

# 合成柱による高架橋橋脚の研究（その2）

—内部補剛材による局部座屈防止と内部配筋による補強の効果について—

野村敏雄 高橋泰彦  
小畠克朗 岡島豊行  
(本社 土木本部設計部)

## Studies on Pier Using Composite Column (Part 2)

—Effects on Prevention of Local Buckling Using Stiffeners and Reinforcing Method—

Toshio Nomura Yasuhiko Takahashi  
Yoshiro Kobatake Toyoyuki Okajima

### Abstract

The aim of these studies is to examine the problematic points involved in using concrete-filled steel tube pier (composite column) for practical purposes. Part 1 studied buckling and post-buckling behaviors according to variations in diameter-thickness ratio ( $D/t$ ) and it was confirmed that good behavior was obtained with  $D/t$  of 110. An improvement in base behavior was exhibited on taking these results into consideration. Therefore, prevention of local buckling using vertical stiffeners fitted inside the tube and a reinforcing method of filling concrete in the steel tube column were tested and the following results were obtained: (1) As vertical stiffeners arrested buckling, bending strength and energy absorption was substantially improved, but a composite column with large  $D/t$  was even more effective. (2) It was possible to control bending strength by reinforcement without change in  $D/t$ .

### 概要

鋼管の内部にコンクリートを充てんした合成柱を、高架橋の橋脚として実用化するための問題点を検討することが本研究の目的である。（その1）では、钢管径厚比の変化に伴う局部座屈の発生と、座屈後の挙動を主に調査し、径厚比が110程度ならば概ね良好な挙動を示すことが確かめられた。今回はその結果を踏まえ、地震時に塑性化する脚部付近の挙動の改善に着目し、钢管の内部に取り付けた縦補剛材（縦リブ）による局部座屈防止方法と充てんコンクリート内部に配筋する方法を対象にして模型実験を行ない、補強効果を検討した。実験によって、次のことが明らかになった。（1）縦リブで補強することにより座屈が防止され、合成柱の耐荷力、履歴性状は大幅に改善される。また、径厚比が大きい钢管ほど補強効果が著しい。（2）配筋により径厚比を変えずに耐荷力を調節できる可能性がある。

### 1. はじめに

コンクリート充てん合成柱の設計上の問題点を検討するため、（その1）<sup>1)</sup>では合成柱の弾塑性域の基本的な挙動を把握するとともに钢管径厚比をパラメータとして局部座屈の発生荷重と座屈後の挙動の変化について調査した。その結果、関連諸基準の径厚比制限（例えば道路橋示方書の許容応力度を低減する必要のない径厚比は、SM50で80、SM58で50である）を越えた合成柱でも十分な耐荷力や良好な変位性状を示すことが把握できた。しかし、局部座屈発生後、構造性能がやや低下することも確認された。

本年度は地震時に塑性化する合成柱脚部近傍の挙動の改善に着目し、

- (1) 鋼管の内部縦補剛材（以下、縦リブと呼ぶ）による局部座屈防止の効果
- (2) 鋼管内のコンクリートに配筋することによる補強効果の2項目を検討した。

### 2. 試験体

図-1に試験体の概略を、表-1に試験体諸元と使用材料の特性を示す。

試験体は H90R-2, H90U-2, W90R-2, H90R-2S と名付けた4体で、钢管の鋼種、縦リブのサイズ、鉄筋の有無がパラメータである。名称中の「H」、「W」が鋼種を、「R」、「U」が縦リブのサイズを意味している。また、配筋試験体は最後に「S」を加えて区別している。いずれも、直径 500 mm の钢管にコンクリートを充てんし

た円形合成柱であり、図-1のように中央部から左右500 mmの範囲を45度ピッチに配置した縦リブで補強している。縦リブの高さは  $h=25, 50 \text{ mm}$  の2種類である。また、「S」にはD10の軸方向筋を15度ピッチで配筋した。鉄筋比は全断面の0.87%で、鋼管断面積の約1/6である。

載荷は単純ばかり形式の漸増繰り返し法で行ない、中央部に集中荷重( $P$ )を加えた。従って、中央部の縦リブで補強した部分が塑性化し、試験体の性状に影響を与えるようになっている。

### 3. 耐荷力

図-2に  $P_{cr}/P_p$ ,  $P_{max}/P_p$  ( $P_{cr}$ :座屈荷重,  $P_{max}$ :最大荷重,  $P_p$ :縦リブを考慮した仮定1による全塑性モーメントに対応する耐荷力)と  $D/t \cdot \sigma_y/E_s$  (ここでは等価径厚比と呼ぶ)の関係を示す。

図-2の  $P_{cr}/P_p$  をみると各試験体とも点線で示した(その1)の縦リブなしの結果を上回っており、縦リブの効果により座屈荷重が大きくなっていることが分かる。等価径厚比の等しい H90R-2, H90U-2, H90R-2Sの値が異なっているのは縦リブ断面の大小や鉄筋を考慮した全塑性モーメントがそれぞれ異なることによる。また、等価径厚比が大きい SM58 を用いた W90R-2 でも縦リブなしの結果を大きく上回っているものの、SM50 の H90R-2 と比較すると低く、同程度の縦リブ補強では高張力鋼の鋼管は座屈に関して不利であることを示している。

次に、 $P_{max}/P_p$  でも実線で示した縦リブなしの結果を各試験体とも上回っている。また、各試験体とも 1.15~1.19 とほぼ一定値である。この耐荷力の上昇は縦リブの効果により座屈の発生が遅くなり座屈波の拡大が制限されるために塑性化が進みひずみ硬化が大きくなっていること、また、コンクリートが鋼管で拘束されることによって生じる三軸効果も大きくなっていることを示している。特に等価径厚比の大きい領域での傾向が著しく、縦リブを設けることにより大幅に性状が改善されることがうかがえ、径厚比の使用限界を拡張できる可能性を示唆している。

### 4. 変位性状

図-3~6に各試験体の  $P \sim \delta$  曲線を示す。図-7には H90U-2 の正荷重時の包絡線を CDC (Column Deflection Curves) 法による解析結果とともに示し、図

|         | 直 径<br>(D:mm) | 板 厚<br>(t:mm) | 径厚比<br>(D/t) | 実験パラメータ       |     |      | 鋼管及び鉄筋の材料特性                                 |  |           | コンクリート<br>材料特性<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 最 大<br>荷 重<br>(ton) |
|---------|---------------|---------------|--------------|---------------|-----|------|---|--|-----------|---|---------------------|
|         |               |               |              | 縦リブ<br>(h:mm) | 鉄 筋 | 鋼 種  | 降伏点<br>( $\sigma_y:\text{kg}/\text{cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\sigma_t:\text{kg}/\text{cm}^2$ ) | 伸び<br>(%) |   |                     |
| H90R-S  | 500           | 6.0           | 83           | 25            | 無   | SM50 | 4250  | 5740   | 32        | 圧縮強度<br>$\sigma_{ck}=270$               | 108.1               |
| H90U-2  | 500           | 6.0           | 83           | 50            | 無   | SM50 | 4250  | 5740   | 32        | 弾性係数<br>$E_s=2.7 \times 10^5$           | 91.8                |
| W90R-2  | 500           | 6.0           | 83           | 25            | 無   | SM58 | 5630  | 6580   | 27        | 各試験体<br>共 同                             | 114.1               |
| H90R-2S | 500           | 6.0           | 83           | 25            | 有   | SM50 | 4250  | 5740   | 32        |   | 98.4                |
|         |               |               |              |               |     | SD35 | 3650  | 5330   | 19        |   | 135.4               |
|         |               |               |              |               |     |      |   |  |           |   | 117.6               |
|         |               |               |              |               |     |      |   |  |           |   | 119.6               |
|         |               |               |              |               |     |      |   |  |           |   | 100.2               |

④最大荷重の欄は上段：実験値、下段：計算値(Mp法、図-7の仮定1を使用)を示している。

表-1 試験体諸元、材料特性および実験結果

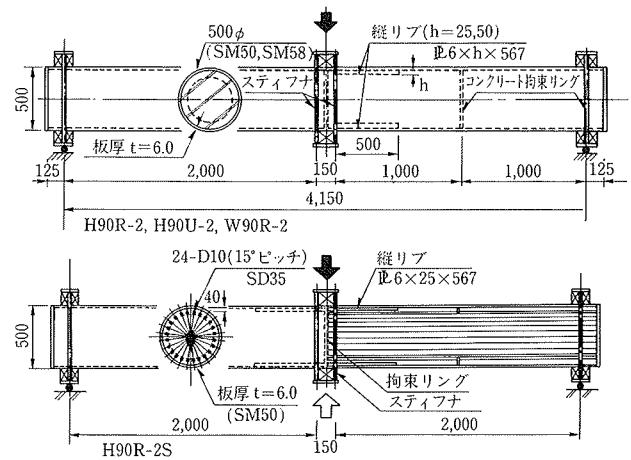


図-1 試験体

一8には包絡線の荷重および変位を無次元化した  $P/P_p$  ~  $\delta/\delta_p$  曲線を示す。また、図-9, 10に載荷点から 10 cm の位置で測定した引張および圧縮縁の  $P$  ~  $\epsilon$  曲線を示す。

図-7の H90U-2 の破壊順序は

次のような経過をたどる。まず、内部のコンクリートに曲げひびわれが発生し、剛性低下を示した後、次第に塑性化が進むとともに、縦リブ補強区間の加力点近傍の圧縮ゾーン 0~45度間(図-11参照)に部分座屈が生じる。次に、縦リブ外側で全体座屈が発生し、部材角  $\gamma=1/36$ で最大荷重に達した。45~90度間に部分座屈が広がるのは最大荷重以後である。

各試験体とも最大荷重時までの  $P \sim \delta$  性状に大きな相違はないが、それ以後は座屈性状が異なり変位性状に多

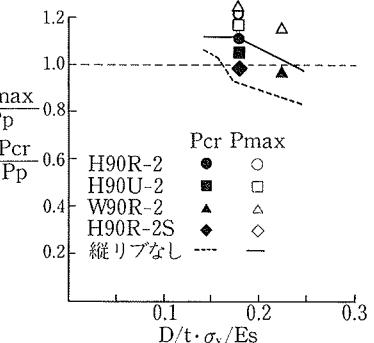


図-2  $P_{cr}/P_p$ ,  $P_{max}/P_p$  ~  $D/t \cdot \sigma_y/E_s$  関係

少変化が現われた。図一8で比較すると、多少の相違はあるものの各試験体とも縦リブのないH90B-2と挙動が異なっている。すなわち、縦リブのないH90B-2が $\delta/\delta p = 4$ 程度で最大荷重に達し、その後は急激に負勾配になるのに対して、縦リブのある4体は引続き荷重が $\delta/\delta p = 5$ 程度まで増加している。これは、前述のように鋼管のひずみ硬化とコンクリートの三軸効果によると考えられる。そして、H90R-2, H90R-2S, H90U-2の3体は最大荷重、変位もほぼ一致し、その後H90U-2がやや負勾配になるもののほぼ同一の挙動を示している。それに対してW90R-2は荷重の低下がやや早い。

次に、CDC解析結果と比較する。図一7のように鋼管のひずみ硬化とコンクリートの三軸効果を無視した仮定1の解析値は、軸力と変位による2次曲げモーメントを含む全塑性モーメントに対応する $P_p'$ 線( $P_p' = P_p - \delta N$ )に漸近していく、次第に実験値と相違する傾向を示す。

そこで、鋼管のひずみ硬化とコンクリートの三軸効果を考慮した仮定2の解析を行なった。鋼材では座屈を考慮して降伏点からの強度増加を $0.5(\sigma_t - \sigma_y)$ 、勾配は繰り返し載荷の影響を考え $0.02 Es$ とし、コンクリートには富井ら<sup>2)</sup>によって提案されている三軸拘束効果を考慮したモデルを採用した。

仮定2のCDC解析では図一7に示す $P\sim\delta$ 曲線となり、最大荷重112.5 ton、最大変位61.4 mmであった。座屈が起こるまで荷重、変位とともに実験結果を良好に追跡していると考えられる。なお、通常用いられる勾配の $0.01 Es$ とすると、最大荷重109.4 ton、最大変位65.1 mmとなり、耐荷力がやや低めに与えられるようである。また、図一9、10の $P\sim\epsilon$ 関係でも実験値と良好な対応を示している。圧縮外縁、引張外縁の最大荷重時のひずみはそれぞれ $-12300\mu$ 、 $19400\mu$ 程度、また、試験体中央では、それぞれ $-21000\mu$ 、 $37500\mu$ となっている。コンク

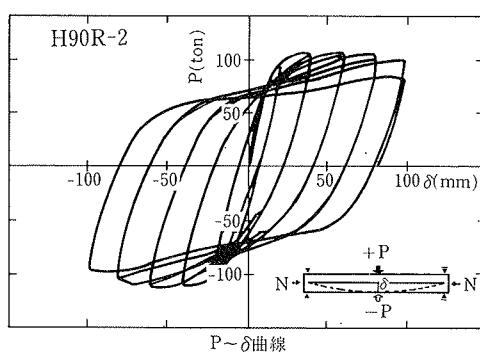


図-3 P~δ曲線

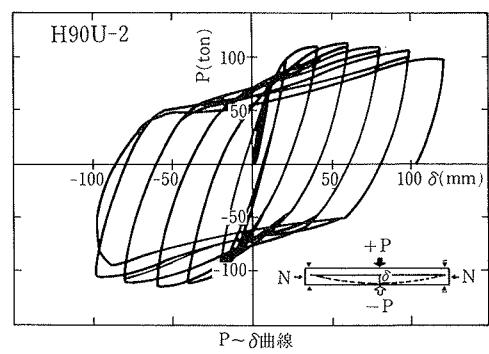


図-4 P~δ曲線

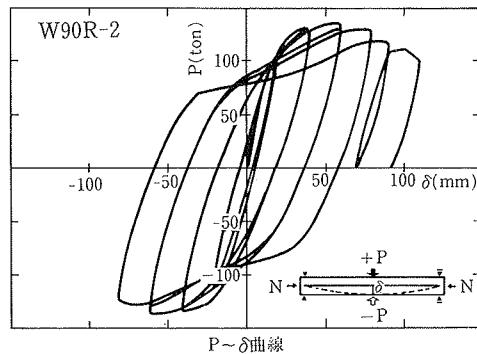


図-5 P~δ曲線

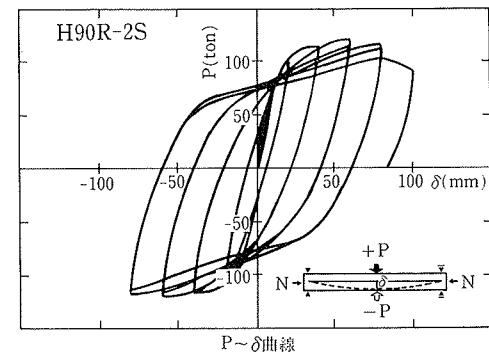


図-6 P~δ曲線

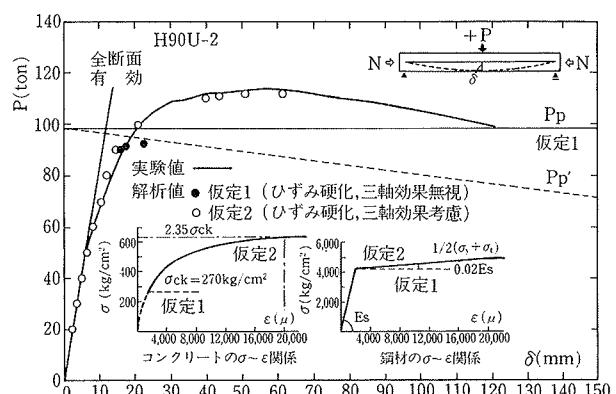


図-7 P~δ曲線(包絡線)

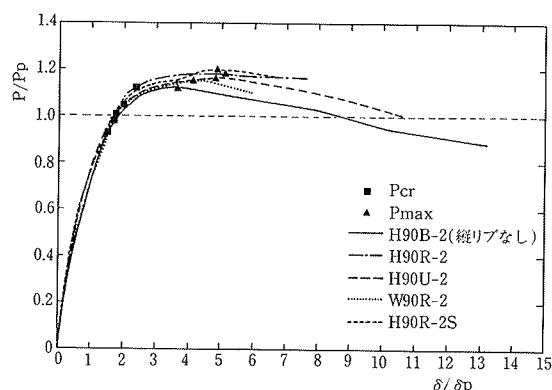


図-8 P/Pp~δ/Pp曲線

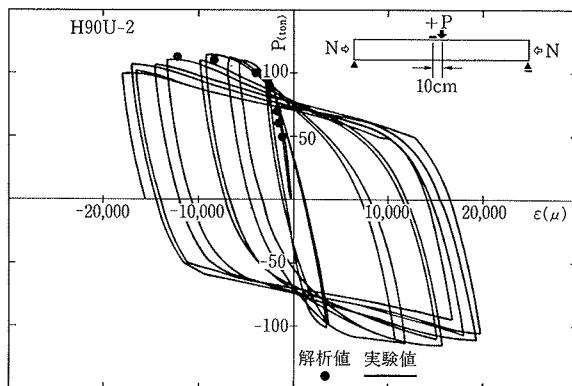


図-9 P～ε曲線

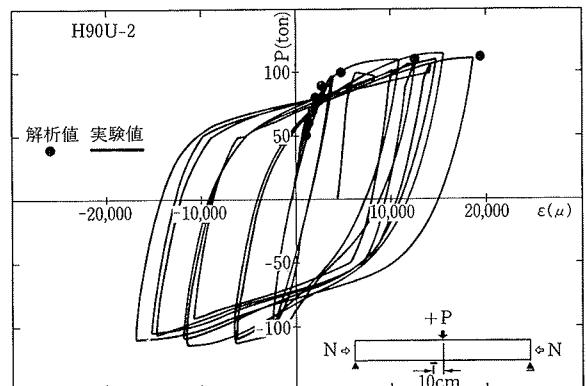


図-10 P～ε曲線

リートの圧縮縁での応力が  $2.35 \sigma_{ck}$ 、鋼管では引張縁から約 15 cm の内部まで最大応力に達した状態で終局状態となっている。

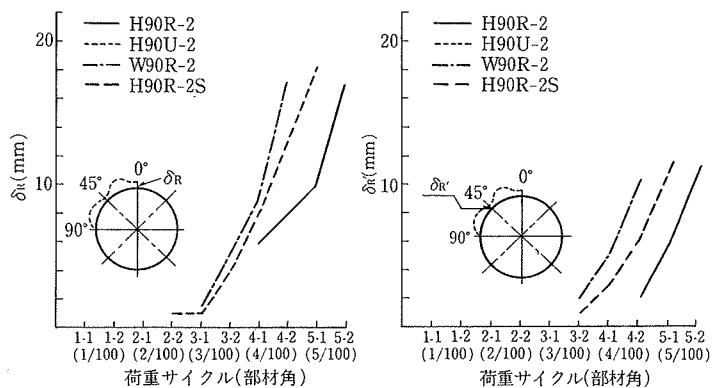
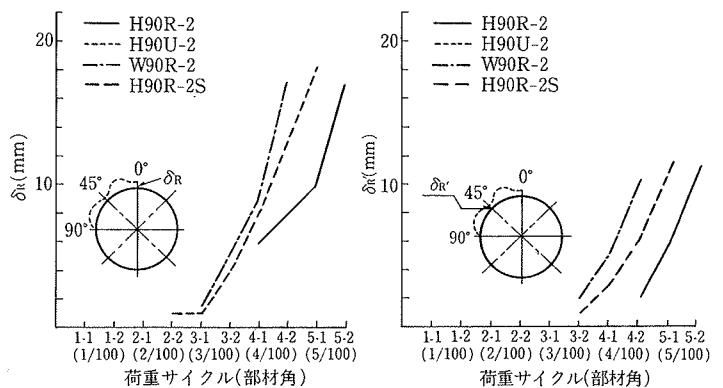
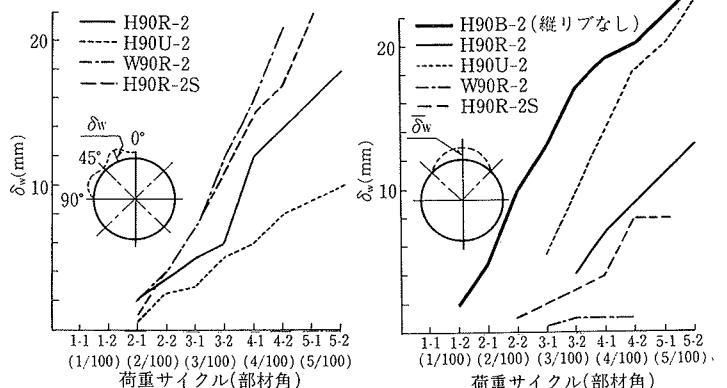
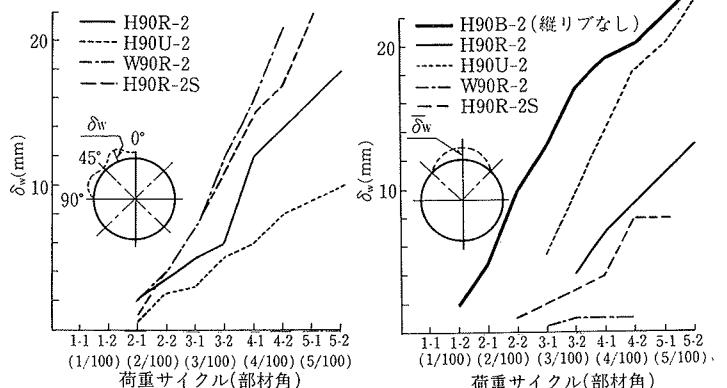
このように、鋼管のひずみ硬化と最大応力上昇、コンクリートの三軸効果を考慮した CDC 解析では、耐荷力、変位およびひずみ性状を適切に評価することが可能である。

## 5. 履歴性状

図-11～14に目視測定した座屈によるふくらみ量を、図-15, 16にそれぞれの P～δ 曲線から求めた吸収エネルギー量 ( $\Delta W$ )、減衰定数 ( $He$ ) を示す。

図-3～6の履歴曲線を見ると、各試験体とも部材角  $\gamma = 3/100$ までは紡錘形の履歴性状を示しているが、 $\gamma = 4/100$ 以降 S 字形の傾向を示し始める。しかし、縦リブのない場合と異なり、S 字形の履歴性状で変位が著しく進行するスリップ現象は生じていない。図-11, 12の縦リブのある 0° 位置、45° 位置でのふくらみ高さをみると、明らかに縦リブサイズの大きい H90U-2 を除く 3 体は  $\gamma = 3/100$ から  $\gamma = 4/100$ にかけてふくらみ高さが増加していることが分かる。すなわち、縦リブで補強している位置の座屈モードが縦リブ間の部分座屈から縦リブを含んだ全体座屈に移行する過程で履歴性状も紡錘形から S 字形に移行していくことを示している。一方、H90U-2 は図-14に示すように  $\gamma = 3/100$ より縦リブで補強された外側、すなわち、縦リブのない部分での全体座屈が他と比べて極めて大きく、この影響により S 字形の傾向を示したと考えられる。そのため最大荷重以後に負勾配となり、縦リブなしの結果に類似した傾向を示している。

図-15の吸収エネルギー量と部材角の関係をみると、各試験体とも変位に比例して吸収エネルギー量が増加し

H90R-2  
H90U-2  
W90R-2  
H90R-2S図-11 0度の縦リブ位置での  
ふくらみ量H90R-2  
H90U-2  
W90R-2  
H90R-2S図-12 45度の縦リブ位置での  
ふくらみ量H90R-2  
H90U-2  
W90R-2  
H90R-2S図-13 0～45度の縦リブ間の  
ふくらみ量H90B-2(縦リブなし)  
H90R-2  
H90U-2  
W90R-2  
H90R-2S図-14 縦リブ外側の座屈によ  
るふくらみ量

ており、縦リブのない H90B-2 と比較してその勾配が大きく、 $\gamma = 2/100$ までは大差ないものの、それ以後は大幅に吸収エネルギー量が増加していることが分かる。

また、図-16の減衰定数と部材角の関係を見ると、W90R-2 を除く 3 体は  $\gamma = 2/100$ までは H90B-2 とほぼ同様の性状を示している。しかし、 $\gamma = 2/100$ 以降、H90B-2 はほぼ一定値を示すが、 $\gamma = 2/100$ まで H90B-2 より低かった W90R-2 を含めて縦リブのある場合は上昇勾配がやや低下するものの、減衰定数はさらに大きくなつ

ていき、縦リブによる影響が顕著になる。縦リブのないH90B-2では $\gamma=4/100$ で減衰定数は0.3程度であったが、H90R-2では0.4程度に増加している。縦リブのサイズの相違でみると、縦リブの大きい方がむしろ減衰定数は小さい傾向となっているが、縦リブの外側での全体座屈の影響が卓越するためであり、縦リブの効果が十分現われていない結果になっている。また、鋼材の相違でみると、縦リブのない場合と同様に高張力鋼の方が不利という結果になっている。しかし、等価径厚比が大きくても縦リブで補強することにより、履歴性状が大幅に改善されていると考えられる。鉄筋の有無では減衰定数に差はみられない。すなわち、配筋試験体は耐荷力が高いだけ座屈に対して不利となるにもかかわらず、変位性状、履歴性状とも同等の性状を示していると考えられる。

## 6.まとめ

### 6.1. 耐荷力について

各試験体とも全塑性モーメント( $M_p$ )の1.15~1.19倍の耐荷力を有しており、縦リブのない場合と比較して鋼管のひずみ硬化と三軸応力状態でのコンクリート強度の増加が著しい。特に、高張力鋼を用いたものは径厚比の大きい試験体であり、この実験結果から判断すると縦リブを取り付けることにより径厚比制限を緩和できる可能性があると言える。

また、配筋により径厚比を変えずに耐荷力を調節できることが示唆された。

### 6.2. 変位性状について

縦リブ間の部分座屈、縦リブ外側の全体座屈、最大荷重などの発生順序は試験体により異なるが、 $P \sim \delta$ 性状は最大荷重時まで大きな相違はない。また、最大荷重に達した後、各試験体の座屈性状を反映して $P \sim \delta$ 性状は多少相違するが、縦リブのない試験体のように急激に負勾配になることはない。

CDC法では鋼管のひずみ硬化および三軸状態でのコンクリート強度の増加を考慮した適切な応力～ひずみ関係を与えることによって耐荷力、変位およびひずみも含めて評価することが可能である。

### 6.3. 履歴性状について

各試験体とも $\gamma=3/100$ までは安定した紡錘形の履歴性状を示すが、その後、S字形の履歴性状を示し始める。しかし、縦リブのない試験体と異なり変位が著しく進行するスリップ現象は生じなかった。

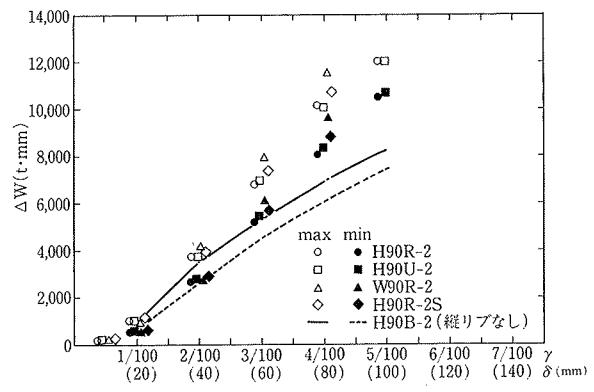


図-15 吸収エネルギー

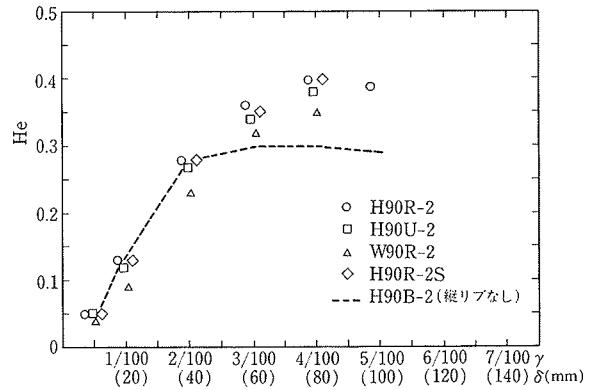


図-16 減衰定数

吸収エネルギーは変位に比例して大きくなる。縦リブのない場合と比較すると勾配が大きく $\gamma=2/100$ を超えると相違が顕著になる。また、減衰定数は縦リブなしでは $\gamma=2/100$ 程度で0.3となり、その後ほぼ一定値を示したが、縦リブのある場合はさらに大きくなり、 $\gamma=4/100$ で0.4となっており、縦リブの効果は明瞭である。

## 謝 辞

この実験は首都高速道路公団の委託により実施したものであり、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 野村, 他:合成柱による高架橋橋脚の研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 62~66
- 2) 富井, 他:円形断面鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊を鋼管補強により防止する設計法に関する実験的研究, 第8回コンクリート工学年次講演会講演論文集, (1986), pp. 517~520