

角材を用いたオンサイト応急橋のせん断剛性

環境構造工学講座 修工 11-168 プイ ジュ ハイ
指導教員 後藤 文彦 加賀谷 誠

1. はじめに

ベトナムでは国土の3分の2が森林に囲まれており、現在森林の面積の5割を人工林が占めており、その6割は個人や企業が所有する民有林であるが、この豊富な森林資源の有効利用が期待されている。木材は、主成分が炭素であり、大気中の二酸化炭素をその原料とする天然資源である。供用期間を終えた木材中の炭素は、他用途へのカスケード利用を経ながら、最終的には焼却や腐朽により大気に戻される。こうした効果は、一定以上の量の木材が使用されることで有効になると考えられるため、橋、ガードレール、防風(砂・雪)柵、杭など、土木分野での新たな木材利用に期待が持たれている。これまで、木材は湿気に弱く、特に直接風雨に曝される屋外の使用環境では腐朽が早く進む問題があり、また天然材料ゆえの強度のばらつきがあることなどから、橋などの土木構造には、あまり積極的に利用されてこなかった。しかし、近年、集成材の防腐技術や、鋼材とのハイブリッド化技術などが発達したことにより、いわゆる近代木橋として比較的長スパンの道路橋も架設されるようになってきた。こうした近代木橋の進歩は、今後も期待される技術であるが、森林資源の有効活用という観点からは、むしろ小スパンで、間伐材などの小径木、中径木を利用できるオンサイト木橋の開発の優先度が高いと考えられる。というのも、ベトナムの農地や山間地域では、現地の間伐材を利用しながら簡単に組み立てられ、かつコンバインなどの農業機械や軽自動車が行き通る強度を有する橋がむしろ必要とされており、こうした要請を満たすオンサイト木橋は、日本の農地・山間地域でも有用であり、また、災害時の応急橋としても期待される。今回、研究の対象とするオンサイト応急橋は、プレストレス床版2段を鋼板や合板で連結した箱桁構造で、部材のそろった状態から現地で1日程度で架設できるものであるが、曲げ試験で測定される曲げ剛性が、断面の剛性から初等梁理論で算定される曲げ剛性よりも5割程度以上も小さくなる場合がある。これは、プレストレス床版部分のバットジョイントの影響(恐らく1割程度)と箱桁断面のせん断変形の影響と思われる。そこで、本研究では、オンサイト応急橋を有限要素モデル化し、せん断変形の影響を数値的に確認する。

2. オンサイト木橋

(1) 試験体と解析モデル

図-1、図-2 のように三角孔を設けた鋼板を用いて、従来のトラスモデルと同様にプレストレス木床版構造を連結したモデルの試験体(写真-1)を制作し、載荷試験を行う。このモデルは、試験施工箇所の関係でスパンが6mと従来のトラスモデルより長めになること、三角孔の周囲の部分(トラスの垂直材や斜材に相当する部分)の面外剛性が、トラスモデルの山形鋼に比べて低くなることなどを考慮して、板厚を9mmとする。

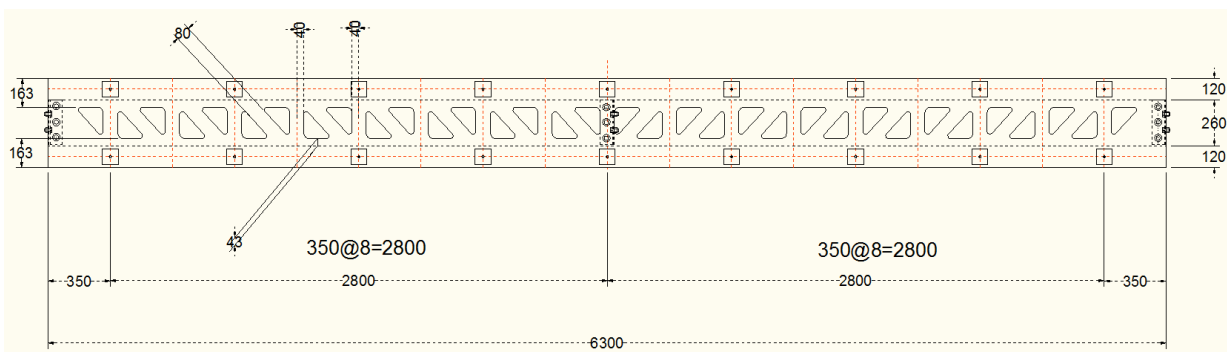


図-1 三角孔を設けた鋼板を用いたモデル

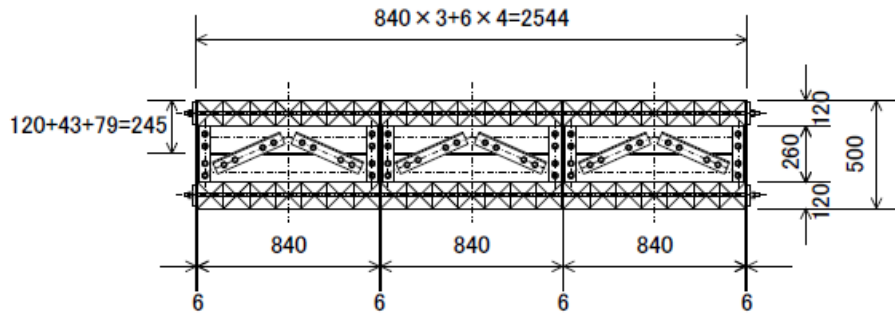


図-2 正面図

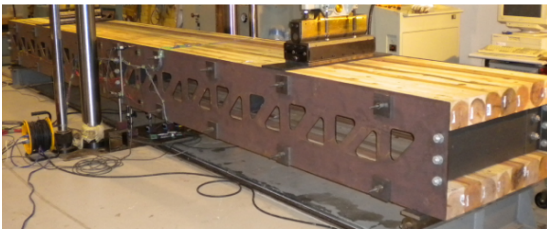


写真-1 試験体

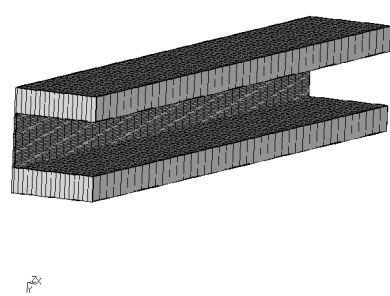


写真-2 解析モデル (試験体の 1/2)

(2) 実験・解析結果

2 段のプレストレス木床版の連結に鋼板を用いたオンサイト木橋では、載荷試験結果により剛性は、初等梁理論より 4 割程度 落ちている。せん断変形の影響が大きいと考慮し、せん断補正係数を用いて、ティモシェンコ梁理論値も求める。また、有限要素法で数値解析を行い、考察する。

載荷試験の結果と各理論値と FEM 値を図-3 に示す。図中に一番固めに出ている緑実線は初等梁理論に示す。ティモシェンコ梁は $\frac{Pl^3}{48EI} + \frac{Pl}{4k^*EA}$ で求めるティモシェンコ梁理論たわみは青実線で示す。修正せん断補正係数 k^* は、木材と鋼材の 2 種類の材料が混ざっている箱型合成断面に対して、以下の Bank の式で求める

$$k^* = \frac{20(\alpha + 3m)^2}{\frac{E_1}{G_1}(60m^2n^2 + 60\alpha mn^2) + \frac{E_1}{G_2}(180m^3 + 300\alpha m^2 + 144\alpha^2 m + 24\alpha^3) + \nu_1(-30m^2n^2 - 50\alpha mn^2) + \nu_2(30m^2 + 6\alpha m - 4\alpha^2)}$$

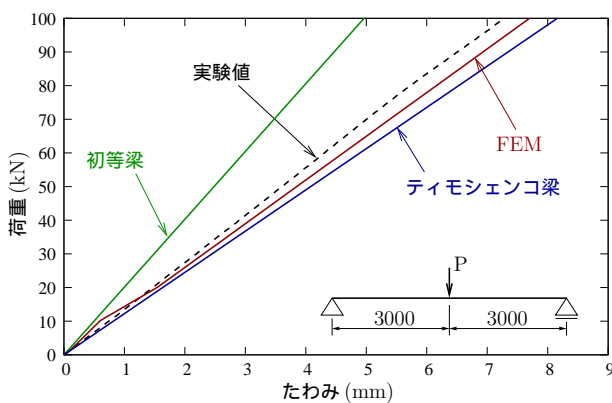


図-3 荷重-変位関係 (オンサイト木橋)

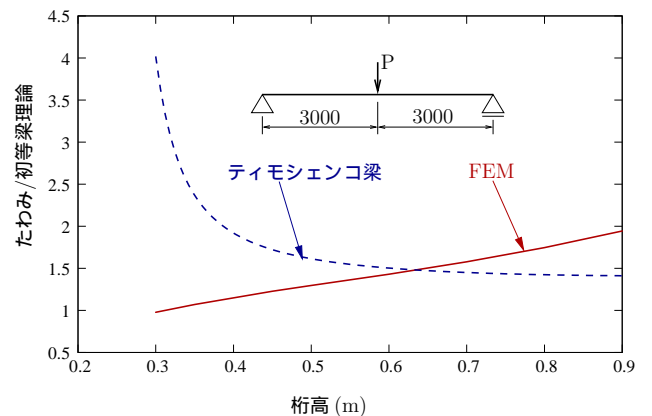


図-4 桁高とたわみの関係 (オンサイト木橋)

曲げ試験による全体の剛性は初等梁理論より 4 割程度落ちているが、ティモシェンコ梁理論に対する誤差は 15% 程度、FEM に対する誤差は 1 割程度となり、せん断変形を考慮したティモシェンコ梁理論や FEM と十分に近い値となった。

それで、断面の高さを変えて解析を行い、FEM で得られたたわみとティモシェンコ梁理論のたわみを、初等梁理論のたわみで無次元化したものを図-4 に示す。

図-4 を見ると、桁高が低く、または高くなるにつれて (特に低くなるにつれて)、ティモシェンコ梁理論の近似精度はかなり落ちてくるが、応急橋として実用的な桁高 0.4~ 0.8m の領域では、ティモシェンコ梁理論でもそれなりに近似できるものと考えられる。

3. 応急木橋

(1) 試験体と解析モデル

図-5、図-6 に示すように、120mm×120mm の杉角材と 24mm×450mm の合板を交互に並べて PC 鋼棒を通して締めた幅員 840mm、スパン 5m (全長 5.4m) の試験体モデルを製作した。橋軸方向には、角材は 1.2m, 2.4m, 3.0m の部材をバットジョイントで連結しており、合板は、1.8m のパネル 3 枚を橋軸方向の $\frac{1}{3}$ 点 2 箇所写真-3 のようにパネルの両面側に添接板を添えて接合している。組み立ては、部材のそろった状態から数人で 3 時間程度で試験体を完成させた (写真-4)。

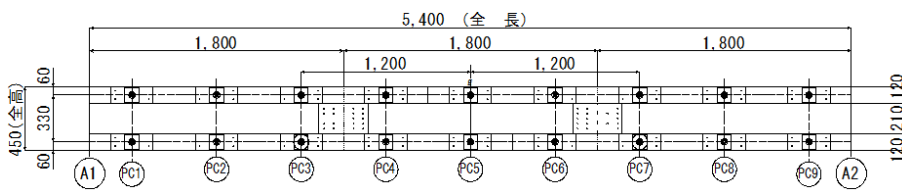


図-5 側面図

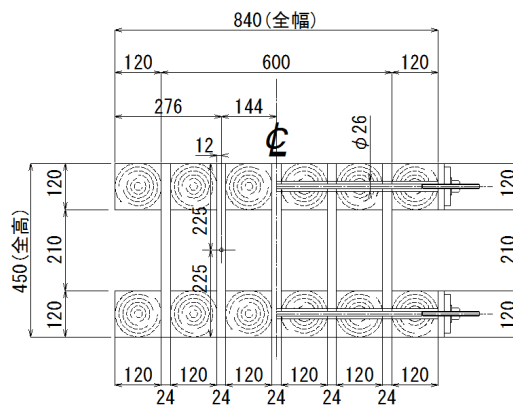


図-6 正面図

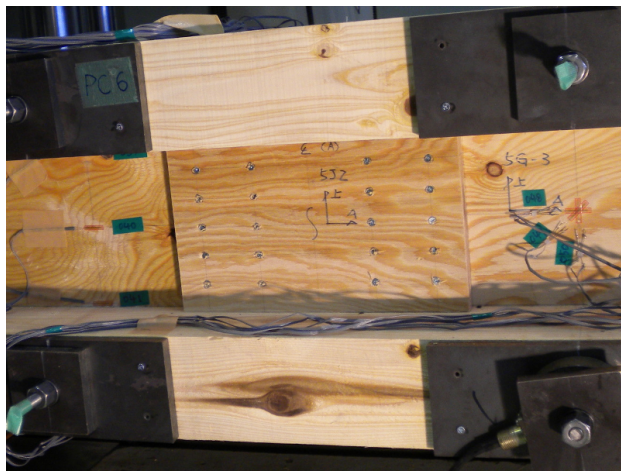


写真-3 合板継手部

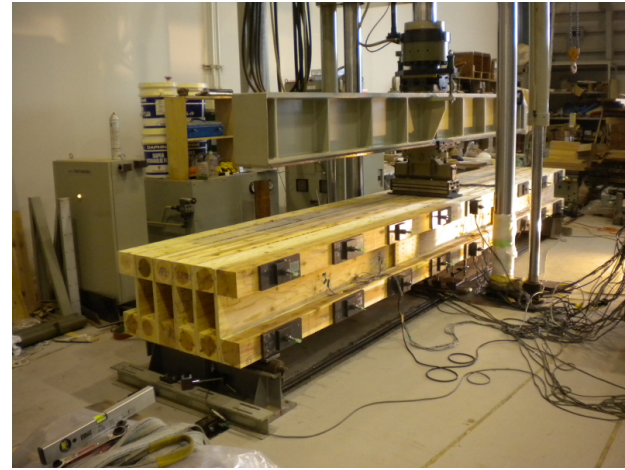


写真-4 試験体

解析モデルは片持ち梁と単純支持を両方ともモデル化し、解析を行った。写真-5 のように試験体の長さの 1/2 にしたモデルであり、写真-6 のように試験体と同じ寸法のモデルである。

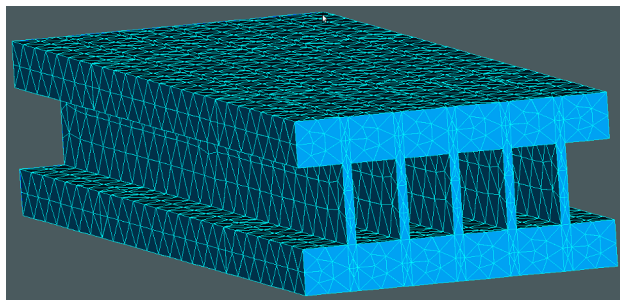


写真-5 解析モデル (試験体の 1/2)

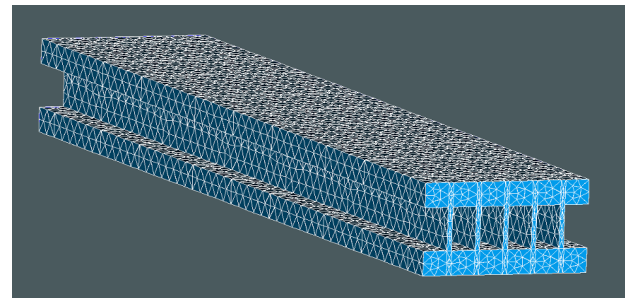


写真-6 解析モデル (試験体と同じ寸法)

実験値を初等梁理論に比較した結果、実験値のたわみは 7 割程度大きく出ている。バットジョイントの原因、木材のヤング率ばらつきの原因とせん断変形の原因と考えられる。そのせん断変形の影響を検討するため、角材の寸法を変えずに、桁高を変更させ、各解析モデルを作って、解析を行った。(写真-7)

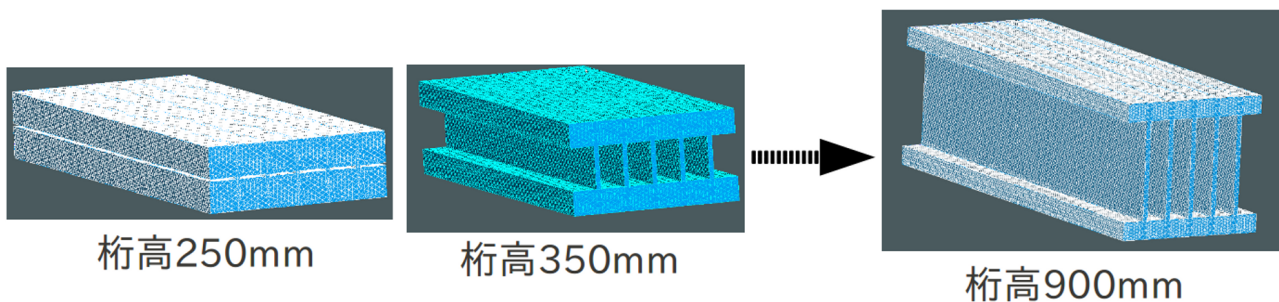


写真-7 桁高変更の応急木橋の解析モデル

(2) 実験・解析結果

オンサイト木橋と同じくティモシェンコ梁理論たわみも求める。

$$\text{単純支持中央載荷の場合：たわみ} = \frac{pl^3}{48EI} + \frac{pl}{4kGA}$$

$$\text{単純支持等曲げ載荷の場合：たわみ} = \frac{P}{48EI} (3\ell^2 a - 4a^3) + \frac{P}{2kGA} a$$

上式のせん断補正係数 k は、以下の Cowper の式で求める

$$k = \frac{10(1+\nu)(1+3m)^2}{(12+72m+150m^2+90m^3)+\nu(11+66m+135m^2+90m^3)+10n^2((3+\nu)m+3m^2)}$$

桁高 450mm の場合 $k=0.27$ である。

中央載荷試験の結果と各理論値を図-7 に示す。初等梁理論たわみは緑実線で、ティモシェンコ梁理論たわみは青実線で示す。

オンサイト木橋と同様に全体の剛性は理論値に比べて、はるかに落ちているが、曲げ変形を考慮するティモシェンコ梁理論と FEM 値に対する誤差は両方とも 5 % 程度となる。せん断変形を考慮したティモシェンコ梁理論や FEM と十分に近い値となった。

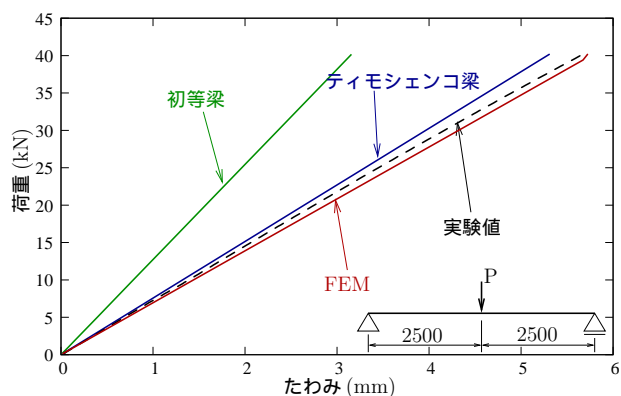


図-7 荷重-変位関係 (応急橋中央載荷)

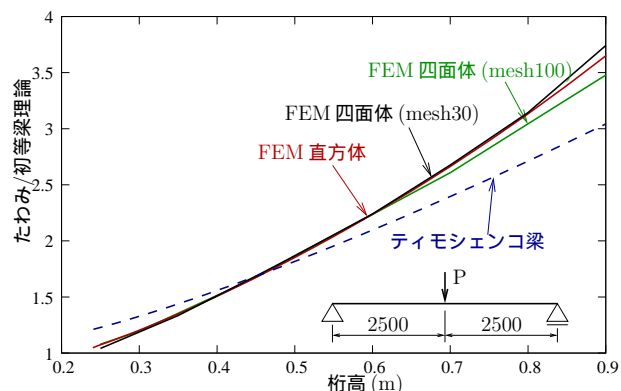


図-8 桁高とたわみの関係 (応急橋中央載荷)

ティモシェンコ梁理論でも十分に実用範囲の近似ができていると考えられる。これを確認するため、角材の大きさは替えずに断面の高さを変えて解析した。FEM で得られたたわみとティモシェンコ梁理論のたわみを、初等梁理論のたわみで無次元化したものを図-8 に示す。実線で示した FEM は、3 種類があり：

FEM 直方体は有限要素解析ツール CalculiX の直方体要素 (C3D8) で解析した結果である。

FEM 四面体 (mesh 100) は salome で荒いメッシュを切るモデル作成、解析した結果である。

FEM 四面体 (mesh 30) は salome で細かいメッシュを切るモデル作成、解析した結果である。

直方体でも四面体でも細かくメッシュを切ったら、FEM 結果はほぼ同じになることを確認できた。

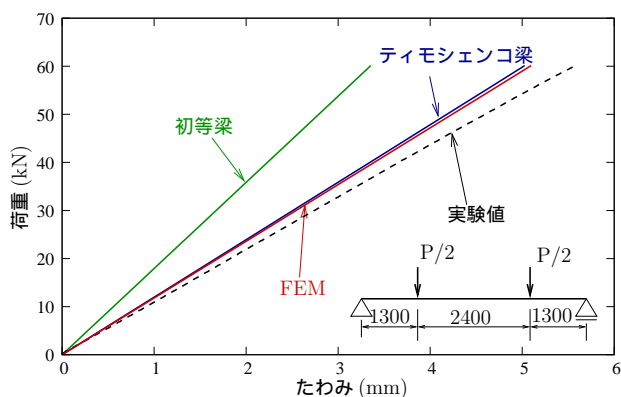


図-9 荷重-変位関係 (応急橋等曲げ載荷)

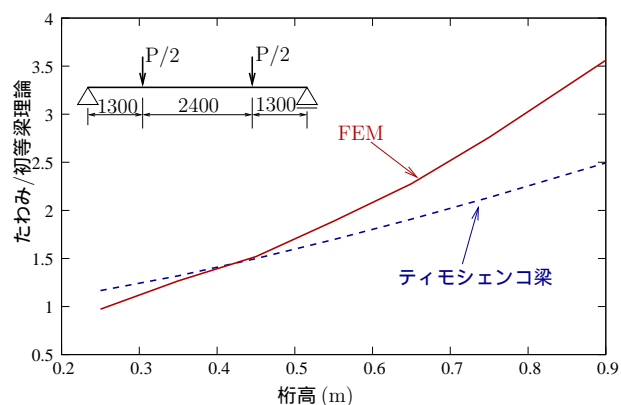


図-10 桁高とたわみの関係 (応急橋中央載荷)

等曲げ載荷試験の結果と各理論値を図-9 に示す。初等梁理論たわみは緑実線で、ティモシェンコ梁理論たわみは青実線で示す。実験値に対してティモシェンコ梁理論たわみの誤差は 3 % ~ 15 % で、FEM たわみの誤差は 2 % ~ 12 % である。グラフにより、FEM 値とティモシェンコ梁理論とほぼ一致していることを確認できた。

FEM のたわみとティモシェンコ梁理論のたわみを初等梁理論のたわみで無次元化したものを図-10 に示す。桁高が 450mm 付近であったところ、FEM 値とティモシェンコ梁理論が交差している。

中央載荷でも、等曲げ載荷でも、桁高が極端に低い場合、極端に高い場合はティモシェンコ梁理論の近似精度は落ちてくるが、応急橋として実用的な桁高 0.45m 前後の領域では、ティモシェンコ梁理論で十分に近似できるものと考えられる。

(3) 破壊試験

このモデルの破壊モードや破壊後のじん性を調べるため、破壊試験を行った結果を図-11 に示す。鋼板を用いたオンサイト木橋の同じ規模の試験体に比べて剛性は半分程度ではあるが、100kN 付近まで特に剛性の低下は認められず、160kN 付近まで部分的な破壊も認められない。170kN を超えた辺りから、引張側角材の部分的な破断や合板の部分的な曲げ破壊が始まることで除荷が生じるが、100kN 以上の荷重に抵抗し続け、高いじん性を示している。この構造は曲げ面内のせん断変形が生じやすいが、合板面内のせん断応力がせん断強度に達しないうちに、曲げ変形能を十分に使い切って曲げ破壊しているのではないかと考えられる。

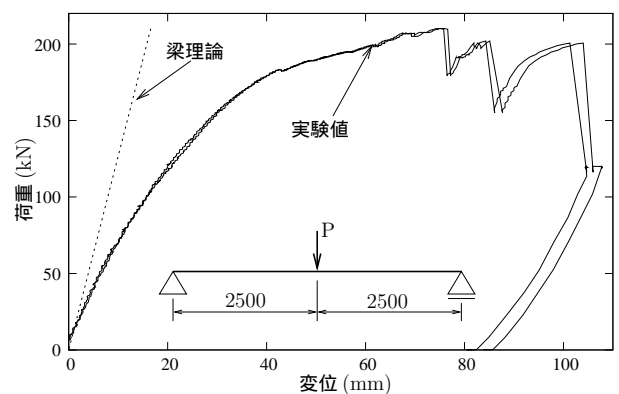


図-11 荷重-変位関係 (破壊試験)

4. まとめ

2 段のプレストレス木床版構造を鋼部材や合板により固定して箱桁を形成する新しい形式の木橋を提案した。鋼トラスと三角孔を用いたモデル (オンサイト木橋) では、適切な補強により一定の剛性が確保できることが確認されたため、実橋モデルの試験施工を行い、施工性・実用性を確認した。震災があった岩手県大槌町で応急歩道橋として利用されている。そして、オンサイト木橋の考えを拡張し、鋼板の代わりに手で持ち運べる合板を角材と交互に並べて PC 鋼棒で締めて固定する新しい応急橋を提案した。各タイプの木橋のせん断変形の影響について、有限要素解析により確認したところ、実験値で認められる程度の大きなせん断変形が認められた。また、薄肉箱型断面に対するせん断補正係数を用いたティモシェンコ梁理論による結果も比較してみたが、実橋として現実的な範囲の桁高であれば、有限要素法による結果に近く、ティモシェンコ梁理論でも十分な近似となることがわかった。

参考文献

- 1) <http://www.calculix.de/>
- 2) <http://www.salome-meca.jp/>
- 3) ブイ ジュ ハイ・後藤文彦・薄木征三・佐々木貴信・安部隆一：プレストレス木床版と鋼トラスを用いたハイブリッド木橋、木材利用研究論文報告集 10, pp. 19-24, 2011.
- 4) 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会，土木学会木材工学特別委員会：2010 年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書，2011.