

論 文

[2064] 円形鋼管で横補強されたコンクリートの三軸圧縮性状に関する実験的研究

正会員 富井政英（九州大学工学部）

正会員 崎野健治（九州大学工学部）

正会員 ○肖 岩（九州大学大学院）

1. 序

著者らは、円形断面鉄筋コンクリート(以下RCと書く)短柱のせん断補強法として、円形钢管(以下钢管と書く)で横補強する方法を提案し、せん断スパン比が1の短柱について繰り返しせん断実験を行い、その有効性を実証してきた^{1),2)}。また、この横補強法を用いた柱における钢管の役割を調べるため、従来のコンクリート充填钢管柱と比較する中心圧縮実験を行った³⁾。その結果によると、コンクリート充填钢管柱の場合、钢管の役割は材軸方向の応力を直接負担することであり、圧潰して体積膨張を起こすコンクリートを円周方向応力により拘束する効果は、すでに钢管が降伏しているので、それほど期待できない。これに対して、钢管を横補強材としてのみ用いる場合は、钢管の充填コンクリートに対する拘束作用が始まる前に軸方向力によって降伏を起こしてしまうことがないので、钢管が大きな円周方向応力を負担し、それによるコンクリートの耐力および韌性の著しい上昇が期待できる。

コンクリートが钢管より側圧を受けると三軸圧縮応力状態になるので、钢管横補強柱の力学的性状を一層把握するためには、钢管で横補強されたコンクリートの構成則に関する研究が必要である。本論文においては、钢管で横補強されたコンクリートの三軸圧縮性状を調べるために行った中心圧縮実験の方法および結果を示す。

2. 実験概要

2.1 試験体

高強度コンクリート(調合強度480kg/cm²)を用いて、钢管の径厚比(D/t)を変えた実験を行った。钢管の径厚比 D/t は19.7(H-20シリーズ)と74.7(H-75シリーズ)の二種類で、横補強材として用いられる钢管の実用的な範囲の上限値と下限値であると考えている。同一条件で5体の試験体の実験を行った。钢管の内面には、钢管とコンクリートとの間の付着応力をできるだけ小さくするため、薄いグリース膜を塗布した。実験は材齢4週にて行った。

コンクリートの重量調合比は、水:セメント:砂:砂利=170:378:781:1011で、スランプは8cmである。細骨材には粒径2.5mm以下の海砂、粗骨材には粒径20mm

表-1 試験体の実験条件と主な実験結果一覧

試験体名	$c\sigma_b$ (kg/cm ²)	D/t	柱高さ H(mm)	初期降伏耐力 N_{yo} (ton)	降伏耐力 N_y (ton)
H-20-1	465	19.7	355	270	296
H-20-2				265	286
H-20-3				265	281
H-20-4				270	291
H-20-5				275	287
H-75-1	483	74.7	350	170	182
H-75-2				171	186
H-75-3				173	182
H-75-4				179	190
H-75-5				180	191

注) 1) $c\sigma_b$: コンクリートの一軸圧縮強度2) D/t : 補強钢管の径厚比

3) 試験体名凡例: H-20-1

1 2 3

1 : high strength concrete 2 : $D/t = 19.7 = 20$

3 : 試験体 No.1

表-2 鋼管の実測寸法と力学的性質

シリーズ名	外径 D(mm)	肉厚 t(mm)	降伏応力度 $s\sigma_y$ (kg/cm ²)	ヤング係数 sE (kg/cm ²)	ボアソン比 $s\nu$
H-20	178.1	9.06	2702	2.23×10^6	0.274
H-75	170.3	2.28	2692	2.20×10^6	0.284

以下の碎石を用いた。厚肉鋼管は市販の鋼管で、材質はSTK41である。薄肉鋼管は材質SS41の薄板を円形に成型した後縫目を溶接して製作した。いずれの鋼管も残留応力を除去するため焼鈍して使用した。試験体の実験条件と主な実験結果一覧を表-1に、鋼管の実測寸法と焼鈍後の力学的性質を表-2に示す。

2.2 実験方法

図-1に示すように、材端において、載荷板を置き、充填コンクリートだけを圧縮する。載荷は一端固定他端ピンの材端条件で、500ton試験機を使用して行った。柱全体の縮み量を4個の変位計(感度 $500\mu/\text{mm}$)を用いて測定した。柱中央部におけるコンクリートの軸方向ひずみ度を、柱中心に埋設した柱と同じ高さの測定パイプ(外径22mm、肉厚1.2mm)内に貼付した2枚の一軸塑性ゲージ(ゲージレンジス60mm)で測定した。測定パイプは半円に切った2本の電縫パイプの内表面に1枚ずつゲージを貼付した後再び接着剤で接合したものである。測定パイプには軸方向ひずみ度が0.03に達するまでは局部座屈が生じないことを予備実験により確認している。また、圧縮に対して明瞭な降伏点を持たないようにするために、あらかじめ引張により降伏させて用いた。補強鋼管表面に一軸塑性ゲージ(ゲージレンジス10mm)を貼付し、鋼管表面の軸方向および円周方向のひずみ度を測定した(図-2参照)。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

実験終了後、試験体中央部近傍ではふくらみが観察され、充填コンクリートの材軸方向の縮み量は鋼管のそれよりはるかに大きく、実験前には同一平面内にあったコンクリートが鋼管内にめり込んでいる。また、試験体H-20-1およびH-20-2に埋設した測定パイプを取り出して、その実験後の状況を観察した。試験体H-20-1は柱の平均ひずみ度が0.07の時に、H-20-2は0.017の時に除荷している。試験体H-20-1の測定パイプには局部座屈が生じているが、H-20-2のそれには全く生じていない。本実験は補強鋼管が降伏するまでの充填コンクリートの三軸圧縮挙動を調べることが主目的で、後述するように、その範囲内において、いずれの試験体の軸方向平均圧縮ひずみ度も0.017より小さく、試験体中央部コンクリートの軸方向ひずみ度に関しては測定パイプの局部座屈の影響を受けない信頼のおけるデータが得られたものと思われる。

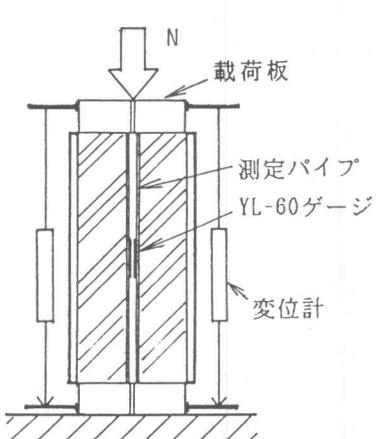


図-1 載荷および測定方法

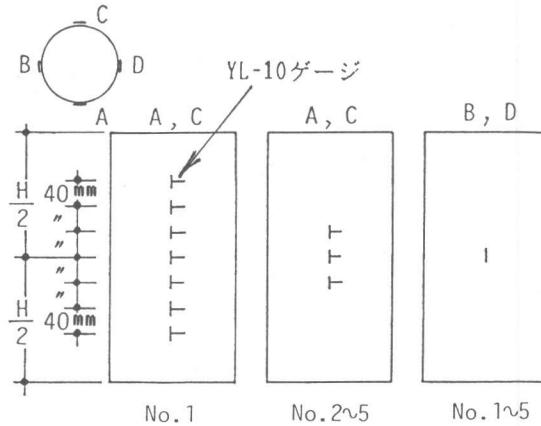


図-2 鋼管表面のひずみゲージの貼付位置

3.2 荷重-変形関係

以下の記述においては、応力および変形に関して圧縮を正とする。

図-3(a)、(b)にH-20シリーズおよびH-75シリーズの各試験体の軸力 N と縮み量 δ の関係を示す。縮み量は4つの変位計で測定した値の平均である。図中の●は鋼管が降伏した点で、鋼管表面に貼付したひずみゲージの測定値より判定した。その時の軸力を柱の初期降伏耐力(N_{yo})と定義する。また、▼は鋼管がひずみ硬化域に入る以前で、柱の軸力 N と縮み量 δ の関係が安定した点(下り勾配が表れる場合は最大荷重)で、この点に対応する軸力を降伏耐力(N_y)と定義する。図-3よりわかるように、鋼管が降伏した後軸力が若干上昇して降伏耐力に達する。降伏耐力 N_y と初期降伏耐力 N_{yo} との差は N_{yo} の10%以下である。H-20シリーズの場合は降伏耐力以降の軸力低下が見られなかつたが、H-75シリーズの場合は低下し、大変形時には降伏耐力の70%位の軸力で安定している。

3.3 弹性範囲にある鋼管の柱高さ方向における応力度分布

実験では、鋼管表面にひずみゲージを貼付し、鋼管表面の軸方向ひずみ度 $s\varepsilon_z$ および円周方向ひずみ度 $s\varepsilon_\theta$ を計測した。鋼管の応力状態を二軸応力状態と仮定すると、弾性範囲の鋼管の軸方向応力度 $s\sigma_z$ および円周方向応力度 $s\sigma_\theta$ は次式で求められる。

$$s\sigma_z = \frac{sE}{1-s\nu^2} (s\varepsilon_z + s\nu \cdot s\varepsilon_\theta) \quad (1a) ; \quad s\sigma_\theta = \frac{sE}{1-s\nu^2} (s\varepsilon_\theta + s\nu \cdot s\varepsilon_z) \quad (1b)$$

ここで、 sE 、 $s\nu$ は鋼管のヤング係数およびポアソン比である。

一例として、試験体H-20-1の弾性範囲にある鋼管の柱高さ方向における応力度分布を図-4

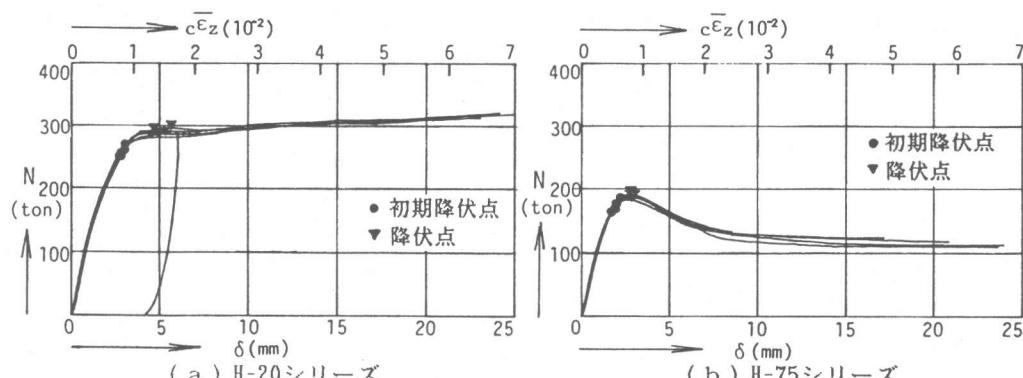


図-3 荷重変形関係

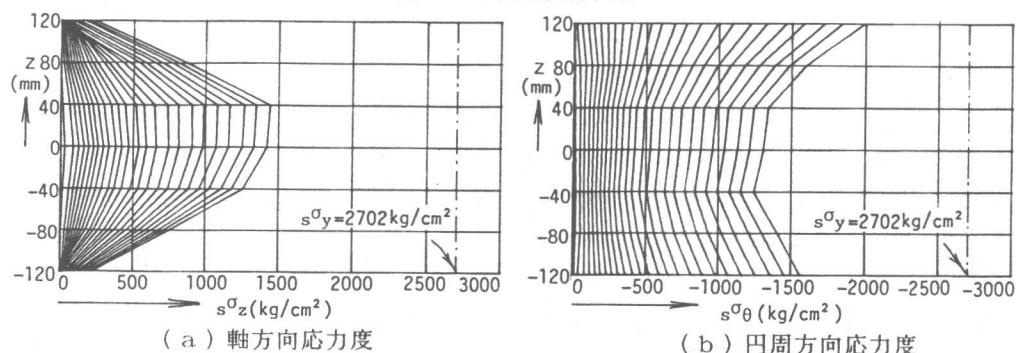


図-4 柱高さ方向における鋼管の応力度分布

に示す。なお、鋼管の降伏条件として二軸応力状態でのMisesの降伏条件を使用した。図-4よりわかるように、鋼管の応力度は柱の中央断面より±40mmの範囲内ではほぼ一様になっている。次節以降においては、柱中央部(材軸方向ひずみ度の測定用に用いたひずみゲージのゲージレンジスは60mm)における充填コンクリートの三軸圧縮挙動について検討する。

3.4 充填コンクリートの軸方向応力度 $c\sigma_z$ とひずみ度 $c\varepsilon_z$ の関係

柱中央断面において、鋼管の応力度 $s\sigma_z$ 、 $s\sigma_\theta$ がわかれば、充填コンクリートの応力状態を図-5のように仮定して、その3主応力度 $c\sigma_z$ 、 $c\sigma_r$ 、 $c\sigma_\theta$ が次の(2)、(3)式により求められる。

$$c\sigma_z = \frac{N - sA \cdot s\sigma_z}{cA} \quad (2)$$

$$c\sigma_r = c\sigma_\theta = \sigma_r = -\frac{2t}{D-2t} \cdot s\sigma_\theta \quad (3)$$

ここで、 N は軸力、 sA は鋼管の断面積、 cA はコンクリートの断面積、 t は鋼管の管厚、 D は鋼管の外径、 σ_r は側圧である。なお、(2)式の軸力 N は全軸力より測定パイプの負担分を差し引いた軸力である。一方、柱中央部充填コンクリートの軸方向ひずみ度 $c\varepsilon_z$ は測定パイプに貼付しているひずみゲージの測定値より求まり、半径および円周方向のひずみ度 $c\varepsilon_r$ 、 $c\varepsilon_\theta$ は鋼管とコンクリート断面内における変形の適合条件より次の関係で求まる。

$$c\varepsilon_r = c\varepsilon_\theta = \varepsilon_r = s\varepsilon_\theta \quad (4)$$

図-6(a)、(b)にH-20およびH-75シリーズの各試験体について求めたコンクリートの軸方向応力度 $c\sigma_z$ とひずみ度 $c\varepsilon_z$ 関係を実線で示す。図中の点線は軸方向応力度 $c\sigma_z$ と軸方向平均ひずみ度 $c\bar{\varepsilon}_z (= \delta / H)$ の関係で、破線はコンクリートシリンダーの中心圧縮試験より

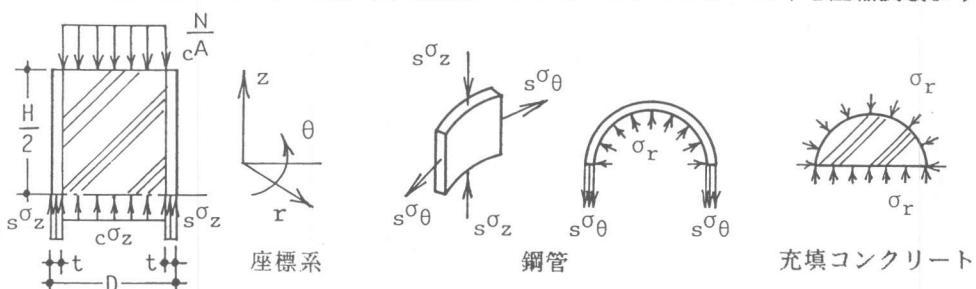


図-5 柱中央部の鋼管および充填コンクリートの応力状態

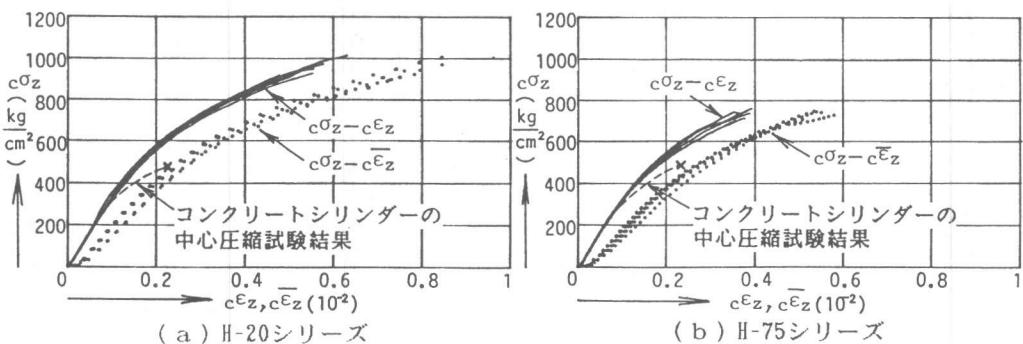


図-6 充填コンクリートの軸方向応力度・ひずみ度関係

求めた応力度・ひずみ度関係である。図-6よりわかるように、各シリーズの5体の試験体に関する実験結果のバラツキは小さい。また、実線と破線で示される応力度・ひずみ度関係の初期剛性は一致している。これは、載荷の初期においては、コンクリートは鋼管からの側圧をほとんど受けていないことと、測定パイプによる測定は精度よく行われたことを意味する。これに対して、点線で示される応力度・ひずみ度関係の初期剛性は実線あるいは破線のそれよりかなり小さく、加圧板と試験体端面の間の局部変形の影響を受けていることがうかがわれる。

3.5 充填コンクリートの三軸圧縮構成関係

前節で述べた方法により柱中央部充填コンクリートの応力度およびひずみ度が求まれば、その八面体垂直応力度とひずみ度 $c\sigma_{oct}$, $c\varepsilon_{oct}$ 、および八面体せん断応力度とひずみ度 $c\tau_{oct}$, cY_{oct} は次式より求まる。

$$c\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(c\sigma_z + 2\sigma_r) \quad (5a); \quad c\varepsilon_{oct} = \frac{1}{3}(c\varepsilon_z + 2\varepsilon_r) \quad (5b);$$

$$c\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}(c\sigma_z - \sigma_r) \quad (5c); \quad cY_{oct} = \frac{2\sqrt{2}}{3}(c\varepsilon_z - \varepsilon_r) \quad (5d)$$

図-7にH-20およびH-75シリーズの各試験体の柱中央部充填コンクリートの八面体応力度・ひずみ度関係をそれぞれ実線および点線で示す。図-7よりわかるように、八面体応力度・ひずみ度関係は2つのシリーズの間でほとんど差がない。このことは、今回の実験で用いた実験条件では、鋼管が降伏するまでコンクリートがほとんど体積膨張を起こさず、その単調圧縮時の構成方程式を等方性非線形弾性体と仮定して八面体応力度・ひずみ度関係により定式化できることを意味する。

一方、Cedolinらは、三軸応力を受けるコンクリートを等方性非線形弾性体と仮定して、既往の実験結果にもとづいて次のような構成方程式を提案している⁴⁾。

$$c\sigma_{oct} = 3cK_0 \cdot [a(b) - \frac{c\varepsilon_{oct}}{c} + d] \cdot c\varepsilon_{oct} \quad (6a)$$

$$c\tau_{oct} = cG_0 \cdot [p(q) - \frac{cY_{oct}}{r} - s \cdot cY_{oct} + t] \cdot cY_{oct} \quad (6b)$$

ここで、 cK_0 、 cG_0 はコンクリートの初期体積係数および初期せん断剛性係数で、実験結果より定める係数は次のものである。

$$a=0.85, b=2.5, c=0.0014, d=0.15;$$

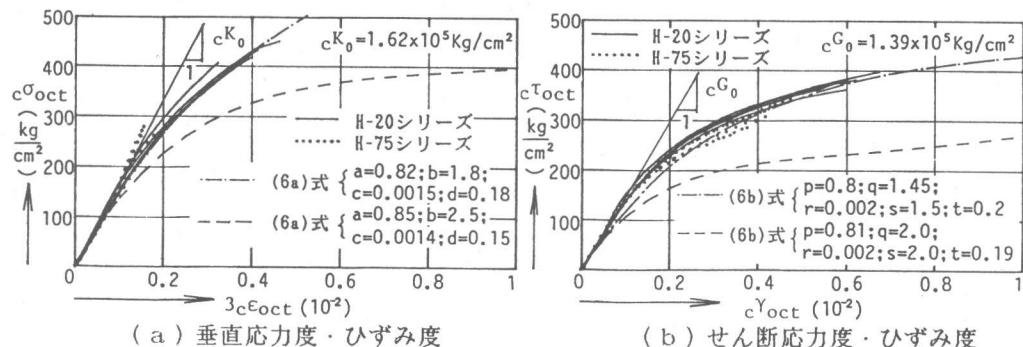


図-7 充填コンクリートの八面体応力度・ひずみ度関係

$$p=0.81, q=2.0, r=0.002, s=2.0, t=0.19$$

この構成方程式を図-7に示すと、破線となり、本実験の結果より剛性が低い。9個のパラメータを本実験結果より定めると次のようになり、これを図-7に示すと一点鎖線を得る。

$$\alpha=0.82, b=1.8, c=0.0015, d=0.18;$$

$$p=0.8, q=1.45, r=0.002, s=1.5, t=0.2$$

Cedolinらの提案式は主に一軸圧縮強度が 300kg/cm^2 以下のコンクリートの三軸圧縮実験結果にもとづいて求めたものである。一方、本実験は高強度コンクリートを用いたものであり、そのことが両者が一致しない原因の一つであると考えられる。低強度のコンクリートの実験は今後行う予定である。なお、本論文は紙面の都合でコンクリートの破壊基準についての検討は割愛した。

4. 結論

径厚比 $D/t = 19.7$ および 74.7 の二種類の円形鋼管で横補強された高強度コンクリートの三軸圧縮性状について実験的に検討し、その結果、鋼管が降伏するまでのコンクリートを等方非線形弾性体として取り扱い、その構成関係を八面体応力度・ひずみ度関係を用いて定式化できることを明らかにした。

[謝辞]実験にあたって、九州大学文部技官藤原文夫、青木治、川口晃、津賀山健次、久島昭久諸氏のご協力を得た。ここに感謝します。本実験に用いた鋼管を提供していただいた住友金属(株)に感謝します。

〔参考文献〕

- 1) 肖岩、富井政英、崎野健治：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.8、1986、pp.517-520.
- 2) 肖岩、崎野健治、富井政英：円形断面鋼管補強鉄筋コンクリート短柱の曲げ耐力および変形性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9, No.2、1987、pp.549-554.
- 3) 崎野健治、渡辺宏一、富井政英：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—その2 短柱の中心圧縮耐力、建築学会学術講演梗概集、昭和60年10月、pp.415-416.
- 4) Cedolin,L.,Crutzen,Y.R.J.,and Poli,S.D.:Triaxial Stress-Strain Relationship for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.Em3, June, 1977, pp.423-464.