

論文の内容の要旨

氏名：難 波 隆 行

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：高強度 CFT 短柱およびその構成要素の一軸圧縮下における挙動に関する研究

本研究は、高層建築物の柱部材への適用が進む高強度コンクリート充填鋼管 (Concrete Filled steel Tube 以下、CFT) 構造の基本的挙動である一軸圧縮下の CFT 短柱(短柱:耐力が全体座屈の影響を受けないもの。本研究では高さ/断面外寸が 3 である柱状試験体)の挙動を明らかにすることを目的とする。

本研究で対象とする CFT 構造は、鋼管の局部座屈やコンクリートの脆性的な破壊という短所を補う構造で、S 造や RC 造に比べて構造性能に富む部材の実現が可能である。鋼管が 590N/mm^2 級以下、コンクリートが 90N/mm^2 級以下である CFT 短柱に関しては、鋼管耐力とコンクリート耐力の単純和 (以下、単純累加強度) による圧縮耐力の評価法が確立されており、円形断面では鋼管が充填コンクリートを拘束する効果 (以下、相互拘束効果) による充填コンクリートの耐力上昇を加味することができる。一方、建築物のさらなる高層化により、これらの材料強度を超える超高強度 CFT 構造が必要とされるケースが増加しているが、超高強度 CFT 構造の実験データは不足しており、その構造性能評価法は確立されていない。超高強度コンクリートは横補強による構造性能の改善が小さいことが指摘されており、相互拘束効果による耐力上昇が従来通りに期待できず、CFT 短柱としての最大耐力が単純累加強度に達しない可能性もある。近年適用例が増加している長方形断面に関する研究例も少なく、その構造性能については不明な点が多い。また、合理的評価法の構築に不可欠である相互拘束効果を受ける充填コンクリートの挙動は実験で直接測定することが難しくその詳細は明らかになっていない。

そこで本研究は、以下の 3 項目の目的に沿って実施した。

- ① 超高強度 CFT 短柱の実験データの蓄積と単純累加強度式の適用可否の検討
- ② 断面形状の違いが CFT 短柱の構造性能に及ぼす影響を明らかにする
- ③ CFT 短柱充填コンクリートの挙動を評価し、構造性能に及ぼす影響を明らかにする

本論文は、全六章で構成される。以下に、各章の概要を記す。

第一章 序論

第一章では、本研究の背景と目的ならびに研究内容について述べた。

研究背景として、CFT 構造は、高い構造性能と施工性を兼ね備えていることから建築物への適用が進んでおり、近年の建築物の高層化に伴い、CFT 構造の高強度化が進んでいることを紹介した。一方、既往研究の調査により、本研究が対象とする超高強度 CFT 短柱については、外径 300mm 以上かつコンクリート強度 90N/mm^2 以上の実験データ、充填コンクリートの応力推移を評価した研究がほとんど無く、耐力評価法が確立されていないことを確認した。そのため上記の 3 項目の目的を掲げた。

本研究では、 780N/mm^2 級鋼管ならびに 100N/mm^2 級充填コンクリートを最高強度とする CFT 構造を対象に、載荷条件が単純であり、相互拘束効果の影響が明確な短柱の一軸圧縮実験を実施すること、その上で、鋼管と充填コンクリートの応力状態を定量的に評価し、それらの挙動が CFT 短柱の構造性能に及ぼす影響について考察することを述べた。

第二章 高強度円形断面 CFT 短柱の一軸圧縮下における挙動

第二章では、 780N/mm^2 、 550N/mm^2 級の鋼管ならびに 100N/mm^2 級コンクリートを用いた円形断面 CFT 短柱の一軸圧縮実験を実施し、その構造性能を評価した。さらに、充填コンクリートの拘束応力と応力上昇の関係を定量的に評価し、相互拘束効果の発生経緯を明らかにした。

CFT 短柱の実験は径厚比、断面サイズをパラメータとして実施した。脆性的に破壊したプレーンコンクリート短柱と異なり、CFT 短柱の破壊は延性的であり徐々に耐力が低下した。鋼管耐力比が高い CFT 短柱は最大耐力比 (=最大耐力/単純累加強度) が大きく、最大耐力時の軸ひずみも大きい結果となった。断面サイズと最大耐力比の間に明確な相関は確認されなかった。

CFT 短柱の荷重を、中空鋼管とプレーンコンクリート短柱の実験荷重の単純和（累加荷重）と比較した。CFT 短柱鋼管の周方向引張ひずみが中空鋼管を上回りつつ、CFT 短柱の荷重が累加荷重を上回ることが確認された。また、CFT 短柱鋼管ならびに充填コンクリートの応力状態の推移を評価し、相互拘束効果が、i) 充填コンクリートの破壊進行に伴う横方向の膨張により、ii) 鋼管による拘束力を発生させ、iii) 充填コンクリートの軸方向応力の上昇をもたらす、ことで生じたことを示した。

CFT 短柱における拘束係数 k （充填コンクリートの軸方向応力上昇／拘束応力）は平均で 2.2 と評価され、鉄筋コンクリート造（RC 造）のフープ筋拘束の場合の 4.1 より低い値となった。CFT 短柱では充填コンクリートの拘束応力の発生経緯がフープ筋拘束の場合と異なることが要因である可能性を指摘した。

第三章 高強度正方形断面 CFT 短柱の一軸圧縮下における挙動

第三章では、780N/mm²級の角形鋼管と 100N/mm²級の充填コンクリートを用いた超高強度正方形断面 CFT 短柱の一軸圧縮試験を行った。その上で、鋼管と充填コンクリートの応力状態が CFT 短柱の最大耐力に及ぼす影響について分析した。

CFT 短柱の実験を幅厚比、断面サイズをパラメータとして実施した。試験体寸法が大きいほど最大耐力比が小さく、早期に耐力低下した。幅厚比が小さい試験体は、最大耐力時のひずみが大きく、耐力低下勾配が緩やかであった。すべての試験体で最大耐力は単純累加強度を下回った。

CFT 短柱における鋼管と充填コンクリートの応力を算定した結果、最大耐力時に鋼管が降伏応力に達していなかった。本研究における超高強度角形断面 CFT 短柱の最大耐力が単純累加強度に達しない要因は、充填コンクリートの破壊ひずみに対して鋼管の降伏ひずみが大きく、鋼管の強度発揮前に充填コンクリートが耐力低下する点であることを確認した。

第四章 高強度長方形断面 CFT 短柱の一軸圧縮下における挙動

第四章では、近年採用事例が増加している長方形断面 CFT 構造を対象とし、短柱の一軸圧縮試験を実施し、その構造性能を正方形断面と比較した。

鋼管の幅厚比をパラメータとした 2 体の正方形断面 CFT 短柱を基準に、幅厚比または鋼管耐力比を合致させた長方形断面 CFT 短柱、ならびに対応するプレーンコンクリート短柱、中空鋼管の一軸圧縮試験を実施した。断面形状の違いによる拘束力の差が比較的生じやすい材料として、超高強度材料ではなく 550N/mm²級鋼管と 60N/mm²級コンクリートを使用した。

長方形断面 CFT 短柱では拘束が弱いと考えられる長辺側にのみ、高さが異なる位置に凸状変形が現れた。長方形断面は正方形断面と比較して、最大耐力比はほぼ等しいが、最大耐力到達後に大きな耐力低下を生じた。拘束力が相対的に弱い点を、耐力低下を大きくした要因として指摘した。最大耐力時ひずみの比較においても、長方形断面の拘束力が弱いことを示す結果を得た。長方形断面間の比較では最大耐力時ひずみが鋼材量に比例する傾向があった。本研究の実験範囲では単純累加強度式が適用可能であることが確認された。

第五章 高強度 CFT 短柱の一軸圧縮下における構造性能に関する考察

第五章では、CFT 短柱の高強度化、断面形状の違い、ならびに大断面化が構造性能に与える影響について検討した。さらに本論において評価した充填コンクリート強度を、試験体と同時打設したコンクリートから採取したコア供試体の圧縮強度（コア強度）と比較し、その上で超高強度 CFT 短柱の構造性能について考察した。

本研究ならびに既往の円形断面 CFT 短柱実験結果を用いた検討において、同時にコンクリート打設した試験体間の比較では、試験体寸法が最大耐力比に及ぼす影響は確認されなかった。最大耐力比の低下は充填コンクリートの機械的性質と材料試験強度の差が要因であった可能性を指摘した。

本研究において評価した充填コンクリート評価強度は、材料試験強度と比較して低い場合があった。充填コンクリート評価強度とコア強度が対応しており、充填コンクリート評価強度は充填コンクリートの機械的性質の評価として妥当であるとの結果が得られた。

一軸圧縮下における超高強度 CFT 短柱の構造性能について考察を加えた。変形性能の改善量は断面形状に関わらず既往の実験結果よりも小さく、超高強度 CFT 短柱の相互拘束効果が相対的に小さいことを確認した。円形断面では、相互拘束効果による充填コンクリートの応力上昇により鋼管耐力比に

比例した耐力上昇が生じ、一方角形断面では、鋼管の降伏ひずみがコンクリート強度時ひずみよりも大きい場合に単純累加強度に達しないケースがあり、両者の強度時ひずみのバランスに留意することで、単純累加強度式が適用可能であることを示す結果を得た。

第六章 総括

第六章に、本研究で得た超高強度 CFT 短柱に関する知見を記す。

超高強度 CFT 短柱への単純累加強度式の適用可否の検討（目的①）に関して、最高 780N/mm² 級の鋼管と、最高 100 N/mm² 級のコンクリートを用いた超高強度 CFT 短柱を対象とした構造実験を実施し、実験データの蓄積と耐力評価に関する検討を行った。円形断面 CFT 短柱では単純累加強度の適用が可能であり、角形断面では、鋼管の降伏ひずみがコンクリートの強度時ひずみよりも大きい場合に単純累加強度に達しないことを実証した。

断面形状の違いが構造性能に及ぼす影響を明らかにする点（目的②）に関して、円形断面では従来強度と比較して小さいものの相互拘束効果による耐力上昇が期待でき、角形断面では耐力上昇がほとんど期待できないことを確認した。長方形断面の拘束力は正方形断面よりも弱い結果を得た。

充填コンクリートの挙動を明らかにする点（目的③）に関して、充填コンクリートの拘束応力-軸方向応力関係の評価し、超高強度コンクリートにおいても拘束を受けつつ軸方向応力が上昇する相互拘束効果が生じたことを確認した。充填コンクリートの載荷経路は、フープ筋により補強されたコンクリート短柱と比較して載荷初期の拘束応力が低く、拘束係数は 2.2 とフープ筋による実験結果よりも低く評価された。