

プレストレス木箱桁橋におけるプレストレス構造のモデル化

環境構造工学講座 修工 13 -116 尾山 龍之介
指導教員 後藤 文彦 徳重 英信

1. はじめに

山間部での間伐材の有効利用や被災地の応急橋に特化して、角材を組み合わせて簡単に組みたられるプレストレス木箱桁橋（オンサイト木橋）^{1),2),3)}は、既に数カ所に架設されてその実用性が確認されているが、せん断変形の影響や局部座屈の危険性などを数値的に予測するには、有限要素法による数値シミュレーションを用いなければならない。有限要素モデルでプレストレスや摩擦の影響を考慮することは、モデルを煩雑にするので、こうした影響を考慮しなくても、プレストレス木箱桁橋の剛性評価は簡単なモデルでも十分に有用である。ただ、有限要素モデルでプレストレスや摩擦の影響で鋼板部と木材部の接触面ですべりが発生した。プレストレスによる部材の接触面の摩擦の影響を考慮するためには、接触解析を用いなければならない。しかし、摩擦係数やプレストレスを考慮した数値モデル化は一般に難しい。そこで、本研究では、プレストレスや摩擦の影響を考慮した有限要素モデルを接触面に弾塑性要素を挟むことで接触解析と同等の解析を行うことができるかを考察する。

2. 解析手法

まずはじめに図-1 のように三角孔を設けた鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋について、次の3つのモデルを作成し有限要素解析を行う。図-2 に示すように (1) 接触解析モデル：鋼板部と木材部が一体化されておらず、木材と接触している範囲の鋼板にプレストレス力相当の分布外力を与えて箱断面を形成しているモデル、(2) 一体化モデル（プレストレスなし）：鋼板部と木材部の節点が共有されて全部材が一体化されているモデル、(3) 一体化モデル（プレストレスあり）：(2) の一体化モデルに (1) と同様の分布外力を与えたモデルである。解析には、MSC Marc/Mentat（要素は 3-D, SOLID hex8）を

用いる。今回は、載荷部や拘束部の応力集中を避けるため、桁高 50cm, 幅員 85.8cm, 軸長 3m のプレストレス木箱桁橋の片持ち梁モデルの自由端に鉛直荷重を載荷する。また図-3 のような合板と木材を用いたプレストレス木箱桁橋についても桁高 50cm, 幅員 84cm, 軸長 2.5m の片持ち梁モデルの自由端に鉛直荷重を載荷し、鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋と同様に3つのモデルを作成し有限要素解析を行う。次に、弾塑性要素を用いたプレストレス木箱桁橋のモデルを作成し、一体化モデル、接触解析モデル、弾塑性要素を用いたモデルで比較をする。

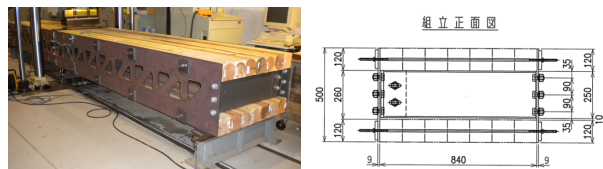


図-1 鋼板を用いたモデル

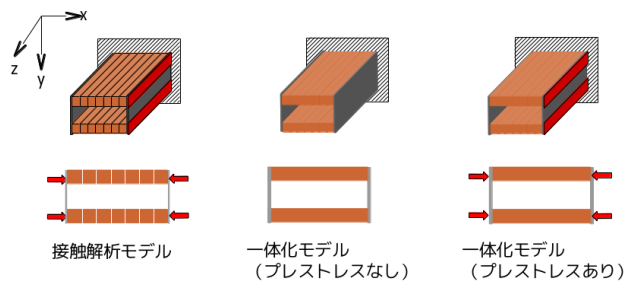


図-2 解析モデル

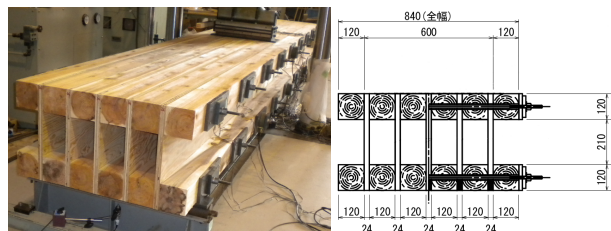


図-3 合板を用いたモデル

3. 解析例 鋼板を用いたモデル

すべてのモデルについて、片持ち梁先端部に 50kN の荷重を受けた場合のたわみを幅員に対してプロッ

トしたものを図-4 に示す。一体化モデルでプレストレスのあるものとなないものとは、大きな違いは認められない。接触解析モデルは、鋼板部と木材部の境界ですべりが発生してたわみがずれているが、平行移動すれば、木材部のたわみ形自体は、一体化モデルとほぼ重なる形である。接触解析モデルでは、便宜上、すべての要素に 0.4 の摩擦係数を与えているが、この数値に特に大きな根拠があるわけではない。また、Marc.mentat で接触解析モデルを解析した後の、鋼板部と木材部の境界でのずれの様子を図-5 に示す。

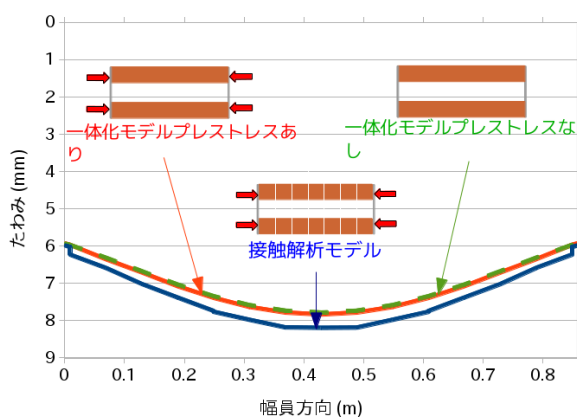


図-4 モデルごとのたわみの比較

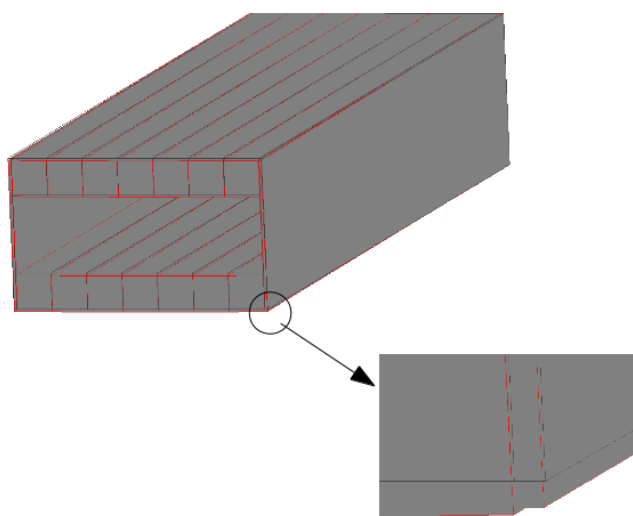


図-5 Marc の鋼板部と木材部のずれの様子

プレストレスが作用していない状態で接触する 2 種材料間の摩擦係数は、鋼材、木材の組合せでは

0.2 ~ 0.6 くらいなので、その範囲で摩擦係数を変化させて比較した結果を図-6 に示す。摩擦係数が小さくなっていくと、鋼板部と木材部の接触面のずれが大きくなっていき、摩擦係数がある程度大きくなれば、このずれがほとんどなくなることがわかる。実際の载荷試験では、破壊するまで载荷を行っても鋼板部と木材部が目に見えてずれることはなく、プレストレス化での実際の摩擦係数はかなり高いことがうかがえる。

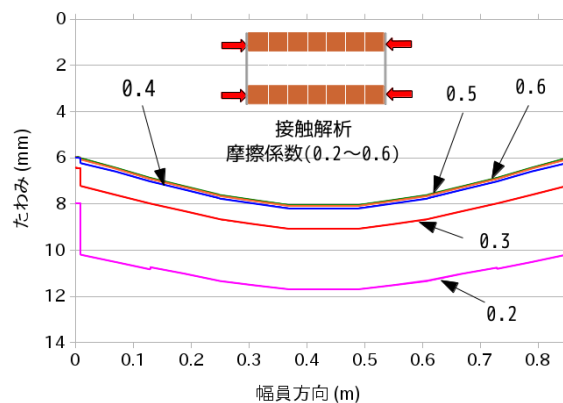


図-6 摩擦係数の変化させて比較 (鋼板を用いたモデル)

4. 解析例 合板を用いたモデル



図-7 解析モデル (合板を用いたモデル)

合板を用いた解析モデルは、図-7 に示す。鋼板を用いたモデルと同様に、片持ち梁先端部に 20kN の荷重を受けた場合のたわみを幅員に対してプロットしたものを図-8 に示す。一体化モデルモデルでプレストレスのあるものとなないものとは、多少違いは見られるが大きな違いは認められない。接触解析モデルは、やはり合板部と角材部の境界ですべりが発生しているためたわみずれている。接触解析モデルでは、すべての要素に 0.4 の摩擦係数を与えている。

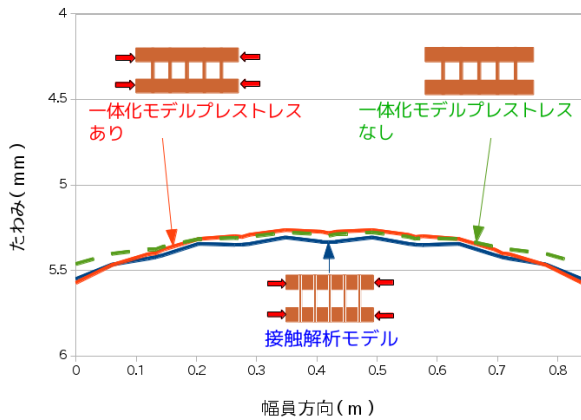


図-8 モデルごとのたわみ比較 (合板を用いたモデル)

プレストレスが作用していない状態で接触する2種材料間の摩擦係数は、木材、木材の組合せでは0.2～0.5ぐらいなので、その範囲で摩擦係数を変化させて比較した結果を図-9に示す。鋼板部と木材部のプレストレス木箱桁橋と同じように摩擦係数が小さくなっていくと、合板部と木材部の接触面のずれが大きくなっていき、摩擦係数がある程度大きくなれば、このずれがほとんどなくなることがわかる。

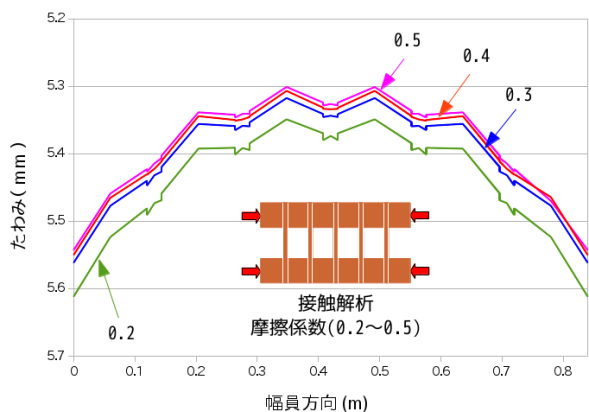


図-9 摩擦係数を変化させて比較 (合板を用いたモデル)

プレストレス木箱桁橋について、鋼板部と木材部、合板部と木材部の2種類を一体化させずにプレストレスで押さえた接触解析モデル、一体化させたモデルを比較してみたが、摩擦係数が十分に大きければ、接触解析モデルも一体化モデルも同様の結果を与えることがわかった。載荷試験で、破壊するまで載荷を行った際の接触面付近の写真を図-10に示

すが、破壊試験結果から、実際の摩擦係数は十分に大きいと思われるので、プレストレス木箱桁橋の剛性評価は簡単な一体化モデルでも十分に有効であると考えられる。



図-10 載荷試験

5. 弾塑性材料を挟む場合

プレストレス木箱桁橋において接触解析 (接触解析モデル) で解析を行った際、鋼板部と木材部の接触面でずれが発生しているので、そのずれを鋼板部と木材部の境界面に弾塑性材料を挟むことで接触解析 (接触解析モデル) と同等の解析ができるかを考察する。弾塑性要素を用いたモデルでは、摩擦係数やプレストレスを考慮した弾塑性材料を鋼板や木材の間に挟み、節点が全て共有している状態すなわち全部材が一体化モデルとして解析が可能である。その際、鋼板や木材の間に挟む弾塑性要素の降伏点を考慮しなければならない。MSC Marc/Mentat では、弾塑性要素の降伏点を相当応力として与えなければならない。相当応力の求め方は様々あるが、今回はミーゼス応力の計算方法をもとに弾塑性要素の降伏点を導きました。ミーゼス応力の式は以下のように表される。

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{3}\tau_{zx} \quad (1)$$

ここで、 σ_{Mises} はミーゼス応力、 τ_{zx} はせん断応力である。プレストレス力を考慮した場合のミーゼス応力の式は以下のように表される。

$$\sigma_{Mises} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{zz}^2 + 2\tau_{zx}^2)} \quad (2)$$

ここで、 σ_{zz} はプレストレス力である。

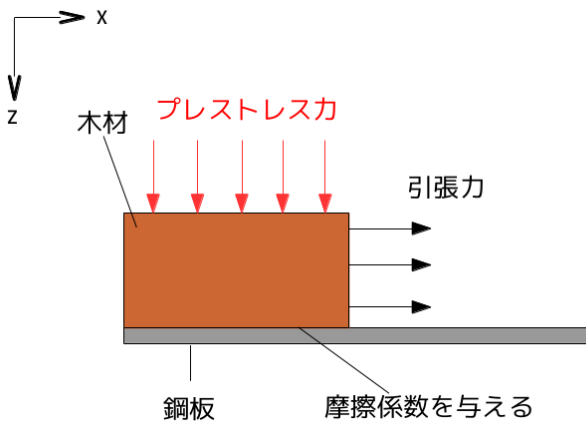


図-11 簡単なモデルでの接触解析

まず接触解析の代わりに挟む弾塑性要素にどのくらいの降伏点を与えればよいのかを検討するために図-11のような簡単なモデル用いて、有限要素で接触解析を行う。図-11のモデルにおいて木材の寸法(100mm × 80mm × 200mm)とし、鋼板と木材での摩擦係数を0.4、プレストレス力はプレストレス木箱桁橋相当の面荷重を与える。

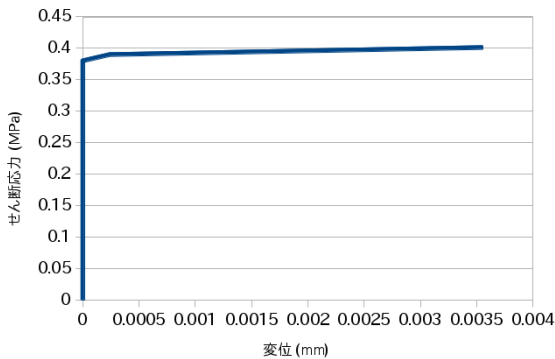


図-12 変位とせん断応力の関係

図-11のような簡単なモデルで解析した結果を図-12に示す。木材と鋼板の間に摩擦係数を与えることで、引張力を増やすと木材と鋼板の間ですべりが発生していることが分かる。図-12から得られるすべり直前のせん断応力 $\tau_{zx} = 0.8996\text{MPa}$ を式(1)に代入して計算すると、ミーゼス応力 $\sigma_{Mises} = 0.675\text{MPa}$ と算出される。ここで求めたミーゼス応力をプレストレス木箱桁橋に挟む弾塑性要素の降伏点として与える。

6. 解析例 鋼板を用いたモデル

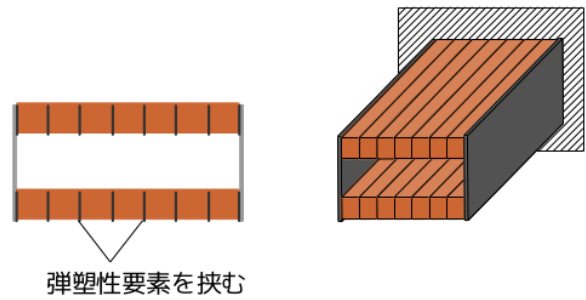


図-13 弾塑性要素モデル(プレストレスなし)

プレストレス木箱桁橋に幅1mmの弾塑性材料を両端の鋼板と角材1本1本挟んだモデルを図-13に示す。先程、求めたミーゼス応力 σ_{Mises} をプレストレス木箱桁橋の弾塑性要素の降伏点として与える。

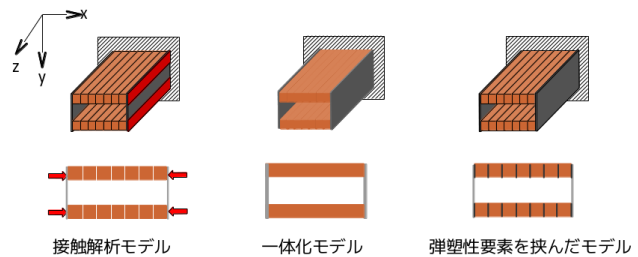


図-14 鋼板を用いたモデル

図-14のような鋼板と木材のを用いた一体化モデルと摩擦係数0.4を与えた場合の接触解析モデルと弾塑性要素モデルで比較を行った。なお、3つのモデルについて片持ち梁先端部に50kNを与える。また、弾塑性材料には木材と同等のヤング率を与える。図-14の3つのモデルのたわみを幅員方向に対してプロットしたものを図-15に示す。一体化モデルと弾塑性要素モデルとで比較したところ、弾塑性要素モデルの方が大きく変位することがわかる。ただ、接触解析モデルのような鋼板部と木材部の境界でのすべりがうまく表現できないという結果が得られた。このことから、弾塑性材料が少しずつずれが生じ、一体化モデルより変位したことが考えられる。接触解析モデルにおける鋼板部と木材部でのすべりを表現するためには鋼板部と木材部に挟む弾塑

性要素の降伏点を厳密に考慮しなければならない。

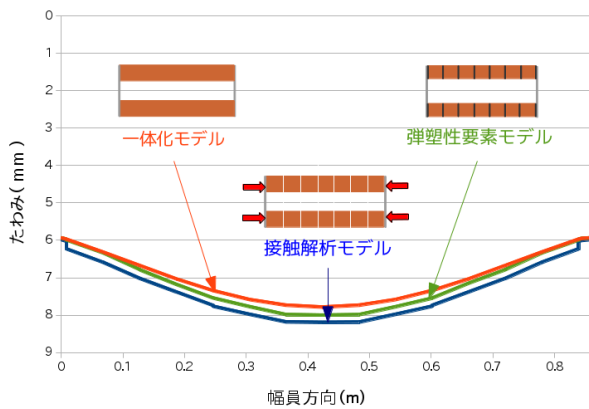
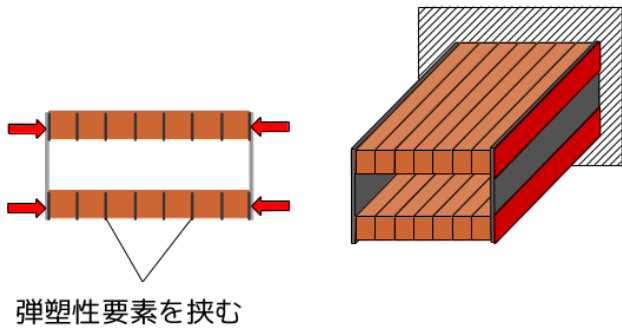


図-15 各モデルごとの比較 (鋼板も用いたモデル)



弾塑性要素を挟む

図-16 弾塑性要素プレストレス木箱桁橋 (プレストレスあり)

一方、図-16 のような弾塑性要素モデルにプレストレス力与える場合、弾塑性要素に与える降伏点は式 (2) を用いて求めなければならない。先程の図-11 のモデルで求めた直前のせん断応力 $\tau_{zx} = 0.8996MPa$ とプレストレス木箱桁橋に与えるプレストレス力 $\sigma_{zz} = 0.972MPa$ を式 (2) に代入すると、ミーゼス応力 $\sigma_{Mises} = 1.369MPa$ という値が得られる。この値を図-16 の弾塑性要素の降伏点として与える。接触解析モデル、弾塑性要素モデル (プレストレスなし)、弾塑性要素モデル (プレストレスあり) で比較したのが、図-12 に示す。弾塑性要素モデルにおいて、プレストレスを無視したモデルでも考慮したモデルでも、大きな違いが見られない。

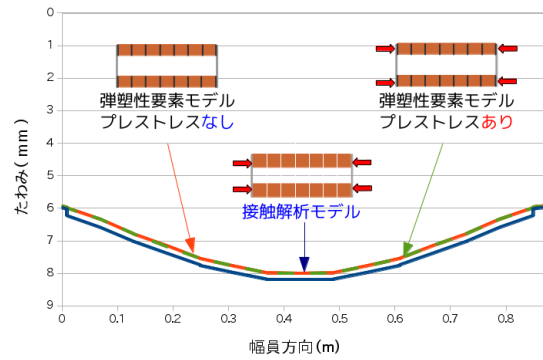
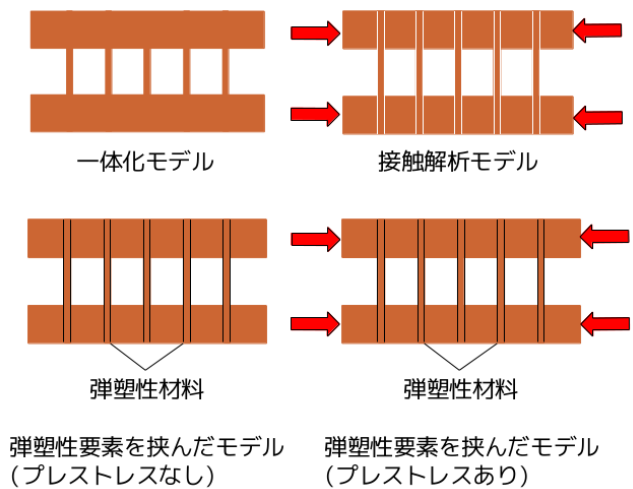


図-17 各モデルごとの比較 (鋼板を用いたモデル)

7. 解析例 合板と角材を用いたモデル



弾塑性要素を挟んだモデル (プレストレスなし) 弾塑性要素を挟んだモデル (プレストレスあり)

図-18 合板を用いたモデル

合板を用いたモデルにおいても、鋼板を用いたモデルと同様に弾塑性材料を挟んだモデルを作成し、数値解析を行う。図-18 のようにすべての節点が共有している一体化モデルと、接触解析モデルと、接触解析の代わりに、合板と角材 1 本 1 本の間 に 1mm の弾塑性材料を挟んだモデル (プレストレスありとなし) の 4 つのモデルで、片持ち梁先端部に 20kN の荷重を与える。また、弾塑性材料の降伏点、ヤング率は先程の鋼板と角材を用いたモデルと同等の値を与えた。4 つのモデルについて、たわみを幅員方向に対してプロットしたものを図-19 に示す。この結果から、弾塑性材料うまく降伏していない状態で、一体化モデルと接触解析モデルに比べ、曲げ剛性 EI がただ大きくなったと思われ、弾塑性要素を用いたモデルの変位が小さくなったこと

が考えられる。また弾塑性要素モデルにおいて、プレストレスありとなしとで少し違いがでる結果となった。合板を用いたモデルについても、接触解析と完全に等価になっていないので、弾塑性要素の降伏点の設定方法等を見直し、より接触解析に近づけるためには今後、検討していく必要がある。

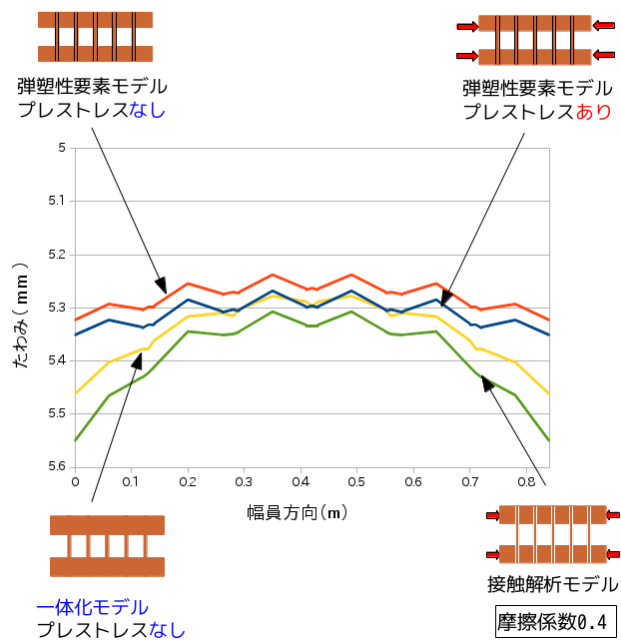


図-19 各モデルごとの比較（合板を用いたモデル）

8. まとめ

本研究では、角材と鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋と角材と合板を用いたプレストレス木箱桁橋について、有限要素解析モデルをどのくらい厳密にモデル化をすべきなのかを調べるため、まずは、(1) 接触解析モデル：鋼板部と木材部が一体化されておらず、木材部と接触している範囲の鋼板にプレストレス力相当の分布外力与えて箱断面を形成しているモデル、(2) 一体化モデル（プレストレスなし）：鋼板部と木材部の節点が共有されて全部材が一体化されているモデル、(3) 一体化モデル（プレストレスあり）：(2)の一体化モデルに(1)と同様の分布外力を与えたモデルの3つのモデルで比較をした。プレストレス木箱桁橋について、摩擦係数が十分に大きければ、接触解析モデルも一体化モデルも同様の結果が得られることがわかった。実際の载荷試験で、破壊するまで载荷した際に、鋼板部と木材部の境界

面でのずれは目に見えてずれることではなく、摩擦係数は十分に大きいと思われるので、有限要素で解析する際は、簡単な一体モデルでも十分に剛性評価は可能である。

有限要素解析を行った際、接触解析モデルにおいて、摩擦やプレストレス考慮した場合、鋼板部と木材部または合板部と角材部でずれが生じていることがわかった。そこで、接触面に弾塑性要素を挟むことで接触解析を用いることなく、簡単に接触解析と同等の解析を行うことができるかを提案してきました。角材と鋼板を用いたモデルでは、接触解析の代わりに、両端の鋼板と角材1本1本の間に弾塑性要素を挟むモデルでは、プレストレスを無視したモデルでも考慮したモデルでも、両端の鋼板と角材の間では、特に大きなずれは生じずに、角材と角材の間で少しずつずれが生じて、全体としては、一体化モデルと接触解析モデルの間ぐらいの剛性を示した。一方、角材と合板を用いたモデルでも、合板と角材1本1本の間に弾塑性要素を挟み、数値解析を行いました。载荷荷重が角材と鋼板を用いたモデルに比べ、小さいため接触解析の代替りとなる、弾塑性材料がうまくずれが生じなく、弾塑性材料挟むことで曲げ剛性が大きくなり、一体化モデルと接触解析モデルに比べ、変位が小さくなったと考えられる。今回の弾塑性要素モデルについて、挟む弾塑性要素の降伏点を同じにしたため、接触解析と完全に等価なモデルにはなっていないが、今後、挟んだ弾塑性要素の降伏点等を見直し、より接触解析（接触解析モデル）に近い挙動を示すモデルを検討していきたい。

参考文献

- 1) 尾山 龍之介, 上村 哲範, 滝田 拓史, 後藤 文彦: プレストレス木箱桁橋の数値モデル, 木材利用研究論文報告集 13, pp. 40-41, (2014).
- 2) 斉藤 輝, 滝田 拓史, 後藤 文彦, 佐々木 貴信: プレストレス木箱桁橋の剛性挙動, 木材利用研究論文報告集 13, pp. 72-73, (2014).
- 3) 滝田 拓史, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 清水 光弘, 安倍 隆一: 角材を用いたオンサイト応急橋の剛性挙動, 木材利用研究論文報告集 12(要旨審査), pp. 41-46, (2013).