

分割外ダイアフラム形式を用いたコンクリート充填角形鋼管柱・鉄骨梁接合部の実験的研究

Elasto-Plastic Behavior of Connection between Concrete-Filled Square Steel Tubular Column and Steel Beam Using Split External Diaphragm

久保田 淳 瀧 正 哉¹⁾ 塚 本 清¹⁾
藤 村 博¹⁾ 萩 原 行 正²⁾ 福 元 敏 之

要 約

本研究では、中低層建物に適用されるコンクリート充填鋼管 (CFT) 構造を対象に、柱梁接合部に用いられる従来の外ダイアフラム形式に対し、生産性を向上できる4枚の板材でダイアフラムを構成する分割外ダイアフラム形式を考案した。かかる接合部の弾塑性性状を把握するために、柱梁接合形式 (中柱形式及びサイドスチフナを併用した側柱形式)、鋼管幅厚比、ダイアフラムの形状、サイドスチフナの高さをパラメータとした接合部局部引張実験を行った。その結果、分割外ダイアフラム形式は、従来の外ダイアフラム形式とほぼ同一の荷重-変形関係を示し、接合形式 (中柱形式及び側柱形式) の違いによらず荷重-変形関係はほぼ同一であった。さらに、柱鋼管フランジを格子梁でモデル化して得られた面外抵抗耐力とダイアフラム (サイドスチフナ) の耐力を累加することで、本接合部局部の耐力を評価できることが判った。

目 次

- I. はじめに
- II. 試験体
- III. 実験方法
- IV. 実験結果
- V. 耐力評価
- VI. おわりに

I. はじめに

コンクリート充填鋼管柱 (以下 CFT 柱と呼ぶ) は、鋼管がコンクリートを拘束し、コンクリートが鋼管の座屈を抑制するため、優れた構造性能を発揮する。この角形 CFT 柱と鉄骨梁の柱梁接合部に一般的に用いられる接合形式として、柱鋼管を切断せずに柱梁接合部を形成する外ダイアフラム形式があるが、かかる柱梁接合部には製作・加工面で改良の余地がある。そこで、本研究では、生産性の向上を目的に、Fig.1(a)に示すように外ダイアフラムを4分割し、板取の歩留まり及び軽量化による加工時のハンドリングの向上を図ると共に、梁継手と柱梁間の接合を集約化した分割外ダイアフラム形式 (以下中柱形式と呼ぶ) を考案した。ダイアフラムと鋼管の溶接は、鋼管角部の溶接を無くし、鋼管平行部のみの溶接とし、加工の簡便化を図っている。また、側柱や隅柱に対しては、仕上げ材との干渉を避けるため、分割外ダイアフラムとサイドスチフナを併用することとした (Fig.1(b)参照、以下側柱形式と呼ぶ)。考案の柱梁接合部に関して把握すべき構造的性状としては、接合部パネルの性状と、梁フランジから接合部パネルへの応力伝達に関する接合部局部の性状が考えられる。

ところで、日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・

同解説」¹⁾では、従来の外ダイアフラム形式を用いた柱梁接合部局部の耐力評価式を規定しているが、本接合形式のような分割されたダイアフラムで構成された接合部を対象とはしていない。また、本接合形式と類似の研究は、松尾等²⁾が、ダイアフラムを分割し、ダイアフラム間のスリット部にガセットプレートを通し、ダイアフラムと溶接で一体化する接合形式に関して構造実験を行い、従来の外ダイアフラム形式と同等の耐震性能を示すことを報告している。松

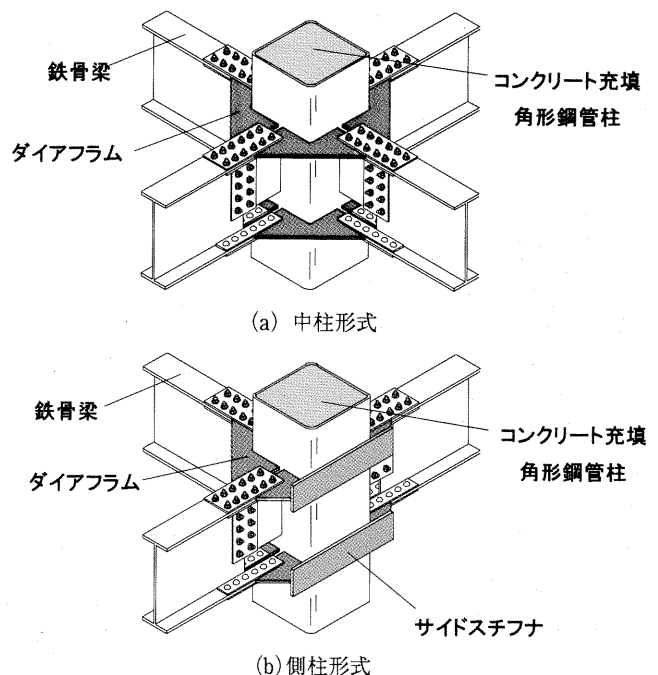


Fig.1 Beam-to-Column Connection Details

- 1) 建築設計本部
- 2) 建築管理本部

キーワード: コンクリート充填角形鋼管柱, 鉄骨梁,
柱梁接合部, 外ダイアフラム, 荷重-変形関係

Fig.2 Specimens and Loading

的に用いられる構造種別 FA クラス⁴⁾と CFT 柱の場合には鋼管幅厚比を大きくできることを勘案して FD クラスの 2 種類とした。⑤サイドスチフナ高さ(h_s)は、ダイアフラム板厚に対するサイドスチフナ高さの比率について、実状より想定される範囲を 3.0~6.0 程度と考え、梁の偏心無試験体で 2.9, 4.6, 梁の偏心有試験体で 5.8, 9.2 とした。また、サイドスチフナの母材破断による耐力評価を行うため、サイドスチフナの母材耐力がダイアフラム 45° 方向斜め部の母材耐力の約 0.8 倍となるように設定した。⑥柱の芯に対する梁の偏心率は 1/6 (偏心率=偏心距離/柱幅, 偏心距離 50mm) とし、偏心の有無の比較検討を行った。⑦柱梁接合形式は、側柱形式と中柱形式とし、両者の比較検討を行った。

試験体は、中柱形式 7 体、側柱形式 4 体の計 11 体であり、柱外径の 2 倍の材長を持つ CFT 柱と梁フランジ、ダイアフラム及びサイドスチフナで構成された試験体である。鋼管とダイアフラム及びサイドスチフナは、鋼管平行部のみで溶接接合されている。試験体に用いた鋼材及びコンクリートの機械的性質を Table 2 及び Table 3 に示す。

III. 実験方法

加力は、梁フランジを単調に両引きすることで行い、最大耐力以後、破壊形式が確認できるまで行った。

接合部の局部変形の計測を、Fig.2 に示す測定区間について行った。また、ひずみの計測を、柱鋼管、ダイアフラム、サイドスチフナの主要点について行った。

IV. 実験結果

実験結果一覧を Table 4 に、試験体の終局状態の例を Photo 1 に示す。また、中柱形式及び側柱形式の荷重-変形関係をそれぞれ Fig.3 及び Fig.4 に示す。なお、同図の横軸の変形は、測定区間の全変形の 1/2 の値を示している。

1. 実験経過

(1) 中柱形式試験体

分割型及び一体型の試験体とも、General Yield 法⁵⁾で評価した降伏点に達した後、鋼管フランジが面外変形する (Photo 1(a)①)。その後、ダイアフラムと鋼管フランジの前面溶接止端部に亀裂 (Photo 1(a)②) が発生する。以後、分割型の試験体では、鋼管ウェブも側面のダイアフラムに引張られることで面外に膨らむが (Photo 1(a)③)、一体型及び鋼管側面ダイアフラムの無い試験体では鋼管ウェブの面外変形は小さい。その後、全試験体とも前述の前面溶接止端部の亀裂が進展し、部分的に破断し、最大耐力に達した。なお、一体型試験体 0-1/5-1-A 及びダイアフラム斜め部寸法が小さい F-1/10-1/2-A では、ダイアフラム母材も破断した (Photo 1(a)④)。

(2) 側柱形式試験体

中柱形式と同様に、いずれの試験体も、General Yield 法⁵⁾で評価した降伏点に達した後、ダイアフラムと鋼管フランジの前面溶接止端部に亀裂 (Photo 1(b)①) が発生する。その後、鋼管フランジの面外変形 (Photo 1(b)②)、サイドスチフナの伸び (Photo 1(b)③) が顕著になり、これらが進展すると共に、前述の亀裂が柱フラ

Table 2 Material Properties of Steel

(a) 中柱形式 ※1:0.2%オフセット降伏点による。

部位	鋼種	サイズ	試験片	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	降伏比
柱鋼管	STKR400	PL-6	JIS5号	5.67	325※1	444	41.5	73
	STKR400	PL-12	JIS5号	11.78	365※1	450	44.2	81
ダイアフラム	SS400	PL-12	JIS5号	11.70	278	451	44.0	62
梁補強材	SM490A	PL-25	JIS1A号	24.28	325	534	30.8	61

(b) 側柱形式

部位	鋼種	サイズ	試験片	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	降伏比
柱鋼管	STKR400	PL-9	JIS5号	8.89	362※1	453	38.8	80
ダイアフラム, サイドスチフナ	SS400	PL-9	JIS5号	9.13	286	437	40.6	65
梁補強材	SM490	PL-25	JIS1A号	24.66	313	512	29.0	61

Table 3 Material Properties of Concrete

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^3$ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
中柱形式試験体	30.9	24.74	3.02
側柱形式試験体	35.3	25.81	2.91

ンジ板厚方向に貫通し (Photo 1(b)④)、最終的にスチフナの破断により急激な耐力低下を起こす結果となった。梁偏心率 1/6 試験体は、梁偏心率 0 試験体に対し、柱フランジ板厚方向への亀裂発生後の変形が小さく、また、柱フランジのサイドスチフナ側では亀裂の貫通が見られたが、ダイアフラム側では確認できなかった。

2. 荷重-変形関係

(1) 中柱形式試験体

分割型 (F-1/5-1/2-A) と一体型 (0-1/5-1-A) を比較すると、両者の最大耐力までの荷重-変形関係はほぼ同一で差異は見られず、両者とも塑性率 (最大耐力時変形/降伏耐力時変形) 21~22 と高い変形性能を示している (Fig.3(a))。また、柱鋼管幅厚比に関して、FA クラス (F-1/5-1/2-A) は、FD クラス (F-1/5-1/2-D) に比較して、耐力が高く鋼管の面外抵抗が発揮されていることが分かる (Fig.3(b))。ダイアフラム斜め部寸法に関して、柱幅に対して 1/5 (F-1/5-1/2-A) と 1/10 (F-1/10-1/2-A) を比較すると、大きな耐力差は見られず、鋼管の面外抵抗が、耐力に大きく寄与していることが考えられる (Fig.3(c))。また、ダイアフラムの側面寸法が、柱幅の 1/2 (F-1/5-1/2-A) と 1/4 (F-1/5-1/4-A) を比較すると、荷重-変形関係に差は見られないが、側面のダイアフラムが無い場合 (F-1/5-0-A) は、ある場合に比較して、耐力が 1/2 程度となっている (Fig.3(d))。

(2) 側柱形式試験体

スチフナ高さに関して、梁偏心率 0 の場合、ダイアフラム板厚に対して 4.6 (SM-S55-FB) は、2.9 (SM-S35-FA) に比較して最大耐力が 1.28 倍となっており、スチフナ高さが大きいほど耐力が高く、また、終局状態でのサイドスチフナのくびれがより顕著なため、最大耐力時の変形も 1.40 倍と大きく、塑性率 (最大耐力時変形/降伏耐力時変形) 25 と高い変形性能を示している (Fig.4(a))。一方、梁偏心率 1/6 の場合、ダイアフラム板厚に対して 9.2 (SE-S110-FB) は、5.8 (SE-S70-FA) に比較して最大耐力が 1.21 倍と高くなるが、スチフナ高さに関わらず、梁の偏心の影響でサイドスチフナがくび

Table 4 Test Results

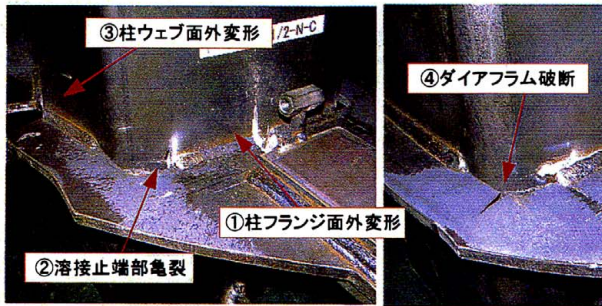
(a) 中柱形式

 ※1: General Yield 法による。
 ()内は実験値/計算値を示す。

試験体名	実験値						計算値	
	降伏耐力※1		亀裂発生		最大耐力		降伏耐力	最大耐力
	荷重 [kN]	変形 [mm]	荷重 [kN]	変形 [mm]	荷重 [kN]	変形 [mm]		
F-1/5-1/2-A	480	1.19	801	7.76	1130	26.25	470 (1.02)	969 (1.17)
F-1/5-1/2-D	270	1.73	495	9.50	679	27.26	310 (0.87)	557 (1.22)
F-1/5-1/4-A	440	1.07	666	4.00	1187	28.25	386 (1.14)	846 (1.40)
F-1/5-0-A	281	1.48	350	2.60	603	24.75	195 (1.44)	544 (1.11)
F-1/10-1/2-A	428	1.50	569	4.10	1044	26.76	330 (1.30)	749 (1.39)
O-1/5-1-A	520	1.09	721	4.50	1200	22.50	463 (1.12)	955 (1.26)

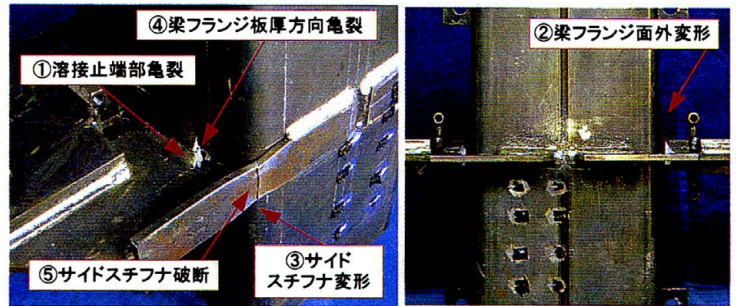
(b) 側柱形式

試験体名	実験値						計算値	
	降伏耐力※1		亀裂発生		最大耐力		降伏耐力	最大耐力
	荷重 [kN]	変形 [mm]	荷重 [kN]	変形 [mm]	荷重 [kN]	変形 [mm]		
SM-S35-FA	310	1.22	391	2.54	682	18.42	284 (1.09)	565 (1.21)
SM-S55-FB	381	1.18	461	2.14	876	25.84	387 (0.98)	724 (1.21)
SE-S70-FA	360	0.91	500	2.70	730	12.85	349 (1.03)	632 (1.16)
SE-S110-FB	481	0.95	583	1.93	886	10.51	503 (0.96)	868 (1.02)
DM-SN-FB	401	1.86	401	1.86	893	29.3	456 (0.88)	828 (1.08)



F-1/5-1/2-D

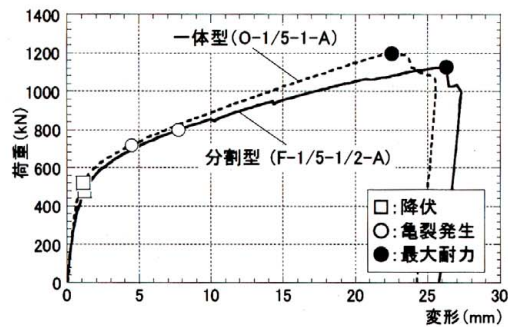
(a) 中柱形式



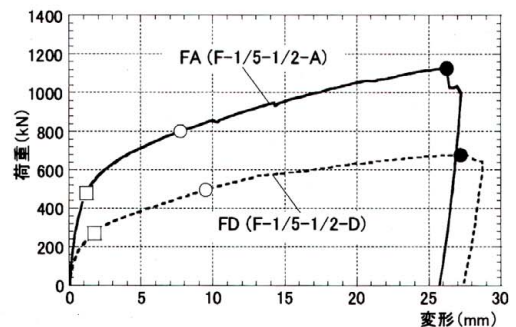
SM-S55-FB

(b) 側柱形式

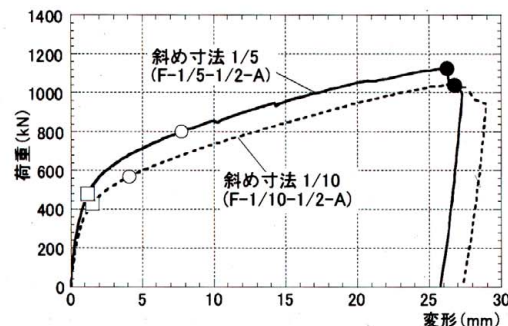
Photo 1 Ultimate State



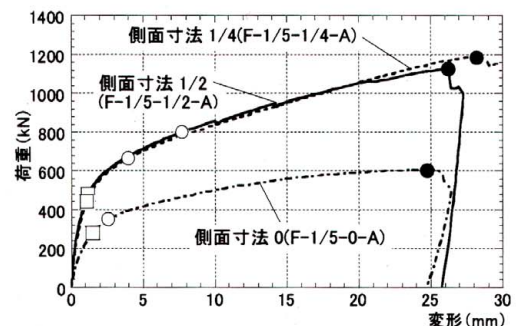
(a) ダイアフラム形式による比較



(b) 鋼管壁厚比による比較



(c) ダイアフラム形状による比較 (斜め寸法)



(d) ダイアフラム形状による比較 (側面寸法)

Fig.3 Load-Deflection Curves for Interior Connection

れて十分に伸びる前に両者共に破断に至り、最大耐力時の変形はほぼ同一となった (Fig. 4 (a))。また、梁の偏心率の観点から荷重-変形関係を比較すると、梁偏心率 1/6 は、梁偏心率 0 に比較して耐力は同等であるが、前述のとおり、サイドスチフナのくびれが顕著になる前に破断に至るため、鋼管が十分に面外変形してから最大耐力に達する梁偏心率 0 に対し、最大耐力時の変形が小さい。この傾向は、特にダイアフラム斜め部の幅厚比が大きいほうが顕著である (Fig. 4 (b))。側柱形式と中柱形式を比較すると、両者の最大耐力までの荷重-変形関係はほぼ同一である (Fig. 4 (c))。

V. 耐力評価

本章では、梁フランジからの引張力に対する接合部局所の耐力について、柱鋼管フランジを格子梁でモデル化⁶⁾して得られた面外抵抗耐力とダイアフラム (サイドスチフナ) の耐力を累加する耐力式を考え、実験結果との比較検討を行った。降伏耐力及び最大耐力実験値と計算値の比較を Table 4 に示す。

中柱形式の接合部局所の降伏耐力 (dP_y) 及び最大耐力 (dP_u) は、Fig. 5 に示す柱フランジの面外抵抗耐力 ((2), (5) 式)⁶⁾と、Fig. 6 に示すミーゼスの降伏条件により、垂直応力度とせん断応力度の複合応力を考えて算出したダイアフラム斜め部断面の耐力 ((3), (6) 式) を累加する (1) 式及び (4) 式で評価する。

$$dP_y = d_1P_y + d_2P_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$d_1P_y = \frac{2}{3}ct^2 \cdot c \cdot \sigma_y \left(\frac{xb}{xl} + \frac{yb \cdot x \cdot l^2}{yl^3} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$xl = \frac{D - rB - ct}{2}, \quad yl = \sqrt{\frac{x \cdot l(D - ct)}{2}}$$

$$xb = 2y_l + r \cdot t, \quad yb = 2x_l + r \cdot B$$

$$d_2P_y = \sqrt{2}d \cdot h \cdot d \cdot t \cdot d \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$dP_u = d_1P_u + d_2P_u \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$d_1P_u = ct^2 \cdot c \cdot \sigma_B \left(\frac{xb}{xl} + \frac{yb}{yl} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$d_2P_u = \sqrt{2}d \cdot h \cdot d \cdot t \cdot d \cdot \sigma_B \quad \dots\dots\dots (6)$$

rB : 鋼管フランジ部とダイアフラムとの溶接継目の長さ (Fig. 5)

x, yb : 鋼管フランジ部の周方向及び材軸方向格子梁幅 (Fig. 5)

x, yl : 鋼管フランジ部の周方向及び材軸方向格子梁長 (Fig. 5)

D : 鋼管幅 ct : 鋼管板厚

$d \cdot t$: ダイアフラム板厚 $d \cdot h$: ダイアフラム斜め部寸法

$r \cdot t$: 隅肉溶接の余盛を含めたダイアフラム板厚 (Fig. 5)

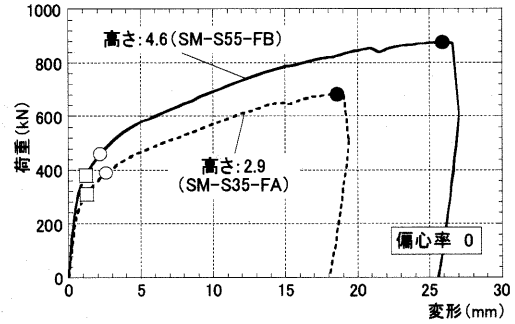
$c \cdot \sigma_y$: 鋼管の降伏点 $c \cdot \sigma_B$: 鋼管の引張強さ

$d \cdot \sigma_y$: ダイアフラムの降伏点 $d \cdot \sigma_B$: ダイアフラムの引張強さ

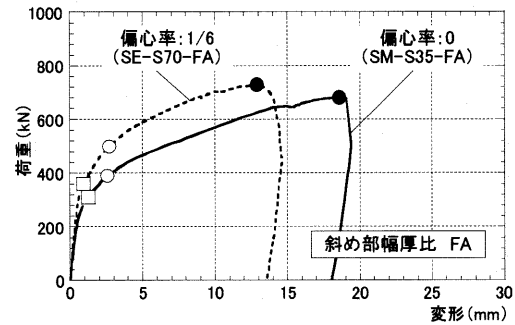
一方、側柱形式の接合部局所の降伏耐力 (dsP_y) 及び最大耐力 (dsP_u) は、(7) 式及び (8) 式による。ただし、柱芯と梁芯とが偏心している場合の降伏耐力 ($dseP_y$) 及び最大耐力 ($dseP_u$) は、(11) 式及び (13) 式による³⁾。

$$dsP_y = \min(dP_y, sP_y) \quad \dots\dots\dots (7)$$

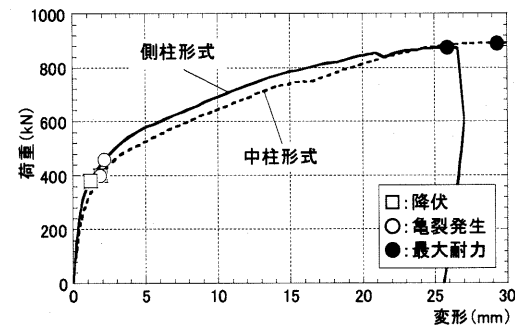
$$dsP_u = \min(dP_u, sP_u) \quad \dots\dots\dots (8)$$



(a) スチフナ高さによる比較



(b) 偏心率による比較



(c) 柱梁接合形式による比較

Fig.4 Load-Deflection Curves for Exterior Connection

ここで、 dP_y 及び dP_u は、(1)式及び(4)式による。

$$sP_y = 2s h_s t_s \sigma_y + d_1 P_y \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$sP_u = 2s h_s t_s \sigma_B + d_1 P_u \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $d_1 P_y$ 及び $d_1 P_u$ は、(2)式及び(5)式による。

$$dse P_y = \min(d_e P_y, se P_y) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$d_e P_y = \frac{D}{2s_d} d P_y \quad se P_y = \frac{D}{2d_d} s P_y \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$dse P_u = \min(d_e P_u, se P_u) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$d_e P_u = \frac{D}{2s_d} d P_u \quad se P_u = \frac{D}{2d_d} s P_u \quad \dots\dots\dots (14)$$

- $s h$: サイドスチフナの高さ $s t$: サイドスチフナ板厚
- $s \sigma_y$: サイドスチフナの短期許容応力度
- $s \sigma_B$: サイドスチフナの引張強さ
- $d d$: ダイアフラム側鋼管ウェブ面から梁芯までの距離
- $s d$: サイドスチフナ側鋼管ウェブ面から梁芯までの距離
- ※ $d d$ 及び $s d$ は Fig.7 参照

各試験体の降伏耐力及び最大耐力の実験値と計算値の比較を Fig.8 に示す。降伏耐力について、計算値に対する実験値の比率は、0.87~1.44 (平均値 1.08) であり、計算値と実験値は概ね良い対応を示している。また、最大耐力について、計算値に対する実験値の比率は、1.02~1.40 (平均値 1.20) であり、計算値は安全側の評価となっている。

IV. おわりに

生産性を向上できる分割外ダイアフラムを用いた角形 CFT 柱・鉄骨梁接合部局所の弾塑性性状を把握するために、接合部局所引張実験を実施すると共に、接合部局所の耐力評価式として、柱鋼管フランジを格子梁でモデル化して得られた面外抵抗耐力とダイアフラム(サイドスチフナ)の耐力を累加する耐力式を考え、実験結果との比較検討を行った。以下に本研究で得られた成果を示す。

- ① 中柱形式に関して、分割型と一体型を比較すると、両者の最大耐力までの荷重-変形関係はほぼ同一である。また、柱鋼管壁厚比、ダイアフラムの形状を変化させても荷重-変形関係に大きな差異は見られなかった。
- ② 側柱形式に関して、梁偏心率 0 及び梁偏心率 1/6 の場合共に、スチフナ高さが大きい方が耐力は高くなる。また、梁偏心率 1/6 は、梁偏心率 0 と比較すると、同等の最大耐力は発揮するが、変形性能が幾分劣る結果となった。
- ③ 側柱形式と中柱形式を比較すると、両者の最大耐力までの荷重-変形関係はほぼ同一である。
- ④ 本柱梁接合部局所の耐力に関して、各試験体の計算値に対する実験値の比率の平均値は、降伏耐力で 1.08 と概ね良い対応を示し、また、最大耐力では 1.20 となり、計算値は安全側の評価となっている。

参考文献

- 1) 日本建築学会；鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、(2001)。
- 2) 松尾隆一他；外ダイアフラム形式の角形鋼管柱-梁接合部の実験、日本建築学会学術講演梗概集 構造Ⅲ、(2001.9)、pp.845-852。

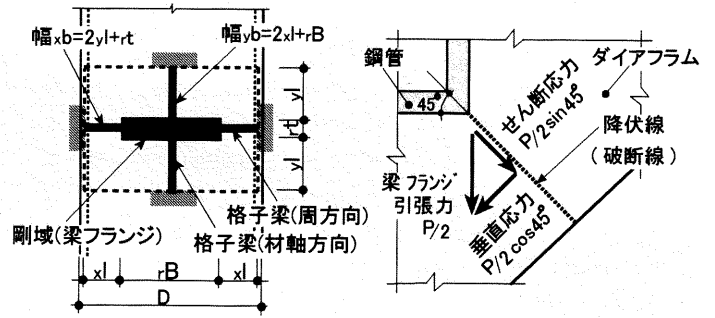


Fig.5 Analytical Model for Tube Flange⁶⁾

Fig.6 Analytical Model for Diaphragm

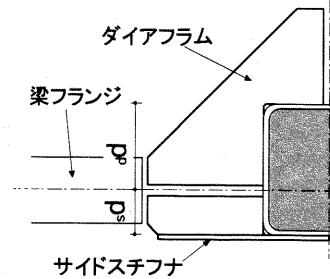
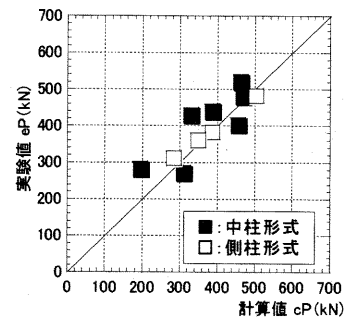
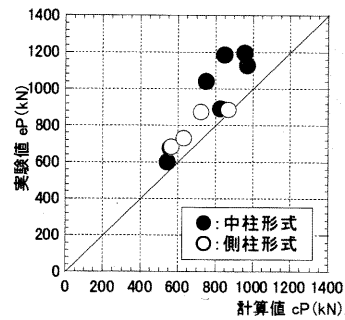


Fig.7 Dimension for Exterior Connection Detail with Eccentric Beam



(a) 降伏耐力



(b) 最大耐力

Fig.8 Comparison of Calculated Strength and Experimental Results

- 3) 松井千秋他；中空およびコンクリート充填角形鋼管柱とH形鋼梁の新接合形式に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.486、(1996.8)、pp.133-142。
- 4) 日本建築センター；建築物の構造関係技術基準解説書、(2001.3)。
- 5) 建築研究所他；鋼構造建築物の構造性能評価試験法に関する研究委員会報告書、(2001.4)。
- 6) 福元敏之、森田耕次；コンクリート充填角形鋼管柱・鉄骨はりの内部補強形式接合部の研究-接合部局所の弾塑性性状-、日本建築学会構造系論文集、No.528、(2000.2)、pp.175-182。