

角形断面鋼製橋脚のダクティリティ性能

桜井 孝昌*、 忠 和男**、都築 修治***、後藤 芳顕****

*工博 豊田高専教授 環境都市工学科、**工修同助教授、***同専攻科学生 (〒471 愛知県豊田市栄生町2-1)
****工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

本論文では、角形断面鋼製橋脚が地震時に生じるような水平荷重を受ける場合について、橋脚のダクティリティ性能を実験的及び解析的に研究した。実験は実橋をモデルとする小規模供試体によって行った。供試体としては橋脚側面に作業用マンホールを有するものとそれが無いものの両者を選んだ。外力は一定軸力作用下で水平力を単調および繰り返し載荷した。一方この実験に対応させて数値解析を行い両者の結果を比較した。その結果単調載荷の場合に比較して繰り返し載荷の場合はダクティリティが著しく低下する事がわかった。なお、本研究の形状ではマンホールのダクティリティにおよぼす影響は無かった。

Key Word; Ductility, Box sectional steel pier, Experiment, Nonlinear behavior, Numerical analysis

1、はじめに

阪神・淡路大震災の経験を経て、橋脚が崩壊に至るまでの安全性を確保するため、そのダクティリティ性能の向上を計ることが求められ、多くの研究が行われている(1)、(2)、(3)。

本研究は角形断面鋼製橋脚を対象として、橋脚が地震力に対応する水平方向繰り返し荷重を受ける場合の強度とダクティリティ性能について実験的および解析的に研究したものである。

2、実験概要

本実験で用いた供試体は実構造の縮小模型となるように形状のパラメータを選んだ。本実験では橋脚の側面に設けられるマンホールの力学的影響についても調べるため、マンホールを有する供試体についても実験した。供試体は補剛リブを有する正方形断面とし、鋼種はSS400 (235MPa、2400kgf/cm²)を使用した。供試体の緒元、材料常数等は表-1および図-1に示すとおりである。表-1に示す幅厚比パラメータR_Rおよび細長比パラメータλは、構造物設計指針⁽¹⁾に従って表下部に示したように定義されているが、ここで用いられている記号は次のように定義される。

- R_R : 幅厚比パラメータ μ : ポアソン比
- k : 座屈パラメータ E : ヤング係数(kgf/cm²)
- b : 自由突出幅 (cm) t : 板厚 (cm)
- f : 応力勾配による係数
- 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

表-1における降伏水平荷重H_yは橋脚固定端の最外縁が降伏応力σ_yに達するときの水平荷重を表し、δ_yはその荷重に対応する水平変位である。ここでは、図-1に示す

供試体の最下端から800mm上部の位置の水平変位で定義した。

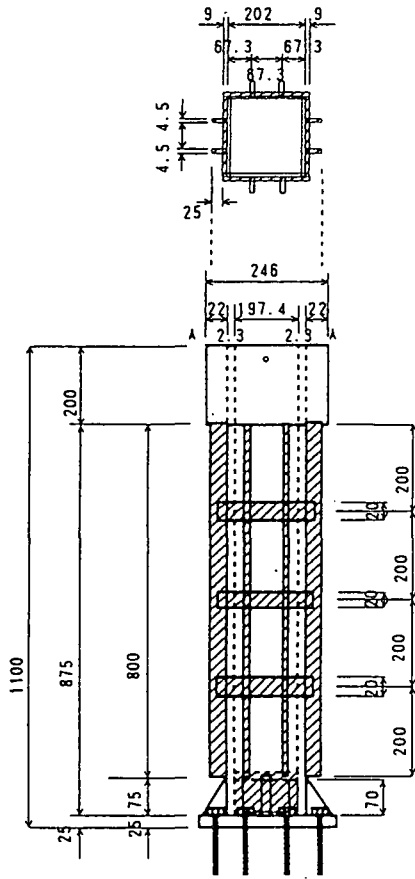
表-1 供試体諸元および材料定数

| | | |
|--------------|--------------------------------------|---------|
| 長さ | mm | 900 |
| フランジ | mm | 202 |
| ウェブ | mm | 202 |
| 板厚 | mm | 2.16 |
| 断面積 | cm ² | 26.2 |
| 断面2次モーメント | cm ⁴ | 1764.5 |
| 断面係数 | cm ³ | 176.8 |
| ヤング係数 | ×10 ⁶ kgf/cm ² | 2.327 |
| 降伏応力 | kgf/cm ² | 3350 |
| ポアソン比 | μ | 0.258 |
| 降伏歪み | ×10 ⁻⁶ | 1439.6 |
| 幅厚比パラメータ | R _R | 0.63 |
| 細長比パラメータ | λ | 0.265 |
| 剛比 | γ / γ* | 3.17 |
| 全断面降伏軸力 | kgf | 87883.9 |
| 作用軸力 | kgf | 13183 |
| 降伏水平荷重 (計算値) | kgf | 5593.8 |
| (実験値) | kgf | 5200 |
| 降伏変位 (計算値) | mm | 2.2 |
| (実験値) | mm | 5.2 |

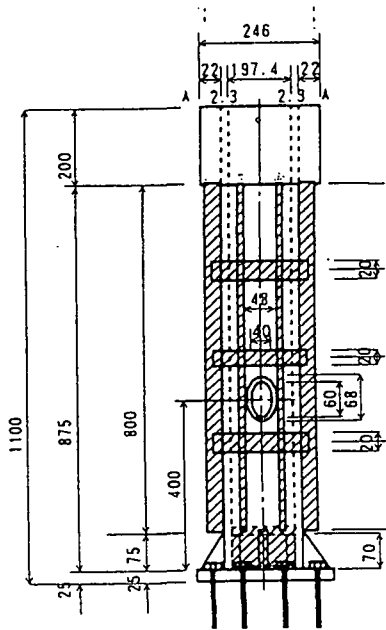
$$R_R = (1/\pi) * (12 * (1 - \mu^2) / k_R)^{1/2} * (F/E)^{1/2} * b/tf$$

$$\lambda = (1/\pi) * (F/E)^{1/2} * (l/r)$$

γ / γ* : 縦方向補剛材の剛比/縦方向補剛材の必要剛比



(a) マンホール無し



(b) マンホール有り

図-1 供試体概要

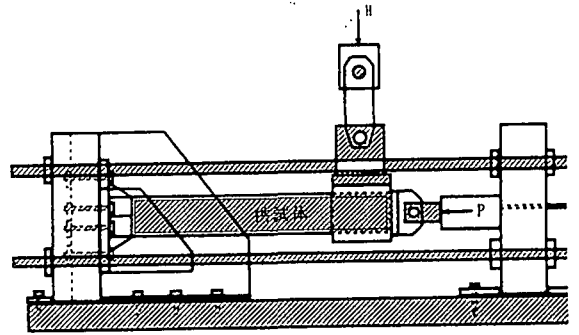


図-2 載荷装置および載荷状態

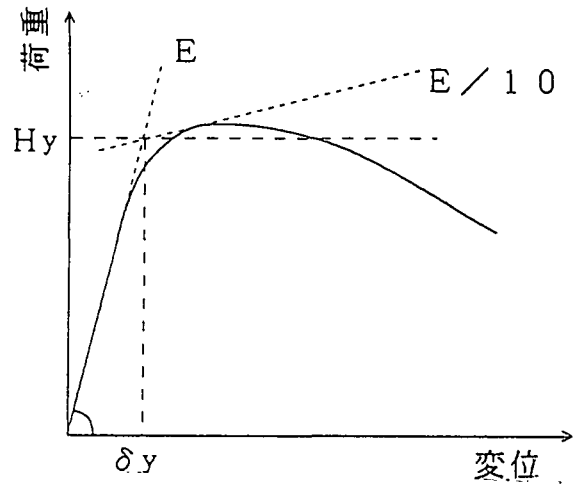


図-3 ECCS基準による H_y と δ_y の定義

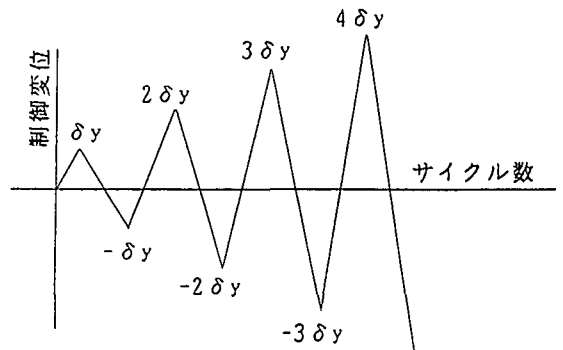


図-4 繰り返し載荷方法

荷重実験は図-2に示す実験装置で行った。供試体の一端を固定し、他端の自由端に死荷重に相当する一定軸圧縮力Pを作用させる。この状態で供試体の軸に直角方向の荷重H（水平荷重）を作用させる。荷重は変位制御で行い、単調荷重と繰り返し荷重の両者について実験した。降伏水平変位 δy は図-3に示すECCS（ヨーロッパ鋼構造協会）⁵⁾の方法で定義した。

繰り返し荷重は土木研究所によって提案された方法を用いた。つまり、図-4に示すように、降伏水平変位 δy を単位として、 $\pm 1\delta y$ 、 $\pm 2\delta y$ 、 $\pm 3\delta y$ ・・・と $1\delta y$ づつ漸増させて行き、水平荷重が充分低下するまで荷重を続ける。

3、実験結果および考察

図-5に材料の引っ張り試験結果を示す。ひずみが2%程度までは降伏棚が生じ、それ以降は初期弾性係数の1/100のひずみ硬化が生じる。

図-6に単調荷重試験結果を示す。図の横座標は図-1に示す供試体の最下端より800mmの位置の水平方向変位 δ を採り、縦座標は荷重点の水平荷重Hを採っている。荷重の最大値は水平変位が $\delta/\delta y = 1.5$ ないし2.0の位置で生じ、その大きさ $H_{max} = 1.1$ ないし1.4であった。図に示すように、マンホール無しの場合のほうがマンホールありの場合より最大荷重が小さくなっている。この原因は供試体製作上の不整が主な原因で局部座屈が早期に発生したものと考えられる。写真-1に局部座屈形状を示す。断面の圧縮側が外側に凸状に変形している。

図-7と図-8にマンホール無しと有りの場合の繰り返し荷重の結果を示す。繰り返し荷重は5サイクル行った。両者共2サイクル目で最大荷重に達し、その後単調荷重の場合に比較して著しい荷重低下を示した。

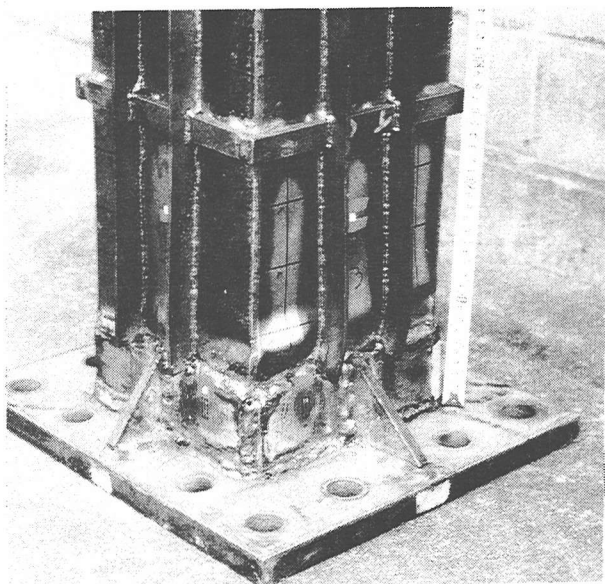


写真-1 局部座屈形状

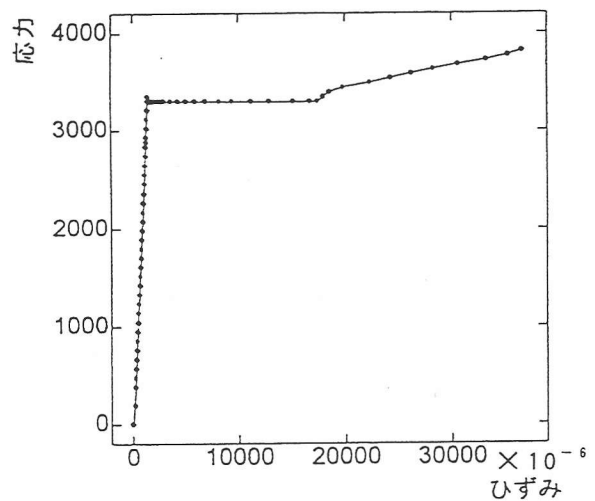


図-5 材料の引っ張り試験結果

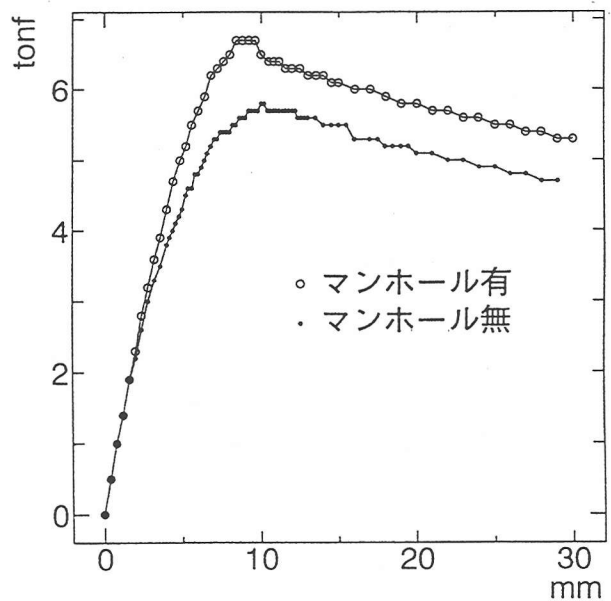


図-6 単調荷重 荷重-変位曲線

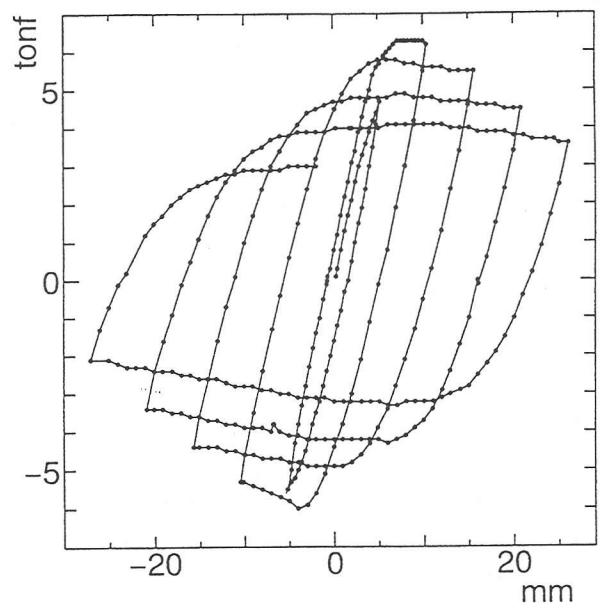


図-7 マンホール無し 荷重-変位曲線

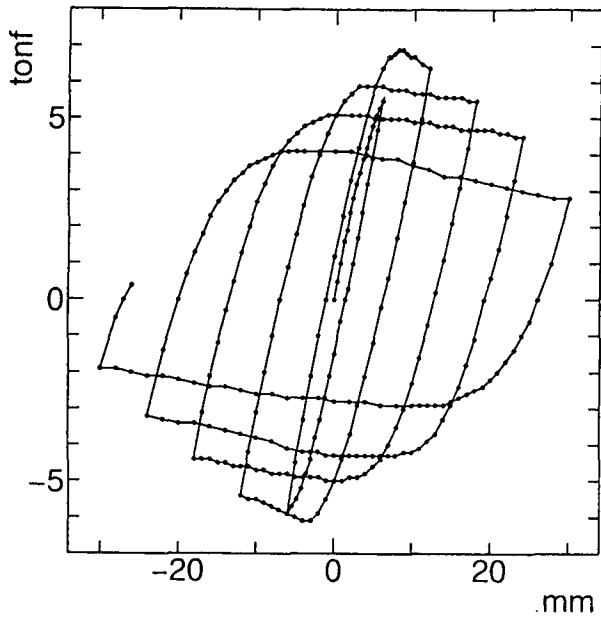


図-8 マンホール有り荷重-変位曲線

4. 解析結果および考察

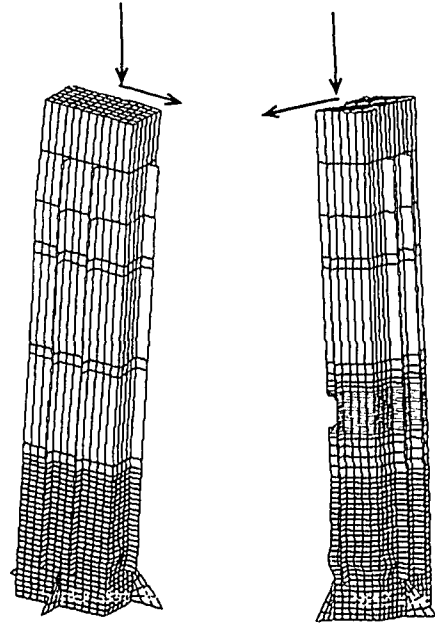
実験と同じ条件で数値解析を行った。解析は汎用構造解析プログラムMARCを用い、von misesの降伏条件と移動硬化則を適用して、弾塑性有限変位解析を行った。四節点厚肉板要素を用い、対称性を利用して矩形断面の1/2について解析した。まず、単調荷重についての解析を図-9に示す要素分割で行った。マンホール無しの場合(図-9(a))は要素数1128、節点数1180である。マンホール有りの場合(図-9(b))は要素数1782、節点数1856である。両者の荷重-変位曲線は全く一致したので、繰り返し荷重については、マンホール無しの場合についてのみ解析した。なお図-9は座屈時の変形状態も合わせて示している。基部に鋼板の外側に凸状の局部座局が見られる。これは写真-1に示す変形と同じである。

解析の精度を検証するため、座屈部分の要素分割数を増加させて要素数1480で解析した結果を比較したが、荷重-変位曲線はほとんど一致したため、要素分割は図-9(a)に示すもので行った。図-10にマンホール無しの場合の単調荷重と繰り返し荷重の解析結果を示す。単調荷重の荷重-変位曲線と比較して繰り返し荷重のそのほうが荷重低下が著しいことが分かる。

図-11に実験結果と解析結果をまとめて比較した。この図には単調荷重と繰り返し荷重の包絡線の荷重-変位曲線をまとめて示した。図より荷重-変位曲線において、最大荷重に達した後の荷重低下は、実験と解析共に繰り返し荷重の場合のほうが著しいことが分かる。

ダクティリティ性能の評価方法の一つとして、最大荷重に達した後の荷重低下率で表す方法がある¹⁾。図-12に示す荷重-変位曲線を用いてここで用いたダクテ

ィリティの評価方法を説明する。 H_y 、 δy を初期降伏状態の荷重と変位、 H_u と δu を終局強度状態の荷重と変位、 $\delta y'$ を劣化限界状態の変位と定義する。ダクテ



(a) マンホール無し (b) マンホール有り

図-9 要素分割と変形状態

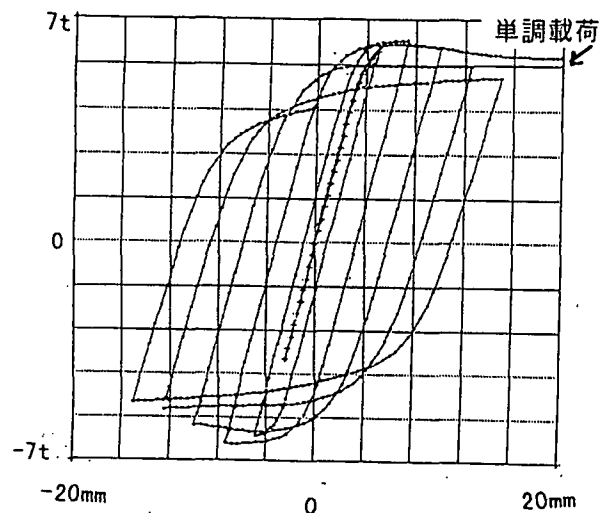


図-10 解析による荷重-変位曲線

イリティ性能を表す評価係数を I とし、

$$I = (H_u - H_y) / (\delta y' - \delta y)$$

と定義する。この定義式より得られる勾配 I はその値が大きい程ダクティリティ性能が小さいことを意味する。

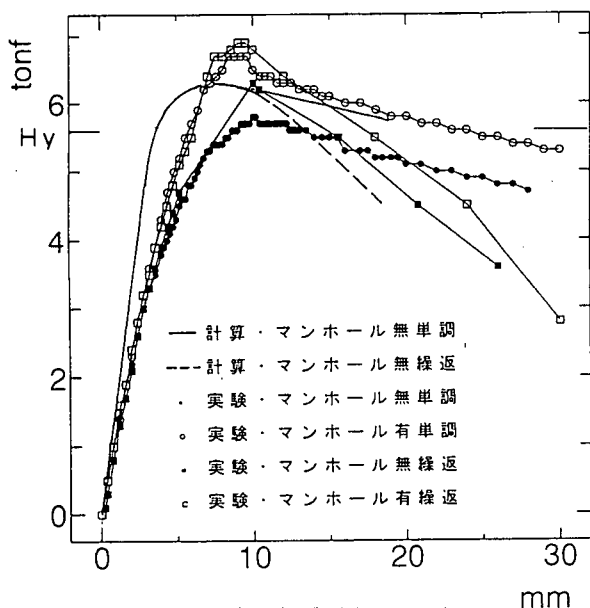


図-1.1 単調荷重および

繰返し荷重の包絡線の荷重-変位曲線

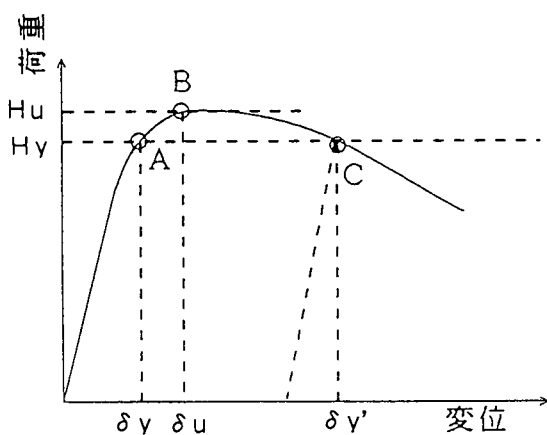


図-1.2 ダクティリティー性能の評価

表-2 ダクティリティー評価係数 I / I_0

| ダクティリティー評価係数 | | |
|--------------|------|------|
| | 単調 | 繰返 |
| 計算・マンホール無 | 1.00 | 2.73 |
| 実験・マンホール無 | 1.41 | 3.57 |
| 実験・マンホール有 | 1.60 | 3.57 |

図-1.1に示す荷重-変位曲線より得られる評価係数は表-2のようにになる。ただし、この表における値はマンホール無し、単調荷重の I_0 の値で除してそれとの相対的比率で表わしてある。この表より、単調荷重に比較して繰返し荷重のダクティリティ性能は2倍以上低下することがわかる。

5、まとめ

水平荷重が作用する角形断面鋼製橋脚について、そのダクティリティ性能を実験のおよび数値解析的に検討し、以下に示す結論を得た。

(1) 表-2に示すダクティリティ評価係数 I / I_0 で比較すると、繰返し荷重のそれは単調荷重の場合に比較して、約2倍大きくなり、この程度繰返し荷重の方がダクティリティ性能が低下することを表す。

(2) マンホール有りとなしの結果を比較すると、数値解析においては両者の荷重-変位曲線に差は見られなかった。実験においても、この影響があることを示す結果は得られていない。従って、本実験のように設置されたマンホールは橋脚の強度とダクティリティに全く影響を及ぼさない。

(3) 表-2に示すダクティリティ評価係数の実験結果と数値解析結果を比較すると単調荷重では実験値の方が最大で6.0%大きく繰返し荷重の場合はそれが3.1%大きい。この差は実験供試体には初期ひずみや残留応力あるいは固定端の不完全性等の初期不整が存在し、数値解析ではそれらが考慮されていないためと考えられる。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、供試体製作にあたり、瀧上工業株式会社のご協力を頂いた。ここに記した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(一般研究(c))で行った。

参考文献

- 1) 三上・辻・中野・竹原：円周方向内圧縮力を受ける円筒パネルのダクティリティと幅厚比、構造工学論文集 Vol. 39A pp37-50 (1993年3月)
- 2) 水谷・宇佐美・青木・伊藤・岡本：パイプ断面鋼圧縮部材の繰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 pp105-114 (1996年3月)
- 3) 西川・山本・名取・寺尾・安波・岡本：既成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 pp975-985 (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-Structural Safety and Loadings Technical Working Group1.3-Seismic Design, 1986 (1997年3月31日受付)

Ductility of Box Sectional Steel Piers

Takamasa SAKURAI, Kazuo CHU, Shuji THUZUKI and Yoshiaki GOTHO

A Property of ductility for box sectional steel 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 analyses are carried out. The result is that efficiency of ductility under cyclic bending is considerable lower than that of ductylity under monotonous bending.