

コンクリートを充填した円形鋼管柱の繰返し弾塑性挙動に関する実験的研究

Experimental Study on the Cyclic Elasto-plastic Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns

森下 益臣*, 鈴木 森晶**, 青木 徹彦**

Masuomi MORISHITA, Moriaki SUZUKI, Tetsuhiko AOKI

A lot of steel bridge piers are accepted instead of reinforced concrete bridge piers at city highway recently. The Great Hanshin Earthquake on 1995 caused several types of damage in steel structures. Many types of local buckling appeared in elevated steel bridge piers. In this paper, prepare 5 pipes sectioned specimens. Quasi-static cyclic loading tests assuming seismic force were conducted to investigate the elasto-plastic behavior. It is concluded that diaphragms are required to increase strength and ductility piers.

1. はじめに

鋼製橋脚は、従来のコンクリート製橋脚に比べて、優れた変形性能・軽量・工期の短縮・設計の自由度などから、設計・施工条件の厳しい都市内高速道路で近年多く採用されている。しかし、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、これまでの耐震設計基準をはるかに上回る極大地震であったため、鋼製橋脚にも局部座屈、角溶接の割れに起因すると考えられる圧壊など、少なからず被害を生じ、設計基準の再検討を余儀なくされた。

地震後、各研究機関で精力的に研究が行われ、鋼製橋脚については上部工重量による軸圧縮力と地震動による繰返し水平外力が橋脚基部に座屈損傷を発生させ、構造物が崩壊することが明らかにされた¹⁾。そして平成8年12月には耐震設計の見直しがされた道路橋示方書・同解説²⁾(以下、道示と略す)が改定され、鋼製橋脚についてはコンクリートを充填することが推奨された。これはコンクリートを橋脚基部に部分的に充填し、基部の局部座屈の発生を抑制しようとするものである。しかし、設計の対象とされているのが箱型断面のみであるように、未解明とする部分をまだ多く残している。

本研究では実験データの少ないパイプ断面を用い、コンクリートの充填高さ、コンクリート上部に設置したダイアフラム(横リブ)が鋼管の強度と変形能に及ぼす影響を調べるため、準静的繰返し載荷実験を行った。

2. 実験計画

2.1 実験供試体

実験供試体の寸法を図1(a)、諸元を表1に示す。供試体は鋼種 STK490、外径 $D=318.5\text{mm}$ 、板厚 $t=6.9\text{mm}$ の電縫鋼管を使用し、ベースプレート、補強三角リブ、外ダイアフラム(補強三角リブ上端部)を溶接により取り付けたものを計5体製作した³⁾。また、このうちの1体は鋼管内側にダイアフラム(横リブ)を設置するために鋼管を切断(ダイアフラム下10cmの位置)したため、切断部分に補剛板(軸方向に幅5cm)を巻き立てて溶接を行っている(図1(b)参照)。径厚比パラメータ Rt と細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は次のような式で定義される⁴⁾。

$$Rt = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \frac{D}{2t} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

ここで、 σ_y : 鋼材の降伏応力、 E : 鋼材のヤング率、 ν : ポアソン比、 D : 外径、 t : 板厚、 h : 柱長さ、 r : 断面2次半径である。

2.2 供試体概要

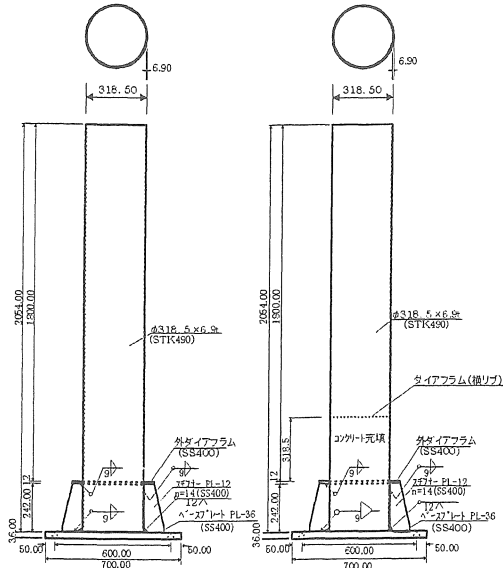
本研究ではコンクリートの充填高さ(充填率)による

*愛知工業大学 大学院 建設システム工学専攻

**愛知工業大学 土木工学科(豊田市)

表 1 供試体諸元

鋼種		STK490
柱長	h(mm)	1800
外径	D(mm)	318.5
板厚	t(mm)	6.9
径厚比パラメータ Rt		0.058
細長比パラメータ λ		0.407
降伏応力	$\sigma_y(\text{kgf/mm}^2)$	32.14
ヤング率	E(kgf/mm ²)	21000
ポアソン比	ν	0.3
軸力比	P/Py	0.2
水平降伏荷重	Hy(tf)	9.2
水平降伏変位	$\delta_y(\text{mm})$	10.16

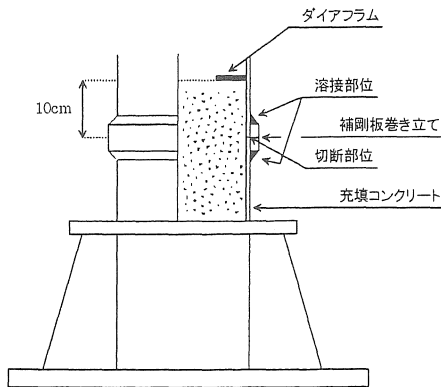


(a) 供試体寸法

表 2 供試体概要

供試体名	コンクリート充填高さ	ダイアフラム
C0D-U	0D (0%)	無
C1D-U	1D (18%)	無
C1D-S	1D (18%)	有
C1.5D-U	1.5D (27%)	無
C2D-U	2D (35%)	無

※注 D : 鋼管外径 318.5mm



(b) 補剛板溶接概要図

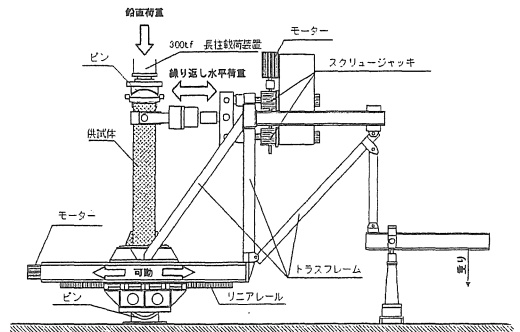


図 2 実験装置全体図

図 1 実験供試体図

鋼管の強度と変形能への影響を調べるため充填高さを 0D(充填なし)、1D(18%)、1.5D(27%)、2D(35%)と設定した。また、充填コンクリート上部に設置したダイアフラム(横リブ)の効果を調べるために 1D の高さにダイアフラムを設けた供試体を製作し、計 5 体について実験した。供試体概要を表 2 に示す。

3. 実験方法

3.1 載荷装置

載荷装置および供試体の設置状況を図 2 に示す。供試体の頂部に 300tf 長柱載荷装置により、一定の鉛直荷重(軸力)を負荷した状態を保ちつつ、供試体頂部に設置

したスクリージャッキにより水平荷重（地震慣性力）を載荷する。装置全体は、300tf長柱載荷装置に対して、上下端ピン支持されている。柱頂部の水平力は、トラスフレームを通して供試体に伝達される。水平力が載荷されると供試体に傾きが生じるが、本研究では、供試体と下部ピン支持装置の間にリニアレールを設け、モータにより供試体およびフレーム全体をレール上でスライドさせ、レールを水平に、供試体基部を垂直に保つようにして実験を行った⁵⁾。

3.2 水平力載荷方法

水平力用スクリージャッキはモータにより駆動し、1本あたりの載荷能力は押しで約25tf、引きで約12tfである。ジャッキは2本並列にモーターと連結され、制御はモーターのコントローラを手動操作により行う。

水平力載荷パターンを図3に示す。繰り返し載荷の振幅変位は供試体の降伏水平荷重 H_y に対する変位 δ_y を基準とし、 $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、・・・のように漸増させ、各変位での繰り返し回数を3回とする。降伏荷重 H_y と降伏変位 δ_y は、公称降伏応力($STK490$: $\sigma_y=32.14\text{kgf/mm}^2$)を用い、次の式より求められる⁶⁾。

$$H_y = \frac{M_y}{h} \tag{3}$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \tag{4}$$

ここで、 M_y =軸力の影響を考慮していない降伏モーメント、 I =断面2次モーメントである。

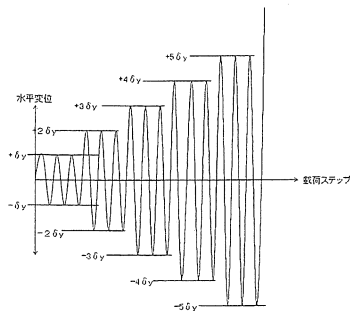


図3 載荷パターン

3.3 充填コンクリート

供試体に充填するコンクリートは圧縮強度 150kgf/cm^2 程度の早強コンクリートである。圧縮試験結果（各5体の平均値）を表3に示す。

表3 充填コンクリートの強度

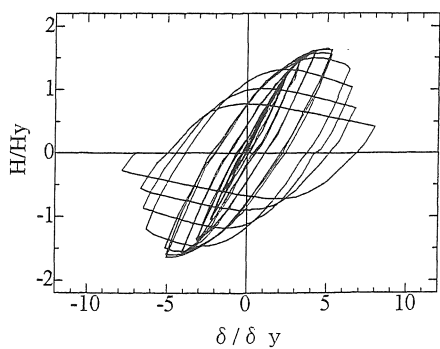
供試体名	コンクリート強度 (kgf/cm ²)
コンクリート1D充填 (ダイアフラム無)	156 (8日養生)
コンクリート1D充填 (ダイアフラム有)	176 (12日養生)
コンクリート1.5D充填 (ダイアフラム無)	172 (26日養生)
コンクリート2D充填 (ダイアフラム無)	163 (32日養生)

4. 実験結果

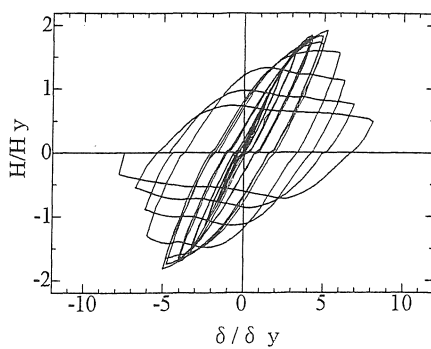
4.1 水平変位-水平荷重履歴曲線

各供試体の水平変位-水平荷重履歴曲線を図4に、包絡曲線を図5に示す。これらの図より以下のことが言える。

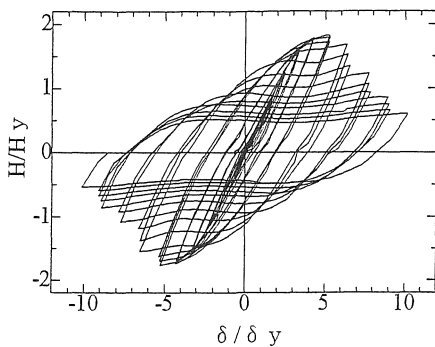
- (1) コンクリートを充填した場合は、いずれの充填高さにおいても最大水平荷重が充填無しと比較して上昇している。また、C1D-UとC1.5D-Uでは最大水平荷重を越えた劣化域で耐荷力が低下した後、再び耐荷力が上昇している。これはコンクリートによる座屈変形抑制効果によるものと思われる(図4参照)。
- (2) コンクリートの充填高さによる耐荷力を比較すると、最大耐荷力は充填高さに比例するが、劣化域での耐荷力の減少は充填高さに反比例する。これはコンクリートが破壊後、鋼管の変形に伴いコンクリートが上方に抜けて機能しなくなるためと思われる(図5参照)。
- (3) ダイアフラムを設置しない供試体が $5\delta_y$ 付近で最大水平荷重を記録しているのに対し、ダイアフラムを設置した供試体は $5\delta_y$ 以降の耐力の向上が見られる。このことから、ダイアフラムがコンクリートの抜けを抑制し、有効に機能していると考えられる(図5参照)。
- (4) ダイアフラムを設置した場合(C1D-S)は、最大荷重点に達する前(付近)で、ダイアフラムを設置した際に巻き立てた補剛板(図1(b)参照)の下部溶接部分に亀裂を生じ、急激に耐力を失ったため途中で実験を中止した。



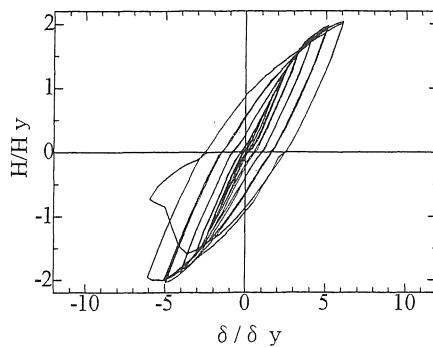
(a) コンクリートなし (C0D-U)



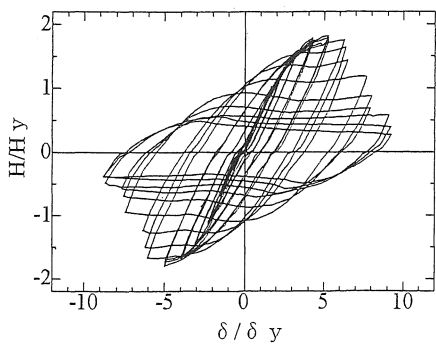
(d) コンクリート 2D 充填 (C2D-U)



(b) コンクリート 1D 充填 (C1D-U)



(e) コンクリート 1D・ダイアフラム有 (C1D-S)



(c) コンクリート 1.5D 充填 (C1.5D-U)

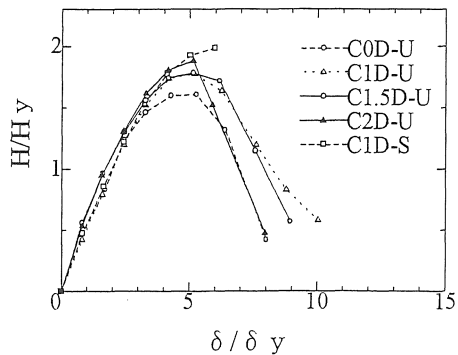


図5 包絡曲線

図4 水平変位—水平荷重履歴曲線

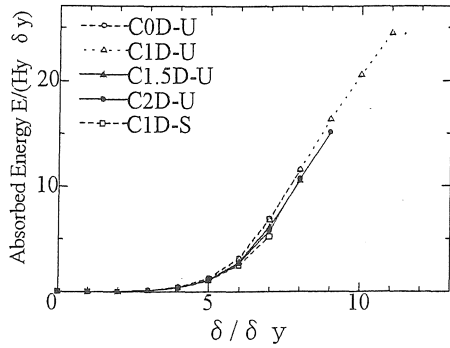
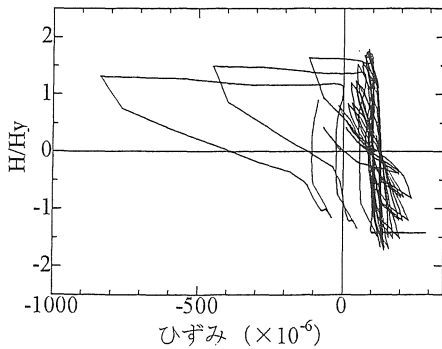
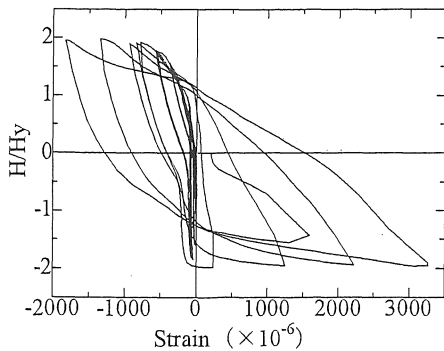


図6 累積エネルギー吸収量



(a) コンクリート 1D 充填・リブ無 (C1D-U)



(b) コンクリート 1D 充填・リブ有 (C1D-S)

図7 コンクリートの荷重-ひずみ曲線

(5) いずれの供試体も $4\delta y$ までは包絡曲線の傾きがほぼ等しいが、 $4\delta y$ 以降は傾きに差が出ている。充填コンクリートの効果が現れるのは $5\delta y$ 以降であり、変位の増大に従いその差は明瞭となる。そして、劣化域の傾きはコンクリートの充填高さが高くなる程大きくなる。

4.2 エネルギー吸収量の比較

各供試体の水平荷重-水平変位履歴曲線の面積を累積した累積エネルギー吸収量を図6に示す。いずれの供試体もほぼ同じような吸収量推移を示しており、コンクリートの充填高さによる違いはあまり見られない。ただし、ダイアフラムを有する C1D-S は途中で実験を中止しているため、本来ならさらにエネルギー吸収が期待できると考えられる。

4.3 ダイアフラムによる効果の検討

充填コンクリート内部に設置したモールドゲージより得られたコンクリートの鉛直荷重-鉛直ひずみ曲線を図7に示す。コンクリート 1D 充填・リブ無(C1D-U) (図7-(a)参照) とコンクリート 1D 充填・リブ有(C1D-S) (図7-(b)参照) のコンクリートのひずみを比較すると、コンクリート 1D 充填・リブ無(C1D-U)は変位 $5\delta y$ まではひずみの増減が顕著でないのに対し、コンクリート 1D 充填・リブ有(C1D-S)は荷重が増加すると圧縮ひずみも増加している。つまり、圧縮力がコンクリートにも伝達され、鋼管とコンクリートで効率良く分担していることが分かる。このことから、コンクリート上部にダイアフラムを設けることで、充填コンクリートの効果がより発揮されることが分かる。

5. まとめ

本研究ではコンクリートを充填した円形鋼管柱の繰り返し載荷実験を行い、コンクリートの充填高さとコンクリート上部に設置したダイアフラムが鋼管の強度と変形能に及ぼす影響を調べた。実験によって得られた結論を以下に示す。

- 1) 充填したコンクリートは鋼管の局部座屈発生を遅らせ、耐荷力を向上させる。
- 2) 最大耐荷力はコンクリートの充填高さに比例するが、劣化域における耐力はコンクリートの充填高さに反比例し減少する (包絡線の劣化勾配が大きくなる)。
- 3) 累積エネルギー吸収量はコンクリート充填高さに依存しない。
- 4) コンクリート上部に設置したダイアフラムは、コンクリートの抜けを抑制し鋼管の最大耐荷力を向上させることから有効である。

謝辞：本研究では、本学土木工学科 4 年生の天谷公彦君、飯田豊和君、岡本隆之君、成田宏樹君に協力していただいた。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究 WG (主査：宇佐美勉)：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術、1996 年 5 月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・V 耐震設計編、1996 年 12 月。
- 3) 安波博道：円形断面鋼製橋脚の耐震性能評価および補強構造に関する研究、九州大学大学院博士論文、1999 年 10 月。
- 4) 葛漢彬、高聖彬、宇佐美勉、松村寿男：鋼製パイプ断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究、土木学会論文集、No.577/I-41、pp.181-190、1997 年 10 月。
- 5) 水谷慎吾、宇佐美勉、青木徹彦、伊藤義人、岡本隆：パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.42A、pp.105-114、1996 年 3 月。
- 6) 安波博道、寺田昌弘、青木徹彦、山田将樹：高張力鋼 (SM570Q) 鋼管柱の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、No.591/I-43、pp.233-242、1998 年 4 月。

(受理 平成11年3月20日)