

令和4年度林野庁補助事業
森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策

CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業

CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等

CLTの特性を活かした

汎用性の高い折版構造による建築物の実用化

令和5年3月

木構造振興株式会社

はじめに

2016年に木質系厚板面材としてCLTパネル工法の整備がされることとなったが、それまでには、並行してCLTを用いたさまざまな建築の提案がされ実現してきた。CLTを壁、床・屋根として用いる壁式工法だけでなく、柱梁の軸組の中にCLTを耐力壁あるいは床・屋根として用いる工法、CLTを壁柱として用いる工法、大断面梁として上り梁として用いる工法、CLT圧縮材として用いる張弦梁、トラス構造、折版構造として用いる床・屋根工法などを実現してきた。こうした工法の実現においては、常に経済性が課題になっている。CLT部材の材料費、加工費、運搬費、施工費までトータルで考えた場合、材料費、加工費については製造サイドの努力に頼る部分が多いが、運搬費、施工費は、設計サイドでの工夫の余地がある。特に大版のCLTを用いた施工効率向上は海外でもその優位性が示されている。

本事業では、幅2.4m程度の部材運搬に制限される日本での道路輸送事情、海外に比べてヤング係数の低いスギCLTを前提とした構造システム、木造＝軸組工法を用いた開放的な木造建築を活用してきた文化を前提にしたCLTの床、大スパンの屋根システムに向けた構造設計者への基礎情報の整備を目指している。輸送の限界サイズを前提に、現場接合での大型パネル化と施工効率向上、小パネルによる折版構造での薄板パネルによる合理的な大スパンの実現といった構造計画においては、面材パネルの面外方向の曲げ、せん断性能と面材パネル同士の幅方向、あるいは角度をもった接合の特性を把握することが重要である。基礎的な情報を提供することにより、プロジェクト初期の計画段階において、部材寸法の概要をとらえやすくするとともにプロジェクトの実現可能性、改良の方向性を検討しやすくなりCLTを用いた建築の実現可能性が高まることになる。今年度は、さらに施工の合理化による経済性向上の検証を実施している。現場接合による大版部材の構築、ハングアップ・システムによる施工を考慮した接合金物、施工治具を提案し、部分施工を実施し実現可能性を課題を提示している。この試験施工にあたっては、躯体工事だけでなく防水工事、仕上工事との連携を意識した構造システムとして全体工事費での合理化をめざしている。

こうした目標を実施するため、本事業では、従来の木質構造研究者だけでなく、材料特性を活かした木造建築の構造設計を担ってきた構造設計者、施工業者、防水メーカーも事業に参加することにより、実務者が望む、実務者が活用しやすいデータの収集を試みている。

今後、本事業の成果が、CLTの需要拡大と共に魅力的な木造建築の実現に役立つことを期待している。

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：金箱温春（金箱構造設計事務所 代表取締役）

萩生田秀之（KAP 取締役／共立女子大学家政学部建築・デザイン学科准教授）

田中 圭（大分大学理工学部 准教授）

光井周平（広島工業大学環境学部 講師）

森 拓郎（広島大学大学院先進理工系科学研究科）

玉置教司（愛媛県農林水産研究所林業研究センター 担当係長）

関根治之（田島ルーフィング株式会社防水開発部）

オブザーバー：

松本直之（東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻）

砂田雄太郎（株式会社サイプレス・スナダヤ 専務取締役）

CLT・LVL等の建築物への利用環境整備事業

CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等

CLT の特性を活かした汎用性の高い折版構造による建築物の実用化

*はじめに

*委員名簿

目 次

第 1 章	事業概要	・・・	1
1.1	事業の目的	・・・	1
1.2	事業の内容	・・・	2
1.2.1	折版構造の利点と課題	・・・	3
1.2.2	ツーウェイ・スラブの実用化に向けて	・・・	3
第 2 章	折版構造の構造設計	・・・	5
2.1	折版構造屋根の種類	・・・	5
2.2	施工方法の検討	・・・	6
2.2.1	仮組みでの検討課題	・・・	6
2.2.2	建て方方法の提案	・・・	8
2.3	接合ディテールの検討	・・・	9
2.3.1	接合金物の選択	・・・	9
2.3.2	蝶番金物の検討	・・・	9
2.4	折版構造屋根の試設計	・・・	11
2.4.1	解析条件	・・・	11
2.4.2	解析結果	・・・	19
2.4.3	応力検定	・・・	37
2.5	接合金物のせん断試験	・・・	39
2.5.1	試験体概要	・・・	39
2.5.2	試験方法	・・・	40
2.5.3	試験結果	・・・	40

第3章	縮小モデルでの実験	・・・	47
3.1	試験体概要	・・・	47
3.2	組み立て	・・・	49
3.3	加力試験	・・・	51
3.3.1	試験方法	・・・	51
3.3.2	試験結果	・・・	53
3.3.3	考察	・・・	54
第4章	折版構造屋根のモックアップ	・・・	55
4.1	試験体の概要	・・・	55
4.2	試験場所	・・・	58
4.3	仮設工事	・・・	59
4.3.1	仮設基礎の設置	・・・	59
4.3.2	敷台の設置	・・・	61
4.3.3	仮設鋼材の設置	・・・	62
4.3.4	ダイロッド	・・・	64
4.4	支承金物	・・・	66
4.5	接合金物	・・・	70
4.6	吊治具	・・・	71
4.6.1	建て方の計画	・・・	71
4.6.2	吊治具	・・・	75
4.7	CLTの加工	・・・	81
4.7.1	加工図	・・・	81
4.7.2	加工	・・・	84
4.8	ハンガアップ	・・・	87
4.8.1	CLTの敷設	・・・	87
4.8.2	蝶金物の取り付け	・・・	89
4.8.3	防水工事	・・・	89
4.8.4	ハンガアップ	・・・	90
4.9	作業工程	・・・	93
4.10	課題と対処法案	・・・	94
4.10.1	支承金物	・・・	94
4.10.2	ハンガアップ手法の再考	・・・	98
4.10.3	x方向への移動システム	・・・	102
4.10.4	接合部の施工精度	・・・	102
4.10.5	頂部の納まり	・・・	104
4.10.6	CLTのNC加工の留意点	・・・	106
4.10.7	CLT躯体の接合	・・・	107

6.3.3	接合部をモデル化するせん断バネ特性の影響	・・・153
6.3.4	CLT の材料特性の影響	・・・154
6.3.5	実験結果と解析結果の比較	・・・156
6.3.6	田の字プランのモデルを用いた跳ね出し形式の効果の検証	・・・160
6.4	動的試験の結果を踏まえた設計上の留意点	・・・162
6.4.1	分析データの概要	・・・162
6.4.2	加振位置または CLT 枚数による 1/3 オクターブバンド分析結果の比較	・・・164
6.4.3	中央で加振した場合における CLT 4 枚と 3 枚の比較	・・・168
6.4.4	まとめ	・・・169
第 7 章	経年変化の検証	・・・171
7.1	非対称構成の CLT の暴露試験による経年変化	・・・171
7.1.1	試験目的	・・・171
7.1.2	試験体概要	・・・171
7.1.3	試験の結果	・・・172
7.2	屋外暴露実験における CLT 内部の含水率の変化	・・・175
7.2.1	計測の目的	・・・175
7.2.2	計測概要	・・・175
7.2.3	外部環境	・・・176
7.2.4	試験体各面の様子	・・・178
7.2.5	計測結果	・・・180
7.2.6	まとめ	・・・186
7.3	接合部のクリープ試験	・・・187
7.3.1	接合部のクリープ試験の目的	・・・187
7.3.2	試験概要	・・・187
7.3.3	実験結果 (2023 年 2 月 16 日までのデータ)	・・・191
第 8 章	まとめ	・・・195
8.1	折版構造	・・・195
8.1.1	実際により得られた成果	・・・195
8.1.2	今後の検討課題	・・・196
8.1.3	CLT 利用拡大に向けての普及活動	・・・197
8.2	ツーウェイ・床スラブ	・・・198
8.2.1	解析により確認できた項目	・・・198
8.2.2	経年変化の検証	・・・199

第 1 章 事業概要

1.1 事業の目的

CLT は、図 1.1 に示すように 2 方向にラミナが配向されるため、双方向に対し曲げ・引張・圧縮抵抗を有する木質材料である。この特徴を屋根や床に巧く活かせれば、強度性能上有意な状況が作れると期待される。加えて、大きな平版の利用は、使用する部材数が少なくなるとともに、垂木や母屋を省略でき、CLT 表面を仕上げにすれば、内装工事も削減できるため、工期短縮と建設コストの低減効果が見込める。しかし国内では運搬上の問題から、CLT の幅寸法は制限を受け、幅広い CLT を利用できないことから、床や屋根に使用される時は、単純梁や連続梁のようなワンウェイに架け渡す構造形式で使用されており、現時点では、CLT の双方向性という特徴が活かされていない状況にある。

そこで CLT を利用した折版構造の屋根（図 1.2 参照）の具現化と、短辺方向の接合部に曲げモーメントが伝達できる接合手法を取り入れたツーウェイ・スラブ（図 1.3 参照）の実用化を目指して、この CLT の特徴を引き出し、CLT の利用拡大に繋げることを、本事業の目的とした。

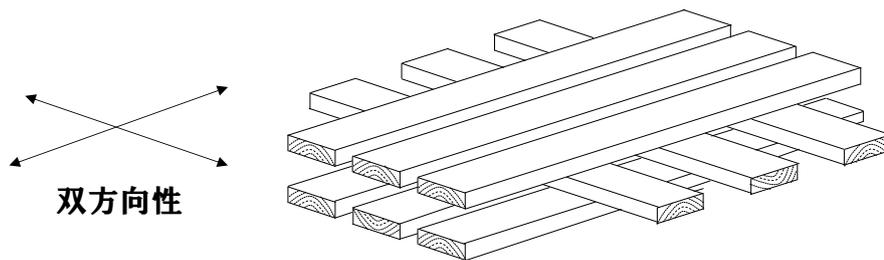


図 1.1 CLT（5層5プライ）のラミナの配向

例えば

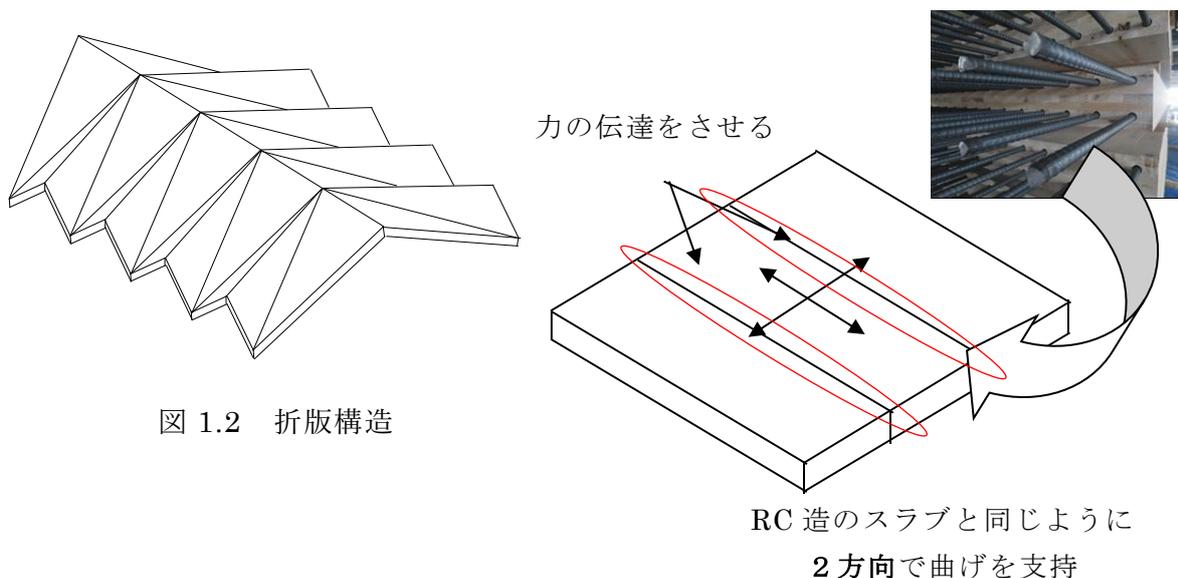


図 1.2 折版構造

図 1.3 ツーウェイ・スラブ

1.2 事業の内容

1.2.1 折版構造の利点と課題

折版構造は、双方向性という特徴を有する CLT だからこそできる構造形式である。具現化できれば、次のような効果が期待される。

① 単位面積当たりの木材使用量の削減

折版構造により建築物が構築できると、単位面積あたりの CLT 利用量が削減できると見込まれ、コスト削減効果が期待できる。昨年度、試設計したプラン（スパン 20m）で、3層3プライ、厚み 90mm の CLT を使用したと仮定すると、木材使用量は約 $0.25\text{m}^3/\text{m}^2$ となり、この数値は軸組工法の使用量に匹敵する。この場合、炭素貯蔵効果は $60\text{kg-C}/\text{m}^2$ となる。

② 生産効率の向上

CLT で主要構造部を構成する工法は、他の工法と比較するとコストアップするイメージがある。木材の使用量が増えることが大きな原因ではあるが、一方で、大きな平板を利用することから、現場での工数の削減、並びに施工期間の短縮が期待される。

③ 接合部のコスト軽減

折版構造の特徴は、CLT の継手に、曲げモーメントが発生せず、圧縮力とせん断力の伝達が主になることである。CLT パネル工法で価格が向上する理由のひとつが、接合金物のコストアップであるが、折版構造を採用することで、脚部以外は特殊な金物を使用する必要がなく、接合部に必要なコストが、大幅に削減されることが期待される。

④ 折り紙式の折版構造は、デザイン性の高い空間を構成できる。

一方で折版構造を具現化するには、下記のような課題がある。

① 折版構造は形状が複雑になるため、仕上げ工事や仮設工事の材工価格が増加する可能性がある。

② 木造による折版構造は事例が少なく、仮設計画・建方計画に必要な歩掛等に関する情報がないため、工事費の概算を算出することができない。

③ 屋根の形状が複雑になると、漏水や気密性・断熱性能が低下する懸念があり、ディテールや施工方法の検討を十分に検討しておく必要がある。

そこで令和3年度に試設計を行った、桁行方向に連続させることで工場や屋根付きのスポーツ施設が実現できる、汎用性の高いと推察される架構フレームのユニット（図1.4）を、実大サイズで組み立てることにより、コスト低減のためのVE案、建築物の品質性能、及び作業の安全性を確保するための手法を明確にし、上記の課題解決を図ることにした。

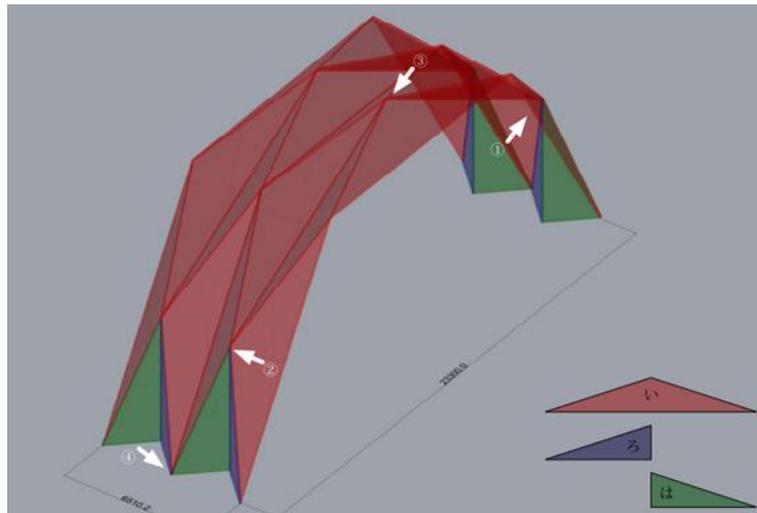


図 1.4 令和 3 年度に試設計を行った架構フレームのユニット

1.2.2 ツーウェイ・スラブの実用化に向けて

図 1.3 を実現するため、令和 2 年度は接合部の実験（図 1.5 参照）を実施し、そのデータは、ヴォールト形状の屋根を持つ愛媛県の事務所（写真 1.1）に活用されている。また令和 3 年度には、令和 2 年度の成果を踏まえて、6m×6m の居室を田の字に配置した建物を想定（図 1.6）した実大サイズの床スラブを製作し、4 辺支持、2 辺支持（2 方向）、4 点支持の 4 条件で、静的載荷試験（写真 1.2 参照）及び動的試験（写真 1.3 参照）を実施している。

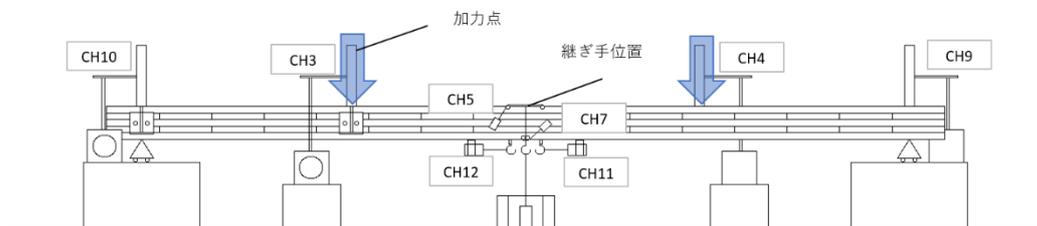


図 1.5 令和 2 年度に実施した接合部の強度試験の方法



写真 1.1 南予森林組合事務所（写真提供：新企画設計）

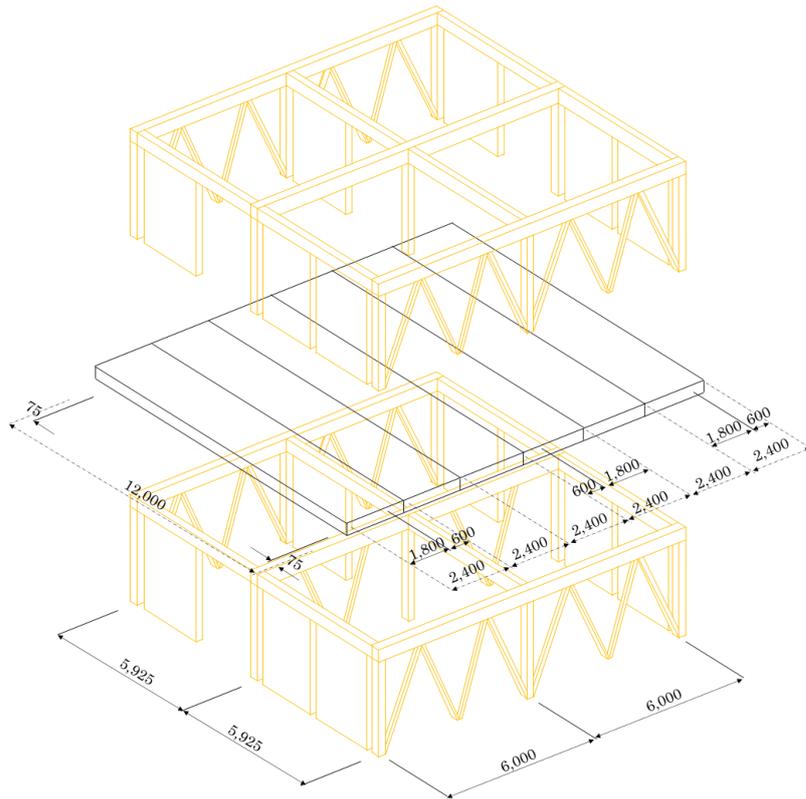


図 1.6 6m×6m の居室の田の字配置のイメージ図と CLT の割付図



写真 1.2 床スラブの静的載荷試験

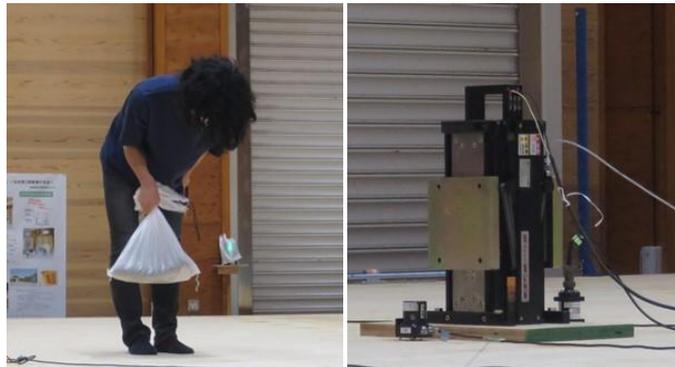


写真 1.3 床スラブの動的試験

今年度は、これら実験で得られた強度性能のデータを実施設計に活用できるように、情報を整理するとともに、設計上の注意点などをまとめることにした。

また床や屋根に使用した CLT は、長期荷重を負担することになるため、経年変化に対する配慮が必要となる。そこで令和 2 年度より、下記の調査を継続して実施している。

- ① 床に採用した CLT は、日本農林規格の対象外となっている 6 層 6 プライの構成であるため、寸法・形状の経年変化を調査するため、屋内・屋外の暴露試験を実施。
- ② 曲げモーメントが伝達できる接合方法として、グルード・イン・ロッドと鋼板添え板方式の 2 つの接合方法により、令和 3 年度のスラブの静的試験及び動的試験を実施したが、鋼板添え板方式は、接合部の経年変化が危惧されるため、クリープ試験を実施し、今年度も引き続き、調査を行った。

第2章 折版構造の構造設計

2.1 折版構造屋根の種類

折版構造とは、鉛直面に対して傾斜した平板を組合せ一体化することにより、せい
の大きな疑似的部材を形成することにより大きなスパンを架け渡すことができる、形
態抵抗システムである。CLT の登場により木質厚板大盤が比較的安価に成形できるよ
うになり、木造折版構造の可能性が広がった。

現在、CLT マザーボードの最大寸法は $3\text{m}\times 12\text{m}$ 、運搬の最大寸法は使用する車両
や経路にもよるが、一般的に $2.4\text{m}\times 12\text{m}$ 程度が最大であるため、折版を構成する平
板要素（ここでは、折版を形成する1枚の板要素をこのように呼称する）も、この寸
法以下にする必要がある。

折版の形態抵抗のメリットを最大限享受するためには、できる限り CLT の厚みを
抑えたいが、局部的な曲げモーメントに対する曲げ剛性・耐力の確保、接合部の耐
力・剛性の確保のために、最低限必要な厚みがある。

他の構造形式同様、木造（CLT）折版には鉄筋コンクリートや鉄骨とは異なる与条
件はあるが、軽量であること、断熱性能が比較的高いこと、プレファブリケーション
による施工が可能であることなどから、CLT 折版構造には十分メリットがあると考え
る。

CLT 折版の種類は無数のタイプが考えられるが、抵抗システムとしては大きく曲げ
系と軸力系に分類できる（図 2.1.1）。A、B、C は、折版によって成が増した部材に
よるラーメンフレームであり、応力は曲げが中心になる。A はラーメンフレームをス
パンと直交方向に連続配置、B は離散配置した形式である。C は A の変形型であり平
板要素を三角形とし、柱脚をピンにして部材数を抑制したタイプである。

D、E、F は折版によりアーチやドームを形成したタイプである。応力は軸力中心
のため、A～C タイプよりも効率が良く、単位面積当たりの木材料は抑制できる傾向
にある。一方で、平板要素が三角形となるため、歩留まりが低くなりやすいというデ
メリットもある。また、三角形の平板要素を連続したアーチやドームを形成する必
要があるため、部材同士の連結方法（木口の加工や接合）や建方がやや複雑になるとい
う課題もある。

しかしながら、歩留まりに関しては、後述するように、長方形のマザーボードから
切り出した平板要素の残りを連結させることで、一枚のマザーボードから2枚の平板
要素を作成できるなど、折版の形状を工夫することで、歩留まりの良い架構を実現す
ることが可能である。

CLT の折版構造と一口に言っても様々な種類が考えられるが、今回は奥行方向への
拡張性の高さや、後述するハングアップ工法との相性の良さといった点から D タイプ
の構造形式で試解析等を行う。

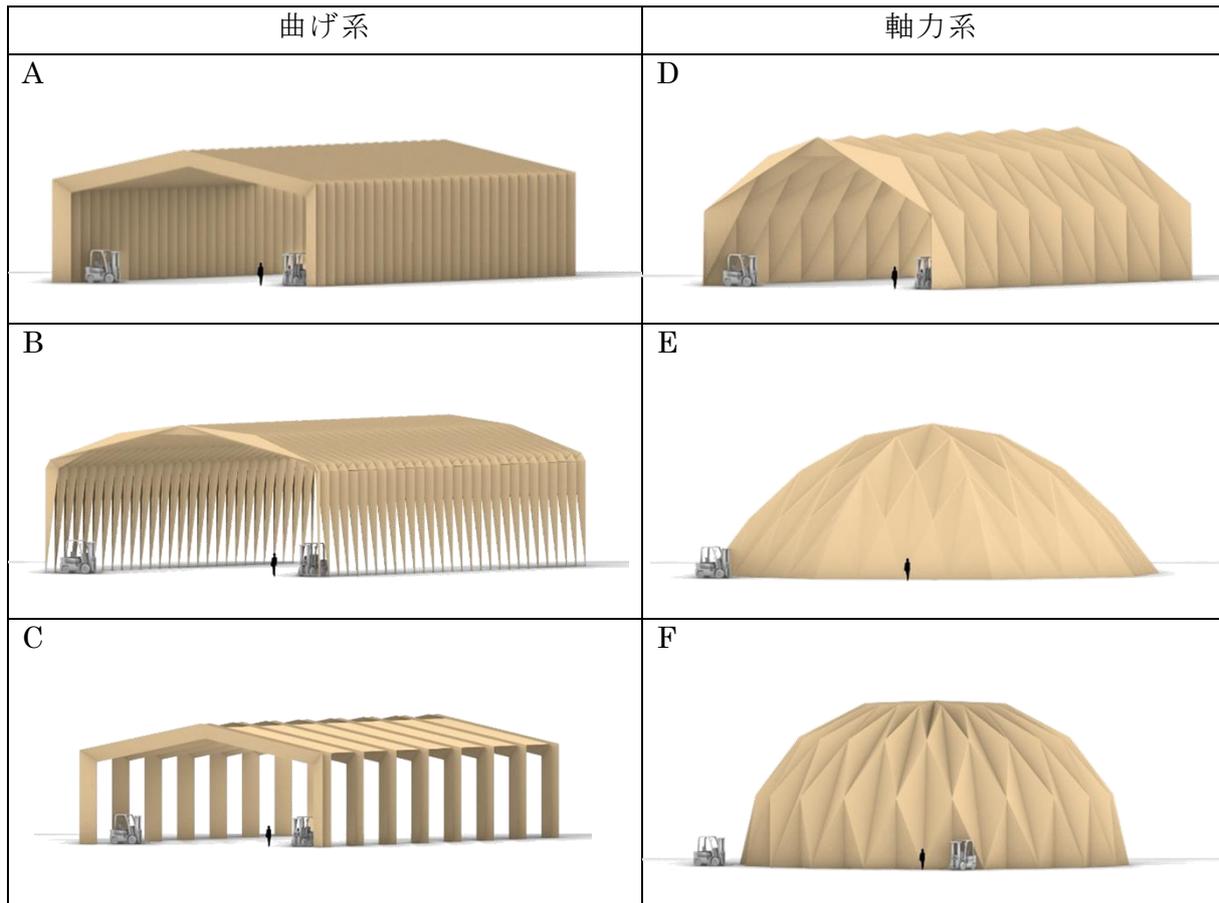


図 2.1.1 CLT 折版架構の種類

2.2 施工方法の検討

2.2.1 仮組みでの検討課題

昨年度、実用化に向けて解決すべき課題の抽出を目的に、図 2.1.1 の D を対象とし、2 枚の幅 2.4m×長さ 12.0m、厚さ 90mm の CLT マザーボードから切り出した大きな三角形 2 枚と小さな三角形 4 枚を使って、図 2.2.1 に示す試験体を、株式会社サイプレス・スナダヤの CLT 工場内にて仮組みを行っている（写真 2.2.1）。

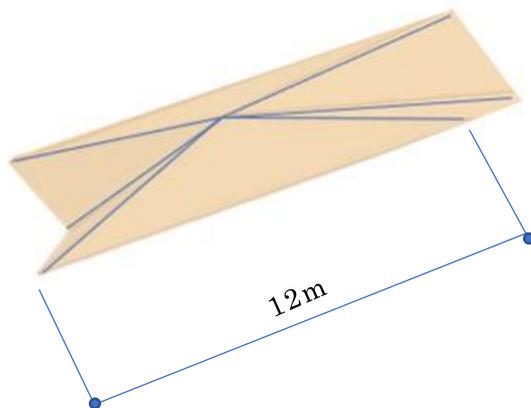


図 2.2.1 令和 3 年度に実施した仮組みの形状



写真 2.2.1 折版構造の仮組み課程

この仮組みを行うことで、次のような点を学んだ。

- ① 本試験施工においては、2枚のパネルをV字に構成したユニットを2組製作した後、それらを接続する大判のパネルを接合するという手順としたが、このV字のユニットが不安定で、高所での組み立て作業になる場合は危険性が伴う。
- ② 上記①の手順で組み立てを進めると、パネル同士の位置、角度等、施工精度を確保することが難しい（写真 2.2.2、写真 2.2.3 参照）。
- ③ 構成上、CLT の端部は鋭角となるため、施工時に損傷するおそれが高く（写真 2.2.4 参照）、また板厚方向に傾斜した切断面となることで、最外層のラミナ1枚（基本的に 120mm 幅）の残存幅が非常に小さくなり、幅はぎ接着をしていない CLT パネルでは、ラミナごと脱落（写真 2.2.5 参照）する可能性が高い。特に6枚の CLT が取り合う頂点部分の納まり（写真 2.2.6）は、断面の欠損を意識して決定する必要がある。
- ④ CLT-CLT 接合部の接合具の設計は、接合具の耐力が発揮されることが前提となるが、高所での施工時の安全性と作業の効率化も鑑みる必要がある。
- ⑤ CLT パネルの最大幅が 2.2m 程度となること、また組み立て後は作業面の勾配が 22.5 度、45 度、67.5 度等になることから、組み立て時の足場をどのように架けるのか、仮設計画が重要で、建て方後の断熱工事、防水工事も考慮しなければならない。
- ⑥ 大きな寸法の三角形の CLT で構成する折版構造を実現するには、建方の手順、仮設計画など、設計者・施工者による事前打ち合わせを実施し、綿密に立てることが肝要である。

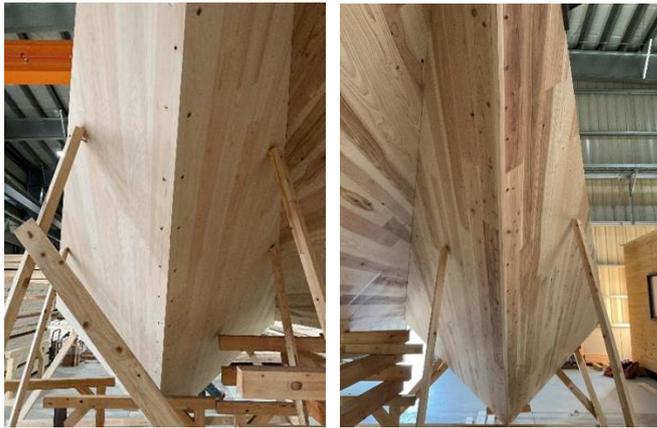


写真 2.2.2 CLT-CLT の取り合い部
(左：ヒノキ、右：スギ)



写真 2.2.3 CLT-CLT の取り合い部



写真 2.2.4 CLT の欠損



写真 2.2.5 ラミナの剥離落下

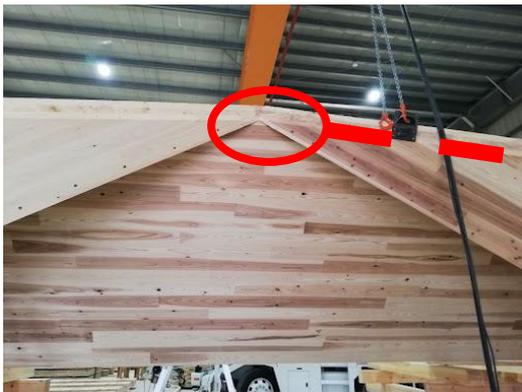


写真 2.2.6 6枚のCLTが取り合う頂部

2.2.2 建て方方法の提案

建物の施工計画は、品質、コスト、工程、安全性を考慮して立てる必要がある。
2.2.1 の経験から、同じ作業を高所で行うことは、いずれの視点から見ても難しい。
また建て方後に施工することになる防水工事は、図 2.2.1 の屋根形状での施工は、材料ロスが増える可能性が高いこと、施工効率がかなり落ちること、雨天に対し対応策がとりにくいこと、また安全に作業するためには仮設足場が必要になるが、この仮設

足場そのものが施工効率や品質を維持しにくい原因になることが予想され、コストアップの要因になる可能性も高い。

そこで設計者より提案された、川口衛名誉教授考案の、高所での作業を可能な限り地組の段階で施工できる、パンタグラフの仕組みを取り入れたハングアップ工法で、施工することを検討委員会で協議し、モックアップ作業を行うことにした。

2.3 接合ディテールの検討

2.3.1 接合金物の選択

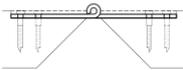
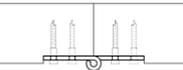
ハングアップ工法を実現するには CLT-CLT 間の接合金物は可能式もものでなければならない。そこでピンを軸に回転する蝶番金物を採用することにした。

2.3.2 蝶番金物の検討

蝶番金物は、ピンの回転中心の位置により次の表 2.3.1 の 3 種類に分けられる。

- ① CLT の厚みの中心とピンの回転中心が一致する場合
- ② CLT の屋外側表面とピンの回転中心が一致する場合
- ③ CLT の屋内側表面とピンの回転中心が一致する場合

表 2.3.1 蝶番金物の種類

番号	メリット	デメリット
① 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山と谷を同じ仕組みで製作可能・既製蝶番金物で製作可能 ・ 変形終了時に木同士が接触することで、形状が安定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 上と下の両面から施工が必要
②-1 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 変形前後で防水面の形状が変わらないため、地組の状態ですべて防水が完結 ・ 上面からのみの施工でよい ・ 内観に金物が露出しない 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 山折り側の CLT が欠けやすい形状 ・ 山折り側のビスに特殊な座金が必要
②-2 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 山折り側の CLT が欠けやすい形状 ・ 山折り側に製作蝶番が必要
③ 	-	<ul style="list-style-type: none"> ・ 下面から施工が必要 ・ 山折り側の CLT が欠けやすい形状 ・ 山折り側に製作蝶番が必要

①はパネル裏面からの施工が必要という点が唯一懸念された。しかしハングアップ工法による建て方を含めて考えると、CLT パネルをスライド・変形する機構のためにパネル下側にも十分な空間が必要であり、裏面から施工が必要という点は必ずしもコストの増大につながるというわけではない。

②は変形の前後も防水面の形状が変化しないため、地組の状態ですべて防水の施工が完結し、組立変形後に足場を組む必要がないという点で大きなメリットがある。ただし蝶

番金物が特殊な製作金物となることによるコストの増大や、CLTが欠けてしまいやすい端部形状になることが懸念点として挙げられる。

③には特にメリットがないばかりでなく、①と②の両方のデメリットを併せ持つ。

以上を踏まえ、本開発では①を採用することとした。図 2.3.1 に重量ドアに使用されている既製品を活用して製作できる蝶番金物の姿図を示す。また 3層 3 プライ、厚さ 90mm の CLT を想定した場合の①の仕様の断面詳細図を、図 2.3.2、図 2.3.3 に示す。

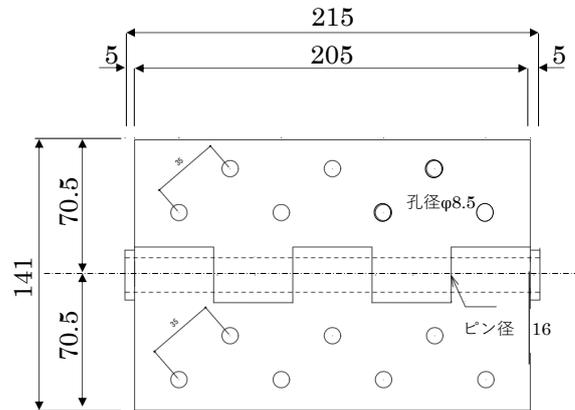


図 2.3.1 既製品を活用して製作できる蝶番金物図

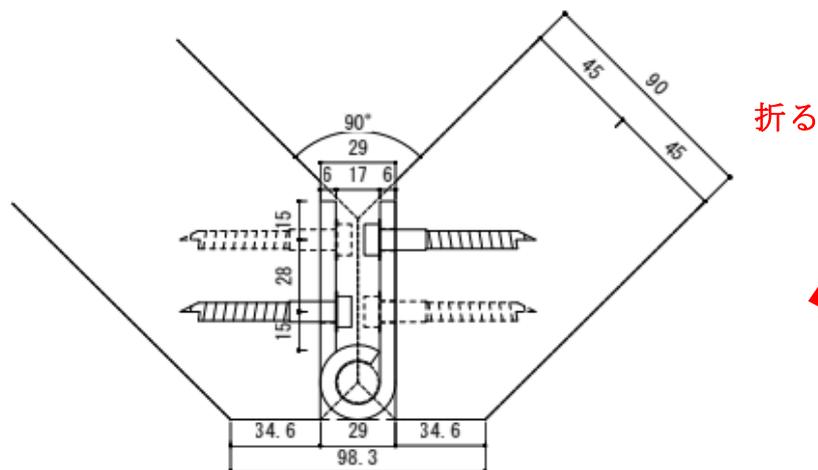
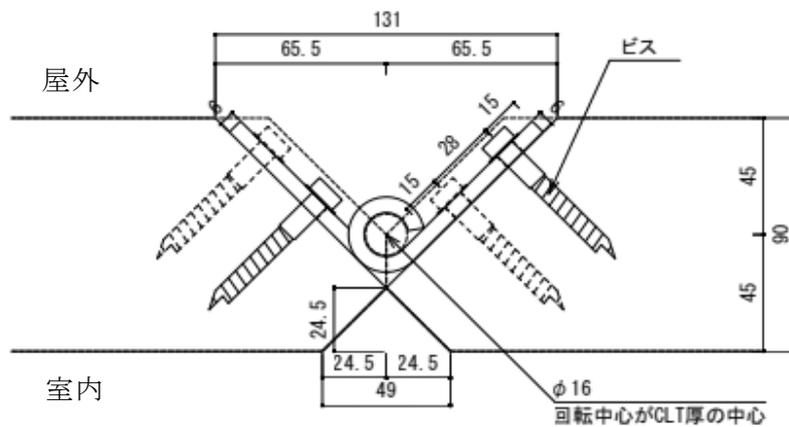


図 2.3.2 蝶番金物を使った接合部断面詳細図（谷折り部）

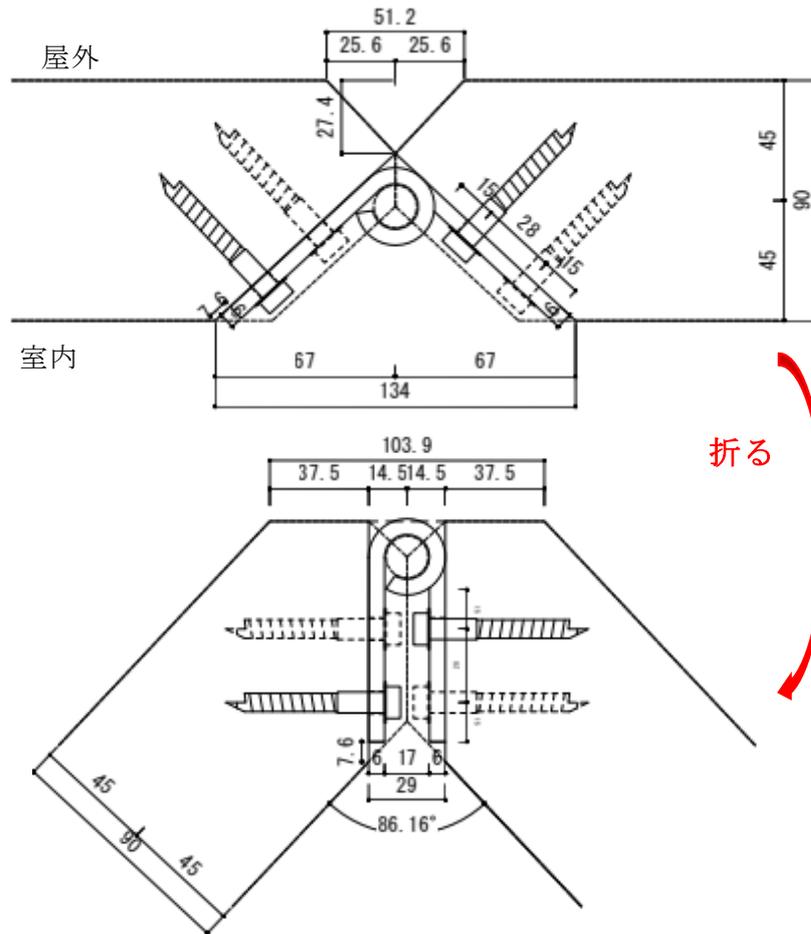


図 2.3.3 蝶番金物を使った接合部断面詳細図（山折り部）

2.4 折版構造屋根の試設計

2.4.1 解析条件

2.4.1.1 解析パターン

解析は実際の建物を想定する 2 種類と、施工途中に生じる応力を検証するための 3 種類、計 5 種類のモデルに対して行う。

1-1、1-2 は実際の建物形状を想定し、固定荷重を作用させる。水平力は地震力よりも風圧力が支配的となるが、施工初期段階で接合部や CLT パネルに生じる応力の方が大きくなるため省略する。

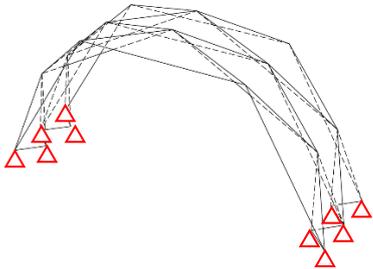
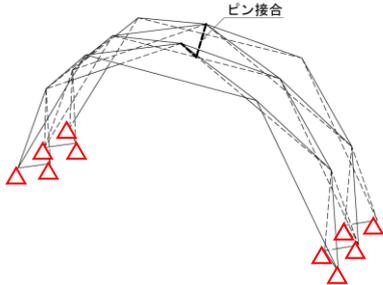
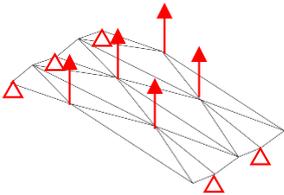
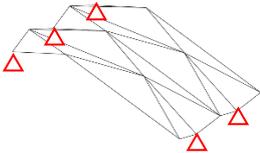
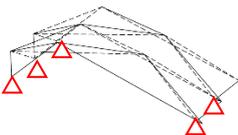
1-2 では建物全体を半分ずつハングアップ工法で製作し、最後に中央で継ぐような施工方法を想定し、アーチ頂部のパネル中央をピン接合とする。なお、外側のパネルは中央をピンとすると不安定構造になってしまうため、剛接合としている。

2-1、2-2、2-3 では、ハングアップ工法による建て方を想定し、その施工過程でパネルや接合部にどのような応力が発生するかを検証する。2-1 のようにパネル同士の角度が浅い時はクレーンにより吊り上げられながら変形を進めることを想定しパネルの山部で高さ方向の力を支持させ、アーチの端部でピン支持とする。

2-2、2-3 ではアーチ足元の治具を動かすことで変形を進めることを想定し、アーチの端部のみでピン接合とする。

各モデルの解析パターンを表 2.4.1 に、展開図を図 2.4.1～図 2.4.5 に示す。

表 2.4.1 解析パターン

モデル形状	解析条件
<p>1-1.フルモデル・パネル中央剛接合</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・パネル中央は剛接合（1枚物） ・門型足元でピン支持
<p>1-2.フルモデル・パネル中央ピン接合</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・一部のパネル中央でピン接合 ・門型足元でピン支持
<p>2-1.ハーフモデル-20度</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・パネルが20度折りたたまれたときの形状 ・パネル山部で高さ方向の力を支持 ・アーチ端部でピン支持
<p>2-2.ハーフモデル-45度</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・パネルが45度折りたたまれたときの形状 ・アーチ端部でピン支持
<p>2-3.ハーフモデル-90度</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ・パネルが90度折りたたまれたときの形状 ・アーチ端部でピン支持

△：ピン支持 ↑：高さ方向の力を支持

S=1:400(A4)

1-1. フルモデルパネル中央剛接合

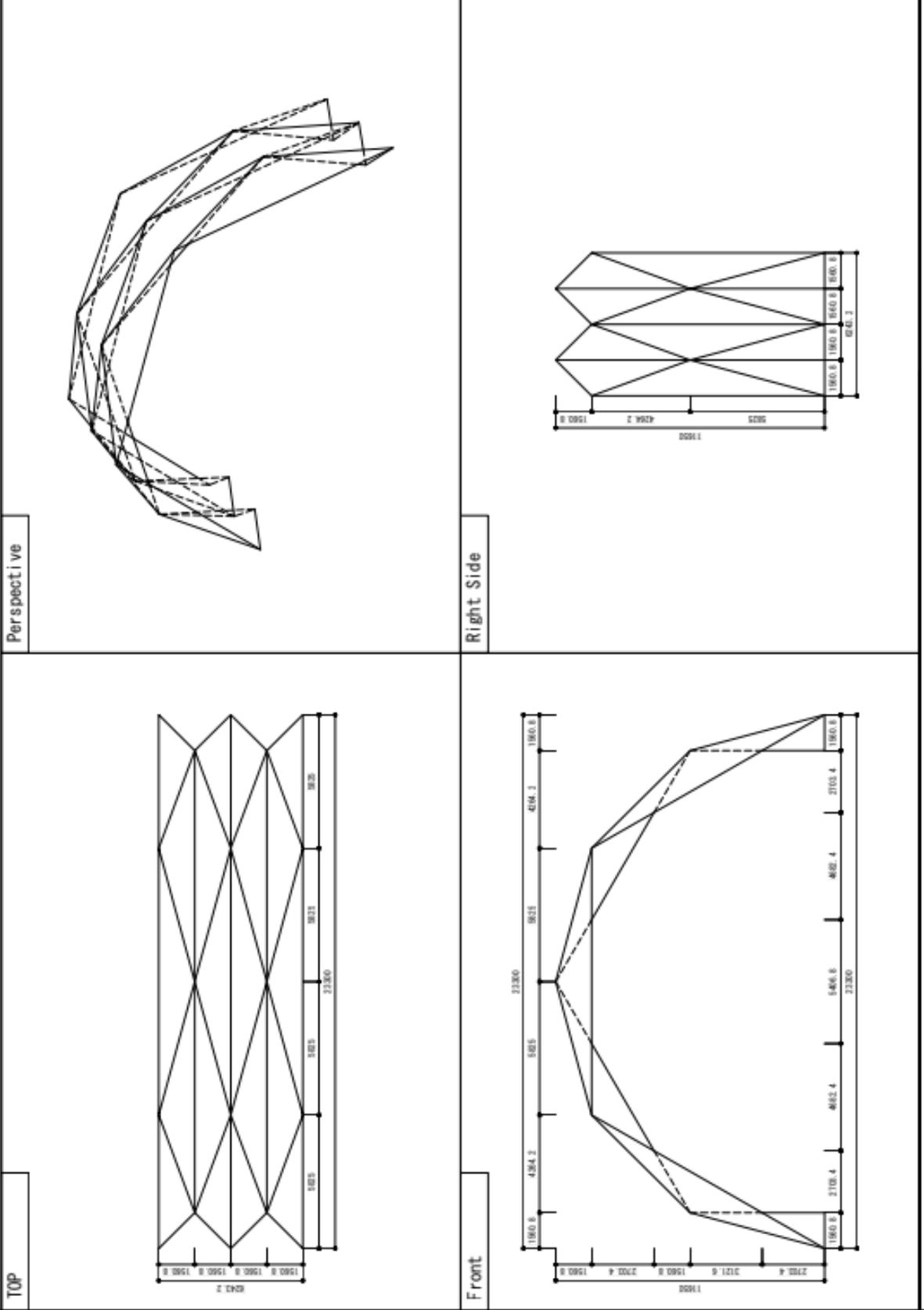


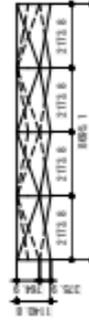
図 2.4.1 フルモデルパネル中央剛接合 展開図

S=1:400(A4)

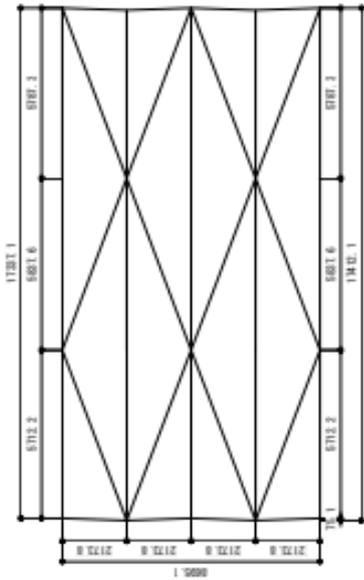
Perspective



Right Side



2-1. ハーフモデル-20度
TOP



Front

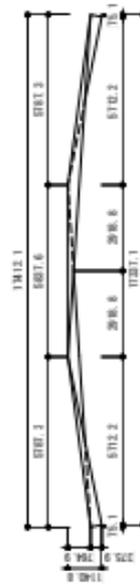


図 2.4.3 ハーフモデル-20度 展開図

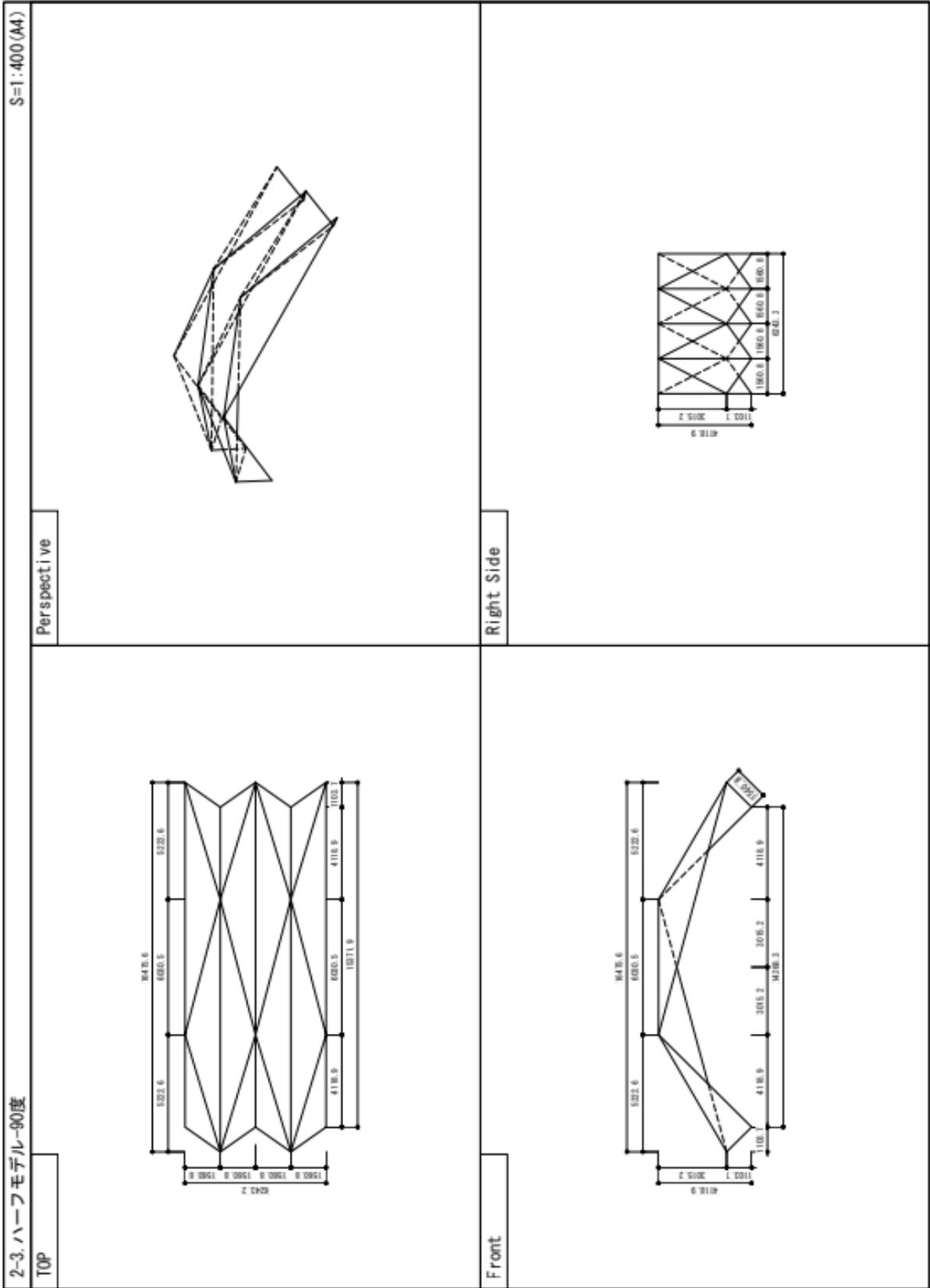


図 2.4.5 ハーフモデル-90度 展開図

2.4.1.2 モデル化の方法

CLT は 50mm 内側にオフセットした外形を持つ板要素によりモデル化し、CLT 同士は接合部と等価な剛性(軸剛性とせん断剛性ともに 7.7kN/mm)を持つように設定した梁要素によって応力を伝達する。

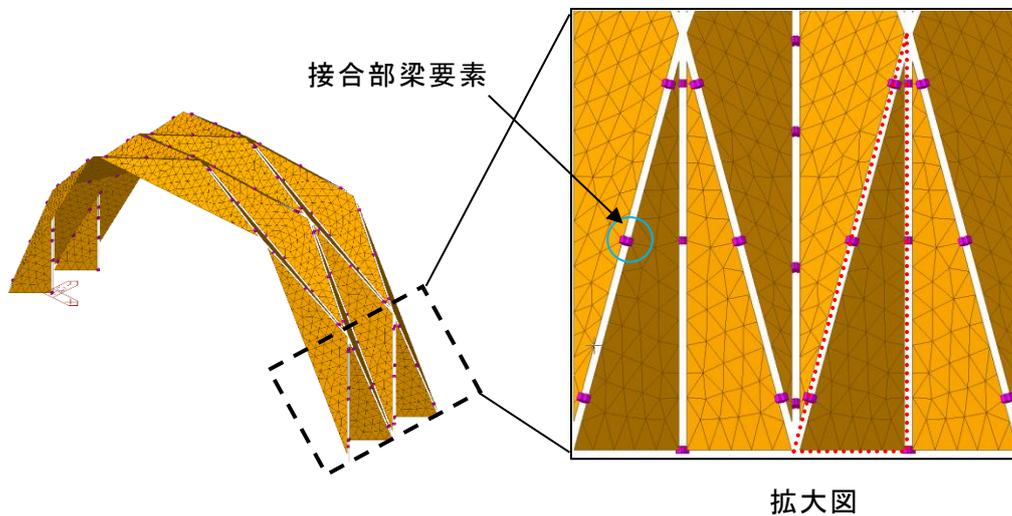


図 2.4.6 要素の配置の例

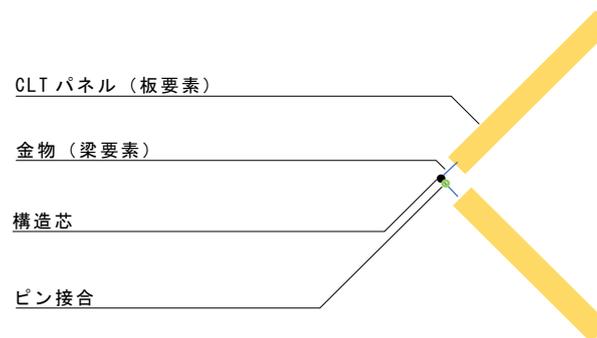


図 2.4.7 要素の配置

2.4.1.3 材料定数

今回の CLT 折版構造では曲げよりも軸力が卓越すると考えられるため、圧縮弾性係数を用いる。安全側の検討として S60-3-3 (樹種 スギ) の弱軸圧縮弾性係数である 2000N/mm^2 とし、せん断弾性係数は 500N/mm^2 とする。

2.4.1.4 荷重条件

固定荷重は CLT パネルに対し、厚さ 90mm の CLT と塩ビシート防水を合わせて 4.5kN/m^2 とする。

2.4.2 解析結果

全ての解析パターンに対して固定荷重作用時の CLT パネルの応力図と接合部の応力図を次頁以降に示す。

「1-1.フルモデル-パネル中央剛接合」と「1-2.フルモデル-パネル中央ピン接合」については固定荷重作用時の建物頂部の高さ方向の変形及び、支点反力も併せて示す。

各解析により記録した最大値を表 2.4.2、表 2.4.3 に示す。ここで接合部に生じる応力 F_x 、 F_y は蝶番金物の面内せん断方向の力を表し、 F_z は蝶番金物（図の面外せん断力（ビスが抜け出す方向の力）を意味する。

表 2.4.2 パネル応力・接合部応力最大値

モデル	CLT パネルに生じる最大応力		接合部に生じる最大応力		
	面内せん断力	面内軸力	面内方向 せん断力	面内方向 せん断力	面外方向 せん断力
	F_{xy} (kN/m)	F_{max} (kN/m)	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)
1-1	33.1	114.1	2.5	6.9	2.5
1-2	33.2	114.4	3.3	6.9	2.5
2-1	132.0	121.1	12.9	4.4	2.6
2-2	76.6	126.7	8.6	6.3	6.7
2-3	54.9	156.0	4.0	3.0	4.6

表 2.4.3 反力と変形量の最大値

モデル	反力 (kN)				変形量(mm)	
	FX	FY	FZ		内側パネル DZ	外側パネル DZ
			圧縮	引張		
1-1	11.7	2.1	35.8	-3.2	-16	-74
1-2	11.8	2.1	35.9	-3.2	-17	-73

CLT パネル応力図

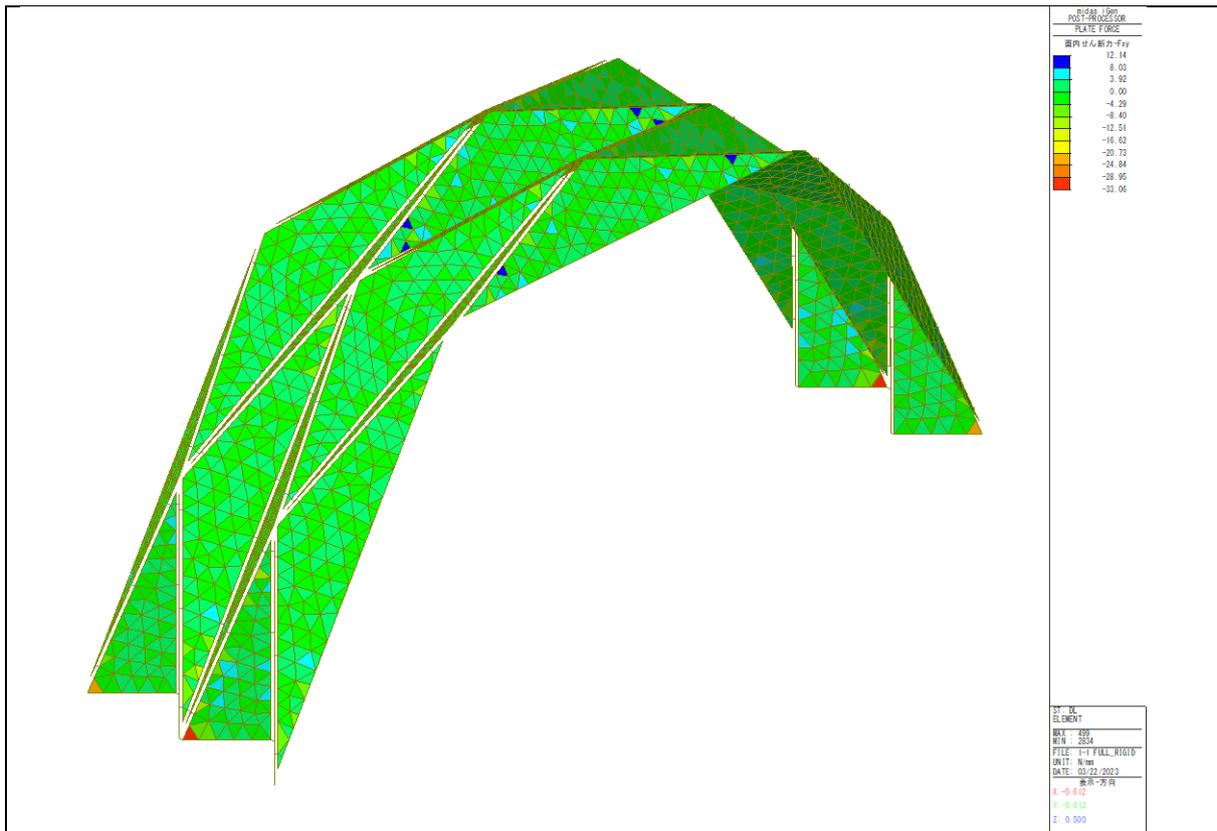


図 2.4.8 モデル 1-1 パネル応力 Fxy

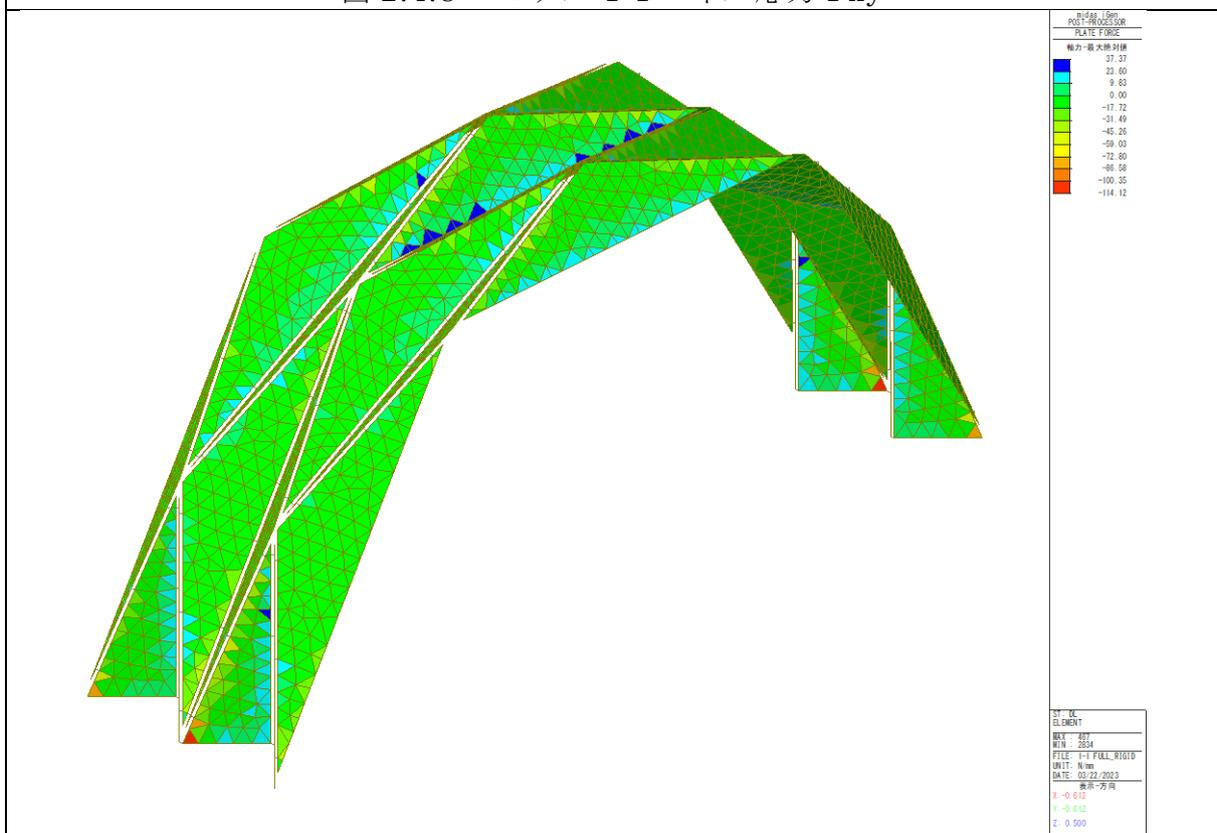


図 2.4.9 モデル 1-1 パネル応力 Fmax

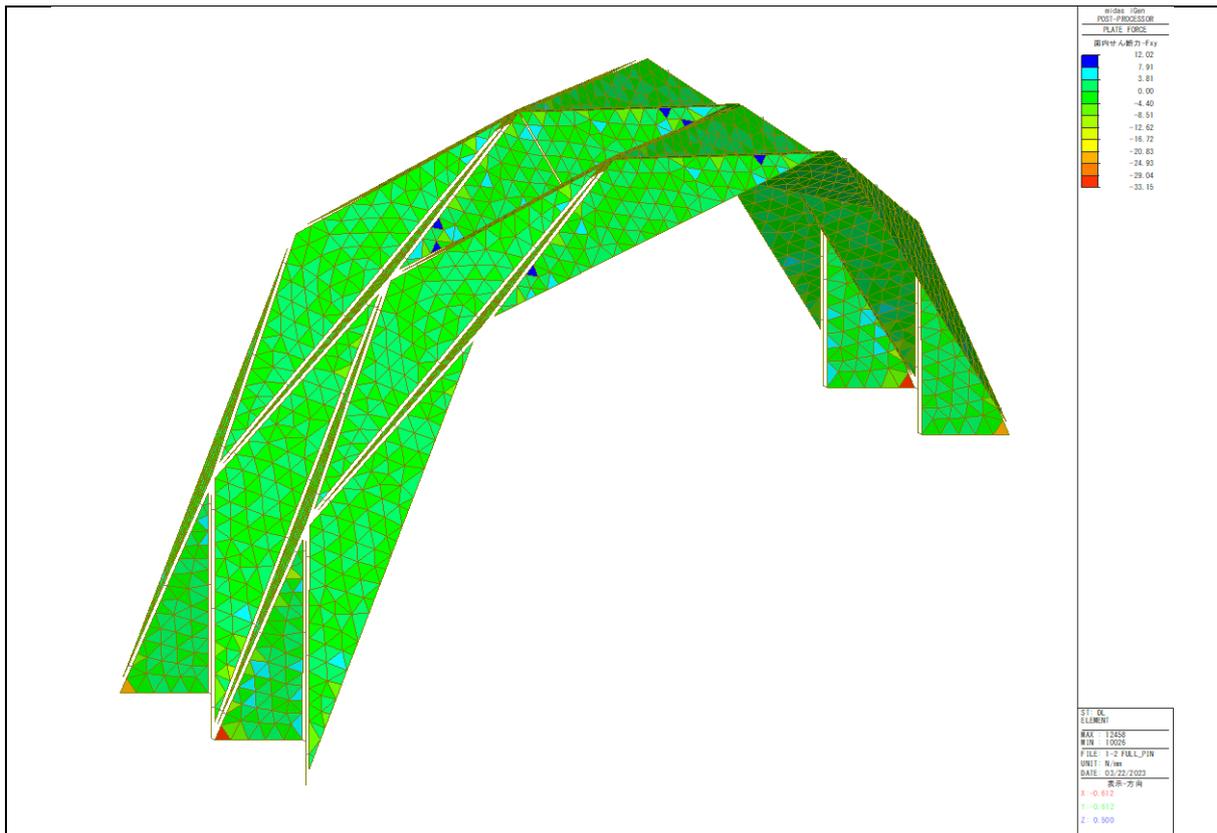


図 2.4.10 モデル 1-2 パネル応力 F_{xy}

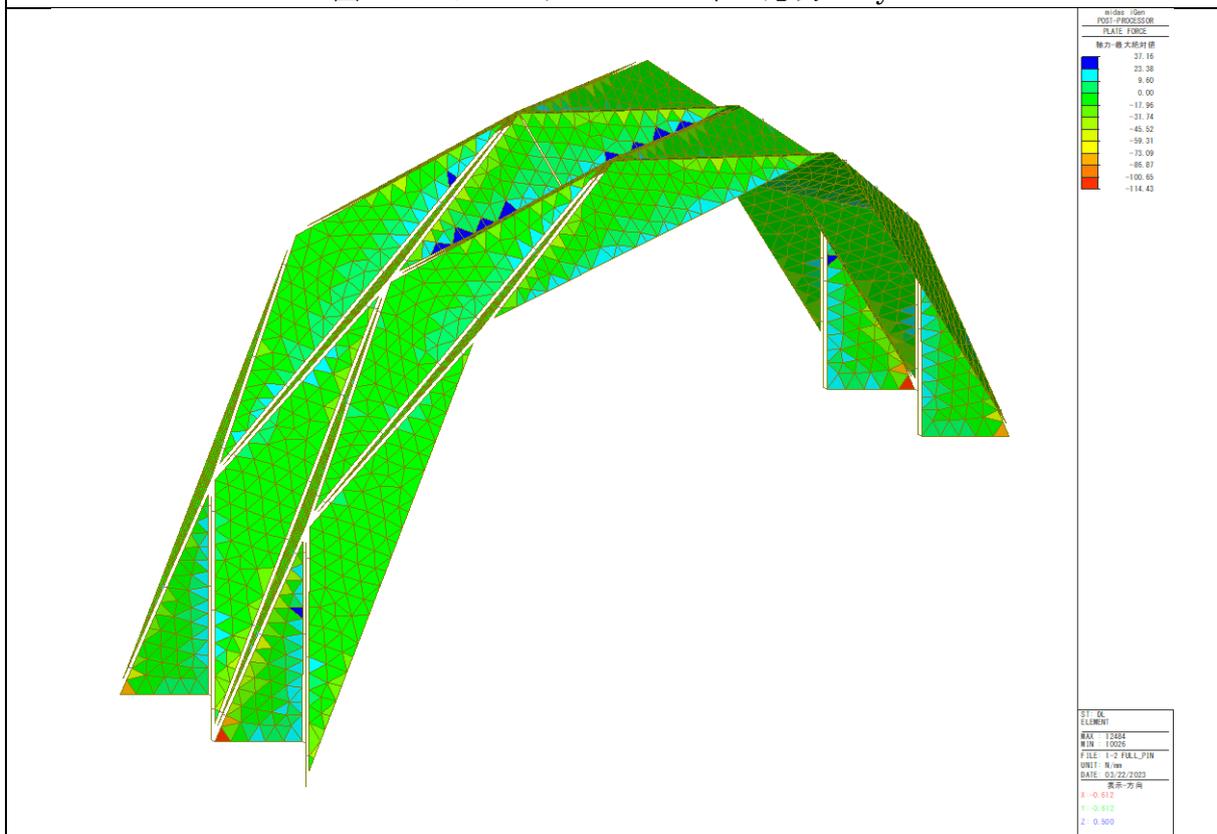


図 2.4.11 モデル 1-2 パネル応力 F_{max}

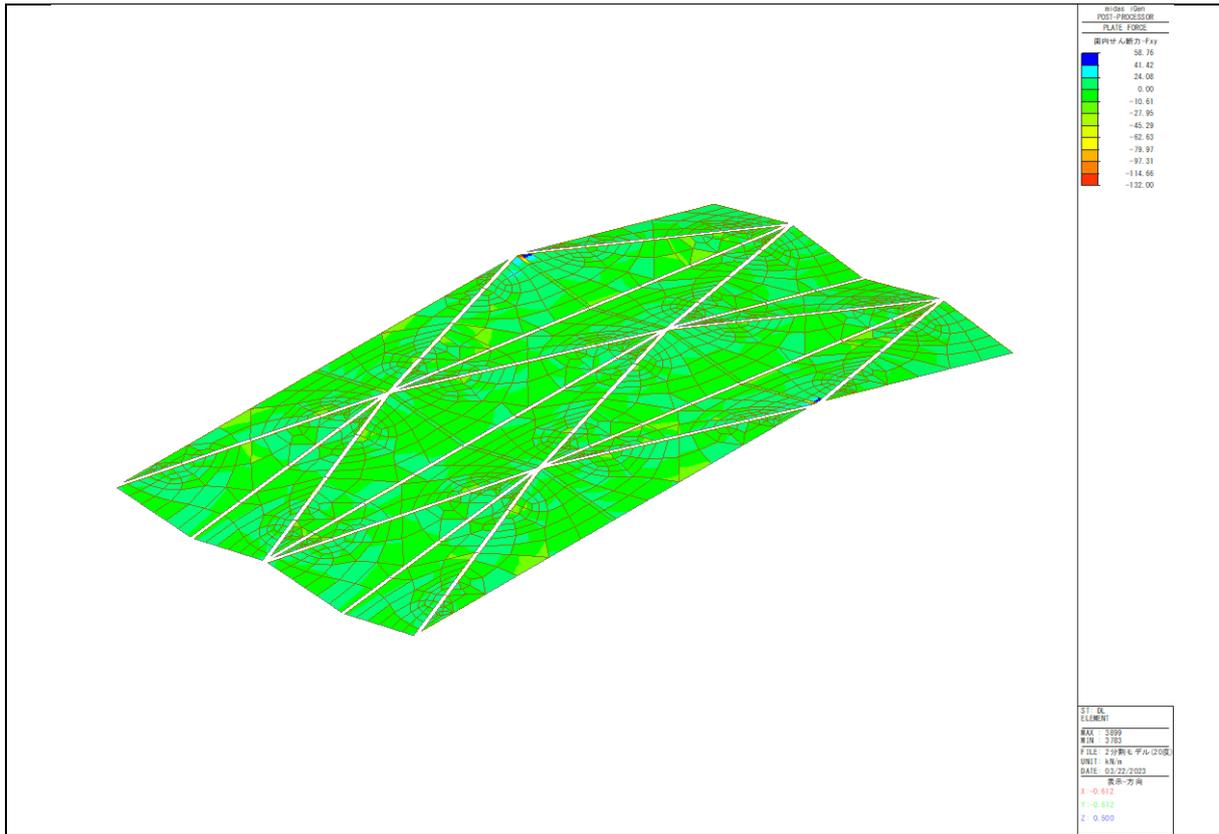


図 2.4.12 モデル 2-1 パネル応力 F_{xy}

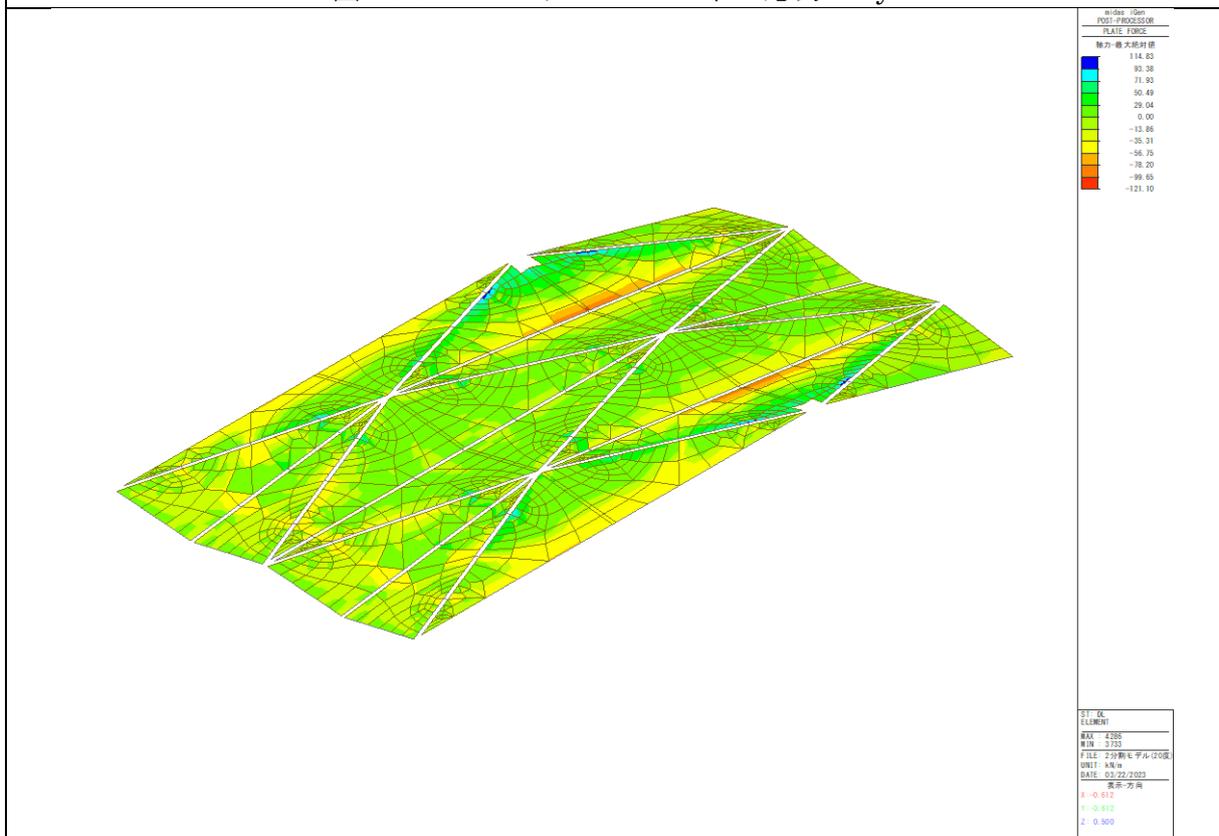


図 2.4.13 モデル 2-1 パネル応力 F_{max}

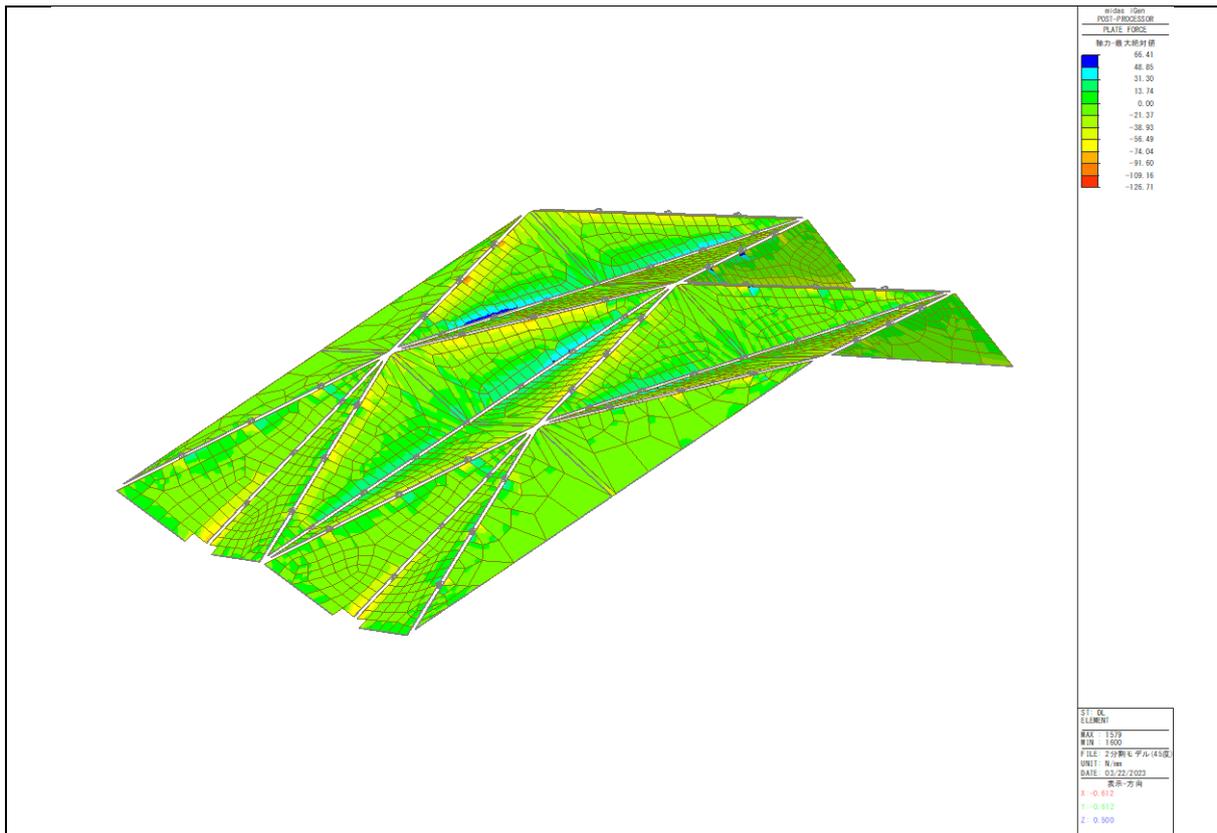


図 2.4.14 モデル 2-2 パネル応力 F_{xy}

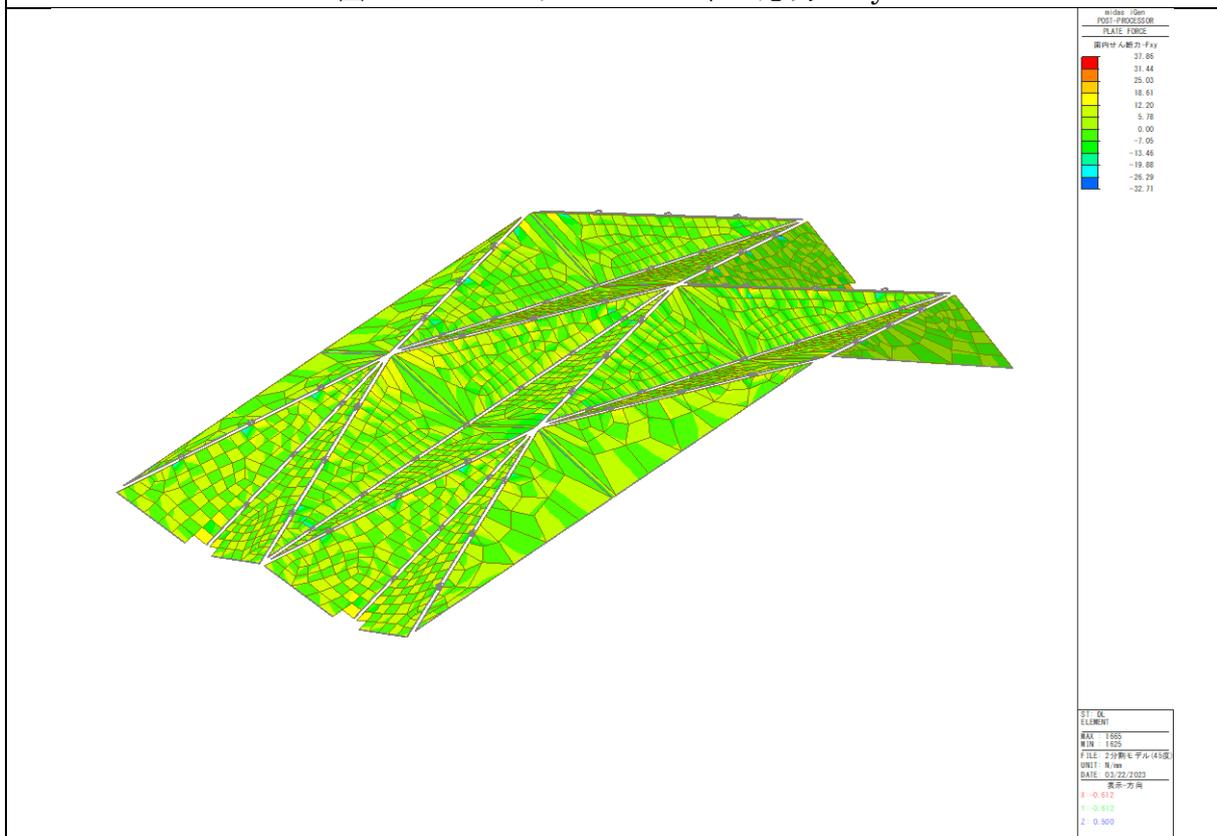


図 2.4.15 モデル 2-2 パネル応力 F_{max}

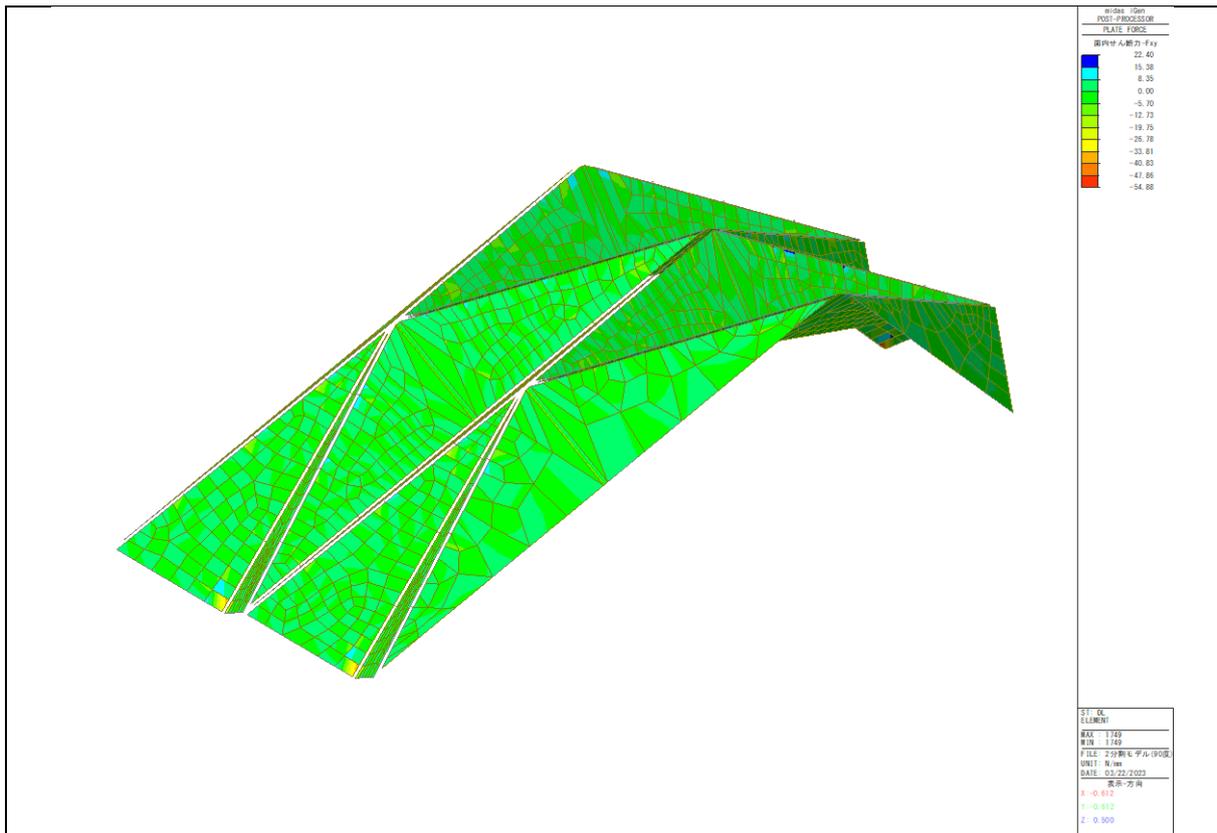


図 2.4.16 モデル 2-3 パネル応力 F_{xy}

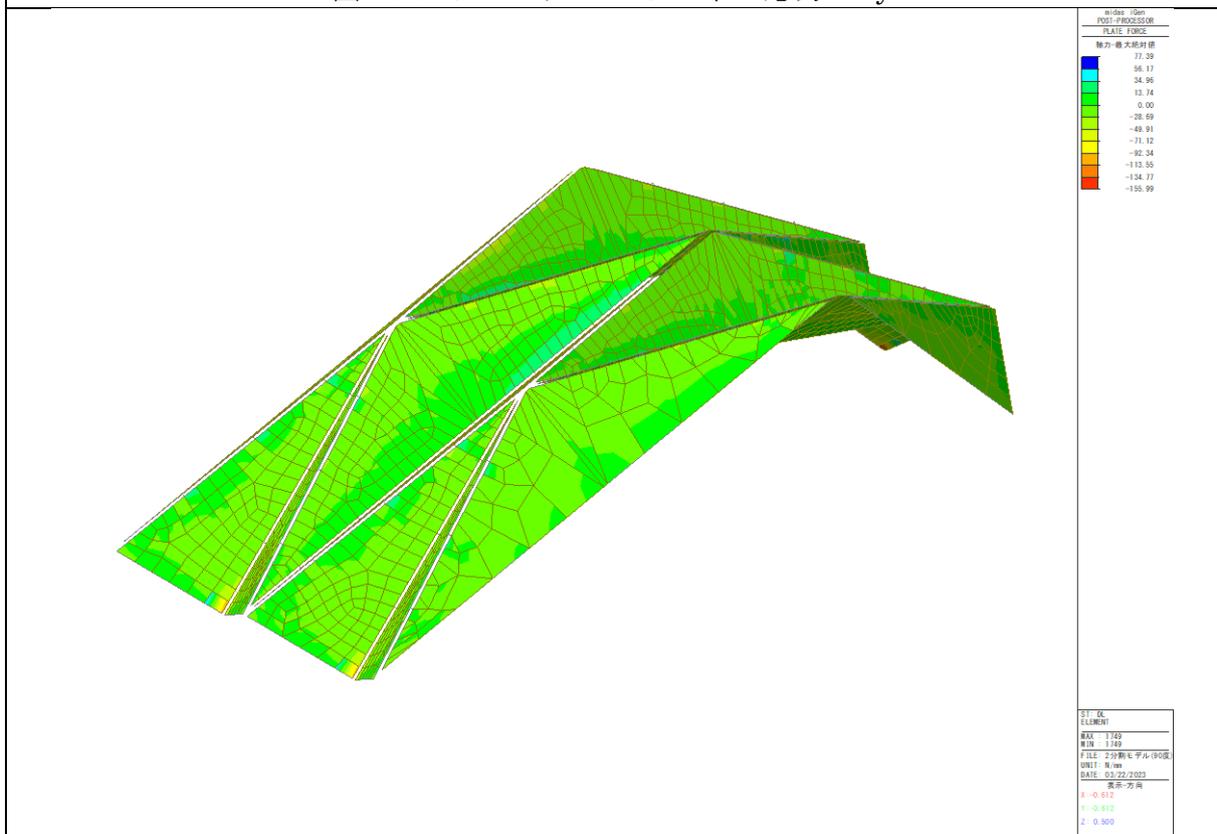


図 2.4.17 モデル 2-3 パネル応力 F_{max}

・接合部応力図 (F_x、F_y、F_z)

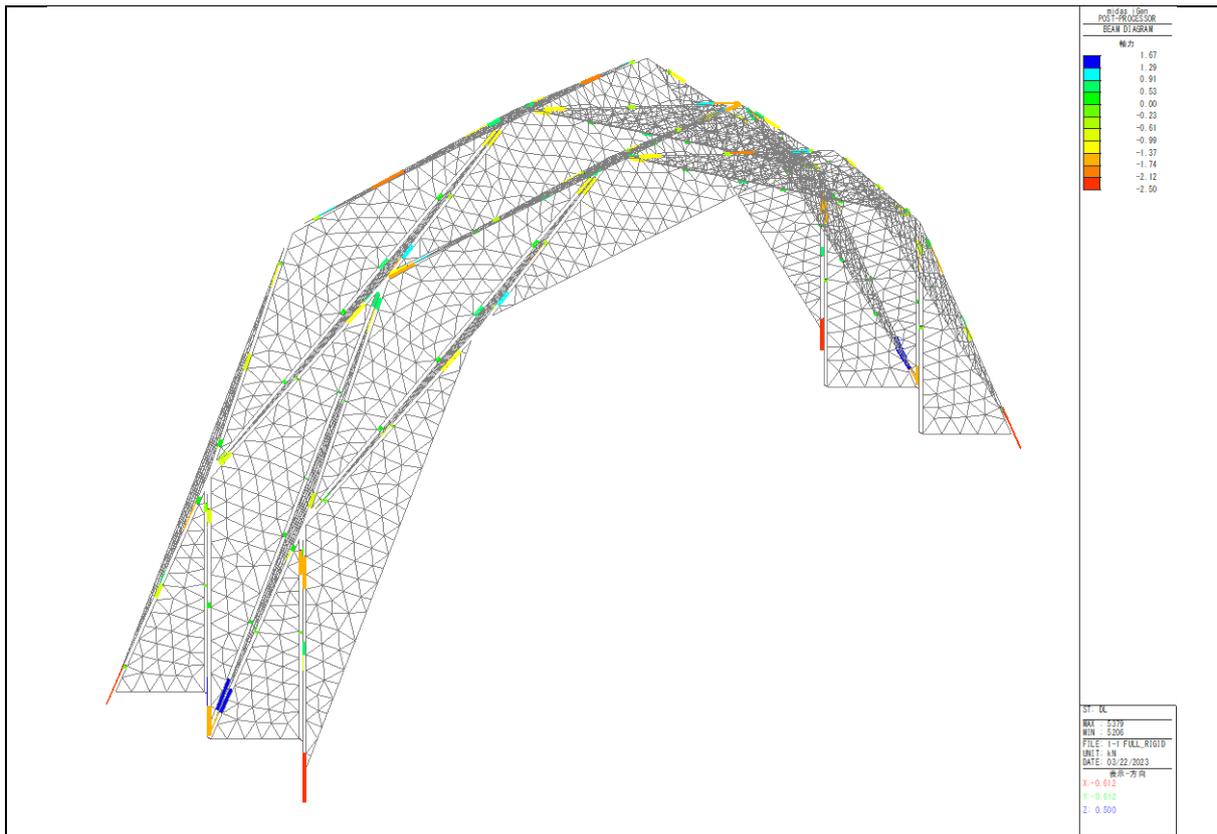


図 2.4.18 モデル 1-1 接合部応力 F_x

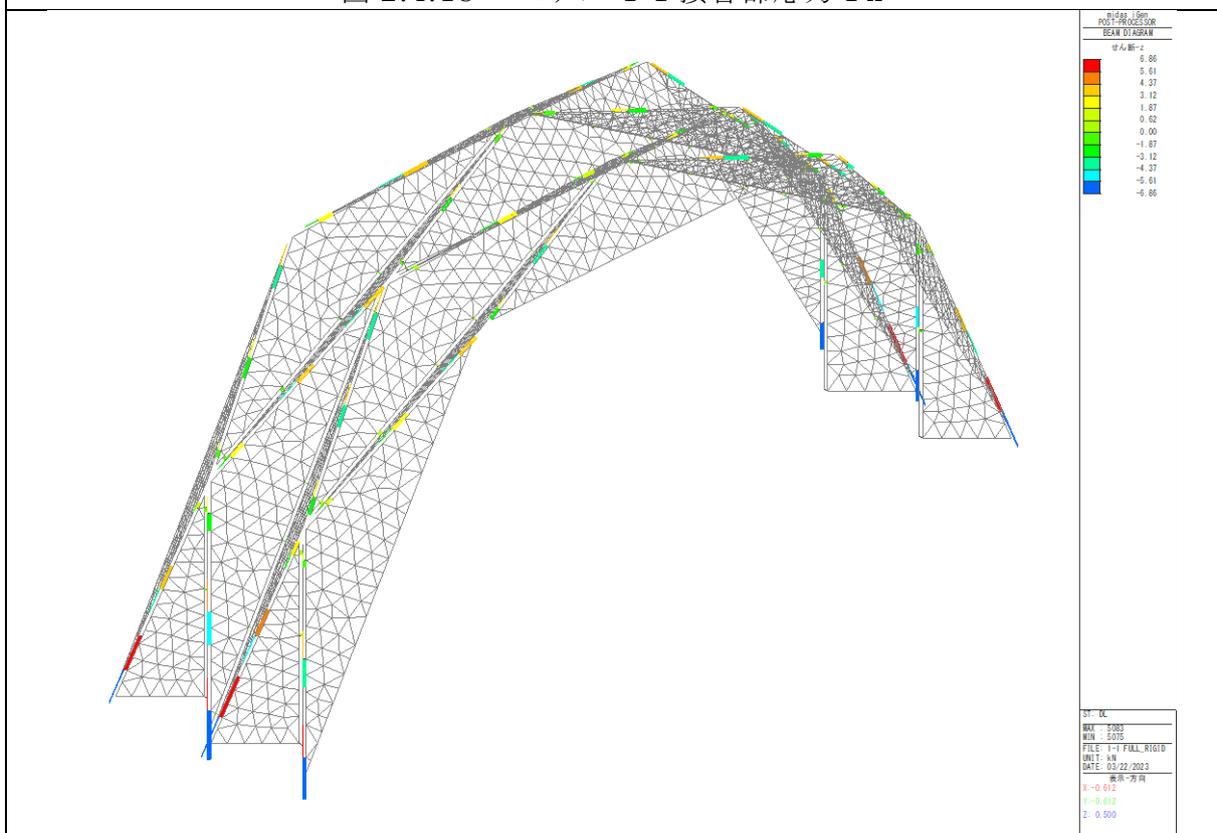


図 2.4.19 モデル 1-1 接合部応力 F_y

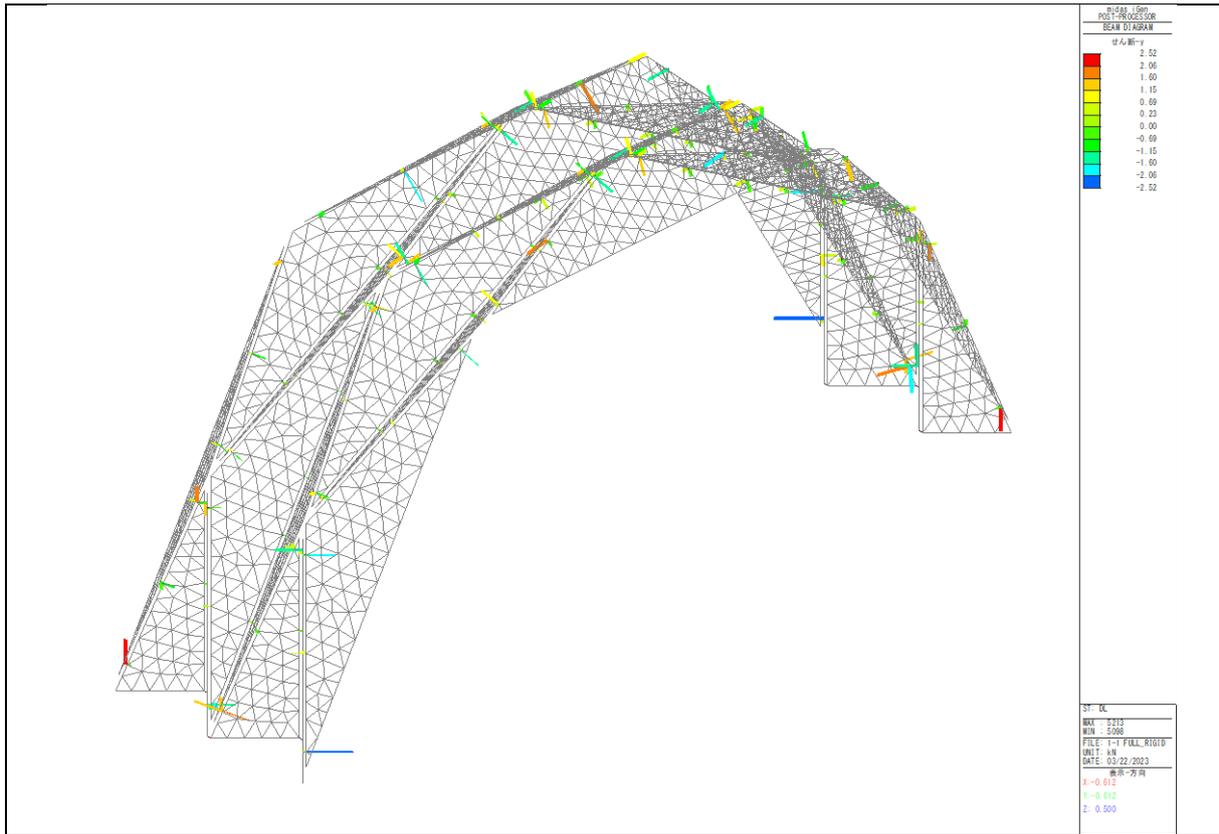


図 2.4.20 モデル 1-1 接合部応力 F_z

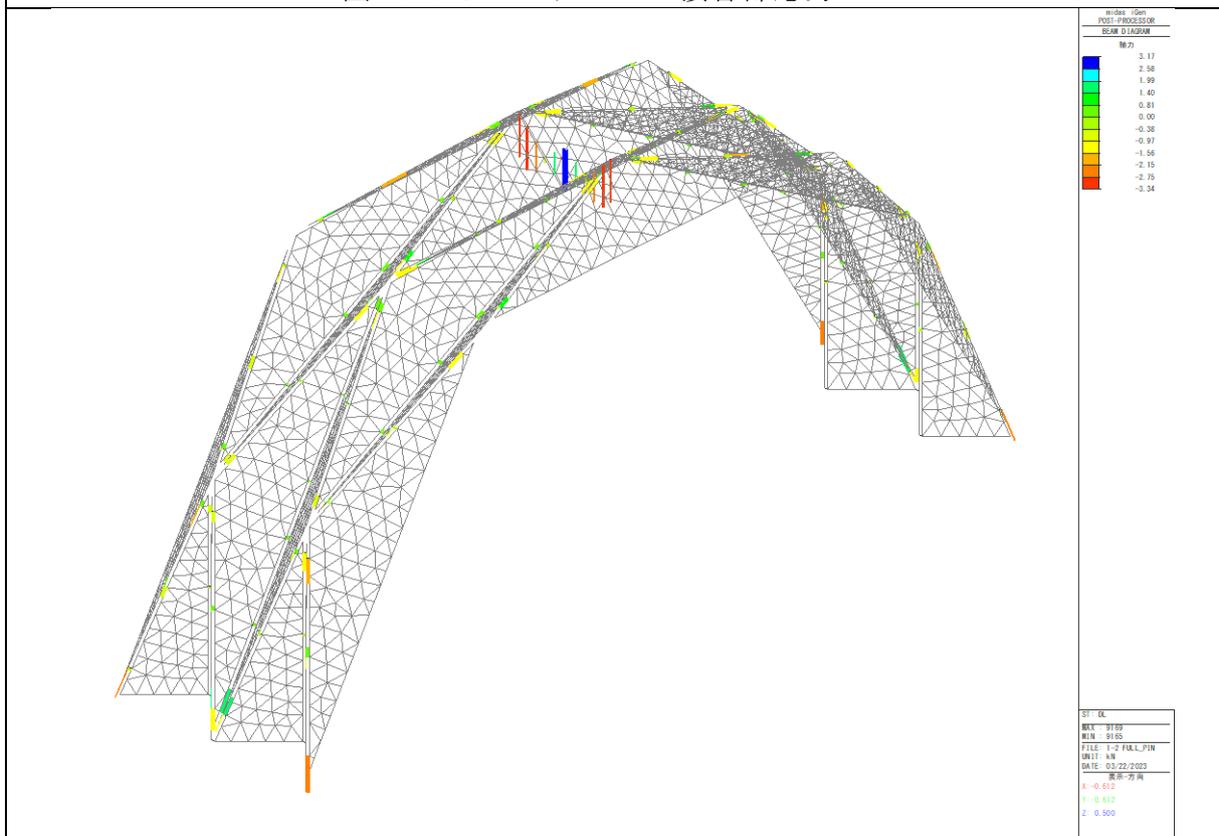


図 2.4.21 モデル 1-2 接合部応力 F_x

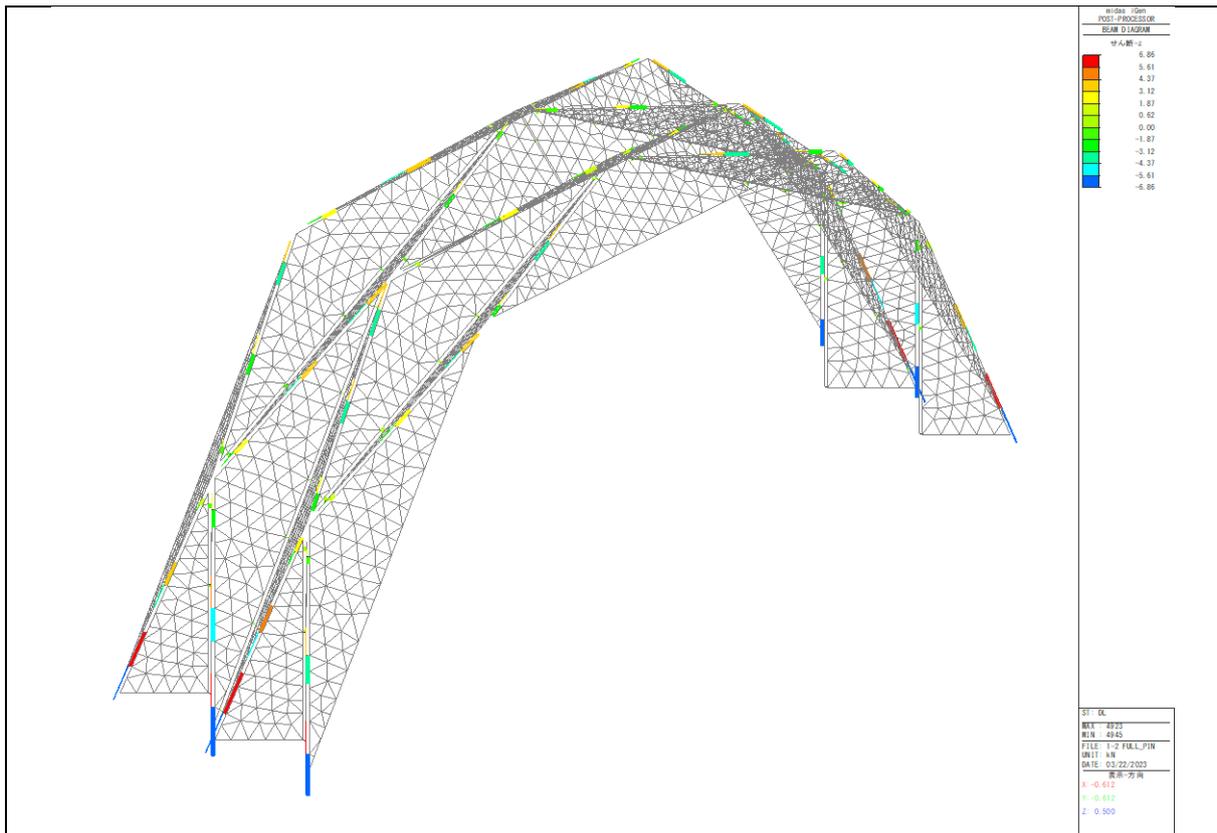


図 2.4.22 モデル 1-2 接合部応力 F_y

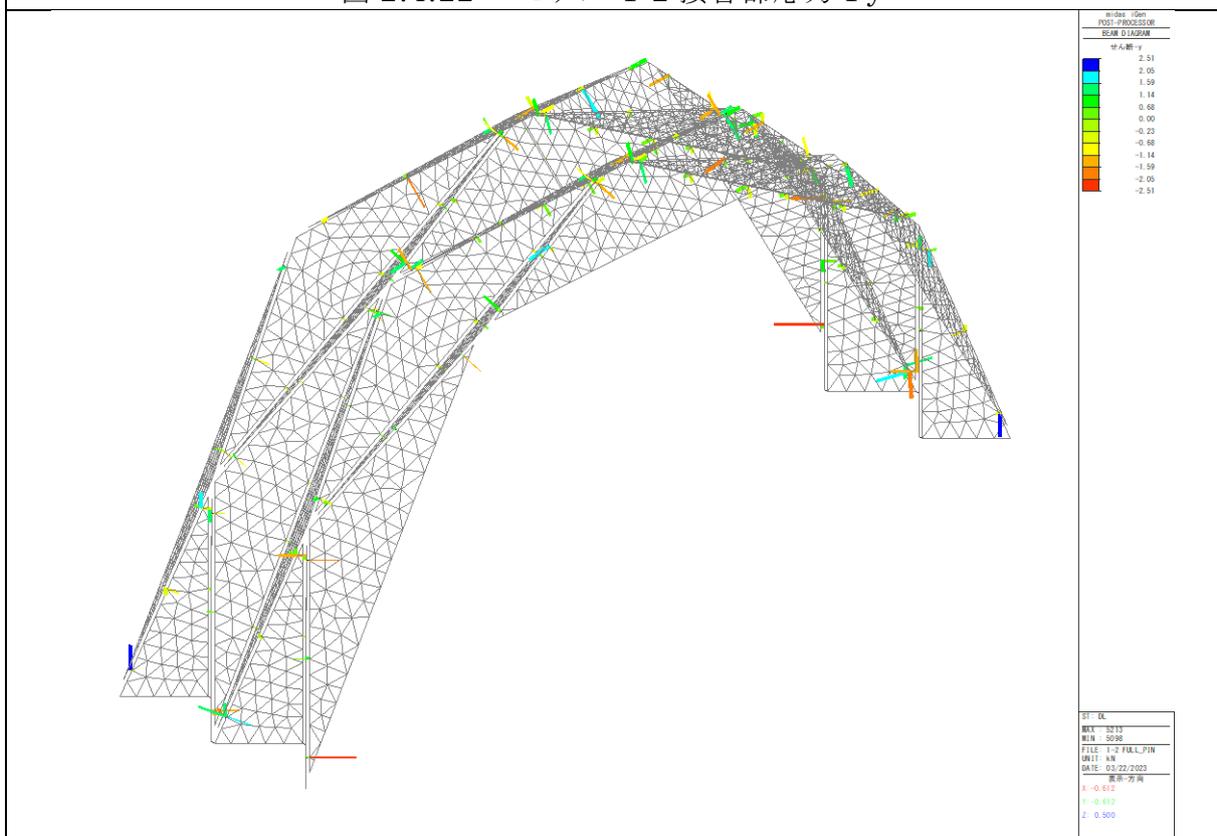


図 2.4.23 モデル 1-2 接合部応力 F_z

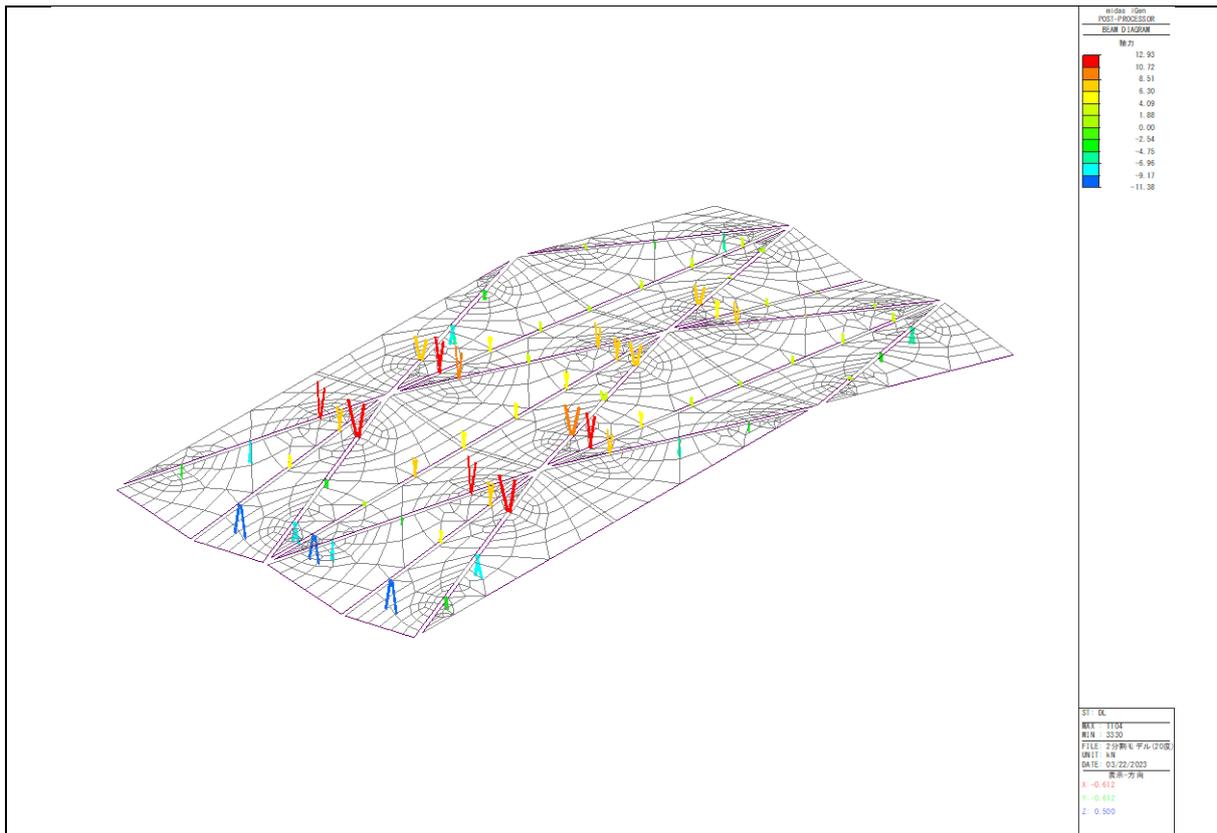


図 2.4.24 モデル 2-1 接合部応力 F_x

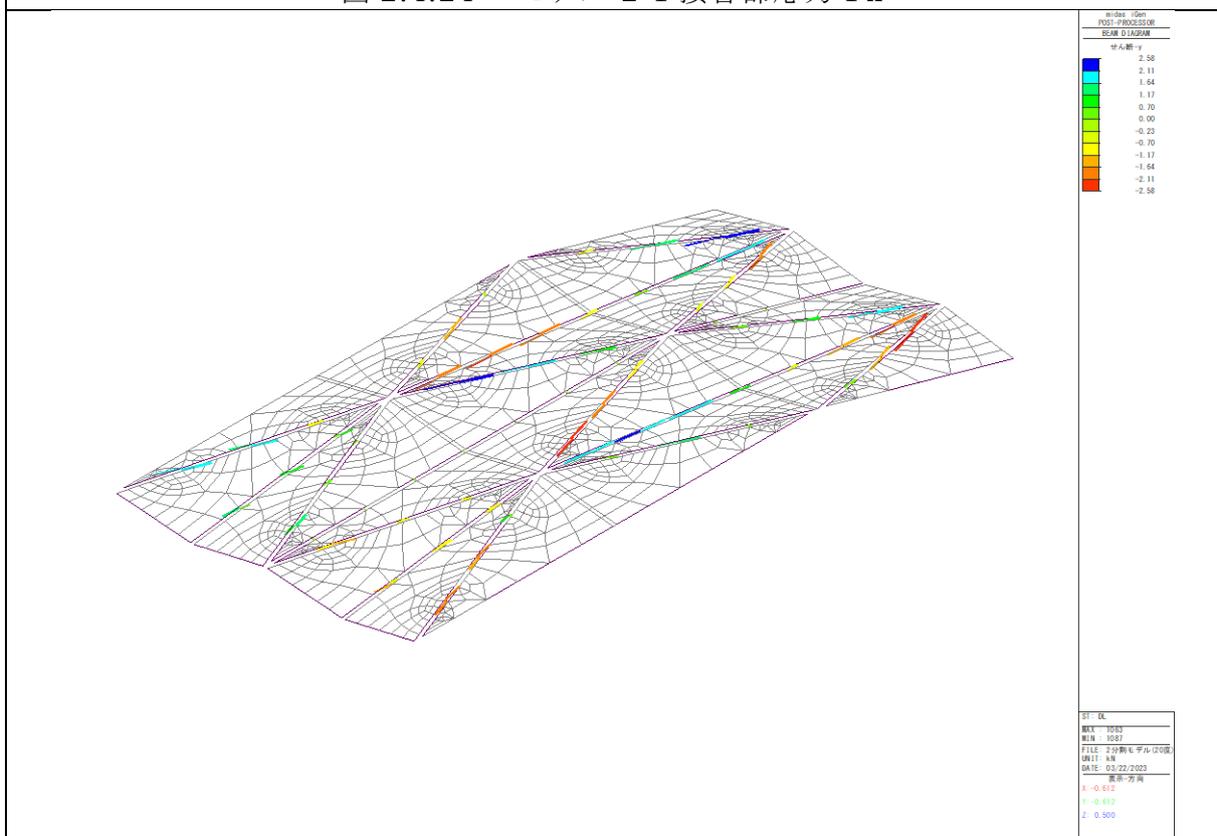


図 2.4.25 モデル 2-1 接合部応力 F_y

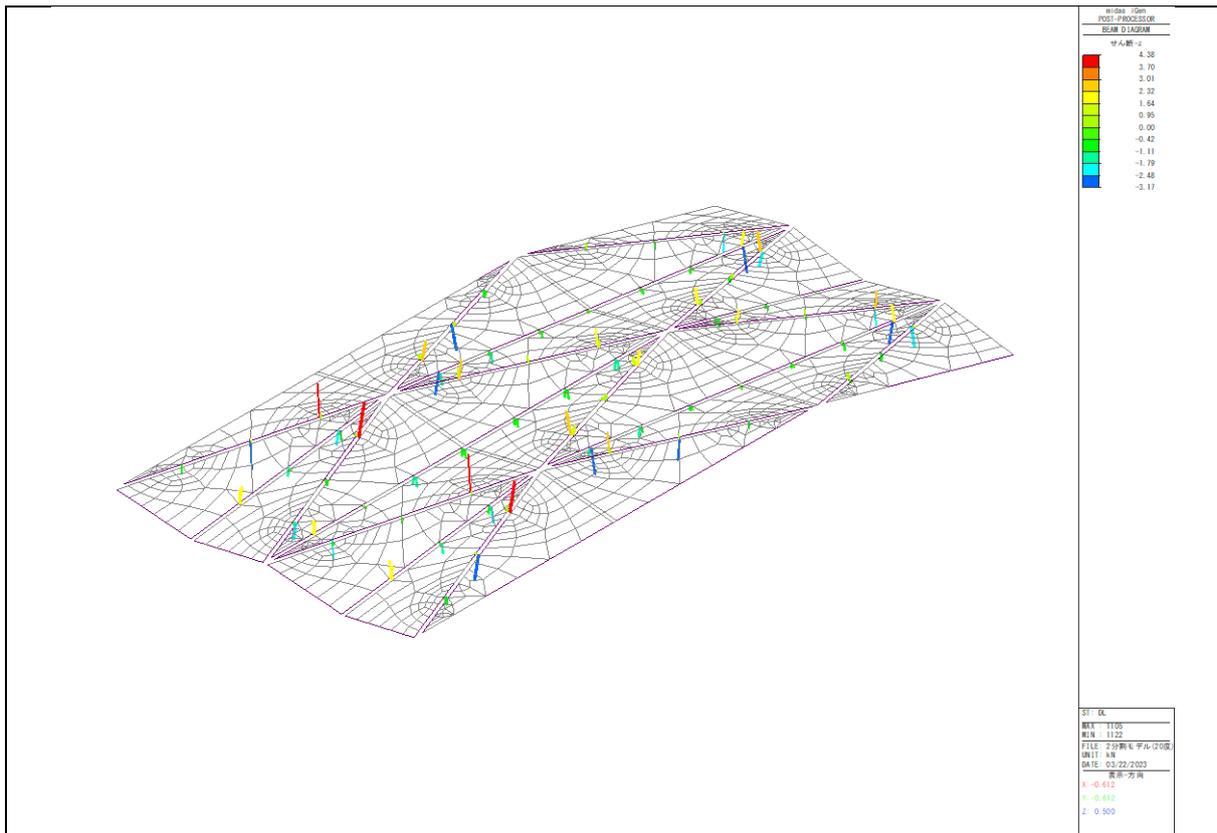


図 2.4.26 モデル 2-1 接合部応力 F_z

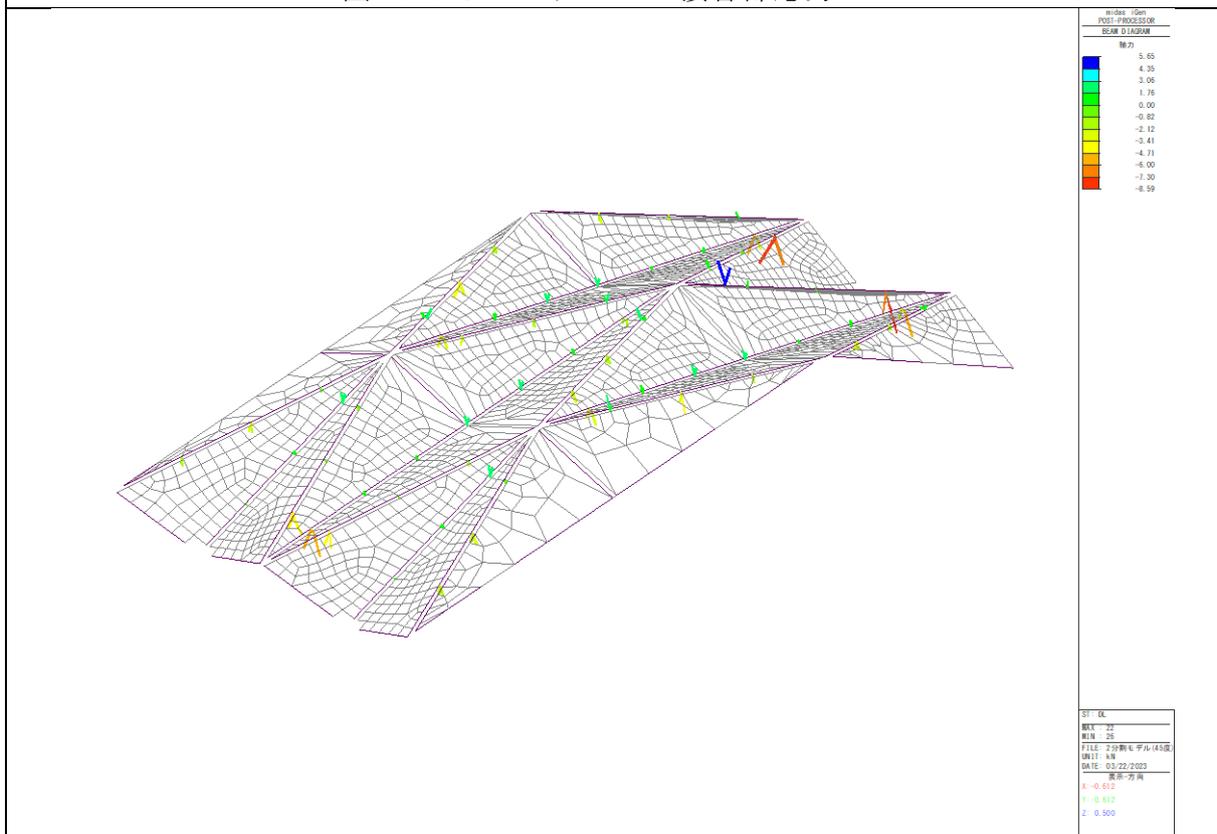


図 2.4.27 モデル 2-2 接合部応力 F_x

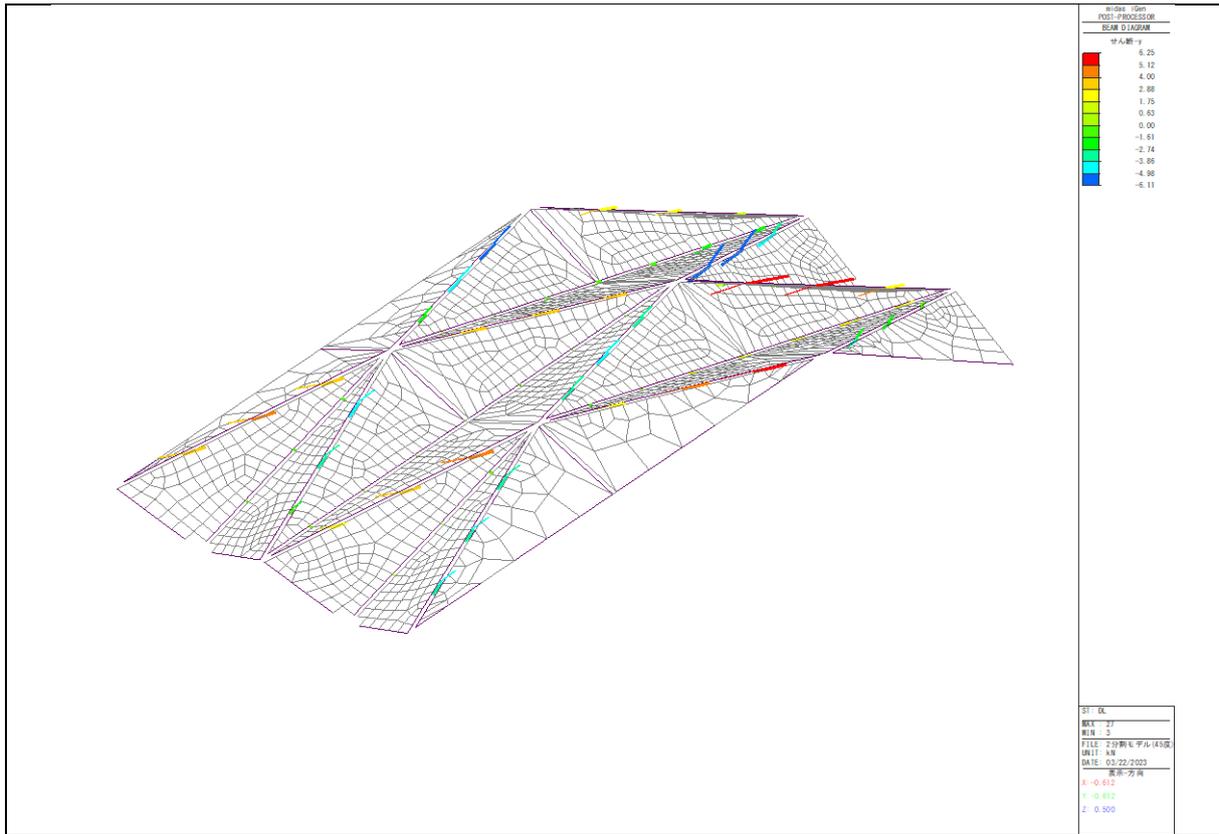


図 2.4.28 モデル 2-2 接合部応力 F_y

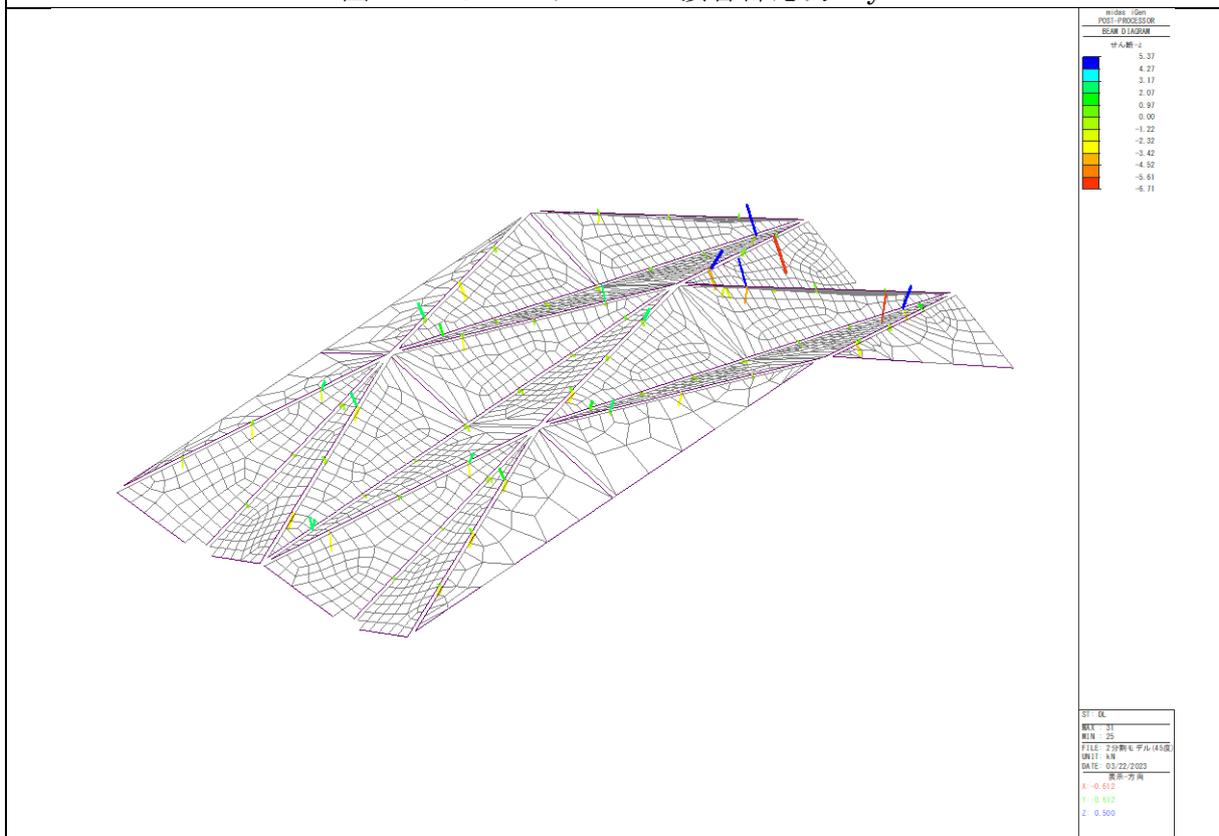


図 2.4.29 モデル 2-2 接合部応力 F_z

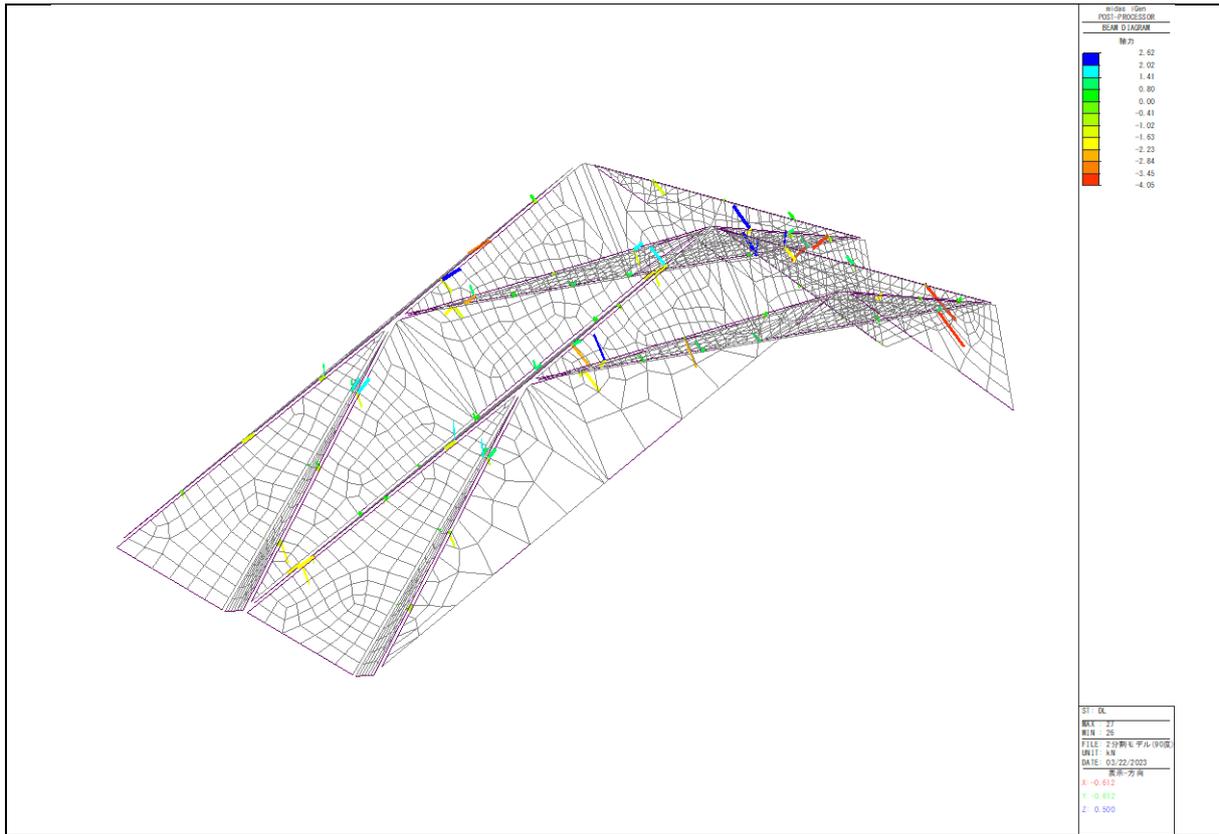


図 2.4.30 モデル 2-3 接合部応力 F_x

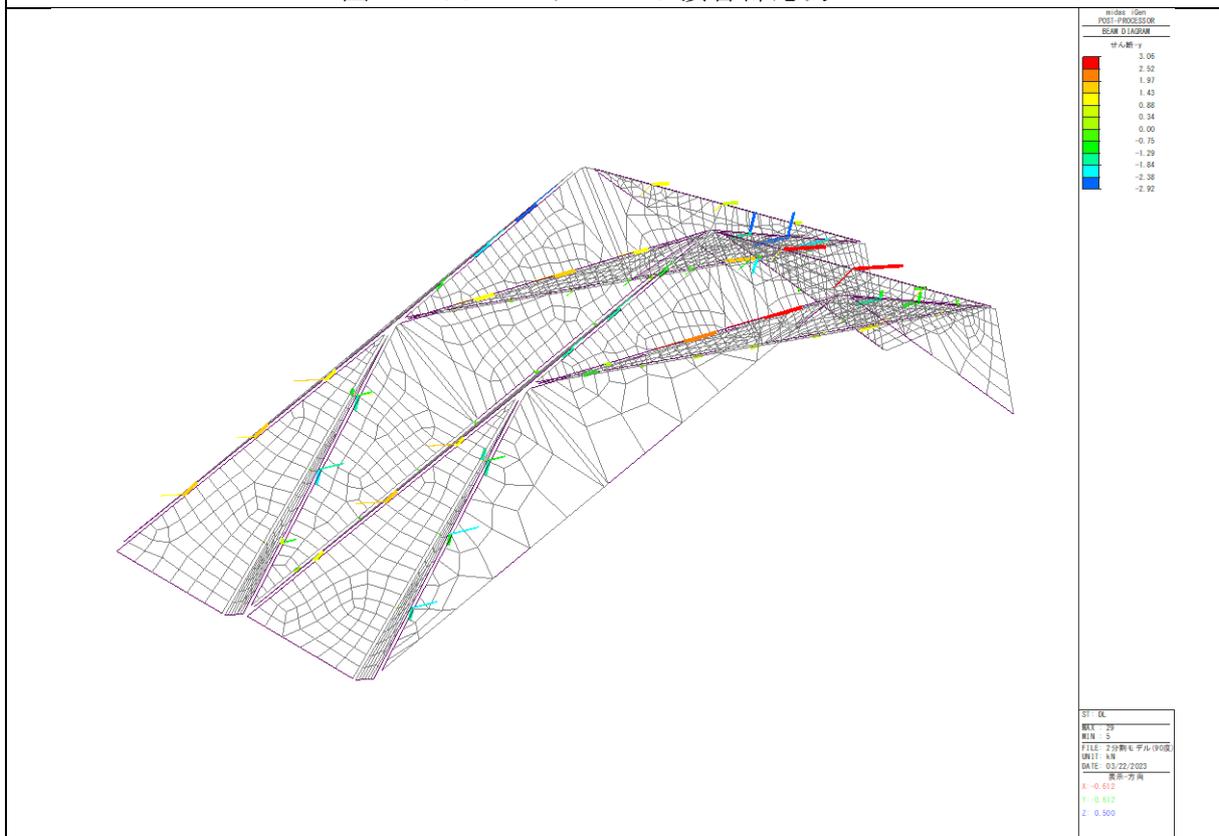
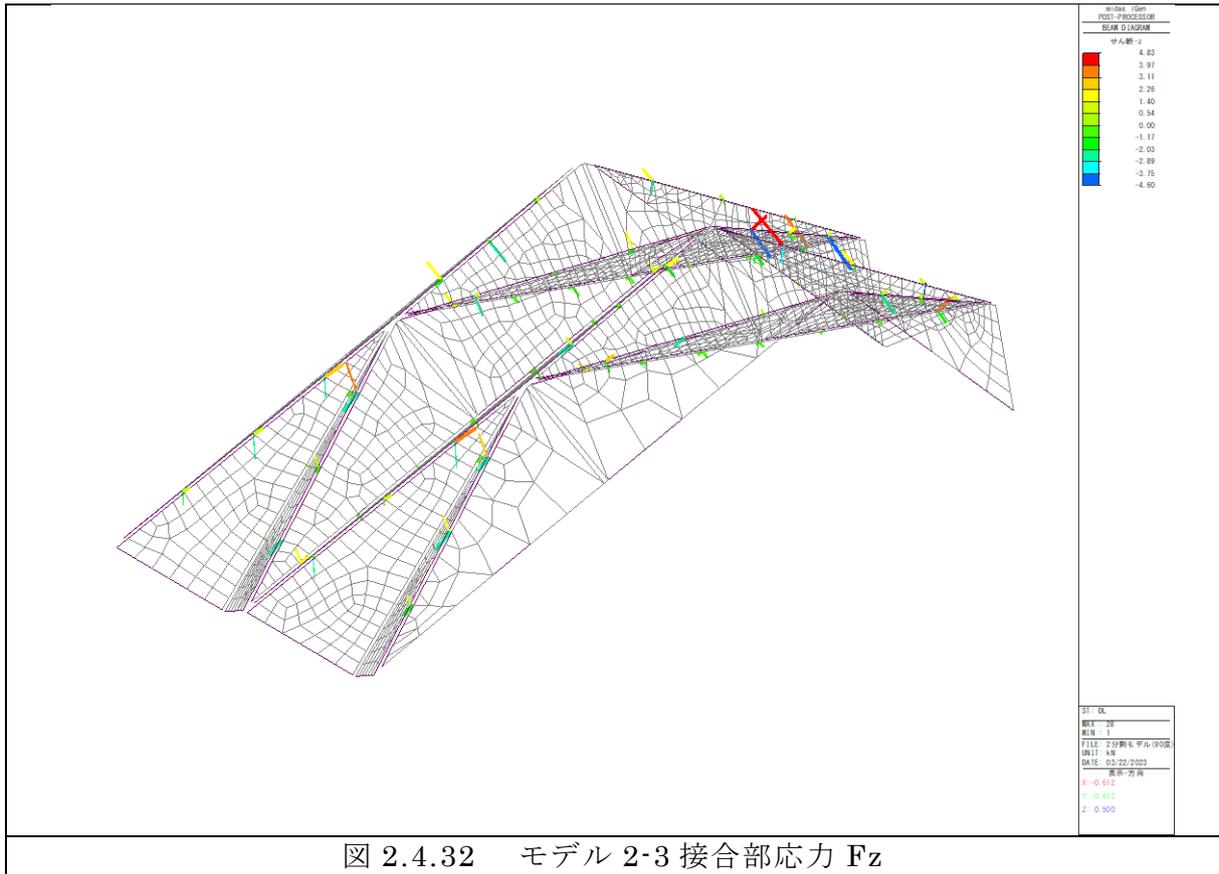


図 2.4.31 モデル 2-3 接合部応力 F_y



・ 支点反力 (1-1、1-2)

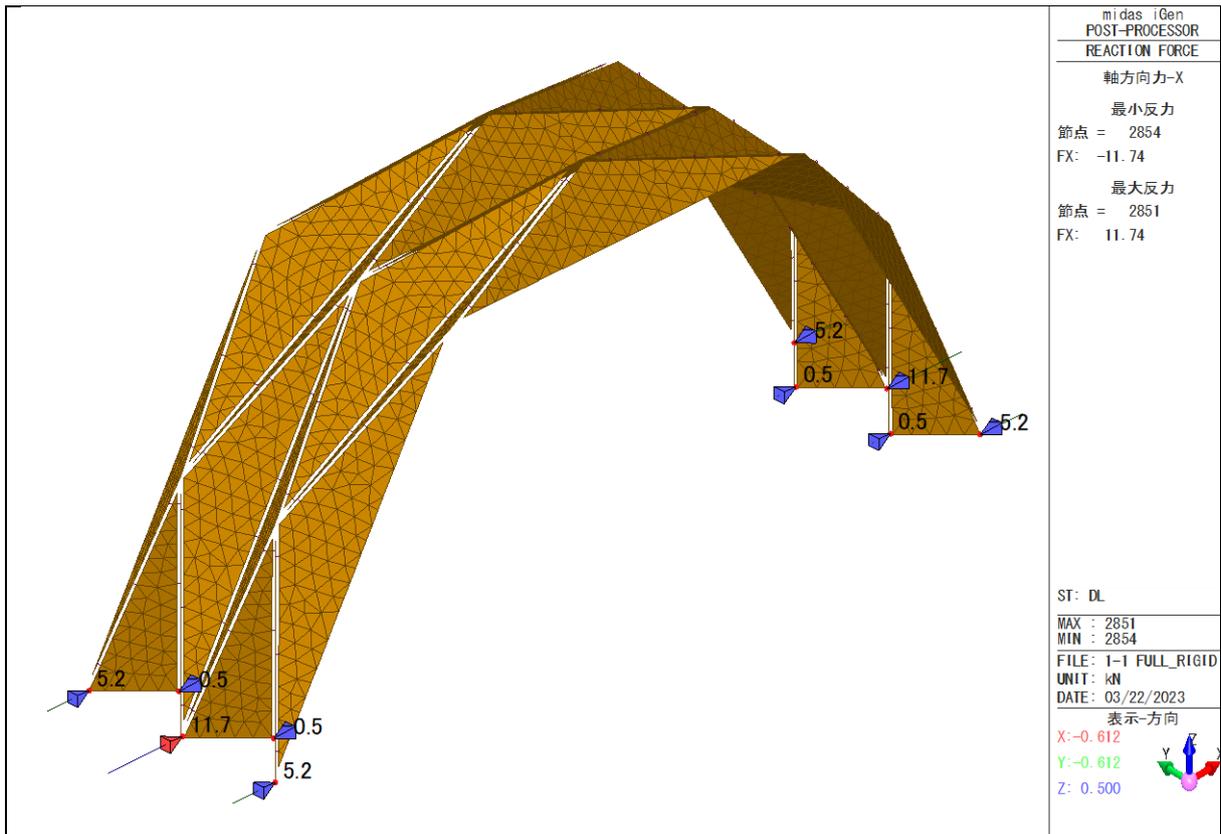


図 2.4.33 モデル 1-1 支点反力 FX

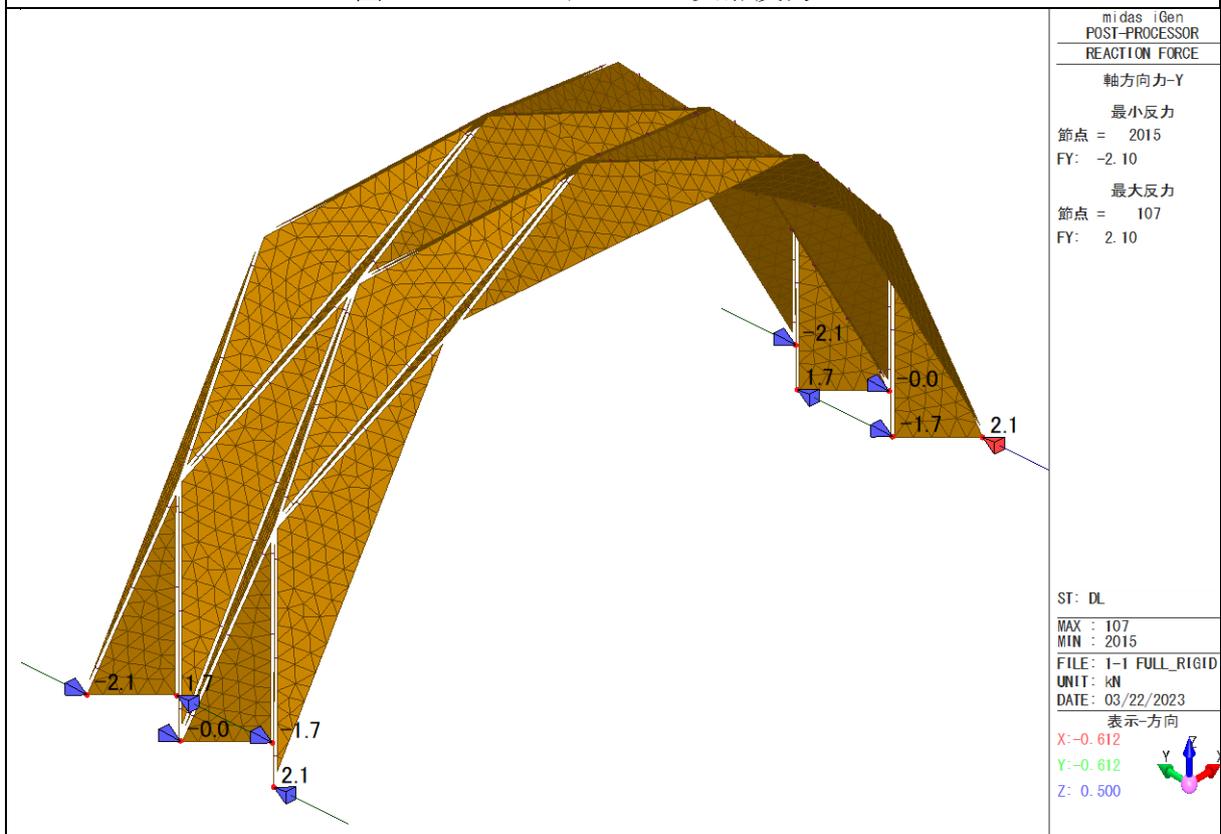


図 2.4.34 モデル 1-1 支点反力 FY

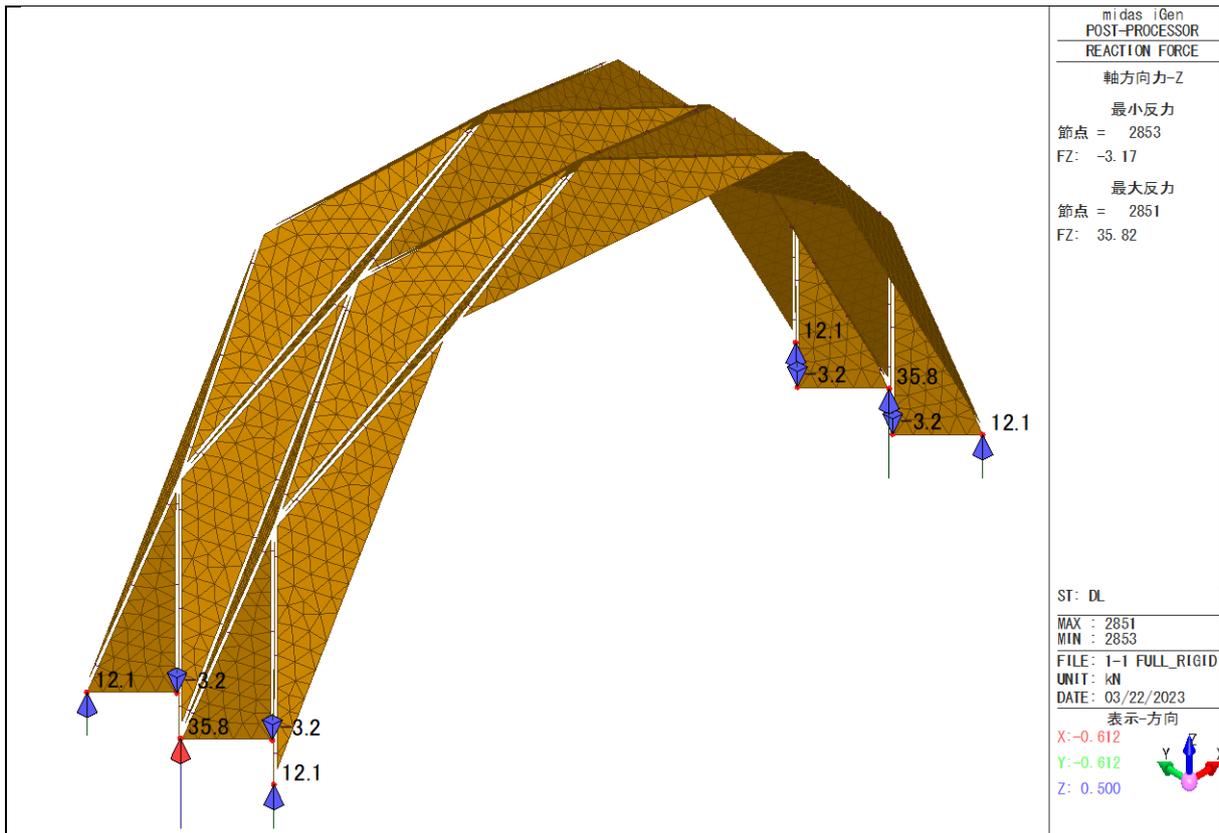


図 2.4.35 モデル 1-1 支点反力 FZ

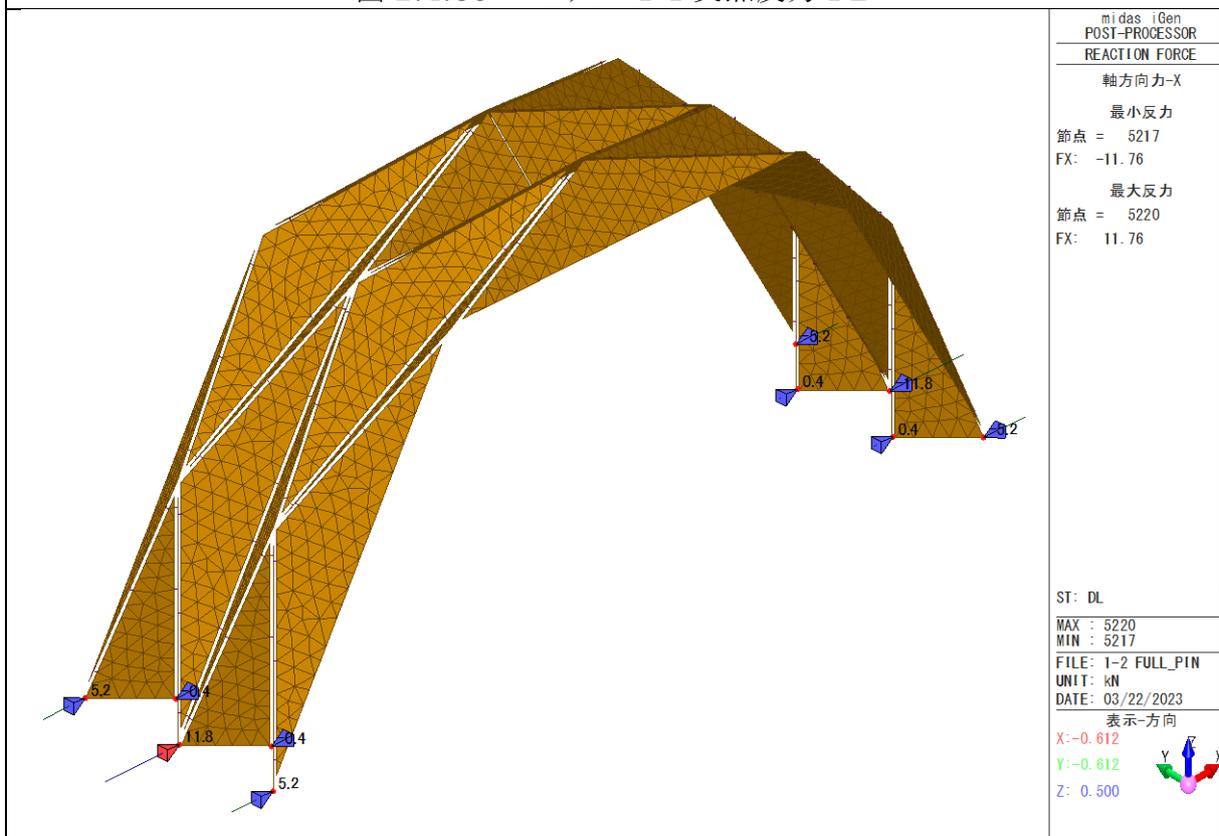


図 2.4.36 モデル 1-2 支点反力 FX

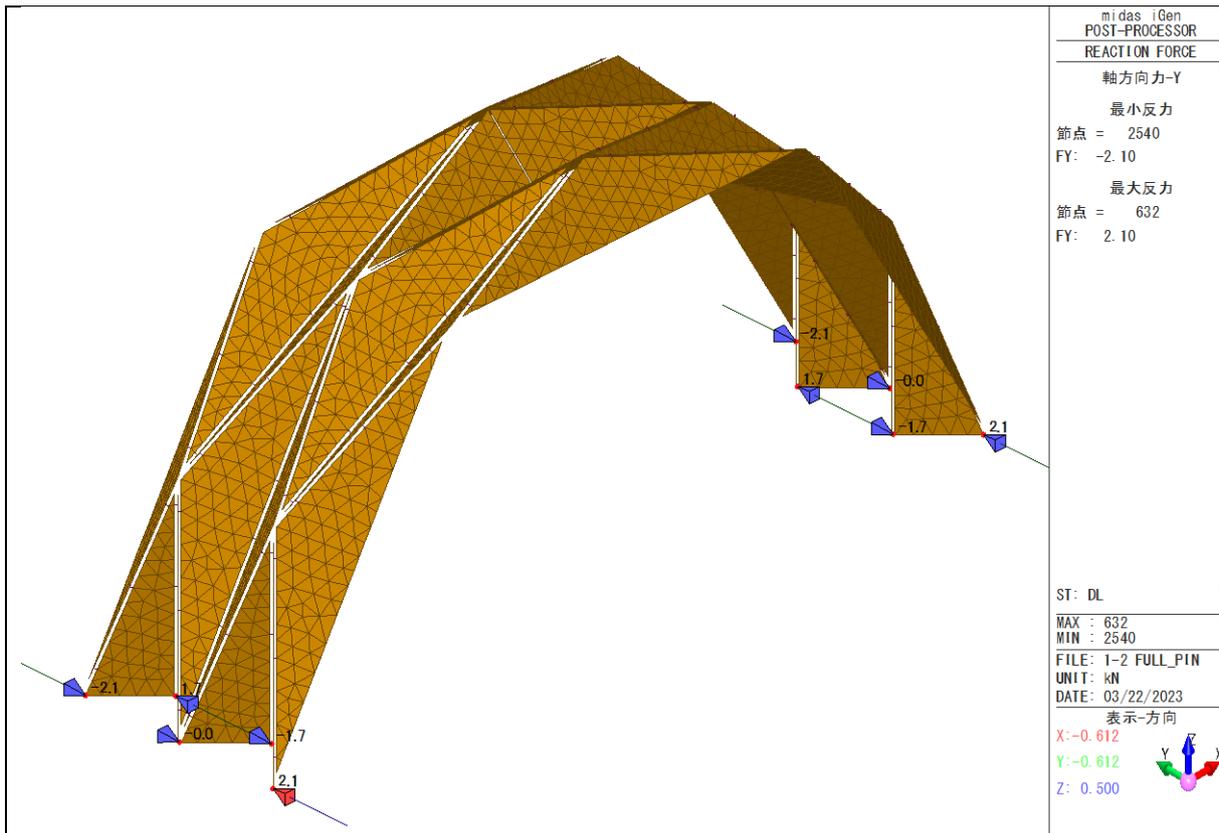


図 2.4.37 モデル 1-2 支点反力 FY

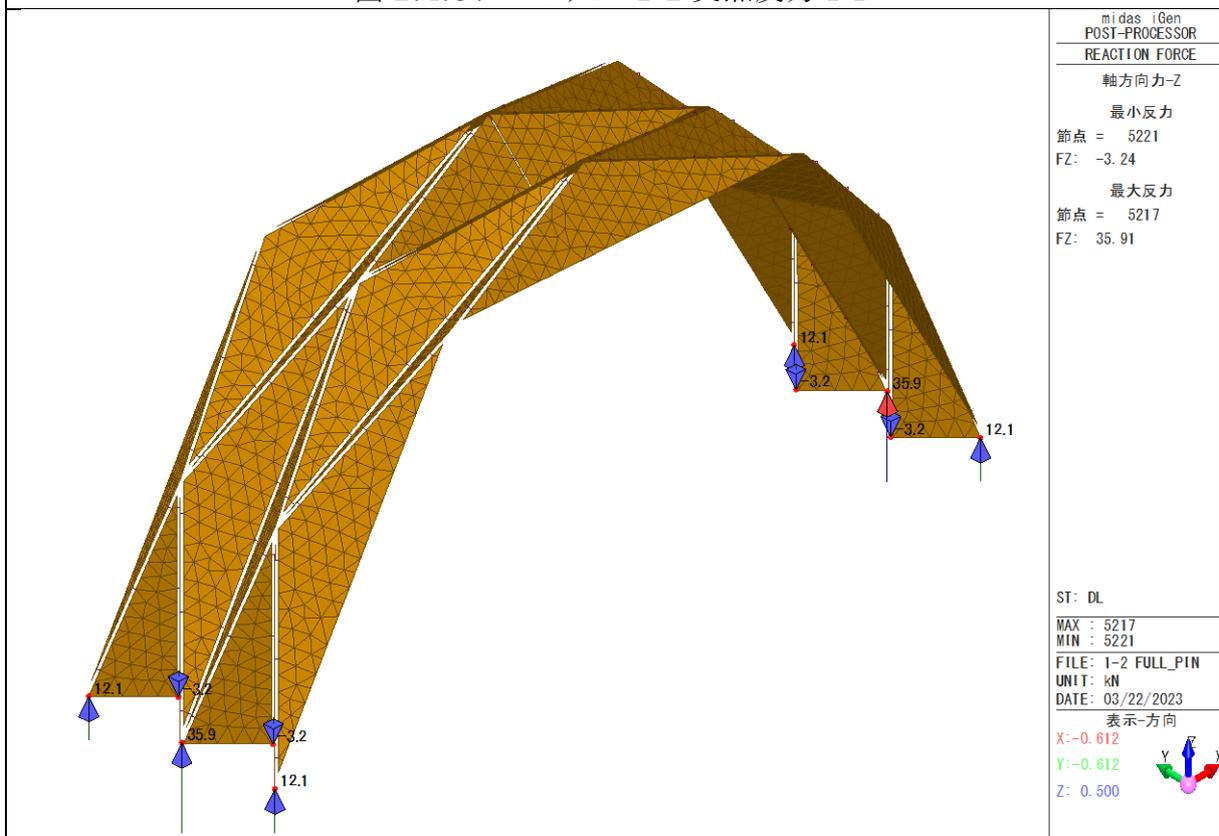


図 2.4.38 モデル 1-2 支点反力 FZ

・建物頂部の変形量 (1-1、1-2)

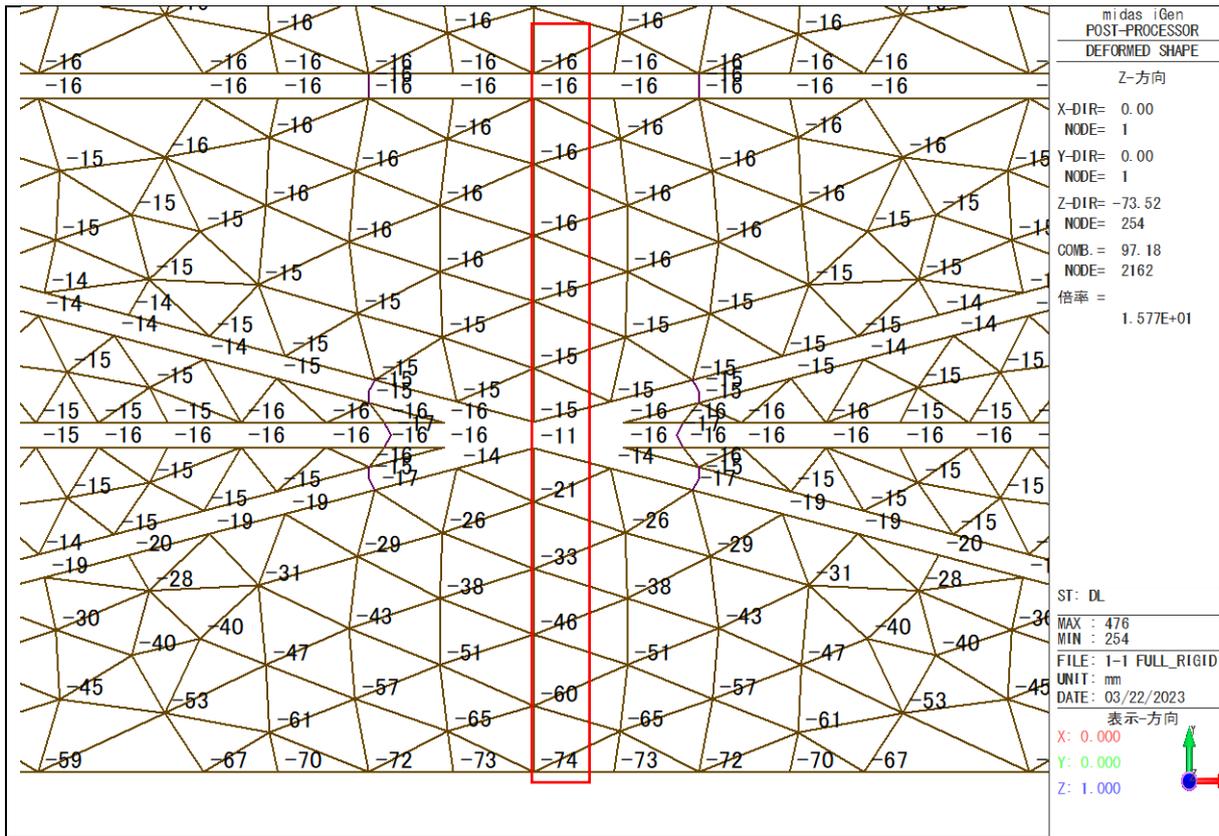


図 2.4.39 モデル 1-1 変形量 DZ

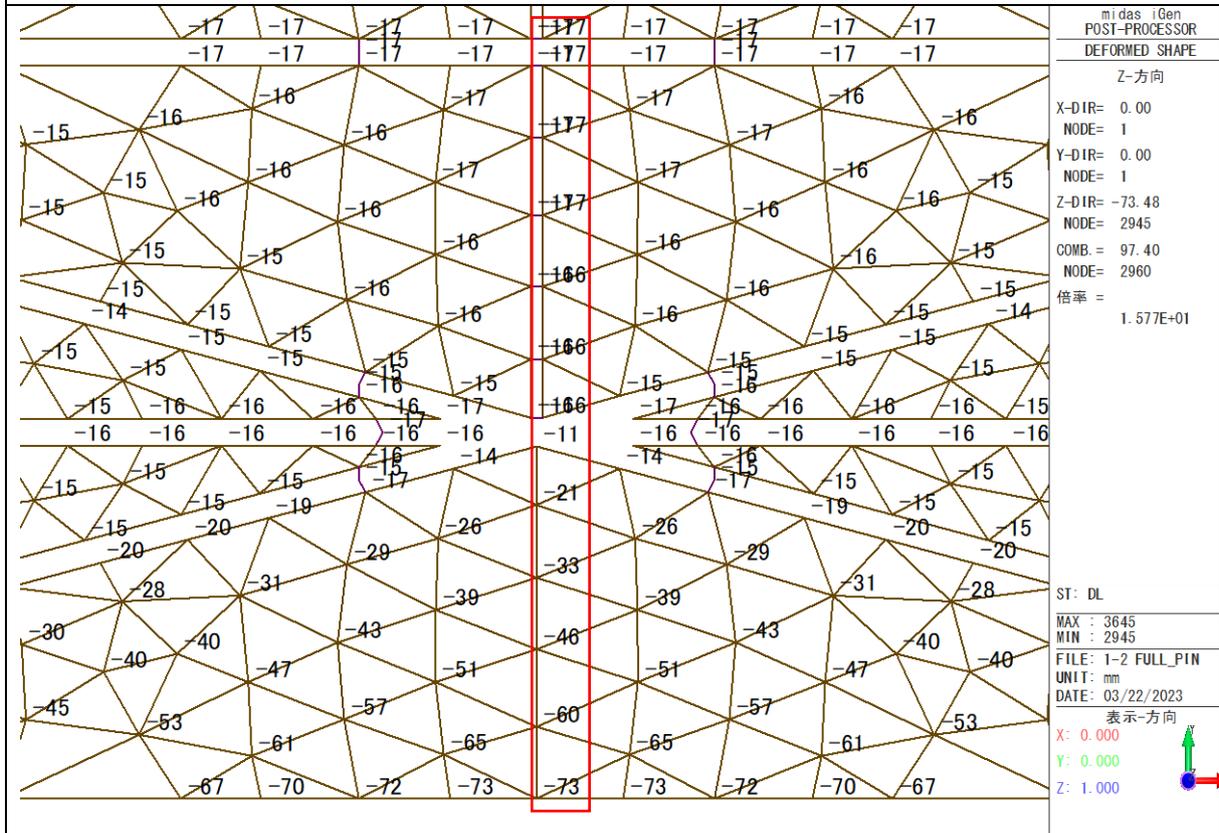


図 2.4.40 モデル 1-2 変形量 DZ

2.4.3 応力検定

前項で得られた最大値に対して検定を行う。なお各算定に用いる応力は 1-1、1-2 では長期、2-1、2-2、2-3 では短期として検定する。

2.4.3.1 CLT パネルの検定

CLT パネルに生じる最大応力・応力度を表 2.4.4 に示す。パネルの検定は解析結果の最大応力を CLT の厚み 90mm で割ることで存在応力度とし、CLT の S60-3-3 の許容応力度と比較し、存在応力度が許容応力度以下であることを確認する。CLT の軸方向の許容応力度は安全側の検討として引張の弱軸の値を使用する。

検定の結果を表 2.4.5 に示す。

表 2.4.4 CLT パネルに生じる最大応力・応力度

モデル名	荷重継続時間	CLT最大応力		CLT存在応力度	
		面内せん断力 Fxy	面内軸力 Fmax	面内せん断 応力度	軸方向 応力度
		(kN/m)	(kN/m)	(N/mm2)	(N/mm2)
1-1. フルモデル パネル中央剛接合	長期	33.1	114.1	0.37	1.27
1-2. フルモデル パネル中央ピン接合		33.2	114.4	0.37	1.27
2-1. ハーフモデル-20度	短期	132.0	121.1	1.47	1.35
2-2. ハーフモデル-45度		76.6	126.7	0.85	1.41
2-3. ハーフモデル-90度		54.9	156.0	0.61	1.73

表 2.4.5 CLT パネル応力の検定

モデル名	荷重継続時間	面内せん断応力検定						軸方向の応力検定					
		面内せん断 応力度	せん断 基準強度	荷重継続時間 による係数	許容 応力度	検定比	判定	軸方向 応力度	引張弱軸 基準強度	荷重継続時間 による係数	許容 応力度	検定比	判定
		(N/mm2)	(N/mm2)	-	(N/mm2)			(N/mm2)	(N/mm2)	-	(N/mm2)		
1-1	長期	0.37	2.45	0.37	0.90	0.41	OK	1.27	4.00	0.37	1.47	0.86	OK
1-2		0.37	2.45	0.37	0.90	0.41	OK	1.27	4.00	0.37	1.47	0.87	OK
2-1	短期	1.47	2.45	0.67	1.63	0.90	OK	1.35	4.00	0.67	2.67	0.50	OK
2-2		0.85	2.45	0.67	1.63	0.52	OK	1.41	4.00	0.67	2.67	0.53	OK
2-3		0.61	2.45	0.67	1.63	0.37	OK	1.73	4.00	0.67	2.67	0.65	OK

2.4.3.2 接合金物の検定

接合金物の検定に用いるせん断力 F_s は F_x と F_y の 2 方向のベクトルの足し算として下記の式によって求める。

$$F_s = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

ビスの引き抜き方向の力 F_z は図 2.4.41 のように金物内側にある 3 本のビスのみが力を負担するものとして算定する。

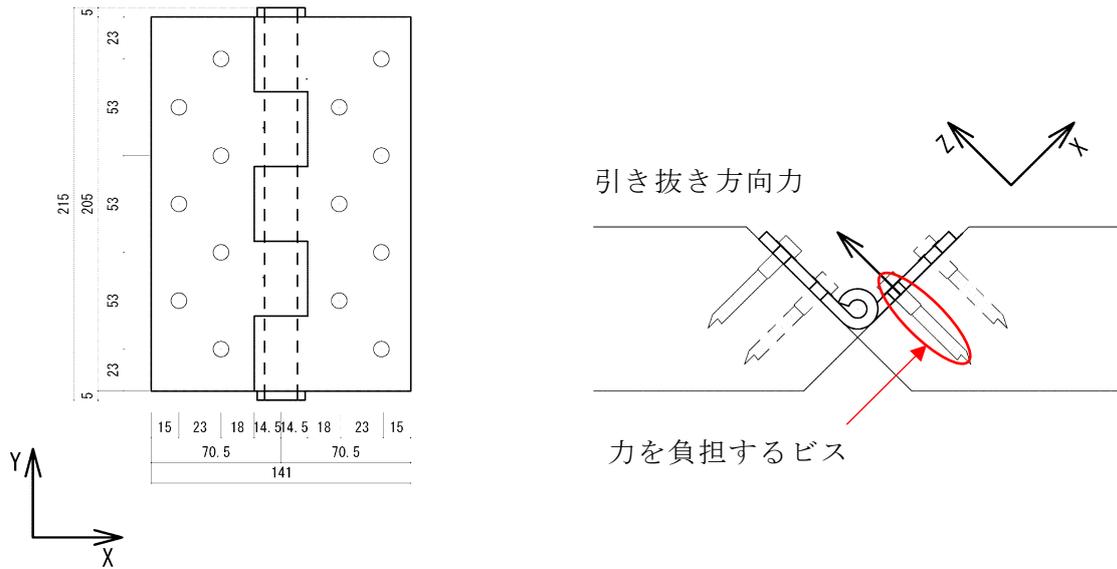


図 2.4.41 引き抜き方向力を負担するビス

蝶番接合部の短期及び長期のせん断耐力は「2.5 接合金物のせん断実験」の表 2.5.3 を参考にし、安全側の検討として OP タイプの耐力で検定を行う。

引き抜き耐力はシネジック社のパネリード鋼（PK8-60）の試験結果より、最大耐力 4.45kN の 2/3 を短期耐力、1.1/3 を長期耐力とする。

ビス 1 本あたりの耐力を表 2.4.6 に、接合部に生じる最大応力を表 2.4.7 に、検定の結果を表 2.4.8 に示す。

表 2.4.6 ビス 1 本あたりの耐力(kN)

せん断耐力 (OP タイプ)		引き抜き耐力	
長期	短期	長期	短期
1.8	3.2	1.6	3.0

表 2.4.7 接合部に生じる最大応力

モデル名	荷重継続時間	接合部に生じる最大応力			
		面内せん断力 F_x (kN)	面内せん断力 F_y (kN)	面内せん断力 F_s (kN)	面外せん断力 F_z (kN)
1-1. フルモデル パネル中央剛接合	長期	2.5	6.9	7.3	2.5
1-2. フルモデル パネル中央ピン接合		3.3	6.9	7.6	2.5
2-1. ハーフモデル-20度	短期	12.9	4.4	13.6	2.6
2-2. ハーフモデル-45度		8.6	6.3	10.7	6.7
2-3. ハーフモデル-90度		4.0	3.0	5.0	4.6

表 2.4.8 接合部の検定

モデル名	荷重継続時間	せん断方向の検定				引き抜き方向の検定							
		面内せん断力 F_s (kN)	ビス一本あたりのせん断耐力 (kN)	ビスの本数 (本)	接合部のせん断耐力 (kN)	検定比	判定	面外せん断力 F_z (kN)	ビス一本あたりの引き抜き耐力 (kN)	ビスの本数 (本)	接合部の引き抜き耐力 (kN)	検定比	判定
1-1	長期	7.3	2.0	7	14.1	0.52	OK	2.5	1.6	3	4.9	0.51	OK
1-2		7.6	2.0	7	14.1	0.54	OK	2.5	1.6	3	4.9	0.51	OK
2-1	短期	13.6	3.7	7	25.7	0.53	OK	2.6	3.0	3	8.9	0.29	OK
2-2		10.7	3.7	7	25.7	0.41	OK	6.7	3.0	3	8.9	0.75	OK
2-3		5.0	3.7	7	25.7	0.19	OK	4.6	3.0	3	8.9	0.52	OK

2.5 接合金物のせん断実験

2.5.1 試験体概要

試験体形状および寸法を図 2.5.1 に、蝶番の形状および寸法を図 2.5.2 に示す。実験は、蝶番が 90 度を開いた場合（OP タイプ）と完全に閉じた場合（CL タイプ）を想定し、2 種類の試験体で行った。CL タイプは、OP タイプを 2 つ接合したものとし、接合には GIR を用いた。

試験体の母材は、スギ（S60-3-3）の直交集成材であり、厚さ 90mm、弱軸長さ 300mm、強軸長さは 300mm または 235mm である。蝶番の取り付け位置は、蝶番が 90 度となるよう母材を 45 度に加工した。金物には、構造用ビス（シネジック：パネリード鋼 PK8-60）と重量蝶番（クマモト：鉄重量蝶番 K-38-205）を使用した。蝶番は、ビス用の穴あけ加工を施し、片面 7 本、両面で 14 本の仕様とした。

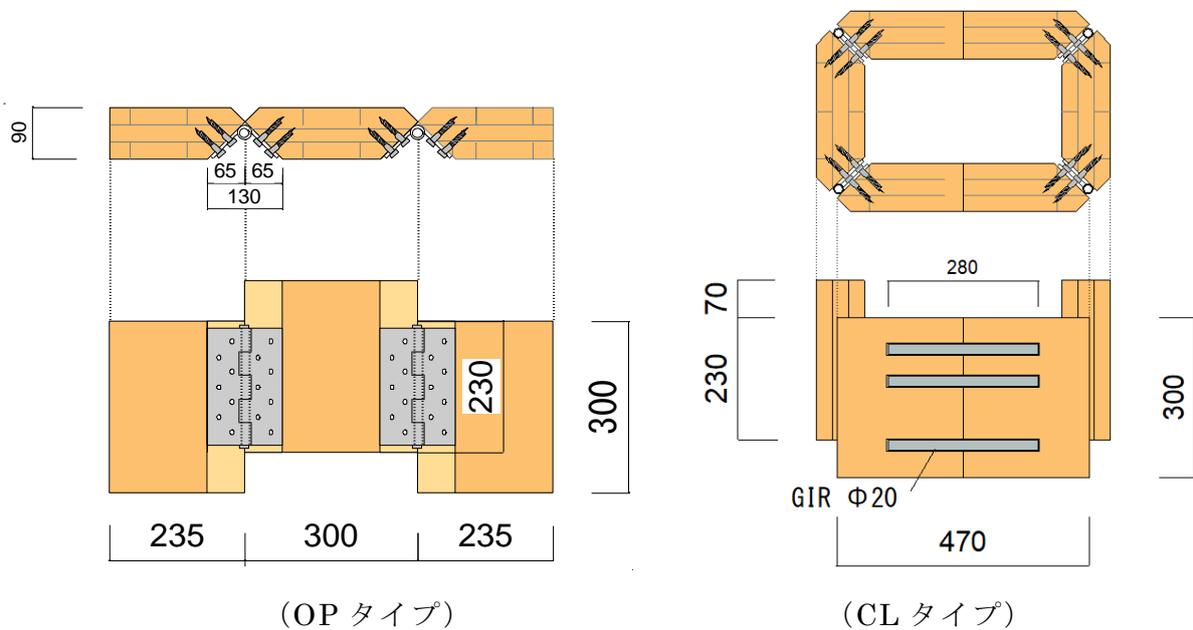


図 2.5.1 試験体形状および寸法 (mm)

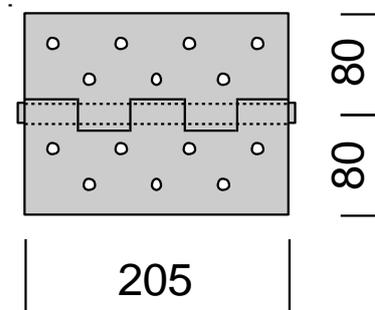


図 2.5.2 蝶番の形状および寸法 (mm)

2.5.2 試験方法

試験に用いた加力装置を図 2.5.3 に示す。载荷には 2000kN 万能試験機（島津製作所：UH-2000kNC）を使用し、単調加力（1.0mm/min）で試験を行った。パネル相互の相対変位はストレインゲージ式変位計（東京測器研究所：SDP-100）を用いて測定を行った。

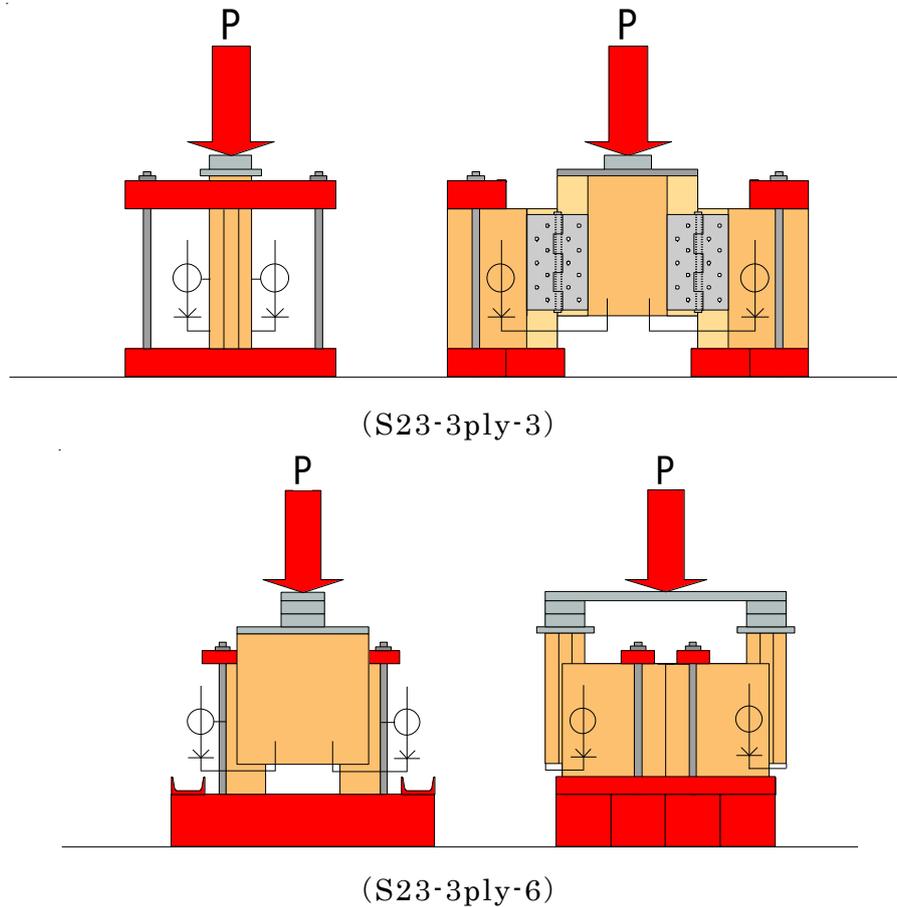


図 2.5.3 加力装置

2.5.3 試験結果

2.5.3.1 荷重－変形関係及び破壊性状

蝶番 1 枚あたり荷重－パネル相対変位の関係を図 2.5.4 に、実験の破壊性状を写真 2.5.1 に示す。すべての試験体において蝶番付近の木部にビスの引き抜けに伴って木材に割裂が生じ、CLT 接着面や年輪に沿って割れが進行した。パネルのずれが大きくなるにつれ、パネルに従って蝶番も斜めにずれた。また蝶番はヒンジにゆがみが生じ、ビスは折れ曲がりが生じていた。

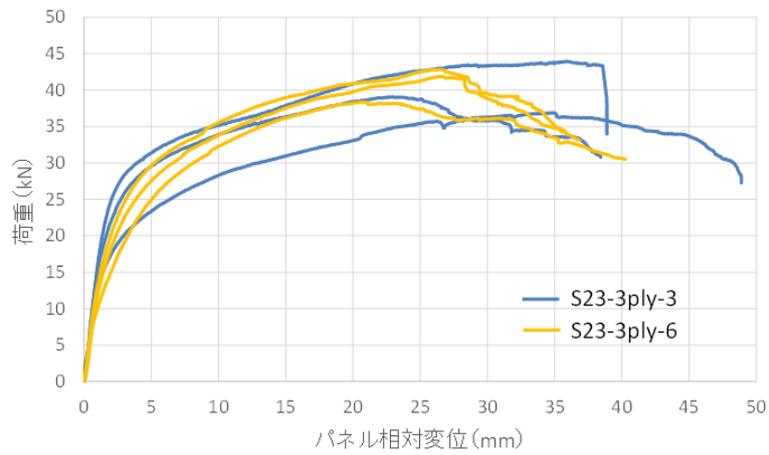


図 2.5.4 蝶番 1 枚あたりの荷重—パネル相対変位

<p>パネルおよび蝶番のずれ OP タイプ</p>	
<p>CLT 接着面の割れ OP タイプ</p>	
<p>パネルのずれ CL タイプ</p>	
<p>CLT 接着面の割れ CL タイプ</p>	

写真 2.5.1 破壊性状

2.5.3.2 各特性値

試験より得られた特性値を表 2.5.1 に示す。ここでは、蝶番 1 枚あたり値を示す。

表 2.5.1 特性値一覧

試験体名		初期剛性 (kN/mm)	降伏耐力 (kN)	最大耐力 (kN)	2/3Pmax (kN)	
OPタイプ	実験値(kN)	1	6.30	20.77	36.89	24.59
		2	10.54	27.13	43.94	29.29
		3	9.91	23.90	39.07	26.05
	平均値(kN)		8.92	23.93	39.97	26.64
	標準偏差		2.29	3.18	3.61	2.41
	変動係数		0.26	0.13	0.09	0.09
CLタイプ	実験値(kN)	1	7.97	25.09	42.84	28.56
		2	7.03	23.74	41.85	27.90
		3	7.66	21.55	38.37	25.58
	平均値(kN)		7.55	23.46	41.02	27.35
	標準偏差		0.48	1.79	2.35	1.57
	変動係数		0.06	0.08	0.06	0.06

(1) 初期剛性

各シリーズの初期剛性およびその平均値を図 2.5.5 に示す。なお、ここでの初期剛性は、それぞれの荷重-変位関係における最大耐力の 0.1 倍と 0.4 倍の点を結んだ直線の傾きとした。

平均値を比較すると、CL タイプは OP タイプの約 0.85 倍の値を示し、蝶番を 90 度に開いた方が蝶番を完全に閉じた場合よりも、初期剛性は高いという結果となった。



図 2.5.5 初期剛性

(2) 降伏耐力

各シリーズの降伏耐力およびその平均値を図 2.5.6 に示す。平均値を比較すると、CL タイプは OP タイプの約 0.98 倍の値を示し、ほぼ同等の値であった。

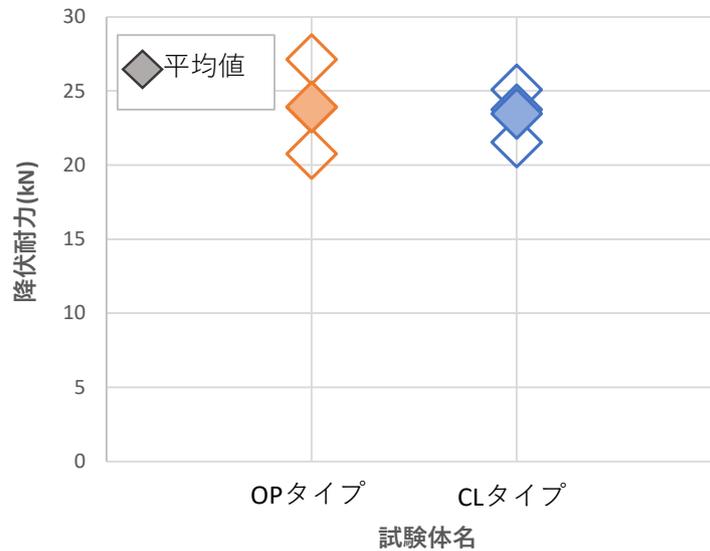


図 2.5.6 降伏耐力

(3) 最大耐力

各シリーズの最大耐力およびその平均値を図 2.5.7 に示す。平均値を比較すると、CL タイプは OP タイプの約 1.03 倍の値を示し、ほぼ同等の値であった。

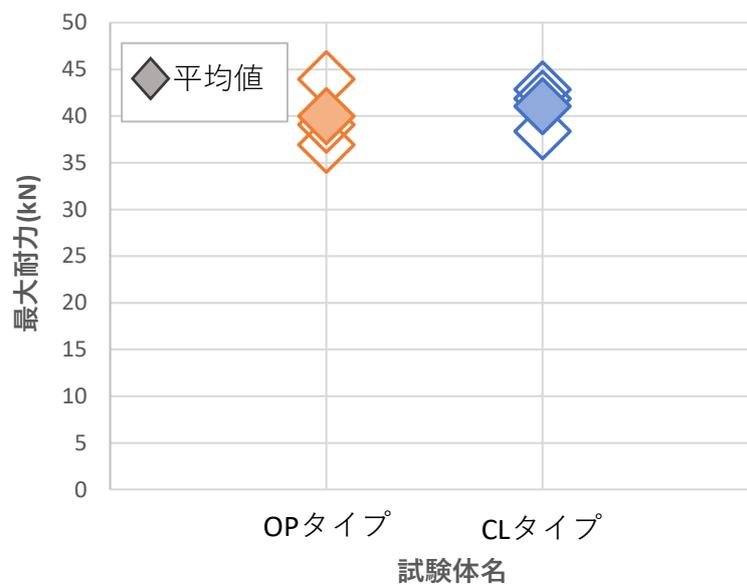


図 2.5.7 最大耐力

(4) 蝶番一枚あたりの設計用短期せん断耐力

設計用短期せん断耐力算定に用いた各評価項目と算出結果を表 2.5.2、図 2.5.8 に示す。

なお、ここで設計用短期せん断耐力 P_0 は、下記の(a)(b)の値に、ばらつき係数を乗じて算出した値のうち最も小さい値とする。なお、ここで用いたばらつき係数は、本接合部が同じ条件で多数箇所設置されることから、母集団の分布形を正規分布とみなし、統計的処理に基づく信頼水準 75% の 50% 下側許容限界値をもとに式 2.5.1 により求めることとした。

この結果、設計用短期せん断耐力は、蝶番の開閉にかかわらず、蝶番一枚あたり約 22.5kN となった。

(a)降伏耐力 P_y

(b)最大荷重 P_{max} の 2/3

$$\text{ばらつき係数} = 1 - CV \cdot k \quad \dots(2.5.1)$$

ただし、 CV : 変動係数 (標本標準偏差/平均値)

k : 信頼水準 75% における 50% 下側許容限界値を求めるための

係数

(試験体数 $n=3$ のとき、 $k=0.471$)

表 2.5.2 各評価項目と設計用短期せん断耐力算出結果(■: 決定項目)

試験体名		評価項目	
		2/3Pmax (kN)	降伏耐力 P_y (kN)
OPタイプ	平均	26.64	23.93
	ばらつき係数	0.96	0.94
	設計用短期せん断耐力(kN)	25.51	22.43
CLタイプ	平均	27.35	23.46
	ばらつき係数	0.97	0.96
	設計用短期せん断耐力(kN)	26.61	22.62

図 2.5.8 蝶番一枚あたりの設計用短期せん断耐力

(5) 蝶番一枚あたりの設計用長期基準せん断耐力

設計用長期せん断耐力、および設計用短期せん断耐力の算出結果を表 2.5.3、図 2.5.9、図 2.5.10 に示す。長期基準接合耐力は、式 2.5.2 により算出した。この結果、設計用長期せん断耐力は、蝶番の開閉にかかわらず、蝶番一枚あたり約 12.4kN となった。

$$\text{設計用長期せん断耐力} = P_0 \times (1.1/2) \quad \dots(2.5.2)$$

なお、 P_0 : 設計用短期せん断耐力

表 2.5.3 設計用短期せん断耐力および設計用長期せん断耐力

試験体名	設計用短期せん断耐力 (kN)	設計用長期せん断耐力 (kN)
OPタイプ	22.43	12.34
CLタイプ	22.62	12.44

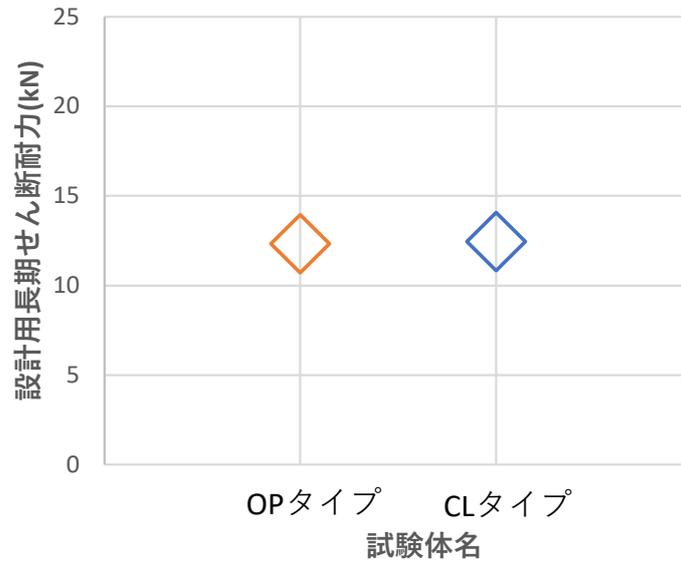


図 2.5.9 蝶番一枚あたりの設計用長期せん断耐力

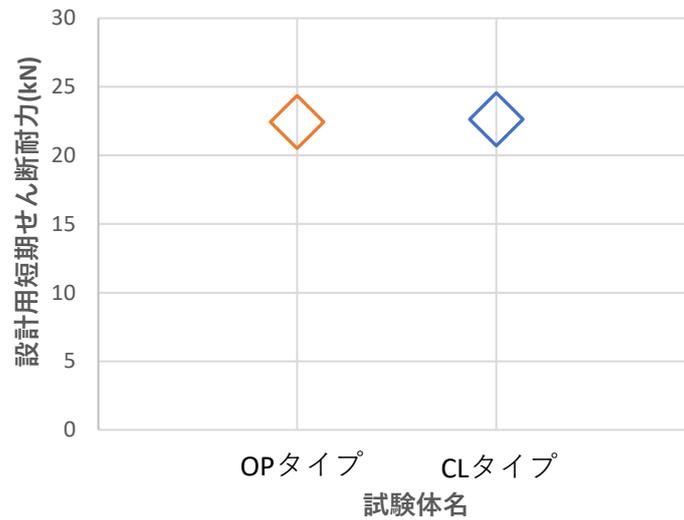


図 2.5.10 蝶番一枚あたりの設計用短期せん断耐力

(6) ビスの耐力との比較

ビスのせん断強度および蝶番の最大耐力を表 2.5.4、ビス 7 本あたりのせん断強度および蝶番の最大耐力を図 2.5.11 に示す。蝶番 1 枚あたりの推定耐力と実験より得られた最大耐力を比較する。構造用ビス(シネジック:パネリード鋼 PK8-60)の 1 本あたりの繊維直交方向におけるせん断強度は 7.69kN である。蝶番 1 枚あたりである、ビス 7 本のせん断強度は 53.83kN である。

表 2.5.4 ビスのせん断耐力および蝶番一枚あたりの最大せん断耐力

試験体名	ビス 1 本あたりのせん断耐力 ^{2.5.1)} (kN)	ビス 7 本あたりのせん断耐力 (kN)	蝶番一枚あたりの最大せん断耐力 (kN)
OP タイプ	7.69	53.83	39.97
CL タイプ			41.02

ビス 7 本あたりのせん断耐力と、実験より得られた蝶番 1 枚あたりの最大耐力平均値を比較する。蝶番 1 枚あたりの最大耐力がビス 7 本あたりのせん断耐力を、OP タイプでは 13.86kN、CL タイプでは、12.81kN 下回る結果となった。これは、蝶番を CLT の木口面に施工したことにより、ビスの耐力に達する前に CLT が破壊されるためだと考えられる。

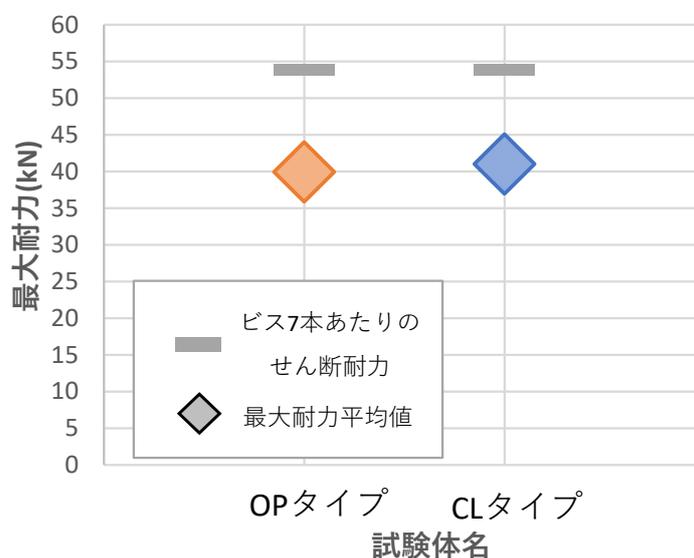


図 2.5.11 ビスのせん断耐力と蝶番一枚あたりの最大耐力の比較

参考文献

2.5.1) シネジック株式会社 テクニカルデータシート (パネリード鋼 Φ8・Φ12)
<https://kensetsu.ipros.jp/catalog/detail/376126?hub=41+%E3%82%B7%E3%83%8D%E3%82%B8%E3%83%83%E3%82%AF>

第3章 縮小モデルでの実験

本章では、第4章で説明する実大サイズのモックアップを行うにあたり、縮小スケールのモデルを試作して、表2.4.1の1-1のフルモデル（以下、モデル1）と、1-2のフルモデル・パネル中央ピン接合型（以下、モデル2）の2種のモックアップと載荷試験を行い、組み立て時の作業性の確認と2体の構造特性の比較を行うことにした。

3.1 試験体概要

試験体の材料はSPF材であり、厚さ30mm、幅750mm、高さ285mmの三角形の板を8枚、厚さ30mm、幅1500mm、高さ30mmの二等辺三角形の板を20枚接合し、短手1137mm、長手4500mmの平板状になるように構成した。図3.1にモデル1のパネル展開図と、各寸法、および丁番の取付位置を、図3.2にモデル1のモックアップ後の試験体透視図を示す。モックアップ後の試験体の寸法は全長3000mm、奥行804mm、高さ1500mmとなる。

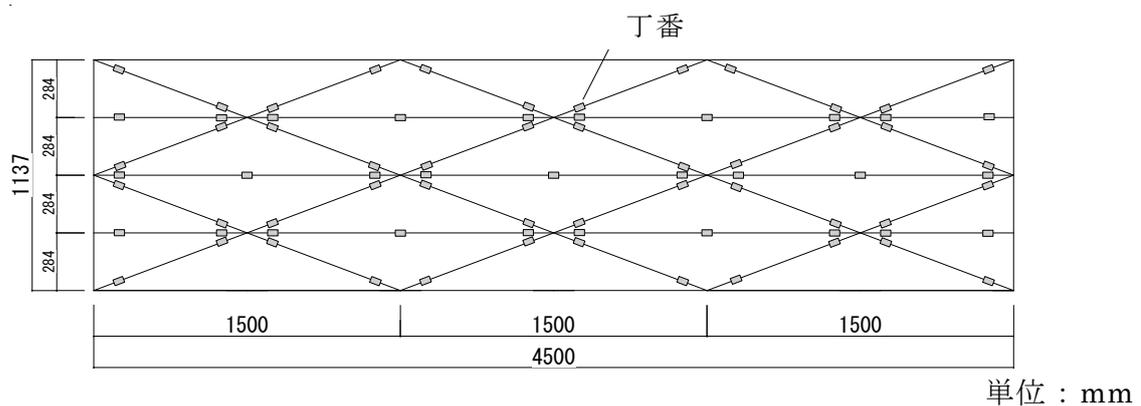


図3.1 モデル1のパネル展開図および丁番の取付位置

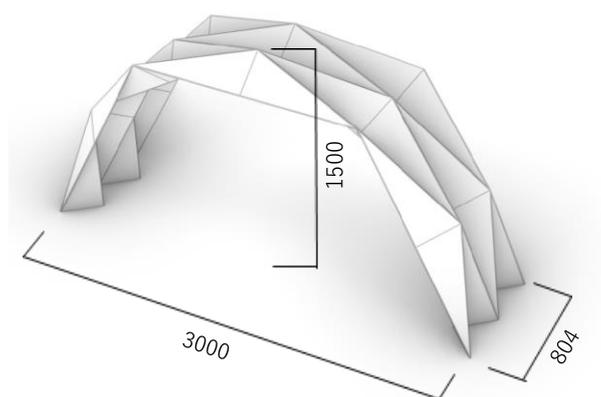


図3.2 モデル1のモックアップ後の透視図 (mm)

各三角形パネル同士の接合は、市販の家具用の厚さ1.2mm、幅15mm、高さ50mmの丁番を用いている。丁番は備え付けの木ビスで試験体に固定した。図3.3は、丁番取付け部の断面図で、パネルの切削は、表層面に対し45°にカットしている。

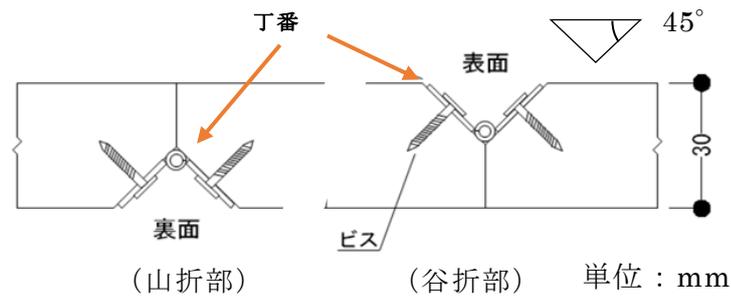


図 3.3 丁番取付部の断面図

またモデル 2 は、図 3.4 の位置で試験体 1 を長手方向で二等分に切断し、左右対称のパネル 2 枚で構成する。このパネル頂部の接合には、平板金物をビス 8 本で、外面に 4 か所、内面に 4 か所の計 8 か所で固定 (図 3.5) した。試験体脚部の支持方法は、モデル 1, モデル 2 共に住宅用の市販の L 字金物 (30×50×32×1.6(t)) を用いて、ビスで床に敷いた合板に固定した。

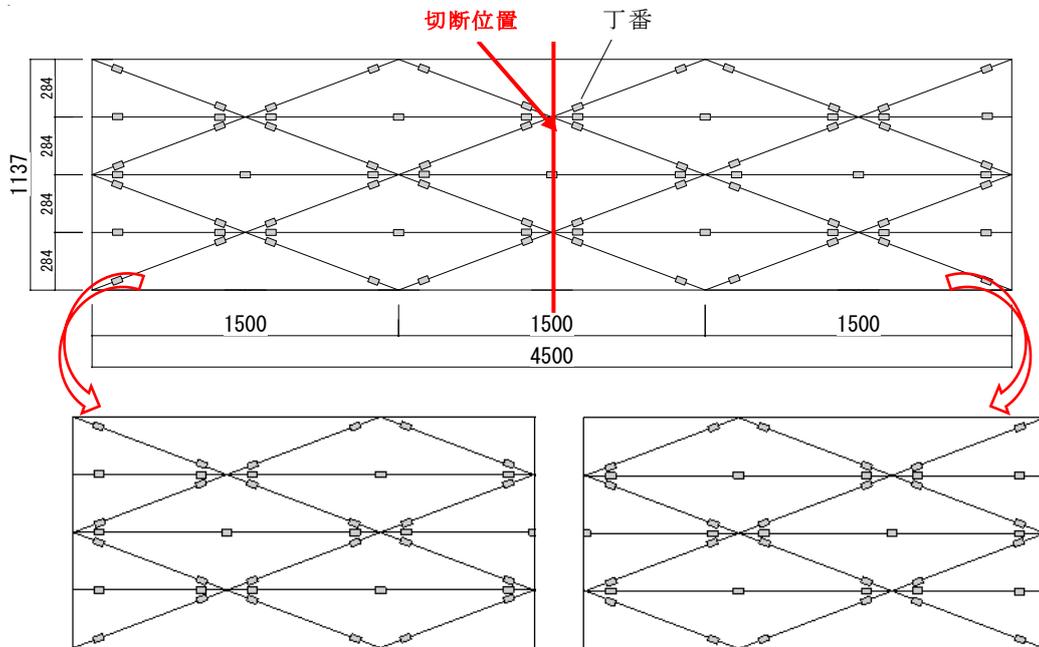


図 3.4 モデル 2 製作のためのモデル 1 の切断

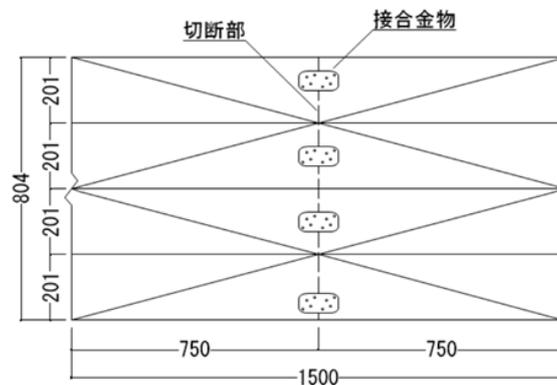


図 3.5 モデル 2 の頂部の接合金物取付状況

3.2 組み立て

モデル1の組み立ては、吊位置を次のように変えて、2回行っている。

- ① 図 3.6 の ▲ 位置
- ② 図 3.7 の ▲ 位置

吊位置には穴をあけ、アイボルトを取り付け、これにロープを通し、クレーンで吊り上げた。②の組み立ての状況を写真 3.1 に示す。

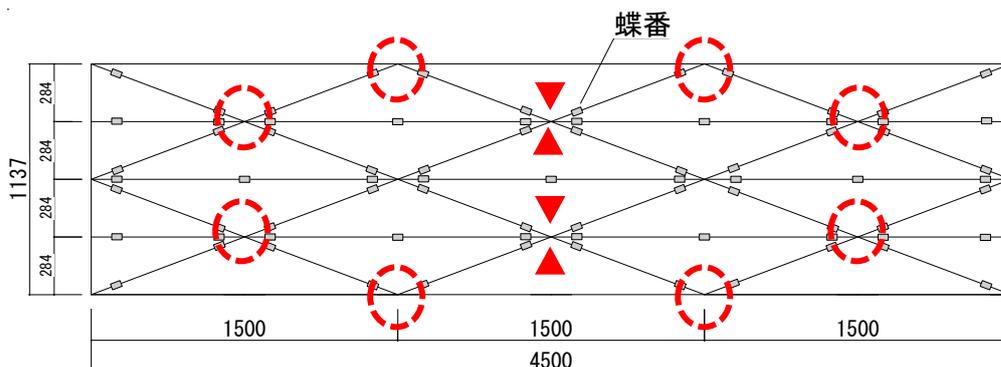


図 3.6 モデル1の組み立て（1回目）の吊位置

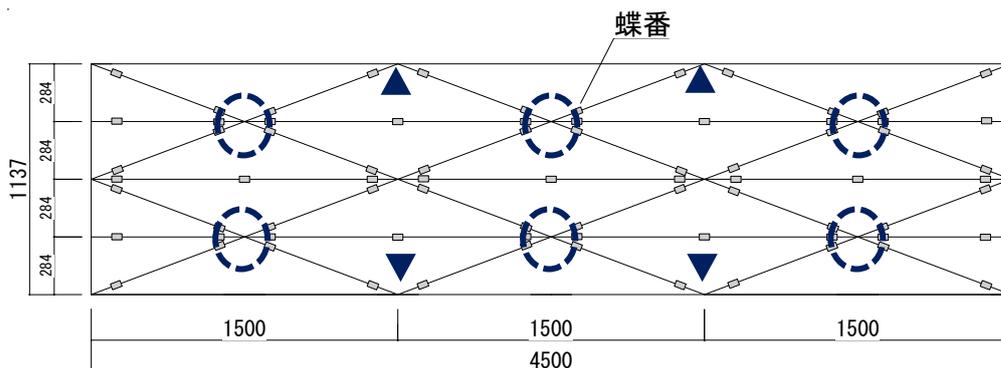


図 3.7 モデル1の組み立て（2回目）の吊位置

いずれもクレーンで持ち上げただけでは、アーチ状に立ち上げることは困難なため、試験体の両サイドから、図 3.6 の  部、または図 3.7 の  部が折れ曲がるように手で誘導し、試験体の形状を整えようとした。始動させた後、それぞれの折り目を正常に折れ曲がるまでには時間を要したが、すべての折り目が正常に曲がり、ある程度持ち上げたのちは、正規の位置に設置するための動作以外は、特に人力による作業は必要としなかった。

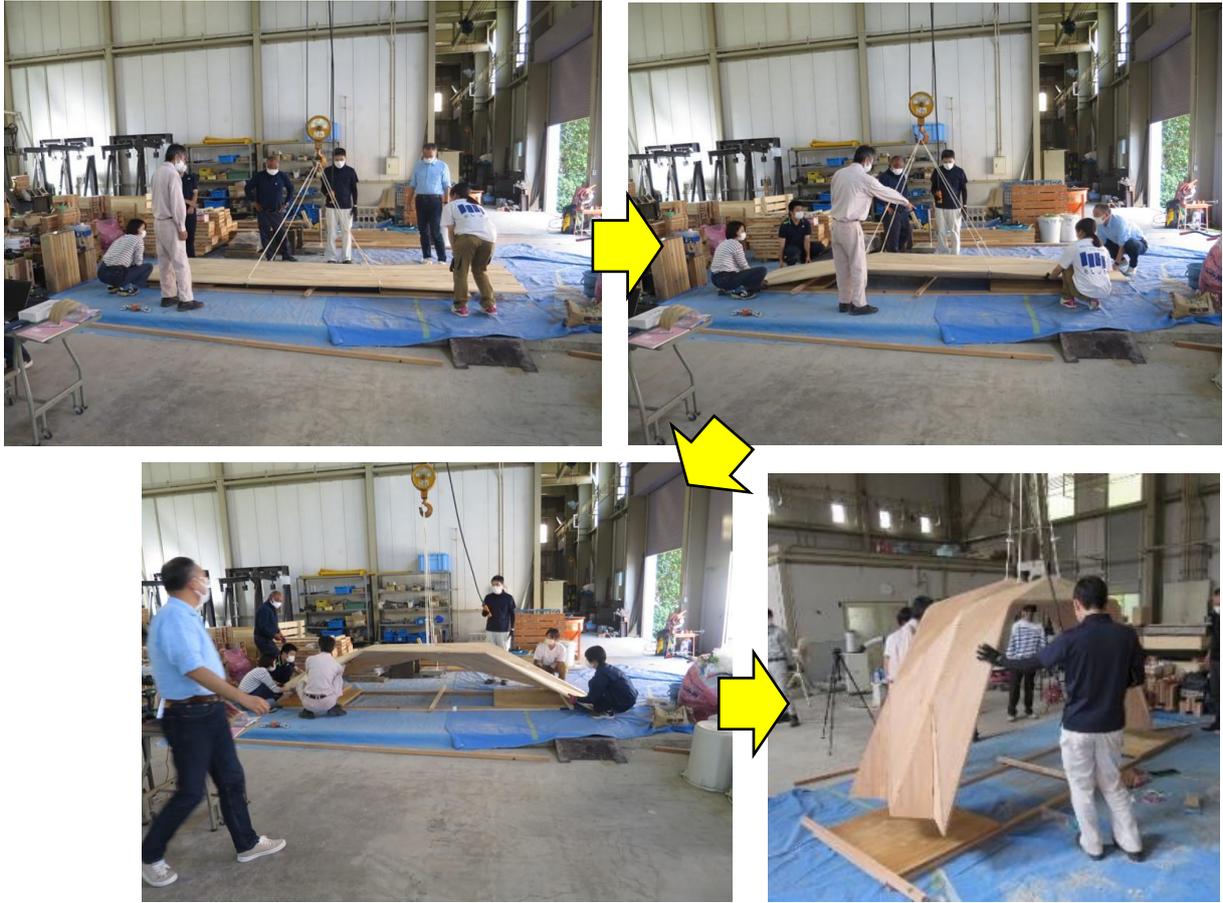


写真 3.1 モデル 1 の組み立て風景

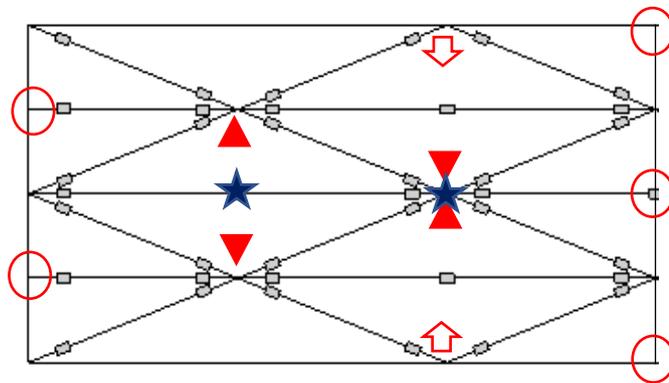


図 3.8 モデル 2 の吊り上げ位置等



写真 3.2 モデル 2 のパネル組み立て風景

モデル 2 のパネルは、図 3.8 の ▲ および ⤴ にアイボルトを取り付け、⤴ の部分はその内側の ▲ の方向に平行にロープを通し、▲ と ★ を結び、★ にはチェーン・ブロックを取り付け、★ の 2 点をクレーンで吊り上げるとともに、チェーン・ブロックで ⤴ 部分を ▲ 部分に引き寄せるようなかたちで吊り上げた（写真 3.2 参照）。また始動の段階では ○ 点が、谷方向に折れ曲がるように注意を払った。始動させた後、いったん谷部・山部に正規の折り目がつけば、容易にアーチ状に成型されることが確認できた。その後、この 2 つのアーチを写真 3.3 の要領にて中央で接合した。

実大サイズの組み立てでは、チェーン・ブロックを使って ⤴ と ▲ 部を引き寄せる作業は、CLT パネルの上に乗っての作業になるため、安全性の面でできない。またモデル 1 の組み立てで顕著であったように、初期の段階でパネルの幅方向に引きつけられるような負荷がかかると、谷折り部・山折り部の一部が正規の向きとは逆の方向に変形しようとし、うまく折れ曲がらなかった。両端の ○ 部の上方への浮き上がりの拘束は実大サイズにおいても可能であるが、その他の山折り部と谷折り部の正規な方向への誘導は困難である。そこで実大サイズの組み立てでは図 3.9 の ▲ の位置をクレーンにて真上に吊り上げる対策を講じ、○ の横移動は手動にて行うことにした。



写真 3.3 モデル 2 の組み立て

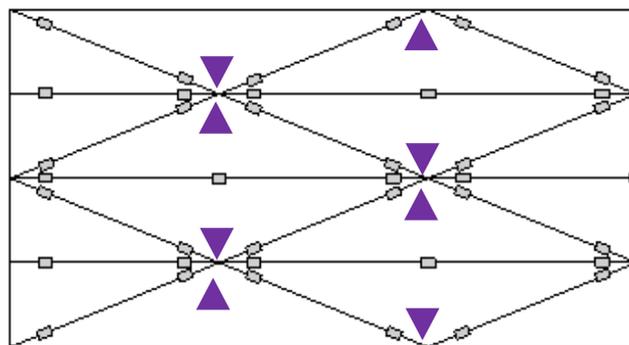


図 3.9 実大サイズ CLT 躯体の吊り上げ位置案

3.3 加力試験

3.3.1 試験方法

図 3.10 に試験体立面図および計測位置、図 3.11 に試験体平面図および変位計位置、図 3.12 に載荷点、写真 3.3、写真 3.4 に載荷の様子を示す。

鉛直荷重載荷には1枚9.18kgの鋼板を用い、本実験での最大荷重においては鋼板計11枚の1013Nを載荷した。荷重の計測はロードセル（東京測器研究所：CLP-2B）を用いた。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-25, CDP-50, SDP-50）、巻込型変位計（東京測器研究所：DP-1000G）を用いて計測した。計測は床との相対変位であり、変位計の位置は11か所とした。

載荷は、次の4つの方法で行った。

- ① 試験体中央部に重りを載荷した中央荷重
- ② 試験体上部および試験体右上部にロープを取り付け、レバーホイストを用いて牽引することによる頂部水平荷重

モデル1は、①を4回、②は1回、④を1回、モデル2では、①を2回、②を2回行った。

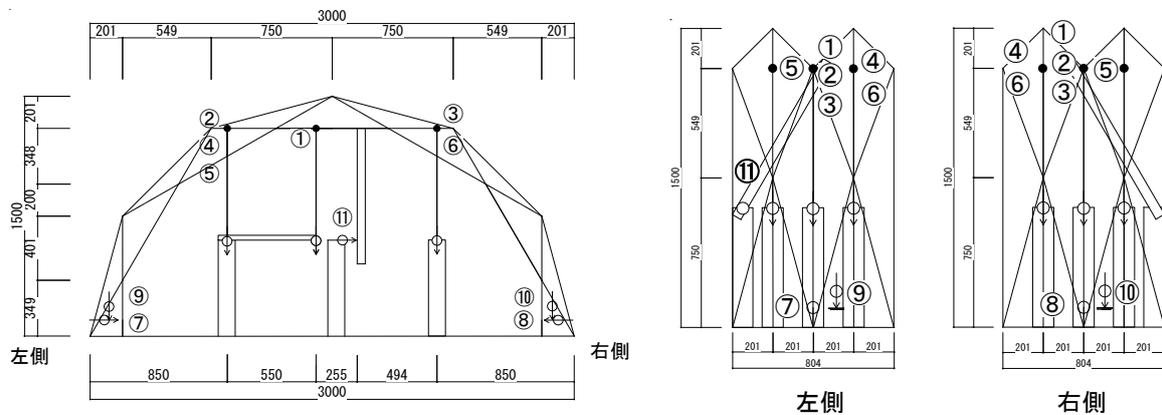


図 3.10 試験体立面図および計測位置 (mm)

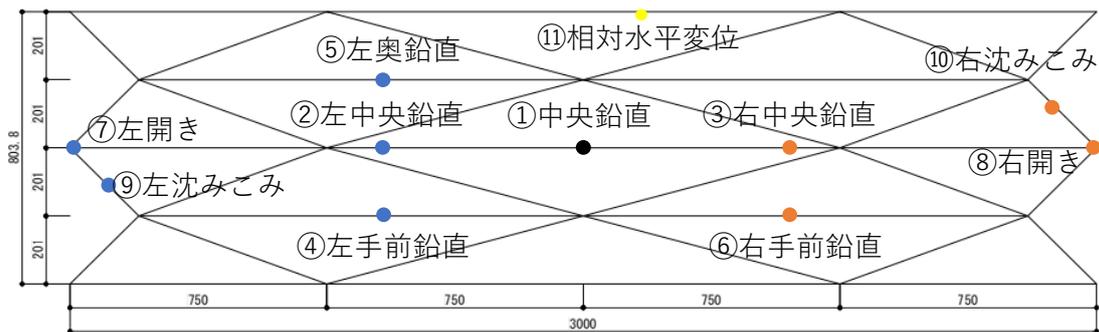
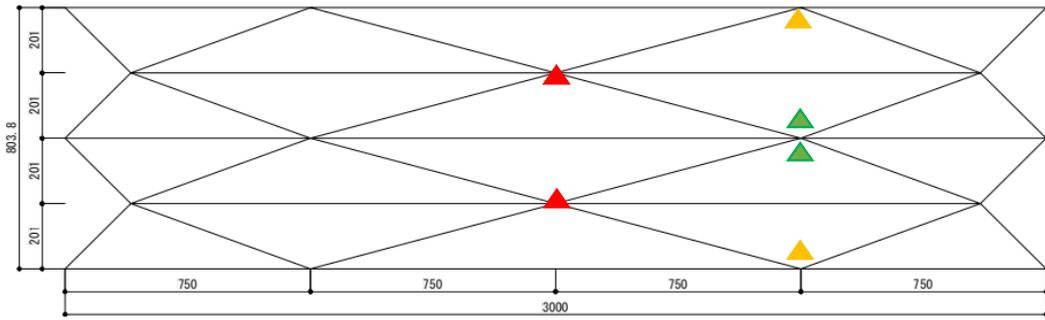


図 3.11 試験体平面図および変位計位置



▲ 中央荷重載荷点、頂部水平荷重載荷点 ▲ 偏荷重載荷点 ▲ 中間部水平荷重載荷点

図 3.12 載荷点



写真 3.4 中央荷重載荷の様子



写真 3.5 水平加力の様子

3.3.2 試験結果

中央荷重載荷と偏荷重載荷は 833N 載荷したとき、頂部水平荷重載荷と中間部水平荷重載荷は 1460N 載荷したときのそれぞれの測定位置における変位の平均値を算出した。なお、モデル 2 の上部水平荷重載荷 2 回目と中部水平荷重載荷 1 回目のデータは載荷荷重 1460N 時の計測点がなかったため、直線補間を行い算出した。

各試験の変位図を図 3.13～図 3.16 に記す。

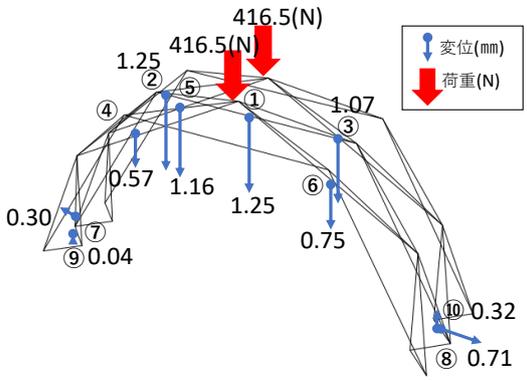


図 3.13 中央荷重載荷時変位図 (モデル 1)

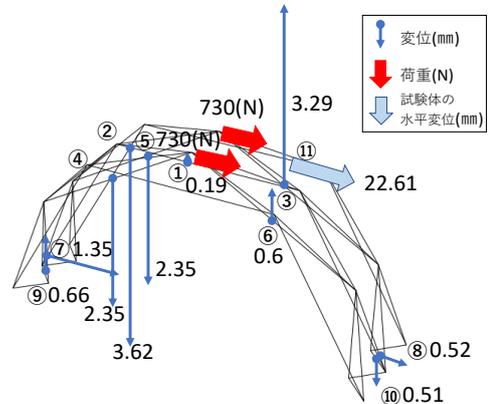


図 3.14 頂部水平荷重載荷時変位図 (モデル 1)

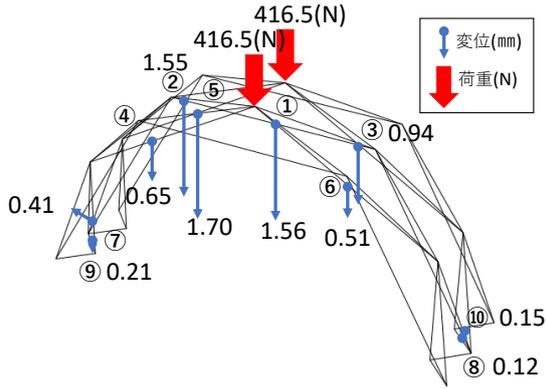


図 3.15 中央荷重載荷時変位図
(モデル 2)

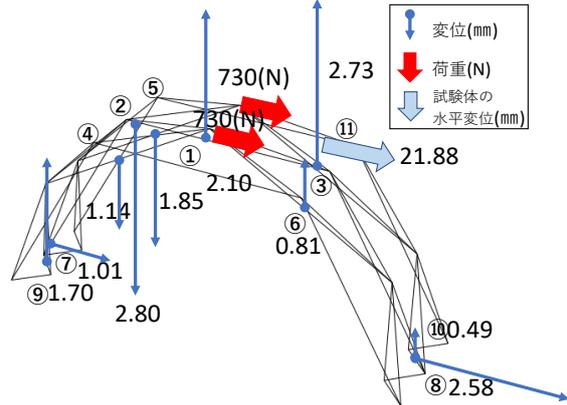


図 3.16 頂部水平荷重載荷時変位図
(モデル 2)

3.3.3 考察

中央荷重載荷時の変位と、水平方向への中央部載荷時の変位を表 3.1 にまとめた。複数回実験したものは平均値を示している。モデル 1 とモデル 2 の脚部の固定方法等が多少異なり、また頂部の接合は市販の住宅用の接合金物を使っているため、参考値ということになるが、鉛直変位はモデル 1 に対しモデル 2 は約 2 割変形が増加している状況となった。また水平力については、モデル 2 の変形量がモデル 1 に対し 1 割程度小さい値になっている。これは上向きの変位が大きくなっている箇所が部分的に観察されていることから、完全に水平方向に加力できなかったことが要因ではないかと考えられる。

表 3.1 モデル 1 とモデル 2 の変位の比較 (mm)

向き	計測点	鉛直荷重			水平荷重		
		モデル1	モデル2	モデル2/モデル1	モデル1	モデル2	モデル2/モデル1
鉛直	1	1.25	1.56	1.25	—	—	—
	2	1.25	1.55	1.24	—	—	—
	3	1.07	0.94	0.88	—	—	—
水平	8	—	—	—	0.52	2.58	—
	11	—	—	—	22.61	21.88	—
	相対変位	—	—	—	22.09	19.30	0.87

第4章 折版構造屋根のモックアップ

4.1 試験体の概要

図 4.1.1 の形状は、図 4.1.2 に示す長方形のマザーボードから、切り出される大きな三角形と小さな三角形を、図 4.1.3 のように平面上で組み合わせ、 x 方向に平行につけたライン上は谷に折り、 x 方向に対し角度を持ったライン上では山に折りたたむことで作ることができる。

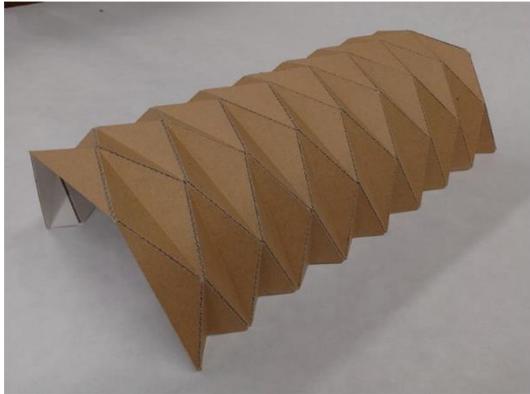


図 4.1.1 段ボール紙で作った折版形状の模型



図 4.1.2 長方形の CLT から三角形形状の材料の切り出しイメージ

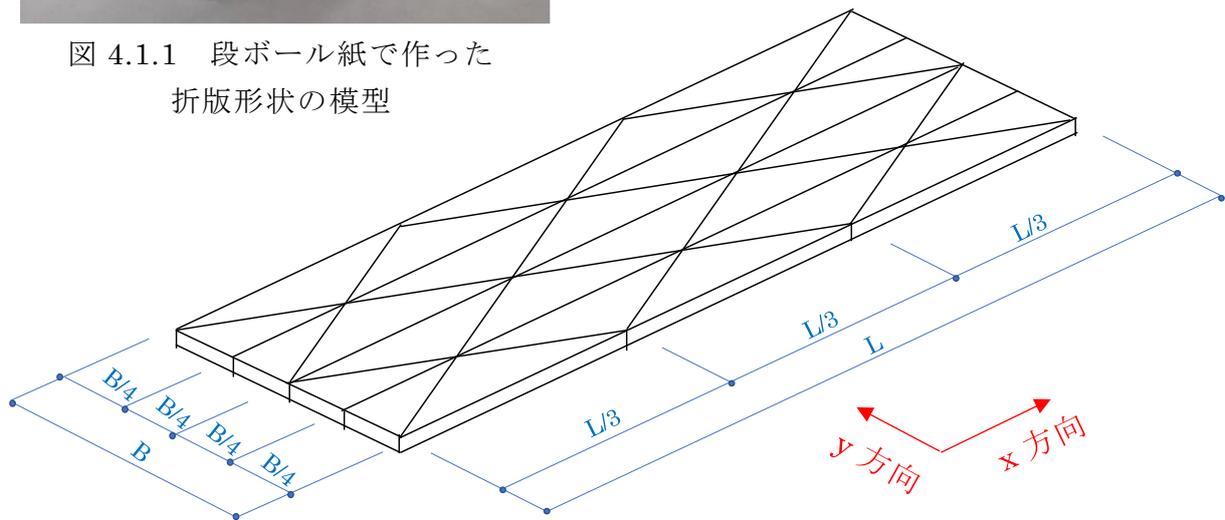


図 4.1.3 CLT で構成する折版構造のパネル割

国内で製造可能な最大長さ 12m のマザーボードで、図 4.1.3 の $L/3$ を概ね 12m とした三角形で構成すると、張間のスパン約 20m とする図 4.1.1 の形状の建築物を造ることができる（図 4.1.4 参照）。

このモデルによる折版構造を 2.2 で提案したハングアップ工法により工事現場にて組み立てるには、次のような課題がある。

- ① 平置きするためには、 $36\text{m} + \alpha$ の奥行き作業場所が必要になる。
- ② このユニットは、大きな三角形 20 枚と、小さな三角形 8 枚で構成されるが、図 4.1.2 のように、1 枚の長方形のマザーボードから切り出しできるのは、大きな三角形が 1 枚、小さな三角形が 2 枚のため、材料の歩留まりが極めて悪く、コストアップの大きな要因になる。

図 4.1.5 のように図 4.1.3 を 2 つのパーツに分けると、大きな三角形と小さな三角形の数は同数となり、CLT の歩留まりは向上する。構造的には頂部の継ぎ手は、第 3 章で紹介している構造実験で確認されたように、曲げモーメントの伝達ができない接合方法でも図 4.1.6 のように構成できる。また図 4.1.5 のように 2 つのパーツに分けることで、敷地の奥行きは、図 4.1.4 のスパン 20m あれば、平置きできる状況になる。

そこで汎用性も鑑み、図 4.1.5 および図 4.1.6 に示す片側ユニットを試験体としてモックアップを行うことにした。

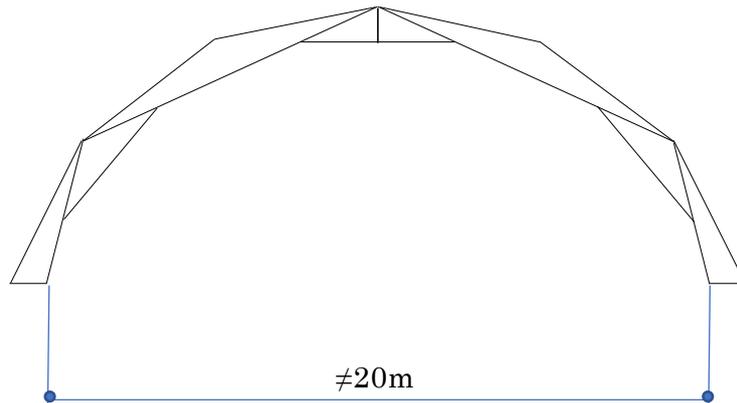


図 4.1.4 折版構造の建物の側面展開図

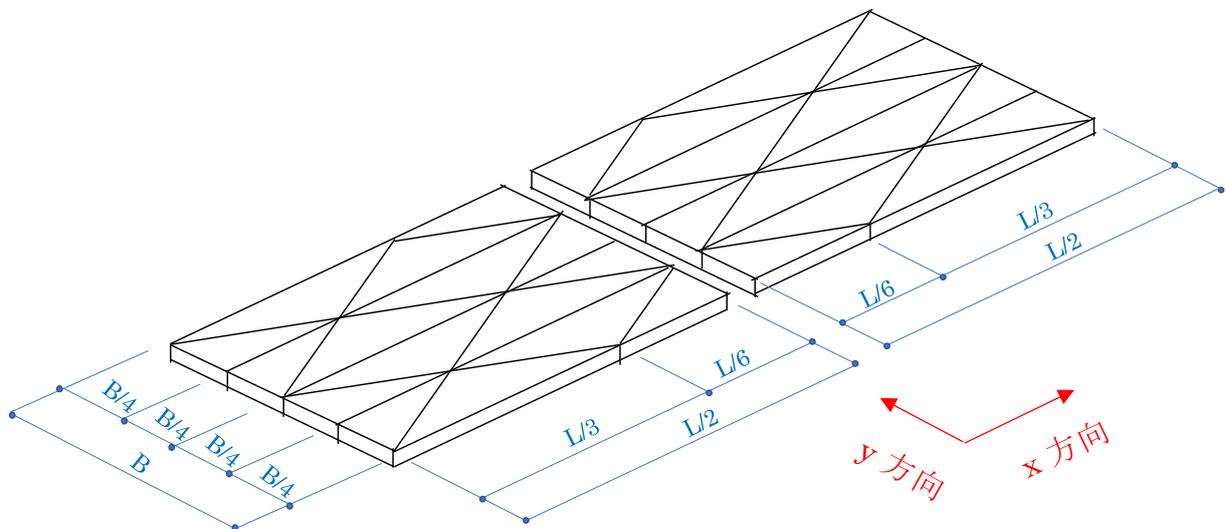


図 4.1.5 図 4.1.6 の折版構造を構成する CLT のパネル割

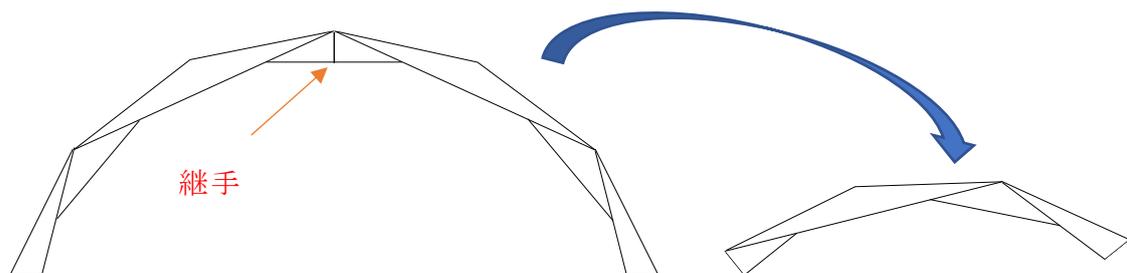


図 4.1.6 折版構造の建物（3 ヒンジ型）の側面展開図

使用する材料は、S60-3-3 (樹種 スギ) の CLT で、厚さは 90mm、長辺長さが 12m、短辺長さは、平積みでトラック運送できる幅 2.4m を超えないように、図 4.1.3 の B/4 寸法を設定した。モックアップ後の試験体寸法を図 4.1.7、図 4.1.8 に、アイソメ図を図 4.1.9 に示す。

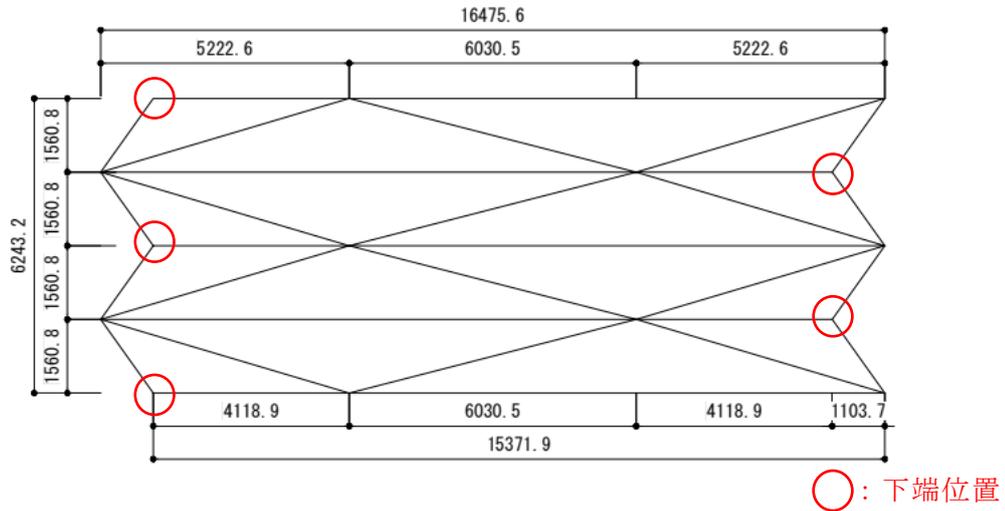


図 4.1.7 折版構造試験体 見下展開図

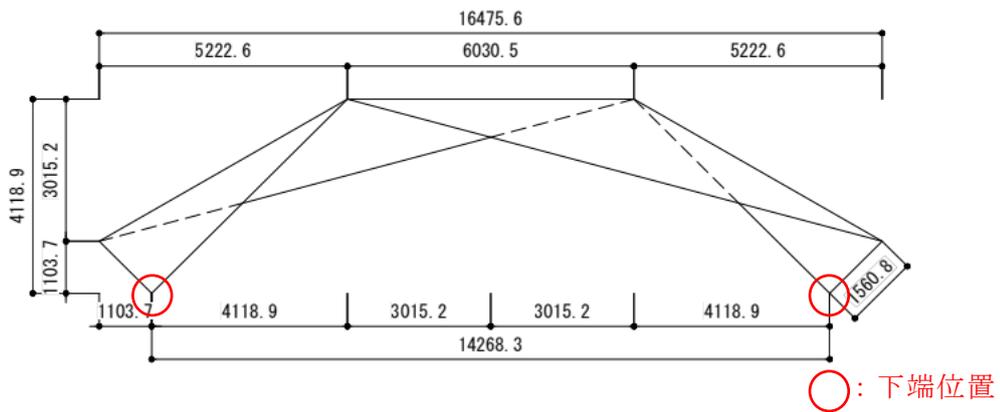


図 4.1.8 折版構造試験体 側面展開図

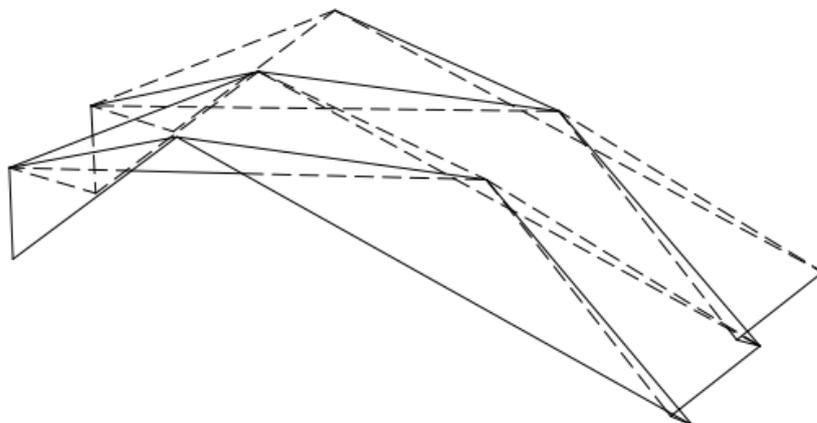


図 4.1.9 折版構造試験体のアイソメ図

4.2 試験場所

実験は、株式会社サイプレス・スナダヤ 東予インダストリアルパーク工場（愛媛県西条市）の敷地内にて実施した（写真 4.1.1、写真 4.1.2 参照）。



写真 4.1.1 試験体設置場所 (引用：google map)



写真 4.1.2 試験体設置場所

4.3 仮設工事

4.3.1 仮設基礎の設置

CLT を図 4.1.5 のように平置きして、躯体を図 4.1.9 のように折込んでいくためには、図 4.1.8 に示す躯体の下端部に支承金物を配置し、この支承金物を図 4.1.5 に示す x 方向及び y 方向に、水平に可動させる必要がある。そこでまず、支承金物が移動する範囲内で水平移動できるように両端の仮設基礎を CLT で造り、ジャッキベースの調整により、水平面を構築することにした。図 4.3.1 に仮設基礎配置図、図 4.3.2 に仮設基礎に使用した CLT の加工図、図 4.3.3 に CLT による仮設基礎の断面図を示す。

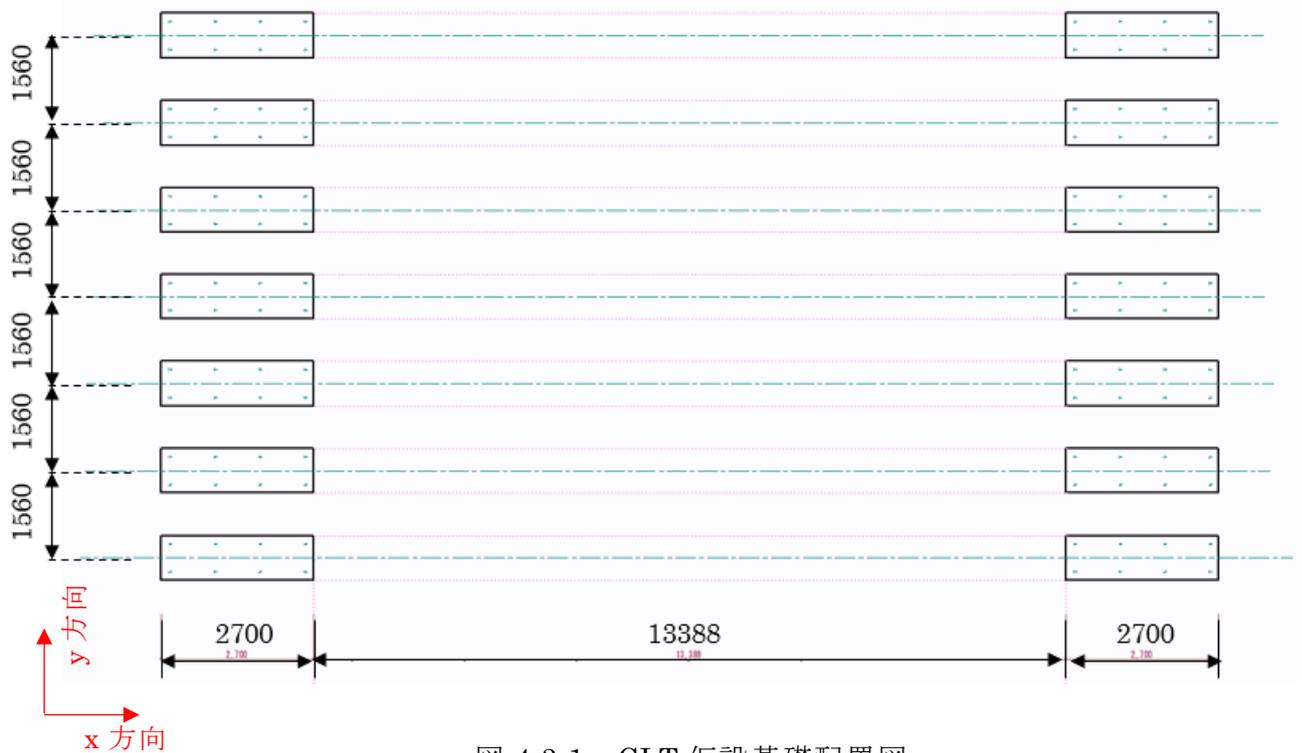


図 4.3.1 CLT 仮設基礎配置図

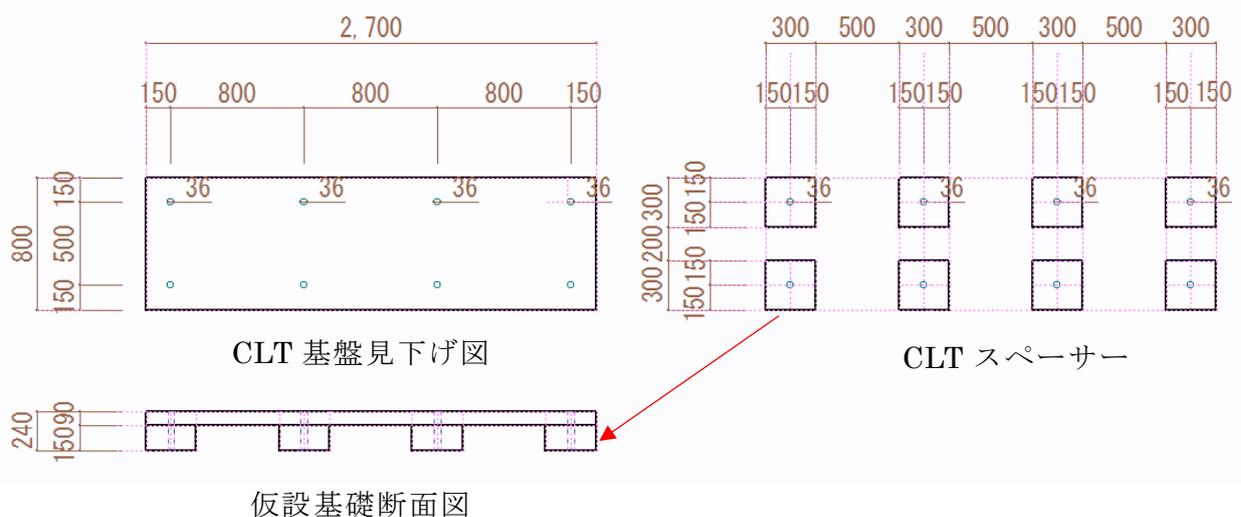


図 4.3.2 仮設基礎の CLT の加工図

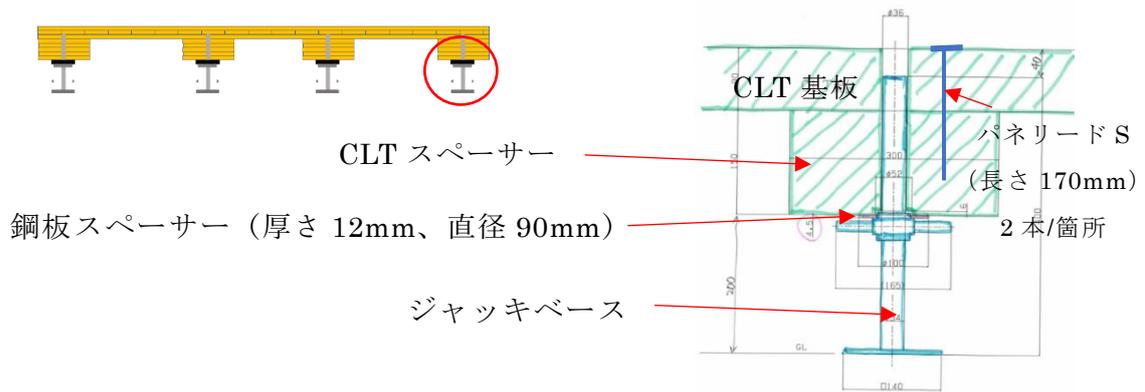


図 4.3.3 仮設基礎の断面図

仮設基礎の設置状況を写真 4.3.1～写真 4.3.6 に示す。



写真 4.3.1 敷板の敷き込み

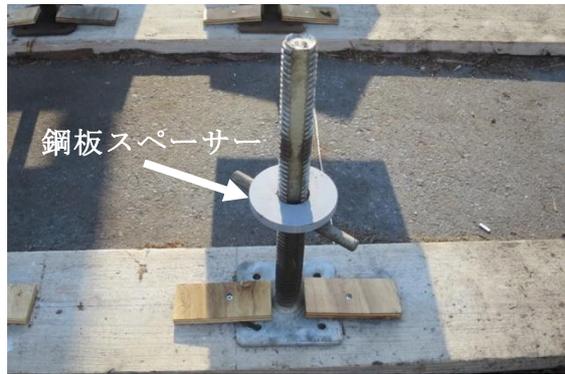


写真 4.3.2 ジャッキベースの固定



写真 4.3.3 ジャッキベースの設置状況



写真 4.3.4 CLT のスパースー取り付け



写真 4.3.5 CLT 基盤設置



写真 4.3.6 仮設基礎設置状況

4.3.2 敷台の設置

CLT を水平に敷設するため、図 4.3.4 のように仮設基礎間に図 4.3.5 に示す木製馬を 2m 以下の間隔で設置した。また木製馬が設置できない仮設基礎上については、大引を配置した。木製馬と大引の上端高さの調整は、写真 4.3.7 の鋼製束で実施した。木製馬と大引きの設置状況を写真 4.3.8 に示す。

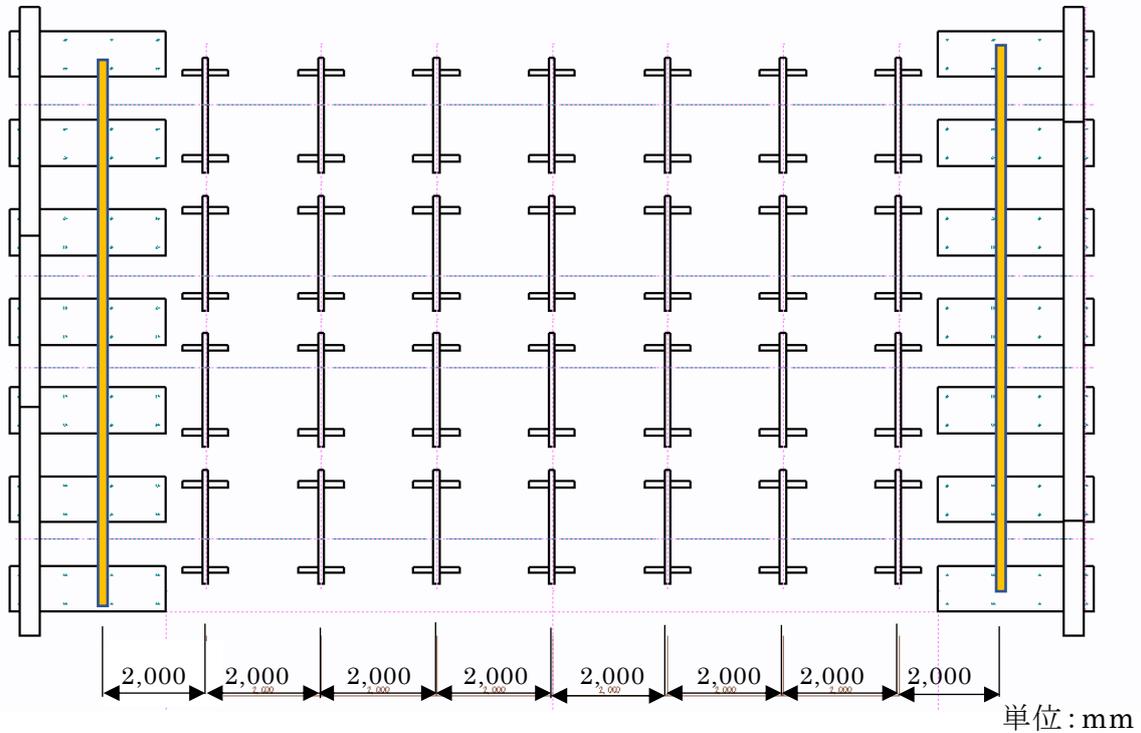


図 4.3.4 木製馬および大引の配置図

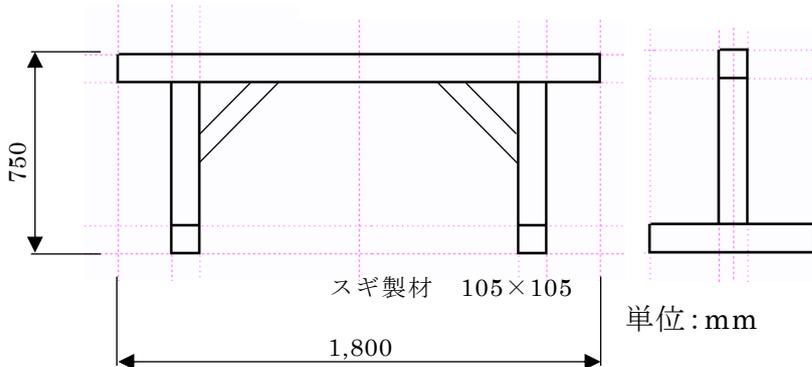


図 4.3.5 木製馬側面図



写真 4.3.7 鋼製束



写真 4.3.8 木製馬および大引きの設置状況

4.3.3 仮設鋼材の設置

図 4.1.7 の下端位置を、図 4.3.1 に示す x 方向に可動させるため、図 4.3.1 の CLT で構成した水平な仮設基礎上に、めり込み対策として敷いた 4.5mm 厚の鋼板上に図 4.3.6 のフラットローラー（表 4.3.1 参照）を載せ、その上にリースで手配できる図 4.3.7 の山留用鋼材（H350）を、図 4.3.8 のように設置した。山留用鋼材の長さは、この鋼材の上を移動する次節 4.4 で説明する支承金物が、山留用鋼材の継ぎ手を跨がないように配慮している。

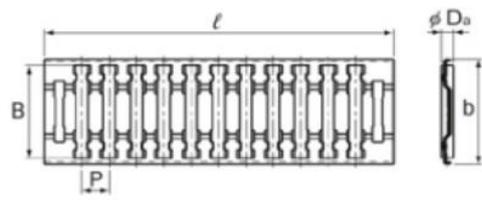


図 4.3.6 フラットローラーの概要

表 4.3.1 フラットローラーの寸法表

呼び形番	主要寸法		ローラー寸法				基本動 定格荷重	基本静 定格荷重	質量 g
	幅 b	長さ l	径 D ₀	長さ B	本数 Z	ピッチ P	C kN	C ₀ kN	
FT 2010-32	10	32	2	7.8	7	4	5.2	10.4	1.9
FT 2515-45	15	45	2.5	11.8	7	4.75	10.9	25.2	5.6
FT 3020-60	20	60	3	15.8	8	5.51	17.4	42.8	12.5
FT 3525-75	25	75	3.5	19.8	8	7	27.4	72.7	23
FT 4030-150	30	150	4	25.8	18	7.3	55.7	176	73
FT 4035-150	35	150	4	30.8	18	7.3	64.2	212	86
FT 4028V-150	26	150	2.828	22.8	22	6	45.1	155	45
FT 5038-250	38	250	5	32.8	21	11	109	387	195
FT 5043-250	43	250	5	37.8	21	11	122	449	200
FT 5030V-250	30	250	3.535	26.8	33	7	78	290	103

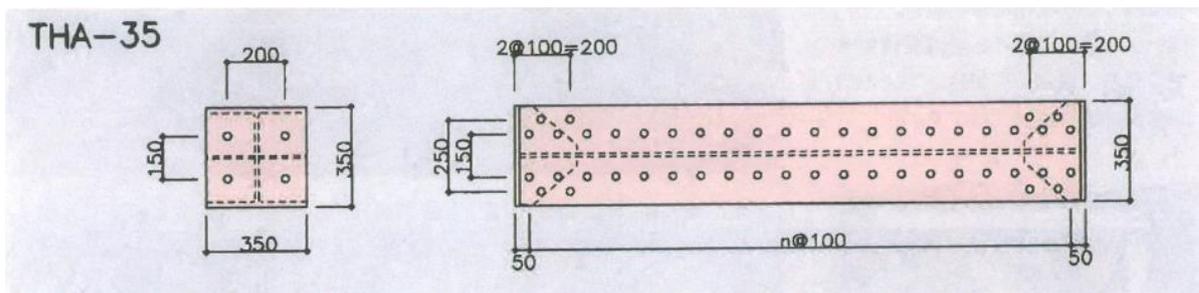


図 4.3.7 山留用鋼材の概要

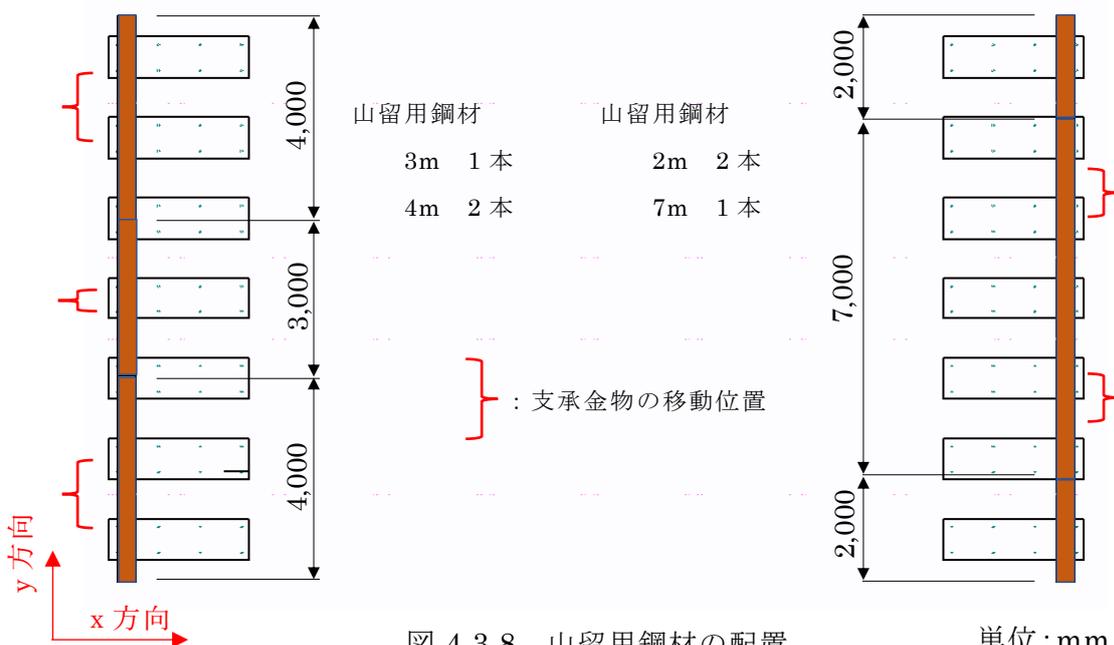


図 4.3.8 山留用鋼材の配置

山留用鋼材は図 4.3.9 のように図 4.3.8 の x 方向に水平移動し、最大移動距離は 1,649mm となる。山留用鋼材設置の状況を写真 4.3.9 に示す。

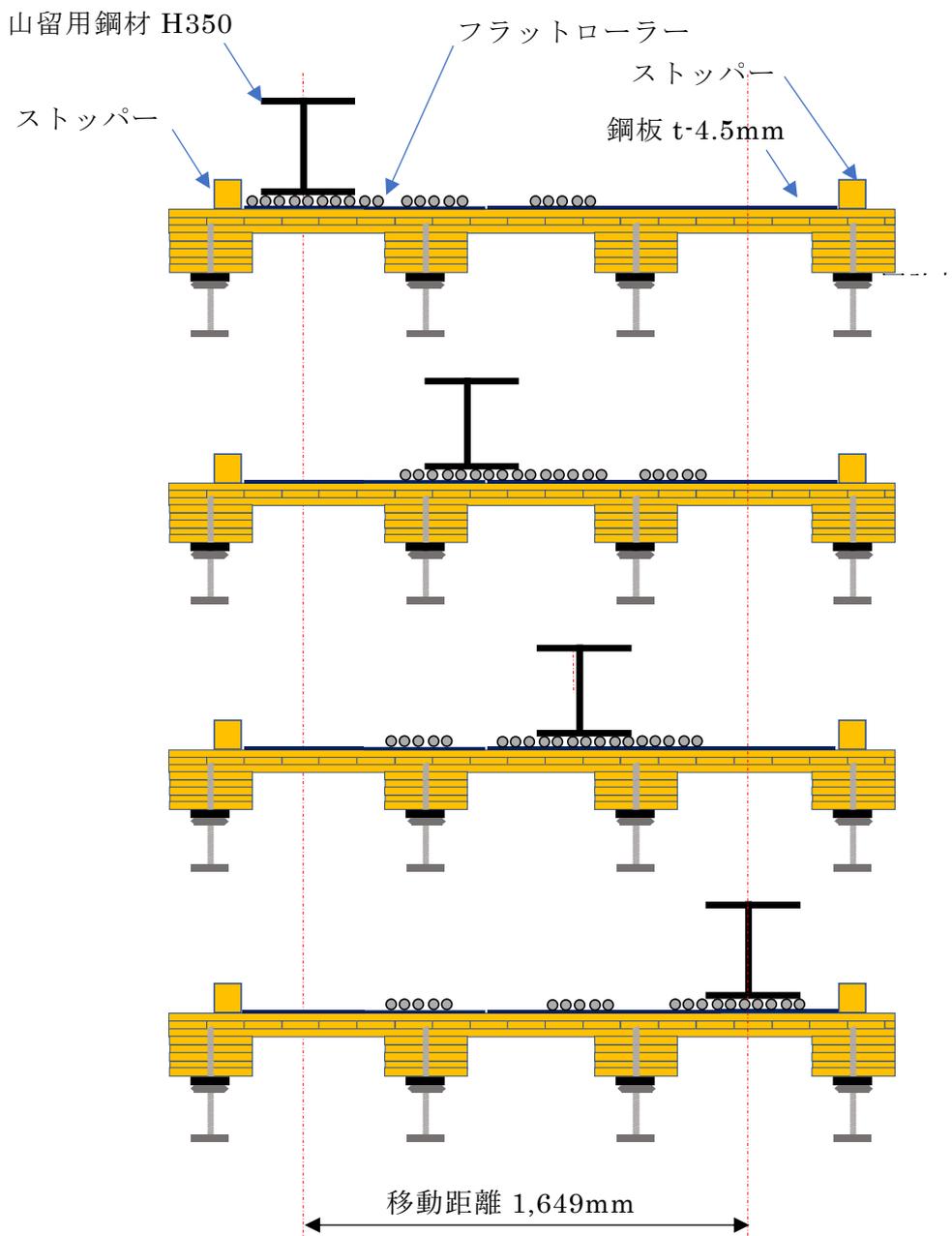


図 4.3.9 山留用鋼材の移動状況



写真 4.3.9 山留用鋼材の設置状況

4.3.4 タイロッド

試験体中央部を上を持ち上げるとともに、両端の山留用鋼材を内側（図 4.3.8 に示す x 方向）に引き寄せることと、試験体を折込んだ後、図 4.1.9 の形状を維持するために発生する約 20kN のスラスト力に対応することを目的に図 4.3.10 のように 4 箇所、タイロッドを配置した。タイロッドの直径は 30mm、全長は 19m で、写真 4.3.10 に示すように戻り締め対策を施したジョイントを 3 か所設けて繋いでおり、その両端には山留用鋼材の移動距離を考慮して、長さ 2.5m の全ねじボルトを、そのほかは丸鋼とした（図 4.3.11）。

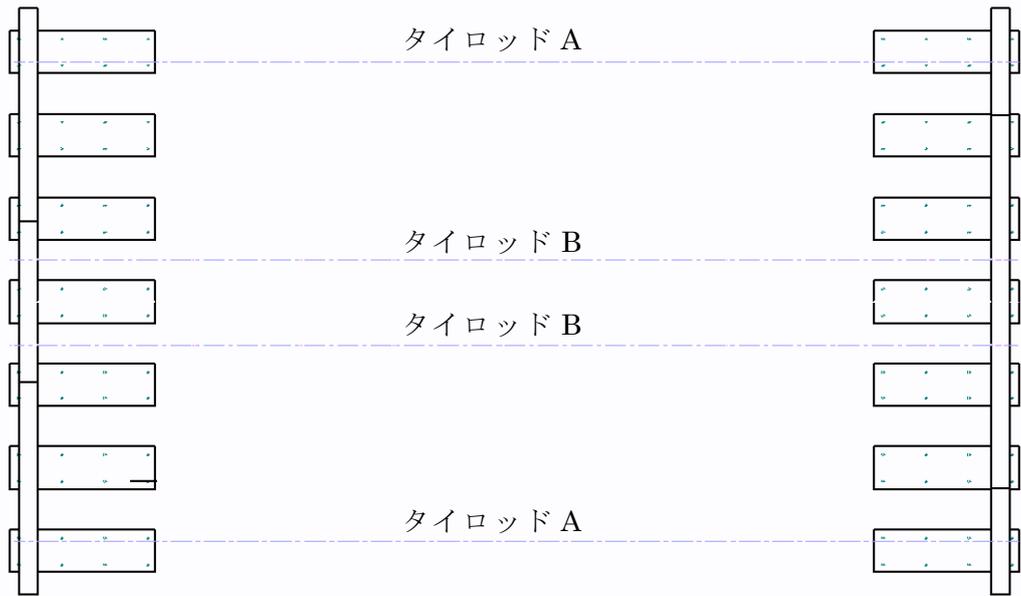


図 4.3.10 タイロッドの取付位置

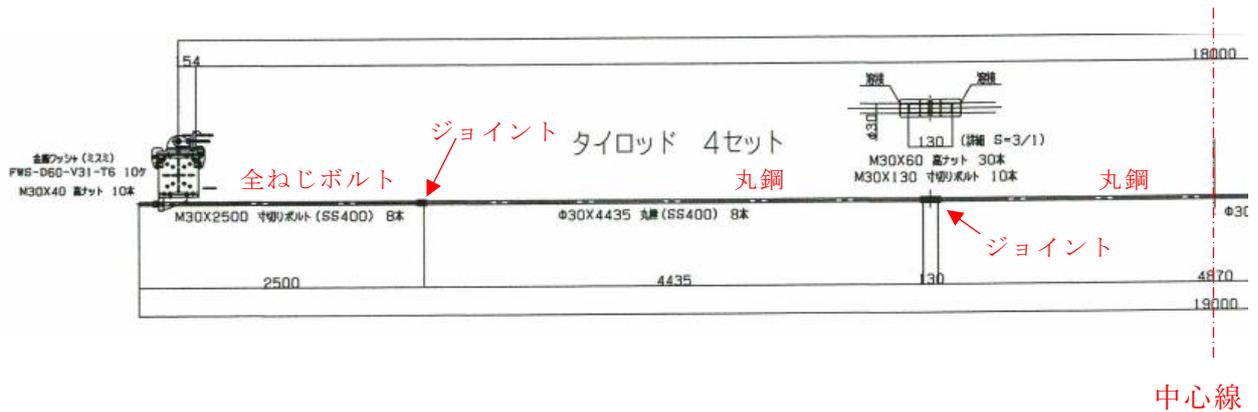


図 4.3.11 タイロッド側面図



写真 4.3.10 タイロッドのジョイント

タイロッドから山留用鋼材への力の伝達は、図 4.3.12、写真 4.3.11 に示す製作金物をハイテンション・ボルトで山留用鋼材に取り付け、この金物を介して行っている。図 4.3.10 に示すタイロッド B については、CLT 試験体との高さ関係から山留用鋼材の下側に製作金物を取付け、タイロッド A については山留用鋼材が転倒しないように山留用鋼材の上側に取付け (図 4.3.13) を行った。タイロッド A の設置状況を写真 4.3.12、写真 4.3.13 に示す。

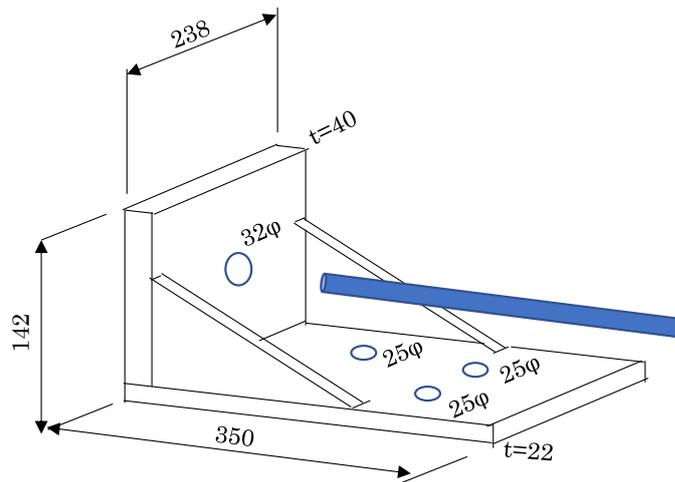
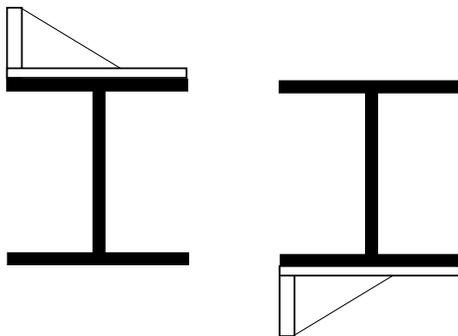


図 4.3.12 タイロッド取付用製作金物



写真 4.3.11 タイロッド取付用製作金物



タイロッド A 用 タイロッド B 用

図 4.3.13 製作金物の取付位置



写真 4.3.12 タイロッドの取付状況

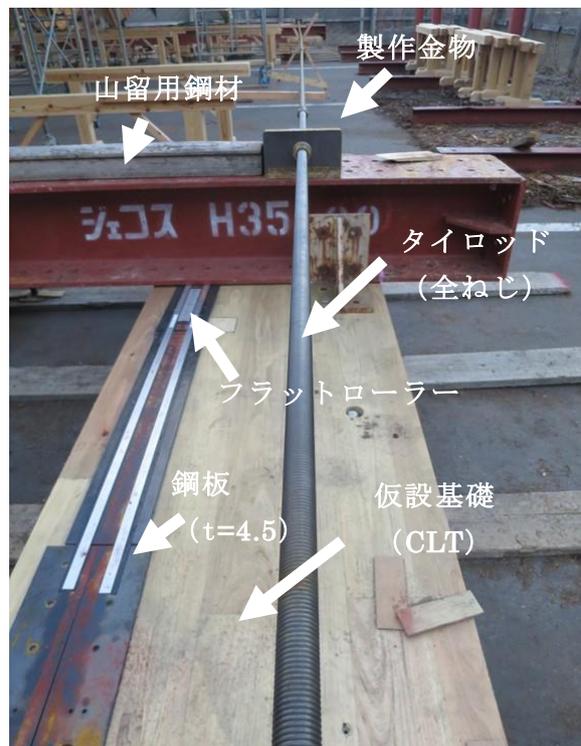


写真 4.3.13 タイロッドの取付状況

4.4 支承金物

図 4.1.7 および図 4.1.8 の下端位置には、ハングアップ始動直後から試験体を支持する支承金物が必要になる。この支承金物は図 4.3.8 図の y 方向に山留用鋼材の上を水平移動する（写真 4.4.1 の y 方向）と共に順次、水平面との角度の変化や CLT の回転にも追従させる必要がある。そこで写真 4.4.2 のように A 軸、B 軸、C 軸で回転する、図 4.4.1 の支承金物を製作し、図 4.4.2 の位置に取り付けることにした。

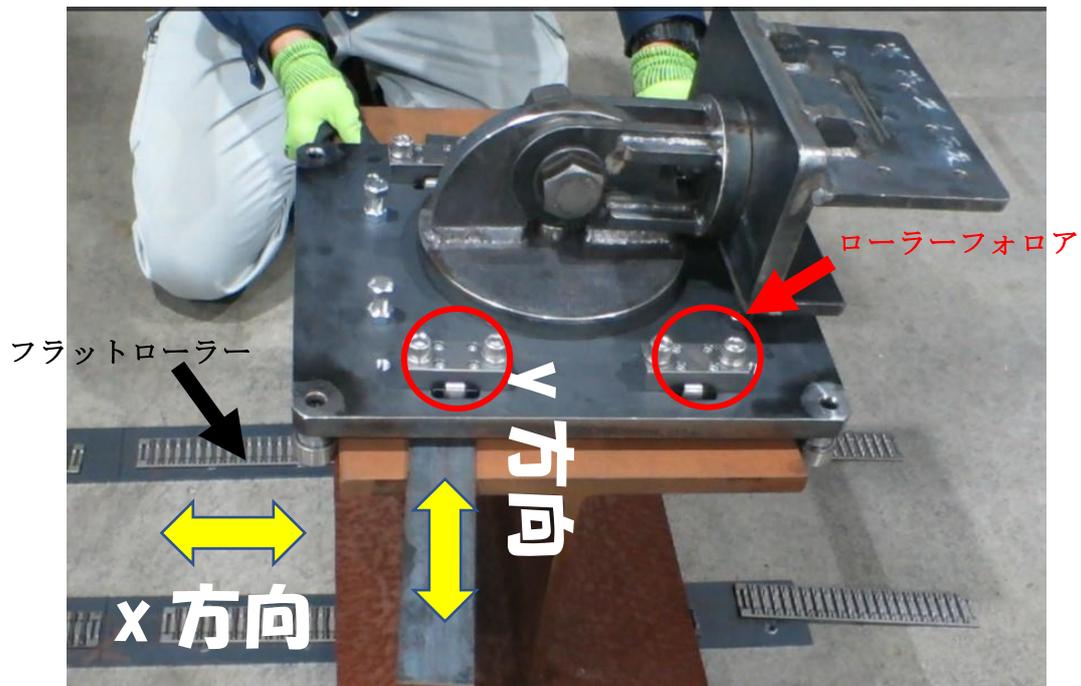


写真 4.4.1 支承金物を水平移動させるための工夫

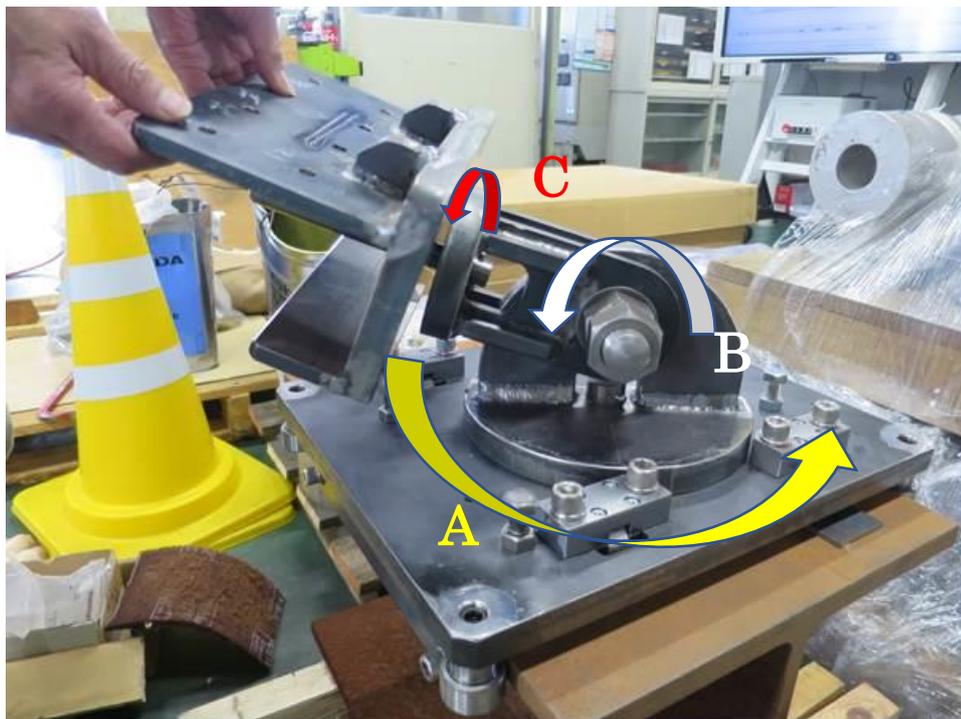


写真 4.4.2 支承金物を 3 方向に回転させるための工夫

* * * * * (Machine Cutting B)			
No.	Size	Qty	Unit
01	Φ6X40	100	個
02	Φ6X40	100	個
03	Φ6X40	100	個
04	Φ6X40	100	個
05	Φ6X40	100	個
06	Φ6X40	100	個

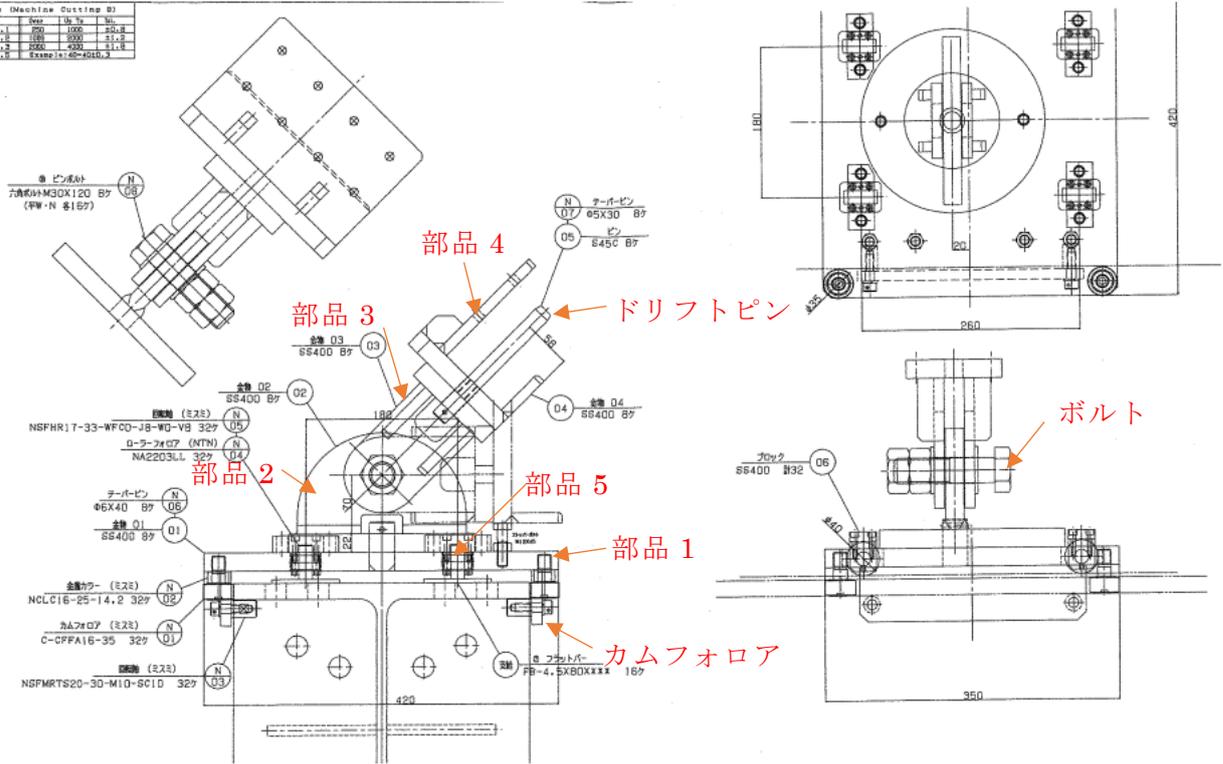


図 4.4.1 支承金物図

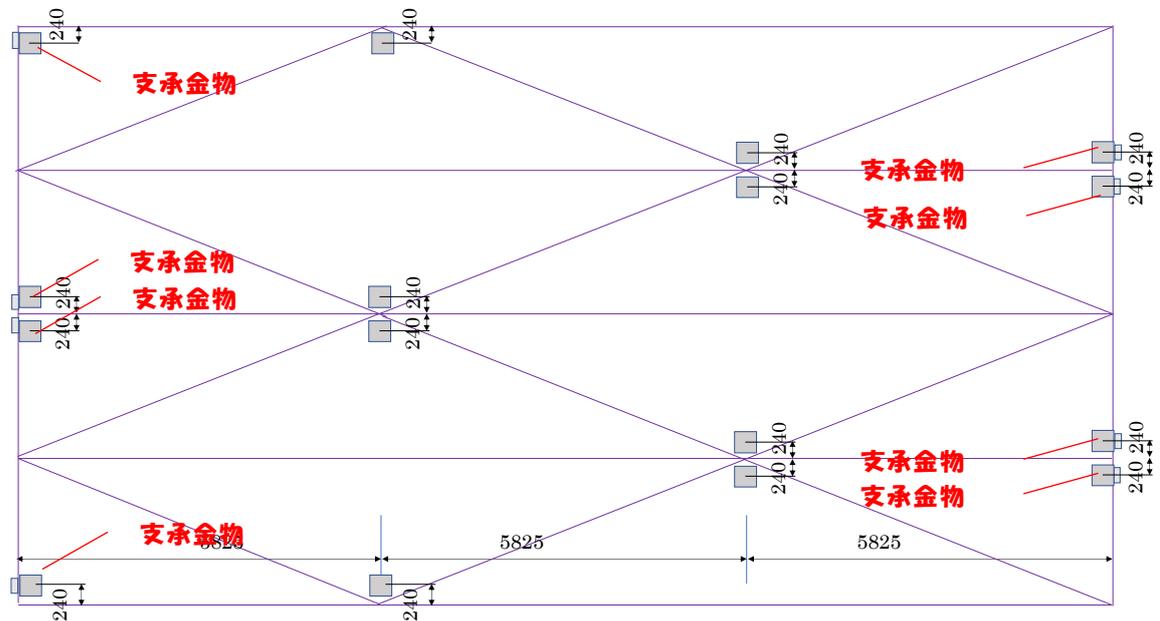


図 4.4.2 支承金物取付位置 (計 8 箇所)

図 4.4.1 の支承金物は、図 4.4.3～図 4.4.7 に示す 5 つの部品で構成されている。写真 4.4.1 の y 軸方向への動きは部品 5 に取り付けられたローラーで可能にし、山留用鋼材からの浮き上がりは、鋼材側面に取り付けられたカムフォロアにより拘束されている。

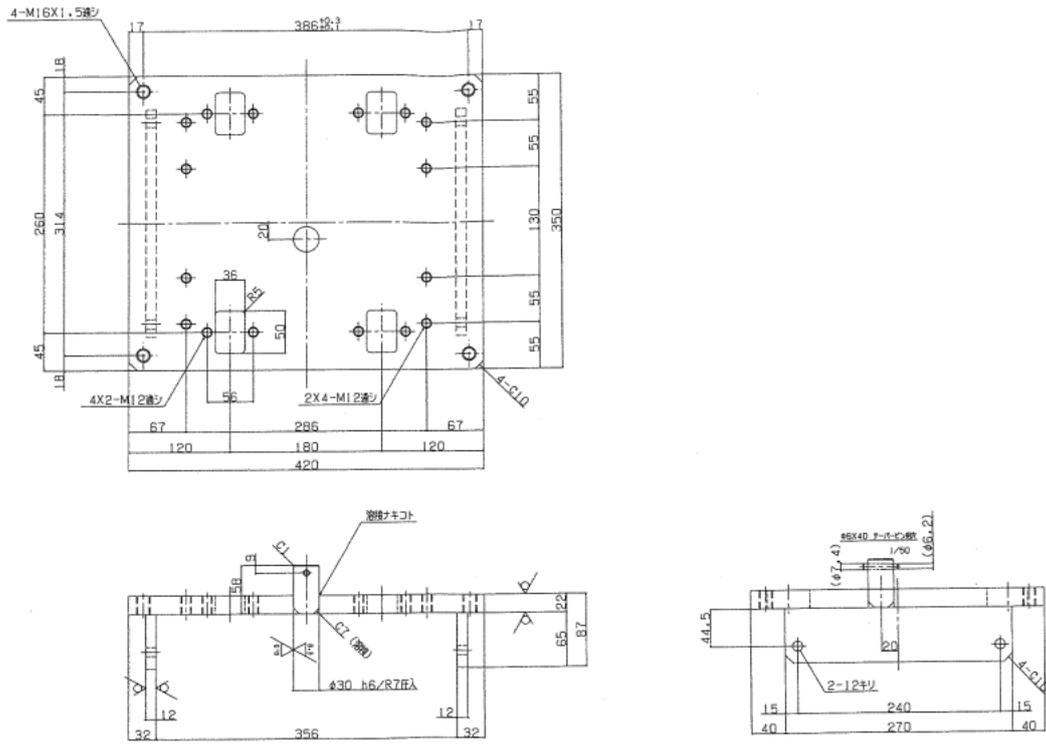


図 4.4.3 部品 1 詳細図

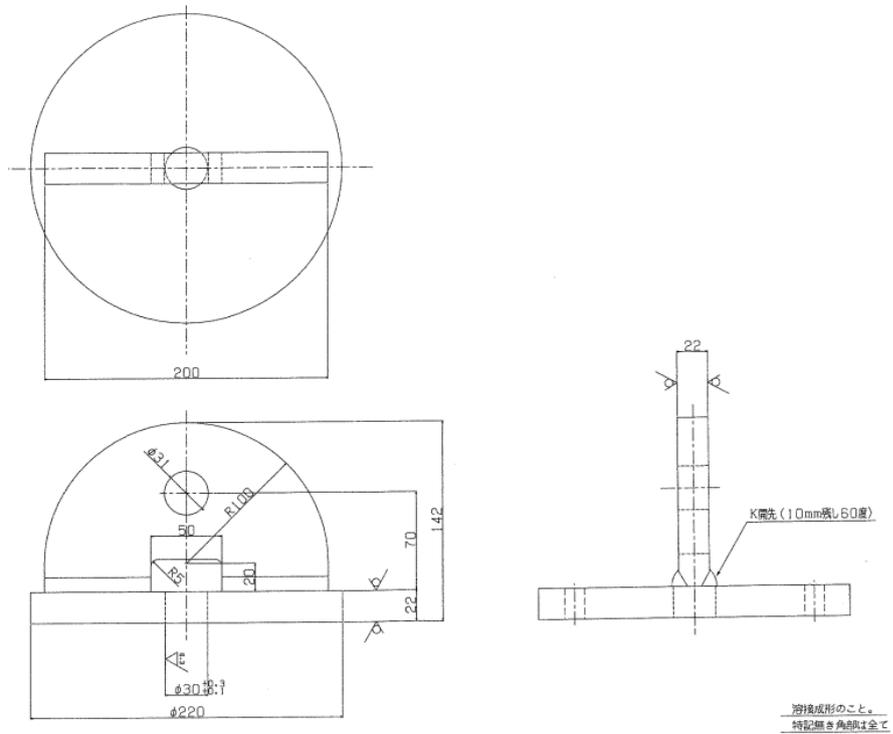


図 4.4.4 部品 2 詳細図

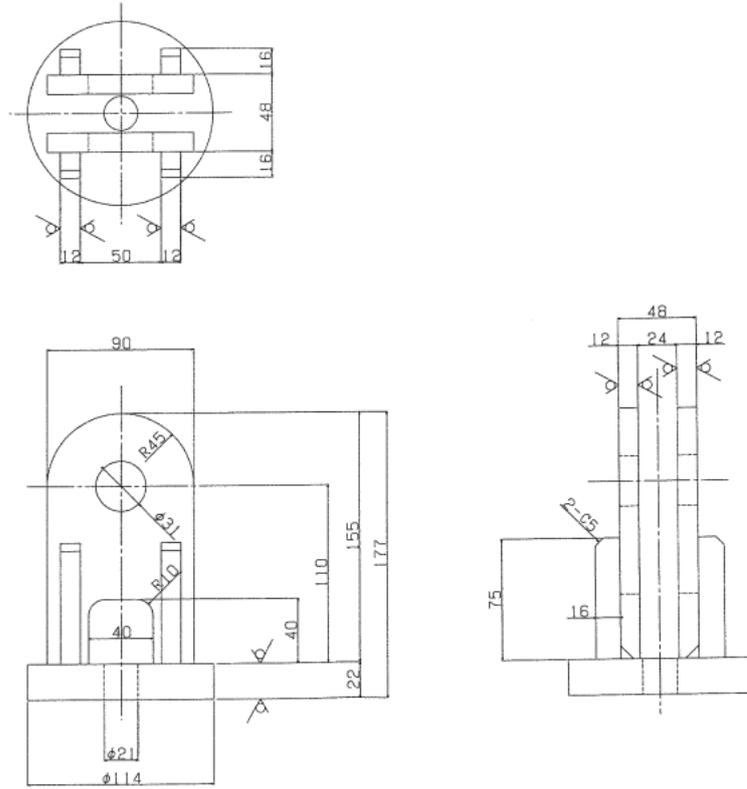


図 4.4.5 部品 3 詳細図

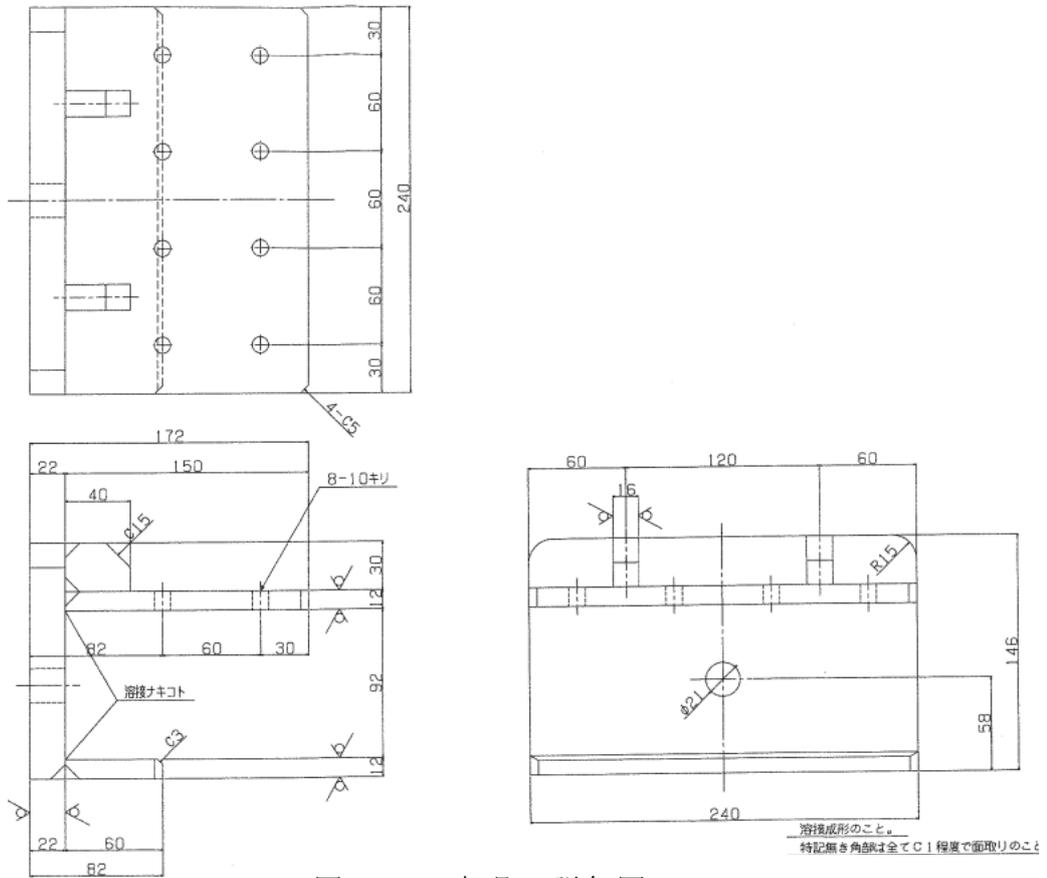


図 4.4.6 部品 4 詳細図

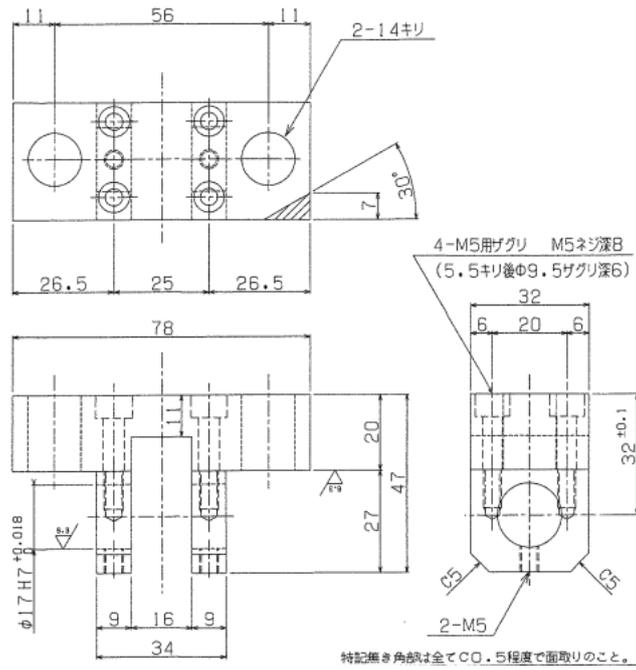


図 4.4.7 部品 5 詳細図

CLT と支承金物の取り付けは、部品 4 を直径 9mm (L=75mm) の六角コーチスクリューにて実施している (写真 4.4.3、写真 4.4.4 参照)。



写真 4.4.3 支承金物と CLT の接合 (上面)



写真 4.4.4 支承金物と CLT の接合 (下面)

4.5 接合金物

2.4.1 での検討において採用された①案の蝶番金物については、重量ドアに使用される既成品の蝶番（図 4.5.1）を使用することにした。ただし防水工事を施す上面の谷折り部の蝶番金物は、CLT 表面から金物が突き出ないようにするために、幅方向に両端を 9.5mm 切断加工することとした（図 4.5.2 参照）。接合具は PK-60（図 4.5.3）を、接触するそれぞれの CLT に 7 本打ち込んでいる。取付位置を図 4.5.4 に示す。

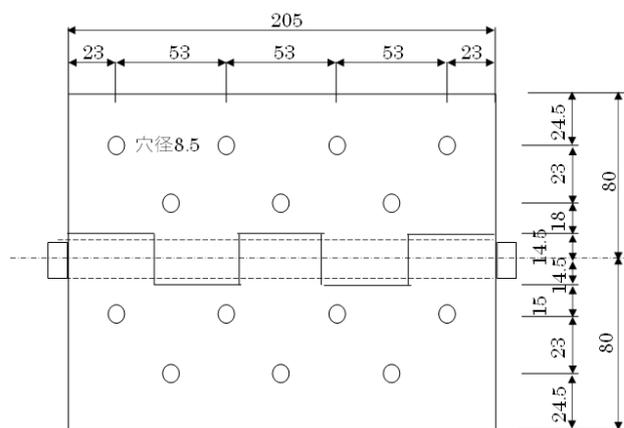


図 4.5.1 蝶番金物（山折り用）

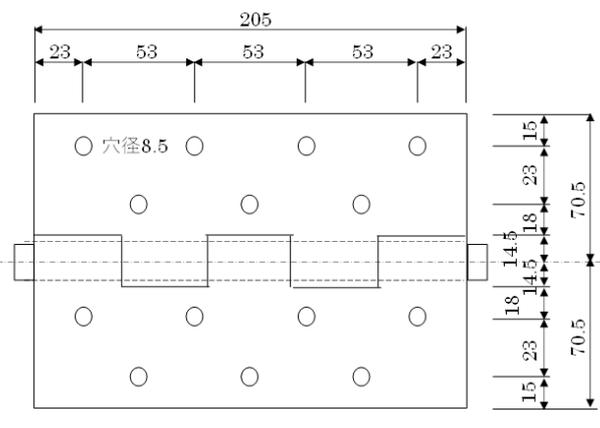


図 4.5.2 蝶番金物（谷折り用）

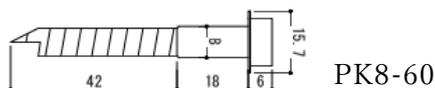
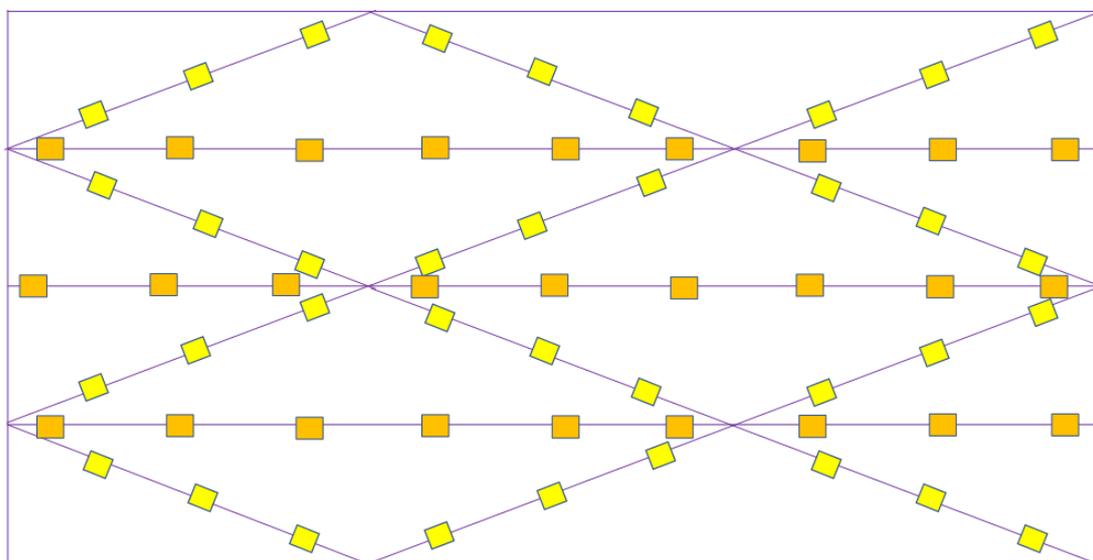


図 4.5.3 接合具



- : 蝶番金物（山部） 36
- : 蝶番金物（谷部） 27

図 4.5.3 蝶番金物の取付位置

4.6 吊治具

4.6.1 建て方計画

試験体吊り上げ前と吊り上げ終了時の CLT の平面的位置を、図 4.6.1 に示す。

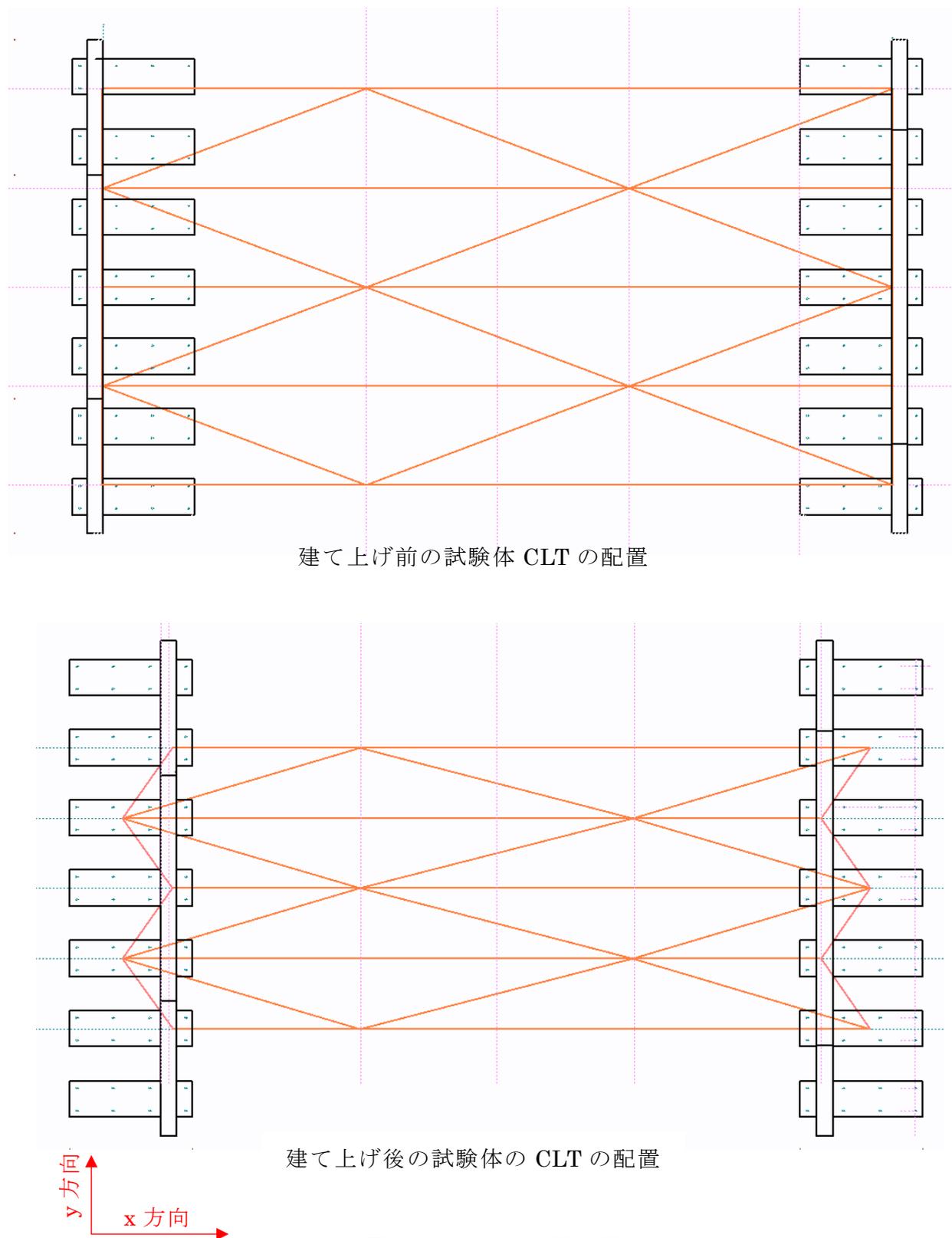


図 4.6.1 CLT の平面配置

表 4.6.1 および図 4.6.2 により吊り荷重と作業半径を確認し、50ton ラフター・クレーンを選択、図 4.6.2 の位置に着け、試験体の吊り上げは、図 4.6.3 の吊治具を製作し、図 4.6.4 のような要領で実施することにした。

表 4.6.1 50ton ラフター・クレーンの
の定格総荷重表

ブーム	ジブ		アウトリガ		作業範囲		(1)	
	7.2m							
[m]	10.1	17.6	25.1	25.0	32.5	36.5	40.0	
3.0	50.00	30.00	14.00	15.00	12.50			
3.2	45.00	30.00	14.00	15.00	12.50	7.50		
3.5	41.00	30.00	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
4.0	37.00	30.00	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
4.5	33.50	30.00	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
5.0	30.20	28.00	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
5.5	27.50	26.10	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
6.0	25.00	24.40	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
6.5	22.70	22.40	14.00	15.00	12.50	7.50	9.00	7.50
7.0	20.70	20.60	14.00	15.00	11.95	12.50	7.50	9.00
7.5		18.90	14.00	15.00	11.35	12.50	7.50	9.00
8.0		17.50	14.00	15.00	10.70	12.50	7.50	9.00
9.0		13.75	13.80	14.50	9.65	12.50	7.50	9.00
11.0		9.00	10.95	10.10	8.05	10.70	6.25	9.00
12.0		7.45	9.30	8.50	7.40	9.10	5.70	8.55
13.0		6.25	8.05	7.25	6.85	7.80	5.25	7.90
14.0		5.25	7.00	6.25	6.35	6.80	4.85	6.95
15.0			5.40	5.90	5.90	4.45	6.10	5.20
16.0			4.70	5.50	5.20	4.15	5.35	4.80
17.0			4.05	5.20	4.60	3.85	4.75	4.50
18.0			3.50	4.80	4.05	3.60	4.20	4.35
19.0			3.00	4.30	3.55	3.35	3.75	3.90
20.0			2.55	3.85	3.10	3.15	3.30	3.70
21.0			2.15	3.50	2.70	2.95	2.90	3.35
22.0			1.80	3.15	2.35	2.75	2.55	3.00
24.0					1.75	2.45	1.90	2.40
26.0					1.25	2.20	1.40	1.90
28.0					0.80	1.85	1.00	1.50
30.0							0.65	1.20
32.0								0.90
33.0								0.80
ブーム2(%)	0	100	0	100	0	100	0	100
ブーム3(%)	0	0	33	33	66	66	100	83
ブーム4(%)	0	0	33	33	66	66	100	83
ブーム5(%)	0	0	33	33	66	66	100	83
MODE	A,B	A	B	A	B	A	B	A,B
危険角度	[°]	-	-	-	-	-	25	-
標準フック	[ton]	50				34		
フック質量	[kg]	500				330		
巻掛本数	[本]	12	7	4	6	4	4	4

(単位: ton)

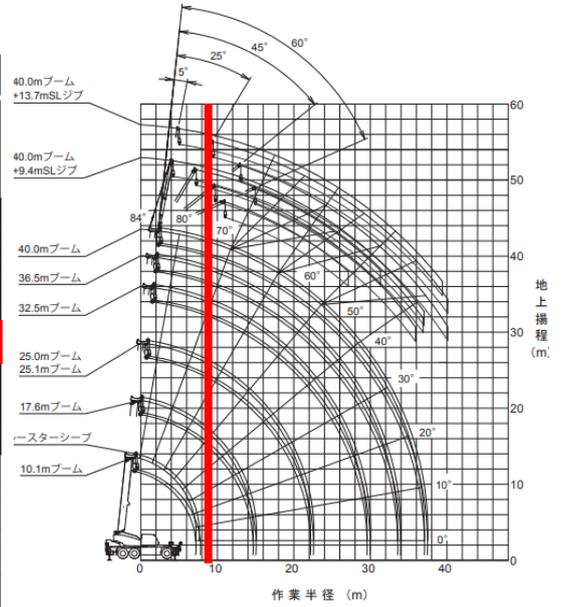


図 4.6.1 50ton ラフター・クレーンの
の作業半径

吊り荷重:

CLT 等重量 8,000/2 kg

吊具重量 2,000kg

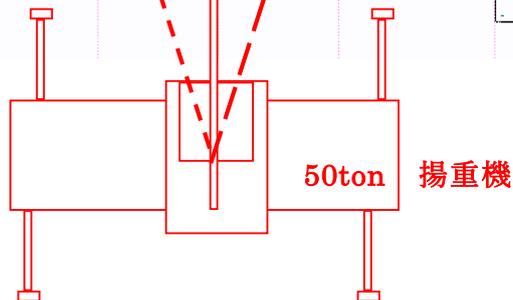


図 4.6.2 クレーンの配置計画

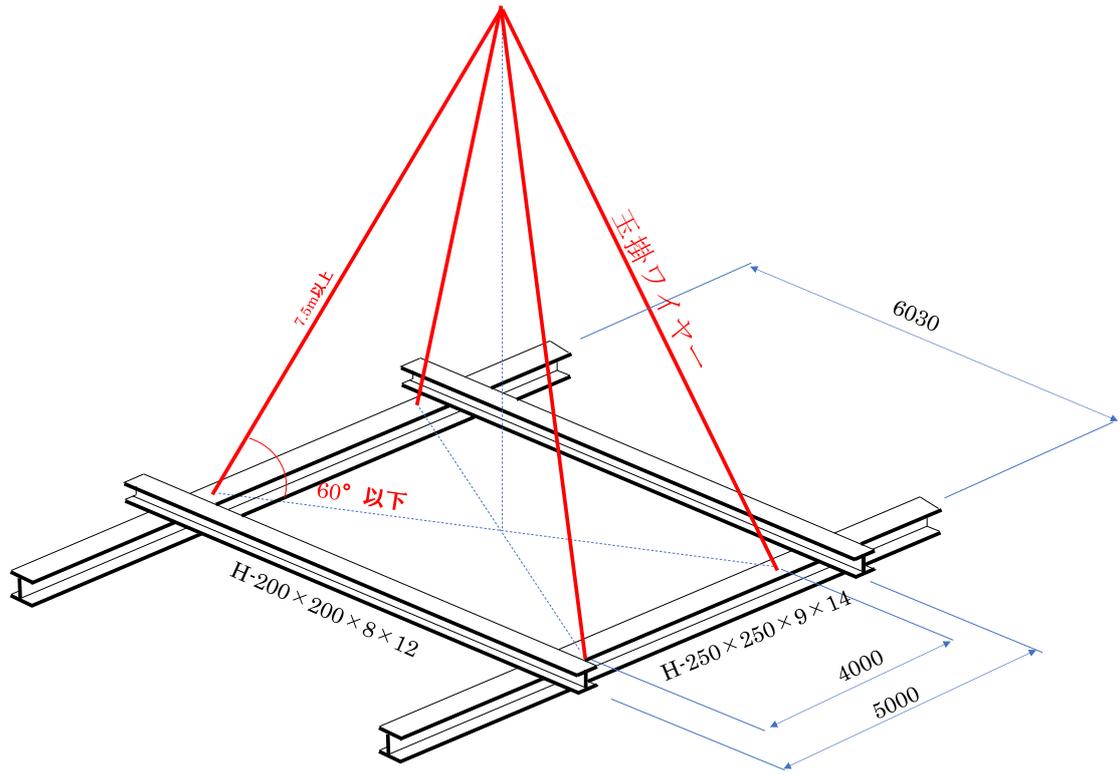


図 4.6.3 吊治具

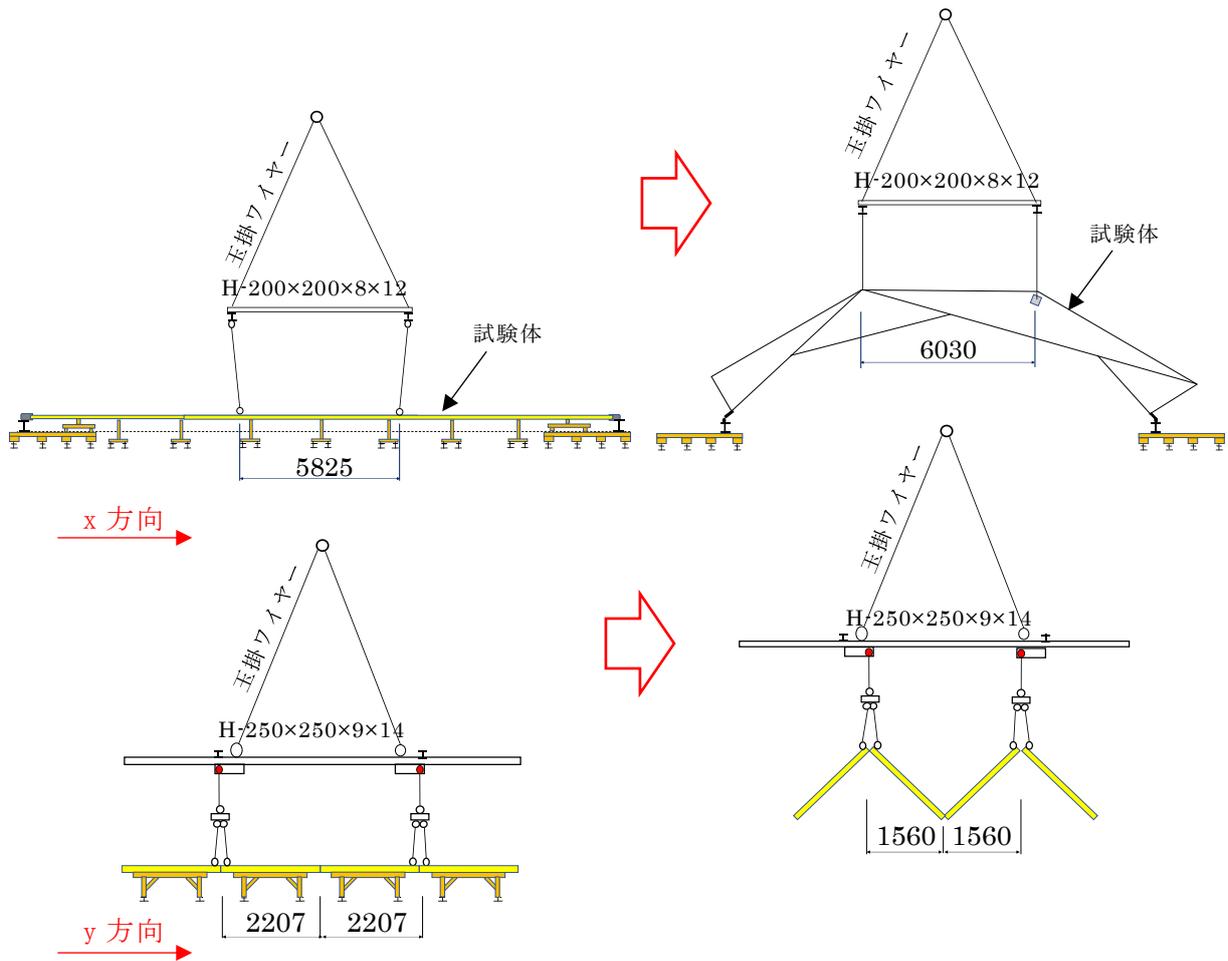


図 4.6.4 吊治具を用いたハングアップ計画案

4.6.2 吊治具

図 4.6.3 の吊治具製作図を図 4.6.5 に、製作した吊金具の写真を写真 4.6.1 に示す。
鋼材は愛媛県農林水産研究所林業研究センターが保管されている H 型鋼を借用した。

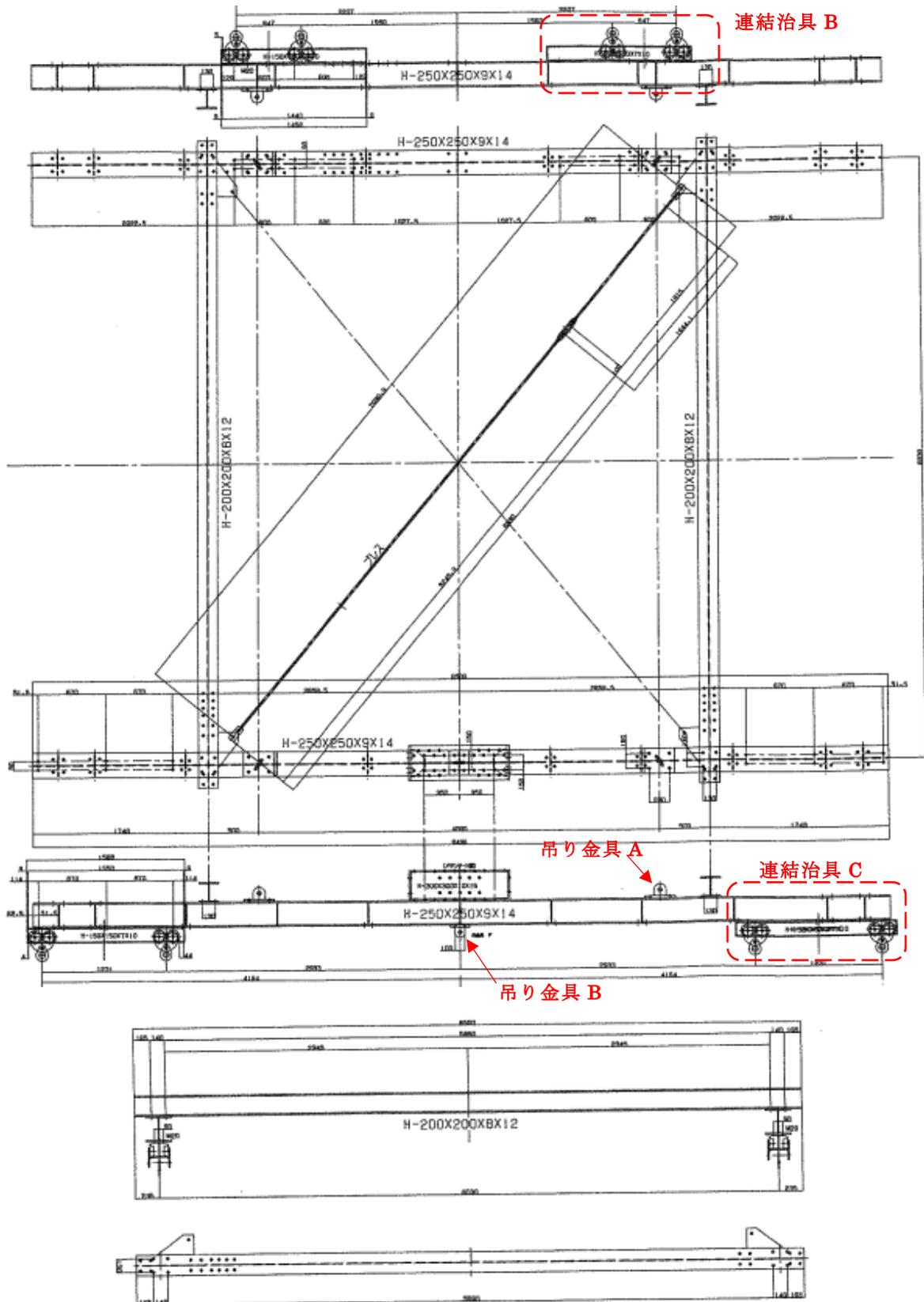


図 4.6.5 吊治具製作図

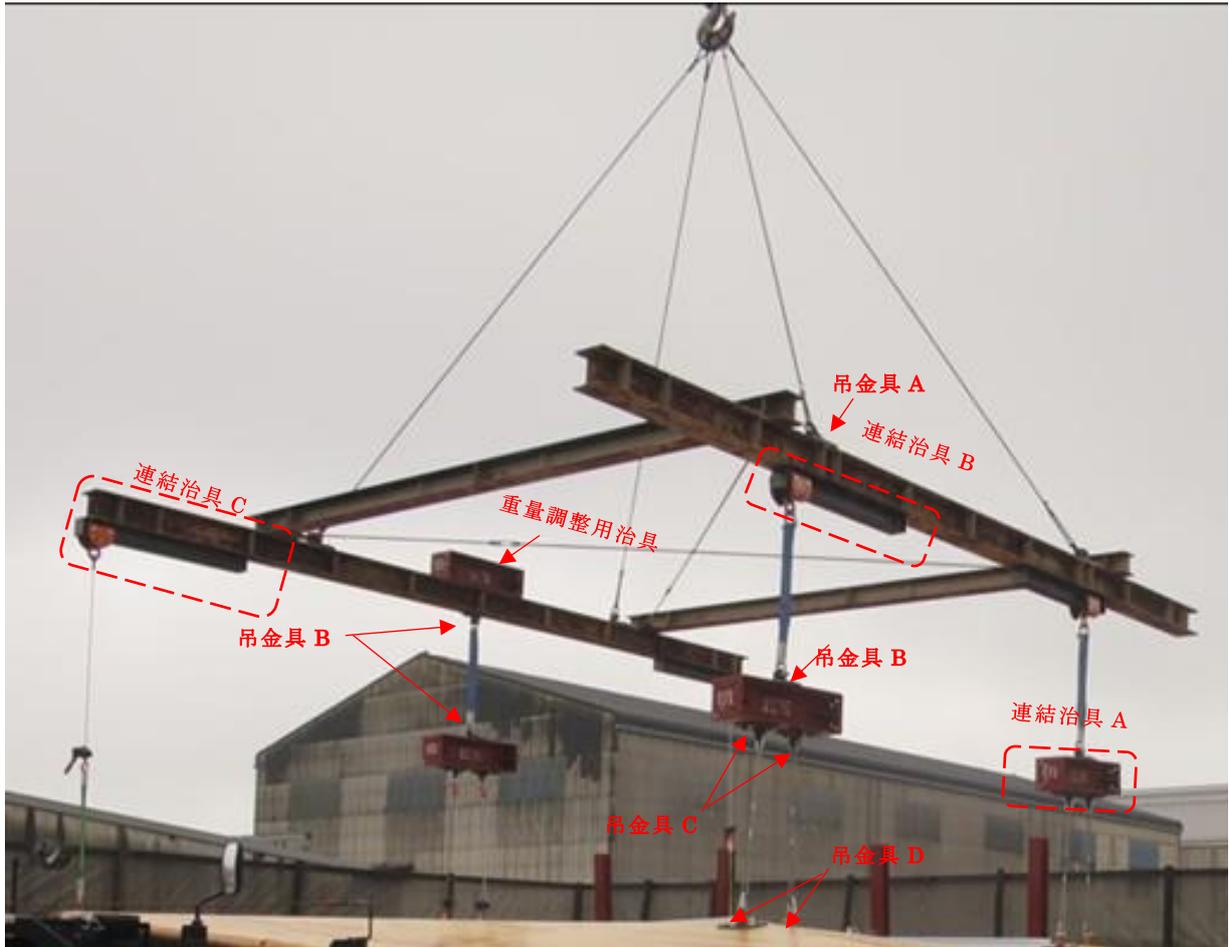
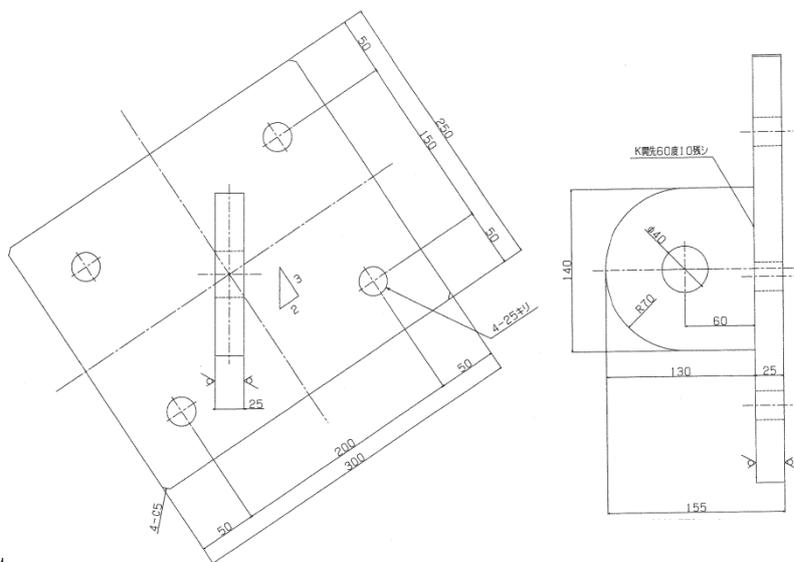


写真 4.6.1 吊治具

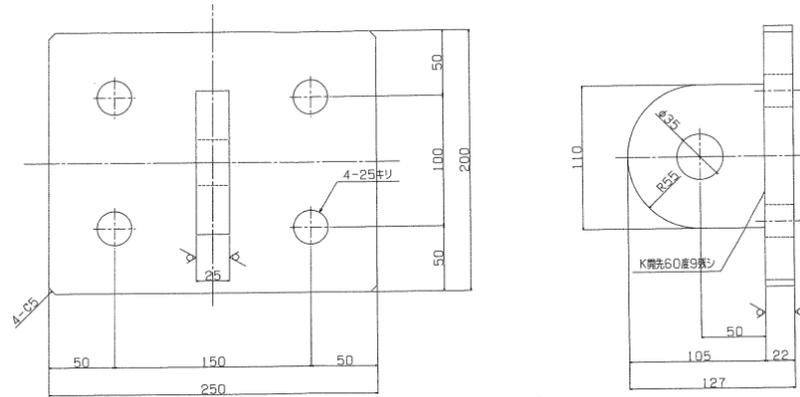
図 4.6.5 と写真 4.6.1 の吊金具 A の図面を図 4.6.6 に示す。



吊荷重 : 3.5ton

図 4.6.6 吊金具 A 詳細図

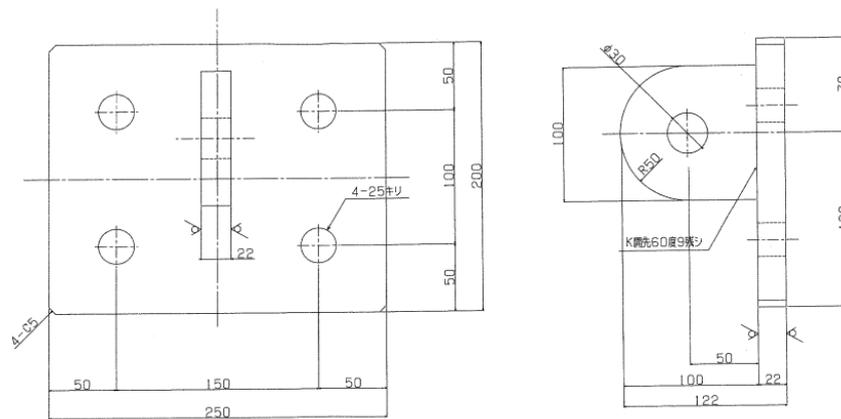
図 4.6.5 と写真 4.6.1 の吊金具 B の図面を図 4.6.7 に示す。



吊荷重：2.0ton

図 4.6.7 吊金具 B 詳細図

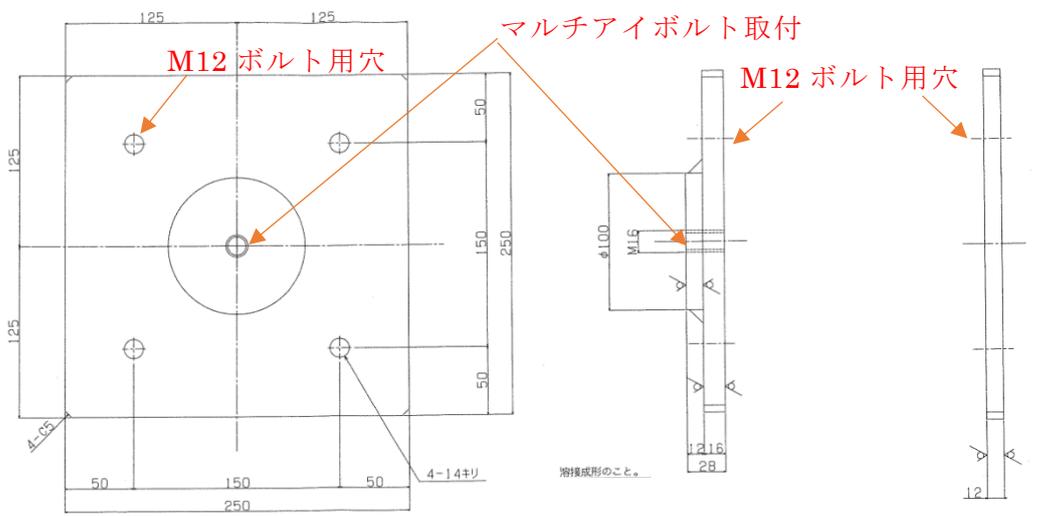
図 4.6.5 と写真 4.6.1 の吊金具 C の図面を図 4.6.8 に示す。



吊荷重：1.0ton

図 4.6.8 吊金具 C 詳細図

図 4.6.5 と写真 4.6.1 の吊金具 D の図面を図 4.6.9 に示す。



吊荷重：1.0ton

図 4.6.9 吊金具 D 詳細図

裏座金

写真 4.6.1 の連結治具 A の図面を図 4.6.12 に、写真を写真 4.6.4 に示す。山留用鋼材 H-300 (L=1m) を利用している。尚、写真 4.6.1 の重量調整用治具も山留用鋼材 H-300 (L=1m) とし、吊り上げた際、吊治具のバランスをとることを目的とした。

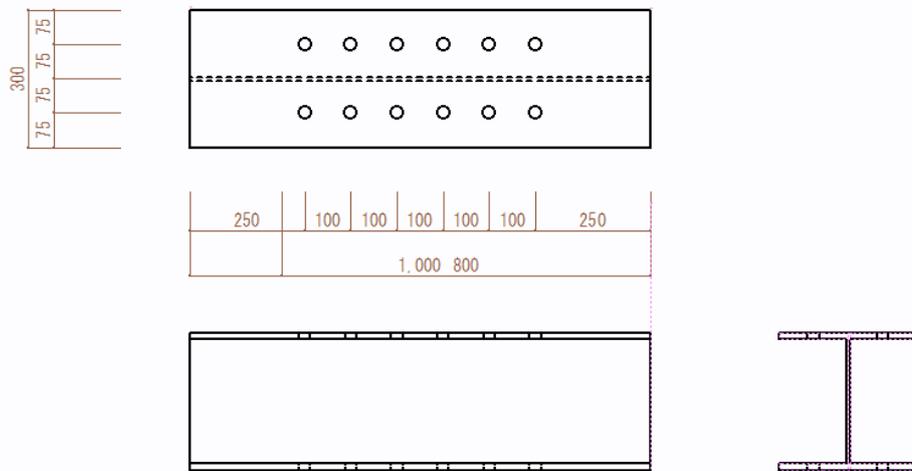


図 4.6.12 連結治具 A



写真 4.6.4 連結治具 A

図 4.6.5 と写真 4.6.1 に記載のある連結金具 B の写真を写真 4.6.5 に、連結金具 C の写真を写真 4.6.6 に示す。



写真 4.6.5 連結治具 B



写真 4.6.6 連結治具 C

連結治具 B および連結治具 C は、試験体が図 4.6.4 に示す y 方向に試験体が引き寄せられる際、吊り位置も同じ方向に移動させる必要があるため、鋼材 H-150 をレールとし、これに写真 4.6.7 のプレートローリを取り付けるかたちで構成している。Y 方向への水平移動距離は、連結治具 B は 647mm、連結治具 C は 1221mm となる。



写真 4.6.7 プレートローリ

図 4.6.11 の吊金具 D の各高さは、吊り上げの始動からハングアップ終了まで、常に皆同じ高さになる。そこで写真 4.6.8 の  部分にはチェーン・ブロックを採用し、吊り上げる前に、同じ長さに調整できるように配慮した。

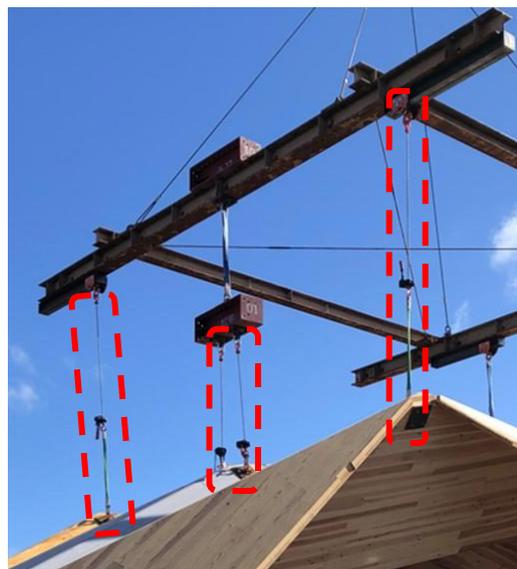


写真 4.6.8 玉掛ワイヤーの高さ調整

4.7 CLT の加工

4.7.1 加工図

CLT の加工図は、CAD WORK にて作成された。加工図を図 4.7.1、図 4.7.2、および図 4.7.3 に示す。

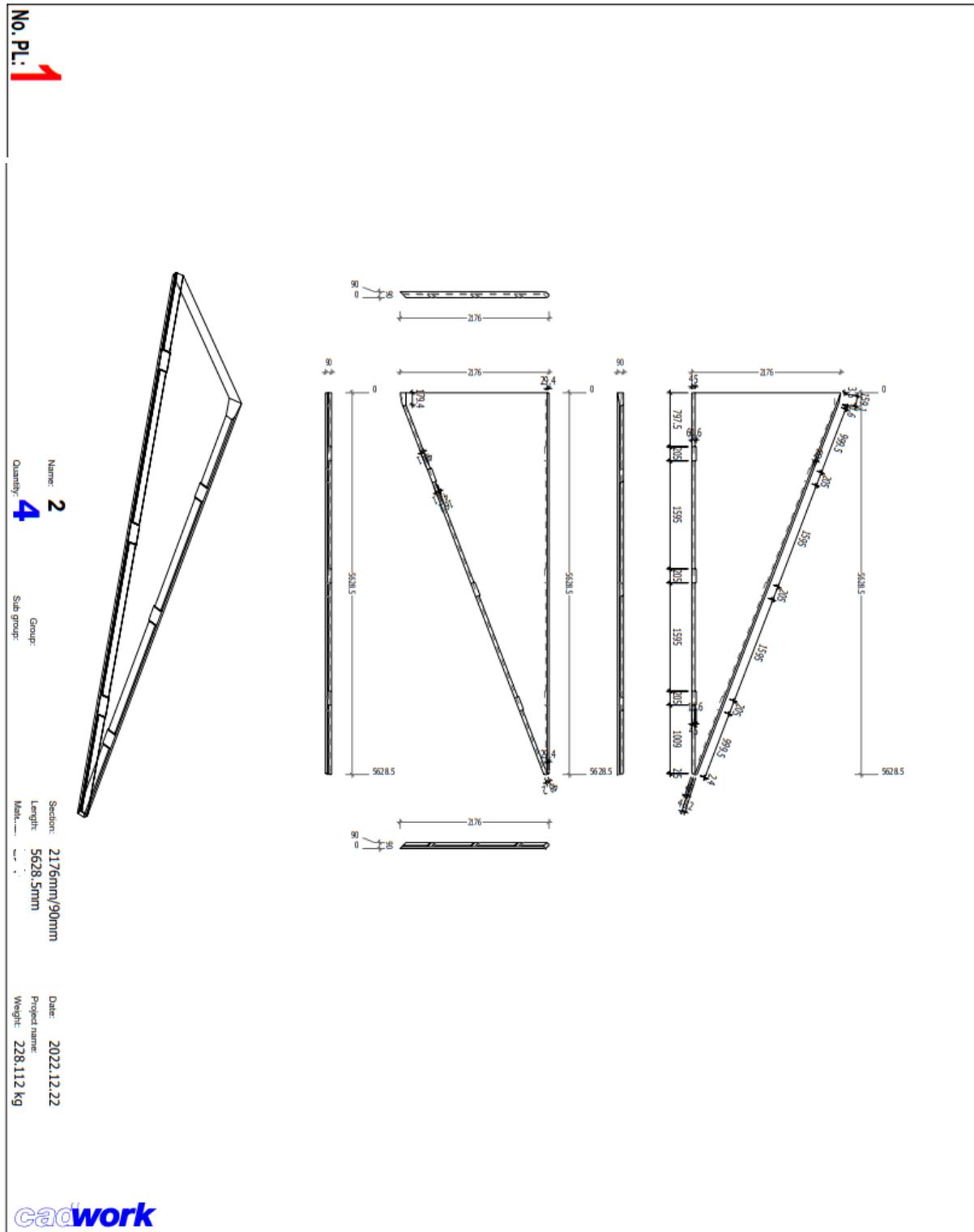


図 4.7.1 CLT 加工図

資料提供：サイプレス・スナダヤ

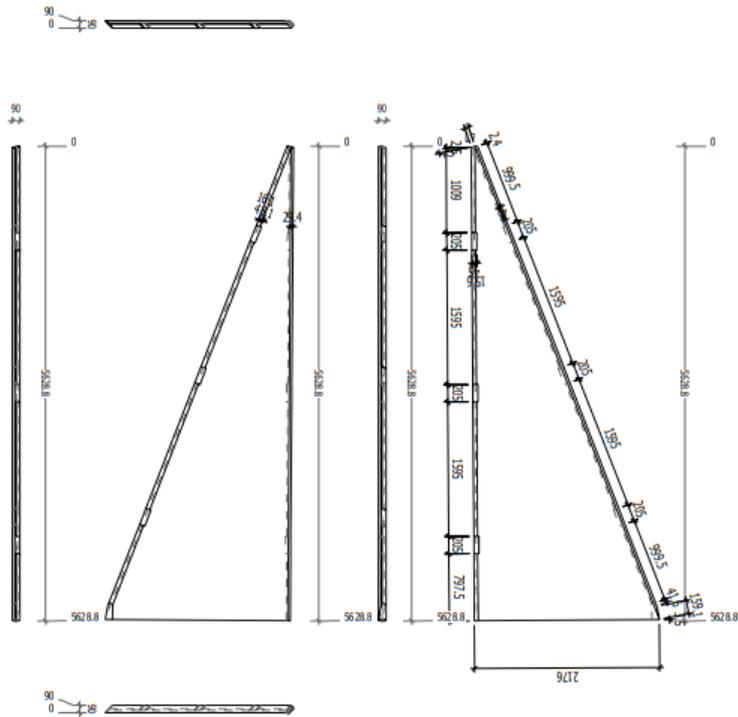
No. PL.3

Name: 1
Quantity: 4

Group:
Sub group:

Section: 2213.5mm/90mm
Length: 5628.8mm
Material: C/4

Date: 2022.12.22
Project name:
Weight: 228.112 Kg



Gadwork

資料提供：サイプレス・スナダヤ

図 4.7.3 CLT 加工図

4.7.2 加工

CLT は、スギの S60-3-3、厚さ 90mm を使用した。マザーボードのサイズは、国内で製造できる最大寸法 12m、幅は 2.3m で、このサイズはトラック運送する際、荷台に平積みできる寸法になっている。

加工はサイプレス・スナダヤの CLT 工場にて、エセツレ社製の Techno Wall（写真 4.7.1）にて行われた。成型加工後の CLT の写真を写真 4.7.2 に示す。



写真 4.7.1 CLT 加工風景



写真 4.7.2 成型加工された CLT

写真 4.7.3 は、CLT-CLT の接合部に蝶番金物を取り付けたサンプルである。



写真 4.7.3 蝶番金物を取り付けた CLT サンプル

CLT の木口部加工の代表寸法を図 4.7.4 に示す。

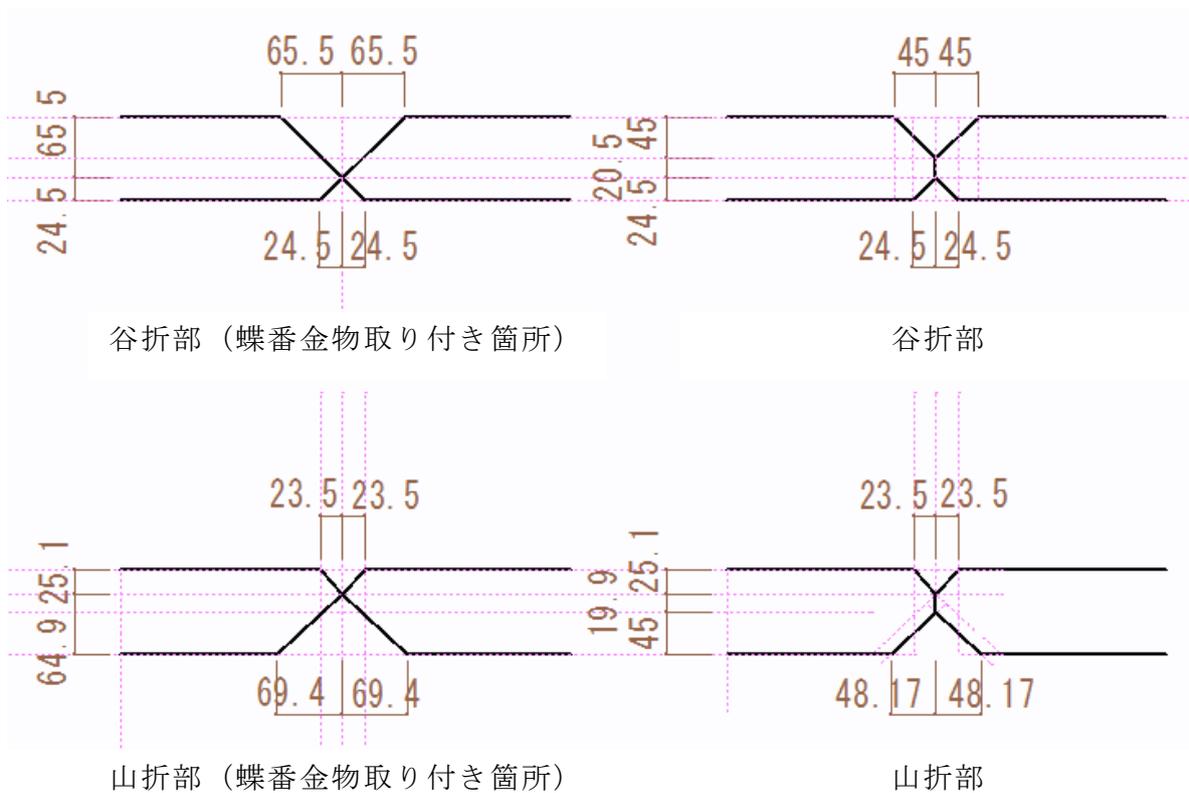


図 4.7.4 CLT の木口部の加工寸法

CLT 成型加工後の写真を、写真 4.7.4 および写真 4.7.5 に示す。



写真 4.7.4 成型加工後の CLT



写真 4.7.5 成型加工後の CLT

蝶番金物部の加工は、写真 4.7.6 のように Techno Wall にて行うが、円形状に残る写真 4.7.7 の  部は、大工の手により電動式ルーターを活用（写真 4.7.8）して、写真 4.7.9 のように仕上げられた。



写真 4.7.6 蝶番金物部機械加工

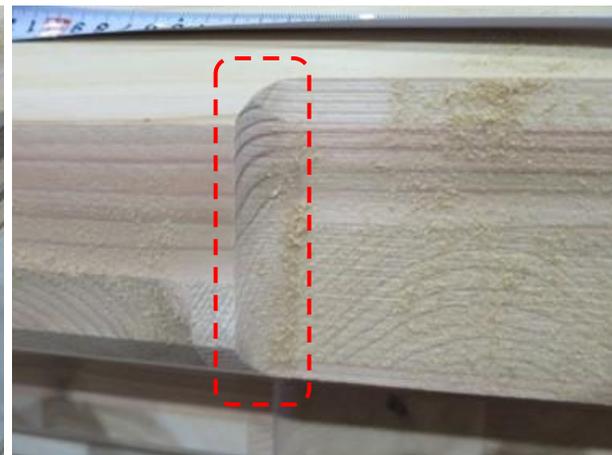


写真 4.7.7 蝶番金物部機械加工



写真 4.7.8 蝶番金物部手加工風景



写真 4.7.9 蝶番金物部加工終了

4.8 ハングアップ

4.8.1 CLT の敷設

試験体組み立て現地への CLT の搬入風景を写真 4.8.1、写真 4.8.2 に示す。



写真 4.8.1 CLT の搬入



写真 4.8.2 CLT の荷下ろし

CLT を図 4.3.4 で説明した木製馬と大引の上に敷設している状況を、写真 4.8.3～写真 4.8.10 に示す。



写真 4.8.3 CLT の敷設開始



写真 4.8.4 CLT の敷設風景

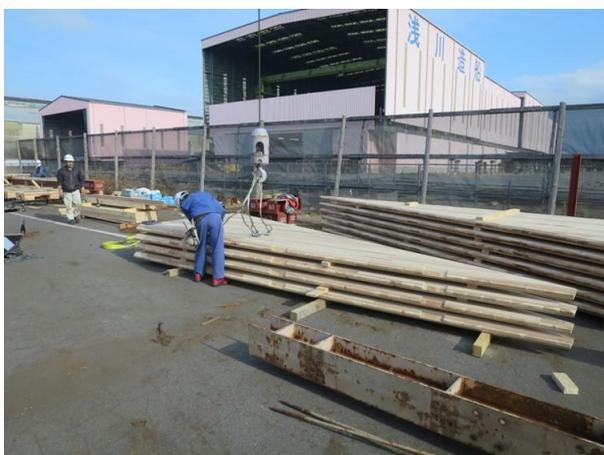


写真 4.8.5 CLT の吊り上げ



写真 4.8.6 CLT の敷設風景



写真 4.8.7 CLT の敷設風景



写真 4.8.8 CLT の敷設風景



写真 4.8.9 CLT の敷設風景

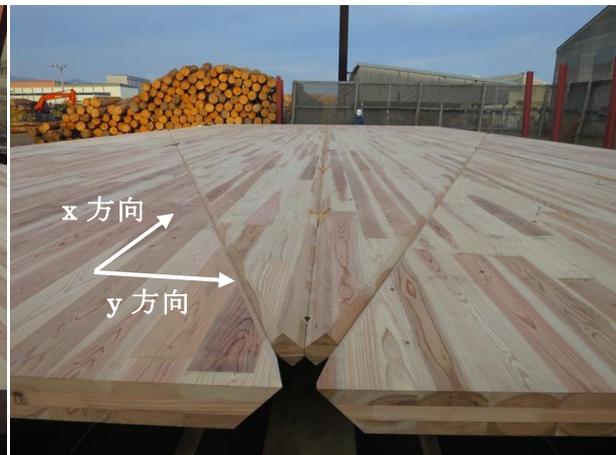


写真 4.8.10 CLT の敷設終了

敷設は、大工 5 人にて 15:00 から開始し、図 4.1.2 の大きな三角形 8 枚と小さな三角形 8 枚を、16:30 には敷き終わった。揚重機は 25ton ラフター・クレーンを使用している。

CLT 敷設後、写真 4.8.10 に示す x 方向、y 方向および対角線の長さを計測し、誤差は 1mm 程度であることを確認（写真 4.8.11）した。



x 方向



y 方向



対角線

写真 4.8.11 長さの計測

4.8.2 蝶金物の取り付け

蝶番金物の取り付け状況を、写真 4.8.12、写真 4.8.13 に示す。蝶番金物は、大工 3 人で 9:00～12:00 間で谷部（CLT の上面で取り付け）27 カ所、山部（CLT の下面で取り付け）36 カ所の取付が完了している。



写真 4.8.12 蝶番金物取付



写真 4.8.13 蝶番金物取付

4.8.3 防水工事

シート防水の施工は、写真 4.8.14 の材料および写真 4.8.15 の接着剤を使用して、写真 4.8.16、写真 4.8.17 のように施工した。防水工事について、詳細は第 5 章で説明する。



写真 4.8.15
接着剤



写真 4.8.16 防水の施工



写真 4.8.14 防水シート材料



写真 4.8.17 防水の施工

4.8.4 ハングアップ

試験体を徐々に吊り上げているハングアップの様様を以下に示す（写真 4.8.18）。



写真 4.8.18-1



写真 4.8.18-2



写真 4.8.18-3



写真 4.8.18-4



写真 4.8.18-5



写真 4.8.18-6



写真 4.8.18-7



写真 4.8.18-8



写真 4.8.18-9



写真 4.8.18-10



写真 4.8.18-11



写真 4.8.18-12



写真 4.8.18-13



写真 4.8.18-14



写真 4.8.18-15



写真 4.8.18-16

写真 4.8.18 ハングアップ施工風景

ハングアップの作業は 8:30 から開始、昼食時間の休憩を挟み、15:00 に終了した。施工は雨天の中行われた。翌日、晴天時の試験体写真を写真 4.8.19 に、内観の写真を写真 4.8.20 に示す。



写真 4.8.19 ハングアップ終了後 外観



写真 4.8.20 ハングアップ終了後 内観

4.9 作業工程

「4.3 仮設工事」から「4.8 ハングアップ」までの作業日誌を表 4.9.1 に示す。

表 4.9.1 ハングアップ工法の作業日誌

月日	作業内容	搬入車両	作業者
1月24(火)	遣り方		大工 3名
1月30(月)	鋼材・敷板・ジャッキベースの搬入 仮設基礎用 CLT の加工 試験体 CLT の加工 木製馬・吊り具等工具の搬入	10ton ユニック 3ton ユニック	大工 2名
1月31(火)	敷板・ジャッキベース設置 仮設基礎用 CLT の据え付け フラットローラー・鋼板の搬入	3ton ユニック	大工 2名
2月1(水)	大引搬入 木製馬および大引の据え付け		大工 4名
2月2(木)	CLT の運搬 木製馬高さ調整・連結 山留用鋼材据え付け CLT 据え付け 支承金物・タイロッド搬入 タイロッド準備 吊治具用鋼材搬入	10ton トラック 25ton クレーン 3ton ユニック 10ton トラック	大工 4名
2月3(金)	寸法確認・蝶番金物取付 吊治具の組み立て 支承金物の設置 防水プライマー塗布	25ton クレーン	大工 4名 金物工 1名
2月4(土)	雨養生		大工 1名
2月6(月)	防水材料の搬入		
2月8(水)	防水工事(平部)		防水工 1名
2月9(木)	防水工事(谷・山・頂部)		防水工 1名
2月11(土)	フラットローラー用ガイド取り付け ハングアップ準備 仮設足場搬入 試験吊り	50ton クレーン 3ton ユニック	大工 5名 金物工 1名
2月13(月)	ハングアップ	50ton クレーン	大工 7名 金物工 1名

*トラック、ユニック、揚重機のオペレーターは作業者人工に含んでいない。

*クレーンは、いずれもラフター・クレーンを使用。

4.10 課題と対処法案

本節では、実大サイズによるモックアップでの経験を踏まえて、実践に向け改善が必要となる項目を取り上げ、解決策の提案を行う。

4.10.1 支承金物

4.10.1.1 改善点

「4.4 支承金物」で説明した支承金物は、水平移動と共に、本事業でハングアップを実施した CLT 躯体では、写真 4.4.2 の B 軸と C 軸に対し、回転させる必要がある（今回試作した支承金物は、A 軸に対しても回転する）。写真 4.4.2 の C の回転に対してはドリフトピンを図 4.4.1 の部品 3 と部品 4 に挿入するディテールとしていた。この金物の設計にあたり、ハングアップの始動以降、常に圧縮力が負荷され、部品 3 と部品 4 が離れることはない前提で考えていたが、実際には吊り上げる力により、山留用鋼材が図 4.3.8 の x 方向に引き寄せられるため、写真 4.10.1 のように部品 3 と部品 4 が離れてしまい、ハングアップがうまくいかない、ひとつの原因となった。そこで改善案として、図 4.10.1 のように部品 4 が部品 3 から離れないような仕組みに改良する必要がある、

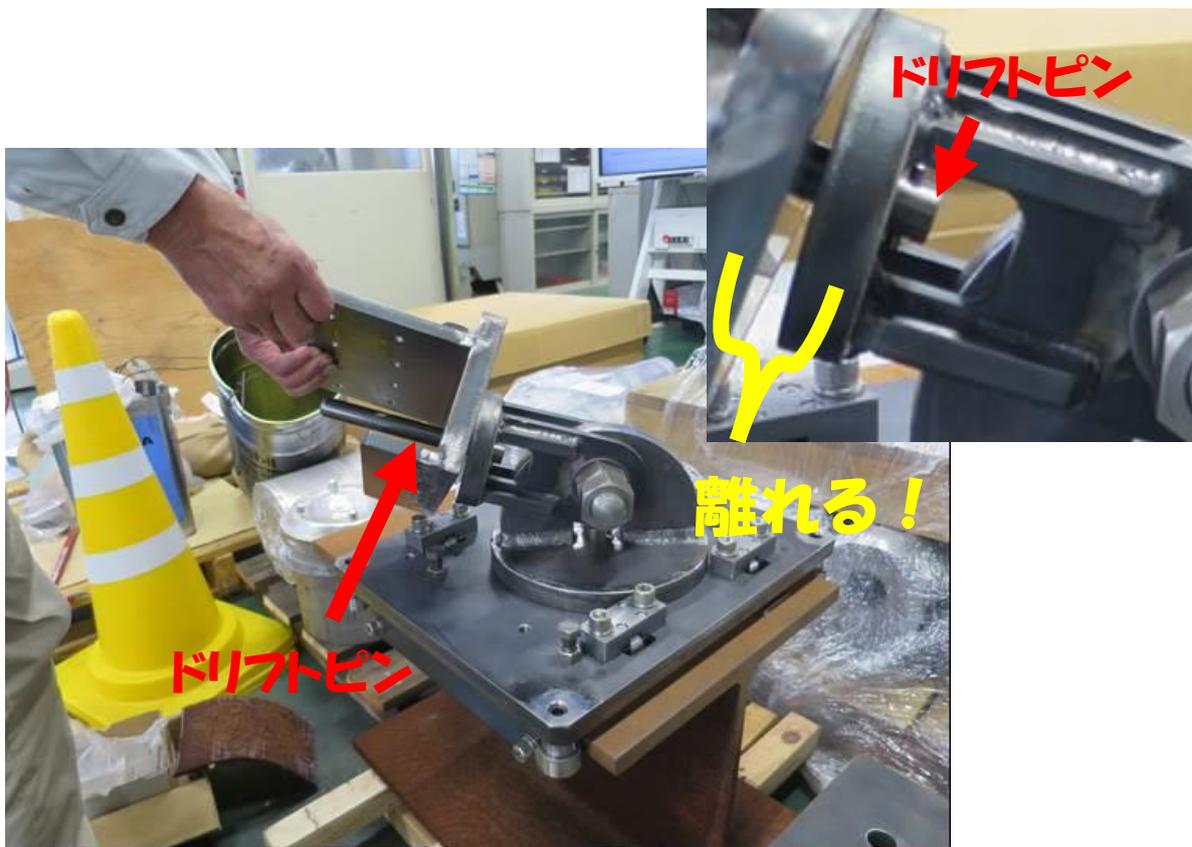


写真 4.10.1 支承金物の不具合

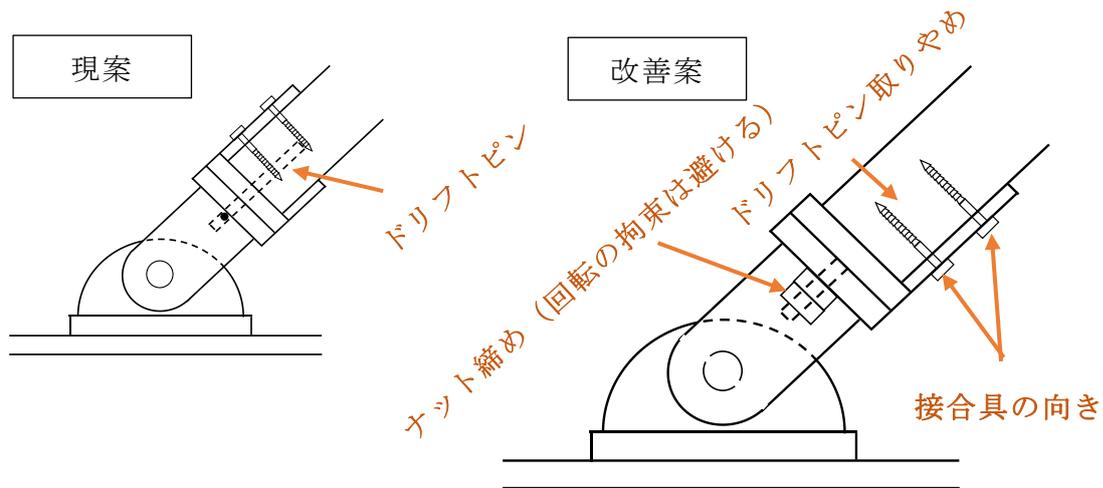


図 4.10.1 支承金物の改善ポイント

4.10.1.2 次工程および接合部の納まりへの配慮

実際の施工を考えた際、支承金物の設計は、ハングアップ完了後の次工程を踏まえ、以下の項目に配慮しなければならない。

- i 建て方計画（事例を図 4.10.2 に示す）
- ii 本設基礎の鉄筋コンクリートと CLT 躯体との接合方法
- iii 頂部の接合方法
- iv CLT 躯体の形を維持するためのタイロッドの取付方法

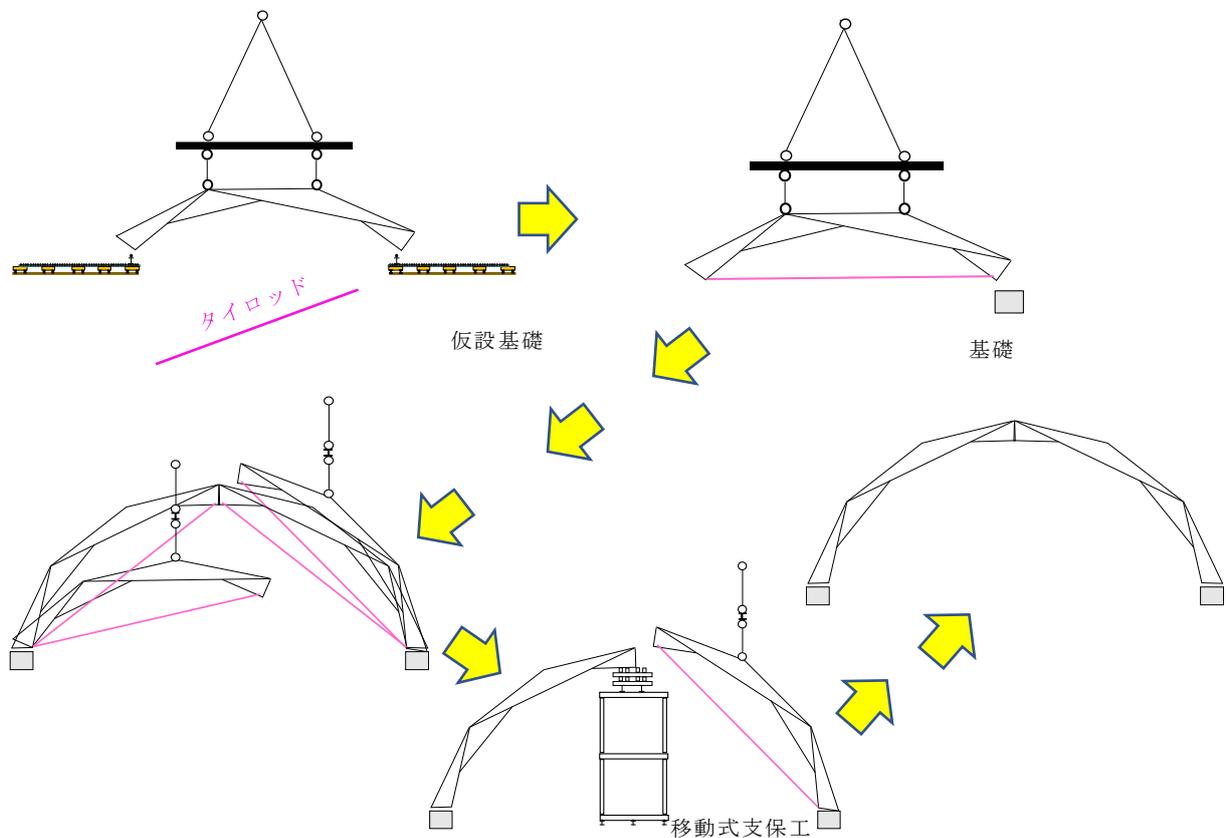


図 4.10.2 建て方の計画（案）

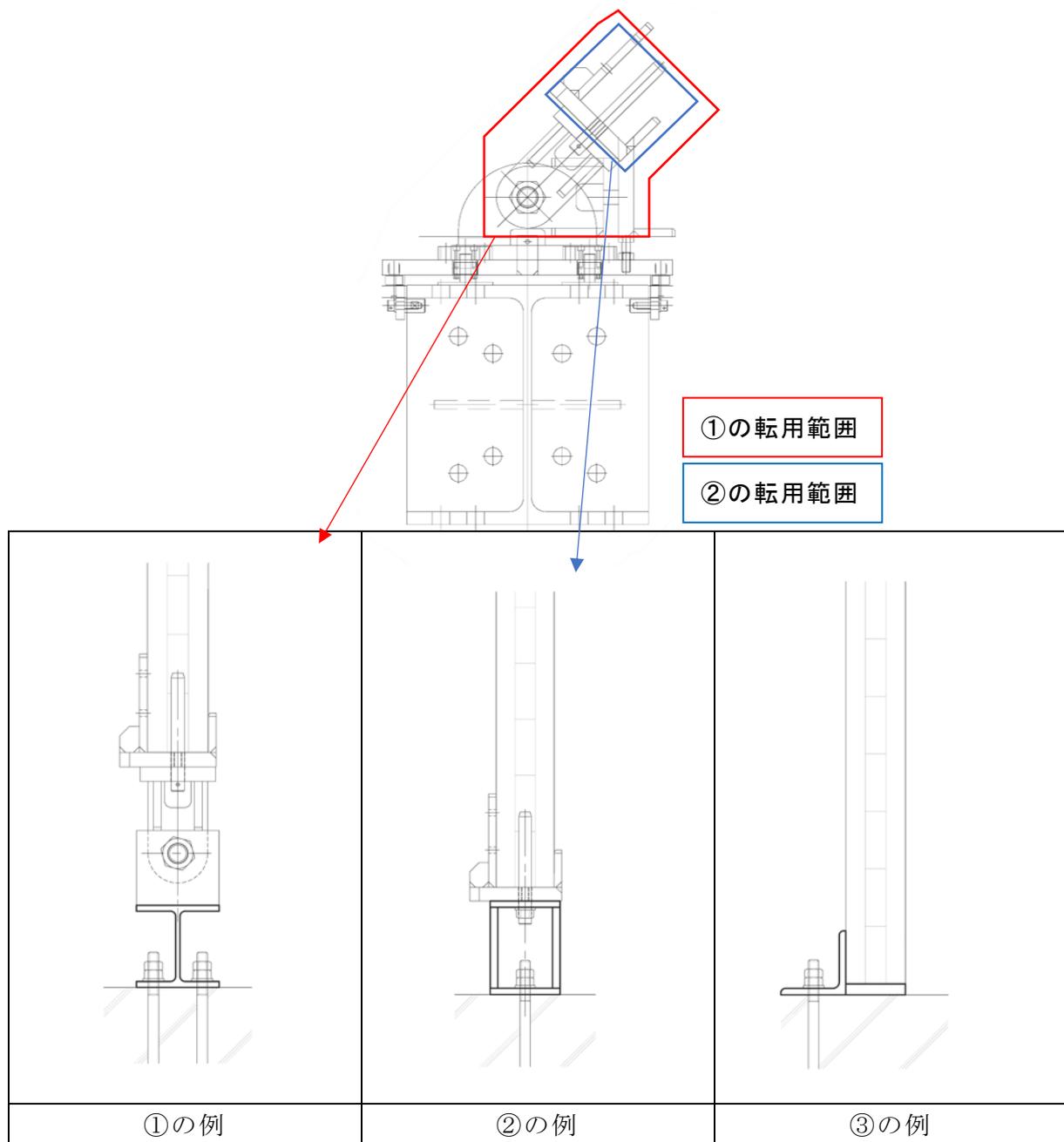


図 4.10.3 支承金物の転用も考慮した柱脚金物の事例

ii のコンクリート基礎と CLT の躯体をつなぐ、柱脚金物はハングアップ工法に使用した支承金物をどこまで柱脚金物に転用するかにより、次の 3 パターンの仕様が考えられる。

① 図 4.10.3 の**赤枠範囲**の製作治具を転用する場合は、鉄骨の基礎梁などを介して基礎に緊結する(図 4.10.3-①参照)。施工治具から最も取り外しやすい箇所を分断するため作業性は良いが、施工治具が製作金物のためコストの増大が懸念される。

② 図 4.10.3 の**青枠範囲**の製作治具を転用する場合は、既製品の箱型金物などを介して基礎に緊結する。製作治具の一部を転用するものの、比較的安価な部分のため、コス

トと作業性のバランスが良いと考えられる。

③ 支承金物を全く転用しない場合は、アングル型の金物などを介して基礎に緊結する(図 4.10.3-③参照)。金物は最も簡素なものとなるが、CLT に固定された治具を一度全て取り外し、新たな金物を取り付ける事になるため、作業性は悪くなる。

iii の頂部の接合方法については、表 2.4.2 の解析結果より、解析モデル 1-1 と 1-2 の建物頂部でのパネルの変形量を比較すると、外側パネルでは-74mm と-73mm、内側パネルでは-16mm と-17mm と結果にはほとんど差がないことが読み取れる。つまり今回の検討の範囲では CLT パネルの継手に必要な性能は単純なピン接合で十分であると言える。具体的には次の 2 つのような仕様が考えられる。

① 鋼板添え板ビス打ち継手 (図 4.10.4)

パネルの屋外側から鋼板をビスで止めつける仕様。接合部の性能としてはピン接合であればよいが、実際の応力の状態によっては継手の下端が開いてくることも予想される。

その場合のオプションとしては、鋼板を両面から添える、隙間が目立たないように CLT パネルのエッジに面取り処理を行っておく、などが挙げられる。

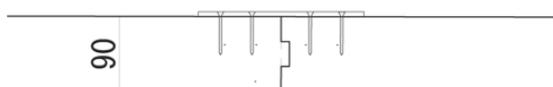


図 4.10.4 鋼板添え板ビス打ち継手



図 4.10.5 ビス斜め打ち継手

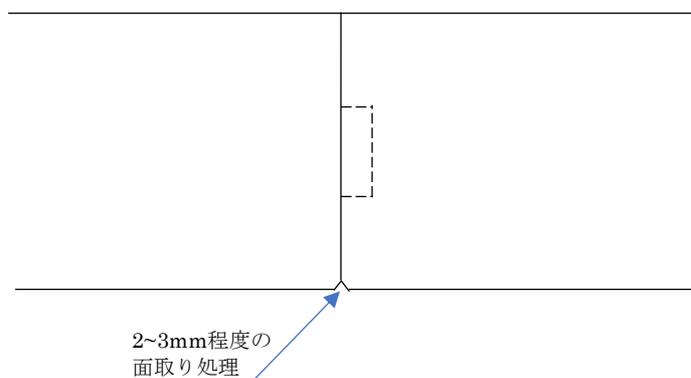


図 4.10.6 CLT パネル下端の面取り処理

② ビス斜め打ち継手 (図 4.10.5)

パネルの屋外側からビスを斜め打ちで止めつける仕様。屋内側からの止めつけであれば高所作業車などを用いることで、建物外形に沿って大きな足場を設ける必要がなくなる。ただし、ハングアップ工法で変形させたユニット同士を中央で接合してアーチを形成する場合、ハングアップ後に防水作業が発生するため、ある程度の足場が必

要となる。そのことを考慮すると、足場を嫌って屋内側から施工するのではなく、屋外側から止めつける方が美観上良いとも考えられる。

こちらの仕様に関しても、1と同様に開きを考慮して CLT パネル下端に面取り処理を行っておく（図 4.10.6）というオプションが考えられる。

4.10.2 ハングアップ手法の再考

今回のモックアップでは、図 4.10.7 の緑の↑と↑の位置を吊り上げ、CLT 躯体端部を引き寄せることによって自然に形状が整っていくことを期待していた。しかし実際には赤の↑および紫の↑を同時に持ち上げ、さらに図 4.10.8 の ○ の位置を引きつけないければ形状は整っていかなかった。赤の↑と紫の↑の持ち上げは、本試験では 90mm × 90mm の角材を使って、この原理で持ち上げ（写真 4.10.2）、○の引きつけはチェーン・ブロックを活用した（写真 4.10.3）が、作業効率、材料の損傷や、防水施工を先行することを考慮すると、施工手法の再考が必要である。

本実験では、防水施工および足場工事の状況を確認後、解体のため、リフトダウンを行っているが、リフトダウン終了後、図 4.10.9 の赤↑と緑↑の位置をクレーンにて持ち上げ（写真 4.10.4、写真 4.10.5）、その後、大工の職長およびクレーンのオペレーターと協議を行っている。その結果、揚重の装置を使えば、各点を持ちあげることは容易であるが、本事業での折版構造の躯体組み立ては、図 4.10.10 の A 点と B 点、および C 点と D 点は、立ち上がる高さ h_1 と h_2 、 h_2 と h_3 が異なるため、同じクレーンでは同時に吊れないことを確認した。同じクレーンで図 4.10.11 のように、クレーンの親アームと子アームを活用することで高さだけであれば順次、双方の高さを調整することも可能であるが、同時に長さ L_1 と L_3 が変化（短くなる）ため、この動きには順応できないことが確認された。

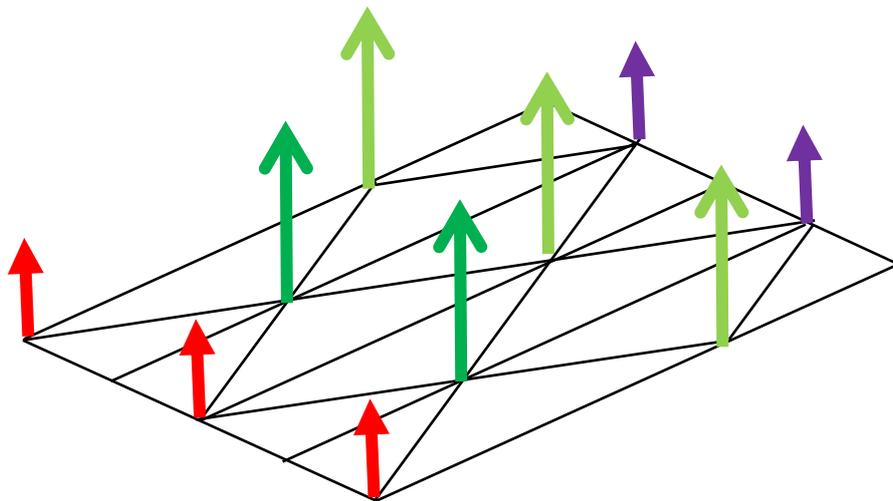


図 4.10.7 ハングアップにより吊り上げたい節点

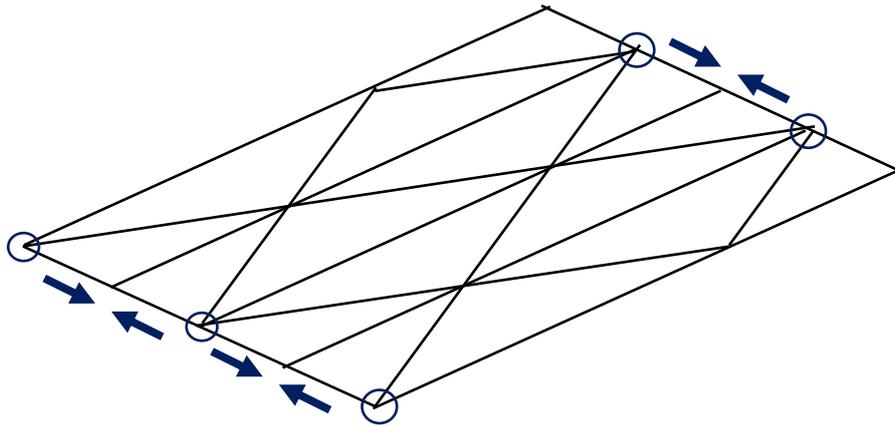


図 4.10.8 本実験で引き寄せを試みた節点



写真 4.10.2 角材による、てこの原理
による節点の持ち上げ



写真 4.10.3 チェーン・ブロック
による CLT の引き寄せ

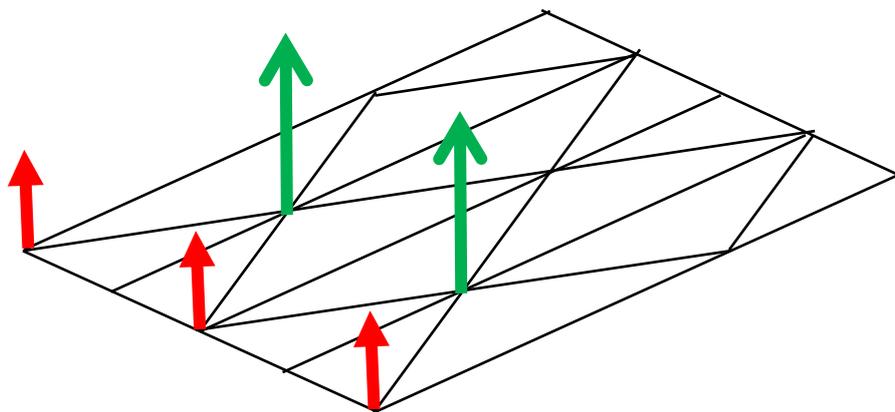


図 4.10.9 リフトダウン後の節点の吊り上げ



写真 4.10.4 リフトダウン後に
実施した試し吊りの状況



写真 4.10.5 リフトダウン後に
実施した試し吊りの状況

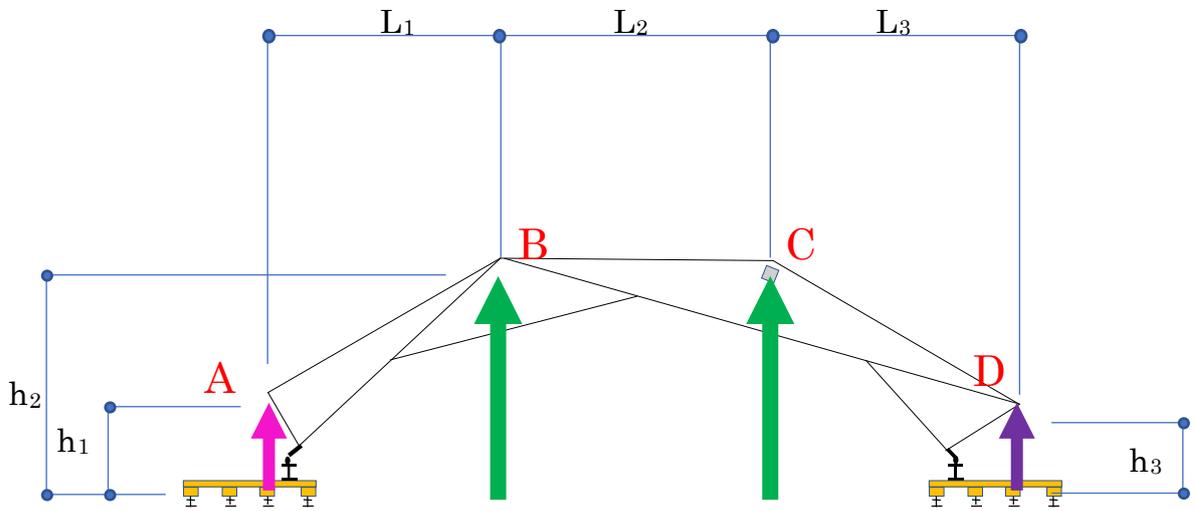


図 4.10.10 ハングアップのイメージ

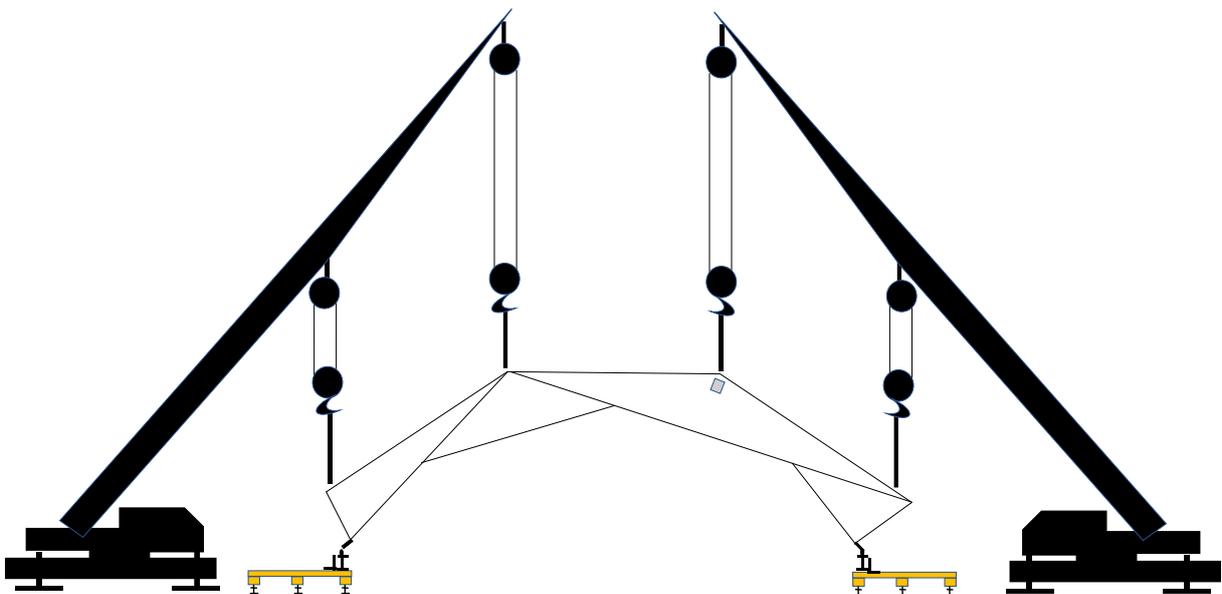


図 4.10.11 ハングアップのクレーン配置案 1

図 4.10.10 のいずれの節点も同時に持ち上げるためには、図 4.10.12 のように、各高さに対し、それぞれ揚重の装置を準備することが必要になる。ただし図 4.10.10 の A と B 点、および C 点と D 点の吊り上げに際し、図 4.10.12 のようにクレーン A と D を両サイドに配置することは、建設現場の敷地の問題、およびコンクリート基礎の位置の関係から、実用的ではなく、クレーン B と同じ方向からの揚重作業となろう。

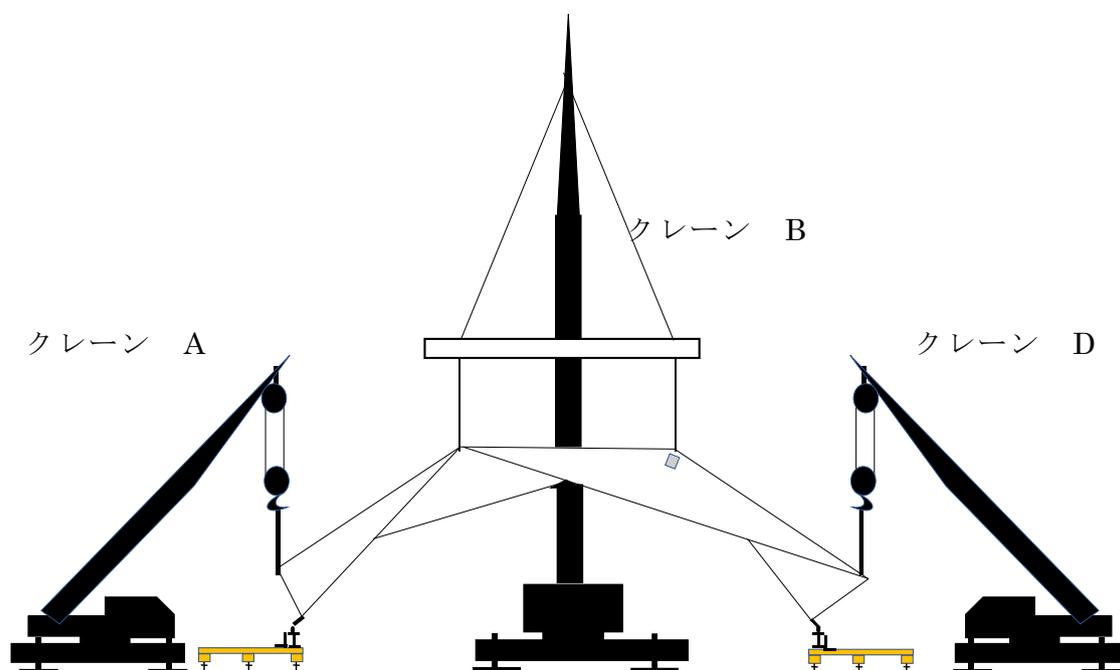


図 4.10.12 ハングアップのクレーン配置案 2

あるいは A 点、B 点の吊り上げ荷重は、今回のケースでは 1 か所あたりの吊り上げ荷重は、写真 4.6.5 および写真 4.6.6 の連結治具に取り付けられたプレートローリに負荷される荷重の概ね 1/2 程度であることから、簡易な揚重装置を鋼材やプレートローリ、チェーン・ブロック等を活用して製作する方法も考えられる。その際、吊り点の水平方向への移動にある程度追従させる必要があるが、水平面に対して垂直方向の CLT の曲げ剛性が高く（CLT に水平面に対し傾斜し始めると、材料の面外曲げの影響を徐々に受けにくくなるため）なれば、この部分の吊り上げる作業は打ち切ってもよい。

また図 4.10.8 の引き寄せる手法については支承金物同士を引き付ける方法が妥当であると考えられる。その際、片方の支承金物だけが引き寄せられない対策を講じておくことが望まれる。

尚、このハングアップの作業のポイントになるのは、各点を同時に計画通りの速度で移動させることにある。今回の試験装置であれば、山留用鋼材の x 方向への移動と、支承金物の y 方向への移動を管理する必要があったが、残念ながらこの点に対する配慮をしておらず、ハングアップが思うように行えなかった、ひとつの要因となっている。

4.10.3 x 方向への移動システム

今回は屋外のアスファルト上での施工となったため、CLT で仮設基礎を作成し、ジャッキベースで水平面を構成し、その上に載せたフラットローラーの回転により山留用鋼材を図 4.3.9 の x 方向に移動するように計画した。建築の現場においては、べた基礎等、水平に打設されたコンクリート床版にレールを設置し、写真 4.10.6 のように車輪により可動させるシステムを採用することで、x 方向への可動はスムーズにいくと共に、片端だけが移動する状況を制御できるものと考えられる。

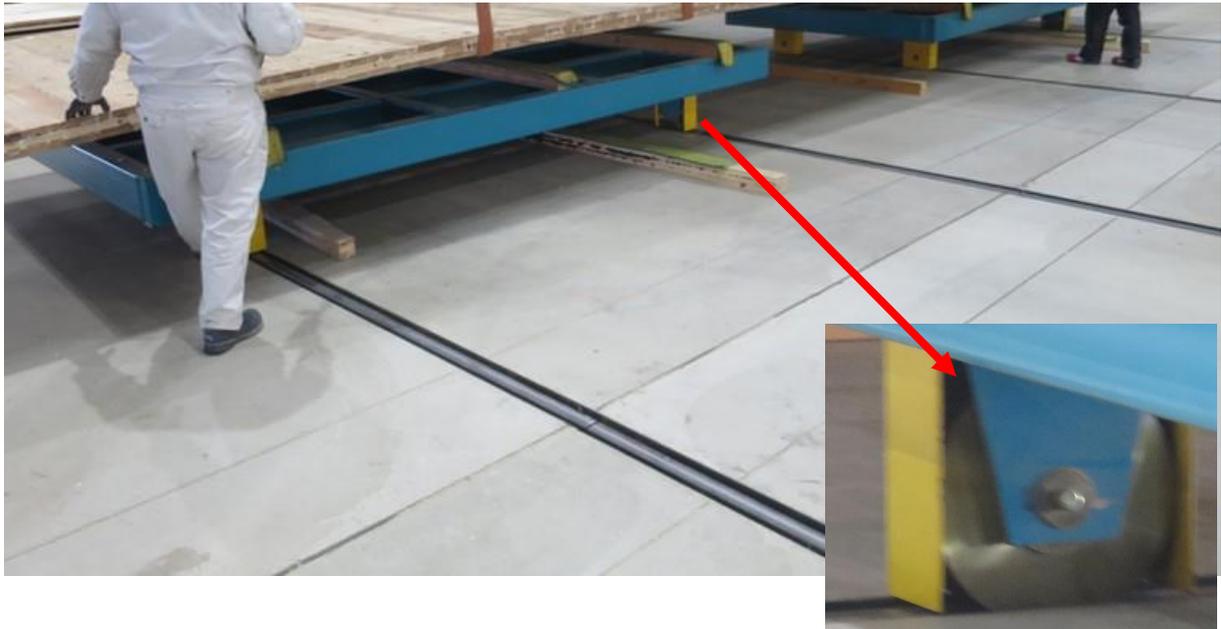


写真 4.10.6 移動システムの事例

4.10.4 接合部の施工精度

ハングアップ作業後、下からの目視観察では、図 4.10.13 の位置に、写真 4.10.7～写真 4.10.10 のように CLT—CLT 間に隙間が見られた。また写真 4.10.11 に対し、写真 4.10.12 のように隣接する CLT にズレが見られる部分もあった。

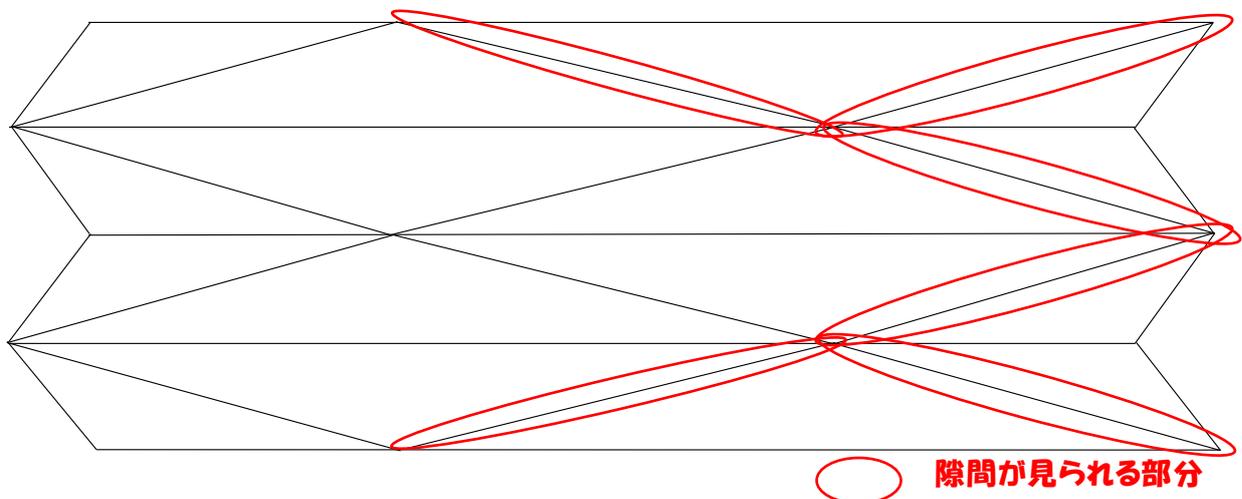


図 4.10.13 CLT-CLT 間に隙間が見られる部分



写真 4.10.7 CLT-CLT 間の隙間状況



写真 4.10.8 CLT-CLT 間の隙間状況



写真 4.10.9 CLT-CLT 間の隙間状況

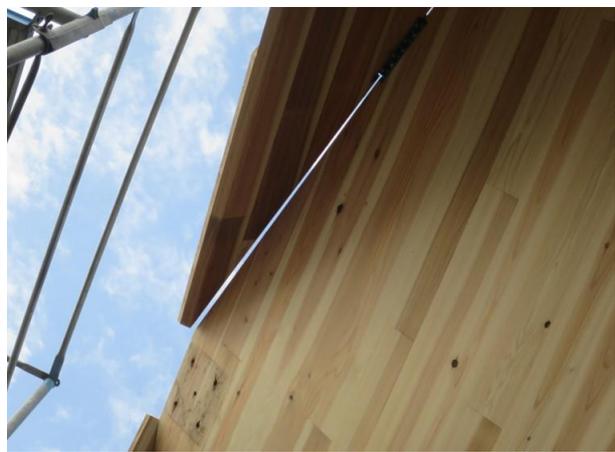


写真 4.10.10 CLT-CLT 間の隙間状況



写真 4.10.11 隣接する CLT 間の状況



写真 4.10.12 隣接する CLT 間の状況

加工の誤差は、「4.8.1 CLT の敷設」で説明したように全体で 1mm 程度であったことからこのズレは、ハングアップ時に発生したものと考えられる。ひとつの原因として、写真 4.10.13 のように、隣接する CLT の片側だけが吊られないような工夫をしていたが、ハングアップ時、CLT 躯体が平面的に見て斜めに移動した状況も見られたため、この時、偏載が生じたのではないかと推察される。また各 CLT の端部でしか吊

っておらず、端部に関しては写真 4.10.2 のように無理に持ち上げたことがこれらの原因であったと考えられ、「4.10.2 ハングアップ手法の再考」に記載した作業時の注意点に留意することで、かなりの部分が解消されると期待される。



写真 4.10.13 CLT 頂部の吊り方の状況

また写真 4.7.3 のようにサンプルで蝶番金物部分の可動状況を検討しているが、かなり力を入れないと写真 4.7.3 (下) の状況で CLT-CLT 間が 0 タッチにならないことが確認されている。よって図 4.7.4 の寸法に対し、木工事の造作工事の慣習にならって、幾分か余分に削るような加工をすることで、隙間はかなり解消されるものと推察される

CLT—CLT のズレについては、ハングアップ時に蝶番金物に負荷されるせん断力を再度検討して適切な数の金物を配置するとともに、接合具の端あきを踏まえて、可能な限り端部に蝶番金物が配置されることが望まれる。

4.10.5 頂部の納まり

「2.2 施工方法の検討」で述べたように、6 枚の CLT が集まる頂部の納まりについては、断面の欠損を意識する必要があることを記した。この頂点については、写真 4.10.14 のような加工を行い、ここに図 4.10.14 のような 3 案の木材ピースを納める提案が設計側よりなされた。



写真 4.10.14 頂部の CLT 加工

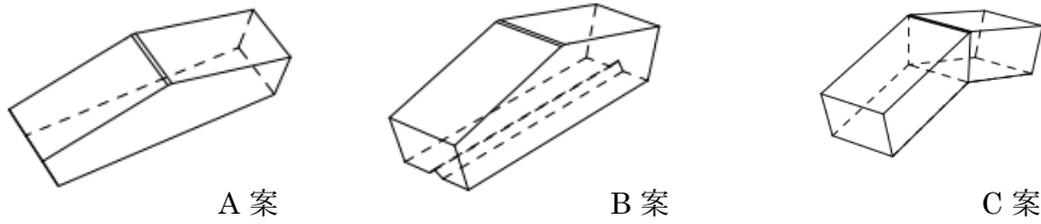


図 4.10.14 頂部に納める木材ピース

この納まりの確認のため、写真 4.10.15 のように発泡スチロールで実大サイズの模型を製作し、A 案については木材加工を施し、写真 4.10.16 および写真 4.10.17 のように試験体に取り付けを行い、施工性を確認した。



写真 4.10.15 頂部の実大模型

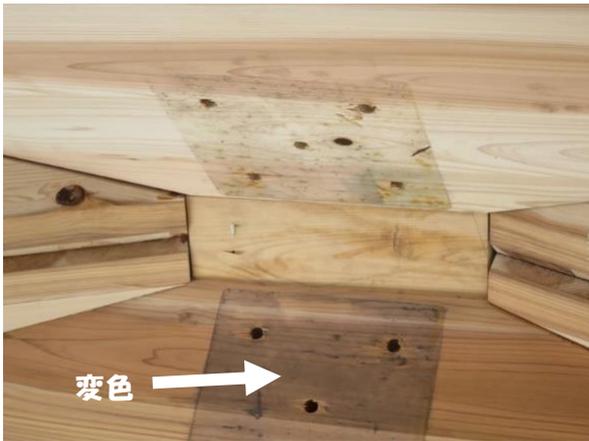


写真 4.10.16 頂部の納まり状況
(室内側)



写真 4.10.17 頂部の納まり状況
(屋外側)

尚、写真 4.10.16 の白い矢印部の変色は、図 4.6.9 の吊金具 D の裏座金 (250mm×250mm、t=12mm) の錆が原因である。ここではこの裏座金 1 枚に対し、4 本の M ボルトを使っているが、吊り荷重を鑑み、各ボルトに対して、適切な径と厚みの丸座金で施工した方が、仕上がり状況を考えると適切であると考えられる。

4.10.6 CLT の NC 加工の留意点

NC 加工機による木質材料の加工は、中大規模木造建築物において広く普及している技術で、今回の試験体の加工においても、非常に高い精度で加工できたことが確認できており、折版構造を具現化するにおいても不可欠な技術である。

今回、CLT—CLT 間の接合に写真 4.7.3 の蝶番金物を採用するにあたり、まずマザーボードを写真 4.7.1→写真 4.7.2 のように CLT を三角形に切り分け、その状態で図 4.7.4 の形状に切削をするため、図 4.10.15 のように NC 加工機の切削ドリルを、CLT の木口面に対して 45° の角度をつけて加工を行っている。このとき CLT が厚くなると、切削ドリルのアームが CLT にぶつかるため、CLT 間の間隔を大きく設ける必要がある。このような切削加工の条件は CLT の歩留まりにも影響することから、ドリルの稼働長さの確認等を含め、設計の段階で事前に加工担当者等と協議しておくことが肝要である。

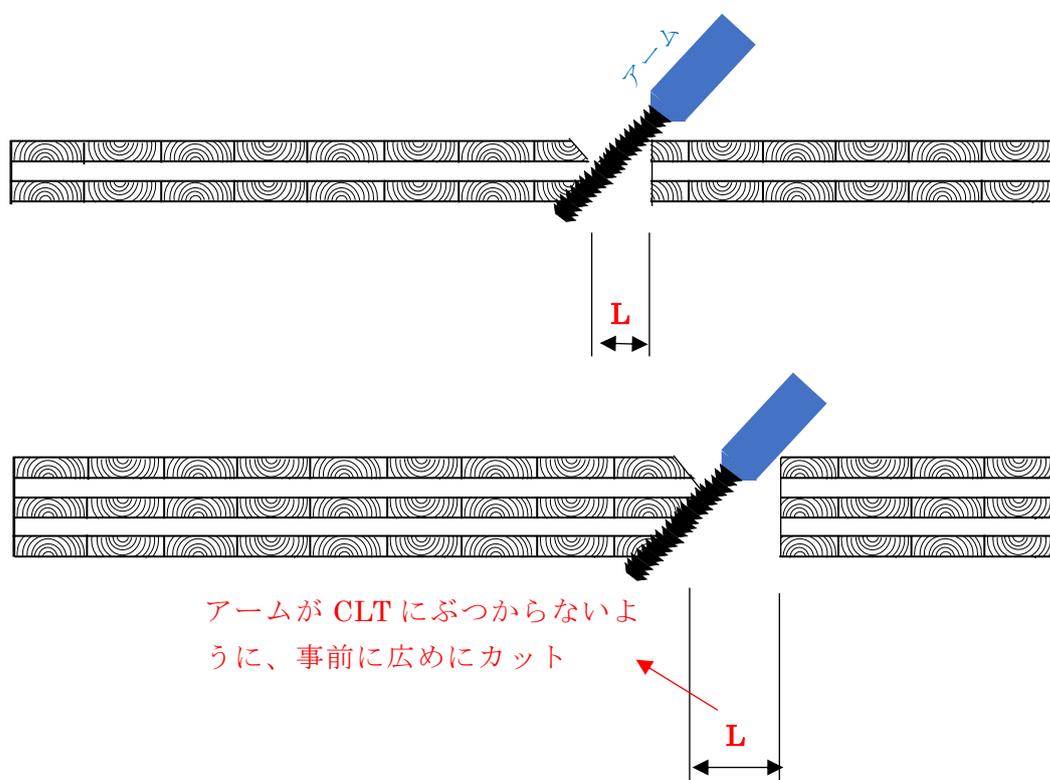


図 4.10.15 CLT の加工イメージ

4.10.7 CLT 躯体の接合

図 4.1.4 の CLT 躯体を桁行方向に繋いでいくことで、工場や倉庫、体育館等の建築物が具現化する。図 4.10.16 の CLT 躯体間の接合位置はすべて谷折りの部分となるため、図 4.10.16 のような CLT-CLT を引き付けることが可能な建築用ビスを利用する等の方法が考えられる。。

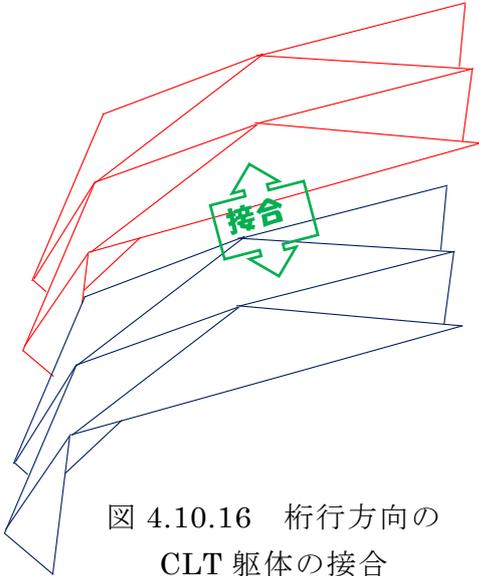


図 4.10.16 桁行方向の CLT 躯体の接合

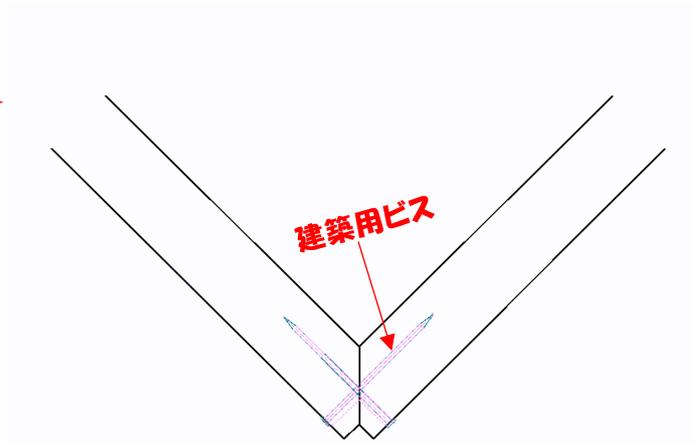


図 4.10.17 谷折り部の接合方法案

4.10.8 漏気対策

室内から屋外へ水蒸気が移動すると、外気の影響で室温よりも気密性の高い防水シートの温度が下がった状況下で、防水シートの下面で結露が発生する。これを防止するには、蝶番金物の取り付け部だけではなく、CLT-CLT 間に隙間が生じると漏気*する（図 4.10.18 参照）ため、CLT-CLT の取り合い部に関しても、図 4.10.19 のような対策を施すことが求められる。

また蝶番金物については、室内から外気に貫通しているような状況になっているため、ヒートブリッジに対する配慮も必要である。

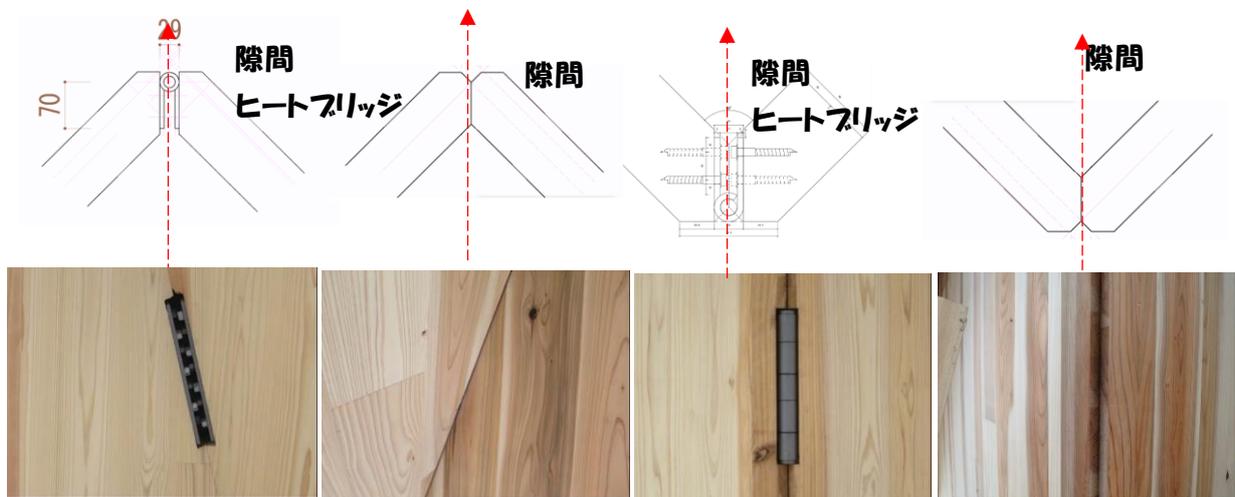


図 4.10.18 CLT-CLT 間の漏気イメージ

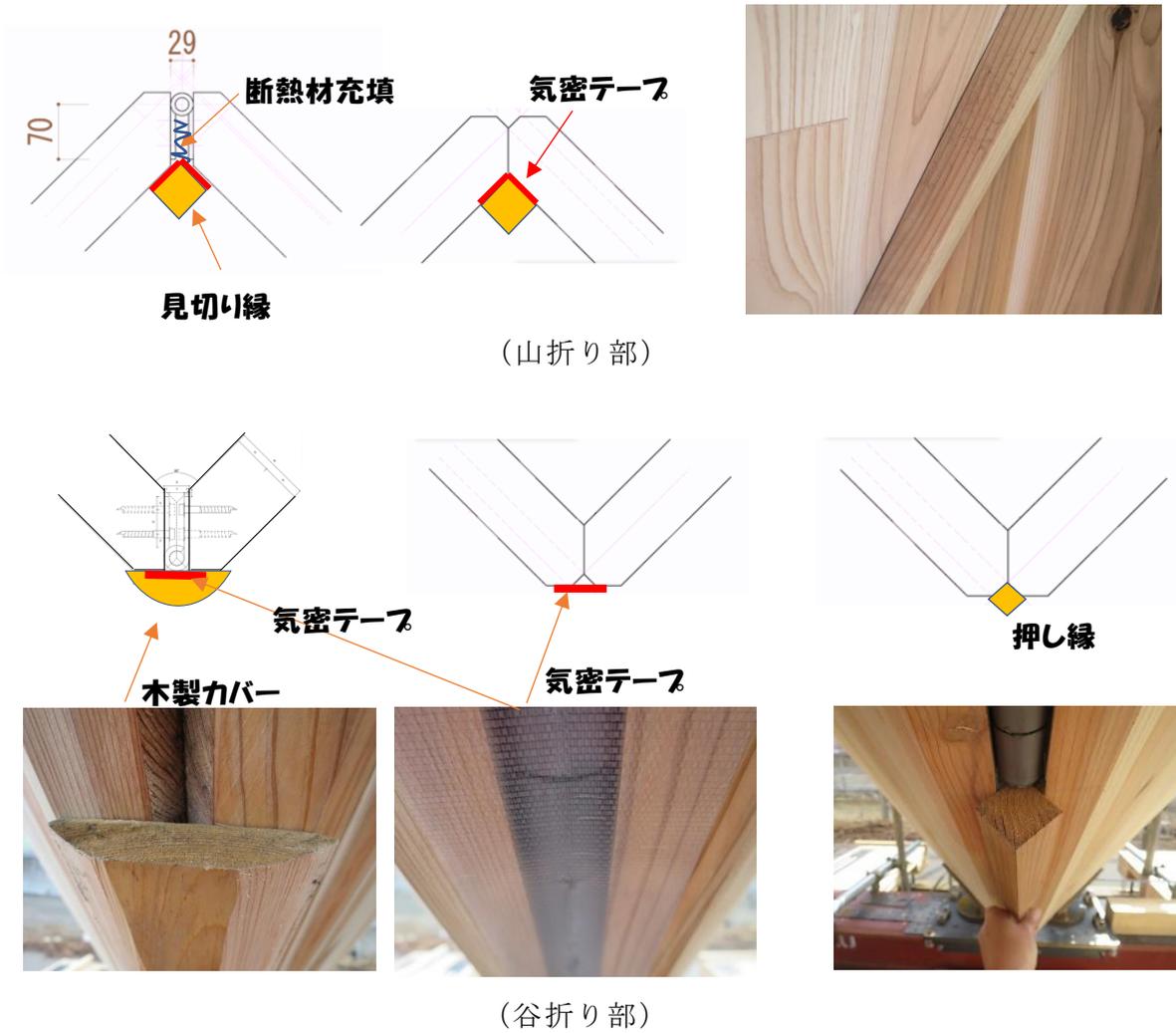


図 4.10.19 CLT-CLT 間の通気対策案

* 木構造振興が平成 2016 年度補正によって実施した、「林野庁委託事業 CLT 建築物等普及促進委託事業 (CLT の性能データ収集・分析) 報告書, pp150~pp225, 2017」によれば、1 mm の隙間で相当隙間面積 $0.595\text{cm}^2/\text{m}$ であったと報告している。

第5章 防水工事の検証

5.1 施工方法の検討

5.1.1 防水施工方法の検討

折版構造の屋根に対して防水を行うにあたり、当初は組み上げ後（図 5.1.1）に防水を実施することを検討していた。しかしながら、屋根全面に足場設置が必要となり、費用もさることながら、足場がある状態で防水施工を実施する煩雑さ、また、急勾配面への足場上での防水施工の危険性、さらには施工効率の低下を勘案し、地組の時点で可能な範囲について防水施工（図 5.1.2）を予め行うこととした。

一方、地組時点で全面に防水層の施工を想定すると、組み上げ時でのジョイント部の伸縮により、不具合の発生が想定されたため、ジョイント部については事前に実大模型を使用した検証を実施した。

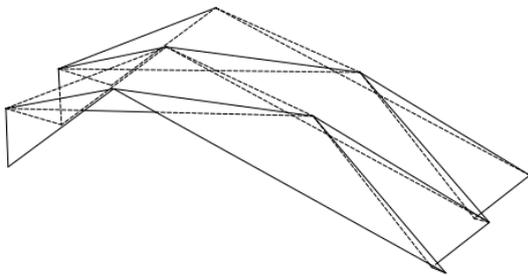


図 5.1.1 組み上げ後に
未施工部位を足場設置し実施

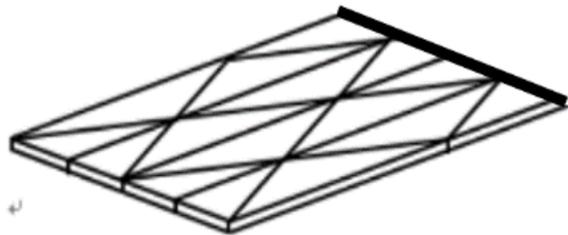


図 5.1.2 地組時点にて
可能な範囲に防水施工

5.1.2 防水工法の選定

当初は折版構造の屋根（勾配屋根）であるため外観意匠も考慮し、アスファルトシングル材等の屋根材での施工も検討していたが、組み上げ時に CLT 接合部の伸縮により支障が発生するリスクの低い工法として塩ビシート防水密着工法を選定した。なお、塩ビシート機械固定工法については出入隅部にプレートが必要となり、材料、工法コスト面で不利となるため密着工法とした。

5.1.3 防水施工概略

本年度実施の実大モックアップの地組段階での防水施工範囲（図 5.1.3 赤塗部分、図 5.1.4 の赤枠部分）は偏荷重とならないように中心部とした。

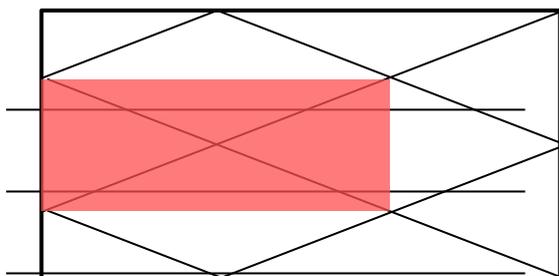


図 5.1.3 地組時点での防水施工範囲

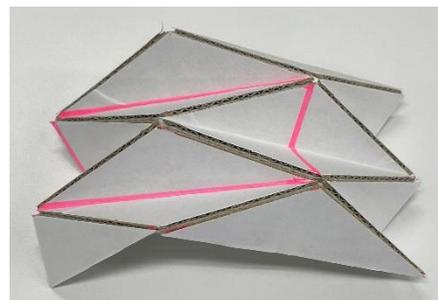


図 5.1.4 吊り上げ後の防水施工範囲

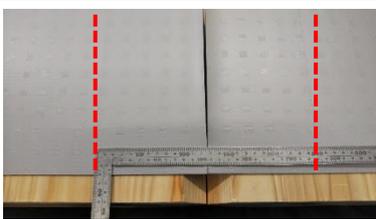
5.2 細部納まりの施工手順

上記の通り、地組の時点で最大限防水を施工する方針より、組み上げ時に伸縮が発生する山部・谷部について、実大模型を用い事前検討を実施した。

5.2.1 山部分の事前検討

組み上げ時に山になる部分は地組時点からシートは伸びるため、あらかじめ伸びる距離をたるませて施工し、対応可否を検証した。模型での検証では 310mm 幅のシートを 250mm 幅に施工する(60mm たるませ)ことで納まることが確認できた(表 5.2.1)。尚、実大の試験体では、315・320・325mm 幅の 3 種についても施工し、評価を行った。

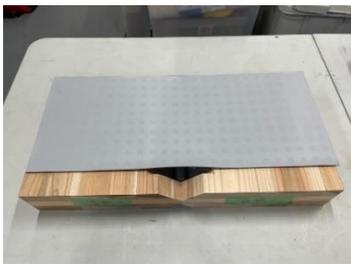
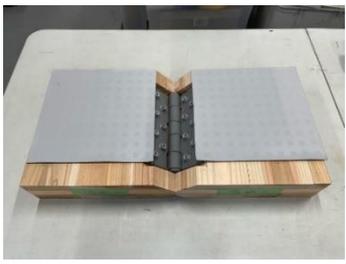
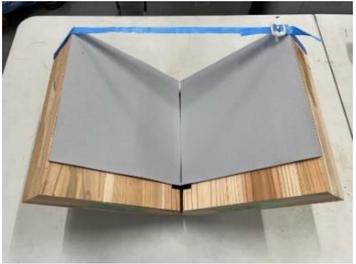
表 5.2.1 山部の防水施工の事前検討

		
<p>①組み上げ後、山部となる下地</p>	<p>②地組時点でのシート施工</p>	<p>③接合部の広がり进行想定し中心をカット。带状シート張り付け位置を墨出し(赤破線 250mm 間隔)</p>
		
<p>④带状シートを墨通りに 50mm 程度溶着(シート幅は 310mm 幅)</p>	<p>⑤墨通りに、逆側を 50mm 程度溶着</p>	<p>⑥組み上げ後状態</p>

5.2.2 谷部分の事前検討

谷部分は組み上げ時にシートがたるむ方向となるため、事前にたるむ部分を切断・除去することでの対応を検討した(表 5.2.2)。

表 5.2.2 谷部の防水施工の事前検討

		
① 吊上げ後、谷部となる下地	② 地組時点でのシート施工	③ 接合部のシート余りを想定し余分を出隅でカット
		
④ 組み上げ後入隅状態	⑤ 谷部への帯状シートを施工（120mm 幅程度）	

5.3 実大試験体での施工

5.3.1 地組状態での防水施工

表 5.3.1 に、地組状態での防水施工の手順の概要を示す。

表 5.3.1 地組状態での防水施工の手順

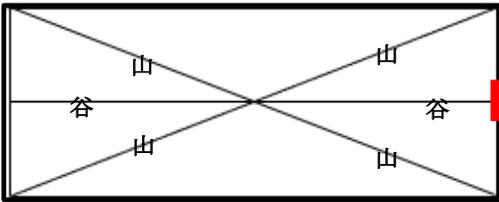
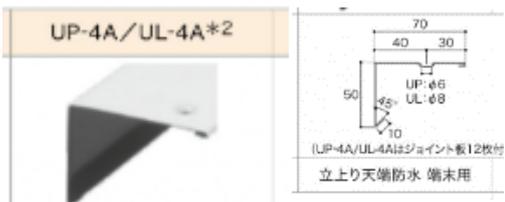
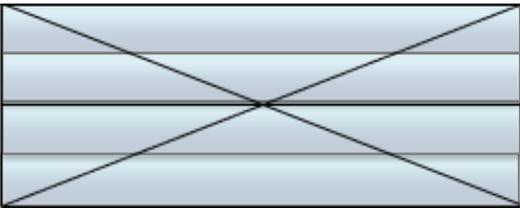
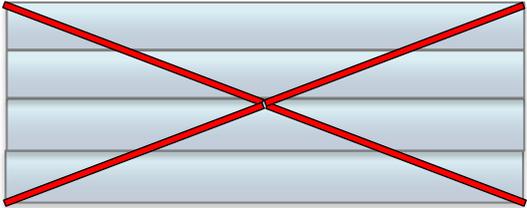
	
① 施工範囲概略：地組状態での施工 水切り金物施工（上図赤線部 2m程度）	② 水切り金物（UP-4）概略
	
③ 該当部位防水：地組状態での防水施工 一般部 4 通、施工後に山部はカット谷部も CLT 出隅でカットし切除	④ 山部への帯シート施工 所定幅の帯シートをたるませて施工する

表 5.3.2 に、地組状態での防水施工の状況を示す。

表 5.3.2 実大試験体での防水施工状況（地組状態）

① 施工部位全景	② 下地への接着剤塗布
③ 塩ビシート裏面への接着剤塗布	④ 同左 山部・谷部には塗布せず、接着させず(今回は実験のためであり、実現場では塗布しても可)
⑤ 一般部シート施工完了（中央部はシート割付上ジョイントを広くしている）	⑥ サイドジョイント部溶着施工



⑦ 帯シート片側溶着施工後



⑧ 帯シート片側溶着施工後の頂部重なり状態



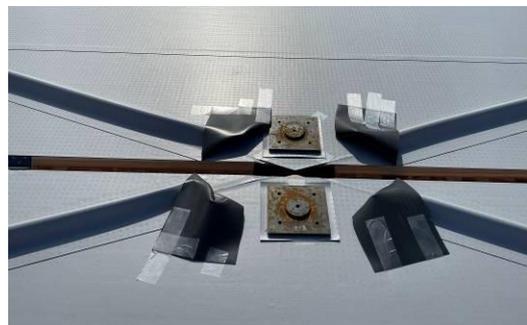
⑨ 帯シート逆側の溶着施工



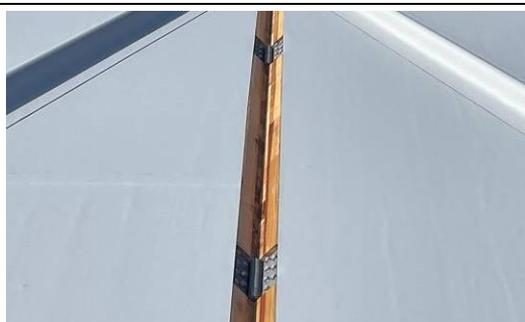
⑩ 同左 塩ビシートを仮置きし、シートをたるとませた



⑪ 帯シート施工完了



⑫ 同左 頂部は吊り上げ治具取り付けのため、帯シートは治具を避けて仮固定



⑬ 谷部シートは CLT 出隅で切断、除去
本工程は雨養生を考慮し、組上直前に行っても可能



⑭ 金物設置状況 金物設置およびシート施工に問題は無く実施できている

実大試験体を使った地組状態での防水施工を実施し、次のような事項を確認した。

- ① CLT 下地への塩ビシートの直接施工は下地不陸等、特に問題ない。
- ② 防水施工前の CLT への吸水防止のため、ブルーシートでの養生や遮水プライマー塗布等の処理が望まれる。
- ③ 組み上げ時の水勾配を考慮したシート割付については、高い難易度および煩雑さが想定される（ただし、塩ビシート防水はすべてのケースで水勾配に準ずる必要はないため、水勾配を考慮したシート割付は必ずしも必要でない）。
- ④ CLT 接合部上（山部、谷部となる部分の空隙）のシート裏面への接着材塗布について、今回は非塗布としたが、塗布しても問題ない（塗分けがなくなるため施工効率向上がみこまれる）
- ⑤ 山部への帯シート施工はたるませるため、やや煩雑であるが、施工には問題ない。
- ⑥ 山部の帯シートは 310mm で問題ない。320mm 以上はたるみ部分が大きく頂部施工に支障がでる。
- ⑦ 谷部シートは今回地組状態で直ちに切断除去したが、雨養生を考慮すると、組上げ直前に切断してもよい。
- ⑧ 水切り金物種別、取り付けについても問題はない。
- ⑨ CLT 表面の節については、死節（写真 5.3.1）には防水シート用の接着剤が溜まり、硬化後、シート防水表面上に凹部ができるため、ホットメルト等での事前処理が必要である。



写真 5.3.1 CLT 表面上の死節

5.3.2 ハングアップ後の防水施工

表 5.3.3 にハングアップ終了後の防水施工の手順を示す。

表 5.3.3 ハングアップ後の防水施工の手順

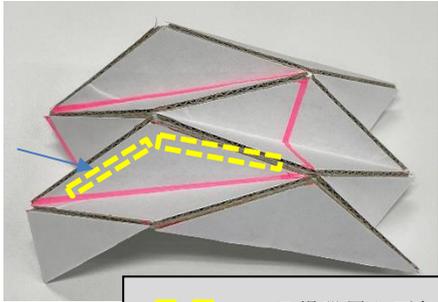
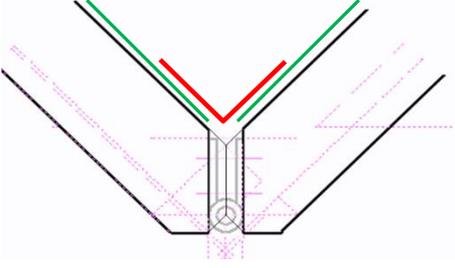
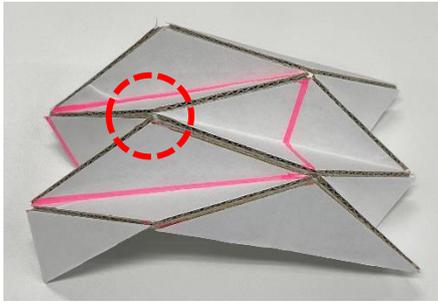
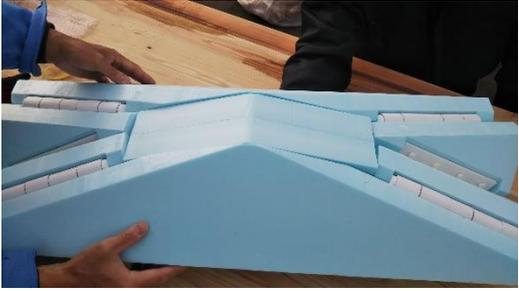
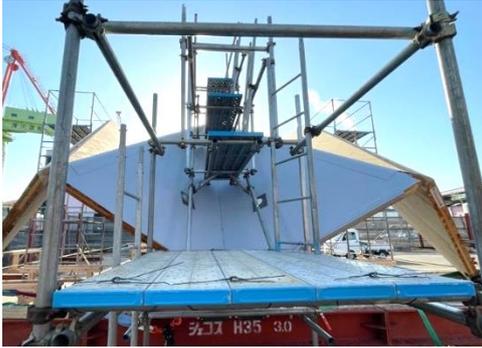
 <p style="text-align: center;">— — — — — : 足場設置必要部</p>	
<p>①組み上げ後に谷部への帯シート施工 (上図黄色点線内) 上図左側は足場設置必要</p>	<p>②谷部帯シート施工 図中赤線</p>
	
<p>③頂部へのシート施工および吊り具穴補修 基材なし塩ビシートを使用</p>	<p>④断熱材を用いた頂部の実大模型で、事前に施工 手順をシミュレーション</p>

表 5.3.4 に、ハングアップ後の防水施工の状況を示す。

表 5.3.4 ハングアップ後の防水施工状況

	
<p>①組み上げ時防水層状況 特に伸縮等問題 ない</p>	<p>②組み上げ後 足場設置状況</p>

	
<p>③谷部への足場設置</p>	<p>④防水層上への養生</p>
	
<p>⑤ 棟部帯シート納まり 310mm で問題ない</p>	<p>⑥ 同左 320,325mm 幅はシート余り多く納まり不良</p>
	
<p>⑦谷部状況 入隅精度高く防水に問題ない</p>	<p>⑧谷部施工 120mm 幅帯シート施工に問題ない</p>
	
<p>⑨頂部状況</p>	<p>⑩頂部隣接の棟部施工</p>

	
<p>⑪ 頂部施工 谷部帯シート施工</p>	<p>⑫ 頂部施工 基材なしシートの施工</p>
	
<p>⑬ 頂部施工 溶着施工</p>	<p>⑭ 頂部施工 凹凸部は熱風溶接機による融着施工</p>
	
<p>⑮ 同上</p>	<p>⑯ 頂部施工完成</p>

ハングアップ後の防水施工を実施し、次のような事項を確認した。

<棟部関連>

- ① 組み上げ時における棟部伸縮の防水層への影響はない。

<谷部施工関連>

- ② 谷部に設置した足場は良好。
 ③ 谷折り部の CLT の入隅精度は高い。

- ④ あらかじめ防水シートを切断除去したが、谷折り部の帯シートの施工は問題ない。
- ⑤ 蝶番金物設置部の凹部は帯シート施工に影響しない。
- ⑥ 地組時に帯シートの片側のみ溶着施工することで、施工性はより向上する（写真 5.3.2 参照）。

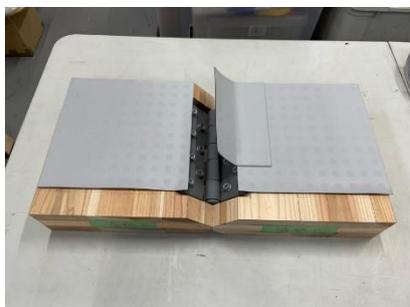


写真 5.3.2 地組時での谷部帯シート施工イメージ
120mmシートを片側のみ溶着施工

<頂部施工>

- ⑦ 今回は棟部を先行したが、水勾配を考慮すると、谷部→棟部の順での施工が望ましいため棟部帯シートは頂部より 1 m 程度溶着せずに残しておく方が好ましい。
- ⑧ 上記より、施工順は「谷部」→「棟部」→「頂部」となる。
- ⑨ 谷部と棟部の帯シートは突き付けとする。（頂部の基材なしシートが施工されるため）
- ⑩ 頂部シートは上記より治具取り付け孔の補修も含めて、570mm×820mm 程度の長方形シートで納めることが可能であり、施工効率も高い。

上記⑦～⑩の検討事項を踏まえ、推奨される頂部の施工手順を表 5.3.5 にまとめる。

5.4 折版構造の屋根の防水施工にあたり、その他検討事項

5.4.1 勾配面木の検討

本施工時において、図 5.4.1 のように谷部が水平となる部分が発生するため、面木を設置し水勾配を設置する必要がある。そこでハングアップ後、防水シート上に写真 5.4.1 のように納まる面木を加工し、その上に谷部の防水施工と合わせて、シート防水を行う検討を行った。

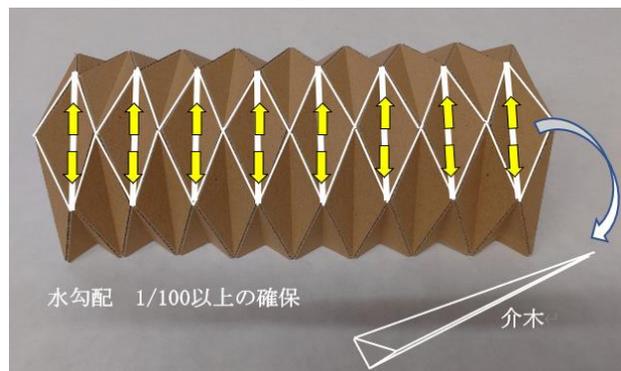
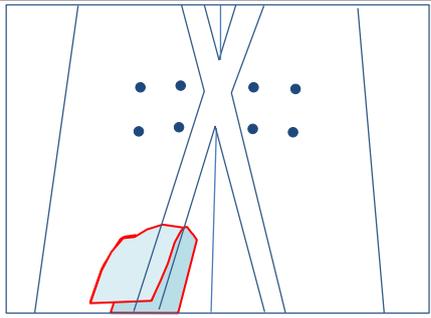
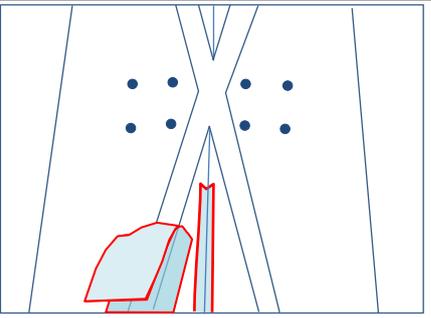
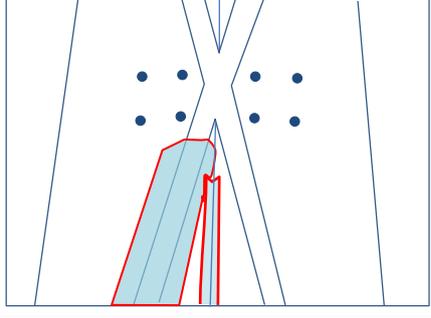
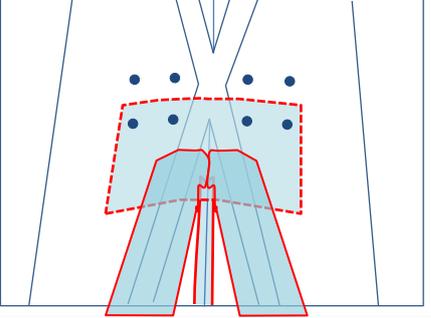


図 5.4.1 水勾配が必要となる谷部



写真 5.4.1 水勾配用の面木

表 5.3.5 推奨される頂部の防水施工手順

	
<p>① 棟部帯シートは頂部より 1m 程度溶着せずに残す 水勾配を考慮し、谷部→棟部の順での施工</p>	<p>② 谷部帯シートを施工</p>
	
<p>③ 山部帯シートを施工 谷部、山部帯シートは突き付け施工で可</p>	<p>④ 頂部シートを施工 基材なしシート(570×820mm 程度の長方形)にて帯シートと治具取り付け孔を覆うように施工</p>

5.4.2 防水施工前の雨対策

防水の下地となる CLT の表面は、防水施工が完了するまでに降雨により水濡れすることが想定され、冬場は表面に霜が降りる可能性もある。下地がコンクリートの場合には、ガスバーナー等を用いて強制的に乾燥させることができるが、木材は可燃物であることから、このような強制的な乾燥はできず、溜まっている水を雑巾等で拭き取っても、防水の品質に影響がないようにするためには、好天に期待し、‘待つ’必要が生じる。また谷部には水が流れ込みやすいため、CLT の木口を湿らせてしまい、木材深く水が浸透し、防水の品質を損なう可能性も否定できない。

対策方法として、ブルーシートによる養生方法がある。今回の試験体では、地組の状況で 10m×10m のブルーシート 2 枚にて養生を実施（写真 5.4.2）し、試験の施工期間中、幾度か雨天にもなったが、その効果が認められた。ただし CLT 接合部の山部、谷部の加工により、凹凸があるため、上部の歩行時には足をとられないように注意する必要がある。また冬場は、表面が氷結することもあり、ブルーシート上は、かなり滑りやすい状況となる。

別の対策方法として、遮水効果が期待されるプライマーを塗布する方法がある。今



写真 5.4.2 ブルーシートによる養生

回の実験では、CLT を敷設した直後に、y 方向の片側半面に写真 5.4.3 のプライマーをローラーにて塗布（写真 5.4.4）し、塗布していない片側半面部分との比較を行っている。塗布部は雨水をはじいている一方、未塗布部は雨水を吸収している状況（写真 5.4.5）が確認され、期待する効果が得られていることがわかる。このプライマーの遮水性能については今後評価を行っていくとともに、異なる樹種、例えば樹脂成分の影響に配慮が必要となるヒノキ等についても、接着性能に影響しないか等、調査が必要である。

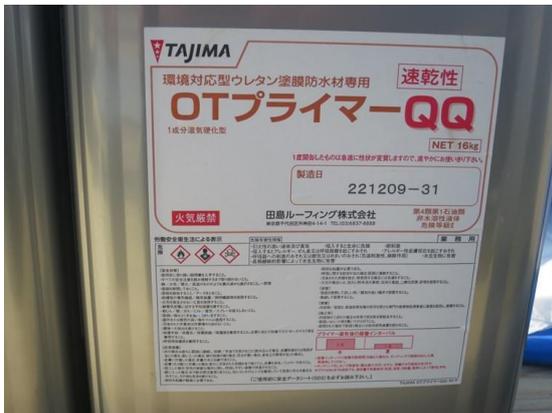


写真 5.4.3 塗布した防水プライマー



写真 5.4.4 防水プライマーの塗布



塗布部

未塗布部

写真 5.4.5 防水プライマー処理の効果の比較

5.4.3 防火認定の取得に関して

都市計画区域内の建築物については、建築基準法第 22 条により、飛び火に対する要求条件を満たさなければいけない。現状塩ビシート防水は、急勾配（30 度以上）の下地への施工は想定していなかったことから、この飛び火に対する大臣認定の適用範囲は 30 度までとなっている。検討中の折版構造では 30 度以上の部分が大部分となることより、今後 30~70 度においても適用可能な防火認定の取得を検討していく必要がある。

また角度が 70 度以上となった場合には、壁と判断されるため、建設地の条件によっては建築基準法第 23 条により、準防火構造の要求条件を満たす必要がある。

5.5 直接足場の検討

防水工事は高所作業となり、また折版構造の屋根では形状が複雑で屋根勾配が 30 度を超える場所もあり、安全に作業を進めるためには足場が必要になる。しかし足場は「5.1.1 防水施工方法の検討」でも述べたように、防水施工の手順が煩雑になることから、施工効率が大幅に低下する要因にもなる。そこで地組の時点で谷折り部および頂部を除き、防水施工を予め行う選択を行った。

防水施工を屋根が組みあがった後、実施する場合には、全面的に単管本足場を架ける必要があるが、谷折り部、頂部だけの防水施工であれば、谷折り部にそって足場を架けるだけでよく、直接仮設工事においてもハングアップによるコスト削減効果が見込める。本事業では、鳶工と事前打ち合わせを行った計画に基づき足場を実際に架け、防水施工の容易さを検討し、不備な点を確認後、足場を払し再度、足場を架けることによって、安全に効率よく防水施工ができる図 5.5.1 のような直接仮設計画案を見出した。

屋根谷部の勾配が 45 度の部分については、図 5.5.1 のように階段状の足場とし、作業場となるステージの間隔 H は、防水施工は膝を屋根面についての作業となるため、1m 程度（写真 5.5.2 参照）が望ましい。勾配が 70 度程度になった場合には、屋根面に膝をついての作業にはならないため、 H 寸法は高くできると推察される。一方、勾配が 22.5 度程度であれば歩行および防水施工も可能であり、足場がない方が防水施工の作業効率は高くなる。しかし足を滑らせた場合や、転倒した場合には人身事故に繋がるため、親綱を張って安全性を確保する必要がある。

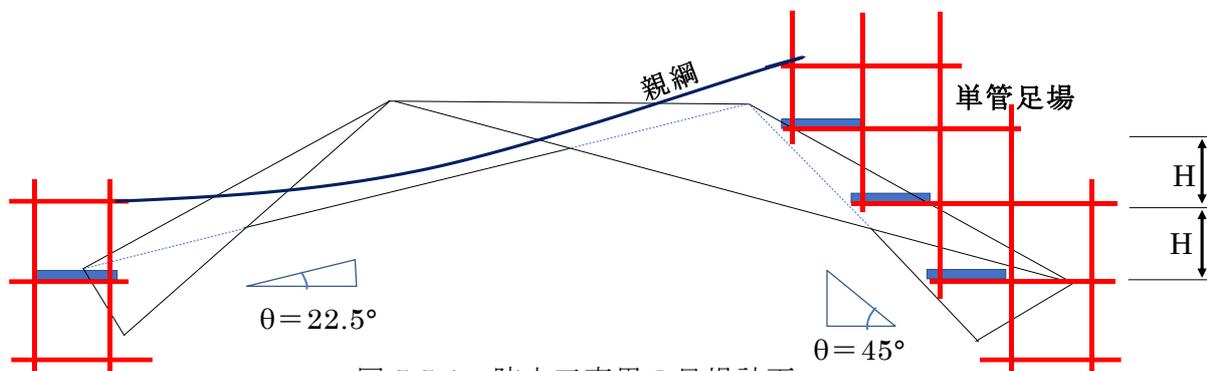


図 5.5.1 防水工事に用いる足場計画

写真 5.1.1～写真 5.1.4 に単管本足場の写真を示す。



写真 5.5.1 防水工事用の単管本足場



写真 5.5.2 防水工事用の単管本足場
作業高さの確認(1,060mm)



写真 5.5.3 防水工事用の単管本足場

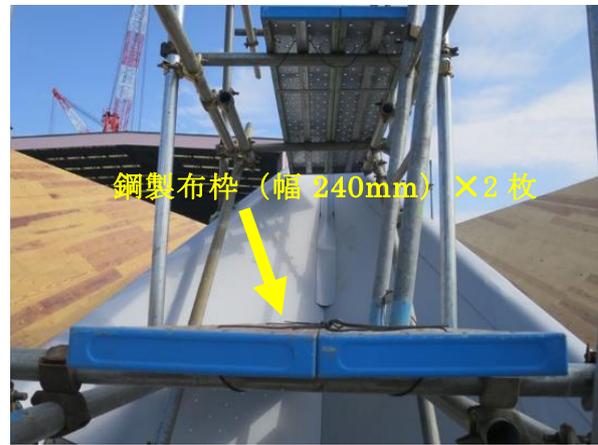


写真 5.5.4 防水工事用の単管本足場

尚、足場は防水シートが貼られている状況で架けなければならないため、写真 5.5.5、写真 5.5.6 のようにジャッキの下に養生用シートを添えて、防水層が破損しないよう対策を講じなければいけない。



写真 5.5.5 単管本足場の足元の養生



写真 5.5.6 単管本足場の足元の養生

5.6 ハングアップ工法によるコストパフォーマンスの考察

5.6.1 防水施工

本事業で実施した試験では、平面部 55 m²、山部 25m、谷部 12m を 1 人工にて 3 日間で行い、請求金額は、工賃+諸経費+消費税で 15 万円程度（出張・交通費除く）であった。しかし、谷部は一部の施工にとどまったため、平面+棟部で 62.5m² を 2 日間（10 万円）とみなすと、m² 当たりの工賃は約 1,600 円/m² となる。これは通常の実現場と比較すると、若干高めとはなったが、大きくかけ離れていないため妥当であると判断した。実現場を実施する際には複数名での施工となり、かつ慣れもあることで施工効率の向上は見込まれる。

一方で組み上げ後に防水施工を実施した場合について防水工事店と協議したところ、急勾配での施工となること、足場を避けながら実施するため、大まかに施工時間は約 2.5 倍程度になると見込まれた。工賃も 2.5 倍の 4,000 円/m² になるため、一般的な塩ビシート施工工賃より大幅なコストアップとなり、コスト面で大きなデメリットになる。また急勾配下地への接着塗布は定量塗布が困難となるため施工精度の低下も発生する懸念がある。

5.6.2 足場

本事業では、実際に防水施工を行った図 5.6.1 の ■ 部と、リフトダウンにあたり、図 4.6.9 の金物 D の取付のために必要となった ■ 部に単管本足場を架けた。■ 部の足場は検討後、架け替えを実施したが、屋根面に沿った 6m の長さに対し、鳶工 3 人で 15:00~16:30 で足場が架けられており、歩掛かりは 0.75 hour/m となった。

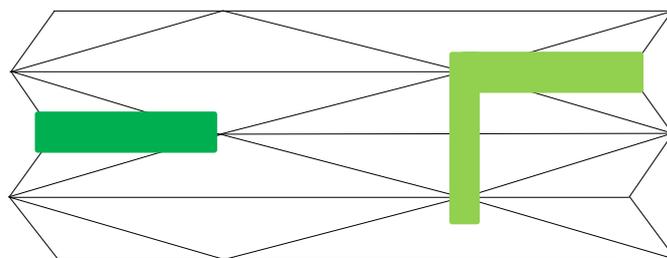


図 5.6.1 本事業で架設した単管本足場の位置

防水工事に足場が必要な理由として、高所作業であること以外の、折版構造独自の理由を下記に示す（図 5.6.2 参照）。

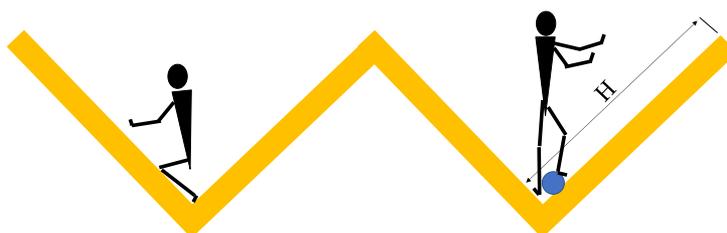


図 5.6.2 折版構造屋根の防水施工における課題

- ① 施工場所には縦断方向と横断方向の 2 方向に勾配（本事業での試験体では 45°）があり、作業性が悪い。
- ② 図 5.6.2 の H 寸法（本事業では 2.2m）が 1.5m 以上になると、CLT 表面に手が届かない部分が多くなる。
- ③ ロールで搬入される 33kg/巻の防水シート（写真 4.8.13 参照）の固定、およびコントロールが難しい。

そのため防水施工を建て方後に行う場合には、図 5.6.3 のような単管パイプによる本足場が、屋根面全面に必要になる。しかしこのような足場を架けた場合には、5.1.1 で述べたように、足場位置の部分的盛り換えを伴うため、作業効率は大幅に低下することになる。

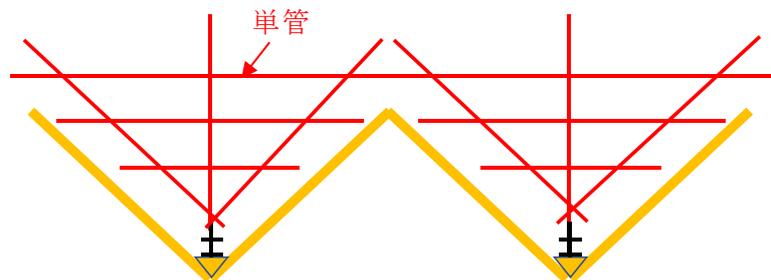


図 5.6.3 折版構造屋根の防水施工のための単管本足場
（建て方後の防水施工）

一方、建て方を行う前に、谷折り部と頂部以外の防水施工を行った場合、次のようなメリットが生まれる。

- ① 足場は図 5.6.4 の **ピンク線** の位置に帯状に架ければ防水施工は可能
- ② 防水施工時に足場の盛り替え作業は不要（鳶工の相番作業が不要）
- ③ 防水シートを事前に帯状に切断して材料の小運搬をおこなえば、重量のある防水シートのロールを持って上がる必要はない。

上記①～③の理由から、本事業で実施した、谷折り部と頂部以外の防水施工を行った後、ハングアップ工法により躯体を立ち上げる手法を採用すれば、足場にかかる材料および工賃は、概ね 1/3 程度までコストダウンできると期待される。

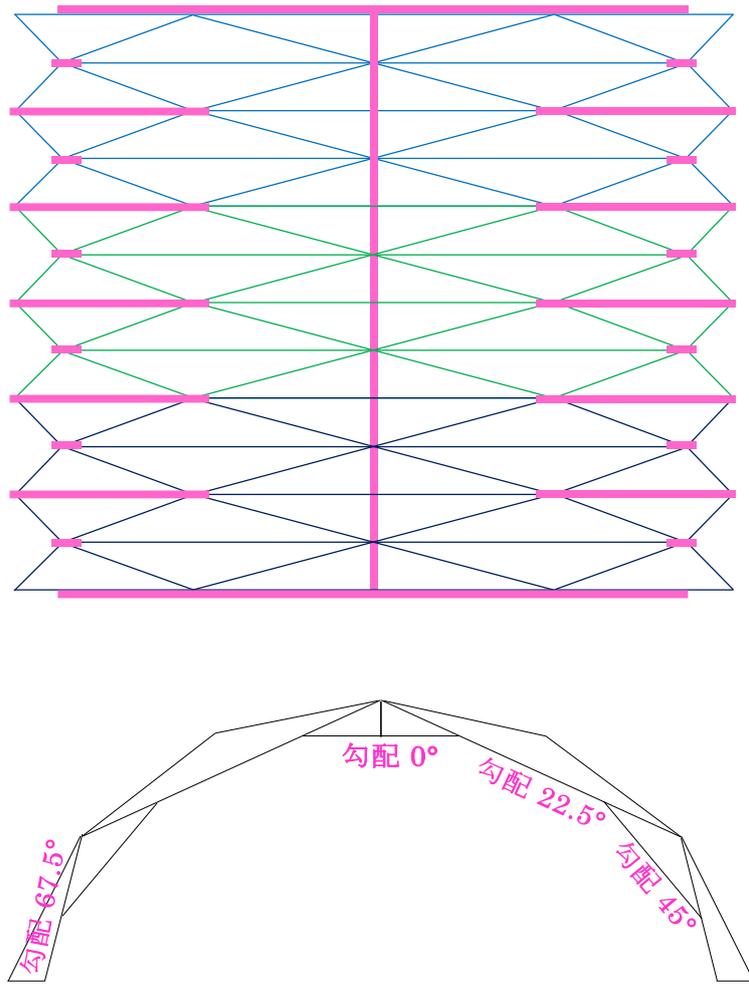


図 5.6.4 折版構造屋根の防水施工のための単管本足場仮設位置
(建て方前に防水施工した場合)

(備考) 防水施工の実施要項概略

- ・実施時期

2023年 2/8～9 防水施工① 地組状態での一般部、山部施工

2/17 防水施工② 組み上げ後の谷部、頂部、吊り具固定部補修

- ・防水種別

塩ビシート防水 (ビュートップ防水 密着仕様 田島ルーフィング株式会社)

- ・面積

平面部 55 m²、山部 25m、谷部 12m

- ・施工者

岸防水工業有限公司

第6章 ツーウェイ・床スラブの設計

6.1 6層6プライ CLT の曲げ試験

本項では、実大試験に用いた試験体から切り出した継手に GIR 接合を有する CLT の面外曲げ試験を行ったので、その結果を報告する。

6.1.1 試験体概要

本報で用いた面外曲げ試験の試験体リストを表 6.1.1 に示し、図 6.1.1 に試験体の切り出し寸法、図 6.1.2 に接合部の詳細を示す。試験体は、実大試験体から切り出し、母材は、厚さ 180mm のヒノキの CLT (S90-6-6) である。試験体は幅 728mm、長さ 4200mm に切り出した。接合金物には全ねじボルト M20 (強度規格: 4.8) を使用し、6層6プライの上端から 2 層目に繊維直交方向、5 層目に繊維平行方向となるように埋め込み、埋め込み長さは 2 層目で 400mm、5 層目で 500mm とした。

表 6.1.1 試験体リスト

試験体名	全ねじボルトの仕様		CLTの仕様			試験体数
	径 (mm)	埋め込み長さ (mm)	樹種	規格	幅 (mm)	
B22-GIR-6ply	径20 (M20)	上 L=400 (2層) 下 L=500 (5層)	ヒノキ	S-90-6-6	728	6

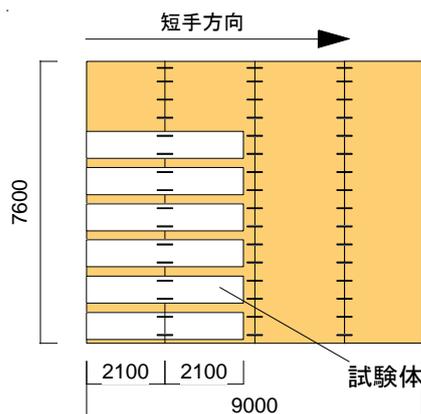


図 6.1.1 実大床試験からの切り出し寸法

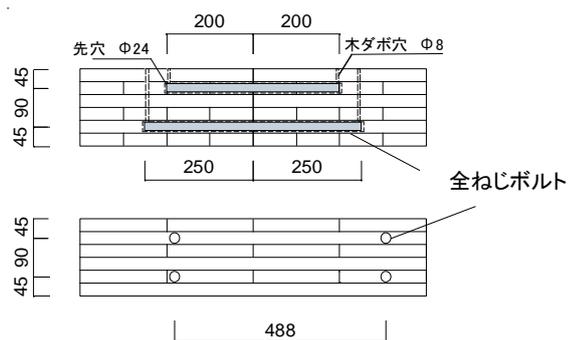


図 6.1.2 GIR 接合試験体接合部

6.1.2 試験方法

図 6.1.3 に試験の加力スパン図、図 6.1.4 に加力方向、写真 6.1.1 に実験の様子を示す。荷重には 2000kN 万能試験機（島津製作所：UH-2000kNC）を使用し、3 等分 4 点曲げ試験を行った。床スラブの上面からの加力と、下面からの加力を想定し、上面のラミナがスパンに対して繊維直交方向の場合（以下、負加力とする）で、20kN まで荷重し初期剛性を計測し、最終的な破壊は上面のラミナがスパンに対して繊維並行方向の場合（以下、負加力とする）で鉛直荷重により行った。試験の加力速度は荷重速度 4mm/min の単調荷重とし、試験体の変形は、支持点間中央の両側面に設置した変位計により中央たわみを測定した。

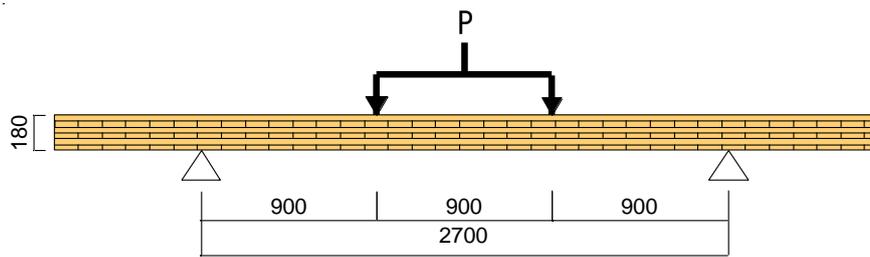


図 6.1.3 加力スパン

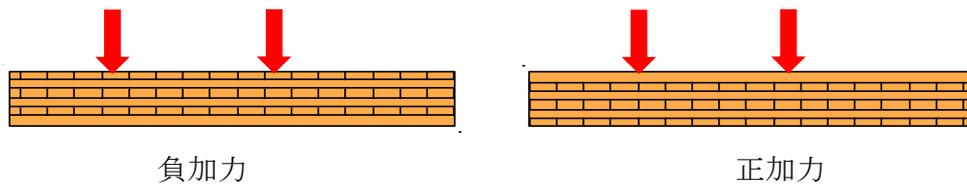


図 6.1.4 加力方向

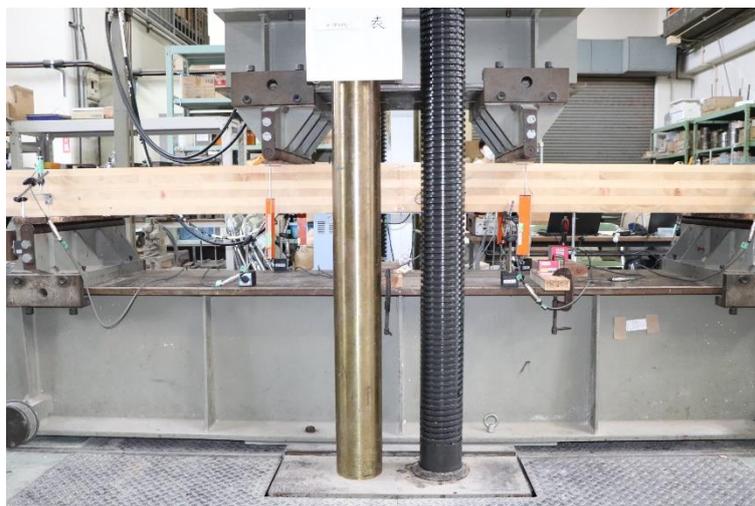


写真 6.1.1 実験写真

6.1.3 試験結果

6.1.3.1 荷重変位関係

図 6.1.5 に荷重-中央たわみの関係を示す。中央変位は、中央鉛直変位から支持点の変位を引いた値とした。GIR 接合の試験体は、全ての試験体で引張側金物の引き抜け破壊により、荷重が急激に低下した。

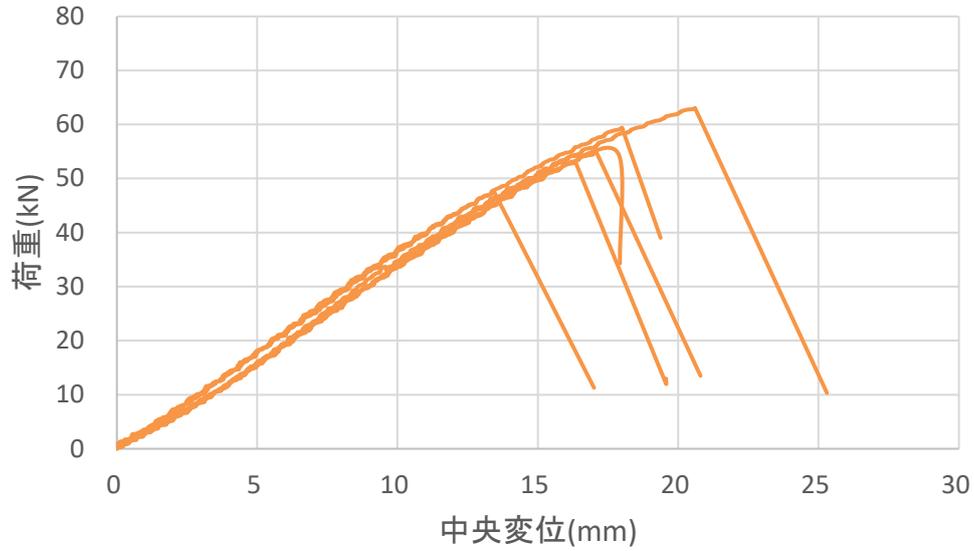


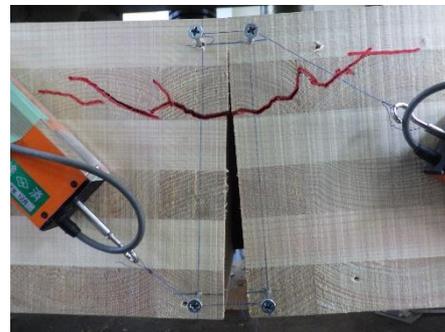
図 6.1.5 荷重－中央たわみ関係

6.1.3.2 破壊性状

実験の破壊性状を写真 6.1.2 に示す。GIR 接合の試験体は、全ての試験体において接合金物と接着層周囲の母材が一緒になって引き抜ける引き抜けせん断破壊が起こった。一部の試験体では、2 層目弱軸層の破壊がみられた。



引き抜けせん断破壊



弱軸層の破壊

写真 6.1.2 破壊性状

6.1.3.3 強度特性

図 6.1.6 に各強度特性値を示す。GIR 接合の試験体は明確な降伏挙動がみられなかったため、初期剛性は、荷重-変位関係における 0.1Pmax と 0.4Pmax の点を結んだ直線の傾きとした。最大耐力に関して、GIR 接合の試験体の平均値は 55.42kN を示した。初期剛性に関して、GIR 接合の試験体は、正加力が負加力の 1.3 倍高い値となり、引張側金物の埋め込み長さが 50mm 長いことが原因と考えられる。

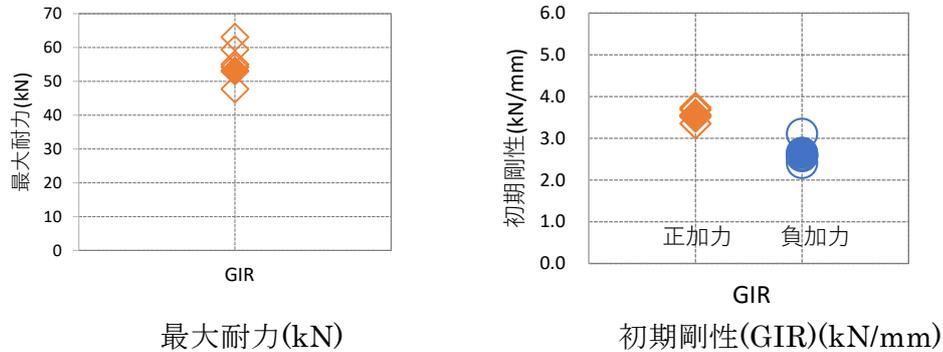


図 6.1.6 強度特性

6.1.3.4 試験結果まとめ

表 6.1.2 に試験結果を示す。各試験体の最大耐力、初期剛性に加え、短期許容耐力を算出した。短期基準耐力は、降伏耐力の平均値及び最大耐力の 2/3 の値に、それぞれのばらつき係数を乗じた値のうち、小さい方の値とした。

表 6.1.2 GIR 接合強度特性 (0内はばらつき係数)

試験体名	最大耐力 (kN)	初期剛性(kN/mm)		2/3Pmax (kN)	短期基準耐力 (kN)
		正加力	負加力		
1	54.24	3.52	3.11	36.16	
2	55.02	3.55	2.41	36.68	
3	59.44	3.69	2.57	39.63	
4	63.08	3.55	2.65	42.05	
5	47.72	3.73	2.59	31.81	
6	53.02	3.35	2.61	35.35	
平均	55.42	3.57	2.66	36.95	

6.1.3.5 接合効率

表 6.1.3、6.1.4 にそれぞれ曲げ剛性及び曲げ耐力に関する接合効率の値を示す。曲げ剛性の基準は JAS¹⁾ から得たラミナのヤング係数にそれぞれの試験体の断面二次モーメントを乗じた値とした。曲げ耐力の設計値算出に当たり、曲げ強度 f_b は、JAS^{6.1.1} から得た。なお、6 層 6 プライについては記述がなかったため、5 層 5 プライ強軸方向の曲げ強度の値を採用し、それぞれの試験体のみかけの断面係数を乗じた値とした。実験値による曲げ耐力及び曲げ剛性は、既往の実験^{6.1.2} によって得られた最大耐力の平均値 (136.26kN) をそれぞれの試験体の幅の比率に補正し、算出した。

表 6.1.3 曲げ剛性に関する接合効率

GIR接合試験体の 実験値(N・mm ²)	曲げ剛性基準値(N・mm ²)		接合効率(%)
	1.14×10 ¹²	実験値	
理論値		1.59×10 ¹²	

表 6.1.4 曲げ耐力に関する接合効率

GIR接合試験体の 実験値(kN・m)	曲げ耐力基準値(kN・m)		接合効率(%)
	24.94	実験値	
理論値		52.68	

6.1.4 推定値との比較

6.1.4.1 中立軸の位置

中立軸の位置は、圧縮縁につけた変位計のめり込み量と、引張縁につけた変位計の開き量の値を直線をつなぎ、0 となる位置をみかけの中立軸 λ (圧縮縁からの距離) として算出した (図 6.1.7 参照)。

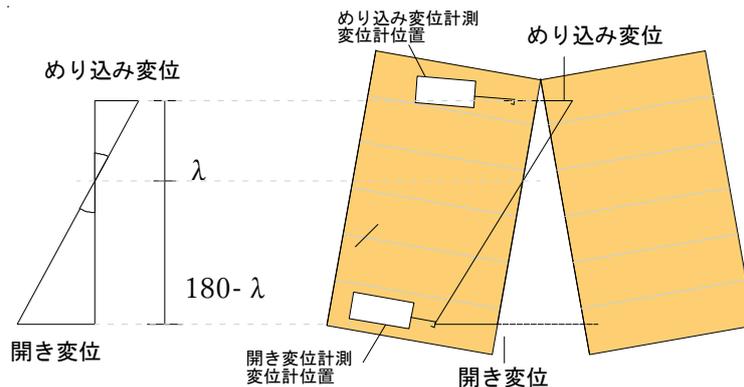


図 6.1.7 中立軸実験値計算方法

6.1.4.2 推定値の導出方法

GIR 接合の曲げ試験の推定には既往の中立軸及び曲げ耐力の推定手法^{6.1.3} を用いた。CLT の圧縮力は、1 層目が負担すると仮定し、木材圧縮強度は木材工業ハンドブック^{6.1.4} から得たヒノキの繊維方向の圧縮耐力の平均値とした。また、求めた最大曲げ耐力から回転剛性の推定を行った。

表 6.1.5 推定式中の諸定数

名称	記号・式	数値	単位
木材の圧縮強度(ヒノキ, 繊維方向)	f_c	40	N/mm ²
圧縮側木材ヤング係数(JAS基準値)	E_w	9	kN/mm ²
引張側金物の有効表面積	$A_t (= \Phi \times \pi \times l)$	11850	mm ²
圧縮側金物の有効表面積	$A_t' (= \Phi' \times \pi \times l')$	15080	mm ²
木材の引き抜けせん断強度	f_v	6.3	MPa
引張側金物埋込み長さ	l	250	mm
圧縮側金物埋込み長さ	l'	200	mm
引張側接合金物先穴の直径	Φ	24	mm
圧縮側接合金物先穴の直径	Φ'	24	mm
引張側金物本数	a	2	本
圧縮側金物本数	i	2	本
Py時の接合金物の引抜け量	S	1	mm
CLT厚	D	180	mm
CLT材幅	b	728	mm

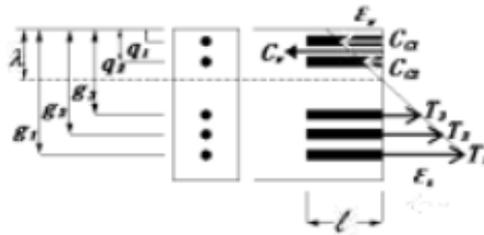


図 6.1.8 推定手法における断面内の仮定

- ・ 中立軸及び最大耐力

$$\lambda = \frac{l}{bSE_w} \left[-A_t f_t \left(\sum_{a=1}^n n_a + \sum_{a=1}^n m_a \right) + \sqrt{\left\{ -A_t f_t \left(\sum_{a=1}^n n_a + \sum_{a=1}^n m_a \right) \right\}^2 + \frac{2bSE_w}{l} \left\{ A_t f_t \left(\sum_{a=1}^n n_a q_a + \sum_{a=1}^n m_a g_a \right) \right\}} \right]$$

$$M_{ucal} = \frac{bSE_w}{3l(g_1 - \lambda)} \lambda^3 + \frac{A_t f_t}{g_1 - \lambda} \sum_{a=1}^n n_a (\lambda - q_a)^2 + \frac{A_t f_t}{g_1 - \lambda} \sum_{a=1}^n m_a (g_a - \lambda)^2$$

- b : 木材の幅 (mm)
- E_w : 木材のヤング係数 (N/mm²)
- S : 降伏耐力時の接合金物の引抜け量 (mm)
- $A_t f_t$: 接合金物1本あたりの降伏耐力 (kN)
- k : 接合金物1本あたりの引張剛性 (kN/mm)
- f_c : 木材の圧縮強度 (N/mm²)
- g_1 : 圧縮縁から引張側最外端の接合金物までの距離 (mm)
- g_a : 圧縮縁から引張側 n 段目の接合金物までの距離の和 (mm)
- q_a : 圧縮縁から圧縮側 n 段目の接合金物までの距離の和 (mm)
- n_a : 引張側に配置された接合金物の本数 (本)
- m_a : 圧縮側に配置された接合金物の本数 (本)
- l : 接合金物の埋込み長さ (mm)

・ 回転剛性

$$\theta = \tan^{-1} \frac{s}{h-\lambda} \quad K = \frac{M}{\theta}$$

M : 接合部にはたらく曲げモーメント
 θ : 接合部の回転角(rad)
 S : P_y 時の接合金物の引抜け量(mm)
 h : 有効せい(mm)

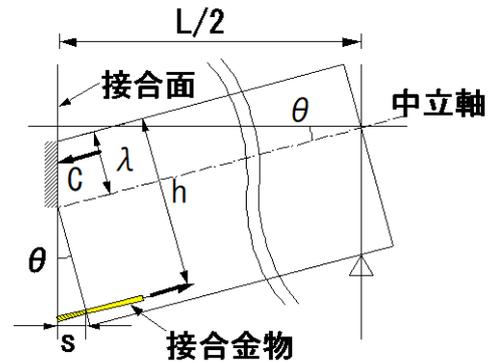


図 6.1.9 接合部回転図

6.1.4.3 実験値と推定値の比較

中立軸に関して、実験値と推定値を比較すると、推定値が少し圧縮側となったが概ね一致した。回転剛性に関して、実験値にばらつきがあったが、実験平均値との誤差が25%以内となり、安全側を推定した。最大曲げ耐力については、全ての試験体との誤差が25%以内となり、推定値と実験平均値がよく一致した。

表 6.1.6 推定値と実験平均値の比較

GIR	推定値	実験平均値
圧縮縁-中立軸距離(mm)	39.01	45.39
最大曲げ耐力(kN・m)	24.46	24.94
回転剛性($\times 10^3$ kN・m/rad)	2.35	2.80

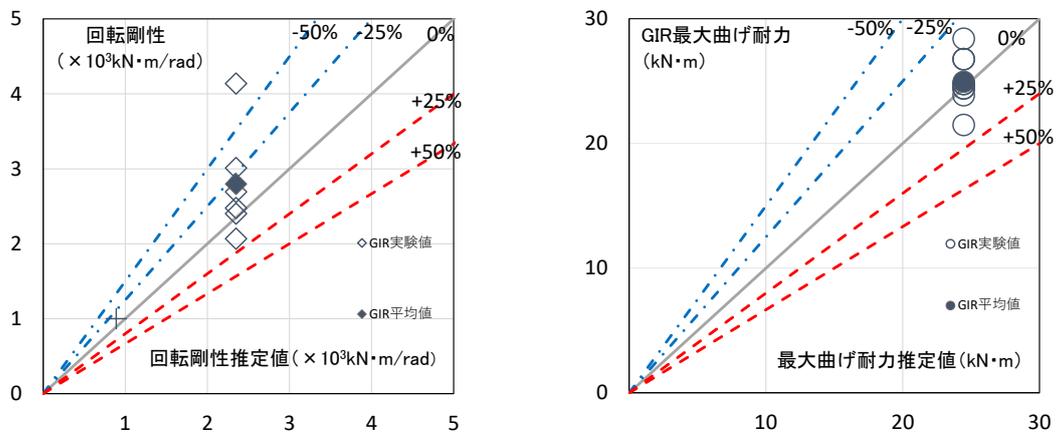


図 6.1.10 推定値と実験値の比較

6.1.5 まとめ

本事業では、継手接合部を有する CLT の床スラブの面外曲げ性能を明らかにすることを目的とし、面外曲げ試験を行った。試験結果をもとに実験値と推定値の比較を行った結果、中立軸及び、回転剛性に関して、概ね推定することができた。曲げ耐力については、全ての試験体との誤差が 25%以内となり、推定値と実験平均値がよく一致した。

参考文献

6.1.1) 農林水産省：平成 25 年 12 月 20 日農林水産省告示第 3079 号,2019

6.1.2) RICHARD YIP JE TOO 他：継手接合部を有する CLT の面外曲げ性能に関する研究（その 2）全ねじボルトを接合具とした GIR 接合工法の場合，日本建築学会学術講演梗概集,2021 号,pp.111-112,2021,7

6.1.3) 植月和輝他：中高層大規模木造に用いる柱脚接合システムの開発（その 3）回転剛性及び降伏耐力に関する推定手法の概要,日本建築学会学術講演梗概集,2018 号,pp.411-412,2018,7

6.1.4) 木材工業ハンドブック（改訂 4 版）：森林総合研究所,p.194,2004

6.2. GIR 接合部を有する CLT 床版の静的たわみに関する解析的検討

本節では、GIR 接合部(以下、接合部)を有する CLT 床版の静的たわみの実験結果を解析的に追跡するために、格子梁モデルを用いて解析を行った。また、CLT マニュアル 6.2.1)の知見を活かした格子梁モデルを作成し、四辺単純支持におけるモデル間の解析精度を比較した。

6.2.1. 格子梁モデルの諸元に関する仮定の整理

腰原ら 6.2.2)は図 6.2.1 のように一枚の CLT 版を格子梁に置換して面外変形についての骨組解析をしている。シェルモデルやソリッドモデルでは計算が煩雑となるため、本節では比較的計算が簡易である格子梁モデルを解析に用いる。本項では、格子梁モデルの諸元について整理する。諸元の設定概要を表 6.2.1 に示す。

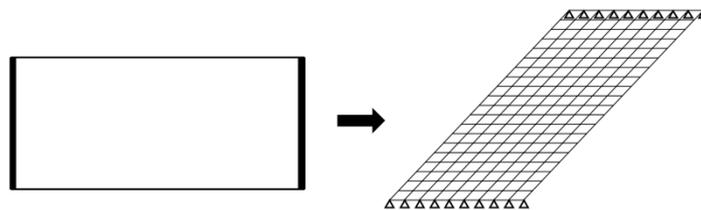


図 6.2.1 モデル化の概要 6.2.2)

表 6.2.1 諸元の設定概要

項目	設定	備考
梁要素の剛性	曲げ剛性: $E \cdot I_{\text{dom}}$ or $E_p \cdot I_{\text{dom}}$ 、 せん断剛性: $G_{XZ} \cdot A_{SZ}$ 、 ねじり剛性: $G \cdot I_{XX, \text{dom}}$	<u>dom</u> : 梁幅=支配幅
ヤング係数E	実験値δから逆算した値	梁の曲げ剛性から逆算
等価なヤング係数E _p	Eとνを用いた計算値	板の曲げ剛性から置換
CLTのポアソン比ν	$\nu = \nu_{LT} = 0.5$	文献 ^{6.2.5)} の概数
弾性材料のせん断弾性係数G	EとνまたはE _p とνを用いた計算値	$G = E / \{2(1 + \nu)\}$ or $G = E_p / \{2(1 + \nu)\}$
積層方向のせん断弾性係数G _{XZ}	計算値	重ね梁の式 ^{6.2.1)}
せん断断面積A _{SZ}	せん断剛性 $G_{XZ} \cdot A_{SZ}$ がモデルに正しく入力されるように係数αを乗じる	$\alpha = G_{XZ} / G$
材軸に関する断面二次モーメントI _{XX}	サンブナンねじり定数J	$G \cdot J$: ねじり剛性
梁要素の接合有方向ピッチ	300 mm	CLTマニュアル ^{6.2.1)} に示されている適用範囲
梁要素の接合無方向ピッチ	120~160 mm	接合部に起因するせん断応力の評価 ^{6.2.8)}

6.2.1.1 CLT の材料及び断面性能

CLT マニュアル^{6.2.1)}より、曲げ・積層方向における6層6プライのせん断弾性係数 G_{XZ} は式(6.2.1)で表される。

$$G_{XZ} = \frac{a^2}{\frac{h}{2G_1b} + \sum_{i=2}^5 \frac{h}{G_i b} + \frac{h}{2G_6b}} / (bH) = \frac{2a^2}{5hH} \left(\frac{1}{G_{\parallel}} + \frac{1}{G_{\perp}} \right)^{-1} \quad \text{式 6.2.1}$$

ここに、 a : 最外層ラミナの重心間距離^{6.2.3)}[mm], h : ラミナの背[mm], G_i : i 層ラミナのせん断弾性係数[N/mm²], b : ラミナの幅[mm], H : CLT の背[mm]

また、 G_i には CLT Handbook で提案されている繊維平行方向のヤング係数 E_{\parallel} との係数比を用いる^{6.2.1)}。つまり、式(6.2.2)で示すように、ラミナの繊維平行方向のせん断弾性係数 G_{\parallel} は E_{\parallel} の 1/16、ラミナの繊維直交方向のせん断弾性係数 G_{\perp} は E_{\parallel} の 1/160 として G_{XZ} の計算に用いる。

$$G_{\perp} = \frac{1}{10} \cdot G_{\parallel} = \frac{1}{10} \cdot \frac{E_{\parallel}}{16} = \frac{E_{\parallel}}{160} \quad \text{式 6.2.2}$$

ヤング係数 E_{bs} は曲げ剛性測定試験^{6.2.4)}で計測したたわみ δ から式(6.2.3)で逆算したものとす。 E_{bs} の算定においては、 δ を曲げ変形 δ_b とせん断変形 δ_s の和である考える。この E_{bs} を二辺単純支持における格子梁モデルのヤング係数として用いる。

$$E_{bs} = \frac{1}{I} \cdot (EI)_{bs} = \frac{12}{BH^3} \cdot \frac{Pl^3}{48\delta_b} = \frac{Pl^3}{4BH^3} \cdot (\delta - \delta_s)^{-1} = \frac{Pl^3}{4BH^3} \cdot \left(\delta - \frac{Pl}{4G_{XZ}A_{SZ}} \right)^{-1} \quad \text{式 6.2.3}$$

ここに、 P : 荷重[N], l : スパン[mm], I : CLT の断面二次モーメント[mm⁴], $(EI)_{bs}$: δ と δ_s の差分から逆算される梁の曲げ剛性[N・mm²], B : CLT の幅[mm], A_{SZ} : 鉛直方向のせん断力に抵抗する有効断面積[mm²]

・四辺単純支持における等価なヤング係数 E_p は式(6.2.4)における板の曲げ剛性 D から考えられるものとする。

$$D = \frac{E_p H^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{E_p}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{I_{dom}}{B_{dom}} = E \frac{I_{dom}}{B_{dom}} \quad \text{式 6.2.4}$$

$$\therefore E_p = (1-\nu^2)E \quad \text{式 6.2.5}$$

ここに、 ν : CLT のポアソン比, I_{dom} : 支配幅と H から計算される断面二次モーメント[mm⁴], B_{dom} : 支配幅[mm]

版を分割して支配幅 B_{dom} を有する梁に置換するため、格子梁の等価な曲げ剛性 $E_p I_{dom}/B_{dom}$ を単位幅当たりの梁の曲げ剛性 $E I_{dom}/B_{dom}$ に $(1-\nu^2)$ を乗じたものであると考える。よって、 E_p を式(6.2.5)で定義し、四辺単純支持における格子梁モデルのヤング係数として用いる。算定ここで用いるポアソン比は文献における概数である0.5とする^{6.2.5)}。

ポアソン比 ν は解析上0.5未満として入力する必要があったため^{6.2.6)}、0.49としている。

解析ソフトの都合上、梁要素に G_{XZ} を直接入力することができなかった。そのため、弾性材料として計算される G に対する G_{XZ} の比を低減係数 α として式(6.2.6), (6.2.7)で求め、それを A_{SZ} に乗じることで、格子梁モデルのせん断剛性を $G_{XZ}A_{SZ}$ として考えている^{6.2.7)}。

$$\alpha = \frac{G_{XZ}}{G} = G_{XZ} \cdot \frac{2(1+\nu)}{E} \quad \text{式 6.2.6}$$

$$\alpha = \frac{G_{XZ}}{G} = G_{XZ} \cdot \frac{2(1+\nu)}{E_p} \quad \text{式 6.2.7}$$

・幅方向のせん断弾性係数 G_{XY} や幅方向のヤング係数 E_Z については、面内方向に外力が加わっていないため、水平方向のせん断力に抵抗する有効断面積 A_{SY} や鉛直方向軸に関する断面二次モーメント I_{ZZ} を低減させてもモデルの面外変形に寄与しないことを確認している。また、材軸に関する断面二次モーメント I_{XX} については、静的試験において荷重偏心が少ない載荷計画としているため、ねじり成分の変形は少ないものと見做し、低減させていない。

6.2.1.2 CLT 床版のモデル化

CLT 床版全体を格子梁に置換して解析モデルを作成するが、図 6.2.2 のように厚さ方向においては一本の梁要素で置換する。

接合部及び面タッチ部を考慮するため、図 6.2.3 のように版間の節点内側に材端ばねを付与する。面タッチ部は図 6.2.2 のように、接合部間にある梁端部に付与するものとする。尚、図 6.2.3 に示す()中の自由度は面外変形に関与しない自由度であることを示している。接合部及び面タッチ部に共通して、接合有方向(X軸)にずれることはないと考え、 F_x の剛性値は無限大とする。また、摩擦は効かないものと仮定するため、 F_y の剛性値は0とする。 M_z についてはラミナの面圧定数に起因する圧縮力で抵抗するものとするが、今回は外力が面内方向(X軸またはY軸)に作用しないため、剛性値は0と見做す。

接合部について、ねじりモーメントの影響で接着剤の層がずれることは GIR の引張力の効き方に矛盾すると考えるため、 M_x の剛性値は無限大とする。CLT の支圧力と GIR の引張力が釣り合うと考えるため、 M_y の剛性値は計算値とする^{6.2.9-6.2.12}。圧縮側二層目の全ねじボルトは鉛直方向のせん断力に抵抗するように挿入しているため、 E_z の剛性値は弾性床上の梁のたわみに関して成り立つ微分方程式から導かれる基準剛性係数としての計算値とする^{6.2.13}。以下に回転剛性の算定式を示す。

6.2.1.3 回転剛性

前節に示した要素試験の評価方法とは異なり、上から二層目の GIR の圧縮力は考慮していない。また、CLT の圧縮力を計算する際に参照する材幅は接合部のピッチ(488 mm)と同等としており、GIR の本数は単位接合部当たり引張側の一本とする。さらに、算出している回転剛性は GIR の最大耐力時の割線剛性ではなく、GIR の降伏耐力時の初期剛性である。

CLT の厚さ方向において応力度分布が直線状に推移する場合、つまり平行層と直交層のヤング係数が平均化された場合におけるヤング係数比を想定した場合において、田中ら^{6.2.9}の曲げ耐力の算定法を用いて接合部の回転剛性 K_θ を算定する。回転剛性の諸元表を表 6.2.2 に示す。GIR の初期引抜き剛性 K は井上ら^{6.2.10}によって式(6.2.8)のように示された。

$$K = a \cdot \frac{2}{3} P_v \quad \text{式 6.2.8}$$

$$\frac{2}{3} P_v = \frac{2}{3} A_t \cdot f_v \cdot R = K \cdot \frac{1}{a} \quad \text{式, 6.2.9}$$

ここに、 $\frac{2}{3}P_v$: 降伏引抜きせん断耐力[N], a : 調整係数[1/mm], A_t : 接合金物の有効表面積[mm²], f_v : 木材の引抜きせん断強度[N/mm²], R : 低減係数

フックの法則より、比例限以下における荷重と変位は比例関係にあるため、式(6.2.9)に示す a^{-1} を降伏変位とする^{6.2.11}。また、仮定となる接合金物の片側引抜き量 s と回転角 θ の式は竹内ら¹²⁾によって式(6.2.10)のように示された。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{s}{h - \lambda} \quad \text{式 6.2.10}$$

ここに、 h : 圧縮縁から接合金物までの距離[mm], λ : 圧縮縁から中立軸までの距離[mm] 式(6.2.9), (6.2.10)を用いて、 K_θ は式(6.2.18)で表される。

$$\sigma_c = -E_L \varepsilon_c \quad \text{式 6.2.11}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\lambda}{h - \lambda} \cdot \varepsilon_t = \frac{\lambda}{(h - \lambda)a l} \quad \text{式 6.2.12}$$

$$C = -\frac{p\lambda}{2} \cdot \sigma_c = \frac{pE_L \lambda^2}{2al(h - \lambda)} \quad \text{式 6.2.13}$$

$$T = \frac{2}{3} A_t \cdot f_v \cdot R \quad \text{式 6.2.14}$$

$C = T$ より

$$0 = pE_L \lambda^2 + 2alT\lambda - 2alTh \quad \text{式 6.2.15}$$

$$M = C \cdot \frac{2}{3} \lambda + T \cdot (h - \lambda) = T \left(h - \frac{1}{3} \lambda \right) \quad \text{式 6.2.16}$$

$$\theta = \frac{1}{a(h - \lambda)} \quad \text{式 6.2.17}$$

$$K_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{T(3h - \lambda)a(h - \lambda)}{3} \quad \text{式 6.2.18}$$

ここに、 σ_c :木材の圧縮縁の応力度[N/mm²], E_L : ラミナの繊維方向のヤング係数[N/mm²], ε_c : 圧縮縁での木材のひずみ度, l : 接合金物の片側埋め込み長さ[mm], C : 圧縮力[N], p : 接合部ピッチ[mm], T : 引張力[N]

面タッチ部について、モーメント及び鉛直方向のせん断力に抵抗しないと仮定するため、 M_x と M_y 及び F_z の剛性値は0とする。

表 6.2.2 回転剛性の諸元表

項目	接合金物の有効表面積 A_t	木材の引抜きせん断強度 f_v	低減係数 R	調整係数 a	圧縮縁から接合金物までの距離 h	圧縮縁から中立軸までの距離 λ	ラミナの繊維方向のヤング係数 E_L	接合金物の片側埋め込み長さ l	接合金物ピッチ p	回転剛性 K_θ
単位	mm ²	N/mm ²	-	1/mm	mm	mm	N/mm ²	mm		kNm/rad
値	18850	6.3	0.8	3.61	135	36	6.6 5.0	250	488	2224 2023

6.2.1.4 支持辺の設定

本節で対象とする支持条件は図 6.2.4 に示す 3 つとする。

支持辺は当該部にある節点にピンで与えるものとする。

支持辺上の変位は 0 mm と見做して解析値と比較するため、支持辺に生じる沈み込みの計測値を平均して他の計測位置における生データに加算したものを実験値とする。

6.2.1.5 荷重の設定

本節で対象とする支持条件は図 6.2.5 に示す 2 つとする。

荷重の種類は積載荷重として、774 N/m² を鉛直下方向に与えるものとする。

載荷形式は一方向の等分布荷重とする。

以上の諸元を整理した表を表 6.2.3 に示す。

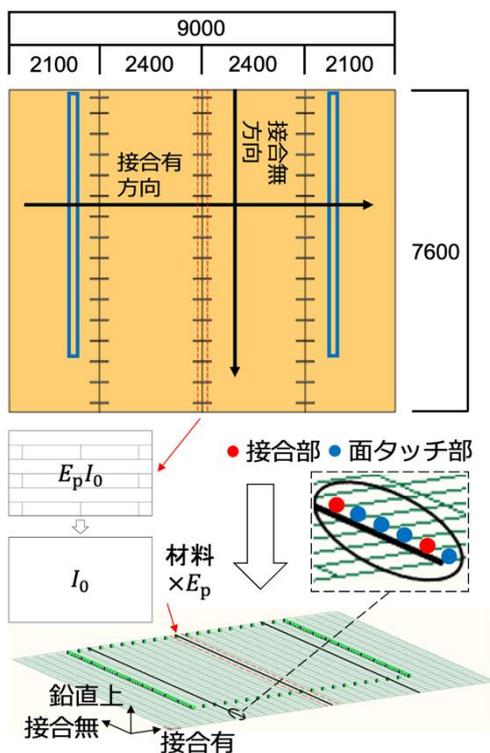


図 6.2.2 格子梁モデルへの置換概要 (単位:

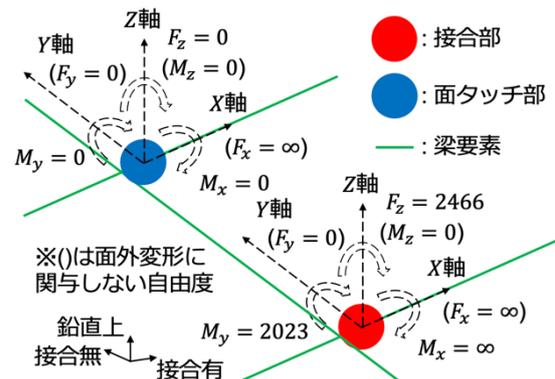


図 6.2.3 材端ばねの自由度

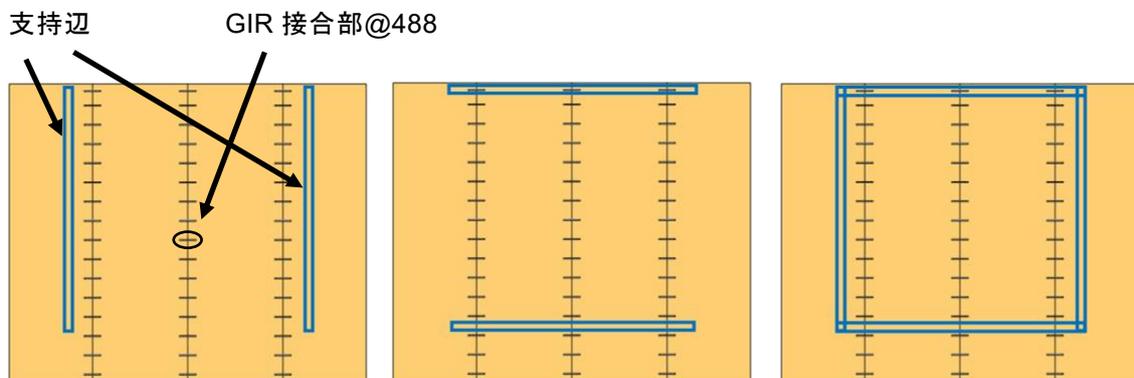


図 6.2.4 支持条件(左:二辺支持(接合有)、中央:二辺支持(接合無)、右:四辺支持)

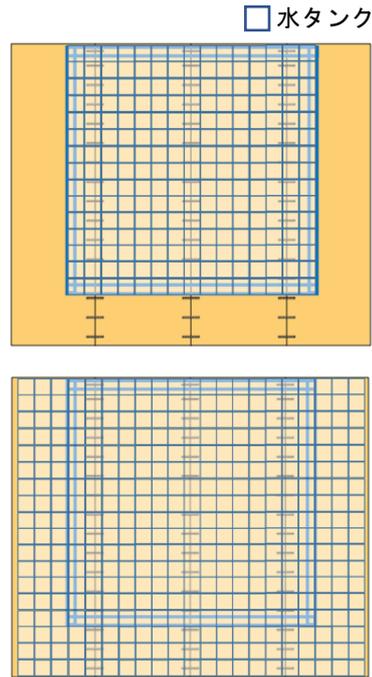


図 6.2.5 荷条件(上:架台内部荷、下:全面荷)

表 6.2.3 格子梁モデルの諸元表

項目	単位	値
接合有方向の全長	mm	9000
接合無方向の全長		7600
接合有方向ピッチ		300
接合無方向ピッチ		120, 122, 160
梁幅		60~300
梁背		180
ヤング係数 E_{bs} $E_{p,bs}$		6.6 5.0
弾性材料のせん断弾性係数 G	kN/mm^2	2.2 1.7
積層方向のせん断弾性係数 G_{xz}		8.5×10^{-2}
調整係数	-	3.8×10^{-2} 5.1×10^{-2}
ポワソン比		0.49
接合部ピッチ	mm	488
回転剛性	$kN \cdot m/rad$	2224 2023
せん断剛性	kN/m	3092 2466

6.2.2. 解析結果

本項では、ヤング係数に E_{bs} または $E_{p,bs}$ を用いて、せん断変形を考慮した解析結果を示す。本項以降の解析結果は図 6.2.6 に示す位置で計測した変位をプロットして描いている。また、図 6.2.6 の計測番号に対応するように、全体変形図における計測番号(灰色の丸)を図 6.2.7 に示す。図 6.2.9 のような断面変形図は中央を通るように描いており、接合有方向については番号 1 から 7 にかけて、接合無方向は番号 8 から 12 にかけて描いている。

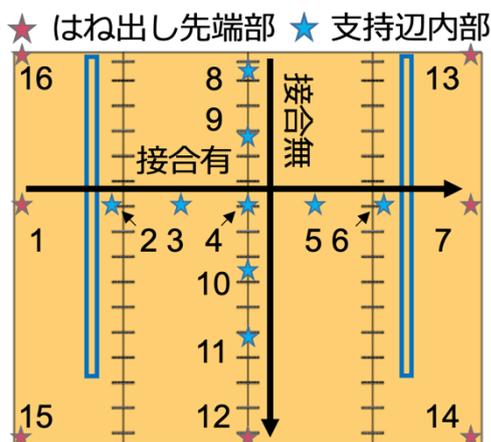


図 6.2.6 計測位置及び番号

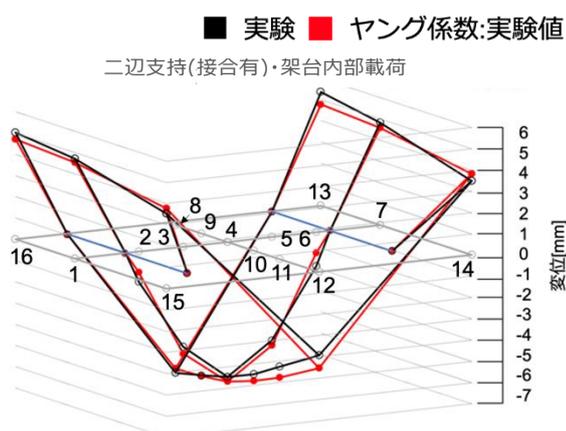


図 6.2.7 全体変形図における計測番号

6.2.2.1. 接合部がある方向を曲げスパンとする二辺単純支持の場合

解析結果を図 6.2.8, 6.2.9、表 6.2.4 に示す。番号 4(以下、中央)において、架台内部載荷時では 4 % となり、全面載荷時では 2 % の誤差率(実験値と解析値の誤差を実験値で割った値の百分率)となった。番号 12(以下、接合無方向はね出し)において、架台内部載荷では 16 % となり、全面載荷では 8 % となった。番号 1 または 7(以下、接合有方向はね出し)において、架台内部載荷では 4 % となり、全面載荷では 3 % となった。

6.2.2.2. 接合部がない方向を曲げスパンとする二辺単純支持の場合

解析結果を図 6.2.10, 6.2.11、表 6.2.5 に示す。中央において、架台内部載荷では 6 % となり、全面載荷では 1% の誤差率となった。接合無方向はね出しにおいて、架台内部載荷では 5 % となり、全面載荷では 4 % となった。接合有方向はね出しにおいて、架台内部載荷では 40 % となり、全面載荷では 5 % となった。

6.2.2.3. 二方向版となる四辺単純支持の場合

解析結果を図 6.2.12, 6.2.13、表 6.2.6 に示す。中央において、架台内部載荷では 10 % となり、全面載荷では 4 % の誤差率となった。接合無方向はね出しにおいて、架台内部載荷では 0 % となり、全面載荷では 57 % となった。接合有方向はね出しで、架台内部載荷では 10 % となり、全面載荷では 7 % となった。

床版全面載荷時において、中央の誤差は 0.02 mm、接合無方向はね出し部の誤差は 0.2 mm、接合有方向はねだし部の誤差は 0.01 mm、二方向はねだし部の誤差は 0.2 mm となっており、二方向版としての解析モデルの有用性を確認した。

接合部がある方向を曲げスパンとする二辺単純支持：二辺支持(接合有)

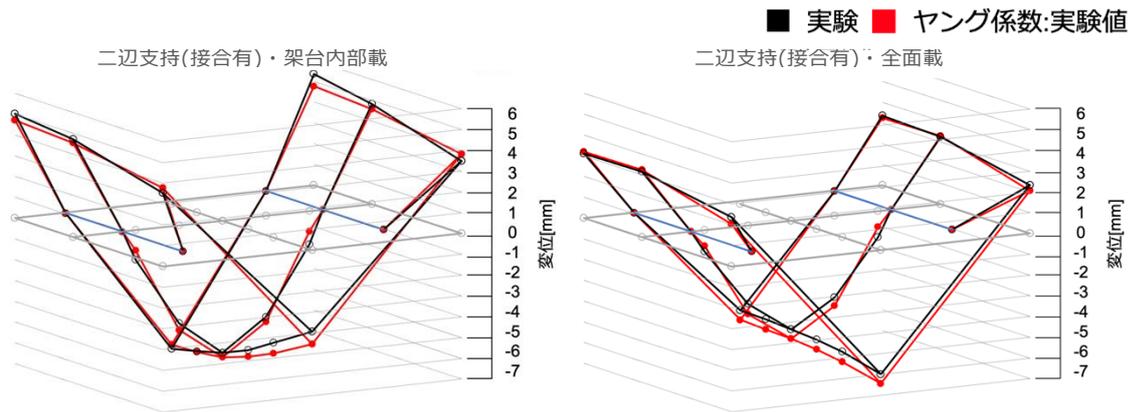


図 6.2.8 全体変形図 (左:架台内部載荷、右:全面載荷)

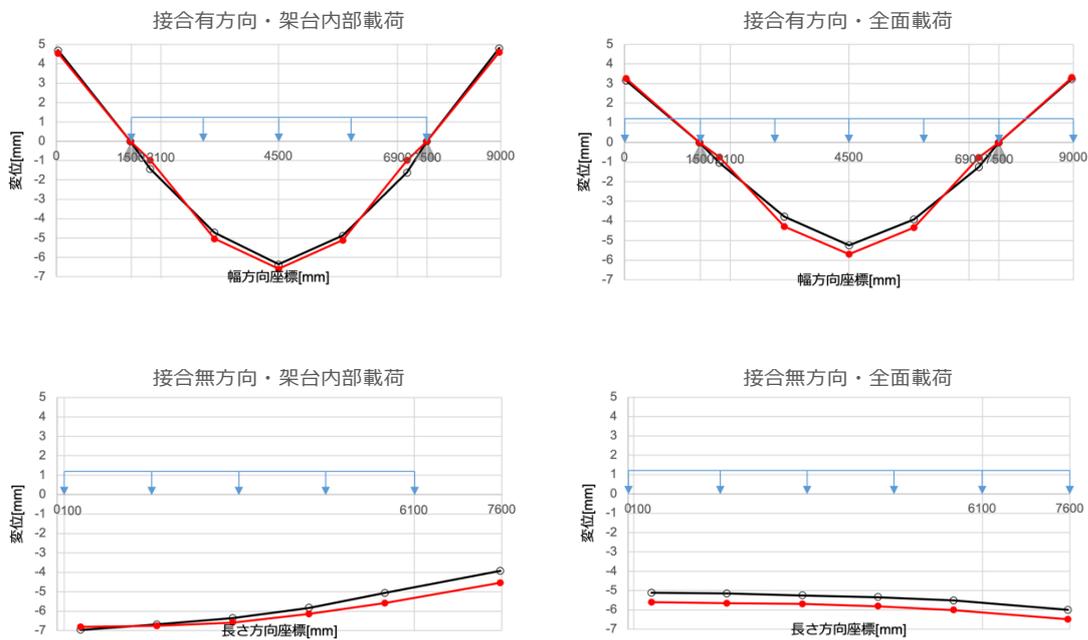


図 6.2.9 中央断面変形図 (左:架台内部載荷、右:全面載荷、上:接合有、下:接合無)

表 6.2.4 変位一覧表(正数は反り) (上:架台内部載荷、下:全面載荷)

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	4.7	-1.4	-4.7	-6.4	-4.9	-1.6	4.8	-7.0	-6.7	-5.8	-5.1	-3.9	5.4	3.5	3.5	5.0
ヤング係数:実験値	4.6	-1.0	-5.0	-6.6	-5.1	-1.0	4.6	-6.8	-6.8	-6.1	-5.6	-4.5	4.8	3.8	3.8	4.8

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	3.1	-1.0	-3.8	-5.2	-3.9	-1.2	3.2	-5.1	-5.2	-5.3	-5.5	-6.0	3.3	2.3	2.4	3.1
ヤング係数:実験値	3.3	-0.7	-4.3	-5.7	-4.3	-0.8	3.3	-5.6	-5.6	-5.8	-6.0	-6.5	3.2	2.1	2.1	3.2

接合部がない方向を曲げスパンとする二辺単純支持：二辺支持(接合無)

■ 実験 ■ ヤング係数:実験値

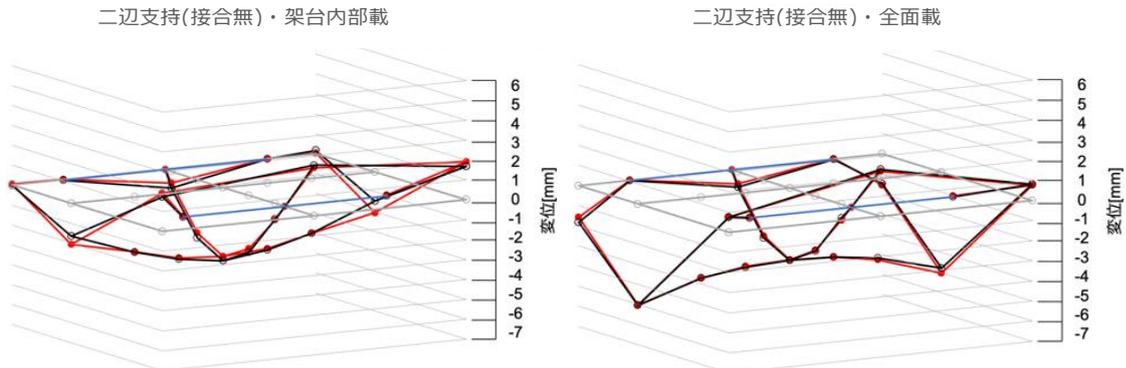


図 6.2.10 全体変形図 (左:架台内部载荷、右:全面载荷)

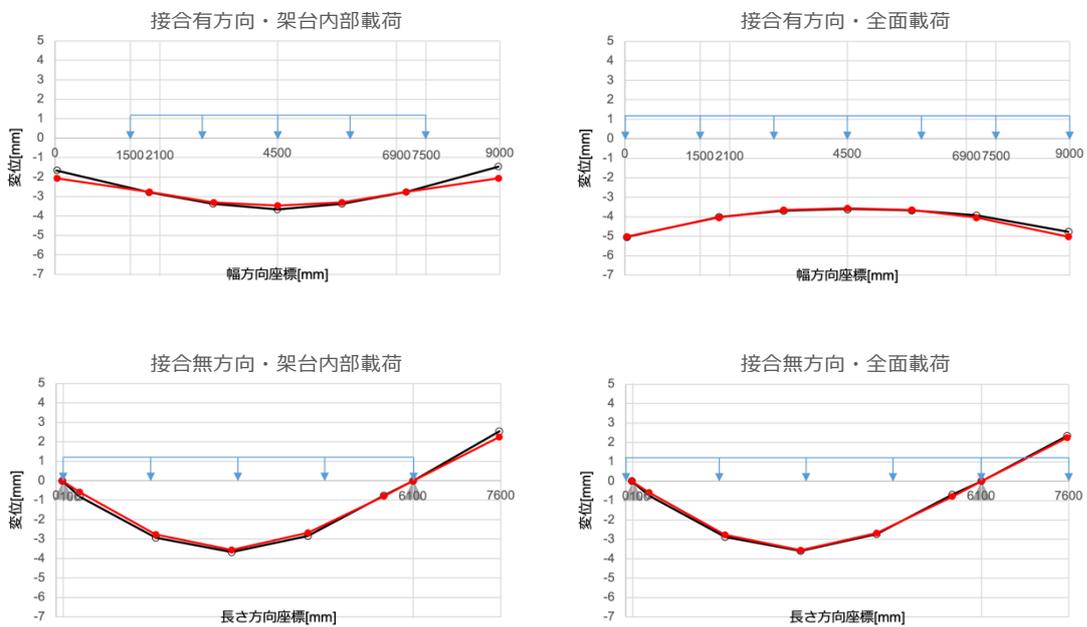


図 6.2.11 中央断面変形図 (左:架台内部载荷、右:全面载荷、上:接合有、下:接合無)

表 6.2.5 変位一覧表(正数は反り) (上:架台内部载荷、下:全面载荷)

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	-1.7	-2.8	-3.4	-3.7	-3.4	-2.8	-1.5	-0.8	-2.9	-2.8	-0.8	2.5	0.2	1.7	1.7	0.0
ヤング係数:実験値	-2.1	-2.8	-3.3	-3.5	-3.3	-2.8	-2.1	-0.6	-2.7	-2.7	-0.8	2.4	0.1	1.9	1.9	0.0

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	-5.0	-4.0	-3.7	-3.6	-3.7	-3.9	-4.8	-0.7	-2.9	-2.7	-0.7	2.3	-1.5	0.8	0.7	-1.8
ヤング係数:実験値	-5.0	-4.0	-3.7	-3.6	-3.7	-4.0	-5.0	-0.6	-2.8	-2.7	-0.8	2.2	-1.6	0.8	0.8	-1.6

二方向版となる四辺単純支持：四辺支持

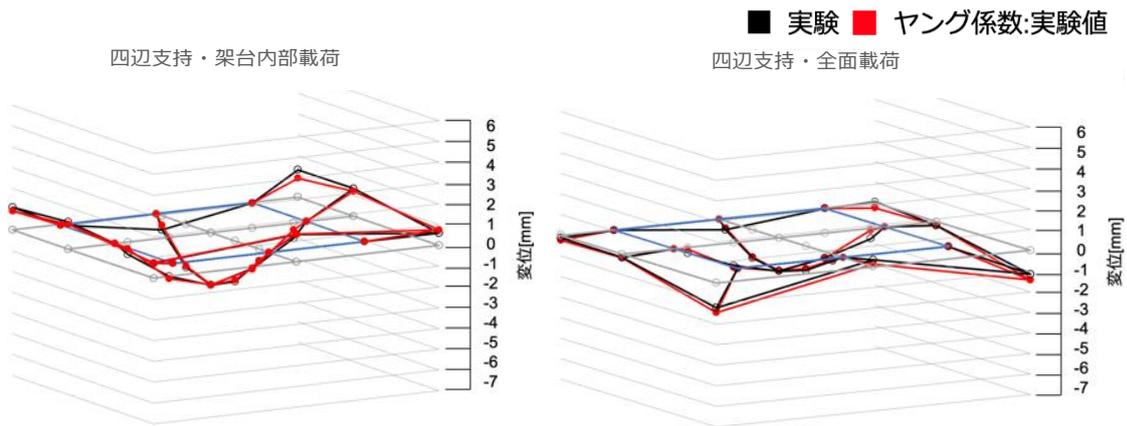


図 6.2.12 全体変形図 (左:架台内部载荷、右:全面载荷)

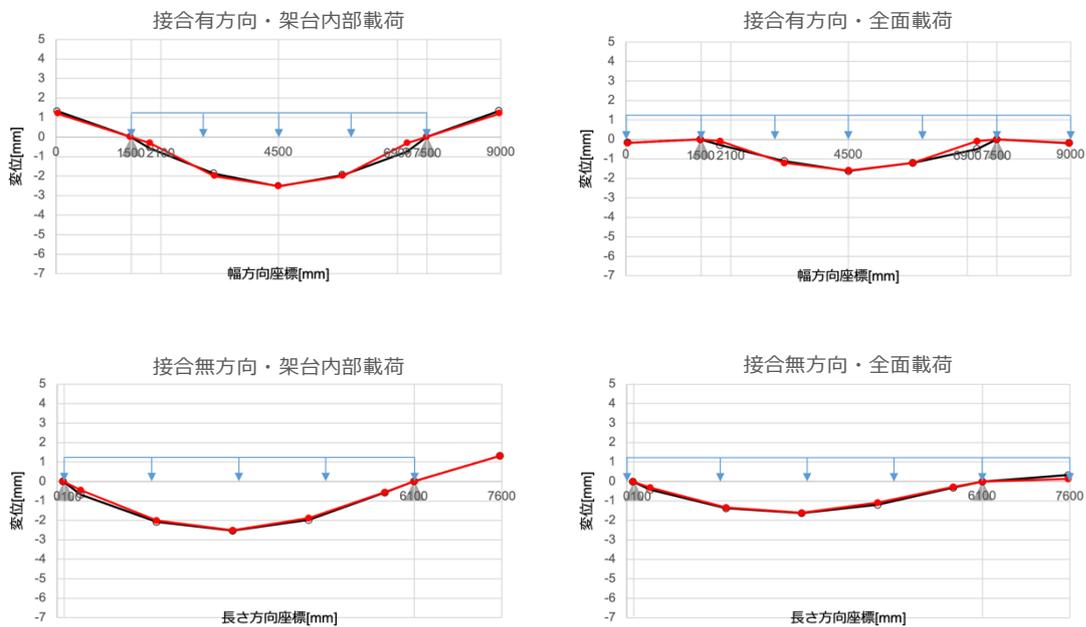


図 6.2.13 中央断面変形図 (左:架台内部载荷、右:全面载荷、上:接合有、下:接合無)

表 6.2.6 変位一覧表(正数は反り) (上:架台内部载荷、下:全面载荷)

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	1.3	-0.6	-1.9	-2.5	-2.0	-0.7	1.3	-0.7	-2.1	-2.0	-0.6	1.3	1.3	0.6	0.7	1.1
ヤング係数:実験値	1.2	-0.3	-2.0	-2.5	-2.0	-0.3	1.2	-0.4	-2.0	-1.9	-0.6	1.3	0.9	0.8	0.8	0.9

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	-0.2	-0.3	-1.1	-1.6	-1.2	-0.5	-0.2	-0.4	-1.4	-1.2	-0.3	0.3	0.0	-1.2	-1.2	-0.1
ヤング係数:実験値	-0.2	-0.1	-1.2	-1.6	-1.2	-0.1	-0.2	-0.3	-1.3	-1.1	-0.3	0.1	-0.3	-1.4	-1.4	-0.3

6.2.3. CLT マニュアルの知見を活かしたモデルの解析結果

本項では、CLT マニュアル^{6.2.1)}の知見を活かした格子梁モデルを作成し、四辺単純支持において比較する。本節のモデルに用いるヤング係数は CLT マニュアル^{6.2.1)}に記載されている等価断面法に基づいて計算した値とする。また、そのヤング係数を用いて接合部の剛性値を算定し、本節の格子梁モデルに用いる。算定結果を表 6.2.7 に示す。前節と同様に、剛性の設定方法上、せん断剛性については前節と同じであるが、ねじり剛性については前節と異なる。

解析結果を図 6.2.14, 6.2.15、表 6.2.8 に示す。中央において、架台内部載荷では 16 % となり、全面載荷では 16 % の誤差率となった。接合無方向はね出しにおいて、架台内部載荷では 18 % となり、全面載荷では 47 % となった。接合有方向はね出しにおいて、架台内部載荷では 7 % となり、全面載荷では 6 % となった。

前 6.2.2 項のたわみ量の解析結果よりも大きい値となり、安全側に評価することができた。また、前 6.2.2 項と同様に、床版全面載荷時については実験ではたわんでいるのに対して、解析では反る変形性状となった。従って、接合有方向側はね出し部の変位を計算する際はせん断変形を考慮することが必要であると考えられる。

表 6.2.7 接合部の剛性値の算定結果

E=4.1	回転剛性	せん断剛性
単位	kNm/rad	kN/m
値	1891	2123

四辺支持

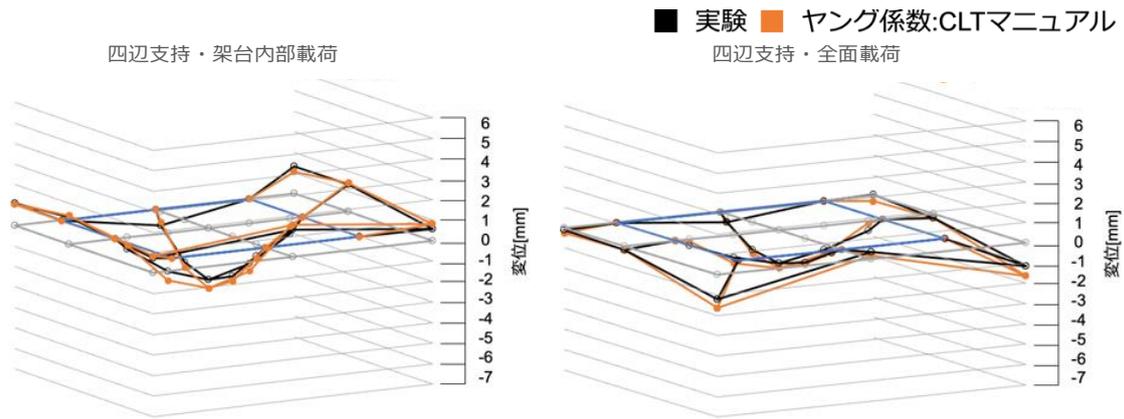


図 6.2.14 全体変形図 (左:架台内部載荷、右:全面載荷)

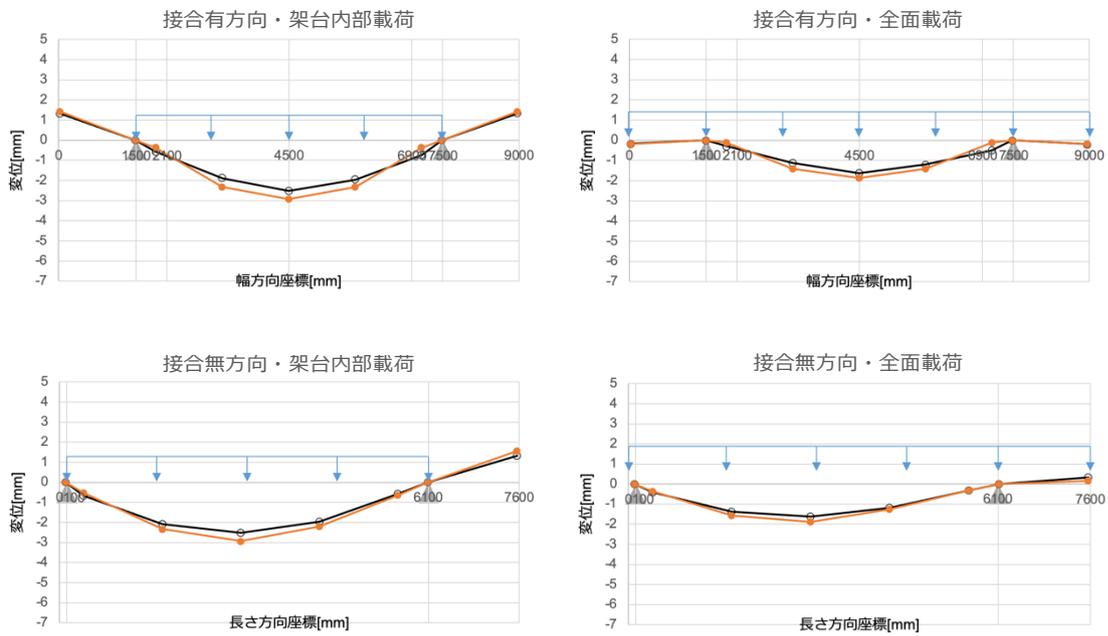


図 6.2.15 中央断面変形図 (左:架台内部載荷、右:全面載荷、上:接合有、下:接合無)

表 6.2.8 変位一覧表(正数は反り) (上:架台内部載荷、下:全面載荷)

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	1.3	-0.6	-1.9	-2.5	-2.0	-0.7	1.3	-0.7	-2.1	-2.0	-0.6	1.3	1.3	0.6	0.7	1.1
ヤング係数:CLTマニュアル	1.4	-0.4	-2.3	-2.9	-2.3	-0.4	1.4	-0.5	-2.3	-2.2	-0.6	1.6	1.0	0.8	0.8	1.0

計測番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
実験	-0.2	-0.3	-1.1	-1.6	-1.2	-0.5	-0.2	-0.4	-1.4	-1.2	-0.3	0.3	0.0	-1.2	-1.2	-0.1
ヤング係数:CLTマニュアル	-0.2	-0.1	-1.4	-1.9	-1.4	-0.1	-0.2	-0.4	-1.6	-1.3	-0.3	0.2	-0.3	-1.6	-1.6	-0.3

6.2.4. 中央及びはね出し部における変位の比較

本項では、前項までに検討した格子梁モデルそれぞれの変位量の解析結果を計測位置ごとに実験結果と比較する。比較する計測位置は中央(番号 4)、接合無方向はね出し(番号 12)、二方向はね出し(番号 15)、接合有方向はね出し(番号 1)の合計 4 つとする。また、対象とする支持条件は二辺支持(接合有)、二辺支持(接合無)、四辺支持の合計 3 つとして、対象とする荷重領域は架台内部荷重、全面荷重の合計 2 つの荷重領域とする。比較した結果を図 6.2.16-6.2.18、表 6.2.9-6.2.11 に示す。

二辺支持(接合有)及び二辺支持(接合無)ともに、架台内部荷重及び全面荷重時ともにヤング係数に実験値を用いた場合のたわみ量の解析結果は実験結果と概ね良い精度で対応していた。

四辺支持について、架台内部荷重及び全面荷重時ともにヤング係数に実験値を用いた場合のたわみ量の解析結果は中央において実験結果と対応していた。また、接合有方向側はね出し部においては実験結果より大きく、安全側に評価していた。ヤング係数に CLT マニュアルの値を用いた場合の解析結果は中央及び接合有方向側はね出し部において実験結果より大きく、安全側に評価していた。

二辺支持(接合有)

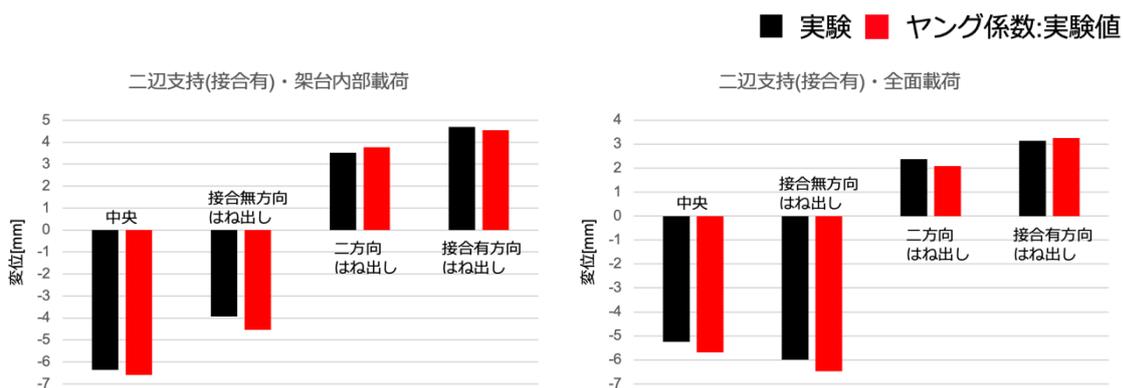


図 6.2.16 各部における変位比較図(正数は反り)

(左:架台内部荷重、右:全面荷重)

表 6.2.9 各部における変位比較表(正数は反り)

(左:架台内部荷重、右:全面荷重)

計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし	計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし
実験	-6.4	-3.9	3.5	4.7	実験	-5.2	-6.0	2.4	3.1
ヤング係数:実験値	-6.6	-4.5	3.8	4.6	ヤング係数:実験値	-5.7	-6.5	2.1	3.3

二辺支持(接合無)

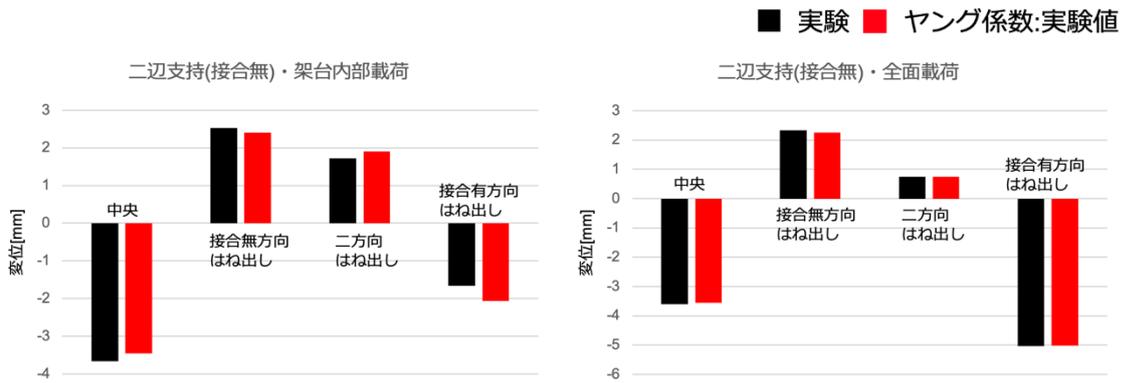


図 6.2.17 各部における変位比較図(正数は反り)
(左:架台内部载荷、右:全面载荷)

表 6.2.10 各部における変位比較表(正数は反り)
(左:架台内部载荷、右:全面载荷)

計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし	計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし
実験	-3.7	2.5	1.7	-1.7	実験	-3.6	2.3	0.7	-5.0
ヤング係数:実験値	-3.5	2.4	1.9	-2.1	ヤング係数:実験値	-3.6	2.2	0.8	-5.0

四辺支持

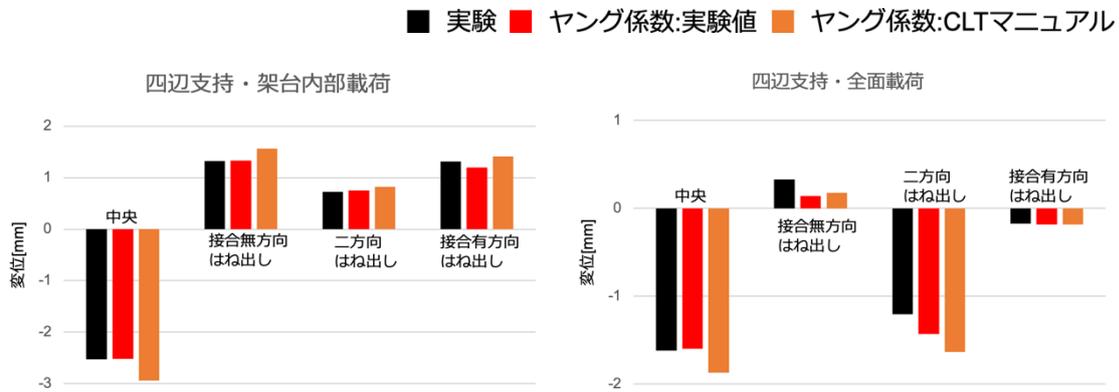


図 6.2.18 各部における変位比較図(正数は反り)
(左:架台内部载荷、右:全面载荷)

表 6.2.11 各部における変位比較表(正数は反り)
(左:架台内部载荷、右:全面载荷)

計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし	計測位置	中央	接合無方向 はねだし	二方向 はねだし	接合有方向 はねだし
実験	-2.5	1.3	0.7	1.3	実験	-1.6	0.3	-1.2	-0.2
ヤング係数:実験値	-2.5	1.3	0.8	1.2	ヤング係数:実験値	-1.6	0.1	-1.4	-0.2
ヤング係数:CLTマニュアル	-2.9	1.6	0.8	1.4	ヤング係数:CLTマニュアル	-1.9	0.2	-1.6	-0.2

参考文献

- 6.2.1) (財)日本住宅・木材技術センター: 2016年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル 2021年構造・材料増補版, pp.91, pp.241, 2021.11
- 6.2.2) 腰原幹雄, 加藤信一: CLT フラットスラブに関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.401-402, 2015.9
- 6.2.3) 中島史郎: CLT による木造建築物の設計法の開発(その1)～材料強度等の評価～, BRI-H26 講習会テキスト,
<https://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h26/pdf/T2.pdf>, (最終閲覧日 2022年12月29日)
- 6.2.4) (株)木構造振興: CLT・LVL 等を活用した建築物低コスト化・検証等 CLT の特性を活かす平版構成の普及に向けての開発, pp.16, 2022.3
- 6.2.5) 澤田稔: 木材の変形挙動, (社)日本材料学会, 材料, 第32巻, 第359号, pp.838-847, 1983.8, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsms1963/32/359/32_359_838/pdf/-char/ja, (最終閲覧日 2022年12月29日)
- 6.2.6) (株)マイダスアイティジャパン: マイダス ユーザーサイト,
https://www.midasuser.com/jp/support/faq_view.asp?idx=50636&sk=&so=&sort=&bid=16&nCat2=&field=1&prog=iGen&pg=1, (最終閲覧日 2022年11月30日)
- 6.2.7) (株)マイダスアイティジャパン: CLT パネル工法のモデリング,
https://www.midasuser.com/jp/support/guide_view.asp?idx=16082&sk=&so=&sort=&bid=14&nCat0=&field=1&prog=iGen&pg=1, (最終閲覧日 2022年11月30日)
- 6.2.8) 田中亮磨, 安曇良治, 腰原幹雄, 三宅辰哉, 河合直人, 鈴木圭: CLT パネル工法の構造設計法拡充・合理化に関する検討 その72 方向床版の構造計算方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.471-472, 2019.9
- 6.2.9) 田中圭, 井上正文, 後藤泰男: GIR(Glued-in Rod)接合法を用いた木質構造接合部の曲げ耐力算定法, 日本建築学会九州支部研究報告, 第41号, pp.297-300, 2002.3
- 6.2.10) 井上樹里也, 重光紗杜, 伊藤大貴, 森達登, 田中圭, 腰原幹雄: 接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構について (その17) GIR 接合部の引抜き剛性推定手法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.95-96, 2020.9
- 6.2.11) 井上樹里也, 植月和輝, 田中圭, 井上正文: 接合金物と接着剤を併用した木材接合法の強度発現機構に関する研究 (その18) 繊維平行方向引抜き耐力設計法の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第57号, pp.253-256, 2018.3
- 6.2.12) 竹内麻美子, 藤川将登, 田中圭, 後藤泰男, 井上正文: GIR (Glued-in Rod) 接合法を用いた木質構造接合部の回転剛性に関する研究 (その1) 推定手法の検討及び継手接合部実験による検証, 日本建築学会九州支部研究報告, 第44号, pp.477-480, 2005.3
- 6.2.13) (社)日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, pp.231-234, 2009.3

6.3 接合部のモデル化と平面要素モデルを用いた検証

6.3.1 はじめに

昨年度の報告書^{6.3.1}では、図 6.3.1 に示すように長手方向（一般には強軸側となる）の辺長を a 、短手方向の辺長を b とし、辺長比を b/a と定義した場合、層構成に関わらず辺長比 b/a が 2.0 程度以下の場合には四辺支持、すなわちツーウェイ・スラブとする効果が期待できることを報告した。また、6 層 6 プライのような面内等方性に近い材料特性を有する層構成を用いることで床スラブの最大たわみ量の抑制が期待できるという知見が得られた。

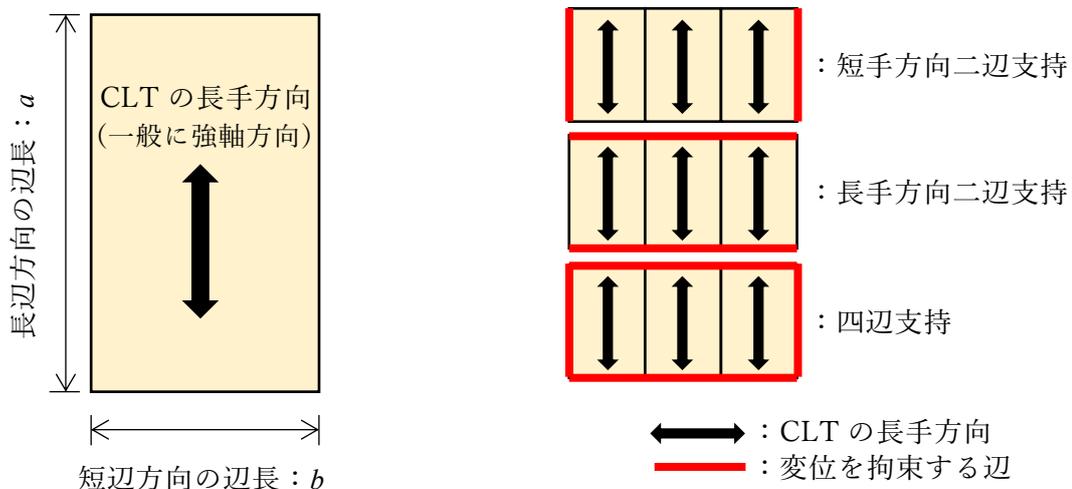


図 6.3.1 解析対象とする床スラブの辺長

図 6.3.2 床スラブの支持条件

本節では、文献^{6.3.2}に示されている実大 CLT 床試験体を対象に、実験結果と平面要素モデルを用いた解析結果との比較を通じて、接合部をモデル化するバネの特性や CLT の材料特性が床スラブの変形にどのような影響を及ぼすのか検証する。また、跳ね出し梁の曲げ戻しの効果によりどの程度たわみが軽減されるのかも合わせて検証する。支持条件は図 6.3.2 に示す 3 形式とし、载荷形式は支持辺内部に载荷する「内部载荷」と支持辺外部も含めたスラブ全体に载荷する「全面载荷」の 2 形式について検討を行う。実験方法の詳細は文献^{6.3.2}等を参照されたい。なお、本節に示す解析には株式会社マイダスアイティジャパン「midas iGen Ver.930 R2x」を用いる。

6.3.2 継手接合部バネ（回転成分）の特性が及ぼす影響

まず、接合部をモデル化する継手接合部バネ（以下、継手バネ）の回転成分が、床スラブの変形特性に及ぼす影響について検証する。表 6.3.1 ならびに図 6.3.3 及び図 6.3.4 に短手方向二辺支持における全面載荷時のたわみの最大値ならびにたわみ分布を示す。図 6.3.3 は、6.1 節や文献^{6.3.1}で示された接合部の要素実験結果のうち、GIR 接合を用いた場合の初期剛性の平均値に相当する回転剛性が 700 [kN.m/rad]^{註 1)}であることを考慮して、ここでは継手バネ（回転成分）の剛性が 500 [kN.m/rad]の場合を基準に最大たわみ量と継手バネ剛性の比で表しており、表中（ ）内の値は基準とするバネ剛性の際のたわみを 1.0 とした場合の値を示している。

表 6.3.1 たわみ量に及ぼす継手バネ（回転成分）の影響
[短手方向二辺支持]

継手バネ (回転成分) [kN.m/rad]	たわみの最大値 [mm]
25	75.17 (11.41)
50	39.07 (5.93)
125	17.41 (2.64)
250	10.19 (1.55)
500	6.59 (1.00)
1250	4.43 (0.67)
2500	3.71 (0.56)

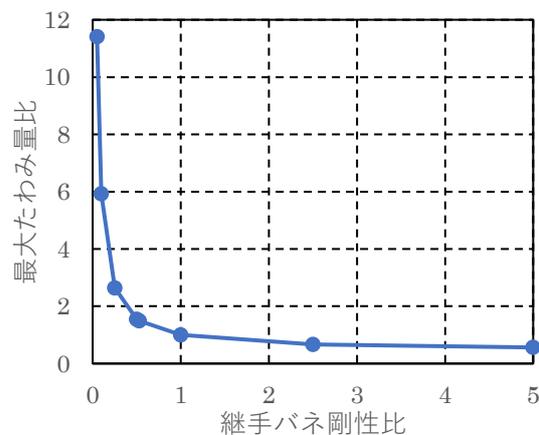


図 6.3.3 たわみ量に及ぼす継手バネ（回転成分）の影響
[短手方向二辺支持]

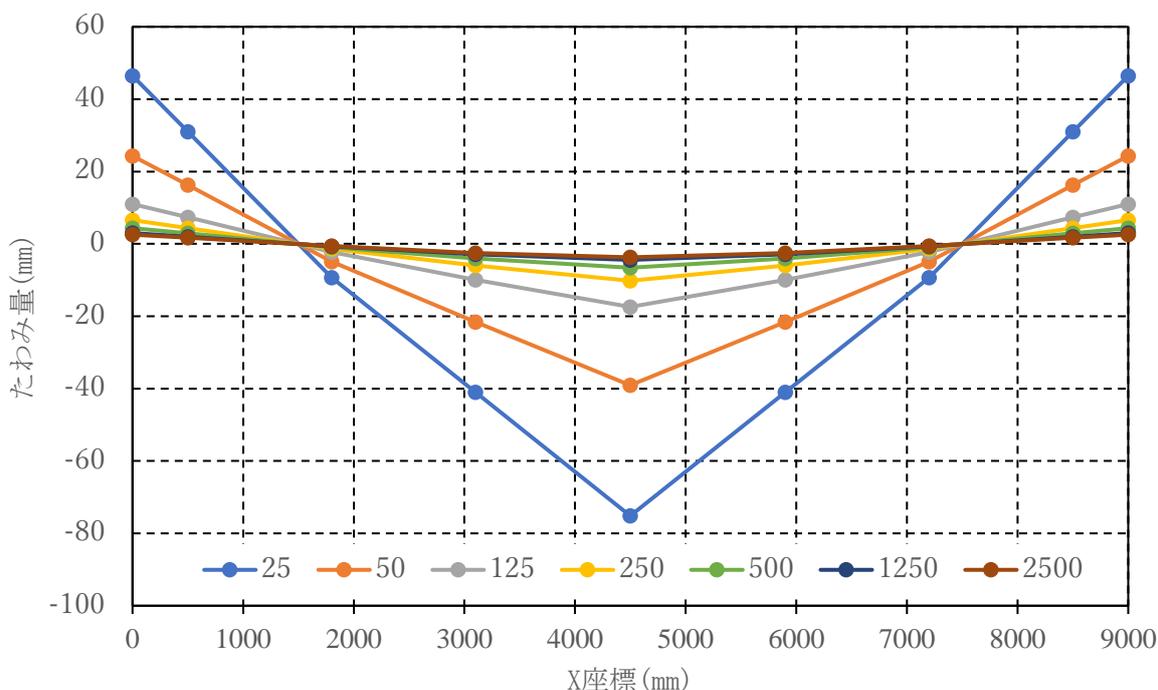


図 6.3.4 たわみ分布（短手方向二辺支持：全面載荷時）

次に、四辺支持における全面載荷時のたわみの最大値ならびにたわみ分布を表 6.3.2 ならびに図 6.3.5 及び図 6.3.6 に示す。短手方向二辺支持の際と同様に継手バネの剛性が増大するとスラブのたわみが減少するが、四辺支持の場合の方がその影響は軽減されていることが分かる。

表 6.3.2 たわみ量に及ぼす継手バネ
(回転成分) の影響
[四辺支持]

継手バネ (回転成分) [kN.m/rad]	たわみの最大値 [mm]
25	2.88 (1.88)
50	2.65 (1.73)
125	2.22 (1.45)
250	1.85 (1.21)
500	1.53 (1.00)
1250	1.24 (0.81)
2500	1.12 (0.73)

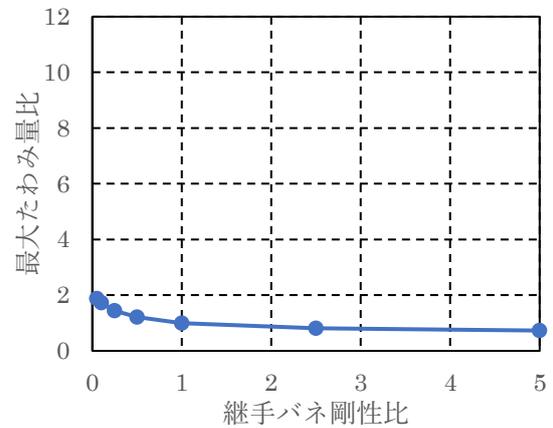


図 6.3.5 たわみ量に及ぼす継手バネ
(回転成分) の影響
[四辺支持]

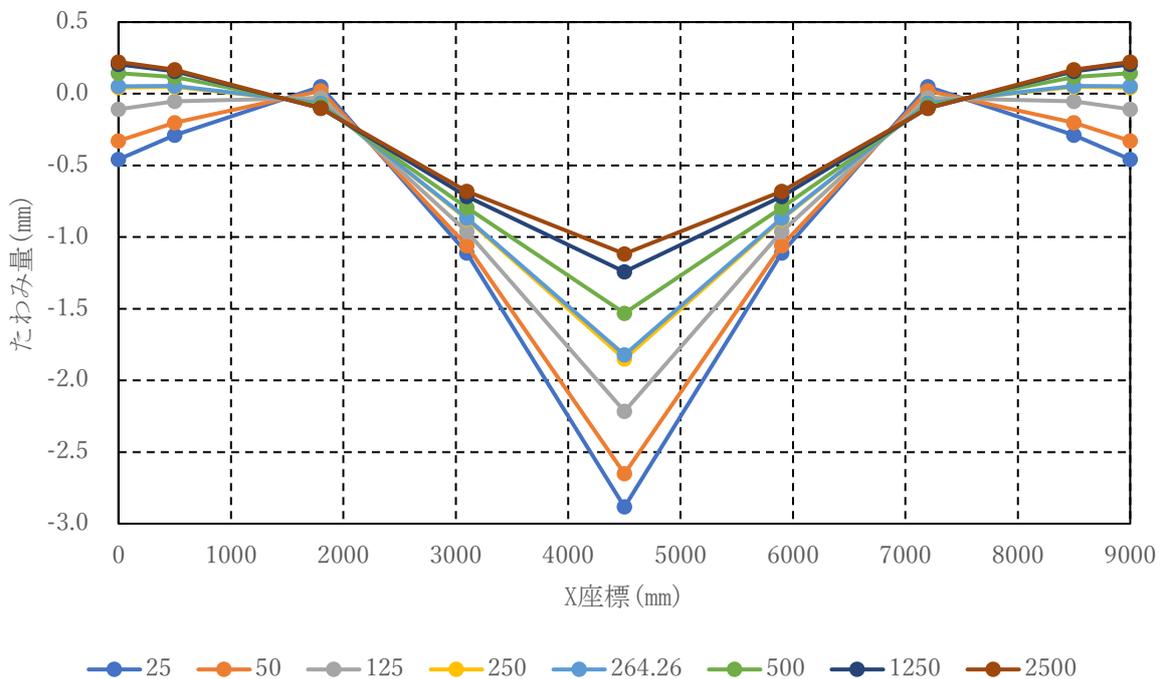


図 6.3.6 たわみ分布 (四辺支持 : 全面載荷時)

長手方向二辺支持については、支持形式の特性上、短手方向に挿入する継手バネの剛性がスラブのたわみにほぼ影響しないことから、ここでは割愛する。

6.3.3 接合部をモデル化するせん断バネ特性の影響

続いて、継手バネのせん断成分が、床スラブの変形特性に及ぼす影響について検証する。表 6.3.3 ならびに図 6.3.7 に短手方向二辺支持、表 6.3.4 ならびに図 6.3.8 に四辺支持における全面載荷時のたわみの最大値を示す。図 6.3.7 及び図 6.3.8 は、CLT の文献 6.3.3 を参考に算出した実験で使用されている S90-6-6 の面外せん断剛性に相当する 42000[kN/m] を基準に最大たわみ量と継手バネ剛性の比で表している。回転成分と比較するとせん断成分の剛性を 1/10 とした場合でもスラブのたわみの変化は 10%以下と十分に小さいことから、以後の検討ではせん断成分は剛と仮定し、その影響は無視して検証を行うこととする。

表 6.3.3 たわみ量に及ぼす継手バネ
(せん断成分) の影響
[短手方向二辺支持]

継手バネ (せん断成分) [kN/m]	たわみの最大値 [mm]
420	5.18 (1.71)
840	4.08 (1.35)
2100	3.42 (1.13)
4200	3.20 (1.06)
8400	3.09 (1.02)
21000	3.02 (1.00)
42000	3.02 (1.00)
420000	2.98 (0.99)

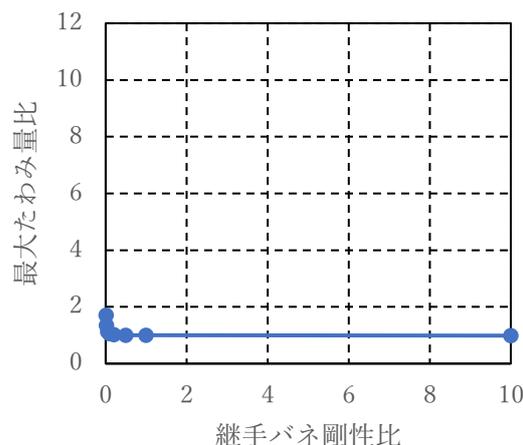


図 6.3.7 たわみ量に及ぼす継手バネ
(せん断成分) の影響
[短手方向二辺支持]

表 6.3.4 たわみ量に及ぼす継手バネ
(せん断成分) の影響
[四辺支持]

継手バネ (せん断成分) [kN/m]	たわみの最大値 [mm]
420	1.34 (1.37)
840	1.25 (1.27)
2100	1.13 (1.15)
4200	1.06 (1.08)
8400	1.02 (1.04)
21000	0.99 (1.01)
42000	0.98 (1.00)
420000	0.97 (0.99)

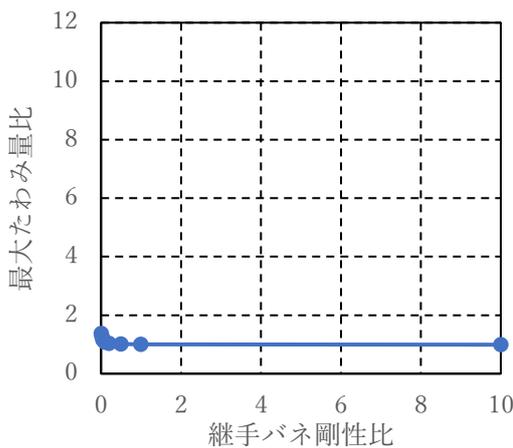


図 6.3.8 たわみ量に及ぼす継手バネ
(せん断成分) の影響
[四辺支持]

6.3.4 CLT の材料特性の影響

継手バネの剛性を一定として CLT の材料定数を変化させた場合の解析結果を表 6.3.5 ならびに図 6.3.9～6.3.11 に示す。表中、「マニュアル」は文献^{6.3.3}の CLT マニュアルに記載の方法を用いて算出した S90-6-6 のヤング係数を採用した場合を表す。その他は文献^{6.3.1}に記載されている接合部を有する CLT スラブの曲げ試験結果を採用したものであり、「GIR」は GIR 接合の平均値、「平均」は GIR 接合と鋼板添え板ビス接合の平均値、「鋼板添え板」は鋼板添え板ビス接合の平均値を採用した場合を表す。表中（ ）内の数値はマニュアルの値を採用した場合を 1.0 としたときのたわみの最大値の比率を示している。長手方向二辺支持の場合に最大たわみ量の変化が最も大きく、CLT マニュアルに記載の値を採用した場合には 3 割程度たわみが増大する結果となった。

表 6.3.5 たわみ量に及ぼす CLT の材料定数の影響（全面載荷）

材料定数の種類	ヤング係数 [kN/mm ²]	たわみの最大値[mm]		
		短手方向二辺支持	長手方向二辺支持	四辺支持
マニュアル	4.12	5.23 (1.00)	5.15 (1.00)	1.45 (1.00)
鋼板添え板	5.47	4.27 (0.82)	3.89 (0.75)	1.21 (0.83)
平均値	5.80	4.10 (0.78)	3.67 (0.71)	1.16 (0.80)
GIR	6.12	3.95 (0.76)	3.47 (0.67)	1.13 (0.78)

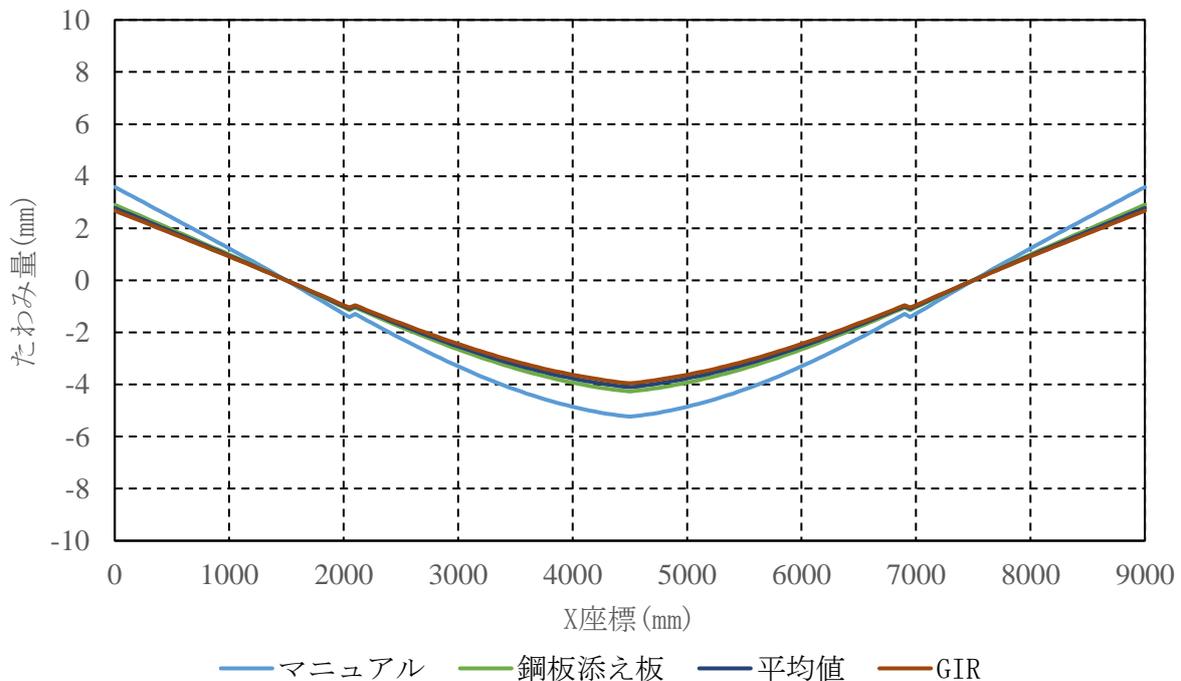


図 6.3.9 たわみ分布（短手方向二辺支持：全面載荷時）

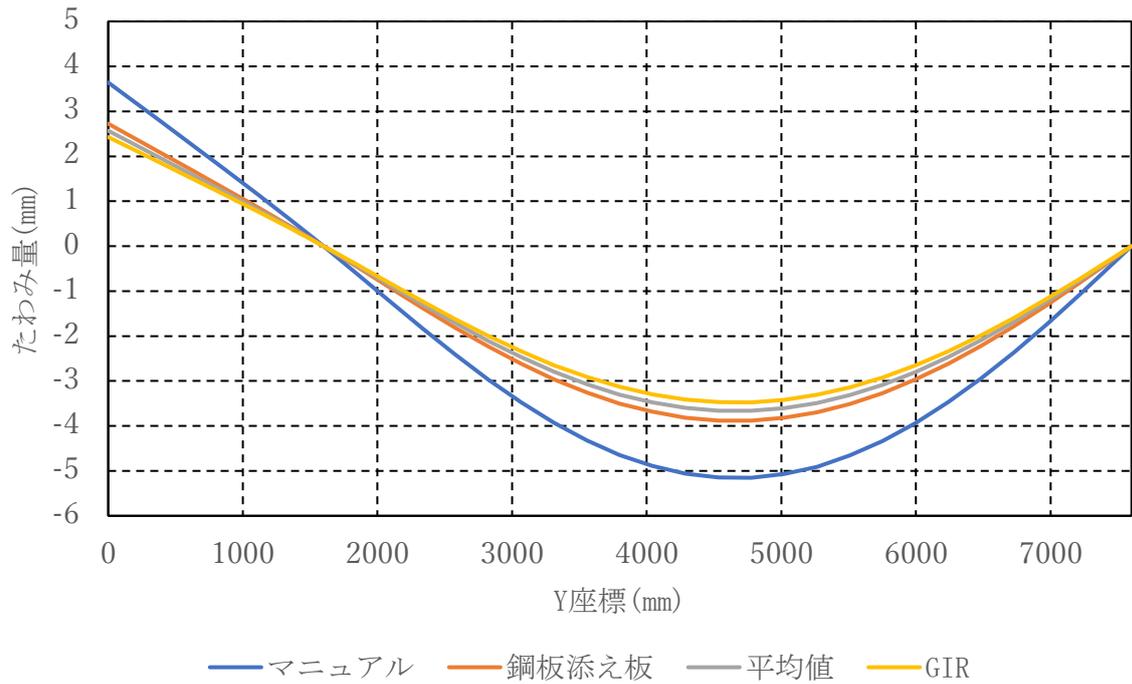


図 6.3.10 たわみ分布（長手方向二辺支持：全面載荷時）

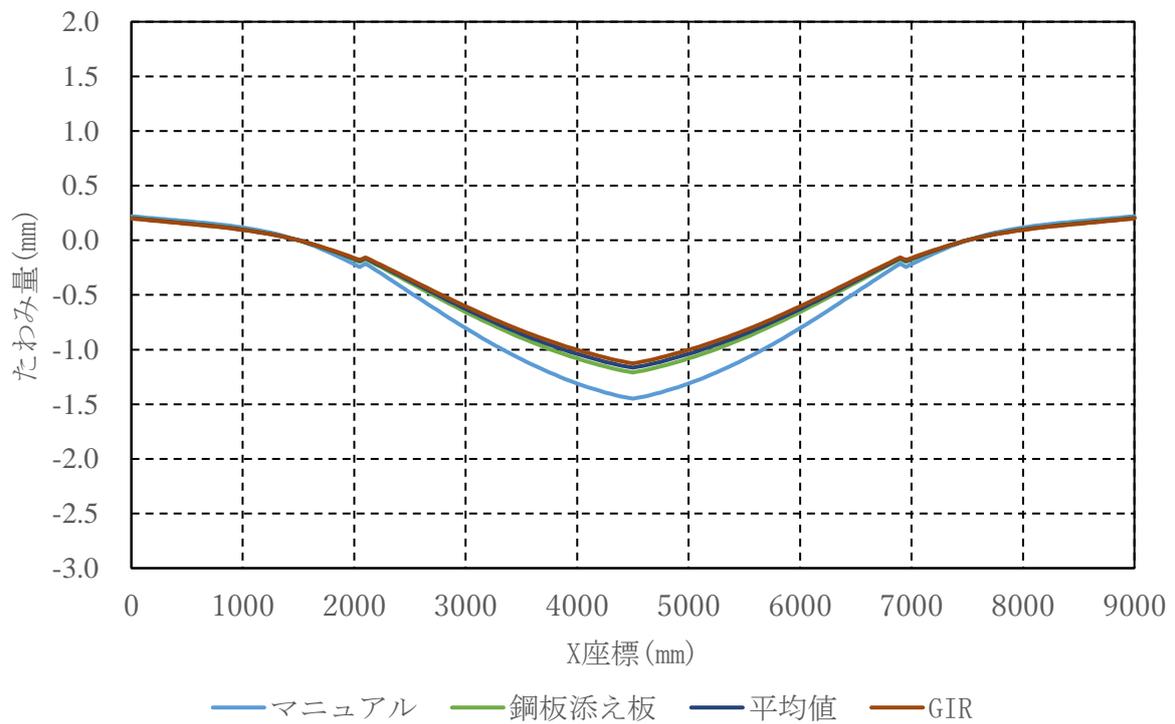


図 6.3.11 たわみ分布（四辺支持：全面載荷時）

6.3.5 実験結果と解析結果の比較

前項までの議論を踏まえて、解析に用いる材料定数として表 6.3.6 に示す値を採用した場合の解析結果と実験結果の比較を行う。継手バネの特性は、回転成分は要素実験から決定した 700 [kN.m/rad]、せん断成分は剛とする。ポアソン比は 0.3 としている。

表 6.3.6 採用する材料定数

層構成	E_x [kN/mm ²]	E_y [kN/mm ²]	G_{xy} [kN/mm ²]	G_{zx} [kN/mm ²]	G_{yz} [kN/mm ²]	ν	h [mm]
S90-6-6	6.12	6.12	0.5	0.085	0.085	0.3	180

解析結果と実験結果の最大たわみ量の比較を表 6.3.7 に、たわみ分布を図 6.3.12 から図 6.3.17 に示す。表中 () 内の数値は材料定数を要素実験結果から決定した場合の解析結果を実験結果で除した値を示している。長手方向二辺支持の場合に要素実験結果から材料定数を決定した場合に解析結果と実験結果は良好に一致している一方で、短手方向二辺支持の場合には 2 割程度解析結果の方がたわみ量が小さく、材料定数を CLT マニュアルから決定した場合で実験結果と同程度の値となった。四辺支持の場合にはさらに解析結果の方がたわみが小さくなり、実験結果に対して 3 割ほど剛性を高めに評価する結果となった。こうした結果の要因としては、CLT の面外せん断弾性係数やポアソン比等の材料定数の設定による影響も考えられるが、継手バネのモデル化も要因の一つと考えられる。

今後の検討が必要な事項があるものの、CLT の素材や継手接合部の要素実験結果を踏まえて入力データを設定することにより、内部載荷時と比較して全面載荷時には跳ね出し部分にも載荷することによる曲げ戻しの効果が特に四辺支持の場合に顕著に見られることなど、CLT 床スラブの変形性状を概ね的確に再現可能であることが確認できた。なお、今回の解析では CLT の自重は考慮していない。

表 6.3.7 解析結果と実験結果の比較

支持条件	載荷条件	最大たわみ量(mm)			解析(要素実験)／実験
		解析結果 (マニュアル)	解析結果 (要素実験)	実験結果	
短手方向 二辺支持	内部載荷	6.63	5.05	6.36	(0.794)
	全面載荷	5.23	3.95	5.25	(0.753)
長手方向 二辺支持	内部載荷	4.91	3.42	3.67	(0.932)
	全面載荷	5.15	3.47	3.60	(0.965)
四辺支持	内部載荷	2.33	1.81	2.53	(0.715)
	全面載荷	1.45	1.13	1.62	(0.695)

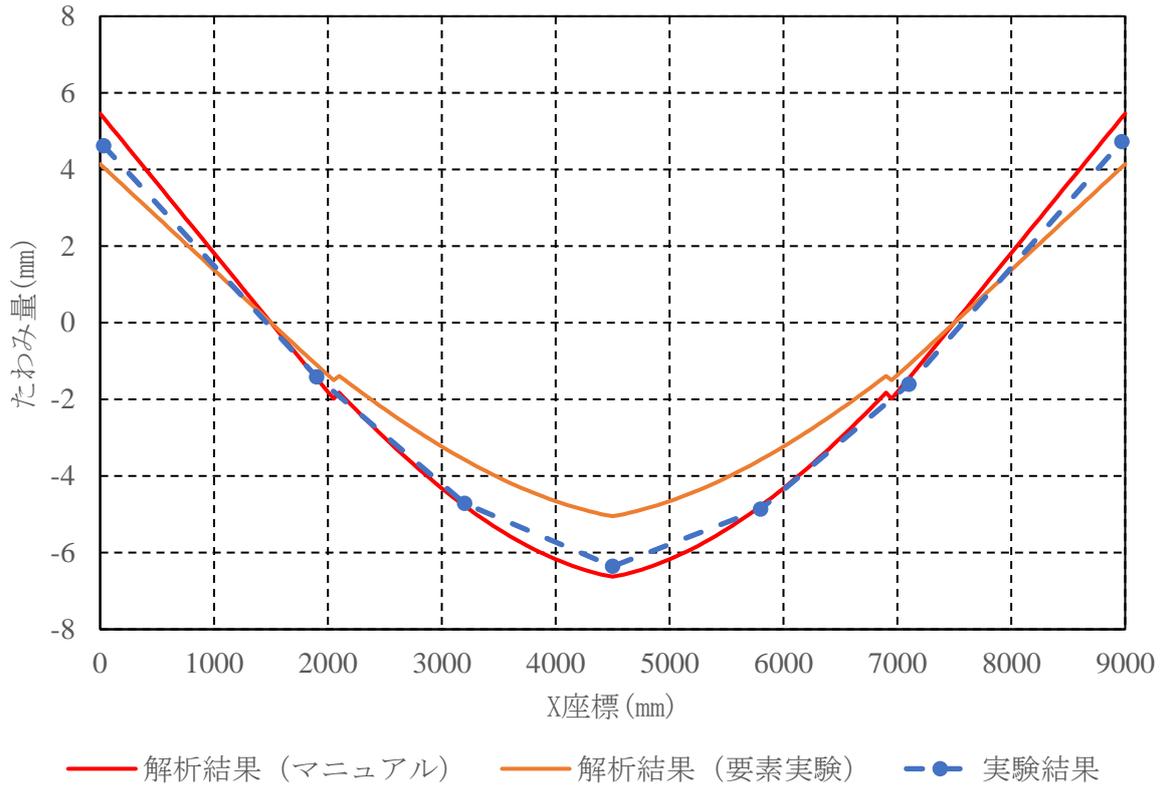


図 6.3.12 たわみ分布 (短手方向二辺支持 : 内部载荷時)

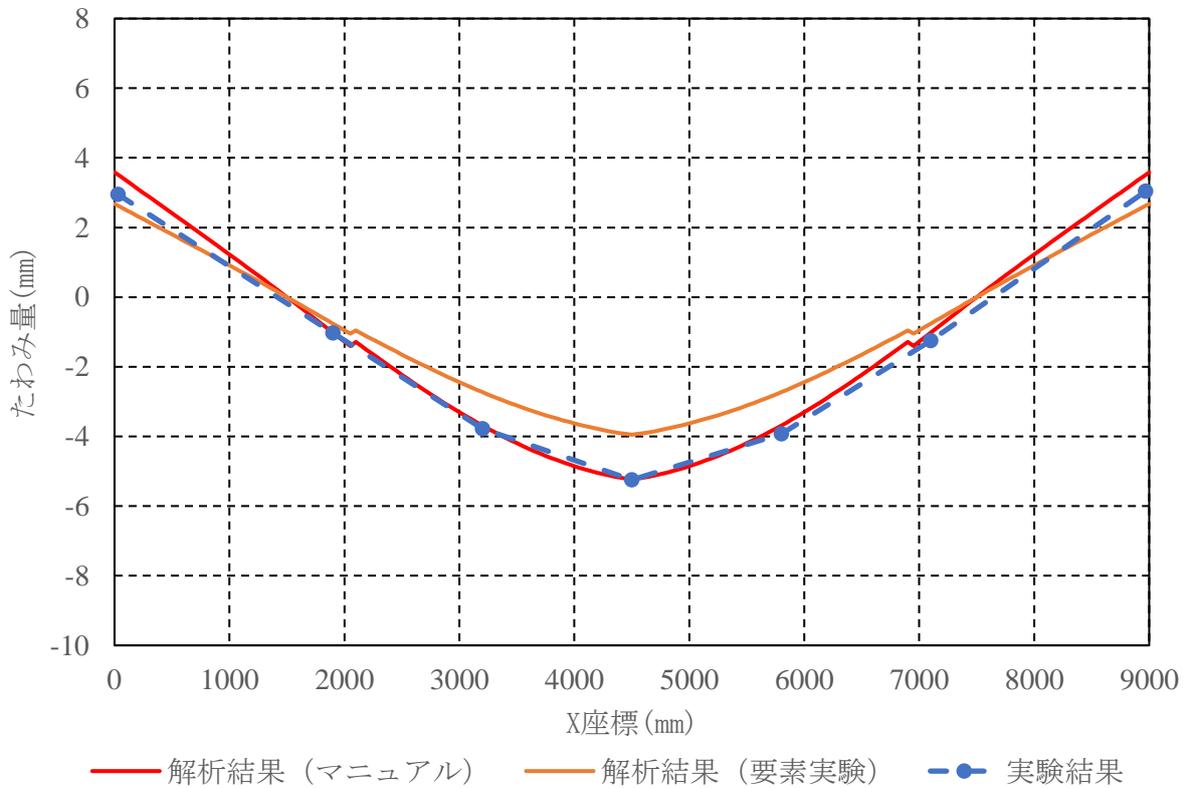


図 6.3.13 たわみ分布 (短手方向二辺支持 : 全面载荷時)

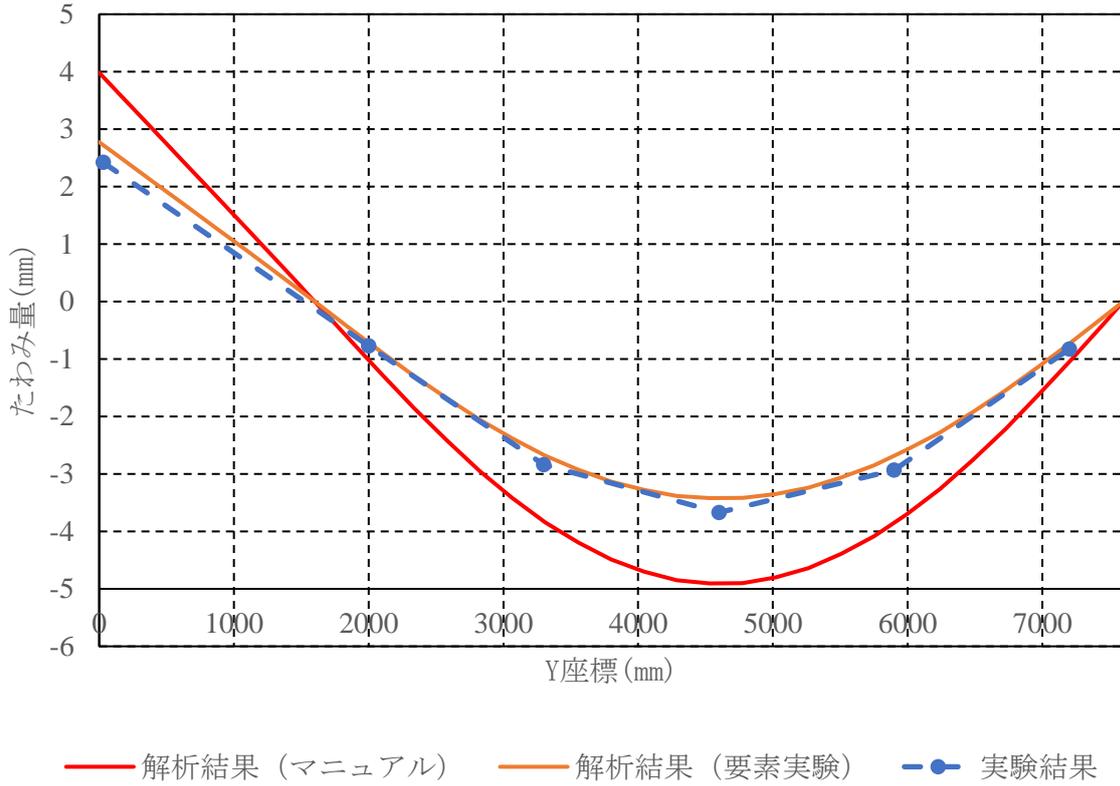


図 6.3.14 たわみ分布 (長手方向二辺支持 : 内部载荷時)

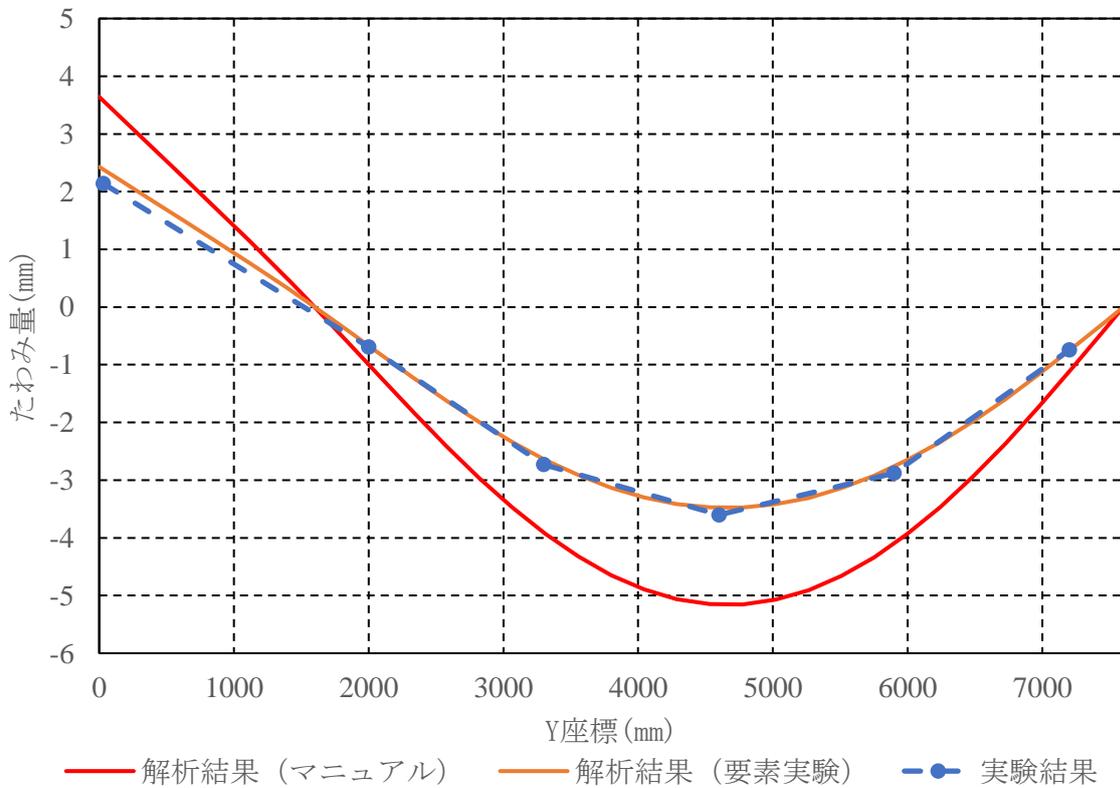


図 6.3.15 たわみ分布 (長手方向二辺支持 : 全面载荷時)

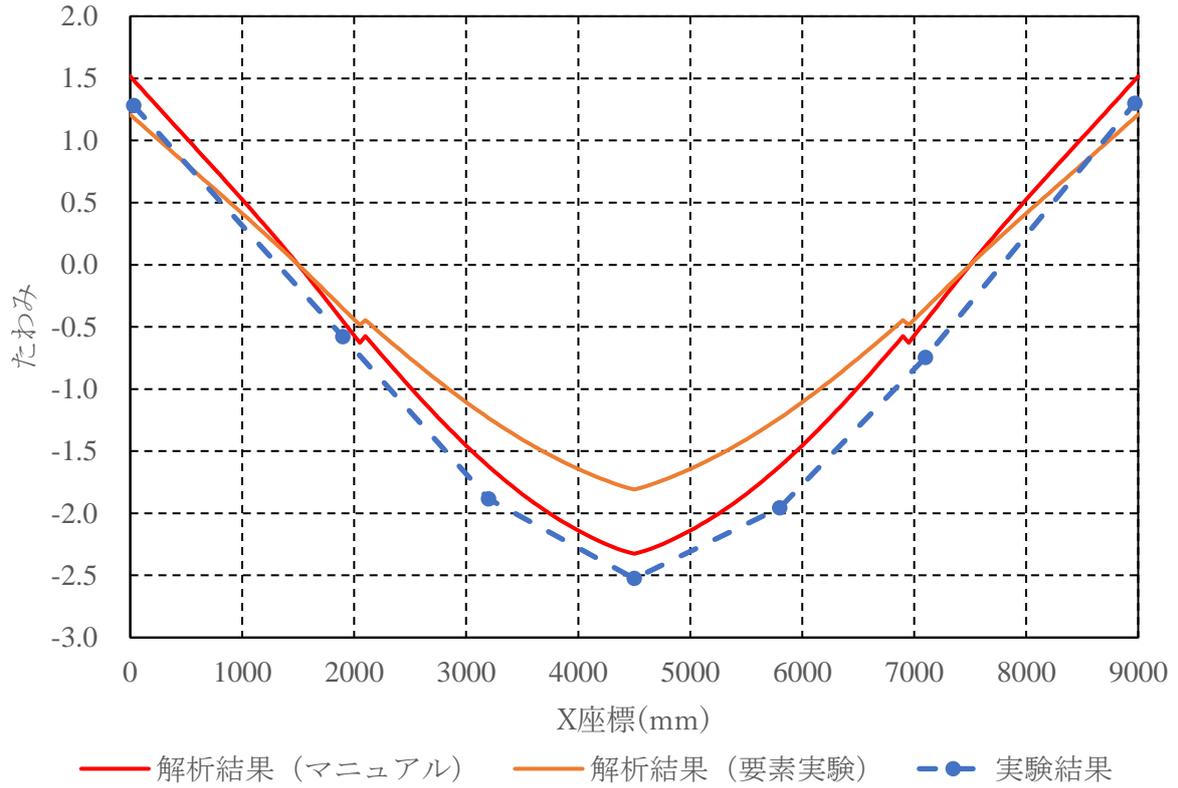


図 6.3.16 たわみ分布 (四辺支持 : 内部载荷時)

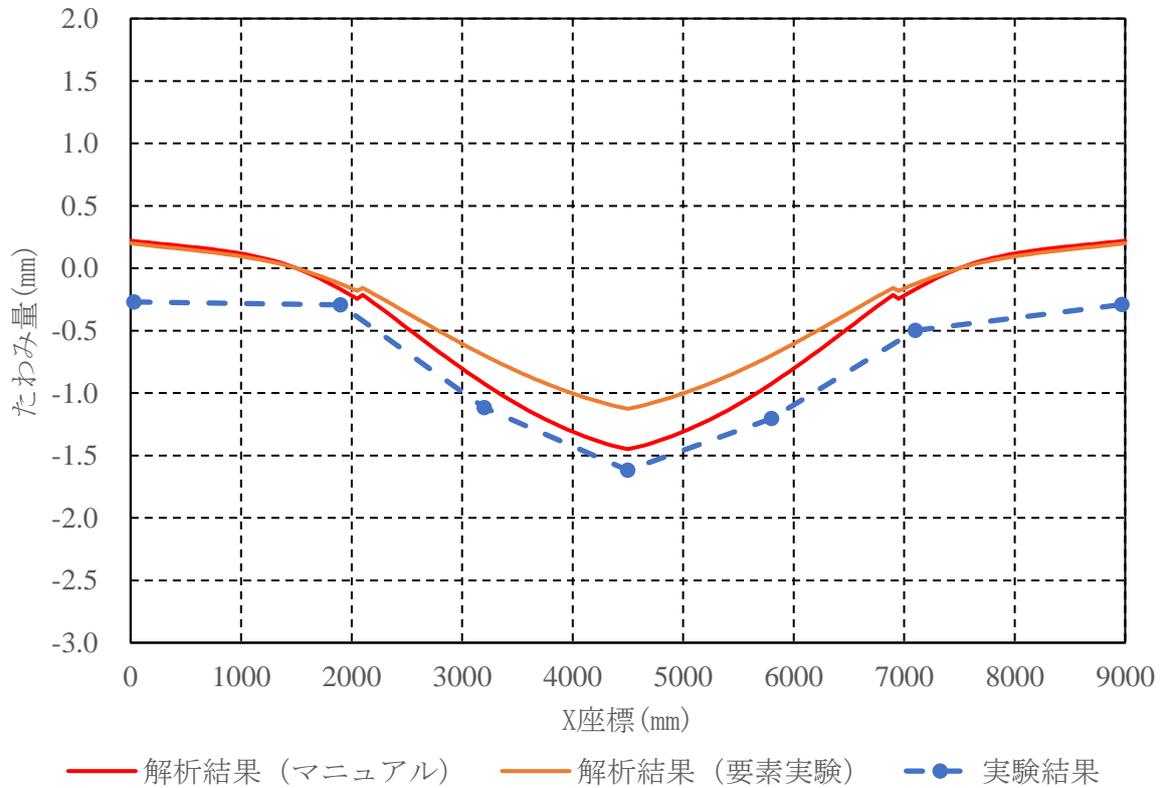
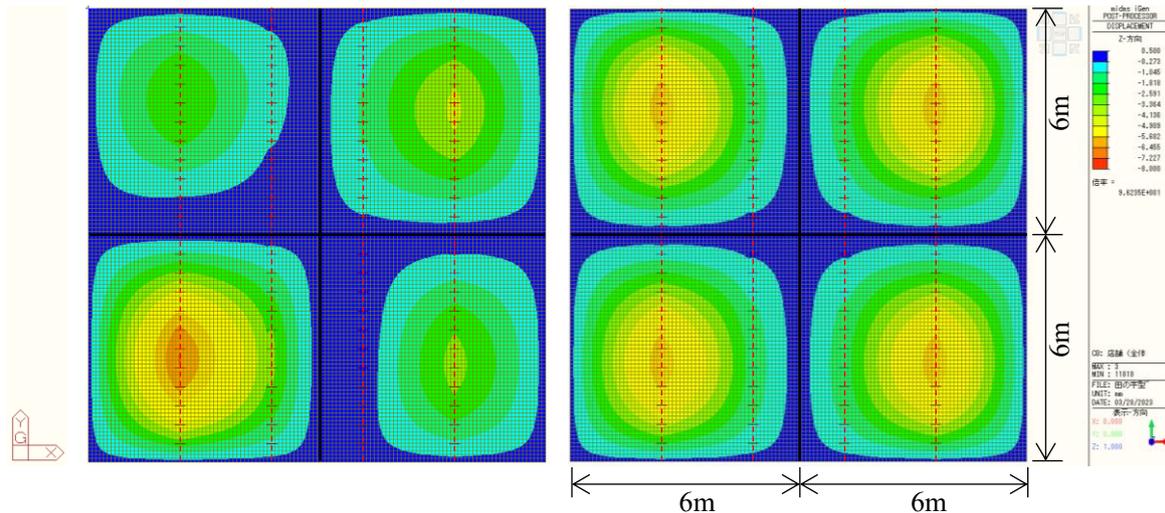


図 6.3.17 たわみ分布 (四辺支持 : 全面载荷時)

6.3.6 田の字プランのモデルを用いた跳ね出し形式の効果の検証

図 6.3.18 に示すような支持間隔 6m の田の字プランの CLT 床スラブの数値解析を行って、跳ね出し形式とした場合の効果を検証した。ここに、図中の黒実線は単純支持とした辺、赤破線は継手の辺を表す。CLT の実用的な寸法を考慮して、短手方向の幅は 2.4m とした。住宅、事務所、店舗の 3 ケースを想定し、各ケースの固定荷重及び積載荷重の値は文献 6.3.4) に準じて設定した。載荷した固定荷重、積載荷重の値を表 6.3.8 に示す。なお、積載荷重は地震時算出用の値を採用している。



(左下部分にのみ積載荷重を載荷)

(全面に積載荷重を載荷)

図 6.3.18 田の字プランのモデル (変形コンター図・店舗)

表 6.3.8 荷重を変化させた場合のたわみ量

用途	固定荷重 [N/m ²]	積載荷重 [N/m ²]	部分的に積載荷重を載荷	全面に積載荷重を載荷	
			たわみの 最大値 [mm]	たわみの 最大値 [mm]	変形増大 係数考慮 [mm]
住宅	1000	600	2.51	2.18	4.36
事務所	1500	800	3.58	3.13	6.26
店舗	1500	1300	4.54	3.81	7.62

全面に固定荷重を載荷した上で、左下部分にのみ積載荷重を載荷した場合と全面に積載荷重を載荷したとのたわみの最大値を比較すると、12%から 16%程度たわみが減少する結果が得られ、跳ね出し形式で CLT を用いることによる効果が見られた。

また、表 6.3.8 に示す 3 ケースの荷重を載荷して設計時のたわみ制限をクリアできるか確認した。たわみの制限値をスパンの 1/300 以内かつ 20mm 以内とした場合、スパン 6m の場合には制限値が 20mm となる。木造の変形増大係数 (×2) を考慮した場合にも解析結果は制

限值以内に収まった。以上のように、跳ね出し形式として CLT 床スラブを配置することにより、短手方向（一般には弱軸方向）に継手接合部を有する場合にも、実用可能なたわみ量となることが確認できた。

注 1)

本節では 6.1 節ならびに文献 6.3.1 で示された接合部の要素試験結果のうち、GIR 接合を用いた場合の回転剛性： $K_{\theta} = 2.8 \times 10^3 [\text{kN.m/rad}]$ を、GIR1 本分に換算（要素試験では幅方向に GIR を 2 本挿入）し、かつ単純梁のスパン中央に回転バネを挿入した場合に梁の曲げ剛性を無視すれば支点における回転角に対してバネ位置での回転角が 2 倍となることを考慮して、継手バネの回転成分の剛性を 700 [kN.m/rad]とした場合を基準として検証を行った。

なお、上記の値は要素試験における実際に計測された回転角を踏まえた値であるが、要素試験で得られた荷重とたわみとの間の剛性から CLT の曲げ変形を無視して換算した回転剛性は約 450 [kN.m/rad]となることから、6.3.2 節での議論を踏まえると、この値を用いることで CLT の材料特性として CLT の曲げ試験から得られた値を採用した場合の解析結果と実験結果との差が小さくなるものと推測される。

参考文献

6.3.1) 木構造振興株式会社：CLT の特性を活かす平版構成の普及に向けての開発、CLT・LVL 等を活用した建築物低コスト化・検証等、令和 3 年度林野庁補助事業木材産業・木造建築活性化対策事業、pp.17-22、2022.3

6.3.2) 田中圭ほか：CLT の特性を活かした二方向スラブの開発（その 1）実大 CLT 床の静的載荷試験雄概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.537-538、2022.9

6.3.3) CLT 設計施工マニュアル編集委員会：2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル増補版、pp.178-212、2016.

6.3.4) 木構造振興株式会社：CLT の特性を活かす平版構成の普及に向けての開発、CLT 等の利用促進及び低コスト化の推進に係る技術開発・検証等、令和 2 年度林野庁補助事業木材産業・木造建築活性化対策事業、pp.5、2021.3

6.4 動的試験の結果を踏まえた設計上の留意点

6.4.1 分析データの概要

本節では、衝撃加振試験の結果から、各部分の振動性状をいって整理し、設計上の留意点をまとめた。

本節において着目するのは、4辺支持（二方向版としての使用時）の中央点、また支持辺の外側（はね出し：強軸方向、弱軸方向、二方向はね出し）の位置での記録である。

6.4.1.1 評価法

衝撃加振試験の結果については、①中央で加振した場合、②二方向はね出し部で加振した場合、の2種類について、それぞれ上記の4点での記録を分析した。試験結果の詳細は、2021年度報告書^{6.4.1}を参照。応答加速度を記録し、1/3オクターブバンド分析を行い、結果は、「建築物の振動に関する居住性能評価基準」（日本建築学会、2018年）^{6.4.2}に規定されるV-I~V-VIIの7段階によって評価した。ただし、鉛直振動評価指標は住居用、事務所用、の2種類が示されているうち、本検討では事務所用（指標となる加速度応答値が各段階で0.5~2Gal大きい）

6.4.1.2 衝撃試験結果

1/3オクターブバンドの中心周波数を表6.4.1に、試験体の一次固有振動数を図6.4.1に示す。衝撃加振試験は5kgの砂袋を用いた30cmの高さからの落下による衝撃試験結果を用いた。

表 6.4.1 1/3 オクターブバンド（中心周波数： f_0 ）

f_0	G	$G^{-1/2}$	$G^{1/2}$	f1	f2	B
Hz	-	-	-	Hz	Hz	Hz
3.15	1.259	0.891	1.122	2.81	3.53	0.73
4	1.259	0.891	1.122	3.57	4.49	0.92
5	1.259	0.891	1.122	4.46	5.61	1.15
6.3	1.259	0.891	1.122	5.61	7.07	1.45
8	1.259	0.891	1.122	7.13	8.98	1.85
10	1.259	0.891	1.122	8.91	11.22	2.31
12.5	1.259	0.891	1.122	11.14	14.03	2.88
16	1.259	0.891	1.122	14.26	17.95	3.69
20	1.259	0.891	1.122	17.83	22.44	4.62
25	1.259	0.891	1.122	22.28	28.05	5.77

6.4.1.3 GIR 接合と鋼板添え板ビス打接合の接合部剛性

田の字型平面に床を設置した場合、連続梁の効果により梁に囲われた部分の見かけの剛性は上昇する。動的試験ではその影響を考慮することはできていないが、剛性の変化による影響を類推する目的で、GIR接合と鋼板添え板ビス打接合のそれぞれの場合での弱軸方向の接合部剛性の違いが動的応答性状に与える影響を考察した。

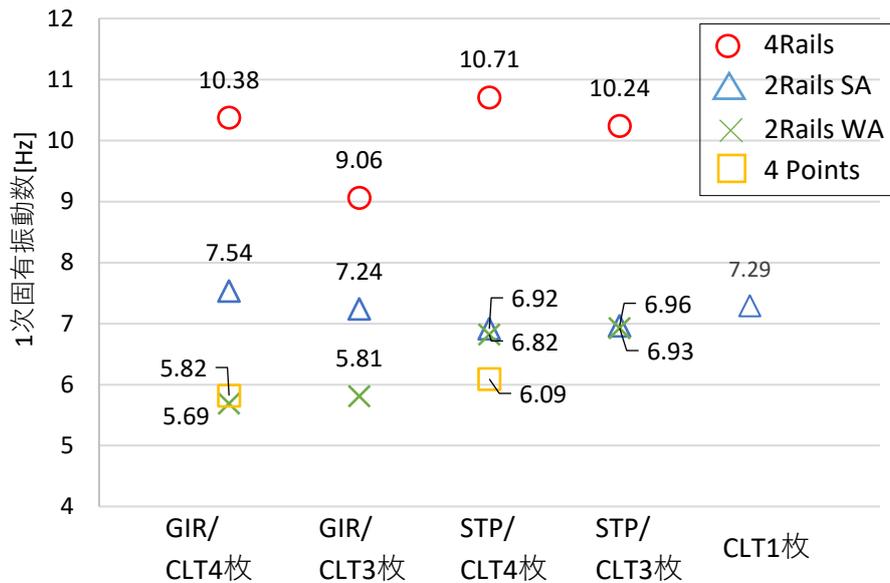


図 6.4.1 接合具・CLT 枚数・支持条件ごとの 1 次固有振動数の比較

表 6.4.2 GIR・鋼板添え板ビス打の要素実験（曲げ試験）結果
※大分大学実験報告，2022.3 より引用

試験体名		最大耐力(kN)	降伏耐力(kN)	初期剛性(kN/mm ²)
B-GIR-6Ply-J	1	54.24	33.77	0.0048
	2	55.02	45.28	0.0043
	3	59.44	44.20	0.0051
	4	63.08	49.79	0.0049
	5	47.72	32.93	0.0051
	6	53.02	32.26	0.0046
		55.42	39.70	0.0048
B-SP-6Ply-J	1	98.27	47.64	0.0045
	2	109.19	58.62	0.0029
	3	99.65	57.13	0.0030
	4	98.26	53.17	0.0030
	5	106.22	54.12	0.0033
	6	97.11	49.32	0.0040
		101.45	53.33	0.0034

なお、接合部の配置図に基づけば、試験体全体での接合個所と接合による剛性は
 ①単位接合部剛性×8 か所×3 列（GIR 接合）
 ②単位接合部剛性×13 か所×3 列（鋼板ビス打接合）
 と考えられる。

接合部の剛性のみ抽出すると、単位接合部の初期剛性を使用個数倍して示せば、GIR 接合では、0.115 [kN/mm²]、鋼板添え板ビス打接合では、0.133 [kN/mm²]の曲げ剛性が接合部に付与されていると考えられ、後者が約 15%高くなっている。この結果に基づいて、ビス接合をやや剛性が高い状態として想定し、オクターブ分析の結果を考察する。

6.4.2 加振位置または CLT 枚数による 1/3 オクターブバンド分析結果の比較

6.4.2.1 CLT4 枚の場合における中央と二方向はねだしの比較

支持条件の違いによる分析結果の比較を図 6.4.3 に示す。

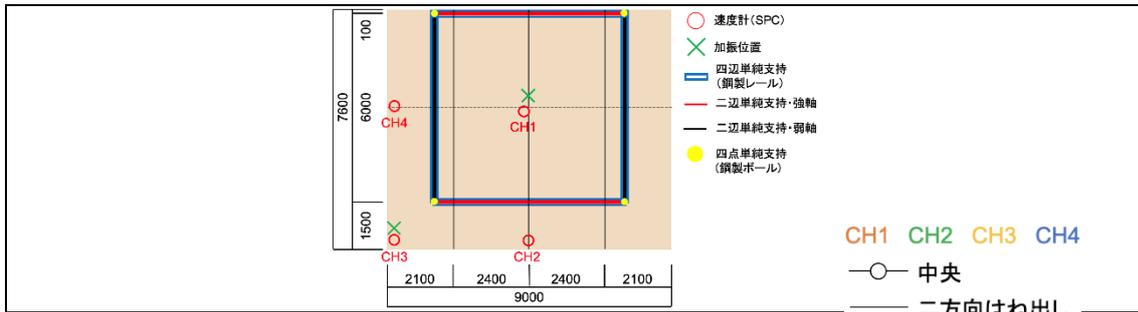
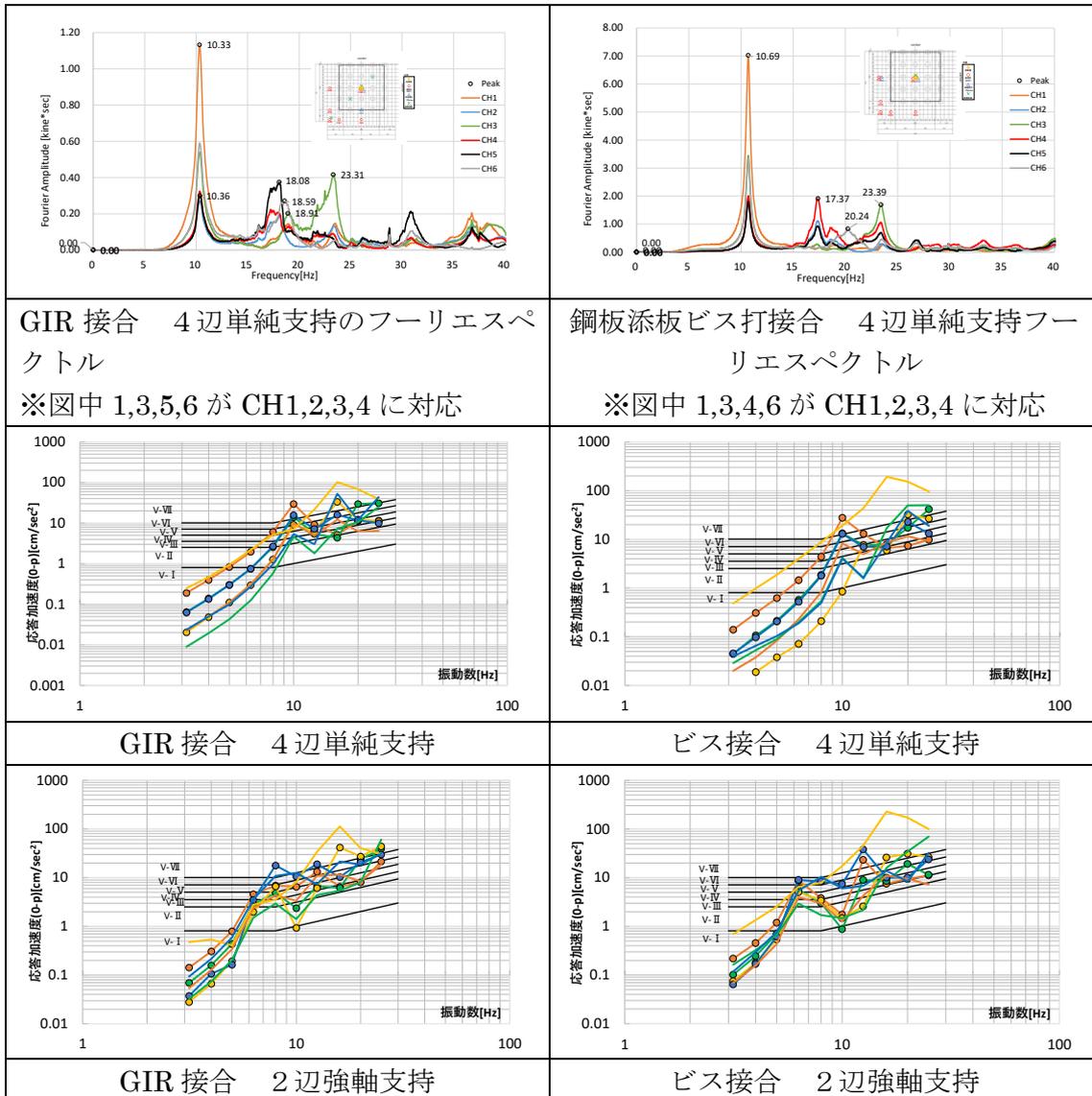


図 6.4.2 計測位置



(左 : GIR、右 : 鋼板ビス打) (上段から四辺単純支持、二辺単純支持・強軸)

図 6.4.3 支持条件による分析結果の比較

4 辺単純支持の場合の 剛性の違いによる応答値変化の比較を図 6.4.4 に示す。

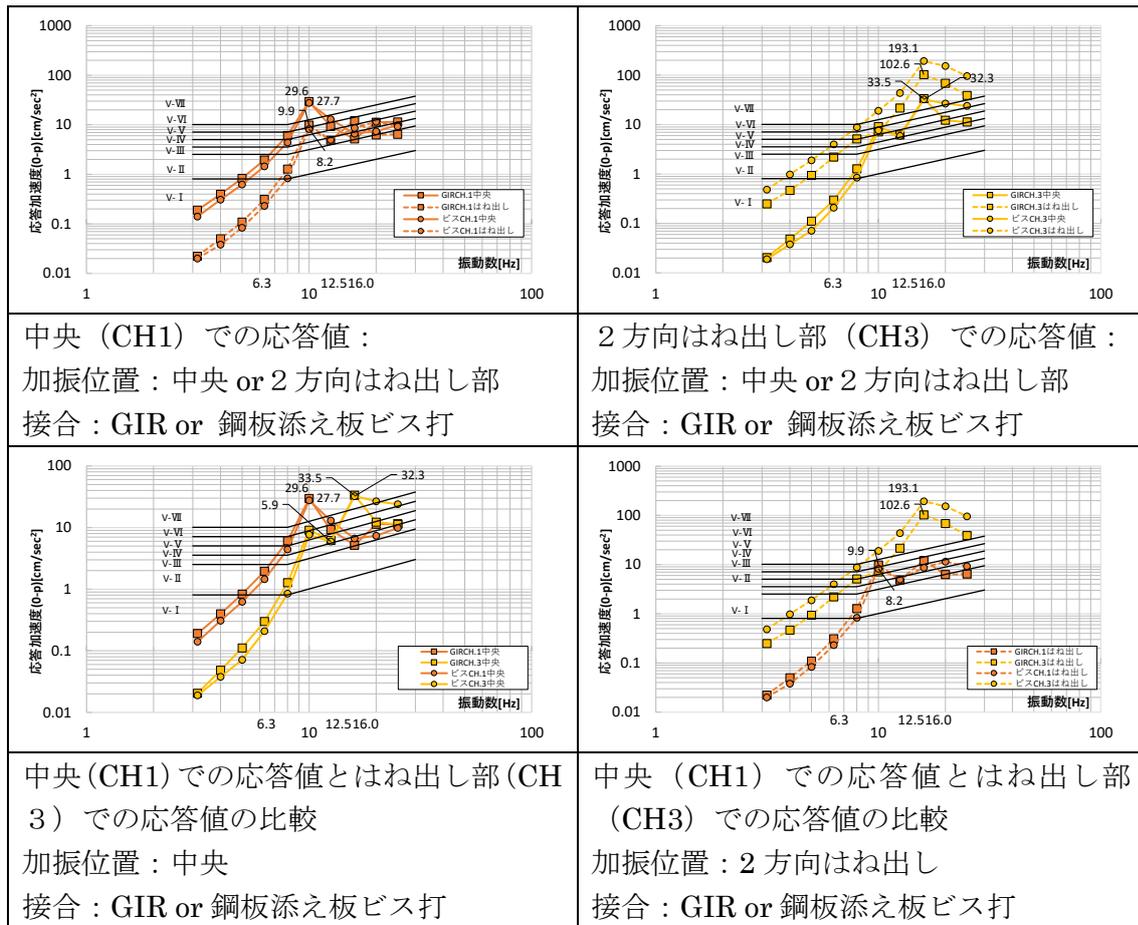


図 6.4.4 4 辺単純支持の場合の比較

接合部剛性の影響を考察する目的で、加振位置 (中央または 2 方向はね出し位置)、計測位置 (中央または 2 方向はね出し位置) について、接合部を GIR と鋼板添え板ビス接合とした場合それぞれの応答値を比較した。

(1) ピーク振動数の傾向

共通した最大応答する振動数の傾向として、中央で計測した場合、一次固有振動数 10.4Hz の付近のバンド (10Hz) でピークを生じた。はね出し部で計測した場合は、はね出し部が大きく揺れる振動数 (17-18Hz 前後) に近いバンド (16.3Hz) にもピークを生じた。

(2) 応答値の傾向：加振位置と計測位置

応答値の傾向として、中央での応答値は、中央で加振した場合には V-VII 以上となるが、はね出しで加振した場合には V-V ~ VI にとどまった。はね出しでの応答値は、中央での加振でもはね出しでの加振でも V-VII に達した。ただし、はね出し位置での加振とすることで、中央加振に比べて、ピークでの応答加速度はそれぞれ約 1/3 となった (接合によらず)。

計測位置での違い・接合部剛性の影響

(3) 中央での計測値 (図 6.4.4 左上図)：

中央で加振した場合は、どちらの接合方法でも V-VII に達した。他方、はね出し部分で加振した場合はどちらの接合方法でも V-V ~ V-VI に留まった。

(4) はね出し位置での計測結果 (図 6.4.4 右上図)：

中央からはね出し部に加振位置を変えた場合、ビス打では約 6 倍、GIR では約 3 倍の応答

値となった。はね出し部分のピークに当たる 16Hz 前後での応答が大きい。

GIR から鋼板ビス打に変化させると、中央加振では 4%小さくなったが、はね出し部分では 88%大きくなっており、変化の傾向は明確ではない。

以上より、中央での加振に対して、GIR とビスでの差は明確ではなかった。中央付近の応答値が大きいのが、はね出し部でもやや高い振動数帯で同程度応答した。

すなわち、振動数によるものの、ベランダ等のはね出し部と床中央で異なる振動数で同程度揺れる可能性があり、部位ごとの固有振動数を検討できるとよい。

他方、はね出し部での加振に対しても GIR とビスの差は明確ではない。ただし、はね出し部での応答値が大きく V-VII に達するが、中央での計測では V-VII には達しない。

よって、ベランダ等が想定されるはね出し部での振動については、中央での励起はやや小さくなる傾向があり、他方で床中央での振動に対しては、はね出し部も大きく揺れる場合があり、発生する歩行振動等の振動数に対する検討が必要である。

6.4.2.2 2 辺強軸支持の場合 剛性の違いによる応答値の比較

次に、2 辺強軸支持の場合を抽出した (図 6.4.5 参照)。

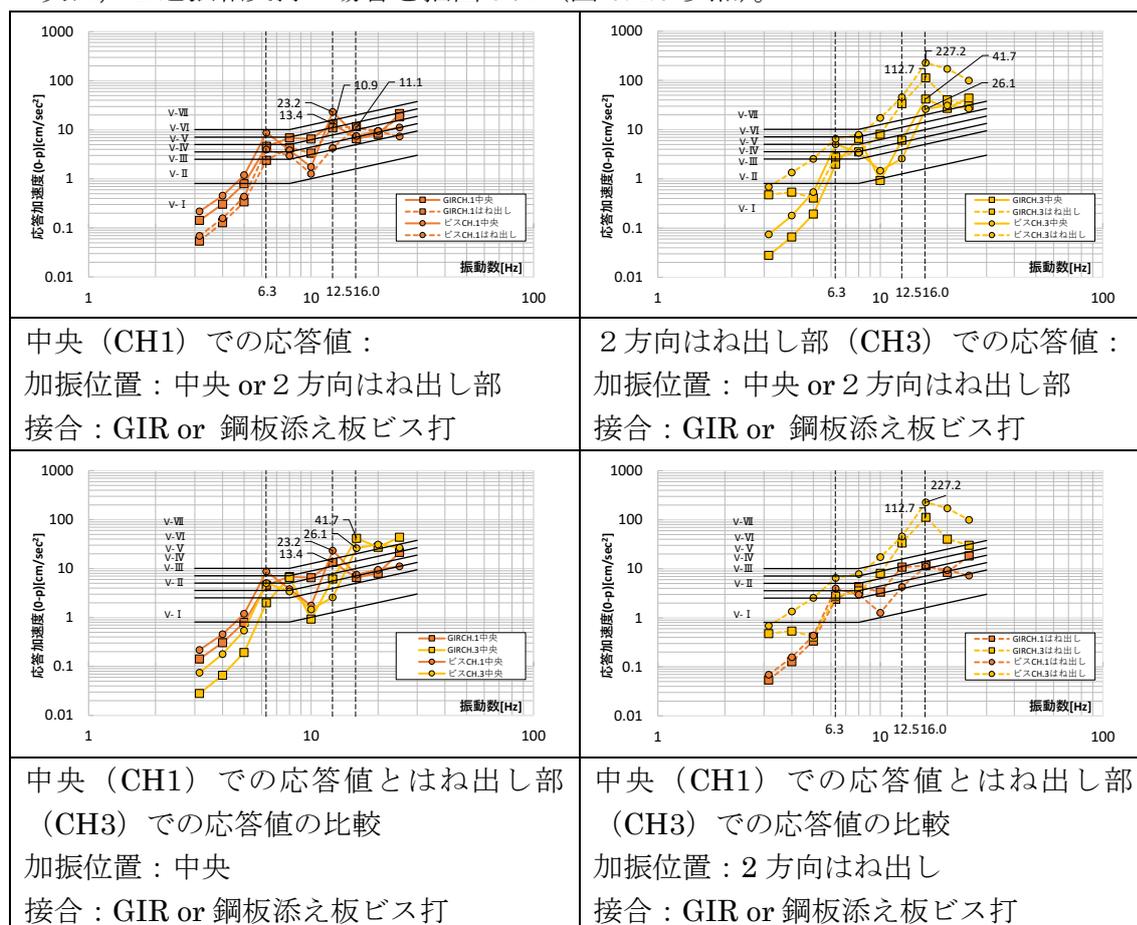


図 6.4.5 2 辺強軸支持の場合の比較

(1) 中央での応答値：はね出しや中央で加振した場合

4辺単純支持と比較すると、全体的に応答値が低くなる。一部しかV-VIIを超えず、V-V-VI程度である。応答値は一次固有振動数とレールのない部分でのやや高い振動数のふた山のピークを生じる。共振試験でのフーリエスペクトルと類似の形状となる。

一次固有振動数ではV-VIIに達しない。ピークで比較しても、4辺支持と比較して最小で2割程度は応答値は減少している。ただし、全く同じ加振ではない。

はね出しでの応答値：はね出しや中央で加振した場合

中央加振による応答の方が小さいものの、はね出しで加振した場合とともにV-VIIを超える。

(2) 剛性の影響

GIRよりも鋼板添え板ビス打接合の方が応答値が大きい傾向があるが、ピークでは逆転することもあった。中央加振に対しては、はね出し位置でも中央位置でもビスの方が大きい傾向にあり、概ねV-VIIに達した。他方、はね出し部での加振を見ると、はね出し部の計測結果は増加（10倍以上の場合も）中央位置での計測結果は減少した。

6.4.2.3 2辺強軸支持と4辺単純支持の比較

2辺強軸支持条件（点線）と、4辺単純支持条件（実線）を比較した（図6.4.6参照）。

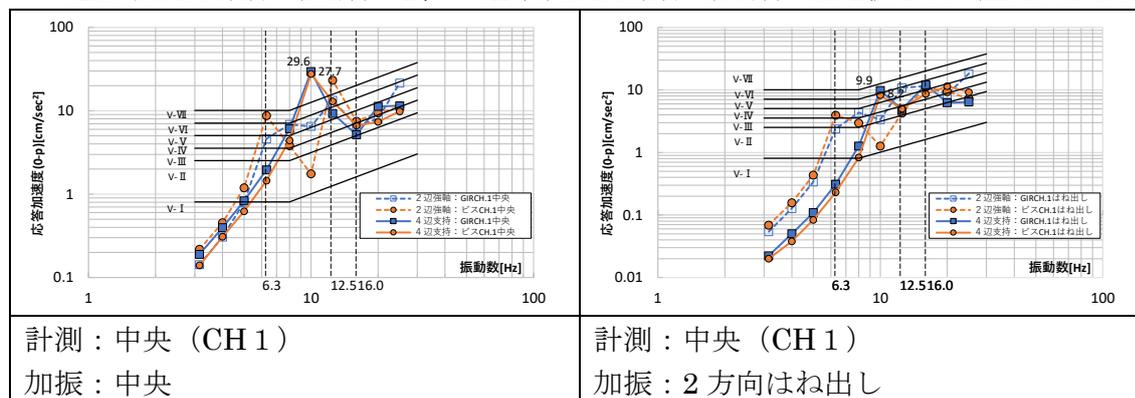


図 6.4.6 2辺強軸支持と4辺単純支持の場合の比較

中央で加振した場合（左図。同色同士を比較）、2辺強軸支持から4辺単純支持にすることで、最大応答振動数が変化（ふた山からひと山へ）した。全体的には応答値は下がる傾向にあるが、最大応答値はやや大きくなった（27.7→29.6gal）。この傾向は、GIR接合（青）でもビス接合（オレンジ）でも（接合部の剛性を変化させても）同様であった。

はね出しで加振した場合（右図）も同様の傾向であり、4辺支持にすることで、全体的には応答値は下がるが、最大応答値は同程度であった。

以上より、床として使用する場合の共振する振動数が支持条件によって異なり、これを歩行振動による周波数（10Hz等）と共振しないよう考慮した計画が必要であることが示唆された。

6.4.3 中央で加振した場合における CLT4 枚と 3 枚の比較

CLT 4 枚 (○) と 3 枚 (□) を比較した結果を示す (図 6.4.8 参照)。

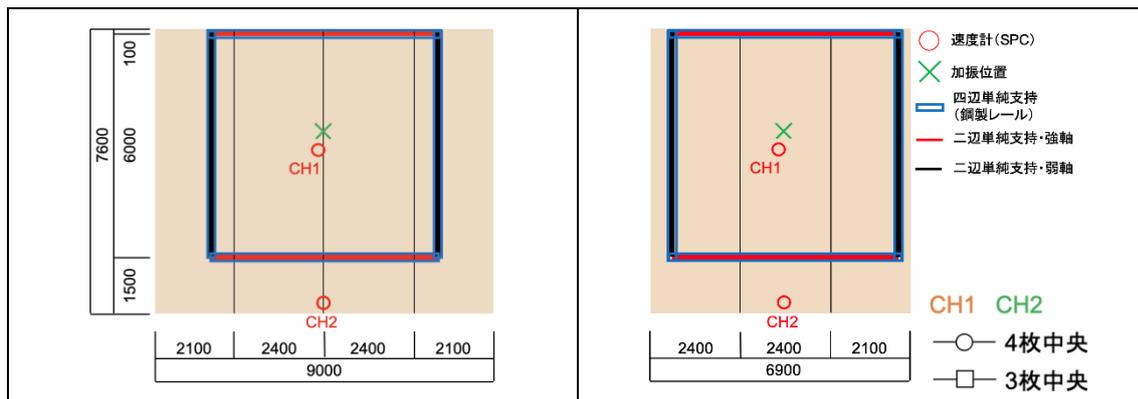


図 6.4.7 計測位置

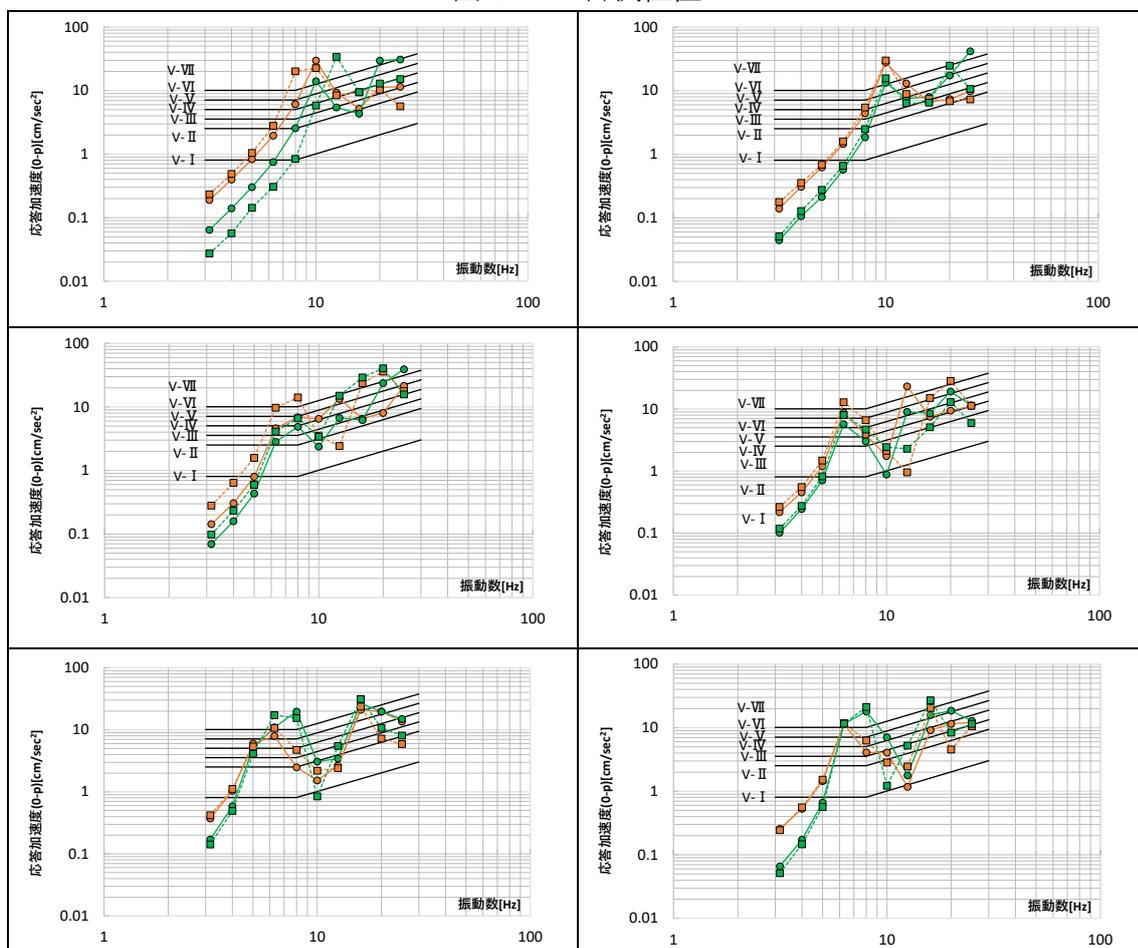


図 6.4.8 CLT 4 枚と 3 枚の比較

(左 : GIR、右 : 鋼板ビス打) (上段から四辺単純支持、二辺単純支持・強軸、二辺単純支持・弱軸)

3 枚での中央の固有振動数は 9.5Hz 程度で、4 枚より 1 割程度低い。全体的な傾向として、低い周波数での応答値は中央での計測値が、高い周波数での応答値ははね出し部での計測値が大きい傾向がみられた。4 辺単純支持、2 辺強軸支持では中央の方がはね出しより応答値が大きい傾向があるが、2 辺弱軸支持では、はね出しの方が大きい傾向がある。

(1) GIR 接合：4 辺単純支持

同じ計測位置でみると、中央 (CH1) ではほとんど差はなく、やや 3 枚 (□) の方が 4 枚 (○) より応答値が大きい傾向がある。はね出し (CH2) では逆で、4 枚の方が、応答値が高い傾向にあるが、最大のピークは 3 枚の方が大きい。

応答評価値では、応答値は GIR 接合の場合枚数に寄らず V-VII を超える。

(2) 鋼板添え板ビス打：4 辺単純支持

4 枚と 3 枚の差は小さいが 3 枚の方が応答が大きい傾向がみられる。中央の方が応答値は大きく、CLT の枚数に寄らず V-VII を超える。

剛性の影響に関しては、GIR からビス打に変更しても、最大応答値は大きく変わらない。

2 辺強軸支持と 4 辺単純支持を比較すると、全体に最大応答値は少し下がる。中央での応答値は、4 枚では V-VII に達しないが、3 枚では V-VII を超える。

ビス打の 2 辺強軸にすると中央の応答値がやや下がり、はね出し部の最大応答値は増加する。中央は V-VII を超えるが、はね出し部では超えていない。

支持条件による衝撃振動による加速度応答値の変化も考慮した水平構面の計画とすることが望ましい。

6.4.4 まとめ

① 2 辺強軸支持から継手を設けて 4 辺単純支持とした効果

加振位置によらず、2 辺支持では比較的低い中央の固有振動数と、レールのない位置の比較的高い固有振動数の 2 つのピークを持つが、4 辺支持にすることでそれが中間程度の 1 つのピーク (中央を腹とする 1 次固有振動数) が卓越するようになる。周波数領域全体では、4 辺支持にすることで応答値は小さくなる傾向にあるが、ピーク周辺の応答値においては必ずしも大小は明確ではない (4 辺支持の方が大きくなる場合もある)。

歩行振動の影響を考慮して設計する際に、小さいピークが前後に 2 か所ある場合と、大きなピークがその間程度に一つある場合のどちらが歩行障害に影響するかは現時点では明らかではないが、少なくとも歩行振動 (2 Hz 前後) から一次固有振動数がより離れること、ピーク付近以外では応答値は下がることに、継手を設けて 4 辺単純支持 とすることの優位性があると考えられる。

② 連続梁の効果

連続梁の効果は動的試験では直接は検討できていない。代替として、接合方法を GIR 接合とした場合と鋼板添え板ビス打接合とした場合を比較した。

4 辺支持の場合、中央での加振に対しては、GIR の方が応答値の大きい傾向があった。はね出しで加振した場合、必ずしも GIR が大きくはならなかった。

2 辺強軸支持の場合、GIR よりも鋼板添え板ビス打接合の方が、応答値が大きい傾向があるが、ピークでは逆転することもあった。中央加振に対しては、はね出し位置でも中央位置でもビスの方が大きい傾向にあり、概ね V-VII に達した。

明確な傾向はみられなかったが、支持条件によって異なる場合があることが示された。今後は、動的試験結果についても、解析モデルを持ちいた定量的な検証が必要である。

参考文献

- 6.4.1) 令和3年度林野庁補助事業 木材産業・木造建築活性化対策事業 CLT・LVL等を活用した建築物の低コスト化・検証等 CLTの特性を活かす平版構成の普及に向けての開発 報告書, 2022.3
- 6.4.2) 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説 第3版, 日本建築学会, 2018

第7章 経年変化の検証

7.1 非対称構成の CLT の暴露試験による経年変化

7.1.1 試験の目的

令和3年度報告書の第4章、第6章で対象とした実験では、本報告書の図1.6で想定した建築物の床に採用することを前提に、6層6プライのCLTを使用している。6層6プライのCLTは、通常建築物に使用されている3層3プライ、5層5プライ、5層7プライ等のように、積層面におけるラミナの向きが、対象になっている構成とは異なり、非対称構成となっており、時間とともに対象構成と比較すると、形状変化の影響が大きいのではと危惧されている。

そこで状況を確認するため、令和2年度に実施した試験体を再利用して、5層5プライ（厚さ150mm）と6層6プライ（厚さ180mm）のCLTを室内と屋外に設置し、形状変化の程度を比較確認することにした。

7.1.2 試験体概要

試験体の概要を表7.1.1、試験体の形状および寸法を図7.1.1に示す。

表 7.1.1 試験体概要

試験体の設置環境	CLTの規格	寸法
室内 (大分大学工学部試験棟内)	S90-5-5 (ヒノキ)	厚さ150mm 480mm×1200mm
	S90-6-6 (ヒノキ)	厚さ150mm 480mm×1200mm
屋外 (屋根なし)	S90-5-5 (ヒノキ)	厚さ150mm 480mm×1200mm
	S90-6-6 (ヒノキ)	厚さ180mm 480mm×1200mm

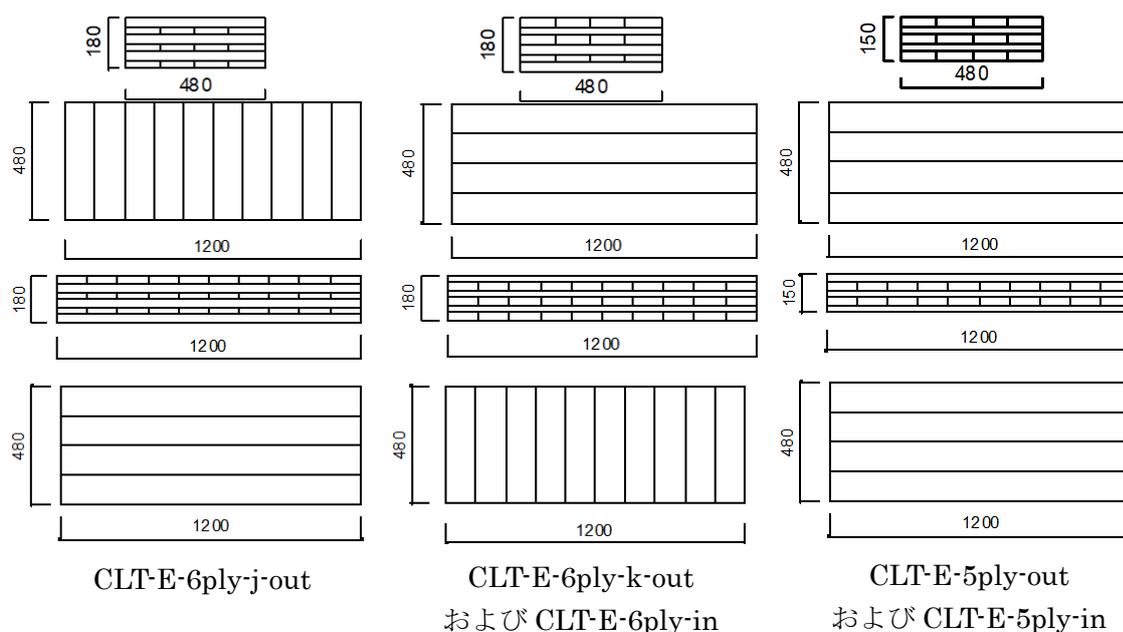


図 7.1.1 試験体の形状および寸法 (mm)

表 7.1.1 の CLT を各 1 体準備し、令和 3 年 4 月から経過観察を始めた（写真 7.1.1~写真 7.1.4 参照）。計測位置を図 7.1.2 に示す。



写真 7.1.1 試験体設置の様子



写真 7.1.2 弱軸の様子



写真 7.1.3 強軸の様子



写真 7.1.4 断面の様子

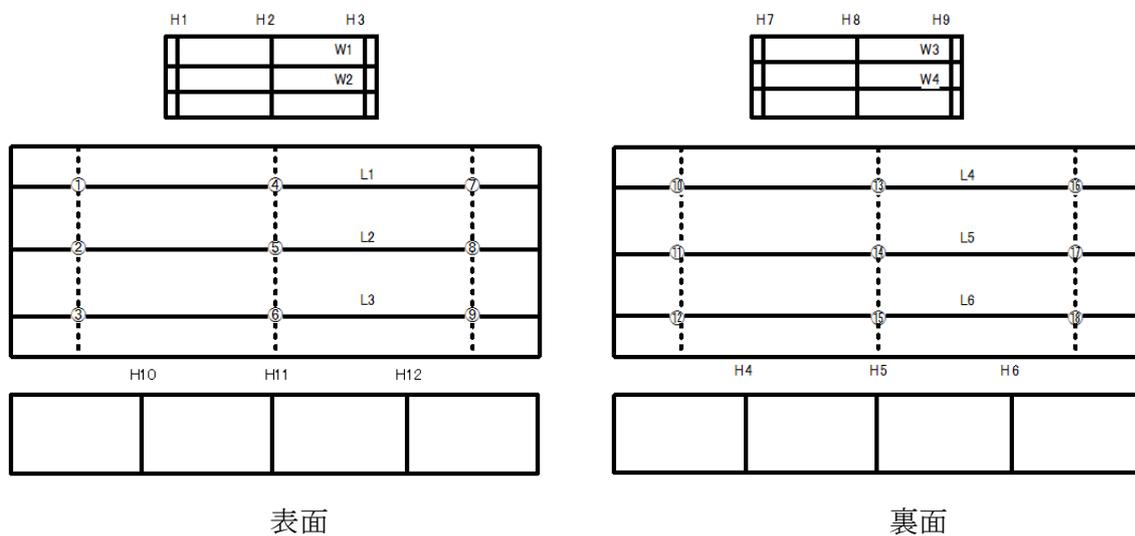


図 7.1.2 計測位置

7.1.3 試験の結果

図 7.1.3~7.1.5 に試験体の寸法変化の推移、図 7.1.6 に表層の含水率の推移、図 7.1.7 に重量変化の推移を示す。写真 7.1.5~写真 7.1.8 に令和 5 年 1 月時点での各試験体の状況を示す。なお、ここでの変化量は、各試験体の令和 3 年 4 月の計測値を基準とした。5 層 5 プライ構成の試験体と比較し、懸念された 6 層 6 プライの CLT の大きな相違は観察されていない。

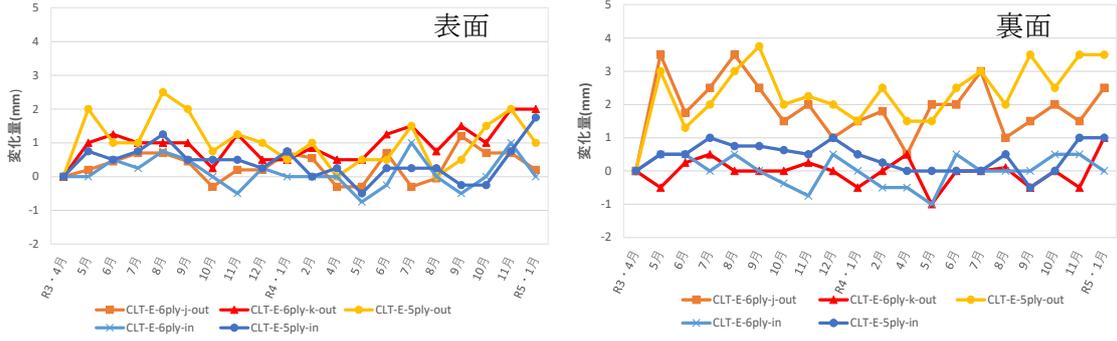


図 7.1.3 幅方向長さの変化

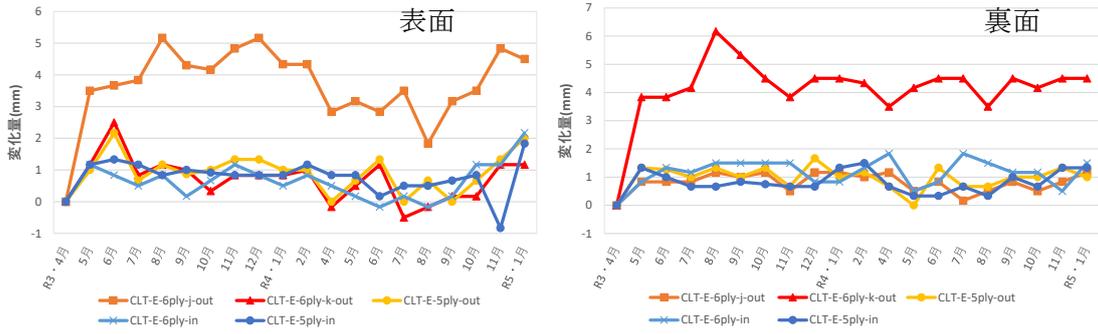


図 7.1.4 長さ方向長さの変化

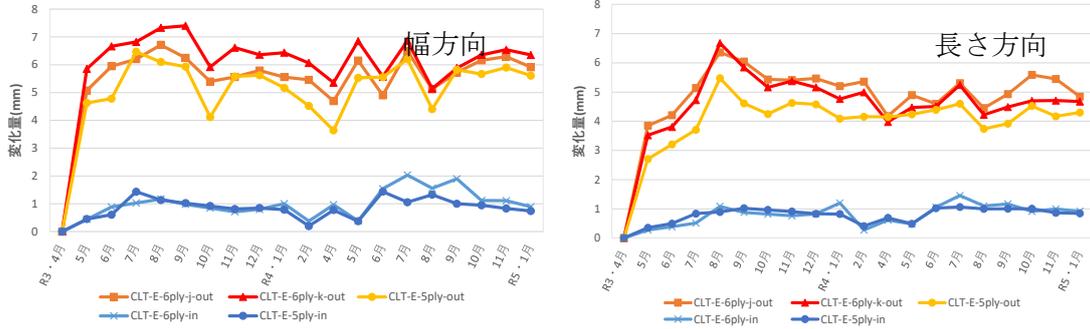


図 7.1.5 厚さの変化

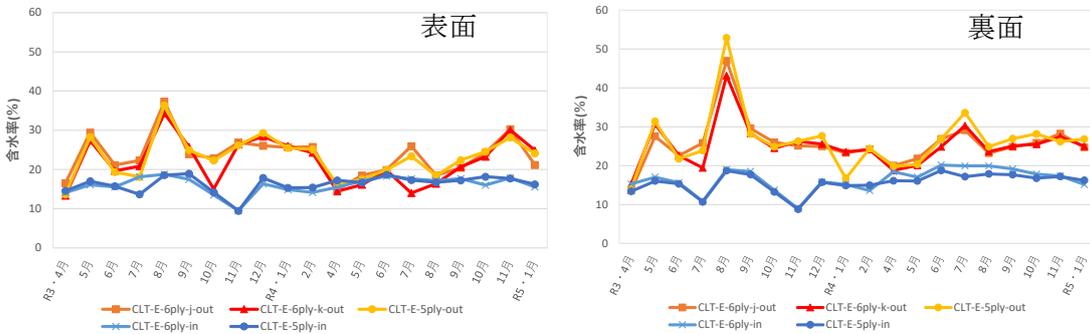


図 7.1.6 含水率の変化

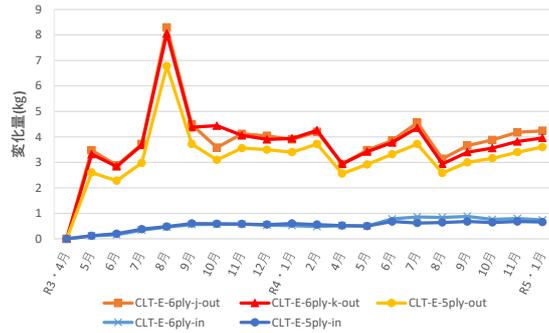


図 7.1.7 重量の変化



写真 7.1.5 試験体の様子



写真 7.1.6 幅方向の様子 (CLT-E-6ply-j-out)



写真 7.1.7 長さ方向の様子 (CLT-E-6ply-j-out)



写真 7.1.8 試験体裏面の様子

7.2 屋外暴露実験における CLT 内部の含水率の変化

7.2.1 計測の目的

大分で実施している屋外暴露実験では、暴露開始から1年以上経過していた5層5プライのヒノキ CLT、6層6プライのヒノキ CLT、の2種類の材料に関して、温湿度センサを用いた内部含水率計測方法で暴露中の含水率を計測している。また5層5プライのヒノキ CLT に関しては、屋内と屋外平置きの2条件で計測している。それ以外の種類の試験体は屋外平置きのみ計測している。

この結果から、暴露の条件（屋内外、CLT 構成）と内部含水率変動との関係を得ることを目的としている。さらに含水率を試験体の材端から 30, 80, 400mm 離れた3点で計測することで、材内部の繊維方向の含水率分布が外部環境によってどのように影響を受けるのかを明らかにする。

本節では、屋外暴露実験の概要とその結果を報告する。

7.2.2 計測概要

内部含水率は、温湿度センサを用いた内部含水率計測方法を用いている。これは、材内部湿度を Kollmann^{7.2.1)} の平衡含水率曲線に適用し、局所的な含水率の推移を求める方法である。平衡含水率曲線の適用には、曲線を近似した齋藤ら^{7.2.2)} の式を用いている。

図 7. に計測点の位置を示す。計測している層は、設置したときに下面になる層を1層目として数える。温湿度センサはハイグロクロン (KN ラボラトリーズ、以下 HY) を用いて3時間間隔で計測した。温湿度センサを設置した後、計測穴からの水分流入を防ぐために、計測層以外をウレタンゴム棒と配管用パテ (AP-1000-I) を用いて塞いでいる。試験体を設置している場所の外部の湿度は、屋外では HY を用いて3時間間隔で、屋内では温湿度センサ (おんどとり) を用いて1時間間隔で計測している。温湿度センサのデータの取り出しは、2022年7月22日と2023年2月16日の2回おこなっている。

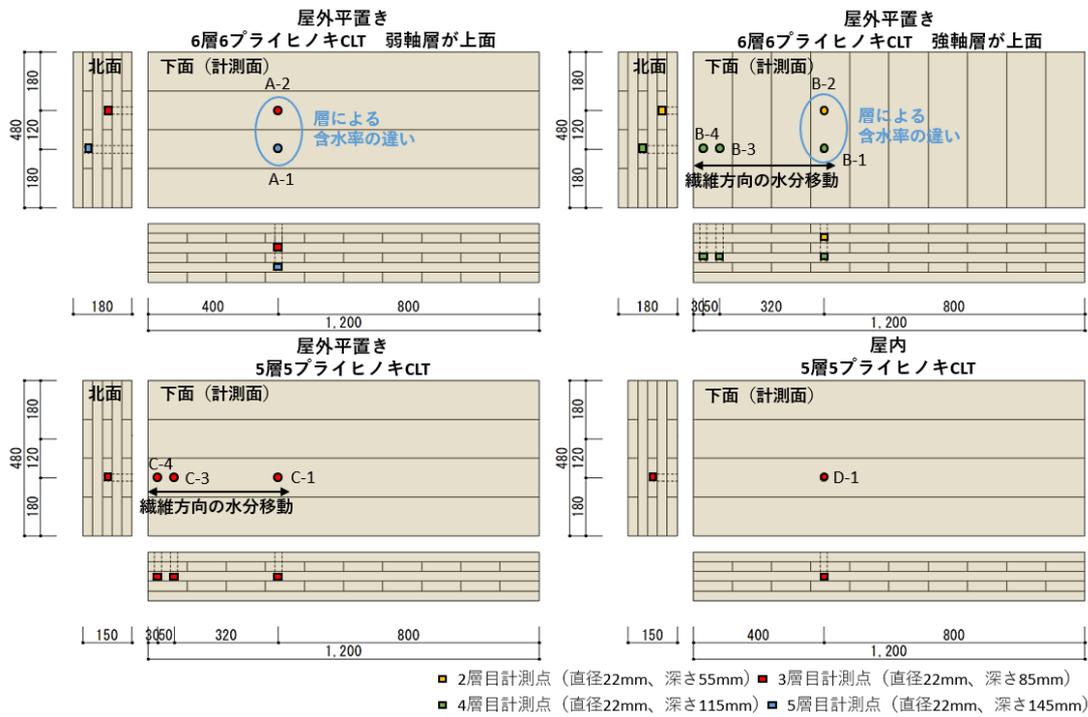


図 7.2.1 計測点の位置

7.2.3 外部環境

表 7.1.1 に大分の屋外の気温と降水量の月別のデータを示す。気温は試験体設置場所で HY を使用して計測した値、降水量は気象庁のデータベース 7.2.3) から得た値を用いている。

図 7.2.2 に屋内外温湿度の日平均値の変動を示す。また図 2.3 に降水量の推移を示す。

表 7.1.1 大分の屋外気温と降水量の月別データ

	年	2022												2023
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
月平均屋外気温	°C	4.2	4.1	11.0	15.1	19.0	23.3	26.8	28.0	23.9	17.5	13.5	7.4	4.8
月平均屋内気温	°C	6.5	6.5	13.1	17.5	21.3	25.7	29.7	31.0	26.7		16.8	8.3	7.3
月の降水量合計	mm	42	31.5	127.5	123.5	98	246	194.5	109.5	405.5	24.5	28.5	21.5	45.5
1時間降水量の最大	mm	3	3.5	13.5	15	7.5	16.5	26	27	38.5	4	8	4.5	6

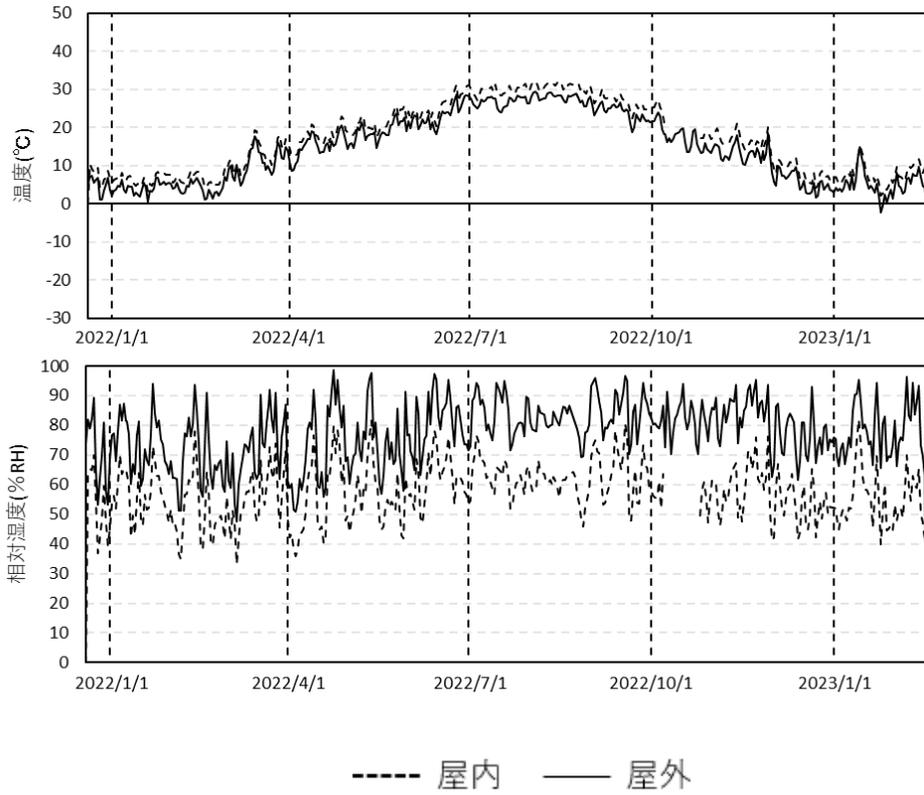


図 7.2.2 試験地の屋外温湿度の日平均値

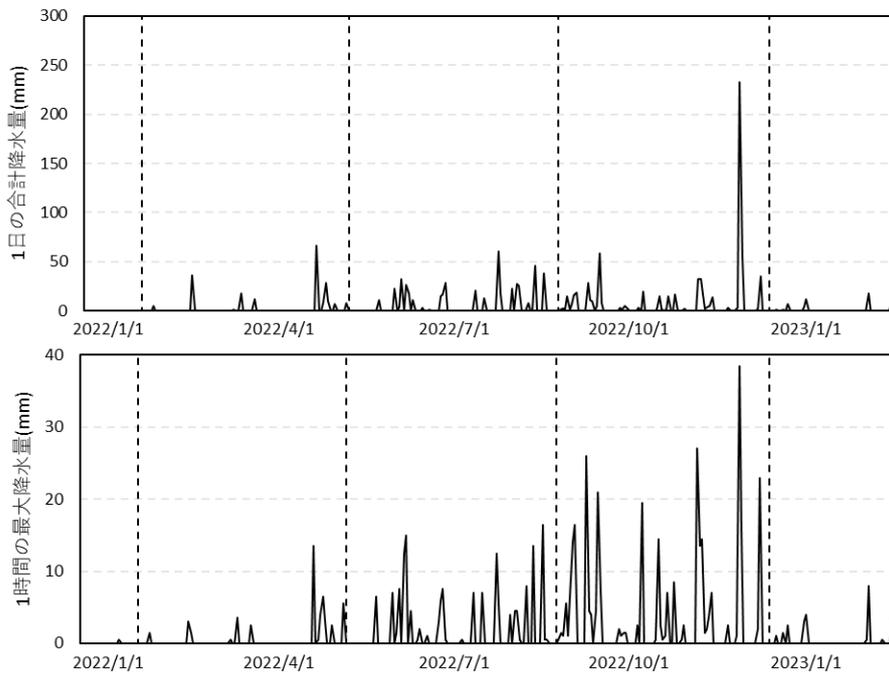


図 7.2.3 大分市の降水量推移

図

7.2.4 試験体各面の様子

写真 7.2.1 から写真 7.2.3 に計測開始から約半年（2022 年 7 月 22 日）の試験体各面の様子を示す。暴露開始から 1 年以上経過していることもあり、屋外試験体は全て試験体側面（写真、東西面と南北面）に幅 3mm 以上の割れが生じていた。特に接着層付近の割れがかなり進展していた。また屋外試験体北面にはカビが発生していた。

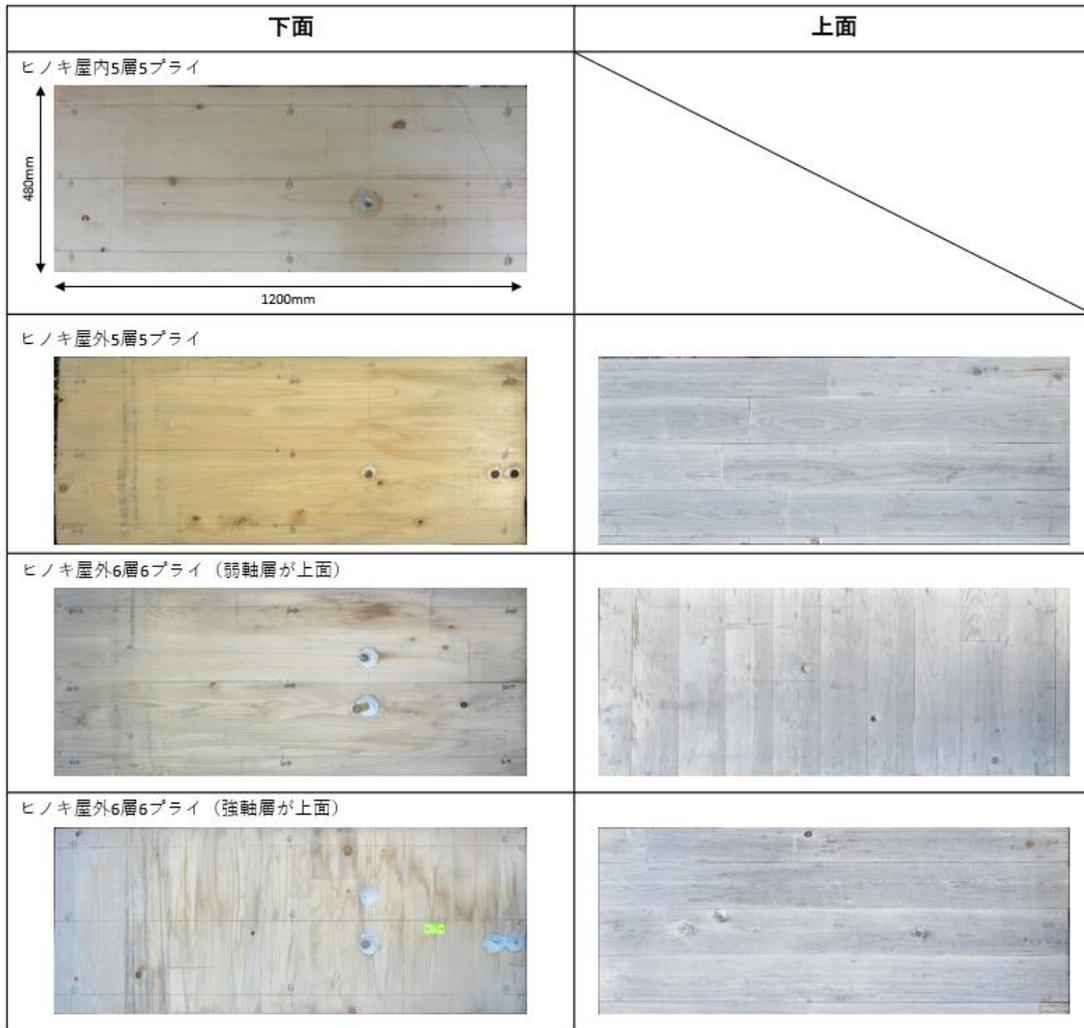


写真 7.2.1 試験体上下面の様子

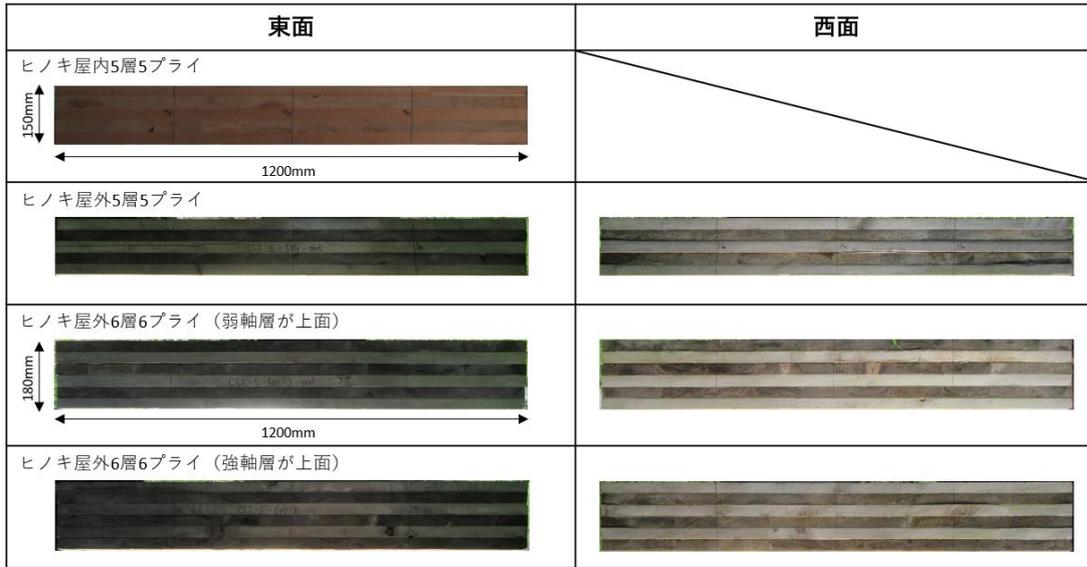


写真 7.2.2 試験体東西面の様子

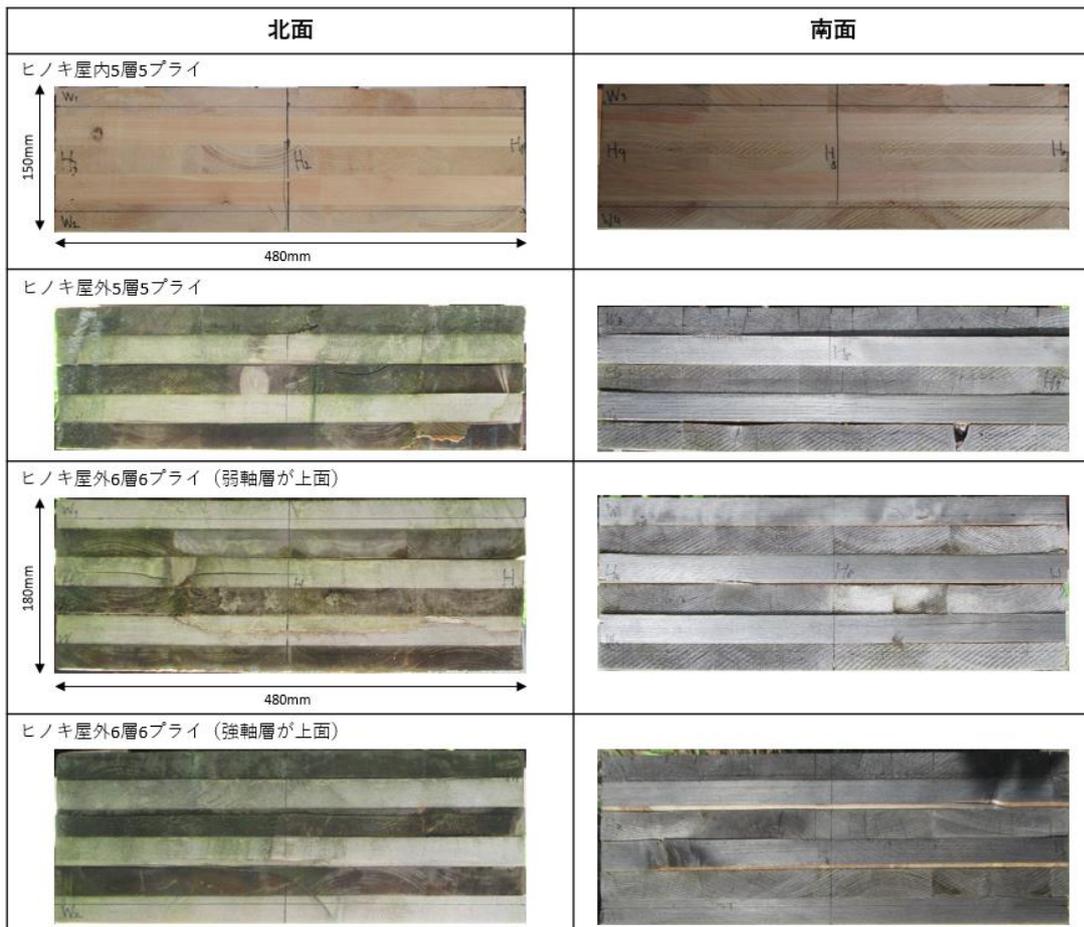


写真 7.2.3 試験体南北面の様子

7.2.5 計測結果

図 7.から図 7.2.7 にそれぞれの試験体の内部温湿度とそこから算出した内部含水率、及び屋外温湿度と1時間の降水量を示す。

屋外平置ききの6層6プライ CLT（強軸層が上面）と5層5プライ CLT で計測していた、材端から距離の近い計測点（30mm と 80mm）は、写真 7.に示すように試験体の割れが大きかったこともあり、相対湿度が長期間計測可能最大値以上となっている計測点が多かった。これは計測点まで通じる割れによって、雨水が計測部に付着し正確な計測値を計測できなかったためと考えている。そのため、2022年7月22日の計測以降は、材端に近い計測点の計測を中止した。計測点に水分が流入していたかどうかを確認するため、2022年7月22日の計測後、ヒノキ棒（直径 20mm）を計測穴に埋めた。写真 7.2.4 に約2か月経過した2022年9月16日のヒノキ棒の様子を示す。材端から 30mm 計測点に入れていた棒が、湿っていたことを確認し、計測穴まで水分が流入していたことがわかった。本計測方法での計測では、計測穴まで通じる割れの発生によって計測値に影響を及ぼすことがわかった。

材端から 400mm の距離の計測点は、計測点を設けた層によって差が生じていた。屋外平置き6層6プライ CLT では、3層目計測値（設置時上面になっていた層から4層目）に対して5層目計測値（設置時上面になっていた層から2層目）の方が内部相対湿度と内部含水率の1日の変動が大きくなっていた。しかし、5層目計測点は木材内部含水率としては変動速度が速すぎるため、CLT の目地の開きなどによって外部環境の影響を受けていたと考えられる。

図 7.2.8 に材端から 400mm の距離の計測点の変動の小さかったものの結果を示す。今回の計測において屋外平置き試験体の中では、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点と6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では内部含水率の変動が小さかった。しかし屋内計測点の内部含水率が12%程度であったのに対し、6層6プライ（弱軸上面）3層目計測点では14～18%、6層6プライ（強軸上面）2層目計測点では16～20%の間と、屋内試験体の含水率より高い状態で推移していた。また、設置時の上層からの距離が近い6層6プライ（強軸上面）2層目計測点の方が高い含水率で推移していた。

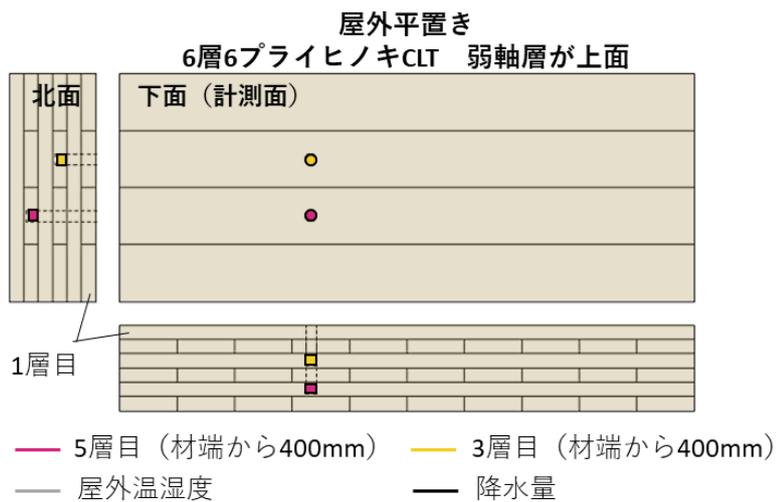
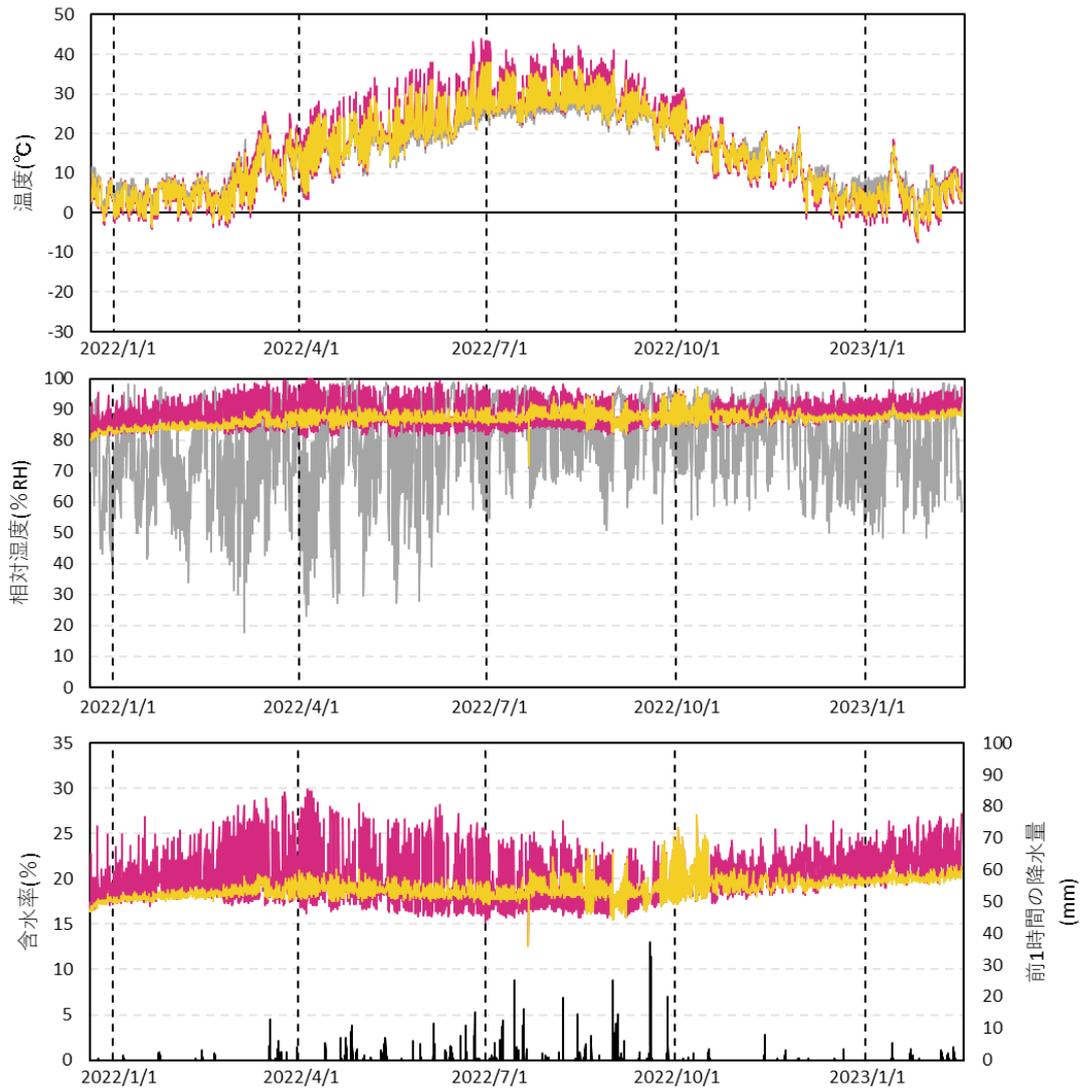


図 7.2.4 屋外平置き 6層 6 プライ CLT (弱軸層が上面) 試験体の計測値

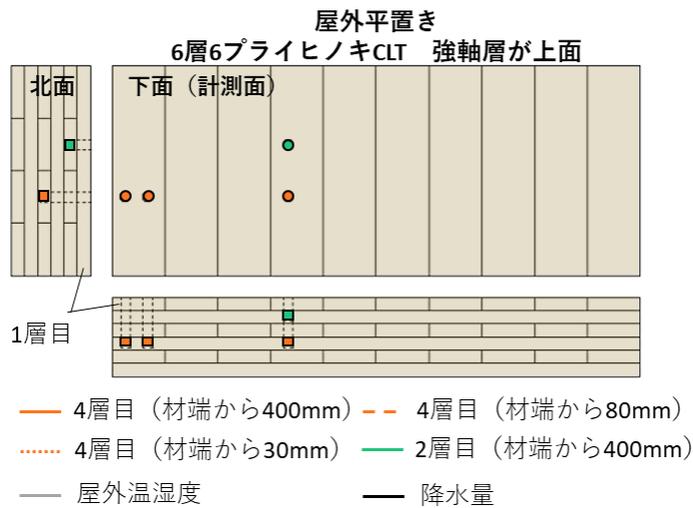
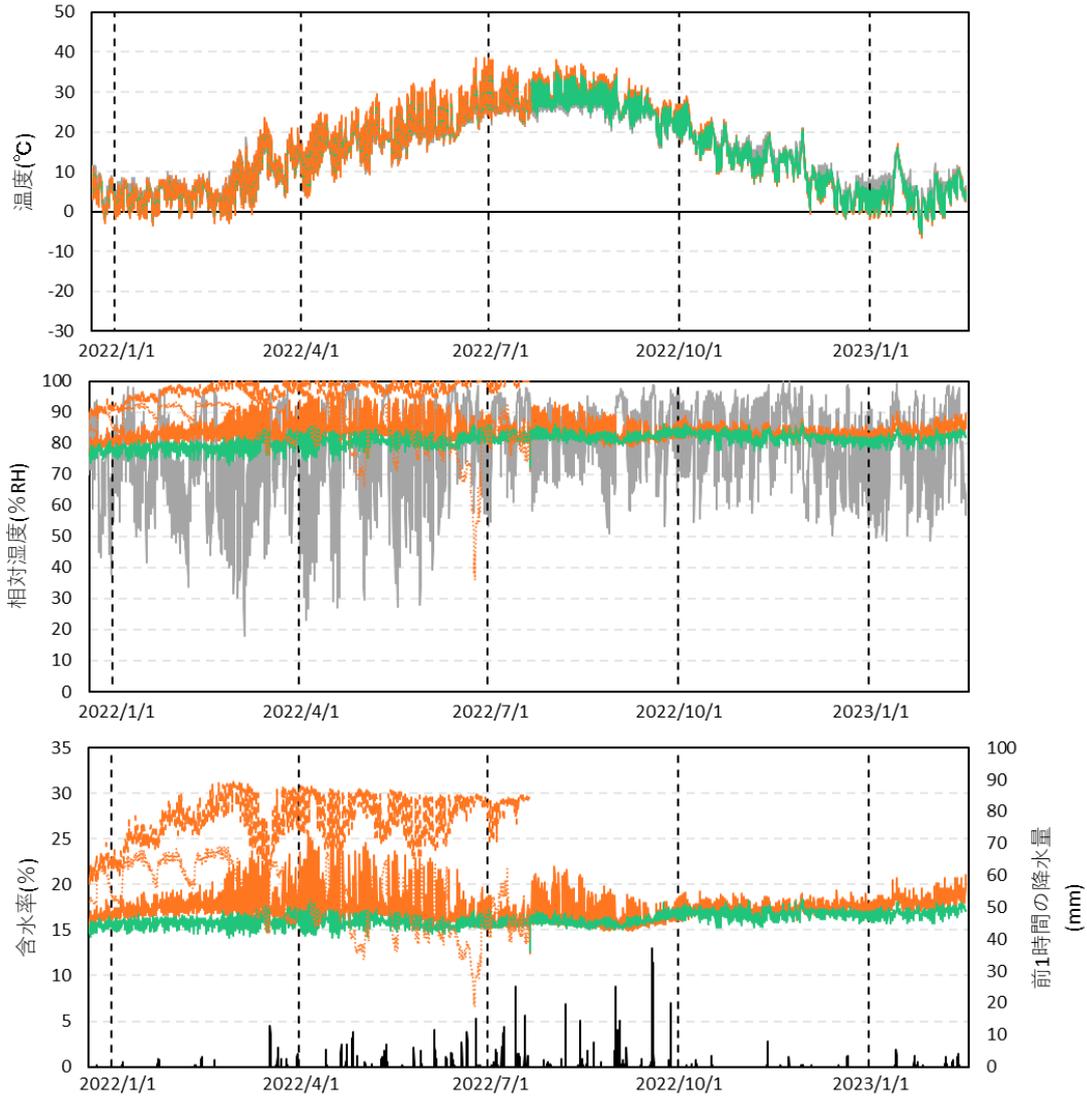


図 7.2.5 屋外平置き 6層6プライ CLT (強軸層が上面) 試験体の計測値

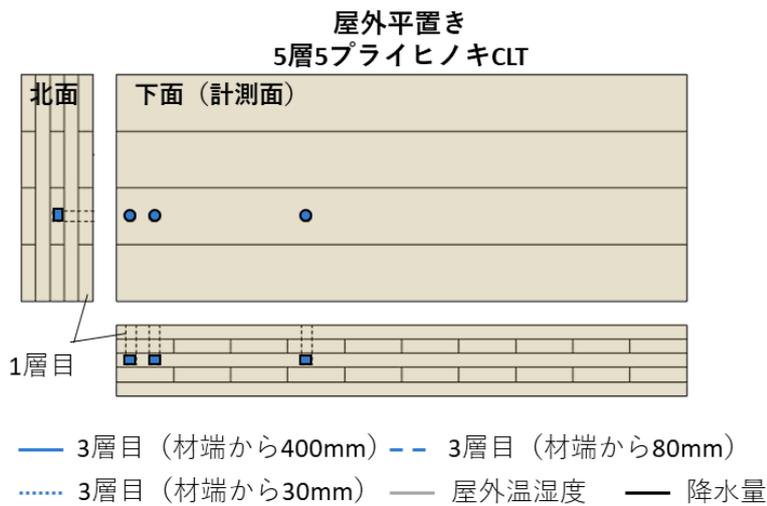
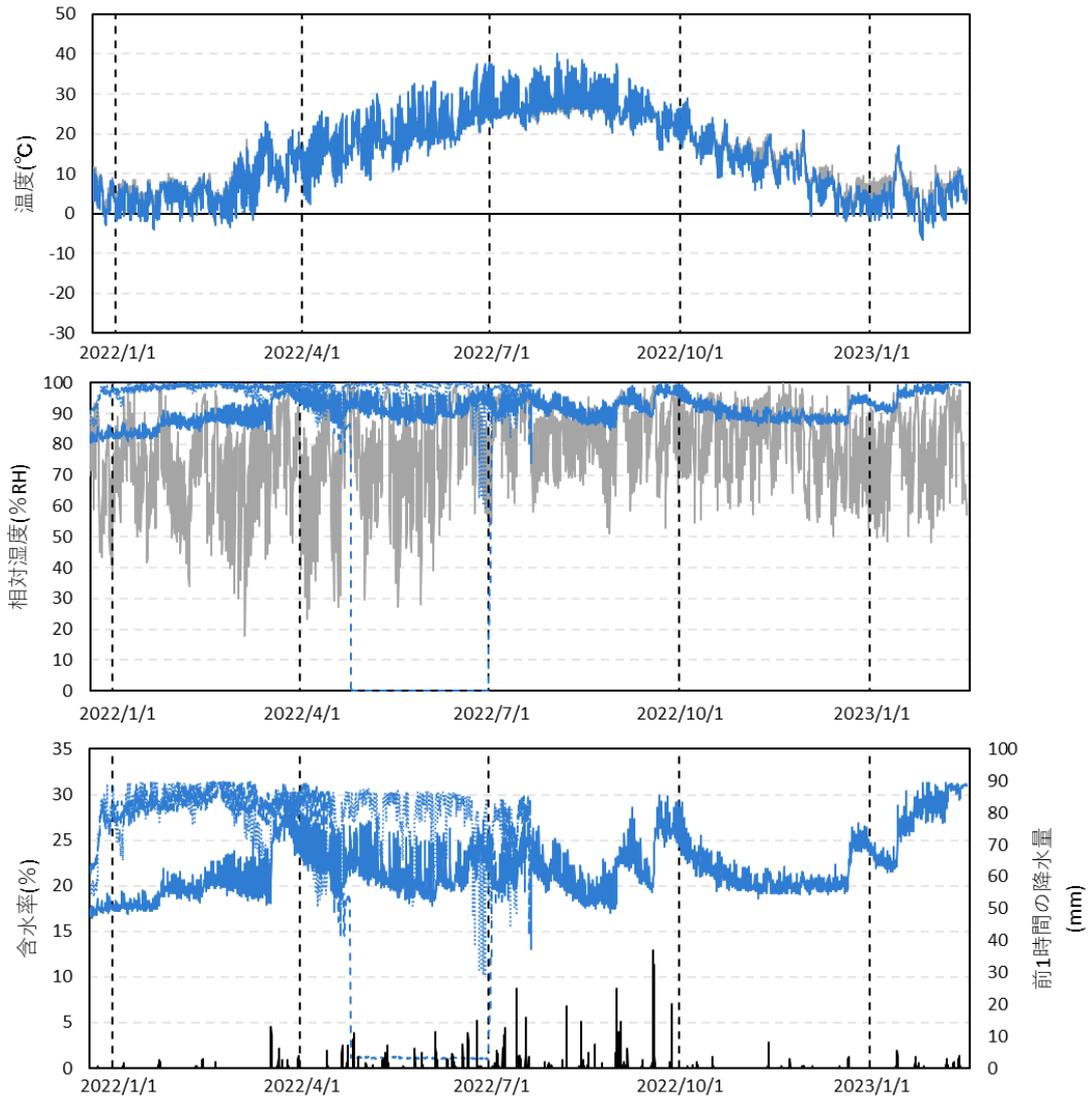


図 7.2.6 屋外平置き 5層5プライ CLT 試験体の計測値

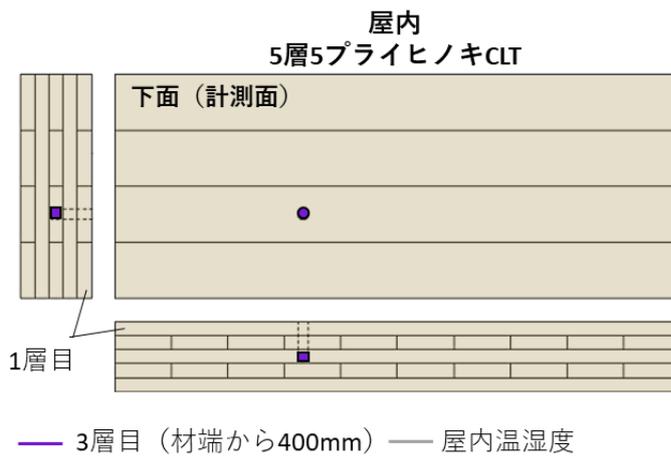
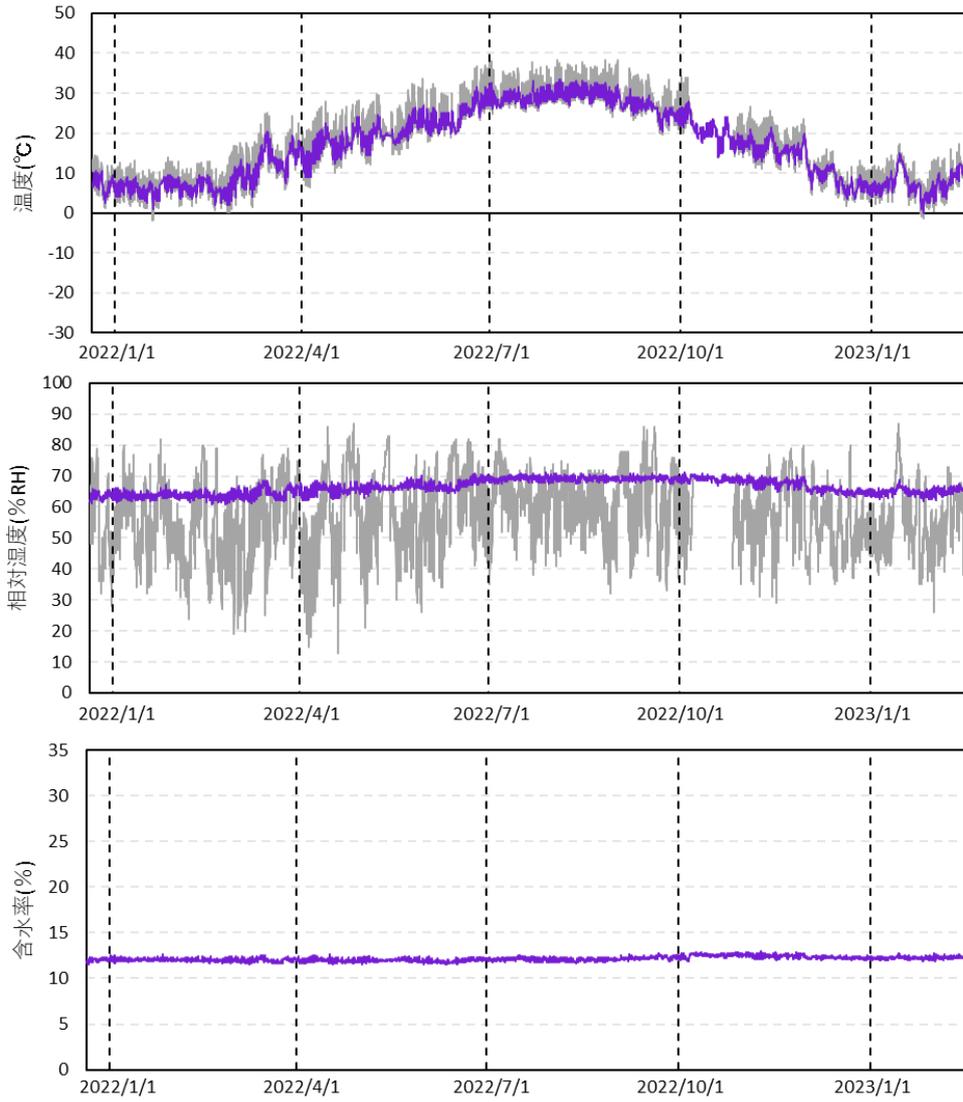


図 7.2.7 屋内 5 層 5 プライ CLT の計測値



写真 7.2.4 計測を中止した計測点の様子 (2022年9月16日)

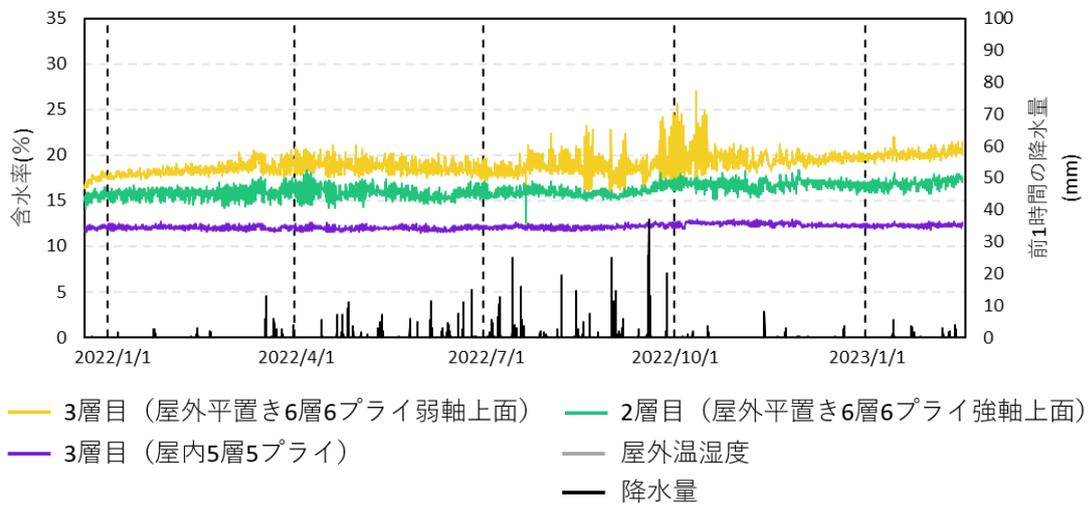


図 7.2.8 各試験体材端から 400mm 計測点の計測値 (変動が小さかったもの)

7.2.6 まとめ

暴露の条件（屋内外、CLT 構成）と内部含水率変動との関係を得ることを目的とし、暴露開始から 1 年以上経過していた 5 層 5 プライのヒノキ CLT、6 層 6 プライのヒノキ CLT、の 2 種類の材料の暴露実験を大分市でおこなった。

その結果、暴露開始から 1 年以上経過しており幅の広い割れが多く、材端から距離の近い計測点や、材端から 400mm 離れていても設置時の上層からの距離が近い計測点は外部環境の影響を強く受ける結果となった。

外部環境の影響が小さかった計測点は、材端から 400mm の距離で、6 層 6 プライ（弱軸上面）3 層目計測点では 14～18%、6 層 6 プライ（強軸上面）2 層目計測点では 16～20%の間と、屋内試験体の含水率（12%程度）より高い状態で推移していた。

参考文献

7.2.1) Franz F.P. Kollmann, Wilfred A. Cote, Jr., Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.189, 1968

7.2.2) 齋藤周逸, 信田聡：日本の気候値平衡含水率, 木材学会誌 Vol.62 No.5, pp.182-189, 2016

7.2.3) <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>

7.3 接合部のクリープ試験

7.3.1 接合部クリープ試験の目的

一昨年度、短期せん断実験を実施したヒノキ CLT での鋼板添え板ビス接合部において、これまでほとんど実績が無いため、長期性能の評価の導入としてクリープ性能試験を実施し、その性能を確認することを目的とする。

7.3.2 試験概要

7.3.2.1 試験体概要

図 7.3.1 に試験体図、図 7.3.2 に添え板鋼板の寸法、表 7.3.1 に実験前ヒノキ CLT の寸法を示す。試験体は昨年度実施した鋼板添え板ビス接合部短期せん断実験と同様の寸法とし、強軸方向と弱軸方向のものを 1 体ずつ実施している。なお、CLT は強度規格 S90A の 5 層 5 プライ、ビスはパネリード鋼 (PK8-90)、鋼板は SS400 とした。

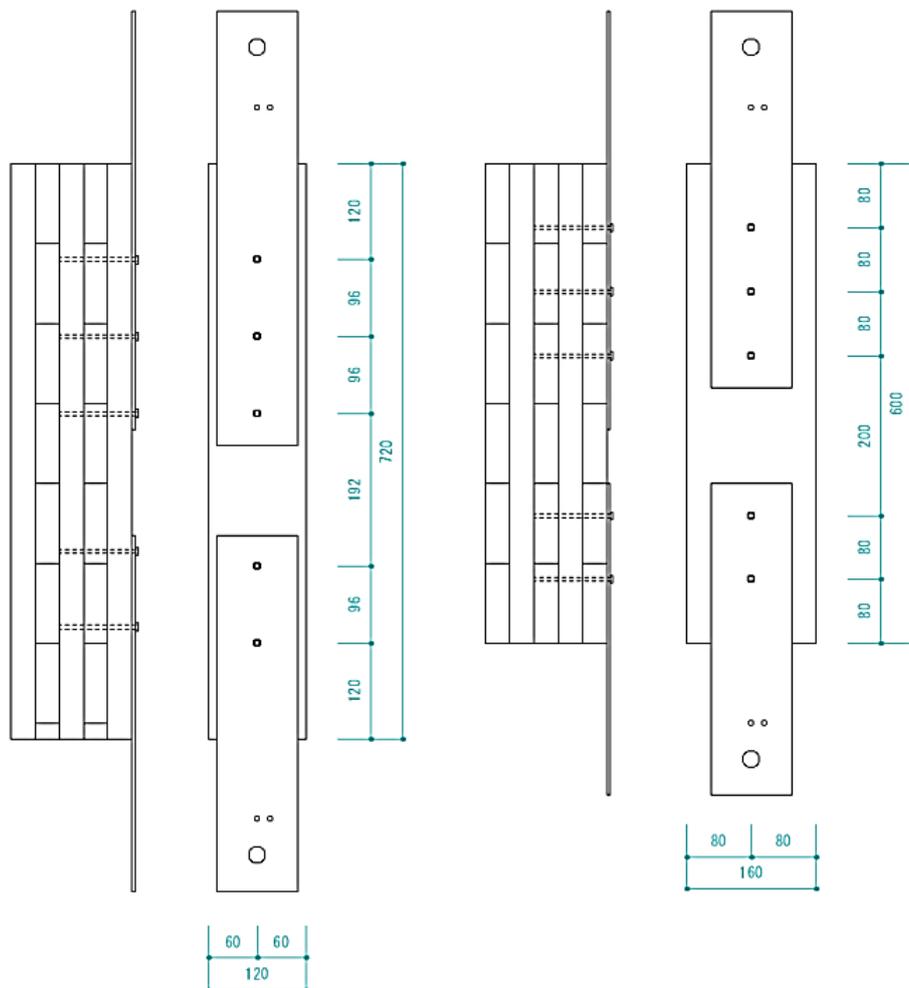


図 7.3.1 試験体図 (左：強軸方向、右：弱軸方向)

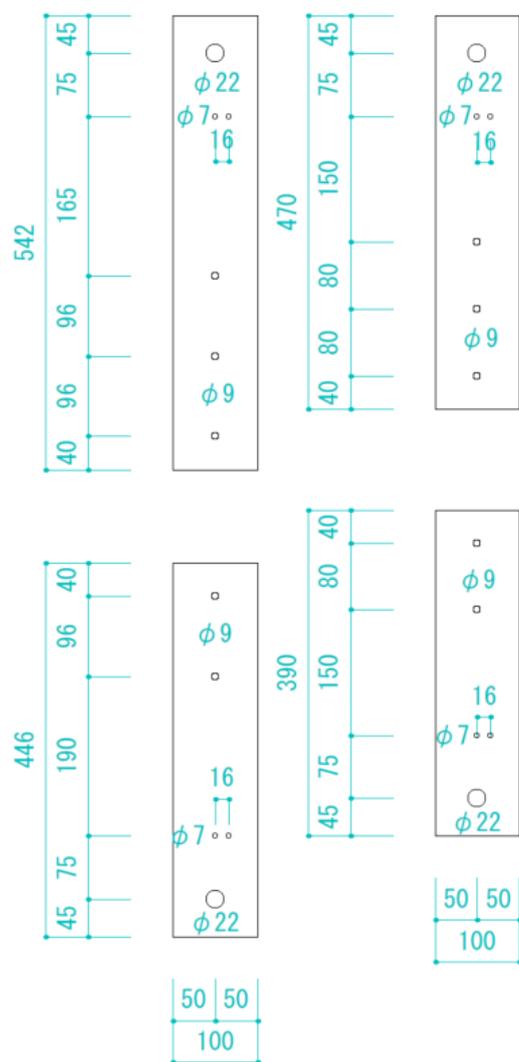


図 7.3.2 添え板鋼板の寸法

表 7.3.1 実験前ヒノキ CLT の寸法

载荷方向	試験体名	重量	幅	厚さ	長さ
		g	mm	mm	mm
強軸	S1	6692.9	121.30	151.54	720
	S2	6732.1	120.55	151.97	720
弱軸	W1	7116.4	160.74	152.00	600
	W2	7189.9	159.96	152.97	600

7.3.2.2 実験概要

図 7.3.3 に試験体設置図、表 7.3.2 に各試験体の載荷荷重、表 7.3.3 に昨年度の強度性能評価実験の結果、写真 7.3.1 に載荷の様子を示す。載荷は試験体 2 つを組み合わせ、偏心しないよう考慮し、試験体を上下に引っ張ることで接合部にせん断力を付与した。変位は、いずれも CDP-25（東京測器製）を用い、写真 7.3.2 に示すように鋼板と CLT との相対変位を計測している。載荷は、2021 年 8 月 24 日 15 時 58 分から開始し、載荷作業の修了は同日 16 時 4 分であった。それ以降、変位は 1 時間間隔で計測している。また、外部温湿度は、RTR-503（おんどとり）を用いて、1 時間間隔で計測している。

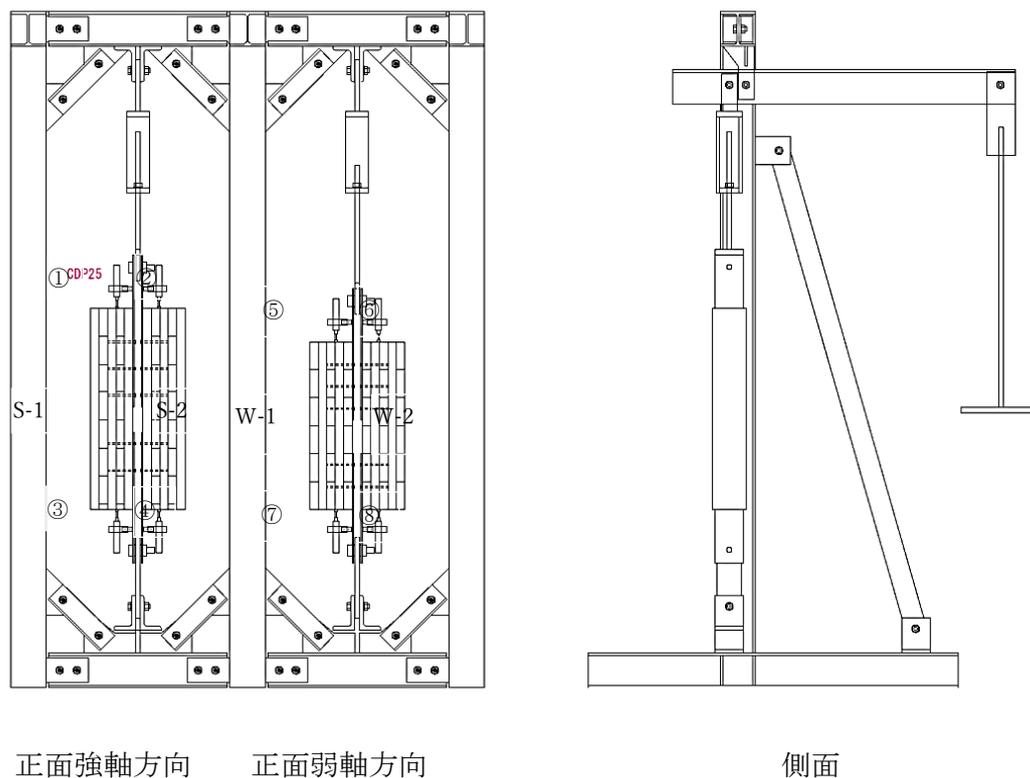


図 7.3.3 試験体設置図

表 7.3.2 載荷荷重

試験体種類	長期許容耐力 kN/本	4本の耐力 kN	1体の耐力 kN/体	アーム荷重 kN	アーム荷重除いた値 kN	試験機テコ率	おもり kN
弱軸試験体	4.7	18.8	9.4	3.0	15.8	13.8	1.15
強軸試験体	4.6	18.4	9.2	2.8	15.6	14.1	1.10

表 7.3.3 昨年度短期試験結果

載荷方向	接合具本数	強度性能	
		初期剛性 (平均値)	長期許容耐力 (下限値)
		kN/mm/本	kN/本
強軸	2	2.9	4.7
	4	3.0	4.4
弱軸	2	2.2	4.6
	4	2.3	4.6



強軸試験体



弱軸試験体



全体写真

写真 7.3.1 載荷の様子



写真 7.3.2 変位計設置の様子

7.3.3 実験結果 (2023年2月16日までのデータ)

7.3.3.1 変位計計測値

図 7.3.4 に、载荷開始日である 2021 年 8 月 24 日から 2023 年 2 月 16 日までの 541 日間における各変位計の計測値と、下図に計測位置ごとの平均値を示す。それぞれの計測点ごとに値のばらつきがあり、特に強軸方向の試験体は同じ計測点で大きく異なり、変形の大きい側と小さい側のような傾向を示さなかった。また、弱軸方向では変位の大小の傾向は同じであったがそれぞれのばらつきは大きい傾向があった。これは 1 つにした 2 体の試験体にまったく同様の力がかかっていなかったためと考えられる。そこで、それぞれの計測位置ごとに平均値で比較することとした。その結果、载荷方向が強軸方向の試験体は、ビス本数より 1.5 倍の差が見られると考えていたがわずかに 3 本の方が小さい変形を示しており、弱軸方向は 2 本打ち試験体の方が 3 本打ち試験体と比べて約 2 倍の変形を示した。

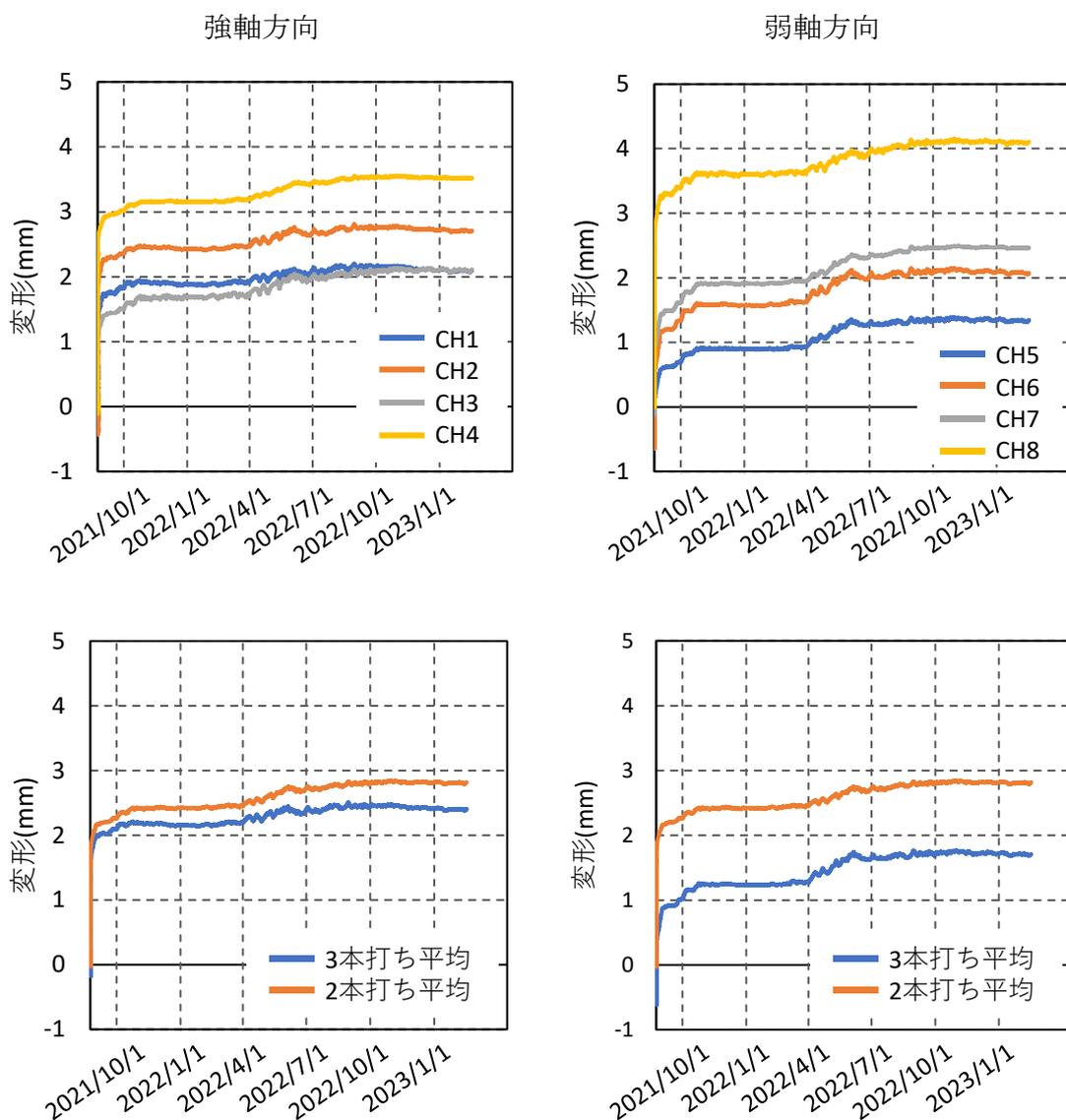


図 7.3.4 変位計計測値 (2023年2月16日まで)

7.3.3.2 クリープ変形

図 7.3.5 に両試験体の初期変形の推移を、表 7.3.4 に初期変形を示す。初期変形は構造用木材の強度試験マニュアル^{7.4)}より、载荷終了後 10 分間の変形量とした。弱軸試験体 3 本打ち側で、アーム荷重をかけた際に圧縮方向に 0.61mm 動いてしまった。これは初期がたによるものと考えているが、初期変形を決定するにあたってその分を引張側に移動させることとした。表 7.3.4 中の予測変形は、昨年度実施した強度特性評価実験の平均初期剛性をもとに、今回载荷している荷重がかかっている時の変形量を算出したものである。また、3 本打ち試験は実施していないため、2 本打ちと 4 本打ちの予測変形を直線補間して求めた。今回の初期変形は、4 体のうち 3 体の試験体は、予測変形よりも小さい変形量となっており、1 体は予測変形と同様の変形量となった。

図 7.3.6 に両試験体のクリープ変形と試験体付近の温湿度を示す。载荷開始から 50 日程度経過した急激に気温が下がった頃から変形が落ち着いているように見える。現在、強軸方向試験体では 2 本打ち側が約 1.2mm、3 本打ち側が約 1.0mm となっている。弱軸方向試験体では 2 本打ち側が約 1.65mm、3 本打ち側が約 1.4mm となっている。

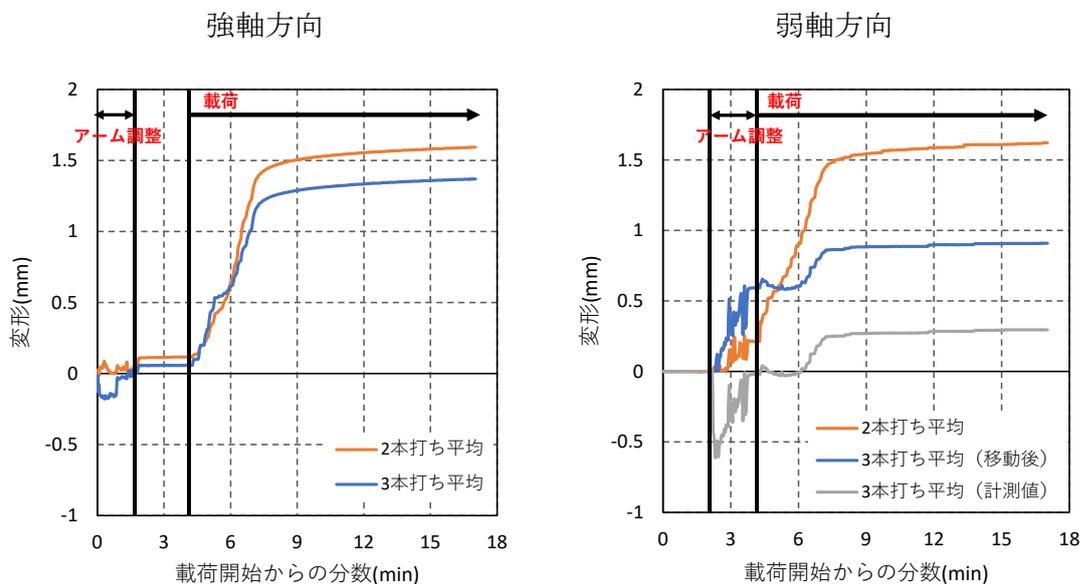


図 7.3.5 初期変形（载荷後 10 分まで）

表 7.3.4 初期変形

	強軸		弱軸	
	平均		平均	
	3本打ち	2本打ち	3本打ち	2本打ち
初期変形	1.37	1.59	0.30	1.62
操作後初期変形	1.37	1.59	0.91	1.62
予測変形	1.56	2.14	1.20	1.62

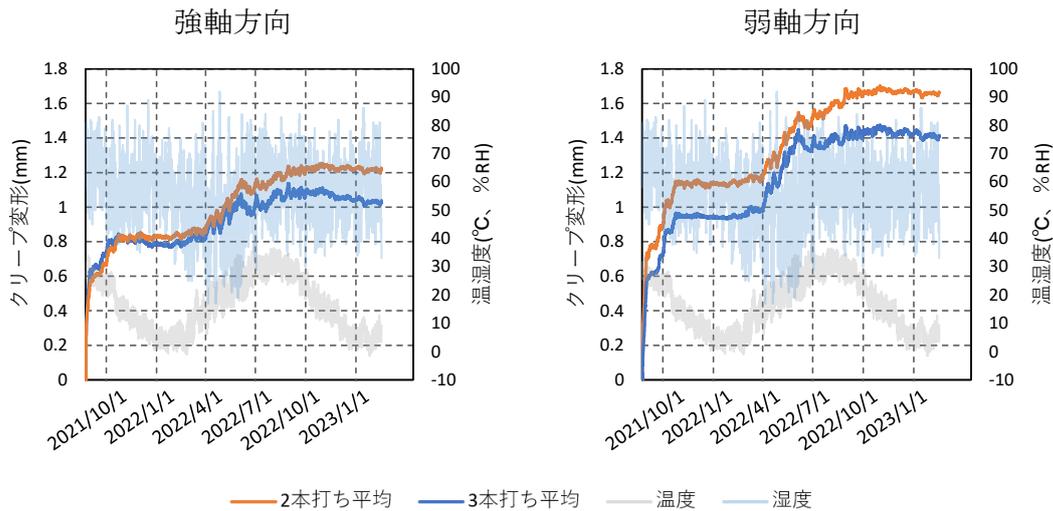


図 7.3.6 クリープ変形と温湿度 (2023年2月16日まで)

7.3.3.3 パワー則による予測変形と変形増大係数

図 7.3.7 にパワー則¹⁾によって算出した 50 年後の予測変形の推移、表 7.3.5 に予測変形と変形増大係数を示す。算出は構造用木材の強度試験マニュアル²⁾に記述の式 7.3.1～式 7.3.3 を用いており、載荷後 30 日からのクリープ変形のデータで算出している。その結果、50 年後の予測変形は、2 本打ちの試験体では強軸方向で 2.93mm、弱軸方向で 3.98mm となり、変形増大係数は強軸試験体が 2.8 倍、弱軸試験体が 3.45 倍である。

$$\log \delta_c(t) = a \log t + b \quad (7.3.1)$$

$$\delta_c(t) = At^N \quad (7.3.2)$$

$$\delta_{50}/\delta_0 = 1 + ct^N \quad (7.3.3)$$

$\delta_c(t)$: 負荷 t 日経過後のクリープたわみ

a, b : 定数、ただし b は負荷 1 日後の点に外装された定数

$A, b = \log A$ により得られる定数。ただし A は負荷 1 日経過後のクリープたわみを意味する

N : 定数、ただし $a = N$

δ_{50} : 50 年後の曲げクリープたわみ

δ_0 : 初期たわみ (全試験体の負荷終了 10 分後のたわみ)

$c: A/\delta_0$

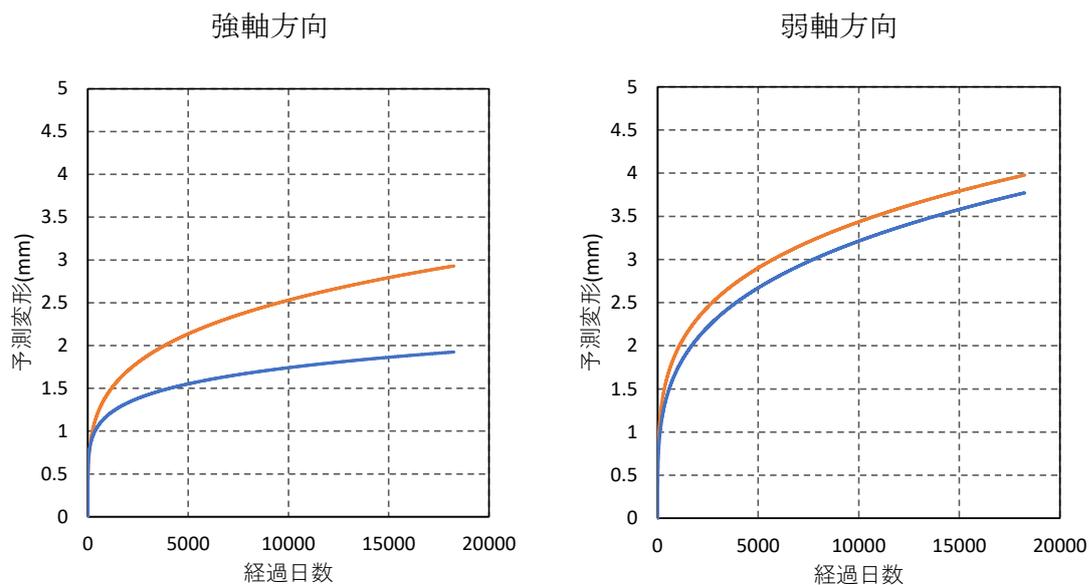


図 7.3.7 50 年後までの予測変形

表 7.3.5 パワー則による 50 年後の予測変形と変形増大係数

	強軸試験体		弱軸試験体	
	3本打ち	2本打ち	3本打ち	2本打ち
50年後の予測変形(mm)	1.92	2.93	3.77	3.98
短期実験最大荷重時の平均変形(mm)	-	28.5	-	25.4
変形増大係数	2.40	2.84	5.15	3.45

参考文献

7.3.1) Franz F.P. Kollmann, Wilfred A. Cote, Jr., Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.189, 1968

7.3.2) 齋藤周逸, 信田聡: 日本の気候値平衡含水率, 木材学会誌 Vol.62 No.5, pp.182-189, 2016

7.3.3) <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>

7.3.4) 構造用木材の強度試験マニュアル: (公財) 日本住宅・木材技術センター, 平成 23 年 3 月, pp.5

第 8 章 まとめ

本事業では、CLT の 2 方向に強度性能を発揮できる特徴を引き出すため、折版構造による屋根と、短辺方向にモーメント抵抗接合を導入することで構成する CLT の床スラブの実用化を目的に、今年度は、前者は実大サイズのモックアップを、後者は過去 2 年間の実験および解析結果を踏まえて、構造計算に活用できる情報の整理を行った。

8.1 折版構造

8.1.1 モックアップにより得られた成果

図 2.2.1 の D プランを代表事例として取り上げ、図 4.1.6 に示す 3 ヒンジ型モデルの片側部分の実大サイズによる CLT の躯体を、ハングアップ工法による建て方の実用性を確認し、下記のような成果とともに改善点を整理した。

- ① CLT-CLT の継手には、ハングアップ工法を鑑み、図 2.3.1 に示す蝶番金物を採用した。CLT パネルおよび蝶番金物に対し、建築物としての安全性に加え、施工時の負荷も考慮して構造設計を実施し、支障なく建て方が行えることが確認できた。蝶番金物についてはせん断試験も実施し、強度性能の確認も行っている。
- ② CLT-CLT の継手部の納まりは、作業性、防水の納まり、コスト等を考慮し、図 2.3.2 および図 2.3.3 とした。また 6 枚の三角形の CLT の頂点が集まる頂部は、施工中の材料の損傷等にも配慮し、写真 4.10.14 のように切削を行い、図 4.10.14 のような木材ピースをあてはめるディテールとし、写真 4.10.16、写真 4.10.17 の通り納まりの確認を行った。
- ③ ハングアップ工法による CLT 躯体の建て方計画を立て、CLT 躯体の動きに追従できる図 4.4.1 の支承金物、および図 4.6.3 の吊治具の設計を行い、モックアップにて試験運用し、稼働状況を確認すると共に、実用化に向けての改善点を拾い上げた。
- ④ ハングアップ工法を採用した場合の、CLT の敷設、接合金物の取付、次工程の防水工事を終え、ハングアップに至るまでの、工数と必要工期が確認できた。
- ⑤ ハングアップ工法による建て方工事での安全性、作業効率、施工精度等の効果を確認し、より効果的にするための改善点をまとめた。
- ⑥ 屋根の防水はシート防水を選択し、安全性、作業効率、およびコストを鑑み、表 5.3.1 のようにハングアップする前に、谷折り部と頂部以外は平場で防水施工する方法を採用した。施工にあたり、表 5.2.1、表 5.3.3 のように事前に山折り部・谷折り部・頂部の施工方法を検討し、表 5.3.2 および表 5.3.4 のように試験施工を実施して、品質性能の確認と共に、施工手順の再検討を行い、施工手順を図 5.3.5 のようにまとめた。
- ⑦ ハングアップ工法による建て方後の施工となる、谷折り部と頂部の防水施工を安全に効率よく進めるために、単管本足場を架け、作業性を確認後、写真 5.5.1～写真 5.5.4 のように足場を架け直し、図 5.5.1 に示す直接仮設工事の方法を提案すると共に、直接仮設工事の歩掛かりを整理した。
- ⑧ ハングアップ工法を採用することによる防水工事および防水工事で必要となる直接仮設工事のコストは大幅に削減できることが実証された。

8.1.2 今後の検討課題

8.1.2.1 断熱性能

折版構造で屋根を構成するとき、屋根は外皮となるため、省エネ基準で求められている表 8.1.1 に示す外皮平均熱貫流率（UA 値）の基準値を意識しておく必要がある。

表 8.1.1 に、平成 26 年度林野庁委託事業「CLT 等新製品・新技術利用促進事業」耐火部材の開発にて実施した、CLT（樹種 スギ）の熱貫流率測定試験の結果を示す。CLT は厚い木材でできているため、それ自体である程度の断熱性能は期待できるが、厚さが 90mm の CLT では、平均熱貫流率が $0.90\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ で表 8.1.2 に示す住宅の省エネ基準で要求している基準値を満たしていない状況にあり、一般的には図 8.1.1 のように断熱材と組み合わせることによりこの性能を確保することができる。断熱材を取り囲む栈木をうまく加工することによって、本事業でモックアップを行った形状の屋根でも、防水施工同様に、ハングアップ前施工することも可能である。

一方で、材料の厚さに熱貫流率が概ね反比例すると仮定すると、厚さを 90mm から 120mm にすることで、地域 5~7 の要求性能を満たすことができる。CLT の厚さを増すことで材料費は約 3 割アップするが、材料加工の煩雑さや断熱工事の材工費と比較すると、優位性を見いだせると推察される。

表 8.1.1 CLT（スギ）の熱貫流率測定試験の結果

厚さ mm	平均熱貫流率						
	W/ (m ² ・K)						
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	平均
90	0.94	0.92	0.88	0.87	0.88	0.90	0.90
150	0.66	0.61	0.61	0.64	0.59	0.61	0.62

表 8.1.2 外皮平均熱貫流率の基準値

地域区分	地域1~2	地域3	地域4	地域5~7
		主に北海道と東北の一部	主に東北地方と内陸の中でも寒い地域	内陸地域
目標UA値 W/(m ² ・K)	0.46	0.56	0.756	0.87

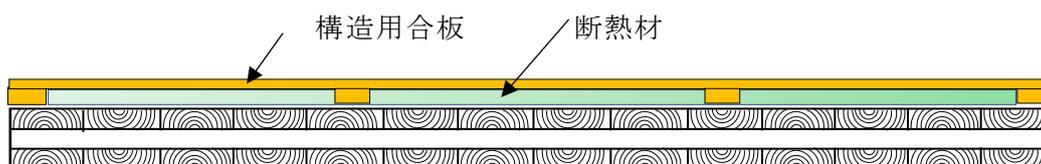


表 8.1.1 断熱材施工の場合の断面図

8.1.2.2 耐火性能

「5.4.3 防火認定の取得に関して」で述べたように屋根の勾配が 70° を超えた場合には、この CLT 躯体は外壁と見なされるため、用途が観覧場や倉庫等の場合、延焼のおそれのある部分については防火構造とする必要がある。現在の想定では平屋のため、隣地境界線または道路中心線から 3m 離すことで、この課題はクリアできるが、仮に隣地境界線から 3m 以内に建設される場合には、防火構造の要求性能を満足させる必要がある。

この課題については、CLT のラミナ (30mm) を一枚増やすことで、30 分の非損傷性・遮炎性・遮熱性を確保することはできる。ただしこの燃えしろ設計は、壁については 45 分の準耐火構造 (燃えしろ寸法は、レゾルシノール樹脂等の接着剤の場合には 35mm、それ以外の接着剤を使って積層している場合には 45mm) は例示規定となっているが、30 分については例示仕様が示されていない状況のため、事前に対応策を検討しておく必要がある。

また床面積が 1,000m² を超えた場合、建築基準法第 26 条で要求される防火上有効な構造の防火壁を避けるためには、準耐火建築物にする必要が生じる。この場合には壁に該当する部分については、45 分の準耐火性能に対応する措置が必要になってくる。

8.1.3 CLT 利用拡大に向けての普及活動

モックアップ終了後、愛媛県内の設計者、県・市町村の林産部門の担当者による現場見学会が、愛媛県 CLT 普及協議会の主催により実施された。参加者には、折版構造のデザイン性の高さを印象づけると共に、設計作業において早い段階での構造設計者との打ち合わせの必要が木質構造では重要であること等の意見が出された。



写真 8.1.1 現場見学会の風景

8.2 ツーウェイ・床スラブ

8.2.1 解析により確認できた項目

昨年度実施した接合試験の結果を踏まえて、市販の構造解析ソフトにより、平面要素モデルでの解析と格子梁モデルでの解析を実施し、昨年度実施した実大の静的載荷試験で得られた変形量との比較を行い、設計時に必要な情報の整理と、留意点をまとめた。尚、接合方法は、過去二年間の本事業の実績と作業性およびコストを鑑み、グールド・イン・ロッドを主体としている。

- ① 6.1節ではFEM解析に必要なCLTの継手部のデータを、理論から導く方法を示し、6.1.1で紹介する実験値との比較を行い、表6.1.6のように最大曲げ耐力および回転剛性が概ね一致していることを確認している。
- ② 6.2.1項では、格子梁モデルのモデル化の方法と、境界条件および材料の特性値について解説した。継手部のデータは、ここでは圧縮側のGIRは無視し、過去の文献を参考に導いている。格子梁モデルでは、実大試験と比較すると、表6.2.3～表6.2.10に示すように算出される変形量の評価は安全側になることを確認した。
- ④ 6.3節では、6.1節ならびに文献6.3.1を参考にしてCLT継手部のデータを導き、平面要素モデルでの解析を行い、各入力データが変形量に与える影響を解説した。また接合部のせん断バネは剛と仮定して入力してもその影響は無視できることをパラメトリック・スタディにより確認した。
- ⑤ 平面要素モデルでは、昨年度の実大試験と比較すると、四辺支持の場合には、表6.3.7に示すように算出される変形量は小さめにできることが確認された。
- ⑥ 平面要素モデル、格子梁モデル共に表6.2.11、表6.3.5に示すように、材料特性として「2016年版 CLTを用いた建築物の設計施工マニュアル」により算出したヤング係数を採用した場合の方が、実験から得られたCLTのヤング係数を用いて解析するよりも、たわみ量が大きくなることを確認した。
- ⑦ 平面要素モデルにおいて、図1.6で想定する6m×6m区画を田の字に配置したモデルにて平面要素モデルで解析を行い、S90-6-6（厚さ180mm）のCLTで住宅、事務所、店舗の床に利用可能であることを確認（図6.3.18、表6.3.8参照）した。

尚、格子梁モデルは、継ぎ手がない方向では幅120mm～160mmで、継ぎ手がある方向では幅300mmの梁として構成（表6.2.1参照）している。今後、この手法を構造計画の段階で有効に活用していくためには、梁要素の数の簡素化を進める方向で検討したい。

また昨年度実施した実大の静的載荷試験と併せ実施した動的試験の結果を踏まえ、ツーウェイ床スラブにして4辺支持することで、歩行振動（2Hz）に対して、一次固有振動数が離れる数値となること、ピーク付近以外では応答値が下がることに優位性があるとした（6.4.4）。一方で、図1.6のような連続梁にすることによる効果は、田の字の一区画での加振に対する他の区画の応答等の状況も含め、今後の課題といえる。

8.2.2 経年変化の検証

床・屋根に利用される CLT は、長期間荷重を受けることになるため、経年変化に対する知見は重要になる。本事業で、想定した建築物の床に使用する 6 層 6 プライの CLT は、通常建築物に使用されている 3 層 3 プライ、5 層 5 プライ、5 層 7 プライ等のように、積層面におけるラミナの向きが、対象になっている構成とは異なり、非対称構成となっているため、令和 2 年度に実施した試験体を再利用して、5 層 5 プライ（厚さ 150mm）と 6 層 6 プライ（厚さ 180mm）の CLT を室内と屋外に設置し、約 2 年間の試験結果、5 層 5 プライと 6 層 6 プライでは、寸法変化や劣化の状況等、相違が見られないことが確認された。

また令和 2 年に実施した接合実験の内、鋼板添え板ビス接合については、実験終了後、試験体を転用して約 2 年 5 か月間、継続的に載荷試験を行っている。図 7.3.6 から夏場に変形が一時的に増加する時期も見られていたが、表 7.3.4 に示すように、昨年度実施した強度特性評価実験の平均初期剛性をもとに予測した変形量に対し、同等または低めの変位となっていることが確認されている。