

# 鉄道における基礎構造物の設計技術の動向

神田 政幸\*

## Recent Trends on Railway Foundation Design Technology

Masayuki KODA

A Committee was established in 2005 for Railway Foundations Design Standards and Retaining Structures Design Standards (Chairman Prof. Osamu KUSAKABE, Tokyo Institute of Technology, Co-chairman Prof. Junichi KOSEKI, Tokyo University) to prepare “Railway Foundation Design Standards and Commentary Revision” and obtained a revised version in the last committee in July 2008. The revised portion was “an introduction of performance based design”, “design model revision concerning the modulus of subgrade reaction”, and “an introduction of new materials and construction methods”. This paper discusses the recent trends on railway foundation design technology, principally revised content for the committee revision version.

キーワード：鉄道構造物等設計標準，基礎構造物，性能規定化，工法開発

### 1. はじめに

現在、鉄道の基礎構造物の設計は、平成9年発刊の「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）（以下、現行基礎標準）」<sup>1)</sup> によりなされている。表1に鉄道の基礎構造物に関わる設計標準整備の経緯を示す。平成12年にSI単位版に移行したものの、発刊から現在まで10年以上経過した。平成11年には「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）（以下、現行耐震標準）」<sup>2)</sup> が発刊され、地盤調査法や基礎工法の技術レベルの向上、また、現行基礎標準規定外の材料や基礎工法の導入、あるいは信頼性設計法の取り組みにより現行基礎標準では、十分な対応ができなくなってきた。

一方、国内での規制緩和の高まりやISOへの対応の観点から、新技術の導入が容易な自由度のある技術基準が求められており、各機関において性能規定型技術基準の導入が図られてきた。平成13年に国の技術基準である「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）」<sup>3)</sup> の中で、従来の仕様規定から性能規定

への改正が謳われた。これを受けて平成16年には「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）（以下、コンクリート標準）」<sup>4)</sup> が、性能規定および照査を包含した性能照査型設計標準に改められた。続いて平成18年には「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」が、平成19年には「鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）（以下、土構造標準）」が、平成21年には「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」が、同様に改訂されている。

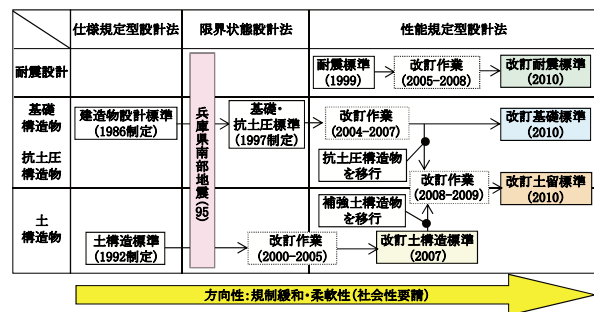
このような状況から、現行基礎標準への性能照査型設計法の導入を目的として、国土交通省の指導のもと平成17年3月に「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会（委員長：日下部治 東京工業大学大学院教授，幹事長：古関潤一 東京大学生産技術研究所教授）」が設置された。その後4年間に亘る審議を重ねた後、平成20年9月開催の最終委員会において基礎標準委員会案<sup>5)</sup> を得るに至った。なお、以下では前述の委員会案を「新設計標準」と呼ぶ。現在、「現行基礎標準」の他に「現行耐震標準」、「鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造

表1 鉄道の基礎構造物の設計標準整備の経緯

年月	設計標準
昭和43年 2月	土構造物の設計施工指針（案）
昭和44年 3月	場所打ちコンクリートグイの設計施工指針（案）
昭和49年 6月	建造物設計標準解説（基礎構造物及び抗土圧構造物）
昭和61年 3月	建造物設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物）
昭和62年 3月	普通鉄道構造規則（運輸省令）
昭和62年 4月	（JR発足）
平成 9年 3月	鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物・抗土圧構造物）
平成12年 6月	同上 SI単位版
平成11年10月	鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）
平成13年12月	国土交通省令151号「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」
平成16年 4月	鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）

\* 構造物技術研究部（基礎・土構造）

表2 鉄道の基礎構造物・抗土圧構造物・土構造物の設計標準の性能規定化



特集：基礎構造物の設計技術

物) (以下、土留め標準)」の3つの設計標準について委員会案を頂いており、平成22年度内の通達、平成23年度初頭の発刊を目的に、条文・解説・付属資料の精査を行っているところである。表2に鉄道の基礎構造物・抗土圧構造物・土構造物の設計標準の性能規定化の流れを示す。なお、本委員会が審議した抗土圧構造物については、土構造標準に示される補強土構造物と統合し、土留め構造物として土留め標準の中で一括して取扱う予定である。

本展望解説では、「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会」での議論を中心に、鉄道の基礎構造物の設計技術の動向を述べる。

2. 鉄道における基礎構造物の設計技術

「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会」では、(1) 性能照査型設計法の導入、(2) 地盤抵抗モデルと制限値の検討、(3) 材料等の適用範囲の拡大、(4) 新工法基礎の導入を主な現行基礎標準の改訂の柱とした。

2.1 性能照査型設計法の導入

(1) 性能規定化の方向性

国土交通省が所管する設計に関わる技術基準の性能規定化の方向性としては、「土木・建築にかかる設計の基本」<sup>6)</sup>で構造物の基本的要求性能として、「安全性」、「使用性」及び「修復性」を確保することが示されている。また、「構造物の設計耐用期間を定めること」、「要求性能を満たすことの検証方法として、限界状態を設定し、信頼性設計の考え方を基礎とすること」、「耐震設計では設定

表3 構造物の要求性能と設計作用の主な組合せ

要求性能	性能項目	作用の組み合わせ
安全性	破壊	永久作用+主たる変動作用+従たる変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用
	疲労破壊	永久作用+変動作用
	走行安全性	永久作用+変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用
使用性	乗り心地	永久作用+変動作用
	外観	
復旧性	損傷	永久作用+変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用

・永久作用は、その変動が無視できるほど小さく、持続的に影響を及ぼすものであり、死荷重、プレストレス力等がある。  
 ・変動作用は、頻繁あるいは継続的に働き、その変動が無視できない作用であり、列車荷重、衝撃荷重、遠心荷重、車両横荷重、制動荷重、始動荷重、風荷重、雪荷重等がある。  
 ・偶発作用は、設計耐用期間中に生じる頻度は極めて小さいが一度生じるとその影響が非常に大きい作用であり、地震の影響、自動車の衝突荷重等がある。

した耐震性能を明示し、それに対する地震動レベルを設定すること」が示されている。

一方、コンクリート標準では、表3に示すように構造物の要求性能、性能項目と作用の組み合わせを定め、構造物の性能照査は、施工中および設計耐用期間内の性能の経時変化を考慮して、設定された要求性能を満足することにより行うことを原則とした。ただし、「耐久性の検討」を満足する場合は、環境の影響による性能の経時変化を考慮しない照査方法を用いることができる。

現行基礎標準への性能照査型設計法の導入においても、これらの方向性と整合を図り検討を進めることとした。

(2) 構造物の要求性能と基礎構造物の性能項目

鉄道構造物としての要求性能は、構造物種別によらず線区毎に同一として整合を図ることが必要と考えられる。そのため、コンクリート標準と同様に「安全性」、「使用性」及び「復旧性」を構造物の要求性能とし、構造物の

表4 構造物の要求性能と基礎構造物の性能項目、照査指標の関係

構造物の要求性能	基礎構造物の性能項目			基礎構造物の照査指標の例	考慮する作用	現行基礎標準、現行耐震標準の限界状態・地震動(耐震性能)		
	大項目	中項目	小項目					
安全性	安定	地震時以外	支持地盤の破壊	沈下量(基礎反力)	・永久作用+主たる変動作用+従たる変動作用	終局限界状態		
			基礎の水平安定	水平変位(水平地盤反力)				
			基礎の回転安定	回転角(抵抗モーメント)				
			基礎部材の破壊	断面力				
		地震時(L2地震)	支持地盤の破壊	沈下量(基礎反力)			・永久作用+偶発作用+従たる変動作用	L2地震(耐震性能Ⅲ・安定レベル3)
			基礎の水平安定	水平変位(水平地盤反力)				
			基礎の回転安定	回転角(抵抗モーメント)				
			基礎部材の破壊	曲率(断面力)				
使用性	支持性能	長期支持性能	基礎の鉛直変位	沈下量(基礎反力)	・永久作用	長期使用限界		
			基礎の水平変位	水平変位				
			基礎の回転	回転角				
		短期支持性能	基礎の鉛直変位	沈下量(基礎反力)	・永久作用+変動作用	使用限界状態		
			基礎の水平変位	水平変位				
			基礎の回転	回転角				
		復旧性	残留変位	地震時(L2地震)	基礎の残留鉛直変位	沈下量(基礎反力)	・永久作用+偶発作用+従たる変動作用	L2地震(耐震性能Ⅱ・安定レベル2)
					基礎の残留水平変位	水平変位		
基礎の残留傾斜	回転角							
基礎部材の損傷	曲率							
地震時(L1地震) <sup>※1</sup>	基礎の残留鉛直変位			沈下量(基礎反力)	・永久作用+偶発作用+従たる変動作用	L1地震(耐震性能Ⅰ・安定レベル1)		
	基礎の残留水平変位			水平変位				
	基礎の残留傾斜			回転角				
	基礎部材の損傷			曲率				

※1：必要に応じて設定される性能項目(例えば、地震時の走行安全性に係る変位の算定において、基礎の挙動を線形として取り扱う場合。)

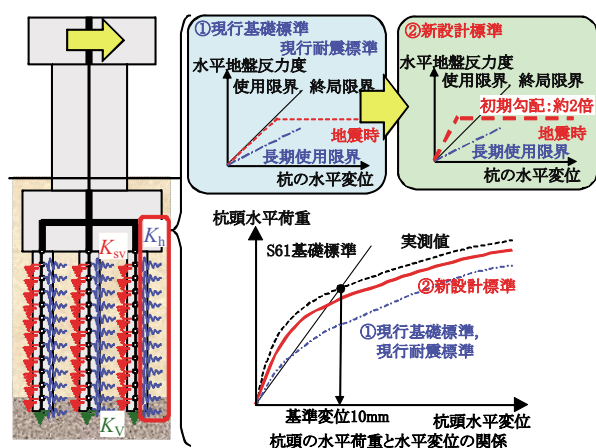


図1 杭の水平地盤抵抗

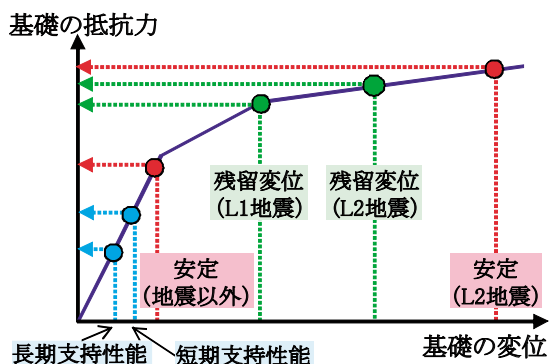


図2 基礎構造物の荷重変位関係と性能項目毎の制限値

一部を成す基礎構造物特有の性能項目を定めた。これを表4に示す。なお、表の右欄には対応する現行基礎標準、現行耐震標準の限界状態、あるいは地震動レベルを示した。

## 2.2 地盤抵抗モデルと制限値の検討

### (1) 地盤抵抗モデル

図1に示すように現行基礎標準、現行耐震標準の杭の水平地盤反力度と水平変位の関係では、①長期使用限界状態、②使用限界状態、終局限界状態、および③地震時の3種類の関係が存在する<sup>7)</sup>。現行基礎標準の改訂では、ケーソン基礎や連壁基礎の水平地盤反力係数と杭基礎のその整合性を図るとともに、同図に示すように地震時に用いた杭の水平地盤反力度と水平変位の関係が、明らかに過小評価であったことから見直しを行った<sup>8)</sup>。

### (2) 基礎構造物の応答値と制限値

基礎構造物の抵抗力と変位の関係の概略図を図2に示す。表4で示した構造物の要求性能に応じた基礎構造物の性能項目に対して、制限値（鉛直、水平、回転、部材）を定めた。同表には基礎構造物の照査指標の例を示した。これにより同一線区に存在する各構造物間の性能レベルを一致させることが可能となった。

## 2.3 材料等の適用範囲の拡大

コンクリート標準の材料の適用範囲を勘案し、基礎構造物に用いる材料の適用範囲を拡大した。

- (1) 18~50N/mm<sup>2</sup>の設計基準強度を有するコンクリートを標準とし、これを超過するコンクリートおよび高流動コンクリートの導入を図った。また、泥水中に打設されるコンクリート強度等の特性値の評価法の見直しを行った。
- (2) 高強度鉄筋(SD390を超過するもの)、大径鉄筋(D38を超過するもの)、高強度せん断補強鉄筋の導入を図った。
- (3) 機械式鉄筋継手(図3)、鉄筋定着板、機械式鋼管継手の導入を図った。

ただし、高強度せん断補強鉄筋、機械式鉄筋継手、鉄筋定着板、機械式鋼管継手はそれぞれ多種・多様の製品が存在することから、施工時の品質確認の他、性能の確認方法を明記することとした。

## 2.4 新工法基礎の導入

現行基礎標準では、直接基礎、打込み杭、場所打ち杭、中掘り根固め杭、深礎杭、鋼管矢板基礎、連壁基礎が導入されている。一方、最近開発された新工法基礎の中には、地盤抵抗特性や部材特性の他、施工毎の品質が明ら



図3 機械式鉄筋継手の例

(ねじふし鉄筋継手：エポキシ系樹脂充填状況)



図4 鋼管ソイルセメント杭

特集：基礎構造物の設計技術



図5 回転杭（斜杭施工）

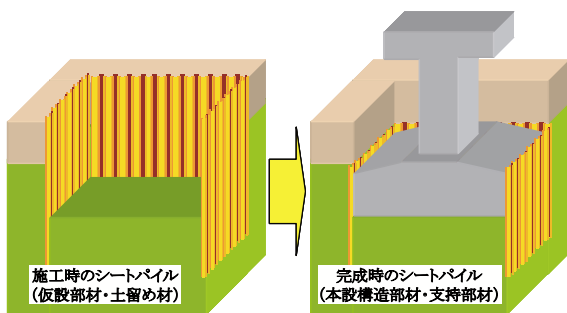


図6 シートパイル基礎

かにされ、現行基礎標準、現行耐震設計に準じ実設計・実施工済みの工法もある。したがって、実績等も勘案し、以下に示す4工法の導入を図った<sup>9), 10)</sup>。

(1) 鋼管ソイルセメント杭（図4）

地盤にセメントミルクを注入し、攪拌混合して構築される固化体と外面突起付き鋼管から構成される。施工性が高く、高支持力が期待できる。

(2) プレボーリング根固め杭

予め地盤をオーガで掘削した後、杭周固定液、根固め液を注入した後に既製杭を挿入する工法である。

(3) 回転杭（図5）

鋼管先端にらせん状に加工した鋼板を溶接した鋼管杭を全旋回機等で地盤に回転圧入する工法である。泥水、泥土の発生がない。

(4) シートパイル基礎（図6）

仮土留め用の鋼矢板とフーチング（直接基礎）を一体化させた基礎工法である。鋼矢板と一体化することで直接基礎の適用地盤の拡大を図った。

3. おわりに

本展望解説では、「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会」での議論を中心に、鉄道の基礎構造物

の設計技術の動向を述べた。性能照査型設計法の導入に伴い、基礎構造物の設計では、基礎施工時の地盤の掘削、仮設や施工手順などある程度想定される範囲を設定する必要がある。新設計標準では、材料・工法の適用範囲の拡大を図りつつ、性能照査型設計法の観点から適用条件を明記する必要があった。

一方、基礎構造物の品質保証、品質確認についても注目され始めており、実構造物基礎の性能を確認するような方法が今後益々求められる可能性もある。したがって、基礎構造物の設計技術の向上だけでなく、施工技術と合致した実構造物基礎の性能評価が今後の課題と言えよう。

謝 辞

新設計標準の審議にあられた「基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会」ならびに「同幹事会」の委員長、幹事長をはじめ、委員、幹事等の関係者各位の長期間にわたる御尽力に対して、ここに謝意を表する。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) 運輸省鉄道局監修, (財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物・抗土圧構造物), 丸善, 1997
- 2) 運輸省鉄道局監修, (財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 1999
- 3) 国土交通省: 鉄道に関する技術上の基準を定める省令, 平成13年国土交通省令第151号, 2001
- 4) 国土交通省鉄道局監修, (財) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 1999
- 5) 基礎構造物・抗土圧構造物設計標準に関する委員会: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物) 委員会案, 2008
- 6) 国土交通省: 土木・建築にかかる設計の基本, 2002
- 7) 高瀬直揮, 池亀真樹, 西村昭彦, 棚村史郎, 近藤政弘: 杭基礎の耐震設計, 鉄道総研報告, Vol.13, No.3, pp.25-30, 1999.3
- 8) 神田政幸, 西岡英俊: 鉄道構造物における杭の横抵抗の考え方, 基礎工, Vol.38, No.6, pp.22-25, 2010.6
- 9) 西岡英俊, 神田政幸, 館山勝, 矢崎澄雄: 鉄道構造物に用いる杭の基準支持力の推定式の検証と提案, 第62回土木学会年次学術講演会, III 部門, pp.475-476, 2007.9
- 10) 西岡英俊, 神田政幸, 平尾淳一, 東野光男, 前田友章, 藤田欽司, 近藤政弘: シートパイル基礎の実大規模水平載荷試験, 土木学会論文集C, Vol.65, No.2, pp.363-382, 2009