

コンクリート地覆が取り付けられた CLT 床版接合部の数値モデル化

環境構造工学分野 8017801 海老 拓紀
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

CLT (Cross Laminated Timber : 直交集成板) は、挽き板 (ラミナ) を繊維方向が直行するように積層接着した木質パネル (図-1) であり、これまでにない大きなサイズの面材料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。

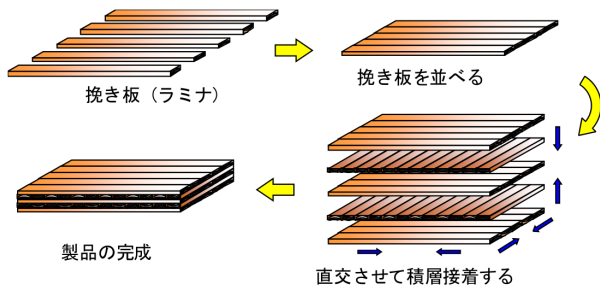


図-1 CLT の製造方法

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」¹⁾ 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。しかし、国内で製造可能な最大サイズが幅 3m×長さ 12m×厚さ 270mm ということや、国産材の CLT に使用されているのはスギやヒノキ、カラマツのラミナであり、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、土木用途を考えた場合のメリットとなり得る。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。

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²⁾、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 を活用出来ないかという着想に至った³⁾⁴⁾。

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³⁾。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⁴⁾。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出来るが、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。既製品の防護柵を取り付けるには、まず CLT にコンクリート地覆を固定する必要がある。コンクリート地覆はラグスクリューによって固定されるが、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。

そこで本研究では、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-2、図-3のように、8層7ブライの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つ作成し、添接板でつなぎ合わせたものである。ラグスクリュー ($\phi 16$ mm, L=350 mm (ねじ部 200 mm, 頭部座金含む) 図-4) 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 400×500 mm²の範囲に約 500 kN まで载荷し、変位を測定する。加力速度は 1.5 mm/min とし、载荷位置においては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-5 に示すように、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-2 CLT-コンクリート接合部試験体

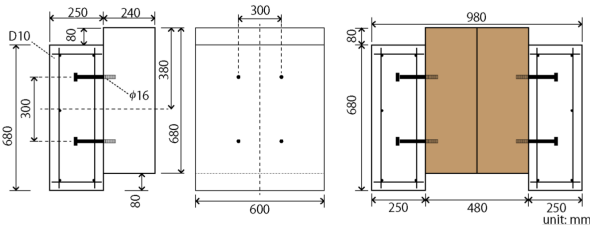


図-3 試験体の寸法



図-4 ラグスクリュー

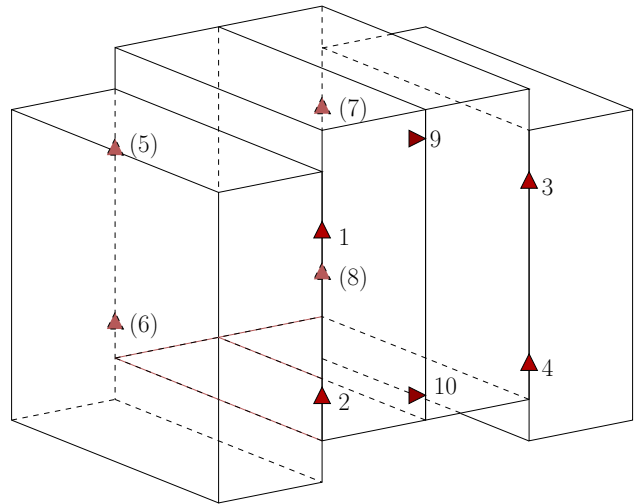


図-5 変位の測定位置

(2) 実験結果

230kN 程荷重が作用した段階で CLT の積層面で割れが生じ、最終的に下から上まで大きく亀裂が入った。このときの鉛直変位を図-6 に、水平変位を図-7 に示す。図中の数字は図-5 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 程差があるが、上下、表裏での差はほとんどない。水平変位は、試験体上部では圧縮力が作用し、変位は

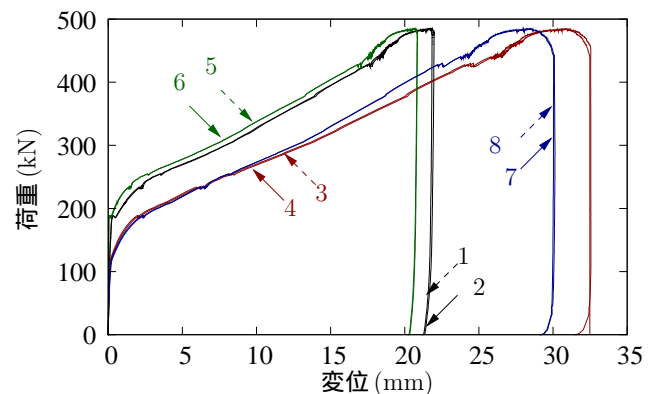


図-6 荷重と鉛直変位の関係

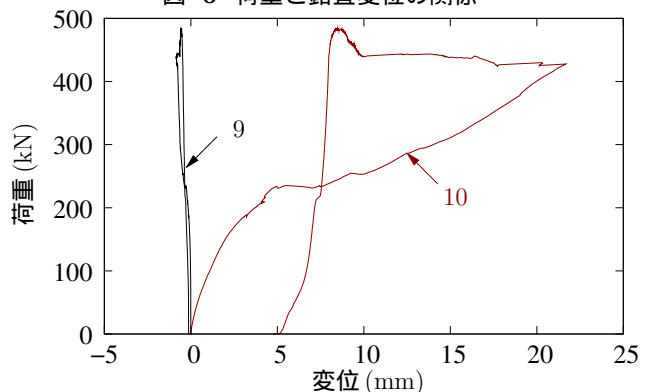


図-7 荷重と水平変位の関係

ほとんど見られないが、下部では CLT に亀裂が生じたため、一時的に 20mm 程の変位が生じる。その後 10mm 程縮んでいるのは、亀裂が生じたことにより、変位計を取り付けている箇所が元に戻ったためと考えられる。载荷後の試験体 (図-8) に見られる、積層面のひび割れ (図-9) より、ラグスクリーウの先端部付近で亀裂が発生したことが分かる。



図-8 载荷後の試験体



図-9 割れが生じた積層面

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に先だって、比較的単純な、文献⁵⁾の一面せん断試験を対象に有限要素法を用いてモデル化し、ラグスクリーウ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。

(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 2016.0.0⁶⁾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出来る全自動接触解析機能³⁾を持っており、モデリングの時間を短縮出来る。

試験体は図-10、図-11 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ーウを打ち込んだ、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)⁵⁾となる。ラグスクリーウ (材質;SWRCH10, $\phi 16$ mm, L=460 mm (ねじ部 170 mm, 頭部座金含む)⁵⁾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-12 に示す。ラグスクリーウのねじ山部の形状については厳密にモデル化するのではなく、引抜抵抗を摩擦係数の違いで再現する。ラグスクリーウのように円形の物体は多角形に近似する必要があるため、要素数を踏まえ正

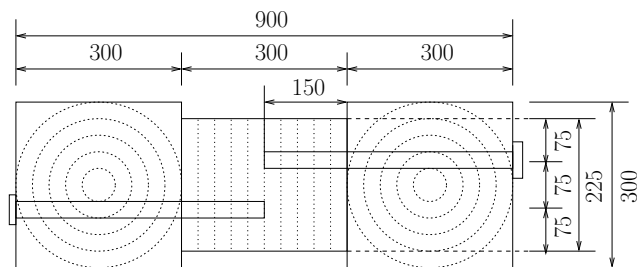


図-10 試験体鉛直上から

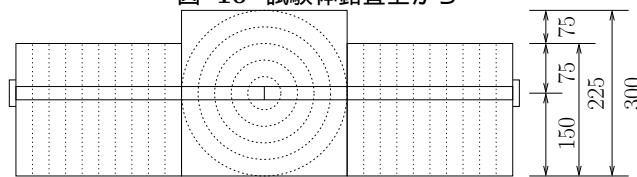


図-11 試験体側面から

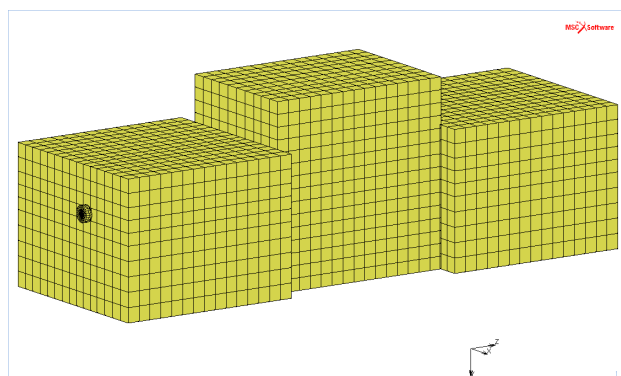


図-12 一面せん断試験における要素分割

24 角形とする．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を参考に， $E_{\text{側}}=7.0\text{GPa}$ ， $E_{\text{主}}=0.28\text{GPa}$ ， $\nu=0.4$ 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-13 に示すように塑性後にも傾きを持たせたバイリニアとする．降伏応力 σ_y は次の通り，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合うように設定し，降伏後の傾きは 0.01 である．降伏条件は Von Mises，硬化則は等方硬化則である．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 Z 方向変位のみ許容とする．荷重は主材上面全体に 25kN を 50 ステップで载荷する．摩擦係数は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，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．

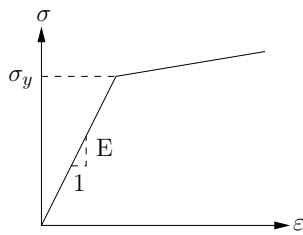


図-13 応力-ひずみ曲線

(2) 解析結果

実験値と解析値の荷重-変位関係を図-14 に，2 次要素の場合における载荷後の全体の Y 変位を図-15 に，ラグスクリューの Y 変位を図-16 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．ラグスクリューの経に対して 1 つ当たりの木材の要素が大きいため，1 次要素の場合木材へのめり込みを細かく表現できず，いびつな曲線となっている．対して，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出来るため，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．変形形状は実験の場合と概ね一致している．

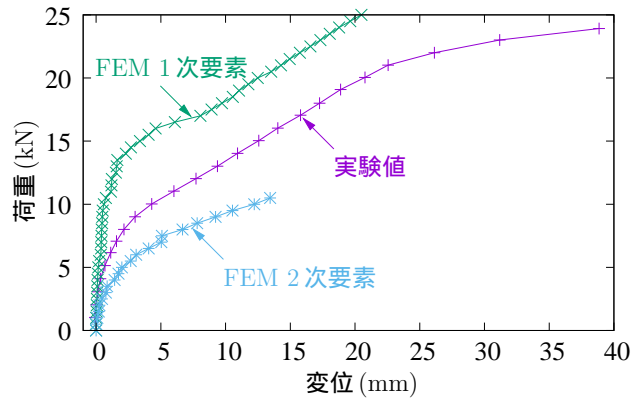


図-14 実験値と解析値の荷重-変位関係の比較

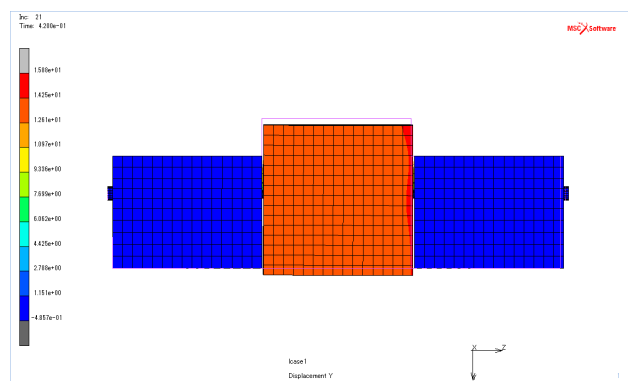


図-15 2 次要素での全体の y 変位

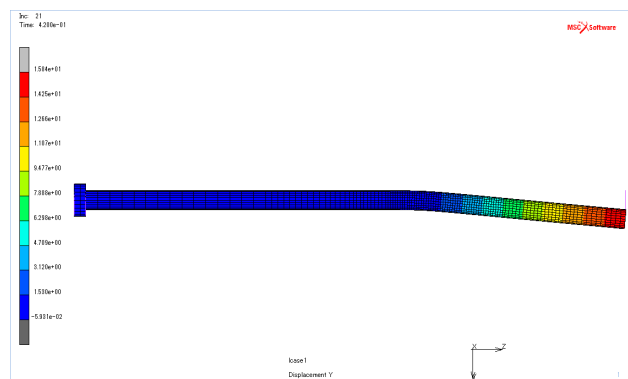


図-16 2 次要素でのラグスクリューの y 変位

4. 解析（押し抜き試験）

全節点を共有させた「全節点共有モデル」，摩擦係数を与え接触を考慮した「接触モデル」，接触を考慮した上で，バイリニアの応力-ひずみ関係を与えた「弾塑性モデル」の 3 通りで解析を行う．

(1) 解析手法

計算容量の都合上, 図-17の通り $\frac{1}{4}$ のモデルとし, 境界条件を設定する. 材料定数について, コンクリートはヤング率 $E_{\text{コン}}=30\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu_{\text{コン}}=0.2$ とし, ラグスクリューはヤング率 $E_{\text{ラ}}=185.4\text{GPa}$, ポアソン比 $\nu_{\text{ラ}}=0.3$ とする. 木材は, 等方性材料とし, 強軸と弱軸を平均化した, $E_{\text{木}}=3.5\text{GPa}$, $\nu_{\text{木}}=0.4$ とする.

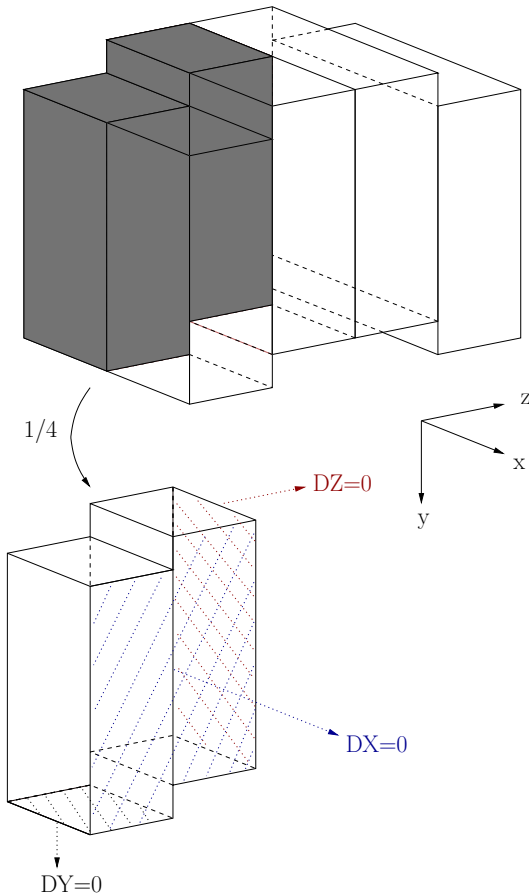


図-17 解析モデルと境界条件

a) 全節点共有モデル

図-18に示すこのモデル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 $200 \times 250 \text{ mm}^2$ の範囲に 125 kN 载荷する.

b) 接触モデル

図-19のモデルを対象に, 摩擦係数を与え, 接触を定義する. 摩擦係数は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, 荷重 125 kN は50ステップで载荷する.

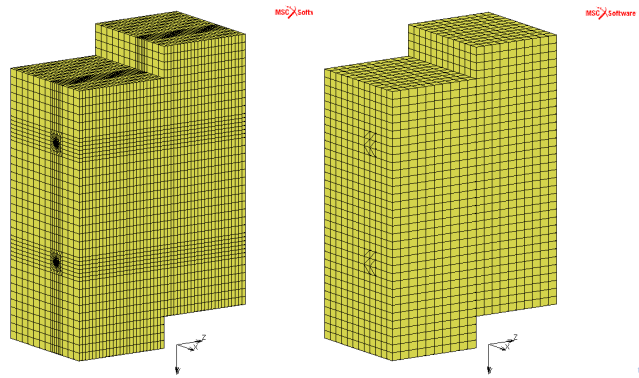


図-18 全節点共有モデル 図-19 接触, 弾塑性モデル

c) 弾塑性モデル

図-19のモデルを対象に, 摩擦に加え弾塑性を定義する. 降伏応力 σ_y および降伏後の傾きは次の通り, 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 MPa , 17.5 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通りとする.

(2) 解析結果

「全節点共有モデル」は, CLTとコンクリートが完全にくっついていないため, 変位は 500kN 载荷時でも 0.219mm とほぼ発生しないので, 特に図には結果を示さない. 「接触モデル」は収束性が悪く, 結果は 170 kN 载荷時までだが, 実験値と「接触モデル」の荷重-変位関係は図-20に示す通り, 変位は約 0.7mm 程度で「全節点共有モデル」の3倍程となった. 接触解析によりCLTとコンクリートの間にずれが生じ, ある程度の変位が発生することを確認した. 弾性線形モデルなので, グラフもほぼ線形である. 次に, パイリニア曲線の降伏点や傾きを変えて

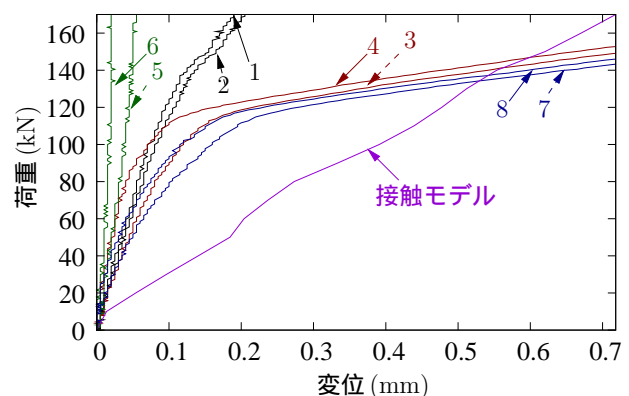


図-20 実験値と解析値の荷重-変位関係の比較

計算した「弾塑性モデル」の結果を図-21 に、その y 方向変位を図-22, 図-23 に示す。 $\sigma_y=3.5\text{MPa}$ の

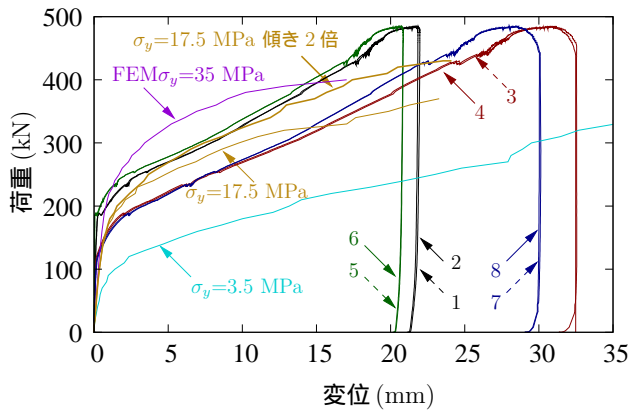


図-21 実験値と解析値の荷重-変位関係の比較

場合は実験値より柔らかく、 $\sigma_y=35\text{MPa}$, 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差が出る。ひび割れを考慮していないた

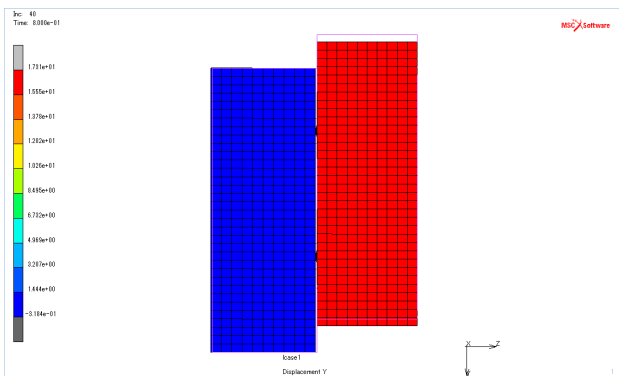


図-22 全体の y 方向変位

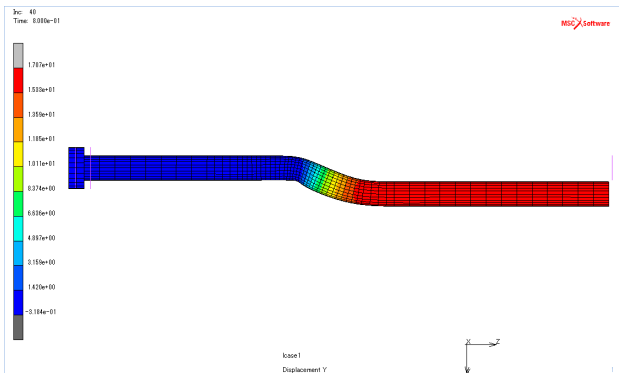


図-23 ラグスクリーの y 方向変位

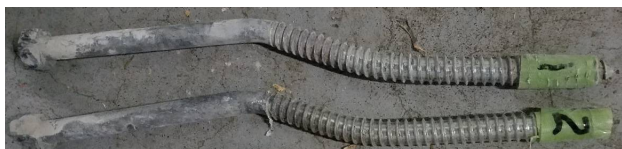


図-24 実験後のラグスクリー

め、実験値のように直線的な変位増加ではなく、山なりの曲線となっていると考える。 $\sigma_y=17.5\text{MPa}$ の場合において、傾きを 2 倍としても徐々に傾きが緩やかになり、350kN から実験値とずれ始める。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出来なかったが、図-24 より、ボルトの変形は似た傾向にある。

5. まとめ

文献⁵⁾の一面せん断試験を 3 次元静的非線形解析により数値解析し、推定した応力-ひずみ関係から、CLT とコンクリートの接合部についての再現性を確認した。その結果、以下の知見を得た。

- 「全節点共有モデル」と「接触モデル」では木材が降伏しないため、ほぼ線形の挙動となるが、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、めりこみを伴う実験値と比較的近い曲線を再現することができる。
- 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ができる 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。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、この点で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る。

参考文献

- 1) www.rinya.maff.go.jp/j/press/mokusan/141111.html
- 2) <http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 3) 佐々木貴信ら：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，p.209, 2017.
- 4) 佐々木貴信ら：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, p.39-44, 2017.
- 5) 野田龍ら：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 $\phi 16\text{mm}$ の長尺ラグスクリ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, p.249-260, 2014.
- 6) www.mssoftware.com/ja