

杭を有する補強土壁の動的遠心模型実験

原隆史¹・辻慎一郎²・八嶋厚³・竜田尚希⁴

これまで補強土は直接基礎で構築され、補強土の水平抵抗は直接基礎底面で負担しており、杭基礎の適用は検討されてこなかった。このため、地震力や土圧などの大きな水平力を受ける補強土擁壁の底面は大きな幅が必要となり、その適用は構築スペースの確保が可能な現場に限定され、特に斜面上など、構築スペースの確保が困難な場合には、合理的な補強土が適用できずにいた。そこで本論文では、大きな靱性を持つ補強土とたわみ性に富む鋼杭を一体化させた、杭を有する補強土の適用を提案する。ここでは、動的遠心模型実験と数値解析により杭と補強土の動的相互作用を解明し、斜面上の盛土の耐震対策への適用性を検討する。

キーワード：杭，補強土壁，地震，遠心模型実験

1. はじめに

本論文は、これまでに例のない土構造物（補強土）と鋼杭との新たなハイブリッド構造の実現を研究するものである。すなわち、大きなじん性（粘り強さ）を持つ補強土とたわみ性に富む鋼杭とを一体化させることにより、これまで適用が困難とされてきた斜面等狭隘な場所への安価な小断面土構造物（補強土）の活用を目指すものである。

例えば図-1の斜面上の盛土の耐震対策では、経済性や排水性の観点から土構造物の活用が望ましいのに対し、せん断抵抗の面で土構造物は大規模断面となり施工性から適用は困難であったが、補強土と鋼杭との一体化により、排水性に優れ安価な対策が可能となる。

本論文では、図-2に示すような、補強土と鋼杭の相互作用を確認するための動的遠心模型実験を実施し、大きなじん性を持つ補強土が杭に荷重を伝達できることを示す。また、動的遠心模型実験結果を数値解析で再現し、設計方法を提案する。

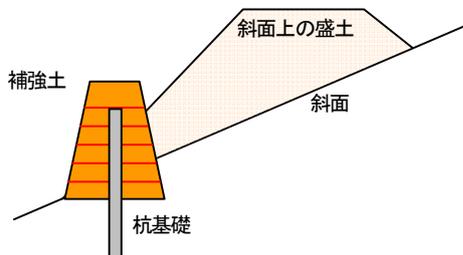


図-1 杭を有する補強土の適用例

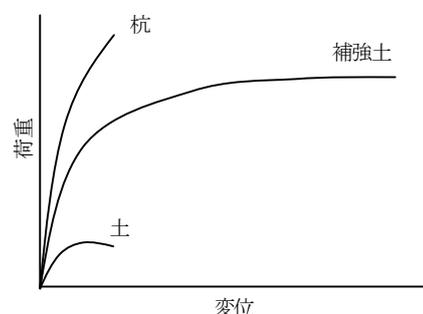


図-2 補強土と杭の相互作用

2. 実験による補強土に対し杭基礎を適用した場合の相互作用と適用効果

(1) 実験概要

ここでは、動的遠心模型実験（25G）により、斜面上の道路盛土の耐震対策を対象とし、対策として盛土途中に杭を配置した補強土と杭なしの補強土を用いた2ケースの実験から、補強土に杭を用いる効果と杭と補強土との相互作用を確認した。模型は図-3に示すように、1.0 m × 1.0 mの土槽の中央を仕切り、杭を配置した補強土と杭なしの補強土を設置した模型を作成して、2ケースの実験を一度に実施した。

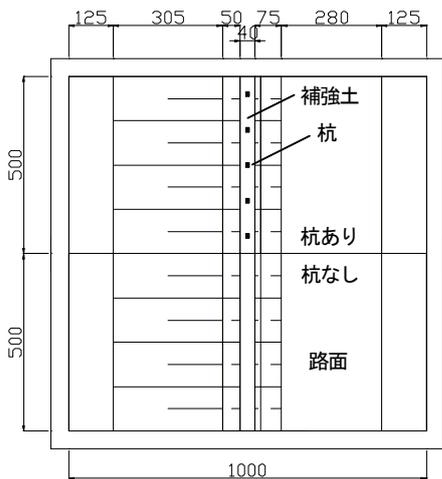
実験に用いた材料は、斜面内で破壊が生じないよう斜面はソイルモルタル（目標強度： $q_u = 300 \text{ kN/m}^2$ ）とし、盛土は珪砂8号（ $w = 4\%$ ， $D_r = 60\%$ ）で構築した。補強土は、土材料は盛土と同等とし、施工過程を実態と同じように補強材を配置しながら図-4に示すように一段毎に構築した。補強材は、実際に用いる材料をイメージして、

¹正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，准教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

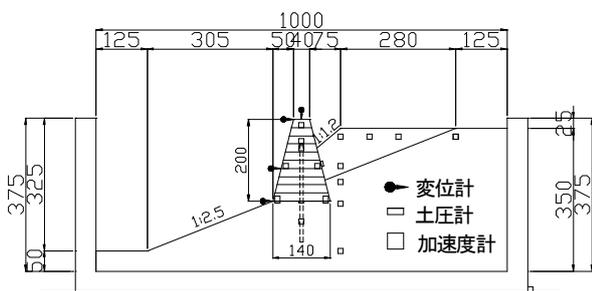
²正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，助教（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

³正会員，岐阜大学工学部 社会基盤工学科，教授（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

⁴正会員，前田工織株式会社 技術部（〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3）



(a) 平面図



(b) 断面図

図-3 実験模型と計測項目

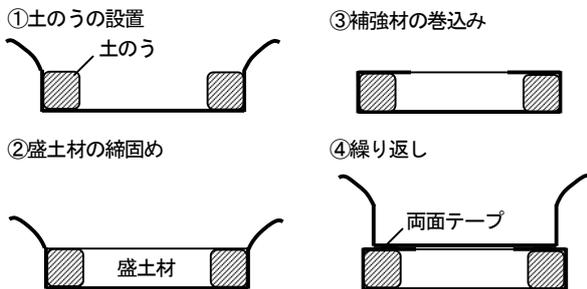


図-4 補強土模型の作成手順

図-5に示すように換算剛性で実物の初期剛性と等価となる材料（日石コンウェッドネットON7100）を用いた。また、補強土の構築にあたり、補強土から杭へスムーズに荷重が伝達されるよう、このための工夫として図-6に示すように、1段毎に補強土延長方向に鉛直に杭に沿って補強材を配置し、その効果を確認することとした。

実験に用いた杭は、実際の補強土に長さ60 m（補強土内：3.5 m，斜面への根入れ：2.5 m）のH鋼杭（H300×300×10×15）を2.5 m間隔で配置することを想定して配置した。この際の模型杭の断面は、杭の抵抗機構上載荷幅と杭の断面2次モーメントを整合させる必要があるため、遠心実験の相似則より杭の前面幅を1/25とし杭の高さは断面2次モーメントが1/25⁴となるようにし、杭断面（12×8mm）を決定した。計測項目は図-3に示したとおりであり、入力波形は図-7に示す兵庫県南部地震神戸海

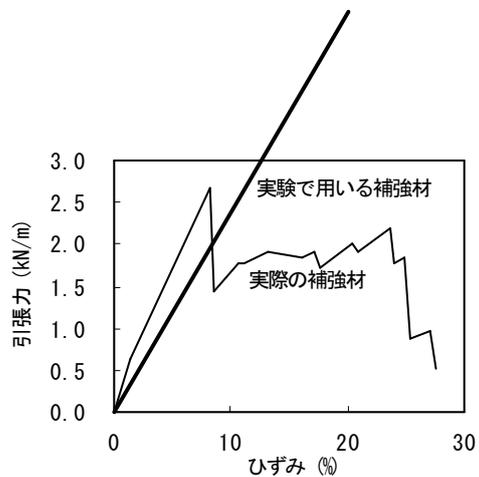


図-5 実験で用いる補強材剛性

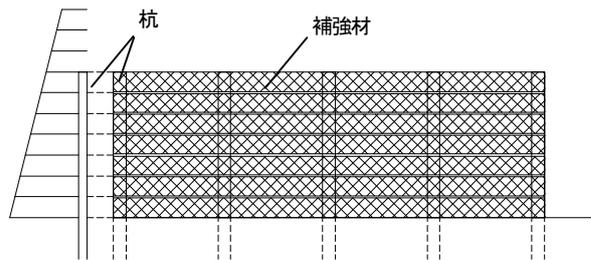


図-6 一体化のための追加補強材

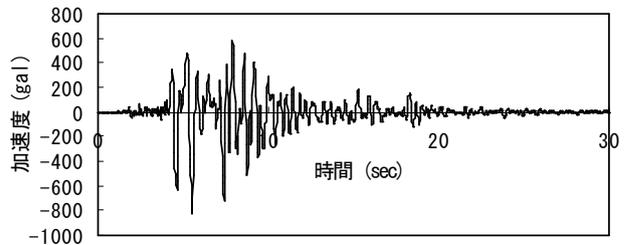


図-7 入力加速度

洋気象台NS波形（Amax=818 gal）とした。

(2) 実験結果

実験の結果得られた道路面の状況を写真-1に示す。これによると、杭を配置しない細幅補強土を設置した側の道路面は、クラックが多数路面に発生して大きな変状が確認された。これに対し、杭を配置した細幅補強土を設置した道路面は大きな変状が見られず、補強土に杭を配置する効果を確認することができた。このような効果を得る要因として補強土と杭の挙動に着目した場合、補強土前面変位の時刻歴と残留変位の状況を図-8, 9に示すが、杭を配置した補強土の変位が杭を配置しないものと比較して小さいことを確認することができる。図-10に杭に発生したひずみを示すが、杭には大きな応力が発生しており、杭を配置した補強土の応答変位を抑制するために杭が機能したことが確認できる。また、補強土背面に設置した土圧計の結果を図-11に示す。これによると、杭を配置した補強土は杭を配置しないものと比較して大きな土圧を支持していることが分かる。これに関連して、道路面に発生したクラックの位置から盛土内のすべり面を想定した場合、図-12に示すように杭を配置した補強土の背面は受働状態に近く、杭を配置しない補強土の背面は主働状態に近いことが想定され、この観点でも杭を

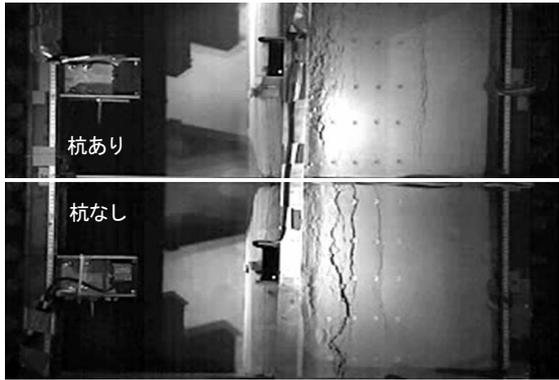


写真-1 加振後の道路面の状況

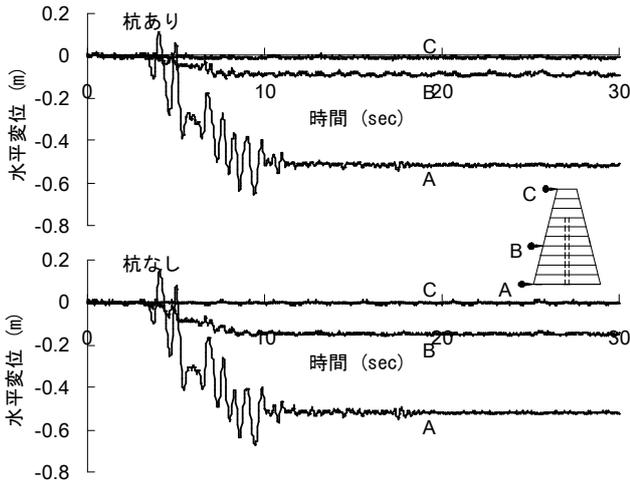


図-8 補強土前面の水平変位の時刻歴

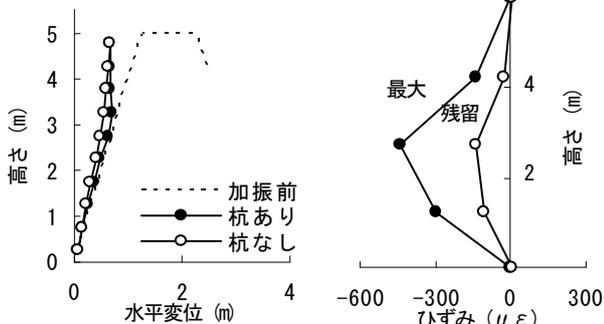


図-9 補強土前面の残留変位

図-10 杭のひずみ分布

配置した補強土の水平抵抗が、杭を配置しないものと比較して破格に向上していることが確認できる。

なお、補強土から杭へスムーズに荷重を伝達するため、各段に補強土延長方向に鉛直に杭に沿って設置した補強材に発生したひずみを図-13に示すが、補強材には大きなひずみが発生しており、ここで設置した補強材の有効性についても確認することができた。

補強土と杭との相互作用について、図-14には杭の変位と補強土の変位の時刻歴を示し、図-15には最大応答時と実験後の補強土と杭の変位分布を示す。これによると、杭と補強土はほぼ同位相で挙動すること、補強土は杭よりも変位は大きく残留するが、その高いダクティリティにより破壊せずに杭に荷重を伝達していることを確認することができた。

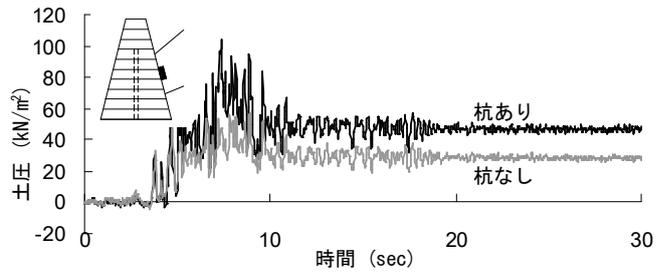


図-11 補強土背面土圧の時刻歴

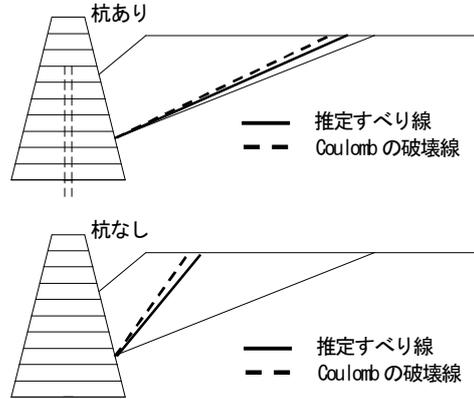


図-12 すべり面の仮定

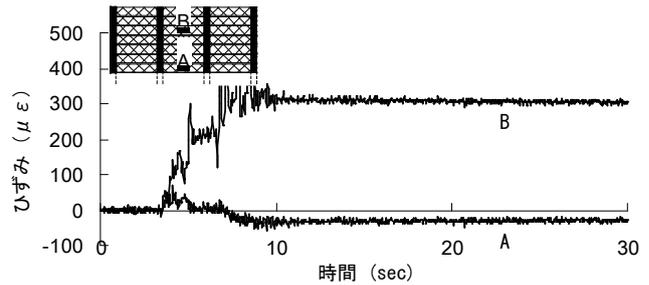


図-13 追加補強材のひずみの時刻歴

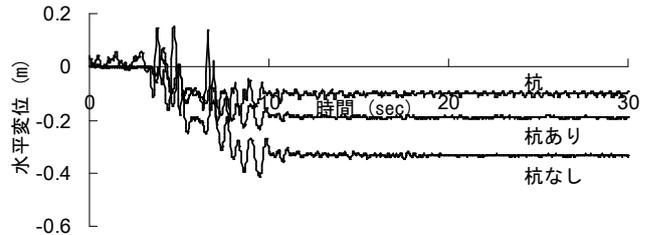


図-14 杭と補強土の変位の時刻歴

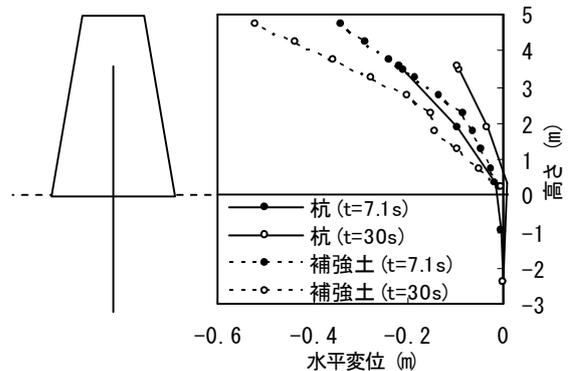


図-15 杭と補強土の変位分布

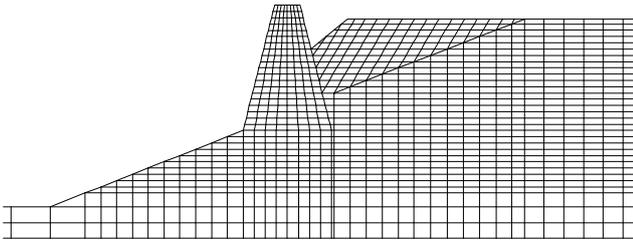


図-16 2次元FEM解析メッシュ

表-1 地盤パラメータ

	弾性係数 (kN/m ²)	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 (度)
斜面	3.26×10^5	55.0	0.0
盛土材	3.0×10^4	0.0	40.0

表-2 構造パラメータ

	弾性係数 (kN/m ²)	断面積 (m ²)	断面2次モーメント (m ⁴)
杭	2.0×10^8	4.79×10^{-5}	4.08×10^{-5}
補強材	8.0×10^5	1.0×10^{-3}	-

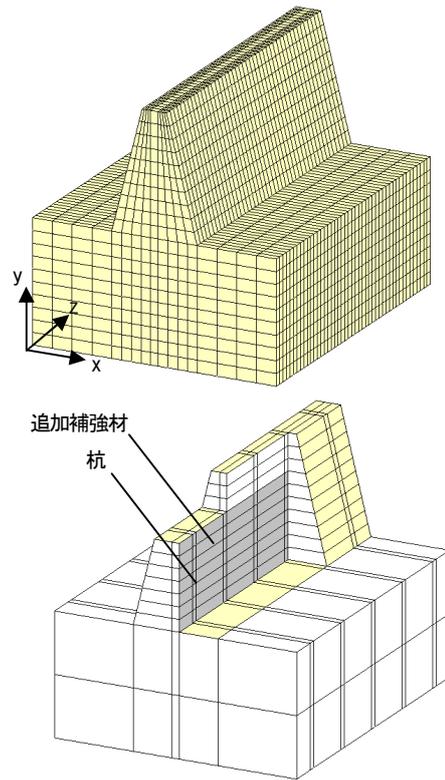


図-17 3次元FEM解析メッシュ

3. 実験結果のシミュレーション

(1) 杭の3次元効果

ここでは、解析により実験結果を再現し、今後のパラメトリックな検討を行うための基本モデルとするとともに、今後杭を用いた補強土の設計が可能なことを確認する。

解析は、今後の検討の簡便さと設計への適用性に配慮して2次元解析を用いることとし、動的弾塑性FEM解析により行った。この際のメッシュを図-16、解析パラメータを表-1と2に示す。なお、ここで杭の剛性は、後述する3次元効果を考慮した値を示している。

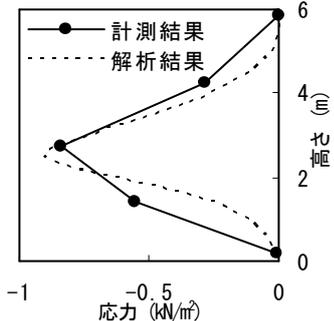


図-18 杭応力の再現結果

(2) 杭モデルの3次元効果

杭補強土に配置する杭は3次元構造物であるため、これを2次元解析で壁のようにモデル化する場合、杭の3次元効果を考慮してモデル化が必要がある。ここでは、この3次元効果を評価するモデルとして、静的3次元FEM解析の適用性について検討し、これが確認できた場合に静的な3次元と2次元の静的FEM解析から、動的2次元FEM解析における杭モデルの3次元効果を設定することとした。

杭モデルの3次元効果を評価する静的3次元FEMの適用性検討は、以下の手順で実施した。

- ① 図-17に示すように斜面、道路盛土、杭、および補強土と補強材を詳細にモデル化
- ② 補強土背面に補強土の慣性力と道路盛土の土圧を、杭のひずみを再現するよう载荷
- ③ このときの各段に設置した補強土延長方向に鉛直に杭に沿って設置した補強材のひずみについて解析値と実測値を比較
- ④ 補強材ひずみの解析値が実測値を再現する場合、解

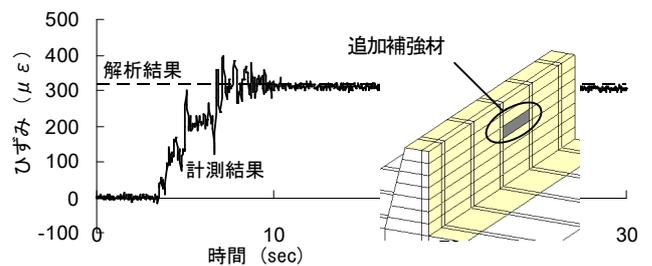


図-19 追加補強材の発生ひずみの解析と計測値との比較

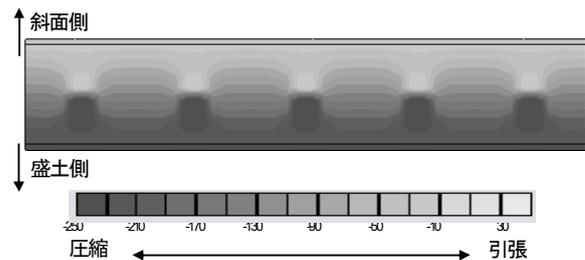


図-20 5層目の補強土内の応力分布

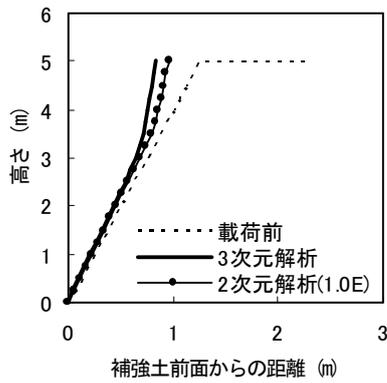


図-21 補強土変位分布の比較

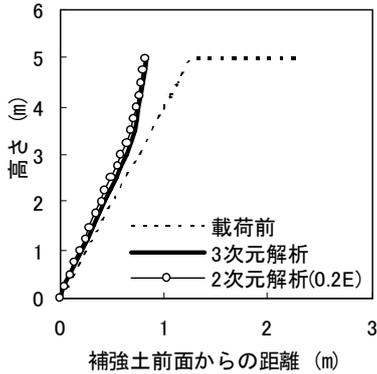


図-22 補強土変位分布の再現

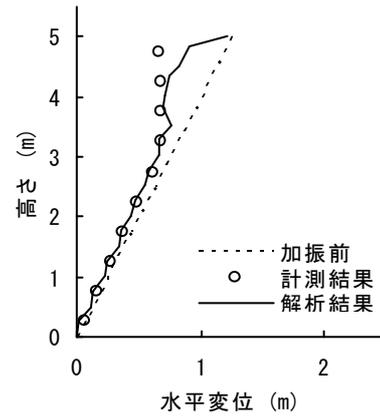


図-23 補強土の残留変位

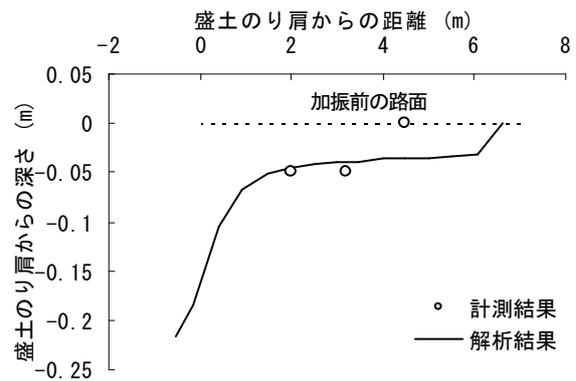


図-24 道路面の変状

析は3次元的な補強土と杭の相互作用を再現しており、静的な3次元と2次元の弾塑性FEM解析から、動的2次元弾塑性FEM解析で用いる杭の3次元効果を評価できるものとみなす

この結果として、杭の最大ひずみが発生する時刻のひずみ分布を盛土背面の荷重強度を調整して再現した結果を図-18に示す。また、この際の補強土延長方向に鉛直に杭に沿って設置した補強材のひずみの解析と計測結果の比較を図-19に示す。これによると、解析結果と計測結果がほぼ一致することを確認することができ、静的な3次元FEM解析であっても、動的な補強土体内の杭の3次元効果を再現できるものとみなすこととした。参考として、補強材のひずみを計測した断面での補強土体内の応力分布を図-20に示す。

次に、動的2次元解析での杭のモデル化を行うための3次元効果を確認するため、静的3次元FEM解析と同じ条件で杭を壁状にモデル化した静的2次元FEM解析を実施した。この際の補強土に生じる変位の2次元解析と3次元解析の比較を図-21に示す。これによると、2次元解析による杭の変位は、3次元解析のものと比較して約2倍となっている。これは、実際の構造物では、補強土が抵抗する部分と杭が抵抗する部分とがある(3次元効果)のに対し、杭を壁状にモデル化した2次元解析では全てを杭が負担するためであると考えられる。すなわち、2次元解析で杭を壁状にモデル化する場合の3次元効果は、補強土の変位が3次元解析と等価となるように杭の曲げ剛性を低減することにより仮定すればよく、今回のケースでは図-22に示すとおり杭の剛性を1/5とすれば

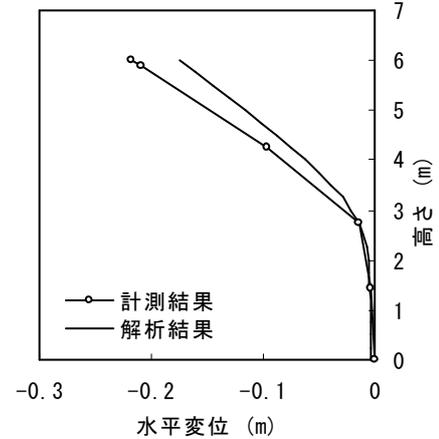


図-25 杭の変形

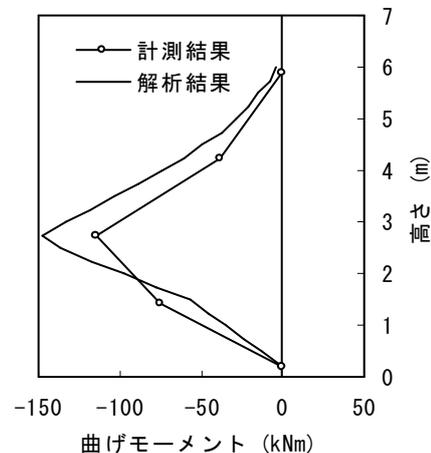


図-26 杭の曲げモーメント

よいと考えられた。

(3) シミュレーション結果

補強土の残留変位，道路盛土路面の変状，杭の最大応答変位と曲げモーメントの分布について，動的2次元FEM解析の結果と計測値を比較したものを図-23～図-26に示す。これらの結果によると，本解析は計測値を比較的良好に再現しており，先に仮定した3次元効果の評価アプローチの妥当性ととも，2次元解析で杭を用いた補強土の設計が可能であることを確認した。

4. 結論

本論文では，杭と補強土を一体化させた杭を有する補強土を開発し，斜面上の盛土の耐震対策としての適用性を検討した。動的遠心载荷模型実験（25G）と実験結果のシミュレーション検討で得られた結論を以下に示す。

① 補強土の水平抵抗を向上する観点で鋼杭基礎の適用

は，十分に実用的であり効果も高い

- ② 鋼杭基礎を用いた細幅補強土であっても，斜面上の道路盛土の耐震対策に適用した場合，地震後の道路路面の変状を抑制する上で効果的である
- ③ 鋼杭を用いた補強土の挙動とその効果は，2次元FEM解析により再現が可能である
- ④ この際の杭のモデル化に対する3次元効果について，一つの有効な評価アプローチを示した

参考文献

- 1) Hara, T., Tsuji, S., Yashima, A., Sawada, K. and Tatta, N.: Dynamic interaction between pile and reinforced soil structure, *Proceeding of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation (IS-Kyoto 2009)*, pp. 457-463, 2009.
- 2) Lee, G.: Development of a New Finite Element Program for Liquefaction Analysis of Soil and Its Application to Seismic Behavior of Embankments on Sandy Ground, Ph.D paper of Gunma University, 2000.

DYNAMIC CENTRIFUGE MODEL TEST ON PILED GEO-WALL

Takashi HARA, Shinichiro TSUJI, Atsushi Yashima and Naoki TATTA

This paper proposes a new application of pile foundation to reinforced soil structure by geogrid, in order to improve horizontal resistance of the structure. In this study, the effectiveness of the application and dynamic interaction between pile and reinforced soil structure were confirmed from the results of a dynamic centrifuge model test (25G), and a design method of the reinforced soil structure with using piles (Piled Geo-wall) was proposed through the numerical simulation of the experiment by using two dimensional dynamic FEM analysis.