

ヘッドランド工法の設計手引き(案)の検討とその適用

横山 嘉夫* ・田辺 勇人** ・中西 勝利***
加藤 史訓**** ・山本 吉道***** ・有村 盾一*****

本研究は、高知海岸で計画されているヘッドランド工法の設計に資すると共に、今後ヘッドランド工法を検討する他の海岸にも適用出来る設計指針の提案を目的としている。それゆえ、ヘッドランド工法の設計の基本方針について述べると共に、透過性構造物にも適用出来る洗掘予測数値モデル、さらに、その数値モデルで作成した算定図を用いた、設計水深や根固・基礎工への洗掘量の評価方法を示し、具体的な事例検討から妥当性を確認した。また、基礎工の構造やブロック算定法についても、近年得られている知見の確認をした。

1. はじめに

高知海岸では、ヘッドランド工法による侵食対策事業が進められようとしている。ヘッドランド工法とは、Silvester (1960) が提案したヘッドランド・コントロール・システムを起源とし、岬(以降、ヘッドランドと呼ぶ)間において汀線が卓越波向に対して直角になることで海浜が安定になっている性質を応用し、岬の適切な配置によって沿岸漂砂を効果的に制御することで侵食を防止する工法である(図-1参照)。我が国では、土屋ら(1979)や宇多・山本(1987)などの研究がある。

砂浜幅が広い海岸や、養浜によって砂浜を回復させる海岸では、ヘッドランドの核となる構造物(離岸堤や突堤)を適切に配置することによって、構造物の設置数を必要最低限に減らすことが可能となり、コスト縮減、海岸の利用や環境への悪影響の軽減を期待できる。

ヘッドランド工法の設計は、「海岸保全計画の手引き」(旧建設省河川局, 1994)や「海岸施設設計便覧」(土木学会, 2000)などを用いることによって、所要の侵食防止機能を有する構造物の平面配置と基本断面諸元的设计(以降、機能設計と呼ぶ)、また、構造形式と設計水深が決まっていると言う条件下で、構造物の安定であるための諸元的设计(以降、安定設計と呼ぶ)は可能である。

しかし、高波来襲時の短期的侵食や洗掘による離岸堤

等の被災が生じており、洗掘等を実用に耐える精度で予測し、それを設計に反映させる手法が求められている。

本報では、ヘッドランド工法の設計手順を整理し、ヘッドランド工法の設計指針を提案する。特に、安定設計における局所洗掘予測手法については、山田ら(2001)の研究をさらに発展させた上で、具体的な事例検討から妥当性を確認した。

2. ヘッドランド設計の基本方針

全国的に顕著になってきた海岸侵食は、そのほとんどが何らかの原因によって土砂供給量が減少したことによる。したがって、これらの原因を取り除けば、海岸侵食が止まる可能性は高く、一連の流砂系と見なせる領域内の上流から下流までの総合的な土砂管理を考えながら、土砂のバイパスシステムの整備、土砂移動を阻害する施設の縮小や土砂採取量の低減を進めていくことが、侵食対策の基本である。しかし、国民生活の安全性や産業活動を阻害することなく、土砂供給を急激に回復させることは難しく、何十年もの時間をかけることなく侵食防止効果を発揮できる方法は以下の通りである。

まず、土砂供給量不足を改善する方法として、養浜が考えられる。ただし、養浜するだけでは養浜材が流出し続けることが多く、将来にわたる予算と養浜材の確保が不可欠となり、養浜材の調達に継続的に可能な場合を除いて、養浜のみによる対策は採用できない。また、大量の養浜材が河口閉塞や港口埋没などの問題を生じさせること無く、必要な箇所に必要な時期に存在するように制御することも容易でない。

一方、対象海岸からの土砂流出量を低減し、土砂供給量とバランスさせる方法として、突堤群や離岸堤群を用いる工法がある。ただし、短期間に必要な基数を設置出来ない場合は、沿岸漂砂移動の下手側侵食を悪化させることがある。また、海岸の景観を悪化させる可能性が高いことに注意する必要もある。

ヘッドランド工法は、突堤と比べて設置間隔が長く、広い砂浜を確保することが出来る。また、離岸堤と比べて沿岸方向の開口部が大きく、ウミガメ等の岸沖方向の移

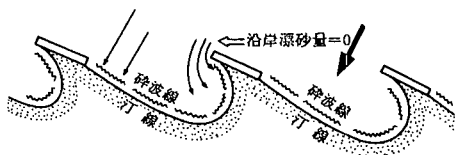


図-1 ヘッドランド工法の説明
(海岸施設設計便覧(2000), p. 331より抜粋)

- * 国土交通省高知工事事務所調査課課長
- ** 国土交通省高知工事事務所調査課前係長
- *** 国土交通省高知工事事務所調査課係長
- **** 正会員 工 修 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室主任研究官
- ***** 正会員 博(工) (株)アイ・エヌ・エー海岸部
- ***** 正会員 工 修 (株)アイ・エヌ・エー海岸部

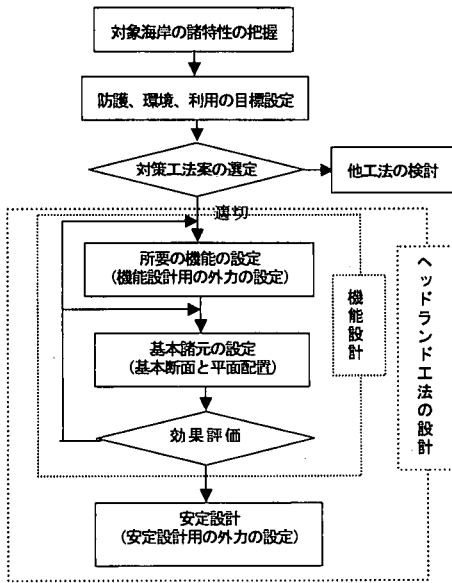


図-2 ヘッドランド工法の設計フロー

定設計を行うことになるが、特に重要な設計水深や根固・基礎工への短期侵食量や洗掘量の考慮の仕方について述べる。

(1) 短期地形変化予測モデルの概要

Boussinesq モデルと乱流クロージャーモデル ($k-\epsilon$ モデル) をベースに、波による掃流砂・浮遊砂の輸送をシミュレートできる Vuら (1999, 2000) の鉛直 1 次元モデルを平面二次元に拡張し、透過構造物にも適用出来るように改良した。このモデルの概要を以下に説明する。

流体の基礎式としては、非線形性と分散性を考慮できる Boussinesq の方程式に、砕波による波エネルギーの損失を加味したものをを用いた。遡上域を含めた波の計算をするために、Hibberd・Peregrine (1979) の方法によって岸側の条件を設定した。また、鉛直方向に積分した砕波帯内における乱れエネルギー方程式 (k 式) と乱れエネルギーの散逸率方程式 (ϵ 式) を解き、砕波による波エネルギーの損失、乱れによる底質の巻き上げ、輸送、沈降を再現できるようにした。

透過構造物に対しては、その周辺で Boussinesq 方程式の分散を無視でき、流体が構造物内の間隙中に流れると仮定し、次の透過構造物内の質量保存式、運動量保存式、乱流エネルギー保存式、および、浮遊砂量保存式と水深変化式を用いた。

$$\frac{\partial V_e q_x}{\partial x} + \frac{\partial V_e q_y}{\partial y} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V_e q_x^2}{d} \right) + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_e q_x q_y}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - M_{bx} + \frac{f_c}{d^2} |q_x| q_x = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V_e q_x q_y}{d} \right) + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V_e q_y^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \eta}{\partial y} - M_{by} + \frac{f_c}{d^2} |q_y| q_y = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{u} k}{\partial x} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{v} k}{\partial y} = P_r - \epsilon + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(V_e \nu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(V_e \nu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right) \dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{u} \epsilon}{\partial x} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{v} \epsilon}{\partial y} = \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(V_e \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(V_e \nu_t \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} P_r - C_{2\epsilon} \epsilon) \dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{u} C}{\partial x} + \frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e \bar{v} C}{\partial y} = \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(V_e \nu_t \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{V_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(V_e \nu_t \frac{\partial C}{\partial y} \right) - C_s + C_{ut} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{1}{V_e} \frac{1}{1 - \epsilon_s} \left(\frac{\partial V_e q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial V_e q_{by}}{\partial y} - V_e C_s + V_e C_{ut} \right) \dots\dots\dots (7)$$

動をあまり妨げない。それゆえ、ヘッドランド工法を用いて、妥当な事業費で十分な侵食防止効果を期待する方法を検討する価値は高く、その設計手順は以下のようになる (図-2 参照)。

2.1 ヘッドランドの機能設計

まず、対象海岸の諸特性を含む一連の漂砂系についての漂砂機構と土砂収支を把握し、保全目標を設定して、対策工法案を選定する。高潮や高波への直接的な対策が必要な場合や、沿岸漂砂よりも岸沖漂砂や飛砂などによる土砂量欠損が侵食の主原因である場合は、ヘッドランド工法の適用性は低く、他の工法を選定することになる。

ヘッドランド工法の適用性が高い場合は、次のようにして機能設計を行う。

防護目標 (最低限確保すべき砂浜幅など) を達成できる所要の機能 (沿岸漂砂阻止率など) とこの機能が発揮される設計外力 (波および潮位条件) を設定する。

次に、防護目標の達成を期待できる構造物の基本断面諸元 (透過性、設置水深、天端高、天端幅等) と平面配置諸元を複数案設定する。

そして、数値シミュレーション等による予測から侵食防止効果を確認し、最小の概算事業費で最大の効果を期待できる案を見出す。この際に、背後陸域に民家や重要な施設が存在し、被災することが許されない場合には、平均的な外力を用いた長期的な防護機能だけでなく、高波来襲時の短期的な防護機能を確認する必要がある。

2.2 ヘッドランドの安定設計

機能設計での比較検討から、最適なヘッドランド計画が決定したならば、ヘッドランドの核となる構造物の安

ここに、 V_e は有効体積比(任意メッシュの体積とその中に占める流体体積の比： V_w/V_0)、 x と y は岸沖と沿岸方向の座標、 q_x と q_y はそれぞれ x と y 方向の線流量、 η は水位、 t は時間、 d は全水深、 g は重力加速度、 f_c は海底摩擦係数、 M_{bx} と M_{by} は砕波による波エネルギー損失項、 \bar{u} と \bar{v} は鉛直方向平均のensemble平均流速、 P_r は乱れエネルギーの生成項、 ν_t は渦粘性係数、 $\sigma_t (=1)$ 、 $\sigma_c (=1.3)$ 、 $C_c (=0.09)$ はクロジャー係数、 $C_{1c} (=1.44)$ 、 $C_{2c} (-1.92)$ は散逸率 ε の生成および減衰速度、 C は鉛直方向積分の浮遊砂密度、 C_s は沈降浮遊砂量、 C_{ut} は巻上浮遊砂量、 ζ はある基準高さに対する底面標高、 q_{bx} と q_{by} は x, y 方向の線掃流砂量、 ε_s は砂層の空隙率である。

(2) 差分スキムの取り方

本数値モデルの式を差分化して計算する。空間差分については staggered grid を用いる。運動方程式の移流項は中央差分、他の式の移流項は風上差分である。その他の項は中央差分である。時間の差分には Crank-Nicolson scheme を用いる。本 scheme を用いる場合は、対象となった変数の未知量を求めるために、新しい時刻における他の変数の値を使用する必要がある。例えば、運動方程式(2)、(3)を解いて流量を求めるとき、新しい時刻における水位と渦粘性係数を用い、繰り返し計算を行う。

また、山田ら(2001)の研究で用いた差分スキムでは、汀線での渦粘性係数に陸上のゼロ渦粘性係数と水のある汀線の隣メッシュの渦粘性係数の平均値を使った結果、運動量が陸上に拡散され、不安定になり易かったので、今回の研究では、汀線付近でスペリの境界条件を使用することにした結果、運動量は陸上に拡散されなくなり、本モデルの安定性が向上した。

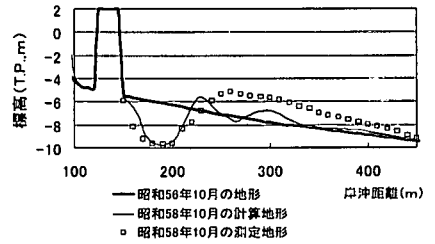
(3) 検証計算

改良された本数値モデルの妥当性を、現地データを用いた再現計算によって確認した。ここでは、「海岸侵食対策」(第18回海岸実務講義集, 1986)で報告されている高知海岸と新潟海岸の洗掘に対する再現結果を示す。なお、計算の格子間隔はすべて5mで、諸係数も全て元論文で採用されている値を変えずに用いている。

a) 高知海岸での検証計算

当海岸18号離岸堤前面で生じた昭和56年10月～昭和58年10月間の洗掘地形の再現計算を試みた。入射波条件は「港湾技研資料, No. 554」(旧運輸省港湾技研, 1986)にある高知港の同期間の波浪から、3m未満の場合を無視した最大有義波高に対して、「海岸事業の費用対効果分析手法」(旧海岸四省庁, 平成9年度版)で提案されている波浪変化モデルから、式(8)で定義出来るエネルギー平均波高 H_{rms} を求めて、入射波高とした。

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{2(0.6H_{1/3})^2 + 2(0.8H_{1/3})^2 + H_{1/3}^2}{5}} \dots\dots (8)$$



図—3 高知海岸離岸堤前面での洗掘計算例

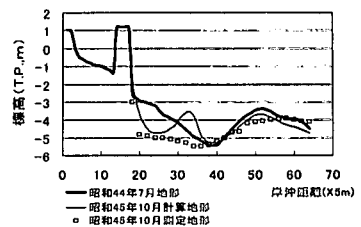
また、入射波の周期は最大有義波の周期に等しいとした。そして、波の作用時間は「同分析手法」で提案されている波浪変化モデルから、エネルギー平均波が24時間作用するとした。底質粒径は0.3mm、離岸堤の堤長は100m、開口部幅は50m、離岸堤の間隙率は0.4とした。

図—3は離岸堤前面の海底断面地形を示しており、堆積量の計算値が測定値より小さいものの、洗掘量の計算値は測定値に良く一致している。数値モデル内の係数を調整することなく、モデル入射波を用いて、この程度一致すれば、本数値モデルの信頼性は良いと言える。

b) 新潟海岸での検証計算

当海岸1号離岸堤前面で生じた昭和44年7月～昭和45年10月間の洗掘地形の再現計算を試みた。波浪データには、「港湾技研資料, No. 137」(旧運輸省港湾技研, 1972)に載っている酒田港で観測された月毎の波高・周期複合頻度表から最大有義波を求め、最近の酒田港と新潟海岸関屋観測所の高波時データの換算係数(波高に対し0.7倍、周期に対し0.9倍)を用いて、新潟海岸の波に換算した。入射波条件は、高知海岸と同様に、24時間継続のエネルギー平均波高として与え、波向は海岸線に直角とした。また、離岸堤の長さは150m、開口幅は50m、離岸堤の間隙率は0.4、底質粒径は0.2mmとした。

図—4は離岸堤前面の断面地形の測定値と計算値を示す。離岸堤前面の計算洗掘断面には重複波形に対応したバーが形成されているが、計算値の洗掘範囲と最大洗掘深は測定値のそれらにほぼ合っているので、推定された一月毎の高波だけを入射し、それ以外の波による均し効果などを無視していることを考えれば、誤差は許容レベル内にあると考えられる。



図—4 新潟海岸離岸堤前面での洗掘計算例

(4) 洗掘量に関する図

I型突堤, T型突堤, 不透過離岸堤, 透過離岸堤の4タイプについて, 図-5に定義する洗掘諸量を, 本数値モデルを用いた洗掘地形が安定になるまでの数値計算(作用時間24~48時間)から求めてグラフ化した。

- a) 基本条件に対する洗掘諸量: 波形勾配0.025, 底質粒径0.2mmに対する構造物前面と離岸堤開口部の最大洗掘量, および, 前面での洗掘幅を図-6~8に示す。複数の調査・研究が, 洗掘量は碎波点付近で最大なることを指摘しており, その様な結果を得ることが出来た。
- b) 波形勾配, 底質粒径, 入射波向の影響: 波形勾配

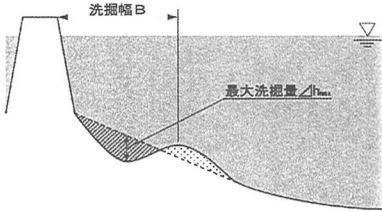


図-5 洗掘諸元の説明図

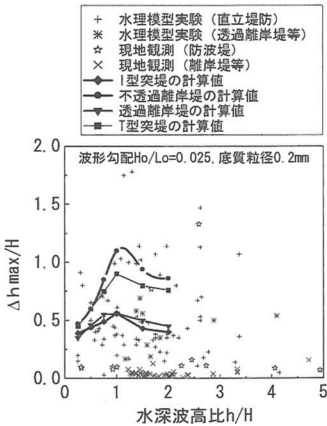


図-6 構造物前面の無次元最大洗掘量

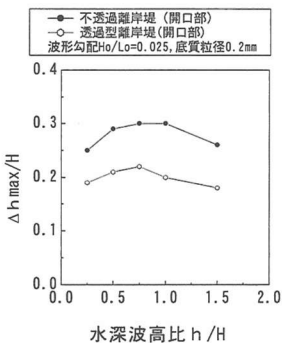


図-7 離岸堤開口部の無次元最大洗掘量

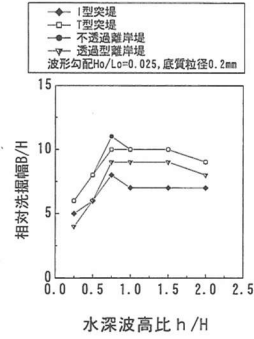


図-8 構造物前面の無次元最大洗掘幅

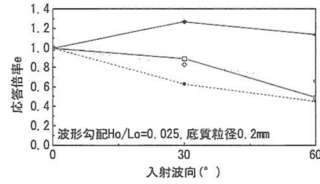
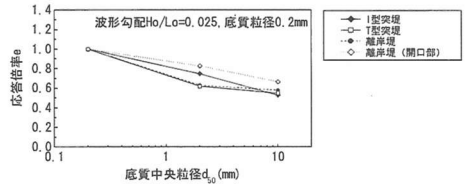


図-9 計算諸条件の違いによる応答倍率

と洗掘量は反比例の関係にあり, 勾配が2倍になると洗掘量は0.5倍前後になった。この関係は Battjes (1974) の波形勾配と反射率の関係式と豊島 (1977) の反射率と最大洗掘量の関係図等を結び付けても得られる。また, 底質粒径と入射波向の影響については図-9に示す通りで, 粒径が大きくなるほど洗掘量は低下し, 入射波向が傾くほどI型突堤以外の洗掘量は低下する。I型突堤に対する入射波向の影響が異なる理由は, 斜め入射になると波力強度の低下より作用面積増加の影響の方が大きくなるからである。

以上の図等を用いて洗掘量は算定できる。そして, 図-5から判るように, 設計水深には, 構造物の前面水深に最大洗掘量を加えた値より, 構造物前面から洗掘幅ほど沖合の水深を用いた方が適当と考えられる。ただし, 洗掘規模が大きくなるほど, 構造物断面が不経済となり易く, 設計水深が構造物の前面水深より1m以上大きい場合(従来から用いられている経験値)は, 根固・基礎工によって洗掘を押さえる場合と比較検討するのが良い。

(5) 全国実態調査等による知見

本研究と同時に実施した全国実態調査(ヘッドランド, 突堤, 離岸堤146ケース)と, 幾つかの既往文献(建設省

海岸課, 1986; 福島ら, 1999 など) から, 次のような重要な知見が得られた。

a) 基礎工について: 捨石類から成る基礎の上に異型ブロックを積上げた構造の場合, 砂地盤に対しては基礎工厚 2 m 以上でも沈下しているケースが多い。沈下の少ない構造事例から, 基礎工は海底地盤への荷重強度を低減出来るように底面積を増やし, 捨石粒径を上で 500 kg 程度から下でクラッシュランへ順じ小さくして, 砂地盤への馴染みを良くする。また, 捨石類から成る傾斜堤を平ブロックで被覆した構造の場合, 顕著な沈下が基本的に無いことから, ブロック被覆間からの捨石吸出しと, 前面洗掘への対処に配慮すれば良い。

b) ブロック重量について: 異型ブロック積み構造の場合は, K_d 値と表のり勾配角を用いたハドソン式による計算値の 1.5 倍の重量を用いれば, 重量不足による被災はほとんど無くなる。一方, 天端の高くない平ブロック被覆式構造の場合は, 上述のハドソン式では被災し, N_s 値を用いたハドソン式による計算値を使用すべきである。

3. 現地海岸への適用

鹿島海岸の突堤型と清水海岸の離岸堤型の各ヘッドランドに対して, 本数値モデルを用いた予測計算を行い, 算定図による安定計算の妥当性を検討した。なお, 計算の格子間隔はすべて 5 m としてある。

(1) 鹿嶋海岸の事例検討

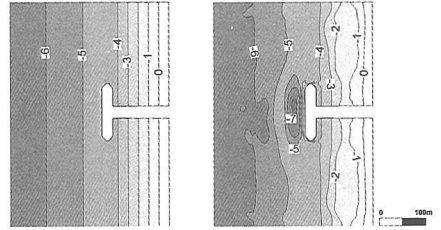
入射波には計画波の換算沖波波高 6.3 m と計画周期 12.9 s を用い, 海岸線に対して垂直に 24 時間作用させた。また, 底質粒径には中央粒径の 0.2 mm を用いた。T 字突堤型ヘッドランド前面の最大洗掘量の予測値は 3.1 m となった (図-10 参照)。

一方, 図-6 の水深波高比 0.7 に対する T 字突堤型前面の無次元最大洗掘量 0.6 から, 最大洗掘量は 3.78 m で, 算定図の方が 20% 程度大きくなった。清水海岸の L 字突堤型ヘッドランドに対しても同様な結果を得た。

また, 図-8 から得られた洗掘幅 63 m ほど沖合の水深は T.P.-4.2~4.7 m, 実際の代表設計水深は最頻度の設置水深に余裕値 1 m を加えた T.P.-4.7 m で, 使用する異型ブロックの所要規格は同じになった。

(2) 清水海岸の事例検討

入射波には計画波の換算沖波波高 11.4 m と計画周期 17.0 s を用い, 海岸線に対して垂直に 24 時間作用させた。また, 底質粒径には中央粒径の 10 mm を用いた。離岸堤型ヘッドランド前面の最大洗掘量の予測値は 3.2 m となった。一方, 図-6 の水深波高比 0.53 に対する離岸堤型前面の無次元最大洗掘量 0.43 に, 図-9 の底質粒径



(a) 初期地形 (b) 24 時間後の地形
図-10 短期海浜地形変化予測の例 (鹿嶋海岸)

に関する倍率を考慮すると, 最大洗掘量は 3.0 m で, 予測計算値とほぼ等しい。

また, 図-8 から得られた値を図-9 の底質粒径と入射波向 (約 15°) による倍率で補正した洗掘幅 33 m ほど沖合の水深は T.P.-5.0~5.5 m, 実際の代表設計水深は最頻度設置水深に余裕値 1 m を加えた T.P.-5.0 m で, 使用する異型ブロックの所要規格は同じになった。

4. 主要な成果

ヘッドランド工法の設計の基本方針について述べると共に, 安定設計で重要な設計水深や根固・基礎工への洗掘量の評価方法 (数値モデル, 算定図) の基本的流れを示すことができた。また, 基礎工の構造やブロック算定法についても, 近年得られている知見の確認ができた。

参考文献

- 宇多高明・山本幸次 (1987): 海浜安定化工法に関する 2, 3 の検討, 土木技術資料, Vol. 29, No. 9, pp. 471-476.
- 建設省海岸課 (1986): 離岸堤の効果及び安定性に関する研究, 第 39 回建設省技術研究会報告, pp. 741-818.
- 土屋義人・R. Silvester・芝野照夫 (1979): 安定海浜工法による海岸侵食制御について, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 191-194.
- 豊島 修 (1977) 現場のための海岸工学, 森北出版, pp. 263-264.
- 福島雅紀・山本幸次・佐藤慎司・山本吉道 (1999): 低天端離岸堤の被覆ブロック被災機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 896-900.
- 山田浩次・田辺勇人・鳥居謙一・加藤史訓・山本吉道・有村盾一・Vu T. C. (2001): 海岸構造物周辺の洗掘の定量的評価, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 551-555.
- Vu T. C.・谷本勝利・山本吉道 (1999): 海浜断面における波動・地形変化の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 611-615.
- Vu T. C.・谷本勝利・山本吉道 (2000): $k-\epsilon$ モデルによる碎波の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 176-180.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity, Proc. 14th I.C.C.E., ASCE, pp. 466-477.
- Hibberd S. and H. D. Peregrine (1979): Surf and runup on beach; a uniform bore, J. Fluid Mech., Vol. 95, pp. 323-345.
- Silvester, R. (1960): Stabilization of sedimentary coastlines, Nature, No. 188, pp. 467-469.