

円筒鋼製橋脚の耐震性能向上の為の補剛法

忠 和男^{*} 桜井孝昌^{**} 日下部和弘^{***} 後藤芳顕^{****}

^{*}工修 豊田工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒471 愛知県豊田市栄生町2-1)

^{**}工博 豊田工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒471 愛知県豊田市栄生町2-1)

^{***}瀧上工業(株)技術プロジェクト (愛知県半田市神明町1-1)

^{****}工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科 (〒 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

本研究は、一定軸力と水平荷重を受ける円筒鋼製橋脚に補剛材を付けた場合の耐荷力特性およびダクティリティ性能について、実験および数値解析により検討した。実験は、実構造物の縮小モデルを用い、供試体は局部座屈発生予想位置に補剛材を付けたものと付けないを選択した。載荷は、単調と繰り返しの2通りとした。実験に対応させた数値解析を行いその結果を比較検討した。その結果、補剛材を付けたものは、付けないものに比較してダクティリティの向上と最大荷重の向上が認められた。

Key Words: Steel brige cylindrical pier, Ductility, Experiment, Nonlinear numerical analysis

1 はじめに

平成7年の阪神大震災においては、多くの土木構造物が損傷を受けた。ここでは、特に、円筒鋼製橋脚の耐荷力特性及びそのダクティリティに着目して検討した。

円筒鋼製橋脚等に使用される円筒鋼製鋼管部材は、地震時にその影響を強く受けると考えられるトラス構成部材、地下構造物の支保工、鋼管杭、等の構成部材として多用されている。この種の鋼管部材は、地震時に弾塑性領域に達するような応力が発生すると、その耐荷力の低下が著しいことが指摘されている。また、現状ではその低下の傾向は不明確であり今後、鋼管部材の耐震設計においては、その耐荷力の低下傾向および変形挙動を十分に把握し設計に反映させる必要がある。

本研究では、実験と数値解析により、円筒鋼製橋脚に橋梁の死荷重に相当する荷重を一定軸力として作用させた状態で地震荷重に対応する水平荷重を載荷し、鋼管部材に補剛材を付けない場合と補剛材を付けた場合の強度およびダクティリティと繰り返し回数による耐荷力の低下傾向、単調載荷と繰り返し載荷を比較し、繰り返し荷重を受ける影響について検討する。

2 実験

実験は円筒供試体に補剛材を付けないもの、及び補剛材を付けたものについて、それぞれ単調載荷と繰り返し載荷の2通りの実験を行った。補剛材は兵庫県南部地震での橋脚基部に見られた局部座屈位置を参考に、橋脚の耐荷力の増加を抑え、ダクティリティを向上させることを目的とし設計した。供試体に用いた電綫鋼管は形状的不完全性や残留応力などの初期不整が存在し、耐荷力に影響を与えると考えられるため、載荷実験前に初期不整を測定した。

2.1 供試体および材料特性

供試体は、補剛材を設けないものと補剛材を設けたものそれぞれについて、単調載荷及び繰り返し載荷の2通り行うため合計4体使用した。供試体は、市販の電綫鋼管(材質、STKR400)の基部200mm部分を削り、図-1

表-1 供試体の諸元及び材料特性

項 目			
形 状	長 さ (L)	mm	900
	直 径 (D)	mm	209.7
	半 径 (r)	mm	104.85
	板 厚 (t)	mm	2.66
特 性	断 面 積 (A)	cm ²	17.30
	断面2次モーメント (I)	cm ⁴	927.20
	断面係数 (Z)	cm ³	88.43
材 料	ヤング係数 (E) × 10 ⁶ kgf/cm ²		2.327
	× 10 ⁵ MPa		2.28
	降伏応力 (σ _y)	kgf/cm ²	3802
	MPa		372.6
	ポアソン比 (ν)		0.253
	歪み硬化係数 (Est) × 10 ⁶ kgf/cm ²		0.029
特 性	全断面降伏軸力 (P _y)	kgf	65780
		MN	6446
	降伏水平荷重 (H _y)	kgf	3175.4
		MN	311.1
	降伏水平変位 (D _y) 補剛無	mm	3.6
	補剛有	mm	4.4
降伏歪み	× 10 ⁻⁶	1634	
幅厚比パラメータ (R _t)		0.106	
細長比パラメータ (λ)		0.316	

に示すような形状に加工した。鋼管の寸法は、実構造物、鋼構造物設計指針⁴⁾、道路橋示方書⁵⁾、既往の研究等を参照し、細長比パラメータ、径厚比パラメータ、径厚比等を考慮して実構造物に近いパラメータとなるように決定した。

表-1には供試体の直径、板厚、断面積等の諸元及び鋼管から切り出した素材試験片を基に引張試験を行った結果から求めたヤング係数、降伏応力等の材料特性を示す。供試体は局部座屈が発生されると予想される位置に補剛材を付けた供試体（補剛有）、及び補剛材を付けない供試体（補剛無）を図-1に示す。

なお、表-1で使用した細長比パラメータ、径厚比パラメータの定義は、以下の通りである。

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \times \frac{l}{r}$$

λ : 細長比パラメータ、 l : 部材の有効座屈長 (cm)

r : 部材の総断面の断面二次半径 (cm)

E : ヤング係数 (Kgf/cm²)

$$R_t = 1.65 \times \frac{\sigma_y}{E} \times \frac{r}{t f}$$

R_t : 径厚比パラメータ、 σ_y : 降伏強度 (Kgf/cm²)

E : ヤング係数 (Kgf/cm²)、 t : 鋼管の板厚 (cm)

r : 鋼管の半径 (中心から外縁までの距離) (cm)

f : 応力勾配による係数

2.2 初期不整の測定

鋼管製作時に生じる形状の初期不整が、鋼管の耐力に及ぼす影響は大きい。鋼管の初期不整は、基準円からの偏心量 OOR (out-of-roundness) および供試体基準線からの偏心量 OOS (out-of-straightness) によって評価した。

鋼管供試体の軸方向の直線性及び真円度の評価基準については参考文献²⁾を参照した。初期不整の計測結果は、表-2からそれぞれの基準を十分に満足するものであった。なお、評価基準として使用したそれぞれのパラメータは以下のように定義する。

管軸方向の直線性 (OOS) においては、

$$L_r = 4 \times (R_c \times t)^{1/2}$$

L_r : 基準長さ (mm)

R_c : 板厚中心までの半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

OOSの制限値は $0.02 L_r$

円周方向の真円度 (大R) においては、

$$OOR = (D_{max} - D_{min}) / D_{ave}$$

D_{max} : 外径の最大値、 D_{min} : 外径の最小値

D_{ave} : 外径の平均値、OORの制限値は 0.01

2.3 載荷実験

載荷実験装置は $\pm 30 t f$ の油圧サーボ疲労試験装置

を用いた。実験は、図-2のような装置を用い、単調載荷では軸力 $9.8 t$ (全断面降伏軸力の 15%) をかけ、水平方向変位を変位制御で制御し漸増増加させた。変位制御は、図に示す基部から $70 cm$ の位置に有る変位計によって行った。

繰り返し載荷では、ECCS⁶⁾の提案を参考にした。単調載荷実験で得られた荷重-変位曲線において、初期接線勾配と、その傾きの $1/10$ の勾配の接線を見だし、この交点をもって降伏荷重 H_y 、降伏変位 D_y を定義する。実験は、降伏変位 D_y を基準制御変位量とし、 $\pm 1.0 D_y$ 、 $\pm 2.0 D_y$ 、 \dots ($\pm n D_y$) まで変位制御で載荷、徐荷を 1 サイクルずつ行った。

2.3.1 変位計及び歪みゲージの位置

変位計及び歪みゲージの位置は、図-3に示すような位置に取り付けた。変位制御するための変位計は基部から $70 cm$ の位置に有り、その他のものも含め合計 12 本取り付けられた。

表-2 鋼管の初期不整測定結果

供試体	OOSの制限値 (mm)	OOS (mm)	OORの制限値	OOR
補剛無単	1.35	0.80	0.01	0.010
補剛無繰	1.35	0.45	0.01	0.004
補剛有単	1.35	0.32	0.01	0.001
補剛有繰	1.35	0.09	0.01	0.002

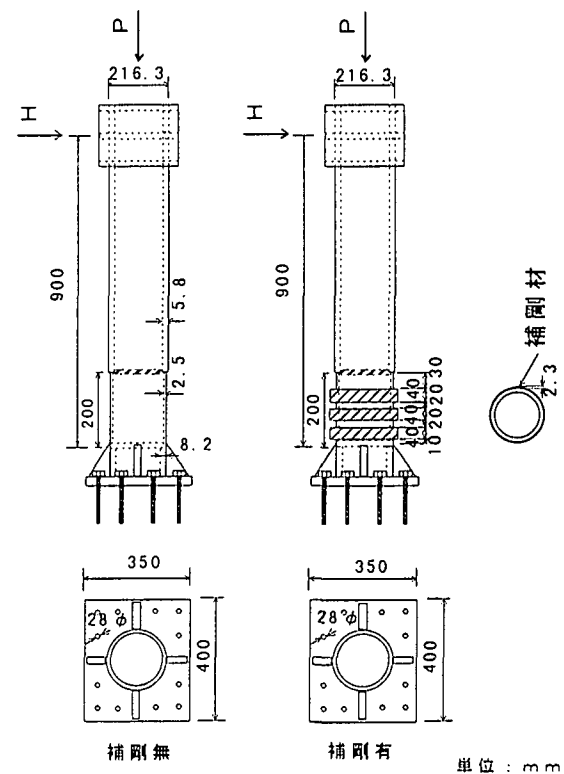


図-1 供試体図

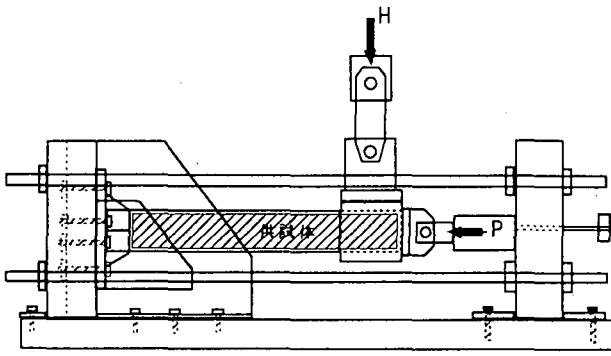
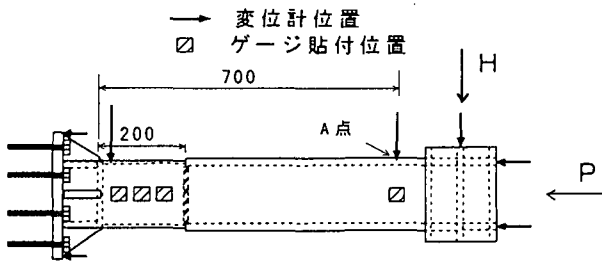


図-2 載荷概略図



A点 (D: 水平変位制御位置)

単位: mm

図-3 変位計及びゲージ位置

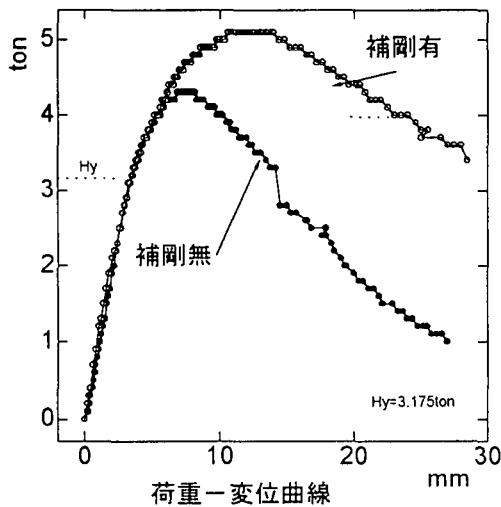


図-4 荷重-変位曲線 (単調載荷)

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重-変位曲線

図-4に補剛有及び補剛無の単調載荷の荷重-変位曲線を示す。縦軸は荷重 (H) を横軸は図-3に示す点Aの水平変位 (D) 示す。なお、単調載荷から求めた H_y 、 D_y は表-1に示すような値となった。この図から、補剛無及び補剛有の最大荷重 (H/H_y) 及びこれに対応する変

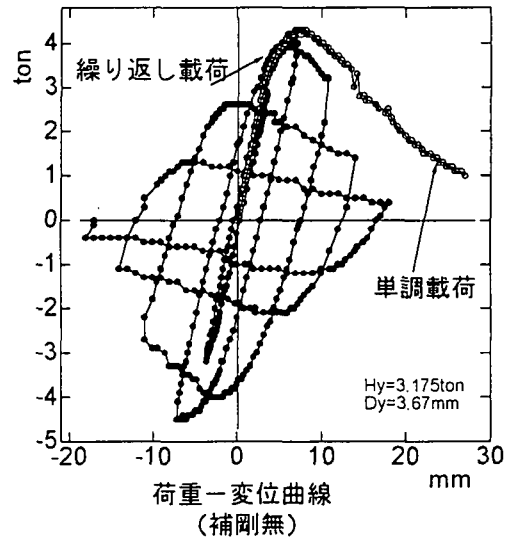


図-5 荷重-変位曲線 (補剛無)

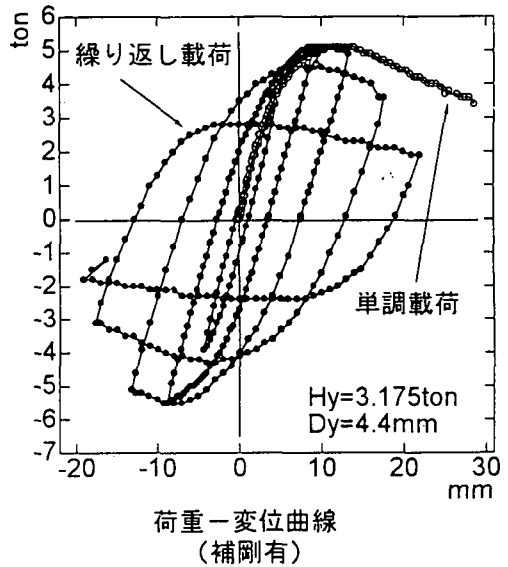
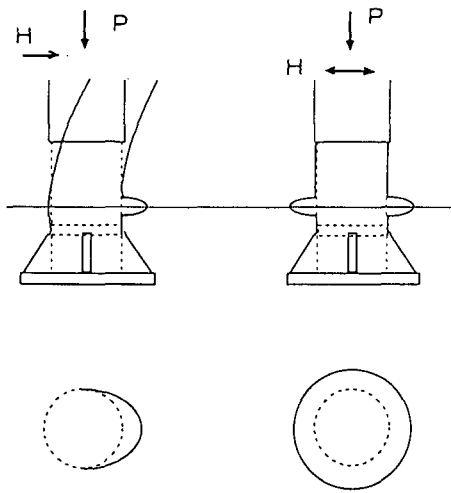


図-6 荷重-変位曲線 (補剛有)

位 (D/D_y) は、それぞれ1.18(2)、1.4(3)となった。補剛有の最大荷重は、 $H/H_y=1.4$ がとなり、補剛無の場合に比べて0.22程度大きくなっており、補剛材を付けることにより耐荷力の増加が認められた。

図-5は、補剛無の単調及び繰返し載荷の荷重-変位曲線である。それぞれの最大荷重は単調および繰返しが $H/H_y=1.18$ ($D/D_y=2$)、 $H/H_y=1.15$ ($D/D_y=2$) となり最大荷重にほとんど差はなく最大荷重に達するまでの相違は認められない。しかし、変位が $D/D_y=5$ において比較すると、単調及び繰返しの H/H_y が0.6、0.1となり繰返しによる影響で単調に比べて耐荷力の低下がみられた。

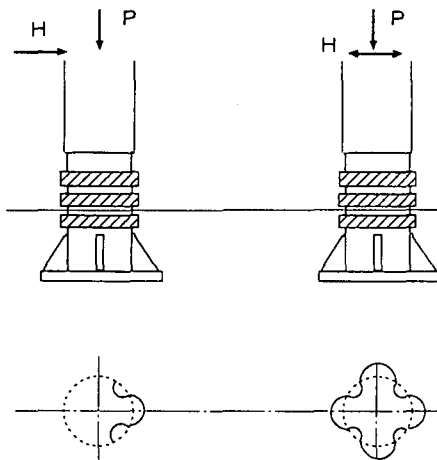
図-6は、補剛有の単調載荷及び繰返し載荷の



単調載荷

繰り返し載荷

図-7 座屈後形状 (補剛無)



単調載荷

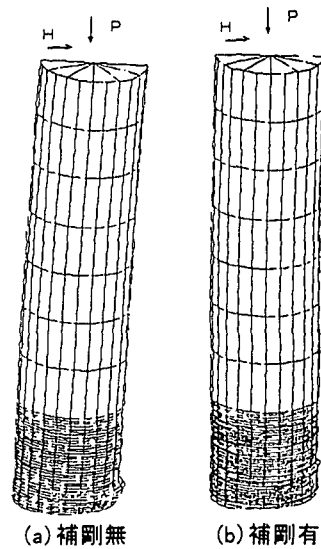
繰り返し載荷

図-8 座屈後形状 (補剛有)

荷重-変位曲線を示す。単調及び繰り返しともに最大荷重は $H/H_y=1.4$ ($D/D_y=2$) 程度となり、補剛無の場合と同様最大荷重に達するまでの繰り返しの影響は認められない。さらに、 $D/D_y=5$ における単調及び繰り返しの H/H_y は、1.0、および0.6となり繰り返しによる強度低下がみられた。補剛有の場合、補剛無の場合に比べて $D/D_y=5$ における強度の絶対値が大きくなっていることからダクティリティの増加が認められた。

3. 2 局部座屈形状

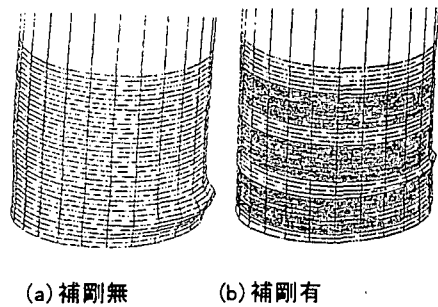
実験後の局部座屈形状を図-7、図-8に示す。補剛無の供試体は単調載荷、繰り返し載荷ともに一般に提灯座屈と呼ばれる局部座屈波形が供試体基部から3~4cm程度の位置に発生した。補剛有の供試体では、局部座屈発生位置は補剛無と同位置であったが、載荷方向および



(a) 補剛無

(b) 補剛有

図-9 要素分割数



(a) 補剛無

(b) 補剛有

図-10 局部座屈形状 (計算)

載荷方向の90°直角方向(水平方向)が膨らみ、それらの間が窪む形状となった。

座屈波形は、補剛無では、“ちょうちん”座屈の形状を示すのに対して、補剛有では、単調で円周方向に2波、繰り返しでは4波の波形を示し座屈波形に違いが認められた。補剛材を溶接することにより、ちょうちん座屈の波形が拘束を受けたものと考えられる。

4. 数値解析

数値解析は、実験と同じ条件で行った。解析は汎用構造解析プログラムMARCを用い、Von Misesの降伏条件と移動硬化則を適用して、弾塑性有限変位解析を行った。4節点厚肉シェル要素を用い、対称性を利用して円筒断面の1/2について解析した。まず、単調載荷についての解析結果を図-9および図-10に示す、補剛材無しの場合(図-9の(a))は、要素数522、節点数573である。補剛材有りの場合(図-9の(b))は、要素数570、節点数625である。図-10は、橋脚下部を拡大したものである。数値解析においては、補剛材有の座屈位置が下から1番目の補剛材間で発生している。

図-11は、補剛材無の単調載荷と繰り返し載荷の数値解析結果を示したものである。図-10、図-11で用いる座標系は、実験結果を示した図-5および6と同じである。実験結果同様、単調および繰り返し載荷の初期の接線

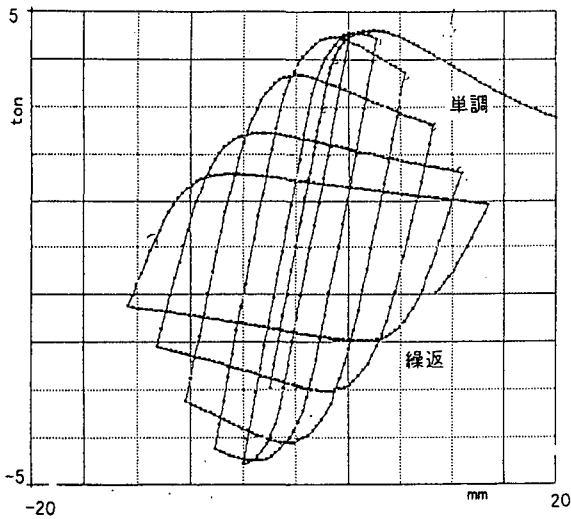


図-11 荷重-変位曲線 (補剛無・計算)

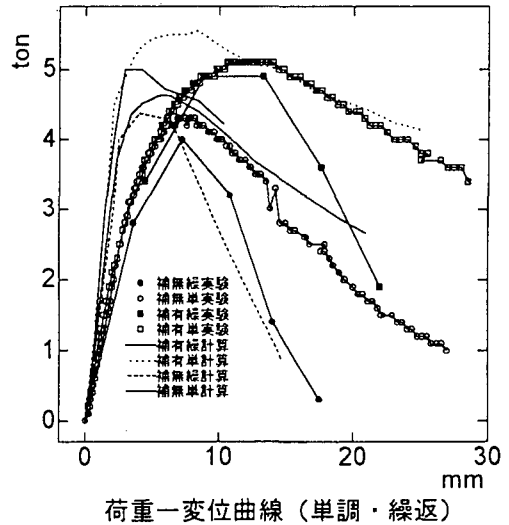


図-13 荷重-変位曲線の比較

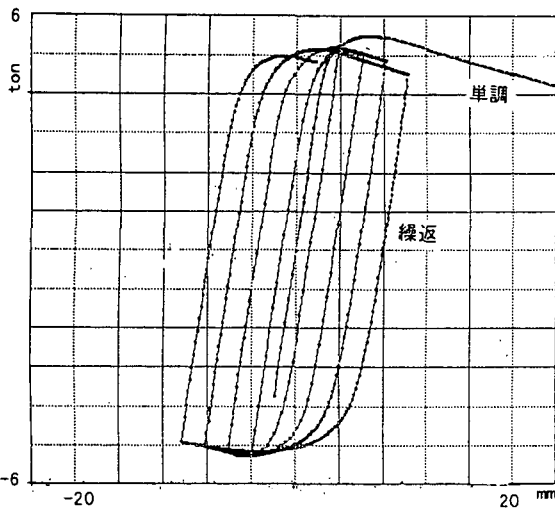


図-12 荷重-変位曲線 (補剛有・計算)

勾配は等しく、最大荷重到達後の荷重変位経路は、繰返し載荷の場合は繰返しの影響により著しいダクティリティの低下がみられた。図-12は、補剛材有りの単調載荷と繰返し載荷の数値解析結果を示したものである。この図の繰返し載荷の最大荷重到達後の荷重低下は図-11に比較して緩やかで補剛材の影響によりダクティリティの向上が認められた。

5 ダクティリティの評価

図-13は、補剛無と補剛有について単調の荷重変位曲線および繰返し載荷の包絡線を実験結果と計算結果を合わせて比較したものである。この図から、単調と繰返しの最大荷重の実験結果と解析結果を比較すると、実験値に対して数値解析の値は、補剛有・無いずれの場合

表-3 評価パラメータ

	df'/df	df'/du	$\frac{\sigma f - \sigma u}{df' - du}$
補剛無単調実験	4.56	2.10	-0.15
補剛無繰り実験	3.48	1.52	-0.22
補剛有単調実験	9.70	3.12	-0.09
補剛有繰り実験	6.01	2.18	-0.17
補剛無単調計算	5.36	3.08	-0.13
補剛無繰り計算	2.82	2.17	-0.25
補剛有単調計算	10.86	5.77	-0.08
補剛有繰り計算	5.94	6.31	-0.12

も9%程度大きくなっているが、数値解析の荷重-変位経路の傾向は実験結果とよく一致している。

表-3には、図-13から評価パラメータの値を計算したものを示す。評価パラメータを三上等¹⁾の文献を参照して以下のように定義する。

(1) 変位の比 df'/df

(2) 変位の比 df'/du

(3) 傾き $|u-f'(v)$

$$|u-f'(v) = (\sigma f - \sigma u) / (df' - du)$$

df : 初期降伏状態の変位

σf : 初期降伏状態の荷重

du : 終局強度状態の変位

σu : 終局強度状態の荷重

df' : 劣化限界状態の変位

計算結果と実験結果の変位パラメータ df'/df の値について、補剛有と無を比較すると単調・繰返しいずれの場合も補剛無の場合の値のほぼ2倍程度大きくなっており、補剛によりダクティリティの向上が認められた。ま

た、評価パラメータの勾配 ($l u-f'(v)$) では、解析結果および実験結果の両者において補剛無に比較して補剛有では、ほぼ2倍程度になっており、繰り返しによるダクティリティの低下が認められた。

以上のことから、実験および数値解析いずれの結果も補剛材を付けることによりダクティリティの向上が認められた。

6 まとめ

円筒製橋脚の縮小モデルの単調載荷および繰り返し載荷実験および数値解析を行い、耐荷力特性、ダクティリティ特性、及び座屈後の変形状を検討した。

- 1、表-3から実験結果と解析結果の両者において単調、繰り返しいずれも、そのダクティリティ評価パラメータ値 df'/df および $l u-f'(v)$ は2倍程度になりダクティリティの向上が認められた。
- 2、図-13から実験結果と解析結果の両者において補剛材有、無の単調および繰り返しにおける同一タイプの供試体では最大荷重に相違がないものの、補剛材有は、無より耐荷力が20%程度増加した
- 3、実験結果の座屈波形は、補剛材無しでは、単調及び繰り返しともに"ちょうちん"座屈の波形を示し、補剛材有では、円周方向に波形となる座屈形状となった。
- 4、表-3から最大荷重における実験結果に対する解析結果は、ほぼ7%程度増加しており、実験と解析が良い対応を示した。
- 5、解析結果における座屈波形およびその位置は、補剛有りの座屈形状に多少の違いがみられるものの局部座屈発生位置は供試体長さ(1)の1/30程度となり実験結果とほぼ一致した。
- 6、初期形状の測定結果は、基準を十分満足するものであり、また、局部座屈位置との相関もなく形状による不整の影響はなかった。

7、実験結果の初期勾配は計算結果のそれに比較して2倍程度小さい。これは、実験における固定条件、残留応力等における不整が原因していると考えられる。

謝辞

供試体製作に当たっては瀧上工業株式会社のご協力を頂いた。ここに謝して感謝の意を表します。本研究は平成7年度および8年度の文部省科学研究費助成金(基盤研究(c))を受けて行ったものである。

参考文献一覧

- 1) 三上市蔵・辻省吾・中野唯史・竹原和夫：円周方向内圧縮力を受ける鋼円筒パネルのダクティリティと幅厚比、構造工学論文集、土木学会、Vol. 39A、1993. 3
- 2) 水谷・宇佐美・青木・伊藤・岡本：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 pp10 5-114(1996 年3月)
- 3) 西川・山本・名取・寺尾・安波・岡本：既製鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol. 42A pp975-9 85(1996年3月)
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針PART A 一般構造物
- 5) ECCS CECM EKS: Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads, ECCS - Technical Committee 1 - Structural Safety and Loadings Technical Working Group 1.3 - Seismic Design, 1986
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I~V、平成6年2月版及び平成2年2月版

Stiffness method for Advanced Ductility of Steel Pipe Piers

Kazuo CHU, Takamasa, SAKURAI, Kazuhiro KUSAKABE, Yoshiaki GOTHO

A Property of ductility for Steel Pipe Piers is discussed. Two kinds of loading types are selected. One is monotonous increase bending and the other is cyclic bending. Experimental approach and nonlinear analysis are carried out.

The result is that the ductility of stiffness Pipe is considerable highest than that ductility of normal Pipe.