

鉄道における鋼とコンクリートの複合構造物の設計技術の動向

佐藤 勉* 杉本 一朗**

Recent Trends of Design Technology for Railway Steel-Concrete Hybrid Structures

Tsutomu SATO Ichiro SUGIMOTO

Design Standard for Railway Steel-Concrete Hybrid Structures (Draft), which is a revised edition of the Standard-1998, has been established. The Design Standard is newly drafted, adopting the “performance-based design method”. As for this design standard, the design methods of steel reinforced concrete members, concrete-filled steel tube members, and various joint panels for Hybrid Structures are included. This paper describes the recent trends of the Design Standard and the design technology for Railway Steel-Concrete Hybrid Structures.

キーワード：設計標準，複合構造物，鉄骨鉄筋コンクリート，コンクリート充填鋼管

1. はじめに

鉄道の技術基準である「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」(国土交通省令第151号)が、平成13年に従来の仕様規定から性能規定へ改正された。これを受けて、鉄道構造物等の各種設計標準は、性能照査型の設計体系への改訂が行われている。既に、平成16年「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」¹⁾(以下、コンクリート標準という)、平成18年「同(変位制限)」、平成19年「同(土構造物)」、平成21年「同(鋼・合成構造物)」²⁾(以下、鋼・合成標準という)が性能照査型に改訂された。さらに、平成24年「同(基礎構造物)」、「同(土留め構造物)」および「同(耐震設計)」³⁾(以下、耐震標準という)が同様に改訂されている。

本稿では、現在改訂作業が進められている「鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物)」(以下、複合標準という)の概要と関連する設計技術の動向について紹介する。

2. 複合標準改訂の経緯と目的

鋼とコンクリートの複合構造物は、両者の材料をうまく組み合わせた合理的な構造であり、近年適用事例が増えている。複合構造物は、優れた耐荷力や変形性能を有しているため断面の縮小化が図れ、急速施工や狭隘な箇所での施工も可能である。このことから、駅部や営業線近接等の狭隘な箇所でも適用される場合が多くなってお

* 構造物技術研究部 主管研究員

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室 室長

り、今後増えるものと想定される。現行の複合標準⁴⁾は平成10年に制定されたもので、その後平成14年にSI単位版が出版されているが、技術的な内容の変更は行われていない。それ以降、各種設計標準の性能照査型への移行や、種々の鋼とコンクリートの複合構造物の開発、複合構造に関する照査法等の新たな知見も得られている。さらに、土木学会では、平成21年に複合構造に関する最新の知見を取り入れた「複合構造標準示方書」⁵⁾が発刊されている。

そこで、複合標準の改訂に向けて、国土交通省の指導のもと平成22年2月に「鋼とコンクリートの複合構造物設計標準に関する委員会」(委員長 上田多門 北海道大学教授、幹事長 中島章典 宇都宮大学教授)を設置し長期間にわたる審議が行われ、平成25年8月に最終委員会が開催されて成案(以下、改訂(案)という)が得られたところである。

3. 複合標準改訂(案)の適用範囲と全体構成

鋼とコンクリートの複合構造物には、多種多様な構造形式がある。現行の複合標準は、鉄骨鉄筋コンクリート構造物とコンクリート充填鋼管構造物を主に対象としているが、改訂(案)ではこれら以外の複合構造物にも適用し易くなるような構成としている。具体的には、図1および図2に示すように、鉄骨鉄筋コンクリート(以下、SRCという)部材あるいはコンクリート充填鋼管(以下、CFTという)部材が使用された合成構造物と、異種部材の接合部を有する混合構造物を適用範囲としたものとなっている。

特集：鋼とコンクリートの複合構造物の設計技術

改訂（案）は、種々の複合構造物への適用を考えて、5編構成としている。その構成と各編の位置付けを整理したものを図3に示す。各編の内容は、以下の通りである。

第I編の共通編には、部材種別によらない複合構造物の照査の共通事項を示した。なお、部材種別、接合部および構造物に特有の事項はII編以降に記述されているため、照査においては、共通編によるほか該当する各編も参照して行う必要がある。

第II編と第III編は、SRC部材およびCFT部材の照査における特有の事項を示した。また、第IV編では、異種部材の接合部等の照査における特有の事項を示した。第V編では、構造形式（鉄骨鉄筋コンクリート桁、橋脚、ラーメン構造物、トラス橋、アーチ橋）に応じた構造物の設計に関する一般事項を示した。

なお、支承部については、ゴム支承と鋼製ストッパーを用いた支承部は主にコンクリート標準に、水平力分散支承や免震支承を用いた支承部および鋼製支承を支承本体に用いた支承部は主に鋼・合成標準によるものとした。さらに、支承部の地震の影響に対する照査は、耐震標準にもよることとした。

各編の章構成を表1に示す。

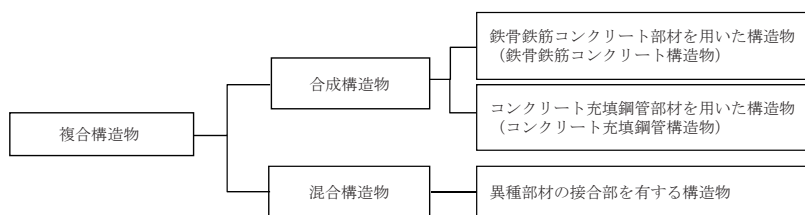


図1 複合構造物の分類

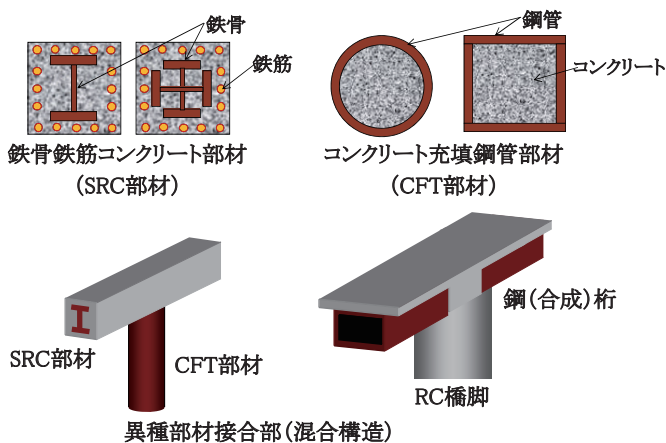


図2 複合構造物の適用の対象

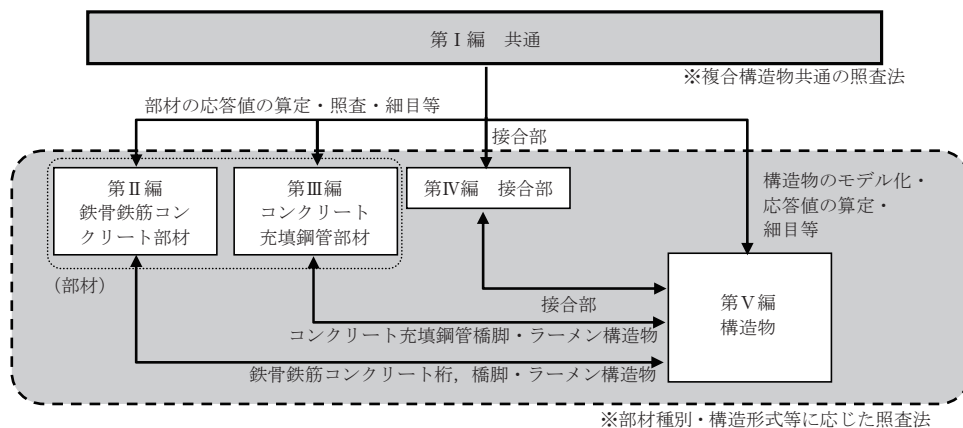


図3 複合標準改訂（案）の構成と各編の位置付け

4. 性能照査型設計と要求性能

性能照査型設計体系の基本的な枠組となる構造物の要求性能に関しては、安全性、使用性および復旧性の3つを基本に定め、SRC部材、CFT部材、接合部等における標準的な照査法を示した。これは、既に先行して性能照査型に移行した設計標準と整合させたものである。なお、「耐久性」は、コンクリート標準と同様に「時間の経過に伴って生じる材料特性の変化に起因した構造物や部材の性能の変化に対する抵抗性」と定義した。

各要求性能に対する性能項目、照査指標および考慮する作用の例を表2に示す。

5. 主な技術的内容の変更点

5.1 高強度材料を適用したSRC部材の変形性能の算定

SRC部材は、駅部高架橋等の施工に制約を受ける箇所に用いられることが多くなっている。また、地震作用の増加による鋼材量の増加や耐久性の向上等が、構造物に求められている。したがって、高性能材料の一つである高強度材料を使用して鋼材量を低減することや部材断面の縮小を図ることは、これらに対する方策として有効であると考えられる。

しかし、耐震標準では、SRC部材の変形性能算定式が示されているが、材料強度に適用範囲（コンクリートの圧縮強度50N/mm²以下、鉄筋規格SD390以下等）が設けられているため、高強度材料を用いる際には変形性

能算定式をそのまま用いることができないのが現状である。

そこで、SRC 部材の鋼材やコンクリートに高強度材料を適用した場合の曲げ耐力や変形性能を確認することを目的に、降伏強度 400N/mm^2 を超える鋼材（鉄筋 SD490、鉄骨 SM570）や高強度コンクリート（圧縮強度 60N/mm^2 程度）を用いた柱の載荷試験を実施した。既往のデータを含め検討を行い、高強度材料まで適用可能な SRC 部材の照査法を提案した⁶⁾。主な内容は以下の通りである。

- (a) 試験体は、曲げ破壊形態であり、普通強度の材料を用いた場合の損傷状況と同程度であった。
- (b) せん断補強鉄筋比が多い場合、耐震標準の変形性能算定式は過大評価するが、せん断補強鉄筋比に 0.3% の上限を設けることで、実験結果を妥当に評価できる。なお、これについては高強度材料に限らないため、普通強度材料を含めて、変形性能算定式にせん断補強鉄筋比の上限を設けることとした。
- (c) せん断補強鉄筋比に上限を設けることにより、現行の曲げ耐力および変形性能の算定式が適用可能である。
- (d) 荷重 - 変位の履歴法則は、高強度鋼材を用いた場合でも現行のモデルで概ね評価することができる。

5.2 SRC 梁のせん断耐力の算定

SRC 梁のせん断耐力に関しては、現行の複合標準に記載があるものの、単純支持が前提の算定式である。一方、ラーメン高架橋の地中梁や中層梁等においては、逆対称曲げモーメント分布となるため、現行の算定式が前提としている支持条件と異なる。また、線路直角方向の梁では、せん断スパン比の小さいディーブビーム的な構造となる場合も少なくない。そのため、逆対称曲げを受ける SRC 梁のせん断耐力に関する各種実験的検討を行った⁷⁾。また、せん断耐力を検討する上では、抵抗メカニズムを解析的に明らかにしておくことが重要である。このため、逆対称曲げを受ける SRC 梁を対象に既往の実験データにより、3次元 FEM 解析の妥当性を確認した上で、抵抗メカニズムやせん断補強鉄筋と鉄骨の補強効果等についても検討した⁸⁾。主な内容は以下の通

表 1 各編の章構成

第 I 編 共通	第 II 編 鉄骨鉄筋コンクリート部材	第 III 編 コンクリート充填鋼管部材
1章 総則 2章 設計の基本 3章 構造物の要求性能と性能照査 4章 作用 5章 材料 6章 応答値の算定 7章 安全性の照査 8章 使用性の照査 9章 復旧性の照査 10章 耐久性の検討 11章 施工および維持管理	1章 総則 2章 応答値の算定 3章 安全性の照査 4章 使用性の照査 5章 復旧性の照査 6章 耐久性の検討 7章 施工時の鉄骨の検討 8章 照査の前提 9章 部材 10章 構造細目	1章 総則 2章 応答値の算定 3章 安全性の照査 4章 使用性の照査 5章 復旧性の照査 6章 耐久性の検討 7章 施工時の鋼管の検討 8章 照査の前提 9章 部材 10章 構造細目
第 IV 編 接合部		第 V 編 構造物
1章 総則 2章 応答値の算定 3章 安全性の照査 4章 使用性の照査 5章 復旧性の照査 6章 耐久性の検討 7章 照査の前提 8章 構造細目 9章 接合部のずれ止め 10章 鉄骨鉄筋コンクリート柱の接合部 11章 コンクリート充填鋼管柱の接合部		1章 総則 2章 鉄骨鉄筋コンクリート桁 3章 橋脚 4章 ラーメン構造物 5章 トラス橋 6章 アーチ橋

表 2 各要求性能に対する性能項目、照査指標、考慮する作用の例

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮する作用
安全性	破壊	力、変位・変形	設計耐用期間中に生じるすべての作用およびその繰返し* ³ 発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用* ²
	疲労破壊	応力度、力	
	走行安全性	変位・変形	
	公衆安全性* ¹	ボルト種類（遅れ破壊）、中性化深さ、塩化物イオン濃度	
使用性	乗り心地	変位・変形	設計耐用期間中に比較的しばしば生じる大きさの作用
	外観* ¹	ひび割れ幅、応力度 塗装系の選定（塗装仕様）、初期さび対策（無塗装仕様）	
	水密性* ¹	ひび割れ幅、応力度	
	騒音・振動* ¹	騒音レベル、振動レベル	
復旧性	損傷	変位・変形、力、応力度	設計耐用期間中に生じる作用発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用* ²

*¹ 必要に応じ設定される性能項目

*² 必要に応じ考慮する作用

*³ 疲労破壊の照査で考慮する作用は、変動の特性を考慮して別に定める。

りである。

- (a) 既往のせん断耐力算定式では、せん断補強鉄筋が降伏する前提となっているが、解析と実験結果では、せん断スパン比が 2.0 より小さい場合、せん断補強鉄筋比 p_w が多いと降伏しないことが確認された。このため、せん断補強鉄筋により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力の算定において、実験でせん断補強鉄筋の降伏が確認された $p_w=0.22\%$ を上限とすることとした。
- (b) 支持条件に応じてせん断耐力の算定式を使い分ける必要があり、単純支持の場合には既往の算定式を用い、逆対称曲げを受ける場合には新たなせん断耐力算定式を示した。

5.3 CFT 部材の曲げ耐力および変形性能の算定

耐震標準では、CFT 部材の曲げ耐力および変形性能の算定式が示されているが、これらの算定式には断面諸元等の適用範囲が設けられている。これに対し、現行の適用範囲を超えた領域における CFT 部材のニーズが高いことから、適用範囲の拡大を目指した。

3 次元 FEM 解析や既往の載荷試験結果をもとに検討を行い、CFT 部材の新たな照査法を示した⁹⁾。主な内容は以下の通りである。

- (a) CFT 部材の曲げ耐力については、鋼管による拘束効果の影響をコンクリートの応力-ひずみ関係に直接考慮して算定する方法に変更した。また、変形性能については、塑性ヒンジ部の回転角を直接算定する方法を新たに示した。これにより、径厚比や細長比等の適用範囲が現行式より拡大するだけでなく、算定精度も向上した。
- (b) 高軸力下への適用拡大のため、CFT 部材の降伏点や損傷レベルの設定方法について見直し、軸力比の適用範囲を現行の 0.3 から 0.6 まで拡大できるようにした。

5.4 部材接合部の照査法

部材と部材が交わる部分または面（接合部コア）が破壊する場合、その破壊形態は一般に脆性的となることが多いため、接合部コアは強度や剛性を十分大きくし破壊や損傷が生じにくい構造とする必要がある。そのため、接合部の具備すべき一般事項を示すとともに、破壊断面の確認方法を新たに改訂（案）に記述した。

複合構造物では異種の部材で構成される場合が多いため、異種部材の接合部が多く存在し、その照査法が重要となる。一方で、様々な形式の接合部があり、すべてを網羅できる照査法はなく、個別に照査法を示すこととなる。改訂（案）では、新たな知見が得られた接合方式の照査法を示すとともに、現行の複合標準の照査法の適用条件をより明確にした。また、異種部材の接合部には、鋼とコンクリートの一体化のために、一般にずれ止めが多く用いられている。そこで、頭付きスタッドおよび孔あき鋼板ジベル等のずれ止めについて、既往の載荷試験結果をもとに、各性能項目に応じた設計限界値を提案した。また、ずれ止めを生じるせん断力については、従来の方で安全側に算定できることを確認した。

6. おわりに

複合標準改訂（案）は、性能照査型設計体系に基づくとともに、最近の研究成果や知見を取り入れたものとなっている。平成 26 年度中の改訂を目標に、実務設計への適用普及が速やかに図られるように、性能照査例や照査支援プログラム等の整備を現在行っているところである。

最後に、改訂（案）の作成にあたっては、検討委員会の委員長・幹事長をはじめ、委員・幹事等の関係各位から長期間にわたりご尽力を賜っており、ここに深甚なる謝意を表する次第である。

なお、本検討は、国土交通省からの委託による「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として実施したものである。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，2004.4
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成複合構造物），丸善，2009.7
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012.9
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，2002.12
- 5) 土木学会：複合構造標準示方書，丸善，2009.12
- 6) 岡本大，奥西淳一，堀慎一：高強度材料を用いた鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力と変形性能の評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.1，pp.11-16，2014
- 7) 中田裕喜，渡辺健，谷村幸裕，田所敏弥，池田学：逆対称曲げを受ける鉄骨鉄筋コンクリート梁のせん断耐力評価，鉄道総研報告，Vol.26，No.11，pp.23-28，2012
- 8) 中田裕喜，渡辺健，田所敏弥，岡本大，池田学：せん断スパン比および支持条件の影響を考慮した鉄骨鉄筋コンクリートはりのせん断耐力の評価方法，鉄道総研報告，Vol.28，No.1，pp.5-10，2014
- 9) 青木千里，池田学，斉藤雅充，萬代能久，吉田直人：せん断スパン比の小さいコンクリート充填鋼管部材の曲げ耐力と変形性能の評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.1，pp.23-28，2014