角形 CFT 柱の曲げ耐力・変形性能の評価方法の検討

東日本旅客鉄道株式会社　正会員　○井上　佳樹　　正会員　吉田　一
東日本旅客鉄道株式会社　正会員　青木　千里　　正会員　山田　正人
鉄道総合技術研究所　正会員　網谷　岳夫　　正会員　池田　学

１．はじめに

コンクリート充填鋼管（以下，CFT）柱の中でも角形 CFT 柱は，内接する円形 CFT 柱に比べて，断面積が大きく，より高い耐力が期待できる．しかし矩形断面の耐力および変形性能については，各機関で検討がなされているが，精度のよい算定法が提案されるに至っていない．そこで，角形 CFT 部材の曲げ耐力および変形性能の算定法を確立することを目的に，力学的性状を把握するため，幅厚比やせん断スパン，材料強度に着目した載荷試験を実施した [1]．そして，既往の載荷試験結果を含む試験結果を基に，降伏時および最大耐力時の角形 CFT 部材の曲げ耐力および変形性能の算定法を検討した．

２．交番載荷試験概要

試験体諸元を**表－１**に示す．今回実施した試験体は K-1～K-8 である．RA および RB 試験体は過去に鉄道総研で実施した試験体であり，後述する最大耐力時の曲げ耐力および部材角の算定法の検討に用いた．試験は正負交番繰返載荷とした．載荷ステップは引張側を正，圧縮側を負とし，引張もしくは圧縮降伏変位 δ_y の整数倍の変位を 3 回繰返し載荷した．

表－１　試験体諸元

	試験体名称	鋼管外幅 B	鋼管厚 t	せん断スパン La(mm)	材料強度 鋼材降伏強度 fsy(N/mm2)	材料強度 コンクリート圧縮強度 f'c(N/mm2)	幅厚比 B/t	せん断スパン比 La/B	軸力比 N/N'y	着目パラメータ
今回実施	K-1	360	6.0	1080	434	20.2	60	3.0	0.20	基本試験体
	K-2	360	6.0	1800	434	27.2	60	5.0	0.20	L/B
	K-3	360	12.0	1080	377	22.3	30	3.0	0.20	B/t
	K-4	360	6.0	2300	458	25.2	60	6.4	0.20	L/B
	K-5	360	4.5	2300	411	26.3	80	6.4	0.20	B/t, L/B
	K-6	360	6.0	1080	389	26.6	60	3.0	0.40	N/N'y
	K-7	360	6.0	1080	496	55.8	60	3.0	0.18	材料強度
	K-8	360	4.5	1080	433	30.7	80	3.0	0.20	B/t
実施済	RA-1	320	3.0	1080	426	24.5	107	3.4	0.20	B/t
	RA-2	320	4.0	1080	431	26.1	80	3.4	0.20	B/t
	RA-3	320	6.0	1080	437	24.5	53	3.4	0.20	基本試験体
	RA-4	320	8.0	1080	401	24.4	40	3.4	0.20	B/t
	RB-1	320	6.0	1080	387	26.5	53	3.4	0.00	N/N'y
	RB-2	320	6.0	1080	437	27.1	53	3.4	0.27	N/N'y

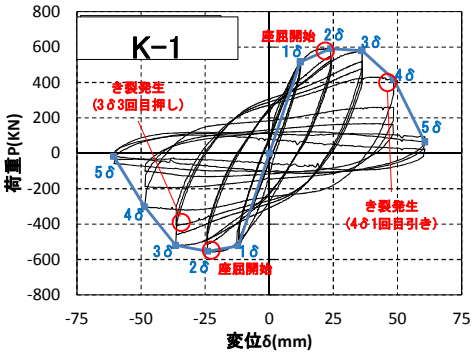
表－２　試験結果

試験体名称	載荷方向	Y点（鋼管降伏） 変位(mm)	Y点（鋼管降伏） 荷重(kN)	M点（最大耐力） 変位(mm)	M点（最大耐力） 荷重(kN)	座屈発生	最大耐力	き裂発生	き裂方向
K-1	引	12.1	515.1	23.9	590.7	2δ	2δ	-3δ	鉛直
	押	12.2	522.7	24.0	553.6				
K-2	引	24.8	326.4	51.0	358.2	2δ	2δ	4δ	鉛直
	押	26.4	329.2	33.8	343.9				
K-3	引	13.8	849.1	29.3	1039.0	3δ	4δ	9δ	鉛直 水平
	押	10.0	797.7	29.5	952.2				
K-4	引	33.4	260.3	67.5	299.5	2δ	3δ	-5δ	鉛直 水平
	押	33.6	252.2	67.6	277.2				
K-5	引	29.8	207.4	69.0	236.6	2δ	3δ	5δ	鉛直 水平
	押	27.9	192.2	69.0	211.9				
K-5	引	8.5	465.1	15.2	521.6	2δ	4δ	6δ	鉛直 水平
	押	9.0	478.4	11.2	485.4				
K-6	引	13.4	659.1	26.2	738.1	2δ	2δ	-4δ	鉛直
	押	12.8	631.9	26.2	672.3				
K-7	引	10.3	415.8	17.6	476.5	2δ	2δ	-4δ	鉛直
	押	7.3	368.3	17.6	435.2				

３．試験結果

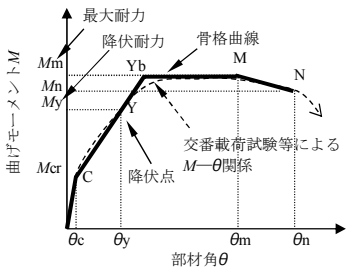
試験結果を**表－２**に示す．鋼管の降伏点を Y 点，最大耐力点を M 点とした．また P-δ 効果を考慮した試験体 K-1 の荷重－変位関係を**図－２**に示す．

試験結果は，いずれの試験体とも曲げ圧縮降伏が局部座屈に先行して生じた．その後，最大荷重に到達する手前の時点で鋼管基部に曲げ圧縮による局部座屈が生じ，局部座屈発生後に最大荷重に到達した．さらに，載荷が進むにつれて局部座屈が進展し，緩やかに荷重が低下した．最終的には，鋼管角部でき裂が生じ，急激に荷重が低下したため，この時点で載荷を終了した．



図－２　荷重－変位図

表－２および**図－２**より，角形 CFT 部材の損傷状況と荷重 - 変位関係との関係は円形 CFT 部材と同じであるため，**図－３**のとおり骨格曲線を設定できると考えられる．



図－３ CFT 部材の骨格曲線

４．曲げ耐力・変形性能の算定法の検討

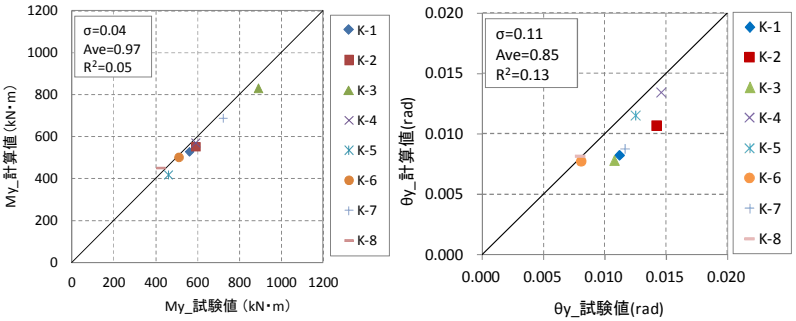
4．1　降伏時の曲げ耐力・部材角

降伏時の曲げ耐力および部材角は，複合標準 [2] の算定法と同様に算定し，試験値との比較を行った．（**図－４**）降伏曲げ耐力（M_y）の計算値は試験値を概ね精度よく評価できることがわかる．降伏時の部材角（θ_y）の計算値はやや過小に評価する傾向にある．

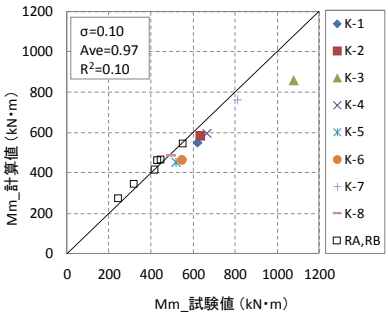
キーワード　角形 CFT，曲げ耐力，変形性能
連絡先　〒151-8512　東京都渋谷区代々木 2-2-6　東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 工事管理室 TEL　03-3320-3482

4．2　最大曲げ耐力・部材角

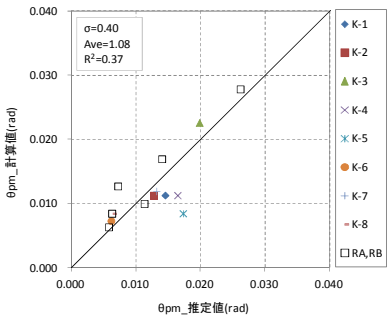
最大曲げ耐力(M_m)は，複合標準[2]の円形 CFT の算定法と同様に算定した．角形 CFT は円形 CFT のように鋼管による拘束効果が高くないと考えられるため，充填コンクリートの限界ひずみは，RC 部材と同等と仮定し，最外縁のコンクリート限界圧縮ひずみ ε'_{cu} (=0.0035)とした．また，鋼管の応力−ひずみ関係は，降伏後のひずみ硬化を考慮した．ひずみ硬化は引張側および圧縮側とも考慮し，降伏後の 2 次剛性は 1 次剛性の 1/100 とした．なお，鋼管の圧縮強度は，試験時に圧縮側鋼板の降伏が局部座屈より先行することから，局部座屈強度でなく圧縮降伏強度を適用した．試験値と計算値の比較を**図－５**に示す．試験体 K-3 は過小評価の傾向が認められるが，それ以外では計算値は試験値を精度よく評価している．試験体 K-3 は，幅厚比 B/t=30 の厚肉鋼管であり，拘束効果が高かったため過小評価したと考えられる．



図－４　試験値との比較（左：降伏曲げ耐力，右：降伏時の部材角）

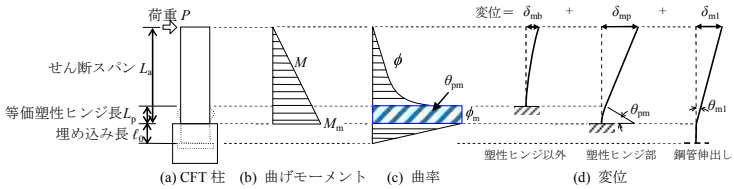


図－５　試験値との比較（最大曲げ耐力）



図－７　試験値との比較（塑性ヒンジ部の最大部材角）

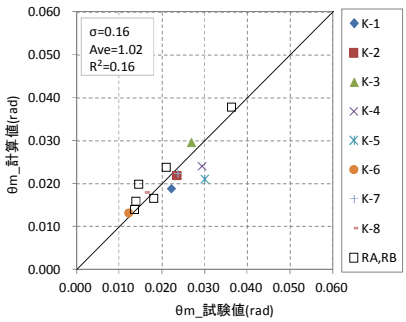
最大部材角(θ_m)は，複合標準[2]の円形 CFT の算定法と同様に，M 点における曲率分布を**図－６**と仮定し，塑性ヒンジ以外の部材角(θ_{mb})，塑性ヒンジ部の部材角(θ_{pm})，埋込み部の部材角(θ_{ml})の和として算出した．θ_{mb} 算出に用いる塑性ヒンジ長(L_p)は試験時の外観形状を測定し，文献[3)~4)]を参考に，試験値の平均値をとり，鋼管幅 B を用いて，L_p=0.5B とした．



図－６　M 点における曲率分布の仮定（埋め込み方式）

θ_{pm} を算定するために，試験結果から得た θ_m から各変位成分である θ_{mb}，θ_{ml} の計算値を差し引くことにより，θ_{pm} 推定値を算出した．θ_{pm} 推定値と断面諸元や軸力により得られるパラメータとの関係を確認し，幅厚比 B/t と軸力比 N'/N'$_y$ に相関がみられたため，B/t と N'/N'$_y$ を用いて，θ_{pm} の算定式(1)を導出した．

$$\theta_{pm} = \frac{0.55(t/B)}{0.37 + 2.2(N'/N'_y)} \qquad (1)$$



図－８　試験値との比較（最大部材角）

(1)の算定式を用いて算出した θ_{pm} 計算値と θ_{pm} 推定値を比較した．(**図－７**) θ_{pm} 計算値は，θ_{pm} 推定値と多少の誤差があるものの，幅厚比や軸力比との相関関係を反映できている．また，θ_m の試験値と計算値の比較を**図－８**に示す．θ_m の計算値は試験値を概ね精度よく評価できることがわかる．

５．まとめ

角形CFT柱の正負交番載荷試験を行い，その破壊性状の確認と，曲げ耐力や変形性能の評価方法の検討を行った．本検討により，降伏時の曲げ耐力および部材角，最大荷重時の曲げ耐力および部材角は概ね精度よく評価できる．今後は，N点の曲げ耐力および変形性能の評価方法について検討する．

参考文献

1)　井上他：幅厚比やせん断スパン比，材料強度に着目した角型 CFT 柱の力学的特性，土木学会第 70 回年次学術講演会，2015.9
2)　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，2016.1
3)　宇佐美他：コンクリートを部分的に充填した鋼箱形断面柱の終局強度と変形能に関する解析的研究，土木学会論文集 No.513，I-31，77-88，1995.4
4)　土木学会：2008 年制定　鋼・合成構造標準示方書【耐震設計編】2008.2