

論文 CLT および鉄筋コンクリートによる複合床スラブの構造耐力

大木 文明^{*1}・師橋 憲貴^{*2}・新藤 健太^{*3}・平松 靖^{*4}

要旨: 本研究は CLT(Cross Laminated Timber, 直交集成板)の上部に鉄筋コンクリートを複合させた複合床スラブの構造耐力について実験的に検討を行ったものである。CLT は厚さ 90mm と 150mm の 2 種類を用いた。CLT とコンクリートを一体化させるためのせん断キーは D10 異形鉄筋, M12 ボルト, VB コネクタを用いた。実験の結果, 初期剛性は CLT が厚くなることで高まり, 比例限荷重はコンクリートの初期曲げひび割れ発生荷重付近となった。降伏荷重は D10 異形鉄筋および M12 ボルトに比べ, VB コネクタが高い値を示した。最大荷重は初期剛性と同様に CLT が厚いものが高い値を示した。

キーワード: CLT, 複合床スラブ, 曲げ性能, せん断キー

1. はじめに

我が国では 2010 年に公共建築物等における木材の利用促進に関する法律¹⁾が施行されるなど, 林業の再生や森林の適正な整備を目的とした法律が施行され, 中・大規模建築物への取り組みがなされている。このような現状の中, CLT(Cross Laminated Timber, 直交集成板,以下 CLT と称する)が注目を集めており, 2013 年には日本農林規格²⁾(以下, JAS 規格と称する)が制定された。CLT とは, 図-1 に示すようにひき板(ラミナ)の繊維方向が直交するように積層接着したパネルである。本論文では人工林資源として豊富なスギの有効利用の観点から, スギを用いた CLT を中大規模建築物の床材として使用する可能性について検討を行った。CLT を中大規模建築物の床材として使用するには, 歩行振動といった居住性を向上させる必要がある。この解決策としてヨーロッパでは製材や集成材の梁の上部に鉄筋コンクリート(以下, RC と称する)を打設し, 両者をせん断キーによって一体化させた複合床スラブが実用化されている³⁾。これによって鉄筋コンクリートのヤング係数の高さを利用し木材単体での使用と比較して剛性の向上を図ることを期待できる。本論文は, 国産のスギ CLT を使い, CLT と RC を異なる種類のせん断キーによって一体化させた複合床スラブ(以下, 複合スラブと称する)を作製し, 複合スラブの載荷実験により構造耐力の基礎として鉛直荷重が作用する際の曲げ性能に関する初期剛性, 比例限荷重, 降伏荷重, 最大荷重について検討を行ったものである。さらに, 各種耐力の算出を既往の提案式により試みたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体一覧を示し, 図-2 a) に試験体平面図を, 図-2 b), 図-2 c) に試験体断面を例示する。試験体は複合スラブの下部に CLT を配置し, 上部に RC を配置した。

2.2 CLT の概要

CLT の作製には厚さ 30mm のスギラミナを用いた。CLT の構成は, 表-1 に示すように 3 層 3 プライで厚さ 90mm の異等級構成 Mx60-3-3²⁾(以下, CLT90 と称する)

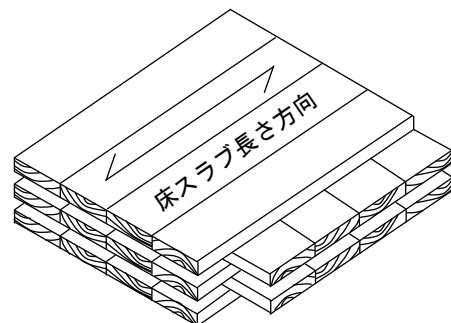


図-1 CLT 概要

表-1 試験体一覧

試験体名	CLT		スタッド
	強度等級	厚さ (mm)	種類
1) CLT90-D10	スギ 異等級構成 Mx60-3-3 ²⁾	90	D10 (11.0 [※])
2) CLT90-M12			M12 (12.0 ^{※※})
3) CLT90-VB			VB (7.5 ^{※※})
4) CLT150-D10	スギ 異等級構成 Mx60-5-5 ²⁾	150	D10 (11.0 [※])
5) CLT150-M12			M12 (12.0 ^{※※})
6) CLT150-VB			VB (7.5 ^{※※})

※:最外径 ※※:ねじ山の外径 (mm)

*1 日本大学大学院生産工学研究科 博士後期課程・森林総合研究所 複合材料研究領域 修士(工学) (正会員)

*2 日本大学生産工学部建築工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 森林総合研究所 複合材料研究領域 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 森林総合研究所 複合材料研究領域 室長 博士(農学)

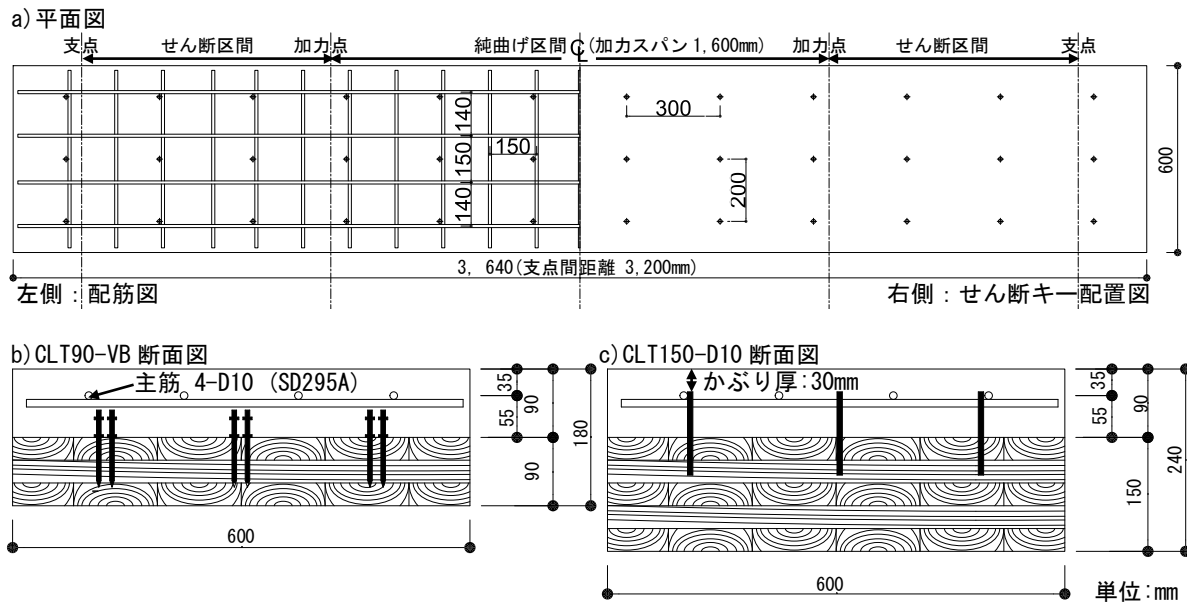


図-2 試験体形状

と5層5プライで厚さ150mmの異等級構成 Mx60-5-5²⁾ (以下、CLT150 と称する)の2種類とし、幅600mm、長さ3,640mmとした。CLT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使用し、幅はぎ接着(幅方向に並ぶラミナ間)はしていない。表-2にCLTの材料特性を示す。平均密度はCLT90が363kg/m³(標準偏差17kg/m³)、CLT150が381kg/m³(標準偏差16kg/m³)、高周波容量式木材水分計を用いて測定した含水率の平均はCLT90が12.7%(標準偏差2.6%)、CLT150が11.7%(標準偏差2.2%)であった。3点曲げ試験⁴⁾によって測定を行った静的ヤング係数の平均値はCLT90が6.51kN/mm²(標準偏差0.62kN/mm²)、CLT150が3.95kN/mm²(標準偏差0.26kN/mm²)であり、全試験体でJAS規格²⁾の下限值(CLT90は4.20kN/mm²、CLT150は3.40kN/mm²)を上回った。CLTとコンクリートの接触面には付着の除去と、生コンクリートの水分がCLTに染み込むのを防止するため、剥離剤を塗布した。

2.3 せん断キーの概要と施工方法

CLTとRCを一体化させるせん断キーには、図-3a)に示すD10(SD295A)異形鉄筋(以下、D10と称する)、図-3b)に示すM12全ネジボルト(ユニクロメッキの一般流通品、焼入れ等の処理はしていない)(以下、M12と

称する)および図-3c)に示すVBコネクタ(引張強度362N/mm²) (以下、VBと称する)の3種類を用いた。これらのせん断キーを用いた理由は、D10は鉄筋コンクリート用棒鋼の日本工業規格(JIS)によって強度が保証されていること、M12は一般的に市販されており購入が容易で実用性があること、VBはヨーロッパ諸国において複合スラブへの使用実績がある⁵⁾、である。D10(最外径:11.0mm)およびM12(ネジ山の外径12.0mm)はともに長さ100mmとした。施工方法はせん断キー外径に1mmを加えた直径の先行穴を設け、表面突出長さを60mm(埋め込み深さ40mm)とし、エポキシ樹脂系接着剤を用いてせん断キーをCLTにあらかじめ鉛直に立てた後、RCの主筋を配置してコンクリートを打設した。VB(直径7.5mm、長さ155mm)はフランジ(外径:12.0mm)のついたネジ形状である。施工方法は45°のV字のネジ打ちとし

表-2 CLTの材料特性

試験体名	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)
1) CLT90-D10	366	11.7	7.02
2) CLT90-M12	344	10.8	6.69
3) CLT90-VB	378	15.7	5.81
4) CLT150-D10	394	11.0	3.82
5) CLT150-M12	363	9.8	4.25
6) CLT150-VB	385	14.2	3.78

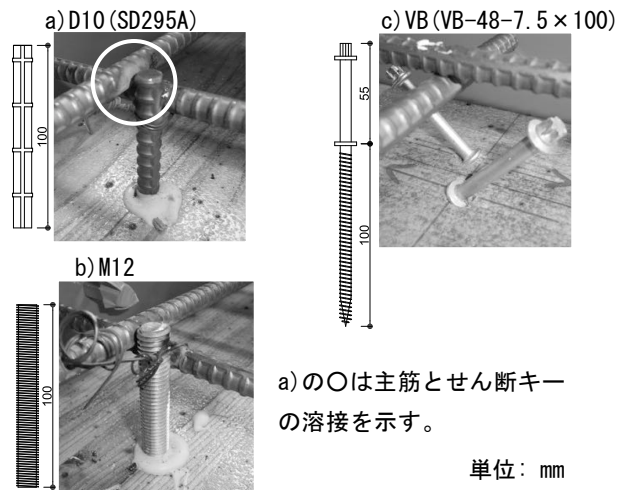


図-3 せん断キー概要および施工状況

た。よって、1 箇所につき 2 本施工した。せん断キースの施工間隔は全試験体で統一し、図-2 a)に示すように長辺方向 300mm、短辺方向 200mm とした。RC の主筋には表-3 に示す D10 異形鉄筋を用い、それらの間隔は長辺方向 140~150mm、短辺方向 150mm とし、長辺方向端部はせん断キースに沿わせて配筋した。せん断キースの本数は、VB を用いた試験体で最大荷重時に RC と CLT の境界面で破壊が生じない数量を求め、D10、M12 は VB と同数とした。なお、主筋の高さを保つため部分的に主筋とせん断キースを溶接した。

2.4 コンクリートの概要

コンクリートは表-4 および表-5 に示す Fc24 の普通コンクリートを用い、厚さ 90mm で打設した。D10 および M12 のかぶり厚は図-2 c)に示すようにせん断キース一端部からの距離 30mm、VB は主筋からの距離 30mm とした。表-5 に示したコンクリートの圧縮強度は、複合スラブの実験を行った材齢 49 日から 84 日の平均値である。

表-3 主筋の材料特性

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D10 (SD295A)	356	517	184

表-4 コンクリートの調査表

単位量(kg/m ³)				
水	セメント	粗骨材	細骨材	AE減水剤
183	313	940	846	3.13

水セメント比:58.5%

表-5 コンクリートの材料特性

設計基準強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
Fc24	31.1	28.2	2.7

2.5 加力方法および測定方法

加力方法は 4 等分点 2 線载荷の一方単調载荷で、支点間距離は 3,200mm、加力スパンは 1,600mm とした。本実験方法採用の理由は、床材としての利用を想定した場合の等分布荷重を仮定したためである。加力には、容量 5,000kN の日本大学生産工学研究所管構造物試験機自動計測制御システムを用いた。荷重は载荷点 2 点の合計で試験機に取り付けたロードセルで測定した。変位は長辺方向に対して中央部 1 箇所と加力点 2 箇所の計 3 箇所を支点との相対変位として測定した。また、コンクリート上面、主筋、CLT 上面および CLT 下面の長辺方向中央部で単軸ひずみゲージによってひずみの計測を行った。

3. 実験結果

図-4 a)に CLT90、図-4 b)に CLT150 を用いた複合スラブの荷重-中央たわみ関係を示す。図-4 b)中の CLT150-D10 のたわみ 40mm 付近のたわみの戻りは、計測用アングルにローラー支点の移動を保護する合板が当たったため、合板を取り外した後、加力を継続した。

3.1 初期剛性

表-6 に実験結果一覧を示す。初期剛性は原点から 0.3Pmax の範囲において最小二乗法を用いて算出した。表-6 中の初期剛性を CLT90 および CLT150 のそれぞれで比較すると、せん断キースの種類による初期剛性への影響は認められず概ね同等の傾向を示した。また CLT90 と CLT150 で同一のせん断キースを用いた複合スラブで比較すると、初期剛性の値は CLT90 に対して CLT150 は 1.5~1.9 倍となり、CLT の厚さが 90mm から 150mm へ 1.7 倍厚くなることにより、初期剛性の増加を確認した。

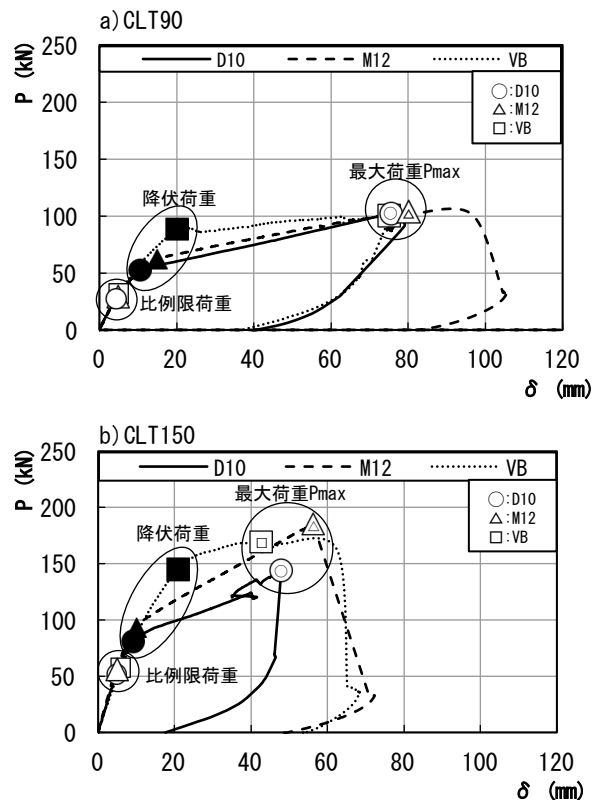


図-4 荷重-中央たわみ関係

表-6 実験結果一覧

試験体名	初期剛性 (kN/mm)	比例限荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
1) CLT90-D10	6.5	27.1	52.3	102.1
2) CLT90-M12	6.4	29.1	62.1	103.7
3) CLT90-VB	6.6	31.8	88.8	100.2
4) CLT150-D10	11.3	51.8	80.9	143.6
5) CLT150-M12	12.2	56.2	93.2	185.5
6) CLT150-VB	10.2	57.2	145.0	169.2

3.2 比例限荷重

比例限荷重は、初期剛性の直線から5%離れた荷重-中央たわみ関係上の荷重値とした。図-5に一例としてCLT90-VBの変形初期の荷重-中央たわみ関係を示す。なお、図中の□印は比例限荷重を示す。表-6および図-4中の比例限荷重をCLT90, CLT150それぞれで比較すると概ね同等の値を示し、せん断キーの種類による影響は認められなかった。一例として図-6にCLT90-D10, 図-7にCLT150-D10の複合スラブ中央部のひずみ分布を示す。なお、主筋以下のコンクリートのひずみは、コンクリート上面と主筋の間のひずみ勾配をCLT上面まで延長し破線で示した。図-6および図-7a)に示すように比例限荷重時はCLTとRCが完全に一体化しており、水平せん断力に抵抗し、相関すべりを生じない完全合成域⁶⁾のため、せん断キーによる差が生じないものと考えられる。図-5中の△印は実験時に目視によって確認したコンクリートの初期曲げひび割れの発生荷重を示す。比例限荷重とコンクリートの初期曲げひび割れの発生荷重を比較すると、コンクリートの初期曲げひび割れの発生荷重付近で複合スラブリットの比例限荷重を迎えており、他の試験体でも同様の傾向が認められた。

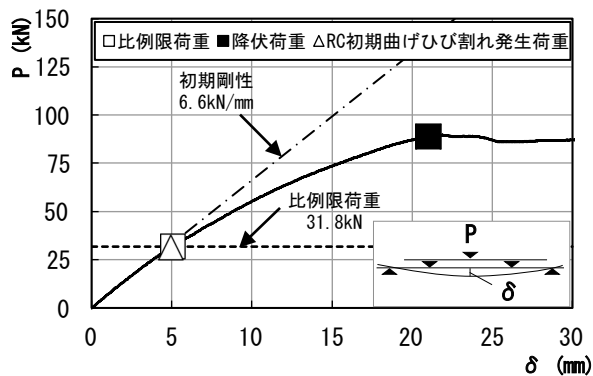


図-5 荷重-中央たわみ関係 (CLT90-VB)

3.3 降伏荷重

複合スラブが曲げ変形した際、図-6および図-7a)に示すように変形初期の完全合成域ではCLTとRCの界面となるCLT上面で、引張力の負担が見られた。その後、変形が進み図-6および図-7c)に示す中央たわみ40mm時ではCLT上面で圧縮力の負担が見られ、CLT上面のひずみが引張から圧縮への移行が見られた。これは水平せん断力に抵抗しつつも相関すべりを生じる不完全合成域⁶⁾へ移行したものと考えられる。そこで、完全合成域から不完全合成域への移行を降伏と定義し、図-6および図-7b)に示すようにCLT上面のひずみが引張から圧縮へ移行し始める荷重を降伏荷重として検討を行った。表-6および図-4中の降伏荷重をCLT90, CLT150そ

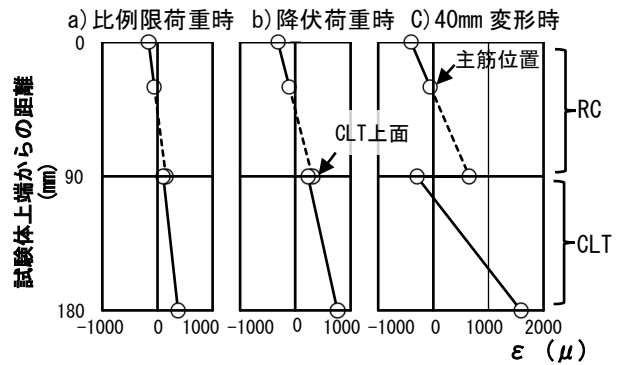


図-6 特定変位時のひずみ分布 (CLT90-D10)

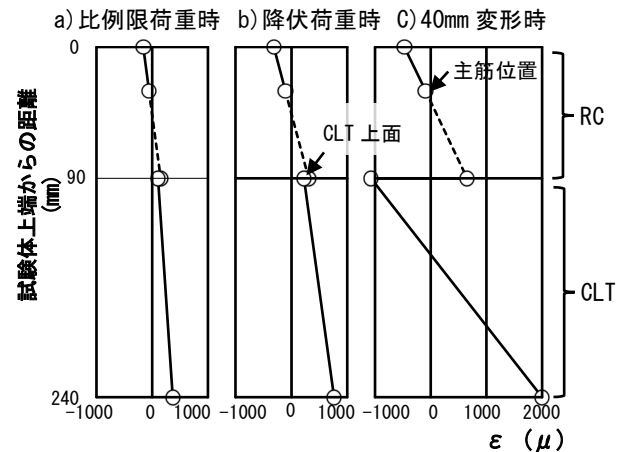


図-7 特定変位時のひずみ分布 (CLT150-D10)

れぞれで比較すると、CLT90, CLT150ともにD10, M12, VBの順に高い値を示し、特にD10に比べVBはCLT90で約1.7倍、CLT150で約1.8倍高い値を示した。これはVBの負担可能なせん断耐力がD10およびM12と比較して高いため差が生じたものと推察する。

3.4 最大荷重

図-4に示した荷重-中央たわみ関係の履歴を見ると、CLT90およびCLT150ともに原点から黒塗りのマーク(●, ▲, ■印)で示した降伏荷重付近まではせん断キーの種類によらず概ね同様な履歴を示した。さらに降伏荷重から最大荷重Pmaxまでの履歴を見るとRC特有の靱性のある履歴を示した。また、せん断キーの種類別に荷重-中央たわみ関係の履歴を比較すると降伏荷重から最大荷重にかけてD10およびM12は直線的な履歴を示すのに対し、VBは曲線的な傾向を示した。これはCLTに対してVBは45°のV字のネジ打ちとしたことで、せん断キーが引き抜き力として抵抗し寄与しているためと考える。表-6および図-4中の最大荷重をCLT90およびCLT150のそれぞれで比較すると、CLT90ではせん断キーの種類によらず概ね同等の値を示し、CLT150ではM12およびVBに比べ、D10が低い値を示した。図-8にCLT150の最終破形状を例示したが、図-8a)に示したCLT150-M12の破壊モードは、CLTの引張側最外層のラミナの曲げ破壊となった。なお、CLT150-VBおよび

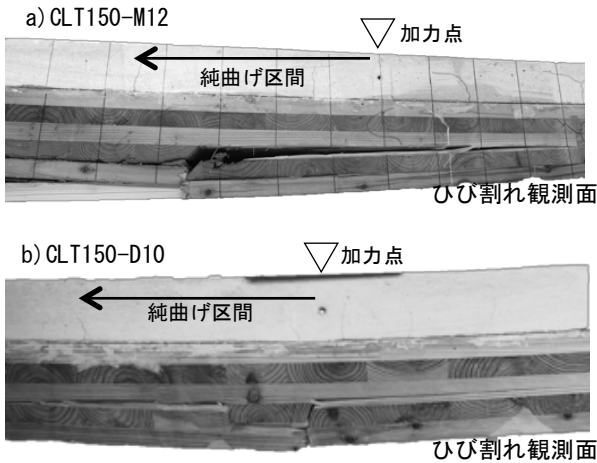


図-8 最終破壊形

CLT90も同様の破壊モードとなった。対して図-8b)に示したCLT150-D10の最終破壊形状は、引張側最外層のラミナの曲げ破壊に加え、CLTのラミナ2層目と3層目の境界で接着層に沿った破壊モードが見られた。CLT150は、CLT90に比べ中立軸からCLTの引張側最外層までの距離が長くなることから、CLTが負担する応力が大きくなる。よってCLT150の最大荷重は、CLT90に比べ、CLTの性能に左右される。以上から、CLT150を用いた試験体の最大荷重のばらつきは、CLTの破壊モードと表-2のCLTの機械特性に影響を受けることが推察される。なお、破壊モードと最大荷重の関係については今後詳細な検討を行っていく予定である。一方、CLT90とCLT150を同一のせん断キーを用いた複合スラブで比較すると、CLT90に対してCLT150はCLTが厚くなり応力中心間距離も大きくなることからCLT150の最大荷重は1.4~1.8倍増加した。

4. 各種耐力の評価

既往の研究において機械的接合によって作製された木材同士の合成梁における応力解析について報告がなされているが⁷⁾、不完全合成域の解法は各層の応力の分布が異なると考えられるため扱いが複雑である。3.3節で述べたとおり、降伏荷重以前では複合スラブは完全合成域と考えられるため、ここでは簡便な完全合成梁理論⁸⁾に基づき3.実験結果で述べた初期剛性、比例限荷重、最大荷重について、既往の提案式を適用して計算値を求め、実験値との評価を行った。なお、算出の際に用いたCLTとコンクリートのヤング係数は表-2および表-5の材料特性値(CL Tについては平均値)を用いた。実験値と4.2~4.3節に述べる計算値の関係を図-9に示す。図-9中のmは実験値を計算値で除した耐力比である。

4.1 初期剛性

図-10にCLTとRCが一体である完全合成域と仮定し、等価断面法⁹⁾を用いて算出した初期剛性を1点鎖線

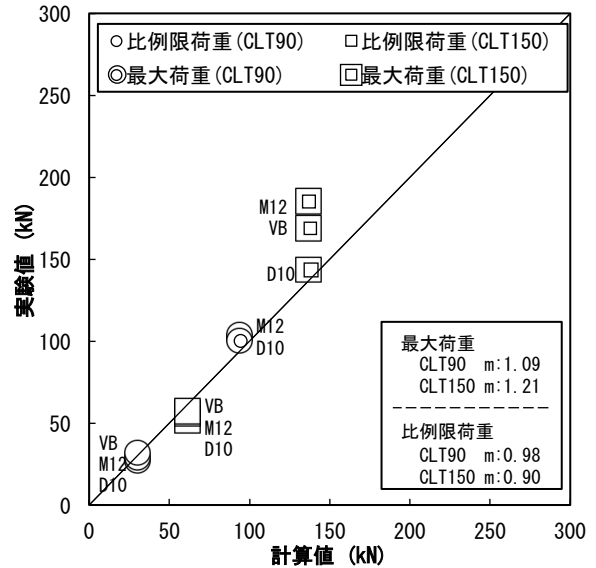


図-9 実験値と計算値の比較

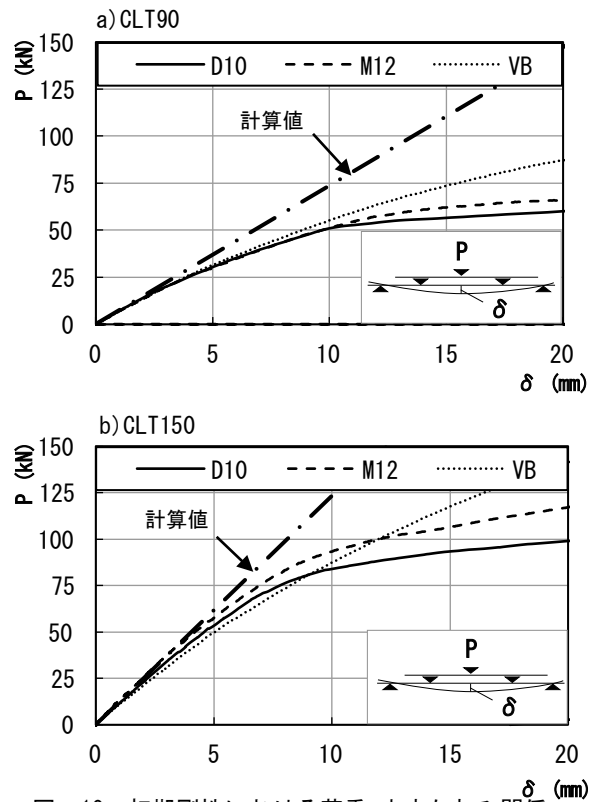


図-10 初期剛性における荷重-中央たわみ関係

で示す。算出の際には中立軸より下部のコンクリートは引張力を負担しないものとし、コンクリートの有効断面は中立軸より上部のコンクリート部分として等価断面2次モーメントを算出し、たわみを計算した。図-10 a)のCLT90および図-10 b)のCLT150は、ともに計算値が実験値を上回った。その差はCLT90では11~15%、CLT150では1~21%であり、全体的に計算値がやや高い値を示した。

4.2 比例限荷重

比例限荷重の算出にあたり、実験値では図-5に示したようにコンクリートの初期曲げひび割れ発生荷重と比例限荷重が概ね同等の値を示したことから、コンクリートの曲げひび割れ発生荷重¹⁰⁾とCLT単体の曲げ強さ²⁾による荷重の累加値を比例限荷重の計算値とした。図-9に比例限荷重の実験値と計算値の関係を○、□印で示す。耐力比 m について見るとCLT90およびCLT150で $m=0.98, 0.90$ と良い相関を示した。このことから複合スラブの比例限荷重はコンクリートの曲げひび割れ発生荷重を基に算出できることが可能と考える。

4.3 最大荷重

最大荷重はCLTの引張側最外層のラミナが引張強度に達したものとして求めた。計算値を求める際の応力中心間距離はRCの主筋の重心から引張側最外層ラミナの中央までの距離とした。計算値と実験値の関係を図-9中の◎、回印で示した。CLT90は $m=1.09$ 、CLT150は $m=1.21$ となり安全側の値となった。洪沢ら¹¹⁾のCLT単体の曲げ性能を検討した研究によると、引張側のたて継ぎ(フィンガージョイント)部の破壊が発生すると試験体の破断となることが報告されている。図-8に示したように本実験においてもCLTの最外層ラミナの引張破壊によって最大荷重が決定したため、主筋の重心から引張側最外層ラミナの中央までの距離を応力中心間距離として用いることで最大荷重を求めることが可能であると考えられる。

5. まとめ

CLTの上部にRCを打設し、せん断キープによって一体化させた複合スラブの構造耐力について実験的に検討を行った結果、本実験の範囲内で以下に示す知見が得られた。なお、せん断キープはD10、M12、VB(VBコネクタ)の3種類で比較を行った。

- 1) 初期剛性はせん断キープの種類による差は認められず、CLTが厚くなることで初期剛性が高くなることが認められた。
- 2) 比例限荷重はコンクリートの初期曲げひび割れ発生荷重付近となることが明らかとなった。
- 3) 降伏荷重は、CLTとRCの界面のひずみが初期の引張ひずみの増加から圧縮ひずみへの移行が始まる荷重を降伏荷重として比較すると、D10、M12に比べVBを用いた複合スラブは高い値を示した。
- 4) 最大荷重はCLTが厚くなることでRCとCLTの引張側最外層のラミナの応力中心間距離が大きくなることから最大荷重の増加が認められた。
- 5) 複合スラブの各種耐力を既往の提案式を用いて算出できることが示唆された。

以上複合スラブの構造耐力について検討を行った結果、

CLTとRCをせん断キープによって一体化することで降伏荷重後、RC特有の靱性のある履歴を示したことから複合スラブは中大規模建築物の床材としての有用性があるものと考えられる。今後は複合スラブの降伏荷重を含む各種耐力の算定について断面における応力の分布に基づく検討およびせん断キープが負担するせん断応力について検討を行いたいと考える。

謝辞

本実験は平成25年度岡山県森林整備加速化・林業再生事業地域材利用開発「CLTの利用開発・研究事業」の一環として実施されたものであり、その際CLTの製造は銘建工業(株)の協力を得た。またエポキシ樹脂系接着剤は(株)オーシカに提供いただいた。

日本大学生産工学部建築工学科の鎌田貴久専任講師および藤本利昭教授、(有)ティー・イー・コンサルティングの宮林正幸氏、森林総合研究所の宮武敦氏には助言を賜った。

参考文献

- 1) 林野庁:公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律,参照: <http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/> (閲覧日:2018年12月24日)
- 2) 直交集成板の日本農林規格,農林水産省告示第3079号,2013.12
- 3) Seven Thelandersson and Hans J. Larsen :Timber Engineering, 21 Composite Structures, Ario Cecotti, 2003.12
- 4) (公財)日本住宅・木材技術センター:構造用木材の強度試験マニュアル,2011.3
- 5) Andreas Manaridis : Evaluation of timber-concrete composite floors , Avdelningen för Konstruktionsteknik Lunds Tekniska Högskola Lund Universitet,2010.7
- 6) 園田里見:重ね梁の不完全合成理論とその応用,木材工業,Vol.69,No.3,pp.104-109,2014
- 7) 神谷文夫:木質釘着パネルの非線形曲げ解析 第1報 基本モデルとしての釘着梁の解析,林業試験場研究報告,第329,pp.121-142,1984.12
- 8) 清田清司,高須治男:建築土木構造マニュアル,理工学社,1989.12
- 9) 伊藤国徳,今西祐志:高強度かつ軽量な木質材料の開発,平成20年度,岐阜県生活技術研究所研究報告 No.11,pp.24-27
- 10) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説,2010.6
- 11) 洪沢龍也ほか:スギを用いて製造したクロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)の強度性能 その2面外曲げ性能,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.117-118,2013.