



## 第6章 部材接合部のモデル化と解析

木質軸組構造の接合部は、半剛接合である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。接合部にはめり込みなどで複雑な応力が発生し、様々な破壊形態が生じる。しかも、現在でも様々な接合具や接合法が開発されており、接合部の詳細な解析は大層難しい。そのため、現在、このような接合部を含む木質構造は、誰でもが容易に解析できるという状況ではないと言える。

本章では、接合部をバネに置換した部材モデルを用いて単純な骨組を解析し、実験結果と比較してその妥当性を評価する。ここでは、第3章で説明した接合部に関する提案式を用いて履歴特性を求め、その履歴を有する並列バネを付加した新たな部材モデルを設定する。

本節では、まず小松ら<sup>20)</sup>の実験的研究を基に、ドリフトピンを用いたモーメント抵抗接合部を有する部材に対し、曲げバネを組み込んだ部材で解析モデルを作成し、弾塑性解析して得た結果と実験結果とを比較する。

図6-1に試験体概要、図6-2に解析モデル、図6-3に接合部の詳細、表6-1に部材の諸元を示す。試験体は、長さ214 cmの柱材で構成されており、エゾ・トド JAS1 級の集成材と、接合部に厚さ9 mmの鋼板を使用している。また、接合具のドリフトピン4本の試験体A、接合具のドリフトピン8本の試験体B、接合具のドリフトピン16本の試験体Cの3種類が用いられる。

部材モデルは、接合部に曲げバネを持つ両端中央ファイバーモデルを使用する。解析は変位増分法を用い、荷重形態は繰り返し载荷とする。

表 6-1 部材の諸元

集成材 エゾ・トド JAS1 級		
断面	cm	15×50
強軸断面二次モーメント	cm <sup>4</sup>	156250
弱軸断面二次モーメント	cm <sup>4</sup>	14062.5
ヤング係数	kN/cm <sup>2</sup>	882
密度	kN/m <sup>3</sup>	4.41

### 6.1 はじめに

### 6.2 主要部材の接合部

#### 6.2.1 ドリフトピン接合

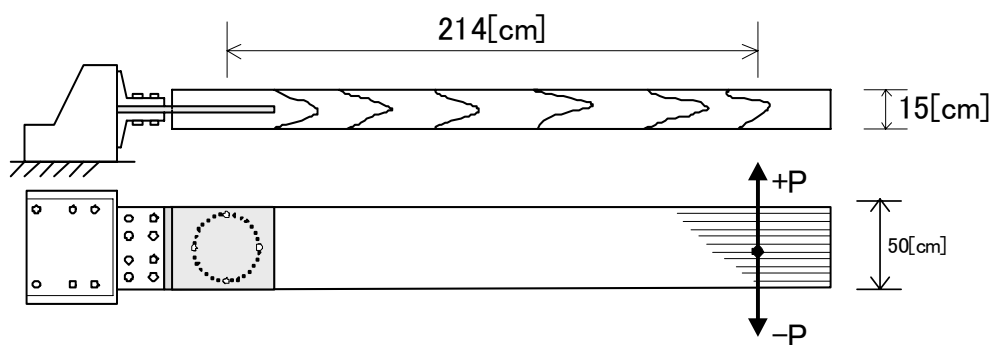


図 6-1 試験体概要

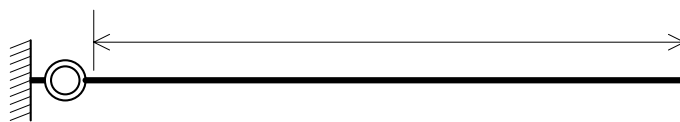
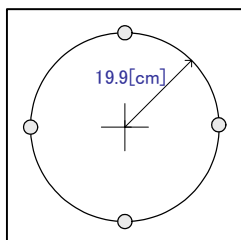
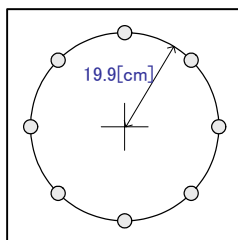


図 6-2 解析モデル

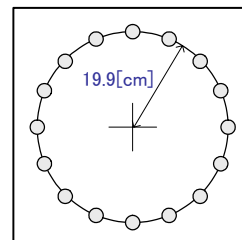
A



B



C



ピンの直径は全て 1.2cm

図 6-3 接合部の詳細

### 6.2.2 曲げバネの履歴特性

本解析で用いる履歴特性を図6-4に示す。履歴特性は、トリリニアの骨格曲線を持つS字スリップトリリニアモデルで、設定する値は、第一剛性、第二剛性、第三剛性、スリップ剛性、除荷剛性、第一降伏モーメント、第二降伏モーメントである。第3章で説明した接合部の設計式より求めた値は、初期剛性とすべり剛性であり、それらは第一剛性と第一降伏モーメントとする。なお、ここでは初期ガタは考慮しないものとする。第二勾配、第三勾配、スリップ剛性は、第一勾配のそれぞれ1/5、1/100、1/50とし、除荷剛性は第一剛性と同等とする。また、第二降伏モーメントは、第一降伏モーメントの2倍とする。これは、実験結果より降伏モーメントの約2倍が最大降伏モーメントの値になることが得られているためである。これらの値をまとめて表6-2に示す。

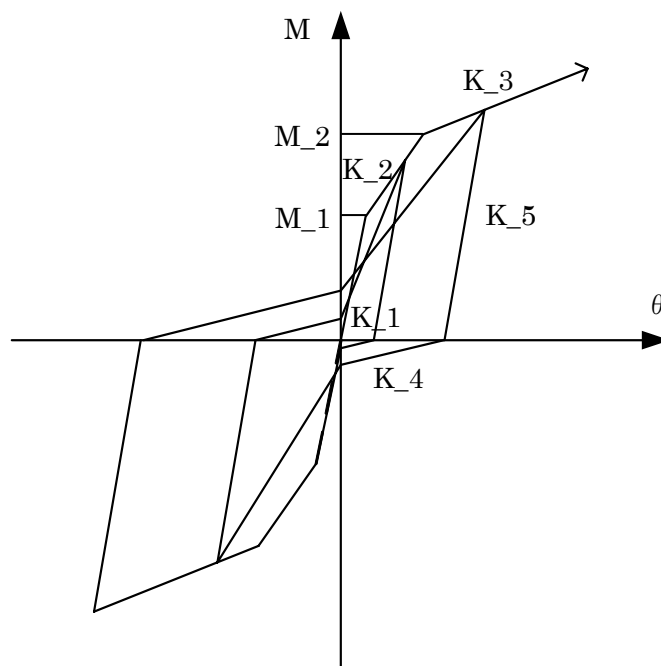


図6-4 曲げバネの復元力特性

表6-2 曲げバネの諸元

試験体		A	B	C
K_1 初期勾配	kN・cm/rad	384160	691250	1375449
K_2 第二勾配	kN・cm/rad	76832	138250	275090
K_3 第三勾配	kN・cm/rad	3842	6913	13755
K_4 スリップ勾配	kN・cm/rad	7683	13825	27510
K_5 除荷勾配	kN・cm/rad	384160	691250	1375449
M_1 第一降伏モーメント	kN・cm	1127	2048	4077
M_2 第二降伏モーメント	kN・cm	2254	4096	8154

## 6.2.3 解析結果

試験体Aの接合部のモーメントと回転角の関係として、図6-5に実験結果、図6-6に解析結果、図6-7に実験結果と解析結果を重ね合わせて示す。

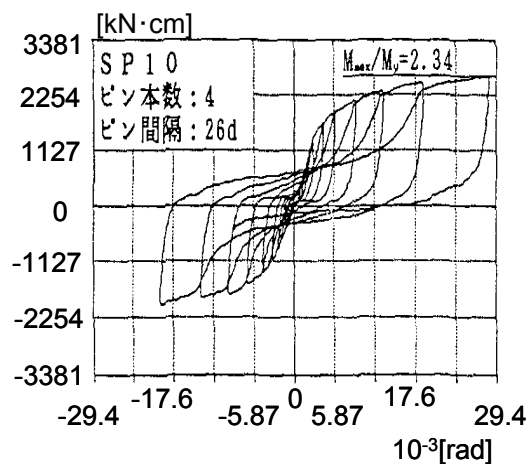


図6-5 実験結果のモーメント - 回転角関係

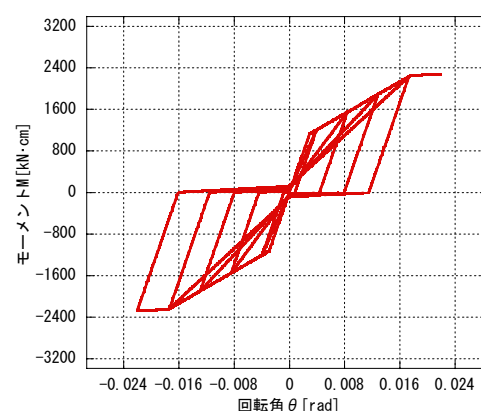


図6-6 解析結果のモーメント - 回転角関係

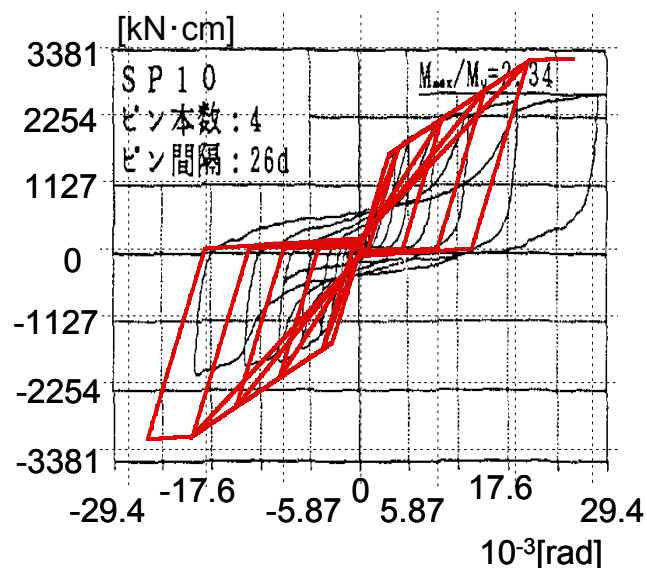


図6-7 実験結果と解析結果のモーメント - 回転角関係

試験体Bの接合部のモーメントと回転角の関係として、図6-8に実験結果、図6-9に解析結果、図6-10に実験結果と解析結果を重ね合わせて示す。

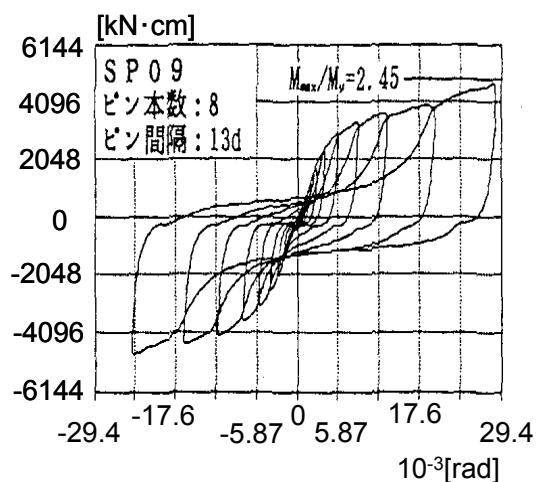


図 6-8 実験結果のモーメント - 回転角関係

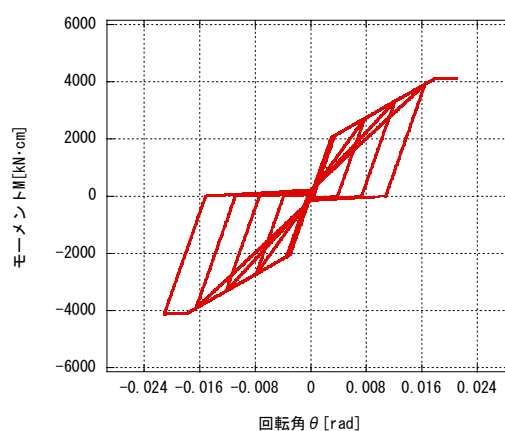


図 6-9 解析結果のモーメント - 回転角関係

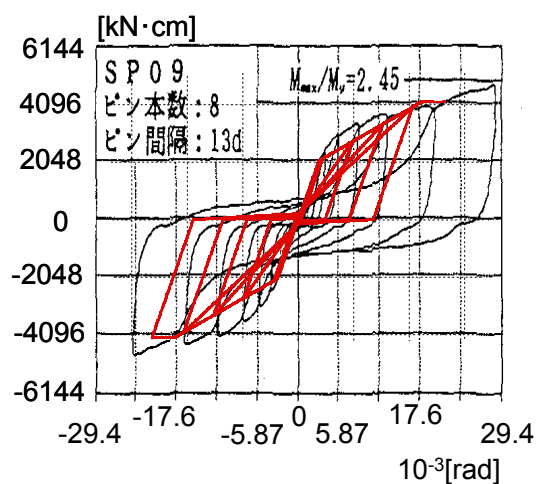


図 6-10 実験結果と解析結果のモーメント - 回転角関係

試験体 C の接合部のモーメントと回転角の関係として、図 6-11 に実験結果、図 6-12 に解析結果、図 6-13 に実験結果と解析結果を重ね合わせて示す。

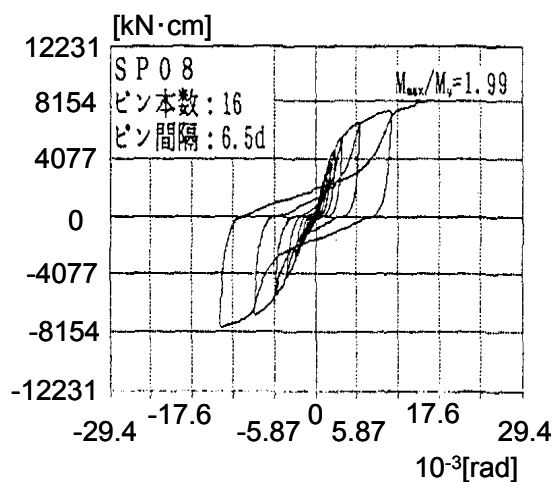


図 6-11 実験結果のモーメント - 回転角関係

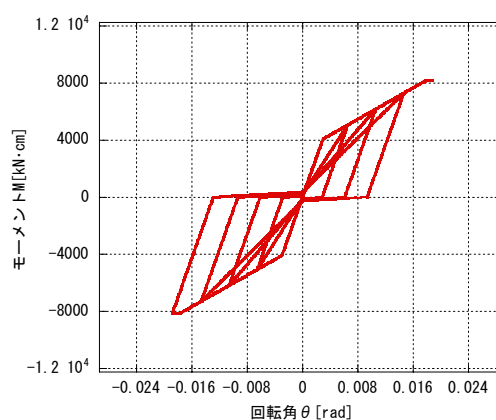


図 6-12 解析結果のモーメント - 回転角関係

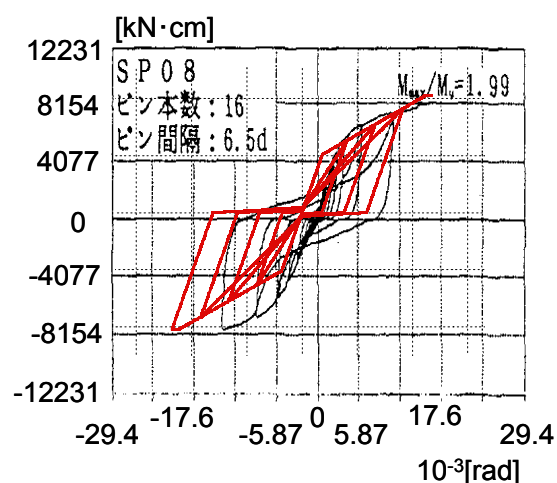


図 6-13 実験結果と解析結果のモーメント - 回転角関係

以上の結果より、全ての試験体において初期勾配は良い近似を示している。また、第一降伏モーメントも近似しているが、実験結果と比べると幾分低い評価となっている。しかし、その差は小さく提案されている設計式は妥当であると考えられる。

この試験体は I 字型モデルであるが、実験結果では非対称性も見られる。また L 字型のモデルでは、履歴が非対称になると考えられるため、今後、非対称履歴特性の検討が必要となろう。

釘やボルトなどの接合具を用いて仕口接合した構造は、半剛接合となり剛節ラーメンと同様に、接合部で軸力、曲げモーメント、せん断力を伝える構造となる。ここでは、小松らの実験的研究<sup>12)</sup>を基に、1層1スパン門型ラーメンの解析を行う。接合部に曲げバネ、軸バネ、せん断バネを組み込んだ部材モデルを作成し、実験結果と比較することで接合部のモデル化の妥当性を検討する。

### 6.3 門型ラーメンの解析

#### 6.3.1 解析モデルの概要

図 6-13 に試験体概要、図 6-14 に解析モデル、図 6-15 に接合部の詳細、表 6-3 に部材の諸元を示す。柱脚接合部は I 型、柱 - 梁接合部は L 型のガセットプレートを用いて接合されている。図 6-13 に示されるように試験体は、高さ 300 cm でスパンが 400 cm のモデル M - 1、スパンが 500 cm の M - 2、スパンが 600 cm の M - 3 の 3 体である。

部材モデルは、接合部に曲げバネ、軸バネ、せん断バネを持つ両端中央ファイバーモデルを使用する。柱、梁ともに、部材を 2 分割してモデル化する。解析は変位増分法を用い、載荷点は柱梁接合部で、荷重を水平方向に繰り返し載荷させる。

表 6-3 部材の諸元

		M - 1 (4m スパン)		M - 2 (5m スパン)		M - 3 (6m スパン)	
		柱	梁	柱	梁	柱	梁
断面積	cm <sup>2</sup>	451.44	516.42	516.42	776.34	711.36	971.28
強軸断面二次モーメント	cm <sup>4</sup>	26219.6	39249.6	39249.6	133346.8	102587.6	261131.9
弱軸断面二次モーメント	cm <sup>4</sup>	11000.5	12583.9	12583.9	18917.5	17334.1	23667.7
ヤング係数	kN/cm <sup>2</sup>	1078	1078	1078	1078	1078	1078

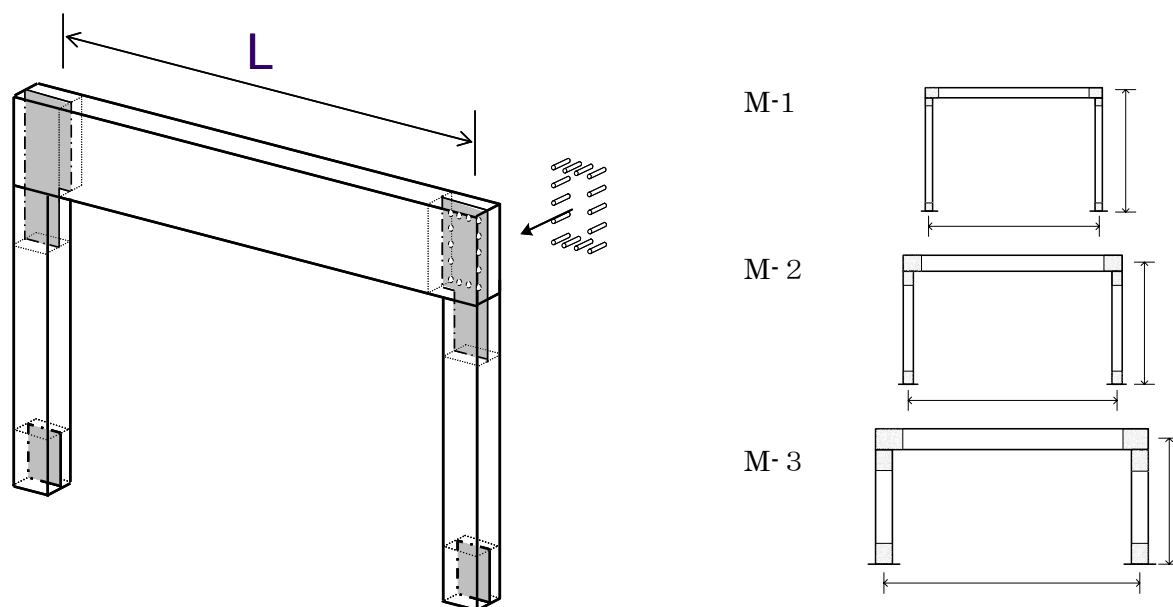


図 6-14 試験体概要

表 6-4 解析モデル仕様

	スパンL (cm)	高さH (cm)		幅b (cm)	せいh (cm)
M-1	400	300	柱	17.1	26.4
			梁	17.1	30.2
M-2	500	300	柱	17.1	30.2
			梁	17.1	45.4
M-3	600	300	柱	17.1	41.6
			梁	17.1	56.8

ベイマツ集成材 1 級

 $E = 1078 \text{ (kN/cm}^2\text{)}$ 

構造体は図 6-15 のような材端にそれぞれバネを組み込んだモデルとし、部材中央で 2 分割した。

部材モデルは材端に曲げ・せん断・軸バネを並列に、また両端と中央にファイバーを組み込んだモデルとする（図 6-16）。前述の接合部の解析では曲げバネの挙動の妥当性を検討するのが目的であったため、接合部に組み込んだバネは曲げバネのみだったが、木質ラーメン構造は曲げだけではなく、軸力やせん断力も生じることから、今回は各バネを並列に組み込むことになる。

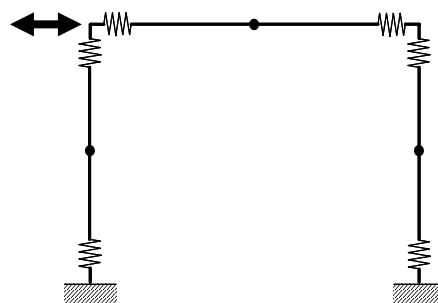


図 6-15 構造体のモデル化



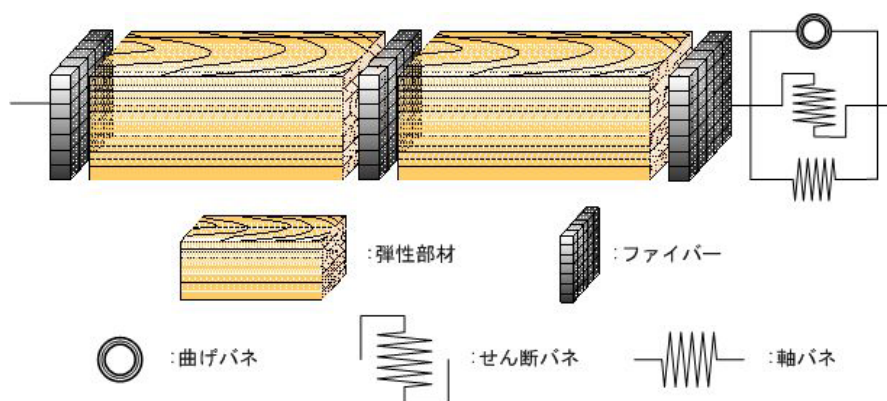


図 6-16 部材モデル

各解析モデルにおける接合部の詳細は以下に示すとおりである。

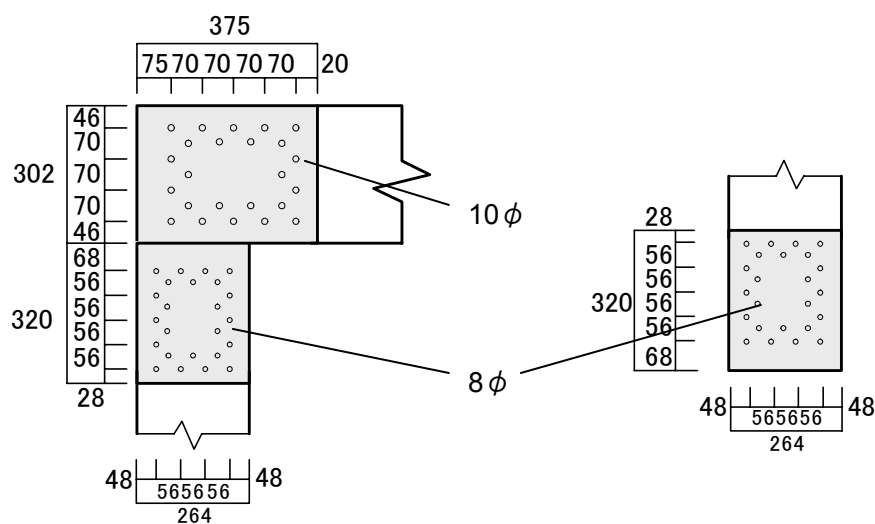


図 6-17 解析モデル M-1 接合部詳細

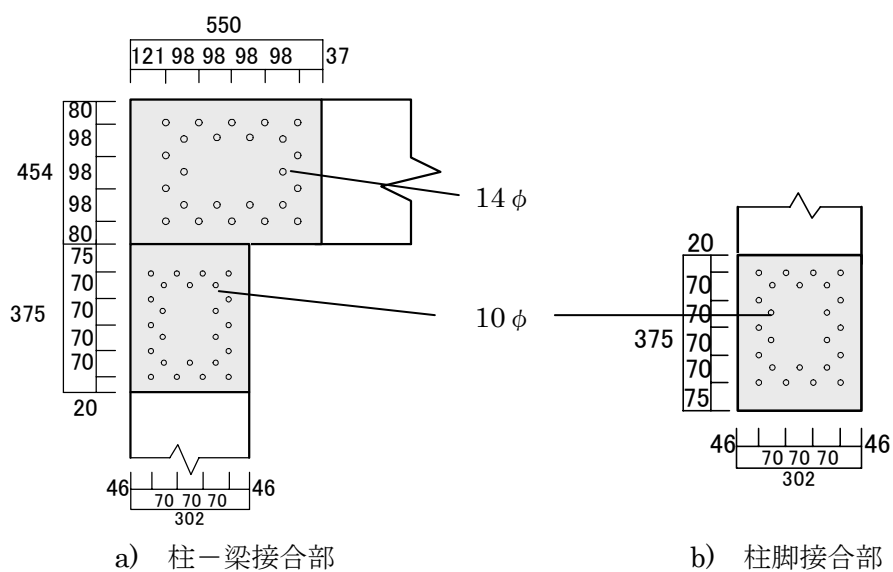


図 6-18 解析モデル M-2 接合部詳細

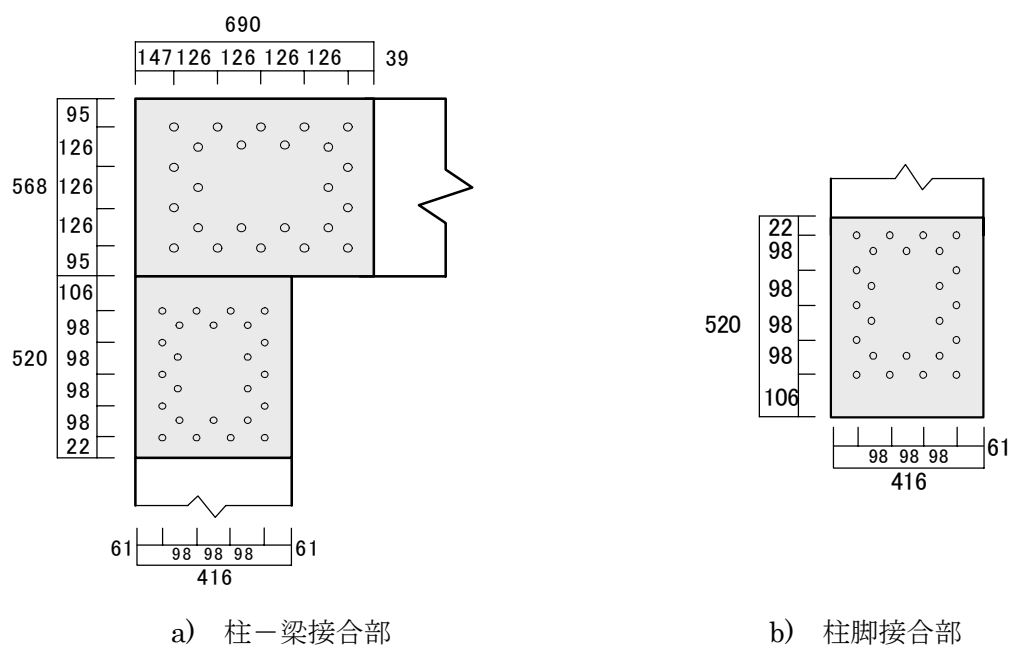


図 6-19 解析モデル M-3 接合部詳細

前節で示した解析モデルの情報を SPACE のモデラーで作成する。モデラーの利用方法は、第4章を参照されたい。モデラーで得られた各モデル接合部の諸元は以下に示す通りになる（表 6-5、表 6-6、表 6-7）。

### 6.3.2 各モデルの 緒元

表 6-5 曲げバネの諸元

曲げバネ (M-1)			曲げバネ (M-2)			曲げバネ (M-3)		
	柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素
$K_{R1}$	423316	837210	$K_{R1}$	837210	2342500	$K_{R1}$	2342500	5055500
$K_{R2}$	84663.2	167442	$K_{R2}$	167442	468500	$K_{R2}$	468500	1011100
$K_{R3}$	4233.16	8372.1	$K_{R3}$	8372.1	23425	$K_{R3}$	23425	50555
$K_{R4}$	8466.32	16744.2	$K_{R4}$	16744.2	46850	$K_{R4}$	46850	101110
$K_{R5}$	423316	837210	$K_{R5}$	837210	2342500	$K_{R5}$	2342500	5055500
$M_1$	1300	2480	$M_1$	2480	5650	$M_1$	5650	10400
$M_2$	2600	4960	$M_2$	4960	11300	$M_2$	11300	20800

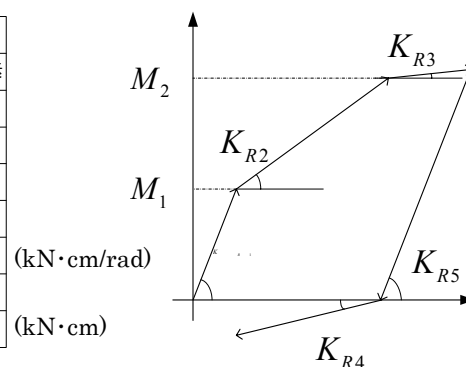


表 6-6 軸バネの諸元

軸バネ (M-1)			軸バネ (M-2)			軸バネ (M-3)		
	柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素
$K_{N1}$	7312.51	9380.69	$K_{N1}$	9380.69	13124.3	$K_{N1}$	13124.3	17056
$K_{N2}$	73.1251	93.8069	$K_{N2}$	93.8069	131.243	$K_{N2}$	131.243	170.56
$K_{N3}$	73.1251	93.8069	$K_{N3}$	93.8069	131.243	$K_{N3}$	131.243	170.56
$K_{N4}$	7312.51	9380.69	$K_{N4}$	9380.69	13124.3	$K_{N4}$	13124.3	17056
$P_N$	192.099	300.155	$P_N$	300.155	588.304	$P_N$	588.304	913.239

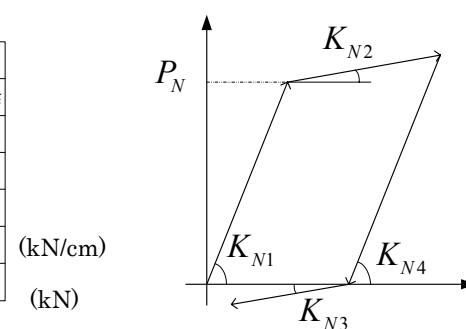
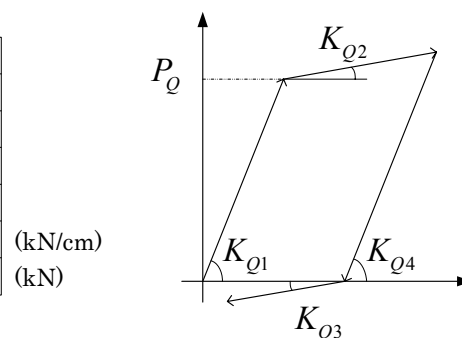


表 6-7 せん断バネの諸元

せん断バネ(M-1)			せん断バネ(M-2)			せん断バネ(M-3)		
	柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素		柱接合要素	梁接合要素
$K_{Q1}$	2837.85	3569.44	$K_{Q1}$	3569.44	5144.13	$K_{Q1}$	5144.13	6730.54
$K_{Q2}$	28.3785	35.6944	$K_{Q2}$	35.6944	51.4413	$K_{Q2}$	51.4413	67.3054
$K_{Q3}$	28.3785	35.6944	$K_{Q3}$	35.6944	51.4413	$K_{Q3}$	51.4413	67.3054
$K_{Q4}$	2837.85	3569.44	$K_{Q4}$	3569.44	5144.13	$K_{Q4}$	5144.13	6730.54
$P_Q$	140.93	210.907	$P_Q$	210.907	326.357	$P_Q$	326.357	457.223



構造が複雑になるにつれ初期ガタが発生し、その幅は大きくなると考えられる。ここでは、各解析モデルに初期ガタが 0.05cm と 0.1cm 生じたと仮定し、初期剛性を低減させた場合についても解析を行った。初期ガタがある場合は、図 6-20 に示すように鋼板挿入型ドリフトピン接合設定ダイアログで入力することができる。

初期ガタが生じた場合、変化する剛性は初期剛性のみである。初期ガタによって低減された各解析モデルの剛性は以下に示す通りである。

図 6-20 初期ガタの入力について

表 6-8 初期ガタ 0.05cm 時の各バネの初期剛性

		曲げバネ(kN・cm/rad)	軸バネ(kN/cm)	せん断バネ(kN/cm)
M-1	柱接合要素	126994.8	2193.753	851.355
	梁接合要素	293023.5	3283.2415	1249.304
M-2	柱接合要素	293023.5	3283.2415	1249.304
	梁接合要素	1054125	5905.935	2314.8585
M-3	柱接合要素	1054125	5905.935	2314.8585
	梁接合要素	2527750	8528	3365.27

表 6-9 初期ガタ 0.1cm 時の各バネの初期剛性

		曲げバネ(kN・cm/rad)	軸バネ(kN/cm)	せん断バネ(kN/cm)
M-1	柱接合要素	84663.2	1462.502	567.57
	梁接合要素	167442	1876.138	713.888
M-2	柱接合要素	167442	1876.138	713.888
	梁接合要素	702750	3937.29	1543.239
M-3	柱接合要素	702750	3937.29	1543.239
	梁接合要素	1516650	5116.8	2019.162

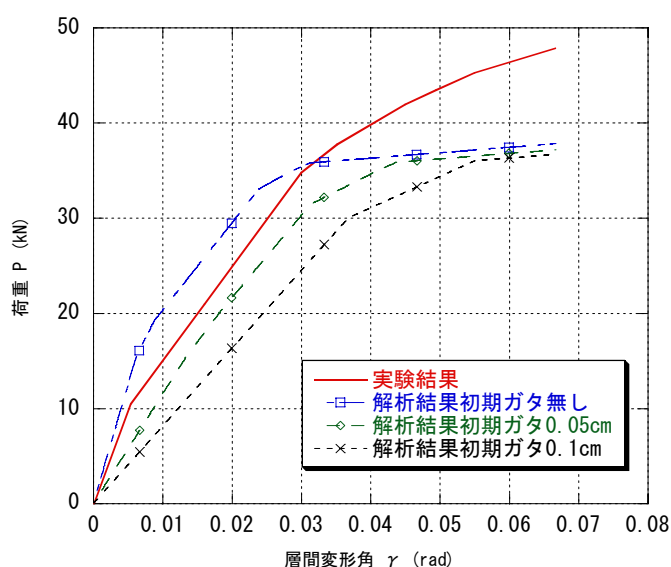
初期ガタによる剛性の低減は初期勾配のみであり、第二勾配や折れ点は低減させない。解析手法は静的弾塑性解析とし、一方向水平載荷及び正負交番繰返し載荷で、層間変形角 1/15(rad) となるまで変位増分法を用い解析を行う。

### 6.3.3 解析結果

#### 6.3.3.1 モデル

M-1

モデルM-1の解析によって得られた各モデルの一方向水平載荷と繰返し載荷の結果を以下に示す。繰返し載荷時では初期ガタ 0.05cm を採用する。



実験結果

短期許容耐力  $P_a = 14.41$  (kN)

最大耐力  $P_{max} = 47.87$  (kN)

解析結果

短期許容耐力  $P_a = 15.6$  (kN)

最大耐力

初期ガタ無し  $P_{max} = 37.85$  (kN)

初期ガタ 0.05cm  $P_{max} = 37.20$  (kN)

初期ガタ 0.1cm  $P_{max} = 36.71$  (kN)

図 6-21 解析モデル M-1 荷重 - 層間変形角関係

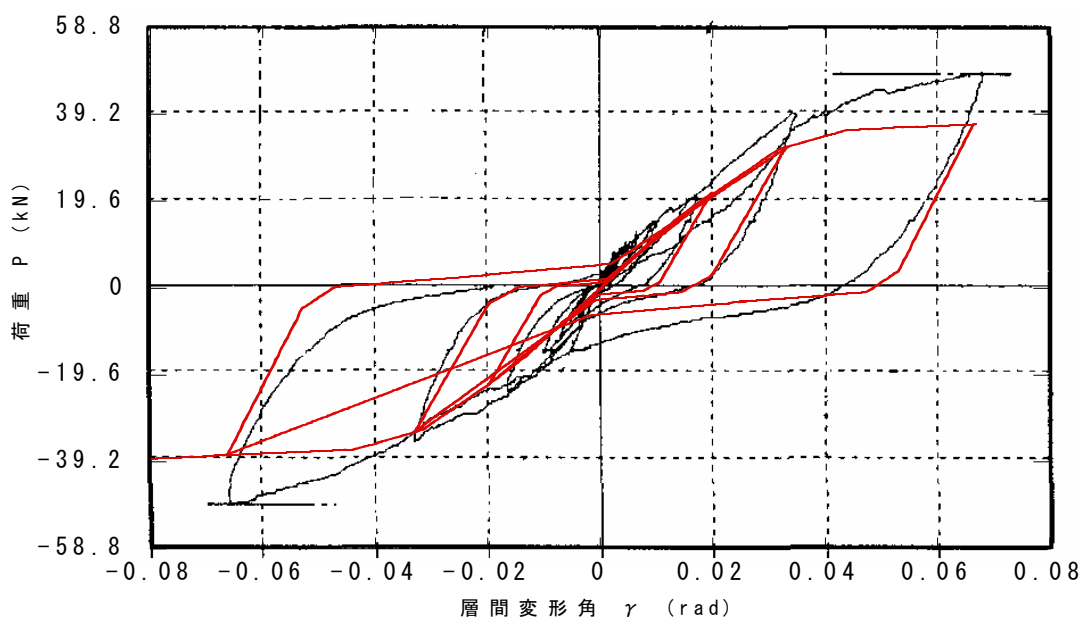
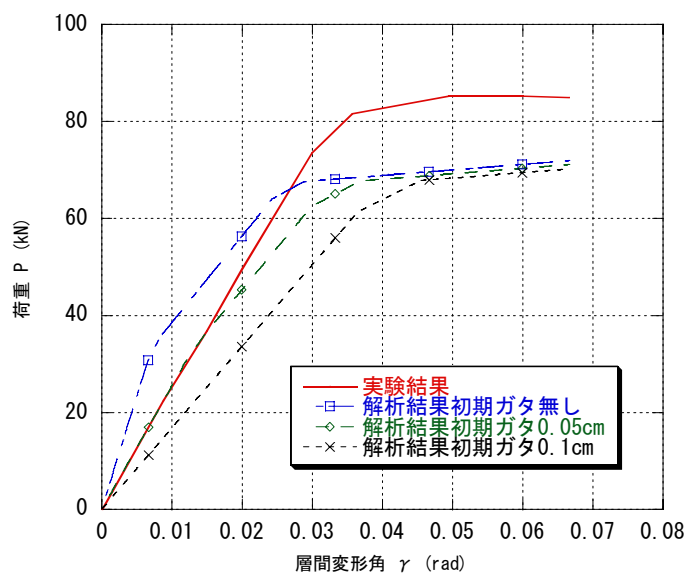


図 6-22 解析モデル M-1 正負交番繰返し載荷解析結果 (初期ガタ 0.05cm)

## 6.3.3.2 モデル

## M-2

モデルM-2の解析によって得られた各モデルの一方方向水平载荷と繰返し载荷の結果を以下に示す。繰返し载荷時では初期ガタ 0.05cm を採用する。



## 実験結果

短期許容耐力  $P_a = 28.81$  (kN)

最大耐力  $P_{max} = 83.50$  (kN)

## 解析結果

短期許容耐力  $P_a = 26.04$  (kN)

## 最大耐力

初期ガタ無し  $P_{max} = 71.93$  (kN)

初期ガタ 0.05cm  $P_{max} = 71.12$  (kN)

初期ガタ 0.1cm  $P_{max} = 70.24$  (kN)

図 6-23 解析モデル M-2 荷重 - 層間変形角関係

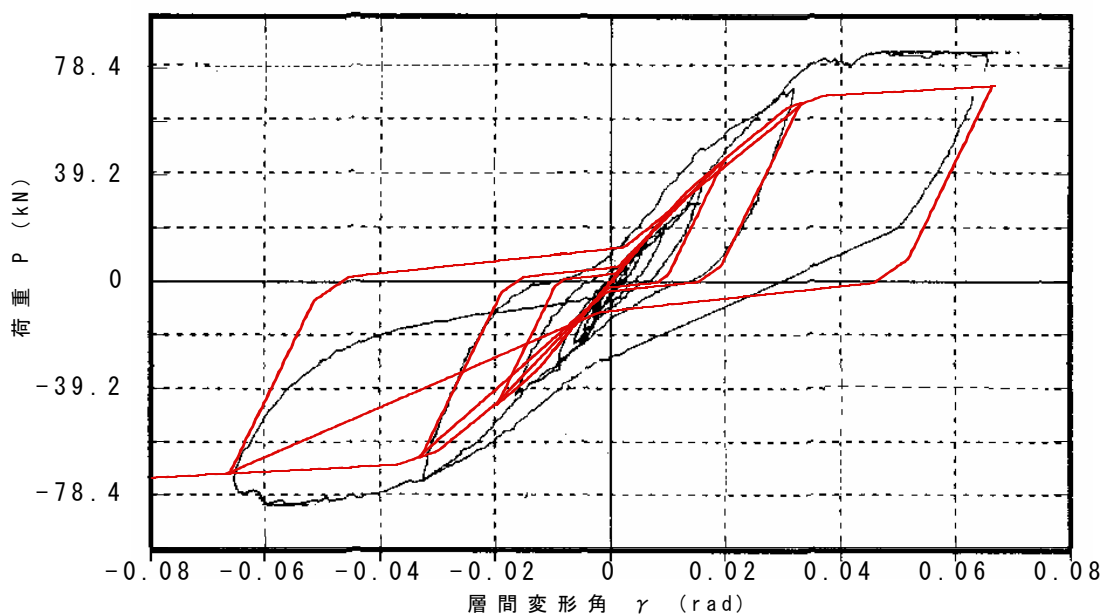
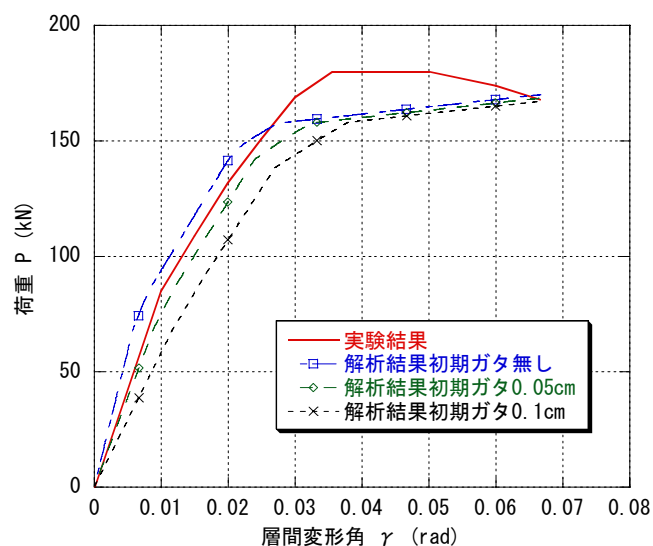


図 6-24 解析モデル M-2 正負交番繰返し载荷解析結果 (初期ガタ 0.05cm)

## 6.3.3.3 モデル

M-3

モデルM-3の解析によって得られた各モデルの一方方向水平载荷と繰返し载荷の結果を以下に示す。繰返し载荷時では初期ガタ 0.05cm を採用する。



## 実験結果

短期許容耐力  $P_a = 75.36$  (kN)最大耐力  $P_{max} = 178.56$  (kN)

## 解析結果

短期許容耐力  $P_a = 67.63$  (kN)

## 最大耐力

初期ガタ無し  $P_{max} = 170.02$  (kN)初期ガタ 0.05cm  $P_{max} = 168.56$  (kN)初期ガタ 0.1cm  $P_{max} = 167.16$  (kN)

図 6-25 解析モデル M-3 荷重 - 層間変形角関係

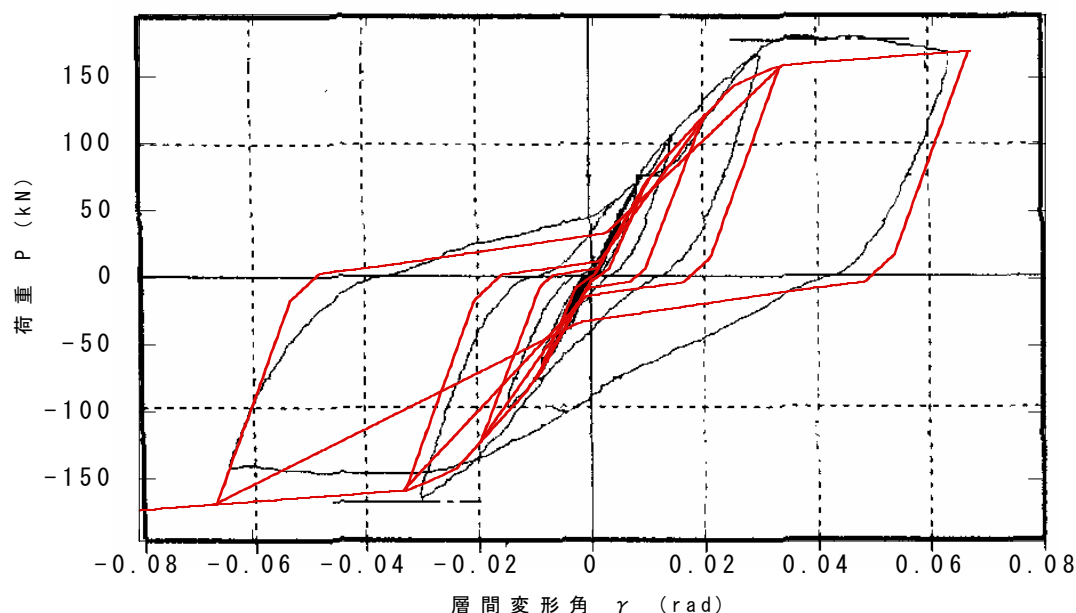


図 6-26 解析モデル M-3 正負交番繰返し载荷解析結果 (初期ガタ 0.05cm)

実験結果と初期ガタがない場合の解析結果を比較すると、初期剛性は全ての試験体で解析結果が実験結果を上回るという結果となった。これ

6.3.4 解析結果の  
評価

は、試験体施工時の初期ガタによる影響と考えられる。初期ガタを考慮し、初期剛性を低減させることで、例えば初期ガタ 0.05cm では、実験結果と良い近似を示す結果が得られている。

第二勾配についても良い近似を示す解を得られているが、短期許容耐力では最大で 11% の誤差がみられる。最大耐力では最大で 23% の誤差という結果だったが、三体のモデルを比較しても短期許容耐力に対する最大耐力の割合が 2.37~3.32 とばらつきが大きいいため最大耐力を全ての試験体で近似させることは難しいと考えられる。実験結果、解析結果共に柱脚のドリフトピン接合部から降伏したという点は一致した。また、モデル M-2、M-3 では柱脚、柱頭ファイバーが降伏したことから木質ラーメン構造の解析では、弾塑性挙動を評価するファイバーモデルの必要性を確認することができた。今回の解析で全体的な挙動を追えていることから解析法は妥当であると言えよう。

前節では 1 層 1 スパンラーメン構造の解析を行ったが、多層多スパン骨組構造となると図 6-27 に示すような T 型接合部や十字型接合部が存在することになる。本節では小松ら<sup>41)</sup>が行った T 型接合部(図 6-27)や十字型接合部をモデル化し解析を行う。結果と実験値とでその妥当性を考察する。

解析モデルは図 6-29 の T 型接合部で梁端部に荷重を加えるモデルとする。試験体仕様が表 6-10 に示される。

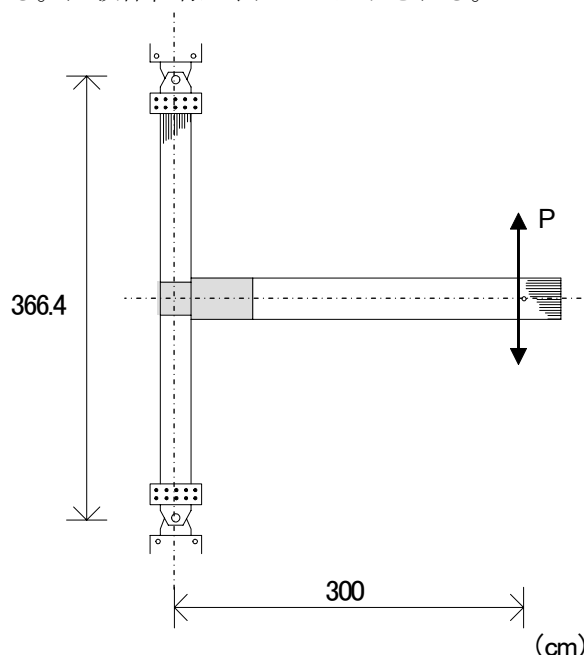


図 6-28 解析モデル

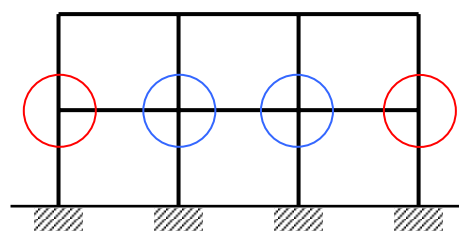


図 6-27 T 型や十字型接合部を用いている箇所

表 6-10 試験体仕様

		幅 (cm)	せい (cm)	材種
T-1	柱	17.1	26.4	北米産ベイマツ集成材 $E=1078\text{kN/cm}^2$
	梁	17.1	30.2	
T-2	柱	17.1	30.2	
	梁	17.1	30.2	

構造体解析モデルは図 6-29 のように柱接合要素を梁の材端にバネとして置換したモデルとする。柱の軸方向バネを梁端部に組み込むとせん断バネとして働き、同様に柱のせん断バネが軸バネとなるので注意が必要になる。現在の SPACE では T 型接合部をモデラーで作成することができないので、このような T 型接合部のモデル化を行う際はユーザーが各剛性を手計算で設定する必要がある。ただし、ドリフトピン接合部の各剛性の設計式は同じ式を用いているので、モデラーで柱接合要素と梁接合要素をそれぞれ作成し、その値を、図 4-32 に示すバネの設定ダイアログ中の該当するパラメータ欄に手入力すれば良い。

今回は接合部が異なる 2 種類のモデルの解析を行う。解析モデルの接合部詳細と各諸元を以下に示す。

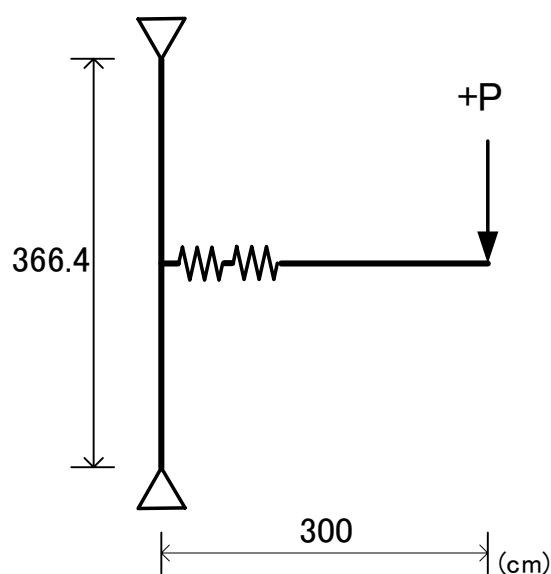


図 6-29 構造体のモデル化

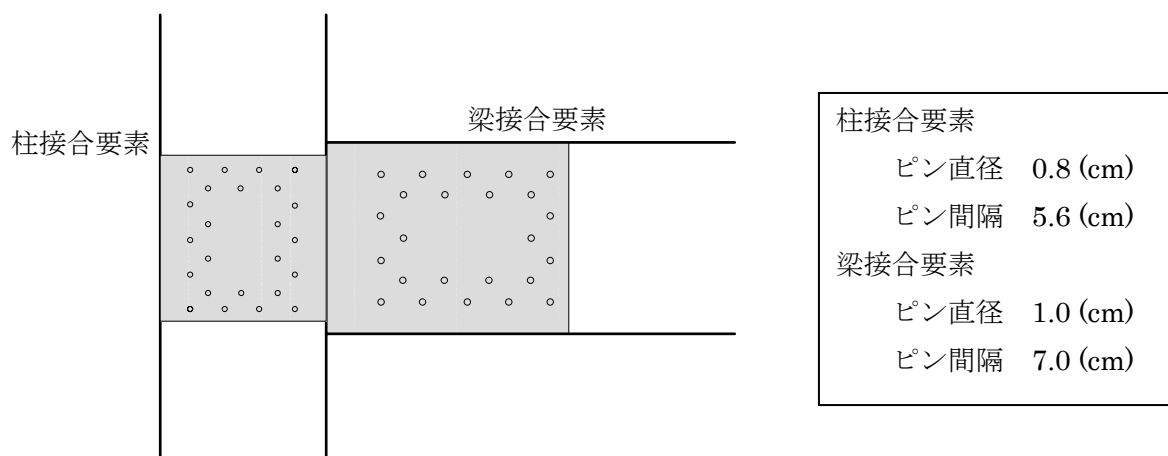


図 6-30 解析モデル T-1 の接合部詳細

表 6-11 解析モデル T-1 の接合部諸元

T-1 曲げバネ		
	柱接合要素	梁接合要素
初期勾配	440553 [kN・cm/rad]	871610 [kN・cm/rad]
第二勾配	88111 [kN・cm/rad]	174322 [kN・cm/rad]
第三勾配	4406 [kN・cm/rad]	8716 [kN・cm/rad]
スリップ勾配	8811 [kN・cm/rad]	17432 [kN・cm/rad]
除荷勾配	440553 [kN・cm/rad]	871610 [kN・cm/rad]
第一折れ点	1330 [kN・cm]	2520 [kN・cm]
第二折れ点	2660 [kN・cm]	5040 [kN・cm]

T-1	柱接合要素		梁接合要素	
	せん断バネ	軸バネ	せん断バネ	軸バネ
初期勾配	7602 [kN/cm]	2955 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	9763 [kN/cm]
第二勾配	76 [kN/cm]	30 [kN/cm]	37 [kN/cm]	98 [kN/cm]
スリップ勾配	76 [kN/cm]	30 [kN/cm]	37 [kN/cm]	98 [kN/cm]
除荷勾配	7602 [kN/cm]	2955 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	9763 [kN/cm]
第一折れ点	198 [kN]	144 [kN]	215 [kN]	309 [kN]



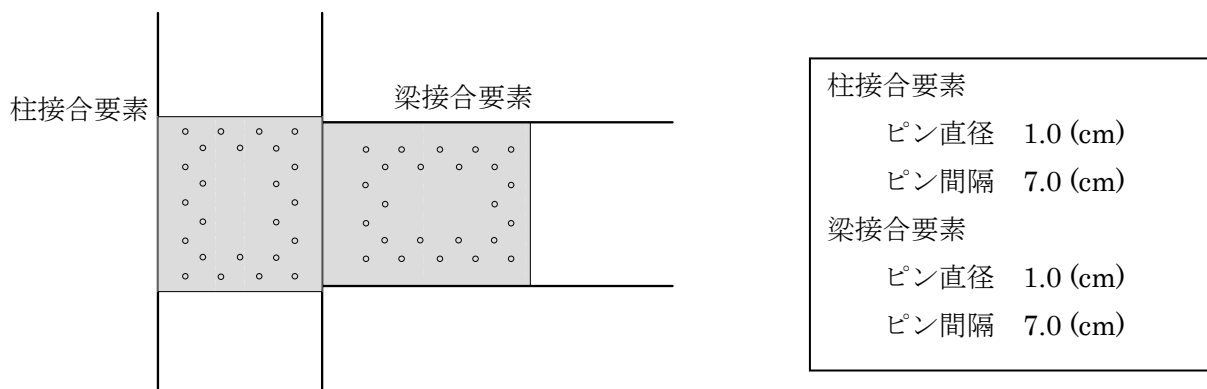


図 6-31 解析モデル T-2 の接合部詳細

表 6-12 解析モデル T-2 の接合部諸元

T-2 曲げバネ		
	柱接合要素	梁接合要素
初期勾配	871610 [kN・cm/rad]	871610 [kN・cm/rad]
第二勾配	174322 [kN・cm/rad]	174322 [kN・cm/rad]
第三勾配	8716 [kN・cm/rad]	8716 [kN・cm/rad]
スリップ勾配	17432 [kN・cm/rad]	17432 [kN・cm/rad]
除荷勾配	871610 [kN・cm/rad]	871610 [kN・cm/rad]
第一折れ点	2520 [kN・cm]	2520 [kN・cm]
第二折れ点	5040 [kN・cm]	5040 [kN・cm]

T-2	柱接合要素		梁接合要素	
	せん断バネ	軸バネ	せん断バネ	軸バネ
初期勾配	9763 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	9763 [kN/cm]
第二勾配	98 [kN/cm]	37 [kN/cm]	37 [kN/cm]	98 [kN/cm]
スリップ勾配	98 [kN/cm]	37 [kN/cm]	37 [kN/cm]	98 [kN/cm]
除荷勾配	9763 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	3717 [kN/cm]	9763 [kN/cm]
第一折れ点	309 [kN]	215 [kN]	215 [kN]	309 [kN]

この2種類の解析モデル（T-1 と T-2）を静的弾塑性解析の変位増分法で解析し、実験結果の最大変形角まで変位を増分する。前節における骨組構造の解析と同様、初期ガタが 0.05 (cm)、0.1 (cm) 生じたと仮定し、その場合の解析についても行う。初期ガタが生じた場合の各バネの初期剛性は以下ようになる。

表 6-13 初期ガタ 0.05 (cm) 時における各バネの初期剛性

		曲げバネ(kN・cm/rad)	軸バネ(kN/cm)	せん断バネ(kN/cm)
T-1	柱接合要素	132165.9	886.5	2280.6
	梁接合要素	305063.5	3417.05	1300.95
T-2	柱接合要素	305063.5	1300.95	3417.05
	梁接合要素	305063.5	3417.05	1300.95

表 6-14 初期ガタ 0.1 (cm) 時における各バネの初期剛性

		曲げバネ(kN・cm/rad)	軸バネ(kN/cm)	せん断バネ(kN/cm)
T-1	柱接合要素	88110.6	591	1520.4
	梁接合要素	174322	1952.6	743.4
T-2	柱接合要素	174322	743.4	1952.6
	梁接合要素	174322	1952.6	743.4

## 6.4.2 解析結果

モデル T-1 と T-2 について静的弾塑性解析を行い、結果を以下に示す。

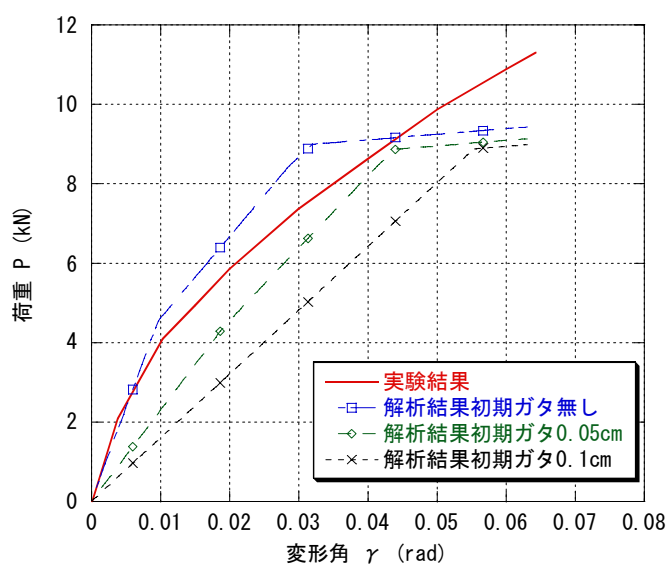


図 6-32 解析モデル T-1 解析結果

## 実験結果

短期許容耐力  $P_a = 6.47$  (kN)

最大耐力  $P_{max} = 11.09$  (kN)

## 解析結果

短期許容耐力  $P_a = 4.54$  (kN)

## 最大耐力

初期ガタ無し  $P_{max} = 9.43$  (kN)

初期ガタ 0.05cm  $P_{max} = 9.14$  (kN)

初期ガタ 0.1cm  $P_{max} = 8.99$  (kN)

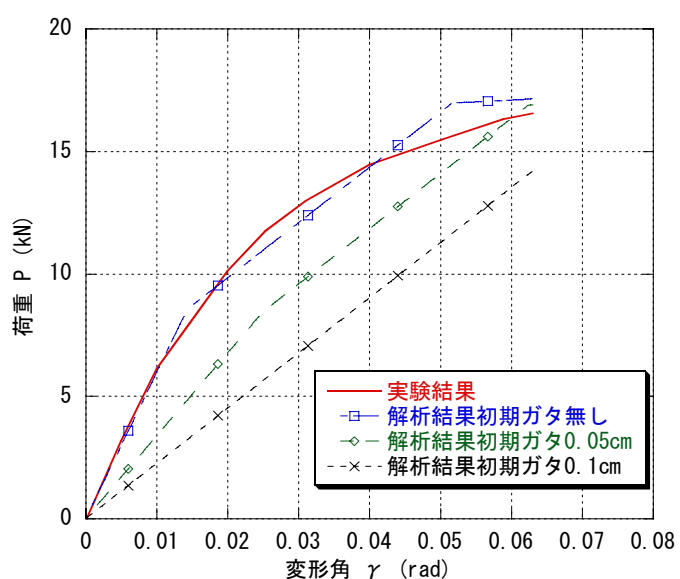


図 6-33 解析モデル T-2 解析結果

## 実験結果

短期許容耐力  $P_a = 11.76$  (kN)

最大耐力  $P_{max} = 16.61$  (kN)

## 解析結果

短期許容耐力  $P_a = 8.56$  (kN)

## 最大耐力

初期ガタ無し  $P_{max} = 17.15$  (kN)

初期ガタ 0.05cm  $P_{max} = 16.89$  (kN)

初期ガタ 0.1cm  $P_{max} = 14.21$  (kN)

今回の解析では、初期ガタを考慮し、初期剛性を低減させることによって実験結果と近似する挙動を得ることができたが、ドリフトピンの降伏後の挙動はほとんどのモデルで実験よりも大きい勾配となった。最大耐力については解析モデル T-2 では非常に良い近似を示していた。降伏後の挙動の整合性を高めることが今後の課題だが、初期勾配は近似していることより、T 型接合部の解析では柱接合要素バネを梁接合要素バネに直列に組み込む手法が妥当であると確認することができた。また今回の解析モデルではいずれの部材内のファイバーでも降伏応力に達していなかった。

### 6.4.3 解析結果の評価

前節での T 型接合部は 2 階床などの端部で用いられる接合部であった。本節では、骨組中央部で用いられる十字型接合部の解析を永原ら<sup>42)</sup>の実験を元に行う。解析モデル・接合部詳細・仕様については以下に示す通りである。

## 6.5 十字型接合部のモデル

### 6.5.1 解析モデル

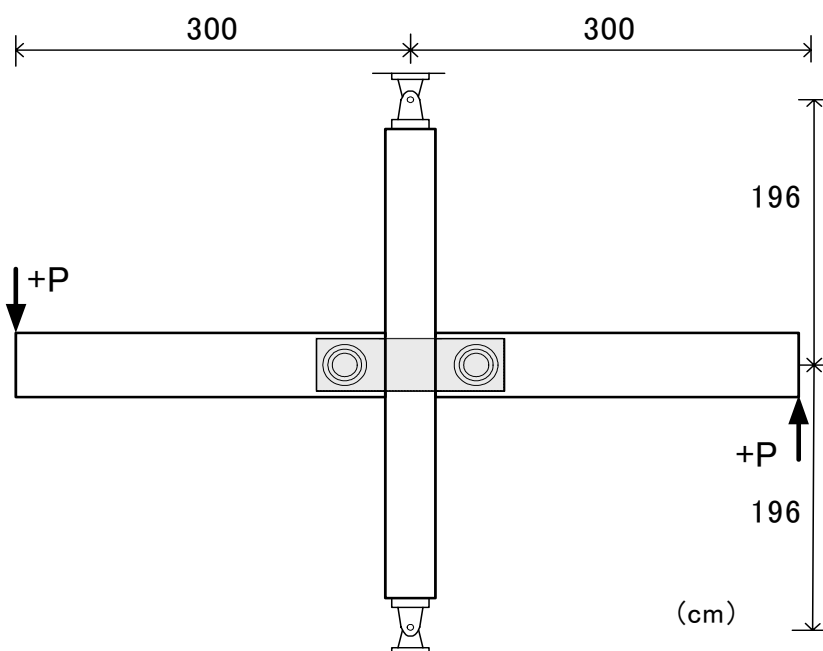


図 6-34 解析モデル

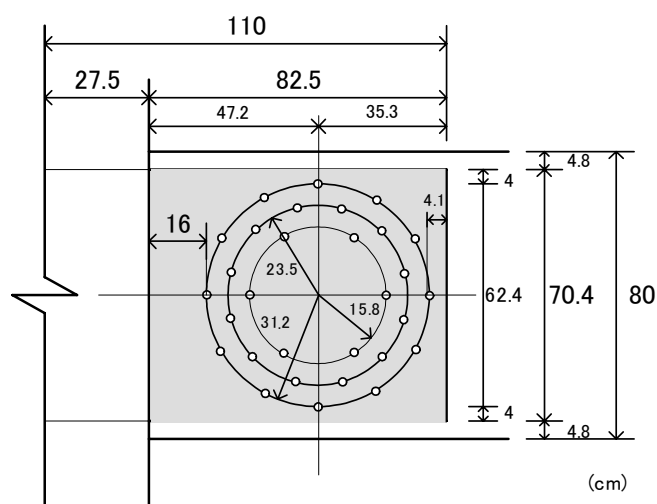


図 6-35 接合部詳細

柱材は両端中央ファイバーモデルとし、また梁材は端部に柱内を通る鋼板のめり込みをせん断バネとして評価したものとドリフトピン接合要素バネとを直列に配置し、さらに部材両端と中央にファイバーを組み込んだ部材モデルとする。

以下に示すドリフトピン接合要素バネの諸元は今までのものと同様、接合部の設計式を用いて求めた(表 6-16)。

表 6-16 ドリフトピン接合要素バネの諸元

曲げバネ	
初期勾配	11288657 (kN・cm/rad)
第二勾配	2257731 (kN・cm/rad)
第三勾配	112887 (kN・cm/rad)
スリップ勾配	225773 (kN・cm/rad)
除荷勾配	11288657 (kN・cm/rad)
第一折れ点	24200 (kN・cm)
第二折れ点	48400 (kN・cm)

	せん断バネ	軸バネ
初期勾配	10765 (kN/cm)	27250 (kN/cm)
第二勾配	108 (kN/cm)	273 (kN/cm)
スリップ勾配	108 (kN/cm)	273 (kN/cm)
除荷勾配	10765 (kN/cm)	27250 (kN/cm)
第一折れ点	857 (kN)	1819 (kN)

梁部材モデル端部に組み込んだせん断バネは前述の通り柱内を通る鋼板のめり込みを評価したものである。用いる履歴特性はS字型スリップバイリニアで勾配は接合部の設計式(3.13)で紹介した評価式の繊維平行方向のすべり係数  $K_{s0}$  を初期勾配とし、降伏点は次式によって求める。

$${}_pQ = CA \cdot F_s \quad (\text{kN})$$

$CA$  : めり込む鋼板の面積 ( $\text{cm}^2$ )

$F$  : せん断の材料強度 ( $\text{kN}/\text{cm}^2$ )

今回の十字型接合部には直径 3.2 (cm) のネジボルトが4本通っている。このめり込む鋼板の面積にはネジボルトの面積を加えて、耐力を計算する。上式によって求めたせん断バネの諸元を右の表に示す。

ここで、第二勾配、スリップ勾配は初期勾配の 1/100、除荷勾配は初期勾配と同じ値を用いる。

数値解析は静的弾塑性解析を用い、実験での最大変形角まで変位増分法で解析を行う。また、文献の初期ガタがあるという記述を参考に前項の骨組構造やT型接合部と同様、初期ガタが 0.05 (cm)、0.1 (cm) 存在すると仮定し、その場合についても解析を行う(表 6-18)。

表 6-17 めり込みを評価したせん断バネの諸元

初期勾配	908	(kN/cm)
第二勾配	9	(kN/cm)
スリップ勾配	9	(kN/cm)
除荷勾配	908	(kN/cm)
第一折れ点	136	(kN)

表 6-18 初期ガタによって低減された各バネの初期剛性

	曲げバネ (kN・cm/rad)	軸バネ (kN/cm)	せん断バネ (kN/cm)
初期ガタ0.05 (cm)	6208761	14988	5921
初期ガタ0.1 (cm)	4515463	10900	4306

6.5.2 解析結果と  
その評価

以下に一方向水平載荷時の解析結果を示す。

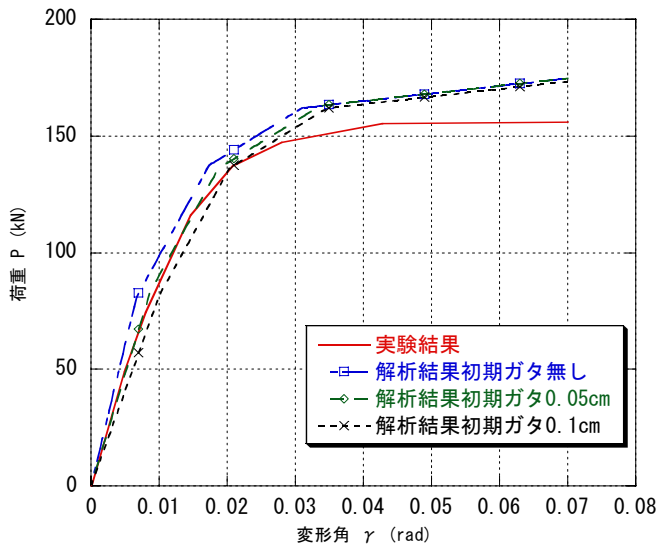


図 6-36 一方向水平載荷解析結果

初期ガタを考慮することによって初期剛性が低減され、実験結果とより近似した解析結果を得ることができた。最大回転角時の耐力は約 12%の誤差が生じたが、実験での鋼板のめり込み降伏時の耐力と上図の解析結果とでは 0.15～4.92%と誤差も小さく精度の良い解析結果を得ることができた。

次に、正負交番繰り返し載荷時の実験結果とこれらのモデルの中で実験値と良い近似を示す初期ガタ 0.05 (cm) 時の解析結果を示す。載荷サイクルは図 6-37 に示す。

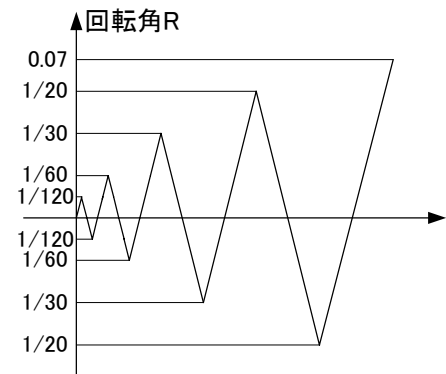


図 6-37 載荷サイクル

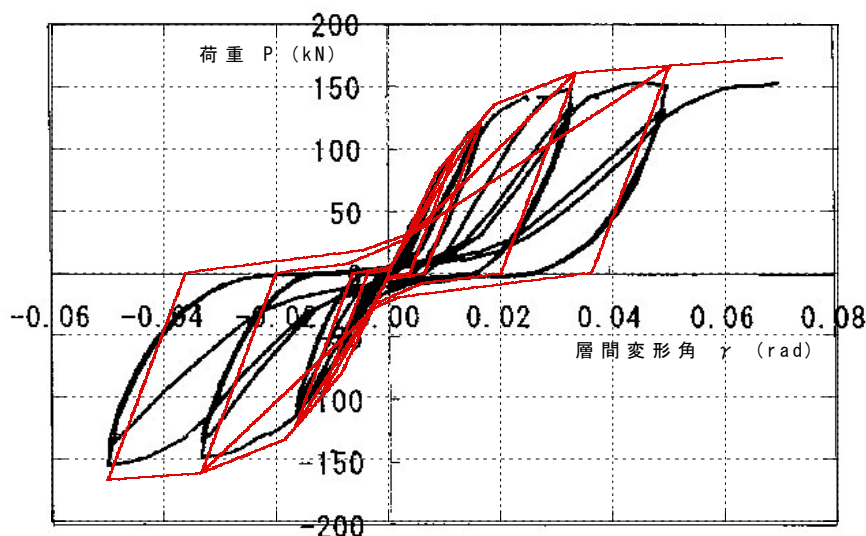


図 6-38 繰り返し載荷時の解析結果

十字型接合部では柱内を通る鋼板のめり込みを考慮し、梁材端にせん断バネとして評価することで実験と良い適合を示す解析結果が得られた。繰り返し載荷時の結果と比較しても、除荷勾配も妥当であると言える。ただし、めり込みせん断バネが降伏した後、実験結果では耐力が増加していないのに対し、解析結果ではやや耐力増加傾向を示している。このことから、めり込みせん断バネの第二勾配の大きさについて今後検討する必要がある。

### 6.6 多層多スパン骨組構造の解析

前節までの解析は木質ラーメン構造の一部である要素解析や1層1スパンなど基本的な構造物の解析が主であった。本節では、これまでの解析のまとめとして、多層多スパン骨組構造の解析を行う。解析モデルは2層3スパン骨組構造とし、解析モデルを図6-39に示す。骨組を構成する柱・梁の仕様についても表6-19に示す。

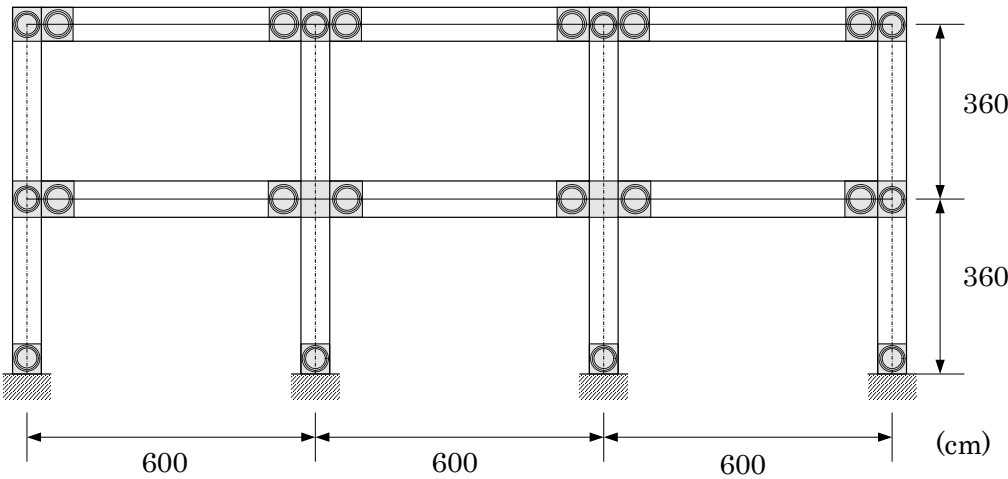


図6-39 解析モデル

表6-19 解析モデル仕様

	幅(cm)	せい(cm)	材種
柱	20	60	ベイマツ 集成材 E=1078 (kN/cm <sup>2</sup> )
2階梁	20	75	
R階梁	20	70	

鋼板(SS400)	
厚さ	1.0(cm)
ドリフトピン(SS400)	
径	1.2(cm)
長さ	20(cm)

構造体の解析モデルは図 6-40 に示されているが、前節で述べたように構造体中にあるT型接合部と十字型接合部については現在のモデラーでは作成することができない。ユーザーが手で接合部の各バネ剛性のデータを設定する必要がある。

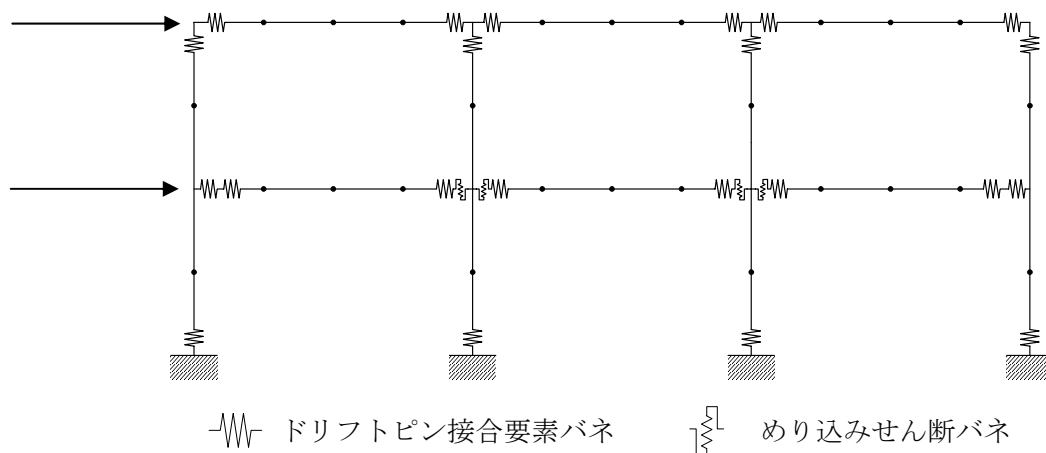


図 6-40 構造体のモデル化

今回の解析では梁材は分割数 4 とし、柱材は分割数 2 とした。接合部の詳細については図 6-41、図 6-42、図 6-43 に示す。

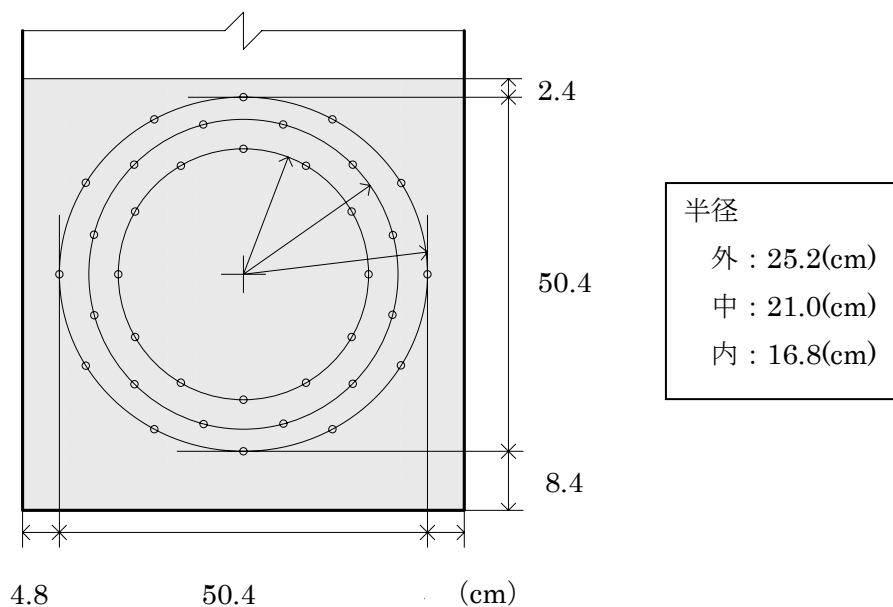


図 6-41 柱側接合部詳細



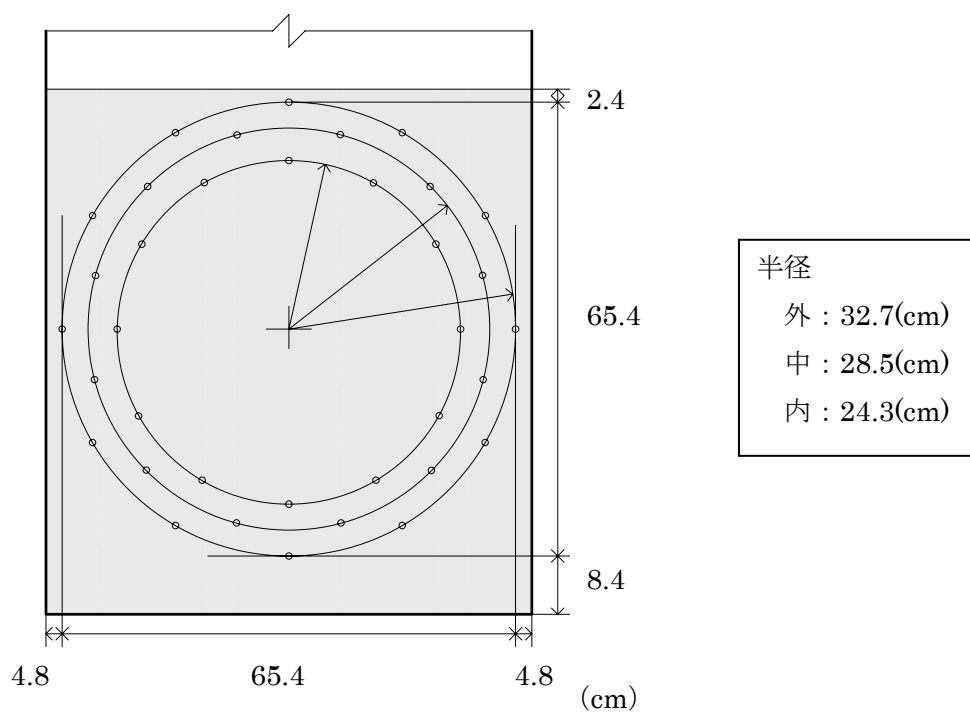


図 6-42 2 階梁接合部詳細

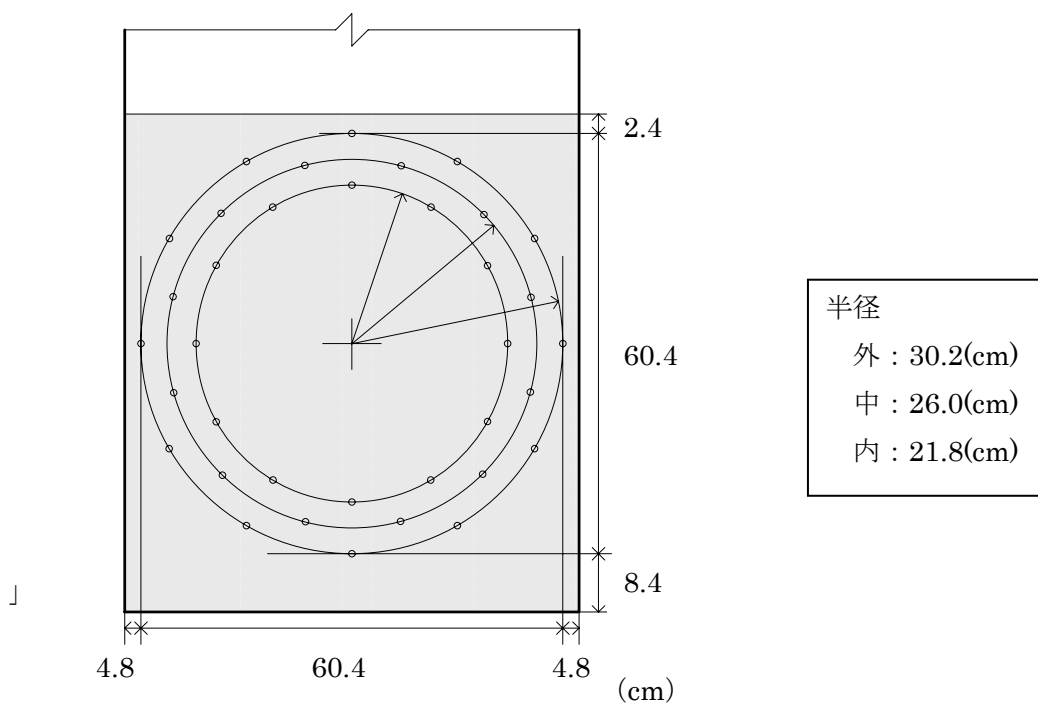


図 6-43 R 階梁接合部詳細

接合部の剛性については第3.4節で紹介した評価式で求めることができる。評価式によって求めた各接合部の剛性は以下に示す通りである。

表 6-20 柱接合部諸元

曲げバネ	
$K_{R1}$	4844700 (kN・cm/rad)
$K_{R2}$	968940 (kN・cm/rad)
$K_{R3}$	48447 (kN・cm/rad)
$K_{R4}$	96894 (kN・cm/rad)
$K_{R5}$	4844700 (kN・cm/rad)
$M_1$	7250 (kN・cm)
$M_2$	14500 (kN・cm)

せん断バネ	
$K_{Q1}$	6598.82 (kN/cm)
$K_{Q2}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q3}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q4}$	6598.82 (kN/cm)
$P_Q$	439.745 (kN)

軸バネ	
$K_{Q1}$	17434.7 (kN/cm)
$K_{Q2}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q3}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q4}$	17434.7 (kN/cm)
$P_Q$	648.335 (kN)

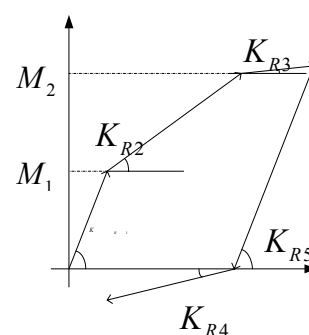


表 6-21 2階梁接合部諸元

曲げバネ	
$K_{R1}$	9985430 (kN・cm/rad)
$K_{R2}$	1997086 (kN・cm/rad)
$K_{R3}$	99854.3 (kN・cm/rad)
$K_{R4}$	199708.6 (kN・cm/rad)
$K_{R5}$	9985430 (kN・cm/rad)
$M_1$	11500 (kN・cm)
$M_2$	23000 (kN・cm)

せん断バネ	
$K_{Q1}$	6598.82 (kN/cm)
$K_{Q2}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q3}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q4}$	6598.82 (kN/cm)
$P_Q$	439.745 (kN)

軸バネ	
$K_{Q1}$	17434.7 (kN/cm)
$K_{Q2}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q3}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q4}$	17434.7 (kN/cm)
$P_Q$	648.335 (kN)

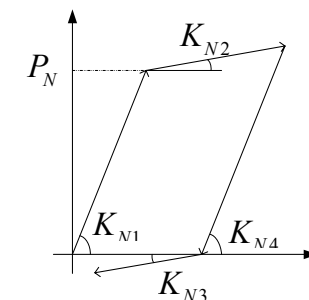
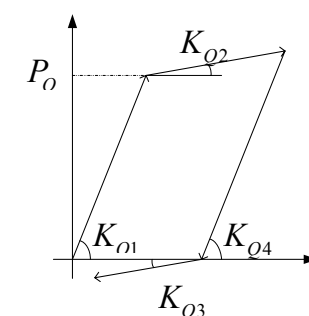


表 6-22 R階梁接合部諸元

曲げバネ	
$K_{R1}$	7359280 (kN・cm/rad)
$K_{R2}$	1471856 (kN・cm/rad)
$K_{R3}$	73592.8 (kN・cm/rad)
$K_{R4}$	147185.6 (kN・cm/rad)
$K_{R5}$	7359280 (kN・cm/rad)
$M_1$	9150 (kN・cm)
$M_2$	18300 (kN・cm)

せん断バネ	
$K_{Q1}$	6598.82 (kN/cm)
$K_{Q2}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q3}$	65.9882 (kN/cm)
$K_{Q4}$	6598.82 (kN/cm)
$P_Q$	439.745 (kN)

軸バネ	
$K_{Q1}$	17434.7 (kN/cm)
$K_{Q2}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q3}$	174.347 (kN/cm)
$K_{Q4}$	17434.7 (kN/cm)
$P_Q$	648.335 (kN)



柱内を通る鋼板を前項の十字型接合部同様、直径 3.2 (cm) のネジボルトを 4 本通したものとした。

めり込みせん断バネの諸元は以下の通りである。

表 6-23 めり込みせん断バネの諸元

めり込みせん断バネ	
$K_{Q1}$	481.861 (kN/cm)
$K_{Q2}$	4.81861 (kN/cm)
$K_{Q3}$	4.81861 (kN/cm)
$K_{Q4}$	481.861 (kN/cm)
$P_Q$	106.97 (kN)

$$P_Q = CA \cdot F_s \quad (\text{kN})$$

$$CA = 303.2 \quad (\text{cm}^2)$$

$$F = 0.3528 \quad (\text{kN/cm}^2)$$

前節で述べたようにT型接合部や十字型接合部は現在の段階ではモデルラーを用いて作成することができない。即ち、ユーザーが各々データを設定していかなければならない。そのため、図 6-40 で構造体をモデル化した、どの部材がどのようなモデルになっているかが理解し難いと思われる。

以下に示す図は構造体の節点番号、部材番号、要素モデル番号をそれぞれ表す。また、これを基に作成した「構造データファイル」、「静的縮合モデル」のファイルを示す。なお、特殊断面ファイルと静的荷重ファイルについては省略する。

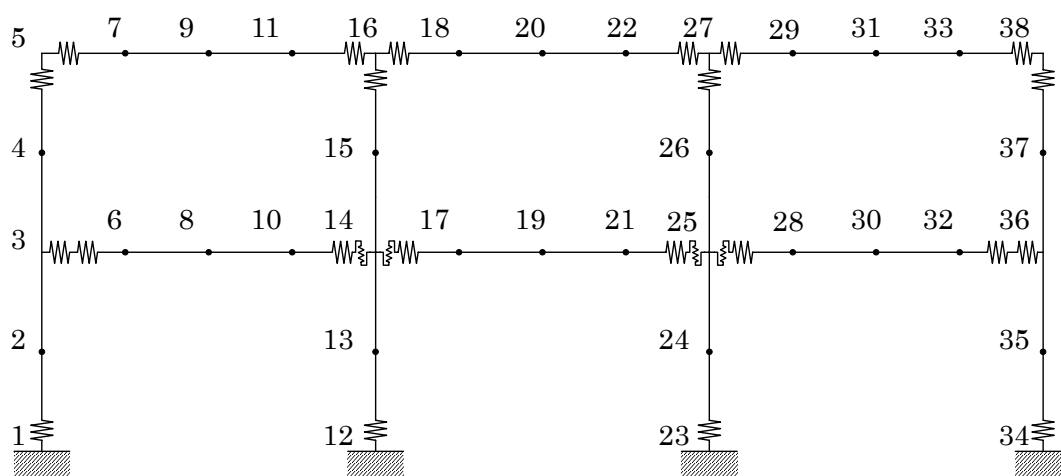


図 4-44 構造体の節点番号

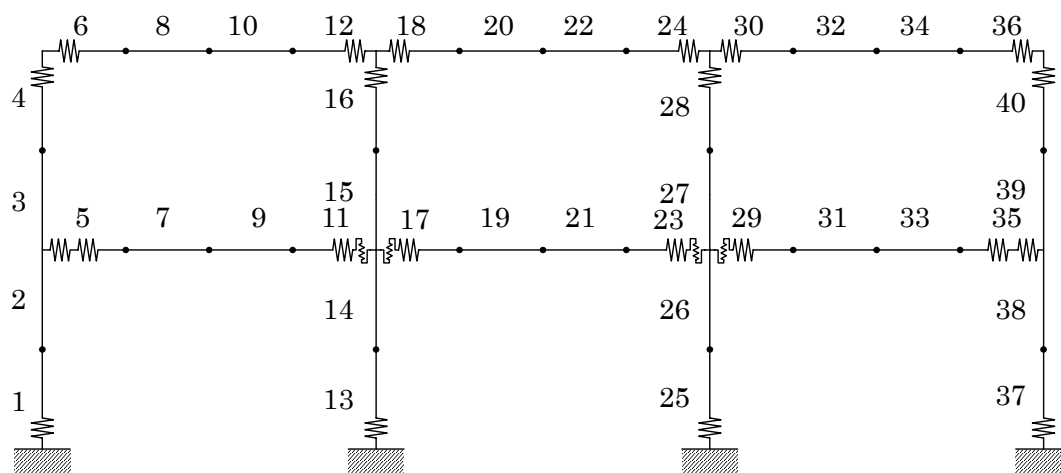


図 4-45 構造体の部材番号

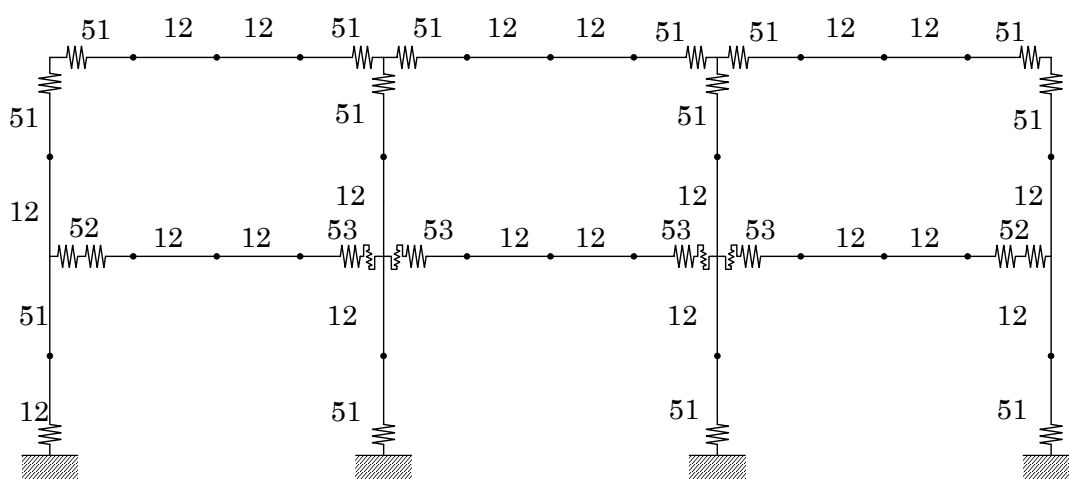


図 4-46 各部材の要素モデル番号

構造データファイル  
(struct.dat)

```

1
2 層 3 スパンラーメン構造の解析
38      7      40      4      0      0
1       0       0       0      0
2       0       0      180    0
3       0       0      360    0
4       0       0      540    0
5       0       0      720    0
6      150      0      360    0

```

SPACE

5	3	6	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	5	7	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	6	8	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	7	9	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	8	10	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	9	11	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	14	10	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	16	11	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
13	12	13	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
14	13	14	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15	14	15	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
16	16	15	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	14	17	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
18	16	18	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
19	17	19	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
20	18	20	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
21	19	21	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22	20	22	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
23	25	21	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24	27	22	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
25	23	24	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
26	24	25	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
27	25	26	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
28	27	26	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
29	25	28	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
30	27	29	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
31	28	30	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
32	29	31	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
33	30	32	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
34	31	33	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
35	36	32	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0
36	38	33	7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
37	34	35	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
38	35	36	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
39	36	37	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
40	38	37	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0

部材の設定

## 静的縮合モデル設定ファイル

(Scom\_M.dat)

```

1
多層多スパンラーメン構造用静的縮合モデル
3      53
左端並列バネ両端中央ファイバー
51     6
5       2      1      2      1      2
0      0.03    0.455  0.03    0.455  0.03
-1     -2     -3     -4     -5     -6
1      12     1      14     1      16
1      1      1      1      1      1
1      1      1      1      1      1
1      1      1      1      1      1

```

左端並列バネ両端中央ファイバーモデル

- ・ 柱頭部
- ・ 柱脚部
- ・ R 階梁の柱梁接合部

1	1	1	1	1	1	
-7	-8	-9	-10	-11	-12	
0	1	0	0	0	2	
2	1	2	0	0	0	
左端並列バネ+並列バネ両端中央ファイバー						
52	7					
5	5	2	1	2	1	2
0	0	0.03	0.455	0.03	0.455	0.03
-1	-2	-3	-4	-5	-6	
1	12	1	14	1	16	
1	22	1	24	1	26	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
-7	-8	-9	-10	-11	-12	
0	1	0	0	0	0	2
2	1	2	0	0	0	
左端せん断バネ+並列バネ両端中央ファイバー						
53	7					
5	5	2	1	2	1	2
0	0	0.03	0.455	0.03	0.455	0.03
-1	-2	-3	-4	-5	-6	
11	12	1	14	15	16	
1	22	1	24	1	26	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
1	1	1	1	1	1	
-7	-8	-9	-10	-11	-12	
0	1	0	0	0	0	2
2	1	2	0	0	0	

左端並列バネ+並列バネ両端  
中央ファイバーモデル  
・ 2階梁端部

左端せん断バネ+並列バネ両  
端中央ファイバーモデル  
・ 2階梁中央部

これらの他に特殊断面ファイル (fiber.dat) と静的荷重ファイル (sload1.dat) を作成し、さらに各コントロールファイルを作成することにより図 6-45 のように 2 層 3 スパン骨組構造の解析が可能となる。

## 6.7 まとめ

本章では鋼板挿入型ドリフトピン接合に特化して解析を行い、実験結果と比較することでモデル化の妥当性を検証した。その結果を以下にまとめる。

1. ドリフトピン接合部をバネモデルに置換することによって、SPACE による木造骨組の解析が可能となった。
2. 接合部の剛性をモデラーで作成することにより、接合部のバネパラメータ設定が容易となった。
3. 全般的に今回の解析では最大耐力に多少の誤差が見られた。

木質ラーメン構造の解析の精度、特にドリフトピンの降伏後の挙動の整合性をより高めていくために、今後も解析・実験データを蓄積していく必要がある。しかも現在のモデラーには多くの課題を抱えている。以下に、今後の課題をまとめる。

1. 解析モデル作成は基本的な骨組のみであり、今後はドリフトピン接合による多層多スパン骨組構造の解析モデルがモデラーを用いて作成され、容易に解析可能となる必要がある。
2. 現在、初期ガタを現在では見掛けの剛性として解析しているが、今後は初期にスリップする履歴モデルを開発する。
3. 現在、平面骨組モデルにおける解析を行っているが、鋼板挿入型ドリフトピン接合を用いた立体フレームへと解析の幅を広げていくことも必要となる。その際、接合部における面外方向の挙動や、ボルト接合や二面せん断形式など他の接合方法に関するモデル化が行われ、解析手法の確立が求められる。

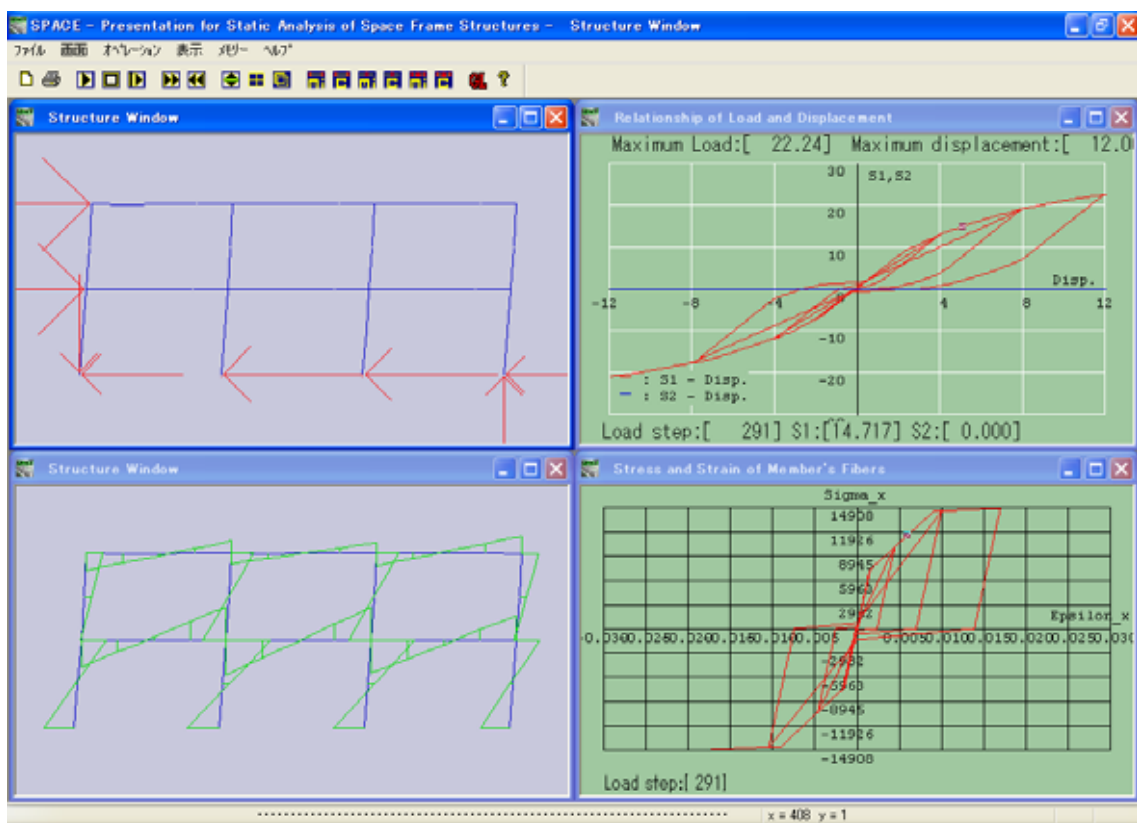


図 6-47 2 層 3 スパンラーメン構造の解析結果