

平成 27 年度
CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業
CLT 等接合部データ等の収集
木質材料を用いた RC 造建築物耐震補強工法開発
報告書

平成 28 年 3 月

株式会社ドット・コーポレーション

目 次

第 I 編 事業の概要と基本データ

第 1 章 事業の概要

1.1 事業の目的	第 1 章-p1
1.2 平成 26 年度の検討内容	第 1 章-p2
1.3 平成 27 年度の検討内容および実施体制等	第 1 章-p3
1.3.1 平成 27 年度の検討内容	第 1 章-p3
1.3.2 実施体制と事業スケジュール	第 1 章-p4
1.3.2.1 実施体制	第 1 章-p4
1.3.2.2 事業スケジュール	第 1 章-p5
1.3.3 打ち合わせ議事録	第 1 章-p6

第 2 章 構造主体を木造以外とする構造への CLT 利用拡大の手法と課題

2.1 はじめに	第 2 章-p1
2.2 鉄骨造との併用	第 2 章-p1
2.2.1 鉄骨造柱はり構法と木床の組み合わせ	第 2 章-p1
2.2.2 鉄骨造の壁に CLT を用いたケーススタディ	第 2 章-p3
2.3 RC 造や鉄骨造の新築建物への CLT の適用と課題	第 2 章-p6
2.3.1 現在の法令に基づいた新築建物への CLT の適用	第 2 章-p6
2.3.1.1 構造安全性の確認方法	第 2 章-p6
2.3.1.2 火災による倒壊や延焼を防止する方法	第 2 章-p6
2.3.1.3 火災時の避難や消火の妨げとならない 壁・天井の仕上げ	第 2 章-p6
2.3.2 材料の基準強度および許容応力度等	第 2 章-p7
2.3.3 CLT と柱・梁部材、CLT 部材間の接合	第 2 章-p7
2.3.3.1 機械的接合	第 2 章-p7
2.3.3.2 かん合接合	第 2 章-p7
2.3.3.3 摩擦接合	第 2 章-p8
2.3.4 CLT の耐震壁としての挙動と地震荷重等に対する設計	第 2 章-p8
2.3.4.1 中地震に対する CLT 壁板もしくは耐震壁を含む 架構の構造設計	第 2 章-p8
2.3.4.2 CLT 壁板もしくは耐震壁を含む架構の保有耐力計算	第 2 章-p8
2.3.5 耐火性能の確保と火災時避難のための使用制限への対応	第 2 章-p8
2.3.6 その他	第 2 章-p9

第 3 章 CLT のせん断強度データの収集

3.1 実験で使用する CLT (30 mm厚) の製造過程	第 3 章-p1
3.1.1 幅はぎありについて	第 3 章-p1
3.1.2 幅はぎなしについて	第 3 章-p3

3.2	大野式せん断実験.....	第3章-p4
3.2.1	実験の目的と概要.....	第3章-p4
3.2.2	試験体と試験方法.....	第3章-p4
3.2.3	試験結果	第3章-p7
3.2.3.1	荷重変形関係.....	第3章-p7
3.2.3.2	せん断特性値.....	第3章-p14
3.2.3.3	要素せん断実験まとめ.....	第3章-p18
3.2.3.4	試験結果一覧.....	第3章-p19
3.3	CLTの純せん断強度データの収集1.....	第3章-p21
3.3.1	実験の目的.....	第3章-p21
3.3.2	実験計画	第3章-p21
3.3.3	実験結果	第3章-p24
3.3.4	まとめ	第3章-p28
3.4	CLTのせん断特性値のまとめ.....	第3章-p29
3.4.1	実験で使用するCLT(30mm厚)の特性値.....	第3章-p29
3.4.2	実大製品のせん断特性値に関する既往のデータ.....	第3章-p29

第Ⅱ編 CLT 耐震補強工法（接着工法）の補強効果発生メカニズムの検討

第1章 木質耐震補強工法の検討

- 1.1 平成26年度事業の成果と残された課題.....第1章-p1
- 1.2 平成27年度事業における目標と実施事項.....第1章-p2

第2章 構造実験（接着工法）

- 2.1 構造実験の目的.....第2章-p1
- 2.2 実験概要.....第2章-p2
 - 2.2.1 試験体計画.....第2章-p2
 - 2.2.2 加力・計測計画.....第2章-p8
- 2.3 構造実験（接着工法）の結果.....第2章-p18
 - 2.3.1 損傷状況と荷重変形関係.....第2章-p18
 - 2.3.1.1 W-C02.....第2章-p18
 - 2.3.1.2 W-C03sh.....第2章-p22
 - 2.3.1.3 W-C04sv.....第2章-p26
 - 2.3.1.4 W-C21.....第2章-p30
 - 2.3.2 補強効果の比較.....第2章-p34

第3章 RC-CLTの接着接合部に関する要素実験

- 3.1 実験の目的.....第3章-p1
- 3.2 実験計画.....第3章-p2
 - 3.2.1 試験体.....第3章-p2
 - 3.2.2 計測計画.....第3章-p5
 - 3.2.3 加力計画.....第3章-p6
- 3.3 実験結果.....第3章-p8
 - 3.3.1 荷重変形関係と損傷状況.....第3章-p8
- 3.4 まとめ.....第3章-p12

第4章 CLT 耐震補強工法（接着工法）の基本設計式の提案

- 4.1 補強効果発生メカニズム.....第4章-p1
 - 4.1.1 概要.....第4章-p1
 - 4.1.2 木質系面材ーコンクリート間のせん断抵抗.....第4章-p2
 - 4.1.3 木質系面材ー柱の圧縮抵抗.....第4章-p6
 - 4.1.4 コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗.....第4章-p8
 - 4.1.5 補強面材の違いが補強効果に与える影響.....第4章-p9
 - 4.1.6 柱スパンが補強効果に与える影響.....第4章-p10
- 4.2 基本設計のガイドライン.....第4章-p11
 - 4.2.1 概要.....第4章-p11
 - 4.2.2 接着せん断破壊までの抵抗機構.....第4章-p11

4.2.3	接着せん断破壊以降の抵抗機構	第4章-p12
4.2.4	まとめ	第4章-p13

第Ⅲ編 CLT の耐震要素としての可能性の検討

第 1 章	CLT 耐震補強工法（乾式工法）の検討：目的と方法	第 1 章-p1
第 2 章	構造実験（乾式工法）	
2.1	構造実験（乾式工法）を行った工法の特徴	第 2 章-p1
2.2	構造実験の概要	第 2 章-p2
2.2.1	試験体（RC フレーム部）	第 2 章-p2
2.2.2	試験体（CLT 補強部）	第 2 章-p3
2.2.2.1	CLT パネル	第 2 章-p4
2.2.2.2	CLT パネル側の接合具	第 2 章-p4
2.2.2.3	現場での接合部分	第 2 章-p5
2.2.2.4	接合部分の検討の際の考慮事項	第 2 章-p6
2.2.3	試験体施工時の様子	第 2 章-p6
2.2.4	加力方法	第 2 章-p8
2.2.5	変位計測方法	第 2 章-p9
2.3	構造実験（乾式工法）の結果	第 2 章-p12
2.3.1	W-C05a 試験体の荷重変形関係・破壊性状	第 2 章-p12
2.3.2	他の接合仕様との比較	第 2 章-p19
2.3.3	まとめ	第 2 章-p20
第 3 章	RC-CLT の乾式接合部に関する要素実験	
3.1	実験の目的	第 3 章-p1
3.2	要素実験 1：RC-CLT の接着接合部試験（改良工法含む）	第 3 章-p2
3.2.1	試験体	第 3 章-p2
3.2.2	実験方法	第 3 章-p5
3.2.3	実験結果	第 3 章-p6
3.2.3.1	接着工法の試験体	第 3 章-p6
3.2.3.2	接着工法と補強金物の併用接合部の試験体	第 3 章-p9
3.3	要素実験 2：RC-CLT の乾式接合部試験	第 3 章-p13
3.3.1	試験体	第 3 章-p13
3.3.2	実験方法	第 3 章-p16
3.3.3	実験結果	第 3 章-p17
3.3.3.1	山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体	第 3 章-p17
3.3.3.2	山形鋼と CLT の接着接合部試験体	第 3 章-p20
第 4 章	まとめ	第 4 章-p1

第 I 編 事業の概要と基本データ

第 1 章 事業の概要

1.1 事業の目的

直交集成板（CLT）は、我が国でも国産材の新しい利用法として期待が高く、その実用化に向けた取組が進められており、平成 25 年 12 月には品質等の基準を定めた「直交集成板の日本農林規格（JAS 規格）」が制定されたところである。

さらに、平成 26 年 11 月には、林野庁と国土交通省が「CLT の普及に向けたロードマップ」を取りまとめ公表し、壁、床等の構造の全てを CLT とする建築物の一般的な設計法が平成 28 年度早期に告示されることが予定されている他、建築物の耐震補強において CLT を使用する等、CLT の部分的利用についても推進することとしている。

そこで、本事業では、既存の RC 造建築物に対する耐震補強部材として CLT の活用を確立するための接合方法の検討や耐震性向上効果の確認等を行うこととした。具体的には、接着工法による耐震補強の設計手法（基本設計式）を確立するために、耐力発現のメカニズムを解明するための実験的検証を行うこととした。接着工法による耐力壁の耐震補強部材としての基本的な性能については、昨年度（平成 26 年度）の事業にて成果が得られている。

また、これらの検討と平行して、RC 造や S 造の新築の建築物における部分利用も視野に入れ、その可能性を検討した。

1.2 平成 26 年度の検討内容

平成 26 年度に実施した事業では、木質パネル（CLT と LVL）を利用した既存 RC 造建築物の耐震補強壁構法の開発を進めた。その結果、基本的な構造性能の他、実際の設計で必要となる壁体の開口の影響を把握することができ、実用化のキーとなる接合方法の基本性状を把握することができた。

また、これらの検討を通じて、施工性ならびにコストなどの面から、一般の耐震補強構法との代替性と有効性が明らかになり、実際の建築物に対する適応例も得ることができた。

昨年の実施したフレーム試験体一覧とその目的を以下に示す。

面材種類	試験体NO.	試験体概要	試験の目的
なし	F-00	フレーム標準スパン	補強されるRC造部分を再現したフレームのみの試験体。 標準スパン(1.8m=実大5.4m)、大スパン(3.2m=実大9.6m)を想定。 (標準試験体)
	F-10	フレーム大スパン	
CLT 30mm2枚施工 実大:90mm×2	W-C01	直交(標準試験体)	標準スパンにて、直交に切断したCLTをスパン全体に施工した試験体。
	Wo-C03	直交・方立壁	標準スパンにて、直交に切断したCLTをスパンの中央に施工した試験体。 両側に開口部が存在する場合を想定。
	W-Cs01	斜交	標準スパンにて、60度斜交したCLTをスパン全体に施工した試験体。 CLTの歩留は下がるが、CLTの性能を引き出すための手法の一つ。
	W-Cs02	斜交・鋼板	W-Cs01の端部接合部に鋼板接合も組み合わせて、全体の性能を向上させることをねらった試験体。
	W-C11	直交・大スパン	大スパンにて、直交に切断したCLTをスパン全体に施工した試験体。
LVL 38mm施工 または12mm×3 実大:38mm×3	Wo-L01	設備開口	LVLでは、既に竹中工務店で標準スパンのものは検証済み。 ただし実際の耐震補強に適用する際には、各種の開口の要望が多いため、開口の位置、大きさを確認するための試験体。 LVL厚は38mm
	Wo-L02	袖壁	
	Wo-L03	方立壁	
	W-L11	大スパン	

※LVL については、これに加え H25 年以前に無開口標準スパンでの検証を行っている。

1.3 平成 27 年度の検討内容および実施体制等

1.3.1 平成 27 年度の検討内容

本事業においては、昨年度（平成 26 年度）の成果を踏まえ、以下のような検討を行った。検討項目別に実施内容と本報告書の全体構成を以下に示す。

検討項目と実施内容	編・章
RC 造建築物の耐震補強以外での CLT の耐震要素利用のための課題整理 RC 造の新築及び S 造の耐震補強・新築の計画に適用するための条件を整理する。	第 I 編 2 章
材料特性の確認 実施した実験等 本事業で使用した 1/3 縮尺の CLT の製造過程の記録 本事業で使用した 1/3 縮尺の CLT のせん断実験 実大 CLT の性能実験に関する既往のデータ収集と整理	第 I 編 3 章
CLT 耐震補強工法（接着工法）の基本設計式の作成 RC 造での CLT 耐震補強の早期普及を図ることを目的に適用範囲を限定したうえで、平成 26 年度に実施した接合法等の検討結果を反映した基本設計式を作成・整備する。 実施した実験等 接着工法の耐力発現メカニズムの把握のための 1/3 縮尺フレーム実験 接着接合部分の性能把握実験	第 II 編
RC 造と CLT 耐震要素の高効率接合方法の要件整理 耐震補強計画での汎用性を高めることを目的として、平成 26 年度で確認された接合強度をより向上させるため、接合部を多様化し、求められる要件を導出する。 ※本検討は、耐震補強だけでなく、RC 造建築物の新築時への適用をイメージして検討を行っている。 実施した実験等 乾式工法耐力壁の基本的な性能把握のための 1/3 縮尺フレーム実験 乾式工法接合部の基本的な性能把握のための接合部要素実験	第 III 編

1.3.2 実施体制と事業スケジュール

1.3.2.1 実施体制

本事業の実施体制等を以下に示す。

事業責任者

株式会社ドット・コーポレーション 代表取締役 平野陽子
 京都大学生存圏研究所 教授 五十田博
 株式会社竹中工務店技術研究所 宇佐美徹

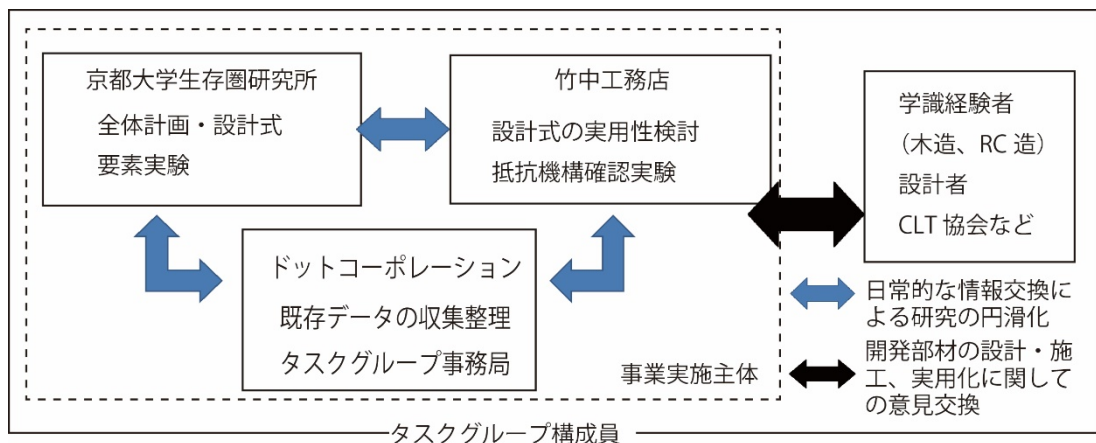
実施体制

学識経験者や CLT 協会などを構成メンバーとするタスクグループを構成し事業を進めた。

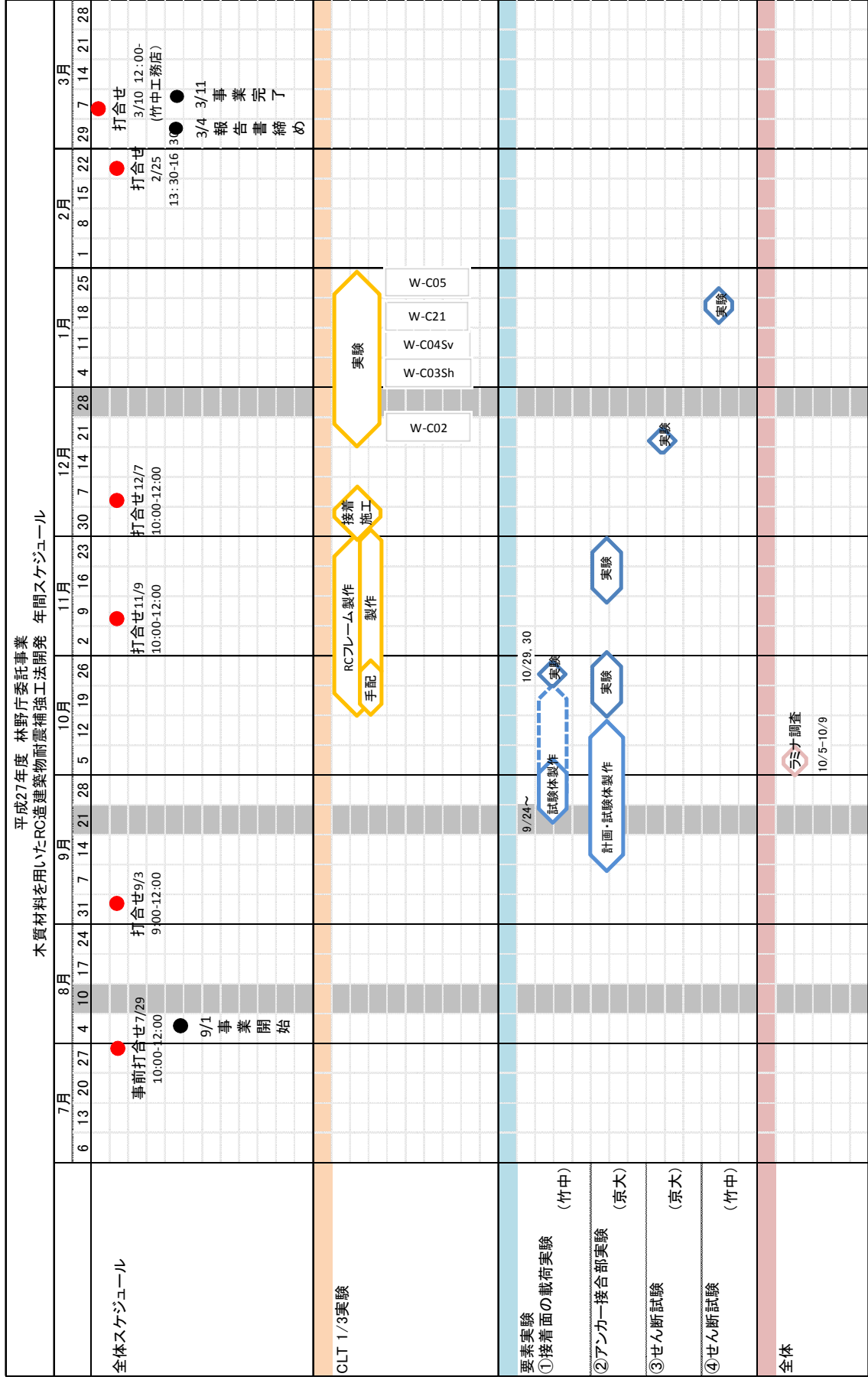
○タスクグループ構成メンバーと役割

代表者 (株)ドット・コーポレーション	① 発注者（林野庁）との調整、事業全体の進捗管理、木質材料供給者との調整など、全体マネジメント ② 既存データの収集整理、全体の報告書のとりまとめ
京都大学生存圏研究所 五十田博	① 実用化に向けての技術的指導 ② 架構実験のうち、CLT耐震補強壁実験について実験の実施・解析
(株)竹中工務店	① 実用化に向けた設計条件の整理、施工方法の検討、試験体製作 ② 架構実験のうち、RCフレーム実験、LVL耐震補強壁実験について実験の実施・解析
学識経験者・設計者	実用化に関する知見の提供・意見交換等

○経費執行・管理の体制



1.3.2.2 事業スケジュール



1.3.3 打ち合わせ議事録

本事業で実施した打ち合わせは以下の通りである。

	日 時	場所
第1回	2015年7月29日 水曜日 10:00-12:00	(株)ドット・コーポレーション
第2回	2015年9月3日 木曜日 9:00-12:00	(株)竹中工務店 東京本店 5階 5D 会議室
第3回	2015年11月9日 木曜日 10:00-12:00	(株)竹中工務店 東京本店 応接No.12
第4回	2015年12月7日 月曜日 10:00-12:00	(株)竹中工務店 東京本店 応接No.12
第5回	2016年2月25日 木曜日 13:30-17:30	(株)竹中工務店 東京本店 4C 会議室

次ページから、打ち合わせの議事録を掲載する。

打合議事録

日時	2015年7月29日(水) 10:00~12:00	
場所	(株)ドット・コーポレーション	
参加者	五十田(京大)、宇佐美(竹中)、福原(竹中)、栗原(竹中)、小林(竹中)、平野(DOT)	
	<p>1)平成27年度の事業内容の確認と、作業の分担について</p> <p>平成26年度の共研を継続し、平成28年度までの研究計画の中で、今年度(平成27年度)の事業内容を以下のア~イの通りとする(仕様書の内容)。</p> <p>円滑な研究着手のため次回の打合せ時まで、各自検討を進めておく。</p> <p>ア CLT耐震補強工法の基本設計式の作成</p> <p>RC造でのCLT耐震補強の早期普及を図ることを目的に適用範囲を限定したうえで、平成26年度に実施した接合法等の検討結果を反映した基本設計式を作成・整備し、設計ガイドライン等として取りまとめる。</p> <p>イ RC造とCLT耐震要素の高効率接合方法等の要件整理</p> <p>耐震補強計画での汎用性を高めることを目的として、平成26年度で確認された接合部の性能効率を上げる方法等、工法の多様化を検討し、求められる要件を導出する。</p> <p>ウ RC造建築物の耐震補強以外でのCLTの耐震要素利用のための課題整理</p> <p>RC造の新築及びS造の耐震補強・新築の計画に適用するための条件を整理する。</p> <p>【次回までの検討事項】</p> <ul style="list-style-type: none"> アについては、竹中が作成している社内向けの設計式をベースに、今年度の実験で確認する性能発現メカニズムを反映させた理論式を完成させ、最終的な成果物としてガイドラインを作成するための作業手順と分担を検討する。(ガイドラインには、設計の適用範囲の他、施工体制の条件なども合わせて示す)。 イについては、アンカーなどと組み合わせた高効率接合部の他、ブロックを用いた耐震補強工法との併用(ブロックの脱落防止)など、耐震補強工法の施工性や信頼性の向上に関わるアイデアを検証する。次回打合せまでに、京大・竹中でそれぞれアイデアのメモを作成し、関連資料を収集する。 ウについては、次回打合せまでに、竹中においては新築物件における適用への課題のメモを作成、京大においては北米のS造への適用事例の整理と課題のメモの作成を行う。 <p>2)実施する実験について</p> <p>【接着が切れた後の補強メカニズムの解明】</p> <ul style="list-style-type: none"> 要素実験にて検証を行う。 本実験の計画は、早急に京大で作成し、竹中とすりあわせを行う。 実験は、別事業で行う複合床の実験を応用。軸力の設定は3パターンとし軸力一定での実験を行う。形状が異なる場合も実験を行う。 	<p>当面の 作業分担</p> <p>京大・竹中</p> <p>京大・竹中</p> <p>京大</p>

- ・ 竹中より、既往の研究資料を五十田に送付。

【1/3試験体での実験】

- ・ 補強効果のメカニズム確認のために以下のA～C、およびアンカータイプの接合部方法を検討するためにD、幅はぎを行っていないCLTでの確認するためにEを行う。予算オーバーとなる場合には、B、Cを省略する。

A: 左右スリットの試験体、 B: 上下スリットの試験体、 C: 短スパンの試験体、
D: 接合部がアンカータイプの試験体、 E: 幅はぎをしていないCLTでの試験体

- ・ Eを行うために、レングスに幅はぎなしのCLTを作成可能か、事務局より確認。(昨年度の実験では、幅はぎしたCLTを使用している。)
- ・ 次回打合せまでに、実験計画書・試験体図を作成。

【実験スケジュールについて】

- ・ 実験は、年末から年始にかけて実施予定。CLTの施工・接着剤の養生などの期間を確保するため、10月中旬には発注する必要がある。9月末までに試験体を決定のこと。

3) その他

- ・ 今年度のメンバー(関係者)は、以下の通りとする。通常の打合せは、京大・竹中・DOTで行う。

京大: 五十田・北守・森・幅

竹中: 宇佐美・福原・栗原・小林・構造設計より2名程度

信州大学: 金子・卒論生

建築研究所: 荒木

DOT: 平野

- ・ 次回の打合せは、9月3日9時より、DOTにて開催。
参加者が多い場合は、開催場所を別途選定。

A-C、E 竹中
D 京大

以上

打合議事録

日時	2015年9月3日(木) 9:00~12:00
場所	(株)竹中工務店 東京本店 5階 5D 会議室
参加者	五十田(京大)、森(京大)、北守(京大)、幅(京大)、小林(竹中)、宇佐美(竹中)、福原(竹中)、栗原(竹中)、須賀(竹中)、荒木(建研)、平野(DOT)
配布資料	<p>NO.01 : H27 木質耐震補強プロジェクト打合議事録 20150730</p> <p>NO.02 : 試験体用三層パネルの調達について</p> <p>NO.03 : 2015 年林野庁委託事業 CLT 等による耐震補強実験計画</p> <p>NO.04-01 : 参考文献</p> <p>NO.04-02 : 試験機図</p> <p>NO.05 : 検討している要素試験について</p> <p>NO.06 : 試験体用三層パネルの枚数及びヤング係数の調査</p> <p>NO.07 : 1/3CLT パネル木取り(案)</p> <p>NO.08 : 京都府の RC-木複合床および RC 耐震補強の実験</p> <p>1) 平成 27 年度の事業内容の確認(議事録確認)</p> <p>2) 1/3 試験体による実験(資料 NO.03)</p> <ul style="list-style-type: none"> 試験体は、A: 左右スリットの試験体、B: 上下スリットの試験体、C: 短スパンの試験体、C': 短スパンフレーム試験体、D: 接合部アンカータイプの試験体、E: 幅はぎ無CLTの試験体の 6(5に変更)体とする。 <p>※打ち合わせ以降、メール等での協議の結果、C'短スパンフレーム試験体は実施しないこととなった。</p> <ul style="list-style-type: none"> A: 左右スリットの試験体→ 左右のスリットは、20/1000 変形時までには問題が生じない最小の寸法とするために、10~15 mmに設定。詳細は竹中で検討。 B: 上下スリットの試験体→ 上下のスリットの方法は検討継続。どの方法を採用しても、長所短所はあるため、試験のやりやすさなどを考慮して決定。同時に、CLTパネルの面外座屈に対応する方法も検討。詳細は竹中で検討。 C: 短スパンの試験体→ CLTのパネルの大きさは、26 年度の方立壁の形状と揃え(幅 214 mm × 4 枚)、比較を行う。詳細は竹中で検討。 実際の施工では、柱の増し打ちが必要となるので、現実的で無いという意見もあるが、CLT部分で設計できる限界を確認する意味はあるか。 D: 接合部アンカータイプの試験体→ 接合部方法は要素実験の結果から確認し 10 月下旬には決定。京大で検討。アンカーの 1/3 サイズを再現できない場合は本数で調整するか。実際の施工時に現実的な本数となるように計算であたりを付ける。 耐震補強計画での汎用性を高めることを目的として、平成 26 年度で確認された接合部の性能効率を上げる方法等、工法の多様化を検討し、求められる要件を導出する。

- ・ E:幅はぎ無CLTの試験体→ これまでと同様の実験とする。詳細は竹中で検討。
- ・ スケジュールは、以下の通り。

10 月末	D:接合部アンカータイプに関する資材の発注
11 月下旬	RCフレーム6(5に変更)体の納品、CLTパネル(厚 30mm)の納品
12 月第 1 週	CLTパネルの接着施工
12 月下旬~1 月末	6 体の実験実施 at 竹中技研

- ・ 1ヶ月強での6(5に変更)体実験は、かなり無理があるため、試験時の盛りかえの対応の工夫、計測計画の変更で、極力、実験時の手間を減らす検討を行う。前者は竹中主体で、後者は京大で検討を進める。
- ・ 実験の見積もりを作成し、事務局に報告(竹中)。
- ・ 案として、CLTの軸を90度回転させたもの(パネルの寸法は同じ)もあったが、設計で使用する範囲では性能に影響を与えない可能性が高いので実施しない。この考え方で、集成材を積み上げるタイプの工法もあり得るか。

3)要素実験について(資料 NO.04 シリーズ、05)

- ・ 実施する要素実験・分担は以下の通り。具体的な実験方法、試験体寸法、各材料の調達については現在未定。連絡を取り合いながら詳細を決定し、実験を実施。

竹中		
実験内容と実施時期	30 mm厚	実大厚
接着面の載荷実験 10 月下旬までに実施予定	寸法:1m×0.3m ? 調達:H26 年度の残りを活用	寸法:厚 150 mm 1m×0.3m ? 調達:京大保管分、他事業の端材を活用
パネルシェア実験 CLT 調達完了後適宜	寸法:0.8m×0.8m? 調達:H27 年度製造分	寸法:厚? 0.8m×0.8m? 調達:京大保管分、他事業の端材を活用

京都		
実験内容	30 mm厚	実大厚
アンカー接合部の実験 10 月下旬までに実施	?	寸法:? 調達:京大保管分、他事業の端材を活用
接着面の実験 (竹中での実験と比較) ?	軸力は3パターン程度としボルトで確保する計画。ただし、軸力一定にはならない。	寸法:? 調達:京大保管分、他事業の端材を活用
せん断試験 CLT 調達完了後適宜	寸法:0.7m×0.2m 幅はぎ無、幅はぎ有、両方実施	—

- ・ 30 mm厚の CLT(三層パネル)の調達量を早急に確認する必要があるため、京大・竹中それぞれで実験内容を検討し、京大・事務局に報告のこと。
- ・ 各実験の見積もりを作成し、事務局に報告(京大・竹中)。

※打ち合わせ以降、メール等での協議の結果、上表の網掛け部分は実施しないこととなった。

4)新築対応の検討

- ・ RC造建築物の耐震補強以外(RC造の新築及びS造の耐震補強・新築)でのCLTの耐震要素利用のための課題整理については、以下の分担で実施する。

竹中:新築物件における適用への課題のメモを作成

京大(五十田):北米・欧州のS造等への適用事例の整理と課題のメモの作成

5)1/3試験体用CLT(三層パネル)の調達(資料NO.02、06、07)

- ・ 要素実験も含めた必要枚数を確認し、ヤング・含水率の計測の準備を進める。(京大)
- ・ 丸天星工業へ事務局より概略を説明し、京大の担当者へつなぐ。
- ・ 齋藤木材工業で製造する幅はぎなしのパネルも、イソシアネートでの製造可能。

6)RC-木複合床およびRC耐震補強の実験(資料NO.08)

- ・ 全3体(集成材梁タイプ2仕様、CLT無梁タイプ1仕様:2m×10m)を西日本建材試験センター(山口県小野田)で1月に実施予定。
- ・ 竹中との共同実施としており、見学のための出張旅費などは確保済。

7)その他

- ・ 次回の打合せは、11月9日(月)10時~12時、(株)竹中工務店にて開催。
- ・ 次回打ち合わせの主な検討内容は以下の通り。
 - ① 接着面の要素実験、アンカー接合部の要素実験が終了し、1/3試験体が決定している状態で、最終チェックを行う。
 - ② 残りの要素実験の計画の報告、終了した実験結果の報告。
 - ③ 新築への対応についての整理の進捗状況確認と作業内容の検討。
- ・ 最終成果物としては、以下のものを予定。
 - ① RC造でのCLT耐震補強の早期普及を図ることを目的に適用範囲を限定したうえで、平成26年度に実施した接合法等の検討結果を反映した基本設計式を作成・整備し、設計ガイドライン等として取りまとめる。(ガイドラインには、設計の適用範囲の他、施工体制の条件なども合わせて示す)。
 - ② 高効率接合部については、検討の中心となるアンカーなどと組み合わせたものの他、ブロックを用いた耐震補強工法との併用(ブロックの脱落防止)など、耐震補強工法の施工性や信頼性の向上に関わるアイデアも検証する。

以上

打合議事録

日時	2015年11月9日(木) 10:00~12:00
場所	(株)竹中工務店 東京本店 応接No.12
参加者	五十田(京大)、森(京大)、北守(京大)、幅(京大)、小林(竹中)、宇佐美(竹中)、福原(竹中)、栗原(竹中)、荒木(建研)、坂(林野庁)、西村(林野庁)、平野(DOT)
配布資料	<p>NO.01 :H27 木質耐震補強プロジェクト打合せ議事録 20150903</p> <p>NO.02 :接着せん断試験結果速報</p> <p>NO.03 :CLT せん断(丸天星製)試験、アンカー接合部分実験報告</p> <p>NO.04 1/3 試験体 実験計画</p> <p> 04-01 :1/3 試験体図 製作4体 スパン1800</p> <p> 04-02 :1/3 試験機図 製作1体 スパン1140</p> <p>NO.05 :鉄筋コンクリート造および鉄骨造への CLT 耐震壁適用の課題(素案)</p> <p>NO.06 :北米・欧州の S 造等への適用事例の整理と課題メモ(欠番)</p> <p>NO.07 データフォーマット</p> <p> 07-01:Read Me</p> <p> 07-02:変位計&ひずみゲージ設置図面</p> <p> 07-03:CLT 耐震補強チャンネルリスト&特記事項</p> <p>NO.08 :2015 委託事業_年間スケジュール</p> <p>NO.09 なぜ国の建物で本工法にて耐震補強ができないか(情報提供)</p> <p> 09-01:151106 耐震診断の参照条文</p> <p> 09-02:H26.2.10 建築指導課長通達</p> <p> 09-03:官庁施設の耐震診断</p> <p>1)前回の議事録確認(資料 NO.01)</p> <p>2)官庁施設における本工法適用の可能性についての情報提供(資料 NO.09 シリーズ)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 官庁施設の耐震診断・補強では、「官庁施設の総合耐震診断・改修設計基準(平成8年10月24日建設省営計発第101号)」にて実施することが求められており、具体的は保有水平耐力により実施することとなる。現状では、本工法を使用するためにどうすれば良いか。 ・ 技術的には、$D_s=0.55$として保有水平耐力を求めることとするならば異論を唱える人はほとんど無いと思われるが、それ以下の数字を用いることとするならば、根拠をどう示すかという問題が生じる可能性が高い。 ・ 実質的に使用できるかどうかは、D_sをどの値とするかの判断を、誰がどのような形で行うかの申請フローによるのでは無いか。その部分を整理し、具体的な対応を検討する必要がある。 ・ 「官庁施設の総合耐震診断・改修設計基準(平成8年10月24日建設省営計発第101号)」において、なぜこのような規定が示されているのか、荒木が過去の経緯を確認する。

3) 接着せん断試験結果の速報(資料 NO.02)

- ・ 竹中において実施した接着せん断試験については、おおむね予想通りの実験結果であった。

4) CLT せん断(丸天星製)試験、アンカー接合部分実験報告(資料 NO.03)

- ・ 今回、製造場所を変更した CLT(30mm厚)が昨年度のものと同様かどうかの確認実験においては、同等との実験結果が得られた。
- ・ アンカー接合部分の実験については、乾式・接着併用接合部についての検討を行った。接着のみの接合部と比較して、わずかに性能を上回ることが確認されたが、期待したレベルには達しなかった。1/3 試験体の仕様決定には、もう少し検討する必要がある。
- ・ この方式の接合部の検討では、チャンピオンデータを得ることを目標としたい。つまり、施工性などについては優先度を下げ、何を行うと高い耐力を得られるかを検討したい。また、耐震補強ということだけでなく、新築への応用を考えると、施工性や納まりも違った評価となり得る。このあたりは、データを得てから、対応を考えていくという手法をとりたい。
- ・ 1/3 試験体の仕様決定は実験スケジュールの都合上、11 月末までに決定し、施工業者に指示する。接着を伴う仕様とする場合には、12 月 3～11 日までに施工を完了する必要がある。完全な乾式とする場合には、年内に施工が完了していることが必要。

5) 1/3 試験体 実験計画(資料 NO.04 シリーズ)

- ・ フレームについては、既に試験体製作に着手している。
- ・ 計測点数については、実験スケジュールの厳しさから、昨年度よりも減らす予定であったが、試験体数が 6→5 体となったことから、昨年度と同じ計測点数とする。
- ・ ただし、やはりゲージの貼り付け等については、マンパワーが不足しているので、東京測器に外注するか、学生アルバイトで対応するか、いずれかの方法をとる。見積もりをとり、決定する。
- ・ 短スパン試験体については、初めてなので、計測点をあらかじめ設定する必要がある。
- ・ アンカー接合部仕様の試験体については、請求を京都大学として分ける。他の部分は DOT 宛てに請求。

6) 新築などへの適応についての課題(資料 NO.05)

- ・ 北米・欧州での実例については次回に五十田より紹介。
- ・ 新築への課題については、法令上のものと技術上のものに分けられる。今回挙げられたものがどちらに当たるのかを整理して、今後、詳細・現状を調査していくこととする。

7) その他

- ・ 昨年度の CLT 関係のデータについて、データベースフォーマットを作成し整理→本日京大より納品。(資料 NO.07)今年度も、同様のスタイルでデータ整備を行う。
- ・ 次回の打ち合わせは、12 月 7 日月曜日 10～12 時 竹中工務店東京本店にて実施。

以上

打合議事録

日時	2015年12月7日(月) 10:00~12:00
場所	(株)竹中工務店 東京本店 応接No.12
参加者	五十田(京大)、森(京大)、北守(京大)、幅(京大)、小林(竹中)、宇佐美(竹中)、福原(竹中)、栗原(竹中)、坂(林野庁)、平野(DOT)
配布資料	<p>NO.01 : H27 木質耐震補強プロジェクト打合せ議事録 20151109</p> <p>NO.02 : 1/3 試験体図(4体分)</p> <p>NO.03 : 乾式タイプの仕様に関する検討</p> <p>NO.04 : 試験体 W-C05A(写真)</p> <p>NO.05 : 1/3 試験 ひずみ計測計画図</p> <p>NO.06 : 1/3 試験スケジュール</p> <p>NO.07 : CLT 純せん断試験計画書</p> <p>NO.08-1 : 報告書 目次(案)20151207</p> <p>NO.08-2 : 2015 委託事業_年間スケジュール</p>
	<p>1) 前回の議事録確認(資料 NO.01)</p> <p>2) 1/3試験体による実験計画について(資料 NO.02、NO.05、NO.06)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 試験体の製作は順調に進み、本日より接着施工に着手。 ・ 計測計画は昨年度をベースとし変更無しで実施。 ただし、W-C02(幅はぎなし)については、パネルのラミナ間の変形(ズレ)が生じるかどうかを計測するために、追加で変位計を設置すること。ラミナ寸法はランダムなので、表と裏のはぎ位置がそろっている等、変形(ズレ)が生じそうな箇所を現地で確認し計測する。 ・ 加力の日程は、試験体種類も含め NO.06 のスケジュール通り、12/25(金)、1/6(水)、1/12(火)、1/18(月)、1/27(水)とする。 <p>3) 乾式タイプの仕様の検討・決定(資料 NO.03、NO.04)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 仕様は、資料 NO.03 をベースとし以下の点を修正したものとする。京大にて最終試験体図を作成し、竹中に報告。 <ol style="list-style-type: none"> ① 下部のクリアランス(無収縮モルタル)は 20 mmから 30 mmに変更。 ② 左右のスリットは 15 mmとする。(W-C04Sv と揃える。) ③ 下部のケミカルアンカーは、柱より 40 mmの位置にある両端を取りやめ、中央に 2 本追加する。(ドリルでの穴開け施工が困難なため。)トータルの本数は変更無し。 また、現在端部から 2 本目のものをなるべく柱に寄せるよう変更。(せん断には本数が関係するが、引き抜きが生じる可能性を考慮し可能な限り端部に設置したいため。) ④ 下部のアンカーはφ12、山形鋼の穴はφ14とする。 スタブへの穴は充填材がきちんとまわる寸法が必要であるため要検討(案φ15)。また、スタブへの穴開けの精度を確保するため、山形鋼の穴開け加工をする際に、スタブ穴開

け用のガイドを同時に製作する。

⑤ 上部のアンカーの両端は、施工ができない場合には無理に設置せず中止する。その場合、アンカー本数は-2本で46本となる。

⑥ 上部のアンカーはφ8、山形鋼の穴はφ12とする。

また、山形鋼の穴の加工を行うために、既に梁に埋め込んでいる木だぼ位置のガイドを製作する。

- ・ CLTの取り付け施工は、1/18(月)からとするため、12月末には各種部材・部品を全て竹中技研に向けて発送すること。
- ・ 本仕様の要素実験は京大で計画中。

4)CLT 純せん断試験の計画(資料 NO.07)

- ・ 竹中において、資料の通りのCLTの純せん断試験を実施する。
- ・ 試験日は1/20(水)を予定。破壊性状を共有したいため、動画を撮っておくこと。
- ・ 京大においても、類似のせん断試験を実施予定。

5)報告書の構成と報告書作成スケジュールについて(資料 NO.08 シリーズ)

- ・ 目次構成を、「接着工法のメカニズムの解明とその設計方式の提案」と、「その他の工法の可能性の検討と課題の整理」に分ける。
- ・ 昨年度からの続きであり、そのベースがないとわかりにくいことから、昨年度の概要を1章にもりこむ。
- ・ 事務局にて、目次の第二案を作成し、今年度の事業計画と一緒に送付する。
- ・ 報告書のメ切りは3月4日(金)とし、事務局でとりまとめた上で、3月11日に林野庁に提出。

7)その他

- ・ 今回の打ち合わせは、2月25日(木)13:30~16:30 竹中工務店東京本店にて実施。この際には、各担当が報告書のたたき台について報告し、修正点などを議論する。報告書のたたき台は可能な限り、事前にメンバーに送付のこと。

以上

打合議事録

日時	2016年2月25日(木) 13:30~17:30
場所	(株)竹中工務店 東京本店 4C 会議室
参加者	五十田(京大)、森(京大)、北守(京大)、幅(京大)、小林(竹中)、宇佐美(竹中)、福原(竹中)、栗原(竹中)、坂(林野庁)、平野(DOT):議事録作成
配布資料	<p>NO.01 :H27 木質耐震補強プロジェクト打合せ議事録 20151207</p> <p>NO.02 :工形 CLT パネルを用いた実大水平せん断実験</p> <p>NO.03 :報告書 目次(案)</p> <p>NO.04 :本事業の仕様書)</p> <p>NO.05 :報告書(案)</p>
	<p>1)前回の議事録確認(資料 NO.01)</p> <p>2)実大製品の CLT せん断実験の紹介(資料 NO.02)</p> <ul style="list-style-type: none"> 別事業で実施している実大製品の CLT のせん断実験結果について、幅はぎ有り無しとの値についての紹介。 <p>3)報告書案のチェック(資料 NO.03、NO.04、NO.05)</p> <ul style="list-style-type: none"> 報告書案のチェックを行った。明確な指摘事項は以下の通り。この他、未だ分析などが十分でないところや技術的な判断が明確にならない部分は、本日の議論を受けて、各担当者が3月4日までに完成させる。 <p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> 材料提供者の企業名は記号で表記することとする。 <p>ex:</p> <p>【1編について】</p> <ul style="list-style-type: none"> 1章に、仕様書で示した内容と本報告書との対応などを明記すること。 2章 2.3については、現在の法令で新築建物に適用できるルートを整理・提示することと一般構法として普及させるための課題を明記する。これらの課題は法律・技術・設計の視点におおよそ分類されるが、明確に分けることは難しいので、課題毎に各視点から見ると現段階でどのような対応を記述することとする。 3章は、節の構成を変更。→新しい目次案を参照。 3章 3.1には、計測したラミナ毎のヤング及び含水率等の表も掲載。幅はぎ有り無しとの差は、差がないと言い切れないので、データの差などを示すことにとどめる。 3章 3.2では、掲載している写真などが幅はぎ有り無しかが明確にわかるように記述する。 3章 3.4にて、京大・竹中でそれぞれ行った実験結果の比較と考察を行う。京大担当。また、実大製品での既往の研究について、特性値の整理や試験方法による違いなどについて、再度まとめておく。(H26年度の2.1に示されているものの他、本日提供されたものも含め、表などでまとめるなど、どのような種類の試験が行われていて、どのような製品が対象となっていたの

かをわかりやすく。)

【2編について】

- ・ 2章 2.3.2については、スパンの比較もしているので、H26に実施したロングスパンの値も掲載する。

【3編について】

- ・ 2章について、試験体の接合部部分を決定した際の考え方を、文章でも記述する(現在は、図に計算式は掲載済み)。
- ・ 4章のまとめについては、本仕様の結果が最終的なアウトプットに対してどうなのかを記述する。耐震補強工法としてと新築の建築物に適用する工法としてを分けて記述。課題についても、同様に記述。
- ・ 1章の目的部分は、4章のまとめの書きぶりに合わせて修正する。

4)その他

- ・ 最終の打合せ、3月9日(水)13:30~16:30 京都大学生存圏にて実施。
- ・ 今後のスケジュール
 - 3月4日金曜日 →事務局に報告書を提出
 - 3月8日火曜日 →編集を終了した報告書をメンバーに送付
各メンバーで内容をチェックし指摘事項・修正事項をピックアップ
 - 3月9日水曜日 →京都大学で最終打合せ
 - 3月10日木曜日 →最終修正を事務局で実施
 - 3月11日金曜日 →事務局より林野庁提出

以上

第2章 構造主体を木造以外とする構造への CLT 利用拡大の 手法と課題

2.1 はじめに

木材はこれまで線材としての利用普及が図られていたが、CLT は面材料であり、木材の利用用途がこれまでとは異なる。これまで本事業で実施してきた鉄筋コンクリート造の耐震補強に用いる方法も木材の面材料としてのひとつの使い方提案である。このように壁としての利用に加え、もともと CLT という材料の開発の経緯を考えた場合、床としての利用が真っ先に思いつき、別途、超高層等に用いるための 2 時間耐火部材の検討が進められているところである。

海外ではすでに先行事例がいくつかある。耐火的な配慮は日本と比べて厳しいものではないが、構造的な観点からの利点や今後の汎用性、普及可能性を考えていくうえで、有益な資料であることは間違いない。そこで、ここでは鉄骨造に対する海外の事例を紹介するとともに、主体構造を木質構造以外とした場合に、新築として CLT を利用する際の課題を整理する。

2.2 鉄骨造との併用

軸材である鉄骨造と面材料を組み合わせる構造では、組み合わせられる面材料として、ALC 版、プレキャスト板、押出成形セメント板などのコンクリート系材料との組み合わせは多く、多様である。しかし、コンクリート系材料は比較的重量があるため、骨組への鉛直荷重、水平荷重ともに負担が大きくなり不利である。そこで、ALC 版を選択して面積当たりの重量を減じる、穴あきプレキャスト板（スパンクリートなど）として同様に重量を減じて使うことも多い。穴あきとすることにより 30~50%程度の質量の軽量化が可能であるとされ、コンクリートの比重が 2.1 程度であることを考えると、見かけの比重が約 1.0 程度まで軽減することになる。一方で、木材の比重は 0.5 であり、きわめて有利である。コンクリート系材料と同様の性能が同程度の厚さで確保されるかの検討は必要であるものの、多少の厚さの増加であっても軽量化の利点は十分にあるものと予想される。

2.2.1 鉄骨造柱はり構法と木床の組み合わせ

図 2.2.1-1 は鉄骨造柱はり構造に木製床を敷きならべたイメージである。これまでは湿式では鋼製デッキ+コンクリートが、乾式ではプレキャストコンクリート、さらに高層建築などをはじめとして、プレキャスト板（PC 板）を型枠代わりとして用いるハーフ PC などが用いられていた。図 2.2.1-1 は木製床を用いたイメージであり、ニュージーランドではす

でに図 2.2.1-2 に示す Scotia Apartment Tower という実例がある。この建物は 12 階建てで、床に 30×65mm のラミナからなる集成材が用いられている。鉄骨はりとは木床の接合は図 2.2.1-3 のように考えられており、床面で面内せん断力を伝える際には、初期にすべりを伴うが、問題のないレベルとして整理されている。木を使う利点は軽さや施工性などとされている。軽さについては一般的な構法に比べて 50% の低減が実現され、その結果として部材断面の削減、基礎の軽減などが図られている。鉄骨の部材断面、床スラブの厚さ、基礎構造などが表 2.2.1-1 のとおり整理されている。

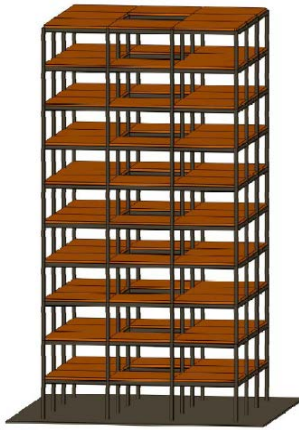


図 2.2.1-1 鉄骨+木床構造イメージ



図 2.2.1-2 Scotia Apartment Tower
(オークランド NZ)

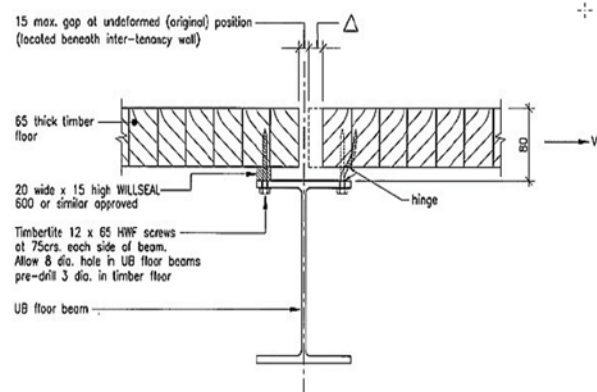
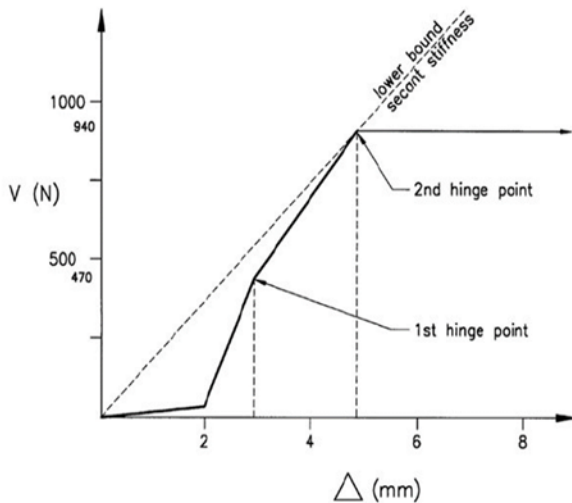


図 2.2.1-3 鉄骨はりとは木床の接合と面内変形が生じたときの挙動の仮定

表 2.2.1-1 コンクリートスラブと木床の比較

Structural Item	Wood Floor	Concrete Floor
Steel Frames: Diagonals	125 SHS and 150 SHS	150 SHS and 200 SHS
Floor Depth	330-mm	460-mm
Tower Steel Cols	200 SHS and 250 UC	250 SHS and 310 UC
Steel Beam/Col Joint	No Stiffeners	Stiffeners Required
Basement Conc Cols	450-mm dia	500-mm and 650-mm dia
Piles	600-mm dia – 2.5 m embedment	750-mm dia – 3.5 m embedment

2.2.2 鉄骨造の壁に CLT を用いたケーススタディ

鉄骨造の水平力に対する抵抗方法は図 2.2.2-1 に示すようにラーメン構造、ブレース構造などがあるが、木質系面材料を壁に用いた耐震壁という方法も考えられる。この利点は、前述した軽量化に加え、耐震壁によって十分な耐震安全性が確保できることや施工性の合理化、木材による室内環境の安定化などがあげられる。この構造はいまだ研究段階で、カナダ UBC の Solomon Tasfamarian らによって研究がすすめられているところである。ここでは、彼らの研究成果の一部を紹介する。

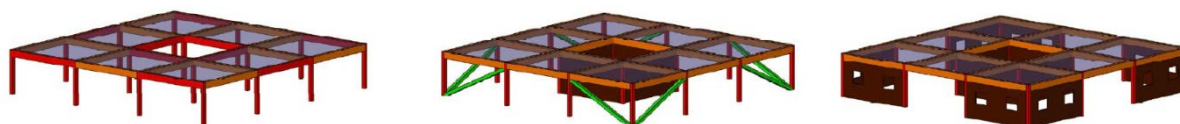


図 2.2.2-1 鉄骨造の水平力に対する抵抗機構（左からラーメン、ブレース、壁）

図 2.2.2-2 は鉄骨フレームに CLT を挿入したイメージ図である。CLT と鉄骨はメカニカルな接合がされており、図 2.2.2-3 のような金物についてのケーススタディが実施されている。

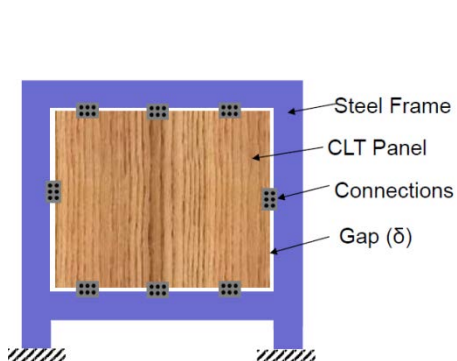


図 2.2.2-2 鉄骨フレーム+CLT



図 2.2.2-3 使用金物

接合部の実験結果や破壊性状などが示されており、その一例を図 2.2.2-4 に示す。1 本の釘によって接合された接合部であるが、最大耐力は 60kN 程度である。これまで CLT 構造の検討で用いている引きボルト接合部や木ネジ接合部では 200kN 程度の耐力で設計しており、我々が鉄骨造と CLT の組み合わせで考えている接合法に比べて耐力的には性能が低い。これらの接合部の実験結果を用いて、図 2.2.2-5 に示すような構造のモデル化を実施し、3 階建て、6 階建て、9 階建ての構造に対して、CLT 位置を様々変えた解析的な検討を実施している。解析結果の一例を図 2.2.2-6 に示した。CLT 耐震壁のない構造に対して 2~3 倍程度の性能向上が実現されている。特に高い剛性が実現されており、地震時に損傷低減が実現できること、さらに鉄骨造の粘り強さによって極大地震に対して倒壊を防ぐことが可能であり、損傷が小さく、かつ極大地震に対しての安全性も確保された構造が実現されている。

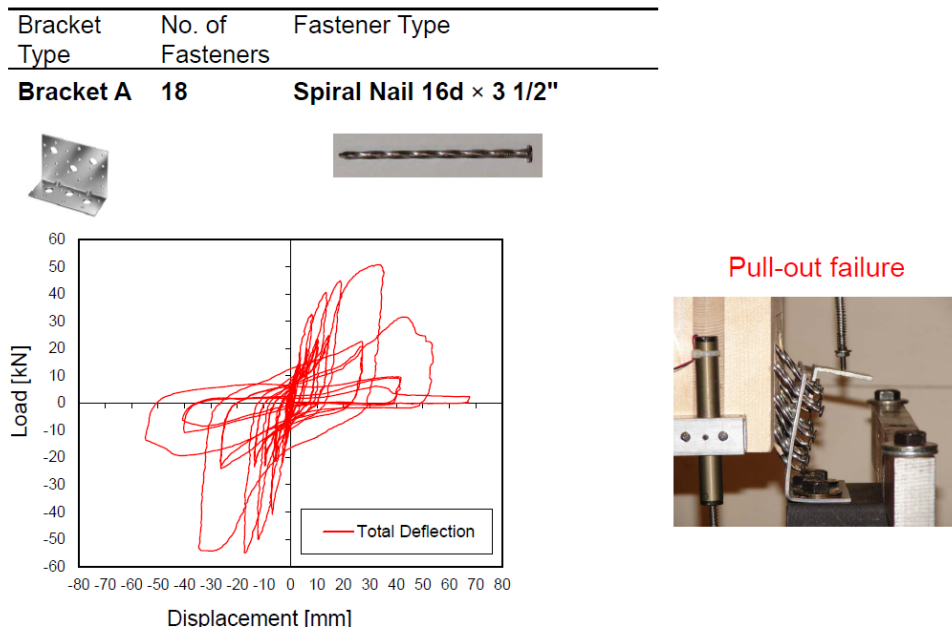


図 2.2.2-4 接合部の性能の一例

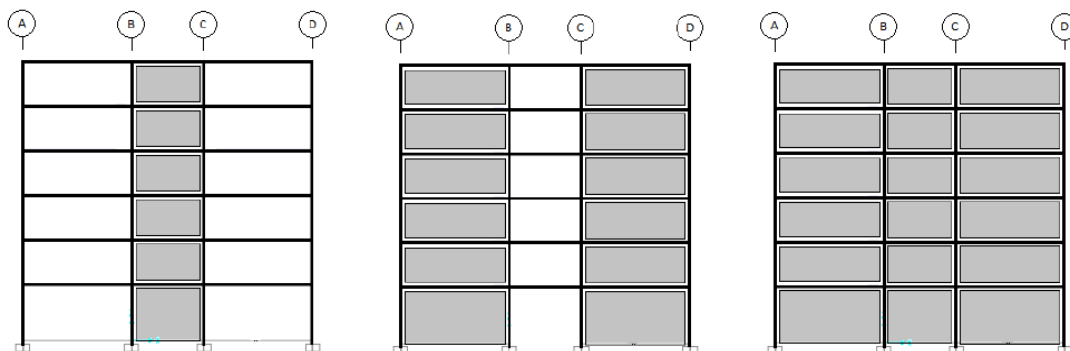


図 2.2.2-5 解析対象建物（6 階建てモデルの例）

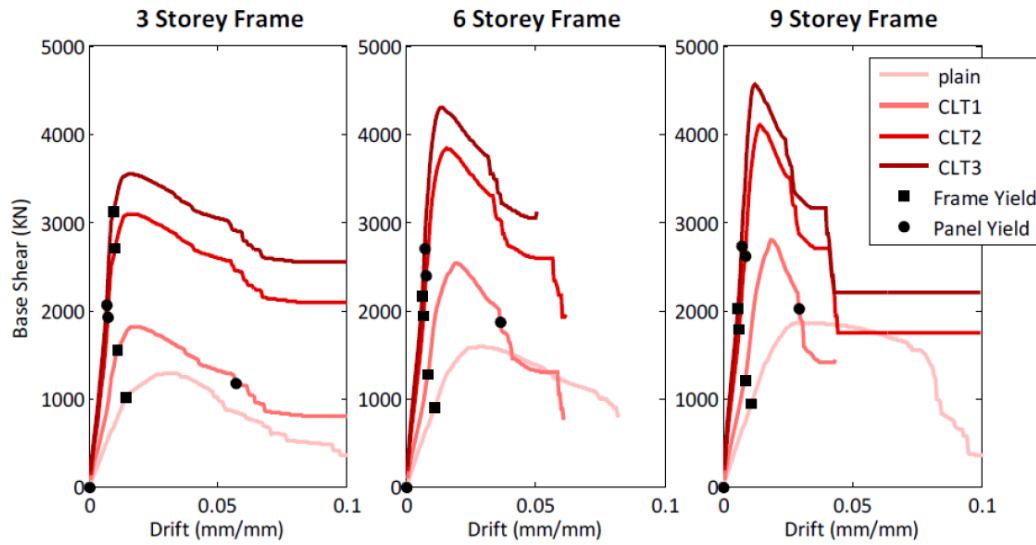


図 2.2.2-6 解析結果の一例

参考文献

- 1) Mark Moore : Scotia Place – 12 Story Apartment Building A case Study of High-Rise Construction Using Wood and Steel ; WCTE2000, 2000
- 2) Carla Dickof : CLT Infill Panels in Steel Moment Resisting Frames as a Hybrid Seismic Force Resisting System, Master Degree Thesis, The University of British Columbia, 2013
- 3) Siegfried Stiemer, Solomon Tesfamariam, et.al : Timber-Steel Hybrid Systems ; From Tree to Buildings Workshop, 2013

2.3 RC造や鉄骨造の新築建物へのCLTの適用と課題

2.3.1 現在の法令に基づいた新築建物へのCLTの適用

2.3.1.1 構造安全性の確認方法

CLTを新築建物の構造部材として採用する場合、発生する応力に対して部材の安全性検討を行うための基準強度（材料）が必要となる。建築基準法の中で国土交通大臣が指定する「指定建築材料（建築基準法第37条）」では、建材ごとに基準強度などが定められているが、CLTはまだ指定を受けておらず基準強度等の設定がなされていない。現在のこの状況で新築建物にCLTを採用するには「高さが60mを超える建物」に適用する構造耐力の確認方法（建築基準法第20条、以下「時刻歴応答計算」）を採用することで可能となる。具体的な計算方法は施行令81条および平12建告第1461号に記載があり、「構造計算を行うに当たり、構造耐力に影響する材料の品質が適切に考慮されている」ことを証明すればよいこととなる。

CLTとRC造や鉄骨造の部材と接合する際に接着剤を用いる場合も同様である。

2.3.1.2 火災による倒壊や延焼を防止する方法

新築建物の規模や用途、建築地の条件により、耐火建築物もしくは準耐火建築物としての性能が求められる場合がある。この場合には、国土交通大臣が指定する方法もしくは政令で定める技術的基準に適合する方法のいずれかを採用することで適用が可能となる。

一つ目は、「耐火構造の構造方法を定める件」（平12建告第1399号）による方法で、CLTを耐力壁として適用し、強化石膏ボード等で被覆する方法である。これにより1時間の耐火構造として採用することが可能となる。

二つ目の方法は、施行令108条の3第1項第一号による耐火性能検証法、もしくは施行令108条の3第1項第二号の「大臣認定を受けた高度な検証方法」によるものである。構造部材が保有する耐火性能と建物内外の火災状況を比較して、火災終了時間まで耐えうることを証明することで採用を可能とするものである。

2.3.1.3 火災時の避難や消火の妨げとならない壁・天井の仕上げ

新築建物の規模と用途に応じて、火災時の避難や消火活動の妨げとならないよう仕上げ材料に制限が設けられる場合がある（内装制限、建築基準法第35条の2）。法令に従ってCLTの部材表面に防火材料を設ければよいが、木表面が見える状態、すなわち「現わし」の状態で使用するには、次の3つの方法がある。

一つ目は、スプリンクラー設備等と排煙設備を用いる方法（施行令第129条第7項）である。この場合は内装制限の適用が除外され、天井・壁等のすべてに木が使えるようになる。

二つ目は、天井に準不燃材料を用いる方法（平12建告第1439号）で、「天井」にせっこうボード等をはることで「壁」に木が使えるようになるものである。

三つ目は、避難安全検証法等（施行令第129条の2、第129条の2の2）を用いる方法であり、火災時の避難時間と煙が拡散・滞留する時間を比較して、避難時の安全性を確認する方法である。

2.3.2 材料の基準強度および許容応力度等

建物の構造安全性確認において、材料の基準強度等の必要性について 2.3.1 で述べた。建築基準法第 20 条の時刻歴応答計算を用いれば、CLT を用いて高い自由度の設計が可能となるが、通常的设计作業と比べて多大な労力と費用が必要となる。CLT 耐震壁が一般的な構法として普及するには、CLT が建築基準法の指定建築材料となって材料強度や許容応力度等が設定され、設計時の利便性を高めることが必要となる。

また、木材と鋼材（鋼棒や鉄筋）を接着剤で接合する方法については、建築基準法・旧 38 条により大臣認定を取得した方法が今もなお使用され、さらに時刻歴応答計算により集成材梁と内装された鉄筋を接着剤で一体化された事例も見られる。技術的・法令を整備する上でのハードルはあるものの木材と異種材料（鋼材やコンクリート）とを接合する接着剤が使用できるようになれば、CLT の用途はさらに拡大するものと思われる。

2.3.3 CLT と柱・梁部材、CLT 部材間の接合

耐震改修での適用を目的とした CLT の接着工法では、接着剤自体の強度が高いことから、架構内での CLT の固定および隣接する CLT の一体化で高い接合効率を実現できたが、新築建物において接着材は、前述のとおり使用することはできない。そこで新築建物に適用する別の接合方法として、機械的接合やかん合接合、摩擦による接合などを想定して設計および施工時の課題を整理する。

2.3.3.1 機械的接合

周辺架構と CLT、CLT 部材間を機械的に接合する部材として、鋼板やドリフトピン、ボルト、ラグスクリューなどが挙げられる。これらは応力伝達要素であり、被接合部材との相互作用により接合部の性能が決定づけられる。これらを用いた機械的接合を採用する際の課題は次のとおりとなる。

- ・周辺架構と CLT、隣接する CLT 部材を一体化する生産性の高い接合方法の選定
- ・各接合方法における応力伝達機構の解明
- ・弾性限耐力や終局耐力、剛性及びその低下率、塑性変形能力等の定式化
- ・接合部の応力解析モデルと設計式（検定式）の構築
- ・施工時の接合部の検査方法

2.3.3.2 かん合接合

ここで言及するかん合接合は、周辺架構と CLT 外周部、CLT 同士の接合部に凹凸等をつけて、ダボ効果もしくは支圧により応力を伝達するものを指す。直接的に応力を伝達することから、高い製作・施工精度が求められる。かん合接合を実用化する場合の課題は次のとおりとなる。

- ・各接合方法・接合部形状における応力伝達機構の解明
- ・弾性限耐力や終局耐力、剛性及びその低下率、塑性変形能力等の定式化
- ・接合部の応力解析モデルと設計式（検定式）の構築
- ・含水率等の環境変化や経時変化による部材寸法の変化と力学性能のばらつきの評価

- ・許容される施工誤差範囲の設定と接合部の検査方法

2.3.3.3 摩擦接合

周辺架構と内挿された CLT は、地震荷重による架構の変形で部分的に密着（圧着）し、その部分に発生する摩擦で応力を伝達させることができる。接着工法の検討を通じて、接着部界面が割裂した後も摩擦により応力が伝達されることが分かったことによる。この摩擦接合を新築建物で実用化するための課題は次のとおりとなる。

- ・ばらつきが少なく、高い摩擦力を得るための摩擦面処理方法
- ・動摩擦係数、静止摩擦係数の設定方法と設計式（検定式）の構築
- ・摩擦性能を発現させるため施工方法と検査・管理方法

2.3.4 CLT の耐震壁としての挙動と地震荷重等に対する設計

2.3.4.1 中地震に対する CLT 耐震壁を含む架構の構造設計

現在の建築基準法では、中地震（震度 5 強程度）に対して構造体に損傷がないように、各部材・部位に発生する応力度が許容応力度内とすることが求められるが、CLT 壁板同士の接合方法や架構内への固定方法、取り付けられる部材種別や部位、境界条件等に応じて CLT を含む架構の力学性状が異なることとなり、設計手法もそれに応じたものでなければならない。現行基準が求める中地震に対する設計手法構築のため、次の課題の解決が必要となる。

- ・CLT とその取り付け状況が適切に反映された応力解析モデル（架構）の構築
- ・様々な形状の壁開口の構造評価方法
- ・解析結果に対する部材の設計方法

2.3.4.2 CLT 耐震壁を含む架構の保有耐力計算

建築物の条件によっては中地震の安全性確認のほかに、大地震（震度 6 強・7 程度）に対して倒壊防止の検討も行わなければならない。部材や架構の塑性化やエネルギー吸収能力について構造設計での検討が求められることから、CLT 耐震壁とそれを含む架構に対する大地震時の安全性の確認手法の構築のため、次の課題解決が必要となる。

- ・塑性化後の CLT 耐震壁の剛性低下ルールの定式化
- ・耐震壁の破壊モードの設定と各部検討方法、耐震壁としての終局耐力の算定方法
- ・必要保有水平耐力算定のための部材ランクおよび構造特性係数 D_s の決定方法

2.3.5 耐火性能の確保と火災時避難のための使用制限への対応

規模や用途、建築地等の条件により構造部材に耐火性能が求められ、また建築物の条件により仕上げ材料に対する制限（内装制限）が課せられることは 2.3.1 で述べた。CLT を耐震壁として採用するにあたり、現行の防耐火基準に対応させるための課題、さらに設計者が自ら安全を確認すべき事項として次のものが挙げられる。

- ・柱梁部材と CLT を接合する部分で鋼材（ドリフトピン、ラグスクリュー等）を使用した場合の火災時のヒートブリッジを回避するディテールの開発

- ・ CLT と柱梁部材が接合する部位の施工クリアランス（隙間・空隙）での耐火性能の確保
- ・ 軸力を負担しない耐震要素として使用して耐火被覆を設けない場合の柱梁部材との接合面の耐火性能の確保
- ・ 木の表面を現わしで使用する際の耐火構造等としての耐火性能の確保
- ・ 木の表面を現わしで使用する際の内装制限に対する対応方法
- ・ 壁に設けられた開口部分・貫通部分における耐火性能の確保

2.3.6 その他

CLT を耐震壁として使用する場合は設計および部材製造、施工上のその他の課題は次の通りとなる。

- ・ 施工中の湿潤・乾燥による寸法の変化に影響を受けない施工方法
- ・ 供用期間中の割れの発生とそれによる影響評価
- ・ 施工手順の違いにより CLT 耐震壁に作用する長期軸力の制御
- ・ 屋外に面する箇所を使用する場合の耐久性確保のための方法

第3章 CLTのせん断強度データの収集

3.1 実験で使用するCLT（30mm厚）の製造過程

今年度（平成27年度）の事業で使用するCLT（30mm）については、幅はぎありと幅はぎなしで、製造過程が異なっているため、以下にその記録を記す。

3.1.1 幅はぎありについて

幅はぎありのCLTに使用したラミナ形状はほぼ2010mmで厚さ12mm程度、幅はランダム（平均幅は102mm）であった。これらのラミナの寸法、質量、縦振動数を計測し動的ヤング係数を算出した。併せて、含水率も高周波式含水率計Kett 520にて計測した。ラミナのヤング係数の平均値は9.1GPa、変動係数16.3%、見かけ密度 381kgf/m^3 、変動係数8.5%、含水率8.7%、変動係数10.7%であった。ラミナのヤング係数の分布を図3.1.1-1に示す。

CLTの製造手順は以下の通りである。（写真3.1.1-1～6に製造過程の様子を示す。）

- ① 計測後のラミナの幅はぎ接着をおこない、必要幅である1005mmに達したところで切断し、 $1005 \times 2010\text{mm}$ の板を製作。
- ② 製作した板のうち、ラミナの平均ヤング係数が低いものを選択し切断。 1005×1005 の板を製作。
- ③ 3層に積層・接着。製品寸法へ切断（ $1000\text{mm} \times 2000\text{mm}$ ）。積層の際、②で製作した板は内層用として1枚の板から切り出したセットでを使用した。（T社で製造）

なお、内層に用いたラミナのヤング係数の平均値は8.4GPa、外層に用いたラミナのヤング係数の平均値は9.4GPaであった。使用したラミナのヤング係数、見かけの密度および含水率は、本章末に参考資料として示す。

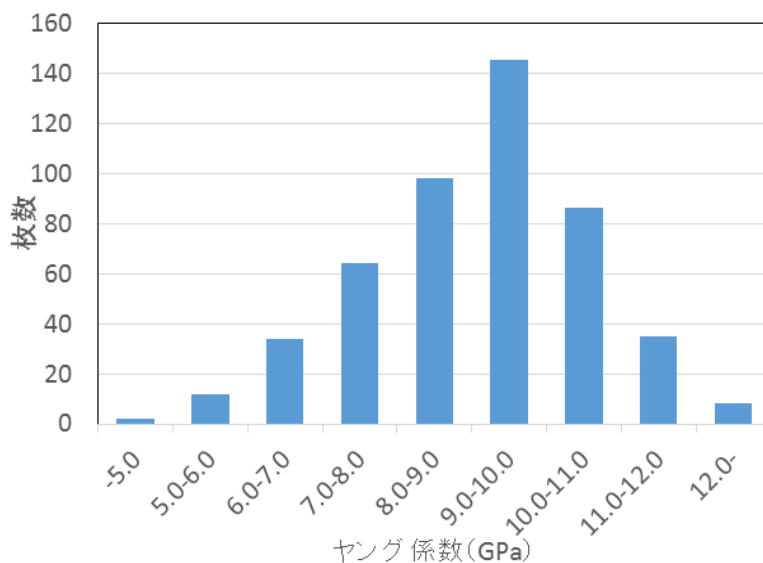


図 3.1.1-1 幅はぎありのラミナ構成



写真 3.1.1-1 寸法の計測



写真 3.1.1-2 含水率の計測



写真 3.1.1-3 縦振動の計測



写真 3.1.1-4 幅はぎ接着



写真 3.1.1-5 積層接着



写真 3.1.1-6 必要寸法への刻み

3.1.2 幅はぎなしについて

幅はぎありの CLT に使用したラミナ形状はほぼ 2010mm で厚さ 15mm 程度、幅はランダム（平均幅は 103mm）であった。これらのラミナの寸法、質量、縦振動数を計測し動的ヤング係数を算出した。併せて、含水率も高周波式含水率計 Kett 520 にて計測した。ラミナのヤング係数の平均値は 7.9GPa、変動係数 15.9%、見かけ密度 345kgf/m³、変動係数 11.1、含水率 8.1%、変動係数 8.2% であった。ラミナのヤング係数の分布を図 3.1.2-1 に示す。

CLT の製造手順は以下の通りである。写真 3.1.1-1~6 のうち、3.1.3-4 幅はぎ接着がないものとなる。

- ① 計測後のラミナを外層用（ヤング大）と内層用（ヤング小）に別け、ほぼ同じ平均ヤング係数になるように、ラミナの配置を決定。
- ② ラミナを幅方向、厚さ方向にプレナーがけ。
- ③ 積層面にのみ接着剤を塗布して、3 層に積層・接着。製品寸法へ切断（1000mm×2000mm）。（S 社で製造）

なお、ここで内層に用いたラミナのヤング係数の平均値は 6.8GPa、外層に用いたラミナのヤング係数の平均値は 8.6GPa であった。使用したラミナのヤング係数、見かけの密度および含水率は、本章末に参考資料として示す。

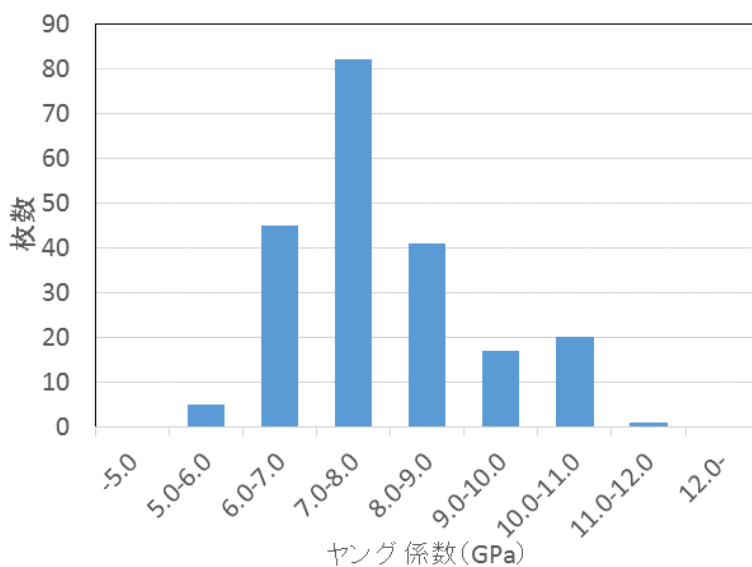


図 3.1.2-1 幅はぎなしのラミナ構成

3.2 大野式せん断実験

3.2.1 実験の目的と概要

今年度の本事業で使用する CLT パネルのせん断性能を確認するため、昨年度と同様の逆対称 4 点曲げせん断試験（大野式せん断試験）法によってせん断特性の評価を行った。

パラメーターは、今年度用意した幅はぎ接着の有無の他、昨年度事業と同等に斜め繊維配向によるせん断特性の向上効果を確認するための繊維傾斜とした。

本試験方法の検証として、せん断応力分布を知るためにひずみゲージ計測を行った。幅はぎがない試験体ではラミナ間のずれによるせん断特性値への影響が考えられたため、見かけのせん断弾性係数（変位計による値）と局所せん断弾性係数（ひずみゲージによる値）を比較することで、この影響の定性的な評価を試みることを目的とする。

3.2.2 試験体と試験方法

試験体の仕様および試験体数等を表 3.2.2-1 に示す。グレーの網掛けは昨年実施したものである。繊維角度については図 3.2.2-3 にあるように、表層ラミナの方が加力方向と直交する方向を 0° とし、それに対する角度で示した。中央せん断区間において、せん断変形時に表層ラミナの繊維方向に伸びる力を受ける試験体を T 条件とし（30T 等と示す）、反対に表層ラミナの繊維方向が縮む力を受ける試験体を C 条件（30C 等と示す）とした。

試験は、試験体寸法が長さ $L=600\text{mm}$ 、高さ $H=200\text{mm}$ 、厚 $B=30\text{mm}$ の場合、ピッチ 200mm の 3 等分において支持し、中心軸線上で静的加力を行った（図 3.2.2-1）。試験体のせいが 240mm の M 社のものは、加力スパン条件はすべて梁せいの比率に応じて拡大した。なお、試験体加力点のめり込みを防止するため、加力点には幅 100mm の鋼板を加圧板として用い、必要に応じて繊維直交力を受ける CLT ラミナをコーススレッドスクリューを打ち込むことでめり込み補強した。

本条件において、荷重 P に対し、中央部でのせん断力 Q は $Q=P/2$ となる。

試験体の上下平面の相対ずれ変形 δ を計測するため、試験体中心軸線上のモーメントが 0 となる位置に試験体両面に変位計 CDP-10m を取り付けした（図 3.2.2-2）。このとき、この断面の平均せん断応力 $\tau_{\text{ave}}=Q/BH$ に対する、断面の平均せん断ひずみ γ_{app} は $\gamma_{\text{app}}=\delta/H$ で計算され、したがってこの断面の平均せん断弾性係数 $G_d=\tau_{\text{ave}}/\gamma_{\text{app}}$ で計算できる。

同時に、せん断ひずみ計測を行った（図 3.2.2-3）。多くの試験体では中心位置の片面で 3 軸ゲージによるせん断ひずみ測定を行った（ひずみゲージ配置①）。また、一部の試験体では中心軸線上の 3 点でひずみ計測を行い、断面内のせん断応力分布を観察した（ひずみゲージ配置②）。各試験体のひずみゲージの配置については、表 3.2.2-1 に示す。

試験体中心部におけるせん断ひずみ γ_m に対し、その位置での局所せん断応力 τ_m は断面内のせん断応力分布がパラボラであると仮定すると $\tau_m=3Q/2BH$ で計算される。したがって、この位置での局所せん断弾性係数 $G_g=\tau_m/\gamma_m$ で計算できる。この値は、せん断応力分布が放物線形状で、中心軸線上で最大になるという仮定に基づいており、かりに CLT のラミナ間にせん断ずれが生じ、応力分布が想定外のものでは実際よりも大きい値を与えることになる点に注意する必要がある。

$$\tau_{ave} = Q/BH, \tau_m = 3Q/2BH \quad B: \text{試験体奥行き(30mm)、H: 試験体せい(200mm)}$$

$$\gamma_{ave} = \delta/H \quad \delta: \text{試験体上下面水平相対変位(前後面平均値)}$$

γ_m : 試験体中心位置せん断ひずみ(ひずみゲージによる計測値)

$$G_d = \tau_{ave}/\gamma_{ave}: \text{試験体中心断面平均せん断弾性係数}$$

$$G_g = \tau_m/\gamma_m: \text{試験体中心位置局所せん断弾性係数(せん断応力放物線仮定)}$$

表 3.2.2-1 せん断試験体の仕様

材料・寸法	作製元	試験体名	繊維角度[°]	試験体数	ひずみゲージ配置
700×200 厚 30mm 幅はぎあり	L 社 (H26 年度製造) 実施済みデータ	30 有 L1	0	6	なし
			30C	6	なし
			30T	6	なし
	L 社 (H26 年度製造)	30 有 L2	0	6	①×4, ②×2
			30C	4	①×4
			30T	4	①×4
			45C	4	①×4
			45T	4	①×4
			90	4	①×4
	T 社	30 有 T	0	6	①×6
			30C	5	①×5, ②×1
			30T	6	①×5, ②×1
700×200 厚 30mm 幅はぎなし	S 社	30 無 S	0	6	①×6
			30C	6	①×6
			30T	6	①×6
参考	M 社	90 無 M	0	6	①×6
	M 社	150 無 M	0	8	なし

※700×200mm 厚 30mm 試験体はスパン 200/200/200mm、780×200mm 厚 90/150mm 試験体はスパン 240/240/240mm

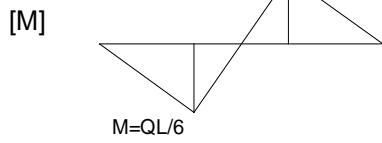
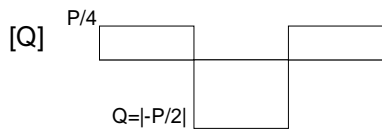
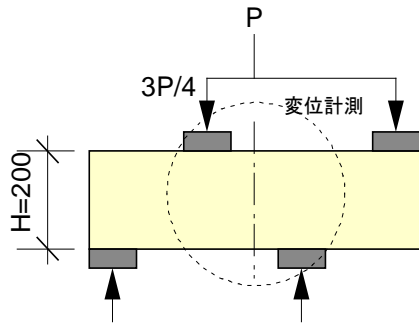
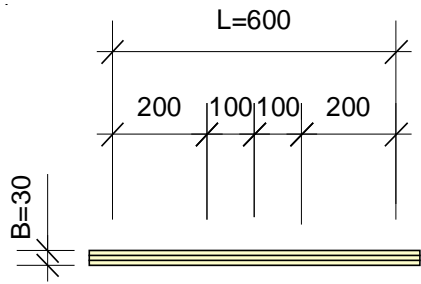


図 3.2.2-1 試験体の概要

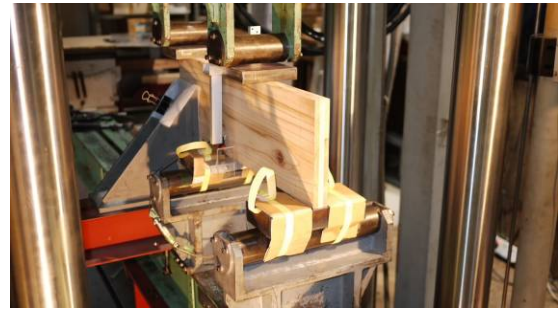
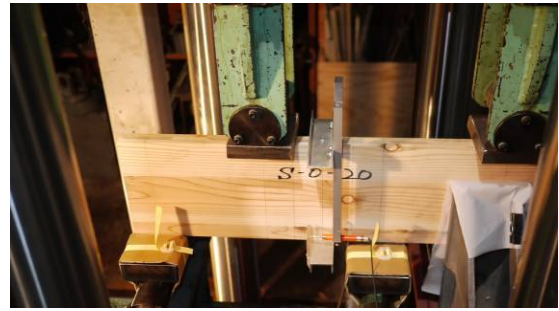


写真 3.2.2-1 試験風景

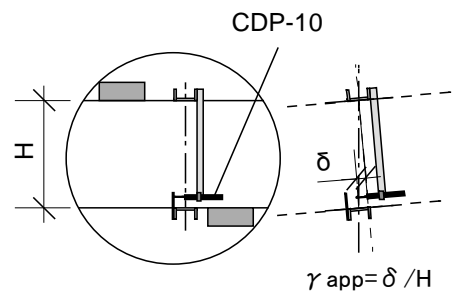
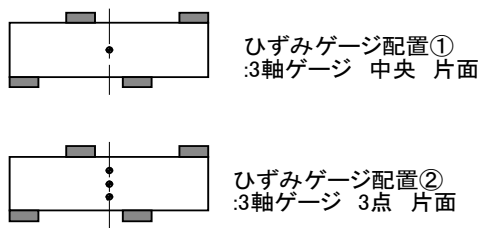


図 3.2.2-2 変位計測



ひずみゲージ配置①
:3軸ゲージ 中央 片面

ひずみゲージ配置②
:3軸ゲージ 3点 片面

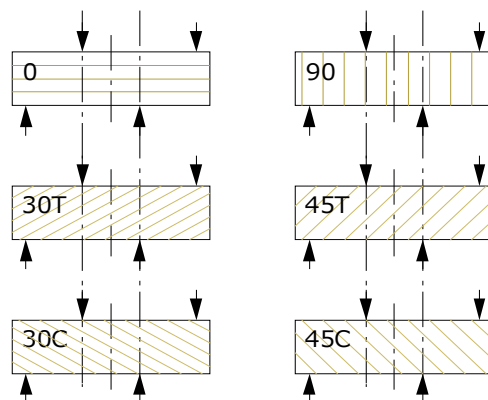


図 3.2.2-3 試験体パラメータ

3.2.3 試験結果

3.2.3.1 荷重変形関係

次ページの図 3.2.3-1 より、以下の 6 仕様についてせん断応力-ひずみ関係を示す。図では、左に $\tau_{ave}-\gamma_{ave}$ 関係の 6 体（もしくは 4 体）をまとめて示してばらつきの程度を示し、右にそれぞれの試験体における、 $\tau_{ave}-\gamma_{ave}$ 関係（平均：黒実線）と $\tau_m-\gamma_m$ 関係（局所：橙実線）を比較した。

図 3.2.3-1	L 社製幅はぎ有り 0° (30 有 L2-0)
図 3.2.3-2	L 社製幅はぎ有り 90° (30 有 L2-90)
図 3.2.3-3	T 社製幅はぎ有り 30° T(30 有 T-30T)
図 3.2.3-4	S 社製幅はぎ無し 0° (30 無 S-0)
図 3.2.3-5	M 社製 90mm 厚幅はぎ無し 0° (90 無 M-0)
図 3.2.3-6	S 社製幅はぎ無し 30° (30 無 S-30C)

(1) 幅はぎありの試験体比較

図 3.2.3-1 に L 社製幅はぎ有り 0° (30 有 L2-0) のせん断応力-ひずみ関係を示した。右側の個々の比較を見ると、両曲線の傾きはほぼ一致しており、変位計で得られる全体平均せん断弾性係数とひずみゲージで得られる局所せん断弾性係数が概ね一致する値を得られることを示す。これは本試験方法の確かさを表すと同時に、断面内でせん断応力分布が放物線状になると言う材料力学的な現象を裏付けるものと言える。すなわち、幅はぎ有りの CLT のせん断では、ラミナ間の相対ずれがほとんど生じていないことがうかがえる。

このことは繊維傾斜角が異なる試験体でも確認できる。図 3.2.3-2 には L 社製幅はぎ有り 90° (30 有 L2-90)、図 3.2.3-3 には T 社製幅はぎ有り 30° T(30 有 T-30T) の試験結果を代表として示したが、図 3.2.3-1 と同様に、全体平均せん断弾性係数と局所せん断弾性係数を示す結果の傾きが概ね一致している。同様の傾向は幅はぎ有りの他の全ての試験条件においてみられた。

(2) 幅はぎなしの試験体比較

図 3.2.3-4 には S 社製幅はぎ無し 0° (30 無 S-0) の結果を示した。個々の試験結果における、全体平均せん断弾性係数と局所せん断弾性係数を示す結果の傾きを観察すると、あまり両者が合致しない。同じ傾向は参考値として図 3.2.3-5 に示す、M 社製 90mm 厚幅はぎ無し 0° (90 無 M-0) の結果においても観察される。以上から、幅はぎ無しの CLT では、ラミナ間のせん断ずれの影響が大きく、結果として断面内のせん断応力分布が放物線とはならず、よって局所のせん断応力を正確に推定することが困難であるため、せん断弾性係数を求める事が難しいと推測できる。しかし、全体平均せん断弾性係数は見かけのせん断特性値を示すものであるが、構造体としてのせん断特性値を示す指標としては有効な値と考える。

図 3.2.3-6 には S 社製幅はぎ無し 30° (30 無 S-30C) の結果を示した。0° (30 無 S-0) の結果とは対照的に、角度をもった条件では幅はぎ有りの結果と同様に、全体平均せん断弾性係数と局所せん断弾性係数を示す結果の傾きが概ね一致した。この原因は不

明であるが、ラミナを斜めに配置した条件では、せん断力が繊維に沿って斜めに流れるため、ラミナ間の相対ずれの影響があまり顕著にならない可能性がある。

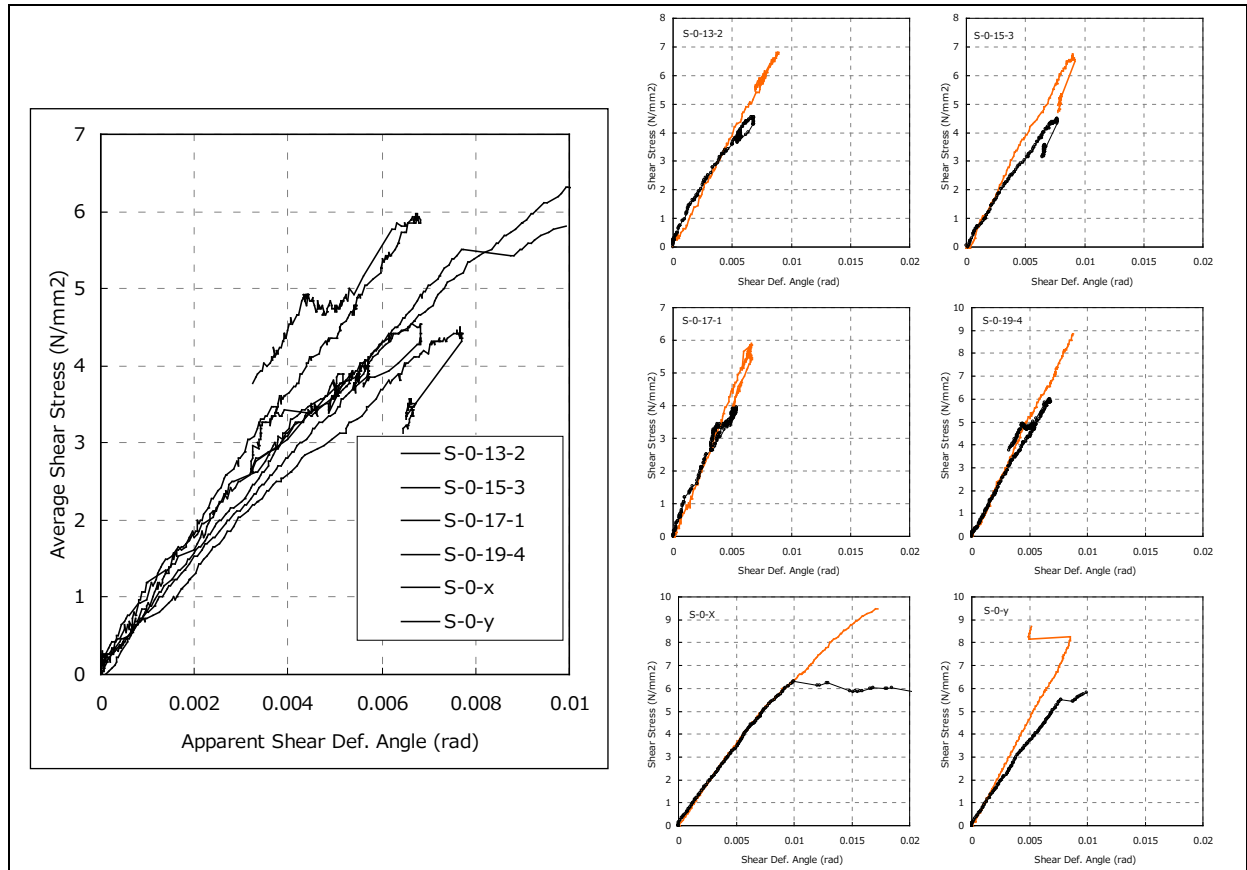


図 3.2.3-1 L 社製幅はぎ有り 0° (30 有 L2-0)のせん断応力-ひずみ関係

左： τ_{ave} - γ_{ave} 関係の 6 体の比較

右 6 体：それぞれの試験体における、 τ_{ave} - γ_{ave} 関係（黒実線）と τ_m - γ_m 関係の比較（橙実線）

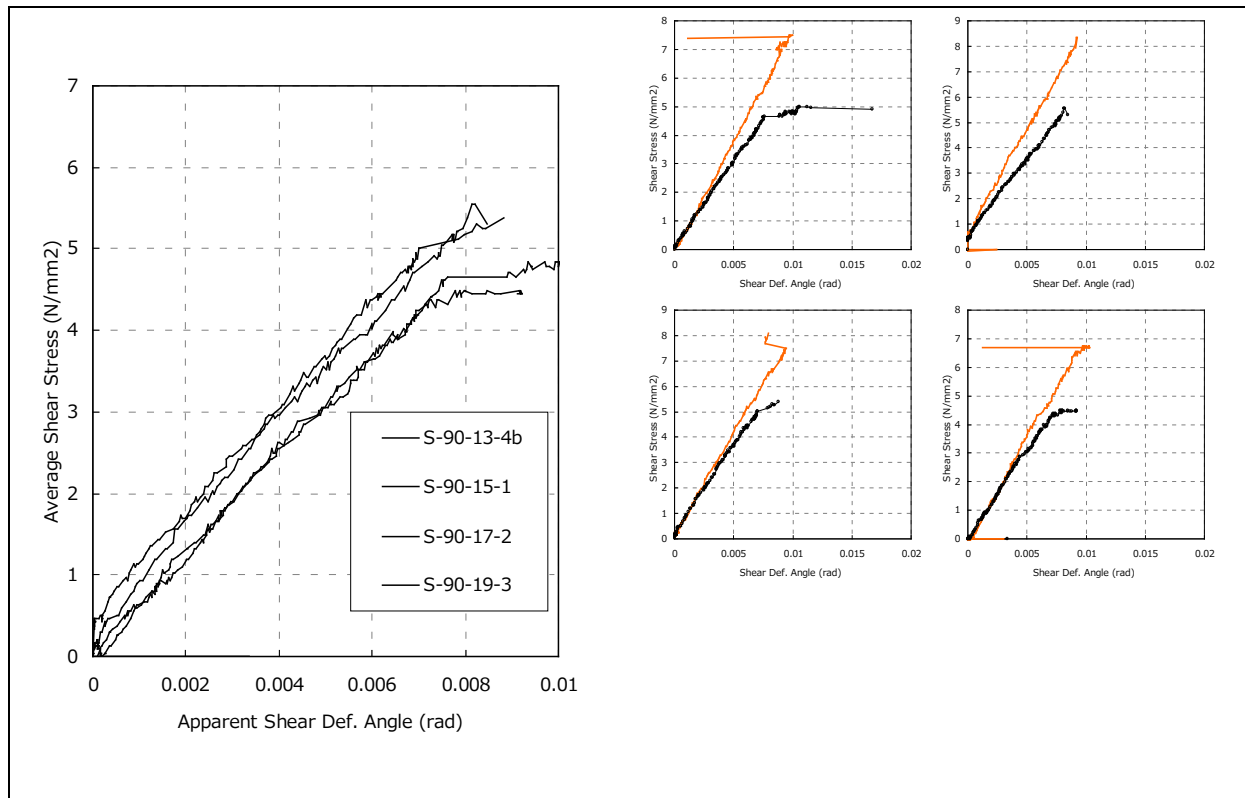


図 3.2.3-2 L 社製幅はぎ有り 90° (30 有 L2-90)のせん断応力-ひずみ関係

左 : τ_{ave} - γ_{ave} 関係の 6 体の比較

右 6 体 : それぞれの試験体における、 τ_{ave} - γ_{ave} 関係 (黒実線) と τ_m - γ_m 関係の比較 (橙実線)

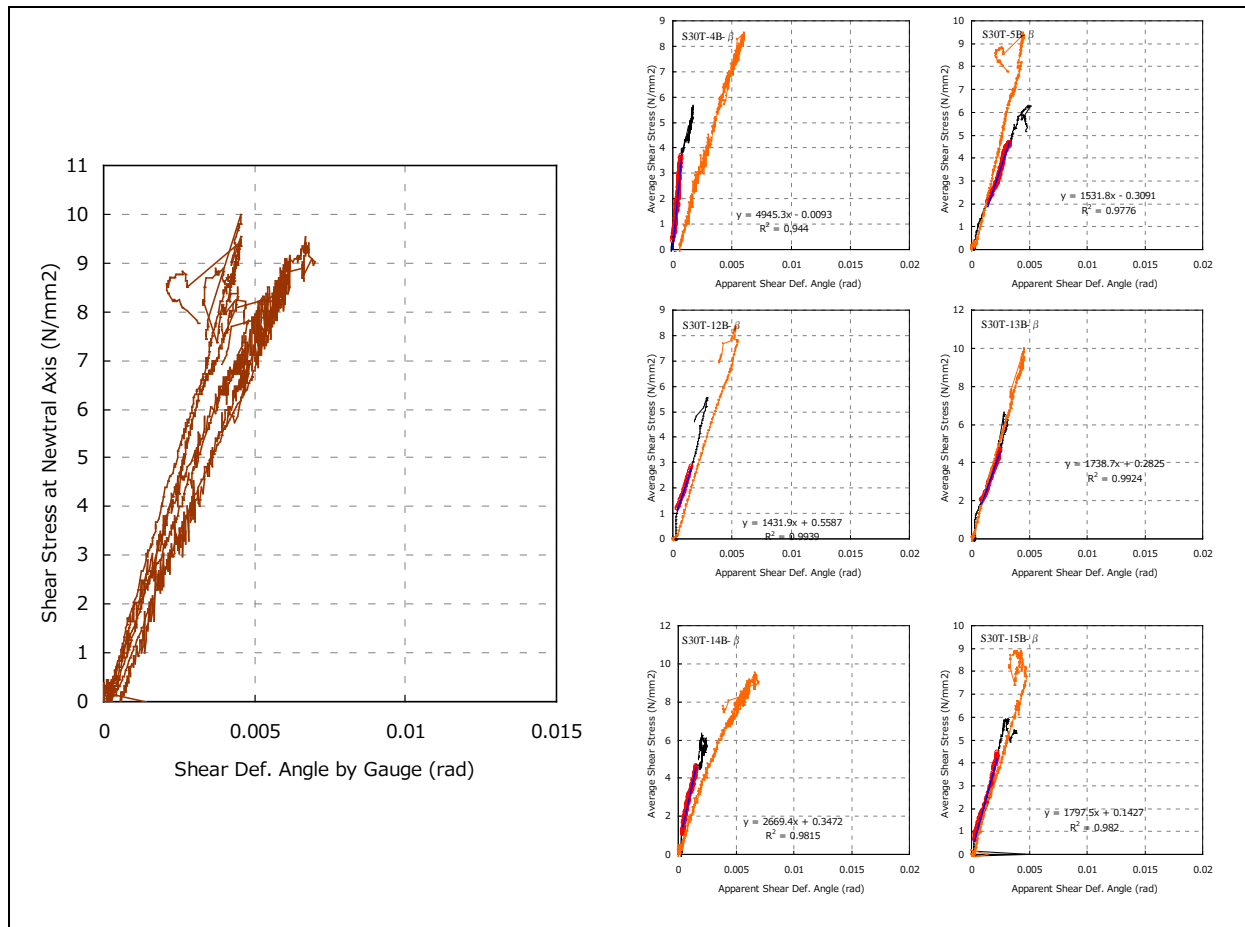


図 3.2.3-3 T 社製幅はぎ有り 30° T(30 有 T-30T)のせん断応力-ひずみ関係

左： τ m- γ m 関係の 6 体の比較

右 6 体：それぞれの試験体における、 τ ave- γ ave 関係（黒実線）と τ m- γ m 関係の比較（橙実線）

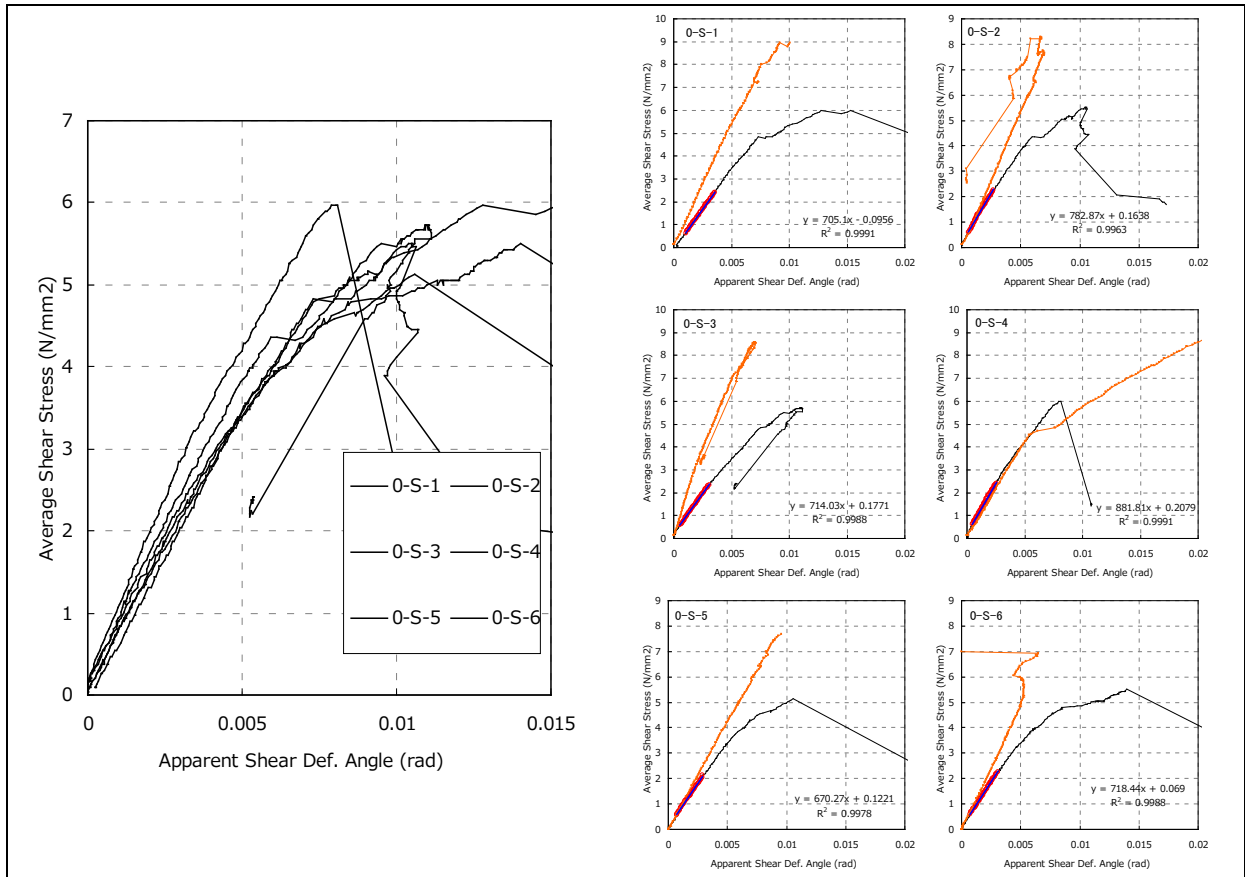


図 3.2.3-4 S 社製幅はぎ無し 0° (30 無 S-0)のせん断応力-ひずみ関係

左： τ_{ave} - γ_{ave} 関係の 6 体の比較

右 6 体：それぞれの試験体における、 τ_{ave} - γ_{ave} 関係（黒実線）と τ_m - γ_m 関係の比較（橙実線）

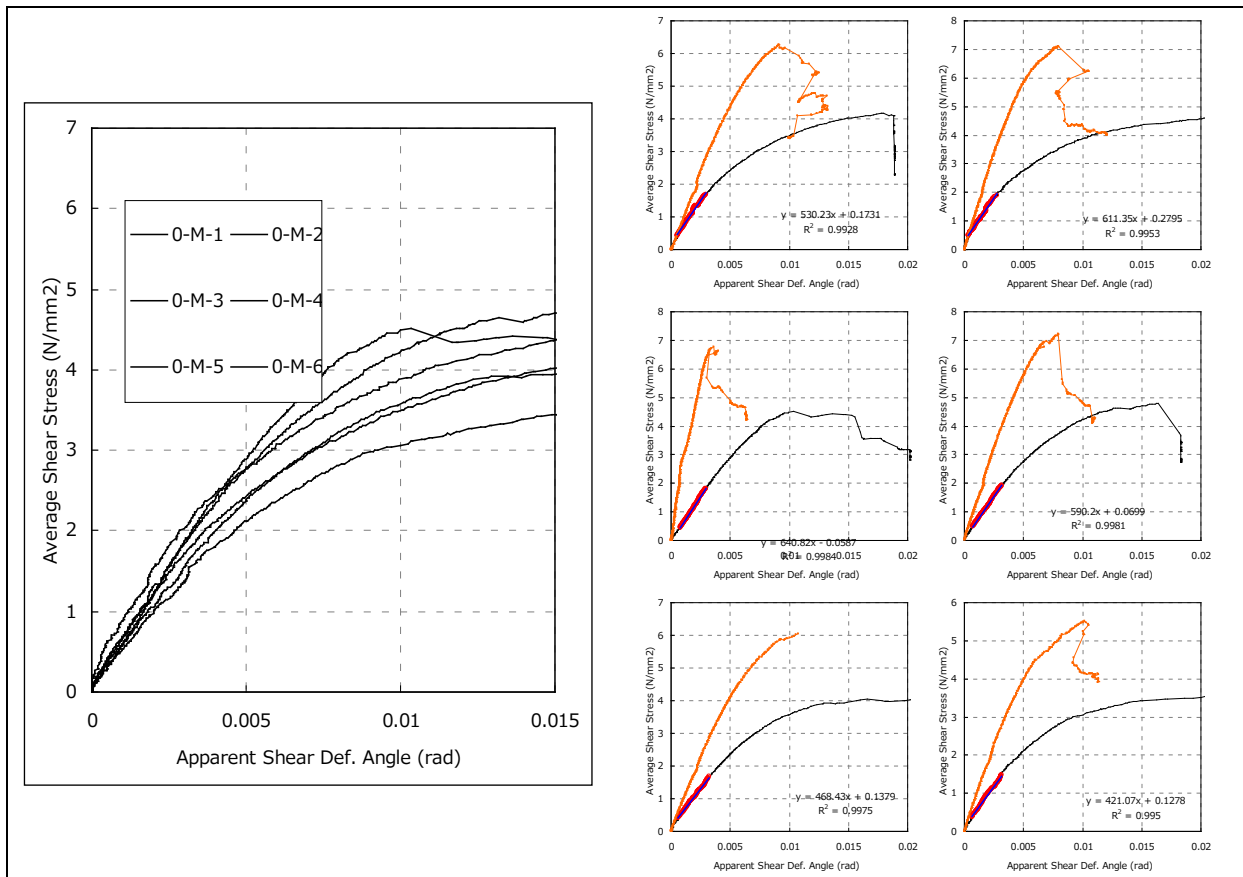


図 3.2.3-5 参考：M 社製 90mm 厚幅はぎ無し 0° (90 無 M-0)のせん断応力-ひずみ関係

左： τ_{ave} - γ_{ave} 関係の 6 体の比較

右 6 体：それぞれの試験体における、 τ_{ave} - γ_{ave} 関係 (黒実線) と τ_m - γ_m 関係の比較 (橙実線)

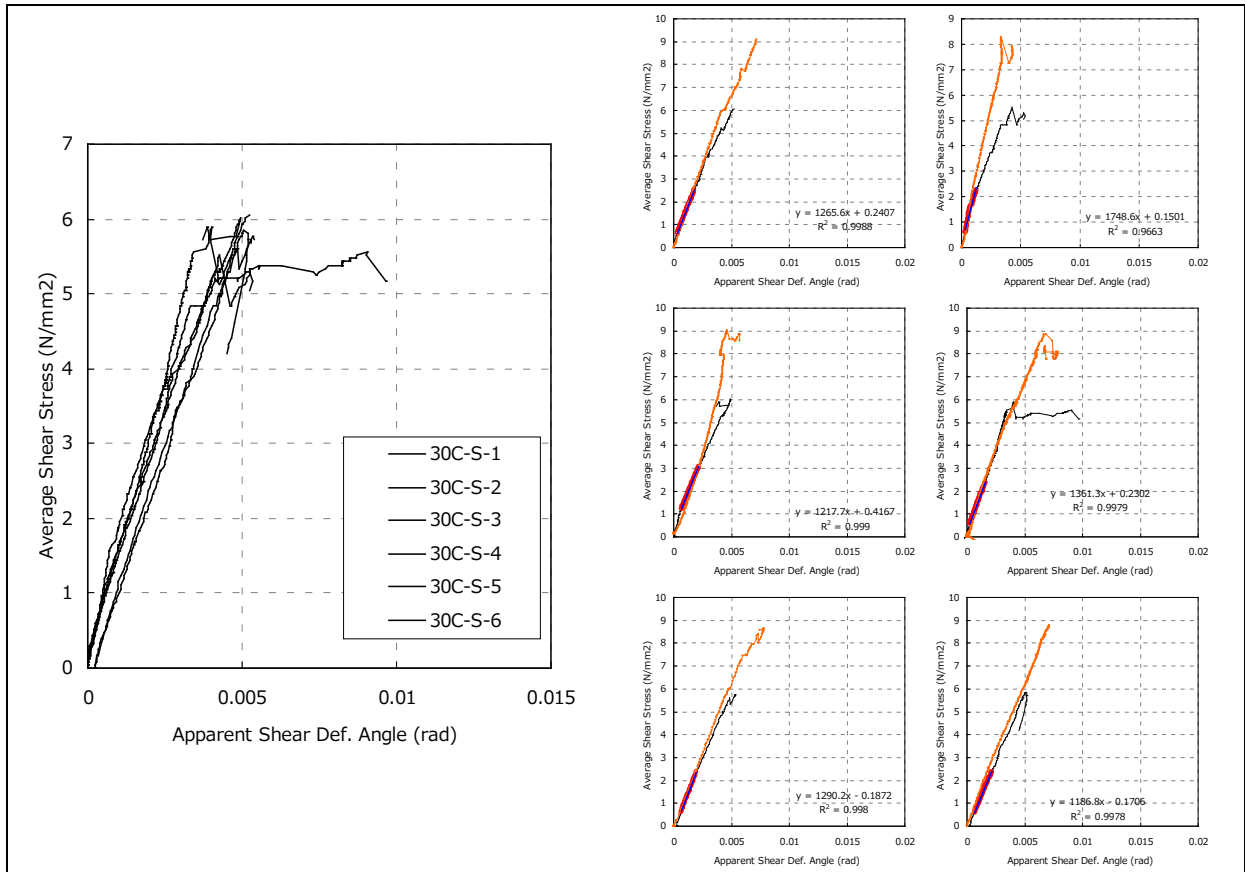


図 3.2.3-6 S 社製幅はぎ無し 30° (30 無 S-30C)のせん断応力-ひずみ関係

左： τ_{ave} - γ_{ave} 関係の 6 体の比較

右 6 体：それぞれの試験体における、 τ_{ave} - γ_{ave} 関係（黒実線）と τ_m - γ_m 関係の比較（橙実線）

3.2.3.2 せん断特性値

表 3.2.3-1 に、断面平均せん断強度、変位計によるせん断剛性、ゲージによるせん断剛性の平均値と標準偏差を、繊維傾斜角度にグルーピングして示した。また、代表的な破壊性状を示した試験体の写真を、写真 3.2.3-1 に示す。

0° 条件において、断面平均せん断強度は厚 30mm 試験体ではいずれの条件でも 5.5～6.0N/mm² であり、製造元の差や幅はぎの有無の差はほとんど見られなかった。同様に、変位計によるせん断剛性においても 730～840N/mm² 程度の値を示し、製造元の差や幅はぎの有無の差は小さかったと言える。応力-ひずみ関係において幅はぎの影響が見られたのにもかかわらず、強度や剛性にその影響が見られなかった理由は不明確である。

一方で、同じ 0° 条件にもかかわらず厚 90、150mm 試験体では、せん断強度が 4.3 N/mm² 程度とやや小さく、変位計によるせん断剛性も厚 90mm で 544 N/mm² と特異に小さかった。

90°、30°、45° の他の条件のせん断強度は平均すると 6.0 N/mm² 程度と 0° 条件の試験体と差がほとんど無い結果であったが、角度の有る条件の試験体は破壊形態が必ずしもせん断破壊では無い（曲げ破壊）ため、参考値とみるべきである。

せん断弾性剛性に関しては、90°の条件では 0°の条件とほとんど変わらない値であったが、30°の条件では T 条件で 1600～2200 N/mm² 程度、C 条件で 1300～1700 N/mm² 程度と、いずれも 0°条件に比べると約 2.39 倍、約 1.89 倍の値を示した。

なお、局所的な真のせん断強度の値は、せん断応力分布が放物線であると仮定し、断面平均剪断強度の 1.5 倍と考えて良いものと考えられる。

表 3.2.3-1 各条件のせん断特性値のまとめ：平均値と標準偏差

		断面平均せん断強度 τ_{ave} [N/mm ²]			変位計によるせん断剛性 G_d [N/mm ²]			ゲージによるせん断剛性 G_g [N/mm ²]	
		ave	SD	平均値	ave	SD	平均値	ave	SD
		0°	30 有 L1-0	5.99	0.24	5.68	841	101	777
	30 有 L2-0	5.18	0.97	728	115		886	147	
	30 有 T-0	5.89	0.72	793	61		830	417	
	30 無 S-0	5.64	0.33	745	76		1089	276	
	90 無 M-0	4.33	0.43	544	86		1402	853	
	150 無 M-0	4.18	0.21	793	84				
90°	30 有 L2-90	5.11	0.47		654	49		806	31
30°	30 有 L1-30T	5.82	0.73	5.63	1696	459	1856		
	30 有 L2-30T	5.07	0.20		1867	300		1850	300
	30 有 T-30T	6.08	0.43		2282	1265		1795	229
	30 無 S-30T	5.56	0.23		1579	513		2033	385
	30 有 L1-30C	6.03	0.79	5.94	1720	395	1471		
	30 有 L2-30C	5.20	0.70		1415	670		1131	264
	30 有 T-30C	6.67	0.61		1404	202		1359	152
	30 無 S-30C	5.85	0.20		1345	207		1671	506
45°	30 有 L2-45T	5.05	0.73		2459	359		1864	225
	30 有 L2-45C	5.33	0.45		3967	1414		1777	130

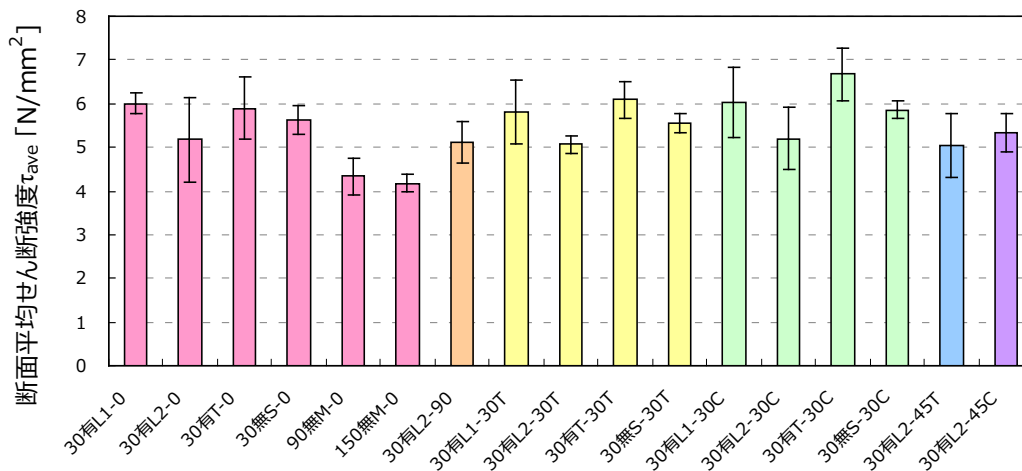


図 3.2.3-7 断面平均せん断強度 τ_{ave} : 試験条件ごとの平均値とばらつき

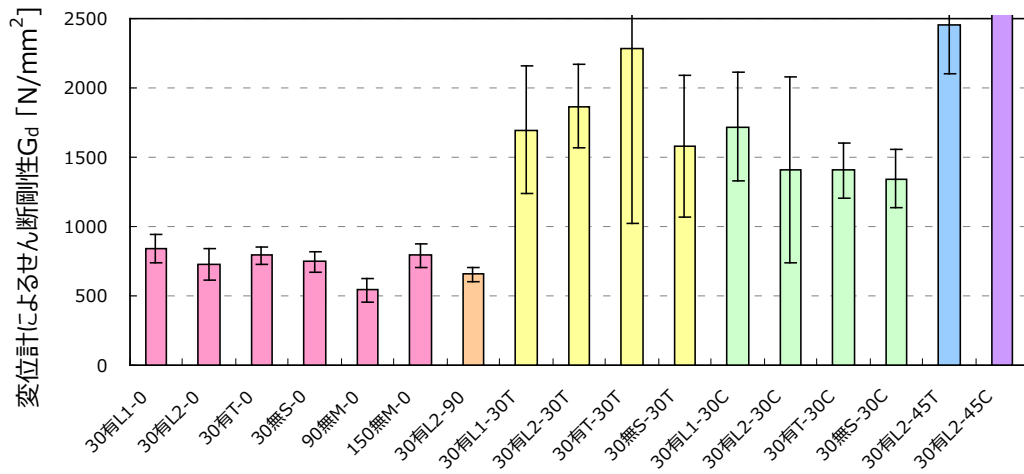


図 3.2.3-8 変位計による全体平均せん断弾性係数 G_d : 試験条件ごとの平均値とばらつき

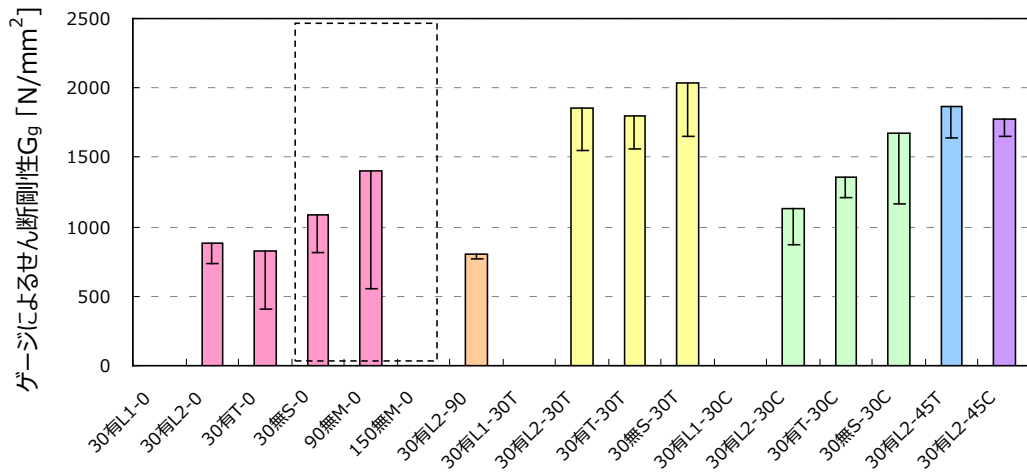


図 3.2.3-9 ゲージによる局所せん断弾性係数 G_g : 試験条件ごとの平均値とばらつき


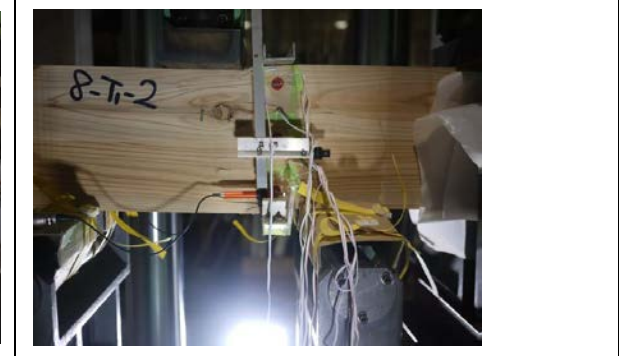


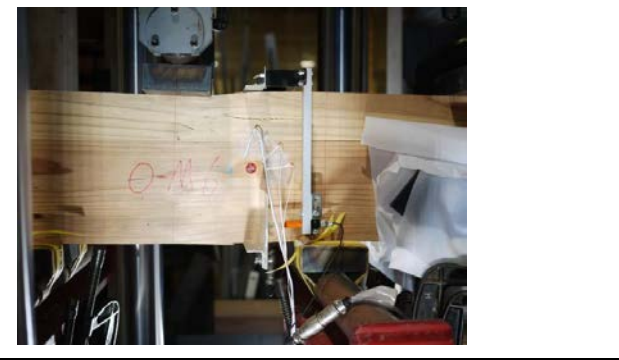



	
<p>30 有 L1-0</p>	<p>30 有 L2-0</p>
	
<p>30 有 T-0</p>	<p>30 無 S-0</p>
	
<p>90 無 M-0</p>	
	
<p>30 有 T-30C</p>	<p>30 有 T-30T</p>

写真 3.2.3-1 試験体破壊性状

3.2.3.3 要素せん断実験まとめ

製造元の違いや、幅はぎの仕様の異なる各種の CLT パネルについて、大野式せん断試験法によってせん断特性値を評価した。その結果、製造元の違いによる影響は少なく、また幅はぎの有無による強度や剛性値への影響は小さい事が明らかとなった。平均的な 30mm 厚 CLT の断面平均せん断強度と断面平均せん断剛性の値は、それぞれ 5.68N/mm^2 、 777N/mm^2 程度である（幅はぎ有りの場合平均値としてせん断強度 5.69N/mm^2 、せん断弾性係数 787N/mm^2 に対して、幅はぎ無しの場合平均値としてせん断強度 5.64N/mm^2 、せん断弾性係数 745N/mm^2 である。）。

3.2.3.4 試験結果一覧

以下に、全ての試験結果について、一覧表を示す。

表 3.2.3-2 L 社 (H26 年度仕様) H26 年度実施済みデータ : 30mm 厚 幅はぎ有り

30有L1	0							ave	SD	CV
	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6				
	Pmax [kN]	67.4	74.6	69.4	71.2	73.7	72.8			
	$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	5.62	6.21		5.93	6.14	6.07	5.99	0.24	0.04
	τ_m-max [N/mm ²]	8.42	9.32		8.90	9.21	9.10	8.99	0.35	0.04
	G _d [N/mm ²]	697	990	824	771	878	886	841	101	0.12
	30T							ave	SD	CV
	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6				
	Pmax [kN]	71.3	59.2	75.2	59.2	74.2	80.1			
	$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	5.94	4.93	6.26	4.93	6.18	6.67	5.82	0.73	0.12
	τ_m-max [N/mm ²]	8.91	7.40	9.40	7.39	9.27	10.01	8.73	1.09	0.12
	G _d [N/mm ²]	2064	1307	2167	1364	1173	2100	1696	459	0.27
	30C							ave	SD	CV
no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6					
Pmax [kN]	72.6	65.1	80.0	59.8	70.7	85.8				
$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	6.05	5.43	6.66	4.98	5.89	7.15	6.03	0.79	0.13	
τ_m-max [N/mm ²]	9.07	8.14	10.00	7.48	8.84	10.73	9.04	1.19	0.13	
G _d [N/mm ²]	1435	1637	2073	1225	2286	1663	1720	395	0.23	

表 3.2.3-3 L 社 (H26 年度仕様) H27 年度追試験 : 30mm 厚 幅はぎ有り

30有L2	0							ave	SD	CV
	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6				
	Pmax [kN]	54.4	53.9	47.3	71.7	75.8	69.7			
	$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	4.5	4.5	3.9	6.0	6.3	5.8	5.18	0.97	0.19
	τ_m-max [N/mm ²]	6.8	6.7	5.9	9.0	9.5	8.7	7.77	1.46	0.19
	G _d [N/mm ²]	692	690	639	951	654	741	728	115	0.16
	G _g [N/mm ²]	790	880	938	1095	664	948	886	147	0.17
	30T							ave	SD	CV
	no.1	no.2	no.3	no.4						
	Pmax [kN]	59.0	61.0	64.1	59.0					
	$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	4.9	5.1	5.3	4.9			5.07	0.20	0.04
	τ_m-max [N/mm ²]	7.4	7.6	8.0	7.4			7.60	0.30	0.04
	G _d [N/mm ²]	2246	1643	1611	1968			1867	300	0.16
G _g [N/mm ²]	1833	1488	2223	1854			1850	300	0.16	
30C							ave	SD	CV	
no.1	no.2	no.3	no.4							
Pmax [kN]	53.9	62.1	73.2	64.6						
$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	4.5	4.8	6.1	5.4			5.20	0.70	0.14	
τ_m-max [N/mm ²]	6.7	7.2	9.2	8.1			7.80	1.06	0.14	
G _d [N/mm ²]	920	1106	2402	1231			1415	670	0.47	
G _g [N/mm ²]	888	1387	1329	920			1131	264	0.23	
45T							ave	SD	CV	
no.1	no.2	no.3	no.4							
Pmax [kN]	54.9	56.5	73.8	57.5						
$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	4.6	4.7	6.1	4.8			5.05	0.73	0.14	
τ_m-max [N/mm ²]	6.9	7.1	9.2	7.2			7.58	1.10	0.14	
G _d [N/mm ²]	2664	2623	1921	2627			2459	359	0.15	
G _g [N/mm ²]	1872	1692	1713	2179			1864	225	0.12	
45C							ave	SD	CV	
no.1	no.2	no.3	no.4							
Pmax [kN]	62.1	58.5	71.2	64.1						
$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	5.2	4.9	5.9	5.3			5.33	0.45	0.08	
τ_m-max [N/mm ²]	7.8	7.3	8.9	8.0			8.00	0.67	0.08	
G _d [N/mm ²]	5183	1994	4760	3931			3967	1414	0.36	
G _g [N/mm ²]	1695	1640	1871	1904			1777	130	0.07	
90							ave	SD	CV	
no.1	no.2	no.3	no.4							
Pmax [kN]	60.0	66.6	64.6	53.9						
$\tau_{ave-max}$ [N/mm ²]	5.0	5.6	5.4	4.5			5.11	0.47	0.09	
τ_m-max [N/mm ²]	7.5	8.3	8.1	6.7			7.66	0.71	0.09	
G _d [N/mm ²]	607	618	684	707			654	49	0.08	
G _g [N/mm ²]	780	833	777	833			806	31	0.04	

表 3.2.3-4 T 社 (H27 年度仕様) : 30mm 厚 幅はぎ有り

30有T	0		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	68.7	76.8	68.7	75.8	78.8	55.4					
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	5.7	6.4	5.7	6.3	6.6	4.6		5.89	0.72	0.12	
	τ_m-max	[N/mm ²]	8.6	9.6	8.6	9.5	9.9	6.9		8.84	1.08	0.12	
	G _d	[N/mm ²]	739	730	805	837	887	761		793	61	0.08	
	G _g	[N/mm ²]	1012	876	1162	0	981	948		830	417	0.50	
	30T		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	68.2	75.8	66.6	79.9	76.3	71.2					
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	5.7	6.3	5.6	6.7	6.4	5.9		6.08	0.43	0.07	
	τ_m-max	[N/mm ²]	8.5	9.5	8.3	10.0	9.5	8.9		9.12	0.64	0.07	
	G _d	[N/mm ²]	4184	1242	1432	1739	3583	1513		2282	1265	0.55	
	G _g	[N/mm ²]	1693	2136	1533	1984	1804	1618		1795	229	0.13	
	30C		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
Pmax	[kN]	80.9	87.0	81.9	82.9	67.7							
$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	6.7	7.2	6.8	6.9	5.6			6.67	0.61	0.09		
τ_m-max	[N/mm ²]	10.1	10.9	10.2	10.4	8.5			10.01	0.91	0.09		
G _d	[N/mm ²]	1613	1490	1227	1153	1537			1404	202	0.14		
G _g	[N/mm ²]	1139	1260	1459	1473	1464			1359	152	0.11		

表 3.2.3-5 S 社 : 30mm 厚 幅はぎ無し

30無S	0		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	71.7	66.1	68.7	71.7	61.5	66.1					
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	6.0	5.5	5.7	6.0	5.1	5.5		5.64	0.33	0.06	
	τ_m-max	[N/mm ²]	9.0	8.3	8.6	9.0	7.7	8.3		8.46	0.49	0.06	
	G _d	[N/mm ²]	705	783	714	882	670	718		745	76	0.10	
	G _g	[N/mm ²]	1122	1108	1606	866	867	968		1089	276	0.25	
	30T		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	66.6	63.1	67.7	68.7	64.1	70.2					
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	5.6	5.3	5.6	5.7	5.3	5.8		5.56	0.23	0.04	
	τ_m-max	[N/mm ²]	8.3	7.9	8.5	8.6	8.0	8.8		8.34	0.34	0.04	
	G _d	[N/mm ²]	1109	1086	1637	1392	2454	1793		1579	513	0.32	
	G _g	[N/mm ²]	2660	1502	1955	1893	2218	1970		2033	385	0.19	
	30C		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
Pmax	[kN]	72.7	66.1	72.2	70.7	69.2	70.2						
$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	6.1	5.5	6.0	5.9	5.8	5.8		5.85	0.20	0.03		
τ_m-max	[N/mm ²]	9.1	8.3	9.0	8.8	8.6	8.8		8.77	0.30	0.03		
G _d	[N/mm ²]	1266	1749	1218	1361	1290	1187		1345	207	0.15		
G _g	[N/mm ²]	1453	2666	1681	1556	1358	1311		1671	506	0.30		

参考データ

表 3.2.3-6 M 社 : 90mm 厚 幅はぎ無し

90無M	0		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6		ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	180.6	204.5	194.8	207.5	177.0	158.7					
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	4.2	4.7	4.5	4.8	4.1	3.7		4.33	0.43	0.10	
	τ_m-max	[N/mm ²]	6.3	7.1	6.8	7.2	6.1	5.5		6.50	0.65	0.10	
	G _d	[N/mm ²]	530	611	641	590	468	421		544	86	0.16	
	G _g	[N/mm ²]	960	1368	3083	1292	864	844		1402	853	0.61	

表 3.2.3-7 M 社 : 150mm 厚 幅はぎ無し

150無M	0		no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6	no.7	no.8	ave	SD	CV	
	Pmax	[kN]	331.9	306.4	295.7	302.7	286.0	287.9	305.0	289.5				
	$\tau_{ave-max}$	[N/mm ²]	4.6	4.3	4.1	4.2	4.0	4.0	4.2	4.0		4.18	0.21	0.05
	τ_m-max	[N/mm ²]	6.9	6.4	6.2	6.3	6.0	6.0	6.4	6.0		6.26	0.31	0.05
	G _d	[N/mm ²]	867	859	843	863	670	756	816	668		793	84	0.11
	G _g	[N/mm ²]												

3.3 CLT の純せん断強度データの収集 1

3.3.1 実験の目的

CLT のせん断強度、せん断弾性係数を把握するためにはいくつかの実験方法が考えられるが、ここでは比較的大判の板材に対して、せん断性能を把握することを目的として実験を行った。

CLT は異方性を有し、既往の実験からせん断応力が作用する方向によってせん断弾性係数が異なることが知られている。また、試験体を設置するための接合部の強度や剛性を上げることが難しいため実験の境界条件が明確とならないことがある。

本実験では写真 3.3.1-1 に示すように、外形 800mm×800mm の CLT を試験体とし、板材に一樣なせん断力を作用させるため 4 辺を幅 100mm×厚 22mm の鋼材で挟み、高力ボルトを用いて摩擦接合する。さらに 4 か所の頂部では鋼材同士をピン接合とし、対角の頂部を引張る試験装置を作成し、CLT のせん断性能を把握する実験を行った。

なお、実験の境界条件を明らかにするため、あらかじめ鋼板を試験体として予備実験を行い、せん断有効幅および 4 辺の支持条件を明らかにした。

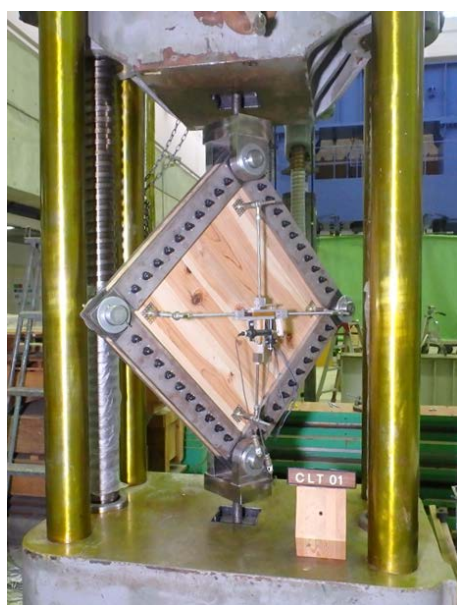


写真 3.3.1-1 せん断実験に用いた治具

3.3.2 実験計画

試験体の形状、および実験装置図を図 3.3.2-1 に示す。外形 800mm×800mm の CLT 試験体の 4 辺を PL-100×22 の鋼材で高力ボルト(M12、40 本)によって挟み、摩擦接合とした。4 か所の頂部は鋼材同士をピン接合とし、内形は 600×600 となる。加力は対角の頂部からクレビスを介して引張り、板材にせん断力を単調に載荷した。

計測は引張軸力 T をロードセルによって計測するとともに、試験体の対角の変位を両面で計測した。また試験体中央に 3 軸のひずみゲージを設置しせん断ひずみを計測できるようにした。

試験体数は2体とし、それぞれ試験体 S-01t は幅はぎをした T 社製、試験体 S-02s は幅はぎをしていない S 社製の CLT を使用した。試験体の写真を写真 3.3.2-1 に、各試験体の詳細を表 3.3.2-1 に示す。また試験体に使用した CLT の特性を表 3.3.2-2 に、ラミナの配置を図 3.3.2-2 に示す。

実験に使用した CLT はいずれも 3 層 3 プライ対象異等級構成 Mx60b 相当で、CLT に使用したラミナの曲げヤング係数の平均は、試験体 S-01t が外層 9.4kN/mm²、内層 8.4kN/mm²、試験体 S-02s が外層 8.6kN/mm²、内層 6.8kN/mm² である（第 I 編 3.2 節参照）。

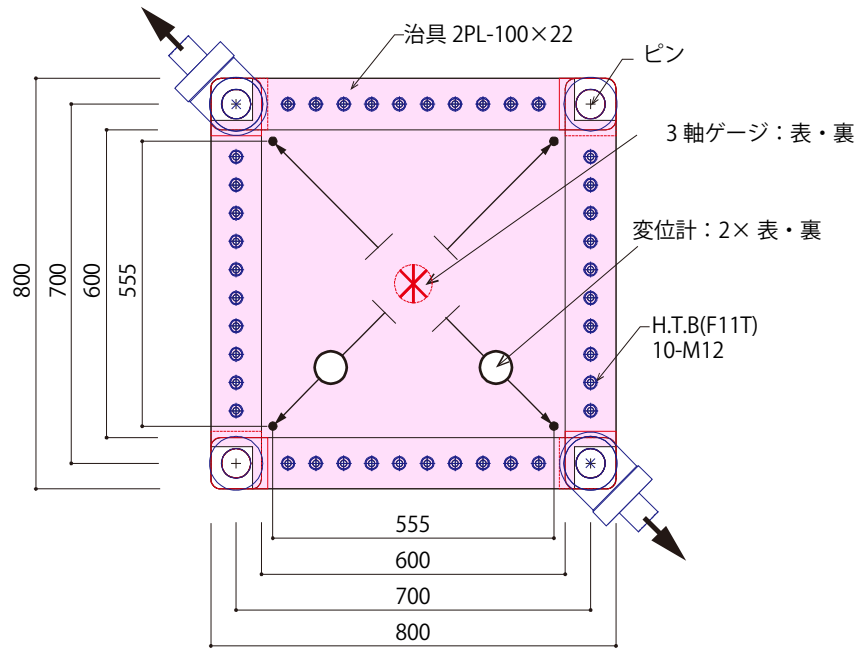


図 3.3.2-1 試験体形状・実験装置図



(1) S-01t



(2) S-02s

写真 3.3.2-1 試験体写真

表 3.3.2-1 試験体詳細

試験体名	幅はぎ	層	寸法 (mm)	備考
S-01t	あり	3層3プライ	厚さ 30×幅 800×長さ 800	T社製
S-02s	なし	3層3プライ	厚さ 30×幅 800×長さ 800	S社製

表 3.3.2-2 試験体 CLT の材料特性

試験体名	S-01t	S-02s
樹種	スギ	
規格等級	3層3プライ 対称異等級構成	
幅はぎ	あり	なし
製造者	T社	S社
使用ラミナの曲げ弾性 係数の平均値 E_0 *	内層 : 8.4 kN/mm ² 外層 : 9.4 kN/mm ²	内層 : 6.8 kN/mm ² 外層 : 8.6 kN/mm ²
せん断強度 F_s (N/mm ²) *	5.89	5.64
せん断弾性係数 G (N/mm ²) *	793	745

* いずれも第 I 編 3.2 節の要素実験による実験値。

111	25	160	130	188	29	179	59	212
90	132	136	203	122	207	108	55	
*7	169	169	174	174	39	*		

(1)S-01t

*	129	128	127	126	125	123	122	121
*	*9	260	262	263	264	265	266	

315	316	317	318	320	321	322	323	

(2) S-02s

図 3.3.2-2 ラミナ配置図

3.3.3 実験結果

図 3.3.3-1 から図 3.3.3-2 に各試験体のせん断応力-ひずみ関係を示す。写真 3.3.3-1 から写真 3.3.3-7 に各試験体の損傷状況写真を示す。

試験体に作用するせん断応力度 τ は式 3.3.1 による。なお有効幅は、事前に行った鋼板を試験体とする実験で求められた値を用いて 700mm とした。

$$\tau = T / \sqrt{2} \cdot t \cdot b_e \quad (3.3.1)$$

ここで、 T : 載荷荷重

t : 板厚

b_e : 有効幅

せん断ひずみは対角に設置した変位計から求めた値と 3 軸ひずみゲージから求めた最大せん断ひずみの両方をグラフ化した。

試験体 S-01t では、せん断応力度が 1.4N/mm^2 前後からひび割れと思われる音が聞こえ始めた。せん断応力度が 5.0N/mm^2 に達した時点で試験体上部に 1 か所目のひび割れが生じた(写真 3.3.3-1)。その後、最大せん断応力度 5.39N/mm^2 に達した時点で試験体中央に 2 か所目のひび割れが生じ耐力が低下した。またこの時ゲージが破損し、ひずみの計測ができなくなった。その後荷重はやや上昇するも試験体下部に 3 か所目のひび割れが生じ、徐々に応力度は低下した。また、変位から求めたひずみと、ゲージから求めたひずみは、ひび割れが観察された以前から若干のかい離がみられることから、それ以前にも、わずかな損傷が生じていたと考えられる。

試験体 S-02s ではせん断応力度が 4.2N/mm^2 に達した時点で 1 か所目のラミナのずれが生

じ、一部ひび割れが生じた(写真 3.3.3-5)。その後、最大せん断応力度 4.80 N/mm^2 に達するまでに複数個所でラミナのずれが生じた。ゲージもラミナの継ぎ目上に設置したため破損し、ひずみの計測ができなくなった。その後ラミナのずれやひび割れも拡大しながら、荷重は徐々に低下した。最終的には、木口面においてもラミナがずれたことが観察された。

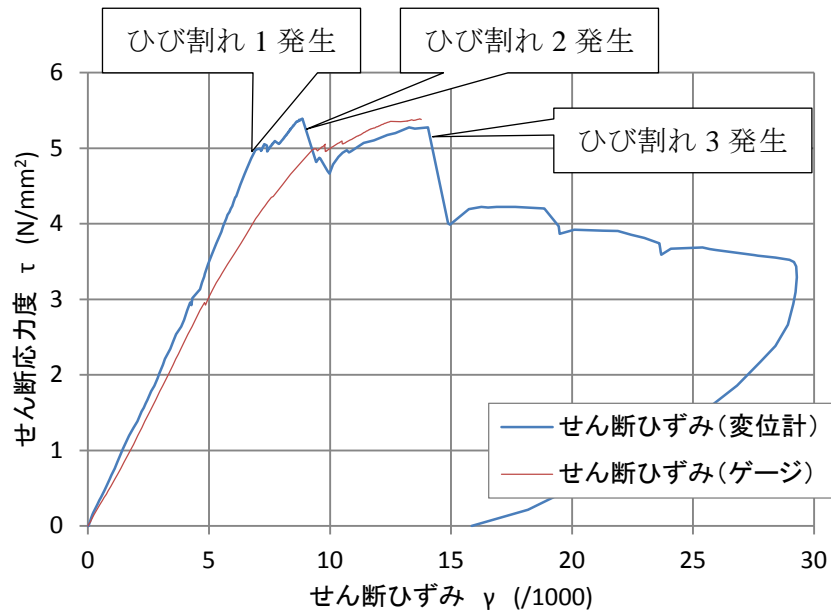


図 3.3.3-1 せん断応力度ひずみ関係 (S-01t)

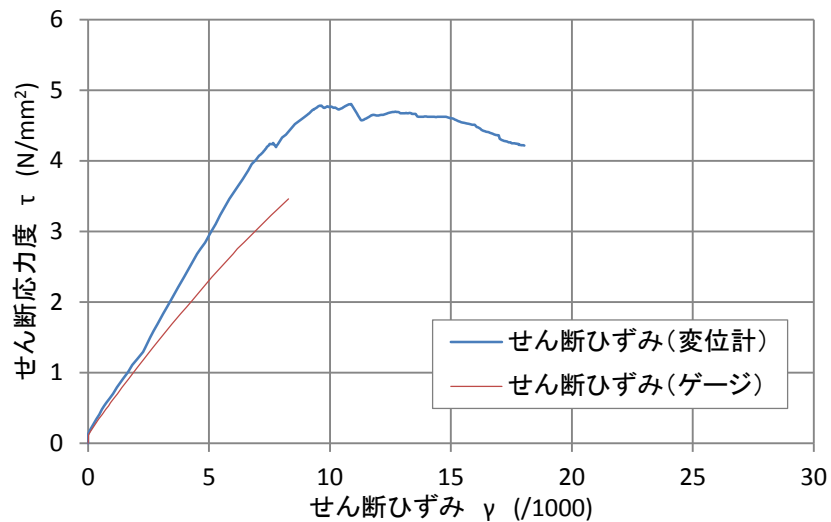


図 3.3.3-2 せん断応力度ひずみ関係 (S-02s)

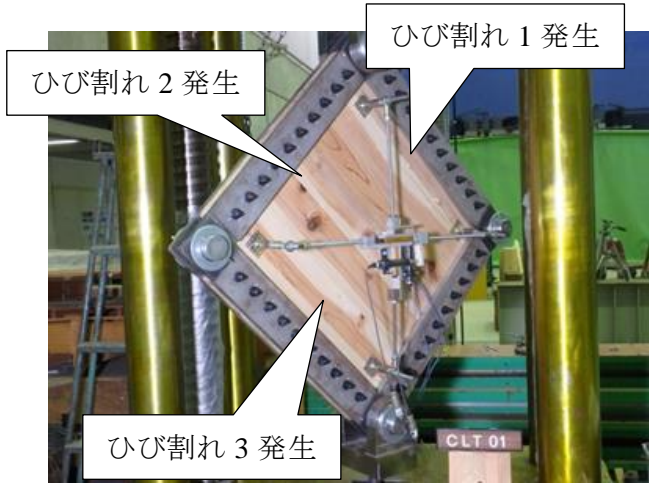


写真 3.3.3-1 試験体 S-01t 損傷状況 (全体)



写真 3.3.3-2 試験体 S-01t 損傷状況
(ひび割れ部 1)



写真 3.3.3-3 試験体 S-01t 損傷状況
(ひび割れ部 2)



写真 3.3.3-4 試験体 S-01t 損傷状況
(ひび割れ部 3)

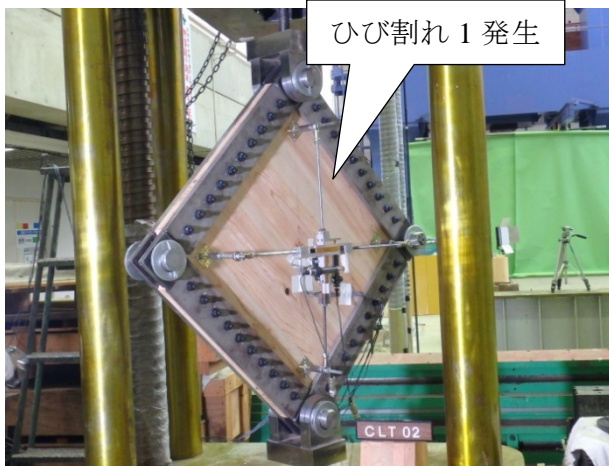


写真 3.3.3-5 試験体 S-02s 損傷状況 (全体)

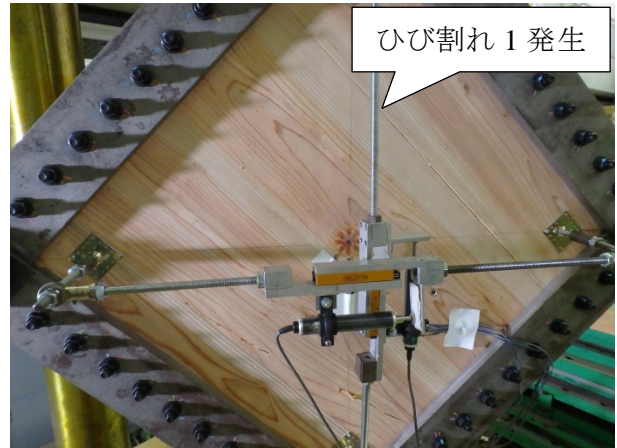


写真 3.3.3-6 試験体 S-02s 損傷状況 (拡大)

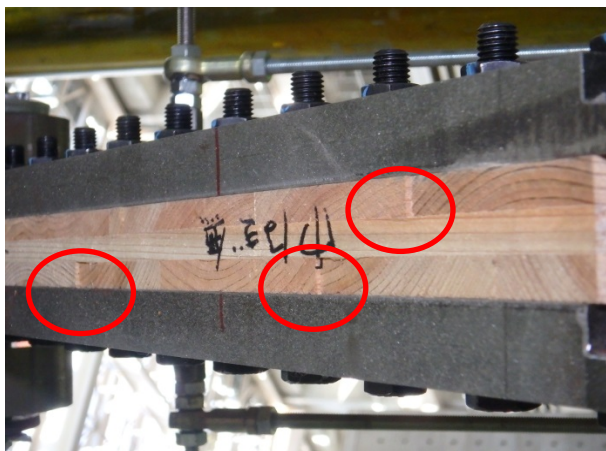


写真 3.3.3-7 試験体 S-02s 損傷状況
(ラミナのずれ)

図 3.3.3-3 に各試験体の対角のひずみを比較したグラフを示す。縦軸は試験体の鉛直方向、引張軸力と同じ方向のひずみ、横軸はそれに直交する水平方向のひずみを表している。

いずれの試験体についても概ね同じ歪レベルになっており、せん断力が板材に想定通り作用していると考えられる。

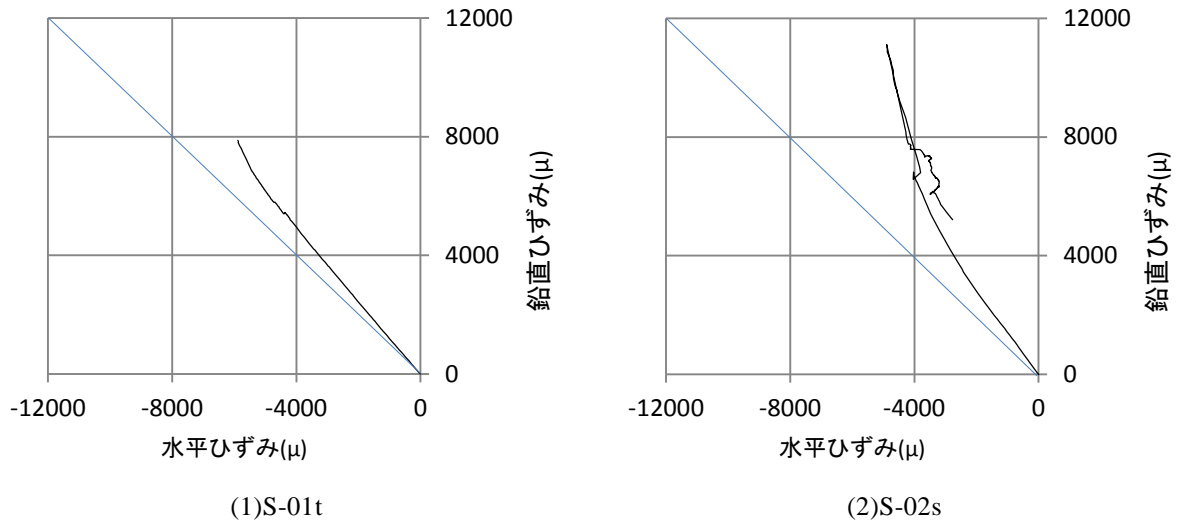


図 3.3.3-3 対角のひずみ比較

3.3.4 まとめ

実験より得られた CLT の最大せん断応力度およびせん断弾性係数を表 3.3.4-1 に示す。なおせん断弾性係数 G は実験結果から以下の式で求めた。

$$G = \frac{T}{\sqrt{2} \cdot t \cdot b_e \cdot \gamma} \quad (3.3.2)$$

ここに、 t : 板厚

G : せん断弾性係数

表 3.3.4-1 より、幅はぎをした CLT を用いた試験体 S-01t の方が、最大せん断応力度、せん断弾性係数ともに大きい値を示した。ただし、試験体に使用したラミナの曲げヤング係数は、幅はぎをした S-01t の方が大きいことから、幅はぎの有無が与えた影響は明確とならなかった。

表 3.3.4-1 せん断応力度とせん断弾性係数

試験体	最大せん断応力度 $\tau_{\max}(\text{N/mm}^2)$	せん断弾性係数 $G (\text{N/mm}^2)$	備考
S-01t	5.39	654	幅はぎあり
S-02s	4.80	536	幅はぎなし

3.4 CLT のせん断特性値のまとめ

3.4.1 実験で使用する CLT (30 mm厚) の特性値

本事業で得られた CLT (30 mm厚) のせん断特性値を以下にまとめる。

3.2 において実施した大野式せん断実験においては、製造元の違いによるせん断強度やせん断弾性係数への影響は小さく、また幅はぎの有無による影響は、幅はぎ有りの場合平均値としてせん断強度 5.69 N/mm^2 、せん断弾性係数 787 N/mm^2 に対して、幅はぎ無しの場合平均値としてせん断強度 5.64 N/mm^2 、せん断弾性係数 745 N/mm^2 とその差が小さいことが示された。

3.3 で実施した純せん断強度実験では、幅はぎの有無による影響として、幅はぎ有りの場合せん断強度 5.39 N/mm^2 、せん断弾性係数 690 N/mm^2 に対して、幅はぎ無しの場合せん断強度 4.80 N/mm^2 、せん断弾性係数 536 N/mm^2 と、幅はぎ有りのものが無しのものに対してせん断強度で 12%、せん断弾性係数で 29% 程度大きい値を示した。

後述するように、CLT の面内せん断強度は大きく 3 つ (Ⅰ 繊維直交せん断(net shear)、Ⅱ ラミナのねじり(torsion)、Ⅲ 繊維平行せん断(gross shear)) のモードによると指摘されており、幅はぎがあるとⅠⅡのモードは生じにくくなる。一方でⅢのモードは幅はぎの影響を受けにくい。試験結果の観察では、破壊性状はモードⅢによって決まっていたように思われた。以上より、現段階ではっきりとした結論に至ることは出来ないが、面内せん断に対して幅はぎの影響はあまり大きく無いと言えそうである。

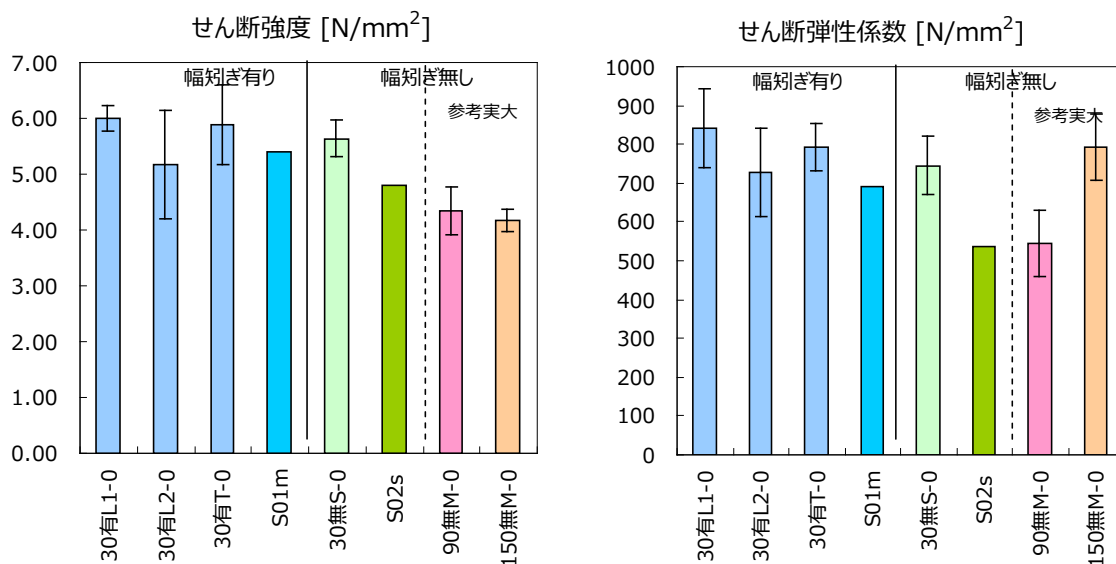


図 3.4.1-1 せん断試験結果のまとめ

3.4.2 実大製品のせん断特性値に関する既往のデータ

CLT は異方性材料で有り、面内・面外 (層内) でせん断性能が異なることが知られているが、国内において実大 CLT の面内せん断試験の実施例はあまり多くない。文献 1-3) では、建築研究所のグループによって工型の試験体 (図 3.4.2-1) を用いてせん断試験を実施している。文献 1) は渡部らによるせん断面に概ね 2 ラミナ分の幅を持つ小型の試験体、文献 2) 3)

は荒木、中島らによる剪断面に7ラミナ以上を有する実大試験体である。この一連の実験は、試験体のせん断変形部(くびれ部分)の高さ/幅比を変化させており、文献 1)では、1/2のもの(A)と1/1のもの(B)について、文献 2)3)では1/1のものについて実験を行っている。

以下は全断面有効と見なした場合のせん断応力度およびせん断剛性の値で論じる。文献 1)では試験結果に大きなばらつきがあり、最大せん断応力度 $5.6\text{-}9.1\text{ N/mm}^2$ の間であることが示されている。文献 2)では最大せん断応力度で $2.8\text{-}3.4\text{ N/mm}^2$ 、せん断剛性 $450\text{-}670\text{ N/mm}^2$ であり、5層試験体の方がやや高い性能を示す。文献 3)でもスギ CLT で 3.0N/mm^2 前後のせん断強度を得ている。文献 1)のみが特異に高い値を示した。この理由は不明であるが、せん断破壊エリアに幅はぎ面が少ない事が影響している可能性がある。またはせん断強度にはせん断エリアとの負の相関がある事も指摘⁹⁾されており、その影響があらわれた可能性も考えられる。

一方、大野式せん断試験法によって実験を行った文献 5)は文献 1)と同様にせん断面積の小さい条件であったが、文献 2)3)に比べやや高いものの似通ったせん断強度値 (4.2N/mm^2)を得ている。文献 3)において、中島はせん断強度はラミナ交差面のねじり強度によって決定されると述べており、文献 7)によって提案されている式を用いて計算すると良く一致すると結論づけている。文献 4)ではせん断エリアに有開口の CLT に対して文献 2)と同様な形状の工形のせん断試験を実施し、図 3.4.2-3 に示す様に、せん断強度を $1.8\times 2=3.6\text{N/mm}^2$ として推定した強度に実質せん断面積をかけることで安全側な耐力推定が可能としている。

図 3.4.2-2 を概観すると、本事業で使用した 1/3 縮尺の厚 30mm の CLT(ラミナ厚 10mm)によるフレームは実大サイズの CLT (ラミナ厚 30mm)のものに比べ、やや高いせん断強度を持つことがうかがえる。

文献 6)にも厚みとラミナ直交せん断強度には負の相関があることが指摘されており、今回の結果を裏付けている。ただし、図 3.4.2-5 に示す様に、CLT の面内せん断破壊モードは大きく 3 つ(繊維直交せん断(net shear)、ラミナのねじり(torsion)、繊維平行せん断(gross shear))が指摘されており⁸⁾、繊維直交せん断はその 1 形態にすぎない。torsion のモードや Gross shear のモードでのせん断強度は比較的良く推定が可能となってきているようである。図 3.4.2-4 に示す様に、net shear に対する様々な試験法が試されている。

我が国における検討は、ヨーロッパに比べて遅れており、今後さらなる研究が進展することが期待される。

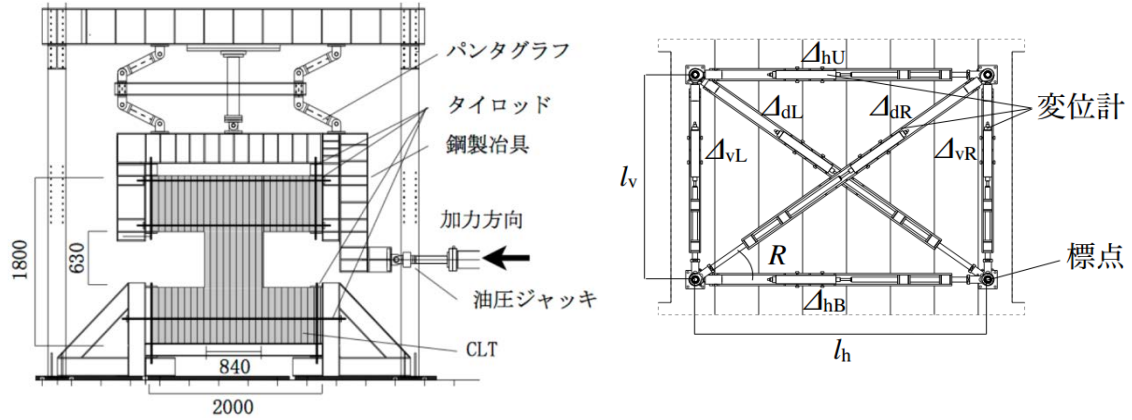


図 3.4.2-1 工形せん断試験方法⁴⁾

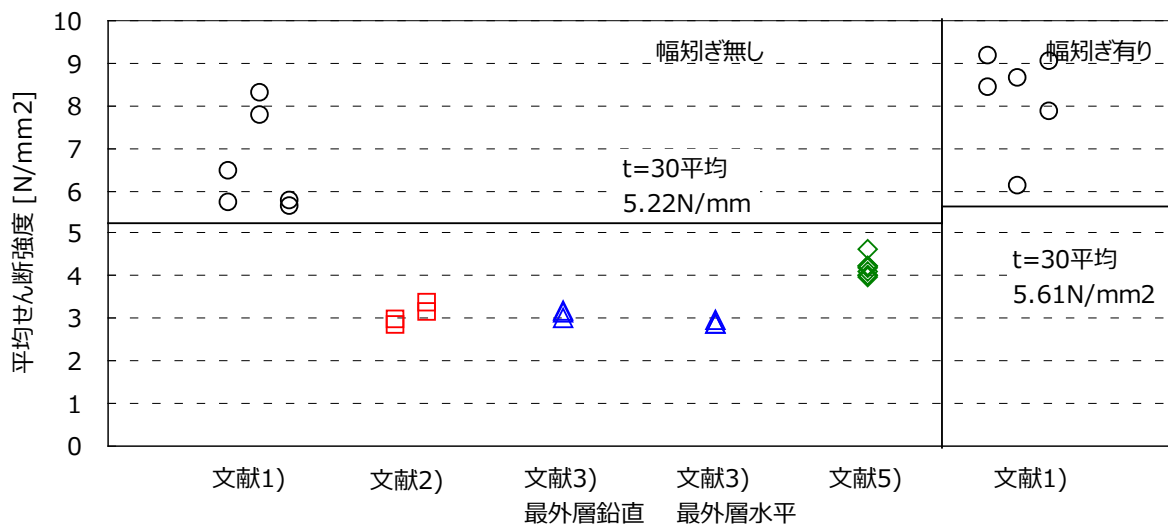


図 3.4.2-2 既往のせん断試験結果¹⁾²⁾³⁾⁵⁾

※文献 1、2、3)は工形試験体による値、文献 5)は大野式試験法による値

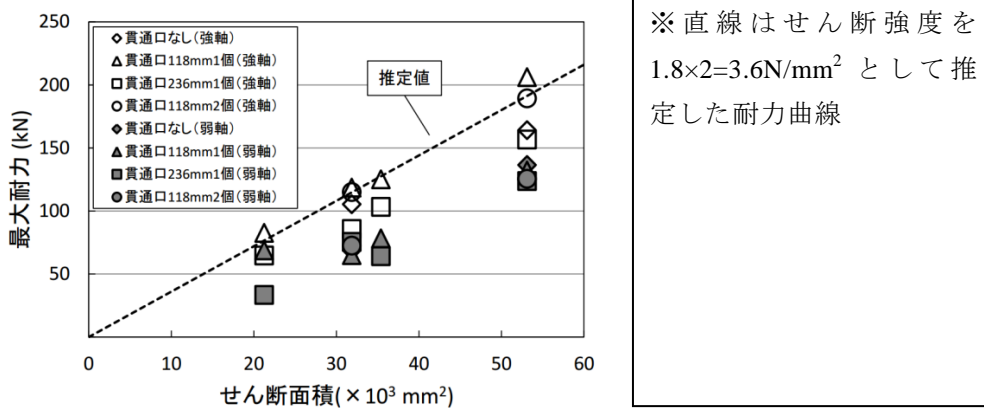

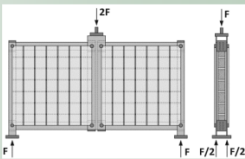


図 3.4.2-3 文献 4)におけるせん断試験結果 最大耐力とせん断面積の関係

INTRODUCTION: Tests on CLT Elements

Investigations on CLT Elements

- **Bosl (2002)**
 - 5-layers | 1,200 x 1,200 x 85 mm³
 - 4-hinged steel-frame | loading diagonally in tension
 - no shear failure → $\tau_{net,mean} \geq 5.6 \text{ N/mm}^2$
- **Traetta et al. (2006) | Bogensperger et al. (2007)**
 - 3-layers | 560 x 560 x 120 mm³
 - hinged steel-frame, 2 squared test fields
 - loading in three-point-bending
 - no shear failure → $\tau_{net,mean} \geq 6.0 \text{ N/mm}^2$

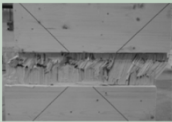
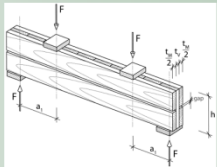



Brandner, Bogensperger, Schickhofer CIB-W18/46-12-2 Institute of Timber Engineering and Wood Technology | TU Graz 5

INTRODUCTION: Tests on CLT Elements

Investigations on CLT Elements

- **Andreolli et al. (2012)**
 - 3 & 5-layers
 - loading diagonally in compression
 - one of four tests failed in shear perpendicular to grain
 - NET SHEAR $f_{v,net} = 12.7 \text{ N/mm}^2$ (interaction shear & compression perp.)
- **CUAP (2005) | Jöbstl et al. (2008)**
 - 3-layers
 - four-point-bending test acc. to EN 408 for determination of „net-shear“ strength
 - mostly bending failures
 - exceptions: rolling shear, shear II in top layers
 - $\tau_{net,mean} \geq 5.4$ to 11.5 N/mm^2


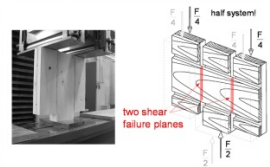



Brandner, Bogensperger, Schickhofer CIB-W18/46-12-2 Institute of Timber Engineering and Wood Technology | TU Graz 6

INTRODUCTION: Tests on CLT Nodes

Investigations on Nodes

- **Wallner (2004)**
 - 3-layers | 2 nodes | focus: rolling shear strength & stiffness
 - three-point-bending test | loading in compression
 - several shear failures parallel to grain in core layer
 - $\tau_{net,mean} \geq 5.9$ to 7.0 N/mm^2
- **Jöbstl et al. (2008)**
 - 3-layers | 2 nodes
 - core layer $w_i \times t_i = 200 \times 10 \text{ mm}^2$
 - focus: „net-shear“ capacity
 - basis: Wallner (2004) & CUAP (2005)
 - 100 % failures in „net-shear“
 - $f_{v,net,mean} = 13.9 \text{ N/mm}^2$ (13.5 %)

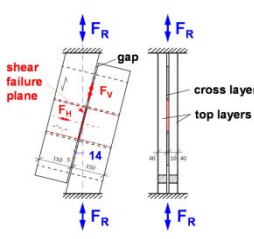
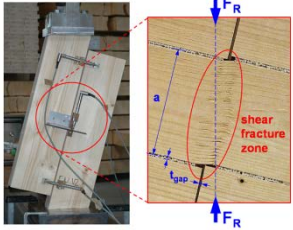
Brandner, Bogensperger, Schickhofer CIB-W18/46-12-2 Institute of Timber Engineering and Wood Technology | TU Graz 7

TEST CONFIGURATION

Test Configuration for Shear Perpendicular to Grain

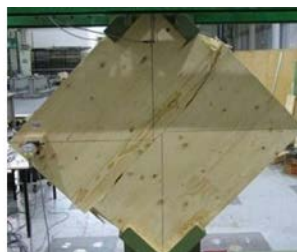
Master Thesis B. Hirschmann (2011)

- on basis of Jöbstl et al. (2008), EN 789 & EN 408
- loading in compression or tension (14° angle) → no significant influence!

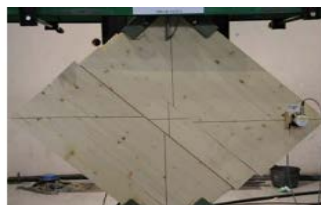



Brandner, Bogensperger, Schickhofer CIB-W18/46-12-2 Institute of Timber Engineering and Wood Technology | TU Graz 10

図 3.4.2-4 文献 6)における様々なせん断試験法のまとめ



Shear parallel to the grain



Torsion



Shear perpendicular to the grain

図 3.4.2-5 CLT の面内せん断破壊モード⁸⁾

- 1) 渡部博、荒木康弘、中島史郎、宮武敦、安村基、安藤直人、河合直人：スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)の強度性能 その9 (小型)面内せん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造Ⅲ)、pp.131-132、2013.
- 2) 荒木康弘、中川貴文、中島史郎、宮武敦、山口修由、安村基：スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)の強度性能 その8 (実大)面内せん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集(構造Ⅲ)、pp.129-130、2013.
- 3) 中島昌一、荒木康弘、孕石剛志、中島史郎、宮武敦: CLTの面内せん断性能に層構成とラミナ等級が与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、(構造Ⅲ)、25-26、2015

- 4) 廣石太郎, 毛利悠平, 中畑拓巳他: CLT 構造における貫通口の影響についての研究 (その1) H 形要素試験体に対するせん断加力試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), (構造 III), 529-530, 2015
- 5) Akihisa Kitamori, Shoichi Nakashima, Hiroshi Isoda : Development of CLT Shear Frame using Metal Plate Insert Connections, *Pro. of World Conference on Timber Engineering 2014*, Quebec, 2014
- 6) Brandner R., Bogensperger T., Schickhofer G. In plane shear strength of cross laminated timber (CLT): test configuration, quantification and influencing parameters. In: Proceedings of CIB W18/46-12-2, Vancouver, Canada, 2013.
- 7) M.Flaig, H.J.Blaß: Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane, Proceedings of the CIB-W18, 46-12-3, pp1-14, 2013
- 8) Mauro Andreolli, Mauro Rigamonti, Roberto Tomasi : DIAGONAL COMPRESSION TEST ON CROSS LAMINATED TIMBER PANELS, *Pro. of World Conference on Timber Engineering 2014*, Quebec, 2014

参考資料（ラミナのデータ）幅はざり用 1

No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
11	9.03	413.5	9.2	93	7.41	350.1	7.7	170	9.13	364.5	7.8
13	8.85	413.4	9.2	94	8.59	333.6	8.0	171	10.00	383.1	8.0
14	9.05	364.5	8.7	95	9.29	337.4	7.5	172	10.01	383.4	8.2
17	11.42	411.8	8.8	96	6.05	329.1	7.7	173	8.15	360.4	7.8
19	7.30	347.5	8.3	97	10.04	316.4	7.7	175	8.16	319.0	8.0
20	7.09	347.4	8.2	98	9.59	364.6	8.0	176	10.20	343.3	7.7
21	7.19	327.7	9.0	99	9.32	358.6	8.5	177	9.13	341.2	7.7
22	6.29	342.0	8.7	100	8.50	310.6	7.8	178	9.34	368.4	7.7
23	8.96	365.2	8.3	101	6.46	332.1	7.7	179	7.65	368.0	7.5
24	7.09	344.3	8.2	107	10.74	367.5	7.5	180	10.21	368.1	7.7
25	8.53	370.4	8.2	108	9.19	362.6	7.5	181	9.99	475.5	11.3
26	9.32	366.5	8.3	109	9.64	392.4	7.5	182	7.73	313.1	7.5
27	7.43	339.8	8.0	110	8.82	390.9	7.8	183	8.21	312.7	7.5
28	9.29	358.4	8.3	111	5.67	425.4	8.2	184	7.56	351.0	7.7
30	8.36	357.6	8.2	112	10.58	419.1	7.8	185	8.27	364.0	7.8
31	9.01	368.2	8.2	113	9.86	390.8	7.7	186	8.22	341.3	7.8
32	8.62	349.3	7.8	114	9.37	391.8	7.7	187	8.83	352.4	7.7
33	10.74	335.4	8.0	115	8.81	430.5	7.5	188	7.96	335.6	7.7
34	9.94	358.2	8.0	118	11.12	383.1	7.5	189	8.40	384.2	7.8
35	9.58	360.0	8.0	120	8.55	347.4	7.8	190	8.95	337.1	7.7
36	8.77	348.0	7.7	121	11.91	434.7	8.0	191	9.35	349.8	7.7
38	8.14	368.8	8.0	122	9.29	345.2	7.8	192	7.72	350.0	8.0
39	9.25	319.1	7.7	123	9.39	349.0	7.7	193	8.73	346.6	7.5
40	7.55	366.7	7.8	125	8.66	375.5	7.7	194	9.77	398.1	8.2
42	10.31	381.4	8.0	126	10.37	365.9	7.5	195	9.21	333.3	7.5
43	9.81	368.8	8.0	127	8.61	346.5	7.5	196	8.77	402.5	7.5
44	10.33	378.4	8.0	128	9.00	373.7	7.7	198	11.00	369.6	8.2
45	10.46	402.8	8.2	129	10.70	378.4	7.8	199	9.91	393.8	8.5
46	11.78	382.3	8.0	131	4.81	360.6	8.2	200	11.84	425.3	9.7
47	9.67	404.7	8.2	132	12.14	417.9	8.3	201	9.38	373.2	8.0
48	11.97	402.4	8.3	134	10.29	416.6	8.5	202	9.32	377.2	7.8
50	8.67	314.8	7.5	135	8.95	369.3	8.0	203	9.80	319.4	7.7
52	6.80	363.9	8.0	136	7.27	360.7	7.7	204	7.79	348.4	7.8
54	8.83	344.2	8.0	138	9.99	409.8	7.7	205	10.17	388.2	8.3
55	9.05	352.9	8.0	139	9.17	373.4	7.7	206	9.77	321.7	7.5
57	9.25	344.3	8.0	140	9.28	417.7	7.7	207	10.34	355.9	7.7
58	9.52	355.6	8.0	141	9.93	348.6	7.8	208	7.31	333.7	7.8
61	8.81	333.3	7.7	142	9.47	340.0	7.8	209	6.76	332.9	8.2
63	8.56	330.2	7.7	143	9.95	362.4	8.0	211	9.36	348.3	7.7
64	9.20	354.6	7.8	144	7.74	367.0	8.3	212	8.65	362.2	8.0
65	9.94	355.9	7.8	146	9.02	357.1	7.8	213	9.10	325.9	7.5
66	9.54	364.1	8.0	147	10.71	361.9	7.5	214	9.45	325.3	7.7
67	11.11	372.0	8.0	148	8.96	318.3	7.5	215	8.01	294.3	7.5
69	7.64	353.7	7.7	149	8.46	343.9	7.7	216	9.27	384.3	9.3
70	8.88	353.0	7.5	150	10.06	348.9	7.7	217	9.28	390.9	9.5
71	7.89	364.6	8.8	151	8.35	468.6	9.3	218	7.89	393.3	9.0
72	9.05	332.1	8.8	152	9.53	430.9	8.2	219	7.57	355.4	8.7
73	8.60	351.5	8.8	153	10.36	331.8	7.5	220	7.51	358.9	8.7
74	7.28	379.7	9.0	154	9.59	385.2	8.5	221	9.16	323.6	7.7
77	9.93	399.8	9.0	156	9.68	398.7	7.8	222	10.18	396.2	8.0
78	10.18	457.7	9.0	157	10.24	374.2	7.7	223	10.42	367.0	8.3
80	9.61	374.2	7.8	158	9.97	400.8	8.0	224	9.32	314.6	7.7
83	10.05	356.3	8.0	159	9.93	364.2	8.2	225	8.32	359.4	8.3
84	11.27	429.6	8.3	160	10.08	363.9	8.0	226	10.09	357.4	7.8
85	8.49	375.9	9.7	161	8.92	352.5	7.5	227	8.11	347.1	7.7
86	10.39	422.0	9.7	162	9.47	376.7	8.0	228	8.45	345.1	8.0
87	11.41	429.0	10.2	163	10.09	344.2	7.8	229	9.12	383.3	8.2
88	8.90	439.0	10.5	164	10.30	347.5	7.5	230	9.40	378.4	8.0
89	7.33	359.7	9.0	165	7.74	364.8	7.8	231	10.75	394.9	8.3
90	8.56	373.9	9.3	166	6.78	345.1	7.8	232	6.45	299.1	8.0
91	9.25	355.3	8.2	167	10.96	411.1	7.8	233	7.77	368.3	8.5
92	8.11	328.9	8.0	169	10.03	378.0	8.0	234	9.83	353.4	8.3

参考資料（ラミナのデータ）幅はぎあり用 2

No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	No.	縦振動 ヤング係数 (GPa)	見かけの密度 (kg/m ³)	含水率 (%)
235	7.94	394.3	9.7	302	9.72	341.2	7.8	368	9.46	413.5	9.0
236	9.04	385.7	9.0	303	8.24	328.5	7.5	369	9.04	418.4	8.5
237	10.24	405.3	8.7	304	7.10	340.8	7.8	370	7.61	414.4	8.3
238	9.11	393.7	9.0	305	9.32	335.5	7.8	371	11.67	465.3	9.7
239	11.03	375.7	8.5	306	9.29	419.3	8.5	372	9.06	359.0	8.5
240	8.91	342.3	8.2	307	7.90	357.8	7.8	373	12.17	430.7	9.2
241	9.17	359.4	9.5	308	7.82	371.9	7.8	374	9.77	445.0	9.3
242	8.65	392.2	9.7	309	6.95	368.6	7.8	375	8.49	397.0	8.3
243	8.17	375.5	9.3	310	9.56	373.3	8.0	376	9.56	408.0	9.0
244	10.37	408.6	9.5	311	6.76	317.1	7.7	377	12.23	425.0	9.3
245	8.61	355.5	9.0	314	8.04	303.3	7.8	378	10.96	450.4	9.0
246	9.05	396.9	9.0	315	9.74	365.9	8.2	379	10.48	406.3	9.0
247	9.05	370.6	9.5	316	5.33	352.1	7.7	380	11.99	439.8	9.2
248	9.22	345.8	9.2	317	9.22	315.8	7.5	381	9.04	386.1	8.7
249	7.67	340.3	8.8	318	8.78	362.0	8.2	386	7.75	357.7	8.7
250	11.46	468.5	10.0	320	9.13	384.4	8.0	387	8.68	368.1	9.2
251	9.64	397.5	8.7	321	10.26	388.6	7.8	388	10.23	391.0	9.3
252	9.14	357.2	9.0	322	9.25	322.5	7.8	389	11.21	425.6	9.5
253	10.17	409.5	9.7	323	9.77	322.0	7.7	390	9.75	410.9	9.5
254	9.92	377.5	9.8	324	4.70	371.2	7.8	391	9.67	404.7	9.0
255	10.45	410.7	10.0	325	10.13	339.5	8.0	392	10.59	423.9	9.5
257	12.09	467.1	9.5	326	9.12	324.1	8.0	393	9.02	423.4	9.5
258	11.97	450.7	10.0	327	6.62	323.2	7.8	394	10.54	407.7	9.7
259	7.52	342.3	9.0	328	9.43	363.7	8.2	395	7.39	448.6	9.2
260	10.91	419.1	9.8	329	5.18	356.4	8.2	396	7.09	390.0	9.5
262	8.41	374.6	9.2	330	9.08	361.0	8.3	397	9.11	414.8	9.0
263	7.26	341.3	9.2	331	9.53	390.8	8.0	398	10.13	365.9	9.2
264	9.46	378.6	10.0	332	7.06	349.1	7.8	399	6.39	395.2	9.5
265	9.01	353.4	10.3	333	9.41	327.8	7.7	400	11.23	437.8	9.8
266	8.74	362.3	9.5	334	8.97	330.7	7.8	402	10.15	429.5	9.2
267	11.26	409.3	10.3	335	9.92	364.1	8.2	403	7.84	348.5	8.2
269	8.30	379.0	9.3	336	10.53	378.7	7.8	404	9.39	399.1	9.8
270	9.64	386.3	10.0	337	10.21	370.9	8.0	405	8.65	344.2	8.3
271	11.56	427.8	9.8	338	10.43	376.3	7.8	406	10.45	433.6	9.3
272	11.05	428.2	10.7	339	10.86	359.6	7.7	407	6.75	332.0	8.2
273	8.00	377.3	10.2	340	9.66	347.5	7.7	408	7.26	360.9	8.3
274	9.56	380.7	9.7	341	9.23	379.9	8.0	409	7.58	343.1	8.7
275	9.88	427.6	10.3	342	10.83	433.5	8.8	410	6.49	338.0	8.0
276	8.45	406.0	9.7	343	8.62	390.8	8.0	411	9.69	423.8	8.7
277	12.13	418.0	9.7	344	11.10	354.1	7.8	412	10.35	425.9	9.2
279	11.18	439.5	10.2	345	8.90	326.9	7.7	413	11.97	452.7	9.7
280	8.73	419.3	9.3	346	9.14	353.3	7.7	414	6.88	379.1	9.2
281	8.96	348.1	9.0	347	7.88	442.2	8.7	415	9.05	368.1	8.3
282	10.03	418.4	10.0	348	10.08	420.2	9.7	417	10.00	405.6	9.3
283	10.44	437.1	9.8	349	9.48	357.4	9.5	418	8.14	356.6	8.5
284	6.74	334.6	8.5	350	9.72	398.3	9.2	419	8.88	407.3	8.8
285	6.97	324.0	8.8	351	8.79	360.7	8.2	420	8.74	365.7	8.5
286	10.75	451.4	9.8	352	8.71	361.2	7.7	421	10.51	401.7	8.8
287	8.20	356.7	8.5	353	8.73	391.4	9.3	422	9.15	387.4	8.8
289	12.05	416.9	8.8	354	5.87	331.9	8.5	423	9.52	395.2	9.0
290	11.76	416.4	9.5	355	9.41	392.6	9.0	424	8.57	368.5	8.3
291	9.83	443.7	9.7	356	8.36	354.9	8.3	425	10.09	425.8	9.0
292	9.51	412.0	9.8	357	9.87	368.1	8.7	426	9.02	358.2	8.8
293	9.25	422.3	10.8	358	7.68	350.6	8.8	427	8.09	338.5	8.0
294	7.35	377.1	8.3	359	8.90	377.4	8.8	428	8.96	367.6	8.3
295	10.75	413.7	10.5	361	9.05	368.4	9.3	430	8.72	413.0	9.3
296	8.80	411.2	10.8	362	9.20	360.6	9.3	431	11.51	418.4	9.5
297	11.56	423.4	9.5	363	7.95	387.3	8.8	432	8.54	405.3	9.7
298	9.14	430.5	12.5	364	8.77	387.5	8.8	433	8.66	419.7	8.8
299	9.87	412.3	12.2	365	7.76	387.9	8.5	434	10.44	413.7	9.3
300	10.90	429.9	9.5	366	9.94	378.9	7.8	435	10.21	443.2	10.3
301	9.83	346.0	8.0	367	11.02	367.9	8.0	436	9.27	423.2	11.0

参考資料（ラミナのデータ）幅はぎあり用 3

No.	縦振動	見かけの密度	含水率	No.	縦振動	見かけの密度	含水率
	ヤング係数				ヤング係数		
	(GPa)	(kg/m ³)	(%)		(GPa)	(kg/m ³)	(%)
437	9.37	404.5	10.3	501	11.00	411.3	9.7
438	9.58	405.8	10.0	502	12.26	413.2	9.2
439	10.38	411.2	10.7	503	8.35	400.4	9.5
440	6.77	429.2	9.3	504	8.03	350.5	8.7
441	9.34	430.7	11.0	505	5.29	373.8	9.0
442	9.76	429.4	9.7	507	8.39	405.2	8.8
443	9.24	463.9	10.3	508	8.05	444.3	9.7
444	8.73	411.0	9.8	509	6.90	408.4	9.8
445	8.64	431.9	11.7	510	10.88	437.4	9.5
446	9.10	401.6	9.8	512	10.45	440.3	9.3
447	8.19	412.1	9.8	513	7.80	381.0	9.2
448	7.84	400.9	9.3	514	11.78	428.7	9.7
449	8.52	402.2	9.7	515	9.65	362.4	9.2
450	11.31	417.2	9.0	516	10.38	365.5	9.2
451	6.85	383.5	9.0	517	7.78	368.4	9.7
452	7.62	374.0	9.3	518	6.96	389.8	9.2
453	7.97	405.3	9.7	520	7.53	380.8	9.0
454	9.88	426.2	8.7	521	9.03	421.8	9.5
455	10.11	410.4	10.3	523	10.16	415.6	8.8
456	10.76	419.2	10.3	525	10.79	438.8	9.7
457	8.86	426.2	9.5	526	10.96	425.9	9.5
458	10.09	426.1	10.0	527	10.42	422.1	8.7
459	8.28	382.8	8.5	528	10.20	424.0	8.8
460	7.47	388.4	9.5	529	10.52	423.4	8.7
462	7.99	403.6	10.0	533	6.45	334.7	8.3
463	7.44	397.4	10.2	534	5.54	324.3	8.5
464	11.57	427.8	12.3	535	5.76	342.0	8.3
465	7.90	437.2	10.2	536	8.50	386.8	9.2
466	9.92	424.7	10.2	537	11.25	429.5	8.8
467	11.79	428.5	10.3	538	6.99	342.6	8.2
468	9.73	441.0	10.5	539	10.57	444.9	9.7
469	5.61	352.5	9.5	540	6.40	329.1	8.8
470	7.23	394.8	10.0	541	6.12	330.7	8.3
471	9.79	429.9	10.7	542	6.32	346.5	9.2
472	8.77	429.0	10.0	543	6.22	360.8	9.0
473	10.74	441.4	10.3	544	9.75	419.9	9.8
474	10.80	433.8	10.2	545	9.66	409.5	10.2
475	8.88	448.3	10.0	546	5.86	348.7	9.3
476	7.00	388.8	9.8	547	10.37	438.2	9.8
477	7.53	403.1	9.8	548	5.93	338.3	8.8
478	7.90	455.0	9.7	549	7.27	382.5	8.7
479	8.58	409.6	9.8	550	6.32	351.9	8.5
480	8.90	410.6	10.0	551	7.23	368.2	9.0
481	9.93	423.3	9.3	553	7.27	348.7	9.3
482	11.83	422.3	9.7	554	6.23	342.9	9.2
483	11.22	436.9	10.0	555	8.80	388.4	9.8
484	11.11	437.7	10.0	556	7.12	377.0	8.8
485	10.89	444.3	9.8	557	6.72	350.0	8.5
486	12.00	434.7	10.2	558	6.68	335.9	9.8
487	9.84	437.9	9.2	559	7.60	355.1	9.0
489	7.91	380.6	9.0				
490	10.23	433.6	9.7				
491	10.06	441.4	9.7				
492	6.50	333.6	8.7				
493	6.55	334.5	8.0				
494	6.55	330.7	8.8				
495	10.26	432.0	10.5				
496	9.88	433.1	10.8				
497	9.77	439.4	10.0				
498	5.60	330.8	8.8				
499	5.12	305.4	8.7				
500	9.19	383.3	10.0				

参考資料（ラミナのデータ）幅はぎなし用 1

No.	縦振動	見かけの密度	含水率	No.	縦振動	見かけの密度	含水率
	ヤング係数				ヤング係数		
	(GPa)	(kg/m ³)	(%)		(GPa)	(kg/m ³)	(%)
1	8.15	349.0	7.5	63	7.07	400.1	8.0
2	6.62	310.4	7.7	64	10.61	407.8	8.0
3	7.27	279.1	7.5	65	8.77	314.3	7.5
4	6.93	313.0	7.5	66	8.39	339.5	7.8
5	7.10	340.1	7.8	67	7.98	348.1	7.7
6	7.42	378.1	8.0	68	8.07	372.2	8.2
7	6.33	286.5	7.8	69	7.63	367.5	7.7
8	7.39	309.8	7.5	70	7.59	343.1	8.2
9	7.63	303.2	7.5	71	10.04	365.8	8.2
10	7.15	305.7	7.7	72	7.35	346.6	7.7
11	7.22	374.2	8.7	73	8.02	384.2	7.7
12	6.76	299.6	8.0	74	6.89	279.3	7.5
13	6.59	315.3	8.5	75	7.52	333.3	7.5
14	6.89	317.8	7.8	76	6.41	284.3	7.5
15	7.27	416.8	9.3	77	7.01	299.4	7.8
16	7.31	285.9	7.5	78	6.90	398.8	8.2
17	7.86	302.2	7.8	79	10.38	413.5	9.0
18	7.27	309.9	7.8	80	8.42	288.0	7.5
19	7.56	311.5	7.7	81	9.70	372.5	8.3
20	6.81	354.7	8.0	82	8.30	375.7	8.0
21	6.81	368.3	7.7	83	7.18	336.3	8.0
22	7.44	469.2	9.2	84	7.74	292.8	7.5
23	10.21	406.7	8.2	85	7.64	298.4	7.5
24	6.90	295.6	7.5	86	10.86	364.2	7.8
25	7.42	290.8	7.5	88	9.46	369.5	7.7
26	7.16	306.3	7.7	89	8.46	361.7	8.0
27	6.99	329.1	7.5	90	8.10	359.5	7.7
28	7.49	326.0	7.7	91	9.99	397.5	8.7
29	7.56	330.3	7.8	92	7.11	491.2	9.3
30	5.93	314.6	7.5	93	8.13	375.3	7.8
31	6.82	420.4	8.2	94	8.04	299.2	7.5
32	8.55	379.0	7.8	95	8.46	362.7	8.3
33	6.14	353.2	9.8	96	6.41	319.5	8.0
34	7.27	310.2	7.5	97	7.48	338.7	8.3
35	7.16	295.2	7.5	98	8.56	367.5	7.7
36	8.61	376.2	8.2	99	6.51	299.3	7.8
37	7.99	369.2	8.3	100	7.03	294.2	7.5
38	6.30	274.4	7.5	101	7.39	401.7	9.0
39	7.08	352.7	7.8	102	6.93	290.3	7.5
40	9.70	399.6	8.0	103	10.27	394.2	8.7
41	10.59	407.9	8.2	104	6.17	340.3	9.2
42	10.81	416.2	8.5	106	7.83	300.7	7.7
43	9.83	405.7	8.3	107	7.14	293.4	7.7
44	7.57	409.5	8.3	108	10.89	418.1	9.2
45	7.96	374.2	8.2	109	6.49	365.7	9.8
46	6.41	354.4	9.3	110	7.42	429.4	9.2
47	7.88	338.1	7.5	111	7.56	384.7	8.8
48	7.35	308.8	7.5	112	8.19	371.0	9.0
49	6.97	320.5	7.5	113	8.19	408.9	9.5
50	7.10	303.6	7.5	114	6.74	350.7	8.2
51	11.63	385.7	7.8	115	6.15	340.1	8.2
52	10.11	440.9	8.8	116	5.94	365.5	9.5
53	10.07	401.1	8.0	117	10.49	376.3	8.5
54	8.94	383.4	8.2	118	8.43	330.1	7.7
55	8.11	366.8	8.3	119	8.68	307.6	7.7
56	9.96	363.2	7.5	120	7.86	324.3	7.5
57	8.56	365.5	7.7	121	8.40	359.4	8.3
58	10.12	390.2	8.0	122	7.80	299.4	7.8
59	9.01	365.8	8.5	123	9.27	396.5	9.7
60	6.04	379.0	8.0	124	9.90	423.7	9.0
61	8.78	350.0	7.8	125	7.27	394.0	8.7
62	6.50	344.6	8.0	126	6.58	354.8	8.2

参考資料（ラミナのデータ）幅はぎなし用 2

No.	縦振動	見かけの密度	含水率	No.	縦振動	見かけの密度	含水率
	ヤング係数 (GPa)				ヤング係数 (GPa)		
127	7.50	315.2	8.2	190	6.96	370.5	8.3
128	7.40	401.4	8.7	191	8.20	310.1	7.8
129	7.42	372.2	8.0	192	7.60	364.6	8.0
130	8.37	360.3	8.2	193	6.75	293.9	7.5
131	7.83	290.3	7.7	194	7.10	287.7	7.7
132	9.85	305.6	7.8	195	7.27	305.1	8.3
133	9.33	313.8	7.7	196	6.45	302.2	8.0
134	8.72	293.6	7.5	197	8.01	362.8	8.0
135	8.93	300.4	7.8	198	5.86	368.5	10.2
136	7.28	342.5	7.8	199	6.92	330.1	8.8
137	7.46	351.6	8.0	200	7.54	310.5	7.7
138	8.14	361.5	7.8	201	5.93	274.3	8.5
139	7.95	354.4	7.8	202	6.73	282.3	7.5
141	7.85	313.4	7.5	203	7.81	305.2	7.5
142	6.94	332.6	8.0	204	7.58	296.6	7.7
143	8.30	308.2	8.0	205	7.51	327.7	8.0
144	7.28	370.5	8.3	206	7.87	385.4	8.7
145	8.76	375.7	7.8	207	7.56	290.5	8.0
146	8.49	315.4	7.5	208	9.75	368.8	8.8
147	7.73	296.9	7.5	209	7.79	360.3	8.8
148	8.72	347.9	7.8	210	6.44	326.5	7.7
149	10.17	342.5	7.8	211	6.73	396.7	9.0
150	7.89	337.3	7.8	212	7.94	285.5	7.7
151	9.17	392.3	8.2	213	9.52	359.6	9.0
152	7.29	310.4	8.3	214	5.11	329.2	8.0
153	7.96	305.3	7.8	215	8.24	301.7	7.5
154	6.37	317.5	8.3	216	8.00	277.7	7.7
155	6.35	408.2	10.0				
156	7.06	330.5	10.0				
157	7.55	399.7	9.7				
158	10.06	414.0	8.3				
159	9.88	393.3	8.2				
160	10.24	423.3	10.2				
161	8.50	300.1	7.5				
162	5.93	301.9	7.8				
163	7.24	299.1	8.3				
164	6.58	271.6	7.5				
165	6.97	385.5	8.3				
166	5.75	304.8	7.8				
167	6.47	292.3	8.0				
168	7.20	343.9	9.3				
169	6.38	278.3	7.5				
170	8.68	322.3	7.5				
171	8.04	385.5	8.0				
172	10.56	405.3	8.5				
173	6.97	333.4	9.2				
174	7.07	353.0	7.7				
175	8.30	308.3	7.5				
176	7.18	356.8	8.2				
177	6.15	369.1	12.0				
178	10.26	356.0	7.5				
179	10.24	355.3	7.8				
180	7.87	336.8	7.5				
181	7.02	323.4	7.7				
182	10.44	423.5	9.2				
183	9.64	351.7	8.5				
184	7.87	364.4	8.3				
185	7.17	295.7	7.7				
186	8.77	304.8	8.0				
187	8.75	356.1	8.2				
188	9.12	351.5	8.8				
189	6.97	321.1	7.8				

**第Ⅱ編 CLT耐震補強工法（接着工法）の補強効果発生メカニ
ズムの検討**

第 1 章 木質耐震補強工法の検討

1.1 平成 26 年度事業の成果と残された課題

CLT、あるいは LVL のせん断強度は基準強度としては低い、その値であってもコンクリートと比べ遜色がない。木材のせん断強度はこれまではりを対象に考えていたため、その破壊を避けるべく安全率 1/2 を乗じているが、一般の壁ではこのような安全率を設けていない。つまり、安全率を緩和できれば、コンクリートを上回るせん断強度が得られる。鉄筋コンクリート造との比較となると鉄筋量により異なるが、対象が鉄筋コンクリートであっても木質系面材が十分なせん断強度を実力として備えている。せん断剛性は鉄筋コンクリートの 1/2 程度であるが、曲げ降伏する柱部材よりはかたく、実用的には問題の無い範囲と考えられる。

平成 26 年度の事業では、こういった性能を持つ CLT、LVL を利用した RC 造建物の耐震補強工法（接着工法）についてその基本的な性能を検証したが、耐震補強に十分な強度性能を有することが確認できた。せん断強度は木質系面材とコンクリート面の接着面において、コンクリートのせん断で生じており、その値は $2\sim 3\text{N/mm}^2$ 程度であった。これは耐震診断の 1 次診断で用いる鉄筋コンクリートのせん断強度に相当し、十分な補強効果が得られた。また、懸念されたせん断剛性であるが、 $1/250\text{rad.}$ までにせん断強度に至ることがわかり、枠付き鉄骨ブレースなどの既存の補強工法と同程度の剛性を有することもわかった。また、CLT の加工・配置を繊維平行方向をストラットが効く方向とすることにより、 $1/500\text{rad.}$ 時程度まで荷重が上昇し、鉄筋コンクリート壁と同等の剛性が得られることもわかった。

以上の結果から、耐震補強工法としての実用化が可能と判断されたが、本工法にて耐震補強設計を行うためには木質系面材のコンクリート枠内での抵抗機構を解明し、設計式を立案する必要がある。そのため明らかにする必要のある項目は、以下の通りである。

- a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗
- b) 木質系面材—柱の圧縮抵抗
- c) コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗

これらの項目についてそれぞれを分離した実験を実施し、それぞれの壁全体への寄与を明確にすること、解析的に実験結果を追跡し、パラメータスタディによって、設計式の妥当性を検証することが必要であると指摘された。

1.2 平成27年度事業における目標と実施事項

平成27年度事業では、CLT耐震補強工法の基本設計式の作成が目標の一つとなっている。本章ではRC造でのCLT耐震補強の早期普及を図ることを目的に適用範囲を限定したうえで、平成26年度に実施した接合法等の検討結果を反映した基本設計式を作成・整備し、設計ガイドライン等として取りまとめる。

具体的には、CLTによって補強したRCフレーム試験体による構造実験、およびCLTとRCの接着接合部を取り出した要素実験によって、下記の項目の検証を行う。

- 1) CLTの幅はぎの有無による補強性能の検証
- 2) スリットを設けた試験体による抵抗機構の解明
- 3) スパンによる補強効果への影響の検証
- 4) 木材（CLT）とRCの接着接合部のせん断抵抗性状の検証

それぞれの項目について、具体的な実施内容と実験の対応を以降に述べる。

1) CLTの幅はぎの有無による補強性能の検証

これまでの実験では、幅はぎしたCLTを用いた補強実験を行い、その補強効果を検証してきた。本年度事業では本技術の汎用性を高めるため、構造実験において幅はぎのないCLTを用いた試験体W-C02を設定し、幅はぎをしたCLTを用いたW-C01との比較により、その補強効果を検証した。（第2章）

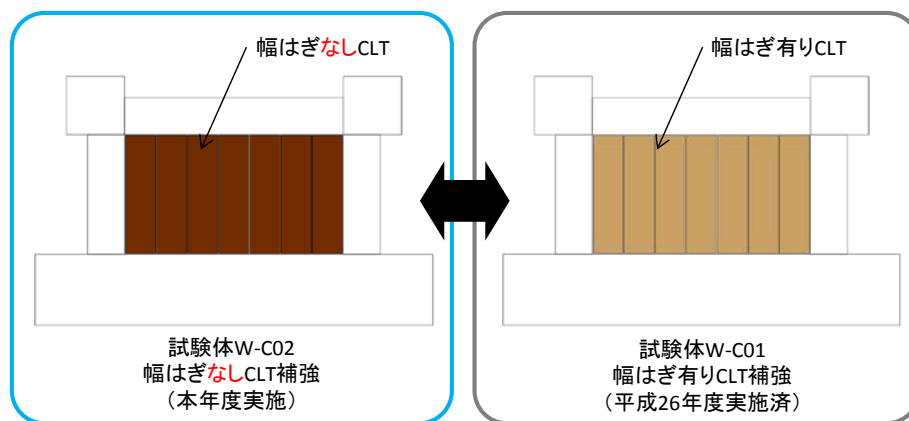


図1.2.1 CLTの幅はぎの有無による補強性能の検証

2) スリットを設けた試験体による補強メカニズムの解明

設計式立案に向けた補強メカニズムの解明を目指すため、構造実験において木質壁にスリットを設けて力の伝達経路を限定した試験体を用いて、1.1節にあげられた検討項目について検証した。

構造実験の試験体W-C03shは壁の上下にスリットを設け、RCフレームとは柱際のみで接着接合し、試験体W-C04svは壁の左右にスリットを設け、RCフレームとは梁下・梁上（スタブ上）のみで接着接合した。それぞれの試験体の木質壁は、RCフレームと接着した部分でのみ力が伝達されることから、試験体W-C03shから木質系面材一柱の圧縮抵抗性状、試験体W-C04svから木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗性状を明らかにすることを意図した。（第2章）

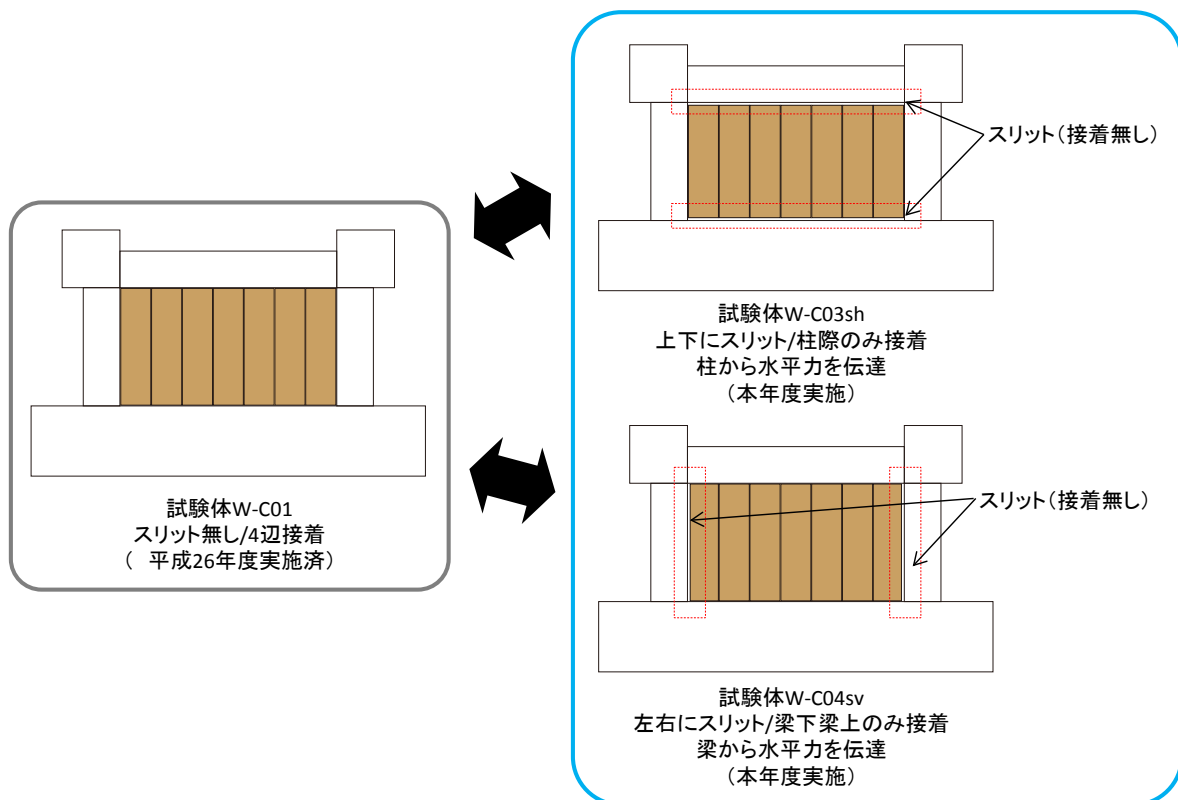


図1.2.2 スリットを設けた試験体による補強メカニズムの解明

3) スパンによる補強効果への影響の検証

木質耐震壁の補強効果は柱スパンの影響をうけることが考えられており、これまでの実験では、標準スパン型およびロングスパン型の試験体を用いてその影響を検証した。本年度事業ではさらに短スパン型の試験体による構造実験を行うことで、スパンの影響をより詳細に検討した。(第2章)

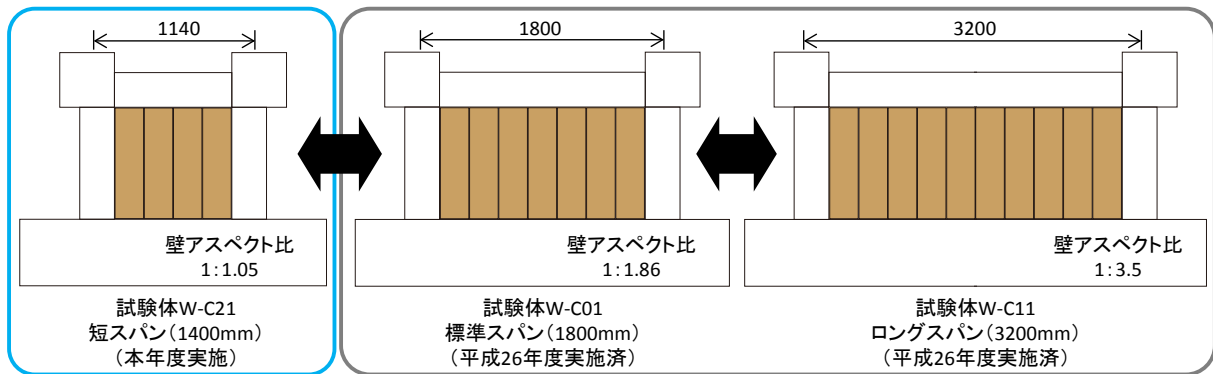


図1.2.3 スパンによる補強効果への影響の検証

4) 木材 (CLT) とRCの接着接合部のせん断抵抗性状の検証

本工法ではこれまでの実験結果から、接着接合部は界面のコンクリートにひび割れが生じてせん断破壊することが分かっている。またひび割れが生じRC躯体と木質壁が乖離した後も、RC柱梁によって木質壁が抑え込まれることによって摩擦が生じ、補強効果が発揮されると考えられている。

既往の実験では、接着接合部のせん断破壊後における摩擦係数および変形性能の把握はされていないことから、CLTとRCの接着接合部の要素実験によってせん断強度の確認と摩擦係数を確認した。(第3章)

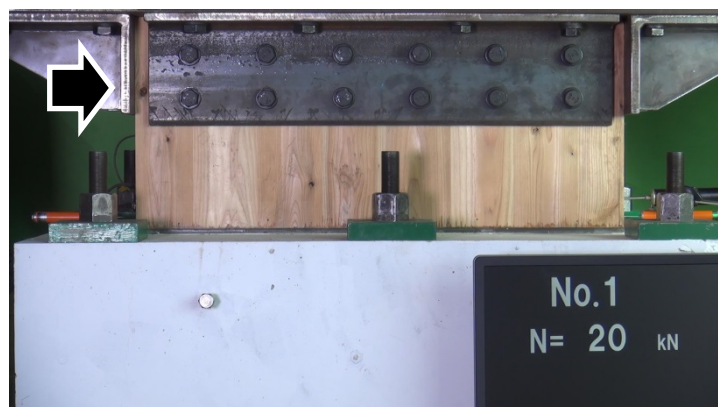


写真1.2.1 接着せん断要素実験状況

第2章 構造実験（接着工法）

2.1 構造実験の目的

本章では下記の項目の検証するために行ったCLTによって補強したRCフレーム試験体による構造実験について報告する。

- 1) CLTの幅はぎの有無による補強性能の検証
- 2) スリットを設けた試験体による抵抗機構の解明
- 3) スパンによる補強効果への影響の検証

上記の項目を検証するため、試験体は4体とした。試験体の名称規則を図2.1.1-1に示す。

試験体W-C02は幅はぎをしていないCLTを用いた補強をした。平成26年度事業で実験した試験体W-C01と比較することにより、幅はぎの有無による補強効果の違いを明らかにする目的としている。

試験体W-C03sh、W-C04svはそれぞれ木質壁の上下、左右にスリットを設け、RCフレームからの力の伝達を制限することを意図した試験体である。これにより、W-C03shはRC柱からのみせん断力が伝達され、W-C04svは梁からのみせん断力が伝達される。これらの試験体とW-C01を比較することによって、せん断力に対する抵抗機構を解明することを目的としている。

試験体W-C21は、柱スパンを1140mmとした短スパンの試験体である。平成26年度事業で実験した試験体W-C01およびW-C11との比較により、柱スパンが補強効果に与える影響を検証することを目的としている。

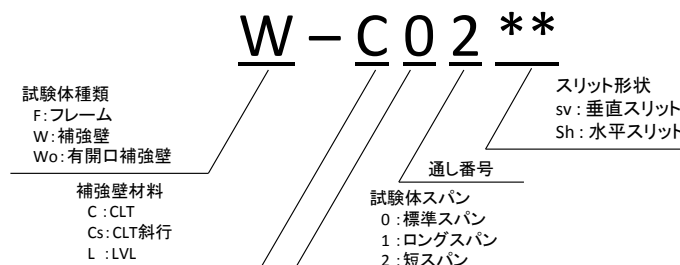


図 2.1.1-1 試験体の名称規則

2.2 実験概要

2.2.1 試験体計画

図 2.2.1-1 に試験体の特徴と写真を、表 2.2.1-1 に試験体の一覧を、図 2.2.1-2 から図 2.2.1-5 に試験体の断面と形状を示す。

試験体は計 4 体で、1/3 縮小モデルとし 1 層 1 スパンの RC 骨組を CLT の壁で補強したものである。RC 骨組は平成 26 年度委託事業で実験した試験体形状を踏襲しており、柱は幅 B_c 260mm×成 D_c 260mm の正方形断面、梁は幅 B_b 180mm×成 D_b 260mm の長方形断面である。骨組みの高さ h は 970mm で、内法名高さ h_0 は 840mm、柱間のスパンは 2 種類あり、標準スパンとしている試験体 W-C02、W-C03sh、W-C04sv の節点距離 l は 1800mm、内法長さ l_0 は 1540mm とし、短スパン試験体 W-C21 の節点距離 l は 1140mm、内法長さ l_0 は 880mm である。

補強壁に使用する木材は 3 層 3 プライ厚さ 30mm、幅 214mm、高さ 830mm の CLT とし、2 枚重ね厚さ 60mm としたものを 7 枚ないし 4 枚並べ、CLT パネルの木口間および RC と CLT パネルの間にエポキシ樹脂を注入し固定した。樹脂層の幅は 5mm とした。

表 2.2.1-1(a) 試験体一覧（骨組部）

試験体	柱軸力比	柱	梁	スパン l	高さ h
W-C02	0.2	断面： $B_c \times D_c = 260 \times 260$ mm 主筋：12-D13 $p_g=2.25\%$ 帯筋：2- ϕ 4@80 $p_w = 0.12\%$ かぶり厚：15mm	断面： $B_b \times D_b = 180 \times 260$ mm 引張筋：3-D16 $p_t=1.4\%$ 帯筋：2-D6@60 $p_w = 0.59\%$	1800mm	970mm
W-C03sh	0.2				
W-C04sv	0.2				
W-C21	0.2			1140mm	

表 2.2.1-1(b) 試験体一覧（補強部）

試験体	CLT	割り付け	接着剤	RC と CLT の接着部
W-C02	Mx60 相当, 3 層 3 プライ $t = 30$ mm, 幅はぎなし	2 枚重ね, 7 分割	エポキシ樹脂 E207D 接着厚 $t=5$ mm	4 周とも接着
W-C03sh	Mx60 相当, 3 層 3 プライ $t = 30$ mm, 幅はぎあり	2 枚重ね, 7 分割		壁の上下にスリットを設け, 壁の左右のみ接着
W-C04sv		2 枚重ね, 7 分割		壁の左右にスリットを設け, 壁の上下のみ接着
W-C21		2 枚重ね, 4 分割		4 周とも接着

試験体	
<p>W-C02 標準スパン 無開口 幅はぎなし CLT を使用</p>	
<p>W-C03sh 標準スパン 壁の上下にスリット (柱との境界のみ接着) 幅はぎした CLT を使用</p>	
<p>W-C04sv 標準スパン 壁の左右にスリット (梁・スタブとの境界のみ接着) 幅はぎした CLT を使用</p>	
<p>W-C21 短スパン (1140mm) 無開口 幅はぎした CLT を使用</p>	

図 2.2.1-1 試験体の一覧

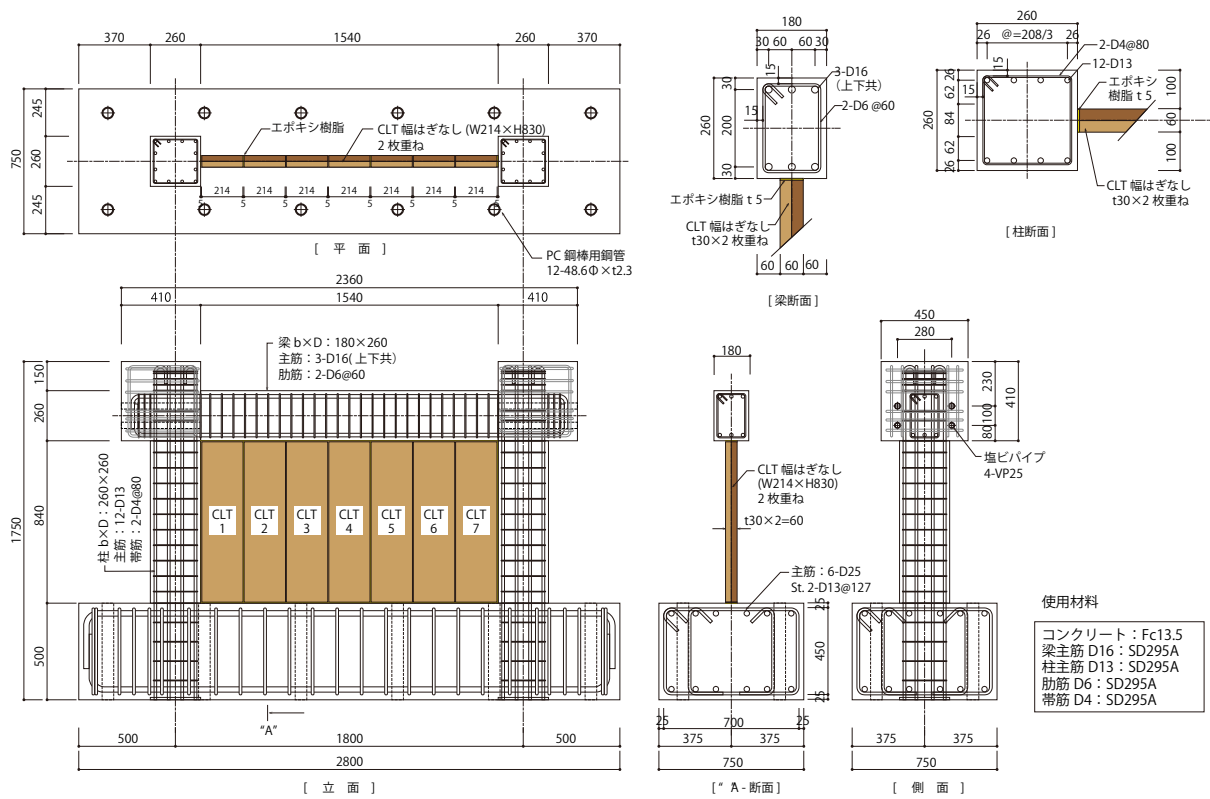


図 2.2.1-2 試験体 W-C02

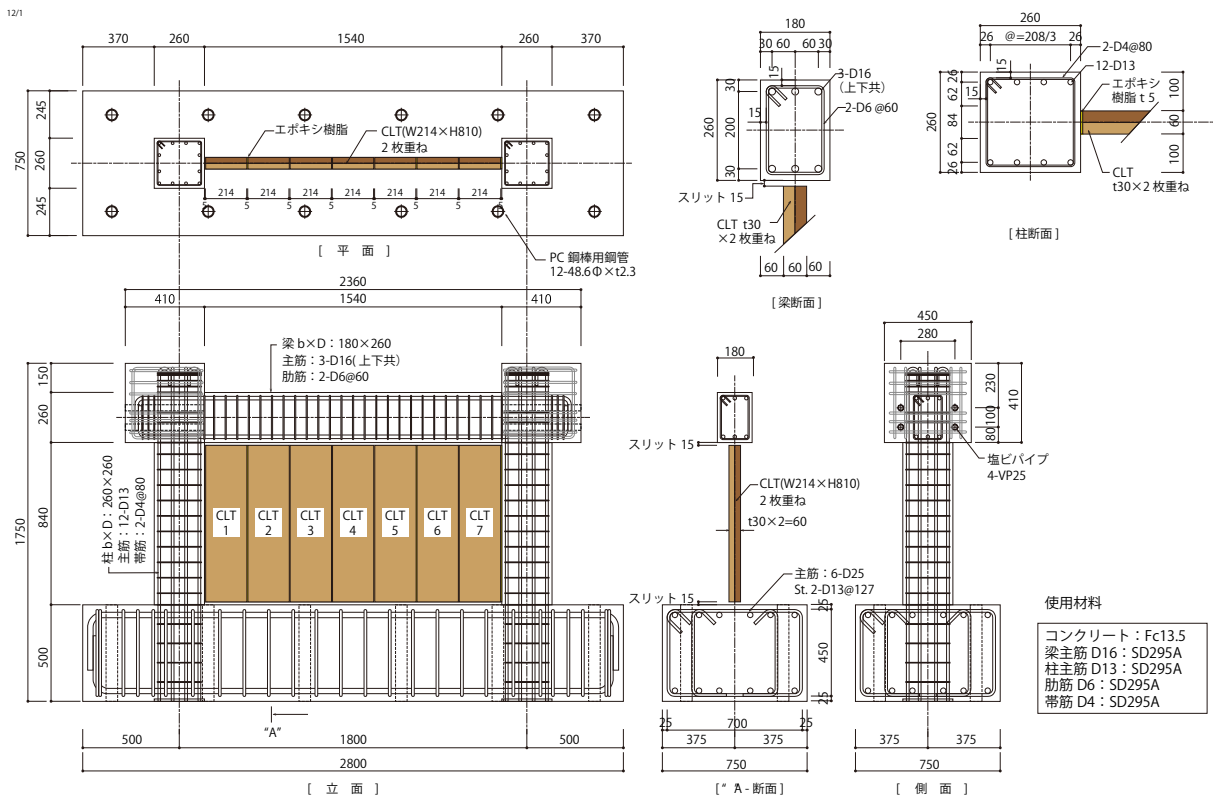


図 2.2.1-3 試験体 W-C03sh

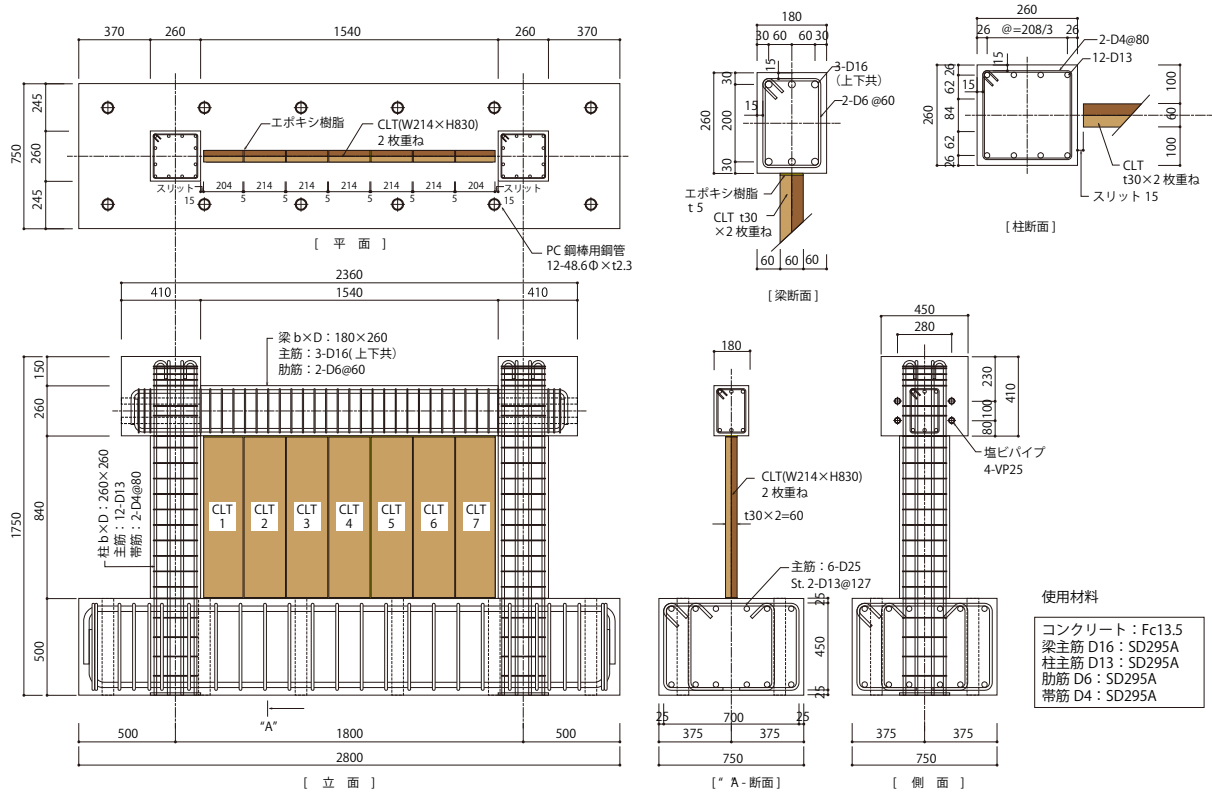


図 2.2.1-4 試験体 W-C04sv

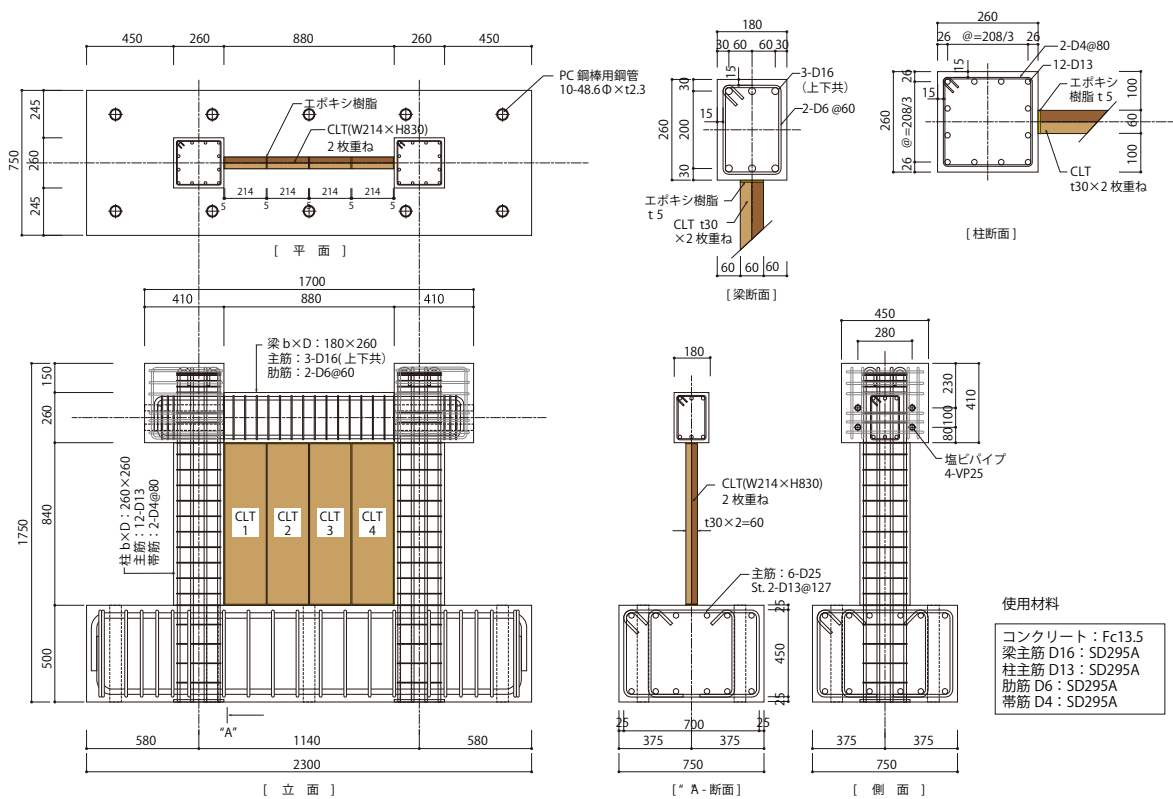


図 2.2.1-5 試験体 W-C21

各試験体に使用したコンクリートの材料試験結果を表 2.2.1-2 に、鋼材の引張試験結果を表 2.2.1-3 に示す。また、補強に使用した接着剤の試験結果を表 2.2.1-4 に示す。ここで使用した接着剤はコニシ社製 2 液混合型エポキシ樹脂 E207DW である。

補強に使用した CLT の材料特性を表 2.2.1-5 に示す。

表 2.2.1-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
W-C02	16.6	2.19	20100
W-C03sh	20.0	2.20	21900
W-C04sv	19.8	2.20	22200
W-C21	21.0	2.20	23000

表 2.2.1-3 鋼材の材料試験結果

種類	仕様部位	降伏強度	ヤング係数	引張強度
D13 SD295	柱主筋	345	1.78	473
D4 SD295	帯筋	341	1.71	513
D16 SD295	梁主筋	354	1.78	484
D6 SD295	あばら筋	371	1.80	521

表 2.2.1-4 接着剤の材料試験結果

試験材料	試験項目	規格値(N/mm ²)	試験値(N/mm ²)
E207DW	引張強さ	20 以上	43
	圧縮降伏強さ	50 以上	85
	引張せん断強さ	10 以上	19

表 2.2.1-5 試験体 CLT の材料特性

試験体	W-C02	W-C03sh / W-C04sv / W-C21
樹種	スギ	
規格等級	3層3プライ 対称異等級構成	
幅はぎ	なし	あり
製造者	S社	T社
使用ラミナの曲げ弾性 係数の平均値 E_0 *	内層 : 6.8 kN/mm ² 外層 : 8.6 kN/mm ²	内層 : 8.4 kN/mm ² 外層 : 9.4 kN/mm ²
せん断強度 F_s (N/mm ²) *	5.64	5.89
せん断弾性係数 G (N/mm ²) *	745	793

* いずれも第1編 3.2節の要素実験による実験値。

2.2.2 加力・計測計画

図 2.2.2-1 に加力装置の概要を示す。試験中、周囲反力フレームに取り付けた鉛直オイルジャッキを用いて、試験体の両側柱それぞれに長期応力度に相当する一定の圧縮軸力 ($N = 0.2\sigma_B \cdot B \cdot D$ 、ここに、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 B : 柱幅、 D : 柱せい) を載荷した状態で、梁心位置を加力芯として水平せん断力を載荷した。このとき架構の層間変形角 R を制御変位として、図 2.2.2-2 に加力スケジュールを載荷した。

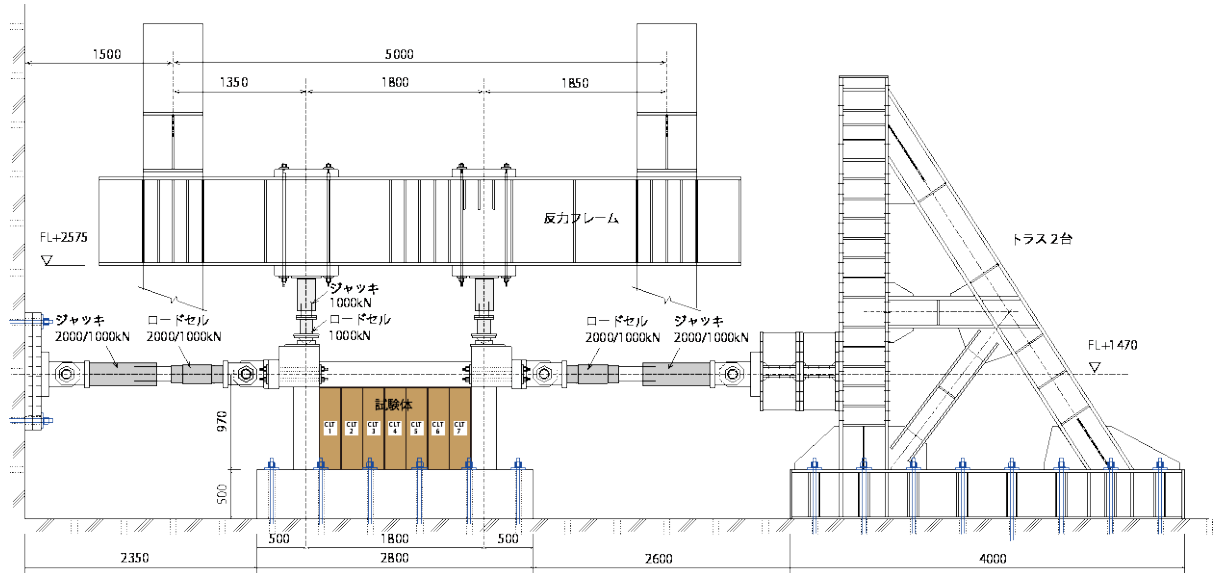


図 2.2.2-1 加力装置図

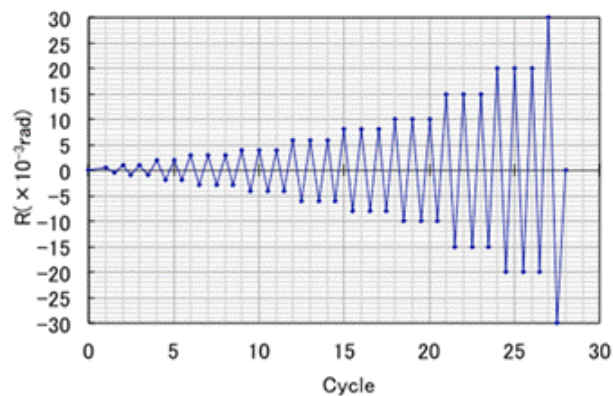


図 2.2.2-2 加力サイクル

図 2.2.2-4 から図 2.2.2-7 には、試験体の変位及びひずみの計測箇所を示す。なお、ジャッキの制御については、各図に赤枠で示す二つの制御用変位計から得た平均の変位 d から図 2.2.2-3 に示すように制御変形角 R を式(2.2.2-1)によって求め制御している。

$$R = d / H \quad (2.2.2-1)$$

ただし

R : 制御変形角

d : 加力高さの変位の平均値

H : 柱脚から加力芯までの高さ

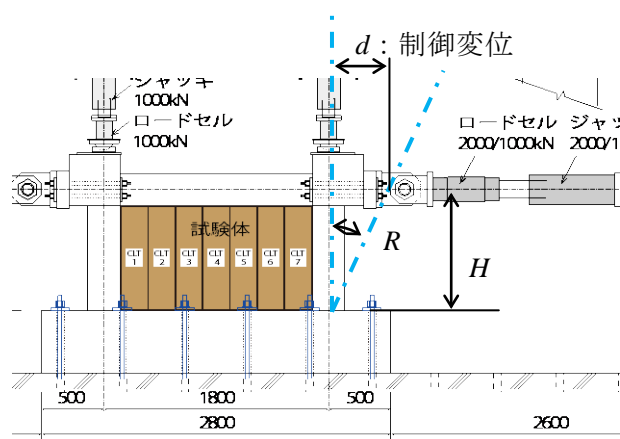
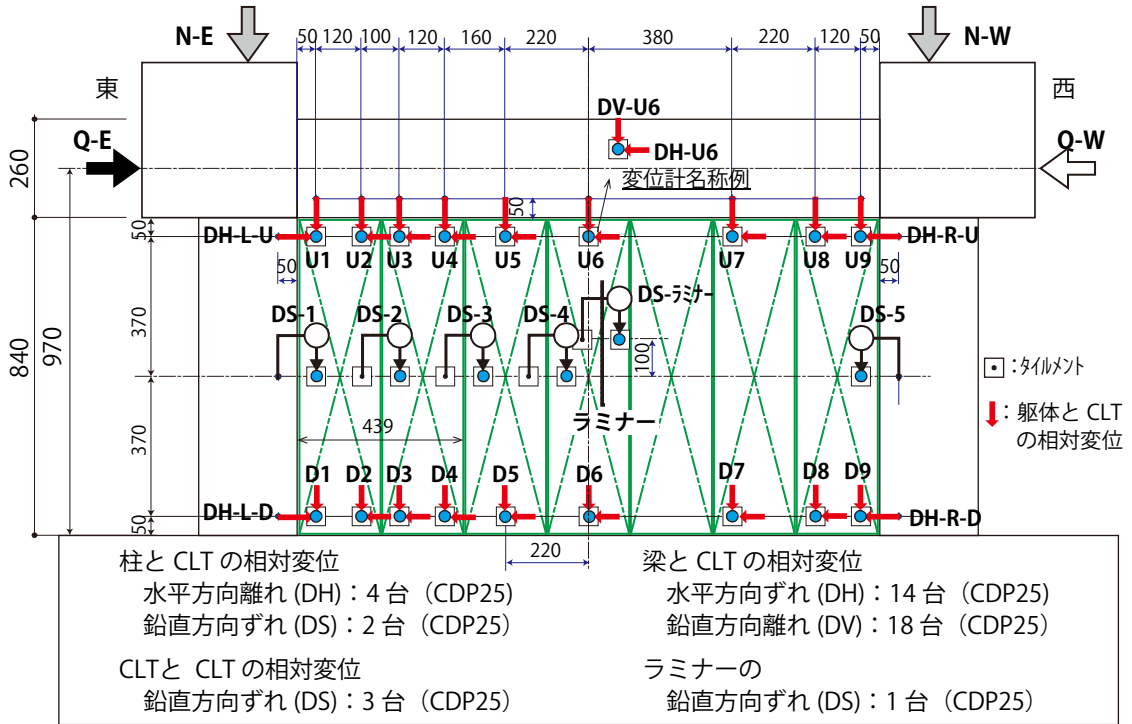


図 2.2.2-3 制御変形角の求め方



注 1) 正面 (北) からの透視図を示す。
注 2) 変位計は、裏面 (南) とする。

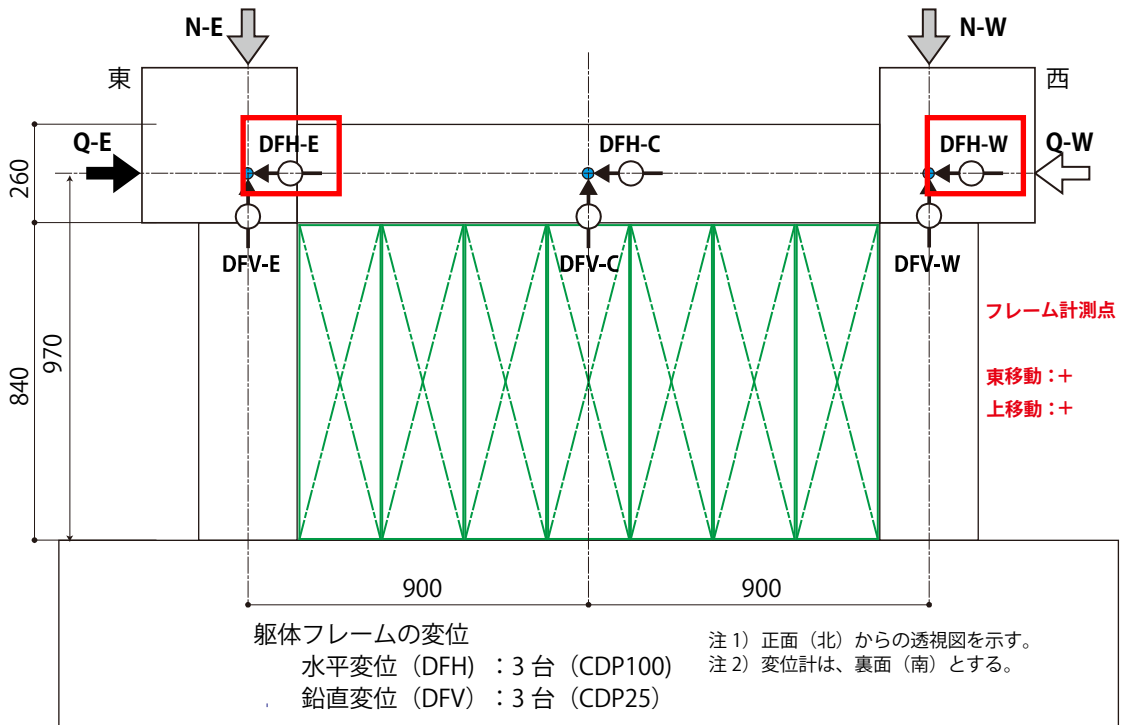
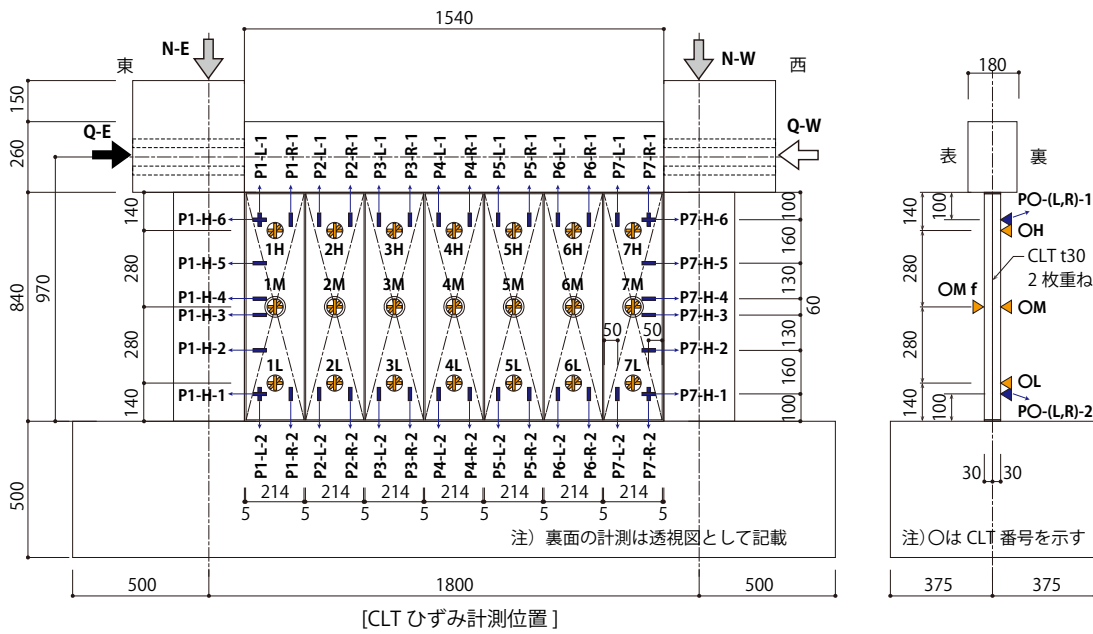
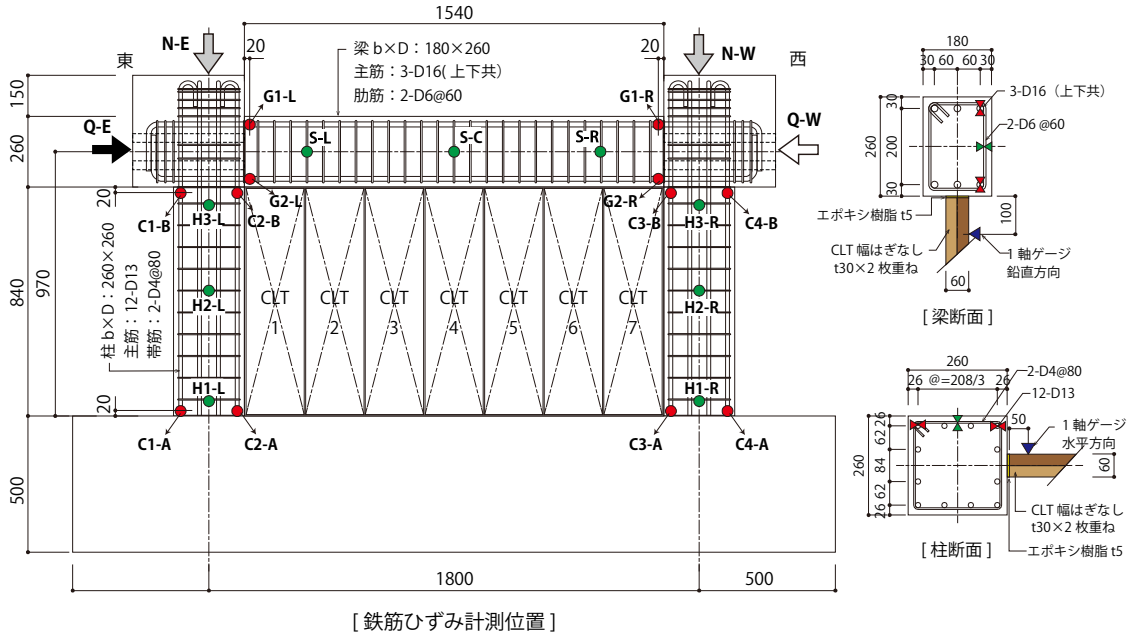


図 2.2.2-4 a) W-C02 変位計配置図



鉄筋ゲージ

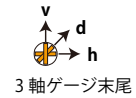
- 柱(C) 2点/本×4本=8点
梁(G) 2点/本×2本=4点
- 帯筋(H) 1点/本×6本=6点
肋筋(S) 1点/本×3本=3点

21点 × 2 = 42枚

CLT : 3軸ゲージ

- CLT裏面 3点/枚×7枚 = 21点
- CLT表面 1点/枚×7枚 = 7点

- ⊙ : 裏面のみ
- ⊗ : 表裏の両面



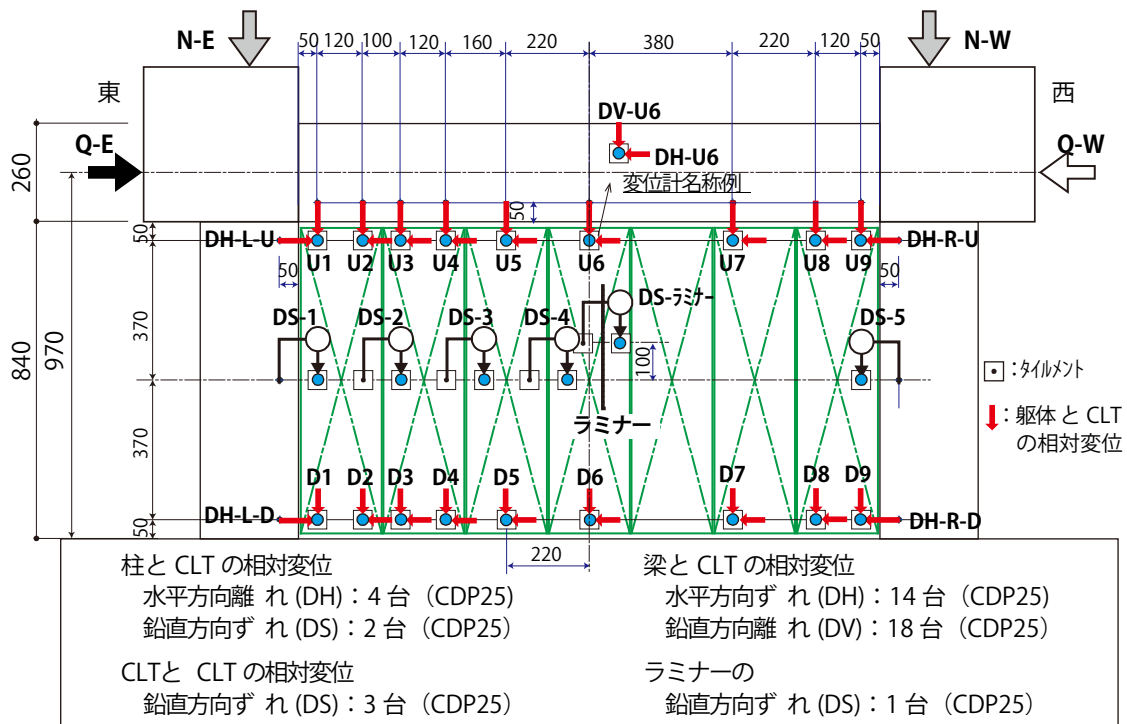
CLT : 1軸ゲージ

- CLT裏面鉛直方向 4点/枚×7枚 = 28点
- CLT裏面水平方向 6点/枚×2枚 = 12点

CLT使用ゲージ

: PFL30-11-5LT
 28×3 + 40 = 124枚

図 2.2.2-4 b) W-C02 ひずみゲージ計配置図



注1) 正面 (北) からの透視図を示す。
 注2) 変位計は、裏面 (南) とする。

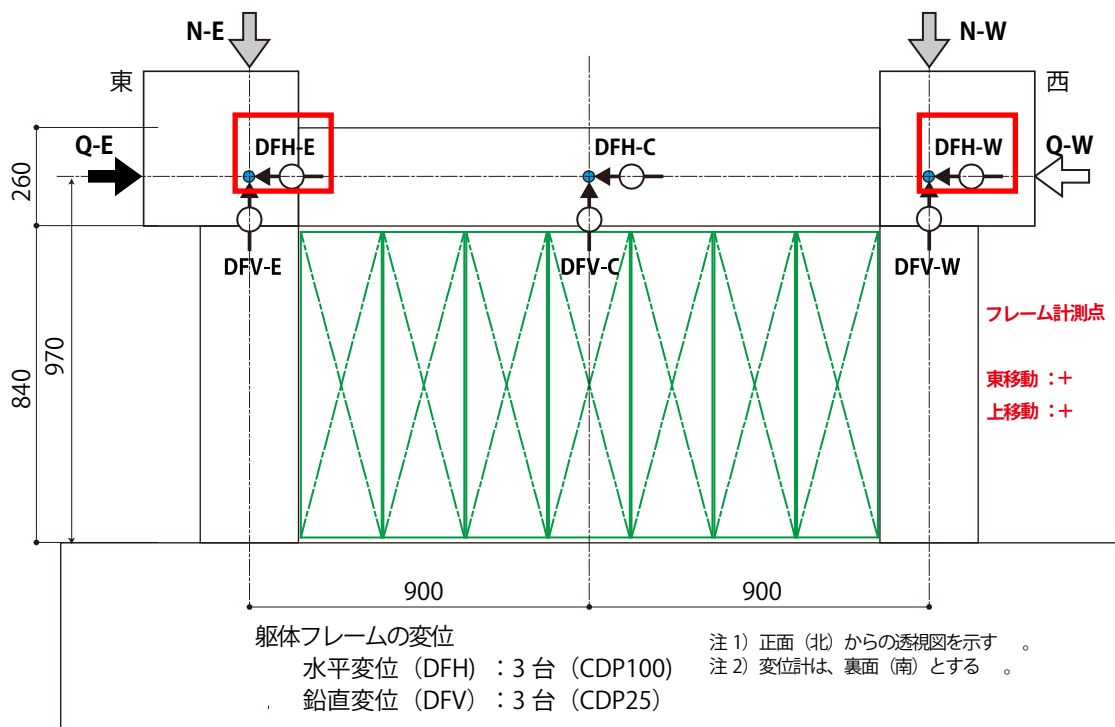
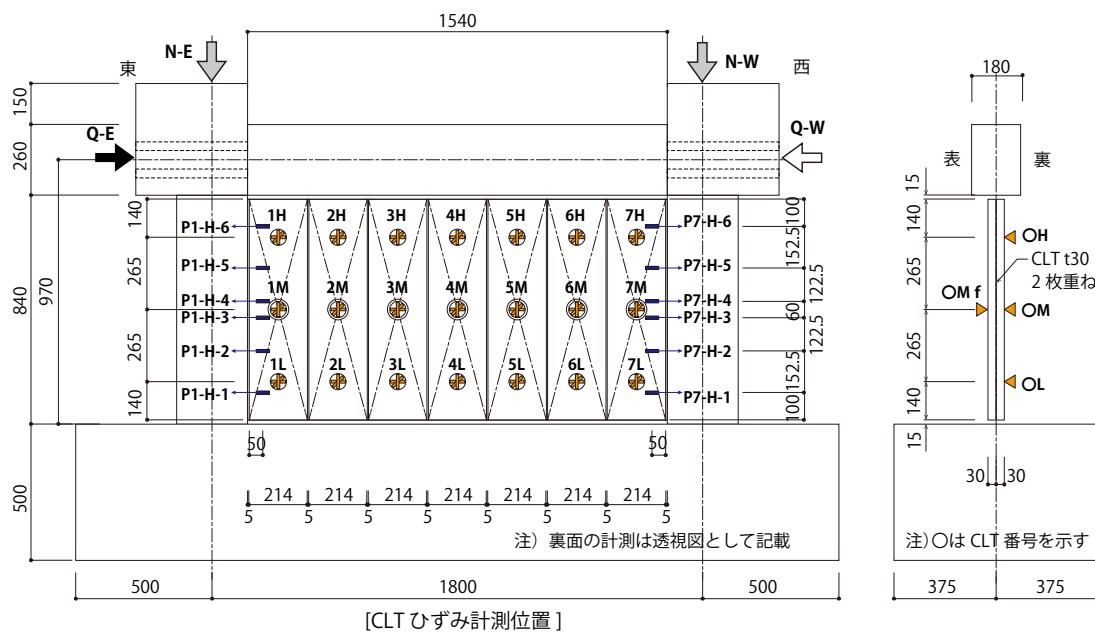
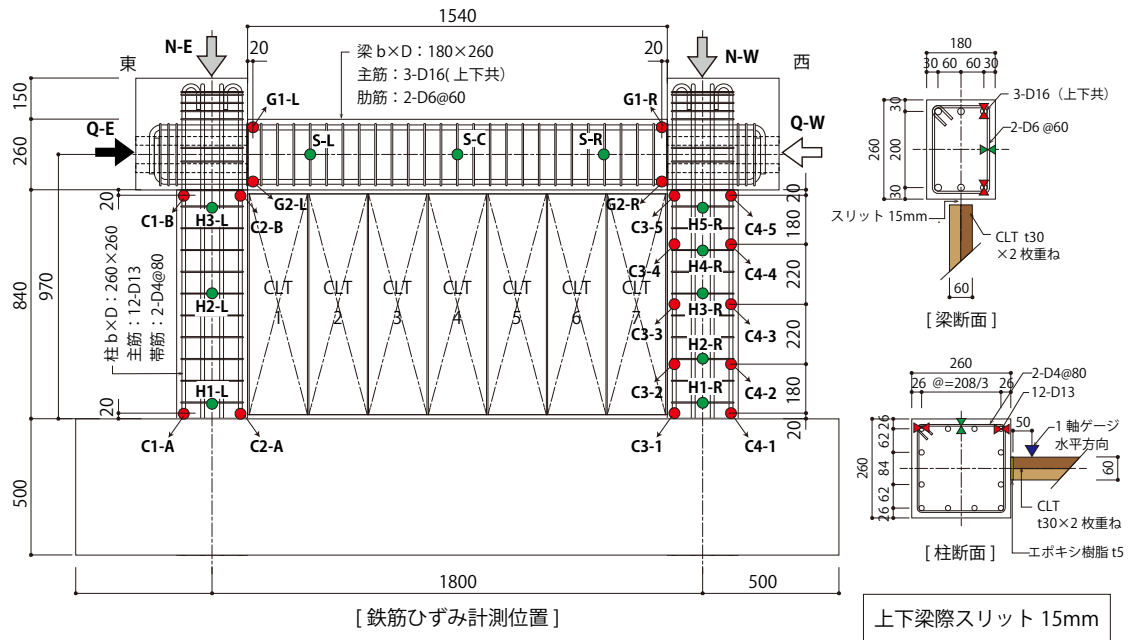


図 2.2.2-5 a) W-C03sh 変位計配置図



鉄筋ゲージ

- 柱 (C) 2点/本×2本=4点
- 柱 (C) 5点/本×2本=10点
- 梁 (G) 2点/本×2本=4点
- 帯筋 (H) 1点/本×8本=8点
- 肋筋 (S) 1点/本×3本=3点

29点 × 2 = 58枚

CLT : 3軸ゲージ

- CLT 裏面 3点/枚×7枚 = 21点
- CLT 表面 1点/枚×7枚 = 7点

- ⊗ : 裏面のみ
- ⊙ : 表裏の両面

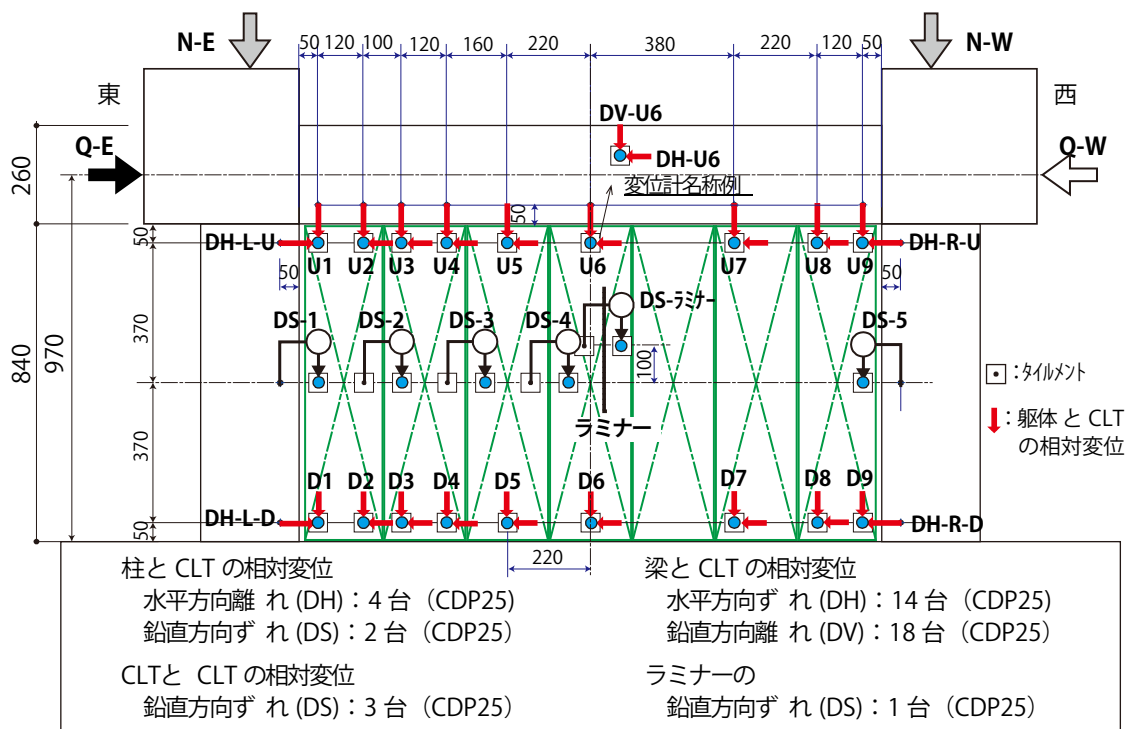


CLT : 1軸ゲージ

- CLT 裏面水平方向 6点/枚×2枚 = 12点

CLT 使用ゲージ
: PFL30-11-5LT
28×3 + 12 = 96枚

図 2.2.2-5 b) W-C03sh ひずみゲージ配置図



注 1) 正面 (北) からの透視図を示す。
 注 2) 変位計は、裏面 (南) とする。

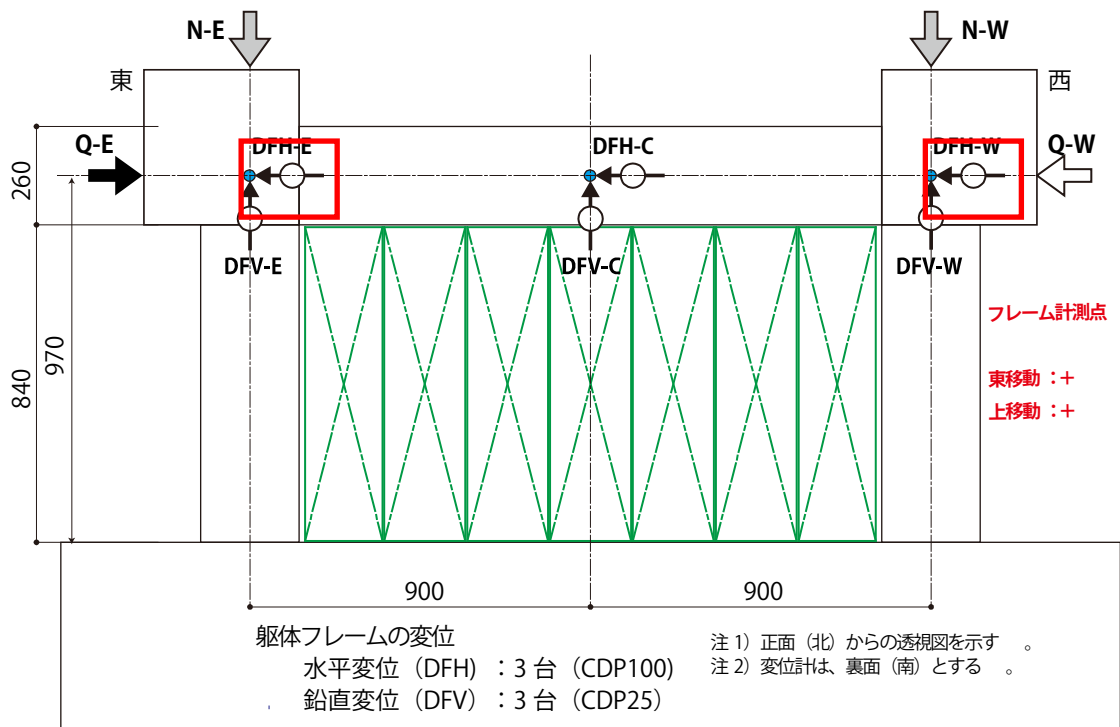
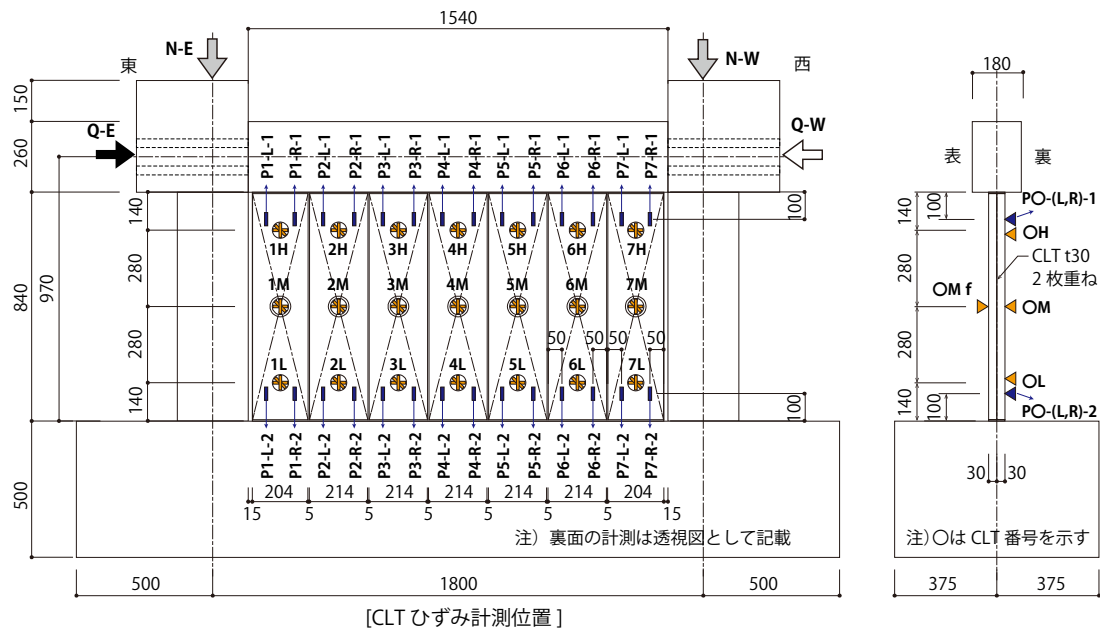
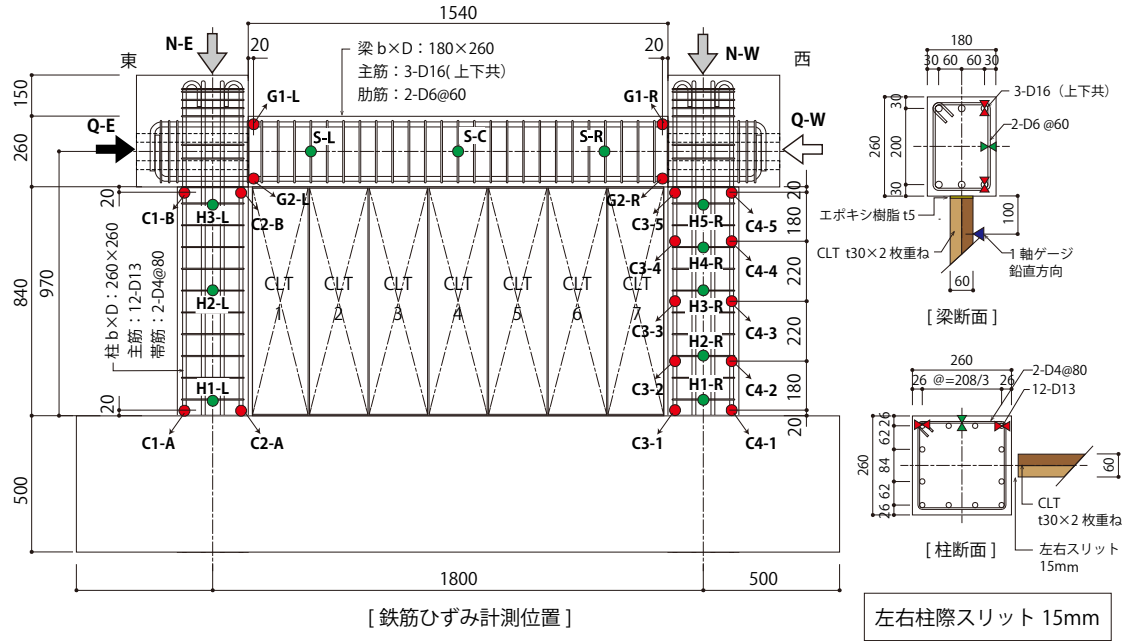


図 2.2.2-6 a) W-C04sv 変位計配置図



鉄筋ゲージ

- 柱(C) 2点/本×2本=4点
- 柱(C) 5点/本×2本=10点
- 梁(G) 2点/本×2本=4点
- 帯筋(H) 1点/本×8本=8点
- 筋筋(S) 1点/本×3本=3点

29点 × 2 = 58枚

CLT : 3軸ゲージ

- CLT裏面 3点/枚×7枚 = 21点
- CLT表面 1点/枚×7枚 = 7点

- ⊙ : 裏面のみ
- ⊗ : 表裏の両面



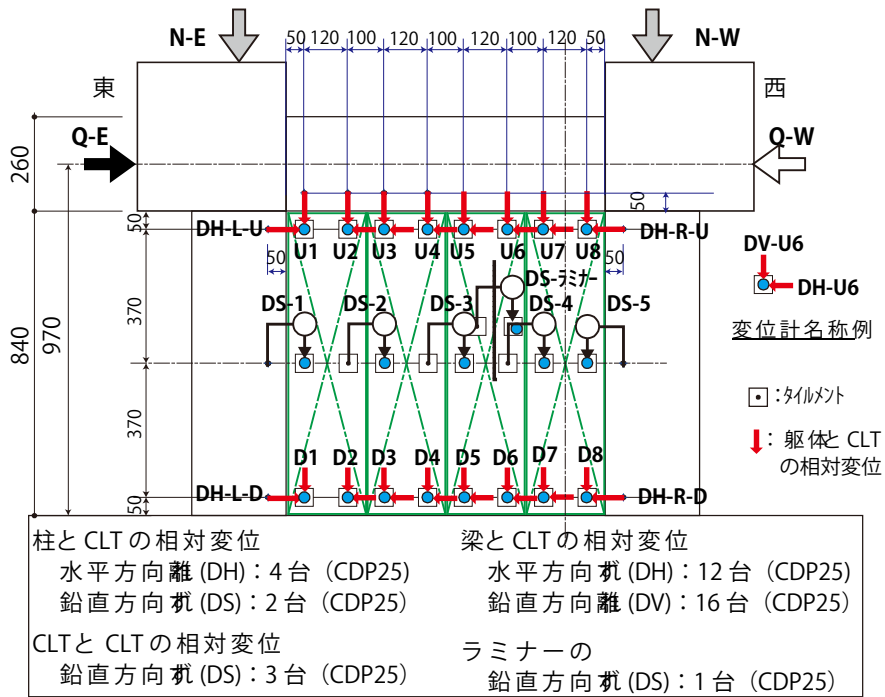
CLT : 1軸ゲージ

- CLT裏面鉛直方向 4点/枚×7枚 = 28点

CLT 使用ゲージ

- : PFL30-11-5LT
- 28×3 + 28 = 112枚

図 2.2.2-6 b) W-C04sv ひずみゲージ配置図



注1) 正面 (北) からの透視図を示す
 注2) 変位計は、裏面 (南) とする

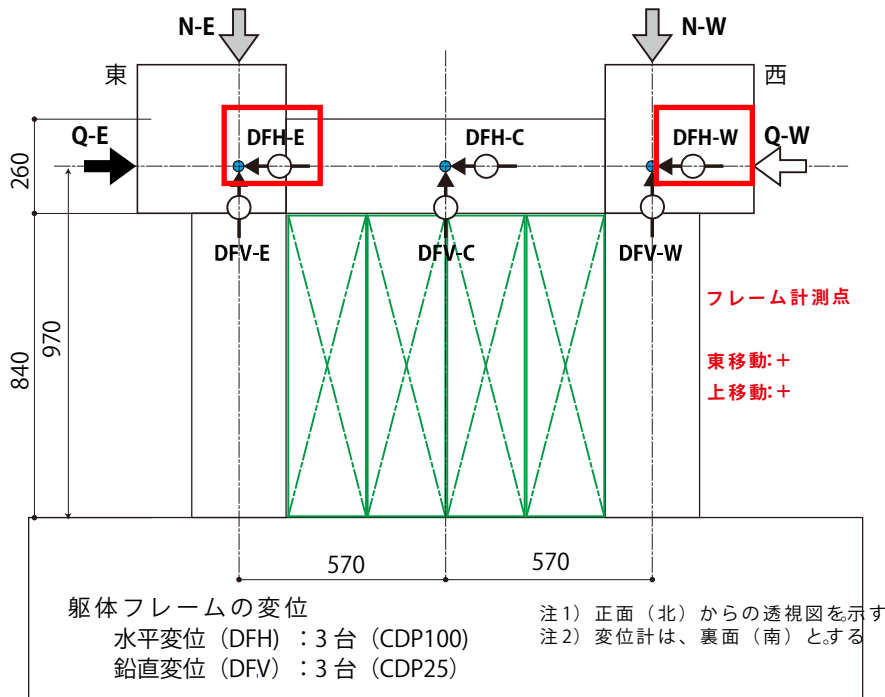
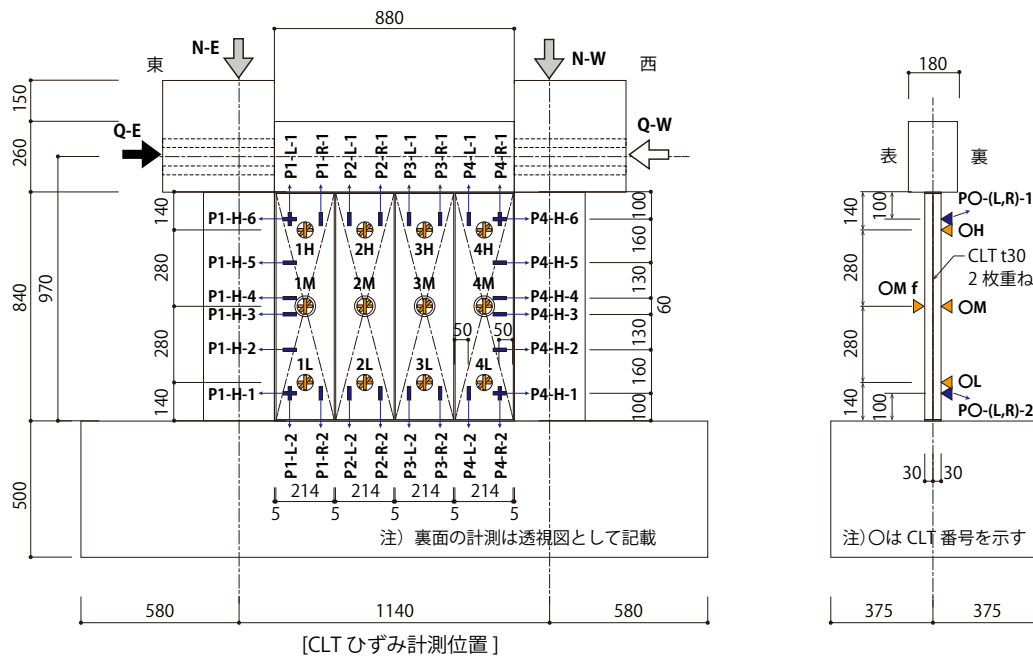
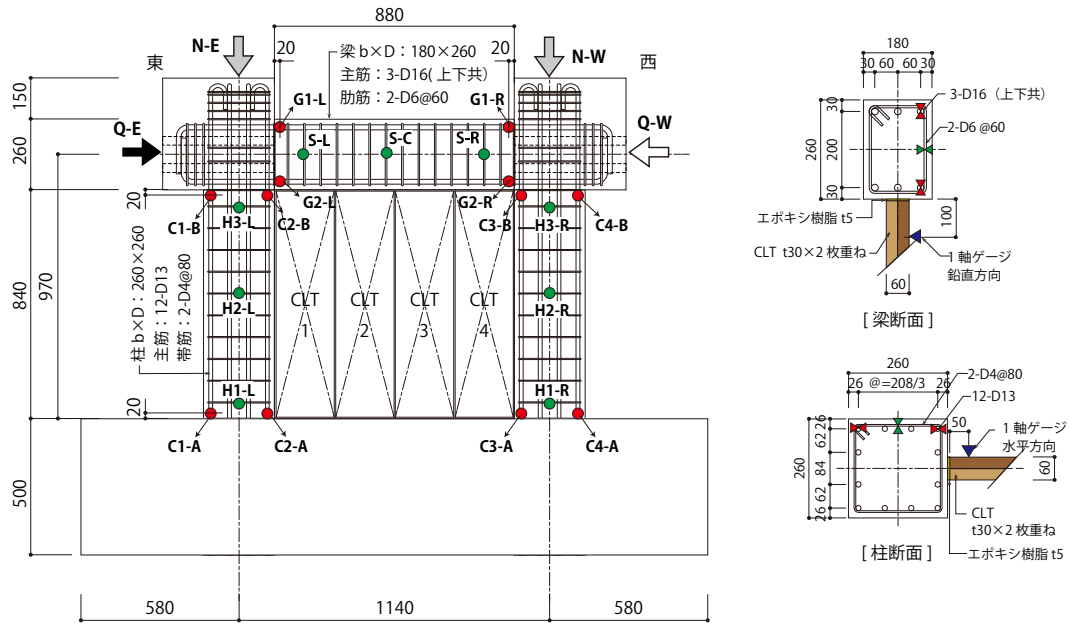


図 2.2.2-7 a) W-C21 変位計配置図



鉄筋ゲージ

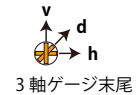
- 柱(C) 2点/本×4本=8点
- 梁(G) 2点/本×2本=4点
- 帯筋(H) 1点/本×6本=6点
- 筋筋(S) 1点/本×3本=3点

21点 × 2 = 42枚

CLT : 3軸ゲージ

- CLT裏面 3点/枚×4枚 = 12点
- CLT表面 1点/枚×4枚 = 4点

- ⊙ : 裏面のみ
- ⊗ : 表裏の両面



CLT : 1軸ゲージ

- CLT裏面鉛直方向 4点/枚×4枚 = 16点
- CLT裏面水平方向 6点/枚×2枚 = 12点

CLT使用ゲージ

: PFL30-11-5LT
16×3 + 28 = 76枚

図 2.2.2-7 b) W-C21 ひずみゲージ配置図

2.3 構造実験（接着工法）の結果

2.3.1 損傷状況と荷重変形関係

以下、実施した試験体ごとの試験結果を示す。

2.3.1.1 W-C02

写真 2.3.1-1(a)～(c)に試験体の損傷状況および最終破壊状況を、図 2.3.1-1 には試験体のひび割れ状況を示す。また、図 2.3.1-2 に、層せん断力-層間変形角関係を示す。

試験体の RC 骨組の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルにて柱脚および梁端の際に曲げひび割れが発生した。その後、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルでせん断ひび割れおよび主筋に沿って付着割裂ひび割れが発生し、柱脚外側一部が圧潰した。最終的には $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクル途中で柱に顕著なせん断ひび割れが生じ、耐力が低下した。耐力低下後も加力を継続したところ、破壊状況からは柱のせん断破壊および柱の付着せん断破壊が確認された。柱中央の帯筋は $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクル目で東西の柱（東は正加力時、西は負加力時）が降伏ひずみに達しており、このタイミングでそれぞれの柱がせん断耐力に達しせん断破壊に至った。

試験体の補強部分である接着接合部および CLT 耐震壁の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ より RC 柱および RC 梁下と CLT の間の接着接合面に沿って、コンクリート側にひび割れが発生しはじめ、 $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ までに梁下との接着接合部の接着面に沿ったひび割れは正側加力時に生じたひび割れと負側加力時に生じたひび割れがつながり、梁下との接着接合部ほぼ全面に沿ったひび割れとなった。その後、梁下との接着接合面のせん断すべりが目視でも観察された。図 2.3.1-3 には、RC 梁下と CLT パネルの間の接着接合部のすべり量と層間変形角の関係を示すが、この計測結果からも、 $R=-2.5 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降から接着接合部のすべりが顕著となっていることが確認できる。最終的に $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ までに CLT パネルは柱に押されて圧縮破壊したことが観察された。



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$

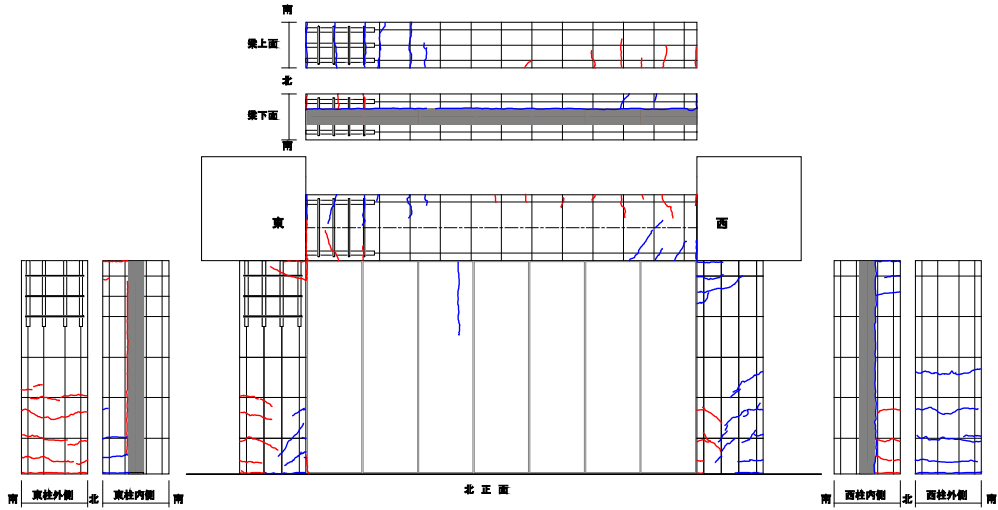


(b) $R=10 \times 10^{-3} \text{ rad}$

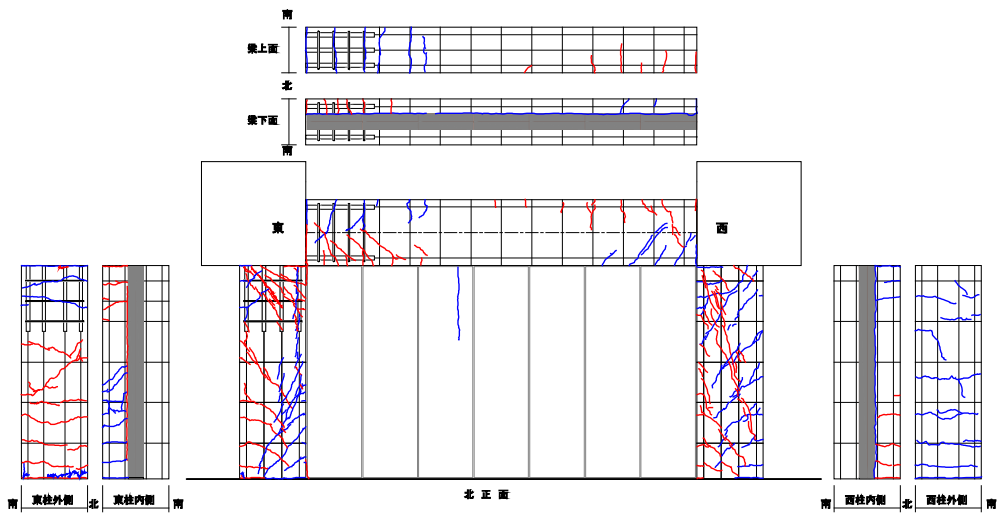


(c) $R=20 \times 10^{-3} \text{ rad}$

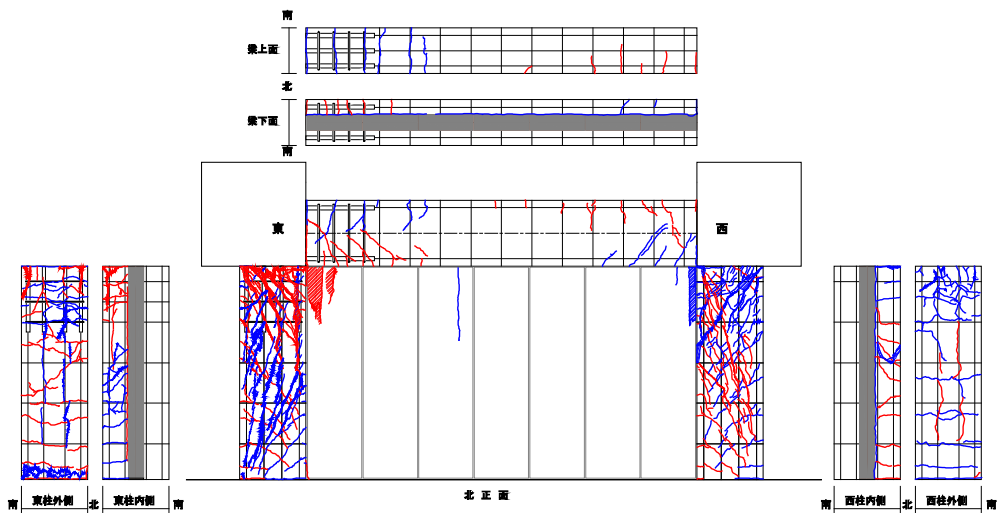
写真 2.3.1-1 W-C02 損傷状況



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$



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



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

図 2.3.1-1 W-C02 ひび割れ状況

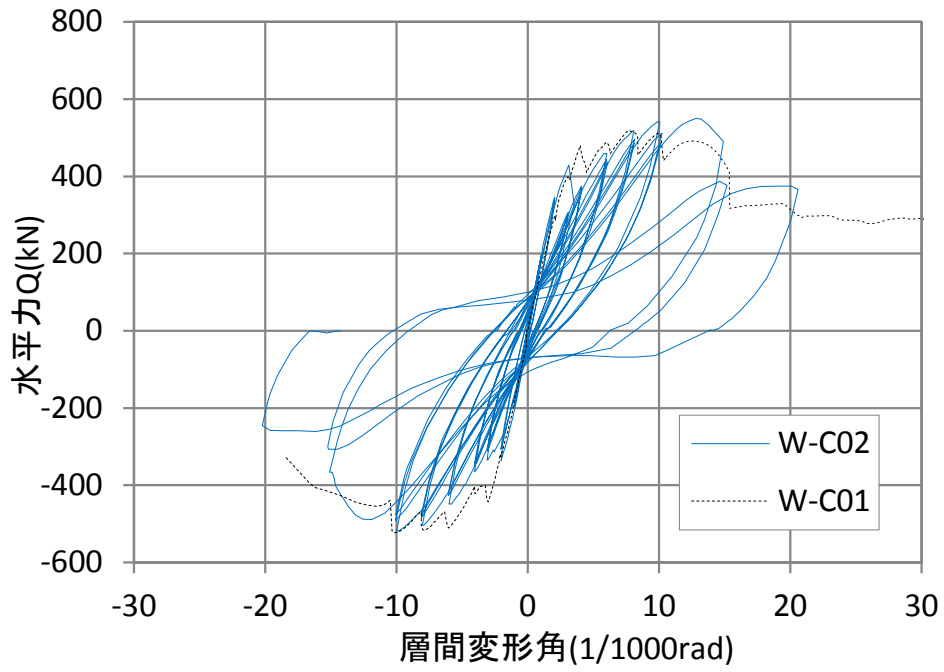


図 2.3.1-2 W-C02 荷重変形関係

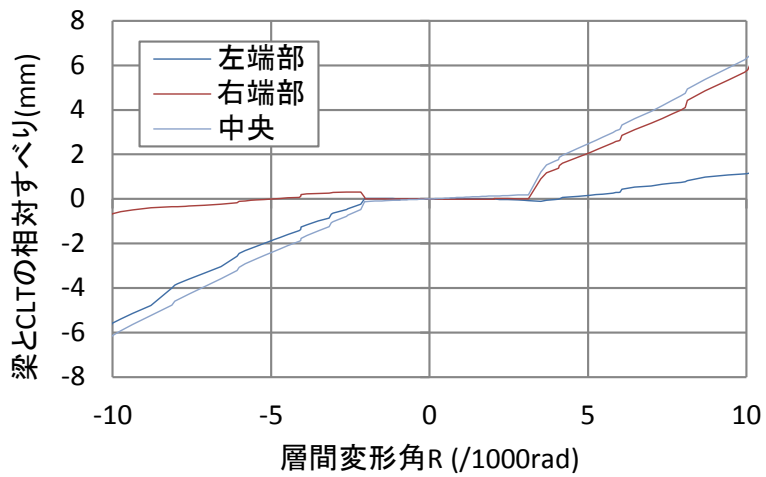


図 2.3.1-3 W-C02 接着接合部のすべり量と層間変形角の関係

2.3.1.2 W-C03sh

写真 2.3.1-2 に試験体 W-C03sh の損傷状況および最終破壊状況を、図 2.3.1-4 には試験体のひび割れ状況を示す。また、図 2.3.1-5 に、層せん断力-層間変形角関係を示す。

試験体 W-C03sh の RC 骨組の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルから柱脚および梁端部に曲げひび割れが生じた。 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ および梁端の際に曲げひび割れが発生した。その後、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルでせん断ひび割れおよび主筋に沿って付着割裂ひび割れが発生し、柱脚外側一部が圧潰した。最終的には $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクル途中で柱に顕著なせん断ひび割れが生じ、耐力が低下した。耐力低下後も加力を継続したところ、破壊状況からは柱のせん断破壊および柱の付着せん断破壊が確認された。柱中央の帯筋は $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクル目で東西の柱（東は正加力時、西は負加力時）が降伏ひずみに達しており、このタイミングでそれぞれの柱がせん断耐力に達しせん断破壊に至った。

試験体の補強部分である接着接合部および CLT 耐震壁の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=0.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ に至る前に、加力側の柱のおよそ下半分の接着接合部のコンクリート側にひび割れが生じ、その後 $2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ までに接着接合部全体にひび割れが進展した。その後 $7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に CLT が座屈により曲げ破壊した。

その後 CLT を取り除いて、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで載荷した。

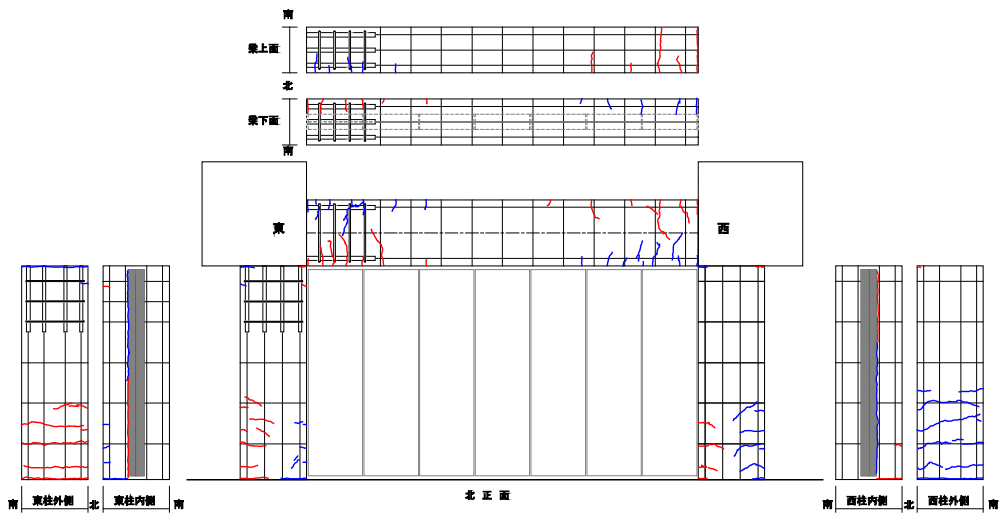


(a) $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad

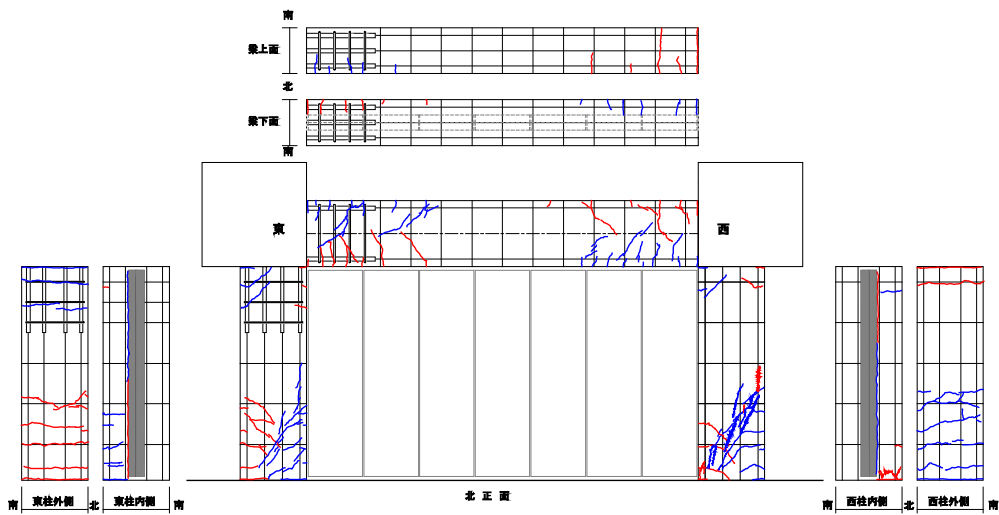


(b) $R=10 \times 10^{-3}$ rad

写真 2.3.1-2 W-C03sh 損傷状況



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$



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

図 2.3.1-4 W-C03sh ひび割れ状況

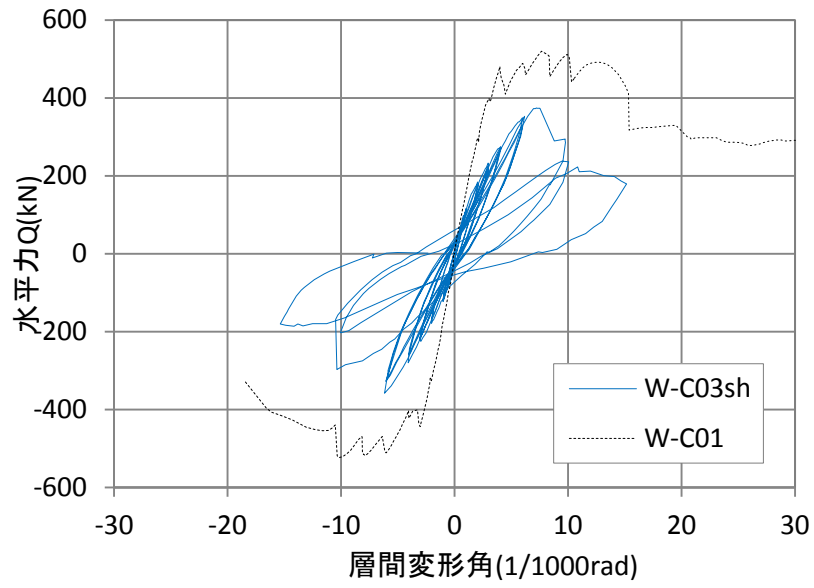


図 2.3.1-5 W-C03sh 荷重変形関係

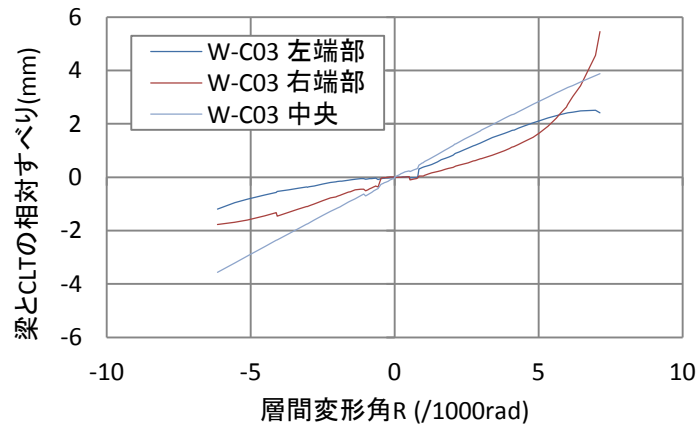


図 2.3.1-6 W-C03sh 接着接合部のすべり量と層間変形角の関係

2.3.1.3 W-C04sv

写真 2.3.1-3 に試験体 W-C04sv の損傷状況および最終破壊状況を、図 2.3.1-7 には試験体のひび割れ状況を示す。また、図 2.3.1-8 に、層せん断力-層間変形角関係を示す。

試験体 W-C04sv の RC 骨組の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルにて両柱脚および梁端の際に曲げひび割れが発生した。その後、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルでせん断ひび割れおよび主筋に沿って付着割裂ひび割れが発生した。最終的には $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクル途中で柱に顕著なせん断ひび割れが生じ、耐力が徐々に低下した。耐力低下後も加力を継続したところ、破壊状況からは柱のせん断破壊および柱の付着せん断破壊が確認された。 $R=8.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクルで西側の柱中央の帯筋が降伏ひずみに達し、その後 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ のサイクルで東側の柱中央の帯筋が降伏ひずみに達した。

試験体の補強部分である接着接合部および CLT 耐震壁の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ のときより RC 柱および RC 梁下と CLT の間の接着接合面に沿って、コンクリート側にひび割れが発生しはじめ、 $R=-2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に梁下の接着接合部の全面にひび割れが進展した。その後、梁下との接着接合面のせん断すべりが目視でも観察された。図 2.3.1-9 には、RC 梁下と CLT パネルの間の接着接合部のすべり量と層間変形角の関係を示すが、この計測結果からも、 $R=-2.5 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降から接着接合部のすべりが顕著となっていることが確認できる。最終的に $R=16 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に CLT パネルと柱が接触することによってせん断力が上昇した。その後 $20 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで加力を行った。



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$

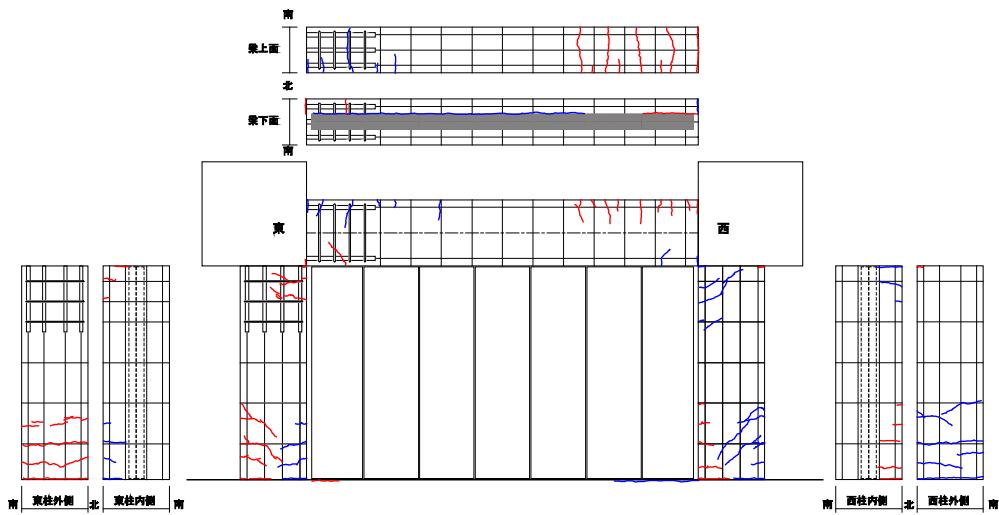


(b) $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$

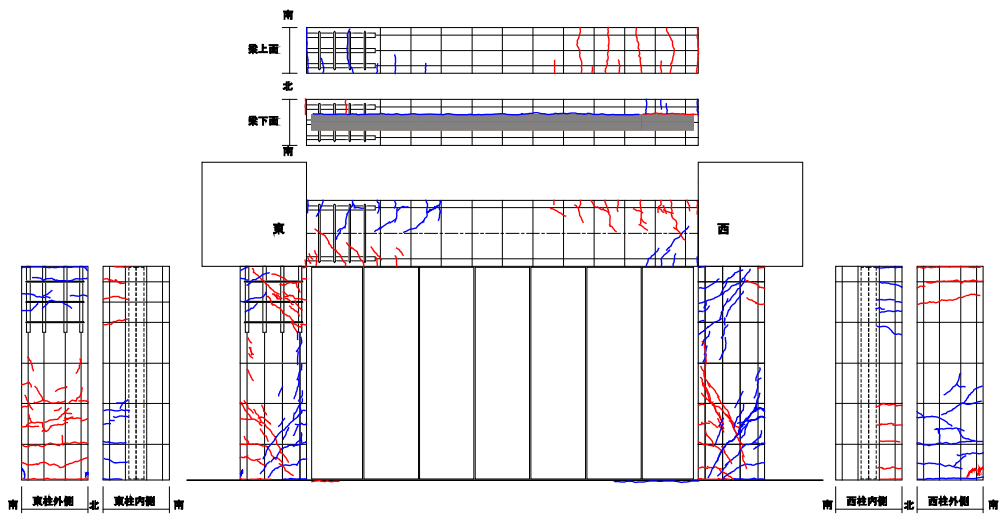


(c) $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$

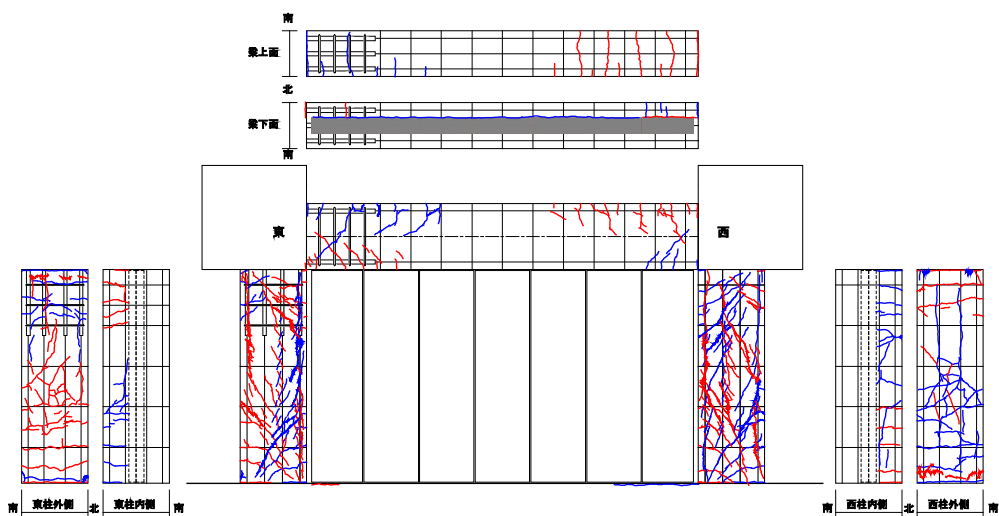
写真 2.3.1-3 W-C04sv 損傷状況



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$



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



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

図 2.3.1-7 W-C04sv ひび割れ状況

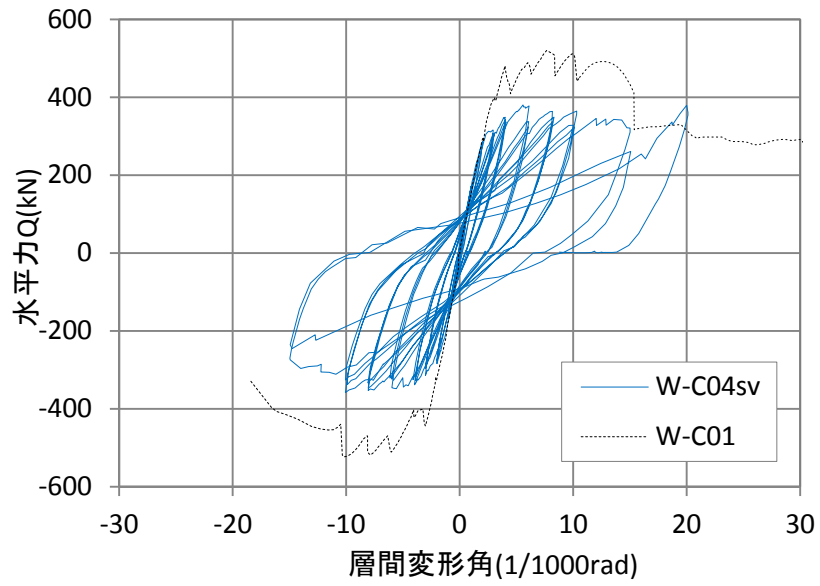


図 2.3.1-8 W-C04sv 荷重変形関係

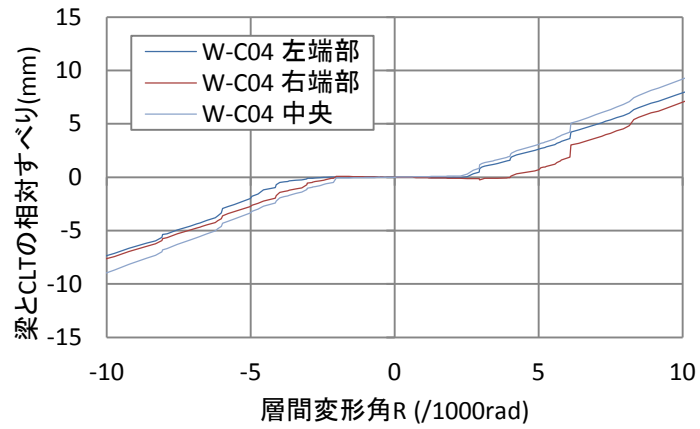


図 2.3.1-9 W-C04sv 接着接合部のすべり量と層間変形角の関係

2.3.1.4 W-C21

写真 2.3.1-4 に試験体 W-C21 の損傷状況および最終破壊状況を、図 2.3.1-10 には試験体のひび割れ状況を示す。また、図 2.3.1-11 に、層せん断力-層間変形角関係を示す。

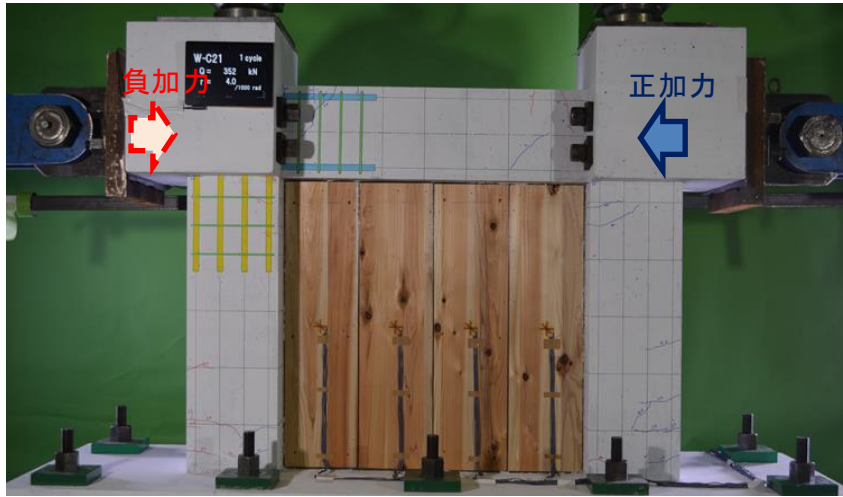
試験体 W-C21 の RC 骨組の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=1.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルにて両柱脚および梁端の際に曲げひび割れが発生した。その後ひび割れが増加し、 $R=3.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルで梁にせん断状のひび割れが生じた。その後、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に東側の梁端部に圧潰が見られ、柱にもせん断ひび割れが生じた。最終的には $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクル途中で柱に顕著なせん断ひび割れが生じ、耐力が低下した。耐力低下後も加力を継続したところ、破壊状況からは柱のせん断破壊が確認された。また、 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の 1 サイクルで西側の柱中央の帯筋が降伏ひずみに達し、その後 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ のサイクルで東側の柱中央の帯筋が降伏ひずみに達した。

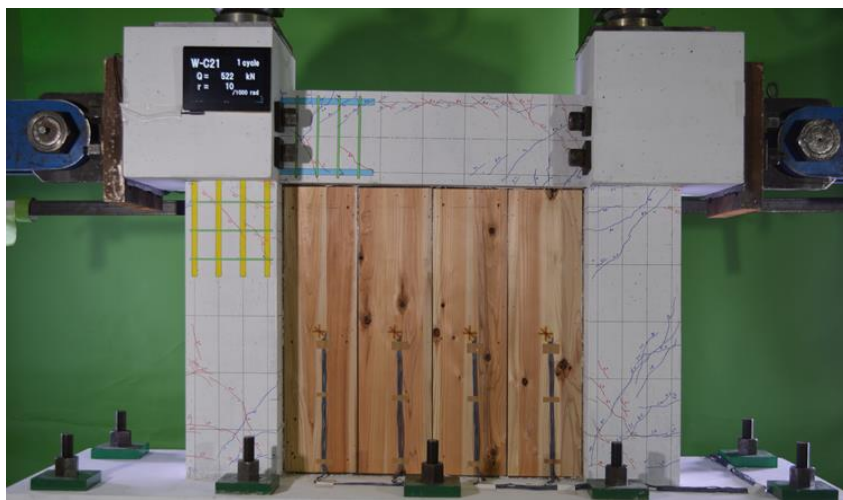
試験体の補強部分である接着接合部および CLT 耐震壁の破壊状況は、下記の通りであった。

層間変形角 $R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ のサイクルより、加力と反対側の柱際上部での接着接合部に沿ってコンクリート側にひび割れが 100mm 程度生じた。 $R=3.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ のサイクルで柱際の接着接合部前面に沿ってひび割れが生じた。

$R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に、梁下の接着接合部に東側から全長の半分強のひび割れが、壁下の接着接合部に西側からパネル 1 枚分ていどの長さのひび割れがコンクリート側に生じ、その後の繰り返しで梁下のひび割れは接着接合部の全面に進展した。その後 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ に至ったとき、CLT の西側（加力側）上部および東側下部に、鉛直方向に入る圧潰線が観察された。その後 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に CLT 壁の中央部に鉛直方向にせん断ひび割れが生じた。その後の繰り返しでひび割れが壁高さ全体に進展した。



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$

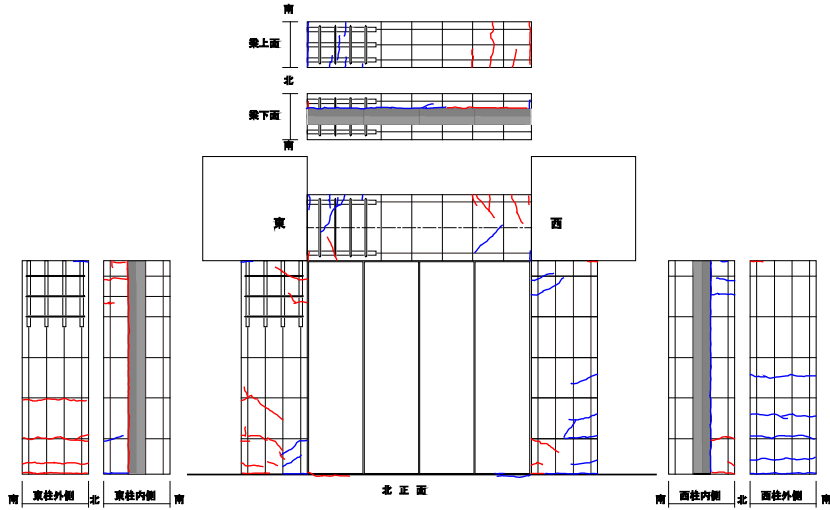


(b) $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$

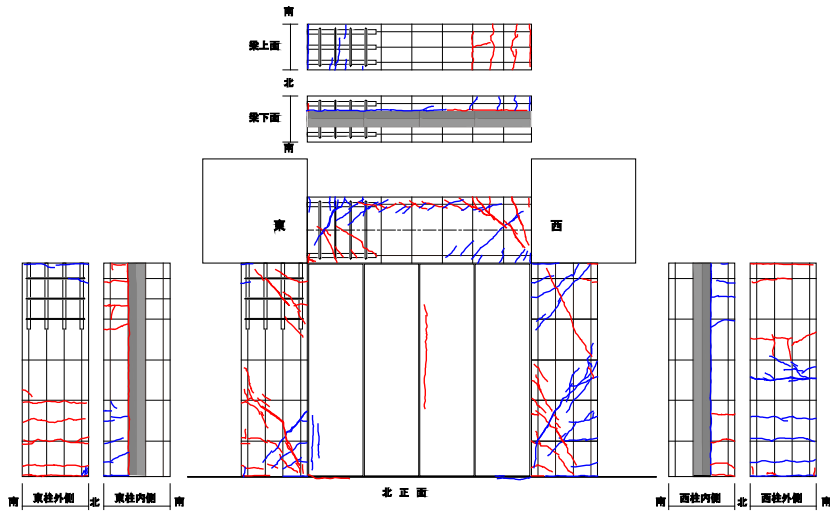


(c) $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$

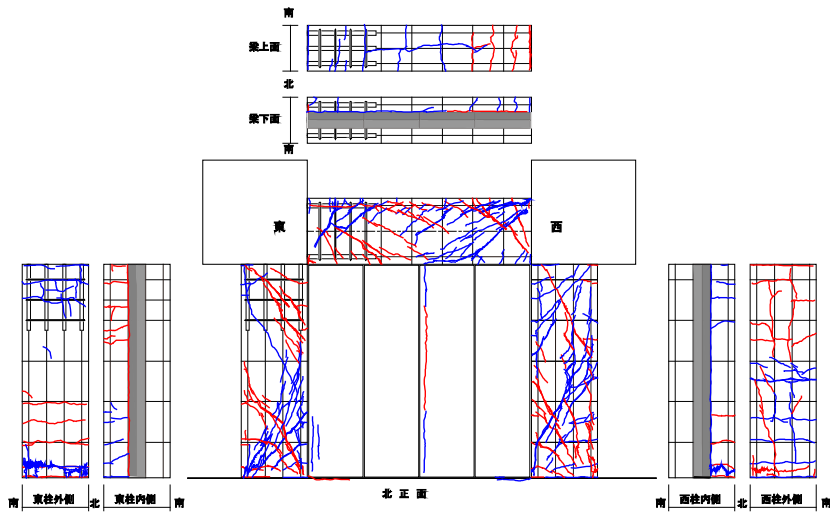
写真 2.3.1-4 W-C21 損傷状況



(a) $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$



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



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

図 2.3.1-10 W-C21 ひび割れ状況

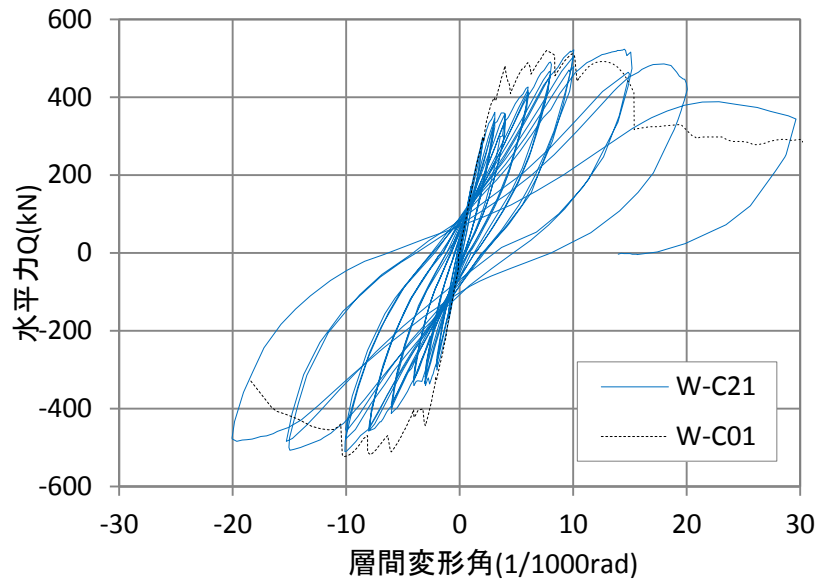


図 2.3.1-11 W-C21 荷重変形関係

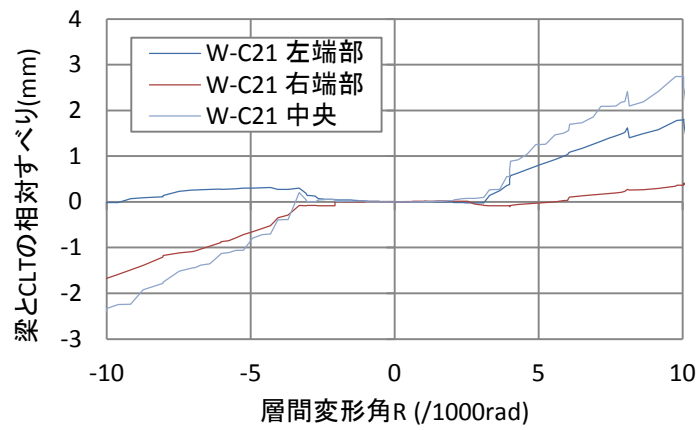


図 2.3.1-12 W-C21 接着接合部のすべり量と層間変形角の関係

2.3.2 補強効果の比較

補強効果を確認するため、図 2.3.2-1(a)～(d)には得られた実験結果の荷重-変形関係の包絡線から基準試験体（フレームのみでパネルによる補強を行っていない試験体。平成 26 年度に実験実施）の包絡線で差し引いたものを示した。比較対象として、平成 26 年度事業において実験した試験体 W-C01 の包絡線と、第 1 編 3.3 節の材料試験で得られた CLT の初期剛性も合わせてプロットした。また、表 2.3.2-1 に実験による接着せん断破壊時の補強結果および計算補強効果一覧を示す。ここで補強効果の計算値は式 (2.3.2-1) による。

$$\tau_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_B} \quad (2.3.2-1)$$

ここで、

τ_{ja} : コンクリートの接着せん断強度 (N/mm²)

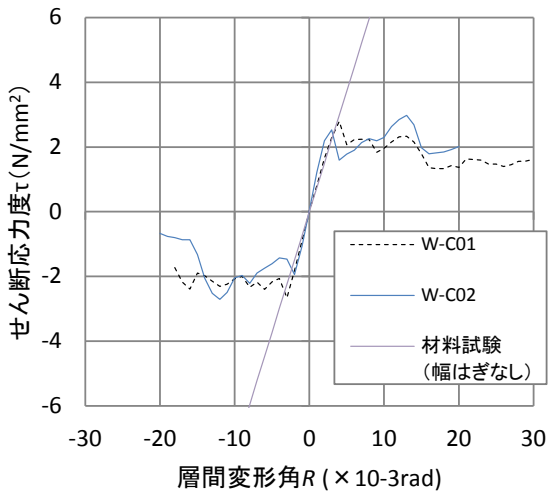
σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

試験体 W-C02（幅はぎなし）について、初期剛性は W-C01（幅はぎあり）と比較し同等以上で材料実験の結果の結果も上回っている。またせん断応力度はやや劣るものの接着せん断強度の計算値を上回る結果となった。よって CLT の幅はぎの有無による補強効果の違いはないといえる。

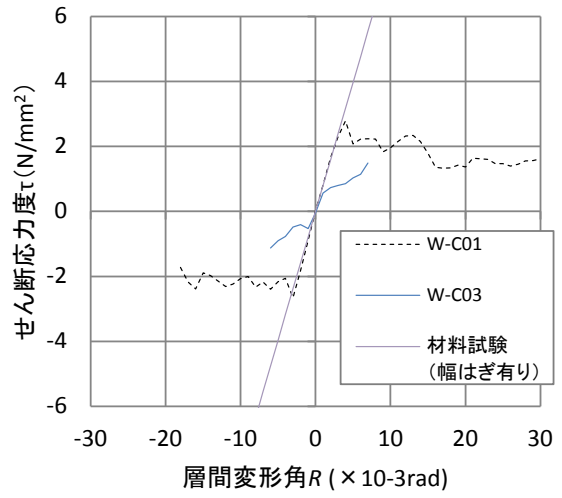
試験体 W-C03sh（上下スリットあり）について、初期剛性は W-C01（4 周とも接着）および材料試験結果に劣り、 $R=1.0 \times 10^{-3}$ rad 程度で早期に剛性低下している。補強耐力も低い。

試験体 W-C04sv（左右スリットあり）について、初期剛性は W-C01（4 周とも接着）および材料試験結果とほぼ同等である。補強耐力は $R=2.0 \times 10^{-3}$ rad でピークを迎えており、接着せん断強度の計算値よりわずかに低い結果となった。

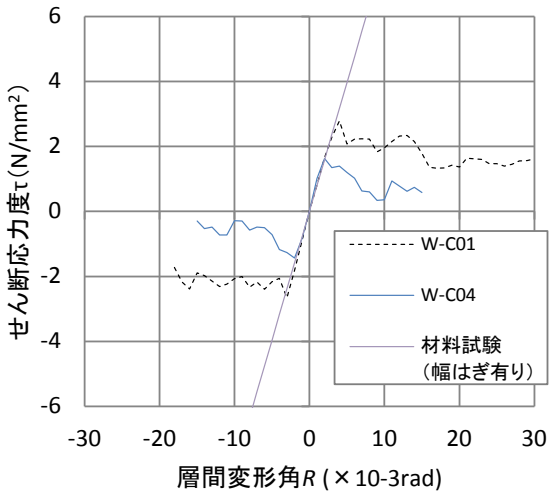
試験体 W-C21（短スパン）について、初期剛性は W-C01（標準スパン）および材料試験結果と上回っている。補強耐力は接着接合部がせん断破壊した以降も上昇し、最大で 5.35N/mm^2 まで上昇し CLT のせん断破壊とともに低下している。このせん断応力度は材料試験で得られた CLT のせん断強度 5.89N/mm^2 と同等である。



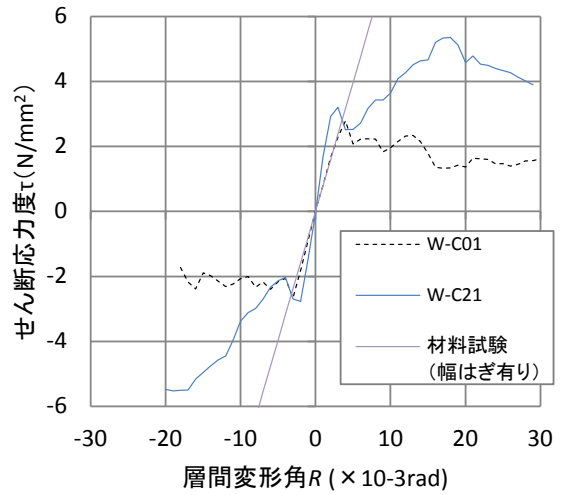
(a) W-C02



(b) W-C03sh



(c) W-C04sv



(d) W-C21

図 2.3.2-1 補強効果の比較

表 2.3.2-1 実験による補強結果および計算補強効果一覧（接着せん断破壊時）

試験体名	W-C01	W-C02	W-C03sh	W-C04sv	W-C21
Q_{ja_exp+}	257.6	239.5	52.8	149.3	169.3
Q_{ja_exp-}	-245.7	-179.2	-44.3	-129.7	-151.0
τ_{ja_exp+}	2.79	2.59	0.57*	1.65	3.21
τ_{ja_exp-}	-2.66	-1.94	-0.48*	-1.43	-2.86
$ave\tau_{ja_exp}$	2.72	2.27	0.53	1.54	3.03
τ_{ja_cal}	1.71	1.55	-	1.69	1.74
$ave\tau_{ja_exp}/\tau_{ja_cal}$	1.59	1.46	-	0.91	1.74

- Q_{ja_exp+} 、 Q_{ja_exp-} : それぞれ、接着接合部のすべりが観察され始める層間変形角 $R=2.0\sim 4.0rad$ 時に発揮された、正加力時および負加力時における最大補強耐力
- τ_{ja_exp+} 、 τ_{ja_exp-} : それぞれ、 Q_{ja_exp+} および Q_{ja_exp-} を接着面積で除して得られた平均接合部せん断強度（*W-C03sh は CLT の水平断面積で除して求めた）
- $ave\tau_{ja_exp}$: τ_{ja_exp+} と τ_{ja_exp-} の平均値
- τ_{ja_cal} : 既往の提案式によるコンクリートの接着せん断強度で、式(2.3.2-1)による。

第3章 RC-CLT 接着接合部に関する要素実験

3.1 実験の目的

接着接合部のせん断耐力を実験によって求めた。類似する工法では、宮内ら¹⁾が、鋼材をコンクリートに接着した時の接着せん断強度 τ_{ja} を実験的に求めており、コンクリートのひび割れ強度の計算式(3.1.1)を用いて安全側に評価できることを示している。

$$\tau_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_b} \quad (3.1.1)$$

τ_{ja} : 接着せん断強度の計算値

σ_b : コンクリートの圧縮強度（またはコンクリートの基準強度 F_c を用いる）

本実験では建研式加力装置を用いて、軸力をかけながら接着接合部にせん断力を作用させることにより、(1)木材を接着した場合の接着せん断耐力を把握するとともに、(2)接着接合部がせん断破壊した後の摩擦係数、および(3)軸力が作用するときの接着接合部がせん断破壊した後の変形性能を検証することとした。

建研式加力装置を用いることで、接合面に作用する曲げモーメントを極力排し、接合面に作用する引張力が接着耐力に与える影響を低減した実験が可能となり、接着接合部が破壊した後の摩擦性状の検証ができる実験とした。

また試験体は CLT と接着層の厚さ、および導入軸力をパラメータとした。

3.2 実験計画

3.2.1 試験体

試験体数は4体とする。試験体の形状を図3.2.1-1に、各試験体の実験変数を表3.2.1-1に示す。

また試験体の使用材料を表3.2.1-2および表3.2.1-3に示す。

試験体 No.1、No.2 は実大の木質耐震壁を想定し、5層5プライ、厚さ150mmの幅はぎしていないCLTを使用し、接着厚さを10mmとした。試験体 No.3、No.4 は構造実験の試験体を想定し、CLTは構造実験と同様の3層3プライ、厚さ30mmで幅はぎしたものとし、接着厚さも構造実験と同様に5mmとした。

軸力は2ケース設定し、実験を安定させるため最低限の軸力(20kN)を作用させるケース(試験体 No.1、No.3)および、平成26年度の構造実験においてW-C01試験体の接着接合部が滑り出したと考えられる変形角4/1000rad時の梁下のCLTの鉛直ひずみの平均値より2.0N/mm² 載荷するケース(試験体 No.2、No.4)とする。

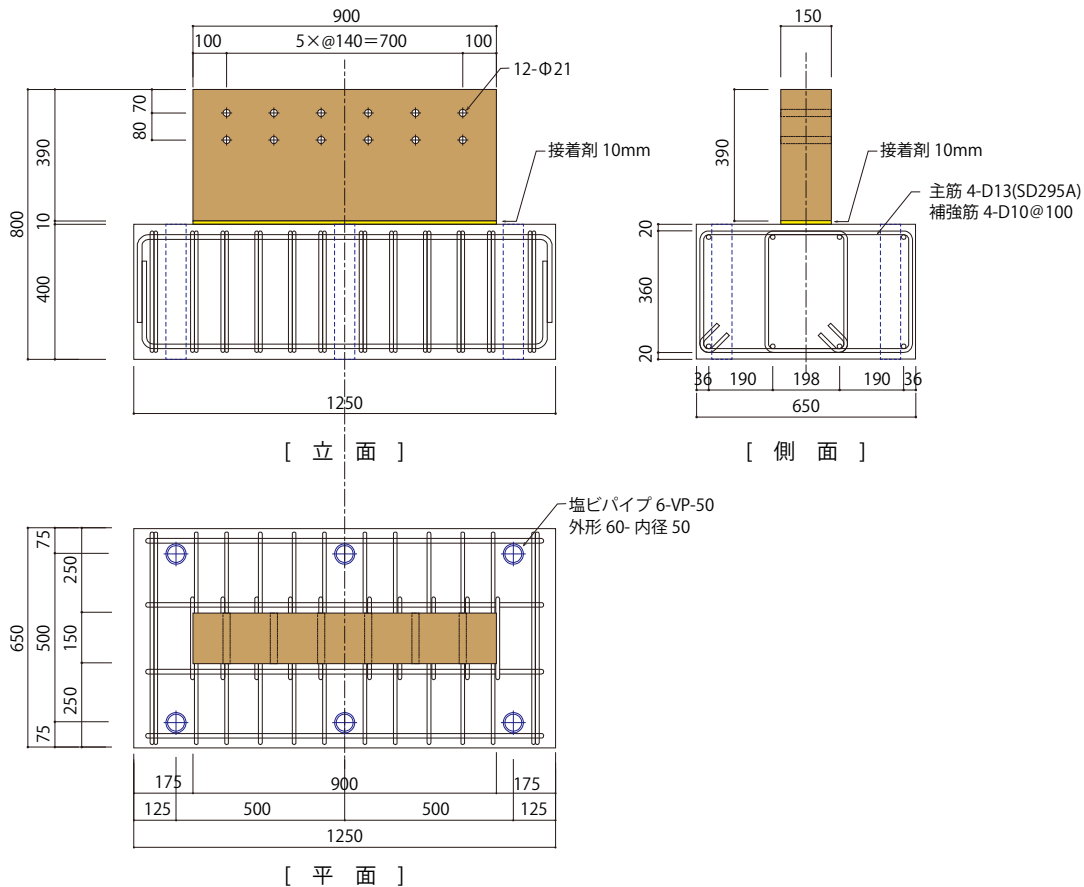


図 3.2.1-1 試験体形状 (No.1)



a) 試験体 No.1



b) 試験体 No.3

図 3.2.1-2 試験体写真

表 3.2.1-1 試験体詳細

	CON	CLT 寸法(mm)	CLT の 強軸方向	鉛直軸力	接着厚さ	備考
No.1	Fc18	厚さ 150×幅 900 ×高さ 390	鉛直方向	20kN (0.15N/mm ²)	10mm	実大想定
No.2	Fc18	厚さ 150×幅 900 ×高さ 390	鉛直方向	270kN (2.0N/mm ²)	10mm	実大想定
No.3	Fc18	厚さ 30×幅 900 ×高さ 395	水平方向	20kN (0.74N/mm ²)	5mm	試験体想定
No.4	Fc18	厚さ 30×幅 900 ×高さ 395	水平方向	54kN (2.0N/mm ²)	5mm	試験体想定

表 3.2.1-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1 / No.2	17.8	1.80	24300
No.3 / No.4	18.6	1.67	23900

表 3.2.1-3 CLT の材料特性

試験体	No.1/No.2	No.3/No.4
樹種	スギ	スギ
規格等級	5層5プライ 対称異等級構成	3層3プライ 対称異等級構成
幅はぎ	なし	あり
製造	M社	T社
使用ラミナの曲げ弾性 係数の平均値 E_0 *	-	内層：6.8 kN/mm ² 外層：8.6 kN/mm ²
せん断強度 F_s (N/mm ²) *	4.18	5.64
せん断弾性係数 G (N/mm ²) *	793	745

* いずれも第1編3章1節の要素実験による実験値。

3.2.2 計測計画

鉛直軸力および水平加力荷重をロードセルによって計測する。変位は接合部上下の水平相対変位および鉛直相対変位、RC部およびCLTの水平絶対変位、載荷梁の水平絶対変位、載荷梁と木部の水平相対変位を計測する。

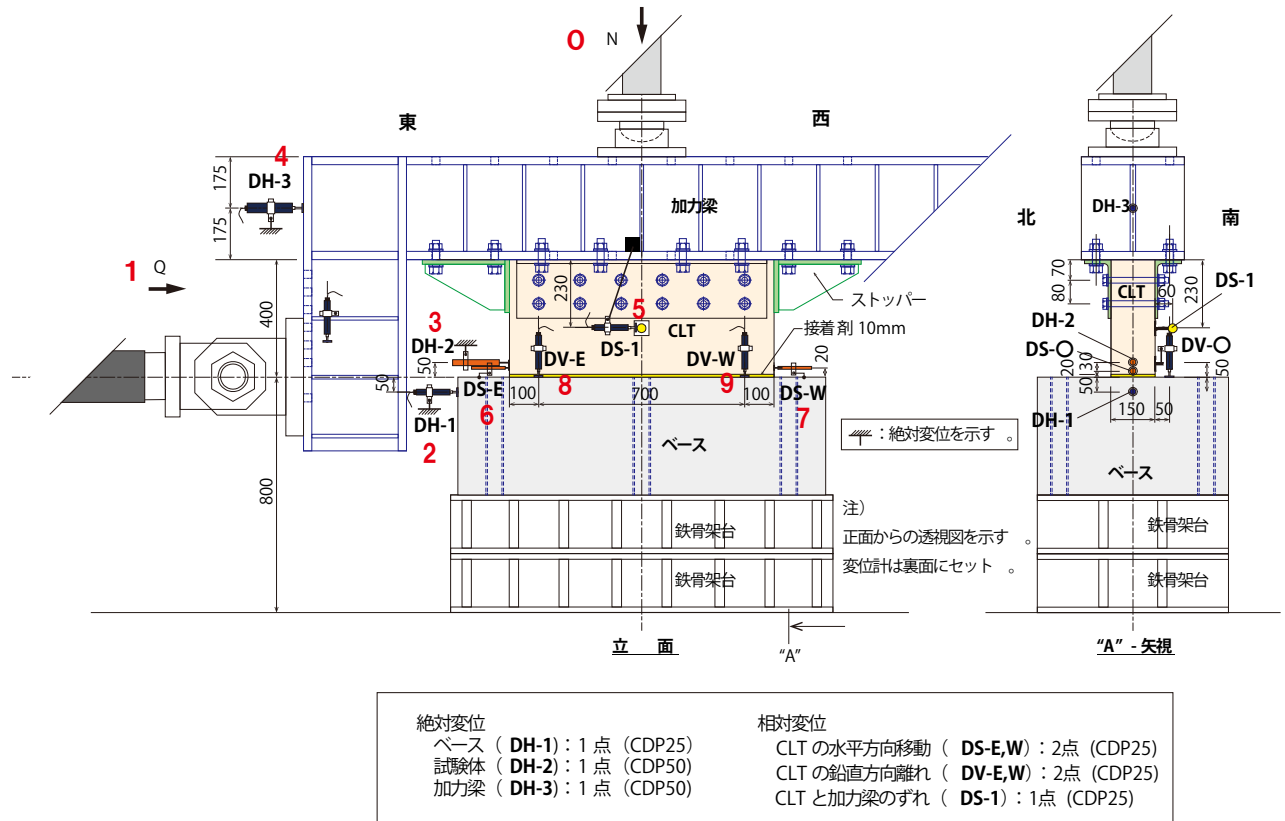


図 3.2.2-1 計測器配置図

3.2.3 加力計画

加力装置図を図 3.2.3-1、図 3.2.3-2 に示すような、建研式加力装置を用いて加力した。一定の鉛直軸力を作用させた状態で、水平方向に正負交番载荷とした。鉛直軸力は表 3.2.1-1 に示した通りとしたが、No.1 については、鉛直軸力を 20kN として実験を行ったあと、鉛直軸力を 100kN、200kN に上昇させて、接着接合部が破壊した後の摩擦力について検証した。

水平力の加力サイクルを表 3.2.3-1 に示す。Step1 では、 $0.38\sqrt{f_c}$ で示される接着せん断強度を目標荷重とし、水平荷重によって加力の制御を行った。Step2 以降は加力梁の水平変位を制御変位として载荷を行った。

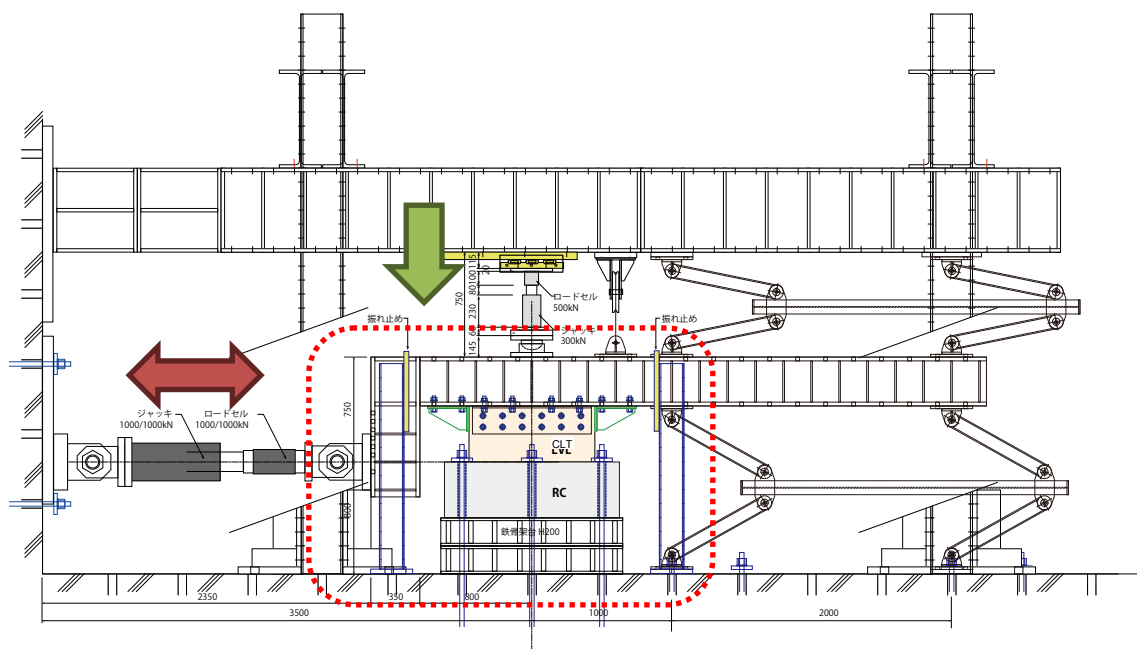


図 3.2.3-1 加力装置図全景 (仮)

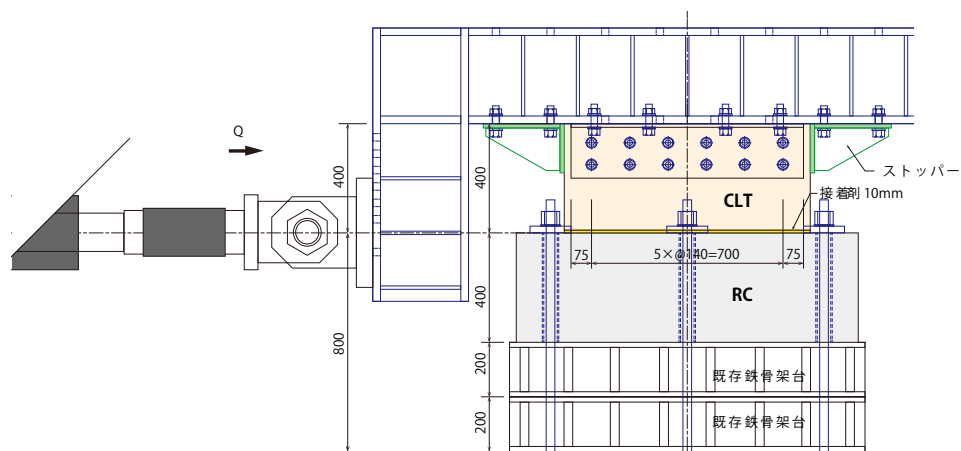


図 3.2.3-2 加力装置図 (図 3.2.3-1 点線部拡大)

表 3.2.3-1 加力サイクル

Step	目標変位（せん断力）	繰り返し回数	備考
1	接着せん断強度 試験体 1,2 : 218kN 試験体 3,4 : 43.5kN	2	接着せん断強度 $0.38\sqrt{f_c}$ 荷重制御とする
2	Step1 の最大変位の 2 倍の変位	2	変位制御とする
3	Step2 の最大変位の 2 倍の変位	2	
4	40mm	1	一方向載荷

3.3 実験結果

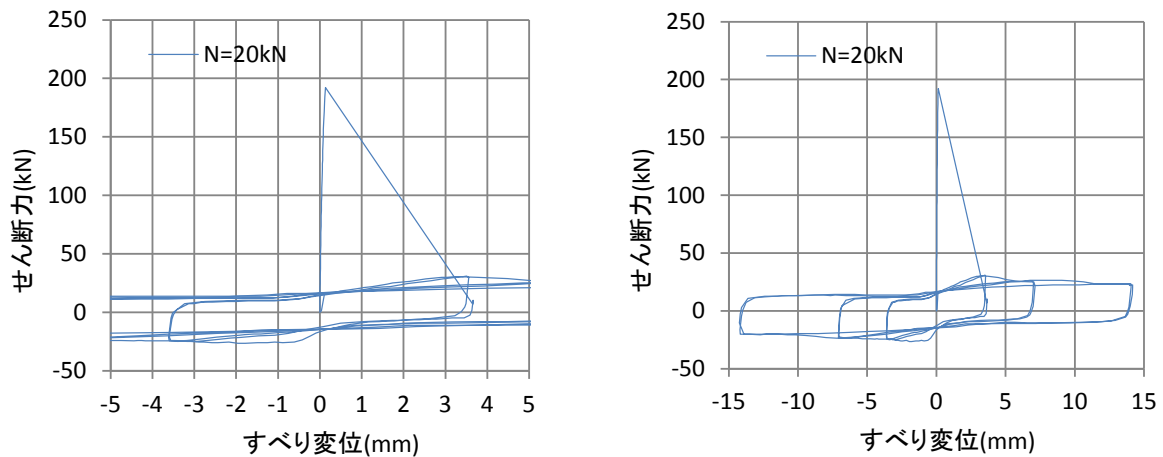
3.3.1 荷重変形関係と損傷状況

以下に各試験体のせん断力と RC 部と CLT の相対すべり変位関係を示す。

試験体 No.1 のせん断力すべり変位の関係を図 3.3.1-1 に示す。

接着接合部は 192kN (1.42N/mm^2) でコンクリートとの界面で破断し、摩擦によるせん断抵抗に移行した。接着せん断耐力の推定値は 1.60N/mm^2 であり、試験体の接着せん断耐力はこれを下回る結果となったが、これは軸力が小さいため CLT が回転し、接着接合部に引張力が生じたためと考えられる。

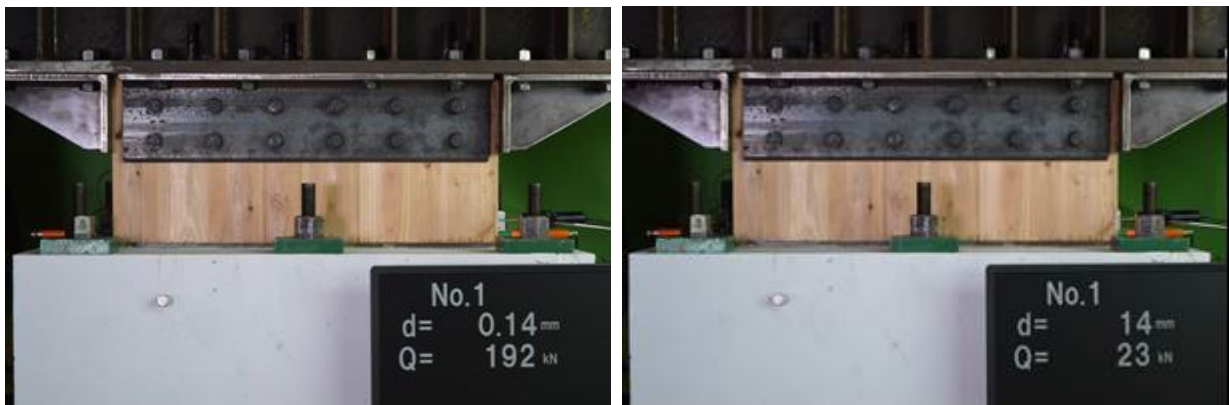
また、接着接合部が破壊した後も、摩擦によってせん断力に抵抗しており、最大変形 ($\pm 14.0\text{mm}$) 時に正側 22.5kN、負側 20.1kN 程度のせん断力を発揮しており、すべり変位が 15mm に達するまで摩擦係数は 1.0 以上を保った。



a) 小変形領域

b) 全体

図 3.3.1-1 せん断力-すべり変位関係



接着接合部のせん断破壊時

b) 最大変形時

写真 3.3.1-1 No.1 実験状況

試験体 No.2 のせん断力すべり変位の関係を図 3.3.1-2 に示す。

本試験体は、実験開始前の時点で西面（写真右側）の接着接合部にひび割れが生じていた。

接着接合部は 336kN (2.49N/mm^2) でコンクリートとの界面で破断し、摩擦によるせん断抵抗に移行した。接着せん断耐力の推定値は 1.60N/mm^2 であり、試験体の接着せん断耐力はこれを上回った。

また接着接合部が破壊した後も、摩擦によってせん断力に抵抗しすべり変位が 30mm に達するまでほぼ一定のせん断力を示した。最大変形時のせん断力は 176kN で摩擦係数にして 0.65 となった。

すべり変位が 0.90mm を超えた程度から、一部のラミナの継ぎ目が広がる様子が観察された。最終的に端部のラミナが大きく曲げ変形した（写真 3.3.1-2 b）。このため、摩擦係数が低くなった可能性がある。

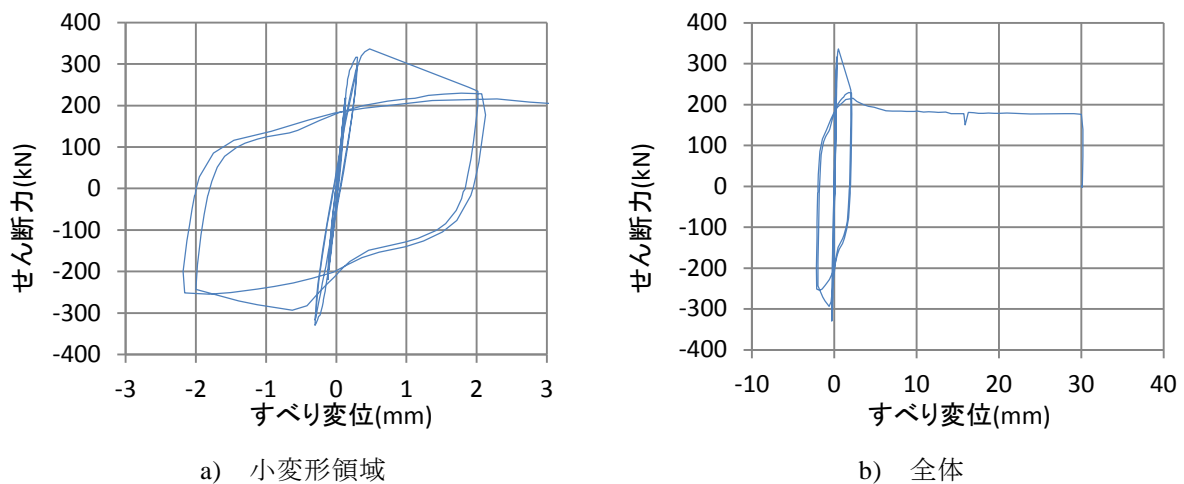


図 3.3.1-2 No.2 せん断力-すべり変位関係

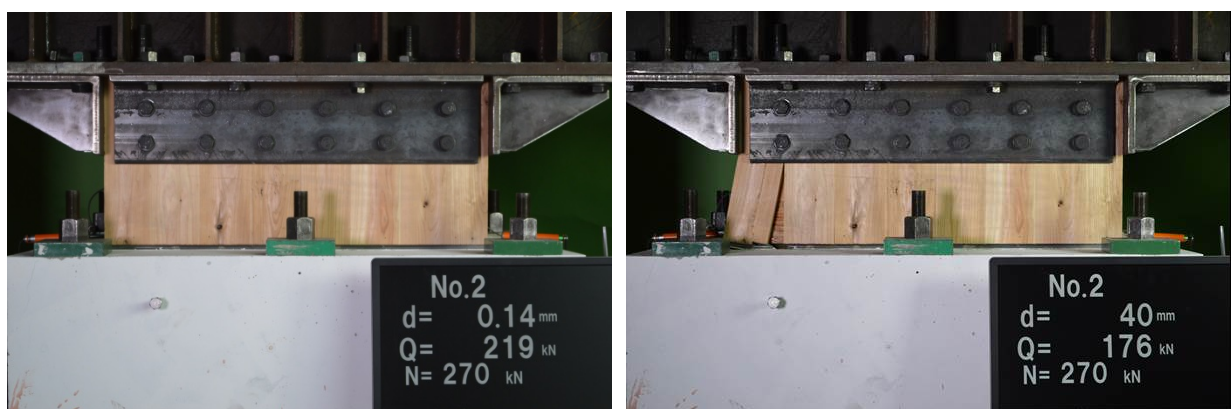


写真 3.3.1-2 No.2 実験状況

試験体 No.3 のせん断力すべり変位の関係を図 3.3.1-3 に示す。

接着接合部は 52.5kN (1.94N/mm²) でコンクリートとの界面で破断し、摩擦によるせん断抵抗に移行した。接着せん断耐力の推定値は 1.64 N/mm² であり、試験体の接着せん断耐力はこれを上回った。

また接着接合部が破壊した後も、すべり変位が 40mm に達するまで摩擦によってせん断力に抵抗した。最大変形時のせん断力は 17.6kN で摩擦係数にして 0.88 となった。

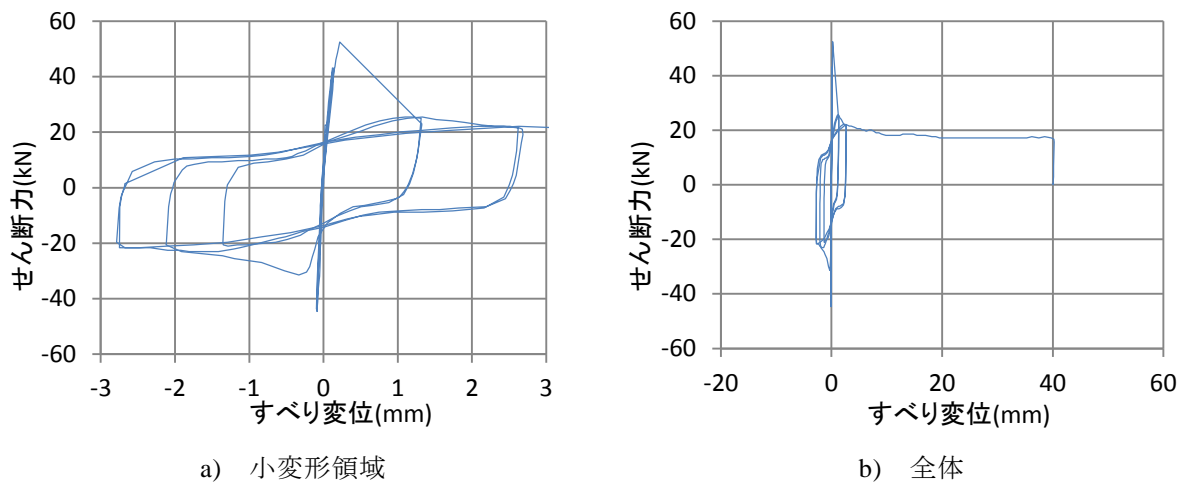


図 3.3.1-3 No.3 せん断力-すべり変位関係

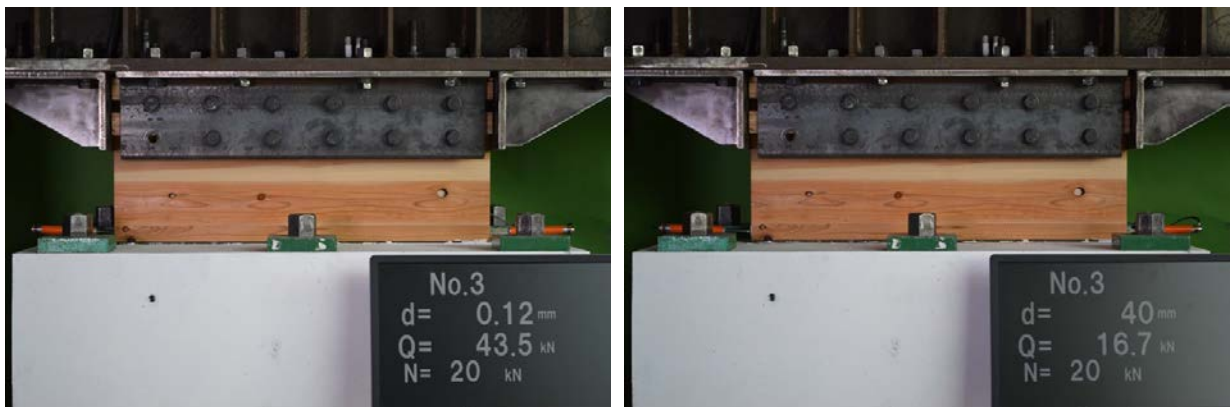


写真 3.3.1-3 No.3 実験状況

試験体 No.4 のせん断力すべり変位の関係を図 3.3.1-4 に示す。

接着接合部は 95.6kN (3.54N/mm²) でコンクリートとの界面で破断し、摩擦によるせん断抵抗に移行した。接着せん断耐力の推定値は 1.64 N/mm² であり、試験体の接着せん断耐力はこれを上回った。

また接着接合部が破壊した後も、すべり変位が 40mm に達するまで摩擦によってせん断力に抵抗した。最大変形時のせん断力は 42.7kN で摩擦係数にして 0.85 となった。

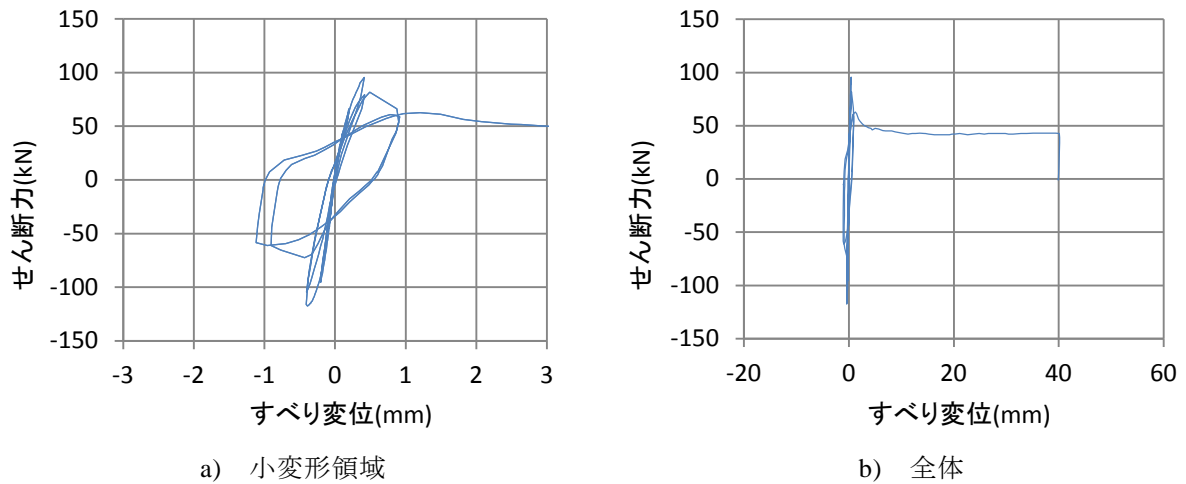


図 3.3.1-4 No.4 せん断力-すべり変位関係

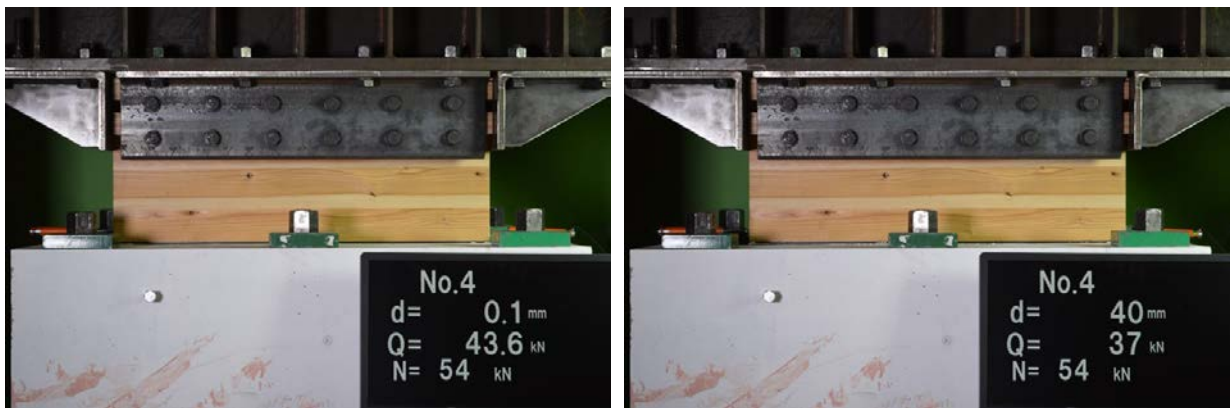


写真 3.3.1-4 No.4 実験状況

3.4 まとめ

要素実験によって CLT と RC の接着接合部のせん断耐力を検証した。実験結果を表 3.4-1 に示す。

接着接合部の接着せん断強度を確認した。すべての試験体の破壊状況は、接着界面のコンクリートが破壊した。実験時の観察から、接着せん断破壊する以前に加力時の CLT の回転が見られたことから、純粋な接着せん断強度はより高いものと考えられ、一部の試験体で接着せん断強度の推定式を下回った原因となったと考えられる。

すべての試験体について最大耐力を迎えた後も摩擦によってせん断力に抵抗し、30mm 以上の大きな変形に対しても一定の摩擦力を発揮し、その摩擦係数は 0.65 以上あることが分かった。また軸力が作用することにより、接着せん断強度が上昇することが確認された。

図 3.4-1 に各試験体の最大せん断応力度と鉛直軸応力度の関係を示す。コンクリート強度はほぼ同等であるため、その影響は強慮していない。このグラフより、鉛直軸応力度と最大せん断応力度は正の相関があり、線形近似した場合、軸応力度が 0 の時には 1.30 N/mm^2 となった。これは式(3.1.1)で求めた接着せん断強度の計算値 (1.60 N/mm^2 程度)と比較し、実験結果が計算値を下回る結果となった。本実験の結果をもとに軸力を考慮した、実験結果の近似式を式 (3.4.1) に示す。

$$\tau_{ja2} = 0.30\sqrt{\sigma_b} + 0.85\sigma_n \quad (3.4.1)$$

ただし、 τ_{ja2} : 接着せん断強度の計算値 (N/mm^2)

σ_b : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

σ_n : 接着接合部に作用する軸応力 (N/mm^2)

表 3.4-1 実験結果のまとめ

	最大せん断力 (kN)	最大せん断 応力度 (N/mm^2)	接着せん断 強度の計算値 (N/mm^2)	摩擦係数 μ
No.1	192	1.42	1.60	0.85~1.25
No.2	336	2.49		0.65
No.3	52.5	1.94	1.64	0.88
No.4	95.6	3.54		0.85

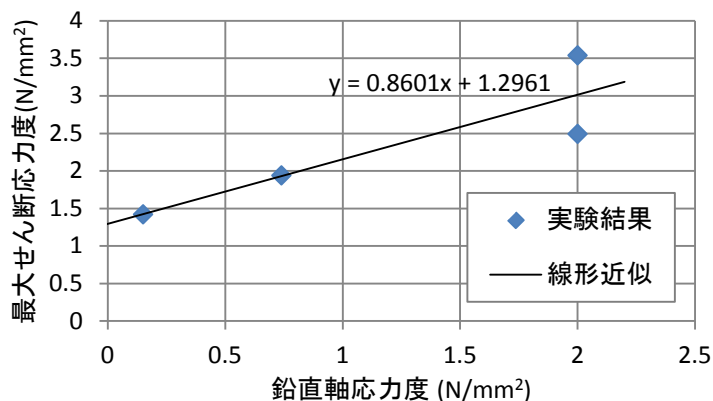


図 3.4-1 最大せん断応力度と鉛直軸応力度の関係

表 3.4-2 に平成 26 年度委託事業で実施した CLT とコンクリートの接着接合部の逆対称 4 点曲げ試験（大野式加力実験）によって得られたせん断強度の値を示す。なおこの実験では接着接合部に軸力は載荷していない。

この時の最大せん断応力度は $2.88 \sim 3.50 \text{ N/mm}^2$ となっている。一方式(3.1.1)より求められる接着接合部のせん断強度の計算値 τ_{ja} は 1.9 N/mm^2 （実験時のコンクリート強度 $\sigma_b = 25 \text{ N/mm}^2$ ）となっており、軸力が作用していないにもかかわらず、接着接合部のせん断強度の計算値を上回り、今回の実験とは異なる傾向を示した。

本年度実施した実験で実験結果の最大せん断応力度が低くなった原因の一つとして、CLT が回転し接着接合部に曲げモーメントが作用していたことにより接着接合部がひび割れ接着せん断強度の低下を招いたことが考えられる。また、実験方法により結果がばらつくものと考えられる。

表 3.4-2 2014 年度要素試験結果（参考）

τ_{\max} (N/mm^2)	20	21	22	28	29	30	平均値	標準偏差	5%下限値
TC-0	3.86	3.27	4.07	3.75	1.27	4.77	3.50	1.09	0.95
TC-90	2.54	4.20	2.77	0.95	3.31	3.56	2.89	1.02	0.51
TC-30C	4.15	3.72	2.98	1.08	4.01	1.34	2.88	1.24	—
TC-30T	4.45	2.61	3.32	2.92	3.18	3.88	3.39	0.61	1.97

参考として試験体 No.1 において、軸力を変えて摩擦力の検証を行った結果を図 3.4-2 に示す。軸力を変えて摩擦力の検証を行った結果、軸力を 100kN とした場合 85kN 程度のせん断力で摩擦係数としては 0.85 となり、軸力を 200kN とした場合にはせん断力は 180kN 程度で摩擦係数としては 0.90 となった (表 3.4-3)。

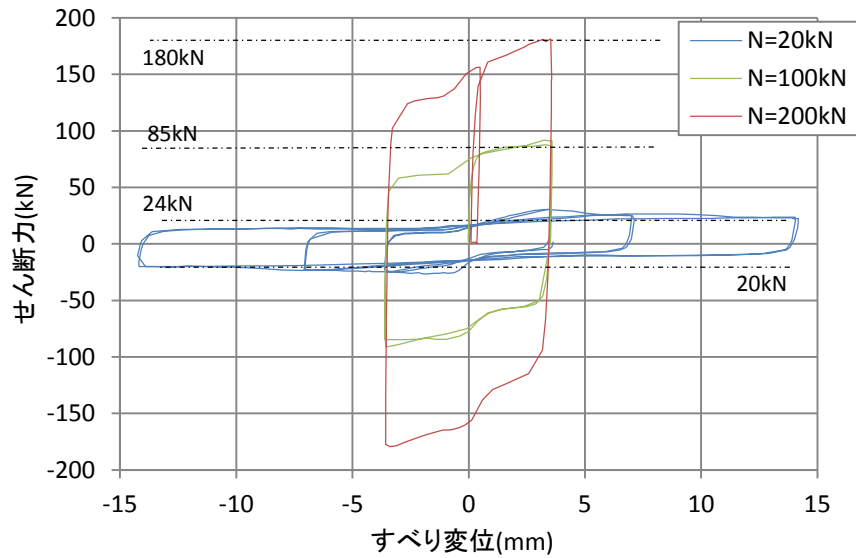


図 3.4-2 軸力ごとのせん断力-すべり変位関係

表 3.4-3 軸力ごとの摩擦係数

軸力	せん断力	摩擦係数
20 kN	20~25kN* ¹	1.0~1.25
100	85kN	0.85
200	180kN	0.90

*1 正側と負側で異なる

参考資料

- 1) 宮内靖昌, 福原武史, 毛井崇博 ; 低強度コンクリート RC 部材の耐震補強性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009

第4章 CLT耐震補強工法（接着工法）の基本設計式の提案

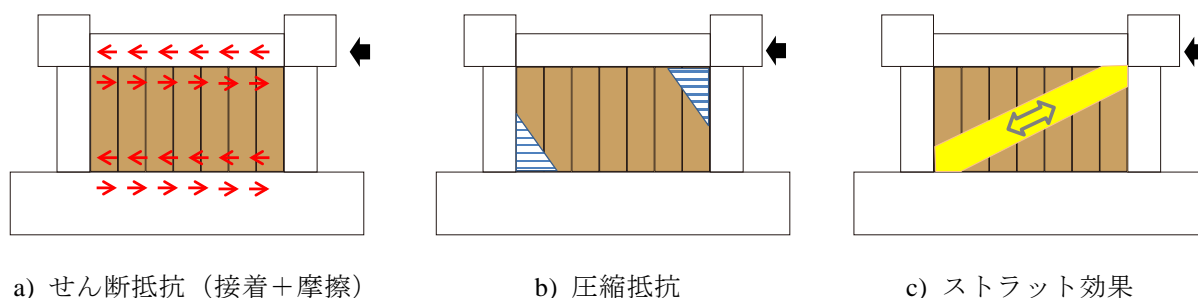
4.1 補強効果発生メカニズム

4.1.1 概要

本章では、設計式を提案するために補強発生メカニズムを、実験結果をもとに明らかにする。

平成26年度事業において、設計式を提案するために必要な検討事項として下記の3項目があげられた。これに沿って実験結果を整理しそれぞれの性状を明らかにする。また、補強面材の材料の違いおよび柱スパンが補強効果に与える影響も合わせて示す。

- a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗
- b) 木質系面材—柱の圧縮抵抗
- c) コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗



a) せん断抵抗（接着+摩擦）

b) 圧縮抵抗

c) ストラット効果

図 4.1.1-1 抵抗性状の模式図

4.1.2 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗

まずは、表 4.1.2-1 に平成 26 年度および平成 27 年度事業で行ったすべての構造実験の補強効果の一覧を示す。

表 4.1.2-1 実験による補強結果および計算補強効果一覧

a) CLT 補強試験体の補強効果比較

試験体名	開口壁形状	スパン	実験における補強効果 $ave\tau_{ja_exp}$	補強効果の計算値 τ_{ja_cal}	$ave\tau_{ja_exp} / \tau_{ja_cal}$
W-C01	無開口	標準	2.72	1.71	1.59
W-C02* ¹			2.27	1.55	1.46
W-Cs01* ²			3.02	1.75	1.73
W-Cs02* ³			3.03	1.78	1.70
W-C11		ロング	2.73	1.77	1.54
W-C21		短	3.03	1.74	1.74
Wo-C03	方立壁	標準	1.51	1.77	0.85
W-C03sh	水平スリット		0.53	-	-
W-C04sv	鉛直スリット		1.54	1.69	0.91

*¹ 幅はぎなし CLT を使用

*² CLT の強軸方向を 30° 傾けたタイプ

*³ CLT の強軸方向を 30° 傾け、かつ接着面積を拡大したタイプ

b) LVL 補強試験体の補強効果比較

試験体名	開口壁形状	スパン	実験における補強効果 $ave\tau_{ja_exp}$	補強効果の計算値 τ_{ja_cal}	$ave\tau_{ja_exp} / \tau_{ja_cal}$
既往無開口	無開口	標準	4.34	1.88	2.31
W-L11		ロング	2.49	1.77	1.40
Wo-L01	設備開口	標準	5.21	1.79	2.91
Wo-L02	袖壁		2.64	1.80	1.47
Wo-L03	方立壁		2.08	1.83	1.13

木質系面材-コンクリート間のせん断抵抗機構は、基本的に RC 梁と木質系面材の力の伝達によって発現する要素である。さらにこの要素は、接着接合部がせん断破壊するまでの接着せん断性能、およびせん断破壊した以降のひび割れ界面に発生する摩擦に分けることができる。

3章に述べた要素実験の結果から、せん断応力度-変形関係を図 4.1.2-1 に示す。要素実験の結果より、接着接合部のせん断剛性は極めて高く、CLT の変形に対して剛接合と考えてよい。

次に、図 4.1.2-2 に構造実験試験体 W-C04sv および W-C01 の補強効果と要素実験の試験体 No.1 から求めたせん断応力度-変形角関係を示す。要素実験から求めたデータは、構造実験の CLT の変形を考慮するため、CLT のせん断弾性係数を 750N/mm^2 として変形角に加算し、接着せん断破壊時までのグラフとした。

また図 4.1.2-3 に W-C01 と W-C04sv の CLT の梁下における鉛直ひずみの分布を、表 4.1.2-2 に加力側のパネル 2 枚分の計測点 4 か所平均の鉛直ひずみとそれから算出した鉛直軸応力度を示す。平均の鉛直ひずみは図 4.1.2-3 に示した矢印の範囲にある計測点のデータを対象とした。

図 4.1.2-2 にて、W-C04sv と要素実験から求めたせん断応力度-変形角関係を比較すると、初期剛性はよく一致しており、接着せん断破壊時のせん断応力度もほぼ同等である。一方 W-C01 と W-C04sv を比較した場合、初期剛性はよく一致するものの、接着せん断強度およびその時の変形は W-C01 の方が大きくなっている。一方図 4.1.2-3 より W-C04sv の接着接合部が破壊した $R=2.0 \times 10^{-3}\text{rad}$ 時の梁下の CLT の鉛直ひずみ分布は W-C04sv の方が大きく、本編第 3 章の要素実験で見られた軸力と接着接合部のせん断強度の相関は見られなかった。

表 4.1.2-1 を見ると、CLT、LVL にかかわらず壁の 4 辺を接着した試験体の補強効果 $ave\tau_{ja_exp}$ についてはすべて、式(2.3.2-1)で求められる接着接合部のせん断強度の計算値 τ_{ja_cal} の 1.4 倍以上の補強効果を示している。対して方立壁タイプの試験体 (Wo-C03、Wo-L03) および柱際鉛直スリット試験体 (W-C04sv) の補強効果は特に低くなっていることから、隅角部が 2 辺とも接着されることによって、ストラットの効果が異なることが影響しているものと考えられる。

3章に述べた要素実験の結果から、接着せん断破壊後の摩擦係数 μ は 0.65 以上といえる。また、表 4.1.2-2 より $10 \times 10^{-3}\text{rad}$ 時に W-C04sv に作用する平均軸ひずみは 141μ で、強軸方向ヤング係数 7.5kN/mm^2 として軸応力度に換算するとおよそ 1.06N/mm^2 となる。摩擦係数を 0.65 とすると、摩擦せん断応力度は 0.69N/mm^2 となり、接着せん断破壊後の W-C04sv のせん断応力度とほぼ一致する (図 4.1.2-2)。

以上から、梁との接着接合部を介したせん断抵抗機構は、接着せん断破壊時のせん断強度はストラット効果の影響も含むものの $0.38\sqrt{\sigma_B}$ で評価でき、せん断剛性は CLT のせん断剛性と同等である。接着せん断破壊以降は CLT に作用する軸力に応じ摩擦係数 0.65 程度であると考えられる。

また 4 辺を接着することによって、接着せん断強度を向上させる効果があると考えられる。この原因としては、ストラット効果の影響と、柱との接着接合部がせん断力負担することによること、また柱自体がすべり止めとして作用し接着接合部の変形を抑えることが考えられる。

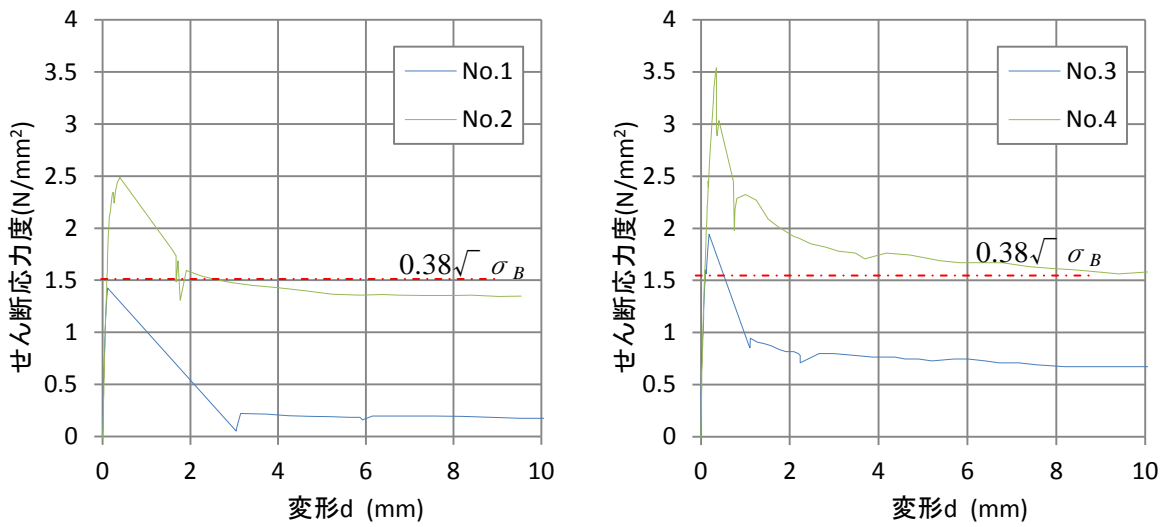


図 4.1.2-1 接着せん断要素実験のせん断応力度-変形関係

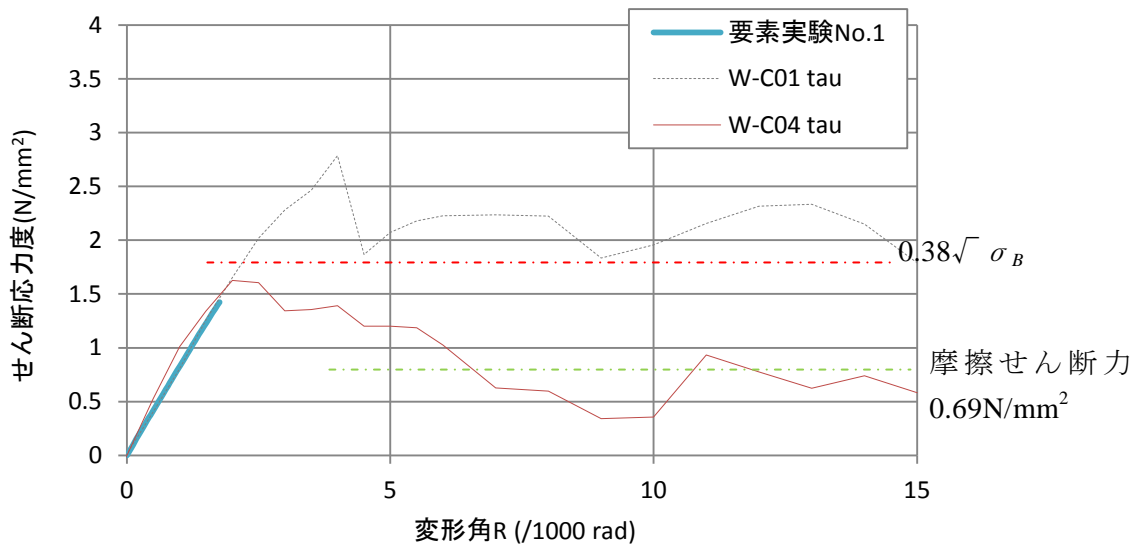
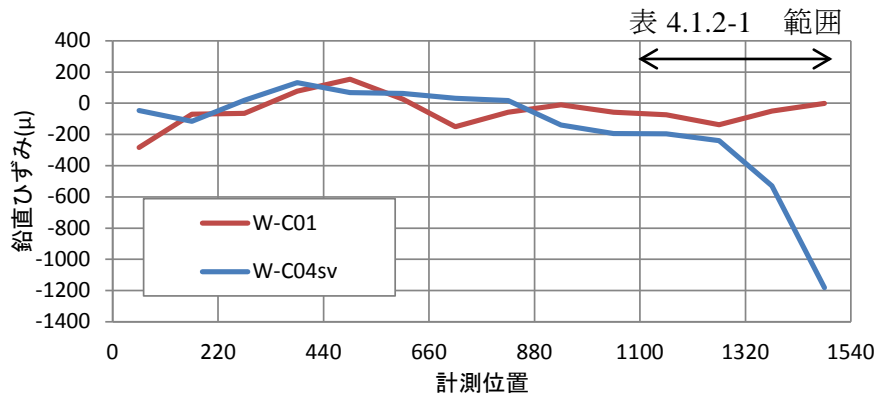
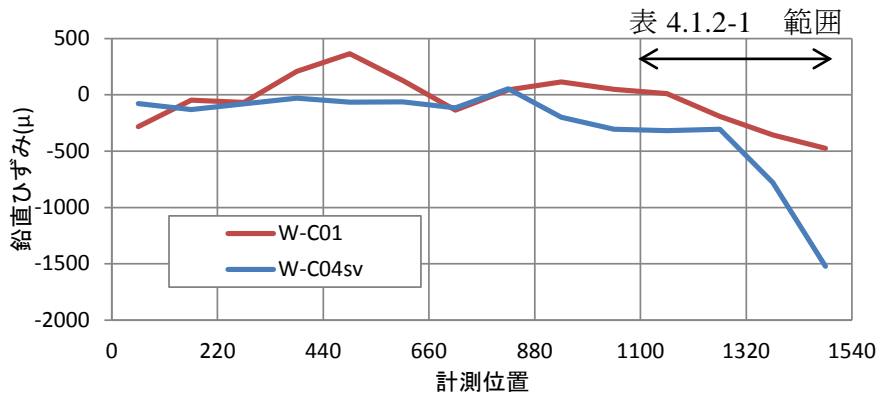


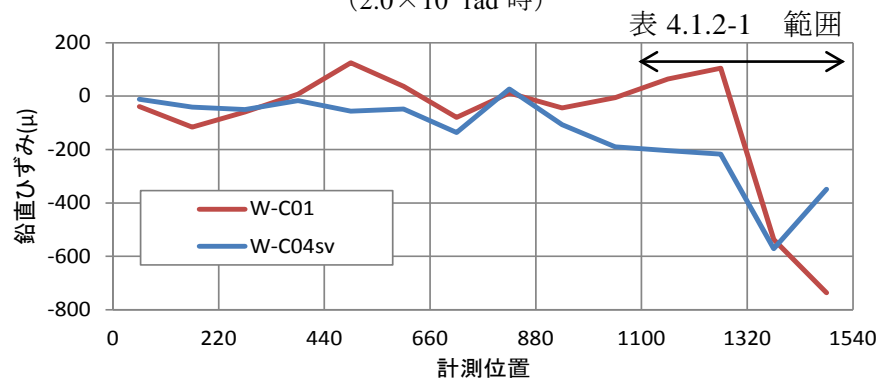
図 4.1.2-2 補強効果と要素実験の比較



(2.0×10^{-3} rad 時)



(2.0×10^{-3} rad 時)



(10×10^{-3} rad 時)

図 4.1.2-3 鉛直ひずみの分布

表 4.1.2-2 鉛直ひずみと軸応力度の平均

試験体	W-C01	W-C04sv
2.0×10^{-3} rad 時 鉛直平均ひずみ	50.6 μ	165 μ
2.0×10^{-3} rad 時 平均鉛直軸応力度*	0.38N/mm ²	1.25 N/mm ²
4.0×10^{-3} rad 時 鉛直平均ひずみ	45.4 μ	281 μ
4.0×10^{-3} rad 時 平均鉛直軸応力度*	0.34N/mm ²	2.10 N/mm ²
10×10^{-3} rad 時 鉛直平均ひずみ	90.4 μ	141 μ
10×10^{-3} rad 時 平均鉛直軸応力度*	0.68N/mm ²	1.06 N/mm ²

* 圧縮ヤング係数を 7500N/mm²として算出

4.1.3 木質系面材一柱の圧縮抵抗

木質系面材一柱の圧縮抵抗は、構造実験の試験体 W-C03sh の補強効果そのものであると考えられる（図 4.1.3-1）。

ただし、実験では W-C03sh の木質壁は座屈によって破壊したことから、四周が接着された W-C01 などのケースでは境界条件が異なるため、剛性、耐力ともより高くなるものと考えられる。また、W-C01 などでは変形角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降で CLT が圧縮破壊していることから、CLT の圧縮耐力程度まで負担できるものと考えられる。

次に、図 4.1.3-2 に構造実験における梁下のすべりと変形角の関係を示す。W-C03sh では変形角が 0 程度でもすべりが生じているが、W-C02、W-C04sv では接着接合部がせん断破壊するまですべりが生じていない。

また図 4.1.3-3 に変形角ごとの CLT の柱際の水平圧縮ひずみを示す。接着せん断破壊した以降（W-C01 では $R=4.0 \times 10^3 \text{rad}$ 、W-C02 では $R=2.0 \times 10^3 \text{rad}$ 以降）のみ圧縮ひずみが生じていることがわかる。よって、木質系面材一柱の圧縮抵抗は初期剛性にはほとんど寄与せず、接着接合部がせん断破壊して以降に効果を発揮するものと考えられる。

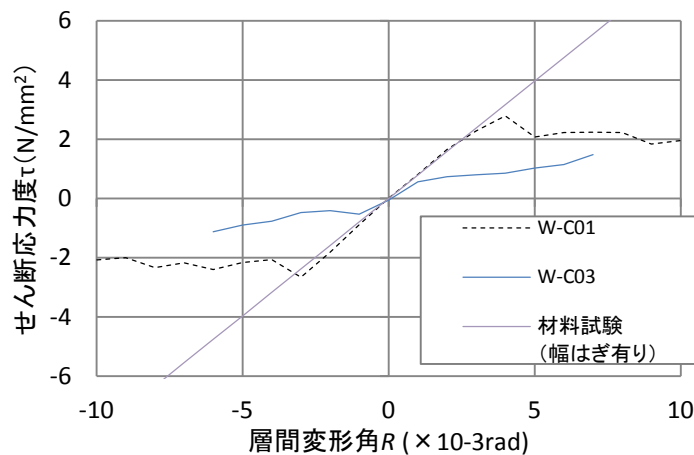


図 4.1.3-1 W-C03sv の補強効果（圧縮抵抗）

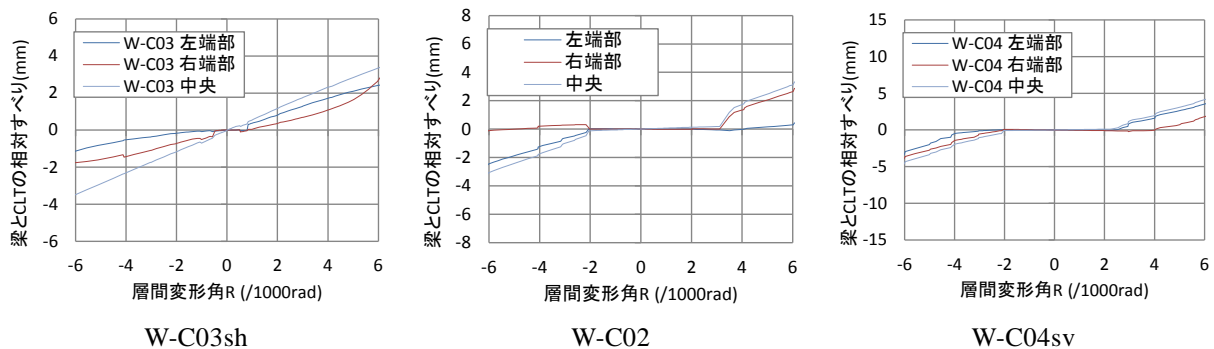
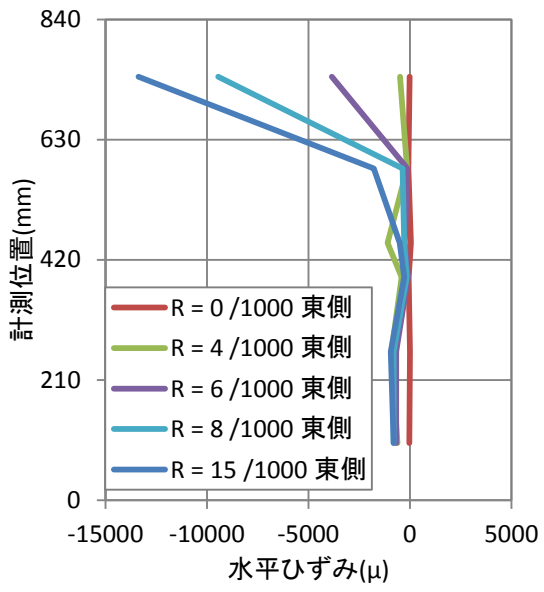
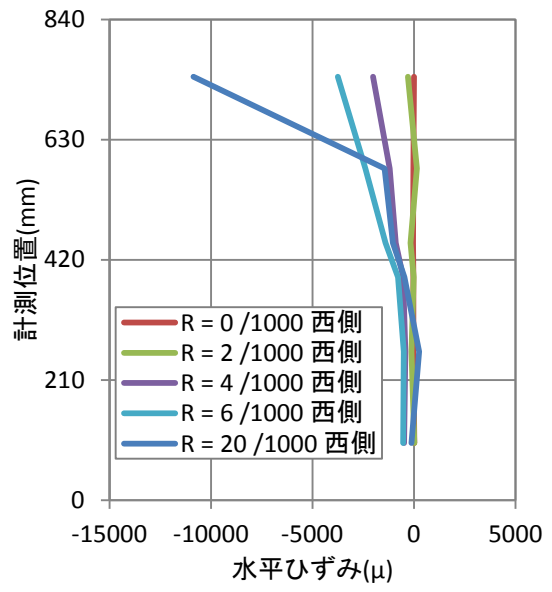


図 4.1.3-2 梁下のすべり-変形角関係



W-C01



W-C02

図 4.1.3-3 柱際の圧縮ひずみ

4.1.4 コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗

コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗は 4.1.2 節でも影響が示唆されたが、実験において直接評価した試験体はない。そこで、木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗が主としてあらわれていると考えられる W-C04sv の補強効果と、木質系面材—柱の圧縮抵抗が表れていると考えられる W-C03sh の補強効果を合算したものと W-C01 の補強効果を比較することでその影響を考察する。

図 4.1.4-1 に W-C01 の補強効果および W-C03sh と W-C04sv の補強効果の合計を示す。ただし W-C03sh の補強効果は W-C04sv の接着接合部が破壊した以降 ($R=2.0 \times 10^{-3} \text{rad}$) にオフセットして加算している。実験では W-C03sv は $R=8.0 \times 10^3 \text{rad}$ までに破壊したため、合計のグラフは $R=10 \times 10^3 \text{rad}$ 程度までを示した。この時の W-C01 と W-C03sh+W-C04sv の差の部分がストラットの効果と考えられる。

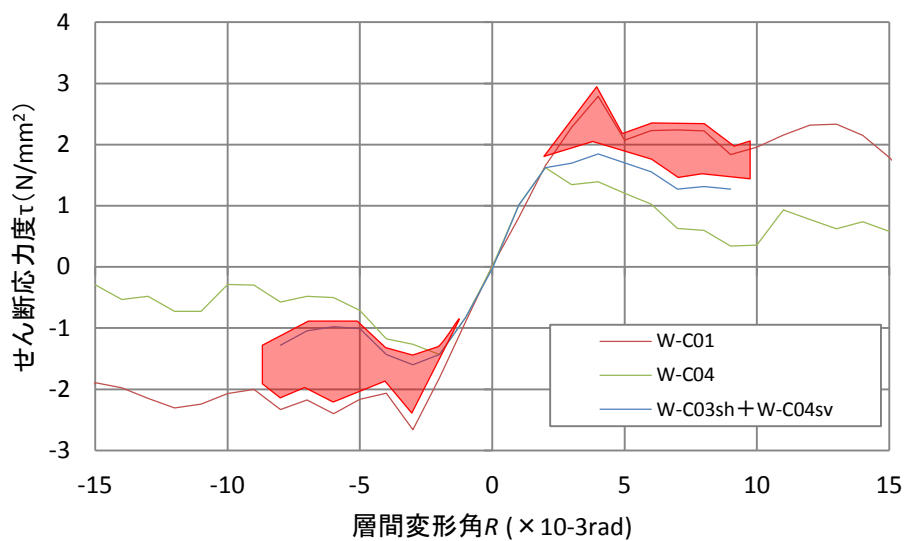


図 4.1.4-1 W-C01 の補強効果と W-C03sh と W-C04sv を加算した補強効果の比較

4.1.5 補強面材の違いが補強効果に与える影響

図 4.1.5-1 に補強材料の違いが補強効果に与える影響を確認するため、無開口標準スパンの試験体同士で比較したグラフを示す (W-C01、W-C02、無開口 LVL (既往))。合わせて、第 I 編 3.3 節の材料試験で得られた CLT (幅はぎあり、なし) および平成 27 年度に得た LVL (材料試験 (12mm)) の初期剛性もプロットした。

いずれの試験体も、接着せん断強度を上回るせん断応力度を發揮し、せん断剛性も材料試験によって得られた材料のせん断剛性を上回っている。また、いずれの試験体も $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad 程度で接着接合部がせん断破壊しており、破壊性状も同じである。

よって、幅はぎした CLT、幅はぎのない CLT、LVL いずれも一定の補強効果があることがわかる。一連の実験で用いた木質面材と同等以上のせん断剛性、せん断強度を有する材料を用いることで、一定の補強効果が得られると考えられる。

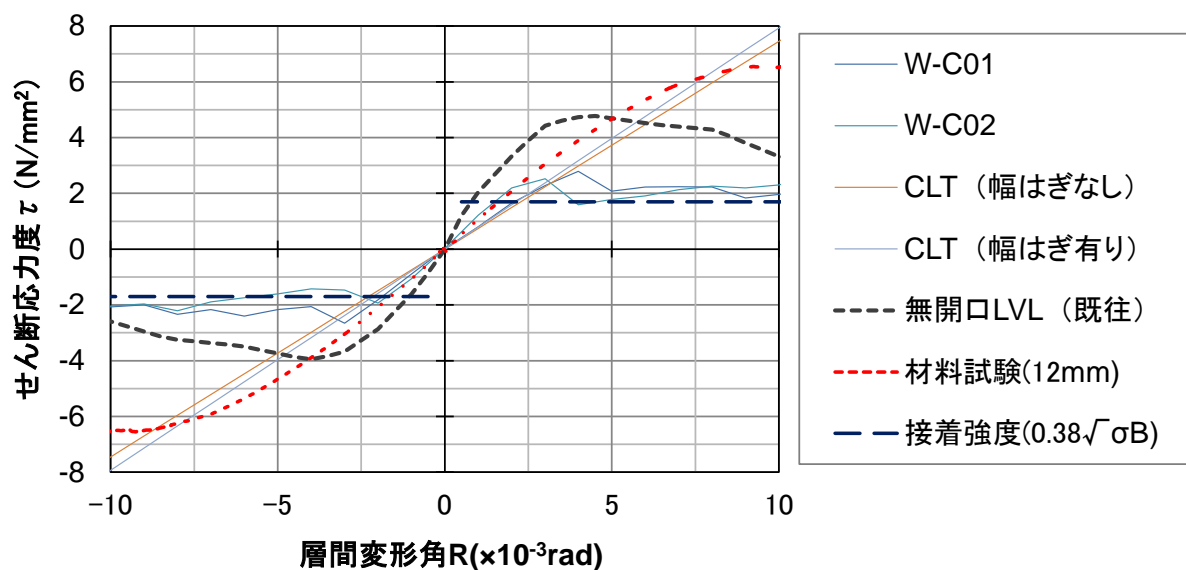


図 4.1.5-1 補強材料の異なる試験体の補強効果比較

4.1.6 柱スパンが補強効果に与える影響

柱スパンが異なる試験体の補強効果比較を図 4.1.6-1 に示す。合わせて、第 I 編 3.3 節の材料試験で得られた CLT (幅はぎあり) の初期剛性もプロットした。

初期剛性は、標準スパン試験体 W-C01 とロングスパン試験体 W-C11 が同等で、短スパン試験体 W-C21 が高い。接着せん断強度も同様の傾向となっている。

接着接合部のせん断破壊以降、短スパン試験体 W-C21 だけがさらに耐力を発揮した。正方形に近いため、ストラット効果がよく発揮された結果と考えられる。

最終的に短スパン試験体 W-C21 だけが CLT のせん断破壊によって耐力が低下した。最大せん断応力度は CLT のせん断強度に一致した。その後、徐々に耐力低下したが、接着せん断強度以上のせん断応力度を負担した。

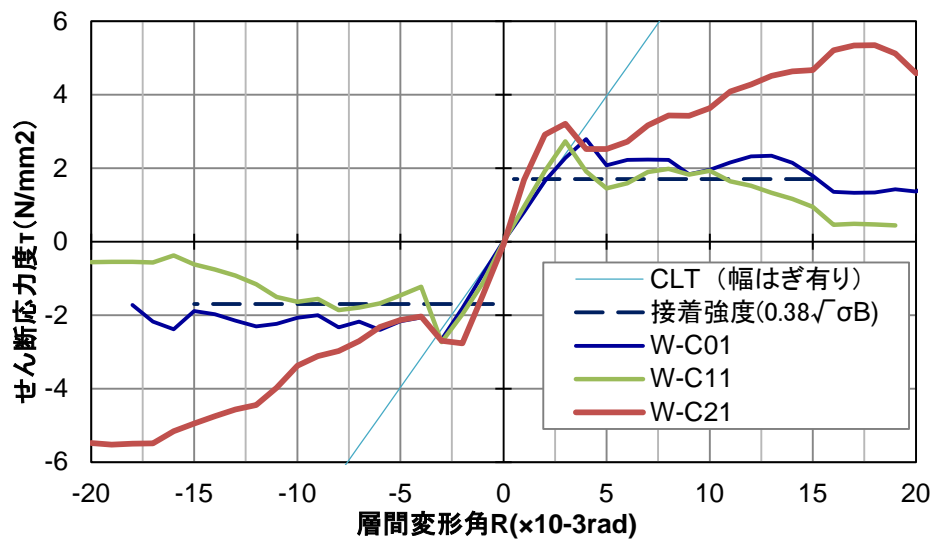


図 4.1.6-1 柱スパンが異なる試験体の補強効果比較

4.2 基本設計のガイドライン

4.2.1 概要

前節までの考察により、本工法の設計にあたっては、「接着せん断破壊まで」と「接着せん断破壊以降」で機構が異なることが分かってきた。ここでそれぞれの抵抗機構を整理し、設計のガイドラインをまとめる。

4.2.2 接着せん断破壊までの抵抗機構

接着せん断破壊までは図 4.2.2-1 に示すように、4.1.1 節に示した要素のうち、a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗と c) コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗が補強効果を発揮しているものと考えられる。このうち、a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗は主として接着強度に依存していると考えられ、c) コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗については、明確に分離することが難しい。

接着せん断破壊までの剛性は 4.1.2 節より、CLT のせん断剛性にほぼ等しいといえる。また接着せん断強度は 4 辺を接着した耐震壁においては、式 (4.2.1) で安全側に評価できることが分かった。開口やスリットを有する試験体についてはさらなる検討が必要と考えられる。

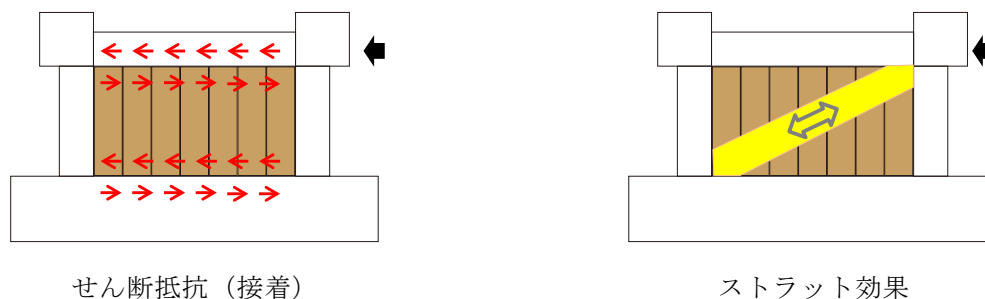


図 4.2.2-1 接着せん断破壊までの補強機構

$$\tau_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_B} \quad (4.2.1)$$

ここで、

τ_{ja} : コンクリートの接着せん断強度	(N/mm ²)
σ_B : コンクリートの圧縮強度	(N/mm ²)

4.2.3 接着せん断破壊以降の抵抗機構

接着せん断破壊以降は図 4.2.3-1 に示すように、4.1.1 節に示した要素のうち、a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗、b) 木質系面材—柱の圧縮抵抗、および c) コンクリート枠内のストラットやアーチ機構と称される抵抗が補強効果を発揮しているものと考えられる。

これまでの実験結果より、このうち、a) 木質系面材—コンクリート間のせん断抵抗は主としてコンクリートのひび割れ面の摩擦によって生じ、その摩擦係数は 0.65 以上と考えられる。

ただし、これらの効果がすべて発揮されるのは壁の 4 辺を RC 躯体に接着した場合のみであり、開口やスリットを有する試験体にあってはいずれかの効果しか得られない。

図 4.2.3-2 に無開口試験体の補強効果を比較したグラフを示す。いずれの試験体においても、接着接合部がせん断破壊した以降も補強効果は接着せん断強度以上が発揮されていることがわかる。

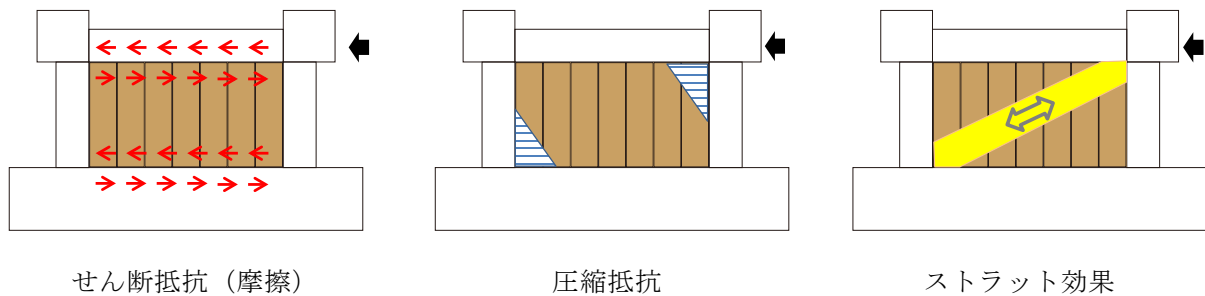


図 4.2.3-1 接着せん断破壊後の耐力発現機構

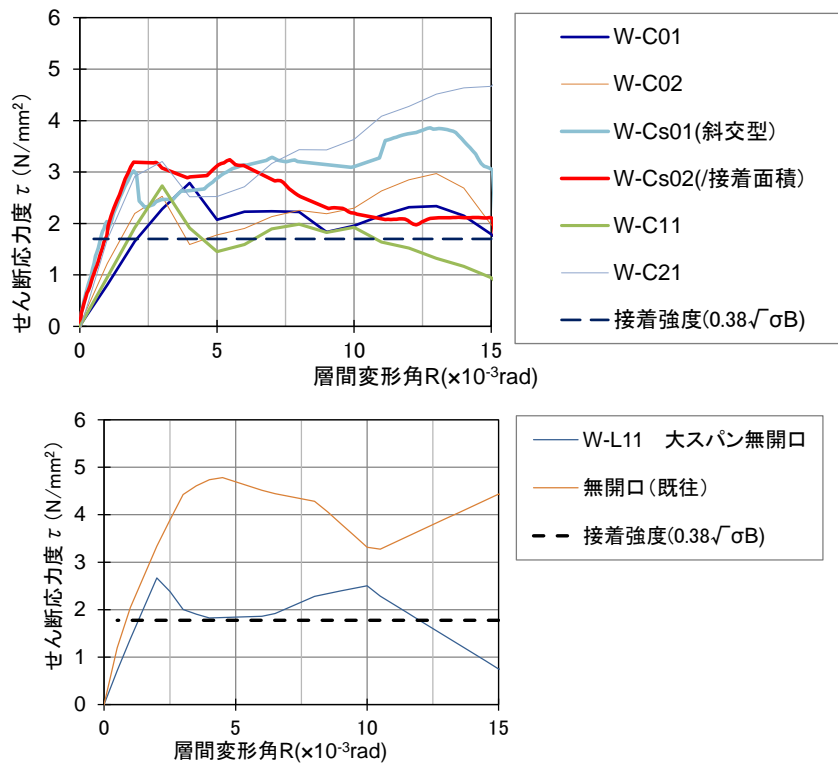


図 4.2.3-2 無開口試験体の補強効果比較 (上：CLT、下：LVL)

4.2.4 まとめ

ここに示す設計ガイドラインは下記の条件を満たすものとする。

- ・実験した柱スパンの範囲（壁長さ/壁高さ：1.0～3.5）
- ・変形角 $10 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで
- ・実験で用いた CLT、LVL と同等以上のせん断強度・剛性を有する材料を使用した場合
- ・壁の開口はないもの

設計にあたっては以下の方針に従うことにより、木質耐震壁の補強効果を安全側に評価できる。

- 1) 初期剛性は使用する木質系面材のせん断剛性とする
- 2) せん断強度は接着接合部のせん断強度によって決まり、式（4.2.1）によって求められる。

$$\tau_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_B} \quad (4.2.1)$$

ここで、

τ_{ja} : コンクリートの接着せん断強度 (N/mm²)

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

- 3) せん断強度に達した以降は、 $10 \times 10^{-3} \text{rad}$ までそのせん断強度維持する

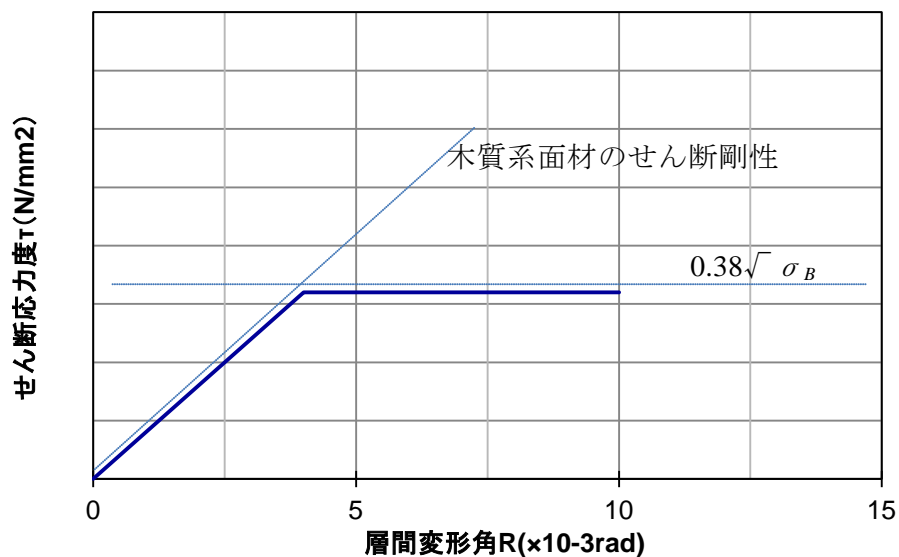


図 4.2.4-1 荷重変形関係の模式図

第Ⅲ編 CLTの耐震要素としての可能性の検討

第 1 章 CLT 耐震補強工法（乾式工法）の検討：目的と方法

木質材料は軽くて強く、強度を比重で割った値は鉄よりも大きく、また繊維方向の強度はコンクリートと同程度であり、せん断はコンクリート以上である。この優れた特性を活かすために、木材を他構造材料とともに使う工法が様々に提案されている。

本事業では、鉄筋コンクリート（RC）造の建築物の耐震補強として CLT 等の木質パネルを用いる工法を検討しており、接着工法については、第Ⅱ編に示した通り基本的な設計ガイドラインを示すことができた。

そこで、本編では、これまでの検討内容をベースに、RC 造建築物等の新築への適用を見据えた工法について検討を行った。

新築に適用するためには剛性・強度共により高い性能が求められる。となると、接合部の仕様も接着メインでは無く、アンカーやボルトなどを用いた工法とすることが効率的である。また、新築に適用する場合には、法令上の問題や施工性からも、接合部を乾式工法とすることが必要である。

そのため、今年度は、CLT-RC 造の接合部について以下に示す基礎的な接合部試験とその接合方法を考慮して施工された耐震壁の性能を評価することとした。

1. RC と木の接着接合やメカニカルな接合に関する接合部実験を実施し、そのデータの収集および評価（3 章）
2. 接合部実験の結果を考慮した RC フレームへの高耐力耐震壁補強方法の提案および実験的検討（2 章）

第2章 構造実験（乾式工法）

2.1 構造実験（乾式工法）を行った工法の特徴

本編では、これまでの検討内容をベースに、RC造建築物等の新築への適用を見据えた工法について検討を行った。本章では、3章3.3で実施した接合部実験の仕様等を参考とし、RCフレームへの高耐力耐震壁補強方法の実験的検討を行った。

ここで検討する工法は、以下の様な特徴を有する。本実験での接合部仕様は、このまま実用化するものというより、乾式工法接合部のチャンピオンデータ（パネルの補強効果耐力はCLTのせん断耐力（ $F_s=6\text{N/mm}^2$ 換算）である543kNを目標）を得ることを目的としている。施工性等の課題に対しては、まずは必要性能を確保できる目処が付いた後、改良を加えていく予定である。

1. 現場での接合部には接着剤を用いず、乾式工法とする。

新築に適用するためには剛性・強度共に高い性能が求められることから、アンカーやボルトなどを用いた工法とした。また、新築に適用する場合には、法令上の問題や施工性からも、接合部を乾式工法とすることが必要である。

このような工法は、耐震補強の場合は接着工法を用いるメリット（騒音・振動・ほこりが出ない）が無くなってしまう上、施工手間も大幅に増加することから採用されない。しかし、新築の場合には、アンカーや鋼板をあらかじめ躯体に埋め込むなどの対応が容易なので、本実験で提案した仕様を改良し活用することが可能である。具体的には、以下のような仕様とした。

- ① CLTにあらかじめ乾式接合用の鋼板を接着する（工場接着）。
- ② 現場にて、CLTに取り付けられている接合用の鋼板とRC躯体を、あらかじめ埋め込まれていたアンカーにてボルトナット止めする。

2. 大型のCLTパネルを用いる。

Ⅱ編で提案している接着工法では、小幅のCLTパネルを用いてパネル間接合にもエポキシ樹脂を現場充填していたが、現場での接着を行わない場合はこの方法が採用できない。したがって、CLTパネルの剛性・耐力を確保するために、大型パネルを用いることとする。

耐震補強の場合には施工性を考慮して小幅パネルでも性能を確保できることをめざしたが、現場の状況によっては大型パネルでの施工の方が好まれる場合もある。また、新築への適用を見据えた場合は、大型パネルが望ましい。

今回めざす高耐力を実現するには、パネルの4周をRCフレームと結合するのが良い。しかし、補強効果の発現機構および施工手間を考慮した結果、パネル上下のみにて接合する仕様とした。

2.2 構造実験の概要

2.2.1 試験体 (RC フレーム部)

図 2.2.1-1 に試験体図を、表 2.2.1-1～2 に試験体に用いた材料の一覧を示す。

試験体は計 1 体で、1/3 縮小モデルとし 1 層 1 スパンの RC 骨組を CLT の壁で補強したものである。RC 骨組は平成 26 年度委託事業で実験した試験体形状を踏襲しており、柱は幅 $B_c 260\text{mm}$ × 成 $D_c 260\text{mm}$ の正方形断面、梁は幅 $B_b 180\text{mm}$ × 成 $D_b 260\text{mm}$ の長方形断面である。フレームの高さ h は 970mm で、内法高さ h_0 は 840mm 、柱間のスパン (節点距離 l) は 1800mm 、内法長さ l_0 は 1540mm とした。

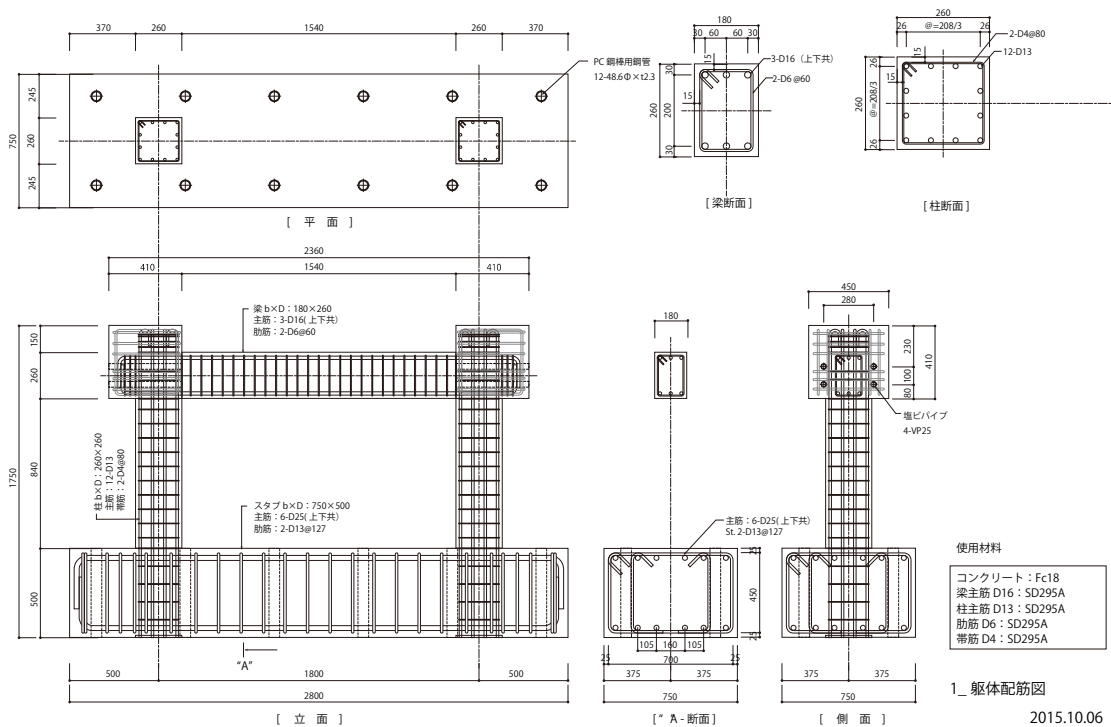


図 2.2.1-1 RC フレームの形状と配筋

表 2.2.1-1 鋼材の引張試験結果

名称	部位	降伏強度 σ_y	ヤング係数 E_s	引張強度 σ_u
		(N/mm^2)	(kN/mm^2)	(N/mm^2)
D4-SD295	柱帯筋	341	1.71	513
D6-SD295	梁あばら筋	371	1.80	521
D13-SD295	柱主筋	345	1.78	473
D16-SD295	梁主筋	354	1.78	484

表 2.2.1-2 コンクリート強度

試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 E (kN/mm^2)	割裂引張強度 (N/mm^2)
W-C05a	23.236	23.401	2.06

2.2.2 試験体 (CLT 補強部)

図 2.2.2-1 に、CLT 補強部分の全体図を示す。

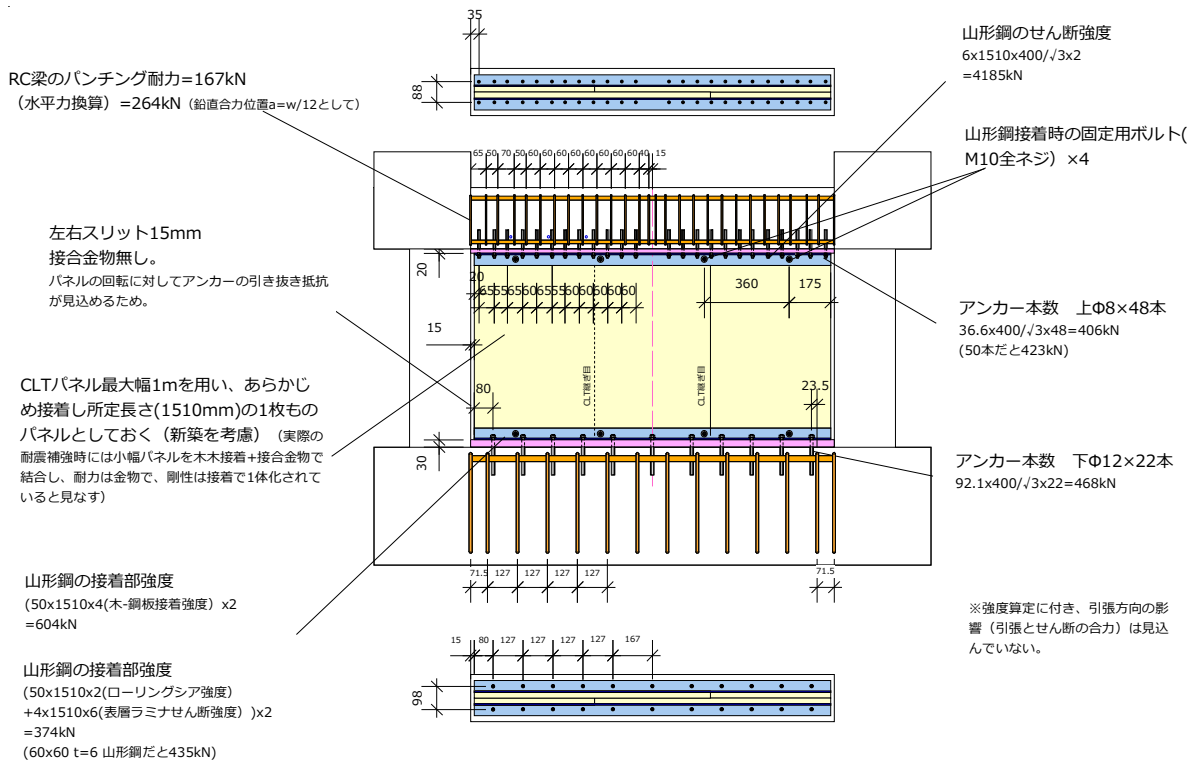


図 2.2.2-1 (a) W-C05a の全体図

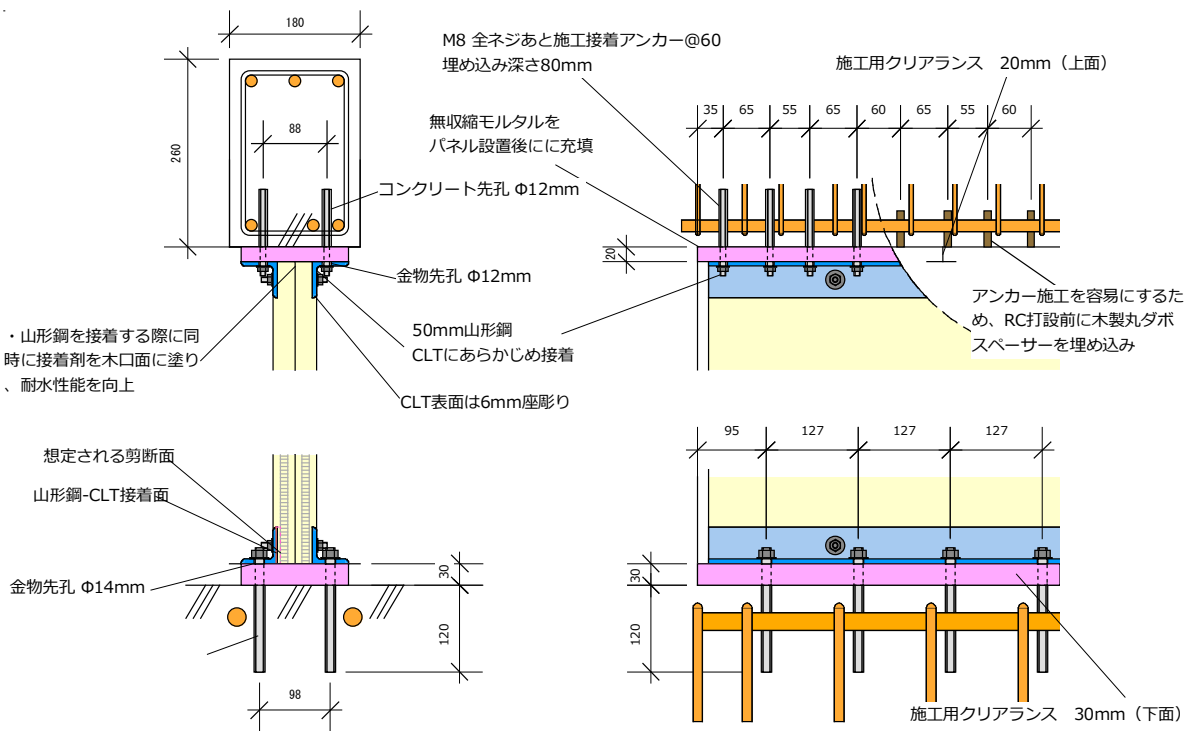


図 2.2.2-1 (b) W-C05a の詳細図

以下に各部の詳細・施工手順を示す。

2.2.2.1 CLT パネル

補強用に用いる CLT パネルは、厚さ 30mm の 3 層 3 プライ異等級スギ CLT 材料を 2 枚重ねにして用いた。本試験では 1 体型の大型パネルを模した仕様とするため、1m 幅程度のパネルを継ぎ目をずらして表裏接着し、継ぎ目にもエポキシ樹脂を充填接着した。

表 2.2.2-1 に、本試験体に使用した CLT についての材料強度データを示す。

表 2.2.2-1 CLT 材料強度特性値

使用材料	使用ラミナ		せん断		圧縮※		
	見かけ密度 kgf/m ³	ヤング係数 N/mm ²	強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²		強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²
T 社製 3層3プライ 30mm 厚 スギ CLT 幅はぎ有り	381	外層：9400 内層：8400	5.18	728	表層繊維 方向	24.89	7468
					表層繊維 直交方向	11.06	3153

※H26 年度試験値より抜粋

2.2.2.2 CLT パネル側の接合具

あらかじめ CLT パネルに留め付けておく鋼材接合部の使用材料、形状を表 2.2.2-2、図 2.2.2-2 に示す。

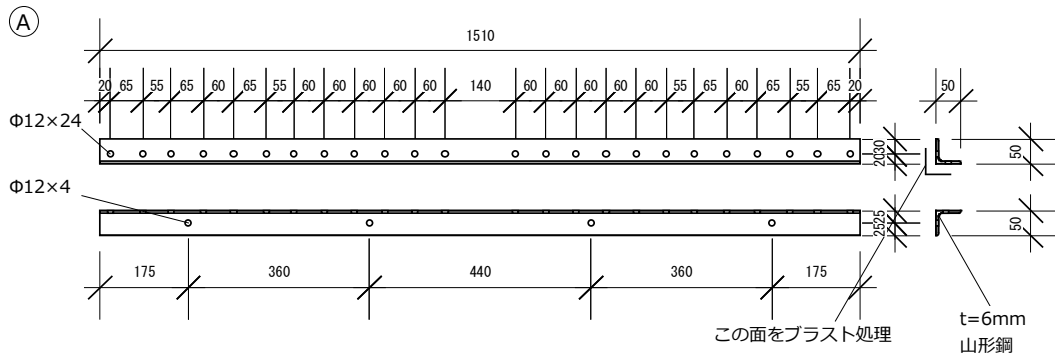
試験体に使用した山形鋼の厚さは 6mm とし、これに CLT との固定用ボルト穴、コンクリート骨組部との固定用アンカー穴を設けた。CLT と接着する部分、グラウトと接する部分の表面にブラスト処理を施した。

これを、CLT にエポキシ樹脂にて接着をし、ボルト M10 で固定した。この際、現場施工時に CLT の木口がモルタルの水分を吸わないよう、接着剤を小口に塗った。

表 2.2.2-2 使用材料一覧

使用材料	
山形鋼	t = 6mm
山形鋼接着時の固定用ボルト	M10 全ネジ

50×50×t=6mm 山形鋼A 外側表面プラスト処理 ×2本



50×50×t=6mm 山形鋼B 外側表面プラスト処理 ×2本

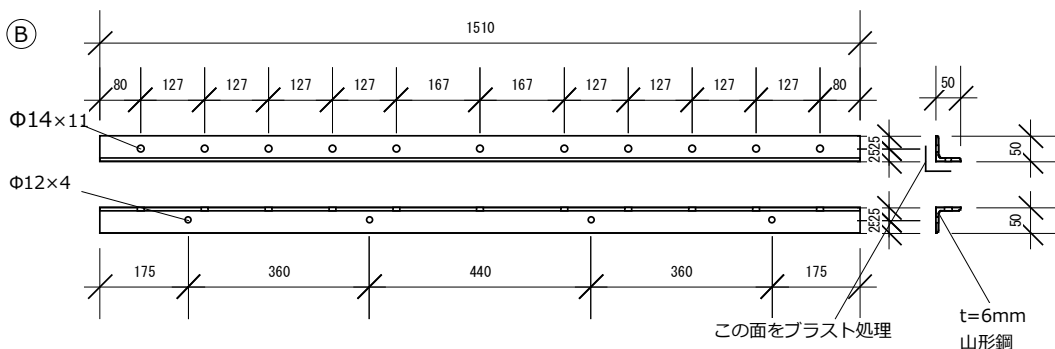


図 2.2.2-2 W-C05a に使用した、山形鋼の詳細図

2.2.2.3 現場での接合部分

RC フレーム部には、あらかじめコンクリート打設前にアンカー用の先穴を確保した。

CLT を固定するアンカー等の詳細を表は以下の通りである。後施工アンカー等を施工して、CLT パネルを固定。隙間を無収縮モルタルで埋める。(詳細な手順は 2.2.3 参照)

表 2.2.2-3 乾式接合部の仕様

	上部：梁側	下部：スタブ側
アンカー	Φ 8	Φ 12、
本数	48 本	22 本
ピッチ	55・60・65mm	127・167mm
コンクリート先穴径	Φ 12 (+4mm)	Φ 15 (+3mm)
定着 (埋め込み長さ) 10d	80mm	120mm
山形鋼の先穴 (CLT 取付)	Φ 12 (+4mm)	Φ 14 (+2mm)

表 2.2.2-4 グラウト (無収縮モルタル) 強度

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 E (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
W-C05a	39.725	18.4	-

2.2.2.4 接合部分の検討の際の考慮事項

接合部の仕様決定時に考慮したことを以下に示す。

- ・ 山形鋼と RC 間の接合は一般的に用いられるあと施工アンカーを用いた。基本的に 1 / 3 スケールを考慮し、サイズ、数量を決定した。
- ・ 必要強度を考慮、50×50 t=6 (実大 150×150 t=19 の 1 / 3 の寸法) の山形鋼を用いた。山形鋼をさらに頑強にするため、リブプレート等による補剛も考慮したが、加工手間を少しでも減らすため、採用は見送った。
- ・ あと施工アンカーのピッチは本来推奨されない寸法となっている、本試験体はせん断にのみ働くことと、RC フレーム内にせん断補強筋がかなりの密度で入っている事を考慮し、問題無いと判断した。後施工アンカーを打ち込む際に鉄筋との干渉を防ぐため、先孔穿孔を容易にするため木片をあらかじめ埋め込んだ状態でコンクリートを打設し、硬化後に木片ごと穿孔することで加工を容易とした。
- ・ 金物を取り付けた CLT パネルを施工するために、フレーム上面に 20mm のクリアランスを設け、設置後、グラウト (無収縮モルタル) で埋める仕様とした。
- ・ 以上の仕様で予想される各部の強度 (フレームの補強効果水平耐力換算) は、下記の通りである。

山形鋼のせん断強度 $6 \times 1510 \times 400 / \sqrt{3} \times 2 = 4185 \text{ kN}$
梁部後施工アンカー耐力 $\Phi 8 \times 48$ 本 : $36.6 \times 400 / \sqrt{3} \times 48 = 406 \text{ kN}$
スタブ部後施工アンカー耐力 $\Phi 12 \times 22$ 本 : $92.1 \times 400 / \sqrt{3} \times 22 = 468 \text{ kN}$
山形鋼の接着部強度 (50×1510×4 (木-鋼板接着強度) × 2 = 604 kN
山形鋼接着部の CLT 部材強度
(50×1510×2 (ボリグ強度) + 4×1510×6 (表層ラミナせん断強度)) × 2 = 374 kN

(参考) RC 梁のパンチング耐力 = 167 kN (換算) = 264 kN (鉛直合力位置 $a = w/12$ とし
て)

以上より、山形鋼接着部において CLT 部材のせん断により破壊に至ることが予想された。

2.2.3 試験体施工時の様子

写真 2.2.3-1 には CLT と山形鋼の接着施工を、写真 2.2.3-2 にはあと施工アンカーとグラウト充填の施工を示す。

【施工時の流れ】

- ① あらかじめ 1510mm に一体化した大判の CLT パネルを使用する。実際には 1m 程度の CLT パネルを継ぎ目をずらして表裏接着かつ継ぎ手にエポキシ樹脂を充填接着することで、大判サイズの CLT パネルとした。
- ② 山形鋼はあらかじめ CLT の両側に接着 (ボルト固定有り) しておく。
- ③ 梁の先孔にあと施工アンカーを挿入。2 液性のエポキシ樹脂で充填する。アンカーの

頭が出過ぎないように注意。

- ④山形鋼付き CLT をアンカーの下に横から滑り込ませて設置し、梁側アンカーを山形鋼先孔に通しつつ 30mm 持ち上げた位置で仮固定する（上部は 20mm の隙間）。
- ⑤CLT に接着した山形鋼を通して、スタブの先孔にあと施工アンカーを挿入。2 液性のエポキシ樹脂で充填する。
- ⑥ある程度アンカーの接着剤が養生されたらあと施工アンカー（梁側、スタブ側両側）に座金とナットを取り付け。
- ⑦上部（20mm）と下部の（30mm）の隙間の周りを塞ぎ、無収縮モルタルを充填。ある程度硬化後にナットを締め付けて完成。ナットと締めすぎに注意（トルク管理要）。締めすぎるとアンカーがコンクリートから引き抜ける。



写真 2.3.3-1 CLT と山形鋼の接着施工



写真 2.3.3-2 あと施工アンカーとグラウト充填の施工

2.2.4 加力方法

図 2.2.4-1 に加力装置の概要を示す。加力装置、加力方法は第Ⅱ編 2 章と同じである。

試験中、周囲反力フレームに取り付けた鉛直オイルジャッキを用いて、試験体の両側柱それぞれに長期応力度に相当する一定の圧縮軸力 ($N=0.2\sigma_B \cdot B \cdot D$, ここに、 σ_B : コンクリートの圧縮強度、 B : 柱幅、 D : 柱せい) を载荷した状態で、梁心位置を加力点として水平せん断力を载荷した。このとき架構の部材角 (層間変形角、6.1.2 節参照) R を制御変位として、目標変形角 $1/2000 \rightarrow 1/1000 \rightarrow 1/500 \rightarrow 3/1000 \rightarrow 1/250 \rightarrow 3/500 \rightarrow 1/125 \rightarrow 1/100 \rightarrow 3/200$ のスケジュールで、正負交番の 3 回繰り返し载荷をおこなった。図 2.2.4-2 に加力スケジュールを示す。なお、水平力の载荷に関して、試験体フレーム両側にジャッキを取り付け、正負いずれの場合においても梁端に圧縮力を加えることによって载荷を行った。

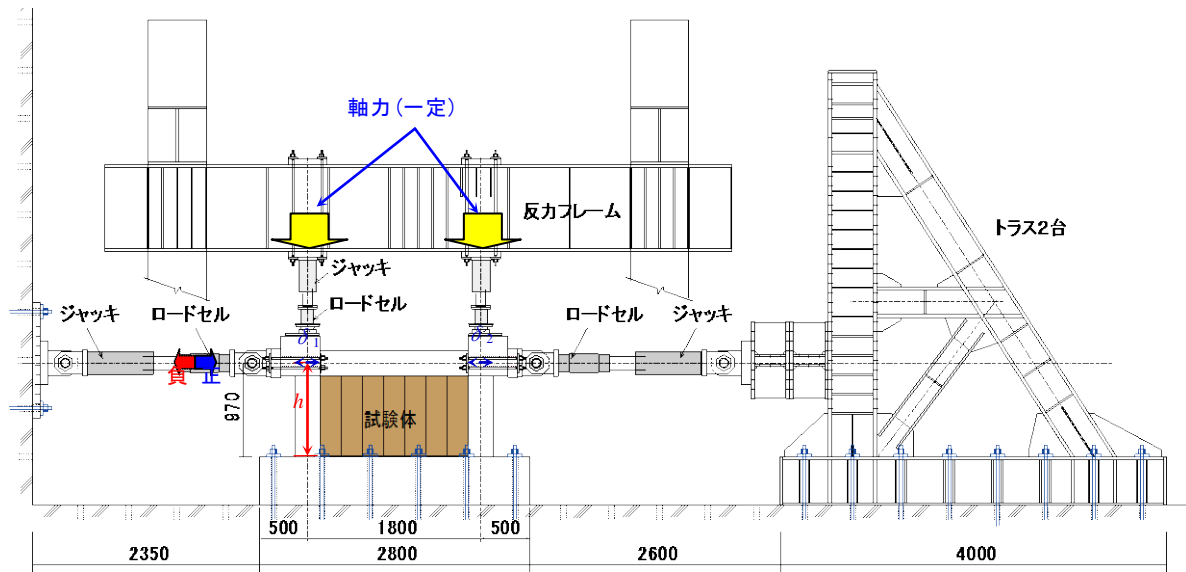


図 2.2.4-1 W-C05a で用いた加力装置図

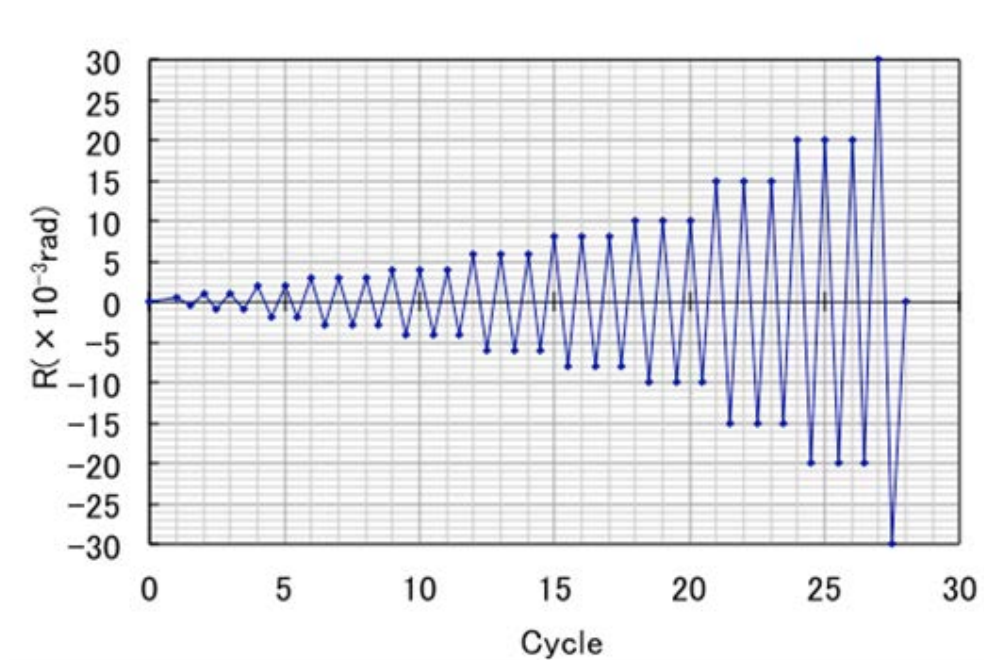


図 2.2.4-2 加力スケジュール

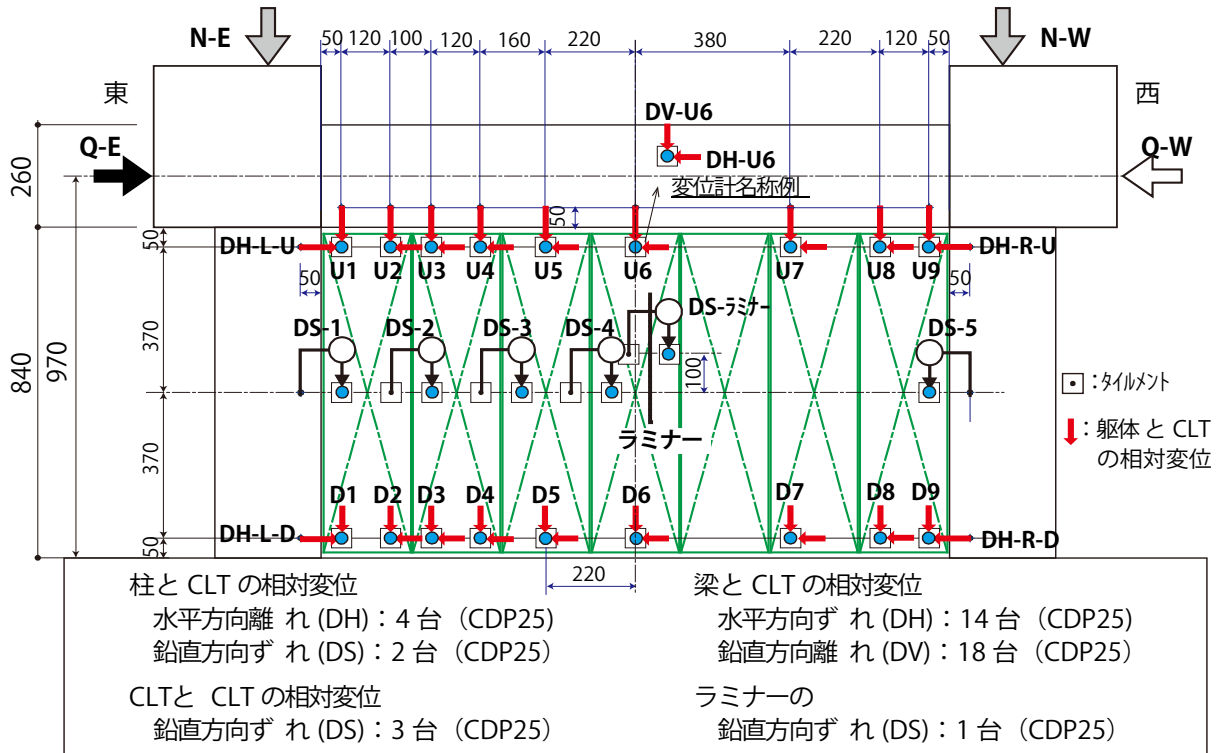
2.2.5 変位計測方法

試験体には各種の変位計を取り付け、絶対、相対変位を計測した。また、フレーム内の主筋、帯筋に短軸ゲージを貼付し、軸ひずみ計測を行った。CLTの面材料表面には短軸・3軸ゲージを取り付け、軸ひずみおよびせん断ひずみを計測した。図2.2.5-1に試験条件の変位計設置状況を、図2.2.5-2にひずみゲージ貼付状況を示す。

変位計測に関して、梁の絶対水平変位は試験体左右および中心の3点で計測し(DFH-E、DFH-C、DFH-W) これらの平均値とスタブの絶対水平変位との差(図中には示されていない)を用いて梁の相対水平変位 δ_H とした。なお水平加力高さは梁心であり、スタブ上端から梁心までの鉛直距離 $H=970\text{mm}$ を用いて、フレームの水平せん断変形角 $\gamma=\delta_H/H$ を計算した。

以下の変位計は山形鋼のフレームに対する独立または集合的なすべりCLTの山形鋼に対する独立または集合的なすべり、回転の変形挙動を計測するために設置したものである。変位計DS-1、DS-2はフレーム-単位面材間の鉛直方向相対滑り変位を計測した。変位計B-DH-U2~4およびB-DH-D2~4は山形鋼-フレーム間の水平方向相対滑り変位を計測(それぞれ上部、下部)するものである。変位計W-DH-U1~5およびB-DH-D1~5は山形鋼-CLT間の水平方向相対滑り変位を計測(それぞれ上部、下部)するものである。変位計B-DV-U1~5およびB-DV-D1~5は山形鋼-フレーム間の鉛直方向相対変位を計測(それぞれ上部、下部)するものである。変位計W-DV-U1~5およびW-DV-D1~5は山形鋼-CLT間の鉛直方向相対変位を計測(それぞれ上部、下部)するものである。またこれら変位計の配置は正負加力時の対称性を考慮し、できる限り少ない計測点数で有効な情報が得られるよう考慮されたものである。

ひずみゲージ計測に関して、フレームの柱・梁それぞれの主筋のパネルゾーン外20mmの位置、またパネルゾーンから60mmの位置の柱帯筋、パネルゾーンから150mm位置の梁助筋、および柱・梁のスパン中央位置の帯筋・あばら筋には短軸ゲージを貼付し、軸ひずみを計測した。各単位面材には、フレームに対する圧縮反力の推定のため、周囲フレームとの接着部付近に接着層に直行する短軸ゲージを貼付し、軸ひずみを計測した。また、単位面材中心軸線上に、上から140mm、上下中心、下から140mmの位置に3軸ゲージを貼付し、せん断ひずみの分布を計測した。



注 1) 正面 (北) からの透視図を示す。
 注 2) 変位計は、裏面 (南) とする。

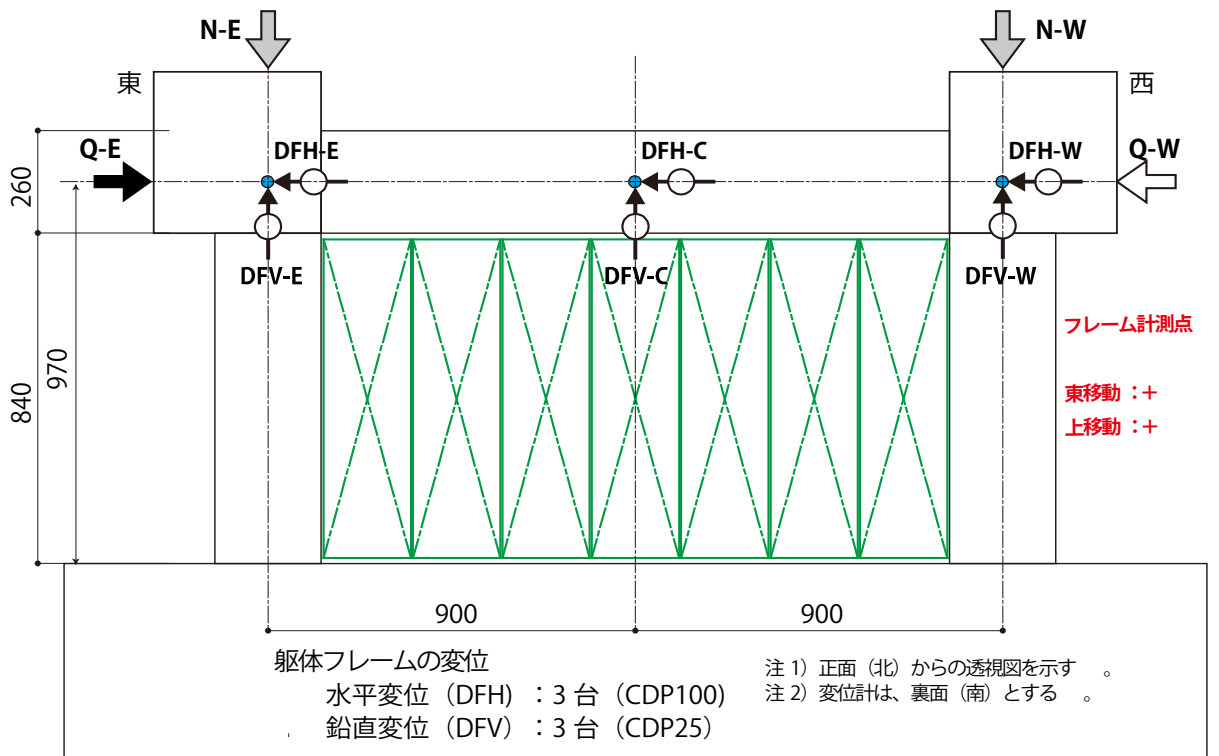
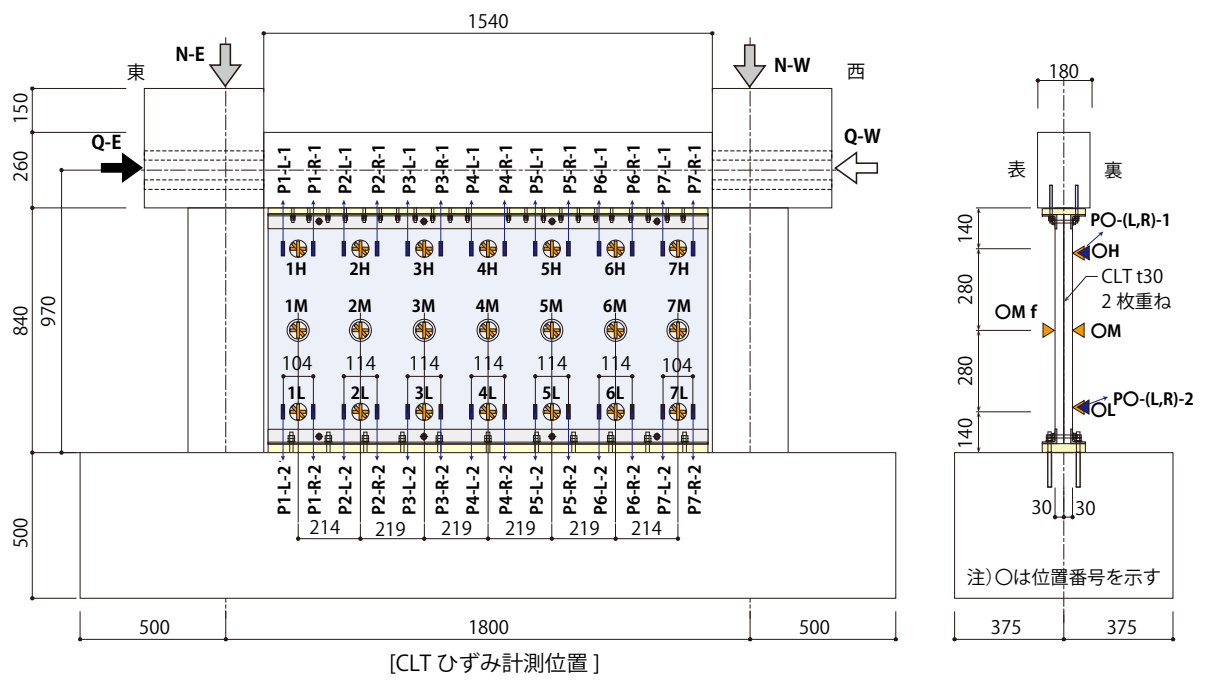
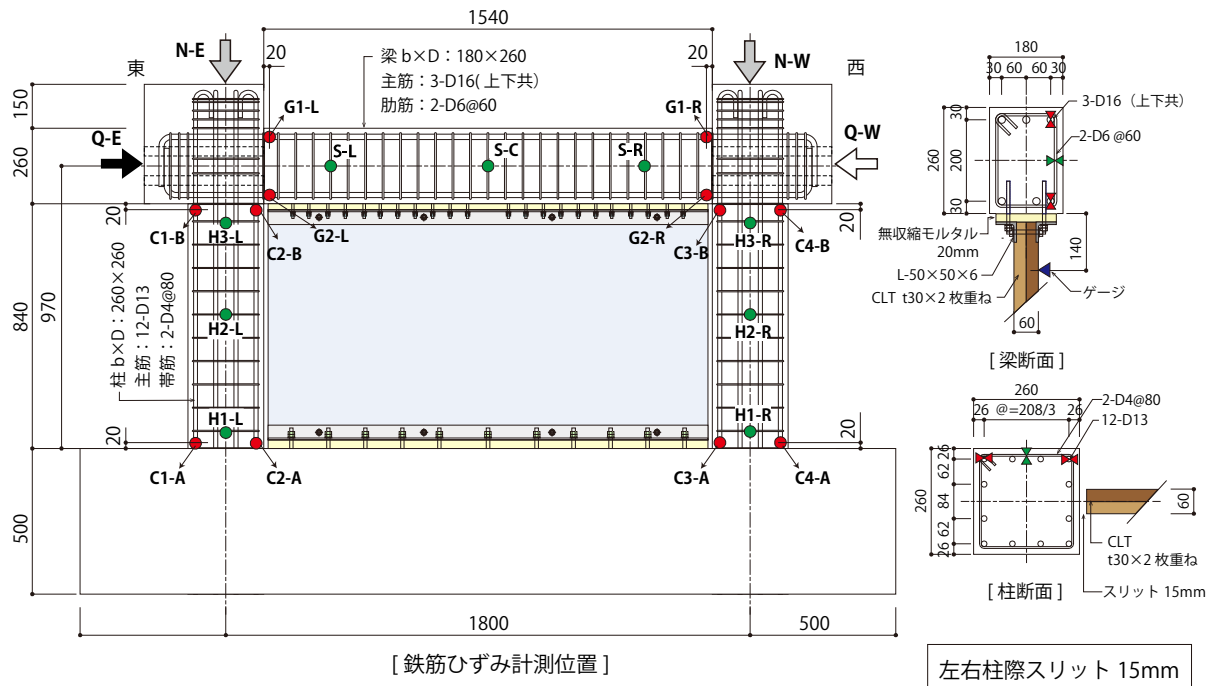


図 2.2.5-1 W-C05a の変位計設置図

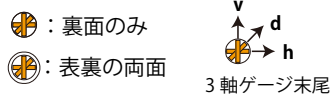


鉄筋ゲージ

- 柱(C) 2点/本×4本=8点
梁(G) 2点/本×2本=4点
 - 帯筋(H) 1点/本×6本=6点
筋筋(S) 1点/本×3本=3点
- 21点 × 2 = 42枚

CLT : 3軸ゲージ

- CLT 裏面 3×7=21点
- CLT 表面 7点



CLT : 1軸ゲージ

- CLT 裏面鉛直方向 2×14=28点

CLT 使用ゲージ
: PFL30-11-5LT
28×3 + 28=112枚

図 2.2.5-2 W-C05a のひずみゲージ貼付図

2.3 構造実験（乾式工法）の結果

2.3.1 W-C05a 試験体の荷重変形関係・破壊性状

以下、試験結果を示す。なお、基準試験体である RC フレームのみの F-00 試験体については昨年度の報告書に記載したためここでは省略する。

層間変形角 $R=4.0/1000\text{rad}$ 、 $R=10/1000\text{rad}$ 、 $R=15/1000\text{rad}$ の正負交番 3 回繰り返し載荷終了後における試験体の損壊状況とひび割れ状況をそれぞれ写真 2.3.1-1 (a)～(c)、図 2.3.1-1 (a)～(c)に示す。図 2.3.1-2 には、W-C05a の荷重層間変形角関係とフレーム骨格曲線をあわせて示す。図 2.3.1-4(a)には梁と山形鋼の間のすべり、(b)にはスタブと山形鋼の間のすべり、(c)には CLT 上部と山形鋼の間のすべり、(d)には CLT 下部と山形鋼の間のすべりをそれぞれ層間変形角との関係で示す。写真 2.3.1-2(a)～(c)には試験体の破壊性状を示す。

試験体は、層間変形角 $R=1.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルにて右柱脚に曲げひび割れが発生した。

層間変形角 $R=2.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルでは、図 2.3.1-3(b)で確認できるように、スタブと山形鋼の間にすべりが生じ、初期剛性が低下した。写真 2.3.1-2(a)ではスタブと山形鋼の間のすべりが観察される。また、同層間変形角の加力サイクルに、左柱脚と、梁の右側上端部に曲げひび割れが発生した。

次いで $R=3.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクル以降、図 2.3.1-3(a)で確認できるように、梁と山形鋼の間にすべりが生じ、剛性が低下した。写真 2.3.1-2(b)では梁と山形鋼の間に発生したすべりが観察される。同層間変形角の加力サイクルに、右柱頭と、梁の左側上端部に曲げひび割れが発生した。

層間変形角 $R=4.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルでは梁の右側下端部に曲げひび割れが発生した。図 2.3.1-1(a)では梁の右側下端部に発生した曲げひび割れが確認できる。

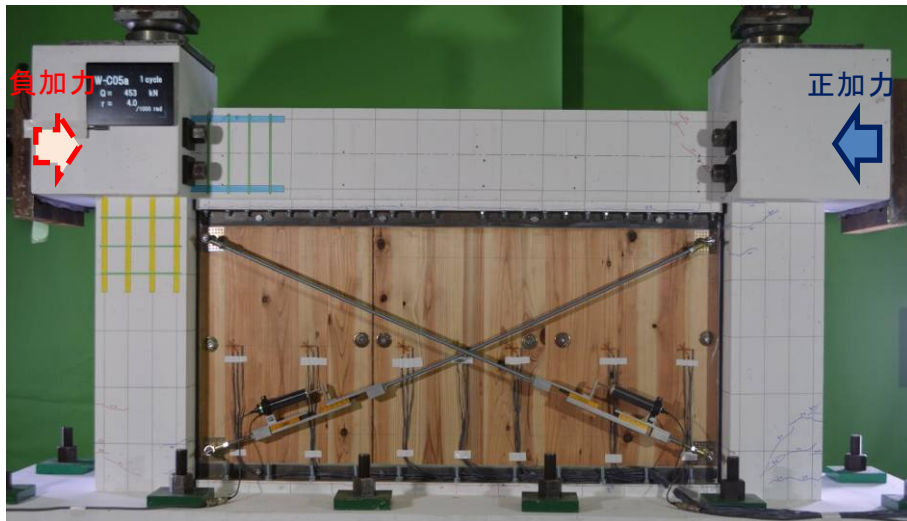
層間変形角 $R=6.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルでは左柱頭に曲げひび割れが発生し、層間変形角 $R=8.0\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルでは、梁の左側下端部に曲げひび割れが発生した。その後、層間変形角 $R=10\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルにて図 2.3.1-4(c)で確認できるように、CLT 上部と山形鋼の間にすべりが生じ、荷重が低下した。写真 2.3.1-2(c)では CLT 上部と山形鋼の間のすべりが観察される。同層間変形角では柱主筋に沿った付着ひび割れとせん断ひび割れも生じた。図 2.3.1-1 には同層間変形角における、フレームひび割れ状況を示す。層間変形角 $R=10\times 10^{-3}\text{rad}$ の加力サイクルにて最大耐力に達し、正側では 693.33kN、負側では -666.85kN となった。

図 2.3.1-2 中に、補強フレーム W-C05a と無補強フレーム F-00 の同一変形角時の耐力の差分をとり、補強効果として見なした荷重-変形角関係を合わせて示した。この補強効果耐力を、CLT パネルの断面積で除すことで、パネルのせん断応力とし、補強効果せん断応力と層間変形角の関係として図 2.3.1-3 に示す。補強効果は $2/1000\text{rad}$ 程度まで弾性的に挙動し、その後概ね $2\text{N}/\text{mm}^2$ の値で降伏性状を示してほぼ横ばいの耐力を示した後、 $4/1000\text{rad}$ 付近から再度上昇をはじめ、 $10/1000\text{rad}$ 時には耐力にして 362kN 、応力度で約 $4\text{N}/\text{mm}^2$ に達した。

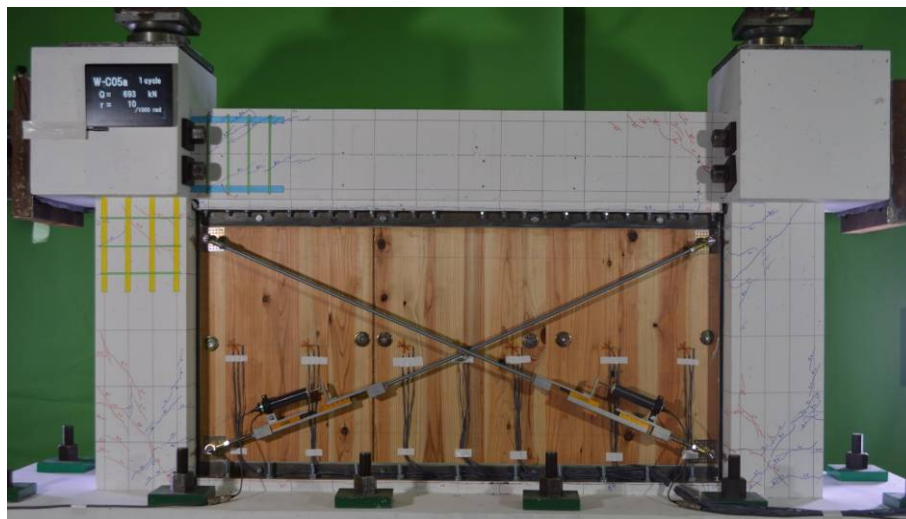
先に触れたように、 $R=2.0\times 10^{-3}\text{rad}$ でスタブと山形鋼の間にすべりが生じるまでの初期の段階では全ての部材が一体に剛に接合された状態で挙動と考えられる。従って、そのせ

せん断剛性は概ね CLT パネルのせん断剛性に依存するものと考えられる。図 2.3.1-3 には 2 章の要素実験で得られた CLT パネルのせん断弾性係数 728N/mm^2 に基づくせん断剛性の関係を直線でしめした。図からわかる様に、実験値の剛性はパネルせん断剛性から予測される値よりも 1.5 倍程度大きかった。この原因は今後検討する必要がある。

せん断応力度 2N/mm^2 で降伏したように見えるのは、スタブと山形鋼の間に亀裂が入り、すべり変位を生じたためである。実際には、スタブと山形鋼の間にはグラウトが充填されており、その下部であるグラウトとスタブの界面ですべりが生じた。すなわち、両者の付着強度が 2N/mm^2 程度であったと言える。付着が剥がれすべりが生じた後、 $4/1000\text{rad}$ 変形あたりからアンカーが働き始め、応力上昇に転じたと考えられる。最終的に CLT 上部と山形鋼の間にすべりが生じたが、これは山形鋼と CLT 界面でのローリングシア破壊が生じたためである。当初想定していたローリングシア強度は、 374kN であり、実際の補強効果耐力 362kN と比べると、精度良い予測が可能であったと考えられる。



(a) $R=4.0/1000\text{rad}$.

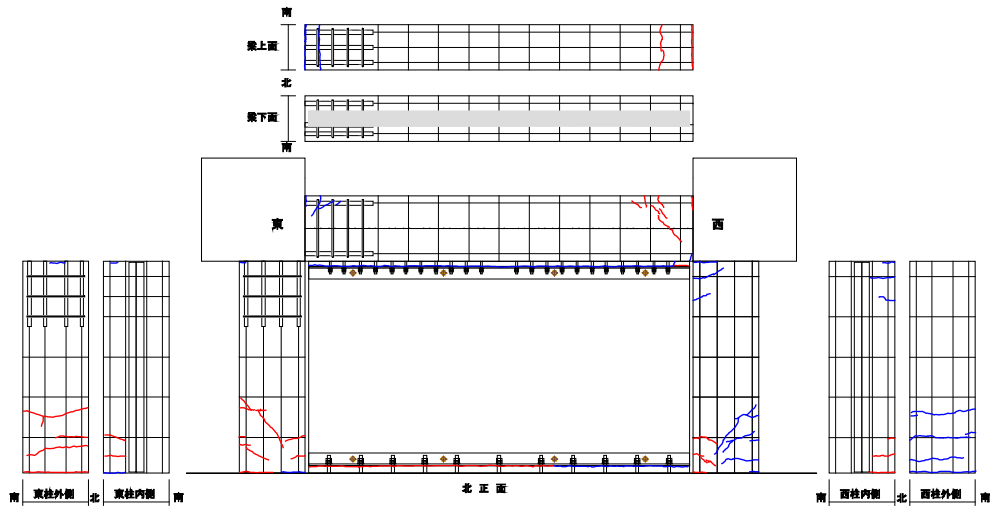


(b) $R=10/1000\text{rad}$.

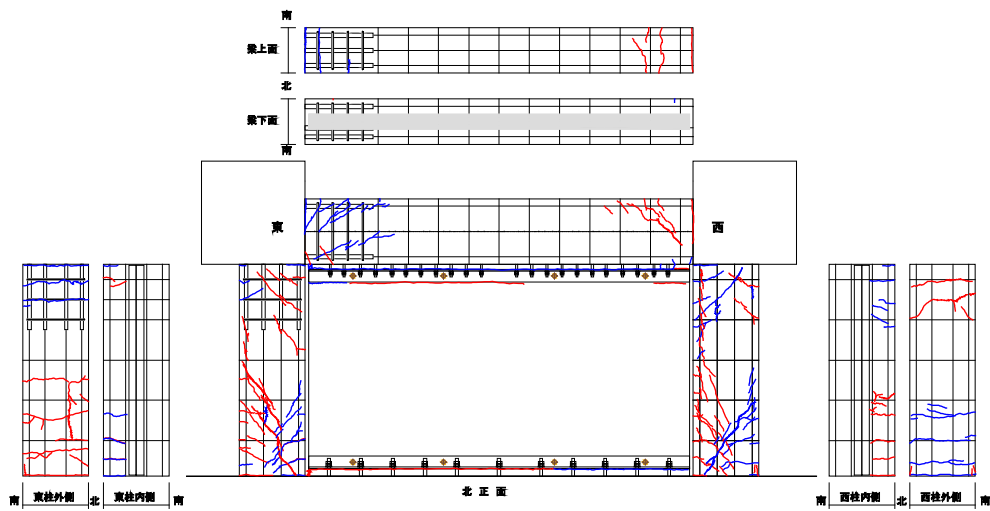


(c) $R=15/1000\text{rad}$.

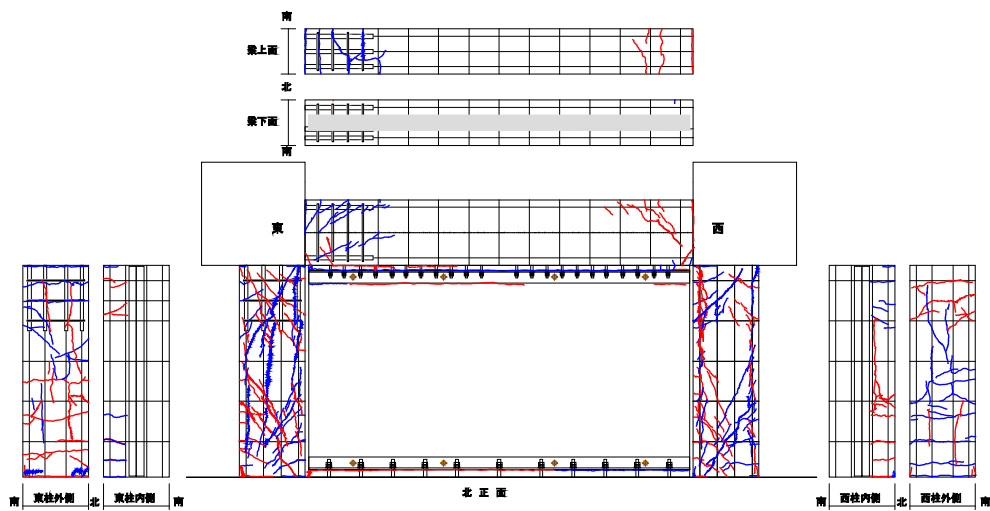
写真 2.3.1-1 損壊状況



(a) $R=4.0/1000\text{rad}$.

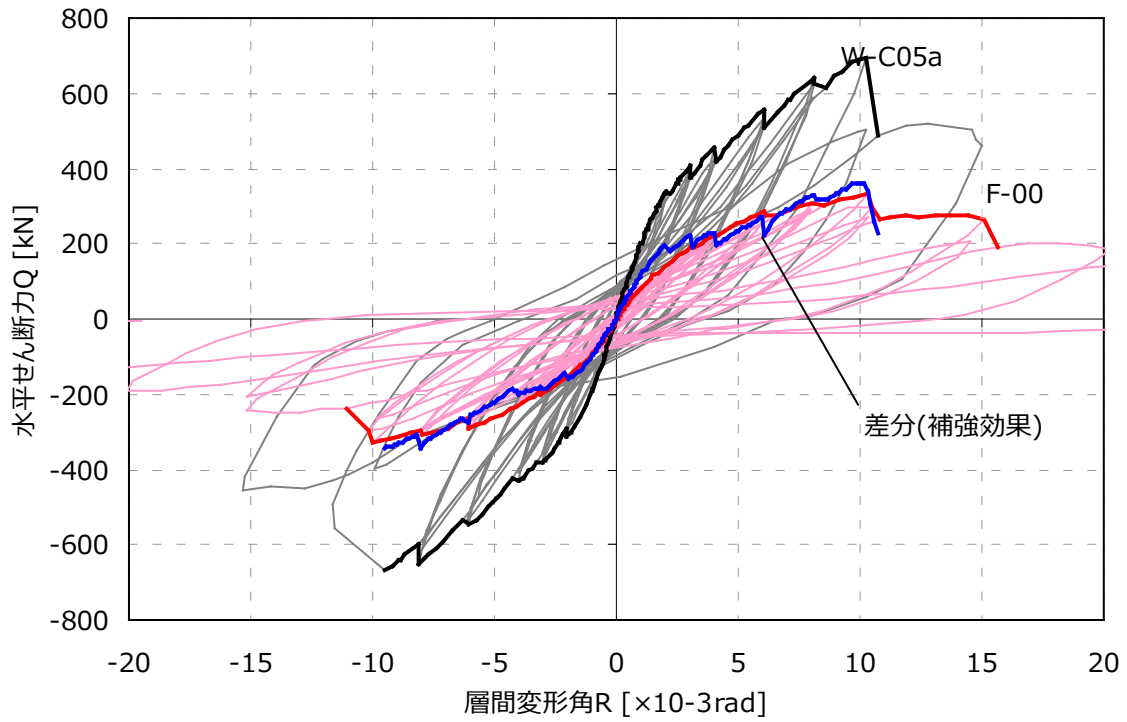


(b) $R=10/1000\text{rad}$.



(c) $R=15/1000\text{rad}$.

図 2.3.1-1 ひび割れ状況



W-C05a と F-00（無補強 RC フレーム）との比較

図 2.3.1-2 荷重層間変形角関係

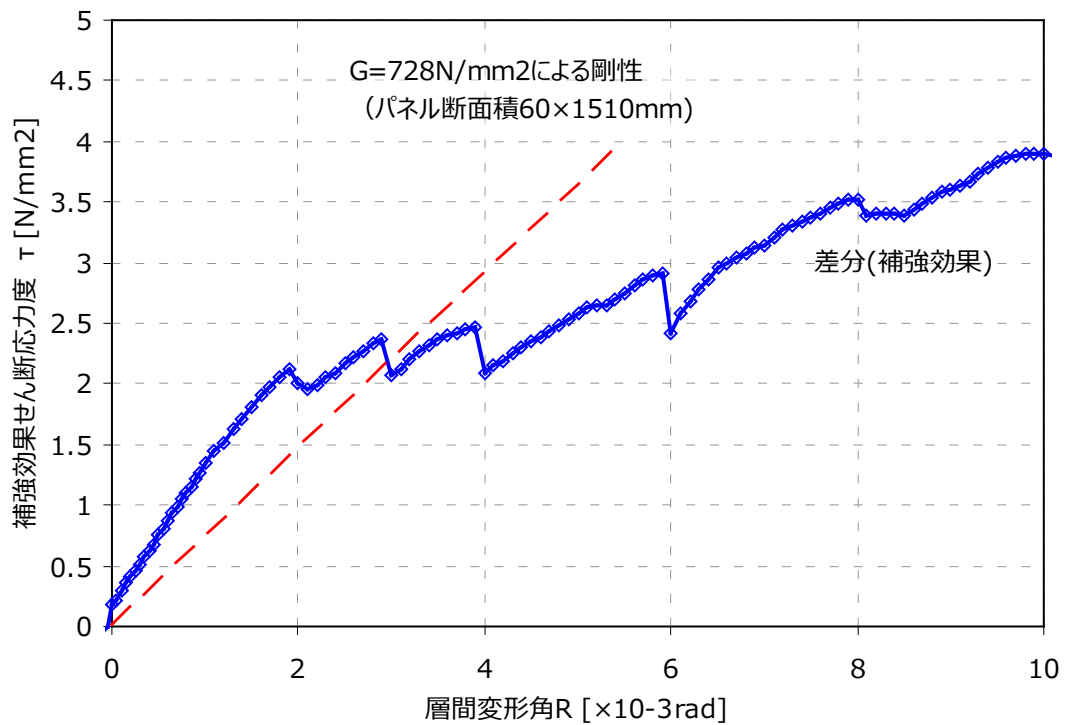


図 2.3.1-3 補強効果応力層間変形角関係

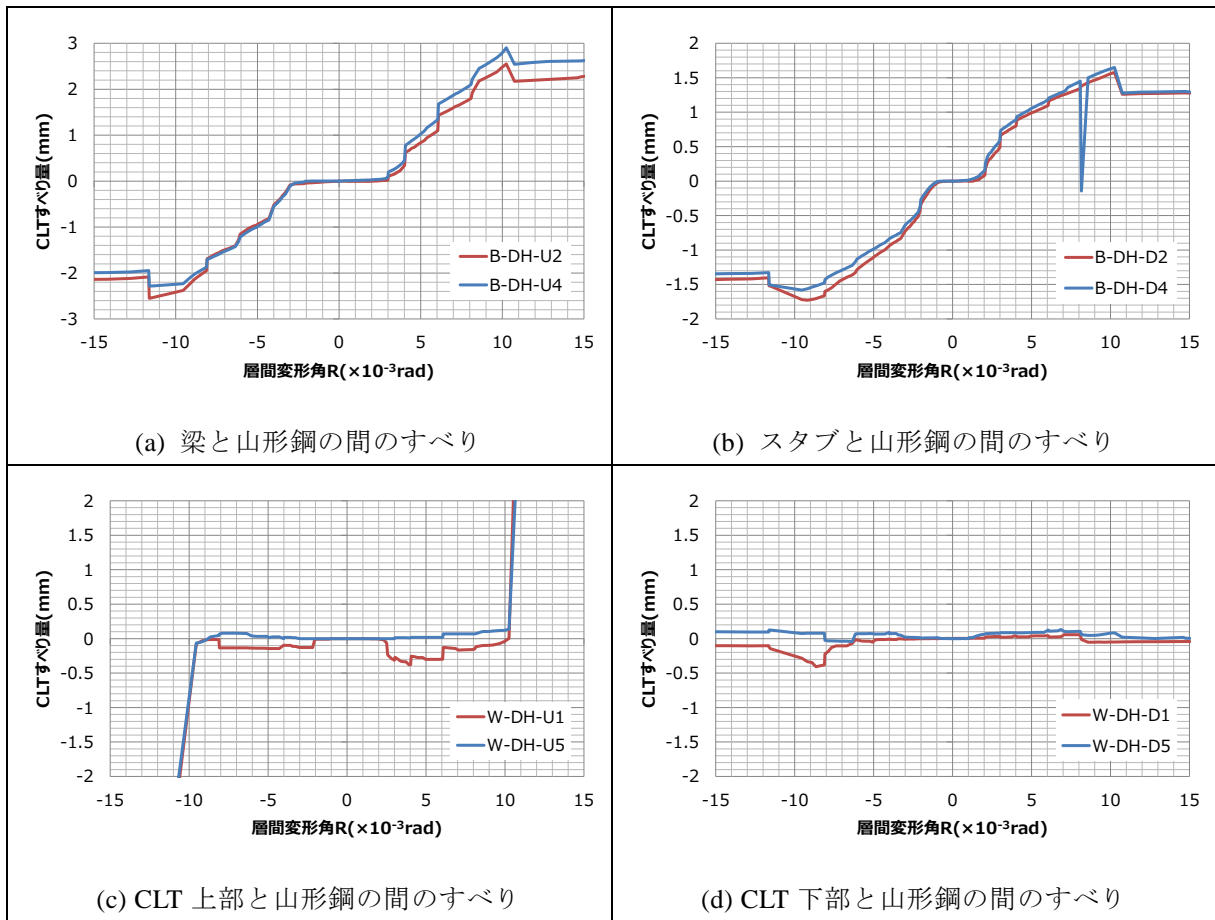
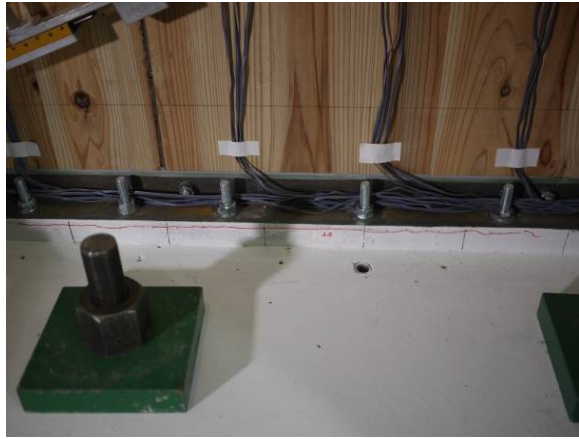
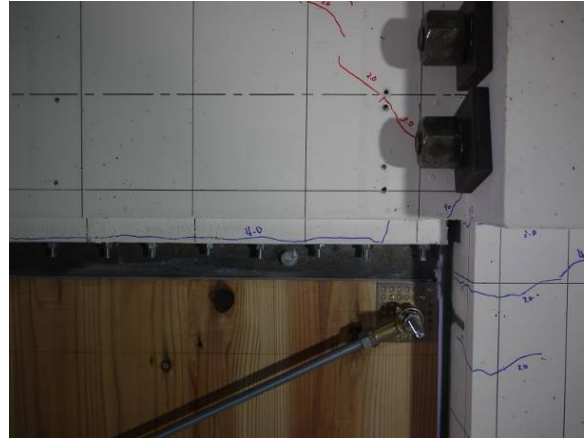


図 2.3.1-4 各部のすべりと層間変形角関係



(a) スタブと山形鋼の間のすべり



(b) 梁と山形鋼の間のすべり



(c) CLT 上部と山形鋼の間のすべり

写真 2.3.1-2 各部のすべり

2.3.2 他の接合仕様との比較

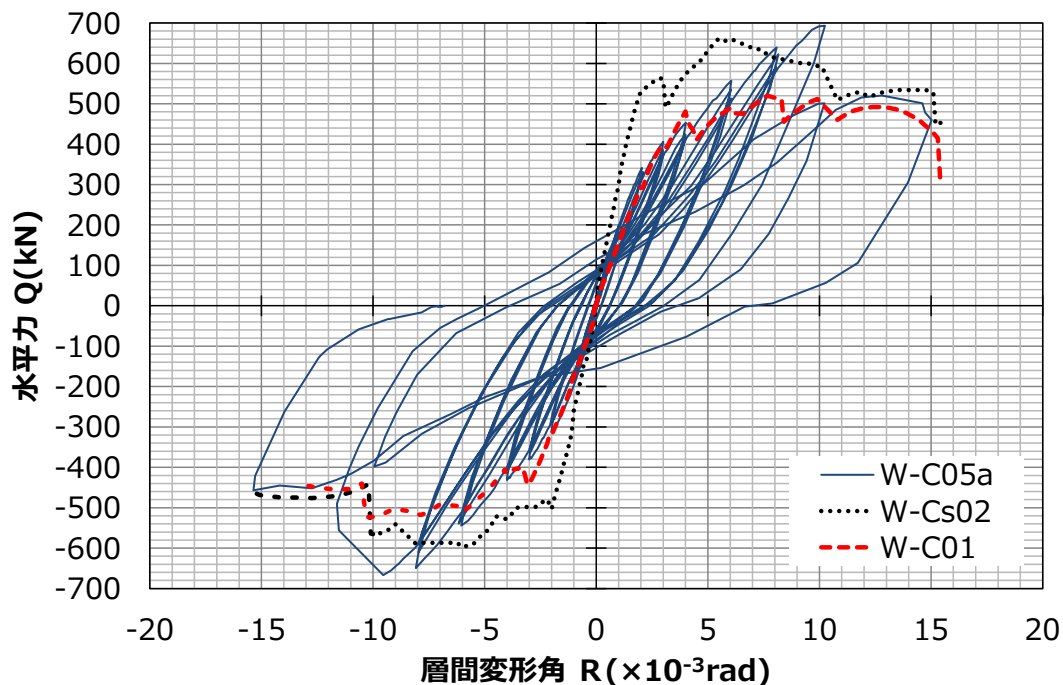
図 2.3.2-1 に昨年度実施した補強フレーム試験体の荷重変形角関係との比較を示した。昨年度実施試験体は、フレームサイズや CLT の強度特性値はほぼ同一のものを用いており、①CLT パネルをフレーム内の 4 周に充填接着したもの(W-C01)、②CLT は斜め 60° の配向して用い、また 4 周のフレームとの結合には底面幅 100mm の鋼板 (T 形鋼) を介して充填接着したもの (W-Cs02)である。

W-C01 との比較においては、初期剛性や降伏耐力はほぼ同一の性状を示したが、最大耐力において、今年度の試験体が 500kN から 700kN と、約 200kN もの向上を示した。

W-Cs02 は今年度のものより高い剛性や降伏耐力であったが、最大耐力は今年度のものを下回った。

これらの結果は補強効果の剛性が、ほぼ CLT パネルのせん断剛性に依存することを示しており、また本年度試験体の様に周囲フレームとの結合が上下面のみだったとしても、その結合が離れるまでは 4 周接着したものと遜色無い剛性を発現する事を示している。また最大耐力の向上には今年度施工したようなアンカーによる手法は非常に有効であることが示唆された。

一方で、耐震補強に対して重要な指標となる微少変形段階での耐力(5/1000rad 時耐力)は、CLT パネルの剛性にほぼ依存することを意味しており、さらなる補強効果の向上にはその改良が不可欠であると言える。その意味で、昨年度実施した CLT の斜め配向による剛性向上策の有効性はあらためて示唆されたと言えるだろう。



W-C05a と W-C01 (直交型)、W-Cs02 (斜交・鋼板挿入型) との比較

図 2.3.2-1 荷重層間変形角関係

2.3.3 まとめ

耐震補強のみならず新築にも対応でき、高耐力が期待できる工法として、本試験では CLT と RC フレームの現場接着を必要としない乾式工法の性能評価をおこなった。層間変形角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$ の加力サイクルにて最大耐力に達し、正側では 693.33kN、負側では -666.85kN となった。既往の CLT を用いた RC フレームの耐震補強と比較しても、W-C05a は十分な高耐力を発揮したと言える。同様の左右スリットのある条件である W-C04sv (2章参照) と比較すると、降伏耐力にはさほど差が無いが、最大耐力では 2 倍近く高い値を示しており、今回の試験体の様にアンカー等で十分に引き抜きに対抗することが出来れば、左右スリットがあっても十分な高耐力と変形性能が担保できることが示された。

一方でその施工性については、非常に多数のアンカーを要するなど、現実性の低いものである点は否めない。現実的には金物をフレーム部材コンクリート打設時にあらかじめ埋め込んでおいたり、鉄骨フレームに高力ボルト締めによって結合する等の、耐震補強では無く、新築向けの本質耐震壁としての利用策が有効であると考えられる。

また初期剛性においては、まだ改善の余地があるものと考えられる。今後は CLT を用いた乾式工法で、高耐力かつ高剛性の補強工法の開発を目指す。

第 3 章 RC-CLT の乾式接合部に関する要素実験

3.1 実験の目的

本章では、CLT パネルと RC 造柱梁接合部の要素実験について示す。本章での実験の目的は以下の通りである。

- ① 第Ⅱ編第 3 章にて実施している RC-CLT の接着面の要素実験は大がかりとなるため、簡易な試験方法で代替することができれば、改良方法等の検討がやりやすくなる。そこで、簡易な試験方法の提案を行う。試験方法の比較検討のため、まずは接着工法の仕様で試験を行った。(3.2)
- ② 第Ⅱ編で示した接着工法のせん断強度はコンクリート接着面のせん断強度によって決まることから、この工法の改良方法としては、アンカーとの併用やコンクリート側の接着面を拡大させる方法などが考えられる。平成 26 年度にも、その考え方で設定した仕様で構造実験を実施している。これらの改良案の接合部分を①で提案した簡易な試験方法で実施してデータを得た。(3.2)
- ③ 本編は RC-CLT の乾式接合部の提案をめざしており、その接合部の検証を 3.2 で提案した試験方法と同様の方法で行った。(3.3)

3.2 要素実験 1 : RC-CLT の接着接合部試験 (改良工法含む)

3.2.1 試験体

本節で実施する試験の試験体およびそのパラメーター等について以下に示す。

(1) 接着工法の試験体

第Ⅱ編第3章にて RC-CLT の接着面の要素実験を実施しているが、ここでは、それと同じ目的、つまり、軸力がかかる場合の接着面の摩擦力の差による性能の違いを確認した。本試験は、第Ⅱ編第3章の試験を簡略化したものである。

試験体は、厚さ 90mm の実大の CLT (幅はぎなし) を用いている。ここでは、接着面に作用する軸力をパラメーターとしており、それは試験体をボルトで締め付けることで発生させている。軸力のコントロールはボルトの引張り力 (圧縮力) で行い、3 種類とした。与えた軸力は CLT の圧縮強度を基準とし、その 1/3 となる条件 (90F1-C0)、2/3 となる条件 (90F2-C0)、および初期軸力 0 となる条件 (手締め) (90F0-C0) である。試験体数は、各 1 体とした。

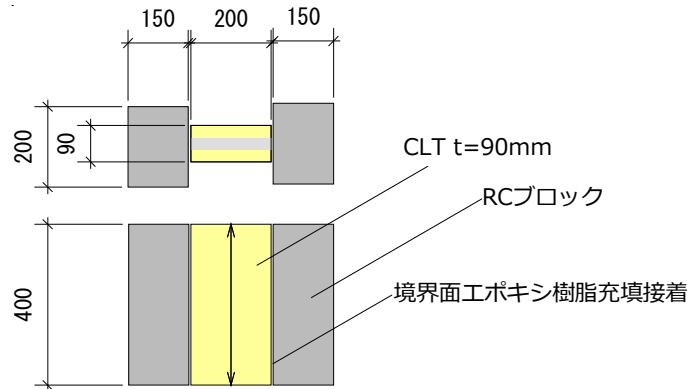


図 3.2.1-1 接着摩擦用試験体形状 (両矢印は試験体表層ラミナの繊維方向を示す。)

表 3.2.1-1 接着摩擦用試験体リスト

	接着摩擦用試験体		
試験体名	90F1-C0	90F2-C0	90F0-C0
柱側部材	鉄筋コンクリート 幅 150mm×高さ 400mm×奥行 200mm		
壁側部材	M 社製 90mm 厚 CLT (3 層 3 プライ、幅はぎ無し) 幅 200mm×高さ 400mm×厚さ 90mm		
補強金物			
軸力 (圧縮力)	CLT の圧縮強度の 1/3=133kN (ボルト 1 本あたり 33.3kN)	CLT の圧縮強度の 2/3=266kN (ボルト 1 本あたり 66.6kN)	手締め (0kN と考える)
試験体数	1	1	1

(2) 接着工法と補強金物の併用接合部の試験体

第Ⅱ編にて提案した接着工法の改良案として設定した接合仕様を提案し、そのデータを得る目的で試験体を設定した。

改良案としては以下の3種類がある。

① コンクリートと CLT を貫くアンカーの併用仕様

この仕様はアンカーがコンクリートから CLT までを貫くものである。アンカーによるせん断強度の向上の他、接着面への初期の補剛も期待する仕様とした。試験体数は2とした。(30RA1-C0)

② コンクリート接着面へのビス打ちの併用仕様

接着工法のせん断強度はコンクリート接着面のせん断強度によって決まることから、コンクリートと接着層の補強を行った場合には、せん断強度が上昇する可能性がある。そこで、コンクリート面にビスを打ち込んでおき、ビスの頭部による接着剤の補強を期待する仕様とした。試験体数は1とした。(30RB1-C0)

③ 鋼板による接着面積の拡大仕様

接着面積を拡大させるため、CLT とコンクリートとの境界に CLT より幅広の鋼板を設置し、CLT-鋼板 と 鋼板-コンクリートも接着によって結合する仕様である。CLT-鋼板のせん断強度は、鋼板-コンクリートの接着強度よりも大きいと予想され、鋼板による表面積拡大に応じた耐力向上を期待する仕様である。なお、コンクリート-鋼板の接着は、手間のかかるエポキシ充填方式によらず、ブラスト処理した鋼板にエポキシ接着剤を塗布し、これをフレームに直接取り付ける方式を採用した。また接着強度を向上させるため、鋼板はチェッカープレートを用いた。(30RP1-C0)

また、ここでは、CLT-鋼板の接着接合部の性能も確認する必要があることから、同じ試験体で、コンクリート部分を集成材に置き換えた試験体での実験も用意した。試験体数は、それぞれ各1体とした。(30RT1-C0)

補強金物用試験体 (CLT t30×2)

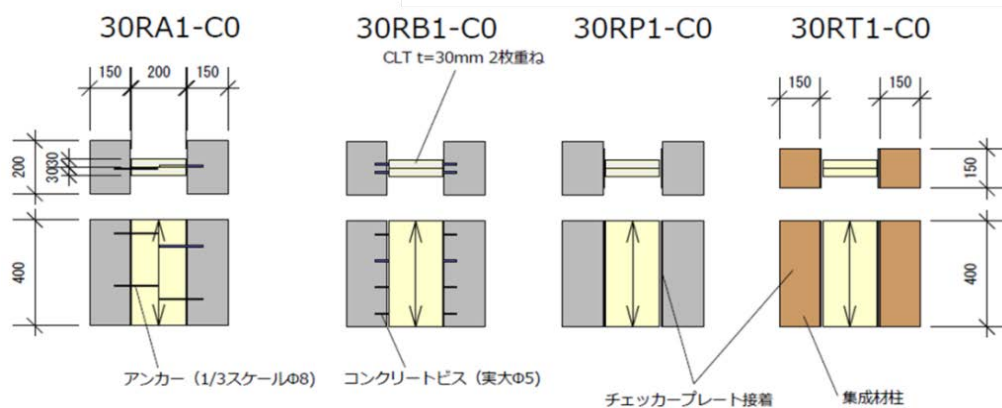


図 3.2.1-2 試験体形状 (両矢印は試験体表層ラミナの繊維方向を示す。)

表 3.2.2-1 補強金物用試験体試験体リスト

	補強金物用試験体			
試験体名	30RA1-C0	30RB1-C0	30RP1-C0	30RT1-C0
接合形態	アンカー系接合具併用		鋼板による面積増大	
柱側部材	鉄筋コンクリート 幅 150mm×高さ 400mm×奥行 200mm			集成材 幅 150mm×高さ 400mm×奥行 150mm
壁側部材	L社製 30mm厚 CLT (3層3プライ、幅矧ぎ有り)×2枚重ね 幅 200mm×高さ 400mm×厚さ 30mm			
補強金物	アンカー φ8×4本	コンクリートビ ス φ5×16本	チェッカープレ ート接着 幅 150mm×高さ 400mm×厚さ 3mm	チェッカープレ ート接着 幅 150mm×高さ 400mm×厚さ 3mm
圧縮力	手締め			
試験体数	2	1	1	1

(3) 試験体に使用した材料の特性

以下に、試験体に使用した各種材料の特性を示す。

表 3.2.2-3 CLT 材料特性

名称	製造	ヤング係数、規格値	剪断強度	せん断弾性係数
CLT90mm厚	M社製幅矧ぎ 無し	Mx60 準拠	4.33N/mm ²	544N/mm ²
CLT30mm厚	L社製幅矧ぎ 有り	ラミナ平均ヤング係数 9.1N/mm ²	5.18N/mm ²	728N/mm ²

表 3.2.2-4 コンクリート圧縮強度

コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	25.3574
--------------------------------	---------

表 3.2.2-5 鉄筋材料特性

名称	部位	降伏強度 σ_y	ヤング係数 E_s	引張強度 σ_u
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
D4-SD295	柱帯筋	361	193500	536
D6-SD295	梁あばら筋	376	202400	545
D13-SD295	柱主筋	351	190100	489
D16-SD295	梁主筋	357	190600	532

3.2.2 実験方法

実験方法を図 3.2.2-1 に示す。

図 3.2.2-1 の「荷重 P」が加力位置である。加力装置は 1000kN アクチュエータ試験機を使用し、試験体の CLT パネル部分へ単調加力を行った。荷重はロードセルにて計測した。

変位はコンクリート（または集成材）と CLT パネル間の相対変位を変位計を用いて 4 点計測した。変位はこれらの平均値を使用した。

また、試験体は鋼製の治具に挟み込んで設置し、鋼製治具間を M18 全ネジボルトを用いて引きつけることで初期軸力（各試験体の軸力は表 3.2.1-1 の軸力を参照）を与えた。ボルトの引張力（軸力）はロードセルにより計測した。

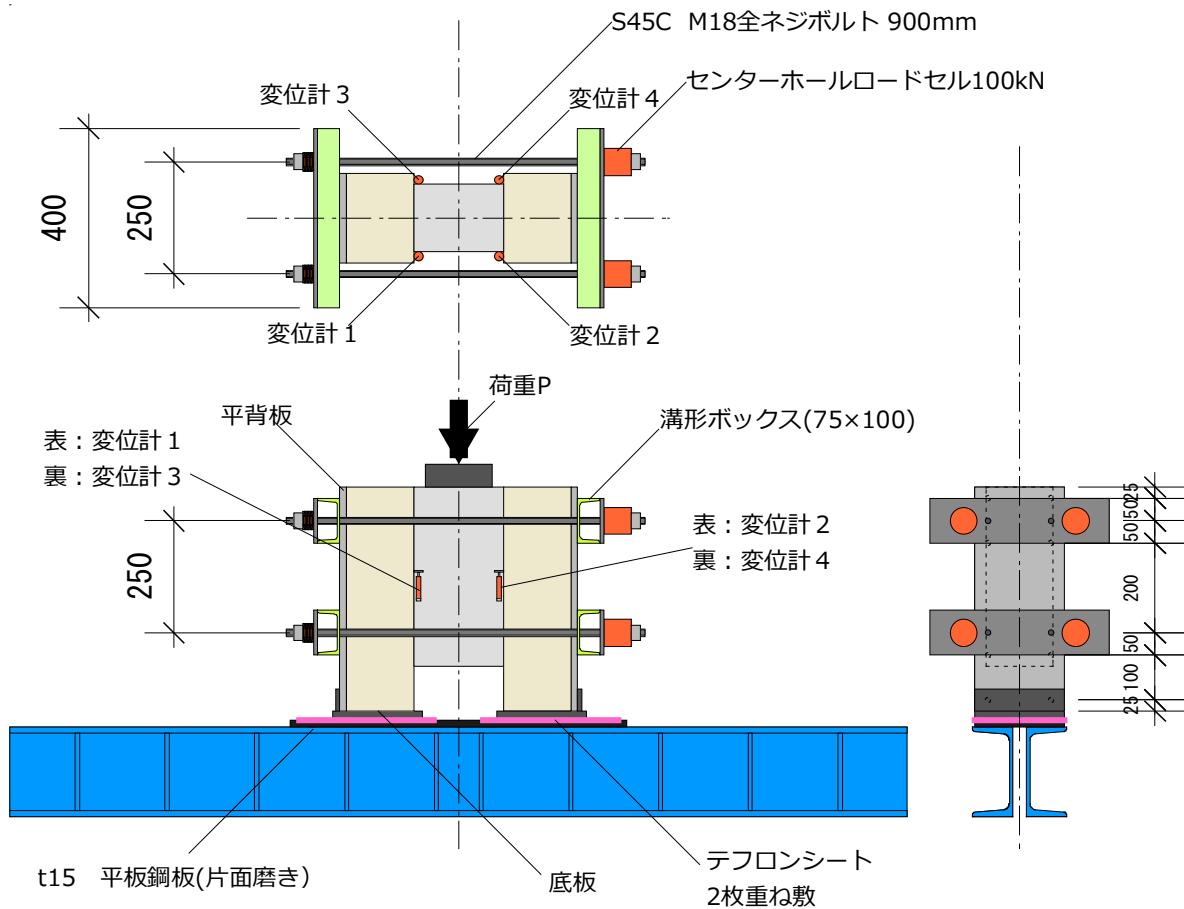


図 3.2.2-1 実験方法

3.2.3 実験結果

3.2.3.1 接着工法の試験体

本実験において、90F2-C0 試験体は実験開始直後に破損したため、計測が不可能であった。90F2-C0 試験体は CLT の圧縮強度の 2/3 である 266kN(ボルト 1 本あたり 66.6kN)を初期軸力(圧縮力)として与える条件であった。初期軸力(圧縮力)は 4 本のボルトの締め付けにより与えられた。定かでは無いが、ボルトに大きな張力を与える過程で、何らかの不釣り合いが生じ、試験体の接着面に損傷を与えていた可能性が考えられる。従って、本報告書には 90F0-C0 と 90F1-C0 の 2 体の結果を示す。

荷重-変位関係を図 3.2.3-1 に、荷重-変位関係を拡大したものを図 3.2.3-2 に示す。

軸力の無い 90F0-C0 試験体の接着剥離時耐力がおおよそ 100kN であったのに対し、軸力 133kN を与えた 90F1-C0 試験体の接着剥離時耐力はおおよそ 390kN と、軸力が存在する場合には最大荷重が 4 倍近く向上した。接着剥離後におおよそ 240kN まで急激に耐力低下を生じた。このときの耐力の低下量が接着が負担していた耐力と想定され、その値は 150kN 程度であり、90F0-C0 の耐力を 1.5 倍程度上回った。なお、90F1-C0 試験体は耐力低下後に CLT-コンクリート間の摩擦が働き、すべり変形を生じつつも 200~250kN の耐力を保持した。

90F0-C0 の接着せん断強度は 1.39N/mm^2 であり、90F1-C0 のせん断強度は 5.42N/mm^2 であった。接着剥離時の耐力低下を接着せん断強度と定義すると、90F1-C0 の接着せん断強度は 2.08N/mm^2 であった。平成 26 年度に実施した、CLT とコンクリートの接着せん断強度試験の結果では、断面平均接着せん断強度の値が平均値で 2.33N/mm^2 であった結果を得ており、今年度の結果は概ねそれに近似するものであった。一方で、軸力が無い条件の 90F0-C0 の接着せん断強度 1.39N/mm^2 という値は 2015 年度の結果と比較しても些少であり、加力時の試験体の開きモーメントによる剥離をボルトによって止めきれていないと考えられ、試験方法には課題が残れた。

90F1-C0 試験体では軸力 133kN を与えており、摩擦すべり時の耐力を平均 220kN と見なすと、その摩擦係数は 0.83 となる結果となった。

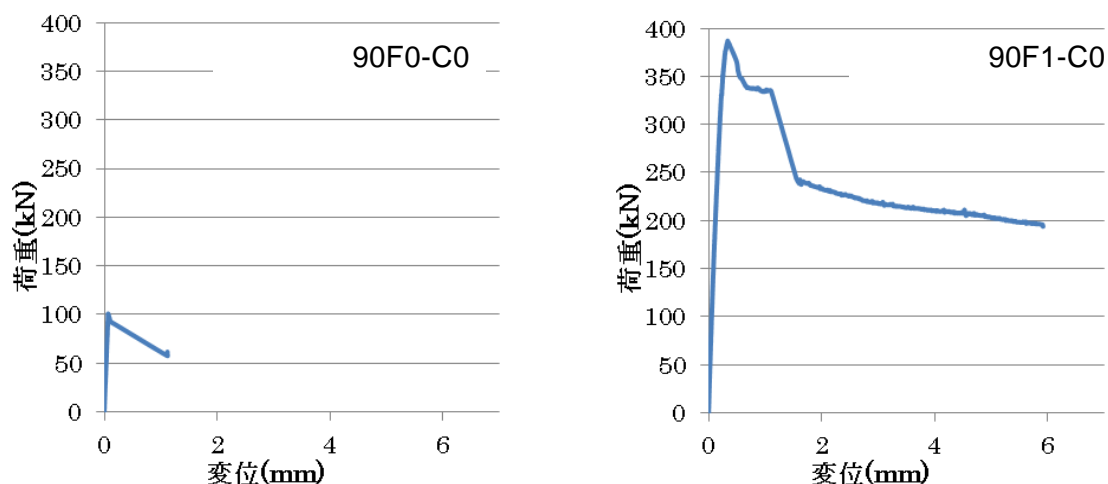


図 3.2.3-1 荷重-変位関係 (接着接合)

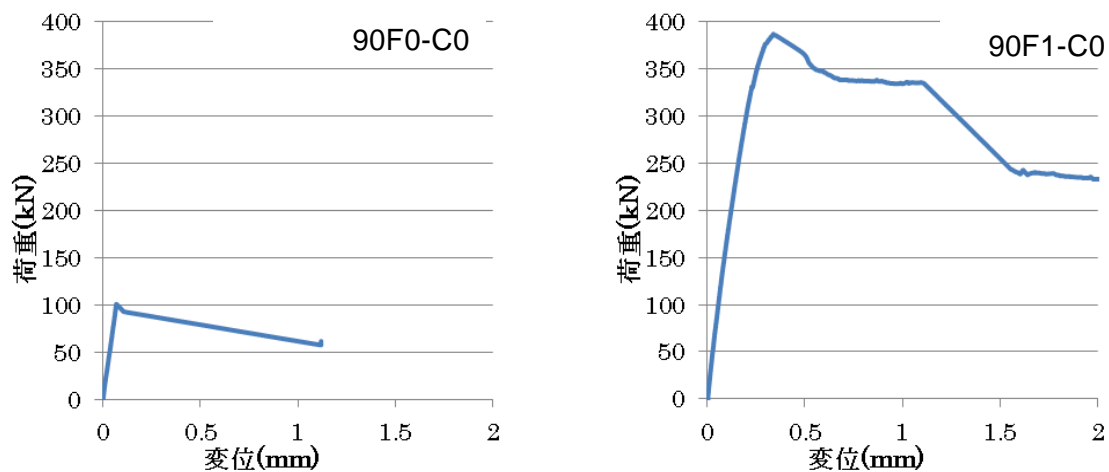


図 3.2.3-2 荷重-変位関係 変位拡大 (接着接合)

表 3.2.3-1 接着接合試験体 見かけのせん断応力度

試験体名	90F0-C0	90F1-C0	90F1-C0 (接着分)	90F2-C0
見かけのせん断 応力度 (N/mm ²)	1.39	5.42	2.08	



写真 3.2.3-1 90F0-C0 破壊性状



写真 3.2.3-2 90F1-C0 破壊性状

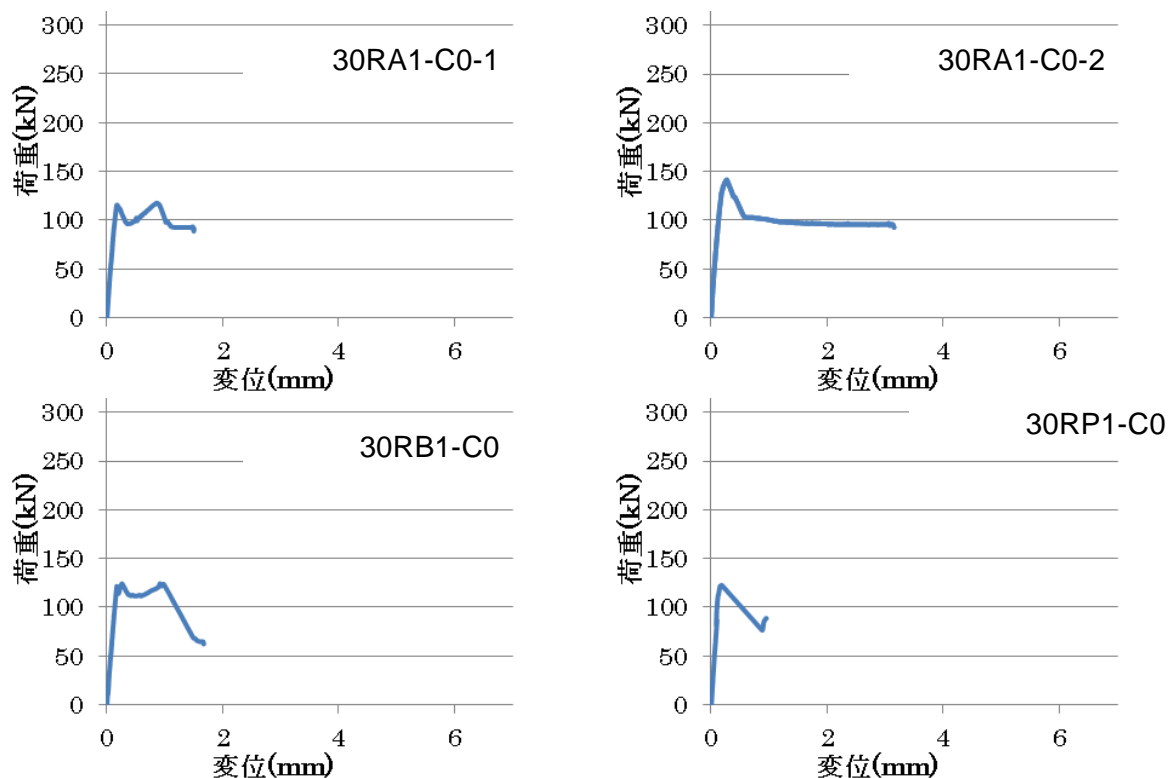
3.2.3.2 接着工法と補強金物の併用接合部の試験体

荷重-変位関係を図 3.2.3-3 に、荷重-変位関係を拡大したものを図 3.2.3-4 に示す。

まず、接着・金物を併用した 3 種類の接合仕様の試験結果について論じる。それぞれの試験条件の最大耐力はアンカー仕様の 30RA1-C0 で平均 127kN、ビス仕様の 30RB1-C0 で 125kN、プレート仕様の 30RP1-C0 で 125kN であった。そのせん断強度は、CLT 断面積で除すと、アンカー仕様平均 $2.7\text{N}/\text{mm}^2$ 、ビス仕様 $2.6\text{N}/\text{mm}^2$ 、プレート仕様 $2.6\text{N}/\text{mm}^2$ であり、いずれも 3.2.3.1 に示した無補強の条件である 90F0-C0 のせん断強度 $1.39\text{N}/\text{mm}^2$ と比較して 1.9 倍程度の向上がみられた。

一方、プレート仕様の 30RP1-C0 は本来コンクリートとプレート間の接着面積で除してせん断強度を求めるべきであり、その方法でせん断強度を求めると $1.04\text{N}/\text{mm}^2$ となり、90F0-C0 と比べても低い値となった。今回使用したチェッカープレートは 3mm 厚のものであったが、せん断力作用時に同時に圧縮軸力が作用するとプレートが面外にはらむ応力が生じ、その結果圧縮拘束の小さくなったプレート周辺部が先行して破壊に至るのでは無いかと推定された。すなわち、プレート装着により接着面積を増大する手法は完全に有効に働くものでは無いことが示唆された。一方平成 26 年度の金物補強フレーム試験体ではプレートの底面積に見合った分の接着耐力の向上が推定されており、その結果と合わせ、今後より詳細に検討する必要がある。

コンクリート-鋼板と集成材（木材）-鋼板の接着接合について、30RP1-C0 と 30RT1-C0 を比較してみると、後者が 2 倍の見かけのせん断応力度を示し、予想通り、木材-鋼板の接着面の性能は高いことが確認された。



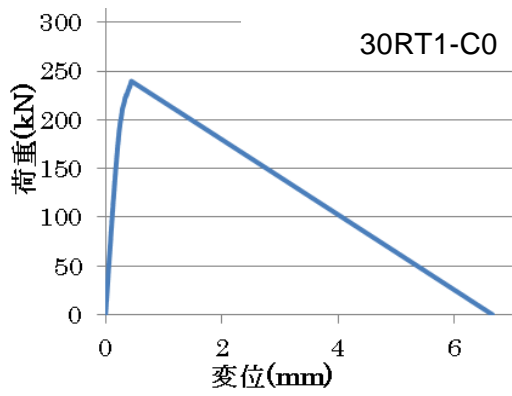


図 3.2.3-3 荷重-変位関係 (接着・金物併用接合)

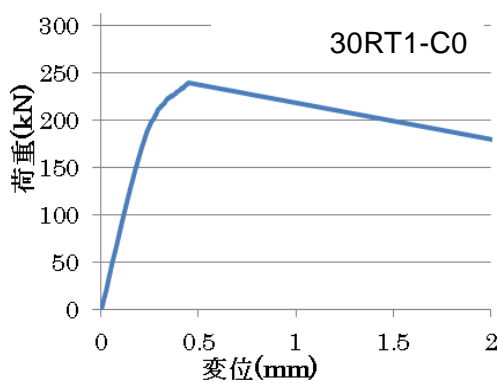
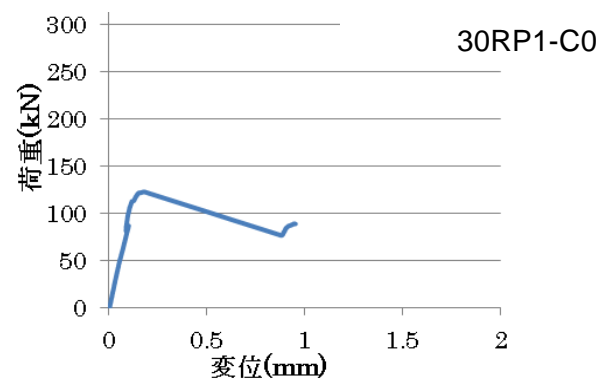
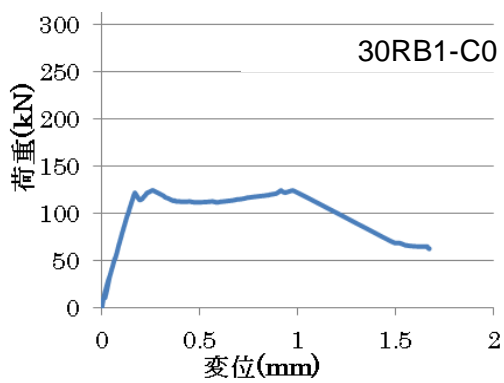
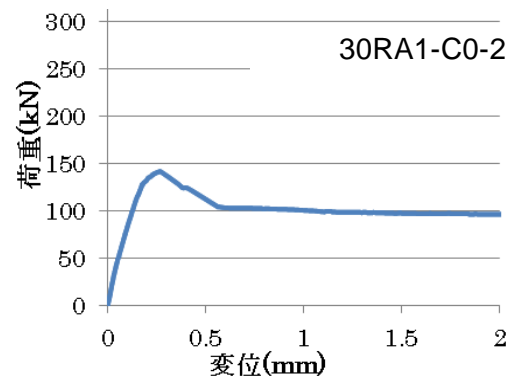
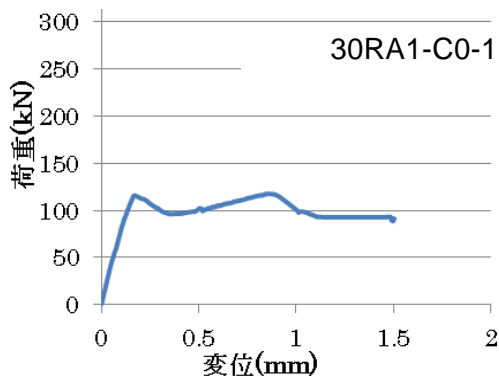


図 3.2.3-4 荷重-変位関係 変位拡大(接着・金物併用接合)

表 3.2.3-2 補強金物用試験体見かけのせん断応力度

試験体名	30RA1-C0		30RB1 -C0	30RP1 -C0		30RT1 -C0
	1	2				
見かけのせん断 応力度 (N/mm ²)	2.4	2.9	2.6	2.6 (CLT 面 積)	1.04 (プレート 面積)	5.0



写真 3.2.3-3 30RA1-C0 破壊性状



写真 3.2.3-4 30RB1-C0 破壊性状

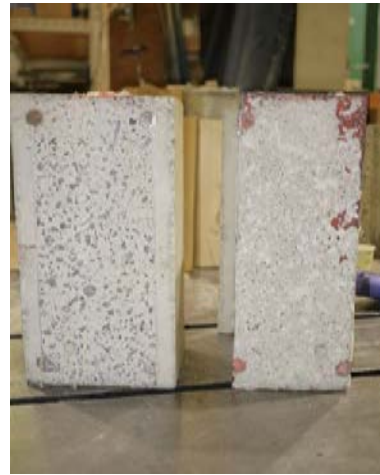


写真 3.2.3-5 30RP1-C0 破壊性状

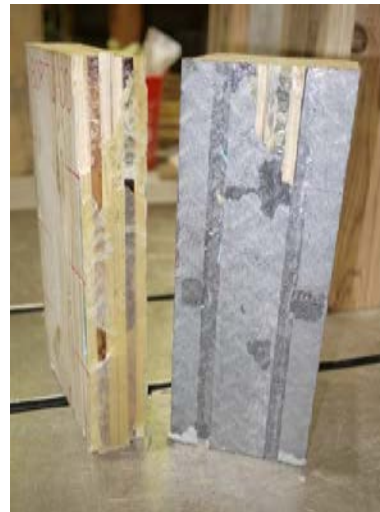


写真 3.2.3-6 30RT1-C0 破壊性状

3.3 要素実験 2 : RC-CLT の乾式接合部試験

3.3.1 試験体

本節では、2章で実施した構造実験の試験体の乾式接合部の要素実験を実施した。

この乾式接合部は、以下の2つの接合によって構成されている。

- ① 山形鋼と RC のアンカーによる接合
- ② 山形鋼と CLT の接着接合

本節では、この二つの接合方法について実験を実施した。また、それぞれ、接合部の納まり、接合具等の仕様をパラメーターとしており、詳細は以下の通りである。試験体は各仕様1体ずつとした。

表 3.3.1-1 山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体部材リスト

試験体名	L-RC-A8	L-RC-A8G	L-RC-A12
梁側部材	鉄筋コンクリート 幅 150mm×高さ 400mm×奥行 200mm		
接合具側部材	山形鋼 50mm×50mm×高さ 420mm 厚さ 6mm		
接合部	M8 全ネジあと施工接着 アンカー 8本 埋め込み深さ 80mm	M8 全ネジあと施工接着 アンカー 8本 埋め込み深さ 80mm 山形鋼面に 2 液混合型 エポキシ系接着剤	M12 全ネジあと施工接 着アンカー 8本 埋め込み深さ 120mm

表 3.3.1-2 山形鋼と CLT の接着による接合部試験体リスト

試験体名	LS50-CLT-G	LS50-CLT	LS30-CLT
壁側部材	CLT パネル 幅 200mm×高さ 420mm×厚さ 30mm		
	接着部分に深さ 6mm の 座堀り	座堀りなし	
接合具側部材	山形鋼 50mm×50mm×高さ 420mm 厚さ 6mm	山形鋼 50mm×50mm×高さ 420mm 厚さ 6mm	山形鋼 30mm×30mm×高さ 420mm 厚さ 5mm

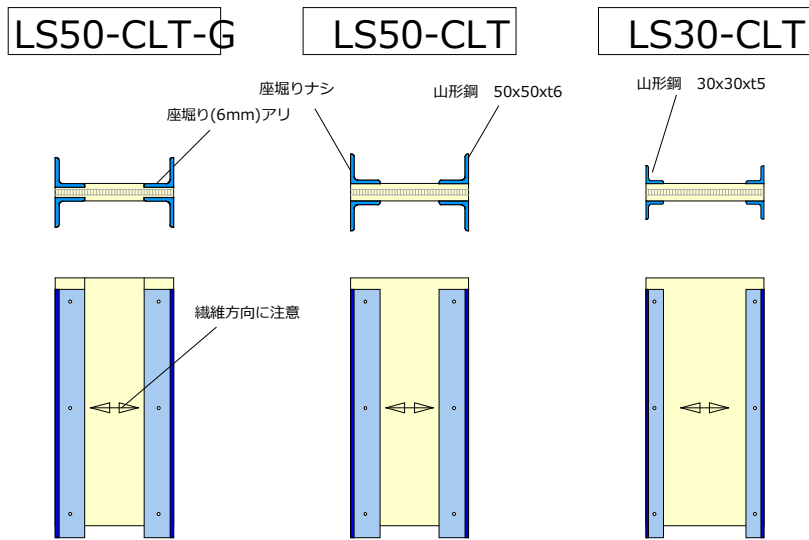
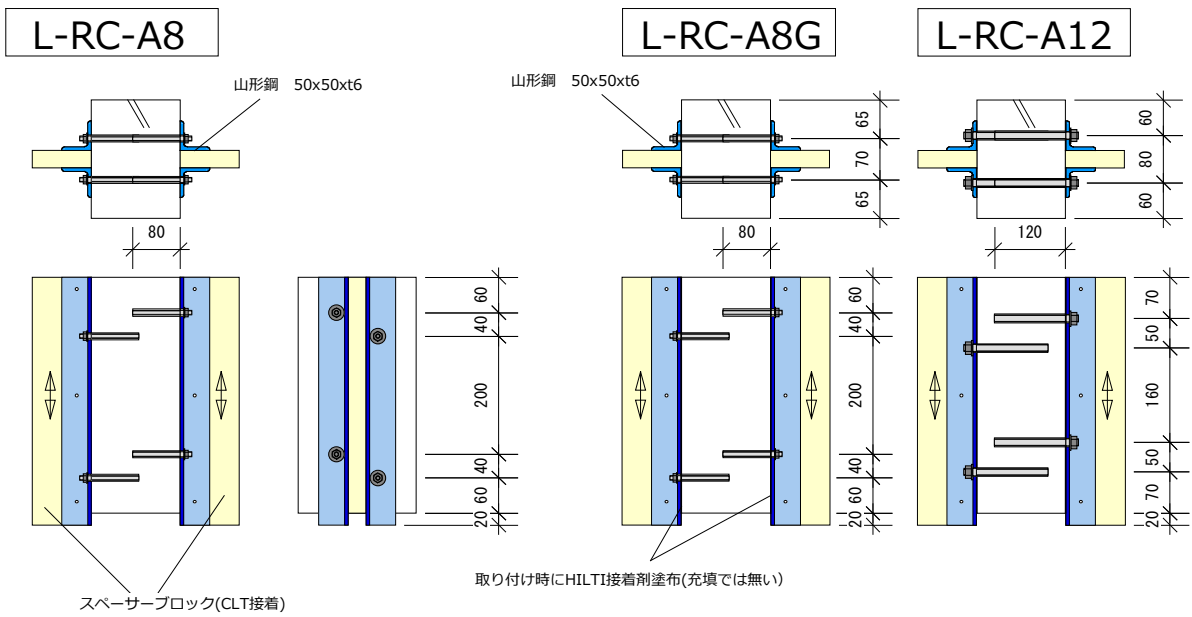


図 3.3.1-1 試験体形状

試験体に用いた、各種材料の特性は以下の通りである。

表 3.3.1-3 CLT 材料特性

名称	製造	ヤング係数、規格値	剪断強度	せん断弾性係数
CLT30mm 厚	L 社製 幅矧ぎ有り	ラミナ平均ヤング係数 9.1N/mm ²	5.18N/mm ²	728N/mm ²

表 3.3.1-4 コンクリート圧縮強度

コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	25.3574
--------------------------------	---------

表 3.3.1-5 鉄筋材料特性

名称	部位	降伏強度 σ_y	ヤング係数 E_s	引張強度 σ_u
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
D4-SD295	柱帯筋	361	193500	536
D6-SD295	梁あばら筋	376	202400	545
D13-SD295	柱主筋	351	190100	489
D16-SD295	梁主筋	357	190600	532

3.3.2 実験方法

実験方法を図 3.3.2-1、図 3.3.2-2 に示す。加力装置は 1000kN アクチュエータ試験機を使用し、単調加力を行った。荷重は 1000kN ロードセルにて計測した。

変位は、山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体では、山形鋼と RC 間の相対変位を 4 点とクロスヘッドの絶対変位を 2 点計測した。山形鋼と CLT の接着接合部試験体では、山形鋼と CLT の相対変位を 4 点と山形鋼の支持鋼板に対する相対変位を 2 点計測した。また、変位は全ての値の平均値を使用した。

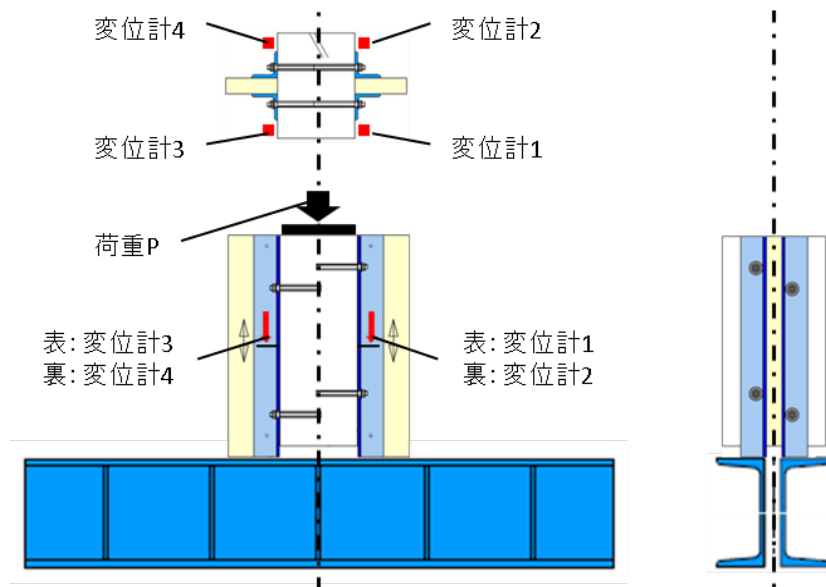


図 3.3.2-1 山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体 実験方法

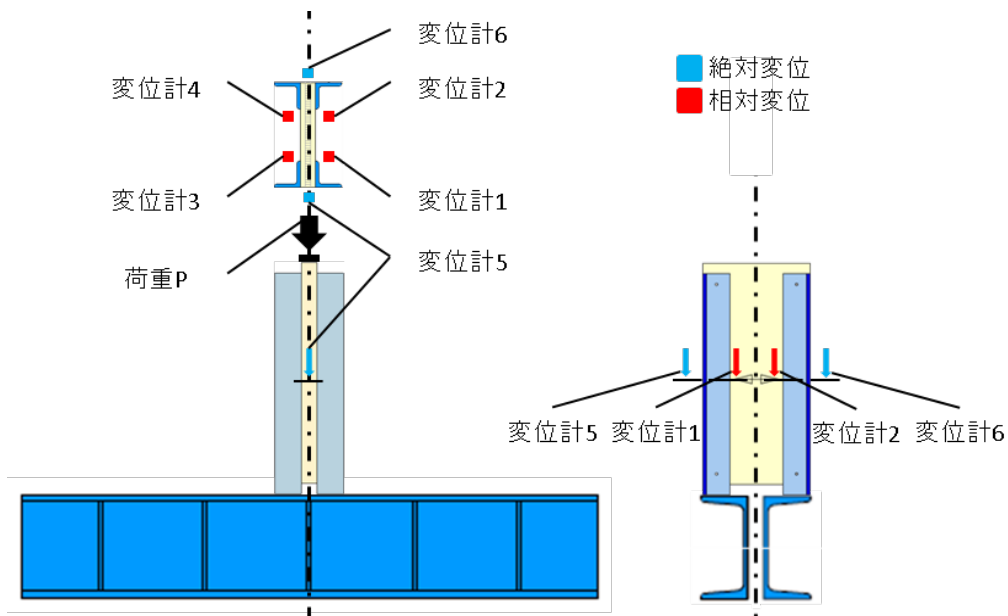


図 3.3.2-2 山形鋼と CLT の接着接合部試験体 実験方法

3.3.3 実験結果

3.3.3.1 山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体

山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体の荷重-変位関係を図 3.3.3-1 に、見かけのせん断応力を表 3.3.3-1 に示す。また、各試験体の破壊性状を写真 3.3.3-1 以降に示す。

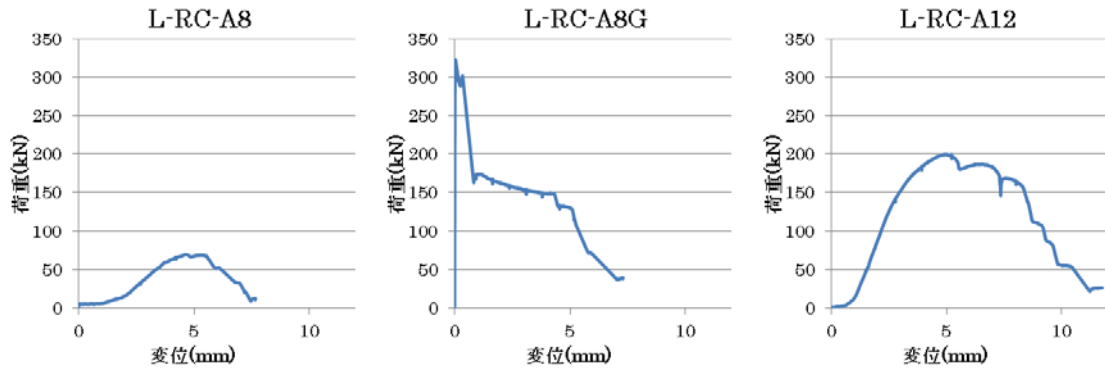


図 3.3.3-1 山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体 荷重変位関係

表 3.3.3-1 山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体 見かけのせん断応力度

試験体名	L-RC-A8	L-RC-A8G	L-RC-A12
見かけのせん断 応力度 (N/mm ²)	0.7	3.1	1.9

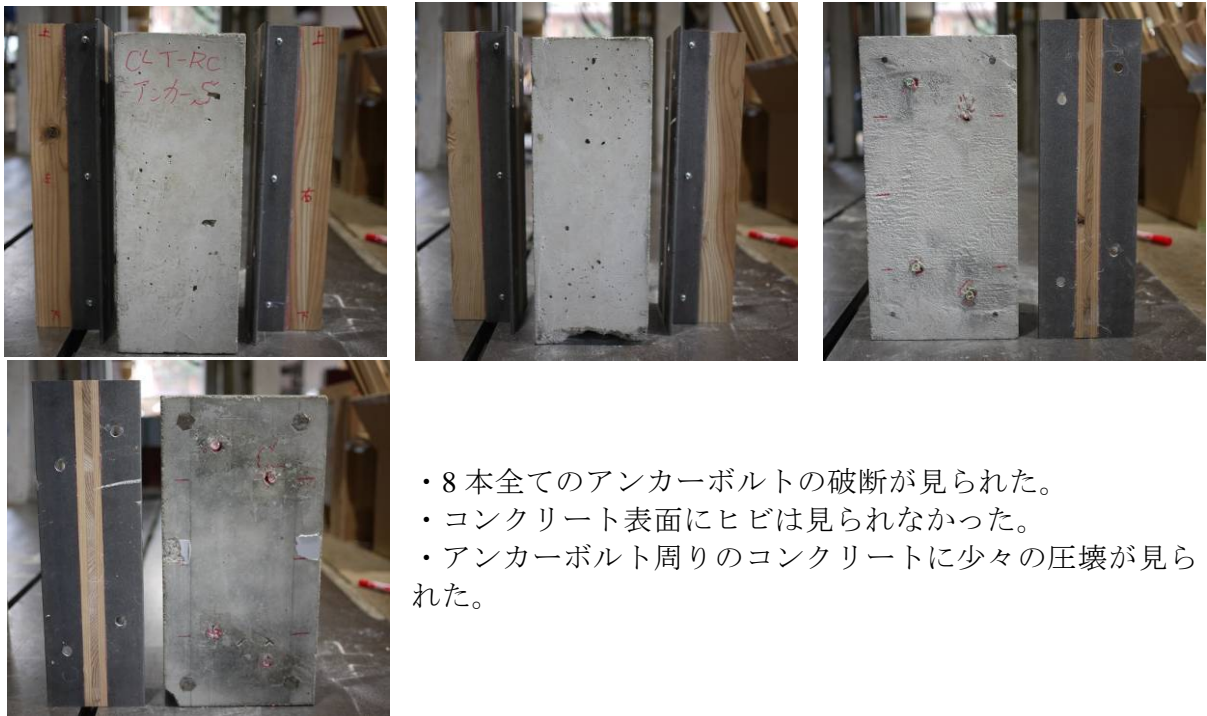


写真 3.3.3-1 L-RC-A8 破壊性状



- ・ 8 本中 6 本のアンカーボルトの破断が見られた。
- ・ コンクリート表面にヒビは見られなかった。

写真 3.3.3-2 L-RC-A8G 破壊性状



- ・ 8 本中 7 本のアンカーボルトの破断が見られた。
- ・ コンクリート表面にヒビが見られた。
- ・ アンカーボルト周りのコンクリートに圧壊が見られた。

写真 3.3.3-3 L-RC-A12 破壊性状

山形鋼と RC のアンカーによる接合部試験体については、接合仕様によって、剛性、最大荷重、見かけのせん断応力度共に大きく異なった。

L-RC-A8 に接着を併用した L-RC-A8G では、接着接合をすることで最大耐力において約 4.6 倍の向上が見られた。アンカーの径、埋め込み深さが異なった L-RC-A8 と L-RC-A12 では、最大耐力において約 2.8 倍の差が見られた。見かけのせん断応力度では、4.4 倍、2.7 倍の差であった。

接着の有無の異なる L-RC-A8 と L-RC-A8G を比較すると、接着も併用している L-RC-A8G は強度も剛性も確保できたが、アンカーのみの試験体では初期にすべりが生じている。L-RC-A8G の初期の耐力約 310kN は接着による効果と推定される。すなわち鋼板を含めた接着面積で除し、接着強度に換算すると 2.98 N/mm^2 となり、3.2.3.2 のアンカーと金物の併用試験体の結果 2.7 N/mm^2 と近似する値となった。また、3.2.3.1 の圧縮力を作用した試験体 (90F1-C0) の接着せん断強度の値 2.08 N/mm^2 と比較するとやや高い値が得られ、アンカー締め付けによって接着剥離を生じせしめない十分な圧縮力（引き寄せ力）が作用していることを示唆する結果となり、アンカーと接着併用工法の有用性が認められた。

主な破壊性状として、アンカーボルトの破断、コンクリート表層の剥離、アンカーボルト周りのコンクリートの圧壊が見られた。

3.3.3.2 山形鋼と CLT の接着接合部試験体

山形鋼と CLT の接着接合部試験体の荷重-変位関係を図 3.3.3-2 に、見かけのせん断応力を表 3.3.3-2 に示す。また、各試験体の破壊性状を写真 3.3.3-4 以降に示す。

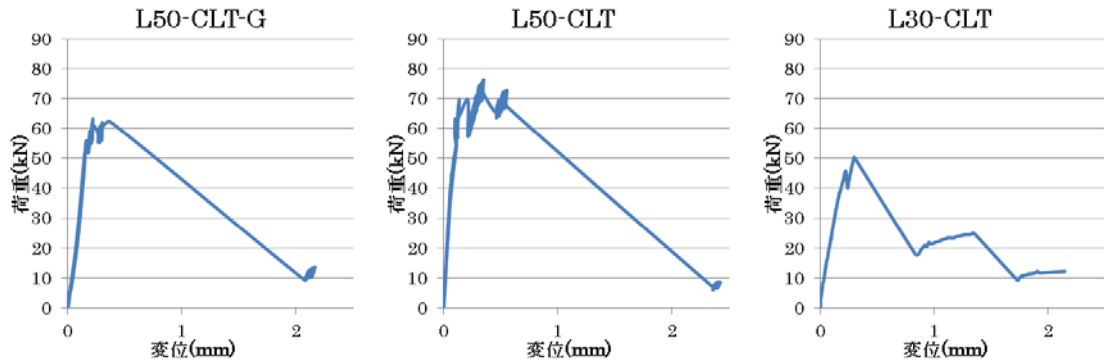


図 3.3.3-2 山形鋼と CLT の接着接合部試験体 荷重変位関係

表 3.3.3-2 山形鋼と CLT の接着接合部試験体 見かけのせん断応力度

試験体名	LS50-CLT-G	LS50-CLT	LS30-CLT
見かけのせん断 応力度 (N/mm ²)	0.8	1.0	1.0



- ・山形鋼の両端部分で木材の破壊が見られ、山形鋼の中心部分では鋼板側で接着の剥離が見られた。

写真 3.3.3-4 L50-CLT-G 破壊性状



- 山形鋼の上端部分で木材の破壊が見られたが、それ以外の大部分では鋼板側で接着の剥離が見られた。

写真 3.3.3-5 L50-CLT 破壊性状



- 試験体全面の上端部分で木材の破壊が見られ、左記以外の部分では鋼板側で接着の剥離が見られた。

写真 3.3.3-6 L30-CLT 破壊性状

山形鋼と CLT の接着接合部試験体については、接着面積を左右する山形鋼の寸法の違いによる差を L50-CLT は L30-CLT で比較すると、寸法の大きい前者の方が耐力が高く、最大耐力で約 1.5 倍の差が見られた。ただし、見かけのせん断応力度は変わらなかった。

座堀と山形鋼の座堀りの有無による差を L50-CLT-G と L50-CLT とで比較すると、座堀りの無い後の方が最大荷重および見かけのせん断応力度が大きく、1.2 倍程度の差があった。

主な破壊性状として、木材の破壊、山形鋼側で接着の剥離が見られた。

本試験体に関して、仮に接着面付近の CLT 表層のローリングシアによる破壊がクライテリアになると仮定すると、ローリングシアせん断強度 2.0N/mm^2 程度の値が得られる事を予想していたが、実際に実験値としては見かけのせん断応力度は LS50-CLT-G で 0.8N/mm^2 、LS50-CLT で 1.0N/mm^2 、LS30-CLT で 1.0N/mm^2 といずれの試験体も想定約半分程度と小さな接着耐力であった。実際の破壊性状は予想されたローリングシアではなく、鋼材表面における接着破壊が生じた。鋼板を CLT に止めつける際にスクリーによって圧縮力を与えたが、それが満足で無く、試験体作製時における接着がやや不良であった可能性が考えられた。2 章においてフレーム試験体においては、施工時に十分配慮した圧縮力を与えて接着を行ったため、想定通りのローリングシアに至る接着強度が得られたものと考えられた。

第4章 まとめ

耐震補強のみならず新築時にも対応できる CLT パネルを用いた現場乾式接合方法を検討し、その補強効果を検証した(2章)。その結果、既往の CLT を用いた接着工法と比較すると、より高い最大耐力を発揮することができた。本事業で得られた性能は、剛性、耐力共に耐震補強としては十分な可能性を示すことができた。ただし、新築時に要求される性能を考慮すると、初期剛性においてはまだ改善の余地があることがわかった。

剛性を上げるためには、面材の厚さを厚くすることが一つの方法ではあるが、その場合は、耐力が必要以上に高くなり、経済的な設計とはならない。今後は、厚さに頼らない方法でのパネル剛性を上げる検討が必要である。

また、今回検討した仕様は、施工性という面では課題がある。今後は、新築に適用することを想定して、アンカーボルト以外の方法(鋼板等)での RC への固定方法を検討することで施工性の向上は可能であると考ええる。

CLT を RC 造、S 造の他の構造の耐力要素として活用するためにキーとなるのは、接合部である。これまでに、1/3 模型のフレーム実験を中心に実施してきたが、これらの成果をベースに、接合部の性能を要素試験で確認し、フレームの補強効果を予測できるようになることが望ましい。

本編では、接合部の要素試験方法を検討し、これまでに実施してきた接着接合、その改良案、今回提案した現場乾式接合方法について検証した(3章)。

接着接合について、軸力をパラメーターとした試験では、軸力を付加することで摩擦力が上昇し、明らかなせん断応力の上昇が確認された。このことから、接着の剥離後、パネルの回転などにより生じる軸力によって発生する摩擦力が、せん断力の負担を可能とすることがわかった。

接着工法の改良については、補強効果がコンクリート面での接着強度に依存することが明らかなことから、接着面へのコンクリートビスの埋め込みやチェッカープレートの接着などを試みたが、わずかな性能の向上が見られるにとどまった。最も効果があったのは、接着面積を拡大させる方法であった。

現場乾式接合方法についての試験では、コンクリートと山形鋼の接合部と CLT パネルと山形鋼の接着について検証した。その結果、コンクリートと山形鋼の接合部では、アンカーボルトのみと比較すると接着接合を併用することで約 4.6 倍の上昇がみられた。アンカーボルトの径を変えて比較したところ、M12 は M8 と比較して約 2.8 倍と高い性能を示した。CLT パネルと山形鋼の接着について、接着面積の比較をしたところ、接着面積が増えることで接着性能が下がるようなことはみられず、接着面積の増加分の性能向上が確認された。また、納まりの面から検討した座掘りについては影響がないことがわかった。