

二重円筒鋼製橋脚による延性向上策の検討

中沢 正利*・目黒 誠**・岩熊 哲夫***

* 正会員 工博 東北大学大学院工学研究科 助教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

** 学生員 学士(工学) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 Ph.D. 東北大学大学院工学研究科 教授

延性向上策として二重管構造を考え、内円筒で上載荷重を支えたまま、水平方向の変形能については外円筒の塑性変形によるエネルギー吸収を期待するモデルについて検討した。その結果、中空二重円筒モデルでは、外円筒の局部変形が発生するとやはり内円筒もその直後に局部変形を起こし、延性の改善はあまり期待できないことが判明した。

しかし、局部変形を抑制するために内円筒と外円筒の間にコンクリートを充填した場合には、延性の大幅な向上が見られ、比較的薄い充填厚でも局部変形の防止効果が得られ、延性をコントロールできる可能性を示唆した。

Key Words : *Steel bridge pier, Twofold cylindrical shell, Energy absorption, Improvement of ductility, Localized deformation*

1. はじめに

兵庫県南部地震では多くの土木構造物の被害が認められた。鋼製橋脚もその例外ではなく、円筒のある部分が周方向に外側へと膨らむ提灯座屈などの損傷例は記憶に新しい。このように、まれに起こる強震により予想を上回る外力が加わって橋脚が損傷を受けることは事実上避けられないため、損傷を受けてもすぐには倒壊に至らないための構造的延性が要求される。この様な震災における教訓を踏まえて、新耐震設計基準¹⁾では橋脚の延性を向上させるための方策として径厚比や補剛材剛比などのパラメータの見直し^{2)~4)}、さらに中詰めコンクリートの実施・促進⁵⁾などが推奨されている。

しかし、単独柱の場合はその静定な構造上の理由により、橋脚に局部座屈等の変形が生じてしまうとその部分に応力が集中し、変形が助長されて耐荷力の維持はほとんど期待できない。また、コンクリートを充填することにより延性が向上することが認められているが、同時に剛度も上昇するため基礎への負担が大きくなる。

一方、鋼構造の発展を考えると、比較的大きな変形に対しても破断せず、塑性変形の際にエネルギーを吸収する鋼材の特性をできるだけ有効に活用したい。そこで、本研究ではパラレルシステムとしての二重鋼管構造を考える。すなわち、内円筒で上載荷重に対する強度を保ったまま、水平方向の変形能については外円筒の局部変形および塑性変形によるエネルギー吸収を期待するという延性向上策について検討する。ここでは構造解析プログラム MARC⁶⁾を用いた弾塑性有限変位解析を行い、この

二重円筒鋼製橋脚の最大耐荷力以降の耐荷性能およびエネルギー吸収能についての特性を数値的に調べるものとする。また、局部変形の発生・拡大を抑制するために外円筒と内円筒の間にコンクリートを充填したモデルを考え、耐荷力と変形能に対するコンクリートの充填効果についても検討した。

2. 弾塑性有限変位解析

実橋脚を参考としてここで提案する二重円筒片持ち柱を図-1に、その断面を図-2に示す。また、そのメッシュ分割を図-3に示す。外円筒と内円筒は曲げを受けたときに一体となって働くようにダイヤフラムでつなぐ。

橋脚上端で水平方向に載荷したとき、曲げによって生じる応力は下方ほど大きく、断面が一定のときは橋脚基部が局部変形を起こすので、基部を二重管にして局部変形によるエネルギー吸収を期待する。しかし、断面変化部には応力集中が発生するため、断面変化部を曲げ応力が小さくなる必要高さの位置に設定するものとする。ここでは、二重管部の高さに余裕を持たせて、橋脚中間上部で二重管から単円筒へ移行させる構造を考える。

まず、内円筒は半径 $R=700\text{mm}$ 、板厚 $t=20\text{mm}$ と一定とし、径厚比パラメータ $R_t (= \frac{R\sigma_y}{tE} \sqrt{3(1-\nu^2)}) = 0.092$ 程度で、上載荷重に十分抵抗できる断面である。この外側の外円筒の半径(内外半径差) および肉厚をパラメータとすることにより、二重円筒構造の水平耐力を検討する。外円筒の半径 R を 900mm に固定し、厚さ t を

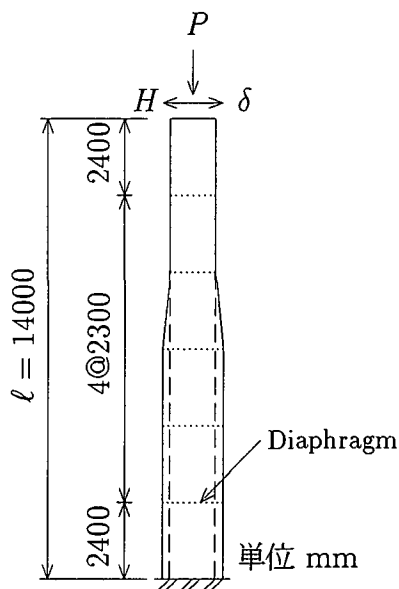


図-1 二重円筒モデル

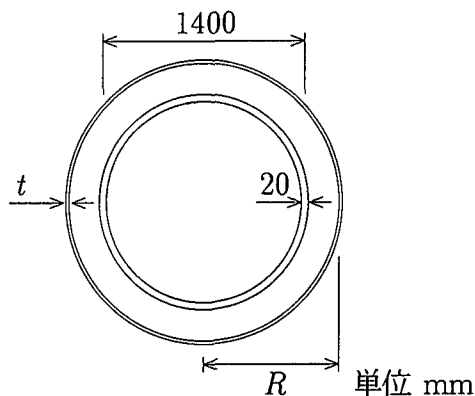


図-2 二重円筒構造の断面形 (柱の下部)

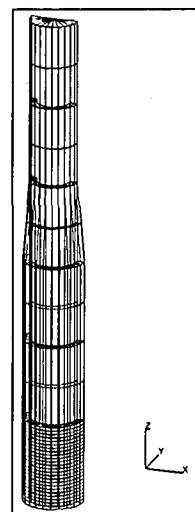


図-3 要素分割 (半解析、二重円筒)、
節点数:937、要素数:900

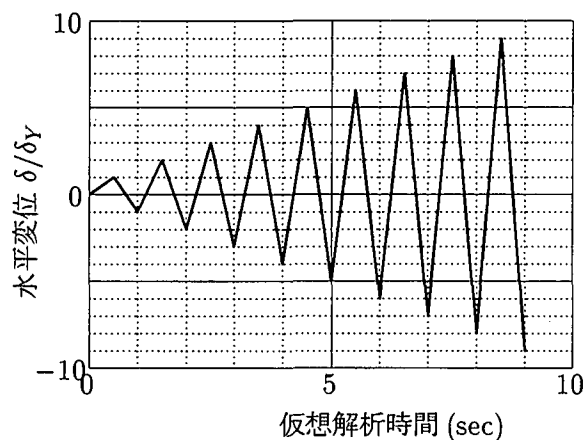


図-4 静的強制作用水平変位の履歴

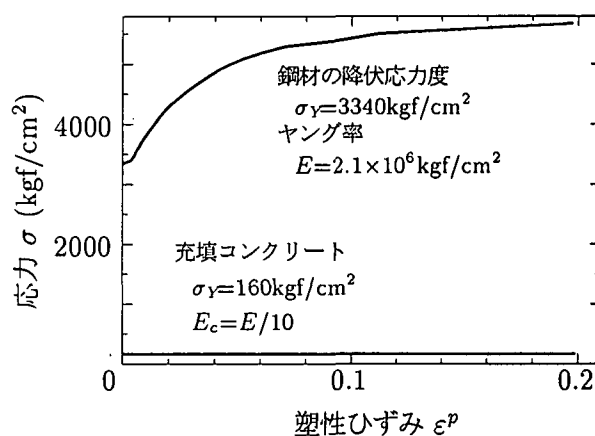


図-5 鋼材およびコンクリートの応力-ひずみ関係

8, 12, 16mm と変化させた場合と、 $t=8\text{mm}$ と固定し $R=700, 800, 900\text{mm}$ と変えた場合について、荷重-変位関係とエネルギー吸収能をそれぞれ比較する。各モデルの構造諸元を表-1に示す。

上部構造の重量を想定した一定鉛直荷重 P (内円筒降伏軸力の 15%) の下で繰り返し水平変位 δ を図-4のように $1\delta_Y$ ずつ漸増載荷した。材料の応力-ひずみ関係は、震災を受けた阪神高速の橋脚に用いられている鋼材 SM50A の引張り試験の結果である図-5を採用し、現実的な材料特性を考慮した。

橋脚モデルは四辺形厚肉線形シェル要素 (MARC 要素ライブラリ 75 番) を用いて作成し、モデルの対称性を考慮して半解析を行なった。幾何学的非線形性は update Lagrangian 手法により考慮し、弾塑性判定は von Mises の降伏条件、塑性域では移動硬化則を採用した。

水平荷重-水平変位関係は縦軸に無次元化荷重 H/H_Y

表-1 各モデルの構造諸元

R (cm)	t (cm)	A (cm^2)	I (cm^4)	H_Y (kgf)	δ_Y (cm)	E_e (kgf·cm)
80	0.8	1282	3351263	89647	11.65	522194
90	0.8	1332	3839131	91683	10.40	476752
100	0.8	1382	4433408	95668	9.40	449640
90	1.2	1558	4634762	112450	10.57	594298
90	1.6	1784	5401864	132600	10.69	708747

を、横軸に無次元化変位 δ/δ_Y をとって整理する。ここで、 H_Y 、 δ_Y は基部外円筒の縁応力が降伏に達するときの水平荷重、水平変位であり、

$$H_Y = \frac{\sigma_Y - P/A}{\ell} \frac{I}{R}, \quad \delta_Y = \frac{H_Y \ell^3}{3EI}$$

と表わせる。ここで σ_Y は材料の降伏応力度、 A は橋脚

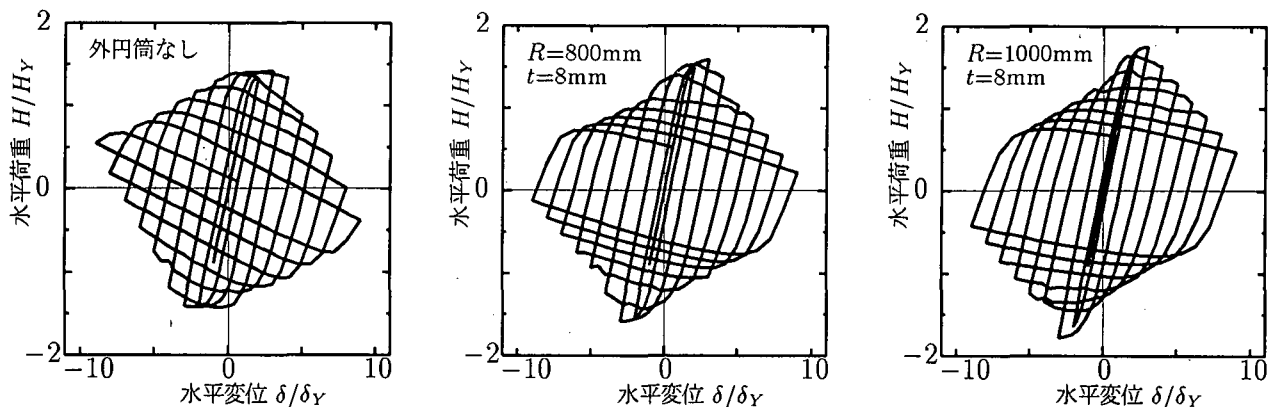


図-6 水平荷重－水平変位履歴曲線 (外円筒半径を変化させた場合の比較)

基部断面積、 E はヤング率、 I は二重円筒断面を一定断面柱に換算したときの断面二次モーメントである。

エネルギー吸収量に関しては、荷重－変位履歴曲線で囲まれる 1 サイクルの面積に相当するエネルギーを、初期降伏時までの三角形の面積 $E_e = H_Y \delta_Y / 2$ で無次元化した比で評価する。

また、この種の解析では、円筒固定端近傍での局部座屈が挙動に大きく影響を及ぼすことが知られているので、妥当な解を得るために必要な要素分割数の検討を内円筒のみのモデルに対して行なった。固定端から最下部のダイヤフラムまでの部分 (全長の約 1/6) を下部、それより上を上部としたとき、半円筒の周方向分割数を 12、軸方向には上部分割数を 10 とし、下部分割数が 12・16・24・30 の 4 通りについて比較した。その結果より、24 分割で妥当な解が得られると判断した。

表-2 各モデルの耐荷力の比較

R (cm)	t (cm)	$H_{\max}$ (kgf)	$H_{\max}/H_Y$	r (cm)
80	0.8	141854	1.582	51.13
90	0.8	154428	1.684	53.68
100	0.8	166833	1.744	56.64
90	1.2	189605	1.686	54.54
90	1.6	224245	1.691	55.03

(2) 水平荷重－水平変位履歴曲線および包絡線の特性

解析から得られた水平荷重－水平変位履歴曲線の、外円筒半径の違いによる比較を図-6に示す。また、それぞれの包絡線の比較を図-7、図-8に示す。

$1\delta_Y$ までの弾性領域ではどのモデルも差は無い。 $1\delta_Y$ から $3\delta_Y$ までは材料が降伏する範囲の拡大と共に水平力も大きくなる。さらに大きな変位を与えると変形が大きくなったところに応力が集中し、降伏する範囲は狭くなり、耐荷力が減少する。

外円筒厚の違いによる比較 (図-7) では、変位 $4\delta_Y$ で外円筒厚 8mm のモデルが外円筒厚 12mm, 16mm のモデルより耐荷力が低く、変位 $5\delta_Y$ 以降は外円筒厚の厚いものほど耐荷力が大きい。外円筒半径の違いによる比較 (図-8) では、半径の大きいものほど耐荷力が大きくなっているのがわかる。

耐荷力に関しては、外円筒厚の違いよりも外円筒半径の違いによる差が大きいことから、断面二次半径 $r (= \sqrt{I/A})$ の大きさによる差であると予想できる。各モデルの最大耐荷力 $H_{\max}$ 、無次元化最大耐荷力 $H_{\max}/H_Y$ 、断面二次半径を表-2に示す。これより断面二次半径が小さいものは最大耐荷力が低くなっていることがわかる。細長比が大きな柱ほど水平変位が大きくなり、 $P-\Delta$ 効果による付加的なモーメントが大きく影響するため耐荷

3. 二重円筒橋脚モデルの変形能およびエネルギー吸収能

(1) 局部変形の発生状況

外円筒半径 900mm、外円筒厚 8mm の二重円筒橋脚モデルを代表として局部変形の発生順序を示す。

橋脚上端に与える水平変位が $2\delta_Y$ の段階では、降伏領域が最下部のダイヤフラムのすぐ下まで広がっているが、局部変形は見られない。変位が $3\delta_Y$ になると、降伏領域はさらに広がり、外円筒基部に局部変形の発生が見られるようになる。変位が $4\delta_Y$ では、外円筒の局部変形が大きくなり、圧縮応力が変形部に集中し、圧縮側の降伏領域の範囲拡大が止まる。また、外円筒での耐力が期待できなくなった分だけ内円筒の負担する力が大きくなり、内円筒も局部変形を始める。さらに変位が $5\delta_Y$ になると、内円筒でも応力集中が起こり、耐荷力が減少していく。

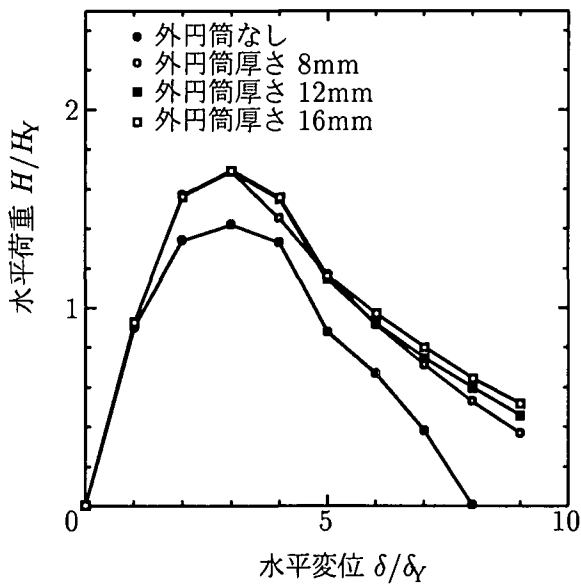


図-7 外円筒厚の違いによる包絡線の比較 (外円筒半径 = 900mm)

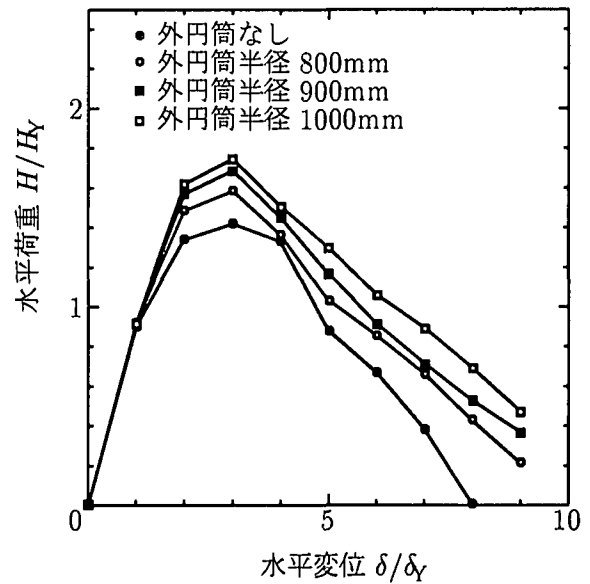


図-8 外円筒半径の違いによる包絡線の比較 (外円筒厚 = 8mm)

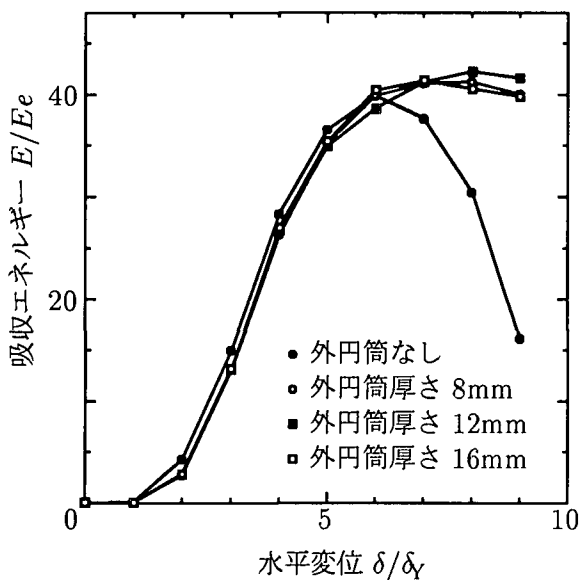


図-9 外円筒厚の違いによる吸収エネルギーの比較 (外円筒半径 = 900mm)

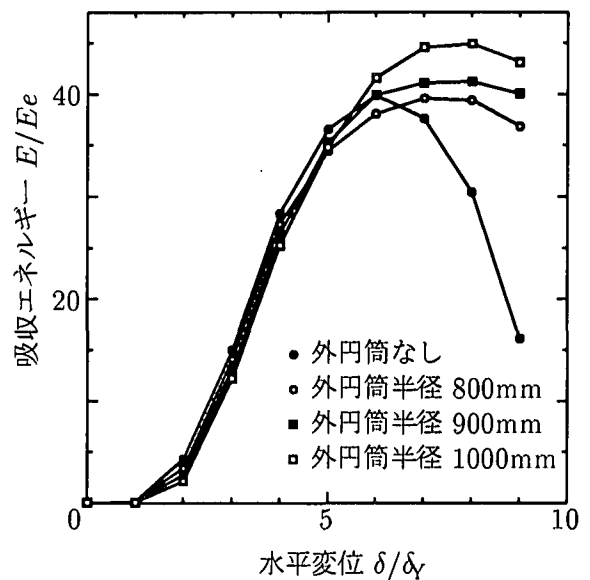


図-10 外円筒半径の違いによる吸収エネルギーの比較 (外円筒厚 = 8mm)

力が低下するものと考えられる。しかし、どのモデルも最大耐荷力後の強度低下勾配にはほとんど差が無く、大幅な延性の増加は見込めない。

(3) 吸収エネルギー

無次元化水平荷重を横軸に、各荷重サイクルごとのエネルギー吸収量を E_e で無次元化した値を縦軸として、外円筒厚の違いによる比較を図-9に、半径の違いによる比較を図-10に示す。

単円筒モデルは $\delta/\delta_y = 6$ を超えるとエネルギー吸収量が大幅に減少するが、二重円筒とすることにより $\delta/\delta_y = 8$ 程度まで高いエネルギー吸収量を維持している。外円筒の厚さによる違いではほとんど差が見られないが、半径

が大きいほど耐荷力が大きいため、エネルギー吸収量も大きくなっている。

4. コンクリート充填モデルの変形能

(1) 解析対象および解析条件

前章までの結果から、外円筒に発生する局部変形 (塑性変形の局所化) によるエネルギー吸収があまり期待できず、すぐに内円筒にも局部変形が生じることがわかった。そこで、この局部変形を抑えるために、内円筒と外円筒の間にコンクリートを充填したモデルを考える。コンクリート材料は低降伏応力 160 kgf/cm^2 の完全弾塑性体であるとし、塑性域では等方硬化則を採用した。ま

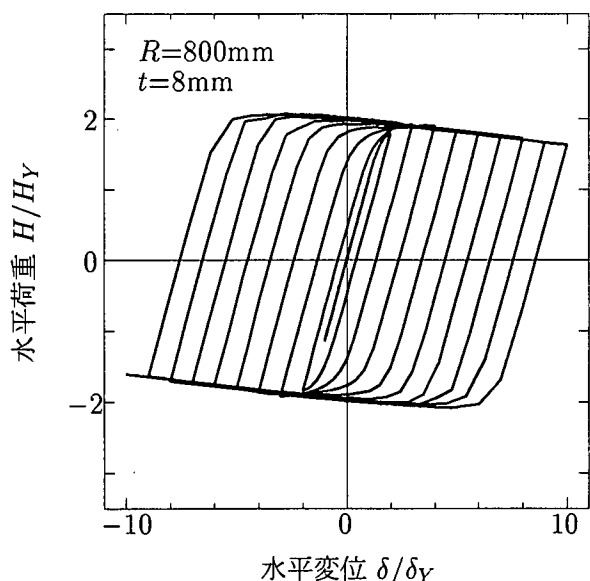


図-11 コンクリート充填二重鋼管の水平荷重－水平変位履歴曲線 ($R=800\text{mm}$, $t=8\text{mm}$)

た、数値解析ではコンクリート部分を 8 節点立体要素 (MARC 要素ライブラリ 7 番) としてモデル化した。鋼管壁とコンクリートの実際の接合条件は、厳密には接触問題になると考えられるが、ここでは数値計算上の簡便性のために押されるときも離れるときも剛結と仮定した。ただし、両材料の降伏応力度が異なるので、コンクリート材料が早期降伏した後は鋼板に対してゴムのような拘束効果を与えることになる。

二重円筒モデルの解析で、外円筒厚の変化による耐荷性能の違いはあまり見られなかったため、コンクリートを充填するモデルは内円筒厚 20mm、内円筒半径 700mm、外円筒厚 8mm で一定、かつ外円筒半径が 800mm, 900mm のものを選択し、外円筒半径の違いによる荷重－変位関係への影響を数値的に調べる。中空二重管構造との比較のために、載荷条件、与える水平変位等は同じ値を設定した。

(2) コンクリート充填二重円筒モデルの水平荷重－水平変位履歴曲線および包絡線

コンクリートを充填した場合の水平荷重－水平変位履歴曲線の例を二重鋼管 (外円筒半径 800mm, 外円筒厚さ 8mm) について図-11に示すが、安定した履歴を示している。

また、外円筒半径 900mm, 外円筒厚さ 8mm の二重円筒モデルについて、水平荷重－水平変位履歴曲線の包絡線の、コンクリート充填の有無による比較を図-12に示す。これらの図における H_y , δ_y はコンクリート充填無しの場合を用いている。

コンクリートを充填したモデルでは、最大耐力力以後の強度低下勾配が緩やかになっており、鋼管の局部変

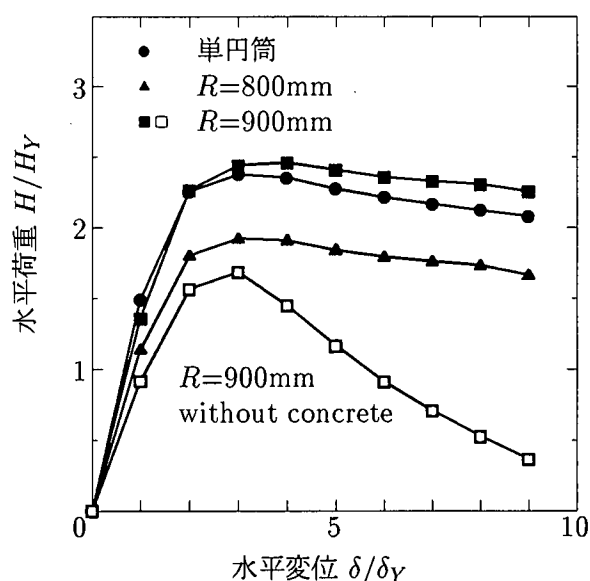


図-12 外円筒半径の違いによるコンクリート充填モデルの包絡線の比較 (単円筒もコンクリートを充填)

形が抑えられることにより大幅な延性の増加が確認された。すなわち、鋼製円筒橋脚の変形能を向上させるには、局部変形を抑制する手段を講じることの効果が大きいことがわかる。

また同図より、コンクリートを充填した単円筒モデルと外円筒厚が 8mm で外円筒半径が 800mm, 900mm のモデルにコンクリートを充填したときの水平荷重－水平変位履歴曲線の包絡線を比較する。外円筒の半径が大きい場合には充填するコンクリートの量も多くなることによって最大耐力力が上昇するが、最大耐力力以後の延性については本研究の条件の範囲内では差はほとんど見られなかった。これは逆に、比較的薄い充填厚でも鋼管壁の局部変形の発生を抑止し得ることを示していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、内円筒で構造物の強度を保ちつつ外円筒でエネルギーを吸収する二重円筒鋼製橋脚の変形能とエネルギー吸収量に着目して、外円筒厚と外円筒半径をパラメータとした数値解析を行なった。また、内円筒と外円筒の間にコンクリートを充填したモデルを考え、その拘束効果による延性向上への寄与の度合を調べた。これらにより得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 二重円筒モデルでは、単円筒のモデルに比べ高い荷重段階までエネルギー吸収能が期待できる。
- (2) 二重円筒モデルの外円筒厚を変化させても荷重－変位関係およびエネルギー吸収量はほとんど変わらない。また、最大耐力以降の強度低下勾配は単円筒モデルとほぼ同じであり、大幅な延性の増加は期待で

きない。

- (3) コンクリートを充填することにより、比較的少ない充填厚でも鋼管の局部変形が抑えられ、延性が大幅に向上する。外円筒半径が小さい場合には充填するコンクリート量も少なく耐荷力は低下するが、最大耐荷力以後の延性については本研究の条件の範囲内ではほとんど低下することはなかった。

6. 謝辞

本研究は、(社) 鋼材倶楽部より平成8年度土木鋼構造研究助成金を受けたことをここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研

究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.7.

- 2) 西川和廣・村越潤・上山靖・高橋実：鋼製橋脚の耐震設計の一手法について, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.401-406, 1997.1.
- 3) 渡辺考一・宇佐美勉・金田一智章・鈴木森晶・岡本隆・池田茂：ハイダクティリティー鋼製橋脚の提案, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.361-368, 1997.1.
- 4) 中沢正利・加藤健旨・鈴木基行・大塚久哲・岩熊哲夫：構成橋脚モデルの静的くり返し耐荷力に関する数値解析, 土木学会第51回年次学術講演会概要集 I-A47, pp.94-95, 1996.9.
- 5) 宇佐美勉・鈴木俊光・伊藤義人：実橋脚をモデル化した基部を有するコンクリート充填柱のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集 No.525/I-33, pp.55-67, 1995.10.
- 6) 日本マーク(株)：MARC Manual, Vol.A~E, Ver.K6, 1995.

(1998年8月17日 受付)

AN IMPROVEMENT OF DUCTILITY BY A TWOFOLD CYLINDRICAL STEEL PIER

Masatoshi NAKAZAWA, Makoto MEGURO and Tetsuo IWAKUMA

An attempt to employ the twofold cylindrical shell in order to improve the ductility of steel bridge pier is examined numerically. Sustaining the vertical load by the inner shell, the horizontal deformability is expected to obtain by the energy absorption of outer shell plastification. As the results of numerical analysis for the hollow section, however, immediate occurrence of localized deformation is recognized at the outer shell without time lag. On the other hand, concrete-filled model between the inner and outer shell showed the remarkable improvement of ductility even relatively small thickness yet.