# 論文　コンクリート充填角形鋼管柱の変形挙動に関する実験的研究

岩佐　高吉[*1]・小林　薫[*2]

**要旨：**本報告は，比較的軸圧縮力の高い角形鋼管柱において，さらなる変形性能の向上を目的として，鋼管柱の内部にコンクリートを充填したものと，鋼管内部に補強材を入れた後にコンクリートを充填したものの供試体について正負交番載荷実験を行った結果をまとめたものである。鋼管内部の補強材としては，縦リブ，鉄筋かごやスパイラル鉄筋を用いた。また，鋼管内部をスパイラル鉄筋で補強し，鋼管柱隅角部付近にスリットを入れた供試体で実験を行った結果,大変形領域でも安定した耐荷特性となる良好な結果が得られた。

**キーワード：**変形性能，スパイラル鉄筋，コンクリート充填鋼管柱

## 1.　はじめに

鉄道構造物では，線路に近接した個所や狭隘個所等，施工環境が厳しい場合が多い。このような施工環境を勘案して，駅設備や駅に近接した空間を新たに生み出そうとする場合，鋼部材を用いた構造形式が採用される場合が多い。

コンクリート充填鋼管柱は,鋼管とコンクリートの合成効果により断面寸法の同じ鋼管と比べて大きな耐荷力が得られる。また、コンクリートが鋼管の局部座屈の進行を遅らせることにより優れた変形性能が期待できる構造である事から，近年，土木・建築の分野で，構造部材として多く用いられるようになってきた[1)]。

本論文は，このような背景をもとに角形鋼管柱において，比較的高軸圧縮応力状態でもさらなる変形性能の向上を目的に，鋼管内部に補強材を入れた後にコンクリートの充填を行った場合の変形挙動を交番載荷実験から検討を行ったので報告する。

## 2.　実験概要

### (1)　供試体概要

今回実験に用いた供試体の諸元を**表-1**に示す。また，供試体の概要図を**図-1**に，断面形状を**図-2**に示す。

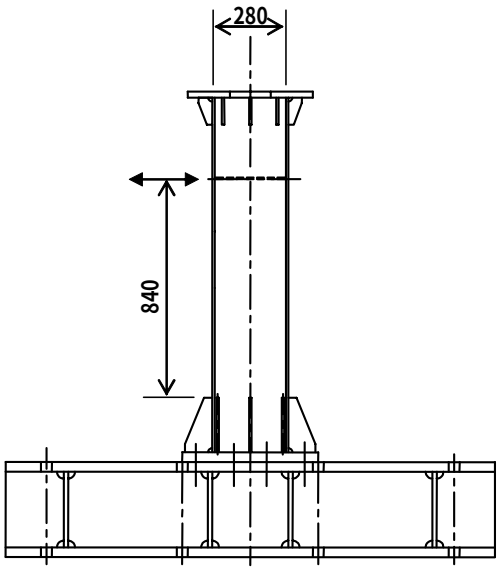


**図-1　供試体概要図**

供試体は，片持ち形式の柱部材とし，柱断面は 280mm×280mm の正方形断面で，その鋼管内部に補強材を入れないものと各種補強材を入れてコンクリートを充填したものである。充填に使用したコンクリートは呼び強度 24N/mm$^2$ のレディーミクストコンクリートである。供試体の製作は 4 枚の鋼板を組立てた後 4 辺を溶け込み溶接により接合して行った。

なお，本供試体は基部にリブ補強を行っている。このため，実験では補強リブ天端を柱下端とし，水平荷重作用点までをせん断スパンとした。

*1 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所　主　席　　(正会員)
*2 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所　副課長　博(工)(正会員)

**表-1　供試体諸元**

| 記号 | 断面寸法 | 板厚 (mm) | 幅厚比 (B/t) | 軸力比 (N/Ny) | 鋼材降伏強度 (N/mm$^2$) | コンクリート強度(N/mm$^2$) | 作用軸力 (KN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S-1 | 280×280 | 6.0 | 46.7 | 0.20 | 387.0 | 25.9 | 814 |
| S-2 | 280×280 | 6.0 | 46.7 | 0.20 | 387.0 | 28.1 | 839 |
| S-3 | 280×280 | 6.0 | 46.7 | 0.20 | 387.0 | 17.4 | 714 |
| S-4 | 280×280 | 6.0 | 46.7 | 0.20 | 387.0 | 17.4 | 714 |
| S-5 | 280×280 | 6.0 | 46.7 | 0.20 | 350.0 | 29.2 | 803 |

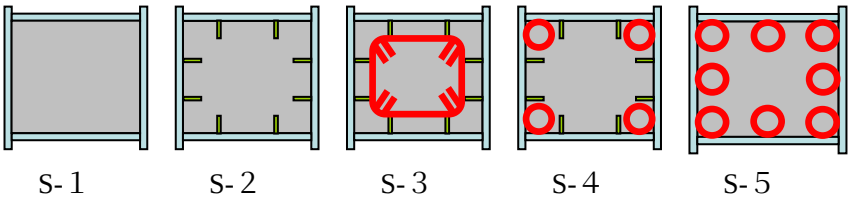


**図-2　供試体断面形状**

**写真-1**　S-5　ｽﾘｯﾄ(h=280)

供試体のパラメータとしては，角形鋼管柱内部の補強方法である。

供試体 S-1 は鋼管内部にコンクリートだけを充填したものである。

供試体 S-2 は鋼管内部に縦リブとして厚さ 3mm，幅 32mm の鋼板を各面に 2 枚配置し，コンクリートを充填したものである。

供試体 S-3 は供試体 S-2 の縦リブ内側に一辺が 184mm の鉄筋かごを追加したものである。鉄筋かごは異形鉄筋 D6(fsy=320 N/mm$^2$)を 33mm ピッチで柱方向に組み, 柱下端より 420mm(1.5D 区間)(D:断面高さ)の高さまで配置している。

供試体 S-4 は供試体 S-2 の四隅の隅角部にスパイラル鉄筋(SW-B60C) (fsu=1,400 N/mm$^2$)を追加したものである。スパイラル鉄筋は鉄筋径 3mm のものを用い，スパイラル径 50mm とし，柱下端より 420mm の高さまで配置している。

供試体 S-5 は供試体 S-1 にスパイラル鉄筋を８本配置したものである。スパイラル鉄筋は供試体 S-4 と同様のもので，柱下端より 280mm(1.0D 区間)の高さまで配置している。また，鋼管には柱下端より 280mm の高さまで各面に２本ずつ幅 3mm のスリット（切れ込み）を施している。**写真-1** にスリットが入った鋼管の状況を示す。

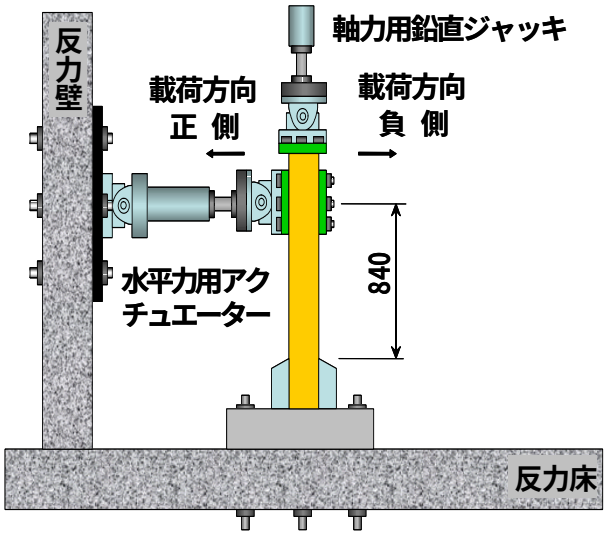


**図-3　実験装置概要図**

**(2)　交番載荷概要**

載荷装置の概要図を，**図-3** に示す。

水平力はアクチュエーターにより柱頭部付近の所定の位置に載荷し，軸方向圧縮力は鉛直ジャッキにより柱頭部に与えた。

なお, 軸方向圧縮力は供試体降伏圧縮力の 0.2 倍に設定した。このときの平均軸方向圧縮応力

**表-2　実験結果**

| 記号 | 降伏変位 $\delta_y$ (mm) | 降伏荷重 $P_y$(kN) | 最大荷重 $P_{max}$(kN) | 局部座屈の発生位置(mm) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 負側 | 正側 |
| S-1 | 4.8 | 270 | 436 | 260(95) | 320(90) |
| S-2 | 4.3 | 274 | 560 | 170(60) | 230(140) |
| S-3 | 3.9 | 243 | 538 | 110(50) | 150(60) |
| S-4 | 3.6 | 225 | 590 | 100(50) | 80(40) |
| S-5 | 3.6 | 227 | 436 | 280(140) | 280(140) |

＊局部座屈の発生位置は実験終了後柱下端からの距離，(　)内は局部座屈中心位置を示す。

度は 9.1～10.7 N/mm$^2$ となっている。

載荷手順は，以下の通りである。

・鉛直ジャッキにより所定の軸方向圧縮力を導入した状態で保持する。

・角形鋼管柱下端（基部）における鋼管の軸方向ひずみの測定値が材料実験の結果から求まる降伏ひずみに達するまで負側にアクチュエーターの荷重制御で載荷する。引き続き，正側について同様に載荷する。(この時の負側載荷，正側載荷の載荷点変位量の平均値を降伏変位$\delta_y$とする。)

・　アクチュエーターを載荷点変位の変位制御に切替え，以降，降伏変位$\delta_y$の整数倍の変位量を片振幅とした正負交番で 1 サイクルずつ振幅を増加させながら載荷する。
ただし，供試体 S-5 については 1,2,4･･･と偶数倍で振幅を増加させて行った。

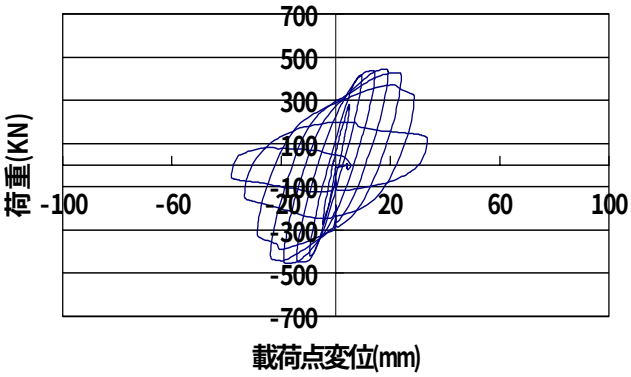


**図-4**　S-1 **の荷重－載荷点変位曲線**

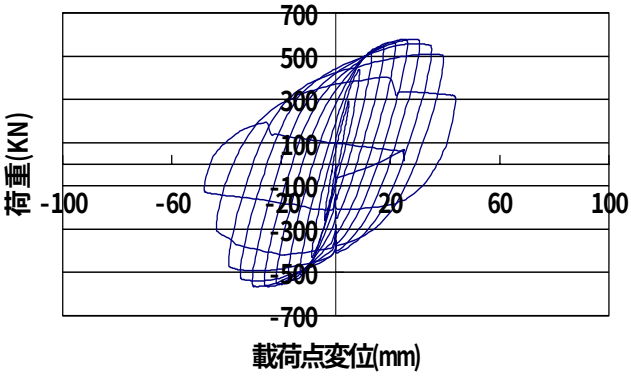


**図-5**　S-2 **の荷重－載荷点変位曲線**

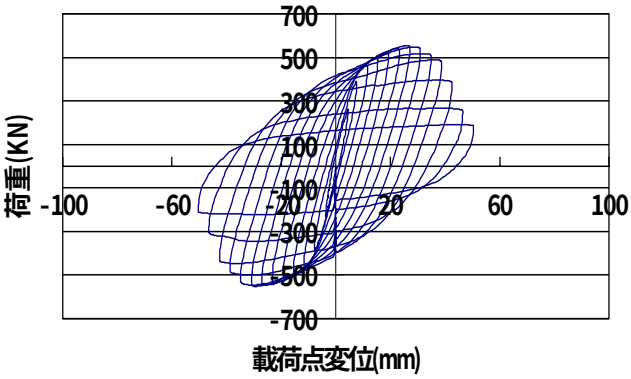


**図-6**　S-3 **の荷重－載荷点変位曲線**

## 3.　実験結果および考察

実験結果を**表-2** に示す。**表-2** 中の降伏変位，降伏荷重，最大荷重は正側載荷，負側載荷両側の値の平均値である。なお，実験結果として実験終了後の鋼管の局部座屈の測定位置も併せて示す。

### 3.1　各供試体の荷重－載荷点変位履歴

今回実験を行った供試体の荷重－載荷点変位曲線を**図-4～8** にそれぞれ示す。

なお，図はＰ－δ効果の影響を含まない荷重－変位曲線となっている。

角形鋼管柱内部にコンクリートだけが充填されている S-1 は 3～4$\delta_y$ で荷重がピークになった後，荷重が急激に低下している。また，鋼管内部に縦リブを入れた S-2 は 6～7$\delta_y$ で荷重がピー

クに達し，8$\delta_y$以降荷重が急激に低下している。鋼管内部に縦リブ及び鉄筋かごを入れた S-3 は 7$\delta_y$で荷重がピークに達し，その後 9$\delta_y$程度まで荷重を保持し，その後急激に荷重が低下している。鋼管内部に縦リブ及びスパイラル鉄筋を入れた S-4 は 9～10$\delta_y$で荷重がピークに達した後，急激に荷重が低下している。S-1～S-4 に見られる荷重の急激な低下は，角形鋼管に発生する亀裂が主たる原因である。

これに対し鋼管内部にスパイラル鉄筋，鋼管側面にスリットを入れた S-5 は 4～6$\delta_y$で荷重がピークに達した後，S-1～S-4 で見られたような急激な荷重の低下はなく緩やかな低下となっている。

最大荷重については，S-4 が 590KN と最も大きかった。また，S-1 と S-5 においては同様なものであった。

これらのことから，角形鋼管柱内部に鉄筋かごあるいはスパイラル鉄筋を入れ，コンクリートを充填することにより内部補強の無い供試体より変形性能が向上している。また，S-5 のように鋼管にスリットを入れることにより，鋼管に発生する局部座屈の範囲を大きくすることで角形鋼管スリット間に亀裂が発生しないので変形性能の向上が見られた。

荷重及び載荷点変位をそれぞれ降伏荷重，降伏変位で除して無次元化した荷重－載荷点変位の抱絡線を**図-9** に示す。これより，供試体 S-5 は降伏変位の 24 倍程度まで降伏荷重を保持している。

### 3.2　各供試体の損傷状況

実験終了後の各供試体の状況を**写真-2～4** に示す。

角形鋼管柱内部にコンクリートだけを充填している S-1 については，2$\delta_y$載荷時に柱基部付近に負側・正側ともに鋼管の局部座屈が生じた。鋼管の局部座屈は柱下端からの高さで正側・負側ともに約 80mm (0.29D)を中心として幅 50mm の範囲であった。その後，載荷ごとに局部座屈による膨みが増加した。6$\delta_y$載荷時において鋼管

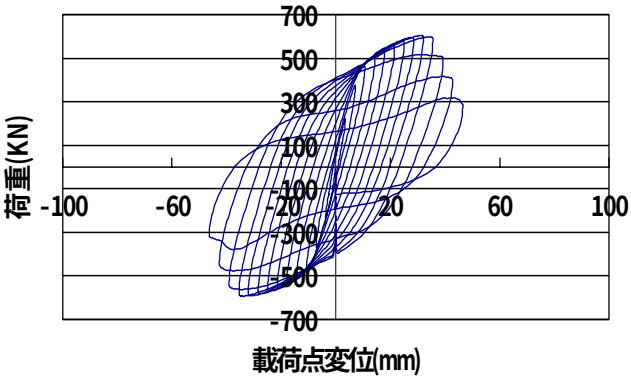


**図-7**　S-4 **の荷重－載荷点変位曲線**

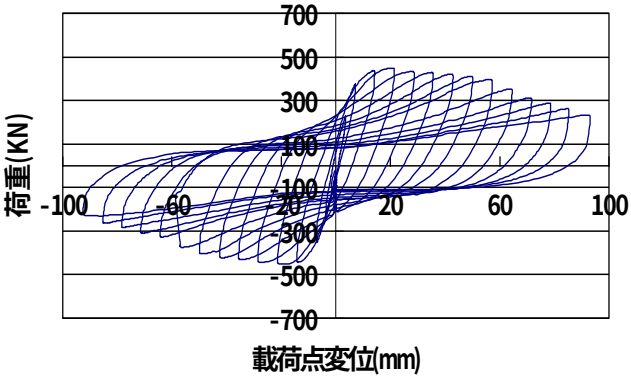


**図-8**　S-5 **の荷重－載荷点変位曲線**

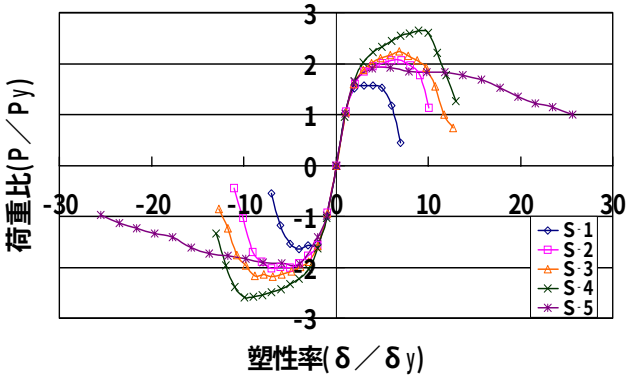


**図-9**　**荷重－載荷点変位抱絡線**

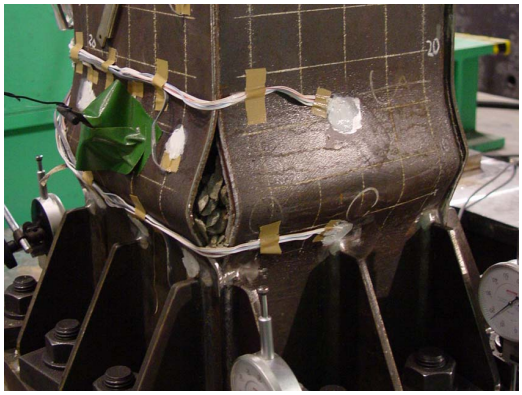

**写真-2**　S-1　7$\delta_y$ **載荷終了**

の隅角部に亀裂が生じた。亀裂の発生高さは，0～150mm の範囲で鋼管溶接部において溶接が切れる鉛直方向のものであった。7$\delta_y$載荷時には鉛直方向の溶接部亀裂がさらに進展し，亀裂から

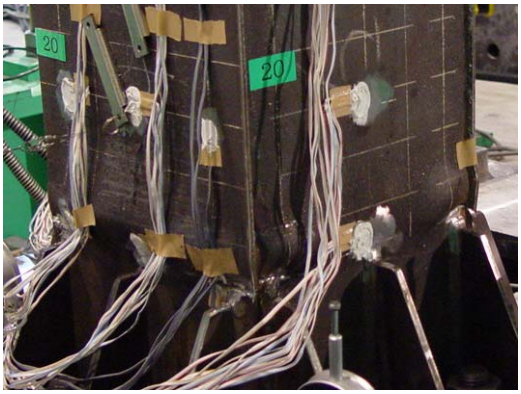

**写真-3**　S-4　13$\delta_y$ **載荷終了**

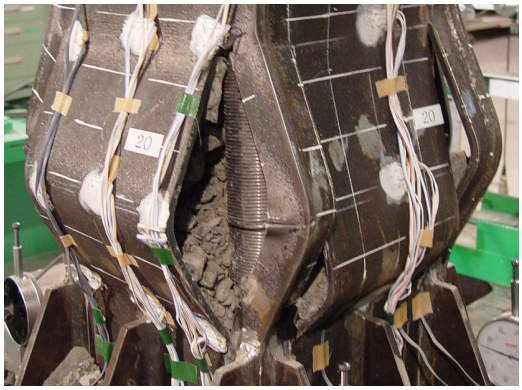

**写真-4**　S-5　26$\delta_y$ **載荷終了**

**写真-5** S-1 **内部**

**写真-6** S-2 **内部**

**写真-7** S-3 **内部**

**写真-8** S-4 **内部**

コンクリートが外にこぼれ落ちてきた。8$\delta_y$ 載荷時には鉛直荷重を保持できなくなった。

鋼管内部に縦リブを入れた S-2 については，S-1 と同様に 8$\delta_y$ 載荷時に柱下端より負側は高さ約 70mm (0.25D)，正側は約 150mm (0.54D)の位置を中心に局部座屈が生じた。その後，10$\delta_y$ 載荷時に隅角部に亀裂が生じた。この亀裂は溶接部において溶接が切れる鉛直方向のものであった。その後，11$\delta_y$ 載荷時には亀裂が鉛直方向にさらに進展し溶接切れの範囲が広がり，鉛直荷重を保持できなくなった。

鋼管内部に縦リブ及び鉄筋かごを入れた S-3 については，7$\delta_y$ 載荷時に柱下端より負側・正側ともに高さ約 60mm (0.21D)の位置を中心に局部座屈が生じ，局部座屈が進展していき 11$\delta_y$ 載荷時に負側・正側ともに補強リブ天端溶接部に水平方向の亀裂が生じた。その後，12$\delta_y$ 載荷時に負側・正側ともに隅角部の溶接部に鉛直方向の縦亀裂が生じた。

鋼管内部に縦リブ及びスパイラル鉄筋を入れた S-4 については，9$\delta_y$ 載荷時に正側の柱下端より高さ約 50mm (0.18D)の位置を中心に局部座屈が生じた。その後，12$\delta_y$ 載荷時に S-3 と同様に負側・正側ともに補強リブ天端溶接部に水平方向の亀裂が生じた。その後，水平方向に進展していった。また，鋼管の局部座屈量に伴うはらみ出し量は，健全な部分の面から 6mm～13mm 程度のふくらみで他の供試体より小さかった。鋼管内部にスパイラル鉄筋を入れ，鋼管側面にスリットを入れた S-5 については，2$\delta_y$ の負側載荷時に柱下端より高さ約 150mm (0.54D)の位置を中心に局部座屈が生じた。その後，局部座屈量が進展していき 16$\delta_y$ 載荷時に隅角部に水平方向の亀裂が生じた。18$\delta_y$ 以降については、スリット間の鋼板の局部座屈量は大きくなったが，亀裂は発生しなかった。

**写真-9** S-5 **内部**

### 3.3　各供試体の鋼管内部の損傷状況

実験終了後の角形鋼管柱基部付近の充填コンクリートについて各供試体の状況を**写真-5～9** に示す。なお，写真は供試体の載荷側面を撮影したものであり，写真の左・右が載荷方向となっている。

S-1 については，鋼管の局部座屈が生じた部分のコンクリートが粉砕化され，局部座屈した部分にコンクリートが詰まっていた。また，鋼管の局部座屈が生じた上の部分については健全なものであった。

S-2，S-3 において，局部座屈箇所における粉砕化したコンクリートの状況は S-1 とほぼ同様であった。S-4 については，鋼板の局部座屈部分のコンクリートは粉砕化されていたものの，他の供試体よりも粉砕化されている範囲は小さかった。また，局部座屈した部分以外のコンクリートは健全なものであった。

S-5 については，鋼板の局部座屈部分のコンクリートが粉砕化されており，粉砕化されたコンクリートは鋼管内部から漏れ出していた。また、スパイラル鉄筋も大きく変形していた。

### 3.3　鋼管内部のコンクリート圧縮ひずみ分布

S-1～S-5 の鋼管内部のコンクリートひずみで，曲げによる圧縮方向のひずみ分布を**図-10～14** に示す。

ひずみの測定は突起を付けたアクリル棒にひずみゲージを貼付けコンクリートの最外縁となる載荷方向の鋼管内側に埋め込んだ。

鋼管内部のひずみ分布は 1.0D から柱基部の間で大きくなっている。また，鋼管内部に補強材を入れた S-3,S-4 は他の供試体に比べ $3\delta_y$ 程度まで小さなひずみ値であった。鋼管内部にスパイラル鉄筋をいれた S-4 のほうが小さい値となっている。これは、スパイラル部分による圧縮力の負担が大きいためだと考えられる。S-5 では $5\delta_y$ 以降計測できなかった。

## 4.　まとめ

角形鋼管柱の鋼管内部に補強材を入れ，コンクリートを充填した場合の柱について正負交番載荷実験を行った。今回の実験により得られた知見を以下に示す。

(1)角形鋼管柱内部に鉄筋かごまたはスパイラル鉄筋を入れ，コンクリートを充填することにより鋼管の局部座屈抑制によって変形性能が向上される。

(2) 角形鋼管柱内部にスパイラル鉄筋を入れコンクリートを充填し，鋼管側面にスリットを設けることにより，最大荷重以降の荷重低下が緩やかな挙動となる。

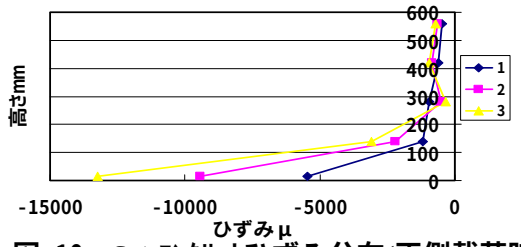


**図-10**　S-1 ｺﾝｸﾘｰﾄひずみ分布(正側載荷時)

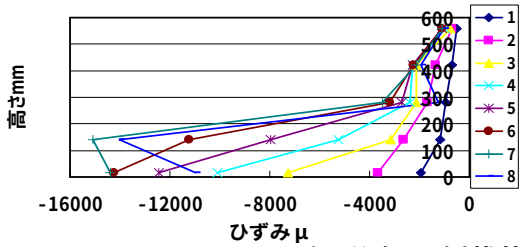


**図-11**　S-2 ｺﾝｸﾘｰﾄひずみ分布(正側載荷時)

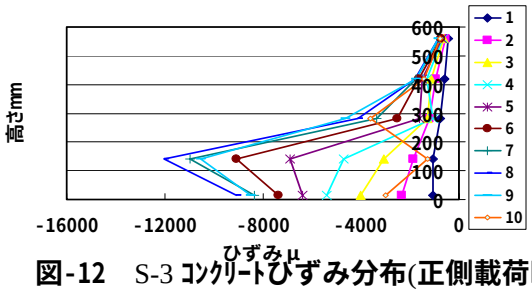


**図-12**　S-3 ｺﾝｸﾘｰﾄひずみ分布(正側載荷時)

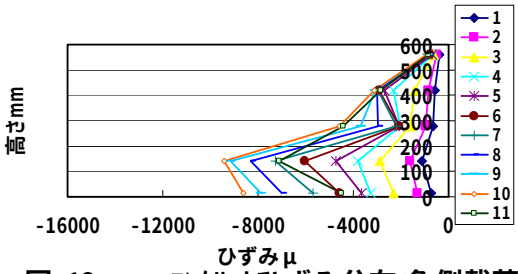


**図-13**　S-4 ｺﾝｸﾘｰﾄひずみ分布(負側載荷時)

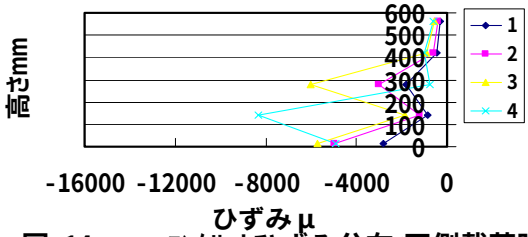


**図-14**　S-5 ｺﾝｸﾘｰﾄひずみ分布(正側載荷時)

(3) 角形鋼管柱の局部座屈発生位置の柱下端からの距離としては，鋼管内部に補強材を入れ，コンクリートを充填した場合のほうが小さく，局部座屈頂点位置が低くなる傾向が見られた。

## 参考文献


1) コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，日本建築学会，1997.10