

# コンクリート地覆を取り付けた CLT床版接合部の数値モデル化

有山 裕亮<sup>1</sup>・海老 拓紀<sup>2</sup>・高橋 佑輔<sup>3</sup>・後藤 文彦<sup>4</sup>・佐々木 貴信<sup>5</sup>・豊田 淳<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島クレス(株) (〒107-0051 東京都港区元赤坂 1-5-31 新井ビル 2F)

E-mail: kan-t-01338q@coop.kajima.com

<sup>2</sup>正会員 五洋建設株式会社 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: hiroki.ebi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>秋田大学工学部 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: s7016833@s.akita-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 秋田大学大学院理工学研究科 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: gotou@gipc.akita-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 北海道大学大学院農学研究院 (〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目)

E-mail: tak-sas@for.agr.hokudai.ac.jp

<sup>6</sup>正会員(株) 新日本コンサルタント社会基盤部 (〒930-0142 富山県富山市吉作 910-1)

E-mail: atsushi.toyoda@shinnihon-cst.co.jp

CLT は、疲労耐久性が高く軽量であることから橋梁床版としても期待されているが、コンクリート地覆に設置される市販の防護柵を利用するには、CLT 床版にもコンクリート地覆を固定する必要がある。CLT 床版にコンクリート地覆をラグスクリューで固定した場合、防護柵に風荷重や車両衝突荷重が加わった際に、このラグスクリューによる接合部がどのような耐荷性能を有しているかを明らかにすることが重要である。そこで本研究では、コンクリート地覆とラグスクリューで接合された CLT 床版を汎用 3D 有限要素ツールでモデル化し、接合部の挙動を比較的簡易なモデルで解析する方法を提案する。

**Key Words:** CLT, bridge deck, contact analysis, elasto-plastic

## 1. はじめに

CLT (Cross Laminated Timber: 直交集成板) は、挽き板(ラミナ)を繊維方向が直交するように積層接着した木質パネルであり、これまでにない大きなサイズの面材の製造が可能となることから欧米では CLT を壁や床などに用いた中高層建築物等の建設が急増している。国内においても中高層建築物等への CLT の活用により新たな木材需要の創出が期待され、国産 CLT の普及に向けた取り組みが盛んに行われている。林野庁と国土交通省は CLT の普及に関する施策を積極的に進めるとともに、CLT の普及に向けたロードマップ<sup>1)</sup>も示している。こうした施策に対応して CLT に関する研究も盛んに行われているが、その殆どが建築構造を対象にしているのが現状である。とはいえ、国内でも幅 3m×長さ 12m×厚さ 270mm クラスのサイズが製造可能となっており、単位体積重量がコンクリートの  $\frac{1}{6} \sim \frac{1}{4}$  程度と軽量であることを考えると、土木分野への適用を考えた場合の長所となり得る。こうした特徴から、CLT の新たな用途の一つとして橋梁の床版としての可能性に着目した研究が行われている<sup>2),3),4)</sup>。

長寿命化対策が求められている国内の橋梁総数は約

70 万橋(橋長 2m 以上)とされている。このうち架設後 50 年以上が経過している橋梁は、2014 年の時点で全体の 18% だったが、10 年後には 43%、20 年後には 67% に達することが試算されており、経済性に優れた補修工法の開発が求められている。

橋梁の機能低下は、床版の劣化に起因するものが最も多く、コンクリート(RC)床版の交換補修が多いのが実態である。このような背景から、RC 床版の代替として CLT を活用できないかという着想に至った。

CLT を床版として活用する上で懸念されるのは、活荷重の繰り返しによる疲労と木材の腐朽による劣化の二つである。前者については、CLT 床版の曲げ疲労試験や輪荷重走行試験を繰り返し行い、十分な疲労耐久性を有することが確認されている<sup>3)</sup>。後者については、防腐薬剤を注入するような従来の化学的処理ではなく、CLT 全体を FRP シートで被覆したり、ポリマーセメントで包埋する物理的な処理で防水・防腐効果を得る方法が開発されている<sup>2)</sup>。このような現状から、RC と同等の基準強度を有する CLT は床版材料として期待できるが、実用化に向けては防護柵(ガードレール)の設置方法に関する課題が残されている。

本研究では、コンクリートに取り付けられるタイプの

既製品の防護柵を利用するために、CLTにコンクリート地覆を固定する方法を提案する。コンクリート地覆はラグスクリューによってCLTと結合されるが、防護柵に荷重が加わった際にこの接合部がどのような耐荷性能を有しているかを明らかにすることが重要である。

そこで、まずラグスクリューによって接合されたCLTとコンクリートの試験体に対して押し抜き試験を行い、荷重-変位関係を明らかにする。その後この試験体を有限要素法を用いてモデル化し数値解析を行い、実験値と解析値を比較することで実現象に近い現象を数値的に再現できるか検討する。

## 2. CLT-コンクリート押し抜き試験

### (1) 実験概要

対象とする試験体は図-1、図-2のように、7層8プライのCLTに対しラグスクリューを打ち込み、コンクリートを打設したものを2体製作し、添接板でつなぎ合わせたものである。同時に製作したコンクリート圧縮強度供試体の平均圧縮強度は35.9MPaである。CLT厚さ方向の中央部の2プライは繊維方向が平行な1層となっており、この繊維直角方向（図-1では高さ方向）が載荷方向である。



図-1 CLT-コンクリート接合部試験体

ラグスクリュー（φ16 mm, L=350 mm（ねじ部 200 mm, 頭部座金含む）図-3）のCLTに対する打ち込み深さは200mmである。この試験体のCLT部分の上面400mm×500mmの範囲に約500kNまでの荷重を載荷して変位を測定する。加力速度は1.5 mm/minとし、載荷位置において木材に対してめり込みが生じないように、ゴム板を挟んでいる。変位の測定位置は図-4に示すように、ラグスクリューの打ち込み位置で、変位計1~4で表側の鉛直変位、変位計5~8で裏側の鉛直変位、変位

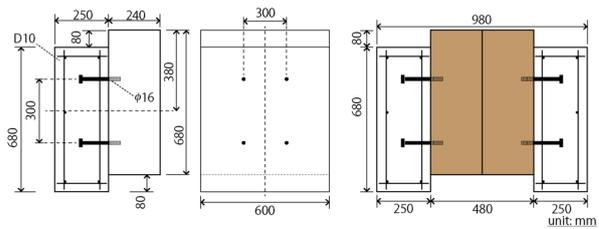


図-2 試験体の寸法



図-3 ラグスクリュー

計9, 10で表側の水平変位を測定する。鉛直変位はCLTとコンクリートの相対変位であり、水平変位はCLT同士の相対変位である。

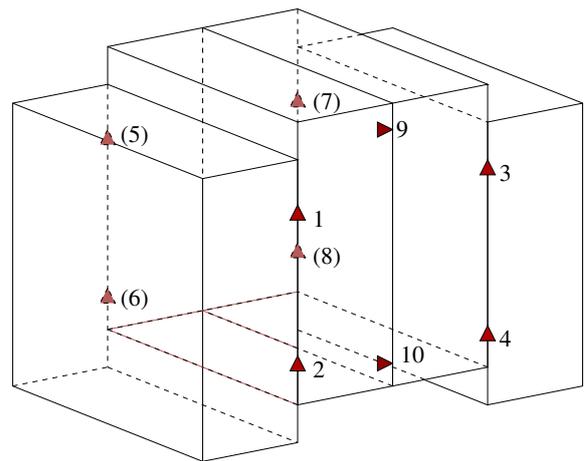


図-4 変位の測定位置

### (2) 実験結果

載荷試験の鉛直変位を図-5に、水平変位を図-6に示す。図中の数字は図-4で示した変位計番号に対応している。鉛直変位は、左右で10mm程度差があるが、上下、表裏での差はほとんどなく、ほぼ重なっている。左右に差が出たのは、載荷時のめり込みなど何らかの不整やその他の左右のばらつきの影響ではないかと考えられる。変位計3, 4, 7, 8側の方が変位計1, 2, 5, 6側よりも早めに剛性が落ち始め、230kNほどの荷重が作用した段階でCLTの積層面で割れが生じ、1, 2, 5, 6側も剛性が落ちて3, 4, 7, 8側と同じぐらいの傾きとなるが、

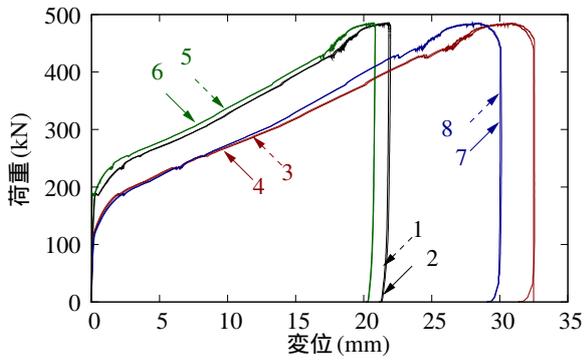


図-5 荷重と鉛直変位の関係

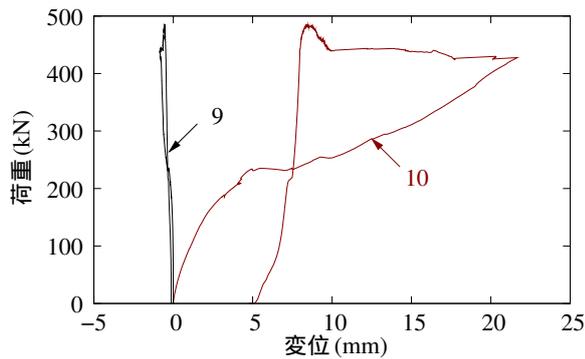


図-6 荷重と水平変位の関係

その後も荷重に抵抗して最終的に下から上まで大きく亀裂が入った。水平変位は、試験体上部では圧縮力が作用し、変位はほとんど見られないものの、下部ではCLTに亀裂が生じた際に一時的に20mm程度の変位が生じるが、その後10mm程度戻っている。載荷後の試験体(図-7)に見られる積層面のひび割れ(図-8)より、ラグスクリューの先端部付近で亀裂が発生したことが分かる。この最終的な破壊については、つき合わされたCLTの離間を添接板が拘束したためにラグスクリュー先端付近に引張を集中させた可能性もあるが、今回はラグスクリューが変形しながらCLTにめり込むまでの挙動を対象とする。

### 3. 予備解析(一面せん断試験)

CLT-コンクリート押し抜き試験を数値モデル化するに先だって、押し抜きせん断によりラグスクリューが降伏する比較的簡単なモデルとして、文献<sup>5)</sup>の角材の一面せん断試験を対象に、ラグスクリューの木材へのめり込みによる特有の変形挙動を、接触解析や弾塑性解析を用いてある程度簡易的に再現することを試みる。



図-7 載荷後の試験体



図-8 割れが生じた積層面

#### (1) 解析手法

本研究では有限要素解析ツールとして、MSC Marc/Mentat 2018.0.0を用いた。MentatはMarc専用のプリ・ポストプロセッサで、ユーザーの定義した接触ボディの運動や変形を評価し、自己の接触を含めた接触と解離を自動的に判定して解析を行う事ができる全自動接触解析機能<sup>3)</sup>を持っており、モデリングの時間を短縮できる。

試験体は図-9, 10に示すように、両側に配置した側材から主材に向けてラグスクリューを打ち込んだ2つの接合面を有する一面せん断試験体であり、繊維直交方向加力(側材が繊維方向, LRL)<sup>5)</sup>となる。ラグスクリュー(材質; SWRCH10,  $\phi 16$  mm,  $L = 460$  mm(ねじ部170 mm, 頭部座金含む))<sup>5)</sup>の主材に対する打ち込み深さは150mmである。

この解析モデルの要素分割を図-11に示す。ラグスクリューのねじ山部の形状については厳密にモデル化

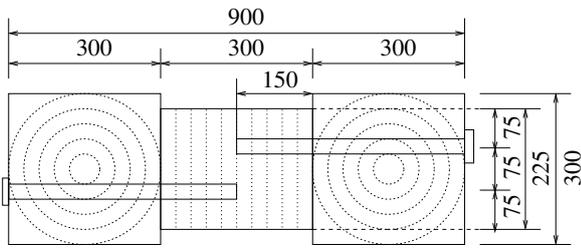


図-9 試験体平面図

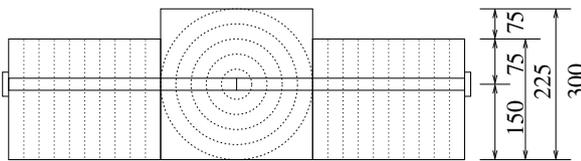


図-10 試験体側面図

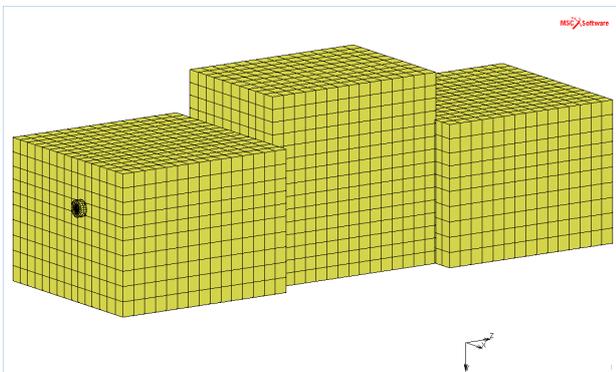


図-11 一面せん断試験における要素分割

するのではなく、引抜抵抗を摩擦係数の違いで再現する。ラグスクリューのような円柱状の物体は多角柱に近似する必要があるため、要素数を踏まえ正 24 角柱とする。木材のラグスクリュー周辺は 4 面体要素で分割し、ラグスクリューを含めたその他の箇所については 6 面体要素で分割する。なお、要素タイプによる違いを確認するため 1 次要素および 2 次要素の 2 通りの解析を行う。材料定数について、ラグスクリューをヤング率  $E_{\text{ラ}}=185.4\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_{\text{ラ}}=0.3$  とし、木材は過去に縦振動法により測定した繊維方向ヤング率の平均値<sup>6)</sup>を参考に、側材： $E_{\text{側}}=7.0\text{GPa}$ 、主材： $E_{\text{主}}=0.28\text{GPa}$ 、ポアソン比： $\nu=0.4$  の等方性材料とする。また、ラグスクリュー、木材共に弾塑性材料とし、応力-ひずみ関係は図-12 に示すようなパイリニアモデルとする。降伏応力は、ラグスクリュー： $\sigma_{y\text{ラ}}=278.1\text{MPa}$ 、主材： $\sigma_{y\text{主}}=0.28\text{MPa}$ 、側材： $\sigma_{y\text{側}}=7\text{MPa}$  とする。なお、初期勾配は各材料の初期弾性係数と一致するように設定し、降伏後の傾きは、0 とすると数値的に不安定となるため、0.01 とする。降

伏条件は Von Mises，硬化則は等方硬化則を用いる。境界条件は、一方の側材底面を全方向固定，もう一方の側材底面はラグスクリュー軸方向変位のみを自由とする。荷重は主材上面全体に 25kN を 50 ステップで載荷する。摩擦係数は過去の解析例<sup>6)</sup>を参考に、主材と側材の接触面は 0.35，ラグスクリュー（ねじ山部）と木材の接触面は 0.5 とし、摩擦を期待しないラグスクリュー（ねじ山部以外）と木材の接触面は 0.01 とする。

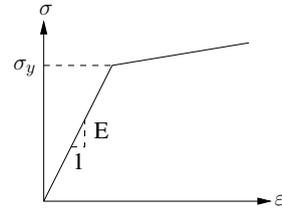


図-12 応力-ひずみ曲線

## (2) 解析結果

実験値と解析値の荷重-変位関係を図-13 に、2 次要素の場合における載荷後の全体の鉛直方向変位を図-14 に、ラグスクリューの鉛直方向変位を図-15 に示す。1 次要素では実験より硬め、2 次要素では柔らかめの結果となった。ラグスクリューの径に対して木材の要素が大きいため、1 次要素の場合は木材へのめり込みを細かく表現できず、曲線が滑らかではない。一方、2 次要素では要素数や大きさはそのままで節点数のみ増やすことができるため、より実物に近い滑らかな曲線となっているのではないかと考えられる。安全側に見積もるためにも、以降の解析では 2 次要素を用いることとする。図-14 から木材表面は一樣に変位していることがわかる。図-15 からラグスクリューの変形形状は実験の場合と概ね一致している。

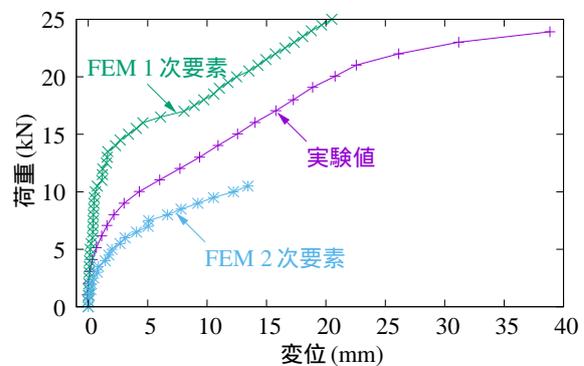


図-13 荷重-変位関係

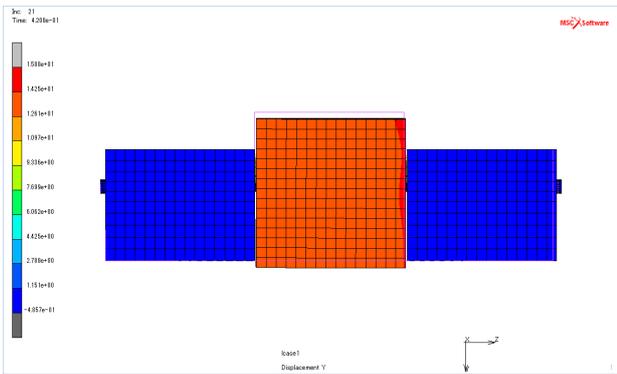


図-14 全体の鉛直変位 (2次要素)

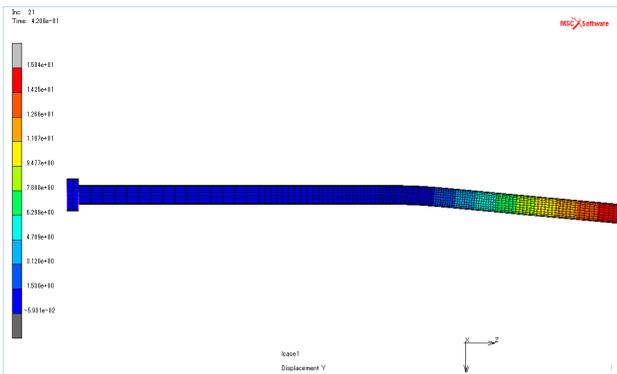


図-15 2次要素でのラグスクリューの y 変位

#### 4. 解析(押し抜き試験)

前章の予備解析の手法に従い、CLT-コンクリート押し抜き試験体を数値モデル化する。実際の試験体をモデル化した「弾塑性モデル」は、木材とコンクリート間やラグスクリューと木材またはコンクリート間の接触を考慮し、バイリニアの応力-ひずみ関係を与える最も厳密なモデルである。これとの比較のため、材料を線形弾性体として接触のみを考慮した「接触モデル」や更に接触を無視して接触面の全節点を共有させた「全節点共有モデル」についても解析を行う。

##### (1) 解析手法

計算容量の節約のため、図-16のような  $\frac{1}{4}$  モデルを対象とし、境界条件を設定する。図-16上の全体モデルの左奥の灰色部分を取り出した  $\frac{1}{4}$  モデルについて、コンクリートと地面との接触面は  $y$  方向変位を拘束、CLT同士が接触する右端の対称面は  $z$  方向変位を拘束、手前の対称面は  $x$  方向を拘束する。材料定数は、コンクリートについて、ヤング率  $E_{\text{コン}}=30\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_{\text{コン}}=0.2$  とし、ラグスクリューについて、ヤング率  $E_{\text{ラ}}=185.4\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_{\text{ラ}}=0.3$  とする。木材は等方性材料として解

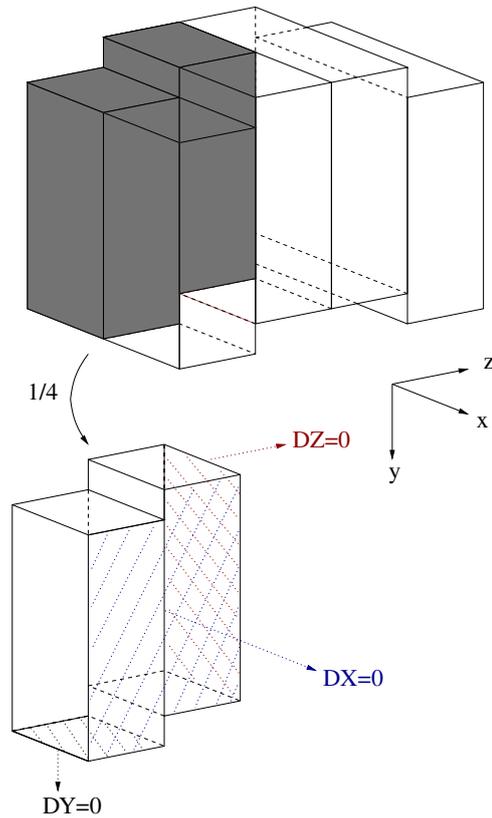


図-16 解析モデルと境界条件

析するため、ヤング率は強軸方向の各層を平均化した  $E_{\text{木}}=3.5\text{GPa}$  とし、ポアソン比は  $\nu_{\text{木}}=0.4$  とする。

##### a) 全節点共有モデル

全節点共有モデル(図-17)は部材間で節点が完全に共有されており、ずれが生じることはない。分割は6面体要素で行い、CLT上面の  $200\text{mm} \times 250\text{mm}$  の範囲に  $125\text{ kN}$  の荷重を載荷する。材料は線形弾性とする。

##### b) 接触モデル

接触モデル(図-18)は、摩擦係数を与え、接触を考慮したモデルである。摩擦係数は予備解析を参考に木材とコンクリート間で  $0.35$ 、ラグスクリューとCLT、コンクリート間で  $0.5$  とする。ラグスクリュー周辺のみ4面体要素で分割し、 $125\text{ kN}$  の荷重を  $50$  ステップで載荷する。材料は線形弾性とする。

##### c) 弾塑性モデル

弾塑性モデル(図-18)は、接触モデルに弾塑性を考慮した実際の試験体に近いモデルである。応力-ひずみ関係における降伏応力  $\sigma_y$  および降伏後の傾きは、ラグスクリュー:  $\sigma_{yラ}=278.1\text{MPa}$ 、傾き  $0.01$ 、木材:  $\sigma_{y木}=3.5\text{MPa}$ 、 $35\text{MPa}$ 、 $17.5\text{MPa}$ 、傾き  $0.01$  の3通りに加え、 $\sigma_{y木}=17.5\text{MPa}$ 、傾き  $0.02$  の計4通りで解析を行う。

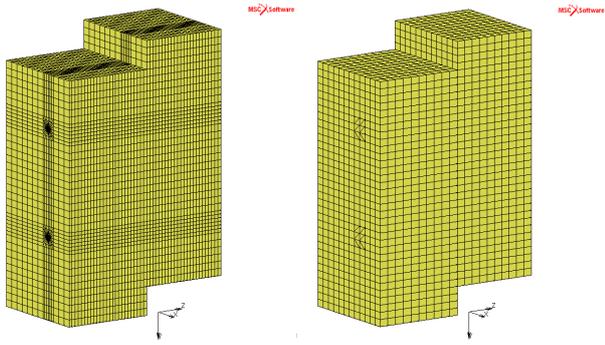


図-17 全節点共有モデル

図-18 接触，弾塑性モデル

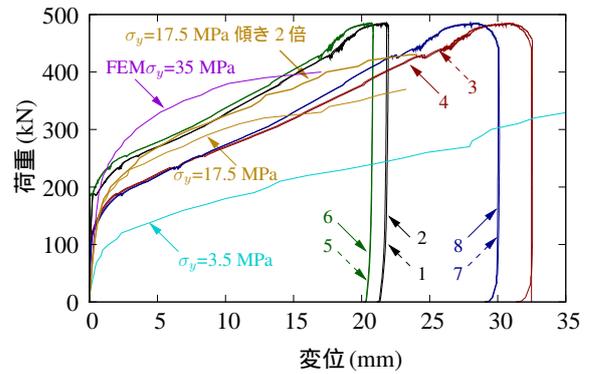


図-20 荷重-変位関係

(2) 解析結果

まず「接触モデル」との比較のため、「全節点共有モデル」による解析を行ったが、CLTとコンクリートが完全にくっついているため、当然のことながら、500kN 載荷時でも変位は 0.219mm とほぼ発生しない。つまり、コンクリートと木材の接触面が完全に付着しているモデルでは、接触面の木材の降伏等によってコンクリートと木材の間にずれが発生することはないことが確認できた。

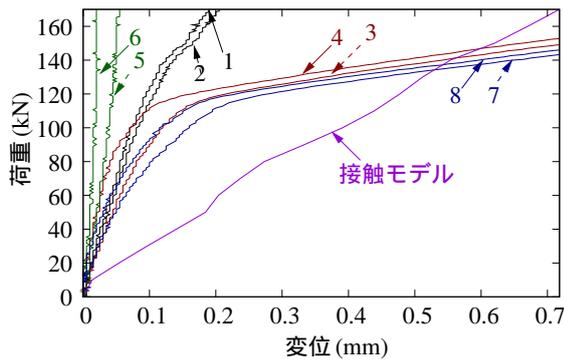


図-19 荷重-変位関係

次に「接触モデル」による解析を行ったところ、材料が線形弾性であるにもかかわらず収束性が悪く、170 kN 載荷時までしか計算できなかった。結果を図-19 に示す。実験値と「接触モデル」の荷重-変位関係は図-19 に示すように、170kN 載荷時の変位は 0.7mm 程度で、全節点共有モデルの 3 倍程度である。接触解析が機能し、CLTとコンクリートの間にずれが生じたことによる変位が発生することが確認できた。材料は線形弾性なので、荷重-変位関係はほぼ線形である。

最後に、接触と弾塑性を共に考慮した「弾塑性モデル」による荷重-変位関係を図-20 に、その鉛直方向変位を図-21 に示す。解析モデルにおける木材の降伏応力は、実際の試験体では、木材にラグスクリューがめり込み始める応力をモデル化しようとしたものであるが、

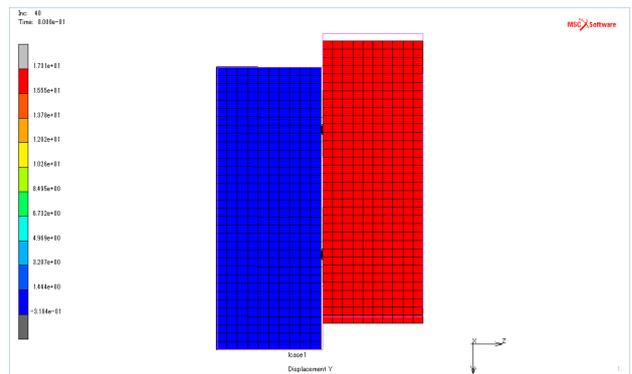


図-21 モデル側面の鉛直方向変位

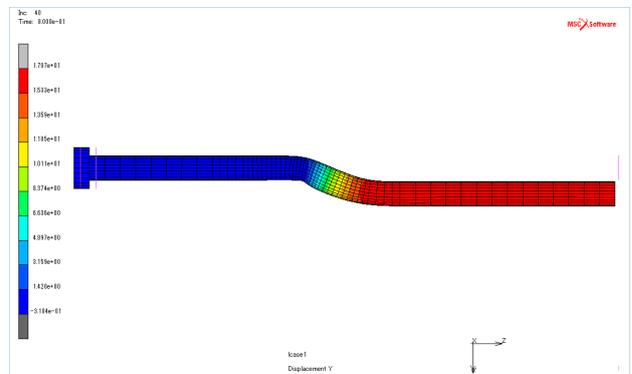


図-22 ラグスクリューの y 方向変位

どの程度の値が妥当なのか不明なので、3 通りの降伏応力で解析してみた。σ<sub>y</sub>=3.5MPa の場合は実験値より柔らかく、σ<sub>y</sub>=35MPa, 17.5MPa の場合は初期勾配の傾向は似ているが、荷重増加に伴い傾きに違いが出てくる。実験では、剛性が落ち始めた後に直線的な分布を示すが、これはひび割れによる変位増加の影響があると考えられる。一方、本解析では、ひび割れは考慮していない。σ<sub>y</sub>=17.5MPa の場合において、降伏後の応力-ひずみ曲線の傾きを 2 倍にしてみると、やや実験値に重なる



図-23 実験後のラグスクリュー

ような曲線形となる。300kN~400kNの段階で収束性が悪くなり、最終ステップまでの挙動は確認できなかったが、このときのラグスクリューの変形状態(図-22)は、実際の試験体から取り出したラグスクリューの変形状態(図-23)とよく似ているので、ラグスクリューが木材にめり込みながら降伏していく変形を、こうした解析手法である程度は再現できるものと考えられる。

## 5. まとめ

コンクリート地覆を取り付けた CLT 床版接合部の押し抜き試験を行い、その変形・破壊挙動を数値的に再現するモデル化を試みた。

まず、角材の一面せん断試験によりラグスクリューが降伏するモデルを接触解析と弾塑性解析により比較的簡易に再現し、これをもとに、CLT とコンクリートの接合部について、接触と弾塑性を考慮したモデルによる有限要素解析を行った。

接触を無視したモデルや木材が降伏しないモデルとの比較により、接触を考慮した弾塑性解析であれば、木材の降伏点を調整することで、めり込みを伴う実験値と比較的近い挙動を再現できることがわかった。

木材のめり込みに相当する降伏後の塑性変形が大きく生じるような解析では、要素の形状や種類の影響を

受けやすい。ただし、ラグスクリュー周辺の形状の細かい部分では、要素分割を増やすことは困難なため、節点数のみを増やすことのできる2次要素が有効である。

実験では 230 kN 程度の荷重で CLT の積層面に割れが生じるが、解析では破壊および添接部の影響を考慮していないため、この点については実際の挙動とは違いがある。ただし作為的ではあるが、CLT 対称面の上部2節点程度より下の節点の変位拘束を外して、CLT 下部が対称面から離れるような回転を誘発することは可能であり、こうした検討については今後の課題である。

謝辞: 本研究の一部は科研費 17K06514 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) [http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/#road\\_map](http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/#road_map)
- 2) 佐々木 貴信, 有山 裕亮, 荒木 昇吾, 豊田 淳, 山内 秀文, 林 知行: CLT 床版の耐久性付与技術の開発, 木材利用研究論文報告集 16, pp.39-44, 2017/12.
- 3) 佐々木 貴信, 林 知行, 豊田 淳, 有山 裕亮, 高海 克彦: 橋梁の床版用途としての CLT の疲労耐久性評価, 第 67 回日本木材学会大会要旨集, pp.209, 2017.
- 4) 豊田 淳, 佐々木 貴信, 荒木 昇吾, 林 知行, 有山 裕亮, 後藤 文彦: CLT 床版を用いた小規模橋梁の補修設計と施工, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp.799-806, 2019.
- 5) 野田 龍ら: 野田 龍, 佐々木 貴信, 千田 知弘: 大断面木質土木構造物に異型棒鋼を用いた場合のせん断性能および引き抜き性能の推定  $\phi 16$  mm の長尺ラグスクリューと異型棒鋼を用いた試験体の性能比較, 木材学会誌, Vol.60, No.5, pp.249-260, 2014.
- 6) 後藤 文彦, 尾山 龍之介, 齊藤 輝, 佐々木 貴信: プレストレス木箱桁橋の数値モデル化と剛性評価, 構造工学論文集, Vol. 61A, (CD-ROM), pp.570-577, 2015.

(Received August 31, 2019)  
(Accepted November 11, 2019)

## NUMERICAL MODELING OF JOINT PART BETWEEN CLT DECK AND CONCRETE WHEEL GUARD

Yusuke ARIYAMA, Hiroki EBI, Yusuke TAKAHASHI, Humihiko GOTOU,  
Takanobu SASAKI and Atsushi TOYODA

While CLT(Cross-Laminated-Timber), which is lightweight and is resistant to fatigue, is expected to apply to bridge deck, it is needed to fix concrete guard on the deck in order to joint commercially available fence on it. It is important to investigate the load bearing performance of the joint part between the concrete guard and the CLT deck fixed by lag screw bolts. We show relatively simple modeling of the joint part using general-purpose 3D FEM tool and illustrate the numerical results. The modeling considering contact analysis and elasto-plastic seems to well simulate the actual deformation behavior of lag screw bolts.