

2011年東北地方太平洋沖地震における鉄道被害

(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部長 館山 勝

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0 (Mw) という未曾有の巨大地震であったが、これまでに耐震対策¹⁾が進められてきた新幹線においては土木構造物の地震動被害は限定的であった。一方、沿岸部における甚大な津波被害、広域多所での電柱折損被害、駅舎天井の落下、度重なる余震被害、首都圏で発生した地盤液状化など、想定を超えた巨大地震ならではの被害も生じており(図-1)、速やかな現象解明と対応策の提案が待たれている。

一方、本学会の守備範囲である補強土構造物に目を転じると、東北新幹線沿いに多数の剛壁面補強土(RRR工法)擁壁が構築されていたが、補強土擁壁自体に目立った損傷はなく、兵庫県南部地震の時と同様に今回も高い耐震性が示された。しかしながら、一部の盛土上面に若干の沈下被害が生じたこと、遠く離れた首都圏においてもボックスカルバートや橋台などの構造物との接続部において不具合が生じたことが確認されている。

本稿でははじめに、東北地方太平洋沖地震における鉄道構造物全体の特徴的被害²⁾について報告する。その後、鉄道における補強土擁壁の被災状況について報告する。最後に、今回のような巨大地震をも視野に入れた鉄道施設に対する耐震化の取り組みについて述べる。

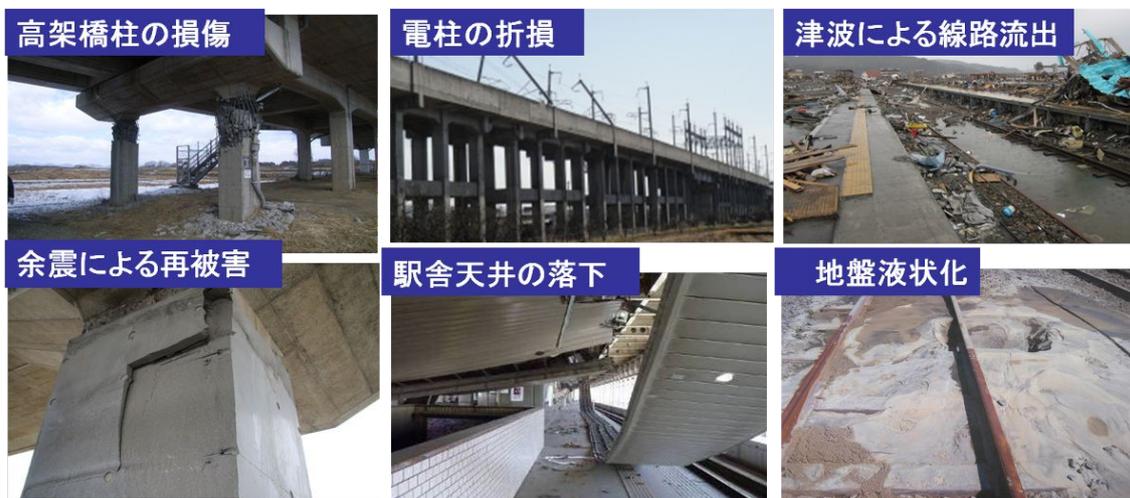


図-1 東北地方太平洋沖地震における鉄道構造物の被害

2. 鉄道土木構造物の地震動被害

東北地方太平洋沖地震では、東北新幹線の一部高架橋柱や中層梁、橋脚の鉄筋途中定着部の損傷などの被害³⁾が生じたが、巨大地震の割には被害が局所的であり、兵庫県南部地震のような橋梁の落橋、高架橋の崩落などの甚大な被害は生じなかった。地震被害が少なかった要因としては、当該地区では宮城県沖地震(1978年)において開業前の東北新幹線に被害が生じたことから、支承部の補強や落橋対策などが十分に施されていたこと、兵庫県南部地震による被害を受け、優先

度の高いものから順次 RC 構造物のせん断破壊対策が行われてきたこと、などの成果によるものと考えられる。図-2 は、鉄道橋梁における耐震補強の例を示す。

また、今回の地震はプレート境界を震源とする海溝型地震であるため、特に新幹線については震源からほどほど離れた位置

にあったこと、東北地方は比較的地震基盤面が浅く短周期成分が卓越した地震動であったこと、なども構造物の地震動被害が少なかった理由として考えられる。図-3 は新幹線近傍で観測された地震波を、鉄道耐震設計標準⁴⁾に示されている設計（弾性加速度応答）スペクトルと比較した結果である。現行の耐震設計では、L2 地震動に対しては大幅に復旧を遅延させない程度の損傷は許容する設計であるため、弾性加速度応答（構造物に損傷がなく弾性挙動した場合の）スペクトルよりは所要降伏震度（若干の損傷を前提とした非線形）スペクトルと比較した方が適切であるのだが、図-3 においても鉄道構造物における固有周期帯域（0.4 秒～1.5 秒程度）では観測波群のスペクトルは設計スペクトルを下回っており、地震の規模の割には構造物への影響程度が小さかったことも肯ける。このように、今回はマグニチュード 9.0 (Mw) という巨大地震であったが、土木構造物の地震動被害は地震の規模から想像するよりはるかに小さかったという印象であり、想定外の軽微な被害であった。

一方、今回の地震では、比較的大きな余震が多数発生した。特に 4 月 7 日の余震においては、マグニチュード 7.1 と本震よりかなり小さかったものの、本震と同じような箇所と同じような被害が繰り返された。例えば図-4 は、震源から少し離れた北上周辺での本震で被害した近傍箇所での高架橋柱が余震被害状況である。当該箇所においては、2003 年三陸南地震においても同様な被害が発生しており、



図-2 鉄道における耐震補強の例

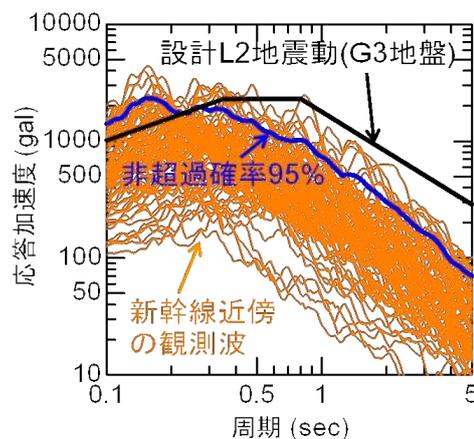


図-3 観測波と設計スペクトルの比較



図-4 余震 (4/7) による被害

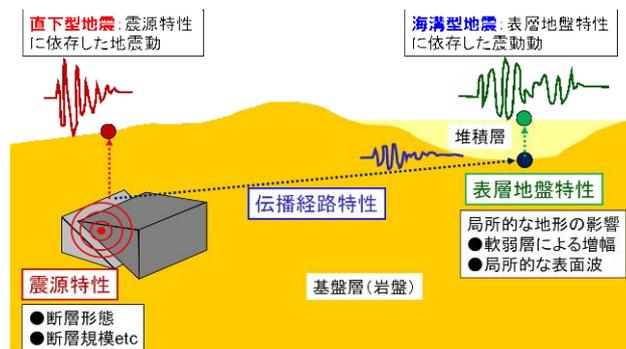


図-5 地表面地震動の決定要因

地震規模によらず同じような揺れが繰り返されていることが示唆される。つまり、地表面地震動は図-5に示すように震源特性・伝搬特性・表層地盤特性のそれぞれに依存して決定されるのだが、海溝型地震動においては表層地盤特性が卓越する傾向となる。このため、地盤の固有周期に近い構造物は、地震の規模によらず被害が繰り返されることになる。

3. 地盤液状化と電柱被害

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、長継続時間の地震動により遠く離れた首都圏の埋め立て地において地盤液状化が発生した。ここで、鉄道における液状化被害が顕在化したのは新潟地震や十勝沖地震からではあるが、この被害を受けて当時の国鉄における設計基準であった建造物設計標準（1974年）では、地盤材の粒径分類による液状化地盤の判別法が導入された。また、1986年には液状化の可能性が高い土層を対象として簡易に液状化判定を行う F_L 法が導入された。さらに、兵庫県南部地震後に制定された耐震標準（1999年）では、大地震動に対する液状化判定は個々の土層ごとに F_L 法により判定するのではなく、地盤全体に対してマクロに判定する P_L 法が導入⁵⁾された。なお、今回の首都圏における地盤液状化の発生を受け、液状化設計を見直す必要があるのかについては現在、国交省が委員会を設営し、検証が行われている。

図-6は、京葉線における地盤液状化の状況である。近隣のK-Net浦安では、最大加速度が150 gal程度であったにも関わらず地震動の継続時間が100秒以上にも及び、その結果として地盤液状化が発生した。ここで、例えばK-Net浦安の小さな地震動を用いて、現行設計法に基づいて液状化評価を行うと当該地区では液状化しないと判定⁶⁾されてしまうため、一見すると設計上に不具合が生じることが懸念される。

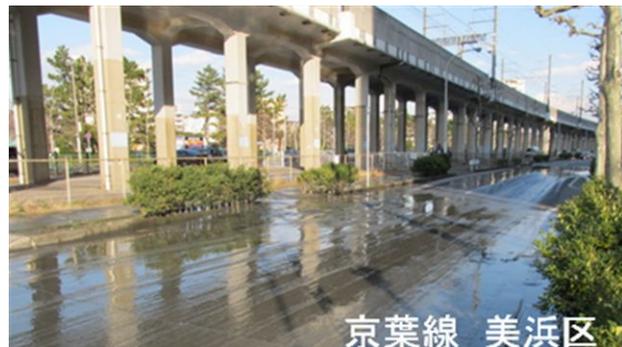


図-6 首都圏における液状化の状況

しかしながら、現行設計法ではK-Net浦安よりも大きな設計（L1、L2）地震動に対して液状化判定を行うこととなるため、当該地区では液状化するとの判定となる。事実、JR京葉線では地盤液状化が発生していたが鉄道構造物は無被害であり、問題が生じることはなかった。このため、本件については想定外の事態ではあったが設計実務上の問題は少ないと考えている。しかしながら、当該地区近隣の同じ埋め立て地でも、多少古くに埋め立てられた地区については液状化していないとの報告もあり、地盤の年代効果や地震波形の特性が液状化に及ぼす影響などの解明については今後の研究課題と考える。

この他、今回の地震では電柱の折損被害が注目を集めた。同様の被害はこれまでの地震でも確認されているが、被害が局所的であったことから大きな問題にはならなかった。しかしながら今回の地震では、新幹線における電柱折損等の被害が広域多所に及んだことから電車線路設備の復旧が工程上のボトムネックとなり大きな注目を集めた。図-7に、電化柱の地際部における損傷状況を示す。以前の電化柱にはPC柱が用いられており、折損したものはコンクリートの圧壊（PC鋼材の破線ではない）により、脆性的に倒壊していた。

ここで、電化柱などの電車線路の耐震設計指針⁷⁾は、1978年宮城県沖地震での被害を契機に1982年に制定され、修正震度法による耐震設計法の提示、砂詰め基礎の導入などが

なされた。その後、北海道南西沖地震、兵庫県南部地震での被害を受け、1997年には同指針の改定がなされて非線形スペクトル法による耐震設計法が示された。具体的には、L1地震においては速やかな運転再開を可能とするため、支持物は勿論、線条や金具等の架線系も含めて電車線路設備全体が損傷しないことを目標とし、L2地震においては列車運行に重大な支障を与えないため、電車線路の支持物が破壊、倒壊しないことを目標とした耐震設計法⁸⁾が示された。また耐震向上策として、新設電化柱への鋼管柱の適用、門型支持物化の導入がなされた。

今回被害を受けた電化柱は、このような耐震指針の適用以前に構築されたものであり、今後は既設電化柱の耐震診断法の開発、簡易で効果的な補強法の提案が待たれる。図-8は特に損傷が多かった電柱地際部の補強の例であるが、従前の鋼管巻きに加えて施工性の観点から繊維シートの巻き立て補強が検討されている。これらについては、本誌の読者各位におかれても係わりがありそうである。経済的であることが前提であるが、耐力は上げずに靱性を向上させることが可能な製品や施工法の提案が待たれる。

5. 鉄道における補強土擁壁の被災状況

耐震性や軌道変位に対する制限が厳しい鉄道においては、補強土工法として剛壁面補強土(RRR工法)擁壁が広く適用されている。また、RRR工法は降雨や地震で被災した盛土の強化復旧法としても多用されている。図-9は東北地方における施工箇所を示したものであるが、東北新幹線沿いに91箇所(青森58、岩手23、宮城10)のRRR工法が構築されていた。地震後の鉄道総研やRRR協会の調査ならびに鉄道事業者や鉄道運輸機構からの報告によると、ほとんどのRRR工法は無被害であり、兵庫県南部地震に継いで高い耐震性が再度示された。しかしながら、軽微ではあるが、見逃すことができない変状が2~3例報告されている。

図-10(a)の東北線衣川橋梁は平成20年10月に改築供用された現場であり、擁壁高さ0.8~8.6m、延長150mである。近傍の地震計では最大360galが観測されている。当該盛土については、保守



図-7 電化柱の地際部における被害状況



(a) 鋼板巻き (b) 繊維シート巻き

図-8 電柱地際部の補強の例

の省力化の観点から図-10(b)に示すようにスラブ軌道構造であったが、橋台の背面で約 10 mm の軌道沈下が報告されている。当該箇所については、予め埋設されていた沈下計測用の鋼管を用いて、コンクリート路盤下にセメントベントナイトが注入されて補修がなされた。なお、補強土擁壁 (RRR 工法) 本体については、目違いや壁面クラック等も無く、全く変状が確認されなかったことから、この沈下については盛土もしくは地盤の地震による揺すり込み沈下であろうとの報告であった。

同様にスラブ軌道を支持する区間としては、盛岡以北の東北新幹線、秋田新幹線が該当するが、それらの箇所では地震後直ぐに (3 月 18 日) 営業再開されており、沈下や変状は生じていない。

また、首都圏においてもスラブ軌道区間の補強土擁壁において 1~2 cm の沈下が報告された箇所があった。このように、スラブ軌道を支持する鉄道盛土、特に橋台との境界で生じる段差については僅な沈下であっても問題視されることがあり、今更ながら鉄道の変形に対する制限値が小さいことに肝を冷される思いであった。

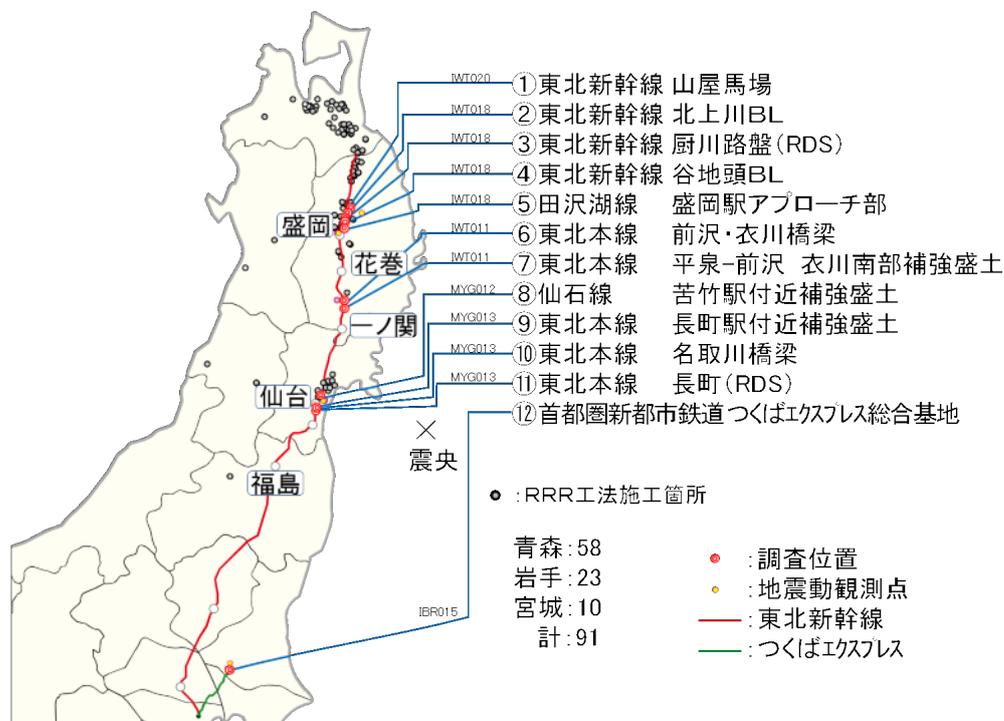


図-9 東北地方における RRR 工法施工箇所と被災調査箇所 (RRR 協会)



(a) 橋梁アプローチ部補強土壁の概観



(b) 補強土擁壁上面の軌道構造

図-10 衣川橋梁部 RRR 工法 (地震後)

図-11は、千葉県某所における鉄道取付け道路のボックスとの境界部における変状例である。当該地区は軟弱地盤であり、近傍の地震計の記録によると最大加速度 340 gal の長周期・長継続時間地震動が作用した。このため、その他の RC 構造物などにおいても変状被害があった箇所である。当該箇所では、ボックスカルバートと補強土擁壁との間で 3 cm 程度の目開き(図中の壁面下端)と、盛土上面で 10 cm 程度の段差が生じていた。目開きについては、ボックスと補強土擁壁の固有周期の違いによる位相差の影響と思われる。段差については、杭で支持された軽量のボックスと地盤改良杭で支持された重たい盛土との重量差や支持性能の違いに起因したものと考える。いずれにしても構造物との境界部は耐震上の弱点部であり、構造の細部について精査する必要があると思っている。



図 11 ボックスとの目開き

現行の鉄道における土構造物の耐震設計では、L2 地震動に対しては沈下の制限値を設けて変形の照査を行っている。ここで、L2 地震時においては他構造物にもそれなりに被害が生じるので相対的には十分な設計法となっていると思うが、問題は RC などの他構造物は弾性挙動となる L1 地震時である。盛土や地盤は空隙を有することから、L1 地震動に対しても幾らかの沈下が生じることは避けられない。このため、特に橋台やボックスカルバートなどの構造物境界部においては更なる配慮が必要となる。場合によっては L1 地震動に対して、更に厳しい制限値を設けて変形照査する必要があるのではないかと考えているところである。また、この課題に対しては、背面盛土と橋台や橋梁と連結する「補強盛土(GRS)一体橋梁⁹⁾」や「セメント改良補強土橋台¹⁰⁾」が構造的に有利と思われる。これらは、段差や位相差が生じにくい構造である。

6. 鉄道の震災復旧・復興技術

今回の沿岸被災地の津波被害は甚大であり、その復旧・復興はまだ緒に就いたばかりである。津波に対しては設計で陽に扱われることもなく、その被害の大きさは甚大なものであった。当該地区の復興に際しての基本的な考え方については、国や学協会などにおいて各種提言がなされている。例えば復興構想会議では、巨大津波による被害を防ぐための具体的な方策として、避難システムとともに多重津波防御施設が有効であるとしている。この案に対して地盤工学会¹¹⁾では、「従来の盛土形式の防潮堤では、津波の越流による浸食・洗掘、越流に対する耐力が特に低いこと、防潮堤には一定の高さが必要となるが、のり面が緩い通常の盛土では堤体幅と土工量が非常に大きくなること」を課題として挙げ、これらを克服する方法として龍岡¹²⁾は本誌にて、「のり面が一定程度急勾配の盛土を塩分に対して耐力があるジオテキスタイル等で補強して安定化させ、のり面と天端は津波波力や越流による浸食・洗掘等に対抗できるように補強材と一体化したコンクリート壁面・のり面工で被覆する」ことを提案し、鉄道で広く用いられている補強土擁壁(RRR)工法の適用を推奨している。

図-12は、この案を基本とした鉄道を多重防御施設とした構築した際のイメージ図を示す。一方、鉄道を津波に対する多重防御施設として用いる場合においても、橋梁や道路の交差部におい

では橋梁構造とする必要があるが、従来の単純桁式橋梁では支承部が弱点となり、桁が流出した箇所が多数見受けられたことから、現在開発を進めている支承レス構造である一体橋梁⁹⁾の適用も提案している。

一体橋梁は、桁と壁面工が支承を用いずに一体化されていて、ラーメン構造であることから桁高が小さくなり、さらに背面盛土は壁面工に連結されたジオシンセティックで補強してあるところに構造上の特徴がある。これにより、桁が津波に流されにくだけでなく、橋台裏の盛土も津波に対して耐力を持つ。このため、津波で桁が流され橋台裏の盛土も流された数多くの鉄道や道路の橋梁の強化復旧に最適な橋梁形式であることが期待できる。

鉄道総研では、上記以外についても兵庫県南部地震など過去の地震被害を教訓として、鉄道施設の耐震技術に関する研究開発を広く進めて来た。そこで、これまでの研究成果を基に今回の地震被害地区における復旧・復興、ならびに既存施設の耐震化を進めるにあたっての参考となるよう2011年12月に技術提案書¹³⁾をまとめた。

本書では、前述の津波防潮構造の提案のように、現時点においては対策工の効果などが十分に解明されているとはいえないが、早期の復旧・復興を技術的に支援するとの立場から現時点で直ちに活用できそうな技術についてはあえて紹介することとした。また、図-13に示すような、遠からず発生が懸念されている首都直下型地震など都市近郊での大規模地震を想定した既存鉄道施設の耐震化技術についても紹介している。

特に都市部の鉄道は盛土や擁壁、高架橋、橋梁、駅舎、電力設備などが連なる線状構造物であるが、どれか一箇所が破壊してもシステム全体が機能不全に陥るため、同一の指標で耐震性を評価し、バランスよく補強することが重要となる。ここでは、想定する地震に備えて事前に対策を施すという観点から、はじめに補強方法や補強の優先順位が妥当であるか判断するための耐震補

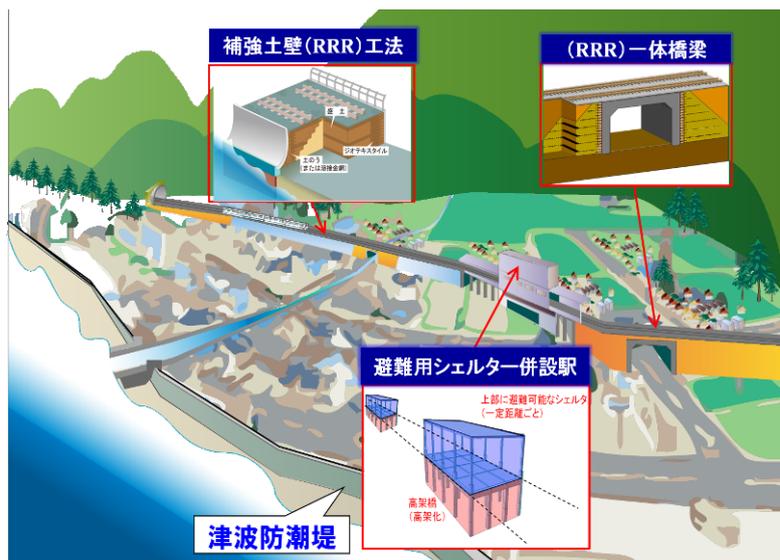


図-12 鉄道における防潮補強盛土の提案

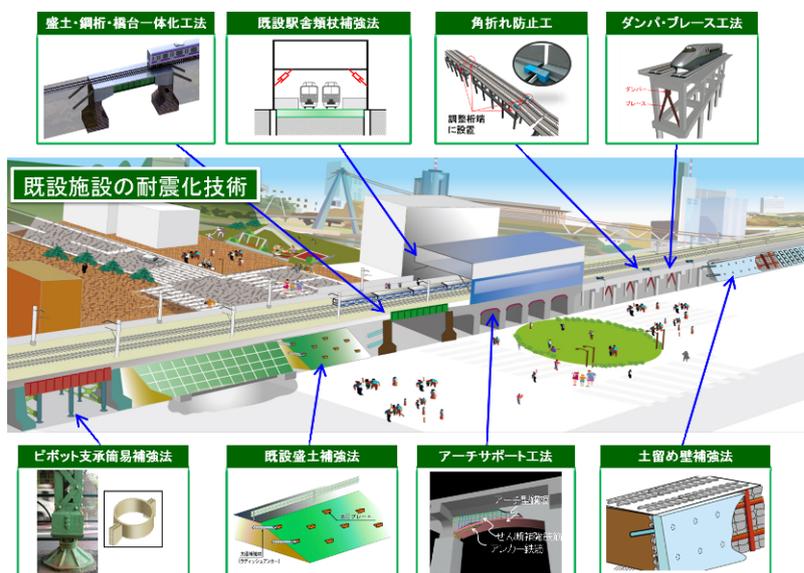


図-13 都市部既設鉄道施設に対する耐震化技術

特に都市部の鉄道は盛土や擁壁、高架橋、橋梁、駅舎、電力設備などが連なる線状構造物であるが、どれか一箇所が破壊してもシステム全体が機能不全に陥るため、同一の指標で耐震性を評価し、バランスよく補強することが重要となる。ここでは、想定する地震に備えて事前に対策を施すという観点から、はじめに補強方法や補強の優先順位が妥当であるか判断するための耐震補

強戦略支援ツールについても紹介している。また、大都市であればあるほど鉄道の建設年次は古く、耐震性能が小さい盛土やレンガや石積み、無筋コンクリートなどの旧式構造物、老朽化構造物が多数存在する。このような構造物に対して、図-13 に例示したような安価で効率的な対策工の技術提案を行っている。さらに、地震時における列車の走行安全性の向上対策についても紹介している。

7. おわりに

最近、首都圏直下地震については、今後4年で70%の発生確率との研究成果もあり、緊急な対策が望まれている。特に大都市であればあるほど、耐震性能が小さいレンガや石積み、無筋コンクリートなどの旧式構造物、老朽構造物が「多数、存在」することから、このような構造物に対して、安価で効率的な対策工の技術提案を行うことが、より一層求められる。これらについては、軽量で施工性がよいジオシンセティックスを用いた方法が各種考えられる。皆様の積極的な提案が期待される。

期せずして3月11日に東北地方太平洋地震が発生したが、鉄道総研においてもこれを契機に、鉄道施設の地震に対する更なる安全性向上のための研究開発に努める所存である。

参考文献

- 1) 舘山勝：地震に備える，第22回鉄道総研講演会講演概要集，2009.11
- 2) 舘山勝：地上設備の耐震技術，第24回鉄道総研講演会講演概要集，2011.11
- 3) JR 東日本構造技術センター：特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」，SED, NO.37, 2011.11
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.10
- 5) 舘山勝：鉄道土木構造物の耐震設計法の歴史、現状及び展望，基礎工，Vol.35, No.3, pp.25-30, 2007.3
- 6) 井澤淳、田上和也、室野剛隆：地盤の液状化に及ぼす長継続時間地震動の影響、第46回地盤工学研究発表会、2011.2
- 7) 電力設備耐震性調査研究委員会：電車線路設備耐震設計指針（案）・同解説，およびその適用例，社団法人日本鉄道電気技術協会，1997.3
- 8) 清水政利、澤田亮、西村昭彦、藤井保和：電車線路設備の新しい耐震設計方法の開発，鉄道総研報告，Vol.13, No.7, 1999.7
- 9) 龍岡文夫，舘山勝，平川大貴，渡辺健治，清田隆：GRS 一体橋梁の特徴と開発経緯：ジオシンセティックス論文集，第24巻，国際ジオシンセティックス学会日本支部，2009.12
- 10) 青木一二三：セメント改良補強土を利用した耐震性橋台に関する研究，東京大学博士論文，2009.4
- 11) 平成23年度学会提言の検証と評価に関する委員会：地震時における地盤災害の課題と対策「2011年東日本大震災の教訓と提言（第一次）」，地盤工学会，2011.7
- 12) 龍岡文夫：2011年東日本大震災とジオシンセティックス工法，ジオシンセティックス技術情報，2011.11
- 13) 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言，2011.12