袋型根固め材を用いた津波に対して効果的な防波堤マウンド被覆方法の検討

三井 順¹・松本 朗¹・半沢 稔¹・小山 裕文²・篠村 幸廣³・尾池 宣佳³

¹正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

E-mail:jun.mitsui@fudotetra.co.jp

E-mail:akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

E-mail:minoru.hanzawa@fudotetra.co.jp

²株式会社不動テトラ ブロック環境事業本部 環境商品部 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)

E-mail:hirofumi.koyama@fudotetra.co.jp

³キョーワ株式会社 土木資材部 (〒542-0081 大阪市中央区南船場1-13-20)

E-mail:shinomura@kyowa-inc.co.jp

E-mail:oike@kyowa-inc.co.jp

防波堤の津波対策として、港内側への腹付工の設置が検討されている。本研究の対象である袋型根固め材は海底の不陸に対応できることや急速に大量の施工が可能であることから、腹付工の被覆材として用いることで、津波対策における工期短縮およびコスト縮減が期待できる。本研究では、津波越流に対する腹付工の保護方法として効果的な袋型根固め材の設置方法を明らかにすることを目的として水理模型実験を実施した。

実験の結果、袋型根固め材は被覆石と比較して安定性が高いことがわかった。また、袋材を部分的に重ね合わせる方法や多層で設置するなどの設置方法の工夫や、岸沖方向の連結により安定性や粘り強さが更に向上した。袋材の種類については、袋の上下を繋ぎ中詰め石の移動を拘束したタイプの方が安定性が高いことがわかった。

Key Words : filter unit, tsunami, overflow, stability, hydraulic model experiment

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は多くの防波堤の被災をもたらしたが、その原因の一つは津波の越流による基礎マウンドや海底地盤の洗掘によるものであった¹⁾。今後の津波対策として、防波堤港内側への腹付工の設置が検討されているが、津波の越流に対して腹付工の被覆材の安定性を確保する必要がある。

本研究の対象である袋型根固め材(図-1)は合成繊維を使用した網材に中詰め石を充填したものであり、河川や海岸の根固め、洗掘防止等に使用されている他、緩傾斜護岸や混成堤のマウンド被覆材としての適用性も確認されている^{2),3),4)}。また、袋型根固め材は海底の不陸に対応できることや急速に大量の施工が可能であることから、腹付工の被覆材として用いることで、津波対策における工期短縮およびコスト縮減が期待できる。そこで本研究では、津波に対して効果的な袋型根固め材の設置方法を明らかにすることを目的として水理模型実験を実施した。

2. 実験方法

(1) 実験水槽

実験には(株)不動テトラ総合技術研究所の長さ50m、幅1.0m、高さ1.5mの二次元水槽を使用した。実験装置を図-2に示す。水槽の水平床となっている部分の一部(約16mの区間)を幅方向に2つに仕切り、手前側(幅50cm)に防波堤模型を設置した。水中ポンプの吸込口と吐出口は防波堤模型をはさむように設置し、ポンプを運転すると防波堤の前後で水位差ができ、定常的な越流が発生する仕組みである。防波堤模型の港外側にはポンプ吐出口

図-1 袋型根固め材

図-2 実験装置

を挟んで越流堰を設置し、越流堰の高さを変えることで津波の高さを調整した。堰を越流した水は、奥側の水路から循環する。越流堰の高さは、0～50cmの範囲で変えられるようにした。整流のために消波材をポンプ吐出口周辺と吸込口付近に設置した。水中ポンプは出力19kW、標準揚水量 $4\text{m}^3/\text{min}$ のものを使用した。

(2) 実験断面

防波堤断面図を図-3に示す。模型縮尺は1/50とした。防波堤設置水深は現地量で13.0mとした。防波堤の天端高は5.35m、ケーソン高さは14.0m、ケーソン幅は15.9mである。港内側の腹付工の高さ（袋材を含んだ高さ）はケーソン高さの1/3とし、腹付工の天端幅は基本的にケーソン高さの1/3以上となるようにした。港内側被覆材の天端上水深は全てのケースで現地量で4mとした。

ケーソンは津波作用により動かないように十分な重さのおもりを入れて固定した状態で実験を行った。また、防波堤を津波が越流する際に越流水脈とケーソンの間にできる空間を大気圧に保つために、ケーソン背後の仕切り壁に直径25mm程度の空気孔を設けた。

(3) 被覆材

実験に用いた袋型根固め材の模型を表-1に示す。FU-Sは袋材の天端面と底面の中心をロープで繋ぎ、中詰め石の移動を拘束したタイプである。FU-通常タイプは拘束のないタイプであり、比較として一部の実験ケースで用いた。いずれも質量64g（現地量で8t）とした。

網の太さは実物と縮尺を合わせると細くなりすぎてしまい強度を確保できないため、実物より太めの径の糸を用いた。網目の大きさは、実物は50mmであるが、実物と合わせると透水性が小さくなりすぎてしまうため、模型では約3mm（現地量で約150mm）とした。中詰め石は、網目から石が抜け出さない程度の大きさの石を用いた。中詰め石の平均の質量は0.62g（現地量で78kg）であった。

図-3 防波堤断面図

表-1 袋型根固め材模型

名称	FU-S	FU-通常タイプ
質量	64g (現地量: 8t)	64g (現地量: 8t)
写真		

(4) 津波の条件

津波の高さは、越流水深の小さい条件から実験を始め、現地量で0.5m刻みで越流水深を大きくしていった。港内側の水位は越流が定常となった状態で水深13.0mとなるようにした。津波の継続時間は、越流が定常状態となつてから現地量で15分間（模型量で127秒間）とした。

(5) 越流の検定方法

越流の検定では、越流が定常状態となった時の港外側水位と港内側水位が目標値となるような越流堰の高さ、初期水位の設定条件を検定した。図-4に示すように港外側3箇所、港内側4箇所の計7箇所水位を測定した。水位の合わせ込み位置は、定常状態の水位が空間的に一定となる位置として、港外側は防波堤前面から模型量で2mの位置(WG1)、港内側は防波堤後面から2mの位置(WG6)とした。ケーソン天端高を基準としたWG1での水位を越流水深と定義した。

上述したように定常状態の津波の継続時間は模型量で127秒間としたが、ポンプの運転開始から水位が定常状態になるまでに60秒程度かかるため、検定時および安定実験時におけるポンプの運転時間は127s+60s=187sとした。越流水深や港内側水位の値はポンプ運転開始後127sから187sの60秒間の平均値を用いて整理した。

図-4 水位の計測位置

(6) 安定実験方法

安定実験は小さい津波ランクから作用させ、127秒間（現地量で15分間）の定常状態の津波を作用させた後、次の津波ランクの実験を行った。津波ランクを上げる際には、軽微な変形や移動のみの場合は被覆材の積み直しは行わず、継続して次のランクの津波を作用させた。水位の計測条件は検定時と同じである。観察対象は水槽壁に接する列を除く部分とし、水槽壁と袋材の隙間はマウンドが洗掘されないように鉄柱を設置した。一部のケースでは津波作用後に2測線で断面形状の測定を行った。

(7) 実験ケース

主な実験ケースは図-5に示すように1層で袋材を被覆する標準的な方法（単被覆）、袋材をオーバーラップして1層で被覆する方法（重被覆）、マウンド肩付近を多層で被覆する方法（多層被覆）、袋材の上面同士をロープで連結する方法である。また、比較のため1t程度の被覆石を2層で被覆したケースも実施した。また、袋材の上下面の拘束の有無が安定性に及ぼす影響を調べるために、単被覆と連結のケースを対象にFU-SとFU-通常タイプの比較を行った。

図-5 検討した主な設置方法

3. 実験結果

(1) 津波作用状況

津波作用状況の例を図-6に示す。防波堤を越流した津波は、腹付工の肩付近に打ち込んだ。越流水深が大きく

図-6 津波作用状況（越流水深1.5m）

なると打ち込み位置はケーソンから遠ざかり、斜面部に打ち込んだ。

(2) 各ケースの安定実験結果

a) 被覆石

被覆石の実験結果を図-7に示す。越流水深1.0mの津波作用において肩付近を中心に多数の被覆石の移動が見られ、下層のマウンドが一部露出した。越流水深2.0mでは法面の多数の被覆石が移動し、法面下部にたまった。また下層の捨石マウンドの洗掘も見られた。

越流水深1.0m

越流水深2.0m

図-7 被覆石の実験結果

b) 単被覆

単被覆の実験結果を図-8に示す。越流水深1.5mでは被害は無く、被覆石と比較して安定性が高い結果であった。

越流水深2.0m

越流水深2.5m

図-8 単被覆の実験結果

初期の被害が発生したのは越流水深2.0mの時点であり、肩下部のFU-Sが2個めくれ上がり離脱した。越流水深2.5mでは急激に被害が進行し、肩付近のマウンドが大きく洗掘された。

c) 重被覆

重被覆の実験結果を図-9に示す。重被覆では越流水塊の打ち込み位置のFU-Sがめくれ上がりづらくなることで、単被覆と比べて安定限界の越流水深が1.5mから3.0mへと大きく向上した。ただし、外力が大きい領域まで耐えるため、被害が発生すると急激に被害は拡大した。

越流水深3.0m

越流水深3.5m

図-9 重被覆の実験結果

d) 多層被覆

多層被覆の実験結果を図-10に示す。多層被覆では初期被害の発生は越流水深2.0mであり単被覆と同程度であった。しかし肩付近を多層で設置しているため、初期被害発生後の被害の進行が緩やかであり、越流水深3.5m作用後もマウンドの大きな変形には至らなかった。単被覆、重被覆、多層被覆のケースの越流水深3.5m作用後の断面形状の測定結果（2測線の平均値）を図-11に示す。多層被覆は他の設置方法と比較してマウンドの変形が小さいことがわかる。

越流水深2.0m

越流水深3.5m

図-10 多層被覆の実験結果

図-11 越流水深3.5m作用後の断面形状の比較

e) 連結

連結のケースの実験結果を図-12に示す。越流水深2.5mの段階で少し変形が見られ、その後徐々に変形が大きくなり、越流水深3.5m作用後には法肩付近のFU-S同士の開きが半個分を超えた。連結により単被覆と比較して安定限界の越流水深が大きくなり、被災の進行も緩やかとなることが確認できた。ただし現地での連結は、袋材の重量程度の強度のロープを用いて結束していること等から、実験での連結強度が実際には確保できないと考えられる。今回の実験結果は連結が外れないとした場合の結果であることに注意が必要である。実際の連結方法については今後の課題である。

越流水深3.5m

図-12 連結の実験結果

(3) 被災ステージによる評価

被覆材の安定性の評価は、通常被災度や被害率を指標とするが、今回の実験については袋材の安定限界を超えた後のマウンドの変形等も含めて評価するために、表-2に示すようにFU-Sの軽微な変形からマウンド全体の大きな変形まで6段階のステージを定義して整理した。

各実験ケースの越流水深と被災のステージの関係を図-13に示す。単被覆では初期被害発生後の被害の進行が急激であること、重被覆は同じく被害の進行は急激であるが安定限界の越流水深が大きいこと、多層被覆は被害の進行が緩やかであること等が図から読み取れる。

表-2 被災のステージの定義

ステージ	状況
0	安定、目立った変形もない
1	移動はないが、軽微な変形が見られる
2	越流水打ち込み部の目地が開く (袋材半個分未満の移動)
3	袋材に軽微な被災 (被災度0.3未満)
4	袋材に大きな被災 (被災度0.3以上) マウンドの洗掘はない
5	袋材に大きな被災 (被災度0.3以上) マウンドが多少洗掘される
6	マウンド全体が大きく変形

図-13 越流水深と被災のステージの関係

(4) 中詰め石の拘束の効果

中詰め石の拘束の効果を把握するために、単被覆と連結のケースで拘束あり・なしによる比較を行った。単被覆のケースでは天端幅を数種類に変えることで越流水が打ち込む位置による違いも調べた。

単被覆での初期被害発生時の越流水深を比較したものを図-14に示す。天端5列のケースは越流の打ち込み位置が天端部となる条件であり、天端3列および2列のケースは主に法肩部に打ち込む条件であり、法肩なしのケースは斜面部に打ち込む条件である。全体的に拘束ありの方が安定性が高いことがわかる。また、法肩なしのケースは拘束あり・なしの違いが顕著に出ており、拘束ありの方が安定性が高いことがわかる。

これらの違いは、網の上下を拘束していない通常タイプは、網の内部で中詰め石が動くので変形しやすく、転動の被害が起きやすいためと考えられる。また袋材の変形を拘束することによる効果は、天端の水平部に越流水が打ち込む場合よりも、斜面部に越流が打ち込む場合により顕著に現れると考えられる。

図-15は連結した場合の拘束あり・なしの比較実験の状

図-14 拘束あり・なしの比較（単被覆）

越流水深2.5m

手前側：FU-通常タイプ

FU-通常タイプ
(拘束なし) FU-S
(拘束あり)

図-15 拘束あり・なしの比較（連結）

況を示したものであるが、拘束のない通常タイプの方が大きな変形をしていることがわかる。これは、拘束をすることで連結した際の袋材自体の可動範囲も狭くなるため、変形が小さくなったと考えられる。

(5) その他の設置方法の工夫

その他の設置方法の工夫として、図-16に示す2種類のケースで実験を行った。シート併用のケースは単被覆で設置したFU-Sの下層にジオグリッドを模したメッシュシートを設置したものである。水槽の手前側半分は、シートの下層にさらにFU-Sを設置した。ウォータークッションのケースは他の実験ケースでの被災後の断面形状を参考に

図-16 その他の設置方法の工夫

越流水深3.5m

シート下層: FU-S シート下層: 捨石

図-17 シート併用の実験結果

越流水深3.5m

図-18 ウォータークッションの実験結果

して、あらかじめ洗掘後の平衡断面となるようにFU-Sを設置したものである。

シート併用の実験結果は、初期被害については単被覆と同程度の越流水深で発生したが、表層のFU-Sが移動した後はシートによりマウンドが保護されるため、単被覆の場合より断面変形量が小さかった。また、シートの下層にもFU-Sを設置することで、シートの下層が捨石の場合よりもマウンドの洗掘防止効果はさらに大きくなった(図-17)。

ウォータークッションのケースは、安定限界越流水深は2.5mであり、単被覆と比較してやや向上した。また、図-18に示すように越流水深3.5m作用後も大きな断面変形には至らず、被災の進行は緩やかであった。また、ウォータークッション部に渦の形成が観察された。渦により津波のエネルギーが逸散され、背後地への津波流速の減衰や遡上高の減少の可能性が考えられるが、その効果

の検証は今後の課題である。

4. 結語

防波堤を越流する津波に対する腹付工の保護方法として効果的な袋型根固め材の設置方法を明らかにすることを目的として、水理模型実験を実施した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 袋型根固め材は被覆石と比較して津波越流に対する安定性が高い。
- (2) 重被覆: 袋材をオーバーラップさせることで越流水の打ち込みに対してめくれ上がりづらくなり、単被覆と比較して安定限界の越流水深が大きくなる。
多層被覆: 越流水の打ち込み箇所を重点的に保護することにより、初期被害発生後の被害の進行が緩やかとなる。
連結: 単被覆と比較して安定限界の越流水深が大きくなり、被害の進行も緩やかとなる。
- (3) 袋の上下を繋ぎ中詰め石の移動を拘束したタイプの方が袋材の変形がしづらく、転動の被害が起きにくくなるため、津波越流に対する安定性が高い。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン(案), <http://www.mlit.go.jp/common/000235379.pdf>, 2013.
- 2) 秋山真吾, 池谷毅, 今藤久夫, 高橋忍, 石川芳一: フィルターユニットで被覆した緩傾斜護岸の耐波安定性, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.405-410, 2001.
- 3) 久保田真一, 松本朗, 半沢稔, 篠村幸廣, 尾池宣佳, 池谷毅, 下迫健一郎: 袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波設計法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.776-780, 2003.
- 4) 下迫健一郎, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔, 篠村幸廣, 尾池宣佳, 池谷毅, 秋山真吾: 袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波安定性と耐久性, 港湾空港技術研究所報告, 第43巻, 第1号, pp.49-83, 2004.

EFFECTIVE METHODS FOR COVERING BREAKWATER RUBBLE MOUNDS AGAINST TSUNAMI USING FILTER UNITS

Jun MITSUI, Akira MATSUMOTO, Minoru HANZAWA, Hirofumi KOYAMA, Yukihiro SHINOMURA and Nobuyoshi OIKE

Rubble mound cover on the harbor-side of a breakwater using filter units is one possible method to reduce construction cost in countermeasures against tsunami. Hydraulic model experiments were conducted to clarify effective layouts of filter units against tsunami overflow. Filter units proved to be more stable than armor stones. A single-layer placement of filter units, partially overlapping enhanced the stability limit compared to without overlapping. Multi-layer placement delayed the progress of damage. Connecting filter units not only enhanced the stability limit, but also slowed progress in damage. Restraint of stone filling movement by connecting the top and bottom of the units improved stability against tsunami overflow.