

Piled Geo-wall (杭を用いた補強土擁壁)の 静的水平抵抗特性

原隆史¹・辻慎一郎²・吉田眞輝³・伊藤修二⁴

本研究では、狭小地でも適用可能な細幅の補強土擁壁の実現を目的として、杭を用いた補強土擁壁 (Piled Geo-wall) の開発を行っている。過年度では、補強土擁壁を斜面上の道路盛土の耐震対策として用いた場合の杭の有無の差異、すなわち補強土擁壁の水平抵抗増加に及ぼす杭の適用効果を動的遠心模型実験により確認している。そこで本論文では、実物大のPiled Geo-wallを構築して静的水平載荷試験を行い、Piled Geo-wallの基本的な水平抵抗特性を確認したので報告する。また、この結果は、弾塑性はり-バネモデルで再現し、Piled Geo-wallを抗土圧構造物に適用する際的设计法として取りまとめたので、合わせて報告する。

キーワード：杭，補強土，擁壁

1. はじめに

補強土は大きなじん性を有しており、コンクリート擁壁のように独立した構造物を土で構築することも可能で、これまでも落石防護擁壁などに活用されている。また、状況に応じて現場の土を用いて構築することも可能なため、合理的な構造物として多方面でその適用が増加している。しかしながら、これまで独立した補強土擁壁 (Geo-wall) は、直接基礎で構築されてきたことから、幅の広い断面が計画され、道路脇などの狭隘な箇所への適用は困難な場合も少なくなかった。

そこで本研究では、補強土の持つ大きなじん性に着目し、杭を用いた細幅補強土擁壁 (Piled Geo-wall) の実現について研究している。ここで、水平抵抗増加における補強土と杭との相互作用としては、図-1に示すように、杭と土構造物 (補強土) のひずみレベルの違いより相対変位は大きくなるものの、じん性に富む補強土は杭に荷重を伝達できることを仮定したものである。過年度では、補強土擁壁を斜面上の道路盛土の耐震対策として用いた場合の杭の有無の差異、すなわち補強土擁壁の水平抵抗増加に及ぼす杭の適用効果を動的遠心模型実験により確認した¹⁾。今年度は、細幅補強土の水平抵抗増加における杭の適用効果とPiled Geo-wallの基本的な水平抵抗特性を確認することを目的とし、実物に近い規模の模型細幅補強土擁壁 (杭を用いたPiled Geo-wallと杭を用いないGeo-wall) を構築し、静的水平載荷試験を実施した。

本論文では、静的水平載荷試験の概要を報告するとともに、ここで得られたPiled Geo-wallの水平抵抗特性と

これを簡易に再現し得る設計モデルについて述べる。

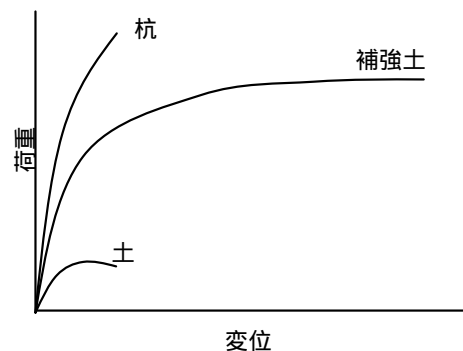


図-1 補強土と杭の相互作用

2. 静的水平載荷試験

(1) 実験概要

ここで構築した実物に近い規模の模型細幅補強土擁壁 (杭を用いたPiled Geo-wallと杭を用いないGeo-wall) の構造を図-2に、現場の地盤状況としてN値に換算した動的貫入試験の結果を図-3に示す。地盤は砂質シルトで、地表が軟弱な埋土に覆われており、地山は傾斜している杭のない模型を作成した方が高く (PD-1)、杭を用いた模型側は低い (PD-2)。ここへ長さ6mのH鋼杭 (H300×300×10×15) を地表から4m打設した。Piled Geo-wallの施工上の特徴として、杭を打設した後に補強材を敷設するが、この際にはあらかじめ杭部に開口部を設けた補強材を、杭を通す形で図-4に示すように設置する。

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，前田工織株式会社 地盤防災推進部 (〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3)

⁴正会員，前田工織株式会社 地盤防災推進部 (〒919-0422 福井県坂井市春江町沖布目38-3)

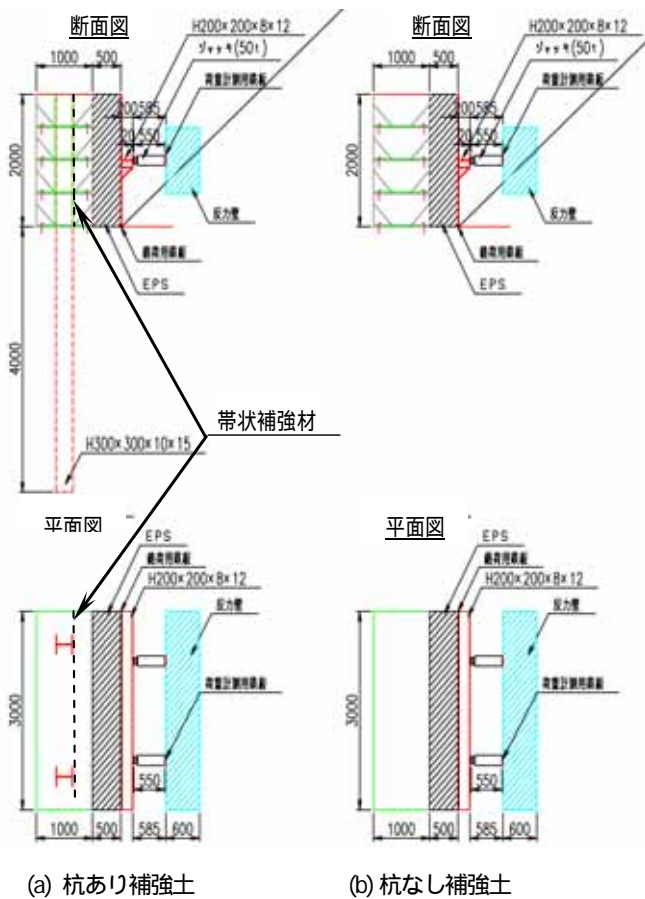


図-2 模型細幅補強土擁壁の構造

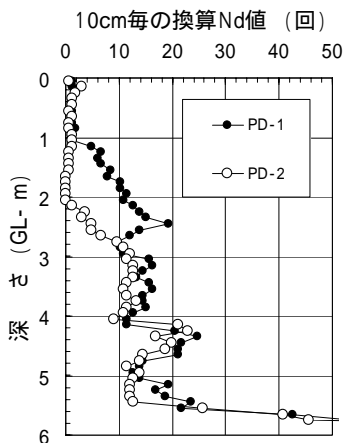


図-3 動的貫入試験結果 (N値換算)



図-4 杭部の補強材の設置

また、Piled Geo-wallの特徴である杭と補強土体との一体化を促す、補強土各層に杭に沿って延長方向に設置する帯状補強材を図-5に示すように設置する。本実験モデルでは、これらの補強材は、図-6に示す引張り特性を有するジオグリッドを用いている。補強土 (H=2.0m) は、鋼製壁面材 (エキスパンドメタル) を用いて、層厚0.5mの4段で構築した。完成時の外観を図-7に示す。



図-5 帯状補強材の設置

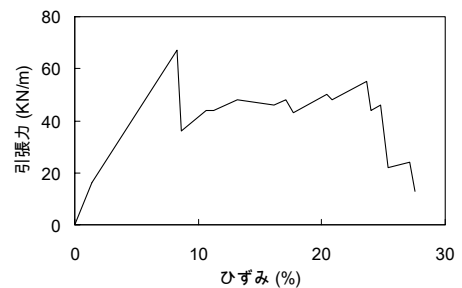
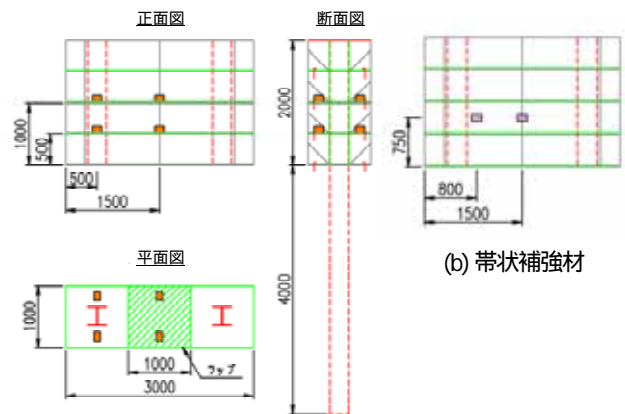


図-6 補強材の引張り特性



図-7 試験模型の外観



(a) 一般補強材

図-8 補強材ひずみの計測

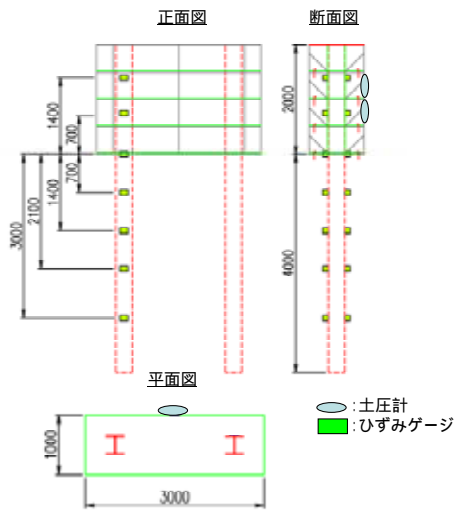


図-9 杭のひずみゲージと背面の土圧計

図-8, 9に一般補強材, 帯状補強材, 杭のひずみ計測箇所と補強土体に作用する土圧の計測箇所について示す。

(2) 実験結果

図-10に, 荷重(転倒モーメント)と補強土体頭部の変位との関係を示す。ここで, 縦軸を転倒モーメントとしているのは, 異なる高さの擁壁土圧との比較を行うためである。ただし, 本実験では高さ1mの位置にジャッキで載荷しているため, 値としては荷重と転倒モーメントは等価である。

この結果によると, 杭を用いない細幅補強土擁壁は, 高さ2mの擁壁相当の荷重で大きな変位が発生して転倒傾向を示している。この点については, 図-3で示したように擁壁基礎地盤が軟弱で, 十分な支持力が得られなかったことが主な要因であると考えられる。すなわち, 当該現場において, 直接基礎で補強土擁壁を構築する場合には, やはり相当に幅の広い構造とする必要がある。これに対し, 杭を用いた細幅補強土は, 高さ4mの擁壁相当の荷重を受けてもなお耐力は増加傾向にあり, Piled Geo-wallの高い抵抗特性を確認することができた。このことは, 擁壁の実用的な許容変位が50mm程度と仮定しても, ここでの模型擁壁の幅1.0mでも高さ4m程度までは適用が可能であり, 杭を用いた細幅補強土擁壁の実用性を確認したものである。

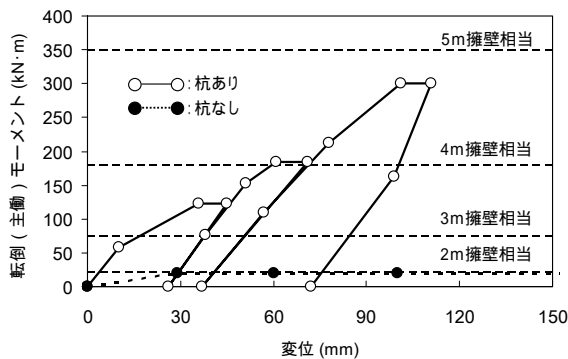
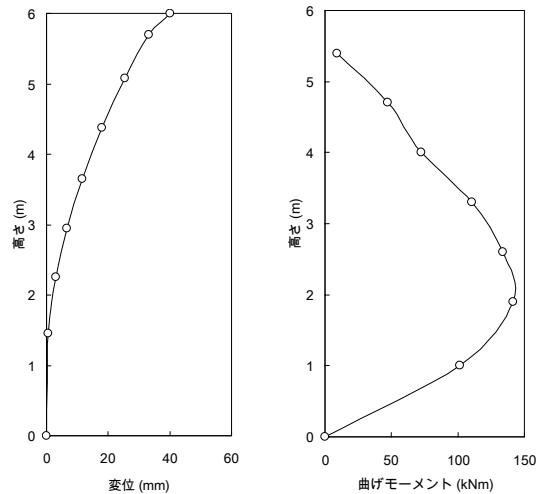


図-10 転倒モーメントと擁壁変位との関係

杭の変位と曲げモーメントの深さ方向の最大応答分布を図-11に示す。この結果によると, 地表面から深さ2m近傍の地山表面箇所で最大モーメントが発生しており, 杭は補強土体からの荷重を受け, 細幅補強土の水平抵抗増加に機能していることが分かる。



(a) 最大変位分布 (b) 最大モーメント分布

図-11 杭の最大応答値

一般補強材と帯状補強材の最大ひずみを表-1と2に示す。この結果によると, 一般補強材に発生しているひずみは, 使用補強材の許容ひずみ5%に対し最大でも0.034%と小さく, 水平抵抗にはほとんど機能していないものと考えられた。ここで, 一般補強材のひずみが負(圧縮)となっている計測結果については, 本来, 圧縮に抵抗しない補強材に対し, 補強土各層間のずれの発生によりひずみゲージが反応したのと考えられる。このような一般補強材に対し, 帯状補強材には大きな引張りひずみが発生しており, 補強土体が受けた荷重を杭へ伝達する過程で機能していることを確認した。

表-1 一般補強材に発生した最大ひずみ

層位置	載荷方向位置	縦断方向位置	
		杭近傍	杭間
第2層	載荷側	(-0.061%)	(-0.204%)
	反載荷側	0.033%	0.014%
第3層	載荷側	(-0.119%)	(-0.276%)
	反載荷側	0.034%	0.088%

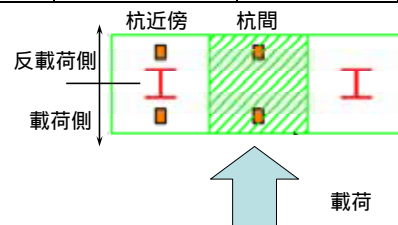


表-2 帯状補強材に発生した最大ひずみ

層位置	縦断方向位置	
	杭近傍	杭間
第2層	1.336%	0.396%

図-12に各補強土体の残留変位を示す。これによると、杭のない補強土は一体として転倒傾向にあり、杭を用いた補強土は杭とともに地表面での変位は小さく、断面内の変位が卓越しており、杭と補強土体との一体化が機能していることが分かる。ただし、杭を用いた補強土体では、杭部分と杭間で相対変位が発生している。これをさらに明らかとするため、補強土体天端近傍の縦断方向変位に着目したものを図-13に示す。また、載荷試験終了後に完全除荷した状態での補強土体天端において、杭と補強土体との間に発生した隙間を図-14に示す。これら相対変位の発生は、杭と補強土体とのひずみレベルの違いに原因があり、それでもじん性の大きな補強土体は杭へ荷重を伝達できるとした、図-1に示した補強土体と杭との相互作用の仮定の妥当性を確認した。

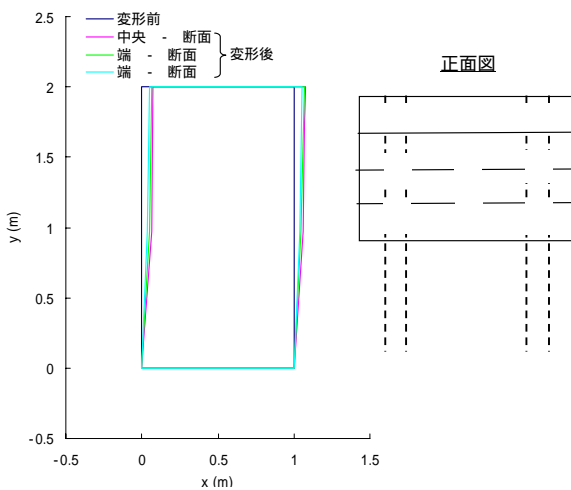
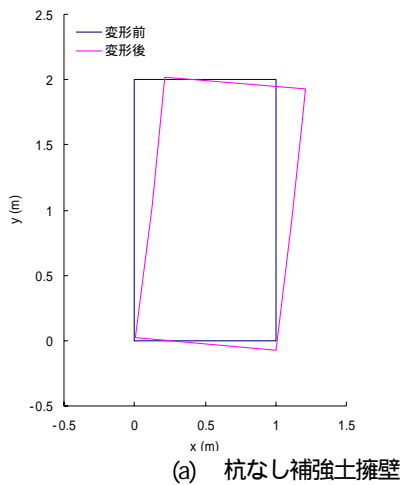


図-12 補強土体の残留変位

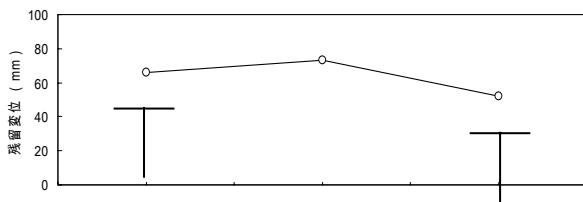


図-13 補強土体天端近傍(, ,)の残留変位



図-14 補強土体天端の除荷後の杭と補強土との隙間

3. 簡易な設計モデルの提案

水平載荷試験の結果を比較的簡易に再現する、外的安定と内的安定の設計モデルについて検討したので、以下に示す。

(1) 外的安定

外的安定は、弾塑性床上の梁として図-15に示すモデルを仮定した。

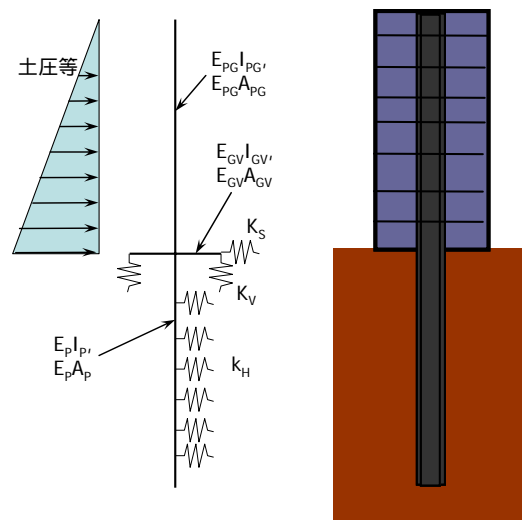


図-15 外的安定照査モデル

ここで、 $E_p I_p$ ：杭の曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， $E_p A_p$ ：杭の圧縮特性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， $E_{PG} I_{PG}$ ：杭と補強土との一体化を考慮した曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， $E_{PG} A_{PG}$ ：杭と補強土との一体化を考慮した圧縮特性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， $E_{GV} I_{GV}$ ：補強土の鉛直断面を考慮した仮想はりの曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， $E_{GV} A_{GV}$ ：補強土の鉛直断面を考慮した仮想はりの圧縮特性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)， k_H ：水平方向地盤反力弾完全塑性バネ (kN/m)， K_V ：補強土壁の鉛直方向支持弾完全塑性バネ (kN/m)， K_S ：補強土下面の滑動抵抗に係る弾完全塑性バネ (kN/m)である。なお、ここでは考えられる抵抗をすべて考慮できるようにモデル化しているが、基礎地盤の支持力が期待できない場合には、 K_V は考慮しない。

ここでの計算モデルを用いた水平載荷試験での荷重と

補強土体天端変位との関係の比較を図-16に示す．この結果によると、今回の荷重試験では途中から耐力が急に増加しており、この点については再現できていないものの、変位が50mm程度までの実用的な範囲では、比較的良好に荷重と変位の関係を再現していると考えられる．

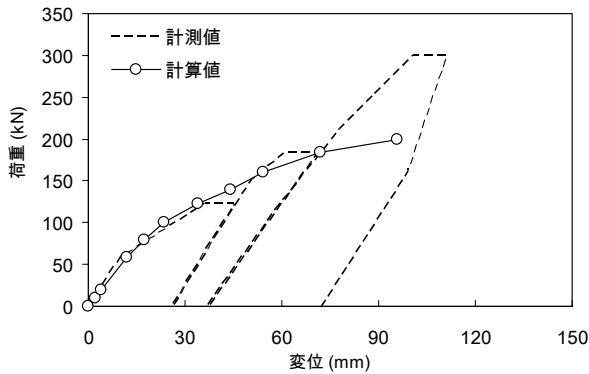
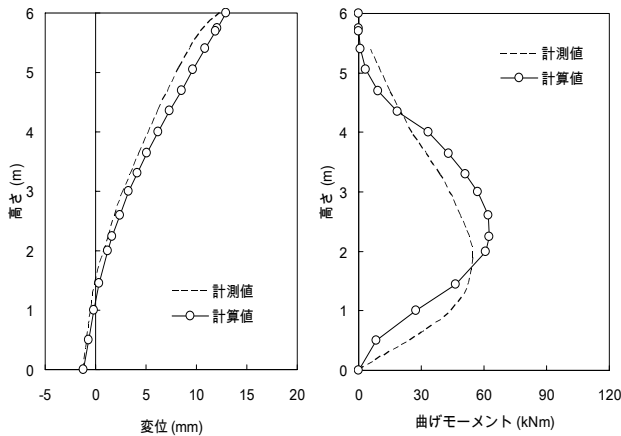
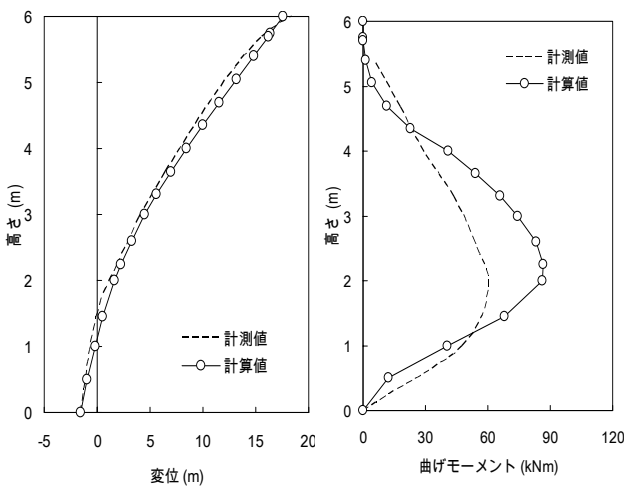


図-16 荷重-変位関係の計測値と計算値との比較

また、荷重が100kNと120kNの時点での杭の変位と曲げモーメントの深さ方向分布を図-17に示す．これらについても、計算値は試験結果を比較的良好に再現している．



(a) 100kN荷重時



(b) 120kN荷重時

図-17 杭の変位と曲げモーメントの深さ方向分布

ただし、ここで100kNと120kNの荷重載荷時で、微妙に曲げモーメントの発生状況が異なっていることに着目されたい．これは、図-18に本荷重試験の荷重の荷重計画を示すが、補強土体背面にEPSと鉄板を介してはいるものの、中央の高さへの1点載荷としている．このため、図-19に示すように、荷重は当初等分布に荷重されるものの、変位に応じて等分布から三角形分布、さらには変位の小さな下端部に集中して荷重される傾向となることが予想される．試験時点では、この推移を補強土体背面に設置した土圧計から推定できればと考えていたが、土圧計がうまく機能せず、この推定を実施することはできなかった．設計モデルを用いた水平荷重試験の計算では、背面荷重を三角形分布として荷重しており、この観点で計算値と計測値とを比較した図-19において、最大曲げモーメントが60~90kNm程度のところでよく再現し、これを超えるごとに計算値は計測値を過大に評価することになっていると考える．仮に荷重分布の推移を推定できた場合には、図-16における大変位部や全荷重領域に対する杭の応答も、さらによく表現できたのではないかと考えている．

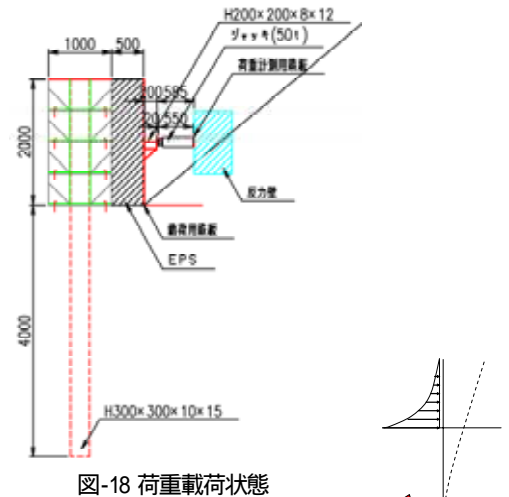


図-18 荷重載荷状態

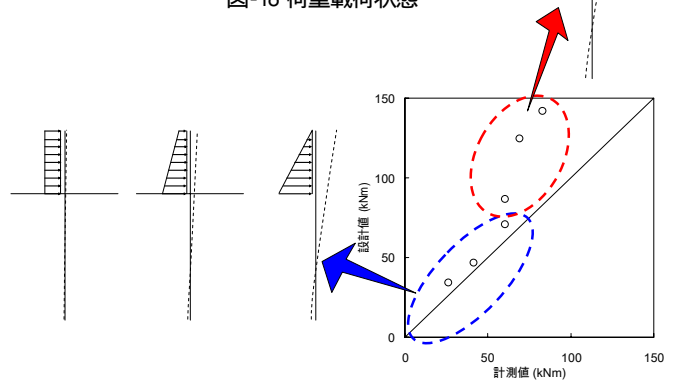


図-19 荷重状態と杭の最大曲げモーメントの計算値と計測値

(2) 内的安定

内的安定は、一般補強材が補強土体の水平抵抗にあまり寄与していないと考えられたことから、ここでは主に帯状補強材に発生するひずみを予測することとした．具体的には、図-20に示す帯状補強材を引張り材とした補

強土のはりを仮定し、それぞれ杭部と杭間部に発生する曲げモーメントによる引張り材に発生する引張りひずみを式(1)～(3)で推定することとした。ここで推定される300kN載荷時の帯状補強材に発生するひずみの計測値と計算値との比較を図-21に示す。この結果によると、計算値は比較的良好に実測値を再現していると考えられる。ただし、この点については、今後、別途FEM等で杭間隔や補強土体断面の影響について、パラメトリックな検討を踏まえて検証していきたいと考えている。

$$\max[\varepsilon_1, \varepsilon_2] < \varepsilon_a \quad (1)$$

ここに、 ε_1 ：杭近傍の帯状補強材に発生するひずみ、

$$\varepsilon_1 = \frac{w \cdot l_1^2}{12 \cdot A_G \cdot d_1 \cdot E} \quad (2)$$

ε_2 ：杭間の帯状補強材に発生するひずみ

$$\varepsilon_2 = \frac{w \cdot l_2^2}{24 \cdot A_G \cdot d_2 \cdot E} \quad (3)$$

ε_a ：帯状補強材の許容ひずみ、 w ：等分布側圧

(kN/m^2)、 l_1 ：杭芯間隔(m)、 l_2 ：杭端間隔(m)、

E ：補強材のひずみに応じたヤング係数(kN/m^2)、

A_G ：補強材の断面積(m^2/m)、 d_1, d_2 ：側圧非載荷面、

および側圧載荷面から帯状補強材までの距離(m)

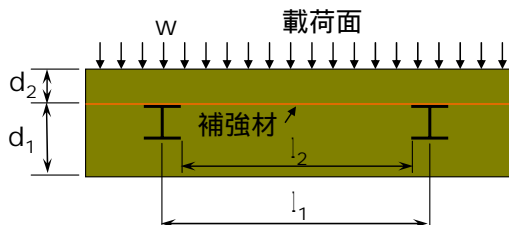


図-20 内的安定照査時の仮想はり

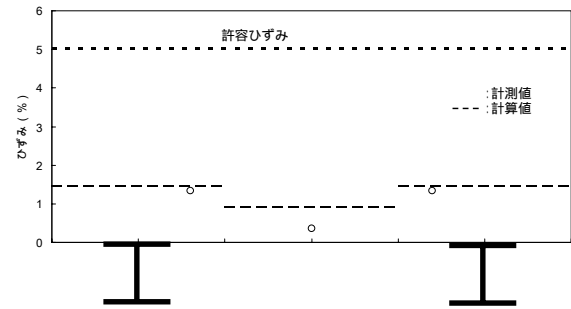


図-21 帯状補強材ひずみの計算値と計測値の比較 (300kN)

4. まとめ

ここでは、杭を用いた細幅補強土擁壁 (Piled Geo-wall) の基本的な水平抵抗特性を確認するため、実際に近い試験模型を構築し、静的水平載荷試験を実施した。その結果は、以下のようにまとめることができる。

杭を用いた細幅補強土の耐力は大きく、幅1.0mの補強土擁壁でも、高さ4.0m程度まで適用できることも考えられ、その実用性の高さを確認した。

補強土体の水平抵抗は、主に帯状補強材が杭に荷重を伝達することにより増加される。

杭と補強土体とは一体化して挙動し、その変形状はくいの変位と同等となる。ただし、相対変位は小さくないが、じん性の大きな補強土体は荷重を杭に伝達する。

また、本研究では簡易に水平載荷試験を再現する位置手法についても提案し、今後Piled Geo-wallを簡易に設計できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 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, ジオシンセティックス論文集 第24巻 pp.257-262, 2009.12

STATIC LATERAL RESISTANCE OF PILED GEO-WALL

Takashi HARA, Shinichiro TSUJI, Masaki YOSHIDA and Syuji ITO

This study aims to achieve the independent reinforced soil wall with pile foundation (Piled Geo-wall); which can be built at narrow construction site such as beside of mountainous road and so on. In the previous period, the effectiveness of the application of pile foundation to improve lateral resistance of the independent reinforced soil structure was confirmed from a dynamic centrifuge test. Therefore, fundamental lateral resistance of Piled Geo-wall was investigated from static loading tests on the real scale model of Piled Geo-wall and normal Geo-wall without pile in this time.