

特集 「リニューアル」

変形性能を考慮した土構造物リニューアル

- 橋台の耐震補強と軟弱地盤上の盛土拡幅時の変形抑制対策 -



伊藤 浩二



高橋 真一

Performance design engineering in earth-structures renewal

Centrifuge model test of countermeasures on retaining wall and widening embankment

Koji Ito Shinichi Takahashi

Abstract

This paper describes results of two types of centrifuge model tests and numerical analyses for performance design of an earth-structure. One was comprised a retaining wall structure with small diameter reinforcing bars designed to resist strong earthquakes. The other was comprised a widened embankment, with sheet lagging and driven steel sheet pile tied with steel rods. Centrifuge model tests and numerical analyses were carried out to clarify the behavior of structures and to confirm its effectiveness. It is concluded that the reinforcing bars were capable of decreasing performance indices, retaining wall sliding and the difference in level between retaining wall and backfill. The lagging together with the steel rods was capable of decreasing the deformation of the existed embankment. These numerical procedures were capable of estimating a rational specification of countermeasures according to the seismic performance of restoration and reinforcing performance.

概要

土構造物に対する性能設計の適用検証を目的に、橋台の耐震補強と盛土拡幅時の対策工に関する遠心模型実験と数値解析を行った。橋台の耐震補強では、地震後の復旧性の確保として、アースネイリングによる小口径補強材を用いた躯体傾斜対策の有効性、盛土拡幅時の対策工では、道路や鉄道、宅地などの既設盛土に、さらに盛土を追加する事例を対象に、拡幅盛土による既設盛土への影響と対策の有効性を検討した。補強材を用いた橋台では、高地震力における復旧性の指標である橋台の移動、橋台と背面盛土との段差を低減できること、補強材の効果を検討した評価手法により、橋台および背面盛土の復旧性能に応じた合理的な対策諸元の評価が可能であることを確認した。盛土拡幅時の対策工では、既設盛土のとも下がり沈下を確認するとともに、盛土下部にシートを敷設する対策、矢板とタイロッドを組み合わせた対策の両者において変状抑制効果が高いことが認められた。

1. はじめに

土構造物のリニューアルでは、作用する荷重や構造物の健全性、構造物の機能を柱と考えると、

1)作用荷重に対して健全性が確保されない場合の補強
(耐震補強対策など)

2)構造物の機能不足に対応する機能向上
(盛土拡幅における盛土機能付加など)

をその範疇に挙げることができる。一般的にリニューアルと考えられる前者の荷重としては地震と降雨、後者の機能向上の例として道路、鉄道盛土や堤体の拡幅などが挙げられる。各々リニューアルの目的は異なるが、現状の土構造物の健全性診断は重要な入り口と言える。

健全性診断の体系的な取り組みの必要性が学会の委員会等を中心に大きく取り上げられている¹⁾。一方で、ライフサイクルコストを考えた場合に土構造物のタフな特徴も見直され始めており、土構造物のリニューアルはより重要性を増している。

このような背景において、本論文では大きくとらえた「土構造物のリニューアル」に対して、性能設計を意識した対策工法の提案の具体例として、Fig. 1の橋台の耐震補強対策と盛土拡幅に伴う地盤変状対策を示す。

橋台等の構造物を含む既設土構造物では、地震後の早急な機能復旧の確保として、構造物と背面盛土、周辺地盤との段差や不同沈下を低減する耐震対策が必要となる場合がある。橋台の耐震対策では、躯体傾斜対策として

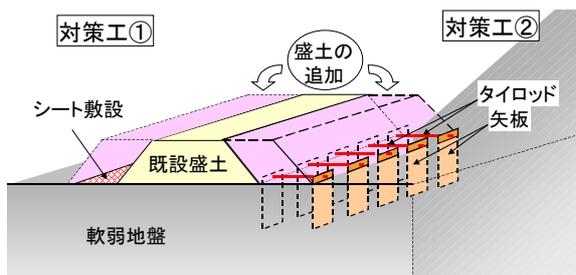
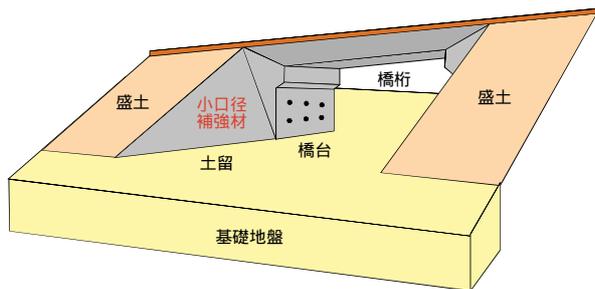


Fig. 1 橋台および既設盛土の変状防止対策
Retaining Wall and Widened Embankment

補強材等による構造物と背面盛土との一体化，セメント改良土による背面盛土の高剛性化と土圧低減，基礎地盤対策としてマイクロパイル等による高耐震化が提案されている²⁾。一方で想定する地震力の増加に伴い，復旧性能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補強効果の把握と評価手法の確立，実橋台への適用に関する規準化を図る必要がある。

本研究では，地震時における橋台の躯体傾斜対策としてアースネイリングによる小口径補強材を用いた橋台部全体の遠心力模型振動実験と地震応答解析を行い，補強材なしの橋台との比較より復旧性能の指標である橋台の移動，橋台と背面盛土との段差に基づく補強効果の把握，補強材の効果を検討した評価手法の適用性を検討した。

一方，盛土機能の向上策として，道路や鉄道あるいは宅地などの既設盛土に，さらに盛土を付加する拡幅工事に対しては，地盤の変形挙動を精度良く検証するため，これまで遠心载荷装置を用いて，軟弱地盤上に新設盛土を造成した場合の粘性土地盤の挙動³⁾や，地盤改良⁴⁾あるいは矢板打設などによる変形対策工法に関する数多くの研究がなされている。しかし，拡幅盛土を付加した場合の，軟弱地盤の挙動に関する研究は少ないことから，この論文では，拡幅盛土とその対策に関する遠心载荷模型実験と数値シミュレーションによる検討を行った。

2. 橋台の耐震補強

2.1 橋台の遠心力模型振動実験

2.1.1 実験方法 遠心力実験では，健全な密砂の支持地盤，直接基礎形式の橋台，一樣な中密砂の盛土で構成される基本的な2次元平面ひずみ条件を想定した。なお，橋桁の水平力，橋台の塑性化，支持地盤の液状化，3次元効

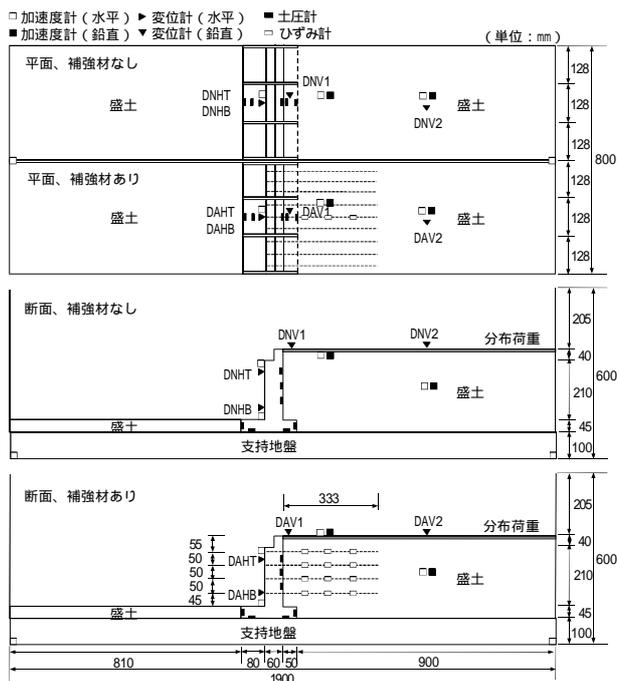


Fig. 2 模型地盤と計器配置
Model Configuration and Transducers

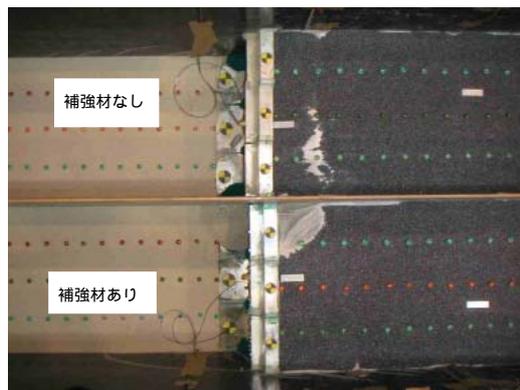


Photo 1 橋台の移動 (実験)
Retaining Wall Sliding (Experiment)

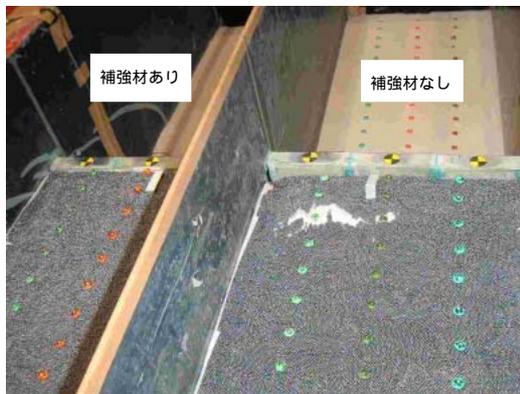


Photo 2 橋台と背面盛土との段差 (実験)
Difference in Level between Retaining Wall and Backfill (Experiment)

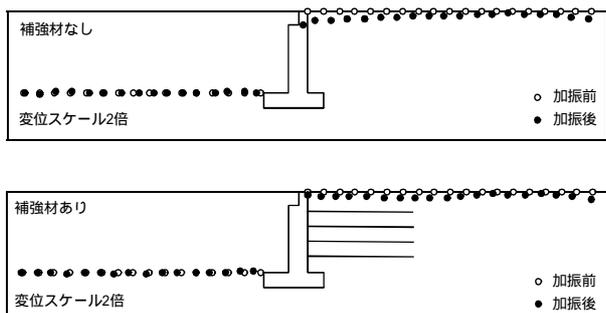


Fig. 3 残留変形 (実験)
Residual Deformation (Experiment)

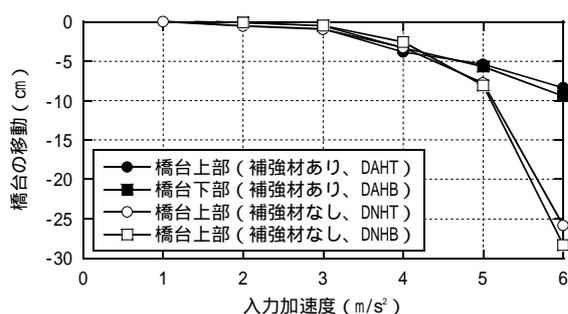


Fig. 4 橋台の移動 (実験)
Retaining Wall Sliding (Experiment)

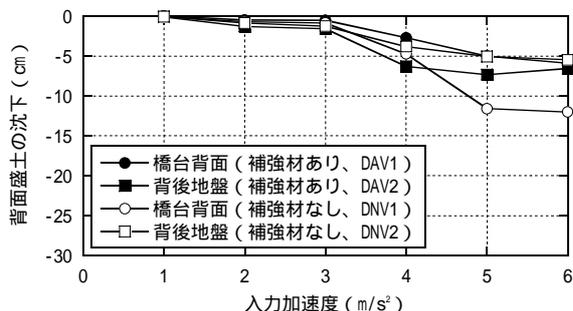


Fig. 5 背面盛土の沈下 (実験)
Settlement of Backfill (Experiment)

果を考慮しない。Fig. 2に模型縮尺1/30の模型地盤と計器配置を示す。実験では剛土槽 (1900 × 800 × 600mm) に仕切り板を設置し、補強材がある場合とない場合の橋台を同時に加振した。支持地盤は、珪砂6号を締固めることで単位体積質量 $\rho_d = 1.52t/m^3$ 、相対密度 $Dr = 100\%$ 、一方前面および背面盛土は空中落下法によって $\rho_d = 1.46t/m^3$ 、 $Dr = 80\%$ とした。また、鉛玉を盛土上に設置することにより分布荷重 ($q = 14.7kN/m^2$) を考慮した。

橋台は、各実験モデルでアルミ製の主橋台1基 (奥行128mm)、側壁、仕切り板の影響を排除するためのダミー橋台2基 (奥行128mm) からなる。補強材は、基本的な補強効果を得る目的から、砂を塗布した 3.2mmのアルミ棒 (実物寸法: 長さ10m、径10cm、間隔1.5m) で製作し、橋台と補強材を一体化した。実験では、遠心加速度30G、振動数60Hz、波数20波、振動台入力加速度3G、6G、9G、12G、15G、18G (実物で振動数2Hz、波

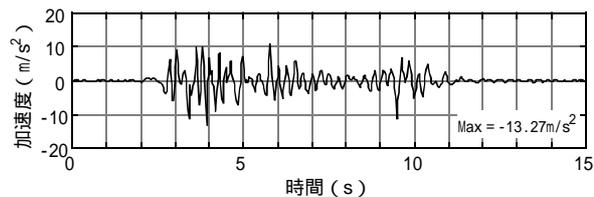


Fig. 6 入力地震波
Input Motion

Table 1 補強体の諸元と定数
Mechanical Properties of Reinforcing Bar

材料	仕様
小口径補強材	補強材: D 19 (SD345)
	打設ピッチ: 鉛直方向@1.5m × 水平方向@1.5m
	打設長: L = 5, 10, 15, 20m
	削孔径: d 100
	補強材ヤング係数: $E_o = 2 \times 10^8$ kPa
背面盛土	補強材降伏強度: $\sigma_s = 3.45 \times 10^5$ kPa
	周面のせん断地盤反力係数: $k_{sv} = 0.03 E \cdot d^{-3/4}$ kgf/cm ³
	周面の最大摩擦力: $F_{max} = d L (\nu \cdot \tan + C)$ kN
	単位体積重量: = 17kN/m ³
支持地盤	有効内部摩擦角: = 40°
	粘着力: C = 0kPa
	単位体積重量: = 20kN/m ³
	有効内部摩擦角: = 50°
	粘着力: C = 0kPa

数20波、入力加速度1m/s² ~ 6m/s²)を段階的に入力した。2.1.2 実験結果 Photo 1, 2に入力加速度6m/s²の加振終了後における橋台の移動、背面盛土との段差の状況を、Fig. 3には地表測点から得られた背面盛土の残留変形を示す。

補強材がない場合では橋台背面で残留沈下が大きくなるが、補強材がある場合では、橋台と背面盛土との一体化により補強材背面で残留沈下が大きくなるものの橋台の移動、橋台と背面盛土との段差は小さく抑えられる。

Fig. 4, 5に各加振毎で得られた残留時の橋台の移動、背面盛土の沈下と入力加速度の関係を示す。ここで残留変位は、遠心加速度0 ~ 30G到達時の自重により生じた変位を差し引いた常時からの変動量 (累積量) で評価した。

橋台の残留水平変位は、Fig. 3に対応して橋台上部、下部で概ね同様であり、並進モードが支配的である。橋台の移動、背面盛土の沈下は入力加速度3m/s²まで小さいが、移動、沈下の増加が大きい入力加速度4m/s²から補強材による低減効果が顕著となり、補強材ありの残留変位は、入力加速度6m/s²で補強材なしの1/3 ~ 1/2程度まで低減される。補強材ありの背面盛土の沈下は、Fig. 3に対応して補強材背面で大きくなるが、補強材なしと比較して地表における沈下の勾配、橋台背面で生じる段差が小さく抑えられる。以上より、補強材を用いた橋台の傾斜対策では、適切な補強材長を設定することにより、高地震力においても橋台の移動、橋台と背面盛土との段差等の残留変位を低減できる。

2.2 橋台の地震応答解析

2.2.1 解析方法 Fig. 2の遠心力実験の実物寸法を対

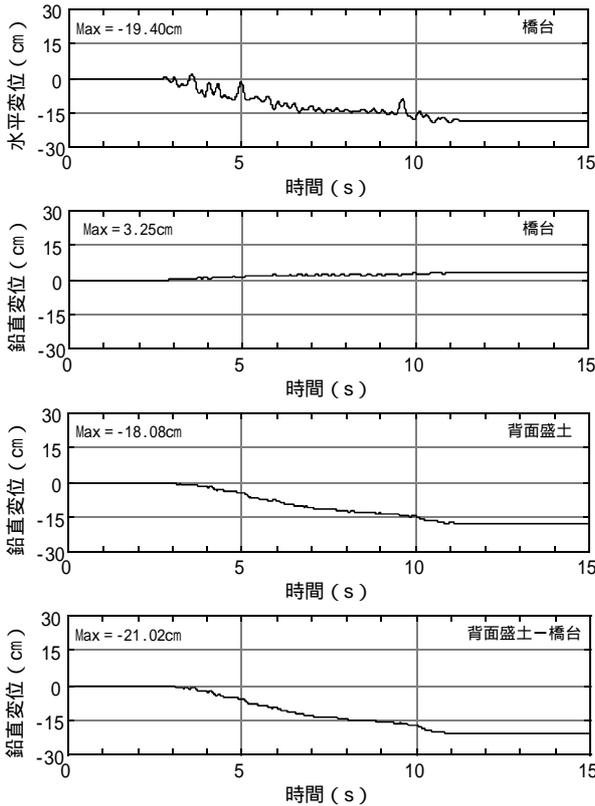


Fig. 7 時刻歴 (解析)
Time Histories (Prediction)

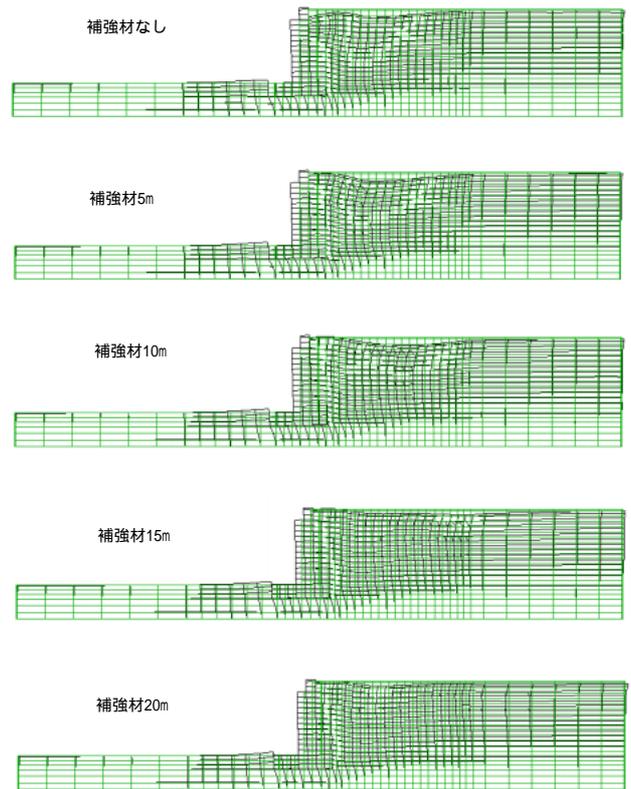


Fig. 8 残留変形 (解析, 変位スケール5倍)
Residual Deformation (Prediction, Scale:5.0)

象に、補強材なし、補強材長5、10、15、20mの2次元FEM解析を行った。解析では、盛土、支持地盤を弾塑性モデル、橋台と盛土、支持地盤間をモール・クーロン型のジョイント要素($\mu = 0.5, c = 0kPa$), 補強材を非線形ばね、補強材と背面盛土間を最大周面摩擦力を有する非線形ばね、橋台、地盤の解析奥行きを補強材間隔1.5mとし、Fig. 6の高地震力を想定した模擬地震波を用いた。

Table 1に補強材、地盤の諸元と主な定数を示す⁵⁾。

2.2.2 解析結果 Fig. 7に補強材なしの橋台、背面盛土の変位、橋台と背面盛土との段差の時刻歴、Fig. 8に各補強材長における残留変形を示す。補強材なしの橋台では、明瞭な背面盛土との段差、主働崩壊角 45° 程度(仮想背面より8.85m相当)の範囲で背面盛土の残留沈下が生じ、入力地震波が異なるものの、Fig. 3の遠心力実験で得られた補強材なしの残留変形分布と対応する。補強材10m、15mの橋台では、Fig. 3の補強材ありの残留変形分布と概ね対応することから、本手法により、高地震力における補強材を用いた橋台、背面盛土の残留変位に基づく対策効果の評価が可能である。

Fig. 9, 10に橋台の移動、橋台と背面盛土との段差と補強材長との関係を示す。補強材を5~20mと長くするに伴い橋台の移動、橋台と背面盛土との段差が次第に小さくなり、想定した地震動においては、補強材10~15mで橋台の移動の低減が大きく補強効果を期待できる。

以上より、補強材を用いた橋台の傾斜対策では、想定

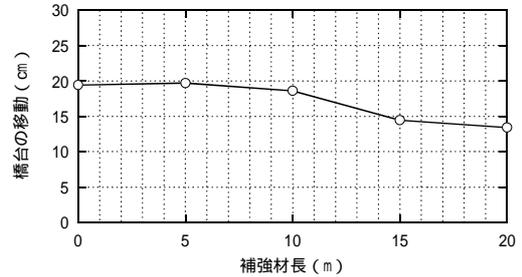


Fig. 9 橋台の移動 (解析)
Retaining Wall Sliding (Prediction)

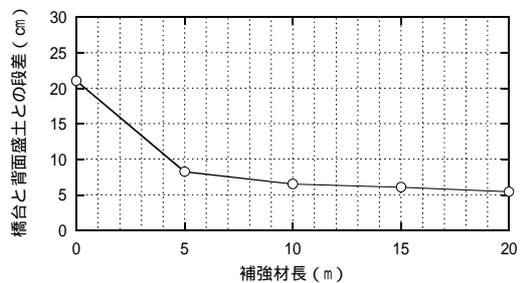


Fig. 10 橋台と背面盛土との段差 (解析)
Difference in Level between Retaining Wall and Backfill (Prediction)

する地震動に応じてFig. 9, 10の関係を得ることにより、復旧性能の指標(例えば、橋台と背面盛土との段差)に応じた合理的な補強材諸元の設定が可能である。

3. 盛土拡幅に伴う既設盛土変状防護対策

3.1 盛土拡幅時（拡幅盛土）の遠心力模型実験

3.1.1 実験方法 盛土拡幅時の変形挙動とその対策効果を検証するため、Fig. 11に示すように、無対策モデルと、既設盛土および拡幅盛土法尻に矢板を打設し両矢板をタイロッドで結束する対策モデルの2種類の模型実験を行った。矢板模型は、遠心力場で型鋼矢板の剛性に相当する厚さ5mmのアルミ板を用い、根入れ長は無対策の実験で観測されたすべり面の位置を通るように13cmとした。また、延長方向に対しては、矢板3cm - ブランク2cmの「歯抜け」施工とした。

粘性土地盤は、粘性土（カオリン系工業用粘土）を液性限界の1.5倍相当の含水比43%に調整し、圧密圧力60 kN/m²で予圧密を行い、さらに遠心加速度50Gで6時間の自重圧密を行い準備した。粘性土の厚さは26cmで、実物に換算すると13mに相当する。自重圧密終了後、一旦、遠心載荷装置を停止させ、対策工（矢板打設とタイロッドによる結束）の設置や、Photo 3に示す模型土槽上面に盛土作製装置を搭載した。

盛土の作製は、遠心加速度50Gを維持した状態で、所定の形状になるよう粘土地盤上に盛土作製装置を遠隔操作して模型地盤上に盛土材を投下し、既設および拡幅盛土（高さ8cm、実物換算4m）を造成した。

計測は変位計、間隙水圧計、CCDカメラを用いた画像計測を行い、地盤の挙動を把握した。

3.1.2 実験結果 既設盛土造成の圧密完了後（約6時間経過後）に、拡幅盛土の造成を行った。Fig. 12に地盤内の標点の軌跡を示す。拡幅盛土部分から放射状に変位が発生している。既設盛土の法面部分（拡幅盛土の左側）では、既設盛土方向（左側）への水平変位が発生しており、拡幅盛土の既設盛土への影響が観測された。

地中変位に関して、Fig. 13に沈下量の経時変化を示す。無対策と比較して、盛土直後の沈下量は差が小さいが、圧密終了時の沈下量は無対策の約70%程度に減少した。

一方、水平変位は、歯抜け部分中央で最大値を示していると考えられるが、Fig. 14に示す画像センサーによる遠心載荷中の水平変位は0.6mm程度で、実験終了後に矢板の変状を計測した結果でも、ほとんど差はなかった。

3.2 FEMによるシミュレーション解析

3.2.1 解析方法 矢板+タイロッドの対策効果について数値解析を行い、実験から得られた挙動の検証と、矢板根入れ長さの効果について考察を行った。

地盤モデルは、粘性土層は、弾塑性モデル（関口・太田モデル）、粘土層上部のサンドマットおよび盛土は弾性体である。載荷条件は、遠心模型実験の盛土施工過程にあわせて既設盛土と拡幅盛土部の要素を追加し盛土自重を与える方法で載荷した。

3.2.2 解析結果 Fig.15,16は、盛土拡幅時の変形解析結果である。対策モデルでは、無対策に比べ法尻付近の

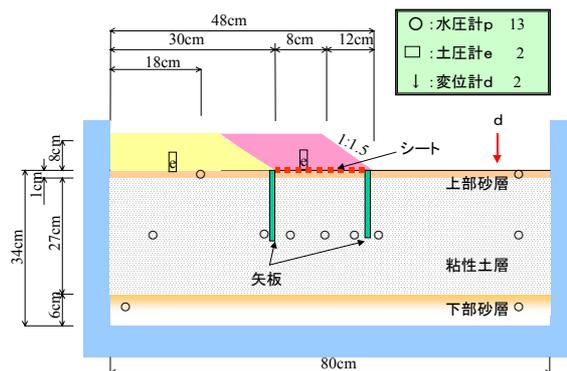


Fig. 11 模型断面

Geo-textile Reinforcement & Lagging + Steel Rod

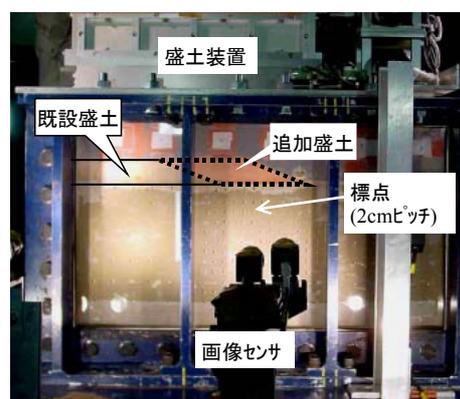


Photo 3 盛土作製装置および画像センサー
Embankment Device &
Visual Deformation Transducer

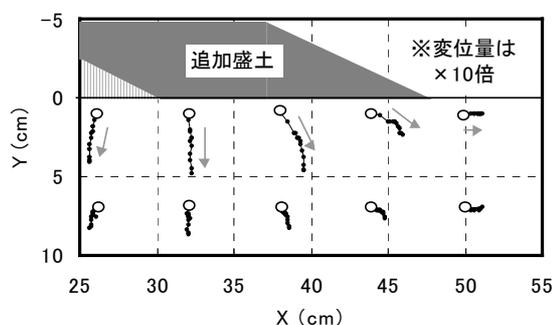


Fig. 12 拡幅盛土造成に伴う軟弱地盤の変状
Ground Locus by Adding Embankment

水平変位、拡幅盛土下の沈下とも全体的に小さく、矢板打設の効果が認められる。

Fig. 17は、矢板打設長さを変化させた解析を行い、矢板打設長さとして拡幅盛土法尻の水平変位の関係を示したものである。水平変位量は、矢板長さに応じて減少するが深いほどその効果の割合が低下する傾向にある。また、沈下量は、浅い打設長さでは効果は現れず、解析条件では7m以深の打設がより有効となっている。変位抑制目標に応じた改良仕様を適用することで品質目標を考慮した最適な対策工法の適用が可能であることが確認できる。

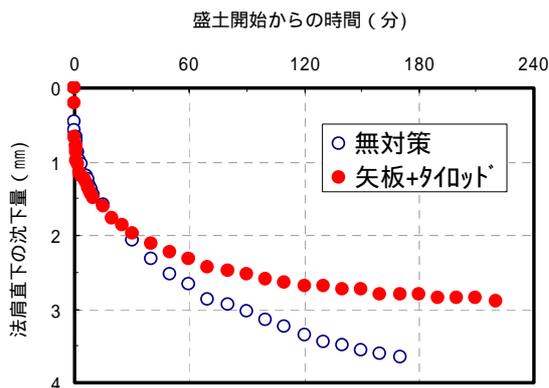


Fig. 13 各ケースでの法肩の沈下(実験)
Settlement at End of Slope (Experiment)

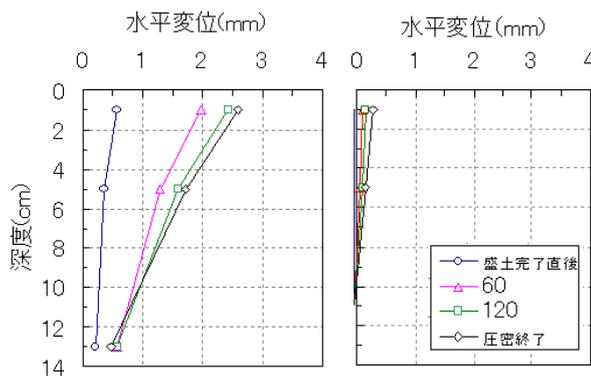


Fig. 14 各ケースでの法尻部の側方変形(実験)
Horizontal Ground Deformation (Experiment)

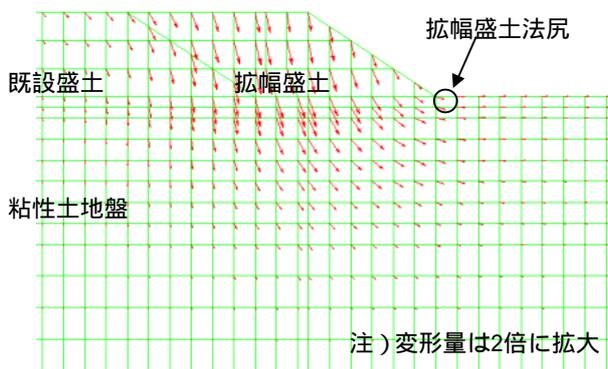


Fig. 15 盛土拡幅に伴う変形 (無対策: 解析)
Deformation by Widened Embankment (Prediction)

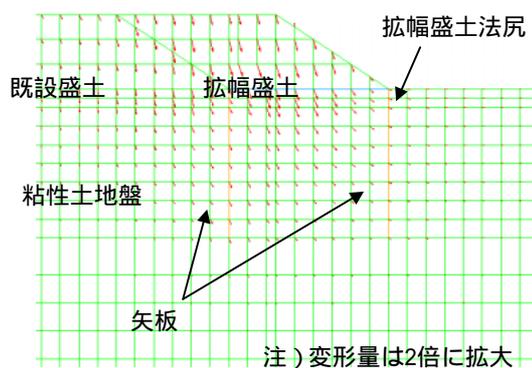


Fig. 16 盛土拡幅に伴う変形 (対策: 解析)
Effect of Lagging (Prediction)

4. おわりに

土構造物のリニューアルは今後ますますその重要性が増してくると考えられる分野である。ここでは、耐震補強と機能拡大に伴う盛土拡幅を例に取り上げ、性能設計を意識した新しい取り組みを紹介した。前者では、小口径補強材を用いた橋台の遠心力模型振動実験と地震応答解析より、補強材を用いた耐震対策では、高地震力においても背面盛土との一体化により橋台の移動、橋台と背面盛土との段差を低減できること、補強材の効果を考慮した評価手法は、橋台、背面盛土の残留変位に基づく補強効果の把握、復旧性能に応じた合理的な対策諸元の評価へ適用できることを確認した。また、後者では、拡幅盛土の造成が既設盛土に影響を与えることが確認でき、その対策として、変形性能を考慮することでより柔軟な改良仕様が可能であることを示した。

今後実用設計の確立など少し未確定の部分もあるが、ここで示した手法やその考え方は広く共通するものであり、多様な土構造物のリニューアルに対して対応できる技術であると考えている。

参考文献

- 1) 例えば、土木学会 地盤工学委員会：地盤に関わる維持・補修・管理技術に関するシンポジウム (1998)
- 2) 例えば、渡辺健治，館山勝，青木一三，米澤豊司：

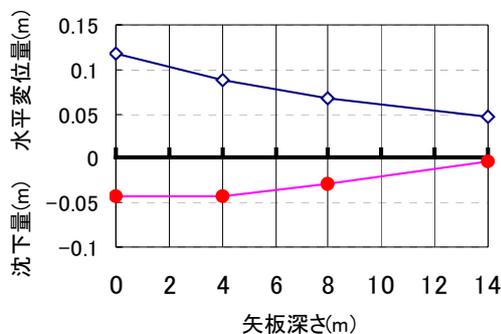


Fig. 17 矢板根入り長さの変形抑止効果
Effect of Lagging

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)

- 3) 例えば，長沼ら：遠心力载荷装置を用いた盛土の建設，第18回土質工学研究発表会 (1983)
- 4) 例えば，北詰ら：低改良率で改良された杭式深層混合処理地盤の鉛直支持力，港湾技術研究所報告 (1999)
- 5) RRR工法協会：既設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) 森拓雄，高橋真一，鳥井原誠：盛土拡幅が既設盛土および周辺地盤に与える影響とその対策工，大林組技術研究所報，No.67 (2003)