

鉄道構造物に関する設計標準の最近の動向

佐藤 勉*

Recent Trends of Design Standards for Railway Structures

Tsutomu SATO

Design Standards for Railway Structures of Foundations and Soil Retaining were revised in December 2011. After the verification for the damages of railway structures due to “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake” was executed, Seismic Design Standard was revised in July 2012. Moreover, Design Standard for Railway Steel-Concrete Hybrid Structures is newly drafted, adopting the “performance based design method”. This paper describes the recent trends of the Design Standards for Railway Structures.

キーワード：設計標準，土留め構造物，耐震設計，複合構造物

1. はじめに

鉄道の技術基準に関しては、「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,平成13年)において、従来の仕様規定から性能規定への改正が行われた。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)」,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)」が性能照査型設計法へ改訂された。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)」が同様に改訂されている。

本稿では、最近改訂された「鉄道構造物等設計標準・同解説(土留め構造物)」(以下、土留め標準という)および「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」について、改訂の概要を簡単に紹介する。さらに、現在改訂原案を作成中の「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)の改訂動向についても紹介する。なお、「鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)」に関しては、文献¹⁾において、改訂の概要を紹介しているので参照されたい。

2. 土留め構造物の設計

2.1 改訂の経緯

擁壁、橋台などの土留め構造物には多種多様な種類があり、これまで多く採用されてきた抗土圧擁壁、抗土圧橋台に加え、近年では補強土擁壁、補強土橋台等も用いられるようになった。抗土圧擁壁、抗土圧橋台は背面地盤から受ける土圧に抵抗する構造物として「抗土圧構

物」に分類され、これまで鉄道構造物等設計標準(抗土圧構造物)において設計方法が示されていた。一方で、補強土擁壁、補強土橋台は盛土に適用されていた補強土工法が擁壁、橋台等の構造物に対しても適用が拡張されてきた経緯から、鉄道構造物等設計標準(土構造物)において設計方法が示されていた。このような背景から土留め構造物は異なる設計標準を用いて設計されていたが、設計や施工の実務からは、抗土圧構造物と補強土構造物を同一の設計標準の中で統一的に取り扱えるようにすることが求められていた。このため、平成20年8月から土構造物設計標準(土留め構造物編)に関する検討委員会(委員長 龍岡文夫 東京理科大学教授(当時)、幹事長 古関潤一 東京大学教授)を設置し、検討が行われた。

2.2 改訂の概要

土留め標準は、図1に示す構造物が取り扱われており、性能照査型設計法の導入とともに、適用箇所、適用条件に応じた抗土圧構造物と補強土構造物の体系的な体系のもとでの設計が可能となっている。

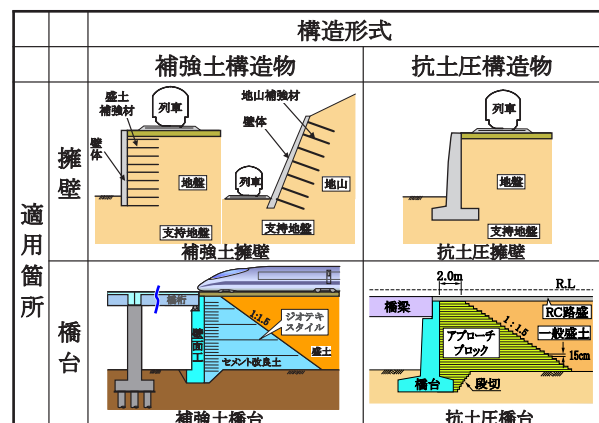


図1 土留め標準で取り扱う土留め構造物²⁾

* 構造物技術研究部 主管研究員

特集：構造物技術

擁壁は地震時の慣性力に比べて土圧の影響が大きく、橋台は土圧の影響を受けるが、むしろ桁等による慣性力の影響の方が大きい。このため、擁壁と橋台の応答値算定法や設計限界値を区別し、擁壁は土構造物に、橋台は橋梁・高架橋に整合を図ることとしている。改訂の詳細については、紙面の都合上、文献²⁾などを参照されたい。

3. 構造物の耐震設計

3.1 改訂の経緯

今回の改訂は、兵庫県南部地震後に制定された「鉄道構造物等設計標準(耐震設計)」(以下、平成11年版耐震標準という)を見直し、本格的な性能照査型設計に移行したものである。改訂原案の作成にあたっては、平成18年から検討委員会(委員長 佐藤忠信 神戸学院大学教授、幹事長 澤田純男 京都大学教授)を設置し、4年間にわたり審議が重ねられ、既に成案が得られていた。これに基づき、通達・出版の準備が行われていたが、平成23年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震は、国内史上最大とされるMw9.0(Mw:モーメントマグニチュード)の巨大地震であり、これまで耐震設計で想定していたL2地震の規模を遥かに上回る規模の地震であった。そこで、国土交通省では「鉄道構造物耐震基準検討委員会」を発足させ、概ね1年をかけて地震動や耐震設計法についての検証が行われた。その結果を踏まえ、平成24年7月に国土交通省より設計標準の改訂が通達されるとともに、同解説が9月に出版されたところである。今回改訂された設計標準(以下、新耐震標準という)の概要について紹介する。

3.2 改訂の概要

改訂にあたっては、既に先行して性能規定化に移行した「鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)」などの整合性を考慮しつつ、主な改訂点は以下のとおりである。

(1) 要求性能

要求性能に関して、平成11年版耐震標準では「耐震性能Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ」を用いていたが、新耐震標準では「安全性」と「復旧性」と呼ぶこととした。これは、既に先行して性能規定化された設計標準と整合させたものである。

なお、平成11年版耐震標準では、L1地震動に対して耐震性能Ⅰ(無損傷)の制限を設けていたが、今回の改訂では要求性能として設定していない。これは、L1地震動に対して耐震性能Ⅰで設計しても必ずしも中小地震に対する被害を合理的にコントロールできるとは限らないことや、新しい構造形式や材料の導入の妨げになっている場合があるためである。ただし、鉄道構造物等設計標準(変位制限)の「地震時の横方向の振動変位の照査」に示されるスペクトル強度を用いた照査を行う場合には、L1地震動で構造物が降伏しないことが照査の前提条件となっている。

(2) 耐震構造計画

新耐震標準の「耐震構造計画」には、構造物が地震により損傷し、その構造物を速やかに復旧するのに影響の大きい事項のうち、構造物の計画・設計で考慮すべき事柄として、①構造物への進入路、作業ヤードの確保、②高架橋下などの利用状況、③構造物の損傷の程度等であることを記載した。復旧性は、兵庫県南部地震や新潟県中越地震における被災構造物復旧の経験から明らかなように、上記③に示す構造物の損傷等に対する修復の難易度のみならず、①②などの構造物周辺の環境状況に大きく左右される。このため、新耐震標準では、構造物周辺の環境状況の要因を構造計画において別途考慮することを前提に、修復の難易度から定まる損傷等に関わる力学的な性能項目として、変位等の定量的な指標を定めて、これを照査することにより復旧性の確保を目指すものとした。

また、地震動以外に地震に付随して発生し得る地震随伴事象としては、構造物周辺の斜面の崩落、津波、地表断層変位、余震の地震動などがある。これらの地震随伴事象に対しては、未解明な部分も多く、設計手法も確立していないことから、性能を定めて照査する対象としていない。しかし、これらに対しても構造物の安全性の確保の面から、構造計画の段階から適切に配慮することを新耐震標準に記載することとした。

(3) 性能照査の方法

新耐震標準における性能照査の方法は、あらかじめその精度が検証された信頼性の高い方法によって行うこととした。つまり、性能照査の方法を限定しないことで自由度を持たせ、新しい照査方法の導入を妨げないこととしたものである。なお、上記の考えを基本としつつ、解釈基準としての設計標準の位置付けとして、具体的な照査方法を例示する必要があることから、これまでの設計で実績があり信頼性の高い方法である、部分安全係数を用いた限界状態設計法による照査方法を示している。

(4) 設計地震動

新耐震標準では、従来通りL1地震動とL2地震動を設定することとした。L1地震動については定義やスペクトルレベルなどは従来のものと基本的に変更していない。L2地震動については、従来の「設計耐用期間中に発生する確率は低いが、非常に強い地震動」という定義から「建設地点で想定される最大級地震動」という定義に変更した。これは、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震と活断層による内陸直下の地震では、その再現期間が大幅に異なっていることや大規模地震の発生確率に関する情報は現時点では極めて不足していることから、地震の発生確率をL2地震動の定義に持ち込まないこととしたものである。また、将来の地震に関しては、震源断層の破壊プロセスに不確定要因が多く、予測にはばらつきが伴うことは避けられない。そのため、L2地震動の設定

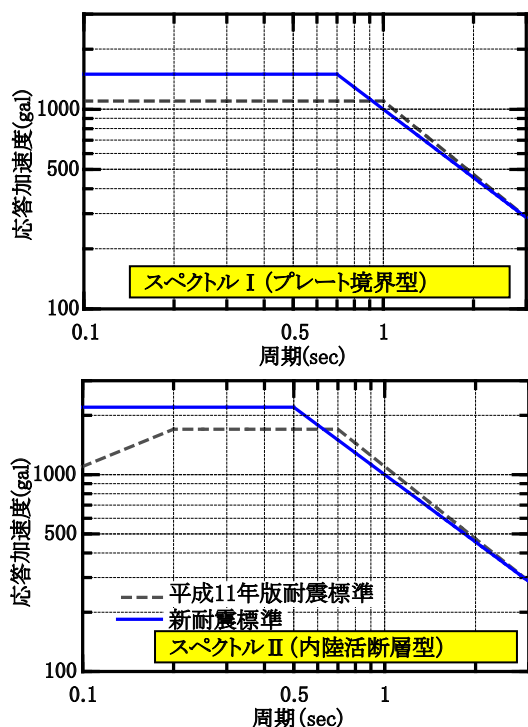


図2 L2地震動弾性加速度応答スペクトルの比較

においては、構造物に付与する性能と経済性のバランスのもとで地震動強度を合理的に選定することが必要であり、L2地震動は物理的に発生可能と考えられる極限としての最大地震動強度を下回ることもある。そこで、L2地震動を「最大級の強さ」をもつ地震動と定義している。

図2に、平成11年版耐震標準と新耐震標準におけるL2地震動弾性加速度応答スペクトルの比較を示す。図2に示したスペクトルIは、プレート境界で繰返し発生するMw8.0程度の海溝型地震が60km程度離れた地点で発生した場合の地震動を想定したものである。スペクトルIIは、Mw7.0程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合の地震動を想定したものである。

また、東北地方太平洋沖地震において観測された地震動を分析した結果、短周期側で設計地震動を上回る場合があることが確認された。これは、地震基盤が浅い地域において短周期成分が卓越することが原因と考えられ、このような地域に0.3秒よりも短周期の構造物を設計する場合の取り扱いについて、新耐震標準に反映させることとした。なお、地盤・構造物系の動的相互作用による入力損失効果等を考慮することで、構造物への影響はそれほど大きくならないことも確認されている³⁾。

(5) 応答値算定法の見直し

地震動の見直しを受け、応答値の算定に関しても精度向上を図った。具体的には、地盤挙動の算定における土の構成則、非線形応答スペクトル法、部材の非線形特性などの見直しを図ることにより、設計地震動の変更による断面や鉄筋量の増加が抑制されている。

また、東北地方太平洋沖地震では、高架橋上に設置されていた多数の電車線柱に折損や傾斜等の被害が発生し、その復旧には時間を要した。電車線柱は土木構造物と連成して振動するため、設計に際しては、その影響を考慮した地震作用とする必要がある。そこで、土木構造物と電車線柱一体モデルに

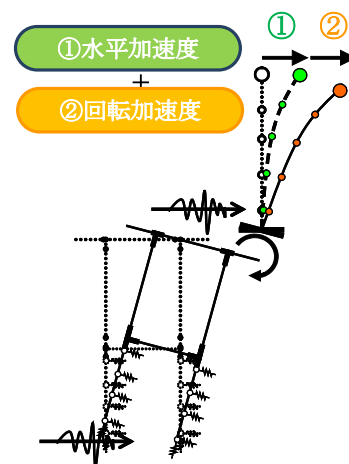


図3 高架橋上の電車線柱の挙動イメージ

よる地震応答解析を実施⁴⁾し、以下の点などを明らかとした。

- (i) 構造物を塑性化させるような大きな地震動よりも少し小さい地震動に対して、電車線柱が損傷前の状態の構造物と共振して大きく振動する場合があること。
- (ii) 電車線柱の耐震設計では、従来構造物天端の水平加速度のみを入力として考えていたが、実際には構造物の回転運動によっても電車線柱が大きな影響を受ける場合があること (図3参照)。

上記の事項については、電車線柱などの構造物に付随する施設の応答値の算定として、新耐震標準において新たに記載することとした。

(6) 新しい照査法の提案と新技術の導入

復旧性の照査は、想定される地震動に対して短期間で機能回復できる状態であることを照査するものである。

平成11年版耐震標準では限界状態設計法に基づき、標準的な構造を仮定し所定の地震動に対して損傷を制御することによって行われてきた。

新耐震標準では、例えば標準的な構造に代えて、より耐震性の高い構造に変更した場合に、構造変更に伴う初期建設費の増加分と、地震時における損失費用の総和が最小となることを照査する復旧性照査法の考え方も示している⁵⁾。また、性能規定化の利点として、新材料や新工法などが導入しやすくなる点が挙げられる。

4. 複合構造物の設計

4.1 改訂の目的

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、営業線近接や駅部等の狭隘な箇所でも適用される場合があり、今後も増えるもの

特集：構造物技術

と考えられる。複合標準は平成10年に制定されているが、それ以降各種設計標準の性能照査型設計への移行や、種々の新しい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などの新たな知見も得られている。

そこで、複合標準の改訂に向けて、平成21年度から「鋼とコンクリートの複合構造物設計標準に関する検討委員会」（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、平成24年度末までに改訂原案を作成する予定で審議が行われている。以下に、現時点における改訂の動向を紹介する。

4.2 改訂の動向

(1) 複合標準の構成および性能照査型設計法の検討

鋼とコンクリートの複合構造物には、多種多様な構造物がある。現行の複合標準は、鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCという）構造物とコンクリート充填鋼管（以下、CFTという）構造物を主に対象としているが、これら以外の複合構造物にも適用しやすくなるように構成を見直す予定である。全体構成としては、共通、SRC部材、CFT部材、接合部、支承部、構造物の6編の構成とすることが検討されている（図4参照）。

また、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、復旧性の3つを基本に定め、SRC部材、CFT部材および接合部などにおける標準的な照査法を示す予定である。

(2) 高強度材料の適用

複合構造物に高強度鋼材や高強度コンクリートを使用することによって断面の縮小化が期待されるため、これらの照査法を取り入れる予定である。具体的には、高強度材料を用いたSRC部材やCFT部材の耐力、変形性能（部材の骨格曲線や復元力モデル）などについて、実験および解析等により検討を行っているところである。

(3) 照査法の適用拡大に関する検討

SRC部材の照査法において、低せん断スパン比の場合におけるせん断耐力や変形性能の算定法などへの適用範囲の拡大を検討している。また、CFT部材の照査法についても、曲げ耐力や変形性能の算定法の適用範囲が限定されていることから、せん断スパン比や径厚比などをパラメータとした載荷試験等により、短柱や高軸力のCFT部材にも適用拡大することなどを検討している。

(4) 異種部材接合部の照査法の検討

最近の研究や実構造物での設計事例などを参考に、異種部材接合部の設計の考え方を整理し、汎用的な照査法を提案する予定である。さらに、CFT部材の新しい接合方式について、既往の研究成果をもとに具体的な算定

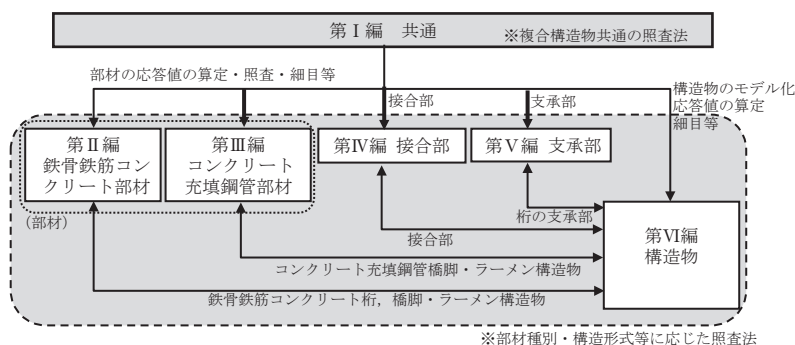


図4 検討中の複合標準の全体構成（案）

法を示す予定である。その他、異種部材接合部に用いられるずれ止めについても、合理的かつ精度の良い耐力算定式の検討などを行っている。

5. おわりに

最近改訂された設計標準および改訂作業中の設計標準について、その概要を簡単に紹介した。改訂された設計標準に関しては、実務設計において適用普及がすみやかに図られるように、鉄道総研では並行して照査例や設計プログラム等の整備を行っているのをご活用頂きたい。また、これまで各種の設計標準が性能照査型へ移行されたことから、今後は、これまで各種整備されてきた設計標準をより使いやすいものとして行くため、設計標準全体の体系などの見直しについても検討していきたいと考えている。

最後に、各種設計標準の改訂にあたっては、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、国土交通省委託による鉄道の技術基準整備のための調査研究の一環として実施されたものである。

文 献

- 1) 神田政幸：鉄道における基礎構造物の設計技術の動向，鉄道総研報告，Vol.24，No.7，pp.1-4，2010.7
- 2) 神田政幸，渡辺健治，西岡英俊：鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物）の発刊，日本鉄道施設協会誌，第50巻，第4号，pp.44-46，2012.4
- 3) 室野剛隆，坂井公俊：短周期の卓越した地震動が橋梁・高架橋の耐震設計に与える影響評価，鉄道総研報告，Vol.26，No.11，pp.5-10，2012.11
- 4) 加藤尚，坂井公俊，室野剛隆：構造物一電車線柱一体モデルによる地震応答特性の評価，鉄道総研報告，Vol.26，No.11，pp.17-22，2012.11
- 5) 室野剛隆，佐藤勉：最近の鉄道構造物の耐震設計技術，鉄道総研報告，Vol.25，No.9，pp.1-4，2011.9