

氏名	内藤 英樹
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成19年3月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成15年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程後期課程退学
学位論文題目	鉄骨鉄筋コンクリート橋脚の変形性能と復元力特性に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 鈴木 基行 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 岩熊 哲夫

## 論文内容要旨

鉄骨鉄筋コンクリート(以下, SRC)構造は, 今日まで我が国の建築分野において多く用いられているが, 1960年代後半から山間部の高橋脚や都市部の高架橋などにも使用されている. SRC構造は, 鉄骨を骨組みにすることによって, 支保工設置の省力化や配筋作業の軽減など, 施工の合理化や工期短縮が図れるほか, 鉄骨とコンクリートが相互に拘束するため, 高耐力・高靱性構造が可能となる. 兵庫県南部地震以降, 橋脚の耐震設計ではレベル2地震動を想定した照査が行われており, 従来のRC構造では, 過密な配筋による施工性の問題などが報告されている. これに対して, 近年, 施工の合理化, 断面縮小化, および高い耐震性能を同時に可能とするSRC構造の橋梁上部工・下部工への適用例が増加している.

しかし, 従来のSRC柱の変形性能評価法では, 降伏荷重を維持する最大変位点あるいは最大耐力の80%を維持する最大変位点を終局と定義するなど, 終局限界の定義に力学的根拠が乏しく, 得られる部材変形量と損傷状況との対応は明確ではない. また, 限られた供試体諸元による実験結果を回帰した既往の変形性能評価式や復元力モデルでは, 軸方向鉄筋や鉄骨の組み合わせにより力学的特性が大きく変化するSRC柱において, 広範な諸元に対して適切な評価を与えることは難しく, 特に, 建築構造物を想定した変形性能評価式や復元力モデルをSRC橋脚の耐震設計に適用することはできない. このため, 地震時のSRC橋脚の損傷状況や復旧性までを考慮した合理的な耐震設計を行うためには, 軸方向鉄筋や鉄骨の局部座屈などの力学的に明確な損傷状況に対応した限界状態を定義し, その変形性能評価法と復元力モデルを新たに構築する必要がある.

そこで, 本研究では, 曲げ破壊を呈するSRC橋脚の変形性能と復元力特性に関する検討を行う. 特に, 実験結果より得られる荷重-変位関係を回帰する既往の変形性能評価法や復元力モデルとは異なり, 本研究では, 軸方向鉄筋やH形鋼の座屈モデルに立脚した評価手法を構築する. このような提案手法は, i) 力学的に明確な損傷発生点や損傷領域を軸方向鉄筋やH形鋼の座屈モデルに基づいて解析的に評価できること, ii) RCからSRC断面までの広範な諸元に対して, これらを一元的に評価可能となること, などの大きな特色がある.

以下に, 本論文を構成する6章の概要を示す.

第1章では, SRC構造の特色および橋梁上部工・下部工への適用例をまとめた. さらに, 既往の

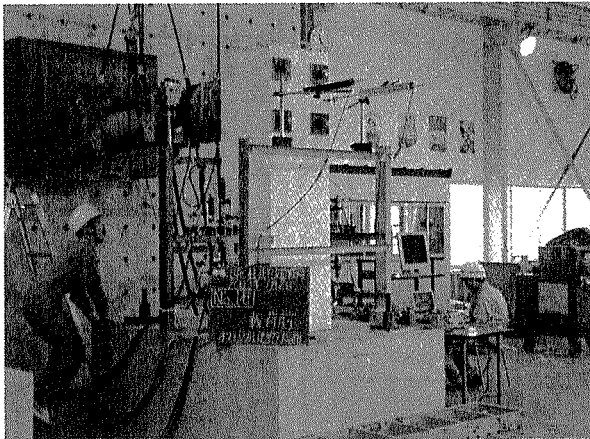


写真-1 SRC柱の正負交番載荷実験

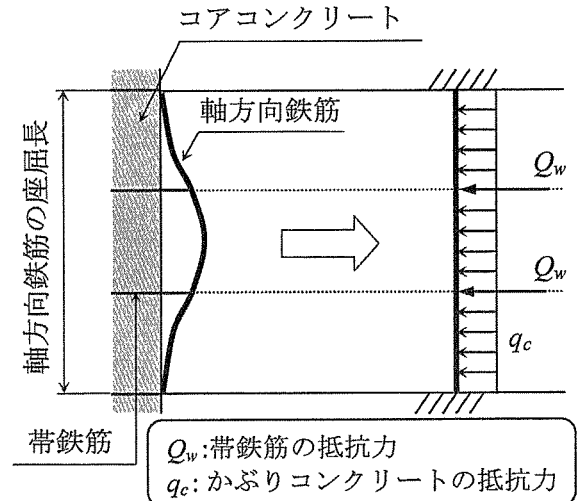


図-1 軸方向鉄筋の座屈モデル

研究とその問題点を整理した。そして、本研究の目的と既往の研究に対する位置づけを示した。

第2章では、写真-1に示すRCおよびSRC柱の正負交番載荷実験の概要および実験結果を整理した。これらの正負交番載荷実験では、荷重-変位関係の他にも、軸方向鉄筋のひずみ分布、H形鋼のひずみ分布、帯鉄筋のひずみ、柱基部の塑性曲率分布など、第3章以降の変形性能評価法や復元力モデルを構築する際に必要となる基礎的データを収集した。これらの正負交番載荷実験の結果では、かぶり剥落までの損傷過程はRC柱とSRC柱で同様であったが、SRC柱では、かぶり剥落後にせん断ひび割れが進展せず、H形鋼フランジの局部座屈後も安定した復元力特性を維持することが示された。しかし、一部の供試体では、H形鋼の局部座屈後の10回程度の繰り返し荷重によって座屈部の鋼材が破断し、脆性的に耐力を失う事例も確認された。これらの実験結果より、本研究では、かぶり剥落をRCとSRC柱に共通する修復限界と定義し、さらに、SRC柱に関してはかぶり剥落後の変形性能も期待できることから、H形鋼の局部座屈をSRC柱の終局限界と定義した。なお、現状では鉄骨の破断を精度良く予測することが困難であると判断し、安全側の配慮により、このSRC柱の終局限界(H形鋼の局部座屈)を定めた。

第3章では、かぶり剥落を修復限界と定義したRCおよびSRC柱の変形性能評価に関する検討を行った。かぶり剥落と軸方向鉄筋の座屈は同時に生じるものと考え、はじめに、既往のRC柱の正負交番載荷実験で計測された柱基部の塑性曲率分布の実験データを基にして、軸方向鉄筋の座屈モデルを構築した。図-1に示す軸方向鉄筋の座屈モデルは、帯鉄筋やかぶりコンクリートによる座屈抑制効果を考慮しており、軸方向鉄筋や帯鉄筋の鉄筋径や配筋間隔およびかぶりなどに応じて、軸方向鉄筋の座屈長や座屈発生時ひずみが算定できる。さらに、この座屈モデルを基に、座屈発生点に対応するかぶり剥落時曲率の簡易的な算定フローを提示した。そして、かぶり剥落時曲率と別途定めた等価塑性ヒンジ長を用いてモデル化される部材軸方向の塑性曲率分布を二階積分することによって、軸方向鉄筋の座屈発生時変位を算定する手法を体系化した。次に、第2章のSRC柱の正負交番載荷実験において計測した塑性曲率分布と提案手法による塑性曲率分布とを比較し、提案手法のSRC柱への拡張を検討した。その結果、SRC断面からH形鋼を除くという条件を設けることによって、提案するかぶり剥落時変位の算定手法はSRC柱にも適用可能であることを示した。そして、既往のRCおよびSRC柱の正負交番載荷実験の再現を試みた結果、提案手法は、全58体のRC柱および全20体のSRC柱に対して、かぶりコンクリート剥落時や軸方向鉄筋の座屈発生時変位を

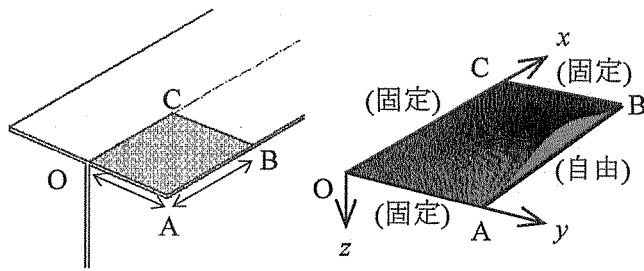


図-2 H形鋼のフランジ要素の座屈モデル

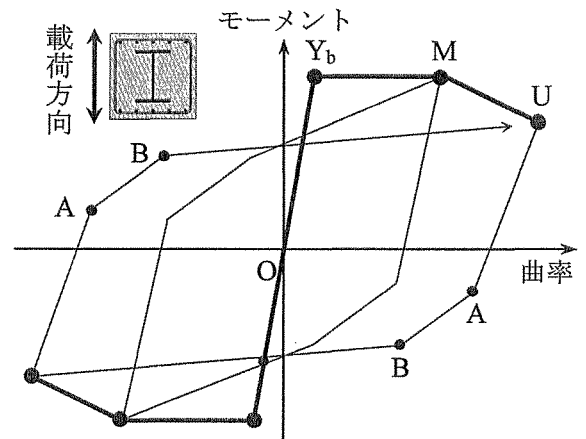


図-3 モーメントー曲率関係のモデル化

精度良く評価できた。

第4章では、H形鋼の局部座屈を終局限界と定義したSRC柱の変形性能評価法に関する検討を行った。はじめに、コンクリートによる拘束条件を与えたH形鋼の局部座屈解析(FEMモデル)を行うことによって、SRC柱の正負交番載荷実験で確認されたH形鋼の座屈性状が概ね再現できた。さらに、このFEMモデルを用いた数値解析により、SRC構造では、コンクリートがH形鋼ウェブの面外変形とフランジの内側への変形を拘束するために裸鉄骨とは異なる座屈形状となり、その結果、H形鋼の座屈抵抗性が大きく向上することを示した。このFEM解析や実験結果で確認されたH形鋼の座屈性状に着目し、3辺固定-1辺自由の支持条件を仮定した図-2のフランジ要素(平板要素)のポテンシャルエネルギーの釣合式を解くことによって、SRC柱におけるH形鋼フランジの座屈発生時ひずみを定式化した。さらに、この座屈発生時ひずみを基にして、部材軸方向の塑性曲率分布をモデル化する手法により、座屈時変位の算定式を導出した。その結果、提案手法は、フランジ幅厚比6.0~12.5、軸力比0~0.2、せん断スパン比3~6の範囲において、FEM解析と同等の座屈時変位やフランジの座屈長および塑性化長さを得ることができた。また、第2章のSRC柱の正負交番載荷実験の再現解析を行った結果、提案手法は、実験時のH形鋼の座屈時変位を過小評価する傾向が見られたが、フランジの座屈長や塑性化長さについては妥当に再現することができた。

第5章では、RCからSRC断面まで適用可能な復元力モデル(モーメントー曲率関係)に関する検討を行った。RCおよびSRC橋脚を想定した場合、除荷から再載荷におけるモーメントー曲率関係の履歴曲線は、コンクリート断面を無視した軸方向鉄筋と鉄骨断面の弾塑性解析によって概ね評価できることを示した。そして、軸方向鉄筋と鉄骨断面の弾塑性解析により図-3に示す履歴曲線上のA点とB点(剛性変化点)を定めることによって、RCからSRC断面までを一元的に評価可能とする履歴則を提示した。そして、第3章と第4章の提案手法を用いて、部材降伏点( $Y_b$ 点)、かぶり剥落点(M点)、およびH形鋼の局部座屈発生点(U点)を直線で結んだスケルトンカーブの設定と、この履歴則とを組み合わせた図-3の復元力モデルを提示した。さらに、柱部材を2次元はり要素でモデル化し、この復元力モデルに基づいて各要素のモーメントー曲率関係を与えることによって、正負交番載荷を受けるRCおよびSRC柱におけるかぶり剥落点、H形鋼の座屈発生点、およびエネルギー吸収量や等価減衰係数が妥当に評価できた。

第6章では、各章の検討によって得られた知見をまとめ、本研究の結論を示した。

なお、本研究が提示する変形性能評価法や復元力モデルは、橋脚を想定した軸力や諸元の範囲の

使用に限定することによって、現行の設計規準と同程度の計算量により、上記の部材損傷点 (かぶり剥落と H 形鋼の局部座屈) および復元力特性を評価するものである。このため、建築構造物など、橋脚と諸元が大きく異なる SRC 部材への適用は、別途検討が必要である。

## 論文審査結果の要旨

鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造をはじめとする鋼・コンクリート合成構造は、施工の合理化と高い耐震性能を同時に可能とするため、近年、橋梁上部工・下部工への適用例が増加している。本研究は、鉄骨鉄筋コンクリート橋脚を対象として、かぶりコンクリートの剥落 (軸方向鉄筋の座屈) を修復限界状態、H 形鋼の局部座屈を終局限界状態と定義した変形性能評価法と復元力モデルを提示したものであり、全 6 章によって構成されている。

第 1 章では、序論として本研究の背景と目的および研究のフローを示した。

第 2 章では、RC および SRC 柱の正負交番載荷実験の概要および実験結果が示されている。これらの実験結果に基づき、かぶりコンクリートの剥落を修復限界状態、および H 形鋼の局部座屈を終局限界状態とした SRC 柱の新しい限界状態を定義した。これらの限界状態の設定は、性能照査型設計に向けて意義深いことである。また、橋脚を模した SRC 柱の載荷実験は少なく、本研究が提示する実験データは、コンクリート工学の分野において極めて貴重なものである。

第 3 章では、軸方向鉄筋の座屈モデルを基にした RC および SRC 柱に適用可能な変形性能評価法を提示した。提案した手法は、RC および SRC 柱の修復限界状態を簡便かつ精度良く算定できるものであり、コンクリート工学並びに耐震工学において極めて有意な成果である。

第 4 章では、H 形鋼の座屈モデルを基にした SRC 柱の変形性能評価法を提示した。提示した手法は、SRC 柱の終局限界状態を簡便かつ精度良く算定できるものであり、コンクリート工学並びに耐震工学において極めて有意な成果である。

第 5 章では、断面の鉄骨量をパラメータとする履歴曲線のモデル化と、第 3 章および第 4 章の変形性能評価法を統合した復元力モデル (モーメントー曲率関係) を提示した。そして、提案手法と既往の正負交番載荷実験との比較を行うことによって、提案手法は広範な諸元に対し、かぶり剥落や H 形鋼の局部座屈に対応した部材損傷点や復元力特性を精度良く再現できることを確認した。本論文で提示した変形性能評価法および復元力モデルは、SRC 構造のみならず RC 構造にも適用可能であり、コンクリート工学並びに耐震工学において極めて独創的かつ有意な成果である。

第 6 章では、本研究の結論を示した。

以上、要するに本論文は、部材損傷に着目した SRC 橋脚の変形性能と復元力特性の評価手法を提示したものであり、これによって地震時の損傷状況と復旧性を考慮した SRC 橋脚の耐震設計が可能となる。本研究の成果は、コンクリート工学並びに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。