

防波堤マウンド被覆石の安定性に関する 実験的研究 (その2)

EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY OF ARMOR STONES OF COMPOSITE MOUND(PART 2)

西本光弘¹・谷口義憲¹・加藤道康¹

Mitsuhiro NISHIMOTO, Yoshinori TANIGUTI, Michiyasu KATO

金田研一郎²・西村正²・吉田要²

Kenichiro KANETA, Tadashi NISHIMURA, Kaname YOSHIDA

¹運輸省第五港湾建設局設計室 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57番地の2)

²玉野総合コンサルタント(株) 海洋部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜二丁目17番43号)

The relaxation of the construction criterion for leveling of armor stones in mound is expected to reduce the construction cost of a breakwater covered with wave dissipating blocks in Open Sea. The stability of armor stones in the "non-leveling" and "heaping up" construction methods is studied in a hydraulic experiment. The result for these cases is compared with that for the general leveling. Additionally, the diagram giving the critical depth for an allowable damage rate of approximately 3% in the non-leveling method is proposed.

Key Words : Leveling of armor stones, relaxation of construction criterion, hydraulic experiment
breakwater covered with wave dissipating blocks, critical depth of stability,

1. はじめに

最近の社会経済情勢をみると、景気低迷による税収不足を背景に、国、地方の財政は深刻な状況にあり、港湾整備事業においても、各種のコスト縮減が緊急の課題となっている。

こうした課題の一環として、著者らは、防波堤基礎マウンド築造に際し、大きなウェイトを占める「被覆石均し」の施工基準の緩和を目的に、伊勢湾内の任意の海域における混成堤を対象として、マウンド被覆石を「均し無し」とした条件での安定特性を水理模型実験により検討し、その安定限界水深(被覆石均しを割愛できる範囲)を明らかにして前回報告した。

これに引き続き、今回は「その2」として、外洋に面した海域に建設される、消波ブロック被覆堤(上部斜面式)を対象に、「均し無し」の条件におけるマウンド被覆石の安定限界水深を水理模型実験により明らかにしたのでここに報告する。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、運輸省第五港湾建設局伊勢湾水理模型実験場内の二次元水路で行った。実験水路は、図-1に示すように、長さ30m、幅1m、深さ1.2mからなり、水路の一端に設置されている吸収制御方式のピストン型造波装置で、単一方向不規則波を造波することができる。

(2) 実験条件

図-2は、実験対象とした消波ブロック被覆堤の標準断面を示したものである。マウンドの条件は天端水深-9m、肩幅23.9m、法面勾配1:2とし、上部工天端高は+7.5m(消波ブロック天端高+2.5m)とした。

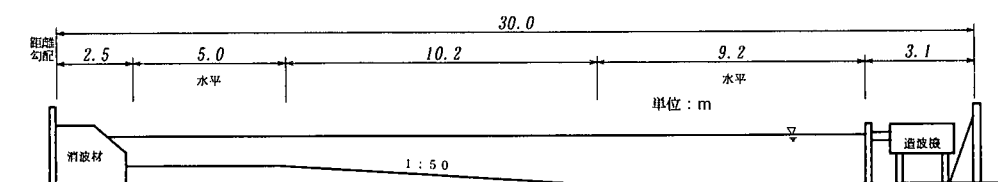


図-1 実験水路

実験対象波は、外洋や大水深域の設計波を参考に $H_{1/3} = 8.0\text{ m}, 9.0\text{ m}, 10.0\text{ m}$ の 3 種類、 $T_{1/3} = 14.0\text{ s}, 16.0\text{ s}, 18.0\text{ s}$ の 3 種類を組み合わせた計 9 種類を対象とした。周波数スペクトルは、いずれも、修正プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

実験に使用した被覆石質量 W は 2.5 t とし、法肩を除くマウンド法面の全範囲に各種条件（均し有り、無しは 2 層、多層積みは 3 層及び 4 層）で配置した。マウンド天端及び法肩部には、被覆石の 2 層厚分とほぼ等しい高さの被覆ブロックを配置した（表－ 1 参照）。

(3) 実験及び解析方法

a) 実験模型

図－ 3 は、実験に使用した模型平面及び断面を示したものである。安定実験の対象範囲は、水路幅 1 m の中央 50 cm 幅分のマウンド法面とし、検査域の被覆石は 7 つの水深帯（水深 2.0 m ピッチ）に区分し、色分けをした。以降、この水深帯を安定限界水深把握のための基準とした。なお、「多層積み」における多層石については、マウンド中央付近を境に、本体層と異なる色で 2 分した。

b) 被覆石の設置方法

「均し無し」の条件における被覆石の設置は、現地施工方法に準じ、1 層毎に、マウンド上 5 cm 程度の位置から 1 ～ 2 個を同時に捨て込み、2 層分設置した。設置後は、顕著に不安定なもの以外、石の修正は行わなかった。

「多層積み」の場合も、「均し無し」と同様な方法で本体層分 2 層、多層分 1 層～ 2 層、計 3 層及び 4 層を設置した。なお、「均し有り」の条件では、被覆石間の隙間を開けないように 1 つずつ設置した。

c) 実験方法

各ケースの実験の作用波数は 1000 波以上、繰り返し回数は 3 回とした。ここで、同一周期の条件では低波高から高波高にかけて連続して実験を行い、各々、被害個数の累計として評価した。

なお、「多層積み」の条件との混在を回避するため、各波高終了時に、被害を受けた被覆石を回収した。

d) 解析方法

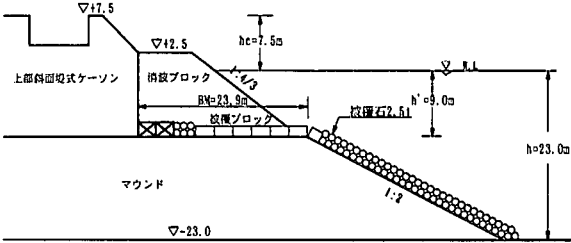
被覆石の被害個数は、色分けした 7 つの水深帯毎に測定し、当該水深帯及びそれ以深の累計被害個数を検査域内の総設置個数で除して、水深帯別の被害率として算出した。

そして、「均し無し」や「多層積み」の条件における各種入射波諸元に対する安定特性を「均し有り」の実験結果と比較しながら検討した。

さらに、実験結果をもとにして、許容被害率（ 3% と設定）を指標に、相対肩幅（ B_M/L' ： L' は水深 h' における波長）をパラメータとする各種条件での安定限界水深推定図を作成した。

なお、各水深毎の被害率には、繰り返し回数 3 回の平均値を使用することを原則としたが、被覆石の被害は変動性の高い現象であることから、許容被害

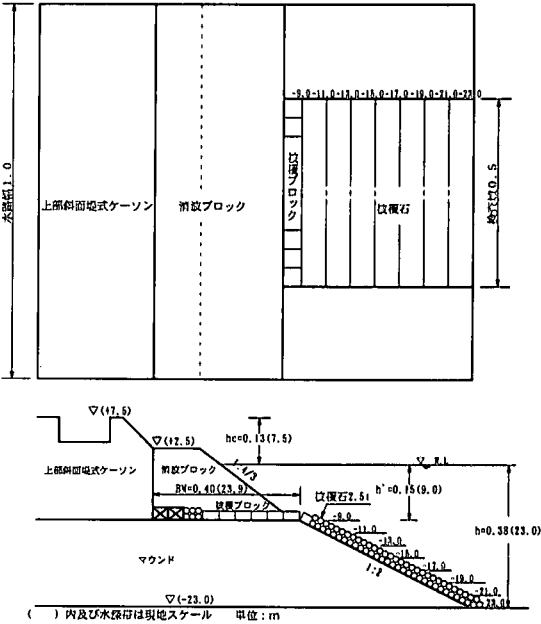
率付近の結果については、変動性を勘案しつつ、危険側の値を代表値とすることとした。



図－ 2 実験対象断面

表－ 1 実験条件

項目	条件
模型縮尺	1 / 60
防波堤形状	消波ブロック被覆上部斜面堤
水深 h マウンド水深 h' マウンド肩幅 B_M	23.0 m 9.0 m 23.9 m
石の質量 W	2.5 t
有義波周期 $T_{1/3}$ 有義波高 $H_{1/3}$	14.1, 16.1, 18 s の 3 種類 (多層 2 層、均し有り時 14 s) 8.0, 9.0, 10.0 m の 3 種類
沖波波形勾配	0.015 ～ 0.033
作用波数	1000 波以上
直立部の天端高 h_c	7.5 m (消波ブロック天端高 2.5 m)



図－ 3 実験対象模型平面及び断面

3. 均し無しの条件における安定特性

(1) 波高・周期と被害率の関係

図-4は、各波高・周期とマウンド法面水深帯毎の被害率の関係を示したものである。

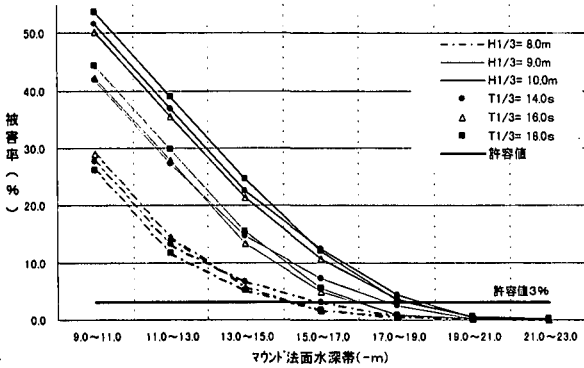


図-4 波高・周期と被害率の関係(均し無し)

はじめに、全体傾向をみると、被害率は、波高が高く、水深が浅いほど高くなっており、いずれの条件においても、-19.0m以深の水深帯では、ほとんど被害はみられないのに対し、-15.0m以浅では、許容値(3%)以上となり、-11.0m層以浅では、マウンド基礎石が吸い出されるほどの凄まじい被害状況となった。

周期による違いをみると、-15.0m層以浅の浅い水深帯では明確な傾向はみられない。これは、入射波高が高く、当該水深帯での被害が碎波による擾乱に支配されるためと考えられる。

これに対し、-15.0m~-19.0m層の水深帯では、各波高とも $T_{1/3}=14s$ の被害率が高くなっている。これは、水深が深い場所では、石の被害は重複波の「流速」に支配され、 $T_{1/3}=14s$ 時における「節」の位置が $T_{1/3}=16s, 18s$ と比べて、当該水深帯に近づいたためと推測される。ただ、全体的にみれば、周期による違いは比較的少ない。

次いで、周期別に-13.0m層以深の傾向をみると、 $T_{1/3}=14s$ の場合、 $H_{1/3}=8.0m, 9.0m$ 時には、-17.0m以浅、 $H_{1/3}=10.0m$ 時には、-19.0m以浅の水深帯で許容値以上となっているが、それ以深については、許容値未満となっており、マウンド法面の30%程度は、均し無しでも安定的と推測できる。

$T_{1/3}=16s, 18s$ の被害傾向は、ほぼ同様であり、 $H_{1/3}=8.0m$ 時には、-15.0m以浅、 $H_{1/3}=9.0m$ 時には、-17.0m以浅、 $H_{1/3}=10.0m$ 時には、-19.0m以浅の水深帯で各々許容値以上となっているが、それ以深については、 $T_{1/3}=14s$ の場合と同様に、許容値未満となっており、マウンド法面の30~50%程度は、均し無しでも安定的と推測できる。

なお、目視観察の結果、いずれのケースにおいても、動揺していた石が、波の繰り返し作用によって、

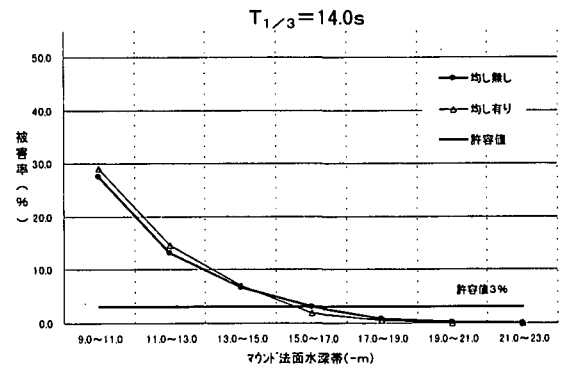
徐々に安定化する例を多々確認している。これは、初期状態時に「石同士の隙間」が存在することによって、自然の力による「かみ合わせ向上」が図られたためであり、「均し無し」の大きな特性となることが解った。

この「かみ合わせ向上」は、前回報告した「混成堤のマウンド被覆石」についても、同様に確認されたことである。

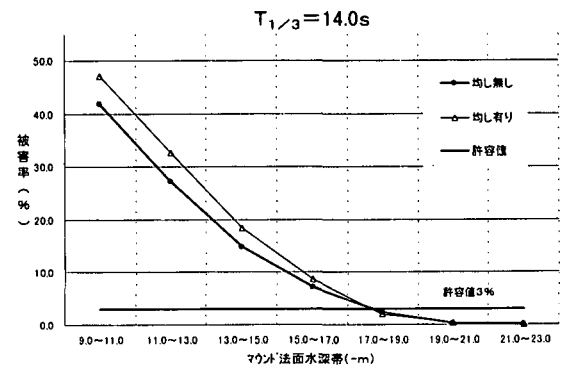
(2) 均し有りの条件との比較

ここでは、一般的な「均し有り」の条件における実験結果と比較しながら、「均し無し」の特性を検討する。

図-5(a),(b)は、 $T_{1/3}=14s, H_{1/3}=8.0m, 9.0m$ における「均し無し」、「均し有り」の被害率を比較したものである。



(a) 波高8.0m



(b) 波高9.0m

図-5 「均し有り」「均し無し」の被害率の比較

これをみると、 $H_{1/3}=8.0m$ 時の-15.0m以深、 $H_{1/3}=9.0m$ 時の-17.0m以深では、「均し有り」の条件の被害率が低く、「均し」の効果が見られているが、被害が許容値を超える-15.0m以浅では、いずれの波高も「均し有り」の条件が高い被害率となっている。「均し有り」の被害率が、浅い水深で「均し無し」より高くなる要因としては、目視観察の結果、以下のとおり推測される。

①水深の浅い層では、「かみ合わせの強さ」以上に、波による擾乱が高まること

②「均し有り」の場合、被覆石設置時にほとんど隙間がないことから、かみ合わせに寄与していた被覆石が1ヶ所被害を受けると全体の「かみ合わせ」効果が一気に低下してしまうこと

以上のことより、許容被害率（3％）を指標としてみると、 $H1/3=8.0\text{m}$ 時においては、「均し無し」で許容値を超えている水深帯を「均し」によって許容値未満に抑える効果があるものの、許容被害率を超える浅い水深帯では、「均し」による対応ができないことが解った。

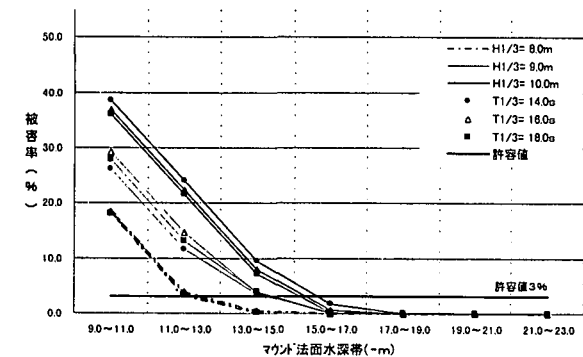
4. 多層積みの条件における被覆石の安定特性

ここでは、被覆石を「多層積み」とした場合の特性を検討する。

なお、「多層積み」の被害率は、多層石（1層及び2層分）に覆われた本体層の被覆石を対象としている。

図－6は、「多層積み1層」の条件における波高・周期とマウンド法面水深帯毎の被害率の関係を示したものである。

これより「多層積み」の全体傾向をみると、マウンド法面の50％以上に相当する-15.0m層以深の水深帯では、いずれの波高も被害はほとんど発生していないことがわかる。なお、「均し無し」と同様、周期による違いは比較的少ない。



図－6 波高・周期と被害率の関係（多層1層）

次いで、「多層積み」の特性を詳細にみてみる。

図－7(a)～(c)は、 $T1/3=14\text{s}$ 、 $H1/3=8.0\text{m}$ 、 9.0m 、 10.0m における「多層積み1層、2層」の条件と「均し無し」及び「均し有り」の条件での被害率を比較したものである。

これをみると、被覆石を「多層積み1層」にすることにより、いずれの波高も被害は減少し、「均し有り」や「均し無し」の条件で許容値を大きく超えていた $H1/3=10.0\text{m}$ 時における-15.0m～-17.0mの水深帯が、3％未満に収まる結果となった。

さらに「多層積み2層」にすると、「多層積み1層」で許容値以上となる $H1/3=9.0\text{m}$ 時の-13.0m～-15.0m層が被害率3％未満に収まる結果となった。

「多層積み」により、本体層の被害が激減する要因は、波作用中及び作用後の石の配置状況に対する

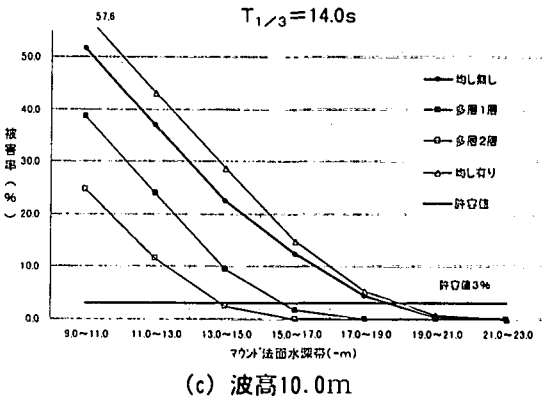
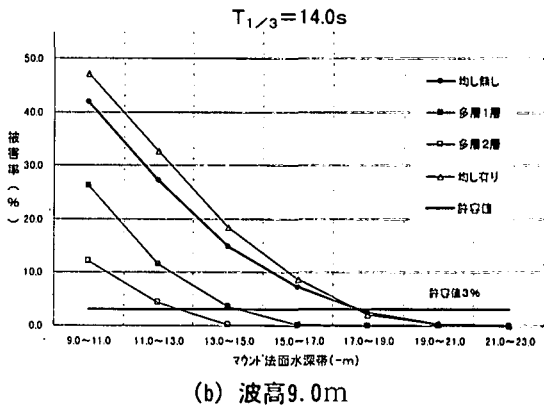
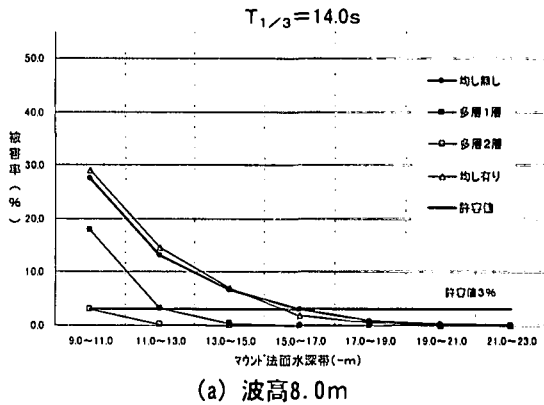
目視観察の結果、以下のとおりと推測される。

①一次効果として、多層石により、波による外力（抗力・揚力）から保護されること

②二次効果として、多層石で保護されている間に、本体被覆石も動揺を繰り返しながら、前述のとおり、石同士のかみ合わせが向上すること。なお、多層石自体のかみ合わせも同時に向上すること。

③三次効果として、本体層が動揺している間に、多層石自体が当該層にはまり込み、自然の力による「強固なかみ合わせ」が実現すること

以上のことより、「多層積み」は、「均し無し」や「均し有り」に比べて、被覆石の安定性に関し優位となることが確認された。



図－7 「多層積み」「均し無し」の被害率の比較

5. 安定限界水深推定図の提案

図- 8は、「均し無し」の実験結果を基に作成した、周期をパラメータとする波高と安定限界水深 h_D の関係を示したものである。ここに、「安定限界水深」とは、「均し無し」の条件でも安定性が確保できるマウンド法面上の上限水深であり、具体的には、被害率が許容値（3 %）未満となる水深帯の上限値を対象とした。ただし、被害率が許容値未満であっても、目視観察等の結果によっては適宜、許容値を超える結果として処理した。

これをみると、 $H_{1/3}=8.0\text{m}\sim 10.0\text{m}$ における安定限界水深は、 $T_{1/3}=14\text{s}$ の場合、 $-17.0\text{m}\sim -19.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=16\text{s}, 18\text{s}$ の場合、 $-15.0\text{m}\sim -19.0\text{m}$ となり、各々、それ以深では、「均し無し」でも、所要の安定性を確保することができるものと推測される。

また、図- 9は、図- 8と同様な方法で作成した「多層積み」の条件における安定限界水深 h_D を示したものである。

これをみると、「多層積み1層」の場合、本体層の被覆石の被害に、周期の違いがほとんど現れないことから、安定限界水深 h_D は、すべての周期について同じとなり、 $H_{1/3}=8.0\text{m}\sim 10.0\text{m}$ における安定限界水深 h_D は、 $-13.0\text{m}\sim -15.0\text{m}$ となる。さらに、「多層積み2層（ $T_{1/3}=14\text{s}$ のみ実施）」とすると、その安定限界水深 h_D は、「多層積み1層」より水深帯1層分（ 2.0m ）浅い $-11.0\text{m}\sim -13.0\text{m}$ となり、各々、それ以深では、所要の安定性を確保することができるものと推測される。

図- 10は、「均し無し」、「多層積み」、「均し有り」の安定限界水深 h_D を比較したものである。

これによれば、「均し無し」の $T_{1/3}=14\text{s}$ における安定限界水深 h_D は、 $H_{1/3}=8.0\text{m}$ 時を除き、「均し有り」のそれと同様になることが解る。また、「多層積み1層」とすると、全ての周期において、限界水深 h_D を「均し無し」より1～2層分（ $2\sim 4\text{m}$ ）浅くできるものと推測される。さらに、「多層積み2層」とすると、 $T_{1/3}=14\text{s}$ 時の限界水深 h_D は、「均し無し」より2～3層分（ $4\sim 6\text{m}$ ）浅くできるものと推測される。

図- 11は、 $T_{1/3}=14\text{s}, 16\text{s}, 18\text{s}$ のすべての条件で実験を実施した「均し無し」及び「多層積み（1層）」の条件を対象に、安定限界水深 h_D を求め、相対マウンド肩幅（ B_M/L' ）をパラメータとしてプロットした任意の波高における安定限界水深推定図である。この図より、本実験で対象とした消波ブロック被覆堤（マウンド天端水深 9m ）に関し、任意の波高、周期、マウンド肩幅に対する「均し無し」及び多層積み（1層）の条件での安定限界水深 h_D を推定することができる。

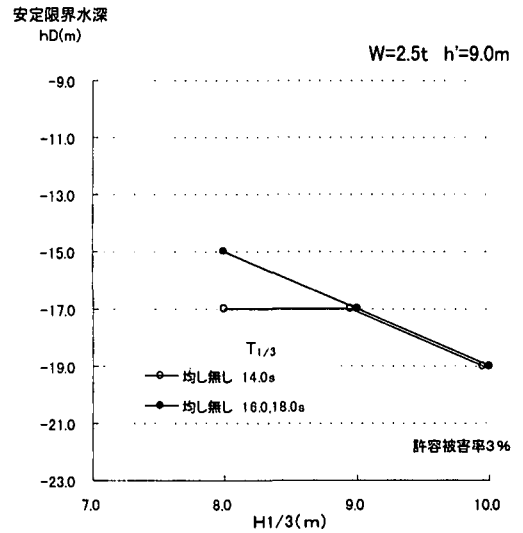


図- 8 均し無しの条件における安定限界水深 h_D

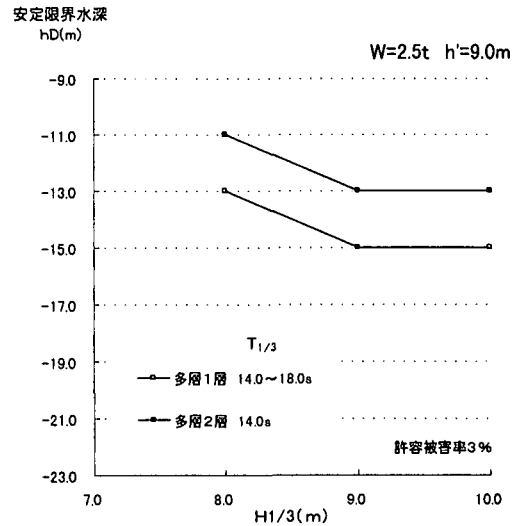


図- 9 多層積みの条件における安定限界水深 h_D

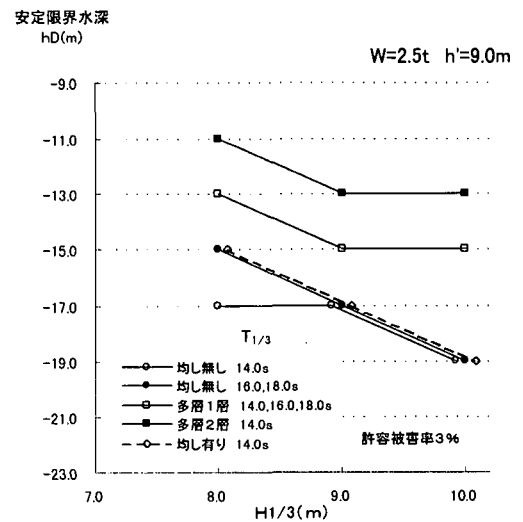


図- 10 被覆石状態の違いによる安定限界水深 h_D

ただし、本推定図の精度に対する検証実験は現時点で実施していないことから、本実験で対象とした条件以外は、あくまでも目安として用いるべきと考える。

6. 主要な結論

著者らは、報告（その1）において伊勢湾内の任意の海域における混成堤を対象に、マウンド被覆石を「均し無し」とした条件での安定特性を検討し、その安定限界水深を明らかにすると共に、「多層積み」が被覆石の安定性に関し優位となることを確認した。

これに引き続き、本研究では、外洋に面した海域に建設される「消波ブロック被覆堤」について水理模型実験を行い、マウンド被覆石（質量2.5 t）を「均し無し」及び「多層積み」とした条件での安定特性を検討した。

その主要な結論は、以下に示すとおりである。

①「均し無し」の場合、本実験の波浪条件（ $H_{1/3}=8.0\sim10.0\text{ m}$ ， $T_{1/3}=14\sim18\text{ s}$ ）で許容被害率（3％）を超える範囲は、マウンド法面の $-9.0\text{ m}\sim-19.0\text{ m}$ に限られ、各々、それ以深の範囲は「均し無し」でも安定的となることが解った。

なお、最も周期の短い $T_{1/3}=14\text{ s}$ で被害が若干多く発生するものの、周期による違いはそれほど現れなかった。その理由として、実験対象周期が長く、水深も深いことから、重複波の節がマウンド法面の深い位置に存在したことによるものと推測される

②「多層積み」の条件では、いずれの波高、周期でも、「均し無し」より本体層の被害は激減した。このことより、「多層積み」は、被覆石の安定性に関し、優位となることが解った。

③ 実験結果を基に、許容被害率（3％）未満となる安定限界水深を求め、各種の被覆石設置条件に対する「安定限界水深推定図」を作成した。

さらに、すべての波浪条件で実験を実施した「均し無し」及び「多層積み1層」の条件については、相対マウンド肩幅（ B_M/L' ）をパラメータとする任意の波高、周期、マウンド肩幅に対する「安定限界水深推定図」を作成した。

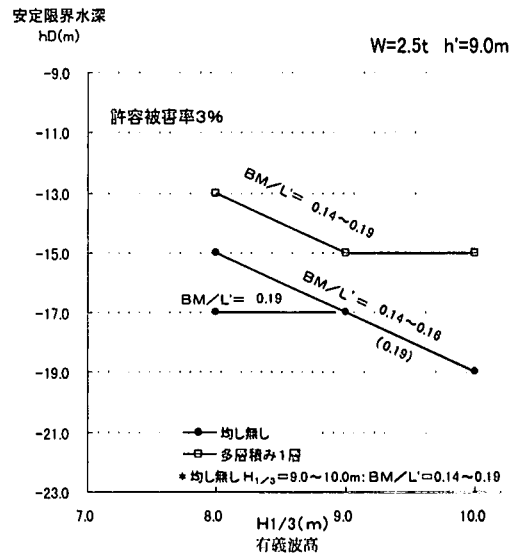


図- 11 「均し無し」及び「多層積み（1層）」の条件における安定限界水深推定図

参考文献

- 1) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良実: 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第3号, pp. 3~42, 1982
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 1991
- 3) 杉野輝彦, 古田喜代志, 金田研一郎, 吉田要: 混成堤マウンド被覆石の安定性に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 59~64, 1999