

波の遮蔽構造物を有する海岸における 3 次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル

酒井 和也* ・ 小林 昭男** ・ 宇多 高明***
芹沢 真澄**** ・ 熊田 貴之*****

海浜における侵食対策の立案や養浜計画に際しては, 海浜の安定形状予測が重要である。ポケットビーチの安定汀線の予測手法には Hsu・Evans の方式がある。筆者らは, これまでに護岸の存在する場合においても 3 次元安定海浜形状を直接計算できるよう Hsu モデルを拡張した。しかし Hsu らの手法では海浜に離岸堤などの構造物がないことを前提としており, 実務への適用に制約があった。そこで本研究では, 島や構造物による不規則波の回折変化を簡易に計算可能な方向分散法を用いて構造物周辺の波浪場を計算し, これをもとに安定海浜形状を XY メッシュ上で直接計算する手法を開発した。

1. ま え が き

海浜における侵食対策の立案や養浜量の算定に際しては, 海浜の安定形状予測が非常に重要である。実務でよく用いられるポケットビーチの安定汀線の予測手法には Hsu・Evans(1989)の方式がある。筆者ら(芹沢ら, 2000)は, これまでに Hsu らの式に土砂量保存式を導入して土砂収支を満足させつつ, 等深線変化モデルにおける沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮することにより, 3 次元地形変化を直接的に計算可能なモデルに拡張した。さらに one-line モデルでも用いられている護岸考慮の境界条件を付加することで, 護岸を考慮した 3 次元地形変化を直接的に計算する手法を開発した(酒井ら, 2002)。しかし Hsu らの手法ではポケットビーチ内に離岸堤や人工リーフなどの構造物がないことを前提としているため, 実務への適用には強い制約があった。本研究では, 島や構造物による不規則波の回折変化を簡易に計算可能な方向分散法を用いて構造物周辺の波浪場を計算し, これをもとに非常に短時間で, 波の遮蔽構造物が設置された場合の静的安定海浜形状を XY メッシュ上で直接計算する手法を開発した。

2. 計 算 方 法

(1) 波浪場の計算方法

防波堤のような波の遮蔽構造物背後の回折係数と波向分布は, 芹沢ら (1993) による方向分散法を基本とし, 以下に述べる工夫を行った。まず, 波エネルギーの方向分布 $G(\theta)$ の累加関数 $M_0(\theta)$ について, 数値積分をせず, 実務で簡単に使えるように近似関数を導入することとし, Kraus (1984) の近似式を改良して式 (1) で与えた。

$$M_0(\theta) \equiv \int_{-\pi/2}^{\theta} G(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\tanh(A_0 \theta)}{\tanh(A_0 \pi/2)} \right] \quad \cdots (1)$$

$$A_0 = 0.425 \times S_{\max}^{0.499} \quad (S_{\max} = 10 \sim 100) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに $S_{\max}$ は方向集中度パラメータである。なお, Kraus (1984) の近似式では, 端部 $\theta = -90^\circ, +90^\circ$ で 0, 1 となるべき境界条件が完全には満足されていないが, 式 (1) はこれを満足している。式 (2) は数値積分で求めた累加関数値に対して最小自乗法によるカーブフィットより定めたもので相関係数は 0.999 であり, 最大誤差は Kraus (1984) が 2% であるのに対して 0.1% 以下と高精度の近似式となっている。方向分布関数 $G(\theta)$ は式 (1) を θ で微分することにより式 (3) で与えられる。

$$G(\theta) \equiv \frac{dM_0}{d\theta} = \frac{A_0}{2 \tanh(A_0 \pi/2)} \times \frac{1}{\cosh^2(A_0 \theta)} \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに, $S(f, \theta)$ は Bretschneider・光易型の周波数スペクトルと光易型方向関数を組み合わせた方向スペクトルであり, $G(\theta)$ は $S(f, \theta)$ を全周波数帯にわたって積分したものである(合田, 1990)。また波向の一次モーメント (M_1) を次式で定義するとともに, 式 (3) を用いて積分すると式 (4) となる。

$$M_1(\theta) \equiv \int_{-\pi/2}^{\theta} G(\theta) \cdot \theta d\theta = \frac{1}{2 \tanh(A_0 \pi/2)} \left\{ \theta \tanh(A_0 \theta) - \frac{\pi}{2} \tanh(A_0 \pi/2) - \frac{1}{A_0} \log e \left[\frac{\cosh(A_0 \theta)}{\cosh(A_0 \pi/2)} \right] \right\} \quad \cdots \cdots (4)$$

式 (1), (4) を用いると波の入射範囲が $\theta = \theta_1 \sim \theta_2$ の地点の回折係数 K_d と平均波向 θ_m は次式より算出される。

$$K_d = \sqrt{M_0(\theta_2) - M_0(\theta_1)} \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\theta_m = \frac{M_1(\theta_2) - M_1(\theta_1)}{M_0(\theta_2) - M_0(\theta_1)} \quad \cdots \cdots (6)$$

* 学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻
** 正 会 員 工 博 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科
*** 正 会 員 工 博 (財)土本研究センター審議役なぎさ総合研究室長
**** 正 会 員 海岸研究室(有)
***** 学生会員 修(工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻

また、離岸堤などのように波の入射領域が複数ある場合は、 K_d および θ_m は次式で計算できる。

$$K_d = \sqrt{\sum_{j=1}^N K_{t(j)}^2 M_0(\theta_{2(j)}) - M_0(\theta_{1(j)})} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\theta_m = \frac{\sum_{j=1}^N K_{t(j)}^2 [M_1(\theta_{2(j)}) - M_1(\theta_{1(j)})]}{\sum_{j=1}^N K_{t(j)}^2 [M_0(\theta_{2(j)}) - M_0(\theta_{1(j)})]} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに N は波の入射領域の個数、 K_t は波高伝達率である。本研究では式 (5)、(6) により得られた計算領域の回折係数と波向分布をもとに、次項で述べる静的安定海浜形状の計算法へ適用し安定海浜形状を求める。

(2) 静的安定海浜形状の計算方法

静的安定海浜は、長期的な意味で各地点の岸沖・沿岸漂砂量がない状態にある海浜と定義されるが、Dean (1991) の平衡断面の概念と沿岸漂砂の基本的機構より、①海浜縦断面形を見たとき各地点の断面勾配が平衡勾配に等しいこと、かつ②沿岸漂砂による砂移動が生じる区域では各地点の等深線が波の入射方向と直交すること、の2条件を満足すると考えた。この考え方を模式図に表したのが図-1である。図-1(a)に示すポケットビーチの汀線および等深線は、図-1(b)のように各地点の波向に直角となって安定する。そこで点1の位置が与えられたとすると、点1から波向直角方向に Δm の距離の線分を引けば点2の位置が与えられる。この操作を繰り返せば点1→2→・・・→11の順に全点の位置が定まる。

縦断方向にも同様の操作を行うことができる。図-1(c)を参照したとき、安定な縦断面形では各地点の縦断勾配が平衡勾配 $\tan \beta_c$ に一致している。したがって点1が与えられれば、 $\tan \beta_c$ の勾配で長さ Δl の線分を引き、点2を求める。汀線と同様、この操作を繰り返せば点1→2→・・・→7の順に全点が定まり、縦断面形が求められる。

以上の計算を組み合わせることで、平面上の任意地点の地盤高が与えられたとき、安定海浜形状が求められることになる。これが基本的な考え方であるが、計算では次のようにして x - y 空間の地盤高 $Z(x, y)$ を求める。

まず、図-2に示す P 点 (水深 Z_{ij}) において、波向 θ_w の入射波と等深線 S_i, S_{i+1} を想定した時、 P 点において θ_w と S_i のなす角は直角となる。そして等深線 S_i, S_{i+1} 間の水深変化量 ΔZ は幾何学的に式 (9) のように求まる。

$$\Delta Z = \Delta X \cdot \sin \theta_w \cdot \tan \beta_c = \Delta Y \cdot \cos \theta_w \cdot \tan \beta_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに β_c は平衡勾配角である。また式 (9) を変形し両辺を x, y で微分すると式 (10)、(11) が得られる。

$$\partial Z / \partial X = \sin \theta_w \cdot \tan \beta_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\partial Z / \partial Y = \cos \theta_w \cdot \tan \beta_c \quad \dots\dots\dots (11)$$

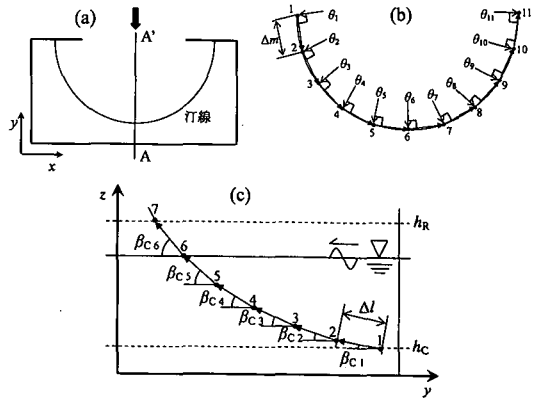


図-1 静的安定海浜の模式図

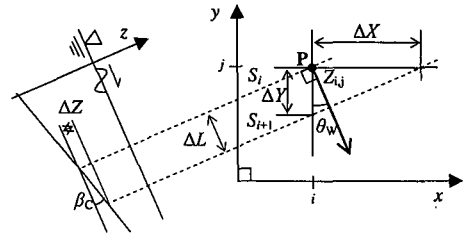


図-2 計算方式の説明図

式 (10)、(11) が本研究の基礎方程式である。数値計算ではこれらを x, y 空間で差分化して解く。差分式は次式となる。

$$Z_{(i+1,j)} = Z_{(i,j)} + \Delta X \cdot \left[\sin \theta_w \tan \beta_c \right] \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Z_{(i,j+1)} = Z_{(i,j)} + \Delta Y \cdot \left[\cos \theta_w \tan \beta_c \right] \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに i, j は x, y 方向の計算格子点につけた番号である。また碎波帯内の波高分布に起因する沿岸漂砂を考慮し、CERC型漂砂量公式における小笹・Bramptonの項を考慮して式 (9)～(13) における波向 θ_w を次式のようにした。

$$\begin{aligned} \theta_w &= \theta_w + \Delta \theta = \theta_w + \left[-\frac{K_2}{K_1} \frac{1}{\tan \beta} \frac{\partial H_b}{\partial s} \right] \\ &= \theta_w + \left[-\frac{K_2}{K_1} \frac{1}{\tan \beta} \left(\cos \theta_w \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} + \sin \theta_w \cdot \frac{\partial H_b}{\partial y} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

ここに $\partial/\partial s$ は波峰線方向の微分を表す。 K_1 は沿岸漂砂量係数、 K_2 は小笹らの補正項の係数、 H_b は碎波波高である。式 (14) は小笹・Bramptonの項を付加したCERC型漂砂量公式に対して、静的安定の条件、つまり沿岸漂砂量=0と置くことで得られる式である。防波堤遮蔽域のように波高が強い沿岸方向分布を持つとき、通常の斜め

入射波による沿岸流とは別に、波高分布に起因して波高の大きい場所から波高の小さい場所へと向かう沿岸流成分が生じることで付加的な沿岸漂砂が生じる。このため、等深線は波向に直角になった段階ではまだ安定ではなく、波高勾配に応じた角度 $\Delta\theta$ を成すまで変化してはじめて安定する。式 (14) はこの補正を行うものである。補正の結果、Hsu の式にあるように防波堤遮蔽域の安定汀線は波向直角方向よりもさら遮蔽域の奥に向って立ち上がることになる。Hsu の安定汀線形の式は物理的意味を含まない経験的な回帰式であるが、当方式は物理的意味を有していることが特徴である。

この方法では、波向と平衡勾配が与えられたとき、ある地点の地盤高を初期値として与えると x, y 方向の隣接点の地盤高が計算でき、これを繰り返すことで全地点の地盤高が求められる。さらに土砂収支を満足させるために、初期形状との地盤高の差分の加算値を求め、これに応じて計算開始地点の地盤高を修正し、土量変化が 0 に収束するまで計算を繰り返す。海浜変形の範囲は漂砂の限界水深 $h_c \sim$ バーム高 h_R の範囲である。この範囲外では平衡勾配には重力による土砂の落ち込みに対応する安息勾配を用いる。また遮蔽構造物背後では回折係数に比例させて次式のように h_c, h_R を低減する。

$$h_c = K_d \cdot h_c \dots\dots\dots (15)$$

$$h_R = K_d \cdot h_R \dots\dots\dots (16)$$

ここに h_c, h_R は遮蔽構造物のない場合の値である。実際には水深変化による屈折によって波向が変化するが、現地海岸では本計算の対象とするような最終安定地形は回折波向が支配的と考えられることから、屈折は無視して回折波向をそのまま用いる。

(3) 計算手順

図-3 に計算フローを示す。本計算における入力データは入射波浪の諸元、初期地形 $Z(i, j)$ 、波の遮蔽構造物の諸元、平衡勾配 $\tan \beta_c$ および水中部、陸上部の土砂の安息勾配 i_c, i_R である。まず、沿岸方向と岸沖方向に等間隔で計算範囲を分割する。次に分割した各格子点において、前述の方向分散法から回折係数 K_d と平均波向 θ_m を計算する。さらに各地点において、回折の影響を考慮した h_c, h_R を式 (15)、(16) より求める。

静的安定海浜地形の計算においては、ある地点の地盤高が $Z(i, j)$ として与えられたとき、式 (12)、(13) により x, y 方向の隣接する地点間における地盤高の変化量 ΔZ を計算し、 $Z(i, j)$ に加算して隣接する地盤高 $Z(i+1, j)$ $Z(i, j+1)$ を計算する。これを x, y 方向に繰り返すことで全地点の地盤高を求める。この段階で各地点において等深線と回折波向のなす角が直角で、波の遮蔽による波高減衰に応じた h_c, h_R を考慮した安定海浜形状が求

まる。しかし、この時点では土砂収支の保存が満足されないため、初期海浜地形との地盤高との差分の加算値を求め、これに応じて計算開始地点の地盤高を修正し再び全地点の地盤高を求める。これらの工程を土量変化が 0 に収束するまで繰り返す。以上が計算の概要である。

3. モデル計算と検証実験の概要

まずモデルの特性を把握するため、海浜の両端部を逆 L 字突堤に囲まれたポケットビーチを想定してモデル計算を行った。初期海浜は沿岸方向に 400 m、岸沖方向に 200 m の広がりを持つ海浜であり、勾配 1/10 の一様海浜とし、初期汀線は $Y=100$ m の位置にある。入射波浪の諸元は $H_0=2$ m、 $T=8$ s、 $S_{max}=25$ であり、波は初期汀線に対し直角入射させた。平衡勾配 β_c は 1/10、海中および陸上の土砂の安息勾配 i_c, i_R はそれぞれ 1/3 と 1/2 に設定した。さらに h_R, h_c は 2 m、-5 m とした。

次に移動床実験の結果 (酒井ら, 2003) と比較した。模型海浜は幅が 400 cm、初期海浜は勾配 1/10 の一様海浜であり、初期汀線は $Y=80$ cm の位置にある。海浜の中央に堤長 100 cm の完全不透過離岸堤を初期汀線より 80 cm 沖合の初期水深 8 cm の位置に設置した。波浪条件は $H_0=4$ cm、 $T=0.8$ s の規則波であり、初期海浜および離岸堤に対し波を直角入射させた。波浪は海浜が安定形に至るまで 10 時間作用させた。検証計算における条件

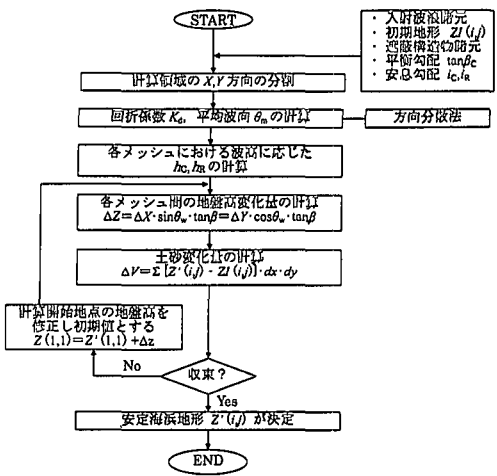


図-3 計算のフロー

表-1 計算条件の一覧

テスト計算の条件一覧

初期勾配	構造物	H_0	S_{max}	h_c	h_R	β_c	i_c	i_R
1/10	両逆 L 字突堤	2.0	25	1.5	-5.0	1/10	1/3	1/2

検証ト計算の条件一覧

初期勾配	構造物	H_0	S_{max}	h_c	h_R	β_c	i_c	i_R
1/10	離岸堤	4.0	75	2.0	-5.0	1/10	1/3	1/2

は、実験は規則波であるが計算は不規則波なので方向集中度の高いうねり性の波として扱い $S_{\max}=75$ とし、平衡勾配 β_c は $1/10$ 、海中および陸上の土砂の安息勾配 i_c 、 i_R はそれぞれ $1/3$ と $1/2$ に設定した。表-1 に計算条件を示す。

4. 予測計算の結果と実験データとの比較

(1) モデル計算の結果

図-4 には計算領域の各格子点における平均波向 θ_m と回折係数 K_d の分布を示す。現象は左右対称であるために、左半平面が平均波向 θ_m の分布を、右半平面が回折係数 K_d の分布を示す。端部にある逆し字突堤によって波の遮蔽が生じ、汀線付近で見ると波の遮蔽域の奥ほど斜め入射角度がきつくなる。この波向分布に対応して防砂突堤の開口部から防砂突堤の付け根に向かって波高の低下が起こる。図-5 には安定海浜の計算結果を示す。防砂突堤による波の遮蔽域では、回折波向に直角になるように等深線が大きく湾曲しつつ前進して舌状砂州が形成された。防砂突堤の背後に形成された舌状砂州では波高が低いために平坦面の標高は低い。防砂突堤の先端部付近では沿岸漂砂によって運ばれてきた土砂が落ち込むために急勾配の海底面が形成されている。舌状砂州の陸上部には、打ちあがり高さに応じた平坦面が形成された。また海浜中央部においては、沿岸漂砂によって波の遮蔽域に土砂が運ばれるために等深線が後退し、陸上部には高さ5mの浜崖の形成も見られる。一方、海中では波高減衰のない場合の限界水深である-5mに平坦面が形成された。このようなポケットビーチ内の安定海浜の形状は、熊田ら(2001)が示した検見川浜での測量結果から得られた特性をうまく説明している。

(2) 移動床模型実験結果との比較

まず図-6 には移動床模型実験による造波10時間における離岸堤周辺の深淺図を示す(酒井ら, 2003)。離岸堤背後の両側の開口部の-6cmから-2cmの間では初期の平行等深線が大きく侵食されて後退し、凹状の窪地が形成された。これと対照的に離岸堤の背後では等深線が大きく前進し、舌状砂州が形成された。舌状砂州の高さは2cmから-1cmの間に分布し、緩やかな斜面が形成された。

以上の実験結果に対応させた計算を行った。まず図-7 には計算領域の各格子点における平均波向 θ_m と回折係数 K_d の分布を示す。不透過離岸堤の背後に離岸堤の端部からの波が伝達されている。離岸堤背後では波の遮蔽により K_d の値が減少している。初期汀線上では離岸堤中央に近づくにつれて K_d の値は小さくなり、岸沖方向に同一測線上では、沖方向に進むにつれ K_d は小さくなる。 θ_m もこれに対応し、離岸堤背後では沿岸方向では離

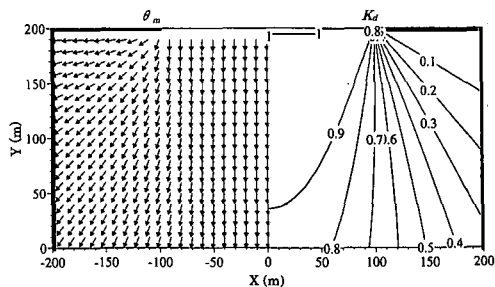


図-4 平均波向 θ_m と回折係数 K_d の分布 (モデル計算)

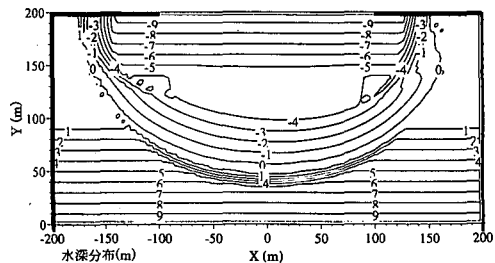


図-5 ポケットビーチの安定海浜形状

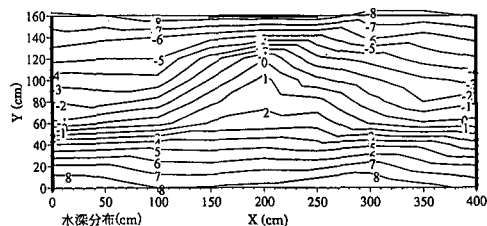


図-6 離岸堤背後の安定海浜 (実験)

岸堤中央に、岸沖方向では沖方向に進むにつれて斜め入射角度が大きくなっている。しかし、離岸堤中央では逆に θ_m の入射角度が小さくなる。これは離岸堤の両端から回折してくる双方向の波のエネルギーを平均して波向を求めた結果、双方からのエネルギーの差が小さくなる。離岸堤中央付近では波向が小さくなったことによる。図-8 に安定地形の計算結果を示す。計算では離岸堤背後における舌状砂州の発達状況がわずかに過小に予測されたものの、全体の傾向は良くあっている。離岸堤の遮蔽域外の $X=0\sim100$ cm, $X=300\sim400$ cm では、等深線が後退し陸上部では浜崖が形成されている。離岸堤背後の遮蔽域内では回折波向に直角になるように等深線が前進し舌状砂州が形成されている。離岸堤中央では汀線が急激に前進したが、波高の低下に応じて設定された限界水深 h_c より深い等深線は、土砂落込みによりさらに前進し、等深線の間隔が密となっている。この現象は実験結果でもみられ、よく再現されている。舌状砂州の陸上部には高さ2cmの平坦面が形成されており、実験結果と

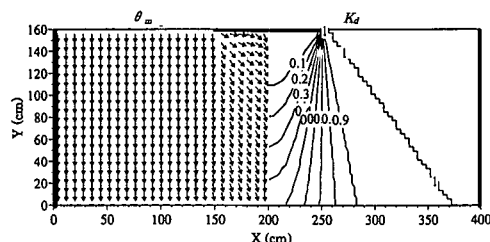
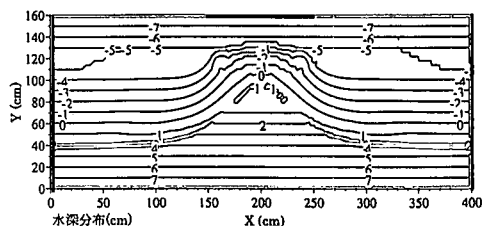
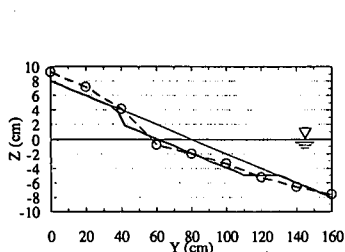
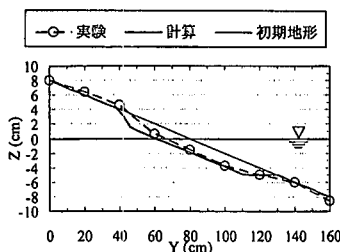
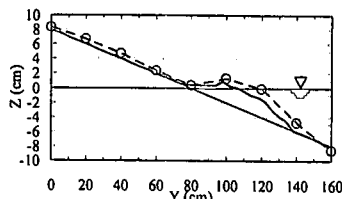
図-7 平均波向 θ_m と回折係数 K_d の分布 (離岸堤)

図-8 離岸堤背後の安定海浜 (計算)

図-9 縦断形変化の比較 ($X=0$ cm)図-10 縦断形変化の比較 ($X=100$ cm)図-11 縦断形変化の比較 ($X=200$ cm)

もよく一致している。

図-9, 10, 11 は離岸堤の開口部を通る $X=0$ cm 測線、離岸堤遮蔽域の中心の $X=200$ cm 断面、さらにはそれらの間の $X=100$ cm 断面における実験と計算による縦断形の比較である。 $X=0$ cm 断面では、砂が削り取られ全体に凹状形状となり、陸上では浜崖が形成され水面下では緩勾配斜面が形成された。計算は実験より陸上部の侵食が少々過大に予測されたが、傾向は良く合っている。 $X=100$ cm 断面でも、実験では $X=0$ cm と同様に陸上部の侵食が少々過大に予測されたが、水面下においては計算はよく一致している。 $X=200$ cm 断面では、実験結果において離岸堤の遮蔽域外から沿岸漂砂によって運ばれた土砂が大きく堆積した。最も大きく堆積したのは汀線付近であり、水面下では土砂落込みによる安息勾配を保ちつつ縦断形が前進している。計算では全体的な堆積こそ過小に予測されたものの、堆積域に生ずる平坦面と土砂の落込みによる等深線の前進の傾向は非常によく再現できた。

5. 結 論

芹沢らの方向分散法による回折波向を求める手法において、波エネルギーの方向分布の累加関数に Kraus の近似式を改良して与えることにより、より簡単に構造物周辺の回折波の波浪場を求められるようにした。計算した波浪場を入力値とし、Dean の平衡勾配の概念を沿岸漂砂の基本的機構に組み込むことで、波の遮蔽構造物を有する海岸における 3 次元静的安定海浜形状を XY メッ

シュ上で直接計算可能な方式を開発した。両端を逆 L 字突堤に囲まれた仮想海岸に本計算モデルを適用した結果、突堤背後の波の遮蔽域の土砂の堆積や突堤開口部での海浜の侵食傾向が良く再現できた。また、離岸堤を設置した移動床平面実験との検証計算では、離岸堤背後の舌状砂洲の発達や波の遮蔽域外の侵食が精度よく再現できた。

参 考 文 献

- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・星上幸良 (2001): 千葉県検見川浜の海浜変形と 3 次元 Hsu モデルによる変化予測, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 536-540.
- 合田良實 (1990): 港湾構造物の対波設計, 鹿島出版会.
- 酒井和也・小林昭男・熊田貴之・芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎 (2002): 3 次元 Hsu モデルによるポケットビーチ内の護岸周辺の静的安定海岸形状の予測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 631-635.
- 酒井和也・熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保人 (2003): 混合粒径砂を用いた離岸堤周辺の海浜変形の実験と計算, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 486-490.
- 芹沢真澄・Abdelaziz Rabil・三波俊郎・五味久昭 (1993): 回折領域の不規則波浪場の簡単な計算法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 76-80.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣 (2000): Hsu モデルの 3 次元海浜変形予測モデルへの拡張, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 601-605.
- Dean, R. G. (1991): Equilibrium beach profiles, characteristics and application, J. Coastal Res., 7(1), pp. 53-84.
- Kraus, N. C. (1984): Estimate of breaking wave height behind structures, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 110, No. 2, pp. 276-282.
- Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989): Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intn. Civ. Eng., Part 2, 87, pp. 557-570.