

2210 東海道新幹線構造物の耐震強化工事について

フェロー [土] ○関 雅樹 (JR 東海)

フェロー [土] 松田 猛 (JR 東海)

正 [土] 荒鹿 忠義 (JR 東海)

正 [土] 阪本 泰士 (JR 東海)

Seismic Retrofit of Tokaido Shinkansen Structures

Masaki SEKI, Central Japan Railway Company. 33-1545, Ohyama, Komaki City.

Takeshi MATSUDA, Central Japan Railway Company.

Tadayoshi ARASHIKA, Central Japan Railway Company.

Yasushi SAKAMOTO, Central Japan Railway Company.

For measures against earthquake in Tokaido Shinkansen, the seismic retrofit of structures such as embankments, viaducts, tunnels and piers has been continuously carried out for many years. In this paper, seismic measures and its applicable criteria of the site where serious damage is predicted to be caused on viaducts, piers and embankments by an earthquake are clarified experimentally and analytically.

Keywords: seismic retrofit, structure, viaduct, pier, embankment, TERRA-S

1. はじめに

東海道新幹線における地震対策については、これまで盛土、高架橋、トンネル並びに橋脚等の土木構造物の耐震補強を長年継続的に実施してきた。本報告では、これまで実施してきた東海道新幹線土木構造物の耐震強化工事内容について紹介する。具体的には、土木構造物の長期不通防止対策のための耐震強化工事、及び地震時に列車を一早く止めるための早期地震警報システムの導入・改良内容について報告する。

2. 土木構造物の耐震強化工事

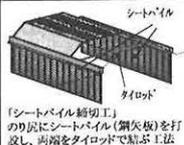
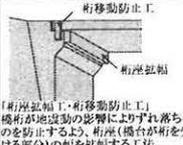
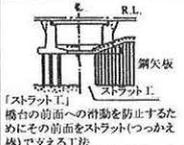
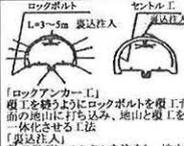
2.1 地震による鉄道構造物の被害事例

1978年の宮城県沖地震後、静岡県を中心に耐震性能の低い軟弱地盤上の盛土補強、落橋防止工、橋台裏補強、RC橋脚補強、斜面補強並びにトンネル補強等の耐震強化工事を実施してきた。対策の実施概要を、表-1に示す¹⁾。

一方、RC高架橋に関しては従来地震被害事例が少なく、全国的にも耐震強化工事の実績は少なかった。しかしながら、1995年に発生した兵庫県南部地震では山陽新幹線を中心にRC高架橋がせん断破壊により倒壊するという大きな被害が発生した。兵庫県南部地震は内陸直下型の地震であり、大きな地震動により、これまでの土木の分野での想定地震力を超える大きな力が加わったことによる。兵庫県南部地震時の山陽新幹線のせん断破壊と曲げ破壊の被害状況を写真-1に示す。実際に復旧に要した時間は、せん断破壊が3箇月に対し、曲げ破壊は比較的短期間であった。当時、長期不通となった代表的な被災構造物は、せん断耐震性能が低い鉄道のRC高架橋および道路の橋脚であった。なお、東海道新幹線では震源から離れていたため、大きな被害は発生しなかった。このため、兵庫県南部地震後、東海道新幹線では国からの指導もあり、せん断力に対する耐力が、曲げに対する耐力より小さいもの(せん断破壊先行型)

について全数を対象に耐震強化工事を実施し、2008年までに必要な箇所の対策を完了した。

表-1 耐震強化工事実施概要 (1979~1996)

盛土補強 17.9km	落橋防止工 3033箇所	橋台裏補強 159箇所
 <p>「シートパイル補強工」 のり面にシートパイル(鋼矢板)を打ち出し、両端をタイロッドで結ぶ工法</p>	 <p>「耐震型橋脚・耐移動防止工」 橋脚が地震動の影響によりずれ落ちるのを防止するよう、耐震(橋台が耐を受ける部分)の軸を拡幅する工法</p>	 <p>「ストラット工」 橋台の前面への前動を防止するためにその前面をストラット(つかえ棒)で支える工法</p>
橋脚補強 55基	斜面補強 22箇所	トンネル補強 18.2km
 <p>「RC芯工」 橋脚のせん断破壊を防止するため、鋼筋または鉄筋コンクリートにより補強する工法</p>	 <p>「土留補強」 盛土等の土留に抵抗する構造物「のり面防護工」 のり面を強化し、地震によるのり面の前動を防止する工法</p>	 <p>「ロックアンカー工」 掘工を誘うようにロックボルトを掘工前面の地山に打ち込み、地山と掘工を一体化させる工法 「裏込め工」 掘工前面にモルタルを注入し、地山と掘工を一体化させる工法</p>



せん断破壊

曲げ破壊

写真-1 兵庫県南部地震のRC高架橋の被害

一方、盛土に関しては、新潟地震(1964)、十勝沖地震(1968,2003)、及び新潟県中越地震(2004)において、支持地盤を含む円弧すべり(写真-2)や支持地盤の液状化による盛土の縦割れ(写真-3)の被害などが発生した。長期不通防止の観点から、これらの被災事例の形式(鉄道耐震設計標準²⁾の変形レベル4)の大きな被害が想定される盛土に対して、概ね2013年までに耐震強化工事を完了する。

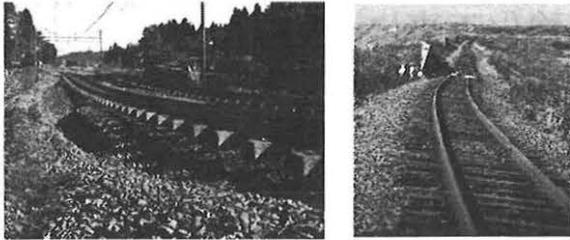


写真-2 支持地盤を含む円弧すべり (新潟県中越地震)

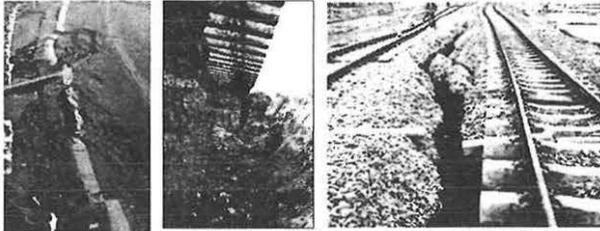


写真-3 支持地盤液状化による堤体縦割れ
(左: 2003年十勝沖地震, 中央・右: 1968年十勝沖地震)

2.2 兵庫県南部地震以前の地震対策の概要

1978年に発生した宮城県沖地震後に国において「大規模地震対策特別措置法」が制定され、同法律により「東海地震防災強化地域」が指定された。東海道新幹線においては、新横浜～豊橋間の214kmが対象となった。これを受け、東海道新幹線の地震対策として、部外の学識経験者も含め当時の国内の叡智を集めた「鉄道土木構造物耐震強化の研究委員会(委員長:岡本舜三東京大学名誉教授(当時))」において耐震評価方法、強化地域内での耐震補強工事が必要な箇所を選定基準ならびに合理的な耐震強化工法等が定められ、それを基に具体的に耐震強化工事が実施された。

耐震評価の結果、耐震補強箇所として、盛土(17.9km)、橋台裏(159箇所)、土留(3.6km)、斜面(22箇所)、落橋防止(3033箇所)、高架橋(144箇所)、橋台・橋脚(55基)、トンネル(延べ18.2km)が選定され、1979年から1996年にかけて耐震強化工事が実施された¹⁾。

2.3 兵庫県南部地震後のRC構造物の耐震補強

1995年の兵庫県南部地震以降、L2地震対策として、東海道新幹線全線のRC高架橋のせん断破壊先行型の柱を対象に鋼板巻き補強工法による対策を実施した(写真-4)。本工法の有効性は、理論数値解析に加えて、標準的なRC高架橋をモデルとして交番載荷試験を行って確認している。特に、L2地震波によるRC高架橋1/5モデルの模型振動実験により効果を確認している(写真-5)。2008年までに約17,600本の対策必要箇所への対策が完了している。

2003年5月に、内閣府より想定東海地震動が発表された。想定東海地震波はL2地震波と比較して、長周期で、継続時間が長いという特徴がある(図-1)。実験や解析により検討した結果、想定東海地震によりL2地震動以上の大きな地震動を受ける地域においては、RC高架橋柱の中で、曲げ破壊先行型高架橋においても大きな被害が振動実験から予測された。そのため、東海道新幹線では会社独自の施策として、2005年から、曲げ破壊先行型の約2,000本の補強工事を追加実施している。また、駅部等の高架橋下利用箇所では、鋼板巻き補強工法が施工困

難な箇所がある。これらの箇所では、鋼製パネル組立補強工法³⁾、ダンパー・ブレース工法^{4),5)}を開発し、適用している(写真-6)。以上の対策により、RC高架橋柱は全数35,900本のうち、全体数量として、約19,600本の耐震補強工事を実施した。

RC橋脚についても、東海道新幹線全数約2,400基に対し、1979年以降すでに対策を実施した55基に加えて、1995年からせん断破壊先行型の橋脚約1100基の耐震補強工事を実施した。さらに、想定東海地震を受ける箇所の曲げ破壊先行型のRC橋脚に対し、約200基の追加対策を現在施工中である。補強工法については、写真-7の、RC巻き補強工法および鋼板巻き補強工法を実施している。



写真-4 RC高架橋の標準補強工法(鋼板巻き補強工法)

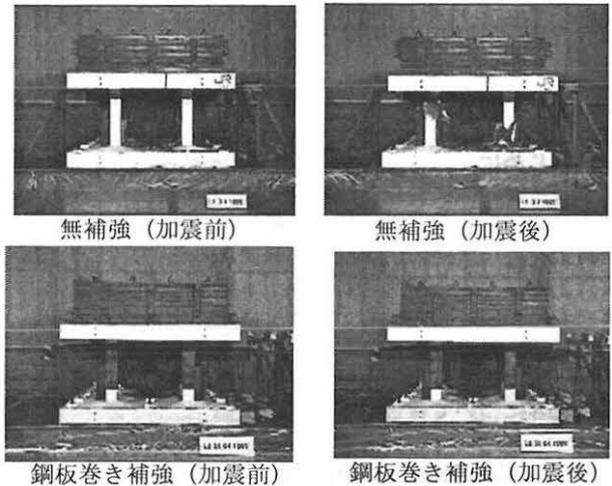


写真-5 RC高架橋の1/5模型実験

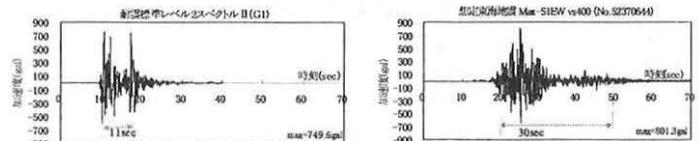


図-1 地震波形(左: L2地震, 右: 想定東海地震)

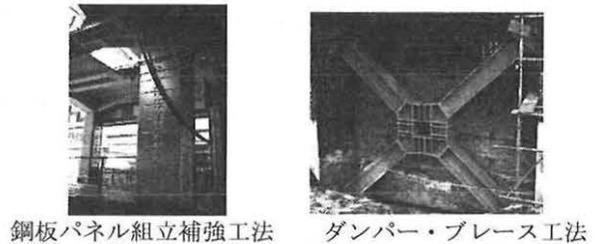


写真-6 RC高架橋の特殊補強工法



写真-7 RC橋脚の補強工法

表-2 盛土の破壊形態と補強工法 (○数字は変形レベルを表す)

分類	対策目的 破壊形態	長期不通防止			走行安全性
		東海地震対策	全線追加(L2地震)対策	想定東海地震対策	脱線・逸脱防止対策
A	軟弱な粘土地盤 地盤を含む円弧滑りによる沈下	④ シートパイル シートパイル(支持材)+タイロッド ・N≤4	④ シートパイル シートパイル(支持材)+タイロッド ・N≤4	対象外	対象外
B	液状化地盤 地盤の液状化による沈下	④ シートパイル シートパイル(支持材)+タイロッド ・液状化地盤	④ シートパイル シートパイル(GL-3m)+タイロッド ・液状化地盤	対象外	対象外
C	やや軟弱な砂質土 盛土の円弧滑りによる沈下	対象外	対象外	④ 地山補強工法 地山補強工法 ・N≤15 かつ 6m≤H (L2地震) ・9m≤H (普通地盤)	③ 地山補強工法 地山補強工法 ・N≤15 かつ 6m≤H (L2地震) ・15<N≤20 かつ 6m≤H (想定東海地震)
D	やや軟弱な粘土地盤 盛土と地盤の境界の掘り込みによる沈下	対象外	対象外	④ シートパイル(GL-1m)+タイロッド または上層活用タイロッド ・4<N≤5 かつ 3m≤H	③ 地山補強工法 地山補強工法 ・4<N≤6 かつ 3m≤H (L2地震) ・5<N≤6 かつ 3m≤H (想定東海地震)
E	普通地盤 盛土の緩い沈下	対象外	対象外	対象外	② パイル根拠止工 ・対策箇所を含む盛土区間すべて

2.4 盛土の耐震補強

東海道新幹線の土木構造物のうち、盛土は約230kmで全体の44%を占める。盛土は建設当初耐震設計がなされておらず、耐震性能が低い構造物といわれてきた。著者らは、長年の研究成果の結果、地震による盛土の破壊形態と補強工法を整理している(表-2)。盛土の破壊形態に関しては、図-2の模型実験等最近の知見により、A～E型の5形態に分類した⁶⁾。概して、支持地盤が軟弱なほど沈下量が大きく、破壊の程度が大きくなる。模型実験の結果から、L2地震や想定東海地震によって生じると想定されるA～E型の各破壊形態を、支持地盤のN値及び盛土高さHをパラメータとして整理した。この結果を用いて、全線の盛土に対して、想定される破壊形態を個々に特定した。

この中で、A型、B型については、長期不通となる大きな被害が発生すると考えられるため、1979年から優先的に対策工事を開始し、約17.9kmを強化完了した。さらに東海道新幹線全線を対象に、L2地震動に対する長期不通防止の追加対策として6.5kmの対策を2005年から2009年にかけて完了した。この結果、A型、B型の長期不通防止対策は完了済である。その後、想定東海地震により大きな地震動の影響範囲については、C型、D型についても、想定東海地震対策として、変形レベル4となる箇所2.9kmの対策を2008年より追加耐震強化工事として施工中である。なお、新潟県中越地震後の脱線対策

としての、盛土の新たな耐震補強工事に関しては別稿にて報告する。

盛土の補強工法は、大規模地震時の盛土本体の沈下や変形を最低限にすることを目的としている。各種工法を検討した結果、A型の破壊形態に関しては、「シートパイル締切り工法⁷⁾」が採用されている。この工法の原理は、基底円弧すべり破壊に対する抵抗が強くなること、並びに地震動による盛土直下の地盤の支持力が低下に対しても、シートパイルによって地盤の側方流動を防止することから、盛土本体の沈下、変状を最小限にすることが可能ということである。

ここで、シートパイル締切り工法の概要を説明する。シートパイルを盛土のり尻部両側に線路と並行に、直下の軟弱地盤を貫通し、基盤に確実に根入れをする。頭部はPC鋼棒にて線路を横断して両側のシートパイル同士を緊結する。シートパイルの長さは施工の結果、最大で20mになる場合もある。シートパイル締切り工法の耐震補強効果は、地震時の盛土の沈下量が、1/6に抑制されるという実験結果が得られている⁷⁾。写真-8に対策箇所の完成写真を示す。

また、液状化地盤上の盛土では、盛土直下の液状化層で最大で3mまでにシートパイルを打設することにより、つまり短尺タイプで有効であることを実験および解析で検証し、本施工方法を適用することとした^{8),9)}。

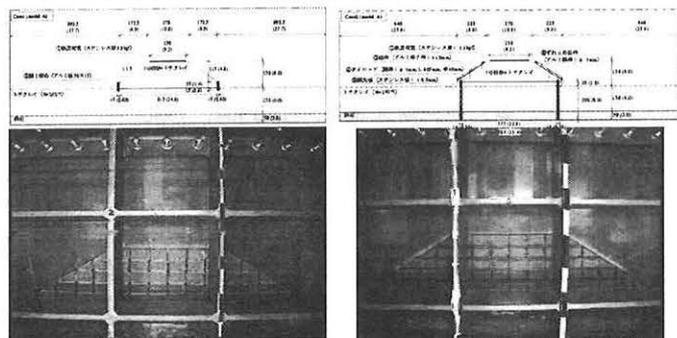


図-2 盛土の模型実験例

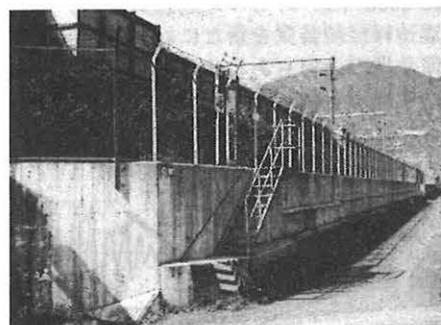


写真-8 盛土の耐震補強工法(シートパイル締切り工法)

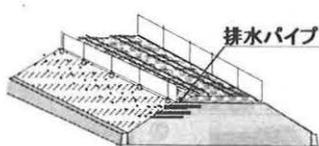
なお、東海道新幹線盛土 230km には、国鉄時代より耐降雨性能の低い箇所全数に対して、必要な降雨対策（盛土堤体の飽和防止）が、現場での降雨性能の優先順位を定めて順次実施されている（図-3）。年代別に施工方法は異なるが、降雨対策は地震時における飽和度を下げること、及びのり面表層のすべり抑制にも効果があることは数値解析から明らかである。



①プレキャスト格子枠工 (1964～1974)



②場所打ち格子枠張ブロック工 (1974～1994)



③排水パイプ工 (1990～1994)



④張コンクリート工 (2000～2003)

図-3 東海道新幹線の盛土の降雨対策

3. 列車を早期に止める対策

東海道新幹線では、前述の構造物の耐震強化に加え、列車を早期に止める対策として、「東海道新幹線早期地震警報システム（TERRA-S=Tokaido shinkansen EaRthquake Rapid Alarm System：テラス（当初の名称はユレダス）」及び「沿線地震計」からなる地震防災システムを 1992 年より導入している¹⁰⁾。ユレダスは世界で初めて実用化、導入した。

テラスの原理は、図-4 のとおり、東海道新幹線から離れた位置に設置された遠方地震計により、初期微動 P 波（7.0km/sec）をいち早く強震計で検知し、地震の規模（M）と地震位置である震央距離（ Δ ）を約 2 秒間に推定するものである。テラス、沿線地震計ともにある閾値を越えた場合に、直ちに警報を発生し、変電所において電力供給を遮断することにより新幹線を緊急停止させ、列車の安全度向上が図れるとともに、被災の発生の有無の判断にも活用できるため、地震後の構造物点検による遅れ時分短縮にも大きな効果もある。

2005 年にユレダスの論理部分を一部改善したシステムとして現在のテラスとした。P 波一点検知システムであることには変わりはない。新しい地震諸元推定手法の導入による警報時間短縮、警報精度の向上、情報伝送ネットワークの改良による信頼性向上を図った。その後 2007 年より、図-5 のとおり、遠方地震計（テラス検知点）を 21 箇所、沿線地震計を 50 箇所それぞれ増設した。

さらに 2008 年には、この地震防災システムに気象庁の緊急地震速報接続装置を新たに設置し、気象庁から送信される緊急地震速報もあわせて活用することで、地震時の安全性の向上を図っている。

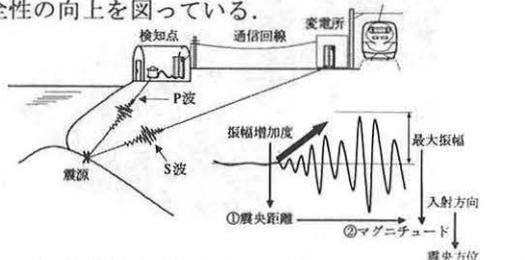


図-4 東海道新幹線早期地震警報システム（テラス）

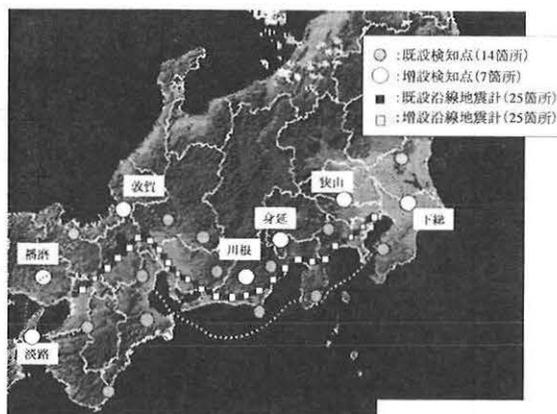


図-5 テラス検知点および地震計の配置状況

4. 終わりに

東海道新幹線構造物では、その時代の最も新しい知見を常に加えて耐震性能を向上させてきた。既設構造物の耐震工事を高速運転の新幹線営業の下で実施するため、特殊な施工工法を常に開発している。2004 年に発生した新潟県中越地震脱線事故を受け、構造物の脱線対策として、今後は高架橋の地震時変位抑制工法、目違ひ対策、並びに盛土の変形レベル 3 を対象とした沈下抑制対策、盛土区間全線を対象とした軌道状態保持対策を推進していくこととなる。今後とも常に最新の知見を収集し、技術開発を進めることで、東海道新幹線の地震時の安全安定輸送のさらなる強化に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 関雅樹：仁杉巖監修 鉄道を巨大地震から守る，山海堂，pp.183-226，2000.11.
- 2) 国土交通省鉄道局，鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.10.
- 3) 長縄卓夫，岡野素之，小松章，相京博幸：鋼製パネル組立てによる RC 柱の耐震補強に関する研究，構造工学論文集，Vol.52A，pp.521-528，2006.3.
- 4) 吉田幸司，喜多直之，岡野秀之，関雅樹：圧縮型鋼製ダンパー・ブレースによる RC ラーメン高架橋の耐震補強工法，構造工学論文集，vol.50A，pp.551-558，2004.3.
- 5) 吉田幸司，喜多直之，岡野秀之，関雅樹：圧縮型鋼製ダンパー・ブレースによる RC ラーメン高架橋の補強効果に関する振動台実験及び解析，構造工学論文集，vol.51A，pp.839-846，2005.3.
- 6) 関雅樹，大木基裕，庄司朋宏，永尾拓洋，荒鹿忠義：地震時における盛土の破壊と対策の有効性に関する実験的検証，第 21 回中部シンポジウム論文集，2009.8.
- 7) 野沢太三：新幹線盛土構造物の耐震強化に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1304，1986.
- 8) 永尾拓洋，関雅樹，佐藤清：液状化による盛土の破壊形態に関する検討，第 40 回地盤工学研究発表会 No.701，2005.7.
- 9) 永尾拓洋，関雅樹，佐藤清：鉄道盛土の軌道変形対策を目的とした耐震補強工法の検討，第 41 回地盤工学研究発表会 No.645，2006.7.
- 10) 他谷周一，浅川高行：JR 東海の地震防災システム，新線路，pp.15-17，2008.4.