

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04658

研究課題名（和文）安全性・メンテナンス性に考慮したオンサイト木橋の改良

研究課題名（英文）Improvement of on-site bridge considering safety and maintainability

研究代表者

後藤 文彦（GOTOU, Humihiko）

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10261596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：既に実用化されているオンサイト木橋で使われているPC鋼棒横締め構造を見直し、安全に低コストでオンサイト施工できる新しい形式のオンサイト木橋を開発し直すため、PC鋼棒の代わりに繊維補強ロッドを用いたモデルや角材の代わりにCLTを用いたモデルなど、いくつかの代替案を検討した。更に、環境外力のうち積雪等の季節依存外力に対しては、構造形式の変換で対応し、腐朽等の常時の生物学的外力に対しては、定期点検を特別な道具が不要なタブレット等の手軽な手法で行えるようにすることで、環境外力に対する弱点を抱える木材であっても、厳しい自然環境の中で環境親和型の材料として利用できるような手法の可能性について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オンサイト木橋は、自然景観に馴染む木橋のニーズに応える合目的な構造形式を有するものの、PC鋼棒の横締め構造に安全上の懸念があった。そこで、PC鋼棒の横締めを繊維補強ロッドで代替する構造案や横締め自体を行わずにCLTで角材を代替する構造案など、PC鋼棒を用いないオンサイト木橋の改良案を検討した。これらの改良案により、より安全にオンサイト木橋のニーズに対応できる選択肢が広がった。また、従来のオンサイト木橋のような木・鋼ハイブリッド材料に頼らずに木橋の構造の変換で積雪等の季節依存外力をかわし、腐朽等の生物学的外力にはタブレット等の手軽な機材で劣化診断を行うといった新たな木橋の方向性も示した。

研究成果の概要（英文）：In order to redevelop on-site bridge, whose PC bars can be concern about safety, we investigated alternative model using fiber-reinforced rods instead of PC bars and another model using CLT instead of square logs. On the other hand, we also explored possibility of the approach to fix the problem by transformation of structural form for season-dependent external load such as snow load and to fix the problem by periodic inspection using convenient devices such as portable tablets for biological external load such as decay.

研究分野：構造工学、木質構造

キーワード：オンサイト木橋 プレストレス木箱桁橋 応急橋 緊急架設橋 豪雪地帯 雪荷重 登山道

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2010年に間伐材の有効利用を目的に開発されたプレストレス木箱桁橋タイプのオンサイト木橋は、2011年の東日本大震災以降、応急橋としての用途も含めて改良が続けられ、主に秋田県内の町道や森吉山、太平山といった豪雪山間部の登山道として、県外も含めると10橋が架設され、そのオンサイト施工性、豪雪地帯での耐久性など、既に実用性が確認され、より長スパンへの拡張等にも期待されている。

このような実用性を実現した鍵は、桁上部と下部に配置された角材を、PC鋼棒の横締めにより箱断面として一体化する構造にある。しかし、近年木橋にPC鋼棒の横締め構造を導入することに対して、PC鋼棒の腐食による破断等の懸念から警鐘を鳴らす声もあり、PC鋼棒メーカー等の自主規制により、木橋の横締めを利用目的とするPC鋼棒が購入できないといった問題が生じている。

木橋におけるPC鋼棒の横締め自体は、プレストレス木床版橋等で、既に海外でも確立された技術ではあるが、PC鋼棒の腐食や木材の含水膨張によるPC鋼棒の破断は、確かに一定の確率では起き得る現象で、構造的に避けられるなら、それが最も望ましい。とはいえ、既に実用化されているPC鋼棒横締めを利用したプレストレス木箱桁橋タイプのオンサイト木橋は、山間部の登山道など、山林景観に馴染みながら、豪雪荷重にも耐え、山間部の施工に適しているため、秋田県のような山林が多い雪国では、ニーズが高い。もし、今後プレストレス木箱桁橋タイプのオンサイト木橋の架設ができなくなるようであれば、早急に、それに代わる新しいタイプのオンサイト木橋の開発が望まれる。



写真1 オンサイト木橋

1つの案は、現行のオンサイト木橋の利点を保った状態で、PC鋼棒の破断の危険性を除去することである。木材が含水膨張した場合、PC鋼棒は剛性が非常に高いため、伸びが発生して応力を緩和する効果はなく、引張応力がどんどん高くなる危険性がある。近年、アラミド等の繊維で補強された複合材料のロッド各種が開発されているが、こうした繊維補強ロッドは、引張強度はPC鋼棒とそれほど変わらないものの、伸び変形能があるため、木材が含水膨張した場合に、伸びて応力を緩和する効果が期待される。定着部の処理等、詳細部分の検討は必要であるが、繊維補強ロッドを使えば、腐食の心配もなく従来の構造の利点をあまり変えずに、より安全な形式に移行できるものと予想している。

2つめの案は、緊張材による角材の横締めを使わない構造に変更することである。角材の使用をやめるのであれば、角材の横締めで成立する板状部材を代替し、容易な施工と高剛性をも両立する新たな木質材料の使用を検討しなければならない。欧米で壁材や床材のパネルとして利用され、近年、国内でも各種の用途に利用が期待されているCLT(Cross Laminated Timber)は、一方向に長く連結することも可能な板材であり、オンサイト木橋の箱桁を形成する木質材料としては、角材に代わる候補となり得る。

### 2. 研究の目的

本研究では既に実用化されているオンサイト木橋を代替し得る新たな木橋を、PC鋼棒を用いずに実現することを目的としている。繊維補強ロッドは、PC鋼棒を代替し得る建設用緊張材として、各種の用途に利用され始めてはいるが、これらは耐腐食性を期待されての利用である。もちろん、オンサイト木橋においても耐腐食性は重要であるが、それ以上に、含水膨張による応力増大に対して、伸び変形能を有するロッドが応力緩和する効果を積極的に期待するという点が、この案の独自性になっている。この効果が有効と認められれば、こうした繊維補強ロッドの利用方法は、緊張材としての可能性・自由度を拡張し、新たな構造の創造にも繋がる。CLTパネルは、主に建築分野で壁材や床材等として使われているが、橋梁の床版等に応用する研究は、研究分担者が中心になって国内でも実証実験が行われている。本研究は、それを更に拡張し、CLTパネルを箱桁断面のフランジ部材として利用する可能性を模索するものである。

角材のPC鋼棒横締めタイプのオンサイト木橋では、桁の底面にも角材が並び、側面の鋼板部もPC鋼棒のアンカープレートを固定するための化粧角材が取り付けられているため、側面や下

方から眺めた場合でも木部材の割合が多く、十分に森林景観に馴染む木質景観を演出できている。CLT パネルを箱桁の上下フランジに取り付けた新たな構造は、角材の PC 鋼棒横締めタイプのオンサイト木橋と似た外見となるので、側方や下方から眺めた場合でも従来タイプと同等の木質景観が期待される。

1990 年代から国内で木橋が見直され、大断面集成材等を利用した各種の近代木橋が架設されたが、コンクリート橋や鋼橋と比べてコストが高く、なかなか普及していない。一方、2010 年代から研究代表者、研究分担者等で開発したオンサイト木橋は、角材の PC 鋼棒横締めを利用することでコストも安く、施工性に優れているため、秋田県内の山間部を中心に次第に普及し始めている。CLT パネルは、本来の建築資材としての利用でも国内ではそれほど普及していないが、本研究で木橋の構造材としての利用を実用化できれば、世界的にも独創的な利用方法であり、CLT パネルの更なる可能性を開拓し、その消費を拡大することにも繋がるであろう。

一方、オンサイト木橋は冬季の雪荷重に抵抗するために、ハイブリッド化によって高剛性を確保し、登山道の歩道橋としてはオーバースペックになっている嫌いもある。そこで、季節依存型の環境外力は、床版の折り畳みなどの構造形式の変換で対応し、腐朽等の常時の生物学的外力に対しては、タブレットによる振動測定といった手軽な点検手法によりメンテナンスを容易にすることで、新たなオンサイト木橋の改良の方向性を提示できないかについても検討する。

### 3. 研究の方法

繊維補強ロッドを用いたモデルについては、PC 鋼棒であれば破断し得るような木材の含水膨張が生じて、伸び変形による応力緩和が生じ、ロッドの破断には至らないかどうかを明らかにする。理論計算レベルでは、線膨張係数を設定したロッドと木材の合成ばねのモデルに、含水膨張を与え、膨張率とロッドの応力との関係を算定する。一方、数値解析では、実橋として組み立てられた橋の全体モデルの特定のロッドに、最も不利に働く局所的な含水膨張や局所的な熱膨張の組み合わせが発生した場合をケーススタディーし、起こり得る荷重の組み合わせで、ロッドにどの程度の安全率が見込めるのかを明らかにする。

CLT モデルについては、過去に曲げ試験を行ったプレストレス木箱桁の試験体と同程度の断面のモデルを作成し、数値解析により、プレストレス木箱桁モデルとの比較を行う。

積雪等の季節依存外力を回避する新しい木橋の方向性については、床版を折りたたむ構造など検討する。定期点検を簡易化するメンテナンス手法についても、携帯タブレットを用いた固有振動数の測定方法等を検討する。

### 4. 研究成果

2020 年度は、まずプレストレス木箱桁橋の横締め PC 鋼棒以外の繊維強化複合材料のロッド各種を利用した場合の耐性について、数値解析により検討を行った。木部材部分の含水膨張と熱膨張を考慮し、含水率の低い 4 月に架設されたとして、含水率の高い 7 月に、含水膨張と熱膨張により、繊維補強ロッド各種に発生する応力を計算したところ、PC 鋼棒を始め、その他の代替ロッド各種でも、耐力には達しないことがわかった。現実的に想定される含水膨張では、いずれの緊張材でも、耐力には達しないが、それぞれのロッドの耐力に達するまで、仮想的にあり得ない膨張を与えて解析したところ、繊維補強ロッド各種は、剛性については PC 鋼棒よりも柔らかめであるものの、耐力については、PC 鋼棒よりも大きいため、変形して応力を緩和しながら、PC 鋼棒よりもはるかに大きい耐力を示すことがわかった。そのため、PC 鋼棒よりも小さい断面の繊維補強ロッドについても同様の解析を行ったところ、PC 鋼棒よりも小さいロッド断面でも、耐力には余裕があることもわかった。

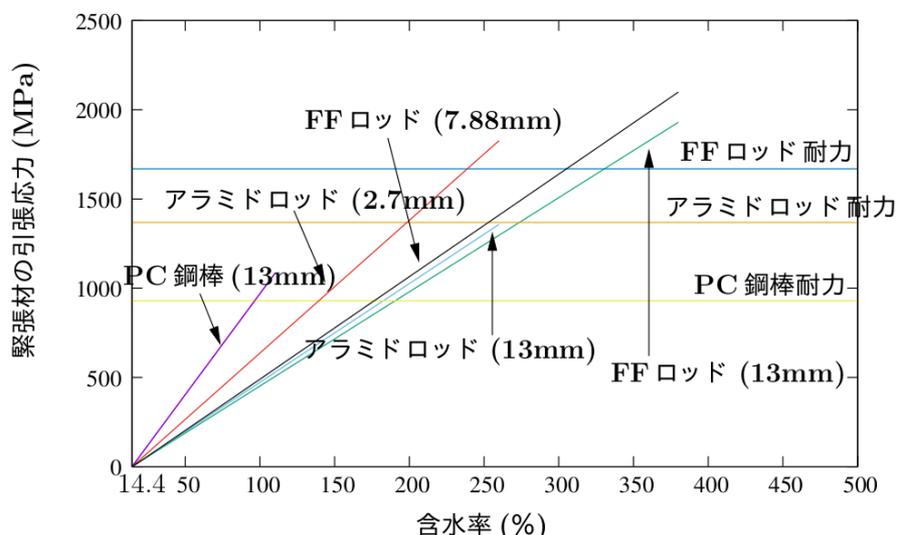


図1 緊張材の引張応力

2021年度は、PC鋼棒による横締めを行わないオンサイト木橋の新しい形式についての検討を行った。これまで、角材の横締めにより構成されていたボックス桁の上下フランジ部を、CLTパネルで代替する構造についてFEMモデルによる検討を行った。これは上下に配置したCLTパネルを2つの鋼1桁にボルトで接合し、ボックス桁を構成する新しいモデルである。CLTパネルは、強軸、弱軸2方向の曲げに対してそれぞれある程度の剛性を有するものの、仮に強軸方向を通常床版として使用される際の幅員方向ではなく、橋軸方向の剛性を高めるように橋軸方向に向けたとしても、角材の軸方向の剛性の半分程度の剛性しか有さない。このため、CLTパネルを用いたモデルをボックス桁として構成した場合に、従来型の角材を横締めするプレストレス木箱桁タイプのオンサイト木橋と同程度の断面性能を有するかどうかについて、3次元有限要素モデルにより検討を行った。その結果、従来の角材を横締めするタイプと同程度の大きさの断面で構成した場合、CLTパネルを用いたモデルでは、剛性はわずかに低下するものの、CLTパネルの強軸方向を橋軸方向に配置するならば、従来タイプと比較してそれほど遜色のない結果が得られた。このことから、今回のCLTパネルを用いたモデルは、オンサイト木橋を構成する木・鋼ハイブリッド断面によるボックス桁構造として、PC鋼棒による横締めを用いない有力な代替候補となる可能性が示された。

表1 解析結果

	CLT鋼箱桁橋モデル	従来モデル
平均たわみ	9.40mm	9.17mm
最小主応力	-11.65N/mm <sup>2</sup>	-9.87N/mm <sup>2</sup>
最大主応力	2.85N/mm <sup>2</sup>	3.28N/mm <sup>2</sup>

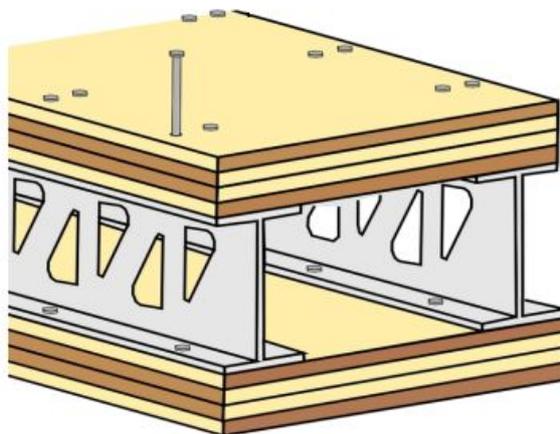


図2 CLT鋼箱桁橋モデル

安全性・メンテナンス性に考慮したオンサイト木橋の改良として、最終年度は、新たな構造形式の検討とメンテナンス手法の検討を行った。本研究ではこれまで、豪雪山間部の登山道に自然景観に馴染む木橋を架けたいといったニーズに応えるため、現地まで部材を運びやすく、現地で組み立てやすく、積雪に耐える剛性を保持し、腐朽した際の部材交換もしやすいオンサイト木橋の改良を検討してきた。これまでのオンサイト木橋は、豪雪地帯の想定外の雪荷重に対しては、剛性を高くした木・鋼ハイブリッド構造で荷重に正面から抵抗しようとしていたため、冬季の雪対策のために、登山道の歩道橋としてはオーバースペックな構造となっており、そのぶん環境親和性を犠牲にしていた。そこで、環境外力のうち積雪等の力学的環境外力の変化に対しては、構造形式の変換で対応し、腐朽等の常時の生物学的外力に対しては、定期点検を特別な道具が不要なタブレット等の手軽な手法で行えるようにすることで、環境外力に対する弱点を抱える木材であっても、厳しい自然環境の中で環境親和型の材料として利用できるような手法の可能性について検討した。オンサイト木橋がPC鋼棒の横締めにより箱桁構造を導入することで高剛性を確保しなければならないのは、冬季間の過大な雪荷重に対抗するためであるが、この冬季間の雪荷重さえ、構造形式の変換で回避できるのであれば、鋼部材への依存率の低い新たな木橋の開発へとつながる。一方、鋼部材への依存性が低いほど、木部材のメンテナンスの重要性は高くなるため、新たな構造の提案はそれに適したメンテナンス手法と合わせて検討する必要がある。



図3 タブレットによる振動試験

秋田市仁別の国有林内に架かるめおと橋に対して、砂袋を用いた振動試験を行い、携帯タブレットの加速度センサーにより固有振動数を測定した。一方、測定ヤング率を3Dモデルに入力して振動解析により予測された固有振動数は、測定値とよく一致した。測定時の含水率の影響等を考慮しても、10%前後の誤差に留まると考えられ、タブレットを用いた固有振動測定の妥当性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 及川 大輔, 岩崎 圭音, 後藤 文彦, 青木 由香利	4. 巻 21
2. 論文標題 加速度センサ搭載タブレットを用いた振動測定によるめおと橋の動的特性調査	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 木材工学研究発表会講演概要集	6. 最初と最後の頁 81-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小川 虹輝, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 荒木 昇吾, 青木 由香利	4. 巻 77 巻 5 号
2. 論文標題 鋼製防護柵を取り付けたCLT床版の破壊挙動	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), 77 巻 (2021) 5 号	6. 最初と最後の頁 I_55-I_63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejmcs.77.5_I_55	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 及川大輔, 後藤文彦, 野田龍, 青木由香利
2. 発表標題 27 年供用された木橋の構造性能評価
3. 学会等名 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 及川 大輔, 後藤 文彦, 野田 龍, 青木 由香利
2. 発表標題 新旧部材の測定値を用いた木製歩道橋の構造性能と振動使用性評価
3. 学会等名 令和4年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩崎 圭音, 及川 大輔, 新谷 駿元, 後藤 文彦, 青木 由香利
2. 発表標題 加速度搭載タブレット端末を用いた木製歩道橋の振動使用性
3. 学会等名 令和4年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新谷 駿元, 及川 大輔, 岩崎 圭音, 後藤 文彦, 青木 由香利
2. 発表標題 経年劣化を考慮した中路式木製アーチ歩道橋(めおと橋)の振動使用性に関する検討
3. 学会等名 令和4年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 憲史, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 青木 由香利
2. 発表標題 オンサイト木橋としてのCLT・鋼箱桁橋の検討
3. 学会等名 令和3年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川 虹輝, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 荒木 昇吾, 青木 由香利
2. 発表標題 CLT床版に取り付けられた鋼製防護柵の破壊挙動
3. 学会等名 令和3年度 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 一穂, 後藤 文彦, 佐々木 貴信
2. 発表標題 プレストレス木箱桁橋の横締め緊張材について
3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田 一穂, 石井 佑季, 後藤 文彦, 佐々木 貴信
2. 発表標題 PC鋼棒を繊維強化ロッドで代替するプレストレス木箱桁橋の検討
3. 学会等名 第19回木材工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	佐々木 貴信  (SASAKI Takanobu)  (00279514)	北海道大学・農学研究院・教授   (10101)	
研究分担者	野田 龍  (NODA Ryu)  (00626955)	秋田県立大学・木材高度加工研究所・准教授   (21401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------