

# CLT と鉄筋コンクリートをラグスクリーによって接合した 複合床スラブの構造耐力

日大生産工(院) ○大木 文明 日大生産工 師橋 憲貴  
森林総研 新藤 健太 森林総研 平松 靖  
森林総研 宮武 敦

## 1. はじめに

近年、国内外でマスティンバーを用いた中・大規模木造建築物への取り組みがなされている中、CLT(Cross Laminated Timber)を単体で中・大規模建築物の床材として使用する場合、床振動といった居住性能や剛性不足によって設計時にスパンの制限が生じるといった点が課題として挙げられる。これらの課題を解決するため、CLTと鉄筋コンクリート(以下、RCと称する)を積層し、せん断キーによってこれらを接合した複合床スラブ(以下、複合床スラブと称する)について検討を行った。

本報告では複合床スラブの曲げ実験を行った結果を考察し、せん断キーの施工方法が曲げ性能に与える影響について評価を行うとともに、降伏に至るまでの挙動について検討を行った。

## 2. 実験概要

**2.1 試験体概要** Table 1に試験体一覧を、Fig.1 a)にCS-L90-150のせん断キー配置図および配筋図を、b)に長辺方向断面図をそれぞれ示す。試験体は下部に配置したCLTにせん断キーを施工し、CLTの上部に鉄筋を配筋した後、コンクリートを打設してRCとした。試験体のパラメータはせん断キーの配置ピッチおよび打込み深さとした。

**2.2 CLTの概要** CLTのラミナには厚さ30mmのスギを用い、CLTの強度等級および層構成は、直交集成板の日本農林規格<sup>1)</sup>(以下、JASと称する)に定められる3層3プライのMx60-3-3とした。寸法は厚さ90mm、短辺(弱軸)方向600mm、長辺(強軸)方向2,000mmとし、CLTの外層ラミナの繊維方向が長辺方向と平行となるよう使用した。CLTの積層接着には、水性高分子ーイソシアネート系木材接着剤を使用し、ラミナの幅方向の接着は行っていない。CLTの材料特性をTable 2に示す。複合床スラ

ブの試験体製作前に支点間距離1,600mmの中央集中荷試験によって測定したCLT単体の見かけの曲げヤング係数の平均値は6.70kN/mm<sup>2</sup>であり、JASの基準値の平均値(5.2kN/mm<sup>2</sup>)を満たしていた。全乾法によって測定を行った含水率の平均値は12.1%であった。また、せん断キーによるCLTとRCの接合

Table 1 試験体一覧

| 試験体名          | せん断キー        |       |    |       |      |
|---------------|--------------|-------|----|-------|------|
|               | 全長<br>(首下長さ) | 埋込み深さ |    | 配置ピッチ |      |
|               |              | CLT   | RC | 長辺方向  | 短辺方向 |
| (mm)          |              |       |    |       |      |
| 1)CS-L90-150  | 98<br>(90)   | 38    | 60 | 150   | 200  |
| 2)CS-L90-300  |              |       |    | 300   |      |
| 3)CS-L90-500  |              |       |    | 500   |      |
| 4)CS-L150-300 | 158(150)     | 90    | 68 | 300   |      |

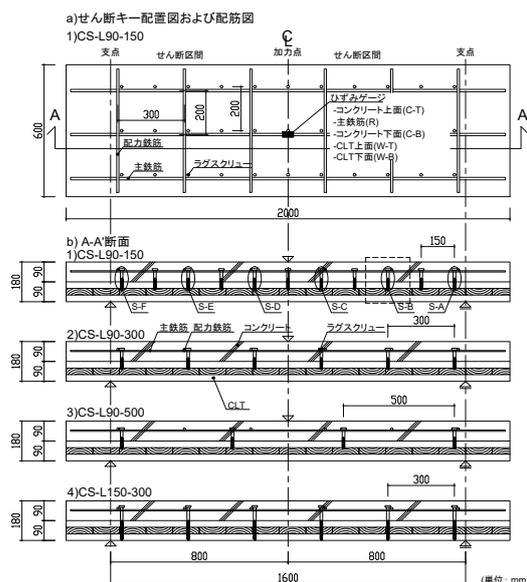


Fig.1 試験体図 (ラグスクリー-L90)

Table 2 CLTの材料特性 (Mx60-3-3)

| 試験体名          | 密度<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 含水率<br>(%) | 曲げヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|---------------|----------------------------|------------|----------------------------------|
| 1)CS-L90-150  | 405                        | 12.1       | 6.57                             |
| 2)CS-L90-300  | 407                        |            | 6.85                             |
| 3)CS-L90-500  | 409                        |            | 6.93                             |
| 4)CS-L150-300 | 414                        |            | 6.43                             |

Load Carrying Capacity of Composite Slabs Consisting of CLT and RC joined with Lug Screws

Fumiaki OHKI, Noritaka MOROHASHI, Kenta SHINDO,  
Yasushi HIRAMATSU and Atsushi MIYATAKE

の効果を直接的に確認するため、試験体のせん断断面にはCLTとRCの付着を防止するために合板型枠の表面強化剤を塗布した。

**2.3 RCの概要** コンクリートは呼び強度24N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリートを用い、鉄筋のかぶり厚さ30mmを確保して厚さ90mmを打設した。打設後は屋根のある屋外にて試験体にビニールシートを掛けて養生を行った。実験前後に測定を行ったコンクリートの材料特性の平均値をTable 3に示す。曲げモーメントを負担する主鉄筋および主鉄筋と直交方向に配した配力鉄筋には、SD295AのD10異形鉄筋を用い、Fig.1に示すように配筋間隔は主鉄筋が200mm、配力鉄筋が300mmのシングル配筋とし、主鉄筋はせん断キーに添わせて配筋した。なお、引張試験によって確認した降伏応力は364N/mm<sup>2</sup>であった。

**2.4 せん断キーの概要と施工方法** CLTとRCを接合するせん断キーには、径がM12のラグスクリューを用いた。長さは全長98mmで首下長さ90mm(以下、L90と称する)と、全長158mmで首下長さ150mm(以下、L150と称する)の2種類を用いた。いずれのラグスクリューも試験機のつかみ具に装着するための長さが足りないことから、L90およびL150と同様の鋼材で製造されていることを製造メーカーに確認した上で、M12六角ボルト(全長600mm)を用いて引張試験を行い、せん断キーの材料特性の参考値とした。六角ボルトの引張試験の結果をTable 4に示す。施工方法は、ラグスクリューのネジ部谷径の73%(40~70%が推奨)であるφ6.5の先行穴を設け、Table 1に示すようにL90はCLTへ38mm、コンクリートへ60mm、L150はCLTへ90mm、コンクリートへ68mm埋込んだ。

**2.5 加力方法および測定方法** 加力方法は支点間距離1,600mmの中央集中载荷の一方方向単調载荷とし、最大荷重後、十分に荷重が低下するまで载荷した。本試験方法採用の理由は、せん断キーが曲げ性能に与える影響を検討することを目的として、全区間にせん断力が作用するように設定したためである。荷重は試験機に取付けたロードセルで測定した。複合床スラブの鉛直変位はRCの支点との相対変位とし、検長50mmの変位計を用いて長辺方向中央部の加力点を測定した。RCおよびCLTのひずみはFig.1 a)およびPhoto.1に示すように単軸ひずみゲージを用い、RC上面のコンクリート(C-T)、主鉄筋(R)、RC下面のコンクリート(C-B)、CLT上面(W-T)、CLT下面(W-B)それぞれにおいて測定した。また、Fig.1に示す短辺方向中央

Table 3 コンクリートの材料特性

| 呼び強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 割裂強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| 24                           | 26.8                         | 21.4                           | 2.1                          |



Photo.1 施工状況

Table 4 せん断キーの材料特性(参考値)

|      | 0.2%耐力               | 引張強度 | 引張ヤング係数               |
|------|----------------------|------|-----------------------|
|      | (N/mm <sup>2</sup> ) |      | (kN/mm <sup>2</sup> ) |
| 平均   | 508                  | 542  | 212                   |
| 標準偏差 | 30                   | 35   | 10                    |

部のせん断キーについては、Photo.1および後述するFig.6に示すように、せん断キーのコンクリート埋込み側におけるCLTとRCの界面付近の引張および圧縮ひずみを単軸ひずみゲージを用いて測定した。

### 3. 実験結果

**3.1 荷重—変位関係および力学的特性値** Fig.2に長辺方向中央部(6v-1)の荷重—変位関係を示し、併せて比例限度荷重、降伏荷重、最大荷重をそれぞれ示す。いずれの試験体も20kN付近に至るまでの加力初期においては概ね同様の履歴を示した。その後、25~40kN付近で勾配が緩やかになった以降も変位の増加とともに荷重の増加が認められた。最大荷重はいずれの試験体もCLTの破壊によって決定した。Photo.2に示すせん断キーにL90を用い、配置ピッチを150mmとしたCS-L90-150の最終破壊形状は、CLTの接着層に沿って割れが生じるせん断破壊であった。一方、せん断キーにL90を用い、配置ピッチが300mm、500mmのCS-L90-300、CS-L90-500およびせん断キーにL150を用い、配置ピッチが300mmのCS-L150-300ではCLTが曲げ破壊を生じ、加力点付近の引張側最外層ラミナの破断が認められた。また、RCにおけるコンクリートの曲げひび割れは、いずれの試験体もコンクリート下面のCLTとRCの境界面から生じ、加力点付近に向かって進展した。

力学的特性値の算出方法について、初期剛性は最も直線域が長いと認められる0.1Pmaxから0.15Pmaxの範囲における荷重—変位関係の傾きを、最小二乗法を用いて算出した。比例限度荷重は初期剛性の直線から荷重が5%離れた点の荷重値とした。降伏荷重は木造軸組工法住宅の許容応力度設計に記載されている完全弾塑性モデルを参考に下記の1) から4)に示す方法で降伏荷重を算出した。

- 1) 荷重—変位関係上の0.1Pmaxと0.15Pmaxを結ぶ第Ⅰ直線を引く。
- 2) 荷重—変位関係上の0.15Pmaxと0.9Pmaxを結ぶ第Ⅱ直線を引く。
- 3) 荷重—変位関係に接するまで第Ⅱ直線を平行移動し、これを第Ⅲ直線とする。
- 4) 第Ⅰ直線と第Ⅲ直線との交点の荷重を降伏荷重とする。

最大荷重(Pmax)は荷重—変位関係における荷重の最大値とした。Fig.2およびTable 5に上記の手順で求めた実験結果を示す。せん断キーの配置ピッチが異なる試験体で比較すると、比例限度荷重、降伏荷重および最大荷重は、せん断キーの配置ピッチを短くし、密に配置することで値が上昇する傾向が認められた。また、せん断キーの配置ピッチを同一とし、せん断キーの打込み深さが異なる試験体で比較すると、打込み深さを深くすることでいずれの値が上昇する傾向が認められた。一方、初期剛性をせん断キーの配置ピッチで比較すると、150mm間隔で密に配置したCS-L90-150では、せん断キーの配置ピッチを300mmおよび500mmとしたCS-L90-300とCS-L90-500と比較して高い値を示したが、CS-L90-300とCS-L90-500とを比較すると、同程度であった。また、せん断キーの配置ピッチを同一とし、せん断キーの打込み深さで比較すると、打込み深さを深くすることで値の上昇が認められた。

**3.2 初期剛性低下の要因** Fig.3に一例としてCS-L90-150におけるCLTおよびRCの荷重—ひずみ関係を示し、併せて比例限度荷重、降伏荷重を示す。20kN付近に至るまでの加力初期ではコンクリート上面(C-T)および主鉄筋(R)で圧縮力、コンクリート下面(C-B)、CLT上面(W-T)およびCLT下面(W-B)では引張力の負担が認められた。その後、比例限度荷重付近を

超えると、測定箇所によってひずみの変化の傾向が異なり、コンクリート上面(C-T)およびCLT下面(W-B)では荷重の増加に対するひずみの変化量が大きくなり、主鉄筋(R)は圧縮ひずみから引張ひずみへ、CLT上面(W-T)は引張ひずみから圧縮ひずみへ移行した。

Fig.4にコンクリート下面のひずみと荷重の関係を示し、併せて比例限度荷重および実験前後におけるコンクリートの割裂強度時のひずみの平均値を示す。いずれの試験体も割裂強度時のひずみ付近で比例限度荷重に達していることがわかる。このことからコンクリート下面に曲げひび割れが生じることで剛性が低下し、比例限度荷重を迎えたものと考えられる。比例限度荷重以降はCS-L90-300、CS-L90-500およびCS-L150-300では荷重が増加してもひずみは概ね一定の値を示したのに対し、せん断キーの配置ピッチを密にしたCS-L90-150では比例限

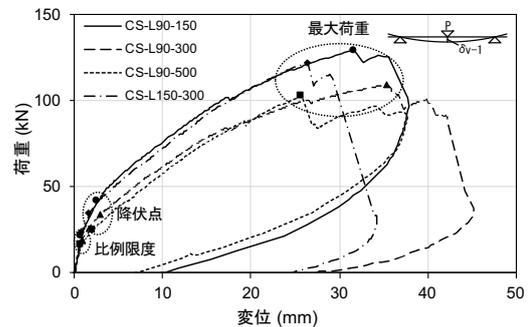


Fig.2 荷重—変位関係

Table 5 実験結果一覧

| 試験体名          | 初期剛性 (kN/mm) | 比例限度荷重 (kN) | 降伏荷重 (kN) | 最大荷重 (kN) |
|---------------|--------------|-------------|-----------|-----------|
| 1)CS-L90-150  | 28.8         | 21.6        | 41.5      | 128.9     |
| 2)CS-L90-300  | 22.6         | 19.2        | 33.9      | 109.4     |
| 3)CS-L90-500  | 22.8         | 16.5        | 25.2      | 102.7     |
| 4)CS-L150-300 | 29.2         | 23.9        | 35.2      | 122.2     |

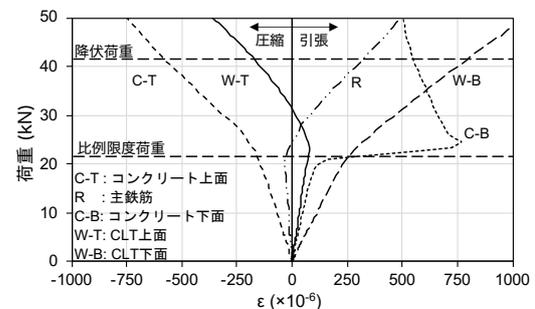


Fig.3 荷重—ひずみ関係 (CS-L90-150)

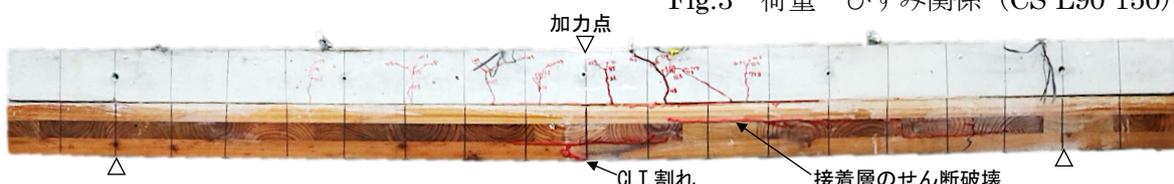


Photo.2 最終破壊形状 (CS-L90-150)

度荷重付近で急激にひずみの増加が見られた後、荷重の増加に伴いひずみが減少し、約50kN以降は概ね一定の値を示した。

### 3.3 せん断キーによる接合と降伏荷重の関係

Fig.5に一例としてCS-L90-150のひずみ分布を示す。a)に加力初期として20kN時、b)に比例限度荷重時、c)に降伏荷重時をそれぞれ示した。c)に示す降伏荷重時のRC下面は、コンクリートの曲げひび割れによって応力が伝達されていないと考えられるため、主鉄筋からコンクリート下面およびコンクリート下面からCLT上面までのひずみは破線で示した。a)に示す加力初期のひずみ分布を見ると、RC下面とCLT上面のひずみの差がわずかに認められることから加力初期から平面保持が崩れた不完全合成梁<sup>2)</sup>となっていることがわかる。また、b)に示す比例限度荷重時ではさらに顕著に認められた。c)に示す降伏荷重時ではCLTとRCそれぞれが圧縮力、引張力を負担するまで接合が弱まり、明確に平面保持が崩れていることがわかる。

Fig.6に一例としてCS-L90-150における荷重—せん断キーの曲げひずみ関係を示し、併せて比例限度荷重、降伏荷重を示す。Fig.6中の線種の違いはFig.1 b)に示したせん断キーのひずみ測定位置(S-A~S-F)に対応させたものである。曲げひずみはFig.6中の凡例に示す引張側のひずみと圧縮側のひずみの差を平均したものである。荷重—曲げひずみ関係を見ると、20kN付近に至るまでの加力初期において測定位置によらず明確な曲げひずみの増加は認められなかった。その後、比例限度荷重付近から曲げひずみが増加し、降伏荷重付近以降は荷重の増加に対する曲げひずみの変化量が増加する傾向が認められた。測定位置で比較すると、長辺方向中央部のS-CおよびS-Dに比べ、S-BおよびS-Fのような長辺方向端部に向かった位置で大きな曲げひずみを示す傾向が認められた。このことから、複合床スラブは、CLTとRCの境界付近でCLTへのめり込みを含むせん断キーの曲げ変形が生じ、平面保持が明確に崩れたことによって、降伏を迎えたものと考えられる。

### 4. まとめ

本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 比例限荷重、降伏荷重、最大荷重はせん断キーの配置ピッチを密にする、または打込み深さを深くすることで、値の上昇が認められた。
- 2) 複合床スラブは加力初期から平面保持が崩れた不完全合成梁となっていることが確認された。

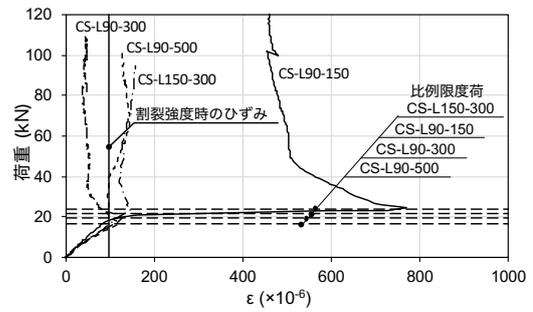


Fig.4 荷重—コンクリート下面のひずみ関係

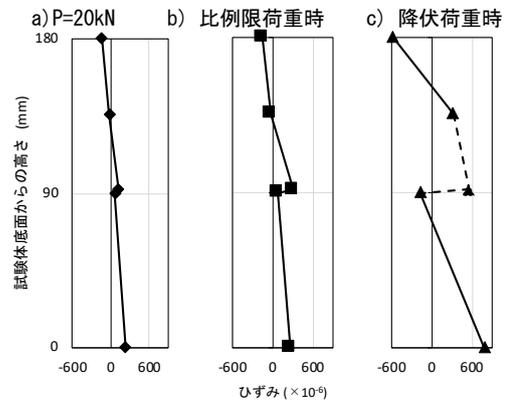


Fig.5 ひずみ分布 (CS-L90-150)

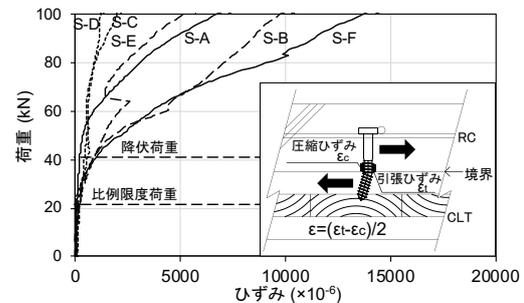


Fig.6 荷重—せん断キーの曲げひずみ関係 (CS-L90-150)

- 3) 比例限度はコンクリートの曲げひび割れによって剛性が低下することで生じるものと推察した。
- 4) 降伏は、せん断キーが曲げ変形を生じ、明確に平面保持が崩れることで生じるものと推察した。

謝辞 本研究は(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所交付金プロジェクト(課題番号201914)の研究成果である。

### 参考文献

- 1) 農林水産省: 直交集成板の日本農林規格(JAS3079号: 2019), 2019.8
- 2) Thelandersson, S. and Larsen, H.: Timber Engineering, 21 Composite Structures, Cecotti, A., WILEY, 2003.12