

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

基礎・土構造物の耐震技術

本報では、過去の大地震における鉄道の基礎構造物や土構造物の被害事例を挙げ、それらを教訓とした基礎構造物や土構造物の耐震基準の変遷を解説します。さらに、東北地方太平洋沖地震における基礎構造物や土構造物の特徴的な被害を示し、最後に基礎構造物や土構造物の耐震化に関する鉄道総研の取り組みを紹介します。



神田 政幸
Masayuki Koda
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
室長
[専門分野] 地盤工学,
基礎工学



舘山 勝
Masaru Tateyama
構造物技術研究部
部長
[専門分野] 地盤工学,
土質力学

はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機に、空港・港湾・鉄道・道路など重要度の高い社会基盤施設に対して、大地震に対する耐震性が求められ、鉄道においても、鋭意、耐震化が進められてきました。2011年3月の東北地方太平洋沖地震(マグニチュードMw=9.0)は、このような状況下で発生しました。

過去の基礎・土構造物の地震被害と耐震基準

過去の地震においては、盛土の被害事例が数多く報告されています¹⁾。これは明治から昭和初期に造られた在来鉄道のほとんどが、土構造物であるこ

とに起因しています。例えば関東大震災(1923年、マグニチュードM=7.9)、東南海地震(1944年、M=7.9)、福井地震(1948年、M=7.1)や新潟地震(1964年、M=7.5)では、多くの土構造物が被害を受けています(図1)。鉄道の土構造物の耐震性が注目されたのは、十勝沖地震(1968年、M=7.9)からです。この地震は、複線化工事完成直前の東北本線の盛土に大被害をもたらしました(図2)。この地震を契機に旧国鉄では、耐震対策に関する系統的研究が実施されています。これらの成果は、1978年の「建造物設計標準解説(土構造物)」²⁾に支持地盤条件や盛

土本体の構造条件の仕様規定として反映されています。さらに、東海道新幹線の盛土の耐震診断と対策を目的に、1978年の「盛土耐震補強工設計の手引き」³⁾や1981年の「橋台裏耐震補強工設計の手引き」⁴⁾としてまとめられました。これにより東海道新幹線では、十勝沖地震での被害を教訓とし、



図1 関東大震災の盛土崩壊(1923年、東海道本線 現御殿場線)

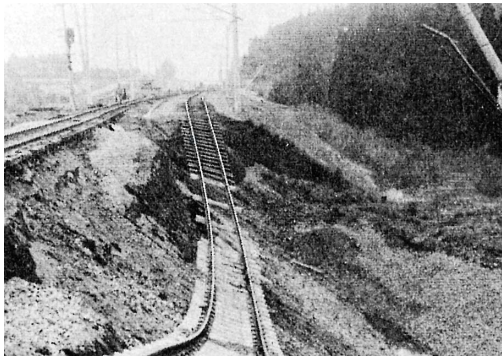


図2 十勝沖地震の盛土崩壊(1968年, 東北本線)



図3 兵庫県南部地震の盛土崩壊(1995年, 東海道本線)

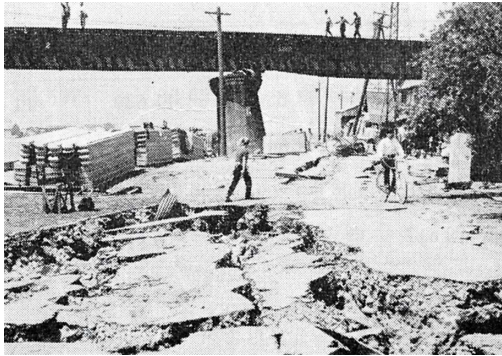


図4 新潟地震の橋脚基礎の傾斜(1964年, 越後線)



図5 兵庫県南部地震の杭頭のずれ(1995年, 建築基礎)

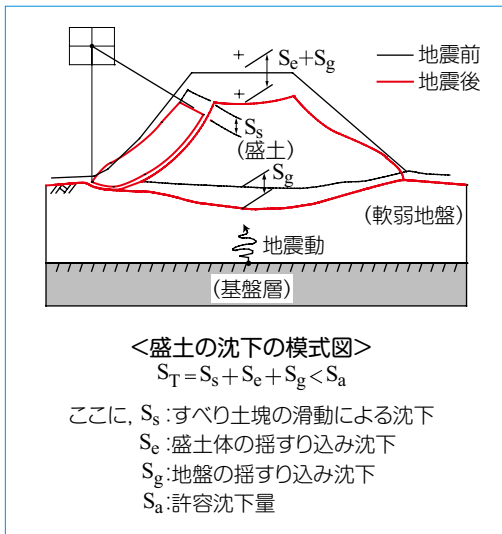


図6 盛土の地震時変形量の概念

軟弱地盤上の盛土の液状化対策や側方流動対策を中心に耐震対策が実施されてきました。兵庫県南部地震(1995年, $M=7.2$)では、それまでの設計震度をはるかに超える地震動により未曾有の被害⁵⁾がもたらされました。盛土の支持地盤として比較的良好な場合でも震度7の激震地の盛土は、ほとんどの箇所0.5~1m沈下し(図3)、特にのり面が大きく変状しました。

一方、構造物基礎の地震被害は、昭

和大橋に代表される新潟地震での液状化現象によって注目されました。新潟駅建屋は打込み杭であったためほとんど無被害であったものの、越後線信濃川橋りょうが液状化による側方流動により傾斜の被害を受けています⁶⁾(図4)。この経験から地盤の液状化判定法が、1974年の「建造物設計標準解説(基礎構造物及び抗土圧構造物)」⁷⁾に反映されました。十勝沖地震では、在来盛土から約30m離れた姉沼高架橋が最大0.1m反対側に動く被害が生じています。これにより地震時の地盤変位の影響を考慮した応答変位法が1979年の「耐震設計指針(案)」⁸⁾に初めて導入されました。兵庫県南部地震での構造物基礎の地震被害としては、従来から散見された軟弱地盤中の基礎が地盤の液状化による側方流動によって、傾斜・沈下や基礎部材の損傷・破壊をもたらすものでした(図5)。しかしながら、その被害程度は甚大でかつ埋立て地盤の広範囲で同

様の被害が生じています⁹⁾。

兵庫県南部地震以降の鉄道の基礎・土構造物の耐震基準

兵庫県南部地震による鉄道構造物の被害に基づき、レベル2地震動に対応した新設の鉄道構造物の耐震設計法として、「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」が制定されています¹⁰⁾。

この標準では、鉄道のような線状構造物では一カ所の構造物の破壊がシステム全体の機能不全につながるため、盛土といえどもほかの構造物と同様に2段階設計法が導入されています。レベル1地震動に対して盛土が降伏しないこと、レベル2地震動に対しては地震による損傷をできるだけ小さく抑え、早急復旧の観点から地震時に生じる盛土の変形量を算定し(図6)、復旧性から定まる許容沈下量以内とする設計法としました。

一方、鉄道構造物基礎では、上部工・下部工(基礎)の一体解析が基本となり、レベル1地震動に対して構造物が降伏しないこと、レベル2地震動に対

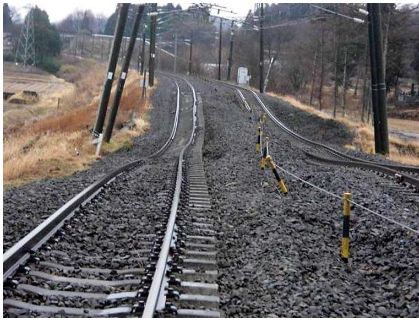


図7 盛土崩壊(東北本線)

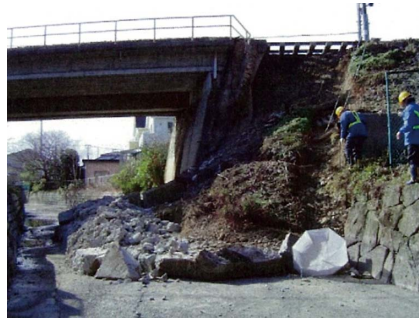


図8 土留め壁崩壊(東北本線)



図9 高架橋無被害(京葉線)



図10 軌道・路盤流出(三陸鉄道)



図11 橋脚の傾斜(気仙沼線)

しては、地震動・地盤および構造物の非線形動特性を考慮した応答値の算定法(非線形スペクトル法)が導入されています。基礎の応答値として、基礎の安定レベル(基礎の塑性率、部材の損傷、変位量)を求め、制限値を超過しない設計法としました。

以降、2007年には性能照査型設計法を導入した「鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)」¹¹⁾が、2012年には「鉄道構造物等設計標準(基礎構造物)」¹²⁾、「鉄道構造物等設計標準・同解説(土留め構造物)」¹³⁾が制定されています。

東北地方太平洋沖地震での基礎・土構造物の地震被害

東北地方太平洋沖地震では、旧基準で設計・施工された既設の鉄道盛土が地震動によって被害を受けています。図7は軟弱地盤上の盛土の被害です。このほかに液状化地盤上の盛土や谷埋め盛土が沈下した例もありました¹⁴⁾。このように旧基準で設計・施工された盛土のうち、地盤を起因とする弱点箇所に限定して被害が集中しています。

一方、旧基準で設計・施工された鉄道擁壁や橋台などの抗土圧構造物も地震動により被害を受けています。図8は橋台側面の無筋土留め壁が地震動によって背面盛土とともに大きく振動して崩壊が生じた例です。このほか切土地山に設置された土留め壁に損傷や傾斜が生じた例もありました¹⁴⁾。このように旧基準で設計・施工された橋台や擁壁などの構造物と土構造物が接する構造物境界は、地震時の振動変位や地震後の残留変位も両者で異なります。両者の差が相対変位や壁体や背面盛土の崩壊となって現れます。このような構造物境界は耐震上弱点箇所の1つと言えます。

東北地方太平洋沖地震では、加速度は小さかったにも関わらず長時間の地震動により、首都圏の埋立て地などの若齢地盤において、液状化が発生しています。浦安地区の鉄道構造物は1974年の「建造物設計標準(基礎構造物及び抗土圧構造物)」⁷⁾を基本とした比較的古い設計でしたが、液状化被害はほとんどありませんでした(図9)。当時、表層から10mまで堆積するしゅ

んせつ埋立て土、および沖積砂質土を液状化層と判定し、これらの層の地盤抵抗を無視した設計をしています¹⁵⁾。このことから現行の耐震基準では、首都圏で観測された地震動を超えるレベル2地震動による液状化判定を導入していることから、現行の耐震基準での液状化の問題は比較的少ないものと考えられます。

最近の基礎・土構造物の耐震技術

東北地方太平洋沖地震では、鉄道の盛土や基礎構造物など旧基準で設計・施工されたもの、軟弱地盤や構造物境界に限定して被害が生じていました。一方、沿岸部の津波被害は甚大でした。鉄道構造物においても例外ではなく、沿岸部の広範囲の鉄道路線で津波被害を受けています。土構造物においては、軌道や盛土体が流出し(図10)、基礎構造物については桁の流出とともに洗掘や橋脚の傾斜・倒壊が発生しています(図11)¹⁴⁾。

鉄道総研では、東北地方太平洋沖地震による被害を受けて、早期の鉄道の



図12 補強土壁工法による鉄道の復旧案

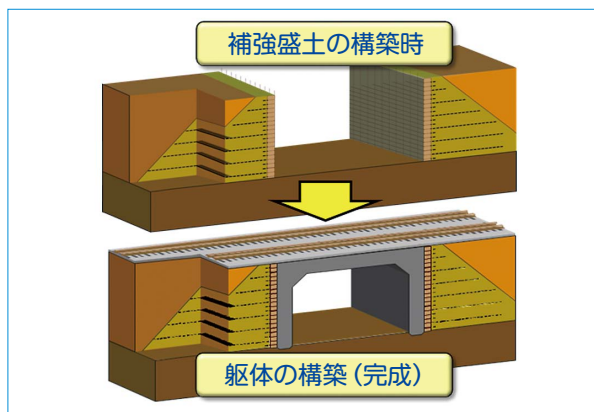


図13 補強盛土一体橋りょう (GRS一体橋りょう)

復旧・復興を目的に、さらに今後の都市部の鉄道の耐震化を目指して、研究開発成果を技術提案として取りまとめています¹⁶⁾。図12は技術提案に示した補強土工法による鉄道の復旧イメージです。鉄道で用いられる補強土壁(RRR)工法は、津波波力や越流による浸食・洗掘に対抗できるように補強材と一体化した鉄筋コンクリート壁で土構造を被覆しています。一方、橋りょうや道路の交差点においては、盛土から橋りょう構造とする必要があります。従来の桁式橋りょうでは支承部や橋台背面盛土が弱点箇所となり桁や橋台背面盛土の流出が生じています。これに対して、新たに開発した図13の補強盛土一体橋りょう (GRS一体橋りょう)¹⁷⁾は、支承部がなく、補強土工法によるアプローチブロックとラーメン橋りょう

が補強材を介して一体となっていることから、高い維持管理性や経済性を有するだけではなく、高い耐震性と津波抵抗性が期待できます。この新型橋りょうは、鉄道総研における試験橋りょうの構築により実用化の目途が得られ、現在、北海道新幹線(新青森・新函館間)や三陸鉄道北リアス線の復旧現場で建設されています。

おわりに

昨年末、首都直下地震の新被害想定が公表されました。これによると想定地震動は、今後30年以内に70%の確率で発生が見込まれるM7クラスとされ、東京で死者1万人以上、鉄道は約1ヶ月の不通が推定されています。古くから発展した大都市では、耐震性の低い旧基準のレンガ積み、石積み、無筋コ

ンクリート構造物や土構造物が存在することから、既設構造物の耐震化が望まれています。鉄道は線状構造物であり、車両・軌道・構造物・電力設備・信号設備などの巨大複合システムであることから、バランスよく耐震化を図ることが重要と言えます。RRR

文献

- 1) 例えば、「地震と鉄道」、日本鉄道施設協会、pp.5-13、1971
- 2) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説(土構造物)、1978
- 3) 日本国有鉄道：盛土耐震補強工設計の手引き(案)、1978
- 4) 日本国有鉄道：橋台裏耐震補強工設計の手引き(案)、1981
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第4号、1996
- 6) (社)土木学会：昭和39年新潟地震震害調査報告、1966
- 7) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説(基礎構造物及び抗土圧構造物)、1974
- 8) 日本国有鉄道：耐震設計指針(案)、1979
- 9) (社)地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、pp.443-444、1996
- 10) 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
- 11) 国土交通省鉄道局監修、(公財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)、丸善、2007
- 12) 国土交通省鉄道局監修、(公財)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)、丸善、2012
- 13) 国土交通省鉄道局監修、(公財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(土留め構造物)、丸善、2012
- 14) 東日本旅客鉄道(株)：特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」、SED、No.37、2011
- 15) 日本鉄道建設公団東京支社：京葉線工事誌、pp.167-168、1991
- 16) (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道の震災復旧・復興に向けた技術提案、2011
- 17) 野中隆博、神田政幸、舘山勝、龍岡文夫：補強盛土一体橋梁 (GRS一体橋梁)の開発、橋梁と基礎、Vol.47、No.8、pp.54-56、2013