

論文 一軸圧縮を受ける円形 CFT 柱の力学特性に関する実験的研究

山口 恭平*1・秋山 充良*2・内藤 英樹*3・鈴木 基行*4

要旨: コンクリート充填鋼管の一軸圧縮実験を行い、その力学特性に関する基礎データを収集した。主な実験因子は、鋼管種別（電縫鋼管とスパイラル鋼管）、および充填されるコンクリートの圧縮強度である。コンクリート圧縮強度が大きく、かつ鋼管の周方向応力の発現が遅れる場合には、RC 柱と同じく、充填コンクリートに圧縮破壊の局所化が生じ、局所ひずみが後退または停滞する領域が現われることを確認した。また、鋼管の応力経路や充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係の比較から、充填コンクリートのコンファインド効果の評価ではスパイラル鋼管が持つらせん形のシーム(溶接)の影響は考慮する必要がないと判断された。

キーワード: コンクリート充填鋼管、一軸圧縮実験、スパイラル鋼管、電縫鋼管、圧縮破壊の局所化

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（以下、CFT）構造は、耐荷力や変形性能の向上、また、施工の合理化などを可能にするため、近年、橋梁上部工・下部工への適用が増加している。著者らは、この背景のもと、橋梁下部工（橋脚）のコスト削減を第一の目的に、従来は杭体に用いられてきたスパイラル鋼管にコンクリートを充填した CFT 柱を製作し、正負交番載荷実験に基づきその耐震性能を検証した¹⁾。スパイラル鋼管の製造では、コイルを連続的に巻き戻しながら成形ロールでスパイラル状に曲げて円筒状にし、継ぎ目を溶接する。そのため、シーム（溶接）部がらせん形となり、従来の冷間成形鋼管部材（電縫鋼管等）と比べて形状初期不整や初期応力は複雑となる。このため、スパイラル鋼管柱の耐震性能評価では、シーム部がその耐力や変形性能に与える影響に着目したが、結果として、電縫鋼管で製作した CFT 柱と同等の荷重-変位関係が得られ、既存の電縫鋼管を対象とした変形性能評価法がそのままコンクリート充填スパイラル鋼管柱に適用できることなどを確認した。

しかしながら、参考文献 1) の検討は、鋼管製造方法の異なる CFT 柱の耐震性能の差異を荷重-変位関係を用いたマクロ的な視点から考察したのみであり、それが鋼管内部の充填コンクリートの破壊特性などに及ぼす影響は検証できていない。参考文献 1) と同時に行ったコンクリート充填がない場合のスパイラル鋼管柱の正負交番載荷実験では、シーム部があることで外観的な局部座屈性状に電縫鋼管との明らかな違いが観察されているなど、鋼管から充填コンクリートに与えられる横拘束圧や充填コンクリートの破壊性状に及ぼす鋼管製造方法の影響をより詳細に検証する必要がある。

そこで、本研究では、電縫鋼管とスパイラル鋼管を用意し、その一軸圧縮実験から、鋼管内のコンクリートの破壊性状やそのコンファインド効果の発現状況の違いなどを確認した。その際、充填コンクリートの圧縮強度や、鋼とコンクリートの軸力分担割合を変えた一軸圧縮載荷も行い、それらが CFT 柱の破壊性状や力学特性に与える影響をあわせて考察した。

2. CFT 柱の一軸圧縮実験

2.1 供試体諸元

供試体諸元の一覧を表-1 に示す。電縫鋼管柱の一部の実験結果は、既に参考文献 2) で報告している。鋼管は、STK400 の電縫鋼管と SKK490 のスパイラル鋼管の 2 種類である。スパイラル鋼管では、用意した電縫鋼管と同程度の小径鋼管を製造できないことから、両者の径厚比が近くなるようにその諸元（鋼管の外径・鋼管厚さ）を決めている。

供試体タイプと載荷方法を図-1 (a)~(c) に示す。図-1 (a) は、鋼管内部にコンクリートを充填しない供試体（以下、無充填鋼管柱）であり、スパイラル鋼管の場合に入るらせん形のシームも記載している。CFT 供試体は、図-1 (b) と (c) に示すように、鋼管とコンクリートの軸荷重の分担割合を変えた 2 種類を作製した。図-1 (b) に示されるボンド型柱は、コンクリートと鋼管を同時に圧縮載荷するものであり、鋼管柱の上端に内径 $0.8D$ (D : 鋼管の外径) の内リブを設け、内リブより下部ではコンクリートと鋼管が一体となって荷重を支持するようにした。図-1 (c) のアンボンド型柱は、鋼管に軸荷重を負担させず、コンクリート部分のみに軸荷重を加える供試体とした。コンクリートと鋼管の付着を除くため、鋼管

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元の一覧

| 供試体名 | 供試体タイプ | 鋼管 | | | | | | コンクリート | | 横拘束圧 (MPa) |
|----------|--------------------|---------|---------|-------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | | 外径 (mm) | 厚さ (mm) | 径厚比 | 降伏強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | ヤング係数 (MPa) | 圧縮強度 (MPa) | ヤング係数 (MPa) | |
| 電縫鋼管柱 | TA ²⁾ | 216 | 4.5 | 48 | 380 | 445 | 202000 | --- | --- | --- |
| | TB20 ²⁾ | | | | | | | 22.2 | 17600 | 16.2 |
| | TC20 | | | | | | | 21.5 | 19100 | 17.0 |
| | TB60 ²⁾ | | | | | | | 58.5 | 31600 | 16.2 |
| | TC60 | | | | | | | 42.6 | 28800 | 17.0 |
| スパイラル鋼管柱 | SA-7 | 400 | 7 | 57 | 409 | 516 | 192000 | --- | --- | --- |
| | SB20-7 | | | | | | | 21.7 | 17800 | 14.6 |
| | SC20-7 | | | | | | | --- | --- | --- |
| | SA-9 | | | | | | | --- | --- | --- |
| | SB20-9 | | 25.6 | 17200 | 21.6 | | | | | |
| | SC20-9 | | 22.2 | 15800 | | | | | | |
| | SB60-9 | | 40.5 | 29100 | | | | | | |
| | SC60-9 | | --- | --- | | | | | | |

※ 全供試体の高さは外径の4倍。

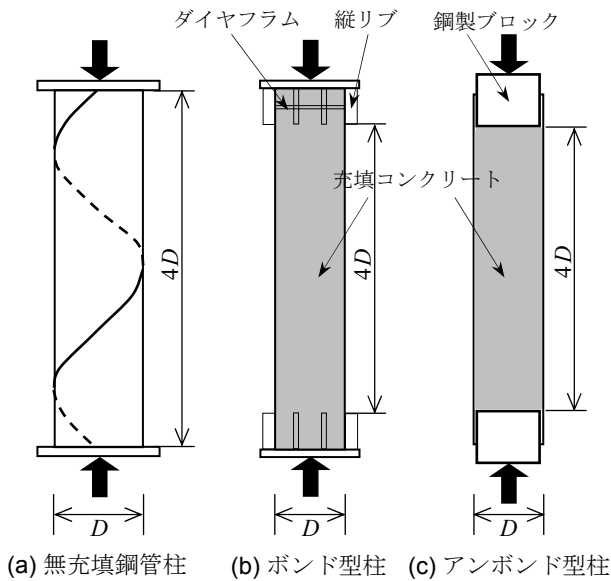


図-1 供試体概略図

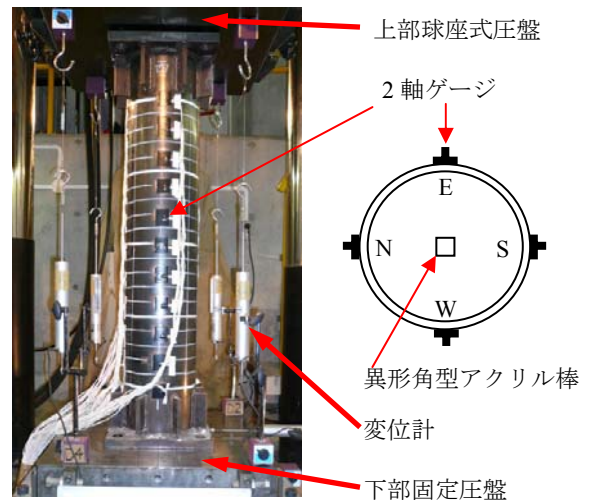


図-2 載荷状況の一例

内側にグリースを塗布した後にコンクリートを充填した。

2.2 載荷方法と測定項目

載荷には、東北大学の10MN大型載荷試験装置と日本大学の30MN大型載荷試験装置を用いた。載荷状況の一例を図-2に示す。載荷は変位制御で行い、無充填鋼管柱では、最大荷重の50%に荷重が低下するまで、CFT柱では、上下部圧盤間の変位を供試体高さで除したひずみ（以下、平均ひずみ）が3%を超えるまで継続した。上下部圧盤間の軸方向変位は、図-2に示すように設置した4つの変位計の測定値の平均を用いた。

無充填柱とボンド型柱では、図-2に示されるように、軸方向に0.4D間隔で2軸ひずみゲージを貼付した。アンボンド型柱でも同じ位置にゲージを貼付しているが、その多くが円周方向ひずみを計測するための1軸ゲージであり、一部で鋼管とコンクリートの付着状態を確認するために2軸ゲージを貼付した。また、CFT柱では、コンクリートの軸ひずみ分布を計測するため、高さ方向に80mm間隔でひずみゲージを貼付した异形角型アクリル棒を断面中心に埋め込んでいる^{2),3)}。以降では、この80mm間の平均ひずみを局所ひずみと呼ぶ。なお、アクリ

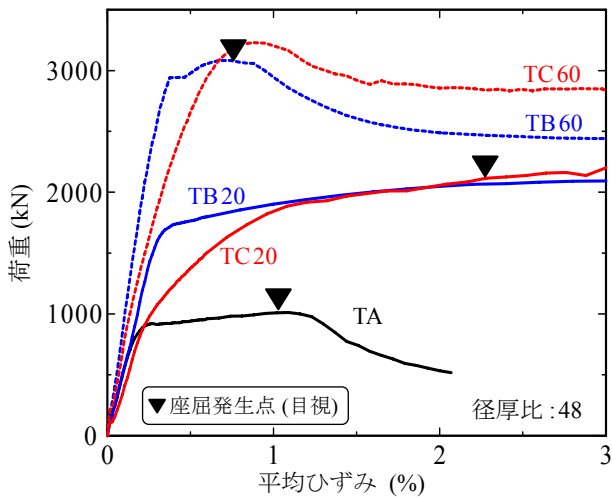


図-3 荷重-平均ひずみ関係(電縫鋼管)

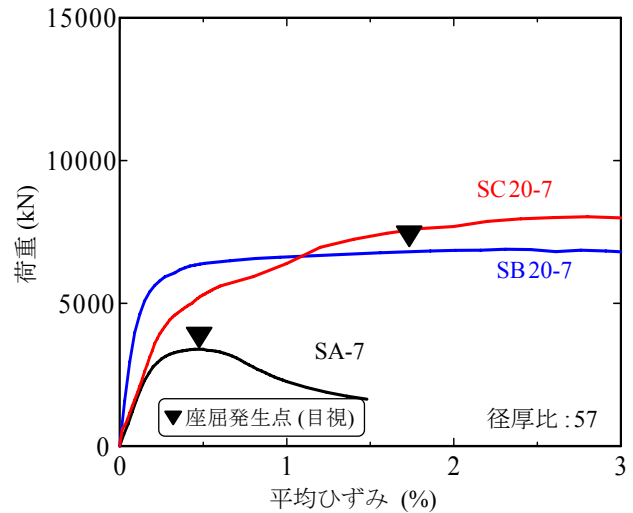


図-4 荷重-平均ひずみ関係
(スパイラル鋼管板厚7mm)

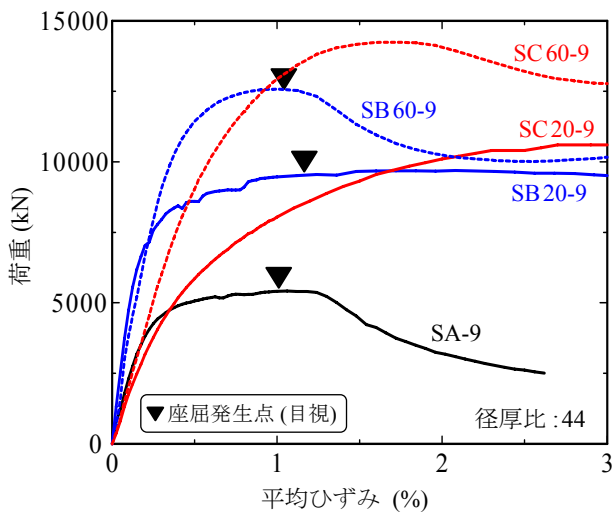


図-5 荷重-全長ひずみ関係
(スパイラル鋼管板厚9mm)

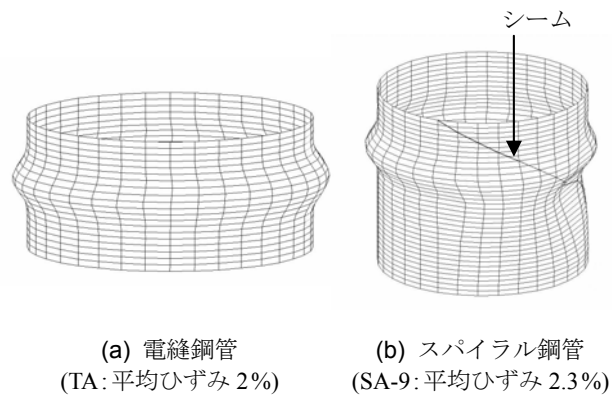


図-6 無充填鋼管柱の局部座屈形状

ル棒には大ひずみゲージ(精度保障範囲: $\pm 1.5 \times 10^5 \mu$), 鋼管には通常の2軸ゲージ(精度保障範囲: $\pm 3.0 \times 10^4 \mu$)を貼付した。さらに、鋼管に局部座屈が発生した場合には、型取ゲージにより局部座屈形状を記録した。

2.3 実験結果

(1) 損傷状況と荷重-変位関係

荷重-平均ひずみ関係を図-3~図-5に示す。各図には、目視による鋼管の局部座屈発生点も示している。

無充填鋼管柱(TA, SA-7, SA-9)では、電縫鋼管とスパイラル鋼管のいずれも最大荷重付近で鋼管の柱上端部に局部座屈が確認され、軸ひずみの増加に伴ってその変形が進展した。型取ゲージを用いて作成した電縫鋼管およびスパイラル鋼管の変形図を図-6(a), (b)に示す。前記した正負交番荷重実験と同様に、コンクリートを充填しない板厚9mmのスパイラル鋼管(SA-9)では、図-6(b)に示すようにシーム部の下側が鋼管内側へ入り込む変形となった。一方、鋼管にコンクリートを充填したボンド型柱では、鋼管が軸圧縮力を受けた際に鋼管内部への座屈変形が抑制されるため、スパイラル鋼管を用い

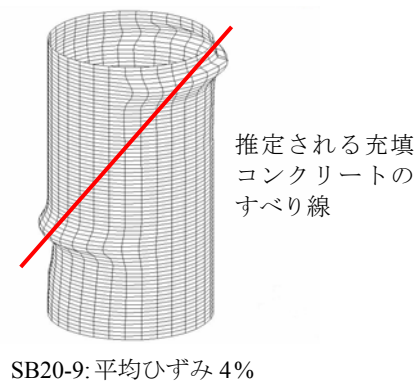


図-7 せん断すべりの形成

た場合にも柱上部において図-6(a)と同様の象の足座屈が確認された。

圧縮強度20MPa程度のコンクリートを充填したボンド型柱(TB20, SB20-7)では、無充填鋼管柱よりも座屈発生時ひずみが増加しており、鋼管の局部座屈後の大幅な荷重低下は見られない。一方、コンクリート圧縮強度が大きいボンド型柱(TB60, SB60-9)では、無充填鋼管柱と同程度の平均ひずみにおいて鋼管上端部に局部座屈が確認され、その後に荷重が低下した。また、ボンド型柱

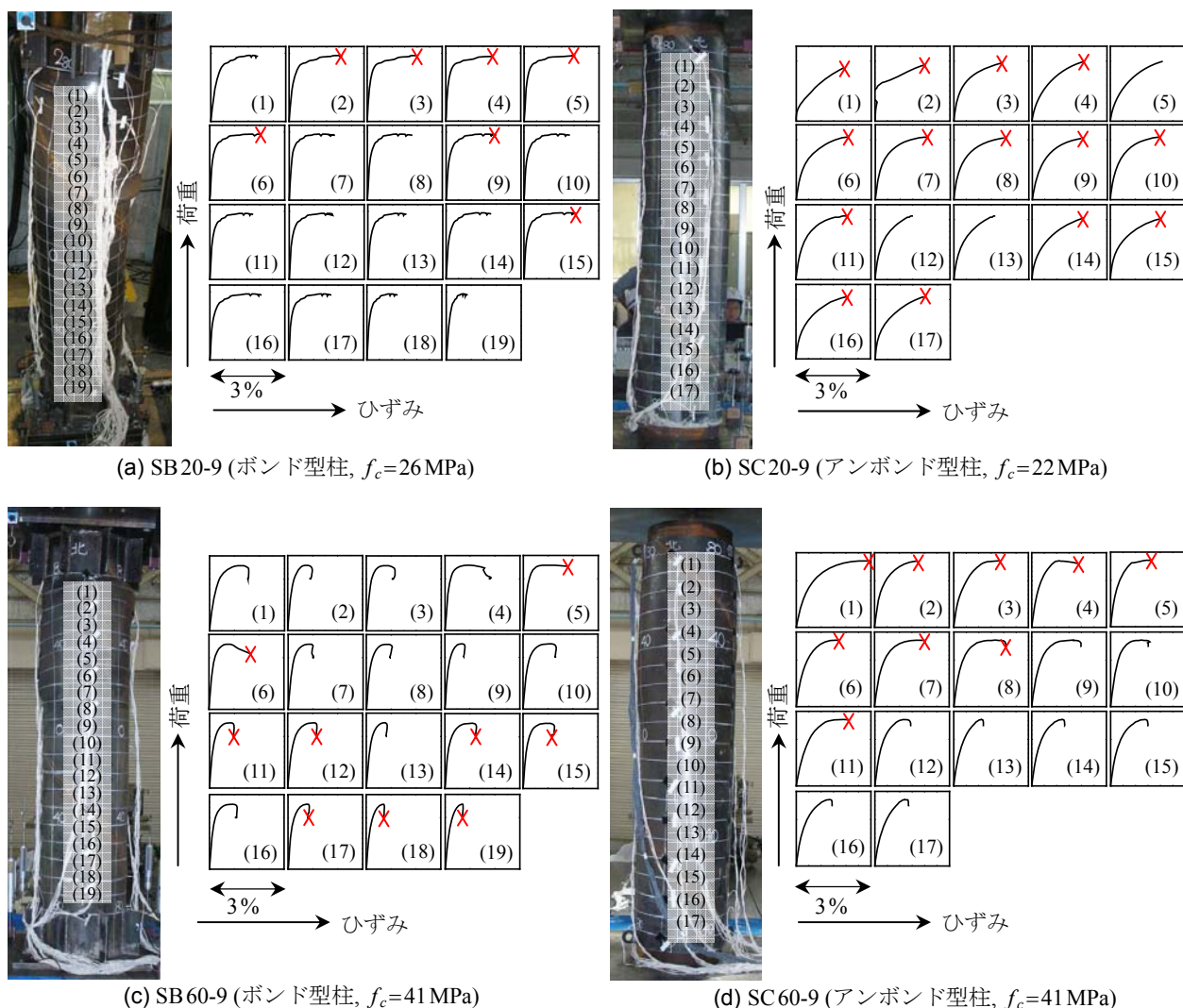


図-8 充填コンクリートの荷重一局所ひずみ分布

(TB60, SB60-9, SB20-9)では、外観的な鋼管の変形状から、図-7に示すような充填コンクリートのせん断すべりが形成されたと思われる。本実験における図-7のすべり線角度はいずれも60度程度であった。電縫鋼管を用いた佐藤⁴⁾の同種の実験では、荷重後に鋼管が溶断され、60度程度のせん断すべりの形成が確認されており、本実験結果とあわせて考えると、このせん断すべり面の角度に鋼管種別やコンクリート強度は影響しないと判断できる。

充填コンクリートのみに荷重を加えたアンボンド型柱では、鋼管の局部座屈は見られなかった。また、コンクリート圧縮強度が大きいTC60には図-7に示す充填コンクリートのせん断すべりが形成されたが、その他のアンボンド型柱では、鋼管種別やコンクリート強度などに関わらず、鋼管全体が周方向に膨張する変形が見られた。その結果、TC60では若干の荷重低下が見られたが、その他のアンボンド型柱では平均ひずみ3%までほとんど荷重が低下しなかった。

(2) 充填コンクリートの軸ひずみ分布

本実験では、参考文献2)や3)の検討と同様に、断面中心部に異形角型アクリル棒を埋め込み、充填コンクリートの軸ひずみ分布を計測した。一例として、平均ひずみが3%に達するまでのスパイラル鋼管柱(厚さ:9mm)における荷重一局所ひずみ関係を図-8(a)~(d)に示す。図中の×印は、ひずみゲージの破損を示している。平均ひずみが3%に到達する前に局所ひずみが大きくなり、多くのひずみゲージが破損したが、局所ひずみが進展する領域を特定するには問題のないデータが得られた。圧縮強度20MPa程度のコンクリートを充填したSB20-9やSC20-9では、平均ひずみ3%まで荷重が低下しないため、図-8(a)や(b)に示されるように、供試体全長でコンクリートの局所ひずみが進展した。一方、圧縮強度の大きなコンクリートを充填した場合には、図-8(c)や(d)に示すように、最大荷重後に局所ひずみが進展する領域と局所ひずみが後退または停滞する領域³⁾が混在した。SB60-9では、ゲージ番号(4)~(6)のみが局所ひずみの進展領域となり、荷重低下の程度が大きいボンド型柱で

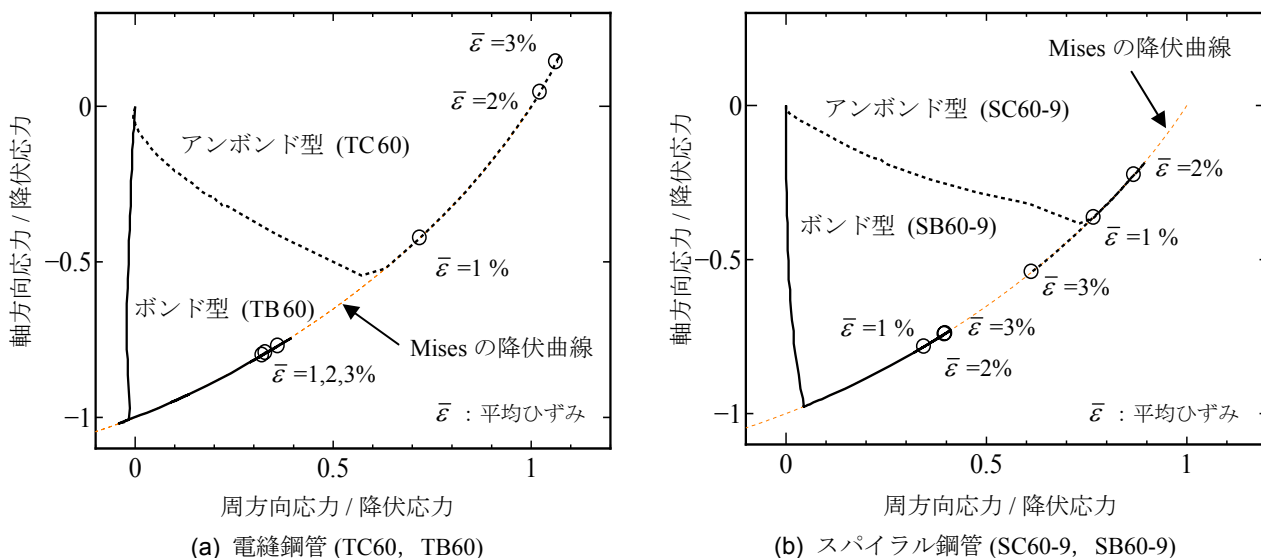


図-9 鋼管の応力経路

その領域長さは小さくなった。著者らは、RC 柱の一軸圧縮実験に基づき、横拘束筋から与えられる横拘束圧をコンクリート圧縮強度や横拘束筋に作用する応力の関数として定式化しており、高強度コンクリートを使用した場合など、横拘束圧が小さいと最大荷重後の荷重低下が大きく、局所ひずみが進展する領域長さは小さくなることを報告した³⁾。後述されるように、ボンド型柱では、周方向応力がアンボンド型柱よりも小さく、さらに SB20-9 よりもコンクリート圧縮強度が大きいことから、RC 柱の場合と同様に、SB60-9 では最大荷重後の荷重低下が大きく、局所ひずみが進展する領域長さが他の供試体よりも小さくなったと推察される。

なお、参考文献 2) で一部報告したように、電縫鋼管を対象に図-8 と同様の荷重-局所ひずみ関係を作成した場合にも同様の考察を得ている。

(3) 鋼管の軸方向応力と周方向応力

鋼管に貼付した 2 軸ゲージにより、鋼管の軸方向応力と周方向応力の応力経路を求めた。応力経路を算定する際には、von Mises の降伏曲面を仮定した。鋼管の材料特性は表-1 のヤング率と降伏応力を用いたほか、ポアソン比は 0.3 とし、降伏後のひずみ硬化は無視した。

一例として、コンクリート圧縮強度が大きい電縫鋼管 (TB60 と TC60) とスパイラル鋼管 (SB60-9 と SC60-9) の応力経路を図-9 に示す。図-9 の縦軸と横軸は各鋼管の降伏応力で無次元化している。なお、アンボンド型柱では全ての 2 軸ゲージから、ボンド型柱ではコンクリートの局所ひずみが進展する領域にある 2 軸ゲージからそれぞれ平均値を算定し、応力経路の計算に用いた。

鋼管種別に関わらず、ボンド型柱ではコンクリートと鋼管に同時に軸応力が発生し、鋼管の降伏後、コンクリートの塑性化が顕著となる。塑性域における鋼管のポア

ソン比 0.5 よりもコンクリートのポアソン比が大きいため、コンクリートに軸圧縮力が作用するとコンクリートの横膨張を抑制するために鋼管の周方向応力が増加する。最終的に、鋼管の応力経路は Mises の降伏曲面上を移動し、平均ひずみ 3% までに軸方向応力は降伏応力の 80% 程度まで低下している。また、佐藤⁴⁾ や孫ら⁵⁾ は、コンクリート強度や鋼管の径厚比などに関わらず、最大荷重時に鋼管に発生する周方向応力は降伏応力の 20% 程度になることを報告している。本実験のボンド型柱でも、最大荷重付近で周方向応力は降伏応力の 20~30% 程度となっている。

アンボンド型柱では、前記したとおり、鋼管とコンクリートの付着を除くためグリースを塗布したが、部分的に付着が生じており、図-9 に示されるような軸方向応力が生じた。全体的な傾向としては、ボンド型柱と異なり、平均ひずみが小さい段階から周方向応力が発現し、どちらの鋼管でも平均ひずみ 2% で降伏応力に近づき、これが図-8 のアンボンド型柱とボンド型柱の局所ひずみが進展する領域長さの差を生み出している。

アンボンド型柱では電縫鋼管とスパイラル鋼管の応力経路に差が見られるが、アンボンド型柱では部分的な付着が存在し、その程度が鋼管毎に異なる影響が現われたと思われること、付着の条件が同じとみなせるボンド型柱では応力経路が同等と判断できることを考えると、鋼管種別が応力経路に及ぼす影響は小さく、充填コンクリートに与えられる鋼管からの横拘束圧の大きさにスパイラル鋼管が持つシームは影響していないと思われる。

(4) 充填コンクリートの応力-ひずみ関係

鋼管から与えられる横拘束圧を径厚比と降伏応力から計算すると⁵⁾、表-1 に示される通り、電縫鋼管柱とスパイラル鋼管柱 (板厚: 7mm) で概ね同程度となる。

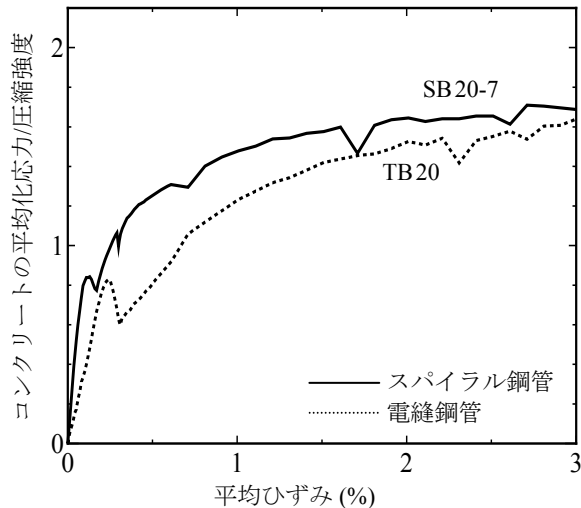


図-10 平均化応力-ひずみ関係の比較

アンボンド型柱では、電縫鋼管とスパイラル鋼管で鋼管とコンクリートの付着状態に差が見られたことから、ここではボンド型柱である TB-20 と SB20-7 の充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係を作成し、その比較からシームの影響を考察する。充填コンクリートの平均応力は次式で算定した。

$$\bar{\sigma} = \frac{N_{all} - \bar{\sigma}_L \cdot A_s}{A_c} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$ ：充填コンクリートの平均応力、 N_{all} ：全荷重、 $\bar{\sigma}_L$ ：ひずみ増分理論による鋼管の軸応力（計算条件は図-9 と同じ）、 A_s ：鋼管断面積、 A_c ：コンクリート断面積、である。

TB20 と SB20-7 の充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係を図-10 に示す。図-10 の縦軸は、軸応力を材料試験で得られたテストピース ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$) の圧縮強度で除している。平均ひずみが小さい領域で、電縫鋼管とスパイラル鋼管内の充填コンクリートの挙動に差が生じているが、全体としてみれば、鋼管種別に関わらず充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係は一致していると言える。既往の無充填鋼管柱の一軸圧縮実験では、電縫鋼管とスパイラル鋼管ではシームの影響によって一軸圧縮特性が異なることが報告されている⁶⁾。しかし、本実験結果に基づく、コンクリート充填を行ったときには、スパイラル鋼管を用いた場合でも、CFT 柱やその充填コンクリートの力学特性を評価する際に、シームの影響は特に考慮する必要はないと思われる。

3. まとめ

本実験により得られた結論を以下に示す。

- (1) 鋼管が軸荷重を負担する場合には、周方向応力の発現が遅れることから、鋼管から充填コンクリートに与えられる横拘束圧が小さくなる。加えて、コンクリート強度が大きくなると、RC 柱の場合と同じく、最大荷重後に荷重低下が生じ、軸ひずみが進展する領域とそれが後退・停滞する領域が現れることを確認した。
- (2) 本実験の範囲では、コンクリートを充填した場合には、スパイラル鋼管を用いた CFT 柱やその充填コンクリートの力学特性を評価する際に、らせん形のシームの影響は特に考慮する必要がないと判断された。

謝辞

本実験の一部は、日本鉄鋼連盟鋼構造研究・教育助成事業（土木一般研究）により実施したものである。また、最大荷重が 10MN を超える供試体の载荷には、日本大学理工学部所有の 30MN 大型载荷試験装置を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口恭平, 白濱永才, 秋山充良, 内藤英樹, 鈴木基行：コンクリートを充填したスパイラル鋼管柱の正負交番荷重実験, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 5-153, pp.305-306, 2007.9
- 2) 佐々木健太, 青木峻二, 秋山充良, 鈴木基行：一軸圧縮を受けるコンクリート充填鋼管柱で生じる圧縮破壊の局所化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1375-1380, 2007.7
- 3) 秋山充良, 渡邊正俊, 阿部論史, 崔松涛, 前田直己, 鈴木基行：一軸圧縮を受ける高強度 RC 柱の破壊性状および力学的特性に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.477-496, 2006.8
- 4) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造における鋼管とコンクリートの相互作用に関する研究, 大阪大学学位論文, 1995.
- 5) 孫玉平, 池之野陽一, 崎野健治：円形鋼管横拘束高強度コンクリートの応力-ひずみ関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.601-606, 1999.7
- 6) 木村祥裕, 小河利行, 佐伯英一郎：製造方法の異なる冷間成形鋼管の局部座屈挙動, 鋼構造論文集, Vol.8, No.29, pp.27-34, 2001.3