



付 1 履歴特性の使用法と木質構造物の解析

付 1.1 はじめに

日本では、1987 年 10 月の建築基準法の改定から大断面集成材を梁、柱などの主要構造部に用いる場合、最高 13m を超える大規模な建築物を作ることが可能となった。しかしながら、その用途は非常に狭く、耐火構造や準耐火構造とされる構造物に使用することができず、そのため、大規模な建築物を作る技術がありながら、諸制限の多い木質構造物はあまり建築されることはなかった。その後、1998 年の建築基準法の改正、2000 年の建築基準法施工令の整備に伴い建築基準法が性能規定化されて、自由な木質構造の構築とその可能性が大きく広がることとなった。

関西大震災を契機に木質構造の研究が盛んになったが、木質構造物の構造特性については未だ未知な部分が多いのが現状である。特に、木質構造物にとって接合部の特性は非常に重要であり、多くの実大実験が行われている。

一方、木質構造の解析を試みる研究も行われている。木材の異方性や接合部の扱いなど、解析にとって未知な部分が多く残されており、接合部、木質パネルや壁、耐震壁など、木質構造に特有な部分が研究の中心となっている。未だ、構造全体の解析を行う手法が確立されているとは言いがたく、木質構造の解析手法の確立と解析システムの開発が急務となっている。

木質構造物の解析手法の提案は、藤谷らによって伝統木造建築物の解析法が試みられ、接合部に半剛接合をあらわす復元力特性を組み込んだばねモデルによる解析法^[1]や、安村らによる時刻歴地震応答解析による在来軸組み構法耐力壁の動的解析法^[2]などがある。

木質構造の解析の難しさは、木材自体の特殊な性能によるものであり、例えば、木材の機械的性質が異方性であることや、接合部のめり込みや割れといった木質構造独特の性質に、未知な要素が多々あるためだと考えられる。木質構造物の数値解析が本格的に行われてきたのはここ数年である。しかし、木質構造は鉄骨造などと異なり、構造材として扱う上で困難な問題がある。それらを下記にまとめると、

- 1) 木材は天然の異方性材料であり、木材内の欠点やばらつき、含水率による伸縮、虫害や不朽の恐れがある。
- 2) 接合部が半剛接合であり、接合部によって耐力や変形の大きさが決まる。また割れひび割れは解析することが難しい。

- 3) 多様に存在する樹種や木質系材料ごとに特性が異なる。製材、丸太、集成材、LVL など、それぞれに特性が異なる。

これらすべての問題を考慮して解析を行うことは非常に困難である。従って、本研究では、材料の質を比較的均一化できる集成材や LVL を用いた構造物を解析することを中心に考え、木質構造材によるスペースフレームの数値解析手法を提案し、その妥当性を検証する。

付 1.2 木質構造の種類

木質構造とは、主要構造部分（柱・梁・壁・床・階段等）を製材や木質材料で構成した構造をいう。ここで、下記に木質構造の代表的な構法を述べる。

- ・ 伝統木造構法 （軸組構法・軸組 + 壁構法）
- ・ 在来軸組構法 （軸組構法・軸組 + 壁構法）
- ・ 木質プレハブ構法（軸組構法・壁構法）
- ・ 枠組壁構法 （壁構法）
- ・ 丸太組構法 （校倉造・ログハウス・壁構法）
- ・ 集成材構法 （軸組構法・軸組 + 壁構法・ラーメン等）
- ・ ハイブリッド構法（軸組構法・軸組 + 壁構法・ラーメン・アーチ・ドーム等）

本研究では、木質構造材を用いたスペースフレームの解析を行うことが目的であり、集成材構法とハイブリッド構法に重点を置き、解析法を検討する。

付 1.2.1 木材の性質

ここで、木材の性質について述べる。まず初めに木材を構造材料として使用する上での問題点について以下に記述する。

1) 木材の異方性

- ・ 各方向によって機械的特性が異なる。
- ・ 脆性的な破壊を生じる事がある。

2) 木材のばらつき

- ・ 節・割れ・丸みといった欠点が多く、材のばらつきが大きい。

3) 木材のクリープ

- ・クリープに伴う耐力低下が生じる。

4) 木材の含水率

- ・含水率によって、乾燥収縮・湿潤膨張による寸法や機械的特性の変化が生じる。

1) 木材の異方性

木材は天然の材料であり、木材の繊維は軸方向に配列しており、年輪は円周方向に配列する構成となっている。このため、木材の物理的、機械的特性は各方向で異なる性質を持つ。これを異方性と言う。この性質は木材の成長過程によっても左右される。

2) 材のばらつき

木材は天然の材料であるため、細胞組織の配列や仮道管の配列などにより、木材の力学的・機械的特質が異なる。これに伴って、材内にばらつきが生じる事となる。また、木材の成長の過程で生じる節や、割れといった欠点要素も材のばらつきの原因となっている。

設計計算上でこのばらつきを考慮する事は困難であり、一般的には木質構造設計規準・同解説¹¹⁾で述べられている方法で強度や、弾性係数を環境条件や使用条件に合わせて計算する事で、ばらつきを考慮している。

3) 木材のクリープ

木材に荷重を加えると変形を生じるが、時間の経過とともに変形が更に増大する。この現象をクリープと言う。荷重が強度と比べてある限度内であるならば、クリープ変形は長期的に安定するが、荷重がある限度を超えると変形は一定の時間経過後、急速に増加して破壊に至るとされている。

本研究においては短期荷重における木質構造の解析であり、この現象については詳しくは述べないが、木材の場合一般的にクリープによる長期の強度低下は 50%程度であるとされている。

4) 木材の含水率

木材は大気中の湿度変化に伴って、水分は結合水となって木材の細胞に付いたり離れたりする現象が起きる。木材は全乾状態から繊維飽和点（含水率約 30%）の状態までは水分が細胞壁の非結晶領域に出入りするために、細胞壁の寸法が変化し、木材の乾燥収縮・湿潤膨張の現象が起きる。この現象によって、機械的特性にも影響を及ぼすと考えられており、強度や弾性係数に変化が生じる。

付 1.2.2 木質材料の
性質

前項で木材の性質について述べたが、ここでは、木材を用いて人工的に作られた材料について述べる。木質材料は、天然材料を人工的に構成を変える事によって木材とは違った性質を持たせた材料である。

木質材料の内、一般的に構造用として用いられる材料を以下に挙げる。

- 1) 集成材 (laminated wood, or, glulam (glued-laminated timber))
- 2) 単板積層材 「 L V L 」 (laminated veneer lumber)
- 3) 合板 (plywood)

ここでは、上記の各材料について概略説明する。

1) 集成材

集成材は、ひき板または小角材をその繊維方向を互いに並行して、厚さ、幅及び長さの方向に集成接着した一般材をいう。ひき板または小角材をラミナといい、厚さは一般的に 2~5cm である。

集成材には

造作用集成材
化粧ばり造作用集成材
化粧ばり構造用集成柱
構造用集成材

があり、それぞれ JAS によって規定されている。次に、集成材の性質と集成材断面の構成について説明する。

1-1) 集成材の性質

集成材の特徴を以下に述べる。

1. 自由な材の形状と長さを作る事ができる。
2. 湾曲した材 (アーチ) を作る事ができる。
3. 構造材では木材特有の欠点をラミナ加工時に分散し、除去する事ができ、自由な強度を持つ材料を生産可能である。
4. ラミナ加工時に十分に乾燥する事ができる。(含水率 15% 前後)
5. 欠点の除去・十分な乾燥により、ばらつきを少なくする事ができる。また、強度が木材より高くなる。

1-2) 集成材断面の構成

ここで、集成材の断面設計について説明する。集成材断面の構成は、用いるラミナの等級によって、同じ等級のみのラミナで構成された同一等級構成集成材と、異等級のラミナで構成された異等級構成集成材に分けることができる。

異等級構成集成材断面のラミナの配置を図 2-1 に示す。断面を 4 層に分け、「最外層」「外層」「中間層」「内層」にラミナをそれぞれ配置する。この時、最外層に上等級のラミナを配置し、内層ほど低等級のラミナを配置する構成となる。

2) 単板積層材 (LVL)

LVL に用いられる材料には、ロータリーレースと呼ばれる機械を用いて丸太を桂剥きした板目板状の単板が使用される。この単板の繊維方向が同じになるように積層接着して構成する。単板の厚さは 1mm 程度から 20mm 程度まで使用されているが、一般的に LVL の場合、積層数が多くなるとばらつきが小さくなると言われているため、積層数を多くする傾向がある。

ここで、LVL の特徴と性質を以下に述べる。

1. 積層数が多いため、材質のばらつきが集成材より小さく、強度も高い。
2. 集成材と同様に用途に応じて単板の構成が可能である。

3) 合板

合板は LVL と同様に桂剥きされた単板を用いて、繊維方向を一枚ごとに積層し、板材料としたものである。合板に様々な種類があるが、本研究においては構造用合板についてのみ着目する。合板の特徴について以下に述べる。

1. 大きい面の材料を作ることが出来る。
2. 板材としての強度は高いが、比較的ばらつきが大きい。



図 1-1 集成材断面の構成

木質構造の設計方法は鉄骨造の設計とは大きく異なる。本節ではその違いについて述べ、木質部材の設計方法を木質構造設計規準・同解説^[1]を用いて簡潔に述べておく。

まず、木質材と鉄骨における設計時の違いについて考察する。

付 1.2.3 木質部材の設計方法

1. 木質材は異方性を有する材料であり、弾性係数も異なる。
2. 木質材は材料強度が、樹種・成育環境・含水率・材のばらつき等により異なる。
3. 木質材はクリープによる破壊特性を持つ。
4. 木質構造には材中間に切り欠きや穴などの断面欠損があり、引張・曲げに計算上考慮が必要である。
5. 木質部材の圧縮材の座屈に対する考慮の仕方が異なる。
6. 接合部が半剛接合である。

以上のような違いがあり、部材の設計上で考慮が必要となっている。上記 1. に関しては前述している。ここでは、研究の論点から 2.、5.、6. について部材の設計に伴って述べていく。

1) 構造用材料の強度

構造用材料の強度については、基準強度特性値・基準材料強度・設計用材料強度の 3 つに分けられ、各々、次のように規定されている。

基準強度特性値 ($_0F$)	原則として標準試験体を用いた標準試験により得られた強度分布の信頼水準 75%における 5%下限許容限界値の事をいう。ただし、基準強度特性値の全部または一部について、合理的に推定が可能な場合には推定値に基づき決定しても良い。
基準材料強度 (F)	基準強度特性値 ($_0F$) に使用環境における劣化影響係数 (K_t) を乗じて決定する。
設計用材料強度 ($_dF$)	基準材料強度 (F) に寸法効果係数 (K_z) 及び、強度にかかわる含水率影響係数 (K_m) を乗じて決定する。

ここで、上記の劣化影響係数 (K_t) 及び、寸法効果係数 (K_z) と含水率影響係数 (K_m) については、次のように規定されている。各値については、木質構造設計規準・同解説^[1]参照されたい。

劣化影響係数 (K_t)	通常の使用環境に対応した促進劣化試験等の結果に基づいて決定する。
寸法効果係数 (K_z)	基準材料強度の根拠となる標準断面寸法と設計断面寸法との差異の影響を勘案して決定する。
含水率影響係数 (K_m)	基準材料強度の根拠となる標準断面寸法と設計断面寸法との差異の影響を勘案して決定する。

2) 構造用材料の許容応力度

構造用材料の許容応力度には基準許容応力度と設計用許容応力度が定義されており、以下に示す。

基準許容応力度 (${}_0f$)	基準材料強度 (F) に安全係数 (K_f) 及び、基準化係数 (K_o) を乗じて決定する。基準許容応力度が長期の許容応力度となる。
設計用許容応力度 (f)	基準許容応力度に、部材の設計条件に応じて荷重継続期間影響係数 (K_d)・寸法効果係数 (K_z)・システム係数 (K_s)・含水率影響係数 (K_m) を乗じて決定する。

ここで、上記の安全係数 (K_f)・基準化係数 (K_o)・荷重継続期間影響係数 (K_d)・システム係数 (K_s) については次のように規定されている。

各値については、木質構造設計規準・同解説^[1] を参照されたい。

安全係数 (K_f)	安全係数には通常 2/3 を用いてよい。これは、圧縮・曲げにおいては比例限度の破壊強度に対する割合、引張・せん断においては破壊強度の 2/3 を意味する。つまりは安全率 1.5 となる。
基準化係数 (K_o)	荷重継続期間影響係数の基準となる継続期間に対応させるための調整係数で、材料のクリープ破壊特性に基づき決定される。通常は 1/2 となる。
荷重継続期間影響係数 (K_d)	強度に及ぼす荷重継続期間による影響を勘案するための係数で、継続載荷実験等による材料のクリープ破壊特性に基づき決定する。 (長期で 1.10、長中期で 1.43、中短期で 1.60、短期で 2.00)
システム係数 (K_s)	荷重継続期間影響係数の基準となる継続期間に対応させるための調整係数で、材料のクリープ破壊特性に基づき決定される。通常は 1/2 となる。

3) 構造用材料の基準弾性特性値と設計用弾性係数

構造用材料の弾性係数は基準弾性特性値と設計用弾性係数に分けて定義されている。以下に基準弾性特性値と設計用弾性係数について述べる。また、ここでいう弾性係数は、通常の弾性係数とせん断弾性係数をいう。

基準弾性特性値 (E_0, G_0)	原則として、標準試験体を用いた標準試験により得られる弾性係数値分布の信頼水準 75%における 50%下限許容限界値とする。
設計用弾性係数 (E, G)	基準弾性特性値に剛性にかかわる含水率影響係数 (K_m) を乗じて決定する。ただし、主要な材で変形がきわめて重視される部材、圧縮力に対して単独で働く主要な部材に対しては、さらに下限値調整係数 (K_l) を乗じて決定する。

ここで、上記の含水率影響係数 (K_m)・下限値調整係数 (K_l) については次のように規定されている。各値については、木質構造設計規準・同解説^[1]を参照されたい。

含水率影響係数 (K_m)	含水率が剛性に及ぼす影響を勘案し、使用環境区分に応じて決定する。
下限値調整係数 (K_l)	弾性係数値分布の信頼水準 75%における 5%下限許容限界値に調整するための係数で、弾性係数値分布に基づき決定する。

ただし、せん断弾性係数は通常繊維方向の弾性係数の 1/15 とされており、繊維に直角方向の弾性係数は 1/25 とされている。

これまでに、木質構造材の強度・許容応力度・弾性係数に対する考え方について簡潔にまとめた。これらは、鉄骨の考え方とは大きく異なり、それぞれについて解析ではどのように数値設定するかが問題となる。これについては、次章以降で説明する。

4) 部材の設計

引張材・圧縮材・曲げ材の設計については基本的には鉄骨造と同様であるが、木質構造にはめり込み等の特性を持つため異なる性質がある。また、座屈に対する座屈低減係数の考え方も異なる。

5) 接合部の設計

木質構造における接合部の設計は非常に重要であり、接合方法により構造物の安全性が決まるとも言える。木質構造の接合部で最も問題となるのは、接合部の変形特性を有している事である。これは、接合部が半剛接合であると言う事であり、接合部の設計が悪いと、この部分から大変形破壊を起こす要因となる。

接合部の半剛接合となる要素にめり込みがある。めり込みは接合具（ドリフトピン・ボルトなど）が木材にめり込む現象をいう。これに伴って、接合部では複雑な応力が発生し、複雑な破壊形態が生じる原因となっている。

接合部の特性として、木質材料が靱性の小さい材料である事を補う性質を持っている。木材は大変もろい性質を持っているが、接合部を用いた構造体は非常に靱性が高くなり、破壊までのエネルギー吸収の大きな性質を持たせることができる。このため、耐震性に対して重要な要素であり、大きな役割を担っている。

近年、木質構造物には、接合部に剛性が高い鉄板などを用いたハイブリッド的な接合部が盛んに使用されるようになった。しかしながら、用いる接合具やドリフトピンなどの配置が異なるだけでもその特性は異なり、現在でも接合部の実験的研究が中心に行われている。

前章でも述べたが、木質構造物の構造解析を行う上で非常に困難な問題が多々ある。まず初めに、それらの問題点を以下に挙げる。

付 1.3 解析を行う上 での問題点と対処 法

- 1) 木材は異方性であり、繊維方向、繊維に直角方向、繊維に傾斜方向とそれぞれに物理的・機械的特性が異なる。
- 2) 集成材・LVL の断面ではラミナごとに特性が異なることがある。
- 3) 木材には節や割れなどの欠点があり、また、木質構造材にはフィンガージョイント（以下 FJ）やスカーフジョイントなどの継ぎ目が存在する。また、木材は含水率や季節などによる環境の違いによっても特性が異なる。
- 4) 同樹種・同等級の木材であっても強度・弾性係数が異なる。
- 5) 木質構造の接合部は半剛接合であり、力を受けると必ず変形する性質を持つため、ピン接合や剛接合として仮定することができない。

以上が本研究において取り上げた問題点である。これらの問題点は、スペースフレームの解析を行う上での問題点について挙げたものであり、その他の構造物の解析をするには、これらの他に多くの問題点があると考えられる。

これらの問題を本研究でどのように対処したかを述べる。

1) と 2) への対処法

断面をファイバーモデルを用いてモデル化し、各層のラミナの特性をファイバー要素に設定し、解析を行う。そのため、繊維方向の特性に注目し、引張応力・圧縮応力についてのみ考慮する。

3) への対処法

比較的欠点を取り除いた集成材や LVL に重点を置き、含水率の強度低

下や剛性低下は無いものとして考える。また、FJ などの継ぎ目も無視して解析する。

4) への対処法

同等級・同樹種の木材やラミナであるならば、強度・弾性係数が同じであると仮定する。また、設定する値については、基準許容応力度及び、基準弾性係数を用いて解析する。

5) への対処法

接合部にはばねモデルとして、各力に対するばねを並列に並べて組み込み、軸力・曲げモーメントに対する復元力特性を用いて複雑な特性に対応する。ここでは、各ばねは相互に作用しないものとして仮定する。

先にも述べたとおり、集成材や LVL は構成するラミナや単板が各層によって特性が異なる場合がある。そこで、解析では断面を縦にラミナや単板の枚数に分割し、図 1-2 に示すファイバーモデルを作成して解析を行う。

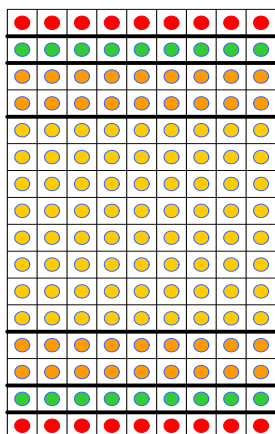


図 1-2 ファイバーモデル断面

木材は繊維方向においても、引張方向と圧縮方向とは異なる特性をっており、このため、一般的な木材の応力 - ひずみ度曲線である図 1-3 の履歴を、本解析では図 1-4 で示す履歴で仮定する。これは、木材が引張方向ではほぼ線形に破壊する脆性的な性質を有するのに対し、圧縮

付 1.3.1 ファイバーモデルと並列ばねを持つ部材モデルによるモデル化

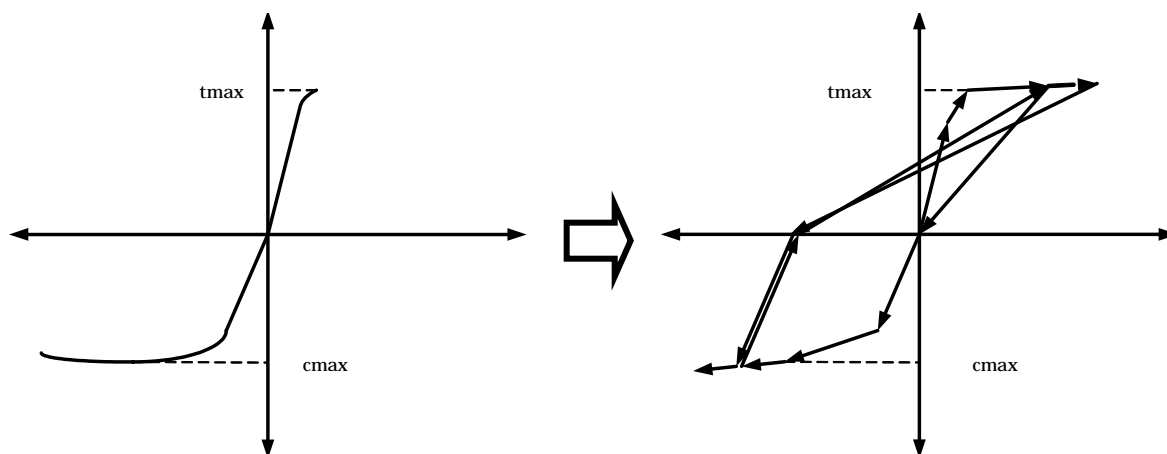


図 1-3 一般的な木材の応力 - ひずみ度関係

図 1-4 ファイバーモデルの復元力特性

方向では比較的靱性があり、非線形的に破壊する性質を持つためである。

本解析では、木質構造接合部の半剛接合を表すばねを部材モデルに組み込んで解析を行う。接合部に軸方向ばねと曲げばねを組み込んだ部材モデルを設定する。また、部材内部には 3 つのファイバー断面を組み込む事とし、図 1-5 に示す任意型の静的縮合部材モデルを作成した。

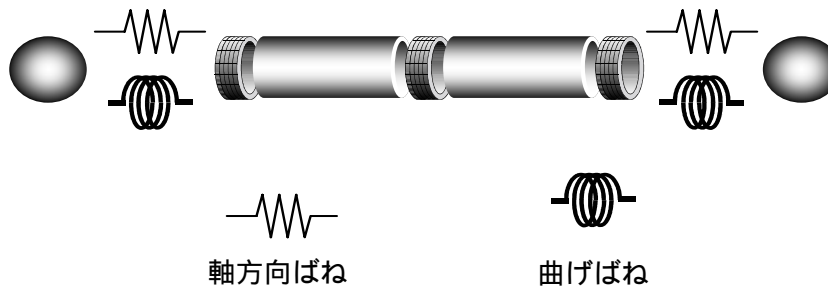


図 1-5 並列ばねを持つ部材モデル

各ばねには各力に対応する復元力特性を組み込む。しかしながら、組み込む復元力特性は、接合具やドリフトピンなどの配置によっても異なり、また、割れや接合部端部の持ち出しの長さ（短距離）によっても異なる。したがって、各実験の結果を元に復元力特性を作成して解析を行う事とする。作成した復元力特性については、各解析モデルにおいて後述する。

木質構造物を用いた構造物の解析を行う際、弾性部材に設定するパラメーターについて注意する点がある。異等級・異樹種で構成された集成材や LVL の場合、断面のヤング係数が 2 通り存在することに注意が必要である。小松ら^{[7][8]}藤田ら^[10]の研究では、軸方向力に対する弾性係数は断面を構成するラミナの平均値で良いとされているが、曲げ材に関しては平均値では得られず、本研究では、木質構造設計規準・同解説^[1]より次式によって計算することとした。

$$E_b = 0.95 \sum (E_i I_i) / I \quad (1-1)$$

上式の各値は次の通りである。

- 曲げに対する弾性係数 (E_b): 集成材・LVL の曲げヤング係数
- 各ラミナの弾性係数 (E_i): 各ラミナの規準弾性係数
- 各ラミナの断面二次モーメント (I_i)
- 全断面の断面二次モーメント (I)

付 1.3.2 弾性部材の 弾性係数について の注意点

つまり、弾性部材の弾性係数を設定する際、曲げに対する等価ヤング係数を用いると、断面積 A に軸方向力に対する弾性係数を曲げに対する弾性係数で除した値を乗じる必要がある。

$$A_e = (E_x / E_b) A \quad (1-2)$$

ここで、弾性部材の断面積： A_e 、軸方向の弾性係数： E_x 、材の曲げヤング係数： E_b である。

木質構造の接合部は半剛接合という性質から、構造物の変形を大きく左右する要素となっていることは先にも述べた。木質構造には鉄骨構造のような接合部の定式化がされておらず、現在でも、多様な接合具や接合法が開発されている。

接合部にはめり込みやすべりなど、複雑な応力や変形が発生して様々な応力伝達機構が生じる。そのため、接合部の詳細な解析には、複雑で難しい問題が多く発生し、多様な接合部に適用可能なモデルを開発することは非常に難しいと思われる。

本研究では、比較的単純でしかも使い易いモデルとして、静的縮合モデルの端部に接合部として並列ばねを配置する方法を提案する。また、そのばねの復元力特性は、実験結果を元に設定されることになる。

付 1.4 曲げばねの解析

付 1.4.1 曲げばねのモデル化

本節では、荘所ら^[18]の実験的研究を元に、接合部に曲げばねを組み込

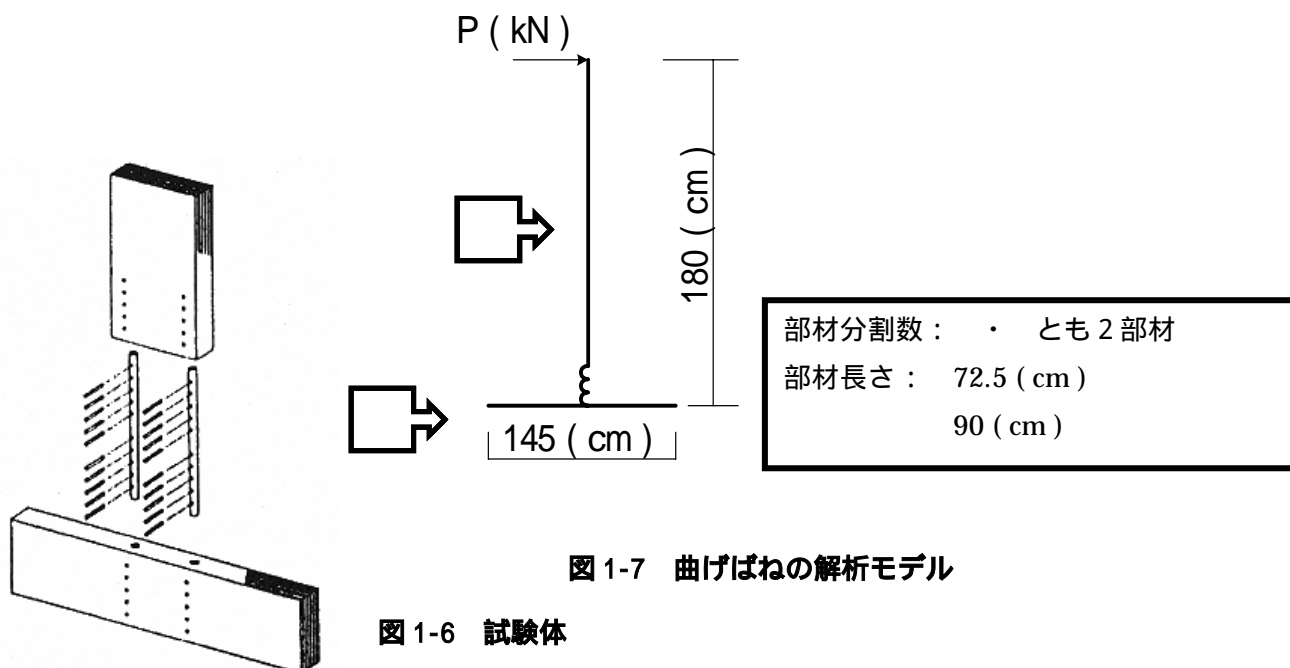


図 1-7 曲げばねの解析モデル

図 1-6 試験体

んだ部材モデルを作成して解析を行い、実験結果と比較する。接合方法は接合金物に鋼管及びドリフトピンを用いた接合部であり、実験に用いた試験体の詳細は図 1-6 に示す。

実験を元に作成した解析モデルを図 1-7 に示す。長さ 145cm の柱材（ ）と、長さ 180cm のはり材（ ）で構成されており、どちらも 2 部材に分割してモデル化を行った。使用する部材モデルは、部材には 3 ファイバーモデルを使用し、部材の接合部には曲げばねを持つ 3 ファイバーモデルを、その他は 3 ファイバー断面を使用した。全てのファイバー断面は 10×10 に分割されている。

実験結果で報告されている接合部のモーメントと回転角の関係をを用いて、復元力特性を作成する。解析に用いた復元力特性を図 1-8 に示す。実験では破壊時まで繰り返し載荷を行っており、破壊する前に剛性が負となっているが、解析上では剛性が負となる部分は考慮せずに直線的に 3 次の勾配を伸ばすこととした。復元力特性はトリリニアの骨格曲線を持つ S 字スリップモデルとし、このモデルで設定する値は、第 1 剛性 (K_1)、第 2 剛性 (K_2)、第 3 剛性 (K_3)、除荷剛性 (K_4)、スリップ剛性 (K_5)、第 1 降伏モーメント (M_1)、第 2 降伏モーメント (M_2) である。それぞれの数値は実験結果より算出され、各値は表 1-1 にまとめられる。

付 1.4.2 曲げばねの復元力特性

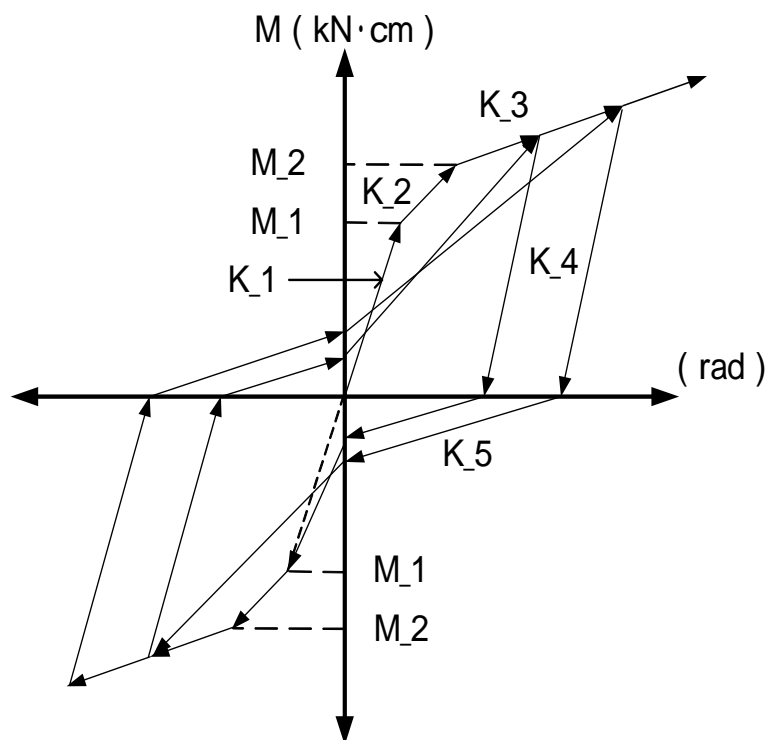


図 1-8 曲げばねの復元力特性

表 1-1 曲げばねの諸元

	実験結果
K_1 ($\text{kN}\cdot\text{cm}/$)	28301.89
K_2 ($\text{kN}\cdot\text{cm}/$)	14285.71
K_3 ($\text{kN}\cdot\text{cm}/$)	3571.43
K_4 ($\text{kN}\cdot\text{cm}/$)	41411.04
K_5 ($\text{kN}\cdot\text{cm}/$)	3571.43
M_1 ($\text{kN}\cdot\text{cm}$)	150
M_2 ($\text{kN}\cdot\text{cm}$)	240

部材断面の諸元を表 1-2 と表 1-3 にまとめる。弾性部材・単板共にこのヤング係数を用いる。また、構造材は LVL (ラミナ厚 4mm、37 層、NZ 産ラジアータパイン) である。

付 1.4.3 断面の諸元

表 1-2 部材 の諸元

部材	
断面	14 (cm) \times 36 (cm)
断面積	504 (cm^2)
強軸の断面二次モーメント	54432 (cm^4)
弱軸の断面二次モーメント	8232 (cm^4)
断面のヤング係数	882 (kN/cm^2)

表 1-3 部材 の諸元

部材	
断面	14 (cm) \times 45 (cm)
断面積	630 (cm^2)
強軸の断面二次モーメント	106312.5 (cm^4)
弱軸の断面二次モーメント	10290 (cm^4)
断面のヤング係数	882 (kN/cm^2)

付 1.4.4 曲げばね の解析結果

接合部のモーメントと回転角の関係として、図 1-9a に実験結果、図 1-9b に解析結果、図 1-9c に実験結果と解析結果を重ねて示す。

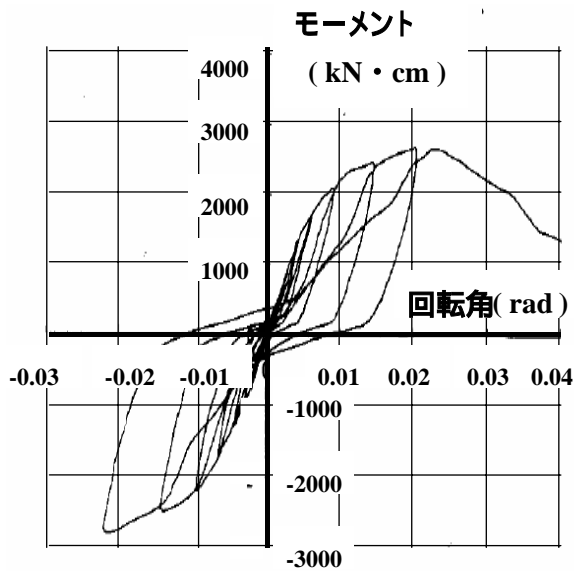


図 1-9a 実験結果のモーメント - 回転角関係

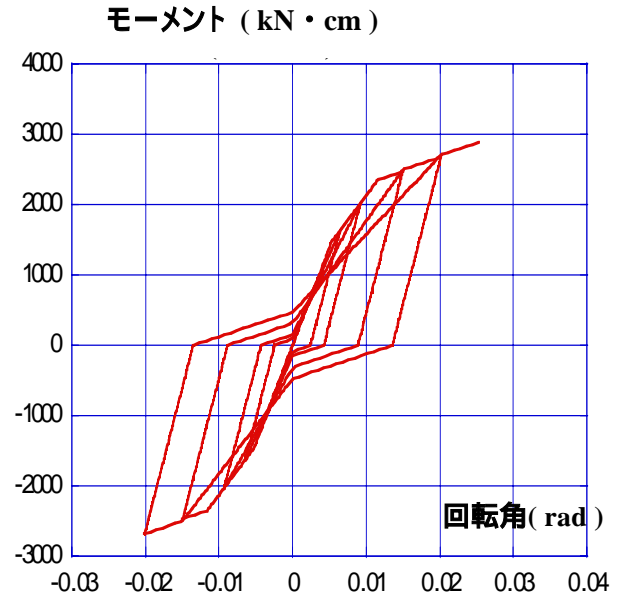


図 1-9b 解析結果のモーメント - 回転角関係

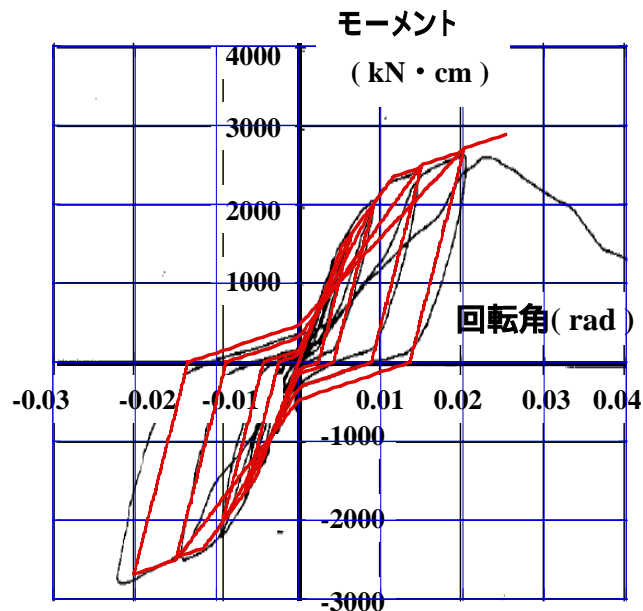


図 1-9c 実験結果と解析結果のモーメント - 回転角関係

この結果より、非常に良い一致が得られていることが分かる。なお、この実験は接合部が T 字型のモデルであり、対称の履歴となっているが、

L 字型のモデルの場合、履歴が非対称となる事があるので用いる復元力特性には、注意が必要である。

本節では、佐久間ら^[21]の実験的研究を元に、軸方向ばねを組み込んだ部材モデルを作成して解析を行い、実験結果との比較を行う。接合方法は接合金物に M20 ボルトを用いた 2 面せん断の接合部であり、実験における試験体の詳細を図 1-10 に示す。

付 1.5 軸方向ばねの解析

付 1.5.1 軸方向ばねのモデル化

実験を元に作成した解析モデルを図 1-11 に示す。長さ 30cm の材で構成されており、2 部材に分割して、部材と部材の接合部分に軸方向ばねを組み込んでモデル化を行う。使用する部材モデルは左端に軸方向ばねをもつ部材モデルと、ばねを持たない弾性部材のみの部材モデルを使用した。

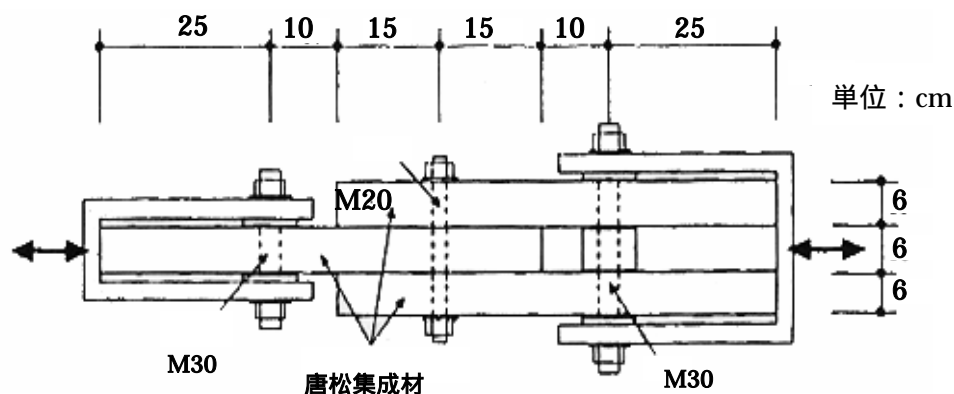
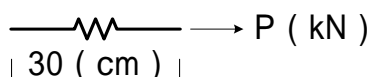


図 1-10 軸方向ばねの解析用試験体



部材分割数	: 2 部材
部材長さ	: 15 (cm)
部材モデル	:
	左端軸方向ばねを持つモデル
	弾性部材

図 1-11 軸方向ばねの解析モデル

付 1.5.2 軸方向ばねの復元力特性

実験結果で報告されている接合部の軸力と水平変位の関係を用いて、復元力特性を作成する。使用した復元力特性を図 1-12 に示す。実験では曲げばねと同じく破壊時まで繰り返し载荷を行っており、破壊する前に剛性が負となっているが、解析上では剛性が負となる部分の解析は考慮せずに直線的に 3 次の勾配を伸ばすこととした。復元力特性はトリリニアの骨格曲線を持つボックス型スリップモデルとし、このモデルで設定する値は、第 1 剛性 (K_1) 第 2 剛性 (K_2) 第 3 剛性 (K_3) 除荷剛性 (K_4) スリップ剛性 (K_5) 第四剛性 (K_6) 第 1 降伏軸力 (N_1) 第 2 降伏軸力 (N_2) 除荷時の折れ点となる軸力 (N_3) である。それぞれの数値は実験結果より算出され、各値は表 1-4 にまとめられる。

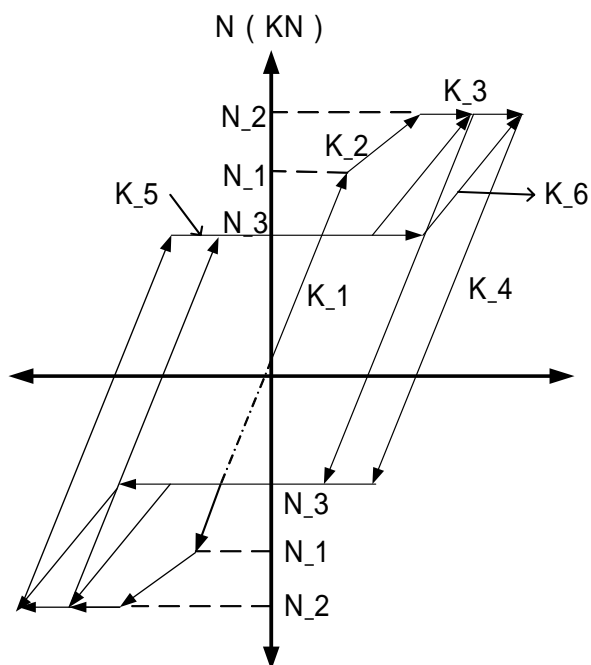


図 1-12 軸方向ばねの復元力特性

	実験結果
K_1 (kN/cm)	30.26
K_2 (kN/cm)	5.8
K_3 (kN/cm)	0.058
K_4 (kN/cm)	39.11
K_5 (kN/cm)	0.058
K_6 (kN/cm)	13.86
N_1 (kN)	3.45
N_2 (kN)	4.5
N_3 (kN)	0.73

表 1-4 軸方向ばねの諸元

付 1.5.3 断面の諸元

解析に使用した部材断面の諸元を表 1-5 にまとめる。構造材は唐松集成材、幅 6cm×せい 13cm である。

表 1-5 断面の諸元

部材	
断面	6 (cm) × 13 (cm)
断面積	78 (cm ²)
強軸の断面二次モーメント	1098.5 (cm ⁴)
弱軸の断面二次モーメント	234 (cm ⁴)
断面のヤング係数	980 (kN/cm ²)

付 1.5.4 軸方向ばねの解析結果

接合部の軸力と水平変位の関係として、図 1-13a に実験結果、図 1-13b に解析結果、図 1-13c に実験結果と解析結果を重ねて示す。

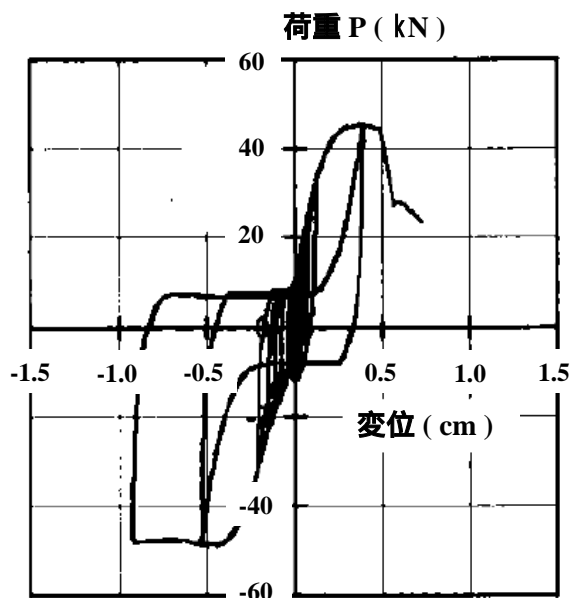


図 1-13a 実験結果の軸力 - 水平変位関係

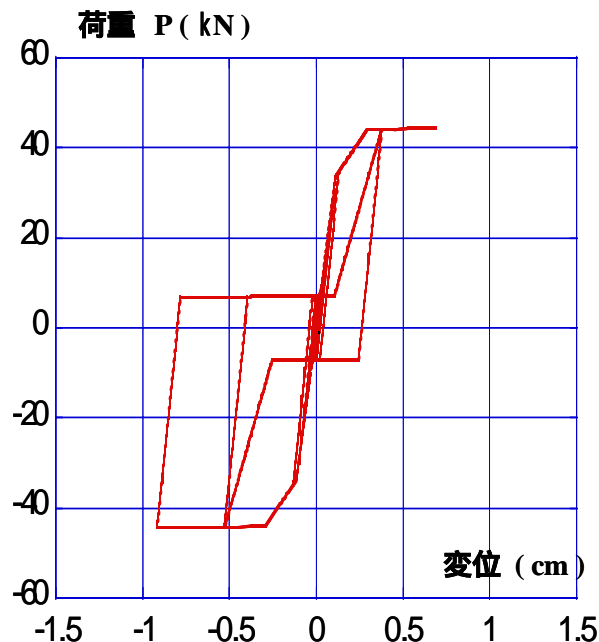


図 1-13b 解析結果の軸力 - 水平変位関係

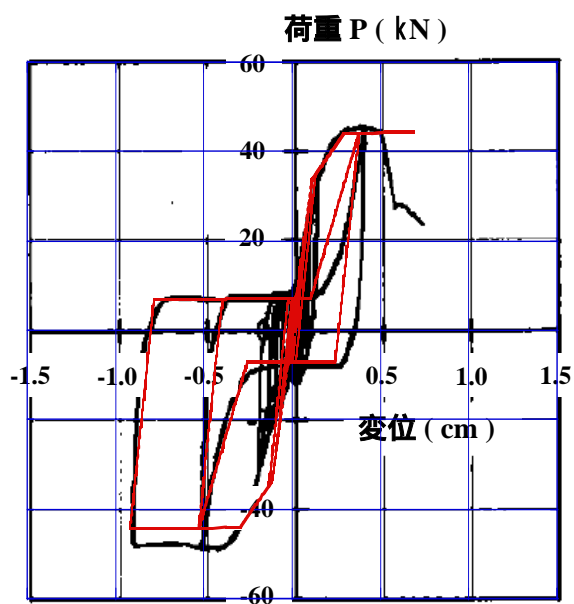


図 1-13c 実験結果と解析結果の軸力 - 水平変位関係

実験では、遊びが考慮されているが本研究では遊びが 0 の時について解析を行った。遊びがあり、初期にスリップが生じる場合は復元力特性に初期スリップを表す履歴を組み込むことによって解析が可能であると考えられる。

以上の結果より、接合部の持つ複雑な特性をこのばねモデルで表しえる事が分かる。しかし、本解析では軸力と曲げの相互間による影響は考えていない。この影響については今後とも情報を集め、研究を行っていく必要があろう。また、接合部の解析の注意点として、スリップ時に非常に低い剛性となる事があり、解析が発散しないように増分荷重を小さくする事や、増分時間を細かくするなどの注意が必要となる。

近年、木質構造の可能性が大きく広がってきている事は先にも述べた。このような時代背景の中、木質構造材を用いた大空間構造物の建築も多く見られるようになってきた。本研究では、木質構造材を用いたスペースフレームの解析を目的としているが、解析を行うには接合部の力学的挙動を知り、構造物全体の挙動に対する影響について考察する必要がある。木質構造の接合部は、めり込みやすべりにより、複雑な挙動を示すことは先に述べた。ここでは、松野、青木ら^{[22]から[39]}の研究を参考にし、ボルト接合部に軸方向ばね・曲げばねを組み込んだ部材モデルを用いて、接合部の挙動を表し、解析する方法を提案した。次章では、この接合部モデルを使用して、木質の単層ラチスドームの解析を行い、このモデルの妥当性をさらに検証する。

付 1.6 単層ラチス ドームの解析

本章では、先に説明した接合部を有する部材モデルを用いて、木質の単層ラチスドームの静的解析を行い、その結果を分析する。松野ら^[24]の

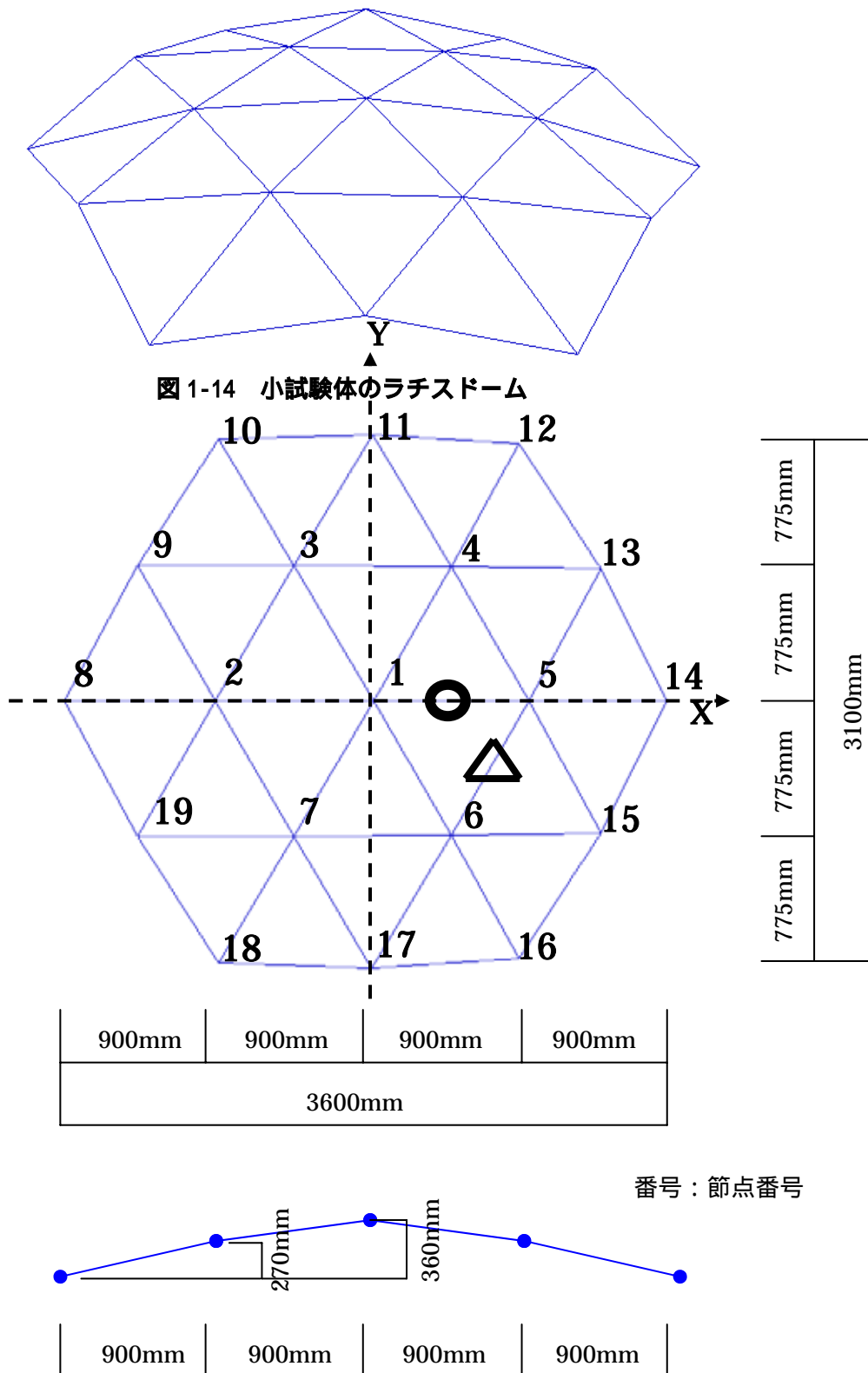


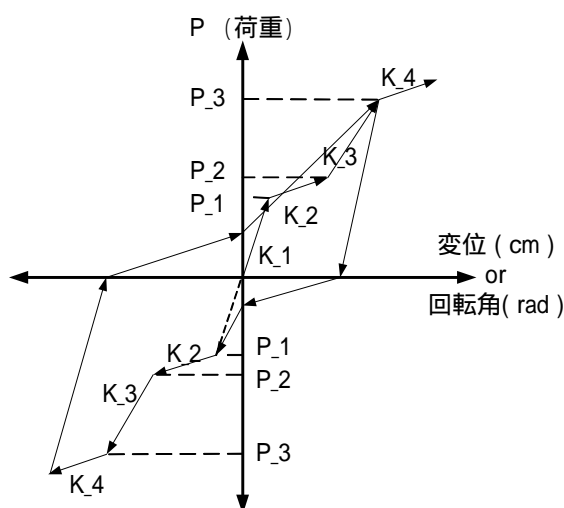
図 1-15 ラチスドームの形状（上図 平面・下図 断面）

研究を元に作成した解析モデルを図 1-14 に示す。また、ラチスドームの平面と断面を図 1-15 に示す。解析モデルは正六角形による単層のラチスドームであり、ドームの対角方向のスパンは 3.6m、対角方向に対して直角方向のスパンは 3.1m である。対角方向のスパンとライズの比は 0.1 である。荷重は実験と同様に、頂点第 1 節点の集中載荷とする。境界条件は、円周方向はピン指示で、法線方向はスライドとする。

付 1.6.1 接合部の力学的特性

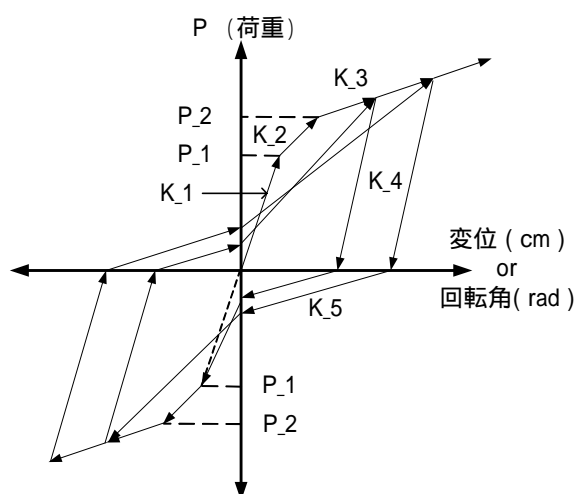
試験体の接合部は鋼板挿入型のボルト接合部であり、ボルト接合部の詳細については参考文献^[24]を参考にして頂きたい。ここでは、ボルトの本数が 2 本と 4 本の場合について解析を行う。実験結果で得られているボルト接合部の引張試験と曲げ試験の結果を元に、図 1-16、図 1-17 で示す接合部の履歴を仮定する。図 1-16 の履歴では、接合部に遊びによる初期すべりが生じる履歴である。一方、図 1-17 は同様の接合部であるが、初期すべりの影響を受けない履歴となっている。

ボルト 2 本の場合、軸方向ばね、曲げばね共に図 1-16 の復元力特性を使用し、ボルト 4 本の場合、軸方向ばねには図 1-16、曲げばねには図 1-17 を使用する。ボルト 2 本の場合、実験結果より得られた接合部の諸元を表 1-6 に示す。また、ボルト 4 本の場合は、実験結果より得られた接合部の諸元を表 1-7 に示す。



ボルト 2 本の軸方向ばね
ボルト 2 本の曲げばね
ボルト 4 本の軸方向ばね

図 1-16 初期すべりを持つ履歴



ボルト 4 本の曲げばね

図 1-17 初期すべりを持たない履歴

表 1-6 ボルト 2 本の場合による接合部の諸元

ボルト2本の場合による接合部の諸元		
軸力に対する 力学的特性	P1: 初期剛性の折れ点 (kN)	10.4
	P2: すべり剛性の折れ点 (kN)	15.9
	P3: めり込み剛性の折れ点 (kN)	47
	K 1: 初期剛性 (kN/cm)	1,040
	K 2: すべり剛性 (kN/cm)	80
	K 3: めり込み剛性 (kN/cm)	360
	K 4: 降伏域剛性 (kN/cm)	160
曲げモーメント に対する力学 的特性	P1: 初期剛性の折れ点 (kN・cm)	23.6
	P2: すべり剛性の折れ点 (kN・cm)	41.1
	P3: めり込み剛性の折れ点 (kN・cm)	122.5
	K 1: 初期剛性 (kN・cm/rad)	4,800
	K 2: すべり剛性 (kN・cm/rad)	870
	K 3: めり込み剛性 (kN・cm/rad)	1,450
	K 4: 降伏域剛性 (kN・cm/rad)	310

表 1-7 ボルト 4 本の場合による接合部の諸元

ボルト4本の場合による接合部の諸元		
軸力に対する 力学的特性	P1: 初期剛性の折れ点 (kN)	19.1
	P2: すべり剛性の折れ点 (kN)	37.4
	P3: めり込み剛性の折れ点 (kN)	107.8
	K 1: 初期剛性 (kN/cm)	1,910
	K 2: すべり剛性 (kN/cm)	250
	K 3: めり込み剛性 (kN/cm)	680
	K 4: 降伏域剛性 (kN/cm)	110
曲げモーメント に対する力学 的特性	P1: 初期剛性の折れ点 (kN・cm)	61.7
	P2: めり込み剛性の折れ点 (kN・cm)	208.3
	K 1: 初期剛性 (kN・cm/rad)	12,350
	K 2: めり込み剛性 (kN・cm/rad)	8,400
	K 3: 降伏域剛性 (kN・cm/rad)	480
	K 4: 除荷剛性 (kN・cm/rad)	12,350
	K 5: すべり剛性 (kN・cm/rad)	480

付 1.6.2 部材モデル

ラチスの部材には、先に説明した図 1-5 の両端に軸方向ばねと、曲げばねを並列に組み込んだ部材モデルを使用する。各ばねの復元力特性は前節でした通りであり、接合部のめり込み挙動やすべりを表す。両端の接合部に用いられる金物は、集成材と比較して非常に高い剛性を有しており、その部分を剛域として考慮する。接合部の曲げばねは強軸曲げ方向のみ考慮し、弱軸曲げとねじりについては剛接を仮定する。さらに、

部材内部には両端と中央部にファイバー断面を組み込むことで部材の弾塑性挙動についても考慮する。

上記の部材モデルの説明をまとめ、図 1-5 を用いて部材モデルの分割について説明する。剛域は接合部の金物部分を表し、並列に並べたばねモデルはボルト接合部を表す。また、集成材母材はファイバー断面を両端と中央に配置したモデルとする。剛域は、金物の部分を表しているが、明確な長さの規定となるものがない。ここでは、接合部の回転中心までを剛域長さの基本とし、ボルト 2 本の接合部では 17cm、ボルト 4 本の接合部では 20cm を基本としている。

付 1.6.3 部材の諸元

実験で用いられているラチス部材の材料は米松集成材であり、幅 3cm × せい 10cm の材料を 2 枚用い、接合部では 9mm の鋼板を挟む構成となっている。解析では、この 2 枚の材を 1 つの幅 6cm × せい 10cm の部材として解析する。この部材の諸元を表 1-8 に示す。使用米松の短期許容応力度は、松野ら^[24]の実験結果より算出した。その実験結果とは、単調載荷による圧縮試験で求めた米松の応力とひずみの関係である。本解析では、引張方向についても同じ強度を持つものと仮定する。部材の断面は、ファイバーモデルとして幅 4 × 縦 5 に分割する。

表 1-8 部材の諸元

部材の諸元	
断面	6 (cm) × 10 (cm)
断面積	60 (cm ²)
強軸の断面二次モーメント	864 (cm ⁴)
弱軸の断面二次モーメント	180 (cm ⁴)
断面のヤング係数	1,550 (kN/cm ²)
繊維方向の基準許容応力度	2.646 (kN/cm ²)

本節では、先に説明したボルト 2 本の接合によるラチスドームの静的弾塑性解析を行い、その結果を分析する。ドーム頂点に局部座屈(以後、節点座屈と呼ぶ)が生じる恐れがあるため、荷重を実験結果で得られている節点座屈荷重 22.1kN まで、荷重増分法を用いて単調載荷として解析を行い、その後は節点 1 を下方に強制的に変位させる変位増分法により解析を行う。解析は、実験結果の最大変位まで行うものとする。

解析結果を分析するために、荷重と鉛直変位の関係を実験結果と比較

付 1.6.4 ボルト 2 本によって接合されたラチスドームの解析結果

する。また、実験で報告されている図 1-15 の と で示した部材の荷重と軸力についても、同様に比較する。さらに、接合部の履歴による接合部の状態も調査する。

最初に、図 1-18 には、荷重と中央第 1 節点における鉛直変位の関係を示す。同図、縦軸は荷重であり、横軸は節点鉛直変位を示す。

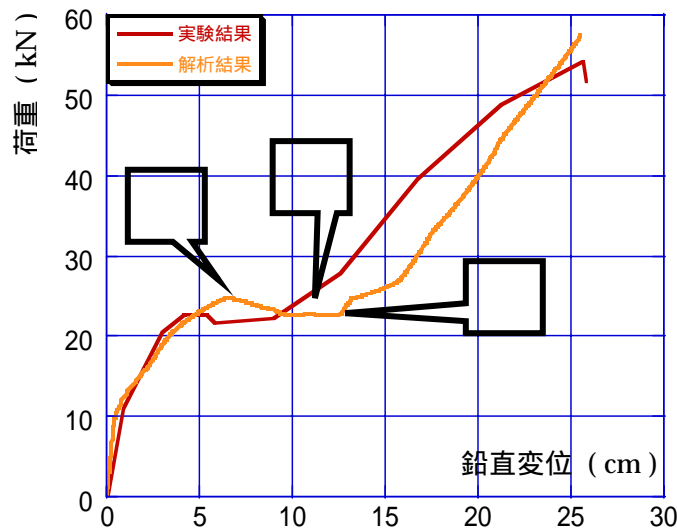


図 1-18 荷重と鉛直変位の関係

図から理解できるように、荷重が増加するとドーム頂部が座屈し、下方に沈み込む現象が生じる。まず、座屈前の応力状態を見てみよう。荷重は、稜線方向部材の圧縮軸力となり、境界節点まで伝達されることになる。その際、2つのリングは引張状態となり、稜線のアーチが外へ開くのを防止している。ドーム頂点が座屈し、下方に沈み込むと内側リング内部の稜線部材は、徐々に圧縮から引張状態に変化し、最終的には張り状態となる。ドーム頂点の座屈によって全体が不安定な状態になった後、再度、荷重が増加し、ドーム全体の剛性が硬化する。このメカニズムには、内側のリングが大きな役割を果たしている。応力発生当初は、稜線アーチの広がりを防ぐためにテンションリングとなっているが、節点座屈後は、頂点の沈み込みを防ぐために圧縮リングとなっている。この働きによって、ドーム全体に鉛直方向の剛性が生じたものと思われる。

図 1-18 より、節点座屈が起きる荷重が実験結果では 22.1kN に対して、解析では約 24.68kN と約 10%程実験結果より高い結果が得られている。また、座屈後の硬化までの鉛直変位は、実験結果で 9cm 程度であるが、解析では約 13cm となり、30%大きな変位が得られている。ここで、節点座屈時を とし、節点座屈後全体剛性が硬化し始める点を 、その中間

を と置き、これらの点で座屈付近の現象を分析する。

まず、後者に挙げた硬化するまでの変位について考察する。先に示したように節点座屈以降、部材に働く軸力が反転する現象が起きる。接合部の軸力の状態を知るために、軸力と軸方向変位の関係を図 1-19 と図 1-20 に示す。図 1-19 は部材（稜線方向の部材）の状態であり、図 1-20 は部材（内部リングの部材）の状態を表す。

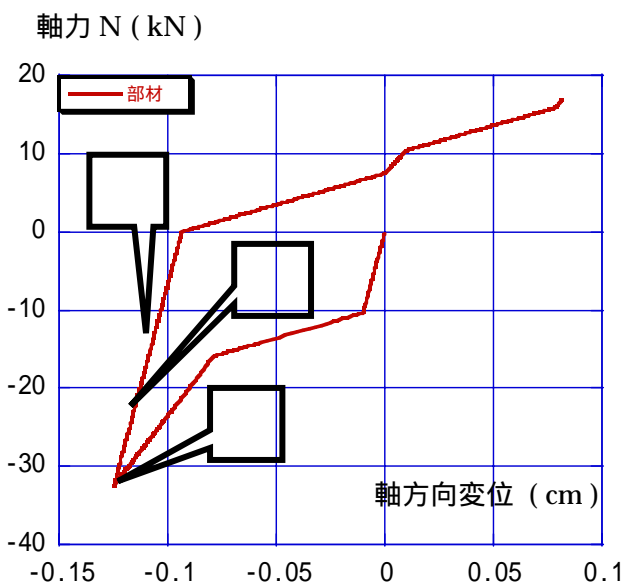


図 1-19 軸力と軸方向変位の関係 部材

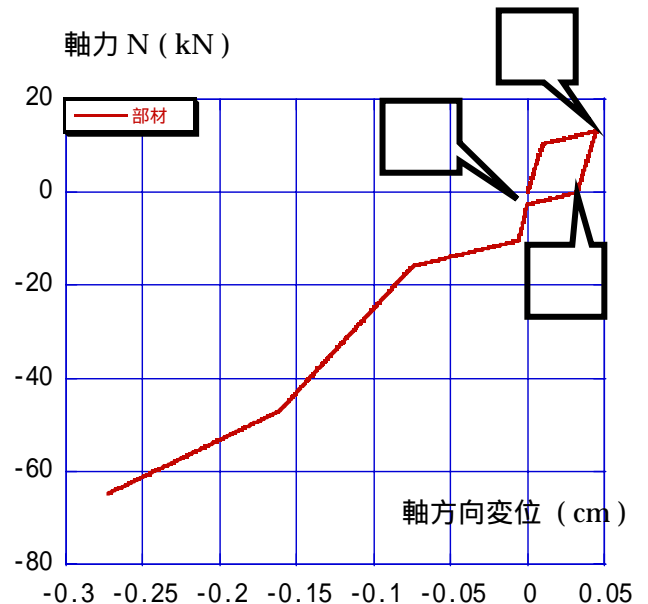


図 1-20 軸力と軸方向変位の関係 部材

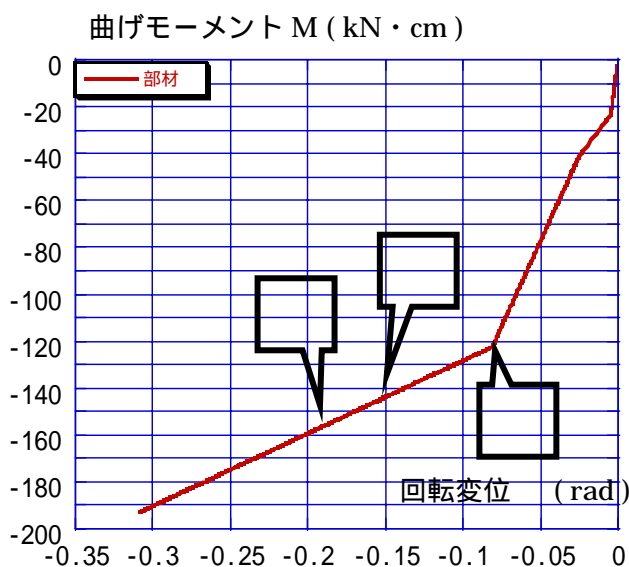


図 1-21 部材第 1 節点の曲げモーメント
と回転変位の関係

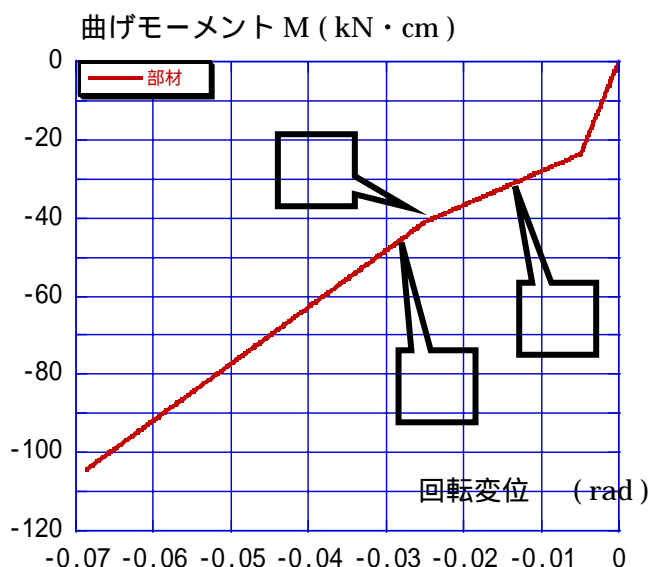


図 1-22 部材第 5 節点の曲げモーメント
と回転変位の関係

図 1-19 と図 1-20 の図中に示す から は節点座屈が起きてから剛性硬化が発生するまでの状態を表す。稜線方向の部材は、圧縮状態から座屈後、急激に軸力が抜け、引張状態に変化している様子が図 1-19 にみられる。また、同時に、リング方向の部材接合部に から ですべりが発生している様子も図 1-20 に見られる。

軸方向ばねの挙動と同様に 両部材の曲げばねの挙動について分析する。図 1-22 に 部材における中央第 1 節点接合部の曲げばねの曲げモーメントと回転変位の関係を示し、図 1-23 に 部材における接合部の曲げモーメントと回転変位の関係を示す。図 1-22 と図 2-23 より、部材中央第一節点の曲げばねの降伏が引き金となって節点が座屈している事が確認できる。節点座屈以降は接合部の曲げ剛性は全体の挙動に大きな影響は与えていないことも図より理解できる。

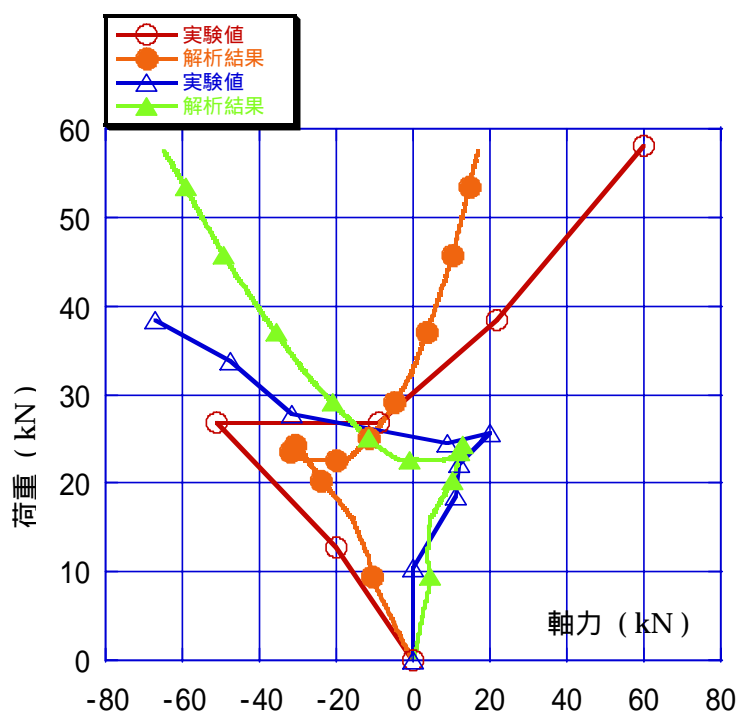


図 1-23 荷重と軸力の関係

次に、部材に働く軸力について実験結果と比較する。図 1-24 に縦軸に荷重を、横軸に軸力とした部材 と部材 における荷重と軸力の関係を示す。この結果から、部材に働く軸力が同じ荷重状態において、解析結果の方が低く発生している事が分かる。これは、実験では第 1 節点における接合部の曲げ破壊が図 1-18 において で発生しており、軸力負担が大きくなっている事が考えられる。なお、部材内部におけるファイバー断面に塑性は見られず、部材の塑性化現象は生じていない。

付 1.6.5 ボルト 4 本によって接合されたラチスドームの解析結果

本節では、ボルト 4 本によって接合しているラチスドームの静的弾塑性解析を行い、その結果を分析する。実験では、節点座屈が生じる事なく中央第 1 節点において曲げ破壊が生じている。そのため、曲げ破壊直前まで荷重増分法を用い、その後は、曲げ破壊荷重近傍からは変位増分法に切り替えて解析する。

ここでは、解析結果を分析するために、第 1 節点の荷重と鉛直変位の関係を実験結果と比較する。報告されている図 1-15 の と で示した部材の荷重と軸力の関係についても比較する。また、接合部の履歴による接合部の状態を検証する。

最初に、荷重と中央第 1 節点における鉛直変位の関係を図 1-25 に示す。

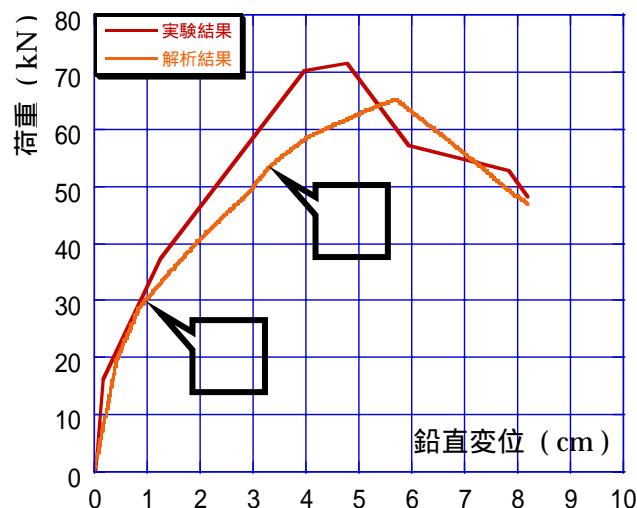


図 1-24 荷重と鉛直変位の関係

図より、初期の剛性はほぼ一致しているが、解析結果の方が非線形性が大きく出現し、荷重の増加と共に、実験値より剛性が低下している。また、最大耐力は、実験結果で約 71kN であるのに対して、解析結果は約 65kN と 9%程度解析結果の方が低く得られている。さらに最大耐力時の変位は実験結果で約 4.8cm であるのに対して解析結果では約 5.6cm と約 15%変位が大きくなっている。

ここで、図 1-24 で剛性が大きく低下し始めている 2 点に注目する。この 2 点を、各々、 とする。剛性低下の要因を検討するため、接合部の応力状態を分析する。図 1-25、26 には、部材 の 1 節点に接合する接合部の軸力と曲げモーメントの状態を、同様に、図 1-28、29 に部

材 の 5 節点に接合する接合部の軸力と曲げモーメントの状態を示す。

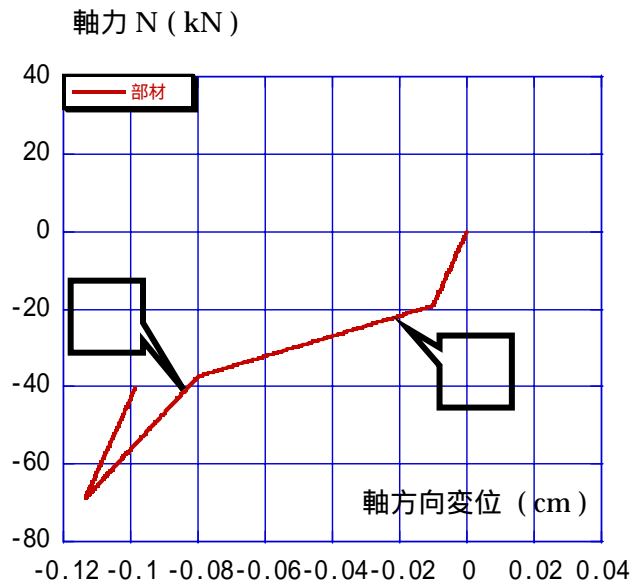


図 1-25 軸力と軸方向変位の関係 部材

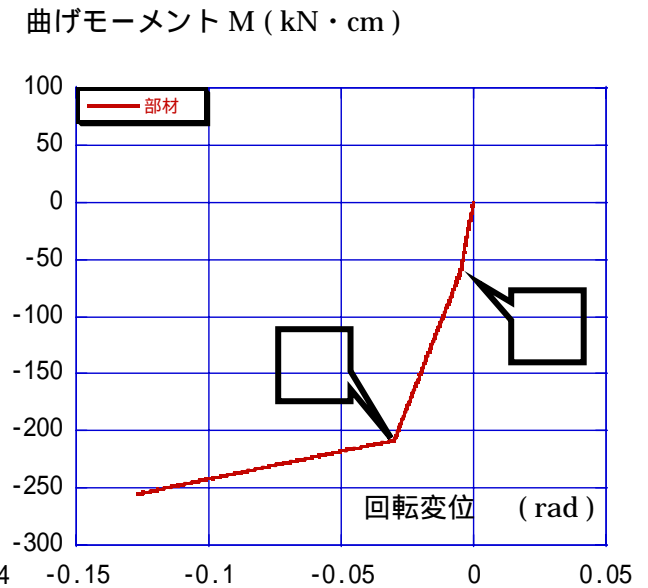


図 1-26 部材第 1 節点の曲げモーメント
と回転変位の関係

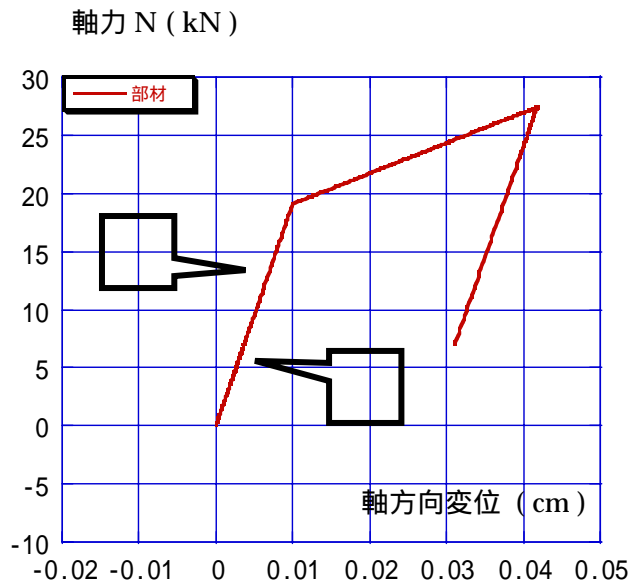


図 1-27 軸力と軸方向変位の関係 部材

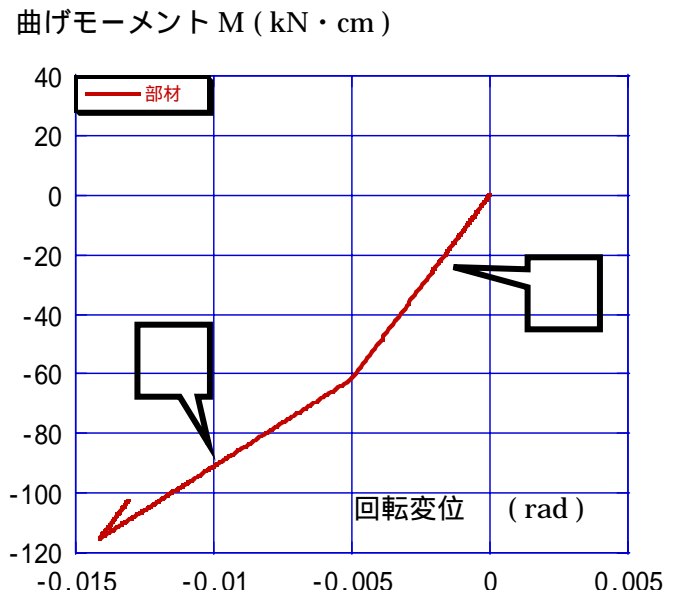


図 1-28 部材第 5 節点の曲げモーメント
と回転変位の関係

これらの結果より、中央部第 1 節点の鉛直変位に対する剛性は、第 1 節点に接合する稜線部材の曲げ剛性に大きく依存していることが分かる。この試験体のように、接合部の曲げ剛性が高くなると節点座屈を起こさず、曲げ破壊によって耐力を失うことになる。解析結果が実験結果

より剛性が低くなる要因、また、最大耐力が低くなる要因は、実験値に比較して、接合部曲げ剛性の評価が低かったものと思われる。

ボルト接合部の評価では、松野ら^[24]は、Hankinson式が実験値を良く評価すると言っている。そこで、このHankinson式より得られた曲げに対するめり込み剛性 $8,400\text{kN} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ と、めり込み剛性の折れ点である $271.7\text{kN} \cdot \text{cm} / \text{rad}$ を用いて、解析を行うことにする。得られた中央第 1 節点の荷重と鉛直変位の関係を図 1-29 に示す。

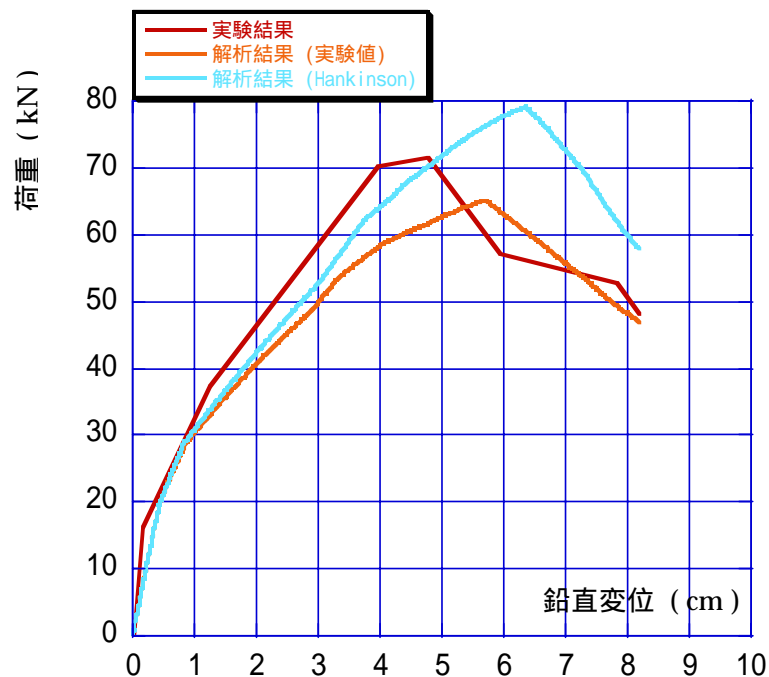


図 1-29 荷重と鉛直変位の関係

この結果、Hankinson 式により得られた接合部の曲げ剛性によって、構造体の剛性は近い結果が得られているが、一方、最大耐力が高くなっている。これは、Hankinson 式で得られた接合部のめり込み剛性が影響しており、求められた値が過剰に評価されている事を示している。

次に、ボルト 2 本の場合と同様に、部材 と部材 に発生する軸力について実験結果と比較する。実験値を用いて解析した場合の荷重と軸力の関係を図 1-30 に示し、図 1-31 に Hankinson 式による値を用いて解析した場合の荷重と軸力の関係を示す。

実験結果と解析の剛性が近似してる範囲である荷重 40kN の辺りまでは、応力状態は実験結果と良い一致を示している。それ以降、実験結果と多少の差異はあるが、剛性が低くなるにつれて軸力による負担が大きくなっていく挙動、あるいは、ドーム頂点の曲げ破壊以降、軸力は反対

方向に働く挙動も追跡できている。

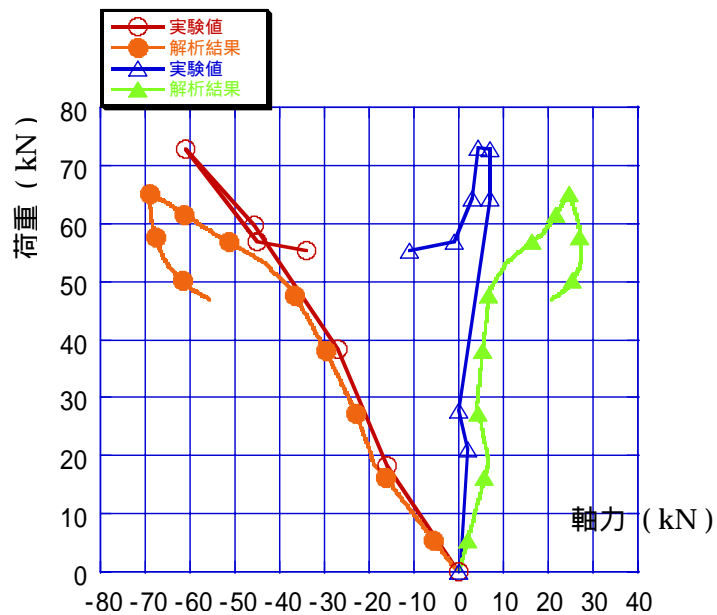


図 1-30 荷重と軸力の関係

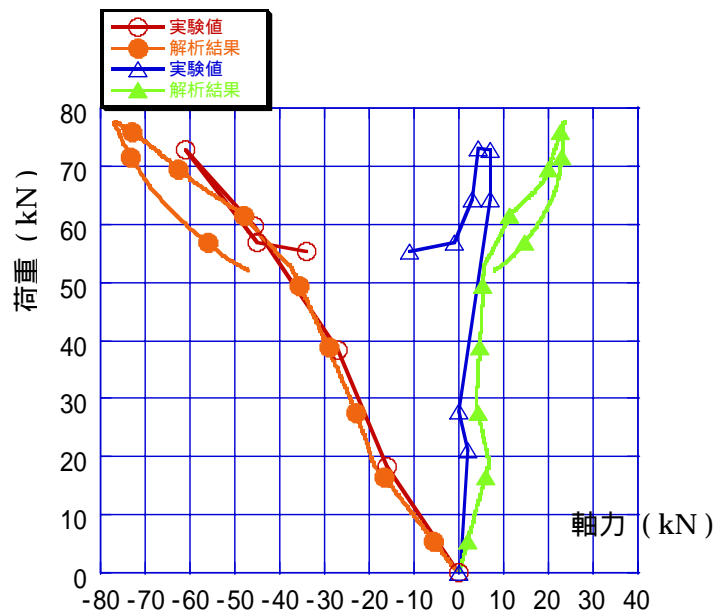


図 1-31 荷重と軸力の関係

これまでの結果より、本研究で作成した並列ばねを持つ部材モデルを使用することによって、木質構造材を用いたスペースフレームの解析が可能であることが確認できた。接合部の特性によって構造物の挙動が左

付 1.6.6 接合部の
特性による挙動の
違い

右され、節点座屈が生じる場合と、接合部の曲げ破壊が生じる場合に分けられる。接合部の曲げ剛性が比較的高い場合、節点座屈せずに曲げ破壊が生じており、逆に、曲げ剛性が低いと、節点座屈が生じて破壊に至る。

付 1.7 まとめ

本論文では、木質構造の構造解析を行う方法を提案し、ファイバーモデルを用いた木質構造部材の静的解析、ばねモデルを用いた接合部の静的解析を行ってモデルの妥当性を検証した。更に、この解析法を用いて幾何学的非線形性を考慮した木質構造単層ラチスドームの静的解析を行い、その挙動を分析する事によって、モデルの妥当性について検証を行った。以下に木質構造部材による単層ラチスドームの解析について結論をまとめる。

1. 提案した部材モデルは十分に木質構造物の解析に適用可能である。
2. 接合部の軸方向ばね、曲げばねは、接合部に生じるめり込み挙動やすべりを表すことが可能である。
3. 座屈挙動はドーム中央の接合部曲げ剛性が大きく関係し、剛性が高い場合は、頂点部分が接合部の曲げによって破壊し、全体崩壊を起こす。
4. 逆に、接合部曲げ剛性が小さい場合は、頂点部が沈み込む節点座屈を起こす。

今後、接合部の特性が構造物の挙動に大きく影響するため、接合方法によつての挙動をまとめる必要がある。また、本解析では、中央節点の集中荷重における挙動の分析だったが、荷重条件を変えた挙動について、分析が必要である。

付 1.8 参考文献

- [1]木質構造設計規準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法 -、日本建築学会、2003.10
- [2]木質構造限界状態設計指針(案)・同解説、日本建築学会、2003.10
- [3]吉田篤生、「ファイバーモデルと塑性論アナロジーモデルによる応答の違いについて」、名城大学大学院修士論文、2002.1
- [4]藤谷義信、松本慎也、「木構造の解析法開発の試み」、日本建築学会大会(北陸)研究協議会資料、木構造と木造文化の再構築を目指して、日本建築学会、2002.8
- [5]平井卓郎、沢田稔、「側材に鋼板を用いたボルト接合部のせん断力」、木材学会誌、28(11)、pp685-694、1982

- [6]小松幸平、「集成材骨組構造の解析(第2報)」, 木材学会誌、35(3)、pp201~211、1989
- [7]森卓郎、小松幸平、野田康信、原田浩司、渡辺公昭、「異樹種集成材の引張強度特性に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 構造 C-1、pp17-18、2002.8
- [8] 森卓郎、小松幸平、野田康信、鄭基浩、飯島泰男、渡辺公昭、藤田和彦「異樹種集成材の引張強度特性に関する実験的研究 その2」、日本木材学会大会研究発表要旨集(福岡) Ib240945、2003.3
- [9]鄭基浩、森卓郎、野田康信、小松幸平、渡辺公昭、「集成材の引張強度特性に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 構造 C-1、pp-18、2002.9
- [10]藤田和彦、五島千津子、小松幸平、森卓郎、飯島泰男、渡辺公昭、「異樹種集成材の圧縮強度に関する実験的研究」, 日本木材学会大会研究発表要旨集(福岡) Ib240930、2003.3
- [11]五十田博、笹川明、森卓郎、「ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 構造 C-1、pp3-4、1997.9
- [12]矢島賢一、橋爪丈夫、笹川明、森卓郎、武田孝志、神戸渡、斉藤潔、「信州産カラマツ大断面集成材の曲げ強度特性に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 構造 C-1、pp499-500、2003.9
- [13]渡辺公昭、田中健太郎、福留重人、小松幸平、森卓郎、飯島泰男、藤田和彦、「異樹種集成材の曲げ強度に関する実験的研究」, 日本木材学会大会研究発表要旨集(福岡) Ib241000、2003.3
- [14]五十田博、森卓郎、笹川明、「曲げを受ける集成材はりの抵抗形態と破壊過程の解明」, 日本建築学会構造系論文集、第529号、pp13~20、2000.3
- [15]森卓郎、五十田博、笹川明、「破壊過程を再現した集成材曲げ強度推定モデルの提案と実験による検証」, 日本建築学会構造系論文集、第541号、pp51~57、2001.3
- [16]大野義昭、埴島裕二、荘所直哉、乃込寛之、藤谷義信、大橋好光、「ドリフトピンを用いた木質ラーメン構造の柱-梁接合部に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集、第567号、pp85~92、2003.5
- [17]小野徹朗、安藤健、井戸田秀樹、加藤征宏、「ドリフトピンを用いた集成材接合部の剛性および終局耐力に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集、第536号、pp101~107、2000.10
- [18]荘所直哉、埴島裕二、大野義昭、藤谷義信、大橋好光、「木質構造の門型ラーメン接合部の開発 その1.接合部曲げ実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 構造 C-1、pp377-378、2000.9
- [19]荘所直哉、埴島裕二、乃込寛之、大野義昭、藤谷義信、大橋好光、「木質ラー

- ン構造の接合部に関する研究 その 2. 曲げ実験」日本建築学会大会学術講演梗概集（関東） 構造 C-1、pp125-126、2001.9
- [20] 前田典昭、「ドリフトピン接合の性能」、林産試験場報、第 4 巻、第 2 号、pp11~18
- [21] 佐久間博文、槌本敬太、「初期「あそび」を考慮した集成材ボルト接合部の剛性設計手法の開発 その 1. 荷重 - 変形関係に与える初期「あそび」の影響」、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北） 構造 C-1、pp373-374、2000.9
- [22] 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、pp117~126、1995.7
- [23] 松野浩一、青木繁、鈴木英次、「木質構造におけるボルト接合部の力学的評価方法に関する研究（その 1；荷重角度が集成材のめり込み性状に与える影響）」、日本建築学会構造系論文集、第 480 号、pp123~132、1996.2
- [24] 松野浩一、青木繁、「木材のめり込み性状を考慮した木質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、pp103~112、2001.8
- [25] 青木繁、藤井賢一、須藤茂、荻野雅士、「大スパン木構造に関する研究（その 1）～単層トラスドームの実験的解析～」、日本建築学会学術講演梗概集（中国） 構造、pp1261~1262、1990.10
- [26] 青木繁、藤井賢一、須藤茂、坂尻裕一、「大スパン木構造に関する研究（その 2）～単層トラスドームの非線形解析～」、日本建築学会学術講演梗概集（中国） 構造、pp1263~1264、1990.10
- [27] 青木繁、藤井賢一、須藤茂、三須安、「大スパン木構造に関する研究（その 3）～単層トラスドームの接合部ゆるみの影響～」、日本建築学会学術講演梗概集（中国） 構造、pp1265~1266、1990.10
- [28] 青木繁、藤井賢一、鈴木英次、松野浩一、三須安、「大スパン木構造に関する研究（その 4）～曲げ抵抗をもつ接合部ゆるみの影響～」、日本建築学会学術講演梗概集（東北） 構造、pp1239~1240、1991.9
- [29] 青木繁、藤井賢一、鈴木英次、松野浩一、三須安、「大スパン木構造に関する研究（その 5）～木造 H.P. シェルの実験的研究～」、日本建築学会学術講演梗概集（東北） 構造、pp1241~1242、1991.9
- [30] 青木繁、松野浩一、三須安、藤田実、「大スパン木構造に関する研究（その 6）～木造 H.P. シェルの解析～」、日本建築学会学術講演梗概集（北陸） 構造、pp1775~1776、1992.8
- [31] 青木繁、松野浩一、三須安、内山雅也、「大スパン木構造に関する研究（その 7）～数値解析結果の検討～」、日本建築学会学術講演梗概集（北陸） 構造、pp1777~1778、1992.8

- [32]松野浩一、内山雅也、岡村和臣、青木繁、「大スパン木構造に関する研究（その 8）～裁断球殻型スペースフレームに関する実験的考察～」、日本建築学会学術講演梗概集（関東） 構造 、pp1511~1512、1993.9
- [33]内山雅也、岡村和臣、松野浩一、青木繁、「大スパン木構造に関する研究（その 9）～裁断球殻型スペースフレームに関する理論的考察～」、日本建築学会学術講演梗概集（関東） 構造 、pp1513~1514、1993.9
- [34]松野浩一、青木繁、内山雅也、小澤浩之、「大スパン木構造に関する研究（その 10：木材のめり込み剛性とボルト接合部の軸方向・曲げ剛性の関係）」、日本建築学会学術講演梗概集（東海） 構造 、pp1871~1872、1994.9
- [35]松野浩一、青木繁、内山雅也、石神正康、「大スパン木構造に関する研究（その 11：単層ラチスドームの座屈挙動に関する実験的研究）」、日本建築学会学術講演梗概集（東海） 構造 、pp1873~1874、1994.9
- [36]松野浩一、青木繁、内山雅也、香取修治、「大スパン木構造に関する研究（その 12：単層ラチスドームの座屈挙動に関する解析的研究）」、日本建築学会学術講演梗概集（東海） 構造 、pp1875~1876、1994.9
- [37]遠藤透、青木繁、松野浩一、小澤浩之、「大スパン木構造に関する研究（その 13：木材めり込み性状評価式の検証）」、日本建築学会学術講演梗概集（近畿） 構造 、pp63~64、1996.9
- [38]小沢浩之、青木繁、松野浩一、「大スパン木構造に関する研究（その 14：木材めり込み性状を考慮した木造単層ラチスドームの座屈荷重）」、日本建築学会学術講演梗概集（近畿） 構造 、pp65~66、1996.9
- [39]石神正康、青木繁、松野浩一、「大スパン木構造に関する研究（その 15：ボルト接合部の性状と木構造単層ラチスドームの振動性状）」、日本建築学会学術講演梗概集（近畿） 構造 、pp67~68、1996.9
- [40]内山雅也、藤田実、松野浩一、青木繁、「木構造アーチに関する実験的研究（その 1）曲げと圧縮力を同時に伝達するボルト接合部の基礎的実験」、日本建築学会学術講演梗概集（関東） 構造 、pp1445~1446、1993.9
- [41]藤田実、内山雅也、松野浩一、青木繁、「木構造アーチに関する実験的研究（その 2）接合部を有するアーチの実験的研究」、日本建築学会学術講演梗概集（関東） 構造 、pp1445~1446、1993.9
- [42]遠藤透、青木繁、松野浩一、「大スパン木質構造の振動性状に関する研究～鉛直地振動を受ける木造単層ラチスドームの応答性状～」、日本建築学会学術講演梗概集（関東） 構造 、pp947~948、1997.9

ここでは、この論文で使用した任意型の静的縮合部材モデルを設定す

付 1.9 任意型静的
縮合モデル用ファ
イル

るファイルを記す。木質構造物の解析を行う場合、このファイルの内容を参考にされたい。

```

1
木質構造部材
1      51
両端接合ばね + 3ファイバーモデル + 2 弾性部材
51      7
5      2      1      2      1      2      5
0      0.03      0.455      0.03      0.455      0.03      0
-1      -2      -3      -4      -5      -6
1      12      13      14      1      16
1      1      1      1      1      1
1      1      1      1      1      1
1      1      1      1      1      1
1      1      1      1      1      1
1      82      83      84      1      86
-7      -8      -9      -10      -11      -12
0      1      0      0      0      2      0
2      1      7      0      0      0

```