

(19) 合成柱（充てんコンクリート方式）を有する柱基部の
くり返し載荷実験について

阪神高速道路公団

吉川 紀

同 上

○ 畠田 穰

同 上

瀬川 卓彦

東京エンジニアリング(株)

木島 信雄

1. まえがき

鋼土木構造部材の設計においては地震荷重に対して必要な強度と機能をそなえるように配慮する必要があるが、厚肉構造を用いた構造物もしくは不静定次数の高い構造物に対して

- ① 主要部材が降伏後もしくは座屈後も安定した耐力および変形能を保有する場合
- ② 降伏もしくは座屈による部材剛度の低下が構造物全体の耐力及び安全性に有害な影響を与えない場合
- ③ 構造物の添接部、支承部など構造物の弱点となりやすい部分が部材の降伏もしくは座屈後においても安定した機能を保持する場合

の以上3点すべての条件を満たす場合に限り通常の鋼土木構造物に対して適用する地震時安全率を低減しもしくは終局限界状態を塑性域にとることができるとの報告がある。¹⁾ しかし、現在、鋼製橋脚の設計において耐震上の配慮を行い、じん性に富んだ安全度の高いものを得るためには、部材の全体座屈や局部座屈などに対する補剛法に十分な配慮が必要となり、その結果、板厚が厚くなってくることがある。筆者らは鋼管柱にコンクリートを充てんした柱（以下、合成柱と称す）を鋼製橋脚の柱基部に適用した場合、内側補剛構造の単純化に関する研究²⁾を行って来た。本文はこれ等の実験研究の一環として内側リブを省略した合成柱の柱基部に高応力交番くり返し応力が作用した時の挙動を調査したものである。

2. 試験体

1) 寸法 阪神高速道路公団が昭和56年度に実施した「鋼製橋脚の実績調査」³⁾及び試算設計により決定した。実績調査によると、鋼製橋脚の形式は（1層1径間門型ラーメン）高さは（12m程度）断面形状は（円形）外径は（2.0m）程度の実績が多い。このような条件で試算設計を行ってみると柱基部の材質はSM50材、板厚は32mmとなった。複雑な柱基部の構造をなるべく忠実に試験体に再現するため、試験体の縮尺は上記の1/5とした。また実績調査によると、細長比パラメータは面内で0.2~0.4、面外で0.2~0.4の範囲が多い。これより、試験体の長さは約1.0mとした。角形試験体の断面寸法は細長比パラメータが円形試験体とほぼ等しくなるように決めた。

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad \text{ここに } \sigma_Y; \text{鋼材の降伏点応力度} \quad \lambda; \text{細長比}$$

試験体図をFig.1に、試験体の諸元をTable.1に示す。

3. 材料

鋼材は材質 SM50 板厚 6.0 mm を使用した。

引張試験結果を Table 2 に示す。充てんコンクリートの配合は下記の通りである。

設計基準強度； 300 kg/cm² 以上

コンクリート； 早強ポルトランドセメント
スランプ； 7 cm ~ 10 cm (目標 10 cm)

最大骨材粒径； 25 mm

空気量； 3 ~ 5% (目標 4%)

コンクリートの圧縮試験結果を Table 3 に示す。充てんコンクリートは鋼管内で固結するので管中養生の供試体を作成し試験を行った。

この結果、管中養生コンクリートは水中養生にくらべて圧縮強度で 6% ~ 11%、ヤング係数で 10% 程度低い値を示した。⁴⁾

4. 試験装置

試験装置を Fig 2 に示す。荷重は鉛直、水平共に 100 t 油圧ジャッキを用いた。

5. 荷重及び測定項目

1) 荷重

「鋼製橋脚の実績調査」によると、軸方向圧縮力と面外曲げモーメントの相関関係は Fig 3 に示すような傾向になる。これより、鉛直荷重と水平荷重比は、鋼管柱において

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{ca}} : \frac{\sigma_M}{\sigma_{bao}} = 0.13 : 0.87$$

となるように決めた。

ここに

σ_N ；軸力による鋼管応力度

σ_{ca} ；許容軸方向圧縮応力度

σ_M ；曲げモーメントによる鋼管応力度

σ_{bao} ；許容曲げ圧縮応力度

載荷方法は弾性範囲は 10 ton きざみで、塑性範囲は 5 ton きざみで載荷した。

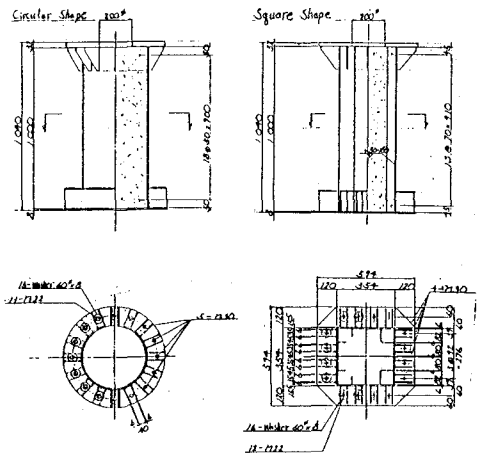


Fig 1. Test specimens

Table 1. Dimensions of Test specimens

Item Shape	Number of Specimen	Shear Connector	Section (mm)	Thickness t _s (mm)	Area of Steel tube A _s (cm ²)	Area of Concrete Core A _c (cm ²)	Moment of Inertia of Steel tube I _s (cm ⁴)	Moment of Inertia of Concrete Core I _c (cm ⁴)	Slenderness Ratio λ	Parameter λ
Circular	1	existence	φ398	5.6	69.0	1175	13 290	109 900	26.20	0.371
Square	1	existence	352 × 352	5.6	77.6	1161	15 520	112 900	25.43	0.360

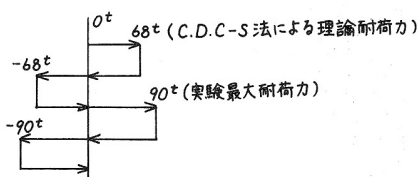
Table 2. Mechanical Properties of Steel Materials

Material	Thickness (mm)	Yield Point (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Young's Modulus × 10 ⁵ (kg/cm ²)	Poisson's Ratio
SM 50 A	5.6	40.5	57.5	2.05	0.28

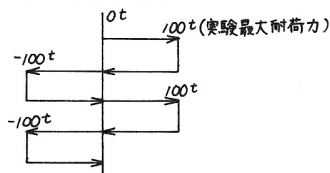
Table 3. Mechanical Properties of Concrete Materials

	Curing Condition	Age (days)	NO. of Specimens	diameter d (cm)	height h (cm)	Ultimate Strength (kg/cm ²)	Young's Modulus E (× 10 ⁵ kg/cm ²)	Poisson's ratio ν
Core Concrete	Air-Cured	7	A-1/A1~3	15.0	30.1	306	2.71	0.28
	In-tube	28	A-1/A1~11	"	29.9	377	3.12	0.20
	Water-Cured	7	A-1/A1~6	15.0	30.0	352	3.04	0.20
		28	A-1/A1~14	"	30.0	425	3.11	0.21
	Air-Cured	7	B-3/B1~3	15.0	30.0	281	2.82	0.20
	In-tube	28	B-3/B1~6	"	30.1	387	3.09	0.20
	Water-Cured	7	B-3/B1~12	15.0	30.0	347	—	—
		28	B-3/B1~18	"	29.9	412	—	—
Footing Concrete	Water-Cured	7	B-1/B1~3	15.0	30.1	251	—	—
	-Cured	28	B-1/B1~6	"	30.1	340	2.74	0.216
	Air-Cured	7	B-2/B1~12	15.0	30.1	307	2.76	0.203
	In-tube	28	B-2/B1~17	"	30.0	358	3.27	0.205
	Water-Cured	7	B-2/B1~11	15.0	30.1	331	—	—
	-Cured	28	B-2/B1~12	"	30.2	439	—	—

(1) 円形試験体



(2) 角形試験体



とした。

2) 測定項目

鋼管の部材軸方向及び軸直角方向のひずみをストレインゲージで、ベースプレート下面コンクリートのひずみをモールドゲージで測定した。また水平変位を変位計で測定した。

6. 試験結果と考察

1) 破壞狀況

円形試験体

Fig5, 6に示すように、圧縮側の鋼板に局部座屈が発生した。しかし下記に示すように水平力を逆に作用させ、座屈部が引張応力を受けると局部座屈は目視するがぎり消失してしまう。



角形試験体

圧縮側の隅角部に局部座屈が発生した。
局部座屈部は水平力を逆に作用させると円形
試験体と同様に消失する。

これは、局部座屈のモードが鋼管の外側にしか発生しえないため、引張応力を受けると容易に消失するものと思われる。

内部コンクリートの破壊状況を調査するた

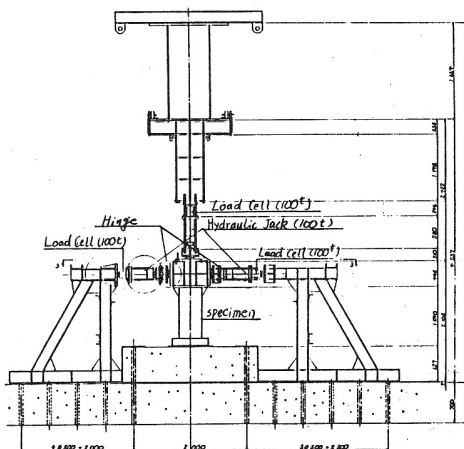


Fig 2 Testing Apparatus

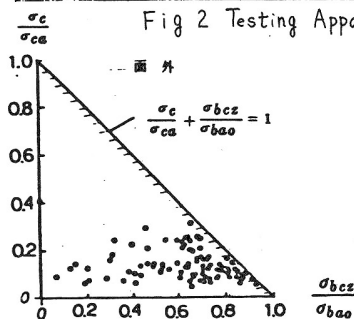


Fig 3

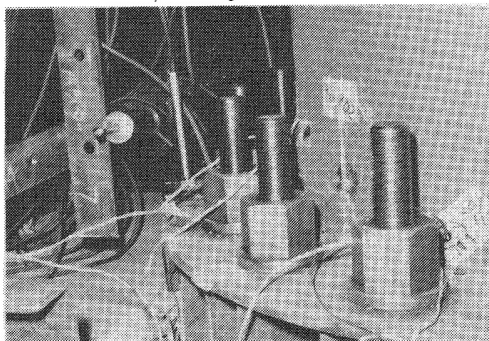


Fig 5

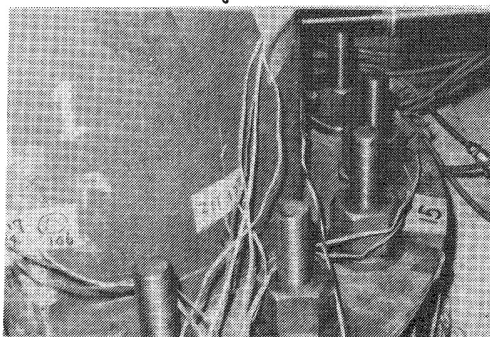


Fig 6

め、鋼板をガス切断した後、ジベルを有するので、ピックで衝撃を与えて鋼板を除去した。

①局部座屈部はスタッドジベル間で発生しており、その部分の充填コンクリートは極めてもろくなっていた。スタッドジベルは切断されていた。

②その他の部分はスタッドジベル先端からはがれコンクリートはもろくなっていた。

2) 履歴曲線

各試験体の履歴曲線を Fig 8, Fig 9 に示す。縦軸は水平荷重、横軸は試験体上端の水平変位を表す。

円形試験体

第1サイクルは P_{H0} (CDCs 法により算出した理論耐荷力) = $1.64 P_e$ まで載荷した。荷重—水平変位曲線は P_e (地震時許容水平荷重) 近くまでほぼ直線性を保っている。

第2サイクルは P_{Hu} (56年度実験で得られた最大耐荷力) まで載荷したが耐荷力の低下等は見られない。

角形試験体

第1サイクル、第2サイクル共 P_{Hu} まで載荷した。荷重—水平変位曲線は、正加力時 ($+P_H$) の荷重の小さい範囲で折線となっているが負加力時 ($-P_H$) では $1.27 P_e \div 40$ 付近までほぼ直線性を保っている。 P_{Hu} に到り局部座屈が発生すると荷重水平曲線の勾配がやや小さくなるが、第1、第2サイクル共大きな変化は見られない。

3) 塑性変形能力

鋼とコンクリートの合成構造である合成柱においては塑性変形能力すなわちじん性をエネルギー吸収能力として表現する方法がある。エネルギー吸収能力を表す指標としてを用い、^{53, 6), 7)} Fig 8, 9 より計算した結果を参考値として Table 4 に示す。

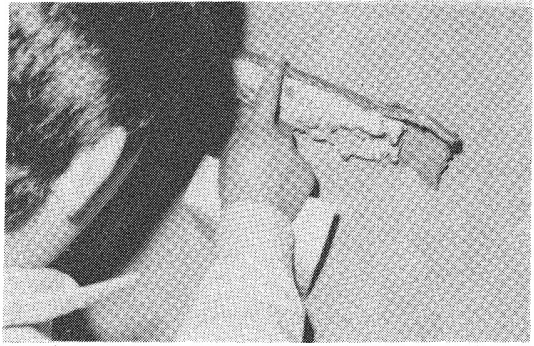


Fig 7

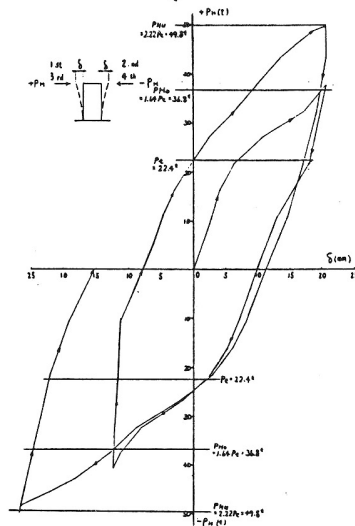


Fig 8 Hysteresis Loop of Circular Shape

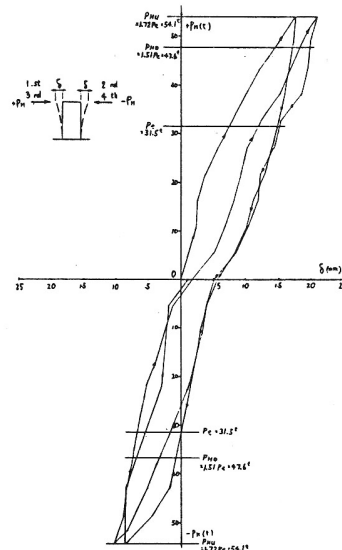


Fig 9 Hysteresis Loop of Square Shape

(1) じん性率；

$$\mu = \frac{\text{② 各荷重レベルでの吸収エネルギー}}{\text{① 地震時許容荷重時の吸収エネルギー}} \dots\dots (1)$$

ここ

① = $\frac{1}{2} P_e \cdot \delta_e$ とする。 P_e は鋼管の縁応力度が降伏点に達した時の許容水平力で地震時の許容水平荷重を表わす。 δ_e は P_e が作用した時の変位である。

② = Fig 4 ACDの面積

(2) 等価粘性減衰定数；

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}$$

ここに ΔW = Fig 4 ACBの面積で消散エネルギーを表わす。

W = Fig 4 OCDの面積で変形によって貯えられたエネルギーを表わす。

(3) 等価剛性比； η

$$\eta = \frac{\text{等価変形係数}}{\text{地震時変形係数}} = \frac{K_{eq}}{K_0}$$

$$K_{eq} = \frac{CD}{OD} \quad K_0 = \frac{P_e}{\delta_e}$$

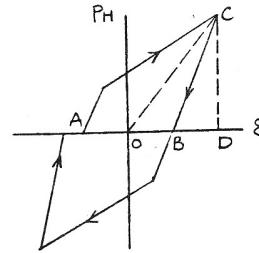


Fig 4

Table 4

Shape	Load.ing Number	P_e (t)	δ_e (cm)	① $\frac{1}{2} P_e \cdot \delta_e$ (t-cm)	② Area of ΔACD (t-cm)	μ ②/①	ΔW Area of ΔACB (t-cm)	W Area of ΔOCD (t-cm)	λ $\frac{\Delta W}{W}$	K_{eq} $= \frac{CD}{OD}$ (1/cm)	K_0 $= \frac{P_e}{\delta_e}$ (t/cm)	η $\frac{K_{eq}}{K_0}$
Circular	1	22.4	0.36	4.0	50.0	12.5	32.0	39.2	0.13	18.3	62.2	0.29
	2	"	"	"	53.5	13.4	48.7	25.3	0.31	32.9	"	0.33
	3	"	"	"	86.9	21.7	67.7	51.5	0.21	24.0	"	0.39
	4	"	"	"	116.6	27.2	93.9	65.0	0.23	18.2	"	0.30
Square	1	31.5	0.41	6.5	56.8	8.7	11.8	47.3	0.04	30.9	76.8	0.40
	2	"	"	"	50.4	7.8	24.2	28.3	0.14	51.5	"	0.67
	3	"	"	"	54.0	8.3	16.6	37.4	0.07	37.4	"	0.49
	4	"	"	"	49.4	7.6	29.3	20.1	0.23	60.1	"	0.78

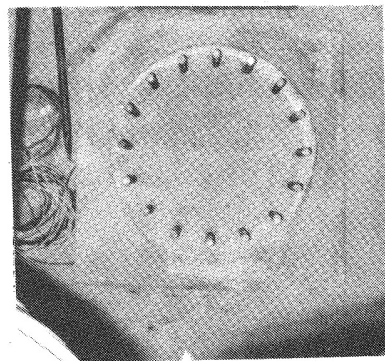


Fig 10 Concrete Surface of Footing under the Base Plate after the Testing

4) ベースプレート下面の台座コンクリートの応力分布

円形試験体

最大ひずみはベースプレート端部よりやや内側に入った所で発生している。第1サイクルと第2サイクルの正加力時、 $P_H = 20^t$ で分布に変動がみられるが、 $P_H = 40^t$ では、第1、第2サイクル共、同じようなひずみ分布を示している。

角形試験体

最大ひずみはベースプレート端部付近に発生している。第1、第2サイクル共、同じよ

うなひずみ分布を示している。

ひずみ量は第1サイクルより第2サイクルの方が増加する傾向を示しており、合成柱の柱基部より台座コンクリートが先に破壊する可能性があると思われる。

7. まとめ

充てんコンクリート方式の合成柱で内側補剛リブを省略した試験体に高応力交番くり返し実験を行い下記の様な挙動を確認した。

- ① 破壊状況として、鋼管は円形、角形共に塑性域で局部座屈を発生したが水平力を逆に作用させると座屈は目視するかぎり消滅する。充てんコンクリートは破壊してもろくなっている。
- ② 変形状として最大耐荷力付近では安定した履歴曲線を示し耐荷力の低下も見られず、変形能力も大きいことがうかがえる。
- ③ ベースプレート下面コンクリートのひずみ分布に大きな変化は見られない。

これより、内側リブを省略しても変形性能が既往の鋼管柱より低下することはないと思われる。本実験は試験体数(2体)、サイクル数(2回)と少いが、土木構造物に合成柱が使用された実績は少く、今後の研究の出発点になれば幸いである。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所 新耐震設計法(案) PP125~136 昭和52年3月
- 2) 袴田・若川・田中 合成柱(充てんコンクリート方式)を有する柱基部の載荷実験 土木学会第37回年次学術講演会概要集 V-189 昭和57年10月
- 3) 阪神高速道路公団 鋼製橋脚の実績調査報告 昭和56年6月
- 4) 金井・大塩 鋼-コンクリート合成鋼管について 土木技術資料 23-9(1981)
- 5) 土木学会 土木工学ハンドブック(上巻) PP383~386
- 6) 小柳・六郷 コンクリートの破壊と靱性評価 コンクリート工学 Vol.20, No.4, April 1982
- 7) 和田・森河 基礎杭の変形性能に関する実験 橋梁と基礎 82-1

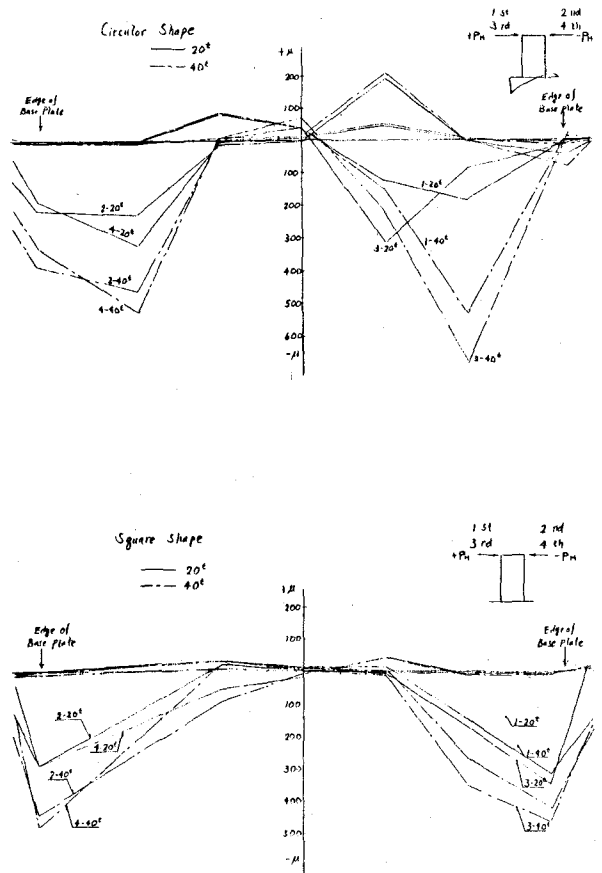


Fig 11 Load-Strain of Concrete under Base plate

Repeated Test of Plastic Bending under Axial Compression
to the Basement of Concrete-filled Steel Tube Column

Osamu Yoshikawa * Minoru Tomita **
Akihiko Segawa *** Nobuo Kijima ****

As the earthquakes are frequent in Japan, necessary strength and function of structures are required for seismic force in designing civil engineering structures. In case of members of steel structure, stable strength and ductility are required after buckling.

We are making reserches with a view that we can simplify stiffening to the inner part of basement of column when we use Concrete-filled Steel Tube to column of steel pier. This paper forms a part of these reserches and is the result of the Alternately Repeated Tests of Plastic Bending under Axial Compression to the test specimens which is omitted the inside stiffening ribs.

One of the test specimens is circular shape and the other is square shape. The purpose of these tests are;

- 1) To know the state of breaking of steel pipe and filled concrete,
- 2) To know the deformed capacity, and
- 3) To know distribution of strains of concrete under the base plate

Our results are as follows;

- 1) Local buckling is produced in the plastic range in both circular and square steel pipes, but local buckling is disappeared by eye when we operate its horizontal force in reverse. The filled concrete became frail after destruction.
- 2) To the ultimate strength point it indicates the stable hysteresis loop and it does not decrease the strength, and we can see a broad range of the ductile ability in it. We do not think there is any influence by omitting the inside stiffening ribs.
- 3) There is not any major change in the distribution of strains of concrete under the base plate.

* Hanshin Expressway Public Corporation, Osaka Management Division
** Hanshin Expressway Public Corporation, Osaka Management Division
*** Hanshin Expressway Public Corporation, Osaka Management Division
**** Tokyo Engineering Co., Ltd.