

複数形式の木製トラス橋に対応した汎用金具の提案

環境構造工学講座 15154 河原 萌
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

近年、GHGの固定や治山、森林資源の有効活用などの観点から建築物の木材利用が求められている。かつての建築基準法では高さ13m以上、または軒高9m以上の大規模な木造建築物の建造は規制されていた。しかし、昭和62年以降の建築基準法の改正により安全・防火の基準を満たすことが出来れば建造が可能となった。さらに平成4年の建築基準法改正により準耐火建築物であれば木造での建造も可能になり、平成12年の建築基準法改正により耐火建築物であっても木造での建造が可能となった。加え、戦後を中心に造成された人工林からの材木生産が可能になり、材木の増産が見込まれている。木は鋼材やコンクリート製の橋梁に比べると耐久性、剛性などが劣るが、材料の入手しやすさ、軽量であるために運搬が容易であるなどの特徴がありこの利点を活かす手法の一つに木製応急橋への利用が挙げられる。災害復旧などにおいて大規模な機材、特殊な材料などが使用できない状況であるとき、入手が比較的容易である機材・材料を用いて、人力で短期間で架設を目的として開発されている。既存の例として函館工業専門学校で開発された角材を用いた木製トラス橋(図-1)や、秋田大学で開発されたプレストレス木箱桁橋などがある。従来はトラスの格点部分に用いられる金具によりトラスの形状が決定されるが、多様な環境での架設が求められるため、単一の形状では架設が制限される場合も考えられる。そこで、様々なトラス形状での架設を想定した汎用金具を提案し、有限要素法での解析による検討を行う。



図-1 函館式木橋

2. 試験方法

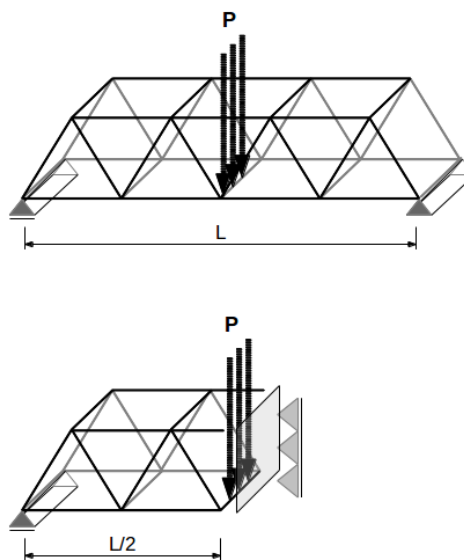


図-2 解析モデル境界条件

3点曲げ載荷試験を行うが、座屈解析には多くの要素分割が必要なため、スパンを半分にした半解析で解く。梁(木材部分)には間伐材であるスギを想定し、金具部分には接合用鋼板にss400を想定した。材料定数については表-1に表した。

キーワード: 橋, 応急木橋

連絡先: 後藤文彦 (<http://www.str.ce.akita-u.ac.jp/~gotou/>)

	梁	金具
ヤング率	9GPa	206GPa
ポアソン比	0.4	0.28
比重	0.38	7.85

表-1 材料諸元

スパン 10.62m、幅員 1.08m のモデルをスパン中央で分割し、拘束条件を図-2 のように橋梁下部をヒンジによる線拘束をし、断面を高さ方向に動かせるようにする。活荷重にスパン中央の横桁に群衆荷重として 3.5kN/m^2 の面載荷をする。載荷面積は 0.14m^2 である。性能評価のため、函館工業専門学校で造られた木橋（函館モデル）と同様のワーレントラスモデルを作成する。その他の橋梁形式についてプラットラス、ハウトラスについても解析を行う。また腐朽などによる梁の不全化を想定して、健全モデルに対する欠損モデルをワーレントラスについて作成し、性能を確かめる。

3. 解析手法

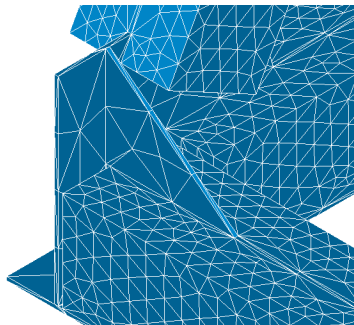


図-3 四面体要素分割

橋梁に用いられる材料はすべて等方性材料であり、部材が金具と剛結したラーメン構造をとる。本研究では汎用金具の形状の差のみによる挙動の違いを調べるため、特に鋼材と木材の接する面は節点同士を共有させているものとして、ボルトによる固定を考慮していない。有限要素法を用いた数値解析で検証を行う。3D モデリングにはオープン CAE ツールである Salome-Meca、解析には Code-aster をそれぞれ用いた。四面体要素によるメッシュ分割を行い線形座屈解析、線形弾性解析を行った。

4. 金具

(1) 函館モデルに使用された金具

比較の基準として作成した函館モデルを図-5 に示す。函館モデルの作成には 3 種類の金具を必要とし、格点に配置される。実物のモデルは梁の挿し込み部分に M20 のボルトを差し込む孔が配置されるが本実験では孔の条件を割愛した。

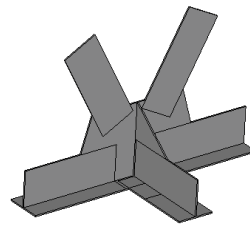


図-4 函館モデルの金具

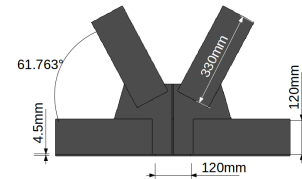


図-5 函館式のモデル化

(2) 8 角形モデル・16 角形モデル

様々な形状のトラスの作成を想定するため、

- 梁差し込み可能箇所を増やすこと
- できるだけ単純な形状であること
- トラスのどの格点にも使用できること
- 軽量であること

を念頭に置いて考案した。ss400 の使用を想定し、厚さ 4.5mm の多角形の鋼板を 3 軸方向にそれぞれ組み合わせた形状を考案した。鋼板の大きさは函館モデルの差し込み長さを参考にした。差し込み角度をより多くするため 8 角形モデル (図-6、図-7) 16 角形モデル (図-8、図-9) を作成した。8 角形モデルで約 18kg、16 角形モデルで約 19kg である。

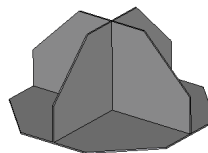


図-6 8 角形モデル

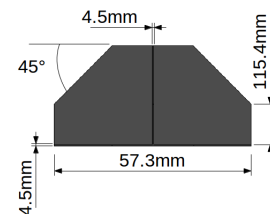


図-7 8 角形モデル寸法

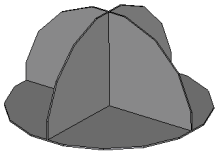


図-8 16角形モデル

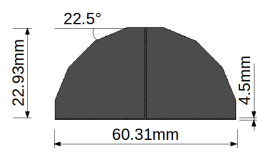


図-9 16角形モデル寸法

5. 数値計算

(1) ワーレントラスモデル

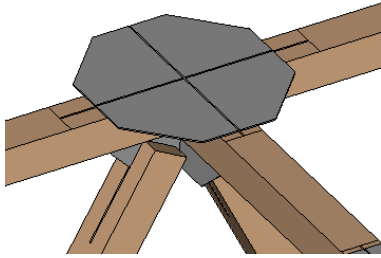


図-10 8角形モデルワーレントラスの接合部

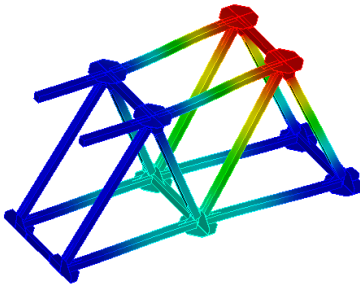


図-11 8角形モデル座屈1次モード

弾性解析の結果を表-2 に表した。橋梁全体のヤング率を $E_{全体}$ 、断面 2 次モーメントを $I_{全体}$ と考え、橋梁の曲げ剛性 $E_{全体}I_{全体}$ を梁と金具の体積 $V_{梁}$ 、 $V_{金具}$ で除した比剛性を梁と金具部分の重量で除して無次元化した値 $(\frac{EI}{\ell^2(V_{梁} \times w_{梁} + V_{金具} \times w_{金具})})$ を評価基準の 1 つとして式-1 に表す。

$$\frac{EI}{\ell^2 \times (V_{梁} \times w_{梁} + V_{金具} \times w_{金具})} = \frac{EI}{48 \times v \times (V_{梁} \times w_{梁} + V_{金具} \times w_{金具})} \quad (1)$$

函館モデルに倣い $120mm \times 120mm \times 2500mm$ の梁をトラス部材に、幅員方向に $120mm \times 120mm \times 1200mm$ の梁を配置した。座屈解析の結果を表-2

に表す。橋梁の構成において構造部材として梁が主にはたらく、座屈解析では図-11 のように格点部を中心に横座屈が見られた。

図-11 は実際の座屈変形の 10 倍の倍率で表示しており、実際の変位は微小である。金具の使用量はいずれのモデルについてもその割合が橋梁全体に対して 5% 以下であり、たわみには大きな差は見られなかったが、いずれのモデルにおいても比剛性に差が見られた。比剛性としては 8 角形モデルが最も大きい値であり次いで 16 角形モデル、8 角形モデルとなった。比剛性は軽量さと剛性の高さで評価されるものであり、橋梁形態を単一としない汎用モデルの使用は比剛性が低下する要因となるが、橋梁に占める金具の割合が低いいためこのような結果になったと考えられる。しかし、たわみの値はいずれも函館モデルを下回った。原因として金具の体積が増加したことによる断面 2 次モーメントの増加、上弦材の上側から金具がはみ出した部分が補剛材としての役割を果たしているからであると考えられる。一方で座屈荷重は差が大きく見られ 8 角形モデルで 1.73 倍、16 角形モデルで 1.66 倍であり、函館モデルに比べて高い値となっている。また、図-12 図-14 のように各モデルの金具部分にミーゼス応力の最大値が分布した。いずれの部分でも金具の降伏には至らない。梁部分、金具部分に働いた最大ミーゼス応力を表-3 に表す。

欠損モデルについて、たわみは健全モデルとの比で函館モデルで 13%、8 角形モデルで 12%、16 角形モデルで 2% の増分である。16 角形ワーレンモデルが欠損状態であってもたわみの増分が小さいのは函館モデルに比べ冗長性があるとあると考えられる。先述した金具のはみ出しによるものと考えられる。

(2) ハウトラス・プラットトラスモデル

比剛性がより高い値になった 8 角形モデルに関してワーレントラス以外の橋梁形式として、ハウトラス・プラットトラスを作成した。使用した梁材料は上弦材・下弦材・鉛直材はワーレントラスと同様

		金具体積 (m^3)	梁体積 (m^3)	全体積 (m^3)	たわみ ($\times 10^{-3}mm$)	比剛性
健全	函館モデル	0.027	1.222	1.249	0.185	84381
	8 角形モデル	0.043		1.265	0.139	94308
	16 角形モデル	0.047		1.268	0.142	89216
欠損	函館モデル	0.027	1.154	1.177	0.210	74335
	8 角形モデル	0.043		1.193	0.157	83443
	16 角形モデル	0.047		1.197	0.150	83898
	ハウトラス	0.049	1.476	1.520	0.098	126312
	プラットラス				0.149	83077

表-2 弾性解析結果と比剛性

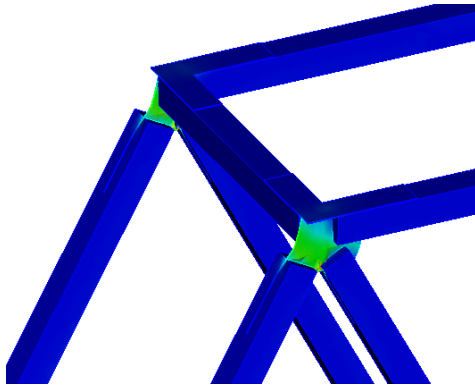


図-12 函館モデルのミーゼス応力最大値

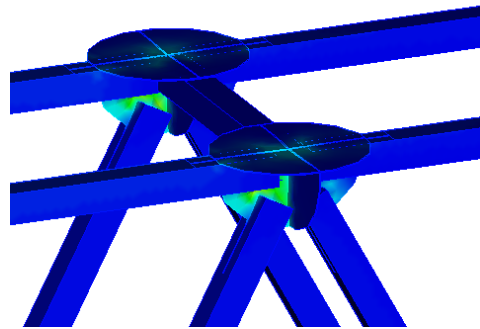


図-14 ワーレン 16 角形モデルのミーゼス応力集中部分

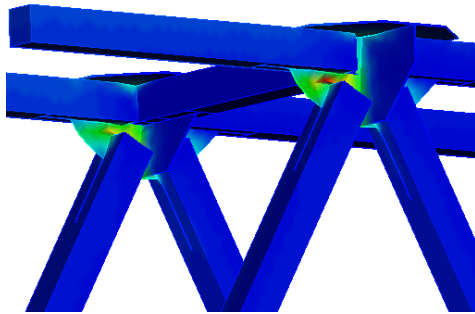


図-13 ワーレン 8 角形モデルのミーゼス応力集中部分

120mm × 120mm × 2500mm であるが、斜材は設計上の都合により 120mm × 120mm × 3240mm となった。鉛直材に十字に切れ込みを入れ結合した。同一面上に斜材と下弦材を取り付けた。取り付け図を図-17 に表す。この図も図-11 と同様倍率を 10 倍にしている。線形弾性解析の結果を表-2 に表す。プラットラスの座屈 1 次モードを図-19 に、ハウ

	金具	梁
函館モデル	302.15	154.9
8 角形モデル	199.30	136.09
16 角形モデル	277.29	176.51

表-3 ワーレンモデルのミーゼス応力最大値 (kN)

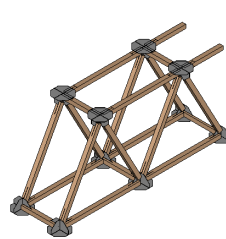


図-15 ワーレントラス

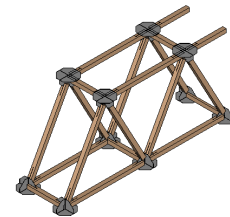


図-16 ワーレントラス (欠損)

トラスの座屈 1 次モードを図-18 表す。使用材料の体積はどちらも同様となっているが比剛性で大きく異なった。どちらもモデルも固定端付近の斜材が座屈した。斜材に引張の向きに力が働くハウトラス

	8角形 モデル	16角形 モデル	函館 モデル
1次	41.36	39.64	26.83
2次	55.98	58.73	54.45
3次	57.15	59.50	54.74

表-4 ワーレントラスモデルの座屈荷重 (kN)

	8角形 モデル	16角形 モデル	函館 モデル
1次	31.46	34.29	9.926
2次	50.41	57.64	40.28
3次	51.29	57.86	53.11

表-5 ワーレントラス欠損モデルの座屈荷重 (kN)

が圧縮の向きに力が働くワーレントラスモデルより高い比剛性を示した。図-18、図-19 にミーゼス応力の集中した部分を表す。ハウトラスは固定端側に、プラットトラスは切断面側にそれぞれ応力集中をした。

	金具	梁
ハウトラス	182.34	99.66
プラットトラス	91.80	61.80

表-6 ハウトラス・プラットトラスのミーゼス応力の最大値 (kN)

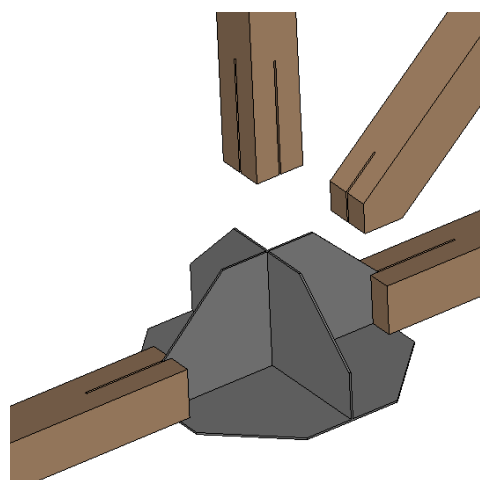


図-17 プラットトラスの接合部

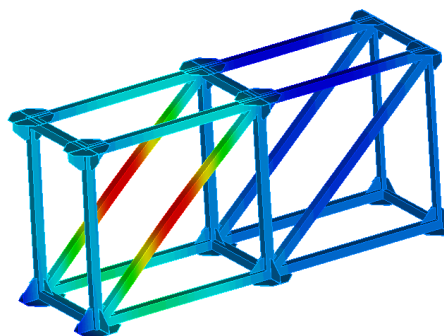


図-18 ハウトラスの座屈1次モード

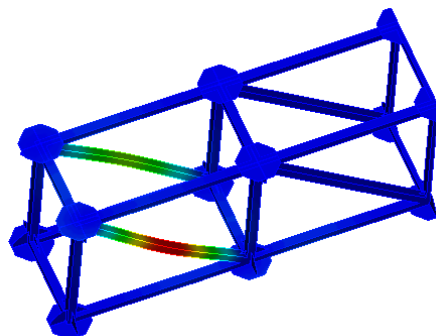


図-19 プラットトラスの座屈1次モード

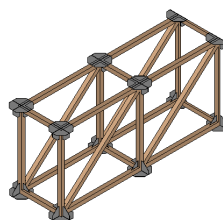


図-20 ハウトラス

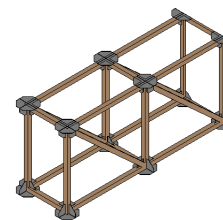


図-21 プラットトラス

	ハウトラス	プラットトラス
1次	58.02	65.08
2次	59.27	70.87
3次	59.528	70.91

表-7 ハウトラス・プラットトラスの座屈荷重 (kN)

6. まとめ

本研究では木製トラス橋のための汎用金具を提案し、有限要素法による座屈解析・線形弾性解析により載荷試験を行った際の挙動を調べ、またワーレントラス式橋梁について既存のモデルとの比較を行った。提案したいずれのモデルも比剛性・座屈荷重・

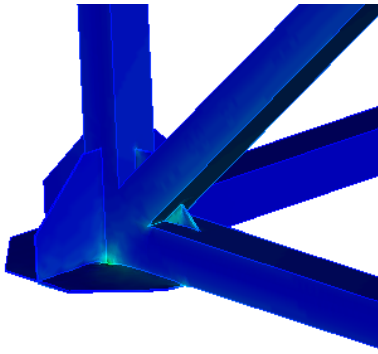


図-22 ハウトラスのミーゼス応力集中部分

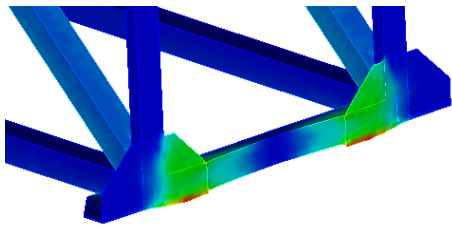


図-23 プラットラスのミーゼス応力集中部分

たわみの値はいずれの 8 角形モデル、16 角形モデルのどちらも既存モデルよりも高い値となった。体梁の挿し込み可能部分の増設をコンセプトとしているために増加した体積により断面 2 次モーメントの増加や金具が梁からはみ出していることによる補剛材としての役割が影響していると考えられる。反面、施工性の観点においては 16 角形モデルで約 20kg であり格点設置作業において、多少困難である重量²⁾である。欠損モデルについて 16 角形モデルは 8 角形モデルや函館モデルに比べたわみの増加量が少なかった。金具の形状により、冗長性が増したと考えられる。プラットラス・ハウトラスモデルについては、より剛性の高かった 8 角形モデルで作成した。たわみの値はワーレントラスよりも小さくなり、座屈荷重も高い値が出ているが、比剛性の値はプラットラスではかえって小さくなった。剛性としては十分であるが梁の体積が 0.524m^3 の増加となり、重量としては約 200kg の増加であり、あまり効率的では無いと言える。これらを加味すると省体積²⁾かつ補剛効果の高い金具モデルの開発が

望ましい。

本研究では接触解析や木材の異方性など考慮されていない。ボルトを考慮するとプレストレス・接触解析・座屈解析を同時に行う高度な解析になるため、金具 1 つまわりについて解析するのが適切である。その場合、固定の条件や、载荷の条件など詳細な検討が必要になる。また施工性の検証には実物の作成が望ましいが、手法の 1 つとして図-24 のように 3D プリンタなどによる造形などと組み合わせて扱う⁷⁾ことでより詳細に検討することが期待される。

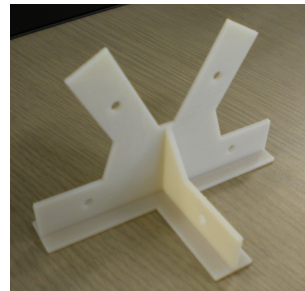


図-24 3D プリンタで作成した函館モデル

参考文献

- 1) 国土交通省”設計概要(共通編)(平成 23 年 9 月改訂版) 木橋設計施工要領”
- 2) 公益社団法人 土木学会 木材工学委員会・木橋研究小委員会”木材の特徴を活かす木橋”
- 3) 公益社団法人土木学会 木材工学委員会”木材利用研究論文報告書 14 架設時間を短縮できる災害時応急橋の開発”
- 4) 公益社団法人土木学会 木材工学委員会”木材利用研究論文報告書 15 屋根部材も剛性に寄与する屋根付き木橋”
- 5) 林野庁”平成 22 年度 森林・林業白書全文 (HTML 版)” http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/22hakusyo_h/index.html
- 6) 土木学会”構造力学公式集”
- 7) 秋田大学工学資源学部土木環境工学科 平成 27 年度 修士論文・卒業論文概要集”CEA ツールを利用した木製応急トラス橋の性能評価”