

平成24年度 林野庁補助事業

木材利用技術整備等支援事業

CLT (Cross Laminated Timber)

の木材利用技術整備

成果報告書

平成25年3月

日本 CLT 協会

## はじめに

欧州で1990年代半ばに開発され、北米では2011年末に規格が完成したCLT（Cross Laminated Timber）は、強度、遮音性、断熱性、施工性等に優れ、炭素貯留効果が大いことなどから、住宅、アパート、学校、商業施設等での構造材としての利用が近年急増している。ロンドンでは2009年に9階建てマンションが、また、メルボルンでは2012年になって10階建てマンションが建てられるなど、これまでの木造の範疇を超える建物がCLTによって可能になっている。CLTは、合板、集成材、LVLに次ぐ、新たな重要かつ価値のある国際的な木質材料となる可能性があり、日本でも今後、中層・大規模の公共建築物、商業建築物や、住宅、アパート等、大きな建物から小さな建物まで多様な建築物に使われることが期待される。

しかし、日本でのCLTについての研究はまだ始まったばかりであり、実用化につなげるためには、基礎データの収集や研究を行っていくことが必要である。

そのため、本事業では、CLTの規格化を見据えたCLTパネルの基礎的性能の把握のための実験と、実用化を見据えて床の音響性能の実験の2つを主として事業を行った。

本事業の進行にあたっては、様々な研究者、事業者、行政担当者等のご尽力をいただき、事業の推進に関するご助言・ご協力をいただいた。この場をお借りして、関係各位に厚くお礼申し上げます。

日本でのCLTの実用化に向けて本事業の成果が役立てられるよう、今後とも情報発信を続けていくとともに、引き続き、多くの方々の助言・ご協力をいただければ幸いである。

平成25年3月

日本CLT協会  
会長 中島 浩一郎

## 事業の概要

本事業では、①地域材による CLT の強度試験実施、製造上の品質と仕様の検討、②木造中高層建築物に利用される CLT 床部材の設計上の仕様、構造モデルの検討と実証実験、③①、②の結果を総合的に解析することにより、日本型 CLT の仕様を作成することを目的に実験・検討を行い、報告書にまとめた。

## 事業の経過

- |                 |   |
|-----------------|---|
| 平成 24 年 6 月 6 日 | 「CLT (Cross Laminated Timber) の木材利用技術整備」<br>第 1 回 本委員会      |
| 平成 25 年 2 月 6 日 | 「CLT (Cross Laminated Timber) の木材利用技術整備」<br>第 2 回 本委員会      |
| 3 月 6 日         | 「CLT (Cross Laminated Timber) の木材利用技術整備」<br>第 3 回 本委員会 (最終) |

## 事業の実施

- |                         |   |
|-------------------------|---|
| 平成 24 年 6 月～平成 25 年 3 月 | <ul style="list-style-type: none"><li>・スギ CLT の材料特性の実験</li><li>・CLT の実用化 (床) の検討の実験</li></ul> |
|-------------------------|---|

委員構成

「CLT (Cross Laminated Timber) の木材利用技術整備」本委員会名簿

(順不同・敬称略)

委員長	安村 基	静岡大学 農学部 教授
副委員長	網野 禎昭	法政大学 デザイン工学部 教授
委員	河合 直人	工学院大学 建築学部 教授
	中島 史郎	(独)建築研究所 建築生産研究グループ 上席研究員
	渋沢 龍也	(独)森林総合研究所 複合材料研究領域 複合化研究室 室長
	宮武 敦	(独)森林総合研究所 複合材料研究領域 チーム長
	神谷 文夫	セイホク(株) 技師長、(独)森林総合研究所 フェロー
	宮林 正幸	(有)ティー・イー・コンサルティング 所長
協力委員	槌本 敬大	国土交通省 国土技術政策総合研究所 総合技術政策研究センター評価システム研究室 室長
事務局	孕石 剛志	日本 CLT 協会 専務理事
	村田 忠	日本 CLT 協会 理事
	岩坂 将	日本 CLT 協会 理事
	海老原 徹	日本木材加工技術協会 専務理事
	中島 洋	銘建工業(株)
	正木 祥子	銘建工業(株)
	原田 浩司	山佐木材(株)



## 目 次

第Ⅰ編	スギCLTの材料特性	1
	目的	2
1	試験体概要	3
2	面外曲げ性能	9
3	面内曲げ性能	19
4	CLTのクリープ破壊とクリープ変形	29
5	面外曲げ弱軸DOL	36
6	CLTの面外(層内)せん断性能	46
7	圧縮試験	59
8	めり込み	71
9	ラミナ曲げ	84
10	ラミナ引張	93
	まとめ	99
第Ⅱ編	CLTの実用化(床)の検討	103
1	音響予備試験	105
1.1	目的	105
1.2	試験方法	105
1.3	試験結果	112
1.4	考察	119
2	音響実大試験	121
2.1	目的	121
2.2	試験方法	121
2.3	試験結果	131
2.4	考察	135
2.5	今後の課題	137
3	床構面の水平せん断性能	138
3.1	目的	138
3.2	試験	138
3.3	結果	143
3.4	まとめ	147

## 第 I 編 スギ CLT の材料特性

## 第 I 編 スギ CLT の材料特性

### 目的

従来の木質構造である在来軸組構法や枠組み壁工法においては、柱、スタッドや梁などの軸材料が建物の自重や載荷物による鉛直方向の荷重を支え、また、軸材料に打ち付けられた合板等の面材料が地震や風などによる水平方向の荷重に対して抵抗するが、主として CLT で構成される構造物ではこれらの荷重を CLT が支えたり抵抗したりすることになる。一方、CLT は強度異方性を持つひき板をその繊維方向を直交させながら積層接着した材料であるため、荷重を受ける面と方向の組合せによりによって力学的挙動が異なる複雑な材料である。さらに、その力学的性質は、原料であるひき板の品質やその構成・組合せの仕方の影響を受けることが考えられる。

しかしながら、我が国における CLT の製造技術開発や強度性能評価は途についたばかりであり、国産スギを用いた製品について海外における研究成果の適用可能性に関して十分な検討もなされていない。そこで本事業では、国産のスギを用いて製造した CLT について強度異方性や直交層の影響など基本的な力学的性質を明らかにするとともに、ラミナの区分法や構成などの製造条件が CLT の強度性能に与える影響についても実験的に明らかにすることを目的とした。

まず、評価すべき強度性能としては、CLT が実際の構造物で受けることになる荷重を考慮して、面外曲げおよび層内せん断、面内曲げ、縦圧縮、めり込みの諸強度性能について実験的に明らかにすることにした。また、CLT が面外曲げ荷重を受ける場合に求められる試験体寸法（CLT の幅）が強度性能及ぼす影響および長期間の荷重が変形量の増大に及ぼす影響や荷重継続時間が強度性能に与える影響についても実験的に検証することにした。また、CLT の強度異方性を考慮して、平面内の 2 方向（強軸・弱軸）の強度試験を行うこととした。

## 1. 試験体概要

本章では、スギを用いた CLT の強度性能を明らかにするために本事業で行った強度試験に用いた試験体の概要とその製造条件について報告する。

### 1. 1 試験項目

従来の在来軸組構法や枠組み壁工法においては、柱、スタッドや梁などの軸材料が建物の自重や載荷物による鉛直方向の荷重を、また、軸材料に打ち付けられた合板等の面材料が地震や風などによる水平方向の荷重を支えているが、主として CLT で構成される構造物ではこれらの荷重を CLT が支えることになる。一方、CLT は強度異方性を持つひき板をその繊維方向を直交させながら積層接着した材料であるため、荷重を受ける面と方向の組合せによりによって力学的挙動が異なる複雑な材料である。

そこで、CLT が実際の構造物で受けることになる荷重を考慮して、面外曲げおよび層内せん断、面内曲げ、縦圧縮、めり込みの諸強度性能について実験的に明らかにすることにした。また、構造設計をする際に求められる試験体寸法（CLT の幅）が強度性能及ぼす影響および長期間の荷重が変形量の増大に及ぼす影響や荷重継続時間が強度性能に与える影響に関して、CLT が面外曲げ荷重を受ける場合について実験的に検証することにした。

### 1. 2 試験体の仕様

CLT の強度性能は、原料のラミナ（ひき板）の厚さや強度性能と直交積層する時にこれらのラミナをどの様に構成させるかによって影響を受ける。

ラミナ断面寸法は集成材原料で使用されることの多い厚さ 30mm 幅 110mm とした。

ラミナの強度等級の区分は連続式グレーディングマシンを用いて計測された曲げヤング係数の平均値により行い、それらの組合せは全層を同じラミナ強度等級で構成する同一等級構成とラミナ強度等級の高いものを平行層<sup>\*</sup>に、低いものを直交層<sup>\*</sup>に配置する異等級構成の 2 種類とした。ラミナの強度等級区分の基準値を表 1-1 に示す。面外曲げ強度の長期性能を検証するための試験体は、試験体の面外曲げ性能のバラツキを極力小さくすることを目的として、ラミナの強度等級区分に用いる曲げヤング係数の最小および最大の基準値の範囲を  $1\text{kN/mm}^2$  にした。

CLT 試験体のラミナの積層数は、振動台実験<sup>1)</sup>に用いられた CLT 部材の仕様を参考にして、5 層 5 プライ（製品厚さ 150mm）と 7 層 7 プライ（製品厚さ 210mm）とした。

（※：図 1-1 参照、CLT 表層ラミナの繊維方向を強軸、これに交差する方向を弱軸、強軸に平行な層を平行層、弱軸に平行な層を直交層と呼ぶ。）

表 1-1 ラミナの強度等級区分の基準

評価項目	構成	用途	区分基準
強度試験	同一等級構成	全層用	4~7kN/mm <sup>2</sup>
	異等級構成	平行層用	6~8kN/mm <sup>2</sup>
		直交層用	3~6kN/mm <sup>2</sup>
長期性能試験	同一等級構成	全層用	6~7kN/mm <sup>2</sup>

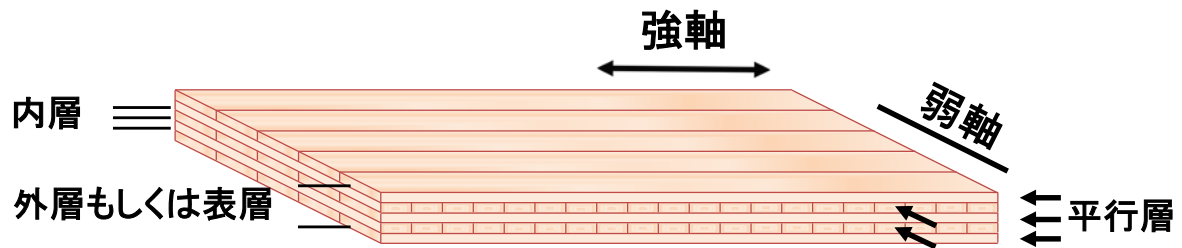


図 1-1 CLT のラミナ構成に関する用語

外層もしくは表層：CLT 表面の層

内層：外層（もしくは表層）に挟まれた層

CLT の強軸方向：CLT 表層の繊維に平行な方向

CLT の弱軸方向：CLT 表層の繊維に直交（交差）する方向

平行層：CLT の強軸方向に平行にラミナの繊維方向を並べた層

直交層：CLT の弱軸方向にラミナの繊維方向を並べた層

層構成：CLT の層の構成をいう。

### 1. 3 試験体の製造

1) ラミナの製造 試験体製造に用いた原料のスギひき板は、積層接着する時点のラミナ仕上がり断面寸法を厚さ 30mm、幅 110mm になるよう製材・乾燥（蒸気乾燥式・目標含水率 12%）を行った。次に、モルダーで荒仕上げした乾燥ひき板を、連続式グレーディングマシン（型番：MGF E-251 飯田工業㈱社製）で測定した曲げヤング係数の長さ方向の平均値を用いて所定の基準により強度等級区分したのち、試験体の仕様に合わせてたて継ぎラミナ長さを調整した（フィンガー長：15.0mm、ピッチ：3.8mm、スカーフ比：1/12、先端厚さ：0.7mm、嵌合度：0.1mm、接着剤：水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤）。各試験項目の試験体寸法と本数に応じた試験体の採材パターン 6 種類を予め決め、面外曲げ（長期性能検証用試験体を含む）、面内曲げ試験体におけるモーメント一定区間および縦圧縮試験体については、その平行層に配置するラミナにたて継部が必ずくるように配置した。また、強度等級毎にたて継ぎラミナを所定数抜き取り、曲げ試験と引張り試験を行った。

2) CLT 大板及び試験体の製造 ラミナの積層接着は、銘建工業株式会社に設置された CLT の試験的量产ラインにおいて大板プレス（2.7m×6.0m）を用いて行った。ラミナに水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を塗布量 200～250（基準 220） $\text{kg/m}^2$  にてグルースプレッダー片面塗布方式で塗布し、ラミナ構成に応じて仮組みした。仮組された状態で圧縮プレスに付属する装置で側圧をかけてラミナ幅方向の透き間を極力なくすように形を整えた後、圧縮圧力 0.8MPa、圧縮時間 60 分で積層方向の圧縮を行った。なお、接着剤塗布開始から圧縮開始までに要した時間は概ね 10 分以内であった。製造した CLT 大板の概要と製造枚数を表 1-2 に示す。なお、ラミナの幅はぎは行わなかった。

各試験項目の試験体は予め定めた採材パターンに沿って、製造した大板から切り出した。採材パターン 7 種類を図 1-2～1-5 に示す。

表 1-2 試験体の採材パターンと試験体切り出し用大板の枚数

ラミナ構成	採材パターン	試験	5層5プライ枚数	7層7プライ枚数
同一等級	1	強度一般	2	
	2	強度一般	2	
	3	幅影響	2	
	4	DOL/面外曲げ強軸	2	
	5	DOL/面外曲げ弱軸	2	
	6	強度一般		1
	7	強度一般		1
異等級	1	強度一般	2	
	2	強度一般	2	
計 枚			14	2

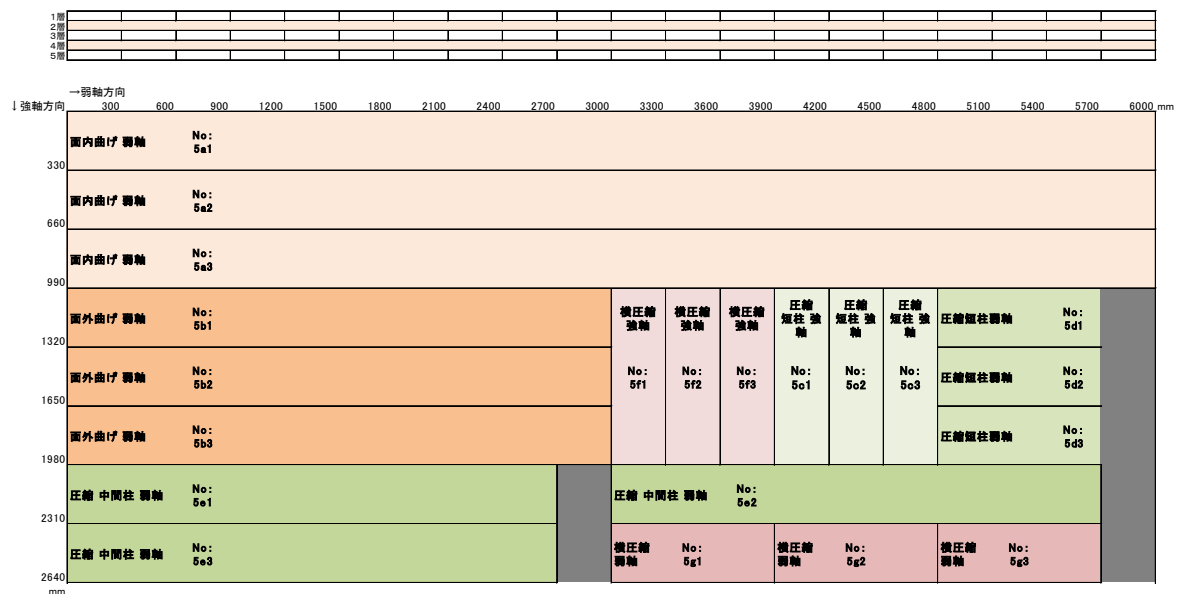
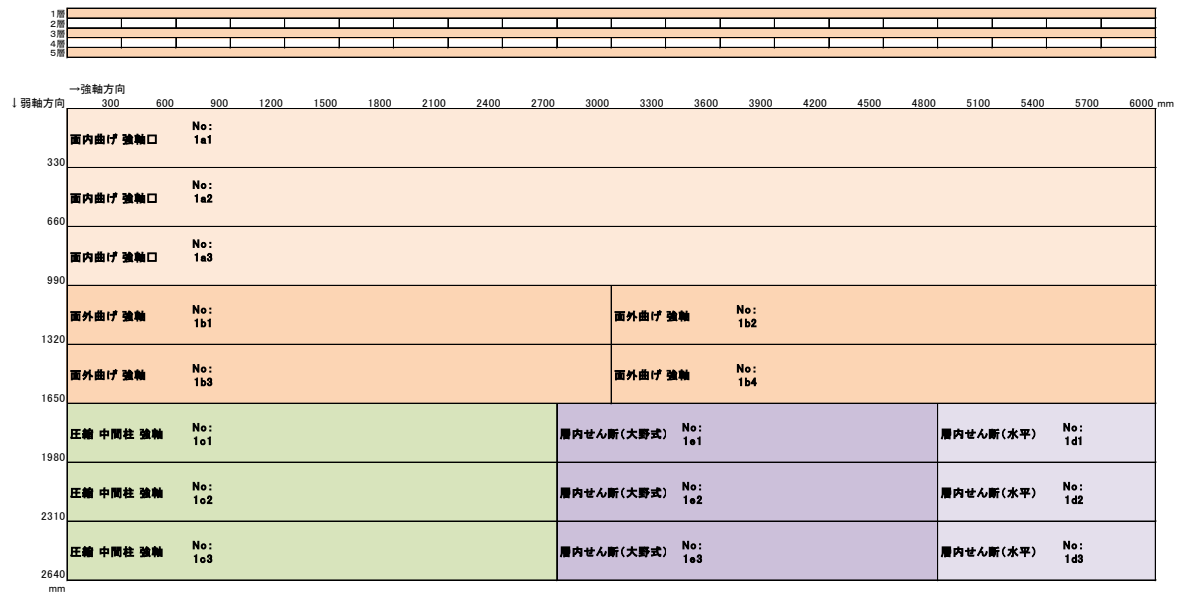


図 1-2 5層5プライ試験体の採材パターン 上：採材パターン1、下：採材パターン2

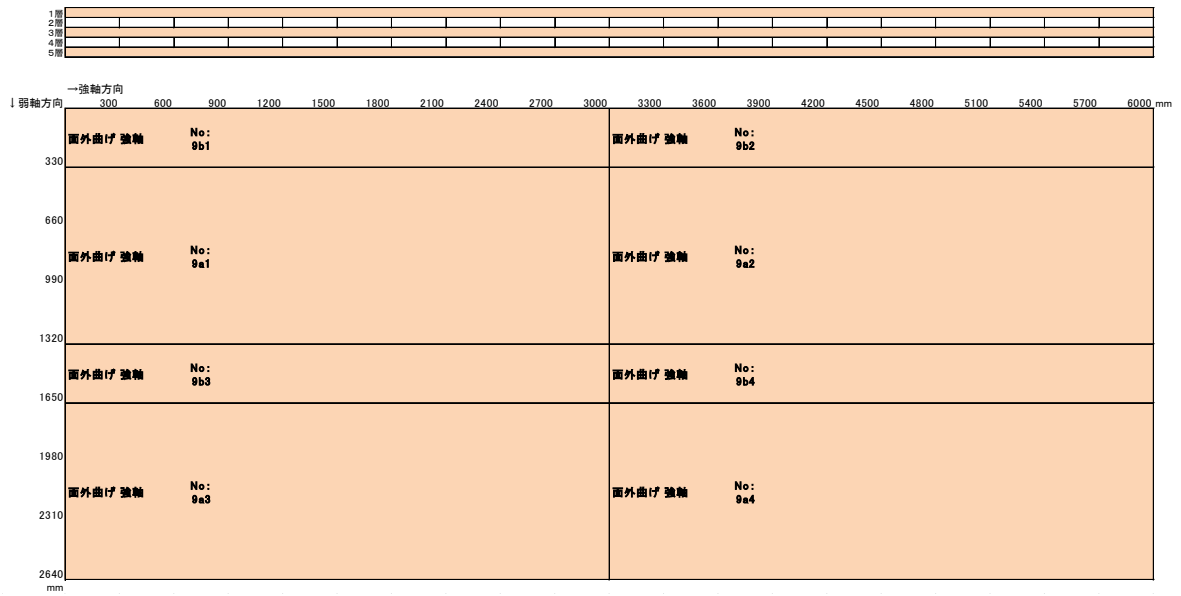


図 1-3 5層5プライ試験体の採材パターン  
採材パターン3：面外曲げ性能に及ぼす試験体幅の影響





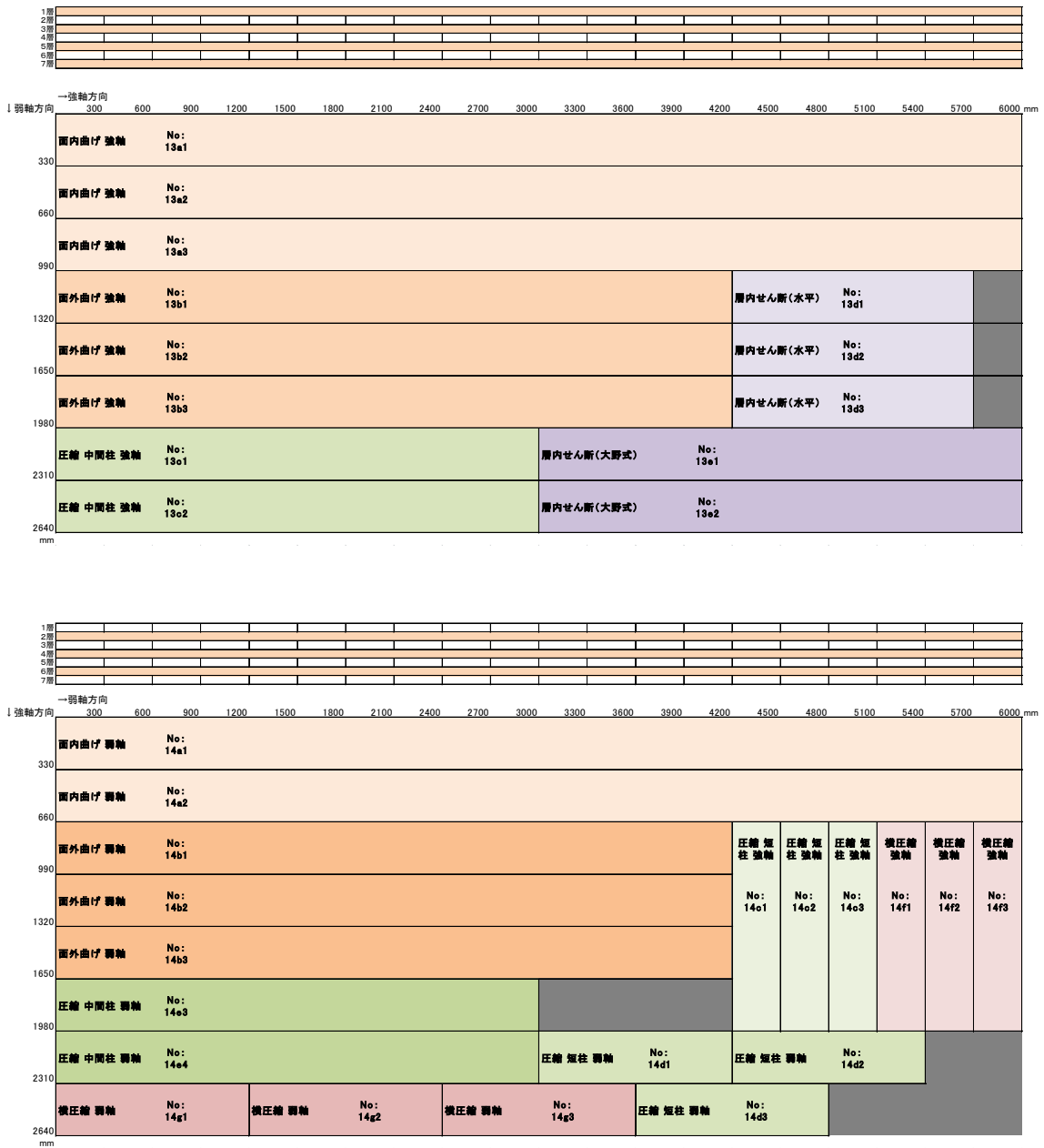


図 1-5 7層7プライ試験体の採材パターン 上：採材パターン6、下：採材パターン7

## 2. 面外曲げ性能

### 2. 1 目的

面外曲げ性能は床・屋根など水平構面に使用される場合、鉛直荷重に対する耐荷重性能および耐変形性能として要求される基本性能であり、壁など鉛直構面に使用される場合、風圧力等に抵抗する性能として考慮すべき性能である。さらに、構成要素の物性値と断面構成から性能設計が可能であることから、日本農林規格（以下 JAS 規格）等における品質管理の指標にも利用可能な重要な性能項目であると考えられる。

本章では、断面構成の異なる CLT の面外曲げ性能を測定し、測定される面外曲げ性能に試験体幅が与える影響および断面構成が面外曲げ性能の異方性に与える影響について実験的検討を行った結果について報告する。

### 2. 2 試験方法

#### 2. 2. 1 供試ラミナ

CLT の製造には、スギラミナを用いた。ラミナは集成材の JAS 規格に規定される構造用集成材の機械等級区分に従い、ヤング係数の平均値により、L30～L50、L40～L60、L60、L60～L80 の 3 グループに区分した。

ラミナの寸法は、厚さ 30mm×幅 110mm×長さ 750mm とし、中央でラミナをフィンガージョイント（以下 FJ）加工した。フィンガー長は 15mm、傾斜 1/12 とし、たて継ぎに使用した接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂である。

#### 2. 2. 2 CLT 原板

スギ CLT 原板は、幅 2700mm×長さ 6000mm とし、FJ ひき板を一方向に配向して単層を形成し、配向方向を直交させながら積層することで、厚さ 150mm の層構成 5 層 5ply、厚さ 210mm の層構成 7 層 7ply の 2 仕様を製造した。

なお、試験体には後述する通り強軸方向と弱軸方向があるため、ここでいう原板の幅は短辺、長さは長辺を意味し、単に外形寸法に対する呼称である。

層構成 5 層 5ply の原板のラミナの構成は L40～L60 または L60 を用いた同一等級構成と、表層ラミナの繊維方向（以下強軸）方向の層に L60～L80、表層繊維直交方向（以下弱軸）方向の層に L30～L50 を用いた異等級構成の 2 種類とした。層構成 7 層 7ply の原板のラミナ構成は同一等級構成のみとした。

強軸試験体を採取する原板では、表層繊維方向を原板の長辺方向とし、弱軸試験体を採取する原板では、表層繊維方向を原板の短辺方向とした。なお、強軸方向ラミナは、各方向の試験体を採取した際に、加力スパン内に FJ 部分が位置し、かつ、同一層内で隣接するラミナの FJ 位置が重ならないように配置した。

積層に使用した接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であり、ラミナ間の幅はぎ接着はしていない。

### 2. 2. 3 試験体の採取

スギ CLT 試験体は、層構成 5 層 5ply の原板では厚さ 150mm×幅 300mm×長さ 3000mm および厚さ 150mm×幅 900mm×長さ 3000mm とした。層構成 7 層 7ply の原板では厚さ 210mm×幅 300mm×長さ 4000mm および厚さ 210mm×幅 900mm×長さ 4000mm とした。

300mm 幅の試験体は、層構成 5 層 5ply の同一等級構成原板から強軸方向 16 体および弱軸方向 6 体、層構成 5 層 5ply の異等級構成原板から強軸方向 8 体および弱軸方向 6 体、層構成 7 層 7ply 原板の強軸および弱軸各 3 体を採取した。

900mm 幅の試験体は、層構成 5 層 5ply の同一等級構成原板から強軸方向 8 体を採材した。なお、900mm 幅試験体と 300mm 幅試験体はサイドマッチを行い、互いに隣接するように採取している。

### 2. 2. 4 試験方法

面外曲げ試験の方法は、JIS A 1414-2 :2010 建築用パネルの「性能試験方法 第二部：力学特性に関する試験」に規定される「5.3 曲げ試験」に準拠した。加力形式は 3 等分点 2 線荷重とし、曲げスパンを試験体厚さの 18 倍とした。すなわち、層構成 5 層 5ply 試験体の場合、曲げスパン 2700mm 加力スパン 900mm、層構成 7 層 7ply 試験体の場合、曲げスパン 3780mm 加力スパン 1260mm とした。また、試験体の両側面中央部で曲げスパンに対する全たわみ量および加力スパンにおける曲げたわみ量を測定した。

## 2. 3 結果

### 2. 3. 1 CLT 曲げ試験結果

CLT 曲げ試験の結果を表に示す。表において、 $L$ ：材長さ、 $b$ ：幅、 $h$ ：厚さ、 $\rho_{\text{test}}$ ：試験時密度、 $\delta_{\text{max}}$ ：最大荷重時たわみ量、 $\sigma_b$ ：曲げ強度、 $E_m$ ：見かけの曲げヤング係数、 $E_b$ ：真の曲げヤング係数、 $\sigma_{bp}$ ：比例限度強度、 $\delta_p$ ：比例限度たわみ量、 $W$ ：最大荷重までの仕事量、 $E_{fr}$ ：縦振動法による動的弾性係数、 $E_{ofb}$ ：TGH 法による動的弾性係数、 $G_{fb}$ ：TGH 法によるせん断弾性係数、 $MC$ ：全乾法による含水率、 $TL_{75\%,1-5\%}$ ：対数正規分布を仮定した信頼水準 75% の 95% 下側許容限界値、である。なお、試験体数が少ない仕様においても、対数正規分布を仮定して算出した 5% 下限値を参考として記載している。

面外曲げ試験に先立ち、動的弾性係数を測定した際には、断面中央部のみでなく、断面の辺縁部等を打撃した場合に固有振動数の測定値が変化するかどうかについても検討したが、特段影響はなく、安定的に測定値が得られた。

測定された面外曲げ性能は、層構成 5 層 5ply の場合、強軸方向の曲げ強度は 20MPa 程度、曲げヤング係数は 4.0GPa 程度、弱軸方向の曲げ強度は 10MPa 程度、曲げヤング係数は 1.0GPa 程度であり、層構成 7 層 7ply の場合、強軸方向の曲げ強度は 16MPa 程度、曲げヤング係数は 3.5GPa 程度、弱軸方向の曲げ強度は 10MPa 程度、曲げヤング係数は 1.5GPa 程度であった。

面外曲げ試験において観察された破壊形態は、300mm 幅強軸試験体では、引張側最弱 FJ 部分が破壊するとそのまま試験体の破断に到ることが大きな特徴であった。

300mm 幅弱軸試験体では、引張側 2 層目のラミナ、すなわち、スパン方向と繊維方向が一致する最外層ラミナの最弱 FJ 部分の破壊により、試験体の破壊が支配されていた。

900mm 幅強軸では、引張側最外層の最弱 FJ 部分が破壊した後、他のラミナ FJ 部分が順次破壊し、試験体の破断に到った。全ての試験体で比例限度荷重は破壊荷重の 80~90%と高い数値を示し、脆的な荷重-変形関係を示した。このことから、CLT の面外曲げ性能においては、最弱部分の破壊ののち、応力再配分による荷重負担能と塑性変形能は低いものと考えられる。

測定された面外曲げ性能の変動係数は、大きくても 10%程度の数値を示し、試験体数が少ないにもかかわらず、曲げ強度、曲げヤング係数とも全体的にばらつきは少なかった。特に弱軸方向試験体では、その傾向が強かった。

### 2. 3. 2 試験体幅が曲げ性能に与える影響

層構成 5 層 5ply 同一等級強軸試験体面外曲げ性能を 300mm 幅と 900mm 幅で比較すると、900mm 幅試験体の曲げ強度は 300mm 幅試験体の曲げ強度の平均値で 92%、5%下限値で 94%と若干低い値を示した。同様に見かけの曲げヤング係数は平均値で 103%、5%下限値で 104%とわずかに高い値を示したが、真の曲げヤング係数では、平均値で 99%、5%下限値で 96%であった。

前項で述べた通り、応力再配分による塑性域の性能上昇効果が高くないことから、試験体幅が増大すると、確率的に性能の低いラミナの影響を受けやすくなるため、測定される面外曲げ性能は低下するものと考えられる。一方、全ての仕様の試験体で面外曲げ性能の測定値の変動係数は極めて小さく、その効果は限定的であるとも予測される。そこで、同一原板から採取した 300mm 幅と 900mm 幅それぞれ 8 体について t 検定を行ったところ、曲げ強度、曲げヤング係数とも両グループの平均値には有意な差がないことが分かった。

### 2. 3. 3 断面構成が異方性に与える影響

層構成 5 層 5ply の 300mm 幅強軸方向試験体では、異等級構成試験体の平均値が同一等級 (L40~L60) 構成試験体に比べて曲げ強度で 1.8 倍、曲げヤング係数で 1.2 倍の数値を示した。層構成 5 層 5ply の 300mm 幅弱軸方向試験体では、異等級と同一等級 (L40~L60) の曲げ強度、曲げヤング係数平均値ともほぼ同じ値であった。弱軸方向の面外曲げ性能は弱軸方向ラミナの性能に依存することから、本章で用いた弱軸方向ラミナの区分の違い、すなわち、L30~L50 と L40~L60 の差異は顕著でなかったといえる。なお、同一等級間で比較を行うと、弱軸では、L40~L60 に比べ L60 の方が曲げ強度が 1.1 倍、曲げヤング係数が 1.2 倍高く、弱軸方向ラミナの区分による影響が見られた。

層構成 5 層 5ply の 300mm 幅試験体の強軸と弱軸を比較すると、同一等級 (L40

～L60) 構成試験体では強軸方向の平均値は弱軸方向に比べて曲げ強度で 2.0 倍、曲げヤング係数で 3.2 倍高かった。異等級構成試験体では強軸方向の平均値は弱軸方向に比べて曲げ強度で 2.0 倍、曲げヤング係数で 3.7 倍高かった。異等級構成の場合、強軸方向ラミナ(L60～L70)と弱軸方向ラミナ(L30～L50)の違いにより、異方性は若干拡大しているものと思われる。

層構成 7 層 7ply の 300mm 幅試験体の強軸と弱軸を比較すると、強軸方向の平均値は弱軸方向に比べて曲げ強度で 1.6 倍、曲げヤング係数で 2.2 倍高かった。層構成 7 層 7ply の場合、層構成 5 層 5ply と比較して異方性は緩和されていることが分かる。

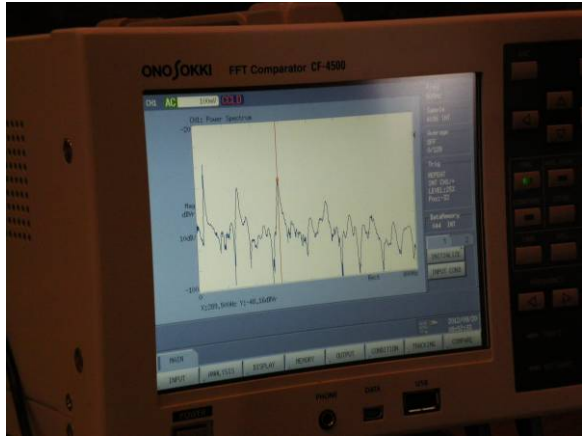
## 2. 4 まとめ

層構成 5 層 5ply と 7 層 7ply の CLT の面外曲げ性能を測定した。試験体幅が曲げ性能に与える影響および断面構成が異方性に与える影響について検討し、以下の知見を得た。

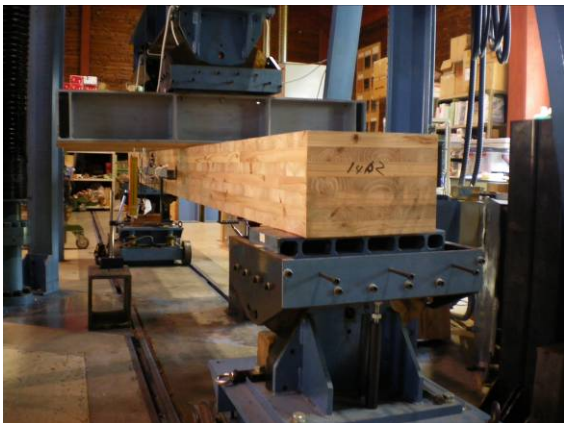
- ・強軸方向の曲げ強度は 16～20MPa、曲げヤング係数は 3.5～4.0GPa、弱軸方向の曲げ強度は 10MPa、曲げヤング係数は 1.0～1.5GPa であった。
- ・比例限度荷重は破壊荷重の 80～90%と高い数値を示し、脆的な荷重－変形関係を示した。
- ・CLT の面外曲げ性能においては、最弱部分の破壊ののち、応力再配分による荷重負担能と塑性変形能は低いものと考えられる。
- ・測定された面外曲げ性能の変動係数は、大きくても 10%程度の数値を示し、曲げ強度、曲げヤング係数とも全体的にばらつきは少なかった。
- ・曲げ試験体の幅が大きい場合、測定される曲げ性能の平均値は若干低いが有意な差は見られなかった。
- ・層構成が同じ場合、同一等級構成より異等級構成の方が高い異方性を示す。
- ・層構成 7 層 7ply の場合、層構成 5 層 5ply と比較して異方性は緩和された。

## 2. 5 資料

次ページ以降に試験時の写真および測定結果一覧を示す。







試験体仕様		種別	$\rho_{test}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{max}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
5層 同一等級 L40-L60 L = 3000mm b = 300mm h = 150mm	表層繊維方向 強軸	MIN	393	47.5	16.6	3.33	3.46	14.8	42.0	1090	2.98	3.90	0.233	10.1
		AV	403	56.5	19.1	3.76	3.91	17.6	49.4	1439	3.31	4.42	0.252	11.2
		MAX	415	66.4	21.4	4.14	4.26	21.0	55.2	1840	3.71	5.38	0.279	11.6
		SD	6.62	6.23	1.40	0.22	0.23	1.39	3.88	256	0.21	0.49	0.014	0.34
		CV (%)	1.6	11.0	7.3	5.9	5.8	7.9	7.8	17.8	6.4	11.1	5.7	3.0
n = 16		TL <sub>75%,1-5%</sub>			16.5	3.34	3.48							

試験体仕様		種別	$\rho_{test}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{max}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
5層 異等級 強軸L60-L70,弱軸L30-L50 L = 3000mm b = 300mm h = 150mm	表層繊維方向 強軸	MIN	397	45.0	17.1	3.62	3.62	14.5	42.0	1120	3.78	4.04	0.222	10.4
		AV	407	51.0	20.7	4.43	4.57	19.1	45.2	1391	4.08	5.08	0.251	11.6
		MAX	416	60.5	22.5	4.81	4.99	21.1	47.1	1904	4.25	5.51	0.287	12.3
		SD	7.59	4.92	1.89	0.48	0.55	2.52	1.46	248	0.18	0.61	0.023	0.62
		CV (%)	1.9	9.6	9.1	10.9	12.1	13.2	3.2	17.8	4.3	11.9	9.3	5.4
n = 8		TL <sub>75%,1-5%</sub>			16.7	3.42	3.42							



試験体仕様		種別	$\rho_{test}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{max}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向 弱軸	5層 同一等級 L40-L60	MIN	399	76.8	8.6	1.09	1.11	7.7	74.0	836	2.15	1.17	0.161	10.8
		AV	407	89.5	9.7	1.17	1.22	8.9	79.8	1141	2.32	1.28	0.179	11.8
		MAX	414	103.8	10.6	1.23	1.29	9.9	85.0	1394	2.41	1.36	0.203	13.5
		SD	5.30	9.05	0.68	0.05	0.07	0.81	5.08	197	0.09	0.06	0.014	0.95
		CV (%)	1.3	10.1	7.0	3.9	5.4	9.1	6.4	17.3	4.0	4.9	8.1	8.0
n = 6		TL <sub>75%,1-5%</sub>			8.2	1.06	1.07							

試験体仕様		種別	$\rho_{test}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{max}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向 弱軸	5層 異等級 強軸L60-L70,弱軸L30-L50	MIN	406	78.3	8.7	1.17	1.21	8.7	78.4	875	2.40	1.22	0.135	10.5
		AV	415	91.2	10.3	1.21	1.25	9.9	86.5	1232	2.46	1.34	0.157	10.7
		MAX	420	97.3	10.8	1.26	1.31	10.7	93.1	1395	2.51	1.43	0.179	10.9
		SD	5.07	6.84	0.83	0.03	0.04	0.76	5.31	183	0.04	0.07	0.018	0.16
		CV (%)	1.2	7.5	8.1	2.4	3.3	7.7	6.1	14.8	1.7	5.5	11.4	1.5
n = 6		TL <sub>75%,1-5%</sub>			8.4	1.14	1.16							

試験体仕様		種別	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{bp}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{\text{fr}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{ofb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{\text{fb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向 弱軸														
5層 同一等級 L60		MIN	401	73.3	9.7	1.34	1.37	7.5	57.6	941	2.71	2.31	0.176	11.0
		AV	411	84.4	10.9	1.41	1.47	8.3	61.4	1228	2.85	2.55	0.237	11.4
		MAX	416	97.9	12.0	1.46	1.54	9.0	64.7	1580	2.98	2.77	0.285	11.7
L = 3000mm b = 300mm h = 150mm		SD	4.82	9.48	0.89	0.04	0.06	0.51	3.05	251	0.09	0.14	0.039	0.25
		CV (%)	1.2	11.2	8.2	2.9	4.0	6.1	5.0	20.5	3.2	5.6	16.4	2.2
n = 8		TL-75%,1-5%			9.1	1.32	1.34							

試験体仕様		種別	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{bp}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{\text{fr}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{ofb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{\text{fb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向 強軸														
7層 同一等級 L40-L60		MIN	409	58.8	14.7	3.43	3.54	14.6	58.8	1541	3.339	3.963	0.275	11.1
		AV	412	74.2	16.7	3.51	3.66	15.5	64.8	2401	3.418	4.009	0.278	11.2
		MAX	413	95.4	19.3	3.66	3.82	16.1	68.5	3668	3.459	4.071	0.283	11.4
L = 4000mm b = 300mm h = 210mm		SD	1.94	19.00	2.35	0.13	0.14	0.78	5.19	1121	0.068	0.056	0.004	0.15
		CV (%)	0.5	25.6	14.0	3.6	3.9	5.0	8.0	46.7	2.0	1.4	1.4	1.3
n = 3		TL-75%,1-5%			10.7	3.13	3.24							

試験体仕様		種別	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{bp}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{\text{fr}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{ofb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{\text{fb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向	弱軸													
7層 同一等級		MIN	405	89.7	9.8	1.50	1.58	9.7	88.1	1630	2.508	1.804	0.190	10.7
L40-L60		AV	406	92.7	10.3	1.62	1.70	10.1	91.1	1721	2.633	1.903	0.208	11.2
L = 4000mm		MAX	407	94.6	10.6	1.71	1.84	10.6	94.6	1830	2.738	1.986	0.227	12.0
b = 300mm		SD	0.96	2.60	0.47	0.11	0.13	0.45	3.26	101	0.116	0.092	0.018	0.65
h = 210mm		CV (%)	0.2	2.8	4.5	6.5	7.6	4.5	3.6	5.9	4.4	4.8	8.8	5.8
n = 3		TL-75%,1-5%			8.9	1.31	1.34							

試験体仕様		種別	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{bp}}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{\text{fr}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{ofb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{\text{fb}}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向	強軸													
5層 同一等級		MIN	398	47.7	16.1	3.48	3.45	14.3	36.8	3068	3.121	3.758	0.264	10.5
L40~L60		AV	404	52.3	17.6	3.86	3.86	15.5	42.3	3774	3.382	4.092	0.316	11.0
L = 3000mm		MAX	411	59.5	18.9	4.07	4.21	16.5	48.1	4535	3.556	4.515	0.356	11.5
b = 900mm		SD	3.89	4.65	1.09	0.20	0.28	0.83	3.66	581	0.135	0.234	0.029	0.34
h = 150mm		CV (%)	1.0	8.9	6.2	5.3	7.2	5.4	8.6	15.4	4.0	5.7	9.2	3.1
n = 8		TL-75%,1-5%			15.5	3.46	3.33							

### 3. 面内曲げ試験

#### 3.1 目的

スギ材を使用したクロス・ラミネイティド・ティンバー（CLT）について、ラミナの積層接着面に平行に加力した場合の曲げ強度特性（面内曲げ強度特性）を明らかにする。

#### 3.2 試験体概要

本報告の1.試験体概要に記載されたスギ材を使用した5層と7層のCLT大板から面内曲げ試験体を切り出した。試験体の概要を表3.2.1、図3.2.1～3.2.4に示す。

表 3.2.1 CLT 面内曲げ試験体の概要

ラミナ構成	ラミナ等級の組合せ	試験方向	試験体数	試験体番号	断面寸法		長さ mm
					幅 (積層方向) mm	厚さ (ラミナの幅方向) mm	
5層5プライ	同一等級	強軸方向	6	1a1～2a3	150	300	6000
		弱軸方向	6	5a1～6a3			
	異等級	強軸方向	6	3a1～4a3	150	300	
		弱軸方向	6	7a1～8a3			
7層7プライ	同一等級	強軸方向	3	13a1～13a3	210	300	
		弱軸方向	2	14a1, 14a2			

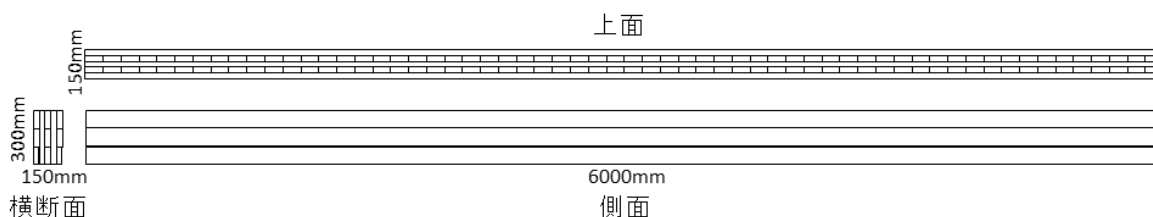


図 3.2.1 5層5プライ CLT 面内曲げ試験体（強軸方向）（試験体番号 1a1～2a3、3a1～4a3）

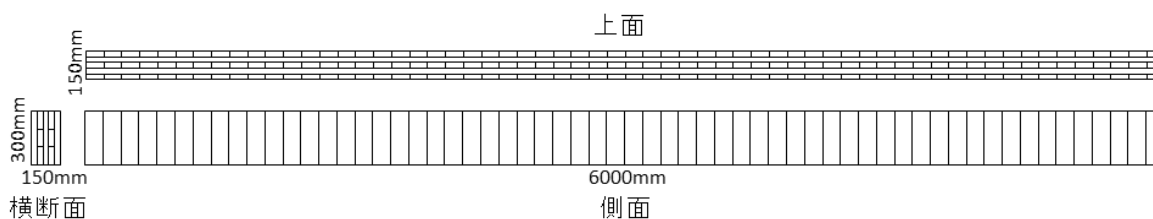


図 3.2.2 5層5プライ CLT 面内曲げ試験体（弱軸方向）（試験体番号 5a1～6a3、7a1～8a3）

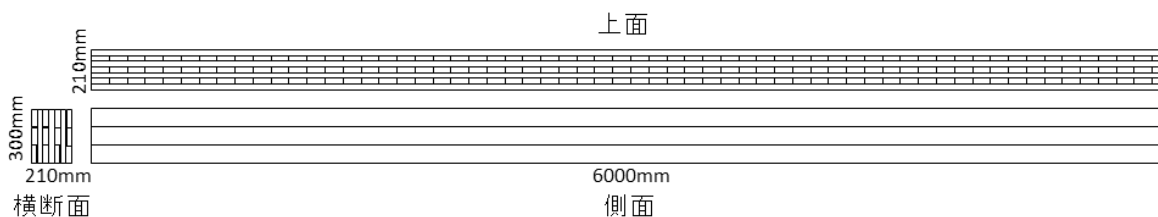


図 3.2.3 7層7プライ CLT 面内曲げ試験体（強軸方向）（試験体番号 13a1～13a3）

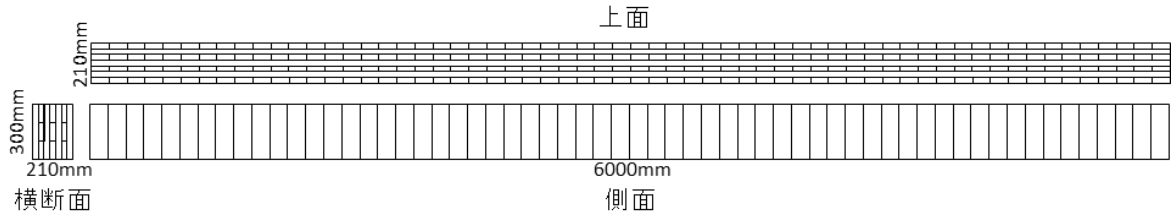


図 3.2.4 7層7プライ CLT 面内曲げ試験体（弱軸方向）（試験体番号 14a1、14a2）

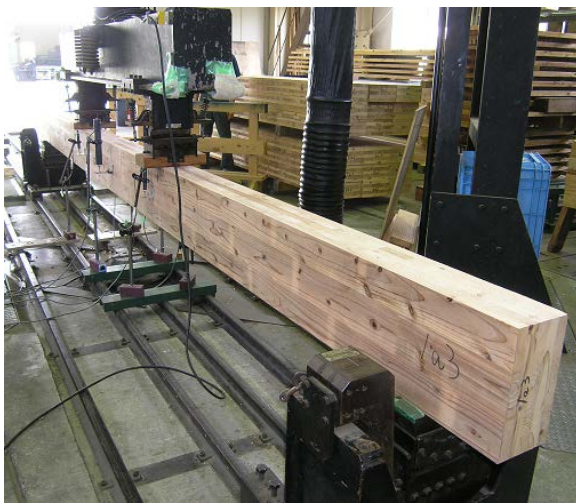
### 3.3 試験方法

#### 3.3.1 非破壊試験

縦振動法[1]により試験体のヤング係数 ( $E_{\text{F}}$ ) を、たわみ振動法 (TGH 法) [2]により試験体のヤング係数 ( $E_{\text{I}}$ ) とせん断弾性係数 ( $G_{\text{I}}$ ) を求めた。TGH 法は、ラミナの積層面に平行方向（面内方向）、積層面に直交方向（面外方向）について行った。

#### 3.3.2 面内曲げ試験

面内曲げ試験は、3等分点4点荷重方式で実施した。全スパンは材せいの18倍の5400mmとし、荷重点間距離1800mmとした。試験には実大強度試験機（東京衡機製造所）を使用した。全スパン中央および荷重点下における変位を試験体の両面で、変位計（東京測器研究所 CDP-100 および CDP-25）を用いて測定した（図 3.3.1）。



強軸方向



弱軸方向

図 3.3.1 面内曲げ試験の様子

### 3.4 結果と考察

#### 3.4.1 非破壊試験結果

縦振動法、TGH 法により求めた各試験体のヤング係数とせん断弾性係数を表 3.4.1～表 3.4.3 に示す。

### 3.4.2 面内曲げ試験結果

面内曲げ試験結果を表 3.4.4～表 3.4.6 に、荷重と全スパン中央での変位の関係を図 3.4.1～図 3.4.3 に示す。見かけの曲げヤング係数は、最大荷重の 10%～40%の範囲における荷重と全スパン中央での変位との関係から求めた。真のヤング係数は最大荷重の 10%～40%の範囲における荷重、全スパン中央での変位および荷重点下の変位の関係から求めた。

面内曲げ試験によるヤング係数は、非破壊試験の結果 ( $E_r$ 、 $E_t$ ) からおおむね推定できることがわかった。また、CLT 試験体の長さ方向に配置されたラミナが主として強度性能に寄与し、長さ方向に配置されたラミナの層数と強度性能から、面内曲げに対する CLT の強度性能を推定できると考えられた。

破壊の状況については、試験体 29 体のうち 26 体は最大荷重に達した時に脆性的に破壊し、試験体の引張り側だけでなく圧縮側まで破断した。同一等級構成 CLT の破壊の様子を例を図 3.4.4～図 3.4.6 に示す。破壊の位置は試験体の中央でなく、荷重点近傍が多い傾向にあった。破壊部は、強軸方向、弱軸方向の試験体ともにラミナのフィンガージョイントを含む破壊であった。また、強軸方向の試験体では内層の弱軸方向に配置されたラミナにおいても材破率が高かった。一方、弱軸方向の試験体では表層に配置されたラミナの材破率は低く、内層においても材破が生じていないものも見られた。

### 3.5 まとめ

5 層 5 プライ同一等級構成 CLT、5 層 5 プライ異等級構成 CLT、7 層 7 プライ同一等級構成 CLT について、強軸方向、弱軸方向の面内曲げ試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) CLT 試験体の長さ方向に配置されたラミナが主として強度性能に寄与し、長さ方向に配置されたラミナの層数と強度性能から、面内曲げに対する CLT の強度性能を推定できる。
- 2) 非破壊試験（縦振動法、TGH 法）により求めたヤング係数から CLT の面内方向の曲げヤング係数をおおむね推定できる。
- 3) 破壊は荷重点近傍で生じる傾向にある。
- 4) 強軸方向、弱軸方向の試験体ともにラミナのフィンガージョイントが破壊要因の一つであると考えられる。
- 5) 強軸方向の試験体では内層の弱軸方向に配置されたラミナにおいても材破率が高いが、弱軸方向の試験体では表層に配置されたラミナの材破率は低く、内層の弱軸方向に配置されたラミナにおいても材破が生じていないものもある。

### 3.6 文献

[1] N. Sobue: *Mokuzai Gakkaishi*, 32(9), 744-747 (1986)

[2] Y. Kubojima, H. Yoshihara, M. Ohta, T. Okano: *Mokuzai Gakkaish*, 42(12), 1170-1176 (1996)

表 3.4.1 5層5プライ同一等級 CLT のヤング係数とせん断弾性係数

ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	$E_{fr}$	$E_t$	$G_t$	$E_t$	$G_t$
				GPa	(面内) GPa	(面内) GPa	(面外) GPa	(面外) GPa
5層5プライ	同一等級	強軸方向	1a1	3.13	2.99	0.72	3.96	0.30
			1a2	3.33	3.29	0.66	4.16	0.27
			1a3	3.29	3.19	0.73	4.21	0.25
			2a1	3.41	3.39	0.70	4.72	0.24
			2a2	3.37	3.45	0.74	4.43	0.23
			2a3	3.22	3.20	0.87	3.85	0.33
			試験体数	6	6	6	6	6
			平均	3.29	3.25	0.74	4.22	0.27
			最小	3.13	2.99	0.66	3.85	0.23
			最大	3.41	3.45	0.87	4.72	0.33
		標準偏差	0.103	0.16	0.07	0.32	0.04	
		変動係数(%)	3.14	5.07	9.28	7.54	14.6	
		弱軸方向	5a1	2.15	2.07	0.65	1.37	0.13
			5a2	2.20	2.22	0.67	1.31	0.19
			5a3	2.36	2.12	1.12	1.36	0.19
			6a1	2.20	2.08	0.76	1.25	0.68
			6a2	2.17	2.19	1.00	1.37	0.15
			6a3	2.14	2.08	0.89	1.37	0.14
			試験体数	6	6	6	6	6
			平均	2.20	2.13	0.85	1.34	0.25
最小	2.14		2.07	0.65	1.25	0.13		
最大	2.36		2.22	1.12	1.37	0.68		
標準偏差	0.08	0.06	0.19	0.05	0.21			
変動係数(%)	3.66	3.05	22.2	3.56	86.0			

$E_{fr}$ : 縦振動法により求めたヤング係数

$E_t$ (面内): TGH法により求めたヤング係数(積層面に対して平行方向に振動)

$G_t$ (面内): TGH法により求めたせん断弾性係数(積層面に対して平行方向に振動)

$E_t$ (面外): TGH法により求めたヤング係数(積層面に対して直交方向に振動)

$G_t$ (面外): TGH法により求めたせん断弾性係数(積層面に対して直交方向に振動)

表 3.4.2 5層5プライ異等級 CLT のヤング係数とせん断弾性係数

ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	$E_{fr}$	$E_t$	$G_t$	$E_t$	$G_t$
				GPa	(面内) GPa	(面内) GPa	(面外) GPa	(面外) GPa
5層5プライ	異等級	強軸方向	3a1	4.19	4.16	0.89	5.35	0.23
			3a2	4.12	3.98	0.87	5.40	0.24
			3a3	4.28	4.13	0.87	5.60	0.24
			4a1	3.89	3.88	0.71	5.08	0.28
			4a2	3.50	3.39	0.87	4.68	0.27
			4a3	4.05	3.85	0.76	5.64	0.28
			試験体数	6	6	6	6	6
			平均	4.01	3.90	0.83	5.29	0.26
			最小	3.50	3.39	0.71	4.68	0.23
			最大	4.28	4.16	0.89	5.64	0.28
		標準偏差	0.279	0.28	0.08	0.36	0.02	
		変動係数(%)	6.97	7.13	9.06	6.78	8.9	
		弱軸方向	7a1	2.48	2.39	0.64	1.42	0.17
			7a2	2.41	2.41	0.65	1.36	0.19
			7a3	2.27	2.14	0.90	1.45	0.13
			8a1	2.45	2.37	0.81	1.63	0.11
			8a2	2.38	2.20	1.04	1.46	0.20
			8a3	2.41	2.35	0.77	1.50	0.19
			試験体数	6	6	6	6	6
			平均	2.40	2.31	0.80	1.47	0.16
最小	2.27		2.14	0.64	1.36	0.11		
最大	2.48		2.41	1.04	1.63	0.20		
標準偏差	0.07	0.11	0.15	0.09	0.04			
変動係数(%)	2.97	4.97	19.1	6.09	22.6			

表 3.4.3 7層7プライ同一等級 CLT のヤング係数とせん断弾性係数

ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	$E_{fr}$	$E_t$	$G_t$	$E_t$	$G_t$
				GPa	(面内) GPa	(面内) GPa	(面外) GPa	(面外) GPa
7層7プライ	同一等級	強軸方向	13a1	3.33	3.25	0.75	4.02	0.28
			13a2	3.36	3.40	0.83	4.15	0.27
			13a3	3.51	3.34	0.87	4.15	0.25
			試験体数	3	3	3	3	3
			平均	3.40	3.33	0.82	4.10	0.26
			最小	3.33	3.25	0.75	4.02	0.25
			最大	3.51	3.40	0.87	4.15	0.28
			標準偏差	0.10	0.08	0.06	0.08	0.02
			変動係数(%)	2.83	2.34	7.44	1.88	5.72
		弱軸方向	14a1	2.60	2.50	0.78	1.83	0.22
			14a2	2.60	2.53	0.70	1.80	0.23
			試験体数	2	2	2	2	2
			平均	2.60	2.52	0.74	1.81	0.22
			最小	2.60	2.50	0.70	1.80	0.22
			最大	2.60	2.53	0.78	1.83	0.23
			標準偏差	0.00	0.02	0.06	0.02	0.01
			変動係数(%)	0.09	0.86	7.96	1.36	4.06

表 3.4.4 5層5プライ同一等級構成 CLT の曲げ試験結果

ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	密度	曲げ強さ	見かけの	真の	含水率
				kg/m <sup>3</sup>	MPa	曲げヤング係数 GPa	曲げヤング係数 GPa	%
5層5プライ	同一等級	強軸方向	1a1	397	11.7	2.78	2.80	11.7
			1a2	400	17.2	2.97	2.86	11.6
			1a3	398	16.5	2.98	2.98	11.9
			2a1	398	13.6	3.07	3.14	12.1
			2a2	406	15.0	3.09	3.33	10.9
			2a3	400	14.8	2.90	2.81	11.7
			試験体数	6	6	6	6	6
			平均	400	14.8	2.96	2.99	11.6
			最小	397	11.7	2.78	2.80	10.9
		最大	406	17.2	3.09	3.33	12.1	
		標準偏差	3.14	1.99	0.12	0.21	0.39	
		変動係数(%)	0.78	13.4	3.90	7.12	3.35	
		弱軸方向	5a1	410	10.7	1.87	1.75	11.5
			5a2	402	10.9	2.11	2.11	12.1
			5a3	414	10.0	2.00	2.08	11.3
			6a1	400	9.14	1.91	1.84	11.4
			6a2	409	8.90	2.05	2.01	11.3
6a3	412		9.74	1.92	2.03	11.5		
試験体数	6		6	6	6	6		
平均	408		9.89	1.98	1.97	11.5		
最小	400	8.90	1.87	1.75	11.3			
最大	414	10.9	2.11	2.11	12.1			
標準偏差	5.66	0.81	0.09	0.14	0.29			
変動係数(%)	1.39	8.18	4.68	7.13	2.56			

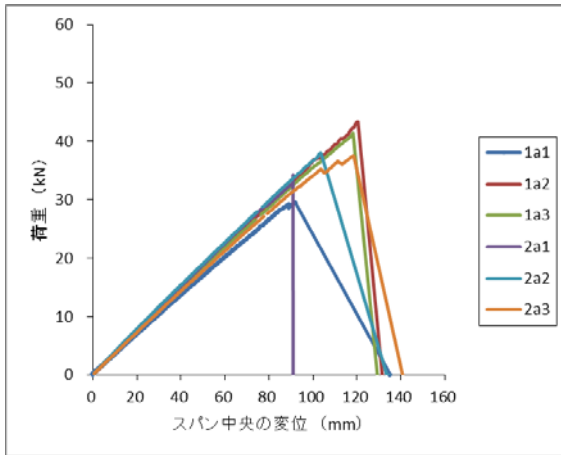


表 3.4.5 5層5プライ異等級構成 CLT の曲げ試験結果

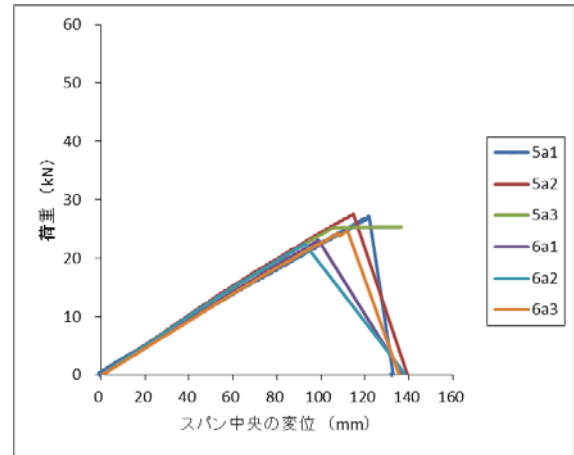
ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	密度	曲げ強さ	見かけの	真の	含水率	
				kg/m <sup>3</sup>	MPa	曲げヤング係数 GPa	曲げヤング係数 GPa		
5層5プライ	異等級	強軸方向	3a1	408	16.0	3.85	3.94	12.1	
			3a2	402	17.7	3.67	3.61	11.6	
			3a3	409	19.3	3.86	3.98	12.7	
			4a1	412	18.7	3.53	3.44	11.7	
			4a2	407	13.9	3.20	3.30	10.9	
			4a3	416	17.7	3.59	3.69	11.8	
			試験体数	6	6	6	6	6	
			平均	409	17.2	3.62	3.66	11.8	
			最小	402	13.9	3.20	3.30	10.9	
			最大	416	19.3	3.86	3.98	12.7	
			標準偏差	4.62	1.97	0.24	0.27	0.57	
			変動係数(%)	1.13	11.5	6.76	7.35	4.86	
			弱軸方向	7a1	420	10.2	2.24	2.13	12.3
				7a2	411	12.0	2.19	2.40	11.9
		7a3		417	11.6	2.02	1.99	11.6	
		8a1		424	10.9	2.25	2.48	11.7	
		8a2		407	13.0	2.03	2.15	11.3	
		8a3		408	9.02	2.17	2.12	12.0	
		試験体数		6	3	3	3	3	
		平均		415	11.1	2.15	2.21	11.8	
		最小		407	9.02	2.02	1.99	11.3	
		最大		424	13.0	2.25	2.48	12.3	
		標準偏差	6.81	1.39	0.10	0.19	0.33		
		変動係数(%)	1.64	12.5	4.71	8.43	2.81		

表 3.4.6 7層7プライ同一等級構成 CLT の曲げ試験結果

ラミナ構成	ラミナ等級の 組合せ	試験方向	試験体 番号	密度	曲げ強さ	見かけの	真の	含水率
				kg/m <sup>3</sup>	MPa	曲げヤング係数 GPa	曲げヤング係数 GPa	
7層7プライ	同一等級	強軸方向	13a1	402	12.3	3.01	2.76	11.6
			13a2	407	15.2	3.10	2.96	12.0
			13a3	406	14.0	3.14	3.14	11.2
			試験体数	3	3	3	3	3
			平均	405	13.9	3.09	2.95	11.6
			最小	402	12.3	3.01	2.76	11.2
			最大	407	15.2	3.14	3.14	12.0
			標準偏差	2.77	1.46	0.07	0.19	0.38
			変動係数(%)	0.68	10.54	2.16	6.47	3.25
		弱軸方向	14a1	409	11.8	2.40	2.48	11.6
			14a2	400	11.4	2.28	2.27	12.9
			試験体数	2	2	2	2	2
			平均	405	11.6	2.34	2.38	12.3
			最小	400	11.4	2.28	2.27	11.6
			最大	409	11.8	2.40	2.48	12.9
			標準偏差	6.51	0.30	0.08	0.14	0.91
			変動係数(%)	1.61	2.59	3.60	6.04	7.42

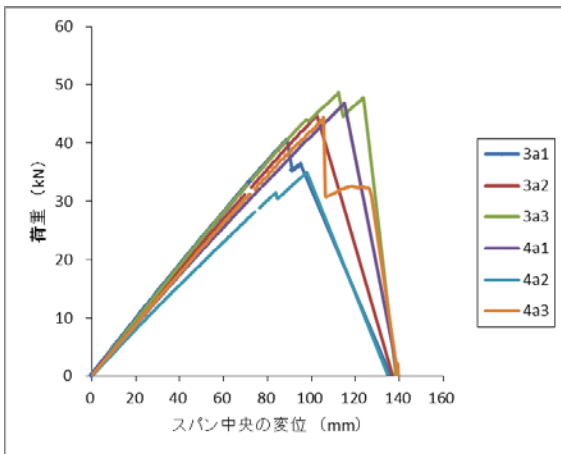


強軸方向

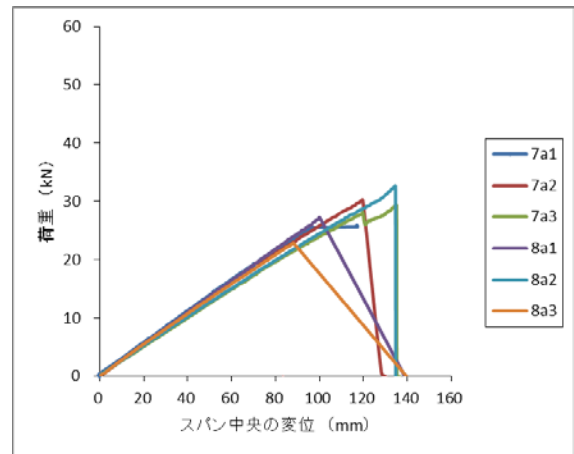


弱軸方向

図 3.4.1 5層5プライ同一等級構成 CLT の面内曲げ試験時の荷重と変位の関係

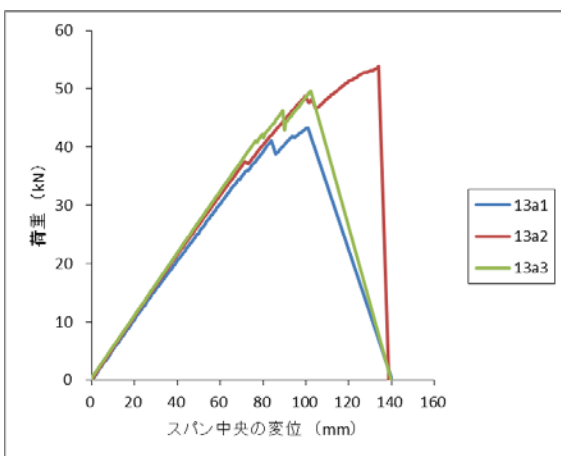


強軸方向

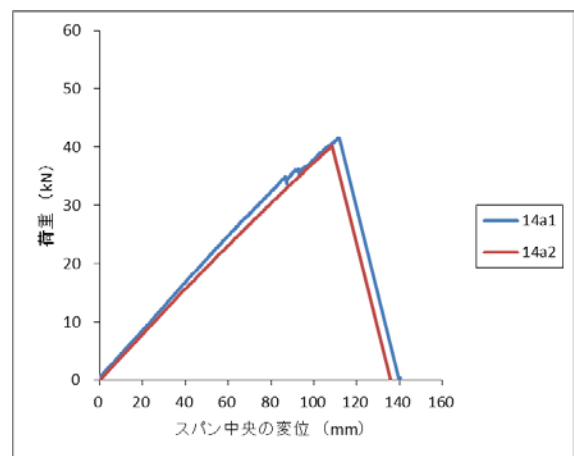


弱軸方向

図 3.4.2 5層5プライ異等級構成 CLT の面内曲げ試験時の荷重と変位の関係



強軸方向



弱軸方向

図 3.4.3 7層7プライ同一等級構成 CLT の面内曲げ試験時の荷重と変位の関係

図 3.4.4 5層5プライ同一等級構成 CLT (強軸方向) の破壊の様子 (試験体番号 2a1)

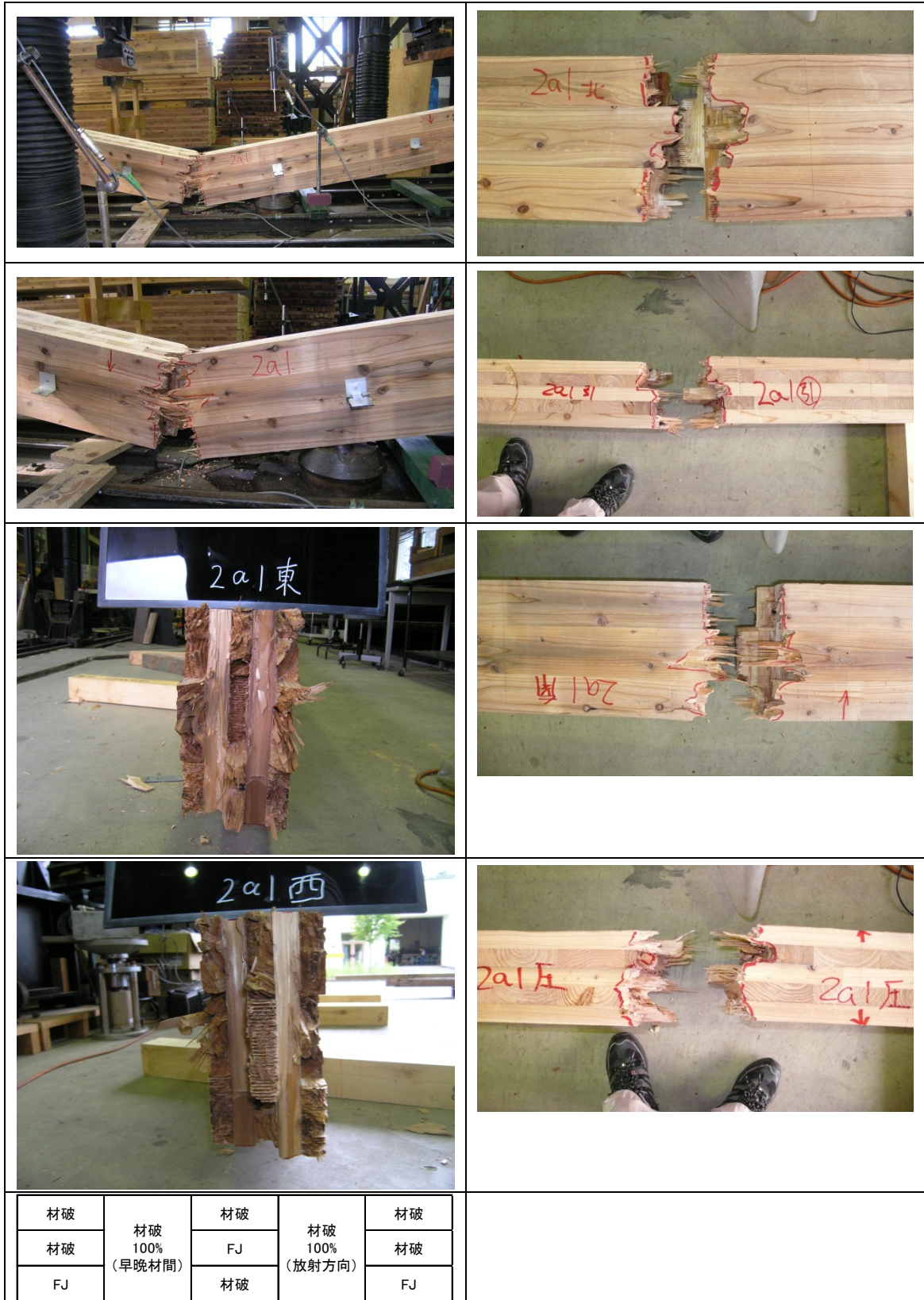




図 3.4.5 5層5プライ同一等級構成 CLT（弱軸方向）の破壊の様子（試験体番号 6a1）

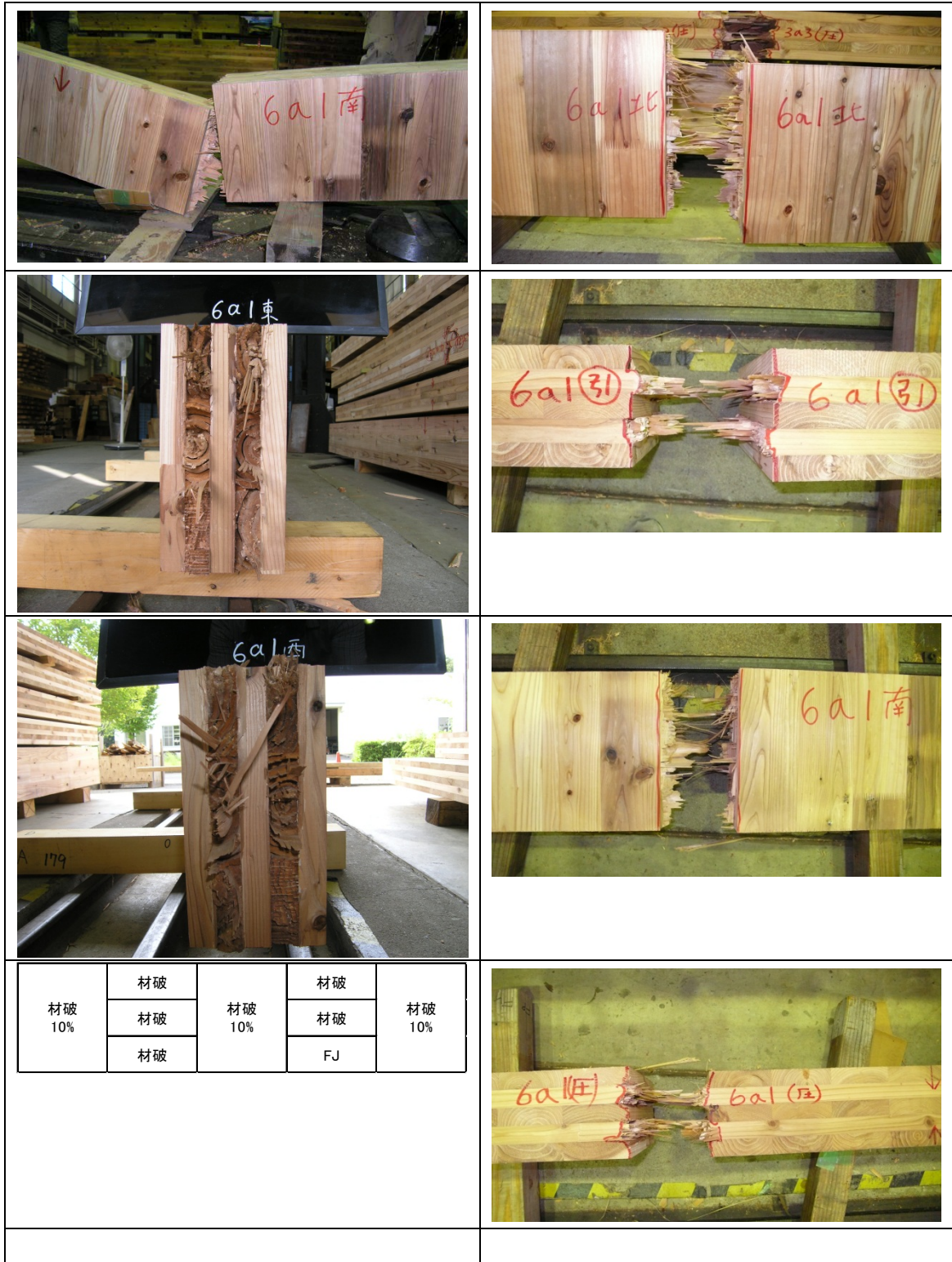




図 3.4.5 7層7プライ同一等級構成 CLT（強軸方向）の破壊の様子（試験体番号 13a1）



## 4 CLT のクリープ破壊とクリープ変形

### 4. 1 目的

長期的かつ継続的に作用する荷重に対する CLT の力学的な性状についての知見を収集することを目的として、CLT のクリープ試験とクリープ破壊試験（DOL：Duration of Load 試験）を実施した。

### 4. 2 内容

#### 4. 2. 1 試験体

クリープ試験とクリープ破壊試験（両試験を合わせて以下、「長期荷重載荷試験」呼ぶ）とに供した試験体の寸法・形状と仕様は、以下に示とおりにした。

- ① 樹種 : スギ
- ② 積層数 : 5 層（挽板厚：30mm）
- ③ 寸法 : 150mm（厚）×300mm（幅）×3000mm（長）
- ④ 挽板強度区分：全層 L60
- ⑤ 接着剤種類 : 水性高分子イソシアネート系接着剤（API）
- ⑥ 幅はぎの有無：長期荷重載荷試験－幅はぎなし  
曲げ試験－幅はぎなし／幅はぎあり

#### 4. 2. 2 試験方法

##### （1）曲げ試験

長期荷重載荷試験において載荷する荷重量を定めるために、曲げ試験を実施した。曲げ試験におけるスパンと荷重方法は長期荷重載荷試験と同じ、スパン 2700mm、4 等分点 3 点曲げ試験とした。ヨークを用いて、全スパンのたわみ量と荷重点間（モーメント一定区間）のたわみ量を測定した。

なお、曲げ試験は幅はぎなしの試験体 20 体、幅はぎありの試験体 20 体について行った。写真 1 に曲げ試験の様子を示す。



写真 4.1 曲げ試験の様子（幅はぎありの試験体）

## (2) クリープ試験

スパン 2700mm にて、スパンの 3 等分点に所定の荷重を載荷し、クリープ試験を行った。曲げ試験により得られた各試験体の最大曲げ耐力 (Pmax) の平均値の 33% に相当する荷重を継続的に載荷し、試験体のたわみ量を測定した。たわみ量は、全スパンのたわみ量と荷重点間 (モーメント一定区間) のたわみ量の双方を、ヨークを用いて測定した。約 20 週間、たわみ量を継続して測定した。なお、クリープ試験は幅はぎなしの試験体についてのみ実施した。写真 2 にクリープ試験の様子を示す。

## (3) クリープ破壊試験

スパン 2700mm にて、スパンの 3 等分点に所定の荷重を載荷し、クリープ試験を行った。曲げ試験により得られた各試験体の最大曲げ耐力 (Pmax) の平均値の 80%、75%、70% の荷重を継続的に載荷し、試験体が破壊に至る時間を測定した。試験体が破壊に至った時間は、ヨークにて測定した全スパンのたわみ量の急激な変化をもって判断した。なお、クリープ試験破壊は幅はぎなしの試験体についてのみ実施した。また、破壊に至っていない試験体については、現在の試験を継続して実施している。写真 2 にクリープ試験破壊の様子を示す。



写真 4.2 クリープ試験とクリープ破壊試験の様子

(解説) 試験機の上段においてクリープ試験を行い、下段においてクリープ破壊試験を行った。クリープ破壊試験は、試験体が破壊に至った段階で、試験体を入れ替えて異なる荷重比において試験を行った。



#### 4. 2. 3 試験結果及び考察

##### (1) 曲げ試験

表 1 に幅はぎなしの試験体の曲げ試験の結果を示す。また、表 2 に幅はぎありの試験体の曲げ試験の結果を示す。

表 4.1 幅はぎなしの試験体の曲げ試験

試験体 番号	MOE 純曲げ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE 全スパン (kN/mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	最大曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )
K1a2	4.529	4.528	52.56	21.02
K1a5	4.530	4.607	55.88	22.35
K1a8	5.394	4.752	55.82	22.33
K1a11	4.937	4.661	51.76	20.70
K2a2	4.596	4.256	47.86	19.14
K2a5	5.227	4.448	52.16	20.86
K2a8	5.095	4.538	55.84	22.34
K2a11	4.857	4.426	49.52	19.81
K3a2	4.997	4.753	48.18	19.27
K3a5	4.707	4.157	52.52	21.01
K3a8	4.655	4.389	47.32	18.93
K3a11	5.037	4.582	54.74	21.90
K4a2	4.721	4.272	51.82	20.73
K4a5	4.675	4.049	53.78	21.51
K4a8	4.660	4.421	46.46	18.58
K4a11	4.603	4.072	52.24	20.90
K5a5	4.797	4.414	55.04	22.02
K5a8	4.966	—	51.78	20.71
K5a2	5.339	4.659	47.90	19.16
K5a11	4.976	4.452	50.12	20.05
平均	4.865	4.444	51.67	20.67
標準偏差	0.262	0.210	3.02	1.21
変動係数	5.38	4.72	5.85	5.85
下限値			45.82	18.33

最大曲げ応力の平均値は、幅はぎなしの試験体が 20.64(N/mm<sup>2</sup>)、幅はぎありの試験体が 20.17(N/mm<sup>2</sup>)、最大曲げ応力の下限値は、幅はぎなしの試験体が 18.84(N/mm<sup>2</sup>)、幅はぎありの試験体が 15.22(N/mm<sup>2</sup>)であった。

全スパンのたわみ量から求めた曲げ弾性係数の平均値は、幅はぎなしの試験体が 4.44 (kN/mm<sup>2</sup>)、幅はぎありの試験体が 4.890 (kN/mm<sup>2</sup>)であった。また、モーメント一定区間のたわみ量から求めた曲げ弾性係数の平均値は、幅はぎなしの試験体が 4.87 (kN/mm<sup>2</sup>)、幅はぎありの試験体が 5.205 (kN/mm<sup>2</sup>)であった。

幅はぎなしの曲げ試験の結果から得られた最大荷重 45.82kN を用いて、長期荷重載荷試験において載荷する荷重の量を定めた。



表 4.2 幅はざありの試験体の曲げ試験

試験体 番号	MOE 純曲げ (kN/mm <sup>2</sup> )	MOE 全スパン (kN/mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	最大曲げ応力 (N/mm <sup>2</sup> )
A1	4.982	4.706	43.64	17.46
A2	5.498	5.042	54.28	21.71
B1	5.550	5.195	52.52	21.01
B2	5.244	4.861	51.52	20.61
C1	5.267	5.021	50.98	20.39
C2	5.018	4.887	49.42	19.77
D1	5.492	5.045	56.52	22.61
D2	5.015	4.899	36.20	14.48
D4	5.165	4.761	50.72	20.29
A3	5.206	4.936	51.66	20.66
A4	5.095	4.644	50.86	20.34
A5	4.960	4.732	47.10	18.84
B3	5.272	4.830	58.02	23.21
B4	5.160	4.906	58.46	23.38
B5	4.992	4.787	49.18	19.67
C3	5.117	4.831	57.90	23.16
C4	5.350	4.987	39.86	15.94
C5	5.128	4.873	51.28	20.51
D3	5.130	4.858	44.58	17.83
D5	5.436	5.042	53.72	21.49
平均	5.204	4.892	50.42	20.17
標準偏差	0.183	0.135	5.88	2.35
変動係数	3.51	2.77	11.66	11.66
下限値			38.05	15.22

(2) クリープ試験

図 1 に相対変位の逆数の対数と時間の対数との関係の一例を示す。平成 12 年国土交通省告示 1446 号の試験評価法により評価を行った結果、6 つの試験体の変形増大係数 (50 年) はそれぞれ、1.66、1.96、1.68、1.60、1.43、1.29 であり、その平均は 1.61 であった。

一方、式 1 に示す Power 則を用いて 50 年後のたわみ量を推定した。

$$\delta_c(t) = At^N \quad \dots \text{式 1}$$

ここで、 $\delta_c(t)$  は推定クリープたわみ

$A$  と  $N$  は定数

$t$  は時間

図 2 に示すクリープ曲線については、変数  $A$  と  $N$  は、全スパンたわみについては、 $A = 0.12$ 、 $N = 0.28$  となった。50 年後のクリープたわみ量は、全スパンの 50 年後のたわみ量は、

$$\delta_{50\text{all span}} = 0.12 \times (50 \times 365 \times 24 \times 60)^{0.28} = 14.34\text{mm} \quad \dots \text{式 2}$$

となり、14.34mm と求った。最大荷重の 33% の荷重を載荷したときの初期たわみが

14.32mm であったので、変形増大係数は、

$$(14.32\text{mm}+14.34\text{mm})\div 14.32\text{mm} = \underline{2.00} \quad \dots \text{式 3}$$

と求めた。また、他の試験体については、1.39、2.49、2.48、2.49、2.50 と求まり、その平均は 2.23 であった。

一般に木材（製材）の変形増大係数（恒温恒湿環境下）が約 2.0 であることを考えると、CLT のクリープ変形は木材に比べて幾分大きくなる可能性があり、クリープ変形に対して注意して設計を行う必要がある可能性がある。この点については、今後データを蓄積し、精査する必要がある。

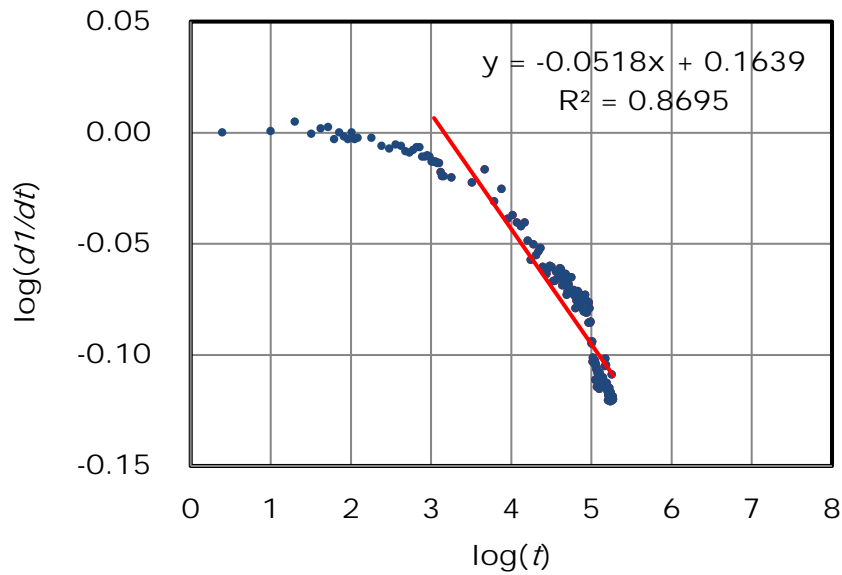


図 4.1 相対変位の逆数の対数と時間の対数との関係（例）

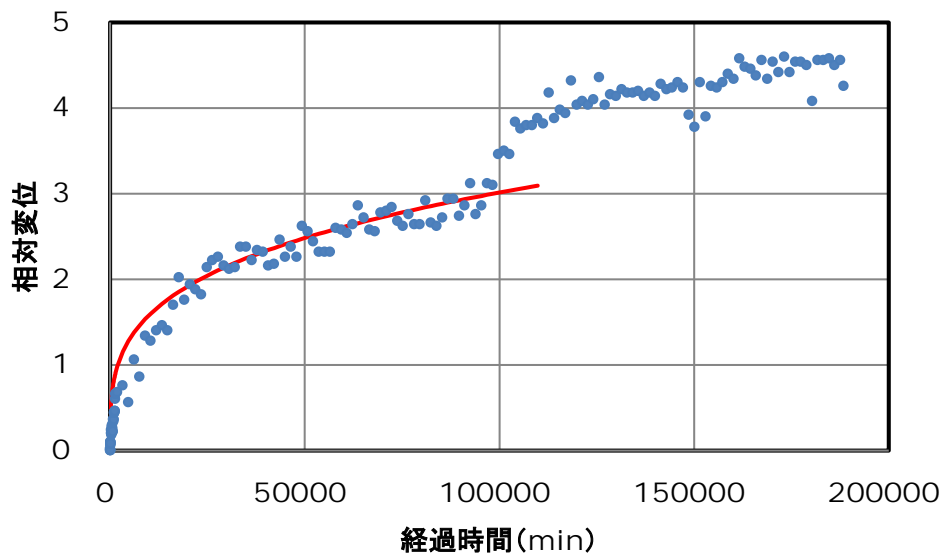


図 4.2 相対変位と経過時間との関係（例）

(注) 図中の赤曲線は計算に用いた  $\delta_c(t) = At^N$  の関数を示す。

### (3) クリープ破壊試験

最大荷重の 80%の荷重を載荷した試験体が破壊に至るまでの時間は以下の通りであった。

80%－1 体目：760min（約 0.5 日、破壊）

80%－2 体目：3119min（約 2.2 日、破壊）

80%－3 体目：8753min（約 6.1 日、破壊）

80%－4 体目：16783min（約 11.7 日、破壊）

80%－5 体目：58871min（約 40.9 日、破壊）

80%－6 体目：69314min（約 48.1 日、破壊）

また、最大荷重の 75%及び 70%の荷重を載荷した試験体については、いずれの試験体とも現時点で破壊に至っていない。荷重継続時間は以下の通りである。

75%－1 体目：760min（約 35 日、破壊）

75%－2 体目：3119min（約 2.2 日、破壊）

75%－3 体目：8753min（約 6.1 日、破壊）

70%－1 体目：16783min（約 11.7 日、破壊）

70%－2 体目：58871min（約 40.9 日、破壊）

70%－3 体目：69314min（約 48.1 日、破壊）

図 3 に荷重比と荷重継続時間の常用対数との関係を示す。図中の黒丸は破壊した試験体であり、青丸は現時点で破壊に至っていない試験体である。また、赤丸は荷重比 80%の荷重を載荷したときに試験体が破壊に至った時間を平均した値である。

荷重比 80%の荷重を載荷した試験体のうち一つの試験体のみ Madison Curve において想定した破壊に至る時間よりも短い時間で破壊に至った。また、荷重比 75%の荷重を載荷した試験体 3 体は全て Madison Curve において想定した破壊に至る時間が経過しても破壊に至っていない。以上の結果より、Madison Curve を用いることにより CLT がクリープ破壊する時間を安全側に評価することができると判断することができる。木材の繊維方向の長期、短期等の許容応力度を求める際に乗じる係数が Madison Curve を基本として定められていることを勘案すると、CLT がクリープ破壊については、木材と同等の扱いをしても差し支えないものと考えられる。

写真 3 にクリープ破壊試験における破壊形状の例を示す。試験体は引っ張り側の挽き板の縦継ぎ部分（フィンガージョイントの部分）において破壊に至る場合がほとんどであった。

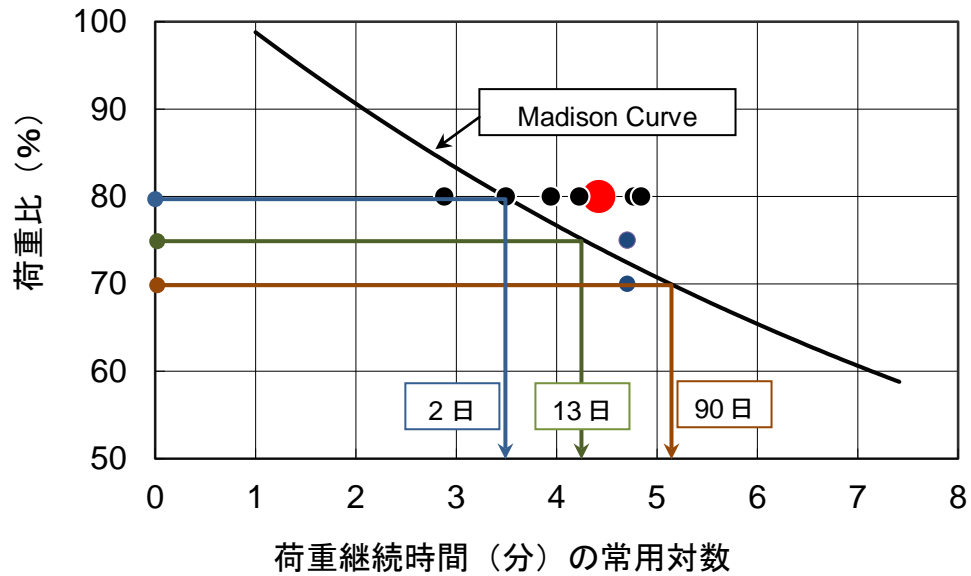


図 4.3 荷重比と荷重継続時間の常用対数との関係

- (注) ● : 破壊した試験体、● : 現時点で破壊していない試験体、  
 ● : 荷重比 80% の荷重を載荷したときに試験体が破壊に至った時間を平均した値



写真 4.3 クリープ破壊試験における試験体の破壊形状 (荷重比 : 80%)

#### 4. 3 まとめ

- (1) CLT の変形増大係数は 2.0 以下であり、CLT のクリープ変形量は木材とほぼ同等とみなしても良い。
- (2) CLT のクリープ変形は木材に比べて幾分大きくなる可能性があり、クリープ変形に対して注意して設計を行う必要がある可能性がある。この点については、今後データを蓄積し、精査する必要がある。

## 5. 面外曲げ弱軸 DOL

### 5.1 目的

スギ CLT の面外弱軸方向の材料について、荷重継続時間の調整係数が不明のため、長期載荷試験により調整係数を求める。

### 5.2 試験方法

#### 5.2.1 非破壊検査方法

##### (1) 静的試験

##### (a) 静的試験方法

CLT 試験体は、フィンガージョイント（以下 FJ）ひき板(L60 のみ)を交互に積層し、厚さ 150mm、断面構成 5 層の表層繊維直交方向（以下弱軸）32 体を 2 枚の大板から採材した。積層の接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂であり、幅はぎ接着はしていない。

静的捻り試験の試験体は、長さ 3m×150mm×300mm の弱軸方向の CLT で、短期静的曲げ試験用の 8 体を試験に供した。

静的捻り試験は、(社)日本建築学会木質構造限界状態設計指針(案)・同解説<sup>5-1)</sup>の試験方法に従って行った。図 5-1 に試験概要図を、試験状況を写真 5-1 から写真 5-4 に示す。

試験体を固定支持部と回転支持部において、めり込み防止のための鋼板を介してボルトにより軽く締め付け、トルク負荷用レバーアームの回転軸から 310mm の位置で試験機により試験体が破壊するまで加力した。

試験体の固定距離は 2700mm、試験体回転軸方向に 2400mm の測定点間距離で、また、回転軸から各変位計までの距離を 140mm とし、捻れ回転角を測定した。

試験機は、広島県立総合技術研究所林業技術センター(株)前川試験機製作所製 IP-100/A-200-B2 (最大能力 1000kN, ラムストローク 500mm) を使用した。

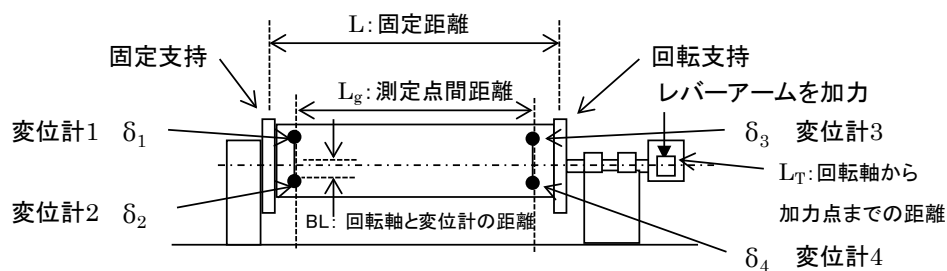


図 5-1 静的捻り試験概要図



写真 5-1 試験状況全景 1



写真 5-2 試験状況全景 2



写真 5-3 加力部



写真 5-4 固定支持部

(b) 静的捻り試験評価方法

静的捻り試験において、せん断弾性係数  $G$  及びせん断強度  $\tau$  をつぎの式により算出した。  
せん断弾性係数  $G$

$$G = \frac{1}{f_1 d b^3} \frac{\Delta T}{\Delta \theta / L_g} \quad (5-1)$$

$T$ : 捻りモーメント ( $F \times L_T$ ),  $L_T$ : 回転軸から加力点までの距離  
(310mm)

$f_1$ : 角棒のねじり公式における係数

$$b < d \text{ のとき } f_1 = \frac{1}{3} - 0.21 \frac{b}{d} + 0.0175 \left( \frac{b}{d} \right)^5$$

$b$ : 試験体の短辺

$d$ : 試験体の長辺

$$\theta: \text{回転角, } \theta = \frac{\{(\delta_3 - \delta_4) - (\delta_1 - \delta_2)\}}{2BL}$$

$\delta_i$ : 固定側 材縁上部の水平方向変位量



$\delta_2$  : 固定側 材縁下部の水平方向変位量  
 $\delta_3$  : 回転側 材縁上部の水平方向変位量  
 $\delta_4$  : 回転側 材縁下部の水平方向変位量  
 $BL$  : 回転軸から変位計までの距離 (55mm)  
 $L$  : 試験体の固定間距離 (2700mm)

せん断強度  $\tau$

$$\tau = \frac{T}{\alpha db^2} \quad (5-2)$$

$\alpha$  :  $d/b$  の比による係数 ( $b=150, d=300$  のとき 0.245)

## (2) 動的試験

### (a) 動的試験方法

静的捻じり試験及び曲げ試験を行う前にせん断弾性係数の簡便な非破壊評価方法として、動的弾性係数の測定を試みた。測定は、たわみ振動法(T.G.H.法)<sup>5-2)</sup>により行った。試験体は短期静的曲げ試験に供する8体である。

たわみ振動法(T.G.H.法)では、スパンを試験体の長さの0.552倍の距離として台の上に置き、試験体中央部材面を上からハンマーで打撃し、下面方向からマイクロフォンで高次の固有振動数を測定した。

また、縦振動法による縦振動ヤング係数も測定した。

### (b) 動的試験評価方法

たわみ振動法(T.G.H.法)では、試験体長さ、断面2次半径、密度を求め、せん断分布定数(1.2)、せん断弾性係数の初期値(0.8Gpa)を設定する。次に、振動次数  $n$  に依存する係数  $mn$  と  $Fmn$ 、1から6次程度までの曲げ固有振動数、各  $n$  における見かけの曲げヤング係数を求める。さらに各  $n$  におけるプロット用の系列  $X, Y$  を求め、その1次回帰式  $Y=aX+c$  とプロットが一致するとき、傾き  $a$  と切片  $c$  が次の関係となる。

$$a = -1.2 \left( \frac{E_{fr-t}}{G_{fr-t}} \right), \quad c = E_{fr-t} \quad (5-3)$$

$E_{fr-t}$  : 真の曲げヤング係数

$G_{fr-t}$  : せん断弾性係数

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (5-4)$$

$E_{fr}$  : 縦振動ヤング係数

$f$  : 固有振動数

$l$  : 材長

$\rho$  : 密度

## 5.2.2 強度試験条件

### (a) 短期静的曲げ試験

長期載荷試験の荷重レベルを決定するために、まず、短期の静的曲げ試験を行った。曲







写真 5-7 モーメントアーム式試験機



写真 5-8 加力点軸ネジ部



写真 5-9 加力点ネジ回転による載荷



写真 5-10 荷重点と変位計の取付け

### (c) 長期載荷試験の評価方法

荷重継続時間の調整係数は、応力レベルを 3 以上選択し、応力レベルごとの破壊荷重継続時間の常用対数と応力レベルとの関係について回帰直線を求め、回帰直線上において破壊継続時間が 50 年に相当する応力レベルとして求める<sup>5-3)</sup>。参考として、製材の荷重継続時間の調整係数は 0.55 (Wood のカーブ) と言われている。

## 5.3 結果

### 5.3.1 非破壊検査

非破壊検査の結果を表 5-1、表 5-2 に示す。

表 5-1 静的捻じり試験によるせん断弾性係数

試験体No	重量 kg	全長 mm	幅 mm	厚 mm	密度 kg/m <sup>3</sup>	載荷荷重 kN	アームトルク kNmm	G kN/mm <sup>2</sup>	載荷時の $\tau$ N/mm <sup>2</sup>
11a1	55.91	3000	150.72	300.50	411	3.61	1163	0.390	0.695
11a6	56.50	3001	151.36	300.26	414	3.57	1146	0.451	0.679
11a11	54.79	3000	151.48	300.56	401	3.56	1150	0.402	0.680
11a16	55.71	3000	151.32	300.51	408	3.53	1131	0.405	0.671
12a1	56.74	3001	151.12	300.44	416	3.57	1145	0.422	0.681
12a6	56.19	3001	150.95	300.40	413	3.48	1118	0.400	0.666
12a11	55.73	3001	151.67	300.48	407	3.51	1131	0.439	0.668
12a16	56.53	3000	151.66	300.95	413	3.52	1130	0.397	0.666
最小値	54.79	3000	150.72	300.26	401	3.48	1118	0.390	0.666
平均値	56.01	3001	151.29	300.51	411	3.54	1139	0.413	0.676
最大値	56.74	3001	151.67	300.95	416	3.61	1163	0.451	0.695
標準偏差	0.63	0.53	0.34	0.20	4.82	0.04	14.35	0.02	0.01
変動係数%	1.1	0.0	0.2	0.1	1.2	1.2	1.3	5.3	1.5

表 5-2 非破壊試験のヤング係数とせん断弾性係数

試験体No	縦振動 $E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	TGH $G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	静的捻じり G kN/mm <sup>2</sup>
11a1	2.93	2.57	0.261	0.390
11a6	2.89	2.59	0.247	0.451
11a11	2.98	2.46	0.285	0.402
11a16	2.81	2.77	0.207	0.405
12a1	2.88	2.31	0.285	0.422
12a6	2.89	2.53	0.218	0.400
12a11	2.75	2.69	0.176	0.439
12a16	2.71	2.48	0.221	0.397
最小値	2.71	2.31	0.176	0.390
平均値	2.85	2.55	0.237	0.413
最大値	2.98	2.77	0.285	0.451
標準偏差	0.09	0.14	0.039	0.022
変動係数%	3.2	5.6	16.4	5.3
TL <sub>75%,1-5%</sub>	2.66	2.25	0.162	0.368

※  $E_{fr}$ : 縦振動法によるヤング係数、 $E_{ofb}$ : TGH法によるヤング係数、  
 $G_{fb}$ : TGH法によるせん断弾性係数、G: 静的捻じりせん断弾性係数  
 TL<sub>75%,1-5%</sub>: 信頼水準75%の95%下側許容限界値(対数正規分布あてはめ)

縦振動ヤング係数とたわみ振動法(T.G.H.法)ヤング係数について、ほとんど差はないが、縦振動ヤング係数の方が高めであった。また、せん断弾性係数は静的捻じりせん断弾性係数の方がたわみ振動法に比べてほぼ2倍の値となった。

### 5.3.2 強度試験

#### (a) 短期静的曲げ試験

短期静的曲げ試験の結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 短期静的曲げ試験と非破壊試験の結果

試験体仕様	No	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_b$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}$ N/mm <sup>2</sup>	$\delta_p$ mm	W kN・mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_{ofb}$ kN/mm <sup>2</sup>	$G_{fb}$ kN/mm <sup>2</sup>	G kN/mm <sup>2</sup>	MC %
表層繊維方向 弱軸	11a1	411	26.4	77.7	10.4	1.45	1.48	8.13	58.8	1057	2.93	2.57	0.261	0.390	11.6
	11a6	414	24.8	73.9	9.7	1.41	1.50	7.79	57.8	941	2.89	2.59	0.247	0.451	11.4
5層 同一等級 L60 L = 3000mm b = 300mm h = 150mm n = 8	11a11	401	25.2	73.3	9.9	1.42	1.54	8.82	64.6	947	2.98	2.46	0.285	0.402	11.5
	11a16	408	29.9	97.9	11.7	1.34	1.40	8.14	63.4	1554	2.81	2.77	0.207	0.405	11.4
	12a1	416	30.5	96.9	12.0	1.41	1.45	8.15	60.6	1580	2.88	2.31	0.285	0.422	11.7
	12a6	413	29.5	86.6	11.6	1.46	1.53	8.97	64.7	1316	2.89	2.53	0.218	0.400	11.0
	12a11	407	26.6	82.5	10.4	1.36	1.37	7.48	57.6	1131	2.75	2.69	0.176	0.439	11.0
	12a16	413	29.0	86.4	11.3	1.41	1.48	8.61	63.6	1298	2.71	2.48	0.221	0.397	11.4
	MIN	401	24.8	73.3	9.7	1.34	1.37	7.5	57.6	941	2.71	2.31	0.176	0.390	11.0
	AV	411	27.7	84.4	10.9	1.41	1.47	8.3	61.4	1228	2.85	2.55	0.237	0.413	11.4
	MAX	416	30.5	97.9	12.0	1.46	1.54	9.0	64.7	1580	2.98	2.77	0.285	0.451	11.7
	SD	4.82	2.25	9.48	0.89	0.04	0.06	0.51	3.05	251	0.09	0.14	0.039	0.022	0.25
	CV (%)	1.2	8.12	11.2	8.2	2.9	4.0	6.1	5.0	20.5	3.2	5.6	16.4	5.3	2.2
	TL <sub>75%,1-5%</sub>					9.1	1.32	1.34				2.66	2.25	0.162	0.368

※L:材長さ、b:幅、h:厚さ、 $\rho_{\text{test}}$ :試験時密度、Pmax:最大荷重、 $\delta_{\text{max}}$ :最大荷重時たわみ量、 $\sigma_b$ :曲げ強度、 $E_m$ :見かけのヤング係数、 $E_b$ :真のヤング係数、 $\sigma_{bp}$ :比例限度強度、 $\delta_p$ :比例限度たわみ量、W:最大荷重までの仕事量、 $E_{fr}$ :縦振動法によるヤング係数、 $E_{ofb}$ :TGH法によるヤング係数、 $G_{fb}$ :TGH法によるせん断弾性係数、G:静的捻じり試験によるせん断弾性係数、MC:全乾法による含水率、TL<sub>75%,1-5%</sub>:信頼水準75%の95%下側許容限界値(対数正規分布あてはめ)

静的曲げ試験による見かけや真のヤング係数と縦振動法によるヤング係数を比べると、縦振動法によるヤング係数が2倍の値となった。

当該仕様における最大荷重の平均値は27,7kNとなった。このことから長期試験にかかる曲げ試験条件では27.7kNを応力レベル1として載荷荷重を計算することにした。

なお、代表的な破壊形態を写真5-11から写真5-12に示す。破壊は引張側の下から2層目FJから始まっていた。



写真 5-11 FJ からの破壊例 1



写真 5-12 FJ からの破壊例 2

(b)長期載荷試験

最初に載荷の応力レベルを短期静的曲げ試験平均値の0.75として8体試験の載荷試験を開始した。

現在(平成25年2月20日)までに7体破壊しており、破壊に至るまでの時間を表5-4に示す。また、写真5-13、写真5-14には載荷試験状況、写真5-15から写真5-20に破壊個所の状況を示す。破壊個所はFJが並列している個所もあるが、破壊時間が短いまたは長い試験体もあった。このFJの並列と破壊時間の関係は、試験の終了後に検討する必要があると考えられる。



表 5-4 応力レベル 0.75 試験の载荷から破壊に至るまでの時間

No	破壊までの時間 (min)	日数	備考
11a3	5	0.003	
11a8	855	0.59	
11a9	77	0.05	
11a14	303	0.21	
12a3	11269	7.8	
12a8	20346	14.1	
12a9	248122	172	試験継続中
12a14	1440	1.0	



写真 5-13 長期载荷試験状況 1



写真 5-14 長期载荷試験状況 2

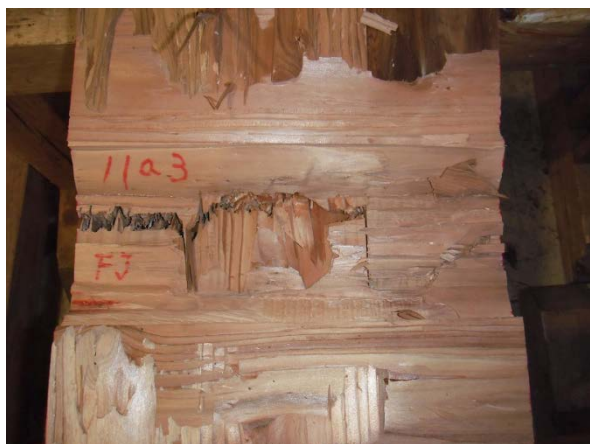


写真 5-15 No11a3 破壊状況



写真 5-16 No11a8 破壊状況



写真 5-17 No11a9 破壊状況



写真 5-18 No11a14 破壊状況



写真 5-19 No12a3 破壊状況



写真 5-20 No12a14 破壊状況

表 5-4 から評価した応力レベルと荷重継続時間の関係を図 5-3 に示す。残りの 2 条件の  
応力レベルの試験が終了後に荷重継続時間の調整係数が決定する。

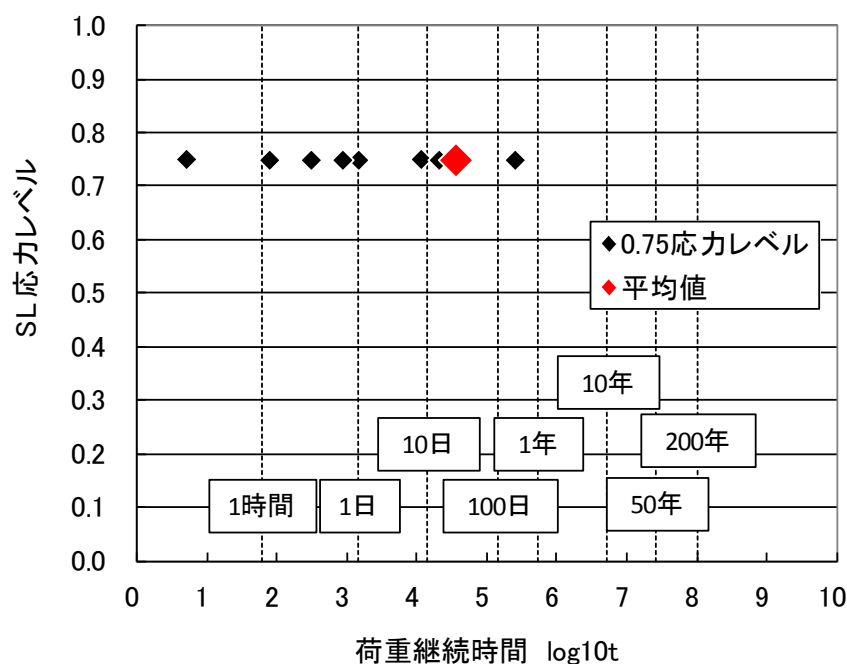


図 5-3 荷重継続時間と応力レベル

#### 5.4 まとめ

CLT の面外弱軸方向の材料について、荷重継続時間の調整係数を求める試験を行った。

まず、短期静的曲げ試験の供試体の非破壊試験において、静的捻じりせん断弾性係数、たわみ振動法によるヤング係数、せん断弾性係数、また、縦振動法におけるヤング係数を測定した。その後、短期静的曲げ試験を行い見かけや真のヤング係数、曲げ強度を測定した。

この結果、静的曲げヤング係数は動的ヤング係数の 1/2 程度であった。

次に、短期静的曲げ試験における曲げ強度平均値を応力レベル 1 として、応力レベル 0.75 で長期載荷試験をモーメントアーム方式の試験機において開始した。現在 8 体のうち 7 体が破壊した。今後、2 条件の応力レベルで各 8 体ずつ載荷試験を行い、荷重継続時間の調整係数を求める予定である。

#### 5.5 文献

5-1) (社)日本建築学会編集：木質構造限界状態設計指針(案)・同解説、p.349、丸善、2003.

5-2) 久保島吉貴：未発表資料

5-3) 日本ツーバイフォー建築協会：2002 年枠組壁工法建築物構造計算指針、工業調査会、東京、2002、pp. 186.

## 6. CLTの面外（層内）せん断性能

### 6. 1 目的

CLTの面外方向に逆対称モーメントが生じるよう荷重（以下、大野式荷重と記す）することによって、CLTの層内せん断性能を把握する。また短スパンでの中央集中1点荷重（以下、水平せん断荷重と記す）することによって大野式荷重との比較を行う。

### 6. 2 試験方法

試験体一覧を表6-1に示す。

表6-1 試験体一覧

層構成	ラミナ等級	大野式 試験体数(サイズ)	水平 試験体数(サイズ)
5層5プライ	同一等級	6 (t150×W300×L2,100)	6 (t150×W300×L1,200)
5層5プライ	異等級	6 (t150×W300×L2,100)	6 (t150×W300×L1,200)
7層7プライ	同一等級	2 (t210×W300×L3,000)	3 (t210×W300×L1,500)

大野式荷重における、M図、Q図を図6-1～図6-2にそれぞれ示す。加圧板の幅は150mmとし、5層5プライ試験体（厚さ150mm）および7層7プライ試験体（厚さ210mm）の加圧板端部間の実質せん断スパン比は、それぞれ、1.50、1.55とした。

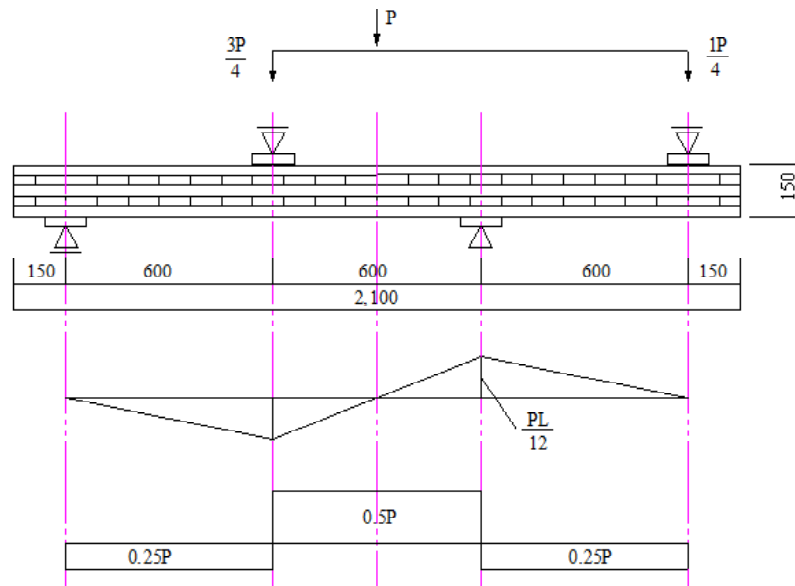


図 6-1 5 層 5 プライ試験体における大野式荷重方法と M 図・Q 図

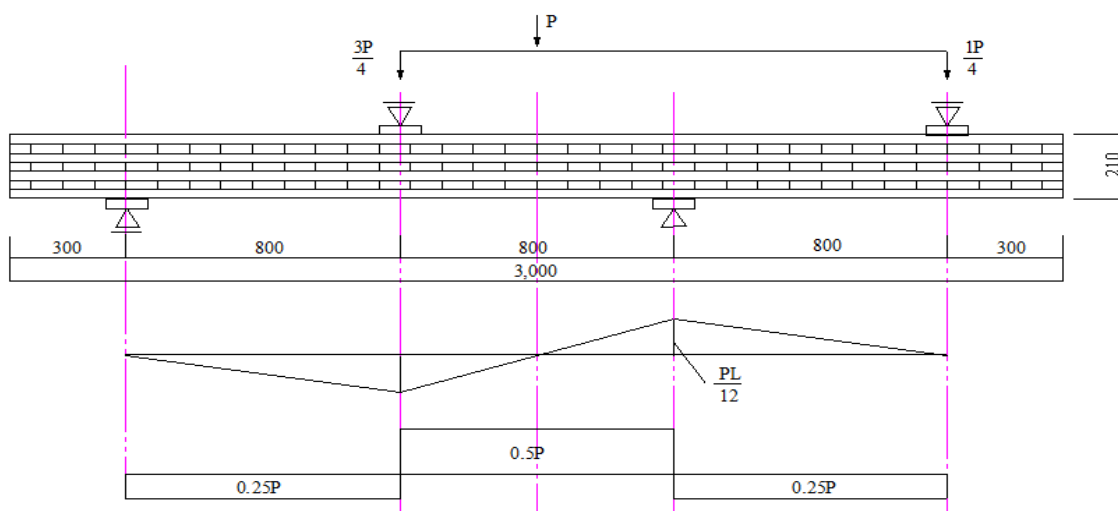


図 6-2 7 層 7 プライ試験体における大野式荷重方法と M 図・Q 図

また、水平せん断荷重におけるM図、Q図を図6-3～図6-4にそれぞれ示す。加圧板の幅は、下支点側150mm、上加力側200mmとし、5層5プライ試験体（厚さ150mm）および7層7プライ試験体（厚さ210mm）の加圧板端部間の実質せん断スパン比は、それぞれ、1.33、1.50とした。

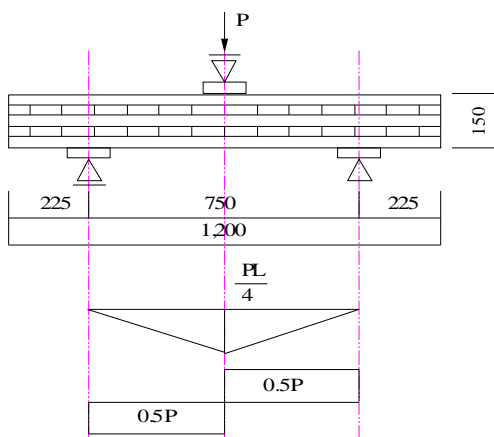


図-6-3 5層5プライ試験体における水平せん断式荷重とM図・Q図

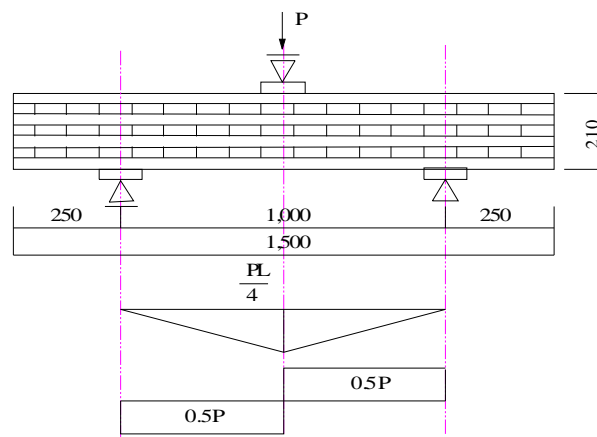


図-6-4 7層7プライ試験体における水平せん断式荷重とM図・Q図

大野式荷重ならびに水平せん断荷重における、せん断スパン比および予想せん断力等の一覧を表6-2ならびに表6-3にそれぞれ示す。予想せん断強さについては、過去の同様の実験結果やせん断スパン比から適宜想定し、せん断力、最大荷重を予想した。



表6-2 大野式載荷におけるせん断スパン比および予想強さ

載荷方法	試験体	ラミナ等級	M/Qd	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	予想せん断強さ (N/mm <sup>2</sup> )	予想せん断力 (kN)	予想最大荷重 P (kN)
大野式	5層5P	同一等級	1.50	45,000	2.0	60	120
	5層5P	異等級	1.50	45,000	2.0	60	120
	7層7P	同一等級	1.55	63,000	2.4	100	200

表6-3 水平せん断載荷におけるせん断スパン比および予想強さ

載荷方法	試験体	ラミナ等級	M/Qd	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	予想せん断強さ (N/mm <sup>2</sup> )	予想せん断力 (kN)	予想最大荷重 P (kN)
水平式	5層5P	同一等級	1.33	45,000	2.5	75	150
	5層5P	異等級	1.33	45,000	2.5	75	150
	7層7P	同一等級	1.55	63,000	2.4	100	200

## 6. 3 試験結果

### 6. 3. 1 大野式載荷

大野式載荷の試験結果一覧を表6-4に、せん断力-変形関係を図6-5～図6-10にそれぞれ示す。また載荷試験終了後の最終破壊性状の例を、写真6-1～写真6-5にそれぞれ示す。

加力は一方向単調載荷とし、最大荷重発生直後にせん断破壊が発生し、脆性的に耐力が低下した。よって、最大荷重をせん断力を求める際の荷重（せん断荷重）とした。

大野式載荷におけるせん断強さを比較すると、5層5プライ同一等級構成試験体では平均1.88 (1.72～2.01) N/mm<sup>2</sup>、5層5プライ異等級構成試験体では1.95 (1.80～2.06) N/mm<sup>2</sup>、7層7プライ同一等級試験体では平均1.83 (1.82～1.83) N/mm<sup>2</sup>となり、ばらつきが非常に少ない傾向が認められた。

なお試験後に、試験体の一部を切り出し、全乾法にて含水率を調べたところ、平均11.4% (10.8～12.2%)であった。

表6-4 大野式載荷における試験結果一覧

試験体名	層構成	ラミナ等級	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	せん断力 (kN)	換算最大せん断力 (kN) <sup>*1</sup>	せん断強さ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断剛性 (kN/mm)
1e1	5層5P	同一	45,000	103.2	51.6	77.4	1.72	8.52 <sup>*2</sup>
1e2				111.0	55.5	83.3	1.85	9.39 <sup>*2</sup>
1e3				116.2	58.1	87.2	1.94	9.87 <sup>*2</sup>
2e1	5層5P	同一	45,000	113.1	56.5	84.8	1.88	8.94 <sup>*2</sup>
2e2				113.4	56.7	85.1	1.89	9.03 <sup>*2</sup>
2e3				120.3	60.2	90.3	2.01	8.57 <sup>*2</sup>
3e1	5層5P	異等級	45,000	123.3	61.7	92.6	2.06	9.01 <sup>*2</sup>
3e2				115.3	57.6	86.4	1.92	8.28 <sup>*2</sup>
3e3				108.0	54.0	81.0	1.80	8.85 <sup>*2</sup>
4e1	5層5P	異等級	45,000	112.3	56.2	84.3	1.87	10.10 <sup>*2</sup>
4e2				116.7	58.3	87.5	2.01	8.83 <sup>*2</sup>
4e3				121.0	60.5	90.8	2.02	8.74 <sup>*2</sup>
13e1	7層7P	同一	63,000	152.8	76.4	114.6	1.82	10.15 <sup>*3</sup>
13e2				153.5	76.8	115.1	1.83	9.65 <sup>*3</sup>

\*1 換算最大せん断力=せん断力×1.5 とした

\*2 5層5P試験体のせん断剛性は、せん断力約24kN(0.4Q)－12kN(0.2Q)間 とした

\*3 7層7P試験体のせん断剛性は、せん断力約30kN(0.4Q)－15kN(0.2Q)間 とした

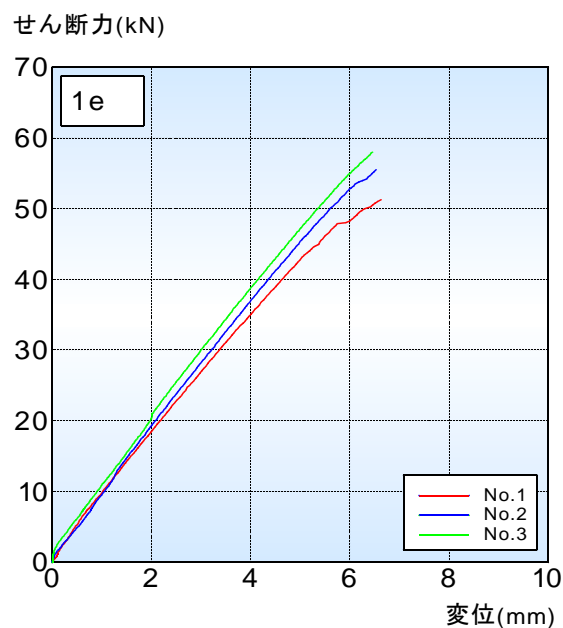


図6-5 せん断力－相対変位曲線(1e1-1e3)

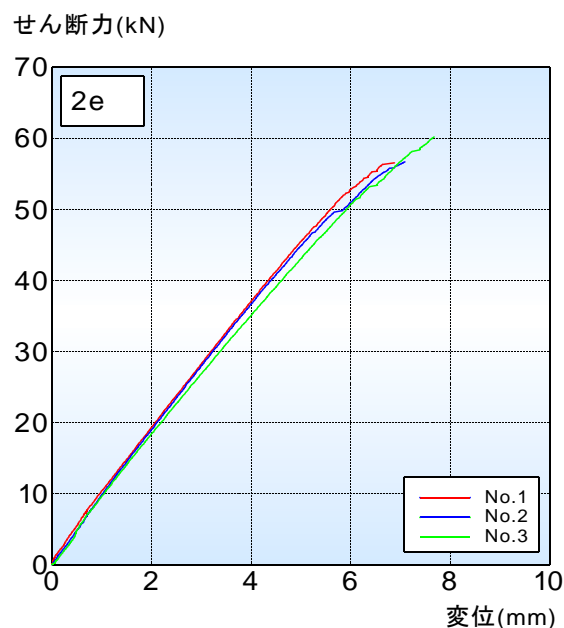


図6-5 せん断力－相対変位曲線(2e1-2e3)

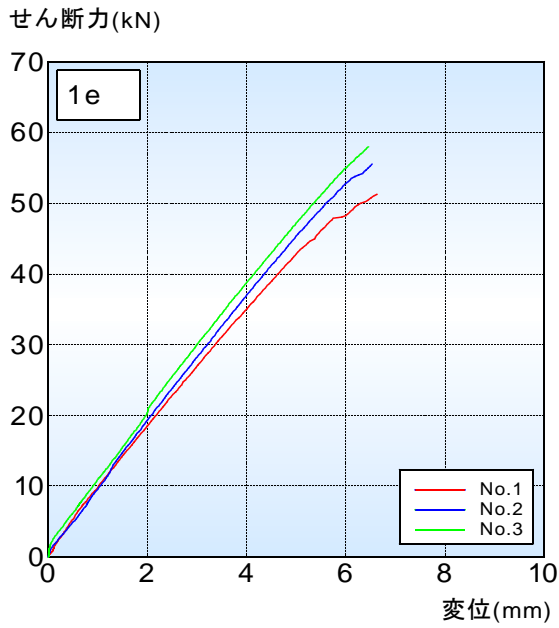


図6-7 せん断力—相対変位曲線 (3e1-3e3)

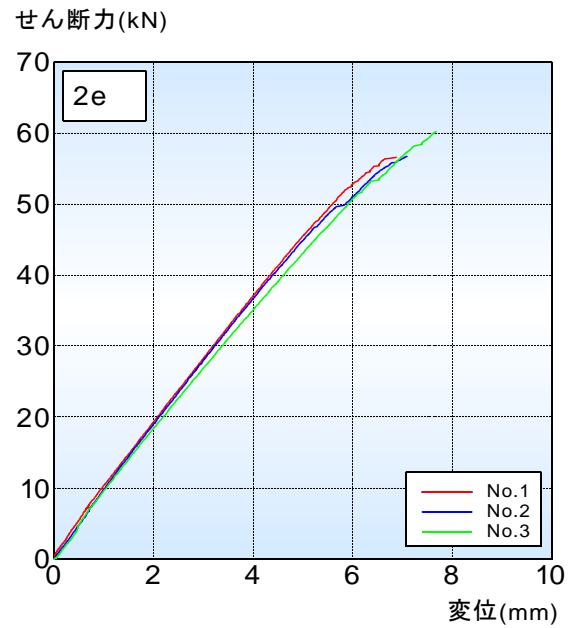


図6-8 せん断力—相対変位曲線 (4e1-4e3)

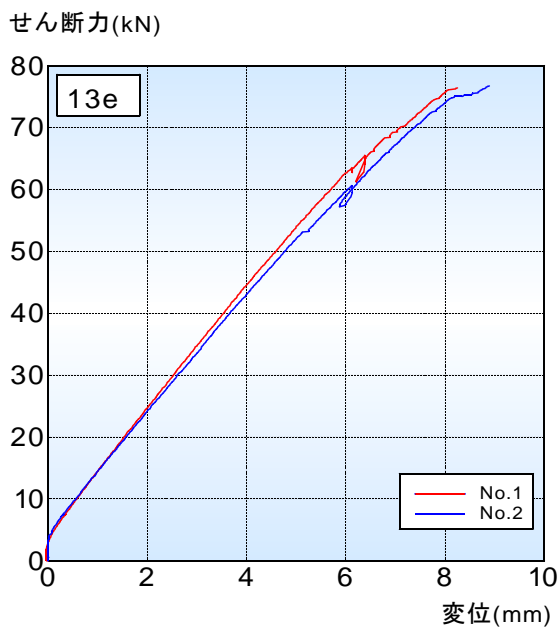


図6-9 せん断力—相対変位曲線 (13e1-13e2)

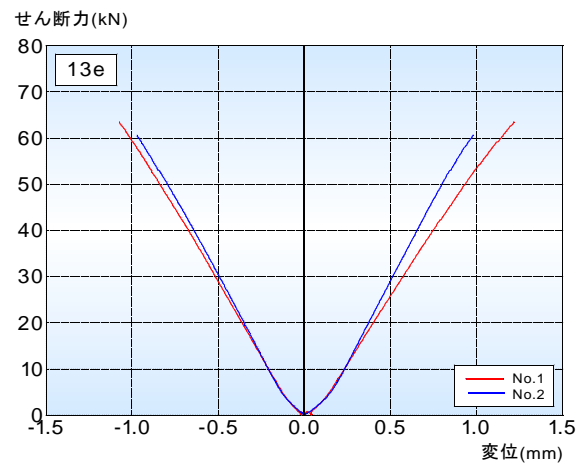


図6-10 せん断区間中央における  
斜め方向の変位 (4e1-4e3)



写真6-1 最終破壊性状(1e3)

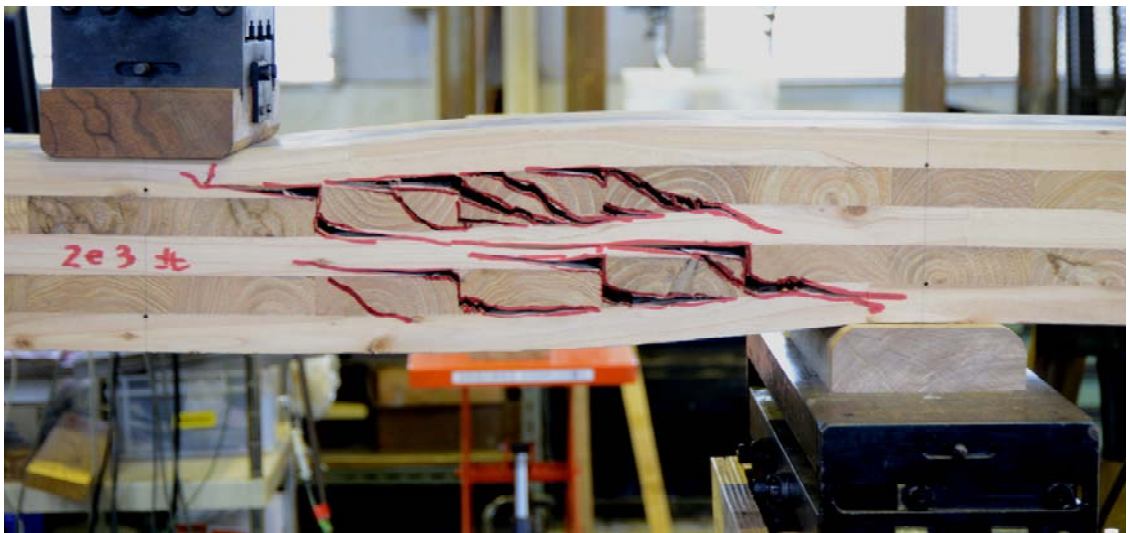


写真6-2 最終破壊性状(2e3)



写真6-3 最終破壊性状(3e2)

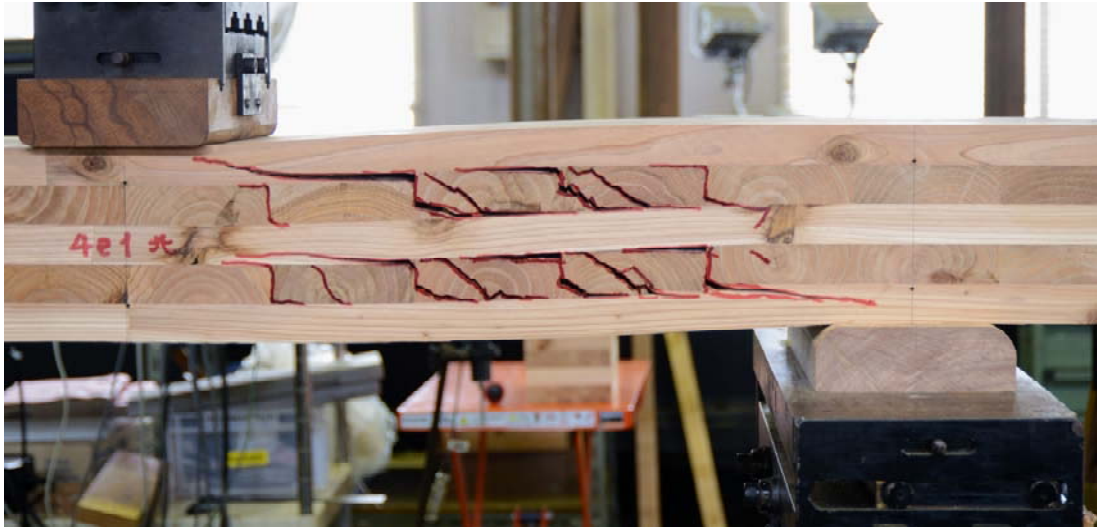


写真6-4 最終破壊性状(4e1)



写真6-5 最終破壊性状(13e2)

### 6. 3. 2 水平せん断載荷

水平せん断載荷の試験結果一覧を表6-5に、せん断力-変形関係を図6-11～図6-15にそれぞれ示す。また載荷試験終了後の最終破壊性状の例を写真6-6～写真6-10にそれぞれ示す。

加力は一方向単調載荷とし、せん断ひび割れが発生し、若干耐力が低下した時点で加力を終了した。よって、試験結果におけるせん断荷重は、最大荷重ではない。一部の試験体については、せん断ひび割れが発生した状況が、他の試験体と比べて明確でなかったことから、観察後に再載荷力したところ、脆性的な曲げ破壊に至った試験体もあった。この場合は、最大荷重ではなく、せん断ひび割れ発生時のピーク荷重をせん断力を求める際の荷重（せん断荷重）とした。



表6-5 水平せん断载荷における試験結果一覧

試験体名	層構成	ラミナ等級	せん断面積 (mm <sup>2</sup> )	せん断荷重 (kN)	せん断力 (kN) * <sup>2</sup>	換算最大せん断力 (kN) * <sup>1</sup>	せん断強さ (N/mm <sup>2</sup> ) * <sup>2</sup>
1d1	5層5P	同一	45,000	122.5	61.3	91.9	2.04
1d2				127.4	63.7	95.6	2.12
1d3				119.5	59.8	89.6	1.99
2d1	5層5P	同一	45,000	118.4	59.2	88.8	1.97
2d2				131.2	68.4	102.6	2.36
2d3				141.1	70.6	105.8	2.35
3d1	5層5P	異等級	45,000	127.3	62.4	93.6	2.08
3d2				121.0	60.5	90.8	2.02
3d3				129.1	64.6	96.8	2.15
4d1	5層5P	異等級	45,000	157.0	78.5	117.8	2.62
4d2				158.9	79.5	119.2	2.65
4d3				145.0	72.5	108.8	2.42
13d1	7層7P	同一	63,000	179.7	89.9	134.8	2.14
13d2				172.3	86.2	129.2	2.05
13d3				169.8	84.9	127.4	2.02

\*1 換算最大せん断力=せん断力×1.5 とした

\*2 せん断力・せん断強さとも最大荷重値から算出した

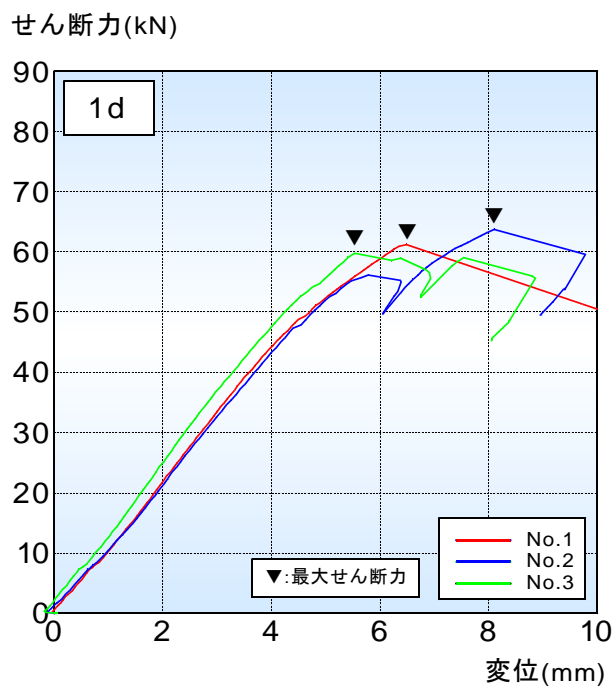


図6-11 せん断力—相対変位曲線(1d1-1d3)

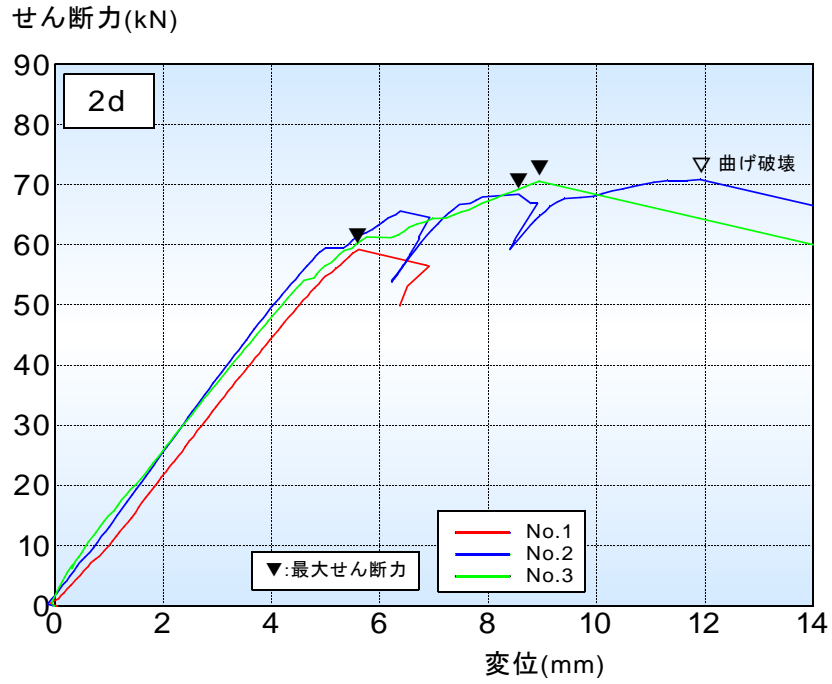


図6-12 せん断力—相対変位曲線 (2d1-2d3)

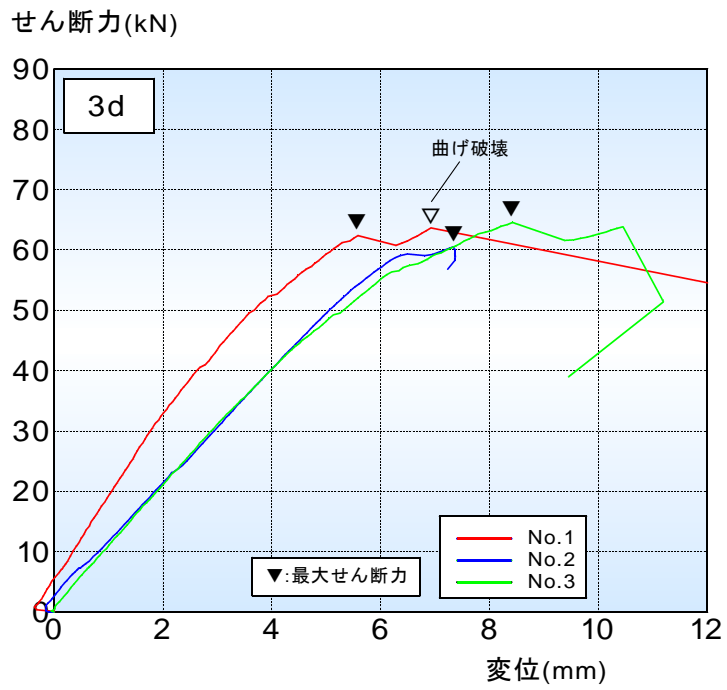


図6-13 せん断力—相対変位曲線 (3d1-3d3)



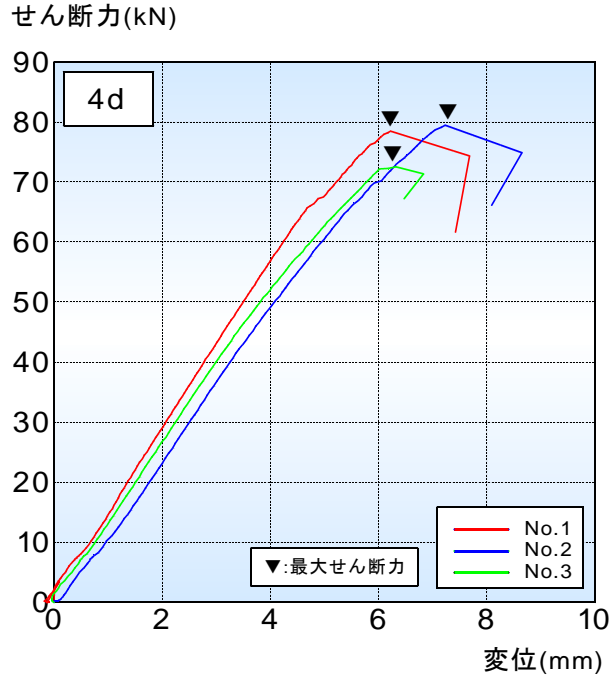


図6-14 せん断力—相対変位曲線(4d1-4d3)

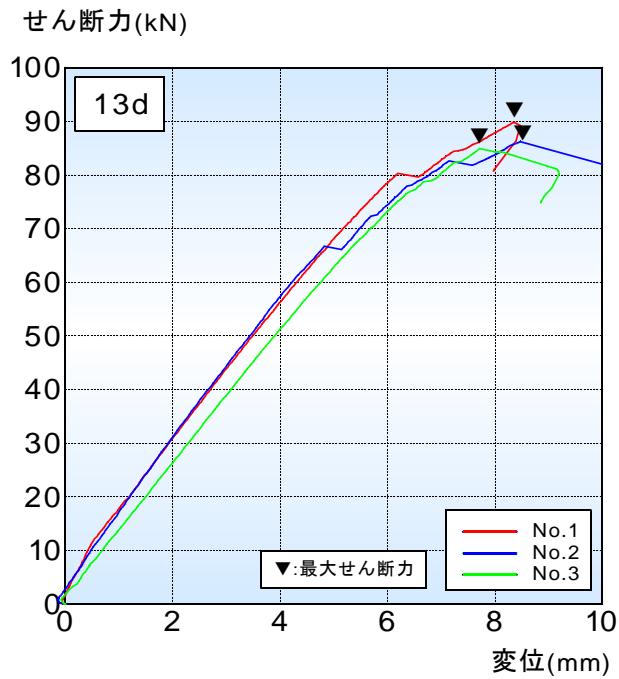


図6-15 せん断力—相対変位曲線(13d1-13d3)

水平せん断载荷におけるせん断強さを比較すると、5層5プライ同一等級構成試験体では平均2.14(1.97~2.36) N/mm<sup>2</sup>、5層5プライ異等級構成試験体では2.32(2.02~2.65) N/mm<sup>2</sup>、7層7プライ同一等級試験体では平均2.07(2.02~2.14) N/mm<sup>2</sup>となり、大野式载荷と比べ、ばらつきが大きくなる傾向が認められた。

なお試験後に、試験体の一部を切り出し、全乾法にて含水率を調べたところ、平均11.4%(11.1~12.2%)であった。

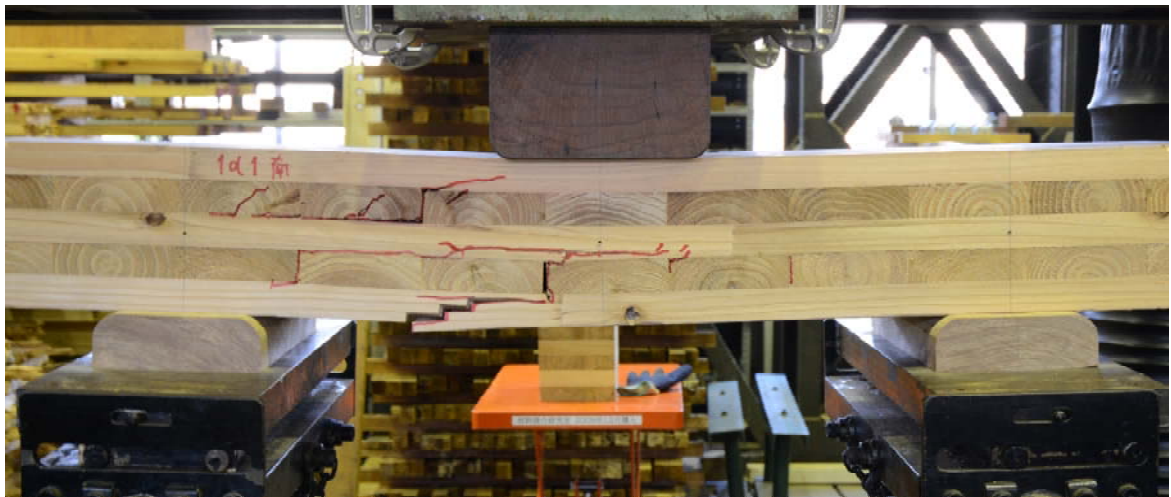


写真6-6 せん断ひび割れ発生時の性状(1d1)

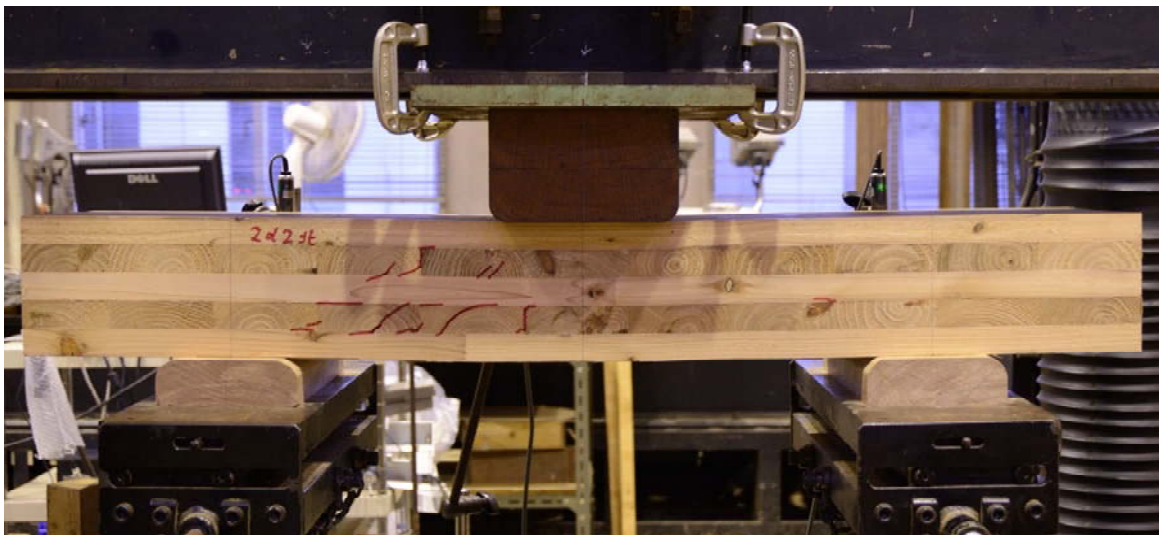


写真6-7 せん断ひび割れ発生時の性状(2d2)

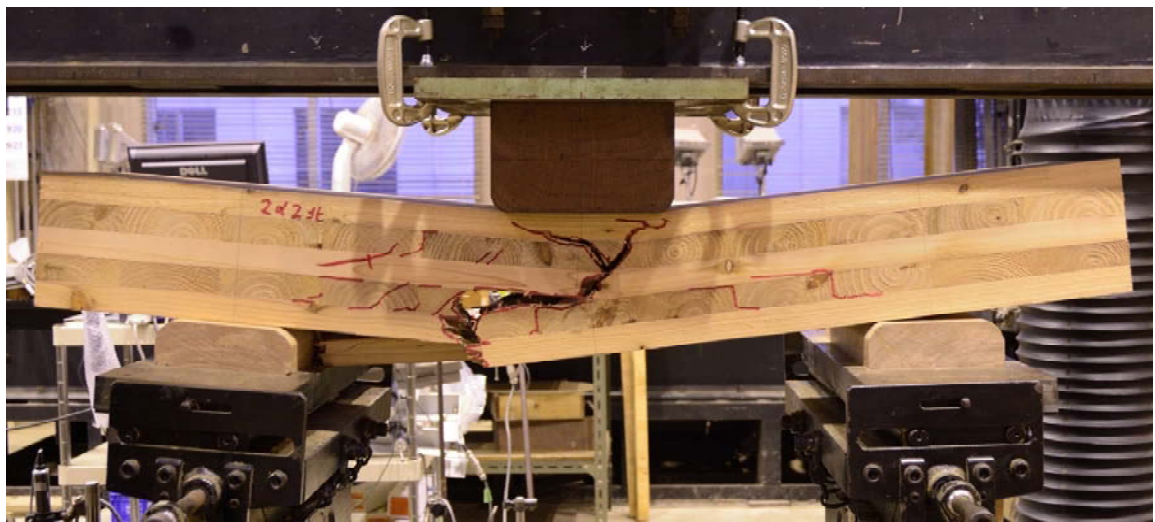


写真6-8 最終破壊性状(2d2)

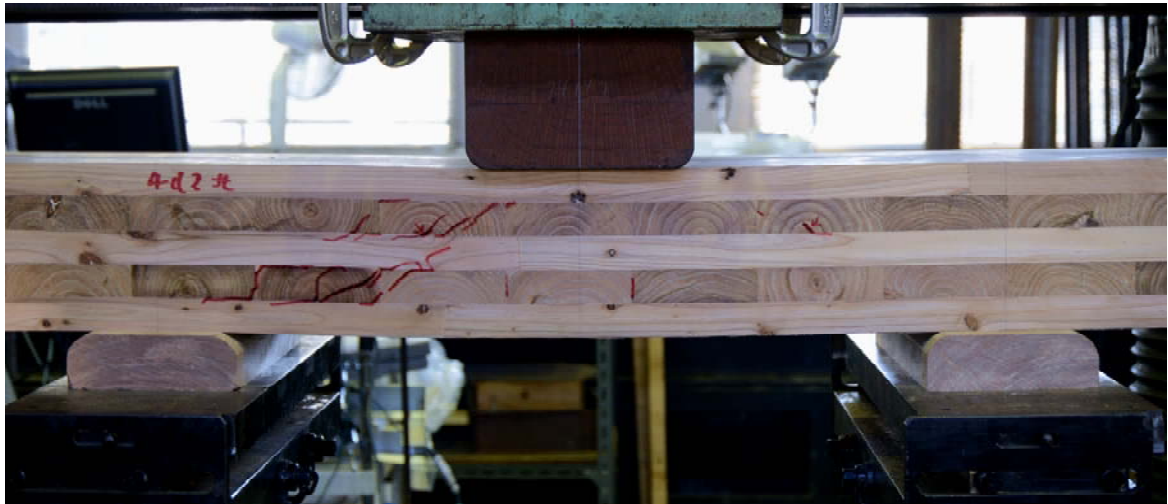


写真6-9 セン断ひび割れ発生時の性状(4d2)



写真6-10 セン断ひび割れ発生時の性状(13e2)

### 6. 3. 3 結果の考察

大野式および水平せん断式のいずれも、直交層を起点としたせん断破壊であったが、大野式と比べ、水平せん断式の方がせん断強さが高めに発現する傾向が認められた。5層5プライ試験体ではせん断スパン比が大野式1.50、水平せん断式1.33と異なるため一概に比較はできないものの、7層7プライ試験体では大野式、水平せん断式ともせん断スパン比が1.55と同じであるにもかかわらず、水平せん断式の方が平均約13%高くなった。

大野式載荷におけるせん断強さを比較すると、5層5プライ同一等級構成試験体では平均1.88 (1.72~2.01) N/mm<sup>2</sup>、5層5プライ異等級構成試験体では1.95 (1.80~2.06) N/mm<sup>2</sup>、7層7プライ同一等級試験体では平均1.83 (1.82~1.83) N/mm<sup>2</sup>と、ばらつきが非常に少ない傾向が認められた。これは今回のラミナが厚さ30mmに対し幅110 mmであり、かつ幅はぎ接着をしていないことから、直交層のローリング・シアーでせん断強さが決まっていたためであると推察される。

また大野式載荷の場合、せん断荷重=最大荷重であるのに対し、水平せん断式載荷の場合、どの時点での荷重がせん断荷重なのか判りづらいことも難点のひとつである。水平せん断式載荷で

は、せん断ひび割れが発生した際、荷重が一時的に低下するケースが、今回の試験においては多かった。この時点のピーク荷重を、せん断力を算出する際のせん断荷重としているが、中にはピークが判りづらい試験体もあった。その場合、再載荷したところ、ピーク荷重を更新したのち、曲げによる脆性破壊で試験終了となる。水平せん断式載荷の場合、最大荷重がせん断荷重ではないことに注意が必要である。結局、せん断力を求める際の荷重（せん断荷重）の決定は、ひび割れの観察に依存することになり、「測定の不確かさ」の問題を内包していると言える。



## 第7章 圧縮試験

### 7.1 目的

断面積の異なる CLT の短柱（細長比 $\lambda = 20$ ）2種類について縦圧縮試験を行い、強度性能を明らかにすることを目的とする。

### 7.2 試験方法

表 7.1 に試験体の形状および試験体数を示す。試験体の樹種はスギで、CLT の幅は 300mm、厚さは 150mm と 210mm の 2種類である。細長比 $\lambda$ を 20 とし、それに応じて試験体の長さを決定した。ラミナ構成は 5層 5プライと 7層 7プライの 2種類、加力方向は強軸方向と弱軸方向の 2種類、5層 5プライについては、ラミナの等級の組み合わせを同一等級のみと異等級の 2種類とした。加力前に容積密度および縦振動法によりヤング係数 ( $E_{fr}$ ) を測定した。写真 7.1 に縦圧縮試験の様子を示す。容量 3000kN の圧縮試験機にて、上端ピン、下端固定にて加力した。ひずみについては、長さ方向の中央部分で、標点距離 300mm 間の縮み量を試験体の厚さ方向の両側で測定し、それらを平均することによって求めた。縦圧縮応力とひずみの関係より、実験時のヤング係数 ( $E_c$ ) を得た。

表 7.1 試験体の形状および試験体数

ラミナ構成	ラミナ等級 組合せ	寸法 (mm)			細長比 $\lambda$	試験体数	
		厚さ	幅	長さ		強軸	弱軸
5層5プライ	同一等級	150	300	865	20	6	6
	異等級					6	6
7層7プライ	同一等級	210	300	1210	20	3	3



写真 7.1 縦圧縮試験の様

### 7. 3 結果

表 7.2 に試験結果を、写真 7.2 に破壊性状の例を示す。試験体の密度は  $396\sim 410\text{kg/m}^3$  (試験体の種類ごとの平均値)、含水率は約 11% (平均値。全乾法で測定) であった。

縦振動法によるヤング係数 (Efr) は 5 層 5 プライの同一等級で強軸  $4.0\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.3\text{kN/mm}^2$ 、異等級で強軸  $4.0\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.5\text{kN/mm}^2$ 、7 層 7 プライの同一等級で強軸  $3.5\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.4\text{kN/mm}^2$  (それぞれ平均値) であった。実験時に求めたヤング係数 (Ec) は 5 層 5 プライの同一等級で強軸  $3.8\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.6\text{kN/mm}^2$ 、異等級で強軸  $3.9\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.8\text{kN/mm}^2$ 、7 層 7 プライの同一等級で強軸  $3.4\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.4\text{kN/mm}^2$  (それぞれ平均値) であった。

圧縮強さは 5 層 5 プライの同一等級で強軸  $19.4\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $14.1\text{N/mm}^2$ 、異等級で強軸  $20.2\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $14.2\text{N/mm}^2$ 、7 層 7 プライの同一等級で強軸  $18.7\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $13.8\text{N/mm}^2$  (それぞれ平均値) であった。

表 7.2 試験結果一覧 (平均値)

ラミナ構成	ラミナ等級 組合せ	加力方向	密度 $\text{kg/m}^3$	圧縮ヤング $\text{kN/mm}^2$		圧縮強さ $\text{N/mm}^2$
				Efr	Ec	
5層5プライ	同一	強軸	409	3.95	3.82 (3.2%)	19.4 (2.4%)
		弱軸	396	2.28	2.61 (13.4%)	14.1 (5.5%)
	異等級	強軸	407	4.04	3.86 (4.9%)	20.2 (3.6%)
		弱軸	410	2.48	2.83 (8.5%)	14.2 (2.5%)
7層7プライ	同一	強軸	408	3.52	3.36	18.7
		弱軸	402	2.41	2.37	13.8

※( )内は変動係数

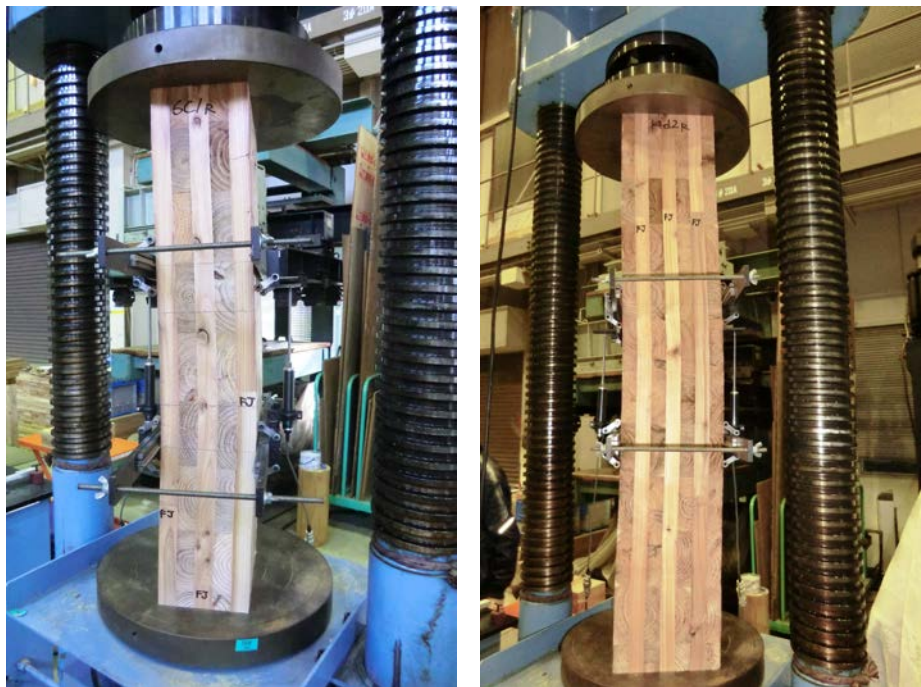


写真 7.2 破壊性状の例 (左: 5 層 5 プライ強軸、右: 7 層 7 プライ弱軸)



縦振動法によるヤング係数 ( $E_{fr}$ ) と実験時に求めたヤング係数 ( $E_c$ ) とを比較すると 2~13% の差であった。加力方向が強軸方向の場合と弱軸方向の場合の圧縮強さを比較すると、弱軸方向が強軸方向のほぼ 7 割であり、試験体の断面積に占める加力方向と繊維が平行であるラミナの割合に比例した。破壊は節近傍やフィンガージョイントの近傍から生じた。

#### 7. 5 まとめ

実験時に求めたヤング係数 ( $E_c$ ) は 5 層 5 プライの同一等級で強軸  $3.8\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.6\text{kN/mm}^2$ 、異等級で強軸  $3.9\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.8\text{kN/mm}^2$ 、7 層 7 プライの同一等級で強軸  $3.4\text{kN/mm}^2$ 、弱軸  $2.4\text{kN/mm}^2$  (それぞれ平均値) であった。

圧縮強さは 5 層 5 プライの同一等級で強軸  $19.4\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $14.1\text{N/mm}^2$ 、異等級で強軸  $20.2\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $14.2\text{N/mm}^2$ 、7 層 7 プライの同一等級で強軸  $18.7\text{N/mm}^2$ 、弱軸  $13.8\text{N/mm}^2$  (それぞれ平均値) であった。

加力方向が強軸方向の場合と弱軸方向の場合のヤング係数および圧縮強さを比較すると、弱軸方向が強軸方向のほぼ 7 割であり、試験体の断面積に占める加力方向と繊維が平行であるラミナの割合に比例した。破壊は節近傍やフィンガージョイントの近傍から生じた。

7. 6 資料

表 7.3 5層5プライ全試験結果

	最外層 の方向	番号	密度	Efr	圧縮ヤング 率	最大荷重	圧縮強さ	最大変位量 /300mm	含水率	
			No.	$\rho$	Efr	$E_c$	Pmax	$\sigma_c$	$\sigma_c$	含水率
			°	kg/m <sup>3</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
同一等級	強軸	5c1	401	4.03	3.86	839.7	18.8	2.70	11.6%	
同一等級	強軸	5c2	420	3.93	3.99	899.4	20.1	2.83	12.1%	
同一等級	強軸	5c3	405	4.15	3.90	875.1	19.5	3.02	11.4%	
同一等級	強軸	6c1	420	3.91	3.70	882.6	19.7	3.52	11.5%	
同一等級	強軸	6c2	406	3.84	3.68	882.6	19.6	3.52	10.8%	
同一等級	強軸	6c3	403	3.84	3.76	853.2	19.1	2.74	11.2%	
n			6	6	6	6	6	6	6	
mean			409	3.95	3.82	872.10	19.44	3.05	11.4%	
min			401	3.84	3.68	839.70	18.77	2.70	10.8%	
max			420	4.15	3.99	899.40	20.07	3.52	12.1%	
sd			8.7	0.12	0.12	21.83	0.46	0.38	0.5%	
cv (%)			2.1	3.1	3.2	2.5	2.4	12.3	4.0	
同一等級	弱軸	5d1	387	2.14	3.02	640.5	14.3	2.65	11.2%	
同一等級	弱軸	5d2	394	2.30	2.45	602.7	13.4	2.93	11.4%	
同一等級	弱軸	5d3	392	2.38	2.63	589.8	13.1	3.76	11.3%	
同一等級	弱軸	6d1	394	2.35	2.80	637.8	14.3	2.99	10.9%	
同一等級	弱軸	6d2	406	2.43	2.75	690.0	15.3	3.10	10.8%	
同一等級	弱軸	6d3	404	2.08	2.00	632.7	14.1	3.74	10.7%	
n			6	6	6	6	6	6	6	
mean			396	2.28	2.61	632.25	14.10	3.20	11.1%	
min			387	2.08	2.00	589.80	13.13	2.65	10.7%	
max			406	2.43	3.02	690.00	15.35	3.76	11.4%	
sd			7.2	0.138	0.350	34.955	0.778	0.455	0.3%	
cv (%)			1.8	6.1	13.4	5.5	5.5	14.2	2.8	

	最外層 の方向	番号	密度	Efr	圧縮ヤング 率	最大荷重	圧縮強さ	最大変位量 /300mm	含水率	
			No.	$\rho$	Efr	$E_c$	Pmax	$\sigma_c$	$\sigma_c$	含水率
			°	kg/m <sup>3</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>	mm	%
異等級	強軸	7c1	403	3.95	3.70	941.1	21.0	3.47	10.9%	
異等級	強軸	7c2	403	3.85	3.63	888.3	19.8	2.85	11.3%	
異等級	強軸	7c3	414	4.06	3.96	914.1	20.3	2.68	11.0%	
異等級	強軸	8c1	410	4.24	4.15	944.7	21.0	2.40	10.6%	
異等級	強軸	8c2	408	4.18	3.92	882.9	19.7	2.34	11.6%	
異等級	強軸	8c3	404	3.95	3.83	863.4	19.2	2.56	11.4%	
n			6	6	6	6	6	6	6	
mean			407	4.04	3.86	905.75	20.17	2.72	11.1%	
min			403	3.85	3.63	863.40	19.23	2.34	10.6%	
max			414	4.24	4.15	944.70	21.02	3.47	11.6%	
sd			4.5	0.153	0.188	33.035	0.734	0.415	0.4%	
cv (%)			1.1	3.8	4.9	3.6	3.6	15.3	3.5	
異等級	弱軸	7d1	416	2.28	2.50	634.2	14.2	3.21	11.0%	
異等級	弱軸	7d2	415	2.52	3.13	663.3	14.8	3.00	10.8%	
異等級	弱軸	7d3	403	2.33	2.68	621.9	13.8	2.77	10.3%	
異等級	弱軸	8d1	412	2.45	2.71	617.4	13.8	2.62	10.8%	
異等級	弱軸	8d2	406	2.62	2.97	638.7	14.2	2.91	10.6%	
異等級	弱軸	8d3	410	2.68	3.01	640.5	14.3	2.70	11.0%	
n			6	6	6	6	6	6	6	
mean			410	2.48	2.83	636.00	14.19	2.87	10.8%	
min			403	2.28	2.50	617.40	13.82	2.62	10.3%	
max			416	2.68	3.13	663.30	14.77	3.21	11.0%	
sd			5.1	0.160	0.240	16.253	0.353	0.218	0.3%	
cv (%)			1.3	6.4	8.5	2.6	2.5	7.6	2.5	

表 7.4 7層7プライ全試験結果

強軸	最外層の方向 °	番号 No.	縦振動 周波数 fr Hz	密度		Efr		圧縮ヤング率		最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ $\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	最大変位量 /300mm $\sigma_c$ mm	含水率 %
				$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>						
1	同一等級	0	14c1	1,188.0	409	3.38	3.24	1171.5	18.7	3.55	10.8%		
2	同一等級	0	14c2	1,253.0	405	3.72	3.68	1168.8	18.6	2.53	11.1%		
3	同一等級	0	14c3	1,198.0	412	3.46	3.16	1185.3	18.9	3.59	10.7%		
n			3	3	3	3	3	3	3	3	3		
mean			1213	408	3.52	3.36	1175.20	18.75	3.22	10.9%			
min			1188	405	3.38	3.16	1168.80	18.65	2.53	10.7%			
max			1253	412	3.72	3.68	1185.30	18.90	3.59	11.1%			
sd			35.0	3.3	0.179	0.279	8.850	0.135	0.601	0.2%			
cv (%)			2.9	0.8	5.1	8.3	0.8	0.7	18.6	1.6			

弱軸	最外層の方向 °	番号 No.	縦振動 周波数 fr Hz	密度		Efr		圧縮ヤング率		最大荷重 Pmax kN	圧縮強さ $\sigma_c$ N/mm <sup>2</sup>	最大変位量 /300mm $\sigma_c$ mm	含水率 %
				$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Efr kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	$E_c$ kN/mm <sup>2</sup>						
1	同一等級	90	14d1	980.0	407	2.29	2.27	902.1	14.3	3.30	10.9%		
2	同一等級	90	14d2	1,011.0	406	2.42	2.44	868.5	13.8	3.99	11.5%		
3	同一等級	90	14d3	1,044.0	394	2.52	2.40	837.0	13.4	3.61	11.1%		
n			3	3	3	3	3	3	3	3	3		
mean			1012	402	2.41	2.37	869.20	13.82	3.63	11.2%			
min			980	394	2.29	2.27	837.00	13.37	3.30	10.9%			
max			1044	407	2.52	2.44	902.10	14.31	3.99	11.5%			
sd			32.0	7.3	0.114	0.092	32.556	0.472	0.348	0.3%			
cv (%)			3.2	1.8	4.7	3.9	3.7	3.4	9.6	2.7			



写真 7. 3 5層5プライ（同一等級、強軸、5c1）の破壊性状



写真 7. 4 5層5プライ（同一等級、強軸、5c2）の破壊性状





写真7. 5 5層5プライ（同一等級、強軸、5c3）の破壊性状



写真7. 6 5層5プライ（同一等級、強軸、6c1）の破壊性状



写真7. 7 5層5プライ（同一等級、強軸、6c2）の破壊性状





写真7. 8 5層5プライ（同一等級、強軸、6c3）の破壊性状



写真7. 9 5層5プライ（異等級、強軸、7c1）の破壊性状



写真7. 10 5層5プライ（異等級、強軸、7c2）の破壊性状





写真7. 1 1 5層5プライ（異等級、強軸、7c3）の破壊性状

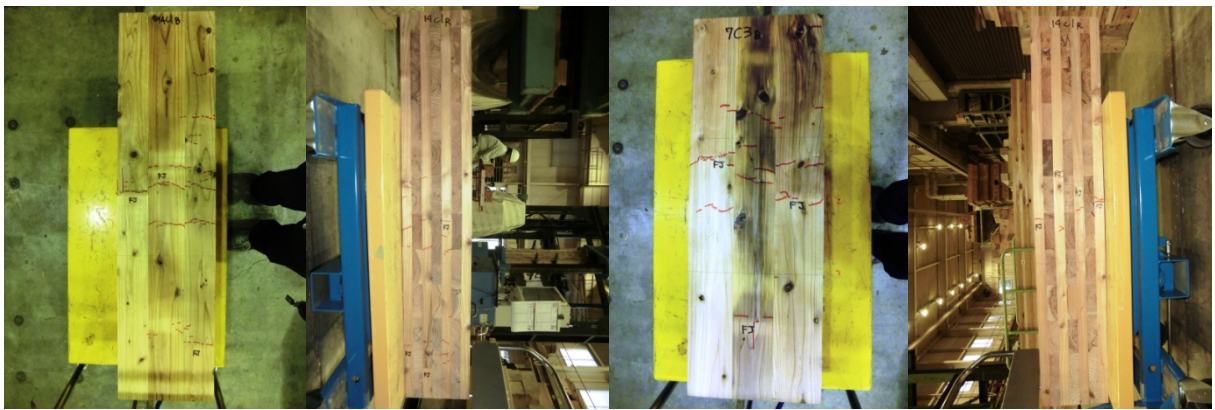


写真7. 1 2 7層7プライ（同一等級、強軸、14c1）の破壊性状

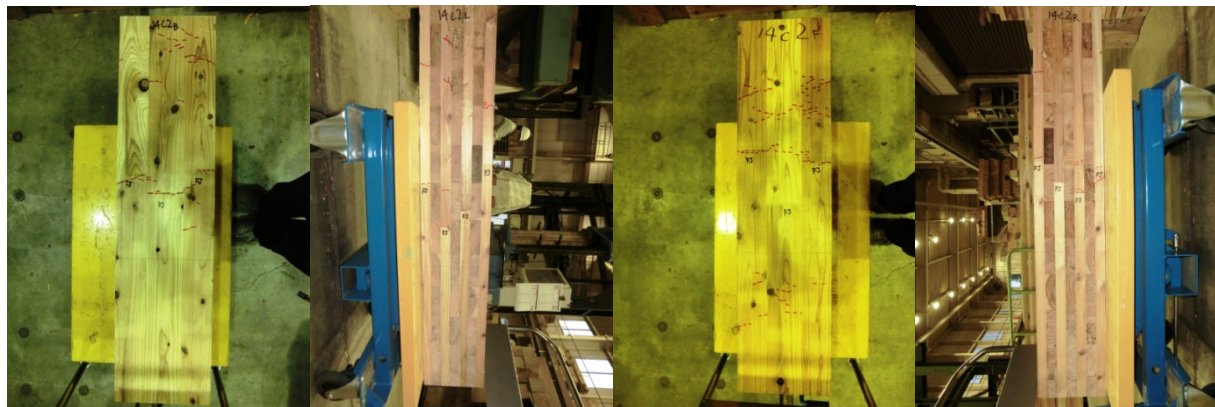


写真7. 1 3 7層7プライ（同一等級、強軸、14c2）の破壊性状





写真7. 14 7層7プライ（同一等級、強軸、14c3）の破壊性状



写真7. 15 7層7プライ（同一等級、弱軸、14d1）の破壊性状

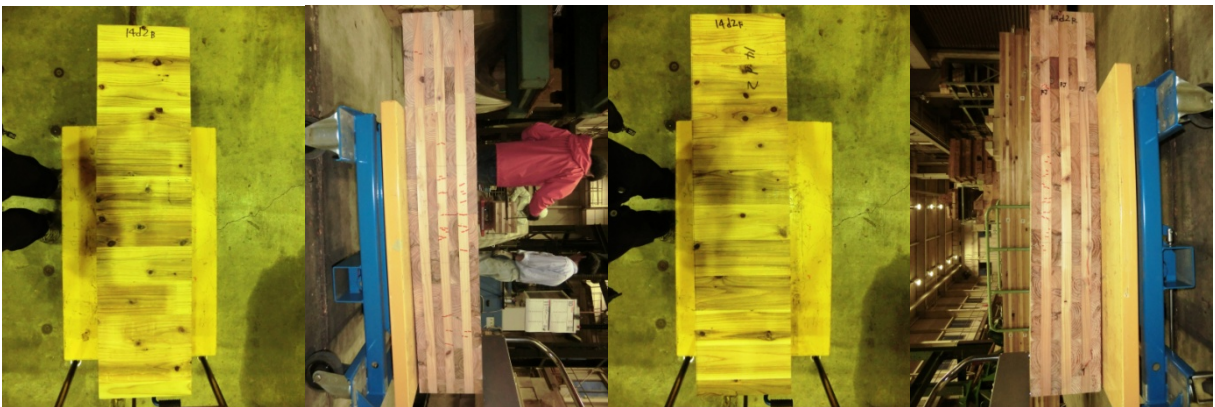


写真7. 16 7層7プライ（同一等級、弱軸、14d2）の破壊性状



写真7. 17 7層7プライ（同一等級、弱軸、14d3）の破壊性状

## 7. 6 CLT 座屈試験

### 1. 試験体概要

#### (1) 試験体 A (5 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 150mm、長さ 3000mm

最外層の繊維方向 : 鉛直方向

挽き板の規格 : 1~5 層 :  $4\sim 7\text{kN/mm}^2$  (同一等級構成)

挽き板の樹種 : スギ

幅はぎの有無 : 幅はぎなし

接着剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

#### (2) 試験体 B (5 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 150mm、長さ 3000mm

最外層の繊維方向 : 鉛直方向

挽き板の規格 : 1/3/5 層 :  $6\sim 8\text{kN/mm}^2$ , 2/4 層 :  $4\sim 7\text{kN/mm}^2$  (異等級構成)

挽き板の樹種 : スギ

幅はぎの有無 : 幅はぎなし

接着剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

#### (3) 試験体 C (5 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 150mm、長さ 3000mm

最外層の繊維方向 : 水平方向

挽き板の規格 : 1~5 層 :  $4\sim 7\text{kN/mm}^2$  (同一等級構成)

挽き板の樹種 : スギ

幅はぎの有無 : 幅はぎなし

接着剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

#### (4) 試験体 D (5 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 150mm、長さ 3000mm

最外層の繊維方向 : 水平方向

挽き板の規格 : 1/3/5 層 :  $6\sim 8\text{kN/mm}^2$ , 2/4 層 :  $4\sim 7\text{kN/mm}^2$  (異等級構成)

挽き板の樹種 : スギ

幅はぎの有無 : 幅はぎなし

接着剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

### (5) 試験体 E (7 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 210mm、長さ 3000mm  
最外層の繊維方向 : 鉛直方向  
挽き板の規格 : 1~7 層 : 6~8kN/mm<sup>2</sup> (同一等級構成)  
挽き板の樹種 : スギ  
幅はぎの有無 : 幅はぎなし  
接 着 剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

### (6) 試験体 F (7 層)

寸法 : 幅 300mm、厚さ 210mm、長さ 3000mm  
最外層の繊維方向 : 水平方向  
挽き板の規格 : 1~7 層 : 6~8kN/mm<sup>2</sup> (同一等級構成)  
挽き板の樹種 : スギ  
幅はぎの有無 : 幅はぎなし  
接 着 剤 : 水性高分子イソシアネート系樹脂

## 2. 試験方法と試験体数と最大荷重の予測

荷重条件 : 両端ピンで鉛直荷重を載荷

試験体数 : 試験体 A 2 体, 最大荷重 : 435kN      実験結果 (2 体) : 426kN, 418kN  
              試験体 B 2 体, 最大荷重 : 435kN  
              試験体 C 2 体, 最大荷重 : 141kN  
              試験体 D 2 体, 最大荷重 : 115kN      実験結果 (1 体) : 123kN  
              試験体 E 1 体, 最大荷重 : 712kN  
              試験体 F 1 体, 最大荷重 : 435kN

ただし、6~8kN/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を 23.1N/mm<sup>2</sup> (L70 の曲げ強さ 33N/mm<sup>2</sup> の 0.7)  
4~7kN/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を 18.9N/mm<sup>2</sup> (L50 の曲げ強さ 27N/mm<sup>2</sup> の 0.7)  
とした。



1000ton 万能試験機



試験体 A



試験体 B



## 8. りり込み

### 8. 1 目的

CLTはラミナを直交して積層接着された材料であるため、CLTの配置と加圧板の設置位置の組み合わせにより、1つの加圧面下で、ラミナごとに異なる材面や木口面が同時にりり込みを受けることになる。その点でCLTは製材品や集成材と異なり、りり込み性能の評価を非常に複雑にしている。本試験では、CLTの作製条件と加圧条件を種々に変化させてCLTのりり込み試験を行い、各組み合わせによるCLTのりり込み性能を明らかにするとともに、りり込み強度性能を簡便に評価する方法を検討することを目的とした。

### 8. 2 試験方法

#### 8. 2. 1 試験体

CLT大板の一部分からりり込み試験体を切り出した。5層同一等級CLT大板と5層異等級CLT大板の各1枚から、外層ラミナの長さ方向とりり込み試験体の長さ方向が一致する（強軸方向と呼ぶ）試験体と、外層ラミナの長さ方向とりり込み試験の長さが直交する（弱軸方向と呼ぶ）試験体をそれぞれ6体ずつ切り出した。7層同一等級CLT大板からも同様に、強軸方向試験体と弱軸方向試験体を6体ずつ切り出した。強軸方向試験体と弱軸方向試験体は、それぞれ積層面が加圧面と平行となる平使いと積層面が加圧面と直交する縦使いの各3体に仕分けた。試験体の種類を表8.1に示すとともに、試験体の構成と加圧方向を図8.1、8.2に示す。5層の試験体は断面寸法が150mm×150mm、長さが900mm、7層の試験体は断面寸法が150mm×210mm、長さが平使いのものが1260mm、縦使いのものが900mmである。

表 8.1 試験体の種類

グループ番号	積層数	ラミナ構成	外層ラミナの方向	試験体の配置	試験体数
1	5	同一等級	強軸	平使い	6
2	5	同一等級	強軸	縦使い	6
3	5	同一等級	弱軸	平使い	6
4	5	同一等級	弱軸	縦使い	6
5	5	異等級	強軸	平使い	6
6	5	異等級	強軸	縦使い	6
7	5	異等級	弱軸	平使い	6
8	5	異等級	弱軸	縦使い	6
9	7	同一等級	強軸	平使い	3
10	7	同一等級	強軸	縦使い	3
11	7	同一等級	弱軸	平使い	3
12	7	同一等級	弱軸	縦使い	3

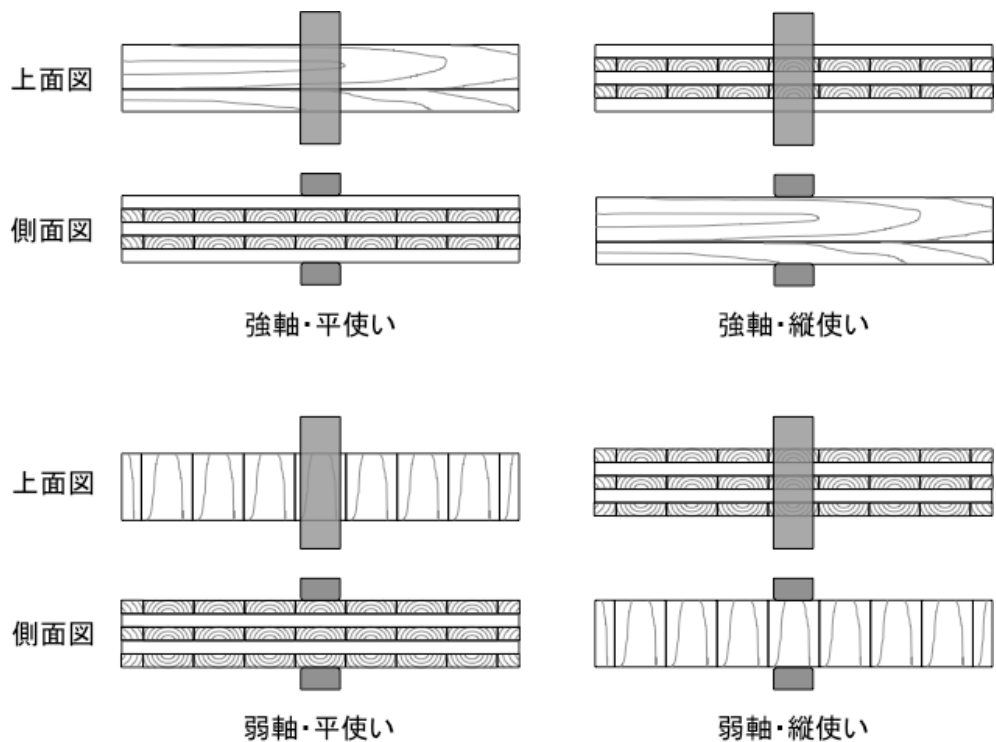


図 8.1 試験体と加圧方向 (5 層)

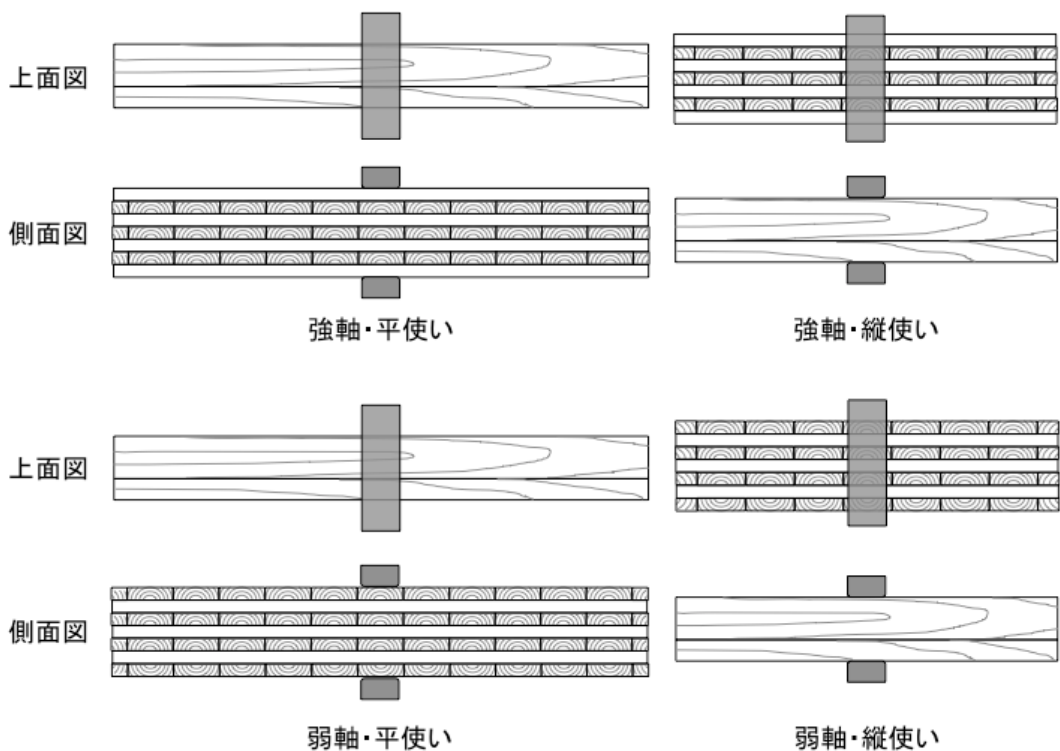


図 8.2 試験体と加圧方向 (7 層)

めり込み試験において4つのパラメータが存在する。すなわち、A：積層数（5層または7層）、B：ラミナ構成（同一等級または異等級）、C：ラミナの方向（外層ラミナが試験体の長さ方向に対して強軸または弱軸）、D：荷重方向に対する試験体の配置（平使いまたは



縦使い、以下および表中では試験体の配置と略す) である。ただし、C：ラミナの方向については、平使いでは加圧面に接するのは外層ラミナだけであるのに対して、縦使いでは各層のラミナが加圧面に接することとなる。また、7層の試験体については、異等級はなく同一等級のみである。各パラメータの組み合わせは、5層の試験体では、ラミナ構成2種×ラミナの方向2種×試験体の配置×2種=8種類であり、7層の試験体では、ラミナ構成1種×ラミナの方向2種×試験体の配置×2種=4種類である。ゆえに、表8.1に示したように試験体の全種類は12種類となる。大板1枚から各パラメータあたり3体の試験体を採取した。ただし、5層の大板は同一等級・異等級ともに2枚存在したため、5層の試験体については、各6体の試験体数となる。

## 8. 2. 2 強度試験方法

ISO 13910 に準じてめり込み試験を行った。すなわち、材長を材せいの6倍として、上下加圧方式とした。加圧板の長さ(材長と同じ方向)は90mmである。加圧には圧縮試験機(前川試験機製作所製、最大容量3000kN)を用いた。圧縮試験機の球座は固定した。圧縮試験機の耐圧板に最大変位が50mmの変位計(東京測器研究所製、CDP-50)を2本、試験体の両側部分に設置し、変位を測定し、平均値を変位とした。5層および7層の試験体のめり込み試験の一例をそれぞれ写真8.1、8.2に示す。

めり込み比例限度応力( $\sigma_p$ )と、ISO 13910に従って、めり込み強度( $f_{c,90}$ )、めり込み降伏強度( $f_{c,90,y}$ )、めり込み剛性( $K_{c,90}$ )を算出した。



写真 8.1 5層の試験体のめり込み試験



写真 8.2 7層の試験体のめり込み試験

## 8. 3 結果

### 8. 3. 1 各パラメータがめり込み強度性能に及ぼす影響

12種類の試験体について、各物性値の平均値を表8.2に示す。各強度性能値において若干の違いはあるが、積層数およびラミナ構成にかかわらず、「弱軸・縦使い」の試験体の強度性能が最も大きく、次いで、「強軸・縦使い」、「強軸・平使い」、「弱軸・平使い」の順であった。縦使いに関しては、縦圧縮となる層が、「弱軸・縦使い」では3層、「強軸・縦使い」では2層含まれるため、縦圧縮となる層が多いほど強度性能が大きくなったものと考えられる。平使いに関しては、「強軸・平使い」では最外層ラミナの余長が十分あるのに対して、「弱軸・縦使い」では幅はぎをしていないため最外層ラミナの余長がほとんどないた

め、前者の強度性能が大きくなったものと考えられる。

ここで、各パラメータが強度性能値に及ぼす影響を調べるために、比例限度応力およびめり込み強度について、各ペアに対して student の t 検定を行った。その結果、比例限度応力、めり込み強度ともに D：試験体の配置および C：ラミナの方向の影響が大きく、A：積層数と B：ラミナ構成は影響が小さいことがわかった。すなわち、積層数やラミナ構成に関わらず、めり込み強度性能は、ラミナの方向と試験体の配置によって、決定づけられることがわかった。

表 8.2 むり込み試験の結果（平均値）

グループ番号	$\rho_{\text{test}}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{\text{fr}}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
1	411	3.44	11.5	3.47	9.12	6.11	3.68
2	407	3.58	11.7	11.7	17.6	17.2	9.42
3	402	2.08	11.5	2.73	6.94	4.17	3.29
4	396	2.21	11.4	14.7	20.0	22.3	15.4
5	408	4.04	11.1	3.41	8.68	5.84	3.66
6	415	4.04	11.3	11.7	17.1	16.8	9.42
7	417	2.33	11.6	2.97	6.91	4.79	3.68
8	412	2.26	11.3	17.1	21.0	23.5	17.8
9	407	3.27	11.5	3.73	8.83	6.42	3.71
10	401	3.14	11.3	11.0	18.5	18.4	16.7
11	390	2.58	11.7	3.31	7.13	5.39	3.10
12	400	2.41	11.4	13.1	20.4	21.1	15.2

注:  $\rho_{\text{test}}$ , 試験時の密度,  $E_{\text{fr}}$ , 縦振動法によるヤング係数, MC, 含水率,  $\sigma_p$ , 比例限度応力,  $f_{c,90}$ , むり込み強度,  $f_{c,90,y}$ , むり込み降伏強度,  $K_{c,90}$ , むり込み剛性

### 8. 3. 2 CLT のめり込み比例限度応力の推定

前節で、めり込み強度性能を決定づけるのはラミナの方向と試験体の配置であることを示した。そこで、CLT のめり込み比例限度応力を推定することを試みた。めり込み比例限度応力を特徴点として取り上げたのは、比例限度応力であれば、縦圧縮、めり込みとも同じ考え方で評価できるためである。この点、強度は縦圧縮とめり込みとは意味するところが異なるため、今回の考察からは除外した。図 8.1、8.2 からわかるように、各ラミナに生じる応力は、「縦圧縮」、「強軸・平使い」、「強軸・縦使い」、「弱軸・平使い」の 4 種類がある。めり込み比例限度応力を推定するにあたり、「縦圧縮」のラミナには、「木材工業ハンドブック」に記載されている縦圧縮比例限度応力の平均値 22.6N/mm<sup>2</sup> を用いた。ただし、この値は無欠点小試験体の値である。「強軸・平使い」、「強軸・縦使い」のラミナには過去に行った L50、L60 のラミナの強度試験の結果（平成 19 年度 農林水産省農林水産技術会議補助事業 産官学連携による食料生産業活性化のための新技術開発事業 信頼性強度設計理論による地域材利用新構造材料の開発 報告書、平成 20 年 3 月、支援機関：財団法人 日本住宅・木材技術センター）から比例限度を新たに算出し、平均値である 3.72N/mm<sup>2</sup>、2.95N/mm<sup>2</sup> をそれぞれ用いた。「弱軸・平使い」のラミナは余長がほとんどないため、全面

横圧縮であると見なし、「強軸・平使い」の値  $3.72\text{N/mm}^2$  に「木材工業ハンドブック」の半径方向の全面加圧/中央加圧の比  $2.6/3.5=0.74$  を乗じた値として、 $2.75\text{N/mm}^2$  を用いた。これらの値を用いて5層・同一等級の試験体を例に取り、CLTのめり込み比例限度応力を推定した。平使いのCLTに関しては、加圧板に接する外層ラミナのめり込み強度性能に依存するため、「弱軸・平使い」、「強軸・平使い」のCLTのめり込み比例限度応力はそれぞれ「弱軸・平使い」、「強軸・平使い」のラミナの比例限度応力  $2.75\text{N/mm}^2$ 、 $3.72\text{N/mm}^2$  と見なせる。「強軸・縦使い」のCLTのめり込み比例限度応力は「強軸・縦使い」のラミナが3枚、「縦圧縮」のラミナが2枚加圧板に接するため、単純に並列で考え、 $(2.95+22.6+2.95+22.6+2.95)/5=10.8\text{N/mm}^2$  で算出した。「弱軸・縦使い」のCLTのめり込み比例限度応力は「縦圧縮」のラミナが3枚、「強軸・縦使い」のラミナが3枚加圧板に接するため、 $(22.6+2.95+22.6+2.95+22.6)/5=14.7\text{N/mm}^2$  で算出した。これらの推定値と実測値の平均値とを比較したものを図8.3に示す。推定値と実測値はよく一致した。また、前節でCLTのめり込み強度性能は、積層数とラミナ構成にはほとんど影響を受けないことがわかったので、今回実験を行った「5層・異等級」、「7層・同一等級」のめり込み比例限度応力についてもよく一致した。以上のことから、ラミナの比例限度応力を用いたごく単純な計算により、CLTのめり込み比例限度応力が推定できることがわかった。

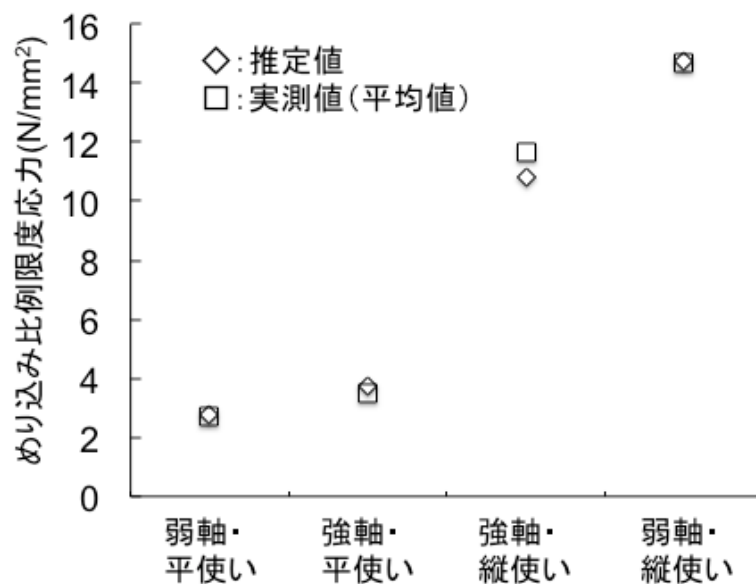


図 8.3 5層・同一等級構成の試験体における各試験体の、めり込み比例限度応力の比較

#### 8. 4 まとめ

スギ CLT について、めり込み強度性能を調べた。その結果、めり込み強度性能を決定づけるパラメータは、ラミナ方向と試験体の配置であり、積層数やラミナ構成はめり込み強度性能にはあまり寄与しないことがわかった。ラミナ方向と試験体の配置に着目し、各ラミナの比例限度応力を用いて、CLTの比例限度応力を推定したところ、実測値と推定値はよく一致した。このため、CLTに用いられるラミナの強度性能を測定すれば、CLTのめり込み比例限度応力を推定できることがわかった。ただし、この方法がスギ以外の樹種や、幅はぎ部分と加圧板との位置関係、同じ方向のプライが重なった例えば5層7プライ

の CLT などにも適用できるかどうかは今後の検討課題である。

## 8. 5 資料

表 8.3～8.14 に試験体の種類別にめり込み試験の結果を示す。カッコ内の表記は（積層数・ラミナ構成・外層ラミナの方向・試験体の配置）を示している。各記号の意味は、 $\rho$ ：試験時の密度、 $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数、MC：全乾法による含水率、 $\sigma_{1\%}$ ：1%変形時の応力、 $\sigma_{2\%}$ ：2%変形時の応力、 $\sigma_{3\%}$ ：3%変形時の応力、 $\sigma_{4\%}$ ：4%変形時の応力、 $\sigma_{5\%}$ ：5%変形時の応力、 $\sigma_p$ ：比例限度応力、 $f_{c,90}$ ：めり込み強度、 $f_{c,90,y}$ ：めり込み降伏強度、 $K_{c,90}$ ：めり込み剛性、である。また、写真 8.3～8.14 に各種類の試験体の破壊形態の例を示す。

表 8.3 めり込み試験の結果（5層・同一等級・強軸・平使い）

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
5f1-1	415	3.08	11.6	4.36	7.03	8.03	8.60	8.99	3.73	10.5	7.95	4.21
5f2-1	394	2.95	10.9	1.76	4.53	5.24	5.88	6.40	3.15	8.59	5.27	3.41
5f3-1	403	3.64	12.4	3.74	4.76	5.21	5.62	5.94	3.09	8.43	5.04	3.10
6f1-1	411	3.63	11.3	3.77	5.17	5.82	6.25	6.55	3.33	8.57	5.58	4.04
6f2-1	426	3.63	11.1	4.87	7.05	7.92	8.54	9.02	4.57	10.4	7.71	4.23
6f3-1	416	3.69	12.0	3.85	4.87	5.34	5.75	6.08	2.93	8.21	5.11	3.08
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	411	3.44	11.5	3.73	5.57	6.26	6.77	7.16	3.47	9.12	6.11	3.68
最小値	394	2.95	10.9	1.76	4.53	5.21	5.62	5.94	2.93	8.21	5.04	3.08
最大値	426	3.69	12.4	4.87	7.05	8.03	8.60	9.02	4.57	10.5	7.95	4.23
標準偏差	10.1	0.300	0.545	0.965	1.06	1.23	1.28	1.32	0.554	0.961	1.23	0.499
変動係数(%)	2.46	8.74	4.72	25.9	19.0	19.6	19.0	18.4	16.0	10.5	20.1	13.6

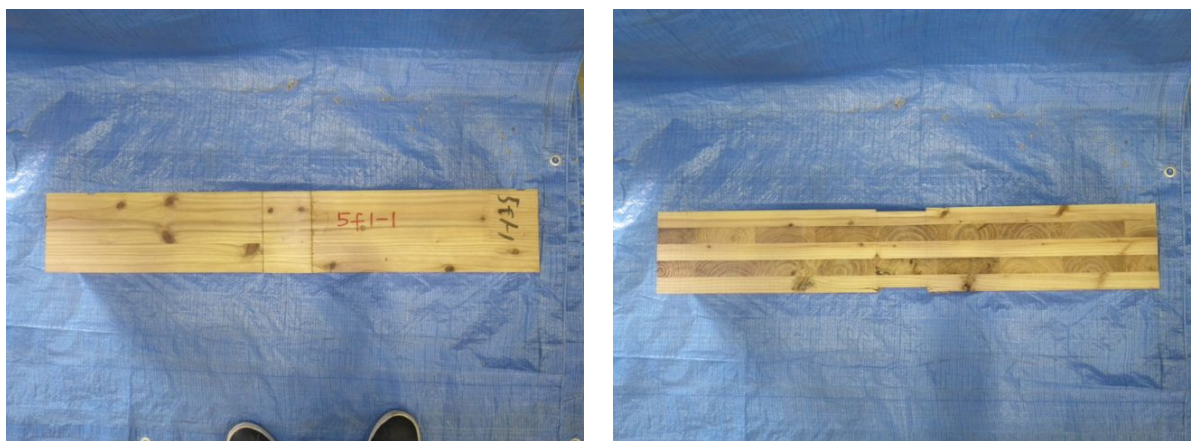


写真 8.3-a), b) 破壊形態（5層・同一等級・強軸・平使い）



表 8.4 むり込み試験の結果 (5層・同一等級・強軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
5f1-2	410	3.29	12.0	6.04	15.6	16.9	17.1	17.3	10.7	17.7	17.0	8.91
5f2-2	399	3.06	11.3	9.08	15.8	16.3	16.6	16.8	10.0	16.9	16.2	10.6
5f3-2	421	3.69	11.6	2.63	14.7	17.0	17.1	17.3	11.8	18.4	17.0	8.93
6f1-2	385	3.46	11.3	10.7	16.9	17.0	16.9	16.8	10.7	16.3	17.0	12.8
6f2-2	414	3.77	11.6	8.77	17.2	17.5	17.4	17.0	12.5	17.6	17.5	8.24
6f3-2	415	4.22	12.4	5.21	16.9	18.5	18.2	18.1	14.4	18.5	18.2	7.01
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	407	3.58	12	7.07	16.2	17.2	17.2	17.2	11.7	17.6	17.2	9.42
最小値	385	3.06	11.3	2.63	14.7	16.3	16.6	16.8	10.0	16.3	16.2	7.01
最大値	421	4.22	12.4	10.7	17.2	18.5	18.2	18.1	14.4	18.5	18.2	12.8
標準偏差	11.9	0.370	0.399	2.71	0.891	0.671	0.496	0.442	1.45	0.790	0.615	1.85
変動係数(%)	2.93	10.3	3.41	38.3	5.50	3.90	2.88	2.57	12.4	4.49	3.58	19.7



写真 8.4-a), b) 破壊形態 (5層・同一等級・強軸・縦使い)

表 8.5 むり込み試験の結果 (5層・同一等級・弱軸・平使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
5g1-1	394	1.93	11.3	2.95	3.98	4.39	4.75	5.01	2.52	6.50	4.15	3.17
5g2-1	401	2.02	11.8	3.42	4.63	4.94	5.10	5.28	2.97	6.88	4.82	3.80
5g3-1	395	2.02	11.7	3.21	3.58	3.84	4.16	4.45	2.43	7.12	3.69	2.27
6g1-1	415	2.17	11.4	3.74	4.16	4.45	4.73	4.98	2.91	7.15	4.22	3.47
6g2-1	410	2.06	11.9	3.54	4.01	4.29	4.58	4.83	3.00	6.87	4.07	3.74
6g3-1	398	2.28	11.0	3.31	3.94	4.20	4.39	4.59	2.56	7.11	4.04	3.31
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	402	2.08	11.5	3.36	4.05	4.35	4.62	4.86	2.73	6.94	4.17	3.29
最小値	394	1.93	11.0	2.95	3.58	3.84	4.16	4.45	2.43	6.50	3.69	2.27
最大値	415	2.28	11.9	3.74	4.63	4.94	5.10	5.28	3.00	7.15	4.82	3.80
標準偏差	7.85	0.113	0.311	0.248	0.312	0.328	0.295	0.276	0.233	0.227	0.335	0.508
変動係数(%)	1.95	5.45	2.70	7.39	7.70	7.53	6.39	5.69	8.53	3.27	8.03	15.4

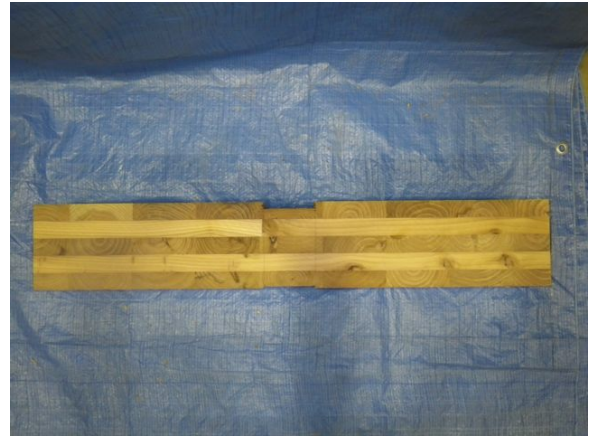
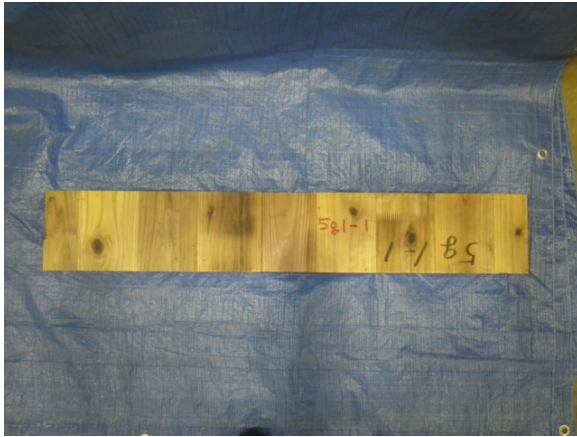


写真 8.5-a), b) 破壊形態 (5層・同一等級・弱軸・平使い)

表 8.6 めり込み試験の結果 (5層・同一等級・弱軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
5g1-2	402	2.27	11.0	10.6	20.6	21.7	20.5	19.6	12.3	20.4	21.8	15.2
5g2-2	393	2.17	11.6	9.68	21.6	22.2	22.0	21.7	14.6	20.7	22.2	12.7
5g3-2	393	2.16	11.3	8.89	22.9	22.7	21.5	20.6	15.4	19.8	22.9	19.3
6g1-2	403	2.14	11.5	19.1	23.4	22.9	21.9	21.6	15.5	20.4	23.3	17.9
6g2-2	388	2.22	11.5	11.3	22.1	21.6	20.8	20.6	16.2	21.0	21.8	15.0
6g3-2	399	2.28	11.3	8.58	20.5	21.5	20.6	19.8	14.2	17.7	21.4	12.3
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	396	2.21	11.4	11.4	21.8	22.1	21.2	20.6	14.7	20.0	22.3	15.4
最小値	388	2.14	11.0	8.58	20.5	21.5	20.5	19.6	12.3	17.7	21.4	12.3
最大値	403	2.28	11.6	19.1	23.4	22.9	22.0	21.7	16.2	21.0	23.3	19.3
標準偏差	5.32	0.0524	0.189	3.58	1.08	0.561	0.623	0.792	1.26	1.08	0.663	2.51
変動係数(%)	1.34	2.37	1.66	31.5	4.93	2.54	2.94	3.84	8.58	5.42	2.98	16.3

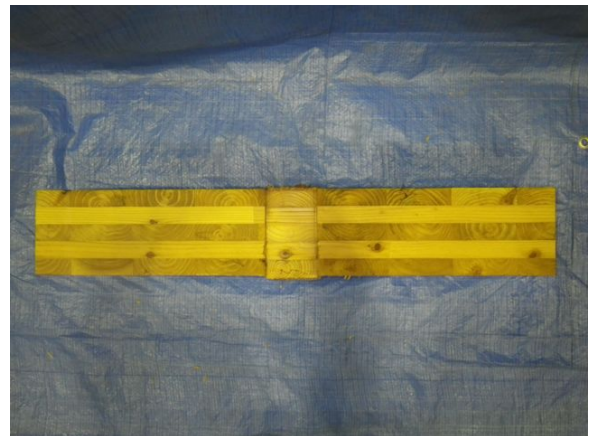


写真 8.6-a), b) 破壊形態 (5層・同一等級・弱軸・縦使い)



表 8.7 むり込み試験の結果 (5層・異等級・強軸・平使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
7f1-1	412	3.96	11.0	4.19	5.50	5.96	6.36	6.68	3.26	8.66	5.74	4.13
7f2-1	419	3.90	10.8	2.28	5.90	6.95	7.57	8.05	4.23	9.01	7.04	4.12
7f3-1	398	3.95	10.7	4.28	5.85	6.51	7.10	7.59	3.71	10.1	6.27	3.88
8f1-1	390	4.14	10.9	3.57	4.45	4.83	5.19	5.52	3.00	7.43	4.63	3.62
8f2-1	410	4.25	11.5	3.05	4.40	5.00	5.27	5.62	2.54	7.75	4.92	2.54
8f3-1	418	4.00	11.9	4.52	5.99	6.61	6.99	7.32	3.74	9.11	6.41	3.68
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	408	4.04	11.1	3.65	5.35	5.98	6.41	6.80	3.41	8.68	5.84	3.66
最小値	390	3.90	10.7	2.28	4.40	4.83	5.19	5.52	2.54	7.43	4.63	2.54
最大値	419	4.25	11.9	4.52	5.99	6.95	7.57	8.05	4.23	10.1	7.04	4.13
標準偏差	10.6	0.121	0.431	0.783	0.672	0.806	0.908	0.958	0.549	0.894	0.844	0.539
変動係数(%)	2.60	3.01	3.87	21.5	12.6	13.5	14.2	14.1	16.1	10.3	14.5	14.7

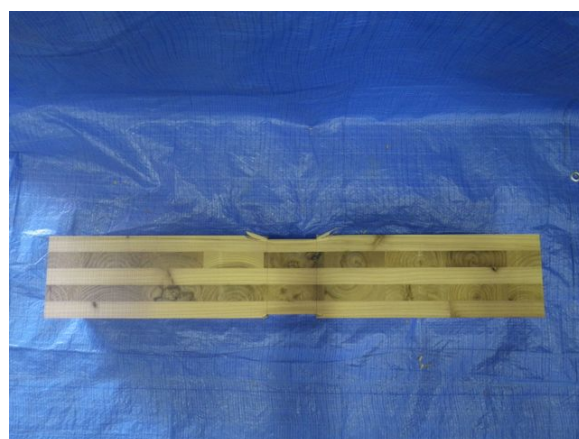


写真 8.7-a), b) 破壊形態 (5層・異等級・強軸・平使い)

表 8.8 むり込み試験の結果 (5層・異等級・強軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
7f1-2	423	4.22	10.9	3.21	14.9	16.5	16.4	16.6	12.3	17.8	16.3	7.72
7f2-2	410	3.51	11.2	8.18	17.2	17.7	17.3	17.0	12.0	16.2	17.6	8.42
7f3-2	405	4.02	10.8	1.69	14.8	16.2	16.5	16.2	12.4	17.2	16.2	8.55
8f1-2	406	4.41	11.6	11.3	15.4	15.7	15.7	15.4	10.3	15.5	15.7	9.81
8f2-2	441	4.07	11.8	6.26	16.7	17.8	17.7	17.8	11.3	18.2	17.8	10.6
8f3-2	404	4.03	11.4	5.84	16.3	16.9	17.0	17.0	11.8	17.7	16.9	11.4
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	415	4.04	11.3	6.08	15.9	16.8	16.8	16.7	11.7	17.1	16.8	9.42
最小値	404	3.51	10.8	1.69	14.8	15.7	15.7	15.4	10.3	15.5	15.7	7.72
最大値	441	4.41	11.8	11.3	17.2	17.8	17.7	17.8	12.4	18.2	17.8	11.4
標準偏差	13.5	0.276	0.376	3.14	0.923	0.759	0.654	0.734	0.721	0.936	0.762	1.30
変動係数(%)	3.26	6.83	3.33	51.7	5.81	4.52	3.90	4.41	6.18	5.47	4.55	13.8



写真 8.8-a), b) 破壊形態 (5層・異等級・強軸・縦使い)

表 8.9 めり込み試験の結果 (5層・異等級・弱軸・平使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
7g1-1	436	2.30	11.8	4.79	5.30	5.63	5.92	6.19	3.39	8.12	5.40	4.50
7g2-1	435	2.30	12.4	3.16	4.71	5.07	5.40	5.69	3.08	6.99	4.94	4.06
7g3-1	428	2.44	11.6	3.38	4.44	4.82	5.16	5.46	2.81	6.87	4.70	3.56
8g1-1	397	2.34	11.1	3.37	4.13	4.52	4.76	4.94	2.91	5.74	4.29	3.57
8g2-1	407	2.16	11.2	3.19	4.72	5.19	5.45	5.77	3.53	7.67	5.09	3.47
8g3-1	398	2.47	11.3	2.54	4.01	4.40	4.62	4.76	2.10	6.08	4.31	2.90
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	417	2.33	11.6	3.40	4.55	4.94	5.22	5.47	2.97	6.91	4.79	3.68
最小値	397	2.16	11.1	2.54	4.01	4.40	4.62	4.76	2.10	5.74	4.29	2.90
最大値	436	2.47	12.4	4.79	5.30	5.63	5.92	6.19	3.53	8.12	5.40	4.50
標準偏差	16.9	0.103	0.434	0.678	0.429	0.416	0.438	0.494	0.465	0.828	0.403	0.499
変動係数(%)	4.05	4.41	3.75	19.9	9.42	8.42	8.38	9.03	15.6	12.0	8.42	13.6

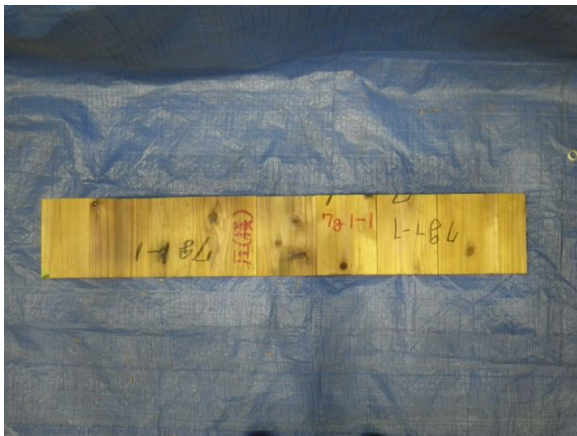


写真 8.9-a), b) 破壊形態 (5層・異等級・弱軸・平使い)

表 8.10 めり込み試験の結果 (5層・異等級・弱軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{ff}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
7g1-2	420	2.34	11.3	12.2	24.8	24.8	23.9	23.5	17.7	21.4	24.9	14.0
7g2-2	415	2.12	11.3	16.3	23.1	21.6	20.8	20.5	16.9	20.5	22.1	16.3
7g3-2	415	2.19	11.2	16.7	24.6	22.7	21.7	21.7	19.0	21.2	23.5	21.0
8g1-2	401	2.39	11.4	21.4	24.7	23.3	22.3	21.9	17.2	20.7	24.4	21.1
8g2-2	417	2.28	11.2	13.2	22.5	22.6	22.3	22.1	15.3	21.6	22.7	17.0
8g3-2	404	2.25	11.4	15.8	23.4	23.0	22.1	21.8	16.5	20.6	23.4	17.1
試験体数	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
平均値	412	2.26	11.3	15.9	23.8	23.0	22.2	21.9	17.1	21.0	23.5	17.7
最小値	401	2.12	11.2	12.2	22.5	21.6	20.8	20.5	15.3	20.5	22.1	14.0
最大値	420	2.39	11.4	21.4	24.8	24.8	23.9	23.5	19.0	21.6	24.9	21.1
標準偏差	6.77	0.0900	0.0851	2.96	0.889	0.967	0.923	0.887	1.15	0.429	0.947	2.56
変動係数(%)	1.64	3.98	0.753	18.6	3.73	4.20	4.16	4.04	6.71	2.04	4.03	14.4



写真 8.10-a), b) 破壊形態 (5層・異等級・弱軸・縦使い)

表 8.11 めり込み試験の結果 (7層・同一等級・強軸・平使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{ff}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
14f1-1	412	3.38	11.4	5.75	7.06	7.78	8.22	8.66	4.00	9.47	6.93	3.92
14f2-1	409	2.98	11.7	5.85	7.20	7.84	8.32	8.74	4.00	9.64	7.15	3.70
14f3-1	399	3.43	11.2	4.69	5.34	5.85	6.23	6.62	3.19	7.40	5.19	3.52
試験体数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
平均値	407	3.27	11.5	5.43	6.54	7.16	7.59	8.01	3.73	8.83	6.42	3.71
最小値	399	2.98	11.2	4.69	5.34	5.85	6.23	6.62	3.19	7.40	5.19	3.52
最大値	412	3.43	11.7	5.85	7.20	7.84	8.32	8.74	4.00	9.64	7.15	3.92
標準偏差	5.63	0.201	0.222	0.527	0.846	0.922	0.964	0.984	0.383	1.02	0.875	0.167
変動係数(%)	1.38	6.16	1.94	9.70	12.9	12.9	12.7	12.3	10.3	11.5	13.6	4.50



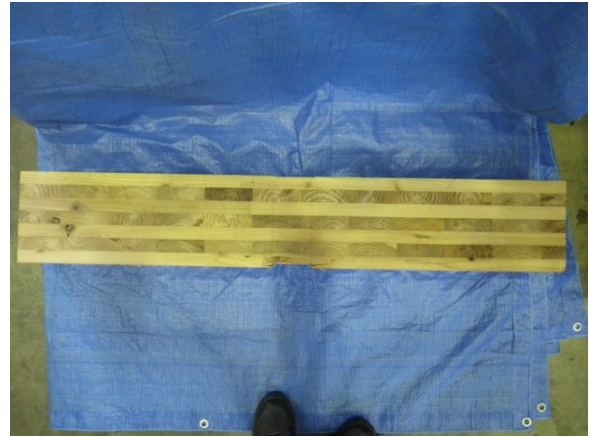


写真 8.11-a), b) 破壊形態 (7層・同一等級・強軸・平使い)

表 8.12 めり込み試験の結果 (7層・同一等級・強軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
14f1-2	413	3.32	11.3	17.3	18.9	18.9	18.9	18.9	12.2	19.5	18.9	18.9
14f2-2	391	2.95	11.4	14.3	17.6	17.5	16.9	16.6	9.80	17.4	17.6	14.9
14f3-2	399	3.14	11.4	16.1	18.7	18.7	18.7	18.6	11.1	18.6	18.8	16.4
試験体数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
平均値	401	3.14	11	15.9	18.4	18.4	18.2	18.0	11.0	18.5	18.4	16.7
最小値	391	2.95	11.3	14.3	17.6	17.5	16.9	16.6	9.80	17.4	17.6	14.9
最大値	413	3.32	11.4	17.3	18.9	18.9	18.9	18.9	12.2	19.5	18.9	18.9
標準偏差	8.90	0.153	0.0471	1.20	0.573	0.654	0.875	1.05	0.987	0.872	0.57	1.64
変動係数(%)	2.22	4.88	0.415	7.55	3.12	3.56	4.82	5.82	8.95	4.71	3.10	9.79



写真 8.12-a), b) 破壊形態 (7層・同一等級・強軸・縦使い)

表 8.13 めり込み試験の結果 (7層・同一等級・弱軸・平使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,y}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
14g1-1	394	2.42	12.1	4.73	5.86	6.18	6.35	6.48	3.51	7.26	5.86	2.89
14g2-1	386	2.34	11.5	5.21	6.24	6.54	6.85	7.07	3.68	7.72	6.18	3.53
14g3-1	389	2.33	11.5	3.81	4.26	4.66	5.12	5.49	2.73	6.40	4.13	2.87
試験体数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
平均値	390	2.37	11.7	4.59	5.45	5.79	6.10	6.35	3.31	7.13	5.39	3.10
最小値	386	2.33	11.5	3.81	4.26	4.66	5.12	5.49	2.73	6.40	4.13	2.87
最大値	394	2.42	12.1	5.21	6.24	6.54	6.85	7.07	3.68	7.72	6.18	3.53
標準偏差	3.11	0.0400	0.297	0.583	0.860	0.816	0.728	0.653	0.410	0.546	0.896	0.303
変動係数(%)	0.799	1.69	2.54	12.7	15.8	14.1	11.9	10.3	12.4	7.66	16.6	9.77

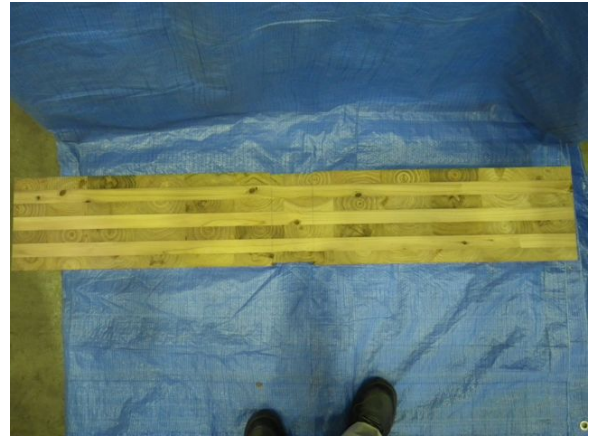


写真 8.13-a), b) 破壊形態 (7層・同一等級・弱軸・平使い)

表 8.14 めり込み試験の結果 (7層・同一等級・弱軸・縦使い)

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	$\sigma_{1\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{2\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{4\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{5\%}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{c,90,g}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{c,90}$ (N/mm <sup>3</sup> )
14g1-2	410	2.43	11.2	16.1	20.4	20.1	19.9	19.7	12.3	20.5	20.5	15.0
14g2-2	399	2.44	11.4	15.2	21.1	21.6	21.4	21.2	12.1	20.7	21.6	13.6
14g3-2	391	2.35	11.7	18.4	21.3	21.1	20.5	20.1	14.7	19.8	21.2	17.0
試験体数	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
平均値	400	2.41	11.4	16.5	21.0	20.9	20.6	20.3	13.0	20.4	21.1	15.2
最小値	391	2.35	11.2	15.2	20.4	20.1	19.9	19.7	12.1	19.8	20.5	13.6
最大値	410	2.44	11.7	18.4	21.3	21.6	21.4	21.2	14.7	20.7	21.6	17.0
標準偏差	7.79	0.0409	0.181	1.34	0.386	0.632	0.643	0.654	1.16	0.396	0.469	1.38
変動係数(%)	1.95	1.70	1.58	8.07	1.84	3.02	3.12	3.22	8.87	1.95	2.22	9.05



写真 8.14-a), b) 破壊形態 (7層・同一等級・弱軸・縦使い)



## 9. ラミナ曲げ

### 9.1 目的

日本においてはスギを用いた CLT 製造の試みが始まり、構造材としての利用を目的として様々な試験が行われている。スギ CLT パネルの要素であるスギラミナについては、歩留まりを考慮してヤング係数の範囲の幅を広く選別して製造することが考えられる。そこで、ヤング係数の選別範囲を4種類に分けて、それぞれのラミナ等級の面外曲げ強度性能を把握することを目的とした。

### 9.2 試験方法

スギラミナは、集成材の日本農林規格（以下 JAS 規格）で規定する構造用集成材の機械等級区分に従いヤング係数の平均値で選別した。ラミナ試験材は、ヤング係数 L60 のみ、L30~L50、L40~L60、L60~L70 に区分した。試験体の寸法は、厚さ 30mm、幅 110mm、長さ 750mm とし、中央でラミナをフィンガージョイント（以下 FJ）加工した。フィンガー長は 15mm、傾斜 1/12、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂である。

#### 9.2.1 非破壊検査方法

##### 動的試験

##### (1) 動的試験方法

縦振動法による縦振動ヤング係数を測定した。

##### (2) 動的試験評価方法

縦振動法では次の式により縦振動ヤング係数を計算した。

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \quad (5-1)$$

$E_{fr}$  : 縦振動ヤング係数

$f$  : 固有振動数

$l$  : 材長

$\rho$  : 密度

#### 9.2.2 強度試験条件

##### 静的曲げ試験

スギラミナ曲げ試験は、JAS 規格による試験方法で、スパン 630mm モーメント一定区間 210mm の3等分点4点荷重方式で行った。支点間スパンにおける中央変形量を測定した。

### 9.3 結果

#### 9.3.1 非破壊検査

非破壊検査の結果を図 9-1 に示す。5%下限値とは、75%信頼水準の 95%下側許容限界値のことを示し、正規分布をあてはめた。動的ヤング係数においては、L60 の下側及び各等級の上側が範囲から外れているようである。

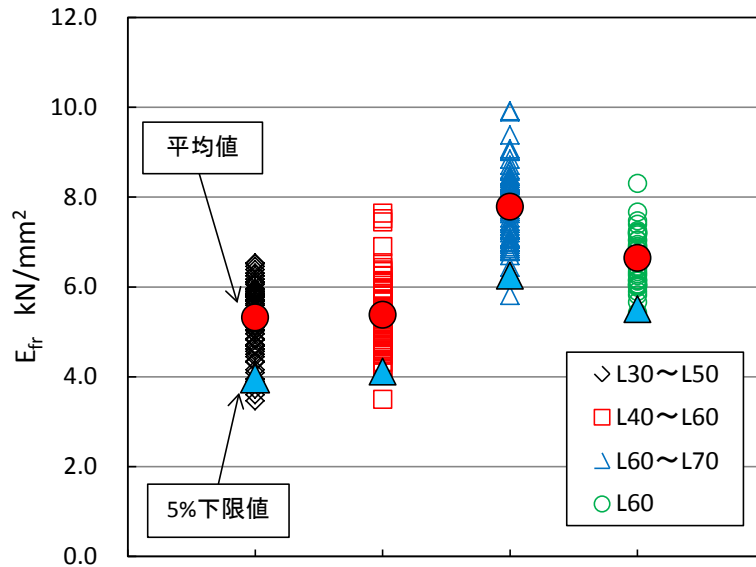


図 9-1 縦振動法による各等級のヤング係数

### 9.3.2 強度試験

#### 静的曲げ試験

縦振動法におけるヤング係数と静的曲げ試験における曲げヤング係数との関係を図 9-2 に示す。L40~L60 及び L60 では動的ヤング係数が 10%程度高めに出るようである。しかし、L30~L50 及び L60~L70 については固有振動数の選択が難しかった。

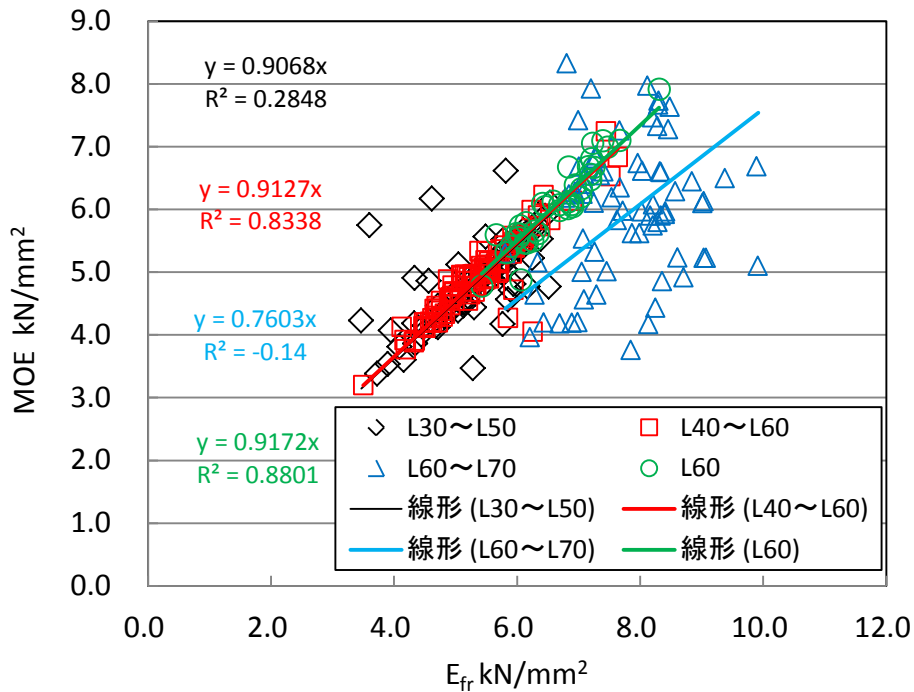


図 9-2 縦振動法ヤング係数と曲げヤング係数との関係

表 9-1 ラミナ曲げ試験結果

試験体	種別	$\rho_{\text{test}}$ kg/m <sup>3</sup>	$\delta_{\text{max}}$ mm	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ kN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{bp}/\sigma_b$ %	$\delta_p$ mm	W/b kNm/mm	$E_{fr}$ kN/mm <sup>2</sup>	MC %
L30~L50 FJ破壊 n = 69 節破壊 n = 1	MIN	327	11.1	17.9	3.38	51.1	11.3	0.140	3.47	9.9
	AV	401	22.3	33.2	4.86	80.1	15.6	0.595	5.32	11.9
	MAX	506	43.3	45.7	6.61	100.0	20.1	1.426	6.53	15.2
	SD	33.4	6.76	5.46	0.68	14.7	1.62	0.285	0.77	1.28
	CV (%)	8.3	30.3	16.4	14.0	18.3	10.4	47.9	14.4	10.8
	TL <sub>75%,1-5%</sub>				24.2	3.73				
L40~L60 FJ破壊 n = 95 節破壊 n = 2	MIN	340	13.0	22.6	3.20	39.8	6.6	0.221	3.50	9.0
	AV	407	21.2	33.1	4.92	83.7	16.2	0.551	5.38	11.1
	MAX	495	33.6	47.1	7.24	99.9	21.8	1.248	7.64	13.6
	SD	33.5	4.64	5.18	0.65	12.1	2.10	0.213	0.72	1.07
	CV (%)	8.2	21.8	15.7	13.2	14.5	12.9	38.6	13.3	9.6
	TL <sub>75%,1-5%</sub>				24.8	3.88				
L60~L70 FJ破壊 n = 69 節破壊 n = 1	MIN	348	11.3	22.4	3.76	62.6	10.8	0.220	5.81	10.4
	AV	416	18.4	35.5	5.97	89.0	15.4	0.501	7.79	11.6
	MAX	520	34.3	54.4	8.33	100.0	21.4	1.157	9.92	14.0
	SD	42.1	4.66	6.03	1.07	10.4	2.03	0.211	0.86	0.84
	CV (%)	10.1	25.3	17.0	18.0	11.7	13.2	42.1	11.1	7.2
	TL <sub>75%,1-5%</sub>				25.8	4.21				
L60 FJ破壊 n = 38	MIN	327	10.4	23.5	4.78	62.1	9.6	0.175	5.42	10.3
	AV	392	15.7	32.0	6.09	90.9	13.7	0.384	6.65	11.6
	MAX	478	23.8	44.2	7.91	99.8	18.4	0.800	8.31	14.2
	SD	33.0	3.26	5.51	0.66	10.0	1.93	0.154	0.62	0.87
	CV (%)	8.4	20.8	17.2	10.9	11.0	14.1	40.2	9.4	7.5
	TL <sub>75%,1-5%</sub>				23.1	4.97				

※L:材長さ、b:幅、h:厚さ、 $\rho_{\text{test}}$ :試験時密度、 $\delta_{\text{max}}$ :最大荷重時たわみ量、 $\sigma_b$ :曲げ強度、 $E_m$ :見かけのヤング係数、 $E_b$ :真のヤング係数、 $\sigma_{bp}$ :比例限度強度、 $\delta_p$ :比例限度たわみ量、W:最大荷重までの仕事量(単位幅あたりに換算)、 $E_{fr}$ :縦振動法によるヤング係数、MC:全乾法による含水率 TL<sub>75%,1-5%</sub>:信頼水準75%の95%下側許容限界値(対数正規分布あてはめ)

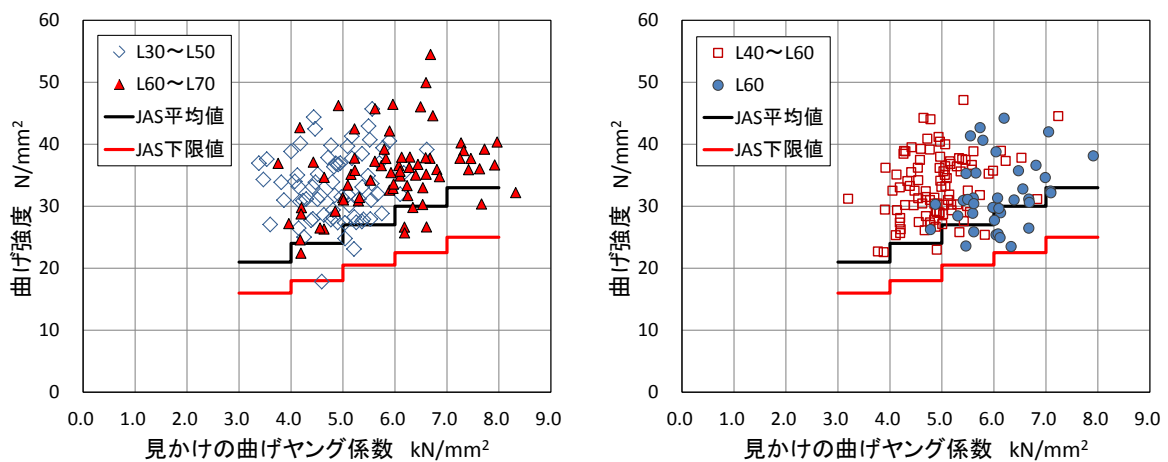


図 9-3 各強度等級の曲げ強度と曲げヤング係数の関係

また、表 9-1 に静的曲げ試験結果及び図 9-3 に曲げ強度と曲げヤング係数の関係を示す。スギラミナ曲げ試験では、破壊形態は、ほとんど FJ の破壊であった(写真 9-1 及び写真

9-2 参照)。L40～L60 と L60 の比較では、曲げ強度は、平均値、5%下限値とも L60 が低かったが、曲げヤング係数では変動係数が低いため、5%下限値で L60 の方が高い値となった。また、L60～L70 と L60 の比較でも、曲げ強度、曲げヤング係数とも同じ傾向であった。比例限度強度/曲げ強度では、L 等級が上がるほど高い値となった。



写真 9-1 L30～L40 ラミナ破壊状況例



写真 9-2 L60～L70 ラミナ破壊状況例

#### 9.4 まとめ

歩留まりを考慮してヤング係数の範囲の幅を広くして 4 等級に分けて選別した。それぞれのラミナ等級の面外曲げ強度性能について検討をした。それぞれの範囲の L 等級に対して JAS 規格によるラミナ強度の適合規準をクリアしていたが、L 等級の範囲の中に完全に収めることができなかった。また、比例限度強度/曲げ強度では、L 等級が上がるほど高い値となった。

資料 ラミナ試験データ

L30~L50 750×110×30mm

試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度荷重 kN	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kNmm	Efr kN/mm <sup>2</sup>	含水率 %	破壊形態
C1	422	5.36	23.9	33.9	4.47	3.37	21.3	13.6	68.9	5.13	14.39	FJ
C2	456	6.46	24.4	40.7	5.52	4.89	30.8	16.3	86.6	5.78	13.65	FJ+W
C3	396	6.75	33.4	42.5	4.46	3.82	24.0	15.7	126.2	4.71	11.90	FJ
C4	381	5.07	19.7	31.7	4.84	3.94	24.7	14.8	51.4	5.23	11.26	FJ+W
C5	435	6.01	43.3	37.6	3.53	3.29	20.6	16.8	153.4	3.90	12.45	FJ+K
C6	436	5.58	27.8	35.0	4.12	3.51	22.1	15.5	84.1	4.71	12.55	FJ+K
C7	427	6.36	25.3	39.7	5.09	3.86	24.1	13.6	87.4	5.67	12.47	FJ
C8	459	6.41	36.6	40.1	4.18	3.28	20.5	14.6	135.8	4.33	12.42	FJ+W
C9	413	5.79	24.7	36.4	4.83	3.77	23.7	14.3	73.1	5.36	12.55	FJ
C10	346	4.80	18.1	30.1	5.12	4.02	25.3	14.4	45.3	5.05	12.23	FJ+K
C11	386	5.80	24.2	36.7	4.91	3.61	22.9	13.4	76.2	4.33	12.58	FJ
C12	429	7.32	28.6	45.7	5.56	4.58	28.6	14.8	119.0	5.49	13.34	FJ
C13	446	7.12	37.4	44.4	4.44	3.94	24.6	15.9	156.8	5.30	12.34	FJ
C14	403	5.45	34.1	34.3	3.47	3.51	22.1	18.5	105.0	5.28	12.42	FJ+K
C15	443	5.87	27.0	36.9	4.86	3.64	22.9	13.8	89.6	4.57	13.91	FJ+W
C16	506	6.33	26.5	39.8	4.77	4.35	27.4	16.7	89.3	6.52	12.21	K
C17	349	4.91	22.0	30.9	4.23	4.14	26.1	18.0	55.4	3.47	10.94	FJ
C18	366	5.42	27.2	34.0	4.07	3.58	22.4	16.1	79.4	3.95	11.54	FJ+K
C19	385	4.90	26.5	30.7	4.17	3.81	23.9	16.4	76.1	5.76	12.02	FJ
C20	435	5.06	21.7	31.7	4.56	4.15	26.0	16.3	59.1	5.85	13.16	FJ+K
C21	404	4.44	15.8	27.9	5.53	3.86	24.3	12.8	37.2	6.39	9.87	FJ
C22	337	4.96	23.1	31.1	4.29	3.27	20.6	14.0	60.7	4.82	12.84	FJ+W
C23	376	4.51	17.1	28.1	4.81	4.22	26.3	15.8	39.1	5.94	12.27	FJ
C24	399	5.58	17.1	35.3	6.17	5.01	31.7	15.0	48.4	4.62	10.39	FJ
C25	428	6.01	24.2	37.8	4.71	4.56	28.7	17.6	75.3	5.90	10.33	FJ+W
C26	465	6.41	20.7	40.5	5.89	4.97	31.4	15.4	68.5	6.46	11.09	FJ+W
C27	427	5.54	25.5	35.1	4.51	4.11	26.1	16.8	77.1	5.10	11.85	FJ
C28	371	4.44	14.7	27.9	5.39	4.41	27.7	14.8	32.5	5.83	10.02	FJ+K
C29	366	3.66	12.5	23.1	5.21	3.64	23.0	12.8	22.8	5.80	10.24	FJ
C30	410	6.85	26.1	42.9	5.49	5.33	33.4	17.6	100.1	5.96	10.68	FJ
C31	403	5.91	42.8	36.9	3.38	3.33	20.9	17.8	148.7	3.73	12.33	FJ+W
C32	400	4.42	19.1	27.7	4.39	3.33	20.9	13.8	43.7	5.04	13.86	FJ
C33	390	5.29	26.8	33.2	4.14	3.28	20.5	14.6	76.9	4.68	15.18	FJ
C34	390	3.99	21.8	25.0	4.25	3.08	19.3	13.1	51.9	4.69	12.44	FJ+K
C35	380	4.20	19.3	26.4	4.15	3.41	21.5	14.9	42.3	4.50	13.89	FJ+W
C36	372	4.92	25.9	31.0	3.86	3.17	20.0	14.9	68.9	4.35	12.71	FJ
C37	398	6.19	32.5	38.8	4.00	3.54	22.2	16.1	110.4	4.44	12.54	FJ+K
C38	401	5.26	23.8	33.1	4.41	4.14	26.1	17.1	68.0	4.95	13.17	FJ
C39	384	5.03	19.6	31.5	4.97	3.64	22.8	13.2	51.8	5.45	13.79	FJ
C40	421	6.26	21.4	39.4	5.77	4.82	30.4	15.1	72.2	6.30	14.25	FJ+W
C41	447	5.85	22.1	36.9	4.95	5.02	31.7	18.5	66.7	5.42	11.05	FJ+W
C42	351	4.34	14.8	27.4	5.26	4.26	26.9	14.9	31.7	5.69	10.15	FJ
C43	377	5.10	15.2	31.9	6.10	4.88	30.5	14.5	39.3	6.53	10.12	FJ+W
C44	390	5.38	35.2	33.9	3.81	3.20	20.2	15.6	111.6	4.09	13.41	FJ
C45	391	4.94	20.0	31.2	5.31	4.59	29.0	16.0	55.5	5.89	13.43	FJ
C46	388	6.19	18.0	39.1	6.61	5.48	34.6	15.6	56.4	5.81	10.72	FJ
C47	387	3.94	14.3	24.8	5.04	3.89	24.5	14.3	27.7	5.81	10.42	FJ
C48	456	5.04	17.8	31.8	5.10	5.00	31.6	18.0	44.8	5.71	10.50	FJ
C49	406	4.92	20.0	31.1	4.51	4.92	31.1	20.1	49.6	5.13	11.73	FJ
C50	392	5.09	16.7	32.0	5.67	4.76	29.9	15.5	42.6	6.11	9.98	FJ
C51	396	4.29	23.1	27.0	3.60	3.25	20.5	16.5	52.0	4.16	10.19	FJ+W
C52	368	4.37	15.9	27.3	4.90	4.33	27.1	15.9	34.8	5.59	11.22	FJ
C53	460	5.54	19.6	34.9	5.48	4.72	29.7	15.7	57.2	5.96	10.67	FJ+W
C54	428	6.12	21.2	38.5	5.37	5.38	33.8	18.1	67.1	5.95	11.30	FJ
C55	391	5.88	19.2	37.0	5.70	5.83	36.6	18.6	58.2	6.30	10.62	FJ
C56	361	4.41	17.8	27.8	4.77	3.96	25.0	15.7	39.1	6.17	10.37	FJ
C57	384	4.52	18.1	28.6	4.63	4.25	26.9	16.9	41.5	4.96	11.97	FJ
C58	366	4.64	17.7	29.4	4.81	4.49	28.4	17.1	41.9	5.20	10.65	FJ
C59	327	4.59	14.8	28.8	5.75	4.23	26.6	13.4	34.8	3.60	11.30	FJ
C60	382	5.34	18.1	33.7	5.55	4.55	28.7	14.9	49.9	6.11	11.93	FJ+W
C61	402	4.92	16.1	31.0	5.54	4.89	30.8	16.1	39.6	6.05	10.93	FJ
C62	381	5.25	18.1	33.1	5.37	4.61	29.0	15.7	48.2	5.93	10.68	FJ
C63	430	6.00	22.5	37.7	5.17	4.79	30.1	17.0	70.3	5.83	10.85	FJ
C64	392	4.39	14.8	27.5	5.36	4.39	27.5	14.8	32.7	6.06	10.35	FJ
C65	380	4.34	15.5	27.3	5.04	4.32	27.2	15.6	33.8	5.81	11.53	FJ
C66	409	5.34	21.8	33.9	4.80	4.01	25.4	15.4	61.1	5.46	13.54	FJ
C67	361	2.83	11.1	17.9	4.59	2.82	17.8	11.3	15.4	5.02	11.87	FJ
C68	384	4.43	19.1	27.9	4.42	4.14	26.1	17.1	44.5	4.85	12.22	FJ
C69	424	4.51	15.6	28.2	5.22	4.49	28.2	15.6	35.2	6.24	13.15	FJ
C70	404	6.54	24.6	41.3	5.17	4.76	30.1	16.7	85.2	5.63	11.22	FJ
最小値	327	2.83	11.1	17.9	3.38	2.82	17.8	11.3	15.4	3.47	9.87	FJ破壊関連
平均値	401	5.28	22.3	33.2	4.86	4.15	26.1	15.6	65.5	5.32	11.89	試験体数
最大値	506	7.32	43.3	45.7	6.61	5.83	36.6	20.1	156.8	6.53	15.18	69
標準偏差	33	0.87	6.8	5.5	0.68	0.66	4.2	1.6	31.4	0.77	1.28	FJ破壊以外
変動係数%	8.3	16.5	30.3	16.4	14.0	16.0	16.1	10.4	47.9	14.4	10.8	1
5%下限值				23.5	3.65							
正規分布				24.2	3.73							
対数正規分布												

FJ:フィンガージョイント破壊  
W:母材部の破壊  
K:節の破壊

太字は100%フィット



## L40~L60 750×110×30mm

試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度荷重 kN	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kNmm	Efr kN/mm <sup>2</sup>	含水率 %	破壊形態
D1	368	4.42	15.0	27.6	5.42	4.24	26.4	14.2	31.9	5.80	10.41	FJ
D2	351	3.62	17.3	22.7	3.77	3.61	22.7	17.3	31.5	4.19	10.67	FJ
D3	433	5.26	19.6	33.1	4.99	4.61	29.0	16.8	52.7	5.68	12.04	FJ
D4	368	4.59	15.3	29.1	5.54	4.51	28.6	14.9	35.5	6.12	12.88	FJ
D5	348	4.22	17.8	26.7	4.88	1.68	10.6	6.6	38.4	4.88	13.06	FJ
D6	432	4.82	19.1	30.2	5.18	4.59	28.8	16.1	51.4	5.67	10.83	FJ+K
D7	426	5.48	22.3	34.2	4.54	4.68	29.2	18.4	63.6	4.99	10.66	FJ
D8	371	4.84	17.6	30.3	5.30	3.96	24.8	13.5	45.1	5.91	10.91	FJ
D9	384	5.54	27.8	35.1	4.13	3.76	23.8	16.7	83.2	4.13	10.89	FJ+W
D10	410	5.16	21.8	32.5	4.48	4.26	26.8	17.3	58.3	4.92	10.74	FJ
D11	442	6.22	27.6	38.9	4.27	4.80	30.0	20.2	90.0	5.85	9.90	FJ+W
D12	372	4.59	18.9	29.0	4.90	3.98	25.2	14.8	47.2	5.54	11.62	K
D13	351	4.43	20.0	28.1	4.20	3.56	22.6	15.5	45.8	4.71	10.88	FJ+W
D14	464	7.43	30.0	47.1	5.42	4.06	25.8	13.8	124.0	5.94	10.82	FJ
D15	421	4.62	16.2	29.3	5.18	4.59	29.1	16.3	37.5	5.49	11.51	FJ+W
D16	370	4.41	16.6	27.8	4.85	4.38	27.6	16.4	36.9	5.16	10.28	FJ+W
D17	410	5.15	17.2	32.5	5.50	4.96	31.3	16.4	44.8	6.08	10.95	FJ
D18	397	5.46	20.0	34.5	5.10	4.75	30.0	17.1	55.8	5.42	11.17	FJ
D19	430	5.96	25.0	37.5	4.58	4.73	29.7	18.6	78.7	4.90	11.94	FJ
D20	419	4.58	18.9	28.7	5.02	4.03	25.2	14.6	48.3	5.70	11.21	FJ+K
D21	481	7.02	30.2	44.2	4.65	4.80	30.2	18.8	112.9	5.24	11.68	FJ
D22	428	5.90	19.0	37.3	6.23	4.83	30.5	14.4	59.0	6.43	12.44	FJ
D23	495	7.05	18.3	44.5	7.24	6.24	39.4	15.9	65.4	7.45	11.27	FJ
D24	456	5.97	17.5	37.8	6.53	5.60	35.5	15.8	54.2	7.52	12.14	FJ
D25	431	6.20	30.1	39.1	4.77	3.69	23.3	14.3	106.9	5.32	13.24	FJ+W
D26	427	6.96	30.0	44.0	4.78	4.50	28.4	17.3	113.1	4.95	11.05	FJ
D27	415	6.49	28.9	40.9	4.72	4.60	29.0	17.8	104.0	5.94	10.43	FJ+W
D28	459	6.15	21.3	38.9	5.61	4.89	30.9	16.0	69.0	6.10	12.81	FJ+K
D29	429	5.59	18.0	35.2	5.90	5.35	33.7	16.4	53.2	6.34	11.38	FJ
D30	425	4.95	13.0	31.1	6.83	4.92	30.9	13.1	32.1	7.64	9.69	FJ+W
D31	462	6.07	26.4	38.0	4.97	5.93	37.0	21.5	88.6	5.31	9.89	FJ+K
D32	381	4.29	15.4	27.1	5.01	4.24	26.8	15.5	33.0	5.55	10.23	FJ
D33	418	5.16	20.6	32.4	4.69	4.25	26.7	16.4	54.9	5.31	10.67	FJ
D34	403	5.95	23.0	37.7	5.33	4.13	26.2	14.3	75.1	5.50	12.05	FJ
D35	380	5.63	22.2	35.6	5.03	3.62	22.9	13.2	65.8	5.41	11.10	FJ+W
D36	370	4.09	14.0	25.8	5.34	4.07	25.7	14.0	28.5	5.39	10.49	FJ+W
D37	441	4.76	21.5	30.2	4.29	4.19	26.6	17.9	54.1	4.79	10.93	FJ+W
D38	391	4.92	22.0	31.0	4.77	3.82	24.1	14.7	60.6	5.34	11.68	FJ
D39	464	6.28	26.9	39.5	4.42	5.30	33.3	21.8	87.4	4.71	10.96	FJ+K
D40	421	4.30	15.9	27.0	4.78	4.23	26.6	16.0	34.3	5.31	9.02	FJ+K
D41	453	5.76	22.9	36.2	4.96	4.23	26.6	15.4	70.4	5.15	9.60	FJ+K
D42	363	4.61	17.2	29.0	4.95	4.46	28.0	16.4	40.3	5.18	9.81	FJ
D43	372	5.70	19.5	35.9	5.58	4.94	31.1	16.3	57.0	5.93	9.88	FJ
D44	417	4.97	30.0	31.2	3.20	3.60	22.6	20.4	78.4	3.50	9.58	FJ
D45	367	5.29	19.8	33.3	5.07	4.13	26.0	14.9	53.8	5.56	11.31	FJ
D46	382	4.18	18.2	26.3	4.21	4.12	25.9	17.9	38.3	4.59	10.12	FJ
D47	340	4.36	19.6	27.4	4.19	3.81	23.9	16.7	43.2	4.52	9.84	FJ
D48	390	4.81	16.0	30.0	5.48	4.62	28.8	15.3	38.5	5.96	10.12	FJ
D49	402	5.89	22.8	37.3	5.16	4.61	29.1	16.5	71.2	5.67	10.91	FJ
D50	361	5.45	20.6	34.1	4.97	4.66	29.1	17.1	57.3	5.48	10.21	FJ
D51	372	4.94	18.1	31.0	5.12	4.20	26.4	15.1	45.5	5.50	10.31	FJ
D52	406	4.76	20.5	30.1	4.46	3.93	24.9	16.3	50.5	4.69	10.46	FJ
D53	457	6.51	28.8	41.2	4.94	4.06	25.7	15.1	105.2	5.12	10.75	FJ+W
D54	399	4.94	21.2	31.3	4.54	4.59	29.1	18.8	54.6	5.20	10.22	FJ+W
D55	399	4.83	18.6	30.4	4.92	4.00	25.2	15.1	45.4	5.22	12.36	FJ+W
D56	444	5.43	26.7	34.1	4.34	4.17	26.1	17.5	81.3	4.83	11.48	FJ
D57	383	4.34	17.8	27.4	4.77	3.99	25.1	15.3	41.5	5.34	10.95	FJ+W
D58	445	6.16	29.1	38.9	4.30	4.14	26.1	17.6	96.1	4.68	12.47	FJ+W
D59	422	5.16	25.4	32.5	4.05	3.71	23.4	16.8	69.6	6.25	13.45	FJ+K
D60	382	4.14	16.1	26.1	4.67	4.13	26.0	16.2	33.4	4.98	11.31	FJ
D61	397	5.82	19.3	36.6	5.58	5.58	35.1	18.4	56.8	6.12	9.65	FJ
D62	430	6.00	20.4	37.5	5.46	5.49	34.3	18.1	63.7	5.96	10.74	FJ
D63	409	6.17	19.5	38.9	6.14	4.90	30.9	14.6	63.4	6.90	12.59	FJ+W
D64	423	5.97	33.6	37.6	5.39	3.58	22.5	12.0	137.3	5.96	13.48	FJ
D65	343	3.66	13.5	23.0	4.90	3.63	22.8	13.7	24.3	5.54	10.54	FJ
D66	355	4.51	17.6	28.4	4.69	4.50	28.3	17.6	39.6	4.98	9.96	FJ
D67	382	5.09	19.6	31.9	5.14	4.47	28.0	15.8	48.8	5.71	11.26	FJ
D68	440	6.35	25.1	40.0	5.06	5.02	31.6	18.1	86.2	5.46	9.68	FJ
D69	452	5.61	20.7	35.0	5.06	4.92	30.7	17.6	60.0	5.52	9.84	FJ
D70	455	5.67	26.5	35.5	4.41	3.84	24.0	15.7	83.2	4.66	12.20	FJ
D71	397	4.01	24.8	25.3	4.11	3.54	22.3	15.8	61.4	4.51	11.31	FJ+K
D72	365	4.37	18.9	27.4	4.55	3.76	23.6	15.0	44.3	4.90	9.99	FJ
D73	379	4.04	13.2	25.4	5.83	3.79	23.8	11.8	27.8	6.54	10.46	FJ
D74	409	5.68	17.5	35.7	5.98	5.23	32.9	16.0	50.3	6.24	10.13	FJ+W
D75	363	4.67	21.4	29.4	4.14	3.83	24.1	16.7	52.2	4.48	11.72	FJ

L40~L60 750×110×30mm

試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度荷重 kN	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kNmm	Efr kN/mm <sup>2</sup>	含水率 %	破壊形態
D76	402	4.05	18.1	25.7	4.20	3.81	24.1	16.7	37.4	4.49	11.14	FJ
D77	440	5.70	25.0	36.2	4.54	4.31	27.3	17.4	76.3	4.77	12.33	FJ+K
D78	407	4.81	19.7	30.4	4.62	3.85	24.4	15.3	48.7	4.95	11.84	FJ+W
D79	439	6.25	25.7	39.3	4.59	5.01	31.5	19.7	83.9	4.92	9.74	FJ
D80	357	4.63	17.3	28.9	4.95	4.16	26.0	15.2	41.0	5.10	9.67	FJ
D84	392	4.67	18.1	29.2	4.88	4.37	27.3	16.2	44.4	5.49	9.77	FJ
D85	393	5.30	23.0	33.3	4.38	4.52	28.4	18.7	63.8	4.77	9.67	FJ
D86	394	4.72	23.6	29.4	3.91	3.54	22.0	16.3	59.5	4.34	9.70	K
D87	433	6.14	31.8	38.5	4.26	4.47	28.0	19.0	111.2	4.62	10.88	FJ+K
D88	397	4.88	18.7	30.4	4.86	4.23	26.4	15.7	47.0	5.31	10.64	FJ+W
D89	428	5.79	22.5	36.5	5.07	4.40	27.7	15.8	69.0	5.48	12.05	FJ+K
D90	430	6.42	25.2	40.4	4.96	4.77	30.0	17.6	84.9	5.27	11.44	FJ+K
D91	371	4.82	18.5	30.2	5.04	4.53	28.4	17.3	43.0	5.57	11.78	FJ
D92	395	3.60	16.7	22.6	3.88	3.57	22.4	16.7	30.1	4.32	11.16	FJ+W
D93	387	5.73	30.2	36.2	3.92	3.55	22.5	16.7	93.6	4.17	11.62	FJ
D94	421	5.29	25.5	33.0	4.19	4.08	25.5	17.6	73.1	4.62	11.54	FJ+W
D95	402	5.91	21.7	36.8	5.17	5.03	31.3	17.5	67.5	5.55	11.03	FJ+K
D96	453	5.80	23.0	36.4	5.29	5.35	33.6	18.4	75.4	5.81	12.50	FJ
D97	411	5.00	19.0	31.4	4.86	4.63	29.0	17.4	47.9	5.28	10.95	FJ+K
D98	418	5.66	20.6	35.6	5.36	4.20	26.4	14.5	60.2	5.73	13.21	FJ+K
D99	421	4.98	21.6	31.5	4.69	3.29	20.8	12.9	58.3	5.10	13.63	FJ+K
D100	397	5.05	16.4	31.8	5.73	4.55	28.6	14.5	42.2	6.38	13.39	FJ
最小値	340	3.60	13.0	22.6	3.20	1.68	10.6	6.6	24.3	3.50	9.02	FJ破壊関連
平均値	407	5.25	21.2	33.1	4.92	4.34	27.3	16.2	60.6	5.38	11.08	試験体数
最大値	495	7.43	33.6	47.1	7.24	6.24	39.4	21.8	137.3	7.64	13.63	95
標準偏差	34	0.82	4.6	5.2	0.65	0.64	4.0	2.1	23.4	0.72	1.07	FJ破壊以外
変動係数%	8.2	15.6	21.8	15.7	13.2	14.6	14.6	12.9	38.6	13.3	9.6	2

5%下限値 正規分布 24.0 3.78  
対数正規分布 24.8 3.88 太字は100%フィット

FJ: フィンガージョイント破壊  
W: 母材部の破壊  
K: 節の破壊

L60~L70 750×110×30mm

試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度荷重 kN	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kNmm	Efr kN/mm <sup>2</sup>	含水率 %	破壊形態
B1	378	4.70	21.3	29.7	4.20	3.88	24.5	17.0	51.4	6.99	14.03	FJ
B2	381	5.55	15.6	35.1	6.60	5.39	34.1	15.1	43.6	7.41	12.94	FJ
B3	403	5.67	16.0	35.9	6.81	4.90	31.0	13.5	45.8	7.28	12.62	FJ
B4	357	4.56	20.2	28.7	4.20	4.06	25.6	17.7	47.2	6.44	10.90	FJ
B5	372	4.32	20.3	27.2	3.96	3.78	23.8	17.5	44.5	6.21	11.38	FJ
B6	430	5.86	28.3	37.1	4.43	4.25	26.9	17.6	93.4	8.25	10.90	FJ+W
B7	435	5.83	19.2	36.5	5.74	5.68	35.5	18.0	58.1	8.21	10.76	FJ
B8	465	7.31	22.0	46.0	6.50	5.58	35.1	15.7	84.4	9.38	12.53	FJ+W
B9	480	5.72	13.5	36.0	7.63	5.65	35.6	13.6	38.4	8.49	12.36	FJ
B10	438	6.39	16.5	40.2	7.28	6.20	39.0	15.9	52.5	8.46	11.69	FJ
B11	414	6.01	15.0	37.7	7.46	5.68	35.6	14.1	45.0	8.20	11.56	FJ
B12	433	6.25	14.8	39.2	7.73	6.22	39.0	14.7	46.4	8.30	11.70	FJ
B13	460	6.15	15.8	38.9	7.33	5.96	37.7	15.2	48.7	8.28	12.34	FJ
B14	430	6.75	34.3	42.6	4.17	4.23	26.7	18.7	127.3	8.14	10.78	FJ+K
B15	361	3.57	16.8	22.4	4.19	3.39	21.2	14.7	32.1	6.89	10.95	FJ
B16	414	5.95	19.2	37.2	5.62	4.82	30.2	14.8	61.3	7.87	11.38	FJ
B17	385	5.54	16.9	34.8	6.11	5.27	33.1	15.9	46.8	7.25	11.43	FJ
B18	458	5.81	17.5	36.5	6.08	5.45	34.3	16.3	51.5	8.21	10.98	FJ
B19	377	5.76	17.6	36.2	6.28	3.72	23.4	10.8	52.5	6.94	10.82	FJ+K
B20	372	4.22	12.7	26.6	6.19	4.06	25.6	12.1	27.1	6.79	11.52	FJ
B21	461	4.63	18.3	29.2	4.86	3.99	25.2	15.1	44.2	8.36	12.36	FJ
B22	496	5.82	16.9	36.7	6.45	4.97	31.4	14.2	50.3	8.84	11.05	FJ+K
B23	418	5.83	33.1	36.9	3.76	4.01	25.4	19.6	107.1	7.85	12.07	FJ+K
B24	348	4.87	16.9	30.8	5.30	4.86	30.8	16.9	41.3	5.81	10.67	FJ+K
B25	354	3.88	17.0	24.5	4.18	3.86	24.4	17.0	32.8	6.69	10.78	FJ+W
B26	459	7.93	22.9	49.9	6.60	6.23	39.2	17.2	94.2	8.33	11.25	FJ
B27	464	5.63	17.6	35.6	6.10	4.98	31.5	15.0	51.5	9.02	11.63	FJ
B28	443	5.60	17.6	35.4	5.93	5.05	31.9	15.5	50.9	8.41	11.55	FJ
B29	353	4.19	16.2	26.3	4.64	4.14	26.0	16.3	33.5	6.29	10.46	FJ
B30	355	5.58	20.3	35.1	5.16	4.72	29.7	16.5	59.3	6.34	10.66	FJ
B31	374	4.80	13.4	30.2	6.54	4.79	30.2	13.4	32.1	7.11	11.51	FJ
B32	421	5.28	14.4	32.9	6.54	5.26	32.8	14.4	38.2	7.35	11.84	FJ
B33	399	5.33	15.4	33.3	6.24	5.32	33.2	15.4	41.3	6.85	12.88	FJ
B34	412	5.98	14.8	37.7	7.26	5.91	37.3	14.9	44.4	7.67	11.50	FJ
B35	434	5.99	19.0	37.9	6.29	5.47	34.7	15.9	61.4	8.58	11.68	FJ
B36	439	5.18	16.8	32.6	5.90	5.07	31.9	15.6	45.9	8.34	10.83	FJ
B37	482	5.65	20.5	35.8	5.23	3.64	23.0	12.9	58.9	8.61	10.99	FJ+K
B38	396	4.06	12.0	25.7	6.19	4.04	25.5	12.1	24.2	7.54	11.06	FJ
B39	439	7.40	23.4	46.4	5.96	5.91	37.0	17.9	90.5	8.03	10.39	FJ
B40	452	5.21	17.7	32.8	5.97	4.99	31.5	15.2	50.1	8.41	10.55	FJ
B41	494	5.96	21.3	37.7	5.23	5.37	34.0	18.8	65.5	9.04	12.52	K
B42	377	5.45	18.2	34.2	5.53	5.00	31.3	16.4	50.4	7.07	11.47	FJ
B43	395	5.97	16.5	37.7	6.68	5.44	34.4	14.9	50.0	7.01	11.34	FJ
B44	369	5.07	11.3	32.2	8.33	5.07	32.2	11.3	28.1	6.81	10.59	FJ
B45	414	4.79	11.3	30.3	7.67	4.70	29.7	11.4	26.6	8.30	10.93	FJ
B46	380	5.78	13.5	36.6	7.92	5.72	36.3	13.3	39.3	7.21	10.98	FJ
B47	385	5.52	14.8	34.7	6.86	5.18	32.6	13.8	41.3	7.28	10.82	FJ
B48	387	5.66	14.0	35.9	7.42	5.64	35.7	14.0	39.8	7.00	12.08	FJ
B49	408	6.38	15.0	40.3	7.97	5.76	36.4	13.3	48.5	8.12	12.22	FJ
B50	371	4.19	17.0	26.4	4.56	3.88	24.5	15.6	36.0	7.09	12.86	FJ
B51	439	6.72	21.9	42.1	5.90	5.72	35.9	17.4	78.2	8.17	12.16	FJ
B52	472	6.74	25.8	42.4	5.23	4.65	29.2	16.2	93.6	9.07	12.72	FJ+W
B53	520	8.67	26.2	54.4	6.69	6.24	39.2	17.0	122.9	9.90	13.04	FJ
B54	470	7.35	28.8	46.2	4.92	5.78	36.4	21.4	111.1	8.71	11.15	FJ+W
B55	499	5.29	18.7	33.4	5.10	5.21	32.9	18.7	49.3	9.92	10.88	FJ+W
B56	351	4.99	18.3	31.3	5.00	4.76	29.9	17.3	46.1	7.06	10.55	FJ
B57	391	4.93	20.4	31.0	5.01	3.86	24.3	13.9	54.5	7.46	11.34	FJ+K
B58	413	5.98	20.7	37.7	5.83	4.74	29.9	14.9	67.2	7.63	13.39	FJ+W
B59	387	5.06	14.4	31.7	6.25	5.03	31.5	14.5	36.8	7.07	10.76	FJ
B60	416	7.29	26.7	45.7	5.62	4.89	30.6	15.7	107.3	7.99	13.73	FJ
B61	433	7.11	20.2	44.6	6.73	5.81	36.5	15.7	75.1	7.97	11.87	FJ
B62	400	5.33	16.6	33.5	5.98	4.64	29.2	14.2	44.9	7.72	10.88	FJ+K
B63	391	4.78	13.2	29.8	6.35	4.73	29.5	13.3	31.6	7.68	11.00	FJ
B64	361	5.56	16.3	35.0	6.40	5.04	31.7	14.5	45.6	7.10	11.15	FJ
B65	480	6.03	19.4	37.8	6.13	4.89	30.7	14.5	62.9	9.04	12.54	FJ
B66	434	6.26	20.6	39.2	5.80	4.94	30.9	15.3	67.8	8.29	12.60	FJ
B67	381	5.03	18.1	31.4	5.32	4.56	28.4	15.3	49.1	7.26	12.29	FJ
B68	399	5.53	22.2	34.6	4.64	4.52	28.3	17.4	64.4	7.30	11.67	FJ
B69	420	5.97	16.4	37.8	6.59	5.90	37.3	16.4	49.5	8.34	12.26	FJ+W
B70	409	4.22	12.0	26.6	6.61	4.11	25.9	11.4	26.3	8.04	11.79	FJ
最小値	348	3.57	11.3	22.4	3.76	3.39	21.2	10.8	24.2	5.81	10.39	FJ破壊関連
平均値	416	5.63	18.4	35.5	5.97	4.96	31.2	15.4	55.1	7.79	11.61	試験体数
最大値	520	8.67	34.3	54.4	8.33	6.24	39.2	21.4	127.3	9.92	14.03	69
標準偏差	42	0.96	4.7	6.0	1.07	0.73	4.6	2.0	23.2	0.86	0.84	FJ破壊以外
変動係数%	10.1	17.1	25.3	17.0	18.0	14.7	14.7	13.2	42.1	11.1	7.2	1
5%下限値				24.7	4.05							
				25.8	4.21							
				25.3	4.10							

FJ:フィンガージョイント破壊  
W:母材部の破壊  
K:節の破壊

太字は100%フィット

L60 750×110×30mm

試験体No	密度 kg/m <sup>3</sup>	Pmax kN	Pmax変位量 mm	MOR N/mm <sup>2</sup>	MOE kN/mm <sup>2</sup>	比例限度荷重 kN	比例限度強度 N/mm <sup>2</sup>	比例限度変位 mm	仕事量 kNmm	Efr kN/mm <sup>2</sup>	含水率 %	破壊形態
A3	363	4.63	16.7	28.8	5.59	2.88	17.9	9.6	40.6	5.66	12.56	FJ
A4	339	4.20	16.4	26.2	4.78	3.56	22.2	13.4	35.7	5.42	12.60	FJ
A5	435	5.64	18.7	35.3	5.65	4.27	26.8	13.8	53.8	6.29	11.29	FJ
A6	395	4.13	12.6	25.9	5.62	4.08	25.5	12.7	25.7	6.34	11.71	FJ
A7	376	5.61	18.4	35.3	5.47	5.56	35.0	18.4	51.9	6.17	11.35	FJ
A8	393	4.90	18.3	30.3	4.88	4.57	28.2	16.7	45.4	6.06	13.84	FJ
A9	385	6.63	18.7	42.0	7.05	5.71	36.2	14.8	67.4	7.23	11.62	FJ+W
A10	374	6.01	14.3	38.1	7.91	5.62	35.6	13.1	43.9	8.31	11.02	FJ
A11	407	4.57	13.8	28.9	6.13	4.25	26.9	12.7	32.2	6.58	11.58	FJ
A12	390	5.17	13.2	32.5	7.09	5.09	32.0	13.0	34.5	7.39	12.78	FJ
A13	354	5.46	14.8	34.6	6.99	4.65	29.4	12.3	41.3	7.47	11.90	FJ
A14	478	6.73	22.0	41.3	5.55	5.70	35.0	18.1	76.3	6.02	11.71	FJ+K
A15	426	6.19	18.8	38.8	6.04	5.74	36.0	17.2	59.2	6.46	10.99	FJ
A16	443	7.05	21.8	44.2	6.20	5.25	32.9	15.2	80.9	7.04	12.23	FJ
A17	451	6.80	23.8	42.7	5.74	4.81	30.2	15.1	88.0	6.05	11.31	FJ
A18	412	5.82	15.6	36.6	6.81	5.54	34.8	14.8	46.0	7.21	11.55	FJ
A19	418	4.94	14.3	31.1	6.67	4.81	30.3	13.1	37.7	6.83	11.23	FJ
A20	327	4.97	17.0	30.9	5.41	4.22	26.3	14.0	43.7	5.90	11.14	FJ
A21	378	5.19	14.6	32.8	6.56	4.83	30.5	13.5	38.4	7.19	10.93	FJ
A22	403	5.65	16.3	35.7	6.47	5.25	33.2	14.9	46.7	7.20	11.39	FJ
A23	365	4.02	11.7	25.4	6.04	3.93	24.8	11.8	23.8	6.90	10.82	FJ
A24	375	4.76	14.3	29.8	5.98	4.75	29.7	14.3	34.3	6.69	11.37	FJ
A25	400	4.56	15.0	28.4	5.31	4.47	27.9	15.1	34.2	5.82	10.72	FJ
A26	364	4.97	16.2	31.3	5.60	4.95	31.2	16.2	40.3	6.05	10.31	FJ
A27	433	6.43	22.7	40.6	5.79	4.34	27.4	13.9	78.7	6.15	12.00	FJ
A28	394	4.97	14.8	31.0	6.39	3.90	24.3	11.3	37.5	6.95	12.75	FJ
A29	358	4.44	13.4	27.7	6.01	4.38	27.4	13.2	29.9	6.83	11.79	FJ
A30	375	5.00	15.2	31.3	6.07	4.39	27.5	13.2	38.1	6.69	11.44	FJ+K
A31	421	4.99	16.9	31.1	5.50	4.35	27.1	14.2	43.8	6.25	14.25	FJ
A32	434	4.87	16.6	30.4	5.61	4.70	29.3	15.1	43.1	6.00	12.46	FJ
A33	394	3.78	12.1	23.6	5.46	3.73	23.2	12.2	22.9	6.13	11.40	FJ
A34	412	4.68	14.5	29.6	6.10	4.43	28.0	13.4	34.8	6.42	11.48	FJ+K
A35	370	3.72	10.4	23.5	6.33	3.65	23.0	10.5	19.2	7.04	12.15	FJ
A36	380	4.05	12.1	25.5	6.08	4.01	25.3	12.2	24.1	6.89	11.68	FJ+W
A37	340	4.90	12.8	30.6	6.68	4.82	30.1	12.9	31.3	7.16	10.53	FJ+W
A38	376	4.00	11.8	24.9	6.12	3.96	24.7	11.8	23.4	6.83	10.51	FJ
A39	370	4.25	11.3	26.5	6.67	4.20	26.2	11.5	23.5	7.25	10.69	FJ
A40	382	5.12	13.1	32.1	7.10	5.11	32.1	13.2	33.4	7.67	10.29	FJ
最小値	327	3.72	10.4	23.5	4.78	2.88	17.9	9.6	19.2	5.42	10.29	FJ破壊関連
平均値	392	5.10	15.7	32.0	6.09	4.59	28.8	13.7	42.3	6.65	11.61	試験体数
最大値	478	7.05	23.8	44.2	7.91	5.74	36.2	18.4	88.0	8.31	14.25	38
標準偏差	33.0	0.875	3.26	5.51	0.662	0.673	4.26	1.93	17.0	0.623	0.874	FJ破壊以外
変動係数%	8.4	17.2	20.8	17.2	10.9	14.7	14.8	14.1	40.2	9.4	7.5	0

5%下限値 正規分布 21.8 4.87

対数正規分布 23.1 4.97

太字は100%フィット

FJ:フィンガージョイント破壊

W:母材部の破壊

K:節の破壊

## 10. ラミナ引張り

### 10.1 目的

スギを用いた CLT について、外層用として L60～L70 のスギラミナを、内層用として L30～L50 のスギラミナを使用することを想定した。CLT の縦引張り強度性能を求める際の基礎データとして用いるため、上記ラミナの縦引張り試験を行い、縦引張り強度性能を求めた。

### 10.2 試験体と試験方法

機械等級区分による等級が L60～L70 であるスギラミナ 50 本、L30～L50 であるスギラミナ 50 本を試験体とした。各試験体は、長さが約 1800mm、幅が約 105mm、厚さが約 30mm である。すべての試験体は長さ中央部にフィンガージョイント部を有している。接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤である。すべての試験体に対して、縦振動法によるヤング係数を測定した後、縦引張り試験を行った。縦引張り試験には飯田工業株式会社製の NET-40（写真 10.1）を用いた。試験体両端部 600mm を試験機のチャックでつかみ、チャック間距離を 600mm として、縦引張り試験を行った。破壊荷重を試験体の断面寸法で除し、縦引張り強度を算出した。試験後、破壊部近傍から長さが約 20mm の含水率測定用試験体を切り出し、全乾法により含水率を測定した。



写真 10.1 縦引張り試験に用いた試験機

### 10.3 結果

L60～L70 および L30～L50 の試験結果をそれぞれ表 10.1、10.2 に示す。縦振動法によるヤング係数の結果、L60～L70 の平均値は  $6.18\text{kN/mm}^2$  であり、L30～L50 の平均値  $5.36\text{kN/mm}^2$  よりも大きく、有意差が認められた ( $p$  値 $<0.0001$ )。一方、引張り強度は、L60～L70 の平均値は  $23.5\text{N/mm}^2$  であり、L30～L50 の平均値  $22.0\text{N/mm}^2$  よりも若干大きかったが、統計的には有意水準 5% で有意差は認められなかった ( $p$  値 $=0.0894$ )。順位法による信頼水準 75% の 5% 下限値は L60～L70 で  $17.1\text{N/mm}^2$ 、L30～L50 で  $13.4\text{N/mm}^2$  であり、下限値を比較すると L60～L70 の方が大きかった。



表 10.1 L60～L70 の試験結果

	試験時の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	縦引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )
試験体数	50	50	50	50
平均値	408	6.18	11.3	23.5
最小値	341	4.18	9.72	15.6
最大値	494	8.51	14.1	33.9
標準偏差	39.7	0.970	1.22	3.83
変動係数(%)	9.73	15.7	10.7	16.3

表 10.2 L30～L50 の試験結果

	試験時の密度 (kg/m <sup>3</sup> )	縦振動法によるヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	含水率 (%)	縦引張り強度 (N/mm <sup>2</sup> )
試験体数	50	50	50	50
平均値	399	5.36	11.1	22.0
最小値	338	3.75	9.10	13.4
最大値	501	6.79	13.9	29.6
標準偏差	41.5	0.676	1.09	4.53
変動係数(%)	10.4	12.6	9.77	20.6

破壊形態の出現数とその割合を表 10.3 に示す。また、写真 10.2～10.3 にそれぞれの破壊形態を示す。L60～L70 では、フィンガージョイントによる破壊が 35 体 (70%)、節による破壊が 5 体 (10%)、フィンガージョイントと節の複合による破壊が 10 体 (20%) であった。L30～L50 では、フィンガージョイントによる破壊が 35 体 (70%)、節による破壊が 13 体 (26%)、フィンガージョイントと節の複合による破壊が 2 体 (4%) であった。フィンガージョイント単独による破壊の数は両者とも等しく、節単独による破壊の数は L30～L50 の方が L60～L70 よりも多かった。フィンガージョイントと節で複合破壊した試験体をそれぞれ単独の要因で破壊した試験体に加えると、L60～L70 では、フィンガージョイントに関する破壊がのべ 45 体、節に関する破壊がのべ 15 体、L30～L50 では、フィンガージョイントに関する破壊がのべ 37 体、節に関する破壊がのべ 15 体となり、節に関する破壊は L60～L70 と L30～L50 とでは同数であるが、フィンガージョイントに関する破壊は L60～L70 の方が L30～L50 に比べて多いという違いが見られた。

表 10.3 破壊形態の出現数と割合

ラミナ等級	フィンガージョイント による破壊	節による 破壊	フィンガージョイント と節との複合破壊
L60～L70	35 体 (70%)	5 体 (10%)	10 体 (20%)
L30～L50	35 体 (70%)	13 体 (26%)	2 体 (4%)



a) フィンガージョイントによる破壊の例 (左 : L60~L70、右 : L30~L50)



b) 節による破壊の例 (左 : L60~L70、右 : L30~L50)



c) フィンガージョイントと節による複合破壊の例 (左 : L60~L70、右 : L30~L50)

写真 10. 2a)-c) L60~L70 の破壊形態の例

写真 10. 3a)-c) L30~L50 の破壊形態の例

縦振動法によるヤング係数と縦引張り強度との関係を図 10.1 (L60~L70) および図 10.2 (L30~L50) に示す。L60~L70 および L30~L50 の両者ともに相関関係が認められた。ただし、L60~L70 の決定係数  $R^2$  は 0.136 と、L30~L50 の決定係数  $R^2$  の 0.245 よりも低く、回帰直線の傾きもより小さかった。

以上の結果から、以下のことが考えられる。すなわち、すべての試験体にフィンガージョイント部が存在するため、ヤング係数の高い試験体であっても、ある程度の引張り荷重が加わると、フィンガージョイント部で破壊する。そのため、特に節による破壊が少なかった L60~L70 では縦引張り強度が頭打ちになり、L60~L70 の回帰直線は L30~L50 のそれよりも傾きが小さくなったものと考えられる。また、同じ理由により、ヤング係数の違いに関わらず、L60~L70 および L30~L50 の縦引張り強度の平均値には差が見られなかったものと考えられる。

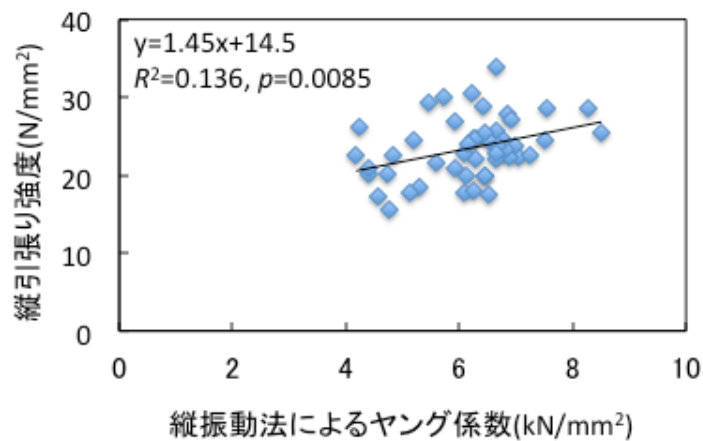


図 10.1 縦振動法によるヤング係数と縦引張り強度との関係 (L60~L70)

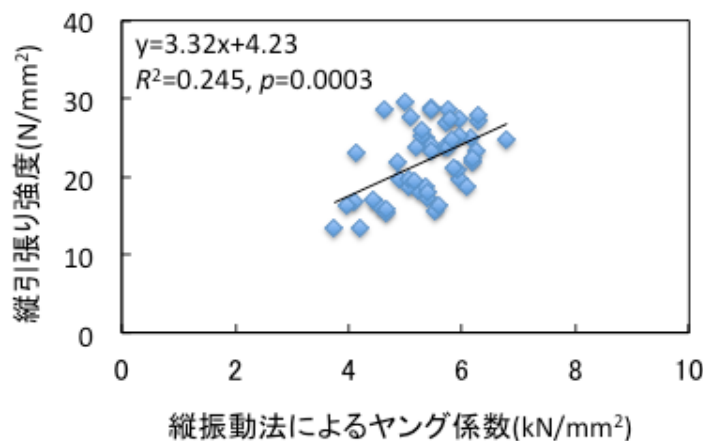


図 10.2 縦振動法によるヤング係数と縦引張り強度との関係 (L30~L50)

#### 10.4 まとめ

CLTの外層用としてL60~L70のスギラミナを、内層用としてL30~L50のスギラミナを使用することを想定し、長さ中央部にフィンガージョイント部を有する上記ラミナの縦引

張り試験を行った。その結果、縦振動法によるヤング係数の平均値を比べると、L60～L70とL30～L50の間には有意差が認められた。縦引張り強度では、下限値はL60～L70の方がL30～L50よりも大きかったが、平均値は両者の間には有意差は認められなかった。この理由として、すべての試験体にフィンガージョイント部が存在するため、ヤング係数の高い試験体であっても、ある程度の引張り荷重が加わると、フィンガージョイント部で破壊し、縦引張り強度が頭打ちになることが考えられた。

#### 10.5 資料

表 10.4 に L60～L70 の結果を、表 10.5 に L30～L50 の結果を示す。

表 10.4 L60~L70 の縦引張り試験結果

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	破壊形態
1	459	5.72	30.1	11.0	FJ+Knot
2	408	6.29	22.1	10.2	FJ+Knot
3	389	6.66	22.2	13.7	FJ
4	383	6.53	17.4	11.3	FJ
5	404	6.50	24.9	13.9	FJ+Knot
6	394	5.45	29.4	11.3	FJ
7	494	6.74	24.7	12.1	FJ
8	363	4.18	22.6	11.0	FJ
9	436	6.83	23.2	11.8	FJ+Knot
10	341	4.58	17.3	10.0	FJ
11	455	5.30	18.5	11.3	FJ
12	369	6.07	22.9	11.1	FJ
13	417	4.83	22.6	10.2	FJ+Knot
14	399	6.07	17.7	11.1	FJ+Knot
15	469	4.24	26.1	9.89	Knot
16	430	6.67	25.7	10.4	FJ
17	379	6.84	27.9	12.4	FJ
18	453	6.24	24.8	9.72	FJ+Knot
19	403	6.57	24.2	10.8	FJ
20	405	4.74	20.2	9.93	FJ
21	362	7.06	22.4	11.3	FJ
22	342	5.13	17.7	11.4	FJ
23	476	7.26	22.5	13.9	FJ+Knot
24	405	6.90	22.4	10.9	FJ
25	432	7.50	24.6	11.6	FJ
26	370	6.90	27.1	12.0	FJ
27	345	4.42	20.1	10.3	FJ
28	406	5.91	20.9	10.7	FJ
29	375	4.42	21.0	10.3	FJ
30	436	6.25	18.1	9.83	Knot
31	368	6.98	23.8	12.9	FJ
32	399	6.27	24.8	11.8	FJ
33	454	5.91	26.8	12.2	FJ
34	438	6.83	23.3	10.3	FJ
35	436	5.21	24.5	11.3	Knot
36	366	6.13	19.8	10.3	FJ
37	413	5.60	21.6	9.93	FJ+Knot
38	494	6.65	33.9	12.7	Knot
39	452	6.43	28.7	10.4	Knot
40	399	8.29	28.5	10.5	FJ
41	358	6.22	30.4	14.1	FJ
42	343	6.45	20.0	10.3	FJ
43	377	4.77	15.6	14.1	FJ+Knot
44	389	6.45	20.0	10.6	FJ
45	461	7.54	28.5	12.0	FJ
46	415	6.70	23.7	11.4	FJ
47	444	6.44	25.4	11.3	FJ
48	409	6.67	22.7	11.9	FJ
49	405	6.16	24.1	13.3	FJ
50	368	8.51	25.5	9.93	FJ
試験体数	50	50	50	50	
平均値	408	6.18	23.5	11.3	
最小値	341	4.18	15.6	9.72	
最大値	494	8.51	33.9	14.1	
標準偏差	39.7	0.970	3.83	1.22	
変動係数(%)	9.73	15.7	16.3	10.7	

表 10.5 L30~L50 の縦引張り試験結果

試験体番号	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E_{fr}$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	MC (%)	破壊形態
1	482	5.37	24.9	11.4	Knot
2	360	5.23	18.2	10.8	FJ
3	344	5.05	18.7	10.9	FJ
4	404	5.96	27.4	11.5	FJ
5	387	6.29	27.1	11.6	FJ
6	399	4.90	19.7	10.6	FJ
7	389	4.09	16.9	10.6	FJ
8	439	5.30	25.3	10.8	Knot
9	442	5.96	19.6	10.4	FJ
10	470	5.45	24.0	12.2	Knot
11	453	4.86	21.8	10.5	Knot
12	391	4.51	16.3	11.0	FJ
13	477	5.09	27.5	10.8	FJ
14	468	5.74	28.5	12.3	FJ
15	338	6.19	21.8	10.0	FJ
16	368	5.00	29.6	10.5	Knot
17	404	5.69	23.7	13.8	FJ
18	378	6.79	24.8	10.6	FJ
19	355	5.92	20.8	10.1	FJ
20	359	6.16	24.9	9.60	FJ
21	351	5.84	21.0	10.5	FJ
22	446	5.20	23.8	10.7	FJ
23	417	5.44	23.4	10.4	FJ
24	345	5.37	18.7	10.2	FJ
25	384	5.38	17.3	10.4	Knot
26	379	5.51	15.5	10.6	FJ
27	363	6.09	18.6	11.2	FJ
28	378	4.65	15.3	10.1	Knot
29	449	5.45	28.8	12.4	FJ
30	501	5.06	19.6	12.8	Knot
31	374	6.26	23.3	9.76	FJ+Knot
32	363	5.96	25.1	9.76	FJ
33	394	4.20	13.4	12.7	Knot
34	383	4.13	23.0	11.6	FJ
35	430	5.16	19.5	12.0	Knot
36	402	6.19	22.2	10.0	FJ
37	348	5.39	17.9	10.1	FJ
38	351	3.96	16.3	12.2	Knot
39	381	4.43	16.9	12.7	FJ
40	370	4.64	15.8	11.5	Knot
41	418	5.74	23.9	11.4	FJ
42	416	5.71	26.8	9.10	FJ
43	405	6.28	27.9	10.9	FJ
44	375	3.75	13.4	13.9	FJ
45	384	5.77	27.4	12.2	FJ
46	401	5.81	24.8	10.4	FJ
47	349	5.57	16.3	9.92	FJ
48	476	5.45	28.5	11.6	FJ
49	433	4.62	28.5	11.2	Knot
50	402	5.29	25.8	13.5	FJ+Knot
試験体数	50	50	50	50	
平均値	399	5.36	22.0	11.1	
最小値	338	3.75	13.4	9.10	
最大値	501	6.79	29.6	13.9	
標準偏差	41.5	0.676	4.53	1.09	
変動係数(%)	10.4	12.6	20.6	9.77	

注； $\sigma$ ：試験時の密度、 $E_{fr}$ ：縦振動法によるヤング係数、 $\sigma_t$ ：縦引張り強度、MC：全館法による含水率、FJ：フィンガージョイントによる破壊、Knot：節による破壊、FJ+Knot：フィンガージョイントと節との複合破壊



## まとめ

本事業では、国産のスギを用いて製造した CLT について強度異方性や直交層の影響など基本的な力学的性質を明らかにするとともに、ラミナの区分法や構成などの製造条件が CLT の強度性能に与える影響についても実験的に明らかにすることを目的とした。

そこで、CLT が実際の構造物で受けることになる荷重を考慮して、面外曲げおよび層内せん断、面内曲げ、縦圧縮、めり込みの諸強度性能について強度試験を行った。また、構造設計をする際に求められる試験体寸法（CLT の幅）が強度性能及ぼす影響および長期間の荷重が変形量の増大に及ぼす影響や荷重継続時間が強度性能に与える影響に関して、CLT が面外曲げ荷重を受ける場合について試験を行った。

CLT のラミナ構成は、同一等級構成の 5 層 5 プライと 7 層 7 プライ、異等級構成の 5 層 5 プライとした。試験体製造に用いるラミナの等級区分には連続式グレーディングマシンで測定した曲げヤング係数を用いた。同一等級構成に用いるラミナは 4~7 k N/mm<sup>2</sup>、異等級構成に用いるものは強軸用に 6~8 k N/mm<sup>2</sup>、弱軸用に 3~6 k N/mm<sup>2</sup>、また、長期性能評価用試験体は同一等級構成の 5 層 5 プライとし、強度性能のバラツキを極力小さくすることを目的に 6~7 k N/mm<sup>2</sup> とした。

ラミナ寸法は 30mm（厚さ）×110mm（幅）とし、必要に応じてフィンガージョイント（フィンガー長：15.0mm、ピッチ：3.8mm、スカーフ比：1/12、先端厚さ：0.7mm、嵌合度：0.1mm、接着剤：水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤）によるたて継を行って試験体中の所定の位置に配置した。ラミナの積層接着には、水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤を用いて圧縮圧力 0.8MPa、圧縮時間 60 分で積層接着を行った。なお、ラミナの幅はぎは行わなかった。

以下に強度試験結果をまとめて示す。

### 【面外曲げ】

- ・強軸方向の曲げ強度は 16~20 N/mm<sup>2</sup>、曲げヤング係数は 3.5~4.0 kN/mm<sup>2</sup>、弱軸方向の曲げ強度は 10 N/mm<sup>2</sup>、曲げヤング係数は 1.0~1.5 kN/mm<sup>2</sup> であった。
- ・破壊は多くの場合たて継ぎ部から生じ、比例限度荷重は破壊荷重の 80~90% と高い数値を示し、塑性変形能は低いものと考えられた。
- ・測定された面外曲げ性能の変動係数は、大きくても 10% 程度の数値を示し、曲げ強度、曲げヤング係数とも全体的にばらつきは少なかった。
- ・CLT の面外曲げ性能においては、最弱部分の破壊ののち、応力再配分による荷重負担能は高くなく、曲げ試験体の幅が大きい場合において、測定される曲げ性能の平均値は若干低いがある差は見られなかった。
- ・層構成が同じ場合、同一等級構成より異等級構成の方が、また、7 層 7ply より 5 層 5ply の方が異方性は高かった。
- ・ラミナの曲げヤング係数からせん断近似法及び平行層理論を用いて推定した CLT の

面外曲げのヤング係数はいずれも良い一致を示した。一方、曲げ強度は、釘着梁理論より平行理論の方がより良い推定を行った。

#### 【面内曲げ】

- ・強軸方向の曲げ強度は 12~19 N/mm<sup>2</sup>、曲げヤング係数は 2.8~3.8 kN/mm<sup>2</sup>、弱軸方向の曲げ強度は 9~13 N/mm<sup>2</sup>、曲げヤング係数は 1.9~2.4 kN/mm<sup>2</sup>であった。
- ・ラミナのフィンガージョイントが破壊に関与する比率が高く、破壊は荷重点近傍で脆性的に生じる傾向にあった。
- ・測定された曲げ強度の変動係数は、8~13%程度であった。
- ・試験体の長さ方向に配置されたラミナの強度性能から CLT の面内曲げ性能が推定できた。また、CLT の面内曲げヤング係数は縦振動法と TGH 法により求めたヤング係数と相関が高かった。

#### 【層内せん断試験】

- ・逆対称モーメント方式（大野式）で測定されたせん断強度は 1.7~2.1 N/mm<sup>2</sup>、中央集中曲げ方式（水平せん断式）で測定されたせん断強度は 2~2.6 N/mm<sup>2</sup>であった。
- ・いずれの方式においても直交層のローリングシアによる破壊が観察された。
- ・ただし、水平せん断式ではせん断破壊後も荷重が増加するものがあり、最大荷重が必ずしもせん断破壊時の荷重と一致しない場合があることに留意しておく必要がある。
- ・同一等級構成より異等級構成の方が若干せん断強度は高い傾向にあった。

#### 【圧縮試験】

- ・5層5 プライの強軸方向の圧縮強度は 19~21 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は 3.6~4.1 kN/mm<sup>2</sup>、弱軸方向の圧縮強度は 13~15 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は 2.0~3.1 kN/mm<sup>2</sup>であった。
- ・ラミナのフィンガージョイントや節などが破壊に関与するが多かった。
- ・測定された圧縮強度の変動係数は 2~6%程度で、バラツキは極めて小さかった。
- ・ヤング係数および圧縮強度について強軸と弱軸を比較すると、試験体の断面積に占める加力方向と繊維が平行なラミナの割合に比例した。
- ・中間柱（ $\lambda=60$ ）の圧縮強度は強軸で 9 N/mm<sup>2</sup>、弱軸で 2.7 N/mm<sup>2</sup>程度であった。

#### 【めり込み】

ISO13910 に準じてめり込み強度試験を行った結果、めり込み強度性能を決定づけるパラメータは、ラミナ方向と試験体の配置であり、積層数やラミナ構成はめり込み強度性能にはあまり寄与しないことがわかった。

- ・5層5 プライの場合、積層方向に加力した（平使い）弱軸 3.7~5.4 N/mm<sup>2</sup>、強軸 4.6~8 N/mm<sup>2</sup>、積層方向に直交方向に加力した（縦使い）強軸 16~18 N/mm<sup>2</sup>、弱軸 21~25 N/mm<sup>2</sup>の順であった。

#### 【面外曲げ・強軸 クリープ DOL 試験】

・CLTの強軸方向の面外曲げクリープ変形量はCLTの変形増大係数が2.0以下である点では、木材とほぼ同等とみなしても良い。ただし、木材に比べて幾分大きくなる可能性があり、今後データを蓄積し、精査する必要がある。

#### 【面外曲げ・弱軸 クリープ DOL 試験】

・短期静的曲げ試験における曲げ強度平均値を応力レベル1として、応力レベル0.75で長期載荷試験を行った結果、破壊までの平均時間はwoodのカーブから得られる値を上回ってはいるものの、それまでに破壊する試験体の確率は大きかった。

#### 【ラミナ曲げ】

試験体製造に用いたラミナの曲げヤング係数と曲げ強度は、同一等級構成(4~7kN/mm<sup>2</sup>)が4.9 kN/mm<sup>2</sup>、33 N/mm<sup>2</sup>、異等級構成の強軸用(6~8kN/mm<sup>2</sup>)が6 kN/mm<sup>2</sup>、35.5 N/mm<sup>2</sup>、弱軸用(3~6 k N/mm<sup>2</sup>)が4.9 kN/mm<sup>2</sup>、33 N/mm<sup>2</sup>、また、長期性能評価用試験体(6~7kN/mm<sup>2</sup>)が6.1 kN/mm<sup>2</sup>、32 N/mm<sup>2</sup>、であった。また、比例限度強度/曲げ強度については、ラミナの曲げヤング係数が大きいほど高くなった。

#### 【ラミナ引張り】

ラミナの引張強度は、6~8kN/mm<sup>2</sup>が6.2 kN/mm<sup>2</sup>、23.5 N/mm<sup>2</sup>、3~6 k N/mm<sup>2</sup>が5.4 kN/mm<sup>2</sup>、22 N/mm<sup>2</sup>、であった。両者の平均値に有意差は認められなかったが、下限値は6~8kN/mm<sup>2</sup>の方が大きかった。



## 第Ⅱ編 CLTの実用化（床）の検討





## 1 音響予備試験

### 1. 1 目的

CLT を床構造とした際の階下への衝撃音遮断性能に対する床仕様および天井仕様の影響を実験室での比較試験により検討する。

同試験の結果をもとに、後続試験である試作棟に対する音響実大試験の床・天井仕様を特定する。

### 1. 2 試験方法

#### 1) 試験の概要

床衝撃音遮断性能については、以下の3種類の床衝撃音測定をJIS規格にもとづき行った。

タッピングマシンによる軽量床衝撃音レベルの測定

バングマシンによる重量床衝撃音レベルの測定

ゴムボールによる重量床衝撃音レベルの測定

本試験における実験室緒元、測定装置、測定方法、関連規格は以下の通りである。実験室の概要を図2-1に示す。

実験室 高知県立森林技術センター・壁式鉄筋コンクリート造試験装置

室容積 受音室 約60m<sup>3</sup>(3.94×4.53×高3.37m)

測定装置等  
マイクロフォン(B&K製コンデンサマイクロフォン4192)、1.2から1.8m高さ  
測定システム(B&K製PULSEシステム)  
軽量衝撃源装置(タッピングマシン、リオン製FI-1)  
重量衝撃源装置(バングマシン、リオン製FI-2)  
重量衝撃源装置(ゴムボール、リオン製YI-1)

#### 床衝撃音レベル測定

##### 軽量床衝撃音レベル

測定周波数範囲 63 から 4kHz まで、1/1 オクターブバンド

リニア、10 秒/回、測定回数 3 回

音源点数 5 点、受音点数 5 点

##### 重量床衝撃音レベル

測定周波数範囲 63 から 4k Hz まで、1/1 オクターブバンド

リニア、20 秒/回、測定回数 3 回

音源点数 5 点、受音点数 5 点

関連規格

JIS A 1440-1:2007「実験室におけるコンクリート床上の床仕上げ構造の床衝撃音レベル低減量の測定方法」

－第1部：標準軽量衝撃源による方法

JIS A 1440-2:2007「実験室におけるコンクリート床上の床仕上げ構造の床衝撃音レベル低減量の測定方法」

－第1部：標準重量衝撃源による方法

JIS A 1418-1:2000「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法」

－第1部：標準軽量衝撃源による方法

JIS A 1418-2:2000「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法」

－第2部：標準重量衝撃源による方法

JIS A 1419-2:2000「建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法」

－第2部：床衝撃音遮断性能

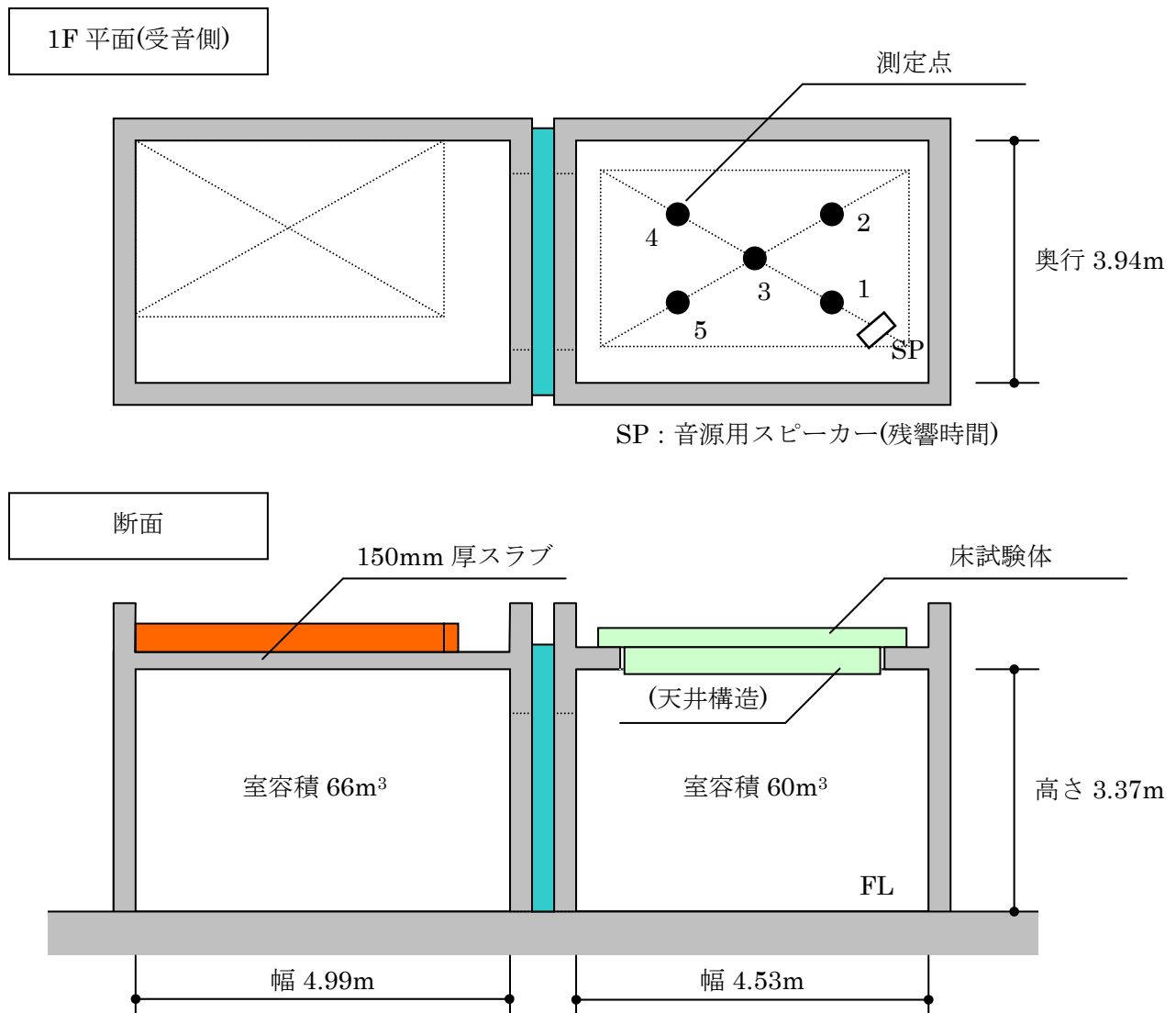


図 2-1 JIS 規定の実験室の概要 (高知県立森林技術センター)

## 2) 試験体の概要

壁式鉄筋コンクリート造試験装置の上面開口部（内寸法 2700×3600mm）上に図 2-2 の配置方法により CLT 製の床板を敷設した。

この CLT 床板の上下面に異なる仕様を施した計 7 種類の試験体（表 2-1、図 2-3）に対し床衝撃音遮断性能試験を実施した。

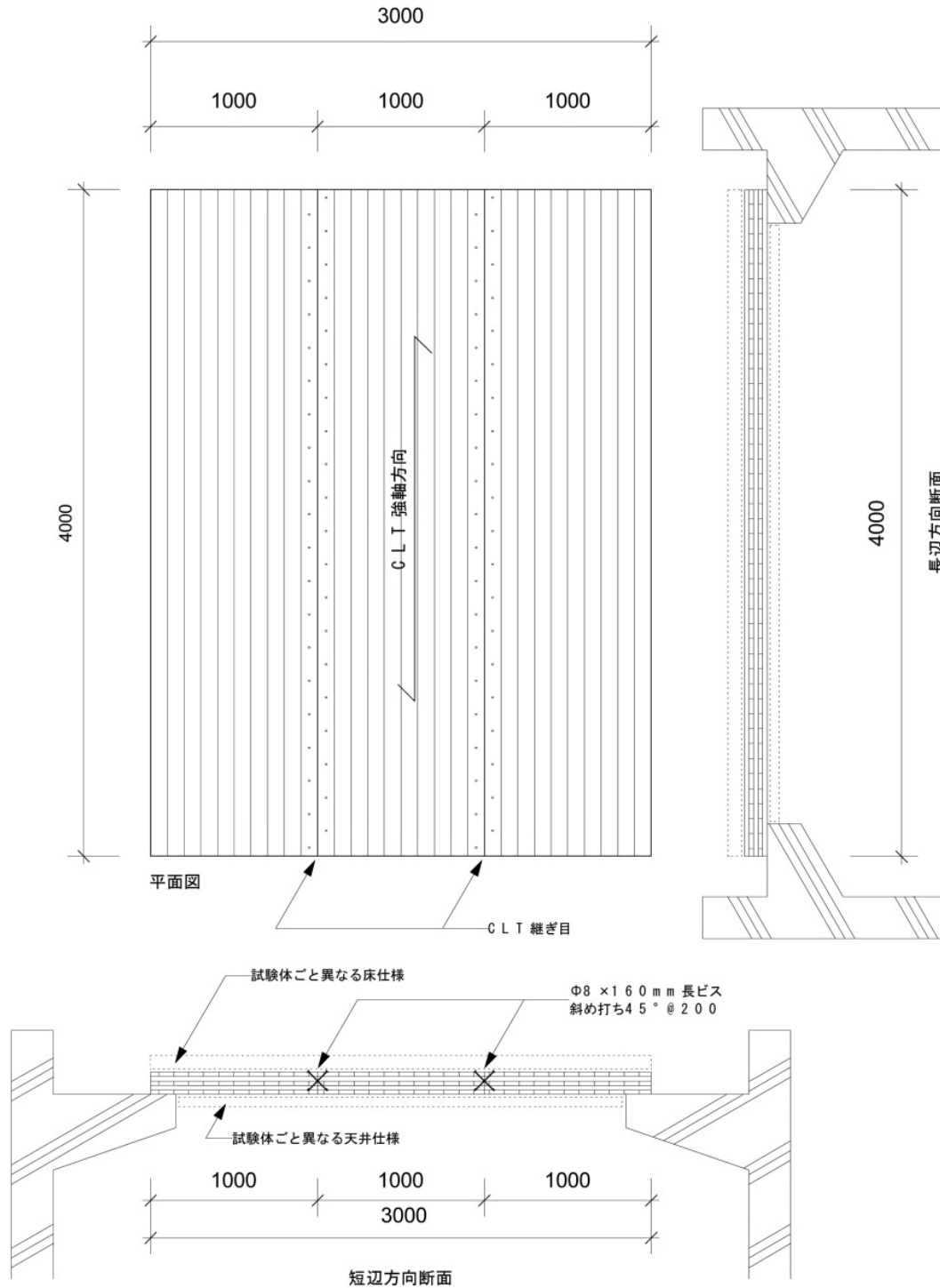


図 2-2 ISO 音響実験装置に対する CLT 床板の配置方法

表 2-1 実験室における床衝撃音遮断性能に供した試験体仕様

	施工法種別	床仕様	天井使用
試験体 1	乾式	ヒノキフローリング 15mm ガラスロンウール 64K 75mm CLT 150mm	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り
試験体 2	乾式	ヒノキフローリング 15mm ガラスロンウール 64K 75mm CLT 150mm	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 2 枚貼り
試験体 3	床上無仕上	CLT 150mm のみ	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 2 枚貼り
試験体 4	床上無仕上	CLT 150mm のみ	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り
試験体 5	乾式	ヒノキフローリング 15mm 木毛セメント板 TS ボード 25mm ガラスロンウール 64K 50mm 砂利 単粒 5-2.5 50mm CLT 150mm	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り
試験体 6	湿式	ヒノキフローリング 15mm モルタル 50mm ガラスロンウール 64K 50mm 砂利 単粒 5-2.5 50mm CLT 150mm	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 ガラスロンウール 16K 50mm 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り
試験体 7	湿式	ヒノキフローリング 15mm モルタル 50mm ガラスロンウール 64K 50mm 砂利 単粒 5-2.5 50mm CLT 150mm	防振ゴム 6mm 野縁 45 角@450 鋼製防振吊木 ガラスロンウール 16K 50mm 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り



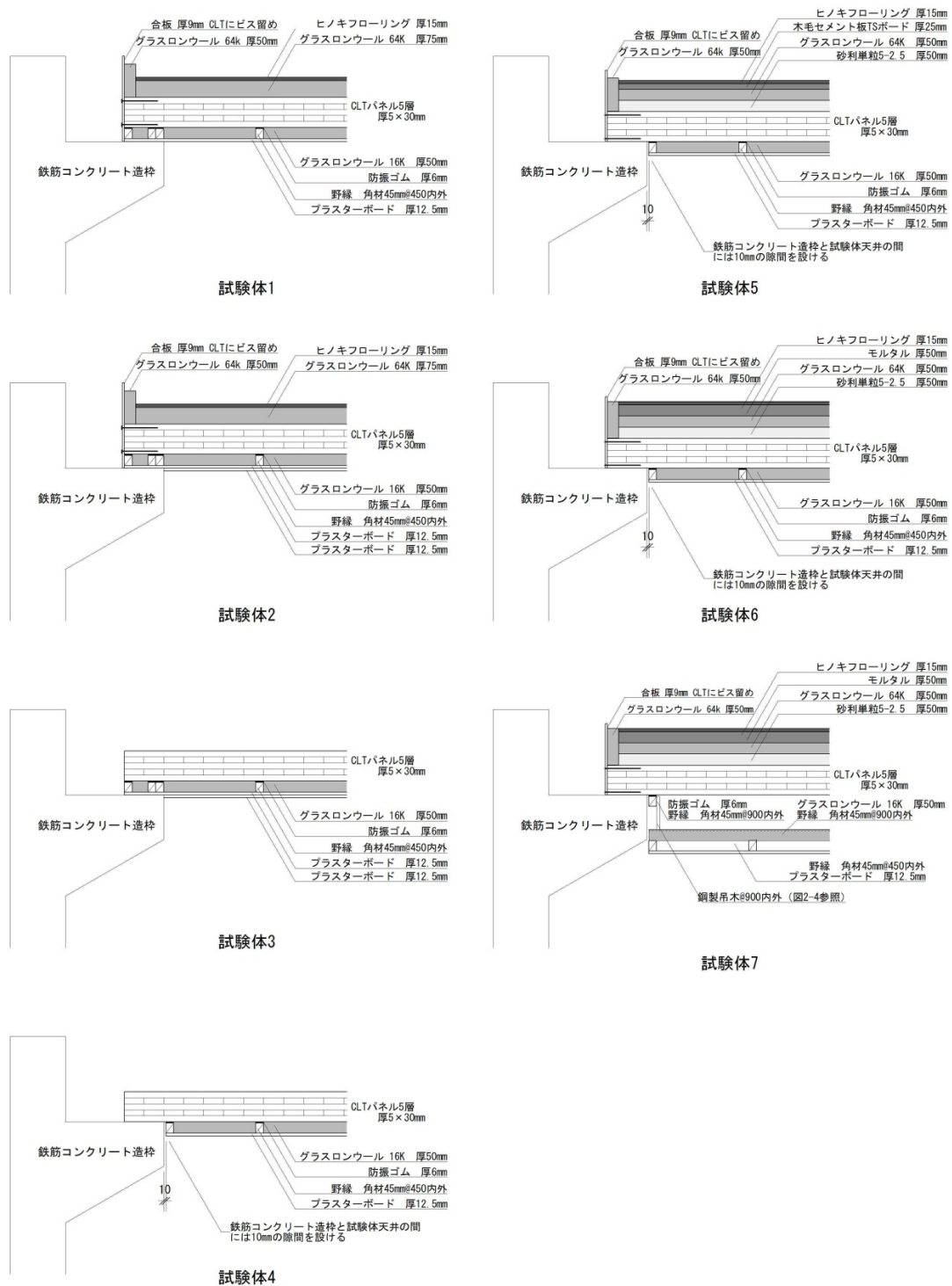


図 2-3 実験室における床衝撃音遮断性能に供した試験体の断面と設置状態

試験体 7 で用いた防振機能を備えた鋼製吊木と、それを設置した天井の施工状況を図 2-4 に示す。



図 2-4 防振機能を備えた鋼製吊木（左上）と試験体 7 の天井施工状況

### 3) 評価：建築学会の性能基準

日本建築学会が示している建築物の遮音性能基準は、表 1 と表 2 に示すとおりで、建物別、室用途別に適用等級が基準化されている。床衝撃音レベルの適用等級では、バングマシンやタッピングマシンの測定値についてすでに学会で基準化されているが、ゴムボールについてはまだ基準化されていないので、本試験では学会性能基準を参考値として示している。

表 2-2 床衝撃音レベルに関する適用等級

建築物	室用途	部位	衝撃源	適用等級			
				特級	1 級	2 級	3 級
集合住宅	居室	隣戸間界床	軽量衝撃源	L-45	L-50	L-55	L-60
			重量衝撃源	L-40	L-45	L-55	L-60
ホテル	客室	客室間界床	軽量衝撃源	L-45	L-50	L-55	L-60
			重量衝撃源	L-40	L-45	L-50	L-55
学校	普通教室	教室間界床	軽量衝撃源 重量衝撃源	L-50	L-55	L-60	L-65

注)木造、軽量鉄骨造またはこれに類する構造の集合住宅には、重量床衝撃源の 3 級に L-65 を適用する。

表 2-3 室間音圧レベル差に関する適用等級

建築物	室用途	部位	適用等級			
			特級	1 級	2 級	3 級
集合住宅	居室	隣戸間界壁 隣戸間界床	D-55	D-50	D-45	D-40
ホテル	客室	客室間界壁 客室間界床	D-55	D-50	D-45	D-40
事務所	業務上プライバシーが 要求される室	室間界壁 テナント間界壁	D-50	D-45	D-40	D-35
学校	普通教室	室間仕切壁	D-45	D-40	D-35	D-30
病院	病室(個室)	室間仕切壁	D-50	D-45	D-40	D-35

# 1. 3 試験結果

表2-4 試験体1の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タビディングマシン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	66.2
80	—	—
100	—	—
125	—	74.6
160	—	—
200	—	—
250	—	70.0
315	—	—
400	—	—
500	—	65.1
630	—	—
800	—	—
1000	—	55.7
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	40.5
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-65	

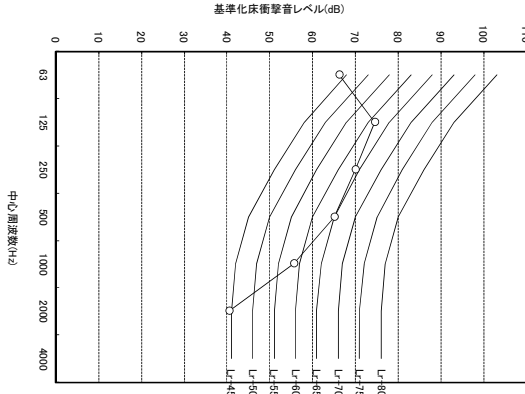


図2-5 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-5 試験体1の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンダマシン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	93.0
80	—	—
100	—	—
125	—	76.3
160	—	—
200	—	—
250	—	68.9
315	—	—
400	—	—
500	—	58.0
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-70	

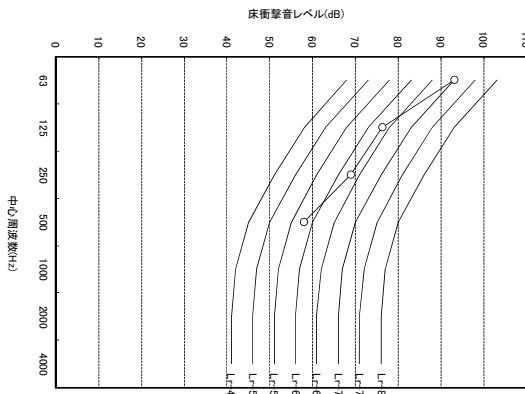


図2-6 重量床衝撃音レベル  
(バンダマシン)

表2-6 試験体1の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	89.7
80	—	—
100	—	—
125	—	74.4
160	—	—
200	—	—
250	—	61.1
315	—	—
400	—	—
500	—	55.5
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-65	

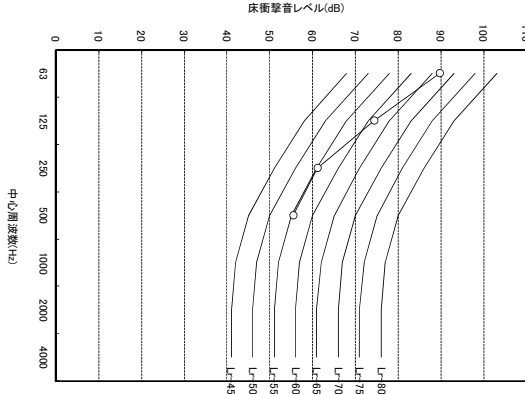


図2-7 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)

表2-7 試験体2の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(ツピンゲン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	64.7
80	—	—
100	—	74.0
125	—	—
160	—	—
200	—	—
250	—	69.0
315	—	—
400	—	—
500	—	61.2
630	—	—
800	—	—
1000	—	49.7
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	33.9
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-65	

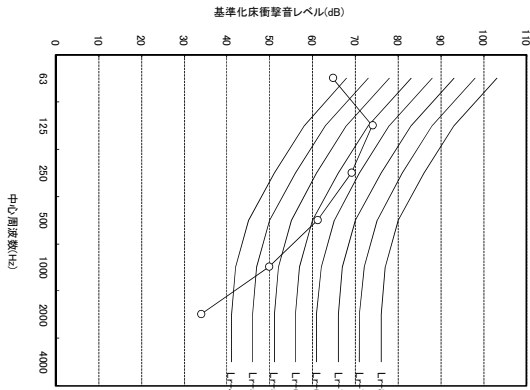


図2-8 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-8 試験体2の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンゲン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	97.0
80	—	—
100	—	74.3
125	—	—
160	—	—
200	—	—
250	—	59.5
315	—	—
400	—	—
500	—	46.8
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-75	

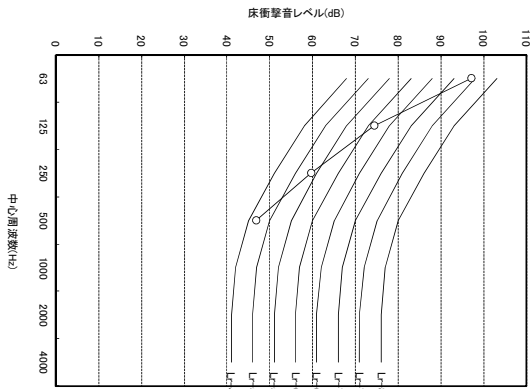


図2-9 重量床衝撃音レベル  
(バンゲン)

表2-9 試験体2の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	89.2
80	—	—
100	—	73.0
125	—	—
160	—	—
200	—	—
250	—	59.6
315	—	—
400	—	—
500	—	45.7
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-65	

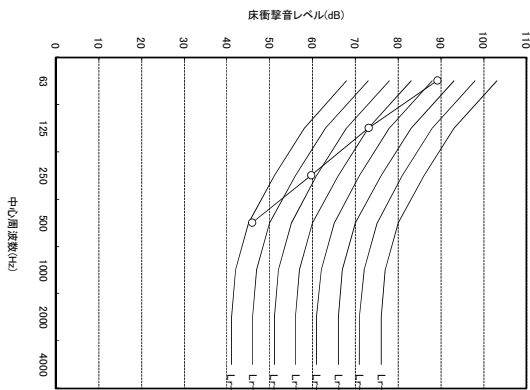


図2-10 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)



表2-10 試験体3の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タビゲインズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	76.2
80	—	—
100	—	—
125	—	85.1
160	—	—
200	—	—
250	—	82.2
315	—	—
400	—	—
500	—	81.5
630	—	—
800	—	—
1000	—	77.0
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	69.4
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-80	

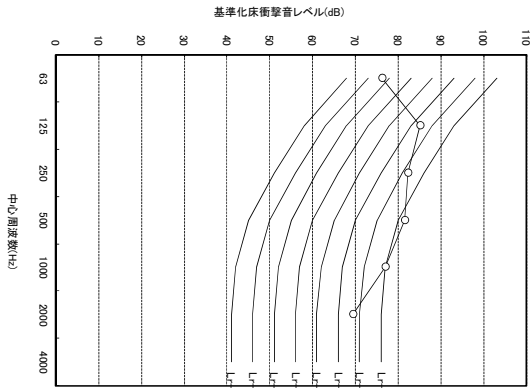


図2-11 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-11 試験体3の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンゲインズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	97.8
80	—	—
100	—	—
125	—	79.2
160	—	—
200	—	—
250	—	67.2
315	—	—
400	—	—
500	—	58.0
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-75	

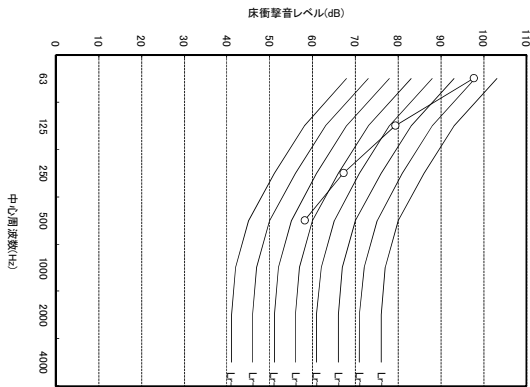


図2-12 重量床衝撃音レベル  
(バンゲインズン)

表2-12 試験体3の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	89.3
80	—	—
100	—	—
125	—	82.4
160	—	—
200	—	—
250	—	71.4
315	—	—
400	—	—
500	—	62.6
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-70	

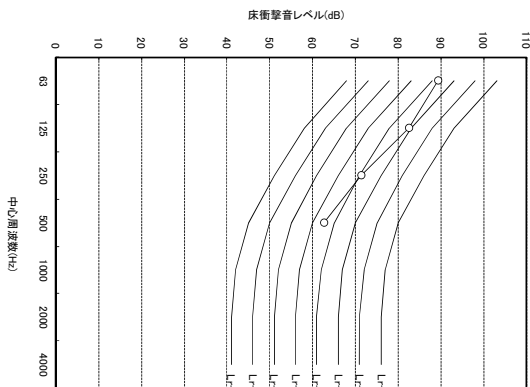


図2-13 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)

表2-13 試験体4の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タビーズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	74.9
80	—	—
100	—	—
125	—	86.3
160	—	—
200	—	—
250	—	83.2
315	—	—
400	—	—
500	—	86.8
630	—	—
800	—	—
1000	—	83.3
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	76.0
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	等級外	

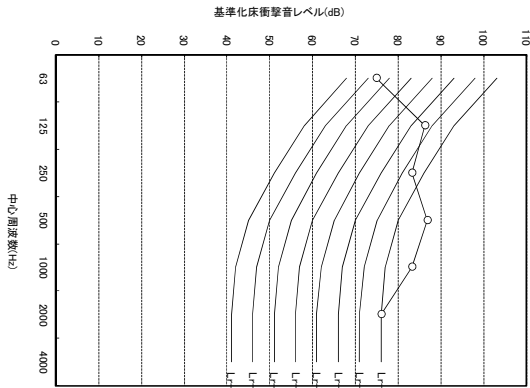


図2-14 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-14 試験体4の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンダマツン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	97.8
80	—	—
100	—	—
125	—	82.1
160	—	—
200	—	—
250	—	67.9
315	—	—
400	—	—
500	—	82.4
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-75	

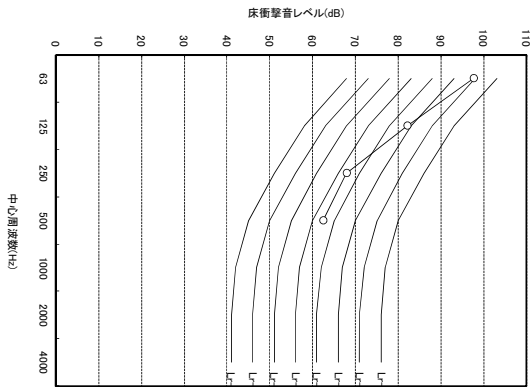


図2-15 重量床衝撃音レベル  
(バンダマツン)

表2-15 試験体4の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムボール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	89.3
80	—	—
100	—	—
125	—	83.8
160	—	—
200	—	—
250	—	72.7
315	—	—
400	—	—
500	—	66.4
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-70	

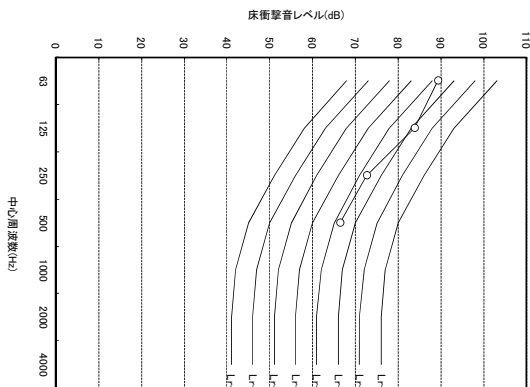


図2-16 重量床衝撃音レベル  
(コムボール)

表2-16 試験体5の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タビゴズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	60.9
80	—	—
100	—	—
125	—	65.7
160	—	—
200	—	—
250	—	61.0
315	—	—
400	—	—
500	—	56.6
630	—	—
800	—	—
1000	—	46.0
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	28.7
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-55	

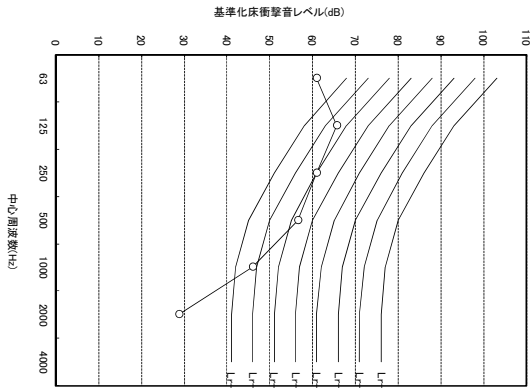


図2-17 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-17 試験体5の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンゴズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	93.5
80	—	—
100	—	—
125	—	70.4
160	—	—
200	—	—
250	—	56.4
315	—	—
400	—	—
500	—	46.2
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-70	

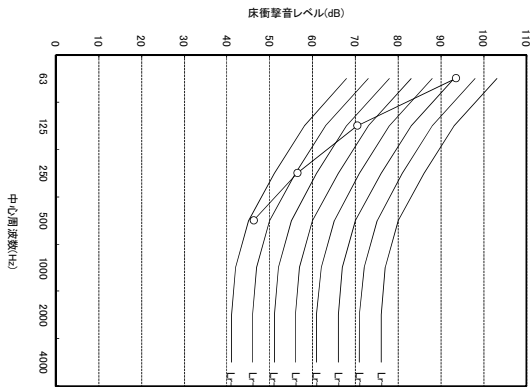


図2-18 重量床衝撃音レベル  
(バンゴズン)

表2-18 試験体5の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	94.8
80	—	—
100	—	—
125	—	66.6
160	—	—
200	—	—
250	—	53.0
315	—	—
400	—	—
500	—	41.3
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-60	

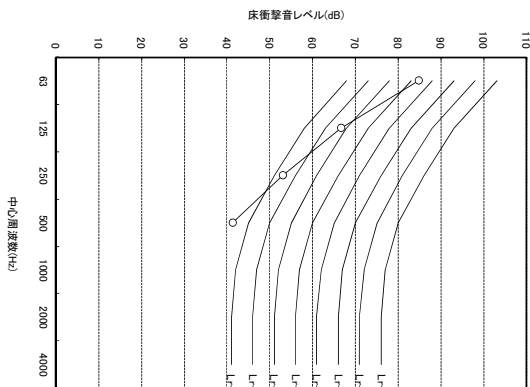


図2-19 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)

表2-19 試験体6の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タビーズン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	59.7
80	—	—
100	—	—
125	—	61.8
160	—	—
200	—	—
250	—	60.6
315	—	—
400	—	—
500	—	51.9
630	—	—
800	—	—
1000	—	44.2
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	45.7
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

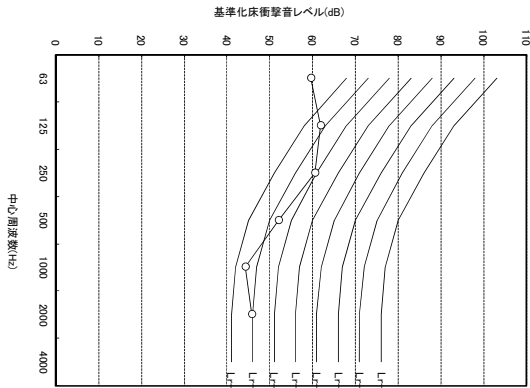


図2-20 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-20 試験体6の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンダマツン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	83.8
80	—	—
100	—	—
125	—	63.9
160	—	—
200	—	—
250	—	54.9
315	—	—
400	—	—
500	—	41.0
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

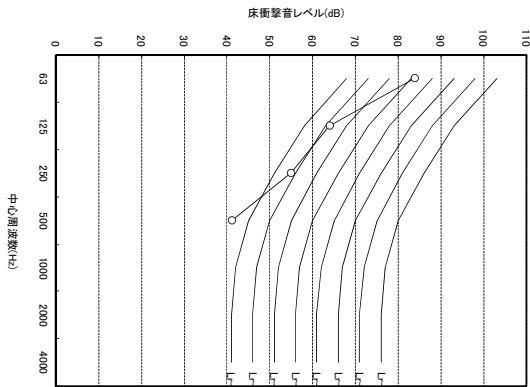


図2-21 重量床衝撃音レベル  
(バンダマツン)

表2-21 試験体6の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	75.3
80	—	—
100	—	—
125	—	63.4
160	—	—
200	—	—
250	—	52.0
315	—	—
400	—	—
500	—	40.3
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

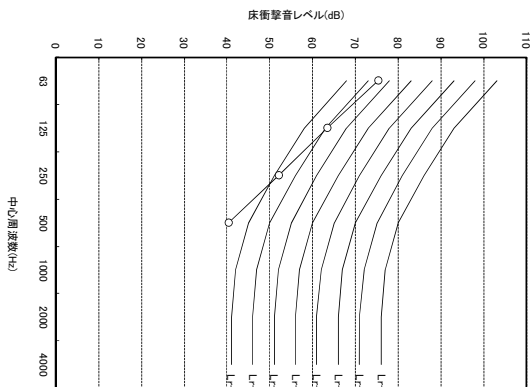


図2-22 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)

表2-22 試験体7の軽重床衝撃レベル測定試験結果(タツノグマシケン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃レベル (dB)	
	L-73 50%	L-71 50%
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	56.9
80	—	—
100	—	54.4
125	—	—
160	—	—
200	—	—
250	—	53.7
315	—	—
400	—	—
500	—	48.2
630	—	—
800	—	—
1000	—	38.1
1250	—	—
1600	—	35.4
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

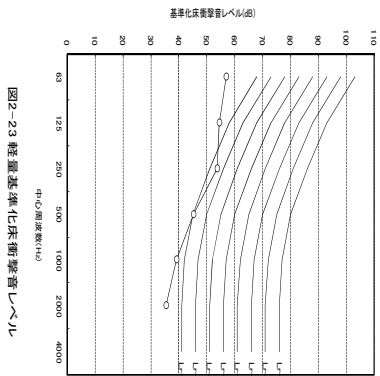


図2-23 軽重基準化床衝撃レベル

表2-23 試験体7の重畳床衝撃レベル測定試験結果(バンダマシケン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃レベル (dB)	
	L-73 50%	L-71 50%
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	82.0
80	—	—
100	—	82.2
125	—	—
160	—	—
200	—	—
250	—	56.3
315	—	—
400	—	—
500	—	53.1
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

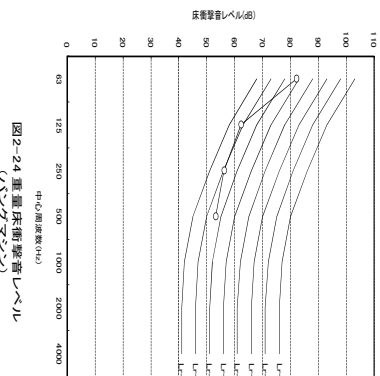


図2-24 重畳床衝撃レベル  
(バンダマシケン)

表2-24 試験体7の重畳床衝撃レベル測定試験結果(コムホール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃レベル (dB)	
	L-73 50%	L-71 50%
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	72.9
80	—	—
100	—	—
125	—	58.2
160	—	—
200	—	—
250	—	47.6
315	—	—
400	—	—
500	—	40.7
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

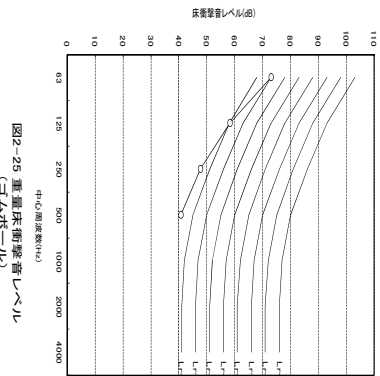


図2-25 重畳床衝撃レベル  
(コムホール)



#### 1. 4 考察

各試験体の試験結果をもとに、以下の事項について検討した。

##### ①乾式床仕様の特性

乾式仕様床(試験体 1)と CLT のみの床(試験体 3)を比較して、乾式仕様床の性能を検討した。軽量床衝撃音遮断性能は、性能を決めた周波数 500Hz で平均音圧レベル 81.5dB が 65.1dB まで約 16.4dB 低減してその効果が高いことが認められた。重量衝撃音遮断性能を決定した周波数 63Hz の平均音圧レベルの低減量が、バングマシンで 4.6dB、ゴムボールでは-0.4dB と軽量衝撃音ほどの効果はみられなかった。

##### ②砂の効果

砂を施工した床(試験体 4)と CLT のみの床(試験体 5)を比較して、砂の効果を検討した。重量床衝撃音遮断性能をみると、性能を決定した周波数 63Hz でバングマシンでは平均音圧レベル 97.6dB が 93.5dB まで約 4.1dB 低下し、ゴムボールでは 89.3dB が 84.8dB まで約 4.5dB 低下して、その効果が認められたが、大幅な改善までには至らなかった。

##### ③モルタルの効果

試験体 5 と試験体 6 を比較して、モルタルの効果を検討した。約 50mm 厚さのモルタルを施工することによって、重量床衝撃音遮断性能を決定する周波数 63Hz の音圧レベルは、衝撃源がバングマシンで 93.5dB から 83.8dB まで約 9dB、ゴムボールで約 11dB 低減し、モルタル施工の効果が高いことが認められた。

##### ④湿式床の特性

モルタルを施工した湿式床(砂とモルタルを組み合わせた仕様、試験体 6)の性能について、CLT のみの床(試験体 4)と比較して検討した。軽量床衝撃音遮断性能は、CLT のみの床で遮音等級 L-80 を超えていたが、湿式床では L-55 と大幅に性能が向上した。また、重量床衝撃音遮断性能は、バングマシンで L-75 が L-55 に、ゴムボールでも L-70 が L-50 に低減して、軽量と同様に大幅な改善効果がみられ、質量付加と剛性向上効果が高いことが認められた。

##### ⑤天井効果

天井の効果を、試験体 6 と試験体 7 を比較して検討した。

一般的に天井部を設置することによって床衝撃音遮断性能の向上が期待できるが、本試験においてもふところのある天井を施工することによって、軽量床衝撃音レベルでは性能を決定した 250Hz で約 7dB 低減し、遮音等級も LL-55 から LL-50 へと 1 ランク向上した。重量床衝撃音レベルでは、性能を決定した 63Hz において、バングマシンでは 1.8dB、ゴムボールでは 2.4dB と、それぞれわずかではあるが低減することができた。これらの性能向上に加えて、配線や配管、エアコンの設置等を考慮すると、天井側に一定高さのふところを設置することが望ましいと考える。

#### ⑥全体評価

日本建築学会が示している建築物の遮音性能基準によると、集合住宅の居室の隣戸間界床に求められる一般的な性能基準として、軽量衝撃源、重量衝撃源ともに L-55 を適用等級 2 級と位置付けている。本試験では、最も性能が高かった湿式床において軽量衝撃源では 2 級を示したが、重量衝撃源では L-60 と 3 級を示していて遮音性能がやや劣る水準であった。これらの結果から、試作棟には、湿式床とふところのある天井仕様を採用し、また比較対照として CLT のみの床仕様もあわせて施工した。

## 2 音響実大試験

### 2.1 目的

先行試験である実験室での衝撃音遮断性能試験において最良の結果を示した床・天井仕様を実大試作棟内に設置し試験することで、現実的な状況下での衝撃音遮断性能を明らかにする。また、あわせて室間音圧レベル差の測定も行い、試作棟各部位の遮音性能を評価する。

### 2.2 試験方法

#### 1) 試験の概要

JIS 規格に基づき、以下の 3 種類の床衝撃音測定を 2) に示す試作棟内部で行った。

タッピングマシンによる軽量床衝撃音レベルの測定  
バングマシンによる重量床衝撃音レベルの測定  
ゴムボールによる重量床衝撃音レベルの測定  
室間音圧レベル差の測定

本試験における実験室緒元、測定装置、測定方法、関連規格は以下の通りである。

試作棟	CLT による木造試作棟
受音室の室容積	湿式床 1 階 約 25m <sup>3</sup> (3.4×3.4×高 2.14m) CLT のみ床 1 階 約 28m <sup>3</sup> (3.4×3.4×高 2.44m)
測定装置等	精密騒音計(リオン製 NA-28)、マイクロフォン高さ 1.2m 軽量衝撃源装置(タッピングマシン、リオン製 FI-1) 重量衝撃源装置(バングマシン、リオン製 FI-2) 重量衝撃源装置(ゴムボール、リオン製 YI-1)

#### 衝撃音レベル測定

##### 軽量床衝撃音レベル

測定周波数範囲 16 から 16kHz まで、1/1 オクターブバンド  
周波数重み付け特性 Z 特性、時間重み付け特性 Fast、10 秒/回  
測定回数 1 回、音源点数 5 点、受音点数 5 点

##### 重量床衝撃音レベル

測定周波数範囲 16 から 16kHz まで、1/1 オクターブバンド  
周波数重み付け特性 Z 特性、時間重み付け特性 Fast、10 秒/回  
測定回数 2 回、音源点数 5 点、受音点数 5 点

## 室間音圧レベル差測定

測定周波数範囲 16 から 16kHz まで、1/1 オクターブバンド  
周波数重み付け特性 Z 特性、時間重み付け特性 Fast、10 秒/回  
測定回数 1 回、音源点数 5 点、受音点数 5 点

## 関連規格

JIS A 1440-1:2007「実験室におけるコンクリート床上の床仕上げ構造の  
床衝撃音レベル低減量の測定方法」

－第 1 部：標準軽量衝撃源による方法

JIS A 1440-2:2007「実験室におけるコンクリート床上の床仕上げ構造の  
床衝撃音レベル低減量の測定方法」

－第 1 部：標準重量衝撃源による方法

JIS A 1418-1:2000「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法」

－第 1 部：標準軽量衝撃源による方法

JIS A 1418-2:2000「建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法」

－第 2 部：標準重量衝撃源による方法

JIS A 1419-2:2000「建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法

JIS A 1417:2000「建築物の空気音遮断性能の測定方法

JIS A 1419-1:2000「建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法

－第 1 部：空気音遮断性能

## 2) 試作棟の概要

集合住宅など世帯の異なる連続した住戸への応用を想定し、界床と界壁によって上下左右に区画される 4 室を備えた試作棟を建設した。この構成により、上下階間他、隣戸間や斜め下階に対する遮音性能の測定が可能となる。また、建設にあたっては、内外装ともに現実的に想定し得る仕様とし、遮音性能をより総合的に検討できるものとした。

以下に各部位ごとの概略を説明し、図 2-25、図 2-26、図 2-27、図 2-28 に詳細図面を示す。

## 基礎

鉄筋コンクリート造ベタ基礎を打設し、基礎周辺部に立ち上げを設け、この上にアンカーボルトによって木製土台を固定した。

## 接地階床

接地階の床は鉄筋コンクリート造ベタ基礎表面のままとした。

## 2 階床

床勝ちの CLT 製とした。2 室あるうち、A 棟の床に対しては、音響予備試験で最良の結果を示した試験体 7 に準じた以下の床・天井仕様を施し、他方 B 棟の床は CLT のままとした。ただし、音響予備試験との明確な差異は、CLT の厚みが 150mm から 135mm に変更された点と、ヒキフローリングに緩衝材が追加された点である。

表 2-25 実験室における床衝撃音遮断性能に供した試験体仕様

	施工法種別	床仕様	天井仕様
試作棟 A棟	湿式	ヒノキフローリング (クッション付) 15mm モルタル 50mm グラスロンウール 64K 50mm 砂利 単粒 5-2.5 50mm CLT 135mm	防振ゴム 6mm 野縁 35 角 鋼製防振吊木 グラスロンウール 16K 50mm、 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り
試作棟 B棟	床上無仕上	CLT 135mm のみ	防振ゴム 6mm 野縁 35 角 石膏ボード 12.5mm 1 枚貼り

- 屋根 屋根は 2 階床と平行な CLT 製の陸屋根とした。下面は無仕上げとし、上面には勾配付スタイロフォームにより排水勾配と断熱層を確保した上にシート防水を施工した。
- 界壁 1 階、2 階の界壁とも、間に緩衝材（グラスロンウール 64K 50 mm）を挟んだ CLT 製の二重壁とした。試作棟は床勝ちの構造であり、1 階界壁はベタ基礎上にアンカーボルトにより固定した木製土台上に設置し、2 階界壁は 2 階界壁の上に設置した。内装面にはプラスターボード 12.5 mm を敷設した。
- 外周壁 CLT 製とし、1 階外周壁はベタ基礎周辺部に固定した木製土台上に設置、2 階外周壁は 2 階床上に設置した。内装面にはプラスターボード 12.5 mm を敷設。試作棟保護のために、外装面には断熱層、防水透湿層、通気層、板張り仕上げの順に施工した。
- 開口部 遮音性に対する開口部の影響も考慮するため、各室に一か所の引き違い戸（三共アルミマディオ J 遮音等級 T2）を設けた。
- 接合部 土台と CLT、あるいは CLT 相互の接合については、欧州での CLT 建物建設で一般化されているフルスレッドスクリュー（Wuerth 社製品）を用いた。床と壁の取り合い部分にはゴムシートを挟み、衝撃音伝播を防止した。
- 廊下階段 外部廊下と外部階段は、安価で腐食の心配のない仮設足場用の単管を組み合わせ、試作棟本体とは構造的な接触の少ない物とした。

### 3) 音源室と受音室の配置

上階下階にそれぞれ 2 室を持つ試作棟の構成を活かし、音源室と受音室を下表のように、界床を挟んだ上下の関係他、斜め、水平にも配することで、遮音性能への界壁の影響もあわせて検証することとした。

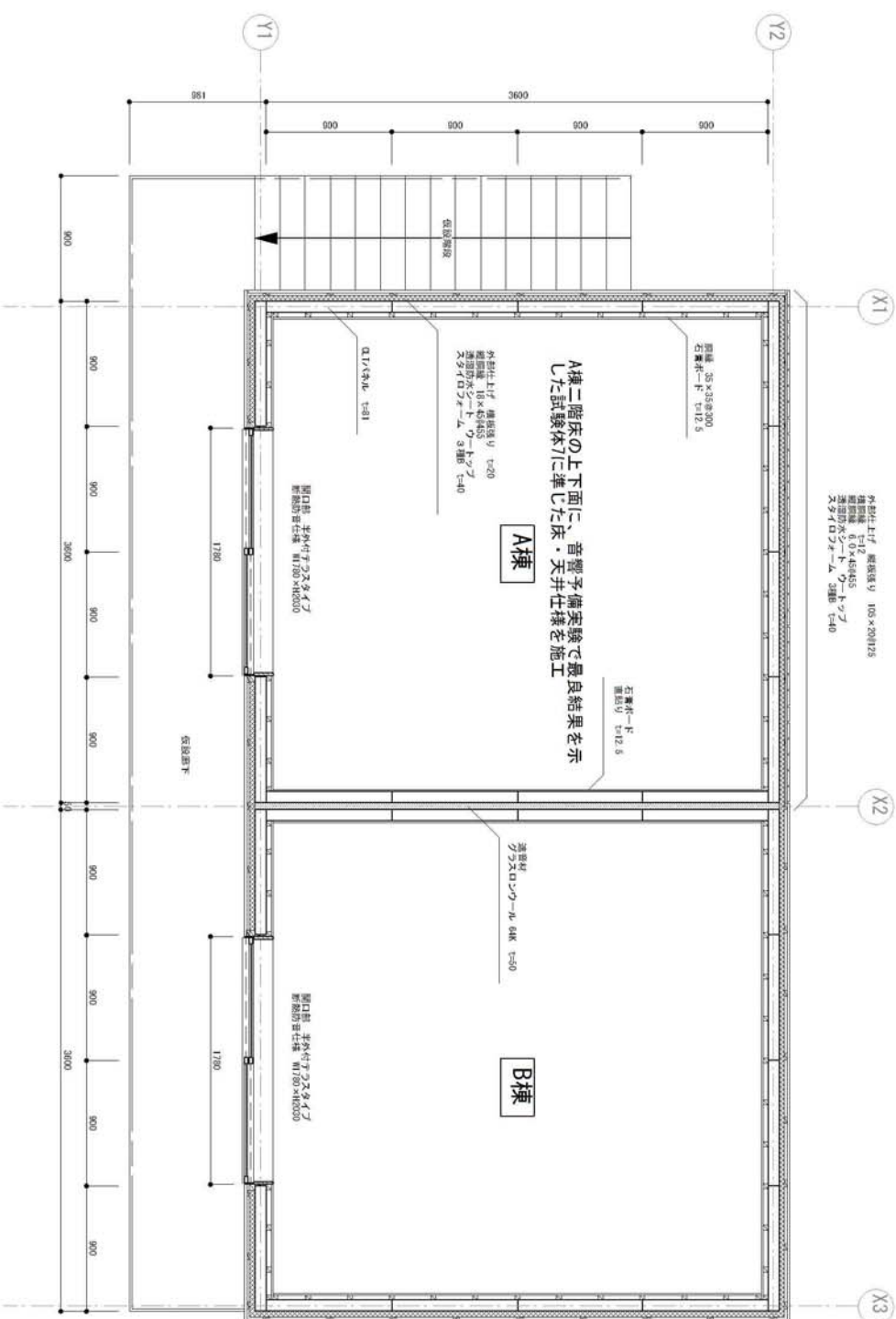
表 2-26 床衝撃音レベル測定試験における音源室と受音室の配置

	試験の種別	音源室	受音室
試験 1	床・天井に遮音仕様を施した床に対し 直下室での衝撃音レベル測定	A 棟 2 階	A 棟 1 階
試験 2	床上無仕上げの床に対し 直下室での衝撃音レベル測定	B 棟 2 階	B 棟 1 階
試験 3	床・天井に遮音仕様を施した床に対し 斜下室での衝撃音レベル測定	A 棟 2 階	B 棟 1 階

表 2-27 室間音圧レベル差測定試験における音源室と受音室の配置

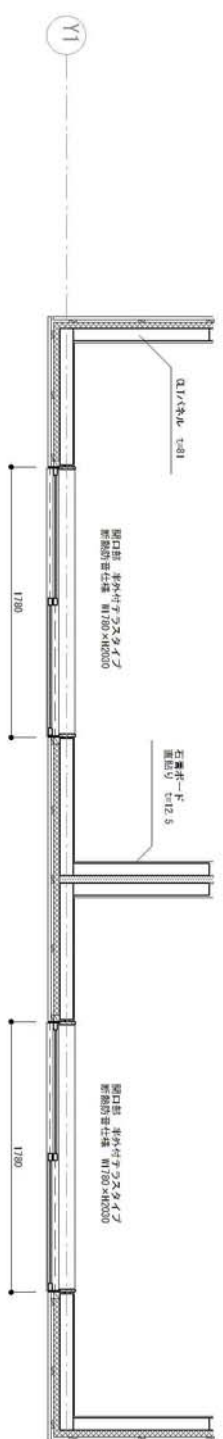
	試験の種別	音源室	受音室
試験 4	界壁に対し隣室の音圧レベル差測定	A 棟 2 階	B 棟 2 階
試験 5	床・天井に遮音仕様を施した床に対し 直下室での音圧レベル差測定	A 棟 2 階	A 棟 1 階
試験 6	床上無仕上げの床に対し 直下室での音圧レベル差測定	B 棟 2 階	B 棟 1 階
試験 7	床・天井に遮音仕様を施した床に対し 斜下室での音圧レベル差測定	A 棟 2 階	B 棟 1 階





※特記事項  
 内装間縁 (35×35) は一階基礎立ち上り面 (外周部) のみ設ける。一階戸境壁面及び二階の全内装面については内装面貼りとする。

一階平面図 S=1:50



二階開口部周辺平面図 S=1:50

図 2-2 6 試作棟平面図



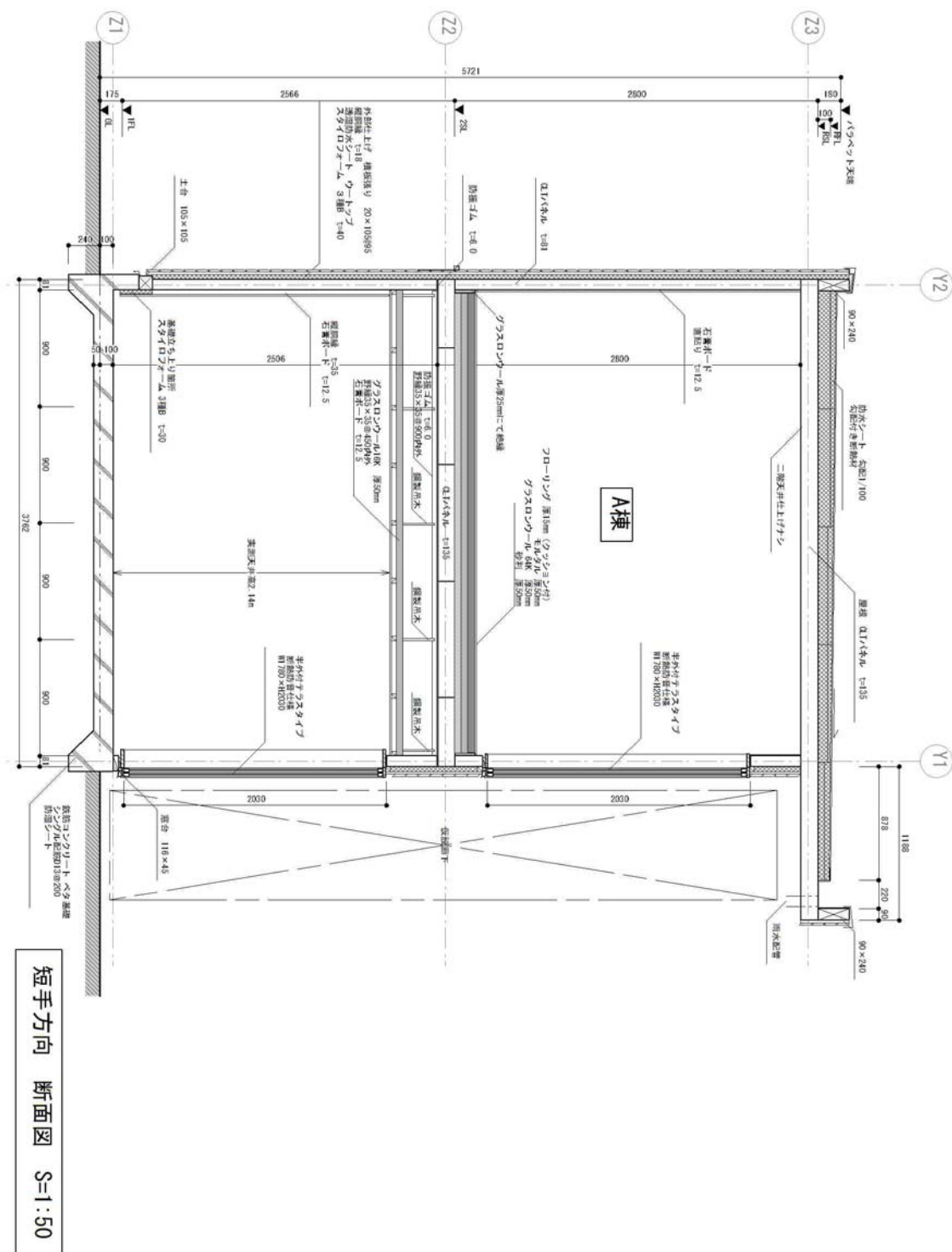
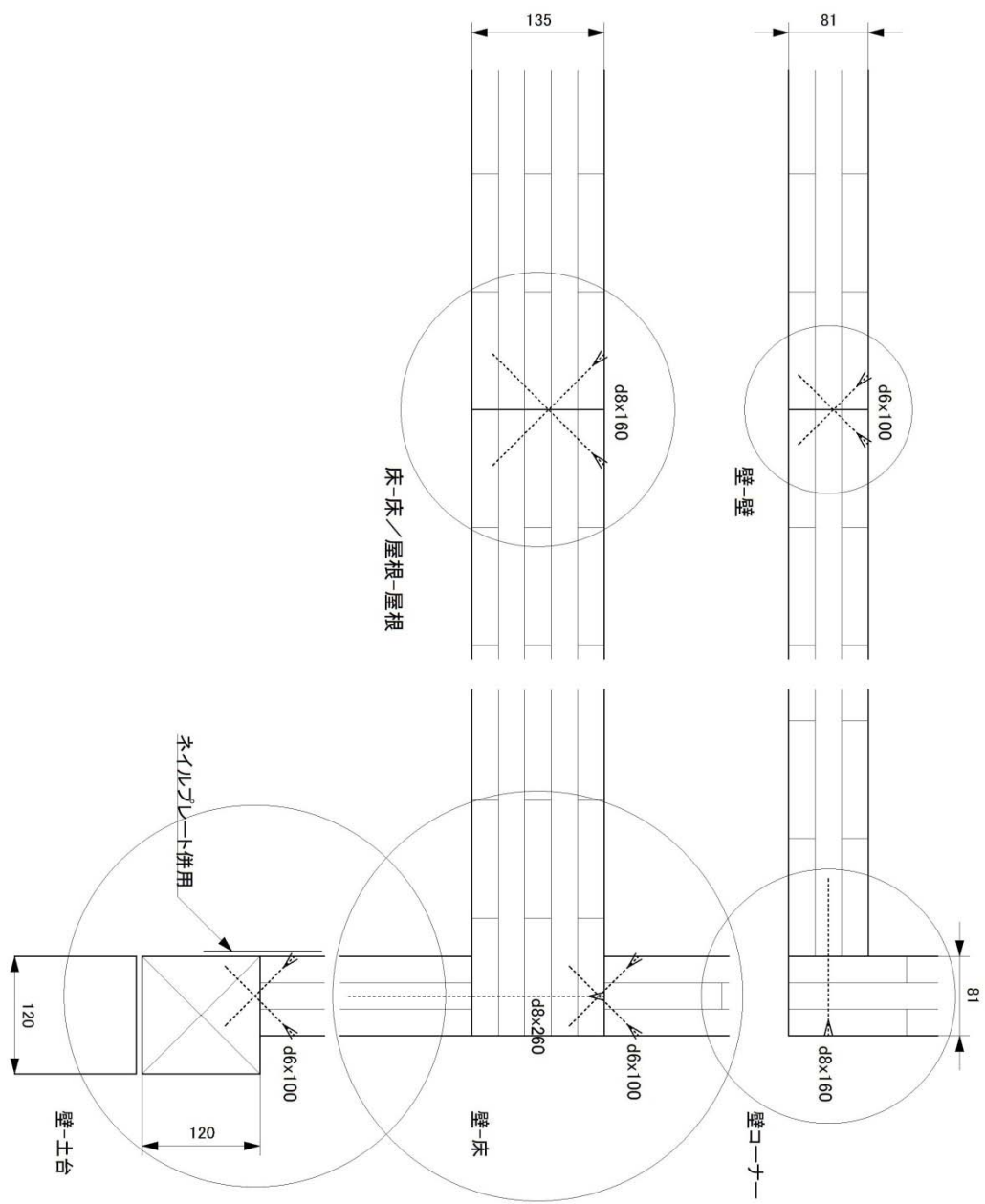


図 2-2 8 試作棟短手断面図

図 2-2 9 試作棟 接合部図





土台施工状況

1階壁および防振ゴム施工状況

2階床施工状況

2階壁施工状況

陸屋根施工状況

屋根-2階壁接合状況

図 2-30 試作棟の施工状況





図 2-31 試作棟の施工状況および床衝撃音レベル測定試験状況



## 2. 3 試験結果

表2-28 試験1の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タピタマン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	82.1
160	—	—
200	—	—
250	—	57.1
315	—	—
400	—	50.7
500	—	—
630	—	—
800	—	—
1000	—	41.3
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	27.0
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

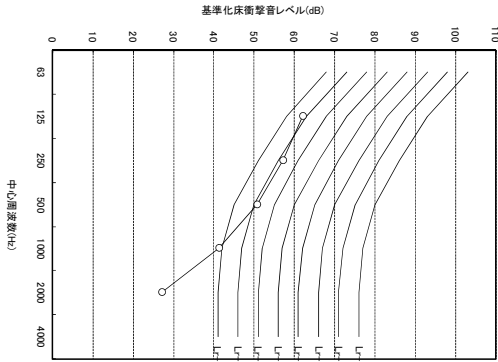


図2-32 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-29 試験1の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンダマン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	96.3
80	—	—
100	—	—
125	—	66.2
160	—	—
200	—	—
250	—	51.3
315	—	—
400	—	44.8
500	—	—
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

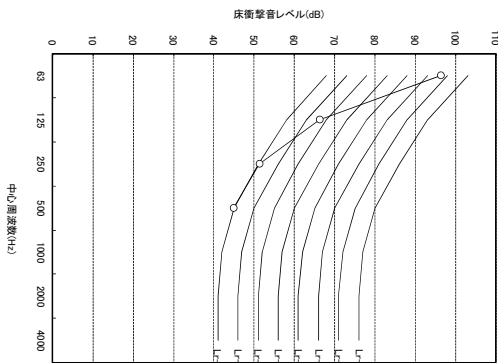


図2-33 重量床衝撃音レベル  
(バンダマン)

表2-30 試験1の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムホール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	86.5
80	—	—
100	—	—
125	—	66.9
160	—	—
200	—	—
250	—	55.6
315	—	—
400	—	—
500	—	41.3
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

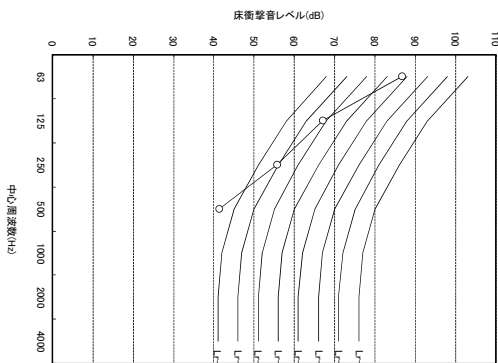


図2-34 重量床衝撃音レベル  
(コムホール)

表2-31 試験2の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(タップン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	75.5
160	—	—
200	—	—
250	—	81.6
315	—	—
400	—	—
500	—	82.5
630	—	—
800	—	—
1000	—	81.5
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	72.5
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	等級外	

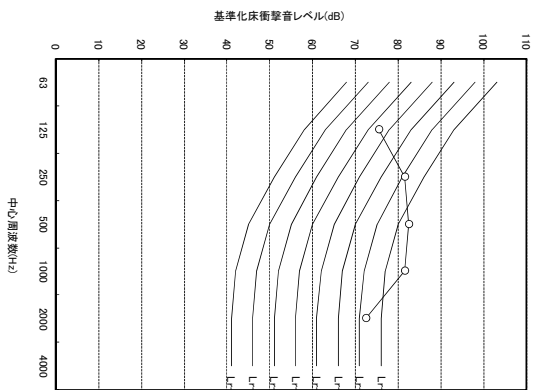


図2-35 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-32 試験2の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンガン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	105.0
80	—	—
100	—	—
125	—	79.2
160	—	—
200	—	—
250	—	72.7
315	—	—
400	—	—
500	—	82.4
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-80	

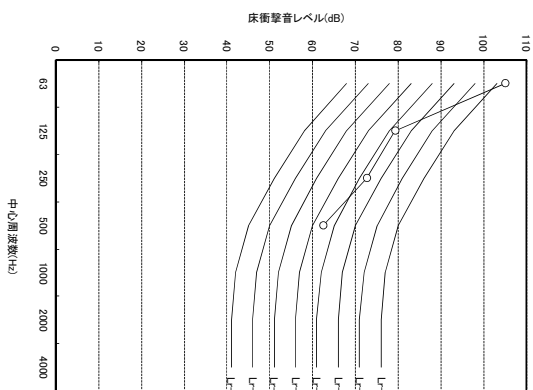


図2-36 重量床衝撃音レベル  
(バンガン)

表2-33 試験2の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムボール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	96.0
80	—	—
100	—	—
125	—	80.8
160	—	—
200	—	—
250	—	76.8
315	—	—
400	—	—
500	—	66.2
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-75	

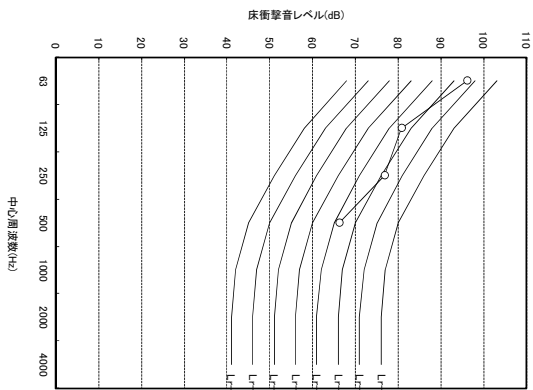


図2-37 重量床衝撃音レベル  
(コムボール)

表2-34 試験3の軽量床衝撃音レベル測定試験結果(ツピンゲン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	51.4
160	—	—
200	—	—
250	—	45.7
315	—	—
400	—	—
500	—	39.3
630	—	—
800	—	—
1000	—	31.2
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	25.4
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-45	

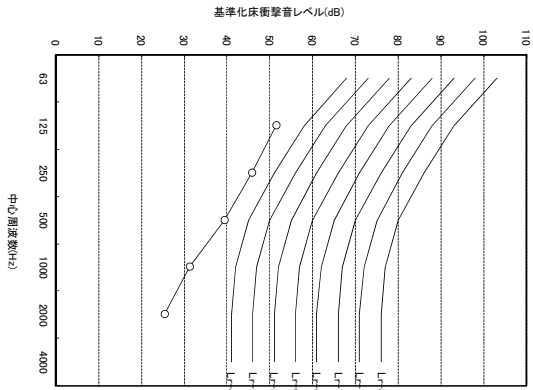


図2-38 軽量基準化床衝撃音レベル

表2-35 試験3の重量床衝撃音レベル測定試験結果(バンダマン)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	79.4
80	—	—
100	—	—
125	—	55.8
160	—	—
200	—	—
250	—	41.1
315	—	—
400	—	35.7
500	—	—
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-55	

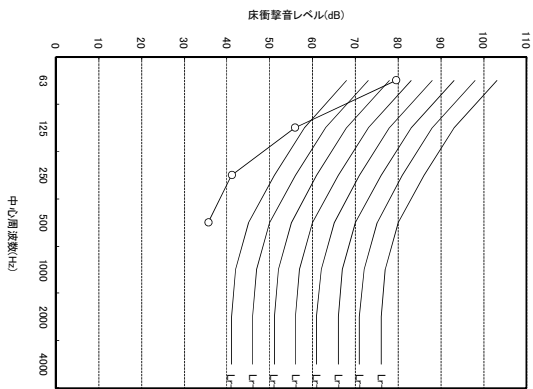


図2-39 重量床衝撃音レベル  
(バンダマン)

表2-36 試験3の重量床衝撃音レベル測定試験結果(コムポール)

中心 周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	70.6
80	—	—
100	—	—
125	—	57.1
160	—	—
200	—	—
250	—	46.8
315	—	—
400	—	—
500	—	34.5
630	—	—
800	—	—
1000	—	—
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	—
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—
等級	L-50	

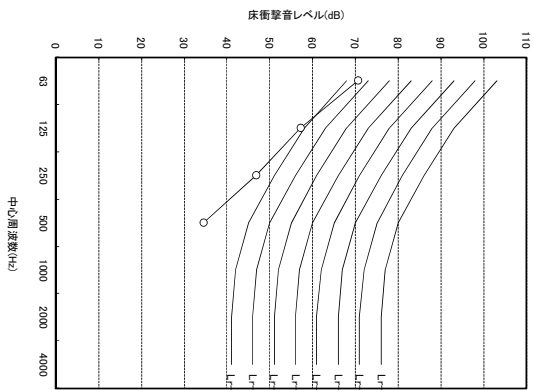


図2-40 重量床衝撃音レベル  
(コムポール)

表2-37 試験4の空間音圧レベル差測定試験結果

中心周波数 (Hz)	空間音圧レベル差 (dB)	
	1/3 oct.	1/1 oct.
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	23.7
160	—	—
200	—	—
250	—	29.4
315	—	—
400	—	—
500	—	34.1
630	—	—
800	—	—
1000	—	43.9
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	53.5
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

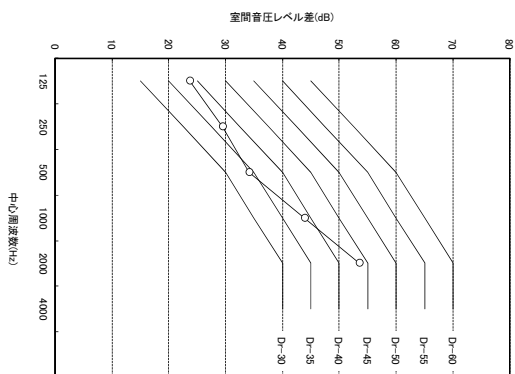


図2-41 空間音圧レベル差

表2-38 試験5の空間音圧レベル差測定試験結果

中心周波数 (Hz)	空間音圧レベル差 (dB)	
	1/3 oct.	1/1 oct.
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	33.0
160	—	—
200	—	—
250	—	33.1
315	—	—
400	—	—
500	—	40.0
630	—	—
800	—	—
1000	—	47.0
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	57.3
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

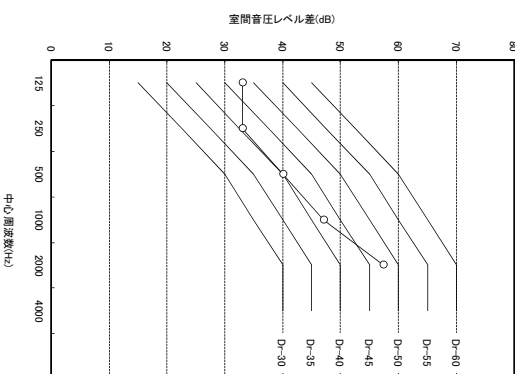


図2-42 空間音圧レベル差

表2-39 試験6の空間音圧レベル差測定試験結果

中心周波数 (Hz)	空間音圧レベル差 (dB)	
	1/3 oct.	1/1 oct.
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	29.2
160	—	—
200	—	—
250	—	30.6
315	—	—
400	—	—
500	—	34.3
630	—	—
800	—	—
1000	—	41.3
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	50.9
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

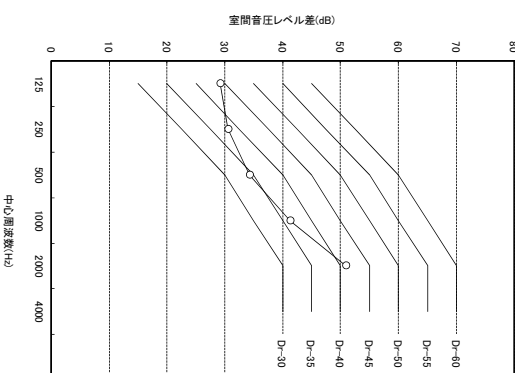


図2-43 空間音圧レベル差

表2-40 試験7の室間音圧レベル差測定試験結果

中心周波数 (Hz)	室間音圧レベル差 (dB)	
	1/3 oct	1/1 oct
25	—	—
31.5	—	—
40	—	—
50	—	—
63	—	—
80	—	—
100	—	—
125	—	37.0
160	—	—
200	—	—
250	—	42.6
315	—	—
400	—	—
500	—	51.5
630	—	—
800	—	—
1000	—	60.4
1250	—	—
1600	—	—
2000	—	63.6
2500	—	—
3150	—	—
4000	—	—
5000	—	—

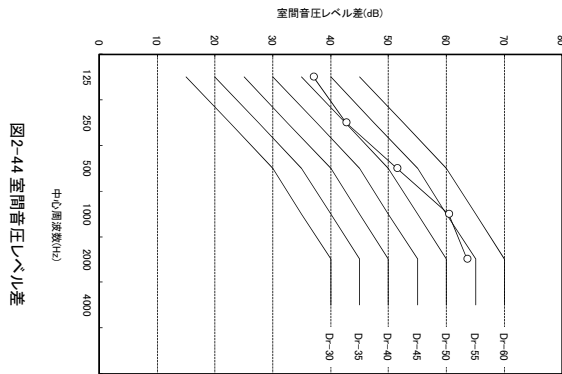


図2-44 室間音圧レベル差

## 2. 4 考察

### 1) 試作棟における床衝撃音レベル測定試験

試作棟に施工した、CLT パネルのみの床仕様と、CLT パネルにモルタル等を施工した湿式床仕様について、その性能を評価した結果、以下の点が明らかになった。

#### ①湿式床の性能

前述した実験室試験結果から特定した湿式床を、試作棟に施工して(試験 1)と CLT のみの床(試験 2)を比較して、試作棟の湿式床の性能を検討した。

軽量床衝撃音遮断性能は、CLT のみの床では遮音等級 L-80 を超える等級外の性能が、湿式床では L-50 と大幅に改善され、実験室での試験結果とほぼ同様な性能を示していた。全周波数帯域における平均音圧レベルをみると、約 25dB 以上の改善効果が認められ性能を向上させることができた。

重量床衝撃音遮断性能は、バングマシンでは、CLT のみの床で L-80、湿式床で L-75 と 1 ランクしか性能改善がみられなかった。この要因として、実験室での試験で使用した CLT 厚さよりも 15mm 薄い 135mm であったこと、実験室では天井部が開口となっている以外は RC 構造であったが試作棟ではすべて木造で躯体の剛性が異なること、容積が異なっていたこと、開口部からの回り込みや戸境壁からの伝搬が大きかったこと等が挙げられ、それらを改善することによって、性能を向上させることが可能であると考えられる。

#### ②斜め下に位置する居室の性能

上階での床衝撃音が、直下階の居室ではなく、斜め下に位置する居室にどの程度伝搬しているのかを確認するために、参考値として測定した。その結果、軽量床衝撃音遮断性能は L-45、重量床衝撃音遮断性能はバングマシンで L-55、ゴムボールで L-50 となっていて、個体伝搬音はかなり低減することから、上下階の性能をさらに向上させることによって必然的に斜め方向の居室の性能はさらに改善されることが期待できるので、大きな問題は認められなかった。

## 2) 試作棟における室間音圧レベル差測定試験

CLT パネルのみの床仕様と、CLT パネルにモルタルを施工した湿式床仕様について、その遮音性能を室間音圧レベル差等級 D 値で評価した結果、以下の点が明らかになった。

### ① 壁

試作棟上階の隣戸間界壁の遮音性能 D 値は、D-35 で、日本建築学会に示している集合住宅の適用等級としては 3 等級である D-40 よりも 1 ランク性能が劣る等級外のレベルであった。その要因として、と開口部等からのまわり込みによる性能低下の他、界壁の施工精度の問題が挙げられる。室内面の石膏ボードの目地や上下縁に性能低下の原因となる隙間が多数確認された。適用等級では、標準的な性能として 2 等級である D-45 を示していることから、当面はその等級を目標として改善策を検討することになる。その改善策として施工品質管理はもとより、CLT パネルを厚くしたり、空気層をさらに厚く設定し吸音材を充てんしたり、面密度の異なる石膏ボードを増し張りする等が挙げられ、全周波数帯域で性能向上が期待でき遮音等級が改善されると考える。

### ② 界床(湿式床)の性能

モルタルと砂を施工した床とふところを設けた天井の組み合わせの界床について、CLT のみの床と性能を比較すると、湿式床が D-40、CLT のみの床が D-35 と、湿式床の方が性能が 1 ランク高く、適用等級 3 等級を示していた。開口部からの回り込みを低減させることによって、さらに性能を向上させることが可能である。

### ④ 斜め下階部屋への影響

日本建築学会では斜め下方向の性能基準は示されていないため参考評価となるが、湿式床のある居室と、隣戸の CLT のみの床のある居室直下の下階居室間の音圧レベル差等級は、D-35 と、湿式床直下の居室の性能よりも悪い値を示していた。本来なら、隣戸間界壁の性能よりも音源が遠いことから遮音製としては良くなることが想定されるが、同程度であったことから開口部からの回り込みによる影響が大きいのではないかと考える。



## 2. 5 今後の課題

安価で入手性が高く、施工も容易な建築材料であるモルタルと砂を敷くことによって床版の剛性や質量を高められ床衝撃音遮断性能を向上させることができた。

一方でこれらの湿式工法は施工の迅速化が難しいという点も指摘される。質量については、より面密度の高い乾式資材を適用することにより容易に高めることが可能である。また、剛性を向上させる手法として、CLT パネルをさらに厚くする方法等、より実用的な方法が考えられるが、今後はそれらの手法の性能評価を実施する必要性がある。

また、界壁の遮音性能について本試験では JIS に規定されている実験室での試験を実施していないが、今後は、界壁の仕様をさらに検討して、実験室でその性能を確認し、一定の性能が確保できるような取組みも必要である。

### 3. 床構面の水平せん断性能

#### 3. 1 目的

CLT パネルを床構面に使用する場合、鉛直荷重に対する耐荷重性能および耐変形性能と共に重要な性能が、地震力や風圧力などの水平荷重に対する耐荷重性能、すなわち水平せん断性能である。水平せん断性能は、CLT パネル自体の面内せん断性能だけでなく、周辺の壁面や梁桁材等の構造部材との接合部分の性能が非常に重要であり、木質構造の場合は一般的に材料強度よりも接合強度が低いことから、この接合部の性能を元に構造体の性能が決まることが多い。

そこで本章では、CLT パネルを梁桁材で組んだ床組の上に載せてビスで接合した試験体に対し水平力を加え、その時の荷重と水平変形量の関係から、品確法に定める存在床倍率を評価することを目的とする。

#### 3. 2 試験

##### 3. 2. 1 試験体材料

CLT パネルを載せる床組に用いた材料は、カラマツの対称異等級構成集成材 (E105-F300) とした。断面寸法は、外周の梁桁材が  $120 \times 240\text{mm}$ 、加力点の張間方向 3ヶ所に入れた加力梁の断面は  $120 \times 210\text{mm}$  とした。仕口は全て腰掛け蟻加工を施した。試験する床組の大きさは、桁行方向  $7280\text{mm}$ 、張間方向  $3640\text{mm}$  であるが、全部材について継手は設けず単一部材同士を組んで床組を構成することとした (図 2-32)。

床組に載せた CLT パネルは、樹種がスギで、厚さは  $135\text{mm}$  (5層5プライ、各層等厚)、寸法は  $1820 \times 3640\text{mm}$  とした (写真 2-1,2-2)。挽き板のヤング係数は、CLT パネルの長手方向の挽き板が  $6.0 \sim 7.9(\text{kN}/\text{mm}^2)$ 、短手方向の挽き板が  $3.0 \sim 5.9(\text{kN}/\text{mm}^2)$  とした。

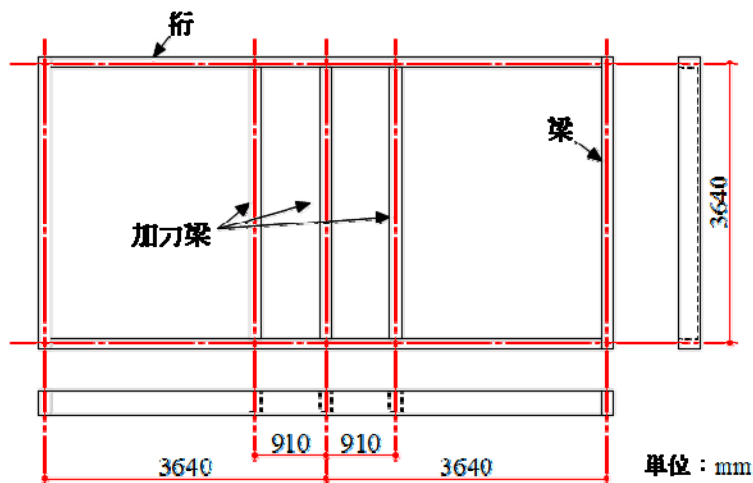


図 2-32 試験体寸法



写真 2-1 搬入された CLT パネル



写真 2-2 CLT パネルの断面

### 3. 2. 2 試験体の構成

まず始めに外周の梁桁材で床組を組み、加力梁をはめ込んだ後に各仕口を羽子板ボルトで緊結した。次に、CLT パネル 4 枚を床組上に載せ、以下の 2 つの接合仕様で床組に緊結した。試験体数は各仕様 1 体ずつとした。

まず、試験体仕様①は、CLT パネル間接合部分に継手等は設けず、突きつけとした。外周の梁桁材および加力梁との接合には、ウルト社の長ビス(ねじ部谷径  $\phi 5\text{mm}$ 、長さ  $215\text{mm}$ )を縁距離  $30\text{mm}$ 、ビス間隔  $150\text{mm}$  で打ち込んだ。パネル間接合部には、ウルト社の長ビス(ねじ部谷径  $\phi 5\text{mm}$ 、長さ  $155\text{mm}$ )を専用治具を用いてビス間隔  $150\text{mm}$  で斜めに打ち込んだ(図 2-33、写真 2-3,2-4)。

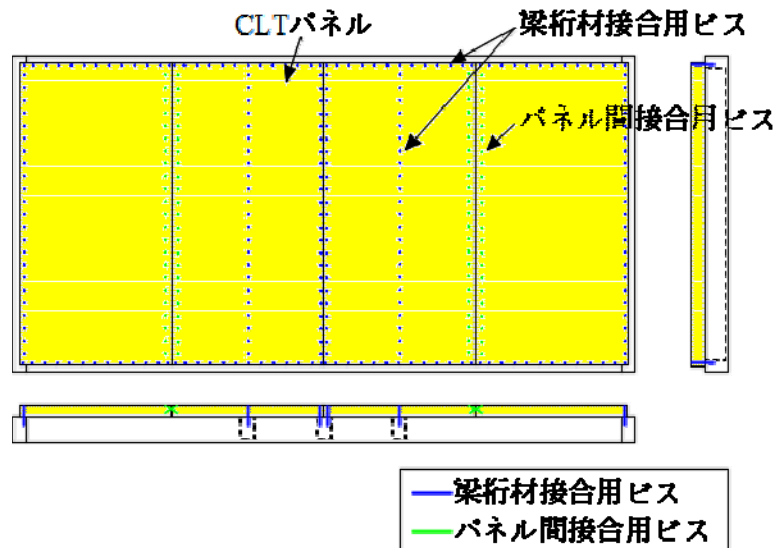


図 2-33 試験体仕様

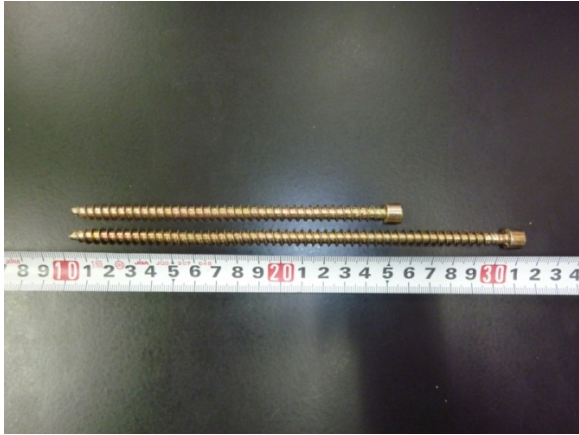


写真 2-3 仕様①に用いたビス  
(加力試験後のビス)



写真 2-4 仕様①のビス接合部

次に、試験体仕様②は、CLT パネル間接合部分に厚物構造用合板によるスプライン材を設ける仕様とした。外周の梁桁材および加力梁との接合には、ロン社の長ビス（Wood Screw Rotho Blass HBS D8-L220、胴部径  $\phi$  5.7mm、ねじ部谷径  $\phi$  5.3mm、長さ 220mm）を縁距離 30mm、ビス間隔 150mm で打ち込んだ。パネル間接合部には予めスプライン接合用の欠き込みを施し、厚さ 28mm、幅 120mm の構造用合板（JAS 2 級、樹種：カラマツ）を嵌め込み、ロン社の長ビス（Wood Screw Rotho Blass HBS D8-L80、胴部径  $\phi$  5.7mm、ねじ部谷径  $\phi$  5.3mm、長さ 80mm）を縁距離 30mm、ビス間隔 150mm で打ち込んだ（図 2-34、写真 2-5,2-6）。ただし、加力梁の 3 本のうち、中央の加力梁部分にはビスを打ったが、両隣の加力梁部分にはビス打ちを忘れてしまった点は、考察上の注意を要する。

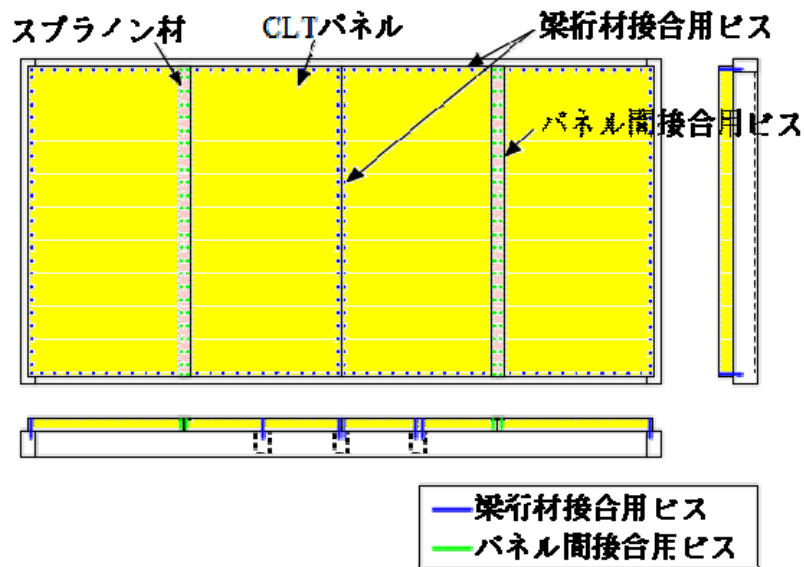


図 2-34 試験体仕様②



写真 2-5 仕様②に用いたビス  
(加力試験後のビス)



写真 2-6 厚物合板によるスプライン接合

### 3. 2. 3 試験方法

試験体の鉛直方向の支持方法としては、支点部分および加力点部分の鉄骨架台上 10ヶ所にスライドベアリングを置き、それに試験体を載せることで水平方向に自由に移動できるように支持した。また、試験体の浮き上がりを防止するための鋼材 6本を、試験体との間にスライドベアリング 12枚を挟みながら設置した。水平方向の支持方法としては、試験体桁行方向の両端部分を、ローラーおよびピンで支持した。その際、ローラーと試験体の間にゆるみが生じないように、支点の位置を調節するナットを十分に締めこんだ。

加力は、試験体の中央部の加力梁のある 3つの通りに、試験体張間方向の両側から油圧ジャッキを設置し、相対するジャッキを順番に出し入れすることにより水平荷重を正負交番で加えた。3本のジャッキは常に同一の油圧がかかるようになっていたため、ロードセルは中央のジャッキのみに付け、ロードセルの荷重を 3倍することで試験体に加えられた総荷重とした。加力の様子を写真 2-8 に示す。

図 2-35 に加力点および変位測定位置を示した。測定点は、加力点、パネル間接合部、支点部分の加力方向水平変位と、支点部分における直交方向変位、CLT パネル同士の相対変位、及び CLT パネルと梁桁材との相対変位とした。

加力スケジュールは、後述するそれぞれの試験体仕様の設計荷重に対し、3基の油圧ジャッキの総荷重が設計荷重の 1/2 倍をやや上回った時点で除荷して、今度は反対側のジャッキから同じ大きさの荷重を加え除荷した。その後、設計荷重の 1 倍、3/2 倍で同様の載荷を行い、最後は一方向に破壊するまで加力を行った。(実際には、試験体全体の設計荷重ではなく半分の設計荷重を元に加力スケジュールを求めてしまったため、予定荷重のそれぞれ半分で繰り返し載荷を行った。)



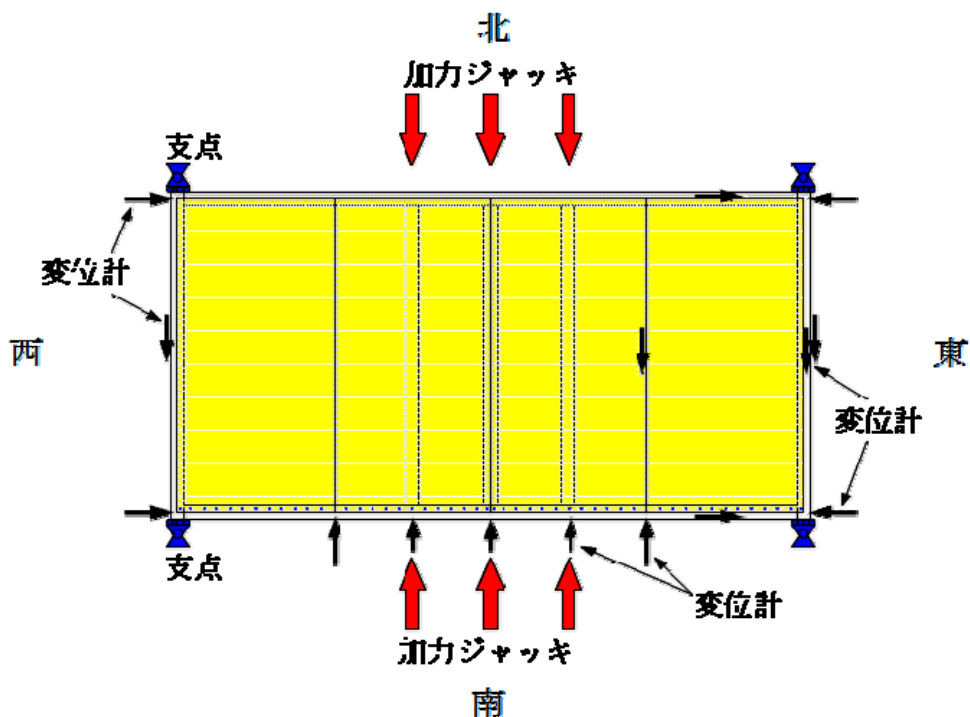


図 2-35 試験・測定方法概略



写真 2-7 浮き上がり防止鋼材の設置



写真 2-8 加力ジャッキと加圧板

### 3. 2. 4 設計荷重の算出

加力スケジュールの決定の際に、試験体に用いたビス 1 本あたりの許容耐力から本試験体における設計荷重を算出した。なお、今回の試験では、図 2-36 に示すように加力点と支点に挟まれたせん断エリアにおいて総荷重の 1/2 を負担すると考え、せん断エリアに含まれるパネル間接合部と外周の梁桁材接合部のそれぞれの許容耐力を求め、その小さい方の値を 2 倍（試験体は左右対称であるため）することで試験体の設計荷重とした。ビス 1 本あたりの許容耐力から設計荷重を求めた結果を表 2-41 に示した。

なお、ビス 1 本あたりの許容耐力は、ビスメーカー提供の技術資料より数値を引用したため、今回の実験に用いた CLT パネルやカラマツ集成材を用いた場合の耐力を実験的に求めたものではない。



表 2-41 設計荷重の算定

仕様	部位	試験体長さ (mm)	ビス間隔 (mm)	ビス本数 (本)	ビス 1 本あたりの許容耐力 (kN)	せん断エリアの許容耐力 (kN)	試験体の設計荷重 (kN)
①	梁桁接合部	3640	150	25	2.48	62.0	124.0
	パネル間接合				4.33	108.3	
②	梁桁接合部	3640	150	25	3.64	91.0	170.6
	パネル間接合				3.41	85.3	

注：①のパネル間接合はビス 2 本をクロス打ちしているため、この 2 本分の耐力をビス接合部 1ヶ所の許容耐力と見なした。

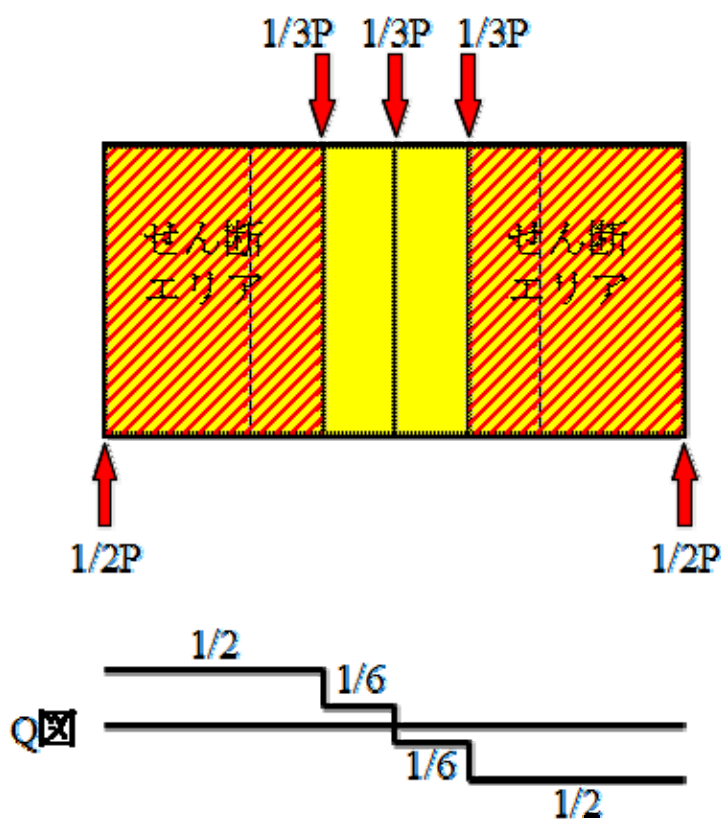


図 2-36 試験体にかかるせん断力

### 3. 3 結果

#### 3. 3. 1 仕様①の結果

図 2-37 に、試験体に加えられた水平荷重と真のせん断変形角の関係を示した。荷重は、せん断エリアに入力されたと見なしうる荷重として総荷重の半分とし、せん断変形角は、せん断エリアにおける加力方向の変形から求まる見かけのせん断変形から、直交方向変形から求まる回転変形を差し引いた値とした。

図 2-37 を見ると、変形角 0.05rad 付近で剛性が若干低下するものの、0.01rad 手前あたりから再び荷重上昇した。これは、CLT パネル留め付けに用いたビスが引張型

のビス（引き抜きに抵抗するように作られたビス）だったため、ある程度試験体の変形が進んでビスに引張力が働くようになってから抵抗力が増したためと考えられる。最大荷重付近で一度除荷したのは、ジャッキのストロークが伸びきってしまったためである。

最終的な破壊は、東側端部の梁材留付ビスが徐々に引き抜かれ（写真 2-9）、それに伴い、負担できなくなったせん断力によって桁材留付ビスが北側の桁材を繊維直交方向に引き裂くと共に（写真 2-10）、南側の桁材は曲げ破壊を生じた（写真 2-11）。また、パネル間接合部の相対変形は、最大で約 13mm 程度であった（写真 2-12）。

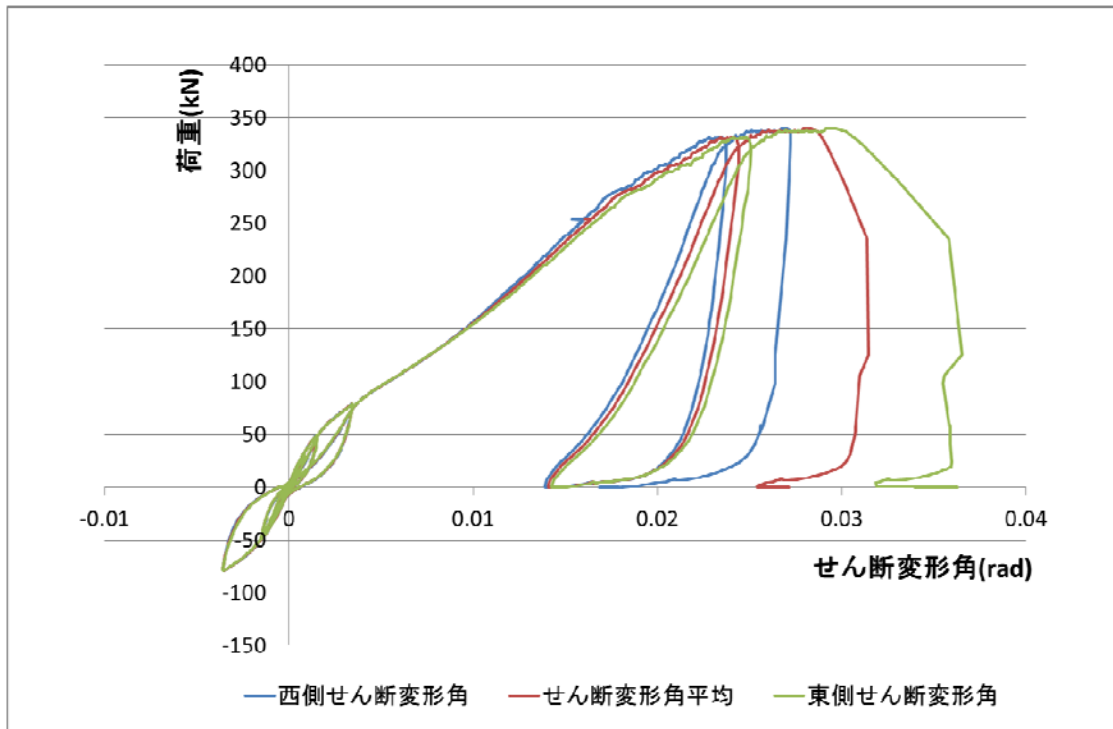


図 2-37 仕様①の荷重と真のせん断変形角の関係



写真 2-9 梁材留付用ビスの引き抜け



写真 2-10 北側桁材の割裂破壊



写真 2-11 南側桁材の曲げ破壊



写真 2-12 パネル間接合部の変形

### 3. 3. 2 仕様②の結果

図 2-38 に、試験体に加えられた水平荷重と真のせん断変形角の関係を示した。荷重と変形角の求め方は前出の通りである。

仕様②では、100kN（総荷重 200kN）程度からスプライン接合部のずれが生じはじめ、荷重の上昇が緩やかになった。ビス頭が徐々にめり込んで行くことにより変形が増大していき、最終的には東側スプライン接合部ビスのパンチングアウトによって荷重が低下した（写真 2-13～2-15）。なお、図 2-38 では水平変形が大きくなったために変位計のストロークを超えてしまい、最大荷重の少し手前（変位計を外す直前）までのデータしかグラフに描いていない。この後の倍率算定もこの範囲の結果から算出している。

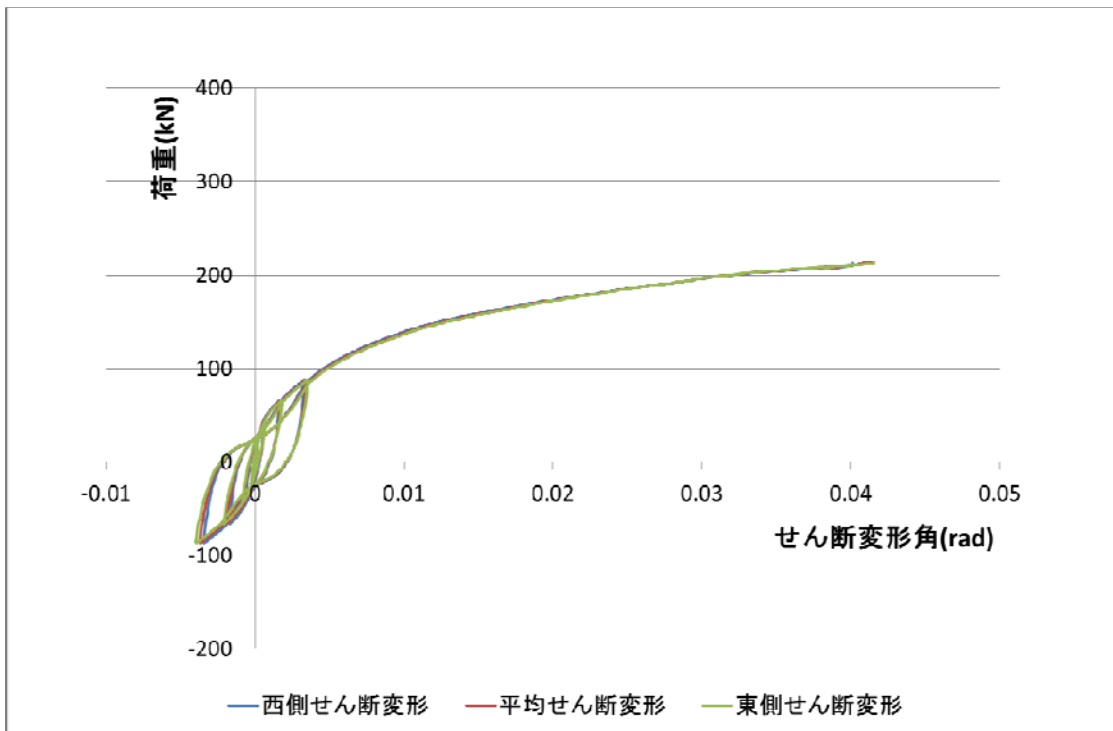


図 2-38 仕様②の荷重と真のせん断変形角の関係



写真 2-13 東側スプライン接合部の破壊



写真 2-14 西側スプライン接合部の破壊



写真 2-15 梁桁材と CLT パネルの変形の違い

### 3. 3. 3 存在床倍率評価

図 2-37、2-38 の左右構面のせん断変形の平均値のデータ（平均せん断変形）を元に、短期基準せん断耐力と存在床倍率の算定を行った。倍率算定の方法は、(財)日本住宅・木材技術センター発行の「木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008 年版)」に収録されている“鉛直構面及び水平構面の剛性と許容せん断耐力を算定するための試験”に準拠した。また、包絡線からの特徴点抽出にあたっては、軽部氏作成の Pickpoint を使用した。

表 2-42 には得られた特徴点データを、表 2-43 にはこれより得られた短期基準せん断耐力及び存在床倍率を算定した結果を示した。仕様②に比べて仕様①の方が最大荷重は高くなったが、現行評価法に当てはめると終局耐力と塑性率を元に求めた基準耐力が最小値となってしまう、引張ビスの粘り強い性状が活かされていない。最終的な床倍率としては、両仕様共に 13 倍強の値となった。

表 2-42 試験結果一覧

	$P_{max}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$K$ (kN/rad)	$E_{negy}$ (kN·rad)	$D_s$	$\gamma P_{max}$ ( $10^{-2}$ rad)	$\gamma y$ ( $10^{-2}$ rad)	$\gamma u$ ( $10^{-2}$ rad)
仕様①	340.4	190.4	332.3	16519	6.65	0.71	2.79	1.15	3.01
仕様②	213.3	115.9	185.9	17782	6.61	0.38	1.29	0.65	4.08

表 2-43 短期基準せん断耐力と存在床倍率の算定

	試験荷重(kN)				$P_0$ (kN/m)	床倍率
	$P_y$	$0.2P_u/D_s$	$2/3P_{max}$	$P_{(1/150)}$		
仕様①	190.4	<u>93.6</u>	226.9	123.7	25.7	13.1
仕様②	115.9	<u>97.0</u>	142.2	117.0	26.7	13.6

注：試験荷重は床長さ 3.64m あたり、 $P_0$  は床長さ 1m あたりの耐力。

### 3.4 まとめ

厚さ 135mm の CLT パネルを床組の上に載せてビス留めした水平構面 2 仕様に対し、水平加力試験を実施した。ビスの仕様によって荷重変形関係に差が出るものの、最終的な床倍率評価結果には大きな差は生じず、いずれも 13 倍以上の非常に高い数値が得られた。現状はビス接合部のせん断性能に関するデータ蓄積が少ないため、定量的な評価をすることは難しいが、CLT を用いた水平構面の水平せん断性能は品確法に定める各種仕様の床倍率を大きく上回ることは確実だと思われる。