

ジオグリッド補強材を用いた矢板式係船岸の耐震性能に関する実験的研究

池野 勝哉¹・田中 智宏²・三好 俊康³・森川 嘉之⁴・
水谷 崇亮⁵・高橋 英紀⁴

¹ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: tomohiro.tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

⁴ 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁵ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

補強土壁工法は優れた耐震性を有するため、擁壁等の陸上工事において広く用いられているものの、港湾工事においては未だ適用されていない。本研究は、補強材の効果を港湾の矢板式係船岸に適用することで、従来の控え式矢板と比較して安価で優れた耐震性能を有する岸壁構造の開発を目指したものである。本稿では、50G 場の遠心載荷模型実験を実施し、矢板背後の補強材に関する敷設長や敷設高および設置段数を変化させ、地震時の変位抑制効果や補強材に作用する引張力、矢板の曲げモーメントについて考察している。その結果、補強材を適切に敷設することによって地震時の安定性が向上するとともに、矢板の曲げモーメントを抑えて低剛性の鋼材を選択できるため、従来の控え式矢板よりも安価で優れた護岸・岸壁構造を構築できる可能性を示した。

Key Words : *geogrid, sheet-pile quaywall, centrifuge-test, seismic performance*

1. はじめに

補強材を用いた補強土壁工法は優れた耐震性を有するため、擁壁等の陸上工事において広く用いられている。補強土壁工法は、土の内部に配置した補強材の張力が、その内部に作用することで土の自立性を高め、鉛直の壁面あるいは鉛直に近い勾配の法面を構築する方法であり、補強材としては帯状鋼材、鉄筋、面状の繊維材料や高分子材料など、様々な種類のものが用いられている。一方、港湾における抗土圧構造物はケーソンやL型ブロックに代表される重力式、土留めの曲げ剛性と地盤の受働抵抗あるいはタイロッドを介した控え杭で土留めを支持した矢板式が一般的であり、補強材を利用した形式は適用されていない。なお、菅野ら¹⁾が補強材と固化処理土を併用したSG-WALLを開発しているが、未処理の土を対象として補強材を適用した事例はない。

補強土壁構造を港湾構造物に適用する場合、できるだけ水中作業を簡略化するため、取付治具を含んだ補強材のユニット化や地盤材料の締固めを不要とすることが求められる。これに対し、菊池ら²⁾は締固め不要の石材を

前提にした多数アンカー工法を対象とした遠心模型実験を実施し、補強土壁工法は通常のケーソンと同程度以上の安定性を持つこと、補強効果は仮想壁体の考え方を導入することで評価できることを示している。さらに、陸上のテールアルメ工法で使用される補強材(帯鋼)と石材(単粒度碎石、粒度調整碎石)との引抜き実験を実施し、締固めによる摩擦抵抗を期待する帯鋼は、締固めが困難な水中施工には不向きであることを指摘している。

著者らは、矢板岸壁の補強材として網目構造のジオグリッドを想定し、補強材と石材との摩擦抵抗および石材の噛み合い(インターロッキング)効果に期待した「補強土壁式係船岸」の開発を目指している。ジオグリッドは、軟鋼を超える強度を有するため、強度特性として他のジオテキスタイルよりも高強度であり、港湾構造物への適用を考えた場合にも、耐薬品性を有しているためセメント安定処理土との相性も良いと考えられる¹⁾³⁾。

本稿では、著者らが開発する「補強土壁式係船岸」の耐震性能について、補強材の敷設長、敷設高および設置段数に着目した遠心載荷実験を実施したので、その結果および考察について示す。

2. 実験概要

補強土壁式係船岸における地震時の耐震性能を調べることを目的に、50G場の遠心模型実験を実施した。実験パラメタは、補強材の敷設長、敷設高および設置段数である。以下に実験概要を示す。

(1) 実験対象断面

実験対象とした水深-10mの補強土壁式係船岸(設計震度 $k_h=0.15$)の断面を図-1に示す。実験で用いた試料容器はアルミニウム製で、内寸が長さ600mm×高さ400mm×奥行き200mm、側面の一方が透明アクリルにより構成されている。容器の内側には容器と模型地盤間の摩擦を極力軽減させるため、シリコンオイルとグリースの混合材を塗布したモビロンシートを貼り付けた。模型地盤は埋立土および原地盤を非液状化層($\phi=40^\circ$)として、飯豊珪砂6号(中央粒径0.279mm)を相対密度85%程度で突き固め法により作製した。裏込石は砕石7号(粒径2.5-5mm)を使用し、特別な締め固めを行わず重力場で作製した。なお、本実験では非液状化地盤を想定していることから、間隙流体として粘性流体を使わず脱気した水道水を使用した。また、裏込石と埋立土の境界部には間隙への砂の落ち込みを防ぐ目的で、モビロンシートを裏込石面上に設置した。写真-1に模型地盤を示す。

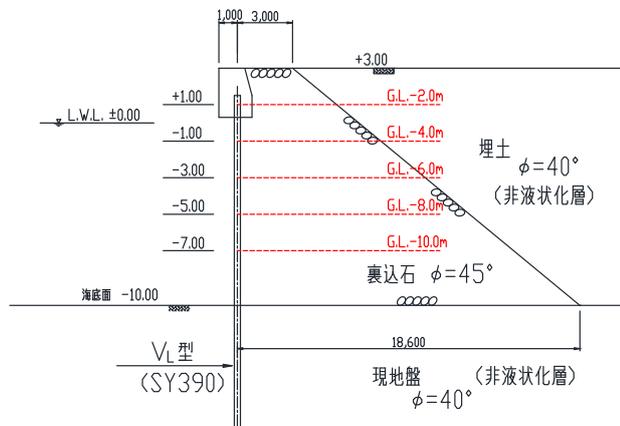


図-1 対象断面(水深-10m, $k_h=0.15$)

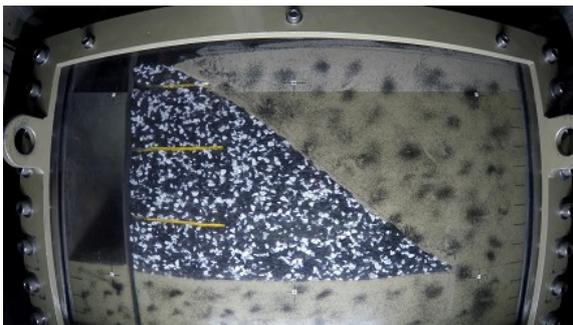


写真-1 模型地盤

(2) 矢板材と補強材

矢板模型にはアルミニウム板を使用し、遠心場(50G)相似則による曲げ剛性から厚さ $t=6\text{mm}$ とした。なお、試料容器と矢板との取付部はヒンジ構造とした。

補強材は想定するジオグリッドを模擬するものとしてポリエチレン製のメッシュを使用した。実験に先立ち、補強材選定のため材料引張試験を実施し、遠心相似則に従った引張剛性に近い材料を選定した。ここで、引張剛性(EA)と引張強度(F)の相似則を同時に満足することは困難であるため、本実験では引張剛性(EA)に着目して補強材を選定した。なお、選定した補強材の引張強度(F)は相似則に基づくジオグリッド強度の約70%である。矢板と補強材の取付けは、実構造において矢板背面に取り付けた鋼部材に、補強材端部に通した芯材がヒンジ構造となるように取り付けることを想定しているため、模型においても図-2に示すようなヒンジ構造とした。

(3) 計測項目とキャリブレーション

矢板天端の水平変位、地盤内の加速度および水圧に関して、図-3に示すようにセンサーを配置して計測した。ここで、水圧計に関しては加振時に液状化していないことを確認する目的で設置した。矢板には軸ひずみをキャンセルできる2ゲージ法(曲げひずみ測定法)でひずみゲージを貼り付け、曲げモーメントの計測を行った。また、補強材には1ゲージ法で上下にひずみゲージを貼り付け、補強材に作用する引張力の計測を行った。ここで、遠心実験に先立ち補強材の引張力と測定ひずみのキャリブレーションを行った。キャリブレーションの様子を写真-2、キャリブレーション結果を図-4に示す。

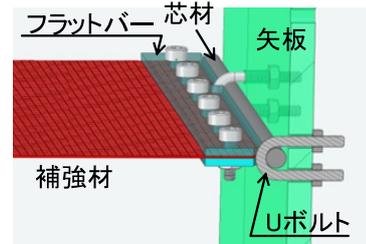


図-2 補強材の取付概要図

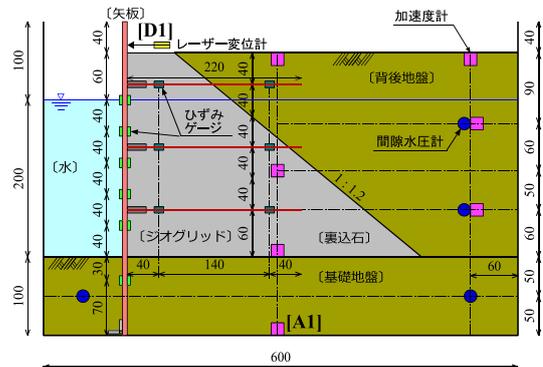


図-3 計測器の配置図 (mm)

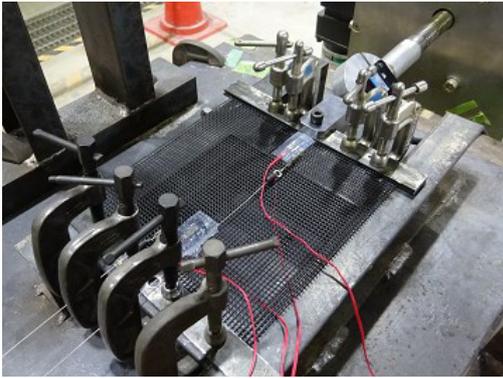


写真-2 キャリブレーションの様子

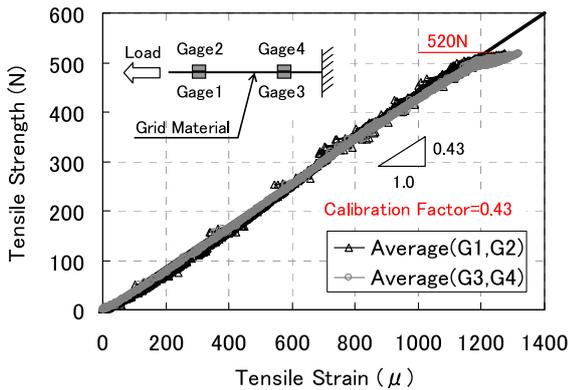


図-4 キャリブレーション結果

同図のキャリブレーション結果より、引張強度(N)/引張ひずみ(μ)=0.43 の関係を得た。

(4) 実験ケースと加振条件

補強材の敷設長、敷設高および設置段数をパラメタにして計5ケースの実験を行った。図-5に実験ケースを実物スケール換算で示す。図中には補強材が無い場合の地震時($k_h=0.15$)主動崩壊角を図-1の物性を基に示している。Case0は矢板のみの無対策、Case1~4は補強材を敷設した対策ケースである。Case1は補強を実物換算で4.0mピッチに5.5mの敷設長で3段設置するケースである。Case2はCase1における補強材の敷設長を2倍の11m(概ね、水深と同程度)とし、敷設長の違いによる耐震性能に着目した。Case3およびCase4は、Case2から設置段数を2段および1段と変化させたケースであり、敷設ピッチの影響を併せて比較するものである。なお、Case4は従来の控え式矢板岸壁の控え工が無い断面に類似しているが、同条件における控え式矢板岸壁ではタイロッド長が15~20m程度必要となるのに対し、Case4はその2/3~1/2程度の敷設長である。加振条件は実物換算で1Hz、20波の正弦波(前後3波にテーパ)とし、目標加速度振幅を50Gal, 100Gal, 150Gal, 200Galと与えるステップ加振とした。

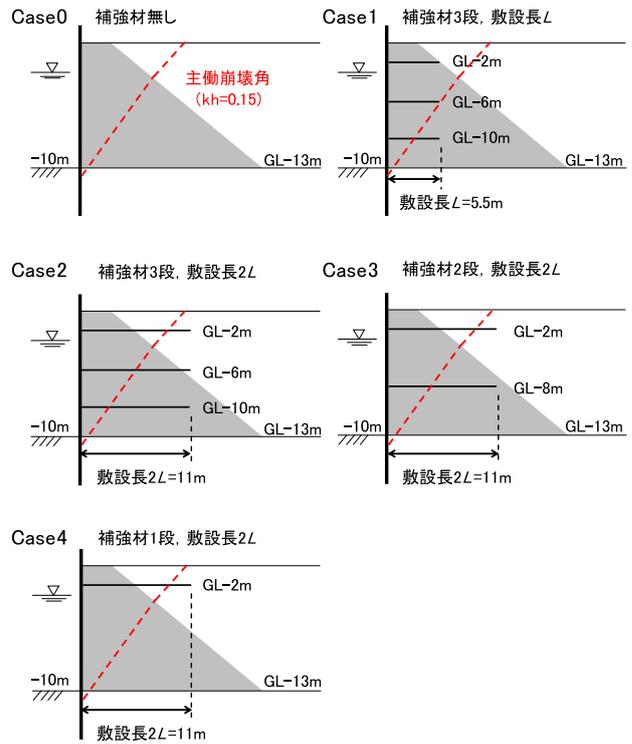


図-5 実験ケース

3. 実験結果

(1) 矢板変位と地盤内変位

試料容器下端 (A1) における平均入力加速度と変位計取付位置 (D1) における矢板天端の累積変位量の関係を実物換算して図-6 に示す。ここで、200Gal のステップに関しては、他のステップと比較して入力加速度が不安定であったため、参考値として破線で図示した。なお、模型に加える遠心力を増加させると、その増加に合わせて矢板も海側へ変位するが、振動のみによる変位を比較するため、50Gal 加振前の 5 秒間(模型スケール)を平均して初期値とし、その後の累積変位として表示している。同図より、いずれのケースも入力加速度の増加とともにほぼ線形的に変位が増加している。補強材の無い Case0 は最も累積変位量が大きく、Case1 および Case4、次いで Case2 および Case3 の順で発生変位が小さくなり、補強材を長く、また深く設置することで矢板の累積変位量を半分程度に低減していることが分かる。

地盤内変位を調べるために、同程度の変位レベル (Case0, Case1 および Case4 は 100Gal, Case2 および Case3 は 150Gal) におけるステップにおいて、遠心場で撮影した画像から PIV 解析により模型地盤の変位ベクトルを算出し、せん断面の方向性を考慮せずに最大せん断ひずみ γ_{max} を求めたコンターを図-7 に示す。なお、要素メッシュおよびベクトル始点は初期座標 (50Gal 加振前) を基

準にし、変位ベクトルは模型スケールで3倍にして表示している。

補強材の無いCase0に着目すると、矢板と計算上の主働崩壊面（青線）に挟まれるくさび形領域において、小さなせん断ひずみが様に発生している。これに加えて、内部には大きなひずみが直線的に連なる領域があり、この領域でのひずみが卓越して、矢板は海側へ大きく変位したと考えられる。なお、裏込石には角の残る碎石を用いているため、ひずみは局所化せず、滑りは発生していない。一方、補強材を有するCase1-4においては、矢板背後に大きなひずみが連なる領域は確認されず、補強材の敷設効果が表れていた。ただし、補強材を敷設することで、小さなひずみの発生領域は陸側に広がっており、補強材の敷設位置を包括していた。参考として、図-7には恣意的に判断したひずみの領域端面を青線で示している。図中より、補強材の長さや本数を変えても、それを包括するようにひずみが発生しており、補強材を敷設することで大きなひずみの発生を抑制できるが、補強材を包括する地盤領域で小さなひずみが様に発生し、矢板が海側へ若干変位することが分かった。

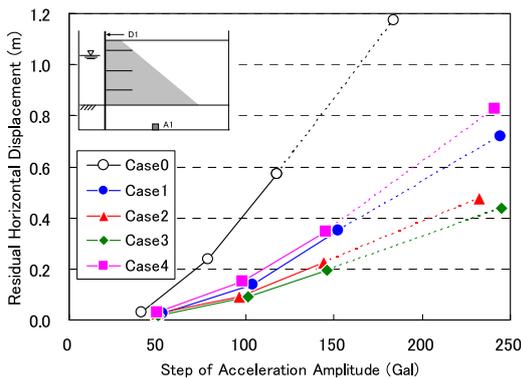


図-6 矢板天端の累積水平変位

(2) 補強材の引張力

補強材の引張力について考察する。補強材に貼り付けたひずみゲージから本実験用の校正係数を乗じて引張力を算出し、各ケースの最大値を評価した。図-8に各ケースの150Gal ステップにおける矢板側の引張力を示す。なお、図中の値は重力場から50G遠心場へ上昇する過程で発生する補強材の残留張力を含んでいる。

各ケースに着目すると、Case1（補強材3段、敷設長L）において、中段位置の補強材に大きな引張力が作用している。Case1は他のケースよりも補強材の敷設長が短く、矢板の取付部に作用する引張力が大きく作用したものと推察される。Case2（補強材3段、敷設長2L）とCase3（補強材2段、敷設長2L）は、各段において比較的同程度の引張力が作用しておりバランス良く補強効果を発揮しているように見受けられる。Case4（補強材1段、敷設長2L）は、上段のみで補強しており比較的大きな引張力が作用しているが、Case3と同程度である。これは、Case4の変位量がCase0を除いて最も大きいことから、補強材の引抜けによる引張力低下の可能性も考えられる。

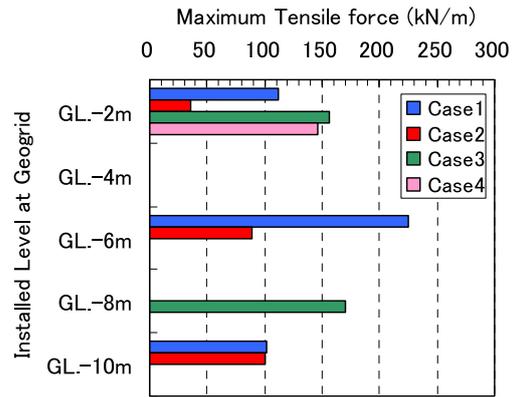


図-8 補強材の最大引張力（矢板側）

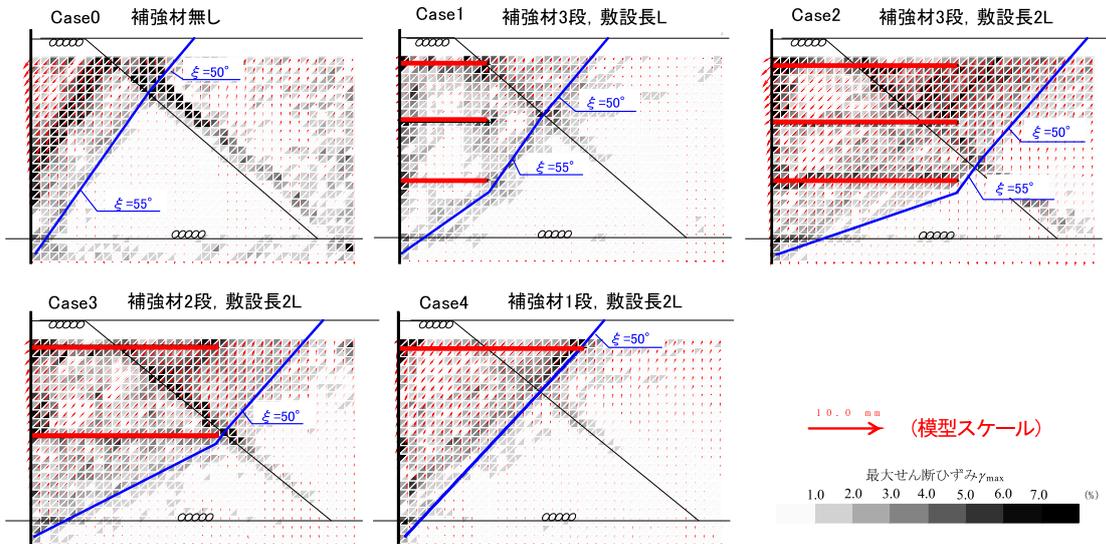


図-7 最大せん断ひずみ γ_{max} の分布（同程度の変位レベルにおける比較）

(3) 矢板曲げモーメント

矢板に貼り付けたひずみゲージから実物換算した曲げモーメント分布を算定し、150Gal相当の加振ステップに着目した最大曲げモーメント分布を図-9に示す。ここで、両図において曲げモーメントは、矢板が海側に凸形状を呈した形状を正值として表示している。補強材を敷設したケース (Case1~4) は、補強材無しのCase0と比較して矢板の発生曲げモーメントは小さい傾向にある。Case1 (補強材3段, 敷設長L) およびCase2 (補強材3段, 敷設長2L) は概ね同じ傾向を示し、特に中段と下段の補強材 (図中ではGridと表記) の間で海側に凸形状を呈している。また、Case3 (補強材2段, 敷設長2L) およびCase4 (補強材1段, 敷設長2L) も同様の傾向を示しているが、Case1 およびCase2の補強材間のスパン長よりも長い場合、補強材間に発生する矢板の曲げモーメントがやや大きくなっている。Case3は、下段の補強材と海底面の間で1点のみ大きな曲げモーメントが発生しているが、異常値の可能性も否定できない。なお、Case4 (補強材1段, 敷設長2L) は、矢板天端の変位が比較的大きいため曲げモーメントの発生が抑えられているが、従来の控え式矢板と同様に頭部で矢板壁を固定する場合、矢板中央部で大きな曲げモーメントが発生するものと推察される。

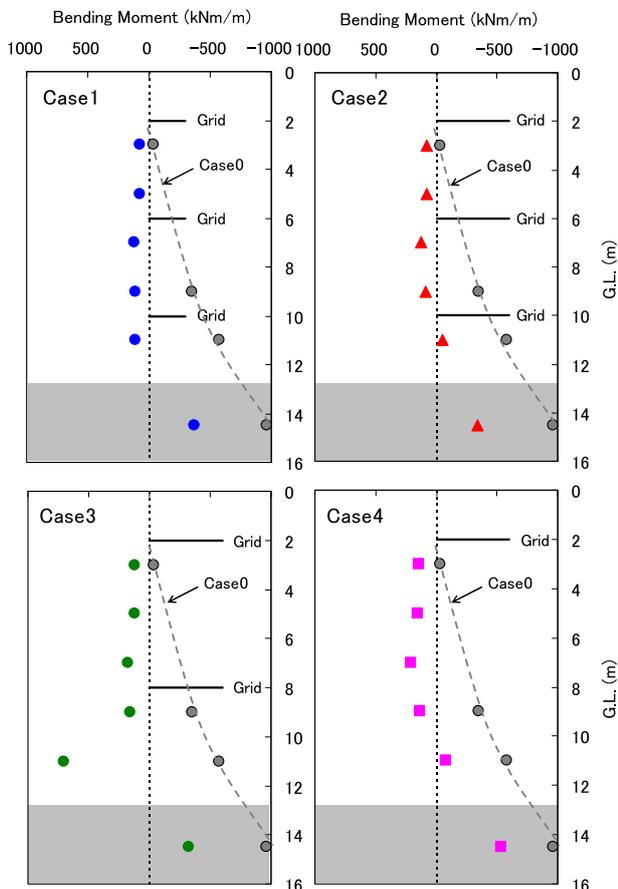


図-9 最大曲げモーメントの分布

補強土壁式係船岸は、最下段の補強材上に裏込石を投入するまでの施工中、自立式矢板として挙動する。したがって、最下段補強材の敷設高には限度があり、一般的な自立式矢板の適用水深が3~4mであることから、実施工を踏まえると最下段補強材は海底面から3m以内に留めるのが望ましいと考えられる。

4. 補強土壁式係船岸の補強メカニズム

本工法の補強メカニズムを図-10に示す。補強材の引抜き抵抗は、有効鉛直力に比例して摩擦力として抵抗するため、壁体に大きな土圧の作用する深部では合理的に働く。設計では、補強材が矢板背後の主働崩壊線の外側まで十分に敷設され、補強材に作用する引張力に対して、引抜けあるいは破断の無いことを検討する必要がある。また、補強材の敷設長を包括する領域全体の安定性を検討する。

補強土壁式係船岸は、従来の控え式矢板のタイロッド位置と比較して、補強材を矢板壁中央部に所定の間隔で取付けできるため、前面矢板に作用する曲げモーメントを抑えることができ、従来の自立式や控え式矢板よりも剛性の小さい矢板壁を選定することができる。このため、鋼管矢板を採用している自立式や控え式矢板と比較すると、補強土壁式係船岸は鋼矢板を選定できる可能性が高く、安価に護岸・岸壁構造を構築できると言える。

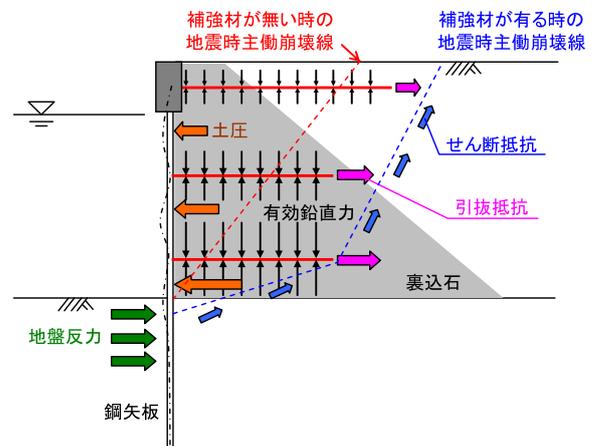


図-10 補強土壁式係船岸の補強メカニズム

5. おわりに

本研究では遠心載荷実験を実施し、矢板式岸壁の背後に補強材を適用した補強土壁式係船岸の耐震性能について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 補強材を矢板式岸壁の背後に適用することで、無対策に比べて水平変位が半分程度に低減された
- ② 補強材の敷設によって、矢板を大きく変位させる背後地盤での大きなひずみの発生を抑制できた。また、小さなひずみの領域は敷設箇所を包括するように発生していた
- ③ 矢板壁中央部に任意に設置できる補強材によって矢板の曲げモーメントが抑えられるため、低剛性の矢板壁を選択できる可能性があり、従来の控え式矢板と比較して安価と成り得る
- ④ 補強材がバランス良く抵抗するためには、適切な敷設長、敷設高および設置段数を必要とする
- ⑤ 本構造は、最下段の補強材上に裏込石を投入するまでは自立式矢板として挙動するため、一般的な自立式矢板の適用水深が3~4mであることから、実施工を踏まえ海底面から3m以内で敷設するのが望ましいと考えられる
- ⑥ 本実験条件下において各補強材の敷設間隔は、4m以内でできるだけ均等に敷設し、敷設長は主働崩壊角の外側まで配置するのが望ましい

本実験では、背後地盤を非液状化として取り扱い、実地盤としては液状化対策の実施を想定している。したがって、補強土壁式係船岸の液状化の影響については不明な点が多い。また、ジオグリッドの目合いと石の粒径・形状によって、最適な敷設間隔が変化する可能性もあり、合理的な設計法を構築する上で更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 菅野高弘・長屋淳一・新舎博・大久保泰宏・喜田浩・北村卓也・太田正規・岸真裕・久保滋・平井貴雄・弘中淳市・足立雅樹・宮田喜壽：SG-Wall式矢板岸壁の設計・施工法に関する検討，港湾技研資料，No.1204，2009.
- 2) 菊池喜昭・北詰昌樹・小田祐二：補強土壁工法の港湾構造物への適用性，港湾技研資料，No.946，1999.
- 3) ジオグリッド研究会：「ジオグリッド工法」ガイドライン—材料試験法，設計法ガイドライン—，第1分冊，244p，1990.

(2017.2.2 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON ASEISMIC PERFORMANCE OF SHEET-PILE QUAYWALL USING REINFORCING GEOGRID

Katsuya IKENO, Tomohiro TANAKA, Toshiyasu MIYOSHI,
Yoshiyuki MORIKAWA, Takaaki MIZUTANI and Hidenori TAKAHASHI

The reinforced earth method has been used in many land construction works, based on its high seismic performance. On the other hand, it has not been applied to the construction of port facilities. Our group studies how to apply this method to sheet-pile quay wall, and it can become a cost-effective quay wall, compared with the conventional one. In this study, a series of centrifuge model tests were conducted under a centrifugal acceleration of 50g by changing length, height, and number of reinforcing geogrids connected with sheet piles. Displacements of sheet pile and ground, tension forces of geogrid, and bending moments of sheet pile during seismic motions were discussed in the paper. The results showed high performance of this method, and the specification of a sheet pile can be reduced because of its low bending moment.