

プレストレス木箱桁橋の剛性と局部座屈の評価方法

環境構造工学講座 修工 14-147 斉藤 輝
指導教員 後藤 文彦 徳重 英信

1. はじめに

オンサイトでの施工性に優れ被災地での架設にも期待されるプレストレス木箱桁橋は、角材を用いた箱断面ゆえにせん断変形が大きいのが、有限要素法やティモシェンコ梁の式等でせん断剛性を適切に評価すれば十分に実用的な設計ができると考えられる¹⁾。とはいえ、木材と鋼板を用いたタイプのプレストレス木箱桁橋では、曲げ剛性に大きな影響を与えない鋼板部に設けられた三角孔や支間中央部に取り付けられた対傾構といった個々の詳細な構造も、その剛性に影響を与えることがある^{2) 3)}。そのため、こうした詳細な構造が解析結果に与える影響を確かめるために、鋼板部の孔や支間中央部の対傾構を無視したモデルと、考慮したモデルでの解析を比較し、プレストレス木箱桁橋の剛性の評価方法について考察する。また、過去の破壊試験結果から、250kN 載荷を行った後、除荷し試験体の様子を確認したところ、試験体の鋼板上部がはらんでいる様子(図-1)が確認されており、圧縮側鋼板部分の局部座屈が強度の支配要因の一つとなる場合も考えられるため、この局部座屈挙動を把握しておくことは重要である。そこで、プレストレス木箱桁橋の鋼板上部の PC 鋼棒間を有効長としたオイラー座屈と、三角孔を有する鋼板部全体での座屈とを比較しながら、座屈挙動とその評価方法について検討した。



図-1 鋼板上部のはらみ

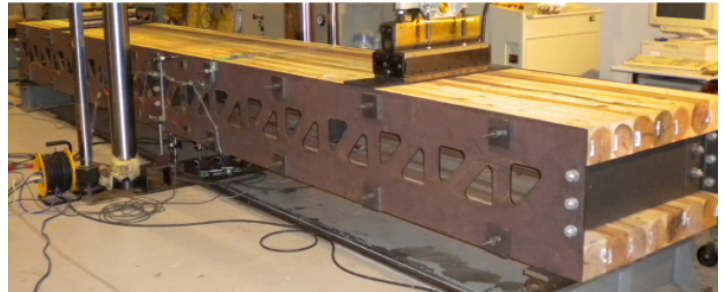


図-2 支間長 6.0m モデル

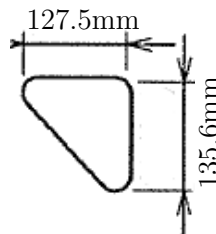


図-3 支間長 6.0m
モデル孔部分

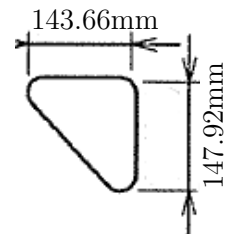


図-4 支間長 7.0m
モデル孔部分

2. 孔・対傾構による影響 解析例

角材と鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋について、3点曲げ載荷に対する実験値、初等梁理論によるたわみ、Bank の修正せん断補正係数⁴⁾を用いたティモシェンコ梁によるたわみ、有限要素法(FEM)による解析値を比較する。実験体(図-2)には、鋼板部に三角孔が設けられており、その三角孔の寸法については、図-3 に示している。図-3 に対し、図-4 の三角孔を有する実験体を「孔大きめ」とする。また、支間中央部と端部には厚さ 6mm の鋼板である対傾構がその断面に収まるように取り付けられている。ティモシェンコ梁のたわみと FEM による解析値では、鋼板の三角孔部分を考慮した値を「三角孔あり」とし、支間中央部に対傾構があるスパン 6m モデルでは、対傾構を考慮してモデル化を行い解析した値を、「対傾構あり」とする。FEM による解析においては、有限要素解析ツール CalculiX の四面体要素を用いた解析を行う。角材部分の要素は一体化した異方性材料で、鋼板部分の要素は一体化し

た等方性材料で、両者の接合面では節点を共有しているものとし、プレストレスは考慮していない。

Bank の修正せん断補正係数 k^* は、図-5 に示すせん断弾性係数算定断面に対して Bank の合成箱型断面を適用した。図-6 では、支間中央部に対傾構のあるスパン 6m モデルの 3 点曲げ試験

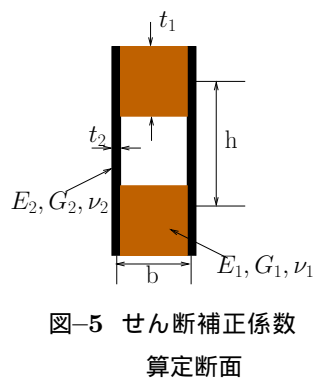


図-5 せん断補正係数算定断面

で得られた荷重-たわみ関係と解析値を示す。図-6 のグラフ中 左上の図は、解析モデルの断面の概略図で、枠で囲われた部分がたわみを計測した部分となる。3 点曲げによるたわみの実験値は、初等梁理論より 4 割程度大きくなるが、ティモシenko梁理論に対する相対誤差は 7% 程度、FEM に対する相対誤差は孔を考慮しないモデルで 21% 程度、三角孔を考慮した「FEM 三角孔あり」でも 19% となっており、対傾構のみ考慮した「FEM 対傾構あり」では、実験値に対する相対誤差は 14% 程度、これに対し、対傾構と三角孔の両方を考慮した「FEM 対傾構あり三角孔あり」では、8% 程度となり、他のモデルに比べ実験値に比較的近い値となる。今回の結果では、ティモシenko梁理論でも実験値に近い値が得られるが、実験値・解析値共に下部木材の下縁でたわみを計測しているため、断面全体のたわみの平均に近い値が得られるティモシenko梁理論では、たまたま解析値に近い値が得られたと考えるのが妥当であろう。また、対傾構ありと対傾構なしを比較した場合、対傾構なしの方がたわみが小さくなっているが、今回のような上面載荷で下部木材の下縁のたわみを計測するような場合には、対傾構を無視してしまうと、下部木材に変形を伝達できないため、上部木材に変形が集中してしまい、下縁のたわみが小さくなるためである。この結果から、有限要素解析においては、支間中央部の対傾構があるモデルを剛性評価する場合、対傾構を考慮したモデル化をし解析を行う方が精度の良い結果が得られると考えら

れる。また、孔をつけることで、対傾構がある場合もない場合も、たわみが大きくなることから、三角孔は曲げ剛性には大きな影響を与えないが、せん断変形をしやすくすると考えられる。

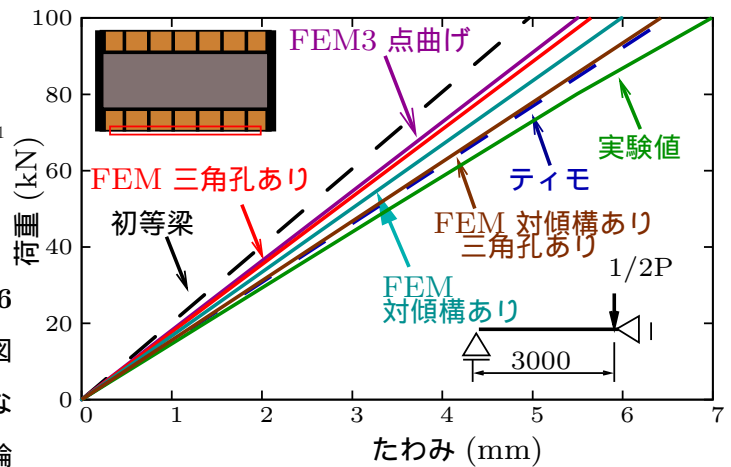


図-6 荷重-たわみ関係 (対傾構あり)

3. 長方形孔・三角孔をつけた解析例 (孔大きめ)

図-7 では、スパン 7m 孔大きめモデルについて、3 点曲げ試験で得られた荷重-たわみ関係と、初等梁理論値、ティモシenko梁理論値、FEM 解析値を示している。「FEM 長方形孔あり」では、鋼板の三角孔部分に簡単のため長方形の孔 (縦 180mm×横 265mm) を設けたモデルの解析値となる。「ティモシenko孔あり」における Bank の修正せん断補正係数は、孔を考慮して、鋼板部分を孔のある状態と同じ体積の孔のない一枚の板に薄くならしたせん断弾性係数算定断面に対して Bank の合成箱型断面を適用した。図-7 での「ティモシenko (長方形孔)」は、この長方形孔を用いて Bank の修正せん断補正係数を算出している。3 点曲げ載荷によるたわみの実験値は、せん断変形を考慮しない初等梁のたわみや、孔を考慮しないティモシenko梁理論・FEM 解析値と比較した場合、かなり剛性が低くなる。実験値に対する相対誤差は、「FEM 長方形孔あり」で 10% 程度、「FEM」で 24% 程度、「ティモシenko (長方形孔)」でも同程度となる。「FEM 長方形孔あり」に対する「FEM」の誤差は、31% 程度となった。図-8 では、同様のモデルの荷重-たわみ関係と、三角孔を考慮

したティモシェンコ梁理論値、FEM 解析値を示し、「FEM 三角孔あり」は、実験体に設けられた三角孔の寸法を用いて、三角孔部分を詳細に再現したモデルの解析値であり、「ティモ (三角孔)」は、この三角孔を用いて Bank の修正せん断補正係数を算出したティモシェンコ梁理論の値である。実験値に対する相対誤差は、「FEM 三角孔あり」で 17% 程度となり、「ティモ (三角孔)」では、元々のティモシェンコ梁理論の値とほぼ変わらない値となった。「FEM 三角孔あり」に対する「FEM」の相対誤差は、8% 程度となった。図-7 と、図-8 を比較すると、「FEM(三角孔あり)」に対する「FEM(長方形孔あり)」の相対誤差は、34% 程度となり、実際の三角孔に比べ、長方形孔ではせん断剛性への影響が過剰に評価されていることがわかる。また、「ティモ (長方形孔)」についても、同様である。曲げ剛性について、せいぜい 2% ほどしか低下しないため、孔が空いていることによりせん断剛性が低下したと考えられる。

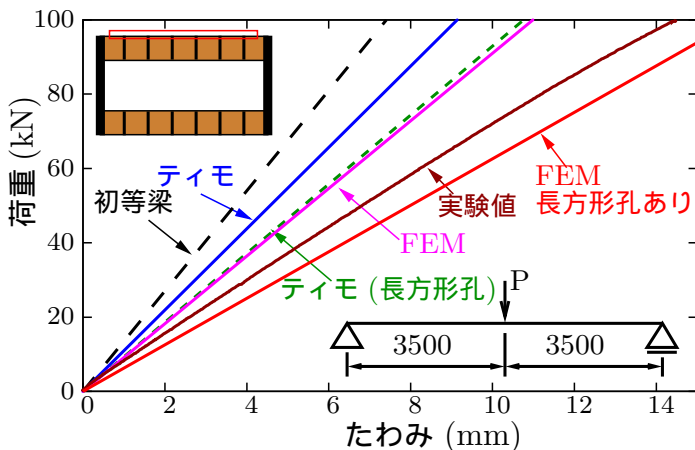


図-7 荷重-たわみ関係 (孔大きめ 長方形孔解析例)

4. 孔による影響 補剛材あり解析例

次に、上部鋼板部に取り付けられた L 字型の鋼材である補剛材を有するプレストレス木箱桁橋 (図-9) について補剛材の影響を検討する。図-10 では、スパン 7m 補剛材あり孔大きめモデルについて、3点曲げ試験で得られた荷重-たわみ関係と、ティモシェンコ梁理論値、FEM 解析値を示している。実験体に設けられた図-4 に示す三角孔の寸法を用いて、三角孔部分を詳細に再現したモデル「FEM 三

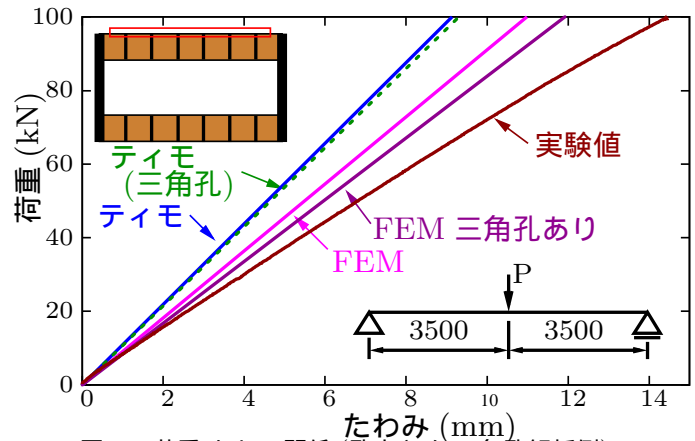


図-8 荷重-たわみ関係 (孔大きめ 三角孔解析例)

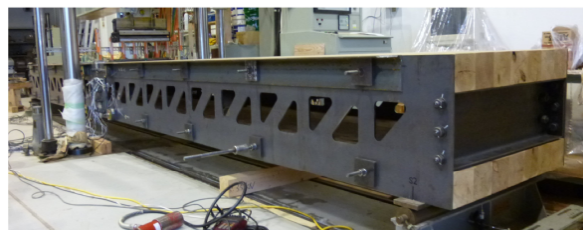


図-9 支間長 7.0m 補剛材ありモデル

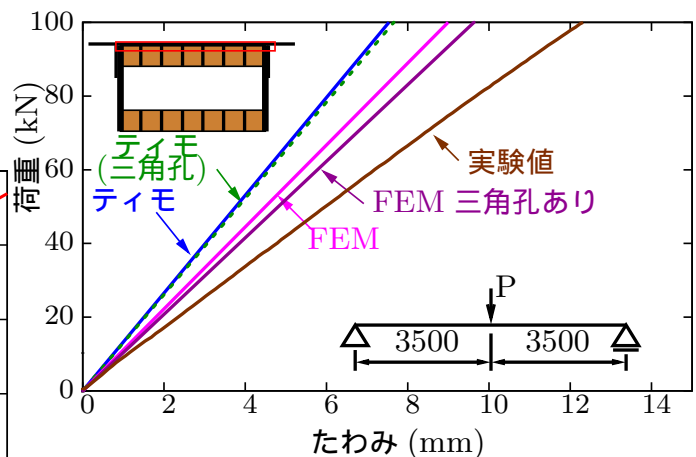


図-10 荷重-たわみ関係 (補剛材あり)

角孔あり」の解析値と、この三角孔を用いて Bank の修正せん断補正係数を算出している「ティモ (三角孔)」を示している。実験値に対する相対誤差は、「FEM 三角孔あり」で 22% 程度となり、「ティモ (三角孔)」では、元々のティモシェンコ梁理論の値とほとんど変わらない結果となった。「FEM 三角孔あり」に対する「FEM」の相対誤差は、7% 程度となった。補剛材がある場合も、三角孔により剛性が低下していることがわかる。ここで、補剛材があるモデルの荷重-たわみ関係である図-10 と、補剛材がないモデルの荷重-たわみ関係である図-8 を比較すると、実験値・解析値 (「FEM 三角孔あり」

) 共に補剛材ありモデルの方が、荷重に対するたわみの値が小さくなっていることから、補剛材があることにより、剛性が高くなっていることがわかる。曲げ剛性についても、補剛材を取り付けることで20%ほど高くなることがわかっている。

5. 座屈解析モデル

次に、角材と鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋について、オイラー座屈の式による座屈荷重と、有限要素法 (FEM) による解析値を比較する。オイラーの式による計算では、実際に最も座屈が起こりやすいと考えられる鋼板部の PC 鋼棒間において、長柱の座屈を想定し、柱端部が固定支持の場合を計算する。固定支持条件のオイラーの座屈荷重は、 $P_{cr \text{ 固定支持}} = 4 \left(\frac{\pi}{\ell_{PC}} \right)^2 E_s I_z$ という式で表される。この時、式中の ℓ_{PC} は座屈有効長、 E_s は鋼材のヤング率、 I_z は座屈する鋼板の弱軸回りの断面二次モーメントで、 $I_z = \frac{hb^3}{12}$ という式で表される。 h は鋼板上部の高さ、 b は鋼板の厚さである。今回の計算では、補剛材の外側から取り付けられたアンカープレート間で座屈が起こると考えるため、座屈有効長 ℓ_{PC} は PC 鋼棒間の距離よりも少し短くなる。計算に使用した材料諸元を表-1 に示す。FEM では、座屈解析にはより多くの要素分割が必要なため、実際のモデルと同じ高さ・幅員・スパンである全体解析モデルに対して、幅員とスパンを半分にした 1/4 モデルによる局所解析を行う。この境界条件について、図-11 に示す。また、今回の解析モデルは、鋼板に有する三角孔、L 字型の補剛材が、どの程度座屈に対して影響があるかを確かめるために、鋼板部に三角孔を有するものと、三角孔を省略したものに対し、それぞれ補剛材をつけないモデルと、補剛材をつけたモデル (補剛材あり) を作り、それらのモデルで座屈解析を行う。荷重条件については、全体解析モデルの支間中央部となる 1/4 モデル端部において、木材上面部分に線載荷したものとす。図-12、図-13 は、1/4 モデルと、その荷重条件を示している。

表-1 オイラーの座屈荷重計算材料諸元

鋼板の幅 b	9mm
鋼板上部の高さ h	120mm
鋼板のヤング率 E_s	206.0GPa
座屈有効長 ℓ_{PC}	630mm

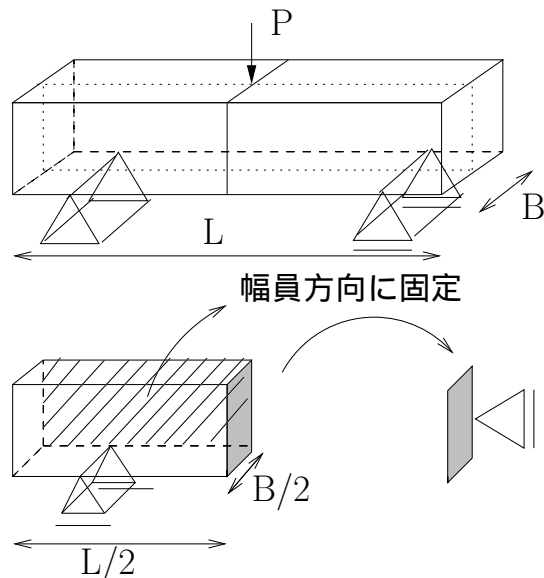


図-11 解析モデル境界条件

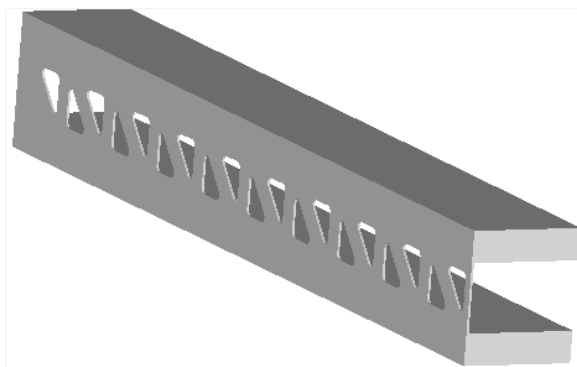


図-12 支間長 7.0m 三角孔あり 1/4 解析モデル

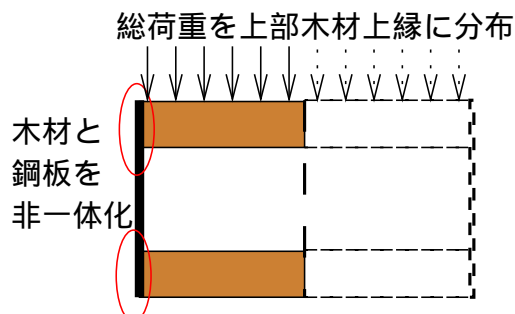


図-13 解析モデル荷重条件

座屈解析では、最も座屈しやすい条件を再現するために、木部材と鋼板部分の接触面にある節点について、支間中央部の PC 鋼棒間では、アンカープレートによる拘束部を除き、鋼部材と木部材との節

点は共有しないものとする。それ以外の部分で、木部材と鋼板が接触している面については、すべての節点を共有して一体化させている。また、今回の解析では、プレストレスは考慮しないものとする。

6. 座屈解析例 孔による影響

この解析では、補剛材なしモデルにおいて、三角孔をつけたものと省略したものの2つの有限要素解析モデルと、オイラーの式で得られた座屈荷重を比較する。三角孔をモデル化するにあたっては、その角の丸みを再現するため、全体を四面体要素で分割した。表-2と、表-3では、モデルごとのFEM解析による結果を示している。また、図-14と、図-15は、その1次座屈モードの座屈挙動である。表-2に示す解析結果では、1次座屈荷重を比較すると、孔があるモデルの方が低い値となっている。このことから、孔があることで鋼板部が座屈しやすくなると考えられる。2次・3次座屈荷重では、共に孔なしよりも孔ありの方が高い結果となっているが、この解析では、全体を四面体要素で分割したために孔なしモデルにおいて、鋼材要素と木材要素の節点共有部に近い節点非共有部において応力集中が発生し、その部分の要素が飛び出すモードが発生した。そのため孔なしの座屈荷重が低い結果となったと考えられる。このため、孔がないモデルにおいて、全て直方体要素で分割したモデルを解析し、おおよそその2次・3次座屈荷重を算出しておく。その結果を表-3に示す。直方体要素では、2次モード、3次モードにおいて、鋼板部の要素の飛び出しは見られず、四面体要素よりも高い値で座屈荷重が得られた。オイラーの式による固定支持条件の1次座屈荷重は、148kNとなり、解析により得られた1次座屈荷重は、その半分程度の値となった。実際の支持条件は、PC鋼棒挿入部では木材部と鋼板部が一体化していると考えられるので、オイラーの式では単純支持条件でなく、固定支持条件で計算するのが妥当である。そのため、座屈についての評価方法としては、有限要素法での解析が安全側となる可能性があると考えられる。

表-2 FEM解析値 補剛材なしモデル

	三角孔あり 四面体要素	孔なし 四面体要素
座屈モード	座屈荷重 (kN)	座屈荷重 (kN)
1次	67.5	77.7
2次	109	78.5
3次	136	124

表-3 FEM解析値 補剛材なし孔なしモデル要素による比較

	四面体要素	直方体要素
座屈モード	座屈荷重 (kN)	座屈荷重 (kN)
1次	77.7	78.5
2次	78.5	228
3次	124	249

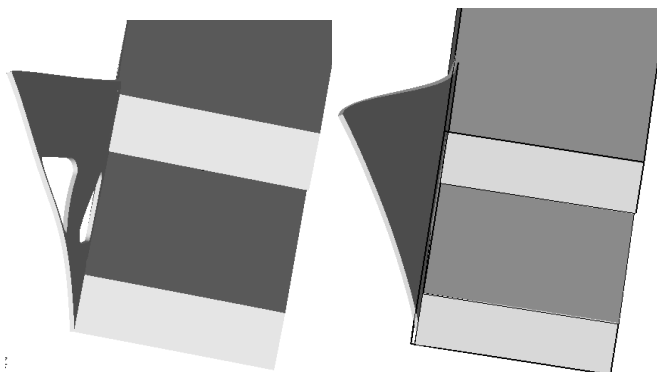


図-14 補剛材なし
孔あり1次座屈
モード

図-15 補剛材なし
孔なし1次座屈
モード

7. 座屈解析例 補剛材による影響

補剛材による座屈荷重への影響を確かめるために、有限要素解析によって孔のない補剛材なしモデルと補剛材ありモデルの座屈荷重を比較した。その結果を表-4に示す。また、その1次座屈モードを図-16、図-17に示す。モデル化においては、先の解析では、四面体要素で行っていたが、この章の解析では、より制御の容易な直方体要素で全体を分割した。解析においては、荷重条件を断面すべてに荷重を分配する面載荷とした。これは、これまでの解析のように木材上部に線載荷を行う荷重条件では、

鋼板が座屈するモードではなく、木材の載荷部において、応力集中部の要素が飛び出してしまうモードが得られるためである。この解析では、どのモードにおいても補剛材ありモデルの方が座屈荷重が非常に高い結果となった。このことから、補剛材をつけることで、座屈に対して一定の効果があると考えられる。

表-4 FEM 解析値 孔なしモデル 補剛材による影響 (面載荷)

	補剛材あり 直方体要素	補剛材なし 直方体要素
座屈モード	座屈荷重 (kN)	座屈荷重 (kN)
1 次	1010	78.5
2 次	1028	228
3 次	1125	437

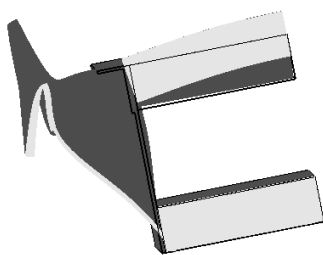


図-16 補剛材なし
孔あり1次座屈
モード

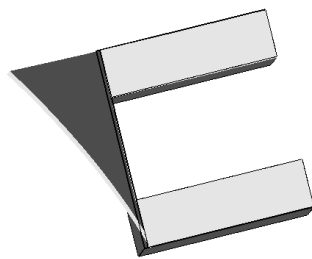


図-17 補剛材なし
孔なし1次座屈
モード

8. まとめ

本研究では、三角孔・対傾構を有する鋼板を用いたプレストレス木箱桁橋において、その剛性の評価方法と、鋼板部の座屈荷重を有限要素法とオイラーの式により調べた。その結果、プレストレス木箱桁橋の剛性評価においては、有限要素法による解析が有効だが、鋼板部に設けられた三角孔や、支間中央部の対傾構といった詳細な構造を考慮するか否かということが、解析結果に一定の影響を与えることがわかった。三角孔については、せん断変形を小さくするため、剛性の評価という意味では、三角孔を考慮したモデルを有限要素解析の方が安全側である。スパン7mモデルでは、三角孔を考慮した解析でも実験値に対し2割程度の誤差が生じたが、こ

の誤差は実験体の木材のせん断弾性係数と、解析で用いたせん断弾性係数に誤差が生じていたためではないかと考察される。簡単のため、三角孔を長方形孔に置き換えてモデル化を行う解析では、せん断変形への影響が過大に評価されるため、実際の三角孔を考慮した解析のほうが適切である。また、ティモシェンコの梁理論でも、三角孔による影響を考慮するために実際の三角孔の体積を用い、その損失を考え、鋼板をならして修正せん断係数を求めるという手法を用いたが、ほとんど計算結果に差がでなかった。ティモシェンコの梁理論において、三角孔による影響を適切に考慮する方法については、今後検討していく必要があると考えられる。

また、局部座屈の評価方法についても検討したが、オイラーの式で得られる座屈荷重と、有限要素解析で得られる座屈荷重を比較した結果、今回のモデルでは、オイラー座屈の式により得られる座屈荷重よりも、低い値で座屈し得ることがわかった。有限要素解析による座屈荷重に対し、オイラーの座屈荷重がその半分程度の値となっていることから、今回のような場合は、座屈の評価方法としては、オイラーの式による座屈ではなく、板の座屈として計算する方が適している可能性もあると考えられる。さらに、補剛材による影響については、曲げ剛性が高くなるだけでなく、座屈に対して一定の補剛効果があることがわかった。実際には、今回のモデルのように、スパンが7mなど比較的長くなるようなモデルでは、支間中央部に継手部を設け、左右を連結させるため補剛されることから、今回の解析値よりも座屈荷重が大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) 後藤 文彦, 尾山 龍之介, 斉藤 輝, 佐々木 貴信: プレストレス木箱桁橋の数値モデルと剛性評価、構造工学論文集 Vol. 61A(CD-ROM), pp. 570-577, 2015.
- 2) 斉藤 輝, 後藤 文彦, 佐々木 貴信: プレストレス木箱桁橋の鋼板部の座屈挙動、木材利用研究論文報告集 14, pp. 43-44, 2015.
- 3) 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.
- 4) 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せん断挙動、木材利用研究論文報告集 12, pp. 41-46, 2013.