

氏名	ほんきなん 洪起男
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成16年7月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	高強度構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験とコンファインド コンクリートの平均化応力-ひずみ関係の提案
指導教官	東北大学教授 鈴木 基行
論文審査委員	主査 東北大学教授 鈴木 基行 東北大学教授 岸野 佑次 東北大学教授 岩熊 哲夫 東北大学助教授 秋山 充良

論文内容要旨

兵庫県南部地震以降, 高性能耐震構造に対する議論が進められている。これら高性能耐震構造としては, 特に, 高耐力構造, 高弾性構造, 高靱性構造, および高免震構造などに関心が集められており, 橋梁など土木構造物の地震時の損傷や破壊リスクを大きく低減することが期待されている。このうちの高耐力構造には, 圧縮強度 100MPa を超える高強度コンクリートおよび降伏強度 500~1000MPa を有する高強度鉄筋を用いた RC 部材の開発が進められ, 今後の労働力不足を補うための施工の合理化, 省力化, さらに建設コスト縮減なども期待されている。山岳橋梁で見られる高橋脚では, 自重軽減のために中空断面とする一方で, その過密配筋を避けるため, 高強度鉄筋を用いた RC 橋脚部材が研究開発されており, 既に設計基準強度 50MPa のコンクリートと降伏強度 685MPa の高強度鉄筋を用いた高さ 100m 超の高橋脚の施工実績も報告されている。

しかしながら, 普通強度構成材料を用いた RC 部材(以下, 普通強度 RC 部材)に比べ, このような高強度構成材料を用いた RC 部材(以下, 高強度 RC 部材)を対象とした実験的, 解析的研究は未だ十分とは言えず, その力学的特性に関し未解明な部分が多い。特に, 高強度 RC 柱では, 横拘束筋量とその降伏強度の大きさが, 横拘束効果に及ぼす影響を定量化できておらず, RC 柱の耐震性能を評価する上で不可欠なコンファインドコンクリートの強度・変形特性は十分に解明されていないのが現状である。特に, 今後, 地震時に非線形挙動を許容する部材への高強度材料の適用を図る際に, その設計時の基礎データとなるコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係に関して, 例えば, 星隈らの平均化応力-ひずみ関係は, コンクリート圧縮強度 18.5~28.8MPa および SR235 と SD295 の横拘束筋から製作された RC 柱を基にしており, この式を採用する道路橋示方書 耐震設計編では, コンクリートの設計基準強度が 40MPa を上回る場合や, 通常強度とは異なる横拘束筋を用いる場合には, 実験や解析によりそのコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を別途検討させている。高強度材料を用いた RC 部材のコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を精度良く定めることができれば, 道路橋示方書に示される簡易的な手法でその耐震設計が可能になり, 高強度コンクリートや高強度鉄筋の耐震部材への適用の促進が期待される。

そこで本研究では, 高強度構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験を行い, その圧縮破壊性状を観察するとともに, 各実験因子とコンファインド効果の関係を考察した。一軸圧縮実験を行う際には, RC

柱の断面中央位置にひずみゲージを貼付した異形角型アクリル棒を埋め込み、ポストピークで現れるひずみの局所化領域を実測している。そして、一軸圧縮実験で得られたデータをもとに、新たな横拘束効果指標を定義し、これを用いたコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を提案した。提案した平均化応力-ひずみ関係は、広範囲なコンクリート圧縮強度や横拘束筋降伏強度を有する RC 柱に適用可能なものであり、さらに、圧縮破壊エネルギーを用いていることから、ひずみの平均化長さに対応できる点に特徴を有する。以下に、各章の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。

第 2 章では、高強度構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験とその横拘束モデルに関する既往の研究を紹介し、それらと本研究の関係を述べた。具体的には、現れるコンファインド効果は、コンクリート圧縮強度や横拘束筋降伏強度、また横拘束筋体積比や横拘束筋拘束形状などの RC 柱の供試体諸元により複雑に変化すること、そのため、日本の RC 橋脚などのように、諸外国で実施された供試体に比べ相対的に横拘束筋体積比が小さい構造の構成材料の高強度化を検討する際、そのコンファインド効果を既往の提案式を基に評価できないこと、などを示した。また、コンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を圧縮破壊エネルギーを基に提案した研究は非常に少なく、既往の高強度 RC 柱の一軸圧縮実験から得られた平均化応力-ひずみ関係を使用する際には、常に実験時の計測長(圧縮変位量を計測する領域)の大きさに注意する必要があること、などを示した。これら既往の文献調査により、本研究で提示されるコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係は、既往の研究成果に比べ、はるかに広範囲なコンクリート圧縮強度や横拘束筋降伏強度を持つ RC 柱に適用可能であり、さらにはひずみの平均化長さの違いにも対応できるなど、その新規性や有用性が明確にされた。

第 3 章では、コンクリート圧縮強度 46.3, 84.8, および 128MPa, 横拘束筋降伏強度 317, 1028, 1288MPa, および横拘束筋体積比 0.32~1.92%の範囲にあり、外周にのみ帯鉄筋を有する 21 体の RC 柱の一軸圧縮実験を行った。実験時の観察より、i)高強度 RC 柱は、載荷終了時になっても、普通強度 RC 柱に比べほとんど横膨張せず、隅角部を支点とした横拘束筋のはらみ出しが生じない、ii)横拘束圧が小さい(横拘束筋間隔が大きい)高強度 RC 柱では供試体全長に及ぶせん断すべり面が形成され破壊に至る、ことなどが確認された。また、各実験因子に着目したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係の比較より、i)横拘束筋の降伏強度を大きくしても、比例的にコンファインド効果は大きく現れない、ii)既往の横拘束効果指標である $\rho_s \cdot f_{sy}$ (ρ_s : 横拘束筋体積比, f_{sy} : 横拘束筋降伏強度)が同程度の値を有していても、 f_{sy} を大きく ρ_s を小さくした供試体は、 f_{sy} を小さく ρ_s を大きくした供試体よりもコンファインド効果が小さく現れ、 $\rho_s \cdot f_{sy}$ は高強度 RC 柱の横拘束効果指標とならない、iii)これらの原因は、高強度な横拘束筋を用いても、コンファインドコンクリートの圧縮強度時に横拘束筋の作用応力が降伏強度の 50%にも満たないことにある、ことなどを確認した。

なお、コンクリート圧縮強度 128MPa のコンクリートを使用した高強度 RC 柱は、現在設計される RC 橋脚が保有する ρ_s の上限値と考えられる $\rho_s=1.92\%$ を与えても、最大荷重後のわずかなひずみの増加に対し、約 50%もの耐力を一気に失うなど、脆性的な挙動が改善されない。そのため、このような構造の構成材料を高強度化する場合には、十分な横拘束筋量を与えるか、横拘束筋の拘束形状として、Type-A 以外の配筋法を採用するなどの対策が必要である。

第 4 章では、コンクリート圧縮強度 39.2, 80.0, および 116MPa, 横拘束筋降伏強度 379, 1420MPa, および横拘束筋体積比 0.55~2.16%の範囲にあり、横拘束筋拘束形状が 3 種類に異なる 27 体の RC 柱の一軸圧縮実験を行った。この 27 体の実験供試体には、ひずみゲージを貼付した異形角型アクリル棒が埋め込まれており、ポストピークで現れるひずみの局所化領域を測定している。実験時の観察より、

供試体高さの3%近くの圧縮変位量が生じると、中間帯鉄筋を持ち、横拘束筋体積比が1.0%以上の供試体では、横拘束筋の一部が破断し、さらに外周帯鉄筋の端部定着位置でフックの外れが確認されるなど、これらの供試体では、横拘束筋から非常に高い横拘束圧が与えられていることが推察された。中間帯鉄筋のない高強度RC柱では、横拘束筋の高強度化によるコンファインド効果の改善は期待できないのに対して、横拘束筋体積比が同程度であっても、中間帯鉄筋を有する横拘束筋拘束形状を採用することで、横拘束筋を高強度化することによるコンファインド効果の改善が可能になる。また、異形角型アクリル棒を用いたRC柱の局所ひずみの測定により、圧縮強度後に軸ひずみが増加する領域の大きさは供試体諸元により異なることが確認され、(i)中間帯鉄筋を有している、(ii)横拘束筋体積比が大きい、および(iii)コンクリート圧縮強度が小さい供試体ほど局所化領域長さは大きくなる傾向にある。

第5章では、本研究で行った全48体のRC柱の一軸圧縮実験より、コンファインド効果の定量化に際しては、圧縮強度時に横拘束筋に作用する応力が降伏強度に達しないことを考慮した横拘束効果指標が必要であることが確認された。そこで、本研究ではまず、有効横拘束圧 p_e を新たに定義し、これを用いることで、全長変位から求めた平均ひずみに基づく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た。提案モデルは、本実験結果のみならず、既往の実験結果も良く再現できた。さらに、異形角型アクリル棒を用いた局所ひずみの測定結果に基づき、局所化領域長さは圧縮強度時ひずみの2倍以上にひずみが増加する領域、また、圧縮破壊エネルギーは、応力-全長変位関係で囲まれた面積で定義した。そして、有効横拘束圧 p_e を用いて、圧縮破壊エネルギーと局所化領域長さを求める回帰式を提示し、圧縮破壊エネルギーに基づく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た。実験結果のばらつきもあり、コンクリート圧縮強度が大きいRC柱において、提案モデルと実験値に差異が生じる結果も見られたが、総じて、提案モデルは実験から得られるコンファインドコンクリートの圧縮強度、圧縮強度時のひずみ、および圧縮強度後の下降勾配を再現できることを確認した。

提案モデルは、コンクリート圧縮強度39.2~128MPa、横拘束筋降伏強度317~1420MPa、横拘束筋体積比0.32~2.16%を有する高強度RC柱に適用可能であり、複数の横拘束筋拘束形状に対応できる。さらに、圧縮破壊エネルギーを介することで、ひずみの平均化長さに応じて圧縮強度後の軟化曲線が変化するため、計測長が異なる実験結果の再現も可能になるなど、従来のコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係に比べ、非常に高い汎用性を有することを示した。

第6章では、本研究で得られた結論を示した。

論文審査結果の要旨

近年、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋の研究・開発が進み、土木構造物に対する実用化が検討されつつある。本研究では、これら高強度構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験を実施することで、コンクリート圧縮強度 40~130N/mm²、せん断補強鉄筋降伏強度 300~1450N/mm² までの広範囲な材料強度の組合せからなる RC 柱のコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係の構築を目的としており、全 6 章からなる。

第 1 章では、本論文の背景および目的を示している。

第 2 章では、高強度構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験とその横拘束モデルに関する国内外の既往の研究を紹介し、それらと本研究の関係を述べた。横拘束筋によるコンファインド効果の評価法に関し、理論的方法や経験的方法をまとめ、これら既往の研究の問題点について論じた。

第 3 章では、コンクリート圧縮強度 46.3, 84.8, および 128MPa, 横拘束筋降伏強度 317, 1028, 1288MPa, および横拘束筋体積比 0.32~1.92%の範囲にあり、外周にのみ帯鉄筋を有する 21 体の RC 柱の一軸圧縮実験を行った。そして、全実験結果に対し、RC 柱の圧縮破壊性状を詳細に考察し、横拘束筋によるコンファインド効果に及ぼす各実験因子の影響を評価した。

第 4 章では、コンクリート圧縮強度 39.2, 80.0, および 116MPa, 横拘束筋降伏強度 379, 1420MPa, および横拘束筋体積比 0.55~2.16%の範囲にあり、横拘束筋拘束形状が 3 種類に異なる 27 体の RC 柱の一軸圧縮実験を行った。そして、横拘束筋拘束形状がポストピーク挙動に与える影響を詳細に検討し、横拘束筋の高強度化がコンファインド効果の改善につながる条件を整理した。また、異形角型アクリル棒を用いた RC 柱の局所ひずみの測定結果に基づき、RC 柱の圧縮破壊エネルギーと破壊局所化領域を新たに定義し、各実験因子がそれらに及ぼす影響を評価した。このような高強度構成材料を用いた RC 柱における局所ひずみの実測例は世界的に例がなく、高強度材料を耐震部材へ適用する上で極めて貴重な実験データである。

第 5 章では、有効横拘束圧 p_e を提案し、これを用いたコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係を構築した。提案モデルは、コンクリート圧縮強度 39.2~128MPa, 横拘束筋降伏強度 317~1420MPa, 横拘束筋体積比 0.32~2.16%の範囲にあり、また、複数の横拘束筋拘束形状を持つ RC 柱に適用できることを本実験結果および国内外の同種の実験結果の再現解析から確認した。さらに、圧縮破壊エネルギーを介することで、ひずみの平均化長さに応じて圧縮強度後の軟化曲線が変化し、計測長が異なる実験結果の再現も可能になるなど、従来のコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係に比べ、非常に高い汎用性を有することを示した。

第 6 章では、本研究で得られた結論を示した。

以上要するに本論文は、普通強度から高強度に至る構成材料を用いた RC 柱の一軸圧縮実験を行い、実験的・解析的検討から、横拘束筋による横拘束効果の評価と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たものである。提案モデルは、現行示方書などで引用される既往のモデルに比べはるかに広範囲な材料強度に対応でき、さらには圧縮破壊エネルギーを用いることにより、設定したひずみの平均化長さに依存せず使用できる点に大きな特徴を有するものである。また、本論文で示された全 48 体の実験資料と提案モデルは、今後のコンクリート工学および耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。