

令和5年度住宅・建築生産性向上促進事業

令和5年度成果報告書

[CLT 混合構造の耐力・剛性評価方法の開発
及びガイドラインの作成と普及]

令和6年3月

一般社団法人 新都市ハウジング協会

目次

I.	本助成事業の目的と実施事項	3
II.	CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能の把握	21
1.	はじめに.....	23
1.	実験計画.....	25
1.1.	試験体	25
1.2.	加力計画	30
1.3.	計測計画	30
2.	材料試験及び要素試験.....	35
2.1.	材料試験	35
2.1.1.	CLT	35
2.1.2.	コンクリート.....	41
2.1.3.	鋼材.....	42
2.2.	接合部要素試験.....	45
2.2.1.	接合部パネルせん断試験	45
2.2.2.	Two Rail Shear 試験	47
3.	実験結果及び考察.....	49
3.1.	破壊状況と荷重変形角関係.....	49
3.1.1.	試験体 A3-JDP-60-TR	49
3.1.2.	試験体 A3-JDP-60-QT	53
3.1.3.	試験体 A3-JDW-60-QT.....	58
3.1.4.	試験体 A3-JDP-80-QT	63
3.2.	包絡線比較	68
3.3.	CLT パネルの力学挙動	70
3.3.1.	CLT 負担荷重-変形角関係.....	70
3.3.2.	CLT パネル負担荷重と耐力の考察.....	73
3.4.	歪分布	76
3.4.1.	CLT パネルの主歪分布.....	76
3.4.1.	CLT パネルのせん断歪 水平分布	79
3.4.2.	CLT パネルの梁下・梁上の鉛直方向歪分布	82
3.4.3.	CLT パネルの水平方向歪分布.....	85
3.4.4.	梁主筋・柱主筋の歪	87
3.4.5.	梁・柱のせん断補強筋の歪	91
3.4.6.	T 型鋼板の歪	96

3.5.	各部の変形モード.....	99
3.5.1.	CLT パネルと梁との水平ずれ変形.....	99
3.5.2.	CLT パネルと梁との鉛直方向の離れ変形.....	102
3.5.3.	CLT パネルと柱との水平方向の離れ変形.....	105
3.5.4.	CLT パネルと柱との鉛直ずれ変形.....	107
3.5.5.	CLT パネル同士の鉛直ずれ.....	109
3.5.6.	CLT パネルのせん断変形.....	110
4.	おわりに.....	111
III.	CLT にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピン接合部の簡易試験方法の検討.....	113
1.	はじめに.....	115
2.	試験概要と試験結果.....	119
2.1.	CLT 材料試験.....	120
2.2.	CLT 圧縮試験.....	123
2.3.	単位接合部圧縮試験.....	126
2.4.	ドリフトピン接合部パネルせん断試験.....	136
3.	考察.....	141
3.1.	PS 試験の実験値降伏耐力と単位接合部圧縮試験の実験値降伏耐力の比較.....	141
3.2.	計算降伏耐力と各種結果の比較.....	143
3.3.	最大耐力と降伏耐力の比.....	146
4.	おわりに.....	148
IV.	設計ガイドラインの作成.....	149
1.	はじめに.....	151
2.	CLT 耐震壁の荷重-変形角関係モデル.....	151
3.	試設計.....	160
4.	おわりに.....	168
V.	本助成事業のまとめと今後の課題.....	169

I. 本助成事業の目的と実施事項

近年、国策として木質材料の普及促進が謳われ、建築はもとより幅広い分野での利用促進のための検討が行われ、建築分野では急激に中低層の耐火木造建築が増加している。特に木質材料として新たに直交集成板(Cross Laminated Timber, 以後 CLT)が建築構造材料として建築基準法に取り入れられ、その利用方法として様々な研究、開発がなされてきている。

この中で CLT を耐震壁として木造だけでなく鉄筋コンクリート（以後 RC）造や鉄骨（以後 S）造に用いる技術開発が進められ、CLT の利用促進が期待されるが、現状では構造設計に必要な資料が希薄であり、適用の障害となっている。

令和 2 年～3 年度事業では、鉄骨構造の耐震壁に CLT を利用した混合構造を提案し、限られた利用方法ではあるが、その設計に資するデータを提供した。また、令和 4 年度事業では RC 構造に対象を広げ、CLT 耐震壁を適用に向けて取り組み、鉄骨構造の場合と同様、設計に資するデータを提供した。

本年は引き続き RC 構造を対象に、更なる CLT 利用促進の一環として、以下の 4 つ実施項目を掲げ、事業を実施した。

- 1) CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能の把握 (… 本書 第二章)
- 2) CLT にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピン接合部の簡易試験方法の検討 (… 本書 第三章)
- 3) 設計ガイドラインの作成 (… 本書 第四章)

本報告書の構成は以下の通りである。

第二章では、CLT 耐震壁を有する RC 架構を対象に、CLT パネルの分割数、CLT パネル同士の接合部詳細、CLT パネル板厚をパラメータとした架構実験を実施し、力学性状を把握した [申請書実施項目 1) に対応]。第三章では、昨年につき CLT 耐震壁にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピン接合の単体の耐力を簡便な試験で推定できる方法を検討した [申請書実施項目 2) に対応]。第四章では、第二章で得られた知見から構造モデル化や構造特性係数 (D_s 値) などを仮設定し、「CLT 耐震壁を有する RC 造 4 階の文教施設」の試設計を行い、実用可能な一例を示すことで設計ガイドラインとした [申請書実施項目 3) に対応]。第六章では、本助成事業のまとめと今後の課題を示した。

なお本事業は、一般社団法人新都市ハウジング協会の一組織である長寿命建築システム研究委員会混合木造 WG が実施した。同 WG の委員名簿を表 I.1 に示す。また、WG 会議は令和 5 年度事業期間(2023.4.1～2024.3.25)において 4 回開催された。本章に議事録を付記する。

表 I.1 委員名簿

(一社)新都市ハウジング協会

長寿命建築システム研究委員会
混合木造WG

2023(令和5)年度 委員名簿

2023年 12月 01日

	社名	氏名	所 属
WG主査	(株)竹中工務店	太田 義弘	技術本部 技術戦略部 シニアチーフエキスパート
WG委員	(株)竹中工務店	宇佐美 徹	技術研究所 建設基盤技術研究部 主席研究員
WG委員	(株)竹中工務店	中根 一臣	東京本店 設計部 構造部門 部長 構造担当
WG委員	鹿島建設(株)	田中 裕樹	建築設計本部 構造設計統括グループ(業務宿 泊) チーフエンジニア
WG委員	大成建設(株)	森田 仁彦	技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室 主席研究員
WG委員	(株)大林組	澁市 克彦	技術研究所 構造技術研究部 主任
WG委員	清水建設(株)	菅野 英幸	設計本部 構造設計部4部 グループ長
WG委員	清水建設(株)	津畑 慎哉	技術研究所 建設基盤技術センター 架構技術 グループ
WG委員	大和ハウス工業(株)	吉田 文久	総合技術研究所 建築技術研究部 構造研究グ ループ 主任研究員
WG委員	(株)長谷工コーポレーション	太田 雄介	技術研究所 建築構造研究室 室長
WG委員	銘建工業(株)	田中 駿太郎	木質構造事業部 設計部(岡山分室) 課長
協力委員	大阪工業大学	宮内 靖昌	工学部 建築学科 教授
協力委員	京都大学生存圏研究所	五十田 博	生活圏木質構造科学分野 教授
オブザーバー	国土交通省 国土技術政策総合研究所	竹村 好史	建築研究部 基準認証システム研究室 室長
オブザーバー	国土交通省 国土技術政策総合研究所	荒木 康弘	建築研究部 基準認証システム研究室 主任研究官
オブザーバー	国土交通省 国土技術政策総合研究所	小川 翔生	建築研究部 基準認証システム研究室 研究官
オブザーバー	(国研)建築研究所	坂下 雅信	構造研究グループ 主任研究員
事務局	新都市ハウジング協会	白井 清広	専務理事 (2023.10.31まで)
事務局	新都市ハウジング協会	中西 浩	専務理事 (2023.11.01から)
事務局	新都市ハウジング協会	立石 寧俊	研究部長

2023 年度 長寿命建築システム研究委員会・混合木造 WG
第 1 回会議 議事録

1. 日 時：2023 年 5 月 31 日(水) 13:10～15:00
2. 場 所：新都市ハウジング協会会議室及び Teams

3. 出席者

WG 主査	太田義弘 [*] (竹中工務店)
WG 委員	宇佐美徹 (竹中工務店), 中根一臣 [*] (竹中工務店), 田中裕樹 [*] (鹿島建設), 菅野英幸 [*] (清水建設), 森田仁彦 [*] (大成建設), 澁市克彦 [*] (大林組), 吉田文久 [*] (大和ハウス工業), 太田雄介 [*] (長谷工コーポレーション), 田中駿太郎 [*] (銘建工業)
協力委員	五十田博 [*] (京都大学), 宮内靖昌 [*] (大阪工大)
アドバイザー	荒木康弘 [*] (国総研), 坂下雅信 (国総研), 阿部一臣 [*] (国総研)
事務局	白井清広, 立石寧俊 (新都市) 記

^{*} : Web 参加、アンダーライン : 欠席

4. 資 料

資料 1-1	2022 年度第 4 回会議 議事録 (案) (事務局)
資料 1-2	2023 年度委員名簿 (混合木造 WG) 2023. 05. 08 (事務局)
資料 1-3-1	R5 採択通知書_新都市ハウジング協会 (事務局)
資料 1-3-2	R5 交付決定通知書_新都市ハウジング (事務局)
資料 1-4	R5 公募提案書類 (抜粋) (事務局)
資料 1-5-1	R5 架構試験・要素試験計画 (宇佐美)
資料 1-5-2	R5 架構試験・要素試験計画_打合せメモ (宇佐美)

5. 議 事

(1) 前回議事録の確認 (資料 1-1)

修正なく承認された。

(2) 事務局からの連絡事項

- ・ 本事業の技術報告書 (R2～R4 年度) については、協会 HP のフロントページから、非会員も含めダウンロード可能としている。
- ・ 本年度委員名簿 (資料 1-2) を確認した。竹中工務店の川合委員に代わり、中根委員が加わった。
- ・ 国交省からの R5 年度の「採択通知書」、「交付決定通知書」について報告があった (資料 1-3-1, 1-3-2)。本年度予算は 2900 万円、事業期間は R5 年 4 月 6 日～R6 年 3 月 4 日である。

(3) 本年度の実施計画について (資料 1-5-1, 1-5-2)

- ・ 宇佐美委員より資料 1-5-1, 1-5-2 に基づき、本年度の実施計画に関して説明があった。

(3)-1 架構実験について

(ねらい) 対象建物として、RC フレームの「文教施設」(R4 年度は「集合住宅」)を想定した

モジュールで RC フレーム、CLT 耐震壁を作成して架構実験を行う。実大の構造スパンは 8300mm、想定階高は 3700mm を想定して、CLT 壁は 1 枚壁ではなく、分割して使用する。

(試験体案)

- ・ 実大 CLT 壁の幅方向を 3 および 4 分割での実施し、分割数の影響を見たい考え。どちらの分割数をメインとするかは未定。
- ・ RC フレームと CLT 版の接合法は、昨年度のディテールを採用して、カット T 挿入タイプとする。
- ・ CLT 版どうしの接合法は、側面（両面）から鋼板を DP 留めすること、並びに、版の木口どうしダボ継ぎ（DP）をイメージした方法を考えている。
- ・ CLT の版厚は 60mm と 80mm(昨年度は 60mm)で、5 プライとしたい。
- ・ その他のパラメータとして、カット T に挿入する DP の数を減らしたものを考えている。これは、靱性型となる想定である。
- ・ 架構実験は今年も大工大で実施する。大工大の構造実験棟のスケジュールが決まっています、RC フレームのコンクリート打設については、8 月上旬にスタブを、8 月下旬にフレームを打設する予定。実験の実施は 10/4, 11, 18, 25（いずれも水曜日）を予定している。

(コメント・質疑応答等)

- ・ 昨年度は RC フレームの強度が高く、RC フレームがあまり崩壊しなかった。本年度は CLT 版を 5 プライとして、CLT 壁の強度を高めたい。JAS の認定品からは外れることになる。CLT 壁については製作可能なメーカーを探す考え。(宇佐美、五十田)
- ・ 3 分割と 4 分割で、どのような差を見たいのか。(荒木)
→ 梁へのせん断力の分布が変わって来ることが予想される。ただし、4 分割にすると水平断面の断面欠損も大きくなることを考慮する必要がある。(宇佐美)
- ・ 分割壁を一体化するのは、1 枚壁を理想とした強度型の壁を再現するイメージで良いか。(森田)
→ 壁どうしの接合部は、しっかりと接合して、一体化を目指すイメージである。(宇佐美)
- ・ 基準整備促進事業では、強度型と靱性型の 2 種類を揃える予定で、今回の試験もそれに適合したものを意識している。その中で今回は強度型を指向している。また、他の研究でも RC フレームが崩壊するタイプが余りないので、今回は CLT 壁の板厚を増やす考えである。(五十田)

(3)-2 鋼板挿入ドリフトピン接合部耐力推定のための簡易単体試験方法の検討について

- ・ 昨年度得られた知見の一つとして、DP 径と板厚の比が小さいほど、パネルせん断試験結果と単体試験結果の比が大きな値を示したことが挙げられる。
- ・ 本年度はこの傾向を確かめるため、DP 径(d)8, 12, 16 mm、CLT の板厚 (t) 100, 140mm で実施したい(昨年度は DP 径 10, 14 mm を実施)。なお、単体試験は、結果のばらつきが少なかった圧縮試験のみで行う計画である。
- ・ 単体試験の試験片の製作に関しては、9 月発注、試験の実施は 12 月を予定している。

(コメント・質疑応答)

- ・ d/1 による耐力評価は EYT 式を用いれば計算できると思うが、本事業で取り扱っているのは、木材が CLT であるためか。(田中裕)
 - 昨年度の試験結果においても、繊維方向の違いが明確に表れなかった。今回、より多くのデータを採取することも目的の一つと言える。(宇佐美)
 - EYT 式は現在広く設計者に用いられていることから、EYT 式を取り込んだ評価が出来れば良いと考える。(田中裕)
 - パネルせん断試験の結果に関しては、各 DP に係る応力の方向は異なり、現在はその平均値で評価している。各 DP を正確に評価すれば、EYT 式に合うと思われるが、本事業ではそこまで追求するのは難しい。(宇佐美)
 - 面圧定数を正確に求めれば、EYT 式と合うとは思う。(五十田)
-
- ・ (情報提供)「CLT 設計・施工マニュアル」の改訂版が、本年度中に発行される見込み。その中で、CLT の鋼板挿入 DP タイプの接合耐力評価式も掲載される予定である。(荒木)
 - 今回の要素試験で設定している条件は、同マニュアルの適用範囲を意識したものとなっている。一方で、実際には CLT の板厚 150mm 以上が使用されることも多いので、多少気掛かりな面もある。次年度以降の業界の活動に期待したい。(宇佐美)

(3)-3 その他、構造実験の結果等を用いた試設計を計画

6. その他

次回開催は 7 月中を予定。議題は、実験計画の詳細に関して。

以上

2023 年度 長寿命建築システム研究委員会・混合木造 WG
第 2 回会議 議事録

1. 日 時：2023 年 8 月 7 日(水) 10:00～11:00
2. 場 所：新都市ハウジング協会会議室及び Teams

3. 出席者

WG 主査 太田義弘[▽] (竹中工務店)
WG 委員 宇佐美徹 (竹中工務店), 中根一臣[▽] (竹中工務店), 金澤和寿美[▽] (竹中工務店), 田中裕樹[▽] (鹿島建設), 菅野英幸[▽] (清水建設), 津畑慎哉[▽] (清水建設), 森田仁彦[▽] (大成建設), 澁市克彦[▽] (大林組), 吉田文久[▽] (大和ハウス工業), 太田雄介[▽] (長谷工コーポレーション), 田中駿太郎[▽] (銘建工業)
協力委員 五十田博[▽] (京都大学), 宮内靖昌[▽] (大阪工大)
ワーキンググループ事務局 荒木康弘[▽] (国総研), 坂下雅信[▽] (国総研), 竹村好史[▽] (国総研), 小川翔生[▽] (国総研)
事務局 白井清広, 立石寧俊 (新都市) 記

[▽] : Web 参加、アンダーライン : 欠席

4. 資 料

- 資料 2-1 第 1 回会議 議事録 (案) (事務局)
資料 2-2 R5 架構試験・要素試験計画 (宇佐美)

5. 議 事

(1) 前回議事録の確認 (資料 2-1)

修正なく承認された。

(2) 事務連絡

- ・ 委員交代・加入：国総研の阿部一臣委員の異動に伴い、竹村好史氏、小川翔生氏がオブザーバーとして参加。また、清水建設の津畑慎哉氏が新たに委員として参加。

(3) 本年度の実施計画について (資料 2-2)

- ・ 宇佐美委員より資料 2-2 に基づき、実験計画の詳細に関して説明があった。

(3)-1 架構実験について

(試験体)

- ・ 試験体は、RC フレーム+分割 CLT の接合壁で、4 体とする。
- ・ 実験パラメータは、CLT 壁の分割数 (3 及び 4)、壁同士の接合法 (鋼板挿入 DP 又は DP によるダボのみ)、CLT 壁の板厚 (60 及び 80 mm) とする。
- ・ CLT 版の材料はスギ、強度等級 S60。版厚 60mm は 5 層 5 プライ (ラミナ厚 12mm)、版厚 80mm は 5 層 5 プライ (ラミナ厚 16mm) とする。
- ・ CLT 壁の分割数は、国内の多くの木工所での加工が可能となる実長 2 m 以下を方針として、4 分割をメインとした。試験体数は 4 分割が 3 体、3 分割が 1 体である。
- ・ RC フレームと CLT 壁の接合法に関しては、RC 梁と CLT 壁の接合は、頭付きスタッドが溶接されたカット T 鋼板挿入 DP 接合 (昨年度の実施ディテール: CON 側頭付きスタッド、CLT 側

DP)、RC柱とCLT壁の接合は、直付け (CON埋め込み8mm) とする。

(計測計画)

- ・変位：加力位置 RC 梁の水平絶対変位、柱 3 カ所の水平絶対変位、RC フレームと CLT 版の相対変位 (水平、垂直)、CLT 版の対角方向の変形、等
- ・ひずみ：CLT 壁各所の面内ひずみ、RC 柱端部の主筋・帯筋、RC 梁の主筋・あばら筋、カット T 鋼板、等

(加力計画)

- ・試験体の面内方向に、油圧ジャッキによる変位制御にて、静的に加力する。正負交番漸増繰返し加力とする。
- ・実験場は大工大八幡実験場で、加力は 10/4, 11, 18, 25 (いずれも水曜日) で予定。
→ 試験の実施順は未定だが、3 分割 CLT 版の試験体から実施したい。(宇佐美)

(コメント・質疑応答等)

- ・CLT 壁同士の接合に、鋼板挿入 DP 又は DP によるダボを使用するとのことだが、その箇所の強度・剛性確認のための要素実験は行わないのか。(津畑)
→ 鋼板挿入 DP については、要素実験データがあるが、ダボ部分の要素実験については、今のところ考えていない。(宇佐美)
- ・CLT 壁同士の接合に関して、設計上は一枚物の壁と比較して、剛性・耐力はどのように考えているか。(津畑)
→ 剛性ははっきりしたことは言えないが、耐力的には全強を見込んでいる。実際にはロッキングによるずれや、DP 数を打ち過ぎれば集合破壊の可能性もある。一方で、周辺フレームによる拘束効果も考えられ、実験で注視したい。(宇佐美)
→ ご指摘の要素実験については、失念していた。実験後の解析を行う上でも、剛性の把握は重要で、実施しておくべき。(五十田)
→ ダボの実験法は、どのようにすればよいか。(宇佐美)
→ 接合部の単純なせん断実験でよいと思われる。竹中さん方で実施が難しいようなら、大学の方でも可能かもしれない。(五十田)
→ CLT の残材を考慮して、実験法を先生と相談させてほしい。(宇佐美)
- ・CLT 壁同士のダボ接合の位置を教えてください。(津畑)
→ ダボは CLT 版の中央に打ち込む。繊維方向 (強軸) の直交方向に DP が打ち込まれることになる。(宇佐美)
- ・CLT 壁同士のダボ接合に関して、ラミナ厚と DP 径がほぼ同サイズのため、ダボ部分ではほぼ繊維が切断され、版の木口同士が面タッチになるディテールと考えられる。接合部への接着剤の使用はあるのか。(田中裕)
→ 今回、接着剤の使用しない。先日 CLT 壁の組立を行ったが、組立自体は問題なく行えた。余談となるが、S39 でこのタイプの実験を行った際には、加力に伴い木材が DP に負けてずれが生じる現象が見られた。(宇佐美)
- ・CLT 壁の組立に関して、特にダボ接合の場合、先に大壁を組立てから、RC 部材の施工の順に

なるのか。(森田)

- 試験体の組立てでも、先に大壁を組んでから RC 部材の施工となった。版の大きさや重量、施工サイドの考えにもよるが、実施工も同様の手順となるのではないか。(宇佐美)
- ・ RC 梁に関して、壁を分割したことによる壁コーナー部ストラットの発生応力に対する補強は必要ないか。(田中裕)
- 過去の S フレームによる実験では、分割壁のロッキングによる局所応力の影響はあまり見られなかったため、補強は考えていない。実験では、カット T 鋼板にひずみゲージを貼付しており、曲げ応力が発生すればその値から確認したい。(宇佐美)
- ・ ダボ接合部分の想定破壊モードは？(荒木)
- 想定出来ていない。実験で確認したい。施工本数に関しても、ずれ止め、倒れ止め程度の効きかもしれない。(宇佐美)
- ・ CLT 壁同士のダボ接合に関して、DP 径に対して下穴径はどのようなものか。片面への DP 打ちは問題なく行えるが、対面を差し込む際には難しくなかったか。(津畑)
- 試験体サイズに依存すると思われるが、大壁を組む際に特に問題はなかった。(宇佐美)
- ・ ダボ接合の大壁の設置は、クレーンで吊り上げての施工となると考えられるが、面外補強などは行ったのか。(津畑)
- 上下にカット T 鋼板を施工した後で吊り上げ、特に補強は行わなかった。ただし、面外曲げ剛性が小さいので、注意を要した。(宇佐美)
- ・ 加力実験の際にも、壁の面外変形が大きくなる可能性があるが、面外変位の計測は必要ないか。(津畑)
- 今のところ、壁の面外変位の計測は計画していない。CLT 壁は柱側に 8 mm 埋め込まれているが、特にダボ接合の試験体では、加力が進むにつれて、面外変位が顕著になる可能性はある。(宇佐美)

(3)-2 鋼板挿入ドリフトピン接合部耐力推定のための簡易単体試験方法の検討について

(試験方法)

- ・ 昨年度実施した「単体接合部圧縮試験」で行う(追加試験)。
- ・ 比較のため、「DP 接合部パネルせん断試験」も実施する。

(試験体)

- ・ 板厚 100mm(S60-5-5)に対して、DP 径 8, 12, 16mm。
- ・ 板厚 140mm(S60-7-7)に対して、DP 径 12, 16mm。

(試験スケジュール)

- ・ 試験の実施は、竹中工務店の技術研究所にて、12月に予定。

6. その他

(架構実験の見学)

- ・ 大工大での架構実験の見学希望者は、新都市ハウジング協会事務局が窓口となってまとめる。
- ・ 見学案内については、後日、事務局からメンバーへ配信する。

(次回会議)

次回会議は11月下旬～12月上旬を予定。

以上

2023 年度 長寿命建築システム研究委員会・混合木造 WG
第 3 回会議 議事録

1. 日 時：2023 年 12 月 20 日(水) 13:00～14:00
2. 場 所：新都市ハウジング協会会議室及び Teams

3. 出席者

- WG 主査 太田義弘 ^{Web} (竹中工務店)
- WG 委員 宇佐美徹 (竹中工務店), 中根一臣 ^{Web} (竹中工務店), 金澤和寿美 (竹中工務店), 田中裕樹 ^{Web} (鹿島建設), 菅野英幸 ^{Web} (清水建設), 津畑慎哉 ^{Web} (清水建設), 森田仁彦 ^{Web} (大成建設), 澁市克彦 ^{Web} (大林組), 吉田文久 ^{Web} (大和ハウス工業), 太田雄介 ^{Web} (長谷工コーポレーション), 田中駿太郎 ^{Web} (銘建工業)
- 協力委員 五十田博 ^{Web} (京都大学), 宮内靖昌 ^{Web} (大阪工大)
- オブザーバー 荒木康弘 ^{Web} (国総研), 坂下雅信 ^{Web} (国総研), 竹村好史 ^{Web} (国総研), 小川翔生 ^{Web} (国総研)
- 事務局 中西浩, 立石寧俊 ^{Web} (新都市)

^{Web} : Web 参加、アンダーライン : 欠席

4. 資 料

- 資料 3-1 第 2 回会議 議事録 (案) (事務局)
- 資料 3-2 R5 年度架構実験報告 (宇佐美)

5. 議 事

- (1) 前回議事録の確認 (資料 3-1)
修正なく承認された。
- (2) 事務連絡
 - ・事務局の白井専務理事の転籍に伴い、中西浩専務理事が加入。
- (3) 架構実験の結果報告について (資料 3-2)
 - ・宇佐美委員より、10 月に実施した「RC フレーム+CLT 分割耐震壁」の構造実験結果に関する報告があった。
 - ・比較のため、前年度に実施した「RC フレーム+CLT 一枚耐震壁」の実験結果の概要説明があった。

(以下、今回の実験結果について)

- ・試験体は以下の 4 体とした。
 - ① A3-JDP-60-TR : 3 分割、版厚 60mm、CLT 版同士の接合は鋼板挿入 DP (以下、試験体①)
 - ② A3-JDP-60-QT : 4 分割、版厚 60mm、CLT 版同士の接合は鋼板挿入 DP (以下、試験体②)
 - ③ A3-JDW-60-QT : 4 分割、版厚 60mm、CLT 版同士の接合は DP ホゾ (以下、試験体③)
 - ④ A3-JDP-80-QT : 4 分割、版厚 80mm、CLT 版同士の接合は鋼板挿入 DP (以下、試験体④)
- ・2022 年度の実験と比較して、荷重変形角関係の挙動は大きく異なり、最大耐力は層間変形角約 1/30 まで、繰り返し荷重ごとに上昇した。ただし、同一変形の加力サイクルで、2 回

目以降の履歴ループのエネルギー吸収は小さいと言える。

- CLT 耐震壁の分割数（試験体①、②）で比較すると、荷重変形角関係の挙動にあまり差は生じなかった。試験体②は①に対して、最大耐力が約 5%低下し、プッシュオーバー時の耐力は約 25%上昇する結果が得られた。
- CLT 版同士の接合法（試験体②、③）で比較すると、荷重変形角関係の挙動にあまり差は生じなかった。試験体③は②に対して、最大耐力が約 12.7%低下。CLT 壁の破壊性状は、試験体②は CLT 壁接合部でのせん断破壊、試験体③は CLT の圧壊で、CLT 同士のずれが顕著であった。
- CLT 版の版厚（試験体②、④）で比較すると、荷重変形角関係の挙動にあまり差は生じなかったが、各加力サイクルで、試験体④の最大耐力は試験体②の約 1.3 倍であった。これは版厚の増加の割合にはほぼ一致している。一方、壁耐力が大きい分、RC フレームの損傷は大きくなり、プッシュオーバー終局時における耐力低下は大きかった。

(コメント・質疑応答等)

- 混合構造として、初期剛性はどのように定義したか。(津畑)
 - 割線剛性(荷重変形角関係の原点と 1/200 変形時の点を結んだ直線)を採用した。(宇佐美)
- 1/400 変形の繰り返し加力では線形挙動と考えてよいか。また、CLT 版を分割しても一枚版と比較して、初期剛性の低下はそれほどない印象を受ける。(津畑)
 - 1/400 変形の繰り返し加力ではほぼ線形挙動と言える。一枚版と比較して初期剛性の低下が小さかったのは、上下辺に設置されたカット T が効いているのと、周辺 RC フレームの拘束が大きいためと考えられる。(宇佐美)
- 分割壁のロッキングに関連して、カット T 鋼板のひずみデータはどの程度であったか知りたい。(津畑)
 - ひずみデータの分析は今後予定している。目視観察では、分割壁のロッキングは早期から発生した。(宇佐美)
- 加力に使用した左右の油圧ジャッキの荷重は、押し引き 1 : 1 か。(津畑)
 - ほぼ 1 : 1 で行ったが、RC 梁のひび割れを考慮して、20/1000 以降、やや押しを強くした。(宮内)
- DP の間隔について、繊維直交方向(版の水平方向)と繊維方向(版の垂直方向)を比較して、繊維方向の方が狭いのはなぜか。(津畑)
 - 版の上下にスリットがあり、それを避けるため、繊維方向(版の垂直方向)の DP 間隔が若干狭くなっている。ただし、DP 径の 5d 以上のピッチがある。(金澤)
 - 版のせん断にカット T が効いているとすれば、縦方向の DP 本数は試験体より少なくてもよいかも知れないが、現在、設計上のそこまでの知見がない。(宇佐美)
- 要素実験の DP 間隔は、構造実験の試験体と合わせているか。(津畑)
 - 構造実験の試験体を模擬したものではなく、破壊モードは異なったものと考えている。(金澤・宇佐美)
- 五十田先生へ、版-版ジョイント部の設計で、DP の間隔、縁端距離(はしあき)は 4d だったでしょうか？(宇佐美)
 - 現状 4d だったと思う。(五十田)

- 今後、合理化されると聞いている。(宇佐美)
 - ・ 前回の荒木さんの質問にもあったかと思うが、ダボ部分の破壊モードは確認されているか。(森田)
 - 現在、そこまで解体が進んでいない。感覚的には、ダボは面外の振れ止め程度にしか効いておらず、面内では木部にめり込んでDP斜めになっているように思う。(宇佐美)
 - 木質規準の EYT 式で1面せん断の条件で計算すると、モードIV(接合具曲げ降伏)の判定となったので、確認をお願いしたい。(森田)
 - 年明けに、切り出して確認したい。(宮内)
- (4) 鋼板挿入ドリフトピン接合部耐力推定のための簡易単体試験方法の試験実施状況について
- ・ 「単体接合部圧縮試験」および「DP 接合部パネルせん断試験」を竹中工務店技術研究所で実施中。試験は12/21に完了予定。次回報告したい。(宇佐美)
- (5) 試設計について
- ・ 年明けに着手する予定。文教施設とし、階高4m、4～5階建てを想定している。構造実験に基づくDsの設定については、スケルトン上は良いが、繰り返しでのエネルギー吸収能力の低下を考慮する必要があり、五十田先生、国総研・建研メンバーなどと相談して決めたい。(宇佐美)
- (6) 会議全体を通してのコメント・質疑応答等
- ・ 実験の目的に、CLT壁の版厚を大きくして、RCフレームを損傷させることがあったと思うが、その点はどうだったのか。(事務局)
 - CLT壁の版厚を大きくした場合、RCフレームの損傷は大きくなった。版のロッキングにより、RC梁が上に凸に持ち上がる現象も見られた。(宇佐美)
 - ・ 構造実験については、良い結果が得られた印象を持っており、今後の試設計について注目している。文教施設を対象とした場合、耐震壁は連層配置が想定されるが、梁のむくりなどが発生しており、連層での評価は解析で行うことになるのか。(田中裕)
 - 梁のむくりの写真は、層間変形角1/20の時のものになる。設計ではCLT壁1枚ごとをブレース置換する予定。更なる検討が必要となれば、今後別の枠組みでの成果に期待することになる。(宇佐美)

6. その他

次回会議は、令和6年2月中旬を予定。

以上

2023 年度 長寿命建築システム研究委員会・混合木造 WG
第 4 回会議 議事録

1. 日 時：2024 年 2 月 22 日(木) 10:00～12:00
2. 場 所：新都市ハウジング協会会議室及び Teams

3. 出席者

WG 主査 太田義弘[▽] (竹中工務店)
WG 委員 宇佐美徹 (竹中工務店), 中根一臣[▽] (竹中工務店), 金澤和寿美 (竹中工務店), 田中裕樹[▽] (鹿島建設), 菅野英幸[▽] (清水建設), 津畑慎哉[▽] (清水建設), 森田仁彦[▽] (大成建設), 澁市克彦[▽] (大林組), 吉田文久[▽] (大和ハウス工業), 太田雄介[▽] (長谷工コーポレーション), 田中駿太郎[▽] (銘建工業)
協力委員 五十田博[▽] (京都大学), 宮内靖昌[▽] (大阪工大)
ワグナー ゲスト 荒木康弘[▽] (国総研), 坂下雅信[▽] (国総研), 竹村好史[▽] (国総研), 小川翔生[▽] (国総研)
事務局 中西浩, 立石寧俊[▽] (新都市)

[▽]: Web 参加、アンダーライン: 欠席

4. 資 料

- 資料 4-1 第 3 回会議 議事録 (案) (事務局)
資料 4-2 R5 年度成果報告書 (宇佐美)
資料 4-3 (非配布) R6 年度について (事務局)

5. 議 事

(1) 前回議事録の確認 (資料 4-1)

以下を修正して、承認。

- ・ p. 2 の上から 3 番目の「・」について、「プッシュオーバー終局における」を「プッシュオーバー終局時における」とする。

(2) R5 年度成果報告書について (資料 4-2)

- ・ 宇佐美委員より、R5 年度成果報告書に関して説明があった。なお今回は、前回の内容 (構造実験速報) と重複しない事項の報告とする。

以下、「R5 年度成果報告書」に関して (宇佐美)

- ・ 前回指摘のあった「試験体 A3-JDW-60-QT のダボ・ホゾ部分の破壊性状」について、会議直前にメール配信された写真による説明があった。写真により、同接合部においては、DP の塑性変形は観察されず、木部の圧壊が卓越していた。
- ・ 前回指摘のあった「CLT パネルの分割による梁へのせん断の影響」については、梁のせん断補強筋の歪-層間変形角関係が、昨年実施した一枚壁の試験体 A2-ST-H と、大きな差が見られないことから、分割 CLT パネルのロッキングによる梁のせん断の影響は、ほとんどないと考えられる (報告書 p81~83)。これはパネル上下辺に挿入した T 字形鋼板のパネルへの補強効果によるものと考えられる。

- ・ (Ⅱ. CLT パネルの負担荷重と耐力の考察-(1)耐力、報告書 p. 61~63) 今年度の試験体は CLT の有効断面による CLT の水平耐力と鋼板挿入 DP 接合部の最大耐力が同等となるように接合部の設計を行っている。要素試験より求めた各接合部耐力と各試験体の CLT 負担荷重を比較すると、CLT 負担荷重の最大値は、鋼板挿入 DP 接合部の降伏耐力より上回ったが、有効断面による CLT の水平耐力や鋼板挿入 DP 接合部の最大耐力に到達しなかった。昨年度は CLT の水平耐力に到達していたことより、この原因は CLT パネルを分割によるものだと考えられる。
- ・ (同-(2)剛性、報告書 p. 61~63) CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した 3 つの試験体では、鋼板挿入 DP 接合部の降伏耐力付近で CLT 負担荷重・層間変形角の剛性がやや低下する傾向が見られた。
- ・ (同-(3) ダボ接合試験体、報告書 p. 61~63) CLT パネル同士をダボで接合した試験体 A3-JDW-60-QT では、ダボ接合部の降伏耐力・最大耐力を超えても初期剛性は低下せず、CLT 負担荷重の最大値は DP 接合部の降伏耐力程度にとどまった。

- ・ (Ⅲ. 鋼板挿入 DP 接合部の簡易試験方法の検討 p. 100~138) CLT の版厚と DP 径のパリエーションを増やしデータの蓄積をすることを目的として、接合部パネルせん断試験及び単位接合部圧縮試験を行った。昨年度と本年度を合わせると、パラメータは S60-5-5 厚さ 100mm の CLT に対して DP 径を $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 14$ とし、S60-7-7 厚さ 140mm の CLT に対 DP 径を $\phi 12$ 、 $\phi 14$ 、 $\phi 16$ とした。本年度は 2 年分の接合部パネルせん断試験と単位接合部圧縮試験の結果合わせて考察した。

(Ⅲ. コメント・質疑応答等)

- ・ 単位接合部圧縮試験の結果は、CLT 版厚 l と DP 径 d の比 l/d に対して、強い線形性が認められる結果が得られた。単位接合部圧縮試験の結果を係数倍して、補正できる可能性がある。(宇佐美)
- ・ 接合部パネルせん断試験の方が大きくなる理由はどのように考えているか。パネルせん断試験では、各 DP への荷重が均等とならないため、そこに原因があるのではないか。(津畑)
→ 指摘された現象は見られており、接合部パネルせん断試験の方が大きくなる原因と考えている。現象を細かく見れば、DP 1 本 1 本で耐力が異なる。今回は時間的にそこまで分析することは出来ないため、今後の課題としたい。(宇佐美)

- ・ (Ⅳ. 設計ガイドラインの作成 p. 139~156) ここでは、第Ⅱ章の構造実験結果をもとに CLT 耐震壁の荷重・変形角関係をモデル化する。また、CLT 耐震壁の荷重・変形角関係をブレース置換により再現する方法を示し、低層建物の試設計例 (CLT 耐震壁を有する高さ 16m 地上 4 階建ての RC 造建物 (用途: 学校)) を示した。
- ・ (Ⅳ. 同 - CLT 耐震壁のモデル化) Ⅱ. で示した CLT 耐震壁の荷重・変形角関係をモデル化した。CLT 耐震壁は以下の方針でモデル化し、実験結果を解析によりトレースすることでモデル化の妥当性を確認した。
- ・ (Ⅳ. 同 - CLT 耐震壁の部材ランク、p. 147) RC フレームと同様の手順で各試験体の D_s を

求め、部材ランクを検討した。終局変形角を 22/1,000rad として設定した場合の各試験体の塑性率 μ ・等価粘性減衰定数 h_{eq} ・ D_s およびせん断力負担率の最大値を表 2.1 に示した。4 種類の耐震壁で、 D_s 値は 0.37～0.56 である。また、技術基準解説書に示される RC 耐力壁の部材群種別と D_s の関係に準拠し、CLT 耐震壁は D ランクの耐力壁相当 0.45 として扱うこととした。

- ・ (IV. 同 - 試設計、p.150～158) 上記のモデル化を基に、CLT 耐震壁を有する高さ 16m の RC 造建物 (用途: 学校) の許容応力度設計および保有水平耐力計算の計算例を示した。X 方向は RC ラーメン構造で、CLT 耐震壁は、Y 方向 (張間方向) に配置されている。
- ・ CLT 壁の許容応力度は $\beta \cdot F_s$ (基準せん断強度 $F_s = 2.70\text{N/mm}^2$) で定義し、せん断強度低減係数 $\beta = 0.50$ (実験結果から得られた各試験体の β を安全側に丸めた) とした。
- ・ なお、本設計例に関して、「CLT 耐震壁のモデル化の検討」は、オーソライズされた考え方ではないため、今後の研究成果の蓄積により、より合理的な部材ランクの設定方法が提案されることを期待する。」とし、また、本章のおわりに「… 仮にはあるが D_s を定め、試設計を示した。なお、試設計における CLT 耐震壁の剛性・耐力は実験結果を元に設定したが、剛性・耐力の低減係数の値は接合部の仕様と分割数による影響が大きいと考えられ、これら低減係数の設計での取り扱いは今後の課題である。」と付記した。(宇佐美)

(IV. コメント・質疑応答等)

- ・ 分割した CLT 壁のそれぞれを X 字型ブレースに置換した場合も検討したが、実験結果の挙動と合わなかったため、CLT 1 組を X 字型ブレース置換することとした。(宇佐美)
- ・ D_s を 0.45 とした説明があったが、表 3.3 保有耐力設計の計算結果一覧 (p.156) では、0.3 や 0.55 が見られるが。(田中裕)
 - 表 2.1 の各試験体の D_s (p.147) を参照し、設計的に安全側の値を用いた。(宇佐美)
 - 今回、復元力特性で同一加力の 2 回目のループでは、1 回目に対してエネルギー吸収性能が大きく減少することが明らかとなっている。今回示した方法が正しいものであるのかについては、疑問の余地がある。「技術基準解説書」では、このような木造の特性に対して明記されておらず、「S39 検討会」でもデータが不足しており、 D_s を厳しめに設定している状況がある。今後、合理的な D_s の決定方法の確立が必要であると言える。(宇佐美)
 - 「 D_s の決合理的な定方法、評価方法」については、 D_h を取って良いかをはじめとして、何が正しいと誰も言えない状況にある。今回は試行であり、オーソライズされたものでないことは明記しておく必要がある。(五十田)
- ・ S39 関係者、日建連関係者の参加を念頭として、実務者として「 D_s の決合理的な定方法」など、この種の構造に関して要望を募集しているので、宜しく願いたい。なお、意見聴取については、日建連にもお願いしている。(五十田)
 - 具体的には、日建連とどこから連絡があるのか。(森田)
 - 日建連には昨日依頼した。日建連小林氏からメールが届くものと思われる。(五十田)
- ・ 今後、本事業の成果を使用して、実建物を設計する場合、申請者が個別性能評価を取得する必要があるのか。例えば、 D_s の設定に関しても、各社が個別評価してもらうことになるのか。(宇佐美)
 - 当初の狙いとしては、新都市で開発した技術も S39 で取り扱い、例えば、特別な調査研

究の位置づけとなり、確認申請でその扱いで使用できることを目標としていたが、今回、実験の分析検討にも相応の時間を要し、S39 との共有関係もできなかった事により、その目標には到達できなかった。(五十田)

→ 各社については、本報告書をベースとしての個別性能評価となる。それでも本事業の実績を踏まえたことで、ハードルは下げられていると考える。(宇佐美、五十田)

→ 本件についても、要望のひとつとしてお待ちしたい。(五十田)

(3) 来年度のスケジュール、実施概要

- ・ 来年度のスケジュール等を事務局から報告した。要点は以下の通り。(事務局)
 - 1) 新都市ハウジング協会を運営する幹事会社が、現在の竹中工務店 (R2～R5 年度) から清水建設 (R6～R9 年度、4 年間) へ交代する。
 - 2) 当 WG の名称：(仮称)「木質ハイブリッド WG」。

以上

II. CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能の把握

1. はじめに

CLT が建築構造材料として建築基準法に取り入れられて以降、その利用方法として様々な研究、開発がなされてきている。その中で CLT を耐震壁として、木造だけでなく RC 造や S 造に用いる構造実験を主体とした研究開発が進められている^{2.1)-2.10)}。これらは、混構造であるため規模の小さな建物でもルート 3 での構造設計を実施する必要がある、その際に設計者が構造特性係数 D_s を決める必要がある。 D_s の決定には様々なパラメータ(階高、柱スパン、架構と耐震壁の耐力比、接合形式等)に対して構造的な根拠が求められるため、実験や解析によるデータの蓄積が必須であるが、現状はデータが希薄な状況である。

この中で、令和 2~3 年度には設計データの蓄積を目的に、CLT 耐震壁を有する鉄骨架構の構造実験を実施し、力学性能を把握してきた^{2.6)-2.7)}。これらに関しては一定の成果を残すことができたため、令和 4 年度からは CLT 耐震壁を有する RC 架構を対象とし、CLT 耐震壁と RC フレームの接合方法をパラメータとする架構実験を実施した^{2.11)}。その結果、ラグスクリューとドリフトピン (以後、DP) によるせん断キーのみの試験体では、CLT 耐震壁は圧縮ストラットのみでせん断力負担し、CLT 耐震壁の発生せん断応力度レベルは材料強度の 6 割程度であった。それに対し、鋼板挿入 DP 接合とスタッドを用いた試験体では、上下の挿入鋼板用のスリットによる断面欠損を考慮したせん断応力度が材料強度に達した。また、CLT 耐震壁部分の初期剛性は、せん断キーのみの試験体では材料試験結果をやや下回るものの、鋼板挿入 DP 接合とスタッドを用いた試験体では概ね材料試験結果レベルを確保した。一方で、せん断キーのみの試験体の最大耐力発生時の変形は $20 \times 10^{-3} \text{rad}$ となり靱性指向型の性状を示したのに対し、材料強度レベルのせん断応力度を發揮した試験体では $10 \times 10^{-3} \text{rad}$ と小さくなり、最大耐力後の耐力低下も大きくなる強度指向型の性状を示した。

ところで、令和 4 年度事業では集合住宅を対象とした試験体であり、CLT 耐震壁の分割はしなかった。一方で文教施設や事務所を対象とした用途の建築の場合、階高と CLT の製作サイズの制約から CLT パネルを分割する必要がある。パネルの分割により、個々のパネルがロッキング挙動し、縦分割すれば梁中間部に集中荷重が発生するため、その影響が懸念される。また、鋼板挿入 DP 接合の DP 耐力は、学会の木指針^{2.12)}に基づいて設計した場合、高い安全率により過剰な本数になることが、文献(2.13)でも示されている。過剰な本数になることは集合破壊につながる可能性もあり、必ずしも安全な設計とならないのに加え、設計の合理化によりスリットサイズが縮小され、耐力の向上が期待できる。また、RC 架構の耐力に対して、CLT 耐震壁の負担割合が高い場合の検証も重要である。

以上より本年度は、CLT 耐震壁を有する RC 架構を対象とし、パネル分割数とパネル同士の接合方法、CLT パネル厚さをパラメータとする架構実験を実施し、力学性状を把握するとともに、設計データを蓄積する。

<参考文献>

- 2.1) 栗原嵩明他:鉄骨架構に適用する CLT 耐震壁の構造実験, 2018 年度大会(北陸)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.143-144, 2018.07
- 2.2) 金澤和寿美他: CLT を耐震壁として挿入した鉄骨造の構造性能 その 1-その 2, 2019 年度大会(東北)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.331-334, 2019.07
- 2.3) 李瑞他:CLT を耐震壁として挿入した鉄骨造の構造性能 その 3, 令和 2 年度大会(関東)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.297-298, 2020.07
- 2.4) 難波嵩之他:CLT+鉄骨ハイブリッド構造システムに関する研究 その 1-その 2, 2019 年度大会(東北)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.645-648, 2019.07
- 2.5) 久保和民他:CLT+鉄骨ハイブリッド構造システムに関する研究 その 3-その 5, 2019 年度大会(関東)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.357-362, 2020.07
- 2.6) 宇佐美徹他:CLT 耐震壁を有する鉄骨架構の構造性能 その 1-その 2 , 2021 年度大会(東海)日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-138, 構造Ⅲ, 2021.07
- 2.7) 宇佐美徹他:CLT 耐震壁を有する鉄骨架構の構造性能 その 3-その 4 , 2022 年度大会(北海道)日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-138, 構造Ⅲ, 2022.07
- 2.8) 安並卓嗣他:CLT を用いた RC 架構の耐震壁の構造性能 その 1-その 2, 2017 年度大会(中国)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.613-616, 2017.07
- 2.9) 麻生直木他:CLT を用いた RC 架構の耐震壁の構造性能 その 3-その 4, 2018 年度大会(北陸)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.13-16, 2018.07
- 2.10) 梁田真史他:CLT を用いた RC 架構の耐震壁の構造性能 その 5, 2020 年度大会(関東)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.295-296, 2020.07
- 2.11) 栗原嵩明他:CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能 その 1-その 2, 2023 年度大会(近畿)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.401-404, 2023.07
- 2.12) 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-, 2006.12
- 2.13) 金澤和寿美他:せん断力を負担する鋼板挿入ドリフトピン接合部の耐力その 1, 2023 年度大会(近畿)日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.405-406, 2023.07

1. 実験計画

1.1. 試験体

表 1.1 に試験体一覧を、図 1.1 から図 1.4 に試験体図を示す。試験体の総数は 4 体で、実験パラメータは CLT 耐震壁のパネル分割数とパネル同士の接合部の接合方法および CLT パネル厚さである。試験体は文教施設の一般的な階高柱スパンの個所を対象にした実大の 34%縮小モデルとし、柱心距離は 2880mm、試験体スタブ上端から梁心距離は 1280mm、柱を 320×320、梁を 320×180 とした。コンクリートの設計基準強度は F_c30 とし、柱主筋 D16(SD390)、帯筋 D10(SD295A)、梁主筋 D13(SD390)、あばら筋 D6(SD295A)とした。

すべての試験体において RC 梁と CLT 壁の接合は、令和 4 年度に実施した試験体 A2-ST-H の接合ディテールを採用する。CLT 耐震壁の水平面木口に設けたスリットに山形鋼（以後 CT 鋼）のウェブを差し込んで DP を打込むとともに、フランジに打設したスタッドを介して RC フレームと一体化した。全試験体で、CT 鋼の分割位置は、CLT パネルのロッキング変形を抑制するため CLT パネルの中央部に配置した。試験体 A3-JDP-60-TR は CLT 耐震壁を 3 分割したタイプ、試験体 A3-JDP-60-QT は 4 分割したタイプで、CLT 壁同士は両試験体とも鋼板挿入 DP 接合とした。試験体 A3-JDW-60-QT は CLT 耐震壁を 4 分割とし壁同士の接合は CLT 耐震壁の木口に直接 DP を打込むダボ接合である。以上の 3 試験体の CLT 耐震壁は 5 層 5 プライの厚さ 60mm（ラミナ厚 12mm）、樹種スギ、強度等級 S60 を採用した。試験体 A3-JDP-80-QT は 5 層 5 プライの厚さ 80mm（ラミナ厚 16mm）、樹種スギ、強度等級 S60 の CLT を採用し、CLT 耐震壁を 4 分割して壁同士の接合に鋼板挿入 DP 接合を用いた。

表 1.1 試験体一覧

試験体	CLT パネル分割数	パネル同士の接合	CLT 諸元
A3-JDP-60-TR	3	鋼板挿入 DP	S60-5-5
A3-JDP-60-QT	4	鋼板挿入 DP	CLT 厚さ 60mm
A3-JDW-60-QT	4	DP によるダボ	
A3-JDP-80-QT	4	鋼板挿入 DP	S60-5-5 CLT 厚さ 80mm

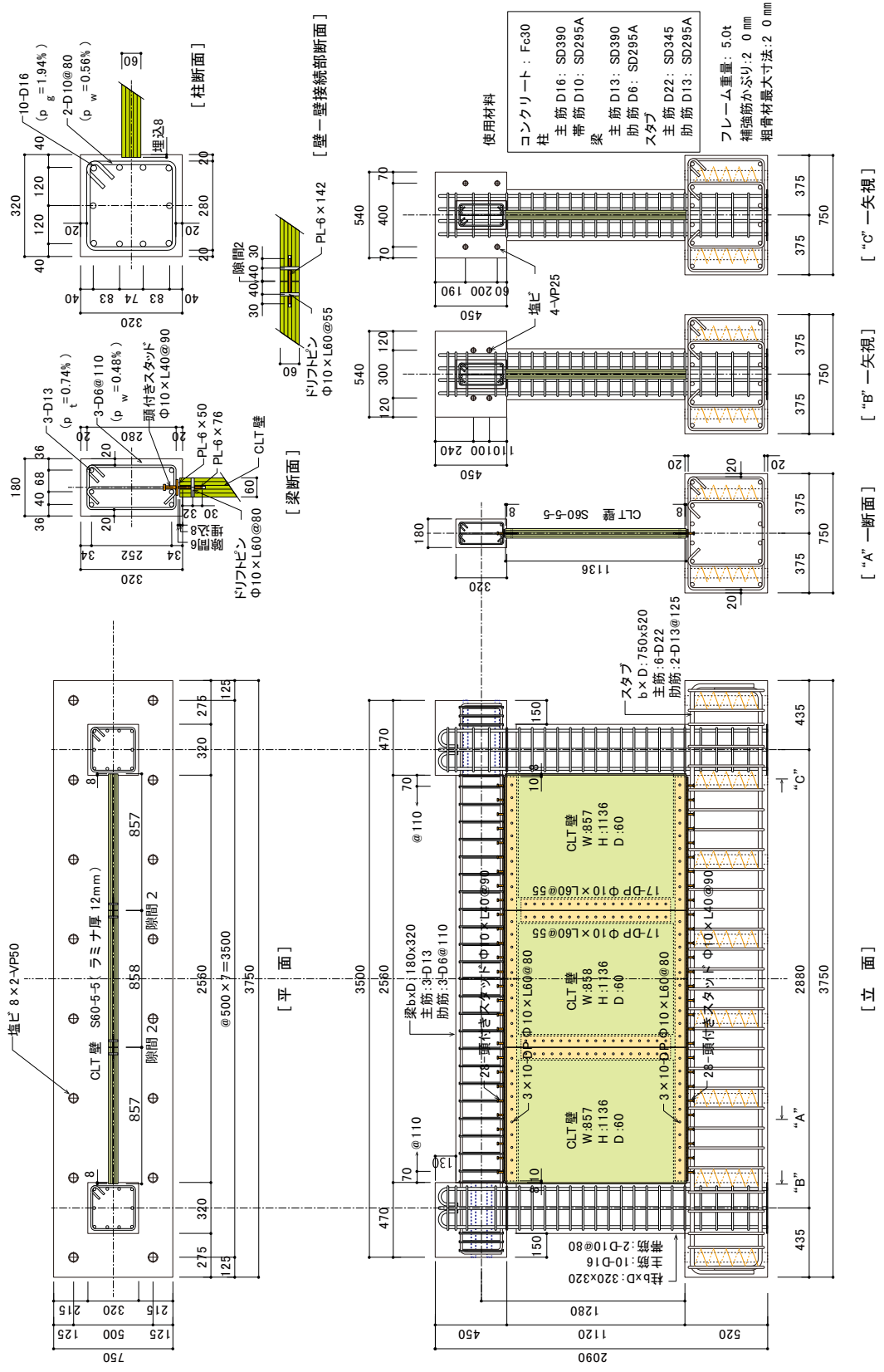


図 1.1 試験体形状・寸法(試験体 A3-JDP-60-TR)

1.2. 加力計画

図 1.5 に加力装置図を示す。試験体スタブを反力床と接合し、柱-梁接合部上面に鉛直ジャッキを設置し、長期軸力(一定, 軸力比 0.2=746kN)を与える。また、柱-梁接合部の側面に水平ジャッキを設置し、水平力を与えることで地震時の状況を再現した。鉛直ジャッキにはリニアスライダが設置されており水平方向の変形に追随する。

加力振幅は試験体上部左右の柱梁接合部で計測した水平変位の平均値を試験体高さ 1280mm で除した層間変形角で制御した(以後, 制御変形角とする)。梁に軸力が入らないよう, 左右の水平力を与えるジャッキは圧縮力と引張力を同値で載荷した。

加力は図 1.5 で左から右へ加力する方向を正として, 制御変形角が $2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$, $5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$, $10 \times 10^{-3} \text{rad}$, $20 \times 10^{-3} \text{rad}$, $33 \times 10^{-3} \text{rad}$ で正負交番の繰り返し加力をそれぞれ 3 回繰り返し, その後 $50 \times 10^{-3} \text{rad}$ を目安として正方向に一方向載荷した。

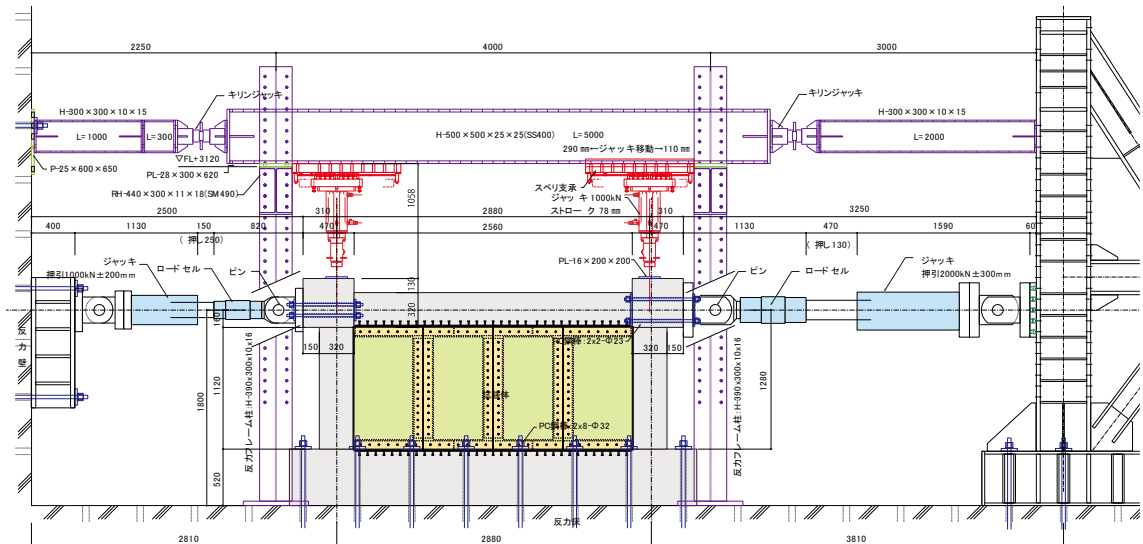


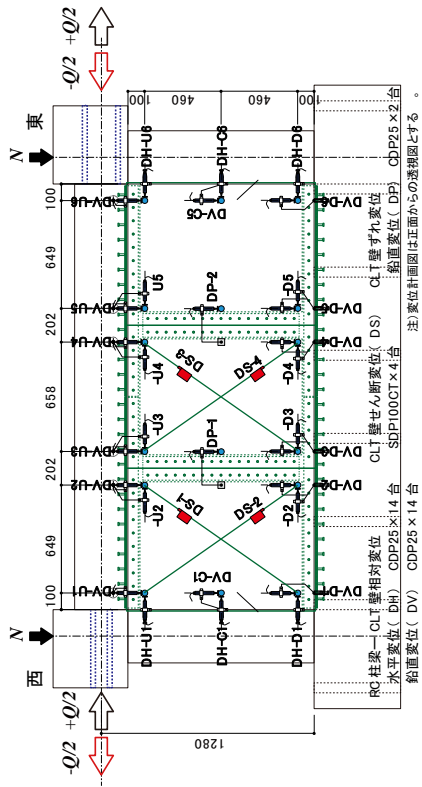
図 1.5 加力装置図(試験体 A3-JDP-60-QT)

1.3. 計測計画

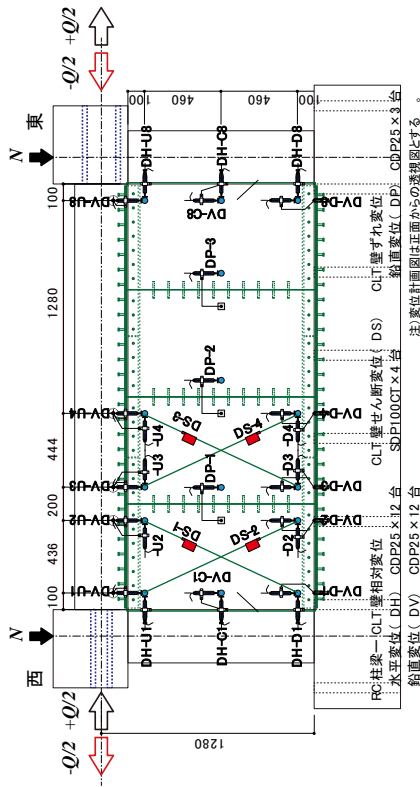
各試験体の計測計画を図 1.6～図 1.9 に示す。

全体の層間変形(せん断変形+曲げ変形)を確認するために柱梁接合部 2 か所と上梁中央部で水平変位と鉛直変位を計測する。また, CLT パネルのせん断変形を捉えるために, DP 接合部等より内側の四隅を対角に計測する。さらに, RC フレームと CLT 耐震壁のずれ変形を捉える目的で, RC フレームより柱側中央の 1 か所, 梁側の各 CLT パネルの端部で水平及び鉛直変位を計測する。

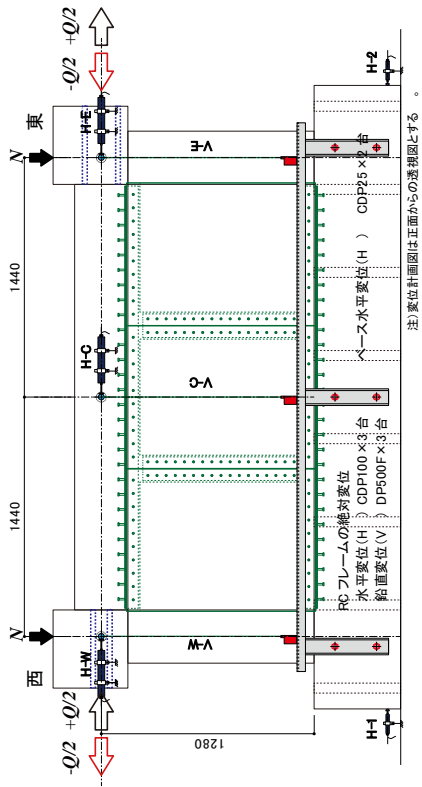
歪は, RC フレームの各柱梁部材端部で主筋と帯筋について計測する。また, 壁パネルのせん断応力度分布把握のためパネル 1 枚につき 5 か所でせん断歪を, 水平方向軸応力度分布把握のため各柱側 5 か所で水平方向の歪を計測する。なお, 計測点数が膨大になることを防ぐため, 試験体の対称性を考慮して配置した。



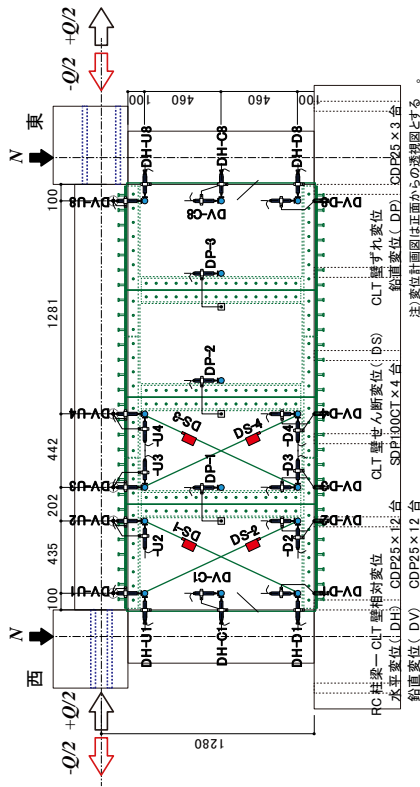
試験体 A3-JDP-60-TR



試験体 A3-JDW-60-QT



全試験体共通



試験体 A3-JDP-80-QT

図 1.6 変位計測図

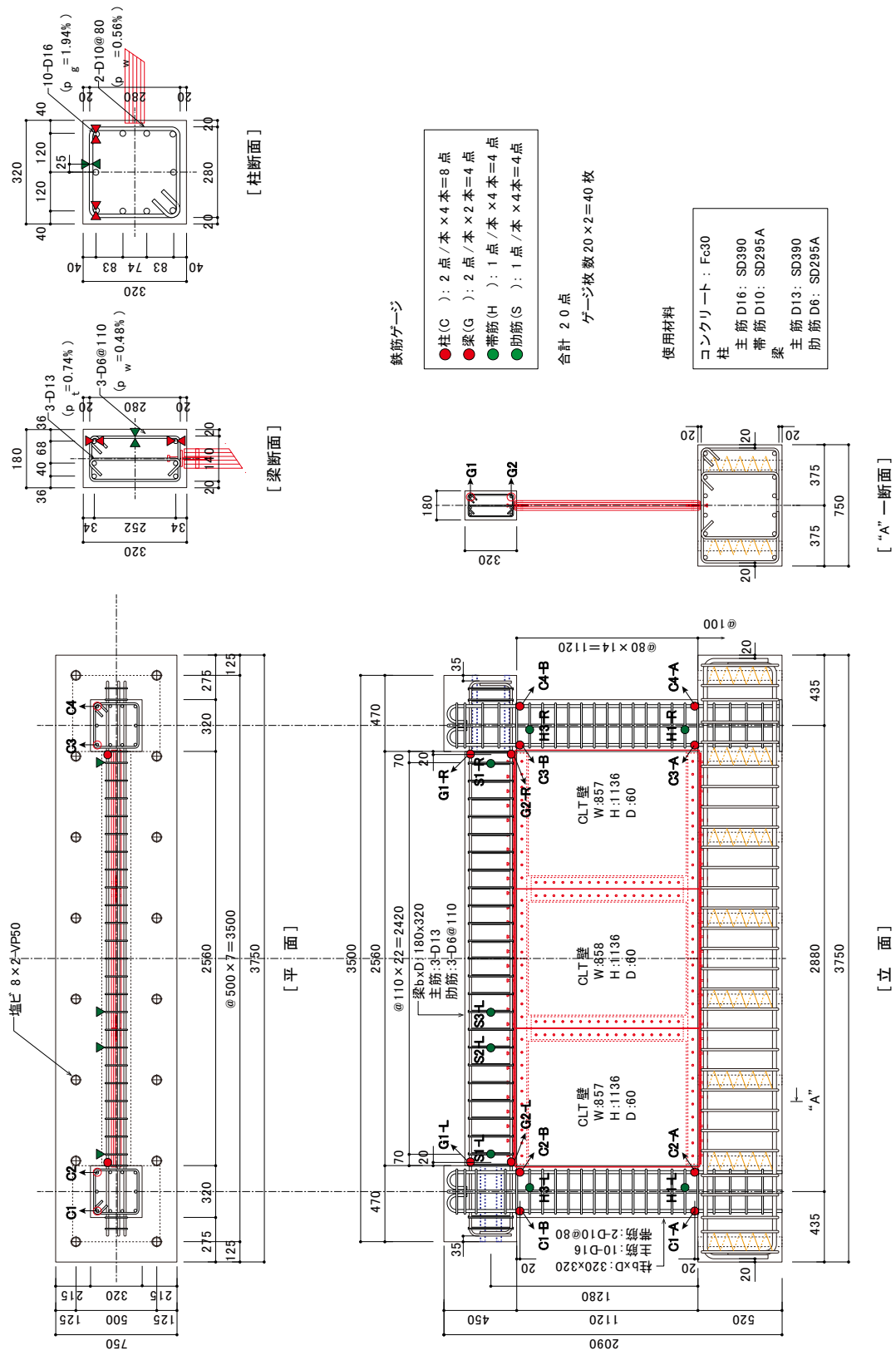


図 1.7 RC 鉄筋部歪ゲージ計測図 (試験体 A3-JDP-60-TR)

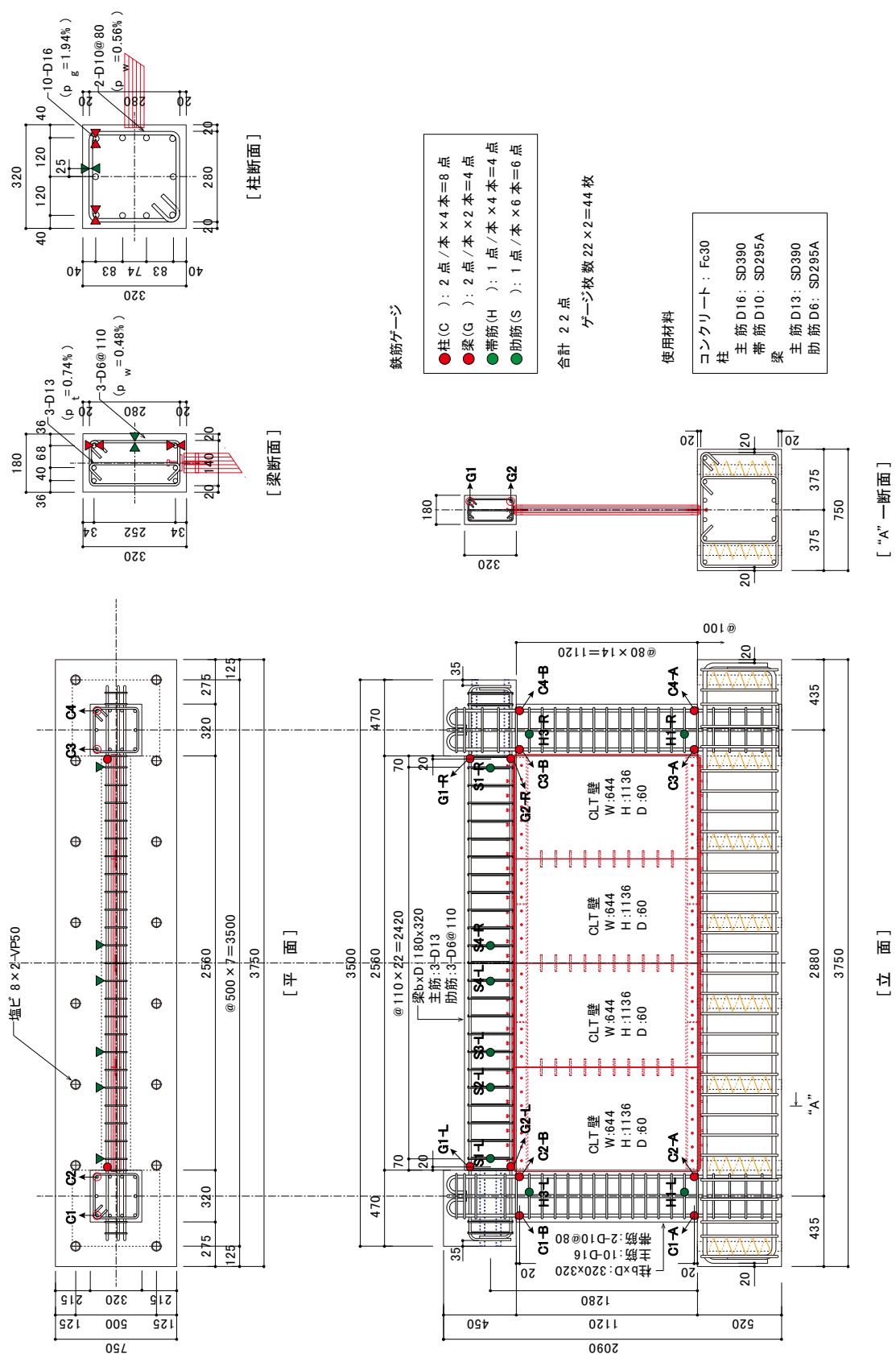


図 1.8 RC 鉄筋部歪ゲージ計測図 (試験体 A3-JDE-60-QT)

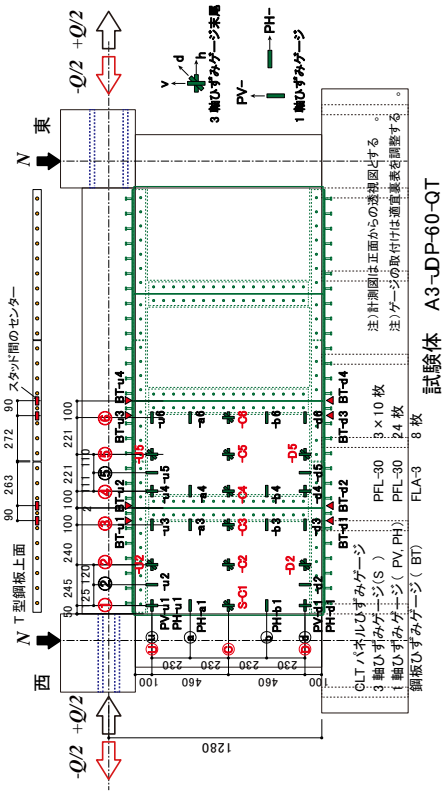
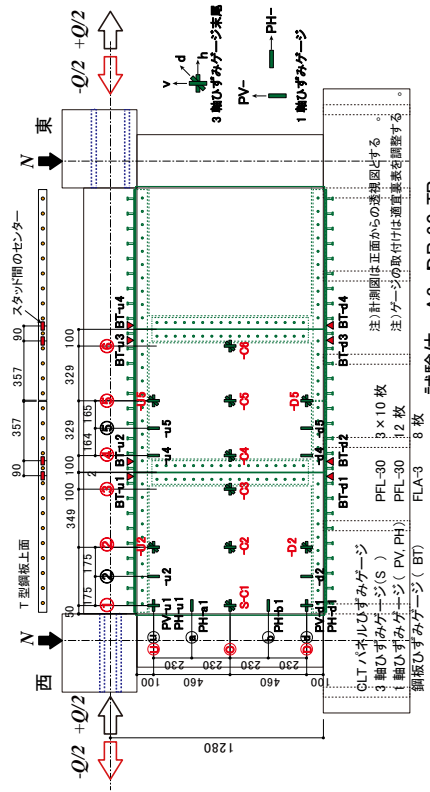
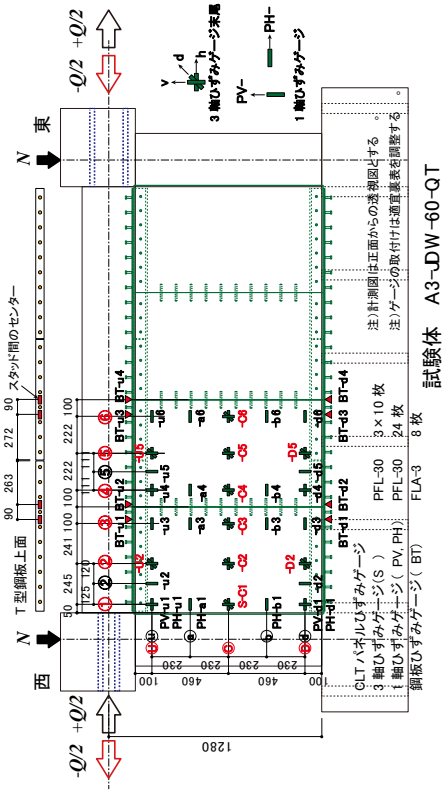
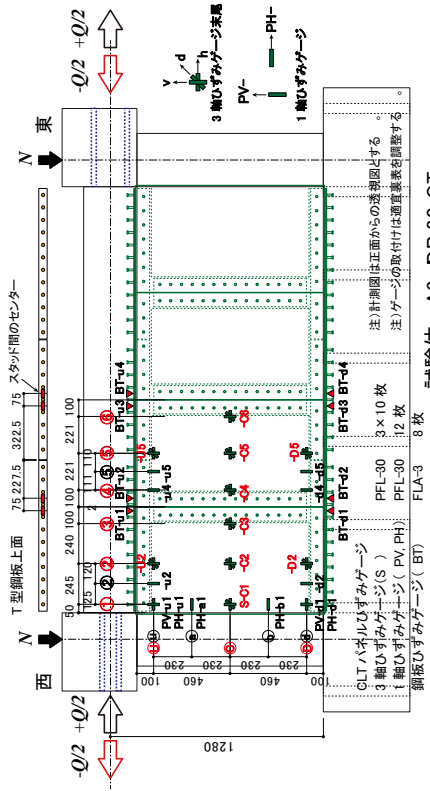


図 1.9 CLT 歪計測図

2. 材料試験及び要素試験

2.1. 材料試験

2.1.1. CLT

(1)CLT せん断試験

図 2.1 に試験体図を示す。せん断試験は外形 1200mm×300mm×60 mm で逆対称 4 点曲げ式（大野式）せん断試験とした。強軸方向・弱軸方向それぞれ 3 体を試験に供した。

使用する CLT は樹種スギ，強度等級 S60-5-5（ラミナ厚さ 12mm）及び強度等級 S60-5-5（ラミナ厚さ 16mm）で，架構試験と同じマザーボードから切り出して製作した。

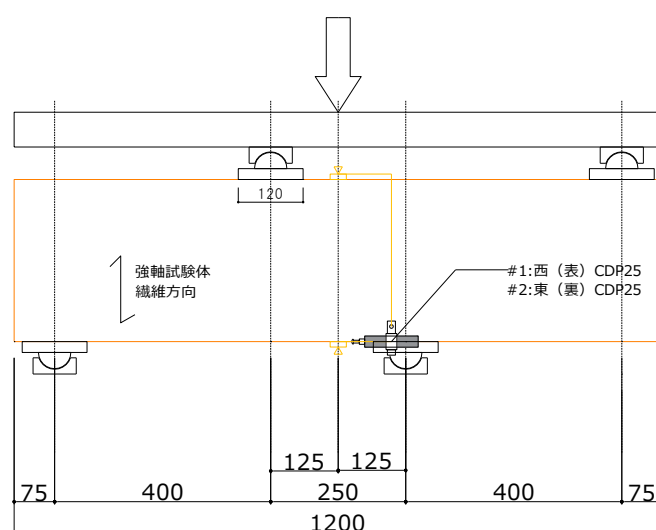


図 2.1 CLT せん断試験 試験体図

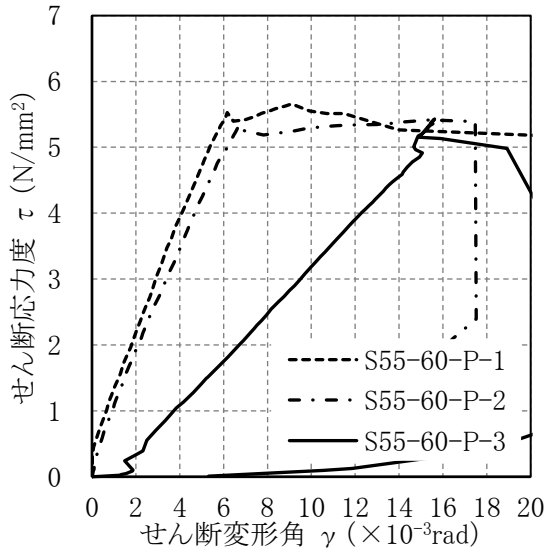
図 2.2 にせん断試験結果およびに実験結果から得られた特性値を示す。

特性値の算出方法は以下の通りとした。

最大せん断応力	τ_{\max}
最大応力時のせん断変形角	γ
せん断弾性係数	G $0.1\tau_{\max}$ の点と $0.4\tau_{\max}$ の点を結んだ直線の傾き

試験結果は，最大せん断応力 τ_{\max} の平均値がラミナ厚さ 12mm の試験体では強軸で 5.50 N/mm²，弱軸で 5.45 N/mm²，ラミナ厚さ 16mm の試験体では強軸で 6.00 N/mm²，弱軸で 6.14 N/mm² となった。

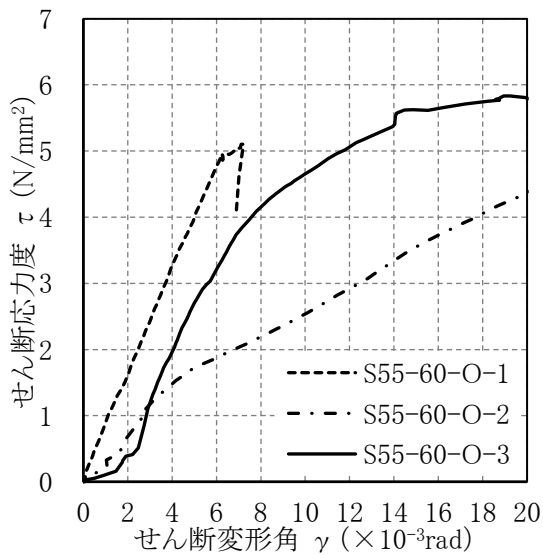
せん断弾性係数 G については，ラミナ厚さ 12mm の試験体では強軸で 879 N/mm²，弱軸で 845 N/mm²，ラミナ厚さ 16mm の試験体では強軸で 937 N/mm²，弱軸で 981 N/mm² となった。



(1) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 強軸方向

S60-5-5(t=60) 強軸	τ_{\max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S55-60-P-1	5.659	9.097	898
S55-60-P-2	5.417	15.407	861
S55-60-P-3	5.431	15.613	347
平均値	5.502	13.372	879
標準偏差	0.111	0.103	252
変動係数	0.020	0.008	0.286
下限値	5.153		761

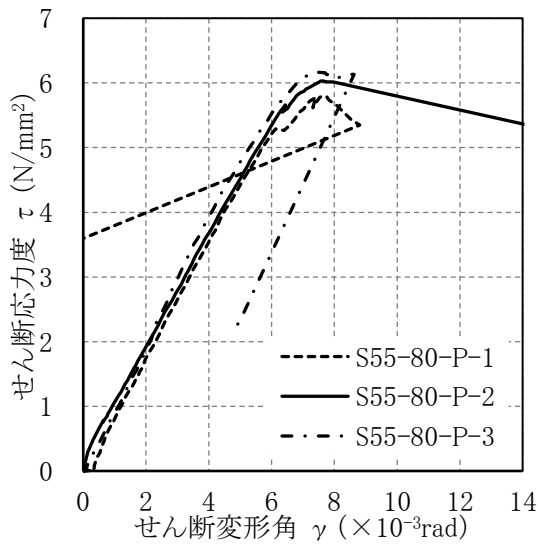
※せん断弾性係数 G は網掛けデータを除く平均値とした。ただし下限値を求めるために用いる試験体数に依存する定数 K は試験体数 3 に対応する値とした。



(2) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 弱軸方向

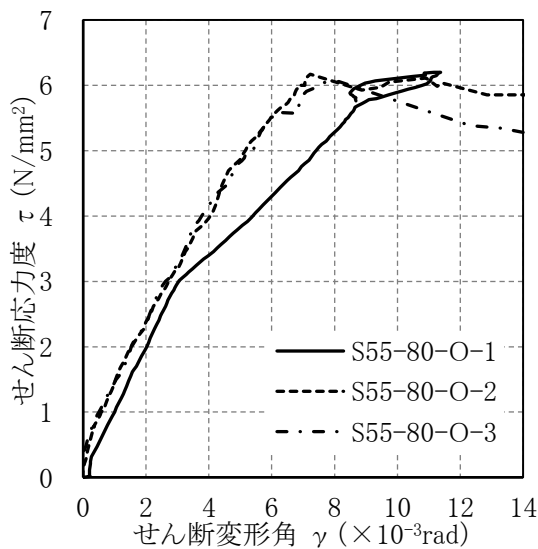
S60-5-5(t=60) 弱軸	τ_{\max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S55-60-O-1	5.104	7.217	778
S55-60-O-2	5.418	33.457	267
S55-60-O-3	5.833	18.947	912
平均値	5.452	19.874	845
標準偏差	0.299	10.732	278
変動係数	0.055	0.540	0.329
下限値	4.511		714

※せん断弾性係数 G は網掛けデータを除く平均値とした。ただし下限値を求めるために用いる試験体数に依存する定数 K は試験体数 3 に対応する値とした。



S60-5-5(t=80) 強軸	τ_{\max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S55-80-P-1	5.795	7.607	934
S55-80-P-2	6.032	7.580	860
S55-80-P-3	6.167	7.400	1016
平均値	5.998	7.529	937
標準偏差	0.154	0.092	64
変動係数	0.026	0.012	0.068
下限値	5.513		907

(3) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 強軸方向



S60-5-5(t=80) 弱軸	τ_{\max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S55-80-O-1	6.198	11.213	991
S55-80-O-2	6.169	7.227	998
S55-80-O-3	6.059	8.140	954
平均値	6.142	8.860	981
標準偏差	0.060	1.705	19
変動係数	0.010	0.192	0.020
下限値	5.953		972

(4) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 弱軸方向

図 2.2 セン断試験結果と特性値

(2)CLT 圧縮試験

試験体図を図 2.3 に示す。圧縮試験は外形 100mm×60 mm×(CLT 厚)で標点間距離は 100mm とした。載荷は単調圧縮とした。

載荷方向に対して、強軸方向・弱軸方向・45 度方向でそれぞれ 3 体を試験に供した。使用した CLT は、樹種スギ、強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 及び強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 16mm) で、架構試験と同じマザーボードから切り出して作成した。載荷は単調圧縮とした。

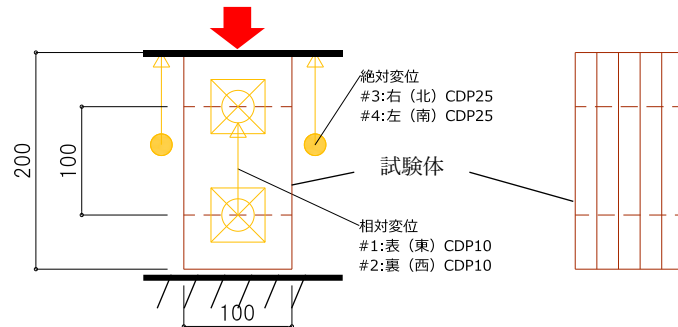


図 2.3 CLT 圧縮試験 試験体図

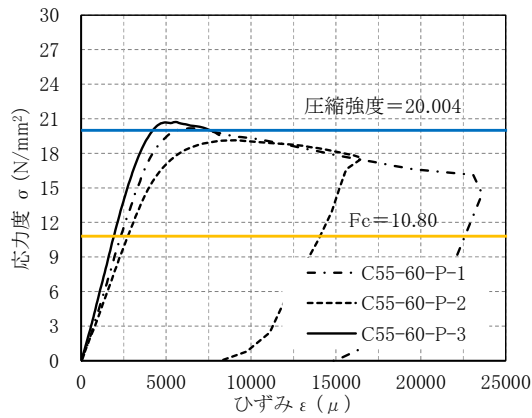
図 2.4 に圧縮試験結果と実験結果から得られた特性値を示す。

特性値の算出方法は以下の通りとした。

最大圧縮応力度	σ_{\max}
最大応力時の歪	ϵ
圧縮弾性係数	E 0.1 σ_{\max} の点と 0.4 σ_{\max} の点を結んだ直線の傾き

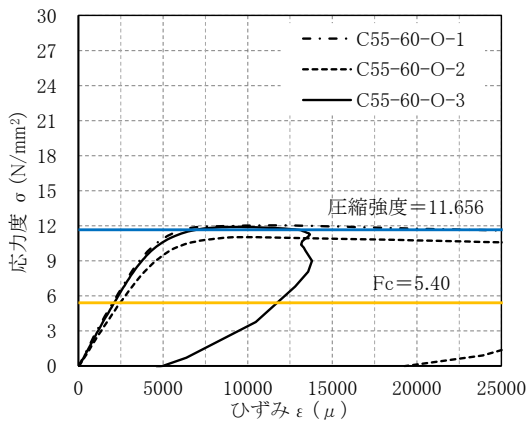
試験結果は、最大圧縮応力度 σ_{\max} の平均値がラミナ厚 12mm の試験体については強軸で 20.0 N/mm²、弱軸で 11.7 N/mm²、45 度で 12.4 N/mm² となった。ラミナ厚 16mm の試験体については強軸で 17.4 N/mm²、弱軸で 12.4 N/mm²、45 度で 13.0 N/mm² となった。

圧縮弾性係数 E については、ラミナ厚 12mm の試験体については強軸で 4823 N/mm²、弱軸で 2518 N/mm²、45 度で 1681 N/mm² となった。ラミナ厚 16mm の試験体については強軸で 3948 N/mm²、弱軸で 3242 N/mm²、45 度で 2237 N/mm² となった。



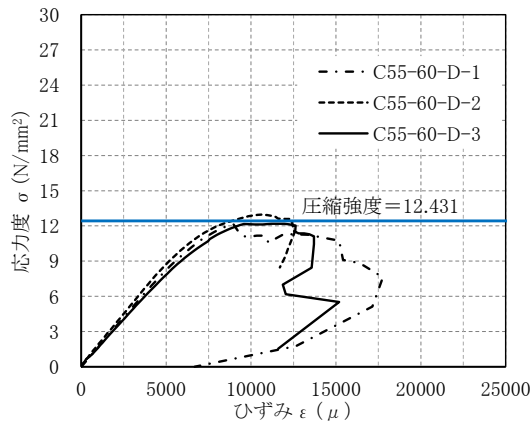
S60-5-5(t=60) 強軸圧縮	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-60-P-1	20.160	6420	4762
C55-60-P-2	19.124	9055	4003
C55-60-P-3	20.729	5575	5705
平均値	20.004	7017	4823
標準偏差	0.664	1482	696
変動係数	0.033	0.211	0.144
下限値	17.910		4495

(1) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 強軸方向



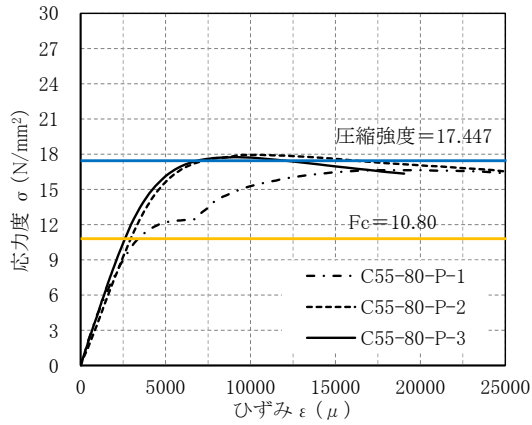
S60-5-5(t=60) 弱軸圧縮	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-60-O-1	12.045	11310	2704
C55-60-O-2	11.025	9520	2263
C55-60-O-3	11.897	9240	2587
平均値	11.656	10023	2518
標準偏差	0.450	917	187
変動係数	0.039	0.091	0.074
下限値	10.237		2430

(2) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 弱軸方向



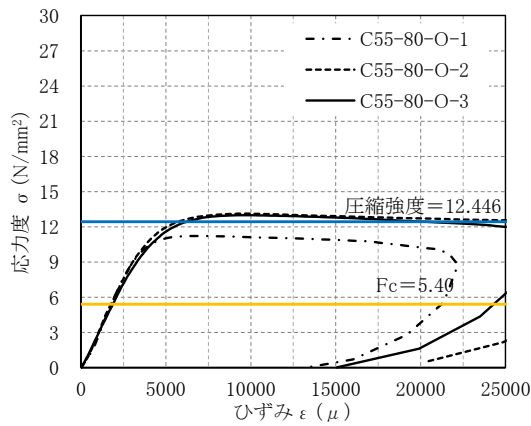
S60-5-5(t=60) 45度圧縮	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-60-D-1	12.136	8975	1690
C55-60-D-2	12.972	10615	1750
C55-60-D-3	12.185	11190	1602
平均値	12.431	10260	1681
標準偏差	0.383	938	61
変動係数	0.031	0.091	0.036
下限値	11.224		1652

(3) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 12mm) 45 度方向



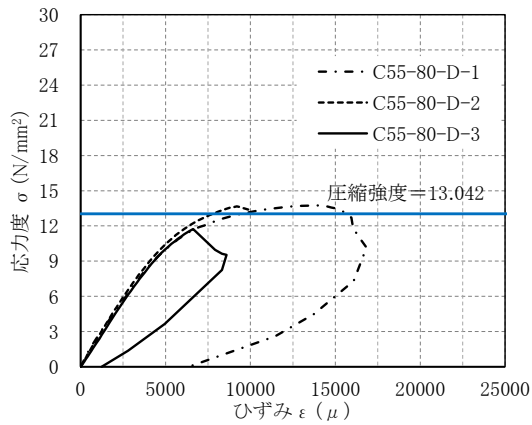
S60-5-5(t=80) 強軸圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-80-P-1	16.642	18145	3772
C55-80-P-2	17.949	10005	3779
C55-80-P-3	17.750	9270	4293
平均値	17.447	12473	3948
標準偏差	0.575	4022	244
変動係数	0.033	0.322	0.062
下限値	15.635		3833

(1) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 16mm) 強軸方向



S60-5-5(t=80) 弱軸圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-80-O-1	11.224	6855	3397
C55-80-O-2	13.126	9640	3366
C55-80-O-3	12.987	9235	2965
平均値	12.446	8577	3242
標準偏差	0.866	1229	197
変動係数	0.070	0.143	0.061
下限値	9.717		3150

(2) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 16mm) 弱軸方向



S60-5-5(t=80) 45度圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-80-D-1	13.738	13715	2136
C55-80-D-2	13.657	9195	2335
C55-80-D-3	11.731	6625	2241
平均値	13.042	9845	2237
標準偏差	0.928	2931	81
変動係数	0.071	0.298	0.036
下限値	10.118		2199

(3) 強度等級 S60-5-5 (ラミナ厚さ 16mm) 45度方向

図 2.4 CLT 圧縮強度試験 圧縮応力度-歪関係と特性値

2.1.2. コンクリート

コンクリートの圧縮試験は、表 2.1 に示すスケジュールで架構実験期間中に実施した。試験は、JIS A 1108:2018 コンクリートの圧縮強度試験方法に準拠した。圧縮強度試験結果一覧を表 2.2 に示す。

表 2.1 コンクリート圧縮試験・架構実験スケジュール

日付	ベース材齢	柱梁材齢	材料試験	架構試験
2023/8/8	ベース打設			
2023/8/30	22	柱梁打設		
2023/10/3	56	34	○	
2023/10/4	57	35		A3-JDP-60-TR
2023/10/11	64	42		A3-JDP-60-QT
2023/10/17	70	48	○	
2023/10/18	71	49		A3-JDW-60-QT
2023/10/25	78	56		A3-JDP-80-QT
2023/10/27	80	58	○	

表 2.2 コンクリート圧縮試験結果

(1)ベース 1 台目

1 台目	設計基準強度 $F_c(N/mm^2)$	コンク リート 打設日	材齢(日)	試験日	圧縮強度 $\sigma_B(N/mm^2)$	ヤング係数 $E_c(N/mm^2)$	割裂強度 (N/mm^2)
	30		2023/8/8	70	2023/10/17	44.62	28923
80				2023/10/27	44.28	28790	3.31
平均値				44.45	28856	3.47	

(2)ベース 2 台目

2 台目	設計基準強度 $F_c(N/mm^2)$	コンク リート 打設日	材齢(日)	試験日	圧縮強度 $\sigma_B(N/mm^2)$	ヤング係数 $E_c(N/mm^2)$	割裂強度 (N/mm^2)
	30		2023/8/8	56	2023/10/3	40.72	28178
70				2023/10/17	40.40	28387	3.23
平均値				40.56	28282	3.02	

(3)柱梁

設計基準強度 $F_c(N/mm^2)$	コンク リート 打設日	材齢(日)	試験日	圧縮強度 $\sigma_B(N/mm^2)$	ヤング係数 $E_c(N/mm^2)$	割裂強度 (N/mm^2)
30	2023/8/30	34	2023/10/3	36.73	24438	2.65
		48	2023/10/17	36.75	24953	2.65
		58	2023/10/27	38.73	25110	3.20
	平均値			37.40	24833	2.83

試験体 A3-JDP-60-TR と A3-JDP-60-QT はその前後の試験結果の平均値として、圧縮強度 σ_B は $36.7N/mm^2$ 、ヤング係数 E_c は $24,700N/mm^2$ となった。試験体 A3-JDW-60-QT, A3-JDP-80-QT も同様に圧縮強度 σ_B は $37.7N/mm^2$ 、ヤング係数 E_c は $25,000N/mm^2$ となった。

2.1.3. 鋼材

(1)鉄筋

架構実験で使用した鉄筋について、JIS Z 2241:2011（金属材料引張試験方法）に準拠して引張試験を実施した。試験結果を表 2.3 に示す。

表 2.3 鉄筋引張試験結果

(1)D22, SD345, ベース主筋

	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
No.1	353.37	545.80	183995	13.184	1921
No.2	357.54	545.51	164075	13.243	2179
No.3	355.98	552.48	186690	14.128	1907
平均	355.631	547.931	178253	13.518	2002

(2)D16, SD390, 柱主筋

	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
No.1	409.36	571.40	161740	11.714	2531
No.2	412.43	593.15	169432	12.552	2434
No.3	428.18	602.30	156754	13.218	2732
平均	416.65	588.95	162642	12.495	2566

(3) D13, SD390, 梁主筋

	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
No.1	443.37	623.49	174943	—	—
No.2	430.14	615.22	156949	10.719	2741
No.3	417.41	616.80	154073	12.028	2709
No.4	428.96	632.04	194013	13.941	2211
No.5	418.60	615.31	189507	11.330	2209
No.6	436.14	614.18	169463	13.232	2574
平均	429.10	619.51	173158	12.250	2489

(4) D10, SD295, 柱帯筋

	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
No.1	351.02	487.59	189083	—	1856
No.2	347.40	479.97	188217	—	1846
No.3	347.65	474.92	184226	—	1887
平均	348.69	480.83	187175	—	1863

(5) D6, SD295, 梁あばら筋

	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	破断伸び (%)	降伏ひずみ (μ)
No.1	467.07	578.84	178146	—	2622
No.2	467.57	552.20	186836	—	2503
No.3	464.92	548.03	185575	—	2505
平均	466.52	559.69	183519	—	2543

(2)鋼板

試験片は、架構実験の挿入鋼板で、板厚 6mm(SN490B)である。試験片は架構実験で使用した鋼材と同一ロットの鋼材より採取した。

試験片は JIS Z 2241:2011（金属材料引張試験方法）に示される 5 号試験片とした。

試験方法は、JIS Z 2241:2011（金属材料引張試験方法）に準拠して実施した。試験結果を表 2.4 に示す。

表 2.4 鋼板引張試験結果

試験片名	採取位置	降伏応力 N/mm ²	降伏ひずみ μ	引張強さ N/mm ²	断面積 N/mm ²	破断伸び %	降伏比
A-1	挿入鋼板 t=6	420	2050	567	149	31.8	0.741
A-2		386	1880	545	149	29.8	0.708
A-3		387	1890	544	149	35.0	0.711
ave		398	1940	552	149	32.2	0.721

(3)ドリフトピン

架構試験で使用したドリフトピンは、試験体 A3-JDP-60-TR, A3-JDP-60-QT 及び A3-JDW-60-QT(鋼板挿入 DP 部)で径 $\Phi=10\text{mm}$, 長さ $L=60\text{mm}$, A3-JDW-60-QT (DP ダボ接合部)で径 $\Phi=10\text{mm}$, 長さ $L=100\text{mm}$, 試験体 A3-JDP-80-QT で径 $\Phi=12\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ である. 同一径のドリフトピンは同ロットの鋼材から製作している. また, 試験片も架構試験のドリフトピンと同ロットの鋼材を使用して製作した.

試験片は JIS Z 3111 (溶着金属の引張試験方法) に示される A2 号試験片とした. それぞれ 3 体を試験に供した.

試験方法は JIS Z 2241:2011 (金属材料引張試験方法) に準拠して実施した. 試験結果を表 2.5 に示す.

表 2.5 ドリフトピン引張試験結果

試験片名	採取位置	降伏応力 N/mm^2	降伏ひずみ μ	引張強さ N/mm^2	断面積 N/mm^2	破断伸び %	降伏比
DP10-1	ドリフト ピン (ϕ =10)	644	3140	727	28.1	14.8	0.886
DP10-2		650	3170	736	28.1	15.7	0.883
DP10-3		642	3130	727	28.2	13.9	0.884
ave		645	3150	730	28.2	14.8	0.884
DP12-1	ドリフト ピン (ϕ =12)	592	2890	682	28.2	18.3	0.869
DP12-2		601	2930	678	28.3	17.3	0.887
DP12-3		584	2850	680	28.2	15.2	0.859
ave		593	2890	680	28.3	17.0	0.872

2.2. 接合部要素試験

2.2.1. 接合部パネルせん断試験

四辺をドリフトピン接合された CLT パネルのせん断試験を行った。試験体図と荷重装置写真を図 2.5 に示す。CLT は 540mm×540mm とし、保有せん断耐力に対して DP の曲げ降伏が先行するように DP 本数を決定した。試験体は、架構試験の試験体 A3-JDP-60-TR,A3-JDP-60-QT,A3-JDW-60-QT で使用した強度等級 S60-5-5(ラミナ厚さ 12mm, CLT 厚さ 60mm, 樹種スギ)の CLT に径 $\Phi=10\text{mm}$ の DP を使用した試験体と、架構試験の試験体 A3-JDP-80-QT で使用した S60-5-5 (ラミナ厚さ 16mm, CLT 厚さ 80mm, 樹種スギ) の CLT に径 $\Phi=12\text{mm}$ の DP を使用した試験体の 2 種類で、CLT はそれぞれ架構試験と同一のマザーボードから切り出した。各 3 体を試験に供し、荷重は単調引張とした。

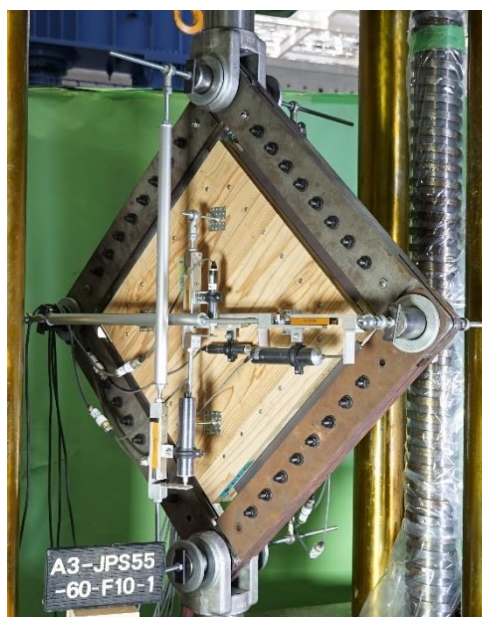
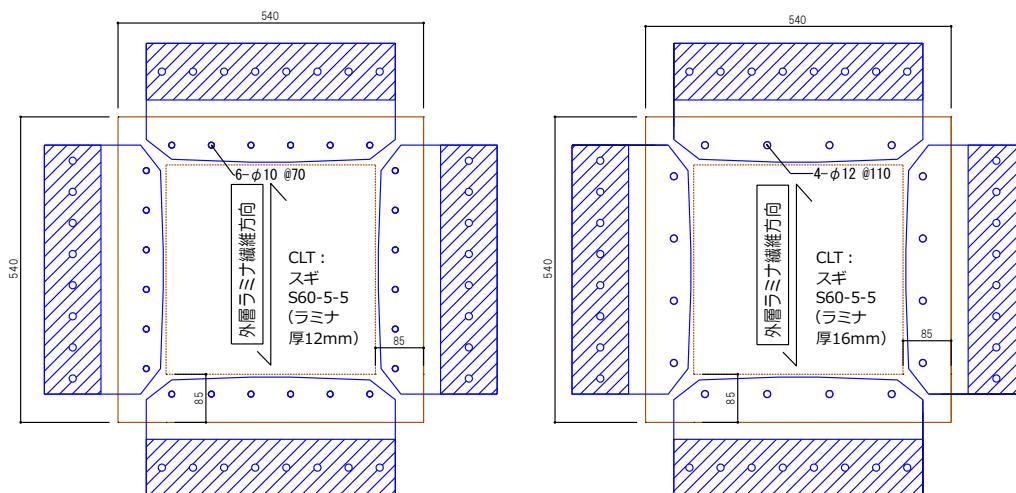
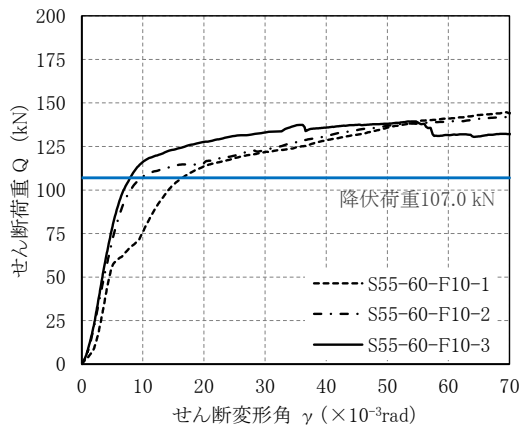


図 2.5 接合部パネルせん断試験 試験体図・荷重装置写真

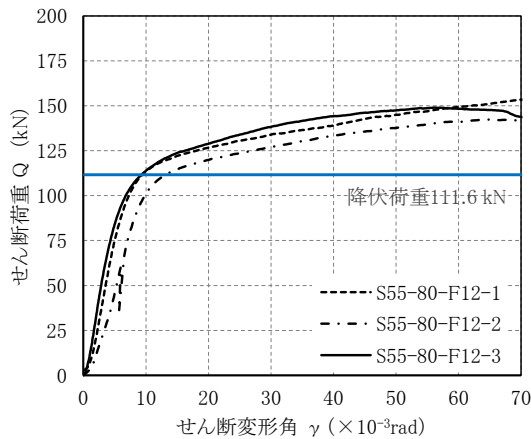
図 2.6 に圧縮試験結果と実験結果から得られた特性値を示す。

特性値の算出方法は以下の通りとした。

せん断荷重	Q	$P/\sqrt{2}$	(P は引張荷重)
せん断変形角	γ	裏表で計測したせん断変形角の平均値	
降伏荷重	Q_y	Q - γ 曲線において $0.1Q_{max}$ の点と $0.4Q_{max}$ の点を結んだ直線と、 $0.8Q_{max}$ の点と $0.9Q_{max}$ の点を結んだ直線との交点の荷重	
初期剛性	K	Q - γ 曲線上の降伏荷重となる時の点と原点を結んだ直線の傾き	



S60-5-5 DP:6-Φ10	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
S55-60-F10-1	107.500	11945	148.139
S55-60-F10-2	105.670	15076	144.610
S55-60-F10-3	107.782	16704	139.413
平均値	106.984	14575	144.054
標準偏差	0.937	1975	3.584
変動係数	0.009	0.136	0.025
下限値	104.032	13645	132.757



S60-5-5 DP:4-Φ12	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
S55-80-F12-1	119.139	16368	156.352
S55-80-F12-2	108.244	10958	142.532
S55-80-F12-3	107.562	19143	148.966
平均値	111.648	15490	149.283
標準偏差	5.304	3399	5.646
変動係数	0.048	0.219	0.038
下限値	94.931	13889	131.486

図 2.6 接合部パネルせん断試験 せん断荷重－せん断変形角関係と特性値

試験結果より、 $\Phi 10$ の一本当たりの降伏耐力は 17.83kN、 $\Phi 12$ の一本当たりの降伏耐力は 27.91kN となった。

2.2.2. Two Rail Shear 試験

CLT 版の接合方法（鋼板挿入 DP 接合，DP ダボ接合）について Two Rail Shear せん断試験を行った．試験体図及び加力装置図を図 2.7 に示す．試験体は縦 200mm×横 150mm×60mm の CLT を横に二つ並べ，その間に接合部を配置した．試験体の両端でφ8 のコーチスクリューを裏表 8 本ずつ，荷重支持部から 6 本ずつ加力装置に留め付けた．試験体の仕様を表 2.6 に示す．各試験体で 3 体を試験に供し，加力は単調引張とした．

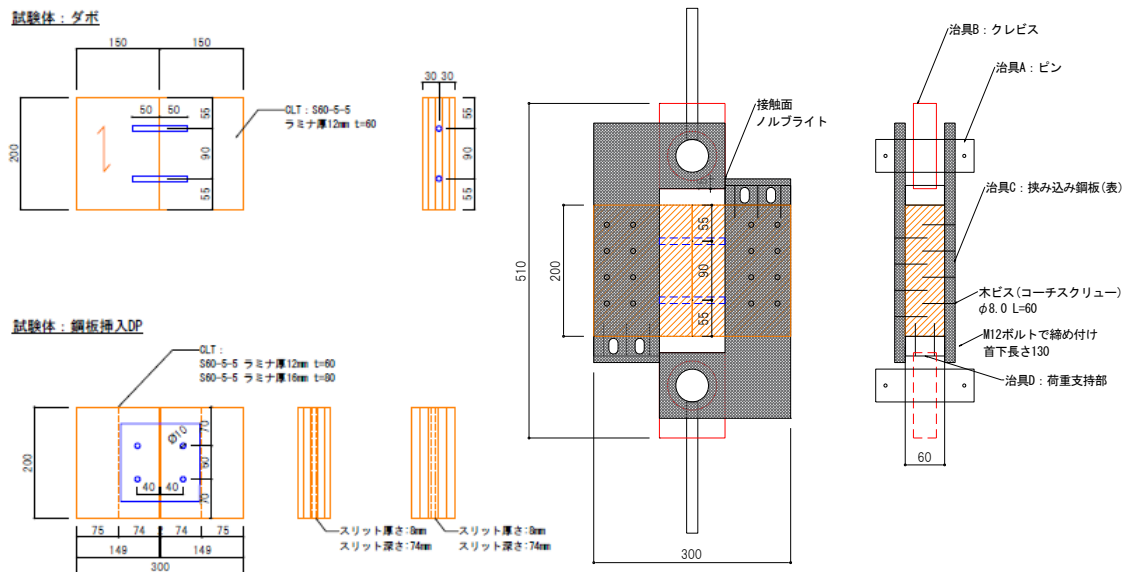


図 2.7 TRS せん断試験体図・加力装置図

表 2.6 Two Rail Shear 接合部試験 試験体一覧

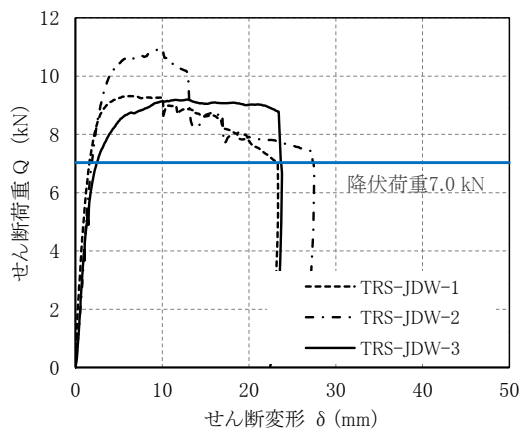
試験体名	接合種類	CLT	接合具
TRS-JDW	ダボ接合	S60-5-5 (60mm 厚)	DP Φ=10(l=100)
TRS-JDP-60	鋼板挿入 DP 接合	S60-5-5 (60mm 厚)	DP Φ=10(l=60)
TRS-JDP-80		S60-5-5 (80mm 厚)	DP Φ=12(l=80)

図 2.8 に TRS 接合部試験結果と実験結果から得られた特性値を示す．

特性値の算出方法は以下の通りとした．

せん断変形	δ	左右の CLT の相対鉛直変形(mm)
降伏荷重	Q_y	Q - δ 曲線において $0.1Q_{max}$ の点と $0.4Q_{max}$ の点を結んだ直線と， $0.8Q_{max}$ の点と $0.9Q_{max}$ の点を結んだ直線との交点の荷重
初期剛性	K	Q - δ 曲線上の降伏荷重となる時の点と原点を結んだ直線の傾き

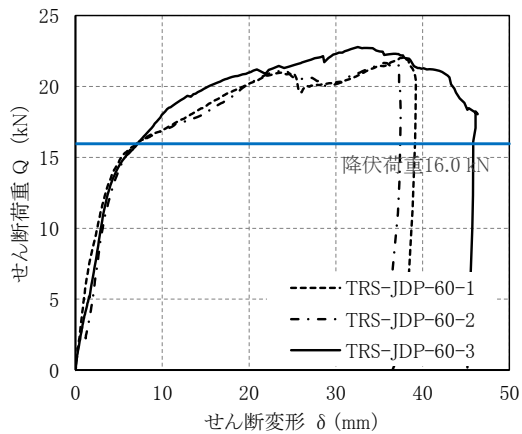
試験結果より，各試験体の一本当たりの降伏耐力はダボ接合で 3.51kN，鋼板挿入 DP 接合の試験体 TRS-JDP-60 で 7.97kN，鋼板挿入 DP 接合の試験体 TRS-JDP-80 で 10.79kN となった．



S60-5-5 2-DPΦ10 L=100	Q_y (kN)	K (kN/mm)	Q_{max} (kN)
TRS-JDW-1	6.535	5656	9.320
TRS-JDW-2	7.860	4060	10.943
TRS-JDW-3	6.690	4349	9.197
平均值	7.028	4688	9.820
標準偏差	0.592	694	0.796
変動係数	0.084	0.148	0.081
下限値	5.163	4361	7.312



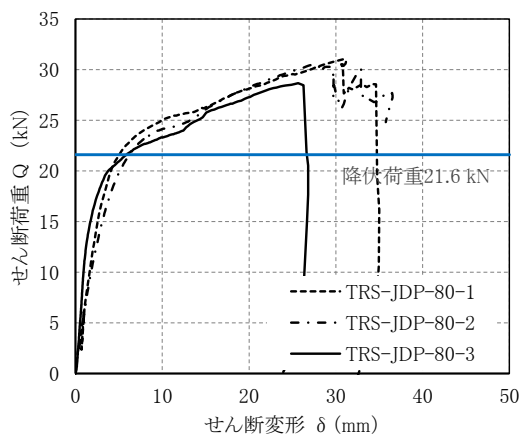
TRS-JDW-1 試験後



S60-5-5 2-DPΦ10 L=60	Q_y (kN)	K (kN/mm)	Q_{max} (kN)
TRS-JDP-60-1	14.801	4178	22.032
TRS-JDP-60-2	16.591	2957	21.649
TRS-JDP-60-3	16.469	3306	22.778
平均值	15.954	3480	22.153
標準偏差	0.817	513	0.469
変動係数	0.051	0.148	0.021
下限値	13.379	3238	20.675



TRS-JDP-60-1 試験後



S60-5-5 2-DPΦ12 L=80	Q_y (kN)	K (kN/mm)	Q_{max} (kN)
TRS-JDP-80-1	22.942	5980	31.040
TRS-JDP-80-2	22.155	5172	30.570
TRS-JDP-80-3	19.688	11052	28.656
平均值	21.595	7401	30.089
標準偏差	1.386	2603	1.031
変動係数	0.064	0.352	0.034
下限値	17.225	6175	26.839



TRS-JDP-80-1 試験後

図 2.8 パネルせん断試験 せん断荷重－せん断変形角関係と特性値

3. 実験結果及び考察

3.1. 破壊状況と荷重変形角関係

3.1.1. 試験体 A3-JDP-60-TR

試験体 A3-JDP-60-TR のせん断荷重-層間変形角関係を図 3.1 に示す。図 3.2 に各部変形や歪と層間変形角関係の抜粋を、写真 3.1 に各制御変形角の損傷状況を示す。試験体 A3-JDP-60-TR は制御変形角 $R=2.5 \times 10^{-3}\text{rad}$ のサイクルで梁・柱にひび割れが見られた。また CLT 同士の接合部にも 1mm 程度のずれが確認できた。 $R=5.0 \times 10^{-3}\text{rad}$ ではひび割れが広がり、接合部のずれも大きくなったが、そのほかの変化は見られなかった。 $R=10 \times 10^{-3}\text{rad}$ で RC 梁と CLT 壁の接合部で DP が CLT へめりこんでいることが確認できた。 $R=20 \times 10^{-3}\text{rad}$ で柱の圧壊、RC 梁と CLT 壁の接合部ではさらにめり込みが顕著になり、CLT 同士の接合部においても DP のめり込みがみられ、版同士のずれが大きくなった。また、一部 CLT にも圧壊が見られた。 $R=33 \times 10^{-3}\text{rad}$ に向かう 28/1000rad 付近で最大値 988kN を記録し、その後は 940kN 程度を維持した。RC 梁-CLT 接合部の木部が大きく損傷し、RC 柱と CLT 壁の間に隙間ができるほど変形が見られた。

負側と 2 回目のサイクルでは 600kN 程度までしか荷重は上がらず、3 回目のサイクルを省略して $R=50 \times 10^{-3}\text{rad}$ のサイクルを実施した。600kN 程度を維持したが、木部の破壊が顕著になるのみであった。

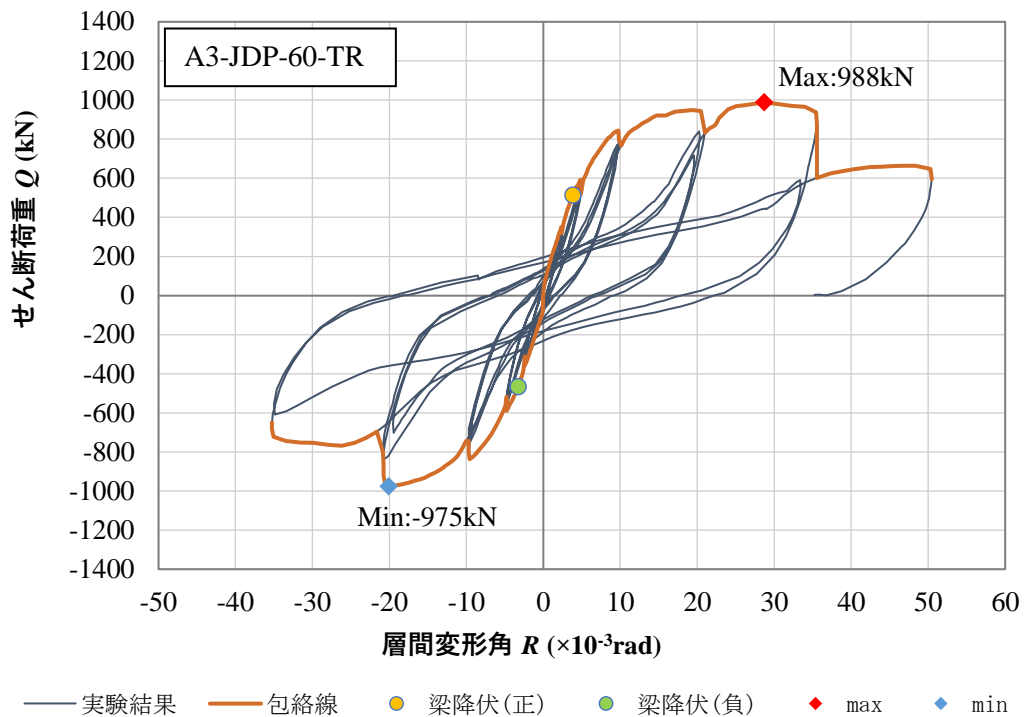
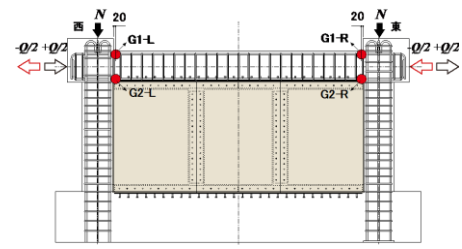
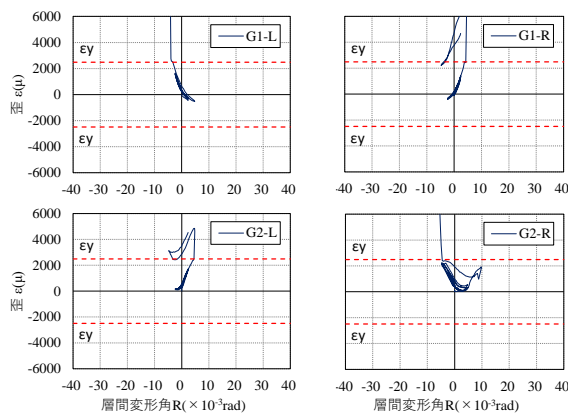
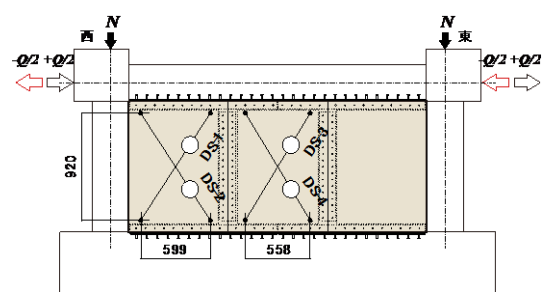
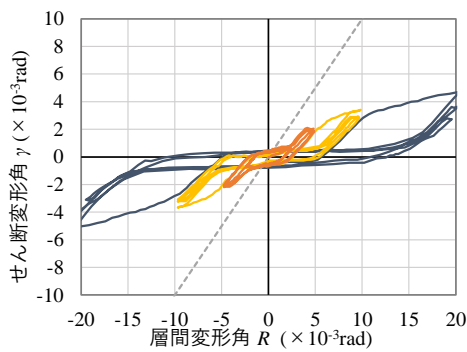


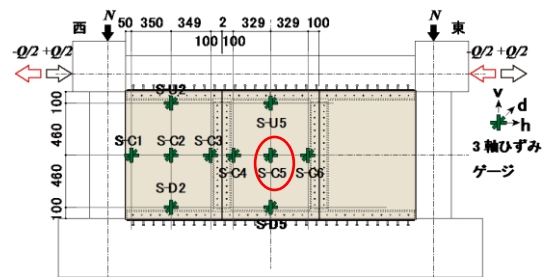
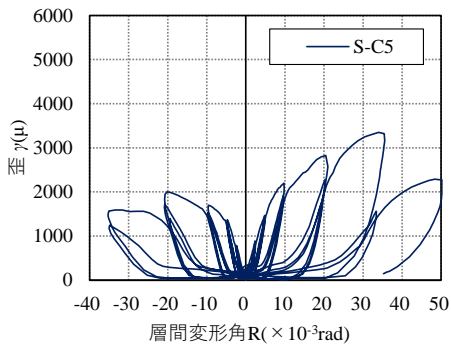
図 3.1 試験体 A3-JDP-60-TR せん断荷重-層間変形角関係



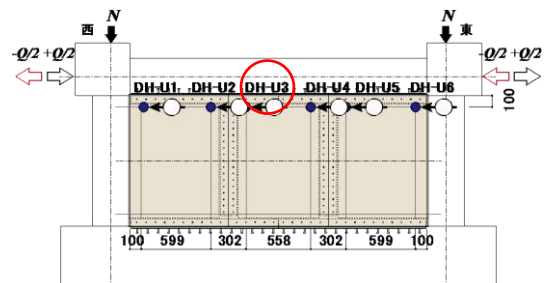
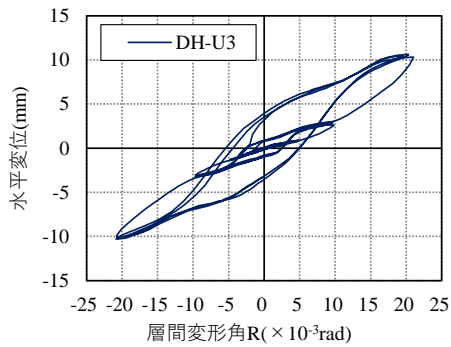
(1) 梁主筋の歪



(2) CLT パネルのせん断変形角



(3) CLT パネル中央部歪



(4) RC 上梁-CLT パネル水平ずれ

図 3.2 各部変形および歪と層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-TR)



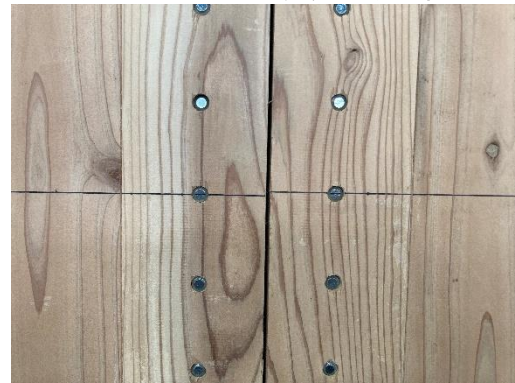
(a) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 全景



(b) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 右梁ひび割れ状況



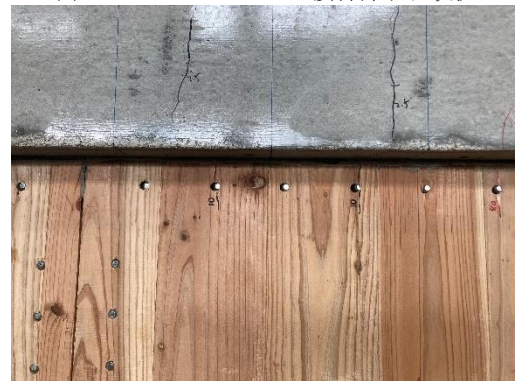
(c) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 全景



(d) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad CLT 接合部ずれ状況



(e) $R=10 \times 10^{-3}$ rad 全景



(f) $R=10 \times 10^{-3}$ rad DP めりこみ状況



(g) $R=20 \times 10^{-3}$ rad 全景



(h) $R=20 \times 10^{-3}$ rad CLT 一部圧壊



(i) $R=33 \times 10^{-3}$ rad 全景



(j) $R=33 \times 10^{-3}$ rad 接合部損傷状況



(k) $R=50 \times 10^{-3}$ rad 全景



(l) $R=50 \times 10^{-3}$ rad 接合部損傷状況

写真 3.1 試験体 A3-JDP-60-TR 損傷状況

3.1.2. 試験体 A3-JDP-60-QT

試験体 A3-JDP-60-QT のせん断荷重-層間変形角関係を図 3.3 に示す。図 3.4 に各部変形や歪と層間変形角関係の抜粋を、写真 3.2 に各制御変形角の損傷状況を示す。4 分割の試験体 A3-JDP-60-QT は、3 分割試験体 A3-JDP-60-TR とほぼ同様の破壊性状を示した。 $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱・梁ひび割れ、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で RC 梁と CLT 壁の接合部で DP が CLT へのめりこみが見られた。 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱の圧壊、 CLT に一部圧壊が見られたほか、 CLT 壁同士の接合部にも DP 接合部の縦側に割裂がみられた。 $R=31.9 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大値 938kN、負側は $R=-30.8 \times 10^{-3} \text{rad}$ で 927.5kN を記録した。 $R=33 \times 10^{-3} \text{rad}$ では CLT 壁同士の接合部で集合型破壊を確認した。 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ では 800kN 程度の荷重を記録した。

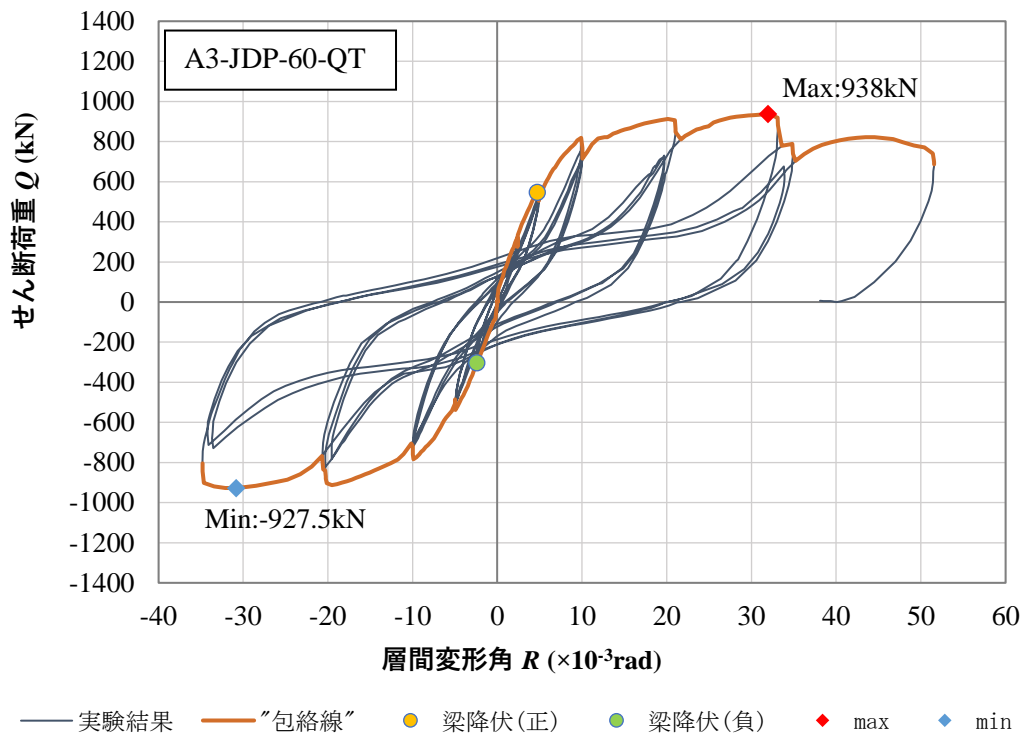
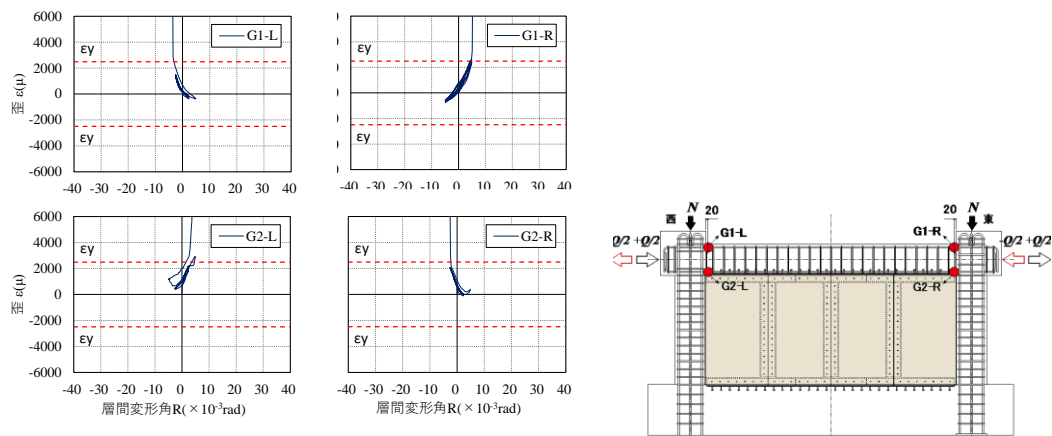
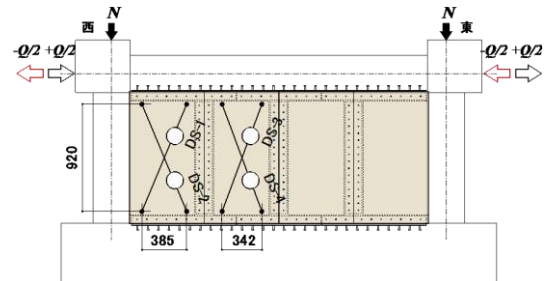
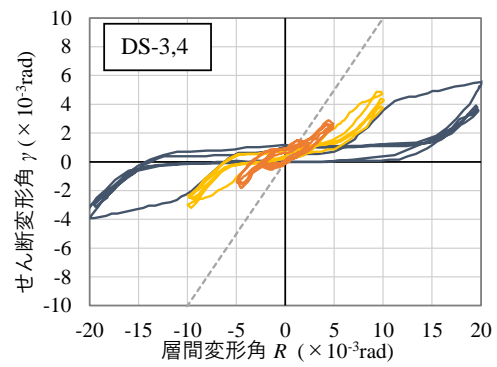
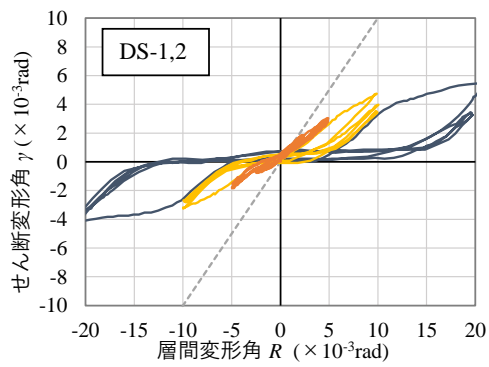


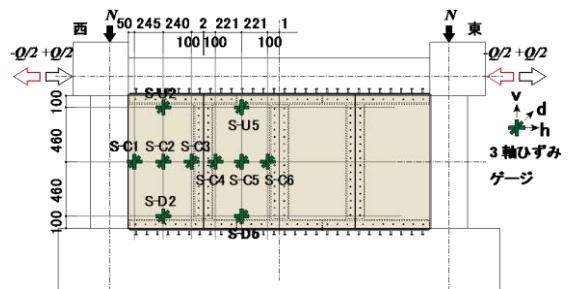
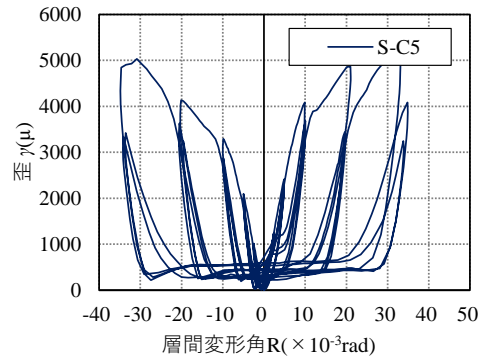
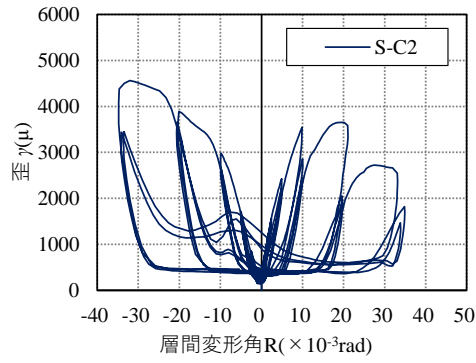
図 3.3 試験体 A3-JDP-60-QT せん断荷重-層間変形角関係



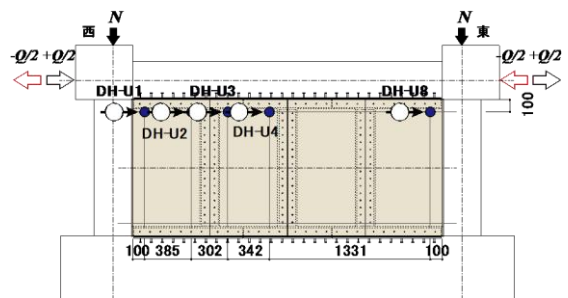
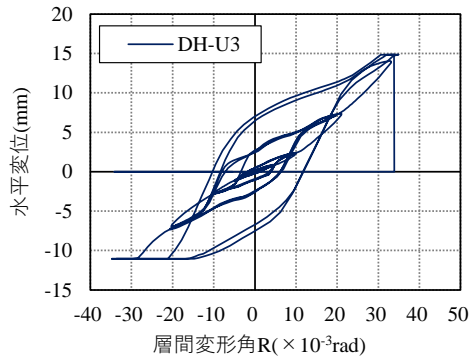
(1) 梁主筋の歪



(2) CLT パネルのせん断変形角



(3) CLT パネル中央部歪



(4) RC 上梁-CLT パネル水平ずれ

図 3.4 各部変形および歪と層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-QT)



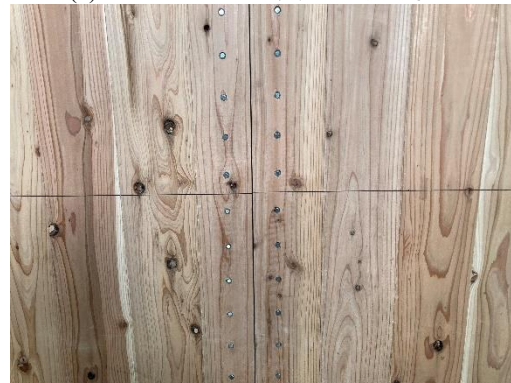
(a) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 全景



(b) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 梁右ひび割れ状況



(c) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 全景



(d) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad CLT 同士の接合部ずれ状況



(e) $R=10 \times 10^{-3}$ rad 全景



(f) $R=10 \times 10^{-3}$ rad DP 接合部めりこみ状況



(g) $R=20 \times 10^{-3}$ rad 全景



(h) $R=20 \times 10^{-3}$ rad DP 接合部損傷状況



(i) $R=33 \times 10^{-3}$ rad 全景



(j) $R=33 \times 10^{-3}$ rad
CLT 同士の接合部集合型破壊



(k) $R=50 \times 10^{-3}$ rad 全景



(l) $R=50 \times 10^{-3}$ rad DP 接合部損傷状況

写真 3.2 試験体 A3-JDP-60-QT 損傷状況

3.1.3. 試験体 A3-JDW-60-QT

試験体 A3-JDW-60-QT のせん断荷重-層間変形角関係を図 3.5 に、各部の変形や歪と層間変形角関係を図 3.6 に示す。各制御変形角の損傷状況を写真 3.3 に示す。4 分割で CLT パネル同士の接合部が DP ダボ接合である試験体 A3-JDW-60-QT も荷重初期はほかの試験体と同様の挙動を示し、 $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱・梁ひび割れ、CLT パネル同士の接合部のずれ、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ で RC 梁と CLT 壁の接合部で DP が CLT へのめりこみが見られた。 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱の圧壊、CLT に一部圧壊が見られた。CLT パネル同士の相対鉛直変位は 10mm を超え、パネルがロッキング変形していることが確認できた。 $R=32.2 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大値 819kN、負側は $R=-19.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で 794.5kN を記録し、CLT パネル同士のダボ接合部の耐力や剛性が小さいため、DP 接合した試験体 A3-JDP-60-QT に比べて小さくなった。 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ では最大荷重の 8 割程度の荷重を記録した。CLT パネルの面外変形も確認した。

CLT パネルを DP 接合した試験体 A3-JDP-60-QT より初期剛性、耐力ともに小さい結果となった。また、実験終了後のダボ接合部の一部を切り出して確認したところ、ダボ付近の木部での割裂を確認した（写真 3.3(m)参照）。

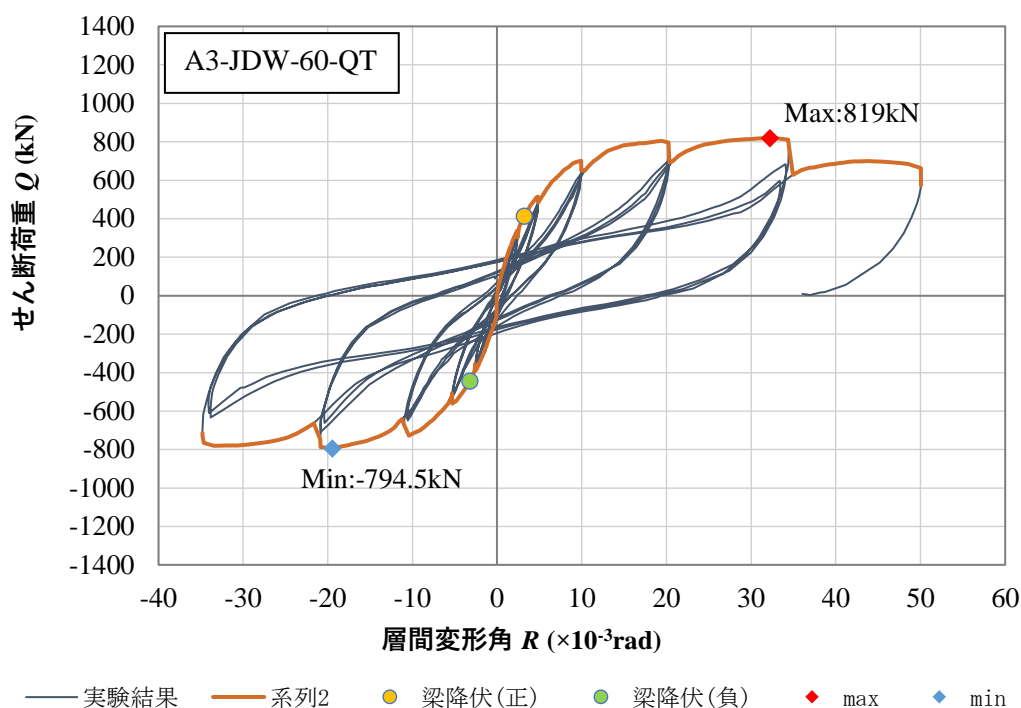
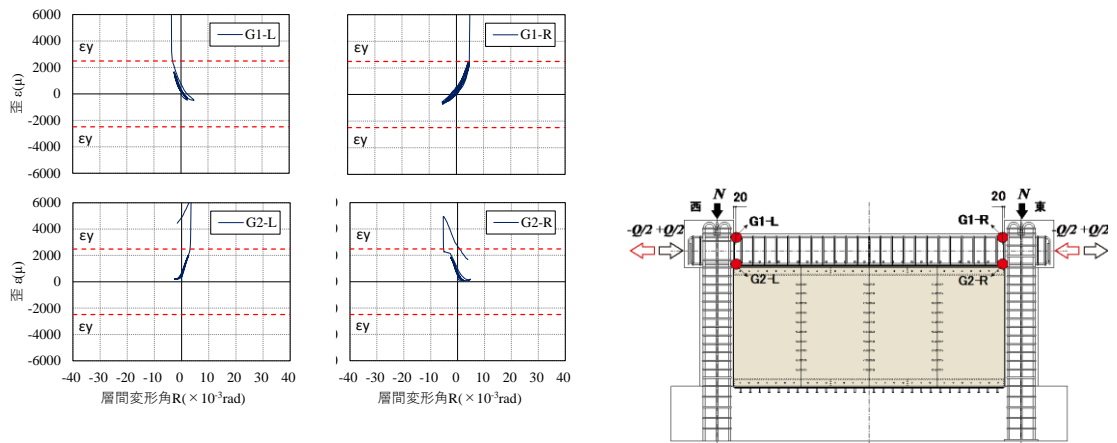
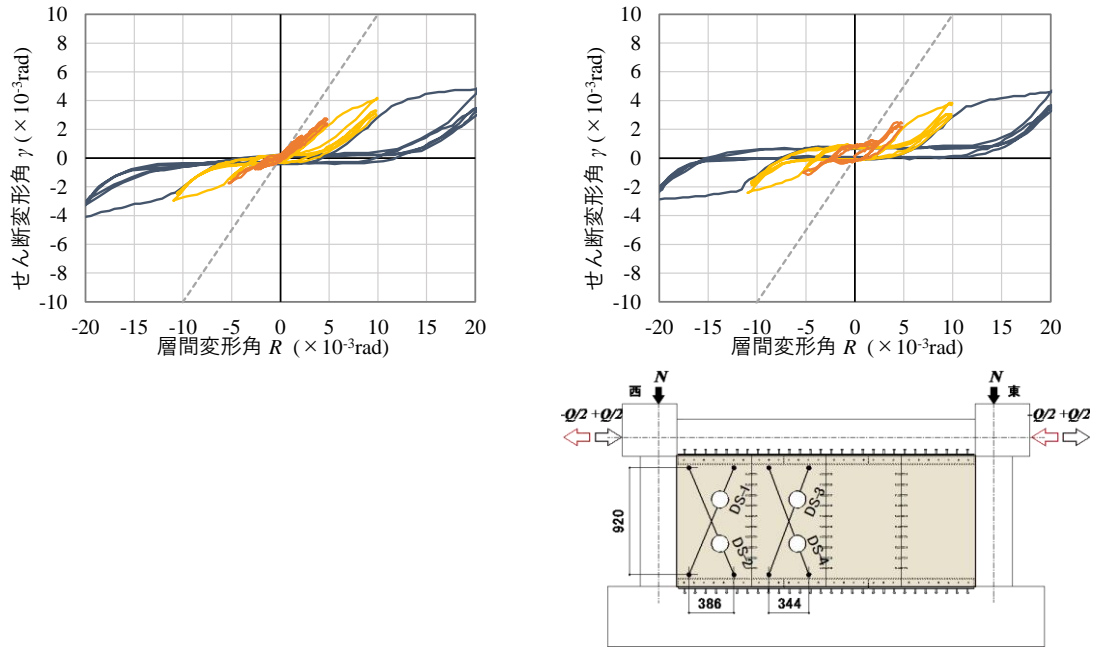


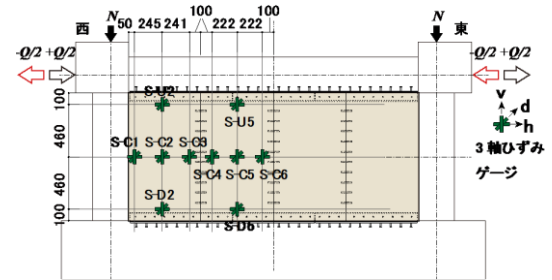
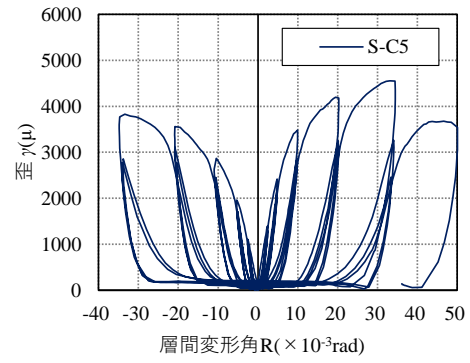
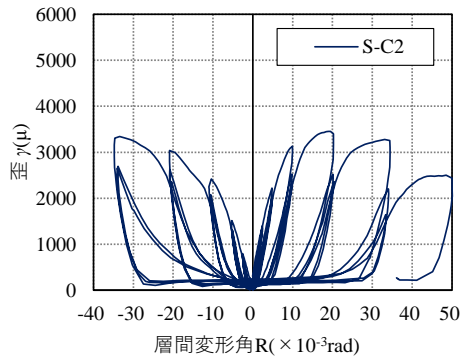
図 3.5 試験体 A3-JDW-60-QT せん断荷重-層間変形角関係



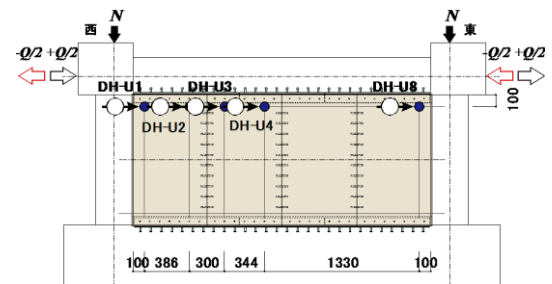
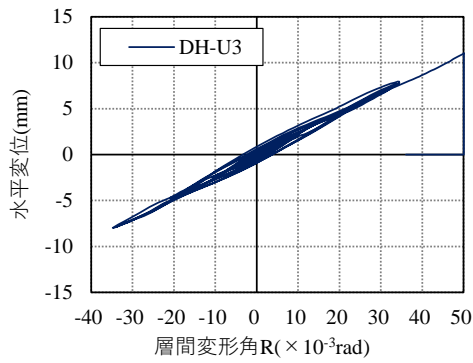
(1) 梁主筋歪



(2) CLT パネルせん断変形角



(3) CLT パネル中央部歪



(4) RC 上梁と CLT パネルの水平ずれ

図 3.6 各部変形および歪と層間変形角関係 (試験体 A3-JDW-60-QT)



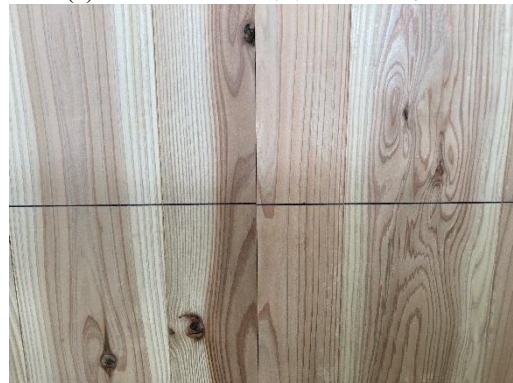
(a) $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(b) $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 梁右ひび割れ状況



(c) $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(d) $R=5.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ CLT 同士の接合部ずれ



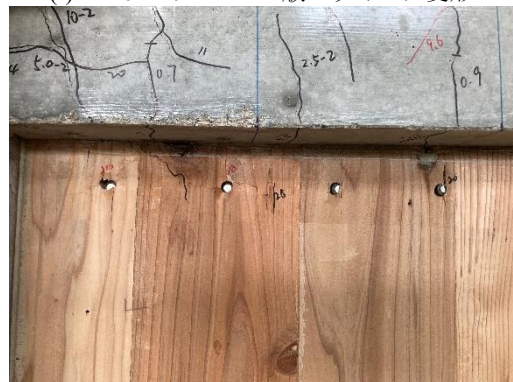
(e) $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(f) $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ CLT 版ロック変形



(g) $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(h) $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ DP 接合部損傷状況



(i) $R=33 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(j) $R=33 \times 10^{-3} \text{rad}$
CLT 同士のずれ・DP 損傷状況



(k) $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ 全景



(l) $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ CLT の面外ずれ



(m) 実験終了後 ダボ接合部の損傷部

写真 3.3 試験体 A3-JDW-60-QT 損傷状況

3.1.4. 試験体 A3-JDP-80-QT

試験体 A3-JDP-80-QT のせん断荷重-層間変形角関係を図 3.7 に、各部の変形や歪と層間変形角関係を図 3.8 に示す。各制御変形角の損傷状況を写真 3.4 に示す。4 分割で CLT が厚い試験体 A3-JDP-80-QT は CLT パネル耐力が高いため、試験体 A3-JDP-60-QT と比べて RC 躯体への損傷が大きくなった。 $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱・梁ひび割れ、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ では梁端に幅 1mm 以上とみられるひび割れが発生した。 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で柱の圧壊が見られたほか、CLT 壁同士の接合部の DP によるめり込みが一部見られた。 $R=31.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大値 1259.5kN、負側は $R=-18.8 \times 10^{-3} \text{rad}$ で 1183.5kN を記録した。 $R=33 \times 10^{-3} \text{rad}$ では CLT 壁同士の接合部で集合型破壊を確認した。 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$ では 900kN 程度の荷重を記録した。

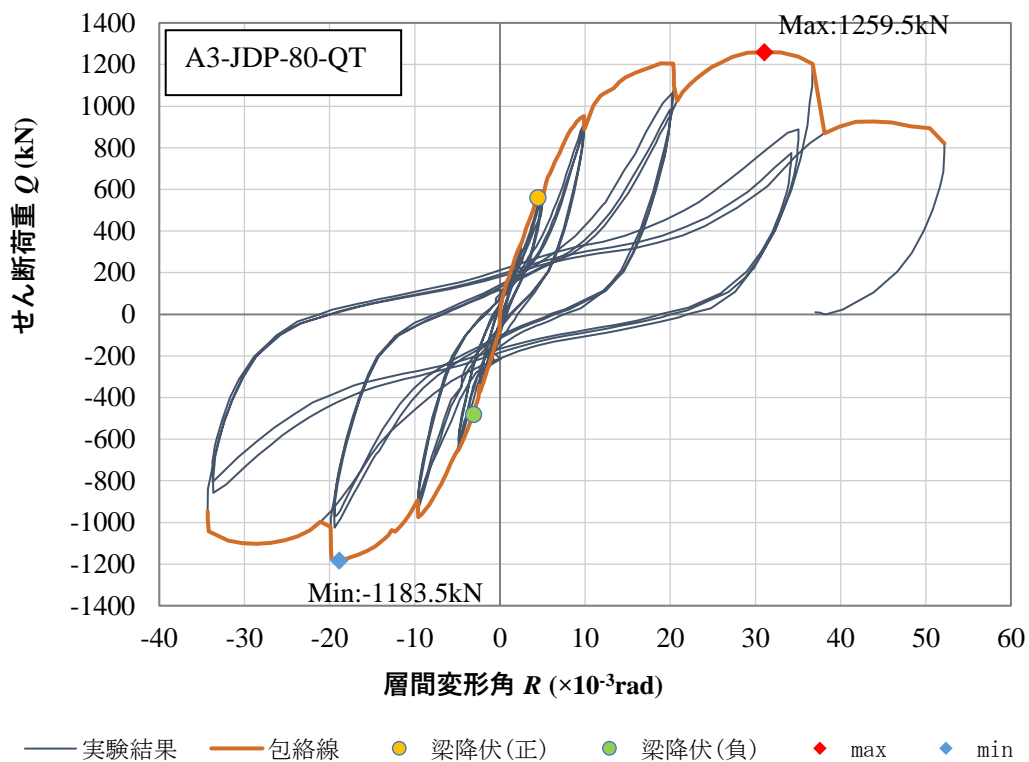
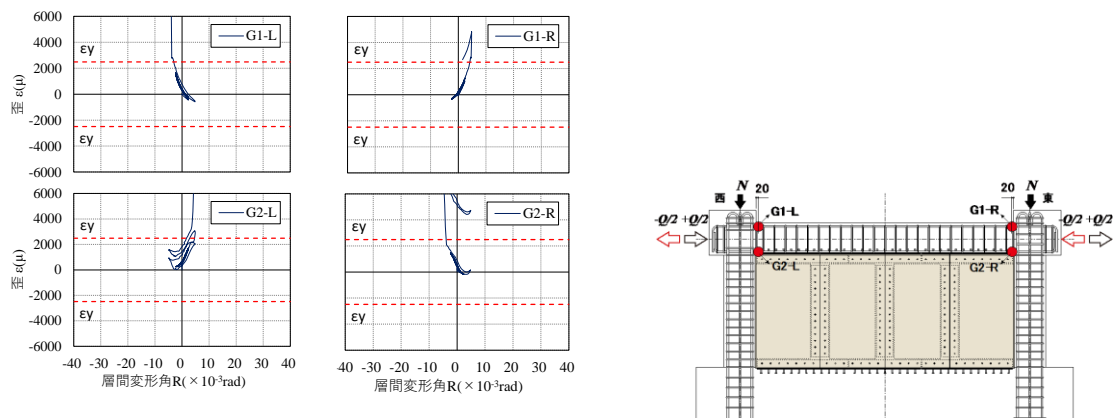
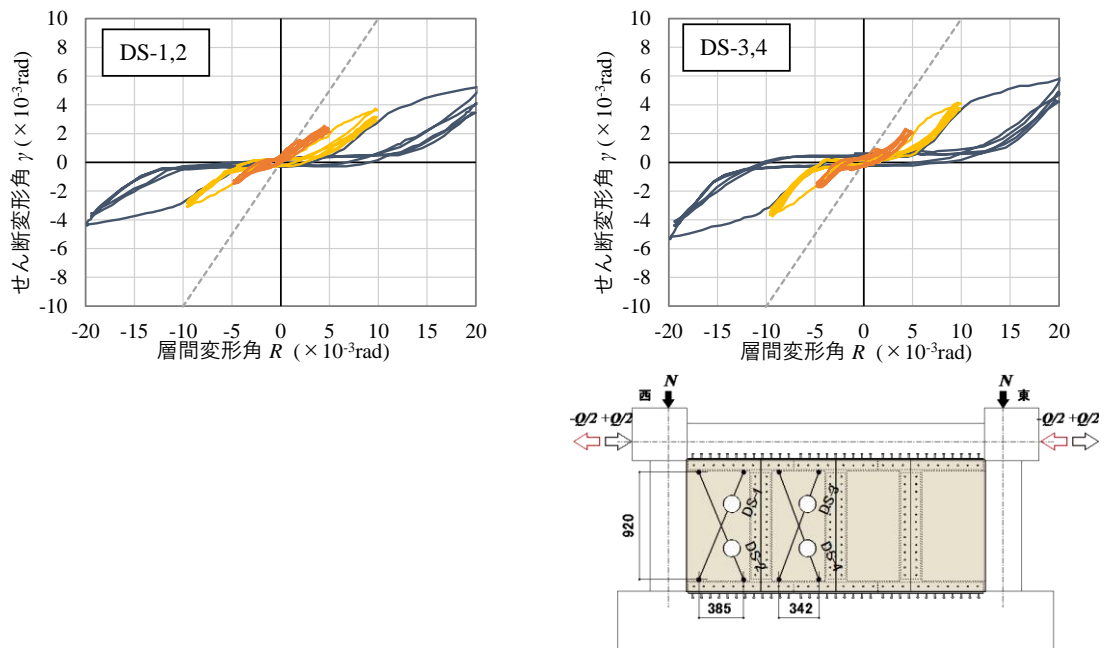


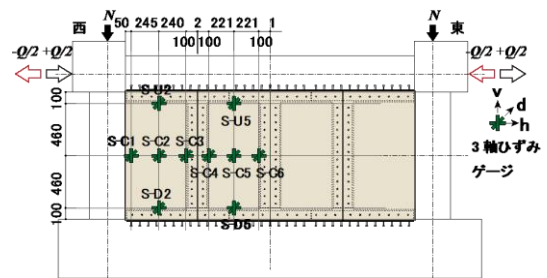
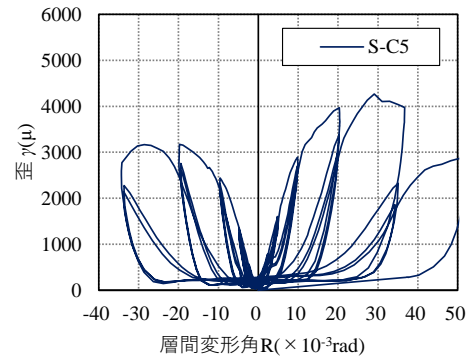
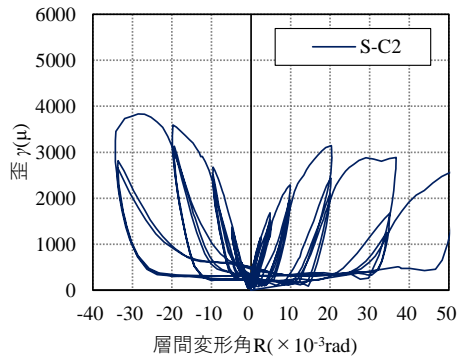
図 3.7 試験体 A3-JDP-80-QT せん断荷重-層間変形角関係



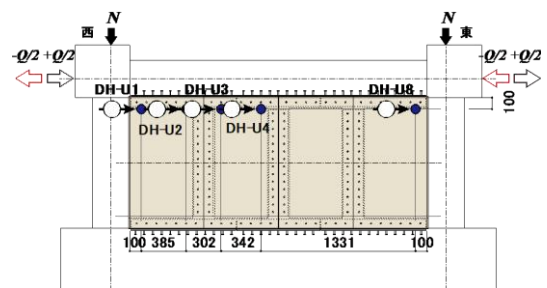
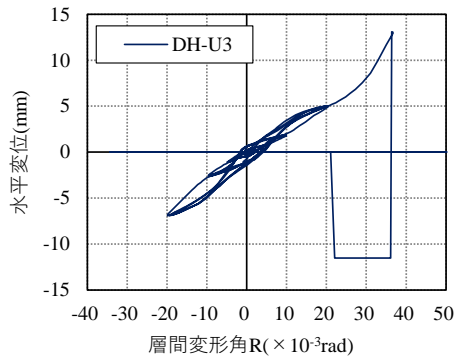
(1) 梁主筋歪



(2) CLT パネルせん断変形角



(3) CLT パネル中央部せん断歪



(4) RC 上梁-CLT パネル水平ずれ

図 3.8 各部変形および歪と層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-80-QT)



(a) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 全景



(b) $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad 梁右ひび割れ状況



(c) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad 全景



(d) $R=5.0 \times 10^{-3}$ rad CLT 同士の接合部ずれ状況



(e) $R=10 \times 10^{-3}$ rad 全景



(f) $R=10 \times 10^{-3}$ rad 梁部ひび割れ状況



(g) $R=20 \times 10^{-3}$ rad 全景



(h) $R=20 \times 10^{-3}$ rad DP 接合部めり込み状況



(i) $R=33 \times 10^{-3}$ rad 全景



(j) $R=33 \times 10^{-3}$ rad DP 接合部集合型破壊



(k) $R=50 \times 10^{-3}$ rad 全景



(l) $R=50 \times 10^{-3}$ rad 梁部・DP 接合部損傷状況

写真 3.4 試験体 A3-JDP-80-QT 損傷状況

3.2. 包絡線比較

図 3.9 に今年度の試験体と、昨年度実施した試験体 A2-ST-H の層間変形角関係の正側包絡線を示す。また、表 3.1 に各試験体の正側の初期剛性と最大耐力の一覧を示す。

各試験体の初期剛性は、1 回目の制御変形角 $R = \pm 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ の最大荷重をその時の層間変形角で除して求めた。ただし、昨年度の試験体 A2-ST-H は今年度と同様に RC 梁と CLT パネルは鋼板挿入 DP 接合されているが、CLT 耐震壁の分割はない。また、CLT の厚さは同じであるが層構成が 3 層 3 プライであることと、鋼板挿入 DP 接合部の設計方針の違いにより今年度の試験体と比較して DP 耐力が高いことに留意されたい。

CLT の分割のない試験体 A2-ST-H は CLT パネルのせん断破壊により靱性の乏しい挙動を示していたことに対し、分割した試験体では大きく荷重低下することなく靱性が向上し、最大耐力も大きくなった。一方で初期剛性は下がり、分割した試験体はすべて試験体 A2-ST-H の 8 割程度となった。

CLT パネル同士の接合部の違いをみると、ダボ接合とした試験体 A3-JDW-60-QT は鋼板挿入 DP 接合とした試験体 A3-JDP-60-QT より初期剛性は高くなった。これは、鋼板挿入 DP 接合部には鋼板の孔径を DP 径+1mm とし、CLT パネル同士のクリアランスも 2mm あることに対して、ダボ接合部の場合 CLT パネル同士の接合部にクリアランスがないためだと考えられる。一方で、ダボ接合部の耐力が小さいため最大耐力は小さくなった。

CLT の厚さの違いを見ると、CLT が 80mm 厚の試験体 A3-JDP-80-QT は試験体 A3-JDP-60-QT に比べ最大耐力は大きくなったが、初期剛性は上昇率はわずかであった。これは、RC 柱梁の断面が同一で、周辺フレームの拘束効果が相対的に小さくなったためと考えられる。

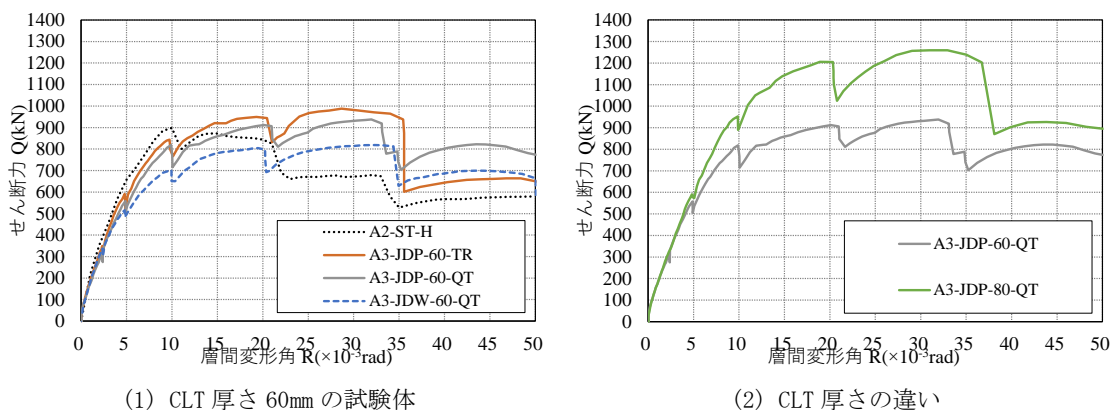


図 3.9 層間変形角包絡線の比較

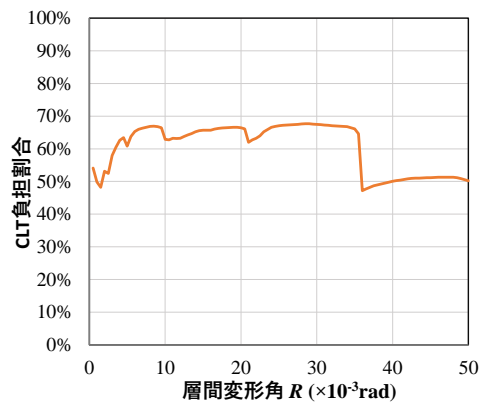
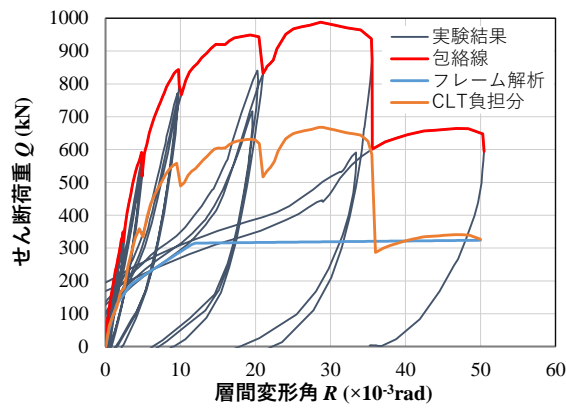
表 3.1 初期剛性・最大耐力一覧

試験体	初期剛性 ($\times 10^3 \text{kN/rad}$)				最大耐力 (kN)	
	正	A2-ST-H に対する割合 (%)	負	A2-ST-H に対する割合 (%)	正	負
A3-JDP-60-TR	127	0.78	151	0.93	988	975
A3-JDP-60-QT	136	0.83	126	0.78	938	928
A3-JDW-60-QT	143	0.87	152	0.93	819	795
A3-JDP-80-QT	139	0.85	159	0.98	1260	1184
A2-ST-H	163	—	162	—	904	867

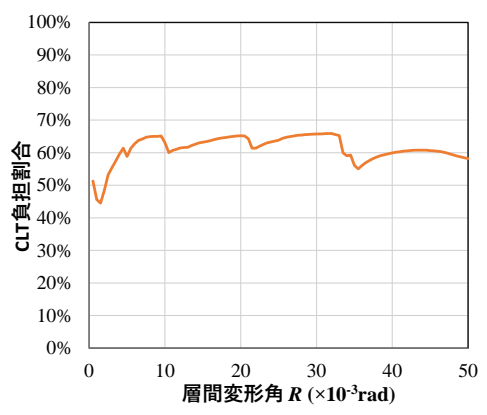
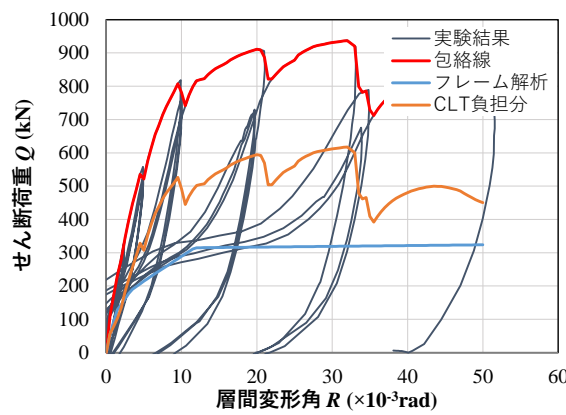
3.3. CLT パネルの力学挙動

3.3.1. CLT 負担荷重-変形角関係

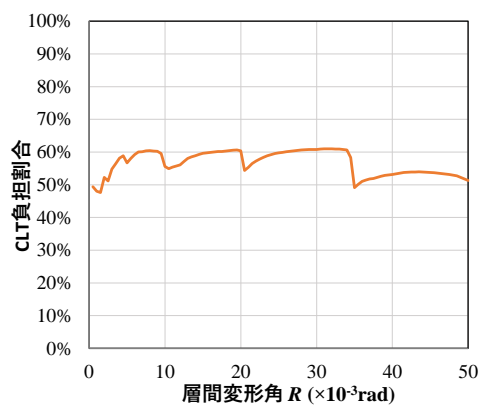
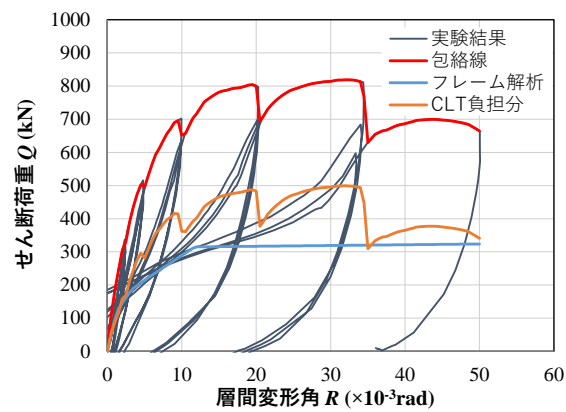
図 3.10 に各試験体について、正側の層間変形角について CLT パネルの負担荷重-層間変形角関係の包絡線を示す。ここで CLT パネルの負担荷重は、IV章で述べる RC フレームのみの解析により得た RC フレームのせん断荷重を、実験結果の包絡線から差し引いて求めた。右側には CLT の負担荷重が全体の荷重に占める割合を示す。試験体 A3-JDP-60-TR,試験体 A3-JDP-60-QT では、CLT の負担割合は、 $R=33 \times 10^{-3}\text{rad}$ 程度まで 60~70%で、二つの試験体に大きく差はみられなかったが、 $R=50 \times 10^{-3}\text{rad}$ では試験体 A3-JDP-60-TR の試験体の負担割合が下がり、50%程度となった。試験体 A3-JDW-60-QT では、初期から $R=50 \times 10^{-3}\text{rad}$ までほぼ一定の負担割合で 60%程度であり、CLT 版同士の接合部の違いによる影響がみられた。試験体 A3-JDP-80-QT では、CLT 厚が 60mm の試験体 A3-JDP-60-QT と比べて全体的に CLT の負担割合が大きくなり、70~80%を示した。



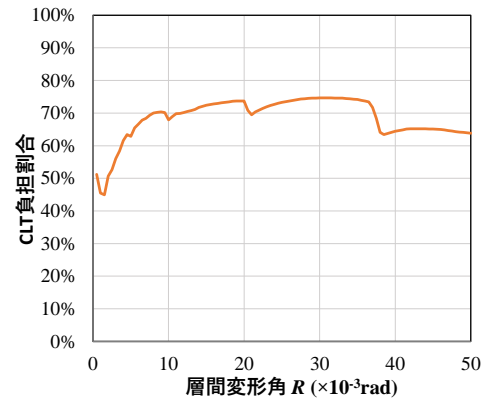
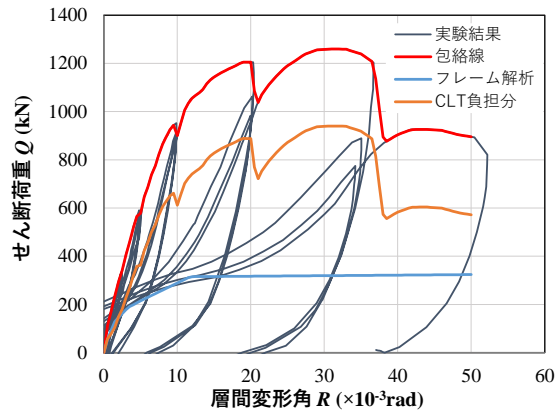
(1) 試験体 A3-JDP-60-TR



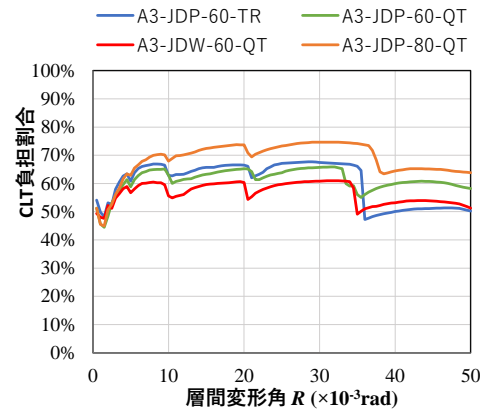
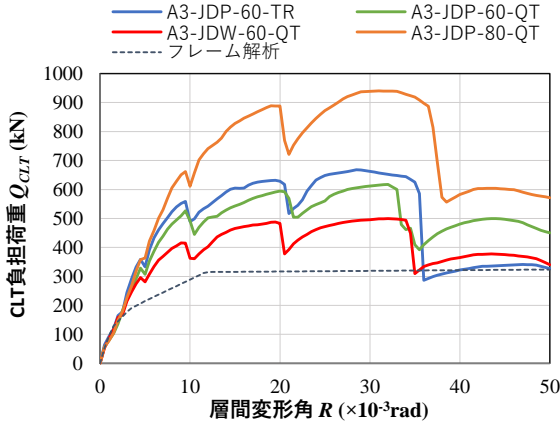
(2) 試験体 A3-JDP-60-QT



(3) 試験体 A3-JDW-60-QT



(4) 試験体 A3-JDP-80-QT



(5) 全試験体比較

図 3.10 CLT パネルの負担荷重-層間変形角関係

3.3.2. CLT パネル負担荷重と耐力の考察

図 3.11 に CLT 負担荷重-層間変形角関係に各耐力を比較して示す。各耐力とは以下に示す耐力でそれぞれ次のように算出した。

① CLT 保有水平耐力 Q

$$Q = W \times t \times f_s$$

ここで、 W :CLT 幅 (枚数分の合計 mm)
 t :CLT 厚さ (=60mm)
 f_s :CLT の最大せん断応力度

f_s は、材料試験せん断試験の強軸値より、60mm 厚の試験体で 5.50N/mm²、80mm 厚の試験体で 6.00N/mm² とした。

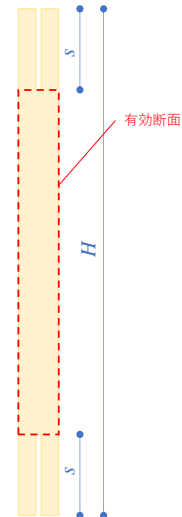
② 有効断面による CLT の水平耐力 Q_e

$$Q_e = \min(Q_{eh}, Q_{ev})$$

$$Q_{eh} = (W - 2s) \times n \times t \times f_{so}$$

$$Q_{ev} = (H - 2s) \times t \times \frac{W}{H} \times f_{sp}$$

ここで W :CLT 幅(1枚あたり)
 n :CLT 枚数
 f_{so} :CLT せん断強度 (弱軸)
 s :CLT のスリット深さ (=120mm)
 H :CLT 高さ(=1136 mm)
 f_{sp} :CLT せん断強度 (強軸)



③ 接合部降伏耐力 P_y 、最大耐力 P_{max}

鋼板挿入 DP 接合部の 1 本あたりの降伏耐力 p_y と最大耐力 p_{max} は本章 3 節の要素試験より表 3.2 に示す値とした。なお、鋼板挿入 DP 接合部については接合部パネルせん断試験の結果を、ダボ接合部については Two Rail Shear 接合部試験の結果を用いた。

$$P_y = \min(P_{yh}, P_{yv})$$

$$P_{yh} = m \times p_y$$

$$P_{yv} = l \times p_y \times \frac{W}{H} \times n$$

ここで m :水平方向の DP 本数 (総計)
 l :鉛直方向の DP 本数 (CLT 1 辺あたり)

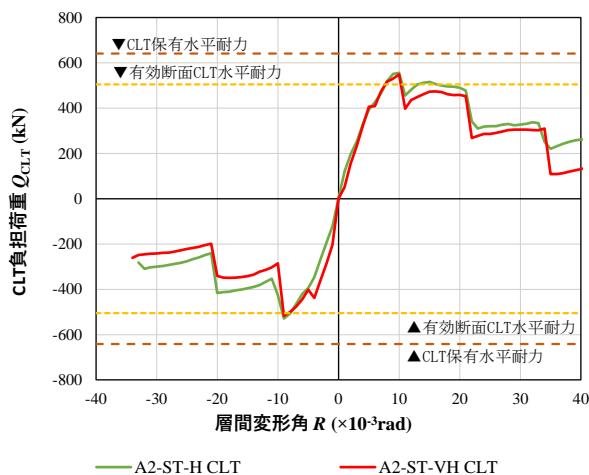
表 3.2 要素試験より求めた各接合部耐力

接合部	CLT 厚(mm)-DP 径	降伏耐力 p_y (kN)	最大耐力 p_{max} (kN)
鋼板挿入 DP 接合部	60-F10	17.83	24.01
	80-F12	27.91	37.32
ダボ接合部	60-F10	3.51	4.91

今年度の試験体は CLT の有効断面による CLT の水平耐力と鋼板挿入 DP 接合部の最大耐力が同等となるように接合部の設計を行った。上記の耐力と各試験体の CLT 負担荷重を比較すると、CLT 負担荷重の最大値は、鋼板挿入 DP 接合部の降伏耐力より上回ったが、有効断面による CLT の水平耐力や鋼板挿入 DP 接合部の最大耐力に到達しなかった。昨年度は CLT 水平耐力に到達していたことより、CLT パネルを分割したためだと考えられる。また、CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した 3 つの試験体では、鋼板挿入 DP 接合部の降伏耐力付近で CLT 負担荷重-層間変形角の剛性がやや低下する傾向が見られた。CLT パネル同士をダボ接合した試験体 A3-JDW-60-QT では、ダボ接合部の降伏耐力・最大耐力を超えても初期剛性が一定であり、CLT 負担荷重の最大値は DP 接合部の降伏耐力程度にとどまった。

図 3.12 に CLT 負担せん断応力 τ と CLT のせん断弾性係数の比較を示す。ここで、CLT の負担せん断応力は、CLT 負担荷重を上記②の有効断面で除して算出した。図中にはさらに材料試験の CLT せん断試験から得られたせん断弾性係数を合わせて示す。各試験体の材料強度に対する CLT 負担荷重の初期剛性は、5 割程度にとどまった。

参考：2022 年度試験体の CLT パネル負担荷重



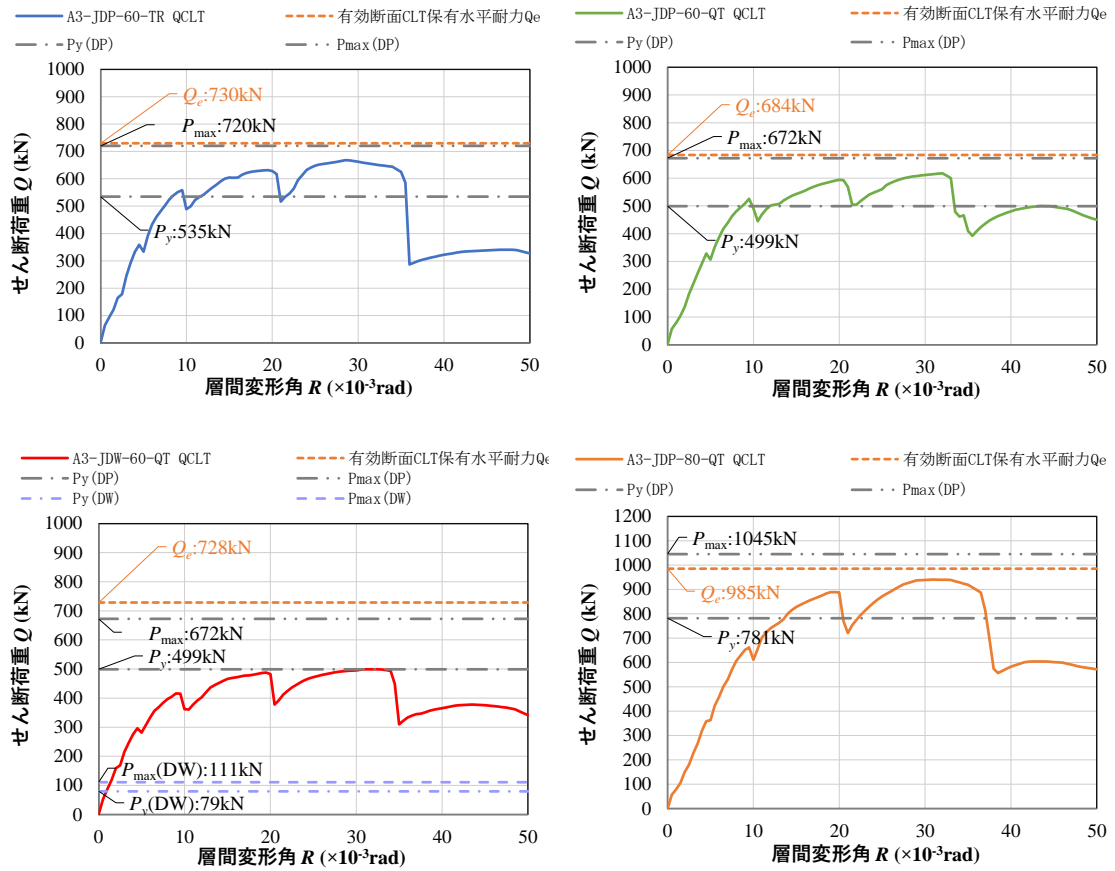


図 3.11 CLT 負担荷重と各耐力比較

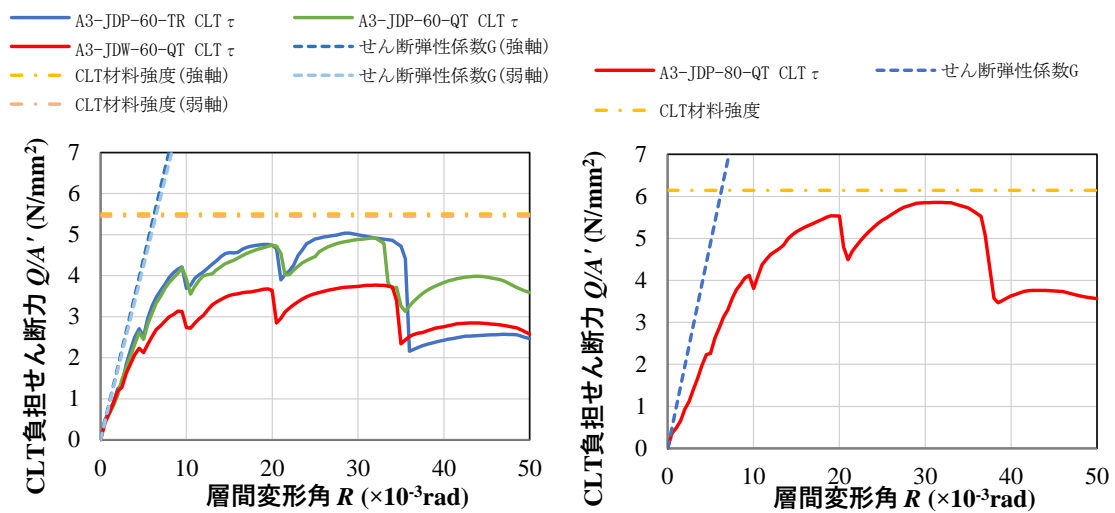


図 3.12 CLT 負担せん断応力 τ と CLT のせん断弾性係数の比較

3.4. 歪分布

3.4.1. CLT パネルの主歪分布

図 3.14 から図 3.15 に、 $R=\pm 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ における CLT パネルの主歪分布を示す。これらは図 3.13 に示す位置に貼付した 3 軸ゲージがから求めたものである。図中の矢印の長さは歪の大きさを示し、矢印の色は赤が引張、青が圧縮を示す。

すべての試験体において、RC 躯体との接合部のある CLT パネル上部・下部が中央部より大きい主歪を示した。また、複数ある CLT パネルのうち柱に近いパネルより中央に配置したパネルで主歪が大きい傾向が見られた。主歪の方向は概ね 45 度方向を示した。

パネル同士の接合部の違いによる主歪分布の違いはみられなかった。

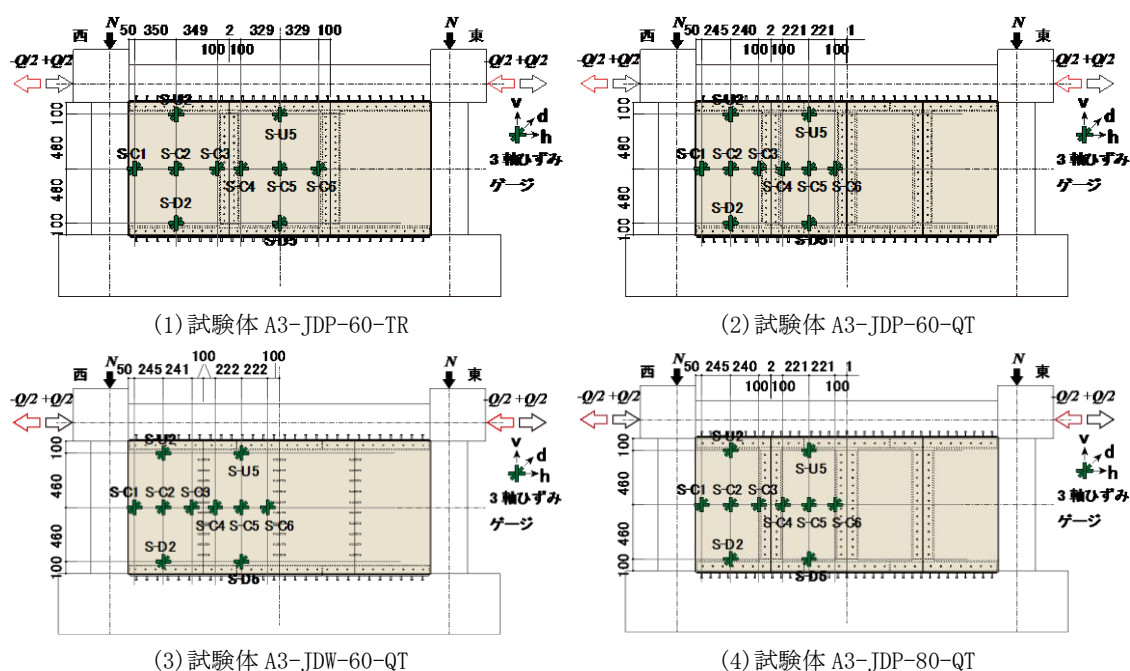
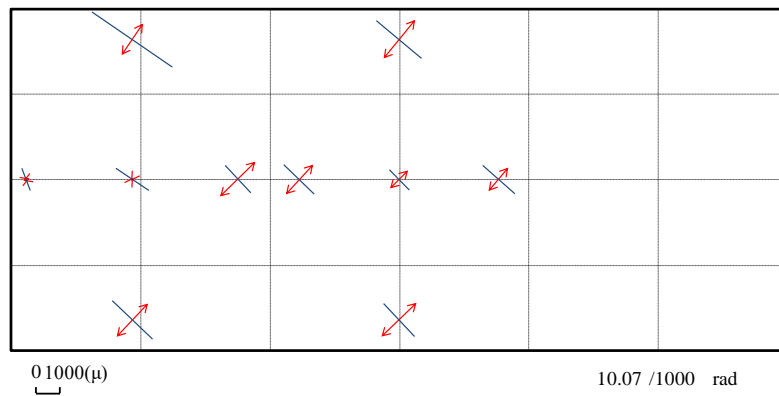
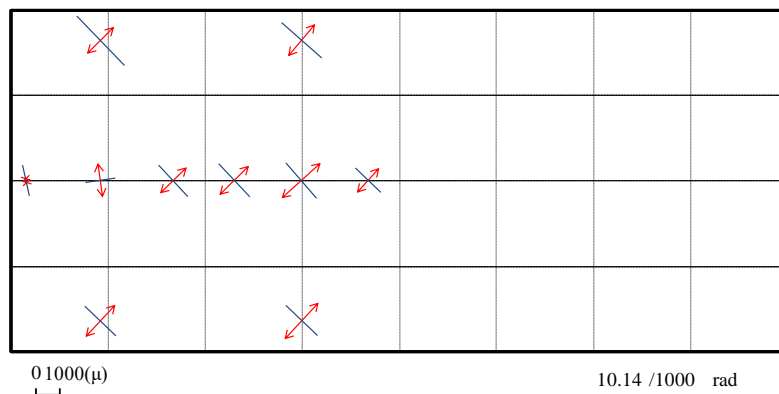


図 3.13 CLT パネル歪貼付位置

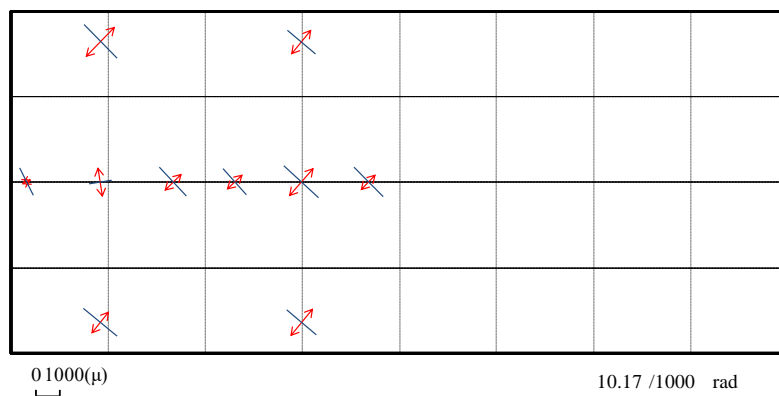
A3-JDP-60-TR



A3-JDP-60-QT



A3-JDW-60-QT



A3-JDP-80-QT

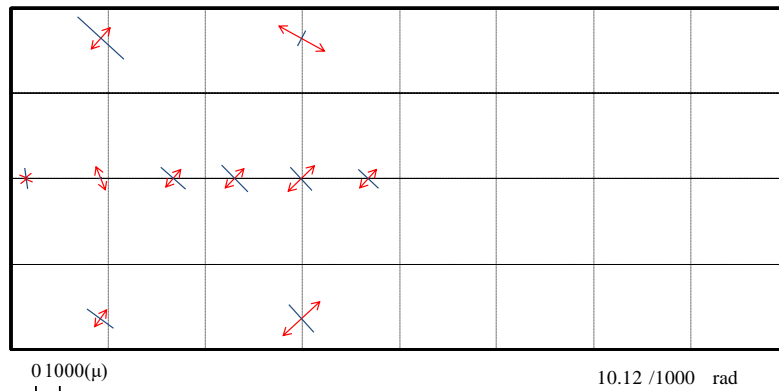
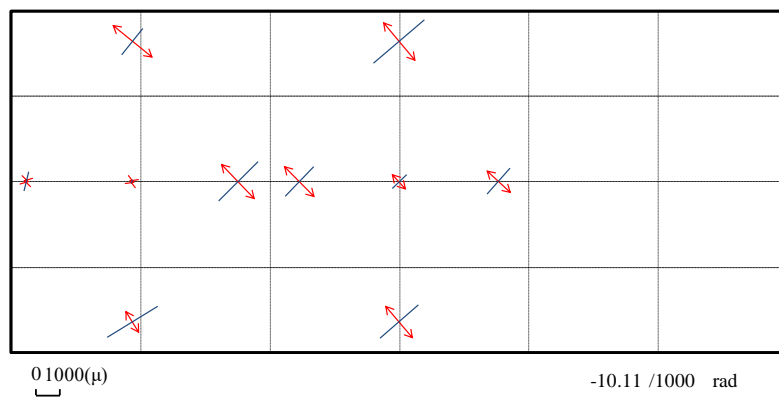
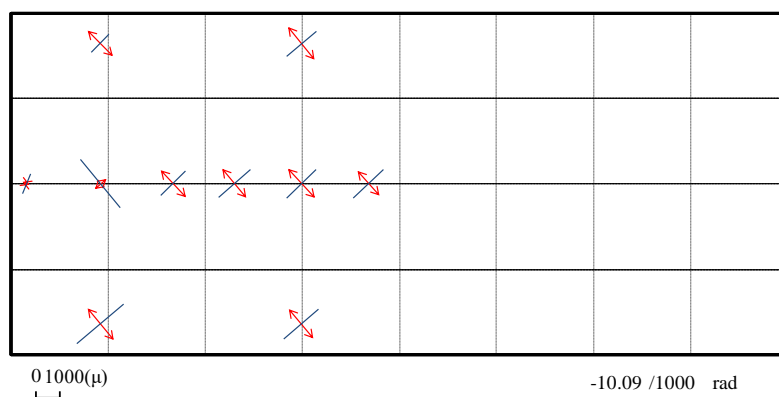


図 3.14 CLT パネル主歪分布図 (正加力時 $R = +10/1000\text{rad}$)

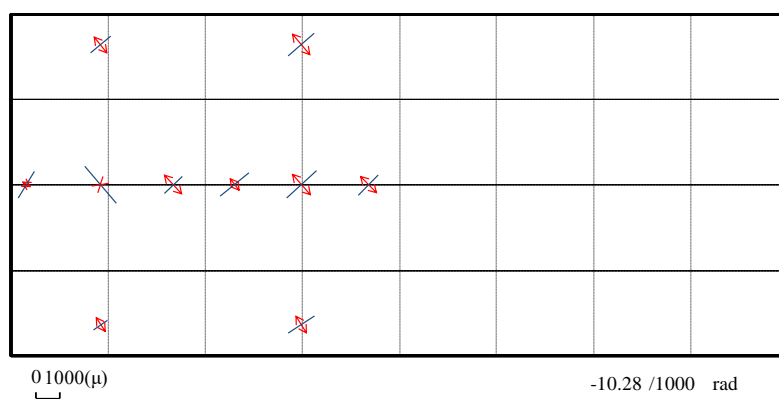
A3-JDP-60-TR



A3-JDP-60-QT



A3-JDW-60-QT



A3-JDP-80-QT

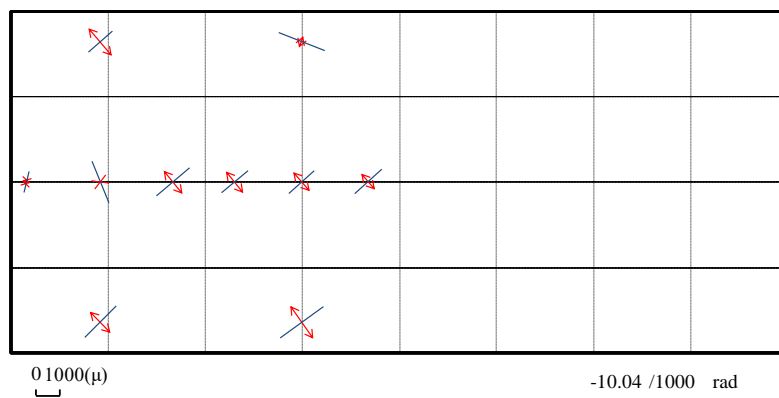


図 3.15 CLT パネル主歪分布図 (負加力時 $R=-10/1000\text{rad}$)

3.4.1. CLT パネルのせん断歪 水平分布

図 3.16 から図 3.17 に CLT パネルの水平方向のせん断歪分布を示す。

すべての試験体に共通して、柱と CLT パネルは接合されていないため、柱に近い計測点で最も小さく、パネル接合部の有無にかかわらず試験体中央部で少し小さくなる傾向が見られた。さらに、試験体 A3-JDP-60-QT と試験体 A3-JDW-60-QT を比較すると、CLT パネル間の接合方法の違いにより、鋼板挿入 DP 接合とした場合は歪分布が連続的であるのに対し、ダボ接合部の付近では各パネル中央に比べて小さな歪分布を示した。

負側も正側と同様な挙動を示したが、全体的に正側よりも小さい値を示す傾向が見られた。

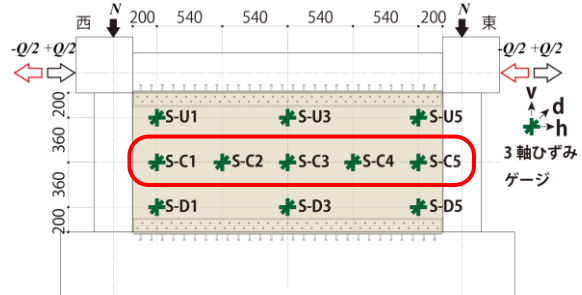
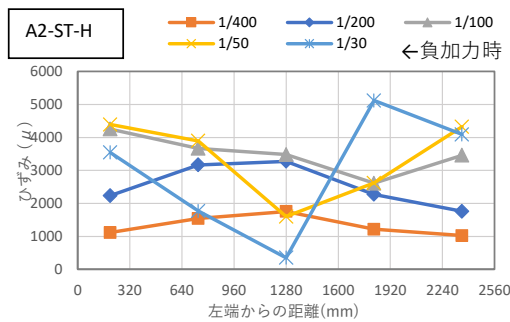
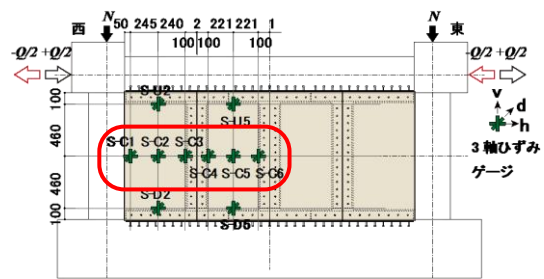
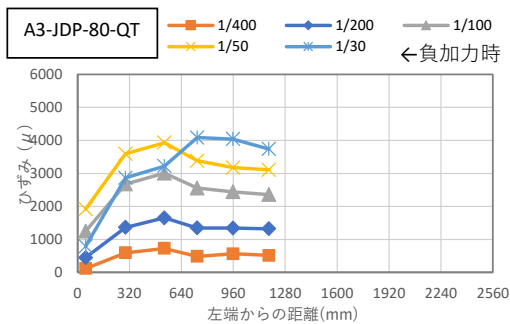
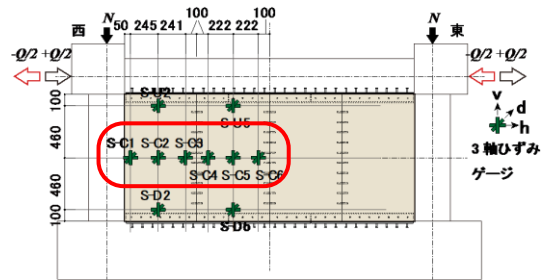
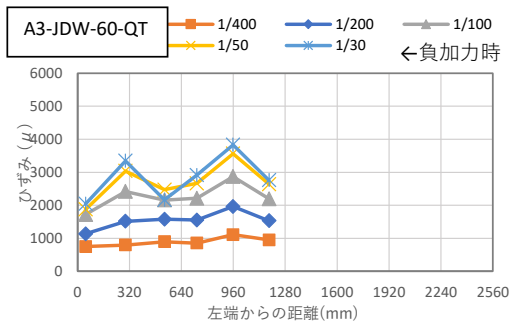
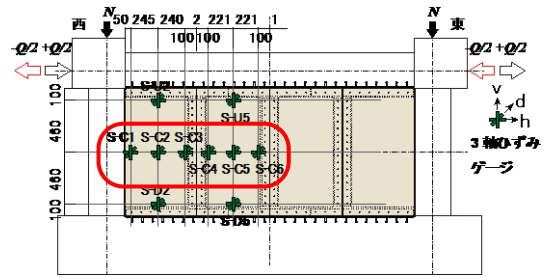
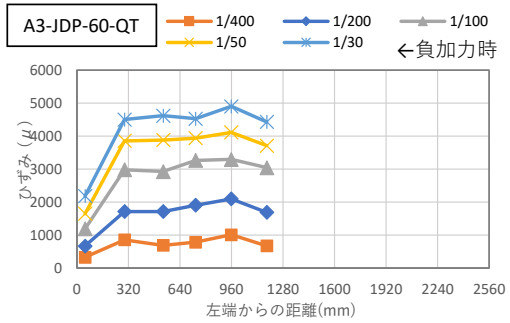
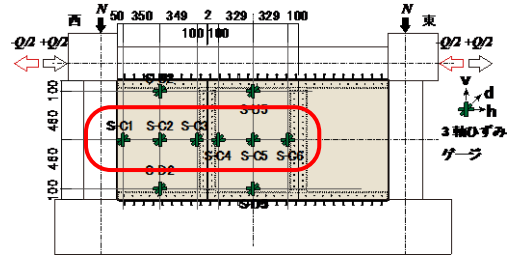
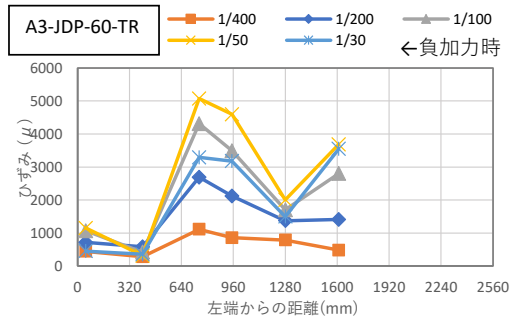


図 3.17 CLT パネル水平方向せん断歪分布 負加力時

3.4.2. CLT パネルの梁下・梁上の鉛直方向歪分布

図 3.18 から図 3.19 に CLT パネルの梁下部，梁上部における鉛直方向の歪分布を正側（右側に加力方向）の各層間変形角ごとに示す。正の歪は引張を，負の歪は圧縮を示す。

梁下の計測点では，各パネルが独立して変形し，正加力時は CLT パネルの左上部分に大きな圧縮歪が見られた。また，各パネルで比較すると，柱側のパネルの方が中央側のパネルより大きな圧縮歪を示した。

梁上の計測点では，梁下の計測点と比べて値はほとんど出ず，全体的に引張の傾向を示しスタッドによる引張抵抗が確認できた。

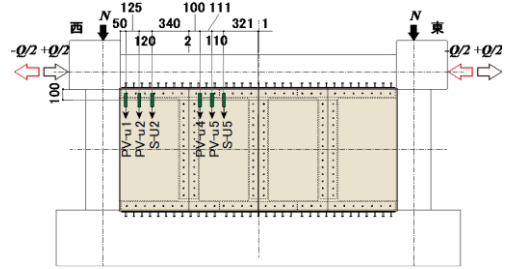
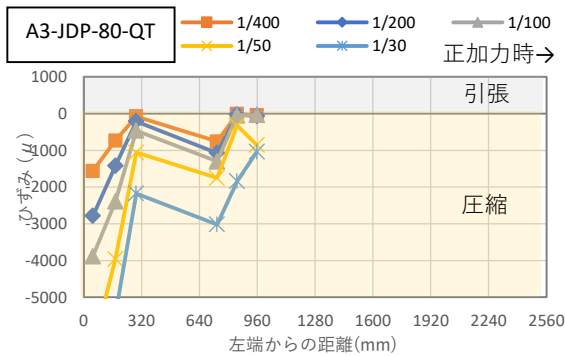
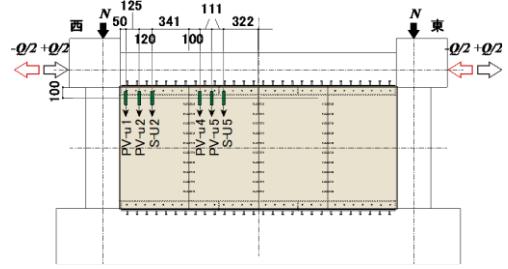
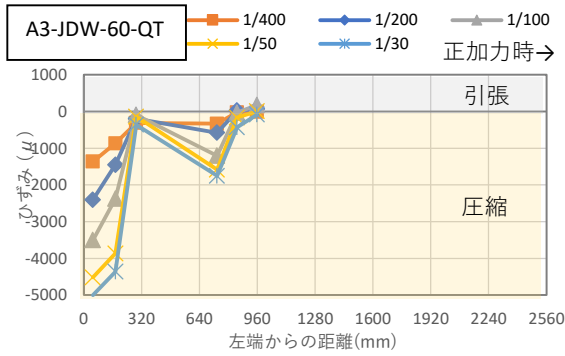
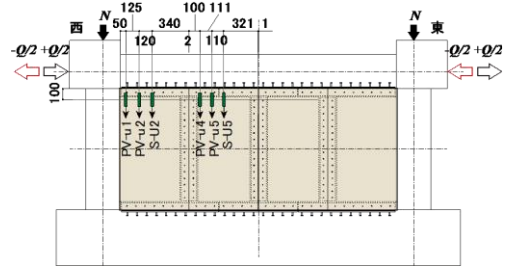
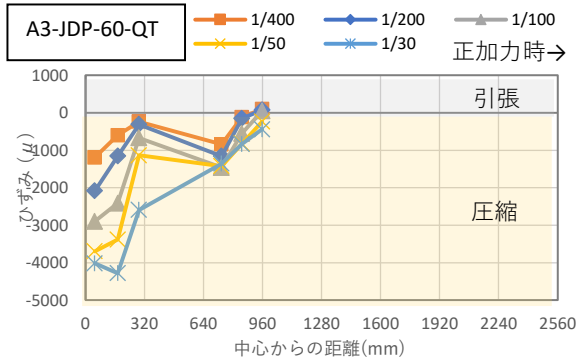
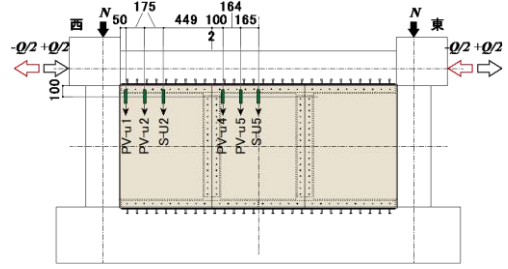
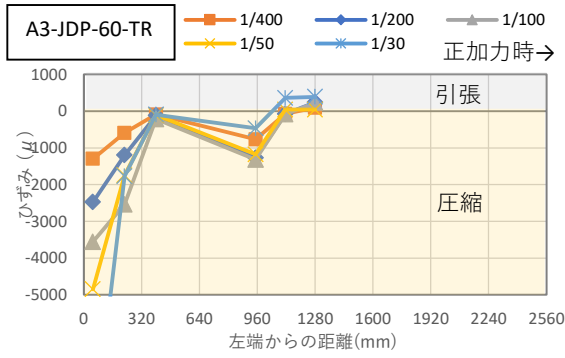


図 3.18 梁下 (CLT パネル上) 部 CLT パネル鉛直歪分布

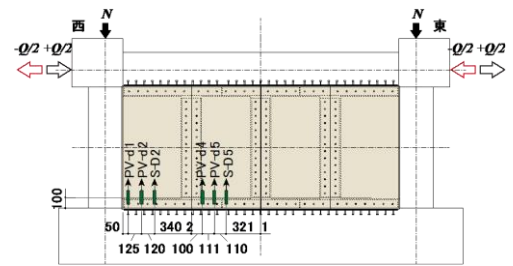
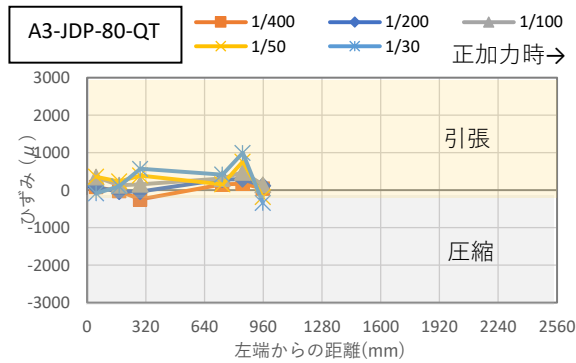
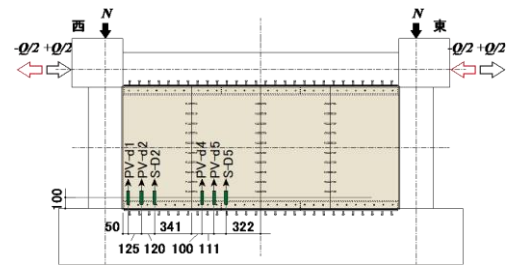
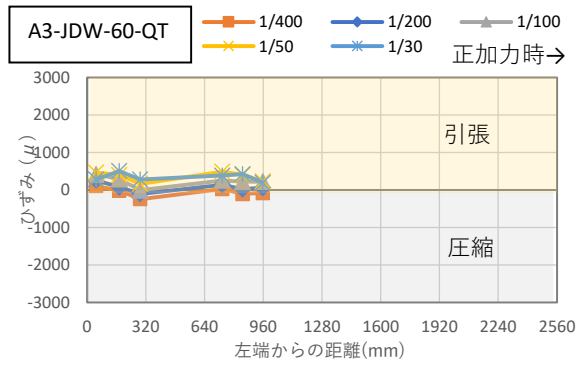
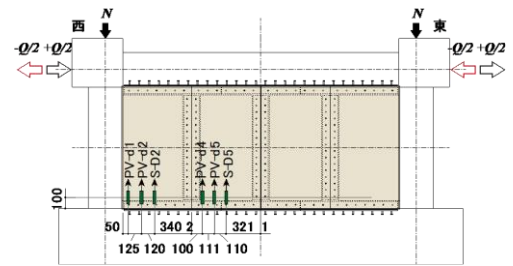
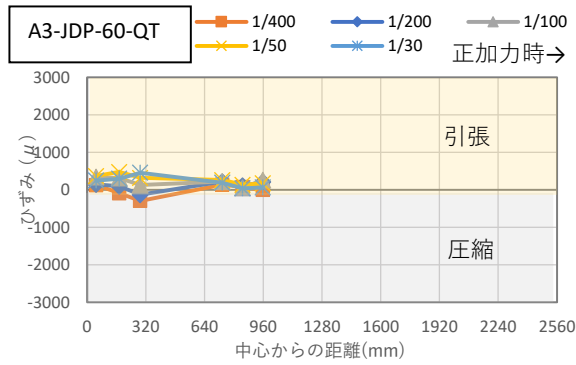
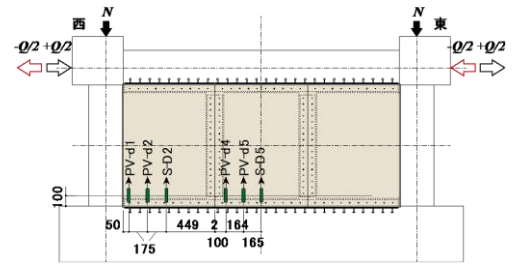
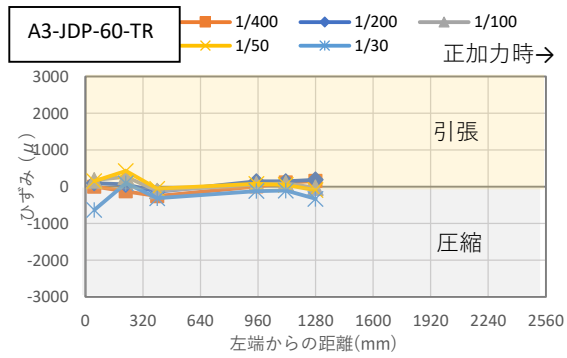


図 3.19 梁上 (CLT パネル下) 部 CLT パネル鉛直歪分布

3.4.3. CLT パネルの水平方向歪分布

図 3.20 に、正加力時の $R=1/30\text{rad}$ までの各層間変形角について各試験体の CLT パネルの柱際に貼付した水平方向の歪分布を示す。

左端の壁の柱際に貼付した歪ゲージは、おおむねすべての試験体で最上部上部の計測点が引張側の歪を示した。下側の計測点ではほとんど歪を生じなかった。

CLT パネルが 4 枚の試験体 A3-JDP-60-QT および A3-JDW-60-QT には、パネル同士の接合部付近でも歪を計測した。鋼板挿入 DP 接合した試験体ではパネルの右側の計測点上部で圧縮歪が計測された。ダボ接合した試験体では全体的に歪レベルが小さく、ほとんどの計測点でわずかに圧縮歪が計測された。

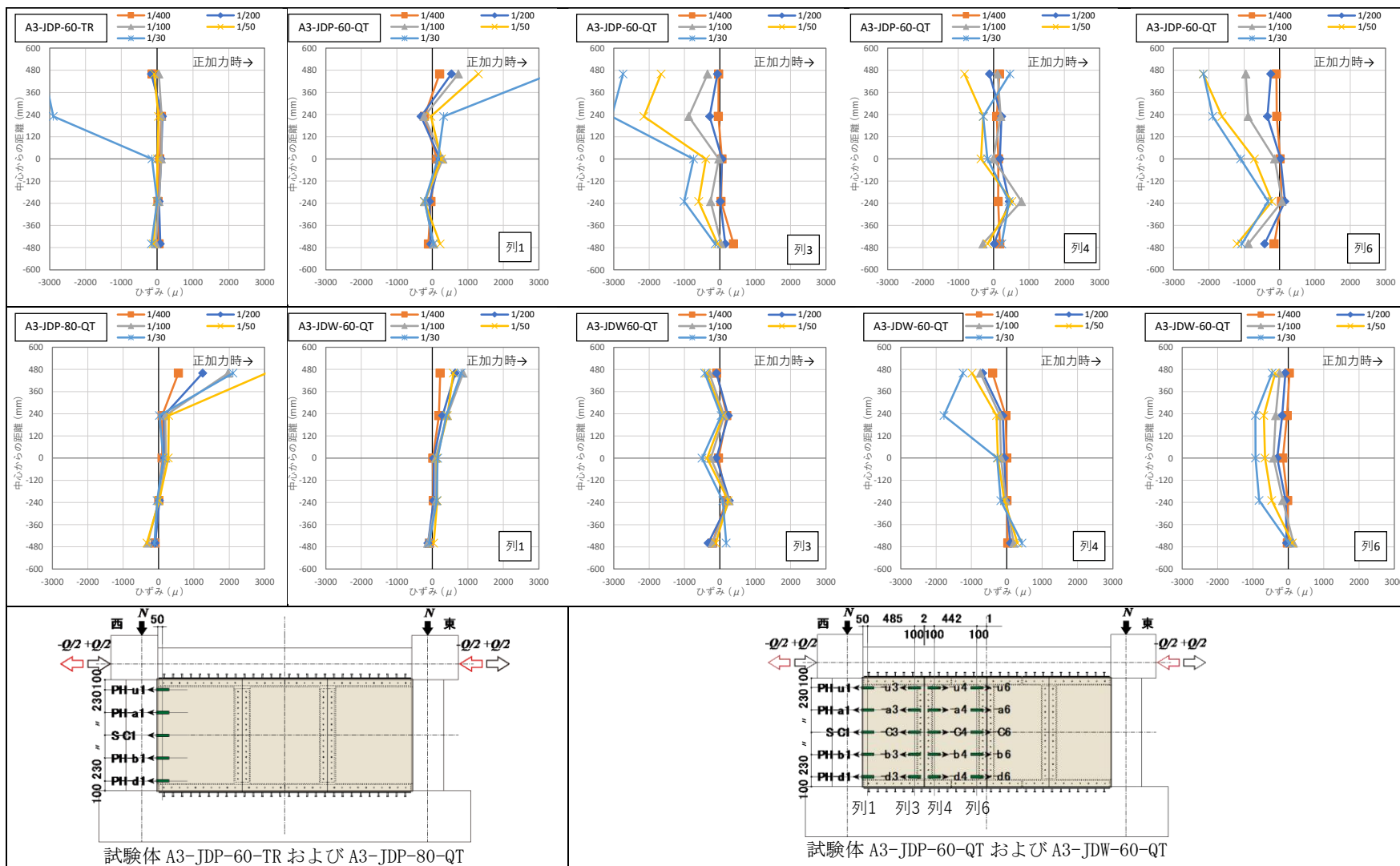
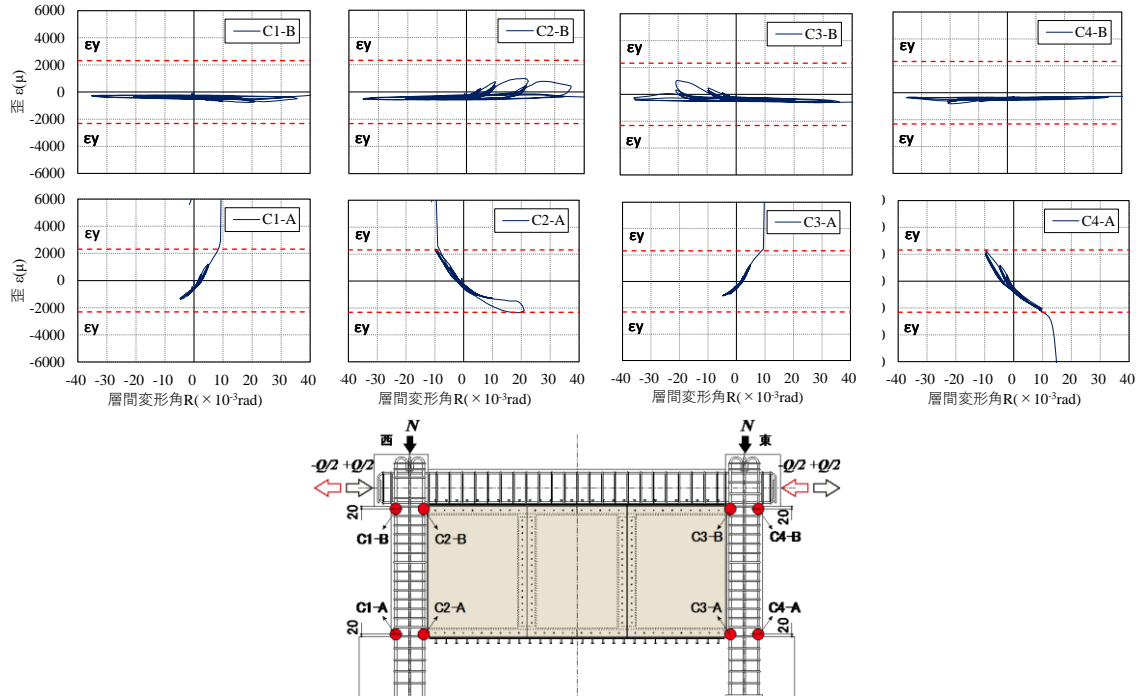


図 3.20 CLT パネル水平歪分布

3.4.4. 梁主筋・柱主筋の歪

図 3.21～図 3.24 に柱主筋と梁主筋の歪層間変形角関係を示す。

A3-JDP-60-TR 柱



梁

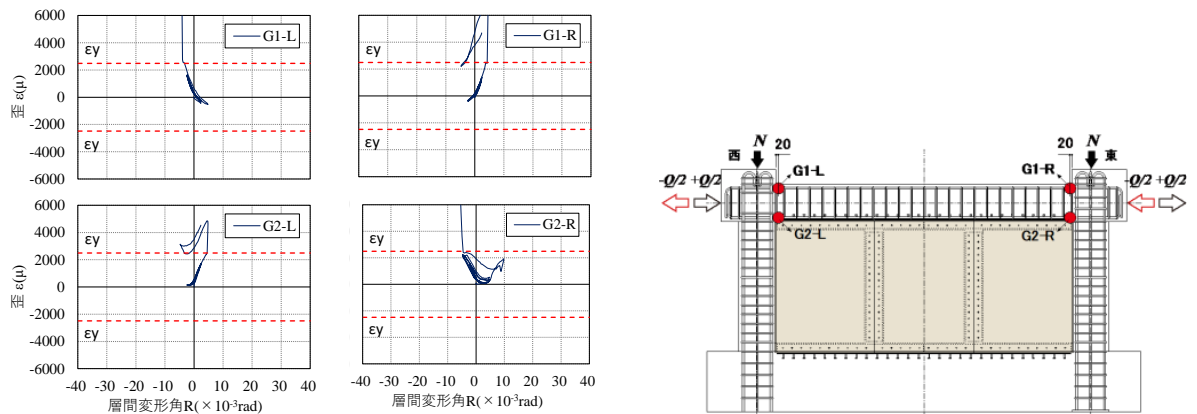
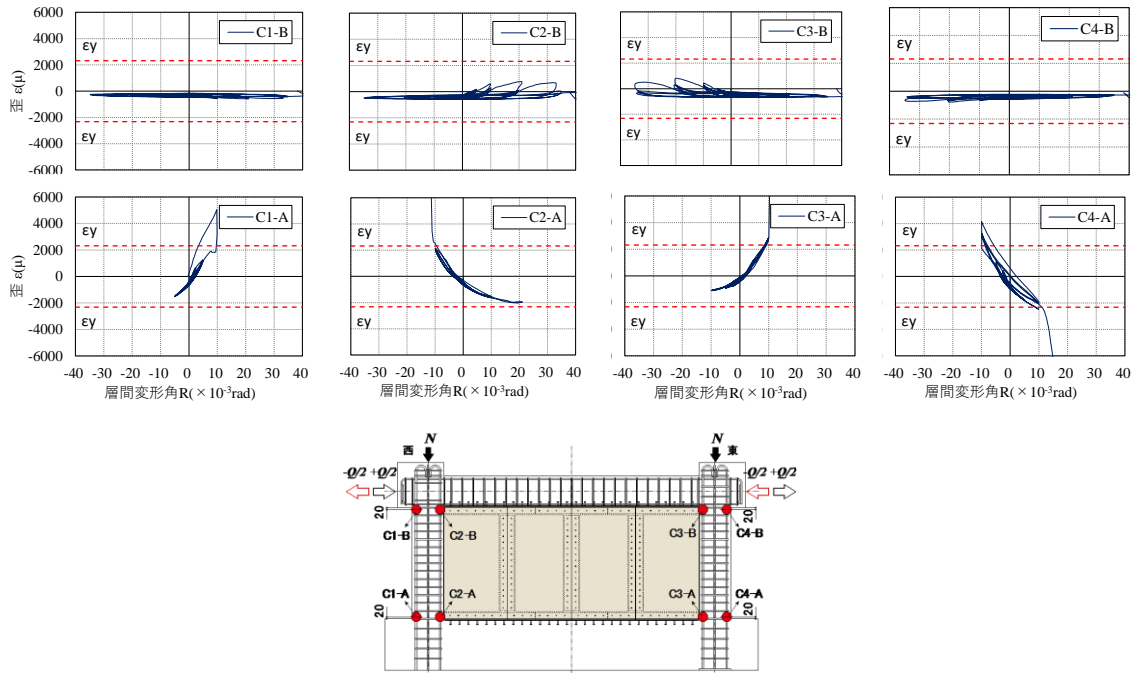


図 3.21 柱主筋・梁主筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-TR)

A3-JDP-60-QT 柱



梁

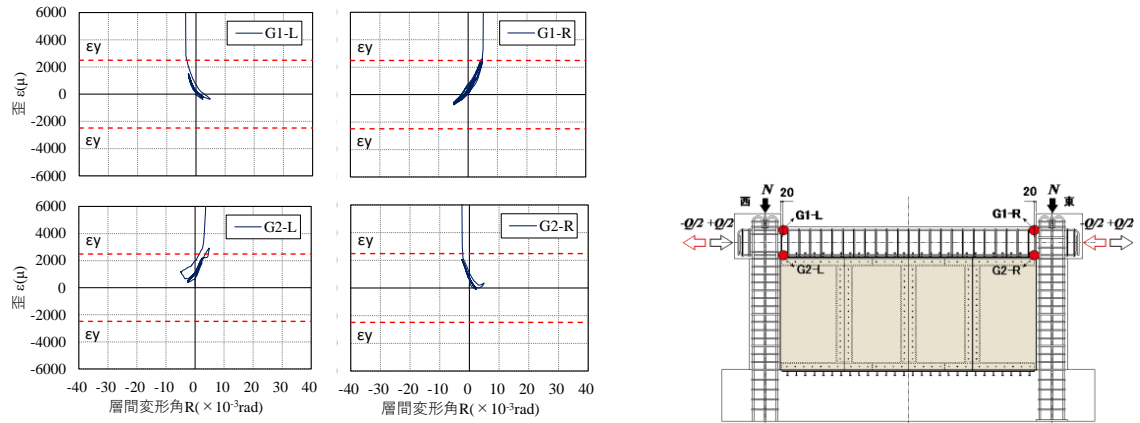
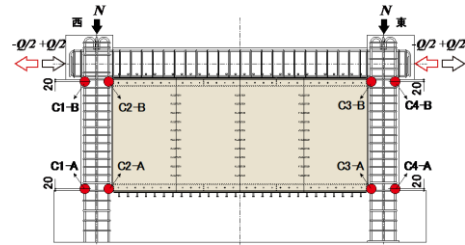
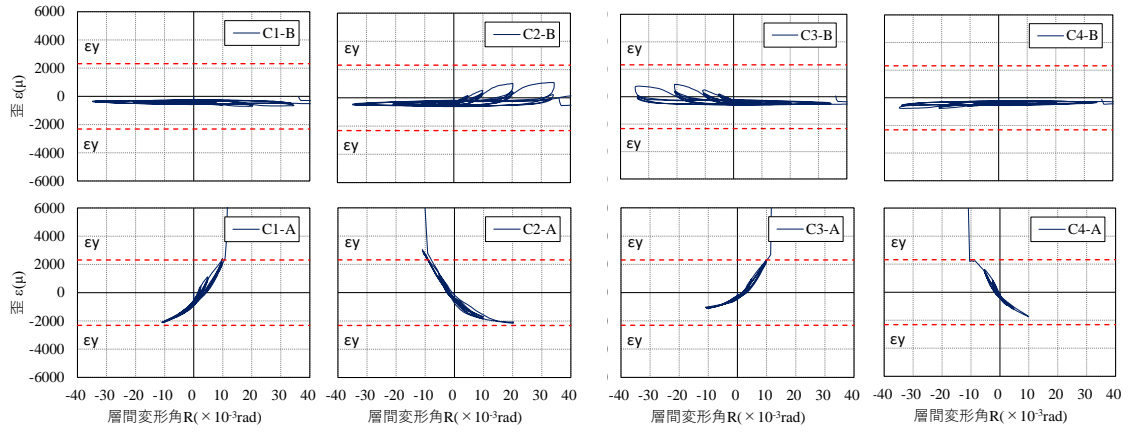


图 3.22 柱主筋・梁主筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-QT)

A3-JDW-60-QT 柱



梁

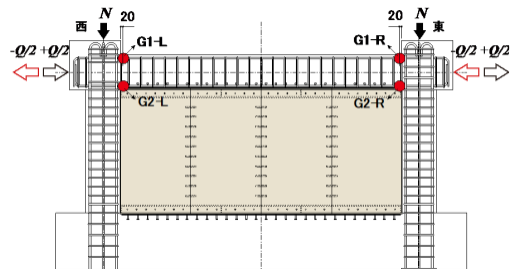
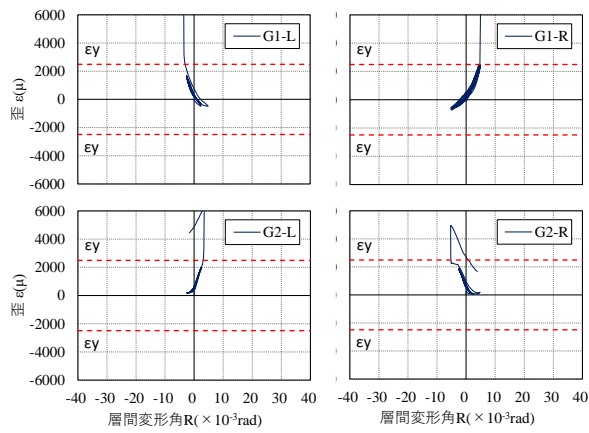
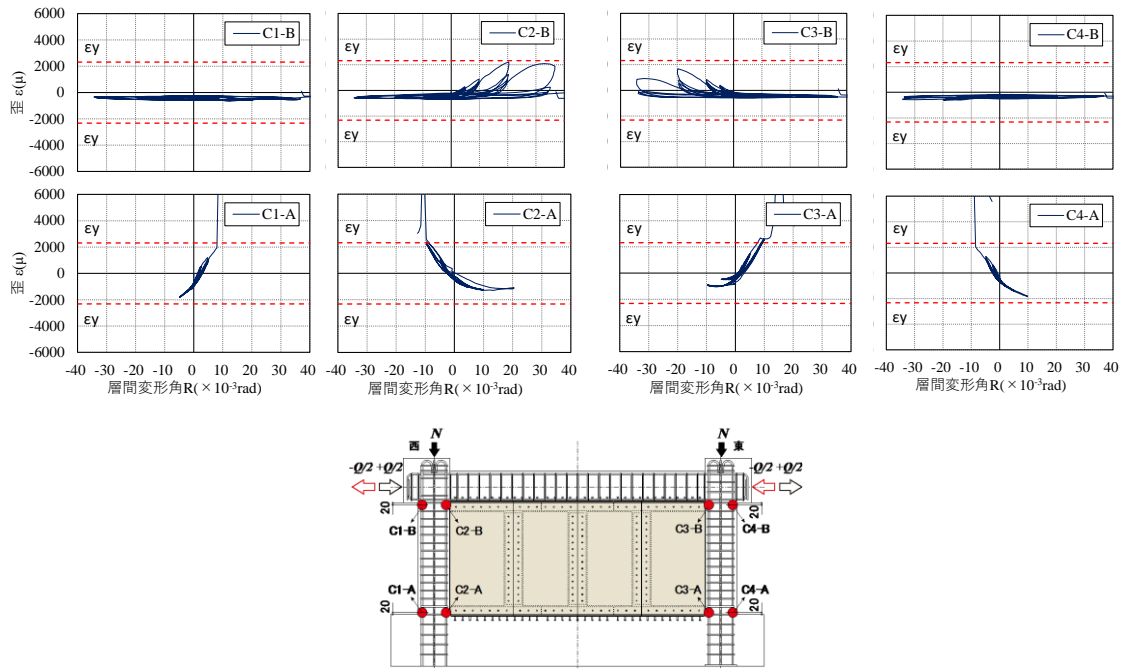


図 3.23 柱主筋・梁主筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDW-60-QT)

A3-JDP-80-QT 柱



梁

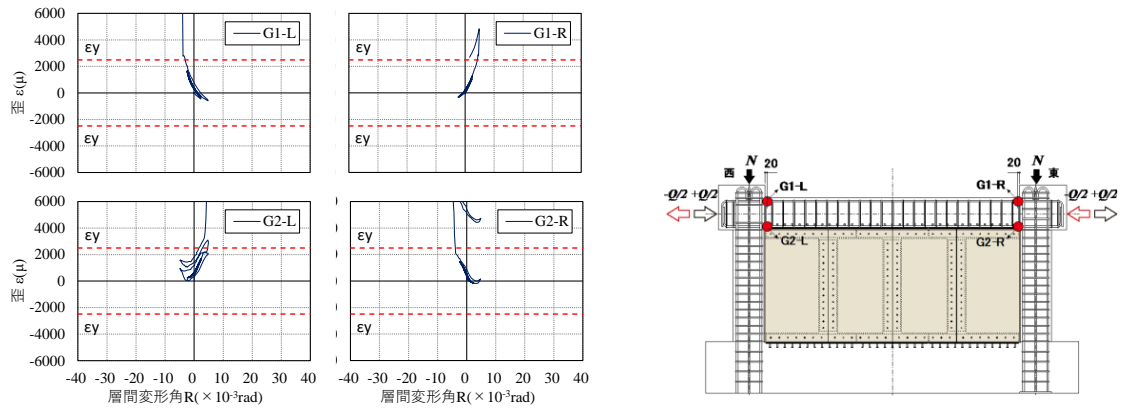


図 3.24 柱主筋・梁主筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-80-QT)

3.4.5. 梁・柱のせん断補強筋の歪

図 3.25～図 3.28 に柱・梁のせん断補強筋の歪層間変形角関係を示す。

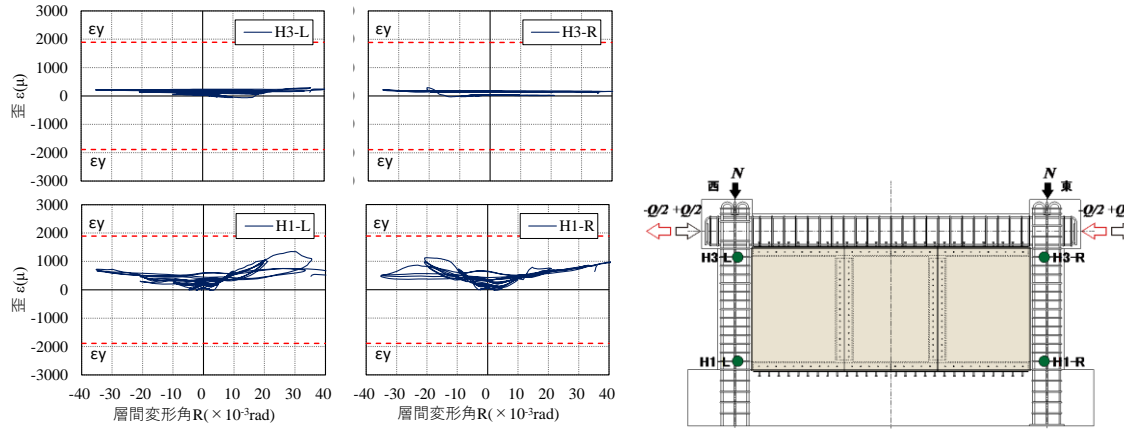


図 3.25 柱帯筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-TR)

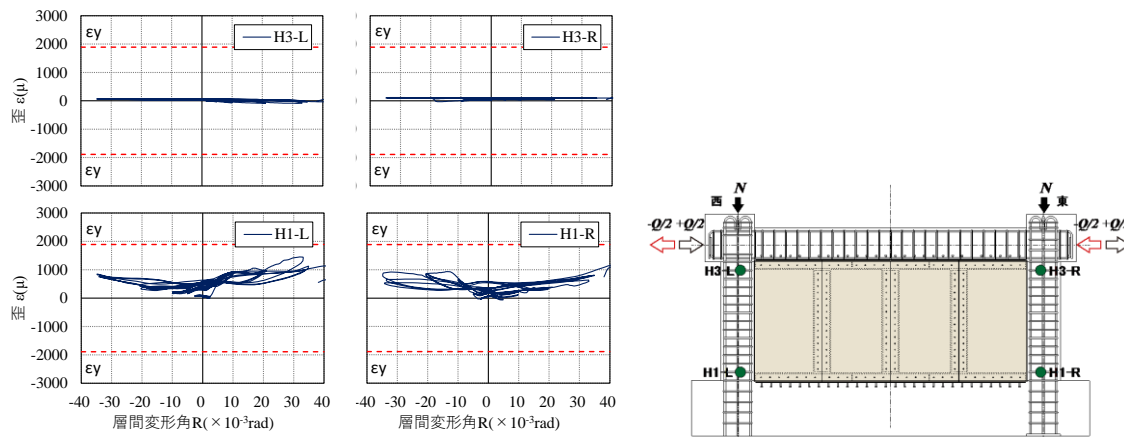


図 3.26 柱帯筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-QT)

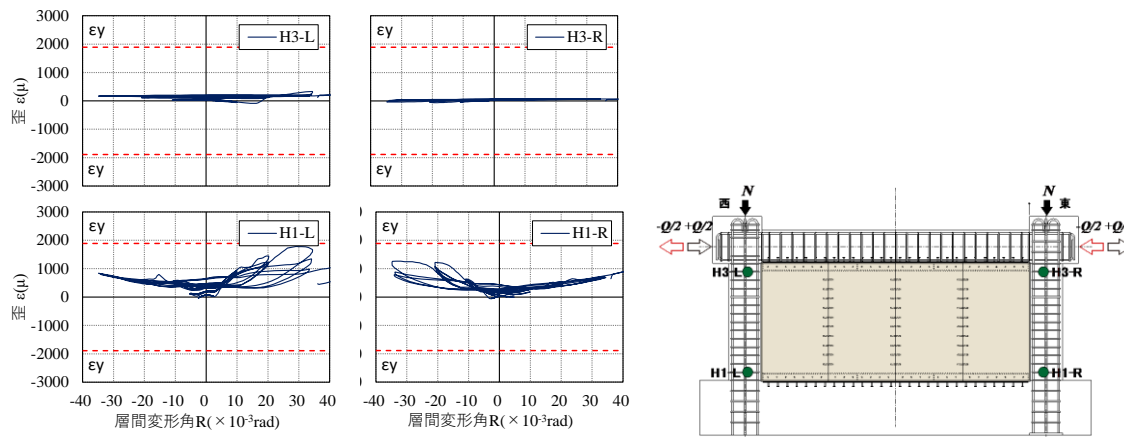


图 3.27 柱带筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDW-60-QT)

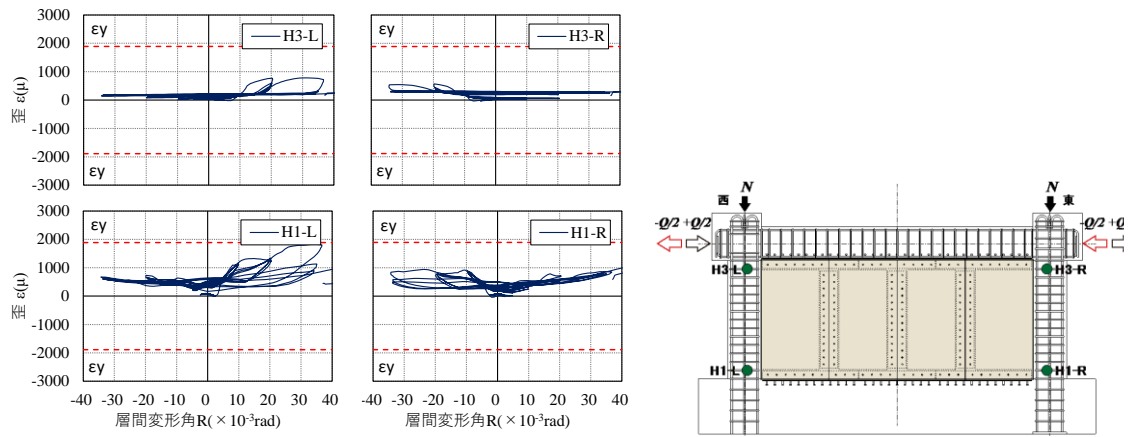
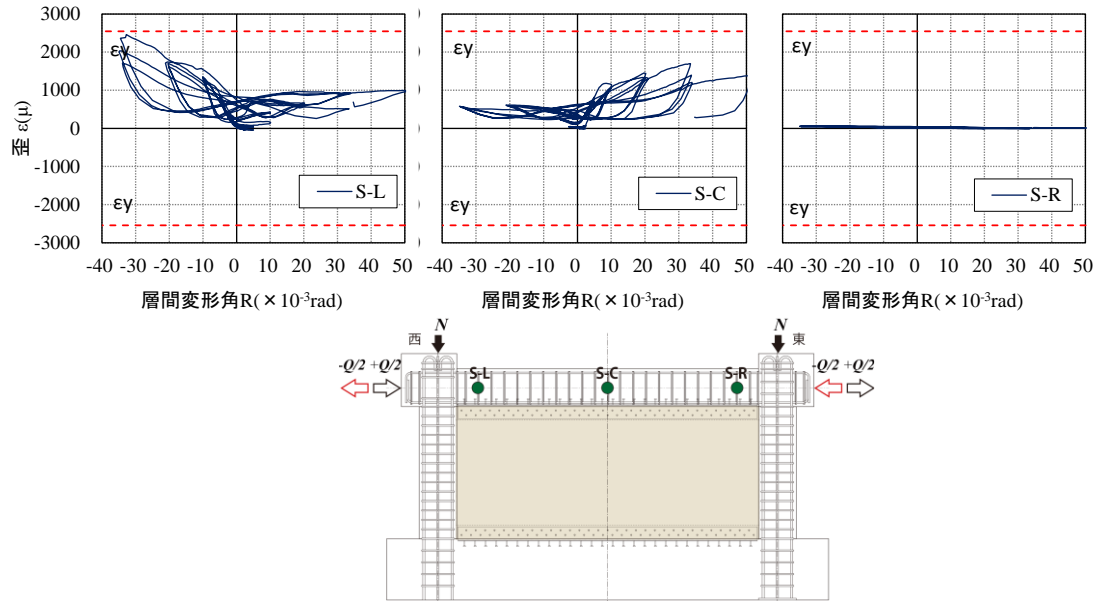


图 3.28 柱带筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-80-QT)

図 3.30～図 3.33 に梁のせん断補強筋の歪層間変形角関係を示す。参考として図 3.29 に 2022 年度に実施した試験体 A2-ST-H の梁あばら筋の歪層間変形角関係を示す。

CLT パネルの分割による梁へのせん断の影響が懸念されたが、3 分割試験体 A3-JDP-60-TR および 4 分割試験体 A3-JDP-60-QT と分割なしの試験体 A2-ST-H を比較すると大きな差はなく、CLT パネルのロッキングによる梁のせん断の影響はほとんどないと考えられる。



※S-C と S-R は結線ミスによりデータが逆になっていると考えられる。

図 3.29 梁あばら筋歪-層間変形角関係 (試験体 A2-ST-H)

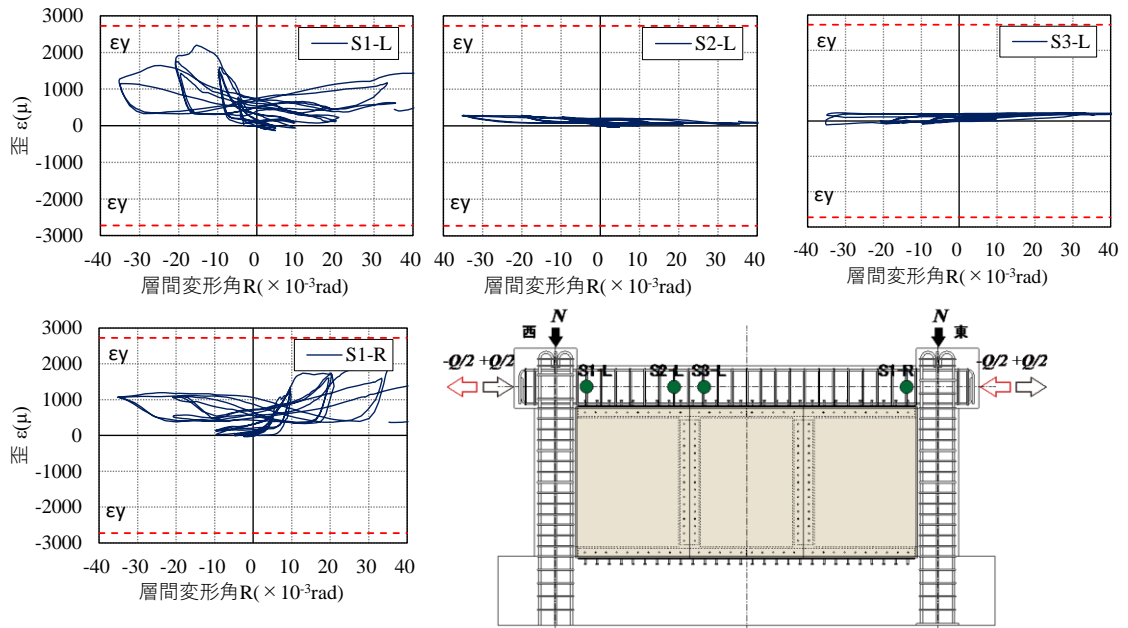


図 3.30 梁あばら筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-TR)

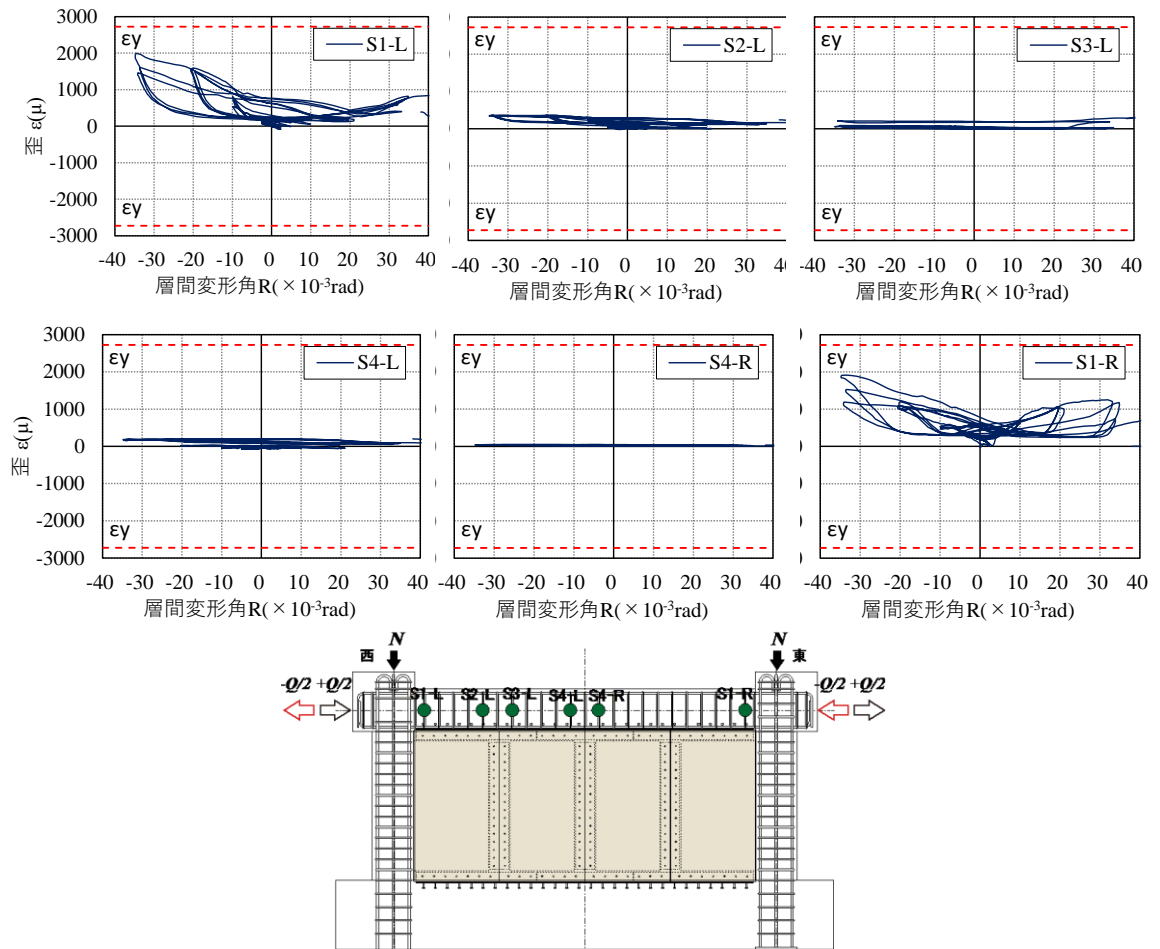


図 3.31 梁あばら筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-60-QT)

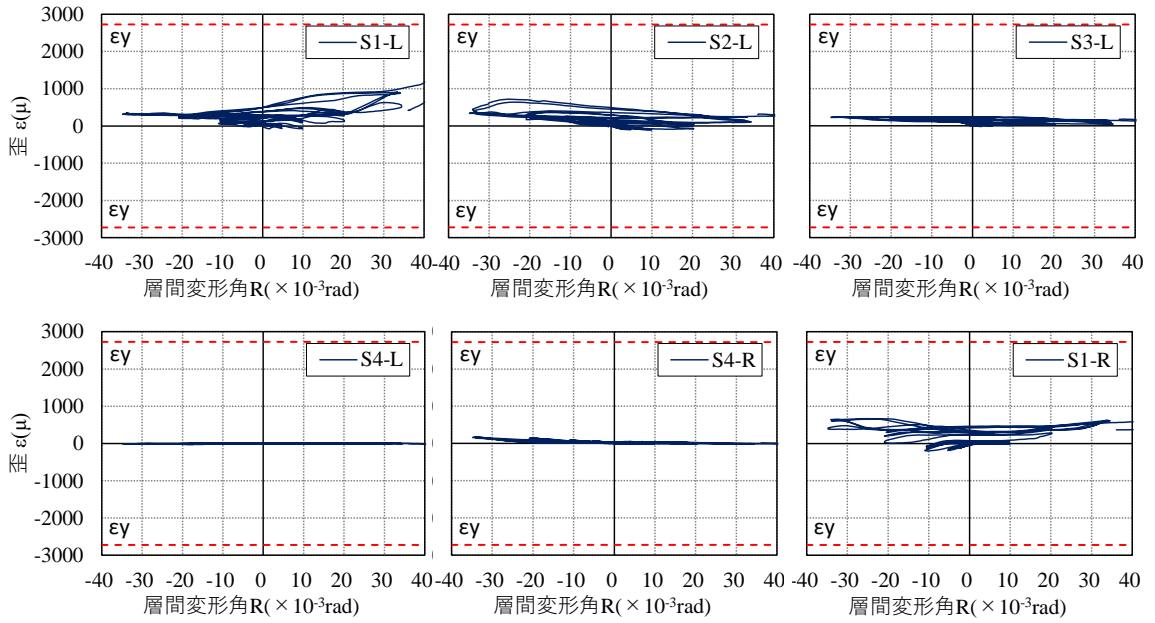


図 3.32 梁あばら筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDW-60-QT)

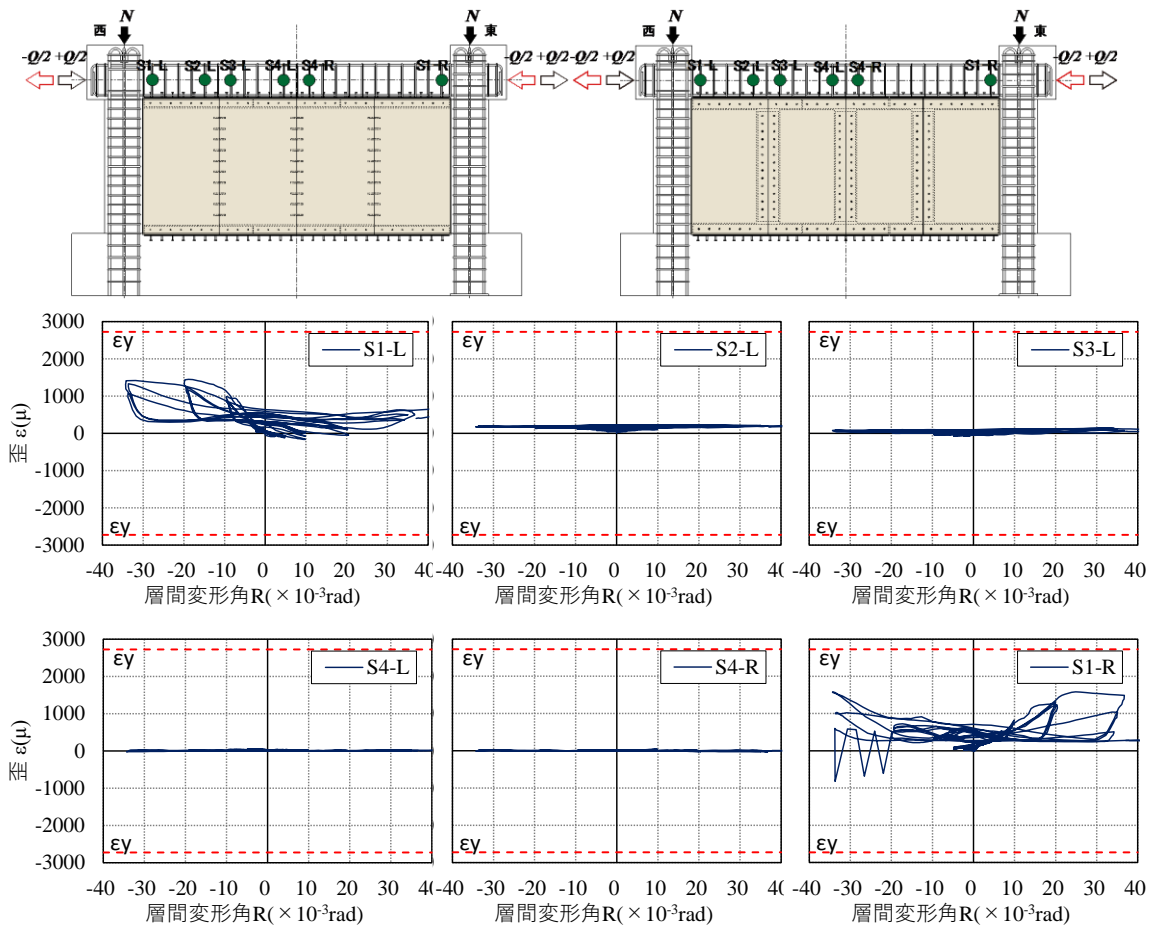


図 3.33 梁あばら筋歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-80-QT)

3.4.6. T型鋼板の歪

図 3.34～図 3.37 に T 型鋼板のフランジ面に貼付した歪ゲージによる歪と層間変形角の関係を示す。

CLT パネル同士の接合部の直上・直下に貼付し、CLT パネルのロッキング変形による RC 梁へのせん断力の程度を観察する目的で計測した。すべての試験体の度の計測箇所においても、鋼板の降伏耐力に対して十分小さく、梁への集中荷重を緩和し、補強の効果が見られた。

CLT パネルが 4 枚の試験体で、パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した試験体 A3-JDP-60-QT とパネル同士をダボ接合した試験体 A3-JDW-60-QT を比較すると、CLT パネルロッキング変形が大きいため、ダボ接合の試験体の方が大きな歪レベルを記録した。

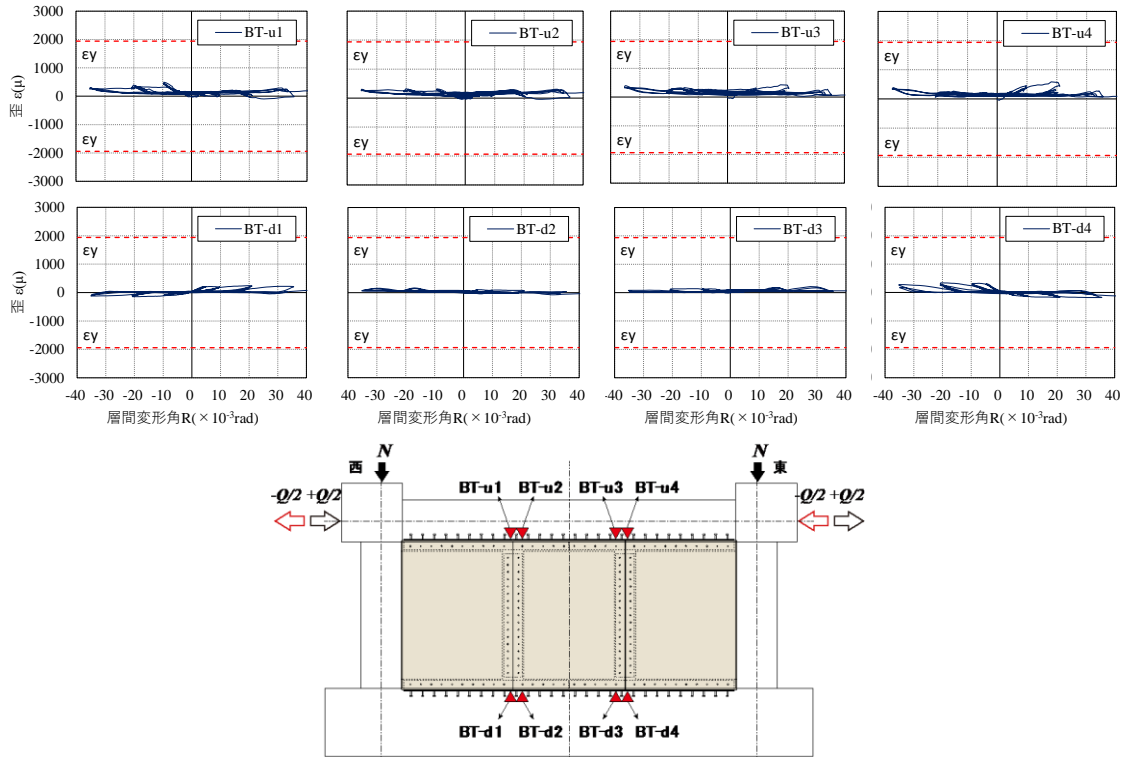


图 3.34 T 型鋼板歪-層間変形角關係 (試驗体 A3-JDP-60-TR)

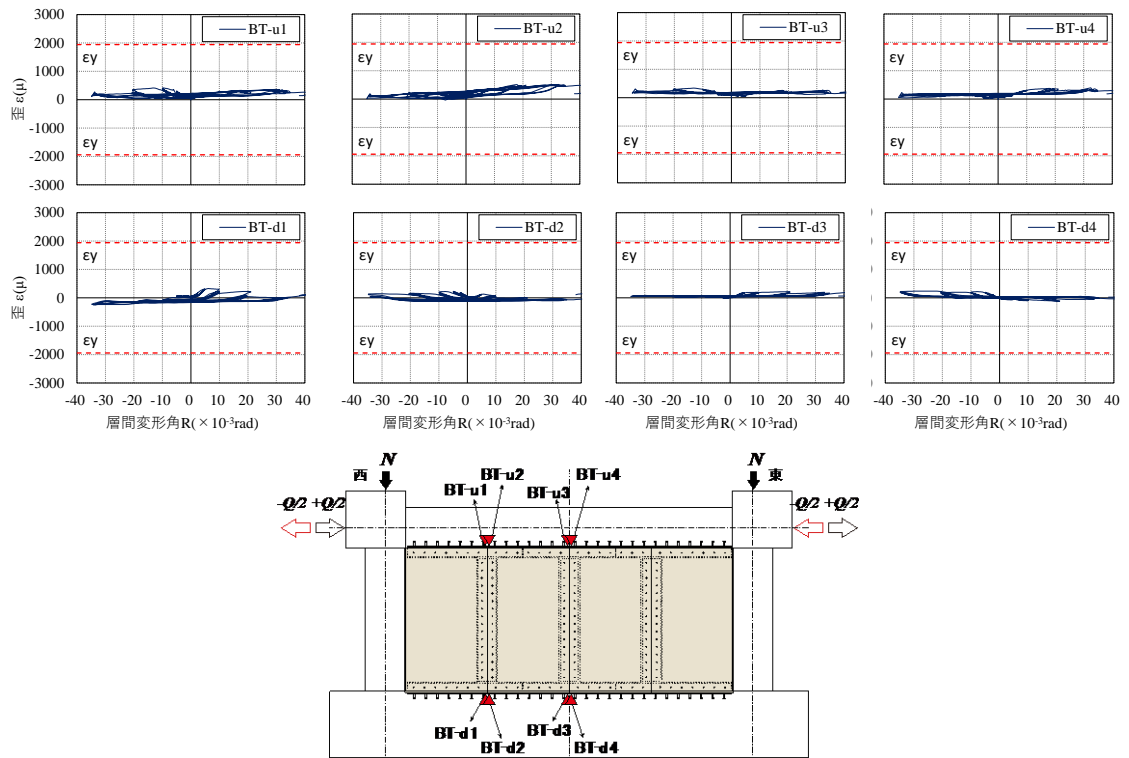


图 3.35 T 型鋼板歪-層間変形角關係 (試驗体 A3-JDP-60-QT)

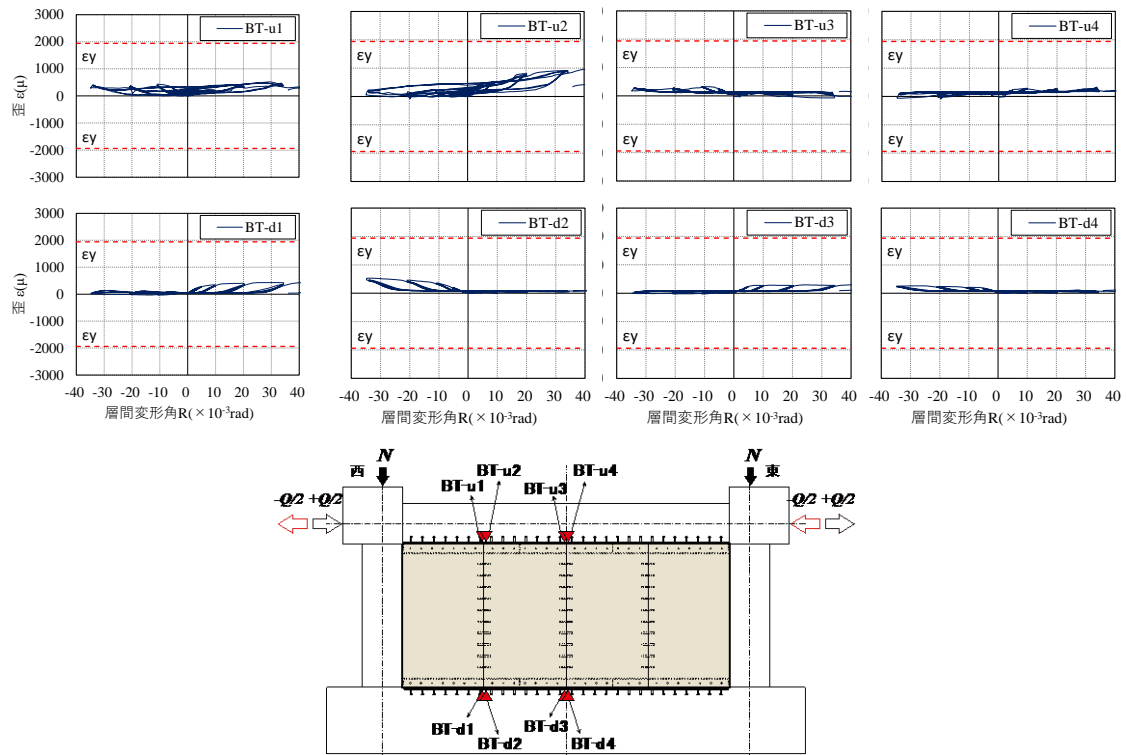


図 3.36 T 型鋼板歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDW-60-QT)

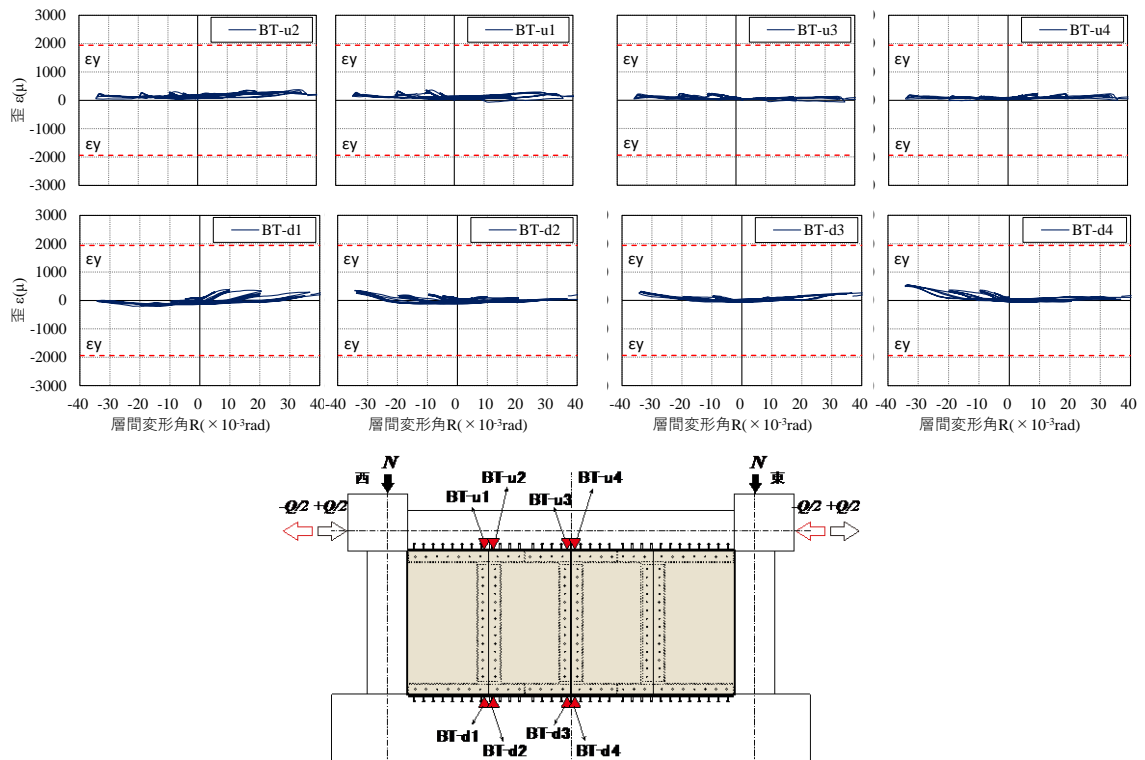


図 3.37 T 型鋼板歪-層間変形角関係 (試験体 A3-JDP-80-QT)

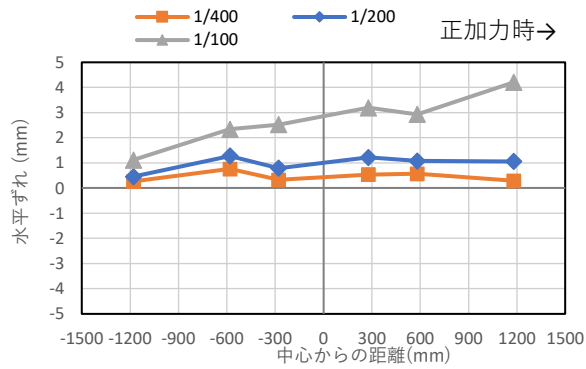
3.5. 各部の変形モード

3.5.1. CLT パネルと梁との水平ずれ変形

図 3.38 から図 3.39 に各試験体の梁上・梁下部について、CLT パネルと RC 梁との水平ずれ変形を正加力時の各層間変形角で示す。梁下部については CLT パネルからみて RC 梁が右側（加力方向）にずれる方向を正、梁上部については、梁からみて CLT パネルが右側（加力方向）にずれる方向を正とする。

全試験体で、層間変形角 $1/200\text{rad}$ までほどの計測点も 1mm 程度の変形に収まっていたが、層間変形角 $1/100\text{rad}$ 時で大きな変位が見られた。また、正方向加力時に梁下部では向かって右側の計測点の方が相対変位が大きく、梁上の計測点でも対称な傾向を示した。

CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した試験体と、ダボ接合した試験体では大きな差はみられなかった。



梁下 (CLT パネル上) 部

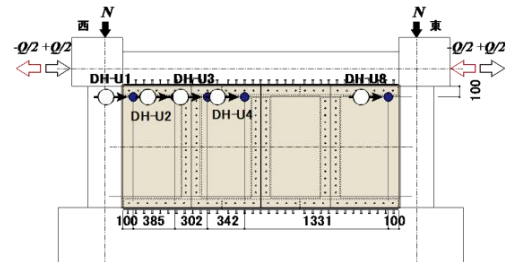
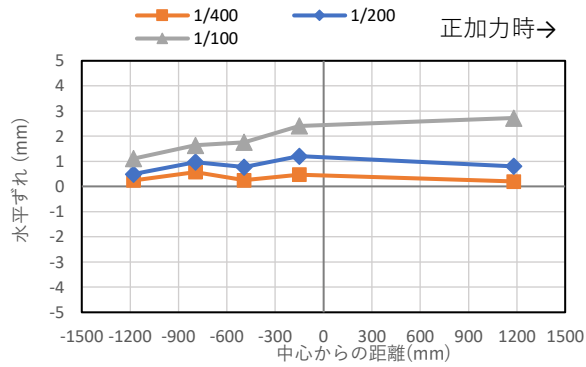
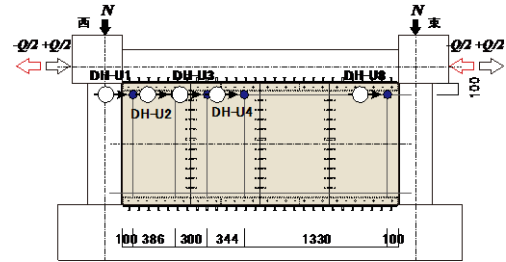
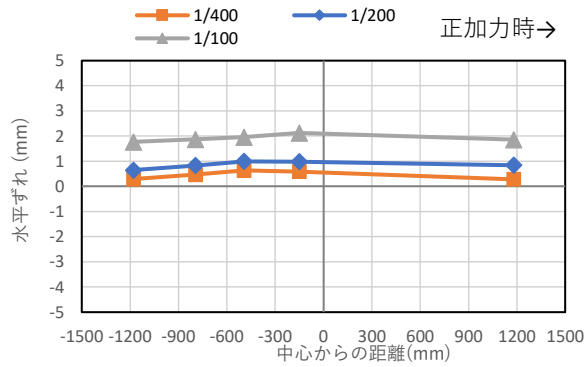
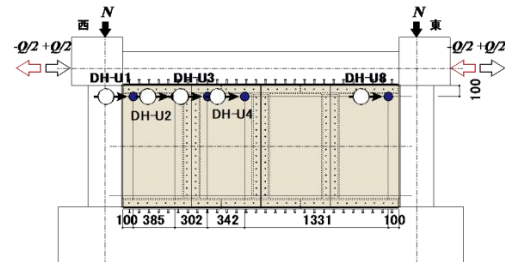
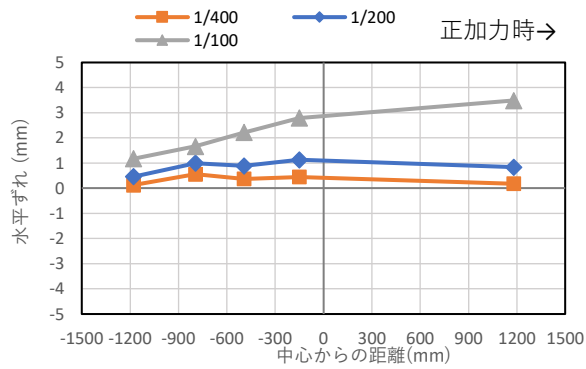
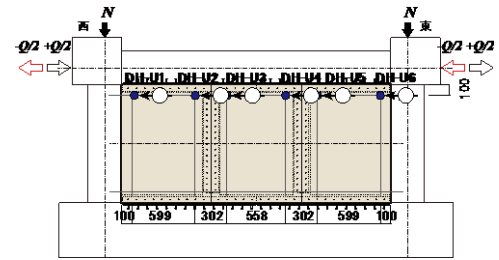
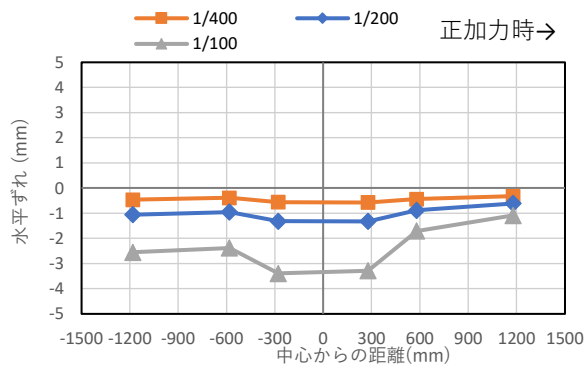


図 3.38 CLT パネルと梁下の水平ずれ変形



梁上 (CLT パネル下) 部

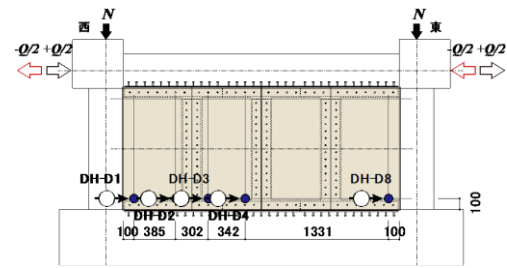
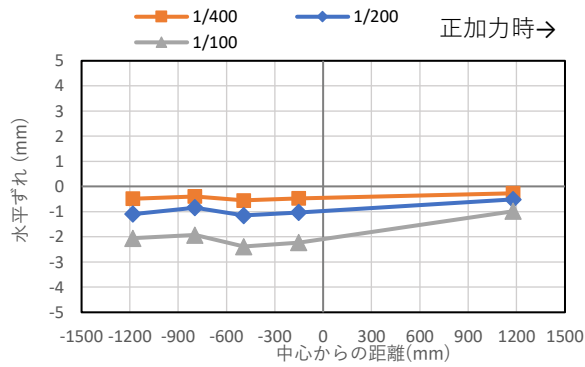
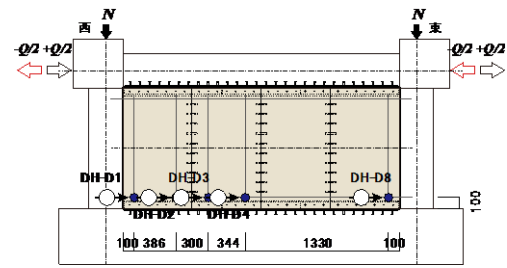
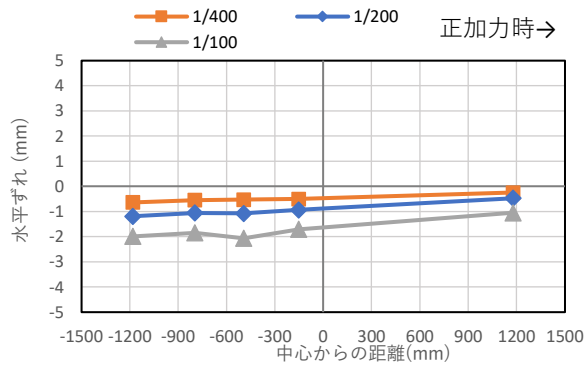
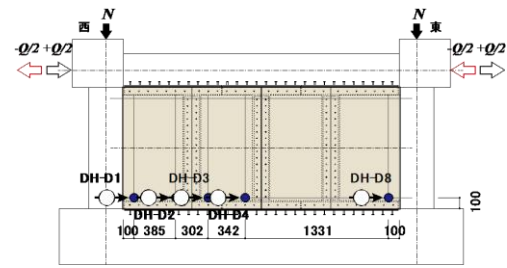
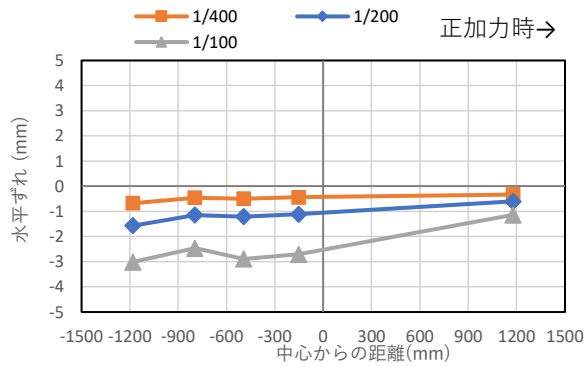
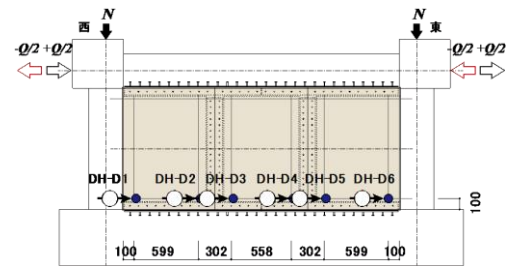
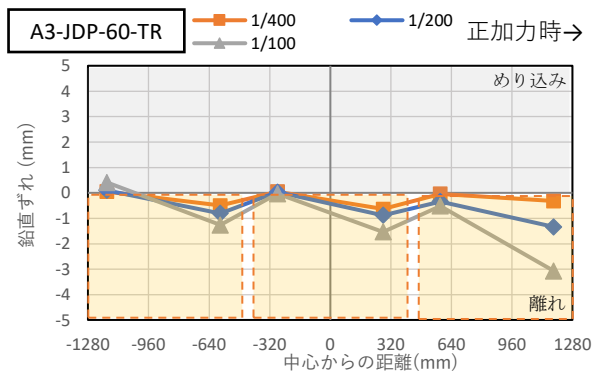


図 3.39 CLT パネルと梁上の水平ずれ変形

3.5.2. CLT パネルと梁との鉛直方向の離れ変形

図 3.40 から図 3.41 に各試験体の梁上・梁下部について、CLT パネルと RC 梁との鉛直ずれ変形を正加力時の各層間変形角で示す。CLT と RC 梁がめり込む方向を正、離れる方向を負とする。

梁下部についてみると、全試験体でパネルが独立して変形していることが観察できた。水平変形と同様に、正方向加力時に梁下部では向かって右側の計測点の方が相対変位が大きく、梁上の計測点でも対称な傾向を示した。また、CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した試験体とダボ接合した試験体を比較すると、CLT パネルのロッキング変形が大きいため、ダボ接合した試験体の方が大きな変形となった。



梁下 (CLT パネル上) 部

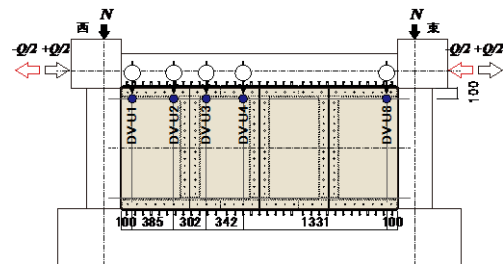
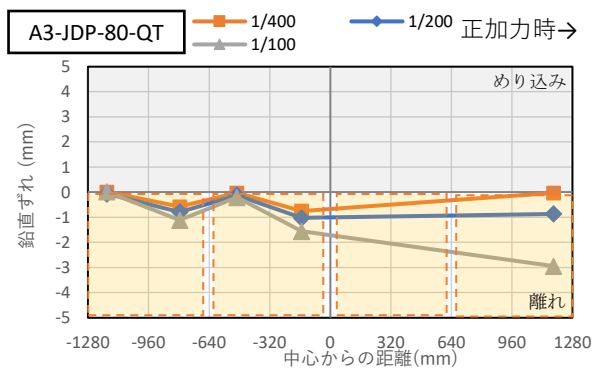
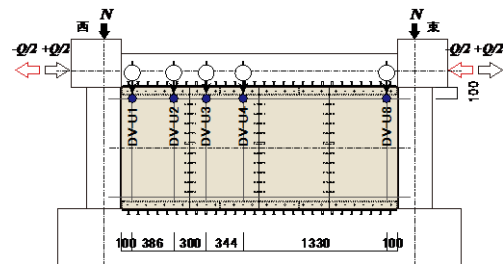
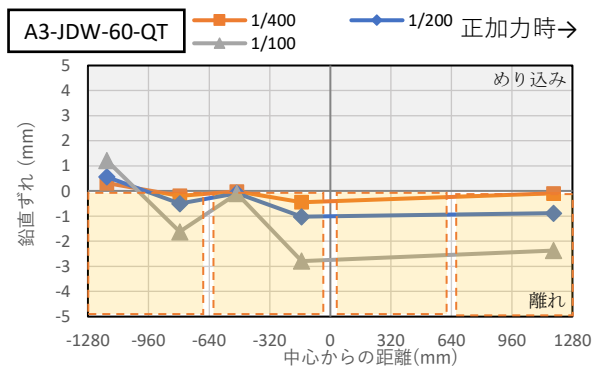
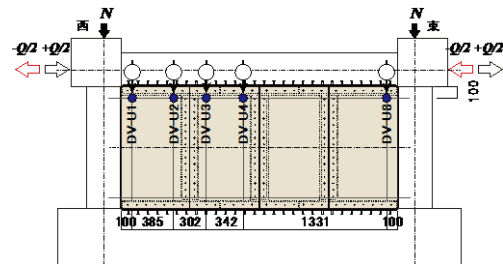
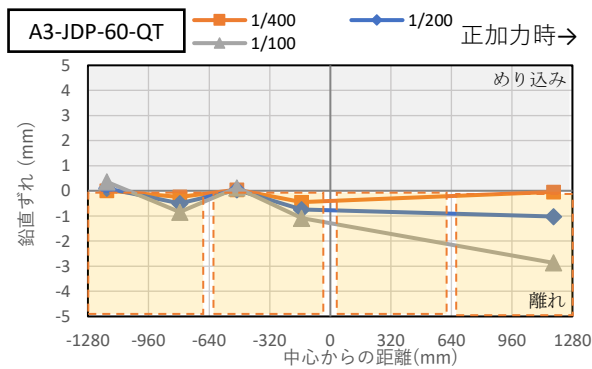
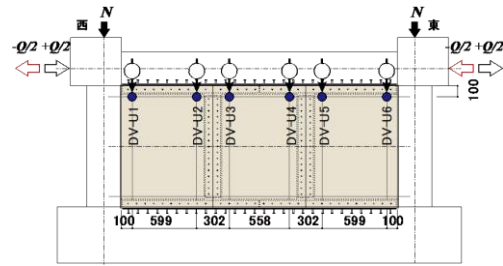
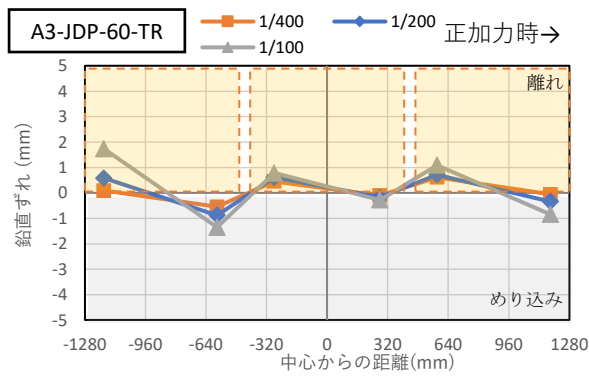


図 3.40 CLT パネルと梁下の鉛直ずれ変形



梁上 (CLT パネル下) 部

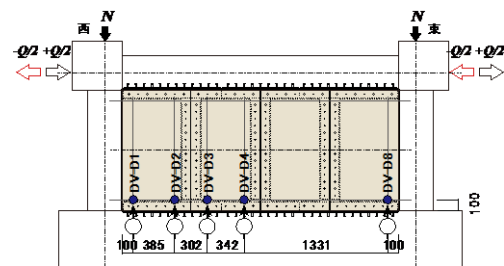
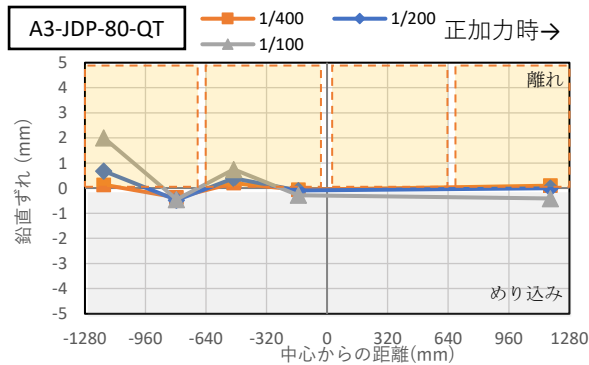
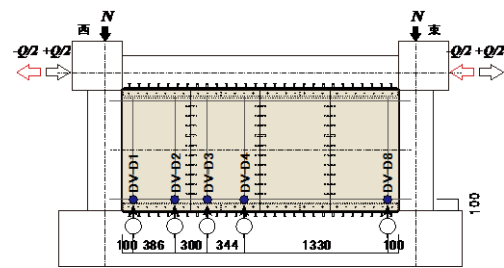
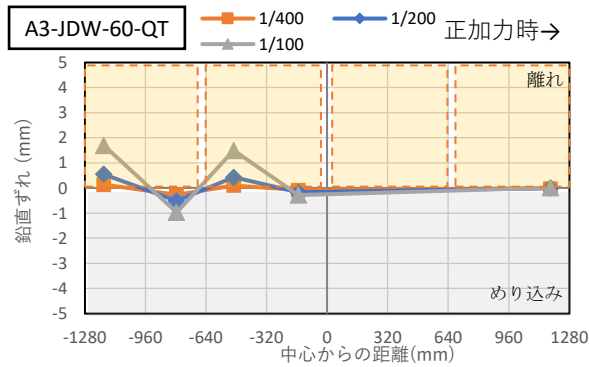
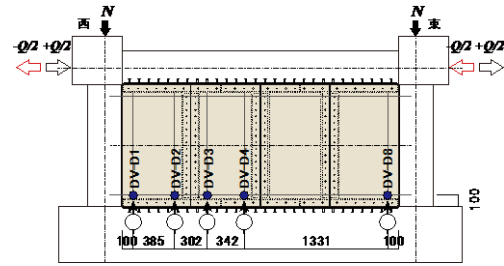
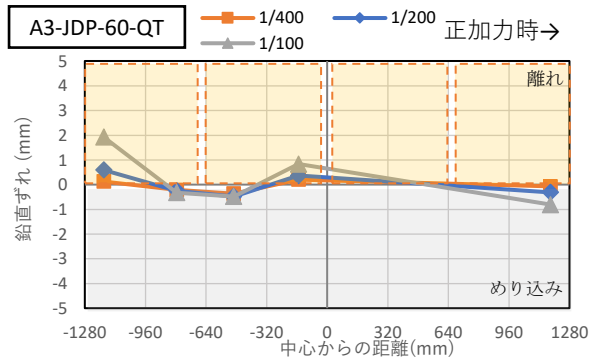
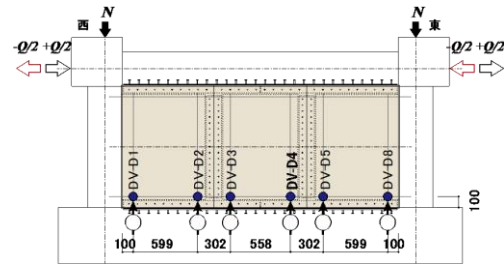


図 3.41 CLT パネルと梁上の鉛直ずれ変形

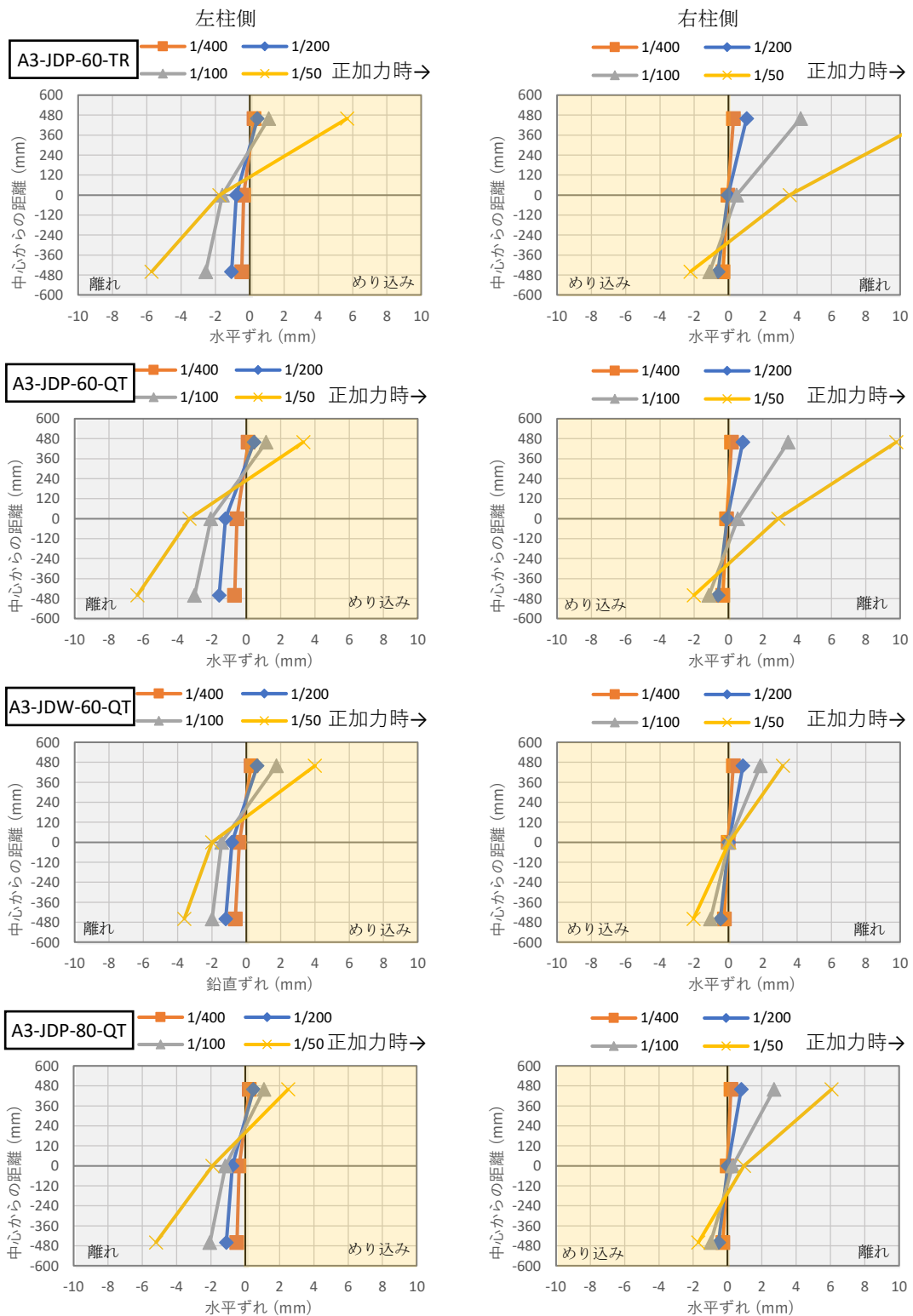
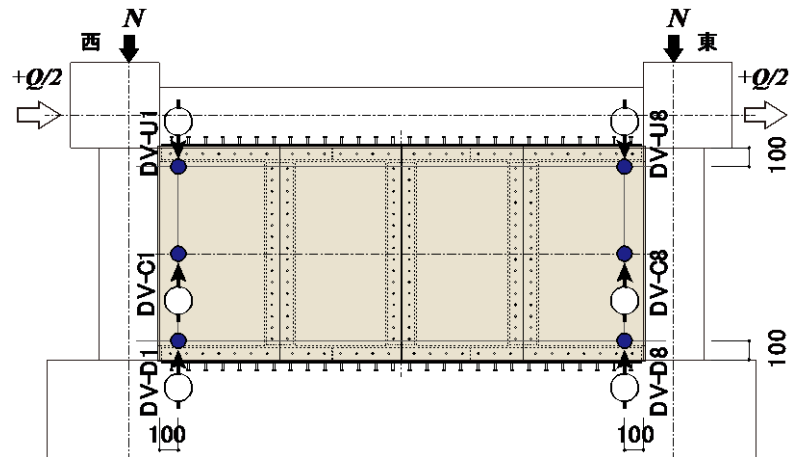


図 3.42 CLT パネルと柱の水平ずれ変形

3.5.4. CLT パネルと柱との鉛直ずれ変形

図 3.43 に各変形角における RC 柱と CLT パネルの鉛直ずれ変形を示す。ここで、RC 柱に対して CLT パネルが相対的にみて浮き上がる方向を正とする。

すべての試験体において、中央部の変形が最も大きくなった。試験体ごとに有意な差異は認められなかった。



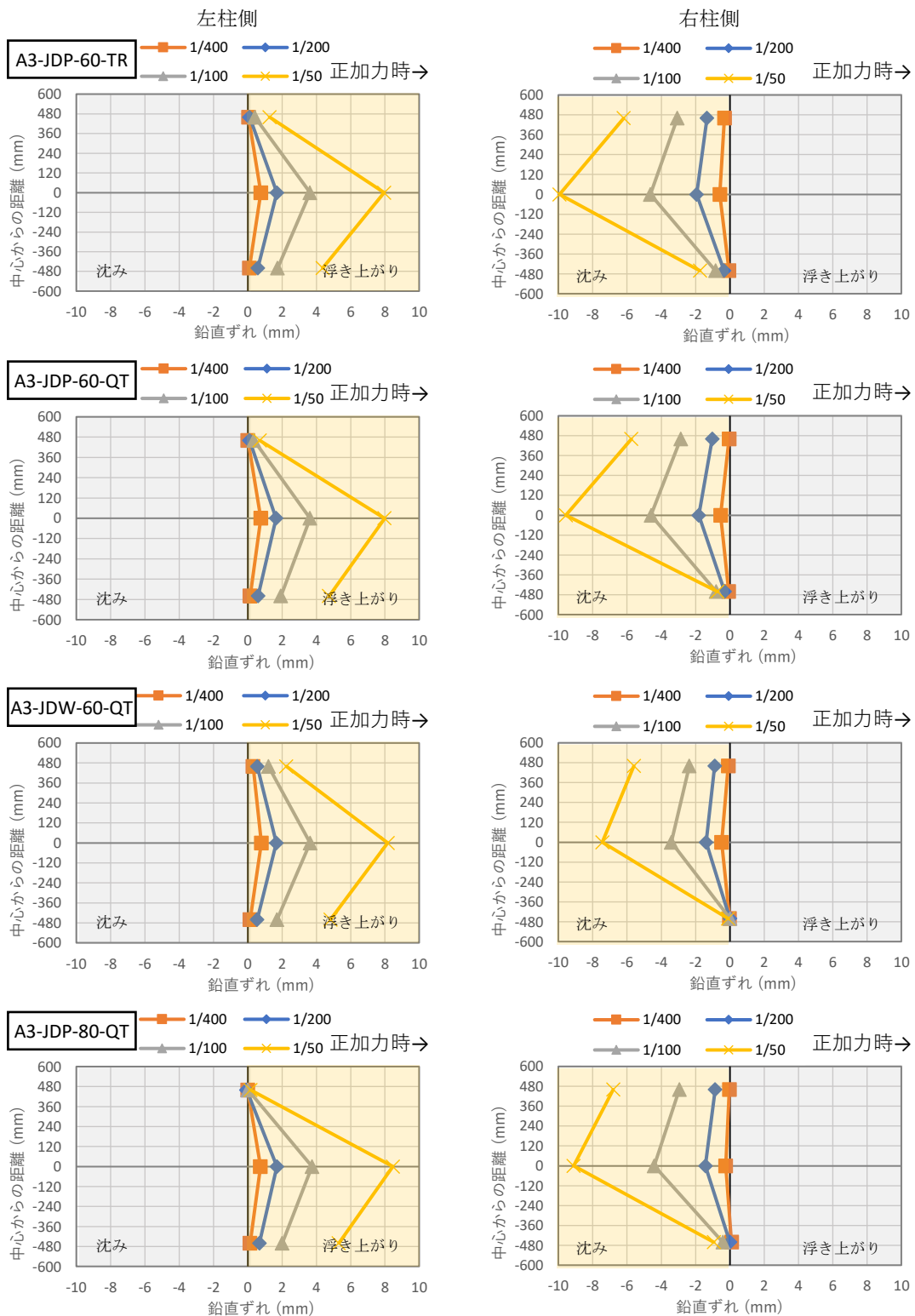


図 3.43 CLT パネルと柱の鉛直ずれ変形

3.5.5. CLT パネル同士の鉛直ずれ

図 3.44 に CLT パネル同士の鉛直ずれ変形を層間変形角ごとに示す。

正面から見て、左側の版（もしくは RC 柱）より右側の版（もしくは RC 柱）が上部に動く向きを正とする。CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した試験体と比べて、ダボ接合した試験体は層間変形角が 1/100rad で大きく変形しており、特に RC 柱とのずれ変形より中央の計測点の方が大きい特徴があった。

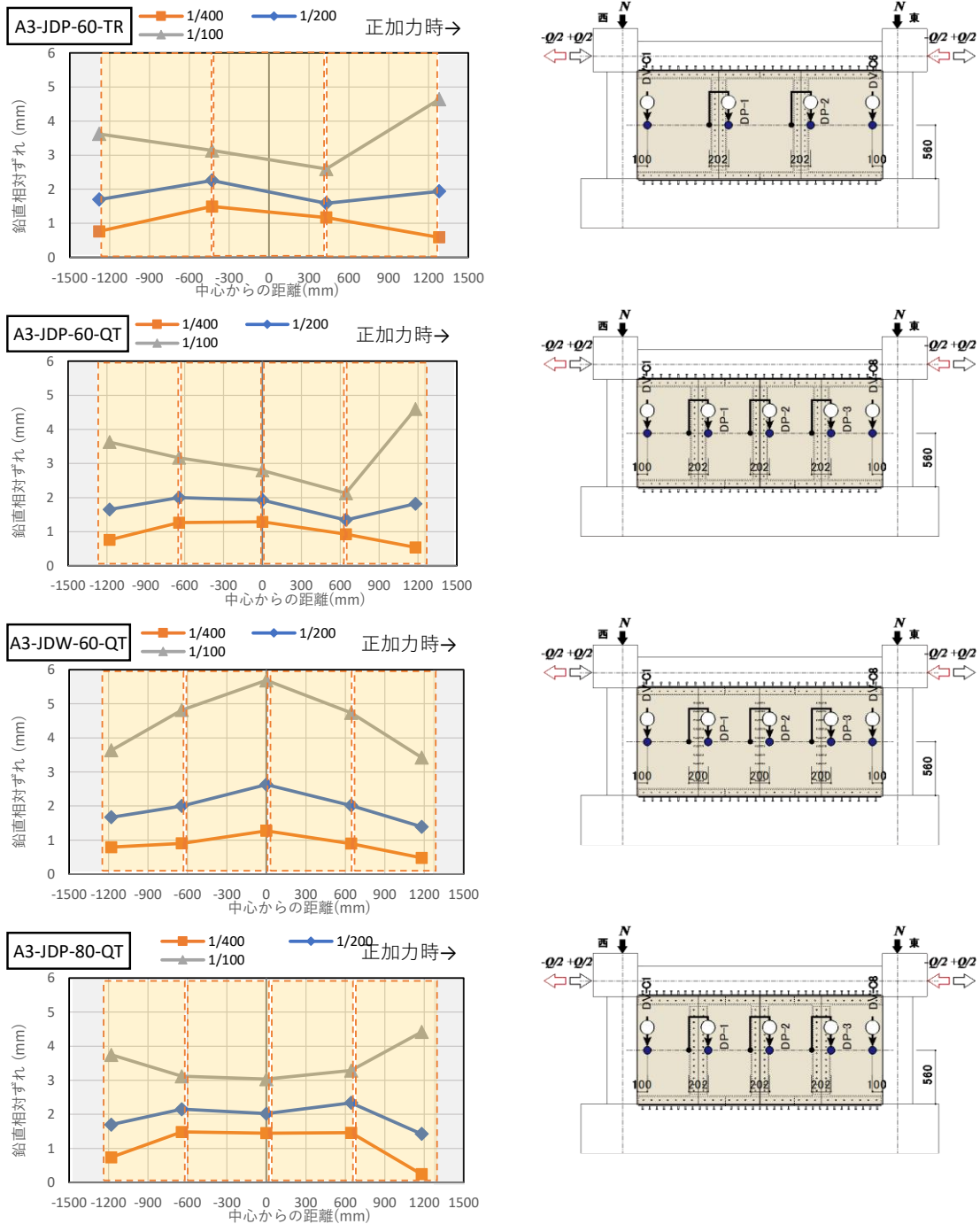


図 3.44 CLT パネル同士の鉛直ずれ

3.5.6. CLT パネルのせん断変形

図 3.45 に試験体全体の層間変形角と、各 CLT パネルで計測したせん断変形角の関係を示す。

すべての試験体において、層間変形角 $1/100\text{rad}$ までの領域で、各 CLT パネルのせん断変形角は全体の層間変形角の約半分程度であり、線形性が失われてからはスリップ挙動を示した。また、パネル位置による違いは見られなかった。

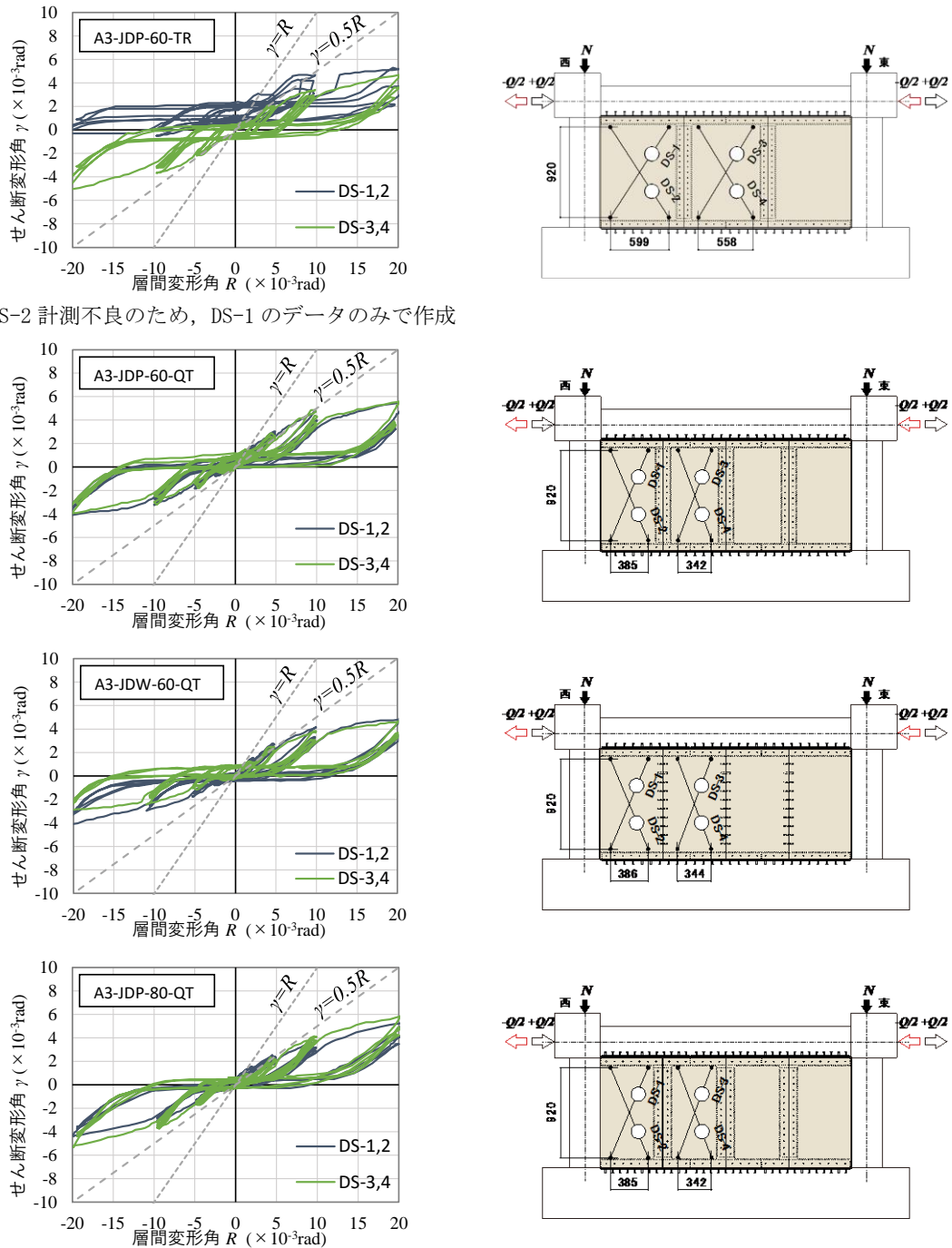


図 3.45 CLT パネルのせん断変形

4. おわりに

第Ⅱ章では、CLT 耐震壁を有する RC 架構を対象とし、壁分割数と壁同士の接合方法、CLT 厚さをパラメータとする架構実験を実施した。昨年度の架構実験の結果より、今年度の試験体の RC 梁との接合は、全試験体でスタッド付きの T 型鋼板を CLT パネルのスリットに挿入し DP 接合とした。試験体は柱間の CLT 耐震壁を 3 分割し、CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した A3-JDP-60-TR、CLT 耐震壁を 4 分割し、CLT パネル同士を鋼板挿入 DP 接合した A3-JDP-60-QT、CLT 耐震壁を 4 分割し、CLT パネル同士の接合を DP によるダボ接合とした A3-JDW-60-QT、CLT パネルの厚さを 80mm とし CLT 耐震壁は 4 分割で CLT パネル同士の接合部を鋼板挿入 DP 接合した試験体 A3-JDP-80-QT の 4 種類である。以下にまとめを示す。

- 1) 3 分割の試験体と 4 分割の試験体は、梁端の曲げ降伏後、各パネルがそれぞれロッキング変形し鋼板挿入 DP 接合部の木部の破壊と柱脚の曲げ破壊より終局に至った。
- 2) CLT パネル同士の接合部をダボ接合とした試験体は、梁端の曲げ降伏後、早期に CLT パネル同士の接合部のずれが見られ、CLT の圧壊と柱脚の曲げ破壊により終局に至った。鋼板挿入 DP 接合部とした試験体と比較して耐力が 85%程度となった。
- 3) CLT の厚さを 80mm とした試験体は、60mm の試験体と同様の破壊性状を示した。周辺フレームの拘束効果が相対的に小さく、CLT 厚さが上がっても初期剛性はほとんど上昇しなかった。
- 4) すべての試験体で、鋼板挿入 DP 接合部の降伏が先行したため、断面欠損を考慮しても発生せん断応力が材料試験で得た強度に達することがなかった。
- 5) 昨年度行った分割のない試験体と比較すると、初期剛性は 8 割程度まで低下したが、CLT パネルのせん断破壊ではなく、CLT パネルがロッキング変形して鋼板挿入 DP 接合部が破壊することで靱性が向上し、最大耐力も上昇した。
- 6) RC 梁との接合のための T 型鋼板の分割位置を CLT パネルの分割位置とずらすことで、CLT パネルを分割したことによる RC 梁への影響は見られなかった。

III. CLT にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピン接合部の
簡易試験方法の検討

1. はじめに

CLT 耐震壁と S フレームあるいは RC フレームとの接合に鋼板挿入 DP 接合を用いるのは、典型的な接合方法であると考えられる。令和 2-4 年度の事業でも DP 接合を採用しており、その際、実験に当たり DP 接合部の耐力を確認すべく要素実験を実施した^{3.1)-3.2)}。

令和 3 年度事業の要素試験では、単位接合部引張試験とパネル接合部せん断試験を実施した。試験体の概略図を表 1.1 に示す。単位接合部引張試験は、DP 接合部 ($\phi 10$, $\phi 14$) について、加力方向と繊維方向の角度 (0° , 90° , 45°) をパラメータとして試験を実施した。接合部パネルせん断試験では、架構実験の CLT 壁に作用する力の状態を模し CLT の四辺を DP 接合し、対角方向に引張加力した。引張荷重を $1/\sqrt{2}$ 倍して算出したせん断荷重と、加力治具のピン位置での対角変位より算出したせん断変形角の関係を図 1.1 に示す。単位接合部試験 45° 方向の降伏荷重 P_y 、最大荷重 P_{max} をそれぞれ本数倍して図中に示す。パネルせん断試験では単位接合部試験に比べて降伏荷重が $\phi 14$ で 1.26 倍、 $\phi 10$ で 1.44 倍となった。

表 1.1 接合部試験の試験方法

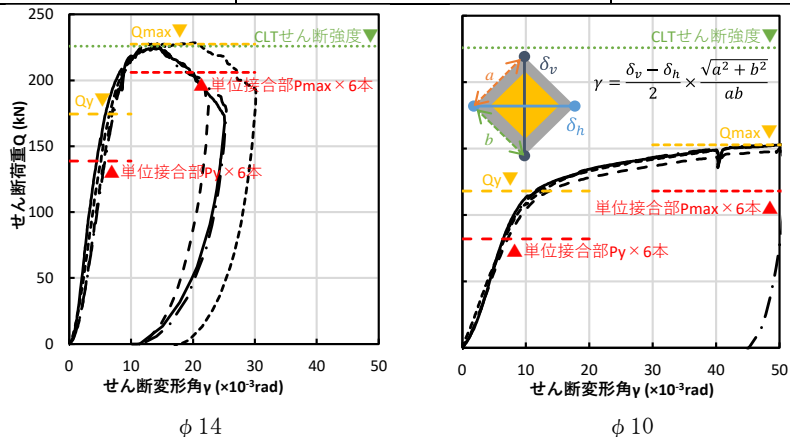
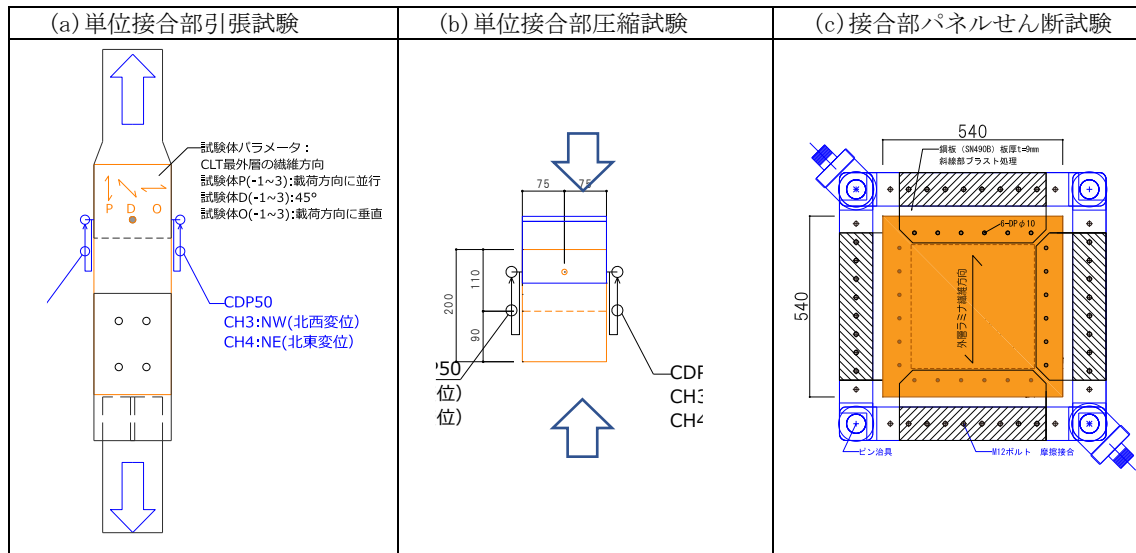


図 1.1 パネルせん断試験のせん断荷重-せん断変位関係

これらの結果は、単位接合部引張試験では DP の 1 本あたりの耐力を把握できないことを示している。一方で、パネルせん断試験と架構実験結果との対応は良好であったことを、令和 3 年の事業では報告しているが^{3.1)}、要素実験としては大掛かりであり、より簡便な方法での耐力確認が求められる。

そこで、令和 4 年度の事業では簡便な試験方法を探るため、CLT 厚さと DP 径の組み合わせをパラメータとして単位接合部引張試験に加え、単位接合部圧縮試験を実施し、パネルせん断試験結果と比較、考察した^{3.3)}。図 1.2 及び図 1.3 に各試験方法での 1 本あたりの降伏荷重及び最大荷重の分布を示す。ここで、試験方法は T：単位接合部引張試験，C：単位接合部圧縮試験，PS：接合部パネルせん断試験を示し、加力方向についてのパラメータを P：最外層ラミナの繊維方向と同方向に加力（強軸），O：最外層ラミナの繊維方向と直行方向に加力（弱軸），D：最外層ラミナの繊維方向と 45 度方向に加力 を示す。T，C については試験方法のパラメータによる違いはほとんど見られず，PS の結果が抜きんでて高いことが示された。

図 1.4 は降伏耐力と最大耐力について、各単体試験法と接合部パネルせん断試験の比と DP 径 D を CLT 版厚 t で除した値の割合(%)との関係を示す。ここで、

T(P) :強軸のみの単位接合部引張試験結果降伏点の平均値

T(P,O,D):すべての方向の単位接合部引張試験の降伏荷重平均値

C(P,O,D) :すべての方向の単位接合部圧縮試験の降伏荷重平均値

である。T(P), T(P,O,D), C(P,O,D)では、C(P,O,D)が最もばらつきが小さく、版厚に対して径が大きいほど、耐力比は小さくなる傾向を示す。降伏耐力は DP 径の割合の影響が大きい、最大耐力ではほとんど見られない。データが少ないため定性的であるが、版厚と DP 径をパラメータとしてデータを蓄積することで、ある程度耐力を推定できる可能性があることが分かった。

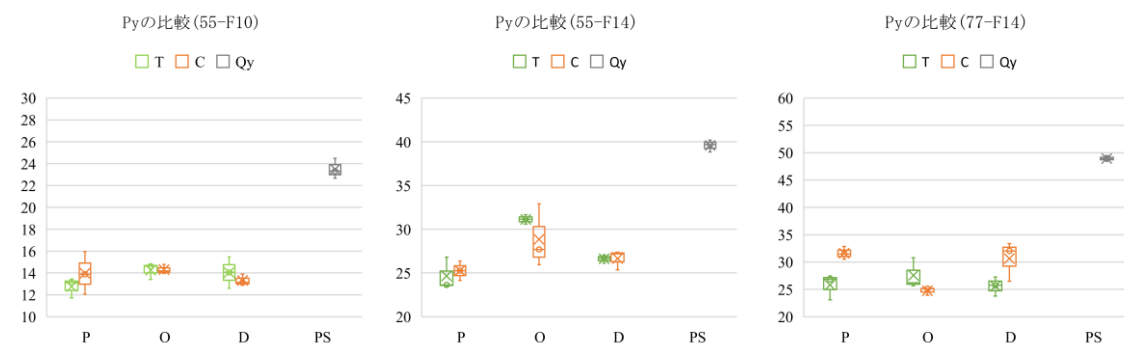


図 1.2 降伏荷重の比較



図 1.3 最大荷重の比較

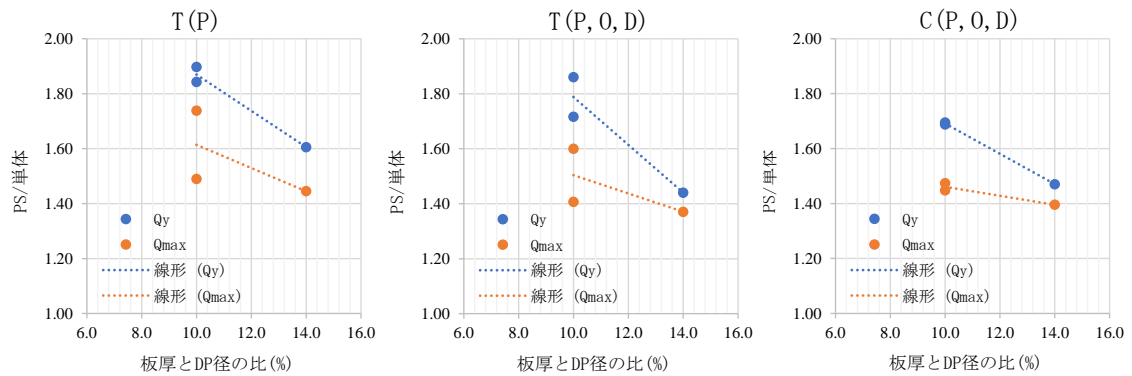


図 1.4 板厚と DP 径の割合との比較

そこで本年度は、CLT の版厚と DP 径のバリエーションを増やしデータの蓄積をすることを目的として、接合部パネルせん断試験及び単位接合部圧縮試験を行う。表 1.2 に昨年度と本年度実施予定の試験体の板厚と DP 径のパラメータを示す。本年度は S60-5-5 厚さ 100mm の CLT に対して DP 径を $\phi 8$, $\phi 12$ としたパラメータ, S60-7-7 厚さ 140mm の CLT に対して DP 径を $\phi 12$, $\phi 16$ としたパラメータについて、それぞれの試験を行った。

表 1.2 CLT の板厚と DP 径のパラメータ

CLT 厚さ l	DP 径 d	8	10	12	14	16
100(S60-5-5)		○ l/d=12.5	昨年度実施済 l/d=10	○ l/d=8.3	昨年度実施済 l/d=7.14	—
140(S60-7-7)		—	—	○ l/d=11.6	昨年度実施済 l/d=10	○ l/d=8.75

<参考文献>

- 3.1) 宇佐美徹他:CLT 耐震壁を有する鉄骨架構の構造性能 その1-その2, 2021 年度大会(東海)日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.135-138, 構造Ⅲ, 2021.07
- 3.2) 宇佐美徹他:CLT 耐震壁を有する鉄骨架構の構造性能 その3-その4, 2022 年度大会(関東)日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.355-358, 構造Ⅲ, 2022.07
- 3.3) 金澤和寿美他:せん断力を負担する鋼板挿入ドリフトピン接合部の耐力 その1 簡易試験方法の検討, 2023 年度大会(近畿)日本建築学会大会学術講演梗概集, pp405-406

2. 試験概要と試験結果

本試験では、材料について特性を把握するための(1)材料試験と、DP 接合部の耐力の比較検証のための(2)DP 接合部耐力試験を行う。各試験で行う項目を以下とする。ただし、挿入鋼板、DP 鋼材については、架構試験と同ロットの鋼材から製作しているためこの章では試験の内容を省略する。

(1)材料試験

CLT せん断試験

CLT 圧縮試験

(2)DP 接合部耐力試験

単位接合部圧縮試験

ドリフトピン接合部パネルせん断試験

2.1. CLT 材料試験

CLT のせん断試験について、図 2.1 に試験体図を示す。せん断試験は外形 1200mm×300mm×(CLT 厚さ) で逆対称 4 点曲げ式（大野式）せん断試験とした。強軸方向・弱軸方向それぞれ 3 体を試験に供した。使用した CLT の仕様を表 2.1 に示す。試験結果の特性値の算出方法はⅡ章 2.1 と同様である。

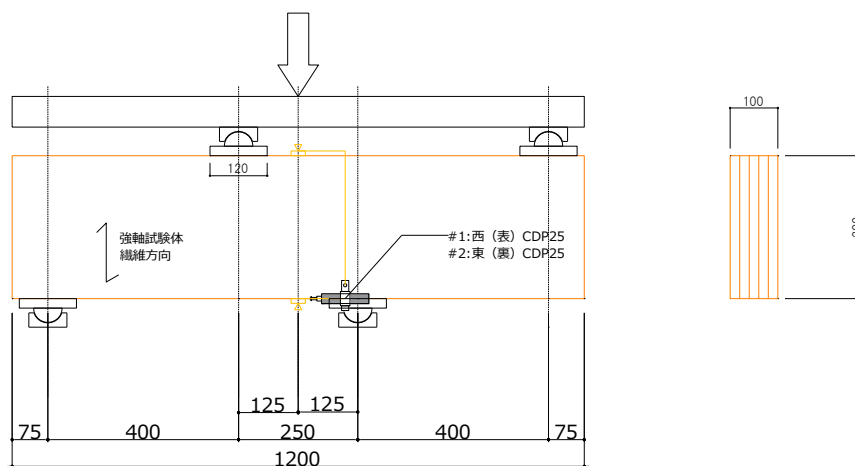


図 2.1 CLT せん断試験 試験体図

表 2.1 CLT せん断試験 CLT 一覧

強度等級	CLT 厚さ	材方向	試験体名
S60-5-5	100mm	強軸	S55-100-P-1 (~3)
		弱軸	S55-100-0-1 (~3)
S60-7-7	140mm	強軸	S77-140-P-1 (~3)
		弱軸	S77-140-0-1 (~3)



写真 2.1 せん断試験加力状況

強度等級 S60-5-5 の試験体について、試験結果を図 2.2 に、試験から得られた特性値を表 2.2 に示す。最大せん断応力 τ_{max} の平均値は、強軸で 5.98N/mm²、弱軸で 5.96N/mm² となった。

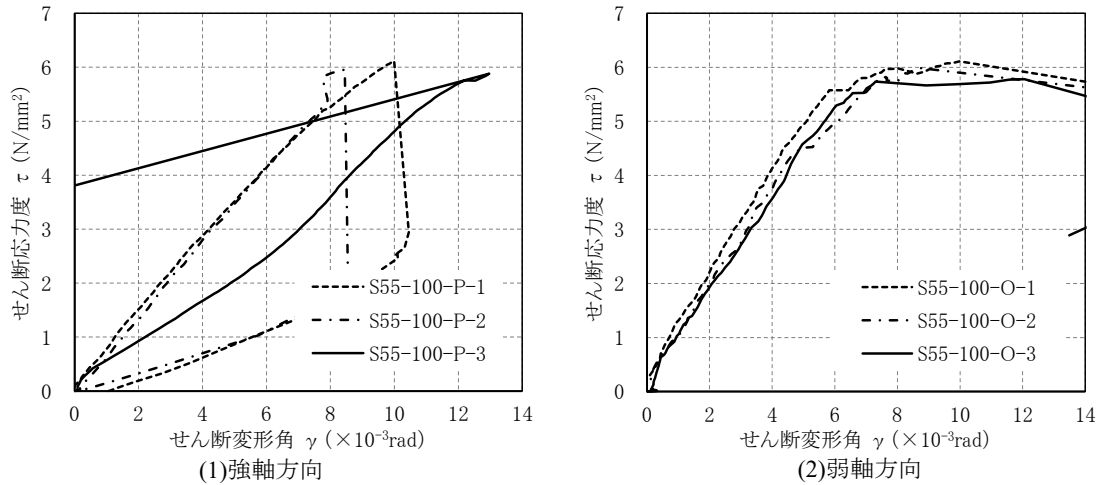


図 2.2 CLT せん断応力度－せん断変形角関係（強度等級 S60-5-5）

表 2.2 CLT せん断試験結果特性値（強度等級 S60-5-5）

S60-5-5(t100) 強軸	τ_{max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)	S60-5-5(t100) 弱軸	τ_{max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S55-100-P-1	6.116	9.997	722	S55-100-O-1	6.111	9.983	997
S55-100-P-2	5.958	8.450	720	S55-100-O-2	5.985	8.737	873
S55-100-P-3	5.883	12.967	378	S55-100-O-3	5.782	12.060	823
平均値	5.986	10.709	721	平均値	5.959	10.260	898
標準偏差	0.097	2.259	161	標準偏差	0.136	1.371	73
変動係数	0.016	0.211	0.224	変動係数	0.023	0.134	0.082
下限値	5.680		645	下限値	5.532		863



(1) 強軸方向

(2) 弱軸方向

写真 2.2 CLT せん断試験破壊状況（強度等級 S60-5-5）

強度等級 S60-7-7 の試験体について、試験結果を図 2.3 に、試験から得られた特性値を表 2.3 に示す。最大せん断応力 τ_{max} の平均値は、強軸で 5.32N/mm²、弱軸で 5.72N/mm² となった。

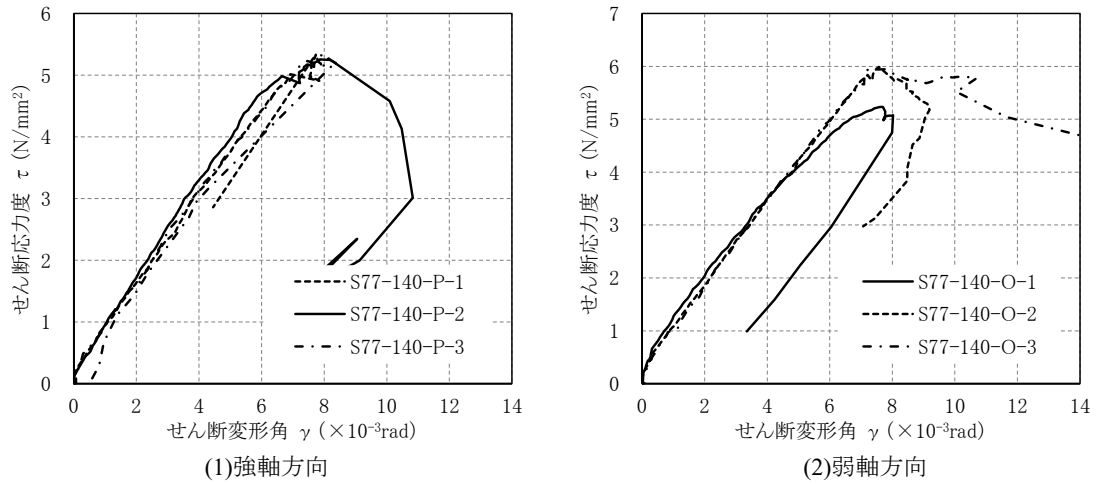


図 2.3 CLT せん断応力度－せん断変形角関係（強度等級 S60-7-7）

表 2.3 CLT せん断試験結果特性値（強度等級 S60-7-7）

S60-7-7 強軸	τ_{max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)	S60-7-7 弱軸	τ_{max} (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$ rad)	G (N/mm ²)
S77-140-P-1	5.337	7.730	713	S77-140-O-1	5.233	7.690	884
S77-140-P-2	5.272	8.140	818	S77-140-O-2	5.989	7.573	790
S77-140-P-3	5.357	7.787	711	S77-140-O-3	5.945	7.777	797
平均値	5.322	7.886	747	平均値	5.722	7.680	824
標準偏差	0.036	0.181	50	標準偏差	0.346	0.084	43
変動係数	0.007	0.023	0.067	変動係数	0.061	0.011	0.052
下限値	5.208		724	下限値	4.630		804



(1) 強軸方向



(2) 弱軸方向

写真 2.3 CLT せん断試験破壊状況（強度等級 S60-7-7）

2.2. CLT 圧縮試験

試験体図を図 2.4 に示す。圧縮試験は外形 100mm×60 mm×(CLT 厚)で標点間距離は 100mm とした。載荷は単調圧縮とした。強軸方向・弱軸方向それぞれ 3 体を試験に供した。

使用した CLT の仕様を表 2.4 に示す。試験結果の特性値の算出方法はⅡ章 2.1 と同様である。

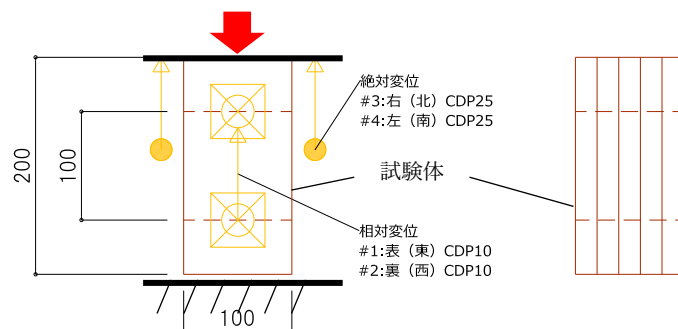


図 2.4 CLT 圧縮試験 試験体図

表 2.4 CLT 圧縮試験 CLT 一覧

強度等級	CLT 厚さ	材方向	試験体名
S60-5-5	100mm (ラミナ厚 20mm)	強軸	C55-100-P-1 (~3)
		弱軸	C55-100-0-1 (~3)
S60-7-7	140mm (ラミナ厚 20mm)	強軸	C77-140-P-1 (~3)
		弱軸	C77-140-0-1 (~3)

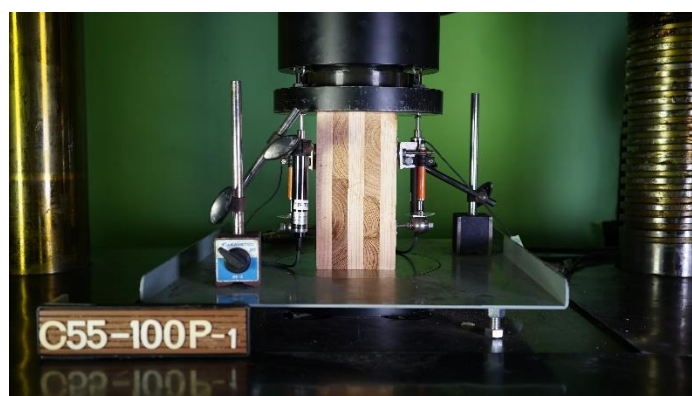


写真 2.4 圧縮試験加力状況

強度等級 S60-5-5 の試験体について、試験結果を図 2.5 に、試験から得られた特性値を表 2.5 に示す。最大圧縮応力度 σ_{max} の平均値は、強軸で 20.7 N/mm²、弱軸で 13.6 N/mm² となった。圧縮弾性係数 E については、強軸で 4823 N/mm²、弱軸で 2518 N/mm² となった。

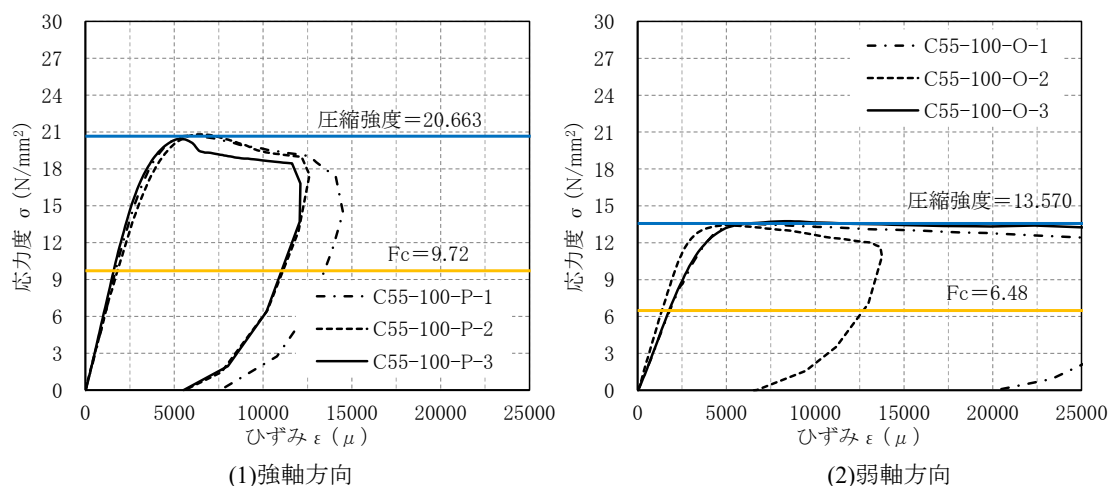
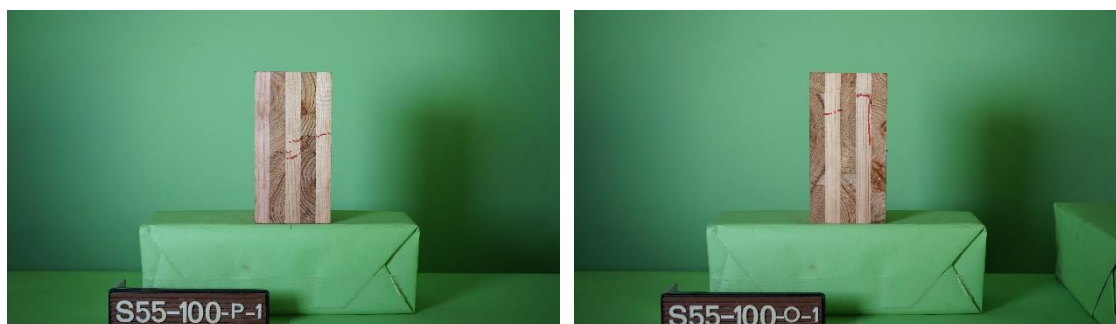


図 2.5 CLT 圧縮応力度－歪関係（強度等級 S60-5-5）

表 2.5 CLT 圧縮試験結果特性値（強度等級 S60-5-5）

S60-5-5 強軸 圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)	S60-5-5 弱軸 圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C55-100-P-1	20.755	6015	5786	C55-100-O-1	13.525	5995	3751
C55-100-P-2	20.803	6560	5353	C55-100-O-2	13.431	5060	4938
C55-100-P-3	20.431	5340	6250	C55-100-O-3	13.754	8255	3830
平均値	20.663	5972	5796	平均値	13.570	6437	4173
標準偏差	0.165	499	366	標準偏差	0.136	1341	542
変動係数	0.008	0.084	0.063	変動係数	0.010	0.208	0.130
下限値	20.142		5623	下限値	13.142		3917



(1) 強軸方向

(2) 弱軸方向

写真 2.5 CLT 圧縮試験破壊状況（強度等級 S60-5-5）

強度等級 S60-7-7 の試験体について、試験結果を図 2.6 に、試験から得られた特性値を表 2.6 に示す。最大圧縮応力度 σ_{max} の平均値は、強軸で 18.1 N/mm²、弱軸で 13.2 N/mm² となった。圧縮弾性係数 E については、強軸で 6586 N/mm²、弱軸で 5417 N/mm² となった。

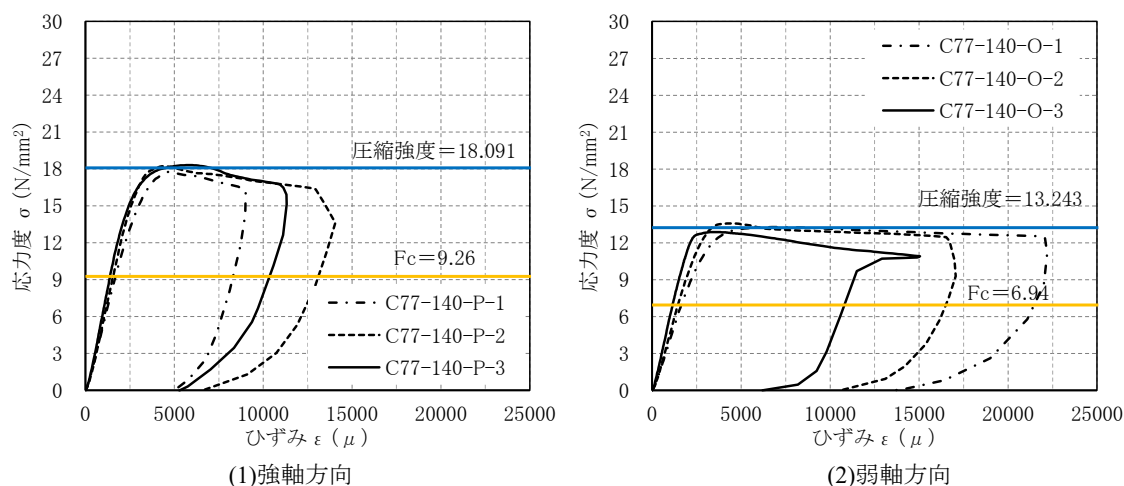
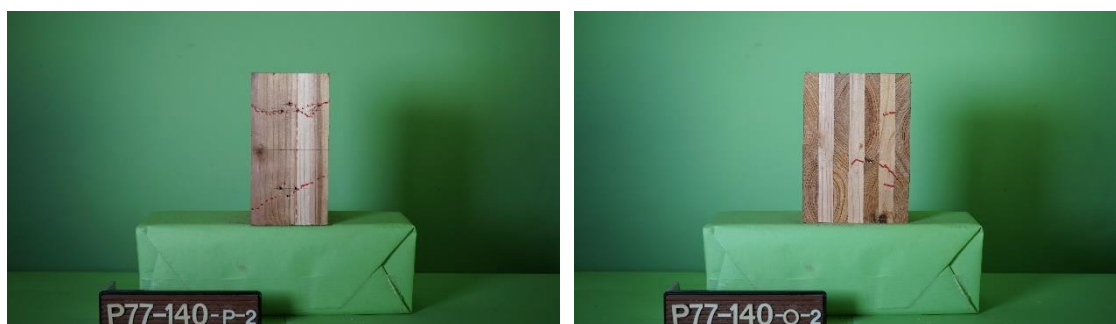


図 2.6 CLT 圧縮応力度－歪関係（強度等級 S60-7-7）

表 2.6 CLT 圧縮試験結果特性値（強度等級 S60-7-7）

S60-7-7 強軸 圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)	S60-7-7 弱軸 圧縮	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (μ)	E (N/mm ²)
C77-140-P-1	17.755	4700	5886	C77-140-O-1	13.275	6725	4585
C77-140-P-2	18.209	4350	6575	C77-140-O-2	13.576	4205	5233
C77-140-P-3	18.309	5840	7296	C77-140-O-3	12.878	3515	6434
平均値	18.091	4963	6586	平均値	13.243	4815	5417
標準偏差	0.241	636	576	標準偏差	0.286	1380	766
変動係数	0.013	0.128	0.087	変動係数	0.022	0.287	0.141
下限値	17.331		6314	下限値	12.342		5056



(1) 強軸方向

(2) 弱軸方向

写真 2.6 CLT 圧縮試験破壊状況（強度等級 S60-7-7）

2.3. 単位接合部圧縮試験

図 2.7 に試験体図を示す。試験体は外形 200mm×150mm×(CLT 厚さ)の CLT にスリットを設けて鋼板を挿入し、ドリフトピンを打ち込んだ。

試験は各強度等級に対して CLT の強軸方向・弱軸方向についてそれぞれ 3 体ずつ行った。表 2.7 に試験体の仕様一覧を示す。使用した鋼板は鋼種 SN490B, ドリフトピンは鋼種 SS400 である。荷重は単調圧縮とした。

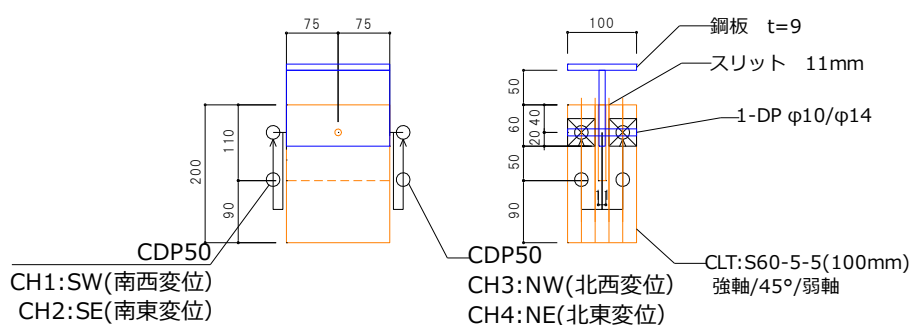


図 2.7 単位接合部圧縮試験 試験体図

表 2.7 単位接合部圧縮試験 試験体仕様一覧

CLT 強度等級	DP 径	材方向	試験体名
S60-5-5(t=100)	φ 8	強軸	DPC-55-F8-P-1(~3)
		弱軸	DPC-55-F8-O-1(~3)
S60-5-5(t=100)	φ 12	強軸	DPC-55-F12-P-1(~3)
		弱軸	DPC-55-F12-O-1(~3)
S60-7-7(t=140)	φ 12	強軸	DPC-77-F12-P-1(~3)
		弱軸	DPC-77-F12-O-1(~3)
S60-7-7(t=140)	φ 16	強軸	DPC-77-F16-P-1(~3)
		弱軸	DPC-77-F16-O-1(~3)

写真 2.7 に試験加力状況を示す。図 2.8 から図 2.11 に試験結果と特性値を、写真 2.8 から写真 2.11 に各試験体の損傷状況を示す。特性値の算出方法は引張試験と同様に次のように求めた。

最大耐力 P_{max}

最大耐力時の変位 δ_{max}

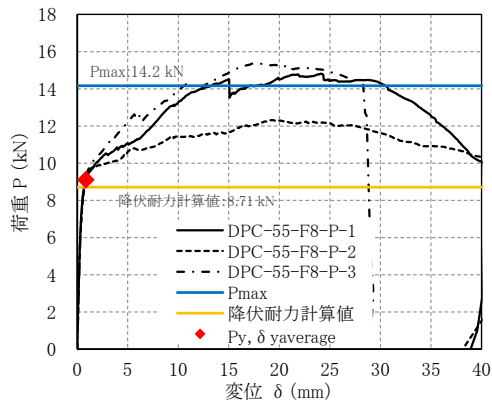
降伏耐力 P_y $0.1P_{max}$ と $0.4P_{max}$ を結んだ直線に対し、接合具径の 5%をずらした直線と荷重変形関係との交点の荷重

降伏耐力時の変位 δ_y

初期剛性 K $0.1P_{max}$ と $0.4P_{max}$ を結ぶ直線の傾き

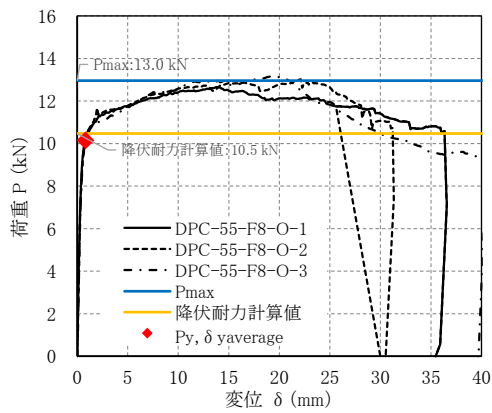


写真 2.7 圧縮試験加力状況



S60-5-5 F8 強軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-55-F8-P-1	14.81	24.08	9.08	0.86	18.94
DPC-55-F8-P-2	12.32	19.20	9.01	0.84	20.09
DPC-55-F8-P-3	15.37	17.82	9.25	0.86	19.96
平均値	14.17	20.36	9.11	0.85	19.66
標準偏差	1.326	2.685	0.098	0.011	0.516
変動係数	0.094	0.132	0.011	0.013	0.026
下限値	9.988		8.803		

(1) 強軸方向(0°)



S60-5-5 F8 弱軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-55-F8-O-1	12.66	13.79	10.19	0.79	26.33
DPC-55-F8-O-2	13.03	22.12	10.16	0.83	24.33
DPC-55-F8-O-3	13.19	19.33	10.10	0.83	24.56
平均値	12.96	18.41	10.15	0.82	25.07
標準偏差	0.222	3.465	0.039	0.019	0.894
変動係数	0.017	0.188	0.004	0.023	0.036
下限値	12.260		10.028		

(2) 弱軸方向(90°)

図 2.8 単位接合部圧縮荷重-変位関係と特性値 (強度等級 S60-5-5, DPφ8)

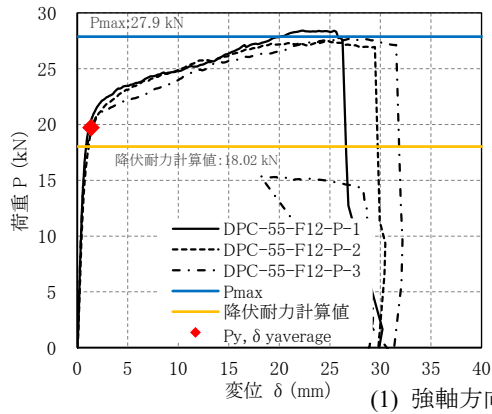


(1) 強軸方向 左から試験体 P-1,P-2,P-3



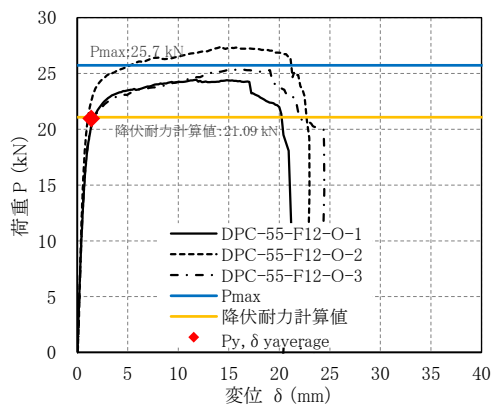
(2) 弱軸方向 左から試験体 O-1,O-2,O-3

写真 2.8 単位接合部圧縮試験損傷状況 (強度等級 S60-5-5, DPφ8)



S60-5-5 F12 強軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-55-F12-P-1	28.41	22.21	20.23	1.33	29.61
DPC-55-F12-P-2	27.47	24.89	19.49	1.43	25.26
DPC-55-F12-P-3	27.73	27.39	19.46	1.34	26.57
平均値	27.87	24.83	19.73	1.36	27.14
標準偏差	0.396	2.118	0.358	0.044	1.822
変動係数	0.014	0.085	0.018	0.032	0.067
下限値	26.621		18.597		

(1) 強軸方向(0°)



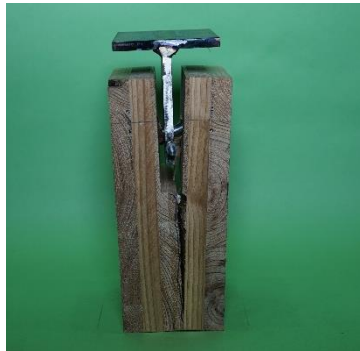
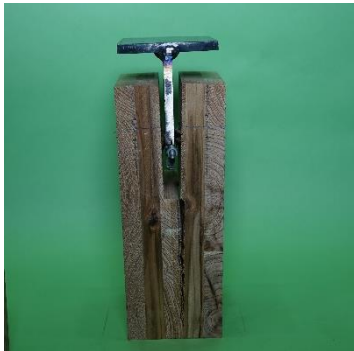
S60-5-5 F12 弱軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-55-F12-O-1	24.43	11.78	20.29	1.42	25.25
DPC-55-F12-O-2	27.43	14.28	22.41	1.35	33.04
DPC-55-F12-O-3	25.36	15.15	20.22	1.37	28.41
平均値	25.74	13.74	20.97	1.38	28.90
標準偏差	1.254	1.427	1.015	0.028	3.196
変動係数	0.049	0.104	0.048	0.020	0.111
下限値	21.788		17.773		

(2) 弱軸方向(90°)

図 2.9 単位接合部圧縮荷重－変位関係と特性値（強度等級 S60-5-5, DPφ12）

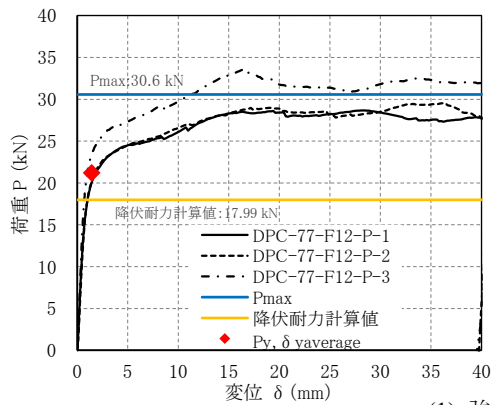


(1) 強軸方向 左から試験体 P-1,P-2,P-3



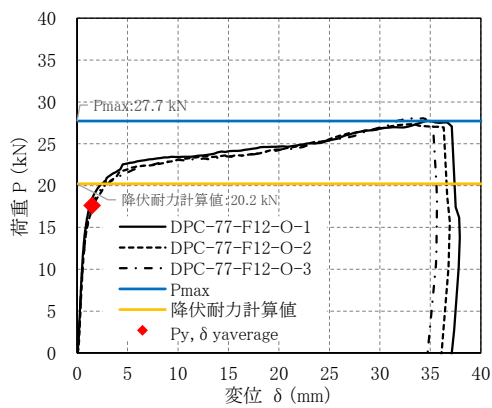
(2) 弱軸方向 左から試験体 O-1,O-2,O-3

写真 2.9 単位接合部圧縮試験損傷状況 (強度等級 S60-5-5, DPφ12)



強軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-77-F12-P-1	28.67	28.32	20.02	1.43	24.92
DPC-77-F12-P-2	29.52	36.31	20.32	1.48	24.71
DPC-77-F12-P-3	33.55	16.42	23.27	1.39	30.81
平均値	30.58	27.02	21.20	1.43	26.81
標準偏差	2.129	8.169	1.468	0.036	2.825
変動係数	0.070	0.302	0.069	0.025	0.105
下限値	23.871		16.575		

(1) 強軸方向(0°)



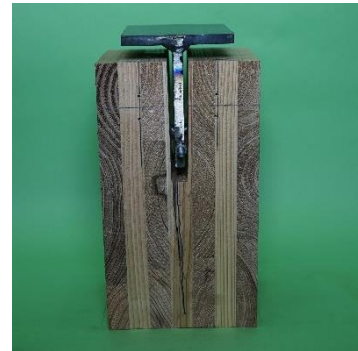
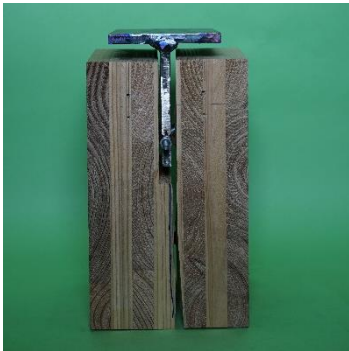
弱軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-77-F12-O-1	27.74	34.73	18.25	1.43	24.34
DPC-77-F12-O-2	27.33	33.11	17.05	1.46	23.13
DPC-77-F12-O-3	28.08	33.52	17.59	1.52	20.50
平均値	27.72	33.78	17.63	1.47	22.66
標準偏差	0.307	0.689	0.493	0.039	1.602
変動係数	0.011	0.020	0.028	0.026	0.071
下限値	26.750		16.077		

(2) 弱軸方向(90°)

図 2.10 単位接合部圧縮荷重-変位関係と特性値 (強度等級 S60-7-7, DPφ12)

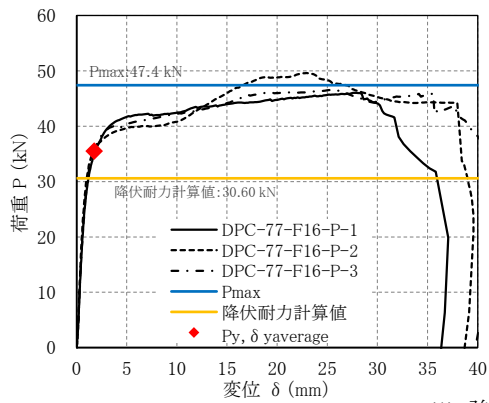


(1) 強軸方向 左から試験体 P-1,P-2,P-3



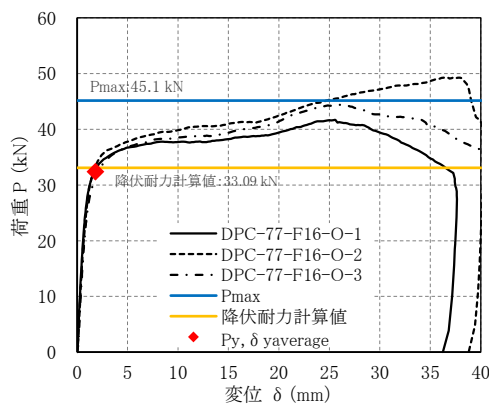
(2) 弱軸方向 左から試験体 O-1,O-2,O-3

写真 2.10 単位接合部圧縮試験損傷状況 (強度等級 S60-7-7, DPφ12)



強軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-77-F16-P-1	46.05	27.90	35.08	1.78	38.08
DPC-77-F16-P-2	49.60	22.94	35.46	1.68	42.63
DPC-77-F16-P-3	46.55	25.19	36.01	1.80	37.66
平均値	47.40	25.35	35.52	1.76	39.45
標準偏差	1.569	2.029	0.382	0.051	2.252
変動係数	0.033	0.080	0.011	0.029	0.057
下限値	42.455		34.315		

(1) 強軸方向(0°)



弱軸 圧縮	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_y (kN)	δ_y (mm)	K (kN/mm)
DPC-77-F16-O-1	41.70	25.59	32.18	1.69	36.86
DPC-77-F16-O-2	49.33	37.35	33.57	1.87	32.41
DPC-77-F16-O-3	44.39	26.05	31.51	1.86	31.48
平均値	45.14	29.66	32.42	1.81	33.58
標準偏差	3.160	5.439	0.858	0.083	2.344
変動係数	0.070	0.183	0.026	0.046	0.070
下限値	35.180		29.716		

(2) 弱軸方向(90°)

図 2.11 単位接合部圧縮荷重-変位関係と特性値 (強度等級 S60-7-7, DPφ16)



(1) 強軸方向 左から試験体 P-1,P-2,P-3



(2) 弱軸方向 左から試験体 O-1,O-2,O-3

写真 2.11 単位接合部圧縮試験損傷状況 (強度等級 S60-7-7, DPφ16)

2.4. ドリフトピン接合部パネルせん断試験

四辺をドリフトピン接合された CLT パネルのせん断試験を行った。試験体図と載荷装置写真を図 2.12 に示す。CLT 幅及び高さは 540mm とし、その保有せん断力に対して DP の曲げ降伏が見られるように DP 本数を決定した。試験体の仕様を表 2.8 に示す。すべての試験体の鋼板厚さは 9mm、スリット厚さは 11mm とした。各仕様に対して 3 体を試験に供する。

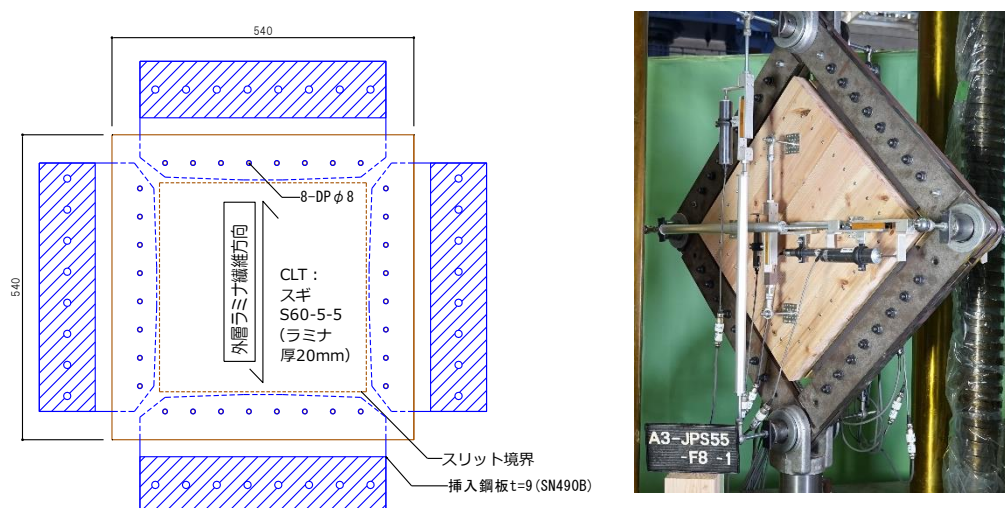


図 2.12 接合部パネル試験試験体図・載荷装置写真

表 2.8 接合部パネルせん断試験 仕様一覧

強度等級	CLT 厚さ	DP 径	DP 本数(一辺)	試験体名
S60-5-5	100mm	Φ=8	8	A3-JDP-55-F8(-1~3)
		Φ=12	4 : 均等配置	A3-JDP-55-F12(-1~3)
		Φ=12	4 : 中央配置	A3-JDP-55-F12C(-1~3)
S60-7-7	140mm	Φ=12	6	A3-JDP-77-F12(-1~3)
		Φ=16	4	A3-JDP-77-F16(-1~3)

特性値の算出方法は以下の通りとした。

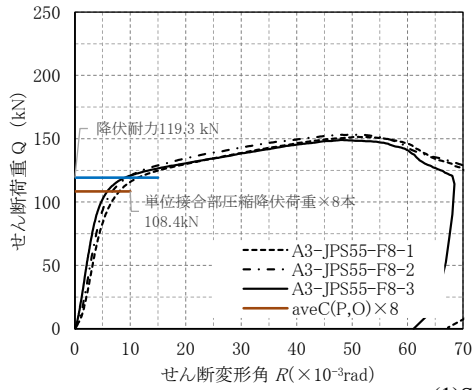
せん断荷重 Q $P/\sqrt{2}$ (P は引張荷重)

せん断変形角 R 裏表で計測したせん断変形角の平均値

降伏荷重 Q_y $Q-R$ 曲線において $0.1Q_{max}$ の点と $0.4Q_{max}$ の点を結んだ直線と、 $0.85Q_{max}$ の点と $0.95Q_{max}$ の点を結んだ直線との交点の荷重

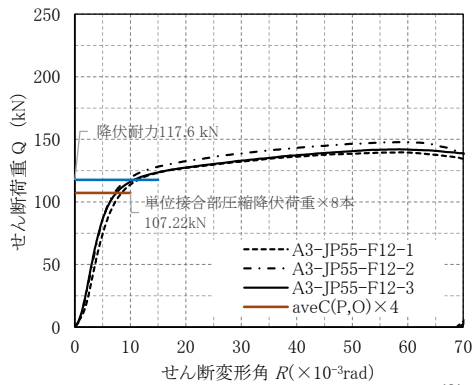
初期剛性 K $Q-R$ 曲線上の降伏荷重となる時の点と原点を結んだ直線の傾き

図 2.13 および図 2.14 に試験結果を示す。各試験体の損傷状況を写真 2.12 および写真 2.13 に示す。合わせて C(P,O):強軸・弱軸の単位接合部圧縮試験の降伏荷重平均値を本数倍した荷重をプロットした。



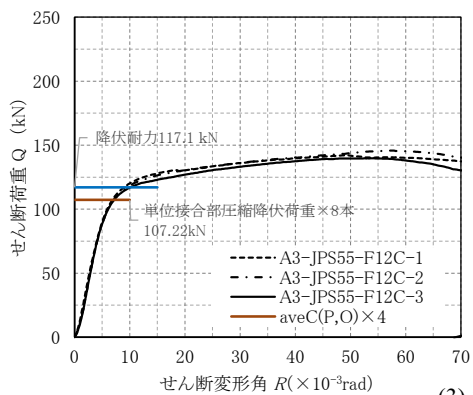
S60-5-5 DP: 8-Φ8	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
A3-JPS55-F8-1	118.3	18689	151.4
A3-JPS55-F8-2	121.0	20836	153.1
A3-JPS55-F8-3	118.6	25529	148.9
平均值	119.3	21685	151.2
標準偏差	1.2	2856	1.7
変動係数	0.010	0.132	0.011
下限値	115.5	20340	145.7

(1) S60-5-5($\phi 8$)



S60-5-5 P: 4-Φ12	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
A3-JP55-F12-1	115.1	16400	139.6
A3-JP55-F12-2	120.9	18794	147.8
A3-JP55-F12-3	116.7	19083	142.0
平均值	117.6	18092	143.2
標準偏差	2.4	1203	3.5
変動係数	0.021	0.066	0.024
下限値	109.9	17526	132.3

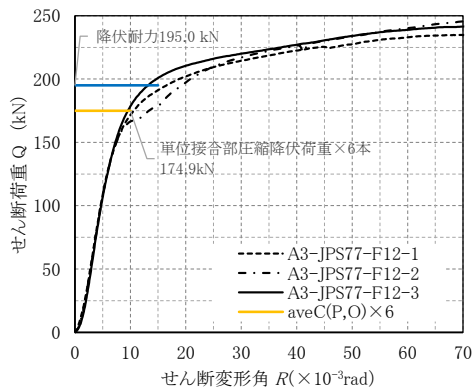
(2) S60-5-5($\phi 12$) 均等配置



S60-5-5 DP: 4-Φ12	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
A3-JPS55-F12C-1	117.2	20087	142.2
A3-JPS55-F12C-2	119.3	19463	145.8
A3-JPS55-F12C-3	114.8	19676	139.8
平均值	117.1	19742	142.6
標準偏差	1.8	259	2.5
変動係数	0.016	0.013	0.017
下限値	111.4	19620	134.7

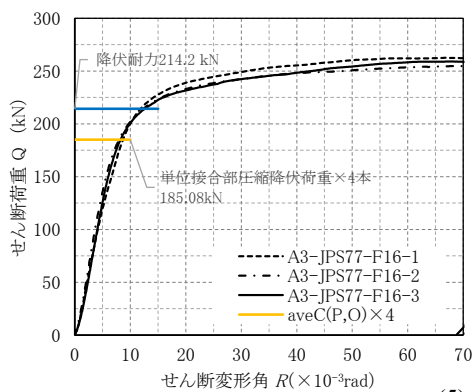
(3) S60-5-5($\phi 12$) 中央配置

図 2.13 パネルせん断荷重－せん断変形角関係と特性値 S60-5-5 シリーズ



S60-7-7 DP:6-Φ12	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
A3-JPS77-F12-1	188.6	23585	234.9
A3-JPS77-F12-2	198.8	23542	252.4
A3-JPS77-F12-3	197.7	23916	241.8
平均値	195.0	23681	243.0
標準偏差	4.6	167	7.2
変動係数	0.023	0.007	0.030
下限値	180.6	23602	220.4

(4) S60-7-7($\phi 12$)



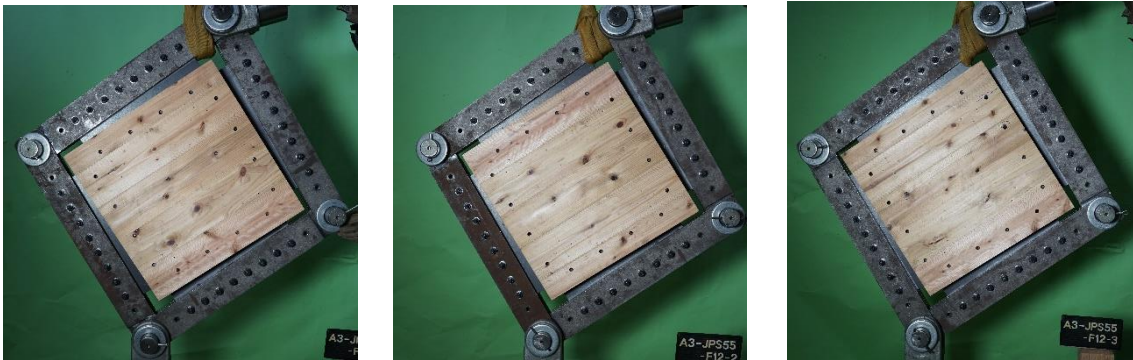
S60-7-7 :4-Φ16	Q_y (kN)	K (kN/rad)	Q_{max} (kN)
A3-JPS77-F16-1	220.9	25053	268.4
A3-JPS77-F16-2	208.6	28797	255.4
A3-JPS77-F16-3	213.3	26509	259.4
平均値	214.2	26786	261.1
標準偏差	5.1	1541	5.4
変動係数	0.024	0.058	0.021
下限値	198.2	26060	244.0

(5) S60-7-7($\phi 16$)

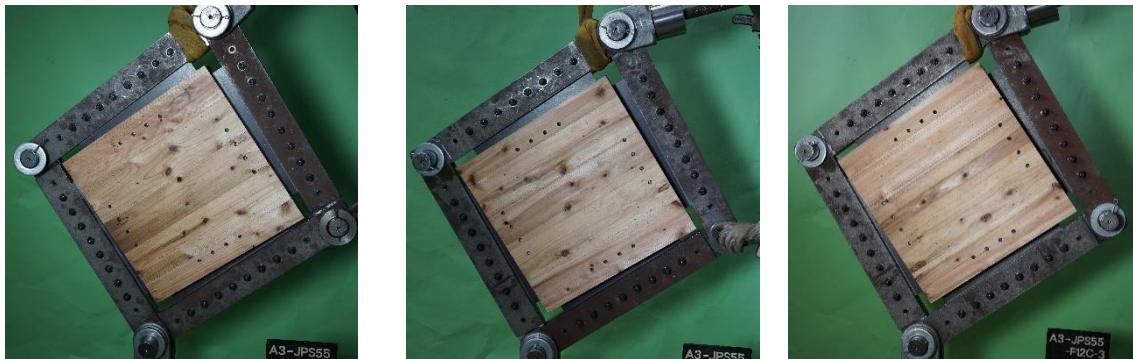
図 2.14 パネルせん断荷重-せん断変形角関係と特性値 S60-7-7 シリーズ



(1) 左から試験体 A3-JPS55-F8-1, F8-2, F8-3



(2) 左から試験体 A3-JPS55-F12-1, F12-2, F12-3



(3) 左から試験体 A3-JPS55-F12C-1, F12C-2, F12C-3

写真 2.12 パネルせん断試験損傷状況 S60-5-5 シリーズ



(4) 左から試験体 A3-JPS77-F12-1, F12-2, F12-3



(5) 左から試験体 A3-JPS77-F16-1, F16-2, F16-3

写真 2.13 パネルせん断試験損傷状況 S60-7-7 シリーズ

3. 考察

3.1. PS試験の実験値降伏耐力と単位接合部圧縮試験の実験値降伏耐力の比較

表 3.1 に昨年度（令和 4 年度）と今年度（令和 5 年度）に実験を実施した試験体のパラメータを一覧で示す。○の記載されたパラメータについて各 3 体を試験に供した。

表 3.1 接合部試験パラメータ一覧

層プライ-DP径	l	d	l/d	実施年度	単位接合部圧縮			単位接合部引張			パネルせん断試験
					P	O	D	P	O	D	
55-F8	100	8	12.50	R5	○	○					○
55-F10	100	10	10.00	R4	○	○	○	○	○	○	○
55-F12	100	12	8.33	R5	○	○					○
55-F14	100	14	7.14	R4	○	○	○	○	○	○	○
77-F12	140	12	11.67	R5	○	○					○
77-F14	140	14	10.00	R4	○	○	○	○	○	○	○
77-F16	140	16	8.75	R5	○	○					○

図 3.1 に PS 試験の実験値降伏耐力と単位接合部圧縮試験の実験値降伏耐力の比較を示す。ここで、PS 試験実験値は各パラメータで 3 体の平均とする。(a)には加力方向別の結果を、(b)には全体の結果を示す。

加力方向に関わらず、PS 試験の降伏耐力 Q_y と単位接合部試験の降伏耐力 P_y には線形関係が見られた。加力方向 P (◆) は Q_y が P_y の 1.54 倍、加力方向 O (●) は 1.62 倍の結果となりその差異は小さい。P,O 全体でみるとその倍率は P, O の平均的な値となり、 Q_y は P_y の 1.57 倍であり、単位接合部試験結果があれば PS 試験の耐力 Q_y を次式で求めることが出来る。

$$Q_y = 1.57P_y \quad (1)$$

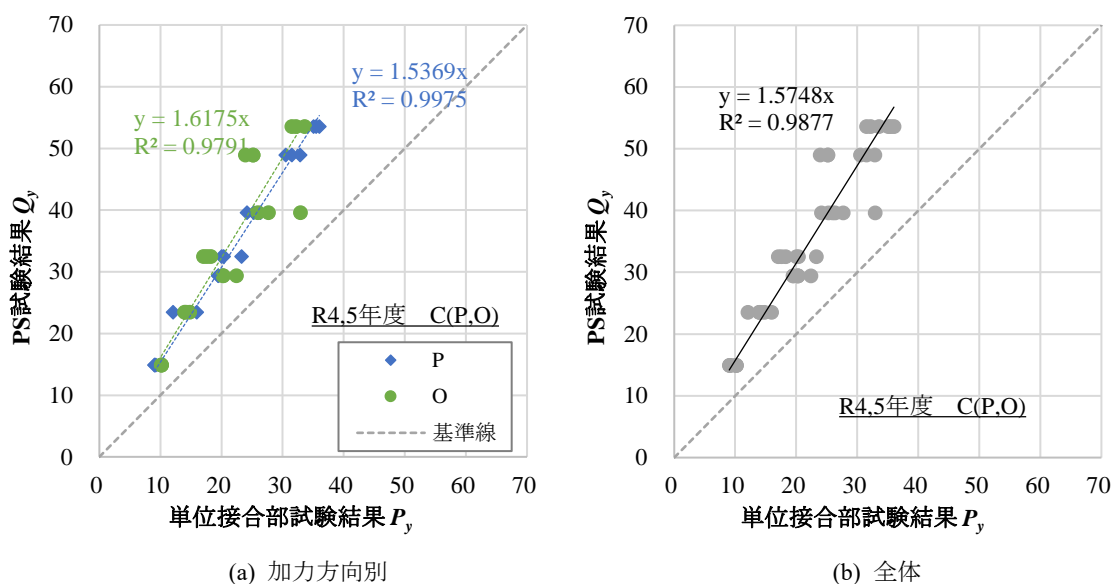


図 3.1 PS 試験と単位接合部圧縮試験の降伏耐力比較（令和 4,5 年度）

図 3.2 に、縦軸に Q_y/P_y の比を、横軸に CLT 厚さと DP 径の比 l/d をとった散布図を示す。昨年度の考察で述べた板厚と DP 径の比 (%) とは逆数になっていることに注意されたい。図 3.3 には昨年度の考察で掲載した図を示すが、これは昨年(令和 4 年)度の P, O, C それぞれのパラメータの平均値をプロットしている。同じく図 3.3 には図 3.2 のデータのうち令和 4 年度分のみを抜粋して示した。こちらは各パラメータの平均値ではなく、単位接合部圧縮試験のデータ全数をプロットした。

昨年度の考察においては版厚と DP 径をパラメータとしてデータを蓄積することで、ある程度耐力を推定できる可能性があることを示唆していたが、今年度の結果を合わせて分析すると、 l/d と Q_y/P_y にはほとんど相関がないことがわかった。

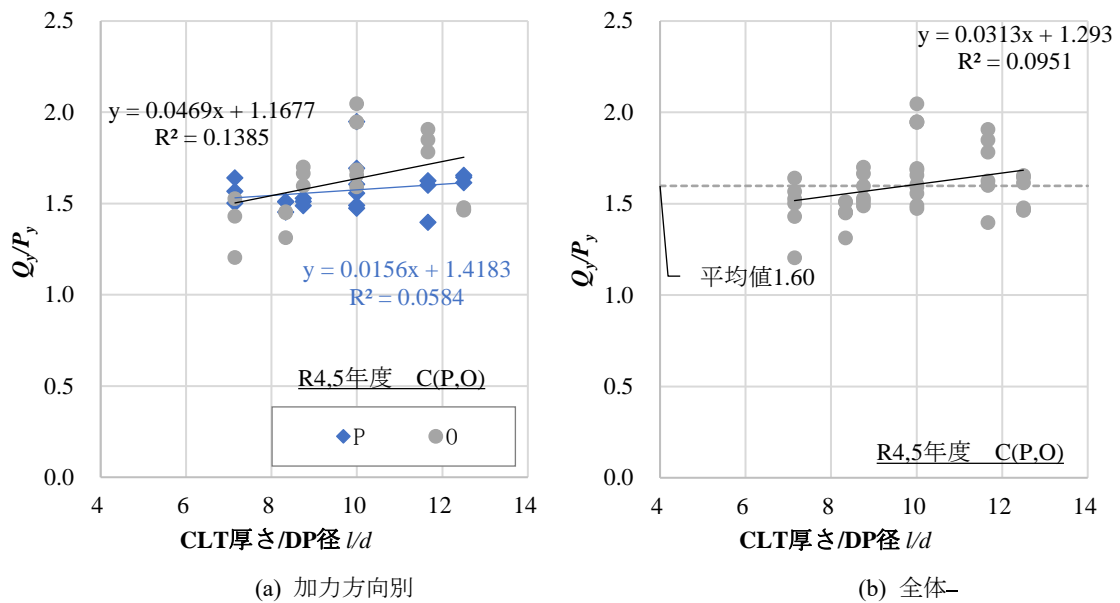


図 3.2 パネルせん断試験と単位接合部試験の降伏耐力比と l/d の相関関係

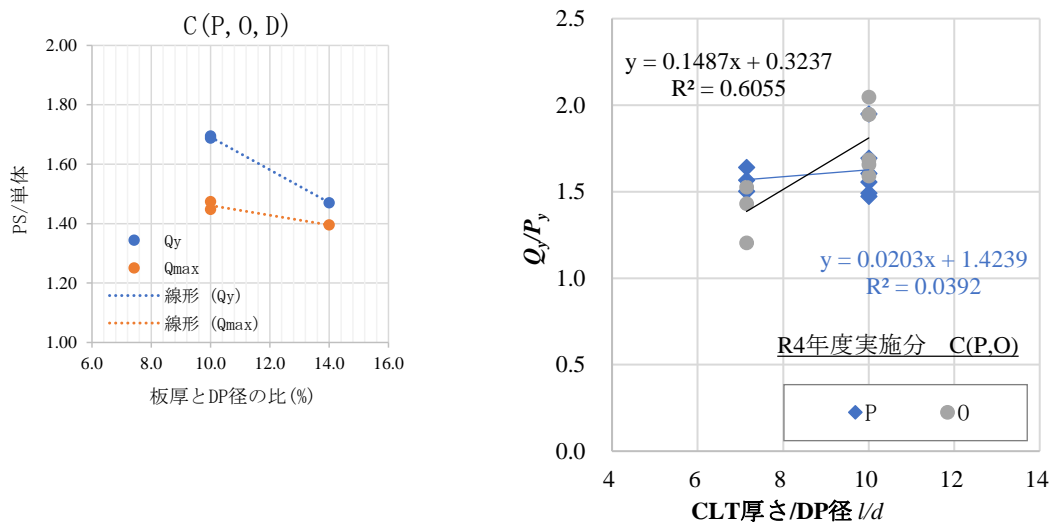


図 3.3 パネルせん断試験と単位接合部試験の降伏耐力比と l/d の相関関係 (令和 4 年度抜粋)

3.2. 計算降伏耐力と各種結果の比較

それぞれの試験に対して、計算降伏耐力 $calP_y$ との比較を行う。計算降伏耐力は中島らによる提案式^{3,4)}により算出した。ここで、CLT およびドリフトピンの材料諸元は各年度の材料試験値による。ただし支圧強度は木質構造設計規準^{2,3)}より以下の式で算出した。

$$F_{ell} = 60.68\rho$$

$$F_{e\perp} = 0.5F_{ell}$$

ここで、 ρ :圧縮試験体で計測した比重(g/cm³)

単位接合部試験の計算耐力は中央層の支圧強度に応じて、加力角度によって異なる値として求められる。

一方で、パネルせん断試験は加力方向 P、O 双方の性格を持つと考え、P と O の計算値の平均とした。計算結果を表 3.2 および表 3.3 に示す。

表 3.2 鋼板挿入 DP 接合部計算降伏耐力 (令和 5 年度実施分)

項目	記号	単位	55-F8		55-F12		77-F12		77-F16	
			P	O	P	O	P	O	P	O
スリット厚	s	mm	11	11	11	11	11	11	11	11
スリット厚さを引いた中央層の厚さの半分	t_1	mm	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
ラミナの厚さ	t_2	mm	20	20	20	20	20	20	20	20
ドリフトピン径	d	mm	8	8	12	12	12	12	16	16
中央層の支圧強度	f_1	N/mm ²	27.03	13.52	27.03	13.52	25.94	12.97	25.94	12.97
中央層に隣接する層の支圧強度	f_2	N/mm ²	13.52	27.03	13.52	27.03	12.97	25.94	12.97	25.94
接合具の基準強度	F	N/mm ²	587	587	593	593	593	593	589	589
モード I	P_{yI}	kN	14.92	13.95	22.38	20.92	27.70	32.53	36.94	43.37
モード III	P_{y3}	kN	8.41	9.45	17.53	19.22	18.54	20.18	31.21	33.08
モード IV	P_{y4}	kN	10.76	12.04	25.27	26.04	24.81	25.44	45.27	43.45
判別値 X1			1.183	0.836	1.177	0.832	1.153	0.815	1.157	0.818
判別値 X2			4.629	6.385	4.606	6.352	4.512	6.223	4.527	6.244
判別式 1	$d \leq X1$		13165	9309	29773	21053	29165	20623	51674	36539
判別式 2	$X1 < d < X2$		12178	13237	25381	29844	24778	29232	42095	51742
判別式 3	$X2 \leq d$		10760	12041	25269	26037	24807	25438	45272	43446
降伏耐力計算値	P_y	kN	8.41	9.45	17.53	19.22	18.54	20.18	31.21	33.08
モード			III	III	III	III	III	III	III	III
平均値(P,O)	$P_{y(p,o)}$	kN	8.93		18.38		19.36		32.15	

表 3.3 鋼板挿入 DP 接合部計算降伏耐力 (令和 4 年度実施分)

項目	記号	単位	55-F10			55-F14			77-F14		
			P	O	D	P	O	D	P	O	D
スリット厚	s	mm	8	8	8	11	11	11	11	11	11
スリット厚さを引いた中央層の厚さの半分	t_1	mm	6	6	6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
ラミナの厚さ	t_2	mm	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ドリフトピン径	d	mm	10	10	10	14	14	14	14	14	14
中央層の支圧強度	f_1	N/mm ²	25.33	12.67	16.89	25.33	12.67	16.89	25.33	12.67	16.89
中央層に隣接する層の支圧強度	f_2	N/mm ²	12.67	25.33	16.89	12.67	25.33	16.89	12.67	25.33	16.89
接合具の基準強度	F	N/mm ²	628	628	628	628	628	628	628	628	628
モード I	P_{yI}	kN	18.24	16.72	15.54	24.47	22.88	21.04	31.57	37.06	30.50
モード III	P_{y3}	kN	12.55	13.45	12.13	23.91	25.47	23.37	24.66	26.31	23.79
モード IV	P_{y4}	kN	17.44	18.15	16.82	35.05	34.33	32.96	35.05	34.33	32.96
判別値 X1			1.476	1.044	1.205	1.107	0.783	0.904	1.106953	0.782734	0.903817
判別値 X2			4.641	6.310	5.222	4.333	5.976	4.921	4.332841	5.975701	4.920779
判別式 1	$d \leq X1$		20598	14565	16818	40371	28547	32963	40371.17	28546.72	32962.66
判別式 2	$X1 < d < X2$		19045	20709	18844	33290	40434	35091	33290.18	40434.21	35090.67
判別式 3	$X2 \leq d$		17437	18146	16818	35046	34332	32963	35046.18	34332.34	32962.66
降伏耐力計算値	P_y	kN	12.55	13.45	12.13	23.91	22.88	21.04	24.66	26.31	23.79
モード			III	III	III	III	I	I	III	III	III
平均値	$P_{y(p,o)}$	kN	13.00			23.39			25.49		

図 3.4 から図 3.5 に、単位接合部圧縮試験の加力方向 P および O について、計算降伏耐力と実験結果の比較を示す。加力方向別でみると、P (◆) の実験値が 15%前後高い傾向にあり、O (●) は実験値が計算値と概ね一致する傾向にあった。全体で見ると、どちらの年でも実験結果が計算値より 5~10%程度高く、その差は小さい。そこで、図 3.6 に両年をまとめて示した。全体では 8%程度高くなり、単位接合部試験の耐力 P_y は次式で求まる。

$$P_y = 1.08_{cal}P_y \quad (2)$$

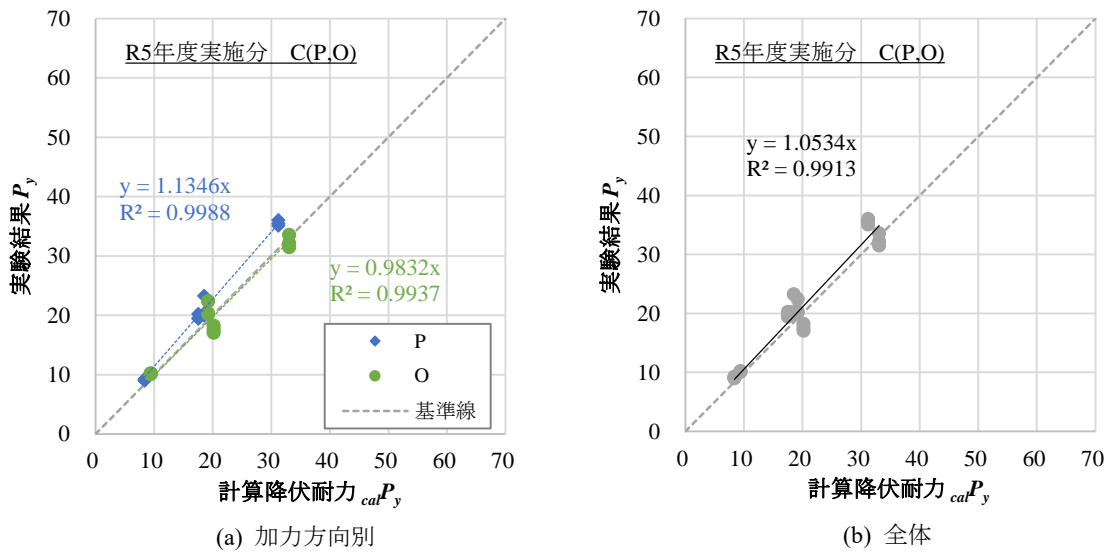


図 3.4 単位接合部圧縮試験結果と計算降伏耐力(令和 5 年度)

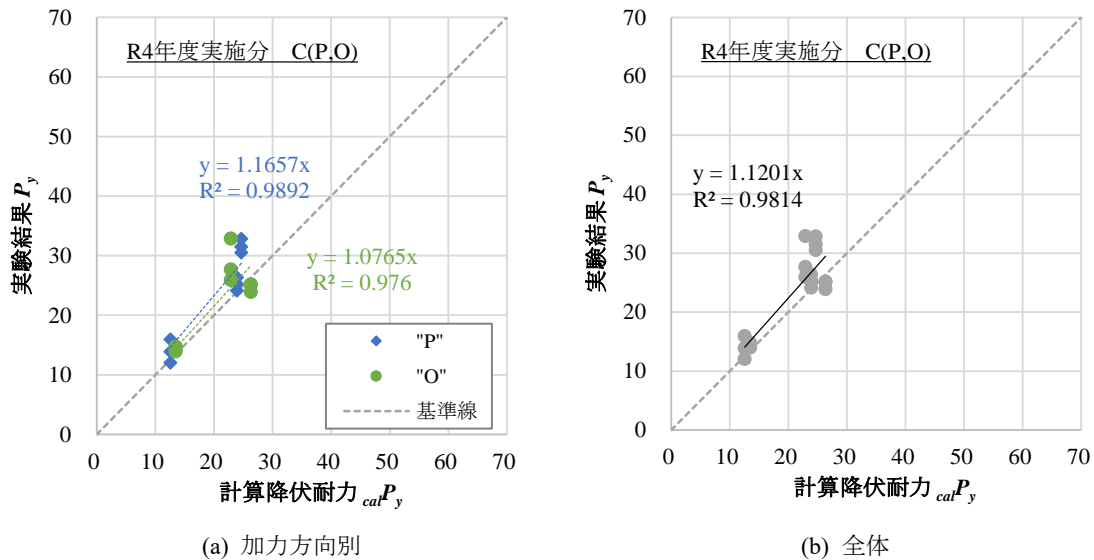


図 3.5 単位接合部圧縮試験結果と計算降伏耐力(令和 4 年度)

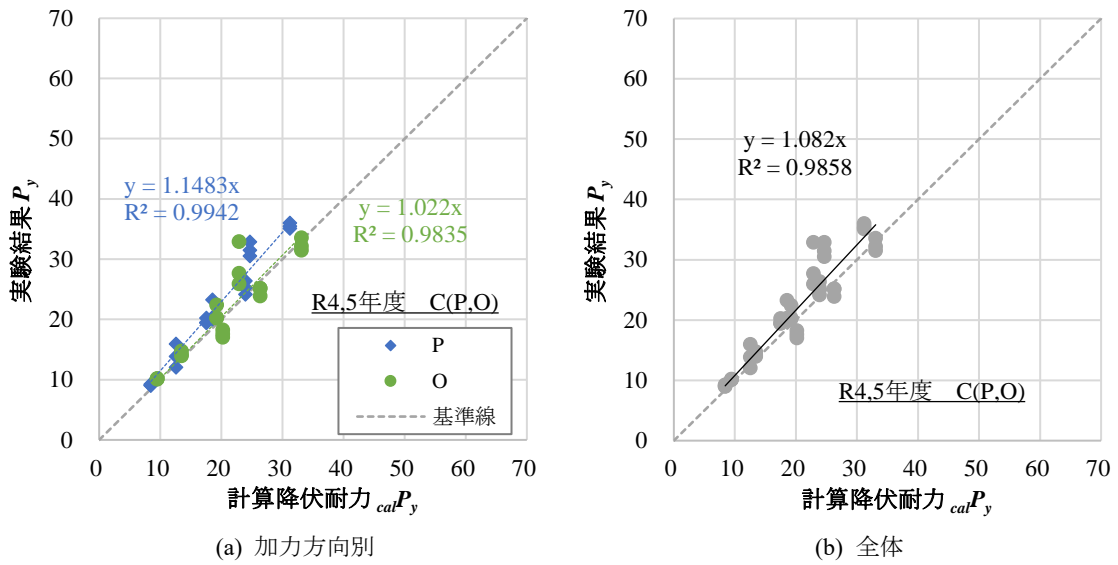


図 3.6 単位接合部圧縮試験結果と計算降伏耐力(令和 4,5 年度)

単位接合部試験と同様に、令和 4~5 年度の PS 試験の全試験体について、図 3.7 に計算降伏耐力と実験結果の関係を示す。図 3.7(a)は計算降伏耐力を P, O それぞれで示し、(b)の計算降伏耐力は PO の平均とした。計算値 P と比較すると 77%, 計算値 O と比較すると 68%程度と大幅に大きい結果となったものの、P, O の差は小さい。そこで、PO の平均した計算降伏耐力でみると実験値は計算値より 72%程度大きい結果であり、PS 試験の耐力 Q_y は次式で求まる。

$$Q_y = 1.72_{cal}P_y \quad (3)$$

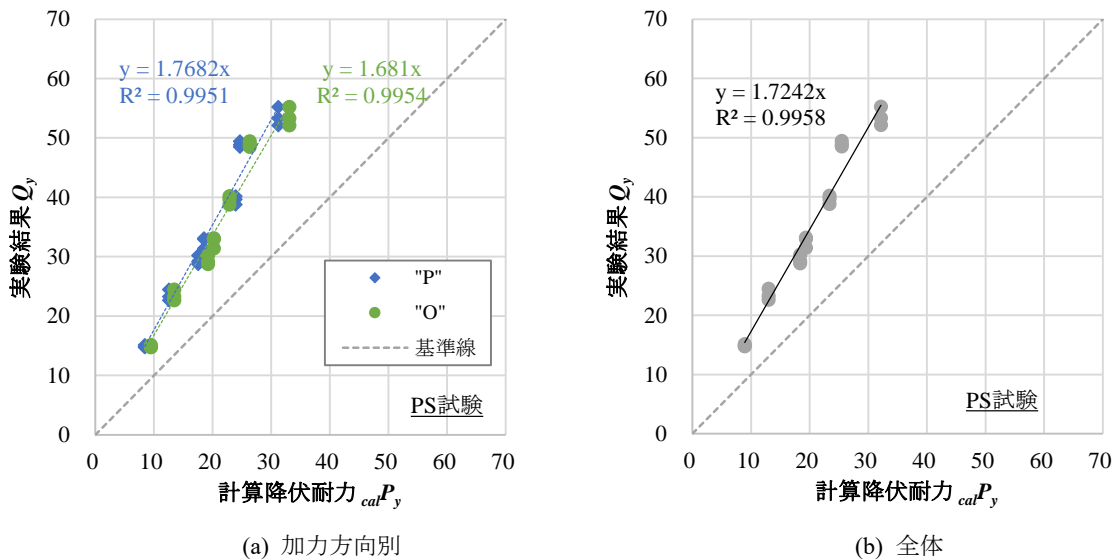


図 3.7 PS 試験実験結果と計算降伏耐力の比較

3.3. 最大耐力と降伏耐力の比

図 3.8 に単位接合部圧縮試験の最大耐力と降伏耐力の散布図を示す。最大耐力は降伏耐力と強い線形関係があり、1.36 倍となった。加力方向別で描画しても回帰直線はほぼ一致し、加力方向に差がない。図 3.9 にパネルせん断試験の最大耐力と降伏耐力の散布図を示す。パネルせん断試験でも最大耐力は降伏耐力と強い相関関係を示し、降伏耐力の 1.22 倍となった。ただし、パネルせん断試験の最大耐力は荷重低下ではなく、加力可能域の限界で決まったケースが多い。そのため単位接合部圧縮試験の結果を考慮すると最大耐力はさらに大きい可能性がある。

以上より、それぞれの試験の最大耐力 P_{\max} 、 Q_{\max} は次式で表される。

$$P_{\max} = 1.36P_y \quad (4)$$

$$Q_{\max} = 1.22Q_y \quad (5)$$

また、計算降伏耐力 $calP_y$ を用いれば 3.2 節からそれぞれ次式で表される。

$$P_{\max} = 1.47 calP_y \quad (6)$$

$$Q_{\max} = 2.10 calP_y \quad (7)$$

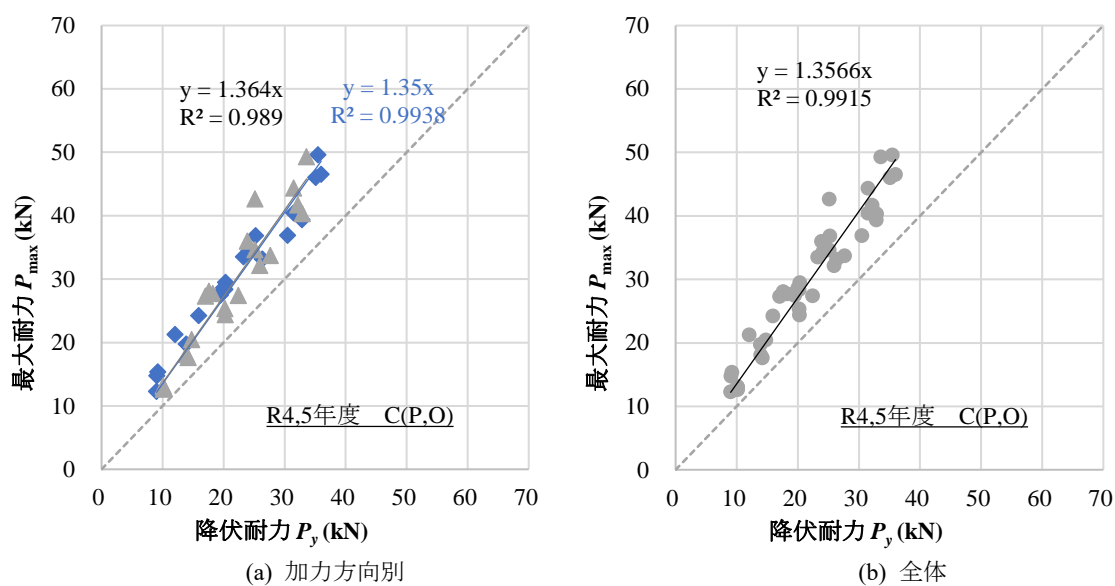


図 3.8 最大耐力と降伏耐力の比較（単位接合部圧縮試験）

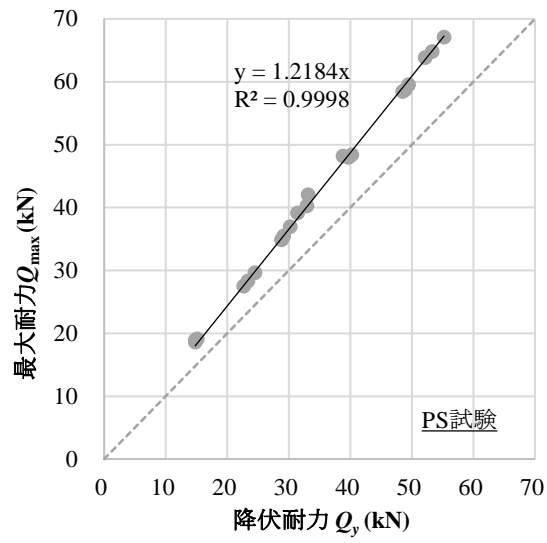


図 3.9 最大耐力と降伏耐力の比較（パネルせん断試験）

<参考文献>

- 3.4) 中島昌一，三木徳人，秋山信彦，荒木康弘：鋼板挿入 CLT ドリフトピン接合部の最大耐力，降伏耐力および初期剛性の推定と実験による検証，日本建築学会構造系論文集，2021.5

4. おわりに

本章では、CLT の版厚と DP 径のバリエーションを増やしデータの蓄積をすることを目的として、接合部パネルせん断試験及び単位接合部圧縮試験を行った。昨年度と本年度を合わせるとパラメータは、S60-5-5、厚さ 100mm の CLT に対して DP 径を $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 14$ とし、S60-7-7、厚さ 140mm の CLT に対して DP 径を $\phi 12$ 、 $\phi 14$ 、 $\phi 16$ とした。本年度は 2 年分の接合部パネルせん断試験と単位接合部圧縮試験の結果を合わせて考察し、以下の結論を得た。

- 1) 接合部パネルせん断試験の実験から求められる DP 1 本あたりの降伏耐力 Q_y は、単位接合部圧縮試験の実験から求められる降伏耐力 P_y と強い線形の相関が認められた。 Q_y は P_y より 57%大きく、次式で表される。

$$Q_y = 1.57P_y \quad (1)$$

- 2) 接合部パネルせん断試験と単位接合部圧縮試験の降伏耐力比 Q_y/P_y は、単位接合部圧縮試験の降伏耐力 P_y との相関は認められなかった。また、CLT 版厚 l と DP 径 d の比 l/d との相関も認められなかった。
- 3) 単位接合部圧縮試験の実験から求められる降伏耐力は、材料強度により求めた計算降伏耐力に対して 8%大きく、次式で表される。

$$P_y = 1.08_{cal}P_y \quad (2)$$

- 4) 接合部パネルせん断試験の実験から求められる DP 1 本あたりの降伏耐力は、上記の計算降伏耐力に対して 72%大きく、次式で表される。

$$Q_y = 1.72_{cal}P_y \quad (3)$$

- 5) 実験による最大耐力と降伏耐力についても強い線形の相関が認められ、単位接合部圧縮試験では 1.36 倍、接合部パネルせん断試験では 1.22 倍となり、次式で表される。ただし接合部パネルせん断試験では加力限度により最大値が決まっており、実現象をとらえていない可能性が高い。

$$P_{\max} = 1.36P_y \quad (4)$$

$$Q_{\max} = 1.22Q_y \quad (5)$$

また、計算降伏耐力 $_{cal}P_y$ を用いればそれぞれ次式で表される。

$$P_{\max} = 1.47_{cal}P_y \quad (6)$$

$$Q_{\max} = 2.10_{cal}P_y \quad (7)$$

IV. 設計ガイドラインの作成

1. はじめに

ここでは第Ⅱ章の構造実験結果をもとに CLT 耐震壁の荷重-変形角関係をモデル化する。また、CLT 耐震壁の荷重-変形角関係をブレース置換により再現する方法を示し、低層建物の試設計例を示す。

2. CLT 耐震壁の荷重-変形角関係モデル

第Ⅱ章に示した試験体について、CLT 耐震壁の荷重-変形角関係をモデル化する。CLT 耐震壁は以下の方針でモデル化し、実験結果を解析によりトレースすることでモデル化の妥当性を確認する。

【モデル化方針】

- ・ CLT は 1 組の X 字型ブレースに置換する。(図 2.1)
- ・ 復元力特性は、終局変形角までの累積吸収エネルギーが実験結果と等価なバイリニアモデルとする。
- ・ バイリニアモデルの初期剛性は、実験から得られた CLT のスケルトンカーブにおいて最大荷重の 0.1 倍と 0.4 倍の点を結んだ線分の勾配とする。
- ・ 累積吸収エネルギーを算出する際の終局変形角は、RC フレームの D_s 値が 0.30 となるように設定する。

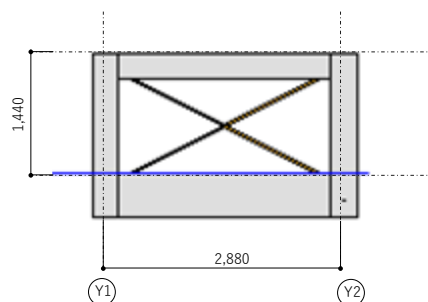


図 2.1 試験体のブレース置換モデル

以下に、モデル化の具体的な手順を示す。

① RC フレームの D_s 値と終局変形角の検討

本年度に実施した実験^{4.1),4.2)}の試験体 RC フレームは、2022 年度に実施した実験の RC フレームと同一の仕様であることから、終局変形角は 2022 年度実験の試験体に準じて設定する。

2022 年度実験の RC フレームのみの試験体である A2-F 試験体の実験結果を用いて、まず下式により RC フレームの等価粘性減衰定数 h_{eq} を求める。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right)$$

ΔW : 履歴ループ 1 サイクルの面積

$$W_e: \text{等価ポテンシャルエネルギー} \left(= \frac{1}{2} \cdot k_e \cdot a^2 \right)$$

a : 履歴ループ片振幅(層間変形角 = $\pm 1.0/1,000\text{rad}$ における値)

実験結果を用いて上式に従って等価粘性減衰定数 h_{eq} を求めると、 $h_{eq}=0.043$ となる。

次に、RC フレームのスケルトンを初期剛性 $rc k_0$ ・降伏荷重 $rc Q_y$ を持つバイリニアモデルに置換し、塑性率 μ を求める。初期剛性は実験から得られた RC フレームのスケルトンカーブにおいて最大荷重の 0.1 倍と 0.4 倍の点を結んだ線分の勾配とする。降伏荷重 $rc Q_y$ は、終局変形角までのバイリニアモデルの累積吸収エネルギーが、実験から得られたスケルトンカーブの終局変形角までの累積吸収エネルギーと等価になるように設定する。

A2-F 試験体の柱梁は告示に従うと FA ランク部材であり、設計上の D_s は 0.30 となる。上記の手順において終局変形角を 22/1,000rad としてバイリニアモデルへの置換を行い、下式に従って D_s 値を求めると $D_s=0.30$ となる。なお、この場合は塑性率 $\mu=6.52$ となる。実験で得られた A2-F 試験体の荷重-変形角関係の包絡線とバイリニアモデルを図 2.2 に示す。

$$D_s = \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}}$$

$$\text{ここで、} D_h = \frac{1.5}{1+10h_{eq}}$$

今年度の実験で用いた RC フレームと 2022 年度実験の RC フレームでは、厳密には材料試験から得られた材料強度が異なるが、図 2.3 に示す両年度の RC フレーム解析結果から分かる通り、両者の差異はごくわずかである。従って、本年度の試験体についても 22/1,000rad を終局変形角とする。

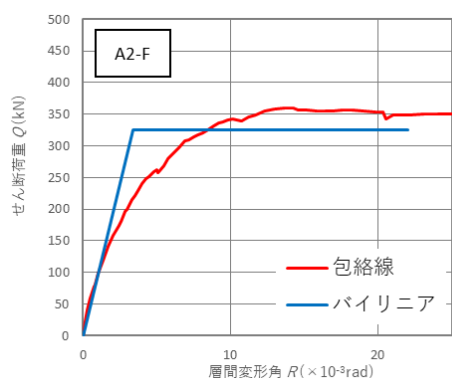


図 2.2 A2-F 試験体
包絡線とバイリニアモデルの比較

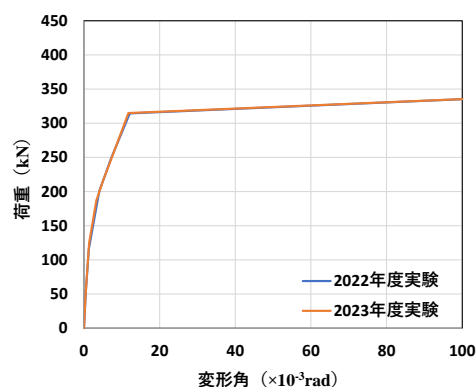


図 2.3 2022 年度・2023 年度 RC フレーム解析結果

②CLT 耐震壁のバイリニアモデル

1)剛性

バイリニアモデルの初期剛性は、各試験体の実験結果から得られる初期剛性とし、CLT 耐震壁のスケルトンカーブにおいて最大荷重の 0.1 倍と 0.4 倍の点を結んだ線分の勾配として設定する。

第 II 章 2.1.1 に示す材料試験結果より、CLT パネルのせん断弾性係数（弱軸方向）の平均値は 845N/mm² であるが、架構内におけるパネルの分割や接合部剛性の影響により、CLT パネルの見かけのせん断剛性は

低下する。そこで、下式の通り剛性低減率 α を定める。

$$\alpha = \frac{e k_0}{G_0 \cdot A_w}$$

ここで、

$e k_0$: 各試験体の CLT 初期剛性 (kN/rad $\times 10^3$)

G_0 : 材料試験で得られた CLT のせん断弾性係数 (=845N/mm²)

A_w : CLT の断面積(= $t_w \cdot l_0$)

t_w : CLT 板厚 (=60mm または 80mm)

l_0 : CLT パネル内法長さの合計 (=2,560mm)

実験結果より、

A3-JDP-60-TR 試験体 : $\alpha = 0.51$, A3-JDP-60-QT 試験体 : $\alpha = 0.48$

A3-JDW-60-TR 試験体 : $\alpha = 0.38$, A3-JDP-80-QT 試験体 : $\alpha = 0.39$

となる。

2)耐力

第 II 章 2.1.1 に示す材料試験から得られた S60-5-5 弱軸方向 CLT のせん断の材料強度 $F_s = 5.452\text{N/mm}^2$ に対し、架構実験において CLT に発生した最大せん断応力度はこの材料強度 F_s を下回っている。これをふまえ、材料強度 F_s にせん断強度低減係数 β を乗じた値を CLT 耐震壁のせん断強度 τ_y として実験のトレースを行う。

せん断強度低減係数 β は、CLT の復元力特性を、初期剛性 $e k_0$ および降伏せん断力 Q_y をもつバイリニアとした場合の終局変形角 (= 22/1,000rad) までの累積吸収エネルギーが、実験で得られた CLT の荷重-変形角関係の包絡線から求まる終局変形角までの累積吸収エネルギーと概ね等しくなるように定めた。すなわち、せん断強度低減係数 β は下式で与えられる。

$$\beta = \frac{Q_y}{F_s \cdot A_w}$$

実験結果と上式を用いてせん断強度低減係数 β を求めると、

A3-JDP-60-TR 試験体 : $\beta = 0.71$, A3-JDP-60-QT 試験体 : $\beta = 0.65$

A3-JDW-60-TR 試験体 : $\beta = 0.55$, A3-JDP-80-QT 試験体 : $\beta = 0.62$

となる。

③ブレースへの置換

1)置換ブレースの剛性

CLT 耐震壁は、接合部の変形を考慮したときのせん断剛性と等価な鉄骨ブレース(X 字配置)に置換する。試験体の CLT は構面内で複数のパネルに分割されているが、ブレースへの置換にあたっては分割された複数の CLT パネルをまとめて 1 組の X 字ブレースに置換する。分割されたそれぞれのパネルごとに CLT を 1 組の X 字ブレースに置換する方が実状に即した解析結果が得られると考えられるが、解析モデルが煩雑

となるため、ここでは分割された複数の CLT をまとめて 1 組のブレースに置換する方法を基本とする。なお、CLT の分割による影響は本節⑤で検討する。

RC フレーム内の CLT のせん断剛性を k_w 、置換ブレース 1 本あたりのせん断剛性を k_b とすると、それぞれ以下のように表される。

$$k_w = \alpha \cdot G_0 \cdot A_w \text{ (kN/rad} \times 10^3)$$

$$k_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_0 \cdot E_s \cdot A_b \cdot \cos^2 \theta}{L_b} \text{ (} \times 10^3 \text{ kN/rad)} \quad \text{(式 1)}$$

ここで、

h_0 : 壁内法高さ(mm)

E_s : 鉄骨ヤング係数(=205,000N/mm²)

A_b : ブレース 1 本あたりの断面積(mm²)

θ : ブレース角度(rad)

L_b : ブレース部材長さ(mm)

L : 柱スパン(mm)

H : 階高さ(mm)

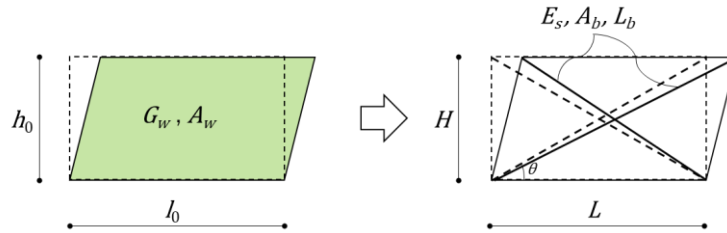


図 2.4 CLT 耐震壁のブレース置換によるモデル化

$k_w = 2 \times k_b$ として置換ブレース 1 本あたりの断面積を求めると、

A3-JDP-60-TR 試験体 : $A_b = 579 \text{ mm}^2$, A3-JDP-60-QT 試験体 : $A_b = 545 \text{ mm}^2$

A3-JDW-60-TR 試験体 : $A_b = 429 \text{ mm}^2$, A3-JDP-80-QT 試験体 : $A_b = 691 \text{ mm}^2$

となる。

2) 置換ブレースの耐力

置換したブレースは圧縮・引張ともに有効とし、1 組(2 本)のブレースの軸耐力の水平成分が CLT パネルのせん断耐力と等価になるよう設定する。CLT パネルのせん断耐力 Q_w は以下の通り定める。

$${}_s N_u = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_w}{\cos \theta}$$

$$Q_w = \beta \cdot F_s \cdot A_w$$

ここで、

${}_s N_u$: 置換ブレース 1 本あたりの降伏軸力

Q_w : CLT 耐震壁のせん断耐力

F_s : 材料試験で得られた CLT のせん断強度

上式に従って各試験体の sN_u , Q_w を求めると,

A3-JDP-60-TR 試験体 : $sN_u = 332\text{kN}$, A3-JDP-60-QT 試験体 : $sN_u = 304\text{kN}$

A3-JDW-60-TR 試験体 : $sN_u = 259\text{kN}$, A3-JDP-80-QT 試験体 : $sN_u = 434\text{kN}$

となる.

以上に基づき, CLT 耐震壁を鉄骨ブレースに置換して実験結果をトレースした結果を図 2.5 に示す. いずれの試験体も, バイリニアモデルにより実験結果を概ね安全側に表現できている.

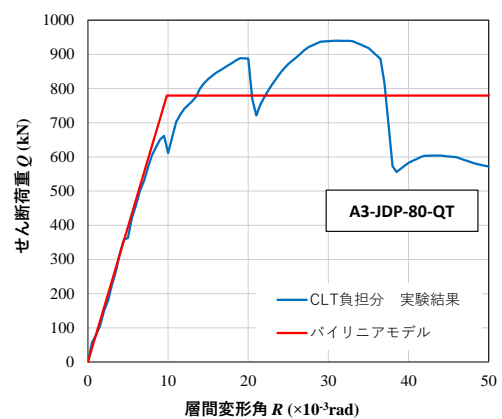
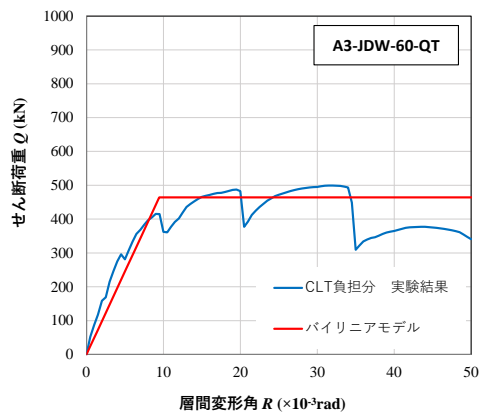
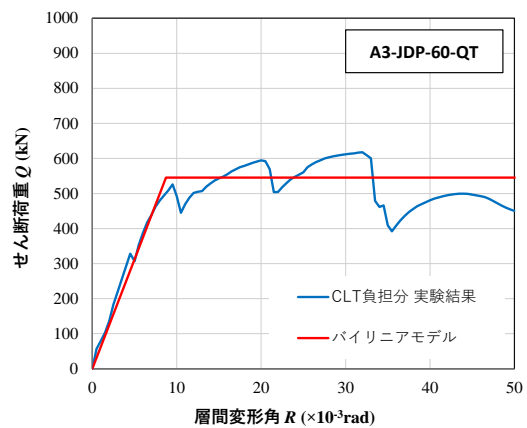
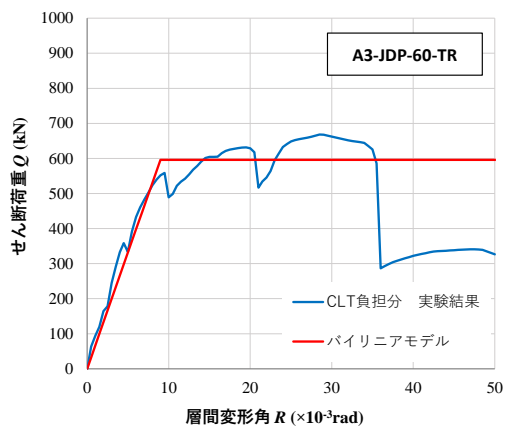
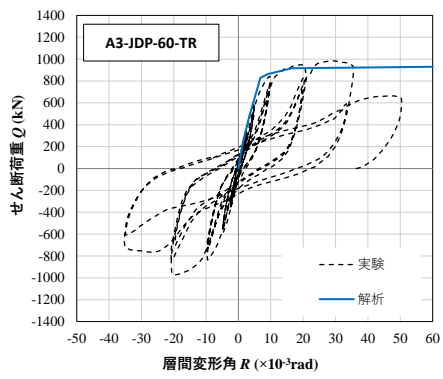
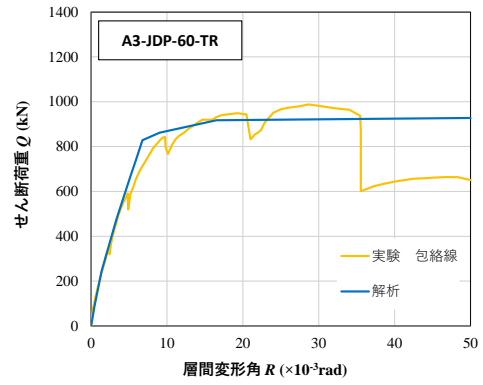


図 2.5 CLT 耐震壁のバイリニアモデル

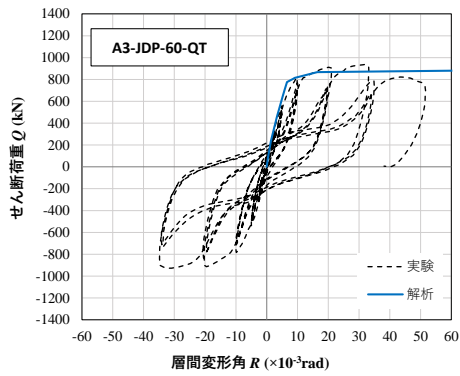


繰返し載荷

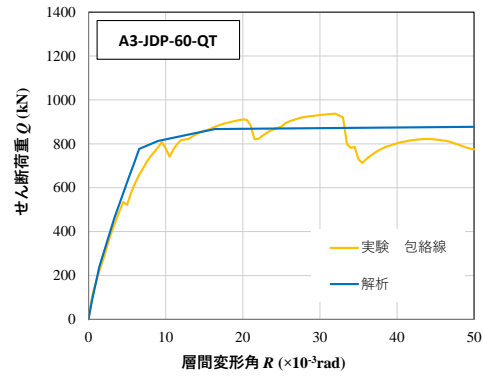


スケルトンカーブ

図 2.6 CLT 耐震壁の解析モデルと実験結果の比較(試験体 A3-JDP-60-TR)

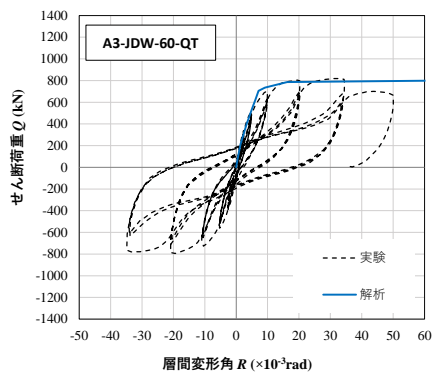


繰返し載荷

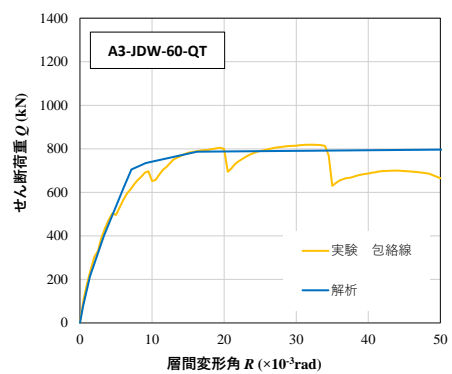


スケルトンカーブ

図 2.7 CLT 耐震壁の解析モデルと実験結果の比較(試験体 A3-JDP-60-QT)

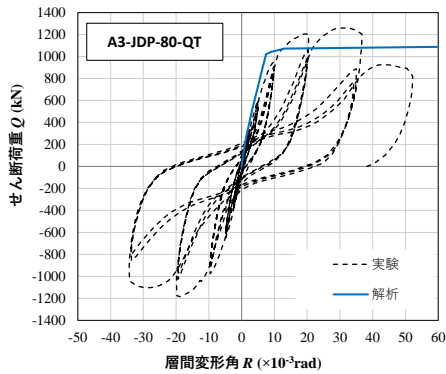


繰返し載荷

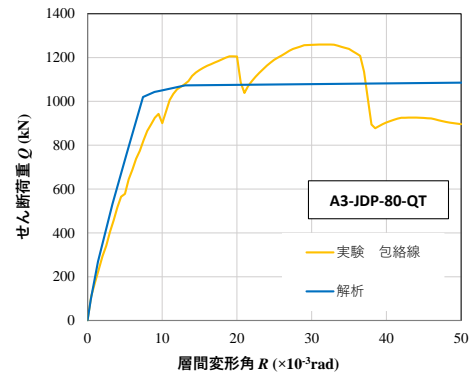


スケルトンカーブ

図 2.8 CLT 耐震壁の解析モデルと実験結果の比較(試験体 A3-JDW-60-QT)



繰返し載荷



スケルトンカーブ

図 2.9 CLT 耐震壁の解析モデルと実験結果の比較(試験体 A3-JDP-60-QT)

④ CLT 耐震壁の部材ランク

前述の RC フレームと同様の手順で各試験体の D_s を求め、部材ランクを検討する。終局変形角を $22/1,000\text{rad}$ として設定した場合の各試験体の塑性率 μ ・等価粘性減衰定数 h_{eq} ・ D_s およびせん断力負担率の最大値を表 2.1 に示す。

表 2.1 各試験体の塑性率 μ ・等価粘性減衰定数 h_{eq} および D_s

試験体名	A3-JDP-60-TR	A3-JDP-60-QT	A3-JDW-60-QT	A3-JDP-80-QT
塑性率 μ	2.71	3.09	4.05	2.30
等価粘性減衰定数 h_{eq}	4.5%	4.6%	5.3%	4.0%
D_s	0.49	0.45	0.37	0.56
せん断力負担率の最大値	0.68	0.66	0.61	0.75

技術基準解説書に示される RC 耐力壁の部材群種別と D_s の関係に準拠し、CLT 耐震壁は D ランクの耐力壁相当として扱うこととする (表 2.2 参照)。

なお、本節の検討はオーソライズされた考え方ではないため、今後の研究成果の蓄積により、より合理的な部材ランクの設定方法が提案されることを期待する。

表 2.2 部材ランクと D_s

		柱及びはりの部材群としての種別				
		A	B	C	D	
耐力壁の部材群としての種別	A	$0 < \beta_n \leq 0.3$ の場合	0.3	0.35	0.4	0.45
		$0.3 < \beta_n \leq 0.7$ の場合	0.35	0.4	0.45	0.5
		$\beta_n > 0.7$ の場合	0.4	0.45	0.45	0.55
	B	$0 < \beta_n \leq 0.3$ の場合	0.35	0.35	0.4	0.45
		$0.3 < \beta_n \leq 0.7$ の場合	0.4	0.4	0.45	0.5
		$\beta_n > 0.7$ の場合	0.45	0.45	0.5	0.55
	C	$0 < \beta_n \leq 0.3$ の場合	0.35	0.35	0.4	0.45
		$0.3 < \beta_n \leq 0.7$ の場合	0.4	0.45	0.45	0.5
		$\beta_n > 0.7$ の場合	0.5	0.5	0.5	0.55
D	$0 < \beta_n \leq 0.3$ の場合	0.4	0.4	0.45	0.45	
	$0.3 < \beta_n \leq 0.7$ の場合	0.45	0.5	0.5	0.5	
	$\beta_n > 0.7$ の場合	0.55	0.55	0.55	0.55	

この表において、 β_n は、耐力壁 (筋かいを含む) の水平耐力の和を保有水平耐力の数値で除した数値を表すものとする。

⑤CLT パネルの分割の影響

試験体の CLT は構面内で複数のパネルに分割されているため、解析上は分割されたそれぞれのパネルを 1 組の X 字ブレースに置換した方が実状に即したモデル化であると考えられるが、設計上はモデル化を簡略化するため、分割された CLT パネルをまとめて 1 組の X 字ブレースに置換することが望まれる。そこで、試験体の CLT 上部の梁端で計測したせん断補強筋の歪データをもとに、CLT パネルの分割の影響について考察する。

図 2.10 および図 2.11 に 2022 年度および今年度の試験体の梁端せん断補強筋歪層間変形角関係を示す。2022 年度の試験体^{1),2)}は CLT パネルの分割なし、今年度の試験体は CLT を 3 分割したもの (A3-JDP-60-TR 試験体) である。分割の有無に関わらず梁中間部には歪は発生しておらず、梁端部に発生した歪のレベルは同等であり、CLT パネルの分割がフレームの応力状態に与える影響は小さいことが確認できる。従って、試験設計においては CLT パネルの分割の有無は無視し、複数の CLT をまとめて 1 組の X 字型ブレースに置換することとする。

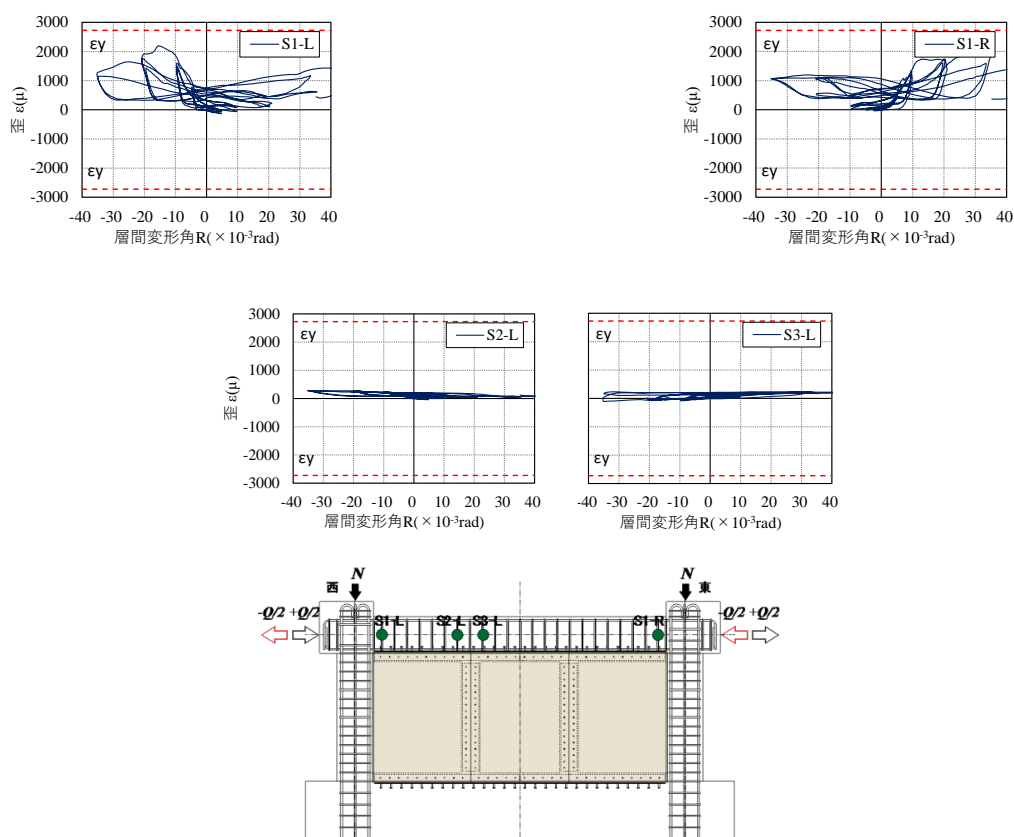


図 2.10 2023 年度実験 A3-JDP-60-TR 試験体の梁せん断補強筋歪

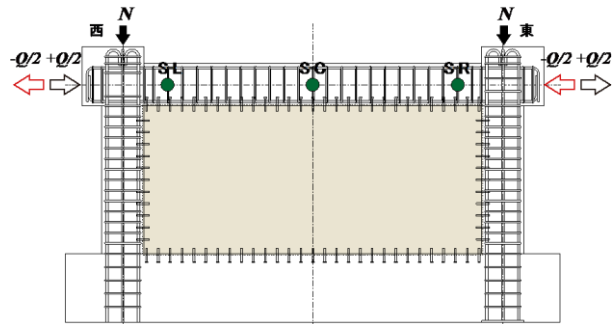
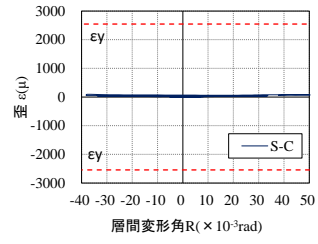
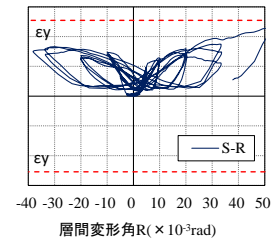
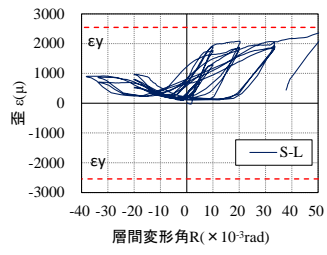


図 2.11 2022 年度実験 A2-LB 試験体の梁せん断補強筋歪

3. 試設計

○建物概要

本節では、CLT耐震壁を有する高さ14.8mのRC造建物（用途：学校）の許容応力度設計および保有水平耐力計算の計算例を示す。

(1) 建物概要

建物規模：地上4階建

架構形式：X方向 ラーメン構造

Y方向 CLT耐震壁を有するラーメン構造

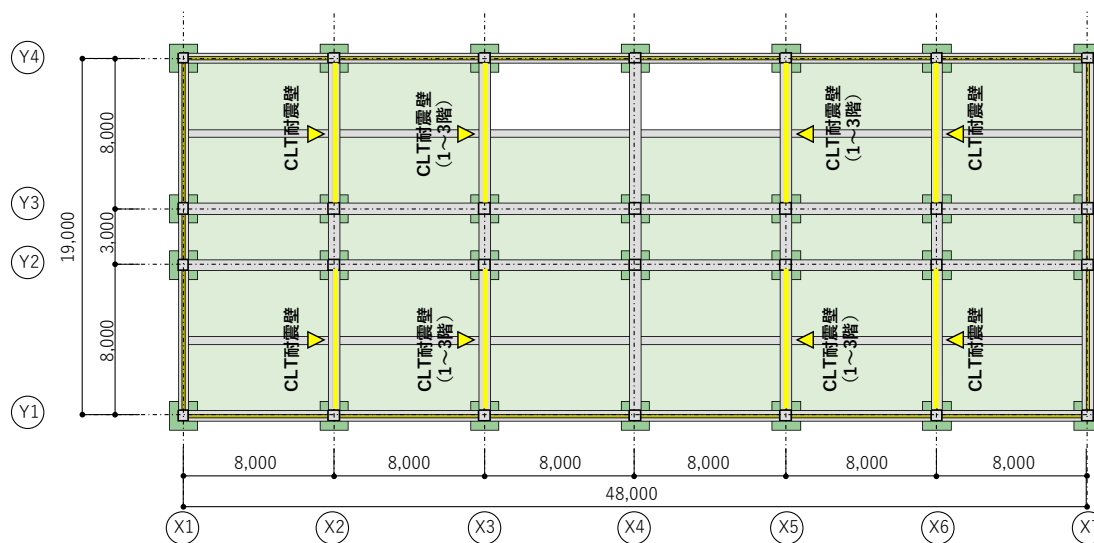


図 3.1 伏図

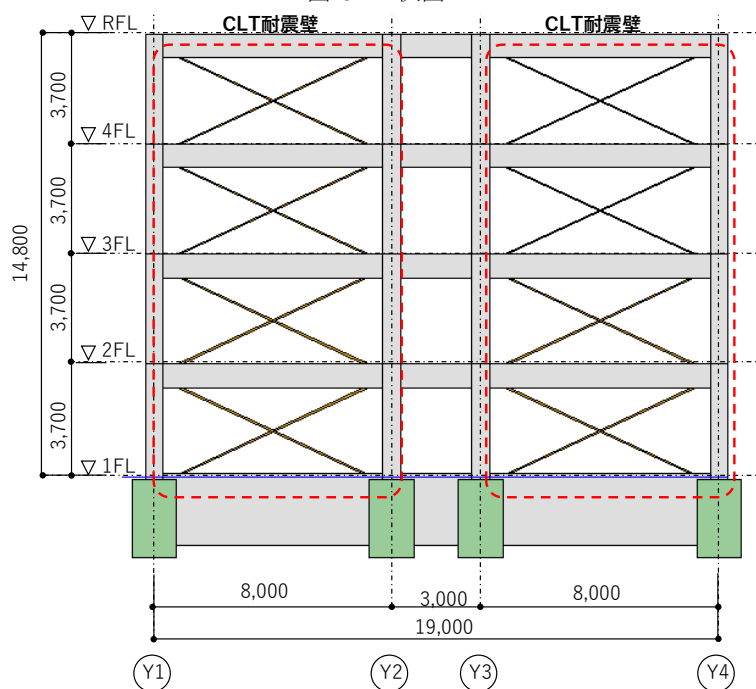


図 3.2 X2通 軸組図

(2) 使用材料

CLT	S60-5-5 (スギ)	ラミナ厚さ 30mm	総厚さ 150mm
		せん断弾性係数 $G = 500\text{N/mm}^2$	
		・ 剛性低減係数 $\alpha = 0.35$ (実験結果から得られた各試験体の α を安全側に丸めた)	
コンクリート	Fc30		
鉄筋	柱主筋	: SD345	D25 (断面積 $a_s=507\text{mm}^2$)
	梁主筋	: SD345	D25 (断面積 $a_s=507\text{mm}^2$)
	帯筋・あばら筋	: SD295A	D13 (断面積 $a_w=127\text{mm}^2$)
	スラブ筋	: SD295A	D10 (断面積 $a_w=71.3\text{mm}^2$) D13 (断面積 $a_w=127\text{mm}^2$)

○許容応力度

各種許容応力度は以下による.

・ コンクリート

短期許容圧縮応力度 $f_c = 20\text{N/mm}^2$ (Fc30)

・ 鉄筋

主筋の短期許容応力度 $f_t = 345\text{N/mm}^2$ (SD345)

帯筋・あばら筋の短期許容引張応力度 $f_t = 295\text{N/mm}^2$ (SD295A)

・ CLT

基準せん断強度 $F_s = 2.70\text{N/mm}^2$

せん断強度低減係数 $\beta = 0.50$ (実験結果から得られた各試験体の β を安全側に丸めた)

設計用終局せん断強度 $dF_s = \beta \cdot F_s = 1.35\text{N/mm}^2$

短期許容せん断応力度 $f_s = \frac{2}{3} dF_s = 0.90\text{N/mm}^2$ (幅方向)

○CLT 耐震壁のモデル化

本章 2 節に示す方法で CLT 耐震壁を鉄骨ブレースに置換してモデル化する.

i) 剛性

式 1 に以下の諸元を代入し, 置換ブレースの断面積を求める.

α : 剛性低減係数(=0.35)

G_w : CLT せん断弾性係数(=500N/mm²)

A_w : CLT 耐震壁せん断面積 (= $l_0 \cdot t_1 = 10,875\text{cm}^2$)

E_s : 鉄骨ヤング係数 (=205,000N/mm²)

A_b : ブレース断面積

l_b : ブレース部材長さ (= $\sqrt{L^2 + H^2} = 8,814\text{mm}$)

L : 柱スパン (=8,000mm) H : 階高さ (=3,700mm)

l_0 : 壁内法長さ (=7,250mm) h_0 : 壁内法高さ (=2,900mm)

θ : ブレース角度 (= 24.8°)

これらの数値を式 1 に代入すると,

$$A_b = 1,713\text{mm}^2 / \text{本}$$

従って, CLT 耐震壁は X 字型に配置された径 46.7mm の丸鋼ブレースとしてモデル化する.

ii) 耐力

CLT 耐震壁の終局せん断耐力と, 置換後の鉄骨ブレースの圧縮・引張降伏耐力の水平成分が等しくなるようにモデル化する. CLT 耐震壁の終局せん断耐力 Q_{CLT} は,

$$Q_{CLT} = dF_s \cdot A_w = 1,468\text{kN}$$

従って, 置換ブレースの降伏軸耐力 N_y は,

$$N_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_{CLT}}{\cos\theta} = 809\text{kN/本}$$

として設定する.

○代表断面

- ・ 柱 : 750×750
- ・ 大梁 : 500×800
- ・ スラブ : t=150mm

○一次設計

図 3.3 に Y 方向正加力時 X2 通り応力図を示す. 代表として Y 方向正加力時の 2 階 CLT 耐震壁の断面算定を行う.

解析結果より,

$$\text{CLT 耐震壁に作用するせん断力 } sQ_w = (56\text{kN}+115\text{kN})/\cos\theta = 189\text{kN}$$

$$\text{CLT パネルの短期許容せん断耐力 } sQ_a = f_s \cdot A_w = 978\text{kN}$$

$$\therefore \text{検定比 } sQ_w / sQ_a = 0.19 < 1.0 \dots \text{OK}$$

同様に各階の CLT 耐震壁の断面算定を行い, いずれの耐震壁も検定比が 1.0 を下回っていることを確認した.

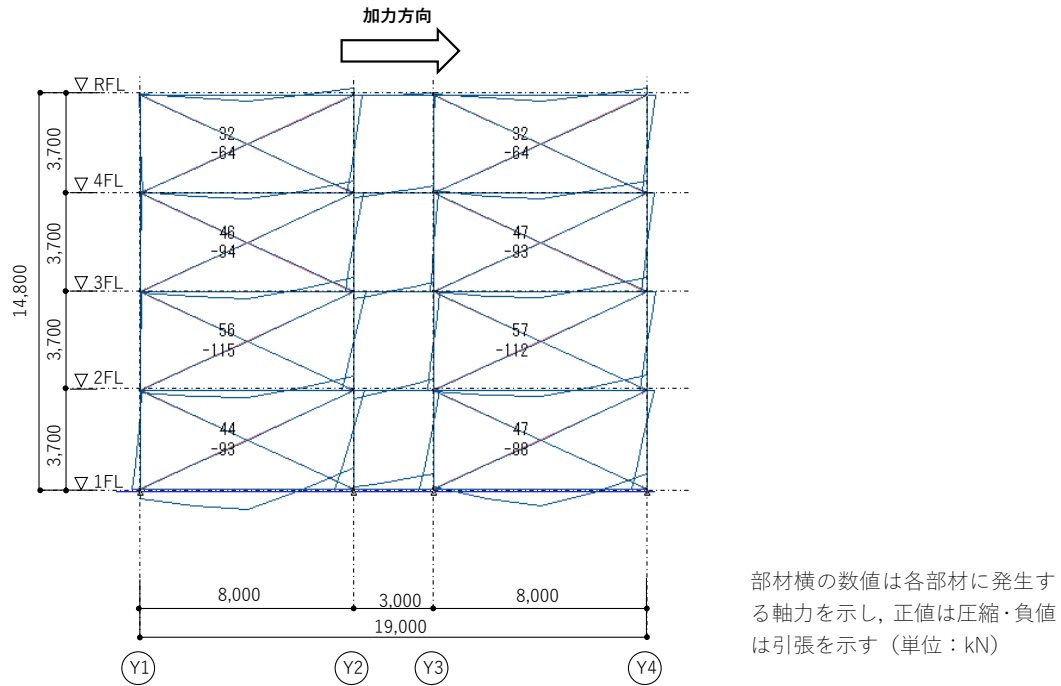


図 3.3 X2 通り応力図（Y 正方向加力時）

表 3.1 に各階の鉄骨架構と CLT 耐震壁のせん断力負担率を示す。CLT のせん断力負担率は各階で 27%～39%程度となっている。

表 3.2 に各階の Y 方向層間変形角の一覧を示す。層間変形角の最大値は 2 階における 1/1,161 で、いずれの階でも 1/200 以下となった。なお、X 方向も同様に各階の層間変形は 1/200 以下となっていることを確認している。

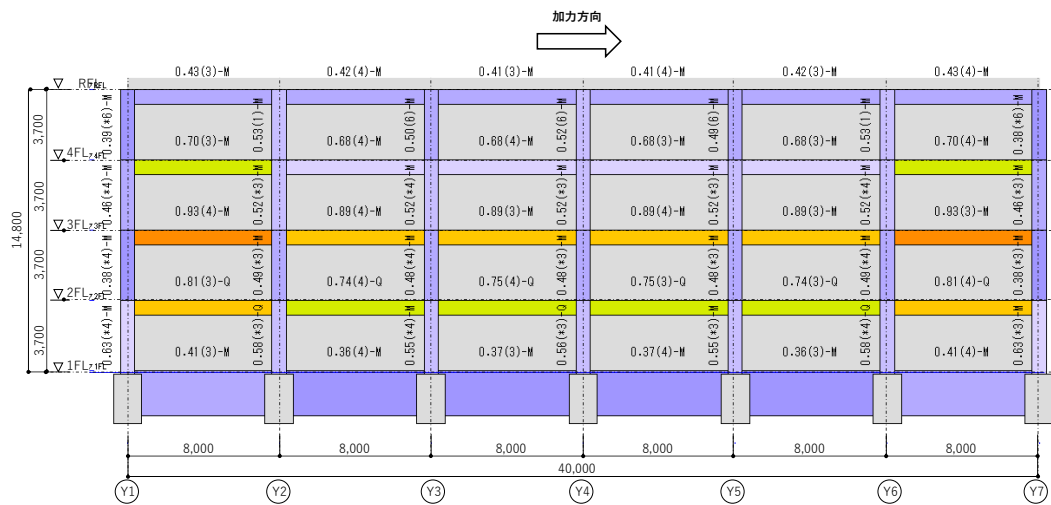
表 3.1 せん断力負担率

階	フレーム		ブレース	
	せん断力(kN)	負担率(%)	せん断力(kN)	負担率(%)
4	2,496	86.4	394	13.6
3	3,864	76.9	1,157	23.1
2	5,306	79.0	1,408	21.0
1	6,875	85.9	1,129	14.1

表 3.2 層間変形角一覧

加力方向	階	階高	層せん断力	最大層間
		(m)	(kN)	変形角
Y	4	3.7	2,890	1/2033
Y	3	3.7	5,021	1/1401
Y	2	3.7	6,714	1/1161
Y	1	3.7	8,004	1/1464

図 3.4 に代表構面の部材応力検定比を示す。X, Y 方向とも、各柱梁部材の検定比が 1.0 を下回ることを確認した。



Y1 通り検定比図 (X 方向)
 ※部材横の数値は検定比を示す

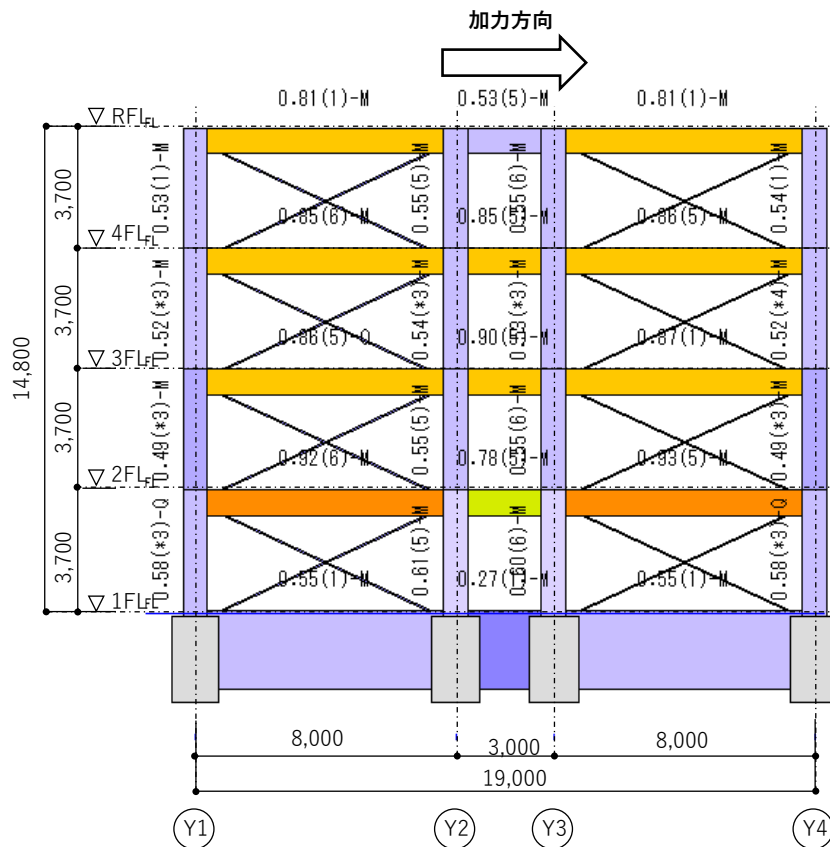
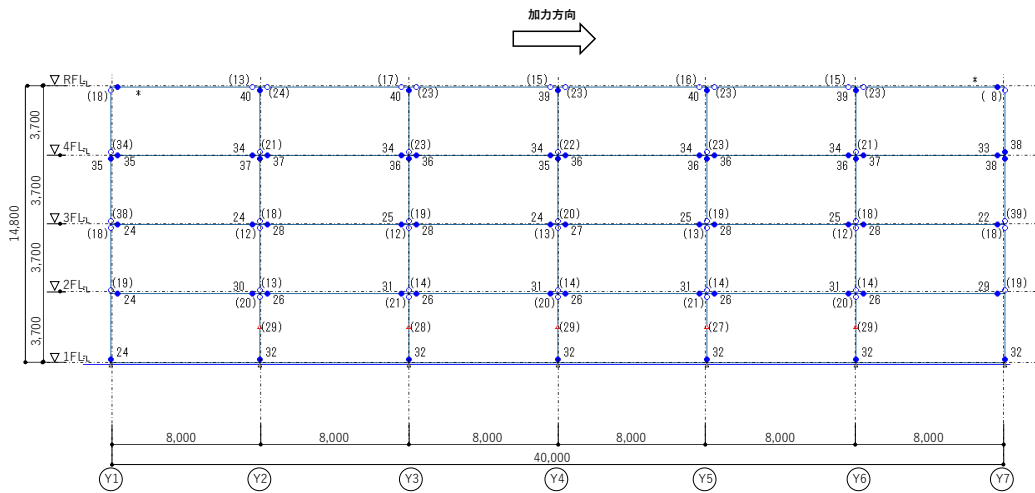


図 3.4 代表構面の部材応力検定比

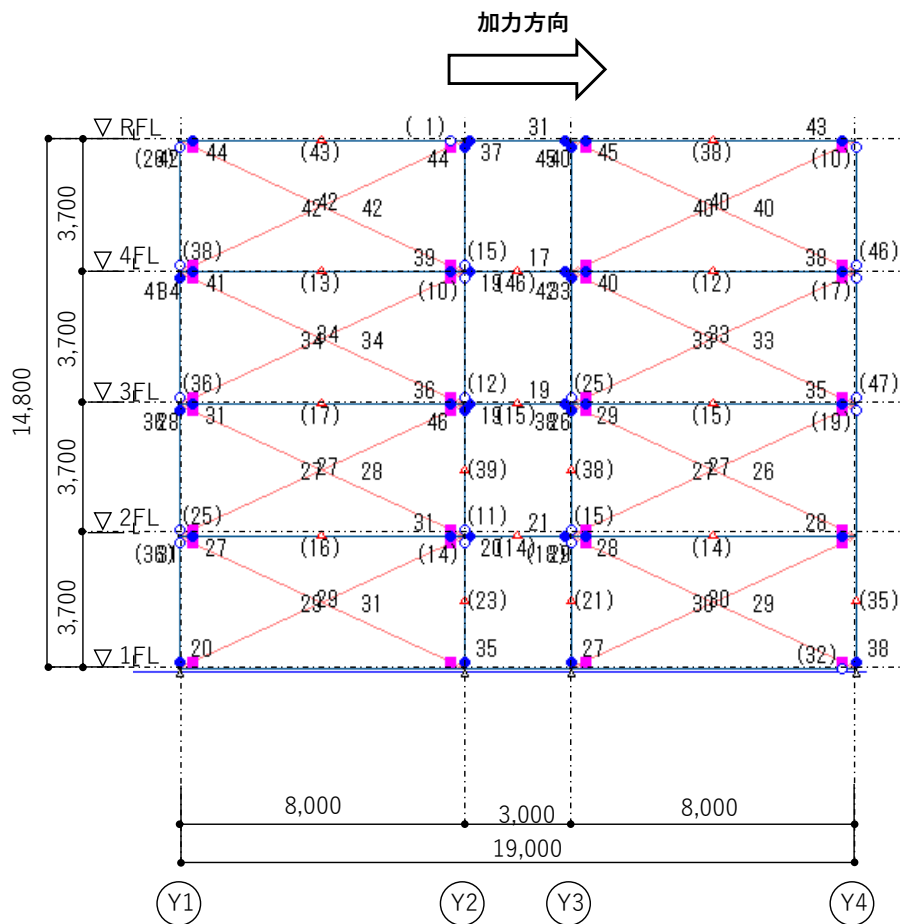
○保有水平耐力設計

図 3.5 に代表構面のメカニズム時のヒンジ図を示す。また、表 3.4 に保有耐力設計の計算結果一覧を示す。CLT 耐震壁は D ランクの壁部材と見なして D_s を算出した。X, Y 方向とも梁先行降伏となり、各階で保有水平耐力比が 1.0 以上となることを確認した。



Y1 通り (X 方向加力時)

※節点周囲の数値はヒンジ発生ステップを示す



X2 通り (Y 方向加力時)

※節点周囲の数値はヒンジ発生ステップを示す

図 3.5 代表構面のメカニズム時のヒンジ図

表 3.3 保有耐力設計の計算結果一覧

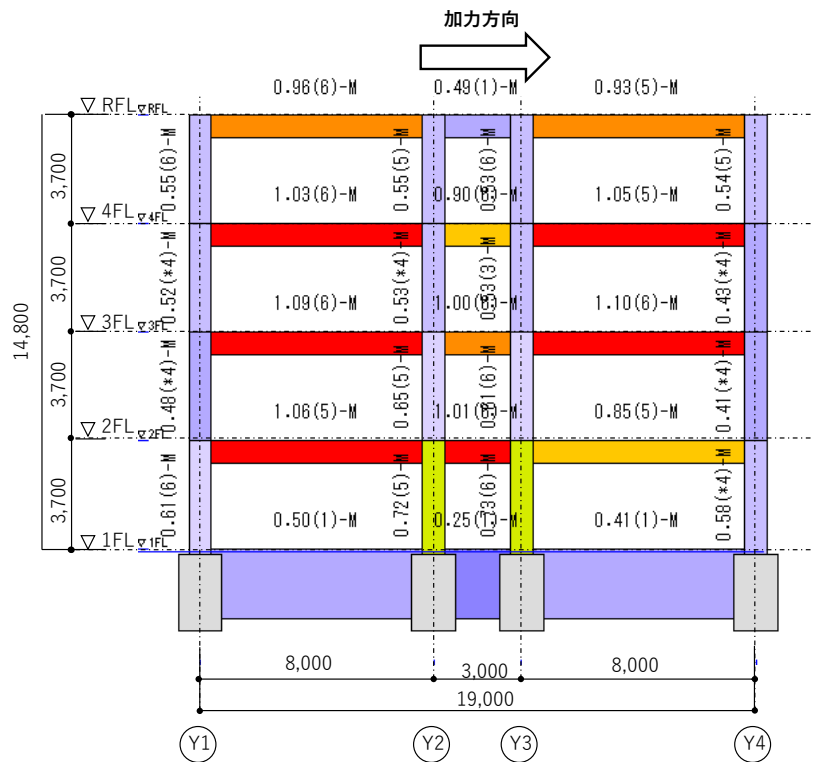
ケース	階	Fe	Fs	Fes	Ds	基準保有 耐力 Qd(kN)	必要保有 耐力 Qun(kN)	保有耐力 Qu(kN)	Qu/Qun	判定
X正	4	1.00	1.00	1.00	0.30	14,450	4,335	5,676	1.32	OK
	3	1.00	1.00	1.00	0.30	25,106	7,532	9,862	1.32	OK
	2	1.00	1.00	1.00	0.30	33,572	10,071	13,188	1.32	OK
	1	1.00	1.00	1.00	0.30	40,021	12,006	15,722	1.32	OK
X負	4	1.00	1.00	1.00	0.30	14,450	4,335	5,676	1.31	OK
	3	1.00	1.00	1.00	0.30	25,106	7,532	9,862	1.31	OK
	2	1.00	1.00	1.00	0.30	33,572	10,071	13,187	1.31	OK
	1	1.00	1.00	1.00	0.30	40,021	12,006	15,721	1.31	OK
Y正	4	1.00	1.00	1.00	0.55	14,450	7,947	10,295	1.30	OK
	3	1.00	1.00	1.00	0.55	25,106	13,808	17,888	1.30	OK
	2	1.00	1.00	1.00	0.55	33,572	18,464	23,919	1.30	OK
	1	1.00	1.00	1.00	0.55	40,021	22,012	28,515	1.30	OK
Y負	4	1.00	1.00	1.00	0.55	14,450	7,947	10,274	1.29	OK
	3	1.00	1.00	1.00	0.55	25,106	13,808	17,850	1.29	OK
	2	1.00	1.00	1.00	0.55	33,572	18,464	23,869	1.29	OK
	1	1.00	1.00	1.00	0.55	40,021	22,012	28,455	1.29	OK

なお、参考として CLT 耐震壁を取り除き純ラーメン架構とした場合の設計も実施した。

表 3.4 に一次設計時の各階の層間変形角の一覧を、図 3.6 に代表構面の部材応力検定比を示す。CLT 耐震壁が無い場合も 1 次設計における層間変形角は各階で 1/200 よりも小さくなるが、CLT 耐震壁がある場合に比べて変形角が 1.2 倍程度に大きくなっている。また、一次設計で多くの部材の検定比が 1.0 を上回った (図 3.6 中で赤く示されている部材)。

表 3.4 一次設計時の層間変形角一覧

加力方向	階	階高	層せん断力	最大層間
		(m)	(kN)	変形角
EY	4	3.7	2,888	1/1724
EY	3	3.7	5,016	1/1138
EY	2	3.7	6,706	1/957
EY	1	3.7	7,994	1/1262



X2 通り検定比図 (Y 方向)

※部材横の数値は検定比を示す

図 3.6 一次設計時の代表構面の部材応力検定比

○CLT 耐震壁の詳細設計

CLT 耐震壁は、前述の通り S60-5-5($t=150$)を使用する。CLT 壁の長さは 7,250mm、高さは 2,900mm (階高 3,700mm より梁せい 800mm を引いた値) である。CLT に挿入する鋼板は $t=12$ mm とし、ドリフトピン径は $\phi=20$ とする。

試験体の設計においては、ドリフトピン接合部の水平方向の耐力が CLT パネル母材の耐力の 2/3 程度となるようにドリフトピン本数を設定していることにならない、ここでは CLT パネルのせん断耐力の 2/3 を設計せん断力とする。

CLT パネル母材の終局せん断耐力は $CLTQ_{u0}$ は、

$$CLTQ_{u0} = A_w \cdot F_s = 2,936 \text{ kN}$$

従って、水平方向のドリフトピン接合部の設計せん断力 dQ_{ch} は、

$$dQ_{ch} = 2/3 CLTQ_{u0} = 1,958 \text{ kN}$$

CLT パネルに作用するせん断力が dQ_{ch} に等しいとすると、鉛直方向の接合部に作用するせん断力 dQ_{cv} は $dQ_{cv} = 784 \text{ kN}$ となる。上記のドリフトピン単位接合部の降伏耐力設計値は CLT 強軸方向 (鉛直) で $P_{yo} = 35.1 \text{ kN}$ 、CLT 弱軸方向 (水平) で $P_{yp} = 38.7 \text{ kN}$ となる。

以上より、水平方向に必要なドリフトピン本数は 51 本 (142mm ピッチ)、鉛直方向は 23 本 (126mm ピッチ) となる。

4. おわりに

第 II 章の実験結果をもとに、CLT 耐震壁を構造計算に用いる場合のモデル化手法と、仮にはあるが D_s を定め、試設計を示した。

なお、試設計における CLT 耐震壁の剛性・耐力は実験結果を元に設定したが、剛性・耐力の低減係数の値は接合部の仕様と分割数による影響が大きいと考えられ、これら低減係数の設計での取り扱いは今後の課題である。

<参考文献>

- 4.1) 栗原嵩明ほか 5 名 : CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能 その 1 接合方法をパラメータとした実験計画, 日本建築学会, 2023 年度大会 (近畿) 学術講演梗概集, pp.401-402, 2023.9
- 4.2) 宇佐美徹ほか 5 名 : CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能 その 2 接合方法をパラメータとした実験結果, 日本建築学会, 2023 年度大会 (近畿) 学術講演梗概集, pp.403-404, 2023.9

V. 本助成事業のまとめと今後の課題

本助成事業では、木材利用、特に CLT 利用促進の一環として、鉄筋コンクリート構造の耐震壁に利用した混合構造を提案し、その設計に資するデータの提供を目的に以下を実施した。

- II. CLT 耐震壁を有する RC 架構の構造性能
- III. CLT にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピン接合部の簡易試験方法の検討
- IV. 設計ガイドライン

本年度は、RC 架構に CLT を耐震壁として利用する中で、施工上、不可避な壁分割の影響に着目した。第 II 章では、CLT パネル分割、パネル同士の接合詳細、CLT パネル厚をパラメータとした構造実験を実施し、その力学性状を把握することで、実設計に資するデータを示した。CLT と RC 架構との接合としては、令和 4 年度に採用した鋼板挿入ドリフトピン接合とスタッドを採用し、CLT パネルを 3 分割あるいは 4 分割とした。また、CLT パネル同士の接合には、汎用性の高い鋼板挿入 DP 接合のほか、デザイン性に優れたダボ接合についても検討を行った。分割がない場合に比べ、分割することで剛性が低下するものの、CLT パネルの破壊が母材のせん断破壊から接合部破壊へと移行することで、靱性の向上が得られた。また、分割による梁への CLT パネルロッキングの影響は、RC 架構と CLT パネルとの接合に用いた T 型鋼の効果で、分割なしの場合と変わらないことを示した。さらに、CLT パネル厚を大きくすると、RC 架構への影響は大きくなり、耐力や剛性の上昇はやや鈍化する [申請書実施項目 1) に対応]。

第 III 章では、CLT にせん断力を伝達する鋼板挿入ドリフトピンの単体耐力を調べる簡易試験方法を検討すべく、CLT 版厚、DP 径をパラメータとした単体の接合部圧縮試験と接合部パネルせん断試験を実施し、比較検討することで、せん断力伝達に用いる DP 接合部耐力を提示した。具体的には、単体の接合部圧縮試験の結果の降伏耐力または学会木指針^{5.1)}による DP 降伏耐力の計算値から、せん断力伝達に用いる DP 接合部の DP1 本あたりの降伏耐力を求める式を提案した。また、参考値にはなるが最大耐力に関しても同様の式を提案した [申請書実施項目 2) に対応]。

第 IV 章では、第 II 章の実験結果をもとに、CLT 耐震壁を構造計算に用いる場合のモデル化手法と、仮にはあるが D_s を定め、RC 造 4 階の文教施設の試設計を示した [申請書実施項目 3) に対応]。

本事業のような技術を実際のプロジェクトに適用するためには、現状、個別の大臣認定(時刻歴応答解析による設計ルート)や限界耐力計算による設計ルート等が考えられる。しかしながら、設計が煩雑になるため、広く普及されることを考えると、民間の評価機関による D_s を含む構造設計手法の性能証明を取得するのが良いと考えられる。この方法に関しても、個別の会社に認められる性能証明の取得が広く展開するか否かについては課題があり、どのようにして普及を推進するののかの方策については議論が必要である。

また、今後更なる研究開発の発展により、様々なディテールや工法が生まれ、また、設計や施工の合理化が図られることを期待する。

<参考文献>

5.1) 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-, 2006.12