

論文 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

佐々木 健太^{*1}・青木 峻二^{*2}・秋山 充良^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨: 円形鋼管内のコンクリートで生じるコンファインド効果の発現メカニズムの解明を目的として、コンクリート圧縮強度が約 20MPa と 60MPa のコンクリートを充填した鋼管柱の一軸圧縮実験を行った。鋼管の軸圧縮力の負担程度によりコンファインド効果は大きく異なり、鋼管の円周方向応力の発現が遅れると、充填コンクリートの圧縮破壊領域で荷重が低下すること、鋼管に軸圧縮力をほとんど負担させないように载荷した場合には、その充填コンクリートの挙動は既往の RC 柱の実験に基づき提案されているコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係により概ね評価可能であること、などが明らかとなった。

キーワード: コンクリート充填鋼管柱, コンファインドコンクリート, 一軸圧縮実験, RC 柱

1. はじめに

著者ら^{1),2)}は、RC 円柱 33 体、RC 角柱 66 体の一軸圧縮実験を実施し、横拘束筋拘束形状、柱長さ、および構成材料の強度や横拘束筋量が圧縮破壊領域長さや応力-変位関係に及ぼす影響などを考察した。実験により、RC 柱の最大荷重後の荷重低下割合と破壊領域長さ(最大荷重後に軸ひずみが進展する領域の柱軸方向の長さ)には相関があり、圧縮軟化挙動が緩やかな性状の供試体ほど破壊領域長さは大きく、柱全体が圧縮破壊されることなどを報告した。

本研究では、円形断面を有する鋼管内のコンクリートで生じるコンファインド効果の発現メカニズムを実験的に明らかにすることを目的に、コンクリート充填鋼管柱(以下、充填鋼管柱)の一軸圧縮実験を行った。本論では特に、充填コンクリートと RC 柱のコアコンクリートで生じる圧縮破壊の局所化や平均化応力-ひずみ関係を比較した結果を報告する。

2. コンクリート充填鋼管柱の一軸圧縮実験

2.1 供試体諸元

供試体諸元の一覧を表-1 に示す。鋼管柱とし

て、無充填鋼管柱 1 体と充填鋼管柱 4 体を製作した。鋼管の板厚と外径の比(径厚比)は、通常の鋼製橋脚に比べやや小さい(厚肉)程度である。コンクリートの目標圧縮強度は 20MPa と 60MPa である。著者らの RC 円柱の一軸圧縮実験²⁾は、目標圧縮強度を全て 40MPa 以上としていたため、目標圧縮強度 20MPa のコンクリートを充填した鋼管柱との比較用に RC 円柱 2 体(CF0P1Y0 と CF0P2Y0)も製作した。RC 円柱の製作方法は、参考文献 2)と同様である。このほか、表-1 には、コンクリート圧縮強度が D2F6N48U および D2F6N48B と概ね等しい既往の RC 円柱(CF2P1Y1)²⁾の諸元も載せている。

充填鋼管柱は、充填コンクリートと鋼管の軸荷重の分担割合を変えた供試体を準備した。図-1(b)に示されるように、D2F2N48B と D2F6N48B では、柱上端に内径 170mm の内リブを設け、内リブより下端ではコンクリートと鋼管が一体となり荷重を支持するようにした。以降、この 2 体をボンド型柱と呼ぶ。なお、ボンド型柱では、充填コンクリートを縦打ちした後、柱上端部の 5cm 程度の範囲に無収縮モルタルを注入して仕上げることで、載荷装置の上部圧盤と

*1 戸田建設(株) 修(工) (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

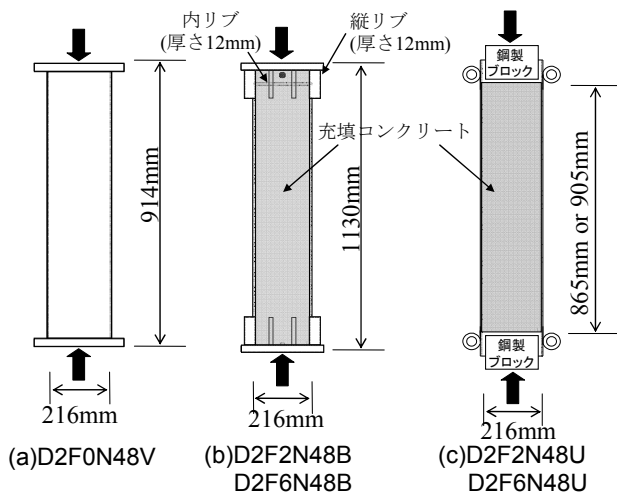
*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*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)

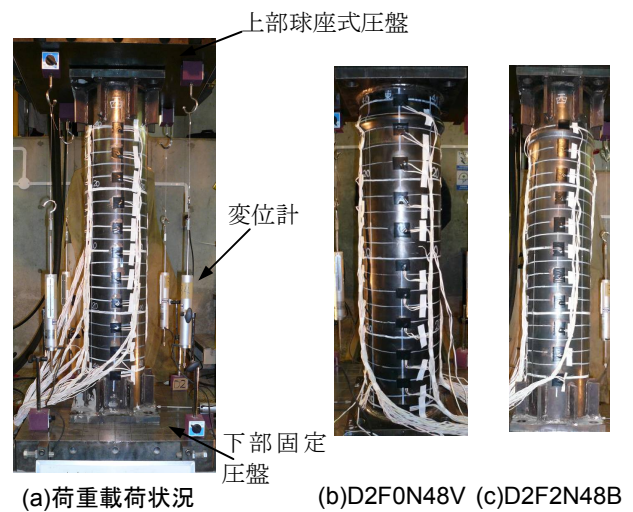
表－1 供試体諸元の一覧

供試体名	外径 (mm)	板厚 (mm)	柱高さ (mm)	コンクリート 圧縮強度 σ'_c (MPa) ^{*1)}	鋼材(横拘束 筋)降伏強度 (MPa)	横拘束筋			備考
						径	間隔 (mm)	体積比 (%)	
CF0P1Y0	300	—	900	21.8	369	D10	55	2.00	RC 柱
CF0P2Y0	300	—	900	21.8	369	D10	110	1.00	RC 柱
CF2P1Y1 ²⁾	300	—	900	65.3	404	$\phi 6.4$	25	1.91	RC 柱
D2F0N48V	216	4.5	914	—	364	—	—	—	図－1(a)
D2F2N48B	216	4.5	1130	22.2	364	—	—	—	図－1(b)
D2F2N48U	216	4.5	905	22.2	364	—	—	—	図－1(c)
D2F6N48B	216	4.5	1130	58.5	364	—	—	—	図－1(b)
D2F6N48U	216	4.5	865	58.5	364	—	—	—	図－1(c)

*1) テストピース($\phi 100 \times 200$ mm)3 本の材料試験より得られた圧縮強度の平均値



図－1 コンクリート充填鋼管の構成



図－2 荷重載荷状況と破壊状況の一例

充填鋼管柱が一様に接地するように配慮した。

図－1(c)の D2F2N48U と D2F6N48U は、充填コンクリートのみに軸荷重を与える載荷方法とした。なお、佐藤³⁾のように、コンクリートと鋼管の付着を完全に除くため、鋼管内側にアスファルトなどを塗布した後にコンクリートを充填する例も見られるが、本研究では、充填コンクリートを鋼管に直接打設している。このため、鋼管にもある程度の軸方向応力が生じ、鋼管中心位置で他の箇所よりも大きな値となっていた。以降では、この2体をアンボンド型柱と呼ぶ。

2.2 荷重載荷方法と測定項目

載荷には、東北大学所有の 10MN 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。

充填鋼管柱と RC 柱には、80mm 間隔でひずみゲージを貼付した異型角型アクリル棒を供試体中心位置に埋め込んでいる。以降では、この

80mm 間の平均軸ひずみを局所ひずみと呼ぶ。この実測方法は、Nakamura and Higai⁴⁾により考案されたものであり、この局所ひずみを積分して得られる圧縮変位は、別途測定した上下圧盤間変位に概ね一致することを確認している。

無充填鋼管柱とボンド型柱では、図－2 に示されるように、柱中央部と、その上下に 80mm 間隔で 11 枚の 2 軸ゲージを鋼管に貼付した。実際には、円周方向に 90 度間隔でこのように 2 軸ゲージを貼付しているため、供試体 1 体につき 44 枚の 2 軸ゲージが貼られている。アンボンド型柱も、同じ位置にゲージを貼付しているが、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、2 軸ゲージを用いている。

この他の測定項目は、荷重、供試体の周囲に 4 つ設置した変位計から測定される柱全長の圧縮

変位, RC 柱の横拘束筋ひずみである。また, 鋼管柱で局部座屈が発生した場合には, 型取ゲージにより座屈形状を記録した。

2.3 実験結果

(1) 荷重－変位関係と損傷状況

無充填鋼管柱と充填鋼管柱の荷重－変位関係を図－3 に示す。また, 局部座屈が明確に確認された無充填鋼管柱と D2F2N48B の載荷終了時に撮影した写真を図－2 に示している。局部座屈は, ともに柱上端部に生じており, 圧縮変位の増加とともににはみ出し量が大きくなる。載荷途中に型取ゲージで測定した座屈形状を荷重－変位関係とともに図－3 に示している。コンクリートが充填されることで, D2F2N48B では, 局部座屈が進展しても荷重低下が生じていない。

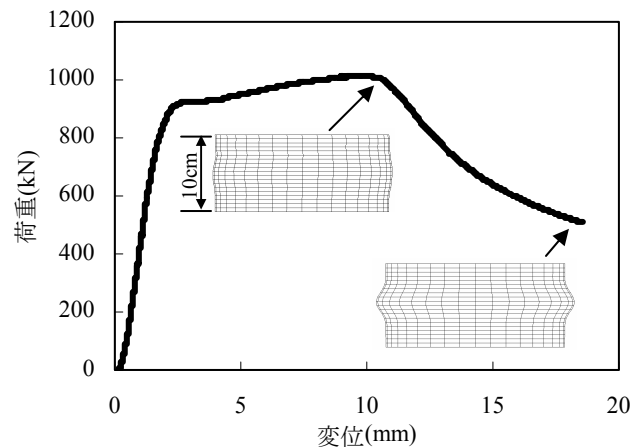
一方, 同じボンド型柱でも, コンクリート圧縮強度の大きい D2F6N48B では, 最大荷重点が明確に現れ, 局部座屈の進展前に荷重低下が生じている。鋼管外側からの観察では, コンクリートにせん断すべり面が発生したと思われる鋼管の変形が生じ, せん断すべり面が鋼管と交差する位置で鋼管は局部的な面外変形が生じていた。

アンボンド型柱では, 圧縮変位の増加に伴い鋼管の膨張が目視でも確認できるようになる。コンクリート圧縮強度が大きい D2F6N48U でも, ボンド型(D2F6N48B)と異なり, 非常に緩やかな荷重低下となる。

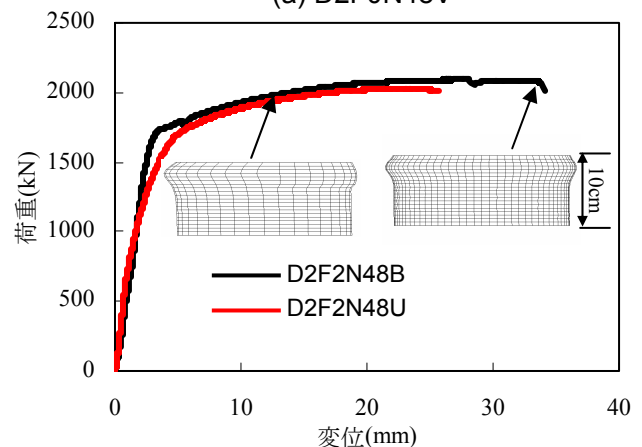
(2) 軸方向ひずみ分布の比較

図－4 には, 異型角型アクリル棒から得られたボンド型柱の荷重－局所ひずみ関係を示す。比較のため, RC 柱の結果も示している。図－3 から推察されるように, コンクリート圧縮強度が大きい充填鋼管柱 D2F6N48B では, 最大荷重後に局所ひずみが進展する圧縮破壊領域(図－4(b)の(4)～(7)の荷重－局所ひずみ関係)と後退する非破壊領域が混在し, コンクリート圧縮強度が小さい D2F2N48B に比べ圧縮破壊領域長さが短くなり, 破壊が局所化する。D2F2N48B は, ほぼ柱全長がひずみ進展領域となっている。

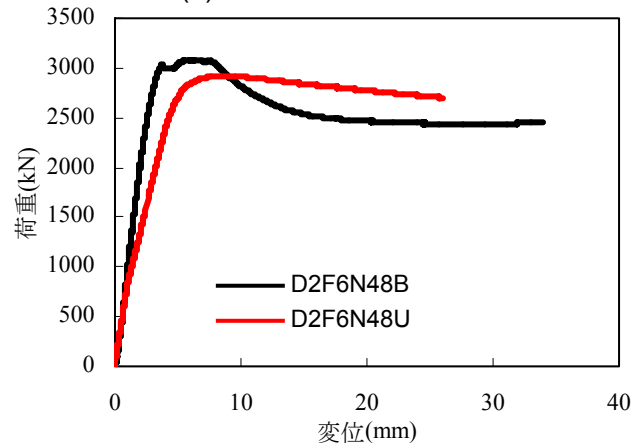
対応する RC 柱の荷重－局所ひずみ関係や, 参



(a) D2F0N48V



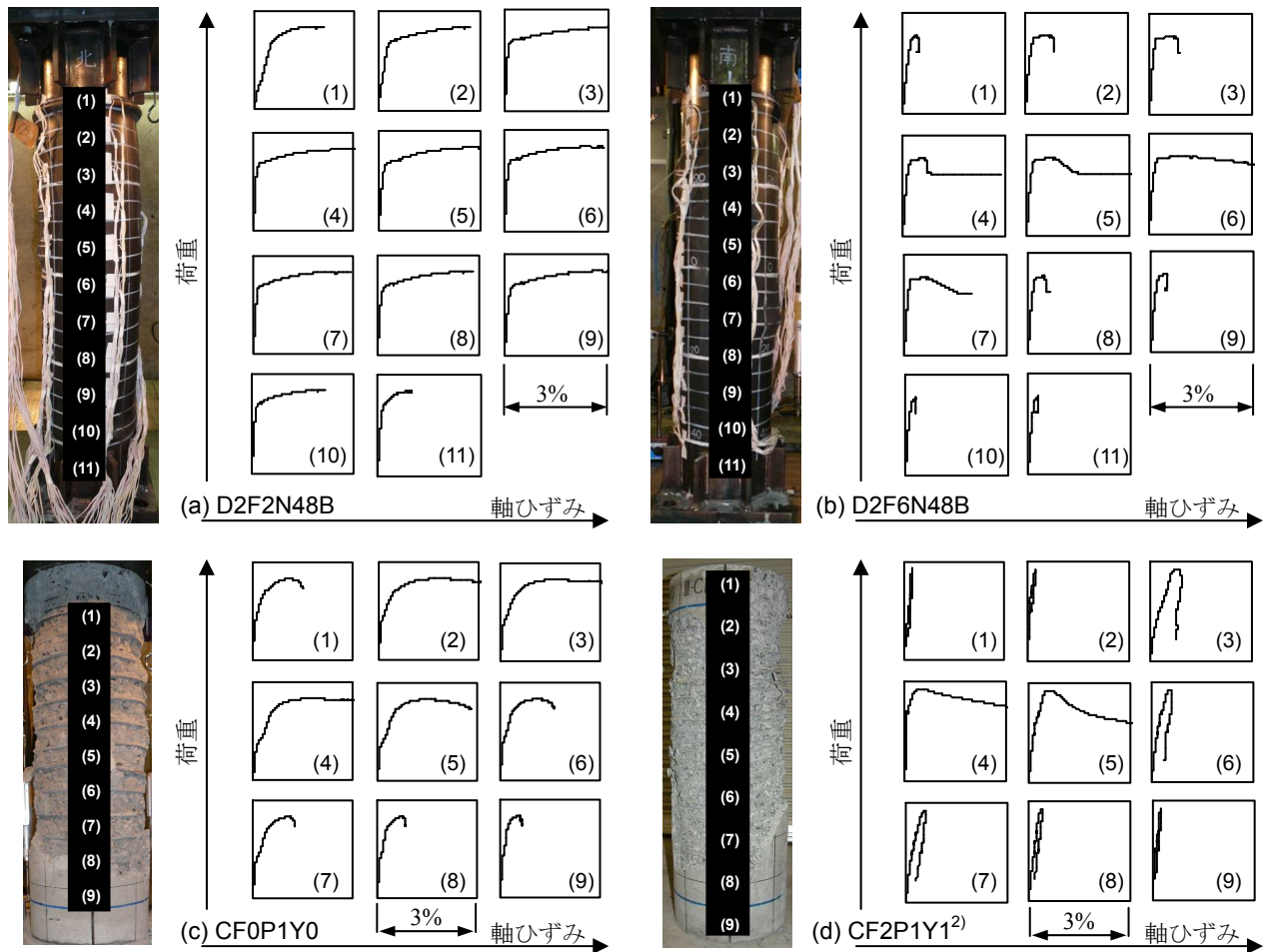
(b) D2F2N48B と D2F2N48U



(c) D2F6N48B と D2F6N48U

図－3 荷重－変位関係の比較

考文献 2)で行った局所ひずみの考察でも同様のことが言え, コンクリート圧縮強度が大きい場合や, 横拘束筋体積比や横拘束筋降伏強度が小さい場合など, 横拘束筋からコアコンクリートに与えられる拘束圧が小さいと圧縮破壊領域長さは短くなる。ただし, RC 柱では, 圧縮破壊の局所化が生じた後, 柱の上下端に与えられる圧縮変位をその小さい圧縮破壊領域で吸収するため, 局所ひずみが加速度的に大きくなり, コア



図－4 荷重－局所ひずみ関係の一例

コンクリートの欠損とせん断すべり面の形成により荷重が低下する。このため、RC 柱では、圧縮破壊領域長さと荷重低下割合には相関があり、ごく一区間に破壊が集中する柱では、脆性的な破壊を呈する。一方、コンクリート圧縮強度の大きい充填鋼管柱では、明確な圧縮破壊領域が形成されるが、鋼管に保護された破壊領域内の充填コンクリートは欠損することなく、せん断すべりも急速に発達しないため、RC 柱ほどの急激な荷重低下は生じないと推察される。

(3) 鋼管の軸方向応力と円周方向応力

2 軸ひずみゲージより得られる円周方向ひずみと軸方向ひずみより、鋼管の円周方向応力と軸方向応力をボンド型柱およびアンボンド型柱それぞれに対して求めた。塑性域では、von Mises の降伏条件を満たすように計算している。降伏強度およびヤング係数は、それぞれ材料試験で得られた 364 MPa と 209000MPa を使用した。ポアソン比とひずみ硬化率はそれぞれ 0.3 と 0.01

を仮定している。D2F2N48B と D2F2N48U の計算結果の一例を図－5 に示した。ひずみゲージは、充填コンクリートが圧縮破壊領域となる箇所に貼付されているものを使用した。

ボンド型柱に軸圧縮力が作用した場合、弾性域ではコンクリートと鋼のポアソン比の違いから、両者の間に付着がないと、コンクリートと鋼管は独立した挙動を示す。一方、十分に付着していれば、鋼管はコンクリートにより内側に引張力を受け、円周方向に圧縮応力が作用する。D2F2N48B の鋼管降伏までの挙動を見ると、鋼とコンクリートは一体化していることが確認できる。一方、鋼管の降伏以降は、コンクリートの横膨張を受け、鋼管の円周方向には引張力が作用するようになり、von Mises の降伏曲面上を移動しながら円周方向応力が増加する。

アンボンド型柱でも、鋼管とコンクリートの付着により、軸方向応力は生じるものの、その値は小さく、ボンド型柱とは異なり、載荷初期

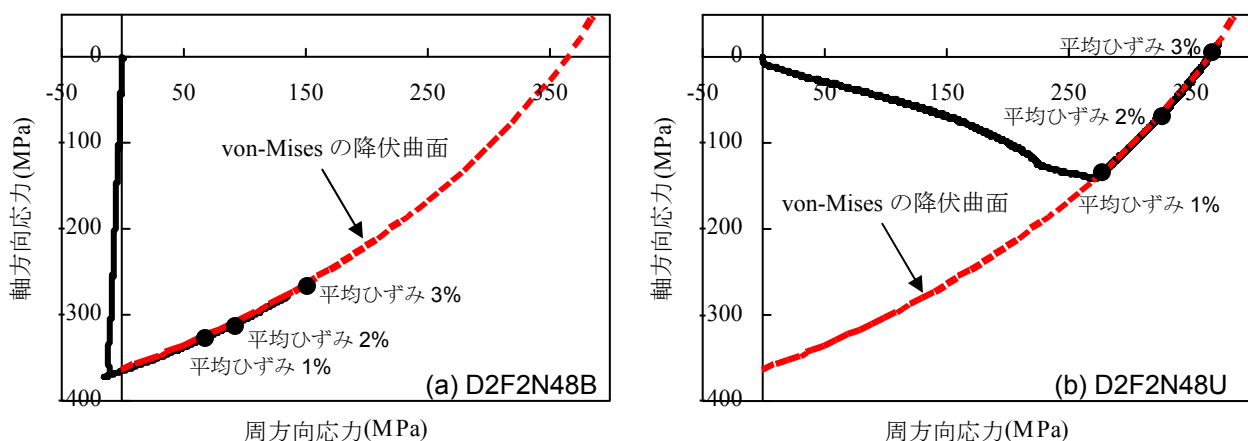


図-5 ボンド型柱とアンボンド型柱における鋼管の応力状態

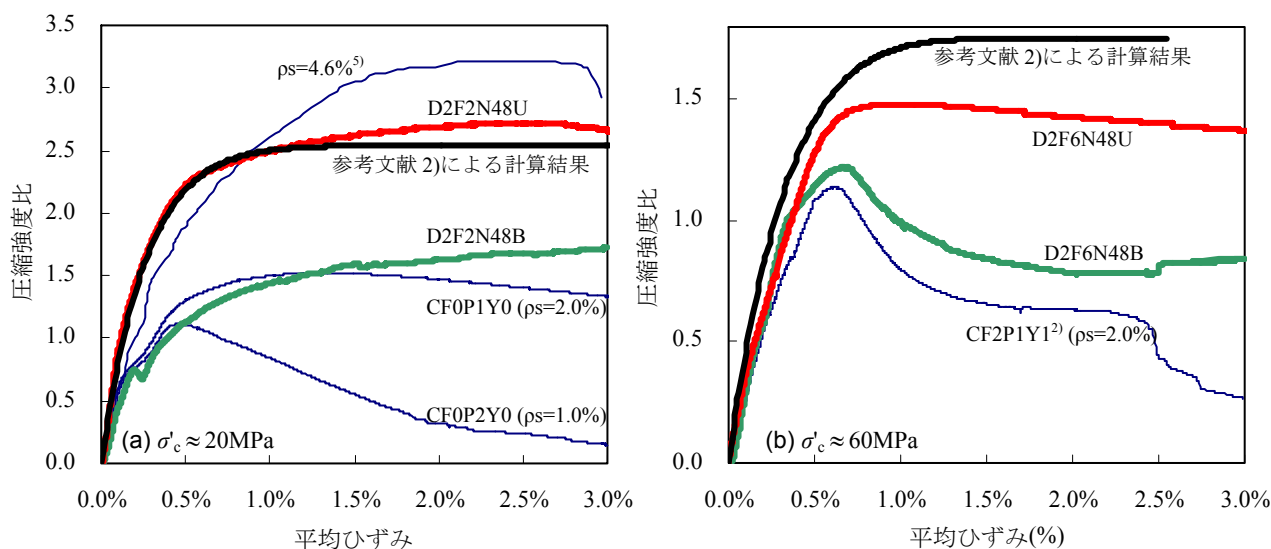


図-6 コンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係の比較

の段階から充填コンクリートの横膨張により円周方向引張力が発現している。なお、図-5 以外でも同様に、コンクリートが圧縮破壊領域になる箇所では、アンボンド型柱の鋼管に生じる軸方向応力は小さいことを確認している。

図-5 から判断すると、ボンド型柱では、コンクリートが圧縮力を受け、横拘束圧が小さい状態でコンクリートが損傷して圧縮破壊の局所化が生じ、横膨張し始めた後に横拘束圧が与えられる。十分な大きさの横拘束圧に達するまでに、コンクリート強度が大きい D2F6N48B では、図-3(c)に示すように、最大荷重直後に荷重低下が生じたと思われる。一方、アンボンド型柱では、当初から鋼管より高い横拘束圧が与えられているため、このような荷重低下は生じないと推察される。

(4) 充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係
著者らは、参考文献 1),2)にて、RC 柱のコンフ

ァインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を提案している。提案された平均化応力-ひずみ関係は、断面形状(円形・矩形)の違いを含む横拘束筋拘束形状、構成材料の強度(コンクリート圧縮強度：40～130 N/mm²，横拘束筋降伏強度：300～1450N/mm²)，横拘束筋体積比(0～2.2%)に関わらず統一的に適用可能である。さらに、圧縮破壊エネルギーをコンクリート強度と横拘束圧の関数として定式化し、破壊力学的方法をコンファインドコンクリートに対して導入することで、軟化型構成則を用いた場合の圧縮破壊の局所化により生じる問題を解決している。本実験では、コンクリート圧縮強度と横拘束筋体積比の大きさが適用範囲外となるが、表-1 の RC 円柱の平均化応力-ひずみ関係を精度良く再現できることが確認されたので、このモデルを充填鋼管柱の充填コンクリートに適用する。

実験供試体における充填コンクリートの平均化応力-ひずみ関係を算出する際には、次の仮定を設けた。i)アンボンド型柱では、鋼管とコンクリートの付着はないものとし、軸荷重をコンクリート断面積で除すことで平均応力とした。ii)ボンド型柱では、コンクリートの破壊が進展する領域に位置する鋼管のひずみゲージから、図-5を計算するときと同じ条件でその領域内の軸方向応力の平均値を算定する。それに鋼管断面積をかけることで、鋼管負担分の軸荷重とした。

結果を図-6に示した。図-6には、比較のため、星隈らのRC円柱の一軸圧縮実験結果も載せている。アンボンド型柱の充填コンクリートは、ボンド型柱よりも高い拘束圧を鋼管から受けており、著者らの提案モデルは、概ね、アンボンド型柱の実験結果に一致している。

ボンド型柱は、前記したように、鋼管の円周方向応力の発現が遅れるが、その挙動は、D2F2N48BおよびD2F6N48Bともに、充填鋼管と同程度のコンクリート圧縮強度および横拘束筋降伏強度を持つ横拘束筋体積比2.0%のRC柱と同程度となった。この横拘束圧は、計算上、本実験で用いた鋼管の厚さを約12.5%に減じたアンボンド型柱の充填コンクリートに与えられる値に相当する。実験供試体数が少なく、定量的な考察を行うことは難しいが、図-6を見る限り、ボンド型柱とアンボンド型柱の充填コンクリートで生じるコンファインド効果は、充填コンクリートと鋼管の軸力負担割合により異なる鋼管の円周方向応力の発現時期を考慮した横拘束圧の算定を行えば、既往のRC柱の一軸圧縮実験に基づき提案されたモデルにより評価できる可能性がある。

3. まとめ

本実験により得られた結論を以下に示す。

(1) 鋼管の軸圧縮力の負担程度によりコンファインド効果は大きく異なり、鋼管の円周方向応力の発現が遅れると、充填コンクリートの圧縮破壊領域で荷重が低下する。ただし、その後の鋼管からの横拘束圧の増加と、RC柱のようなコアコ

ンクリートの欠損が生じないことから、荷重低下の程度は小さいものとなる。

(2) 鋼管に軸圧縮力をほとんど負担させないように載荷した場合には、その充填コンクリートの挙動は既往のRC柱の実験に基づき提案されているコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係により概ね評価可能である。

本論は、破壊領域内で平均化された充填コンクリートの挙動に着目した考察となっており、例えば、局部座屈区間に位置する充填コンクリートの役割については、まだ十分に整理できていない。今後、正負交番荷重を受ける充填鋼管柱の実験なども実施し、鋼とコンクリートの合成效果について、研究を進めたい。

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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋山充良ほか：普通強度から高強度までの構成材料を用いたRC柱の一軸圧縮実験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.788/V-67，pp.81-98，2005.5
- 2) 秋山充良ほか：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
- 3) 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，1995.8
- 4) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI- C51E, Vol.2, pp.259-272, Oct. 1999
- 5) 星隈順一ほか：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.520/V-58，pp.1-11，1995.8