

第5章 一定軸力と変動水平力を受ける
コンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動

§ 5. 1 序

第4章では、角形鋼管柱が一定軸力と変動水平力を受ける時の弾塑性性状について述べ、鋼管の幅厚比が鋼構造設計規準^{5.1)}（以下規準）の幅厚比の制限値を超える断面では、最大耐力以後の抵抗力の低下は急激であり、全塑性モーメントを期待出来ないことを示した。本章では、一定軸力下で変動水平力を受ける規準の幅厚比制限値を超える角形鋼管を用いたコンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性性状について記す。

鋼管コンクリート構造の断面構成としては、充填形、被覆形、充填被覆形の3種類があるが、コンクリート充填鋼管は他の形式の力学性状がSRCのものと同様であるのに対して、力学的には以下の1)-3)の長所がある。内部の充填コンクリートと外部の鋼管が相互に拘束しあい、1)コンクリートは破壊しにくく、靱性が高くなる、2)鋼管はコンクリートの拘束により、局部座屈耐力が大きくなり、座屈後挙動も改善され、幅厚比の大きい鋼管を使っても良い性能を示す事が期待できる。また、3)柱はり接合部などでは、コンクリートが充填されているため、鋼管の局部変形が防止され、強剛な接合部が得られる。

ところで、わが国における鋼管コンクリート構造に関する規準としては、1967年に鋼管コンクリート構造設計規準^{5.2)}が発表された。この規準では鋼管は円形鋼管のみが対象となっており、1980年の同第2版^{5.3)}で角形鋼管も取り入れられた。その後1987年に鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準^{5.4)}の中に統合され、そこでは、建物の保有水平耐力の計算に必要な終局耐力の算定式も示されている。しかしながら、1980年の第2版までは、コンクリート充填鋼管に対してもその鋼管部の幅厚比制限値は、中空鋼管のそれと同じ値を取るように規定されており、上述2)のコンクリートの拘束による効果は取り入れていなかった。その理由としては、それまでの研究では幅厚比の大きい板要素よりなるコンクリート充填鋼管の研究が、実験的にも、理論的にもなされていなかったことによる。

したがって、本章での研究の目的は、鋼構造設計規準で規定されている幅厚比制限値を超えた板要素よりなるコンクリート充填角形鋼管柱の実験を行い、耐力・変形性能を検討すること、また併せて中空鋼管柱の実験を行い、その結果と比較することにより、コンクリートと鋼材の合成効果を考慮にいたし、充填鋼管に対する新しい幅厚比制限値を提示することである。

本章に係るコンクリート充填鋼管部材の弾塑性挙動を調べた既往の研究としては、外国では長柱の座屈強度や、偏心圧縮柱の耐力を調べたものはあるが^{5.5)-5.7)}、本論文で対象とする地震力を受ける荷重に相当する荷重を受ける研究は見あたらない。わが国では、仲・加藤ら^{5.8)、5.9)}がコンクリート充填円形鋼管の力学的挙動を解明することを目的に圧縮実験を行い、短柱の耐力は充填コンクリートと鋼管の累加強度で評価出来ることを示している。また富井ら^{5.10)}は、コンクリート充填円形、角形および八角形鋼管の圧縮試験を行い、その耐力と変形性状を調べている。

軸力と曲げを受ける材としては、山田ら^{5.11)}は、一定軸力と単調曲げを受けるコンクリート充填円形鋼管柱の実験を行い、解析結果と比較している。また、コンクリート充填角形鋼管に対しても実験および解析を行っている^{5.12)}。加藤・秋山ら^{5.13)} - ^{5.15)}は、逆対称曲げを受ける実験を幅厚比、細長比を変化させて行い、若林・佐々木ら^{5.16)}、^{5.17)}は、被覆形、充填被覆形も含めて、コンクリート充填円形および角形鋼管の実験を行っている。富井・崎野ら^{5.18)}、^{5.19)}は、軸力と曲げを受けるコンクリート充填角形鋼管の実験を行い、曲げ終局強度の計算法、モーメント-曲率関係を算定するための鋼管、コンクリートの等価な応力-ひずみ関係を提案している。また、せん断スパン比、鋼管の幅厚比、軸力比を実験変数にとり、単調および繰返し曲げせん断を受ける柱材の実験を行い、せん断スパンの値による破壊モードの相違、せん断破壊するときの終局強度算定法を示している^{5.20)}、^{5.21)}。最近では、高層共同住宅の構法として注目され、コンクリート充填円形および角形鋼管柱の耐力・変形性能を調べる実験が行われている^{5.22)}。

本章の研究目的であるコンクリート充填角形鋼管柱の幅厚比制限値に関連する研究としては、崎野^{5.23)}は幅厚比がおよそ20から40のコンクリート充填角形鋼管柱と中空鋼管柱の挙動を比較して、変形性能の観点から幅厚比制限値に近い板要素よりなる充填鋼管を用いても、幅厚比が小さい中空鋼管と同等の性能が発揮できることを示しており、幅厚比制限値を中空鋼管のものより緩和できることを示唆している。鈴木ら^{5.24)}は、短柱圧縮試験の結果より、最大耐力は幅厚比が80の充填鋼管でも規準の制限幅厚比をもつ中空鋼管とほぼ同等であること、また柱材の実験により幅厚比が100程度でも挙動は安定していることを報告している。松井^{5.25)}は局部座屈を考慮した剛塑性解析に基づき、制限幅厚比をもつ中空鋼管柱と等価なエネルギー吸収能力を持つ充填鋼管柱の幅厚比を、種々の期待する塑性変形能力に対して求めている。その結果、充填鋼管の幅厚比制限値は中空鋼管の1.5倍程度緩和できることを示し、より経済的な設計の可能性のあることを示唆している。また柱にコンクリート充填角形鋼管を、はりにH形鋼を用いた1層1スパンの門形ラーメンの実験を行うことにより、規準の幅厚比制限値の1.5倍の板要素(幅厚比68)よりなる角形鋼管を用いても、耐力・変形性能の点で幅厚比制限値の板要素よりなる中空鋼管よりもよい性能を発揮することを示している^{5.26)}。小泉ら^{5.27)}は幅厚比が70の柱材の、松村ら^{5.28)}、^{5.29)}は、幅厚比が100程度の柱材および骨組の載荷実験を行っている。

しかしながら、文献5.25を除き、コンクリート充填角形鋼管の幅厚比制限値を求めるといのが主目的ではないため、幅厚比が規準の幅厚比制限値を超える板要素よりなる充填鋼管の実験はあるものの、幅厚比を系統的には変化させてなく、充填鋼管の幅厚比制限値に関しての一般的な結論は出ていない。以上のことから、本章では規準の制限値を超える範囲で角形鋼管の幅厚比を変化させて実験を行い、同時に中空鋼管の実験を行うことにより、上述の研究目的に対する検討を行った。

§ 5. 2 実験

5. 2. 1 実験計画

一定鉛直荷重の下で、変動水平力を受ける幅厚比の大きな板要素よりなるコンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動を調べるために、

(1) コンクリート充填の有無

(2) 角形鋼管の板要素の幅厚比 B/t (B :鋼管の幅, t :板厚)

: 47, 60, 75, 94 (普通鋼)

47, 58 (高張力鋼)

(3) 軸力比 n ($= P/P_y$, P :一定鉛直荷重, P_y :中空鋼管試験体では柱断面の降伏軸力, 充填鋼管試験体では圧縮耐力)

: 0.1, 0.3, 0.4

を実験変数として、実験計画をたてている。試験体数はこれらの変数を組み合わせて、充填試験体14体、中空試験体12体で合計26体の実験を行った。なお、充填鋼管の圧縮耐力 P_y は $P_y = A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot F_c$ (A_s :鋼管の断面積, σ_y :鋼管の降伏応力度, A_c :充填コンクリートの断面積, F_c :コンクリートの圧縮強度) として求めた。

表 5.1 実験条件

(1): 公称幅厚比
 A_s : 鉄骨部分の断面積
 F_c : コンクリートの圧縮耐力
 (2): 規準の幅厚比制限値
 σ_y : 鉄骨の降伏応力
 ϵ_b : F_c の時のひずみ度
 P_y : 圧縮耐力

充填の有無	No.	試験体	公称幅厚比 (1)	幅厚比制限値 (2)	(1) (2)	軸力比 n	細長比 λ	$A_s \sigma_y / P_y$	F_c (kg/cm ²)	ϵ_b (%)	加力方法
中空 (普通鋼)	1	VM471	46.9	41.6	1.13	0.1	24.9	-	-	-	単調
	2	VM473	46.9	41.6	1.13	0.3	24.9	-	-	-	
	3	VM601	60.0	41.3	1.45	0.1	24.7	-	-	-	
	4	VM603	60.0	41.3	1.45	0.3	24.7	-	-	-	
	5	VM751	75.0	42.9	1.75	0.1	24.7	-	-	-	
	6	VM753	75.0	42.9	1.75	0.3	24.7	-	-	-	
	7	VM941	93.8	42.9	2.19	0.1	24.7	-	-	-	
	8	VM943	93.8	42.9	2.19	0.3	24.7	-	-	-	
充填 (普通鋼)	9	CM473	46.9	41.6	1.13	0.3	24.9	0.52	328	0.20	単調
	10	CM603	60.0	41.3	1.45	0.3	24.7	0.46	328	0.21	
	11	CM751	75.0	42.9	1.75	0.1	24.7	0.37	333	0.19	
	12	CM753	75.0	42.9	1.75	0.3	24.7	0.38	328	0.20	
	13	CM754	75.0	42.9	1.75	0.4	24.7	0.37	343	0.20	繰返し
	14	CM943	93.8	42.9	2.19	0.3	24.7	0.33	324	0.18	
	15	CC473	46.9	41.6	1.13	0.3	24.9	0.47	402	0.18	
	16	CC603	60.0	41.3	1.45	0.3	24.7	0.4	416	0.20	
17	CC753	75.0	42.9	1.75	0.3	24.7	0.34	392	0.20	繰返し	
18	CC943	93.8	42.9	2.19	0.3	24.7	0.27	423	0.19		
中空 (高張力鋼)	19	HT-VM471	46.9	37.0	1.27	0.1	24.9	-	-	-	単調
	20	HT-VM473	46.9	37.0	1.27	0.3	24.9	-	-	-	
	21	HT-VM581	57.7	37.2	1.55	0.1	24.9	-	-	-	
	22	HT-VM583	57.7	37.2	1.55	0.3	25.1	-	-	-	
充填 (高張力鋼)	23	HT-CM473	46.9	37.0	1.27	0.3	24.9	0.53	416	0.20	単調
	24	HT-CM583	57.7	37.2	1.55	0.3	24.9	0.48	404	0.18	
	25	HT-CC473	46.9	37.0	1.27	0.3	24.9	0.54	398	0.21	繰返し
	26	HT-CC583	57.7	37.2	1.55	0.3	25.1	0.49	386	0.21	

各シリーズの実験条件を表5. 1に示す。同表における試験体名は、次に示すように実験条件を表している。

試験体名 A B C D E

A : コンクリート充填鋼管 (C) と中空鋼管 (V)

B : 単調加力 (M) と繰返し加力 (C)

C D : 幅厚比の値, 47 ~ 94

E : 軸力比 n の値の10倍の値

なお、最初にHTがついている試験体は、鋼管が高張力鋼管であることを示す。

表中の幅厚比制限値は、前章と同様に $(7.4 / \sqrt{\sigma_y} + 4)$ で求めた。表中の(1) / (2)の値より、鋼管幅厚比は規準の1.1 ~ 2.2倍の範囲にあることがわかる。また、細長比は鋼管のみを考えたときの値である。

5. 2. 2 試験体

試験体は、骨組が水平力を受けるときの柱材の反曲点と材端の間を抽象化したもので、一端固定、他端自由となる片持ち柱である。

試験体に用いた角形鋼管は、公称断面せい (D) および幅 (B) が150mmで一定である。板厚 t は普通鋼が、3.2mm (幅厚比 $B/t = 47$)、2.5mm ($B/t = 60$)、2.0mm ($B/t = 75$)、1.6mm ($B/t = 94$) の4種類、高張力鋼が3.2mm ($B/t = 47$)、2.6mm ($B/t = 58$) の2種類である。角形鋼管は、鋼板から溝形断面を成形し、つぎに一对の溝形断面を突合せ溶接することによって制作した。鋼管角部の圆弧部は板厚中心の半径が板厚 t の1.5倍である。熱処理は行っていない。充填鋼管試験体に対しては、設計基準強度300 kg/cm²のコンクリートを試験体上部のエンドプレートにあけた穴より充填した。

図5. 1に試験体の形状・寸法を示す。試験体の上端部には、試験体を球座に取り付けるため、下端部には、試験体を加力装置に固定するために鋼板を溶接している。固定端と球座の中心までの距離は75cmである。柱せい D との比は5であり曲げ破壊

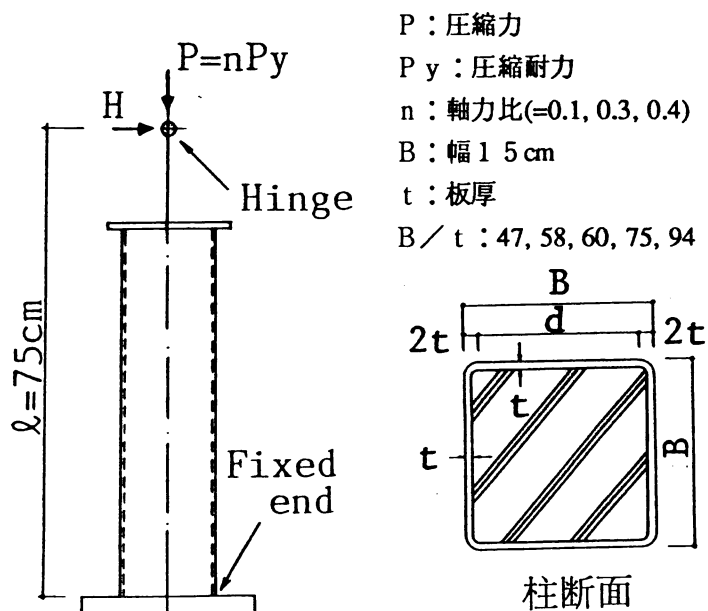


図5.1 試験体

を想定している。各試験体の実験条件を表5. 1, コンクリートおよび鋼材の機械的性質を表5. 1, 5. 2, コンクリートの調合を表5. 3に示す。鋼材の機械的性質はJ I S 1号引張試験片2本の引張試験結果の平均値である。また、コンクリートの性質は載荷実験当日に行ったコンクリートシリンダー3本の圧縮試験結果の平均値である。

表5.2 鋼材の機械的性質

材料	板厚	幅厚比	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	Y (= σ_y/σ_u)	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)	ϵ_{st} (%)
SS41	1.6	94	3.63	4.54	0.80	0.173	26.3	1.72
	2	75	3.62	4.42	0.82	0.172	22.9	1.68
	2.5	60	3.94	4.59	0.86	0.188	21.5	1.97
	3.2	47	3.87	4.88	0.79	0.184	19.0	1.40
HT60	2.6 a	58	4.97	6.16	0.81	0.237	17.6	1.10
	2.6 b		4.96	6.15	0.81	0.236	16.6	1.05
	3.2	47	5.03	6.09	0.83	0.239	16.3	0.85

σ_y : 降伏応力度

σ_u : 引張り強度

Y : 降伏比

ϵ_y : 降伏ひずみ度

ϵ_u : 伸び

ϵ_{st} : ひずみ硬化開始時のひずみ度

表5.3 コンクリートの調合

コンクリートの種類	設計強度 (kg/cm ²)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
普通ポルトランドセメント	300	8	49	45
調合(kg/m ³)				
水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
170.9	368	838	1018	0.11

5. 2. 3 加力装置および加力方法

加力装置を図5. 2に示す。これは第3章の装置と全く同様である。実験は、鉛直荷重Pを試験体に500 tアムスラー型試験機で加え、一定に保持したあとにオイルジャッキで準静的に水平力Hを加えた。試験体の柱脚部は支持ビームにPC鋼棒を用いて固定されている。水平力の加力方法は、単調加力用の試験体には、加力装置の能力の範囲内あるいは試験体に載荷した軸力が維持できる範囲内で行える限り大きい水平変位を与えた。繰返し加力用の試験体には、柱部材角(δ/l)で制御し、まず部材角 $1/200$ の一定振幅で水平力を2サイクル加えた。その後、変位振幅を2サイクルごとに $1/200$ ずつ増加させた。なお試験体はすべて、溶接シーム部分がウェブ位置になるように設置している。

5. 2. 4 測定方法

測定方法も2章と同様である。鉛直荷重は試験機の計測部、水平力はジャッキ先端部にとりつけた20トン容量のロードセルで計測した。試験体の水平変位は、支持ビーム上に設置した変位形で計測した。また、試験体各部にひずみゲージを貼付し、ひずみの計測を行っている。

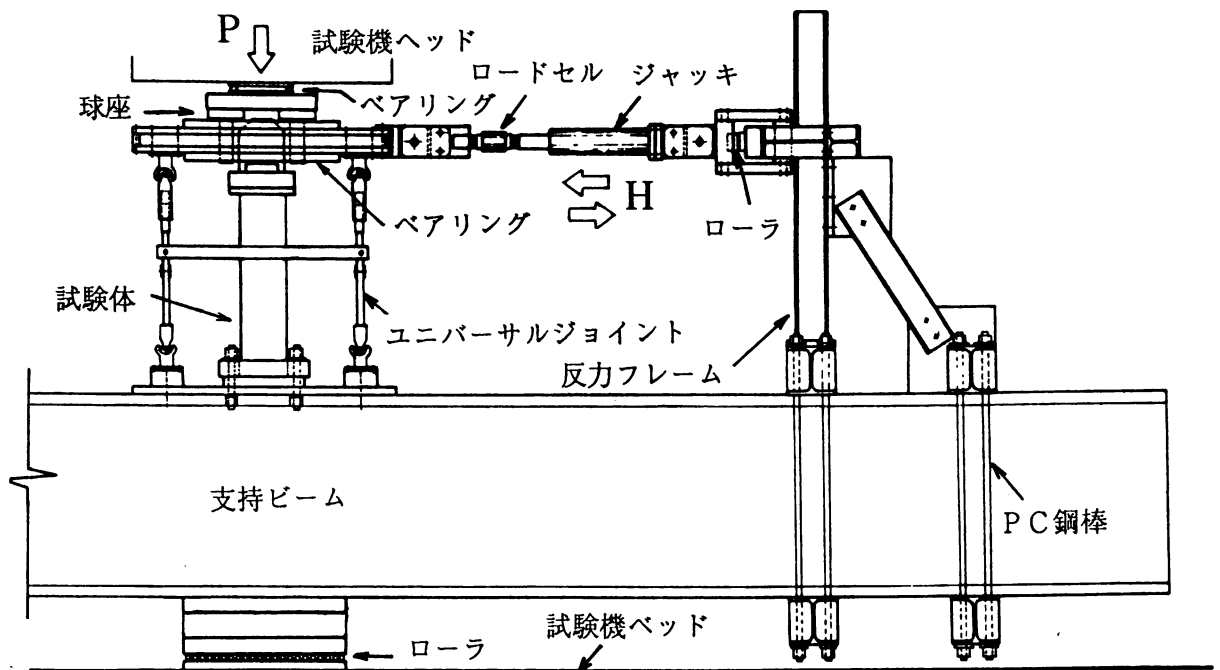


図5.2 加力装置

5. 2. 5 実験結果

(1) 単調挙動 図5. 3に単調荷を受ける試験体の水平力(H) - 水平変位(δ) 関係を示す。図5. 3(a) ~ (d), (f) ~ (h)は、同じ幅厚比、軸力比をもつ充填鋼管と中空鋼管試験体の結果を比較して示した。また、(e)では、充填鋼管試験体、(i), (j)に中空鋼管試験体の結果を示している。

図中f, wでフランジおよびウェブの肉眼による座屈発生点, mで最大耐力を示している。また、充填鋼管試験体に対して、rでフランジとウェブの座屈変形が成長し鋼管角部が曲がり出した点を、crで亀裂が発生した点を示している。一点鎖線は剛塑性崩壊直線である。剛塑性崩壊直線は、前章と同様に柱脚部に塑性ヒンジが生じるとして求めた。塑性ヒンジ点での曲げモーメントMpcは、図5. 4に示すように、鋼材は中立軸より圧縮側は圧縮で、引張側は引張で降伏しており、コンクリートは引張強度は無視し、圧縮側は圧縮強度Fcの長方形分布をしていると仮定して次式で求めた(但し、塑性中立軸はウェブにある場合である)。なお角形鋼管隅角部の円弧部分は無視して完全な矩形としている。

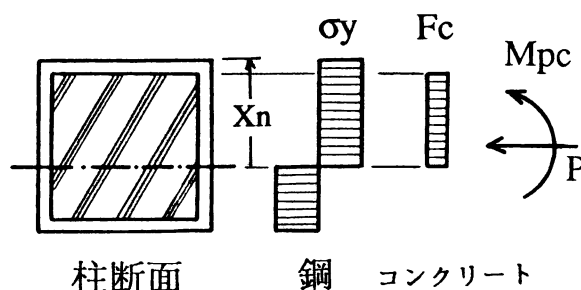


図5.4 Mpc算定の応力分布

$$M_{pc} = B \cdot t \cdot (D - t) \cdot \sigma_y + 2 \cdot (x_n - t) \cdot (D - t - x_n) \cdot t \cdot \sigma_y + (B - 2 \cdot t) \cdot (x_n - t) \cdot (D - t - x_n) \cdot F_c / 2 \quad (5.1)$$

ただし、中立軸位置を表す x_n は次式で与えられる。

$$x_n = \frac{P + \{2 \cdot \sigma_y \cdot D + (B - 2 \cdot t) \cdot F_c\} \cdot t}{(B - 2 \cdot t) \cdot F_c + 4 \cdot t \cdot \sigma_y} \quad (5.2)$$

ここで、Bは角形鋼管の幅、D:鋼管のせい、t:鋼管の板厚、 σ_y :鋼管の降伏応力度、Fc:コンクリートの圧縮強度である。

中空鋼管試験体は、前章でも示したようにフランジの座屈に引き続くウェブの座屈のあと、急激に抵抗力が低下した。全ての試験体が図中に示す剛塑性崩壊直線に達しなかった。中空鋼管では、フランジの局部座屈発生が直ちに最大耐力とはならず、ウェブの座屈で最大耐力となったと考えてよい。

それに対して、コンクリート充填鋼管試験体も、中空鋼管と同様にフランジの局部座屈、ウェブの局部座屈、鋼管角部が直線を保持できなくなるという過程を経るが、

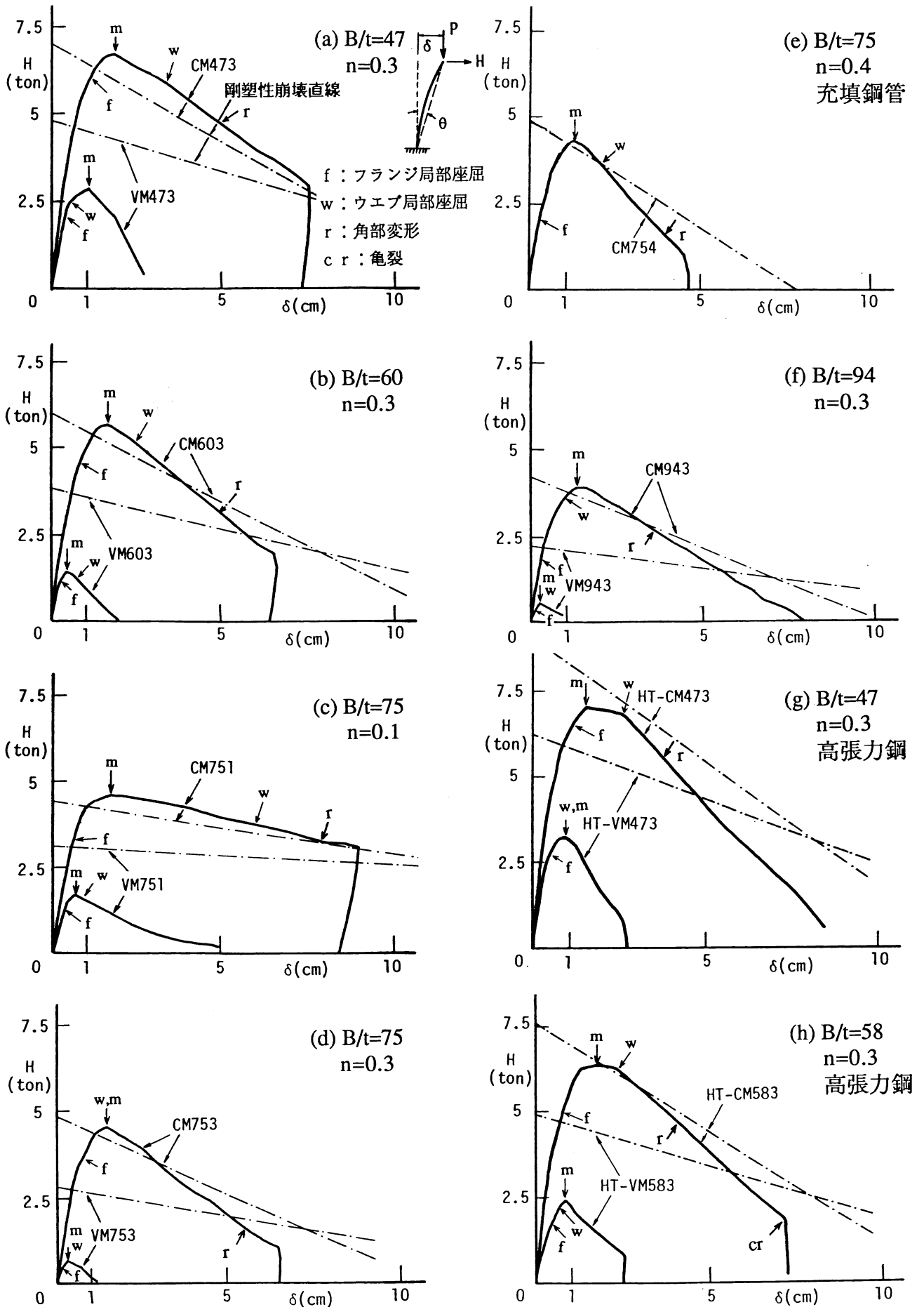


図 5.3 水平力 (H) - 水平変位 (δ) 関係 (つづく)

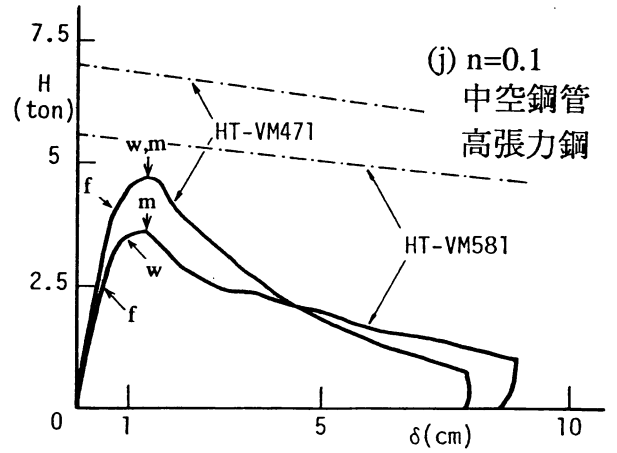
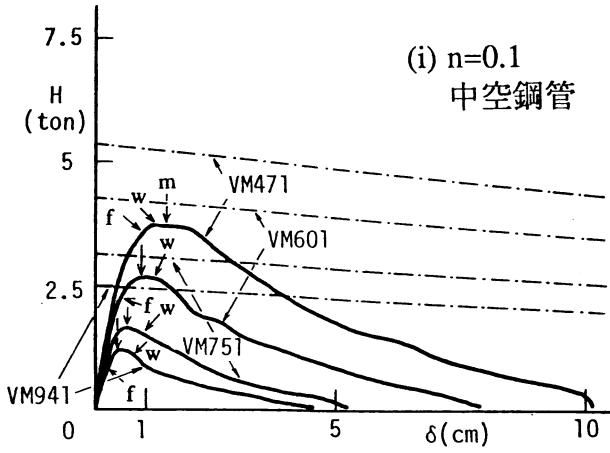


図 5.3 水平力 (H) - 水平変位 (δ) 関係 (つづき)

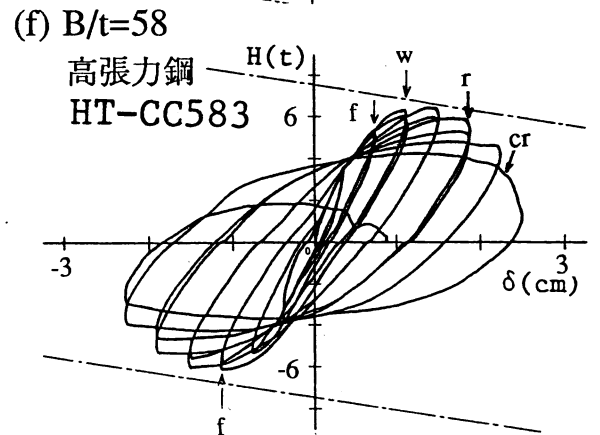
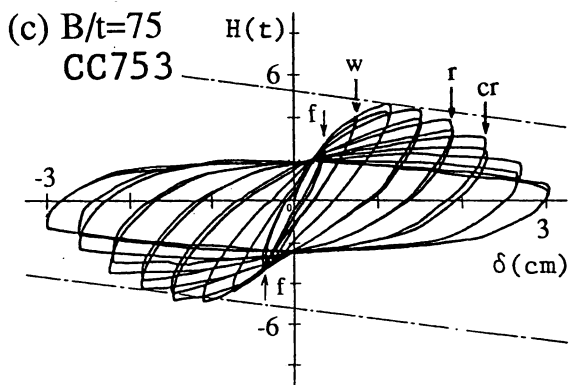
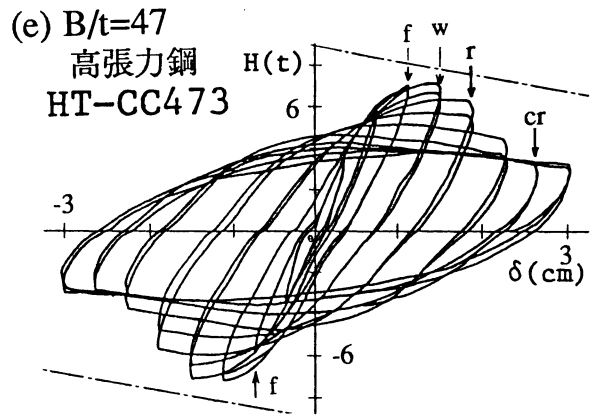
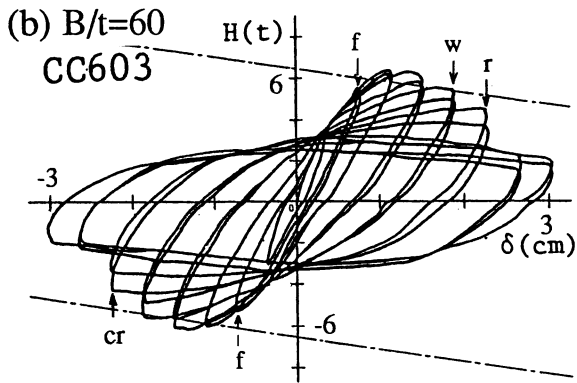
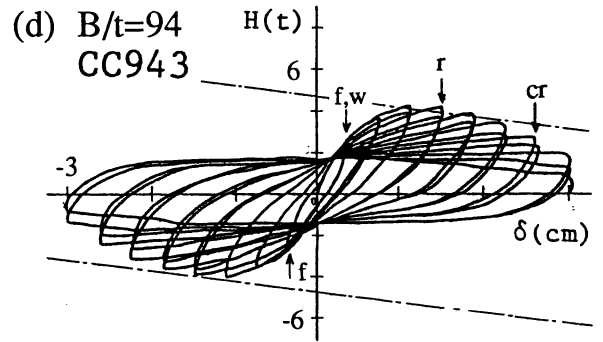
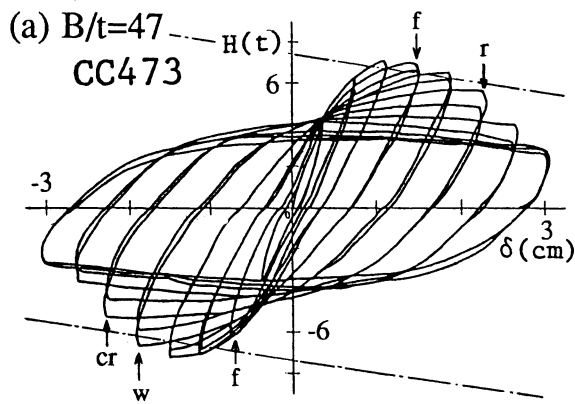


図 5.5 水平力 (H) - 水平変位 (δ) 関係

ウェブ座屈後も抵抗力の低下は、中空試験体ほど急激でなく、ほとんど全ての試験体が剛塑性崩壊直線に達した。試験体HT-CM583は角部に亀裂を生じて抵抗力が急激に低下した。

(2) 繰返し挙動 図5.5に繰返し荷重を受ける充填鋼管試験体の水平力-水平変位関係を示す。これらは全てコンクリート充填試験体である。図5.3と同様に f 、 w 、 r 、 c_r でそれぞれフランジ、ウェブの局部座屈、および角部が曲がり出した点、亀裂発生点を c_r で示している。

繰返しを受ける試験体も、図5.3の単調挙動と同様に、フランジの局部座屈、ウェブの局部座屈、稜線部分が直線を保持できなくなるという過程を経た。角部が直線を保持出来なくなるあたりより、抵抗力の低下が顕著となることがわかる。その後全ての試験体が、鋼管角部に亀裂が生じた。

(3) 局部座屈変形 中空鋼管は、フランジとウェブが交互に凸凹となる座屈変形をした。試験体VM471、VM473を除いて、すべてフランジがへこむ形で座屈を生じた。コンクリート充填鋼管はフランジ、ウェブとも外にとびだす座屈変形をした。表5.4(p.125)に処女荷重時に圧縮側となるフランジの座屈発生点の柱脚からの距離と座屈半波長を示している。この表より、コンクリート充填鋼管では座屈半波長は5~8cmとなっているのに対し、中空鋼管では11~15cmと大きくなっている。座屈発生点は充填鋼管の方が中空鋼管より柱脚に近いところに来てはいるが、軸力比、幅厚比の影響は認められない。

§ 5.3 考察

5.3.1 弾塑性挙動

図5.3の水平力-水平変位関係では、軸力が存在することによる抵抗力の低下が含まれているため、前章と同様に柱脚のモーメントと部材回転角の関係で示す。(1)~(4)で単調荷重を受ける試験体に対して、充填コンクリートの効果、幅厚比の影響、軸力比の影響、鋼材質の影響について述べ、(5)で単調挙動と繰返し挙動の対応性について記す。

(1) 充填コンクリートの効果

図5.6に充填コンクリートの有無による影響を示す。図5.6の各図は、同じ幅厚比、軸力比を持つ充填鋼管および中空鋼管試験体の実験結果を比較して示している。

図より、コンクリートを充填することにより、耐力、変形能力ともに著しい向上が期待できることがわかる。コンクリート充填鋼管の中空鋼管に対する性能の向上は、中空鋼管とコンクリート充填鋼管では局部座屈モードが違うこと、充填鋼管では、鋼管の局部座屈による鋼管部分の圧縮抵抗力の低下分をコンクリートが負担でき、局部座屈発生が中空鋼管の場合と異なり、直ちに抵抗力の低下とはならないためである。

コンクリート充填の効果は、鋼管の幅厚比が大きくなるほど、また軸力比が大きいほど顕著となることが観察される。この主な理由は、幅厚比、軸力比が大きいほど上述の影響が出るためであると考えられる。

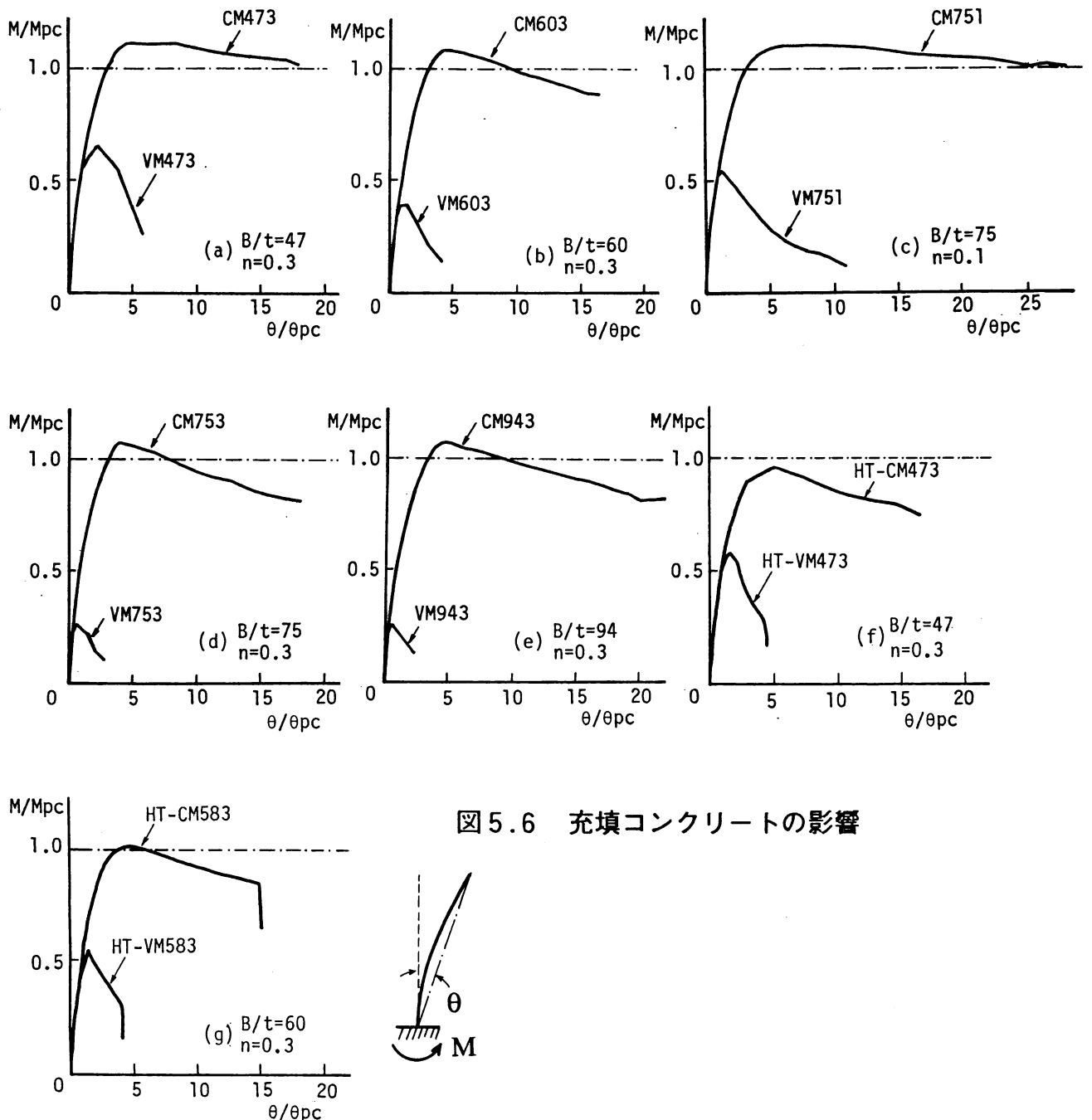


図5.6 充填コンクリートの影響

(2) 幅厚比の影響

図5.7に幅厚比の影響を示す。

図5.7(a)に軸力比が0.3で幅厚比の異なる充填鋼管試験体(普通鋼)の結果を示している。図より幅厚比の影響は、普通鋼よりなる試験体では、幅厚比が4.7の試験体(CM473)は他の試験体と比べて最大耐力後の抵抗力の低下が少なく、変形性状に差が認められる。幅厚比が6.0, 7.5, 9.4の試験体は耐力・変形性状とも差異は少ない。最大耐力後の変形性状が、幅厚比が4.7と6.0~9.4のもので、差がある理由ははっきりしないが、鋼管ウェブの座屈が幅厚比が4.7の試験体は最大耐力後の大変形域(水平変位が35mm)で生じたのに対して、他の試験体は、比較的早い段階で生じていることが観察されており、鋼管自体の挙動に差があることに加えて、充填コンクリートの拘束効果があまり期待出来なく、充填コンクリートの劣化が早期に生じたものと考えられる。

図5.7(b), (c)には、軸力比が0.1, 0.3の中空鋼管試験体(普通鋼)の結果を示している。図より、充填鋼管の場合と異なり、幅厚比が大きくなるほど、最大耐力が小さくなり、また耐力時の変形も小さくなるのがわかる。本章での実験は幅厚比の大きい板要素よりなる角形鋼管を用いているため、中空鋼管の挙動は板要素の座屈に支配されており、したがって鋼管幅厚比の値に密接に関係している。

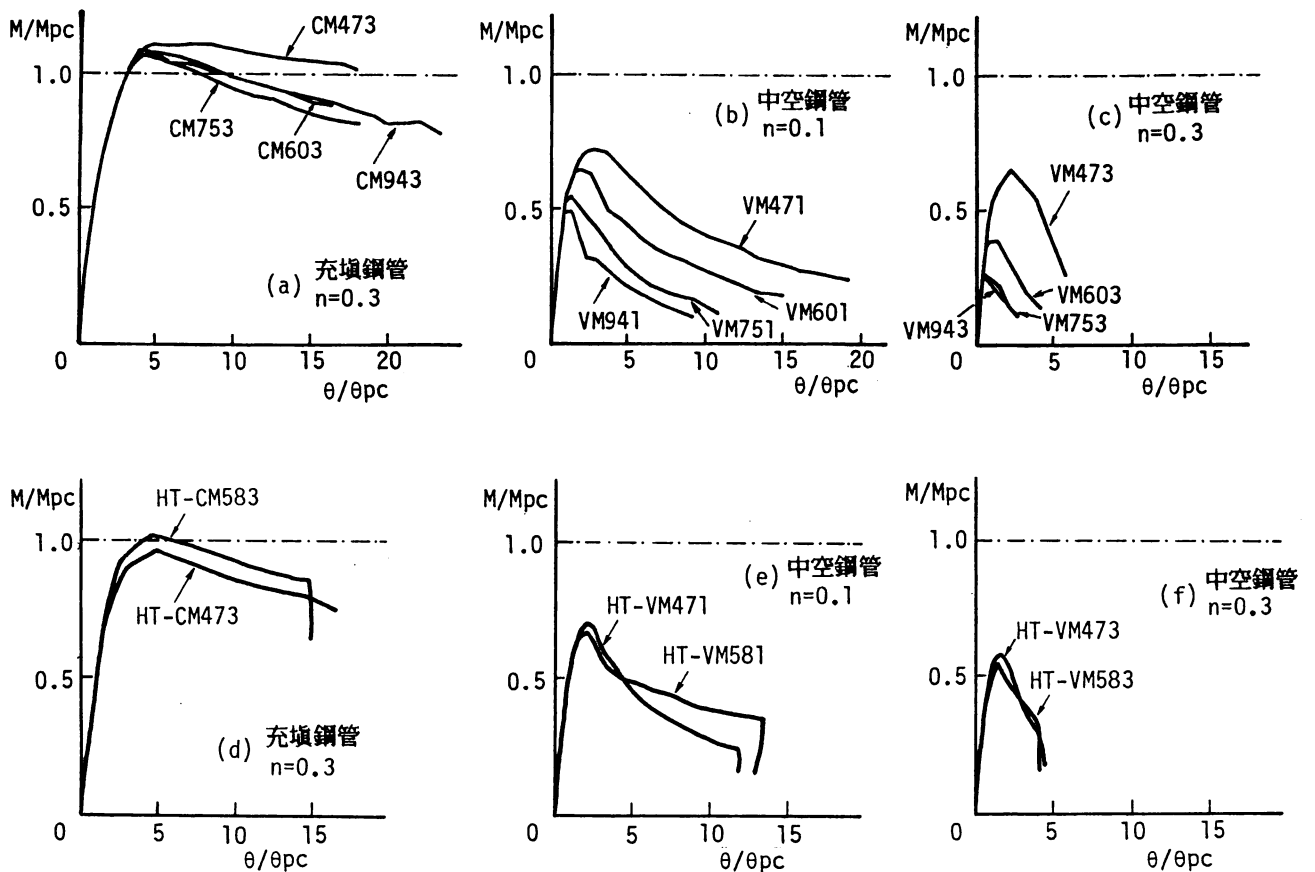


図5.7 幅厚比の影響

図5.7(d)～(f)には、高張力鋼鋼管の実験結果を示している。高張力鋼よりなる充填試験体においては、耐力後の抵抗力の劣化はほぼ同様であるが、幅厚比の大きい試験体の方が最大耐力が大きくなっている。また、中空鋼管ではほぼ同等の耐力となっている。原因ははっきりしないが、幅厚比が大きい方が鋼材の降伏比が小さいことが一因であると思われる。

(3) 軸力比の影響

図5.8に軸力比の影響を示す。

図5.8(a)に幅厚比が75の充填鋼管試験体の結果を示す。図より、最大耐力には大きな差異はないが、耐力後の挙動に違いが見られる。これは軸力比が0.1の試験体(CM751)では、ウェブの局部座屈が水平変位 δ が6cmと大変形域で生じているのに対して、軸力比が0.3, 0.4の試験体は2cm程度と最大耐力に達したとき、あるいは耐力後すぐに生じたことにより、充填コンクリートの圧壊が早まったためであると考えられる。

図5.8(b)～(g)に中空鋼管試験体の結果を示す。図より軸力比が大きくなるにつれて最大耐力は小さく、耐力後の抵抗力の低下は大きくなることわかる。これは、幅厚比の影響の項で記したように、中空鋼管試験体の挙動は、局部座屈に支配されており、軸力比が高いほど、局部座屈の発生が小さい変形で生じることによる。

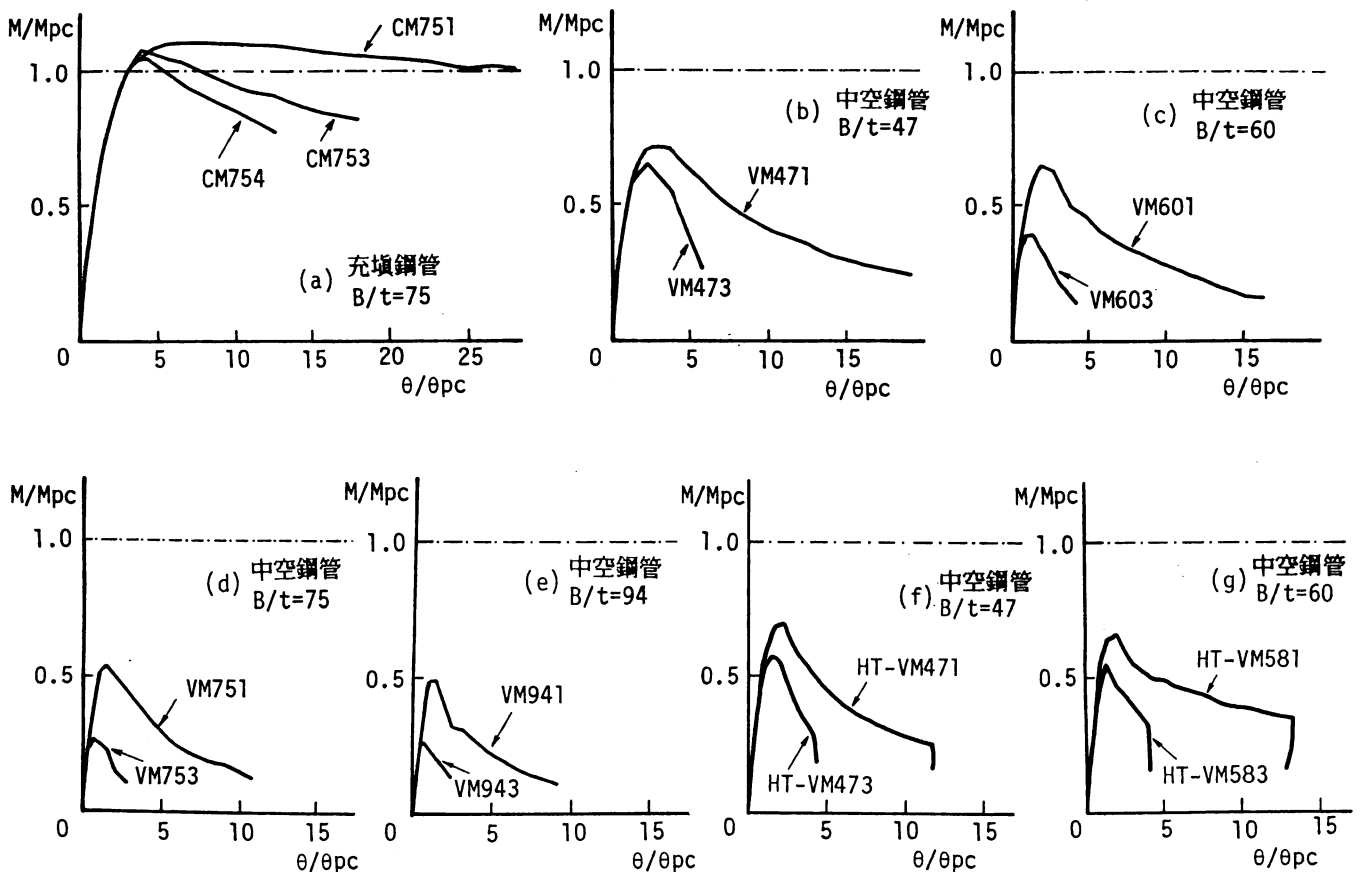


図5.8 軸力比の影響

(4) 鋼材質の影響

図5.9に鋼材質の比較を示す。

充填試験体と中空試験体のいずれの場合においても、普通鋼よりなる試験体が高張力鋼よりなる試験体の最大耐力を上回っている。この理由は、次項で記すようにフランジの局部座屈は弾性域で生じているので、座屈の発生はほぼ同じ応力で発生するが、座屈応力度と降伏応力度に対する割合は高張力鋼の方が小さくなること、また高張力鋼鋼管は（軸力比は普通鋼鋼管と同じでも）载荷軸力は大きくなることにより、座屈発生が早まるためであると考えられる。

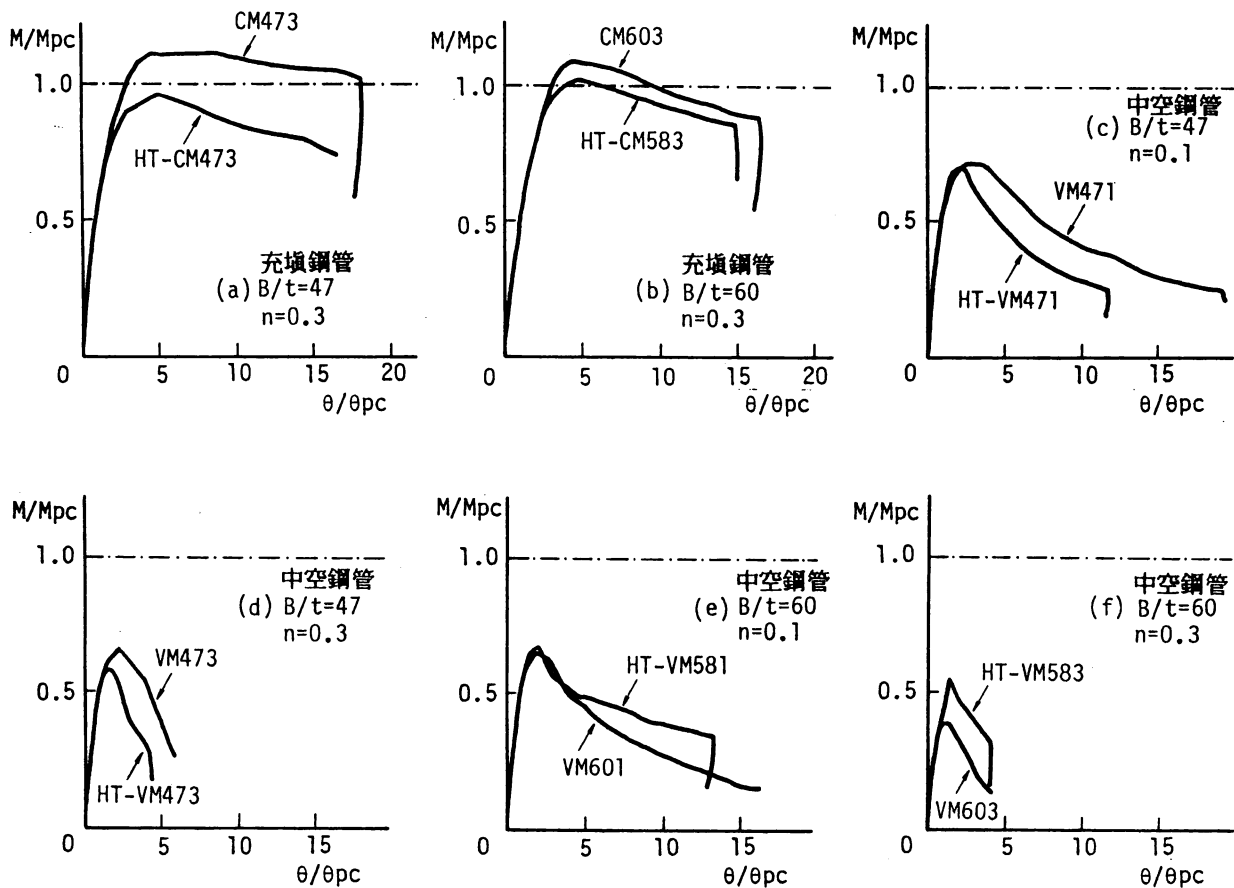


図5.9 鋼材質の影響

(5) 単調挙動と繰返し挙動の対応

図5.10に単調および繰返し载荷を受ける試験体のモーメント-回転角関係を示す。図中●印は単調载荷、実線は繰返し载荷の結果である。繰返し载荷の結果は、モーメント-回転角関係の正側の各履歴曲線を順次つなぎあわせたものである。図より、変形が小さい範囲では、単調载荷の実験値に到達していないが、単調载荷と繰返し载荷の包絡線は比較的良好に対応している。

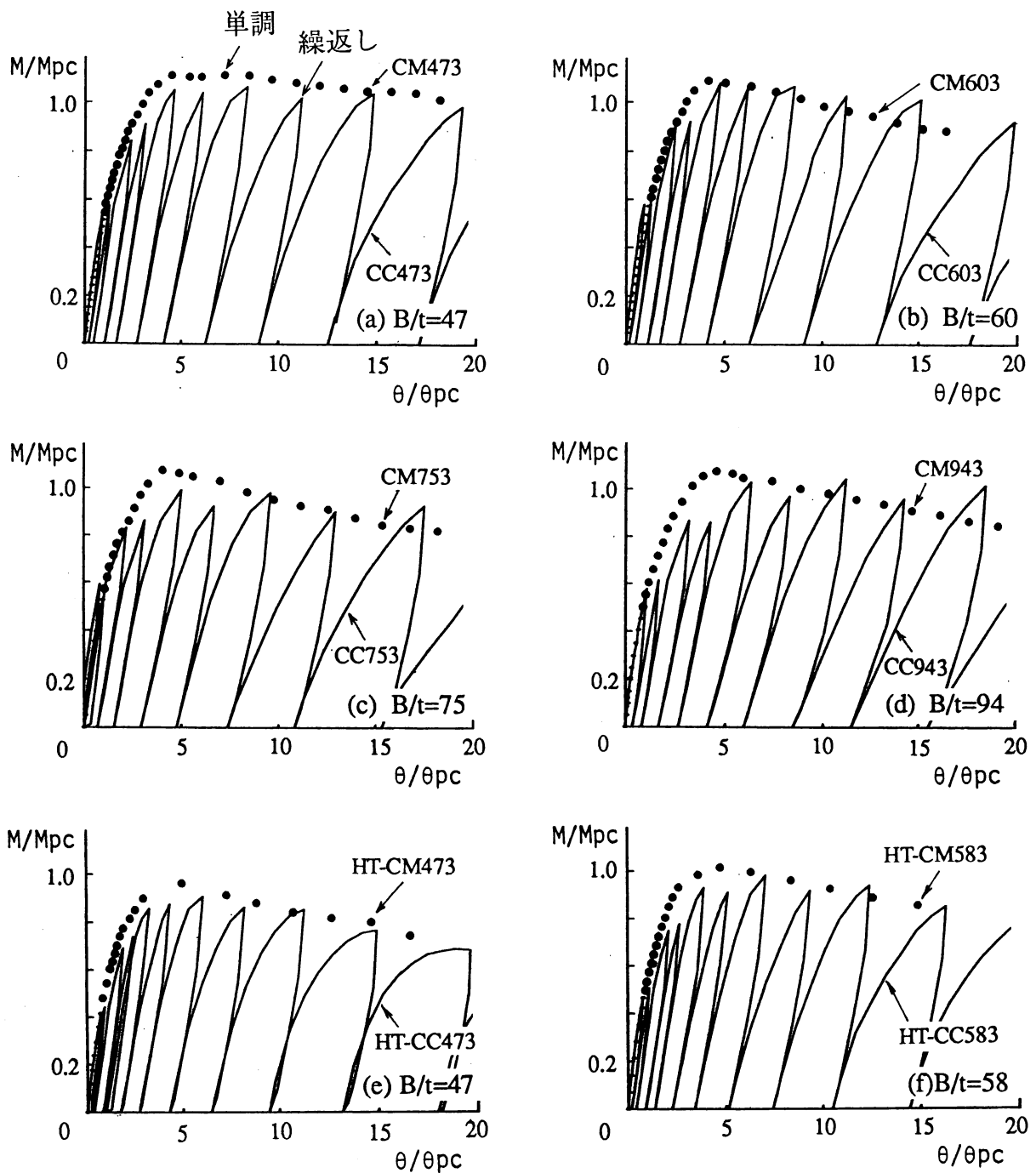


図5.10 単調挙動と繰返し挙動の対応

5.3.2 ひずみ挙動

(1) フランジの局部座屈発生時のひずみ度 図5.11に単調荷を受ける試験体の圧縮側フランジの局部座屈発生時ひずみ度 ϵ_{cr} と幅厚比 B/t の関係を、表5.4 (p.125)に ϵ_{cr} の値を示す。●印が充填鋼管，○印が中空鋼管の実験結果である。幅厚比94，軸力比0.3の中空試験体 (VM943) は、ひずみゲージの値より軸力を載荷した段階で座屈したと考えられ、図にはプロットしていない。なお、座屈発生時のひずみは、実験時に座屈が発生した箇所近傍のひずみゲージの値から判定した。

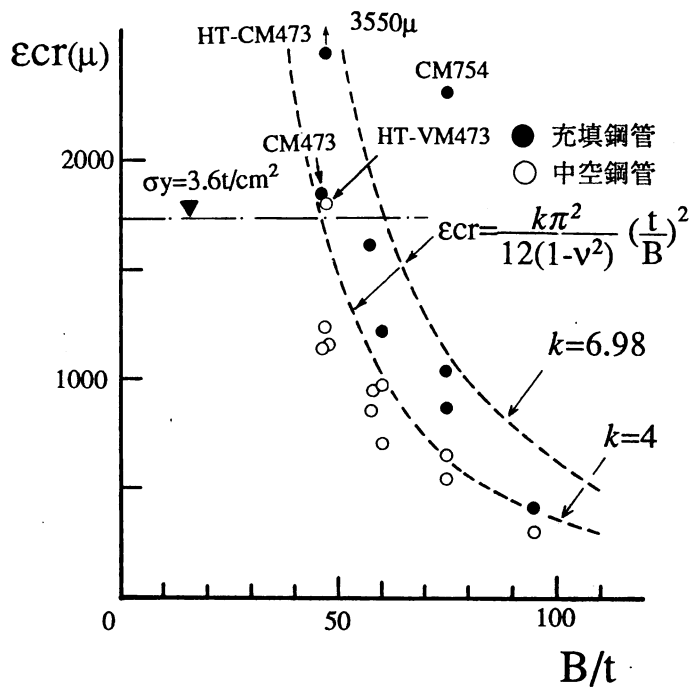


図 5.1 1 座屈発生時のひずみ度

図中の破線は、板の載荷辺に均等応力を受け、非載荷辺が単純支持（座屈係数 $k = 4$ ）と固定（ $k = 6.98$ ）の場合の弾性座屈ひずみの理論値である（ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした）。これは、純圧縮試験に対しては、それぞれ中空鋼管、充填鋼管に対応していると考えられる。

図より、充填鋼管、中空鋼管両方とも、実験値はばらついているものの、幅厚比が大きくなるにつれて座屈発生時ひずみ度は小さくなる傾向がみられる。ばらつきの原因としては、ひずみ測定箇所もそれほど多くなく、座屈発生位置に必ずしもひずみゲージを貼付していないなど測定値も完全なものとはいえないことと、板の元たわみが考えられる。

また、幅厚比が 47 の試験体の一部と、幅厚比 75 で軸力比が 0.4 の試験体を除いて、ほとんど弾性ひずみの範囲で座屈している。しかし、弾性ひずみで座屈した試験体も、中空鋼管試験体では、座屈係数 $k = 4$ に対する理論値には達していない。また、充填鋼管に対しても、 $k = 6.98$ に対する理論値には達していない。しかしながら、中空鋼管に対しては、実験値は $k = 4$ の理論線に概ね沿っており、充填鋼管に対しては $k = 4$ と 6.98 の間にあることが観察される。

充填鋼管と中空鋼管の座屈発生時のひずみ度の違いに対しては、充填鋼管の方が中空鋼管よりも大きくなっている。この理由は、充填コンクリートが板要素の座屈を拘束しているためである。実験結果から、フランジ板要素の座屈発生時のひずみは、充填鋼管の方が中空鋼管よりも大きくなることが確かめられた。

(2) ひずみ挙動 図5.12に単調荷を受ける充填鋼管試験体の柱脚より45 cm上の断面の重心軸ひずみと水平変位の関係を実線で示す。重心軸ひずみは圧縮側、引張側フランジ中央に貼付したひずみゲージの平均値として求めた。図中に、f、wでフランジおよびウェブの視察による座屈発生点を示す。また、○で前節で示したゲージの値から判定したフランジの座屈発生点を示す。

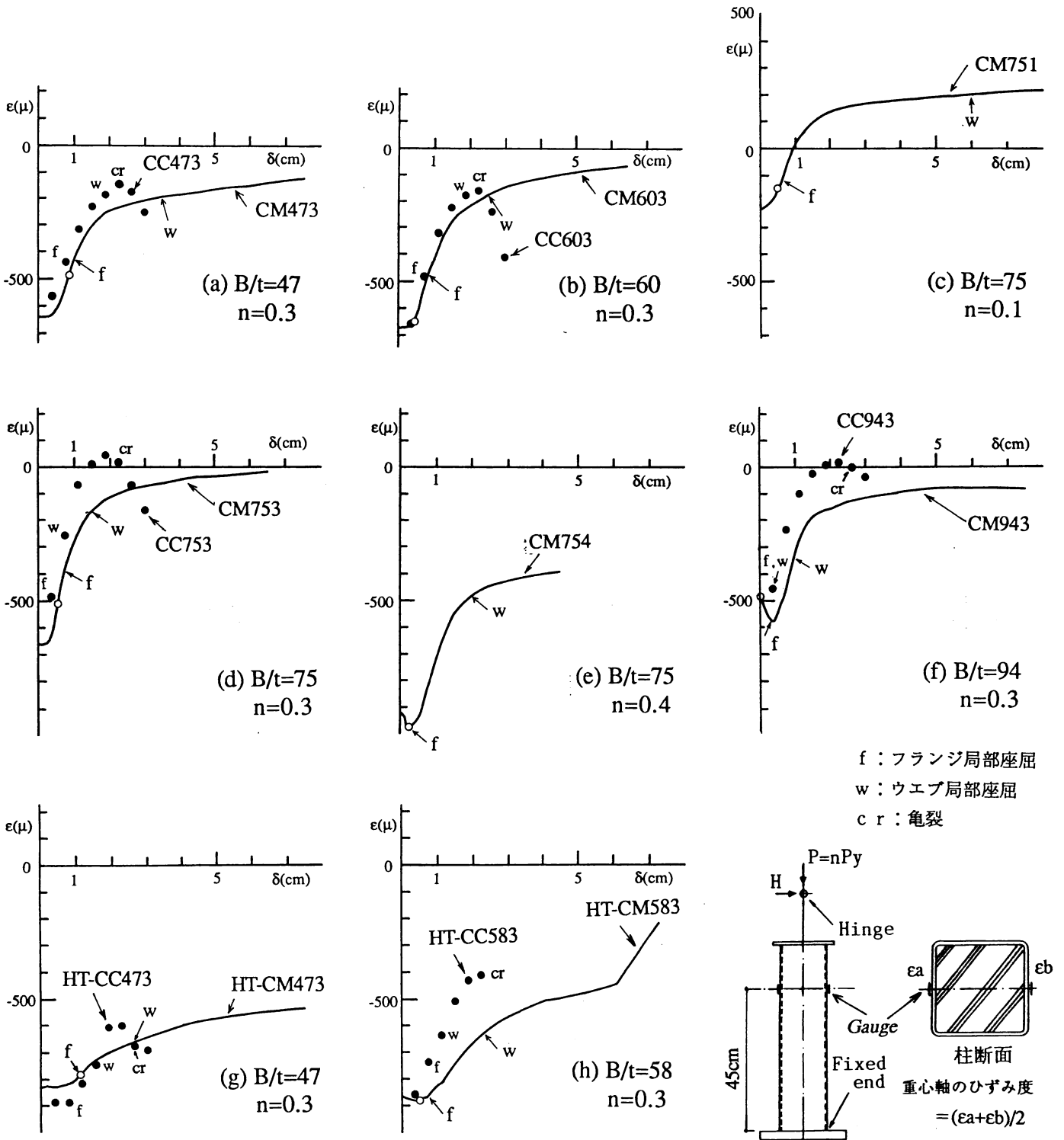


図5.1.2 重心軸ひずみ度-水平変位関係

この図より、視察による局部座屈発生点はひずみゲージによるものより遅れていること、○印のフランジ座屈発生点近傍より、重心軸のひずみ度は引張側に移動していることが観察される。また、ウェブの座屈が観察された後はひずみの変化が小さくなることからわかる。以上のことは、フランジの座屈が生じたあと、鋼管とコンクリートの間で力のやり取りがあること、すなわち鋼管に作用している圧縮力が減少し、コンクリートに圧縮力が移っていること、ウェブ座屈後に柱材全体として崩壊メカニズムになったと考えることができる。

同図中に●印で、図中の実線と同じ幅厚比と軸力比をもつ繰返し载荷を受ける試験体の重心軸ひずみと変位の関係を示してゐる。重心軸ひずみは、各変位振幅での正側加力第1回目の値であり、変位は繰返し反転点の値である。図中c rで鋼管角部に亀裂が発生した変位を示している。繰返し载荷を受ける場合にも、フランジの局部座屈が生じたあと、重心軸ひずみは引張側に移動しており、鋼管の負担していた圧縮力が充填コンクリートに移っていることがわかる。大変形域では重心軸ひずみは圧縮側に移動している。この理由は明白ではないが、角部が直線を保持できなくなったこと、角部に亀裂が生じたことにより、鋼管角部の負担する応力が減少したことと、重心軸ひずみ度はフランジの中央に貼付したひずみゲージによるものであるからだと考えられる。

5.3.3 曲げ耐力

図5.13に最大耐力 M_{max}/M_{pc} (M_{pc}')と幅厚比の関係を示す。 M_{max} は柱脚部での最大モーメントの実験値である。 M_{pc} は式(5.1)により求めた。 M_{pc}' は鉄骨鉄筋コンクリート計算規準に従い、図5.14の応力分布を仮定して求めた耐力である。幅厚比は、鋼管の降伏応力度を考慮した $(B/t)\sqrt{\sigma_y/E}$ をとっている。

また、図5.13中に破線で鋼構造設計規準による鋼管の幅厚比制限値とその値の1.5、2倍の幅厚比を示している。但し、前章でも記したように規準では、鋼管の平板部分の幅 d と板厚 t の比として幅厚比 $(d/t)_{lim}$ を定義しているので、図5.13に示した規準の制限値 $(B/t)_{lim}$ は角部の板厚中心の半径を板厚の1.5倍として次式で求めている。

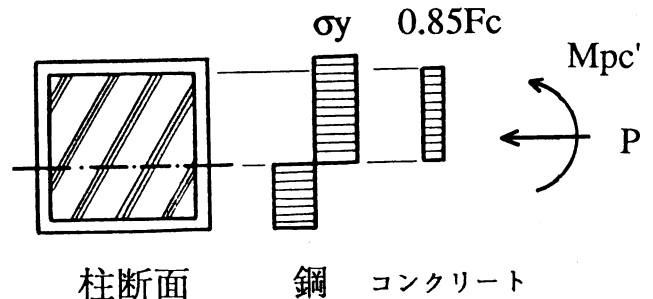


図5.14 M_{pc}' 算定の応力分布

$$\begin{aligned}
 (B/t)_{lim} \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)} &= \{(d/t)_{lim} + 4\} \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)} \\
 &= \{7.4/\sqrt{\sigma_y} + 4\} \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)} \\
 &= 7.4/\sqrt{E} + 4 \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)} \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

但し、応力の次元は t/cm^2 であり、許容応力度を決めるための基準値 F を降伏応力度 σ_y としている。式(5.3)の σ_y は、普通鋼の降伏応力度の平均値 $3.76 t/cm^2$ を用いた。

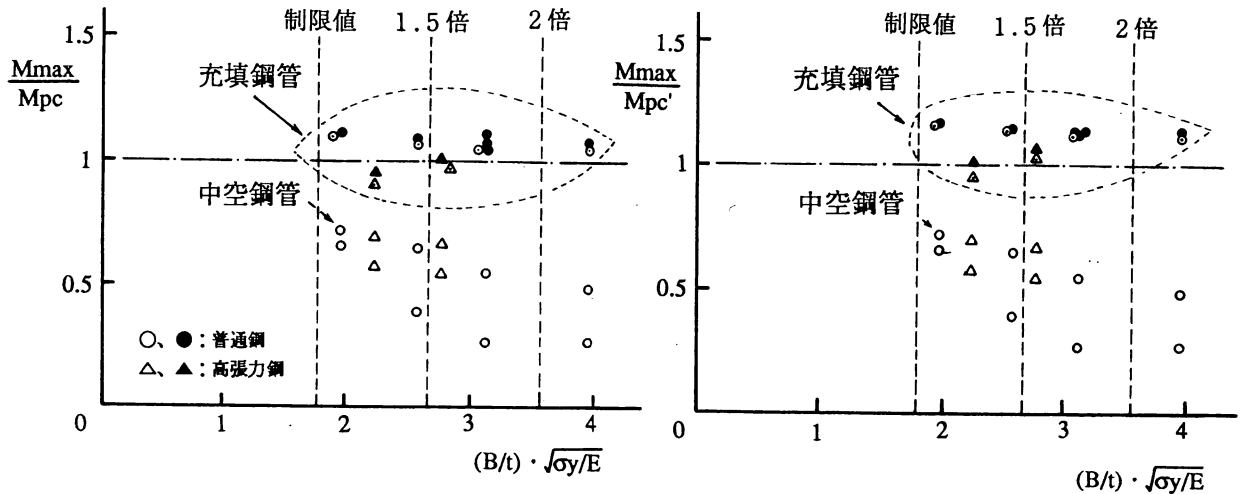


図5.13 M_{max}/M_{pc} (M_{pc}') - 幅厚比関係

表5.4 座屈発生位置、座屈発生時のひずみ度、終局曲げ耐力および変形能力

充填の有無	No.	試験体	公称幅厚比	座屈位置 (cm)	座屈半波長 (cm)	ϵ_{cr} (μ)	M_{max}/M_{pc}	M_{max}/M_{pc}'	R95
中空 (普通鋼)	1	VM471	46.9	8.0	12.8	1146	0.72	0.72	3.10
	2	VM473	46.9	13.5	12.8	1164	0.66	0.66	1.80
	3	VM601	60.0	15.5	13.8	980	0.65	0.65	1.75
	4	VM603	60.0	19.0	14.8	705	0.39	0.39	0.56
	5	VM751	75.0	12.5	11.8	657	0.55	0.55	0.76
	6	VM753	75.0	10.0	11.3	546	0.27	0.27	0.00
	7	VM941	93.8	16.5	11.8	304	0.49	0.49	0.53
	8	VM943	93.8	20.0	11.8	-	0.27	0.27	0.00
充填 (普通鋼)	9	CM473	46.9	10.0	6.8	1848	1.11	1.17	12.78
	10	CM603	60.0	6.0	5.8	1228	1.09	1.15	7.08
	11	CM751	75.0	3.5	6.3	879	1.11	1.13	17.56
	12	CM753	75.0	11.5	5.3	1050	1.08	1.14	6.16
	13	CM754	75.0	4.5	6.8	2324	1.05	1.14	4.61
	14	CM943	93.8	6.0	5.8	409	1.08	1.14	7.08
	15	CC473	46.9	6.0	7.8	-	1.10	1.16	-
	16	CC603	60.0	5.5	6.8	-	1.07	1.14	-
17	CC753	75.0	3.5	8.3	-	1.05	1.12	-	
18	CC943	93.8	6.5	6.8	-	1.05	1.12	-	
中空 (高張力鋼)	19	HT-VM471	46.9	6.0	10.8	1248	0.70	0.70	1.56
	20	HT-VM473	46.9	7.5	12.8	1818	0.58	0.58	1.06
	21	HT-VM581	57.7	10.5	11.8	954	0.67	0.67	1.33
	22	HT-VM583	57.7	13.0	11.8	858	0.55	0.55	0.56
充填 (高張力鋼)	23	HT-CM473	46.9	7.0	6.8	3550	0.96	1.01	6.27
	24	HT-CM583	57.7	5.0	7.8	1622	1.01	1.07	7.15
	25	HT-CC473	46.9	6.0	8.3	-	0.91	0.95	-
	26	HT-CC583	57.7	11.0	7.8	-	0.98	1.03	-

図5.13より、充填鋼管は規準の幅厚比制限値の2倍以上でも、普通鋼鋼管であれば計算による終局曲げ強度 M_{pc} を発揮できることがわかる。表5.4には M_{max}/M_{pc} と M_{max}/M_{pc}' の値を記しているが、充填鋼管では M_{max}/M_{pc} の値は普通鋼で1.05~1.11とよい精度で耐力を評価していることがわかる。高張力鋼管では、0.91~1.01と危険側の評価をしている場合もあるが、概ねよい評価をしていると考えてよい。また、規準による耐力 M_{pc}' では、高張力鋼管(HT-CC473)で1体危険側の評価をしているが、他の試験体は M_{pc} より安全側に評価しており、 M_{max}/M_{pc}' の値は0.95~1.17と規準による耐力もよい耐力評価をしている。

図5.15には充填鋼管の耐力を、前章で示した中空鋼管の実験結果および既往の中空鋼管の実験結果と比較している。中空試験体は幅厚比が大きくなるにつれて、曲げ強度は小さくなり、規準の制限値以内でも全塑性モーメントを期待できない場合もあるが、充填鋼管では、無次元化耐力 M_{max}/M_{pc} (M_{pc}')に及ぼす幅厚比、軸力比の影響は、ほとんどなく全塑性モーメントを期待でき、規準の制限値の2倍以上の幅厚比でも指針の幅厚比制限値をもつ中空鋼管と同じ耐力を発揮できることがわかる。

図5.16に終局曲げ耐力に関するM-N相関曲線を示す。M-N相関関係の理論値は、図5.4に示す応力分布を仮定して求めた。本章の実験は、最大の軸力比が0.4であり、今後軸力比が高い場合の挙動を調べることが必要であろう。

5.3.2ひずみ挙動の項で、ほとんどの試験体は弾性範囲でフランジの局部座屈が生じたことを示した。薄板は、座屈後すぐに抵抗力は低下せず、座屈後も強度が上昇することが知られており、終局強度は有効幅の概念を用いて、概ね評価できることがわかっている。しかし、本章で行った幅厚比の大きいコンクリート充填角形鋼管の耐力は、有効幅の概念を用いて計算した耐力よりも大きな耐力を発揮し、鋼管の全断

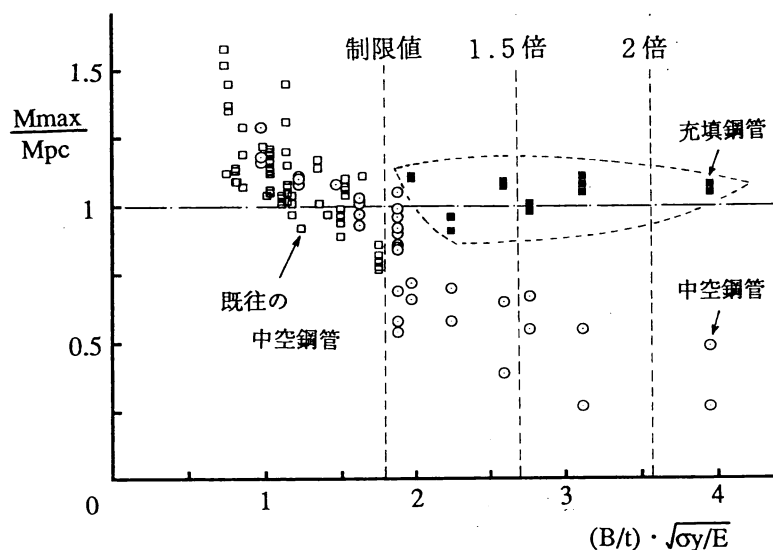


図5.15 M_{max}/M_{pc} —幅厚比関係 (既往の研究を含む)

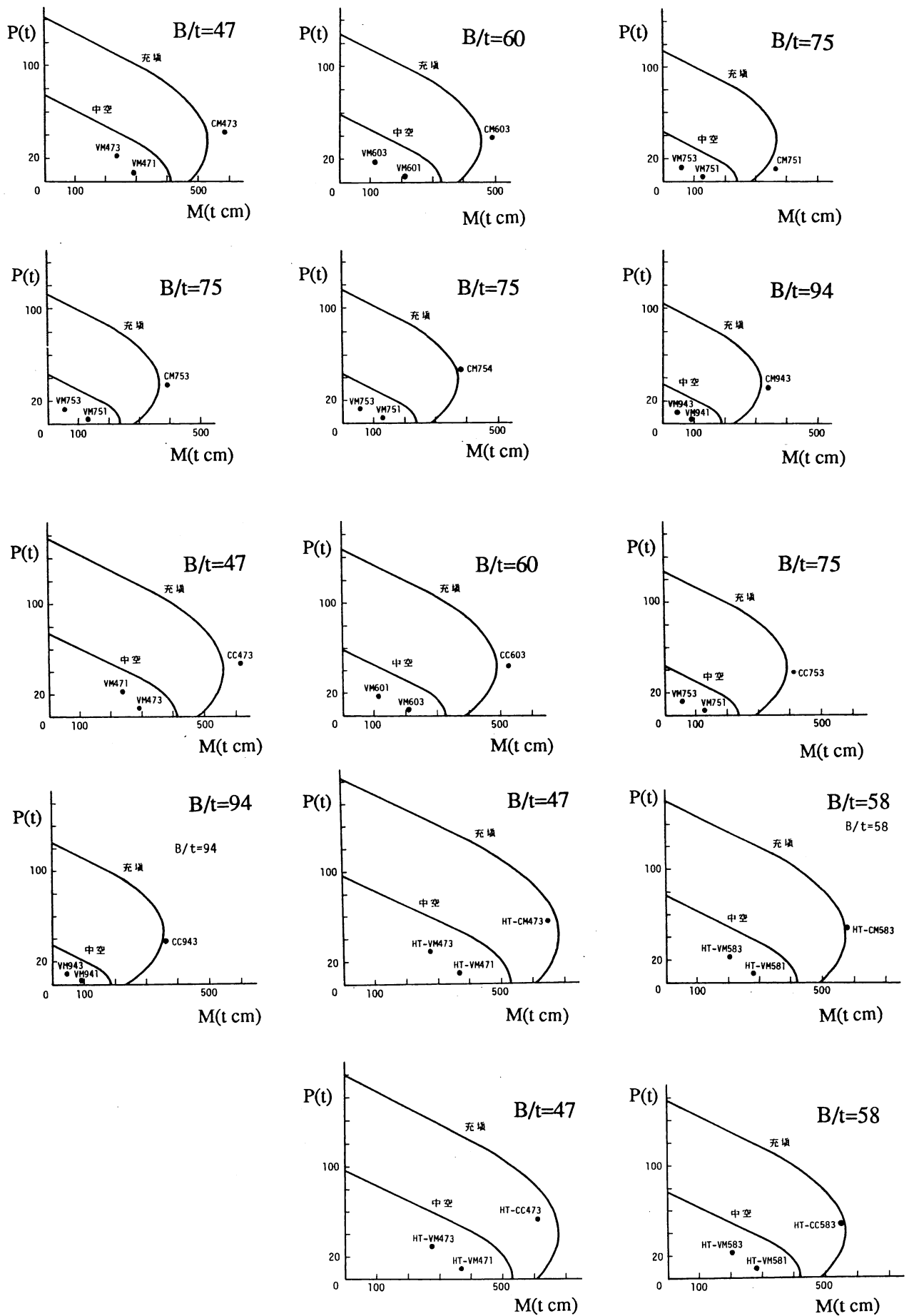


図 5.16 M-P 相関関係

面を有効とした計算値に普通鋼充填鋼管では到達している。これは局部座屈発生点が柱脚断面には生ぜず、塑性ヒンジ位置が固定端ではないこと、また前節で示したように、鋼管が受け持っていた圧縮力がコンクリートに移るといふ、いわば応力の再配分が生じ、鋼管自身としては主として曲げを、充填コンクリートは圧縮力が増え、充填コンクリートはより大きなモーメントを受け持つようになったためと考えられる。

5.3.4 変形能力

図5.17に变形能力と幅厚比の関係を示す。变形能力は前章と同様にして求めた。図中に破線で鋼構造設計規準による鋼管の幅厚比制限値とその値の1.5, 2倍の幅厚比を示している。中空鋼管の变形能力が小さいのに対して、充填鋼管では、規準の制限値の2倍以上の幅厚比でも軸力比が0.3以下であれば $R_{95} = 6$ が期待できる。

図5.18に前章で記した既往の実験結果を含めた中空鋼管の变形能力と比較しているが、この図よりコンクリートを充填すると、幅厚比が規準の2倍を超えても鋼構造塑性設計指針の制限値の幅厚比（無次元化幅厚比=1.03）をもつ試験体の变形能力以上の变形能力が期待できることがわかる。

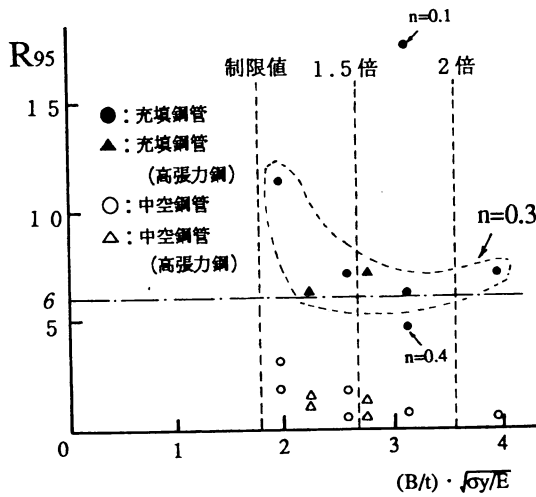


図5.17 変形能力—幅厚比関係

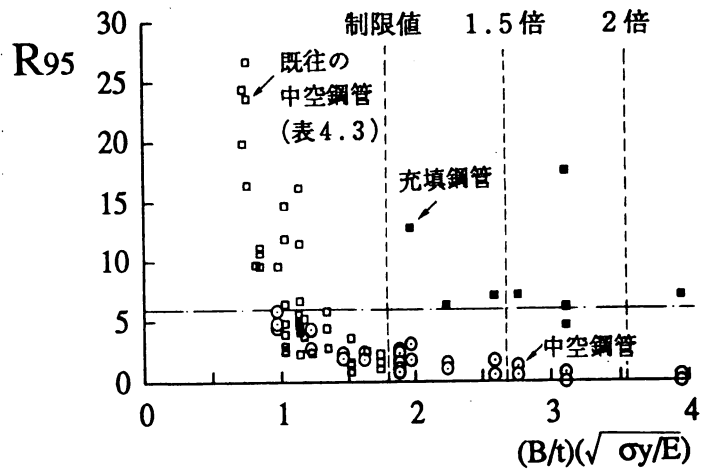


図5.18 変形能力—幅厚比関係
(既往の研究を含む)

5.3.5 コンクリート充填鋼管に対する幅厚比の制限値

鋼構造設計規準の幅厚比制限値をもつ中空鋼管と同等な耐力および変形能力をもつコンクリート充填角形鋼管柱の幅厚比を充填鋼管に対する幅厚比制限値と考えれば、5.3.3, 5.3.4よりコンクリート充填鋼管の幅厚比制限値は規準の幅厚比制限値の2倍程度まで緩和できる。図5.19に鋼管外径が15cmで一定で、幅厚比が94, 軸力比が0.3の充填鋼管, および前章で示した幅厚比が25, 33で軸力比が0.3の中空鋼管の $M/M_{pc} - \theta/\theta_{pc}$ 関係を示している。同図からもコンクリートを充填することにより、幅厚比が2倍以上でも同等以上の性能があることがわかる。

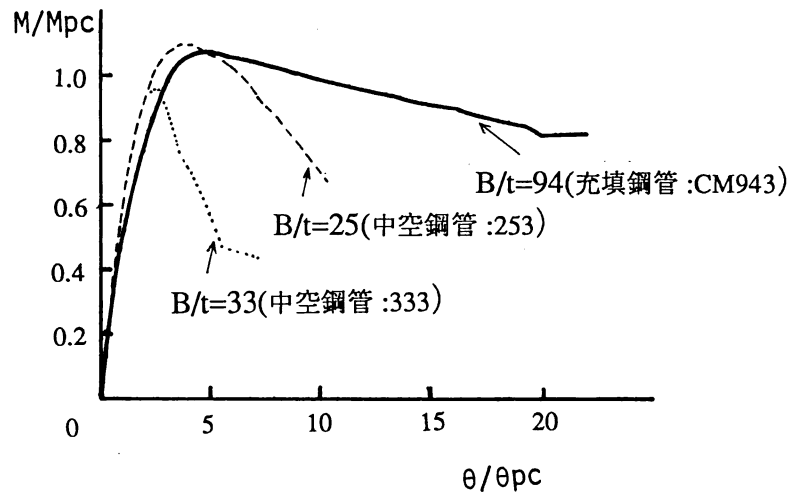


図5.19 充填鋼管と中空鋼管の荷重－変形関係

§ 5.4 結論

角形鋼管の板要素が47～94よりなるコンクリート充填および中空角形鋼管柱の実験を26体行い、弾塑性挙動を調べた。実験結果より次の結論が得られた。

1) コンクリート充填鋼管柱は鋼管部分の幅厚比が47～94と大きな値を持ち、鋼管の板要素が弾性域で座屈するような場合でも、全塑性応力分布から計算した耐力を期待できる。この理由は、フランジの座屈後、鋼管が受け持っていた圧縮力がコンクリートに移るといふ、いわば応力の再配分が生じたためである。しかしながら、中空鋼管では、局部座屈の発生により全塑性モーメントに到達できない。

2) コンクリート充填鋼管の終局曲げ耐力は、図5.4に示した全塑性応力分布を仮定して求めた耐力でおおむね予測できる。

3) コンクリート充填鋼管柱の変形能力は、中空鋼管に比べて非常に大きい。軸力比が0.3以内であれば、変形能力 $R_{95} = 6$ が期待できる。

4) 以上のことより、コンクリート充填鋼管の幅厚比制限値は中空鋼管の制限値の2倍程度まで緩和できる。

第5章の参考文献

- 5.1) 日本建築学会：鋼構造設計規準，1970.5.
- 5.2) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造設計規準・同解説，1967.6.
- 5.3) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算規準・同解説，1980.2.
- 5.4) 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，1987.6.
- 5.5) Furlong, R. W. : Strength of Steel-Encased Concrete Beam Columns, ASCE Vol.93, No.ST5, PP.113-124, 1967.10.
- 5.6) Knowles, R. E. and Park, R. : Strength of Concrete Filled Steel Tubular Columns, ASCE Vol.95, No.ST12, PP.2565-2587, 1969.12.
- 5.7) Neogi, P. K., Sen, H. K. and Chapman, J. C. : Concrete-Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading, The Structural Engineer, Vol.47 No.5, pp.187-195, 1969.5.
- 5.8) 仲威雄, 加藤勉, 阿部信男 : コンクリート充填鋼管の圧縮強さ, 日本建築学会論文報告集, 第69号, pp.605-608, 1961.10.
- 5.9) 鋼管構造研究委員会 : 住友の鋼管構造, pp.321-333, 1964.5.
- 5.10) Tomii, M., Yoshimura, K. and Morishita, Y. : Experimental Studies on Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns under Concentric Loading, International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, SSRC/ASCE/Washington, D. C., PP.718-741, 1977.3.
- 5.11) 山田稔, 坂恵一己, 近藤一雄 : 軸圧をうけるコンクリート充填鋼管柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究 (I : 一方向曲げ-実験並びに解析), 日本建築学会論文報告集, 第233号, 1975.7.
- 5.12) 山田稔, 河村廣ほか : 軸圧をうける角形鋼管コンクリート部材の弾塑性曲げ変形性状に関する研究 (X I), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2129-2130, 1981.9.
- 5.13) 加藤勉, 秋山宏ほか : 水平力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.149-152, 1976.
- 5.14) 加藤勉, 秋山宏ほか : 水平力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の実験的研究 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1535-1536, 1976.10.
- 5.15) 加藤勉, 秋山宏ほか : 水平力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱の実験的研究 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1473-1474, 1977.10.
- 5.16) 若林實, 佐々木良一ほか : 鋼管コンクリート柱のせん断強度に関する一実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1483-1489, 1977.10.
- 5.17) 若林實, 佐々木良一ほか : 鋼管コンクリート柱のせん断破壊性状に関する実験的研究 (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1895-1896, 1978.9.

- 5.18) Masahide TOMII, Kenji SAKINO : Experimental Studies on the Ultimate Moment of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns, 日本建築学会論文報告集, 第275号, 1979.
- 5.19) Masahide TOMII, Kenji SAKINO : Elasto-Plastic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns, 日本建築学会論文報告集, 第280号, 1979
- 5.20) Masahide TOMII, Kenji SAKINO : Experimental Studies on Concrete Filled Square Steel Tubular Beam-Columns Subjected To Monotonic Shearing Force and Constant Axial Force, 日本建築学会論文報告集, 第281号, 1979.
- 5.21) Kenji SAKINO, Hisayoshi ISHIBASHI : Experimental Studies on Concrete Filled Square Steel Tubular Short Columns Subjected to Cyclic Shearing Force and Constant Axial Force, 日本建築学会論文報告集, 第353号, 1985.
- 5.22) 齊藤豊ほか : 充填型鋼管コンクリート柱に関する研究 (その1) - (その6) , 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 1613-1624, 1989.10.
- 5.23) 崎野健治 : 一定軸力下で曲げ・せん断を受けるコンクリート充填正方形鋼管柱の単調および繰返し弾塑性変形性状に関する実験的研究, 九州大学学位論文, 1981.12.
- 5.24) 鈴木敏郎, 木村 衛他 : コンクリート充てん角形鋼管柱の弾塑性性状について 日本建築学会論文報告集, 第345号, pp.70-78, 1984.
- 5.25) Chiaki MATSUI : Local Buckling of Concrete Filled Steel Square Tubular Columns, IABSE-ECCS Symposium on Steel in Buildings, IABSE Reports Vol. 48, pp.269-276, 1985
- 5.26) Chiaki MATSUI : Strength and Deformation Capacity of Frames Composed of Wide Flange Beams and Concrete Filled Square Steel Tubular Columns, Proc. of Pacific Structural Steel Conference, pp.169-181, 1986.
- 5.27) 小泉肇ほか : U形鋼管と角形管を用いた鉄骨鉄筋コンクリート構造の研究 (その3) 柱の構造実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1667-1668, 1979.9.
- 5.28) 松村弘道, 佐久間仁 : 充填型角形鋼管コンクリート柱の耐力と靱性に関する実験, 構造工学論文集, pp.227-236, 1988.3.
- 5.29) 松村弘道, 今野和近 : 充填型角形鋼管コンクリート柱骨組の耐力に及ぼす付着性能の影響, 構造工学論文集, pp.287-298, 1989.3.