

# Piled Geo-wallの設計

原隆史<sup>1</sup>・辻慎一郎<sup>2</sup>・吉田眞輝<sup>3</sup>

本研究は、RC構造物と同程度の規模の独立した補強土擁壁を実現し、建設事業におけるCO<sub>2</sub>排出量削減とコスト削減に資することを目的としている。これまでの研究では、実物大規模の静的水平載荷試験や衝撃載荷試験、および動的遠心模型実験などからその実用性を確認してきた。本論文では、これらの実験結果を再現し得る簡易な外的安定照査手法を提案しているので報告する。

キーワード：補強土，擁壁，杭

## 1. はじめに

ジオグリッドを用いた補強土は高いじん性を有しており、それ自体が独立した構造物を構築することも可能で、これまでも落石や雪崩の被害を防止する擁壁など、多方面で活用されている。特に状況によっては現地の土を用いて構築できるため、経済的でCO<sub>2</sub>排出量削減の観点でも有効なため、合理的な構造物としてその適用は増加している。しかしながら、これまでは直接基礎で構築されることが多く、山岳道路脇など施工用地が狭いところでは適用が困難な場合も少なくなかった。このため、幅の狭い独立した補強土擁壁が実現すれば、その適用はさらに拡大されるとともに、建設事業におけるCO<sub>2</sub>排出量削減とコスト削減の観点での大きく貢献できるものと期待される。

そこで本研究では、図-1に示すように補強土体内部へ杭を挿入した新たな細幅補強土擁壁（Piled Geo-wall）を開発している。

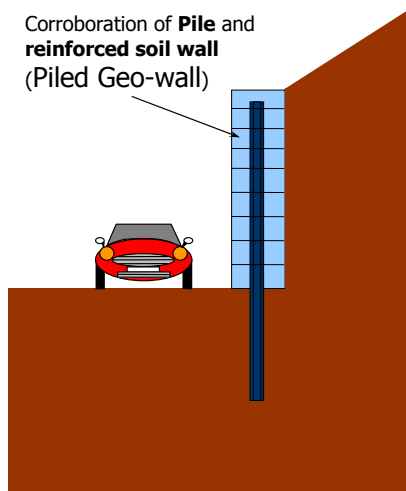


図-1 Piled Geo-wall のイメージ

これまでの研究では、実物大規模の静的水平載荷試験<sup>1</sup>や衝撃載荷試験<sup>2</sup>、および動的遠心模型実験<sup>3</sup>などからその実用性を確認してきた。本論文では、これらの実験結果を再現し得る簡易な外的安定照査手法を提案しているので報告する。

## 2. 基本的な外的安定照査モデル

本研究では、Piled Geo-wallの簡易な設計照査手法として、実務設計で用いられることの多い2次元はりバネモデルによる提案を試みた。ここで、Piled Geo-wallは「補強土体と杭との相対変位は大きくとも、じん性の大きな補強土体は荷重を杭に伝達する（図-2）」といった仮定のもとに開発しているため、2次元はりバネモデルによる設計では、杭と補強土体の応答をそれぞれに推定する必要があり、図-3に示すモデルを提案した。

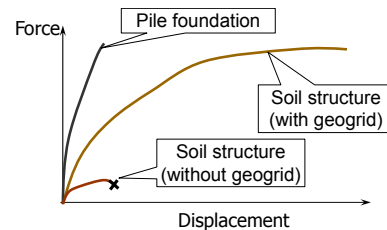


図-2 Piled Geo-wallの杭と補強土体との相互作用の仮定

$$K_H = k_h \cdot D \cdot l_v \quad (1)$$

$$K_{VG} = k_v \cdot A_G \quad (2)$$

$$K_{SG} = 1/3 \cdot k_v \cdot A_G \quad (3)$$

$$S_{\max} = c \cdot A_G + \sigma \cdot \tan \phi \quad (4)$$

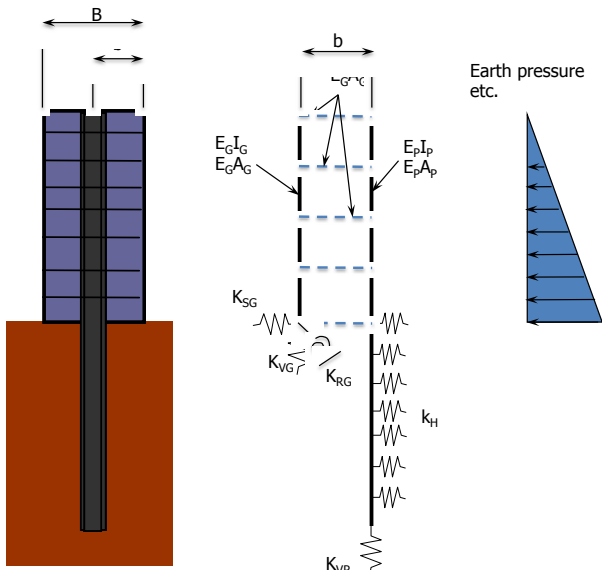
$$K_{RG} = k_v \cdot b \quad (5)$$

<sup>1</sup>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）

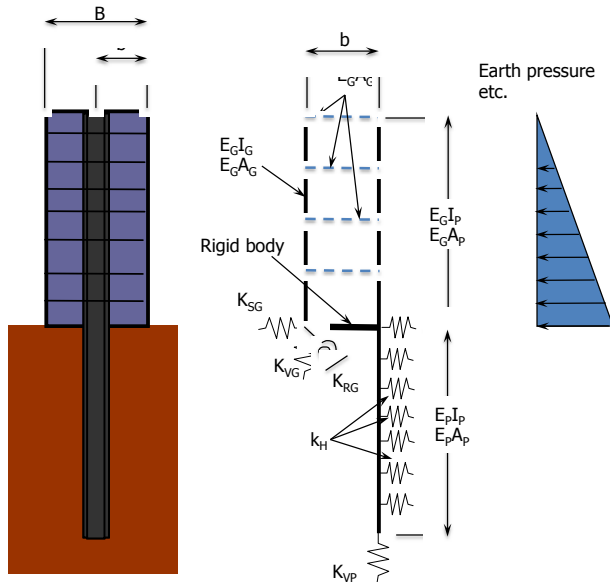
<sup>2</sup>正会員，前田工織株式会社 技術部（〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3）

<sup>3</sup>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）

$$K_{VP} = k_v \cdot A_p \quad (6)$$



(a) 杭応答の推定モデル



(b) 補強土体応答の推定モデル  
図-3 基本的な外的安定照査モデル

ここで、 $E_P I_P$ 、 $E_G I_G$ ：杭と補強土体の曲げ剛性 ( $\text{kNm}^2/\text{m}$ )、 $E_P A_P$ 、 $E_G A_G$ ：杭と補強土体の圧縮剛性 ( $\text{kNm}^2/\text{m}$ )、 $E_G I_P$ ：杭の曲げ剛性を考慮しない範囲、 $K_H$ ：式 (1) から計算される受働土圧を上限値とした弾完全塑性水平方向地盤反力バネ定数 ( $\text{kN/m}$ )、 $l_v$ ：深さ方向の単位長さ (1.0m)  $K_{VG}$ ：式 (2) から計算される極限支持力を上限値とした弾完全塑性鉛直方向地盤反力バネ定数 ( $\text{kN/m}$ )、 $K_{SG}$ ：式 (3) と (4) から計算される補強土体底面の極限水平支持力を上限値とした弾完全塑性水平方向地盤反力バネ定数 ( $\text{kN/m}$ )、 $K_{RG}$ ：式 (5) から計算される極限支持力を上限値とした弾完全塑性回転バネ定数 ( $\text{kN/rad}$ )、 $K_{VP}$ ：式 (6) から計

算される杭の先端極限支持力を上限値とした弾完全塑性鉛直バネ定数 ( $\text{kN/m}$ )、 $k_h$ 、 $k_v$ ：道路橋示方書下部構造編で計算される常時および地震時の水平/鉛直地盤反力係数 ( $\text{kN/m}^3$ )、 $D$ ：杭径 (m)、 $A_G$ 、 $A_P$ ：補強土体と杭の断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $c$ 、 $\phi$ ：地盤の粘着力とせん断抵抗角 ( $\text{kPa}$ ,  $\text{rad}$ )。

### 3. 提案モデルの実用性

#### (1) 抗土圧構造物 (常時)

実物大規模 Piled Geo-wall の水平載荷試験の概要を図-4 に示す。ここでは、提案モデルによる当該実験の再現性から、抗土圧構造物の常時設計への提案モデルの実用性を検証する。また、同図には当該現場における地盤条件として、動的貫入試験を標準貫入試験の N 値に換算した柱状図を示すが、ここでの検証では試験体に近い PD-2 のデータから推定した地盤物性値を用いている。

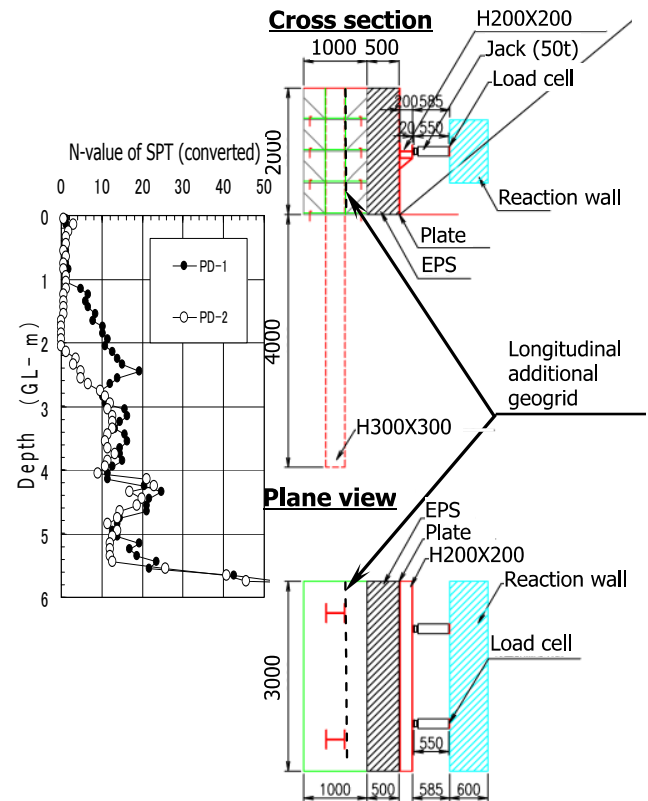


図-4 静的水平載荷試験の概要

図-5 に荷重と Piled Geo-wall 天端の変位との関係について、計算値と実測値とを比較した結果を示す。この図において、GW は補強土体天端中央部の変位を示しており、Pile は杭の天端の変位を示している。また、図-6 には杭の最大応答に対する計算値と実測値との比較を示す。

これらの結果によれば、計算値は実測値を比較的良好に再現しており、提案モデルの抗土圧構造物の常時設計に対する実用性は高いものと考えられた。

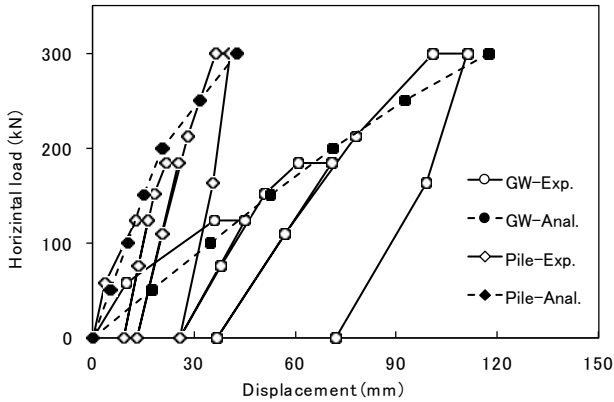


図-5 杭と補強土体との相対変位

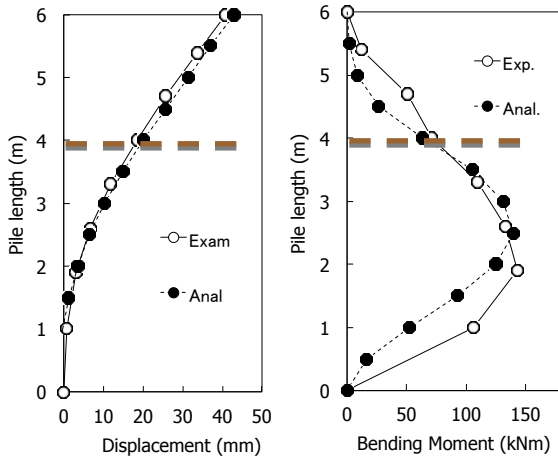


図-6 杭の最大応答

(2) 抗土圧構造物 (地震時)

Piled Geo-wall の動的遠心模型実験 (25G) の概要と入力地震動を図-7, 8 に, 地盤と構造のパラメータを表-1, 2 に示す. ここでは, 提案モデルによる当該実験における Piled Geo-wall の応答の再現性から, 抗土圧構造物の地震時設計への提案モデルの実用性を検証する.

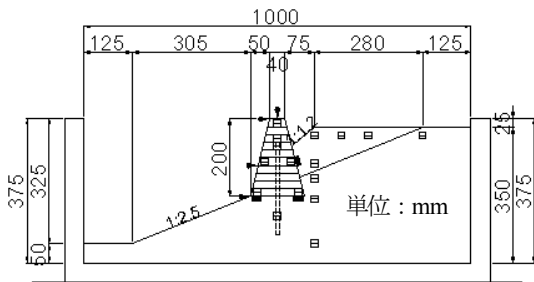


図-7 動的遠心模型実験 (25G)

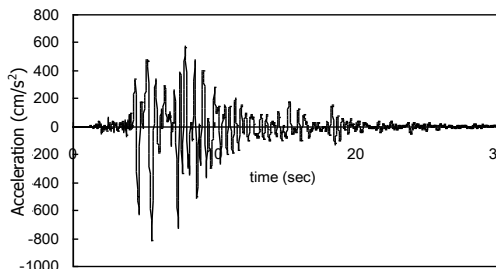


図-8 入力地震動

表-1 地盤パラメータ

	$E_0$ (kPa)	$c$ (kPa)	$\phi$ (deg)
Slope	$3.26 \times 10^5$	55	0
Embankment	$3.0 \times 10^4$	0	40
Geo-wall	$3.0 \times 10^4$	0	40

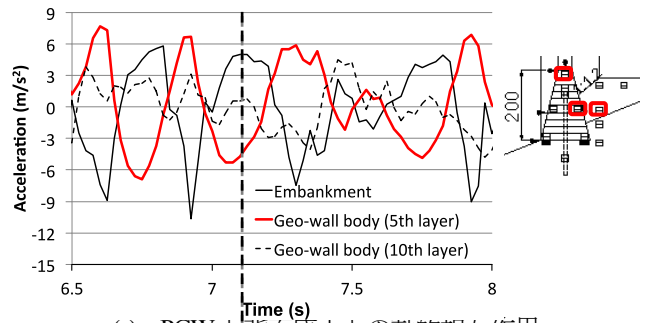
$E_0$ : deformation modulus,  $c$ : cohesion,  $\phi$ : shear resistance angle

表-2 構造パラメータ

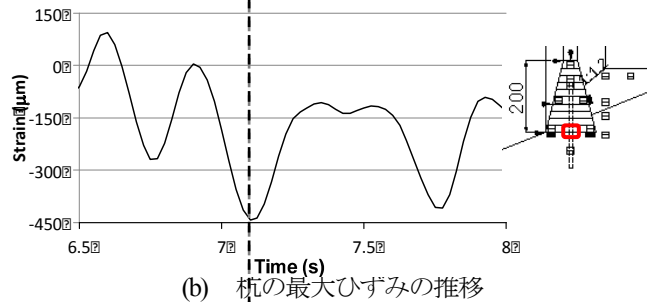
	$E$ (kPa)	$A$ (m <sup>2</sup> /m)	$I$ (m <sup>4</sup> )
Pile	$2.0 \times 10^8$	$4.79 \times 10^3$	$2.04 \times 10^4$
Geogrid	$8.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^3$	-

$E$ : ヤング係数,  $A$ : 断面積,  $I$ : 断面2時モーメント

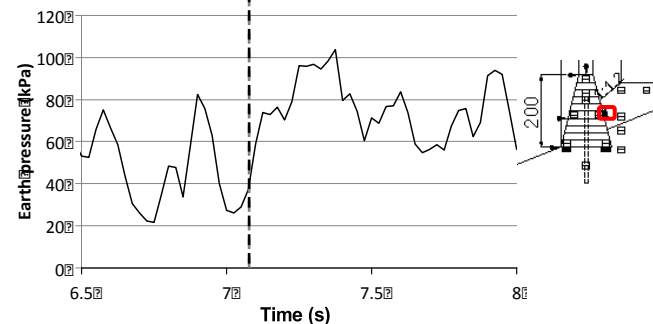
静的解析で動的な挙動を推定する場合には, 動的相互作用の影響を設計に反映する必要があるため, Piled Geo-wall と背面盛土の動的相互作用, 杭の最大ひずみと背面土圧の推移を図-9 に示す.



(a) PGW と背面盛土との動的相互作用



(b) 杭の最大ひずみの推移

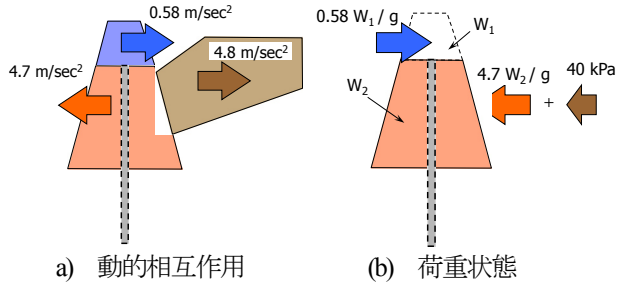


(c) 背面土圧の推移

図-9 動的挙動

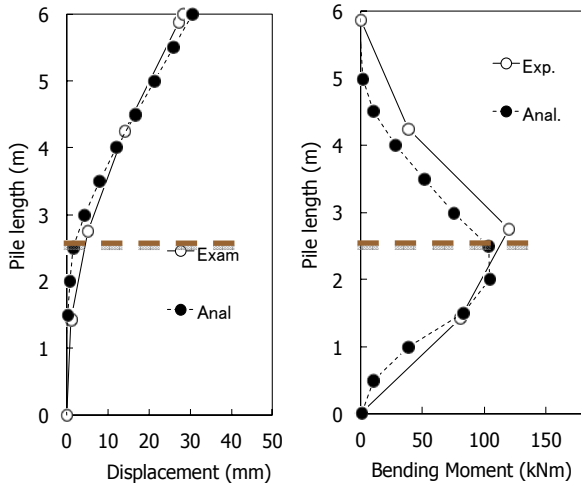
この結果によると, 補強土体 5 層目 (杭が貫入されている部分) と補強土体 10 層目 (杭のない部分) や背面

盛土は逆位相となっていることが確認される。また、杭の最大応答が得られている時刻の慣性力や土圧は、**図-10**の状態となっていることも確認される。この図中、 $W$ は重量を、 $g$ は重力加速度を表している。



**図-10** 設計状況

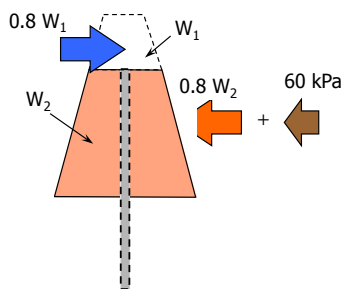
**図-11** に、ここで確認した設計状況により提案モデルで計算した杭の最大応答と計測値との比較を示す。この結果によれば、提案モデルは実測を比較的良好に再現しており、抗土圧構造物の地震時設計においても、提案モデルの実用性は高いものと考えられた。



**図-11** 杭の最大応答

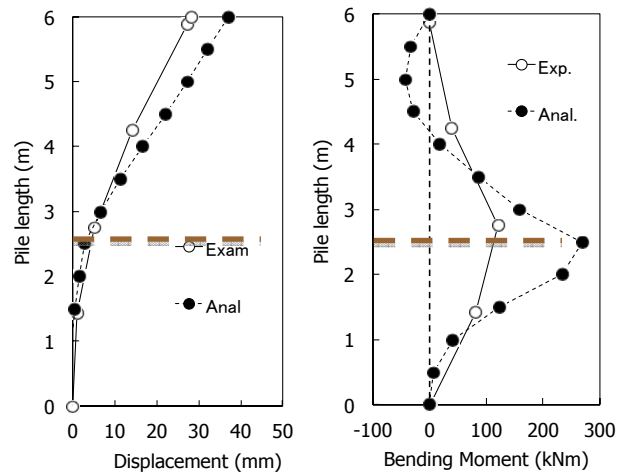
なお、設計実務においては、設計段階で動的相互作用や実際の荷重状態を知ることは困難であり、例えば道路橋示方書の耐震設計編によれば、I種地盤に構築される対象実験モデルでの設計震度 ( $kh$ ) は 0.8、設計土圧は式 (7) で推定され、結果として**図-12** に示す大きな設計荷重により設計されることとなる。

$$K_{EA} = 0.26 + 0.97 \cdot kh \quad (7)$$

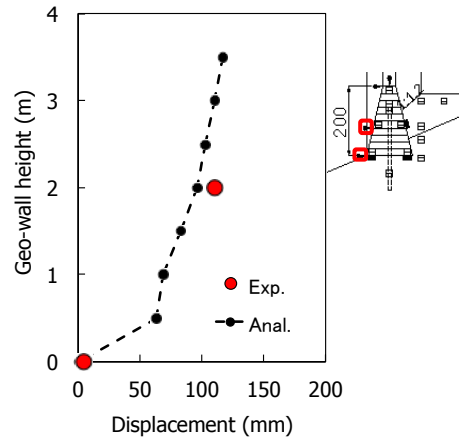


**図-12** 設計状況

これに関し、現行の耐震設計が Piled Geo-wall の設計成果に及ぼす影響を確認する観点で、この大きな設計荷重を用いて提案モデルで計算された杭の最大応答と実測値との比較を**図-13** に示す。この結果によれば、計算値は当然のことながら実測値よりも大きく得られ、1ランク大きな杭が設計されることが確認された。ただし、設計段階で実態挙動を確認できない以上それはやむを得ないことであり、1ランクアップは Piled Geo-wall のコンクリート構造と比較した経済的な有効性の点でも許容の範囲内であると考ええる。また、この際の提案モデルで推定した補強土体の変形と実測値の比較を**図-14** に示すが、この場合には当該設計状況で計算結果は比較的良好に実測値を再現している。



**図-13** 杭の最大応答



**図-14** 補強土体の最大応答

### (3) 道路盛土の耐震対策

ここでは、**図-8** に示した動的遠心模型実験 (25G) における道路面の変状量に対し、提案モデルを用いた計算結果の実測値の再現性により、道路盛土耐震対策として Piled Geo-wall を用いる場合の提案モデルの実用性について検証する。動的遠心模型実験 (25G) における道路面の変状は、**図-15** に示す 20 点のマーカースに対し実験後の残留変状量を計測している。提案モデルを用いた路面の変状量の推定は、**図-14** に示した提案モデルで得られた補強土体の変形を強制変位として**図-16** に示す FEM

モデルへ入力して推定することとした。

この結果得られた道路面の変状量の計算値 (Exp.) と実測値 (Anal.) との比較を図-17 に示す。この結果によると、計算値は実測沈下量を概ね網羅しており、道路盛土の耐震対策として Piled Geo-wall を用いる場合でも提案モデルの実用性は高いものと考えられた。

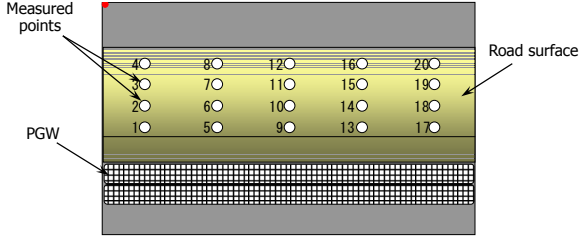


図-15 道路面変状の計測点

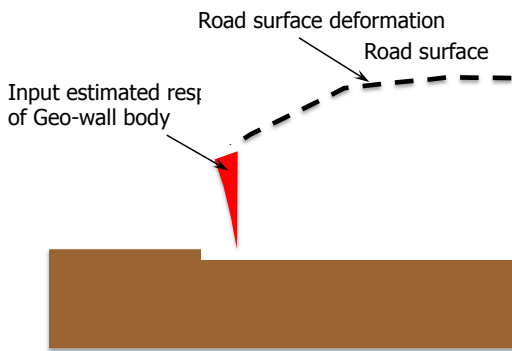


図-16 道路面変状の推定

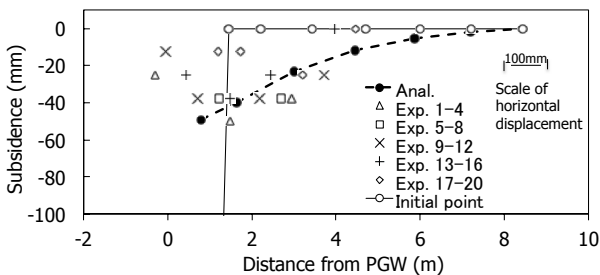


図-17 道路面の変状

#### (4) 落石防護擁壁

実物大規模の Piled Geo-wall を用いた衝撃载荷試験の概要を図-18 に示す。ここでは、提案モデルによる当該実験における Piled Geo-wall の応答の再現性から、落石防護擁壁への提案モデルの実用性を検証する。なお、衝撃载荷試験では、静的载荷試験で用いた杭を補強土体の中央へ配置した図-4 に示すモデル (PGW-1 と呼称) のほか、杭を外側に配置した図-19 に示すモデル (PGW-2 と呼称) の2モデルについて実験を実施した。

また、本研究における衝撃荷重の静的荷重評価の手順を図-20 に示す。ここで、正弦半波に基づく最大静的荷重 ( $P_{max}$ ) は式 (8) により、重錘の補強土体へ衝突する初期速度 ( $V_0$ ) は式 (9) からそれぞれ推定する。

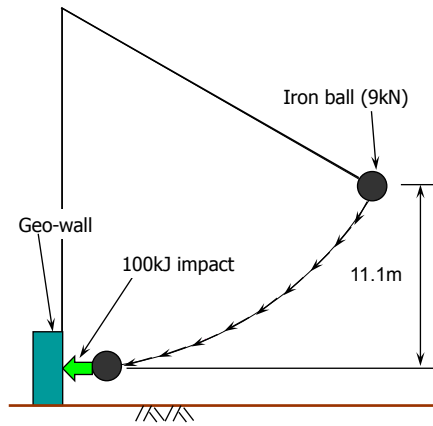


図-18 衝撃载荷試験

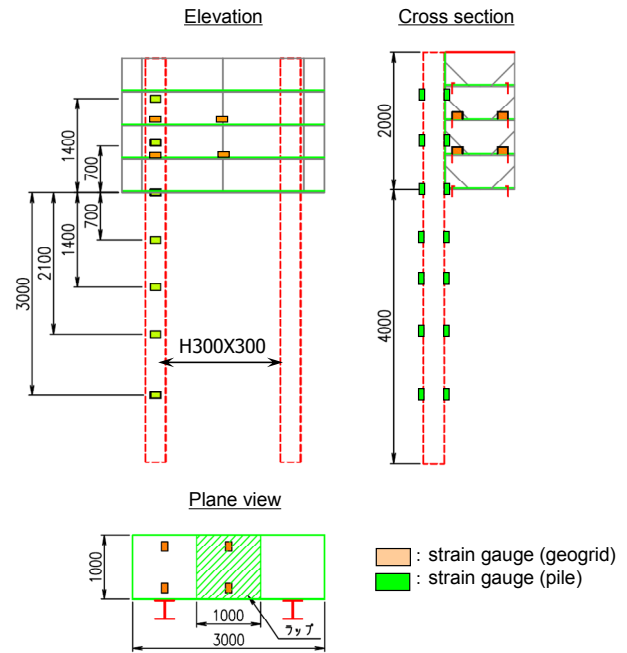


図-19 PGW-2の構造と計測

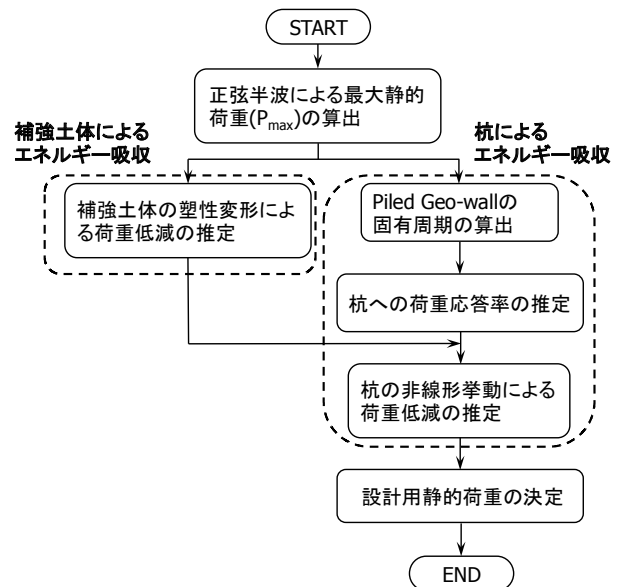


図-20 衝撃荷重の静的荷重換算の流れ

$$P_{\max} = \frac{\pi \cdot m \cdot V_0}{T} \quad (8)$$

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (9)$$

ここで、 $T$  : PGW による衝撃保持時間 (sec) で実験結果から 0.07 sec と仮定、 $g$  : 重力加速度、 $h$  : 落石 (重錘) の落下高さ (m)

補強土体と杭との基本的なエネルギー吸収分担は、杭が分担するものを杭の変位から提案モデルによる逆解析で推定し、全荷重によるものからこれを差し引いたものを補強土体が分担するものとした。ここで、杭の分担における衝撃保持時間と Piled Geo-wall の固有周期から定まる荷重応答率は、既往の研究成果<sup>4)</sup>より推定した。また、杭の非線形挙動に伴うエネルギー吸収は等価エネルギー法から仮定した。

このように推定した静的荷重に対する PGW-1, 2 それぞれの最大応答の提案モデルによる計算値と実測値との比較を図-21, 22 に示す。この結果によると、計算値は実測値を比較的良好に再現しており、落石擁壁へ Piled Geo-wall を用いる場合でも提案モデルの実用性は高いものと考えられた。

なお、杭の変位に伴う荷重低減を提案モデルによる逆解析から推定しているため、杭頭変位の再現性が高いのは当然のことだが、最大曲げモーメントや変位を含めた深さ方向の分布を再現していることは、提案モデルの再現性の高さを示しているものと考えている。

#### 4. まとめ

Piled Geo-wall の簡易な外的安定照査モデルを提案し、実験結果の再現性よりその実用性を検証した。今後は提案モデルの汎用性について課題は残すものの、Piled Geo-wall の実用化に向けて前進できたと考えている。

#### 参考文献

1) 原隆史, 辻慎一郎, 吉田真輝 : Piled Geo-wall の静的水平抵抗特性, ジオセティックス論文集, 第25巻, pp.203-208, 2010.12.

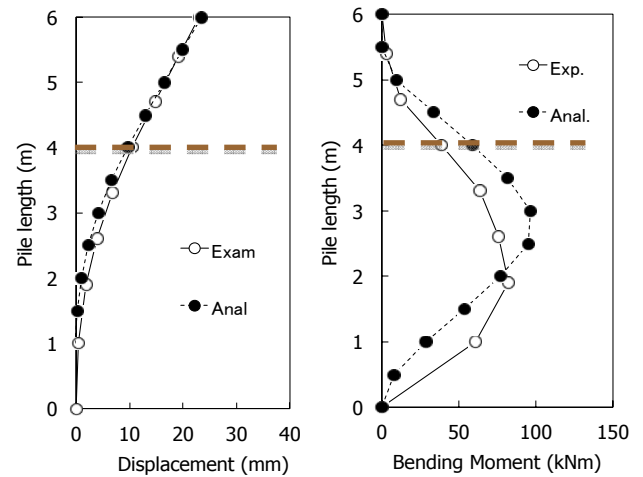


図-21 杭の最大応答 (PGW-1)

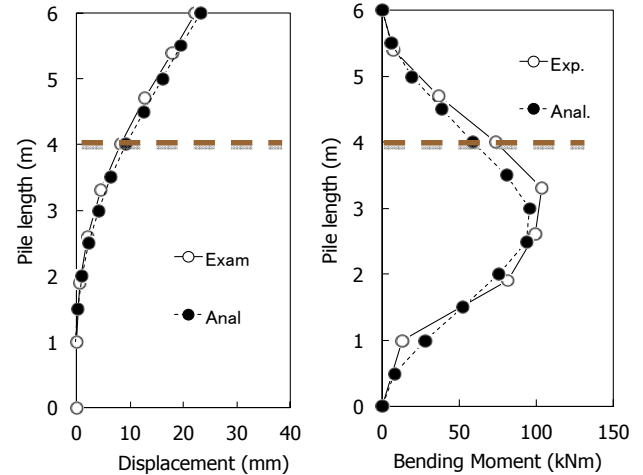


図-22 杭の最大応答 (PGW-2)

- 2) 辻慎一郎, 原隆史, 伊東修二, 吉田真輝 : Piled Geo-wall の落石防護擁壁への適用, ジオセティックス論文集, 第25巻, pp.209-212, 2010.12.
- 3) 原隆史, 辻慎一郎, 八嶋厚, 竜田尚希 : 杭を有する補強土壁の動的遠心模型実験, ジオセティックス論文集, 第24巻, pp.257-262, 2009.12.
- 4) Clough RW and Penzien J, "Dynamics of structures," McGraw-Hill, p.80, 1975.

## DESIGN ON PILED GEO-WALL

Takashi HARA, Shinichiro TSUJI and Masaki YOSHIDA

This study aims to achieve a new type of independent reinforced soil wall (Piled Geo-wall) that can be substitute for one made up of concrete with similar scale, and to contribute to sustainable development. In order to confirm the practicability of the novel structure, three experimental studies with static and impact loading tests and a dynamic centrifuge model test were carried out in the past years. Simple design methods of the novel structure, which can reproduce the results of the experiments, are introduced in this paper.