

プレストレス木箱桁橋鋼板部の座屈解析

近藤 高誉¹・堅固山 衛²・藤田 智郁³・後藤 文彦⁴・野田 龍⁵・佐々木 貴信⁶

¹学生会員 秋田大学大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

²非会員 秋田県 (〒 010-8570 秋田県秋田市山王四丁目 1-1)

³学生会員 秋田大学大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: m8017805@wm.akita-u.ac.jp

⁴正会員 秋田大学大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: gotou@gipc.akita-u.ac.jp

⁵正会員 秋田大学大学院理工学研究科 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

E-mail: noda@gipc.akita-u.ac.jp

⁶正会員 秋田県立大学木材高度加工研究所 (〒 016-0876 能代市海詠坂 11-1)

登山道としてより厳しい条件での供用が期待されているプレストレス木箱桁橋の3次元有限要素モデルを鋼板部三角孔の形状も含めてできる限り正確に作成し、木材部の異方性も考慮して、各種荷重に対する座屈解析を行った。その結果、三角孔の大きさなどの構造詳細や載荷方法の違いが座屈荷重や座屈部位、座屈モードに影響を与えることが分かった。また、より正確な解析のためには木材部を異方性材料とし、要素のすり抜けを防止する必要があることが示された。

Key Words: on-site timber bridge, local buckling, elastic foundation, snow load, Salome, CalculiX

1. はじめに

プレストレス木箱桁橋(図-1)は、秋田県内山間部の登山道として既に数カ所に架設され実用性が確認されてきているが^{1),2),3),4),5),6),7)}、今後、15m以上の長いスパンや積雪深3m以上の豪雪荷重など、更に厳しい条件に適用できることが期待されている。積雪3m以上というのは、積雪深データで3m以下の地域でも実際には橋梁の側面や底面に雪が張り付くため、幅員に設計積雪荷重を載荷するのであれば、積雪深データよりも安全を見る必要が生じるということである。これまで比較的短いスパンで荷重が小さい範囲であれば、鋼板部の局部座屈も特に問題にはならなかったが、長スパンや豪雪荷重に対応して桁高が高くなり、三角孔が大きくなっていけば、鋼板上部圧縮側に限らず三角孔周辺部に局部座屈が生じる可能性も考慮しなければならない。

しかし、本研究で対象としているような孔を有す鋼板が、木材のような弾性床で部分的に支持された構造として局部座屈する問題を解析的に解くことは一般的に困難である。そこで、本研究では、プレストレス木箱桁橋の3次元有限要素モデルを鋼板部三角孔の形状も含めてできる限り正確に作成し、木材部の異方性も考慮して、各種荷重に対する座屈解析を行い、三角孔の大きさなどの構造詳細と座屈挙動との関係を考察する。



図-1 登山道に架けられたプレストレス木箱桁橋

2. 解析手法

解析対象としているプレストレス木箱桁橋では、様々な構造詳細の違いによって影響を受けるため、本研究では、補剛材・ダイヤフラム状の対傾構の有無、一体化の方法(2種)、木材の材料モデル(等方性・直交異方性)、三角孔の拡大率(7種)、載荷方法(3点曲げ・等分布)の計112通りの解析を行い、それらの影響について考察する。

(1) 解析ツール

3次元モデルの作成と解析には、オープンソースの有限要素解析ツールであるSalome-Meca 2016をプリプロ

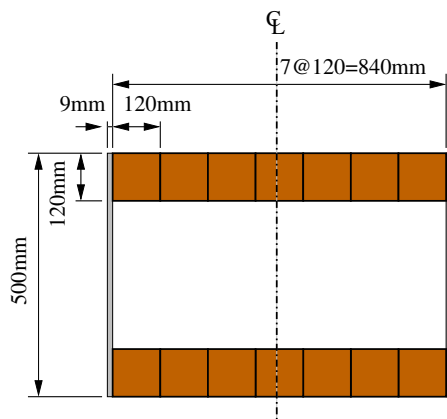


図-2 解析モデルの断面の寸法

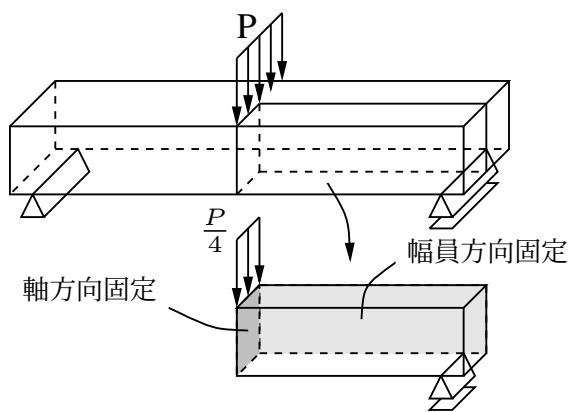


図-3 1/4 モデルの境界条件 (3点曲げ载荷の場合)

セッサとして要素分割まで行い、ソルバーにはオープンソースの有限要素解析ツールの CalculiX 2.9-1 を用いて線形座屈解析を行う。ソルバーも Salome-Meca を使って同様な一連の座屈解析をすることはできるが、今回は、入出力データがテキスト形式で可読性が高く、その加工等も容易な CalculiX を用いることにした。最も重要な座屈挙動は座屈荷重が最小となるモード次数（以降「最低次」と表記）のものであるが、各部位ごとの座屈可能性を把握するため、今回は、50 次までの高次モードの座屈まで含めて解析した。

(2) 解析モデル

本研究では、既に供用されているプレストレス木箱桁橋⁸⁾の諸元を参考にして、実験で破壊荷重がわかっている支間長 7m、桁高 500mm のモデルについて解析を行うことにする。解析モデルの断面の寸法を図-2 に示す。今回は 1 ボックスのモデルを用いるが、このタイプの橋梁で幅員が大きくなる場合は、幅員方向に複数のボックスを並べていく形式を取ることで、本論文で検討している 1 ボックスの挙動を解析すれば、2 ボックス

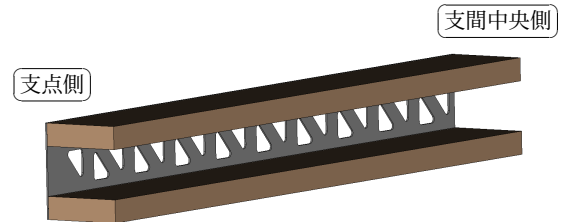


図-4 補剛材・対傾構のないモデル

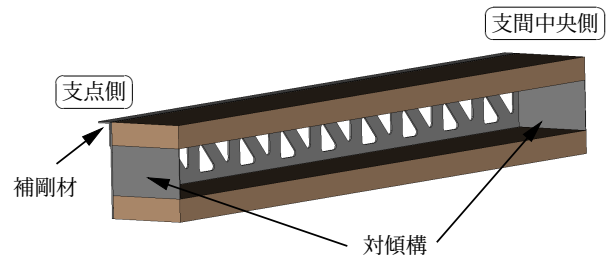


図-5 補剛材・対傾構のあるモデル

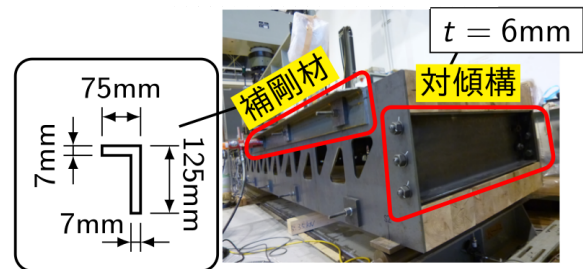


図-6 補剛材・対傾構の寸法

以上の挙動も予測できるものと考えられる。

座屈解析において十分な精度を得るためには、鋼板部の要素分割を細かくする必要がある。全体モデルでは計算容量的に解析が困難なため、対象条件より図-3 に示すような境界条件⁹⁾で単純支持の 1/4 解析を行うことにする。

载荷は、支間中央上部に線载荷する 3 点曲げ载荷と橋桁上面の全節点に等しい鉛直荷重を载荷する等分布载荷の 2 種とする。なお、等分布载荷は、積雪深 1m を 3.5kN/m² 相当¹⁰⁾ とし、座屈荷重を積雪深（以降「座屈積雪深」）で表す。

(3) 補剛材・対傾構の有無

補剛材とダイヤフラム状の対傾構の効果を確かめるために補剛材や対傾構の有無について、補剛材・対傾構のないモデル（図-4）と補剛材・対傾構のあるモデル（図-5）の 2 種類について解析する。補剛材は鋼板上部に山形鋼をフランジ状に取り付けたもので、寸法は図-6 に示す通りである。対傾構は板厚 6mm の平板を

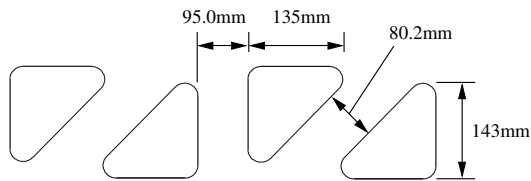


図-7 現行モデルの三角孔の寸法

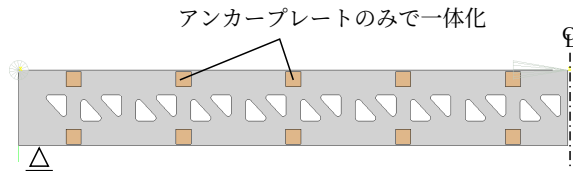


図-8 アンカープレート以外非一体化モデル（ア以外）

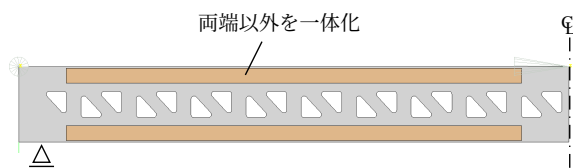


図-9 部分的非一体化モデル（部分的）

箱断面の内部4辺に接するように、梁の両端と中央に配置する。

(4) 孔の拡大率

プレストレス木箱桁橋の鋼板部には自重を軽くし、通気性を確保するために、曲げ方向に対してブラットトラス状に図-7のように三角孔を設けている。

本研究では、三角孔の大きさが座屈荷重に及ぼす影響を調べるために、現行の三角孔の大きさを拡大率0%として、三角形の図心から長さの倍率で0%から30%まで5%ずつ拡大した場合について比較を行う。

(5) 鋼板部と木材部の接触面

鋼板上部圧縮側が木材部から離れて座屈することを再現するためには、木材部と鋼板部の接触面の一部を非一体化する必要がある。実際にはアンカープレートを介して、PC鋼棒で緊張力を与え、鋼板と角材のずれが生じないようにしている。本解析では、そのようなプレストレスは再現せず、図-8のように、全てのアンカープレートの位置でのみ木材と鋼板の節点を共有させ、それ以外の部分では鋼板と木材の節点を共有しないアンカープレート以外非一体化モデル（図表では「ア以外」と表記）と、図-9のように、曲げモーメントが最大となる梁中央部とせん断力が支配的となる支点部周辺のみで木材と鋼板の節点が共有されておらず、そ

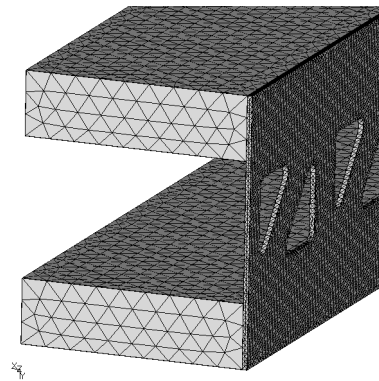


図-10 要素分割

れ以外の部分では木材と鋼板の節点が共有されている部分的非一体化モデル（図表では「部分的」と表記）の2つのモデルについて解析する。木材と鋼板の非一体化部分は、木材部を0.1mmの幅で削ってスリットを設け⁹⁾、鋼板部の節点と接触しないようにしている。

(6) 要素分割

自動要素分割機能を用いてモデルを中間節点を持った4面体の2次要素で要素分割する（図-10）。本解析では、鋼板部の座屈に着目しているため、鋼板の要素分割を木材よりも細かくしている。また、モデルによって異なるものの、要素数は約30万程度である。

(7) 材料定数

鋼板の材料定数は、ヤング率 $E_{\text{鋼}} = 206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_{\text{鋼}} = 0.3$ とする。木材（秋田スギ）の材料定数は、等方性材料として扱う場合には、過去に縦振動法により測定した繊維方向ヤング率の値を平均したもの⁷⁾を参考に、ヤング率 $E_{\text{木}} = 7.694\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_{\text{木}} = 0.4$ とする。木材を直交異方性材料として扱う場合は、繊維方向ヤング率 $E_{zz} = E_{\text{木}}$ をもとにして、繊維直角方向のヤング率を $E_{xx} = E_{yy} = \frac{E_{zz}}{25}$ 、せん断弾性係数を $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = \frac{E_{zz}}{15}$ 、ポアソン比を $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4, \nu_{xy} = \nu_{yx} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.016$ とする。

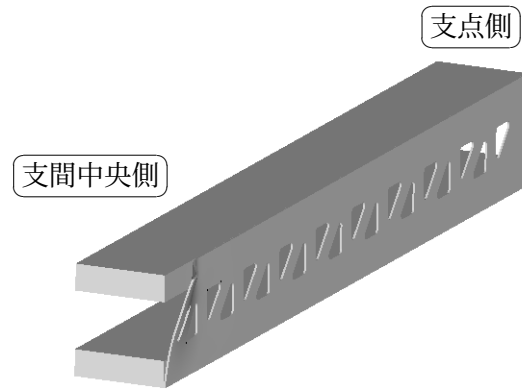
3. 支間中央部の座屈

(1) 補剛材・対傾構のないモデルの座屈

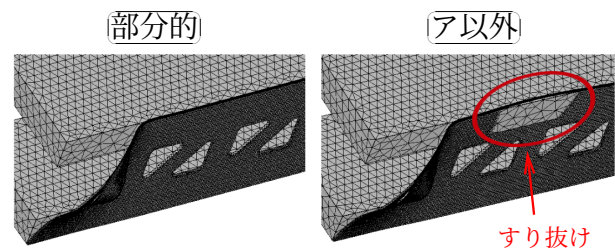
補剛材・対傾構のないモデルの支間中央の鋼板上部圧縮側の座屈荷重について、3点曲げ載荷の場合の結果を表-1に、等分布載荷の場合の結果を表-2に示す。これら補剛材・対傾構がないモデルの場合、最も荷重の低い最低次の座屈モードは、図-11に示すような鋼板上部圧縮側の横ねじれ状の座屈であり、補剛材と対傾構

表-1 補剛材・対傾構のないモデルの3点曲げ載荷における鋼板上部圧縮側の座屈荷重

孔の 拡大率 (%)	座屈荷重 (kN)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	247	262	199	218
5	244	253	196	209
10	241	249	193	206
15	242	252	194	208
20	234	248	188	205
25	231	244	185	202
30	227	241	183	199

**図-11** 鋼板上部圧縮側の座屈モードの例（部分的，等方性，3点曲げ，孔0%）**表-2** 補剛材・対傾構のないモデルの等分布載荷における鋼板上部圧縮側の座屈積雪深

孔の 拡大率 (%)	座屈積雪深 (m)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	23.4	24.4	18.9	20.6
5	23.3	24.1	18.7	20.3
10	22.7	23.6	18.3	19.9
15	22.9	23.4	18.4	19.7
20	22.2	23.0	17.9	19.4
25	21.9	22.6	17.7	19.0
30	21.4	22.2	17.3	18.7

**図-12** 鋼板上部圧縮側の要素のすり抜けの例（異方性，3点曲げ，孔0%）

がある場合には，基本的に鋼板中央部でのこのような座屈は生じない。

表-1, 2より，材料の等方性・異方性の違い，非一体化の範囲の違いによらず孔の拡大率が大きくなるにつれて，ほぼ線形に座屈荷重が低下していることがわかる。

表-1, 2に示すように，等方性材料に比べて直交異方性材料の方が座屈荷重が約2割低いことがわかる。等方性の場合にはアンカープレート間の鋼板がアンカープレート位置で両端固定に近い状態にあるが，直交異方性の場合，軸直交方向のヤング率が軸方向ヤング率の $\frac{1}{25}$ であり，相対的に鋼板が木材にめり込みやすく，両端の拘束がやや緩くなっているために座屈荷重が低下しているものと考えられる。

表-1, 2に示すように，部分的非一体化モデルに比べて，アンカープレート以外非一体化モデルの方が約1割座屈荷重が低くなっていることがわかる。これは，主要な座屈箇所隣接するアンカープレート間の鋼板の要素が，非一体化されていることによって**図-12**に示すように木材の要素をすり抜けることが可能となり，木材と鋼板の一体化している部分に角度がついてしまうからだと考えられる。実際には鋼板が木材をすり抜け

ることはないため，部分的非一体化モデルの方が実際の現象に近いものと考えられる。また，部分的非一体化モデルでは，支間中央しか座屈解析ができないと思われるかもしれないが，アンカープレート以外非一体化モデルの解析結果より，鋼板上部圧縮側の座屈荷重は，支間中央とそれ以外のアンカープレート間では曲げモーメントの比率で線形になっているため，支間中央の座屈荷重のみが分かれば，他の箇所も容易に推測することができる。これらをまとめると，直交異方性の部分的非一体化モデルが最も有用な解析方法であると言える。

補剛材と対傾構を有す支間長7mの試験体に対して行った3点曲げ破壊試験では，鋼板部は座屈を起こさずに載荷点直下の木材部で曲げ破壊を起こし，破壊荷重が約250kNであった。このことから，補剛材と対傾構を取り付けなければ，前述のような座屈が破壊モードとなることが予想される。

表-2を見ると，座屈積雪深約20mという結果が出ており，一見実際には起こりえないように思われる。本解析では便宜上，積雪が橋の上面のみに幅員の幅を保って垂直に積もっていくことを想定しているが，既設のプレストレス木箱桁橋（例えば秋田県北秋田市の森吉山の登山道に架設の立川橋）で冬季に定点観測したと

表-3 3点曲げ载荷における補剛材の座屈荷重

孔の 拡大率 (%)	座屈荷重 (kN)			
	等方性		直交異方性	
	A以外	部分的	A以外	部分的
0	2837	2796	2771	2793
5	2841	2894	2770	2854
10	2763	2818	2716	2804
15	2763	2860	2712	2827
20	2775	2799	2728	2784
25	2689	2818	次数 50 以上	2789
30	2706	2766	次数 50 以上	2751

表-4 等分布载荷における補剛材の座屈積雪深

孔の 拡大率 (%)	座屈積雪深 (m)			
	等方性		直交異方性	
	A以外	部分的	A以外	部分的
0	291.8	302.5	次数 50 以上	287.7
5	291.3	300.6	次数 50 以上	285.9
10	290.1	301.1	次数 50 以上	286.6
15	289.2	300.4	次数 50 以上	285.8
20	288.4	300.6	次数 50 以上	286.0
25	288.5	298.0	次数 50 以上	283.3
30	287.4	297.3	次数 50 以上	282.7

ころ、橋桁の上面のみでなく左右の側面と下面にも 1m 程度貼り付いていることが確認されている。つまり、幅員上面だけの等分布荷重を考える場合、幅員にもよるが、積雪深の数倍の荷重が作用することがありうると考えられる。

また、3点曲げ载荷での座屈荷重と等分布载荷での座屈積雪深は、支間中央における曲げモーメントで比較すると等しくなることから、このような座屈は曲げモーメントの大きさに決まると言え、どちらか一方について解析すれば、もう一方は曲げモーメントから算出できることが分かった。

(2) 補剛材・対傾構のあるモデルの座屈

補剛材・対傾構のあるモデルの支間中央の鋼板上部圧縮側の座屈荷重について、3点曲げ载荷の場合の結果を表-3に、等分布载荷の場合の結果を表-4に示す。等方性材料・異方性材料の違いや3点曲げ载荷・等分布载荷の違いにより、最低次の座屈は支間中央部に生じたり支点部に生じたりするが、表は座屈の生じる部位ごとにまとめている。

表-3より、中央部での座屈は、孔の拡大率が30%のときでも、前述の破壊試験での破壊荷重 250kN の 10 倍

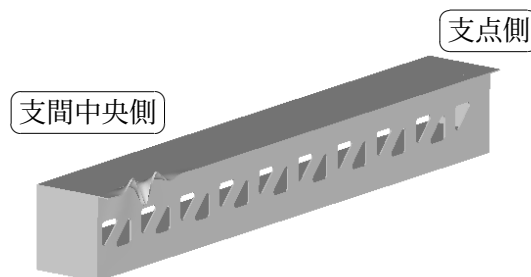


図-13 補剛材の座屈モードの例（部分的、等方性、3点曲げ、孔 0%）

以上の座屈荷重であり、現実的にはほぼ発生しないと考えられる。座屈モードは、図-13に示すように補剛材のフランジ部が波打つような形状をしており、補剛材・対傾構のないモデルに見られるような鋼板中央部での横ねじれ状の座屈は生じない。表-3, 4に示すように、等方性材料・異方性材料の違いや非一体化部分の範囲の違い、孔の拡大率の違いがもたらす座屈荷重の大小関係には、補剛材・対傾構のないモデルの座屈と同じような傾向はあるものの、どの解析モデルでも座屈荷重の値にそれほど差はない。これは、一つには補剛材・対傾構のないモデルの鋼板上部圧縮側の座屈とは違い、鋼板が木材にめり込んだり、離れたりする方向に変形しないため、弾性床である木材の材料定数の影響を受けにくいからであろう。また、座屈モードからわかる通り補剛材のフランジ部のみが変形しており、孔の拡大率の影響もほとんど受けていない。

表-3, 4の直交異方性材料のアンカープレート以外非一体化モデルの欄に「次数 50 以上」とあるのは、次数 50 以上まで座屈解析を行っても、有意な結果が得られなかったということを意味している。線形座屈解析では、応力が集中する箇所では要素が部分的に極端に飛び出したような、実際には起こりえない座屈モードを算出することがあるが、そのような飛び出しが生じた場合の解析結果は採用していない。

木材と鋼板を非一体化するために設けたスリット部分の先端付近の要素は応力が集中しやすいため、アンカープレート以外非一体化モデルの方が部分的非一体化モデルよりも要素の飛び出しが起こりやすい。また、要素の飛び出しは鋼板よりもヤング率が低い木材で生じる。特に木材を直交異方性材料としたときの方が、軸直角方向のヤング率が非常に小さくなるため、要素の飛び出しが格段に生じやすくなる。このような現象を避けるには、予めどこでどのような座屈が生じるかを予想した上で、応力集中が生じないように部分的非一体化モデルのような簡略化をするのは一定の効果がある。

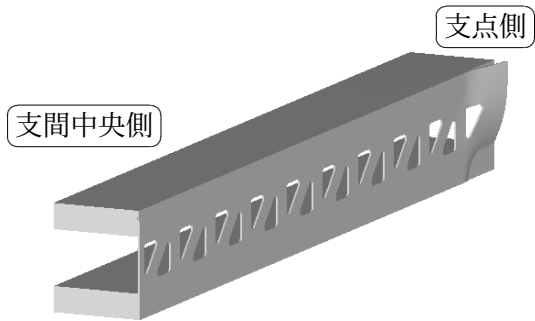


図-14 補剛材・対傾構のないモデルの鋼板支点部周辺の座屈モードの例（ア以外，等方性，3点曲げ，孔0%）

表-5 補剛材・対傾構のあるモデルの3点曲げ载荷における支点部周辺の座屈荷重

孔の 拡大率 (%)	座屈荷重 (kN)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	2983	3078	1959	1989
5	3003	3062	1967	1971
10	3022	3125	1970	2000
15	2912	3120	1881	1994
20	2925	3099	1880	1964
25	2920	3028	1863	1902
30	2958	3027	1880	1888

4. 支点部周辺の座屈

(1) 補剛材・対傾構のないモデルの座屈

支点部周辺の座屈荷重について，補剛材・対傾構のないモデルの座屈モードを図-14に示す．この座屈モードを見ると，支点部付近の鋼板下側が木材をすり抜けて座屈しているため，後述する補剛材・対傾構があるモデルよりも座屈荷重が約5割も低下している．このような座屈は実際には生じないので，ここでは具体的な座屈荷重は示さない．また実際のプレストレス木箱桁橋では端部に対傾構が取り付けられているため，支点部周辺の座屈を解析する際には，端部に対傾構をモデル化する必要がある．

(2) 補剛材・対傾構のあるモデルの座屈

次に補剛材・対傾構のあるモデルの3点曲げ载荷による座屈荷重を表-5に，補剛材・対傾構のあるモデルの座屈積雪深を表-6に，このときの座屈モードを図-15に示す．支点部周辺に生じる座屈荷重が最低次となるのは，補剛材・対傾構のあるモデルでは，等方性材料の3点曲げ载荷を除く全ての場合である．とはいえ，座屈荷重・座屈積雪深ともに非現実的なほど大きく，実際のモデルではこのような座屈は生じないと考えられる．

表-6 補剛材・対傾構のあるモデルの等分布载荷における支点部周辺の座屈積雪深

孔の 拡大率 (%)	座屈積雪深 (m)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	137.1	140.5	91.0	92.0
5	138.1	139.7	91.4	91.2
10	138.9	142.7	91.6	92.6
15	133.9	142.4	87.4	92.4
20	134.5	141.4	87.5	91.0
25	134.3	138.3	87.0	88.2
30	136.1	138.3	87.8	87.7

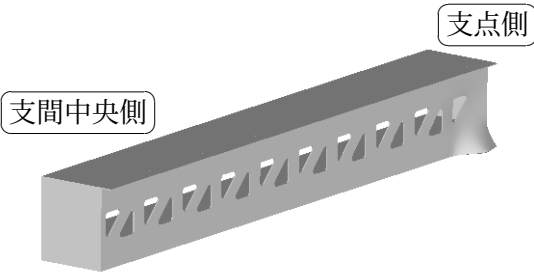


図-15 補剛材・対傾構のあるモデルの鋼板支点部周辺の座屈モードの例（ア以外，等方性，3点曲げ，孔0%）

ただし，等方性材料として解析したときよりも直交異方性材料として解析したときは，座屈荷重が約4割も低下するため，このモデルとは支間長や桁高が異なり，支点部周辺の座屈が危惧されるモデルについて解析する際には，木材の直交異方性を考慮することが重要である．一方，座屈荷重は鋼板部と木材部の接触面の一体化の方法や鋼板部の孔の拡大率にほとんど影響を受けていないことから，モデル化する上でこれらの構造詳細はそれほど重要ではないと考えられる．

5. 三角孔周辺の座屈

三角孔周辺の座屈荷重は，補剛材・対傾構のあるモデルについてのみ，3点曲げ载荷の結果を表-7に，等分布载荷の結果を表-8に，この時の座屈モードを図-16に示す．図-16に示すように，三角孔周辺部をプラットトラスと見なしたときの鉛直材に相当する箇所が座屈するが，常に同じ箇所に最低次の座屈が生じるとは限らない．そこで表-7,8では，座屈箇所を支点部に近い側から順に数えた番号を括弧書きで併記する．例えば，図-16の場合，座屈箇所は(2)となる．

この場合でも，先に述べた補剛材の座屈と同様にアンカープレート以外非一体化モデルを直交異方性材料として解析したとき，木材と鋼板を非一体化するため

表-7 補剛材・対傾構のあるモデルの3点曲げ载荷における三角孔周辺の座屈荷重

孔の 拡大率 (%)	座屈荷重 (kN)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	3871(8)	8041(1)	次数 50 以上	5939(1)
5	3784(8)	7205(4)	次数 50 以上	5656(1)
10	3691(8)	6340(4)	次数 50 以上	5128(5)
15	3443(8)	5561(4)	次数 50 以上	4764(3,7)
20	3246(8)	4855(4)	次数 50 以上	3959(5)
25	3042(8)	4214(4)	次数 50 以上	3449(5)
30	2725(2)	3627(4)	次数 50 以上	2988(5)

表-8 補剛材・対傾構のあるモデルの等分布载荷における三角孔周辺の座屈積雪深

孔の 拡大率 (%)	座屈積雪深 (m)			
	等方性		直交異方性	
	ア以外	部分的	ア以外	部分的
0	279.9(2)	379.9(1)	次数 50 以上	278.8(1)
5	256.9(2)	350.2(1)	次数 50 以上	267.1(1)
10	233.8(2)	319.2(1)	210.8(2)	252.4(1)
15	211.5(2)	290.7(1)	195.8(2)	236.2(1)
20	189.5(2)	260.5(1)	175.6(2)	216.1(1)
25	169.1(2)	231.6(2)	172.0(1)	196.3(1)
30	149.2(2)	201.2(2)	168.4(1)	175.0(1,2)

に設けたスリット部分の先端付近で応力集中が起こるため、要素の飛び出しが発生し、有意な座屈モードが得られていない。

表-7,8より、部分的非一体化モデルと比べて、アンカープレート以外非一体化モデルの座屈荷重・座屈積雪深が著しく低いことがわかる。これは、図-17に示すように座屈箇所の鋼板上部や下部が木材をすり抜けており、実際よりも緩やかな拘束となっているためであると考えられる。また、木材を等方性材料として解析した場合よりも、直交異方性材料とした場合の方が座屈荷重が低いことがわかる。これも、鉛直材の両端が固定端に近い境界条件となっているが、木材を直交異方性材料とした場合の方が軸直角方向に柔らかくなり、拘束が緩いためであると考えられる。しかし、材料の異方性を考慮したかどうかによる座屈荷重や座屈積雪深の差は、孔の拡大率が大きくなるに従って小さくなっていることがわかる。

本解析の結果から、三角孔周辺の座屈は現行の桁高 500mm 程度のモデルではほとんど生じないと考えられる。ただし、この三角孔周辺の座屈は中央部や支点部周辺での座屈に比べ、孔の拡大率の影響が大きいので、桁

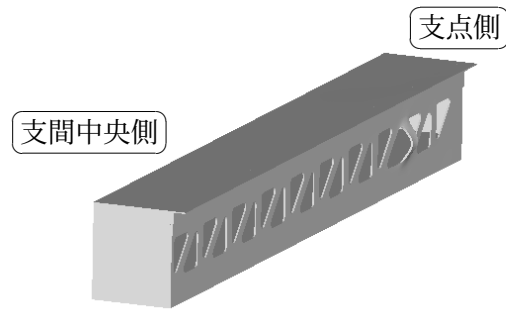


図-16 三角孔周辺の座屈モードの例（ア以外，等方性，等分布，孔 30%）

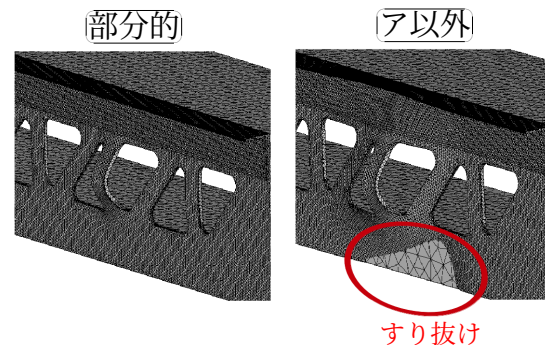


図-17 三角孔座屈時の要素のすり抜けの例（等方性，等分布，孔 30%）

高が大きく相対的に孔の比率が大きいモデルでは、注意が必要となる。

6. まとめ

本研究から、支間長 7m で桁高 500mm のプレストレス木箱桁橋モデルの座屈挙動について、以下の知見を得た。

- 補剛材と対傾構がなくても、現実的な荷重では座屈は生じない。
- 補剛材と対傾構がない場合、最低次の座屈モードは鋼板上部圧縮側の横ねじれ状の座屈であり、この時の座屈荷重は木材の破壊荷重よりも低くなるため、危険な破壊モードと言えるが、補剛材と対傾構を設けることで、解析上はそのような座屈は生じなくなる。
- 補剛材と対傾構がある場合、最低次の座屈モードは支点部周辺の座屈であるが、その値は非現実的に大きく、実際に問題となることはない。
- 三角孔の大きさを拡大しても、支点部周辺の座屈荷重や中央部補剛材の座屈荷重に影響しないが、補剛材がない場合の中央部の座屈荷重と三角孔周辺の座屈荷重は低下する。とはいえ、現行のモデルより 30% 孔を大きくしても、解析上は十分に座屈

に耐え得る.

- 三角孔周辺の座屈は, 3 点曲げ载荷の場合は解析モデルによって座屈箇所がまちまちであるものの, 等分布载荷の場合は支点部に近いほど座屈荷重が低く, より低次のモードで生じる.

また, 座屈解析のモデル化について, 以下の知見が得られた.

- 木材を等方で近似すると, 鋼板との接触面における弾性床としての拘束が大きくなることにより, 座屈荷重を過大評価してしまう危険性がある.
- 鋼板と木材の接触面の非一体化の方法によっては, 実際には起こり得ない要素のすり抜けが生じ, 座屈荷重が低下するため, 対象とする座屈挙動と対応するようにモデル化をする必要がある.
- 鋼板と木材の接触面の非一体化の方法によっては, 応力集中が起こりやすい部位ができ, そこで要素の飛び出しが発生する. 特に木材を直交異方性材料として解析すると, 解析ケースによってはほとんどの座屈モードで要素の飛び出しが生じ, 有意な結果が得られないものもある.

今回, 対傾構・補剛材の有無, 一体化の方法 (2 種), 木材の材料モデル (等方性・異方性), 三角孔の拡大率 (7 種), 载荷方法 (3 点曲げ・等分布) の計 112 通りの解析を行い, 各構造諸元と座屈挙動との関係のある程度明らかにすることができた. 今後, こうしたケーススタディを蓄積していき, この形式の橋梁の構造諸元に対して, 有限要素解析を行わなくても, 簡便に座屈荷重を見積もることのできる図表や換算式等を提案することが課題である.

謝辞: 本研究の一部は科研費 16K01324 の助成を受けたものである.

参考文献

- 1) 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信, 安部隆一, 川村修: プレストレス木床版と鋼トラスを組み合わせた新しいタイプの木橋, 木材利用研究論文報告集 9, pp.108-111, 2010.
- 2) 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部材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.
- 3) 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, pp.41-46, 2013.
- 4) 佐々木貴信, 後藤文彦, 安部隆一, 熊谷誠喜: 秋田スギの角材を利用した組立・解体が容易な木橋の開発, 秋田県立大学ウェブジャーナル A/2013, Vol.1, pp.10-18, 2014.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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化と剛性評価, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp.570-577, 2015.
- 8) 公益社団法人土木学会, 木材工学特別委員会『2016 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』2.2 秋田式木橋, pp.21-30, 2017.
- 9) 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.
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編・II 鋼橋編, 2012.

(2017. 8. 31 受付)

BUCKLING ANALYSIS OF STEEL PLATES IN TIMBER STRESS-LAMINATED BOX-BEAM BRIDGES

Takayasu KONDO, Mamoru KENGOYAMA, Tomohumi HUZITA, Humihiko GOTOU,
Ryu NODA and Takanobu SASAKI

While the timber stress-laminated box-beam bridges are useful for the on-site construction in mountain areas, the local buckling of the steel plate parts can govern the strength for longer span and larger beam depth. Besides it is difficult to analytically investigate the behavior of the local buckling of the steel plate parts, which include triangle holes and are supported by timber elastic foundations. In this study, we make 3D-FEM model for the timber stress-laminated box-beam bridge including shapes of the triangle holes exactly as far as possible, considering the orthotropy of the timber parts, and then numerically investigate the relationship between the structure details and behavior of the local buckling.