

ドリフトピンを用いた木質ラーメン構造の柱脚接合部に関する研究

荘所 直哉* 藤谷 義信** 大野 義昭*** 大橋 好光****

Study on the Column Base Joint of a Timber Frame Structure Using Drift Pins

Naoya SHOJO, Yoshinobu FUJITANI, Yoshiaki OHNO, Yoshimitsu OHASHI

ABSTRACT

In this paper, the column base joint (the moment resisting joint) using drift pins is modeled for the springs, and the moment-rotation angle relationships are calculated. The spring elements relating to the moment transfer are the connecting elements by the drift pins and the round bar in the part of the tension side, and not only the same drift pin element but also the compressive strain inclined to the grain in the part of compression side. It experiments with each element and the results are made into the characteristics of the springs. Comparing the results calculated by the spring models and the bending experimental results of the column base joints. Furthermore the in-plane shear experiments of the timber frame structure are carried out, and comparing the results obtained from it and the results calculated by the spring models, the validity of the modeling is confirmed.

KEY WORDS: timber frame structure, column base joint, drift pin, laminated veneer lumber

1. はじめに

木質構造は、兵庫県南部地震により多くの被害を被ったことを背景に、精力的に研究が行われ、構造力学的に曖昧だった部分が解明されつつある。平行して新しい分野の研究も進められており、木質ラーメン構造の研究はその一つである。ラーメン構造は耐力壁に依存しない構法なので、平面プランの自由度を高められ、また、SI住宅 (Skeleton-Infill Housing) が可能で、木質構造による実現が期待されている。しかし、ラーメン構造で地震力等の水平力に抵抗するには、剛節あるいはそれに準じる接合部 (モーメント抵抗接合部) が必要である。

著者らはこれまでに、丸鋼とドリフトピンを用いた接合部を提案し、柱-梁接合部の曲げ実験を通して接合部の回転剛性および曲げ耐力の評価を行った¹⁾。これらの実験により、接合部に曲げモーメン

トが働くと丸鋼には引張応力と圧縮応力が作用することを確認した。そこで、この丸鋼を固定するドリフトピン接合部の評価を行うため、要素実験としてドリフトピン接合部のせん断実験を行った^{1),2),3)}。繊維と平行方向のせん断を受ける梁側のドリフトピン接合要素と繊維と直交方向のせん断を受ける柱側のドリフトピン接合要素に分けて要素実験を行った。これらの実験結果を用いて、接合部の曲げモーメント抵抗要素であるドリフトピンと木材のめり込みをバネモデルに置換し、接合部の回転剛性の算定式を導出し、曲げ実験との比較を行い、良好な対応結果を得た^{2),3)}。

これまでは主に柱-梁接合部について報告を行ってきたが、本報では、ラーメン構造を構成するために必要な柱脚接合部について報告する。2章で柱脚接合部の曲げ実験を通して柱脚接合部の回転剛性や曲げ耐力の評価を行う。3章では柱脚接合部のモーメント抵抗要素をバネに置換したモデルより、モーメント-回転角関係の評価式を提案し、2章で示した柱脚接合部の曲げ実験の結果と比較し、モデ

* 建築学科
** 広島国際大学
*** (株)ウッドワン
**** 武蔵工業大学

ル化と評価式の妥当性について検討する。

2. 柱脚接合部の曲げ実験

2.1 試験体

試験体は、幅が 360mm、厚さが 150mm で材長 3060mm の構造用 LVL (曲げヤング係数区分 110E、水平せん断性能 60V-51H) の柱である。柱脚接合部には鋼材の SS400 に相当する直径 35.0mm の丸鋼と直径 16.0mm のドリフトピンを用いた。丸鋼を柱の木口から挿入し、ドリフトピンを打ち込み固定する。ドリフトピンを打ちこむ間隔は、112mm である。ドリフトピンの本数は、1本の丸鋼につき5本で合計10本である。試験体数は2体である。試験体の各部位の仕様を表1に示す。

表 1 試験体の部材の仕様

柱	材料 : 構造用 LVL 断面 : 150 × 360 × 3060 (厚さ × 幅 × 長さ) 区分 : 110E ¹ (曲げヤング係数区分) 60V-51H ² (水平せん断性能)
丸鋼	断面 : 35, 長さ 600 材質 : JIS G 3101 (一般構造用圧延鋼材) 記号 : SS400
ドリフトピン	断面 : 16, 長さ 150 材質 : JIS G 3101 (一般構造用圧延鋼材) 記号 : SS400

1 当該区分に属する曲げヤング係数の平均値の意味 (kg/cm²)

2 せん断強さの基準値を意味し、積層方向により縦使いの場合と平使いの場合の二種類ある (kg/cm²)

以下の図 1 に試験体の形状を示す。

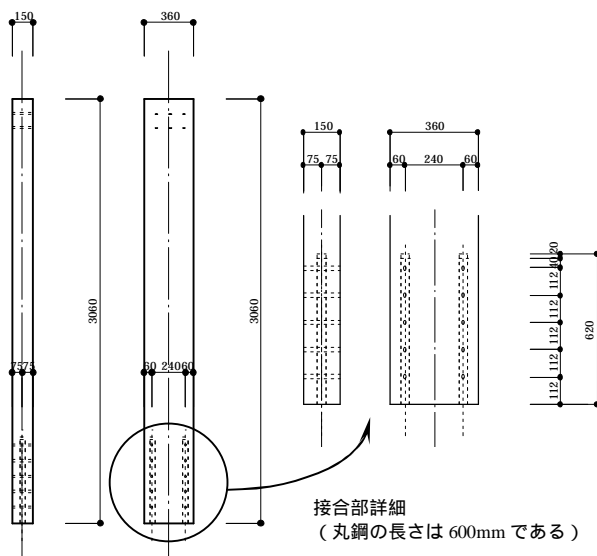


図 1 試験体の形状

2.2 実験方法

柱脚接合部の曲げ実験は、壁体の面内せん断試験装置の油圧ポンプおよび複動式ジャッキを用いて、

正負繰り返し水平交番加力を破壊に至るまで行った。

加力方法は、正負交番繰り返し加力とし、繰り返し履歴は見かけのせん断変形角が 1/500, 1/350, 1/250, 1/175, 1/120, 1/85, 1/60, 1/45, 1/30rad の正負変形時に行う。最大荷重に達した後、最大荷重の 80% の荷重に低下するまで加力した。

変位計は合計 4ヶ所に取付け、変位計 1 で試験体頭部の水平方向変位、変位計 2 で試験体脚部の水平方向変位を、変位計 3 および変位計 4 で柱脚部の鉛直方向変位を測定した。以下の図 2 に実験方法と変位の測定位置を示す。

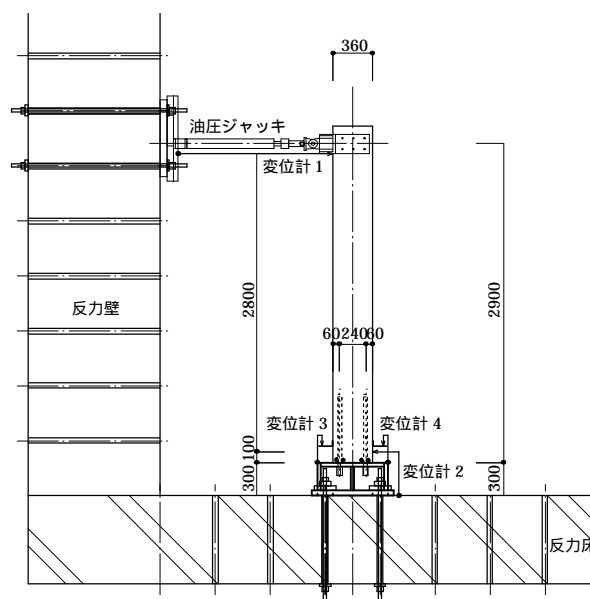


図 2 実験方法と測定位置

2.3 実験結果

2.3.1 モーメント - 回転角関係

実験結果から接合部におけるモーメントと回転角の関係を述べる。モーメントと回転角は(1)式と(2)式によって算出する。

・ モーメント M

$$M = P \times H \quad (1)$$

P : ロードセルより測定された荷重値 (kN)

H : 加力点から柱下端部までの距離 (2900mm)

・ 回転角 θ

$$\theta = \frac{\delta_3 - \delta_4}{560} \quad (2)$$

δ_3 : 変位計 3 の鉛直変位値 (mm)

δ_4 : 変位計 4 の鉛直変位値 (mm)

以下の図 3 と図 4 に、2 体の試験体のモーメント - 回転角関係を示す。

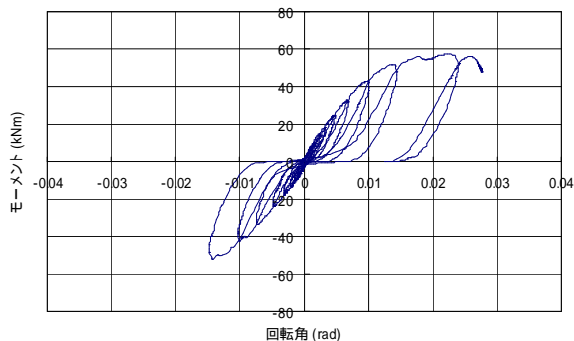


図 3 試験体 1 のモーメント - 回転角関係

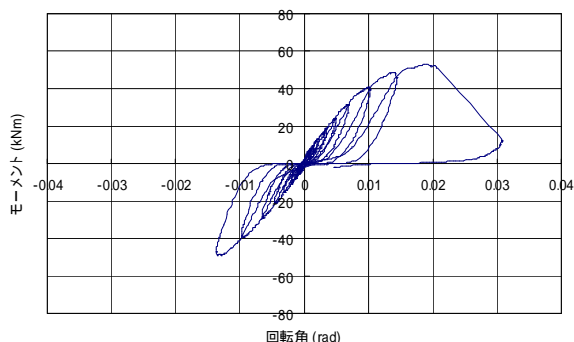


図 4 試験体 2 のモーメント - 回転角関係

ドリフトピンの径と木材部分の先孔の径が同径だったので、回転角が小さい段階でスリップは見られなかった。残留変形は初期にはほとんど見られなかったが、回転角が大きくなるにつれて残留変形が大きくなった。また、残留変形と同じ傾向でスリップも発生している。

2.3.2 接合部の性能評価

図 3 と図 4 で示したモーメント - 回転角関係より、木造軸組工法の試験方法と評価方法⁴⁾に準じた接合部の性能評価の結果を示す。

表 2 柱脚接合部の評価結果

	M_y	θ_y	M_u	θ_u	R
試験体 1	33.7	0.0083	54.4	0.0281	4086
試験体 2	31.0	0.0082	42.3	0.0270	3882
平均	32.2	0.0083	48.1	0.0276	3986

ここに、表 2 に示す諸記号は次の通りである。
 M_y : 降伏モーメント(kNm) θ_y : 降伏回転角(rad)
 M_u : 終局モーメント(kNm) θ_u : 終局回転角(rad)
 R : 回転剛性(kNm/rad)

回転剛性は 4000 (kNm/rad) 程度であった。柱梁接合部の回転剛性²⁾とほぼ同様の剛性を示した。しかし、降伏モーメントや終局モーメントは、柱脚接合部の方が小さい結果となった。降伏回転角や終局

回転角も小さく、変形性能は大きくない。柱脚接合部の変形性能が小さい理由として、柱 - 梁接合部は部材相互のめり込みがあるのに対し、柱脚接合部はそれがないためと考えられる。

2.3.3 破壊状況

破壊は 2 体とも試験体脚部のドリフトピン部分の母材の割裂破壊であった。試験体の破壊の一例として試験体 1 の脚部の破壊状況を図 5 に示す。



図 5 試験体の破壊状況

3. 柱脚接合部の評価式

3.1 柱脚接合部のモデル化と評価式の導出

本節では、各モーメント抵抗要素をバネに置換して、柱脚接合部のモーメント - 回転角関係の評価式の提案を行う。柱脚接合部の外力モーメントに抵抗する要素はドリフトピン接合要素とめり込み要素の 2 つある。なお、ドリフトピン接合要素バネは圧縮、引張に対して抵抗するが、めり込み要素バネは圧縮のみに抵抗する。以下の図 6 に各要素をバネ置換したモデルを示す。

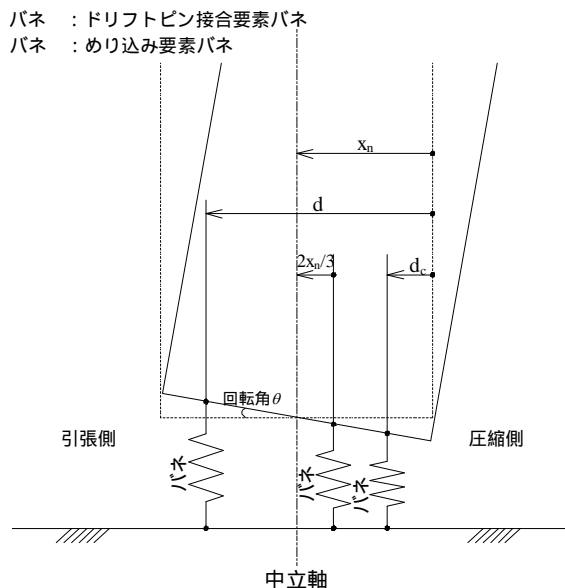


図 6 柱脚接合部のモデル化

ドリフトピン要素バネとめり込み要素バネの力と変位の関係は次式で表される。

$${}_c P_S = K_C \cdot {}_c \delta_S \quad (1)$$

$${}_T P_S = K_T \cdot {}_T \delta_S \quad (2)$$

$$P_m = K_m \cdot \delta_m \quad (3)$$

また, K_m はめり込み要素バネのバネ剛性を示し, めり込み体積に比例すると仮定しためり込み剛性を用いて次式により表せる。

$$K_m = \frac{1}{2} k_m \cdot x_n \cdot y_p \quad (4)$$

ここに, 諸記号は次の通りである。

- ${}_c P_S$: 圧縮側バネ に作用する力
- K_C : 圧縮側バネ の剛性
- ${}_c \delta_S$: 圧縮側バネ の変位
- ${}_T P_S$: 引張側バネ に作用する力
- K_T : 引張側バネ の剛性
- ${}_T \delta_S$: 引張側バネ の変位
- P_m : バネ に作用する力
- K_m : バネ の剛性
- δ_m : 三角形めり込み変形の最深部の変位 (圧縮縁の変位)
- k_m : 部材材料によって決まるめり込み剛性
- x_n : 圧縮縁から中立軸位置までの距離
- y_p : 柱部材の幅

次に, モーメント回転角関係の評価式を導出する。平面保持の仮定が成立つと仮定すると, 圧縮側バネの変位 ${}_c \delta_S$, 引張側バネ の変位 ${}_T \delta_S$, およびめり込み要素バネの変位 δ_m の関係は次式で表される。

$${}_c \delta_S = \frac{x_n - d_c}{x_n} \cdot \delta_m \quad (5)$$

$${}_T \delta_S = \frac{d - x_n}{x_n} \cdot \delta_m \quad (6)$$

回転角 θ は圧縮側バネ の変位 ${}_c \delta_S$, 引張側バネ の変位 ${}_T \delta_S$, めり込み要素バネの変位 δ_m を用いて次式で表される。

$$\theta = \frac{{}_c \delta_S}{x_n - d_c} = \frac{{}_T \delta_S}{d - x_n} = \frac{\delta_m}{x_n} \quad (7)$$

(5), (6)式より, 圧縮側バネ と引張側バネ の力と変位の関係は次式で表される。

$${}_c P_S = K_C \cdot {}_c \delta_S = K_C \cdot \frac{x_n - d_c}{x_n} \cdot \delta_m \quad (8)$$

$${}_T P_S = K_T \cdot {}_T \delta_S = K_T \cdot \frac{d - x_n}{x_n} \cdot \delta_m \quad (9)$$

また, 軸方向の力のつり合いが成立つと仮定すると, 各要素の力の関係は次式で表される。

$${}_c P_S + P_m = {}_T P_S \quad (10)$$

(3), (4), (8)および(9)式を(10)式に代入すると次式が得られる。

$$K_C \cdot \frac{x_n - d_c}{x_n} \cdot \delta_m + \frac{1}{2} k_m \cdot x_n \cdot y_p \cdot \delta_m = K_T \cdot \frac{d - x_n}{x_n} \cdot \delta_m \quad (11)$$

(11)式を x_n について解くと中立軸位置 x_n を求めることができる。

$$x_n = -\frac{K_C + K_T \pm \sqrt{(K_C + K_T)^2 + 2k_m \cdot y_p (K_C \cdot d_c + K_T \cdot d)}}{k_m \cdot y_p} \quad (12)$$

また, 中立軸まわりのモーメントは次式となる。

$$M = {}_c P_S (x_n - d_c) + {}_T P_S (d - x_n) + P_m \cdot \frac{2}{3} x_n \quad (13)$$

(1)~(4)式を(13)式に代入すると次式が得られる。

$$M = K_C \cdot {}_c \delta_S (x_n - d_c) + K_T \cdot {}_T \delta_S (d - x_n) + \frac{1}{3} k_m \cdot y_p \cdot \delta_m \cdot x_n^2 \quad (14)$$

(7), (14)式より ${}_c \delta_S$, ${}_T \delta_S$, δ_m を消去し, 回転角 θ について整理すると, モーメントと回転角の関係式を求めることができる。

$$M = R \cdot \theta \quad (15)$$

ここに, R は回転剛性を示し次式で表される。

$$R = K_C (x_n - d_c)^2 + K_T (d - x_n)^2 + \frac{1}{3} k_m \cdot y_p \cdot x_n^3 \quad (16)$$

3.2 モーメント抵抗要素の要素実験

ここでは前節で導出したモーメント - 回転角関係の算定式に代入する各バネの剛性を得るための実験について述べる。柱脚接合部のモーメント抵抗要素の要素実験はドリフトピン接合要素の引張実験とめり込み要素のめり込み実験である。実験の詳細は文献3)に報告しているので結果のみ示す。

・ドリフトピン接合要素について

ドリフトピン接合要素の引張実験を行った結果, 以下の荷重 - 変位関係と性能評価結果を得た(図 7 および表 3 参照)。

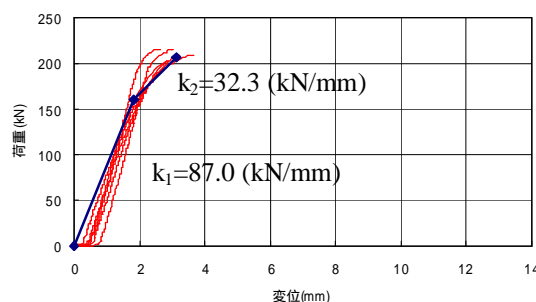


図 7 ドリフトピン接合要素の荷重 - 変位関係

表 3 ドリフトピン接合要素の性能評価の結果

	P_y	δ_y	P_{max}	δ_{pmax}	K
試験体 1	182.0	2.18	209.4	3.21	83.5
試験体 2	130.3	1.53	209.4	3.65	85.2
試験体 3	138.3	1.65	203.7	2.89	83.8
試験体 4	193.5	2.05	203.7	2.86	94.4
平均値	161.0	1.85	206.5	3.15	86.7

ここに、表 3 に示す諸記号は次の通りである。

- P_y : 降伏耐力(kN) δ_y : 降伏変位(mm)
- P_{max} : 最大荷重(kN) $\delta_{p_{max}}$: 最大荷重時変位(mm)
- K : 剛性(kN/mm)

算定式に代入する剛性は原点と降伏点を剛性と降伏点と最大荷重点を結んだ剛性とする。

・めり込み要素について

めり込み要素のめり込み実験を行った結果、以下の応力 - 変位関係を得た (図 8 参照)

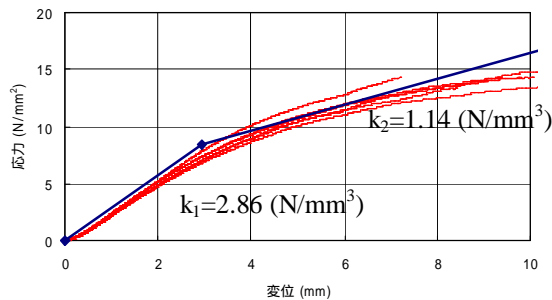


図 8 めり込み要素の応力 - 変位関係

ここで、このめり込み実験は繊維直交方向のめり込み実験の結果である。柱脚接合部のめり込みは繊維方向に発生するため、以下の 3 点の仮定により繊維方向のめり込み要素の剛性を求めた。

- ・めり込み剛性はヤング係数と線形の関係性を有するものとする
 - ・繊維方向のヤング係数は繊維直交方向のヤング係数の 25 倍とする⁵⁾
 - ・降伏変位は繊維方向の違いによらない
- 上記の仮定でめり込み剛性を求めると、以下のようになる。

$$k_1 = 71.5 \text{ (N/mm}^3\text{)}, k_2 = 28.5 \text{ (N/mm}^3\text{)}$$

3.3 実験結果と算定結果の比較

柱脚接合部のモデル化と評価式から接合部のモーメント - 回転角関係の算定を行う。評価式の各バネ剛性は前節で示した各要素実験からバイリニア型にモデル化した結果を用いる。モーメント - 回転角関係の算定方法を以下に示す。

- 評価式より、中立軸位置 x_n を求める
 - 接合部を微小回転させ、微小回転角増分 $\Delta\theta$ における各要素バネ位置の変位を求める
 - 各要素バネの変位より各要素バネの剛性を求め、評価式より回転剛性 R を求める
 - $M = R \cdot \Delta\theta$ より、曲げモーメントを算定する
- いずれかの要素バネが終局点に達するまで ~ を繰り返す。

前節で示した柱脚接合部の曲げ実験の結果と上記で算定したモーメント - 回転角関係の比較を図 9 と図 10 に示す。また、結果一覧を表 4 に示す。

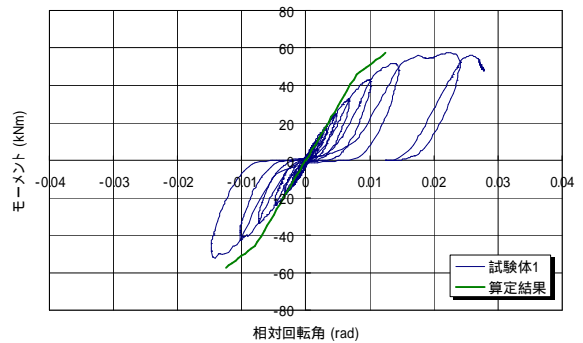


図 9 試験体 1 と算定結果の比較

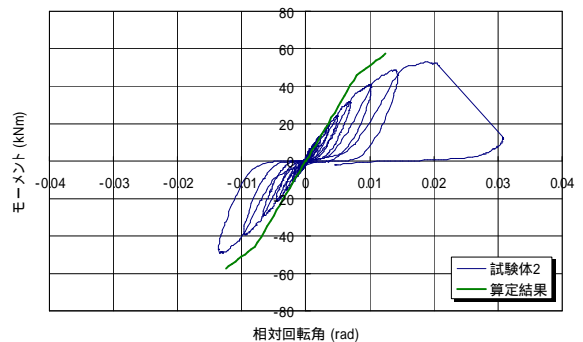


図 10 試験体 2 と算定結果の比較

表 4 実験結果と算定結果の評価結果一覧

	M_y	θ_y	M_u	θ_u	R
試験体 1	33.7	0.0083	54.4	0.0281	4086
試験体 2	31.0	0.0082	42.3	0.0270	3882
平均	32.2	0.0083	48.1	0.0276	3986
算定結果	43.4	0.0075	57.4	0.0130	5780

ここに、表 4 に示す諸記号は次の通りである。

- M_y : 降伏モーメント(kNm) θ_y : 降伏回転角(rad)
- M_u : 終局モーメント(kNm) θ_u : 終局回転角(rad)
- R : 回転剛性(kNm/rad)

実験結果と算定結果を比較した結果、初期剛性は一致している。しかし降伏耐力や終局耐力は算定結果の方が大きい傾向にある。この理由として、ドリフトピン接合要素の要素実験は純引張であるのに対して、柱脚接合部の曲げ実験は曲げ変形によってドリフトピン部分より部材を繊維方向に裂く力が働くためであると考えられる。この力により部材の破壊が進み、荷重の低下が早期に起こる。また、実験結果の方が降伏回転角、終局回転角が大きい結果となっている点からも同様に考察できる。

4. まとめ

ドリフトピンを用いた木質ラーメン構造の柱脚接合部の曲げ実験を行って性能を把握した。また、柱脚接合部のモーメント - 回転角関係の評価式を導出して実験結果と比較した。以下に本報告のまとめを示す。

- ・ 柱脚接合部の曲げ実験の結果、回転剛性は 4000 (kNm/rad) 程度であった。同形式の柱 - 梁接合部の回転剛性とほぼ同様の剛性を示したが、降伏モーメントや終局モーメントは柱脚接合部の方が小さい結果となった。また、降伏回転角や終局回転角も柱 - 梁接合部に対して小さく、変形性能は大きくなかった。
- ・ 柱脚接合部のモーメント抵抗要素をバネモデルに置換してモーメント - 回転角関係の評価式を導出した。実験結果と比較した結果、初期剛性が一致していたことから評価式の有用性は明らかである。しかし、降伏点や終局点で実験結果と若干の差があるので代入するバネ剛性の検討が必要である。

参考文献

- 1) 大野義昭, 中本祐昌, 荘所直哉, 乃込寛之, 槇島裕二, 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接合部の実験および回転剛性に関する一考察, 日本建築学会技術報告集第 14 号, pp107~112, 2001.12.
- 2) 大野義昭, 槇島裕二, 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, pp.85-92, 2003.5.
- 3) 荘所直哉, 藤谷義信, 槇島裕二, 乃込寛之, 大野義昭, 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 その 2 モーメント抵抗要素の実験と実大実験での検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 578 号, pp.91-97, 2004.4.
- 4) 日本住宅・木材技術センター: 木造軸組工法住宅の許容応力度設計, 2001.12
- 5) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2003.10.