

平成 30 年度 林野庁補助事業 木材産業・木造建築活性化対策
CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着事業（新たな製品・技術の開発）

「鋼構造オフィスビル床の CLT 化」

柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建物に関する、鉄骨と CLT 床の新接合方法の開発、
CLT 床相互の新接合方法の開発、および新耐火被覆方法の開発

研究成果報告書

平成 31 年 3 月

山佐木材株式会社

全体構成

【Ⅰ】はじめに

1. 主旨・背景
2. 事業の概要
3. 事業計画
4. 事業推進組織

【Ⅱ】構造編

目次

1. 序論
2. LSB 接合による鉄骨梁と CLT 床の押し抜きせん断実験
 - 2.1 実験計画
 - 2.1.1 実験概要
 - 2.1.2 試験体
 - 2.1.3 載荷方法
 - 2.2 実験結果
 - 2.2.1 荷重－変形関係
 - 2.2.2 考察
3. 円形鋼管を使用したシアキー接合による鉄骨梁と CLT 床の押し抜きせん断実験
 - 3.1 実験計画
 - 3.1.1 実験概要
 - 3.1.2 試験体
 - 3.1.3 載荷方法
 - 3.2 実験結果
4. コッター接着剤接合による CLT 床相互の押し抜きせん断実験
 - 4.1 実験計画
 - 4.1.1 実験概要
 - 4.1.2 試験体
 - 4.1.3 載荷方法
 - 4.2 実験結果
 - 4.2.1 荷重－変形関係
 - 4.2.2 考察
5. LSB 接合による CLT 床相互の押し抜きせん断実験
 - 5.1 実験計画
 - 5.1.1 実験概要
 - 5.1.2 試験体

- 5.1.3 荷重方法
- 5.2 実験結果
 - 5.2.1 荷重－変形関係
 - 5.2.2 考察

- 6. CLT床相互の四点曲げ荷重実験
 - 6.1 実験計画
 - 6.1.1 実験概要
 - 6.1.2 試験体
 - 6.1.3 荷重方法
 - 6.2 実験結果
 - 6.2.1 荷重－たわみ関係
 - 6.2.2 ひずみ－たわみ関係
 - 6.2.3 考察

- 7. 結論

【Ⅲ】防耐火編

目次

- 1. 試験の目的

- 2. 今回開発した耐火被覆方式
 - 2.1 従来の工法
 - 2.2 今回新たに開発した工法

- 3. 性能確認試験
 - 3.1 方法1（吉野石膏提案の方法）
 - (1) 試験体概要
 - (2) 試験体詳細
 - (3) 試験結果
 - (4) 試験体の外観観察結果
 - (5) 判定

 - 3.2 方法2（旭化成建材提案の方法）
 - (1) 試験体概要
 - (2) 試験体詳細
 - (3) 試験結果
 - (4) 試験体の外観観察結果
 - (5) 判定

【Ⅳ】今年度の成果と今後の課題

【1】はじめに

1. 主旨・背景

戦後植林された大量の人工林が活用期を迎える一方、思ったように木材利用が進んでいないという現実がある。我々は、この問題の克服のためには、新しい木材需要としてビル型の中大規模建物（超高層オフィス等）への木材の積極活用を進めることを提案してきた。しかし実際には、我が国は世界的に見ても有数の地震国であり、大型建物の木造化を図ることは、決して容易な事ではない。そのために現実的な対応策として、柱梁は従来通り鉄骨構造とし、床のみ CLT 構造とする、混合構造建物の開発を行ってきた。

今年3月には、我々が手掛けてきた、「柱梁鉄骨造・床 CLT 構造建物」の第一号物件である、松尾建設本店ビルが佐賀市において竣工する運びとなった。そのような中で、我々の提案する工法のメリット・デメリットが明らかになりつつある。まずメリットとしては、工期の短縮の可能性がある程度、見えてきたことである。型枠大工や鉄筋工等の熟練工の介在が不可欠な RC 床とは異なり、CLT 床工法は、養生期間が必要なコンクリート打設を要しないという点でも、工期的には明らかにメリットがある。当初 CLT と鉄骨の加工精度等の関係から、施工効率の点で懸念された鉄骨梁と CLT 床の接合方法についても、松尾建設の現場の工夫によりスタッドの後打ち工法が開発されて、比較的容易に施工可能であることが実証された。

一方デメリットとしては、鉄骨梁と CLT 床の接合で用いるエポキシ樹脂が高価な材料であることから、コスト面での問題が懸念される。また、CLT 床の耐火性能確保のために必要な耐火被覆材の取り付けが、工期・コストに及ぼす影響が懸念される。特に床下面の耐火被覆材の取り付け手間の問題は、本工法の新たな懸念材料と言える。

木材需要を喚起し、新たな木材市場を創設して行くためには、これらの懸念材料の克服が是非とも不可欠である。そのために、本工法の抱える問題点を明らかにし、工法の改良を行うことにより問題の解決を図ることを目的として、本事業を提案する。具体的には、「柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建物に関する、鉄骨と CLT 床の新接合方法の開発、CLT 床相互の新接合方法の開発、および新耐火被覆方法の開発」である。本事業が採択され、CLT の鉄骨造建物における部分的利用に関する新たな技術が開発されることにより、我が国の木材需要の活性化に繋がることを、心より祈念するものである。

2. 事業の概要

本事業は、以下の3項目よりなる。

a) 柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建物に関する鉄骨と CLT 床の新接合方法の開発

・これまでの工法

CLT 床に空けた穴に頭なしスタッドを挿し込み、穴の空隙にエポキシ樹脂充填することにより鉄骨梁と CLT 床を接合する方法（図1 参照）

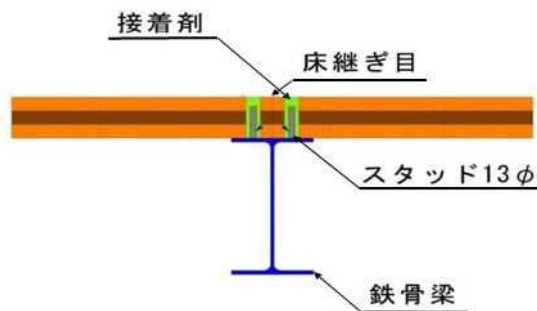


図1) 現状における鉄骨梁と CLT 床の接合方法

・今回新たに開発する工法

CLT 床下面にあらかじめ雌ネジ加工を施した LSB (ラグスクリューボルト) をセットしておき、穴開け加工を施した鉄骨梁上フランジ下側よりボルトを挿入・緊結することにより、鉄骨梁と CLT 床の接合を行う方法。併せて、鉄骨梁と CLT 床のより確実な結合を図るため、シアキーの活用も検討する。(図2 参照)

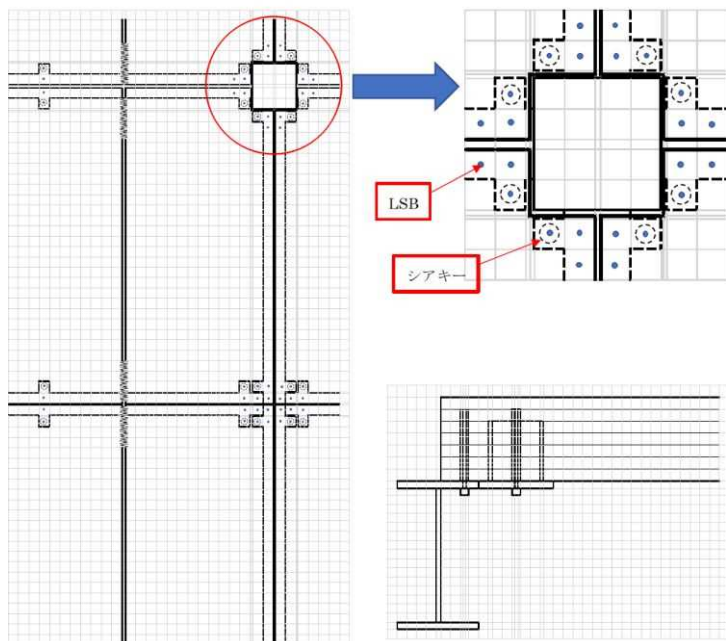


図2) 今回新たに開発する鉄骨梁と CLT 床の接合方法

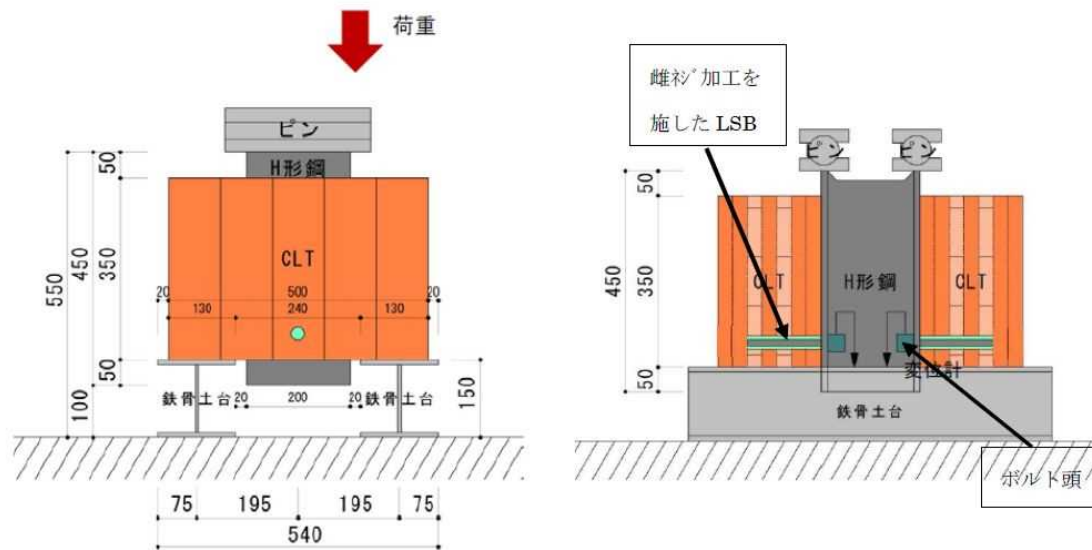


図2-1) LSBによる鉄骨梁とCLT床の接合の実験イメージ

・今回の工法の改善点

比較的高価な材料であるエポキシ樹脂に代えて、標準化を図ることにより大量生産を可能とした安価な LSB を開発・活用することにより、接合部のコストダウンを図る。

b) 柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建物に関する CLT 床相互の新接合方法の開発

・これまでの工法

CLT 床上部表層にスプライン処理を施すことにより、床相互の結合を図る方法。本工法は、床歩行振動の抑制等にはある程度効果が期待できるが、剛床確保の観点からは、効果は期待できなかった。

・今回新たに開発する工法

CLT 床の物理的な結合強度を高めることにより、床相互の緊結を図る。具体的には、以下の方法が考えられる。

方法1) 床の木端面にコッター等を設けることにより、床相互の結合効果を高める方法
(図3参照)

方法2) LSB と鉄板を介して、床相互を結合する方法 (図4参照)

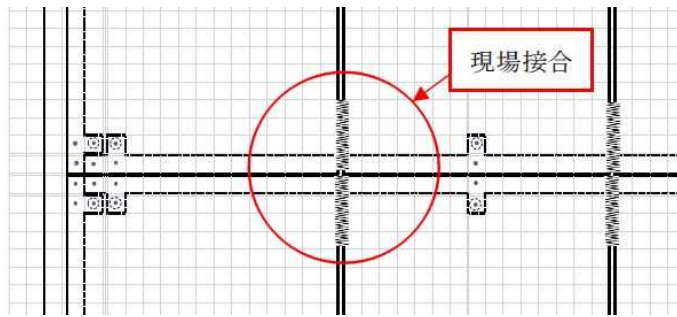


図3) 今回新たに開発する CLT 床相互の接合方法

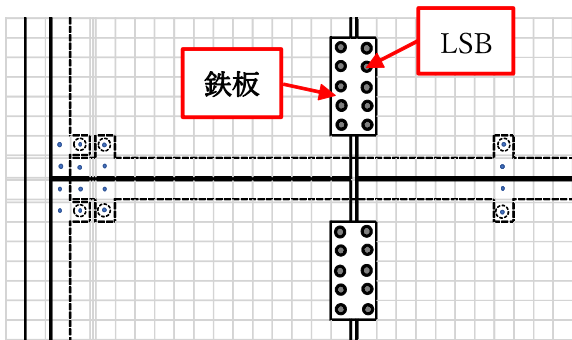


図4) LSB と鉄板を介して床相互を結合する方法

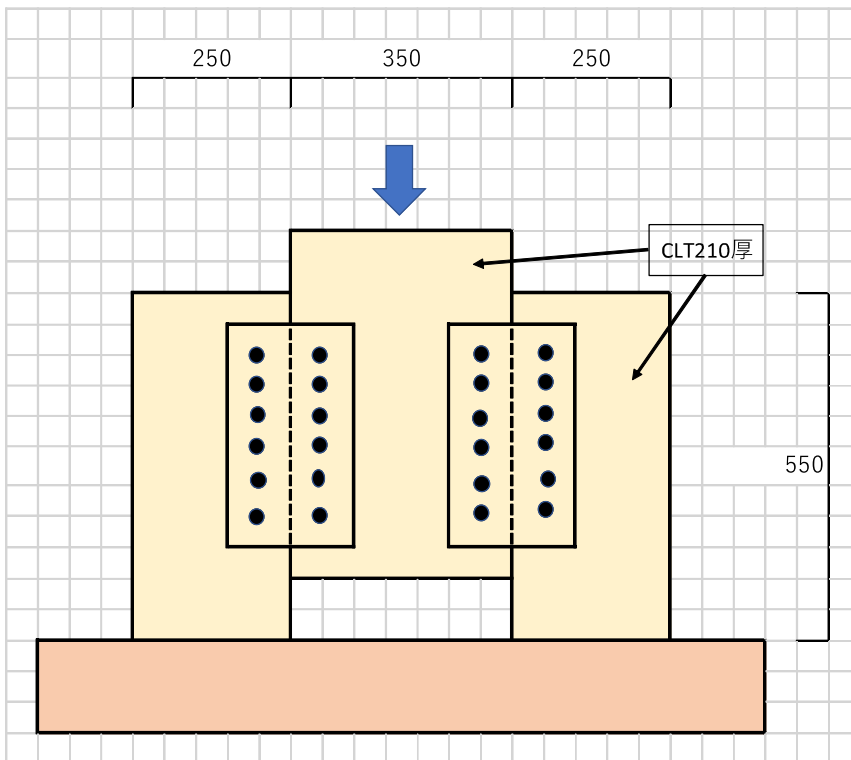


図4-1) LSB と鉄板を介して床相互を結合する方法の実験イメージ (押し抜き実験)

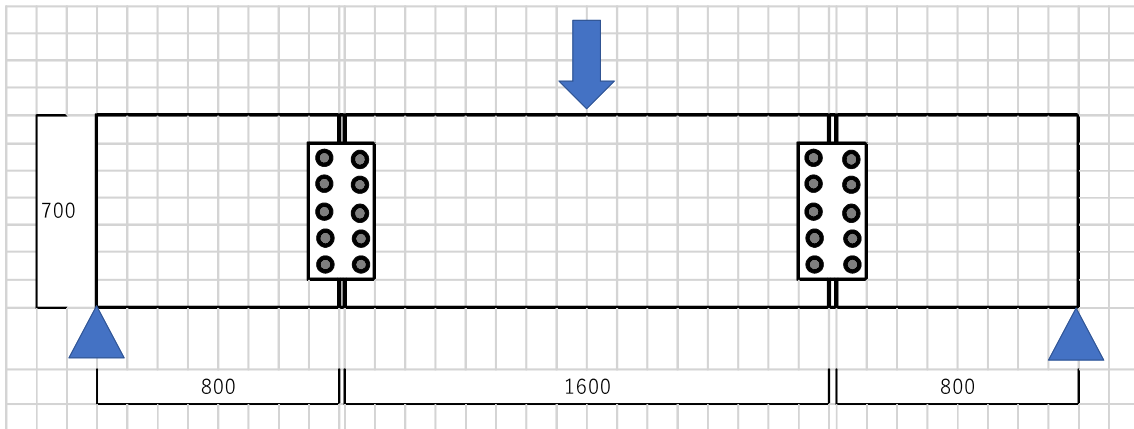


図4-2) LSBと鉄板を介して床相互を結合する方法の実験イメージ(曲げ実験)

・今回の工法の改善点

CLT床相互の結合が確実に行えるようになれば、鉄骨梁とCLT床を接合するLSB等の本数の削減も可能となり、総体的な施工コストの削減に繋がる。

c) 柱梁鉄骨造・床CLT構造の建物に関する新耐火被覆方法の開発

・これまでの工法

施工現場において、あらかじめ定められた耐火被覆材料を、熱の侵入を抑制できるように適宜目地をずらしながら貼付する方法。特に下面の耐火被覆材の貼付について、施工手間の問題が懸念された。(図5参照)

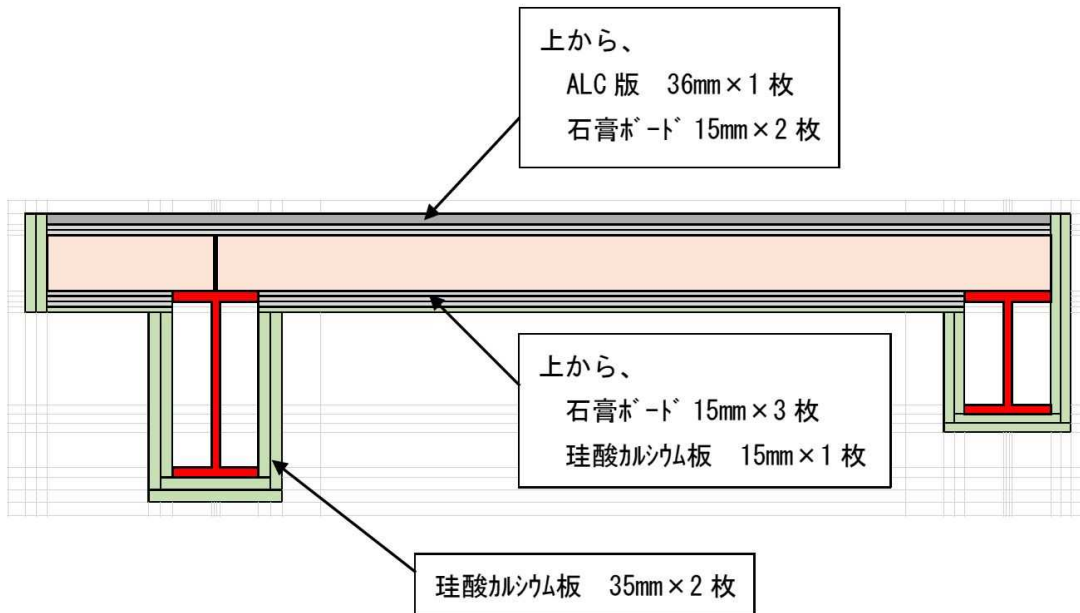


図5) 従来の耐火被覆方式

- ・今回新たに開発する工法

下面の耐火被覆材については、CLT の加工工場においてあらかじめ貼付することにより、施工現場作業の手間の削減を図る。この場合、多層に貼付した耐火被覆材の目地位置が一致することから、熱の侵入が懸念される。熱の侵入阻止する方法として、以下の2つの方法が考えられる。

方法1) 目地位置に充填剤を注入することにより、熱の侵入を防ぐ方法。(図6参照)

方法2) 耐火被覆材の一部に、熱膨張性のある材料を使用し、熱の侵入を防ぐ方法。

(図7参照)

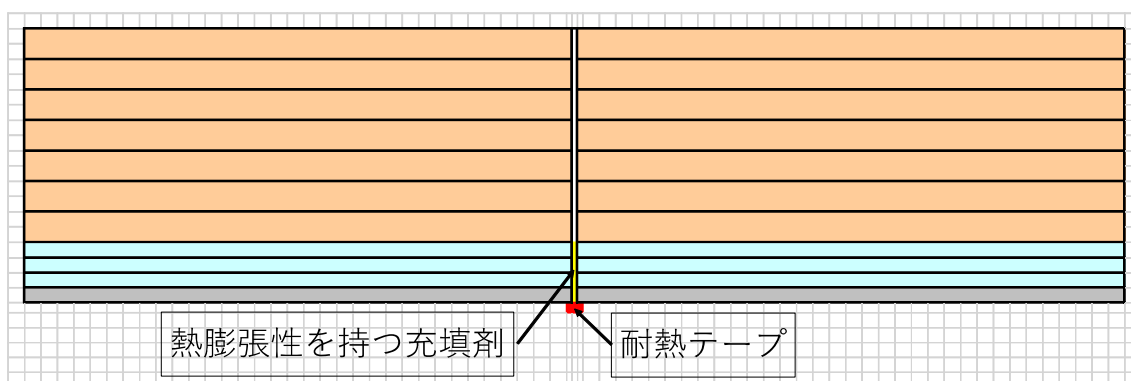


図6) 目地に充填剤および耐熱テープ等を使用し熱の侵入を防ぐ方法

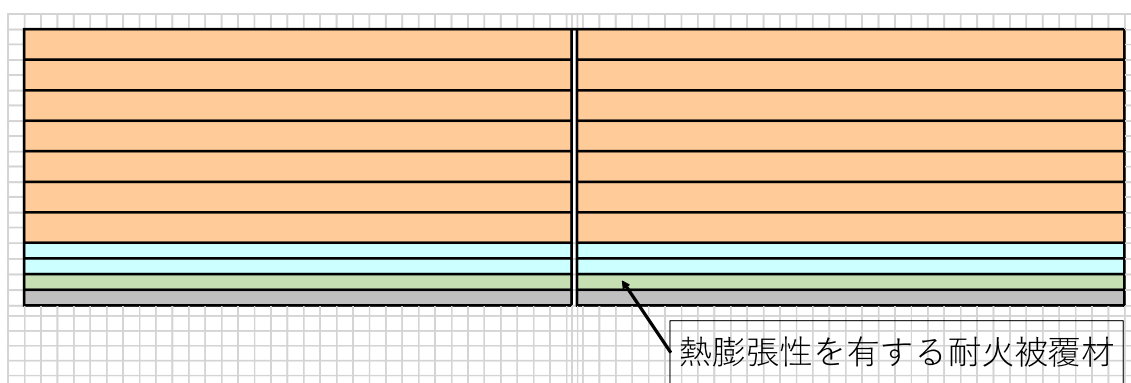


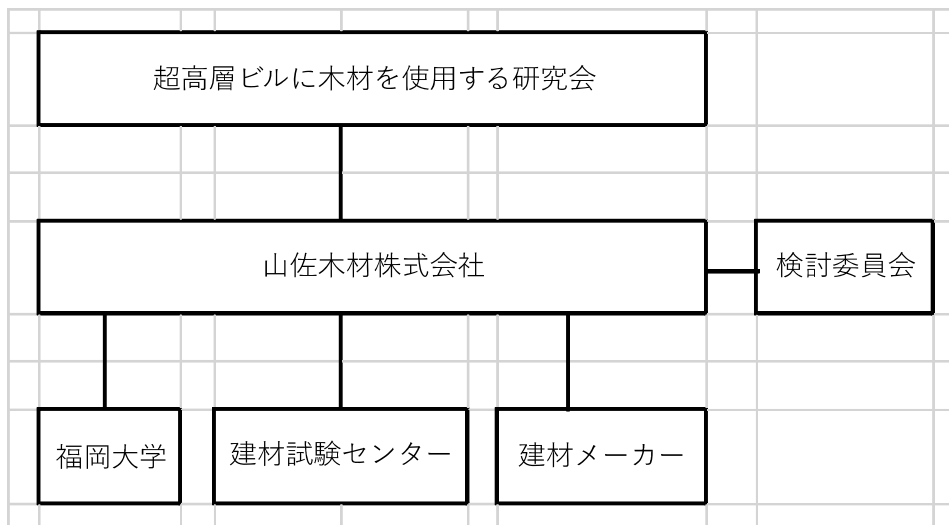
図7) 熱膨張性のある耐火被覆材料を使用し熱の侵入を防ぐ方法

- ・今回の工法の改善点

今回の試みが可能となれば、施工現場における手間の大幅な削減となり、総体的なコスト削減に繋がることが期待される。

4. 事業推進組織

今回応募する補助事業の推進組織は以下のような構成とする。



各組織の役割

超高層ビルに木材を使用する研究会： 事業計画の立案および指導・監督

山佐木材株式会社： 事業の推進責任者

検討委員会： 事業計画および事業の推進に対する評価・助言

福岡大学： 構造実験の実施

建材試験センター： 耐火実験の実施

建材メーカー： 接合部材・耐火被覆材等の試作、実験資材提供

検討委員会の構成

分類	委員名	所属	専門
事業者	佐々木幸久	山佐木材（株）	
	稲田達夫	同上	
	塩崎征男	同上	
	村田忠	同上	
学識経験者	五十田博	京大大学生存圏研究所	木質構造
	槌本敬大	建築研究所材料研究グループ	木質材料
	中島史郎	宇都宮大学地域デザイン科学部	木質材料
	倉富洋	福岡大学工学部建築学科	構造実験
	安井昇	桜設計集団	耐火構造
	上川大輔	森林総合研究所木材保存研究室	耐火構造
民間団体	海老澤渉	（株）三菱地所設計	設計監理
	岡部 純	（株）トーネジ	LSB開発
	山崎心	松尾建設（株）（（株）インフォメディア）	設計施工
	島崎潤悦	（株）吉野石膏DDセンター	耐火被覆
	早乙女一美	旭化成建材（株）	耐火被覆

（3）事業効果

- ・従来工法では、施工コストが総工事費の10～15%程度アップすることが指摘されてきた。本工法を開発することにより、このコストのアップ分を半減させ、5～7.5%程度に抑制することを目指す。コストアップをこの程度まで抑制できれば、工期短縮効果等を考慮することにより、RC床工法等に対しても十分な競争力を得ることができると想定される。

【Ⅱ】構造編

【目次】

1. 序論	1
2. LSB接合による鉄骨梁とCLT床の押し抜きせん断実験	
2.1 実験計画	
2.1.1 実験概要	2
2.1.2 試験体	2
2.1.3 載荷方法	8
2.2 実験結果	
2.2.1 荷重－変形関係	9
2.2.2 考察	33
3. 円形鋼管を使用したシアキー接合による鉄骨梁とCLT床の押し抜きせん断実験	
3.1 実験計画	
3.1.1 実験概要	40
3.1.2 試験体	40
3.1.3 載荷方法	42
3.2 実験結果	43
4. コッター接着剤接合によるCLT床相互の押し抜きせん断実験	
4.1 実験計画	
4.1.1 実験概要	51
4.1.2 試験体	51
4.1.3 載荷方法	55
4.2 実験結果	
4.2.1 荷重－変形関係	56
4.2.2 考察	69
5. LSB接合によるCLT床相互の押し抜きせん断実験	
5.1 実験計画	
5.1.1 実験概要	70
5.1.2 試験体	70
5.1.3 載荷方法	75
5.2 実験結果	
5.2.1 荷重－変形関係	76
5.2.2 考察	93
6. CLT床相互の四点曲げ載荷実験	
6.1 実験計画	
6.1.1 実験概要	95
6.1.2 試験体	95

6.1.3 载荷方法	.....	100
6.2 実験結果		
6.2.1 荷重－たわみ関係	.....	103
6.2.2 ひずみ－たわみ関係	.....	115
6.2.3 考察	.....	123
7. 結論	.....	124
謝辞・参考文献	.....	125

1. 序論

柱梁鉄骨造の床に、木質材料であるクロス・ラミネイティド・ティンバー（以下、CLTと略記）を使用するにあたり、構造性能として明確にしておくべき課題は、鉄骨梁との接合方法と床相互間における接合方法である。これまでの鉄骨梁とCLT床との接合方法は、鉄骨フランジに溶接した頭無しスタッドボルトの箇所に、貫通孔を設けたCLT床を落とし込み、隙間をエポキシ系充填剤で一体化する方法を採用している。既往の実験により、上述した接合方法で鉄骨梁とCLT床間に発生するせん断力を伝達でき、かつ鉄骨梁とCLT床が一体となって挙動する合成梁効果が期待できることを明らかとした¹⁾³⁾。また、床相互の接合方法には、表層スプライン式接合やクロスビス接合が提案されている。これらの接合方法について挙動を調べるために押し抜きせん断実験を実施したところ、地震力を伝達できるほどの接合強度を有していないことを示している⁴⁾⁵⁾。

まず、鉄骨梁とCLT床接合において概略説明する。この接合方法における課題は、エポキシ系接着剤がやや高価であるためにコスト高になることと、鉄筋コンクリートスラブ（以下、RCスラブと略記）におけるスタッドボルトとの接合と比較して一本当たりのせん断耐力が小さくなるため、場所によっては多量のスタッドボルトを配置する必要があることである。こうした課題において、本実験では端部をメネジ加工したラグスクリーボルト（以下、LSBを略記）と高力ボルトを使用した接合方法を提案する。本接合方法の利点は、エポキシ系接着剤を使用しないことによる低コスト化と接着剤の養生期間が不要になることである。第2章では、LSBを使用した本接合方法における押し抜きせん断実験を実施し、LSB一本当たりのせん断耐力を明らかとするとともに、最終破壊に至るまでの挙動について考察する。併せて第3章では、鉄骨梁とCLT床のより確実な応力伝達を図るため、円形鋼管をシアキーとした接合方法についても検討する。

次に、CLT床相互における接合について記載する。これまで床相互は表層スプライン式接合にて床同士を接合していた。しかしながら、この接合方法では地震力を伝達できるほどの接合強度は有しておらず、設計において地震力に伴うせん断力は鉄骨梁とCLT床でのスタッドボルトで応力伝達が行われていた。CLT床相互の接合を緊結化し、例えば二枚のCLT板を一枚物のCLTとしてみなすことができれば、設計上の利点も多く存在することになる。よって、本実験では、CLT床相互の接合方法に着目し、上述したLSBを使用した接合方法と、木口面をコッター加工して接着剤にて接合した方法を考案した。本接合方法における構造性能を検討するために、第4章ではコッター接着接合による押し抜きせん断実験について、第5章ではLSB接合による押し抜きせん断実験について考察する。また、これらの接合方法において、四点曲げ載荷実験を実施したため、本結果について第6章で述べる。

2. ラグスクリーボルトを用いた鉄骨梁とCLT床のせん断押し抜き実験

2.1 実験計画

2.1.1 実験概要

本章では、ラグスクリーボルト（以下、LSBと略記）と高力ボルトを用いてクロス・ラミネイティド・ティンバー（以下、CLTと略記）を使用した木質床と鉄骨梁を接合する際の、接合部におけるせん断性能について実験的に検討することを目的とする。接合方法は、工場にてLSBを予めCLTに埋め込み、鉄骨梁上フランジにはLSBの位置と重なるように孔を開けておき、現場にてCLTと鉄骨梁を高力ボルトを用いて緊結する方法である。本接合方法において肝要な点は、高力ボルトが滑らずにCLTに埋め込まれたLSBの曲げ抵抗でせん断強度を発現できるかである。そこで、本接合方法によるせん断力の伝達性能を調べるため、押し抜き実験を実施した。

2.1.2 試験体

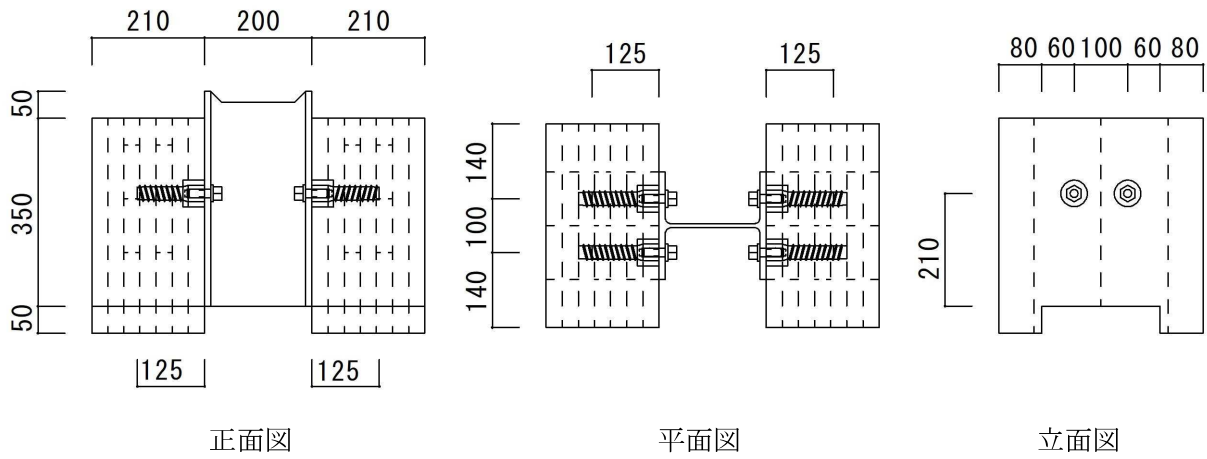
試験体図を図2.1に、試験体一覧を表2.1に示す。実験変数にはLSBの埋め込み長さ、端距離および縁距離、LSBの形状を選定した。試験体名はLSB [LSBの埋め込み長さ] - [端距離または縁距離]（縁距離長さの場合は、語尾にFと記載）、後述する改良版のLSBを使用している試験体は頭文字にImpr-と明記した。本実験で使用したLSBおよび座掘りの詳細を図2.2に示す。

CLTの寸法は5層7プライ（スギMx60-5-7、山佐木材株式会社より提供）の厚さ210mm、高さ400mmである。各試験体には、端距離および縁距離の影響を調べるために底面部に凹部高さ50mmのくぼみを設けた。また、LSBを埋め込む際には直径 $\phi 50$ 、深さ40mmの座掘りが生じ、改良版LSBは座掘りが深さが浅くなるように改良を施し、13.5mmの座掘り深さとなるようにした（図2.2参照）。なお、端距離および縁距離は、LSBの中心から凹部高さまでの長さとして定義する。また、CLTの座掘りの影響を確認するため、試験体LSB150-210③(ep)と試験体LSB150-50Fep①および②の座掘り部分を二液混合硬化型のエポキシ系接着剤（オーシカダイネTE243-L2）で充填する試験体を用意した。

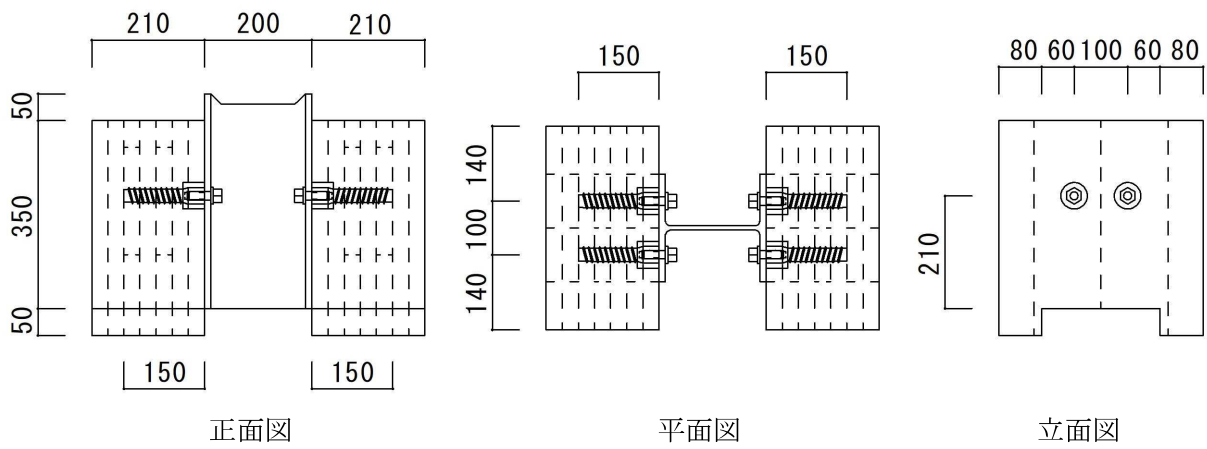
H形鋼には200x200x8x12（SS400鋼材）を使用した。LSBとの接合部分において鉄骨フランジに設ける孔径は、通常の高力ボルト摩擦接合ではボルト径に対して+2.0mm（径によっては+3.0mm）した孔径を使用することが一般的である。ただし、本接合方法においては、LSBが所定の位置よりずれて施工されることが想定され、ボルト径と孔径のクリアランスを広く見ておく必要がある。そこで、試験体LSB150-210①（ $\phi 18$ ）、試験体LSB150-210②（ $\phi 20$ ）の実験結果の検討を行い、同等の結果が得られたため、他の試験体ではフランジに設ける孔径として $\phi 20$ を設けることとした。詳細は後述する実験結果を参照されたい。孔周囲の表面処理は、まずサンダーで黒皮を剥ぎ、その後さび発生剤にて赤さびを発生させた。

H形鋼とCLT部材は高力ボルトをトルクレンチにて締め上げて一体化させるため、木と鋼の接触面において摩擦が発生しているものと考えられる。そこで、本接合条件における摩擦の有無を調べるため、試験体Impr-LSB150-210③では、実験における変形量を考慮して、フランジの表面に外径48mmのワッシャーを用いて孔中心から当該ワッシャーの範囲外にグリスを塗布した。

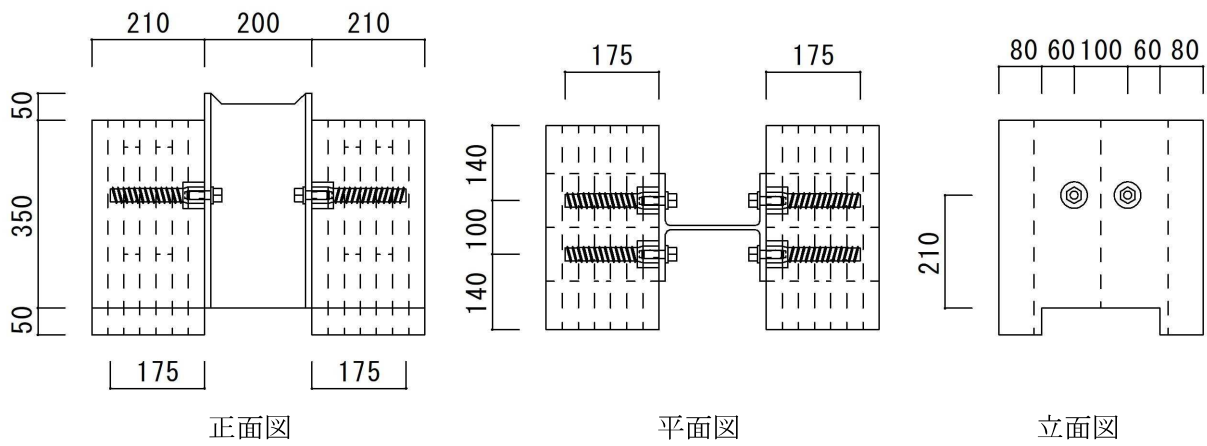
LSBは、山径 $\phi 30$ （谷径 $\phi 25$ ）をとり、長さは125mm、150mm、175mmの三種類を用いた（LSBは株式会社トーネジより提供いただいた）。H形鋼との取り付けにはM16(F10T)の高力ボルトを用いた。接合の際は、試験体ボルト位置の対角で50Nmずつトルクレンチにて締め付けを行い、300N・mまで張力を導入した。また、LSBは埋め込む際に所定の位置から若干のずれが生じることがある。このため、上述したようにフランジに設けた孔径は施工性に余裕を持たせるために、試験体LSB150-210①を除いて $\phi 20$ としている。LSBの設計位置からのずれ量を表2.2に示す。誤差の大きいもので2.0mmほどのずれが生じており、実施工においてもこのずれは十分に配慮すべきものと考えられる。



(a) 試験体LSB125-210

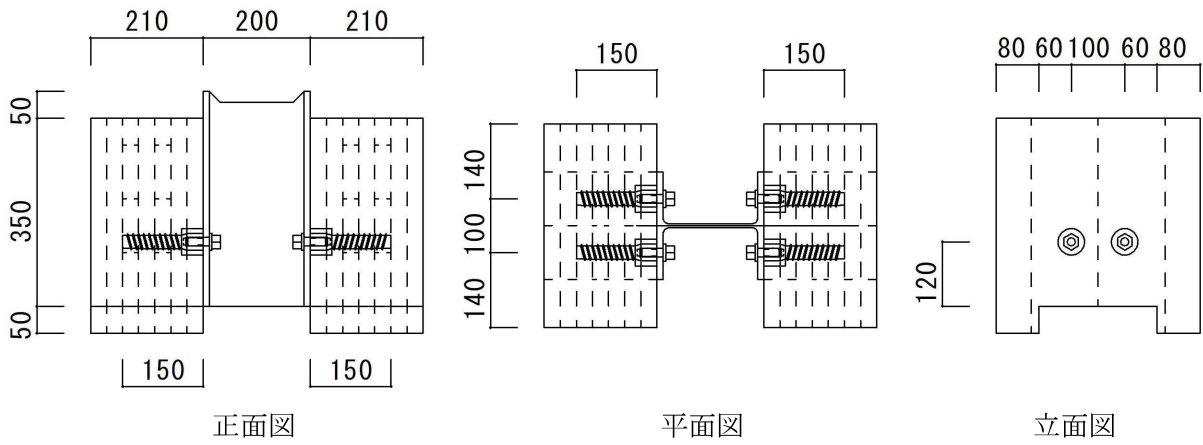


(b) 試験体LSB150-210

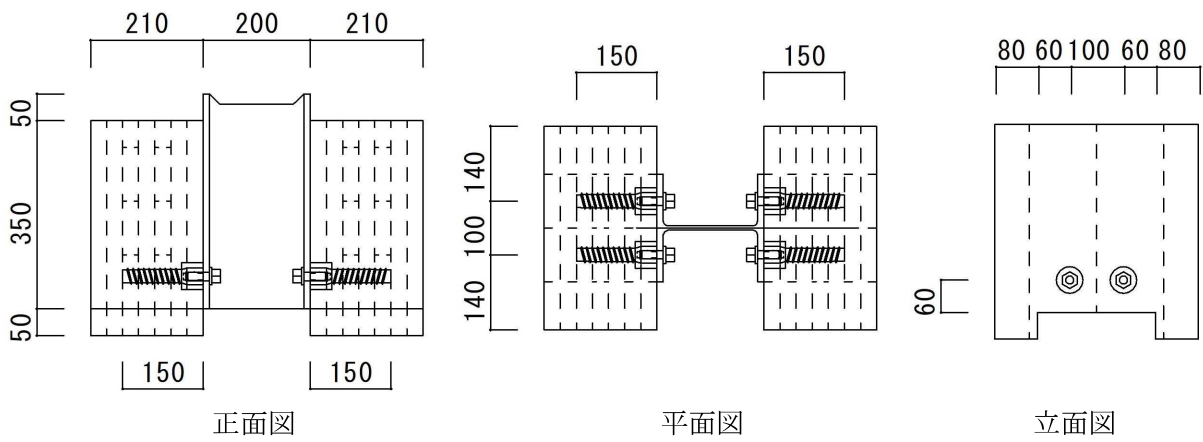


(c) 試験体LSB175-210

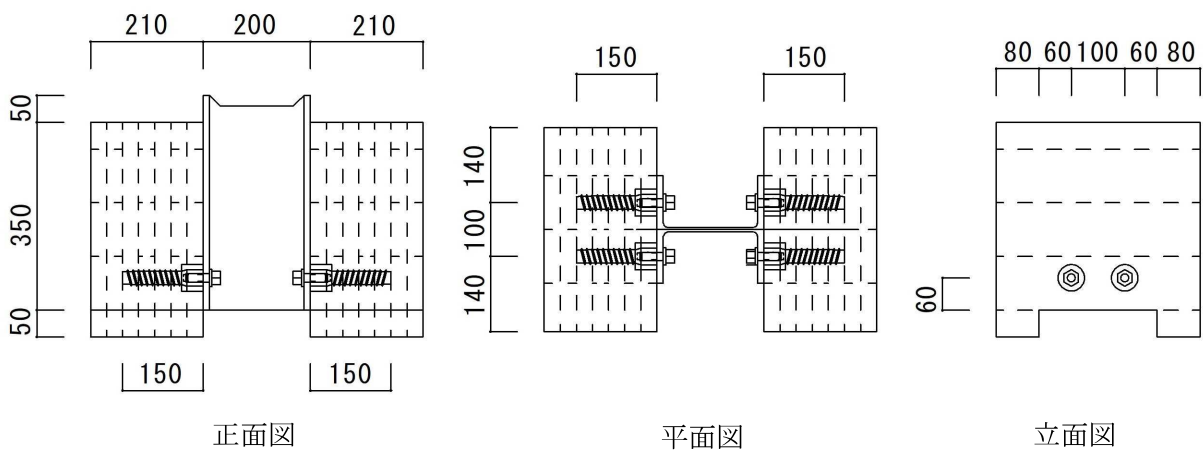
図2.1-1 試験体詳細図 (続く)



(d) 試験体LSB150-120

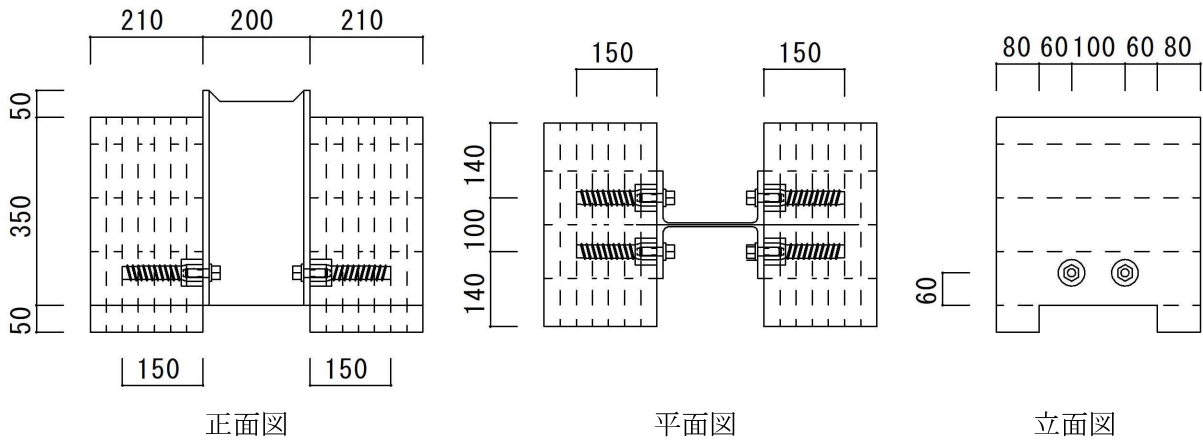


(e) 試験体LSB150-60

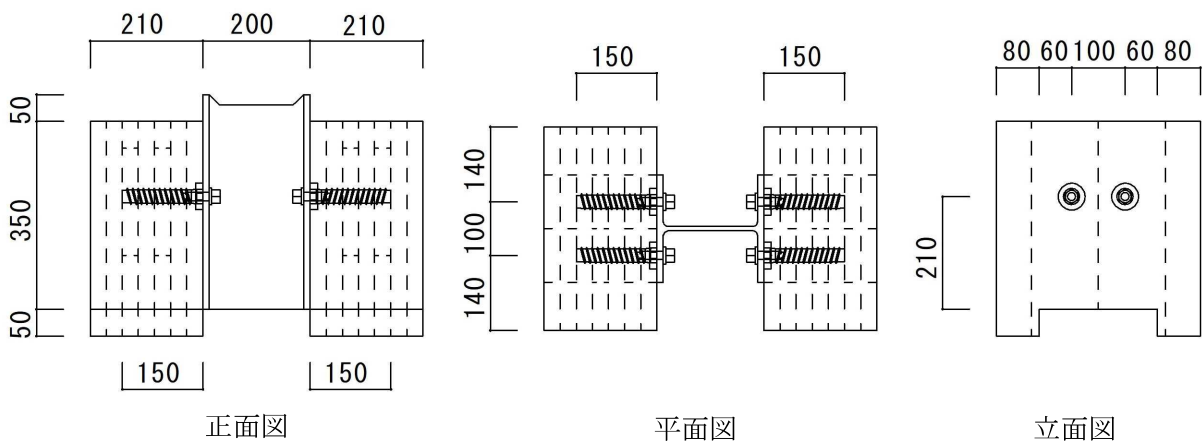


(f) 試験体LSB150-60F

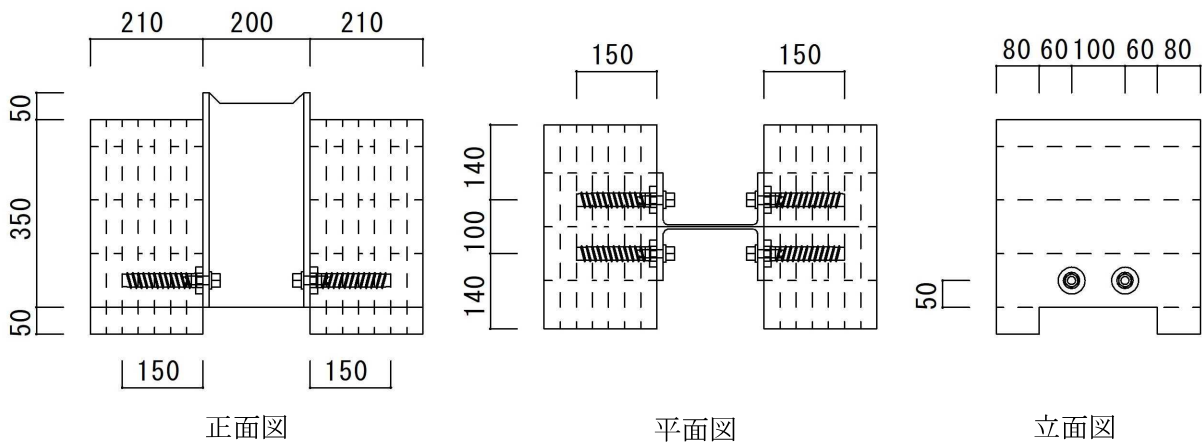
図2.1-2 試験体詳細図 (続く)



(g) 試験体LSB150-50F



(h) 試験体Impr-LSB150-210



(i) 試験体Impe-LSB150-50F

図2.1-3 試験体詳細図 (続き)

表2.1 試験体一覧

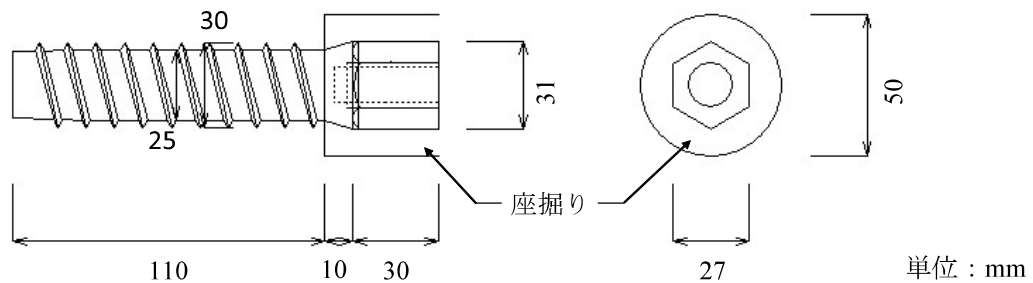
試験体名	LSBの埋め込み長さ (mm)	LSBの端距離 (mm)	LSBの縁距離 (mm)	座掘り深さ (mm)
LSB125-210	125(5d)* ¹	210(7D)* ¹	-	40.0
LSB150-210①	150(6d)	210(7D)	-	40.0
LSB150-210②	150(6d)	210(7D)	-	40.0
LSB150-210③(ep)* ²	150(6d)	210(7D)	-	0.0
LSB175-210	175(7d)	210(7D)	-	40.0
LSB150-120	150(6d)	120(4D)	-	40.0
LSB150-60	150(6d)	60(2D)	-	40.0
LSB150-60F	150(6d)	-	60(2D)	40.0
LSB150-50F	150(6d)	-	50(1.67D)	40.0
LSB150-50Fep①)* ²	150(6d)	-	50(1.67D)	0.0
LSB150-50Fep②)* ²	150(6d)	-	50(1.67D)	0.0
Impr-LSB150-210①	150(6d)	210(7D)	-	13.5
Impr-LSB150-210②	150(6d)	210(7D)	-	13.5
Impr-LSB150-210③)* ³	150(6d)	210(7D)	-	13.5
Impr-LSB150-50F①	150(6d)	-	50(1.67D)	13.5
Impr-LSB150-50F②	150(6d)	-	50(1.67D)	13.5

※共通事項：CLTのサイズ380×400(mm)，CLT厚210(mm)

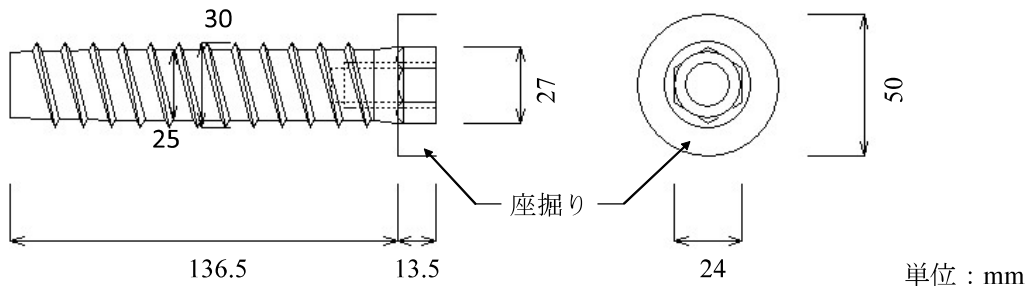
*1:DはLSBの山径(30mm)，dはLSBの谷径(25mm)をそれぞれ示す。

*2:LSBの座掘りにエポキシ系接着剤を充填した。

*3:フランジ表面にグリスを塗布。



(a) 改良前のLSB



(b) 改良版LSB

図2.2 本実験で使用したLSBの詳細

表2.2 LSBのずれ量(mm)

試験体名		A	B	C	D
LSB125-210	X	+0.50	±0.0	±0.0	+2.0
	Y	±0.0	-2.0	+1.0	+2.0
LSB150-210①	X	-1.0	+1.5	+0.50	-1.5
	Y	+2.0	+2.0	+1.0	+2.0
LSB150-210②	X	+1.0	±0.0	-0.50	+1.0
	Y	+1.0	+0.50	±0	±0.0
LSB150-210③(ep)	X	-0.50	±0.0	-0.80	+1.0
	Y	+0.80	+0.50	+1.0	±0.0
LSB175-210	X	-1.0	±0.0	-1.0	±0.0
	Y	+1.0	-0.50	-2.0	-0.50
LSB150-120	X	-0.50	-0.50	-1.0	±0.0
	Y	+2.0	±0.0	+1.0	+0.50
LSB150-60	X	-2.0	+1.0	+1.0	-1.0
	Y	-1.0	-1.0	+1.0	-0.25
LSB150-60F	X	±0.0	+0.50	±0.0	-1.5
	Y	-0.50	-0.50	±0.0	-0.50
LSB150-50F	X	-1.0	±0.0	+1.8	+0.50
	Y	±0.0	-1.0	-0.50	+0.80
LSB150-50Fep①	X	+0.50	+0.25	-1.0	+0.50
	Y	+1.5	+1.75	+2.0	+1.5
LSB150-50Fep②	X	-0.50	-1.0	+1.0	+1.0
	Y	+1.5	+2.0	+1.5	+2.0
Impr-LSB150-210①	X	-1.0	±0.0	±0.0	±0.0
	Y	+1.0	+0.50	+1.0	±0.0
Impr-LSB150-210②	X	-1.0	±0.0	-1.0	±0.0
	Y	-1.0	±0.0	-0.50	±0.0
Impr-LSB150-210③	X	±0.0	±0.0	±0.0	-0.50
	Y	-1.0	±0.0	+0.50	±0.0
Impr-LSB150-50F①	X	-0.50	-0.50	-1.5	±0.0
	Y	-0.50	+0.50	+0.50	±0.0
Impr-LSB150-50F②	X	±0.0	-2.0	-1.0	+0.50
	Y	-0.50	+1.5	±0.0	+0.50

(X方向の「+」は外方向, 「-」は内方向へのずれを示す。
Y方向の「+」は上方向, 「-」は下方向へのずれを示す。)

2.1.3 載荷方法

図2.3に載荷装置を示す。載荷はピンを介して100t万能試験機より鉛直方向に荷重を加えた。試験体下部にはφ16のネジ節鉄筋とチャンネル材から成る開き止めを設置した。ネジ節鉄筋には一本につき二箇所ひずみゲージを貼付している。変形は、LSB埋め込み位置におけるH形鋼とCLT間の相対ずれ変位を、四箇所を設置した変位計により計測した。なお、載荷は試験装置の都合によりずれ変位30mmまでとした。

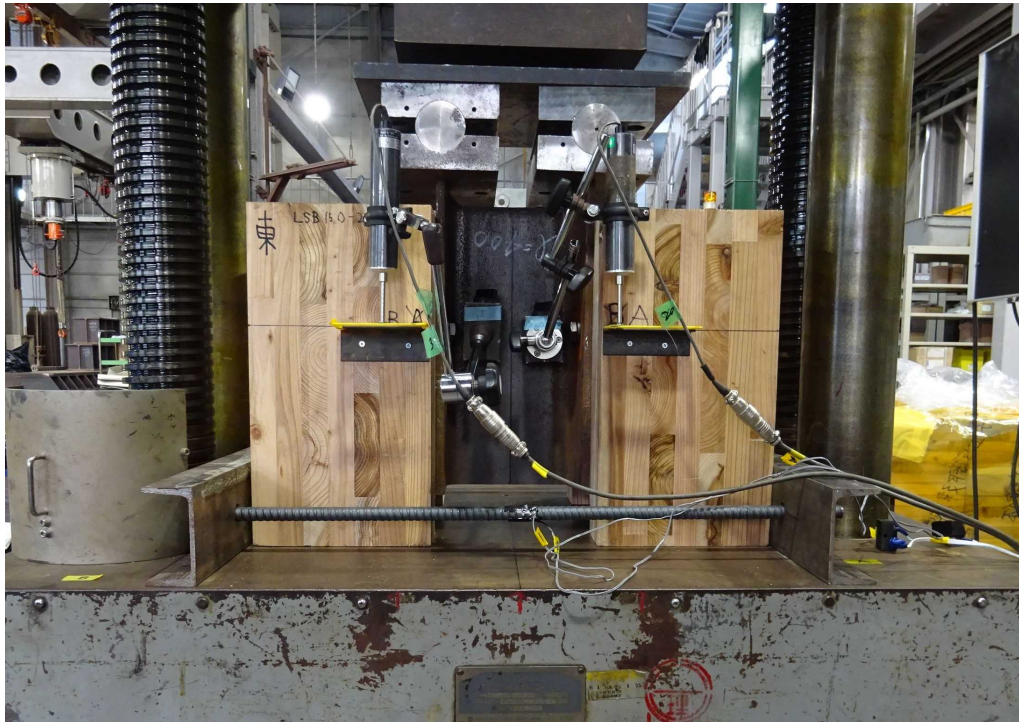


図2.3 載荷方法

2.2 実験結果

2.2.1 荷重－変形関係

図2.4に実験で得られた荷重－変形関係を示す。横軸の変形は四箇所の変形の平均値を示している。それぞれの荷重－変形関係において、30mmまで変形させた全体図と、10mmまでの変形を拡大した二つのグラフを記載した。また、図2.5には各試験体の実験後の写真を示す。

図2.4(a), (b), (c), (e)および図2.5(a), (b), (c), (e)に、試験体LSB125-210、試験体LSB150-210①、試験体LSB150-210②、試験体LSB175-210の結果をそれぞれ示す。実験後のH形鋼を観察すると、フランジ面に設けたLSB側の孔上部が凹んでいた。これは試験体の変形増大に伴い、LSBが孔上部の鉄骨フランジを押し込んだことによるものと考えられる。高力ボルトには軸部において曲げ変形が観察された。荷重－変形関係上で変形12mm付近で一度荷重の上昇が見られるが、これはLSBの曲げ変形によって座掘りと接触したことに起因するものである。また、埋め込み長さが長いほど、荷重の上昇が大きくなることを確認した。さらに、LSBの埋込時に生じる誤差を吸収するために、鉄骨フランジに設ける孔径を18mmとした場合と20mmとした場合の二ケースを実験した。その結果、試験体LSB150-210①（孔径18mm）と試験体LSB150-210②（孔径20mm）の挙動に大きな差は見られなかった。

図2.4(d)および図2.5(d)に試験体LSB150-210③(ep)の結果を示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様である。変形7mm付近でCLTに亀裂が生じるまでに300kNに達し、変形7mm以降はLSB直下のCLTに亀裂が生じたことにより耐力が低下し、その後荷重は一定となった。

図2.4(f)および図2.5(f)に試験体LSB150-120の結果を示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様である。実験後、CLTにLSBと座掘りの接触面から真下に一層分の亀裂が生じていることを確認した（図2.5(f-3)参照）。なお、損傷を大きく受けたCLTは強軸層であった。変形26mm付近からの荷重低下は、このCLTの亀裂発生に起因するものと考えられる。

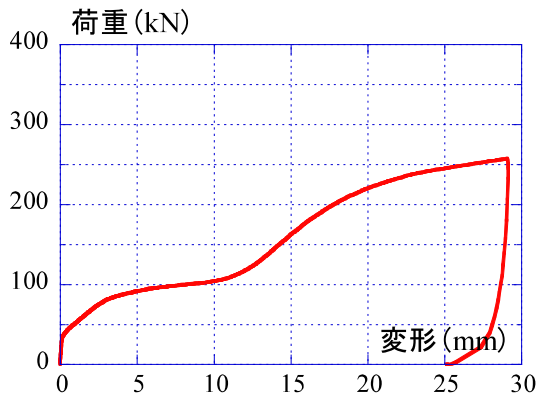
図2.4(g)および図2.5(g)に試験体LSB150-60の結果を示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様である。実験後、CLTにLSBと座掘りの接触面から真下に二層分（強軸層）の亀裂と、二層目（強軸層）と三層目（弱軸層）の境目に沿って亀裂が生じていることを確認した（図2.5(g-3)参照）。損傷具合は試験体LSB150-120よりも激しかった。変形13mm付近からの荷重低下は、このCLTの亀裂発生によるものと考えられる。荷重低下後は、CLTの亀裂発生部分が降下し続けたため、荷重は一定を保持した。

図2.4(h)および図2.5(h)に試験体LSB150-60Fの、図2.4(i)および図2.5(i)には試験体LSB150-50Fの結果をそれぞれ示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様である。LSBと座掘りが接触する前にCLTに亀裂が入り、荷重は一定となった。CLTの座掘り側の表面には、CLTの弱軸層の繊維方向に沿って座掘りを繋ぐように亀裂が生じていた（図2.5(h-3)および図2.5(i-3)参照）。また、座掘り側から数えて二層目（強軸層）にも繊維方向に沿って亀裂が生じ、CLTが押し出された。

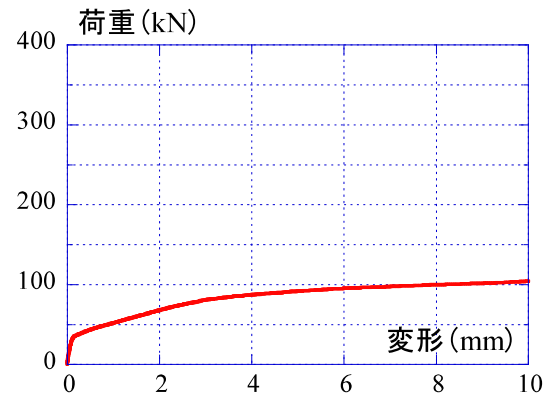
図2.4(j)および図2.5(j)に試験体LSB150-50Fep①の、図2.4(k)および図2.5(k)には試験体LSB150-50Fep②の結果をそれぞれ示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様である。CLTの座掘り側の表面には、弱軸層の繊維方向に沿って座掘りを繋ぐように亀裂が生じており、CLT側面まで達していた（図2.5(j-3)および図2.5(k-3)参照）。また、試験体LSB150-60F、LSB150-50Fと同様、座掘り側から数えて二層目（強軸層）にも繊維方向に沿って亀裂が生じ、CLTが押し出されていた。

図2.4(l)および図2.5(l)に試験体Impr-LSB150-210①の、図2.4(m)および図2.5(m)に試験体Impr-LSB150-210②の、図2.4(n)および図2.5(n)に試験体Impr-LSB150-210③の結果をそれぞれ示す。損傷過程は基準試験体（試験体LSB150-210②）と同様であるが、LSBは曲げ変形が見られた。またCLTとH形鋼フランジとの界面にグリスを塗布した試験体Impr-LSB150-210③は、試験体Impr-LSB150-210①および試験体Impr-LSB150-210②よりも荷重が小さくなった。

図2.4(o)および図2.5(o)に試験体Impr-LSB150-50F①の、図2.4(p)および図2.5(p)に試験体Impr-LSB150-50F②の結果を示す。損傷過程は基準試験体(試験体LSB150-210②)と同様であるが、LSBは曲げ変形が見られた。LSBと座掘りが接触する前にCLTに亀裂が入り、一度荷重の低下が確認された。CLTの座掘り側の表面には、弱軸層の繊維方向に沿って座掘りを繋ぐように亀裂が生じており、それぞれCLT側面まで達していた(図2.5(o-3)および図2.5(p-3)参照)。

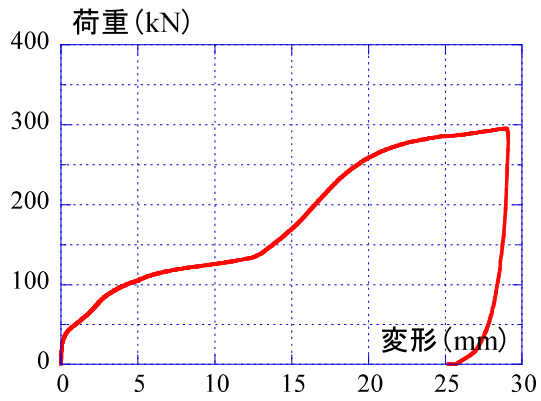


(a-1) 全体

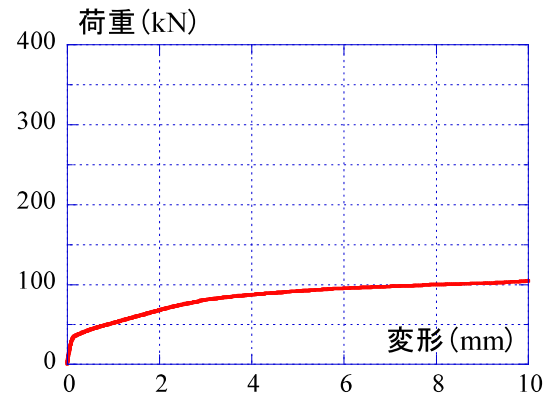


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) 試験体LSB125-210

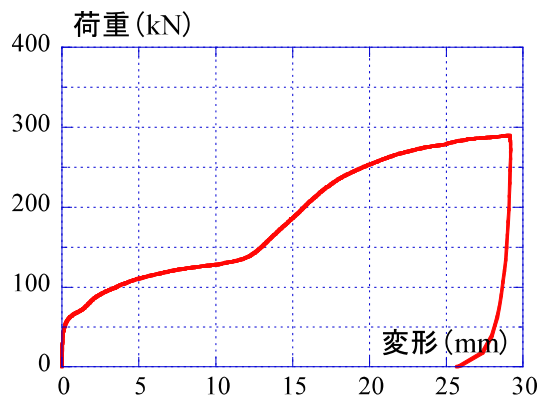


(b-1) 全体

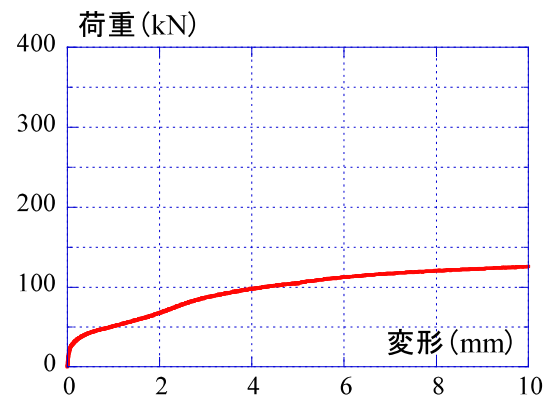


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) 試験体LSB150-210①



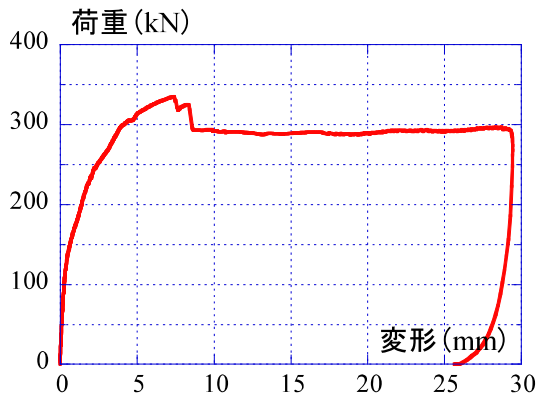
(c-1) 全体



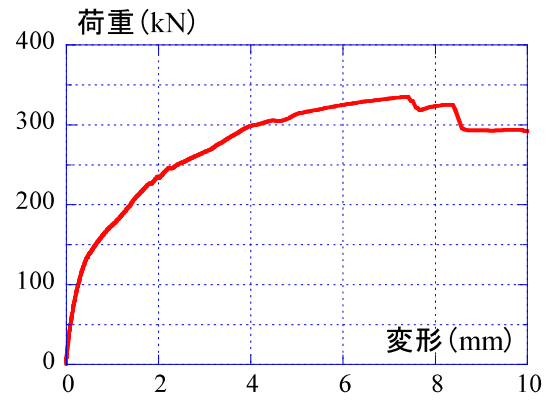
(c-2) 10mmまでの拡大

(c) 試験体LSB150-210②

図2.4-1 荷重—変形関係 (続く)

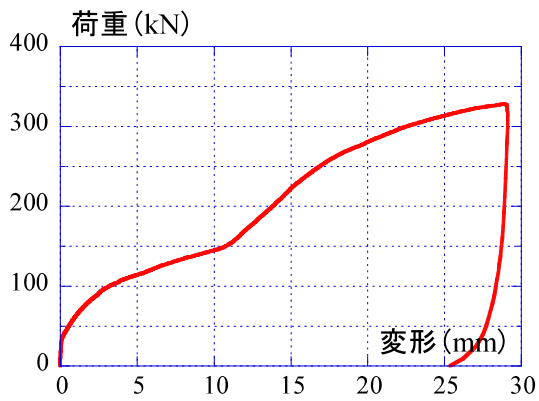


(d-1) 全体

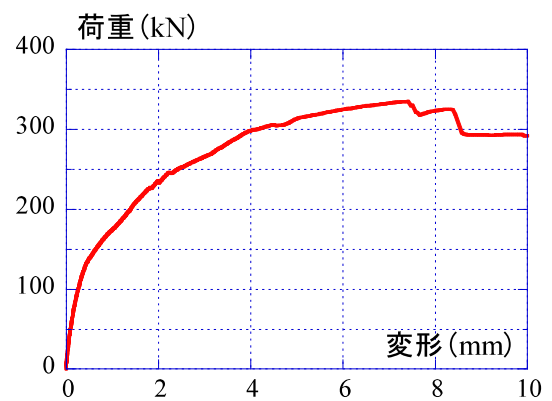


(d-2) 10mmまでの拡大

(d) 試験体LSB150-210③(ep)

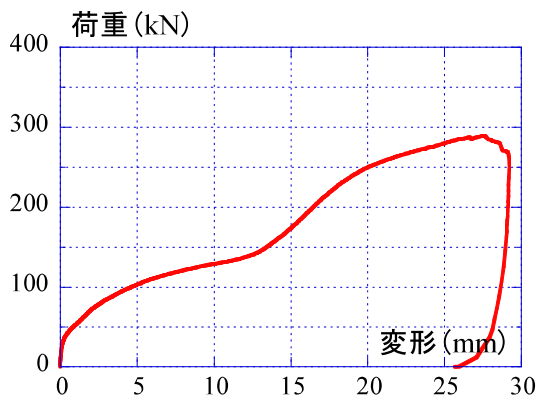


(e-1) 全体

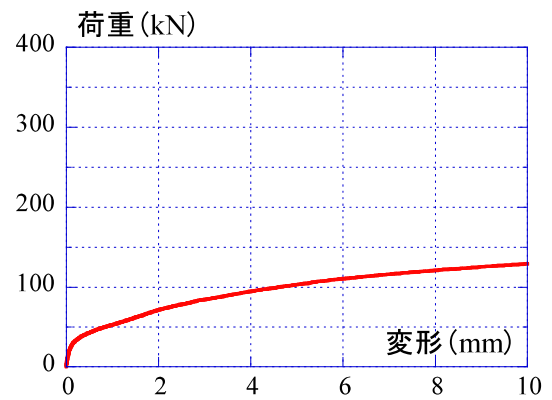


(e-2) 10mmまでの拡大

(e) 試験体LSB175-210



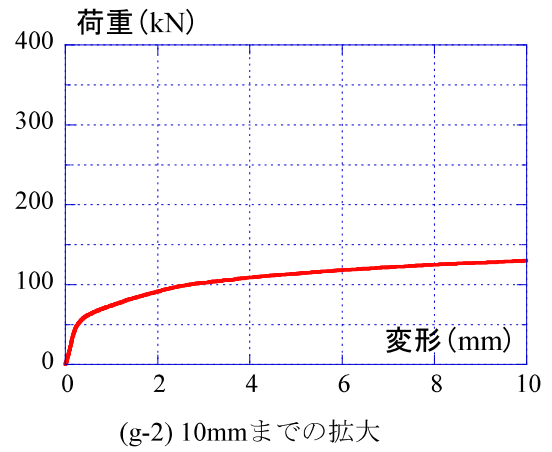
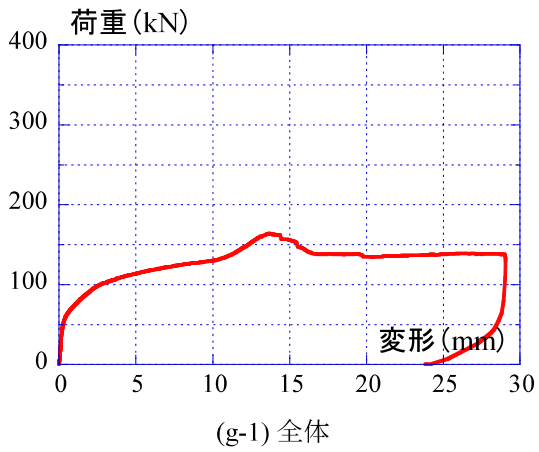
(f-1) 全体



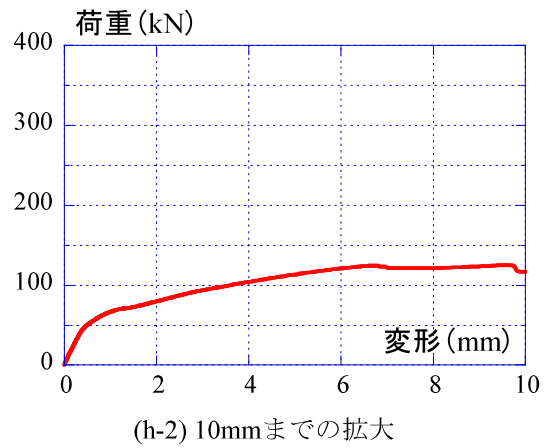
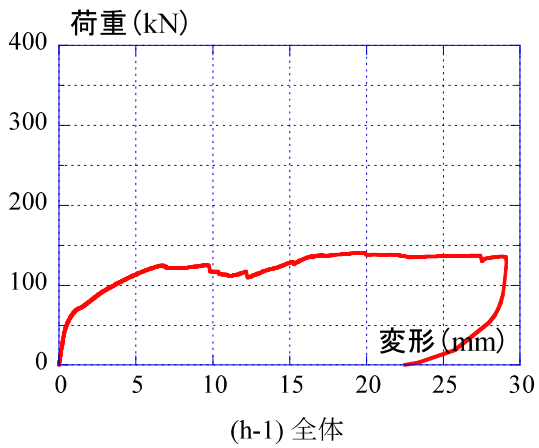
(f-2) 10mmまでの拡大

(f) 試験体LSB150-120

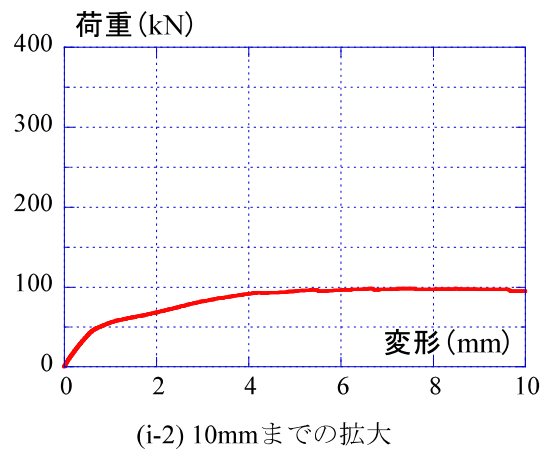
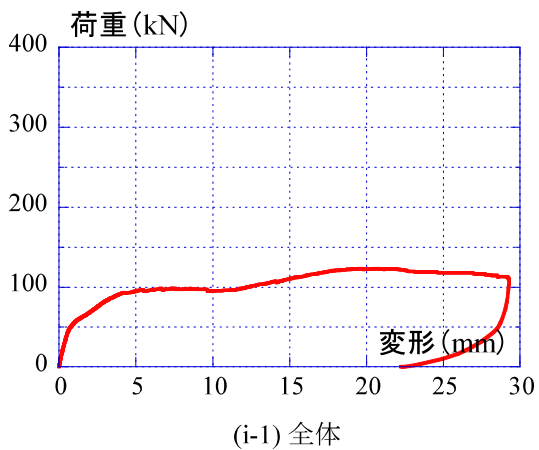
図2.4-2 荷重—変形関係 (続く)



(g) 試験体LSB150-60

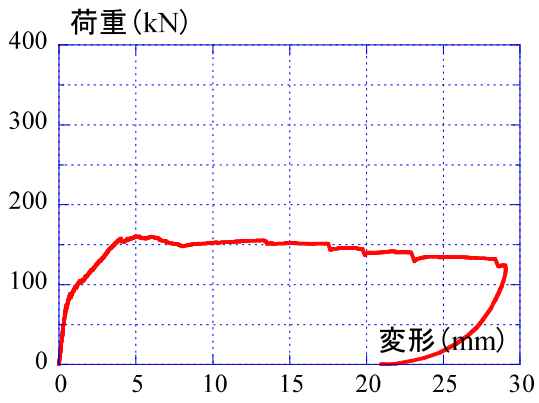


(h) 試験体LSB150-60F

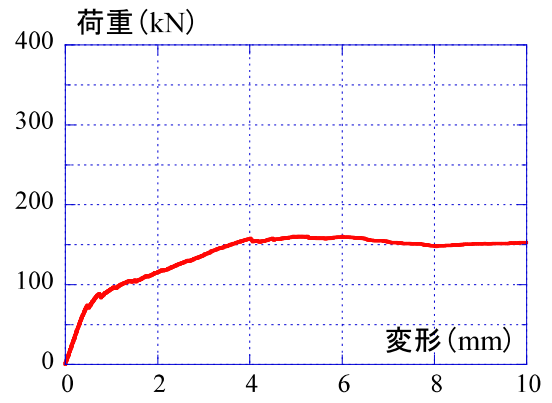


(i) 試験体LSB150-50F

図2.4-3 荷重—変形関係 (続く)

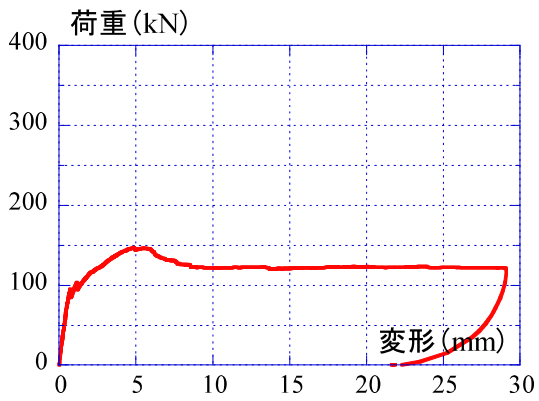


(j-1) 全体

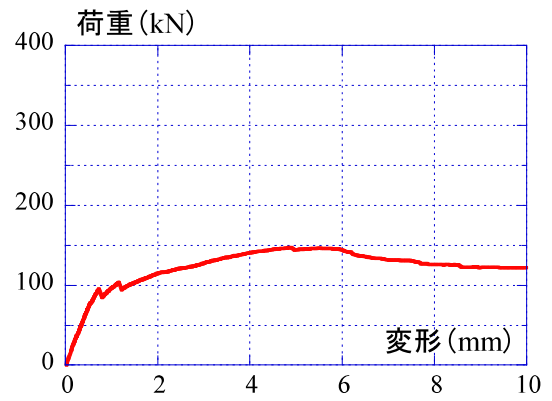


(j-2) 10mmまでの拡大

(j) 試験体LSB150-50ep①

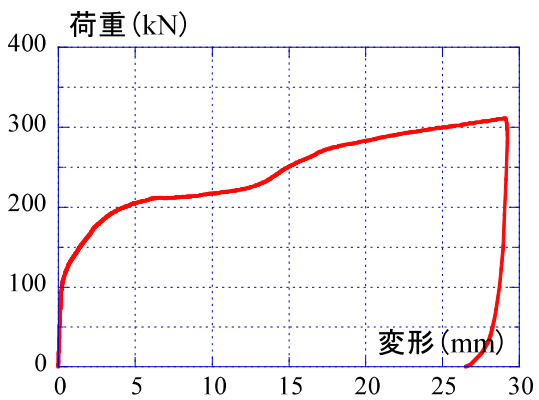


(k-1) 全体

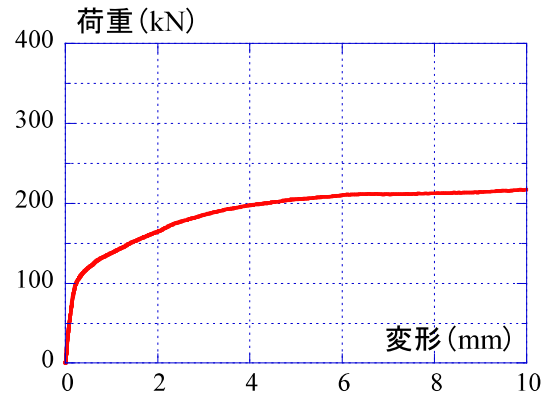


(k-2) 10mmまでの拡大

(k) 試験体LSB150-50ep②



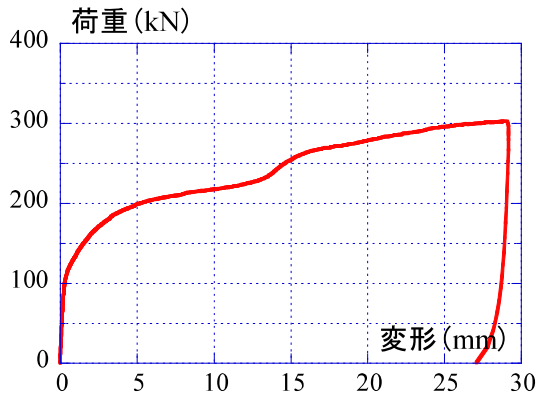
(l-1) 全体



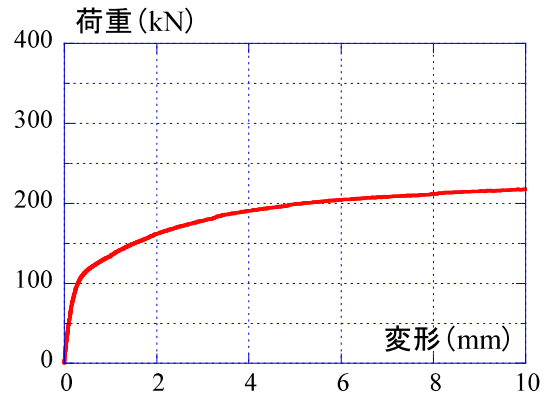
(l-2) 10mmまでの拡大

(l) 試験体Impr-LSB150-210①

図2.4-4 荷重—変形関係 (続く)

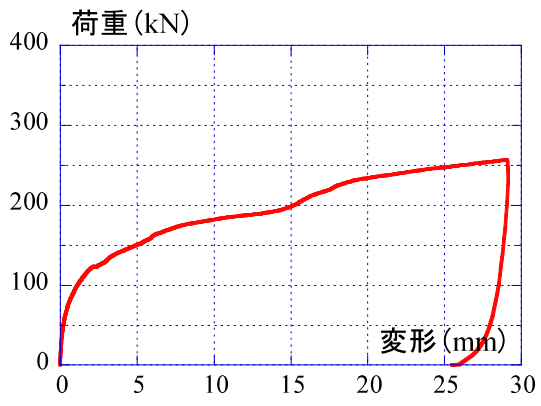


(m-1) 全体

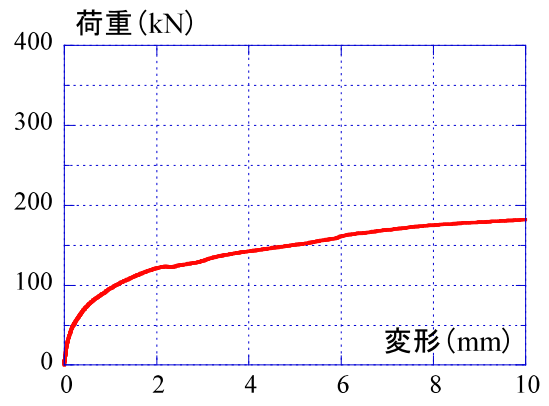


(m-2) 10mmまでの拡大

(m) 試験体Impr-LSB150-210②

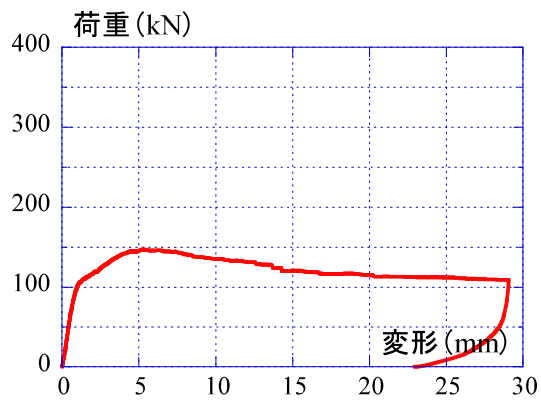


(n-1) 全体

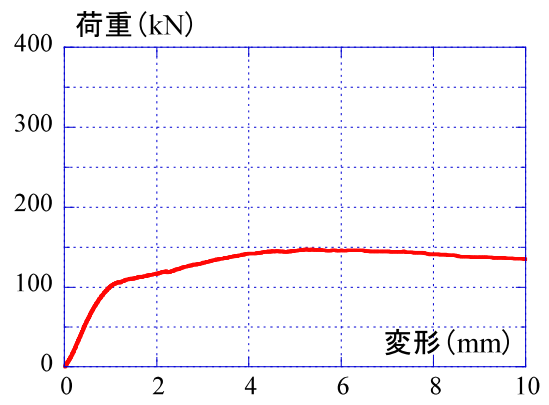


(n-2) 10mmまでの拡大

(n) 試験体Impr-LSB150-210③



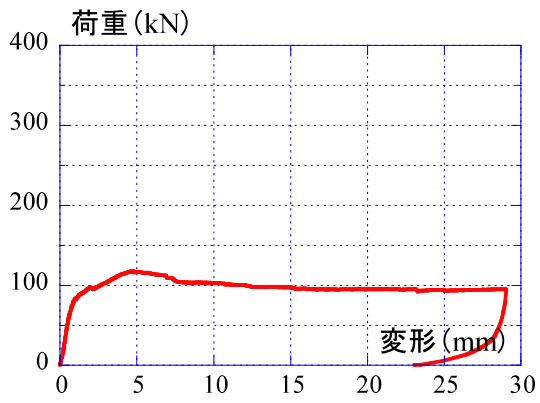
(o-1) 全体



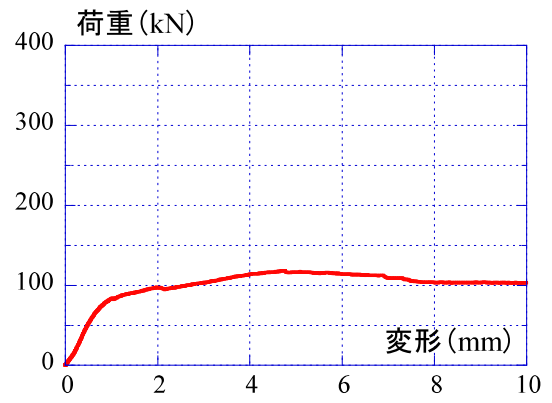
(o-2) 10mmまでの拡大

(o) 試験体Impr-LSB150-50F①

図2.4-5 荷重—変形関係 (続く)



(p-1) 全体



(p-2) 10mmまでの拡大

(p) 試験体Impr-LSB150-50F②

図2.4-6 荷重—変形関係（続き）



(a-1) 試験体LSB125-210のAB側



(a-2) 試験体LSB125-210のCD側



(a-3) CLT AC側



(a-4) CLT BD側



(a-5) CLT A解体時



(a-6) CLT C解体時



(a-7) CLT B解体時



(a-8) CLT D解体時

(a) 試験体LSB125-210

図2.5-1 実験後写真 (続く)



(b-1) 試験体LSB150-210①のAB側



(b-2) 試験体LSB150-210①のCD側



(b-3) CLT AC側



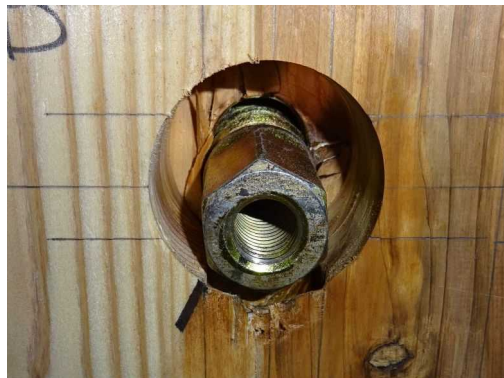
(b-4) CLT BD側



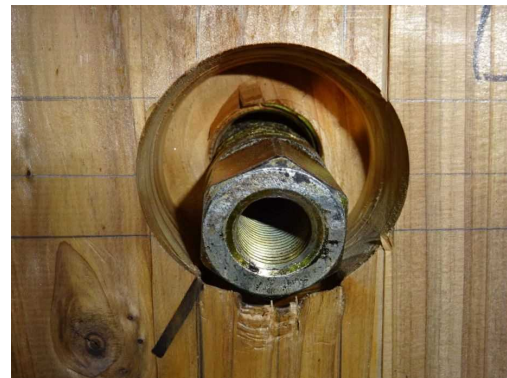
(b-5) CLT A解体時



(b-6) CLT C解体時



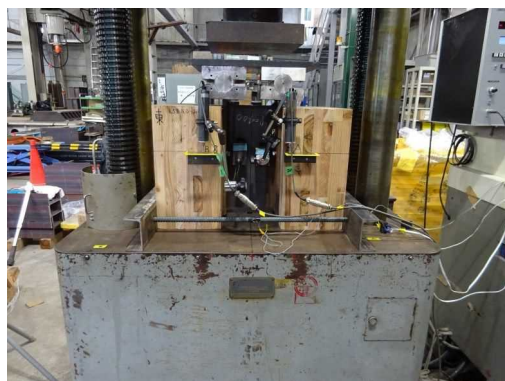
(b-7) CLT B解体時



(b-8) CLT D解体時

(b) 試験体LSB150-210①

図2.5-2 実験後写真 (続く)



(c-1) 試験体LSB150-210②のAB側



(c-2) 試験体LSB150-210②のCD側



(c-3) CLT AC側



(c-4) CLT BD側



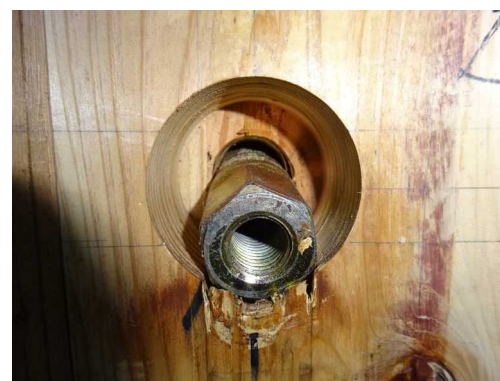
(c-5) CLT A解体時



(c-6) CLT C解体時



(c-7) CLT B解体時



(c-8) CLT D解体時

(c) 試験体LSB150-210②

図2.5-3 実験後写真 (続く)



(d-1) 試験体LSB150-210③(ep)のAB側



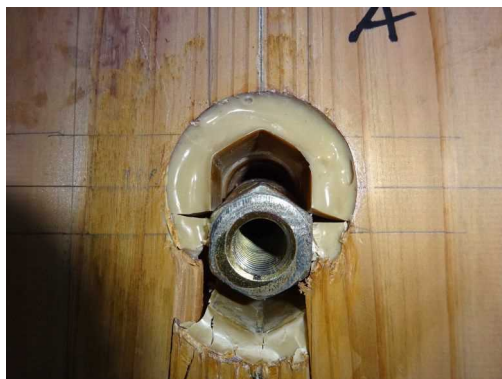
(d-2) 試験体LSB150-210③(ep)のCD側



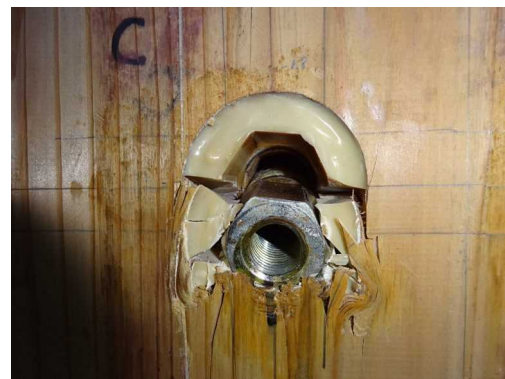
(d-3) CLT AC側



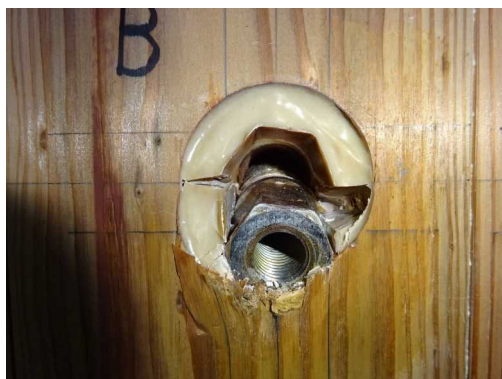
(d-4) CLT BD側



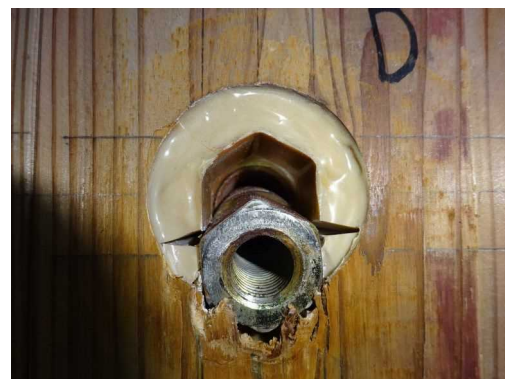
(d-5) CLT A解体時



(d-6) CLT C解体時



(d-7) CLT B解体時



(d-8) CLT D解体時

(d) 試験体LSB150-210③(ep)

図2.5-4 実験後写真 (続く)



(e-1) 試験体LSB175-210のAB側



(e-2) 試験体LSB175-210のCD側



(e-3) CLT AC側



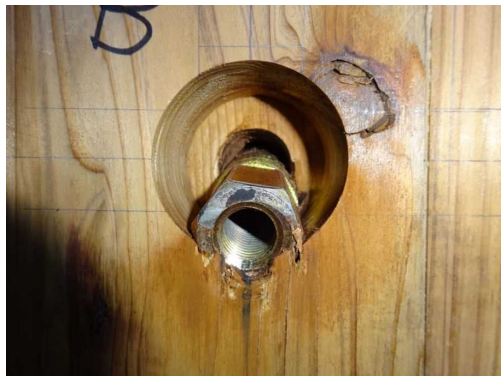
(e-4) CLT BD側



(e-5) CLT A解体時



(e-6) CLT C解体時



(e-7) CLT B解体時



(e-8) CLT D解体時

(e) 試験体LSB175-210

図2.5-5 実験後写真 (続く)



(f-1) 試験体LSB150-120のAB側



(f-2) 試験体LSB150-120のCD側



(f-3) CLT AC側



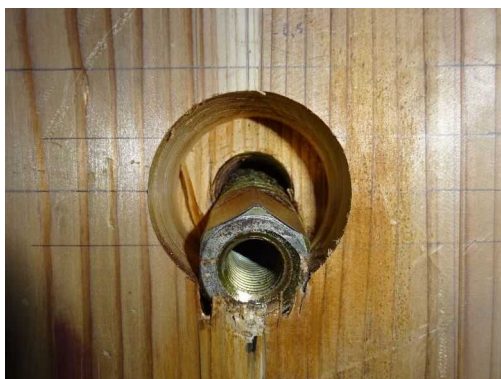
(f-4) CLT BD側



(f-5) CLT A解体時



(f-6) CLT C解体時



(f-7) CLT B解体時



(f-8) CLT D解体時

(f) 試験体LSB150-120

図2.5-6 実験後写真 (続く)



(g-1) 試験体LSB150-60のAB側



(g-2) 試験体LSB150-60のCD側



(g-3) CLT AC側



(g-4) CLT BD側



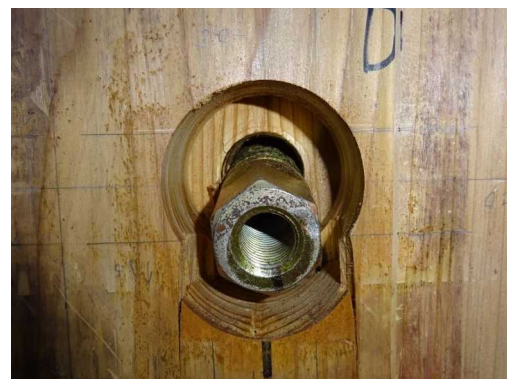
(g-5) CLT A解体時



(g-6) CLT C解体時



(g-7) CLT B解体時



(g-8) CLT D解体時

(g) 試験体LSB150-60

図2.5-7 実験後写真 (続く)



(h-1) 試験体LSB150-60FのAB側



(h-2) 試験体LSB150-60FのCD側



(h-3) CLT AC側



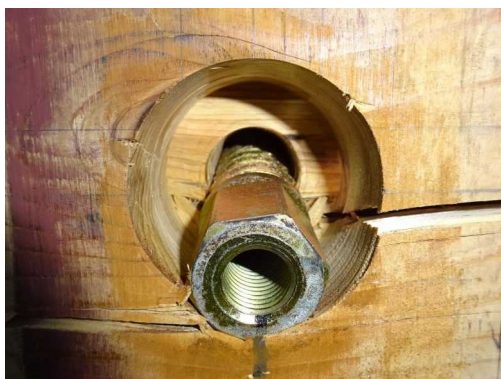
(h-4) CLT BD側



(h-5) CLT A解体時



(h-6) CLT C解体時



(h-7) CLT B解体時



(h-8) CLT D解体時

(h) 試験体LSB150-60F

図2.5-8 実験後写真 (続く)



(i-1) 試験体LSB150-50FのAB側



(i-2) 試験体LSB150-50FのCD側



(i-3) CLT AC側



(i-4) CLT BD側



(i-5) CLT A解体時



(i-6) CLT C解体時



(i-7) CLT B解体時



(i-8) CLT D解体時

(i) 試験体LSB150-50F

図2.5-9 実験後写真 (続く)



(j-1) 試験体LSB150-50Fep①のAB側



(j-2) 試験体LSB150-50Fep①のCD側



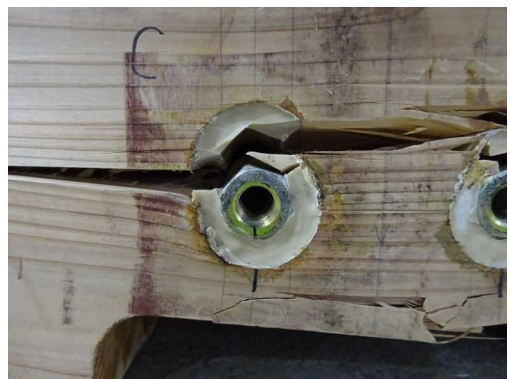
(j-3) CLT AC側



(j-4) CLT BD側



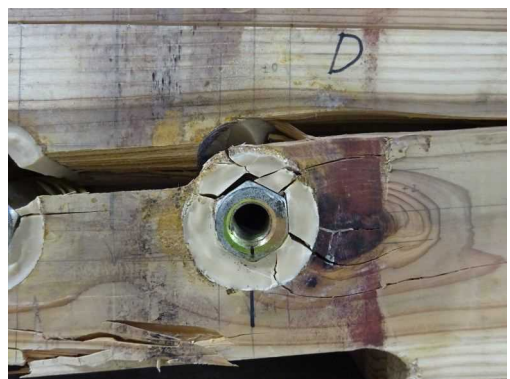
(j-5) CLT A解体時



(j-6) CLT C解体時



(j-7) CLT B解体時



(j-8) CLT D解体時

(j) 試験体LSB150-50Fep①

図2.5-10 実験後写真 (続く)



(k-1) 試験体LSB150-50Fep②のAB側



(k-2) 試験体LSB150-50Fep②のCD側



(k-3) CLT AC側



(k-4) CLT BD側



(k-5) CLT A解体時



(k-6) CLT C解体時



(k-7) CLT B解体時



(k-8) CLT D解体時

(k) 試験体LSB150-50Fep②

図2.5-11 実験後写真 (続く)



(1-1) 試験体Impr-LSB150-210①のAB側



(1-2) 試験体Impr-LSB150-210①のCD側



(1-3) CLT AC側



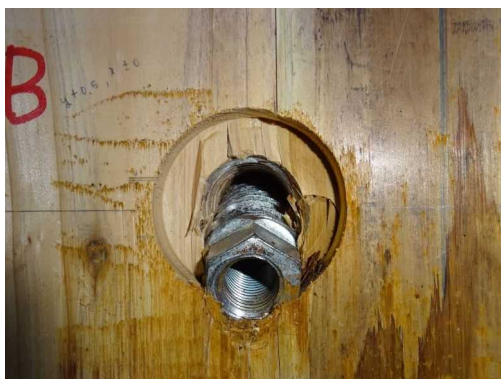
(1-4) CLT BD側



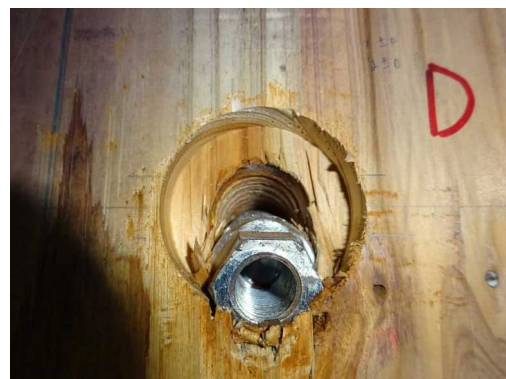
(1-5) CLT A解体時



(1-6) CLT C解体時



(1-7) CLT B解体時



(1-8) CLT D解体時

(I) 試験体Impr-LSB150-210①

図2.5-12 実験後写真 (続く)



(m-1) 試験体Impr-LSB150-210②のAB側



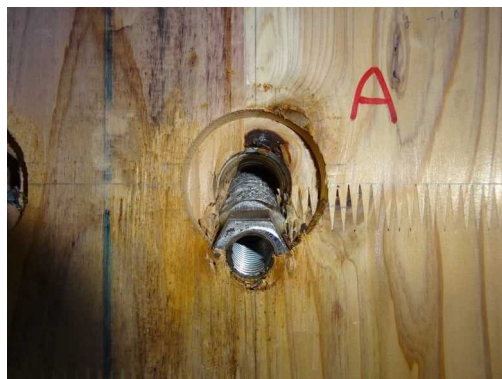
(m-2) 試験体Impr-LSB150-210②のCD側



(m-3) CLT AC側



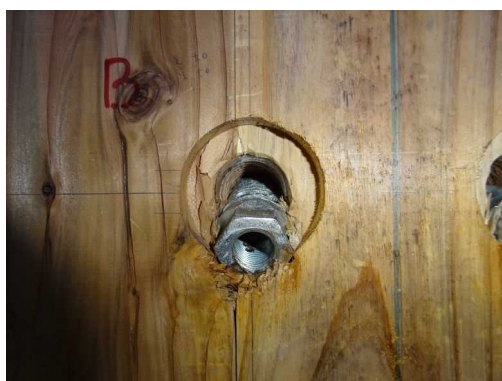
(m-4) CLT BD側



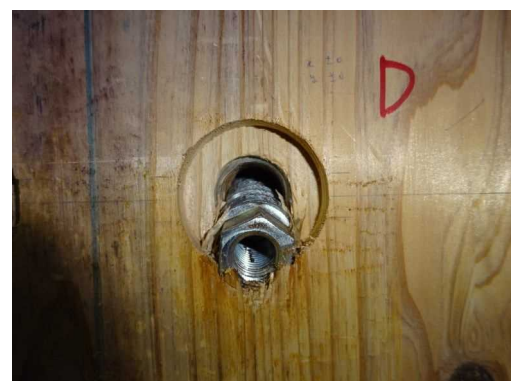
(m-5) CLT A解体時



(m-6) CLT C解体時



(m-7) CLT B解体時



(m-8) CLT D解体時

(m) 試験体Impr-LSB150-210②

図2.5-13 実験後写真 (続く)



(n-1) 試験体Impr-LSB150-210③のAB側



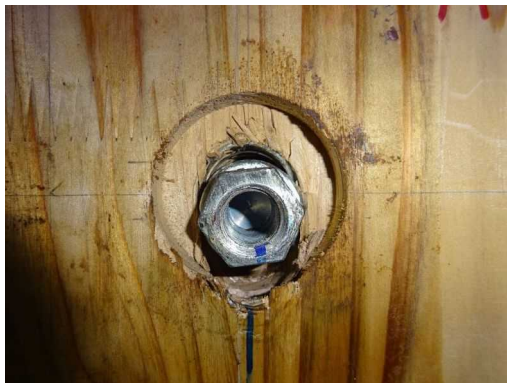
(n-2) 試験体Impr-LSB150-210③のCD側



(n-3) CLT AC側



(n-4) CLT BD側



(n-5) CLT A解体時



(n-6) CLT C解体時



(n-7) CLT B解体時



(n-8) CLT D解体時

(n) 試験体Impr-LSB150-210③

図2.5-14 実験後写真 (続く)



(o-1) 試験体Impr-LSB150-50F①のAB側



(o-2) 試験体Impr-LSB150-50F①のCD側



(o-3) CLT AC側



(o-4) CLT BD側



(o-5) CLT A解体時



(o-6) CLT C解体時



(o-7) CLT B解体時



(o-8) CLT D解体時

(o) 試験体Impr-LSB150-50F①

図2.5-15 実験後写真(続く)



(p-1) 試験体Impr-LSB150-50F②のAB側



(p-2) 試験体Impr-LSB150-50F②のCD側



(p-3) CLT AC側



(p-4) CLT BD側



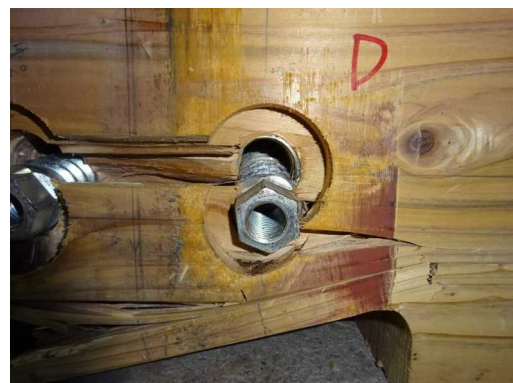
(p-5) CLT A解体時



(p-6) CLT C解体時



(p-7) CLT B解体時



(p-8) CLT D解体時

(p) 試験体Impr-LSB150-50F②

図2.5-16 実験後写真 (続き)

2.2.2 考察

本実験を実施し、実験変数として選定した埋め込み長さ、端距離、縁距離、LSBの形状、CLTとH形鋼間の摩擦、フランジに設けた孔径について、それぞれ比較した荷重－変形関係を図2.6(a)～(g)にそれぞれ示す。

2.2.2.1 埋め込み長さの比較

図2.6(a)に埋込長さの比較を示す。試験体LSB125-210、試験体LSB150-210②、試験体LSB175-210を比較すると、埋め込み長さが長いほど荷重が大きくなる傾向が見られた。いずれの試験体も同形状のLSBを使用しているために座掘りの条件は同様である。このため、破壊メカニズムに違いは見られず、挙動に大きな差異は見られなかった。

2.2.2.2 端距離の比較

図2.6(b)に端距離の比較を示す。試験体LSB150-210②、試験体LSB150-120、試験体LSB150-60を比較すると、変形14mm付近まではどの試験体も同じような挙動を示すが、試験体LSB150-60ではLSB直下のCLTが押し出されたことにより、荷重の低下が確認された。試験体LSB150-120は変形27mm付近でLSB直下のCLTに亀裂が生じたことにより、荷重が低下した。なお、試験体LSB150-210②ではLSB直下のCLTに損傷は見られなかった。このことから、端距離が短くなるほどLSB直下のCLTの損傷が大きくなることがわかる。さらに試験体LSB150-120と試験体LSB150-60の結果から、端距離を4D以上確保することで早期に脆性的な挙動を起こさないようにできるものと考えられる。

2.2.2.3 縁距離の比較

図2.6(c)に縁距離の比較を示す。試験体LSB150-60、試験体LSB150-60F、試験体LSB150-50Fを比較すると、試験体LSB150-60と試験体LSB150-60Fは変形10mmまでは同様の挙動を示したことに對し、試験体LSB150-50Fはせん断抵抗力ならびに初期剛性ともにやや低い値となった。試験体LSB150-60と試験体LSB150-60Fは、変形10mm以降で差異が生じ、試験体LSB150-60は、LSBが座掘りに接触し荷重の上昇がわずかに確認された後、CLTに亀裂が生じるような音とともに荷重の低下を確認した。一方、試験体LSB150-60FはLSBが座掘りに接触する前にCLTに亀裂が生じる音とともに荷重の低下が確認された後、LSB先端が座掘りに接触する変形13mm付近から荷重が上昇した。また、試験体LSB150-60と試験体LSB150-60Fではラミナの繊維方向を入れ替えていることで、各々繊維方向に沿ってCLT表面に亀裂が発生した。試験体LSB150-50Fは全体的に荷重が低く発現されたが、実験後の損傷具合は試験体LSB150-60Fと差異は見られなかった。

2.2.2.4 LSBの形状の比較

図2.6(d), (e)にLSBの形状の違いによる比較を示す。試験体LSB150-210シリーズを比較すると、座掘りをエポキシ系接着剤で充填した試験体LSB150-210③(ep)が最も高いせん断抵抗力を発揮した。試験体Impr-LSB150-210①、試験体Impr-LSB150-210②は座掘りを浅くしたことで、試験体LSB150-210②より試験体LSB150-210③(ep)の挙動に近づき、特に初期剛性はほぼ同一な値となった。このことより、座掘りの深さと座掘りの有無が本接合方法の挙動に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。ずれ変形をどこまで許容するかによって評価は異なるが、仮に1.0mm以内で評価するのであれば、改良されたLSBを使用することで十分なせん断抵抗力を確保できるものと考えられる。一方で、ずれ変形を許容する使い方をするのであれば、エポキシ系接着剤を充填する手間は増すが、座掘りを埋めてしまうことで、より高いせん断抵抗力を確保できる接合となる。

試験体LSB150-50Fシリーズを比較すると、試験体LSB150-50Fep①が最も高いせん断抵抗力を発揮した。また、試験体Impr-LSB150-50F①と試験体Impr-LSB150-50F②は実験結果で試験体LSB150-

50Fep①と試験体LSB150-50Fep②に僅かに劣るものの、初期剛性はほぼ同一な値となった。

これらの結果より、座掘り部分にエポキシ系接着剤を充填させることで、せん断抵抗力は大きくなるが、ずれ変形をどこまで許容するかによってその評価は異なる。設計上のクライテリアを明確にし、適切なせん断抵抗力を確保できるようにすることが望ましいものと考えられる。

図2.6(f)に鉄骨フランジとCLT間における摩擦の有無を比較した結果を示す。初期剛性およびせん断抵抗力ともに、摩擦を部分的に除去した試験体Impr-LSB150-210③の方が低い値となった。摩擦が生じている範囲や摩擦係数の特定には至らなかったが、本結果よりCLTとH形鋼の間には摩擦が発生していることを明らかとした。

2.2.2.5 LSBの損傷の比較

図2.8に実験後のLSBの写真を示す。エポキシ系接着剤を充填した試験体に使用したLSBに損傷は見られなかった一方で、その他のLSBには損傷が確認された。LSBに見られた損傷は、H形鋼フランジ面にめり込んだ変形と、LSB本体の曲げ変形であった。なお、改良版のLSBの曲げ変形による損傷が大きく見られ、これは支圧力によってCLTへ力が伝達されたためだと考えられる。

2.2.2.6 計算値との比較

実験挙動における降伏点は、初期剛性を引き、これを0.2mm横方向に移動させた直線と荷重—変形関係の交点とする0.2mmオフセット法により定義した。また、降伏点の計算値は木質構造設計基準・同解説⁶⁾による式(1)で評価した。

$${}_{cal}P_y = C \cdot F_e \cdot d \cdot l \quad (1)$$

ここで、 ${}_{cal}P_y$:本接合方法におけるLSB1本当たりの降伏耐力、 C :降伏モード、 F_e :木材の基準支圧強度、 d :LSBの谷径、 l :LSBの埋め込み長さである。基準支圧強度 F_e は、木質材料にCLTを使用しているため、LSB埋め込み部の強軸層数と弱軸層数の比に応じて式(2)によって求めた⁷⁾(表2.3参照)。なお表2.4中の ${}_{cal}P_y$ は、上記値をLSB本数分として4倍した値である。

$$F_e = aF_0 + bF_{90} \quad (2)$$

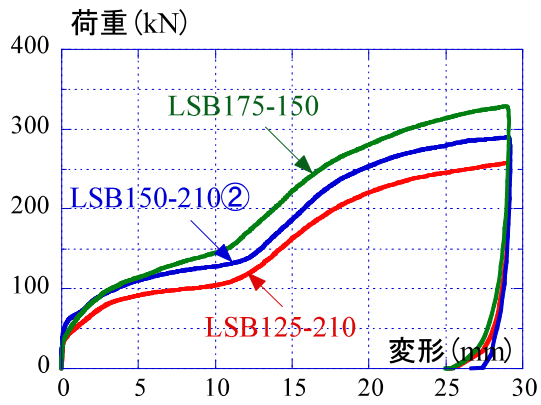
ここで、 a :LSB埋め込み部のCLT全層数に対する強軸層数の比、 F_0 :スギの荷重角度0度(強軸)における基準支圧強度(=19.4N/mm²)、 b :LSB埋め込み部のCLT全層数に対する弱軸層数の比、 F_{90} :スギの荷重角度90度(弱軸)における基準支圧強度(=9.7N/mm²)である。

計算結果一覧を表2.4に示す。実験値と計算値で求めた降伏点を比較すると、改良前のLSBを使用した試験体は、精度よく評価できていないことがわかる。これは、座掘り部分においてLSBの頭部のみが曲げ変形を受け、CLTへ力が伝達されていないためだと考えられる。これに対し、改良版LSBおよびエポキシ系接着剤を使用した試験体は、LSB頭部からCLTへ円滑に支圧力として応力を伝達できるため、概ねよく評価できている。なお、実験値に対する計算値の比は0.81~1.05であった。よって、改良前のLSBを除いて、本実験挙動の降伏点は木質構造設計基準・同解説に記載されている曲げ降伏型の理論式で評価できるものと考えられる。

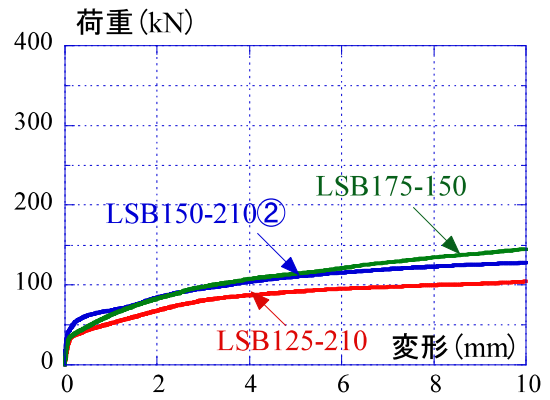
また、明瞭に最大耐力 P_{max} が発揮された試験体LSB15-210③ep1に関して、木質構造設計基準・同解説に記載されている降伏点の算出方法(0.1 P_{max} 、0.4 P_{max} 、0.9 P_{max} の接線から算出)で算定すると、降伏点は $P_y = 173.7kN$ 、 $\delta_y = 0.985mm$ となる。0.2mmオフセット法では改良版LSBと大きな差は見られなかったが、上記算出法に従えば、エポキシ系接着剤を充填することの優位性が見て取れる。

2.2.2.7 既往の接合方法との比較

図2.7に頭無しスタッドボルトとエポキシ系接着剤で接合した方法で得られた実験挙動との比較を示す。改良前のLSBを使用した実験挙動では、既往の接合方法に劣るが、改良版のLSBまたは、エポキシ系接着剤で座掘りを充填した試験体では、既往の接合方法を上回る耐力を発揮できていることが分かる。また、変形性能に関しても、LSBを使用した試験体の方がより優れた靱性を確保できるものと考えられる。

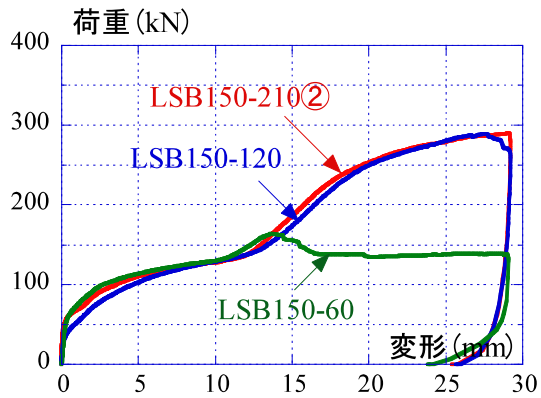


(a-1) 全体

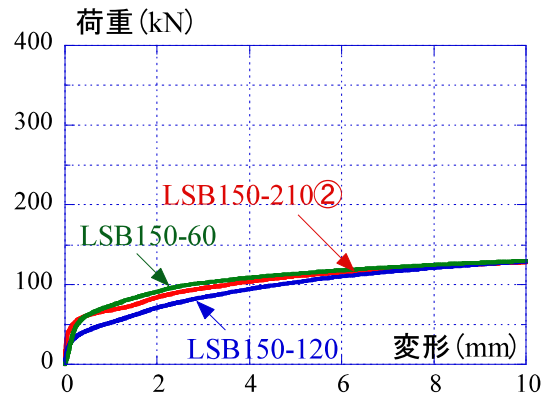


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) 埋め込み長さの比較

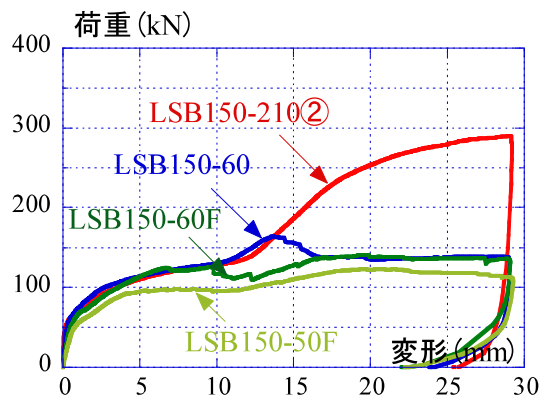


(b-1) 全体

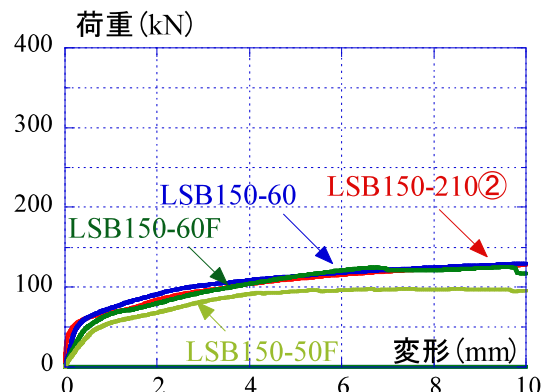


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) 端距離の比較



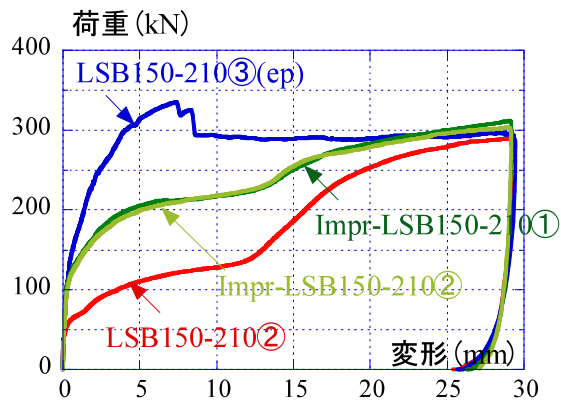
(c-1) 全体



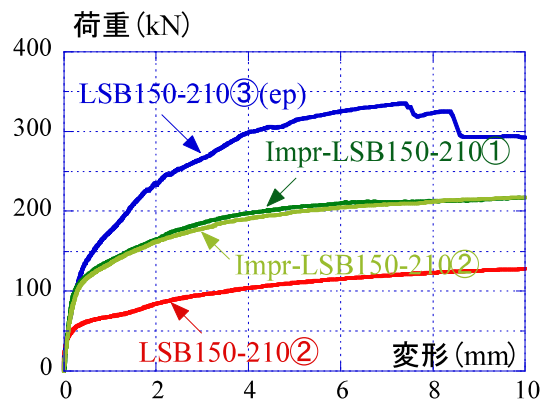
(c-2) 10mmまでの拡大

(c) 縁距離の比較

図2.6-1 各影響因子による荷重－変形関係の比較（続く）

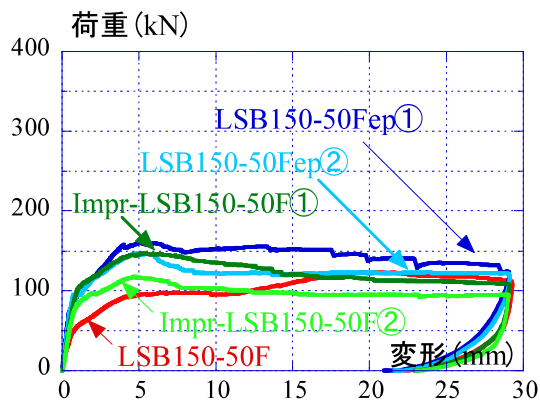


(d-1) 全体

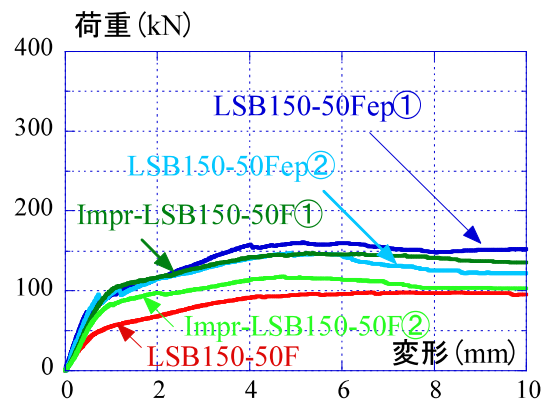


(d-2) 10mmまでの拡大

(d) LSBの形状の比較 LSB150-210シリーズ

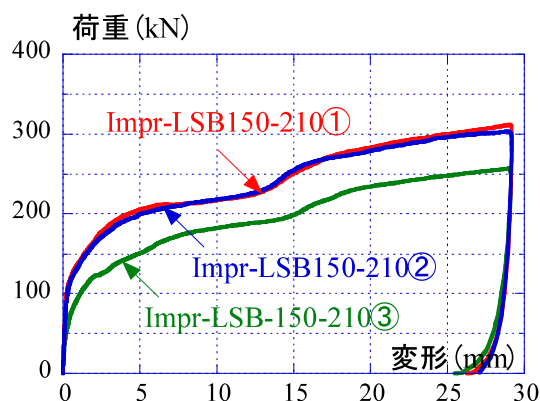


(e-1) 全体

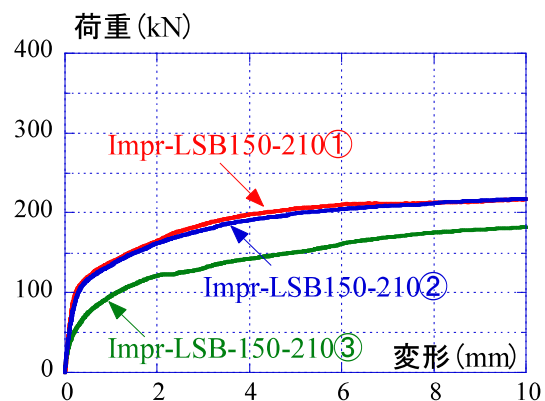


(e-2) 10mmまでの拡大

(e) LSBの形状の比較 LSB150-50Fシリーズ



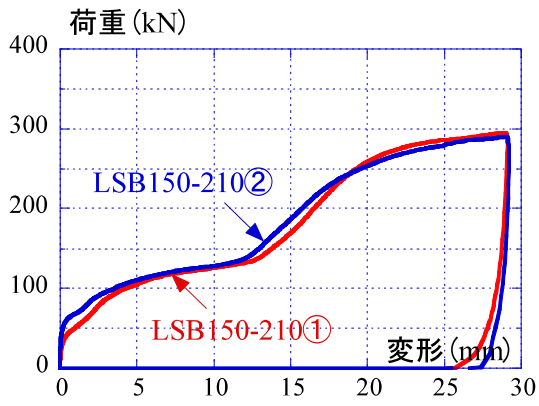
(f-1) 全体



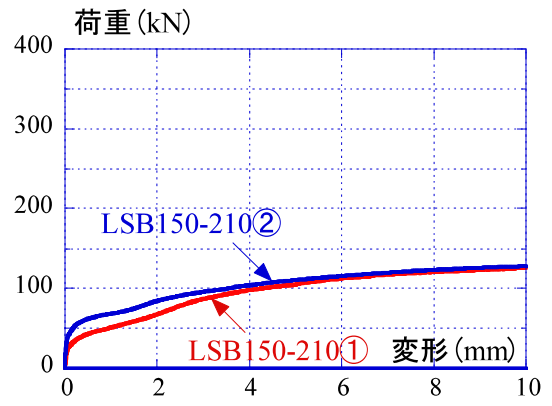
(f-2) 10mmまでの拡大

(f) 木鋼間の摩擦の比較

図2.6-2 各影響因子による荷重—変形関係の比較 (続く)



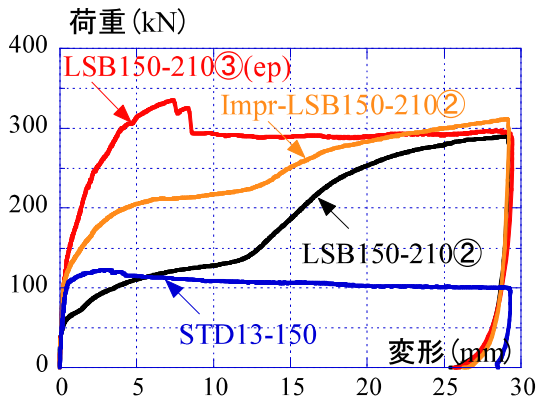
(g-1) 全体



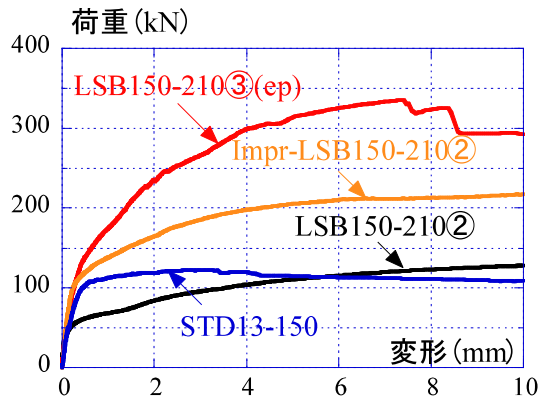
(g-2) 10mmまでの拡大

(g) フランジに設けた孔径の比較

図2.6-3 各影響因子による荷重-変形関係の比較 (続き)

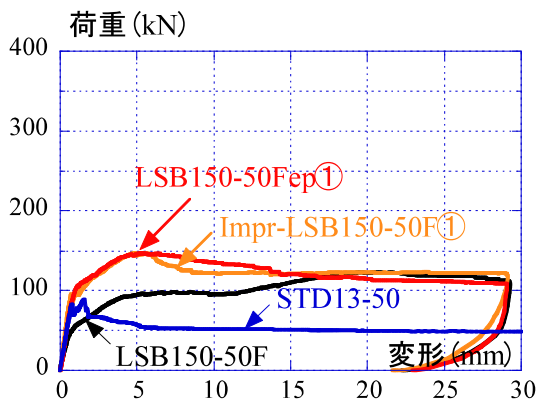


(a-1) 全体

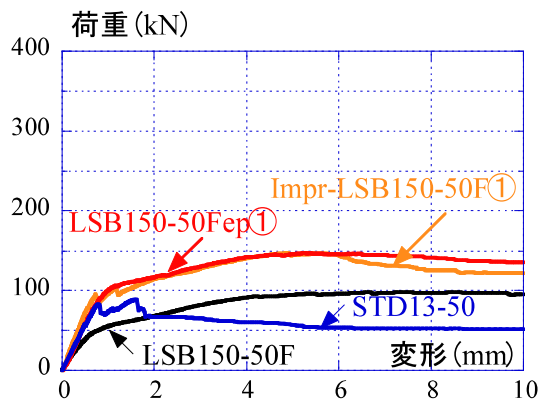


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) 端距離210mmでの比較



(b-1) 全体



(b-2) 10mmまでの拡大

(b) 縁距離50mmでの比較

図2.7 既往の接合方法 (スタッド+エポキシ系接着剤) との比較



(a) 試験体LSB150-210②



(b) 試験体LSB150-50Fep②



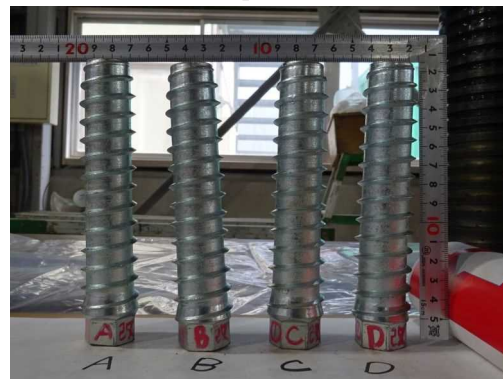
(c) 試験体Impr-LSB150-210①



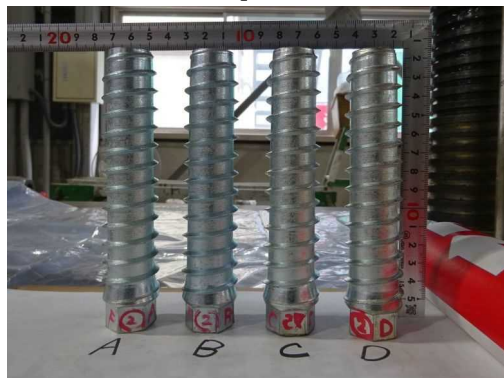
(d) 試験体Impr-LSB150-210②



(e) 試験体Impr-LSB150-210③



(f) 試験体Impr-LSB150-50F①



(g) 試験体Impr-LSB150-50F②

図2.8 LSBの損傷の比較

表2.3 基準支圧強度の算出

試験体名	強軸(mm)	弱軸(mm)	強軸a	弱軸b	Fe(N/mm ²)
LSB125-210	60	60	0.50	0.50	14.6
LSB150-210①	90	60	0.60	0.40	15.5
LSB150-210②	90	60	0.60	0.40	15.5
LSB150-210③(ep)	90	60	0.60	0.40	15.5
LSB175-210	120	60	0.66	0.33	16.0
LSB150-120	90	60	0.60	0.40	15.5
LSB150-60	90	60	0.60	0.40	15.5
LSB150-60F	60	90	0.40	0.60	13.6
LSB150-50F	60	90	0.40	0.60	13.6
LSB150-50Fep①	60	90	0.40	0.60	13.6
LSB150-50Fep②	60	90	0.40	0.60	13.6
Impr-LSB150-210①	90	60	0.60	0.40	15.5
Impr-LSB150-210②	90	60	0.60	0.40	15.5
Impr-LSB150-210③	90	60	0.60	0.40	15.5
Impr-LSB150-50F①	60	90	0.40	0.60	13.6
Impr-LSB150-50F②	60	90	0.40	0.60	13.6

※計算の簡易化のため、埋め込み長さが125mm,175mmの試験体はそれぞれ120mm, 180mmと仮定。

表2.4 実験値と計算値の比較 (0.2mmオフセット法)

試験体名	K (kN/mm)	$P_{y0.2}$ (kN)	$\delta_{y0.2}$ (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	$calP_y$ (kN)	$cal\delta_y$ (mm)	$P_{y0.2}/calP_y$
LSB125-210	738.7	38.4	0.30	257.3	29.1	88.1	4.21	0.44
LSB150-210①	606.5	36.4	0.28	295.0	28.9	100.4	4.30	0.36
LSB150-210②	1434.3	54.5	0.26	289.8	29.1	100.4	3.60	0.54
LSB150-210③(ep)	717.2	125.3	0.39	335.0	7.4	118.8	0.35	1.05
LSB175-210	688.5	40.4	0.28	327.9	28.9	114.1	5.01	0.35
LSB150-120	499.5	36.4	0.28	288.8	27.4	100.4	4.73	0.36
LSB150-60	229.5	60.6	0.48	163.7	13.7	100.4	2.76	0.60
LSB150-60F	119.6	56.6	0.69	140.4	19.0	91.3	2.80	0.62
LSB150-50F	92.5	50.5	0.76	123.0	19.8	91.3	4.01	0.55
LSB150-50Fep①	163.9	86.9	0.74	160.0	5.2	106.6	1.63	0.81
LSB150-50Fep②	151.0	86.9	0.79	146.9	4.9	106.6	1.64	0.81
Impr-LSB150-210①	573.7	113.1	0.39	311.1	29.0	112.1	0.37	1.01
Impr-LSB150-210②	573.7	111.1	0.40	303.0	28.8	112.1	0.43	0.99
Impr-LSB150-210③	573.7	60.6	0.32	256.9	29.1	112.1	1.58	0.54
Impr-LSB150-50F①	133.4	103.0	1.04	146.9	5.3	101.0	1.02	1.02
Impr-LSB150-50F②	119.5	82.8	0.97	118.0	4.7	101.0	2.76	0.82

3. 円形鋼管を用いた鉄骨梁とCLT床のせん断押し抜き実験

3.1 実験計画

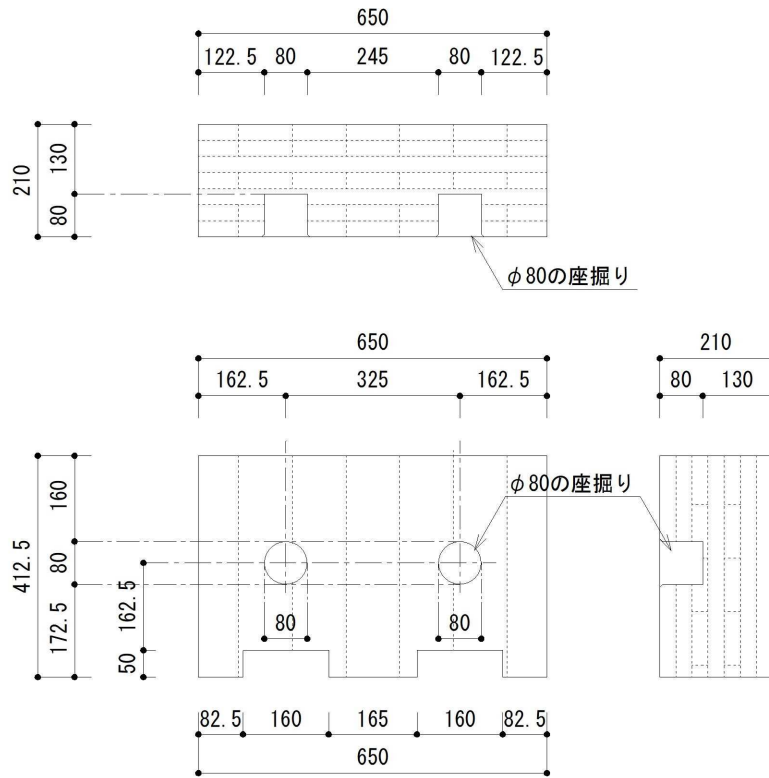
3.1.1 実験概要

本章では、新たな接合方法として、接着剤を使用せずに円形鋼管をシアキーとして用いることで、鉄骨梁とCLT床材を接合する方法を提案し、その力学的挙動について実験的に検討することを目的とする。本接合方法の利点は、接着剤を使用しないことによるコスト削減と施工性の向上などが挙げられる。また、本接合における応力伝達は円形鋼管がCLT床を押し出すことによる支圧作用に期待するため、円形鋼管の管幅や長さを変化させることで、比較的容易に耐力調整が行えるものと考えられる。円形鋼管をシアキーとして使用する際に検討すべき重要な項目は、シアキー一つ当たりの耐力と剛性である。これらを調べるため、押し抜きせん断実験を実施した。

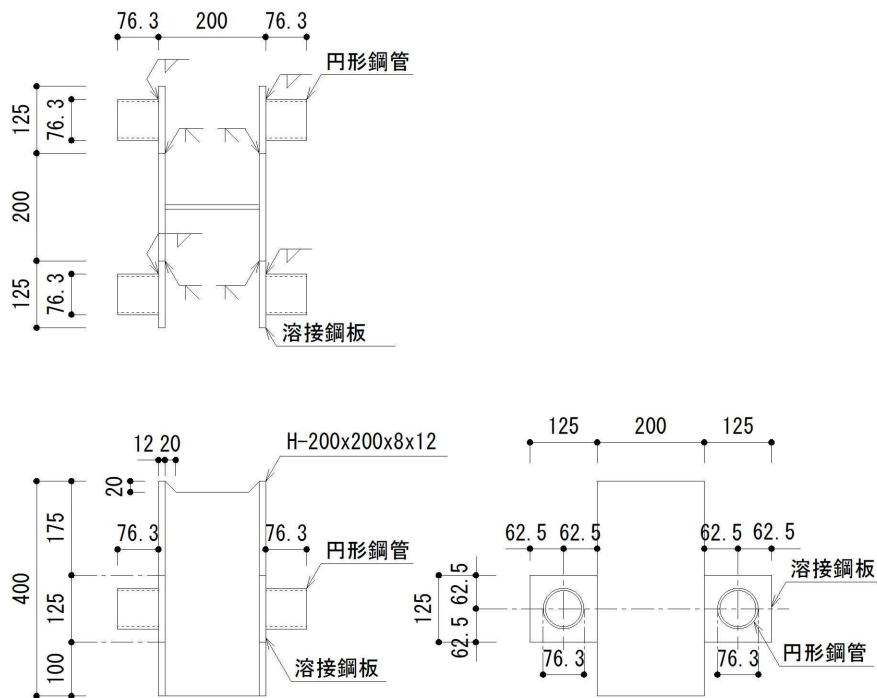
3.1.2 試験体

試験体を図3.1に示す。CLTは5層7プライ(スギMx60-5-7, 山佐木材株式会社より提供)の厚さ210mmである。CLTには、シアキーとなる円形鋼管がスムーズに入るよう、直径80mmで長さ80mmの座掘り加工を施した(図3.1(a)参照)。H形鋼にはH-200x200x8x12を用い、フランジに4枚の溶接鋼板を完全溶け込み溶接で取り付け、溶接後に溶接面をガウジングで平滑化した。なお、溶接鋼板のサイズは12mm厚の125mmx125mmで鋼種はSS400である。さらに、この溶接鋼板にシアキーとなる円形鋼管を外周隅肉溶接にて接合した(図3.1(b)参照)。円形鋼管は、直径76.3mm、板厚4.2mm、長さ76.3mmで鋼種はSTK400を用いた。また、試験体の組み立ては、H形鋼の両側にCLTをはめ込み、一体化させた。シアキーとなる鋼管とCLTは支圧力のみで抵抗させるようにし、隙間等の処理は行っていない。

試験体はばらつきを考慮して、同一条件で2体実施した。



(a) CLT試験体詳細



(b) H形鋼詳細

図3.1 試験体詳細図

3.1.3 載荷方法

図3.2に載荷方法を示す。載荷はピンを介して100t万能試験機より鉛直方向に荷重を加えた。変形は、円形鋼管埋め込み位置におけるH形鋼とCLT間の相対ずれ変位を、四箇所に変位計により計測した。



図3.2 載荷方法

3.2 実験結果

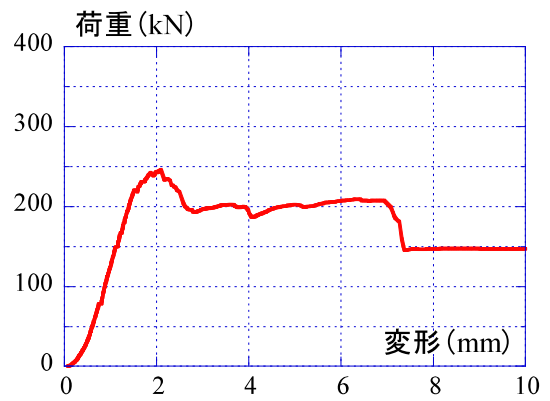
図3.3に実験で得られた荷重－変形関係を示す。横軸の変形は四箇所の変位計の平均値を示している。それぞれの荷重－変形関係において、30mmまで変形させた全体図と、10mmまでの変形を拡大した二つの荷重－変形関係を記載している。また、実験後の写真を図3.4に示す。

実験前のH形鋼は、フランジに対して鋼板が外側に反って溶接されており、CLTとH形鋼のフランジ部分に隙間が生じていた。実験中はCLTの開きと鋼管がCLTにめり込むことで、CLTの孔に対してH形鋼が斜めになるため、鋼板上部にも隙間が観察された。なお、実験後のH形鋼および円形鋼管に損傷はなかった。CLTに亀裂が入ることで荷重が低下し、試験体PIPE①は変形7.5mm付近、試験体PIPE②は変形15mm付近で荷重が一定になった。また、変形表面の孔直下に繊維方向に亀裂が入り、亀裂は一層目まで入ったことが確認された。二つの試験体において、同一条件ではあるが、最大荷重に大きな違いが見られた。明確な原因は不明であるが、本接合ではCLTへの亀裂発生で最大耐力が決定されるため、亀裂の入り方によって差異が生じたものと推察される。

図3.3(c)には、既往の実験で実施した、端距離50mm（円形鋼管下端からCLT縁までの距離）との比較を示す。本実験の試験体では、端距離は122.5mmとなるが、初期剛性において明瞭な差異が見られた。いずれも押抜きせん断実験であり、縁距離の違いによる影響も十分に考えられる一方で、試験体の設置方法を変えていることも考慮しなければならない。試験方法および試験体数の再考も含めて、より詳細な検討が必要であるものと考えられる。

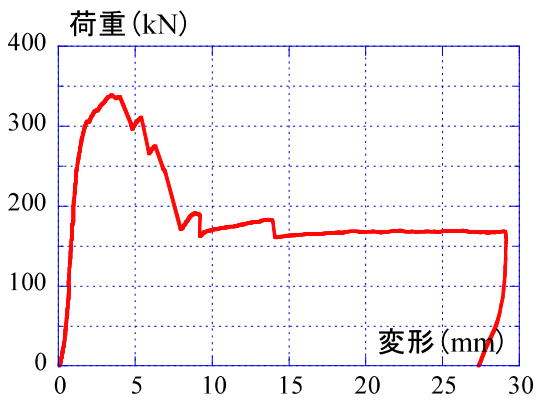


(a-1) 全体

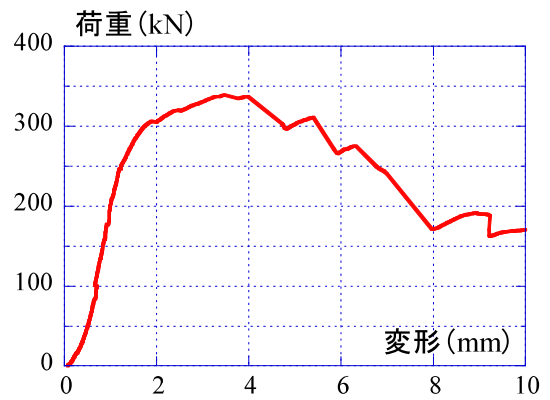


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) PIPE①

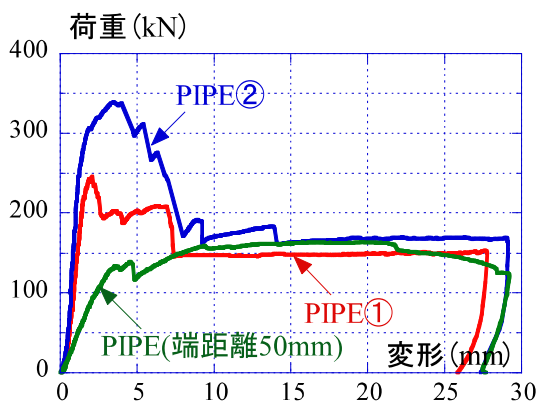


(b-1) 全体

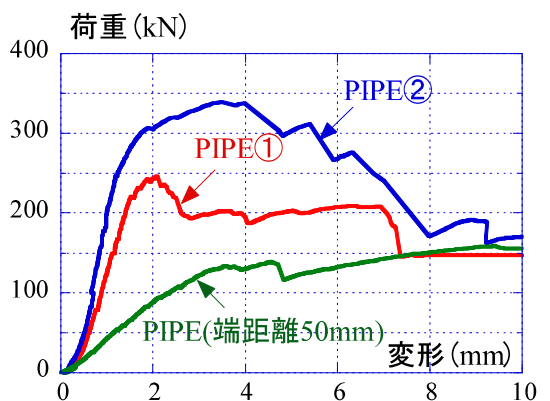


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) PIPE②



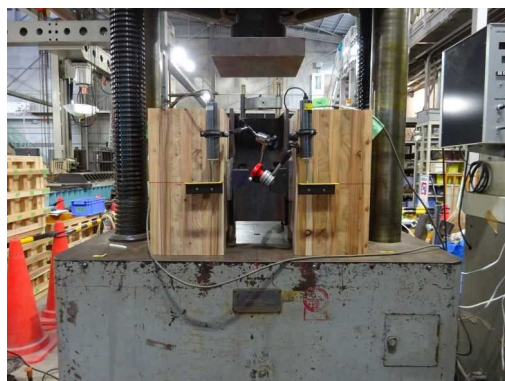
(c-1) 全体



(c-2) 10mmまでの拡大

(c) 端距離の比較

図3.3 荷重—変形関係



(a-1) 試験体PIPE①のAB側



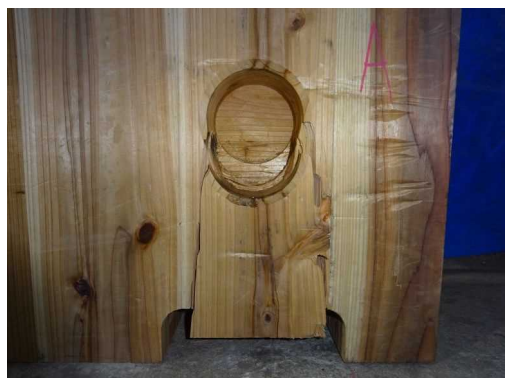
(a-2) 試験体PIPE①のCD側



(a-3) CLT AC側



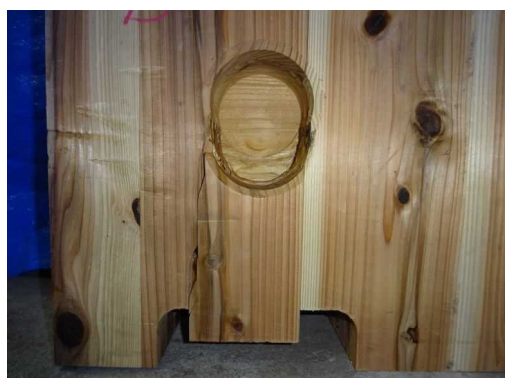
(a-4) CLT BD側



(a-5) CLT A解体時



(a-6) CLT C解体時



(a-7) CLT B解体時



(a-8) CLT D解体時

(a) 試験体PIPE①

図3.4-1 実験後写真 (続く)



(a-9) CLT AC側底面



(a-10) CLT BD側底面



(a-11) CLT A底面



(a-12) CLT C底面



(a-13) CLT B底面



(a-14) CLT D底面



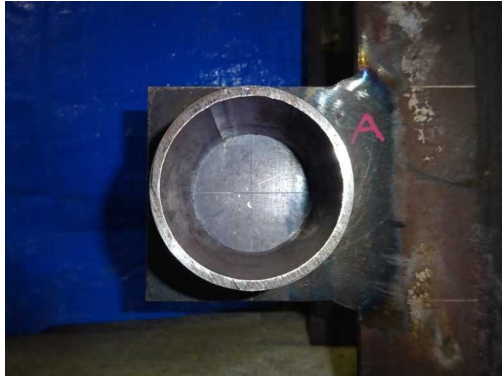
(a-15) H形鋼 AC側



(a-16) H形鋼 BD側

(a) 試験体PIPE①

図3.4-2 実験後写真 (続く)



(a-17) H形鋼 A解体時



(a-18) H形鋼 C解体時



(a-19) H形鋼 B解体時



(a-20) H形鋼 D解体時

(a) 試験体PIPE①

図3.4-3 実験後写真 (続く)



(b-1) 試験体PIPE②のAB側



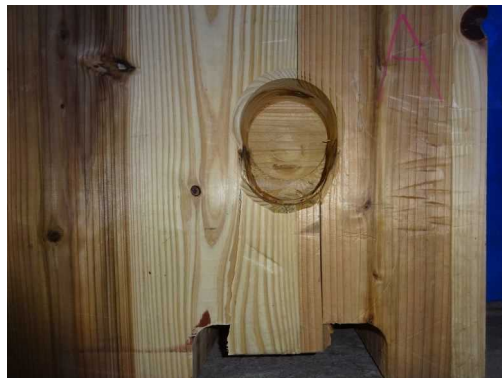
(b-2) 試験体PIPE②のCD側



(b-3) CLT AC側



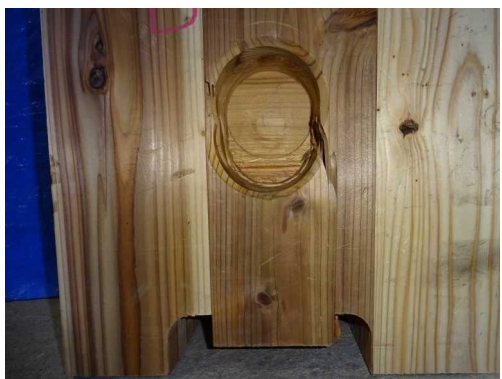
(b-4) CLT BD側



(b-5) CLT A解体時



(b-6) CLT C解体時



(b-7) CLT B解体時



(b-8) CLT D解体時

(b) 試験体PIPE②

図3.4-4 実験後写真 (続く)



(b-9) CLT AC側底面



(b-10) CLT BD側底面



(b-11) CLT A底面



(b-12) CLT C底面



(b-13) CLT B底面



(b-14) CLT D底面



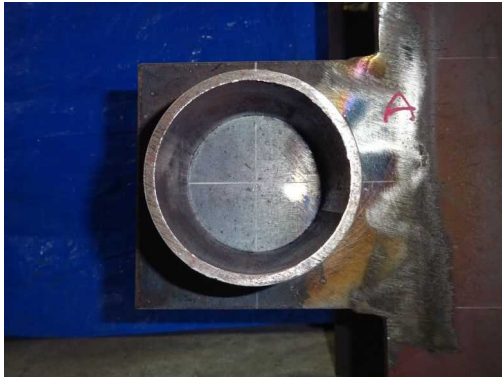
(b-15) H形鋼 AC側



(b-16) H形鋼 BD側

(b) 試験体PIPE②

図3.4-5 実験後写真 (続く)



(b-17) H形鋼 A解体時



(b-18) H形鋼 C解体時



(b-19) H形鋼 B解体時



(b-20) H形鋼 D解体時

(b) 試験体PIPE②

図3.4-6 実験後写真 (続き)

4. コッター接着剤接合によるCLT床相互の押し抜きせん断実験

4.1 実験計画

4.1.1 実験概要

本章では、床相互の接合方法として、床木口面にコッターを設けて接着剤を使用した場合のCLT床相互の接合方法について検討する。本接合方法に対して、せん断抵抗力ならびに最終破壊性状を調べるため、押し抜きせん断実験を行なった。

4.1.2 試験体

試験体一覧を表4.1に、試験体詳細図を図4.1に示す。CLTは5層7プライ（スギMx60-5-7、山佐木材株式会社より提供）で厚さは210mmである。本研究で想定するコッターと接着剤を用いた接合方法を概略説明する。まず、CLT木口面に凹凸状の切り欠きを設け、コッターを形成する。次に、コッターに接着剤を塗布し、CLT同士を一体化させる。本実験で使用した接着剤は、ホームコネクター工法で使用されている変性エポキシ樹脂であり、AHC-Eホームコネクター専用接着剤（半硬質型湿潤面接着剤）を用いた。所定の時間の接着後に簡易圧着バイスを解圧した。

本実験では、主にコッターのサイズおよび形状の違いを実験変数に選定し、これらの違いが接合部の挙動に及ぼす影響について検討する。コッターの形状として、単純な凹凸型に加え、端部をテーパ加工したものも用意し、深さは50mmおよび100mmの違いを調べることとした。なお、コッターは製作の都合上、コーナー部には半径20mmの丸みがつけられている。試験体名はD [コッターの深さ][T:テーパ加工の有無][h:矩形とテーパの複合タイプ]と区別した。

試験体D50、D100およびD100Thは施工性を考慮して、コッターの上下に4mm程度の隙間を設けた。つまり、試験体D50およびD100は、接着剤を塗布しているのは材長方向のみとなる。試験体D50TおよびD100Tはテーパ加工されたものであり、接触面全体に接着剤を塗布している。試験体D100Thは深さ50mmのみテーパ加工し、接着剤は材長方向とテーパ面に塗布した。図4.1において、接着剤を塗布した箇所を斜線で記載している。なお、テーパ部の角度は45度で統一した。表4.2に実験前のCLT相互間の隙間の大きさを、表4.3に実験前の接着面の寸法と隙間の大きさを、それぞれ示す。

図4.2に全試験体共通の上面図を示す。試験体の北東側のコッターをA、南東側のコッターをB、北西側のコッターをC、南西側のコッターをDとして管理する。

表4.1 試験体一覧

試験体名	サイズ (mm)	CLT厚 (mm)	コッター形状	接着剤塗布面
D50	650×400	210	長方形	材長方向のみ
D100	650×400	210	長方形	材長方向のみ
D50T	650×400	210	テーパ形	接触全面
D100T	650×500	210	テーパ形	接触全面
D100Th	650×400	210	長方形+テーパ形	材長方向+テーパ面

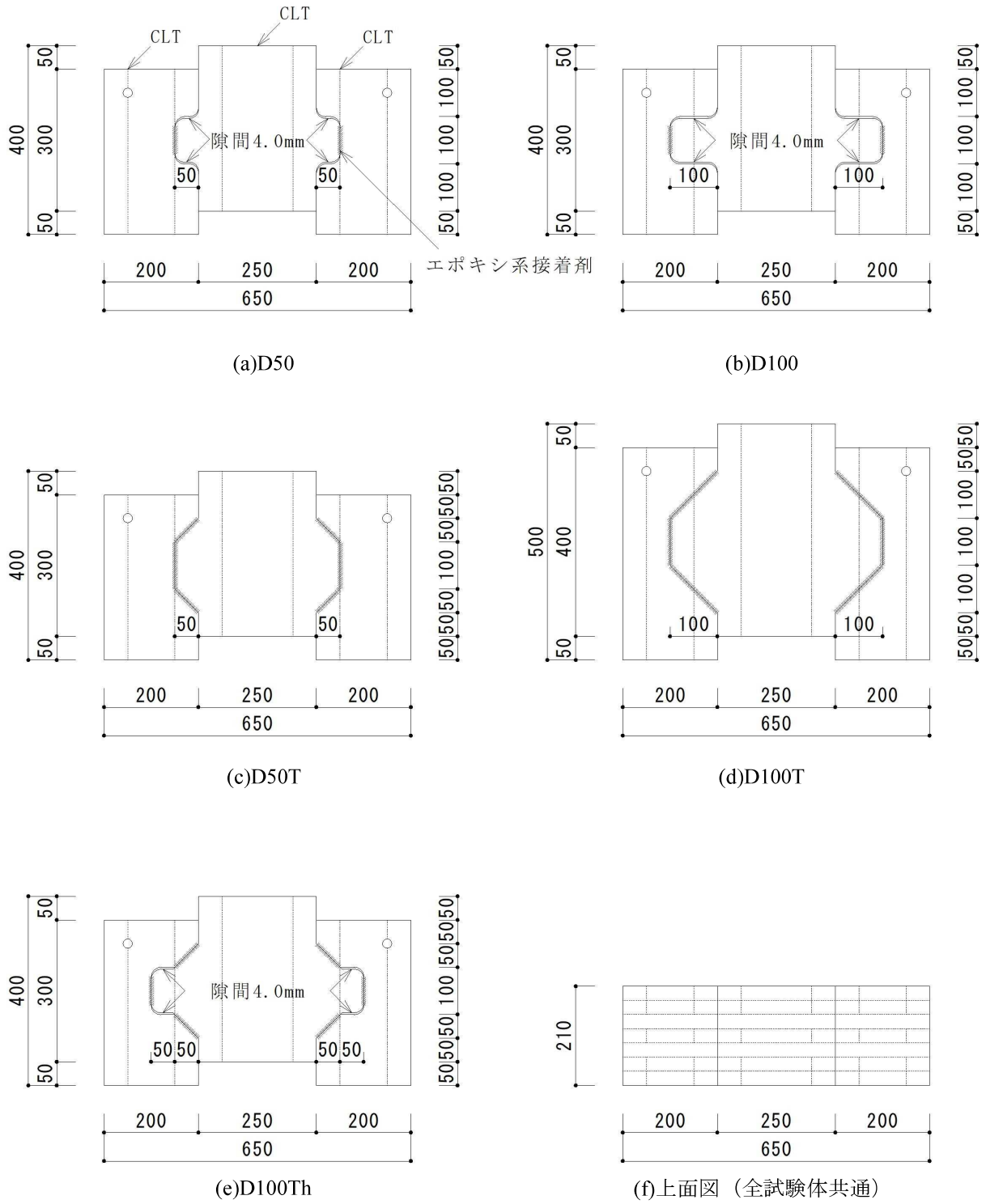


図4.1 試験体詳細

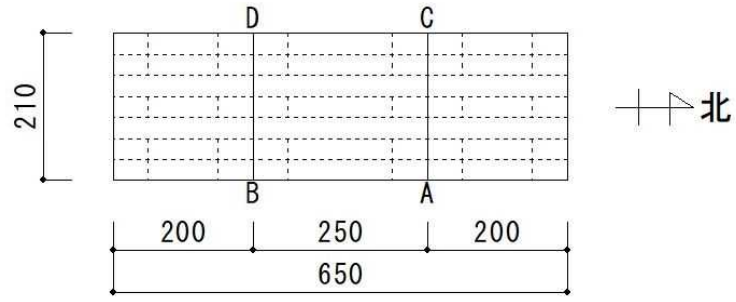


図4.2 コッター名

表4.2 実験前のCLT相互間の隙間の大きさ

試験体名	コッター名	CLT相互間の隙間の大きさ(mm)	
		R_1 (mm)	R_2 (mm)
D50	A	0.0	0.0
	B	0.0	0.0
	C	0.0	0.0
	D	0.0	0.0
D100	A	0.0	0.0
	B	0.0	0.0
	C	3.0	2.5
	D	0.0	0.0
D50T	A	1.0	0.0
	B	4.0	2.0
	C	3.0	1.0
	D	2.0	0.0
D100T	A	0.8	0.0
	B	0.5	1.0
	C	0.0	0.0
	D	3.8	2.0
D100Th	A	0.0	0.5
	B	1.5	3.0
	C	1.5	2.0
	D	0.0	0.8

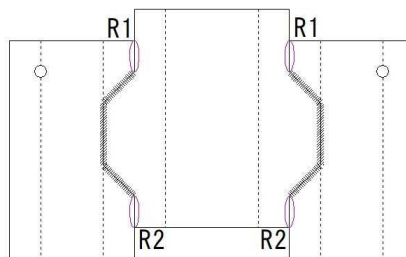
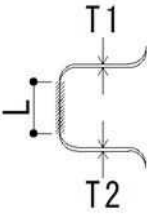
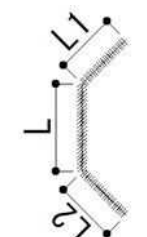
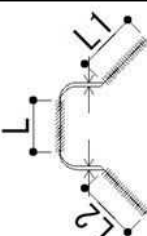


表4.3 実験前の接着面の寸法と隙間の大きさ

試験体名	コッター名	コッターの形状	接着面の寸法			隙間の大きさ	
			$L(\text{mm})$	$L_1(\text{mm})$	$L_2(\text{mm})$	$T_1(\text{mm})$	$T_2(\text{mm})$
D50	A		60(71)	—	—	4.0(5.0)	4.0(2.0)
	B		60(72)	—	—	4.0(4.0)	4.0(3.0)
	C		60(80)	—	—	4.0(5.0)	4.0(3.0)
	D		60(68)	—	—	4.0(3.0)	4.0(3.0)
D100	A		60(60)	—	—	4.0(5.0)	4.0(2.0)
	B		60(70)	—	—	4.0(5.0)	4.0(2.0)
	C		60(60)	—	—	4.0(5.0)	4.0(2.0)
	D		60(70)	—	—	4.0(5.0)	4.0(2.0)
D50T	A		100(100)	70.7(70.0)	70.7(70.0)	—	—
	B		100(100)	70.7(60.0)	70.7(70.0)	—	—
	C		100(100)	70.7(65.0)	70.7(65.0)	—	—
	D		100(100)	70.7(70.0)	70.7(65.0)	—	—
D100T	A		100(100)	141(135)	141(140)	—	—
	B		100(100)	141(135)	141(135)	—	—
	C		100(100)	141(140)	141(135)	—	—
	D		100(100)	141(135)	141(135)	—	—
D100Th	A		60(70)	70.7(65.0)	70.7(70.0)	4.0(4.0)	4.0(3.0)
	B	60(55)	70.7(65.0)	70.7(60.0)	4.0(5.0)	4.0(3.0)	
	C	60(70)	70.7(65.0)	70.7(68.0)	4.0(4.0)	4.0(3.0)	
	D	60(50)	70.7(60.0)	70.7(65.0)	4.0(5.0)	4.0(2.0)	

※()内の数値は実測値を示す

4.1.3 荷重方法

荷重状況を図4.3に示す。荷重は1000kN万能試験機を用いて、一方向に荷重を加えた。実験中に試験体が開かないように、試験体下部には直径16mmのネジ節鉄筋とチャンネル材から成る開き止めを設置した。なお、ネジ節鉄筋には1本につき2箇所ひずみゲージを貼付している。変形は、コーナー中央部におけるCLT間の相対ずれ変位を、4箇所に変位計により計測した。

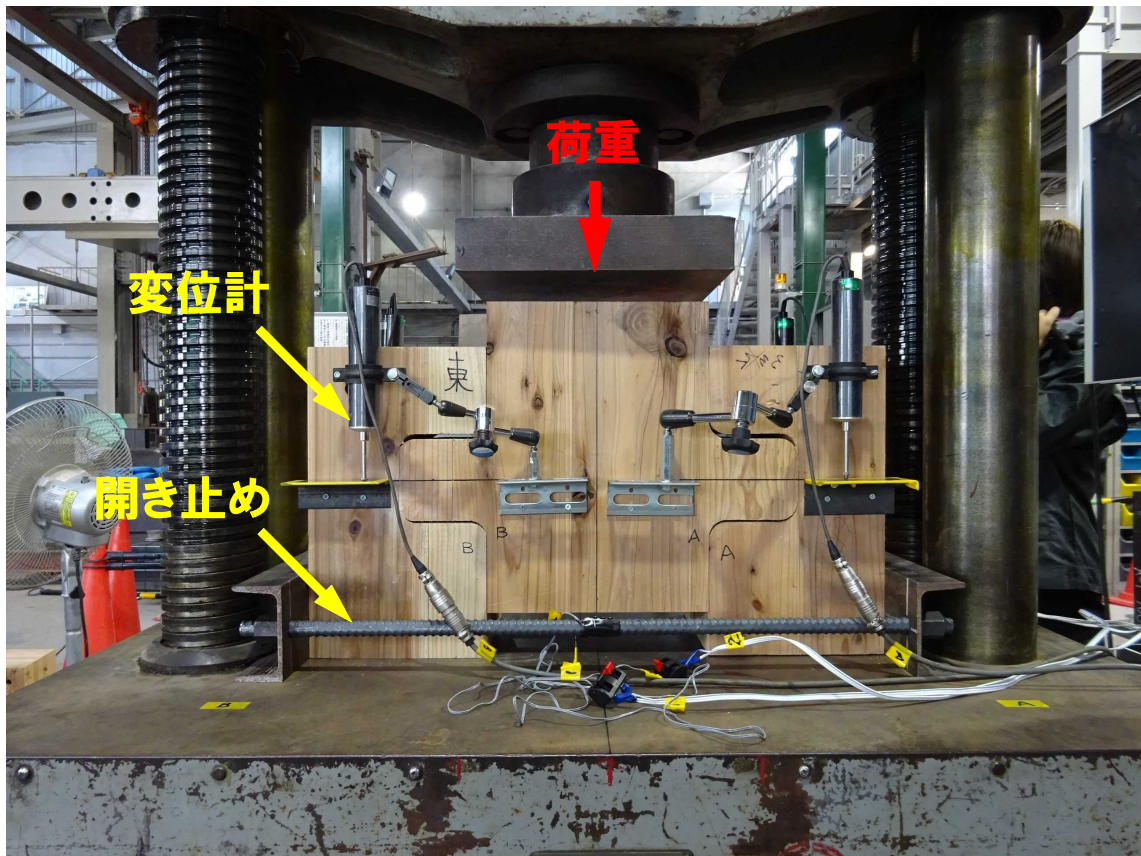


図4.3 荷重装置の写真

4.2 実験結果

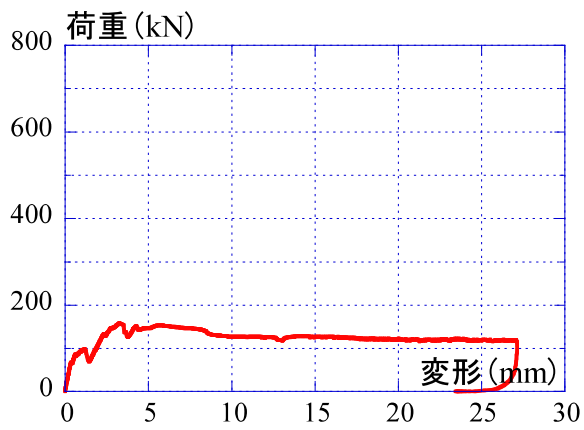
4.2.1 荷重－変形関係

実験で得られた荷重－変形関係を図4.4に示す。図4.4(a)～(e)は各試験体の結果、同図(f)は全試験体の結果を比較したものを示す。それぞれの荷重－変形関係において、30mmまで変形させた全体と、10mmまでの変形を拡大した2つのグラフを示している。横軸は4箇所の変位計で計測した変形の平均値を示している。試験体D100は、計測不備のため、変位計Cを除いた3箇所の変位計で計測した変形の平均値を示した。

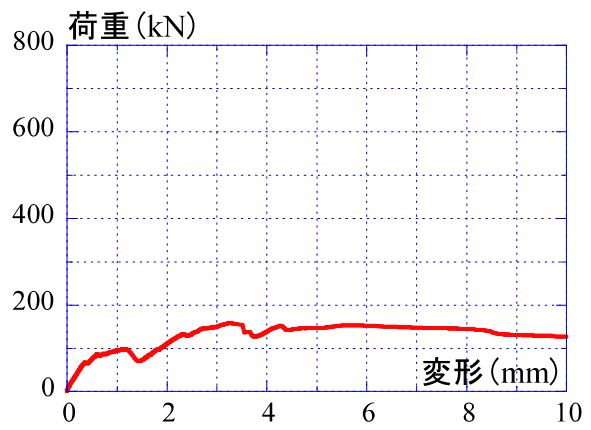
全試験体とも最大耐力を発揮するとともにコッター部分に大きな亀裂が生じ、荷重が低下した。試験体D50およびD100は、初期剛性および最大せん断抵抗力ともにテーパー加工を施した試験体より小さい値となった。これは、コッターの上下に隙間を設けているために、コッター接着面を基点に曲げ変形が生じ、初期剛性の低下につながったためだと考えられる。また、最大せん断抵抗力の低下はコッター底面の断面積が、他三体の試験体よりも小さいためである。一方、テーパー加工を設けることにより、接着面積の増大とともに、初期剛性の向上が見られた。ただし、最大せん断抵抗力を発揮するとともに急激な耐力低下が見られる脆性的な挙動には注意を要する。

各試験体の実験後の写真を図4.5に示す。また、各試験体の解体後の写真を図4.6に示す。図4.6より、最終破壊性状は、コッターの強軸層と弱軸層で段差が生じるような様相を呈していることがわかる。試験体D50およびD100の強軸層のCLTはコッターの底面部分に亀裂が生じ、変形の増大とともにコッター部のCLTが剥落した。一方、弱軸層のCLTはコッターの底面部分に亀裂は生じず、コッターが下部CLTに接触したことで支圧力を受け、部分的に圧縮変形を起こした。また、コッターの強軸層および弱軸層には曲げ変形が生じた。試験体D50およびD100の曲げ変形を比較すると、試験体D100は深さがより大きいために試験体D50に比べて大きな曲げ変形が生じていることが確認された。この曲げ変形は、施工性を考慮して設けられたコッターの上下の隙間があるために生じたものと考えられる。

試験体D50T、D100TおよびD100Thの強軸層のCLTはコッターの底面部分に亀裂が生じ、変形の増大とともにコッター部のCLTが剥落した。一方、弱軸層のCLTはコッターの底面部分に亀裂は生じなかった。なお、解体後の写真において、試験体D100Tは手作業における解体が困難であったため、電動工具を用いて切断したものである（図4.6-4参照）

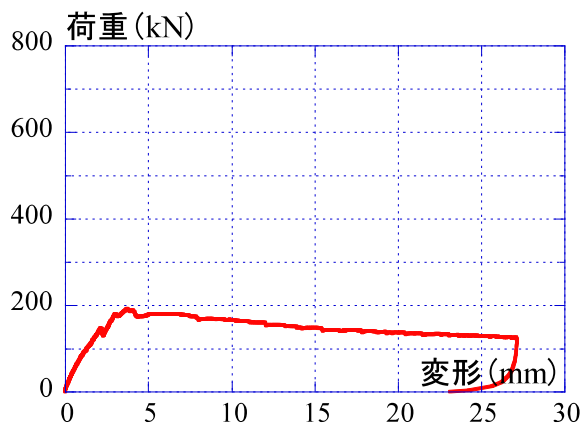


(a-1) 全体

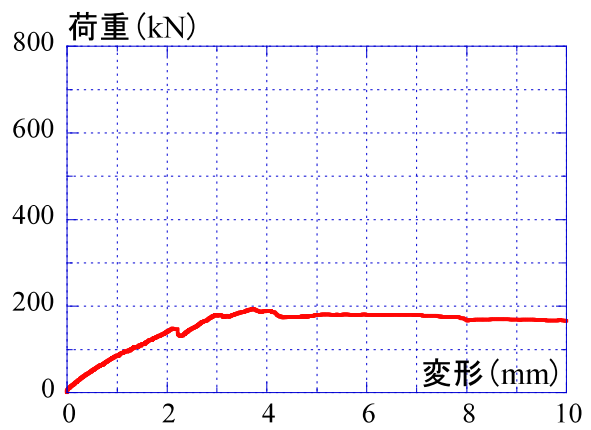


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) 試験体D50

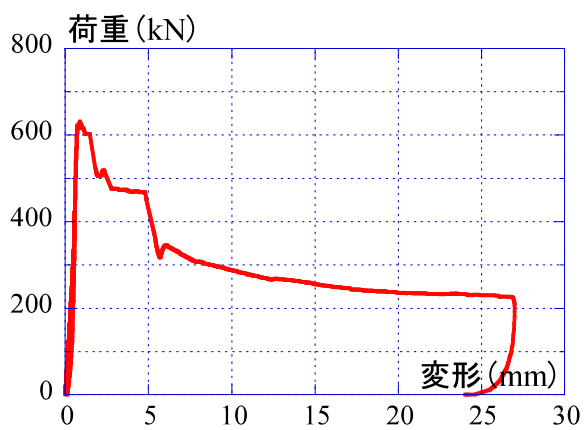


(b-1) 全体

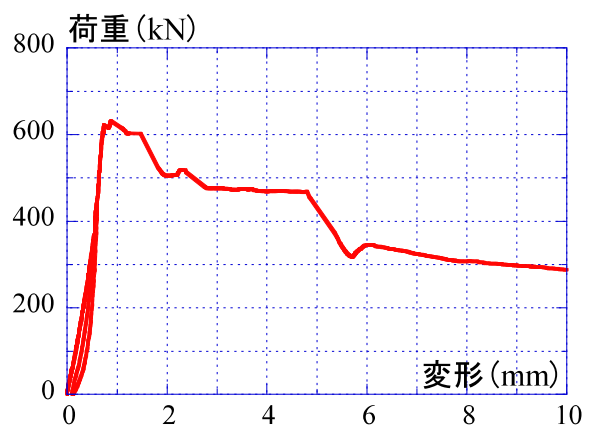


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) 試験体D100



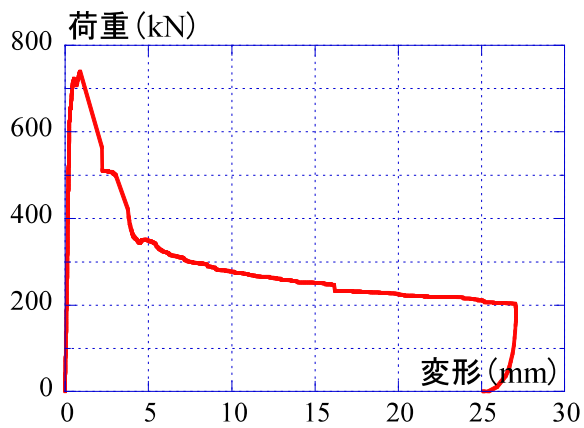
(c-1) 全体



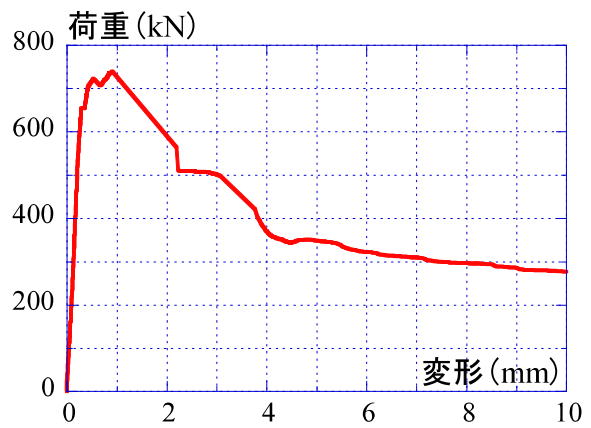
(c-2) 10mmまでの拡大

(c) 試験体D50T

図4.4-1 荷重-変形関係 (つづく)

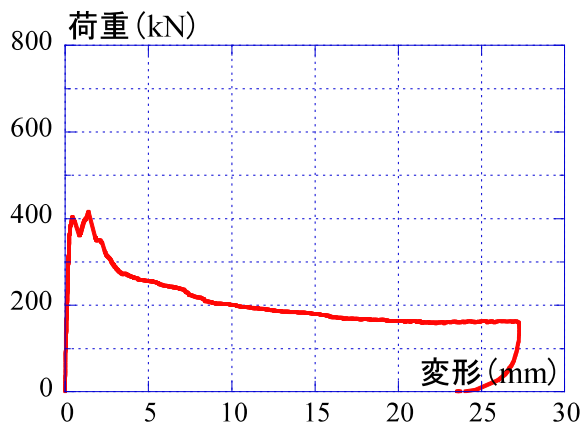


(d-1) 全体

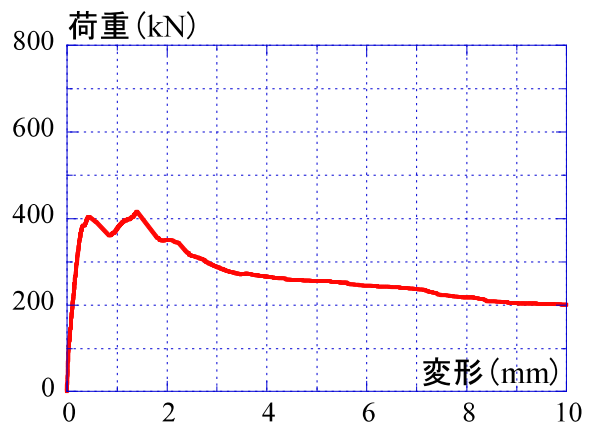


(d-2) 10mmまでの拡大

(d) 試験体D100T

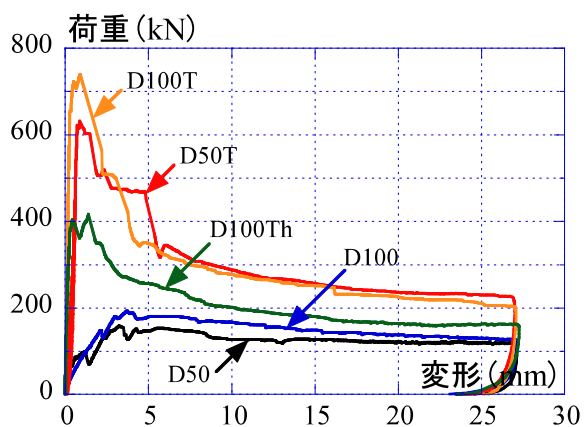


(e-1) 全体

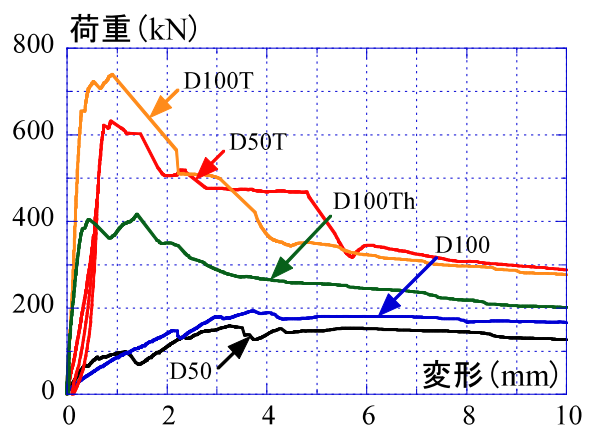


(e-2) 10mmまでの拡大

(e) 試験体D100Th



(f-1) 全体



(f-2) 10mmまでの拡大

(f) 全試験体比較

図4.4-2 荷重-変形関係 (つづき)



(a-1) コッターAおよびB面 (東側)



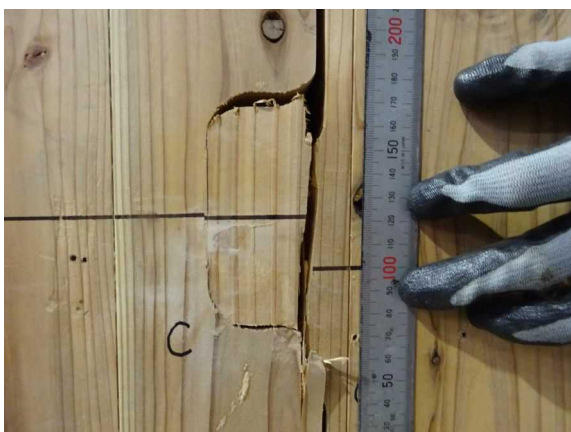
(a-2) コッターCおよびD面 (西側)



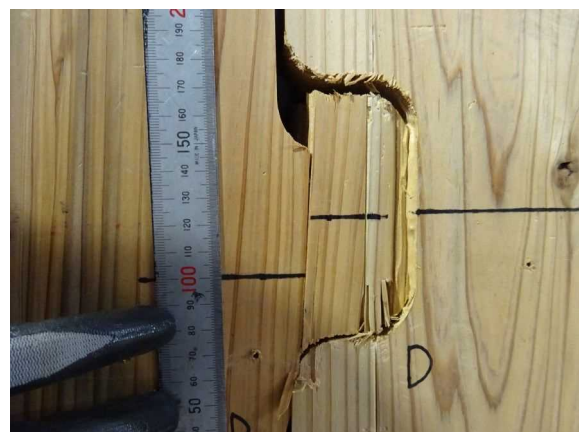
(a-3) コッターA面



(a-4) コッターB面



(a-5) コッターC面



(a-6) コッターD面

(a) 試験体D50

図4.5-1 実験後写真 (続く)



(b-1) コッターAおよびB面 (東側)



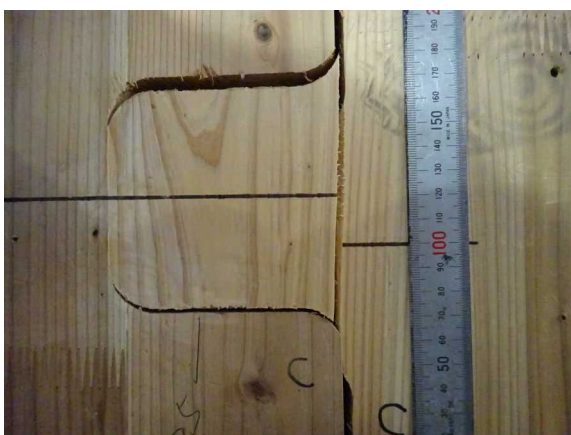
(b-2) コッターCおよびD面 (西側)



(b-3) コッターA面



(b-4) コッターB面



(b-5) コッターC面



(b-6) コッターD面

(b) 試験体D100

図4.5-2 実験後写真 (続く)



(c-1) コッターAおよびB面 (東側)



(c-2) コッターCおよびD面 (西側)



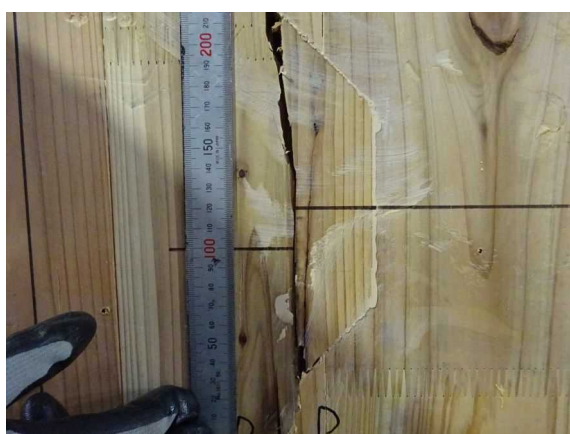
(c-3) コッターA面



(c-4) コッターB面



(c-5) コッターC面



(c-6) コッターD面

(c) 試験体D50T

図4.5-3 実験後写真 (続く)



(d-1) コッターAおよびB面（東側）



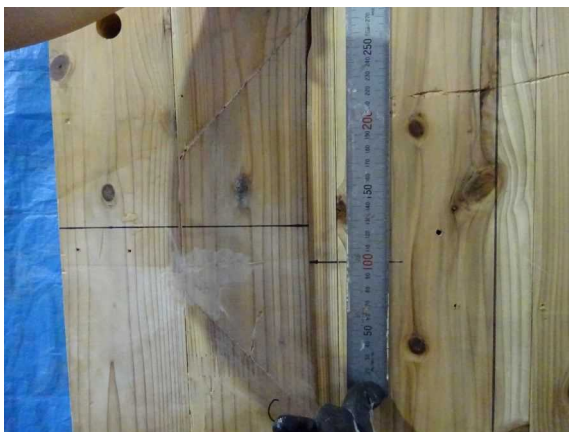
(d-2) コッターCおよびD面（西側）



(d-3) コッターA面



(d-4) コッターB面



(d-5) コッターC面



(d-6) コッターD面

(d) 試験体D100T

図4.5-4 実験後写真（続く）



(e-1) コッターAおよびB面 (東側)



(e-2) コッターCおよびD面 (西側)



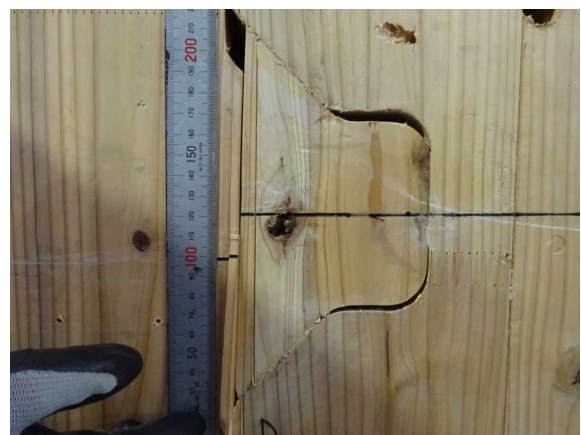
(e-3) コッターA面



(e-4) コッターB面



(e-5) コッターC面



(e-6) コッターD面

(e) 試験体D100Th

図4.5-5 実験後写真 (続く)



(a-1) コッターAおよびC面（北側）



(a-2) コッターAおよびC面（北側）



(a-3) コッターBおよびD面（南側）



(a-4) コッターBおよびD面（南側）



(a-5) コッターAおよびC面（南側）



(a-6) コッターBおよびD面（北側）

(a) 試験体D50

図4.6-1 試験体の解体後写真（続く）



(b-1) コッターAおよびC面 (北側)



(b-2) コッターAおよびC面 (北側)



(b-3) コッターBおよびD面 (南側)



(b-4) コッターBおよびD面 (南側)



(b-5) コッターAおよびC面 (南側)



(b-6) コッターBおよびD面 (北側)

(b) 試験体D100

図4.6-2 試験体の解体後写真 (続く)



(c-1) コッターAおよびC面 (北側)



(c-2) コッターAおよびC面 (北側)



(c-3) コッターBおよびD面 (南側)



(c-4) コッターBおよびD面 (南側)



(c-5) コッターAおよびC面 (南側)



(c-6) コッターBおよびD面 (北側)

(c) 試験体D50T

図4.6-3 試験体の解体後写真 (続く)



(d-1) コッターA面 (東側)



(d-2) コッターC面 (西側)



(d-3) コッターAおよびC面 (南側)



(d-4) コッターAおよびC面 (南側)



(d-5) コッターAおよびC面 (北側)



(d-6) コッターAおよびC面 (北側)

(d) 試験体D100T

図4.6-4 試験体の解体後写真 (続く)



(e-1) コッターAおよびC面（北側）



(e-2) コッターAおよびC面（北側）



(e-3) コッターBおよびD面（南側）



(e-4) コッターBおよびD面（南側）



(e-5) コッターAおよびC面（南側）



(e-6) コッターBおよびD面（北側）

(e) 試験体D100Th

図4.6-5 試験体の解体後写真（続き）

4.2.2 考察

表4.4に主要な実験結果一覧を示す。同表より、CLTパネルの基準せん断強度⁸⁾と、実験より得られた最大せん断応力度を比較すると、全試験体とも安全側となる結果が得られた。特に、試験体D50TおよびD100Tの最大せん断応力度は、それぞれ基準せん断強度の3.54倍、2.74倍を發揮し、そのときの変形量も1.0mm以下と微量であった。このことより、本試験体においては、高耐力および高剛性の接合方法であると云える。また、単純な凹凸型のコッターに比べて、端部をテーパ加工したコッターの方が初期剛性および最大耐力が大きくなった。それに対して、単純な凹凸型のコッターは、コッターの上下に隙間があることで曲げ変形が生じたため、初期剛性および最大耐力が小さくなったと考えられる。試験体D100Thはテーパ部があるので初期剛性は大きくなった。ただし、本タイプは加工に手間を要するため、単調なテーパ加工を施した試験体D50TやD100Tのようなタイプの方が作業効率はよいものと推察される。

上記より、コッター形状は端部をテーパ加工することが良く、コッターの底面の断面積を大きくすると最大せん断抵抗力および初期剛性が向上したため、テーパ加工することの優位性が認められた。

表4.4 実験結果一覧

試験体名	${}_{ex}K$ (kN/mm)	${}_{ex}P_{max}$ (kN)	${}_{ex}\delta_{max}$ (mm)	${}_{ex}\sigma_{smax}$ (N/mm ²)	F_s (N/mm ²)	${}_{ex}\sigma_{smax}/F_s$
D50	175	159	3.26	3.78	2.09	1.81
D100	78	192	3.71	4.58	2.09	2.19
D50T	657	622	0.73	7.40	2.09	3.54
D100T	2168	723	0.53	5.74	2.09	2.74
D100Th	1733	404	0.43	4.81	2.09	2.30

${}_{ex}K$ ：初期剛性， ${}_{ex}P_{max}$ ：最大耐力， ${}_{ex}\delta_{max}$ ： ${}_{ex}P_{max}$ 發揮時の変形量， ${}_{ex}\sigma_{smax}$ ：コッター1つあたりの実験のせん断応力度， F_s ：CLTパネルの基準せん断強度

5. LSB接合によるCLT床相互の押し抜きせん断実験

5.1 実験計画

5.1.1 実験概要

本章では、第2章で述べたLSBを使用した際の、CLT床相互の接合方法について検討する。本接合方法に対して、LSBによるせん断抵抗力および最終破壊性状を調べるため、押し抜きせん断実験を行なった。

5.1.2 試験体

試験体一覧を表5.1に、試験体詳細を図5.1に示す。CLTは5層7プライ（スギMx60-5-7、山佐木材株式会社より提供）で厚さは210mmである。本章で想定するLSBを用いた接合方法を概略説明する。まず始めにCLTにLSBを挿入するために直径50mmおよび深さ40mmの座掘りを設け、その座掘りにLSBを打ち込む。なお、LSBは長さ150mmおよび山径30mm（谷径25mm）のものを使用する（第2章で記述した改良前のタイプ）。次に、CLT同士の繋ぎ目の部分に厚さ12mmの鋼板を使用し、鋼板にM16の高力ボルトが円滑に通るように直径20mmの孔を開ける。本章で使用するLSBの端部には第2章同様、雌ネジ加工してあり、その鋼板の孔とLSBを合わせて、高力ボルトを用いて接合する。このとき、トルクレンチを用いて300N・m程度まで締め上げた。高力ボルトと接触する鋼板の孔周囲には赤さび発生剤を塗布した。なお、実験中にCLTに鋼板の支圧力が作用しないようにするため、鋼板下部のCLTに切り欠きを設けた。

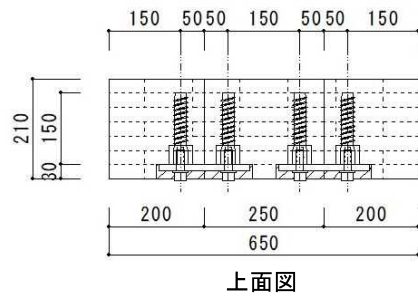
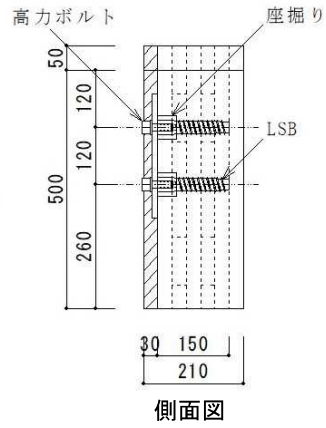
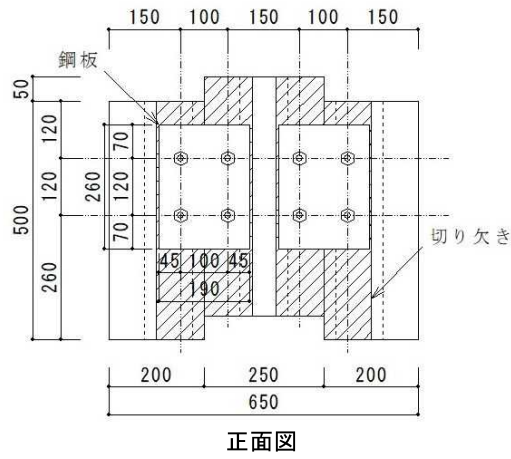
図5.2に試験体の正面図を示す。8つのLSBおよび高力ボルトを左から順にA～Hとして管理した。

表5.2に試験体製作時の打ち込みにおけるLSBのずれ量を示す。最大で2.0mmずれが生じている箇所があり、高力ボルトM16に対して、鋼板に20mmの孔径を設けることは妥当であると云える。

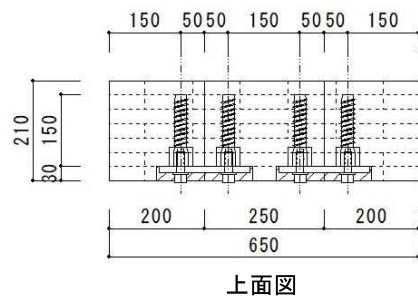
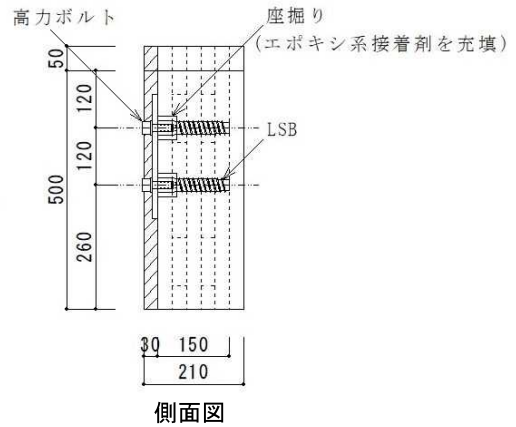
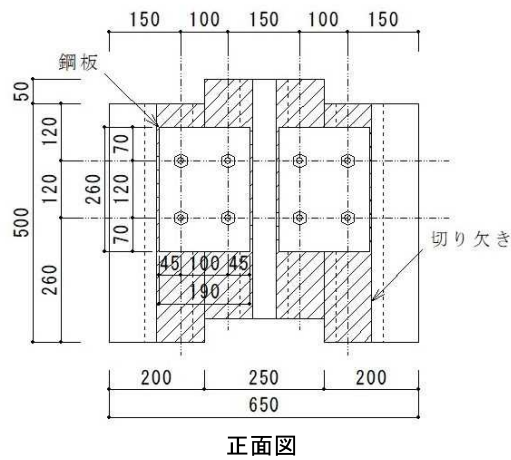
本実験では、CLT相互間の隙間の有無およびエポキシ系接着剤の有無を実験変数に選定し、これらの違いが接合部の挙動に及ぼす影響について検討する。試験体LSB②およびLSB②epは実施工による隙間を考慮して、CLT相互間に4mm程度の隙間を設けた。表5.3に実験前のCLT相互間の隙間の大きさを示す。また、試験体LSB①epおよびLSB②epはLSBの座掘りにエポキシ系接着剤を充填したものである。接着剤には二液混合硬化型のエポキシ系接着剤（オーシカダインTE243-L2）を使用した。

表5.1 試験体一覧

試験体名	サイズ (mm)	CLT厚 (mm)	座彫り		座彫り部分の 接着剤充填	CLT相互間の 隙間(mm)
			直径(mm)	深さ(mm)		
LSB①	650×550	210	50	40	なし	—
LSB②	658×550	210	50	40	なし	4
LSB①ep	650×550	210	50	40	あり	—
LSB②ep	658×550	210	50	40	あり	4

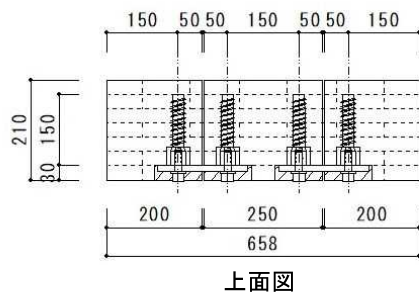
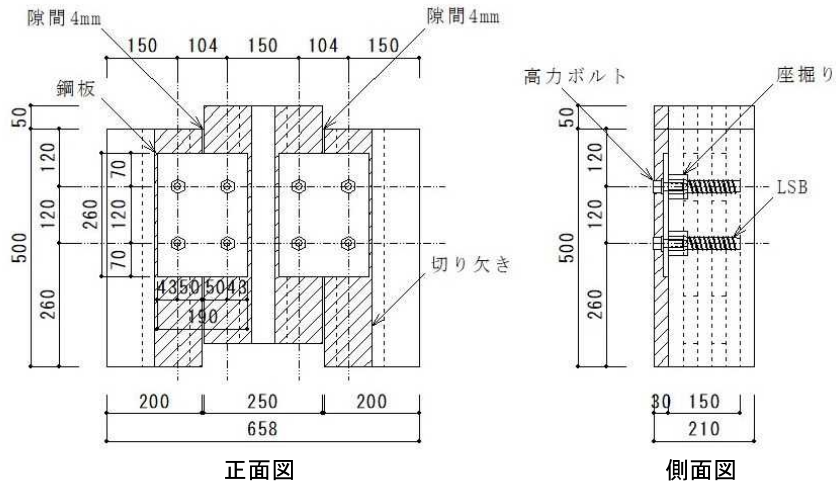


(a)LSB①

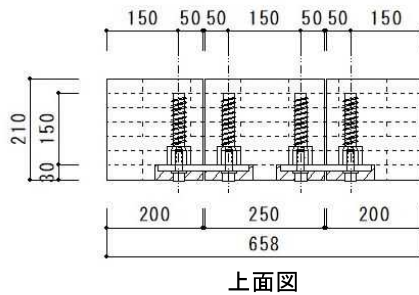
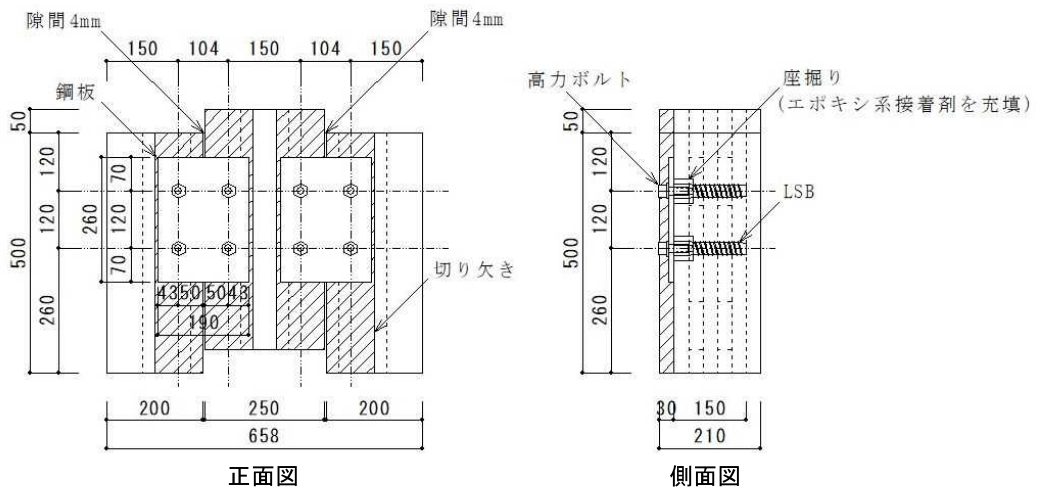


(b)LSB①ep

図5.1-1 試験体詳細 (続く)



(c)LSB②



(d)LSB②ep

図5.1-2 試験体詳細 (続き)

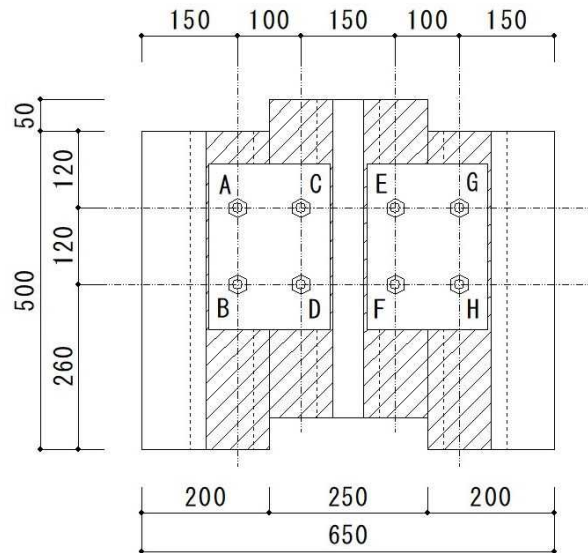


図5.2 LSBおよび高力ボルト名

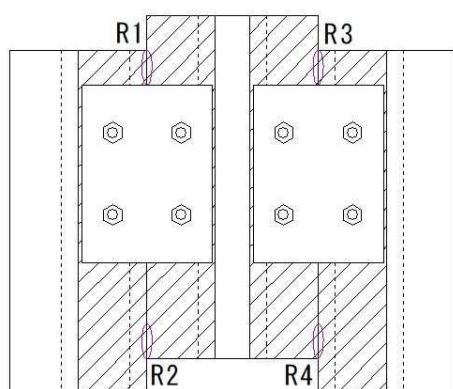
表5.2 LSBのずれ量

試験体名	ずれ方向	LSBのずれ量(mm)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
LSB①	X	+1.0	+1.0	±0.0	-1.0	±0.0	-1.0	+0.5	+0.5
	Y	±0.0	+0.5	-1.0	-1.0	±0.0	-1.0	±0.0	±0.0
LSB②	X	+2.0	+1.0	-1.0	+1.0	±0.0	-0.5	±0.0	-1.0
	Y	+1.0	+2.0	±0.0	-1.0	+0.5	±0.0	-1.0	±0.0
LSB①ep	X	+0.5	+1.0	+1.5	+1.0	±0.0	±0.0	-2.0	±0.0
	Y	-1.0	+1.0	+1.0	+0.5	±0.0	±0.0	-1.0	-1.0
LSB②ep	X	-1.5	-1.0	±0.0	-1.5	-1.0	±0.0	-1.0	-2.0
	Y	+0.5	+1.0	+1.5	+1.0	±0.0	+1.0	±0.0	+2.0

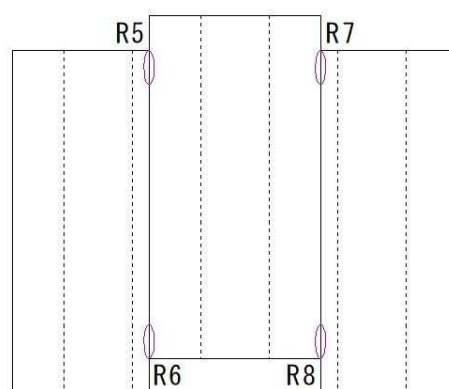
※横軸をX軸，縦軸をY軸とする。X軸は各LSBの中心から右方向のずれを+，左方向のずれを-とする。Y軸は各LSBの中心から上方向のずれを+，下方向のずれを-とする。

表5.3 実験前のCLT相互間の隙間の大きさ

試験体名	CLT相互間の隙間の大きさ(mm)							
	R_1 (mm)	R_2 (mm)	R_3 (mm)	R_4 (mm)	R_5 (mm)	R_6 (mm)	R_7 (mm)	R_8 (mm)
LSB①	—	—	—	—	—	—	—	—
LSB②	—	—	—	—	3.5	3.0	4.0	4.0
LSB①ep	0.0	1.8	0.0	2.5	0.0	2.5	2.0	3.5
LSB②ep	2.5	4.0	4.0	3.0	3.8	2.5	5.0	6.0



東側



西側

5.1.3 載荷方法

載荷状況を図5.2に示す。載荷は1000kN万能試験機を用いて、一方向に荷重を加えた。変形は、4箇所に設置した変位計により計測した。変位計を下の図のようにA～Dとする。

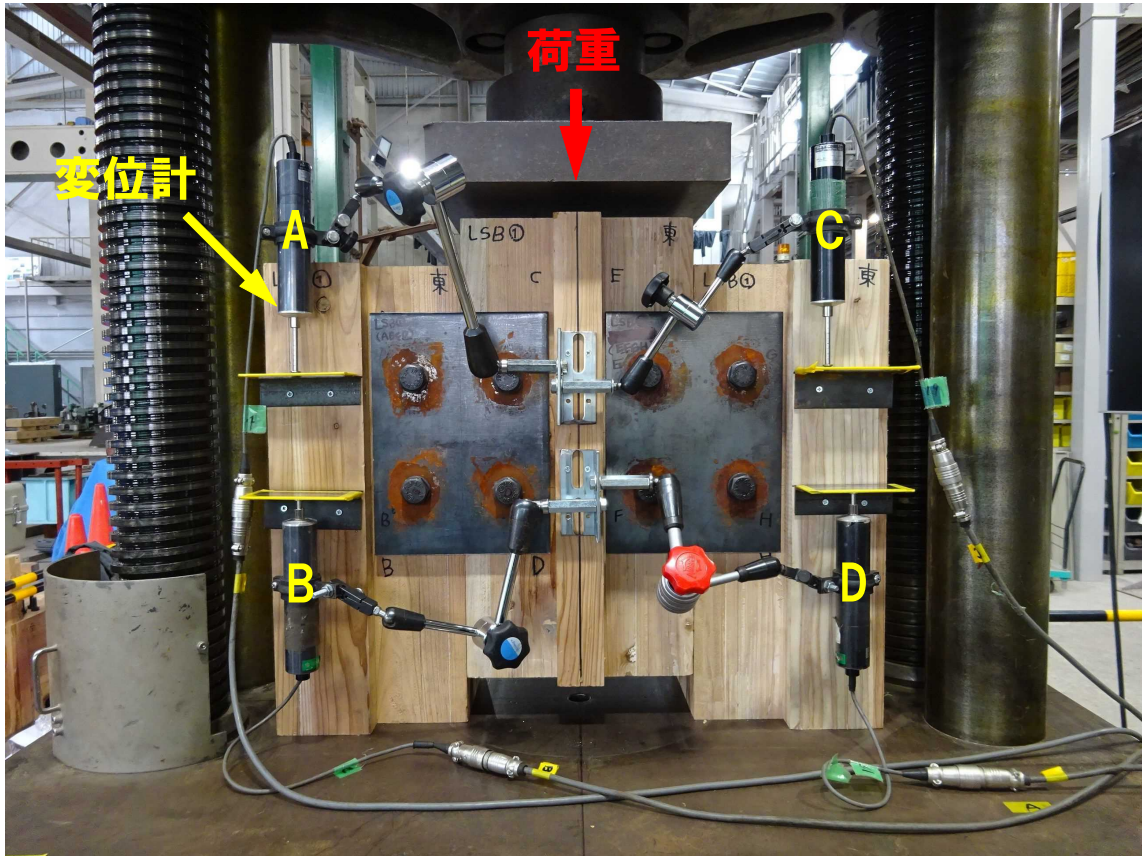


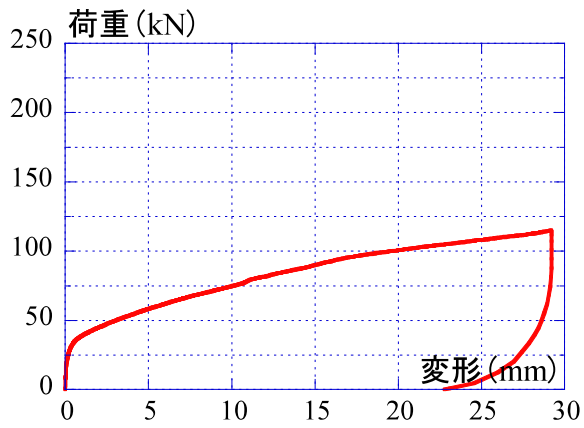
図5.2 載荷装置の写真

5.2 実験結果

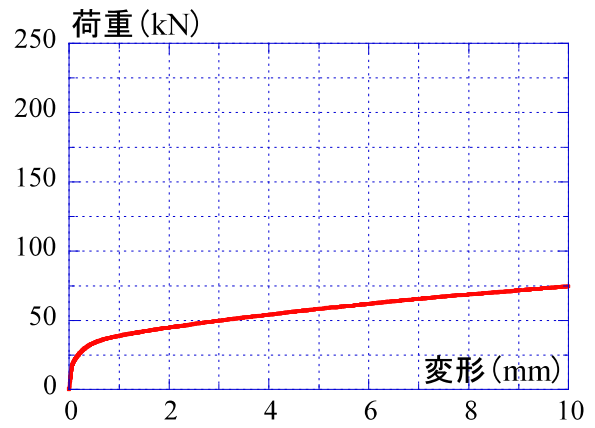
5.2.1 荷重－変形関係

実験で得られた荷重－変形関係を図5.3に示す。図5.3(a)～(d)は各試験体の結果、同図(e)は全試験体の結果を比較したものを示す。それぞれの荷重－変形関係において、30mmまで変形させた全体と、10mmまでの変形を拡大した2つのグラフを記載している。横軸は4箇所の変位計で計測した変形の平均値を示している。試験体LSB①は、実験の途中で変位計AがCLTに当たったため、途中から変位計Aを除いた3箇所の変位計で計測した変形の平均値を示した。試験体LSB①epおよびLSB②epは、試験体の精度が悪かったため、変位計AおよびBを除いた2箇所の変位計で計測した変形の平均値を示している。

各試験体の実験後の写真を図5.4に示す。また、各試験体の解体後の写真を図5.5に示す。全体的に鋼板がハの字に回転するような挙動を示した。隙間の有無による破壊性状の違いとして、エポキシ系接着剤がない場合（LSB①とLSB②）を比較すると、隙間がない方がCLT相互で力の伝達が行われるため、わずかに大きなせん断抵抗力を示した。これはエポキシ系接着剤を充填した試験体でも同様の傾向が見られた。また、エポキシ系接着剤の有無に関しては、第2章同様、座掘り部分をエポキシ系接着剤で充填することにより、LSB頭部直下のCLTに支圧力が発生し、初期性状が大きく改善される。破壊性状について、エポキシ系接着剤を充填した場合（LSB①epとLSB②ep）を比較すると、試験体LSB①epおよびLSB②epには接着剤とCLTに大きな亀裂が確認された。これは、LSBが曲げ降伏時に接着剤にめり込み、CLTに力が伝わって亀裂が生じたものと考えられる。また、LSBは、全試験体のLSBの曲げ変形が確認された。鋼板へのLSBのめり込みは、各々力を受けた方向に対して、0.3～0.5mm程のめり込みがあった。高力ボルトにおいても若干の曲げ変形が生じていた。

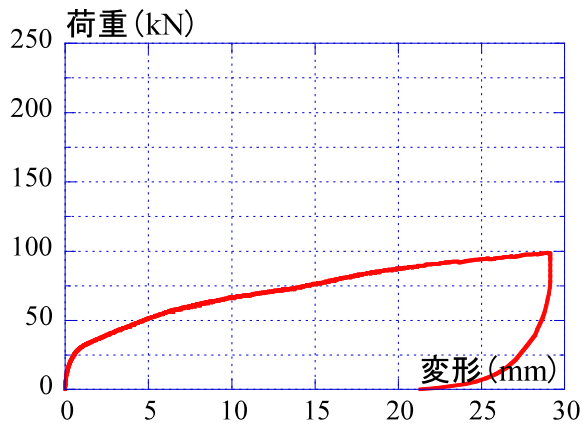


(a-1) 全体

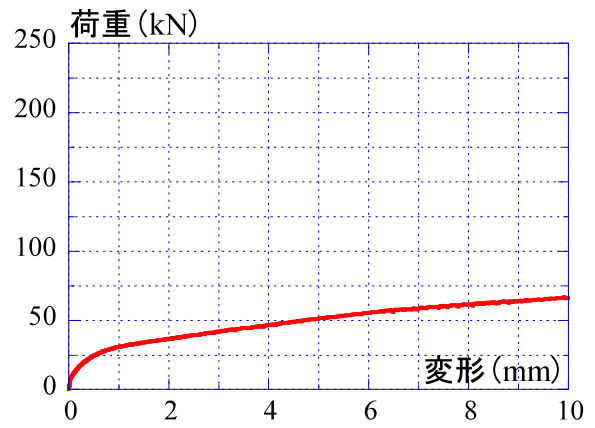


(a-2) 10mmまでの拡大

(a) LSB①

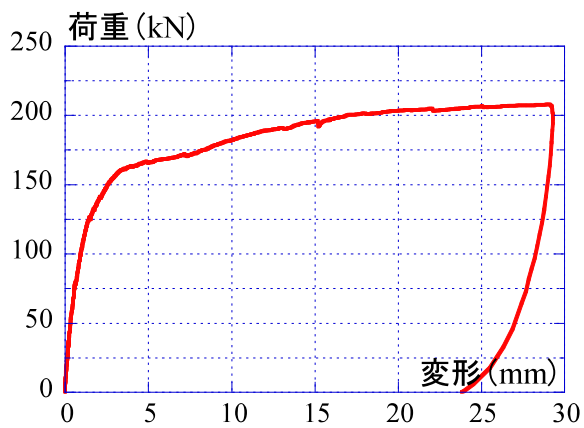


(b-1) 全体

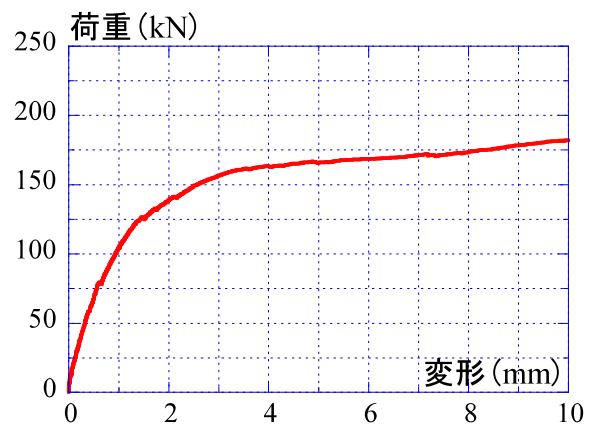


(b-2) 10mmまでの拡大

(b) LSB②



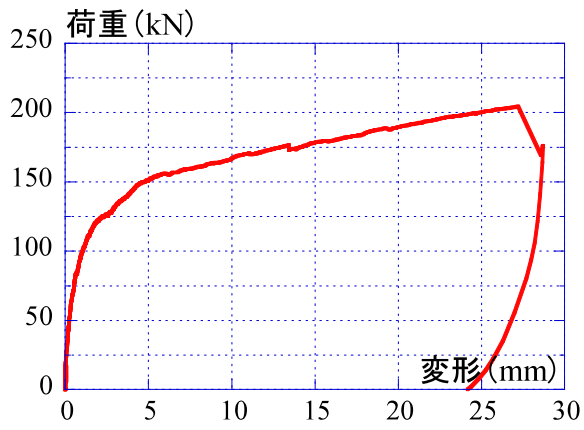
(c-1) 全体



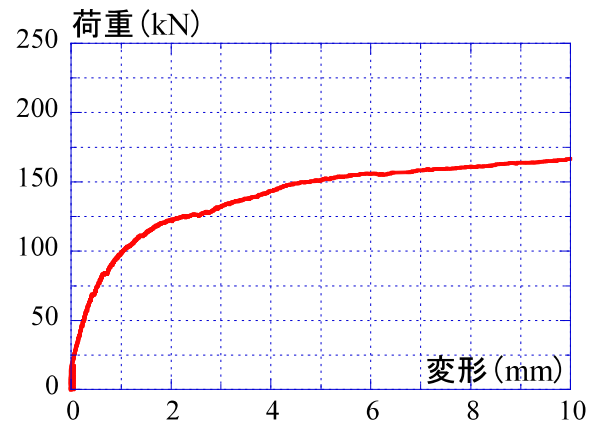
(c-2) 10mmまでの拡大

(c) LSB①ep

図5.3 荷重－変形関係（続く）

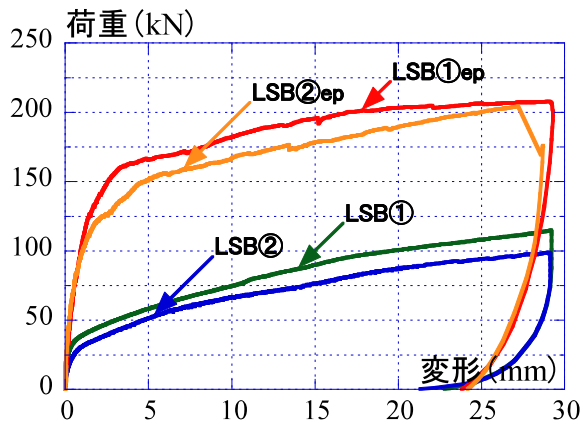


(d-1) 全体

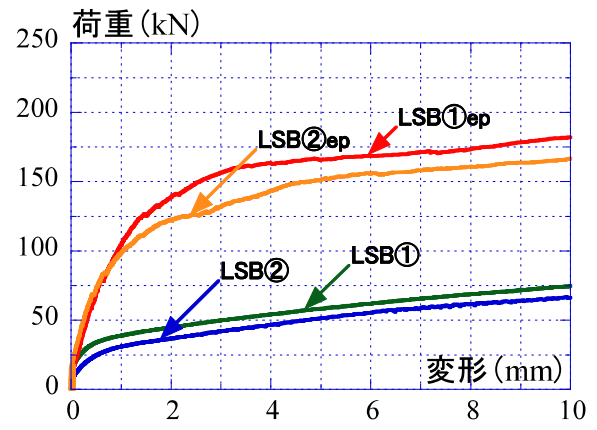


(d-2) 10mmまでの拡大

(d) LSB②ep



(e-1) 全体



(e-2) 10mmまでの拡大

(e) 全試験体比較

図5.3-2 荷重－変形関係（続き）



(a-1) 東側



(a-2) 西側



(a-3) ABCD側



(a-4) EFGH側

(a) 試験体LSB①

図5.4-1 各試験体の実験後写真（続く）



(b-1) 東側



(b-2) 西側



(b-3) ABCD側



(b-4) EFGH側

(b) 試験体LSB②

図5.4-2 各試験体の実験後写真 (続く)



(c-1) 東側



(c-2) 西側



(c-3) ABCD側



(c-4) EFGH側

(c) 試験体LSB①ep

図5.4-3 各試験体の実験後写真 (続く)



(d-1) 東側



(d-2) 西側



(d-3) ABCD側



(d-4) EFGH側

(d) 試験体LSB②ep

図5.4-4 各試験体の実験後写真（続き）



(a-1) 東側



(a-2) 鋼板 (表)



(a-3) 鋼板 (裏)

※LSBが0.5mm程めり込んでいたと推測。



(a-4) 高力ボルト (左から順にA~H)



(a-5) LSB (左から順にA~H)

(a) 試験体LSB①

図5.5-1 各試験体の解体後写真 (続く)



(b-1) 東側



(b-2) 鋼板 (表)



(b-3) 鋼板 (裏)

※LSBが0.5mm程めり込んでいたと推測。



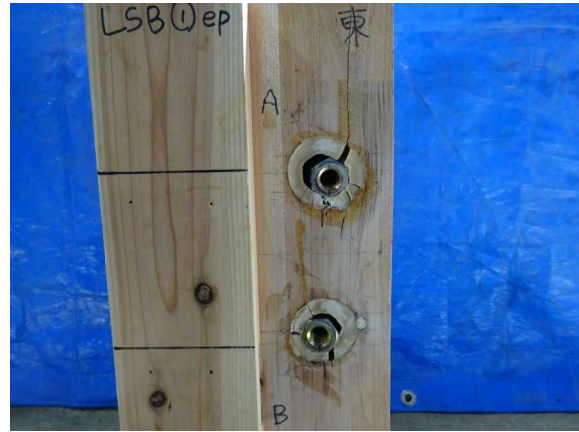
(b-4) 高力ボルト (左から順にA~H)

(b) 試験体LSB②

図5.5-2 各試験体の解体後写真 (続く)



(c-1) AB側 (東側)



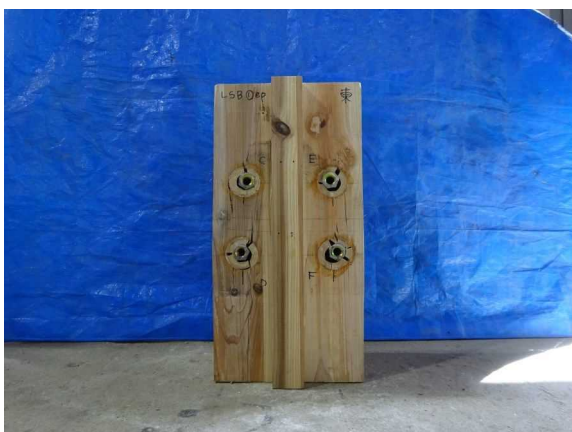
(c-2) AB側 (東側)



(c-3) AB側 (北側)



(c-4) A付近 (北側)



(c-5) CDEF側 (東側)



(c-6) CD側 (東側)

(c) 試験体LSB①ep

図5.5-3 各試験体の解体後写真 (続く)



(c-7) EF側 (東側)



(c-8) CD側 (南側)



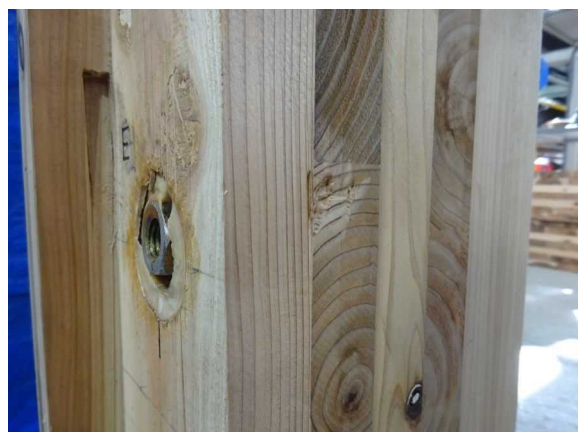
(c-9) C付近 (南側)



(c-10) D付近 (南側)



(c-11) EF側 (北側)



(c-12) E付近 (北側)

(c) 試験体LSB①ep

図5.5-4 各試験体の解体後写真 (続く)



(c-13) F付近 (北側)



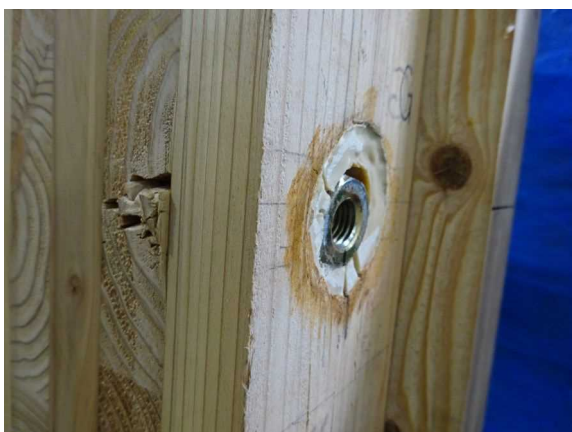
(c-14) GH側 (東側)



(c-15) GH側 (東側)



(c-16) GH側 (南側)



(c-17) G付近 (南側)



(c-18) ABCD側の鋼板 (表)

(c) 試験体LSB①ep

図5.5-5 各試験体の解体後写真 (続く)



(c-19) EFGH側の鋼板 (表)



(c-20) ABCD側の鋼板 (裏)
※LSBが0.3mm程めり込んでいたと推測。



(c-21) EFGH側の鋼板 (裏)
※LSBが0.3mm程めり込んでいたと推測。



(c-22) 高力ボルト (左から順にA~H)



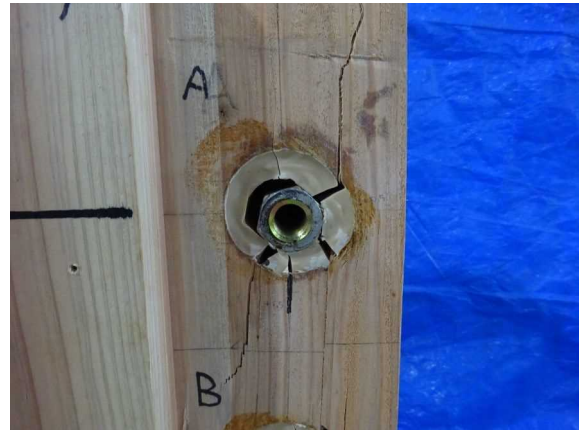
(c-23) LSB (左から順にA~H)

(c) 試験体LSB⓪ep

図5.5-6 各試験体の解体後写真 (続く)



(d-1) AB側 (東側)



(d-2) AB側 (東側)



(d-3) AB側 (北側)



(d-4) A付近 (北側)



(d-5) CDEF側 (東側)



(d-6) CD側 (東側)

(d) 試験体LSB②ep

図5.5-7 各試験体の解体後写真 (続く)



(d-7) EF側 (東側)



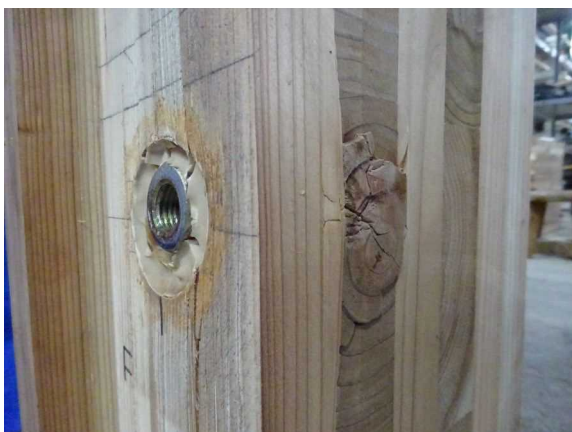
(d-8) CD側 (南側)



(d-9) D付近 (南側)



(d-10) EF側 (北側)



(d-11) F付近 (北側)



(d-12) GH側 (東側)

(d) 試験体LSB②ep

図5.5-8 各試験体の解体後写真 (続く)



(d-13) GH側 (東側)



(d-14) GH側 (南側)



(d-15) G付近 (南側)



(d-16) ABCD側の鋼板 (表)



(d-17) EFGH側の鋼板 (表)



(d-18) ABCD側の鋼板 (裏)

※LSBが0.3~0.5mm程めり込んでいたと推測。

(d) 試験体LSB②ep

図5.5-9 各試験体の解体後写真 (続く)



(d-19) EFGH側の鋼板（裏）

※LSBが0.3~0.5mm程めり込んでいたと推測。



(d-20) 高力ボルト（左から順にA~H）



(d-22) LSB（左から順にA~H）

(d) 試験体LSB②ep

図5.5-10 各試験体の解体後写真（続き）

5.2.2 考察

表5.5に主要な実験結果一覧を示す。同表より、試験体LSB①とLSB②の初期剛性はほとんど変わらなかったが、試験体LSB②は試験体LSB①より最大せん断抵抗力が小さくなった。これは、試験体LSB②のCLT相互間に4mmの隙間があることにより、床相互間で力のやり取りが発生しなかったため、最大せん断抵抗力が小さくなったものと考えられる。また、試験体LSB①epとLSB②epの初期剛性はほとんど変わらなかったが、隙間の有無により、試験体LSB②epは試験体LSB①epより最大せん断抵抗力が小さくなった。エポキシ系接着剤の有無による違いでは、CLT相互間に隙間があると最大耐力が小さくなり、接着剤を充填した試験体は接着剤なしの試験体に比べて初期剛性および最大せん断抵抗力が大きくなった。これは、接着剤を充填したことにより、LSB頭部の曲げ変形を抑制でき、LSB頭部直下のCLTへ力が伝達されることにより、最大せん断抵抗力が上昇したものと考えられる。

表5.5 実験結果一覧

試験体名	${}_{ex}K$ (kN/mm)	${}_{ex}P_{max}$ (kN)	${}_{ex}\delta_{max}$ (mm)
LSB①	15	115	29.2
LSB②	12	99	28.9
LSB①ep	103	208	29.0
LSB②ep	105	204	27.2

${}_{ex}K$ ：初期剛性， ${}_{ex}P_{max}$ ：最大耐力， ${}_{ex}\delta_{max}$ ： ${}_{ex}P_{max}$ 発揮時の変形量

既往の接合方法である、クロスビス接合と、表層スプライン式接合の試験体および実験結果を、図5.6および図5.7にそれぞれ示す。

これらの試験体は、平成25年度補正予算林野庁委託事業および、平成27年度林野庁委託事業で実施した試験体であり、詳細はそれぞれ、平成25年度補正予算「鋼構造オフィスビル床のCLT化」研究成果報告書⁴⁾および、平成27年度「鋼構造オフィスビル床のCLT化」(木質耐火部材開発)研究成果報告書⁵⁾に記載しているので、そちらを参照されたい。

図5.7より、LSB接合は、クロスビス接合および表層スプライン式接合よりも高い耐力を保持できる接合方法であることがわかる。一方で、前述した通り、座掘りにエポキシ系接着剤を充填することで初期性状が改善されるため、既往の接合方法に対する優位性は確認できるものと考えられる。

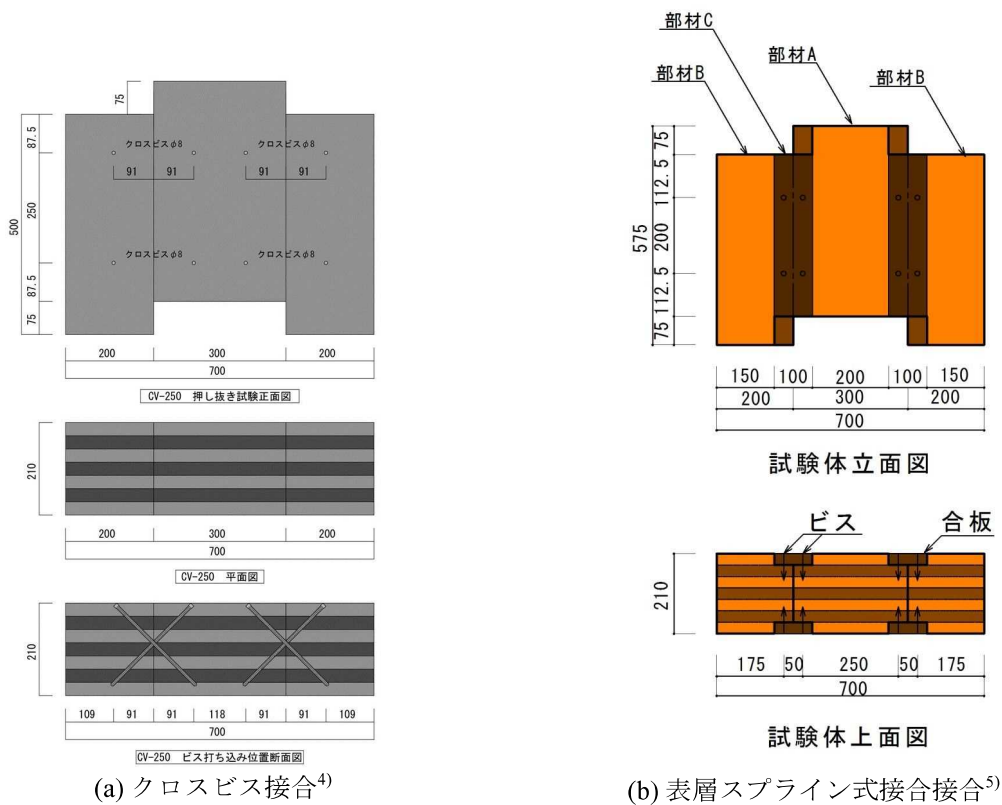


図5.6 既往の接合方法

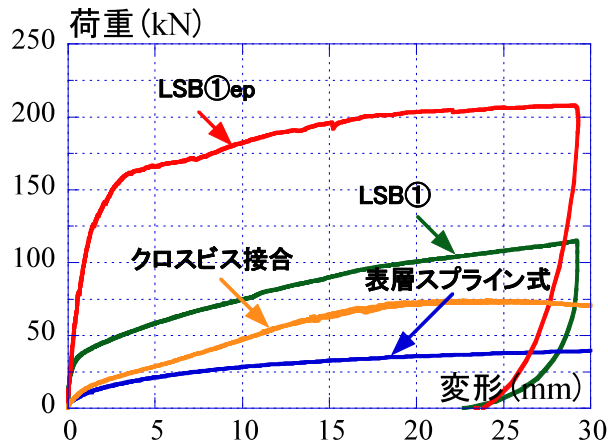


図5.7 既往の接合方法との比較

6. CLT床相互の四点曲げ載荷実験

6.1 実験計画

6.1.1 実験概要

本章では、床木口面にコッターを設けて接着剤を使用した場合とLSBを使用した場合のCLT床相互の接合方法について検討する。また、比較用として一枚物CLTとした無接合の場合の実験も行なう。CLTを床材として使用する際、例えば水回りやコア部分は鉄筋コンクリートスラブを採用することが想定される。その際、床にはせん断力のみならず、曲げ応力など様々な力が作用するものと考えられる。こうした応力に対しての安全性を確認するために四点曲げ載荷実験を行ない、破壊性状および曲げ挙動について検討する。

6.1.2 試験体

無接合の試験体一覧を表6.1、コッターの試験体一覧を表6.2、LSBの試験体一覧を表6.3に、それぞれ示す。また、試験体詳細を図6.1に示す。CLTは5層7プライ（スギMx60-5-7、山佐木材株式会社より提供）で厚さは210mmである。

本研究で想定するコッターと接着剤を用いた接合方法等については第4章と同様である。ここではコッター形状として、第4章の押し抜きせん断実験で良い結果が得られた試験体D50TおよびD100Tを選定した。

本研究で想定するLSBを用いた接合方法等については第5章と同様である。第5章の押し抜きせん断実験で座掘りにエポキシ系接着剤を充填することで良い結果が得られたため、隙間の有無を実験変数とした試験体LSB①epおよびLSB②epの2体を選定した。なお、LSB②epは施工性を考慮して、CLT相互間に4mm程度の隙間を設けている。表6.3に実験前のCLT相互間の隙間の大きさを示す。

本実験では、試験体D50Tを1体、試験体D100Tを2体、試験体LSBepを2体の計5体実験した。実験を行なう。これらと比較するために一枚物CLTとした無接合の試験体2体も載荷した。

図6.2に試験体LSB①epおよびLSB②epの正面図を示す。8つのLSBおよび高力ボルトを左から順にA～Hとする。また、表6.5に試験体製作におけるLSB打ち込み時のずれ量を示す。第5章同様、大きなもので2.0mm程度のずれが生じていることがわかる。

表6.1 試験体一覧

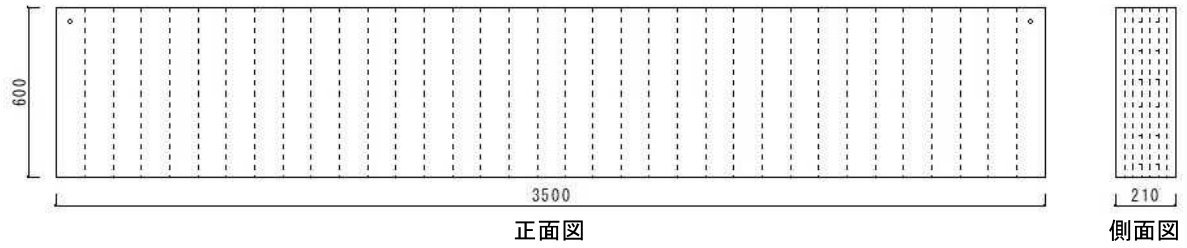
試験体名	サイズ (mm)	CLT厚 (mm)
無接合①	3500×600	210
無接合②	3500×600	210

表6.2 試験体一覧

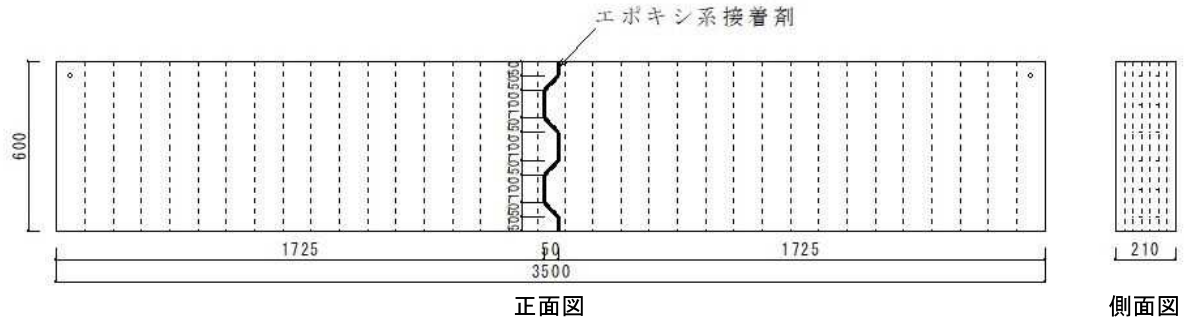
試験体名	サイズ (mm)	CLT厚 (mm)	コッター形状	接着剤塗布面
D50T	3500×600	210	テーパー形	接触全面
D100T①	3500×600	210	テーパー形	接触全面
D100T②	3500×600	210	テーパー形	接触全面

表6.3 試験体一覧

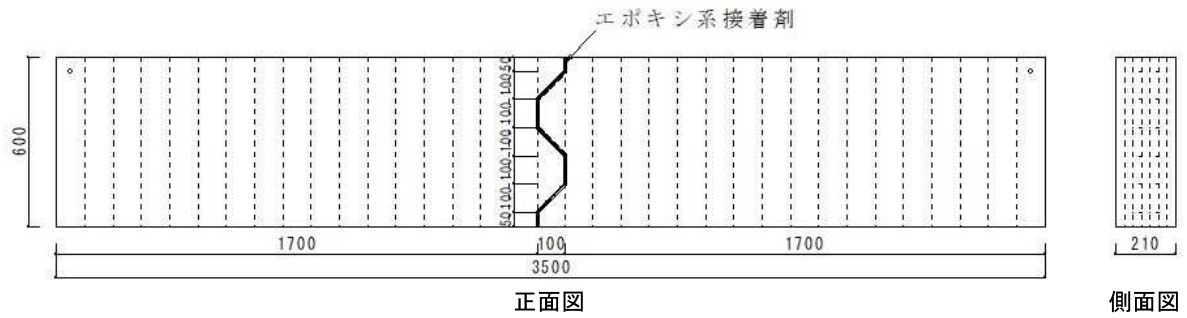
試験体名	サイズ (mm)	CLT厚 (mm)	座彫り		座彫り部分の 接着剤充填	CLT相互間の 隙間(mm)
			直径(mm)	深さ(mm)		
LSB①ep	3500×600	210	50	40	あり	—
LSB②ep	3504×600	210	50	40	あり	4



(a) 無接合①および無接合②



(b) D50T



(c) D100T①およびD100T②

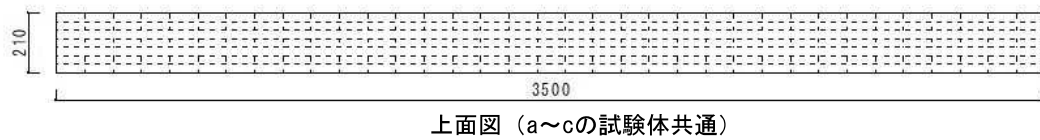
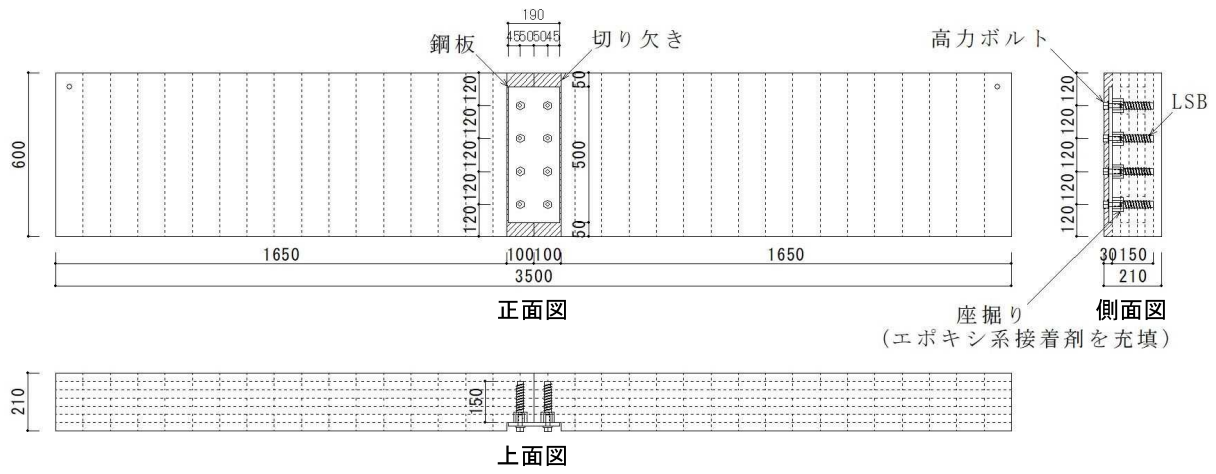
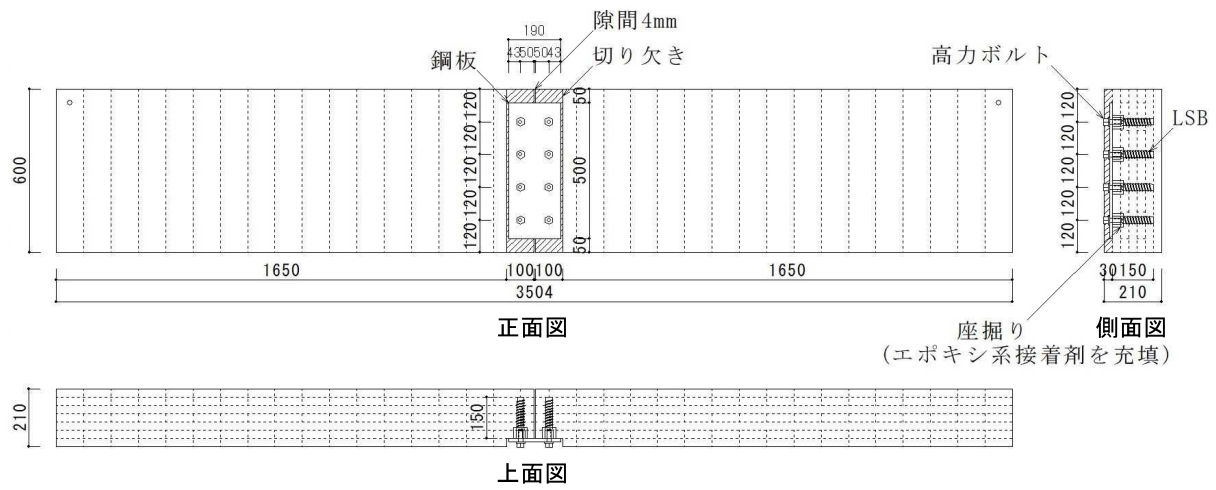


図6.1-1 試験体詳細 (続く)



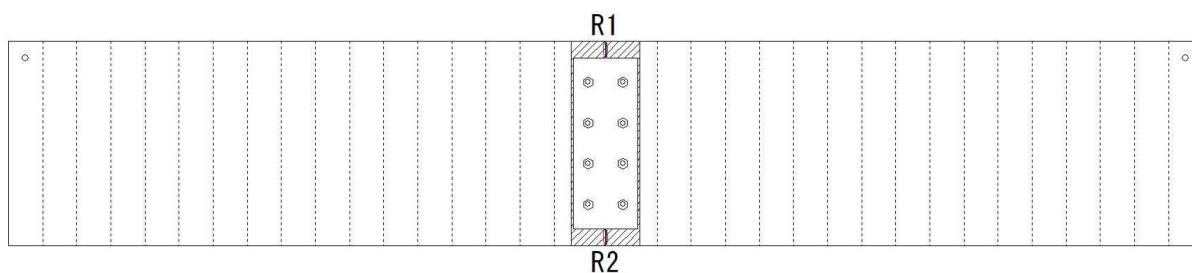
(d) LSB①ep



(e) LSB②ep

図6.1-2 試験体詳細 (続き)

表6.4 実験前のCLT相互間の隙間の大きさ



試験体名	CLT相互間の隙間の大きさ(mm)	
	R_1 (mm)	R_2 (mm)
LSB②ep	4.0	5.0

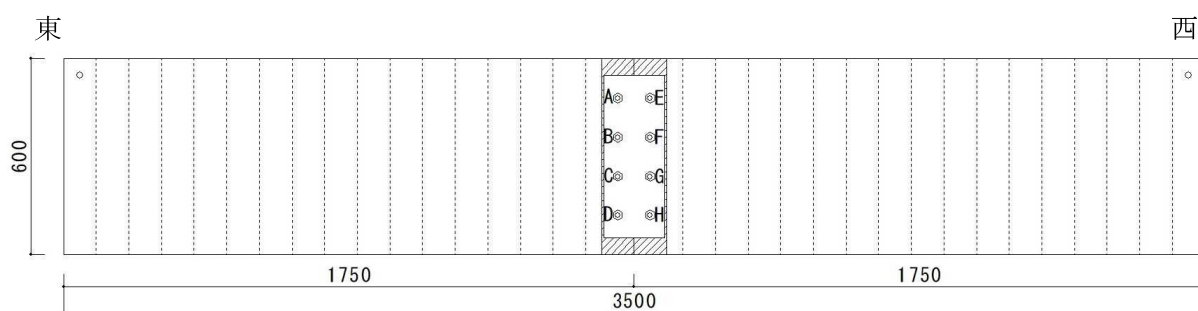


図6.2 LSBおよび高力ボルト名

表6.5 LSBのずれ量

試験体名	ずれ方向	LSBのずれ量(mm)							
		A	B	C	D	E	F	G	H
LSB①ep	X	-0.50	±0.00	±0.00	+1.00	-1.00	-1.00	+1.00	+1.00
	Y	-1.50	-0.50	-0.50	±0.00	-1.50	-0.50	-2.00	-2.00
LSB②ep	X	+1.00	+1.00	+0.50	+0.25	-2.00	±0.00	-1.00	-0.50
	Y	-2.25	-0.25	-0.75	+0.50	-1.00	+1.00	+1.00	-1.00

※横軸をX軸，縦軸をY軸とする。X軸は各LSBの中心から右方向のずれを+，左方向のずれを-とする。Y軸は各LSBの中心から上方向のずれを+，下方向のずれを-とする。

6.1.3 載荷方法

載荷状況を図6.3に示す。試験には5000kN万能試験機を用いた。載荷は、両端をローラー支承とし、載荷梁とピンを介して四点曲げ載荷とした。4箇所（ピン）の下には鋼板を敷いた。図6.4にピン付近の様子を示す、上部の鋼板の上下および、下部の鋼板の下には摩擦が生じないようにテフロンシートを敷いた。なお、支点のテフロンシートにはグリスを塗布した。また、実験中に試験体が倒れないように2箇所（横補剛装置）を設置した（図6.5参照）。図6.6に試験体の下図面を示す。4箇所（ピン）に設置した変位計をA～Dとして、試験体中央部ならびに加力点位置のたわみを計測した。さらに、面外方向の変位計測用として試験体中央部に1箇所（変位計E）を設置した。図6.7に試験体の正面図を示す。試験体中央部付近6箇所（ひずみゲージ）にひずみゲージを貼付し、そのひずみゲージを①～⑥として管理した。

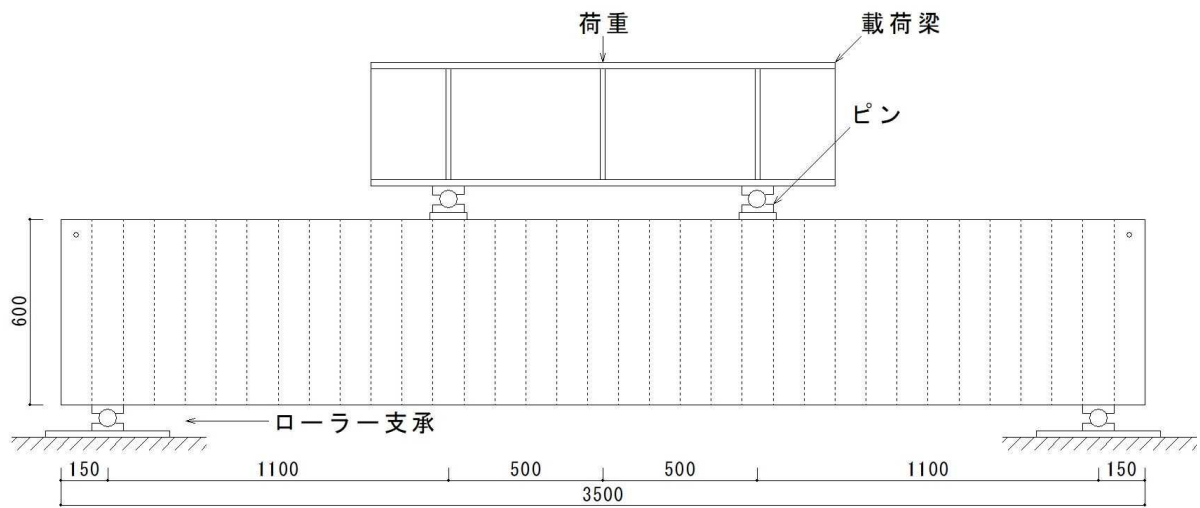
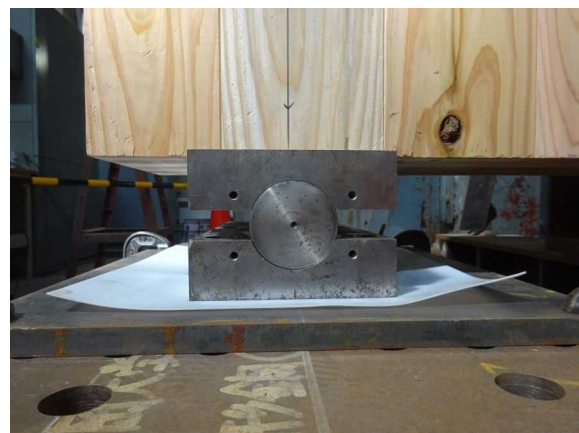


図6.3 載荷装置



(a) 上部の鉄板



(b) 下部の鉄板

図6.4 テフロンシートの設置



(a) 北側



(b) 南側

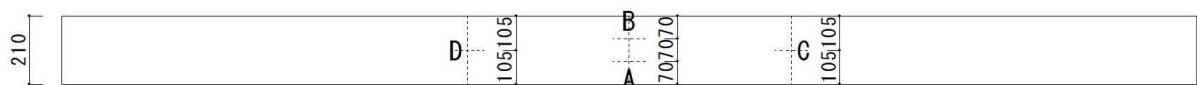


(c) 東側

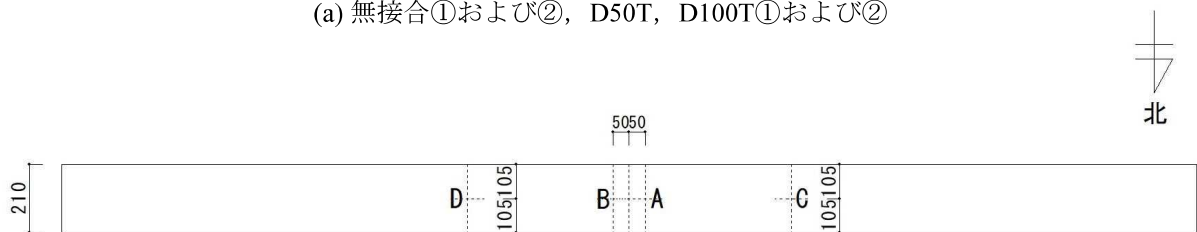


(d) 西側

図6.5 横補剛装置の設置

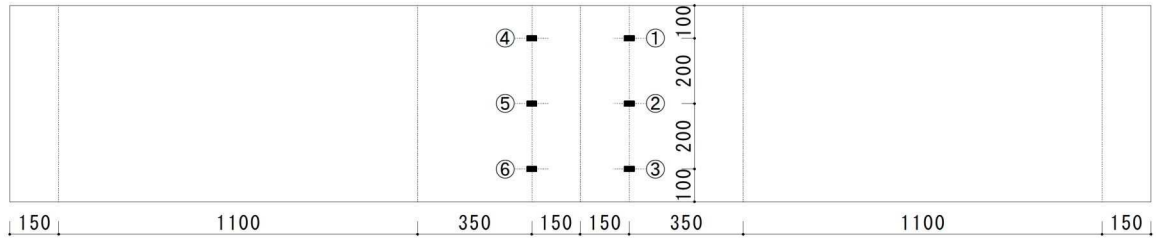


(a) 無接合①および②, D50T, D100T①および②

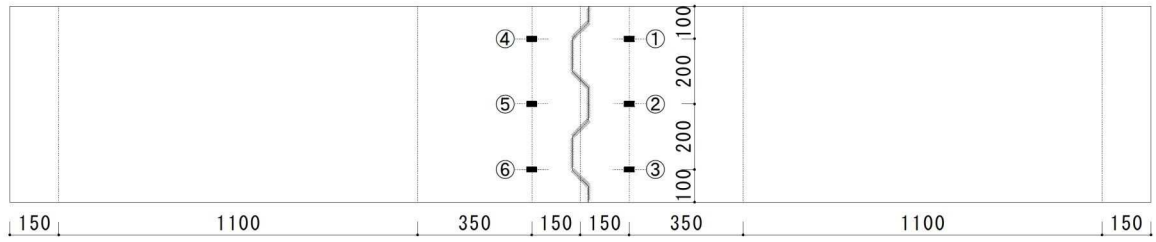


(b) LSB①ep, LSB②ep

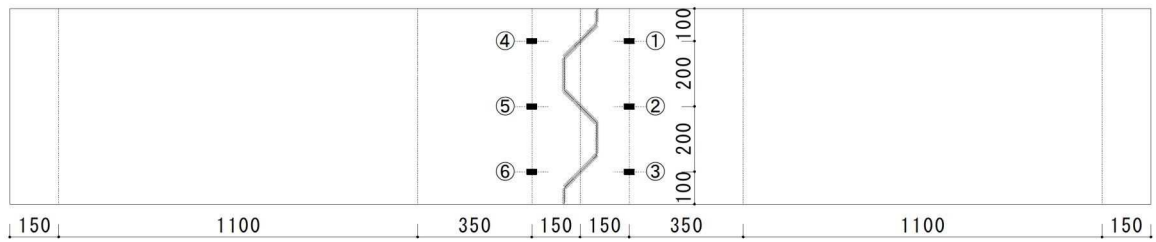
図6.6 変位計位置図



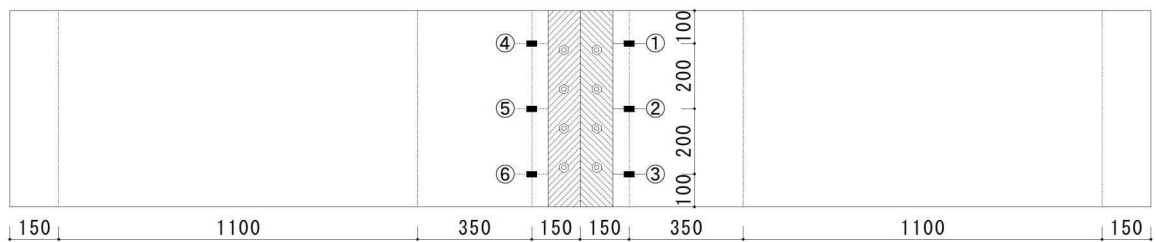
(a) 無接合①および無接合②



(b) D50T



(c) D100T①およびD100T②



(d) LSB①epおよびLSB②ep

図6.7 ひずみゲージ位置図（北面）

6.2 実験結果

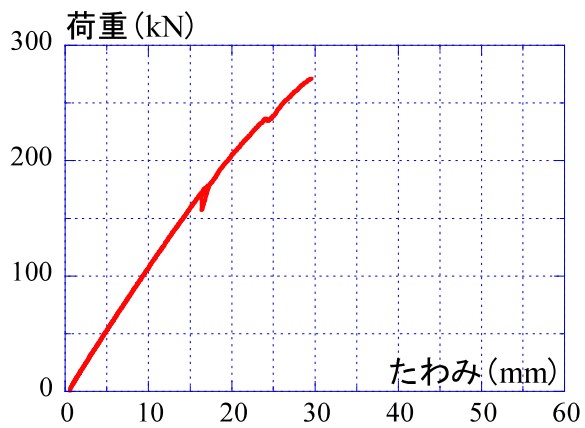
6.2.1 荷重－たわみ関係

実験で得られた荷重－たわみ関係を図6.8に示す。図6.8(a)～(g)は各試験体の結果，同図(h)は全試験体の結果を比較したものを示す。横軸は変位計AおよびBで計測した中央部のたわみの平均値を示している。

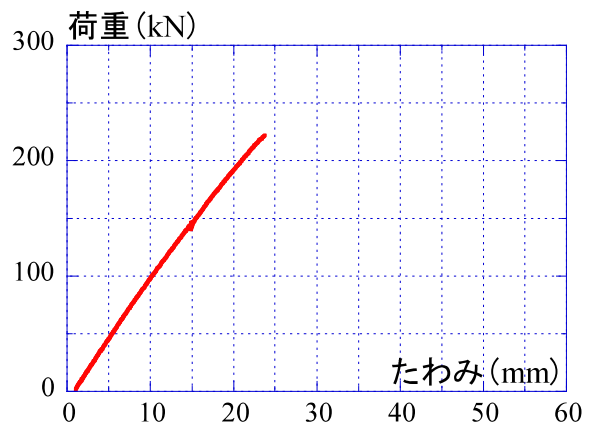
無接合試験体は，CLTから乾いた音を伴いながら変形が進行し，変形25mm前後で突然に亀裂が生じ，実験を終了した。破壊は試験体中央部付近であった。コッター接合した試験体は，最大耐力を迎えた際に大きな音がし，コッター部分に亀裂が生じた。その後，緩やかに耐力が低下し，最終的に荷重保持能力が失われた。LSBで接合した試験体は，なだらかに荷重が上昇し，変形が50mmを過ぎても荷重の低下が見られなかった。

各試験体の実験後の写真を図6.9に示す。また，各試験体の解体後の写真を図6.10に示す。試験体無接合①および無接合②の試験体は，実験後に中央部で二つに割れた。強軸層は繊維方向に沿って二つに割れ，弱軸層は繊維方向に対して引張力が生じることにより引張破断した。試験体D50Tは，CLTの強軸層と弱軸層で破壊性状に違いがみられた。弱軸層ではコッターの接着部分で剥がれが生じ，強軸層ではコッターの底面付近で繊維方向に沿って亀裂が生じた。試験体D100T①およびD100T②は，試験体D50Tのように中央部で二つに割れることはなかった。弱軸層ではコッターの接着部分で剥がれが生じ，強軸層ではコッターの底面付近およびコッターの中心部分で繊維方向に沿って亀裂が生じた。

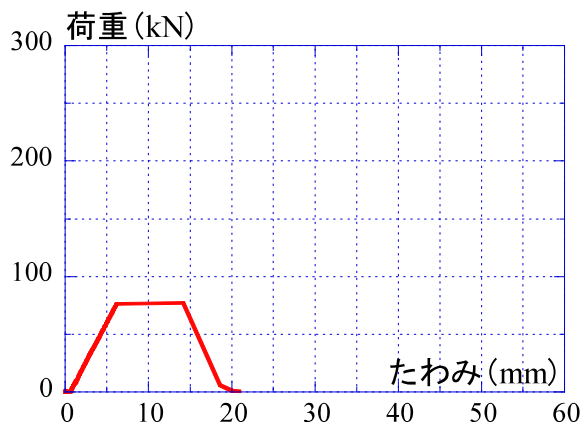
試験体LSB①epおよびLSB②epは，ABCD側の下部から上部へ大きな亀裂が生じた。これは試験体の下部が引張力を受け，その影響でD付近の接着剤に亀裂が入り，さらにCLTにまで亀裂が生じたため，上部にまで亀裂が続いたものと考えられる。また，LSBが鋼板へ力を受けた方向に対して0.5mm程めり込んでおり，高力ボルトは若干曲がっていることを確認した。



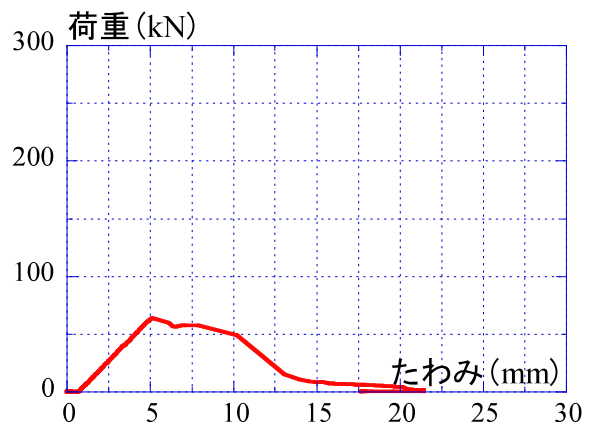
(a) 無接合①



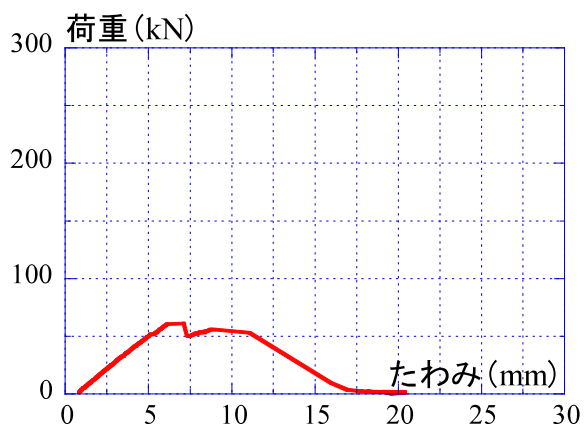
(b) 無接合②



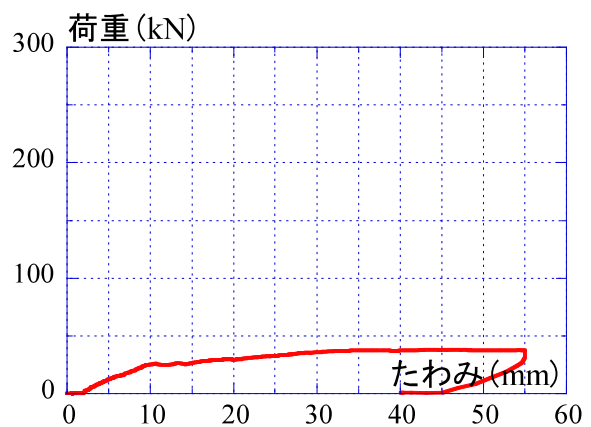
(c) D50T



(d) D100T①



(e) D100T②



(f) LSB①ep

図6.8 荷重-たわみ関係 (つづく)

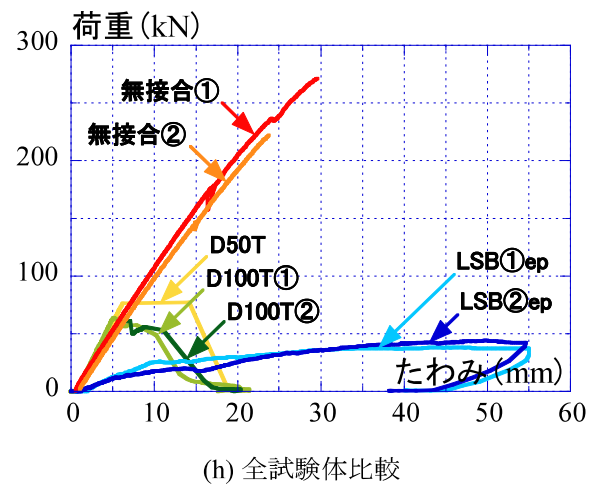
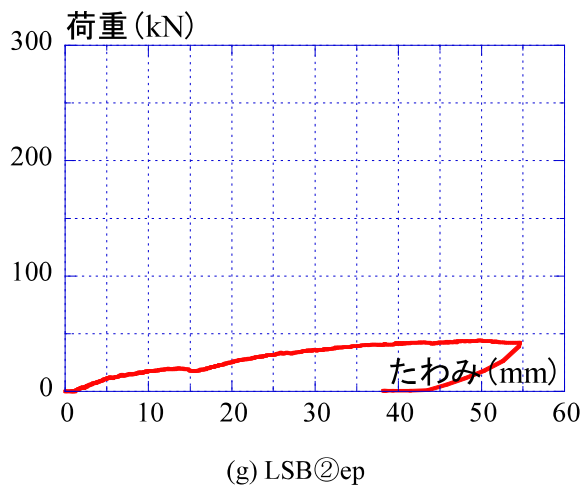


図6.8-2 荷重－たわみ関係 (つづき)



(a-1) 北側



(a-2) 北側拡大



(a-3) 亀裂部分



(a-4) 亀裂部分



(a-5) 亀裂部分



(a-6) 上側

(a) 無接合①

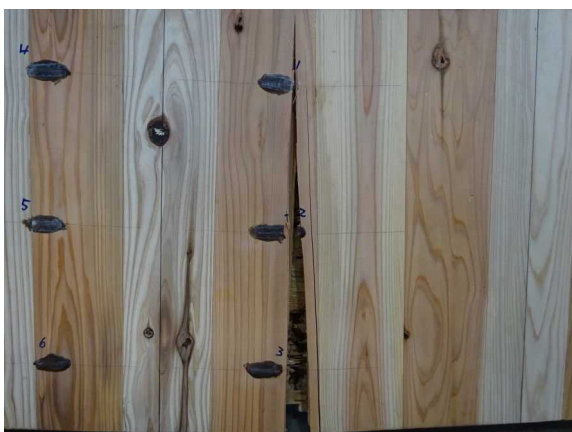
図6.10-1 各試験体の実験後写真（続く）



(b-1) 北側



(b-2) 北側拡大



(b-3) 亀裂部分



(b-4) 亀裂部分

(b) 無接合②

図6.10-2 各試験体の実験後写真 (続く)



(c-1) 北側



(c-2) 北側拡大



(c-3) 亀裂部分



(c-4) 亀裂部分



(c-5) 上側



(c-6) 南側

(c) D50T

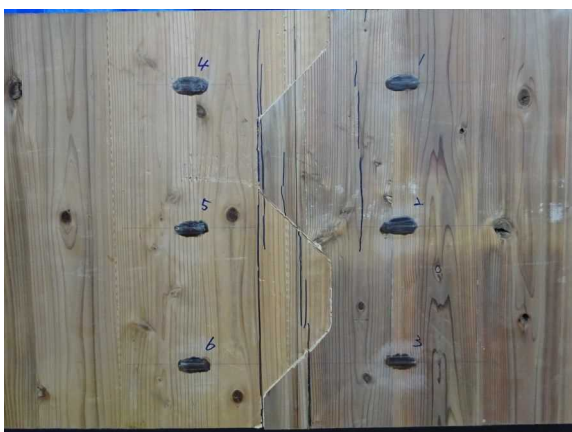
図6.10-3 各試験体の実験後写真 (続く)



(d-1) 北側



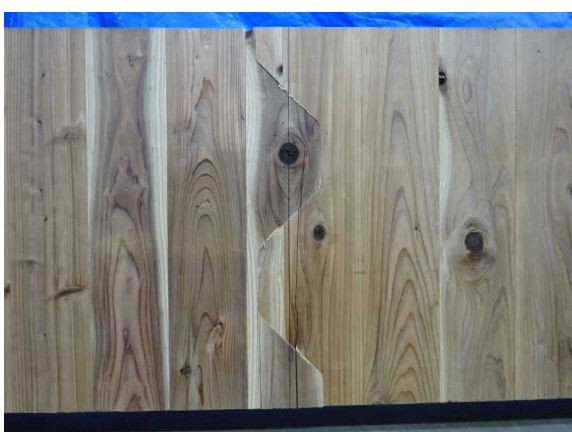
(d-2) 北側拡大



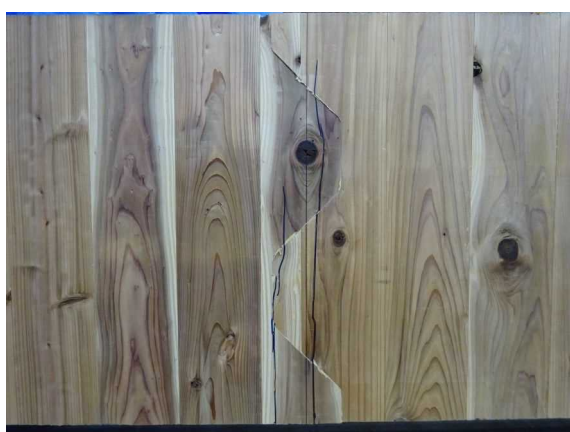
(d-3) 亀裂部分



(d-4) 南側



(d-5) 南側



(d-6) 亀裂部分

(d) D100T①

図6.10-4 各試験体の実験後写真（続く）



(e-1) 北側



(e-2) 北側拡大



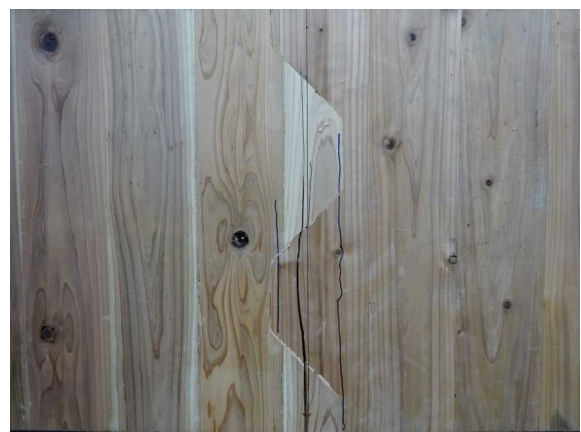
(e-3) 亀裂部分



(e-4) 南側



(e-5) 南側



(e-6) 亀裂部分

(e) D100T②

図6.10-5 各試験体の実験後写真（続く）



(f-1) 北側



(f-2) 北側拡大



(f-3) 亀裂部分



(f-4) 亀裂部分



(f-5) 下側

(f) LSB①

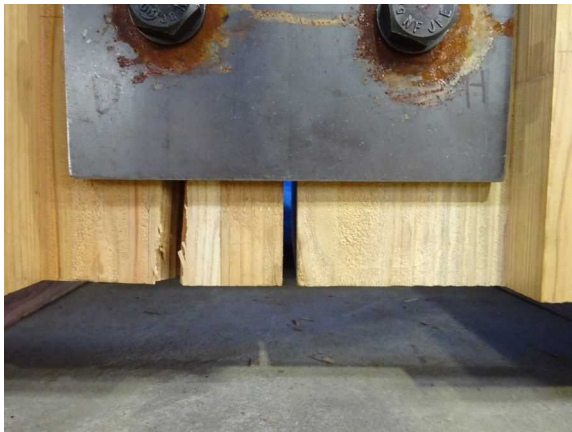
図6.10-6 各試験体の実験後写真（続く）



(g-1) 北側



(g-2) 北側拡大



(g-3) 亀裂部分



(g-4) 下側



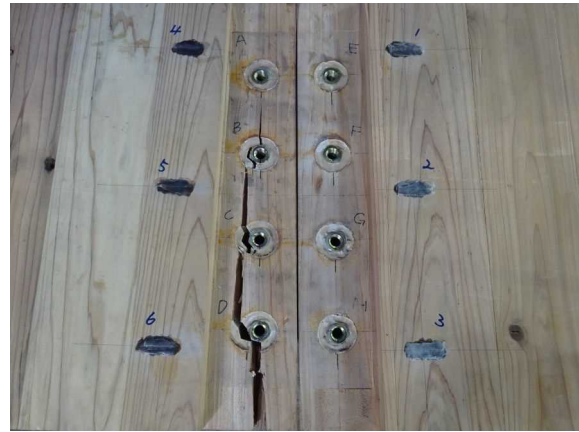
(g-5) 上側

(g) LSB②

図6.10-7 各試験体の実験後写真（続き）



(a-1) 北側



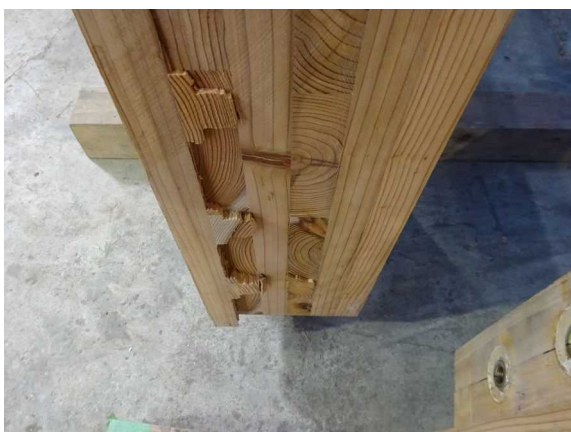
(a-2) 北側拡大



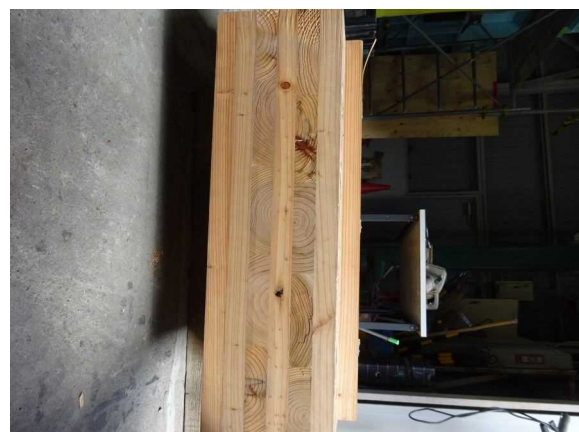
(a-3) 亀裂部分



(a-4) ABCD側（西側）



(a-5) ABCD側（西側）



(a-6) EFGH側（東側）

(a) LSB①

図6.11-1 LSB試験体の解体写真（続く）



(b-1) 北側



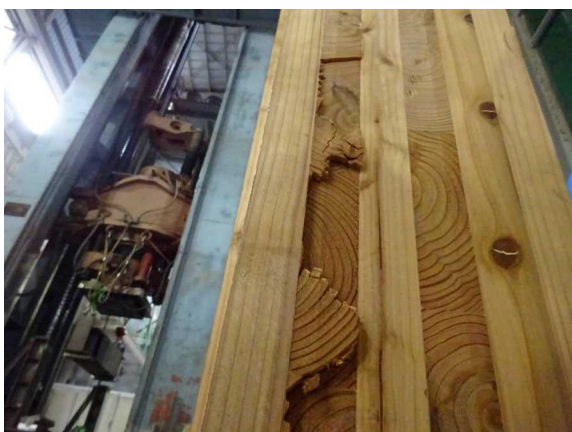
(b-2) 北側拡大



(b-3) 亀裂部分



(b-4) ABCD側 (西側)



(b-5) ABCD側 (西側)



(b-6) EFGH側 (東側)

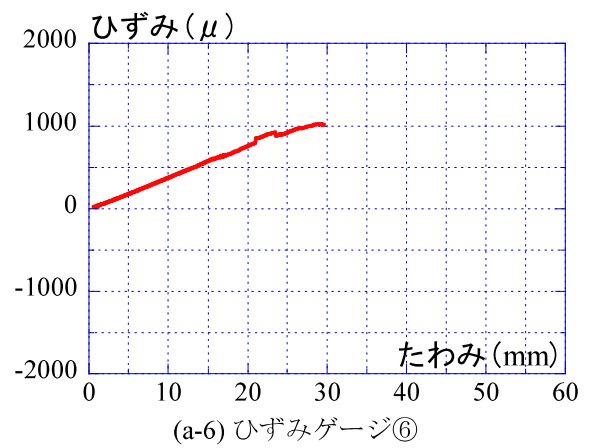
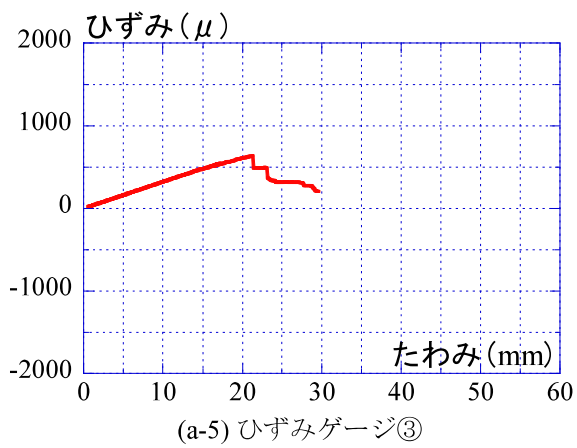
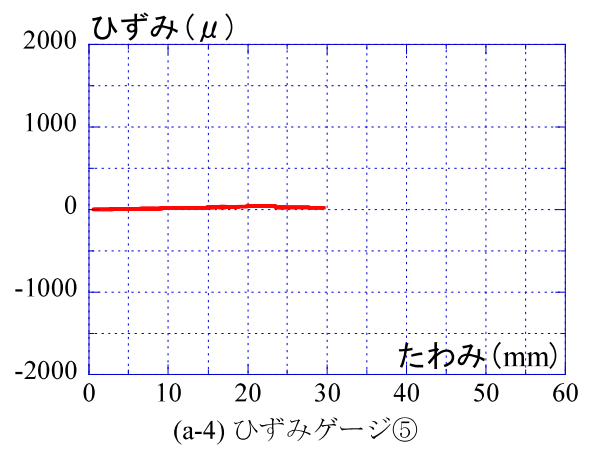
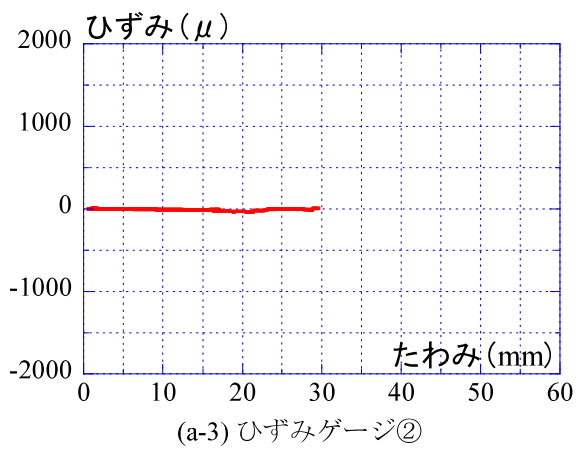
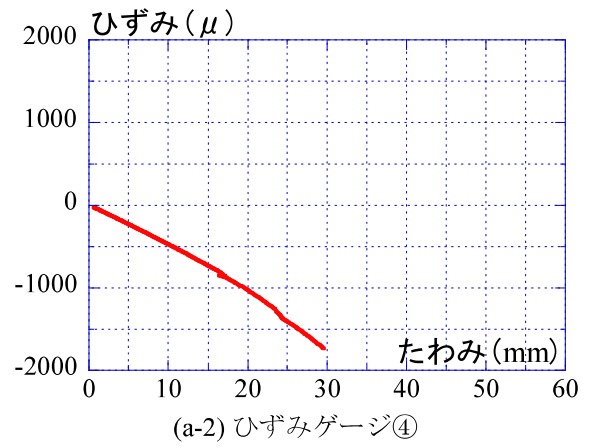
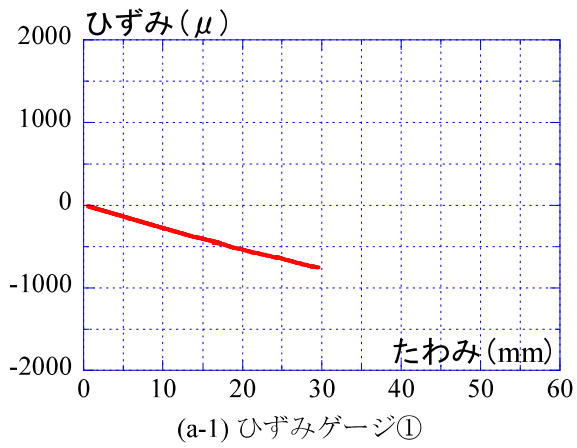
(b) LSB②

図6.11-2 LSB試験体の解体写真 (続き)

6.2.2 ひずみ－たわみ関係

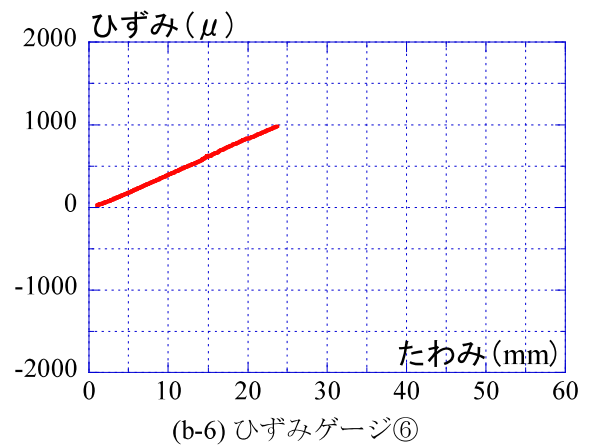
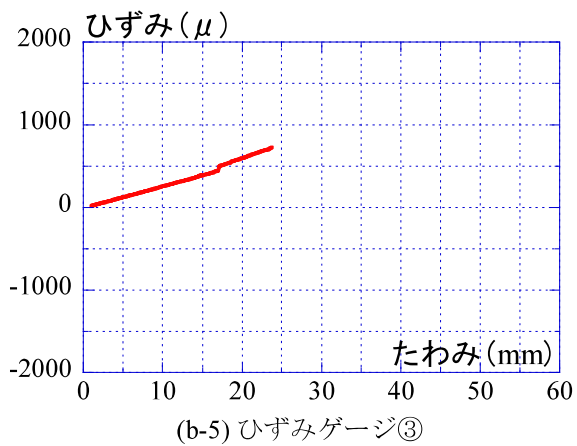
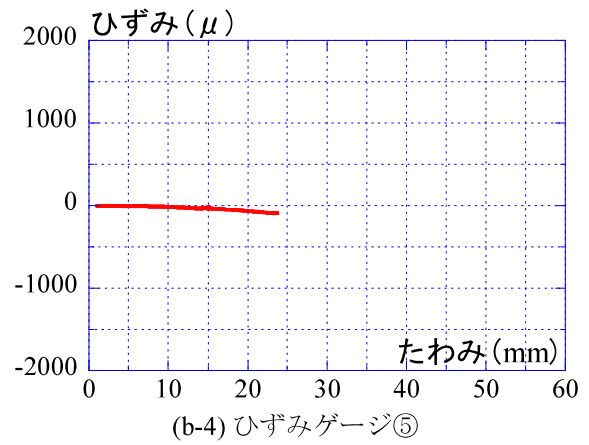
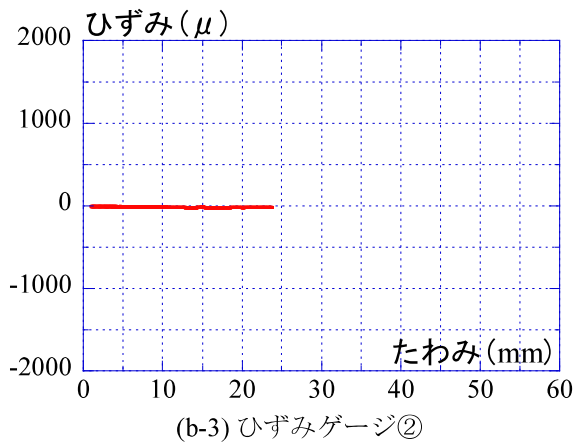
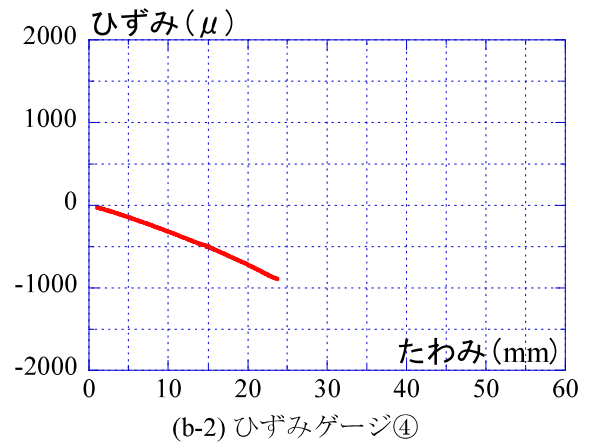
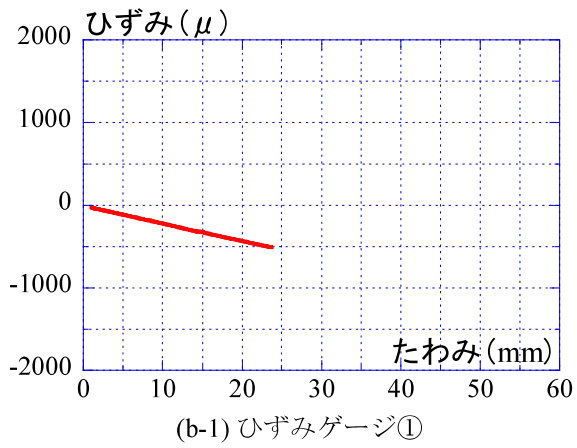
実験で得られた各試験体のひずみ－たわみ関係を図6.11に示す。同図(a)～(f)は①～⑥のひずみゲージの結果を示す。横軸は変位計AおよびBで計測した中央部のたわみの平均値を示している。

同図より、いずれの試験体でも試験体上部に貼付したひずみゲージの値は圧縮側に、中央部のひずみゲージの値は零付近に、下部に貼付したひずみゲージの値は引張側に生じている。圧縮側と引張側のひずみの値はまったく同じ値で正負反転しているわけではないが、弾性範囲においては概ね同様の挙動を示しており、平面保持の仮定は成立しているものと考えられる。



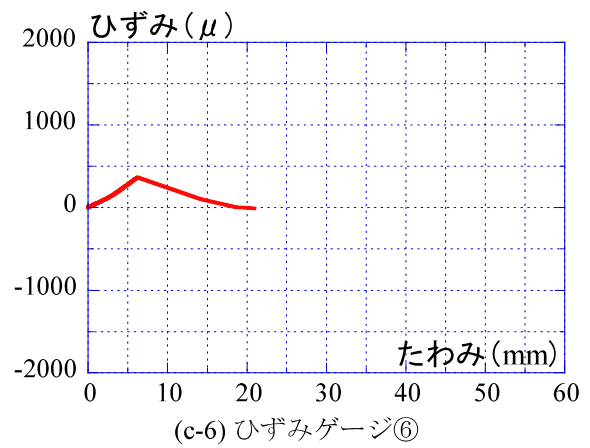
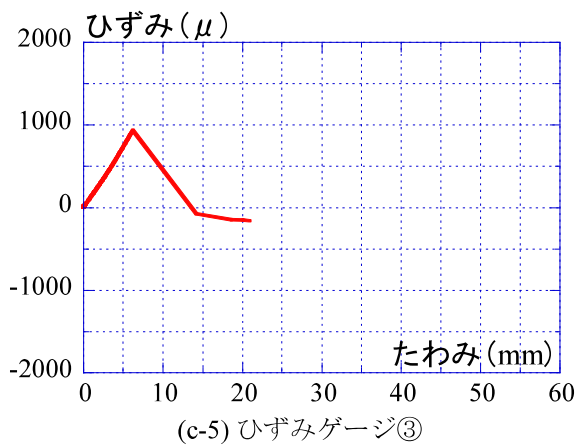
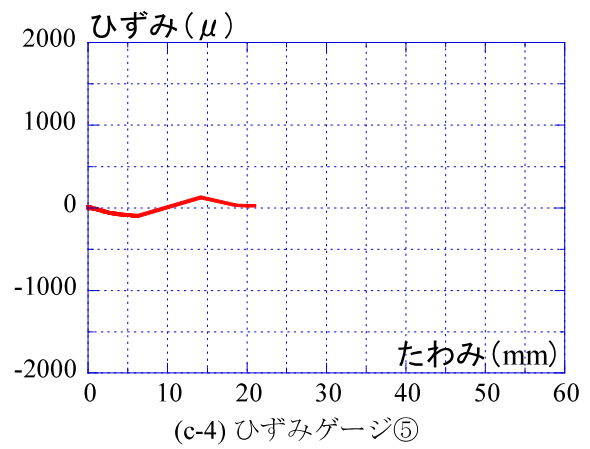
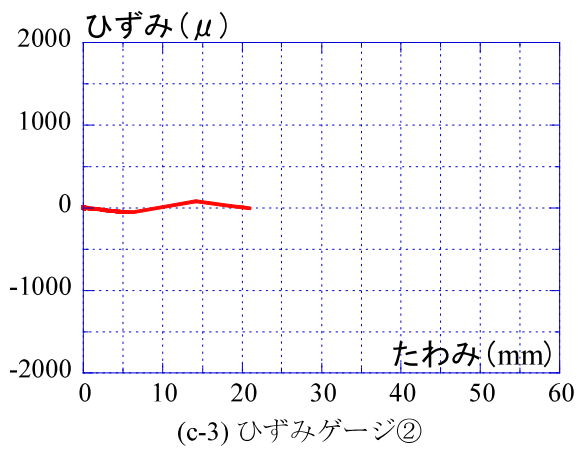
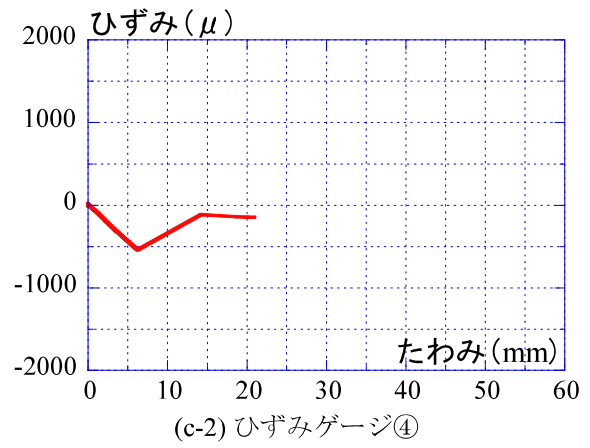
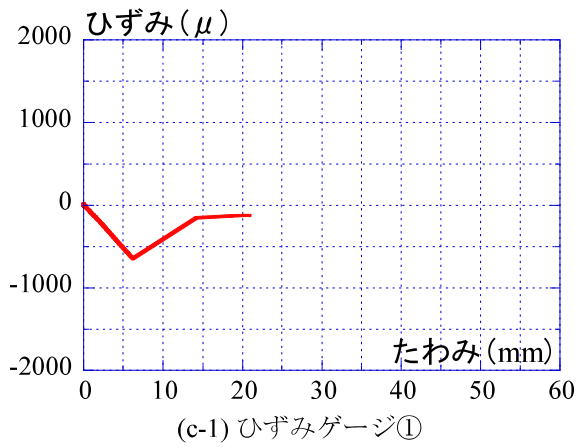
(a) 無接合①

図6.11-1 ひずみ-たわみ関係 (続く)



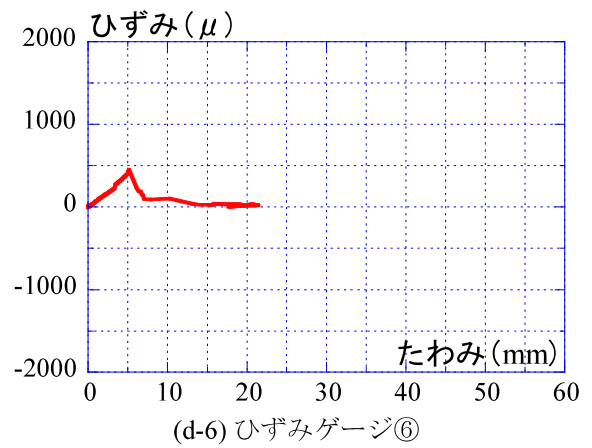
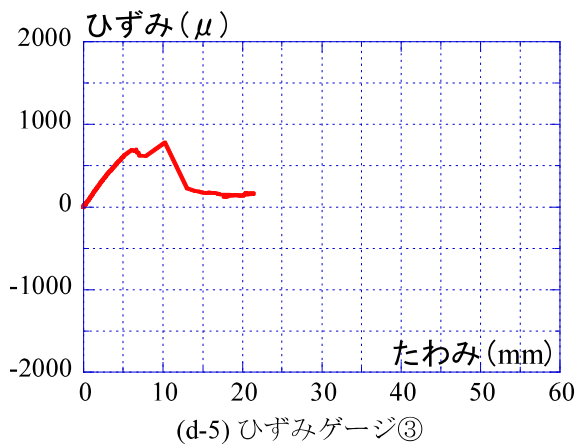
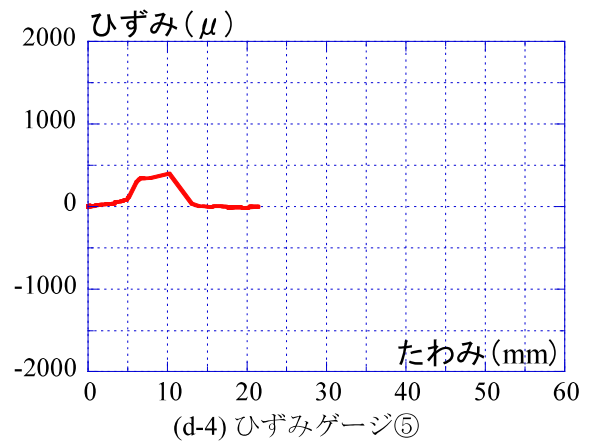
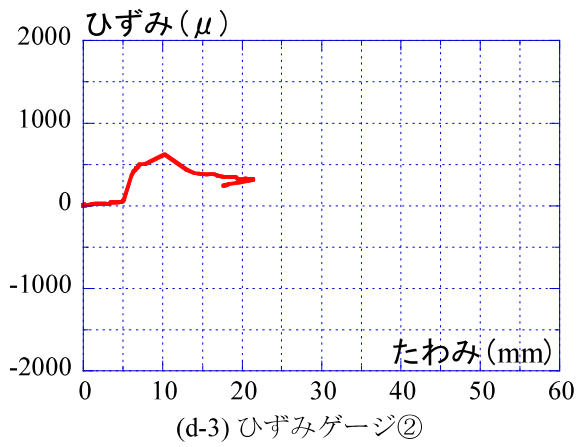
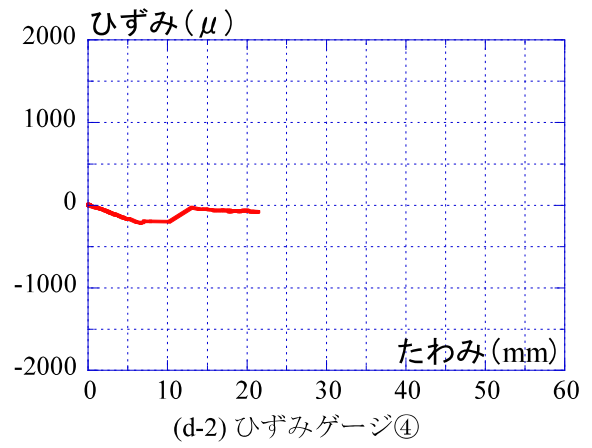
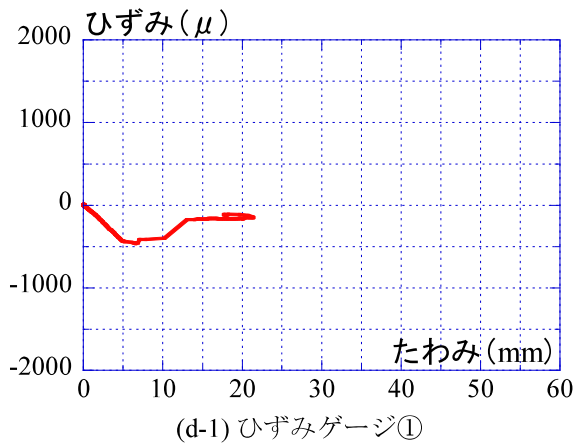
(b) 無接合②

図6.11-2 ひずみ-たわみ関係 (続く)



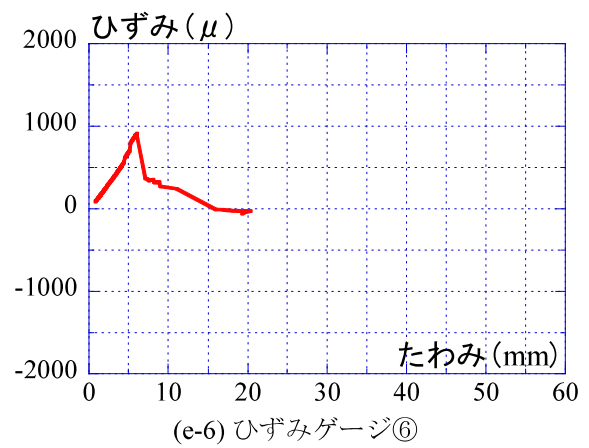
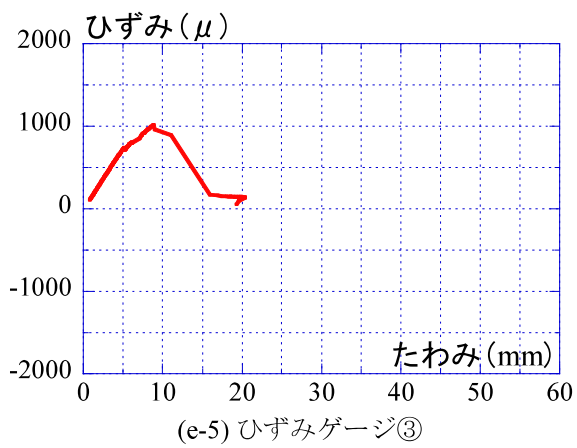
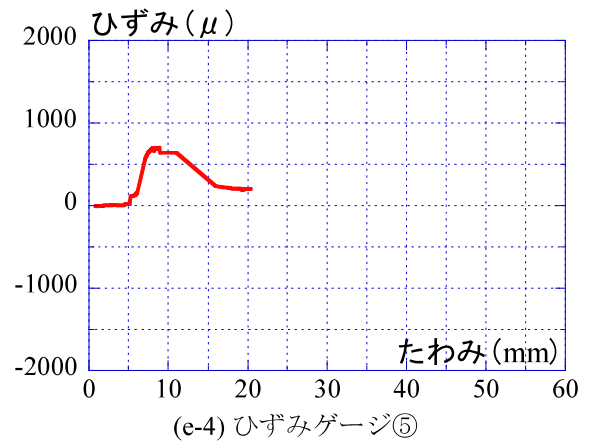
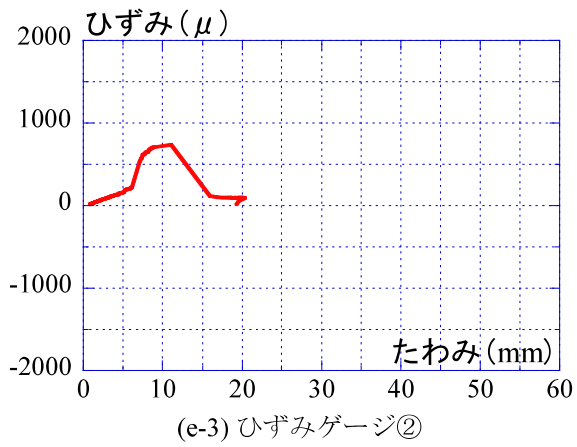
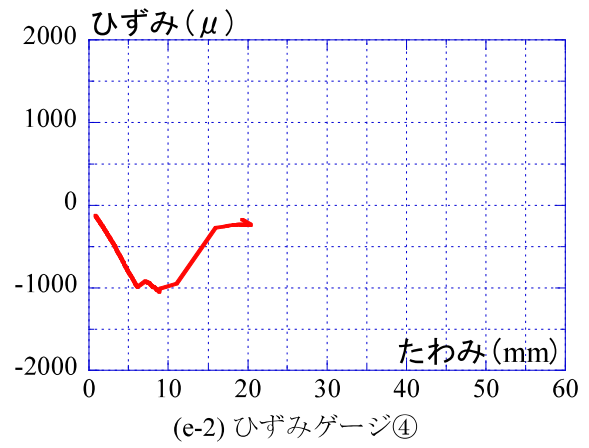
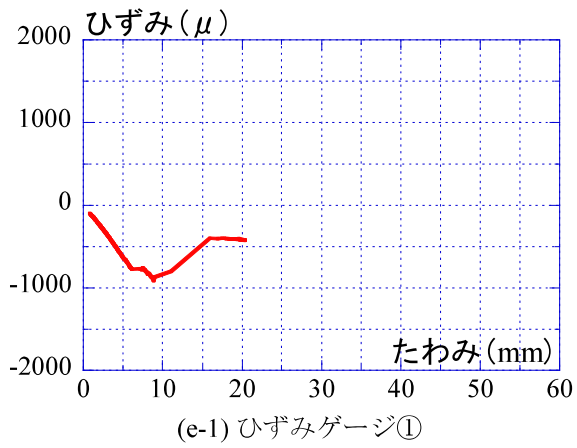
(c) D50T

図6.11-3 ひずみ-たわみ関係 (続く)



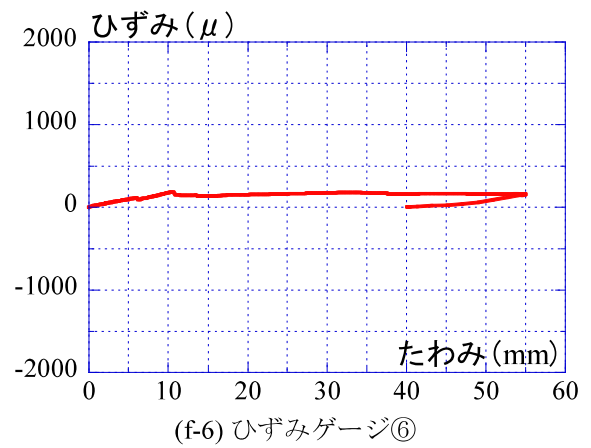
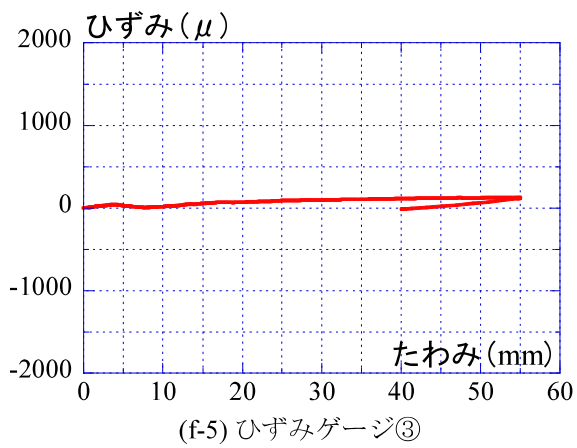
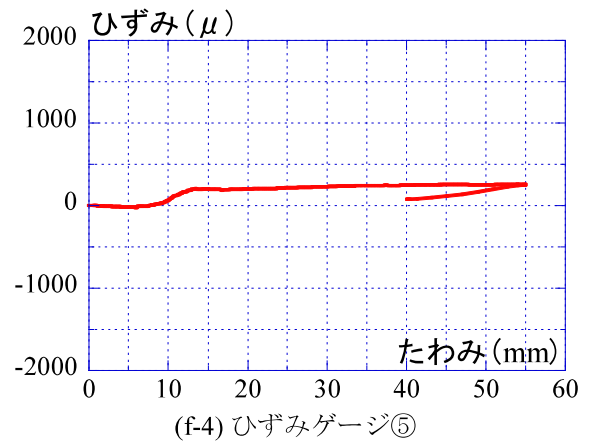
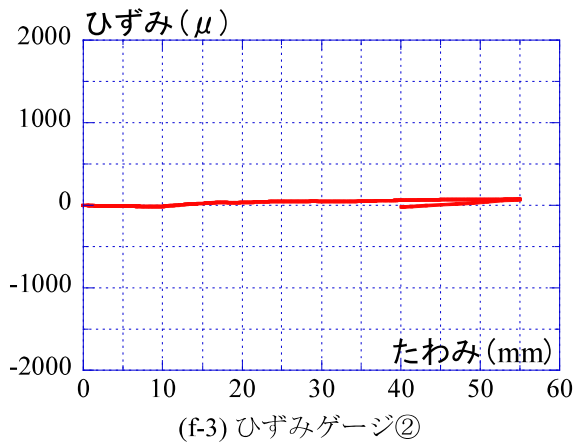
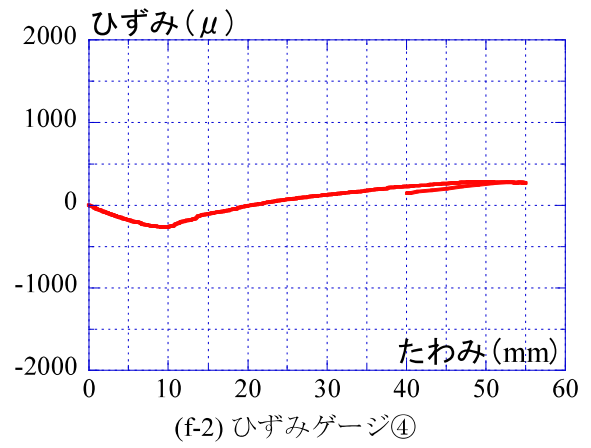
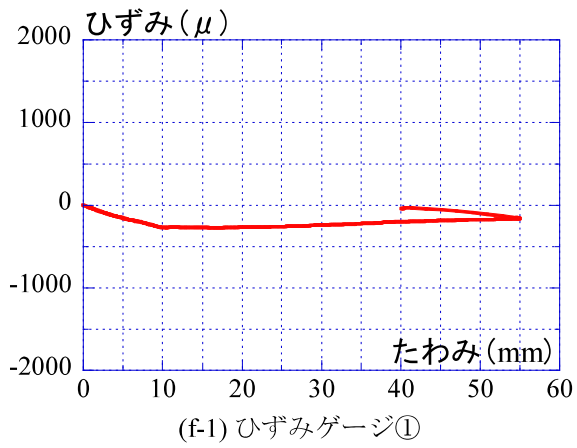
(d) D100T①

図6.11-4 ひずみ-たわみ関係 (続く)



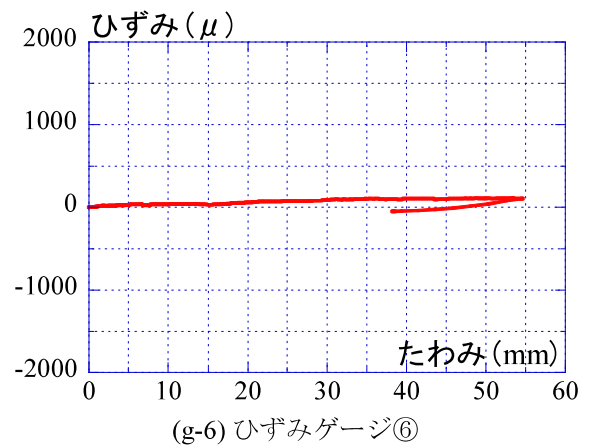
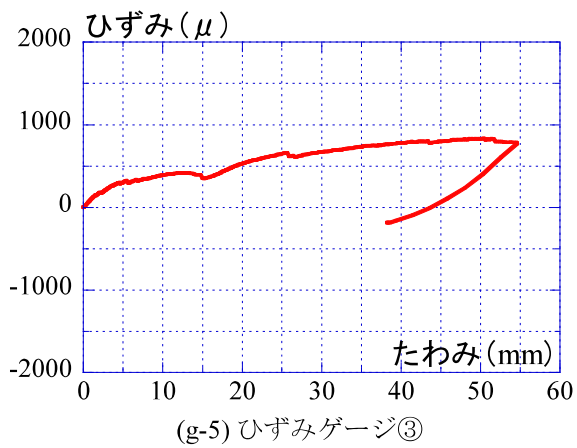
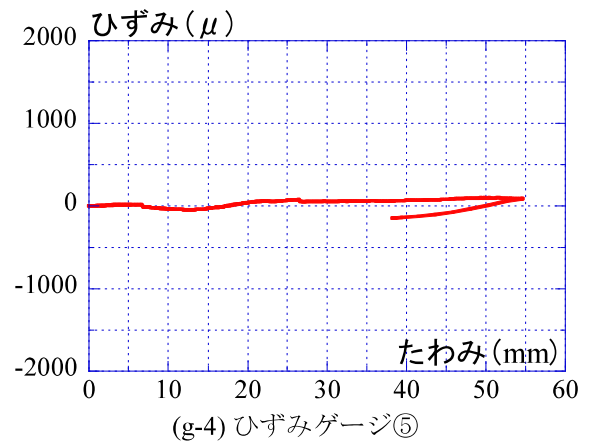
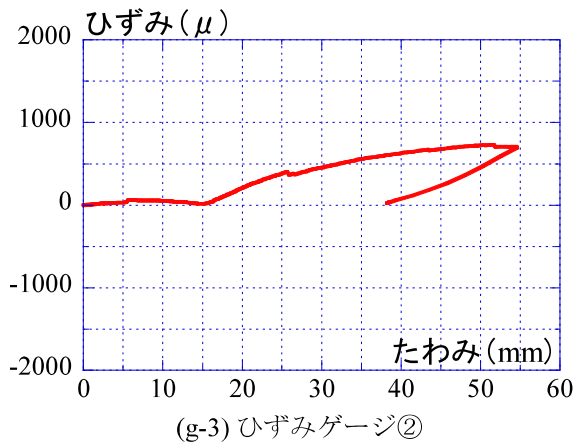
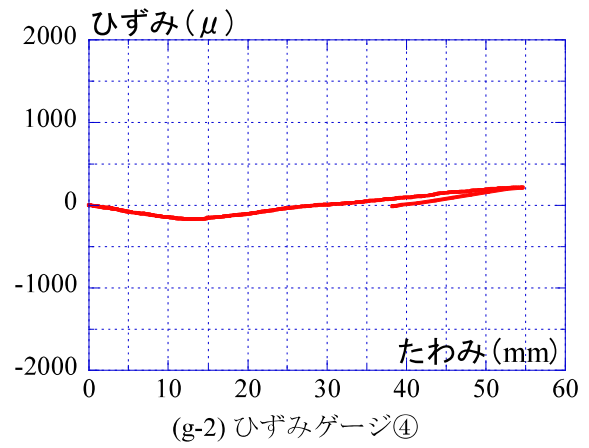
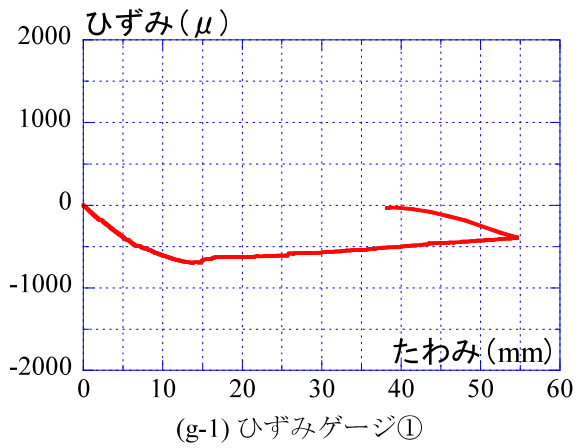
(e) D100T②

図6.11-5 ひずみ-たわみ関係 (続く)



(f) LSB①

図6.11-6 ひずみ-たわみ関係 (続く)



(g) LSB②

図6.11-7 ひずみ-たわみ関係 (続き)

6.2.3 考察

主要な実験結果一覧を表6.6に示す。

まず、試験体無接合①、無接合②および、コッターで接合したD50T、D100T①、D100T②の比較を行なう。同表より、初期剛性は全試験体ほとんど変わらないが、最大耐力は無接合の試験体が大きくなった。この理由として、無接合の試験体の弱軸層は引き裂かれるように割れるのに対して、試験体D50TおよびD100Tは弱軸層で接着剤が剥がれたため、耐力低下の要因になったものと考えられる。続いて、CLTパネルの基準曲げ強度と、実験より得られた曲げ応力度を比較すると、無接合の試験体は安全側に評価できていることがわかる。しかしながら、試験体D50TおよびD100Tは、実験の曲げ応力度は基準曲げ強度より小さい値となった。また、試験体D50TおよびD100Tの最大変形角は1.0%未満となり、変形能力には余り期待できないものと考えられる。また、試験体D50TとD100Tの試験体を比較すると、試験体D50Tの方が最大耐力がやや大きい傾向が見られた。この要因について明確な理由は不明であるが、試験体数を増やすなどより詳細な検討が必要である。

次に、試験体無接合①、無接合②および、LSB接合としたLSB①ep、LSB②epの比較を行なう。同表より、試験体LSBepは無接合の試験体に比べて、初期剛性および最大耐力は大幅に低く発揮された。このことより、LSBによる接合は曲げ応力に対する抵抗力はほとんどなく、金物プレートなどの曲げ抵抗要素を設ける必要があるだろう。なお、試験体LSB①epとLSB②epを比較すると、隙間の有無に拘らず、初期剛性および最大耐力はほとんど変わらなかった。

以上より、試験体D50T、D100TおよびLSBepは無接合の試験体ほどの最大耐力を有しておらず、本接合方法で一枚もののCLT床板の曲げ耐力を期待することは難しい。よって、大きな曲げ応力が作用する箇所に本接合部を設ける際には、別途曲げ抵抗要素を設ける必要があるものと考えられる。

表6.6 実験結果一覧

試験体名	${}_{ex}K$ (kN/mm)	${}_{ex}P_{max}$ (kN)	${}_{ex}\delta_{max}$ (mm)	${}_{ex}\theta_{max}$ (%)	${}_{ex}\sigma_{bmax}$ (N/mm ²)	F_b (N/mm ²)	${}_{ex}\sigma_{bmax}/F_b$
無接合①	10.9	271	29.6	2.69	11.8	3.34	3.54
無接合②	10.7	222	23.8	2.16	9.69	3.34	2.90
D50T	13.9	76	6.21	0.56	3.33	3.34	1.00
D100T①	14.7	64	5.14	0.47	2.80	3.34	0.84
D100T②	11.8	61	6.15	0.56	2.64	3.34	0.79
LSB①ep	3.42	38	47.7	4.34	1.67	3.34	0.50
LSB②ep	1.73	44	49.6	4.51	1.92	3.34	0.58

${}_{ex}K$: 初期剛性, ${}_{ex}P_{max}$: 最大耐力, ${}_{ex}\delta_{max}$: ${}_{ex}P_{max}$ 発揮時のたわみ量, ${}_{ex}\theta_{max}$: ${}_{ex}P_{max}$ 発揮時の変形角
($={}_{ex}\delta_{max}/l \times 100$), l : 支点から載荷点までの長さ1100mm, ${}_{ex}\sigma_{bmax}$: 実験の曲げ応力度, F_b : CLTパ
ネルの基準曲げ強度

7. 結論

本報告書では、LSBと高力ボルトを用いた鉄骨梁-CLT床の接合方法および、CLT床相互の接合方法について、実験的に検討した結果について述べた。各章より得られた知見を以下に記す。

第2章では、LSBによる鉄骨梁とCLT床の接合部におけるせん断性能を調べるため、押抜きせん断実験を実施した。LSBの座掘り深さが本接合部のせん断挙動に及ぼす影響は大きく、座掘り深さを浅くするほど、1.0mm以下のずれ変形量でもせん断抵抗力が大きくなることがわかった。座掘りの影響を無視するために、座掘り部分にエポキシ系接着剤を充填した実験挙動が最も性能としては優れていたが、エポキシ系接着剤を充填することによるコストと手間を考慮すると、一つの解ではあるが、改良されたLSB（座掘り深さ13.5mm）を使用することがベターであるものと考えられる。既往の研究で提案した頭無しスタッドボルトとエポキシ系接着剤による接合方法と比較すると、端距離および縁距離を検討した試験体ともに、改良版LSBを使用した試験体の方が、せん断耐力は大きくとれることを示した。

第3章では、円形鋼管をシアキーとした鉄骨梁とCLT床の押抜きせん断実験を実施した。本実験では試験体数が2体と少なく、実験結果にばらつきが生じた。円形鋼管に損傷は見られず、CLTのせん断破壊で耐力が決定したのと考えられる。

第4章では、コッター接着剤接合によるCLT床相互の押抜きせん断実験を実施した。本実験ではコッターの形状と寸法を実験変数に選定した。その結果、コッター部にテーパ加工を施すと、初期剛性および最大耐力が上昇することを明らかとし、条件によってはCLT基準せん断強度の3倍以上確保できることを示した。

第5章では、LSB接合によるCLT床相互の押抜きせん断実験を実施した。CLT床相互に隙間が生じることを想定し、隙間の有無および座掘り部分のエポキシ系接着剤充填の有無を実験変数とした。その結果、座掘り部分をエポキシ系接着剤を充填した試験体の方が初期剛性および最大耐力ともに大きな値が得られることを示した。

第6章では、第4章および第5章の結果を踏まえたCLT床相互の曲げ載荷実験を実施した。いずれの接合方法とも、無接合試験体ほどの耐力を有することはできなかった。コッターによる接着接合では、初期剛性は無接合試験体と同等の挙動を示したが、変形性能が劣る結果となった。また、LSBで接合した試験体では、変形性能は最も優れていた結果となったが、無接合試験体と比較し初期剛性および耐力ともに小さくなった。床相互接合部であまり変形を許容させないとするとコッター接合の方がよいが、大きな曲げモーメントに抵抗させるためには、別途曲げ抵抗要素を設ける必要があるものと考えられる。

謝辞

本実験の計画および遂行に関し、福岡大学工学部建築学科の堺純一教授および田中照久助教よりご助言をいただいた。また、載荷実験の実施にあたり、福岡大学教育技術職員の石橋宏一郎氏と大野敦宏氏に協力いただいた。さらに、試験体組立、載荷実験の実施、データ整理には、平成30年度福岡大学工学部建築学科倉富研究室の卒研究生である、松山礼佳氏と北村悠希氏の多大なる協力を得た。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄骨梁と木質床間の接合部せん断性状に関する実験的研究，倉富洋，堺純一，稲田達夫，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1535-1536，2018年9月
- 2) 柱梁S造一床木造システムの開発，倉富洋，森宗二郎，工藤 僚恭，山形毬乃，上川大輔，矢埜和彦，藤井秀行，稲田達夫，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.515-528，2015年9月
- 3) Development of the structural system with steel frame and wooden floor-Connection method of steel beam and wooden floor-, Yo KURATOMI, Tatsuo Inada, International Association for Bridge and Structural Engineering Conference , pp.1663-1670 , 2015年9月
- 4) 平成25年度補正予算林野庁委託事業，CLT等新製品・新技術利用促進事業のうちCLT実用化促進（接合部データの収集・分析），「鋼構造オフィスビル床のCLT化」研究成果報告書，2015年2月
- 5) 平成27年度予算林野庁委託事業，CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業（木質耐火部材開発），「鋼構造オフィスビル床のCLT化」（木質耐火部材開発）研究成果報告書，2016年3月
- 6) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2006年12月
- 7) 中島昌一ほか：クロス・ラミネイティド・ティンバーを用いた鋼板挿入型ドリフトピン接合部の引張加力下の耐力指標の検討，日本建築学会構造系論文集，第78巻，第687号，pp.969-975，2013年3月
- 8) 稲山正弘：中大規模木造建築物の構造設計の手引き，pp.44，2017年2月

【Ⅲ】防耐火編

もくじ

1. 試験の目的-----	1
2. 今回開発した耐火被覆方式-----	1
2.1 従来の工法-----	1
2.2 今回新たに開発した工法-----	2
3. 性能確認試験-----	3
3.1 方法1（吉野石膏提案の方法）-----	3
（1）試験体概要-----	3
（2）試験体詳細-----	4
（3）試験結果-----	6
（4）試験体の観察結果-----	9
（5）判定-----	11
3.2 方法2（旭化成建材提案の方法）-----	12
（1）試験体概要-----	12
（2）試験体詳細-----	13
（3）試験結果-----	15
（4）試験体の外観観察結果-----	17
（5）判定-----	20

1. 試験の目的

戦後植林された大量の人工林が活用期を迎える一方、思ったように木材利用が進んでいないという現実がある。我々は、この問題の克服のためには新たな木材需要の喚起が必要と考え、その方法としてビル型の中大規模建築（超高層オフィス等）への木材の積極活用を進めることを提案してきた。しかし実際には、我が国は世界的に見ても有数の地震国であり、大型建築の木造化を図ることは、決して容易な事ではない。そのために現実的な対応策として、柱梁は従来通り鉄骨構造とし、床のみ CLT 構造とする、混構造建築物の開発を行ってきた。

今年4月には、我々が手掛けてきた、「柱梁鉄骨造・床 CLT 構造建築」の第一号物件である、松尾建設本店ビルが佐賀市に竣工したが、その中で、本工法のメリット・デメリットが徐々に明らかになりつつある。中でも特に本工法の問題点として、CLT 床下面の耐火被覆材の取り付け手間の問題が指摘されている。

今後、木材需要を喚起し新たな木材市場を創設して行くためには、これらの問題点の所在を明らかにし、その克服の方法を検討することは是非とも必要なことである。そのために、本工法の抱える問題点を明らかにし、工法の改良を行うことを目的として、補助事業「新耐火被覆方法の開発」を進めてきた。今般、2社より問題解決に関する具体的提案を受け、その実証のための性能確認試験を実施したので、その概要を報告する。

2. 今回開発した耐火被覆方式

2.1 従来の工法

施工現場において、あらかじめ定められた耐火被覆材料を、熱の侵入を抑制できるように適宜目地をずらしながら貼付する方法。特に下面の耐火被覆材の貼付について、施工手間の問題が懸念された。(図1参照)

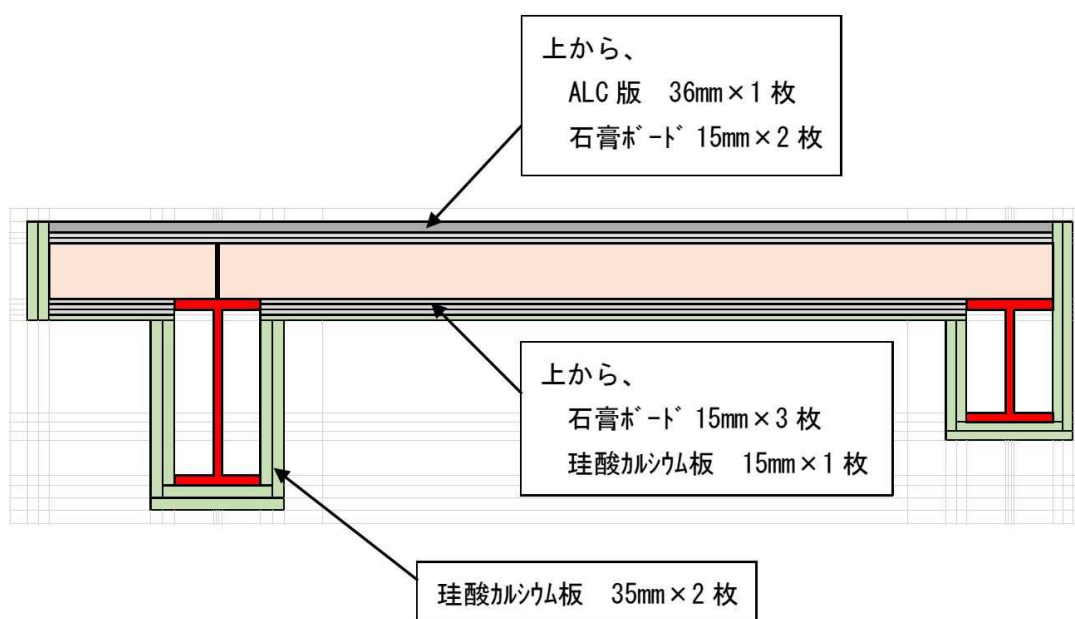


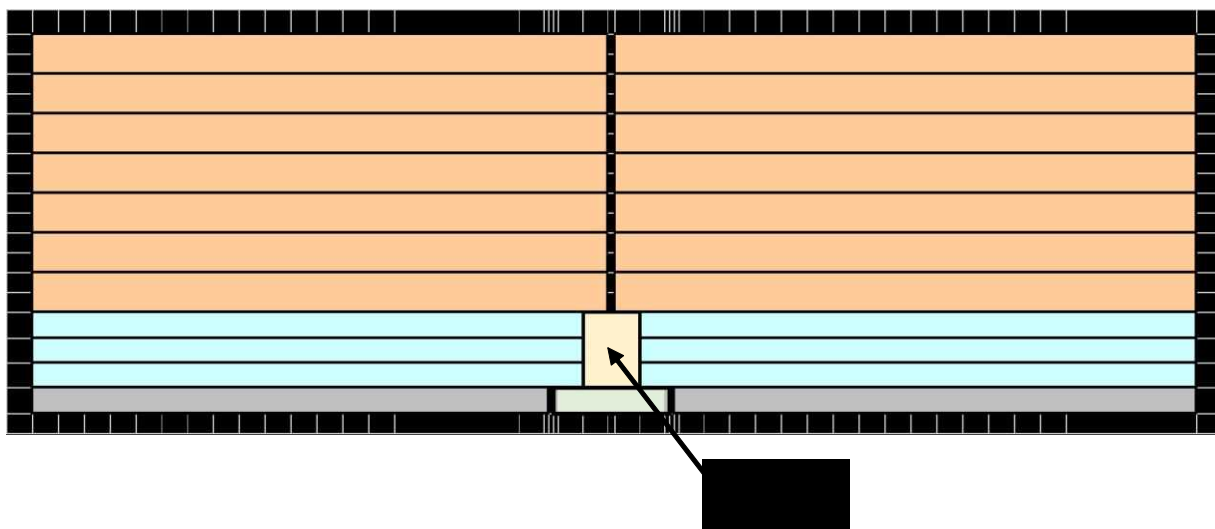
図1) 従来の耐火被覆方式

2.2 今回新たに開発した工法

下面の耐火被覆材については、CLTの加工工場においてあらかじめ貼付することにより、施工現場作業の手間の削減を図る。この場合、多層に貼付した耐火被覆材の目地位置が一致することから、熱の侵入が懸念される。熱の侵入阻止する方法として、以下の2つの方法が考えられる。

方法1) 目地に流動性の高い充填剤を注入することにより、熱の侵入を防ぐ方法。

方法2) 耐火被覆材の一部に熱収縮の小さい充填剤を使用し、熱の侵入を防ぐ方法。



方法1は、吉野石膏より提案があった方式であり、充填剤には同社の製品である、「SL プラスター」を使用している。方法2は、旭化成建材より提案のあった方式であり、充填剤には同社の製品である、「ネオマフォーム」を使用している。両方式について、2時間耐火の性能確認試験を実施したので、その概要を報告する。

3. 性能確認試験

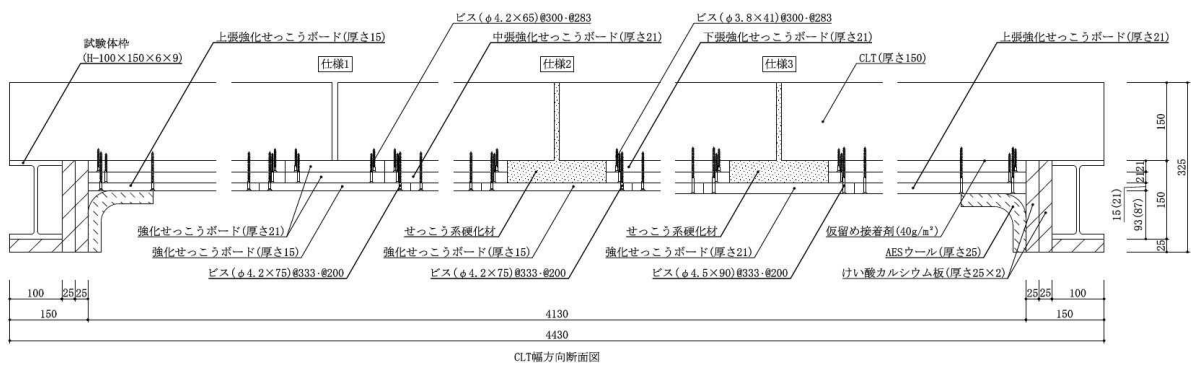
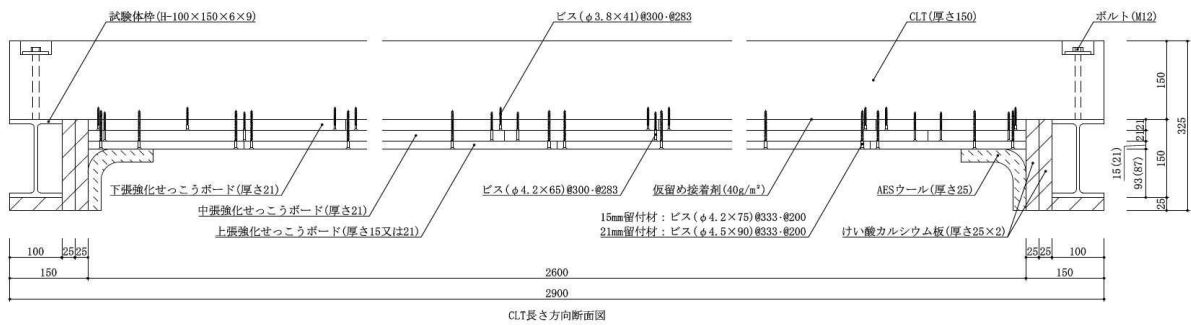
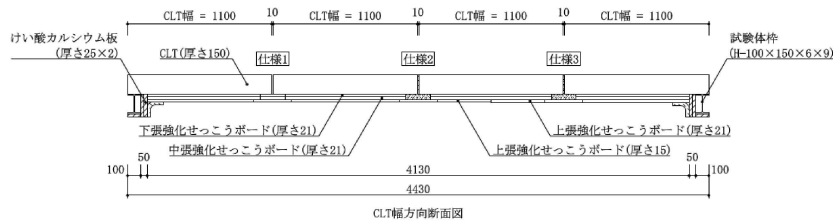
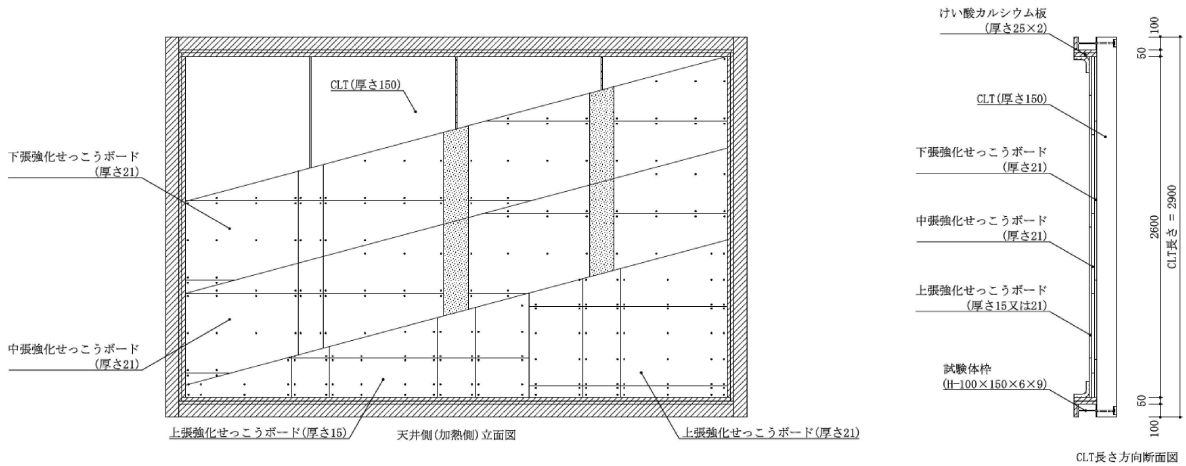
性能確認試験は各方式別に2回に分けて、住友林業の筑波研究所で実施した。

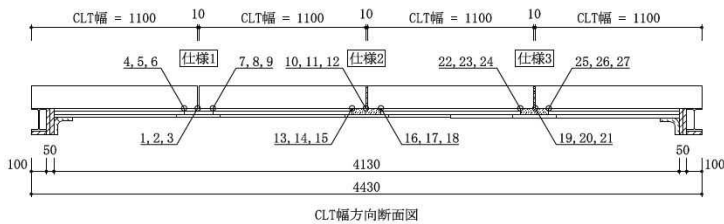
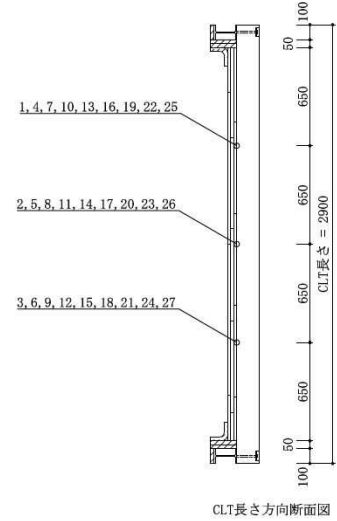
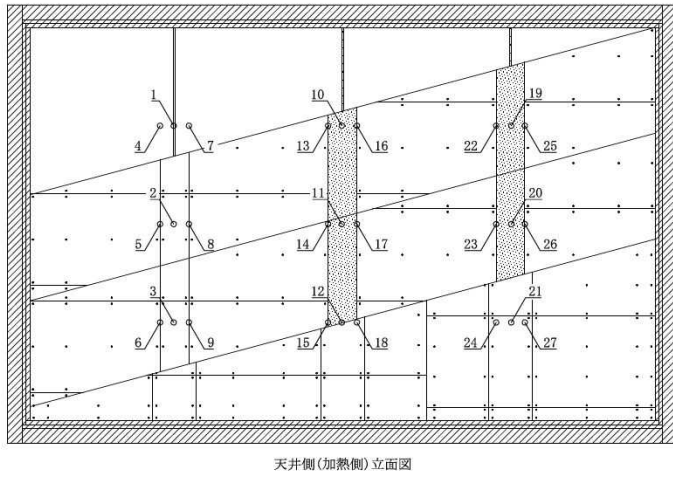
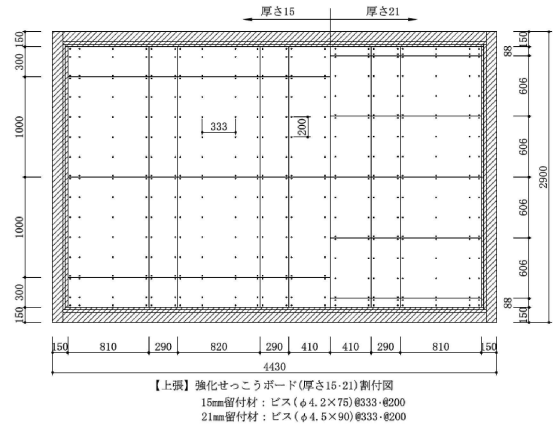
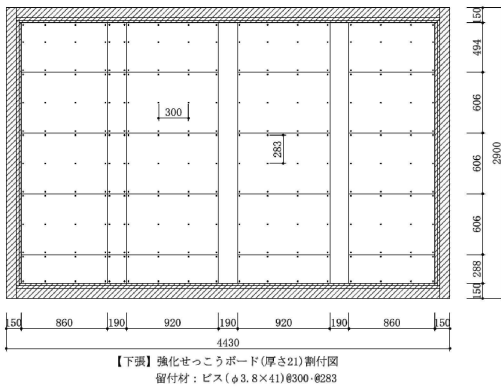
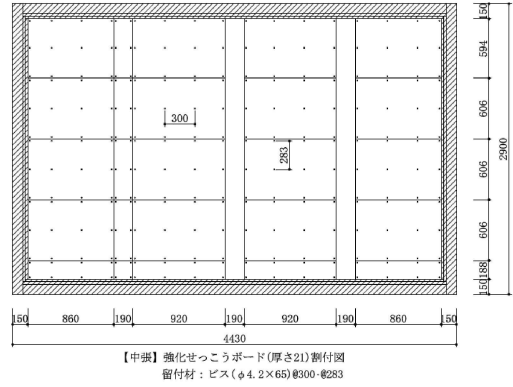
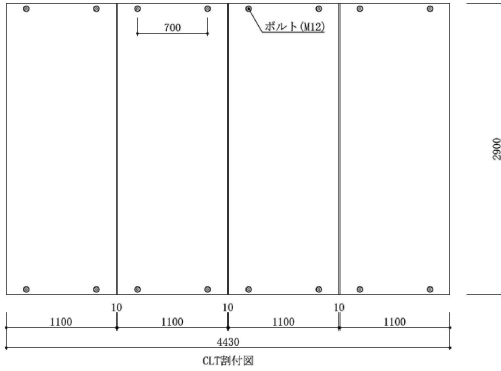
3.1 方法1（吉野石膏提案の方法）

（1）試験体概要

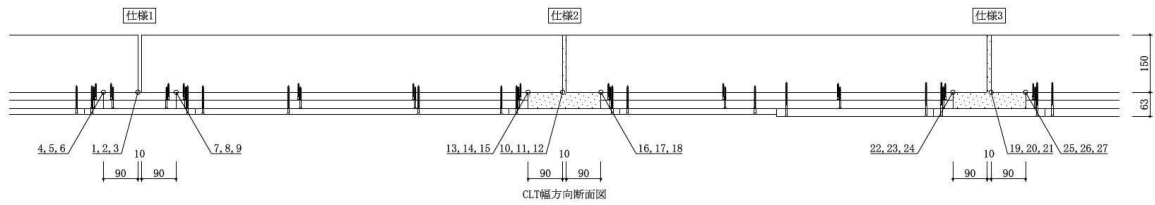
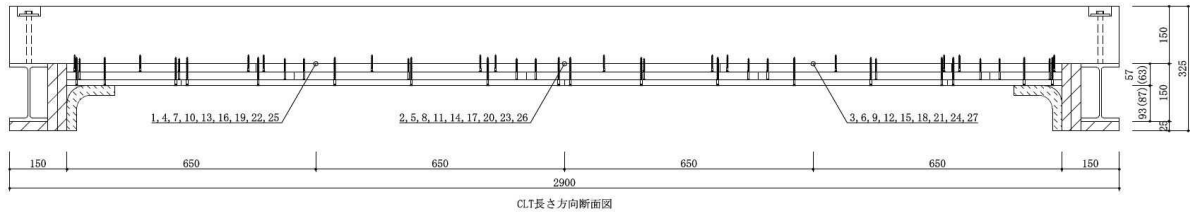
耐火被覆構成		構成図
仕様1	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm	
	充填剤 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm	
仕様2	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm	
	充填剤 石膏系硬化材42mm 強化石膏ボード15mm	
仕様3	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm	
	充填剤 石膏系硬化材42mm 強化石膏ボード21mm	

(2) 試験体詳細





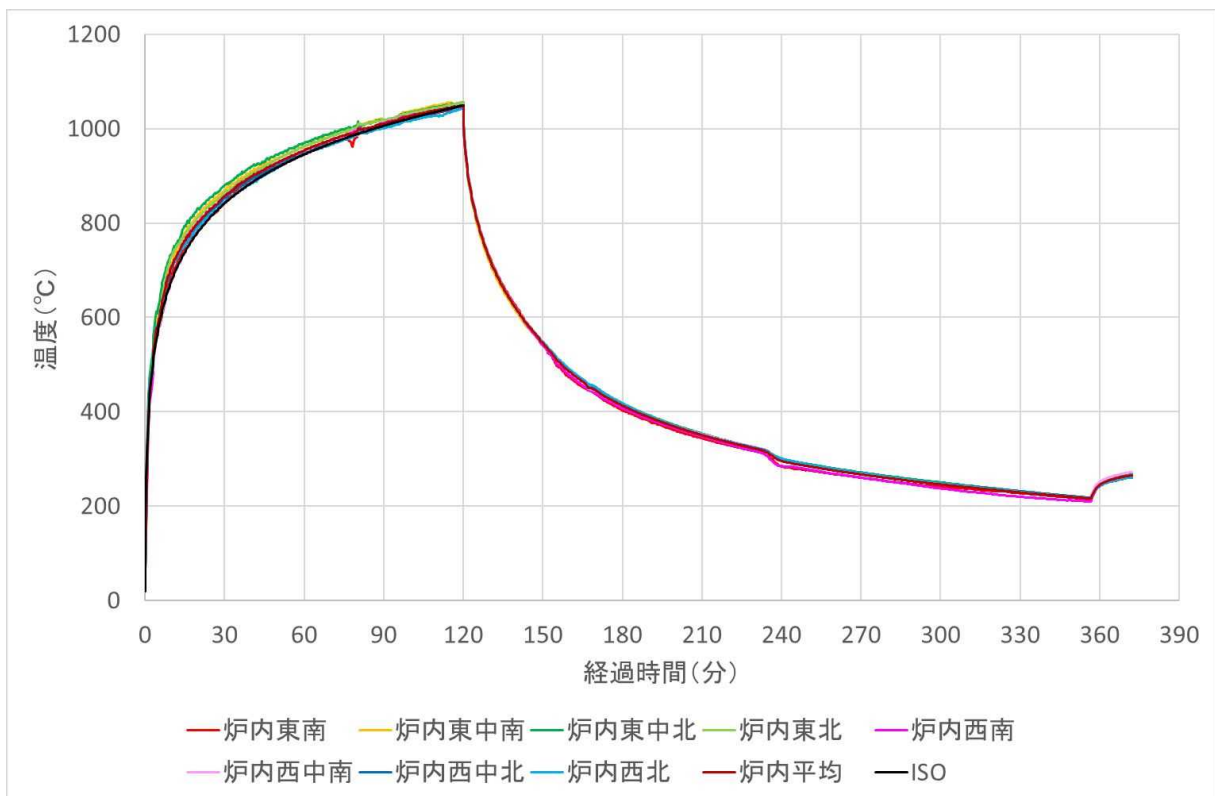
凡例	
1 ~ 9	仕様1CLT表面温度測定位置
10 ~ 18	仕様2
19 ~ 27	仕様3



凡例	
1 ~ 9	仕様1 CLT表面温度測定位置
10 ~ 18	仕様2 "
19 ~ 27	仕様3 "

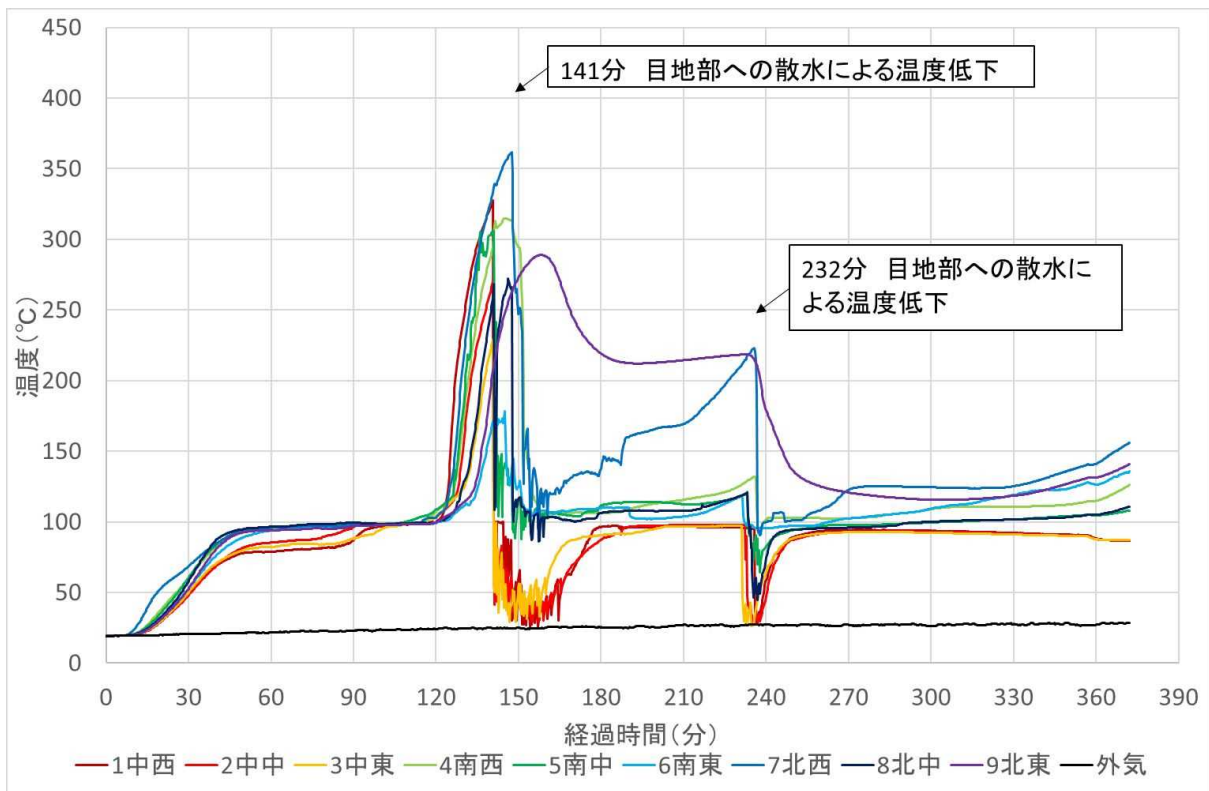
(3) 試験結果

① 炉内温度

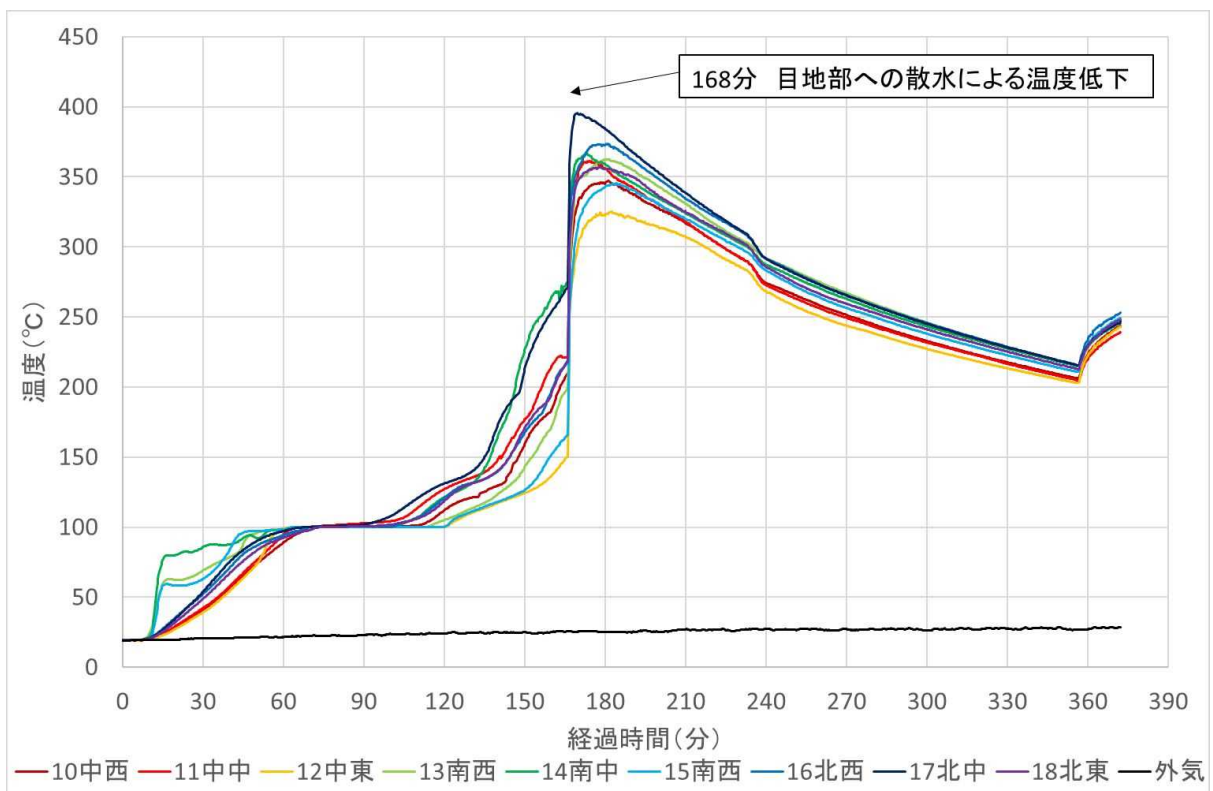


②試験体内部温度

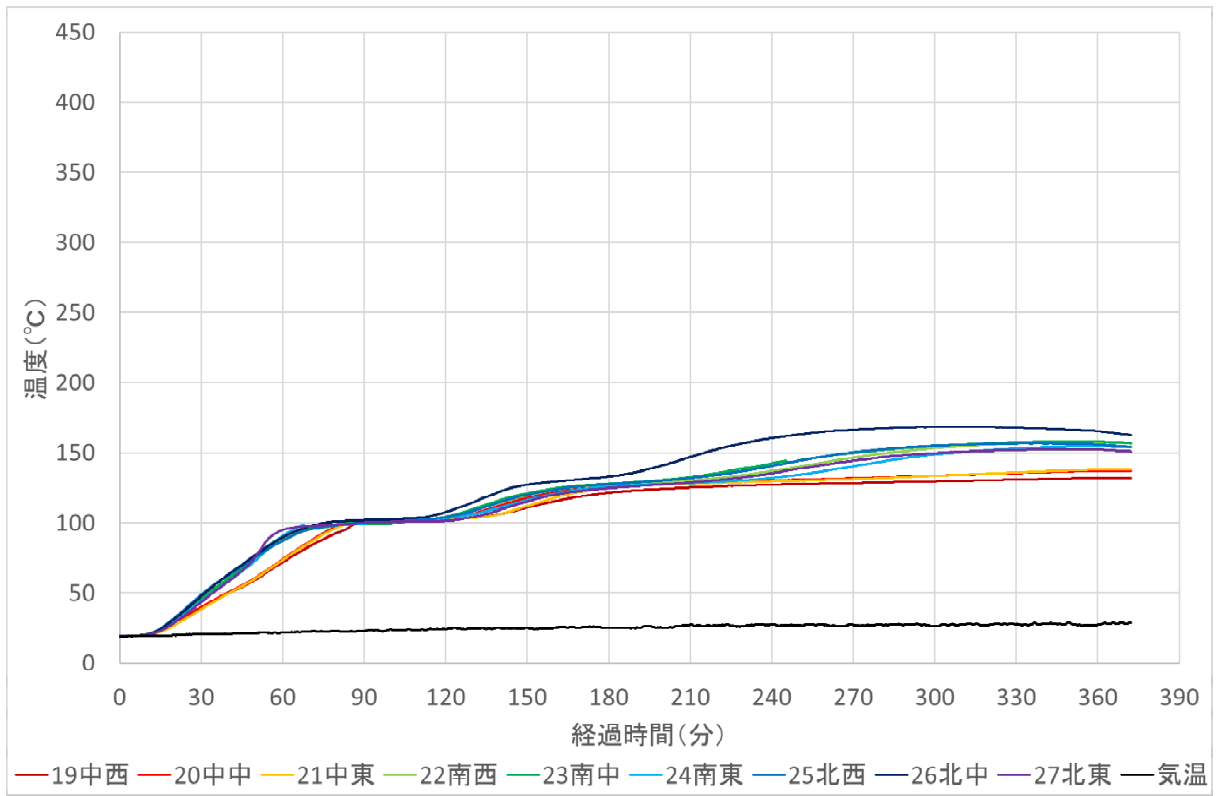
a) 仕様1



b) 仕様2



c) 仕様3



(4) 試験体の外観観察結果

イ) 試験体搬入時および設置時



ロ) 試験開始前加熱面・非加熱面



ハ) 試験時 (炉内)



二) 試験時 (炉外)



ホ) 脱炉後



(5) 判定

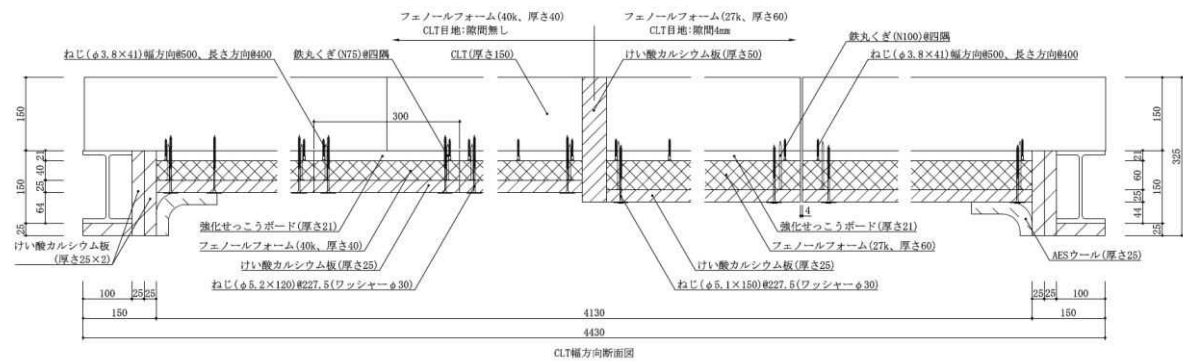
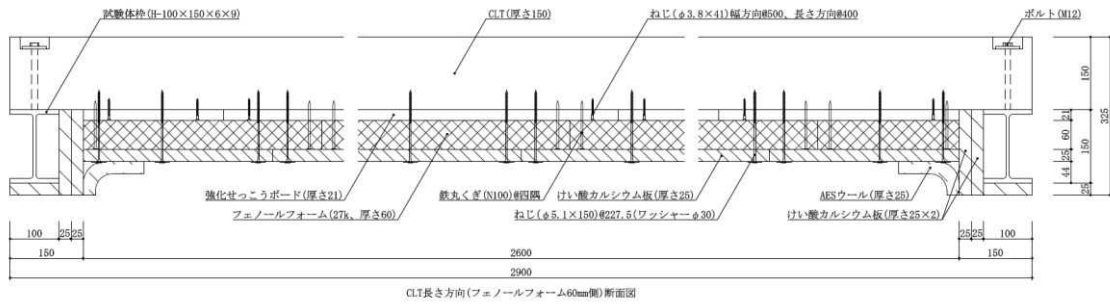
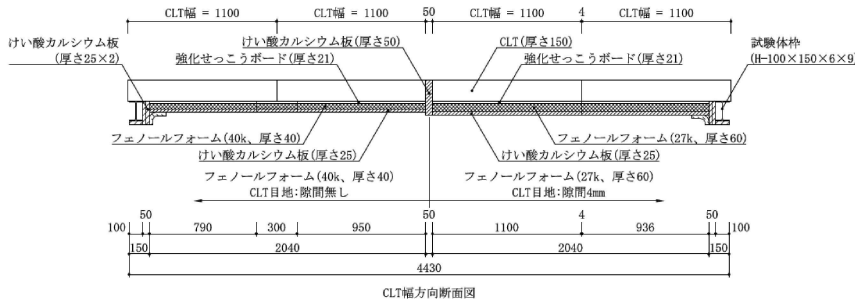
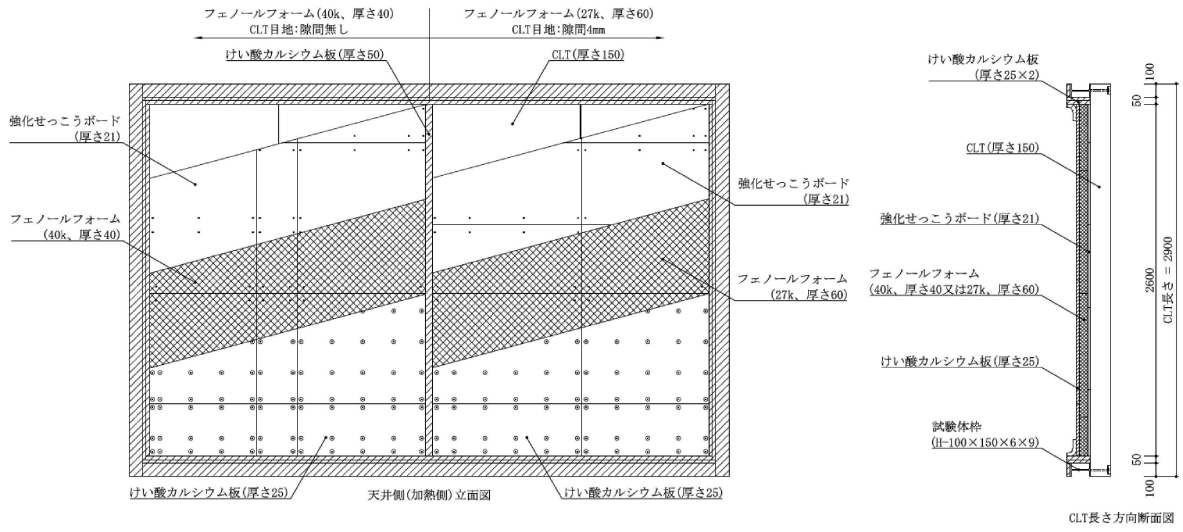
耐火被覆構成		構成図	判定
仕様1	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm		不合格
	充填剤 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm		
仕様2	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード15mm		不合格
	充填剤 石膏系硬化材42mm 強化石膏ボード15mm		
仕様3	耐火被覆 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm 強化石膏ボード21mm		合格
	充填剤 石膏系硬化材42mm 強化石膏ボード21mm		

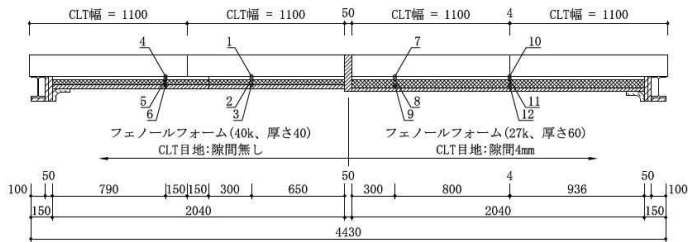
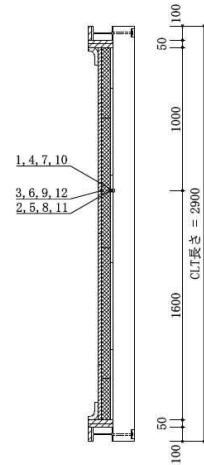
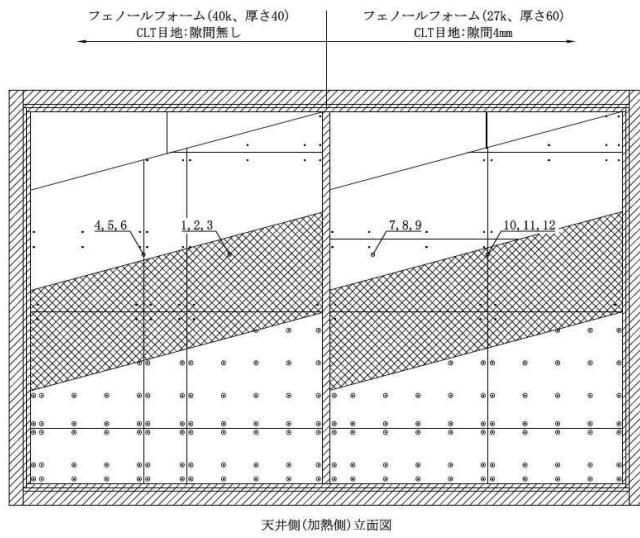
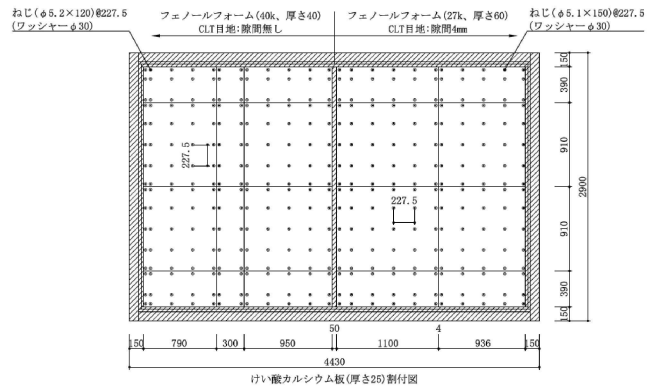
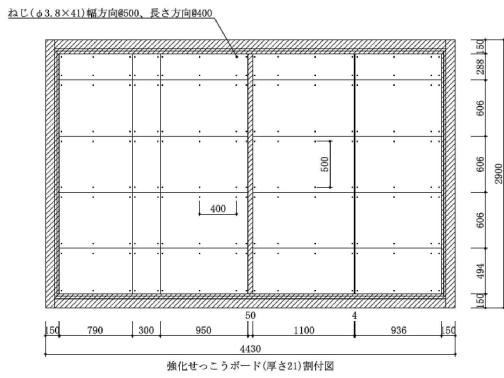
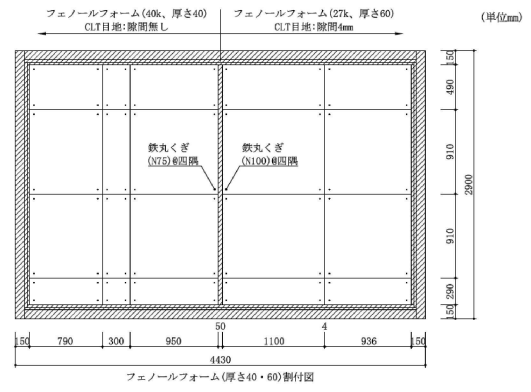
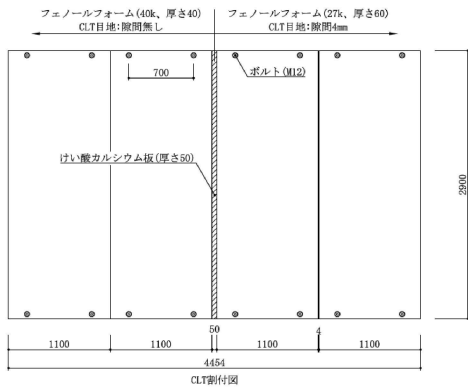
3.2 方法2（旭化成建材提案の方法）

（1）試験体概要

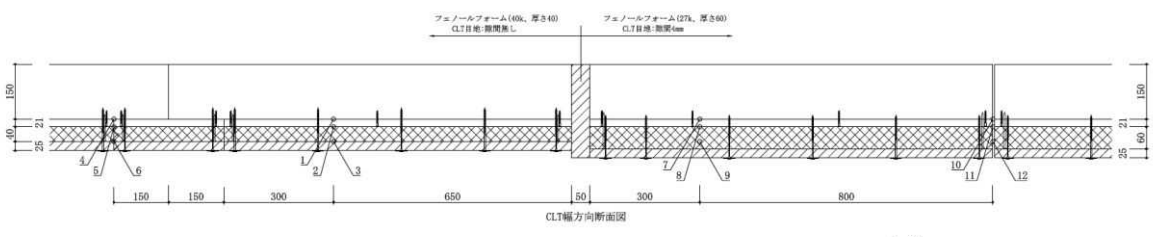
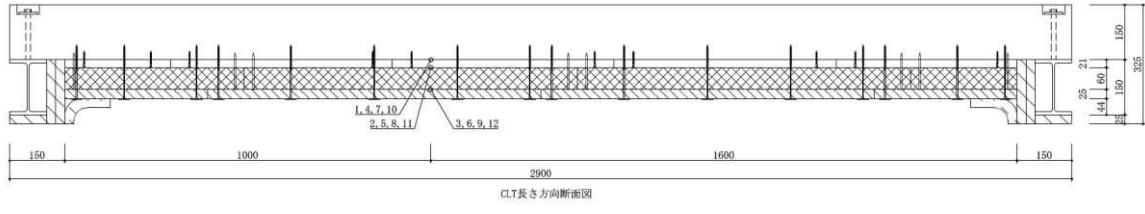
耐火被覆構成		構成図
仕様1	耐火被覆	
	充填剤	
仕様2	耐火被覆	
	充填剤	

(2) 試験体詳細





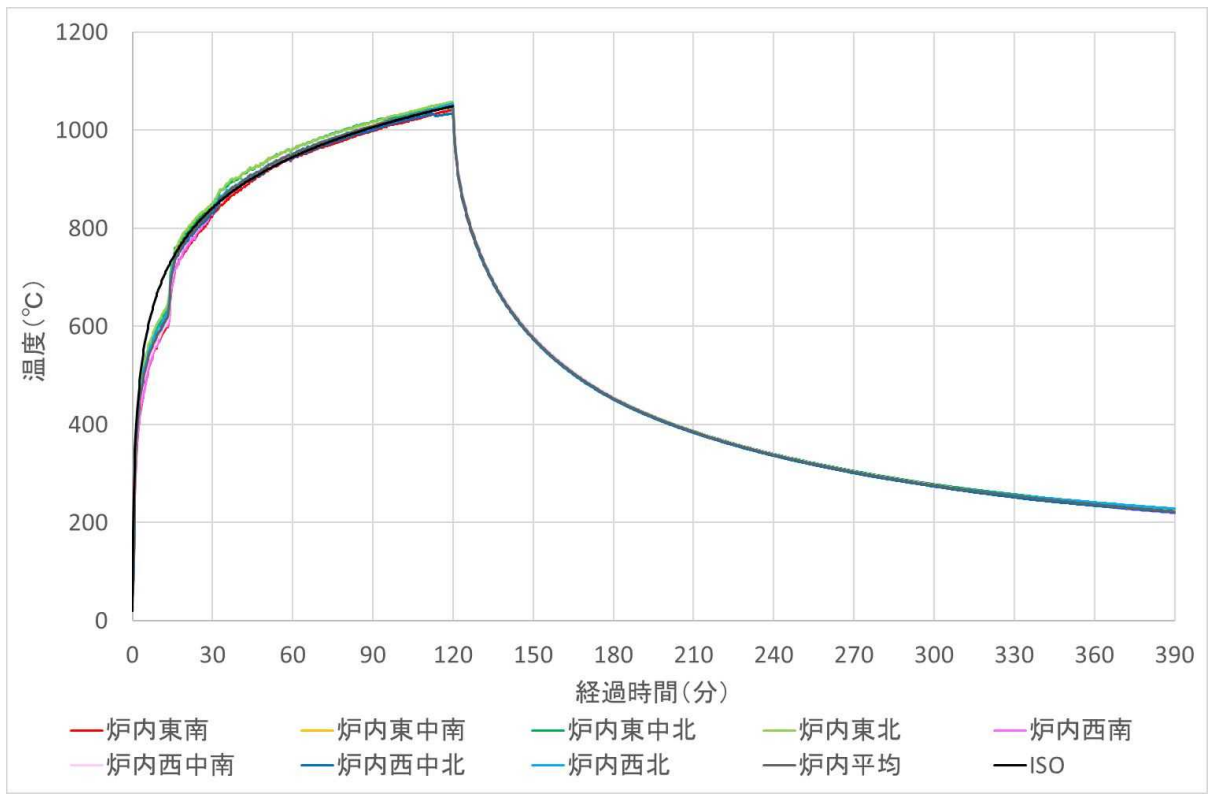
- 凡例
- 1, 4, 7, 10 CLT表面温度測定位置
 - 2, 5, 8, 11 強化せつこうボード表面温度
 - 3, 6, 9, 12 フェノールフォーム表面温度測定位置



凡例	
1, 4, 7, 10	CLT表面温度測定位置
2, 5, 8, 11	強化せつこうボード表面温度
3, 6, 9, 12	フェノールフォーム表面温度測定位置

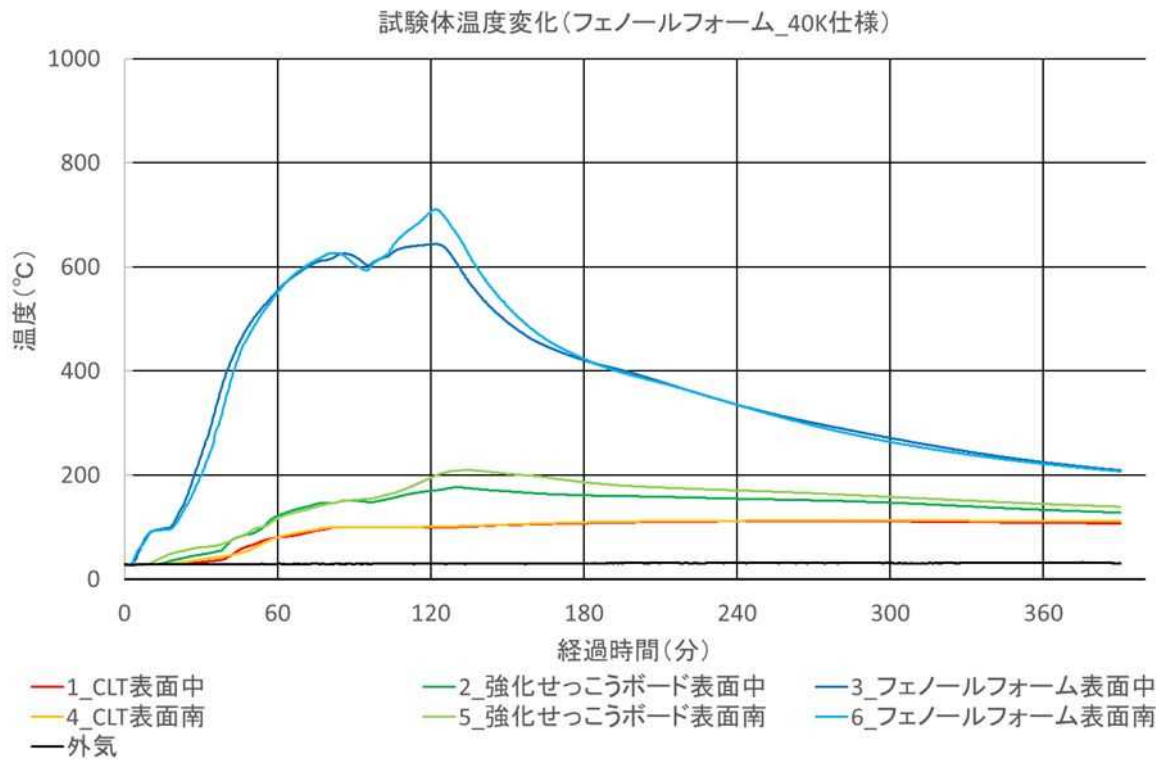
(3) 試験結果

① 炉内温度



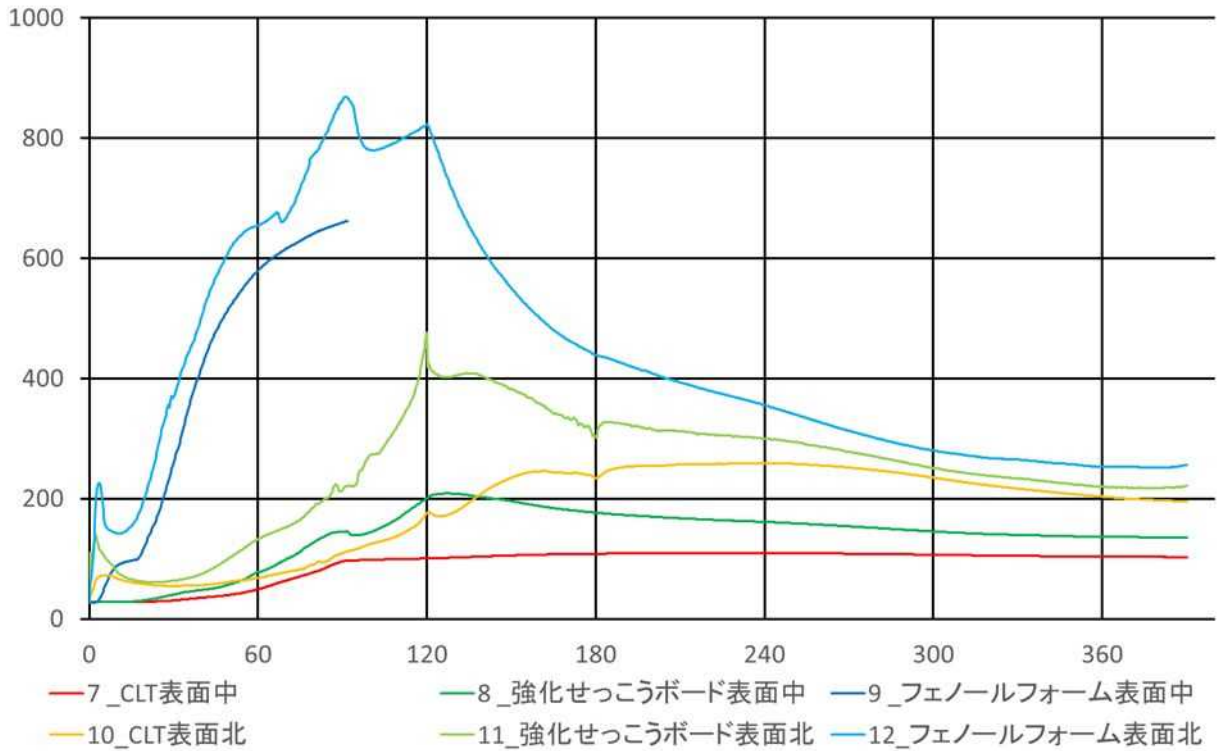
② 試験体内部温度

a)仕様1



b)仕様2

試験体温度変化(フェノールフォーム_27K仕様)



(4) 試験体の外観観察結果

イ) 試験体搬入時および設置時



ロ) 試験開始前加熱面・非加熱面



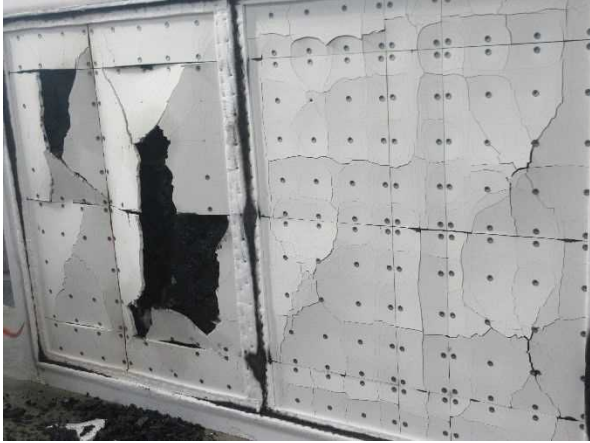
ハ) 試験時 (炉内)



ニ) 試験時 (炉外)



ホ) 脱炉後



(5) 判定

耐火被覆構成		構成図	判定
仕様 1	耐火被覆	強化石膏ボード21mm フェノールフォーム (40k、40mm) 珪酸カルシウム板25mm	合格
	充填剤	強化石膏ボード21mm フェノールフォーム (40k、40mm) 珪酸カルシウム板25mm	
仕様 2	耐火被覆	強化石膏ボード21mm フェノールフォーム (27k、60mm) 珪酸カルシウム板25mm	不合格
	充填剤	なし	

【IV】今年度の成果と今後の課題

今年度の補助事業では、まず「構造編」については、「柱梁鉄骨造・床 CLT 構造の建物に関する鉄骨と CLT 床の新接合方法の開発」として、

- ① LSB 接合による鉄骨梁と CLT 床の押し抜きせん断実験
- ② 円形鋼管を使用したシアキー接合による鉄骨梁と CLT 床の押し抜きせん断実験
- ③ コッター接着剤接合による CLT 床相互の押し抜きせん断実験
- ④ LSB 接合による CLT 床相互の押し抜きせん断実験
- ⑤ CLT 床相互の四点曲げ載荷実験

の5つの検討を行った。

結論としては、

- ・ LSB による鉄骨梁と CLT 床の接合については、従来の頭無しスタッドとエポキシによる方法に比べて、剛性については遜色のない、また強度についてはより高いレベルの接合性能を有することが確認できた。
- ・ コッターと接着剤を用いた CLT 床相互の接合については、かなり高いレベルの接合性能を有することが確認された。
- ・ LSB と鉄板を用いた CLT 床相互の接合については、コッターによる接合よりは劣るが、床に生じるせん断力の伝達のためには十分な剛性・強度が得られることが確認できた。
- ・ 今回開発された、鉄骨梁と CLT 床の接合法、CLT 床相互の接合法を、併せて用いることにより、接合箇所数の削減が可能になり、CLT 床取り付け工事費の削減が可能となる。

次に、防耐火編については、下面の耐火被覆材については、CLT の加工工場においてあらかじめ貼付することにより、施工現場作業の手間の削減を図ることとした。この場合、多層に貼付した耐火被覆材の目地位置が一致することから、熱の侵入が懸念される。熱の侵入阻止する方法として、以下の2つの方法が考えられる。

方法1) 目地位置に充填剤を注入することにより、熱の侵入を防ぐ方法。(図6参照)

方法2) 耐火被覆材の一部に、熱膨張性のある材料を使用し、熱の侵入を防ぐ方法。

結果として、上記2方式について、それぞれ、2時間耐火が成立する耐火被覆方式を確立し、性能確認を行うことができた。

以上により、工事段階の建設コスト削減については、ある程度達成できたものと考えている。今後は歩留まりの改善を図ることにより、CLT パネル製造段階のコスト削減を目指す。

「鋼構造オフィスビル床の CLT 化」

研究成果報告書

平成 31 年 3 月発行

〒893-1206 鹿児島県肝属郡肝付町前田 972 番地

山佐木材株式会社

TEL 0994-31-4141 FAX 0994-31-4142