

大型振動台による橋台背面盛土上バラスト軌道の 座屈再現と対策の検証試験

吉川 秀平* 中村 貴久* 桃谷 尚嗣*
牛田 貴士** 佐名川 太亮** 西岡 英俊**

Verification Test of the Buckling Reproducibility of a Ballasted Track on the Embankment at the Abutment Backfill and the Countermeasures against the Buckling by a Large Shaking Table

Shuhei KIKKAWA Takahisa NAKAMURA Yoshitsugu MOMOYA
Takashi USHIDA Taisuke SANAGAWA Hidetoshi NISHIOKA

If the lateral resistance force of the ballasted track is decreased by the subsidence of the abutment backfill due to the earthquake, the risk for the track buckling will increase. Then, an integrated embankment / track model was tested on a large shaking table, to reproduce abutment backfill subsidence and track buckling, and to investigate the effectiveness of the anti-buckling countermeasures proposed. As a result, when the abutment backfill alone was reinforced (without track reinforcement) and a large earthquake more than the L2 earthquake was simulated, track buckling occurred. However, in cases where with anti-buckling plates were added to each end of each sleeper, and a ballast retaining wall was fixed to the contiguous pile wall, no buckling occurred under the same seismic condition.

キーワード：バラスト軌道，橋台背面盛土，座屈，座屈対策工，大型振動台

1. はじめに

バラスト軌道のロングレール区間では、レール温度の上昇によって軸力が増大しやすく、酷暑期には座屈の発生が懸念されている¹⁾。特に、地震時にはさらにその危険性が高くなる。耐震標準におけるL2地震動相当の地震時、またはそれ以上の地震時（以下、大規模地震時）における軌道の被害は、土木構造物（以下、構造物）の変形に伴って発生する場合がほとんどである。特に、橋台と盛土の接続部のような構造物境界部では、地震時において橋台の変位とともに橋台背面盛土の沈下に伴い、軌道が沈下することに加え、道床横抵抗力が減少するため、座屈安定性が低下しやすいと考えられる。

構造物の設計においては、二つのレベルの地震動（L1地震動，L2地震動）を設定して、主にL1地震動に対して走行安全性に係る変位の照査を行い、L2地震動に対してある程度の変形を許容しつつも構造物全体系が破壊しないことを確認する^{2) 3)}。構造物の設計手法が整備され、適用が進んできたことで、地震時の甚大な被害は減少傾向にある。しかしながら、構造物や路盤に特別な変状を生じていない箇所においても図1のようにバラスト軌道の座屈や著大な軌道変位が生じた事例が報告されており⁴⁾、地震時における軌道の挙動は明らかになっていない。また、大規模地震時には構造物のみの対策では走行安全性を確保することが困難な場合があることが示唆

されており⁶⁾、軌道側の対策などと組み合わせることにより被災軽減を図る必要があると考える。そのため、地震時の座屈発生メカニズムの解明および座屈対策は、鉄道のさらなる安全性を高めるために重要な課題である。

これまで、バラスト軌道の耐震性能に関する研究では、まくらぎ1本あるいは数本の軌きょうの実物大軌道模型を用いた大型振動台試験によってバラスト軌道の耐震性能や地震時の道床横抵抗力についての評価が行われてきたが^{7) 8) 9)}、まくらぎ数本の軌道では実際の地震時に生じる現象を再現することが困難である。実現に近い状況を再現するには、ある程度の延長をもつ軌道に加え、構造物との連成挙動を考慮した実験が必要である。

そこで本研究では、酷暑期のロングレール区間を想定し、レールを加熱して軸力を高めた条件で構造物・バラスト軌道の一体模型を用いて大型振動台による水平2方向加振試験を実施して、橋台背面盛土上における地震時の座屈現象を再現するとともに、座屈対策工の効果を検証した。



図1 地震時の座屈発生状況の例⁵⁾

* 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

** 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

特集：軌道技術

2. 大型振動台試験

2.1 試験概要

本試験では、橋台背面盛土上における座屈再現および座屈対策工の効果を確認するため、香川によって提案されている土構造物の相似則¹⁰⁾に従い、縮尺 1/9 とした複線軌道、高さ 9m 程度の重力式橋台、橋台背面盛土、橋台前面の複線桁式橋りょうの模型を用いて水平 2 方向加振が可能な大型振動台試験を実施した(図 2)。模型延長は橋りょう 2m、盛土 3m である。試験ケースは構造物の耐震補強なし・ありの 2 ケースで実施し、耐震補強および軌道の座屈対策工の効果について評価することとした。構造物の耐震補強は、盛土の沈下対策である柱列状地盤改良体を橋台に連結する工法¹¹⁾(以下、橋台背面对策工)を想定した。座屈対策工は、バラスト止め壁と座屈防止板を組み合わせたものとした。

2.2 供試体作製方法

構造物模型を図 3 に示す。構造物模型のうち橋りょうおよび橋台模型は鋼製とし、橋台模型底面・背面には、模型と地盤材料との摩擦を確保するために、サンドペーパーを貼り付けた。本試験では、軌道模型に軸力を導入する都合から両端を固定端としたため、橋脚模型を固定支承、橋台模型は可動支承とした。桁模型と支承の線路方向の摩擦をなくすため、可動支承はローラー構造とした。橋台背面对策工模型は、機械攪拌などでまくらぎ両端付近に施工された柱列状地盤改良体¹¹⁾を想定し、アルミ製フレームに発泡モルタルを打設して製作した。モルタル打設面には、模型と地盤材料との摩擦を確保するために、模型地盤材料を表面に接着剤で塗付した。柱列状地盤改良体模型と橋台模型は、ねじ切りボルトを用いて橋台前面から連結した。また、「軌道座屈対策工」側の橋台背面对策工模型には、軌道の支持剛性が柱列状地盤改良体端部で急変するのを避けることを目的に改良深さが段階的に浅くなる逆台形状の改良を模擬する柱列状地盤改良体端部に木材を設置した。

模型地盤材料は、気乾状態の東北硅砂 6 号を使用した。試験土槽の中には、相対密度(以下、 D_r)が 90% の支持地盤を構築して橋台模型および柱列状地盤改良体模型を設置し、橋台模型および型枠の内部に $D_r=60%$ の背面盛土、その外部には $D_r=60%$ の前面盛土を構築した。本試験では試験土槽内に背面盛土枠(鋼板)を設置し、その内側に背面盛土を構築しているため、背面盛土の線路直角方向の変形の影響を無視できる条件とした。また、盛土端部での意図しない座屈の発生を防止することを目的に盛土側の軌道模型端部から 500mm の範囲はセメント改良区間を設けて沈下しない条件とした。セメント改良礫は、粒度調整碎石(M40)に無収縮モルタル用の



図 2 構造物・軌道一体模型の概要

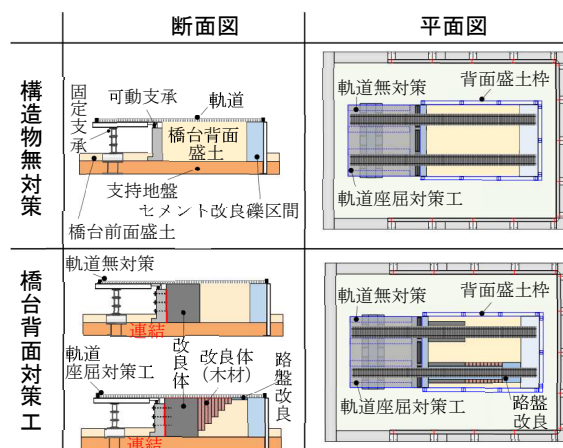


図 3 構造物模型

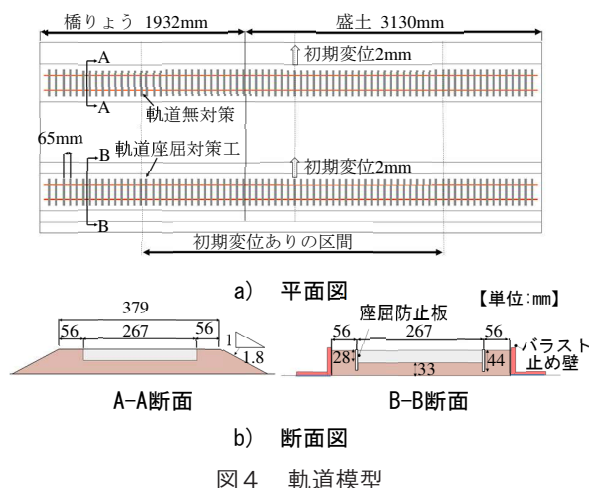


図 4 軌道模型

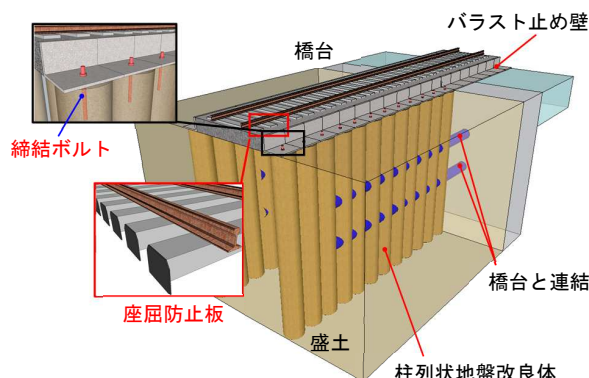


図 5 構造物・軌道模型の対策工

セメントを重量比で10%添加し、乾燥密度約2.0t/m³で締め固めた。路盤模型の厚さは橋台背面盛土の天端から33mmとし、5.6mm以下のふるいを通過したクラッシュラン（以下、C-30）をまき出し、締固め度93%で十分締め固めて構築した。「橋台背面对策工—軌道座屈対策工」のケースでは、5.6mmふるいを通過したC-30に乾燥重量の10%のセメントを添加してセメント安定処理材による路盤改良を行った。バラスト道床模型は、道床厚33mm、道床肩幅56mmとなるように7号砕石をまき出し、道床密度が1.5 t/m³となるように締め固めた¹²⁾。

軌道模型は図4に示すとおりであり、締め固めたバラスト上にまくらぎ間隔65mmでまくらぎ76本の軌きょうを設置し、まくらぎ周辺にバラストをまき出し、つき棒を用いてまくらぎ下のバラストをつき固めて軌道模型を構築した。その後、まくらぎ天端までバラストをまき出して締め固め、所定の道床形状となるように整形した。背面盛土上で座屈が生じるように、バラスト軌道模型の中央部に初期変位として線路直角方向に2mmの変位を与えた。模型まくらぎは、3Hまくらぎを想定してモルタルで作製し、レール模型は鉄製の5インチゲージ用のレールを用いた。座屈対策工はまくらぎ模型端部に鉄製の座屈防止板を設置し、道床肩部に木製のバラスト止め壁模型を設置した。構造物・軌道模型の対策工の概要を図5に示す。「橋台背面对策工—軌道座屈対策工」のケースでは、橋台背面盛土上においてバラスト止め壁と橋台背面对策工の柱列状地盤改良体模型を全ねじボルトおよび接着剤で一体化させ、盛土沈下に伴うバラスト止め壁の滑動および転倒の抑制を図った。レール模型の両端には、加熱によるレールの伸長を拘束するための治具を設置し、レールに軸力が作用する構造とした。本試験では、酷暑期での地震を想定した条件とするため、レールの頭頂面に電熱線をアルミテープで接着させ、1℃刻みで温度制御可能な加熱装置を用いてレール温度を室温から40℃上昇させた条件でのレール軸力において加振を実施した。

2.3 加振条件

橋台の地震時挙動に影響が大きい線路方向成分と軌道に影響が大きい線路直角成分の同時加振を基本とし、表1に示す順序でステップ加振を行った。試番1, 2は予備加振である。試番3, 4では、変位制限標準⁶⁾で走行安全性の照査に用いられるL1地震動での加振を行った。L1地震動には耐震標準²⁾に2方向の概念がないため、線路方向、線路直角方向を個別に加振した。試番5, 6では、L2地震動に相当する加振として、1968年十勝沖地震における八戸港湾での観測波を相似則⁹⁾に従って時間軸を圧縮した波形（以下、八戸波）および1995年

兵庫県南部地震における神戸海洋気象台での観測波を同様に圧縮した波形（以下、神戸波）を加振した。なお、観測されたNS成分・EW成分のうち、最大加速度が大きい方を軌道座屈に影響が大きい線路直角方向に入力した。

試番7以降では、L2地震動を上回る地震動を想定する加振として、正弦波を段階加振した。正弦波は実地震動と比較して繰返し回数が多いため、後述する試験結果から試番10以降がL2地震動を上回る加振であったと想定される。なお、正弦波は線路方向と周期が異なる2成分（線路方向:3Hz, 5波, 線路直角方向:9Hz, 15波）を同時加振した。計測項目は、橋台模型の橋台天端加速度および水平変位、背面盛土の地表面沈下量、まくらぎ水平変位とした。

表1 試験条件

試番	区分	加振波	振動台の最大応答加速度		備考
			線路方向	線路直角方向	
1	不規則波	八戸波 10%	---	---	予備加振
2		神戸波 10%	---	---	
3		L1地震動 / 線路方向	142gal	12gal	1方向加振
4		L1地震動 / 線路直角方向	5gal	211gal	
5		八戸波	533gal	844gal	L2地震動を想定
6		神戸波	731gal	533gal	
7	規則波	正弦波 100gal	112gal	112gal	L2地震動を上回る大規模地震を想定
8		正弦波 200gal	212gal	203gal	
9		正弦波 300gal	306gal	291gal	
10		正弦波 400gal	389gal	423gal	
11		正弦波 500gal	489gal	546gal	
12		正弦波 600gal	601gal	650gal	
13		正弦波 700gal	683gal	721gal	

3. 試験結果

構造物の耐震補強効果を確認するため、橋台水平変位および橋台背面盛土の沈下量を評価し、軌道の座屈対策効果についてはまくらぎ水平変位により評価した。「橋台背面对策工なし」では、加振による橋台変位が大きくなったため、正弦波400galの加振までの実施で試験を終了した。

3.1 橋台水平変位および橋台背面盛土沈下量

不規則波加振による橋台水平変位および橋台背面盛土沈下量の比較を図6に示す。橋台背面盛土沈下量は、複線軌道の間中部において橋台背面から800mmの範囲で設置した変位計により計測した。不規則波加振である神戸波加振後と比較すると、「橋台背面对策工なし」では

特集：軌道技術

橋台水平変位が 25.6mm に対して、「橋台背面对策あり」では 9.0mm となっており、橋台水平変位が約 65% 低減された。橋台背面盛土沈下量では、「橋台背面对策なし」で 31.0mm に対して、「橋台背面对策あり」では 12.7mm となっており、約 59% 低減された。「橋台背面对策あり」ではその補強効果により、橋台背面付近で生じる橋台変位に伴う沈下量が橋台背面から最も離れた計測位置で生じている背面盛土の体積圧縮に伴うゆすり込み沈下量と同程度であった。その後の正弦波加振では、「橋台背面对策なし」の最終試番である正弦波 400gal 加振後と比較すると、図 7 に示すように橋台水平変位が「橋台背面对策なし」で 67.8mm であったのが、「橋台背面对策あり」では 14.0mm となっており、約 79% 低減した。橋台背面盛土沈下量では、「橋台背面对策なし」で 66.1mm に対して、「橋台背面对策あり」では 20.9mm と約 68% 低減されていた。「橋台背面对策あり」の方が沈下量は小さく、正弦波 400gal の加振でゆすり込み沈下は生じたが、不規則波加振後と同様に橋台変位に伴う沈下はほとんど発生しなかった。

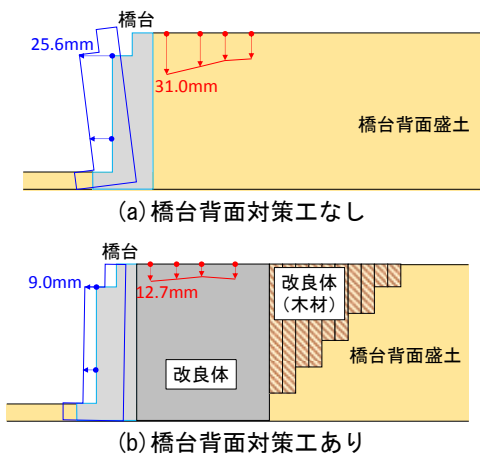


図 6 不規則波加振（神戸波）後の橋台水平変位および橋台背面盛土沈下量の比較

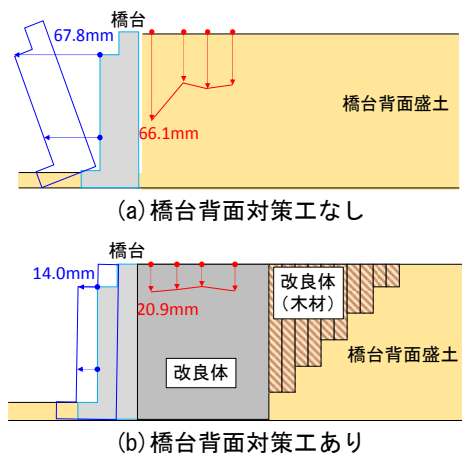


図 7 正弦波 400gal 加振後の橋台水平変位および橋台背面盛土の沈下量の比較

以上より、橋台と柱列状地盤改良体を連結した橋台背面对策工は橋台変位を低減し、それに伴う橋台背面の沈下を抑止する効果があることを確認した。

3.2 まくらぎ水平変位

不規則波加振後のまくらぎ水平変位を図 8 に示す。同図では初期変位 2mm を含んでいないステップ加振の累積変位で整理した。表 1 に示す L1 地震動・線路直角方向の加振までは、橋台背面对策工および軌道座屈対策工の有無の影響は見られなかった。神戸波加振後の「軌道無対策」で比較すると、「橋台背面对策あり」の場合でまくらぎ水平変位が抑制されていた。「座屈対策あり」の軌道では、橋台背面对策工の影響は見られなかった。これは、橋台変位に伴って背面盛土およびまくらぎ周辺のバラストが沈下し、「軌道無対策」では道床横抵

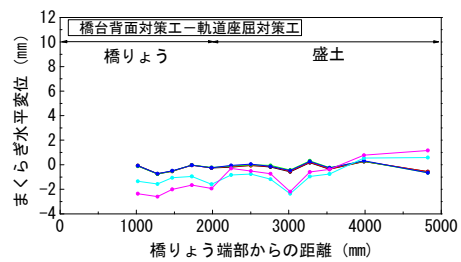
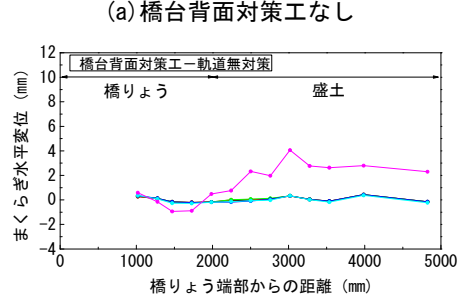
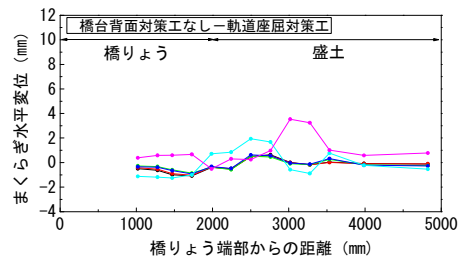
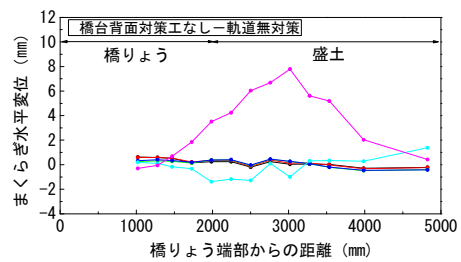
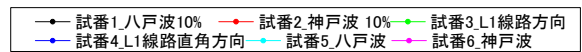


図 8 不規則波加振後のまくらぎ水平変位

抗力が低下したが、「座屈対策工あり」ではその効果が持続したためと考えられる。正弦波加振後のまくらぎ水平変位について、正弦波 400gal 加振までの結果を図 9 に示す。「橋台背面对策工なし」の場合、正弦波 400gal 加振後でみると、軌道座屈対策工の有無に関わらず、加振エネルギーは神戸波より大きくなっているが、神戸波加振後に生じたまくらぎ水平変位より進展することはない。図 10 に示す正弦波 400gal 加振後の状況より、橋台変位に伴い背面盛土の沈下やまくらぎの鉛直変位が大きく生じたことなどが影響してレール軸力が解放され、まくらぎ水平変位が抑制された可能性が考えられる。一方、「橋台背面对策工あり」の場合、正弦波 400gal 加振後の「軌道無対策」ではまくらぎ水平変位が不規則に変化した。これは、橋台背面盛土のゆすり込み沈下に伴い、不規則な道床横抵抗力の変化が生じたことが影響し

たと推定される。「座屈対策工あり」の軌道でも加振エネルギーの増加に伴い、まくらぎ水平変位がやや大きくなったものの座屈対策工の効果が継続していることを確認した。

「橋台背面对策工あり」の正弦波 500gal ~ 700gal 加振によるまくらぎ水平変位を図 11 に示す。ここで、正弦波 600gal 加振でまくらぎ水平変位が大きく生じたため、大きく変位が生じた箇所では追加で定規により変位を測定した。正弦波 600gal 加振後のまくらぎ水平変位は「軌道無対策」が 38mm、「座屈対策工あり」の軌道では 6.3mm と「軌道無対策」において座屈が生じた。正弦波 700gal 加振状況を図 12 に示す。「軌道無対策」が 71mm と座屈が進展したのに対し、「座屈対策工あり」では 12.5mm と軌道座屈を防止できていることを確認した。正弦波 700gal では、橋台背面对策工の効果により橋台変位および橋台背面盛土の沈下は抑制されたものの道床肩が崩壊し、多くの浮きまくらぎが発生することで道床横抵抗力が失われ、「軌道無対策」では座屈が生じたと考えられる。「座屈対策工あり」の軌道では、橋台

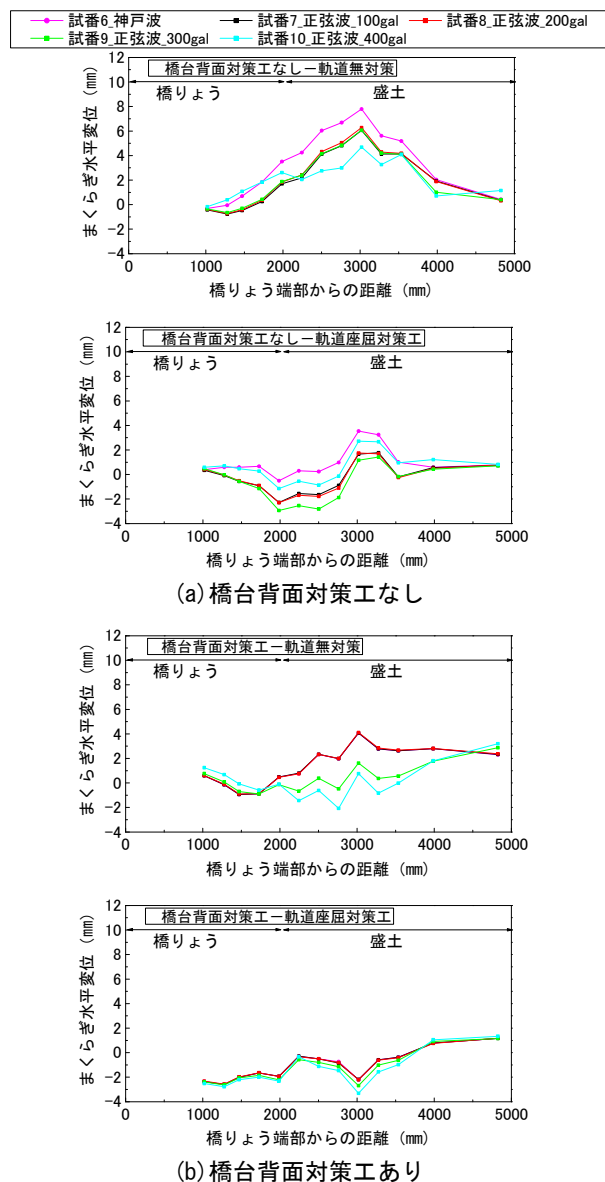


図 9 正弦波 400gal 加振後までのまくらぎ水平変位

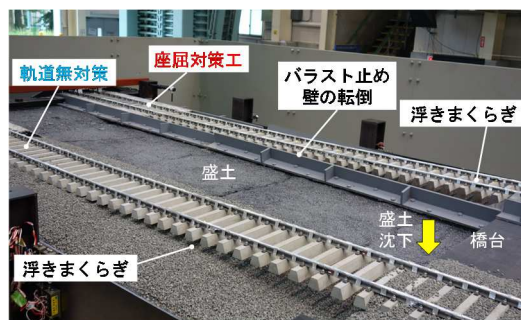


図 10 橋台背面对策工なしの条件における正弦波 400gal 加振後の状況

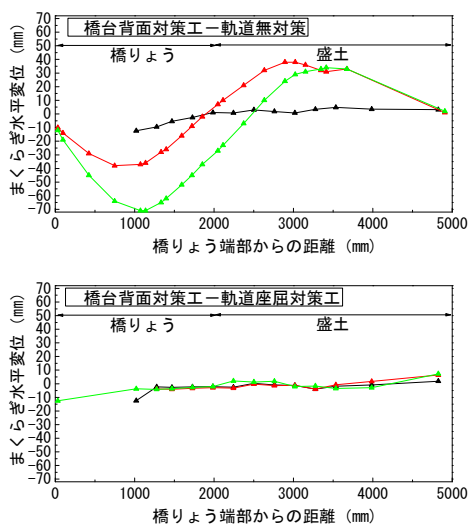
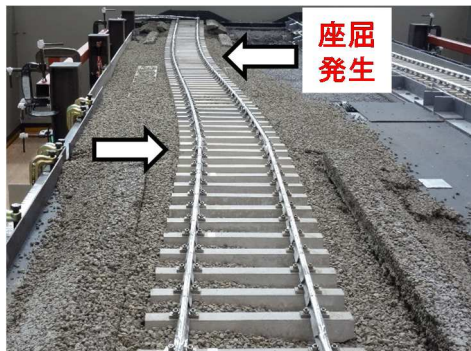


図 11 「橋台背面对策工あり」の正弦波 500gal ~ 700gal 加振によるまくらぎ水平変位

特集：軌道技術

背面对策工である柱列状地盤改良体にバラスト止め壁を固定したことで、正弦波 700gal でもバラスト止め壁の転倒が抑制され、道床横抵抗力が確保されることで模型軌道の座屈を防止することができた。

以上より、構造物境界部において橋台背面盛土が局所的に沈下すると軌道が浮きまくらぎとなり、道床横抵抗力が低下することで座屈が発生するメカニズムが明らかになった。また、橋台背面对策工である柱列状地盤改良体に軌道座屈対策工を組み合わせることで、神戸波の3倍以上のエネルギーをもつ地震動に対しても模型軌道の座屈を抑制する効果が得られることを確認した。



(a) 橋台背面对策工—軌道無対策



(b) 橋台背面对策工—軌道座屈対策工

図 12 加振後の座屈再現状況および座屈対策工による効果

4. まとめ

本研究では、酷暑期のロングレール区間を想定して構造物・軌道の一体模型を用いた加振実験により、座屈対策工の効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 橋台と柱列状地盤改良体を連結した橋台背面对策工の効果により、加振後の橋台水平変位量を 1/5 程度、橋台背面盛土沈下量を 1/3 程度に低減できることを確認した。
- (2) 軌道座屈対策工の有無に関わらず、橋台背面对策工

を実施しない場合、座屈が生じる前に橋台背面盛土および軌道が大きく沈下した。

- (3) 「橋台背面对策工あり—軌道無対策」の場合、正弦波 600gal の地震動で加振した際に座屈が生じた。橋台背面盛土上では、地震時の橋台背面盛土沈下に伴って道床横抵抗力が低下することで座屈が発生するメカニズムが明らかになった。
- (4) 柱列状地盤改良体にバラスト止め壁を固定するとともに、まくらぎに座屈防止板を設けた軌道座屈対策工を組み合わせることで、L2 地震動を上回る大規模地震に対しても模型軌道の座屈を防止できることを確認した。

文献

- 1) 沼田実：ロングレールの座屈強さ，鉄道技術研究報告，No.721，pp.5-6，1970
- 2) 国土交通省鉄道局監修 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，丸善出版，2012
- 3) 国土交通省鉄道局監修 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，丸善出版，2007
- 4) 三浦重，切敷啓介：地震による列車および軌道の被害に関する文献調査，鉄道技術研究所速報，No.82-45，1982
- 5) 西日本旅客鉄道株式会社：阪神・淡路大震災 鉄道復旧記録誌，西日本旅客鉄道株式会社，pp.118,1996
- 6) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 変位制限，丸善出版，2006
- 7) 中村貴久，関根悦夫，白江雄介：大型振動台試験によるバラスト軌道の耐震性能評価，鉄道総研報告，Vol.24，No.12，2010
- 8) 中村貴久，桃谷尚嗣，藪中嘉彦，野村清順：地震動を受けるバラスト軌道の道床横抵抗力の評価，鉄道総研報告，Vol.29，No.8，pp.29-34，2015
- 9) 中村貴久，桃谷尚嗣：座屈対策工を用いたバラスト軌道の地震時道床横抵抗力の評価，鉄道総研報告，Vol.30，No.10，pp.29-34，2016
- 10) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文集，第 275 号，pp.69-77，1978
- 11) 池本宏文，高崎秀明，藤原寅士良，佐名川太亮，西岡英俊：柱列状改良体の連結による橋台耐震補強工法に関する実験的検討，土木学会論文集 A1，Vol.73，No.4，pp.I_679-I_693，2017
- 12) 伊地知卓也，中村貴久，桃谷尚嗣：構造物境界部におけるバラスト軌道の小型模型を用いた加振試験，第 71 回土木学会年次学術講演会，VI -461，pp.919-920，2017