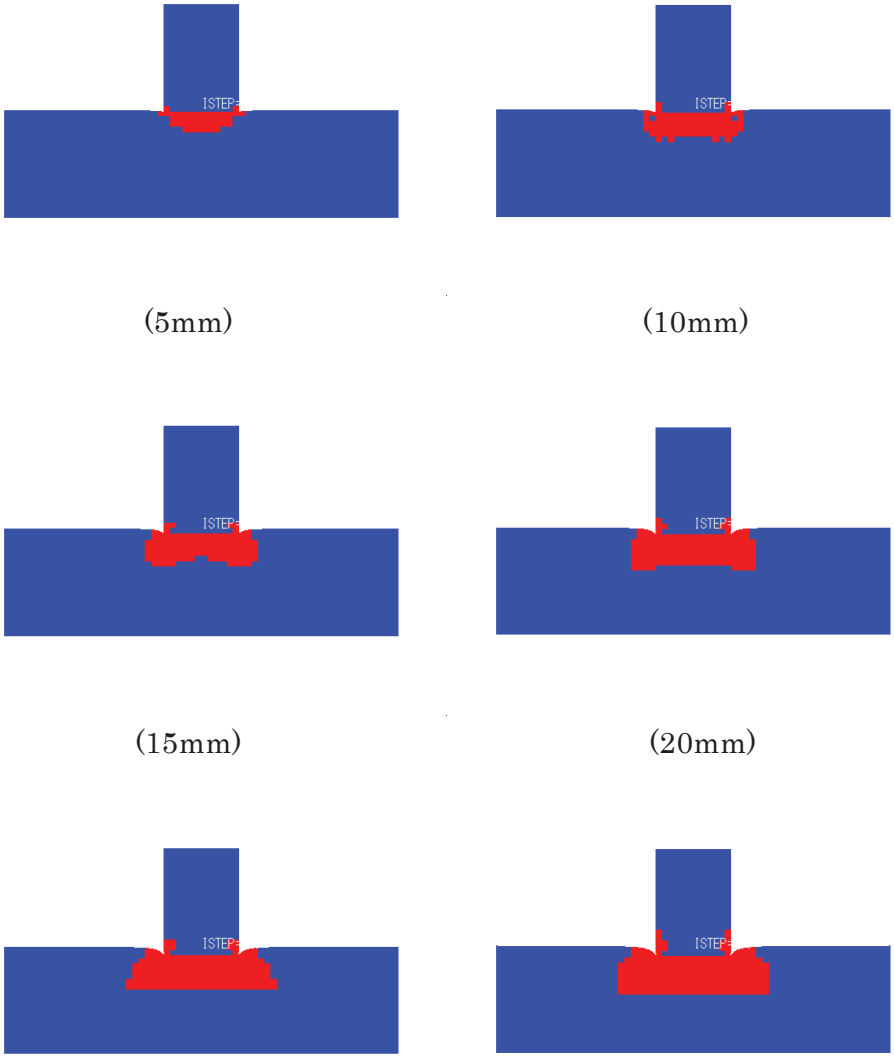


図 5.3-1　集成材のヤング係数の影響(C150-G150)

表 5.3-1　集成材のヤング係数の影響（C150-G150）

	1 層目	他層	初期剛性	
			(kN/mm^2)	比率
Case1	実験_全層	実験_全層	57.83	0.997
Case2	実験_1 層	実験_1 層	59.94	1.033
Case3	実験_2 層	実験_2 層	59.63	1.028
Case4	実験_1 層	実験_各層	58.02	1.000
Case5	実験_1 層	実験_全層	59.67	1.029
Case6	実験_1 層	文献値	53.11	0.915
Case7	文献値	文献値	51.36	0.885



(5mm)　(10mm)

(15mm)　(20mm)

(25mm)　(30mm)

図 5.3-2　降伏域の進展経過(C150-G150：Case1)

5.4　降伏応力の相違が解析結果に及ぼす影響

入力する材料の降伏応力の値としては、表 5.2-3 に示したように 2.1(N/mm²)と 2.8(N/mm²)の２つの値を採用している。前者は文献 2)に掲載されているスギの繊維直交方向の全面横圧縮強度の値である。一方、後者の値は、実験により得られためり込み強度が約 3.37(N/mm²)であったことを踏まえ、全面横圧縮と部分圧縮となるめり込みでの強度の比率を 1.0：1.3 と仮定して算出した値である。

図 5.4-1 に、試験体 C150-G150 について、上述のように２つの降伏応力の値を採用した場合の解析結果と実験結果との比較を示す。接線係数の値は前述のようにヤング係数の 1/150 としている。実験値から算出した値である 2.8(N/mm²)を採用した場合の方が、実験結果により近い値となっている。

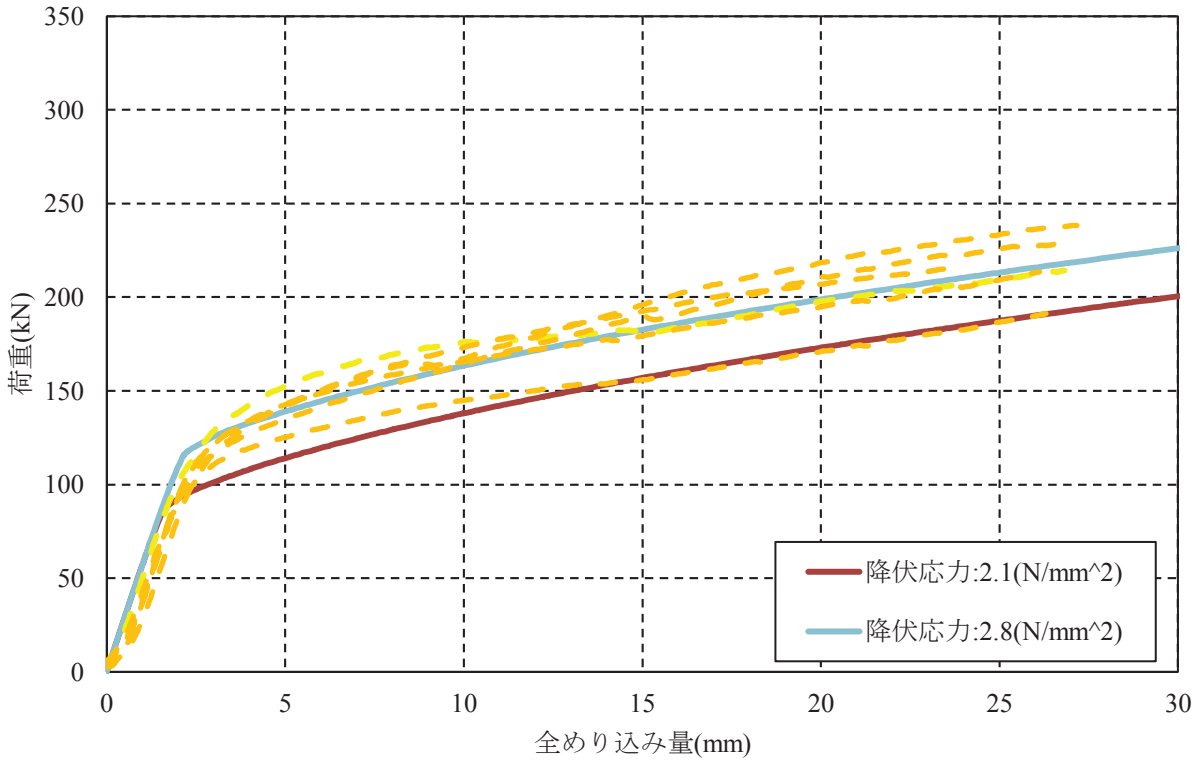


図 5.4-1　集成材の降伏応力の影響(C150-G150)

5.5　接線係数の相違が解析結果に及ぼす影響

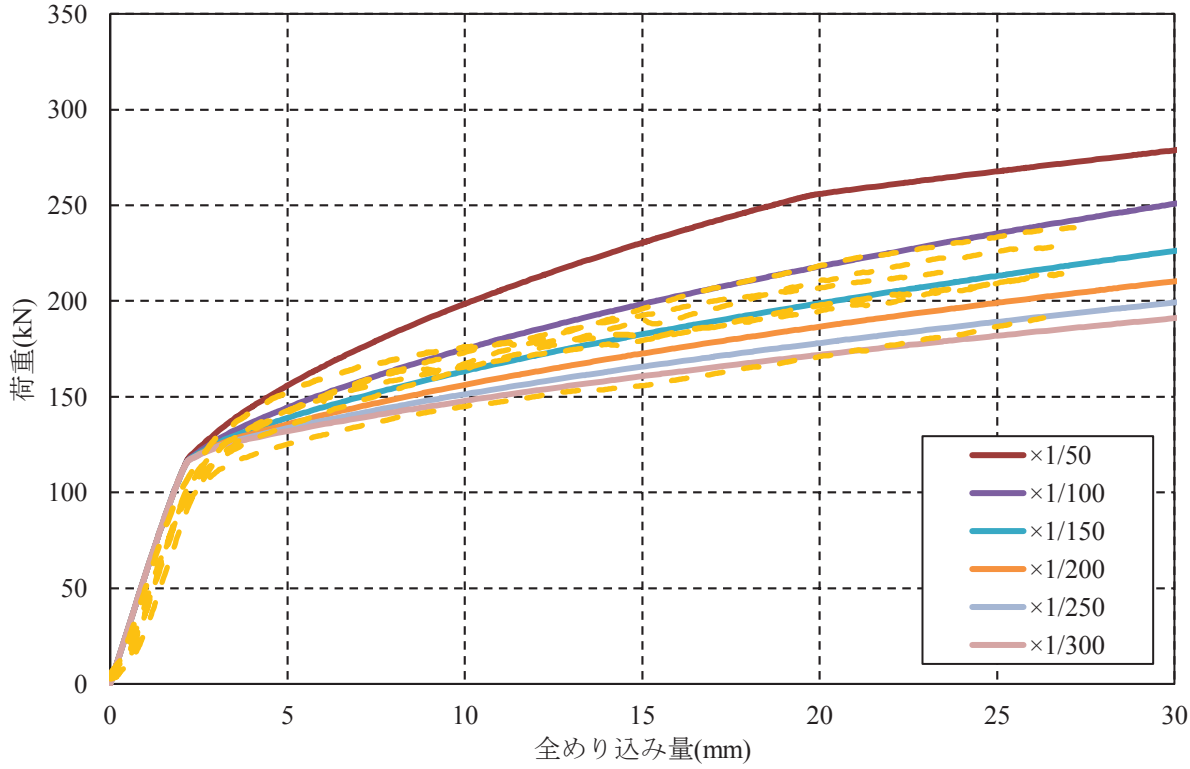


図 5.5-1　集成材の接線係数の影響(C150-G150)

図 5.5-1 には、試験体 C150-G150 について、入力する接線係数の値をヤング係数の 1/50 から 1/300 まで変化させた場合の解析結果と実験結果の比較を示している。前述のように今回の数値解析では接線係数の値としてヤング係数の 1/150 を採用した場合を標準としているが、これは実験により得られためり込みの二次剛性が初期剛性の概ね 1/22 程度であったことを踏まえ、経験を踏まえて設定したものである。図 5.5-1 からは、実験結果と比較して 1/150 を採用した場合には変形が進んだ段階ではやや低めの結果となるものの、概ね妥当な解析結果が得られていることが分かる。なお、接線係数をヤング係数の 1/50 とした場合のみ降伏後の曲線の形状が異なっているが、これは応力値が一定以上になった際に CLT 側の降伏が生じるためである。一方、接線係数の値がそれ以下の場合には、いずれのケースについても CLT 側の降伏は局所的なものに留まる結果となった。

5.6　試験体寸法が異なる場合の解析結果

前節までに示した試験体 C150-G150 の数値解析結果を踏まえ、ヤング係数の値としては表 5.3-1 の case1、降伏応力の値は実験値から算出した 2.8(N/mm^2)、接線係数はヤング係数の 1/150 と設定して、試験体寸法が異なる C210-G210 について解析を行った結果を図 5.6-1 に示す。また、その場合の降伏域の進展状況を図 5.6-2 に示す。

試験体 C150-G150 の場合と比較すると、解析結果は実験結果と比較して剛性・耐力ともに高めの結果が得られた。今回の数値解析では平面応力状態を想定した 2 次元解析により計算を行っているため、奥行き方向の寸法が大きくなるのに伴って寸法に比例して剛性・耐力ともに増大することは自明である。一方、実験では第 3 章にも述べられているように試験体の寸法が変化しても剛性や耐力に有意な差は生じないという結果が得られた。このような実験結果と解析結果の相違については、次節において考察する。

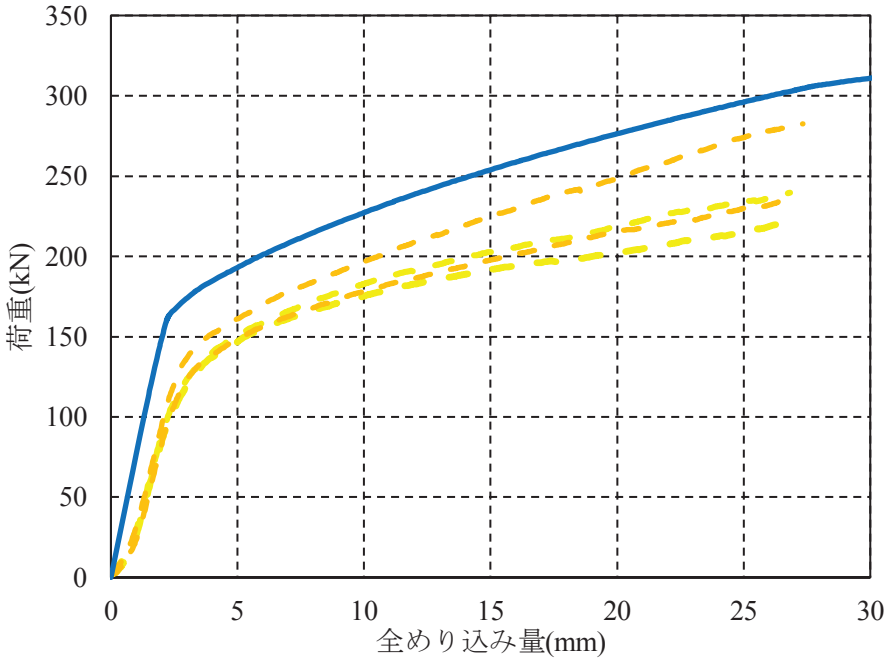


図 5.6-1　解析結果と実験結果の比較(C210-G210)

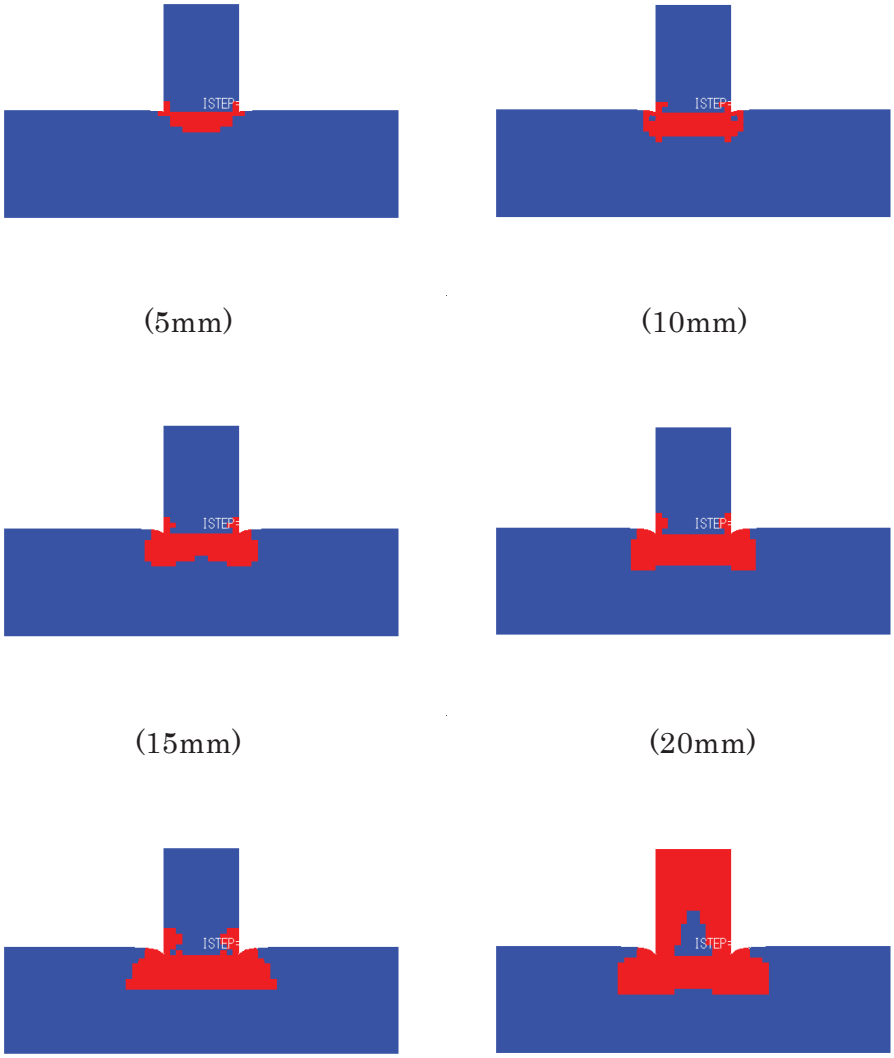


図 5.6-2　降伏域の進展経過(C1210-G210)

降伏域の進展については、変形が小さい段階では C150-G150 の場合と同様に加圧部分の直下で集成材側の降伏が進行するが、変形が 25mm を超えたあたりから CLT 側にも降伏が生じ、その後は CLT 側の降伏が順次進行して剛性低下が生じるという結果になった。

参考までに、試験体 C150-G210 について同様に解析を行った。CLT と集成材の奥行き（厚さ）が異なるこの試験体では、奥行き方向にもめり込み変形が生じるため本来は２次元解析では評価できないが、近似的な評価が可能であるかどうかの検討を目的としたものである。これまでの一連の解析結果から、集成材のめり込み変形において表層のラミナの変形が試験体の剛性・耐力に大きく関係していることが明らかとなっていたため、奥行き方向のめり込み変形による影響を考慮して表 5.6-1 に示すような４つのケースについて解析を行った。

結果を図 5.6-3 に示す。実際と同様に CLT の厚さを 150mm、集成材の厚さを全層で 210mm とした case(a)では、変形が小さい段階では前述の２つの試験体と同様に集成材側のめり込み変形が支配的であるため C210-G210 と近い荷重－変形関係となり、変形が大きくなると CLT 側の剛性が集成材に対して相対的に低くなるため、CLT 側の降伏が生じて荷重－変形関係が折れ曲がる結果となった。剛性・耐力ともに実験結果と比較すると高くなっている。

一方、実際の試験体では集成材の上面は幅方向全体が均等に応力を負担するわけではなく、加圧側の CLT の面積と同程度の面積で抵抗することとなる。この点を考慮して１層目のみ厚さを CLT と同じ 150mm に変更した case(b)では、case(a)に比べて試験体の剛性・耐力が大幅に低下し、実験結果により近い計算結果となった。２層目も厚さを 150mm に変更した case(c)、全層の厚さを 150mm に変更した case(d)（試験体 C150-G150 と同様）の順に荷重－変形関係は下側に移動するが、case(a)と case(b)との差に比べると変化の度合いは極めて小さく、１層目の変形が支配的であることが確認された。今後、３次元解析との比較や次節に示す集成材の木口面の年輪傾角の影響と合わせての検討が必要であるが、試験体 C150-G210 のように材軸方向に加えて奥行き方向にもめり込み変形が生じるような場合でも、表層の板厚を変更することで近似的に評価可能であることが示唆された。

表 5.6-1　CLT・集成材の各層の厚さ設定(C150-G210)

呼称	CLT の厚さ(mm)	集成材の厚さ(mm)		
		１層目	２層目	他層
case(a)	150	210	210	210
case(b)		150	210	210
case(c)		150	150	210
case(d)		150	150	150

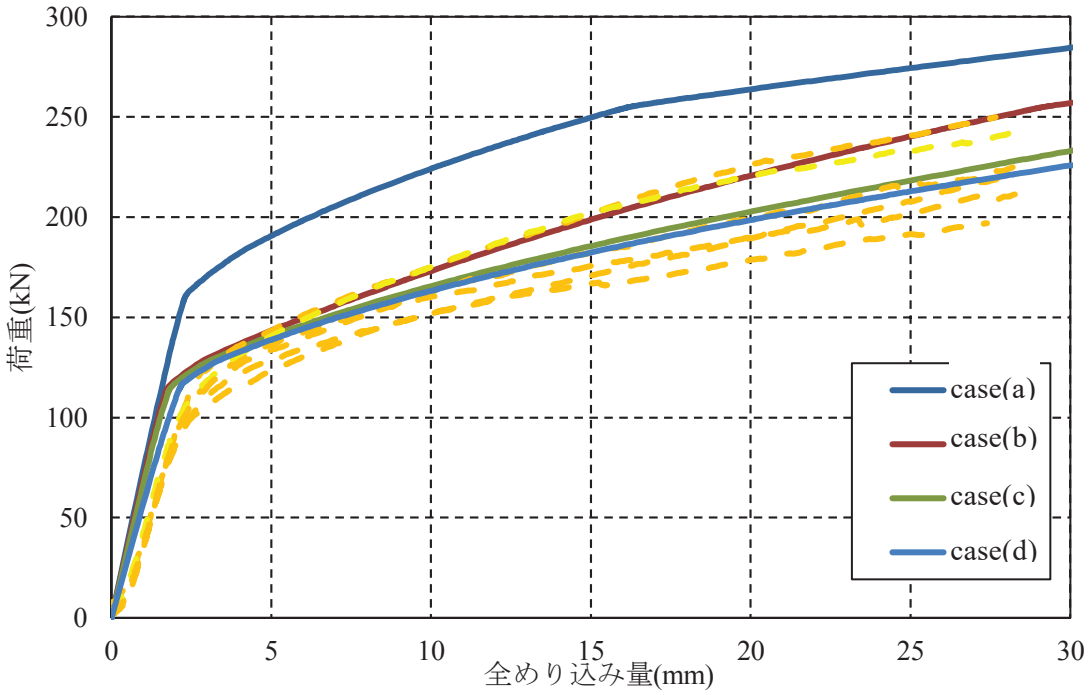


図 5.6-3　解析結果と実験結果の比較(C150-G210)

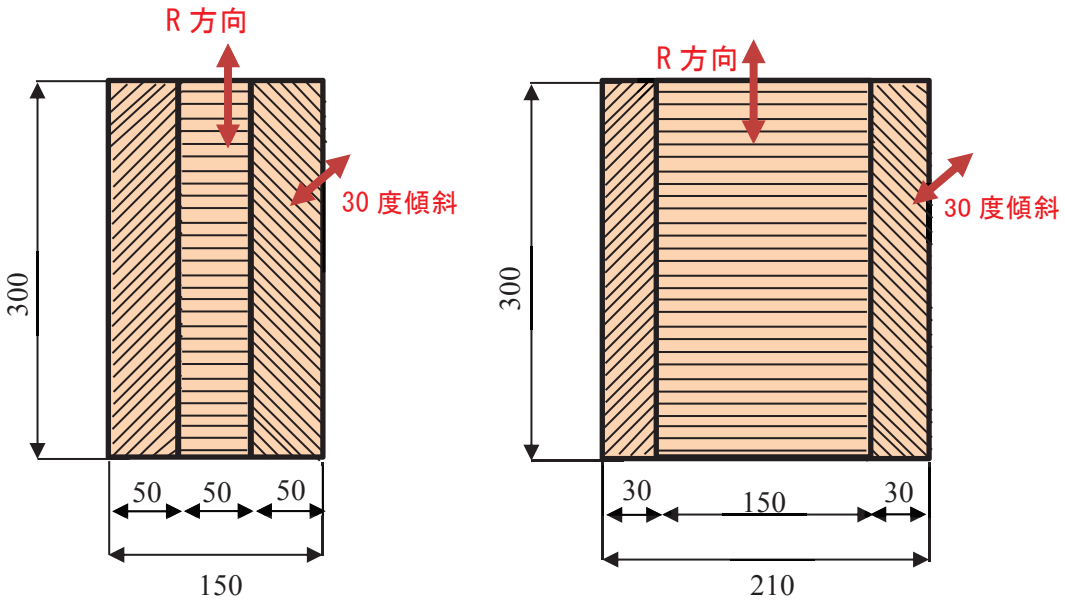
5.7　集成材の幅と試験体の剛性・耐力との関係性について

前述のように、実験においては集成材の幅が 150mm から 210mm に変化しても試験体の剛性や耐力には有意な差が見られず、幅の増大に比例して剛性・耐力も増大する数値解析結果とは異なる結果が得られた。このような実験と解析との相違がどのような要因で生じるのかを検討する中で、集成材を構成する各ラミナの木口面の年輪傾角が影響しているのではないかという仮説を立てた。

集成材の木口面は、図 5.7-1 に示すように加圧方向（図中では上下方向）の年輪傾角が幅方向の中心部では半径方向、端部に向かうに従って半径方向から追柾へと変化するような木目となっている。集成材の幅が広くなると、幅方向の端部では加圧方向がより追柾か接接線方向に近い向きとなることが分かる。

(C150-G150)　　(C210-G210)

図 5.7-1　集成材を構成するラミナの木口面の年輪傾角の例



(a) 集成材の幅が 150mm の場合　　(b) 集成材の幅が 210mm の場合

図 5.7-2　幅方向で年輪傾角が異なる解析モデルの概要

木材のヤング係数は一般に追柾方向＜接線方向＜半径方向のように年輪の向きによって値が異なる異方性を有することが知られており、集成材の上面が均一に加圧された場合においても、幅方向の加圧方向応力分布は均等にはなっていないものと考えられる。この仮説を検証するために、図 5.7-2 のように幅方向で加圧方向の年輪傾角が異なる場合の数値解析を行った。

図 5.7-2 (a)のケースについて、幅方向で年輪傾角が変化することによる荷重－変形関係の変化を図 5.7-3 に、初期剛性及び降伏応力の値を表 5.7-1 に示す。表中の（　）内の値は加圧方向がすべて半径（R）方向とした場合を基準とした場合の比率を示している。今回の解析では幅方向の中央 1/3 では加圧方向が R 方向、両側 1/3 では追柾（RT）方向と設定したが、幅方向全体として加圧方向が R 方向とした場合に比べると初期剛性は約 6 割、降伏耐力は約 4 割と大きく低下する結果となった。図 5-10 を見ると、実際の試験体では解析モデルよりも幅方向両端の年輪傾角は緩やかであると考えられるため剛性・耐力の低下も緩和されるものと思われるが、木口面での年輪傾角はいわゆるローリングシアーの影響を強く受けるため、試験体の剛性・耐力に及ぼす影響が大きいことが確認された。

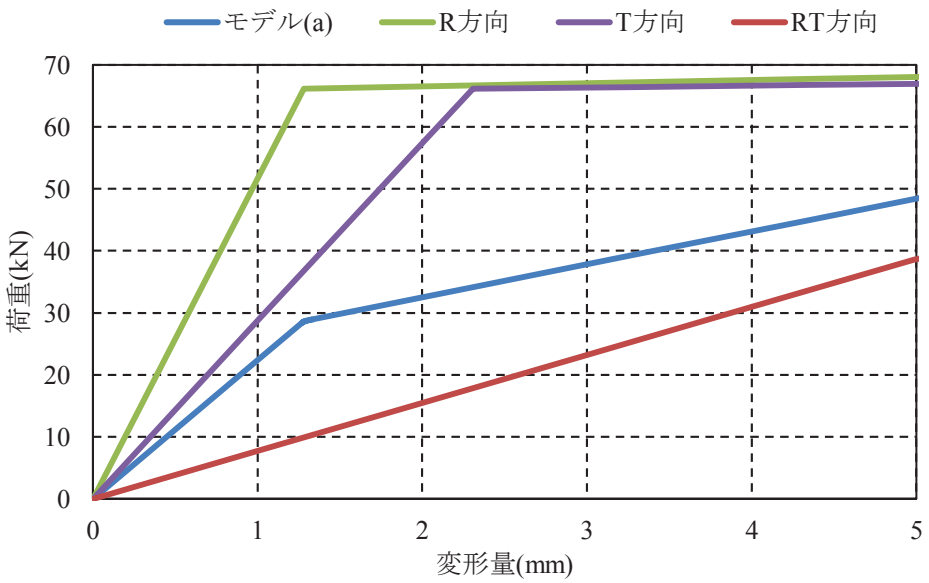


図 5.7-3　幅方向で年輪傾角が変化した場合の荷重－変形関係（集成材幅 150mm）

表 5.7-1　幅方向で年輪傾角が変化した場合の剛性・耐力（集成材幅 150mm）

加圧方向	初期剛性(kN/mm)	降伏耐力(kN)
モデル(a)	24.20　(0.47)	30.38　(0.46)
R 方向	51.62　(1.00)	66.15　(1.00)
T 方向	28.68　(0.56)	66.15　(1.00)
RT 方向	7.73　(0.15)	41.29　(0.62)

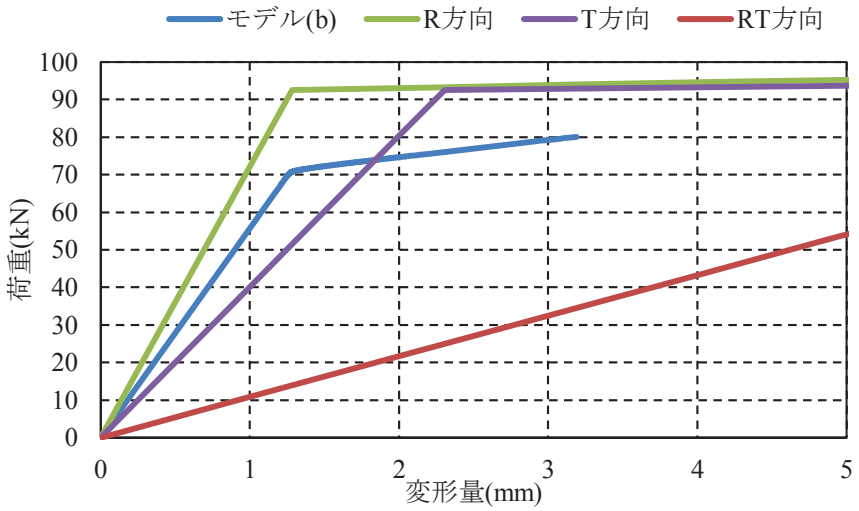


図 5.7-4　幅方向で年輪傾角が変化した場合の荷重－変形関係（集成材幅 210mm）

表 5.7-2　幅方向で年輪傾角が変化した場合の剛性・耐力（集成材幅 210mm）

加圧方向	初期剛性(kN/mm)	降伏耐力(kN)
モデル(b)	55.28　(0.76)	70.76　(0.60)
R 方向	72.27　(1.00)	92.61　(1.00)
T 方向	40.15　(0.56)	92.61　(1.00)
RT 方向	10.83　(0.15)	53.63　(0.57)

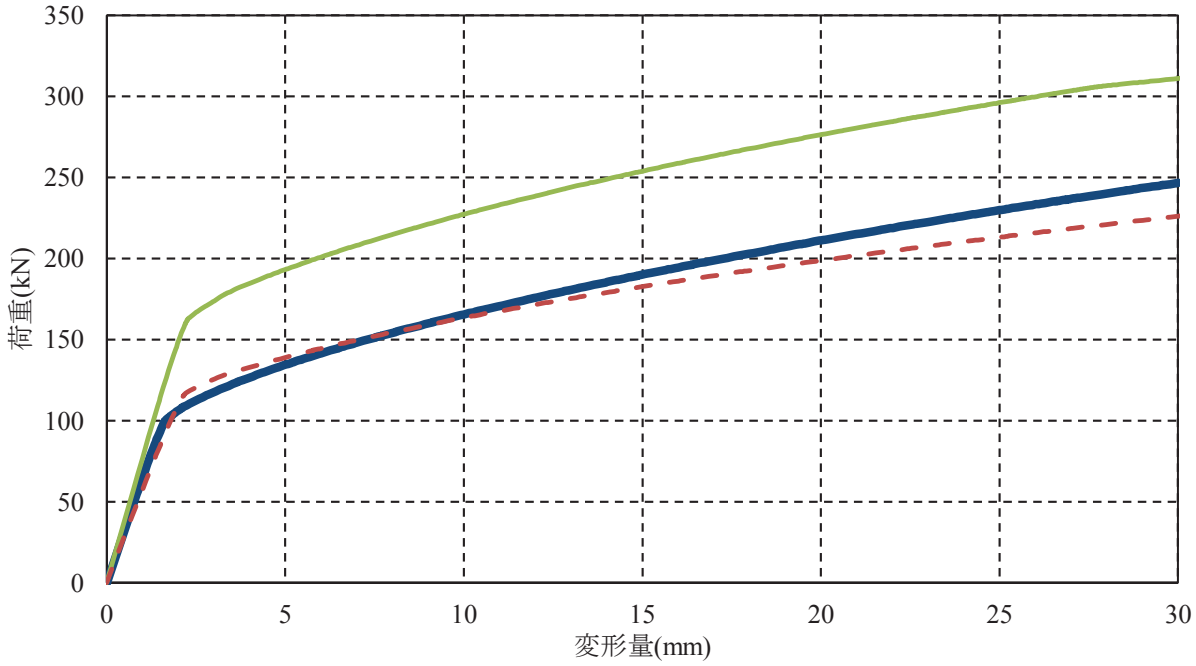


図 5.7-5　幅方向で年輪傾角が変化した場合の試験体の荷重－変形関係（C210-G210）

図 5.7-2(b)のケースについて解析を行った結果を図 5.7-4 及び表 5.7-2 に示す。上述の(a)の場合と同様に、初期剛性・降伏耐力ともに大きく低下することが分かる。

図 5.7-5 には、幅方向で年輪傾角が変化した場合を想定して加圧方向の材料特性を低減した場合の試験体 C210-G210 の荷重－変形関係を示す。緑色実線で示している加圧方向がすべて R 方向であるものとして計算した場合と比較して、青色実線で示している年輪傾角の変化を考慮した場合では剛性・耐力が低下し、破線で示している試験体 C150-G150 の結果と近いものとなっている。このように、今後追加の実験を行って更なる検証を行う必要があるが、実験において集成材の幅が変化した場合にも試験体の剛性・耐力が大きく上昇しない要因の一つとして、木口面の年輪傾角が影響している可能性は高いものと考える。

5.8 まとめ

本章では、第３章で示された CLT－集成材のめり込み実験結果を踏まえ、めり込み現象を数値解析により評価する際に材料定数の設定をどのように行うべきか検討した。得られた主要な知見は以下のように要約される。

- CLT の強軸側の特性値が集成材の繊維直交方向の特性値と比較して一定以上大きければ、CLT 側の材料定数は試験体の解析結果にほとんど影響しない。
- 集成材側の材料定数について、集成材を構成する各ラミナの特性値を個別に入力した場合でも全ラミナの平均値を採用した場合でも解析結果に大きな変化は見られないことから、材料定数として実験値を採用する場合には全ラミナの平均値を採用すればよいものと考えられ、公称値を用いる場合は層配置のヤング係数にそれほど大きなばらつきがないため安全側になることが推定できる。
- 降伏応力として実験により得られた特性値を採用し、接線係数をヤング係数の 1/150 とすれば、実験結果の荷重－変形関係を解析により概ね追跡可能である。
- 試験体 C150-G210 のように CLT と集成材とで幅が異なり、奥行き方向にもめり込み変形が生じるようなケースについて、本来は２次元解析による評価はできないが、解析モデルにおいて集成材の表層のラミナのみ厚さを加圧側の材の幅に合わせることにより、奥行き方向のめり込み変形に伴う影響を近似的に評価できる可能性を確認した。
- 解析では集成材の幅が大きくなるのに比例して試験体の剛性・耐力は増大するが、実験では幅が大きくなった場合にも有意な差は見られないという結果が得られた。このような実験と解析の相違については、集成材の木口面における幅方向での年輪傾角が変化することにより、単一方向に加圧すると想定した場合よりも剛性・耐力が低下することが要因である可能性が示唆された。

参考文献

1) CLT 設計施工マニュアル編集委員会編：2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル、pp.177-211、日本住宅・木材技術センター、2016 年
2) 日本建築学会編：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－、pp.402-405、2009 年
3) 光井周平、金澤寛、南陽二、河内武、近藤一夫：木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析（その３）弾塑性領域における定式化、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1、pp.337-338、2010 年 9 月

第 6 章　耐震フレームの解析

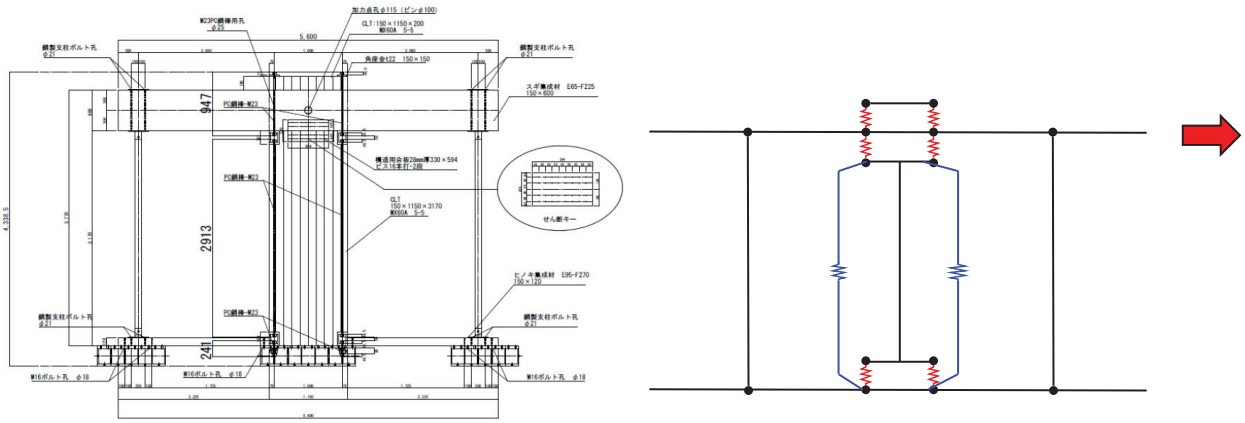
6.1　解析の概要

集成材フレーム＋CLT 壁パネルによる工法を構造設計で用いる構造解析モデルの提案を目的として、本年度実施した構面実験の事前・事後解析及び、3 階建ての構面を想定した解析モデルでの構造解析を行った。本章ではその概要について説明する。解析には京都大学生存圏研究所が無償配布している「WALLSTAT ver.4.1」を用いた。

6.2　事前解析

（1）平成 29 年度試験体を用いたキャリブレーション

本年度の事前解析に先立って、昨年度の実験結果を用いて、解析モデルのキャリブレーションを行った。図 6.1-1 に対象とした試験体（1F-J）と解析もモデルの概要を示す。集成材フレームは線材の梁要素とし、CLT パネルはせん断パネル置換モデルとした。PC 鋼棒は引張バネでモデル化し、CLT パネルと集成材フレーム間には圧縮バネを設定した。



(a)試験体 1F-J　　(b) 解析モデル

図 6.2-1　平成 29 年度試験体（1F-J）と解析モデル

解析モデルの集成材・CLT に用いた梁要素バネのパラメータは表 6.1-1 の通りとした。CLT は強軸のみが曲げ抵抗すると想定し、弾性係数を減じている。PC 鋼棒はカタログ [1] に記載の σ - ε の関係から断面積、長さに応じて図 6.1-2 の骨格曲線を設定した。集成材フレームと CLT 壁パネルの圧縮バネの剛性は平成 29 年度要素実験結果より概算し、1 層試験体の実験結果との整合性を考慮して 245kN/cm とした。

表 6.1-1 集成材、CLT の梁要素バネに設定した物性値

部材	弾性係数(GPa)	寸法
CLT 壁パネル（S60-7-7）	4.0	t=210mm, h=1150mm
2F・3F 集成材梁(E65-F225)	6.5	t=210mm, h=650mm
RF 集成材梁(E65-F225)	6.5	t=210mm, h=240mm

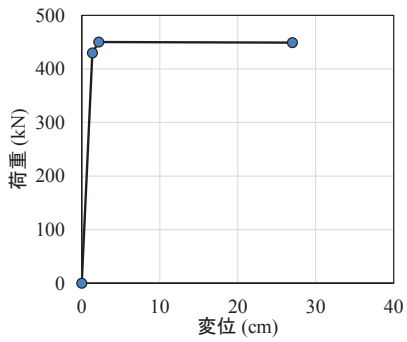
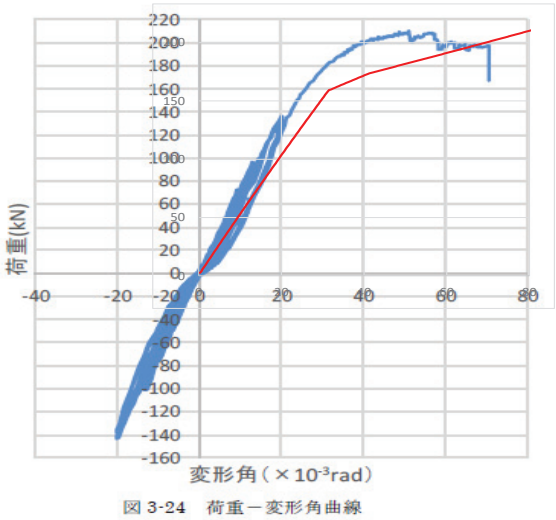
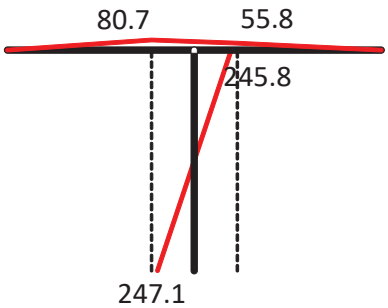


図 6.2-2　PC 鋼棒の引張バネの荷重変形関係

実験結果と荷重変形関係の比較と、PC 鋼棒が降伏した時点でのモーメント図を図 6.1-3 に示した。解析結果の方が剛性がやや低い結果となったが、降伏点など概ね追跡できているものと判断した。





(a) 荷重変形関係の比較（赤線：解析結果）　　(b) PC 鋼棒降伏時のモーメント図

図 6.1-3 荷重変形関係の比較とモーメント図

（2）本年度試験体の事前解析

前項での検討結果を踏まえ、キャリブレーションしたバネのパラメータを元に 2 層試験体の事前解析を行った。2 層目の PC 鋼棒のバネの接続位置は 1 層の CLT 壁パネルの上端部とした。PC 鋼棒の引張バネの荷重変形関係は前項と同様に断面積と長さに応じて図 6.1-5 の骨格曲線を設定した。

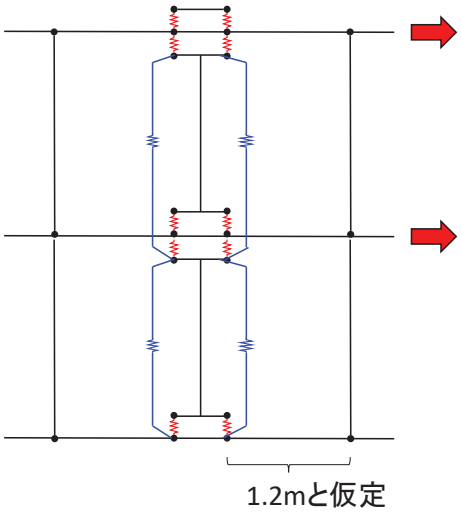
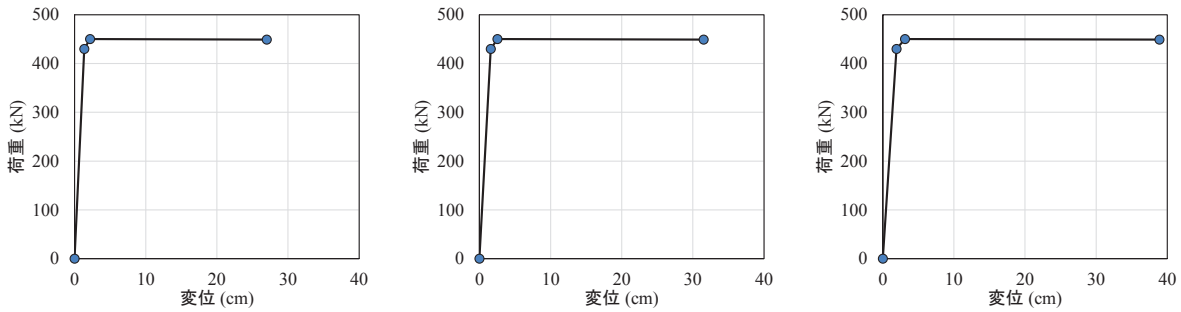


図 6.1-4 2 層試験体の解析モデルの概要



(a) 1 層目　(b) 2 層目　(c) RF

図 6.1-5　PC 鋼棒の引張バネの荷重変形関係

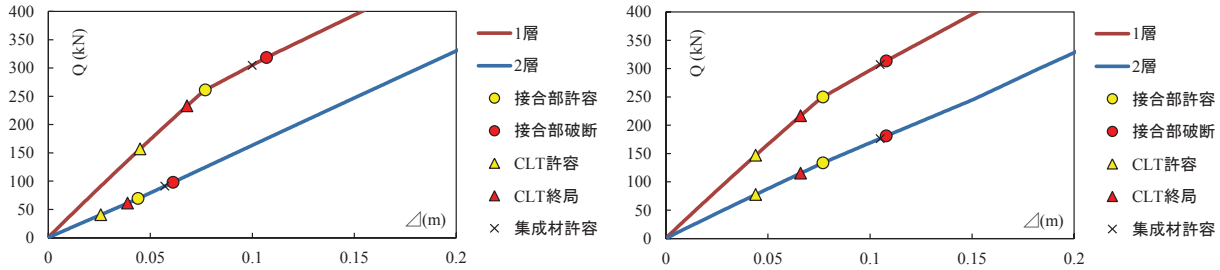
1 層と 2 層の変形比率を 2 層：1 層＝11:7 にした場合と、2:1 にした場合でプッシュオーバー解析を行った。図 6.1-6 に荷重変形関係を示し、図 6.1-7～6.1-8 に C_0=0.25 時、及び PC 鋼棒が降伏した時点でのモーメント図を示した。図中の「接合部許容」「接合部破断」はそれぞれ PC 鋼棒が図 6.1.5 の引張バネが第 1 折れ点、終局荷重に達した時点を示し、CLT 許容、CLT 終局は式 6.1-1 を検定式として、CLT が許容応力度と材料強度に達した時点を示した。めり込みの検定は行っていない。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} < 1.0 \qquad \text{（式 6.1-1）}$$

ここで、

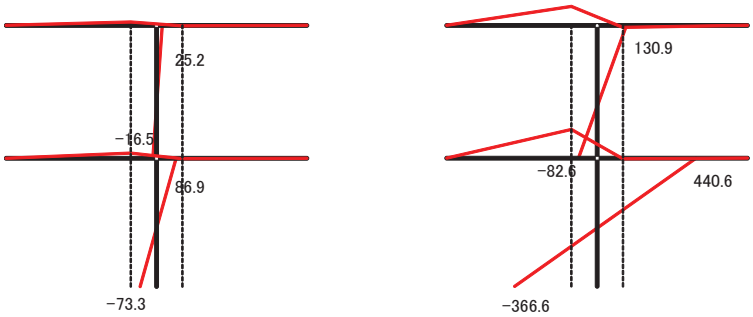
$$\sigma_c = \frac{P}{A} \qquad \sigma_b = \frac{M}{Z} \qquad F_c = 9.25 \qquad F_b = 9.25$$

いずれの解析結果でも 1 層の層せんだん力が 150kN 程度で CLT 壁パネルが許容応力度に達し、その後 250kN 程度で PC 鋼棒が降伏し、2 次勾配に移行する結果となった。



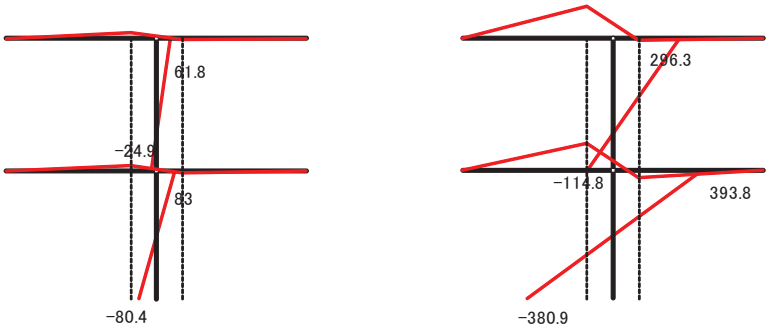
(a) 1 層：2 層の変形比率 11:7　　(b) 1 層：2 層の変形比率 2:1

図 6.1-6 プッシュオーバー解析の荷重変形関係



(a) C_0=0.25 時　　(b) PC 鋼棒降伏時

図 6.1-7 変形比率 11:7 のモーメント図



(a) C_0=0.25 時　　(b) PC 鋼棒降伏時

図 6.1-8 変形比率 2:1 のモーメント図

6.3　事後解析

（１）本年度試験体の事後解析モデル

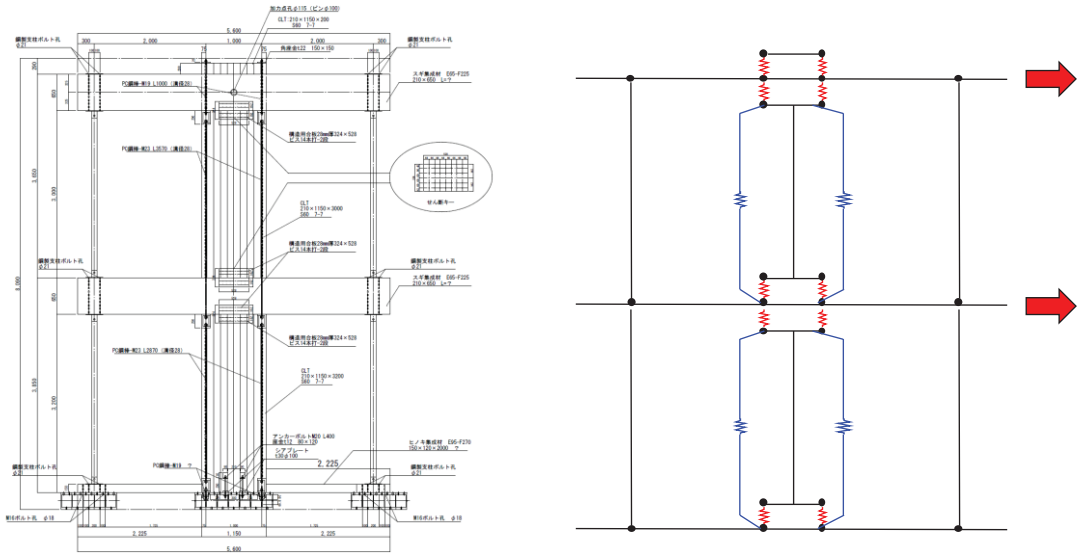
本年度の 2 層試験体の解析結果の再現を目的として、以下通り解析モデルを修正し、事後解析を行った。

【事前解析からの変更点】

①集成材のアームの長さを試験体に合わせて 1.2m から 2m に変更

②集成材フレームと CLT 壁パネルの圧縮バネを今年度要素実験結果に準拠して設定。
（図 6. 3-2 に実験結果と重ね合わせて荷重変形関係を示した）

③PC 鋼棒の塑性率を実況に合わせて、10%から 5%に変更
（図 6. 3-3 に修正後の荷重変形関係を示した）



(a) 試験体　　(b) 解析モデル

図 6.3-1　2 層試験体と解析モデル

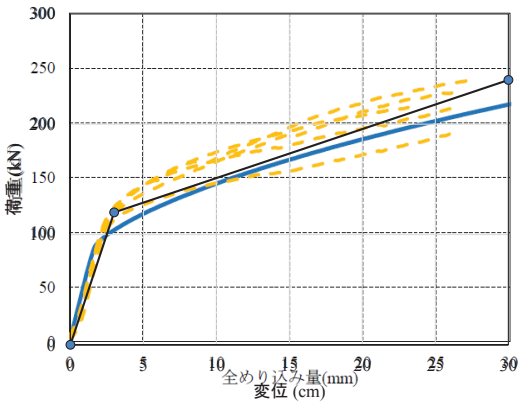
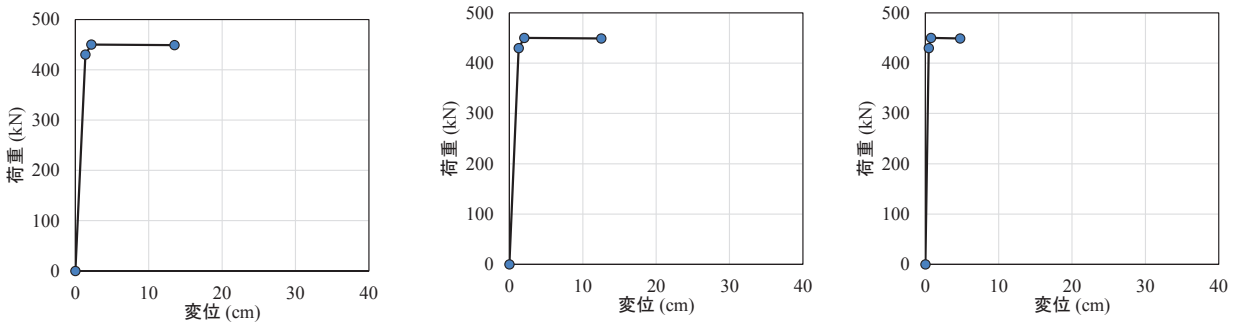


図１　解析結果と実験結果の比較

図 6.3-2 集成材フレームと CLT 壁パネルの圧縮バネの荷重変形関係

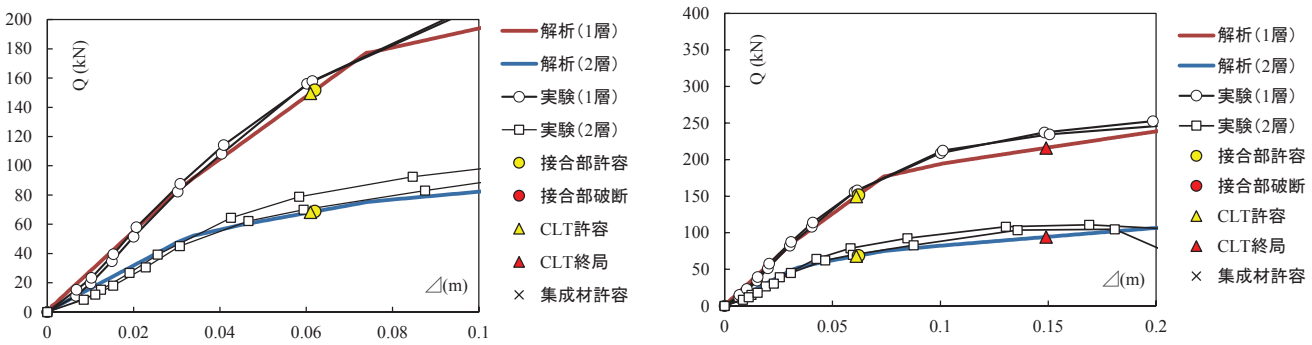


(a) 1 層目　　(b) 2 層目　　(c) RF

図 6.3-3　PC 鋼棒の引張バネの荷重変形関係

（２）解析結果と実験との比較

図 6.3-4 に実験結果と重ね合わせて、解析結果の荷重変形関係を示した。事前解析では耐力が過大評価であったが、事後解析では初期の剛性や降伏後の耐力を含め実験の荷重変形関係が解析で精度よく追跡できていることが分かる。めり込みバネの荷重変形関係が層の荷重変形関係に大きく影響を及ぼすことが分かった。



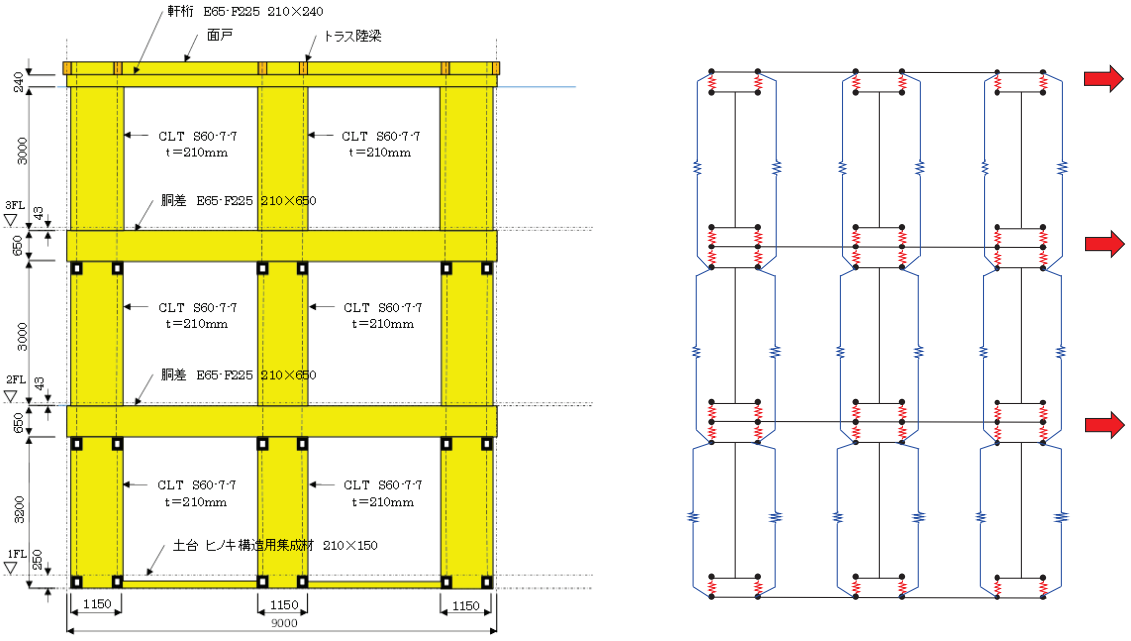
(a) 全体の荷重変形関係　　(b) 小変形域での比較

図 6.3-4 プッシュオーバー解析の荷重変形関係

6.4　3 層構造体での解析

（1）3 層構造体の解析モデル

2 章で検討したモデルプラン A に対して、構面としての必要性能を検討するため、前節までの解析モデルを元に、3 階建て構面の構造体の解析モデルを用いて、プッシュオーバー解析による限界耐力計算により構造的検討を行った。解析モデルの概要を図 6.3-6 に示した。



(a) 3 階建てモデルプラン　　(b) 解析モデル

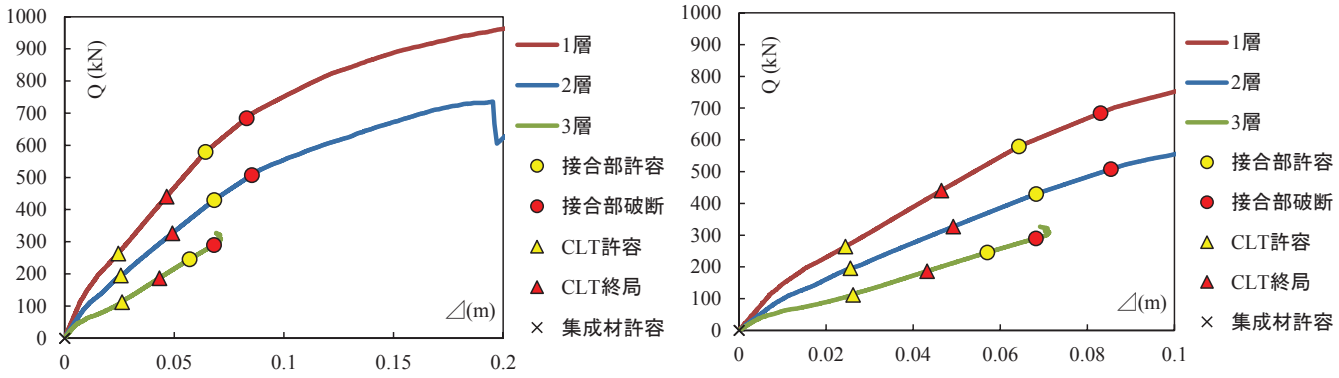
図 6.4-1　3 層モデルプランと解析モデル

（2）解析結果

鉛直荷重はモデルプランの計算例における荷重の 1/2（2F、3F は 227kN、RF は 151kN）を付加し、各層を Ai 分布によるプッシュオーバーで荷重増分解析を行った。限界耐力計算による各層の層間変形の計算結果（告示の第 2 種地盤のスペクトルを用いた）を表 6.4-1 に示した。各層ともに損傷限界、安全限界以内に収まる結果となったが、接合部の終局大量、CLT の材料強度が基準値を超える結果となった。

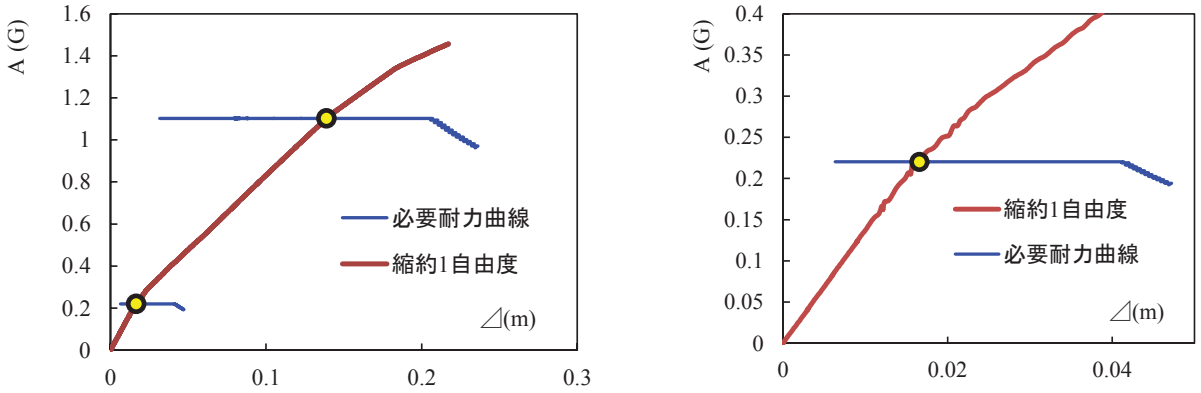
表 6.4-1 各層の層間変形角

層	損傷限界	安全限界
1	1/402	1/46
2	1/336	1/41
3	1/340	1/63



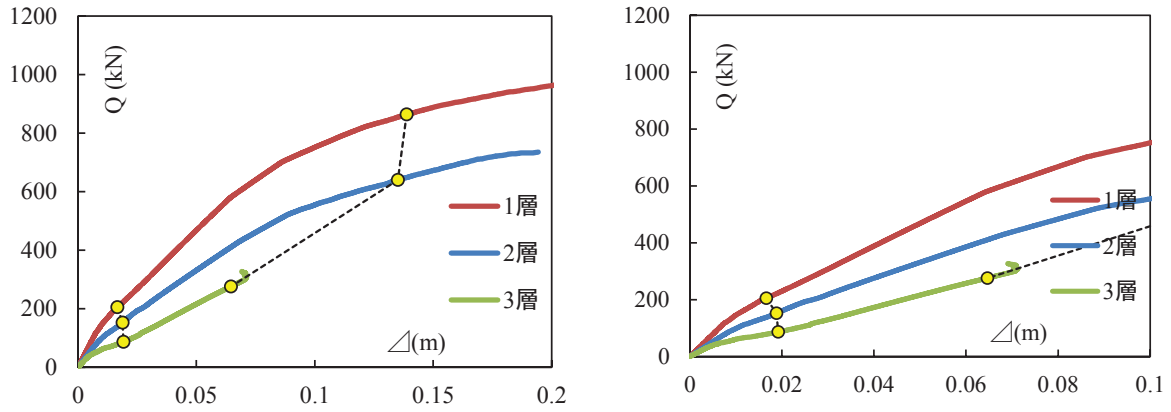
(a) 全体の荷重変形関係　　(b) 小変形域

図 6.4-2 プッシュオーバー解析の荷重変形関係



(a) 全体の荷重変形関係　　(b) 小変形域

図 6.4-3 一自由度縮約の A-⊿と必要耐力曲線



(a) 全体の荷重変形関係　　(b) 小変形域

図 6.4-4 各層の Q-⊿と稀・極稀の応答点

6.5 まとめ

第 4 章の 2 層試験の構造解析を、第 3 章のめり込み試験の結果を活用して、構造解析ソフト WALLSTAT により実施した。構造解析結果と試験結果はめり込み剛性を調整したモデルでは概ね一致し、これにより、ここで設定した解析モデルと、実験で得られためり込み剛性、及び強度を活用すれば、図 2.1 の基本モデルプランをベースにした建物の構造解析が適切に実施できると期待され、本工法の実用化に向け、パラメトリック・スタディを繰り返すことによって、本工法の実用化に向け、7.3 に示す、残されている課題の整理と今後の発展にも役立つものと期待される。

ただし CLT パネル工法では、CLT が地震時・暴風時に生じる短期の水平荷重と共に、長期の鉛直荷重も負担していることから、CLT 脚部の転倒モーメントと、鉛直荷重の大きさによって、逐次、変曲点が変化することになるため、構造設計の実務においては、この問題をどのように処理するかは、木質系のラーメン構造と同様の課題を残している。

文献

1) 高周波熱錬株式会社「PC 鋼棒（丸鋼棒） JIS G 3109」

第 7 章　まとめ

7.1　実験を踏まえての評価

7.1.1　2 層の構面せん断試験

第 4 章の 2 層の構面せん断試験の、2 体目、3 体目の特性値を表 7.1（表 4.4-7 参照）に示す。

準耐火建築物の損傷限界変形角の要求性能である 1/150rad 時の水平力は、概ね、表 2.13 の 1 階、及び 2 階の必要水平せん断耐力を満たしている。

また木造建築物で想定されている限界耐力計算の安全限界変形角である 1/30rad を超える変形性能を有しており、耐力壁の構造特性係数は、1 階で 0.53、2 階で 0.47 となった。

表 7.1　2 層構面せん断試験の試験結果（2 体目、3 体目）

		最大荷重	終局耐力	構造特性係数	評価項目				短期基準せん断耐力
		Pmax	Pu	Ds	Py	Pu（0.2/Ds）	2/3・Pmax	P（1/150）	P_0
	UNIT	kN	kN		kN	kN	kN	kN	kN
2層目	試験体2	111.0	102.3	0.45	67.2	45.0	74.0	39.3	39.3
	試験体3	104.9	93.1	0.48	57.2	38.6	69.9	45.0	38.6
	Ave.	108.0	97.7	0.47	62.2	41.8	72.0	42.2	39.0
1層目	試験体2	252.8	225.8	0.53	146.4	85.5	168.5	51.4	51.4
	試験体3	245.9	224.5	0.52	139.1	86.6	163.9	58.0	58.0
	Ave.	249.4	225.2	0.53	142.8	86.1	166.2	54.7	54.7

尚、1/30rad 以降の加力では、せん断力の伝達に採用した建築用ビスが原因となる、横架材の横引張による割れが発生している。この現象は靭性に影響するため、使用する建築用ビスの径や配置等、再考する必要がある。

7.1.2　めり込み試験

本事業で実用化を目指す、図 1.1 に示す軸組併用型 CLT パネル工法は、横架材の曲げ戻し効果、及び鉛直荷重による抑え込みの効果が見込めるが、横架材が負担する曲げモーメントとせん断力に対し、部材の耐力が確保されることが前提条件であり、横架材の破断は建物全体の脆性的破壊にも繋がるため、注意が必要である。構造計算において、各部材及び接合部の検証を適切に実施するには、各部材及び各接合部の、降伏前・降伏後の剛性の評価が重要で、特に横架材と CLT のめり込み剛性については、実験事例も少ないため、平成 28 年度事業に引き続き、第 3 章に示すめり込み試験を実施した。

表 7.2　実験から得られた CLT と横架材の構造特性

項目	数値	単位
降伏前のめり込み剛性	74.6	kN/mm²
降伏後のめり込み剛性	3.6	kN/mm²
降伏強度	3.35	N/mm²

＊CLT：S60-7-7、樹種　スギ、幅　210mm
　横架材：E65-F225、樹種　スギ、幅 210mm

実験の結果、本事業で想定した建物のモデル（図 2.1、図 2.2 参照）を対象とした幅 210mm の横架材（構造用集成材，樹種　スギ）と幅 210mm の CLT（S60-7-7、樹種　スギ）のめり込み剛性、及び降伏強度は表 7.2 の値が得られた。

ただし第 3 章、第 5 章でも記載した通り、めり込み剛性、めり込み強度とも、CLT の強軸ラミナと横架材の接触面積に比例した数値にはならない。この特性は CLT の構成や樹種によっても異なると推察されるため、今後の検討課題となる。

7.2　構造解析を踏まえての評価

7.2.1　構造フレーム

第 4 章の 2 層試験の構造解析を、第 3 章のめり込み試験の結果を活用して、構造解析ソフト WALLSTAT により実施した。構造解析結果と試験結果はめり込み剛性を調整したモデルでは概ね一致し、これにより、ここで設定した解析モデルと、実験で得られためり込み剛性、及び強度を活用すれば、図 2.1 の基本モデルプランをベースにした建物の構造解析が適切に実施できると期待され、本工法の実用化に向け、パラメトリック・スタディを繰り返すことによって、本工法の実用化に向け、7.3 に示す、残されている課題の整理と今後の発展にも役立つものと期待される。

ただし CLT パネル工法では、CLT が地震時・暴風時に生じる短期の水平荷重と共に、長期の鉛直荷重も負担していることから、CLT 脚部の転倒モーメントと、鉛直荷重の大きさによって、逐次、変曲点が変化することになるため、構造設計の実務においては、この問題をどのように処理するかは、木質系のラーメン構造と同様の課題を残している。

7.2.2　めり込み特性

第 3 章で実施しためり込み試験を対象に、平面応力状態を想定した 2 次元応力解析によるめり込み剛性の推察を実施した。横架材及び CLT の幅が 150mm に対しては、実験結果を踏まえて設定した材料特性値を用いた解析により得られる荷重―変形曲線が概ね実験結果と一致するが、横架材及び CLT の幅が 210mm については、剛性、降伏強度とも、実験値よりも高い結果になっている。その要因について解析により検討した結果、横架材として用いる集成材の木口面の年輪傾斜が影響している可能性が示唆された。

横架材と CLT のめり込みの強度性能の評価は、軸組併用型 CLT パネル工法の実用化に向けて非常に重要なポイントであり、今後、様々な CLT の構成、部材の寸法、樹種の変化に対して、常に実験をしてパラメータを得なければいけない状況におかれており、設計者の費用負担が生じるため、本工法の採用が見送られることになる。また第 3 章の実験結果で明らかになったように、接合部のめり込みによる剛性・耐力が単純に CLT と横架材の接触面積に比例しないことから、木材の特性をうまく反映させた解析モデルの構築が、適格な構造計算に繋がるものと期待される。

また 7.2.1 で課題としてあげた、CLT の転倒モーメントと鉛直荷重の関係を正しく評価することや、フレームの構造解析モデルの簡素化を図るには、このめり込み剛性の解析の研究は、引き続き実用化を睨んで進めていくことが望まれる。

7.3　実用化に向けた今後の課題

7.3.1　学校校舎への実用化に向けて

本工法の実用化に向けて、図 2.4 に示す、桁行方向の耐力壁線と直交する、張間方向の壁の CLT の納まり、及び横架材の継手位置の問題を解決する必要がある。平成 28 年度の事業にて実施した 1 層の構面せん断試験（図 2.6 参照）では、胴差しの端部から PC 鋼棒までの端距離が 75mm と短かったため、PC 鋼棒が端抜け（写真 2.1 参照）してしまう現象と、横架材の端部に CLT が配置された場合に想定される、めり込み剛性の低下に対し、どのように対策を講じるか、具体案の提案と検証が必要になる。

7.3.2　4 階建て建築物への応用

平成 30 年 3 月 6 日、木造建築物の整備の推進などの社会的要請等に対応して規制を見直した「建築基準法の一部を改正する法律案」が、閣議決定され、耐火構造等とすべき木造建築物の対象の見直し（高さ 13m・軒の高さ 9m 超え→高さ 16m・階数 4 以上）とともに、4 階建てであっても、木材をそのまま見せる等の耐火構造以外の構造を可能とするよう基準の見直しが行われた。

本事業では、学校の校舎を対象にして研究開発を進めてきたが、用途を事務所で想定すると、学校校舎で設定した重要度係数 0.25 を、必ずしも考慮する必要がないこと、空間が学校建築よりも狭くなることを踏まえると、4 階建てに対しても応用の利く工法であると推察される。耐火性能についても、まだ現段階（平成 31 年 3 月 25 日時点）では、要求される準耐火性能は明らかでないが、仮に 75 分の準耐火性能が要求性能で、60mm の燃えしろで対応できるならば、本事業で想定したディテールでも対応可能と期待される。