

論文の内容の要旨

論文題目 高強度材料を用いた鉄道コンクリート構造の性能照査法

氏名 岡本 大

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造は、経済性、耐久性、維持管理性等に優れていることや、騒音・振動が少ないこと等から、鉄道構造物に多く用いられてきている。しかし最近では、耐久性に優れていると考えられている RC 構造物の早期劣化がしばしば社会問題となっている。また、兵庫県南部地震以降、より高い安全性を実現するために、耐震設計において考慮される地震動レベルが大きくなっており、RC 構造物においては耐震上必要な鉄筋量が多くなる傾向にある。鉄筋量の増加は、組立等における施工性の低下やコンクリート充填性の低下に繋がる可能性があることから、これらへの対応が迫られている。

このような要求に対応した上で、鉄道コンクリート構造物を構築するための手段の一つに高強度材料の適用が考えられる。すなわち、水セメント比の小さい高強度コンクリートを用いることで、構造物の耐久性や各部材の耐荷性状を高めることが可能となることや、高強度鉄筋を使用することにより、少ない鉄筋量で普通強度鉄筋を用いた部材と同等以上の耐荷性状を得ることを期待するものである。

高強度材料を鉄道構造物に適用するためには、高強度材料を使用した RC 部材の材料、構造特性について検討を行い、具体的な設計法を提案する必要がある。そこで、本研究では、高強度材料を使用した RC 部材の基本的な構造特性として曲げ・せん断耐荷性状、曲げ変形性能、曲げひび割れ性状、および高強度鉄筋の疲労強度について検討を行い、それらについて評価方法を提案することを目的とした。

一方、鉄道 RC 構造物は、主に「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」（以下、鉄道 RC 標準）に基づいて設計される。平成 16 年に改訂された鉄道 RC 標準は性能照査型設計法を採用しており、設計者の自由度を広げ、最新の技術の導入等が可能となる体系とすることが目標とされた。そして冒頭に述べたような背景もあり、新技術として、鉄筋およびコンクリートの材料強度の適用範囲を高強度領域へ拡大することが主要な改訂方針の一つとして挙げられた。鉄道 RC 標準では、構造物に対して安全性、使用性、復旧性の 3 つの要求性能を設定し、それぞれの要求性能に対して構造物が限界状態に至らないことを照査することとしている。本研究で得られた成果は、それぞれの要求性能に対応させる形で鉄道 RC 標準に反映することとした。

本研究では、以下に示すコンクリートの圧縮強度および鉄筋の規格を主な検討対象とした。

- 圧縮強度の特性値が約 $50\sim 100\text{N/mm}^2$ のコンクリート。
- 引張降伏強度の規格値が 490N/mm^2 (SD490), 685N/mm^2 (SD685), 785N/mm^2 (SD785), 1275N/mm^2 (SD1275)の鉄筋

本論文は全 6 章で構成されている。

第 1 章「序論」では、鉄道構造物に高強度材料を適用することの背景と必要性を説明するとともに、本研究の目的を述べた。

第 2 章「高強度材料を適用した RC 部材の耐力評価」では、高強度コンクリートおよび高強度鉄筋を使用した RC 部材のせん断耐力および曲げ耐力の評価方法について示した。

せん断耐力については、せん断スパン比 a/d (a : せん断スパン, d : 有効高さ) が 2.0 を上回るせん断引張破壊を生じる棒部材を検討対象とし、せん断耐力算定法について実験的に検討した。なお、せん断耐力の算定方法は、コンクリートにより負担されるせん断力 V_c とトラス理論により負担されるせん断力 V_s との累加方式とし、 V_c はせん断補強鉄筋のない梁の載荷実験、 V_s はせん断補強鉄筋を有する梁の載荷実験を基に考察を加えた。

高強度コンクリートを用いたせん断補強鉄筋のない梁のせん断耐力は、コンクリートの圧縮強度の増加割合に比して引張強度の増加割合が小さいことや、せん断ひび割れ面の骨材が割裂破壊を生じること等から頭打ち傾向を示すため、何らかの制限が必要とされている。本研究では、RC ラーメン高架橋の上層梁を 1/2 スケールにモデル化した圧縮鉄筋を有する試験体を用いて、斜めひび割れ強度 f_{vc} の上限値について検討を行った。その結果、圧縮鉄筋を有する場合でも、2002 年制定の土木学会示方書と同様に、 $f_{vc} \leq 0.72 \text{ N/mm}^2$ という上限値を設けることで V_c が妥当に評価できることを示した。

せん断補強鉄筋を有する梁については、せん断補強鉄筋を高強度化すると降伏に至るまでの伸びが大きくなり、斜めひび割れ幅が過大になる。そのためコンクリートに発生する斜め圧縮応力が斜めひび割れを横切ることが困難となり、載荷点近傍の圧縮縁コンクリートが破壊を生ずるとともに斜めひび割れが圧縮縁に貫通しやすくなる。その結果、せん断補強鉄筋の降伏に先立って斜めひび割れが圧縮縁に貫通し、荷重低下を生じてしまう。このようなことから、せん断補強鉄筋の降伏を仮定する現行のせん断耐力の算定法においては、せん断補強鉄筋の降伏強度に何らかの上限値を設定することが必要である。本研究では、前述のような破壊メカニズムを考慮し、せん断補強鉄筋の降伏強度 f_{wy} の制限値をコンクリートの圧縮強度の関数として表すこととして検討を行った。その結果、 $f_{wy} \leq 25 f'_c$ とすることで、計算値は実験値を妥当に評価できることが明らかとなった。

また、曲げ耐力については、コンクリート強度の影響をコンクリートの終局ひずみの値に考慮したコンクリートの応力 - ひずみ曲線を用い、ファイバーモデルを用いた断面計算により、精度よく算定できることを示した。

第3章「高強度材料を適用した RC 部材の変形性能評価」では、高強度材料を用いた RC 部材の変形性能算定法について示した。

高強度材料を用いた RC 柱の変形性能の評価は、定変位3回繰返しの静的正負交番載荷実験に基づいて行った。まず、縮小モデルの試験体の載荷実験の結果を基に、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（以下、鉄道耐震標準）に示される、普通強度材料を用いた RC 部材を対象とした変形性能算定式を、高強度材料を用いた RC 部材に拡張した。さらに、普通強度の RC 部材を対象とした変形性能算定式は、実大サイズの試験体を用いた交番載荷試験結果を基に提案されたものであることから、実設計へ適用に際しては、実大試験体における適用性を確認する必要があると考えた。そこで、実大試験体による交番載荷試験を実施し、変形性能算定式の適用性について追加検討を行った。その結果、高強度材料を用いた RC 部材の変形性能は、普通強度材料を対象とした算定式において、帯鉄筋強度、軸方向鉄筋強度が変形性能に及ぼす影響として SD345 の鉄筋を基準とした係数 $k (=f_y/345, f_y$ 、軸方向鉄筋、あるいはせん断補強鉄筋の降伏強度の規格値) を各鉄筋比に乗ずることにより評価可能であることを示した。ただし、本研究ではコンクリート圧縮強度が変形性能に及ぼす影響について定量的な評価を行うまでには至らず、今後の検討課題と考える。

第4章「コンクリート～鉄筋間の付着特性が曲げひび割れ性状に及ぼす影響」では、高強度コンクリートを用いた場合の曲げひび割れ幅算定方法について示した。

まず、コンクリートの圧縮強度とブリーディング量が、RC 部材の鉄筋とコンクリート間の付着およびひび割れ性状に及ぼす影響を、一軸引張試験によって検討した。次に、これまでの高強度コンクリートのひび割れ性状に関する研究データは一

軸引張試験によるものが多いことから、ラーメン高架橋上層梁の 1/2 スケールの梁の単純曲げ試験により、曲げひび割れ幅算定式の適用性を再検証した。

ひび割れ後のコンクリートの平均応力 $\sigma_{c,ave}$ 、すなわち、ひび割れ間のコンクリートの付着による鉄筋応力の減少効果については、実測の平均的な値は、普通強度コンクリートに関する既往の研究と同様にコンクリート引張強度 σ_{ct} の関数 $\sigma_{c,ave} = 0.4 \sigma_{ct}$ で表されることを示した。また、圧縮強度が小さくノンブリーディングとなっていない自己充填コンクリートの場合には、付着による鉄筋応力の減少効果は普通コンクリートと同等と見なすのが妥当と考えられる事を示した。

そして、高強度コンクリートを用いた RC 梁の曲げひび割れ幅は、実設計で対象とするような 0.4mm 以下のひび割れ幅の範囲では、2002 年の土木学会示方書に示されるコンクリートの圧縮強度の影響を考慮した係数を用いることより、妥当に評価できることを示した。

第 5 章「高強度鉄筋の疲労強度」では、軸方向鉄筋への適用が可能とされている SD685 の鉄筋について、現状では研究データのない 200 万回を超える繰返しに対する疲労特性について実験的に検討し、疲労強度算定式を示した。なお、SD490 の鉄筋については検討事例があるものの試験データ数が少ないことから、併せて 2×10^6 回以上の高サイクル繰返し疲労試験を実施した。

試験結果より、SD490、SD685 の鉄筋については、200 万回以上の繰返し回数に対しては、S-N 線の勾配を普通強度鋼材と同一の $k=0.06$ とした場合でも安全側に評価できることを示した。

第 6 章「結論」では、各章毎に得られた成果を学術的結論としてまとめるとともに、本研究の設計実務への貢献として鉄道 RC 標準へ反映した内容、および実構造物への主な適用事例について示し、本研究の結論とした。