

施工時の捨石層の変形を考慮した 緩傾斜石積護岸の施工計画

WORKING PROCEDURE OF RUBBLE MOUND SEAWALL CONSIDERING THE
RISK OF BULKHEAD DAMAGE DURING THE PERIOD OF CONSTRUCTION

相川 秀一¹・阪井田 茂²・金澤 剛³・小竹 康夫⁴・古川 好男⁵
Shuichi AIKAWA, Shigeru SAKAIDA, Tsuyoshi KANAZAWA, Yasuo KOTAKE
and Yoshio FURUKAWA

¹正会員 東洋・大旺・前田・三井・りんかい・浅川特定建設工事共同企業体(〒596-0015 岸和田市地藏浜町7-1)

²関西国際空港株式会社 建設事務所(〒549-0001 泉佐野市泉州空港北一番地)

³正会員 工修 東洋建設株式会社 大阪本店(〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4-1-1)

⁴正会員 工博 東洋建設株式会社 鳴尾研究所(〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25-1)

⁵東洋・大旺・前田・三井・りんかい・浅川特定建設工事共同企業体(〒596-0015 岸和田市地藏浜町7-1)

During the period of the rubble mound seawall construction there is no armor stones or concrete armor units to protect the structure against wave forces. Therefore, if the recession occurs during the construction period, it should be considered that the completion would be delayed.

In this paper, wave basin test has been conducted in multidirectional random waves to investigate deformations of rubble mound seawall with pier head during construction. And a substitute plan that is able to shorten the construction period about three month is proposed.

Key Words : Rubble mound seawall, deformation, working procedure

1. はじめに

緩傾斜石積護岸はコスト面に加え, 関西国際空港 1 期空港島における完成後の環境創造の実績¹⁾等から, 人工島などの護岸に多く採用されている。その構造は捨石による堤体の上部にコンクリートブロックを据え付けたもので, 捨石の表面は散乱防止のために被覆石や消波ブロックで覆われる。すなわち, 完成後の護岸断面は, 高波浪に対して安定な質量を有する被覆石や消波ブロックによって形状が保持される。

ところで, 1999年7月に着工した関西国際空港 2 期空港島においても, 護岸の大部分が緩傾斜石積護岸で計画され, 2001年4月には堤体が水面上に現れる捨石の施工が始まる。この工事では, 施工効率の面から捨石投入工, 被覆石工, 消波ブロック設置工といった異なる3つの工種を作業船の保安距離を確保した上で並行させる施工法が採用されている。この場合, 捨石投入工の先端部付近は, 高波浪に対して安定でない質量の捨石が剥き出しのまま水面上に天端を有する堤頭部を形成する。したがって, この

捨石だけの堤体に台風等の高波浪が来襲すると, 大きな被害が生じる危険性が高い。

一方, 関西国際空港 2 期工事は 1 期工事以上の大水深域における大量急速施工であり, 被災による手戻りは最小限に留める必要がある。しかしながら, 被災を避けるための対策が過大になりすぎるとコスト面において望ましくない。そこで, 合理的な施工途中の捨石部の被災対策を検討することが求められるが, その為には捨石部がどのような形態・規模の変形を受けるのかを把握する必要がある。

捨石堤の破壊に関する研究には, 不規則波による破壊特性を論じ, 破壊後の平衡勾配の存在を示した樁木ら²⁾や, 個別要素法を用いて変形形状の予測を試みた荒木・出口³⁾がある。しかしながら, こうした研究は完成断面を対象としたものであり, 施工時の断面を対象としたものは少ないようである。そこで, 本研究では関西国際空港 2 期空港島護岸を対象に多方向不規則波実験を実施して, 施工時の堤頭部を含む緩傾斜石積護岸の変形形状を測定し, その変形特性について検討する。次にいくつかの対策法の効果について検討し, 最後に, 施工時の捨石層の変

形を考慮した工程について検討する。

2. 検討条件

(1) 検討領域

関西国際空港 2 期空港島の緩傾斜石積護岸のうち、検討対象としたのは 2 期空港島北西に位置する A3 護岸である(図-1)。ただし、A3 護岸の延長は 2000m 以上あり、すべてを水理実験の対象とするのは困難であった。そこで、数値計算により護岸周辺の波浪場を予測し、波高分布の特徴から実験対象領域を定めることとした。

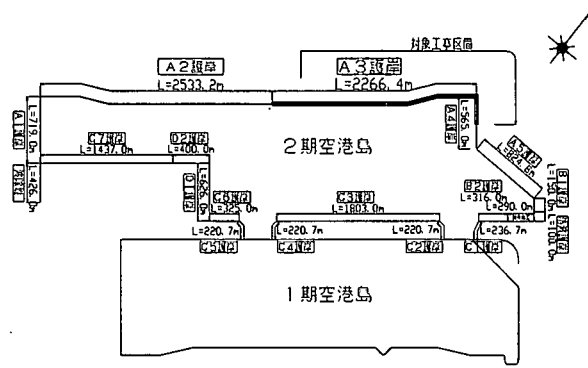


図-1 対象護岸平面位置図

(2) 波浪条件

対象波浪は実測結果から施工期間を考慮して定めた。図-2は空港島近傍の海上観測塔(MT局)における昭和61年から平成7年までの10年間の観測結果から、有義波高が2.0m以上のものについて、波向別度数分布を示したものである。これより有義波高2.0m以上の高波浪の卓越波向はWSWであるといえる。なお、有義波高が1.0mを超える確率は全体の3%程度であるが、2.0mを超える出現確率は0.03%程度とかなり少ない。一方、A3護岸端部にある隅角部ケーソンの施工時の安定計算に用いられた10年確率波のうち、WSWの諸元は $H_{1/3}=3.1\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.8\text{s}$ である。そこで、ここでは対象波を $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7.0\text{sec}$ とした。波向はWSW、Wおよび護岸に直角入射する場合の中から数値計算結果を踏まえて最も危険な波向きを選定することとした。なお、波向WSWは護岸法線と 16.5° をなす。

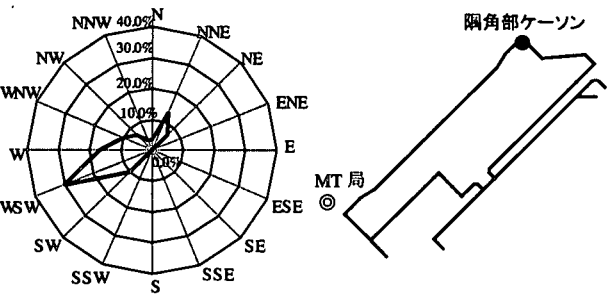


図-2 波向別波高度数分布

3. 数値計算による事前検討

(1) 数値計算法

平面波浪場の計算には、多方向不規則波を直接時系列的に取り扱える石井ら⁴⁾による有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を使用した。また、低反射率境界の取り扱いには金澤ら⁵⁾にしたがった。

(2) 護岸モデル

現地における施工時の護岸断面形状は工事の進捗状況に応じて主として3つのパターンが存在し、図-3に示すように、平面的には工事の進行方向先端の堤頭部から①捨石完了断面、②被覆石設置完了断面、③消波ブロック設置完了完成断面の順にある間隔において連続している。こうした施工時護岸の断面的・平面的特徴を数値計算でも考慮した。

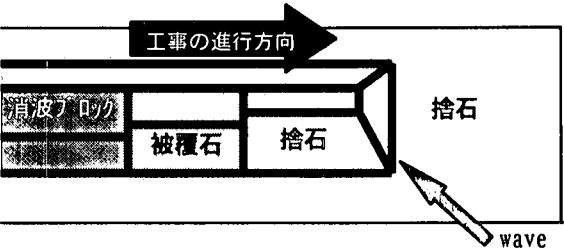


図-3 施工時護岸の平面形状の模式図

(3) 計算領域および計算条件

数値計算でもA3護岸全域を対象とすることは困難であったので、図-4に示す計算領域を設定した。すなわち、捨石完了断面および被覆石設置完了断面延長を各200m、消波ブロック設置完了完成断面延長を300mとした。また、隣接するA2護岸との開口幅を400mとした。計算条件一覧を表-1に示す。なお、方向集中度パラメータ S_{max} は、合田⁶⁾に従い波形勾配と屈折による変化を考慮して設定した。

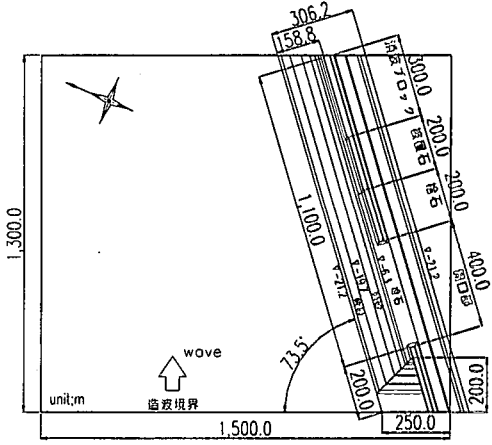


図-4 計算領域図

(4) 計算結果

それぞれの波向について波浪変形計算を実施した結果、護岸周辺の波高分布で局所的な波高増大が見

られたのは堤頭部であった。波向WSWの堤頭部周辺の波高比分布を図-5に示す。波高比は有堤時の波高を無堤時のそれで除して得た。また、表-2に各波向における堤頭部近傍の最大波高比を示す。この結果から、堤頭部近傍における波高増大に及ぼす波向きの影響は小さいと考えられる。一方、捨石完了断面と被覆石設置完了断面の断面変化点および被覆石設置完了断面と消波ブロック設置完了断面の断面変化点近傍では、有意な波高変化が見られなかった。こうしたことから、水理実験では特に堤頭部周辺の領域に注目することとした。

表-1 計算条件一覧

項 目	諸 元
有義波高 $H_{1/3}$	3.0m
有義波周期 $T_{1/3}$	7.0sec
波 向	WSW,W,護岸に直入射
方向集中度 ρ ラメ-タ S_{max}	10
周波数スペクトル	Bretschneider-光易型
方向スペクトル	光易型
潮 位	H.W.L.+1.60m
一様水深部の水深 h	21.6m：含潮位
空間刻みDX	2.5m

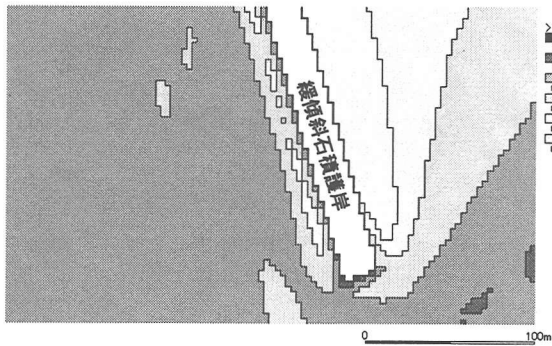


図-5 堤頭部近傍の波高比分布(WSW)

表-2 堤頭部における最大波高比

波 向	最大波高比
WSW	1.24
W	1.23
護岸に直角	1.17

4. 水理実験

(1) 平面水槽

実験で使用した平面水槽は長さ30.0m、幅19.0m、深さ1.5mであり、1枚50cmの造波板30枚(=15.0m)で構成される多方向不規則波造波装置を備えている。

(2) 護岸模型

堤頭部を有する護岸模型は延長を出来るだけ長くとりよう縮尺1/75とし、図-6に示すように敷砂および盛砂部を塩化ビニル板で製作し、捨石部を碎石で

形成した。現地換算値で堤脚水深が-20.0m、捨石の法先水深-11.5m、天端高+4.0m、天端幅13.0m捨石の法勾配は水深-6.0m以浅が1:4/3、以深が1:2である。図-7に護岸模型の設置状況を示す。実験対象波の波向を考慮して、護岸法線と平面水槽の岸沖方向軸が16.5°をなすように配置した。

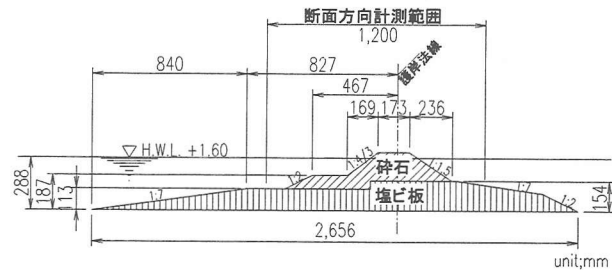


図-6 護岸模型断面図

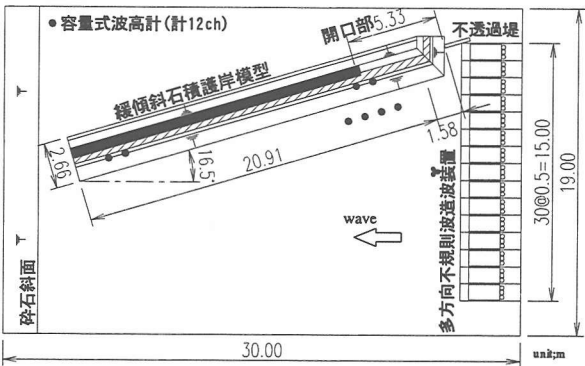


図-7 水槽平面図

(3) 使用石材

現地で使用する石材の規格は10～200kg/個であり、捨石1個あたりの平均質量は50～100kg程度になる。そこで、実験で使用する碎石はこの平均質量を再現するよう6号碎石と7号碎石を混ぜたものをふるい分けし、粒径を3～7mmに調整したものを使用した。この碎石の1個当りの平均質量は現地換算値で約60kgであった。

石材質量の違いが護岸変形量に及ぼす影響を検討するため、同様に粒径を7～10mm、10～13mmに調整したものも用意した。それぞれの平均質量は現地換算300kgおよび1100kgであり、1100kg/個のものは概ね、被覆石1t/個に相当する。

(4) 波浪条件

実験対象波は前述のとおり $H_{1/3}=3.0m$ 、 $T_{1/3}=7.0sec$ である。さらに、波高が護岸変形量に及ぼす影響を検討するため、有義波高を1.0m、2.0m、2.5mとした場合も対象とした。波向は数値計算による検討結果を踏まえてWSWとした。

(5) 実験ケース

実験ケースは図-8に示す現状の平均60kg/個の捨石を用いた基本型(type1)、護岸全体に耐波性能を高めるため平均300kg/個の捨石を使用した捨石質量

増大型 (type2), さらに, 堤頭部を被覆石で覆った端部保護型 (type3) の3護岸モデルと各波浪条件の組合せとした. なお, type1における60kg/個の捨石は護岸堤頭部法肩から3m (現地換算225m) 間に使用し, それ以降は300kg/個の捨石を使用した.

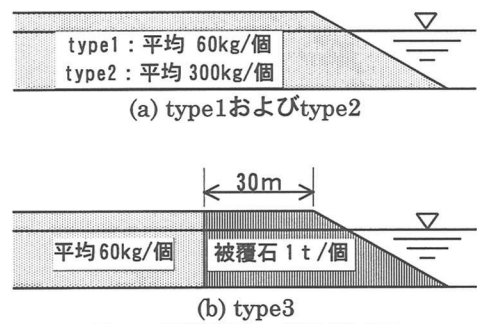


図-8 護岸模型の構造模式図

(6) 計測

護岸模型周辺の波浪場は模型周りに設置した容量式波高計にて水位変動を測定した. 護岸形状はレーザー式変位計を用いて, 波の作用前後の形状を計測した. レーザー式変位計による測定間隔は, 護岸の断面方向には1cm (現地換算0.75m), 法線方向には5~20cm (同3.75~15m) とした.

実験は波高が小さいケースから順に実施し, 1波浪諸元に対して造波時間は10分間とした. なお, 最も波高が小さい $H_{1/3}=1.0\text{m}$ のケース以外は, 波浪を作用させる前に護岸の整形を行っていない. すなわち, 波高が大きなケースにおける護岸の変形量には, それより小さい波高で生じた変形量を含んでいる.

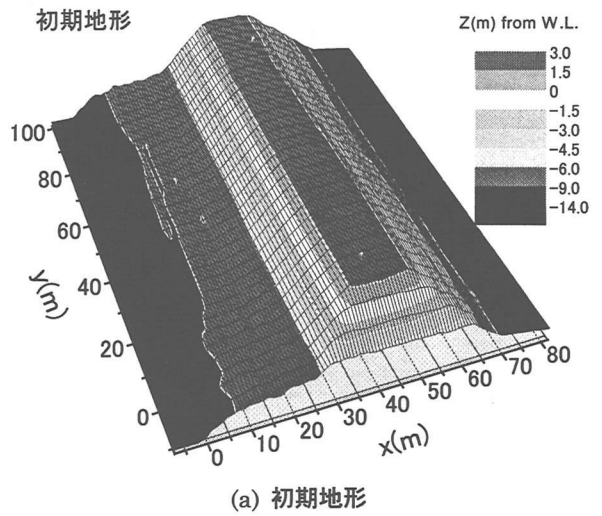
5. 実験結果

(1) 変形の概要

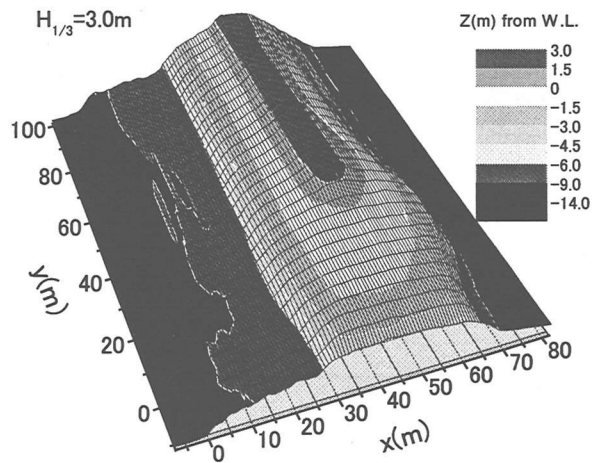
図-9に60kg/個の砕石を用いたtype1の初期形状と $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 作用後の護岸形状を示す. 以降, 数値は現地換算値で論じる. また, 座標系は水面から鉛直上向きにz軸, 護岸断面方向には捨石沖側法尻から岸側にx軸, 護岸法線方向には開口部側法肩から護岸延長方向にy軸とした. 図-9によれば, 波の作用によって, 堤頭部では天端が狭くなるとともに後退し, 天端先端部は丸みを帯びた. また, 堤頭部岸側法尻が膨らんでいる. 一方, 堤頭部以外でも沖側の法肩位置が岸側に移動して天端幅が狭くなった. こうした変形の傾向は他のケースにおいても共通していた. 以後, 堤頭部の変形が影響しない領域を一般部と称する.

(2) 一般部の変形量

図-10に60kg/個の砕石を用いたtype1の $y=150\text{m}$ における断面形状の変化を示す. 図-10によれば, 護岸沖側は水面付近が侵食し法尻付近に堆積が生じる侵食型の断面変形を表している. ただし, 来襲波高



(a) 初期地形



(b) $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 作用後
図-9 護岸地形図(type1)

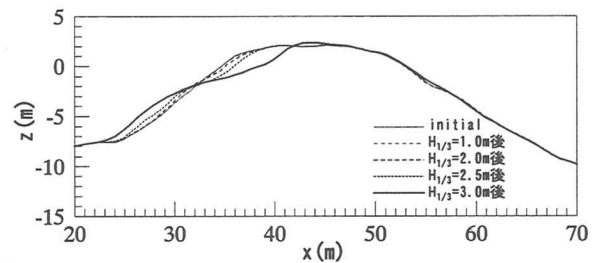


図-10 岸沖方向護岸断面変形(type1 $y=150\text{m}$)

2.0mまでは断面変形は明確でなく, 来襲波高がそれ以上になると, 波高の増大にともなって急激に断面変形が進んだ. $H_{1/3}=3.0\text{m}$ では法肩の後退距離は約5m, 侵食深さは2m程度と大規模な変形が生じた.

次にtype1の一般部で60kg/個の砕石を用いた区間である $y=80\sim 220\text{m}$ の各計測断面について, $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 作用後の沖側侵食部の面積および堆積部の面積を示したものが図-11である. 図中には300kg/個の砕石を用いたtype2の同一区間のデータも示してある. 多少のばらつきはあるものの, それぞれの系列は概

ね一定の値を示しており、多方向不規則波に対して護岸法線方向に護岸の変形はほぼ同一であることがわかる。侵食量に着目すれば、60kg/個の捨石の場合は10m²/m程度であるのに対し、300kg/個の場合は2m²/m程度と、捨石の平均質量を60kg/個から300kg/個に変更したことにより侵食量は約1/5となった。

図-12はtype1およびtype2に各波浪を作用させた場合の沖側侵食部の面積と入射波高の関係を示したものである。斜面上の捨石の所要質量を算定する際、一般に使用される安定数を用いたハドソン式⁷⁾とvan der Meerの被覆石の安定数算定式⁷⁾を組み合わせると、侵食部の面積は波高の5乗に比例するという関係が得られる。今回の実験結果でも侵食部の面積はほぼ入射波高の5乗に比例していた。

(3) 堤頭部の変形量

図-13は60kg/個の砕石を用いたtype1において、各波浪作用後の水深0mと-6mの水深コンターを示したものである。作用波高の増大にともない、天端が法線方向に大きく後退し、岸側法尻付近が膨らんでいる。H_{1/3}=3.0m作用後の変形量は、0mのコンターは初期位置より30m程度後退し、-6mのコンターは5m程度膨らんだ。一方、type1、type2およびtype3におけるH_{1/3}=3.0m作用後の0mのコンターを示したものが図-14である。砕石の平均質量が60kg/個であるtype1の後退量約30mに対し、平均質量300kg/個であるtype2では10m程度の後退量である。1t/個の被覆石で端部保護したtype3では、被覆石が移動した後に60kg/個の砕石も移動したため、後退量は15m程度とtype2よりも大きい。さらに、type3では被覆石と捨石の境界部付近で捨石の侵食が顕著であり、部分的にtype1よりも侵食が激しいところが認められた。一般部の検討において、多方向不規則波に対する護岸法線方向の変形はほぼ同一であるとしたが、このように石材の大きさが変化する部分や法線方向に護岸形状が変化する個所では、より大規模な変形が生じる危険性が高い。

6. 捨石層の変形を考慮した施工計画

捨石に使用する石材質量によって捨石層の変形量は大きく異なるが、来襲波高3.0mの場合、通常の捨石規格に相当する平均質量60kg/個程度では変形量はかなり大きくなる。したがって、捨石層の変形を避けるために、一般的には台風期の施工を一時中断するよう施工計画を立案する(標準断面案)。しかしながら、この計画では次工程の被覆石均し等の施工を、波浪条件が比較的厳しい冬季に行なわなければならない。一方、実験結果によれば平均300kg/個の捨石を使用した場合は、来襲波高が2.0mでは捨石層はほとんど変形せず、来襲波高が3mでも変形量はかなり小さくなった。こうしたことから、図-15のように被災を受ける可能性が高い捨石層の一部に大き

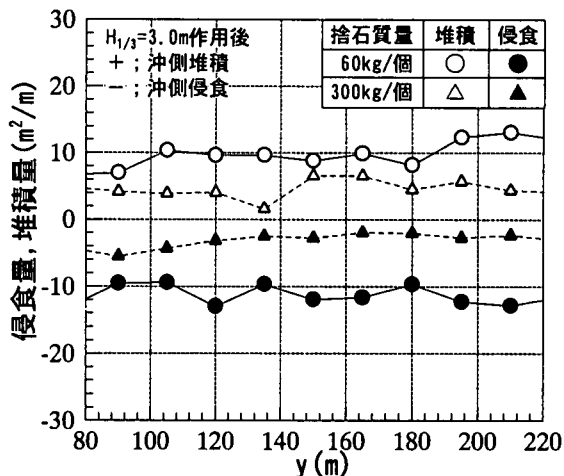


図-11 沖側侵食量および体積量(type1, type2)

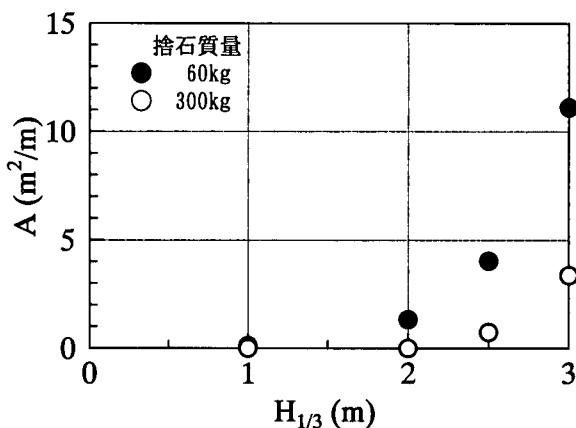


図-12 入射波高と侵食部面積の関係

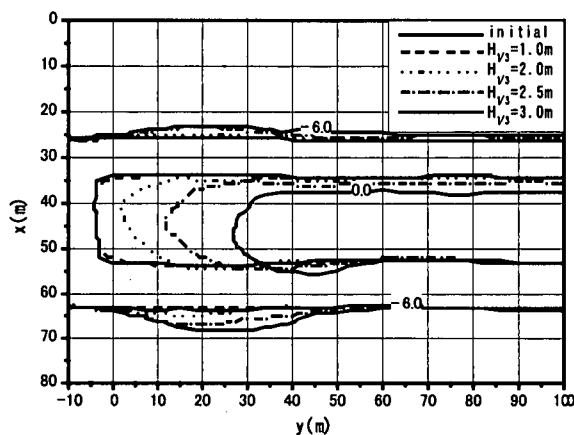


図-13 水深コンターの変化

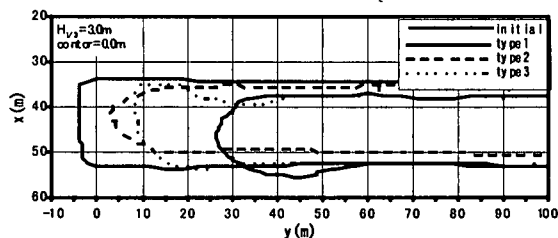


図-14 堤頭部の変形

めの石材を採用して変形を小さくしたうえで、台風期も施工を継続することを考える(対策断面案)。この場合、捨石層の変形の程度によっては手戻りが生じる可能性もあるが、工期は台風期に施工を一時中断する計画より2～3ヵ月程度短縮できる。また、波浪条件が厳しくなる冬季前に被覆石の均し作業を完了させることができるメリットもある。表-3および表-4に標準断面案と対策断面案の工程比較を示す。

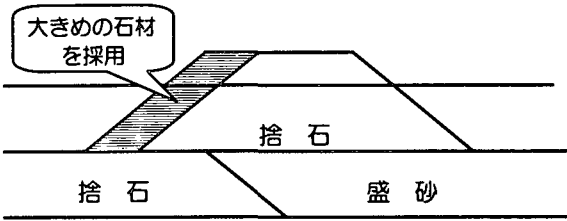


図-15 対策断面案

表-3 工程表の比較

	平成13年						平成14年					
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
捨石②												
被覆石均し(水中)												
被覆石均し(陸上)												
上留工												

□ 標準断面案(施工中断あり)
■ 対策断面案(施工中断なし)

表-4 工程計画の比較

	対策断面案	標準断面案
台風期波浪の影響	△ (変形の程度により手戻りが発生)	○
冬期波浪の影響	○	△ (水中均しの効率低下)
載荷履歴	○	△ (捨石中断部境界で沈下量の差が大)
施工性	○	△

7. まとめ

施工時の堤頭部を含む緩傾斜石積護岸を対象に多方向不規則波実験を実施し、護岸一般部および堤頭部における変形の特性および対策法の効果について検討した。また、施工時の捨石層の小規模な変形を

許容した場合の施工計画を検討した。得られた結論を以下に示す。

- ①数値計算結果に護岸堤頭部での波高増大が見られ、水槽実験での着目点とした。波向は護岸と16.5～90°をなす範囲で検討した結果、それぞれの差異は僅かであった。実験対象波は現地の出現頻度も考慮して16.5°(WSW)とした。
- ②水槽実験では、水面付近が侵食し法尻付近が堆積する侵食型の断面変形が、来襲波高が2mを超えた場合に顕著であった。捨石を10～200kg/個から300kg/個に変更すると $H_{1/3}=3.0\text{m}$ のときの侵食部面積は約1/5となった。
- ③堤頭部の法肩も来襲波高が2mを超えると大きく後退した。この場合も捨石質量を増大させる、或いは被覆石による端部保護で後退量を1/2程度に縮小できた。
- ④護岸法線方向に石材および断面形状が同一であれば、多方向不規則波に対する護岸法線方向の変形はほぼ同一であった。しかしながら、法線方向に石材の大きさが変化する部分では、より大規模な変形が生じた。
- ⑤台風期の施工を一時中断する標準断面案に対して、捨石層の一部を来襲波高が2m以上でも変形量を低減可能な質量の捨石に変更して台風期も施工する対策断面案では、2～3ヶ月程度の工期短縮が望める。

謝辞：本研究を進めるにあたって大阪大学大学院出口一郎教授には数々のご指導をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 尾崎正明・伊藤利加・奥田泰永・二宮早由子：関西国際空港島護岸の藻場造成による環境創造効果について、海岸工学論文集，第47巻，pp.1196-1200，2000。
- 2) 榎木 亨・柳青魯・楠見正人：不規則波に対する捨石堤の設計手法に関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp.567-570，1984。
- 3) 荒木進歩・出口一郎：捨石防波堤の断面変形に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.531-535，1997。
- 4) 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃：有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた平面2次元波浪場計算，海岸工学論文集，第41巻，pp.6-10，1994。
- 5) 金澤 剛・長山秀樹・藤原隆一・小竹康夫：多方向不規則波浪場での任意反射率境界の設定方法，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅱ-3，pp.6-7，2000。
- 6) 合田良実：増補改訂 港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，333p，1990。
- 7) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，(社)日本港湾協会，573p，1999。