

プレストレス木箱桁橋の FEM モデル化について

環境構造工学講座 修工 12-136 上村哲範
指導教員 後藤文彦 徳重英信 長谷部薫

1.はじめに

秋田の杉林をはじめとする人工林は定期的に間伐を行わないと木々が乱雑に育ってしまい、木々の間隔が狭く密集してしまうことから日光の量が制限され光合成などの循環システムが非効率になり、木材として利用する際の弾性係数や強度が低下してしまうことが懸念される。間伐を行うことで残された木々は日光の吸収率が向上し、二酸化炭素の削減が期待され、将来立派な丸太(原木)を育成することができる。そこで間伐された大量の木材は放置しておけばいずれかは腐ってしまい、二酸化炭素を放出してしまうが、木材として利用しているうちは残された木々と同じような効果が期待できると考えられ、間伐材の有効利用が全国的に叫ばれている。さらに森林に近い山間部や農地で現地製材し、その場で利用することができれば運搬時に排出される二酸化炭素や加工時のコストを抑えることができ、より効率的とも言える。そこで余分なコストやエネルギーがかからなくて済むという発想の元、開発されたのがプレストレス木箱桁橋(オンサイト木橋)¹⁾であり、現地製材の小さめの断面の角材を利用しながら、現地で簡単に組立てられるようになっていることから災害時の応急橋にも適していると考えられている。木材には雨水や湿気に弱く、腐りやすいという弱点があるが、短期間の使用を前提としているので比強度が強くて軽い割には丈夫という木材の利点を最大限に活かすことができる。

プレストレス木箱桁橋(オンサイト木橋)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厳密に予測するには、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を十分に行えるなら、簡単なモデルの方が有用である。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とそれらの影響を無視したモデルによる解析を比較し、後者の簡単なモデルで十分な剛性評価ができることを示す。

2.試験体の FEM モデル化

(1)解析モデル

図-1、図-2 のような三角孔を設けた鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋の試験体を以下の 3 種類のようにモデル化し、有限要素解析を行う。

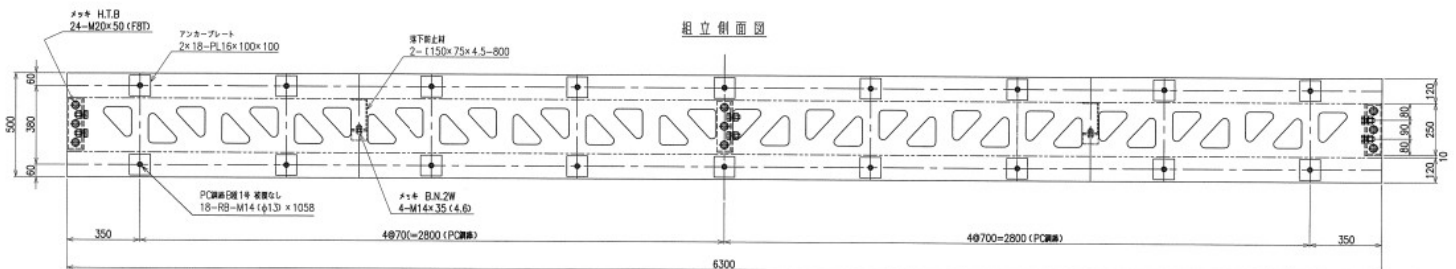


図-1. プレストレス木箱桁橋の試験体 側面図

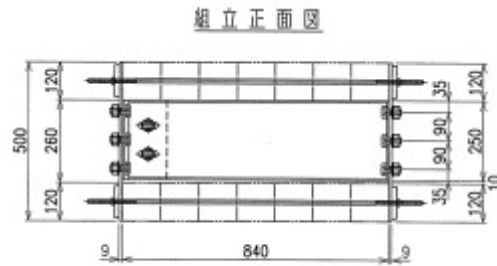


図-2. プレストレス木箱桁橋の試験体 正面図

(a)非一体化モデル: 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。図-1a。

(b)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。図-1b。

(c)一体化モデル(プレストレスあり): (b)の一体化モデルに(a)と同様の分布外力を与えたモデル。図-1c。

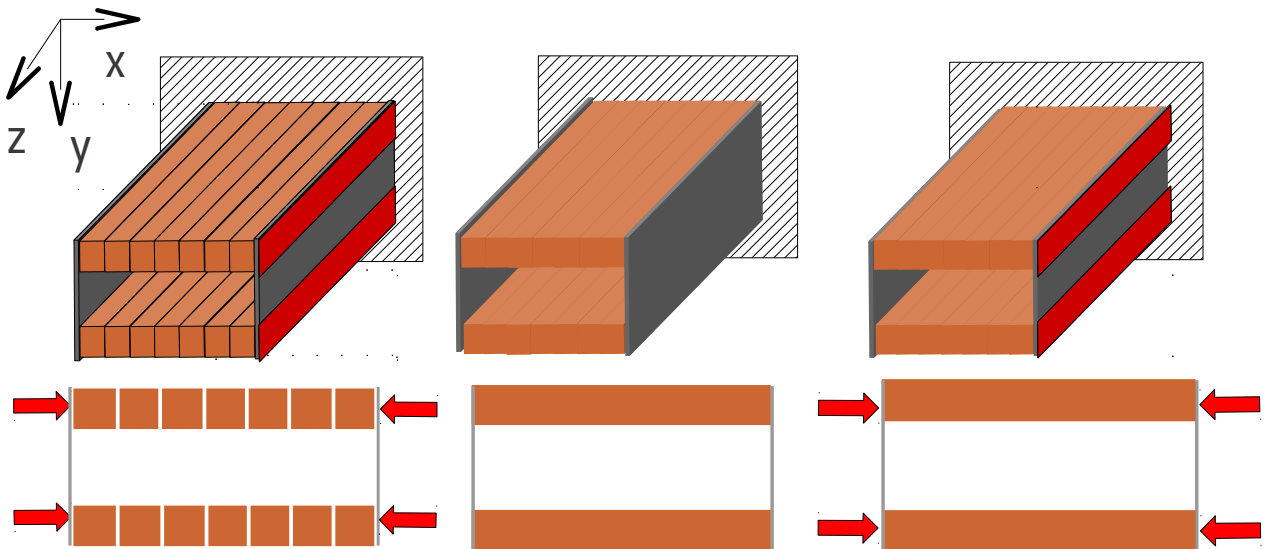


図-3a. 非一体化モデル

図-3b. 一体化モデル
(プレストレスなし)

図-3c. 一体化モデル
(プレストレスあり)

(2)解析手法

有限要素解析ツール CalculiXと汎用有限要素解析プログラム MSC/Marc.Mentat の2種類の有限要素解析ツールを使い、CalculiXでは直方体要素(C3D8)、MSC/Marc.Mentatでは3-Dソリッド要素(hex8)を用いる。また試験体に荷重を載荷する際には単純梁で試験を行なっているが、解析を単純支持で行うと拘束、載荷付近での応力集中が考えられるため図-3a～図-3cのように片持ち梁で半解析を行う。なお固定端部の全節点を拘束し、荷重は自由端部の全節点数で割ったものをすべての節点に同じ大きさのものを+y方向に与える。なお、それぞれの弾性係数は鋼板を206GPa、木材を6.9GPaとする。

3.解析結果

(1)CalculiXと Marc.Mentat による精度比較

まず非一体化モデルと一体化モデルの比較に入る前に 2つの FEM 解析ツールでの精度についての比較を一体化モデル(プレストレスなし)で行う。片持ち梁の先端部に荷重を受けた時のたわみと梁の軸方向分割数の関係を図-4 に示す。このグラフからせん断変形を考慮したティモシェンコ梁の理論値を参考までに載せるが、梁の軸方向分割数を細かくしていくことで収束し、2つの FEM 解析ツールで同等の結果が得られ、図-5 に示す幅員方向とたわみの関係についても同じことが言える。

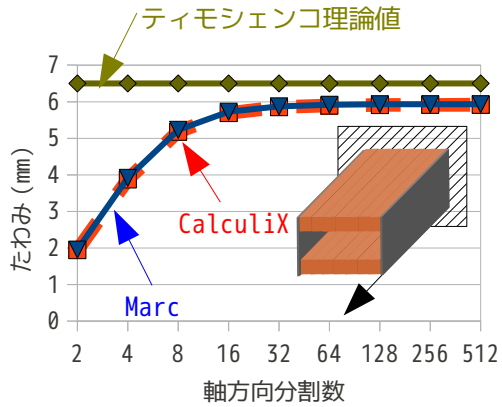


図-4 たわみと軸方向分割数の関係

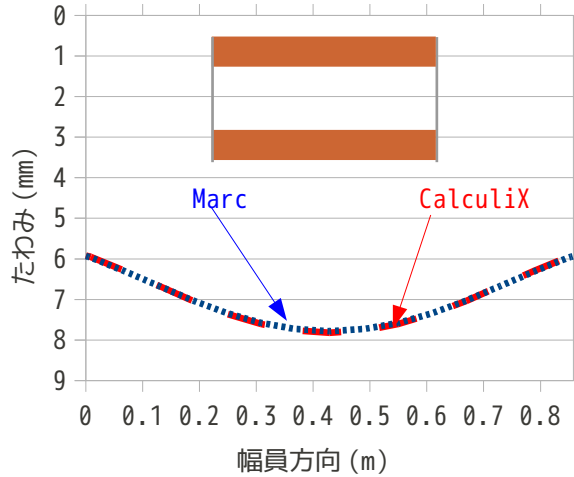


図-5 たわみと幅員方向の関係

(2)幅員方向とたわみの関係

CalculiXと Marc.Mentat の精度比較からこの 2つの FEM 解析ツールは一体化モデル(プレストレスなし)において同等な結果が得られたのでここから先の解析では接触解析に長けている Marc.Mentat を採用することにする。

まずプレストレスの効果について一体化モデル(プレストレスなし)と一体化モデル(プレストレスあり)で比較したものを図-6 に示す。この結果から一体化モデルにおけるプレストレスなしとプレストレスありとでは大きな差はないと言える。

次に非一体化モデルと一体化モデル(プレストレスあり)で比較したものを図-7 に示す。たわみ自体は平行移動すれば重なる形であるが、非一体化モデルについては鋼板部と木材部とでずれが生じてしまうことがわかる。この非一体化モデルでは摩擦係数 0.4 をすべての要素に与えている²⁾。しかし、この数値に大きな根拠があるわけではない。なのでプレストレスが作用していない状態で接触する異種材料の摩擦係数を参考に、鋼材と木材との組

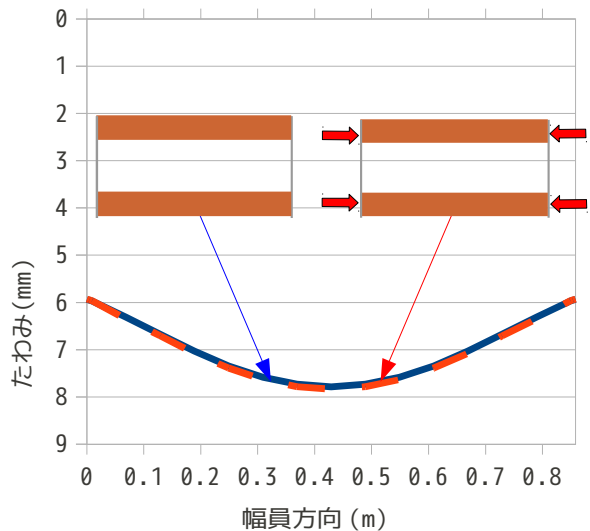


図-6 一体化モデル(プレストレスなし)と一体化モデル(プレストレスあり)の比較

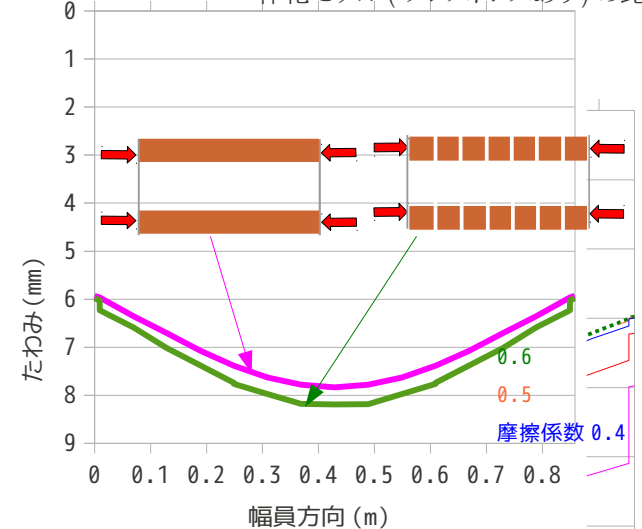


図-7 非一体化モデルと一体化モデル(プレストレスあり)の比較



み合わせではおおよそ0.2~0.6³⁾なので、この範囲で摩擦係数を変化させて解析した結果を図-8に示す。摩擦係数が大きければ鋼板部と木材部とのずれは抑えられ、摩擦係数が小さくしていくと鋼板部と木材部とのずれが摩擦係数0.4の場合より顕著に現れるということがわかる。ただ、プレストレスが作用していない状態で接触する異種材料の摩擦係数を参考に解析を行なっているが、実際の試験体ではプレストレスを作用させているのもう少し摩擦係数が上昇してると考えられる。

図-8 たわみと幅員方向の関係 (摩擦係数別)

(3) 荷重位置からの距離とたわみの関係

この鋼板部と木材部とで生じるずれは FEM 解析特有の部分的に荷重の影響を受けて生じたものなのか、それとも全体的に生じているものなのかを確認するために梁の軸方向の荷重位置から数箇所の幅員方向とたわみの関係の摩擦係数0.4の場合を図-9aに示し、併せて梁の軸方向とずれ量の蓄積を図-9bに示す。

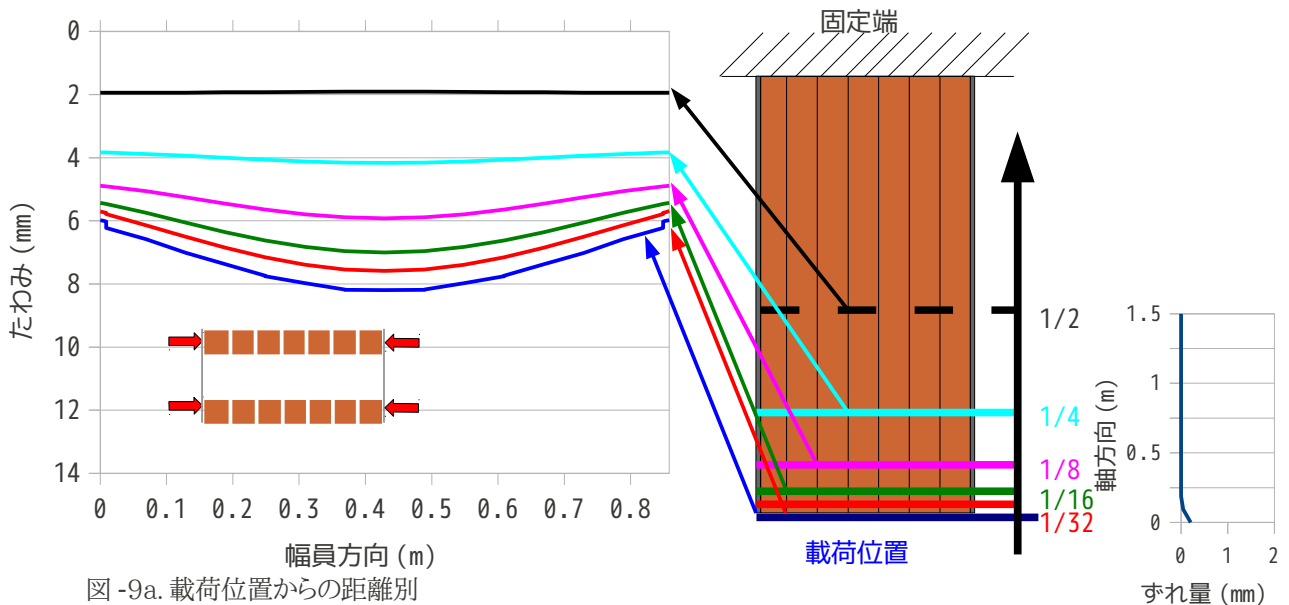


図-9a. 荷重位置からの距離別
たわみと幅員方向の関係 (摩擦係数0.4)

図-9b 軸方向とずれ量の関係
(摩擦係数0.4)

次に摩擦係数が0.4の場合よりもずれが顕著に現れる摩擦係数0.3と0.2の場合を比較したものを図-10a、図-11aに示し、梁の軸方向とずれ量の蓄積を図-10b、図-11bに示す。摩擦係数が小さいものからはよくわかるが、固定端部から自由端部に向かうにつれて鋼板部と木材部の接触面で徐々にずれが累積しているのがわかり、荷重位置で最終的に摩擦係数0.3の場合は1mm程度、摩擦係数0.2の場合は2mm程度のずれが生じている。また、参考までに Marc.Mentat での解析後のモデルの鋼材部と木材部の接触面付近のずれをそれぞれ図-12に示す。

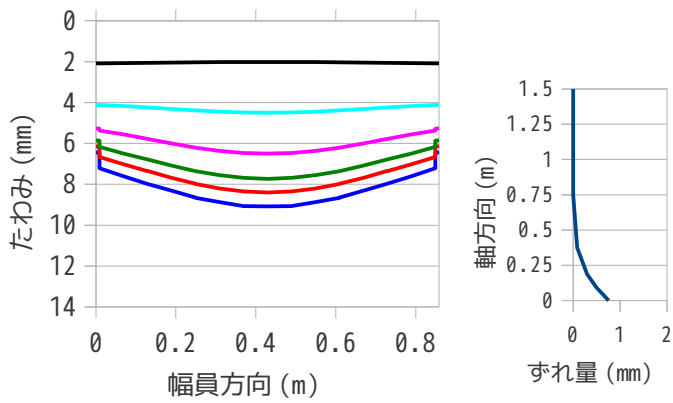


図-10a 荷重位置からの距離
たわみと幅員方向の関係
(摩擦係数 0.3)

図-10b 軸方向とずれ量の関係
(摩擦係数 0.3)

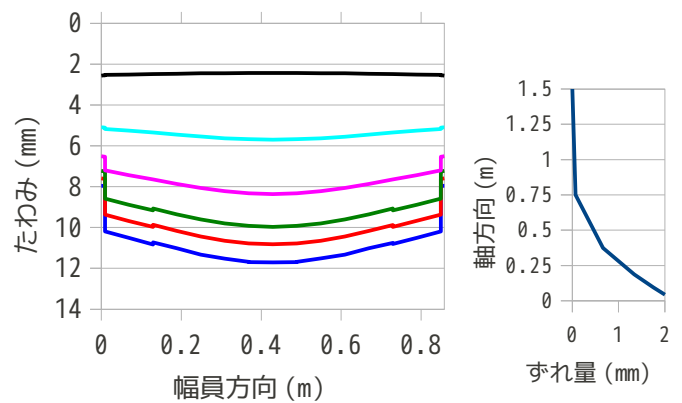


図-11a 荷重位置からの距離
たわみと幅員方向の関係
(摩擦係数 0.2)

図-11b 軸方向とずれ量の関係
(摩擦係数 0.2)

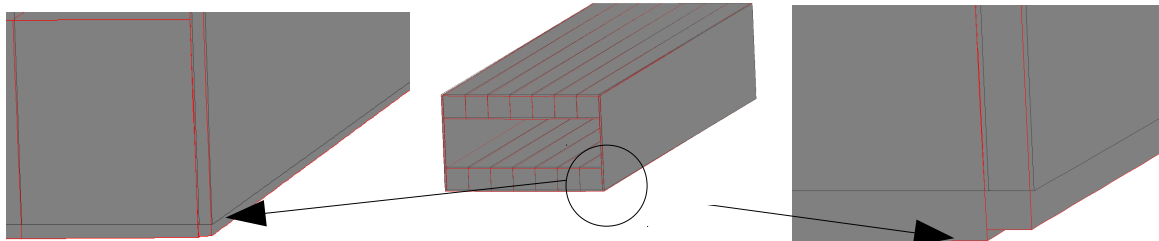


図-12 Marc の鋼板部と木材部のずれの様子

また、荷重試験を行った際の接触面付近の写真を図-13 に、破壊するまで荷重を行った際の接触面付近の写真を図-14 に示すが、実際の荷重試験では、鋼板部と木材部が目に見えてずれることはない。破壊するまで荷重すればずれは生じてしまうが、設計想定荷重範囲であればプレストレス化することで実際の摩擦係数はかなり高いことがうかがえる。

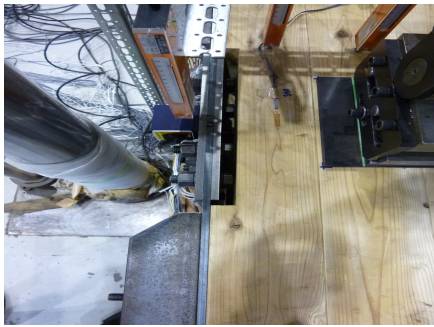


図-13 荷重試験での接触面付近の写真



図-14 破壊試験での接触面付近の写真

(4) 荷重を剛性比で配分

非一体化モデルにおける鋼板部と木材部の接触面でのずれは自由端の全節点に一樣に荷重を与えた場合、木材部は鋼板部に比べて剛性が低いために木材部の方がたわみやすくずれが生じてしまうのではないかと考えられることから鋼板部と木材部の剛性比で荷重を配分し、解析を行ったところ図-15 に示すような結果が得られた。

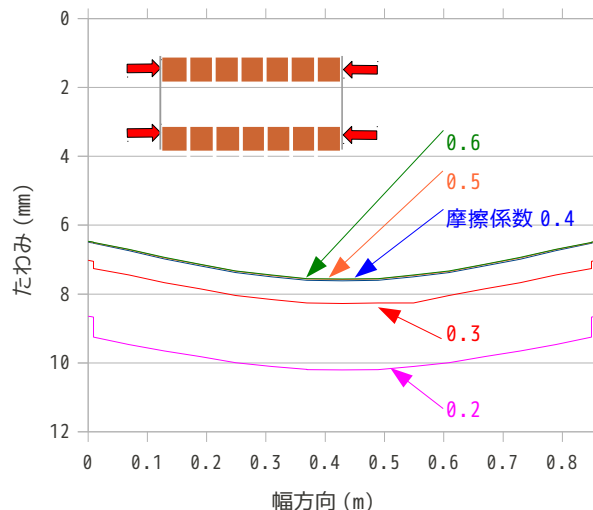


図-15 剛性比で荷重分配後のたわみと幅員方向の関係
(摩擦係数別)

この結果から図-8 と比べて鋼板部と木材部とのずれが抑えられることがわかる。解析上のずれは同じ大きさの荷重の与え方に対してそれぞれ剛性が違いが原因で生じていることがわかると同時に実験では木材部のみで載荷してもずれはみられないことから実物の摩擦係数は十分に大きいのではないかとと言える。

(5)FEM 解析と試験体の載荷実験

FEM 解析結果に加えて試験体の載荷実験結果を図-16 に示す。この実験結果は解析モデルの 2 倍のスパンの単純梁に対して 3 点曲げ試験を行ったものの中央部のたわみであり、CalculiX での一体化モデル(プレストレスなし)、Marc.Mentat での一体化モデル(プレストレスなし)、一体化モデル(プレストレスあり)、非一体化モデルでの幅員方向とたわみの関係ではほぼ同等のが得られたのに対して、大きくたわんでしまっているのはバットジョイントの影響、載荷部や拘束部の違いなどの影響と思われる。

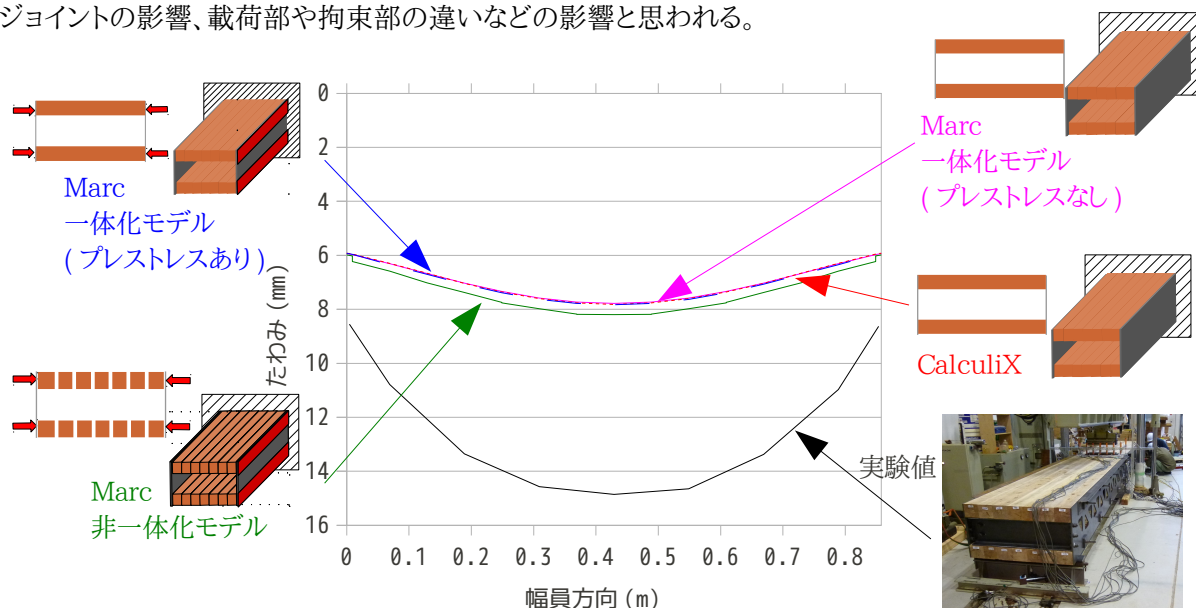


図-16 載荷試験とFEM 解析の比較

4.まとめ

プレストレス木箱桁橋について、有限要素解析における非一体化モデル、一体化モデル(プレストレスなし)、一体化モデル(プレストレスあり)とでは幅員方向とたわみの関係からたわみに大きな差は認められない。ただ、鋼板部と木材部を一体化させずにプレストレスで押さえた非一体化モデルにおいては摩擦係数が小さいと鋼板部と木材部とで FEM 解析上ずれが生じてしまうが、これは鋼板と木材の剛性の違いによるもので摩擦係数が十分に大きければ、非一体化モデルも一体化モデルと同様の結果を与えることがわかった。通常の載荷試験結果からもそのようなずれがみられないことから実際の摩擦係数は十分に大きいと思われる。なので、プレストレス木箱桁橋を FEM モデル化する際には、プレストレスや摩擦の影響を考慮した煩雑なモデルよりもそのような影響を考慮しない一体化している簡単なモデルの方が有用であり、十分な剛性評価ができると考えられる。

参考文献

- 1) 滝田 拓史, 後藤 文彦, 佐々木 貴信, 清水 光弘, 安部 隆一: 角材を用いたオンサイト応急橋のせん断挙動, 木材利用研究論文報告集 12(要旨審査),pp.41-46,(2013).
- 2) 財団法人林業コンサルタント: 実務者のための木橋の設計と施工
- 3) http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.