

変断面を有する既設円筒鋼製橋脚の 靱性向上の為の補強法

櫻井 孝昌* 忠 和男**

* 工博 豊田工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1)

** 工修 豊田工業高等専門学校助教授 同上

変断面で構成されている既設円筒鋼製橋脚の補強法について数値解析的に研究した。補強の目的は補強によって橋脚の水平耐荷力の増加を押さえ、靱性を向上させることにある。本研究では鋼板貼り付けによる「ヒューズ構造」を用い、局部座屈発生位置を橋脚基部に特定した。その結果、先に述べた補強の目的を実現できた。

Key Words: Cylindrical steel pier, Different section, Reinforcement method, Nonlinear analysis

1. はじめに

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災において、多くの鋼製橋脚が局部座屈による損傷を受けたため、それらの構造物の耐震基準の見直しが行われた¹⁾。

本報告では橋脚中央部の断面変化部で局部座屈が生じた阪神高速道路神戸線「P584」を解析モデルとして、橋脚の水平荷重に対する靱性向上を目的とする補強法について数値解析的に研究した。補強の条件として、橋脚の破壊時にその基礎部の破壊を保護するため、補強後の橋脚の水平耐荷力の増加を一定限度内に押さえ、靱性を向上させることが求められている。本研究ではこれを実現するため局部座屈の発生位置を特定し、座屈発生後にその進展を押さえ、靱性を向上させる「ヒューズ構造」を用いる補強法を提案する。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

本解析では表-1に示す阪神高速道路神戸線「P584」を解析モデルとした。鋼材の応力-ひずみ関係は弾性域と加工硬化域を経てひずみが20%に達した後はひずみ勾配をゼロとする3直線モデルを用いた。数値解析は汎用構造解析プログラムMSC.Marcを用い、有限要素法により移動硬化則に基づいて弾塑性有限変位解析を行った。

載荷条件は図-1に示すように、死荷重に相当する荷重として橋脚上部に降伏軸力の15%(P)を一定に作用させ、水平方向には地震力に相当する水平荷重(H)を作用させた。Hは単調および繰り返しの両者が作用する場合について解析した。

図-1に橋脚の諸元と使用材料を示す。さらにコンクリ

表-1 橋脚の諸元と材料特性

強脚高さ:	$H=15663$ mm
半径(板厚中心まで):	$r=1086$ mm
ヤング率:	$E=2.06 \times 10^6$ N/mm ²
加工硬化係数:	$E_{st}=E/100$
ポアソン比:	$\nu=0.3$
降伏応力:	$\sigma_{yI}=274$ N/mm ² $\sigma_{yII}=235$ N/mm ² $\sigma_{yIII}=274$ N/mm ²
降伏水平荷重:	$H_y=1.87 \times 10^6$ N
降伏水平変位:	$\delta_y=78.61$ mm
降伏軸力:	$P_y=3.44 \times 10^7$ N
径厚比パラメータ:	$Rt_I=0.098$ $Rt_{II}=0.073$ $Rt_{III}=0.087$

ここに σ_{yI} はI部分の降伏応力、

Rt_I はI部分の径厚比パラメータ

ート充填部はその断面積の1/10を鋼の断面積として鋼に換算した。図中に示すIの位置は橋脚中央部の板厚変化部、IIは材料の降伏応力変化部、IIIはコンクリート充填部のそれぞれ境界を示す。さらに左端の図は作用荷重Hが降伏水平荷重 H_y である場合の橋脚の縁応力および抵抗応力の分布を示す。IとIIの部分では縁応力が同時に降伏応力に達することを示している。

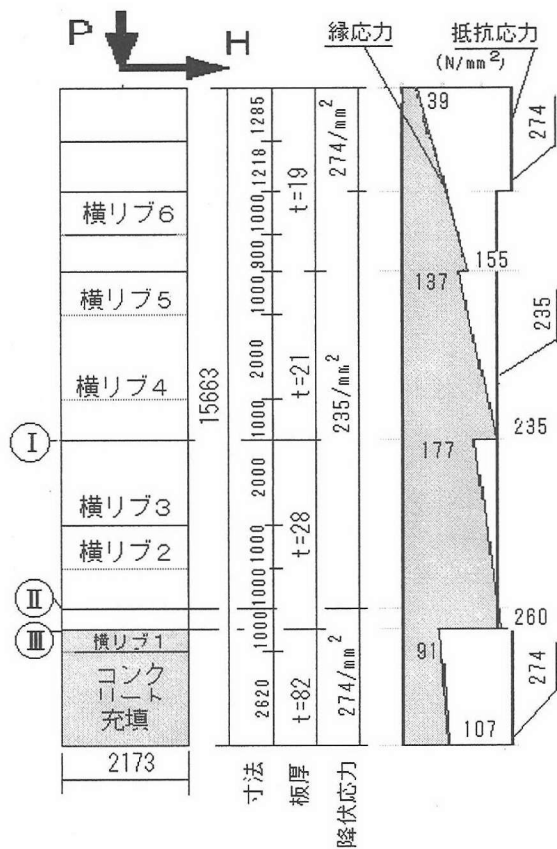


図-1 橋脚の諸元と設計縁応力

2.2 補強法

前述したように、この橋脚は阪神・淡路大震災において、橋脚中央部の断面変化部（図-1のⅠの部分）において局部座屈が生じた。一般に橋脚中央部で局部座屈が生じる場合は橋脚基部で座屈が生じる場合よりも靱性が小さくなることが知られている。そこで、図-2に示すようにⅠの部分には座屈を生じさせないように鋼管と同じ板厚の厚さ21mmの矩形鋼板を張り付けて補強する。そして橋脚下部のⅡの部分には、ここで座屈を起こさせるようヒューズ構造を用いて厚さ28mmの鋼板を貼り付け補強する。さらにその貼り付けた鋼板部の座屈を発生させる位置に鋼板を貼り付けない部分を設け、この部分の幅をヒューズ部と呼ぶ。構造物に弱い部分を設け、耐荷力の増加を押しやっている手法は文献2,3)でも研究されている。橋脚基部の補強法として、ヒューズ幅の違ったTypeA, TypeB, TypeC およびヒューズ幅を設けないType0を選んだ。この補強をするために貼り付けた鋼板の円周方向の長さは円周長の1/12とし、鋼板は円周上の4箇所張り付けた。また、橋脚最下部からヒューズ部中央までの長さは $LA=3560\text{mm}$ 、TypeAのヒューズ部の長さは $w=460\text{mm}$ とした。 LA は無補強の場合に生じた基部の局部座屈の位置および w は、局部座屈の1波長分を選んだ。

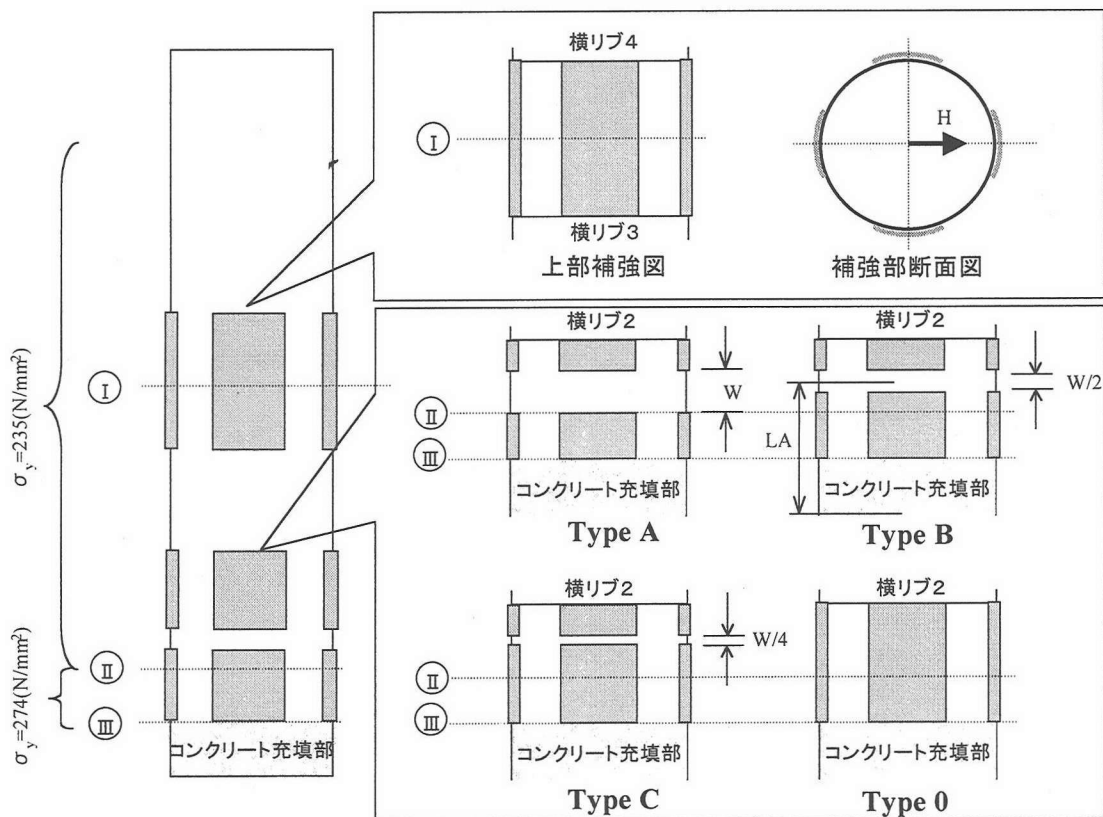


図-2 補強位置

3. 解析結果と考察

3.1 要素分割と解の誤差

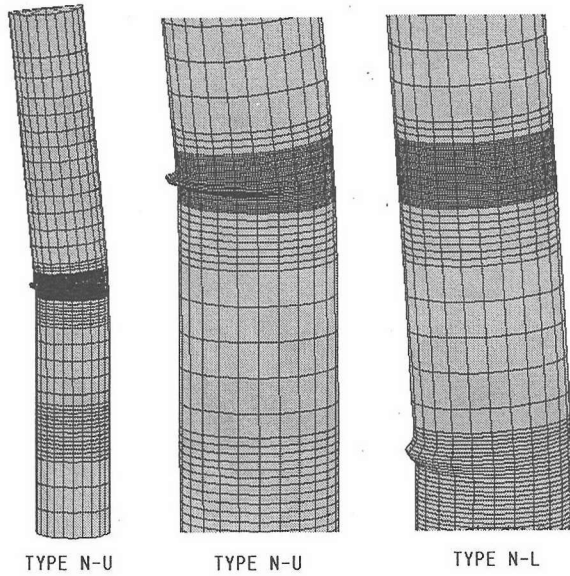


図-3 無補強橋脚の変形図

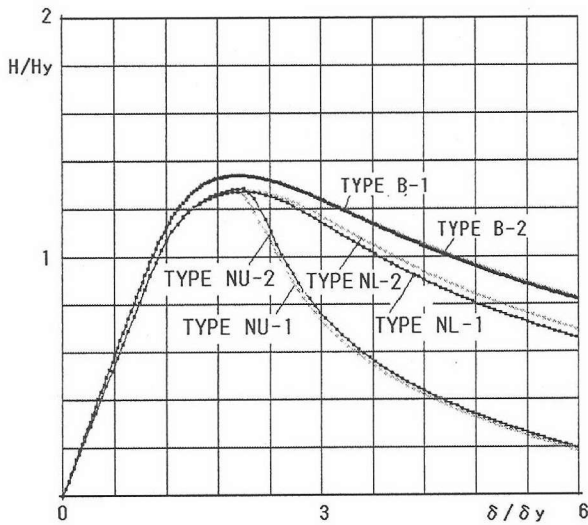


図-4 要素分割と解の誤差

適正な要素分割状態を定めるため、要素分割状態と解の精度について検討した。要素分割の影響は局部座屈部の要素分割によって影響される。図-3は無補強の場合の要素分割と局部座屈の変形状態を示す。Type NUは上部座屈の場合、Type NLは基部座屈の場合を表す。解の精度の比較はType NU, NL, Bの場合について、局部座屈部の分割要素数をそれぞれ2種類変えて計算結果を比較した。表-2に局部座屈部の分割条件を示した。表の記号については

δ : 象脚型座屈変形が発生する円筒殻の軸方向範囲
 $\delta = 3.0\sqrt{rt}$ m ここに r:円筒の半径(m), t : 円筒厚(m)ここで対象としている円筒のIとIIの部分の δ は
 $\delta I = 453\text{mm}$ 、 $\delta II = 523\text{mm}$ である。

表-2 要素分割と解の精度

Type	円周の分割数	$\Delta h / \Delta$	$\Delta s / \Delta h$	塑性率の誤差
NU-1	24	0.42	7.7	-1.70%
NU-2	72	0.42	2.6	
NL-1	24	0.36	4.6	-2.00%
NL-2	48	0.18	7.5	
B-1	48	0.13	10.2	0.00%
B-2	98	0.13	5.1	

中村等,文献4)は軸方向の要素分割として、この δ の間を5分割以上とするのが望ましいとしている。文献5)でこれらを検証している。表-2では

$$\Delta = \delta / 5,$$

Δh = 座屈部1要素の軸方向長さ

Δs = 座屈部1要素の円周方向長さ

と定義してTypeごとに表した。

NU-2はNU-1を3倍に分割し、NL-2はNL-1を4倍にB-2はB-1を2倍に分割した。 $\Delta / \Delta h$ の値は1以下であれば良いので本解析では分割は充分細かくしている。

表の塑性率の誤差は後述する塑性率の誤差を比較した。例えばNU-1とNU-2の誤差は

$$\text{NU-1の誤差} = (\text{NU-2} - \text{NU-1}) / \text{NU-2}$$

と定義した値である。3種類のTypeとも誤差が2%以内であるので、数値計算には要素分割数の少ない各Type-1を用いた。図-4にこれらの解の結果を荷重-変位曲線で示す。ここに、縦軸は橋脚上端部の水平荷重Hを降伏水平荷重Hyで除し、横軸は同じ位置の水平変位を降伏水平変位で除して無次元化してある。以下の章に現れる荷重-変位曲線も同様に無次元化して表す。

3.2 解析結果

解析は単調荷重と繰り返し荷重の両者について行った。繰り返し荷重は橋脚上端部の水平変位を $\pm 1\delta y, \pm 2\delta y, \dots, \pm 5\delta y$ まで順次交番荷重した。図-5に単調荷重の結果を示す。無補強の場合は図-1のIの断面変化部で座屈する場合(Type NU)と橋脚基部のIIの部分で座屈する場合がある。それぞれの座屈形状は図-3に示してある。先の地震時にはType NUの座屈が生じたが図-5に示すように、Type NUはType NLに比べて座屈後の荷重低下が著しく、靱性が小さくなる。従って補強は橋脚基部で座屈を生じさせるように行うのがよい。図に示すようにヒューズ幅がゼロのType 0の場合は水平最大荷重(Hmax)が無補強の場合に比較して1.34倍に増加して

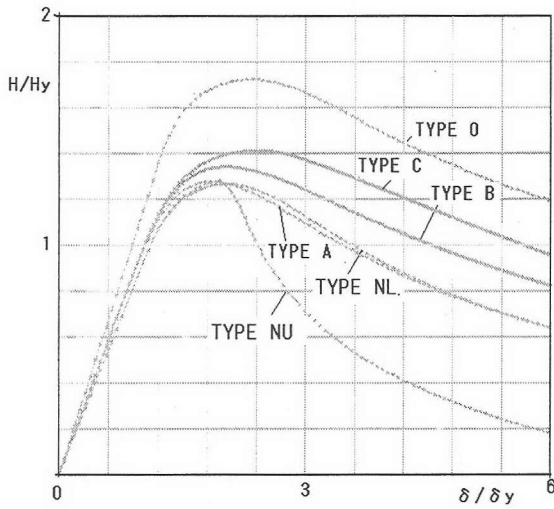
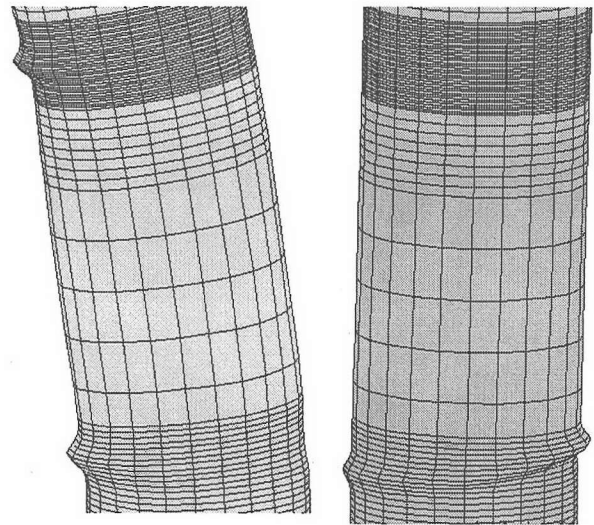


図-5 単調載荷 荷重-変位曲線



TYPE N-L

図-7 無補強(NL)の初期座屈(左)と終局座屈(右)

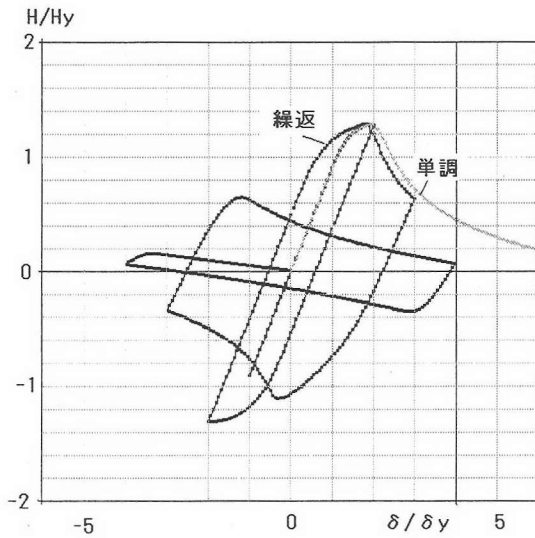


図-6 無補強 (NU) 荷重-変位曲線

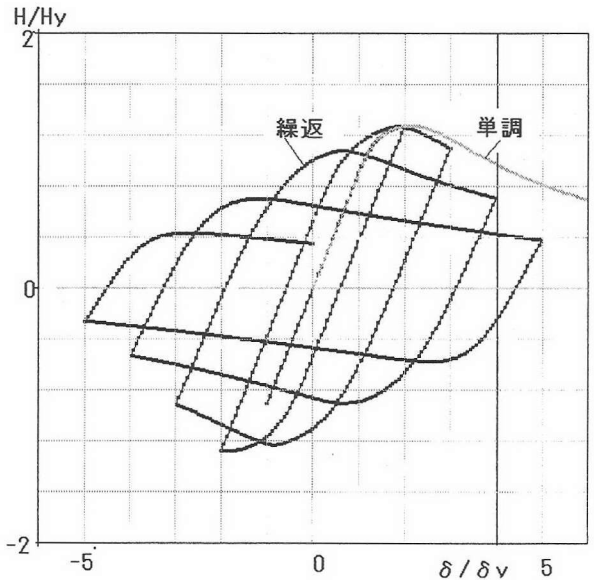
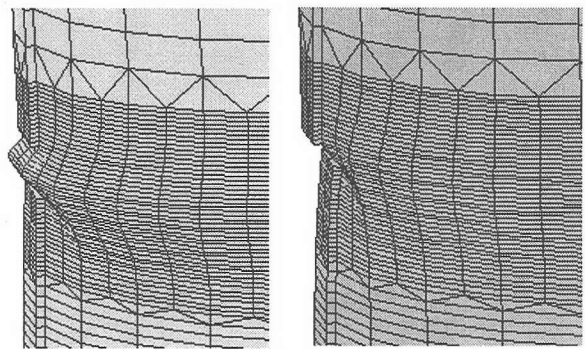


図-8 無補強(NL) 荷重-変位曲線

おり、ヒューズ幅を設けることによりこの荷重の増加が Type C においては 1.1 倍に押さえられることが分かる。

図-6 は Type NU の単調載荷と繰り返し載荷の結果である。図-7 は Type NL の変形図である。図の左側が初期座屈形状で右側が 5 サイクル目の座屈形状である。初期座屈では橋脚の断面変化部 (I の部分) と基部 (II の部分) に同時に局部座屈が生じるが、繰り返し載荷が進むに従って座屈が基部に局所化される。図-8 に Type NL の荷重-変位曲線を示す。図-9 に Type B と C の座屈形状を示す。Type B の場合は象脚型座屈であるのに対し、Type C では補強部が凹み隣接部分が膨らむ形状となる。円周断面全体では星形状となる。

図-10 は繰り返し載荷の場合の包絡線を示す。表-2 に靱性の程度を表す係数として塑性率 μ を示した。 μ は文献 1) の基準に従って $\mu = \delta 90 / \delta y$ と定義する。ここに、 $\delta 90$ は Hmax 到達後荷重が 90% に低下したと



TYPE B

TYPE C

図-9 座屈部 Type B と C の変形 (単調)

表-3 塑性率

Type	塑性率 $\mu (\delta 90 / \delta y)$		Hmax/Hy	
	単調載荷	繰り返し載荷	単調載荷	繰り返し載荷
NU(無補強)	2.21(1.00)	2.19(1.00)	1.28(1.00)	1.28(1.00)
NL(無補強)	3.06(1.38)	2.75(1.26)	1.28(1.00)	1.27(0.99)
TypeA	2.68(1.21)	2.45(1.12)	1.28(1.00)	1.28(1.00)
TypeB	3.67(1.66)	3.06(1.40)	1.34(1.05)	1.34(1.05)
TypeC	3.77(1.71)	3.24(1.48)	1.42(1.11)	1.39(1.09)
Type0	3.65(1.65)	3.35(1.53)	1.72(1.34)	1.71(1.34)

()内は無補強を1としたときの比

きの水平変位を表す。無補強の場合の μ に対してヒューズ幅を小さくするに従って μ の値が増加しており、補強の効果が現れている。Hmax の増加は無補強の場合に比較して Type 0 の場合で 34% 増加しているのに対し、Type A, B, C の場合ではほぼ 10% 以内に留まっている。これはヒューズを設けたことによる効果である。文献 1) では Hmax/Hy の値を 1.4 以下に押さえ μ を 3.7 以上にすることを推奨している。本研究の方法では単調載荷についてはほぼこの条件を満足している。繰り返し載荷については μ の向上がやや不足している。この点はヒューズ幅や補強鋼板の板厚を調整することで解決できるものと考えられる。

4. 結論

既設円筒鋼製橋脚の補強法について解析的に研究した。補強の目的は Hmax/Hy の値を 1.4 以下に押さえ、靱性の向上を計ることである。この目的を達成するため、鋼板張り付けによる方法を選び、局部座屈発生位置には鋼板を張り付けないで「ヒューズ構造」を用いた。

- 1) 適正な解析結果を得るため、要素分割数と解の精度について検証した。その結果表-2 に示す各 type-1 のシリーズを用いればよいことが分かった。
- 2) 無補強の場合の局部座屈モードは橋脚中間部の断面変化部 (Type NU) と橋脚基部 (Type NL) に生じる。最大水平荷重 (Hmax) は両者とも同じであるが、靱性は橋脚基部の部分で座屈が生じる場合のほうが大きい。従って、補強に当たっては橋脚基部で座屈が生じるように補強した。
- 3) 補強に当たっては、無補強の橋脚基部に発生する座屈箇所に補強後も座屈が発生するように補強を施し、最大水平荷重の増加を押さえた。補強 Type としてヒューズ幅を 4 種類に変えたものを選んだ。
- 4) ヒューズ幅を設けない場合は繰り返し載荷に対して Hmax/Hy の値が 1.71 と過大になり、塑性率は 3.35 となり Type C とあまり変わらない。

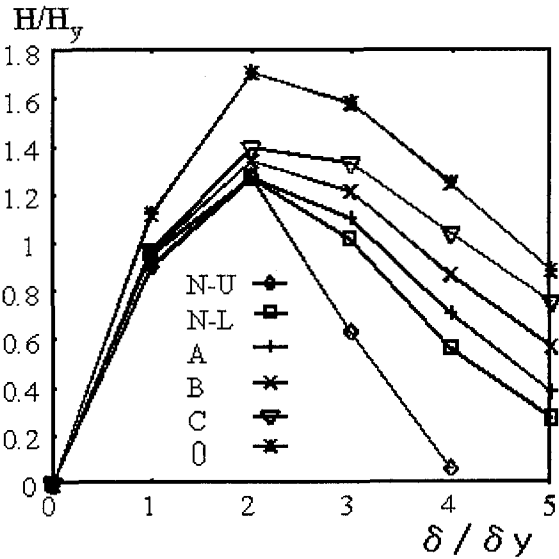


図-10 繰り返し載荷の包絡線

- 5) 今回の補強法の中で、Type C (ヒューズ幅 $w/4$) の場合が繰り返し載荷に対して Hmax/Hy の値を 1.4 以下に押さえ、塑性率を 48% 増加させることができた。これはヒューズ構造の効果によるものであると考えられる。
- 6) ヒューズ構造による補強によって Hmax の増加を押さえ、靱性の向上を実現できることが検証できた。

参考文献

- 1) 都高速道路公団：既設鋼製橋脚の耐震性向上設計要覧 (暫定案), 1996.
- 2) ヒューズ構造を用いた既設円筒鋼製橋脚の補強法に関する靱性向上の為の補強法, 豊田工業高等専門学校研究紀要, Vol.32, pp.71-82
- 3) 松村政秀, 北田俊行, 澤登善誠, 中原嘉郎：無充填区間を有するコンクリート充填工法による既設鋼製橋脚の耐震補強法に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.47a, pp.33-44, 2001.3.
- 4) 中村秀治：円筒殻の弾塑性座屈解析, 土木学会構造工学委員会 構造工学震災調査特別小委員会, WG2 資料, 1995

**A REINFORCEMENT METHOD FOR IMPROVEMENT
OF DUCTILITY IN EXISTING CYLINDRICAL STEEL
PIERS WITH DIFFERENT SECTIONS
OSAKA,JAPAN,11-12,JANUARY,2002**

Takamasa Sakurai and Kazuo Chu

The purpose of reinforcement in existing piers is for improvement of ductility of piers. On the other hand the increase of ultimate horizontal load needs to be kept in the degree of 10%. For the reinforcement system "Fuse Structure" with rectangular steel plates is used and the purpose is realized by the structure.