

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 北嶋 圭二

（副査） 教授 長沼 一洋

名誉教授 安達 洋

元教授 中西 三和

申請者が研究対象とした CFT 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) 構造の略称である。CFT 構造は、鋼管の内部にコンクリートを充填することにより、鋼管の局部座屈やコンクリートの脆性的な破壊という双方の短所を補う構造で、主に高軸力を負担しなければならない高層建物の柱部材に用いられ、鉄骨造（以後、S 造）や鉄筋コンクリート造（以後、RC 造）に比べて構造性能に富む部材の実現が可能であるという利点がある。

CFT 構造は、1985 年当時建設省が主導した「新・都市型集合住宅システム開発プロジェクト」において多数の研究が実施され、その成果が 1996 年に発足した新都市ハウジング協会により「CFT 構造技術指針・同解説」として刊行され設計法や施工法が示された。また、建設省ならびに米国科学財団が主導し 1993 年より開始された「ハイブリッド構造に関する日米共同研究」の研究成果をベースに設計法が整理され、日本建築学会 (AIJ) 刊行の「合成構造設計規準」に反映されている。現在、CFT 構造の設計の基準となる両指針・規準はいずれも鋼管が 590N/mm² 級以下、コンクリートが 90N/mm² 級以下の材料強度の組み合わせを適用範囲とし、CFT 短柱の最大圧縮耐力を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）とする耐力評価法が確立されている。さらに、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としている。

一方、近年都市部において土地の有効利用を図るために建築物のさらなる高層化、大型化が進み 100m を超える超高層建築物にも適用されるようになり、両指針・規準で示された材料強度の適用範囲を超える超高強度の材料を用いた CFT 構造（以後、超高強度 CFT 構造）が要求されるケースが増加している。しかし、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のが現状である。

申請者は、このような背景をもとに超高強度 CFT 構造の基本的な構造性能の合理的な評価方法の構築を目的に、CFT 短柱を対象に実験的研究に取り組んだ成果を取りまとめたものである。通常柱部材は軸力のほかに水平力を負担するが、本研究では CFT 柱の基本的な構造性能である軸圧縮耐力に焦点を絞り部材径（幅）に対する部材高さを 1 : 3 とする短柱を試験体としている。実験は、申請者が所属する企業の委託を受け日本大学が受託し共同研究として、本学理工学研究所が保有する 30MN 大型構造物試験機により実大規模の試験体を用いて実施された。実験では、申請者は実験の計画から取りまとめまで精力的に中心的な立場で取り組み、まずは鋼管形状が円形の場合について測定結果と理論的な検討に基づいて相互拘束効果の影響を明らかにするとともに、充填コンクリートの評価が重要であるとしつつも既往の単純累加強度式が適用可能であることを示したことは、今後の超高強度 CFT 構造の設計に資するものと評価できる。さらに、鋼管が正方形、長方形の場合について形状が及ぼす影響についても検討し、使用する鋼管とコンクリートの最大強度時のひずみを同程度とする材料強度の選択により累加強度式が適用可能になることを示したことも設計上有益な知見である。

本論文は、全六章で構成されている。以下に各章の内容とその評価について述べる。

第一章「序論」では、本研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成を示している。

申請者は、研究背景として建築物の高層化に伴い、使用材料としての鋼管とコンクリートの高強度化が進んでいることを紹介した上で、従来の材料強度を上回る、780N/mm² 級鋼管ならびに 100N/mm² 級

充填コンクリートを最高強度とする CFT 短柱を対象に、実大に近い試験体による一軸圧縮実験を実施することを述べている。本学の 30MN 大型構造物試験機を利用することで実大に近い試験体でしかも超高強度の圧縮試験を行い鋼管と充填コンクリートの詳細な応力状態を検討できたことが本研究の特筆すべき特徴の一つといえる。

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」では、780N/mm²、550N/mm²級の鋼管ならびに 100N/mm²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ている。実験結果から最大耐力比（最大耐力/単純累加強度）は鋼管耐力比に比例するが従来強度よりもその耐力比は小さいことを明らかにした。また、軸ひずみと直行する周方向ひずみの測定結果を詳細に検討し鋼管の負担する応力と充填コンクリートの負担する応力を分析することで、充填コンクリートの拘束応力の発生経緯と応力上昇の関係を定量的に明らかにしたことは**高く評価できる**。

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」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 短柱に対して幅厚比、断面サイズをパラメータとした一軸圧縮試験を行っている。すべての試験体で最大耐力は単純累加強度を下回り相互拘束効果によるコンクリートの応力上昇は円形断面ほど見込めないことを明らかにしている。また、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。本章では、充填コンクリートの破壊ひずみと鋼管の降伏ひずみの大小関係に着目し、その大小関係から単純累加強度に達しない場合が有り得ることを明らかにしており、工学的価値が高いと評価できる。

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」では、長方形断面 CFT 短柱の一軸圧縮実験を実施し正方形断面との構造的な比較を行っている。実験では、形状的に長方形断面は拘束効果の観点からみて長辺側に弱点を持つことから正方形断面と対比可能なパラメータの選択を行っている。ただし、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ている。破壊は、予測通り比較的拘束が弱い長辺側に凸状の変形が生じ破壊している。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が耐力低下を大きくした要因として指摘している。本研究の実験範囲では、正方形断面と比較し拘束効果は少ないとしながら単純累加強度式が適用可能であることを確認しており、これまでに研究事例が少ない高強度長方形断面 CFT 短柱の一軸圧縮下における挙動を明らかにしている点で、貴重な知見を与えているものと評価できる。

第五章「高強度 CFT 短柱の一軸圧縮下における構造的な性能に関する考察」では、CFT 短柱の高強度化について検討し超高強度 CFT 短柱の相互拘束効果は現行指針における適用範囲の強度に比べ小さいことを示したことは有益な成果である。また、その最大耐力比の低下の要因が充填コンクリートの強度が材料強度と異なり、実大寸法に近いほどコンクリートの打設方向のコンクリート強度のばらつきが生じ、平均的なコア抜き試験片の圧縮強度が充填コンクリートの評価強度に対応するとして超高強度 CFT 短柱の構造的な性能を考察している。設計上充填コンクリート強度を適正に評価することが重要であることを示したことは超高強度材料を用いた CFT の構造的な性能を適正に評価する上で有益な知見を与えるものと評価できる。

次に断面寸法の影響と最大強度後の変形性能に言及している。一般的にコンクリートの圧縮性能は断面寸法の影響を受けるとされている。これは破壊の局所化がその要因であるとする破壊力学的な考察による。しかし、今回の実験の範囲では円形断面では寸法の影響は確認されなかった一方、正方形断面では大きな試験体ほど最大耐力比が低下している。円形断面における寸法の影響が少なかった理由は鋼管による拘束の影響であるとした考察は適切な判断であると認められる。さらに、断面形状が最大耐力比に及ぼす影響について考察している。円形断面では充填コンクリートの応力上昇による耐力上昇が得られるが、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、効率よく拘束効果を期待するには両者の強度時ひずみの関係に留意する必要があることを明らかにしたことは工学的に有用であると判断される。

第六章「総括」では、本論文の各章で示した結果を以下の3つの要点で総括している。

①既往の累加強度式の適用可否：円形断面では「可」、角形断面では鋼管の降伏ひずみがコンクリートの最大強度時ひずみより大きい場合には累加強度に達しないこと、②断面形状が相互拘束効果に及ぼす影響：円形断面では従来強度に比較して影響は小さいものの相互拘束効果による耐力上昇を期待できるが、角形断面では耐力上昇はほとんど期待できないこと、③充填コンクリートの挙動：充填コンクリートの拘束応力-軸方向応力関係を詳細に検討し、拘束応力の発生経緯を明らかにすることで拘束係数が RC の帯筋補強の拘束係数より小さいこと、を明らかにしたことは超高強度材料を用いた CFT 部材の設計に大いに貢献する論文であると考えられる。

以上、本論文は高強度 CFT 短柱を対象とした一軸圧縮試験の結果に基づいてその挙動を詳細に検討し、鋼管と充填コンクリートの相互拘束効果の発生経緯を明らかにするとともに、従来の材料強度の適用範囲で利用されている単純累加強度式の適用可否と断面形状の影響について多くの知見を与えたものと認められる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和2年 2月 20日