

# 超々高層建築の開発研究 (その1)

——高軸力を受ける角形鋼管柱とコンクリート充てん角形鋼管柱の曲げせん断実験——

武田 寿一      小 畠 克 朗  
高橋 泰彦      多 田 利 正

## Development of Super Tall Buildings (Part 1)

——Shear Bending Tests of Square Tubular Steel Columns and Concrete-Filled Square Tubular Steel Columns under High Axial Loads——

Toshikazu Takeda      Yoshiro Kobatake  
Yasuhiko Takahashi      Toshimasa Tada

### Abstract

Shear bending tests of square tubular steel columns and concrete-filled square tubular steel columns under high axial loads were conducted to develop columns of super tall buildings. Strength and restoring force characteristics were then examined. The parameters of these experiments were width-to-thickness ratio of square tubular column, axial load ratio, and whether or not filled with concrete. Loading was simple beam type with alternating positive-negative incremental loading. The main test results were as follows: (1) Square steel columns with and without concrete filled inside, whose width-to-thickness ratios are small show high strengths and spindle-type curves under repeated loading. (2) Columns filled with concrete whose width-to-thickness ratios are large show spindle-type curves under low axial load ratios, but have premature collapses under high axial load ratios. (3) The effectiveness of fill concrete depends on the width-to-thickness ratio and the axial load ratio of the square tubular steel column.

### 概 要

超々高層建築の柱材を開発するため、高軸力を受ける角形鋼管柱およびコンクリート充てん角形鋼管柱の曲げせん断実験を行ない、その耐力や復元力特性を調べた。実験のパラメータは角形鋼管の幅厚比・軸力比・コンクリート充てんの有無である。載荷は単純ばり形式とし、正負の漸増繰返し加力とした。実験結果の主要点を列記すると、(1) 幅厚比の小さい鋼管柱およびコンクリート充てん鋼管柱は繰返し加力ごとに耐力が大幅に上昇した。また紡錘形の復元力特性を示した。(2) 幅厚比の大きいコンクリート充てん柱は、軸力比の小さい時は紡錘形の復元力特性を示したが、軸力比が大きくなると早期に局部座屈し破壊した。(3) コンクリート充てんが有効であるためには、幅厚比・軸力比に限界がある。

### 1. 序

近い将来、100階建クラスの超々高層建築や人工地盤などの超大型構造物が実現すると予想される。この研究の目的はこのような超大型構造物を可能とする超高強度の部材を開発することであり、まず、このレポートでは柱材の検討を行なった結果を述べる。

超々高層建築などの柱材の特徴は非常に大きい軸力を受けた状態で水平力が作用することである。このような

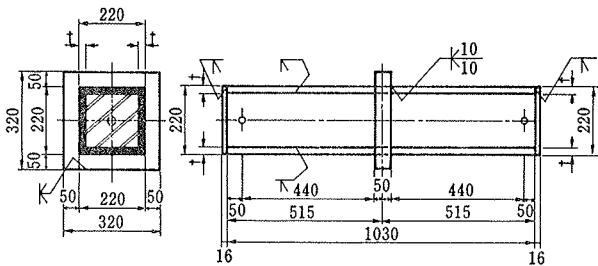
柱には通常、鉄骨の角形鋼管柱 (Box 断面柱) が用いられるが、高軸力を負担する柱としては高強度コンクリートを充てんした角形鋼管柱が構造性能上より有効と考えられる。しかし、高軸力状態で両者の挙動を検討したデータはほとんどない。

そこで角形鋼管とコンクリートを充てんした鋼管で柱のモデルを作り、両者の性状を比較するとともに、設計上の資料を得るために、高軸力下での曲げせん断実験を行なった。

## 2. 試験体

試験体は図一1に示すように、厚さ(t)9, 16, 22 mmの鋼板を溶接して組立てた一辺(B)220 mmの角型鋼管を用いて製作したものである。また実際の柱のプロポーシオンを考慮したせん断スパン比(2.0)を採用して、試験体の長さは44 cmとした。しかし、後述するように単純ばり形式で加力したために、試験体は図一1のような形状・寸法となっている。これは実大の柱をおよそ1/4に縮小した大きさである。

試験体はNo. 1~No. 8と名付けた8体であり、それぞれの内容を表一1に示す。すなわちNo. 1, 3, 5, 7が鋼管柱の、また、No. 2, 4, 6, 8がコンクリート充てん鋼管柱のモデルである。これらのうちNo. 1と2, No. 3と4, No. 5と6, No. 7と8を対応させ、同じ軸力を加えるとともに、短期許容耐力(ただし $F_c=625 \text{ kg/cm}^2$ 使用)をほぼ一致させて、コンクリート充てんの有無による弾塑性域の挙動の比較ができるようにした。なお、対応する試験体を見るとコンクリートを充てんしたことにより、鋼材厚さが試験体レベルで2サイズダウンしていることが分かる。また載荷する軸力は鋼管の試験体で決め、それと同じ軸力をコンクリート充てん鋼管に加えた。



図一1 試験体の詳細

試験体番号と名称	断面の略図	幅原比 $B/t$	コンクリートの充てん		軸力 (t)			鋼材の性質			短期許容耐力* (ton)
			無	有	n=0.9	n=0.75	n=0.6	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (t/cm <sup>2</sup> )	伸び率 %	
No. 1		10.0	○				411	3.15	5.00	29.7	39.3
No. 2		13.8		○			411	4.11	5.22	21.7	42.5
No. 3		13.8	○		○		483	4.11	5.22	21.7	12.4
No. 4		24.4		○			483	3.93	5.40	22.8	10.0
No. 5		13.8	○				403	4.11	5.22	21.7	31.0
No. 6		24.4		○			403	3.93	5.40	22.8	29.8
No. 7		13.8	○				336	4.27	5.53	24.5	49.7
No. 8		24.4		○			322	3.93	5.40	22.8	49.7

表一1 試験体一覧

その他の実験のパラメーターは鋼管の幅厚比(B/t)と軸力比( $n=N/N_y$ ;  $N_y=\sigma_y A_s$ )である。

基準となる断面を $B=220$ ,  $t=16$ すなわち $B/t=13.8$ の鋼管とし、コンクリートを充てんすることに対応する $B/t$ として、10.0, 24.4を加えている。

次に、軸力は鋼管の圧縮降伏耐力の75%, すなわち, $n=0.75$ を基本とし、0.15ずつ増減させた $n=0.9$ ,  $n=0.6$ の3種類とした。いずれも従来の実験データがほとんどない高い軸力である。

No. 1とNo. 5で幅厚比による比較が、No. 3, 5, 7で軸力比による比較ができる。

鋼材はSM 50を使用し、材料特性は表一1に併記している。また、 $F_c=625 \text{ kg/cm}^2$ ,  $F_t=44.6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_c=3.42 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  (1/4  $F_c$ での割線剛性)の非常に高強度なコンクリートを充てんした。

## 3. 載荷および計測方法

載荷は図一2のように、一定軸力(N)を導入した後、試験体の中央部に水平力を想定した集中荷重(P)を加える単純ばり形式とした。荷重(P)は正負交番の漸増繰返しを原則とし、変形部材角が $\pm 0.01$ ,  $\pm 0.02$ ,  $\pm 0.03$ に達した状態で各2回の繰返しを行なうことにした。

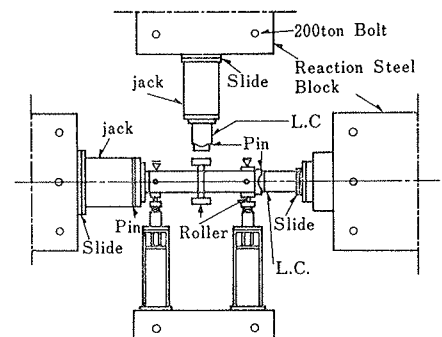
なお、部材角はPの反力支持位置でピン、ローラーを介して試験体に取付けたアルミ治具により測定した水平変形から求めた。また試験体の軸方向のちぢみ量や各部の歪も測定した。

## 4. 実験結果

### 4.1. 荷重—変形曲線

図一3に各試験体の荷重—変形曲線を示す。

図中FLBはFlange Local Bucklingの発生をWLBはWeb Local Bucklingの発生を示す。また $P_y$ ,  $P_B$ は試験体中央が全塑性モーメントと鋼材の引張最大応力 $\sigma_B$ を用いた図一12(b)に示す応力状態に達した値である。図一3



図一2 載荷方法

から分かるように荷重  $P_y$  で多少剛性の低下が認められる。しかし、局部座屈が早期に起こり、軸力の耐荷能力を失って、およそ、 $P_B$  で荷重低下を示した No. 4, No. 6 以外の試験体では、繰返し加力によって安定したループを描きつつ、著しい荷重上昇が起こった。

#### 4.2. 最終破壊状況

写真-1~4 に最終破壊状況を示す。

No. 1 試験体の状況を写真-1, 2 に示す。フランジ・ウェブの局部座屈は生じておらず、引張りフランジの破断で最終状態に至っている。No. 1 以外の試験体では、圧縮フランジとウェブに局部座屈が起こり最大耐力に至っている。

#### 4.3. ひずみ挙動

図-4, 5 に No. 1 試験体の縁ひずみおよび中央部の軸ひずみを示すが、いずれも繰返しごとに圧縮ひずみが累積している。

#### 4.4. 軸ちぢみと軸力変動

図-6, 7 に No. 1 試験体と No. 4 試験体の軸ちぢみ

を示す。No. 1 は繰返しごとに軸ちぢみが漸増していき No. 4 は破壊経過を反映して早期にちぢみ量が激増している。図-8, 9 に No. 1 と No. 4 試験体の軸力変動を示す。安定した復元力特性を示した No. 1 は軸力がほぼ一定に保たれ、早期に破壊した No. 4 は軸力が一定に保てなかった。

### 5. 実験結果の考察

#### 5.1. 初期剛性

図-10 に No. 1 と No. 2 試験体の実験結果と計算結果を示す。 $P=30$  ton 程度までは、若干計算剛性が高い程度でほぼ対応が見られる。

#### 5.2. 最大耐力

表-2 に各試験体の最大耐力  $P_{max}$  と諸計算値を示す。この実験の大きな特徴は約半数の試験体で  $P_{max}$  が  $P_y$  や  $P_B$  を大きく上回ったことである。ちなみに No. 1 試験体では  $P_{max}/P_B=1.70$ , No. 5 試験体では  $P_{max}/P_B=1.83$  となっている。ところで、このように大きな耐力

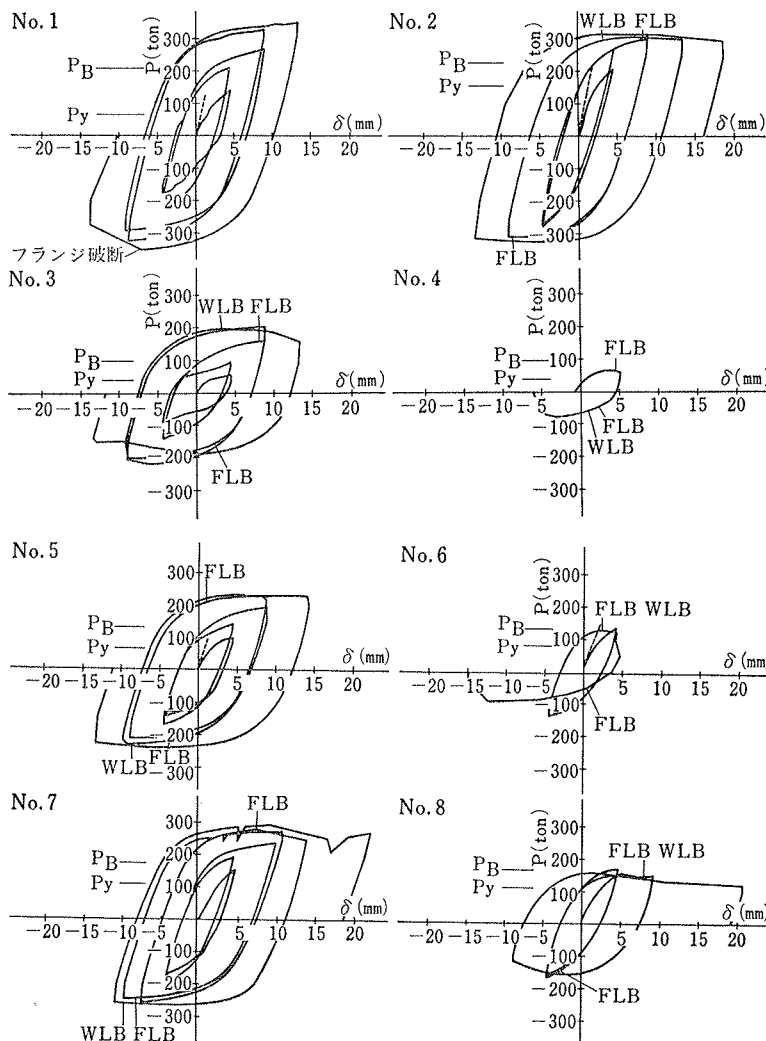


図-3 各試験体の荷重-変形曲線

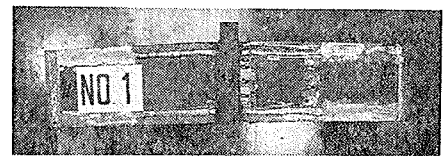


写真-1 No. 1 試験体



写真-2 No. 1 試験体 (フランジの破断)

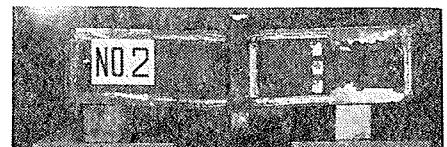


写真-3 No. 2 試験体

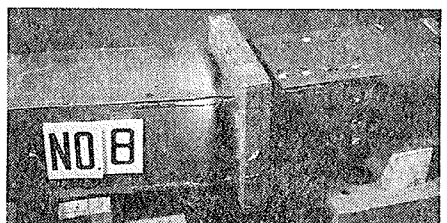


写真-4 No. 8 試験体

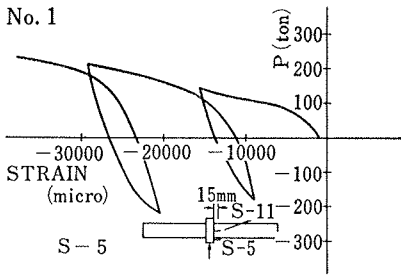


図-4 緑ひずみ (No. 1 試験体)

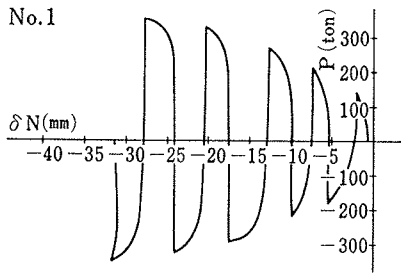


図-6 軸ちぢみ (No. 1 試験体)

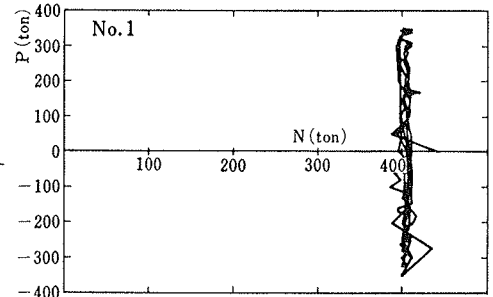


図-8 軸力変動 (No. 1 試験体)

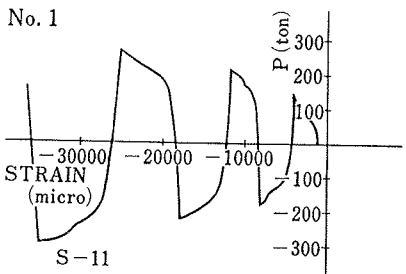


図-5 中央軸ひずみ (No. 1 試験体)

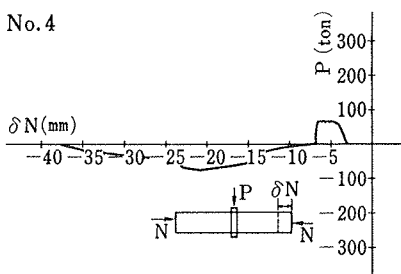


図-7 軸ちぢみ (No. 4 試験体)

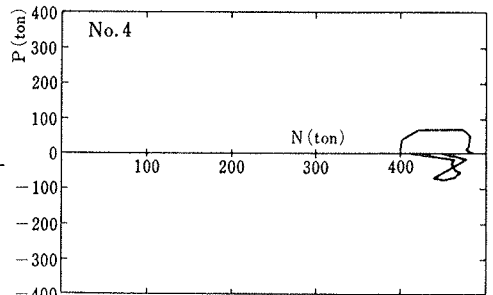


図-9 軸力変動 (No. 4 試験体)

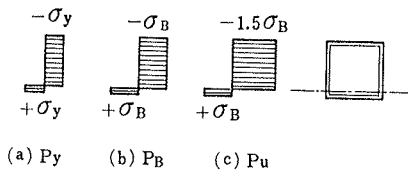


図-12 断面の応力分布

試験体	実験値		計算値 (実験値/計算値)		
	±Pmax		Py(Pmax/Py)	Ps(Pmax/Ps)	Pu(Pmax/Pu)
No.1	+350 -354		65.5 (5.4)	208.0 (1.7)	326 (1.09)
No.2	±320		157.0 (2.0)	215.0 (1.5)	285 (1.12)
No.3	+200 -220		26.7 (8.2)	95.7 (2.3)	196 (1.12)
No.4	+ 67 - 80		29.1 (2.7)	87.0 (0.92)	—
No.5	+232 -240		65.0 (3.7)	131.0 (1.8)	225 (1.07)
No.6	+136 -140		72.3 (1.9)	123.0 (1.14)	—
No.7	+280 -260		106.0 (2.6)	177.0 (1.6)	258 (1.09)
No.8	+178 -162		105.0 (1.7)	150.0 (1.2)	—

表-2 最大耐力と諸計算値

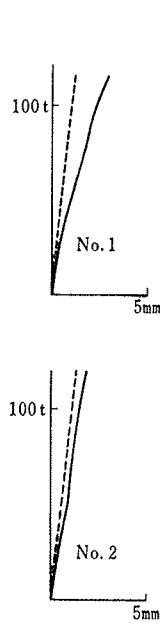


図-10 初期剛性

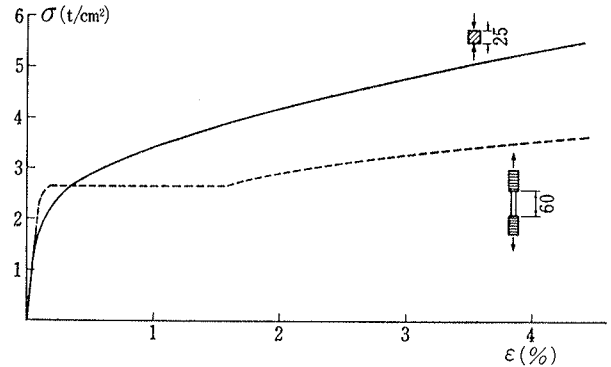


図-11 鋼材の応力-ひずみ関係

が得られた原因としては鋼管の一部が素材試験の最大応力を超えた状態になっていると考えざるを得ない。図-11は当技研で参考文献1)の研究時に行なわれた鋼材の引張試験と同鋼材を25mm角の立方体とした圧縮試験の結果である。圧縮応力は歪硬化域で引張応力の約1.5倍を示していることが分かる。そこで断面の終局状態が圧縮側  $-1.5\sigma_B$ 、引張側  $\sigma_B$  になるものと仮定して部材の耐力を計算したのが  $P_u$  である。(図-12参照)

No. 1 試験体で  $P_u = 326 \text{ ton}$  となり  $P_{\max}/P_u = 1.08$

No. 5 試験体で  $P_u = 225 \text{ ton}$  となり  $P_{\max}/P_u = 1.07$  となる。すなわち、終局状態での断面の圧縮応力は、 $-1.5\sigma_B$  程度に達していたとすれば、実験で得られた耐力は説明し得る。このことは荷重点に剛域があり周囲を拘束していること、モーメント勾配が急なこと、局部座屈がおくれること、鋼材ひずみの圧縮側への累積が顕著なこと、それによるひずみ硬化が予測されること、などの点から考え得る状態といえる。なお No. 2 試験体ではコンクリートは全部圧縮力分担するとし残りの軸力に対して No. 1 と同じ計算をした。その結果は  $P_u = 285 \text{ ton}$  となり

$P_{\max}/P_u = 1.12$  である。

これらの試験体の  $P_{\max}$  は短期許容耐力の5~8倍程度の値を示している。なお、試験体耐力時の断面応力分布(図-12の(c))から分かるように、せん断力に抵抗する余裕は無いものと思われるが、実際のせん断力は極

めて大きく、No. 1 試験体では、軸力を無視してウェブがせん断降伏する程度の値に達している。このことは今後の問題点である。

一方  $B/t=24.4$  の幅厚比の大きいコンクリート充てん柱ではこのような耐力の上昇は起こっていない。これは局部座屈が早期に起こり、コンクリートで軸力をささえ切れず軸力耐荷能力を失うからである。しかしながら、これらの試験体も短期許容耐力の3~4倍の耐力は保持している。

### 5.3. 繰返しによる荷重増加

局部座屈によって早期に軸力耐荷能力を失った試験体を除いて、数回の繰返し加力に耐えた試験体は、いずれも紡錘形の履歴特性を示した。しかも繰返しの加力ごとに荷重が増加した。図-13に繰返しによる荷重増加について比較する。ただし、第一サイクルの最大荷重で各サイクルのピーク荷重を無次元化してある。これを見るとコンクリート充てん柱よりも鋼管柱の方が、さらに鋼管柱では軸力の高い方が低い場合よりも荷重の増加の割合

が大きい。荷重の上昇率が大きいことは第1サイクルで達する荷重が低いことを意味し、 $R=0.01$  程度の変形を許容する場合にはコンクリート充てん柱が耐力的に有利であり、 $R=0.03$  のような大変形を許容する場合には鋼管柱が有利と言えるよう。また軸力が大きい程第1サイクルの荷重が低いことは当然である。

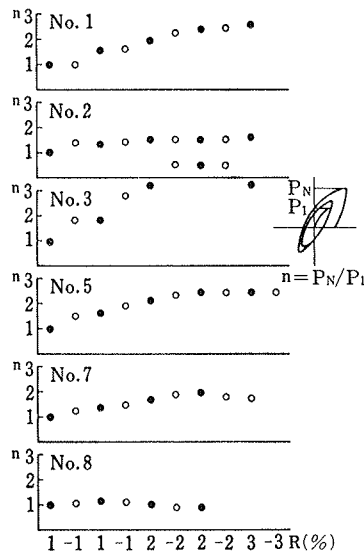


図-13 繰返しによる荷重増加

### 5.4. 幅厚比 $B/t$

幅厚比  $B/t$  は、この実験を通じて支配的な要因であった。すなわち、 $B/t=13.8$  以下の鋼管柱およびコンクリート充てん鋼管柱は、繰返し加力ごとに荷重が上昇し、紡錘形の復元力特性を示した。 $B/t=24.4$  のコンクリート充てん柱は軸力比  $n=0.6$  に相当する軸力では紡錘形の履歴を示したが  $n=0.75$  以上に相当する軸力では、早期に破壊が生じた。

### 5.5. 軸力比 $n$

軸力比  $n$  の影響は同一の幅厚比  $B/t=13.8$  の鋼管柱 3

体 No. 3,  $n=0.9$ , No. 5,  $n=0.75$ , No. 7,  $n=0.6$  の間に見られ、軸力比が小さくなるに従って耐力が上昇した。また、 $B/t=24.4$  のコンクリート充てん柱で上記鋼管柱に対応する軸力を加えた3体、No. 4, No. 6, No. 8 では  $n=0.9, 0.75$  に相当する軸力では早期に座屈して破壊し、 $n=0.6$  に相当する軸力では良好な復元力特性を示した。

### 5.6. コンクリート充てんの有無

コンクリートを充てんしても良好な復元力特性は必ずしも得られない。幅厚比と軸力比の両方に限界があり、幅厚比  $B/t=24.4$  では軸力比  $n=0.6$  程度がその限界と思われる。 $B/t=13.8$  では  $n=0.9$  程度でも性状は良いと思われる。

一方、 $B/t=10.0$  の No. 1 鋼管柱と  $B/t=13.8$  の No. 2 コンクリート充てん柱は、ほぼ同耐力、同履歴特性を示しておりコンクリート充てんにより鋼管厚を 22 mm から 16 mm に落しても、ほぼ同じ性能の柱が得られる。これは鋼材のみに着目すれば約27%の減少ということになる。

## 6. まとめ

(1)  $B/t=10.0$  の鋼管柱はフランジ・ウェブの局部座屈を生じず、耐力は繰返し加力により大幅に上昇した。またフランジの破断で耐力が決まった。

(2)  $B/t=13.8$  の鋼管コンクリート柱は  $B/t=10.0$  の鋼管柱とほぼ同耐力である。その結果コンクリート充てんにより、鋼材が約27%節約できる。

(3) コンクリート充てんが有効であるためには幅厚比・軸力比に限界がある。その値は  $B/t=24.4$  の場合  $n=0.6$  程度である。

(4) 幅厚比が大きく、軸力比の高い柱は局部座屈が早期に発生し、軸力耐荷能力を喪失して破壊につながるの

で、注意が必要である。  
(5)  $B/t=13.8$  以下の鋼管柱およびコンクリート充てん柱は、 $n=0.9$  の高軸力下でも、繰返し加力下において安定した紡錘形の履歴を描く。しかも耐力は全塑性モーメントによる値を大きく上回る。

従って、これらの柱は超々高層骨組の耐震部材として十分な性能と余力を有していると言える。

## 参考文献

- 1) 木村耕三, 他: プレキャストコンクリート耐震壁の開発研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 14~18