



付2 木質構造材を用いた H.P. シェルの解析

付 2.1 はじめに

木質構造建築に対する様々な規制は、数段階に及び規制緩和措置により用途・規模などの規約が広げられた。さらに 1998 年に成立した建築基準法の一部改正により性能規定化が導入され、木質構造、とくに大断面集成材を用いた大規模木質構造の可能性を広げる形となった。それに伴い、一定の強度性能を持つ構造用集成材の普及と、その性能が担保される接合法の出現により、比較的容易に構造安全性が確認できるようになり、あらゆる形態の木質構造の建設が可能となりつつある。

木質構造の構造計画においては、木材または木質材料を使用するため、鋼材やコンクリートなどの人工的材料とは異なる特殊な性質を十分に理解しておく必要がある。構造解析でも木質構造の特殊性や接合部の取扱いを慎重に考慮しなければならないが、不均質性・不確定性ゆえに、構造力学的な解析が極めて難しく、あいまいなままにされてきた。

木造単層スペースフレームを扱った研究は、半谷等のピン状態に近いボルト接合部で構成される木造単層ラチスドームの座屈性状に関する実験的・解析的研究¹⁾、松野・青木等の木材のめり込み挙動を考慮した木造単層スペースフレームの応力・変形・座屈性状に関する実験的研究²⁾³⁾などが挙げられるがその数は極めて少ないのが現状である。そこで、木質構造の解析法が確立されていないことから、解析手法の提案とその妥当性を調べる必要がある。

本論文は、松野・青木等²⁾の研究を元に木質双曲放物形シェル型スペースフレーム（以下 H.P. シェルと呼ぶ）をモデル化し、幾何学的非線形性を考慮した静的弾塑性解析を行い、実験結果と解析結果を比較して解析法の妥当性を調べることを目的とする。解析法として、木質構造部材にファイバーモデルを適用することにより、材内の応力や変形を評価し、さらに接合部で用いられているボルト接合を軸ばね・曲げばねを並列に組み込むことで、接合部のすべりや剛性低下を評価する手法を提案する。

解析モデルは、図 2-1 に示すような H.P. シェル型のスペースフレーム構造である。各対角隅点を同レベルとする平面投影 3m × 3m の正方形で、対角方向ライズスパン比は 0.11 とする。境界条件は、高・低位置の 2 対角支点を共に対角方向ローラー支持とし、低位置の 2 対角支点を鋼棒で連結する。図 2-2 にその構造の規模を示す。

付 2.2 解析対象の モデル化 付 2.2.1 構造のモ デル化

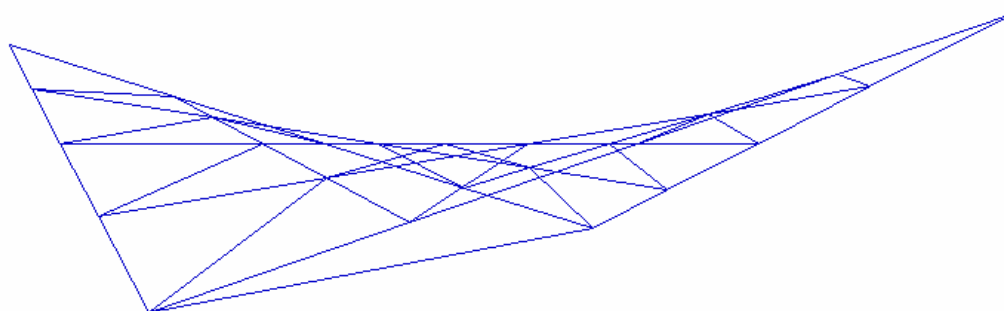


図 2-1a 木質小試験体の H.P. シェル形状

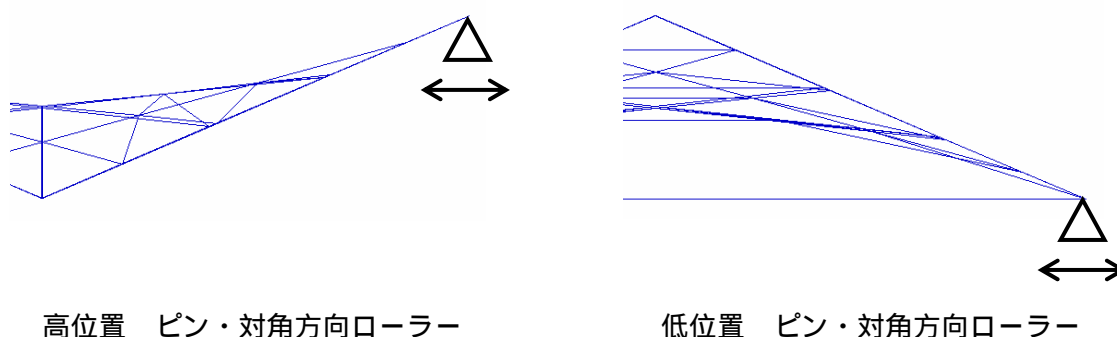


図 2-1b 境界条件

実験で用いられている H.P. シェルは、すぎ集成材を使用したラチス部材と境界部材、それに SS400 の鋼棒の 3 種類で構成される。接合部には、鋼板挟みこみ式ボルト接合法が用いられている。そのため、ラチス部材は 3 cm × 10 cm の通直材を、境界部材は 4 cm × 16 cm の通直材をそれぞれ 2 枚用いて 0.9 cm の鋼板を挟み込んでいるが、解析ではこの厚みを無視する。ラチス材は、全ての節点でボルト接合部を有するが、境界部材では、支点のみにボルト接合部を有している。また鋼棒は、両端で完全ピン接合とする。部材の諸元を表 2-1 に、また部材の配置図を図 2-3 に示す。

付 2.2.2 使用部材の諸元

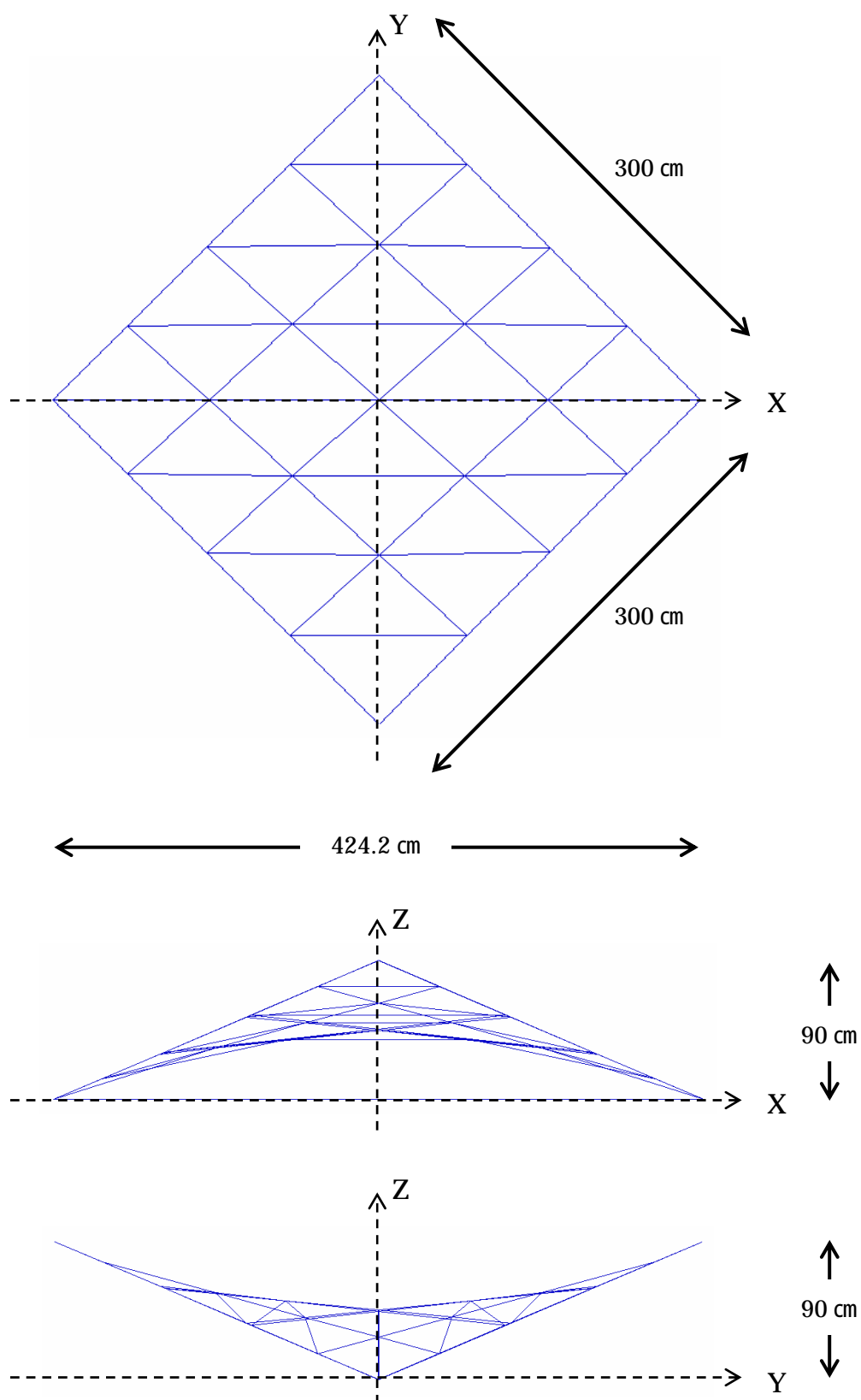


図 2-2 構造の規模

表 2-1 部材の諸元

要素名	ラチス材	境界部材	鋼棒
使用材料	すぎ集成材	すぎ集成材	SS400
断面寸法 (cm)	幅 6 × せい 10	幅 8 × せい 16	直径 1.9
断面積 (cm ²)	60	128	2.84
強軸断面 2 次モーメント (cm ⁴)	500	2730.67	0.64
弱軸断面 2 次モーメント (cm ⁴)	180	682.67	
弾性係数 (kN/cm ²)	891.80	891.80	20580

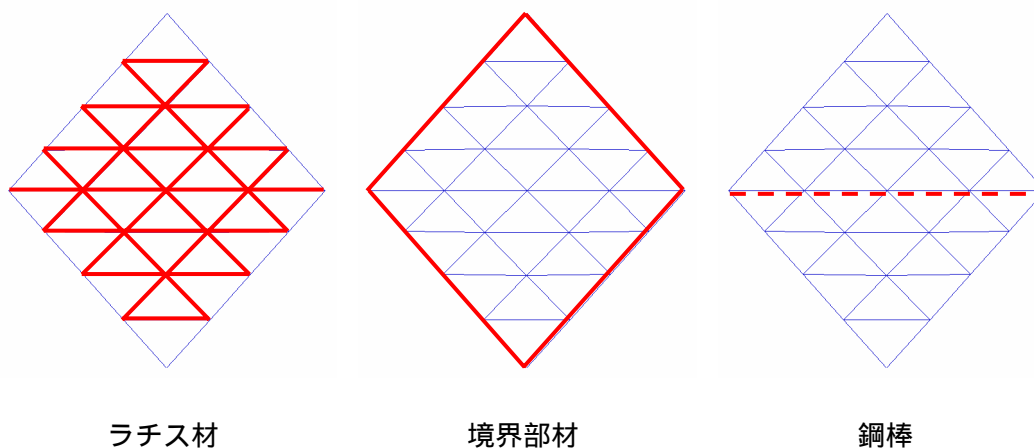


図 2-3 要素の配置

H.P. シェルのラチス材試験体形状を図 2-4 に、その部材モデルを図 2-5 に示す。集成材の断面は、ラミナの積層によって構成されるため、それぞれのラミナの性能を考慮したファイバーモデルを作成し、その各ファイバー要素には、木質材料の性質を考慮した復元力特性を採用する。そのファイバーモデルを集成材の両端・中央に組み込むことで、部材内の弾塑性挙動を扱うことになる。

ボルト接合部に材軸方向ばね・強軸回りの曲げばねを並列に組み込むことで、接合部の力学的挙動を表す。各ばねには、すべり・めり込みを考慮した復元力特性を使用する。接合部の金物部分は、集成材に比べ剛性が高いので剛域として扱う。剛域は、明確な規定が無いため、接合部

付 2.2.3 部材のモデル化

から材端までの 10 cm を剛域長さと仮定する。

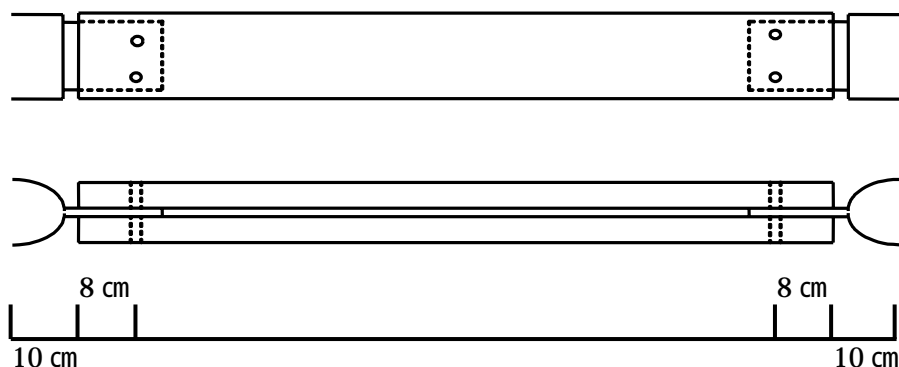


図 2-4 試験体形状

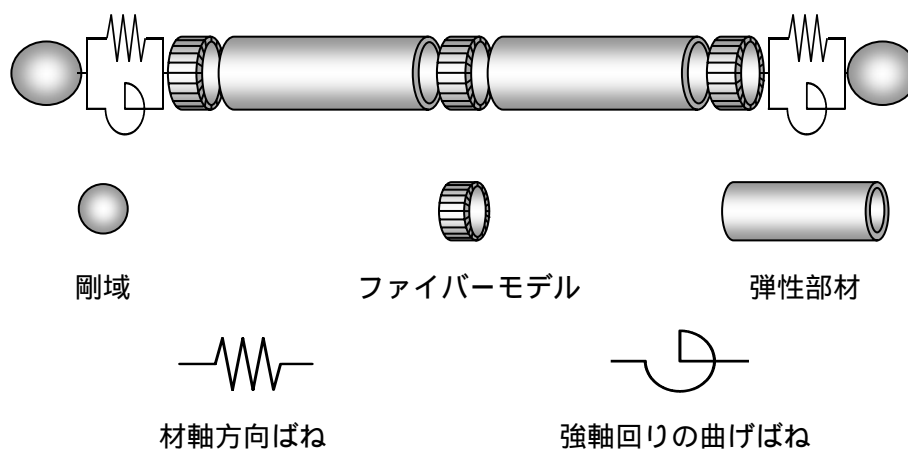


図 2-5 部材モデル

前節で述べたように、ファイバーモデルを用いることで部材内の弾塑性挙動を調べることが可能となる。ファイバーモデルに組み込む復元力特性を図 2-6 のように仮定する。この特性は、木質材料の特徴的であり、引張側の最大耐力までは弾性的な挙動を示すが、それ以降はほとんど耐力が期待できない極めて脆性的な破壊を示す。一方、圧縮側は、最大強度を超えた後も、耐力を保持したままで推移する延性的な性質を示す復元力特性を有する。

付 2.2.4 断面内ファイバーの復元力特性

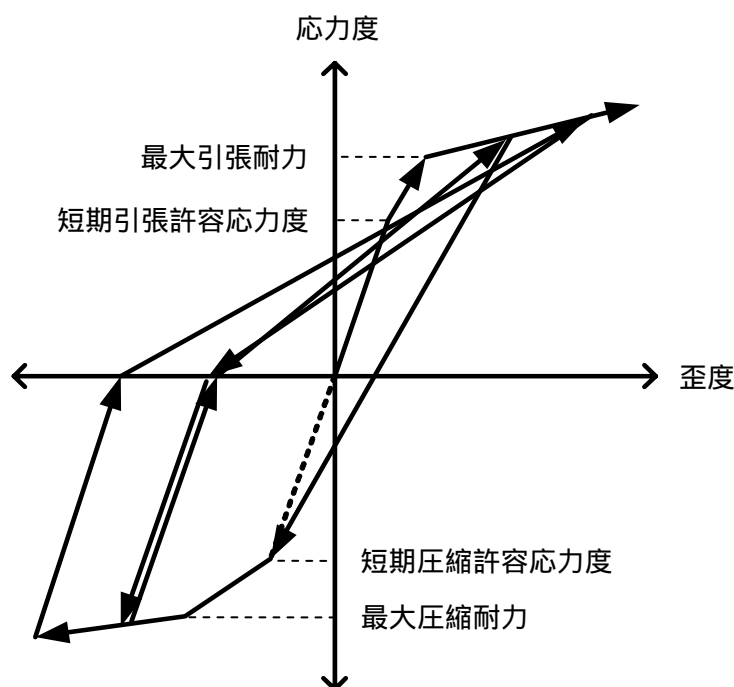


図 2-6 断面内ファイバーの復元力特性

ファイバーモデルの諸元を表 2-2 に示す。松野・青木等²⁾のすぎ集成材の圧縮試験を基に、最大圧縮耐力を求め、その $2/3$ 倍した値を短期圧縮許容応力度とする。最大引張耐力、短期引張許容応力度は、圧縮の値の 0.85 倍と仮定する。第 1 剛性は、圧縮側と引張側が同程度と見なし共に実験値を用いる。第 2 剛性は、圧縮側で第 1 剛性の 0.4 倍、引張側で 0.7 倍と仮定する。

表 2-2 ファイバーモデルの諸元

要素名		ラチス材	境界部材
要素分割数		4×10	4×8
引張側	第 1 剛性 (kN/cm^2)	891.80	
	第 2 剛性 (kN/cm^2)	624.26	
	第 3 剛性 (kN/cm^2)	0.09	
	短期許容応力度 (kN/cm^2)	1.67	
	最大耐力 (kN/cm^2)	2.50	
圧縮側	第 1 剛性 (kN/cm^2)	891.80	
	第 2 剛性 (kN/cm^2)	356.72	
	第 3 剛性 (kN/cm^2)	8.92	
	短期許容応力度 (kN/cm^2)	1.96	
	最大耐力 (kN/cm^2)	2.94	

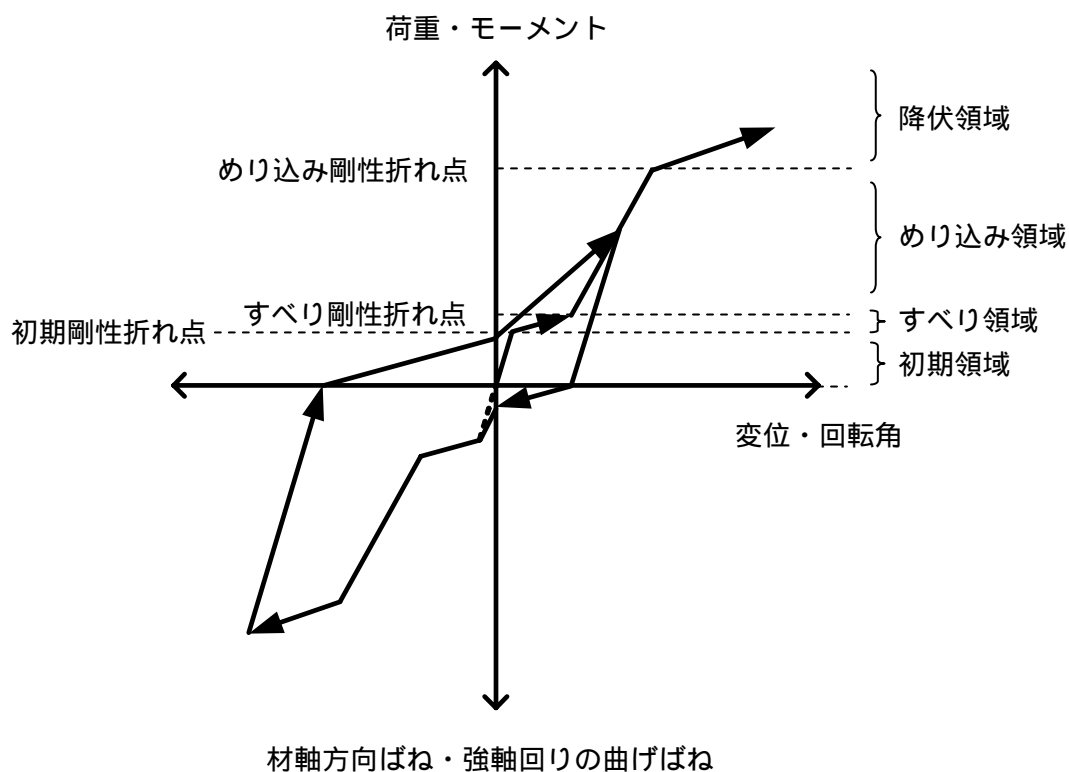


図 2-7 接合部の復元力特性

図 2-7 の復元力特性は以下のような力学的挙動によるものである。

- 初期領域：**木材と接合具との静止摩擦により変位、回転角がほとんど発生しない領域
- すべり領域：**初期の静止摩擦消失後、ボルトが孔壁に接触するまでボルト孔内のクリアランス分だけ移動し、ボルトから孔壁を介して木材に荷重が伝達されるまでの領域
- めり込み領域：**ボルトが木材にめり込みながら荷重を伝達し弾性的挙動を示す領域
- 降伏領域：**木材のめり込み降伏後、ボルト端に接触する木材の亀裂増大に伴い、変位、回転角が増大する領域

実験結果より得られた接合部の復元力特性を表 2-3 に示す。

表 2-3 接合部の復元力特性

材軸方向ばね	
初期剛性 (kN/cm)	473.63
すべり剛性 (kN/cm)	59.68
めり込み剛性 (kN/cm)	243.73
降伏剛性 (kN/cm)	88.00
初期剛性折れ点 (kN)	4.70
すべり剛性折れ点 (kN)	9.51
めり込み剛性折れ点 (kN)	31.36

強軸回りの曲げばね	
初期剛性 (kN・cm/rad)	473.63
すべり剛性 (kN・cm/rad)	59.68
めり込み剛性 (kN・cm/rad)	243.73
降伏剛性 (kN・cm/rad)	88.00
初期剛性折れ点 (kN・cm)	4.70
すべり剛性折れ点 (kN・cm)	9.51
めり込み剛性折れ点 (kN・cm)	31.36

付 2.3 解析結果

本解析で用いる数値解析手法は、幾何学的非線形を考慮した静的弾塑性解析である。荷重は支点以外の全節点に等分布荷重を想定し裁荷する。最大荷重は、145.04kN とする。全載時の様子と反力を図 2-8 に示す。解析モデルは、弱軸回りの接合部を剛接合とした剛モデルと、ピン接合としたピンモデルの 2 種類とする。

上記の条件で解析を行い、中央部の鉛直変位、材内の応力を実験結果と解析結果で比較し考察する。ここで、H.P. シェルに加わる荷重係数と試験体中央節点の鉛直変位関係を図 2-9 に示す。図中、実験結果が 88.2kN 付近で鋼棒が降伏するのに対して、ピンモデルでは 76.44kN、剛モデルでは 80.36kN で降伏しており、支点の開きが実験より大きくなっていることが理解できる。構造物の初期剛性は、両者でほぼ一致しているが、実験結果にはすべり性状が 0～4 cm の範囲で現れ、剛性が低下しているのに対し、解析モデルでは剛性低下は実験結果ほど顕著には見られなかった。すべり発生後のめり込み挙動・降伏後の挙動は、ピンモデルが実験結果と非常に良い一致を示した。

架構全体のすべり性状が現れる荷重は、実験結果より小さい値となっているが、変形量は数値的に概ね近似した値となっている。特にピンモデルでは、変形量の誤差はほとんど無いと言って良い。

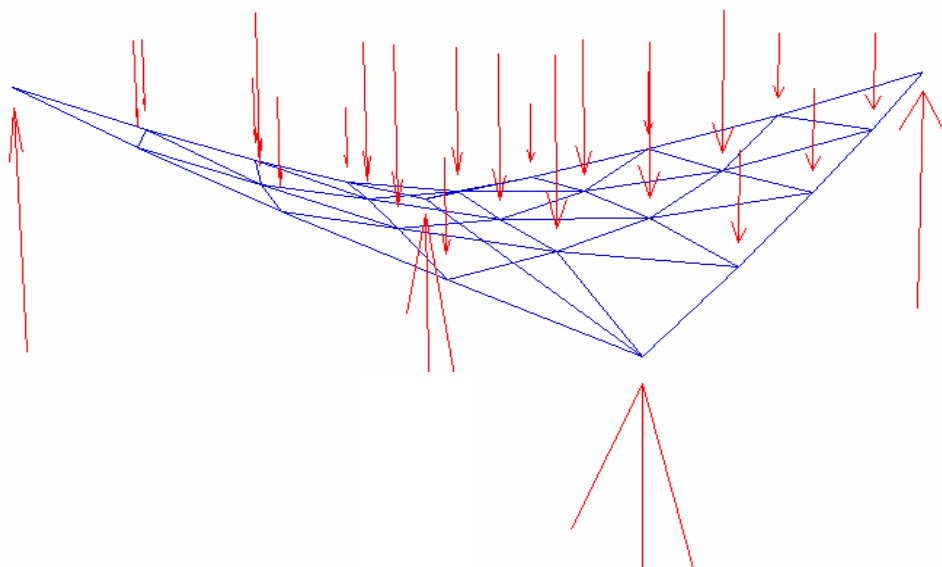


図 2-8 荷重の分布と反力

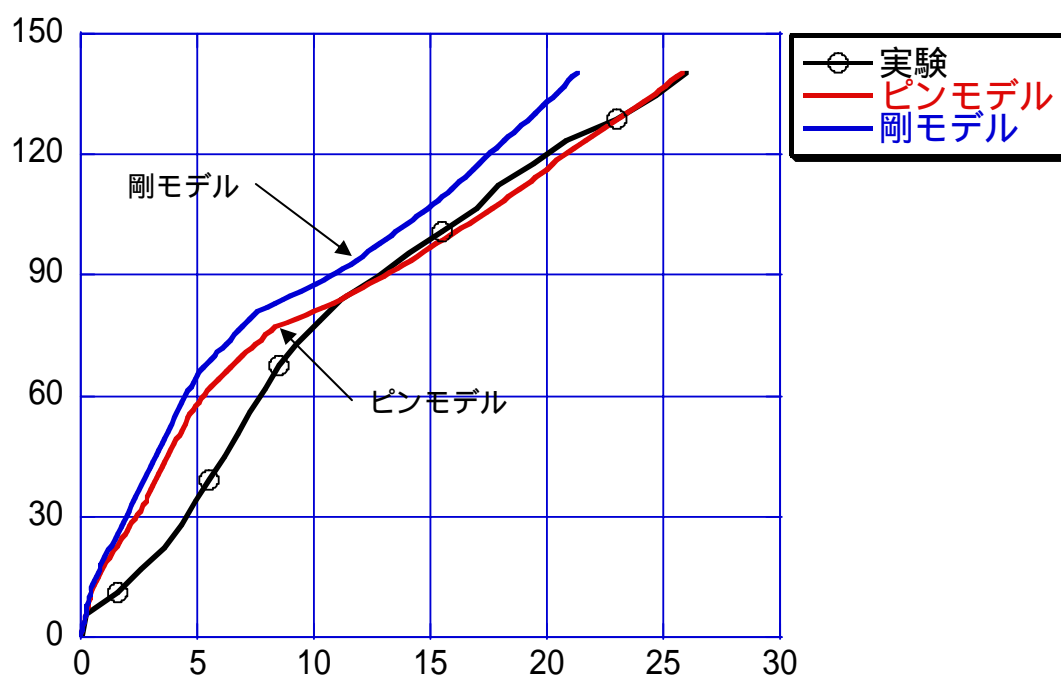


図 2-9 荷重・鉛直変位関係図

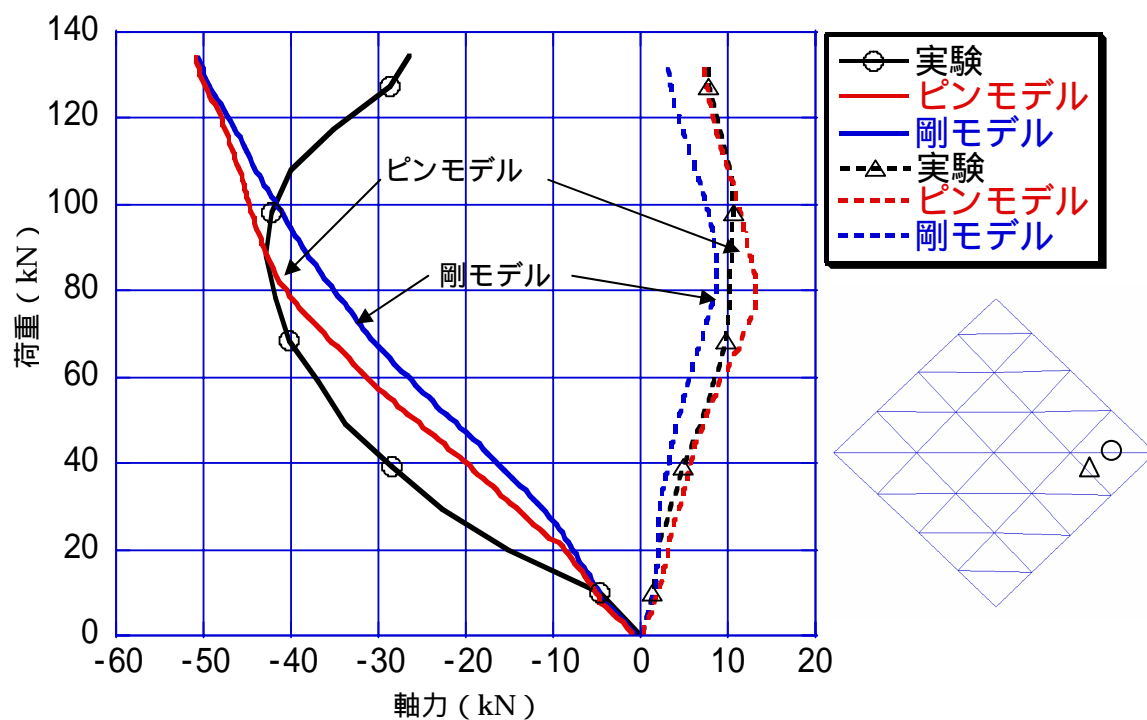


図 2-10 荷重・鉛直変位関係図

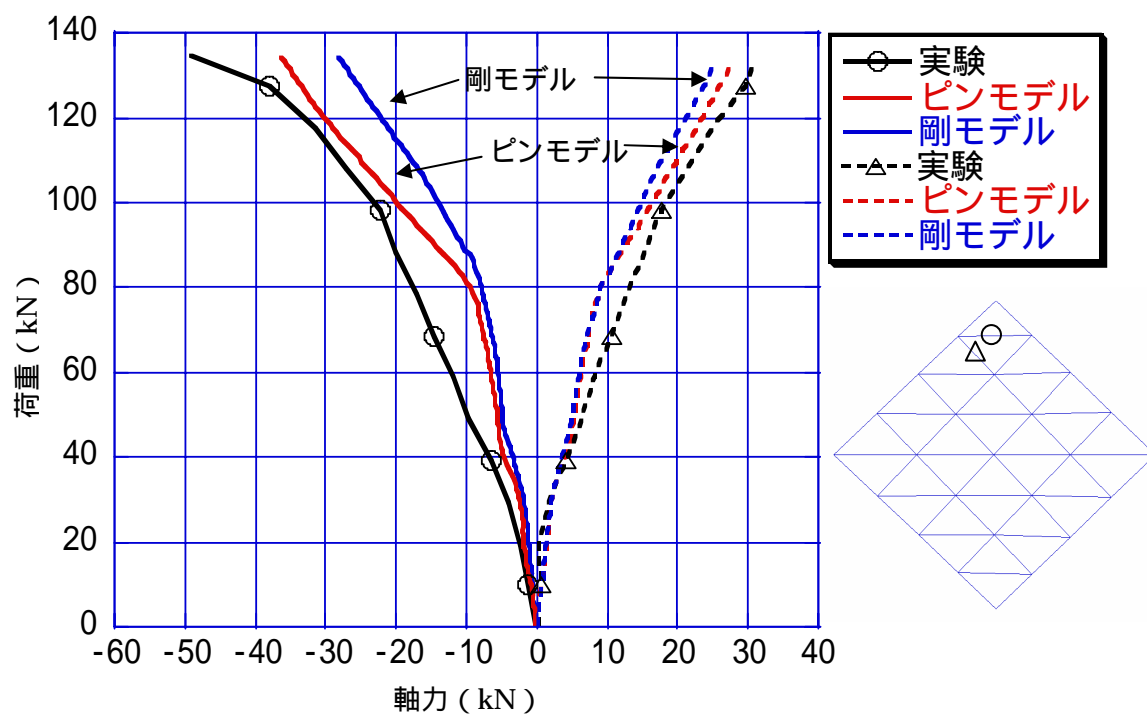


図 2-11 荷重・鉛直変位関係図

実験結果ですべり性状が顕著に発生した理由は、接合部の鋼棒の緩みが大きかったためと思われる。

次に、・印で示しているラチス材の荷重と軸力関係図を図 2-10 と図 2-11 に示す。両図より、ピンモデルが実験値を良く近似していることが分かる。圧縮材、引張材共にボルト接合部の力学的挙動を反映した軸力性状が確認されている。

図 2-10 で圧縮材の実験結果がはやく反転した理由は、スリップによって鉛直変位が増大し、軸力も増大したためと思われる。

多少の差異は見られるが、実験結果と良い一致の軸力性状を示していると云えよう。

付 2.4 まとめ

本論文では、H.P. シェルに幾何学的非線形を考慮した静的弾塑性解析を行い、その挙動を分析した。解析法として、ファイバーモデル・軸ばね・曲げばねを用いた。解析モデルは、弱軸回りの接合を剛接合・ピン接合とした 2 種類である。得られた結果を以下にまとめる。

1. H.P. シェルの解析結果より架構全体の变形性状を追うことが確認できた。
2. 接合部に材軸方向ばね・強軸回りの曲げばねを組み込むことで、ボルト接合部のすべり性状やめり込み性状を表せることが確認できた。
3. 軸力性状は接合部を有することにより影響を受けるが、架構全体の变形性状ほど顕著ではない。
4. 弱軸回りの接合を剛接合とピン接合で比較することにより、部材内の応力の違いを確認できた。
5. 接合部の特性により構造物の挙動が大きく影響するため、接合方法や樹種による挙動の違いを調べる必要がある。
6. 本解析では、弱軸回りの接合を剛接合とピン接合で評価したが、今後、検討が必要である。

以上より、当解析手法の有効性が確認できた。ただし、本研究は限られた条件内の検討であるため、木質構造の解析法を確立するためには、各種の仮定した要因を考慮して検討し、今後も多くのデータを蓄積し、解析の精度を高めていく必要性があろう。

付 2.5 参考文献

- 1) Hangai, Y., Kondoh, K., Oda, K., Ohya, S., : LOAD CARRYING TEST OF A WOOD

LATTICE DOME FOR EXPO 90 OSAKA, Proceedings of IASS-CACE
International Congress 1992, Vol.1, pp.648~656, 1992.7

- 2) 松野浩一、青木繁：木材のめり込み挙動を考慮した木造単層スペース
フレームの応力・変形性状に関する実験的研究、日本建築学会構造系
論文集、第 473 号、pp.117~126、1995.7
- 3) 松野浩一、青木繁：木材のめり込み挙動を考慮した木造単層スペース
フレーム構造の座屈性状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論
文集、第 546 号、pp.103~112、2001.8
- 4) 木質構造設計規準・同解説、日本建築学会、2002 改正
- 5) 菊池重昭：建築学構造シリーズ 建築木質構造、オーム社、2001
- 6) 山田昌昭：木質構造材を用いたスペースフレームの静的・動的挙動に
ついて 部材レベルにおける木質構造材の弾塑性挙動について、名城
大学修士論文、2004.2