

橋台の地震時変状防止対策に関する 遠心力模型振動実験と解析

伊藤浩二¹·長縄卓夫²·松田隆³

¹(株)大林組技術研究所土木構造研究室 主査研究員(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)
 E-mail:ito.koji.ro@obayashi.co.jp
 ²東海旅客鉄道(株)総合技術本部技術開発部 グループリーダー(〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)
 E-mail:naganawa@jr-central.co.jp
 ³(株)大林組技術研究所土木構造研究室 室長(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

橋台等の構造物を含む既設土構造物では、地震後の復旧性を考えた場合には、構造物と背面盛土との段差や 不同沈下を低減する変状防止対策が必要となる場合がある.橋台、背面盛土の復旧性に応じた合理的かつ経済 的な耐震対策を行う上では、高地震力における各対策工の効果の把握とその評価方法を構築する必要がある. 本研究では、橋台の地震時変状防止対策工の効果の把握を目的に、遠心力実験と地震応答解析を実施した.残 留時の橋台の移動、背面盛土の沈下より評価した対策効果は、シートパイルとネイリングの併用工、シートパ イル工、ネイリング工の順で効果を期待できること、ネイリング工、併用工では、補強材力と復旧性の指標と の関係を得ることにより、復旧性に応じた合理的な必要抑止力を設定できることを確認した.

Key Words : centrifuge model test, retaining wall, seismic response, numerical analysis

1. はじめに

橋台等の構造物を含む既設土構造物では,地震後の復 旧性を考えた場合には,構造物と背面盛土との段差や不 同沈下を低減する変状防止対策が必要となる場合がある. 既設橋台等の抗土圧構造物の耐震対策に関しては,構造 物と背面盛土との一体化,地盤改良による背面盛土の高 剛性化,基礎の高耐震化等が考えられ,模型振動実験と 解析,および設計法の提案などが行われている¹⁾⁻³.

一方で、想定する地震力の増加に伴い、橋台、背面盛 土の復旧性に応じた合理的かつ経済的な耐震対策を行う 上では、高地震力における各対策工の効果の把握とその 評価方法を構築する必要がある.

本研究では、橋台の地震時変状防止対策として、シー トパイル工、小口径補強材を用いたネイリング工、シー トパイルおよびネイリングの併用工を想定した遠心力模 型振動実験を行い、対策工がない場合との比較から、復 旧性の指標と考えられる橋台の移動、背面盛土の沈下に 基づく対策効果を検証する.

次に,変状防止対策の遠心力実験条件に対して,2次元 FEM による地震応答解析を適用し,復旧性の指標における各対策工の効果の検証および評価方法を検討する.

2. 遠心力実験

(1) 検討対象

図-1 に模型縮尺 1/50 の模型地盤と計器配置を示す.実 験では、中央の盛土の両脇に橋台と土留壁をそれぞれ設 置し、Case1 で対策工がない場合とシートパイル工があ る場合、Case2 でネイリング工がある場合とシートパイ ルとネイリングの併用工がある場合を 1 つのアルミ製剛 土槽(2000mm×700mm×650mm)で同時に加振した.

(2) 使用材料

a)地盤

支持地盤では足利産山砂を締固めにより湿潤密度ρ_t= 2.00~2.07t/m³,盛土では埼玉産山砂を締固めにより湿潤 密度ρ_t=1.50~1.55t/m³,原地盤では硅砂 6 号を空中落下 法により乾燥密度ρ_d=1.36~1.40t/m³,相対密度 Dr=53~ 64%とし,軌道荷重 (q=14.7kN/m²)を散弾で考慮した. b)構造物,対策工

橋台部および各対策工では,実物の寸法,諸元をでき るだけ反映して,橋台(136mm),土留壁(118mm)を アルミ製,杭(橋台 ϕ 8mm を 2 列,土留壁 ϕ 5mm を 1 列, L140mm),補強材(ϕ 3mm,L100mm,鉛直ピッチ



図-1 模型地盤と計器配置

30mm, 水平ピッチ 40mm) で砂を塗布したアルミ棒, FSP-IV型を想定したシートパイル (t3mm, L263mm), 桁 (t7.4mm, B200mm, L400mm, 質量 5kg) を鋼板, タ イロッド (φ1mm, L600mm) を鋼線で製作した.

(3) 実験方法

シートパイル工,併用工では橋台,土留壁前面のシー トパイルとフーチングを固定し,ネイリング工,併用工 では橋台,土留壁前面で補強材を固定した.橋台,土留 壁の杭の先端は不完全支持とした.実験では遠心加速度 50G,振動数 60Hz(実物 1.2Hz),波数 28 波(主要 20 波, テーパー前後 4 波),振動台入力加速度 5G, 10G, 15G, 20G(実物 1, 2, 3, 4ms²)を段階的に入力した.

(4) 実験結果

図-2 に各加振毎で得られた残留時の橋台の移動 (DNH, DAH),背面盛土の沈下(DNV, DAV)と入 力加速度の関係を示す.ここで,残留変位は常時からの 変動量(累積量)で評価し,水平変位で橋台前面への移 動を負,鉛直変位で沈下を負とした.橋台の移動は,対 策なしで前面への大きな移動,ネイリング工,シートパ イル工で背面への小さな移動,併用工で背面への大きな 移動が生じており,概ね併用工,シートパイル工,ネイ リング工の順で橋台の移動を低減できる.

背面盛土の沈下は、入力加速度が大きくなるに伴い同様に増加し、入力加速度 4m/s²において、対策なしで 0.88m、シートパイル工で 0.56m、ネイリング工で 0.54m、 併用工で 0.35m 生じている.したがって、橋台の背面盛 土の沈下は、対策なしと比較して、シートパイル工で約 65%、ネイリング工で約 60%、併用工で約 40%に低減さ れ、橋台の前面への移動の低減効果とも概ね対応するこ とより、併用工では、シートパイル工とネイリング工を



図-2 橋台の移動,背面盛土の沈下

重合した効果を期待できると考えられる.

図-3 に加振前,加振後の地表ターゲットの移動から得られた橋台と背面盛土の残留変形を示す.橋台では図-2 に対応した残留水平変位が生じており,背面盛土の残留 沈下は, Casel の対策なし,シートパイル工でほぼ一様 な形状, Case2 のネイリング工,併用工で補強材背面から橋台背面に向かって徐々に小さくなり緩やかな勾配を 有する形状である.したがって,ネイリング工,併用工 では,橋台と背面盛土の一体化が図られることにより, 対策なし,シートパイル工で生じる橋台背面の急激な段 差,背面盛土で生じる沈下を小さく抑えられ,橋台の背 面盛土の沈下を平滑化する補強材の効果が確認される. ここで, Case2 の盛土残留沈下が Casel と比較して大きい のは,盛土密度等の実験条件の相違のためと考えられる.

3. 遠心力実験条件の地震応答解析

(1) 解析方法

図-1の遠心力実験を対象に、2次元 FEM による地震応 答解析を行った.実験では中央の盛土の両脇に橋台と土 留壁をそれぞれ設置し、2つの対策工を1つの剛土槽で 同時に加振している.図-4 に併用工の解析モデルを示す. 解析では実物の単独の対策エモデルを想定し、奥行き 2m,側方を粘性境界、底面を固定境界、盛土、原地盤を 弾塑性モデル⁴、杭、桁、シートパイル(下端:回転剛 結)をはり要素、4 段の補強材および補強材の周面摩擦 を非線形ばね要素、橋台およびシートパイルと周辺地盤 との境界をジョイント要素とした.

入力波は,振動数 1.2Hz,振幅 3m/s²,波数 28 波(主要 20 波,テーパー前後 4 波)の正弦波とした.表-1 に対 策工の諸元⁹と地盤定数を示す.

シートパイル工,併用工ではシートパイルとフーチン グを一体化し、補強材を用いたネイリング工,併用工で は、補強材力と対策効果の関係を得るために、補強材長 5mの他に10m,15mの場合を行った.

(2) 解析結果

図-5 に各対策工(補強材長 10m)で得られた橋台上端の水平変位の時刻歴を示す.橋台の移動は、対策なしと比較して、併用工、シートパイル工、ネイリング工の順で残留水平変位を小さく抑えられる.

図-6 に各対策工で得られた残留変形(変位スケール 5 倍)を示す.対策なしでは,橋台の移動により橋台背面 で段差,後フーチングの仮想背面前で隆起,仮想背面後 で大きな沈下が生じる.一方で,シートパイル工では橋 台背面の段差が大きいが橋台の移動,仮想背面後の沈下, ネイリング工では橋台背面の段差,併用工では橋台の移 動,橋台背面の段差,仮想背面後の沈下が低減される.

図-7に各対策工の橋台背面の残留変位から得られた橋 台の移動(橋台上端の水平変位、フーチング下端の水平 変位、上端と下端の相対水平変位、盛土および原地盤の 影響を考慮した平均変位として橋台上端の水平変位の 12)を示す、ネイリング工では補強材の長さに応じて橋 台の移動、傾斜は小さくなるが、シートパイル工と同様 の効果を得るには約15m必要となり、シートパイル工で 大きな効果を期待できる。併用工では、シートパイル工 とネイリング工を重合した効果を概ね期待できる。

図-8 にネイリング工の背面盛土の沈下形状を示す.背 面盛土では、補強材の長さに応じて一体化した盛土背面 で最大沈下が生じるが、補強材を長くするに伴い、対策 なしで生じる橋台背面の段差、仮想背面後の沈下を平滑 化でき、図-3 の遠心力実験で得られたネイリング工、併 用工の背面盛土の残留変形と整合する.





図-4 解析モデル

表-1 対策工の諸元と地盤定数

対策方法	仕様
シートパイルエ	FSP- I V型 曲げ剛性:EI=1.16×10 ⁵ kN*m ² /奥行き2m
ネイリング工 (小口径補強材)	打設ピッチ:鉛直方向@1.5m×水平方向@2.0m 打設長:L=5, 10, 15m 削孔径:d150 周面のせん断地盤反力係数:k _{sv} =0.03E・d ^{-3/4} kgf/cm ³ 周面の最大摩擦力:F _{max} =πdL(σ _V ・tanφ+C)kN
背面盛土	単位体積重量: γ =15.2kN/m ³ S波速度:Vs=100m/s 有効内部摩擦角:φ=31° 粘着力:C=0kPa
支持地盤	単位体積重量:γ=13.3kN/m ³ S波速度:Vs=200m/s 有効内部摩擦角:φ=32° 粘着力:C=0kPa
桁、軌道	125ton/奥行き2m、q=14.7kN/m ²





図−6 残留変形

図-9 に仮想背面後における地表の残留沈下分布から得られた背面盛土の最大沈下を示す.各対策工の最大沈下 は、図-7 の盛土および原地盤で生じる平均的な残留水平 変位である橋台上端 1/2 の水平変位で評価した橋台の移 動の傾向と整合し、対策なしと比較して、シートパイル 工で約 70%、ネイリング工で約 80%、併用工で約 60% に低減される.図-2 の遠心力実験では、シートパイル工 で約 65%、ネイリング工で約 60%、併用工で約 40%の 低減効果が得られており、概ね対応するようである.

図-10 にネイリング工,併用工で得られた橋台との接 合部における補強材全段の軸力の総和で評価した補強材 力と橋台の傾斜(ネイリング工で橋台上端と対策なしの フーチング下端との相対変位,併用工で橋台上端とシー トパイル工のフーチング下端との相対変位)の関係を示 す.ここで,表-1の定数における補強材全段の全周面摩 擦力は,補強材長 5,10,15m で 391,765,1170kN であ り^の,解析で得られた補強材各段の軸力の分担は,概ね 1段,4段で約20%,2段,3段で約30%である.

補強材力は橋台の傾斜が小さくなるに伴い大きくなり、 補強材力と橋台の傾斜の関係は概ね直線で近似される. したがって、この関係を用いることにより、ネイリング 工、タイブルと控え杭等のアンカー工や併用工において、 橋台の復旧性の指標(例えば、橋台の傾斜や背面盛土の 沈下)に応じた合理的な補強材力の設定が可能である.





(1) 解析方法

図-4 の遠心力実験条件の解析モデルにおいて、対策な し、シートパイル工でシートパイル長 s=5,7.5,10m, ネイリング工で補強材長 t=5,10,15m,併用工でシー トパイル長 s=5,7.5,10m と補強材長 t=5,10,15m を パラメータとする2次元 FEM による地震応答解析を行 った.入力波は図-11のスペクトルⅡ適合波⁷とし,表-1の対策工の諸元と地盤定数を用いた.

(2) 解析結果

図-12 に各対策工(シートパイル長 s=10m, 補強材長 t=10m) で得られた橋台上端の水平変位の時刻歴を示す. 橋台の移動は,対策なしと比較して,併用工,シートパ イル工,ネイリング工の順で小さく抑えられるが,正弦 波入力 3m/s²と比較して地震力が大きいため,ネイリン グ工による低減効果は小さい.

図-13 に各対策工で得られた残留変形(変位スケール 5 倍)を示す.対策なしの残留変形は,正弦波入力 3m/s² と同様に,橋台の移動により橋台背面で段差,後フーチ ングの仮想背面前で隆起,仮想背面後で広範囲に大きな 沈下が生じる.一方で,シートパイル工の残留変形は, 正弦波入力 3m/s²と同様に,橋台背面の段差が大きいが 橋台の移動,仮想背面後の沈下が低減される.ネイリン グ工,併用工の残留変形は,正弦波入力 3m/s²と比較し て地震力が大きいため,橋台背面の段差が低減されるも のの橋台の移動,仮想背面後の沈下の低減効果が小さい.

図-14 に各対策工の橋台背面の残留変位から得られた 橋台の移動を示す.橋台の移動は,対策なしと比較して, シートパイル工 s=10m,併用工 s=10m において低減効 果は大きいが,シートパイル長 s=5,75m でシートパイ ルを根入れしない場合では,橋台の移動の低減効果は小 さい.ネイリング工では補強材の長さに応じて橋台の移 動,傾斜は小さくなるが,シートパイル工 s=10m ほど 大きな効果を期待できない.併用工では,正弦波入力 3m/s²と同様に,シートパイル工とネイリング工を重合し た効果を概ね期待できるが,シートパイル工による低減 効果が支配的である.この理由としては,スペクトルII 適合波では,正弦波入力 3m/s²と比較して地震力が大き いため橋台の移動も大きくなり,その結果,ネイリング 工,併用工における補強材による橋台の移動を低減する 効果が相対的に小さくなったためと考えられる.

図-15 に仮想背面後における地表の残留沈下分布から 得られた背面盛土の最大沈下を示す.各対策工の最大沈 下は、対策なしと比較して、シートパイル工 s=10m で 約 70%、ネイリング工で約 90%、併用工 s=10m で約 65%に低減される.正弦波入力 3m/s²では、シートパイ ル工で約 70%、ネイリング工で約 80%、併用工で約 60%の低減効果が得られているが、ネイリング工では、 シートパイル工と比較して背面盛土の沈下低減の効果が 小さい.ここで、対象とした背面盛土の土質区分は、土 質③:粒度配合の悪い砂⁸を想定しており、内部摩擦角、 粘着力が大きく補強材の周面摩擦力を期待できる他の土 質区分におけるネイリング工では、90%より大きな背面 盛土の沈下低減の効果を発揮できると考えられる.



図−13 残留変形

図-16 にネイリング工,併用工で得られた橋台との接 合部における補強材全段の軸力の総和で評価した補強材 力と橋台の傾斜(ネイリング工で橋台上端と対策なしの フーチング下端との相対変位,併用工 s=5,7.5,10m で 橋台上端とシートパイル工 s=5,7.5,10mのフーチング 下端との相対変位)の関係を示す.



図-14 橋台の移動

補強材力は概ね橋台の傾斜が小さくなるに伴い大きく なり、図-10 と同様の勾配を有する直線で近似され、ス ペクトルII適合波、正弦波の入力波に係わらず、補強材 諸元、背面盛土の地盤定数(内部摩擦角、粘着力)に応 じた勾配である.したがって、図-10 および図-16 の補強 材力と橋台の傾斜の関係で得られた勾配を用いることに より、ネイリングエやアンカーエにおいて、橋台の復旧 性の指標に応じた合理的な補強材力の設定が可能である.

5. おわりに

橋台の地震時変状防止対策では、シートパイル工、小 口径補強材を用いたネイリング工、シートパイルとネイ リングの併用工において、復旧性の指標と考えられる残 留時の橋台の移動、橋台の背面盛土の沈下より評価した 対策効果は、併用工、シートパイル工、ネイリング工の 順で効果を期待できること、併用工では、概ねシートパ イル工とネイリング工を重合した対策効果を期待できる こと、ネイリング工、併用工では、補強材力と復旧性の 指標(残留時の橋台の移動および傾斜、橋台背面盛土の 沈下)との関係を得ることにより、復旧性に応じた合理 的な必要抑止力を設定できることを確認した.

参考文献

- 渡辺健治, 舘山勝, 青木一二三, 米澤豊司:セメント改良ア プローチブロックを有する耐震性橋台に関する模型振動実験, 鉄道総研報告, Vol.16, No.3, pp.25-30, 2002.
- 2) 青木一二三,米澤豊司, 舘山勝,小島謙一, 大河内保彦, 堀 井克己:耐震性橋台模型振動台実験の弾塑性 FEM による動



的解析, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1843-1844, 2001.

- 3) 幸原淳,青木一二三,米澤豊司,渡邊修,舘山勝,龍岡文 夫:ジオテキスタイルで補強されたセメント改良補強盛土からなる橋台の耐震設計,ジオシンセティックス論文集,第17 巻,pp.111-116,2002.
- 4)伊藤浩二:動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その
 1) -基礎理論と地盤構成モデルー,大林組技術研究所報, No.51, pp.7-14, 1995.
- 5) RRR 工法協会:盛土のり面急勾配化工法設計・施工マニュアル, pp.39-40, 1998.
- 6) 日本道路公団:切土補強土工法設計・施工指針, pp.31-33, 2002.
- (7) 運輸省鉄道局,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,p.367,1999.
- (3) 運輸省鉄道局,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,pp.46-48,1999.

(2005.3.15 受付)

Seismic Response of Abutment Installed with Countermeasures - Centrifuge Model Test and its Analyses – Koji Ito, Takuo Naganawa and Takashi Matsuda

This paper describes results of centrifuge model tests on an abutment and its numerical analyses installed with three types of countermeasures, sheet-pile on supported ground, nailing on backfill and sheet-pile together with nailing. Centrifuge model tests with similitude of 1/50 and its numerical analyses are carried out. It is concluded that the effectiveness of coutemeasures in turn is sheet-pile together with nailing, sheet-pile and nailing based on the residual movement of abutment and residual settlement of backfill. The required reinforcing force for nailing is rationally determined combined with the relationships between reinforcing force mobilized and residual settlement of backfill.