

地盤構造物に関する最近の研究開発動向

小島 芳之*

Recent Research and Development on Railway Geotechnical Structural Technology

Yoshiyuki KOJIMA

Railway Technical Research Institute has been researching on a variety of technology related to railway structures. These include maintenance technology (inspection, diagnosis, prediction, repair, renewal), earthquake countermeasures technology, construction technology and environmental impact assessment technology. This review describes an overview of the recent research and development trends on the maintenance technology and construction technology of “geotechnical structure” (earth retaining wall, soil structure and tunnel) in the Railway Technical Research Institute.

キーワード：地盤構造物，研究開発動向，土留め壁，土構造物，トンネル

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道構造物の検査・診断・変状予測や延命化（補修・補強）等の維持管理関連技術，耐震補強技術，リニューアル技術，環境影響評価技術等の様々な研究開発と技術基準類の整備を進めている。本稿では、地盤との相互作用により性能が保たれる地盤構造物である土留め壁，土構造物，トンネルを対象として，鉄道総研が行っている最近の研究開発の動向を紹介する。

2. 検査・診断・変状予測技術

2.1 全体動向

鉄道は，明治～昭和初期に建設された古い構造物を多数抱えているが，熟練技術者が減少する中で，構造物を健全に保つことが鉄道の安定・安全輸送にとって喫緊の課題となっている。構造物の検査は主に目視観察とハンマー打音調査によっているが，より客観的・効率的な手法が求められてきた。鉄道総研では，目視の代替であるトンネル等の撮影法と画像解析法，打音調査の代替である打診音やレーザー等の非破壊センシング技術，衝撃振動試験による診断法，変状予測法等の開発を進めてきた。また，急速に発展するITとCIMを活用した維持管理情報ネットワークシステムの開発にも取り組んでいる。

ここでは，地盤構造物の研究開発例として，土留め壁の検査・診断法，トンネルの検査・診断法（変状監視，路盤の診断）と変状予測法の概略を示す。

2.2 土留め壁の検査・診断法¹⁾

目視を中心に行われている土留め壁の定量的な健全度診断法を確立するため，橋梁で行われている衝撃振動試

* 構造物技術研究部 主管研究員

験の適用性を検証した。模型実験の結果，変状の進展に伴い衝撃振動試験により得られる応答速度の振幅が増大すること，低振動数側の応答が卓越することを確認した。さらに現地試験を行い，特定の周波数帯における速度振幅スペクトルの大きさと低振動数帯域における応答の卓越度を指標とした診断法を開発した。

2.3 トンネルの検査・診断法

(1) 無線センサによる覆工変状監視法²⁾

トンネルの変状監視には，人力による内空変位計測等が用いられるが，長大な坑内での列車間合い作業となるため，計測頻度に制約がある。また，光波やレーザー等による自動計測技術もあるが，配線が大がかりでメンテナンスが必要である。そこで，自動計測データを無線センサで転送することで，データ収集の手間やコストを大幅に削減できる手法を開発し（図1），実現場で適用されている。また，膨大なデータの温度変化等による変動の影響を排除して活用し易くするため，計測データにローパスフィルタをかけて変動を除去する手法も開発した。

(2) トンネル内路盤の健全度診断法³⁾

供用中のトンネルではインバートのないものが多く，路盤沈下が問題となることがある。路盤沈下は，列車走行により地盤が泥濘化し空洞が生じて路盤コンクリートが沈下し，軌道変位に至るものである。軌道変位は軌道検測値の異常として把握できるが，軌道側と路盤側のどちらの要因によるかの判別は困難であった。そこで，路盤コンクリートの起振器実験を行い，伝達関数（振動数毎に起振器を入力とした時の路盤コンクリートの応答振幅比）の面積 A_f が大きいと路盤側，小さいと軌道側の要因と判定する診断法を開発し，実トンネルで路盤コンクリート下に空洞が存在する箇所への注入前後の加振試験により検証した（図2）。また，数値解析を行い， A_f が

特集：構造物技術

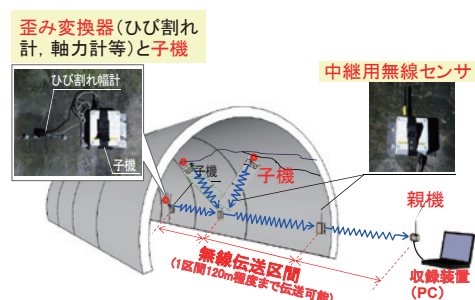


図1 無線センサによるトンネル変状監視法

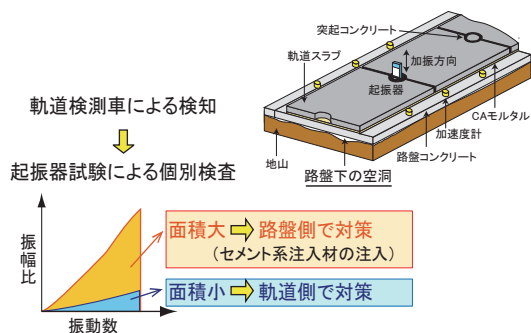


図2 トンネル内路盤の健全度診断法

ら空洞率を推定する方法を提案した。

2.4 トンネルの変状予測法

(1) 山岳トンネルの変状予測法^{4) 5)}

山岳トンネルでは、地圧を受けて変形や路盤隆起等の変状が進行することがあり、地山調査と内空変位等の長期計測が行われる。この結果を用いて、地山強度を経時的に低下させて変状の時間依存性を再現する数値解析法を開発し、実トンネルの変状予測や対策計画に活用できることを示した(図3)⁴⁾。また、トンネルの建設から供用段階の一連の挙動を再現できる手法に拡張し、最適なインバート構造に関する研究にも適用している。

一方、変形が進むと覆工に圧ぎ(曲げ圧縮破壊)が生じ、覆工片が剥落して列車運行の安全性が損なわれる。そこで、無筋コンクリートの曲げ圧縮破壊を表現できる解析モデルを開発して大変形領域の評価法を構築し、種々の材料(無筋, SFRC, RC, 煉瓦)で覆工模型実験を行って固有の変形特性を見出すとともに、上記解析法を用いて内空縮小率による圧ぎの評価指標を示した⁵⁾。

(2) シールドトンネルの変状予測法⁶⁾

軟弱地盤中のシールドトンネルでは、地盤の圧密沈下が原因で変形やひび割れが長期間にわたり発生・進展することがあり、予測法の確立が求められてきた。そこで、土水連成解析で内空変位を求め、これを入力値とした非線形 FEM で覆工のひび割れ進展を求める方法を構築した。また、模型実験を行い、ひび割れの発生によるリング剛性の低下を簡便に評価する手法を提案した。さらに実トンネルの計測結果と比較し、妥当性を確認した。

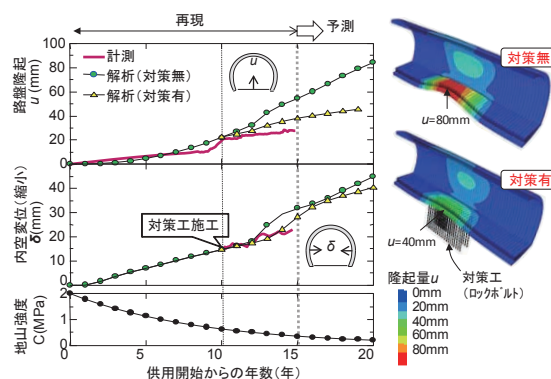


図3 山岳トンネルの変状予測例

3. 延命化・耐震補強・リニューアル技術

3.1 全体動向

検査・診断技術とともに、経済的な補修・補強による延命化、耐震補強、リニューアル技術の発展が求められており、鉄道総研ではその研究開発にも力を入れている。

ここでは、地盤構造物の研究開発例として、土構造物の耐震補強・リニューアル(津波越流に強い盛土、軟弱地盤中の腹付け盛土の補強、土留壁の耐震補強、グラウンドアンカー補強斜面の評価)、山岳トンネルの延命化、地下駅の大規模リニューアルの概略を示す。

3.2 土構造物の耐震補強・リニューアル

(1) 津波越流に強い盛土構造(図4)⁷⁾

津波による盛土の被災挙動を模型実験により再現した。その結果、まず地震の揺れによって盛土堤体とのり面工が損傷し、その後の津波越流によって盛土堤体の侵食と山側のり尻の支持地盤の侵食により不安定化し、盛土が破壊することが分かった。そこで、のり面工と盛土堤体内部に面状補強材を布設して耐震性と津波越流時の浸食に対する抵抗性を向上させ、盛土堤体最下層にセメント改良礫土スラブ(セメント安定処理した粒度調整碎石と面状補強材を併用)を構築して支持地盤の洗掘による侵食と盛土堤体の不安定化を防止する盛土構造を開発した。

(2) 軟弱地盤中の腹付け盛土の補強(図5)⁸⁾

線路拡幅のため既設盛土に腹付け盛土を行う際に軟弱地盤対策が必要になる場合、一般に既設盛土直下の改良は困難なため、既設盛土のり尻部分の対策が行われる。軟弱地盤が厚い場合は、深層混合処理工法による杭式改良が行われるが、水平荷重に対する抵抗機構は解明されていない。そこで、腹付け盛土施工時の軟弱地盤の変形特性の把握と安定性の高い対策工の提案を目的として遠心模型実験を行った。その結果、壁式改良とセメント改良礫土スラブを併用した対策工を提案し、杭式改良と同程度の改良率でも盛土および周辺地盤の変形率を低減できることを確認し、その設計法を整備した。

(3) 土留壁の耐震補強技術⁹⁾

崩壊防止ネットと地山補強材により石積み壁を合理的に耐震補強する工法を開発した。さらに、背面の鉄道用地が狭く制約がある場合の工法も開発している(図6)。

(4) グラウンドアンカー補強斜面の評価法

グラウンドアンカーは、斜面の地震時・豪雨時安定性を向上させる効果的な対策工法だが、抵抗・破壊メカニズムには不明な点が多い。そこで、グラウンドアンカー補強斜面の抵抗・破壊メカニズムを実験的に解明し、地山の特性や水位変動の影響を考慮した斜面補強効果の評価法を開発することを目的とした研究開発を進めている。

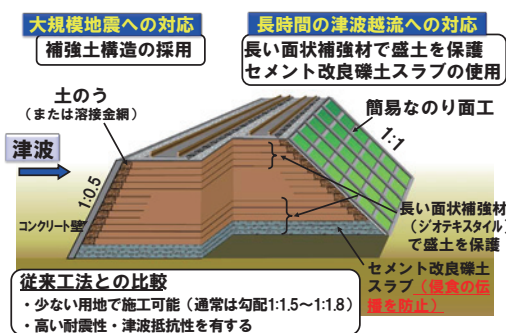


図4 津波越流に強い盛土構造

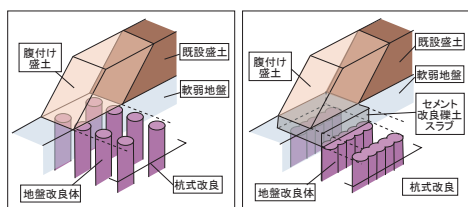


図5 軟弱地盤中の腹付け盛土の補強工法

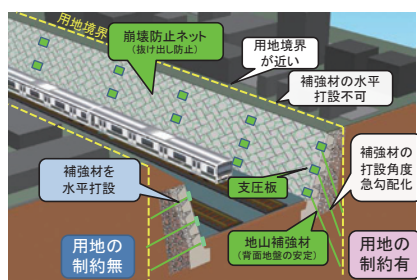


図6 石積み壁の耐震補強工法

能で内空阻害が少なく、施工性・耐久性に優れたバサルト繊維補強プレート (BFRP) 接着工法を開発し、数現場で適用されている(図7)¹⁰⁾。

剥落対策としては、繊維シート接着工やネットが広く適用されているが、繊維シート接着工は不陸に対して施工が困難で、ネットは小片はく落の恐れがあるなど、課題も多い。そこで、優れた伸び性能(200%以上)がありスプレーによる吹付けが可能なポリウレア樹脂による剥落対策工を開発し、現地試験で検証中である¹¹⁾。

(2) 地下駅空間の大規模リニューアル(図8)¹²⁾

地下駅では、混雑緩和や機能向上等を目的として、既設トンネルの一部を開口し、新設トンネルと接続する拡幅工事が増加している。しかし、拡幅規模が大きくなると、既設トンネルに多くの補強が必要となる場合がある。また、開口部が担っていた断面力が周辺部材に再配分されるので、これを正確に把握する必要がある。そこで、まず既設の開削トンネルの側壁に開口を設ける場合を対象に、三次元FEM解析を行い、三次元的な応力の変化や開口の幅が及ぼす影響を把握した。また、新旧トンネル接続部において、地盤側に突起部を設けた補強梁で既設トンネルを抱き込み、水平と鉛直の十字配置のアンカーで接続する工法を開発した。これは、線路方向に対しては補強梁の効果で、横断方向に対しては新旧トンネルが一体となって抵抗することで、既設トンネルの断面力の増加を抑制する構造である。実物大模型載荷試験等を行い、接続部が先行して破壊せず、新旧部材が一体的に挙動すること、本工法を適用するために提案した設計法で期待した曲げ耐力を有することを検証した。標準的な2層2径間のトンネルでは、既設トンネルの補強量が低減することで約10%のコストダウンとなる。



図7 山岳トンネル覆工の補強工法

3.3 トンネルの延命化・リニューアル

(1) 山岳トンネルの補修・補強による延命化^{10) 11)}

外力対策(補強)と剥落対策(補修)に分けて示す。外力対策としては、これまでに裏込注入、ロックボルト、内面補強工、インパート等を適宜組み合わせることにより最適な補強パターンを選定する方法を、模型実験や2.4(2)で示した解析法を用いて開発してきた。また、繊維シート接着工等の従来の内面補強工と同等の変形性

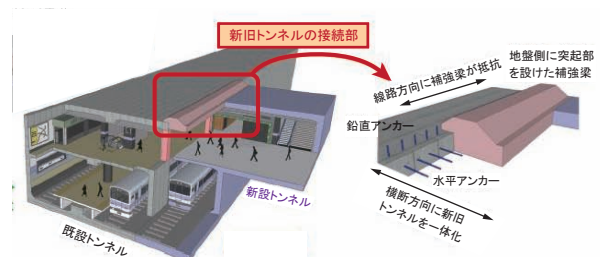


図8 地下駅空間の拡幅工法

特集：構造物技術

4. 技術基準類の整備

4.1 設計標準の性能規定化

鉄道総研では、国土交通省からの委託により鉄道構造物等設計標準および維持管理標準の策定を行っており、コンクリート構造物設計標準の改訂（2004年）を皮切りに順次性能規定化されている。地盤構造物の設計標準に関しては、2007年に土構造物設計標準が、2012年に土留め構造物設計標準が順次性能規定化された。

現在、最後に残されたトンネル設計標準の性能規定化に向けた改訂作業を2013年度から進めており、第I編総論、第II編開削工法、第III編シールド工法、第IV編山岳工法の4編構成とする方向で検討中である。

4.2 マニュアル類の策定

鉄道事業者のニーズに応じて様々なマニュアル類を策定しているが、ここでは地盤構造物に関する2例を示す。

(1) 土構造物の耐震診断と耐震補強計画法¹³⁾

これまで、鉄道の延長の大半を占める土構造物の耐震補強が積極的に行われた事例は少ない。しかし、多くの土構造物に地震被害が生じており、今後は耐震補強が検討される場合もあると考えられる。そこで、耐震診断や補強設計を優先的に行う箇所選定の参考資料として「鉄道土構造物の耐震診断の手引き」をとりまとめた。特徴は、①箇所選定において事業者の施策的な指標を取り入れる、②想定する地震動の発生確率やその大きさを考慮できる、③盛土の地震時の変形量という視点で優先箇所を選定できる、④耐震対策が必要となった場合に概略の対策を選定できる等であり、「首都圏等の鉄道の地震対策に関する検討会」と事業者の意見照会を経て作成した。

(2) 線路下横断構造物の選定・設計法

鉄道事業者のニーズが比較的大きい線路下横断構造物を対象として、施工時の軌道変位予測法等の研究を随時進めてきた。現在、各事業者の意見を踏まえながら、これまでの研究成果と設計標準の改訂内容をもとに線路下横断構造物の設計の手引き作成に着手したところである。

5. おわりに

土留め壁、土構造物、トンネルといった地盤構造物を対象として、鉄道総研が実施している最近の研究開発の一端を紹介した。日本の鉄道ネットワークは、路線の8割を土構造物が、1割をトンネルが占めている。建設中の整備新幹線や中央新幹線等では、トンネルの比率がさらに高まることになる。一方、地盤構造物は複雑な地形・地質からなる山岳部と軟弱な地盤上の都市部に構築され、極めて多様な環境条件下に置かれている。このよ

うな条件を踏まえた地盤構造物の研究開発を、鉄道事業者の要望に沿って今後も様々な視点で進めてゆく必要があると考えている。なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 中島進, 江原季映, 阿部慶太: 振動特性を用いた旧式土留め擁壁の健全度診断, 鉄道総研報告, Vol.30, No.12, pp.17-22, 2016
- 2) 津野究, 平田亮: 無線センサネットワークを活用したトンネルの変状監視手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.6, pp.25-30, 2013
- 3) 篠田昌弘, 窪田勇輝, 坂本寛章, 御崎哲一: トンネル路盤コンクリートの健全度診断手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.17-21, 2014
- 4) 野城一栄, 嶋本敬介, 小島芳之, 高橋幹夫, 松長剛, 朝倉俊弘: 地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.107-119, 2009
- 5) 野城一栄, 平田亮, 岡野法之, 小島芳之: 種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015
- 6) 焼田真司, 津野究, 仲山貴司, 小宮一仁, 赤木寛一: 地盤の圧密沈下に起因するシールドトンネルの変形予測手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.23-28, 2014
- 7) 渡辺健治, 松浦光佑, 藤井公博, 工藤敦弘: 大地震および長時間の津波越流に対して粘り強い鉄道盛土構造の開発, JREA, No.57, Vol.11, 2014
- 8) 工藤敦弘, 渡辺健治, 島田貴文, 佐藤武斗, 森川嘉之, 高橋英紀: 軟弱地盤上の腹付け盛土に対する安定性の高い対策工の提案, 鉄道総研報告, Vol.29, No.10, pp.29-34, 2015
- 9) 中島進, 渡辺健治, 神田政幸, 藤原寅士良, 高崎秀明, 池本宏文: 崩壊防止ネットと地山補強材による既設石積み壁の補強方法の開発, 土木学会論文集 C, Vol.71, No.4 pp.317-334, 2015
- 10) 岡野法之, 植村義幸, 小島芳之: FRP 帯板を用いたトンネル覆工の内面補強工法の開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.12, pp.41-46, 2009
- 11) 伊藤直樹, 野城一栄, 興石正巳, 井出一直: ポリウレア樹脂を用いた吹付け型剥落対策工の開発, 土木学会第71回年次学術講演会, VI-554, 2016
- 12) 仲山貴司, 焼田真司: 地下駅をリニューアルする, RRR, Vol.73, No.1, pp.20-23, 2016
- 13) 鉄道総合技術研究所編(国土交通省監修): 鉄道土構造物の耐震診断の手引き, 2016