

## 柱軸力を考慮した角形鋼管柱・H形鋼梁仕口の復元力特性

正会員 ○ 海原広幸<sup>1</sup>, 同 山成 實<sup>2</sup>,  
同 小川厚治<sup>3</sup>, 同 黒羽啓明<sup>4</sup>

1. 序 骨組解析を行う上で柱や梁部材などを線材に置換して解くことは巨視的にみて妥当な抽象化である。接合部が変形する骨組を解く場合を考えると、簡便かつ有効な骨組解析を行うには接合部をも何らかの抽象化が必要である。しかしながら、接合部は部材の板要素が集まり複雑な形状になるのが常である。構成する接合部の力学的特性を表現する手段として、数学的モデルの表現あるいは具体的な接合部の構造解析結果から導かれる実験式としての表現が挙げられる。

本研究では後者の方法によることとし、柱に角形鋼管、梁にH形鋼をもつ外ダイアフラム型接合部の詳細な有限要素解析を行い、半剛接骨組解析プログラムに組み込み易い表現の接合部の復元力特性を得ることを目的とする。

## 2. 柱梁仕口の復元力特性

2.1 評価方法 図1に示す角形鋼管外ダイアフラム仕口のフランジ-局部変形関係は、荷重が比較的低い時から仕口の局所的な降伏によって非線形性を呈するが、仕口の力学的挙動の本質を失わずに骨組解析に組み込み易い表現を得る手段として、本研究では bi-linear 型を採用することにする。

図2は鋼管柱に外ダイアフラムを取付けた単純化モデルである。ダイアフラム端部に引張力を作用させると鋼管壁は面外変形すなわち局部変形が生じる。この変形は骨組中で梁端部の回転変形として表現され、剛接合とする骨組の変形に更に変形が付加され半剛接骨組では無視できない。

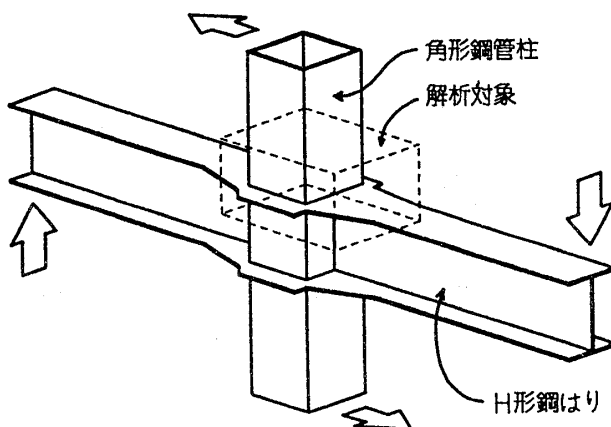


図1 角形鋼管外ダイアフラム接合部

1) 熊本大学大学院生, 2) 同大学助手・工修, 3) 同大学助教授・工博, 4) 同大学教授・工博

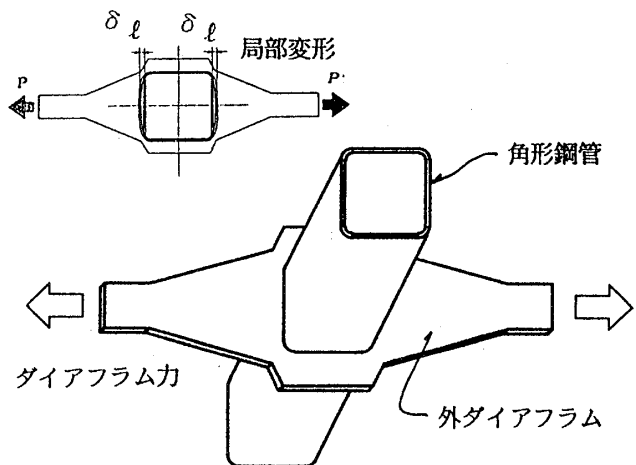


図2 単純化モデル

2.2 初期剛性 ( $K_{\ell_1}$ ) 著者らは接合部を構成する板要素の寸法を系統的に変化させて線形有限要素解析プログラムを用いて解いた結果から仕口の初期剛性推定式を導いた<sup>[1]</sup>。それによると初期剛性に主に影響する諸元は、角形鋼管の径厚比 ( $B/T_c$ )、ダイアフラム厚 ( $T_D$ )、同幅 ( $D_w$ ) および補剛量 ( $H_D$ ) である。得られた評価式は実験値と比較した結果、初期剛性を精度良く推定できる。

2.3 2次剛性 ( $K_{\ell_2}$ ) 初期剛性の評価において最も寄与の多かった鋼管の径厚比 ( $B/T_c$ ) に着目し、仕口の2次剛性を非線形有限要素解析から得る。一方、架構の外柱は比較的高い軸力を受ける。柱軸力は仕口の降伏後の局部変形挙動に影響すると考えられるので、柱材の軸力比 ( $n=N/N_y$ ) をも仕口の荷重-局部変形関係の2次剛性の評価に考慮することにする。

## 3. 柱梁仕口の有限要素解析

3.1 解析モデル 有限要素解析で解析結果の精度に影響するものの一つは解析モデルの要素分割法である。著者らは単純化試験体の載荷実験結果を良く追跡できるような有限要素解析モデル作成法を見いだした<sup>[2]</sup>。ただし、本研究では解析モデルを構成する要素の機械的性質等の物性値、寸法などの不確定因子を排除するため、公称値を用いることにする。従って鋼管とダイアフラム会合部の溶接ビード余盛りは無視する。

非線形解析を行う上で材料の応力度-ひずみ度関係は解析モデルの挙動に大きく反映されるので<sup>[3]</sup>、図3の多直線置換した応力度-ひずみ度関係を用いることにする。

3.2 bi-linear 型復元力モデルの求め方 図4は仕口の局部変形挙動を bi-linear 置換するための模式図である。金谷等<sup>[4]</sup>は一連の実験から仕口の局部破壊耐力 ( $P_{Cmax}$ ) および降伏耐力 ( $P_{Cy}$ ) を誘導している。同図中の  $1/2 \cdot P_{Cmax}$  は復元力特性評価のための解析に先立ち幾つかの鋼管径および管厚を変化させた予備解析を行った結果、解析モデルのダイアフラム力-局部変形関係における降伏耐力は  $P_{Cmax}$  にほぼ比例することから定められた。

この事実は、金谷等による局部降伏耐力が  $P_{Cmax}$  の 0.58 倍であることと符合する。ここでの解析モデルは溶接ビードの余盛りを無視した結果、降伏耐力は  $P_{Cmax}$  の 0.5 倍となった。

一方、図4の  $\delta_{20}$  は骨組の柱梁材が剛であると仮定して層間変形が 1/20 に達する時に対応する仕口の局部変形である。

以上から柱梁仕口の2次剛性の評価は、降伏耐力  $1/2 \cdot P_{Cmax}$  以上かつ  $\delta_{20}$  までの有限要素解析結果を直線近似して求めることにする。

#### 4. 評価式

4.1 有限解析および解析結果 柱梁仕口の2次剛性を誘導するために、汎用有限要素解析プログラム MARC<sup>[5]</sup> を用いて非線形構造解析を行った。3軸対称性から単純化試験体の 1/8 を解析対象とし、図5に示すのはその要素分割の一例である。鋼管の自由端に一定柱軸力を、ダイアフラム端部に漸増引張力をそれぞれ与えて解析した。解析モデルの一覧と後述の方法で得られた解析結果を表1に示す。変化するパラメータは鋼管の径厚比 ( $B/T_c$ ) および鋼管柱の軸力比 ( $n$ ) である。  $B$  ,  $T_c$  はそれぞれ鋼管の外径、管厚である。初期剛性評価で変化させたダイアフラム厚、幅および補剛量は2次剛性に余り影響しないと判断して、一定値とした。  $\sigma_{ua}$  はダイアフラムの引張強さである。実用的な設計範囲を考慮して鋼管外径は 200, 300, 400 (mm) の3種類、鋼管軸力比を 0.0, 0.3, 0.5 の3種類を選び、鋼管径厚比を 10.0 ~ 66.7 の範囲で変化させて解析した。

解析結果を図6に示す。同一寸法の解析モデルで鋼管軸力を変化させても初期剛性は変化せずに降伏後の剛性低下の様子が変化することが窺われる。同図中の○印は

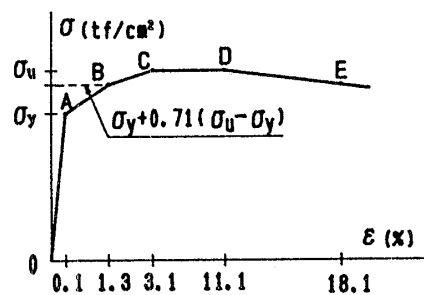


図3 応力度-ひずみ度関係

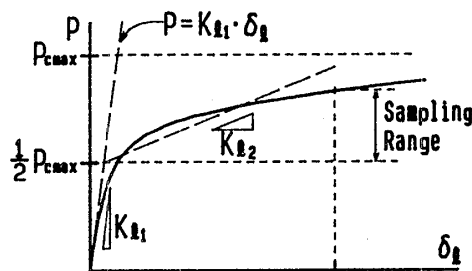


図4 仕口の復元力モデル  $\delta_{20}$

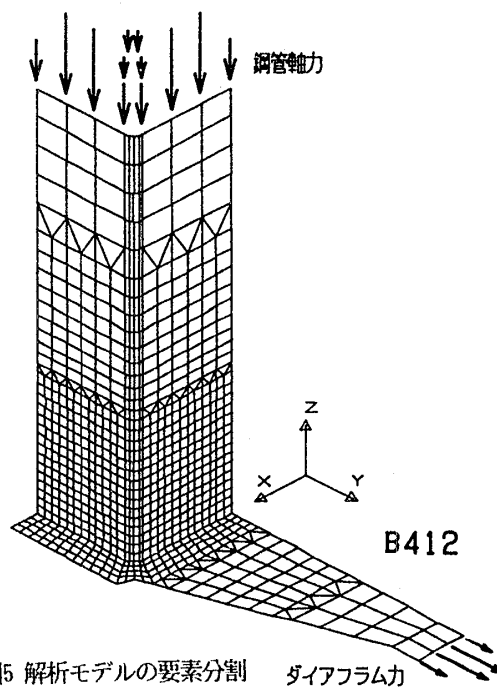


図5 解析モデルの要素分割 ダイアフラム力

荷重-変形関係の接線剛性が初期剛性の 1/3 に達した点である。この点の耐力を三分の一剛性耐力 ( $1/3P$ ) と呼ぶ。

同一寸法の解析モデルで鋼管軸力比 ( $n$ ) を変化させて  $1/3P$  をプロットすると図7が得られる。鋼管軸力を鋼管降伏軸力の 50% まで増加させても三分の一剛性耐力はほぼ一定を保つことが分かり、鋼管軸力が変化する場合でも仕口の復元力特性を bi-linear 置換する際の降伏耐力は一定で良いことを支持している。

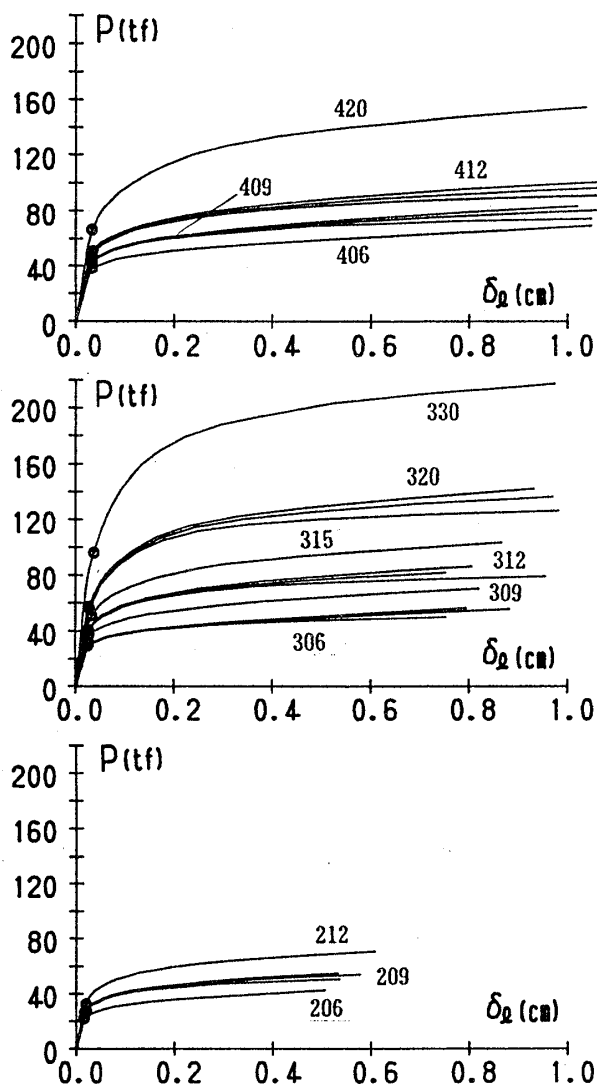


図6 有限要素解析結果

表1 解析結果

名称	n %	B cm	Tc cm	B/Tc	Td cm	Hd cm	Dw cm	$\sigma_{ud}$ tf/cm <sup>2</sup>	P <sub>cmax</sub> tf	1/3P tf	$K_{e1}$ tf/cm	$K_{e2}$ tf/cm	FEM $K_{e1}$ tf/cm	FEM $K_{e2}$ tf/cm	FEM $K_{e2}/K_{e2}$	$K_{e2}/K_{e1}$
A206	0	20	0.6	33.3	2.2	2.0	18	4.1	64.23	22.07	1146.7	21.41	1374.3	21.20	0.990	0.019
A209	0		26.93	25.18					1625.8	20.19	0.802	0.017				
B209	30		0.9	22.2					88.31	26.82	1479.8	20.24	1622.8	16.74	0.827	0.013
C209	50		27.48	15.32					1621.0	10.79	0.704	0.010				
A212	0	1.2	16.7	111.57	32.61	1773.3	33.25	1887.8	25.68	0.772	0.019					
A306	0	30	0.6	50.0	2.2	2.0	18	4.1	81.16	31.45	750.7	20.37	1300.3	22.25	1.092	0.027
B306	30								30.56	16.37	1297.9	19.04	1.163	0.022		
C306	50								29.28	12.39	1296.4	14.35	1.158	0.017		
A309	0								0.9	33.3	110.29	36.80	969.1	21.41	1511.3	20.14
A312	0	40	0.9	33.3	2.2	2.0	18	4.1	138.06	40.71	1161.3	23.55	1741.7	22.33	0.948	0.020
B312	30								40.44	18.93	1737.9	18.20	0.961	0.016		
C312	50								40.96	14.33	1735.4	11.44	0.798	0.012		
A315	0								1.5	20.0	165.06	51.55	1335.1	27.29	1935.1	25.79
A320	0	40	2.0	15.0	2.2	2.0	18	4.1	209.06	57.93	1600.9	38.83	2429.7	48.98	1.261	0.024
B320	30								57.46	31.21	2421.3	40.68	1.303	0.019		
C320	50								57.17	23.63	2417.3	27.65	1.170	0.015		
A330	0								3.0	10.0	295.10	96.21	2065.9	97.24	3609.1	96.46
A406	0	40	0.6	66.7	2.2	2.0	18	4.1	96.39	38.58	561.1	20.12	1279.4	23.57	1.171	0.036
A409	0								43.64	20.55	1471.4	19.56	0.952	0.028		
B409	30								43.12	16.52	1468.5	15.64	0.947	0.023		
C409	50								42.37	12.50	1466.6	9.81	0.785	0.017		
A412	0	40	1.2	33.3	2.2	2.0	18	4.1	161.85	50.78	867.7	21.41	1652.1	19.92	0.930	0.025
B412	30								48.35	17.21	1648.5	15.49	0.900	0.020		
C412	50								47.81	13.03	1646.1	10.06	0.772	0.015		
A420	0								2.0	20.0	242.23	67.10	1196.6	27.29	2357.9	32.98

4.2 鋼管径厚比の効果 角形鋼管の径厚比は柱梁仕口の局部変形生起に最も大きく影響する因子である。軸力比(n)が0の場合で、鋼管径厚比を変化させた表1中の13個のモデルを解析した結果から求めた仕口の2次剛性( $K_{e2}$ )は式(1)で与えられる。

$$K_{e2} = 19.941 + \frac{3.228 \times 10^4}{(B/Tc - 2.0)^{2.902}} \dots (1)$$

式(1)は、 $B/Tc = 2.0$  のとき鋼管は中実となり局部変形剛性は無限大となることから導かれた。有限要素解析結果と推定値の比の変動係数は 0.137 である。

4.3 鋼管軸力比の効果 同一寸法の解析モデルで鋼管軸力を変化させた解析結果を調べると、図6に示されるように軸力が増すにつれて仕口の降伏後の剛性低下は増す。

今、鋼管軸力比の仕口の2次剛性に与える効果を調べるために、径厚比と軸力比は互いに独立して仕口の2次剛性に影響すると仮定する。すなわち、

$$K_{e2} = f(B/Tc, n) = g(B/Tc) \cdot h(n) \dots (2)$$

とおいて、さらに、

$$y = \frac{K_{e2}}{g(B/Tc)} = h(n) \dots (3)$$

とする。 $n = 0$  の時  $y = 1$  であることと軸力比が増すにつれて剛性低下率も増すこと考慮して、有限要素解析結果を基に最小二乗法で推定式を求めると、

$$y = 1 - n^{1.353} \dots (4)$$

が得られる。図8は仕口の二次剛性に与える鋼管軸力の効果を示している。有限要素解析結果と推定値の比の変動係数は 0.092 である。図9は解析結果と推定曲線を描いたものである。曲線は広範囲で解析結果を良く近似している。

4.4 柱梁仕口の復元力特性 以上をまとめると仕口の復元力特性を増分形で表現すると式(5)になる。

$$\Delta P = K_{\ell} \cdot \Delta \delta_{\ell} \quad \dots \dots \dots (5)$$

あるいは、梁端モーメント (M) と仕口の回転角 (α) で表現すると式(6)となる。ただし、

$$K_r = K_{\ell} \frac{d^2}{2}, \quad d \text{ は梁フランジ中心間距離である。}$$

$$\Delta M = K_r \cdot \Delta \alpha \quad \dots \dots \dots (6)$$

①弾性時 (0 ≤ P < P<sub>y</sub>)

$$K_{\ell} = 4.950 \left( \frac{B+H_D}{B} \right)^{4.603} \left( \frac{B+T_D}{B} \right)^{1.353} \left( \frac{B}{T_c} \right)^{2.371} \left( \frac{D_w}{B} \right)^{0.303} \frac{EI}{(B/2)^3}$$

②降伏後 (P ≥ P<sub>y</sub>)

$$K_{\ell} = \left\{ 19.941 + \frac{3.228 \times 10^4}{(B/T_c - 2.0)^{2.902}} \right\} \left\{ 1.0 - \left( \frac{N}{N_y} \right)^{1.953} \right\}$$

ここに、P<sub>y</sub> = 1/2 · P<sub>Cmax</sub>、E は鋼管のヤング係数お

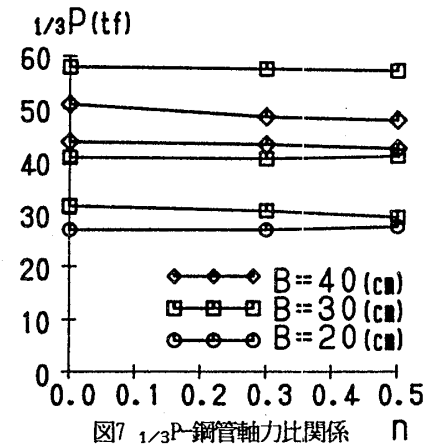


図7 1/3P-鋼管軸力比関係

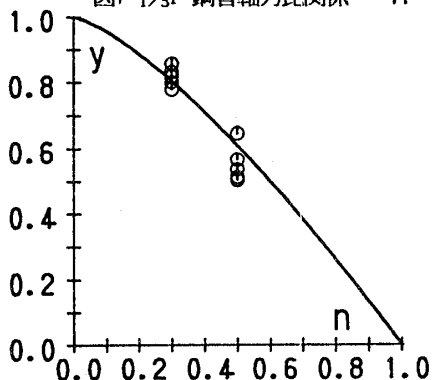


図8 仕口の二次剛性と鋼管軸力比の関係

よび  $I = T_c^3 / 12$  である。

5. 結論 外ダイアフラムをもつ角形鋼管柱・H形鋼梁仕口の複合非線形有限要素解析プログラムによる数値実験から仕口の局部変形挙動を表現する bi-linear モデルを得た。得られた知見を要約すると以下のようになる。

- (1) 柱軸力の変化によらず柱梁仕口の降伏耐力はほぼ一定である。
- (2) 柱軸力が仕口の挙動に及ぼす影響は、仕口の降伏後に現れる。

参考文献

[1] 渡辺純仁, 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明: 半剛接合鋼骨組の柱梁仕口の復元力特性に関する研究 (角形鋼管柱・H形鋼梁仕口の回転剛性の評価式), 日本建築学会九州支部研究報告, 第32号, 1991年3月, pp. 209-212  
 [2] 山田誠一郎, 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明, 海原広幸: 角形鋼管柱・H形鋼梁をもつ外ダイアフラム型接合部の非線形有限要素解析, 第33号, 1992年3月  
 [3] 海原広幸, 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明, 渡辺純仁, 斜め方向から曲げ・せん断力を受ける柱梁接合部パネルの耐力と変形性能に関する研究 (正方形角形鋼管の場合), 日本建築学会九州支部研究報告集, 第32号, 1991年3月, pp. 217-220  
 [4] 田淵基嗣, 金谷弘, 上場輝康: 角形鋼管柱・H形はり接合部の局部耐力推定式-角形鋼管柱溶接接合部の実験的研究 2-, 日本建築学会論文報告集, 第352号, 昭和60年6月, pp. 79-89  
 [5] S.S.Rao: The Finite Element Method in Engineering 2nd Ed., Pergamon Press, 1989

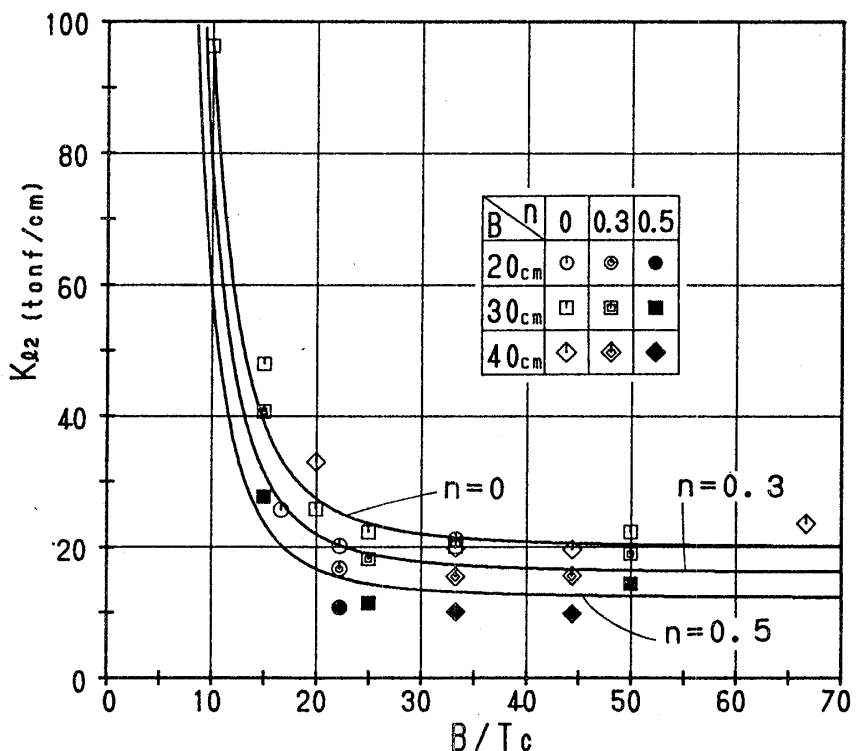


図9 軸力を考慮した仕口の二次剛性の解析値と推定値の比較