

軸圧縮力と水平力を受ける外ダイアフラム仕口の力学的特性評価

An evaluation of Elasto-plastic Characteristics of Beam-to-Column Connection under Biaxial Lateral Force and Compressive Axial Load

隋偉寧*

山成實**

Weining SUI

Minoru YAMANARI

ABSTRACT It is well known that local deformation in a steel beam-to-column connection occurs by beam flange force. In this paper, a numerical study was conducted to get important information on elasto-plastic behaviour of connections stiffened by external diaphragm using a finite element analysis program. The connections are made of circular columns and wide flange beams, connected with external diaphragms under both axial load in column and lateral force. In order to simplify the expression of P-Delta relationship of the subassemblage with bilinear model, the properties of the connections were deduced by the analytical results of 32 subassemblages, which are the value of the initial stiffness, the secondary stiffness, the yield load and the ultimate load. Finally, it was shown that the estimated relationship of P-Delta is able to trace the analysis result very well.

Keywords: 鋼管柱，柱梁接合部，有限要素解析，剛性，耐力

Circular steel column, Beam-to-column connection, Finite element analysis, Stiffness, Loading capacity

1. 序論

外ダイアフラム接合された鋼管柱 - H形鋼梁接合部では，梁フランジ力によって引き起される鋼管壁の面外変形を伴ういわゆる局部変形の存在が知られている^[1]．柱梁接合部において局部変形が生じることは，骨組の剛性低下につながる．すなわち，水平荷重を受ける骨組には余分な水平変位が生じることとなり，局部変形は有害な変形と捉えられがちである．わが国においては柱梁接合部は剛接合を原則とする設計風土があり，梁端部に回転変形が生じることを容認しない傾向がある．

一方，欧米においては，剛接合よりもむしろ半剛接合を積極的に取込んだ骨組の研究や設計が行われてきた^{[2], [3]}．接合部の完全剛を目指す

ことを捨てて，他の構造要素に骨組の水平剛性確保を期待する設計方針を立てれば，わが国においても半剛接合の接合部設計は容易に受け入れられることと考える．

本研究では，円形鋼管柱・H形鋼梁モーメント抵抗骨組中の一つの外ダイアフラム接合部^[4]を含む立体部分骨組の弾塑性性状を調べ，接合部の荷重 - 変形関係を簡単に表現ができる評価式の誘導を試みた．立体部分骨組に作用させる外力は，柱頂部に一定圧縮軸方向力と漸増する水平力を同時に与えるものとした(図1)．有限

*工修 熊本大学大学院 自然科学研究科 大学院生 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

**工博 熊本大学大学院 自然科学研究科 准教授 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

本論文の一部は，2005年第13回鋼構造年次論文報告集および2006年日本建築学会大会学術講演梗概集に発表済み．

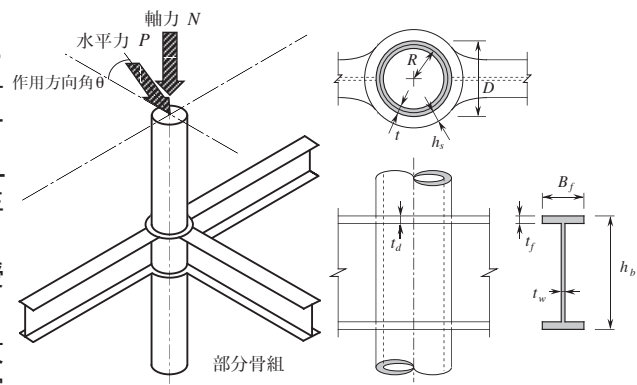


図1 軸力と水平力を受ける部分骨組

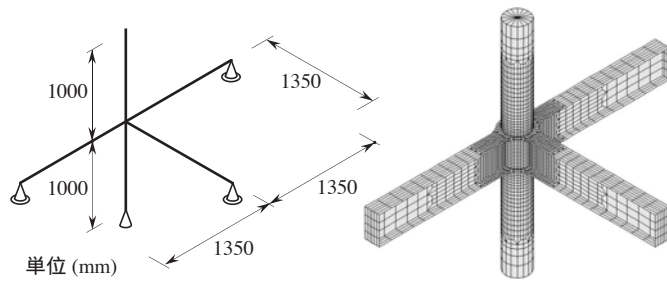


図2 数値実験に用いた有限要素モデル

要素法に基づく汎用構造解析プログラムを用いた立体部分骨組の弾塑性解析をとおして、その力学的特性を調べた。

2. 解析骨組

2.1 解析モデル

本研究では、外ダイアフラム接合部をもつ円形鋼管柱・H形鋼梁で構成される立体骨組から取り出した側柱部分骨組を研究対象として図1に示す。同図は、この柱部分の柱頂部に一定軸圧縮力を作用させ、同頂部に任意方向の漸増水平力を作用させている様子を示している。水平

表1 解析骨組の諸情報

名称	D mm	t mm	h _b mm	B _f mm	t _f mm	t _w mm	t _d mm	h _s mm	K _{L0} kN/mm	K _{L2} kN/mm	P _{Ly} kN	P _{Lmax} kN					
1-1	216.3	4.5	150	300	9	9	15	6	686.53	29.63	258.39	387.5					
1-2		6							793.52	38.59	307.21	482.6					
1-3		8							965.13	54.49	371.83	616.1					
1-4		10							1132.42	73.19	428.28	747					
1-5		12							1312.55	91.24	480.64	852.9					
2-1		4.5							30	45	9	9	12	847.36	51.6	334.82	471
2-2		6												1005.81	62.59	385.1	583.6
2-3		8												1196.26	74.97	446.12	717.5
2-4		10												1370.16	88.56	498.8	836.6
2-5		12												1573.8	116.38	547.22	923.4
3-1		4.5							45	6	9	9	12	1053.83	—	407.76	538.1
3-2		6												1179.74	90.51	461.06	651.8
3-3		8												1349.46	82.02	529.53	778.1
3-4		10												1560.55	91.36	597.37	907.8
3-5		12												1768.47	—	648.63	—
2-3A1		8	100	9	9	9	12	1463.4	98.96	543.53	852.3						
2-3A2								8	1103.2	67.29	418.41	661.8					
2-3B1									125	976.34	63.81	402.91	653				
2-3B2										175	1065.71	65.68	425.14	680.4			
2-3B3											100	1264.83	77.16	452.77	725.8		
4-1												125	1714.24	—	568.85	—	
4-2			150	1842.29	—	593.38	—										
4-3				175	2029.5	—	633.77	—									
4-4					150	2137.2	—	651.66	—								
4-3A						12	2401.98	—	801.31	1229.02							
4-3B							8	1897.61	—	590.77	—						
2-3B11								200	1029.55	—	412.67	676					
2-3B12		250	997.8						69.95	413.73	662.7						
2-3C1			350	1180.82					—	451.96	712.3						
2-3C2				400	1173.14				65.45	464.08	701.5						
2-3B31					350	1258.53			75.67	467.48	730.3						
2-3B32						400	876.19		69.72	471.7	716.7						

表2 解析実験パラメータ

パラメータ	適用範囲	
	min	max
R/t	6.26	~ 23.53
$R/(t+h_s)$	1.79	~ 5.43
D/B_f	1.24	~ 2.16
h_b/B_f	1.7	~ 2.7
R/t_d	8.35	~ 13.02
B_f/t_f	11.11	~ 19.44

力の作用方向角 を図1中に示す。

本論文で注目する柱梁仕口の力学的特性を調べるには、骨組に作用する水平力の作用方向角は0度で良く、これまでに行ってきた立体部分骨組^[5]の中の側柱部分骨組を取り上げ、図1で示した諸寸法の値を変化させて数値実験を行った。数値解析は複合非線形有限要素解析プログラムを用いてモデル挙動を劣化勾配の領域まで追跡できるように強制変位問題として扱った。

要素はすべて1次の四辺形厚肉シェル要素であり、シェル要素のレイヤー数は11とした。要素の降伏条件は、von Misesの降伏条件とした^[6]。

2.2 解析条件

図2は数値実験モデルの境界条件である。水平力下の全体骨組から取出した側柱部分骨組の条件を満足するように、解析モデルの部材端部の支持条件および荷重条件を設定した。すなわち、梁の支持点では水平面内ローラー支持とし、曲げに対してピン支持、ねじりに対して変形を拘束した。

解析骨組は表1に示す計32体の立体部分骨組である。同表にある寸法値は、鋼管径が216.3mmを基準として無次元寸法パラメータが実用の範囲を

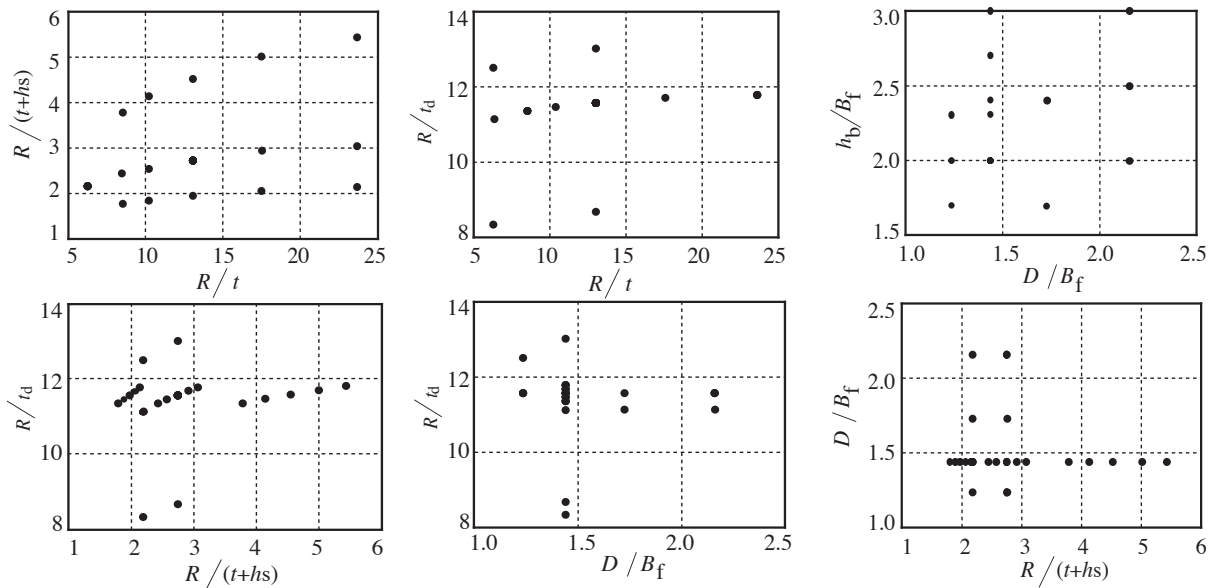


図3 パラメータの独立性

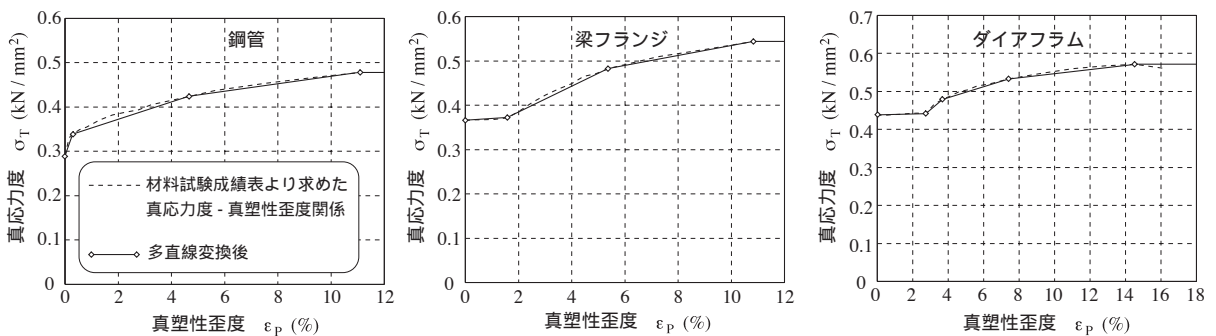


図4 解析に用いた素材の真応力度－真塑性歪度関係

カバーできるように変化している(表2)。図3は寸法パラメータ間の独立性を示している。パラメータの総組み合わせに対して解析することが望ましいが、実験計画法に基づいてパラメータの値を交互に固定して解析数の削減を図った。なお、表1中右4列の記号については、3.で説明する。骨組を構成する要素の材料非線形性は文献[7]の素材試験結果から得られたものを用い、図4に示す多直線置換したデータを用いた。これらは鋼管柱、梁フランジおよびダイアフラムの情報である。解析の不安定を避けるために最終分支線は水平線とした。なお、ヤング係数(E)はすべての素材について 2.05 kN/mm^2 とした。

6つのパラメータを変化させた代表的な解析結果を図5に仕口の荷重 - 変形曲線で示す。グラフの横軸は上下フランジ位置での局部変形の絶対値の平均値を取った。また、同図中の黒丸印(●)は、曲線の接線係数が初期剛性の3分の1に達したときの点である。本論文ではこの

耐力を降伏耐力とする。

ここで、仕口の荷重とは、梁フランジ力であり、局部変形はそれに対応した鋼管壁の面外変形である(図6)。しかしながら、局部変形を梁フランジ中央部で評価すると平均的な局部変形を代表せず過大な値となる危険がある。試みに、図7に示すように、過大な骨組変形が生じるまで鋼管面上の梁フランジ力方向変位を調べてみた結果、概ね梁フランジ中央部の変形で代表させても良いと判断できることが分った。なお、図7のグラフの横軸は、図6で示すように、鋼管断面中心から梁軸線方向へ見込む中心角90度を6等分した鋼管厚中心線上の点の位置であり、それらの点を番号(-3から3)で表している。縦軸の値は、それらの点の梁材軸方向相対変位であり、これを局部変形としている。 R は柱の部材角である。

3. 無軸力下の仕口の特性評価

円形鋼管柱・H形鋼梁で構成される外ダイア

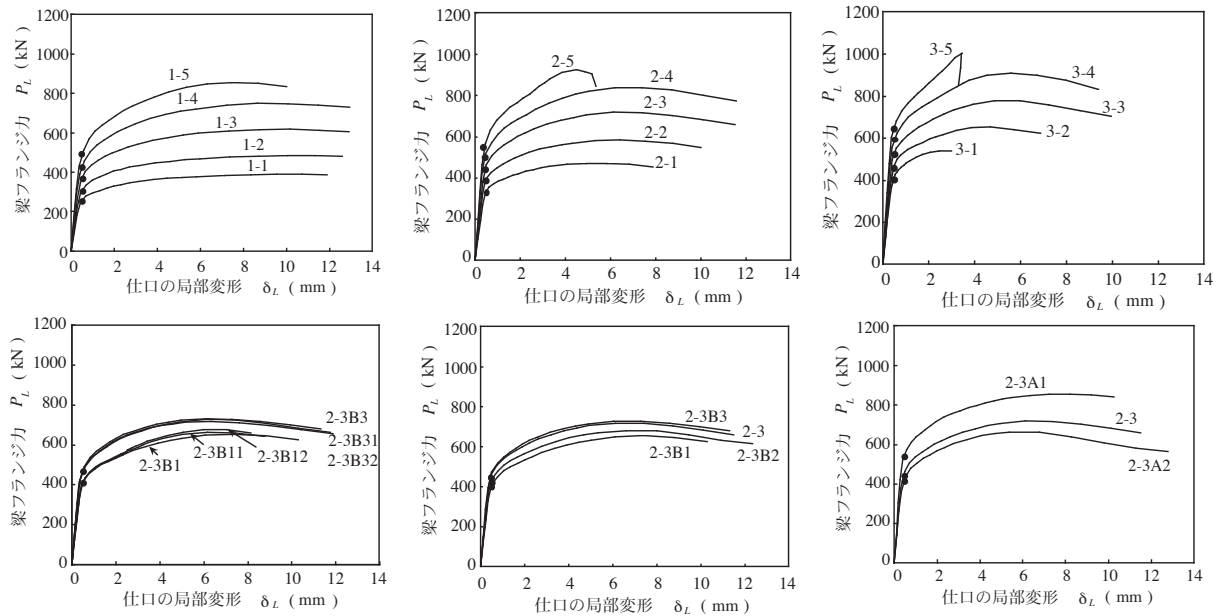


図5 解析結果

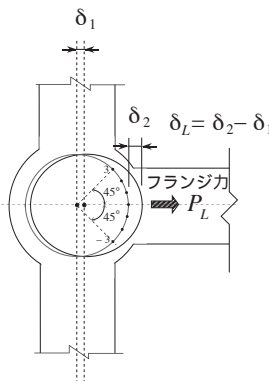


図6 仕口の局部変形図

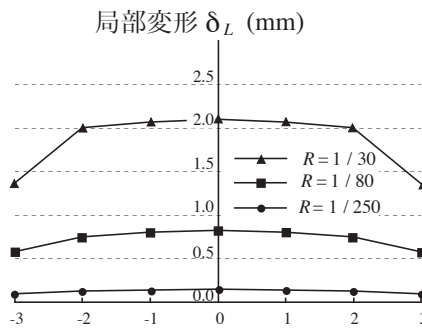


図7 仕口部の局部変形

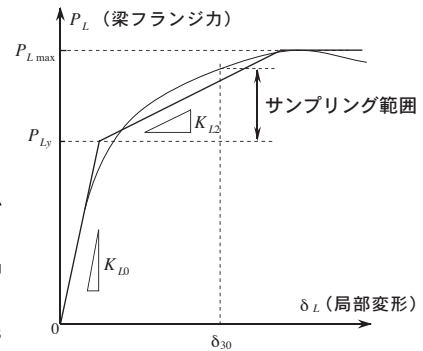


図8 諸情報の定義

フラム接合形式の立体部分骨組の弾塑性挙動を容易に追跡するために、上記の数値実験から柱梁仕口の力学的特性を表す評価式の誘導を行った結果を示す。

ただし、柱軸力を与えないで接合部の寸法パラメータのみを実験変数として、仕口の初期剛性、降伏耐力、2次剛性および最大耐力の推定式を誘導する。すなわち、柱軸力は寸法パラメータと独立であることは当然であり、柱軸力の存在の効果は、これら諸情報の補正係数として扱うことにした。

これらの特性値は図8で定義される。本研究では、仕口の荷重 - 変形曲線を多直線置換することで、簡単な表現で仕口の弾塑性挙動を表現することを目的としている。表1で記した右4列の記号は図8中の記号に対応する。

K_{L0} 、 K_{L2} 、 P_{Ly} および P_{Lmax} はそれぞれ仕口の初期剛性、2次剛性、降伏耐力および最大

耐力である。なお、 δ_{30} とは、柱の部材角(R)が1/30に達したときの仕口の局部変形量である^[6]。その際、梁、柱および接合部パネルは剛体と仮定して求めた値である。

図8に示した柱梁仕口の荷重 - 変形関係において、解析結果の曲線のサンプリングの範囲を直線近似し、その勾配を柱梁仕口の2次剛性とする。

表1中右4列がこの定義で得られた数値情報である。なお、同表中のハイフンは以下の理由で結果を得なかった。

- 1) 梁フランジなどの局部座屈により仕口の荷重 - 変形関係では除荷が起り最大耐力が得られない。
- 2) 同様の理由で、十分な仕口の変形が生じないことで、図8の定義に従った情報が得られない。

このことについて扱った寸法パラメータの範

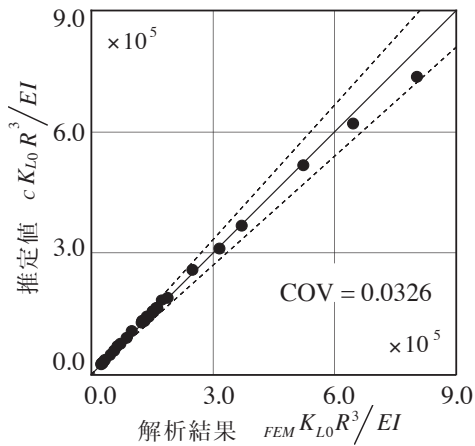


図9 初期剛性の解析値と推定値の関係

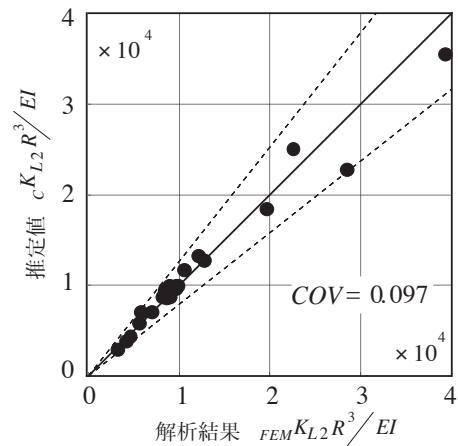


図10 2次剛性の解析値と推定値の関係

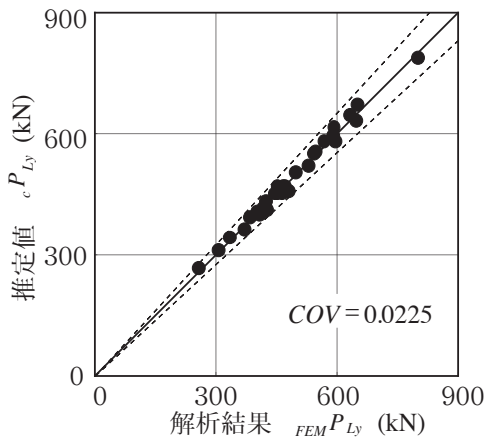


図11 仕口の降伏耐力の解析値と推定値

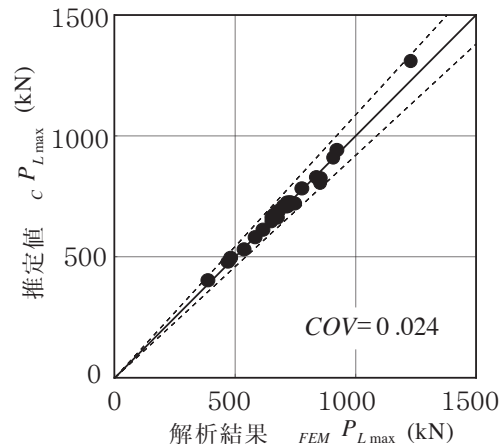


図12 仕口の最大耐力の解析値と推定値

囲内において、フランジの局部座屈発生などに起因する局所不安定が仕口の最大耐力に達する前に起るため、梁フランジの幅厚比の制限を考慮した評価が必要となろう。これは今後の研究課題とする。

3.1 仕口の初期剛性評価

32個の部分骨組の解析結果から文献[8]の方法に従い、柱梁仕口部の初期剛性推定式を誘導した。数式のモデルは、仕口の初期剛性に強く影響を及ぼす無次元寸法パラメータを選択し、対数正規分布に従うと仮定した。柱梁仕口の初期剛性の推定式を式(1)で得た。

$$\frac{c K_{L0} R^3}{EI} = 1.466 \times 10^3 \left(\frac{R}{t}\right)^{2.383} \left(\frac{2R + h_s}{2R}\right)^{2.835} \times \left(\frac{B_f}{D}\right)^{0.409} \left(\frac{t_d}{R}\right)^{0.692} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 E はヤング係数、 I は鋼管壁から単位

長さの幅をもつ長方形断面の断面2次モーメント ($I = t^3 / 12$ (図1))。

推定結果を図9に示す。同中の破線は推定の95%信頼限界線である。COVは変動係数であり、良い推定ができていることを示している。

3.2 仕口の2次剛性評価

表1で示したように、上記の変形に達しなかった結果は除外して誘導した2次剛性推定式を式(2)で示す。

$$\frac{c K_{L2} R^3}{EI} = 1.117 \times 10^3 \left(\frac{R}{t}\right)^{2.330} \left(\frac{t + h_s}{R}\right)^{0.612} \times \left(\frac{B_f}{D}\right)^{1.225} \left(\frac{t_f}{B}\right)^{0.985} \dots \dots \dots (2)$$

推定結果を図10に示す。この結果は初期剛性に比べてばらつきは大きくなるが、絶対量として見たとき、その変動量は初期剛性のものより小さいので、良い推定ができたと判断する。

3.3 仕口の降伏耐力評価

前述の定義した3分の1剛性耐力を柱梁仕口の降伏耐力とし、その推定式を3.1と同様の手順で導いた結果、式(3)を得た。

$$\begin{aligned}
 {}_c P_{Ly} &= 3.042 \left(\frac{t}{R}\right)^{0.421} \left(\frac{t+h_s}{R}\right)^{0.434} \left(\frac{B_f}{D}\right)^{0.254} \\
 &\quad \times \left(\frac{t_d}{R}\right)^{0.695} R^2 \sigma_y \quad \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

ただし、 σ_y はダイアフラムの降伏点。

降伏耐力の推定結果を図11に示す。仕口の剛性と同様に良い推定ができています。

3.4 仕口の最大耐力評価

柱梁仕口の最大耐力は、主にダイアフラムの局部座屈に起因する。式(4)が推定結果である。

$$\begin{aligned}
 {}_c P_{Lmax} &= 3.934 \left(\frac{t}{R}\right)^{0.653} \left(\frac{t+h_s}{D}\right)^{0.297} \left(\frac{B_f}{D}\right)^{0.161} \\
 &\quad \times \left(\frac{t_d}{R}\right)^{0.443} R^2 \sigma_y \quad \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

骨組中の仕口部以外の構造部材が先行降伏することによって仕口が最大耐力に達しない結果は、この推定から除外した。表1中のハイフンは、除外したことを示す。推定結果を図12に示す。ばらつきが比較的少なく良い推定ができています。

4 . 立体部分骨組の弾塑性挙動の追跡

図8の定義に従って誘導した式(1)~(4)を用いて代表的な図1の立体部分骨組の荷重 - 変形関係を文献[6]の方法に準拠して求めてみる。立体部分骨組を平面骨組に置換することで、水平力作用方向角が0度および45度の場合について図13示す記号を用いると骨組の荷重 - 変形関係を増分表記すると式(5)で表される。

$$\Delta P = \left(\frac{l}{2h}\right)^2 K \cdot \Delta \delta \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに $K = \left(\frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_P} + \frac{1}{K_L}\right)^{-1}$ であり、図

13中の諸寸法は、立体部分骨組の水平力作用方向構面へ写像した値をとる。

ただし、 K_B, K_C, K_P および K_L はそれぞれ梁、柱、接合部パネルおよび仕口が平面置換骨組に

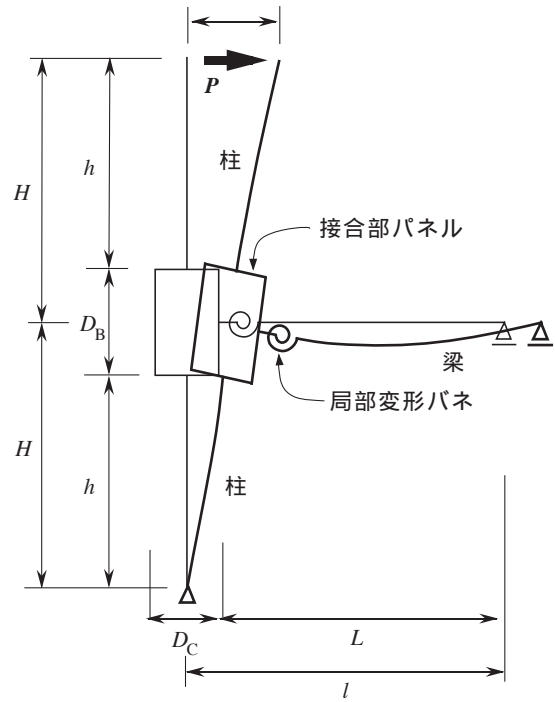


図13 平面置換骨組

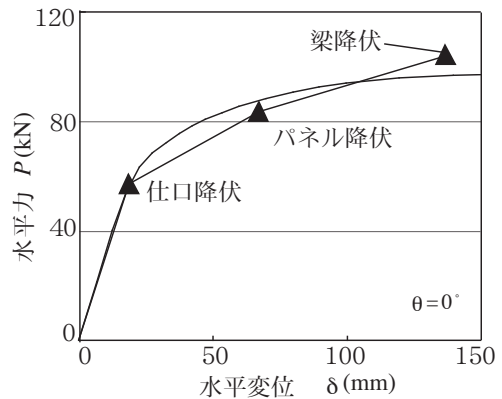


図14 解析結果の追跡
(水平力作用方向角0度)

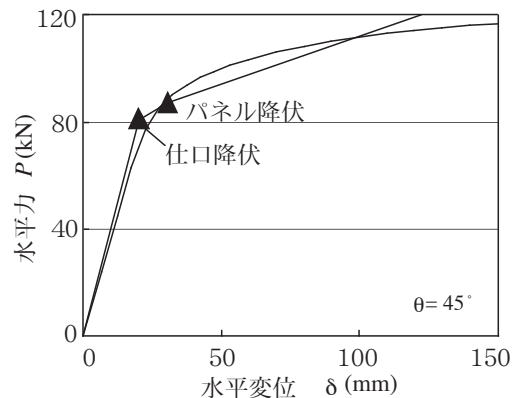


図15 解析結果の追跡
(水平力作用方向角45度)

寄与する剛性である。それらは式(7)～(10)で表される。

$$K_B = \frac{1}{L} \left(\frac{L^2}{3EI_B} + \frac{1}{GA_{WB}} \right)^{-1} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$K_C = \frac{2h^2}{I^2H} \left(\frac{H^2}{3EI_C} + \frac{1}{GA_{WC}} \right)^{-1} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$K_P = \frac{1}{K} GA_C \frac{2D_B h(2H + D_B)}{(2HL - D_B D_C)(2Lh - D_B l)} \quad (9)$$

$$K_L = \frac{K_r}{L^2} \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに、A および I は部材の断面積および断面 2 次モーメントであり、下添字 B, C, P および W は、それぞれ梁、柱、接合部パネルおよびウェブを指す。G はせん断弾性係数である。K_r は仕口の回転曲げ剛性であり、梁フランジ力の偶力剛性である。

また、接合部パネルの降伏耐力は式(11)で表される。

$$Q_y = \frac{A_P}{K} \tau_y \quad \dots \dots (11)$$

ただし、A_P、κ および τ_y は、それぞれパネルの断面積、パネルの断面に対するせん断に関する形状係数(2.0)および降伏せん断応力度である。

パネルの加工硬化係数を 0.03 とした。

図 14 および図 15 は、文献[1] で述べた実験骨組と同じ接合部詳細をもつ立体部分骨組について有限要素解析によって得た荷重 - 変形関係をそれぞれ水平力作用方向角が 0 度および 45 度のときの結果を示したものである。両図で示される多直線で表される追跡結果は、対象骨組曲線のほぼ平均的な線を描いており、比

較的降伏後の耐力が低めであり、降伏直後の硬化係数は妥当な値を示しているものの耐力は過小な値を取っている。特に作用方法角が 0 度の場合、その傾向は強く現れてる。

解析骨組のより現実的な追跡を行うために、接合部パネルの降伏耐力に注目して以下の検討を加える。

これまでの接合部パネルの降伏耐力の定義を全塑性耐力の量として扱わず、初期降伏耐力として扱ってきたことが、パネルの早期降伏を引き起している。仕口の降伏耐力は一種の General yield 耐力であるので、接合部パネルについても同様の扱いをすることにした。図 16 の接合部パネルの素材試験データと 3 種の一定加工硬化係数(0.0,0.01,0.02)について応力度 - 塑性歪関係を用意して、パネルのせん断力 - せん断変形関係を有限要素解析から得て、それぞれの 3 分の

表 3 柱圧縮軸力による仕口の 2 次剛性および降伏耐力への影響

名称	仕口の 2 次剛性の影響 K_{L2}				仕口降伏耐力の影響 P_{Ly}			
	n=0	n=0.1	n=0.2	n=0.3	n=0	n=0.1	n=0.2	n=0.3
1-1	—	—	—	—	258.39	241.1	232.01	222.21
1-2	—	—	—	—	307.21	283.82	273.76	262.47
1-3	—	—	—	—	371.83	358.53	329.28	314.48
1-4	73.19	60.29	47.39	41.36	428.28	413.37	396.65	364.94
1-5	—	—	—	—	480.64	463.52	444.71	422.23
2-1	—	—	—	—	334.82	320.95	309.55	295.66
2-2	—	—	—	—	385.1	375.49	362.7	347.6
2-3	74.97	62.37	50.42	38.61	446.12	435.09	421.63	405.51
2-4	88.56	74.14	60.06	45.96	498.8	485.64	470.55	452.85
2-5	—	—	—	—	547.22	531.18	513.56	493.46
3-1	—	—	—	—	407.76	391.7	373.81	353.15
3-2	—	—	—	—	461.06	448.49	432.27	412.03
3-3	82.02	68.19	55.74	43.6	529.53	515.22	496.39	472.92
3-4	91.36	76.06	61.96	47.97	597.37	580.72	558.39	532.33
3-5	—	—	—	—	648.63	627.78	602.72	573.58
2-3A1	98.96	83.02	76.87	62.18	543.53	527.72	498.23	474.61
2-3A2	67.29	55.61	44.36	33.15	418.41	408.4	396.42	381.9
2-3B1	63.81	52.59	41.64	30.77	402.91	390.5	376.72	361.09
2-3B2	65.68	54.33	43.33	32.34	425.14	413.39	399.88	384.11
2-3B3	77.16	64.18	51.94	39.87	452.77	442.33	429.22	412.84
4-1	—	—	—	—	568.85	537.77	505.13	476.53
4-2	—	—	—	—	593.38	569.47	545.33	519.23
4-3	—	—	—	—	633.77	611.19	587.73	562.19
4-4	—	—	—	—	651.66	630.67	607.77	582.35
4-3A	—	—	—	—	801.31	771.95	738.33	677.8
4-3B	—	—	—	—	590.77	569.53	547.2	522.94
2-3B11	—	—	—	—	412.67	375.62	350.26	324.16
2-3B12	—	—	—	—	413.73	397.22	378.4	358.24
2-3C1	—	—	—	—	451.96	447.9	432.71	411.51
2-3C2	—	—	—	—	464.08	456.9	444.4	426.45
2-3B31	75.67	64.39	53.5	43.3	467.48	458.6	446.4	428.95
2-3B32	—	—	—	—	471.7	463.86	450.3	431.46

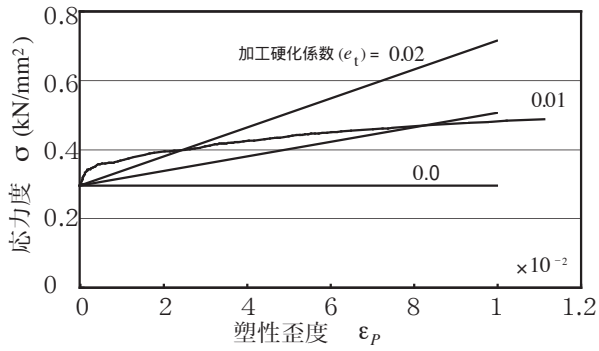


図16 接合部パネル素材の加工硬化係数

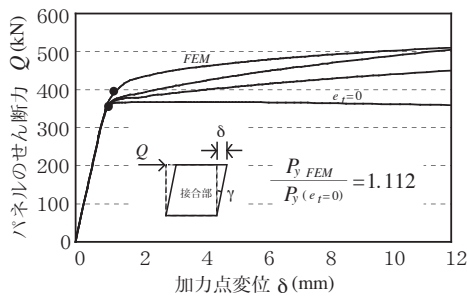


図17 接合部パネルの荷重 - 変形関係

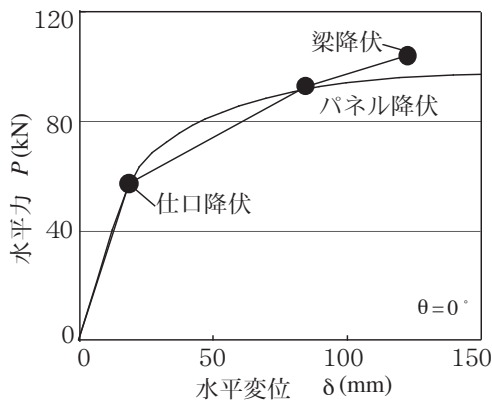


図18 補正後の追跡結果

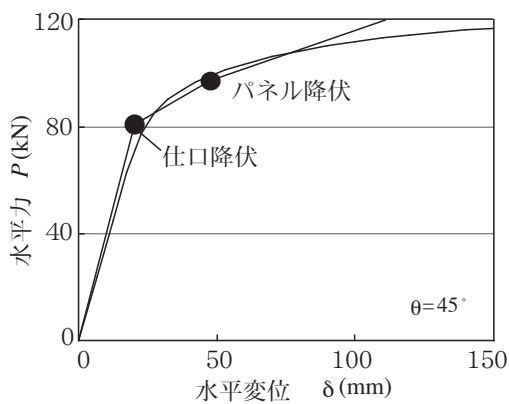


図19 補正後の追跡結果
(水平力作用方向角 45 度)

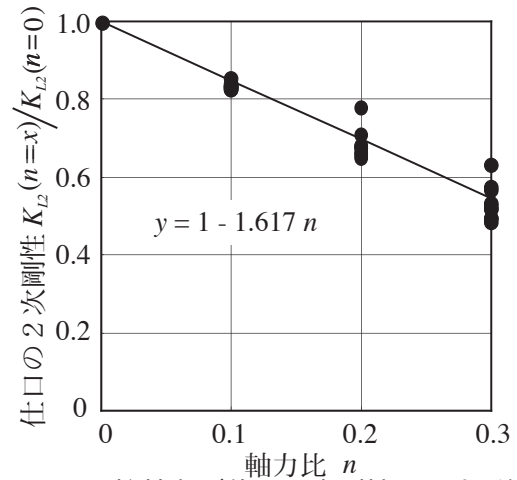


図20 柱軸力が仕口2次剛性に及ぼす影響

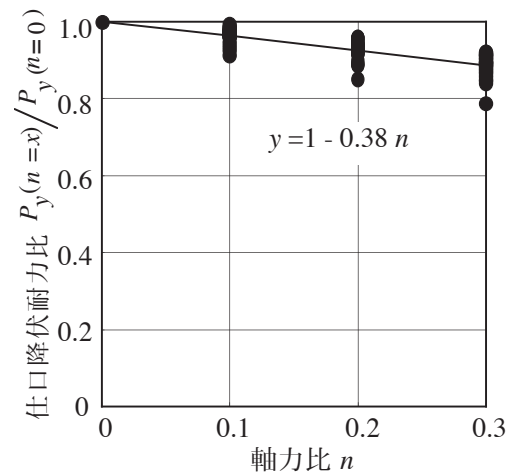


図21 柱軸力が仕口降伏耐力に及ぼす影響

1 剛性耐力を求めた．図17はその結果であり，
 図中の黒丸印は3分の1 剛性耐力である．な
 お，3種の一定加工硬化係数(0.0,0.01,0.02)
 については，黒丸印はほぼ重なっている．素
 材実験データによる降伏耐力は加工硬化係
 数0に対応する降伏耐力を基準とする降伏
 耐力比を計算すると，追跡に用いた骨組の
 接合部パネルでは1.112の値を得た．

接合部パネルの降伏耐力に1.112倍した値
 を用いて対象骨組の挙動の再追跡を行うと，
 図18および図19が得られる．結果として
 この補正によって外ダイアフラム接合部の
 簡単な係数倍補正によって実用的な実挙
 動追跡が可能となったと考える．

5. 柱軸力の影響

本論文が対象とする柱に一定圧縮軸力と漸増

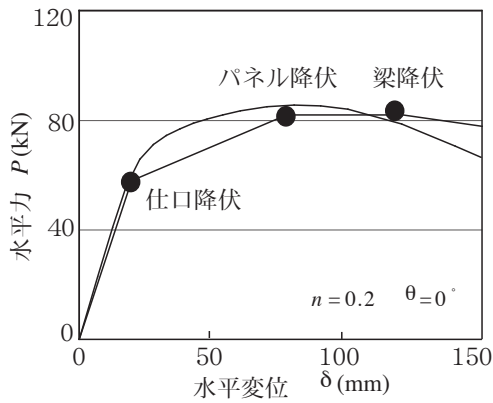


図22 軸力を受ける骨組の追跡結果

水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性挙動を追跡するための柱梁仕口のバイリニア型復元力特性を表現するために、寸法パラメータと独立した柱軸力比($n = N / N_y$)が仕口の諸情報に及ぼす影響を調べた。ここに N_y は柱断面の降伏軸力を指す。

表1に示した32個の解析骨組について柱軸力比 n を0, 0.1, 0.2, 0.3と変化させた有限要素解析結果についてまとめたものを表3で示す。柱軸力が仕口の特性に大きく影響するものとして、仕口降伏後の諸情報が挙げられる。すなわち、降伏耐力および2次剛性である。同表中のハイフンは前述の理由から結果が得られなかったことを示す。

この結果に基づいて、仕口の2次剛性および降伏耐力に関する柱圧縮軸力の影響を図で表すと、それぞれ図20および図21のようになる。柱軸力比0.3までのそれぞれの变化は概ね直線的である。できるだけ式の単純化を図るために、ここでは、両図中の直線式で近似した。これらを各々式(3)および式(2)に乗じることで、柱圧縮軸力を考慮した評価式の誘導ができることになる。

図22は柱軸力を受ける立体部分骨組の荷重 - 変形関係を追跡した結果である。柱軸力による $P - \delta$ 効果を考慮して求めた結果、無軸力の場合と同様に概ね良好に追跡できていることが分る。これまで述べてきた接合部の力学特性評価式を考慮して簡単な骨組挙動の計算をすることで、比較的良好な追跡ができることが分る。

6. 結論

柱圧縮軸力を考慮した円形鋼管柱・H形鋼梁を用いた外ダイアフラム柱梁接合部の仕口部分の力学特性を表す評価式の誘導を試みた。誘導した式は仕口部の初期剛性、降伏耐力、2次剛性および最大耐力の4つであり、これらは仕口部の基本的情報となり、仕口部の弾塑性挙動を簡単な多直線で表現するのに役立つ。

謝辞 本研究の遂行にあたり、財団法人鹿島学術振興財団2006年度研究助成(代表者:熊本大学・小川厚治)より援助を受けた。

参考文献

- [1] 上場輝康, 金谷弘, 藤原勝義, 田淵基嗣, 鋼管柱・H形梁接合部の単純模型実験 - 鋼管柱溶接接合部の研究I -, 日本建築学会論文報告集, 第322号, pp. 44-51, 1982.12
- [2] E. M. Lui, W. F. Chen, Steel Frame Analysis with Flexible Joints, Journal of Construct. Steel Research, pp. 161-202, 1987.8
- [3] S. D. Lindsey, Design of Frames with PR Connection, Journal of Construct. Steel Research, pp. 251-260, 1987.8
- [4] M. Yamanari, H. Kanatani, M. Tabuchi, T. Kamba: Participation of beam-to-column connection deformation in hysteretic behavior of steel frames, Proc. of 9WCEE, Vol. 4, pp.175-180, 1988.8
- [5] 隋偉寧, 山成實: 軸圧縮力と2軸水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性性状, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp. 229-234, 2005.11
- [6] 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明, 海原広幸: 外ダイアフラム接合部の有限要素解析による剛性評価式(半剛接鋼骨組柱梁仕口の復元力特性に関する研究), 構造工学論文集, Vol. 38B, pp.475-484, 1992.3
- [7] 隋偉寧, 山成實: 2方向から水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性性状に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp. 261-268, 2004.11
- [8] 上場輝康, 金谷弘, 藤原勝義, 田淵基嗣, 鋼管柱・H形梁接合部の耐力推定式 - 鋼管柱溶接接合部の研究 -, 日本建築学会論文報告集, 第325号, pp. 67-73, 1983.3