

雪荷重を受けるプレストレス木箱桁橋の座屈挙動

環境構造工学分野 8016802 近藤 高誉
指導教員 後藤 文彦

1. 研究の背景と目的

秋田県には杉の人工林が多くあり、人工林を保全していくために間伐材の積極的な利用が望まれている。しかしながら、土木分野では間伐材はおろか木材の利用が先進的であるとは言えない。このような状況は、ひとつとして木材の加工・流通によって生じる費用やエネルギーの大きさに起因しているものと考えられる。そこで、そのようなコストを削減するために、構造物を共用する現地で必要とする木材を調達・加工し、構造物を施工するオンサイト生産システム¹⁾が構築されてきた。そして、このオンサイト生産システムに適した木橋として開発されたのがプレストレス木箱桁橋²⁾である。

このような経緯で開発されたプレストレス木箱桁橋は主に秋田県内の山間部に登山道として数カ所に架設され(図-1)、その実用性を確認されてきた³⁾。今までのものは5~10mと比較的スパンが短いですが、今後、10~20mの比較的最長いスパンにも対応することが求められている。そこで十分な剛性を確保するために、図-2中の「新しいモデル」に示すようなフランジを鋼板に設けることにした。しかし、このような部分的に木材と一体化した孔の空いた溝形鋼の局部座屈挙動について解析的に求めることは難しく、有限要素法などの数値計算に頼らざるを得ず⁴⁾、そこにかかる労力が設計に占める割合は大きい。迅速な架設が可能なることから応急橋としての活用も期待されている木橋であるため、可能な限り手早く設計できることが望ましい。そこで、本研究では有限要素解析による座屈のケーススタディを行い、対象とする木橋の局部座屈に対する設計や照査を簡便にするための図表を提案すること、また、橋長や桁高、三角孔などの構造諸元と座屈挙動の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 数値モデル化と解析手法

解析の対象としているプレストレス木箱桁橋の断面は図-2中の「新しいモデル」に示す通りである。図-2のように1ボックスで幅員方向に7本の角材を並べるのを標準としており、さらにこれよりも幅員が大きくなる場合には、幅員方向に複数のボックスを並べていく形式を取る。そのため、1ボックス



図-1 登山道に架けられた立川橋

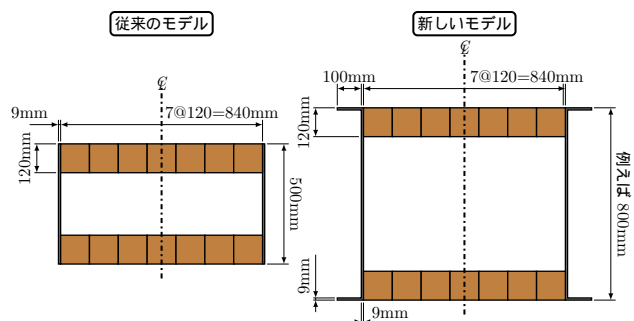


図-2 モデルの断面

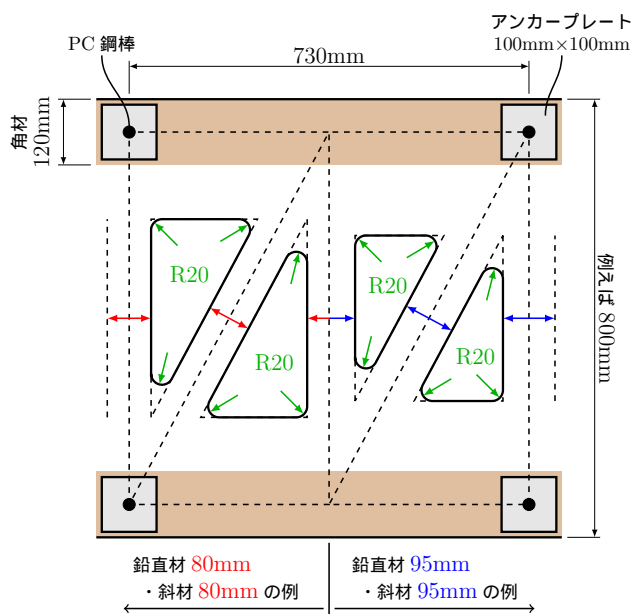


図-3 三角孔の寸法の決まり方

の挙動のみを解析すれば2ボックス以上の挙動も予測できるものと考えられる。

プレストレス木箱桁橋の鋼板には図-3に示すような三角孔が設けられている。これには、施工する上で孔に手を入れて作業する必要があるという理由の他にも、軽量化して施工性を向上させること、通

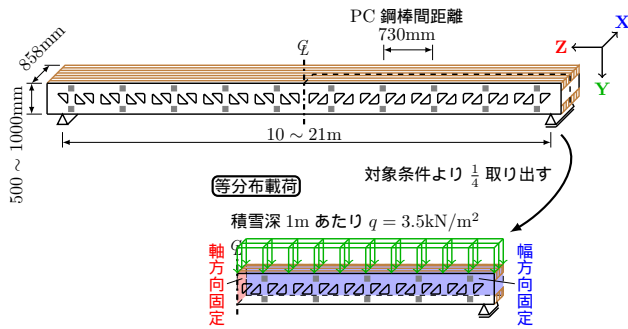


図-4 モデルの全形と解析条件

気性を良くして木材の腐れを防止すること等の理由がある。この三角孔は、PC 鋼棒を交点としたブラットラスを形成するように線を繋ぎ（図-3 中の点線）、縦線・斜線にそれぞれ 80～95mm の幅（以降「鉛直材幅」・「斜材幅」）を持たせることで形状が決定する。PC 鋼棒間距離は幅員方向に所定のプレストレスが導入されるように 730mm と定めているため、三角孔の形状は桁高と鉛直材幅、斜材幅によって決まる。本解析では、三角孔の形状が座屈挙動に与える影響を確認するために、最も三角孔が大きくなる鉛直材 80mm・斜材 80mm（図-3 中の左）と最も三角孔が小さくなる鉛直材 95mm・斜材 95mm（図-3 中の右）の 2 つの場合について解析を行う。また、桁高や橋長が座屈挙動に与える影響を確認するために、桁高について 500～1000mm、橋長に関しては 10.220～21.170m のモデルの解析を行う。木材と鋼板の一体化方法については、プレストレス導入箇所である図-3 に示すアンカープレートの位置のみで要素の節点を共有させることにする⁵⁾。これは、図-2 の「従来モデル」でスパン 7m のもので破壊試験を行ったときに、鋼板の上部圧縮側がはらむような挙動を確認した⁴⁾ ためである。

鋼板の材料定数は、ヤング率 $E_{鋼} = 206\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_{鋼} = 0.3$ とする。また、木材（秋田スギ）の材料定数については、過去に縦振動法により測定した繊維方向ヤング率の平均値を参考に軸方向ヤング率を $E_{zz} = 7.0\text{GPa}$ 、軸直角方向ヤング率を $E_{xx} = E_{yy} = \frac{E_{zz}}{25}$ 、せん断弾性係数を $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = \frac{E_{zz}}{15}$ とし、対象条件からポアソン比を $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4, \nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yx} = \nu_{yz} = 0.016$ とした直交異方性材料とする。

座屈解析において十分な精度を得るためには、鋼板の要素分割を細かくする必要があり、全体モデルでは計算容量的に解析が困難であるため、対象条件より図-4 に示すような単純支持の 1/4 解析を行う。

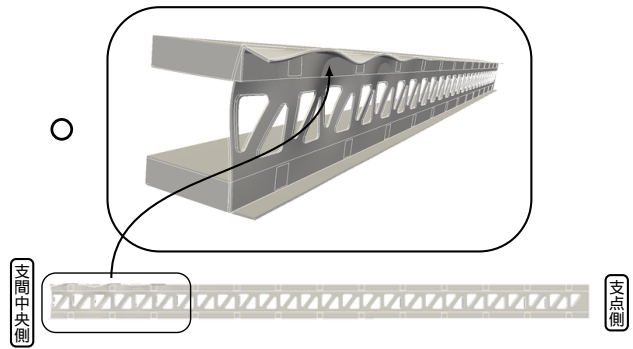


図-5 支間中央側の座屈の例（桁高 600mm、橋長 18.980m、鉛直材 80mm・斜材 80mm）

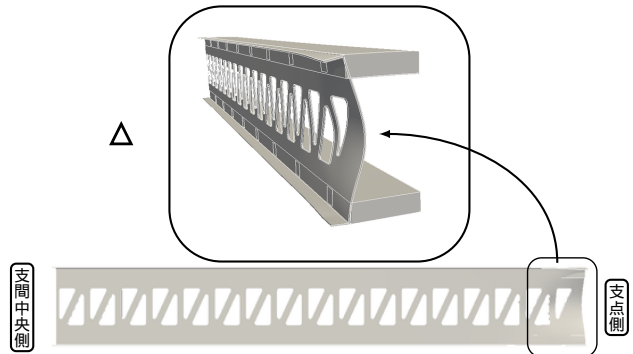


図-6 支点付近の座屈の例（桁高 900mm、橋長 12.410m、鉛直材 80mm・斜材 80mm）

対象としている橋梁は、雪荷重を主な外力として設計を行っているため、図-4 に示すような積雪深 1m あたり $q = 3.5\text{kN/m}^2$ の等分布荷重⁶⁾ を載荷し、求めた座屈荷重を積雪深（以降「座屈積雪深」）で表す。要素分割については、モデルが 3 次元で曲面を有した複雑な形状であることから、要素の自動分割機能で中間節点を持った 4 面体 2 次要素に分割し、座屈荷重を固有値問題として Lanczos 法で算定する。なお、本解析には有限要素解析ツールの Salome-Meca2017⁷⁾ を用いる。

3. 数値解析の結果

(1) 等断面のモデル

実際のモデルには板厚 6mm のダイアフラム状の対傾構が設けられているが、より一般化された問題について解析した方が、構造力学的な観点からの考察や様々な問題への応用が行い易いため、まずは等断面である等断面のモデルについての解析を行う。

座屈積雪深が最小となるモードを図-5、図-6 に示す。曲げモーメントが支配的となるときは、図-5 に示すように支間中央側の鋼板上部圧縮側のウェブが横ねじれしつつ、フランジが複数の PC 鋼棒間をまたいで波を打つような座屈モードとなる。また、せん断力が支配的となるときは、図-6 に示すような

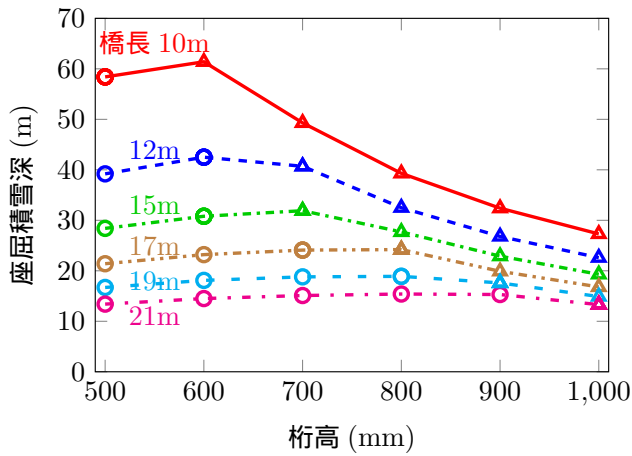


図-7 等断面のモデルの座屈積雪深と桁高の関係 (鉛直材 80mm・斜材 80mm)

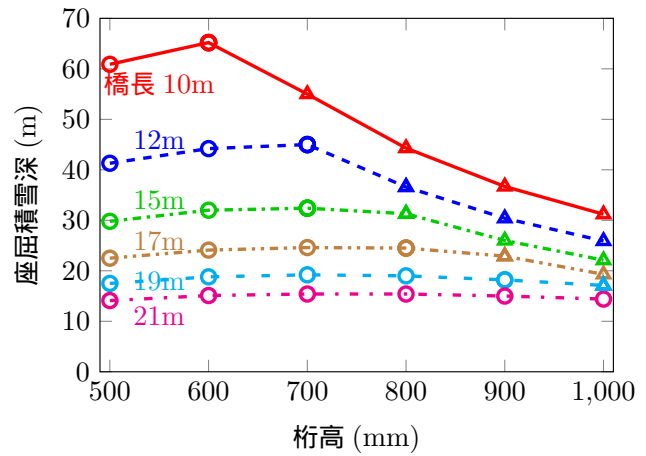


図-8 等断面のモデルの座屈積雪深と桁高の関係 (鉛直材 95mm・斜材 95mm)

支点付近の断面が全体的に潰れるような座屈モードとなる。なお、本項の図中では座屈のモードの違いを、図-5 に示すようなモードの場合で、図-6 に示すようなモードの場合で表記する。

a) 鉛直材 80mm・斜材 80mm の結果

鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルについて、座屈積雪深と桁高の関係を図-7 に示す。図-7 は橋長などの設計条件より桁高が決定した時に、その桁高で座屈に対して十分耐えうるかどうかの確認に使用できる。図-7 より、橋長が短いものの方が桁高の影響を受けやすく、橋長が長いものは桁高の影響を殆ど受けていないことが分かる。また、橋梁が細く長いほど曲げモーメントが支配的になるため図-5 に示すような支間中央側で座屈が生じ、橋梁が太く短くなるほどせん断力が支配的になるため図-6 に示すような支点付近で座屈が生じていることが分かる。支間中央側については、桁高が高い方が曲げ剛性が大きくなるため、支点付近については、桁高が低い方が断面変形が生じにくいために、それぞれ座屈積雪深が大きくなるものと考えられる。図-7 より、どの桁高でも橋長が長くなるほど座屈積雪深が小さくなることが分かるが、等分布荷重の場合、橋長が長くなるほど外力が作用が大きくなるため、このような結果を得られたものと考えられる。

b) 鉛直材 95mm・斜材 95mm の結果

鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルについて、座屈積雪深と桁高の関係を図-8 に示す。全体的に座屈積雪深は鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルよりも少し大きい。座屈積雪深と桁高や橋長との関係は、前項で述べたものと殆ど変化がない。しかし、図-7 と図-8 を比較すると、と の境目が一



図-9 組立中のプレストレス木箱桁橋の対傾構

つ右にずれていることから三角孔の大きさが座屈箇所にある程度の影響を与えることが分かる。

(2) 対傾構のあるモデル

前項では等断面のモデルについての結果を示したが、実際には図-9 に示すような 6mm の鋼板がダイヤフラム状に対傾構として設けられているため、図-6 に示すような座屈が生じるとは考えにくい。このような解析を避けるために、対傾構をモデル化してより実現象に近い解析を行いたいが、実際にはモデルによって対傾構の数が異なる上、対傾構の数が座屈積雪深に与える影響は分からない。そこで、橋長・桁高・三角孔の寸法を統一した 1 つのモデルで対傾構の数を変化させて解析を行ったところ表-1 に示すような結果を得られた。表-1 に示すように、対傾構 3 つ以上では対傾構の数を増やしても座屈積雪深に大きな変化が見られなかったため、本節では両端部・支間中央部の 3 箇所のみに対傾構を設けて解析を行う。

座屈積雪深が最小となるモードを図-10、図-11 に示す。曲げモーメントが支配的なときは、図-10 に示すような支間中央側の鋼板上部圧縮側のウェブ

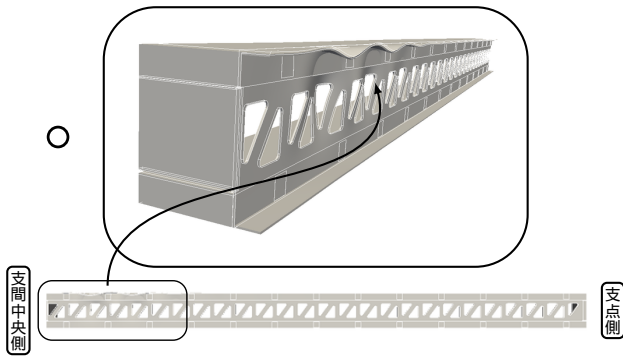


図-10 対傾構のあるモデルの支間中央側の座屈の例 (桁高 600mm, 橋長 18.980m, 鉛直材 80mm・斜材 80mm)

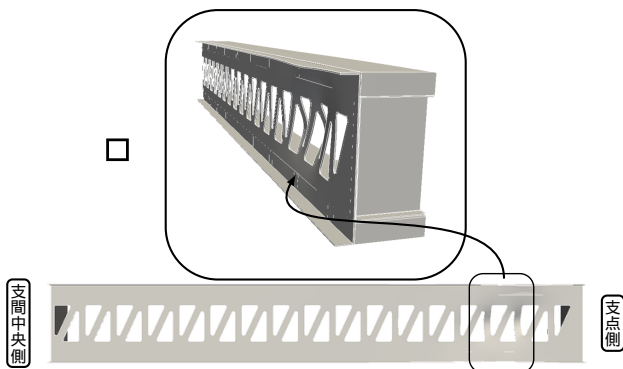


図-11 対傾構のあるモデルの鉛直材の座屈の例 (桁高 600mm, 橋長 18.980m, 鉛直材 80mm・斜材 80mm, 対傾構あり)

が横ねじれしつつ、フランジが複数の PC 鋼棒間をまたいで波を打つような座屈モードとなり、図-5 に示す等断面のモデルと座屈モードにとても似通っている。これら支間中央側の座屈の僅かな違いとして、対傾構のあるモデルの場合には、支間中央に設けられているため対傾構の近くでは座屈が生じていないことが分かる。一方、せん断力が支配的ときは、図-6 に示す等断面のモデルと明らかに異なり、図-11 に示すように端部から 2~3 つ目の鉛直材が座屈することが分かる。これは、支間に近い程せん断力が大きくなるが、端部に対傾構があることで支点付近の断面全体が変形するのを防ぐだけでな

表-1 対傾構の数と座屈積雪深の関係 (橋長 16.790m, 桁高 800mm, 鉛直材 95mm・斜材 85mm)

対傾構の数	座屈積雪深 (m)	座屈箇所
0	24.5	支間中央側
3	25.2	支間中央側
5	25.2	支間中央側
9	25.3	支間中央側

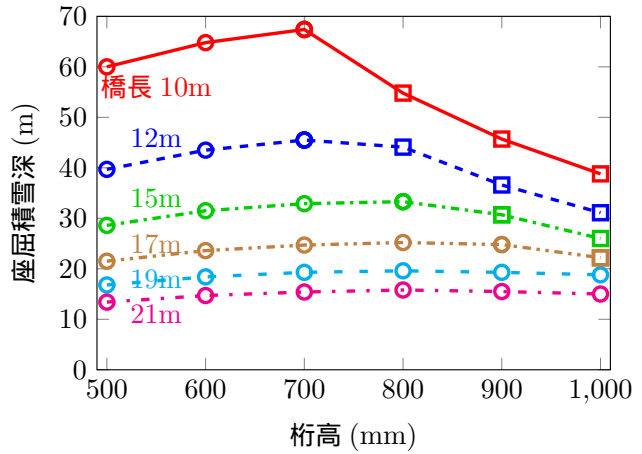


図-12 対傾構のあるモデルの座屈積雪深と桁高の関係 (鉛直材 80mm・斜材 80mm)

く、近くにある鉛直材が座屈するのも防いでいるためであると考えられる。なお、本項の図中では座屈のモードの違いを、図-10 に示すようなモードの場合で、図-11 に示すようなモードの場合で表記する。

a) 鉛直材 80mm・斜材 80mm の結果

鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルについて、座屈積雪深と桁高の関係を図-12 に示す。図-12 は図-7 と同様に、橋長などの設計条件より桁高が決定した時、その桁高で座屈に対して十分耐えうるかどうかの確認に使用できる。座屈積雪深と桁高や橋長は全体的に等断面のモデルの結果 (図-7, 8) と似たような関係にあることが分かる。しかし、図-11 に示すような鉛直材の座屈は、等断面のモデルでは出現しないモードであるため、図-7 と図-12 を見比べれば分かるように、図-6 に示すような支点付近の座屈よりも座屈積雪深が大きいことが分かる。このため、図-12 に示す支間中央側の座屈と鉛直材の座屈の境目が図-7 に示す支間中央側の座屈と支点付近の座屈の境目よりも右寄りになっているものと考えられる。

b) 鉛直材 95mm・斜材 95mm の結果

鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルについて、座屈積雪深と桁高の関係を図-13 に示す。図-13 より鉛直材の座屈が生じているのは橋長 10.220m・桁高 1000mm のケースのみであり、殆どの場合で支間中央側の座屈が生じていることが分かる。これは、図-3 を見れば分かるように鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルよりも鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルの方が鉛直材が太く短いため、鉛直材の座屈が生じにくくなっているからであると考えられ

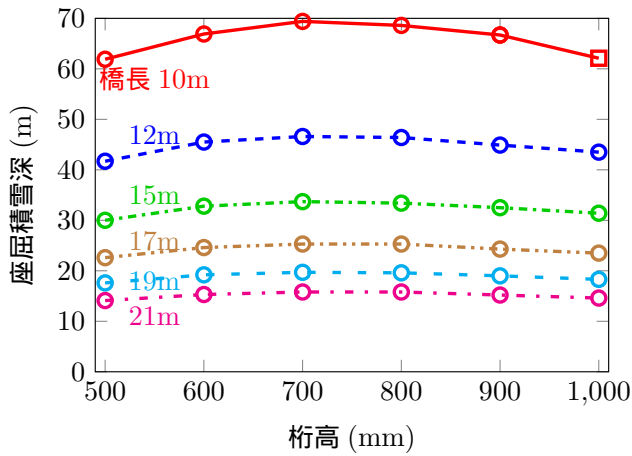


図-13 対傾構のあるモデルの座屈積雪深と桁高の関係 (鉛直材 95mm・斜材 95mm)

る。さらに、桁高の影響を受けやすい鉛直材の座屈が殆ど見られていないため、桁高が変化しても座屈積雪深はそれほど変化しておらず、殆ど橋長のみによって座屈積雪深が変化しているということも分かる。

4. 座屈積雪深と構造諸元の関係

本節では、座屈積雪深と構造諸元の関係について考察するために、着目点ごとに図-7, 8, 12, 13 に示す結果を1つの3次元グラフに描画する。本節の図中では、図-5, 10 に示すようなモードの場合で、図-6 に示すようなモードの場合で、図-11 に示すようなモードの場合で表記する。ここで、支間中央側の座屈に関して2つの座屈モードを1つにまとめたのは、図-5, 10 に示す座屈モードが非常に似通っていることから同じ要因で生じたものと考えられるためである。

(1) 三角孔の寸法の影響

等断面のモデルについて、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルと鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルの結果を比較したものを図-14 に、対傾構のあるモデルについて、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルと鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルの結果を比較したものを図-15 に示す。

図-14, 15 より、支間中央側の座屈は、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルと鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルとで殆ど座屈積雪深が重なっていることが分かる。これは、支間中央側の座屈は図-5, 10 に示すように鋼板上部圧縮側のフランジ部で座屈が生じているため、三角孔の寸法の影響を殆ど受けないことによると考えられる。

また、図-14 に示す支点付近の座屈は鉛直材

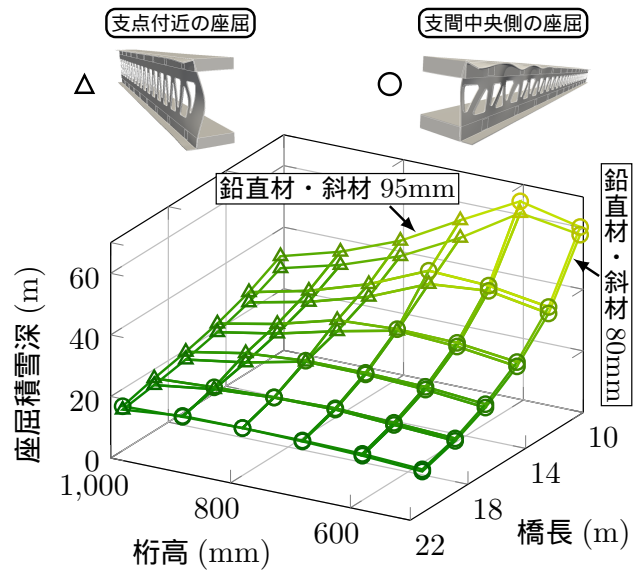


図-14 鉛直材 80mm・斜材 80mm と鉛直材 95mm・斜材 95mm の比較

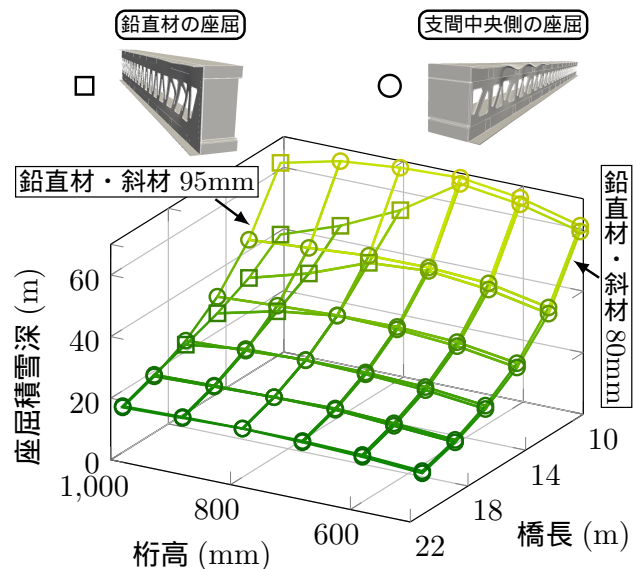


図-15 鉛直材 80mm・斜材 80mm(対傾構あり) と鉛直材 95mm・斜材 95mm(対傾構あり) の比較

80mm・斜材 80mm のモデルよりも鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルの方が座屈積雪深がやや大きいことが分かる。このことから、三角孔の寸法が図-6 に示すような断面全体の変形のしやすさに僅かに影響を与えるということも考えられる。

一方、図-15 に示す鉛直材の座屈については、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルと鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルとで座屈積雪深が大きく異なっていることが分かる。また、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルでは9ケースで生じているものの、鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルでは僅か1ケースでしか生じていないことが分かる。これは、図-3 に示すように三角孔の寸法によって鉛直材の

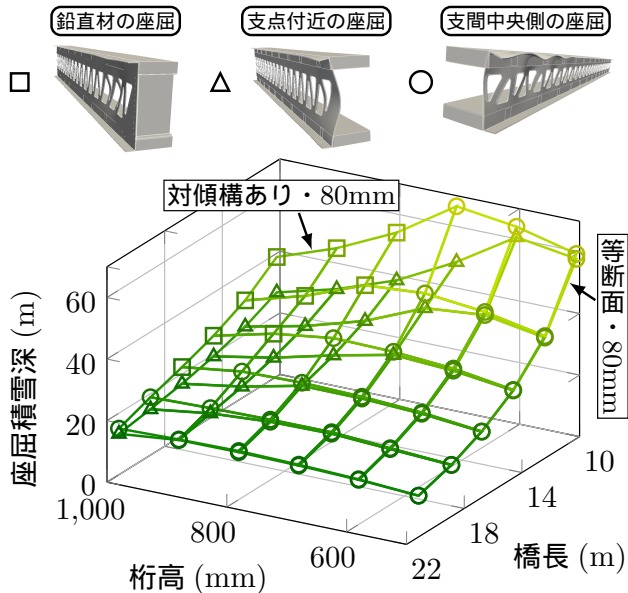


図-16 鉛直材 80mm・斜材 80mm(等断面) と鉛直材 80mm・斜材 80mm(対傾構あり) の比較

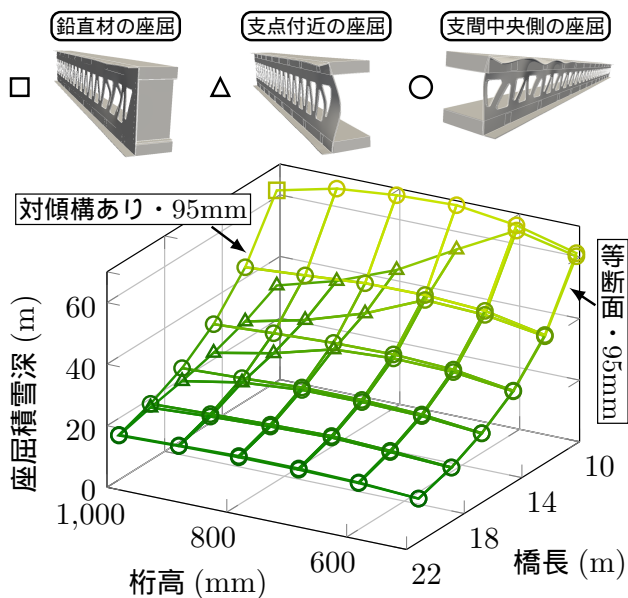


図-17 鉛直材 95mm・斜材 95mm(等断面) と鉛直材 95mm・斜材 95mm(対傾構あり) の比較

幅と長さが明らかに異なるため、このような違いが生じたものと考えられる。

(2) 対傾構の有無の影響

鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルについて、対傾構のあるモデルと等断面のモデルの結果の比較を図-16 に、鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルについて、対傾構のあるモデルと等断面のモデルの結果の比較を図-17 に示す。

図-16, 17 より、支間中央側の座屈 は、対傾構のあるモデルと等断面のモデルとで殆ど座屈積雪深が重なっていることが分かる。これは、前項でも述べたように、支間中央側の座屈 は図-5, 10 に示

すように鋼板上部圧縮側のフランジ部で座屈が生じているため、対傾構の有無の影響を殆ど受けないことによるものと考えられる。

しかし、鉛直材 80mm・斜材 80mm のモデルと鉛直材 95mm・斜材 95mm のモデルのどちらにおいても、桁高が高く橋長の短いモデルでは、対傾構の有無によって座屈積雪深が大きく異なっていることが分かる。これは、対傾構の有無によって、等断面のモデルの場合は支点付近の座屈、対傾構のあるモデルの場合は鉛直材の座屈 というように座屈モードが異なるため、このような違いが生じたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、寸法や構造諸元が異なるプレストレス木箱桁橋の座屈解析を行い、座屈積雪深と寸法や構造諸元の間にある程度明らかにすることができた。このタイプの橋梁の鋼板の座屈に対する設計や照査を支援する図を提案したが、座屈積雪深が最も低い場合でも 13m 程度であることから、殆どの場合では座屈に対する照査が必要ないことが示された。つまり、桁高 500~1000mm・橋長 10.220~21.170m のプレストレス木箱桁橋について、座屈が生じないことを示すためには、これらの図を利用するだけでよく、主な設計は比較的簡単な応力やたわみの照査のみで可能であると思われる。ただし、積雪深データが 3m 程度の所でも、実際には橋梁の側面や底面にも雪が張り付くため、現地の積雪深データをそのまま雪荷重として使用できる訳ではない。本研究で提案した図を使用するとき、現地の積雪深データと図の座屈積雪深の兼ね合いをどう判断するのは設計者の裁量に委ねられるところである。

参考文献

- 1) 佐々木貴信, 山内秀文, 栗本康史, 千田知弘, 後藤文彦, 渡辺浩, 安部隆一, 熊谷誠喜: 木製土木施設オンサイト生産システムの構築, 土木学会第 66 回年次学術講演会, CS13-017, pp.33-34, 2011.
- 2) 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.
- 3) 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合成評価, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.570-577, 2015.
- 4) 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.
- 5) 近藤高誉, 堅固山衛, 藤田智郁, 後藤文彦, 野田龍, 佐々木貴信: プレストレス木箱桁橋鋼板部の座屈解析, 木材利用研究論文報告集 16, pp.9-16, 2017.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編・II 鋼橋編, 2012.
- 7) <https://www.code-aster.org>