

CLT 床版への取付・交換が容易な鋼製防護柵の破壊挙動

環境構造工学分野 8021802 小川 虹輝
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

CLT はコンクリートに比べて軽量であることや十分な疲労耐久性を有する¹⁾ことから、橋梁床版としての利用にも期待されている²⁾³⁾が、そのためには防護柵の取り付けが可能で、車輛が衝突した際の安全性が確認されていることが必須である。

CLT 床版に防護柵を取り付ける試みとして、様々な方法が検討されている⁴⁾⁵⁾が、本研究では、支柱が交換できるように、鞘管に防護柵支柱を差し込む構造や CLT 床版下面のプレートを設定せずに、上面のプレートのみをラグスクリーボルト（以降、LSB）で固定する構造を提案する。こうした構造は、損傷が防護柵支柱のみに留まった場合には支柱部分だけを取り替えればよく、損傷がプレート部までに及んだ場合も、上面のプレートのみを床版上部から交換でき、維持管理の効率化とコストの削減が期待できる。

防護柵の破壊形態としては、防護柵支柱基部の降伏、取付プレートの CLT へのめり込み、LSB の引き抜きなどを想定している。こうした破壊に至る直前の接合部の応力状態を、弾塑性や異方性を考慮した比較的簡易なモデルで有限要素解析する手法を示し、防護柵や取付金具が応力状態に与える影響等を考察する。その上で、提案する接合部が防護柵の有すべき性能を満足するかどうか、防護柵支柱が破壊した場合に CLT 床版に損傷を与えるかどうかについても、実験と数値解析により検討する。

2. 静荷重試験

(1) 試験体概要

防護柵支柱の静荷重試験を行う上で、防護柵の設置基準・同解説⁶⁾の橋梁用ビーム型防護柵の設計方法を参考にする。この設計方法では、支柱の極限支持力 P_W と横梁の極限曲げモーメント M_O の組み合わせが図-1 に示すグラフの部材選定域内に

含まれていなければならない。極限支持力 P_W は支柱の静荷重試験の結果を図-2 のようにバイリニアモデルに等値面積置換することで求められる。横梁の極限曲げモーメントは C 種の最低値である $23\text{kN}\cdot\text{m}$ とする。今回は C 種として設計された防護柵支柱の静荷重試験の結果を示し、その結果を等値面積置換して求められた P_W と M_O の組み合わせが C 種の部材選定域内に含まれるか確認する。

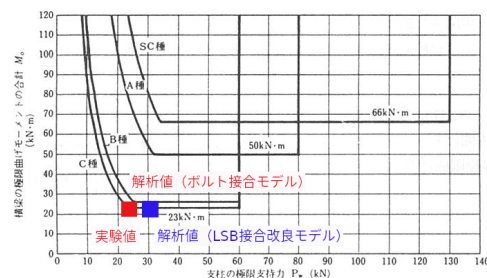


図-1 橋梁用ビーム型防護柵部材選定グラフ⁶⁾

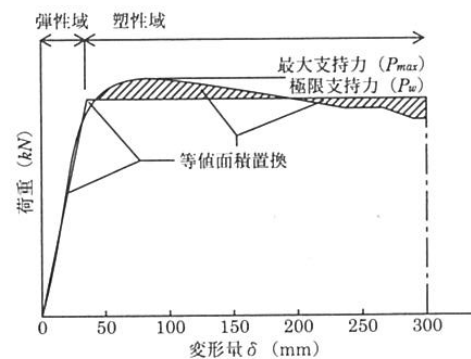


図-2 支柱⁶⁾

対象とする試験体は、図-3 のように基礎ベースに固定された 5 層 5 プライのスギ CLT(S60-5-5) に防護柵支柱を設置したものである。CLT 床版の寸法は橋軸方向 955mm、幅員方向 978mm、厚さ 150mm である。今回は一般市町村道でのガードレールの設置を想定し、支柱は C 種を用いることとした。鞘管が溶接されたプレートと CLT 床版は $\phi 24\text{mm}$ のボルト 4 本または $\phi 30\text{mm}$ と $\phi 36\text{mm}$ の LSB 各 6

本で固定されている。また、鞘管に $\phi 114\text{mm}$ 、高さ 715mm の円柱の防護柵支柱を差し込み、鞘管と支柱は $\phi 12\text{mm}$ のドリフトピンで固定されている（図-3、4）。外鞘構造の場合、隙間から水が入り込むことで CLT が腐朽する可能性があるため、今回は内鞘構造とする。鞘管とプレート、防護柵支柱の形状は図-4 のようになっている。鞘管には曲げ方向の中立軸位置にスリットが入っている。プレートには 2 枚の補剛リブが取り付けられている。

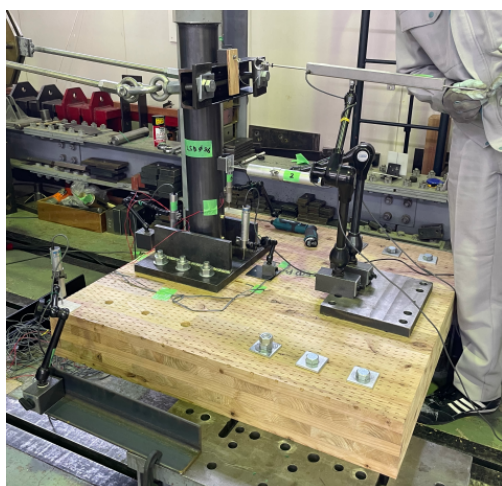


図-3 試験体

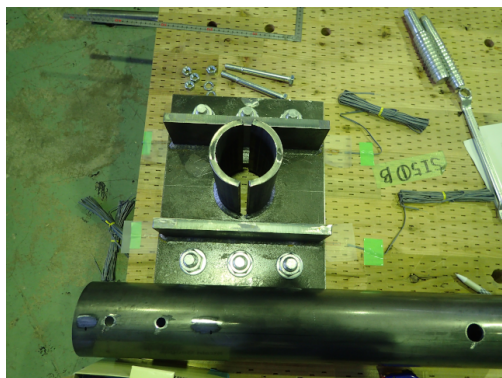


図-4 鞘管，プレート，防護柵支柱の形状

今回は、プレートを 2 つの方法で固定する。1 つはボルトを用いる方法で、CLT 床版の裏側にも補助プレートを設置し、2 枚のプレートで挟み込むように固定する。もう 1 つは LSB を用いる方法で、CLT 床版の裏側には補助プレートを設置せずに、上面のみから固定する。

試験はボルト接合の試験体を 1 体（以降、ボル

ト）と、 $\phi 30\text{mm}$ の LSB および $\phi 36\text{mm}$ の LSB を用いた LSB 接合の試験体を 2 体（以降、LSB $\phi 30$ 、LSB $\phi 36$ ）に対して行う。支柱の高さ 600mm の部位にジャッキを用いて水平に載荷し、支柱の変位、プレート内側の浮き上がり、プレート外側の CLT 床版へのめり込みを測定する。

(2) 実験結果

実験結果から得られた変形後の試験体全体の状態を図-5 に示す。試験体全体としては防護柵支柱の基部付近で折れ曲がっているように見える。そのときの鞘管の状態は図-6 のように外側に倒れ込むように変形していた。また、防護柵支柱は外側基部が圧縮され、僅かに局部座屈のような変形が見られた。

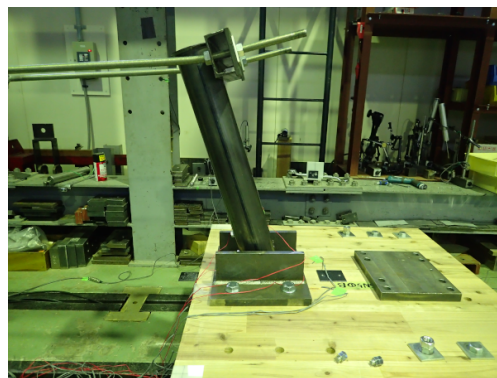


図-5 変形後の試験体



図-6 変形後の鞘管

防護柵支柱載荷面の荷重—変位関係のグラフを図-7 に示す。これを見ると、どの試験体についても荷重 32kN 付近で破壊し、一旦剛性が落ちた後に剛性が回復して、再び剛性が落ちるような変形挙動

を示している．これは，引張側の鞘管が降伏変形することで剛性が落ちた後，圧縮側に接触して剛性が回復し，その後，圧縮側も降伏変形することで再び剛性が落ちるためだと考えられる．

文献⁷⁾を参考に，図-7の破線のような線を引いて等値面積置換により極限支持力 P_W を算定する．3つの試験体（ボルト，LSB ϕ 30，LSB ϕ 36）の極限支持力のうち最低値である 23.7kN（ボルト）と C 種横梁の極限曲げモーメントの最低値 23kN・m を用いて図-1 と照らし合わせると，C 種の部材選定域内に含まれていた．そのため，この試験体は C 種防護柵としての性能を満足していることが分かった．

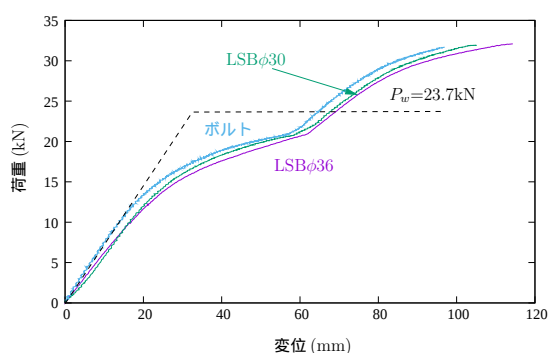


図-7 荷重—変位関係（支柱載荷面の変位）

プレート内側の浮き上がりについて，図-8に荷重—変位関係を示す．これを見ると，ボルト接合よりも LSB 接合の方が浮き上がり変位が大きくなっていることが分かる．これは，CLT 上面のプレートのみで固定する LSB 接合は，CLT 上下面のプレートで挟み込んで固定するボルト接合よりも引き抜きに対して弱いと考えられる．防護柵支柱へ C 種の最大支持力である水平荷重 40kN を作用させたとき，支柱基部のスリット位置を中心とするモーメントのつり合いから，ベースプレートの引張側のボルトまたは LSB には 1 本あたり 70.6kN の引抜力が作用する．LSB の引抜耐力は LSB ϕ 30 で 41.5kN，LSB ϕ 36 で 49.4kN となり引抜力を下回るため，引張側 LSB の本数を増やす必要がある．なお，ボルト接合の引抜耐力は 1 本あたり 95kN である．

プレート外側のめり込みについて，図-9に荷重—変位関係を示す．どの接合の場合においても変位は

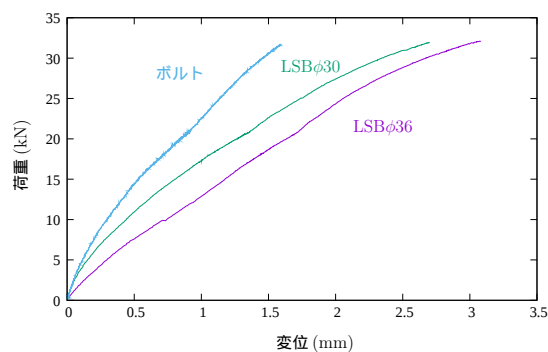


図-8 荷重—変位関係（プレートの浮き上がり）

1mm 程度以内に収まっており，ボルト，LSB ϕ 30 に関しては 0.2mm 以内に収まっていた．したがって，プレートのめり込みが CLT 床版の破壊に与える影響は非常に小さいと考えられる．また，実験後に CLT 床版のプレート縁部付近を確認したところ，目立った傷や破壊の跡は見られなかった．

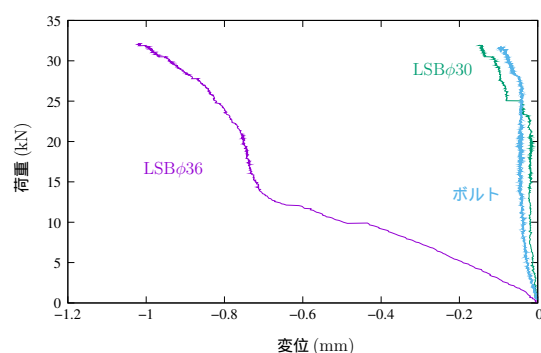


図-9 荷重—変位関係（プレートのめり込み）

3. 数値解析（ボルト接合モデル）

(1) 解析モデル

静荷重試験の結果，いずれの接合方法でも C 種防護柵としては性能を満足することを確認したが，接合部分については，いくつかの課題も見受けられた．そこで，ボルト接合の試験体についてモデル化し，接合部の変形挙動を数値解析で再現し検討を行う．図-10に解析モデルを示す．要素は四面体要素を用い，要素数は約 47 万，節点数は約 8 万程度となっている．

鋼材は SM400 を使用しているため，ヤング率を $E=206\text{GPa}$ ，降伏点を $\sigma_Y=238\text{MPa}$ とする．降伏条件はフォン・ミーゼスの降伏条件を用いる．応力—ひずみ関係はバイリニアモデルを用い，降伏後の

ヤング率 E_t を降伏前の 0.1% とした。

CLT 床版は直交異方性弾性モデルとし、ヤング率は橋軸方向 $E_x = 1438.08\text{MPa}$ 、幅員方向 $E_y = 4801.92\text{MPa}$ 、板厚方向 $E_z = 240\text{MPa}$ とする。二軸の曲げ方向に対応する E_x と E_y については、CLT の各方向各層の剛性を合計した $\sum E_i I_i$ を断面全体の断面 2 次モーメントで除して平均化して求めた。板厚方向に対応する E_z については、板厚方向のばね定数 $E_i A_i / t_i$ を直列に合成して求めた。せん断弾性係数については、強軸（幅員）方向ヤング率の 1/15 の 320.128MPa を用いる。

鞘管と支柱の接合部については、鞘管と支柱の間、支柱とプレートの間、ドリフトピンをモデル化した鋼材の丸棒と鞘管または支柱の孔との間に遊びがそれぞれ設けられている。変形によりこれらの遊びや鞘管のスリットの間隙がなくなった場合の要素表面どうしの接触を、接触解析を用いずに簡易にモデル化するため、これらの隙間を埋めるようにゴム状の仮想材料を挿入し、解析値がなるべく実験値に近づくように調整した 13MPa のヤング率を与える。CLT 床版の基礎ベースとの接触面は、全変位を拘束している。このような解析モデルの床版からの高さ 600mm の支柱部分に水平方向に荷重を載荷する。

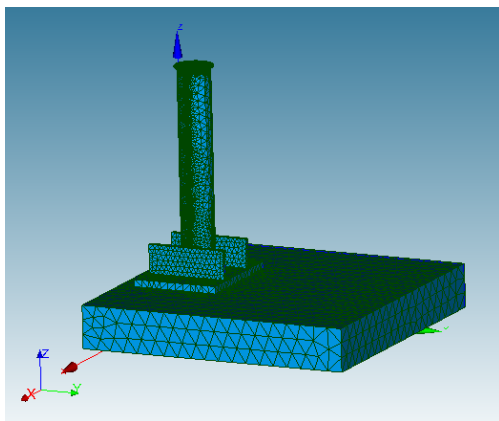


図-10 解析モデル（ボルト接合モデル）

(2) 解析結果

解析結果から得られた解析モデルの変形状態を図-11 に示す。これを見ると、実験と同じように支

柱基部付近で折れ曲がっていることが分かる。このときの鞘管部分の変形を図-12 に示す。こちらも実験と同じように外側に倒れ込むように変形している。実験（図-6）のように鞘管どうしが完全に接触してはいないが、引張側の鞘管が仮想材料を介して圧縮側の鞘管を押し曲げており、実験の変形状態がある程度は再現できている。

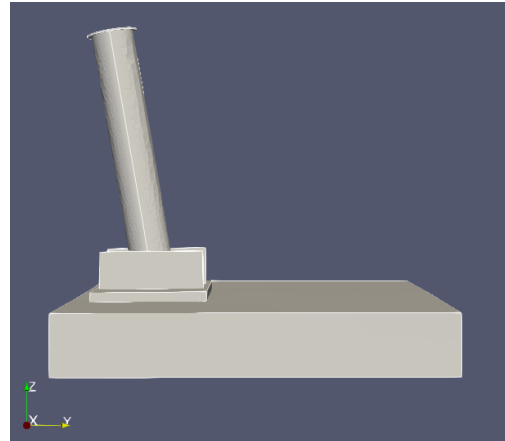


図-11 変形後の解析モデル

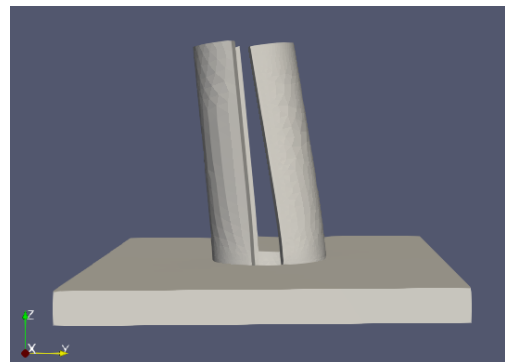


図-12 変形後の鞘管

防護柵支柱の荷重—変位関係を実験結果と共に図-13 に示す。このグラフを見ると、解析値は 10kN 付近まではほぼ線形であるが、 10kN を越えた辺りから剛性が徐々に落ち始めていることが分かる。2 段階の変形の再現までには至らなかったが、初期剛性と後半の剛性に関しては解析値と実験値で近い値となっているため、防護柵の支持力を近似的に予測するには十分なモデルであると考えられる。

図-13 について等値面積置換を行ったところ、この解析モデルの極限支持力 P_W は 23.6kN となり、

実験での極限支持力とほぼ同じ値になった。また、横梁の極限曲げモーメント M_O については実験と同様に C 種横梁の最低値である $23\text{kN}\cdot\text{m}$ とした。これらの値を用いて図-1 と照らし合わせると、実験値とほぼ同じ位置になり C 種の部材選定域内に含まれていたため、この解析モデルは C 種防護柵としての性能を満足していることが分かった。

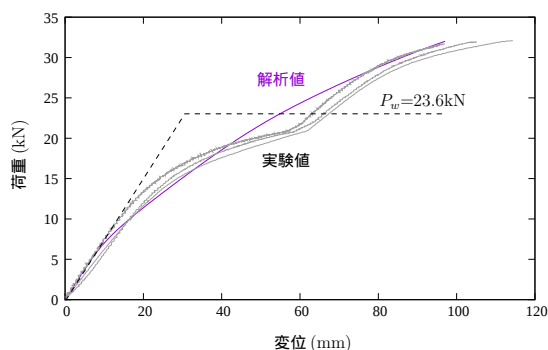


図-13 荷重—変位関係

CLT 床版裏側の最小主応力を確認すると、補助プレート圧縮側縁部付近で最小主応力の最大値（負値）が認められ、 -8.5MPa の最小主応力が生じていた。今回用いた CLT(S60-5-5) に近いと考えられる積層数 5, 同一等級、強軸方向、平使いのスギ CLT のめり込み強度は 9.12MPa ⁸⁾ であるので、最小主応力の最大値に対してやや余裕のある程度である。なお、実験ではプレートの CLT へのめり込みは確認されていない。

4. 数値解析（LSB 接合改良モデル）

(1) 解析モデル

今回の実験ではコスト上の課題や引抜耐力の課題が見受けられた。そこで、実験で用いた LSB 接合モデルを改良した新たな解析モデルを提案する（図-14）。実験で用いたモデルとの違いは、鞘管をなくした点、支柱がプレートに溶接されている点、引張側の LSB $\phi 36$ の本数を 4 本に増やし、支柱が曲げを受ける際の中立軸延長線上に取り付けられていた LSB を取り除いた点である。前章の解析と同様に要素は四面体要素を用い、要素数は約 9 万 6 千、節点数は約 1 万 7 千となっている。鋼材、CLT 床版の材料定数や鋼材の応力—ひずみ関係は前章の解

析と同様のものとする。

この解析モデルに水平荷重 40kN を作用させたとき、モーメントのつりあいから上面プレート引張側の LSB1 本あたりに 39.7kN の引抜力が作用する。今回使用する LSB $\phi 36$ の 1 本あたりの引抜耐力は 49.4kN であるため、引き抜きに耐えることが可能な本数となっている。また、文献⁵⁾ の B タイプと同様に鞘管を用いずに支柱基部を直接プレートに接合している点から比較的簡単な構造になっていると考えられる。

防護柵の設置基準・同解説⁶⁾ によると、防護柵は車両衝突に対して高さ 800mm の位置で変形量が 300mm 以下になる強度を要求されている。今回のモデルは荷重点高さが 600mm のため、変形量を 600mm の高さに換算した変形量 225mm を生じさせる水平荷重を載荷して解析を行う。

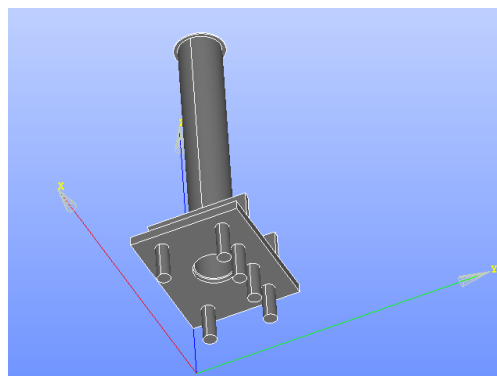


図-14 LSB 接合改良モデルの鋼材部分

(2) 解析結果

解析結果から得られた解析モデルの変形状態を図-15 に示す。これを見ると、前章のボルト接合モデルの解析と同じように支柱基部付近に変形が集中して折れ曲がっていることが分かる。防護柵支柱の荷重—変位関係を図-16 に示す。これを見ると、荷重 25kN 付近から降伏が始まり、その後、剛性が急激に落ちていることが分かる。

図-16 について等値面積置換を行ったところ、この解析モデルの極限支持力 P_W は 30.3kN となった。この値と C 種横梁の極限曲げモーメントの最低値の $23\text{kN}\cdot\text{m}$ を用いて図-1 と照らし合わせると、

C種の部材選定域内に含まれていたため、この解析モデルはC種防護柵としての性能を満足していることが分かった。

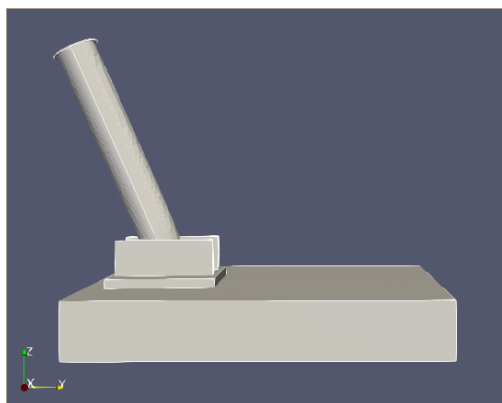


図-15 変形後の解析モデル

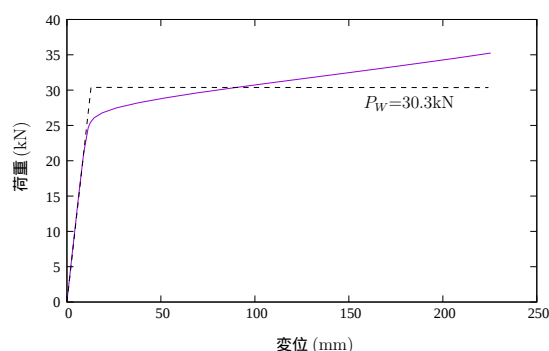


図-16 荷重—変位関係

また、CLT床版上面の取付プレート圧縮側縁部付近には7.9MPaの最小主応力が生じていた。前章のモデルと同様に、スギCLTのめり込み強度9.12MPaを越えていないため、このモデルのCLTへのめり込みが発生する可能性は低いと考えられる。

5. まとめ

本研究では、鞘管に防護柵支柱を差し込む構造やCLT上面のプレートのみをLSBで固定する構造を提案し、その防護柵支柱をCLT床版に取り付けた際に外力によって示す挙動を静荷重試験と数値解析の両面から検討した。

静荷重試験では、鞘管の形状が原因で2段階の変形をすることが確認された。また、等値面積置換を行い図-1と照らし合わせたところ、C種防護柵と

しての性能を満たしていることが分かった。また、プレート外側のCLT床版へのめり込みは、どの接合方法でも1mm程度以内に収まっていた。

ボルト接合モデルの数値解析では、支柱基部に仮想材料を挿入して解析を行った。その結果、初期剛性と後半の剛性に関しては実験値と近い値となり、防護柵の支持力を近似的に予測するには十分なモデルであると考えられる。また、CLT床版裏側のプレート縁部付近にかかる最小主応力は、CLTのめり込み強度に対してやや余裕がある程度である。

LSB接合改良モデルの数値解析では、極限支持力が30.3kNとなり、解析上ではC種防護柵としての性能を満足していることが確認できた。また、プレート縁部付近にかかる最小主応力はスギCLTのめり込み強度を越えていないため、CLTへのめり込みが発生する可能性は低いと考えられる。

今回検討した構造については、すべてのモデルでC種防護柵としての性能を満足し、かつCLTを損傷させずに破壊することが確認できたが、コスト面や安全性など様々な要素を総合してどのような形状の支柱がCLT用防護柵として最もふさわしいかを引き続き検討していきたい。

参考文献

- 1) 有山 裕亮, 豊田 淳, 佐々木 貴信, 荒木 昇吾, 高海 克彦: CLTを利用した床版の輪荷重載荷試験, 木材利用研究論文報告集 15, pp17-26, 2016.
- 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.
- 3) 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, (CD-ROM), pp.799-806, 2019.
- 4) 有山 裕亮, 海老 拓紀, 高橋 佑輔, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 豊田 淳: 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, 木材利用研究論文報告集 18, pp.55-61, 2019.
- 5) 小川 虹輝, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 荒木 昇吾, 青木 由香利: 鋼製防護柵を取り付けたCLT床版の破壊挙動, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)77巻 5号, pp.L55-L63, 2021.
- 6) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, pp110-113, 2016.
- 7) (一社) 全国高欄協会: 防護柵の設計に関する統一見解.
- 8) 日本 CLT 協会: 木造の建築設計に求められる地域材による CLT (クロス・ラミネイティッド・ティンバー) の品質と仕様及び部材の仕様、構造モデルの検討と実証試験, 2014.