

# コンクリート充填鋼管柱の隅角部 の終局強度評価について

堀地 紀行<sup>1</sup>・保坂 鐵矢<sup>2</sup>・依田 照彦<sup>3</sup>・勝尾 伸一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

<sup>2</sup>正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室 (〒100-0014 東京都千代田区永田町 2-14-2)

<sup>3</sup>正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>4</sup>正会員 日本シビックコンサルタント(株) 技術研究部 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-26-2)

The purpose of this study is to investigate an estimation method of ultimate strength of a corner joint of a concrete filled tubular steel column. Model tests have been carried out on the corner joint in which a concrete filled steel beam was connected to a concrete filled tubular steel column. The beam was made of either circular or rectangular hollow section. Four concrete-filled specimens were tested in order to investigate the ductility and the effect of filling concrete on the strength of the corner joint. Interaction between concrete core and steel hollow section in compression and its influence on the ultimate strength and ductility are discussed with reference to test results.

**Key Words :** concrete filled tubular steel column, corner joint, ultimate strength, ductility

## 1. はじめに

コンクリートを充填した鋼管柱や鋼管梁の部材としての力学特性については、数多くの実験データが整理され、終局強度の評価も可能となってきた<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、梁と柱の結合部にコンクリートを充填した鋼管構造を用いた場合の隅角部の力学的挙動については、実験データも少なく、塑性領域の進展を含めた終局強度の評価の必要性が叫ばれている。本研究では、コンクリートを充填した鋼管柱と鋼管梁の隅角部の静的載荷試験を実施し、塑性領域での挙動とじん性との関係を把握するとともに、FEM解析を用いて終局強度の評価を行った。

## 2. 静的載荷試験

### (1) 載荷試験モデル

載荷試験とFEM解析に用いたモデルを表-1に示す。

表-1 載荷試験体モデルとFEM解析モデル

試験体番号	FEM解析番号	柱寸法	梁寸法	充填	補剛	D/T	d/t	d/D
—	①	φ 558.8 × 12.7 (STK400)	φ 457.2 × 9.5 (STK400)	無	—	44	48	0.82
PS-1	②				45°	44	48	0.82
—	③				梁縁部	44	48	0.82
—	④			有	—	44	48	0.82
PS-2	⑤				45°	44	48	0.82
PS-3	⑥				梁縁部	44	48	0.82
PS-4	—	□400× 400×9 (STK400)	—	有	梁縁部	44	—	—

ここに、D、Tは柱部材の外径、板厚、d、tは梁部材の外径、板厚を示す。

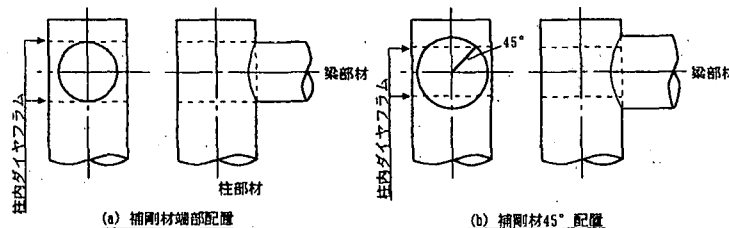
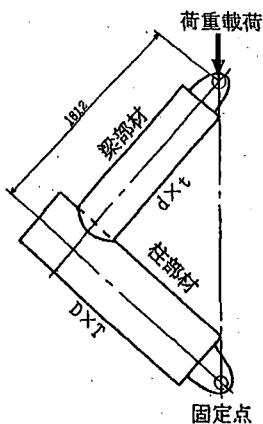


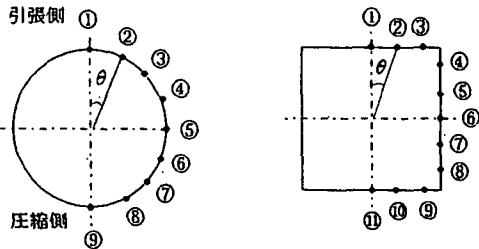
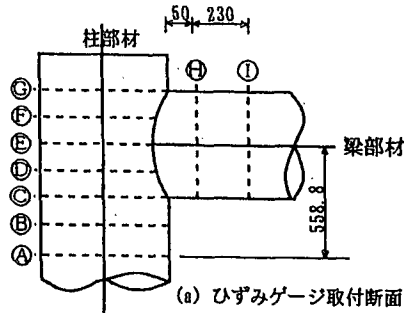
図-1 試験モデルの概略

PS-1~4のモデルは、①コンクリート充填効果、②ダイヤフラム（柱内補剛材）位置の相違、③梁部材が箱形の場合、の比較に着目して選定した。すなわち、PS-1は未充填型モデル、PS-2はPS-1に充填したモデル、PS-3はPS-2とダイヤフラム位置が異なるモデル、PS-4は梁材が箱形断面のモデルとした。

PS-4の梁部材は、PS-2、3とコンクリートが未充填の状態では曲げ剛性（断面2次モーメント）がほぼ等

しい部材（円形断面梁： $I=33,500\text{cm}^4$ 、箱形断面梁： $I=35,100\text{cm}^4$ ）を用いている。

鋼管にはSTK400およびSTKR400、ダイヤフラムにはSS400を用いた。鋼材の材料試験結果を、表-2に示す。また、充填コンクリートの呼び強度は、 $\sigma_{\text{c}}=29.4\text{MPa}$ の普通コンクリートとした。その配合、および各種試験結果を表-3および表-4に示す。



梁部材H断面のひずみ測定点

(b) ゲージ取付位置

図-2 ゲージ取付断面

表-2 鋼材の材料試験結果

品種	材質	試験片寸法 (t mm)	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	降伏ひずみ $\epsilon_y (\mu)$	引張強さ (MPa)
$\phi 558.8 \times 12.7$	STK400	12.25	348	1690	486
$\phi 457.2 \times 9.5$	STK400	9.34	350	1700	478
$\square 400 \times 400 \times 9$	STKR400	8.5	316	1534	436
ダイヤフラム t=12mm	SS400	12.05	322	1564	458

$\epsilon_y = \sigma_y / E$  : Eは鋼材のヤング係数

表-3 充填コンクリートの配合

設計基準強度	30 MPa
水セメント比	46.00%
細骨材率	39.60%
水	1,598 N/cm <sup>3</sup>
セメント	3,472 N/cm <sup>3</sup>
細骨材	6,855 N/cm <sup>3</sup>
粗骨材	10,856 N/cm <sup>3</sup>
混和剤	8,385 N/cm <sup>3</sup>

表-4 各種試験結果

試験結果		PS-2~PS-4		
		梁	柱	
品質管理	空気量	%	4.5	4.5
	スランプ	cm	13.5	13.5
	練上がり温度	℃	24.0	24.0
材料	圧縮強度	MPa	33.0	42.4
	静弾性	$\times 10^4 \text{MPa}$	3.259	3.459

注：材料試験は、載荷試験日の値を示す。

## (2) 載荷試験結果

### a) 荷重-変位関係

荷重の載荷方向は、柱部材に圧縮力が作用する方向に静的に単調載荷した。これは、自重などの常時荷重によるラーメン隅角部の曲げモーメントが実構造物を想定した場合、支配的と判断したためである。

載荷試験では、隅角部のひずみをモニタリングしながら荷重を静的に単調増加させ、破壊に至るまで載荷を続けた。PS-1~4の荷重-変位 (P- $\delta$ ) 曲線図を図-3に示す。ここに、Pは載荷荷重 (kN)、 $\delta$ は荷重載荷点の変位(mm)を示す。

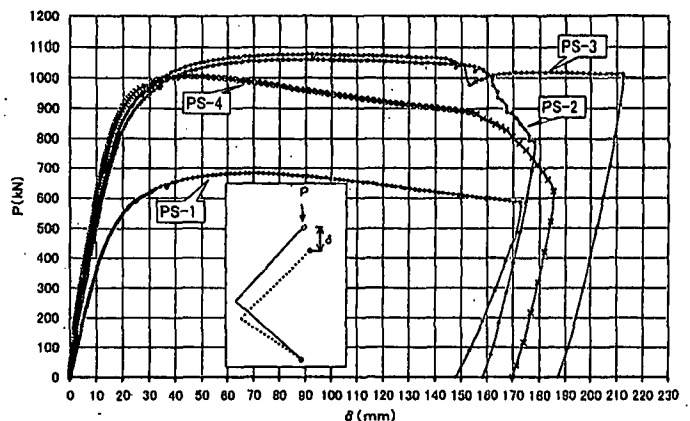


図-3 荷重-変位曲線

### b) 破壊（試験終了時）形状

PS-1~4の載荷試験終了時の形状から以下のことが分かった。①充填型の場合、未充填型で発生した柱が凹むような座屈は発生しない。②梁が角型の場合、座屈

している断面で破断が生じる。③梁が円形の場合、梁引張側の溶接部付近（梁溶接部またはダイヤフラム溶接部）で破断が生じる。④充填型の破断時の変位はいずれも150mm 付近である。⑤梁部材座屈は、接合部より約100mm 離れた位置に発生する。

### c) 鋼材のひずみ

鋼材のひずみが降伏に達した時の荷重・変位、および最大荷重時の変位・ひずみを表-5に示す。柱部材はB～E断面（図-2(a)参照）について最初に降伏した部位、梁部材はH断面について最初と次に降伏した部位および最大荷重時のひずみを示す。

PS-1（未充填型）については、まず梁部材圧縮側端部（H断面）に降伏ひずみが発生し、次に柱部材圧縮側（B断面）に発生した。一方、PS-2～4（充填型）については、柱部材が降伏ひずみに達するのは、いずれも載荷荷重1,000kNを超えてからであった。

P-δ曲線（図-3）において隅角部の弾性限界は700～900kN 付近と考えられるので、柱部材が降伏する荷重が1,000kNを超えていることから、隅角部の降伏は梁部材接合部から始まると判断できる。

表-5 降伏荷重および最大荷重

		PS-1	PS-2	PS-3	PS-4	
柱部材	最初に降伏する部位	B 圧縮側	C 引張側	D 引張側	B 圧縮側	
	載荷荷重	513 kN	1,073 kN	1,004 kN	990 kN	
梁部材	変位	16.2 mm	71.2 mm	36.4 mm	31.2 mm	
	最降伏に	降伏部位	H-⑨	H-③	H-⑨	H-③
		載荷荷重	459 kN	601 kN	603 kN	543 kN
	次に降伏に	降伏部位	H-⑦	H-⑧	H-⑧	H-⑩
		載荷荷重	570 kN	767 kN	679 kN	665 kN
	最大荷重時	変位	21.2 mm	14.6 mm	11.9 mm	11.6 mm
		ひずみ				
		最大部位	H-⑨	H-⑨	H-⑨	H-⑩
		ひずみ	16,860 μ	52,383 μ	53,105 μ	22,172 μ
	載荷荷重	載荷荷重	682 kN	1,078 kN	1,062 kN	1,006 kN
変位		72.0 mm	94.7 mm	87.1 mm	44.7 mm	

## 3. FEM解析結果

### (1) FEM解析モデル

FEM解析に用いる材料特性、部材サイズなどは載荷試験前に行った材料試験結果（表-2、表-4）を参考に非線形材料特性を入力した。また、鋼管は板要素、充填コンクリートはソリッド要素を用いてモデル化し、溶接部のビード形状やコンクリートの付着特性は考慮していない。また、解析では塑性域でのひずみ（変形）を忠実に表現するため荷重増分ステップを出来る限り細かく入力し、試験結果との整合を図った。

### (2) 解析結果

FEM解析では、柱内補剛無しモデルも含めて、①補

剛効果、②充填効果、③実験結果との整合、④詳細ひずみ分布、などを確認した。

試験値とFEM解析値の比較では、①充填型では解析値の方が弾性域で若干大きめの剛性を示した。②降伏荷重は同程度であった。③最大荷重は試験値が大きい結果となった。表-6に、解析値/試験値の最大荷重を示す。なお、表中の太枠内は、載荷試験とFEM解析を行ったケースを示す。

表-6 最大荷重の比較

FEM モデル 番号	載荷 試験体 番号	補剛	充 填	最大荷重 Pmax (kN)		試験値 解析値
				解析値	試験値	
①	—	無	無	401	—	—
②	PS-1	45°	無	605	683	1.13
③	—	端部	無	595	—	—
④	—	無	有	855	—	—
⑤	PS-2	45°	有	1,003	1,078	1.07
⑥	PS-3	端部	有	1,017	1,062	1.04

## 4. 終局強度評価

試験体隅角部の強度を降伏、および終局の状態について載荷試験結果から評価する。理論値を計算する際に着目したのは、梁部材接合部近傍の圧縮側に局部座屈が発生した位置である。それはほぼ接合部から100mm 離れた位置である。梁部材接合部を隅角部の強度判定要因とした理由は、今回の充填型モデルで得られた表-5に示すデータからは、隅角部が降伏に達しても柱部材は降伏に至っていないためである。

### (1) 降伏荷重の判定

載荷試験結果による降伏荷重の判定は、P-δ曲線（図-3）で明らかに弾性から塑性に推移する範囲（P-δ曲線の曲率変化点）に着目した。それぞれの試験体の降伏荷重とその判定要因について表-7に示す。

表-7 降伏荷重(載荷試験結果)

試験体	降伏荷重 P <sub>y</sub> (kN)	判定要因
PS-1	459	梁部材が降伏に達する時点 (表-5参照)
PS-2	785	P-δ曲線の変曲点 (図-3参照)
PS-3	785	P-δ曲線の変曲点 (図-3参照)
PS-4	706	梁部材引張フランジのひずみ が一定値でなくなる時点

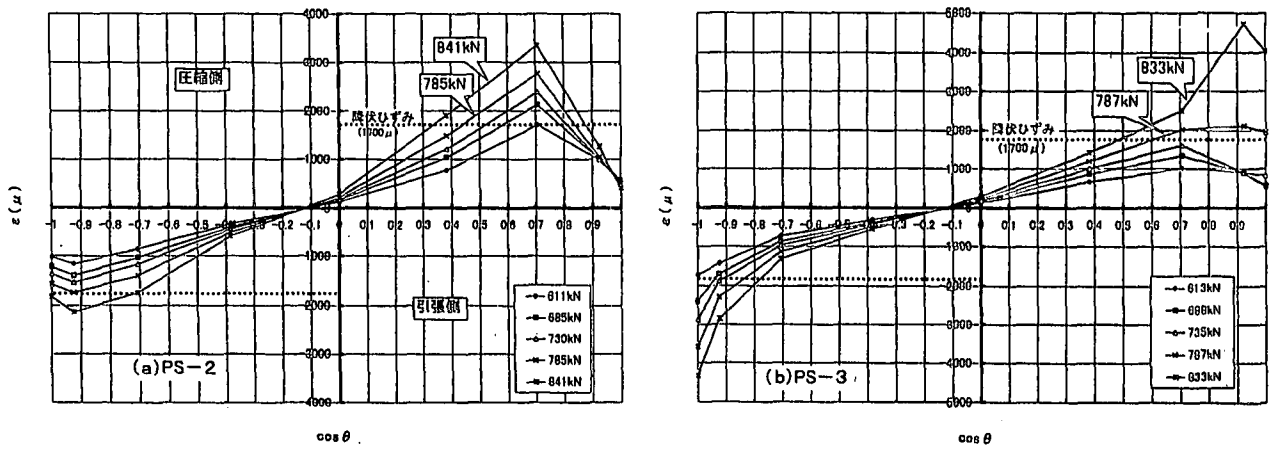


図-4 降伏荷重付近のH断面ひずみ分布

## (2) 終局強度の判定

載荷試験結果による終局強度の判定は、PS-2, 3 については降伏後も耐力の増加が見られ、耐力の劣化が無いことから鋼材の終局ひずみ ( $\epsilon_u$ ) に着目した。その判定方法は、降伏ひずみ  $\epsilon_y$  (表-2 参照) に着目し、既往の研究<sup>4)</sup> から  $\epsilon_u = 20 \epsilon_y$  にて終局状態を評価した。

一方、PS-1, 4 については、降伏後耐力は増加するものの、耐力劣化が見られたため、載荷荷重の最大値を隅角部の終局と評価した。表-8 に各試験体の終局荷重を示す。

表-8 終局荷重 (載荷試験結果)

試験体	終局荷重 $P_u$ (kN)	判定要因
PS-1	682	最大荷重
PS-2	1,070	梁圧縮縁終局ひずみ発生
PS-3	1,050	梁圧縮縁終局ひずみ発生
PS-4	1,006	最大荷重

## (3) 降伏, および終局強度の実験値と理論値の比較

コンクリート充填型円形鋼管の終局曲げモーメント  $M_{u1}$  は全断面が降伏した時、降伏曲げモーメント  $M_y$  は引張側鋼管が  $45^\circ$  の範囲で降伏した時を理論上の限界状態と考えた<sup>5)</sup>。図-4 には載荷試験における PS-2, 3 の降伏荷重付近の梁部材接合部付近 (接合部より 50mm 位置) のひずみ分布を示しているが、この分布からも引張側  $45^\circ$  範囲が降伏した時をおおむね断面の降伏と考えて良いと判断できる。

## 5. まとめ

得られた結論を破壊過程の解明の観点から要約すると、以下の通りである。

- ① 梁部材に円形鋼管を用いた方が局部座屈の進行が遅く、降伏以降の耐力劣化が少なく、じん性に富むことが分かった。梁部材に角形鋼管を用いた場合、局部座屈が発生する時期は最大荷重を超える直前で、円形鋼管の場合に比して早い。このことが、最大荷重後の耐力劣化に直接結びつくので、梁部材に円形鋼管を用いた方がじん性面で、有利であるといえる。
- ② 隅角部にコンクリートを充填する効果は、隅角部の終局強度の向上に直接結びつき、その充填効果は、補剛材 (柱内の補剛) の有無および位置に関係なくほぼ一定である。
- ③ 柱内にダイヤフラムを配置する場合には、応力集中点が限定され、降伏後の応力集中も極端に増加しない梁部材の  $45^\circ$  位置に配置した方が良いと思われる。

## 参考文献

- 1) 村田清満, 安原真人, 渡邊忠明, 木下雅敏: コンクリート充填円形鋼管柱の耐荷力と変形性能の評価, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1555-1564, 1998.
- 2) 保坂鐵矢, 西海健二, 中村俊一: 圧縮強度およびヤング係数の異なるコンクリート系材料を充填した鋼管の曲げ性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1565-1573, 1998.
- 3) 中井博, 吉川紀, 村本和之: コンクリートを充填した長方形鋼製橋脚の梁・柱隅角部の耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.327-340, 1987.
- 4) 佐藤政勝, 依田照彦: 合成構造用鋼材の特性と設計強度の設定に関する提案, 土木学会第 51 回年次学術講演会, CS-70, pp.140-141, 1996.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, 1998.