実務設計における木質ラーメンの構造解析に関する一考察

A STUDY OF THE STRUCTURAL ANALYSIS FOR TIMBER FRAME ON ACTUAL DESIGN

景山 誠 — *1 村上雅英 — *2

Makoto KAGEYAMA — *1 Masahide MURAKAMI — *2

キーワード：
木質ラーメン, 数値解析, 鉛直荷重, 靱性, 危険断面位置

Keywords:
Moment resistance timber frame, Numerical analysis, Vertical load, Ductility, Critical section position

This paper elucidated two problems to calculate the structural performance evaluation of the moment resistance timber frame ("frame") with a vertical load by structural analysis on actual design. Problems as follows; ultimate strength of the frame that connection is brittle, and frame structural performance that critical section position of column-beam connection is not on structural axis. For numerical analysis, it is confirmed that ultimate strength of the frame is fallen because of a vertical load, and critical section position should evaluate appropriate position for each connection specification.

1. はじめに

現在、木造住宅を対象として様々な仕様の木質ラーメンがあるが、それらの多くには以下の問題点がある。

木質ラーメンのせん断耐力 P_0 は、終局耐力 P_u と塑性率 μ で求める $0.2P_u\sqrt{(2\mu-1)^{1/3}}$ か特定変形角時の耐力 $P_{1/120}$ ²⁾で決まることが多い。木質ラーメンの構造性能を試験で求める場合、試験装置の制約で特定のスパンや階高に対して梁に鉛直荷重を載荷しないケースが多い。また、実際は鉛直荷重を負担すると P_u も下がるため、 P_0 を数値解析で求める場合は弾性範囲のみでなく終局状態も含めた弾塑性解析で評価すべきである。よって P_0 が $P_{1/120}$ で決まるとみなして弾性解析のみで評価するのは、必ずしも安全側とはいえない。一方、複合応力状態の接合部の構造性能を試験から評価する場合、危険断面位置は仕様毎で異なるが、回転パネを危険断面位置に設けるため剛域を設定することで適切に評価できることが既報³⁾で明らかとなった。文献3)では、本報で対象とする金物で構成される接合部や、ラグスクリューボルト(LSB)接合部で検討しており、後者は特に剛域を長く設定する必要性が指摘されている。また、剛域を設定する力学的根拠は、接合部内でせん断力が木材から金物へ伝達される抵抗機構に起因する。よって、金物を用いる接合部は、せん断力が構造芯で伝達される抵抗機構でない限り、このように剛域を設定する評価が必要と考えられる。また、接合部の性能を試験で評価する際のせん断スパンの適切な長さを明確に示した規準もない。

しかし、実務設計で木質ラーメンの構造性能を評価する場合、スパンや階高の違いや鉛直荷重の影響が無視されているケースもある。また、これらが考慮されていたとしても、接合部内でせん断力

が伝達される位置を危険断面位置とし、この位置に回転パネを設けて評価することを記した規準がない。そのため実務では、数値解析を用いる場合に、接合部の回転パネの適切な位置を十分に検討せずに設計される場合もあるのが現状である。

よって本報では、実務設計で行われている上記の方法の妥当性を確認するため、下記の検討を数値解析で行い考察を述べる。①：鉛直荷重の有無による木質ラーメンの終局時のせん断耐力の差異を、接合部の靱性を変数として検討する。②：危険断面位置が柱梁部材の構造芯とならない仕様の柱頭接合部を想定し、せん断スパンを変数として接合部の復元力特性を求め、危険断面位置を適切な位置とした場合と構造芯とした場合の比較を行う。これらの検討と考察は5章で行う。そのために必要な試験や解析として、鉛直荷重の有無を変数として木質ラーメンの水平加力試験を行い、その影響を3章で述べる。また、解析結果を試験結果と比較し、終局状態を含めて数値解析で木質ラーメンの挙動をどの程度再現できるかの検討を4章で行う。以降、本報で「架構」は木質ラーメンを指す。

2. 対象とする木質ラーメンの仕様ならびに既報³⁾の概要

柱頭・柱脚接合部は、図1のように在来軸組工法用の鋳鉄製金物2個と木材をドリフトピンで接合して組立てる。木材はE120-F330等級の対称異等級構成集成材、樹種はオウシュウアカマツとし、柱断面は120×240mm、梁断面は120×330mmである。柱頭接合部の柱と梁受金物は六角ボルトでつなぎ、試験体製作時は経年変化による緩みを考慮し20Nmのトルクでナットを弱く締め付けた。

本報で対象とする木質ラーメン接合部について、既報³⁾では柱

*1 近畿大学大学院総合理工学研究科環境系工学専攻 大学院生・工修
(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

*2 近畿大学理工学部建築学科 教授・工博

*1 Graduate Student, Ininterdisciplinary Graduate School of Science & Engineering, Kinki Univ., M. Eng.

*2 Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Science & Engineering, Kinki Univ., Dr. Eng.

図1 接合部仕様

図2 要素試験用試験体仕様

図3 接合部のモデル化

図5 各接合部のM-θ関係

頭・柱脚接合部を抽出した図2の要素試験体で、曲げとせん断の複合応力試験や、純曲げ・純せん断の基準耐力試験（以降、要素試験）を行い、危険断面位置に回転バネを設けるため剛域を設定するモデル化により、せん断スパンによらず曲げ耐力が適切に評価できることを示した。本接合部の危険断面位置は、図3のように柱頭接合部では柱側面、柱脚接合部ではドリフトピンの剛心位置であることを一連の試験で見出した。これらの位置は、接合部内でせん断力が金物或いは他方の部材へ伝達される位置である。また本接合部の構造性能は、図3のように剛域を設定した補正スパン H_2 で評価することで、複合応力試験で得た柱頭・柱脚接合部の降伏耐力、最大耐力は複合応力の検定式（1）の $n=2$ に概ね近くなることを示した。紙面の都合上、文献3）に掲載した柱脚接合部の最大耐力時の結果を、剛域を設定したLSB柱脚接合部の結果と合せて図4に示す。

$$(M_d/M_a)^n + (Q_d/Q_a)^n \leq 1 \quad (1)$$

(Mは曲げモーメント、Qはせん断力、添え字dは作用する力、添え字aは純曲げ又は純せん断状態での許容耐力。)

ここでは複合応力試験の結果の一例として、図2の公称スパン H_1 が柱頭で1500mm（試験体名CT15）、柱脚で1200mm（試験体名CB12）での、試験結果を補正スパン H_2 で評価した曲げモーメント一回転角関係（M-θ関係）の平均の包絡線を図5に示す。

3. 木質ラーメンの水平加力試験

3.1 試験概要

鉛直荷重の有無を実験変数とした木質ラーメンの水平加力試験を行った。鉛直荷重は、柱頭接合部が長期で許容曲げモーメント M_{Ly} となる荷重を予め数値解析で求めた。 M_{Ly} は、既報³⁾の要素試験から完全弾塑性評価⁴⁾による短期基準曲げモーメント M_{Sy} に1.1/2を乗じて求めた。なお、本報での低減係数 α は1.0とした。

試験概要を図6に示す。試験体のスパンは4P、樹種や仕様は2章と同一で試験は鉛直荷重なし（4P-0-1～3）、鉛直荷重45kN（4P-45-1～3）の2通り実施し、試験体数は各3体とした。

図4 複合応力の検定一覧（平均値）

図6 実大架構試験概要

表1 実大架構試験結果（平均値）

		4P-0	4P-45
K	(kN/rad.)	931	867
P_u	(kN)	19.76	17.84
μ	-	3.150	3.251
P_{max}	(kN)	21.83	19.03
①	P_y	12.86	11.81
②	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	9.07	8.35
③	$2/3P_{max}$	14.55	12.69
④	$P_{1/120}$	8.99	7.85
	min(①～④)	8.99	7.85

試験は、図6のように梁と反力柱をピンと鉛直ローラーで接合し、柱脚金物を固定した反力架台を水平移動させて加力した。梁に作用させる鉛直荷重は常に一定値となるよう、油圧式アクチュエーターで荷重制御している。また、鉛直荷重用の加力装置は水平加力装置から独立しているので、実際と同じように鉛直荷重を梁の鉛直方向に載荷しながら水平加力できる。加力履歴は、制御変形角を1/600、1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30、1/15、1/10rad.の正負交番3回繰返し漸増载荷とした。

3.2 試験結果

各試験体の荷重-変形角関係（P-R関係）の包絡線を図7に、各特性値の平均値を表1に示す。架構の耐力評価時の終局変形角 R_u の上限は1/15rad.とする。図7より、鉛直荷重なしの荷重は最大耐力以降ほとんど低下しない。この理由の1つとして、図5のように柱頭接合部は降伏後も緩やかに耐力が上昇し続けるのに対し、柱脚接合部は最大耐力以降に低下するため、両者の耐力が相殺されることが挙げられる。また、最大耐力以降の架構の荷重低下の度合いは、鉛直荷重ありの方が顕著であった。短期基準せん断耐力（ P_0 ）は鉛直荷重の有無によらず特定変形角時の耐力（ $P_{1/120}$ ）で決定し、各特性値は鉛直荷重ありの方が低かった。

3.3 鉛直荷重の影響による考察

本報では、鉛直荷重が木質ラーメンのせん断耐力に与える影響を次の2点に着目して検討する。

3.3.1 各接合部の降伏による影響

図8に各接合部が降伏モーメント M_y に達した時のプロットと、架構の荷重-変形角関係の一例を示す。各接合部の危険断面位置の曲げモーメントは図8(c)の柱に貼付したひずみゲージから推測した架構のモーメント分布から求め、 M_y は4.2で述べる復元力特性とした。鉛直荷重なしでは各接合部の降伏時期は比較的近いのに対し、鉛直荷重ありでは水平力で梁の上側が引張側となる接合部が、鉛直荷重による曲げモーメントのオフセット分だけ早期に降伏した。この現象が架構に与える影響はP-Δ効果と併せて次に述べる。

3.3.2 P-Δ効果の影響

架構の水平加力試験では、図7のように最大耐力以降の耐力低下

図7 P-R関係一覧

図8 接合部の降伏とP-R関係一覧

図9 鉛直荷重を負担する
架構の力のつりあい

図10 M-R関係一覧

図11 解析モデル

(a) 柱頭接合部

(b) 柱脚接合部

図12 M、θの座標

図13 復元力特性一覧

の割合は、鉛直荷重ありの方が大きい。図9より、P-Δ効果を考慮した架構全体に作用するモーメントは、

$$M = PH + W\delta \quad (2)$$

となる。図10に、式(2)で求めた架構全体のモーメント-変形角関係(M-R関係)の、鉛直荷重の有無での平均の包絡線を示す。また、P-Δ効果の影響を表す鉛直荷重Wと変位δの積も併せて示す。架構全体の曲げモーメントで評価すると、P-Δ効果のみであれば鉛直荷重の有無による差はない。しかし、図10のように1/120rad.時の架構全体のモーメントは荷重ありの方が8%程度低い。P-Δ効果以外の影響があると考えられる。これは3.3.1の知見より、鉛直荷重の影響で接合部が早期に降伏していることから、1/120rad.付近での架構のせん断耐力は、接合部の降伏による架構の剛性低下の影響といえる。この時、架構の同一変形角時に、鉛直荷重なしよりありの方が、水平加力時に梁の下端が引張側となる開く側の柱頭接合部では、鉛直荷重により回転角は小さくなり負担するモーメントも小さくなるのに対し、早期に降伏する閉じる側の回転角は大きくなる。また、本報で対象とした柱頭接合部は、降伏以降も耐力が緩やかに上昇する。よって、鉛直荷重ありでの架構の耐力低下には、柱頭接合部が開く側のモーメントや回転角の影響はほとんどないと考えられる。また、図10より、1/120rad.以降において両者の差はほぼないことから、この変形レベル以降はP-Δ効果の影響があるといえる。

なお、本報では鉛直荷重により柱脚接合部に付加される軸力の影響は検討の対象外としたが、鉛直荷重の影響を詳細に調べるには必

要な検討事項で今後の課題である。

4. 数値解析による木質ラーメンの構造性能の算定

4.1 解析モデル

図11は解析モデルの諸元である。解析には、任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラムSNAPを用い、せん断変形やP-Δ効果を考慮した平面フレーム解析とし、強制変位増分による1方向非線形解析を行った。柱頭・柱脚接合部の曲げモーメントに対する復元力特性は、剛域を設定した回転バネのモデルとした。

4.2 接合部の復元力特性

本報で採用する復元力特性の設定方法を示す。既報³⁾の要素試験より、各接合部の復元力特性を設定するモーメント-回転角関係を求めるせん断スパンの長さは、架構の階高やスパンの1/2付近とする。これにより、これらを反曲点位置とした時のせん断力の影響を考慮した、接合部の復元力特性が得られる。図6の架構の場合、図5の柱頭接合部CT15、柱脚接合部CB12が該当し、剛域を設定した補正スパンH₂で評価した試験体6体のモーメント-回転角関係の平均の包絡線を完全弾塑性評価して得られる折曲点での特性値、すなわち、曲げモーメント(M)と回転角(θ)の座標は図12のように定めた。各接合部とも初期剛性K_{1/120}は1/120rad.時の割線剛性とし、降伏曲げモーメントM_yは完全弾塑性評価の値、M_yでの回転角θ_yはM_y/K_{1/120}とした。柱頭接合部では、M_yと最大曲げモーメントM_{max}と結ぶbi-linearとしたのに対し、柱脚接合部では、M_{max}までを(θ_y, M_y), (θ_A, M_A)の3点で結ぶtri-linearとしてM_{max}以降は終局回転角θ_uを通るよう直線的に耐力低下させた。なお、θ_Aはθ_yとθ

図14 解析と試験の比較

表2 解析と試験の比較一覧

	4P-0		4P-45	
	解析	試験	解析	試験
K (kN/rad.)	1008	931	917	867
P_u (kN)	17.67	19.76	15.84	17.84
μ	3.807	3.150	3.864	3.251
P_{max} (kN)	18.55	21.83	16.91	19.03
① P_y	12.03	12.86	10.21	11.81
② $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	9.09	9.07	8.22	8.35
③ $2/3P_{max}$	12.37	14.55	11.27	12.69
④ $P_{1/120}$	8.64	8.99	8.08	7.85
min(①~④)	8.64	8.99	8.08	7.85

図16 接合部の組合せと解析モデル

図15 想定する復元力特性

図17 P-R関係

表3 解析結果一覧

	①鉛直荷重なし			②鉛直荷重あり P-Δ効果なし			③鉛直荷重あり P-Δ効果あり			i:②/①			ii:③/①		
	P_u	μ	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	P_u	μ	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	P_u	μ	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	P_u	μ	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$	P_u	μ	$0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$
I	15.09	3.621	7.54	15.29	3.081	6.95	11.92	3.817	6.14	1.01	0.85	0.92	0.79	1.05	0.81
II	18.24	3.487	8.91	18.31	3.167	8.46	15.10	3.563	7.47	1.00	0.91	0.95	0.83	1.02	0.84
III	21.41	3.339	10.20	21.22	3.163	9.79	18.28	3.220	8.53	0.99	0.95	0.96	0.85	0.96	0.84
IV	18.22	3.454	8.86	18.03	3.212	8.40	14.75	3.651	7.41	0.99	0.93	0.95	0.81	1.06	0.84
V-1.0	48.78	1.216	11.68	24.14	1.249	5.91	19.66	1.188	4.61	0.49	1.03	0.51	0.40	0.98	0.40
V-0.5	48.90	1.512	13.91	33.10	2.408	12.93	23.58	2.400	9.19	0.68	1.59	0.93	0.48	1.59	0.66
V-0.0	54.46	2.159	19.84	51.57	2.102	18.46	34.05	2.791	14.57	0.95	0.97	0.93	0.63	1.29	0.73
VI-0.5	52.57	1.409	14.17	31.17	1.386	8.30	24.60	1.365	6.47	0.59	0.98	0.59	0.47	0.97	0.46
VI-1.0	53.40	1.678	16.39	37.10	1.518	10.59	28.59	1.530	8.21	0.69	0.90	0.65	0.54	0.91	0.50

靱性は比較的高いが、実際には脆性的な性状の接合部形式⁵⁾⁶⁾他もある。この場合は靱性が低いので、架構のせん断耐力は終局時耐力 $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$ で決定されると考えられ、鉛直荷重を負担するとさらに下がると予想される。そこで接合部の靱性に着目して、図15のように靱性が高い接合部から脆性的な接合部までを想定する。そしてこれらを図16のように組合せた解析モデルの架構について、鉛直荷重の影響を考慮した終局耐力 P_u と塑性率 μ を弾塑性解析から求め、違いを検討する。図15のA、Bの各特性値は、それぞれ図13のCTL、CBに対応する。また、鉛直荷重の影響を詳細に調べるため、①鉛直荷重なし、②鉛直荷重あり+P-Δ効果なし、③鉛直荷重あり+P-Δ効果ありの3通りの解析を行う。接合部の特性値の定量的な違いを無視するために、鉛直荷重は各接合部の長期の許容曲げモーメントに相当する荷重とし、各ケースにおいて①を基準とした②、③それぞれの比率を比べる。なお、図15(a)中C-1は文献5)をモデル化した最も負勾配が急な脆性的な接合部である。これを基準としてC-2、C-3は負勾配を緩くした接合部、D-1、D-2は靱性のある程度確保した復元力特性を想定している。

①~③での P_u 、 μ 、 $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$ と鉛直荷重の有無の比率②/①、③/①を表3に示す。なお、終局変形角 R_u は1ヶ所の接合部の耐力が消失した時点の変形角とし、かつ $1/15\text{rad}$ を上限とした。

表3中iiより、図15の比較的高い靱性接合部で構成されたI~IVでは鉛直荷重により $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$ が $0.81\sim0.84$ となるのに対し、脆性型の接合部で構成されるVは負勾配に応じて $0.40\sim0.73$ と大きく低下している。また、I~IVの比率がV-0.0より高いことから、降伏以降の耐力が上昇する接合部で構成される架構において、鉛直荷重による P_u や μ の低下の割合は、降伏以降に耐力が一定となる接合部で構成されるケースV-0.0が最大である。一方、鉛直荷重ありのVとVI-0.5、VI-1.0では一部で μ が上昇するケース

M_{max} の平均で、 M_A は θ_A での曲げモーメントである。図13に各接合部の復元力特性を、CTL15、CB12のモーメント-回転角関係の平均の包絡線と併せて示す。平均値とした理由は、本報では各特性値を試験結果のばらつきを除いた平均値で評価するためである。

ここで、鉛直荷重により付加される梁端部のせん断力や柱軸力の影響は、復元力特性には考慮していない。これは、鉛直荷重で付加される力を忠実に再現した接合部の要素試験は特殊で、また解析モデルも複雑になるため、実務設計で扱うには不向きである。よって本報では、鉛直荷重で付加される力を考慮せずに比較的容易にできる要素試験で得られた復元力特性を使って、簡易な解析モデルの解析結果で試験結果をどの程度再現できるかを調べることにする。

4.3 解析結果

試験結果の平均の包絡線と弾塑性解析の包絡線を図14に、解析結果の包絡線を完全弾塑性で評価した特性値一覧を、試験結果の平均値と併せて表2に示す。なお、解析での終局変形角 R_u も試験での評価と同様に $1/15\text{rad}$ を上限とした。

鉛直荷重の有無によらず、 P_{max} 、 P_u 、 P_y の解析値は試験値より低く、Kは高くなった。また、解析値の方が μ は高めとなったが P_u は低く、それらが相殺されて $0.2P_u\sqrt{2\mu-1}$ は試験値と概ね一致したと考えられる。一方、鉛直荷重の有無で $P_{1/120}$ の傾向が異なり、鉛直荷重なしでは解析値が若干低め、鉛直荷重ありでは若干高めとなったが概ね適切に評価できた。これらの結果より、本報で検討した範囲において、鉛直荷重で付加される梁端部せん断力や柱軸力を考慮しない簡易な復元力特性を用いた数値解析で、鉛直荷重を考慮した架構の挙動は概ね再現できた。

図14に示した各接合部が降伏モーメント M_y に到達した時点の荷重-変形角関係の解析結果を、図8の試験結果と比較する。鉛直荷重ありの場合では、最初に柱頭接合部が降伏した時の架構のせん断耐力は、解析値の方が試験値より高くなったものの、鉛直荷重の影響で曲げモーメントがオフセットされて接合部が早期に降伏する傾向は、試験と同様であった。

5. 実務設計での木質ラーメンの構造性能評価における解析的検討

5.1 接合部の靱性と鉛直荷重を考慮した架構のせん断耐力

4章までで、架構が鉛直荷重を負担する時の挙動を試験と解析で明らかにした。2章で対象とした架構の接合部は柱頭・柱脚ともに

図 18 危険断面位置を考慮した復元力特性

も見られたものの、接合部の性状によらず鉛直荷重の影響で P_u 、 μ とも低下しており、特に P_u の低減が顕著であった。 $P-\Delta$ 効果を除いた鉛直荷重による低減を調べると、表 3 中 i より、VI-0.5、VI-1.0、V-1.0 以外は概ね 0.92～0.96 程度である。

次に、鉛直荷重が架構に影響を与える因子として、3.3 と同様 $P-\Delta$ 効果と接合部の早期の降伏に着目し、それぞれが占める割合を調べる。これは、1.00 から i と ii それぞれの比率を差し引いた値を比べれば分かる。鉛直荷重により架構のせん断耐力が低下する際、 $P-\Delta$ 効果の占める割合は約 50% 以上であった。一方、VI と、脆性的な性状の接合部のうち負勾配が最大の V-1.0 は、 $P-\Delta$ 効果よりも接合部が早期に耐力低下する影響の方が大きかった。

以上のことから、本節で検討した範囲において、 $0.2P_u\sqrt{(2\mu-1)}$ は鉛直荷重の影響で低下することが確認された。そして、脆性的な接合部で構成される架構ではその傾向が顕著なことから、このような場合は特に鉛直荷重の影響を考慮すべきである。

次に VI に着目し、接合部が降伏から耐力低下するまでの変位と架構全体の変形能力を考察する。図 17 は、鉛直荷重を変数とした VI の荷重－変形角関係、接合部の最初の降伏変形角 R_y および最大耐力時の変形角 R_{pmax} とその比率 (R_{pmax}/R_y) である。本報で検討した範囲において、以下の知見が得られた。鉛直荷重ありの場合は柱頭接合部が 1 箇所のみ降伏して最大耐力に到達し、 R_{pmax}/R_y は VI-0.5 で 1.45、VI-1.0 で 1.91 となっており、概ねそれぞれに対応する接合部での復元力特性の回転角の比率 $\theta_{d1}/\theta_y = 1.50$ 、 $\theta_{d2}/\theta_y = 2.00$ に近くなった (θ_{d1} 、 θ_{d2} の定義は図 15 (b) 参照)。これより、鉛直荷重の影響で最大耐力に到達するまで、接合部が 1 箇所しか降伏しない架構において、接合部降伏から最大耐力時の変形角の比率 R_{pmax}/R_y は、接合部の復元力特性での回転角の比率 $\theta_{d(1,2)}/\theta_y$ と概ね一致する。一方、鉛直荷重なしの場合では、先に柱脚接合部が 2 箇所同時に降伏したため、鉛直荷重ありと比べて R_y が概ね 2 倍となり、 R_{pmax}/R_y は VI-0.5 で 1.27、VI-1.0 で 1.57 となった。

図 19 解析モデル

5. 2 接合部のせん断スパンならびに危険断面位置と架構のせん断耐力との関係

鉛直荷重を負担する架構が水平力を受けると、梁の反曲点位置は大きく変動しせん断スパンが極端に短くなるケースもある。危険断面位置での接合部の復元力特性が (1) 式で求まる場合は、せん断スパンが短く作用するせん断力がいほど負担できる曲げモーメントが小さくなる。そのため、要素試験でのせん断スパンを短めに設定しておけば、得られる復元力特性はせん断力の影響を考慮した上でせん断力に対して厳しい条件になり負担できるモーメントも小さくなるので、接合部の性能を危険断面位置で評価しなくても一見安全ように考えられる。そこで本節では、1 章で述べたように適切にモデル化されない接合部の復元力特性を用いる影響や、せん断スパンの短い要素試験の結果から求めた復元力特性を用いることが、剛域を設けた場合と比べて安全側な評価となるか検討する。本節では柱頭接合部に着目し、危険断面位置が柱梁部材の構造芯にない仕様を想定し、架構のスパンに対する要素試験のせん断スパンの比率を変数として剛域を設定し、危険断面位置で復元力特性を求め、架構の構造性能を弾塑性解析で算定する (以降、剛域モデル)。これに対し、接合部を適切にモデル化しない場合として剛域を設定せずに復元力特性を構造芯で求めた架構 (以降、構造芯モデル) の構造性能も同様に求める。そして鉛直荷重の有無を変数にして、剛域モデルと構造芯モデルの結果を比較する。

せん断スパンや剛域を変数とした柱頭接合部の復元力特性は、要素試験を行う代わりに以下の方法で定めた。降伏モーメント M_y は、図 18 のように M_{2y} の位置を危険断面位置とし、この位置での M_y が (1) 式で与えられる仕様の接合部を想定している。(1) 式を変形した (3) 式により、せん断スパン H_2 を変数とした M_{2y} を算定できる。

$$M_{2y} = 1 / \sqrt{(1/M_0^2) + (1/(H_2 \cdot Q_0^2))} \quad (3)$$

ここで、 M_0 と Q_0 は既報³⁾の純曲げおよび純せん断試験で求めた値

図 20 剛域モデルに対する構造芯モデルの比率と荷重－変形角関係の一例 (鉛直荷重なし)

図 21 剛域モデルに対する構造芯モデルの比率と荷重－変形角関係の一例（鉛直荷重あり）

でそれぞれ 8.27kNm、42.10kN とした。構造芯での曲げモーメント M_{1y} は図 18 のように直線で外挿して求めた。

本節で採用する柱頭接合部の復元力特性は、左右の柱頭とも図 13 の C T L とした。初期剛性は $1/120\text{rad}$ の割線剛性とする。割線剛性を求めるための $1/120\text{rad}$ 時の曲げモーメント $M_{1/120}$ は、図 13 の C T L から求めた降伏モーメント M_y と $1/120\text{rad}$ 時のモーメントの比率を、(3) 式で算定した M_{2y} に乗じて求め、回転角は共通で構造芯での値とした。2 次勾配 K_2 と初期剛性 $K_{1/120}$ の比率 β は、剛域モデル、構造芯モデルとも共通で図 13 の C T L の結果を採用した。なお、柱脚接合部の復元力特性は、共通で図 13 の C B とした。

架構スパン $L=3640\text{mm}$ の $1/2$ (以降、 $l=L/2$) において、剛域長 a や公称スパン H_1 を変数として求めた各特性値について、図 19 に解析モデルを、図 20 に剛域モデル r に対する構造芯モデル c との比率 (以降、 c/r) を示す。 H_1/l がおよそ 1.00 から 0.50 を境として、 H_1/l に対する c/r のばらつきの傾向が異なった。まず、 H_1 が短くなり H_1/l が小さくなるほど、剛域モデルより構造芯モデルの方が μ は低く、 μ 以外は高くなりばらつきも大きくなった。これに対し、 H_1 が長くなり H_1/l が大きくなるほど逆の傾向となりばらつきも小さかった。また H_1/l の大小によらず、剛域モデルで剛域長が長いほど c/r が 1.00 より離れる傾向となった。一例として $a=240\text{mm}$ で $H_1/l=0.25$ の荷重－変形角関係を図 20 に示す。次に、柱頭接合部が長期の許容曲げモーメントとなる鉛直荷重を載荷した各特性値の比率を図 21 に示す。鉛直荷重は構造芯モデルで弾性解析により求めた値とし、詳細は 3. 1 と同じである。傾向の概要は鉛直荷重なしの結果と概ね一致したが、 K 、 P_y 、 $0.2P_u\sqrt{(2u-1)}$ 、 $P_{1/120}$ は鉛直荷重なしと比べて c/r の差に開きがみられた。特に P_y ではその傾向が顕著であり、剛域長が 120mm 以上の剛域モデルで剛域長が長いほど差が大きくなった。一例として、 $a=240\text{mm}$ で $H_1/l=0.25$ の荷重－変形角関係を図 21 に示す。

本節での検討範囲において、架構のスパンに対してせん断スパンを極端に短くした構造芯モデルの復元力特性を用いた場合は、剛域モデルと比べて危険側になることが明らかとなった。特に、L S B 接合部のように剛域長が長い、すなわち本来の危険断面位置が構造芯から離れる仕様ほど、その傾向が顕著であると考えられる。つまり、接合部の構造性能を要素試験で求める場合、せん断スパンを短く設定することが必ずしも安全側になるとはいえない。実務設計において、簡略化のためやむを得ず構造芯モデルとする場合は、せん断スパンを架構のスパンの $1/2$ 以上長めにする特性値が低めに

評価される。しかし、架構の構造性能を適切に評価するには、接合部の仕様に応じて適切にモデル化した解析モデルで算定する方が望ましいといえる。

6. まとめ

木質ラーメンの構造性能を評価する際に、鉛直荷重の影響や危険断面位置に着目し、本報で対象とした接合部仕様や試験、解析条件の範囲において得られた知見を下記に示す。

鉛直荷重の有無を変数とした木質ラーメンの実大架構試験で架構の構造性能を調べ解析結果と比較した。接合部の靱性の違いによる鉛直荷重の有無での架構の終局時耐力に着目すると、 $P-\Delta$ 効果の影響や、脆性的な接合部で構成される架構は特に鉛直荷重の影響が大きいことが確認できた。また、接合部の危険断面位置が柱梁の構造芯とならない柱頭接合部で構成される架構の構造性能を、剛域を設けて適切に評価した場合と構造芯とした結果を比較した。その結果、架構のスパンに対して短いせん断スパンの復元力特性で算定すると危険側となる可能性が見出された。

以上のことから、数値解析で木質ラーメンの構造性能を算定するには、適切なモデル化に基づいた復元力特性を用いるのが望ましい。また、鉛直荷重を負担する場合は $P-\Delta$ 効果や接合部が早期に降伏することが架構の構造性能に影響を与えるので、これらのことを考慮して評価すべきである。

参考文献

- 1) 渋谷圭司、近田純生、三城繁伸、山口雅和：合板釘打ち接合を用いた木質ラーメンフレームの開発【その 1、2】、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ、C-1、pp. 149-152、2006. 9
- 2) 宮田雄二郎、山口和弘、川原重明、稲山正弘：プレカット加工を用いた引きボルト式木質ラーメン構造の研究（その 1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ、C-1、pp. 389-392、2008. 9
- 3) 景山 誠、村上雅英、小松幸平：曲げモーメントとせん断力の複合応力を受ける木質ラーメン接合部の構造性能評価法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 647 号、pp. 165-173、2010. 1
- 4) 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、pp. 108-109、2006. 12
- 5) 佐藤基志、五十田博、菅谷泰浩：接着ボルトを用いた木質ラーメンに関する基礎実験、日本建築学会技術報告集、第 13 巻、第 26 号、pp. 539-544、2007. 12
- 6) 井戸田秀樹：接合面に山形加工を施した集成材モーメント抵抗接合部の提案、日本建築学会構造系論文集、第 598 号、pp. 117-123、2005. 12

[2010 年 6 月 16 日原稿受理 2010 年 9 月 1 日採用決定]