

人工干潟の地形変化に関する研究

許 東秀*・牛木賢司**・高木祐介***・岩田好一郎****

本研究では、波の作用による不陸型砂留潜堤を持つ人工干潟の地形変化特性を調べるために固定床及び移動床の三次元水理模型実験を行った。固定床実験より、種々の波浪条件による波高分布や流況から部分重複波及び循環流の形成特性を明らかにした。また移動床実験では、粒径の違い、潮汐、天端長比等が人工干潟の地形変化に及ぼす影響を調べ、潮汐が地形を平滑化することを見出した。なお、3次元波動場の直接数値解析から得られた流速を用いて地形変化を求める手法を採用し、実験値と比較検討することにより、提案した地形変化モデルの適用性について検討した。

1. はじめに

近年、沿岸域の開発に伴い自然干潟の消失が進行している。その代替処置として人工干潟が造成されつつあるが、波と流れによる底質の流出、局所的な洗掘等、造成後の人工干潟の地形変形が著しく、目的とした干潟生物が生息できなくなる等の干潟機能が失われてしまう場合が生じている。したがって、いかに人工干潟地形を安定にするかが、大きな問題となっており、早急に解決しなければならない重要な課題である。これまで、干潟の水質浄化効果や底生生物の種類と生息数に関する研究は数多くなされてきたが(例えば、Havensら, 1995; Leeら, 1998), 人工干潟造成後の地形変化に関する研究は、その重要性にも関わらず、数少ないのが現状である(例えば、加藤ら, 1985; 姜ら, 2001)。

そこで、本研究では、2種類の詳細な3次元水理模型実験を行い人工干潟の地形変化特性について考究することを目的とする。まず水平床における固定床及び移動床実験(実験①)を行い、作用波の違いによる流速場や波浪場の構造と地形変化特性について検討する。次に、緩傾斜斜面を持つ移動床実験(実験②)を行い、潮汐等が地形変化に及ぼす影響を明らかにする。さらに、3次元地形変形計算モデルとして、波と流れ場を3次元直接数値計算法で計算し、この直接数値計算法で算出した流速を使って地形変化計算を行う手法を採用し、計算で得られた地形変化計算結果と水理模型実験値を比較することにより、本研究で採用した3次元地形変形計算手法の妥当性について考察する。

2. 水理模型実験

長さ28.0 m、奥行き8.0 m、高さ0.8 mの名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室の平面造波水槽に干潟模型を設置して水理実験を行った。人工干潟模型の沖側端には、干潟断面の安定化と覆砂材の流出防止のため潜堤

を(加藤ら, 1985), 岸側には鉛直護岸を想定した鉛直壁を設置した。なお、潜堤として海水交換性に有効である不陸型砂留潜堤を用いた(図-1参照)。

(1) 水平固定床及び移動床実験(実験①)

砂留潜堤の直背後に6 m×7 mの固定床及び移動床を設置し、実験を行った。固定床及び移動床実験共に入射波を数種類の規則波とし、固定床実験では、電気容量式波高計を用いて360点での水位変動を、また電磁流速計を用いて1080点(360点×鉛直3層)での流速を計測した。なお、流速の値としては、現象がほぼ定常になった直後の5周期間の値を解析の対象とし、その算術平均値を採用した。移動床実験では、中央粒径 $d_{50}=0.1$ mm, 0.45 mmの2種類の砂を用いた。なお、精密連続計測式水底形状測定器(正豊工学実験装置製作所: MM-E. P. I-2)と変位変換器(共和電業: DTP-5MDS)を用いて、Y方向に15 cm間隔でX方向に連続的に、初期地形と1, 6時間後の地形の計測を行った。

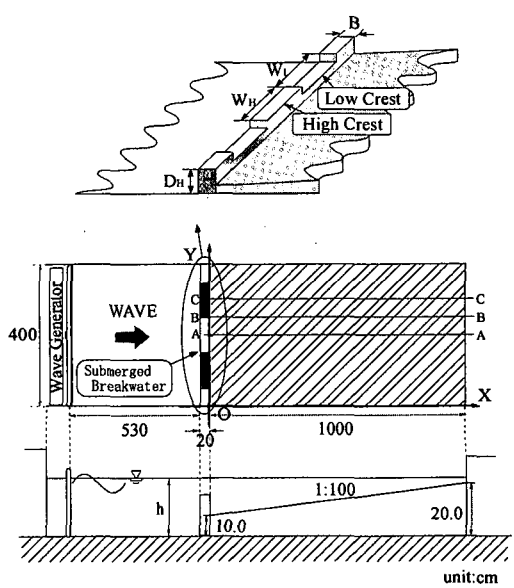


図-1 実験水槽の概要(実験②)

* 正会員 博(工) 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 修(工) (株)アルファ水工コンサルタンツ技術部
*** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻
**** フェロー 工 博 名古屋大学教授大学院工学研究科土木工学専攻

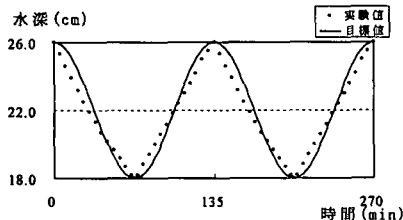


図-2 潮汐に対応した水深の時間変化

(2) 緩傾斜斜面を持つ移動床実験 (実験②)

図-1に示すように、移動床干潟斜面 (4 m×10 m) の勾配を 1/100 のとし、底質として $d_{50}=0.1$ mm の砂を用いた。潮汐の影響を検討するために、図-2に示すように実験中に水深を変化させることにより潮汐変化を与えた。なお、地形変化に及ぼす天端長比 W_H/W_L (W_H : 高天端長, W_L : 低天端長) の影響を調べるために 3 種類の天端長比 ($W_H/W_L=0.5, 1.0, 2.0$) を採用した。また、実験①の移動床実験と同様、Y 方向に 10 cm 間隔で X 方向に連続的に、精密連続計測式水底形状測定器 (正豊工学実験装置製作所: MM-E. P. I-2) と変位変換器 (共和電業: DTP-5MDS) を使って初期地形と 2.25, 4.5 時間後の地形を計測した。

表-1に実験①及び実験②の詳細な実験条件を示す。

3. 数値解析法

(1) 3次元波動場

3次元波動場の数値計算は VOF 法にポーラスボディモデルを組み合わせた数値解析手法 (許, 2000) を用いた。

基礎方程式は 3次元非圧縮性流体の連続式 (1) と、運動方程式 (2)~(4)、および自由表面の形状を模擬す

るための VOF 関数 F の移流方程式 (5) である。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial u}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x \\ &+ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial v}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial v}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - M_y - R_y \\ &+ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zy}}{\partial z} \right) - \frac{2v}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_y v \frac{\partial w}{\partial y} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & - \gamma_v g - M_z - R_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) \\ & - \frac{2w}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \quad (4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (5)$$

ここで、

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \quad (6)$$

であり、造波のためのソース項である。

計算の安定条件には、移流項から生ずる CFL 条件と、拡散項から生ずる拡散不安定条件を用いた。この数値モ

表-1 実験条件

		Case No.	T (s)	H_i (cm)	h (cm)	H_i/L_i	W_H/W_L	d_{50} (mm)	d_{50}/H_i	Tide	WB-HC ¹⁾	WB-LC ²⁾
実験①	固定床	HF-1	1.0	2.5	28.0	0.018	1.0			×	○	×
		HF-2	0.7	5.0	28.0	0.066	1.0			×	○	○
		HF-3	1.0	5.0	28.0	0.036	1.0			×	○	×
		HF-4	1.0	2.5	33.0	0.019	1.0			×	○	×
		HF-5	0.7	5.0	33.0	0.067	1.0			×	○	×
		HF-6	1.0	5.0	33.0	0.037	1.0			×	○	○
	移動床	HM-1	1.0	2.5	33.0	0.019	1.0	0.1	0.04	×	○	×
		HM-2	0.7	5.0	33.0	0.067	1.0	0.1	0.02	×	○	×
		HM-3	1.0	5.0	33.0	0.037	1.0	0.1	0.02	×	○	○
		HM-4	1.4	5.0	33.0	0.027	1.0	0.1	0.02	×	○	×
		HM-5	0.7	5.0	33.0	0.067	1.0	0.45	0.09	×	○	×
		HM-6	1.0	5.0	33.0	0.037	1.0	0.45	0.09	×	○	○
		HM-7	1.4	5.0	33.0	0.027	1.0	0.45	0.09	×	○	×
実験②	移動床	SM-1	0.73	4.0	18.0~26.0	0.053~0.050	1.0	0.1	0.025	○	○~×	○~×
		SM-2	0.73	4.0	26.0	0.050	1.0	0.1	0.025	×	×	×
		SM-3	0.73	4.0	18.0	0.053	1.0	0.1	0.025	×	×	×
		SM-4	1.46	6.7	18.0~26.0	0.037~0.031	1.0	0.1	0.015	○	○~○	○~×
		SM-5	0.73	4.0	18.0~26.0	0.053~0.050	0.5	0.1	0.025	○	○~×	○~×
		SM-6	0.73	4.0	18.0~26.0	0.053~0.050	2.0	0.1	0.025	○	○~×	○~×

¹⁾: Wave Breaking over High Crest, ²⁾: Wave Breaking over Low Crest

デルの詳細については参考文献（例えば，許，2000；Hur-Mizutani, 2003）を参照されたい。なお，本研究では，すべて直交格子に基づき，staggered meshを用いて上記の方程式を差分近似することにより，数値計算を行った。

(2) 地形変化モデル

海底面高 z_b の時間変化の計算に用いる底質量の保存式は底勾配の効果を考慮した式 (7) で与える。漂砂量フラックスは渡辺ら (1984) の漂砂量算定式と類似した式 (8) を用いる。渡辺ら (1984) は波浪場の計算と海浜流場の計算を2段階で行っているために，波による漂砂量フラックスと流れによる漂砂量フラックスの和で求めているが，本研究では3次元波動場の直接数値計算により算出した底面流速を入力値として直接用いるので式 (8) で与えられる漂砂量式を用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\bar{q} = \begin{cases} A \frac{(\tau_{0\max} - \tau_c) \bar{u}_b}{\rho g} & : (\tau_{0\max} - \tau_c) > 0 \\ 0 & : (\tau_{0\max} - \tau_c) \leq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_{0\max} = \frac{\rho}{2} f \bar{u}^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで， z_b ：地盤高， q_x ：X方向漂砂量， q_y ：Y方向漂砂量， ε_s ：正の定数， $\tau_{0\max}$ ：最大せん断応力， $\tau_c (= \Psi_c s g D)$ ：限界シールズ数， s ：底質の水中比重， Ψ_c ：移動限界せん断応力， A ：無次元定数， $\bar{u}_b$ ：底面流速ベクトル， f ：摩擦係数， $\bar{u}$ ：水平流速の振幅である。

砂留潜堤を沖側端，直立壁を岸側端とする計算領域で地形変化計算を行った。そしてこの計算領域に2次元のstaggered meshを採用して基礎方程式 (7) の差分近似を行った。本計算では $\Delta t = 0.02$ 秒とし，次のような安定条件式を用いた。

$$\Delta t < \min \left(\frac{1}{2} \frac{(\Delta x)^2}{\varepsilon_s |q_x|_{\max}}, \frac{1}{2} \frac{(\Delta y)^2}{\varepsilon_s |q_y|_{\max}} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

4. 結果と考察

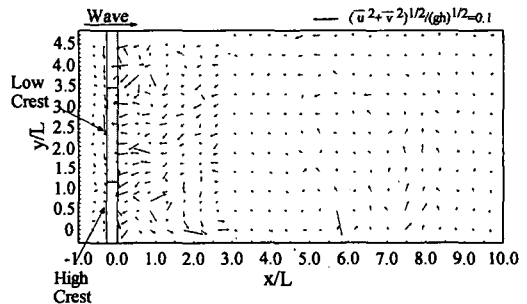
まず，本研究で行った水理実験について考察し，次に数値計算結果を実験結果と比較検証する。

(1) 水平固定床及び移動床（実験①）の実験結果

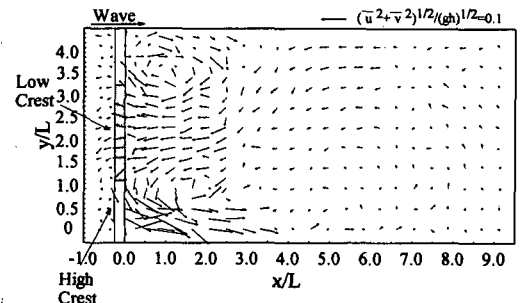
まず，平面2次元場での平均流について検討する。図-3(a)と(b)は，それぞれ，Case HF-2とCase HF-5の上層（干潟底面より12.0 cmの位置）における無次元平均流ベクトル分布を示す。縦軸と横軸は干潟部水深での波長 L で無次元化している。図-3(b)のCase HF-5では明確な循環流が認められる反面，図-3(a)のCase HF-2では循環流が認められるものの多少複雑な流れとなっ

ている。これは，表-1に示すように，Case HF-5では低天端上で碎波が見られなかったことに対し，Case HF-2では高天端上と低天端上に共に碎波が発生したのが一因であると考えられる。また，本文では図示しないが，底面近傍（干潟底面より3.0 cmの位置）でも，平均流の値は小さいが，上層と同じような一対の循環流が形成する。さらに，紙面の制限のため図示できないが，砂留潜堤付近の流況は，波形勾配 H/L に大きく依存し，波形勾配が大きくなるほど3次元性の強い循環流が形成されることが認められた。

図-4は，波作用6時間後の無次元地形変化量 $(z - z_0)/H_L$ (z_0 ：初期の地盤高)を示した一例であり，図-4(a)と(b)は，それぞれ，Case HM-3とCase HM-6の場合である。図中に示すように人工干潟の平面地形は，潜堤付近の碎波や戻り流れの影響を強く受ける“沖側域”，干潟模型沖側端に設置した鉛直壁による部分重複波の影響を強く受ける“岸側域”，及びそれらの中間に位置し，地形変化量が他の域より小さい“中間域”に大別される。砂留潜堤の直背後域（図中の沖側域）の侵食・堆積メカニズムは，図-3の平均流ベクトル分布より説明できる。すなわち，高天端部で碎波した波により潜堤よりやや離れた域で侵食し，循環流によって低天端部背後に堆積する。そして，沖へ向かう戻り流れが潜堤にぶつかることにより，低天端部直近では洗掘される。図-4(a)と(b)を

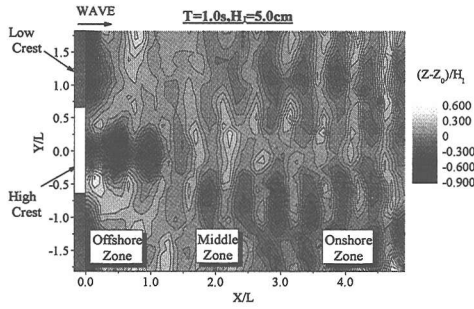


(a) Case HF-2

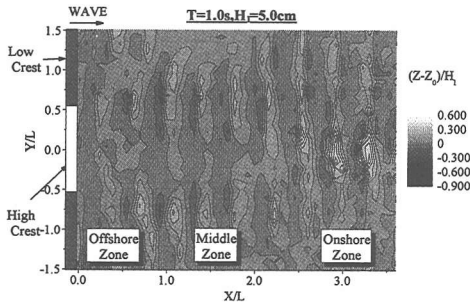


(b) Case HF-5

図-3 平均流ベクトル図（実験①）



(a) Case HM-3 ($d_{50}/H_1=0.02$)



(b) Case HM-6 ($d_{50}/H_1=0.09$)

図—4 平面地形変化図 (実験①)

比較してみると、入射波は同じであるが、容易に予想されるように、粒径の大きい(b)Case HM-6 の場合の地形変化が全般的に小さいことが確認できる。

(2) 緩傾斜斜面を持つ移動床 (実験②) の実験結果

まず、潮汐が地形変化に及ぼす影響について調べる。

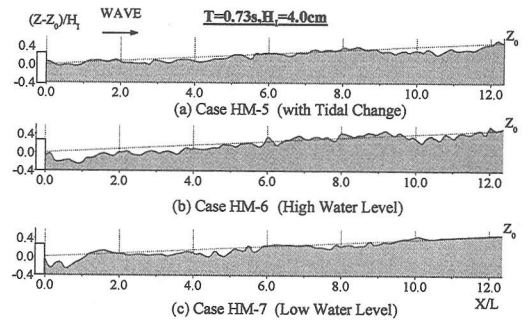
図—5 は、高天端部中央の AA 測線 (図—1 参照) における縦断面の地形変化を示した一例であり、(a), (b), (c) はそれぞれ Case SM-1~3 の場合を示す。なお、図—4(a) は潮汐ありの場合、(b)と(c)は、それぞれ満潮時水深 ($h=26.0$ cm) と干潮時水深 ($h=18.0$ cm) に対応している。

Case SM-3 は、干潮時の水深であるので天端水深が小さく入射波が砂留潜堤の高天端部上で大きく砕波するために、高天端部背後の侵食が最も著しい。また、水平移動床 (実験①) の場合に前述したように、砕波によって洗掘された砂は循環流によって、低天端部背後の沖側域に堆積されると共に、地形変化が大きく3領域(“沖側域”, “中間域”及び“岸側域”)に分けられるのを斜面移動床 (実験②) の場合においても確認した。全体的な地形変化を比較すると、潮汐を考慮した Case SM-1 の場合が Case SM-2 と Case SM-3 より滑らかであり、極端な凹凸が少ないことが分かる。これは、潮流(潮汐流)及び潮汐変化による水深変化で作用波長が時間変化するため、堆積域の砂が侵食域に移動し、堆積域や侵食域を平らにしていると思われる。すなわち、潮汐の“地形平滑

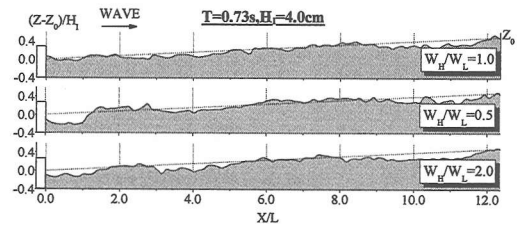
化作用”を見出すことができる。

図—6 は、高天端部長と低天端部長の比である天端長比 (W_H/W_L) が地形に与える影響を示したものであり、天端長比以外は同じ条件を持つ Case SM-1 ($W_H/W_L=1.0$), Case SM-5 ($W_H/W_L=0.5$), Case SM-6 ($W_H/W_L=2.0$) の2潮汐時間後の地形変化である。なお、(a)と(b)はそれぞれ高天端部中央の AA 測線と低天端部中央の CC 測線 (図—1 参照) における縦断面の地形変化を示す。

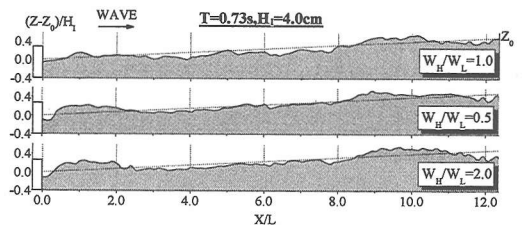
図—6(a) から、高天端部背後の沖側域の侵食の深さは、Case SM-5 > Case SM-6 > Case SM-1 となっており、Case SM-1 に比べて、Case SM-5 が約4倍、Case SM-6 が約2倍になる。また、高天端部背後の $1.0 < X/L < 3.0$ における堆積量や図—6(b)の低天端部背後の $0.5 < X/L < 3.0$ の堆積量は、高天端部背後の侵食量が最も小さい Case SM-1 が最も小さくなっている。なお、紙面の都合上、図示はできないが、平面の地形変化図から、低天端部背後の堆積領域は低天端部長に比例することが確



図—5 縦断面地形変化図 (実験②, Case SM-1~3)



(a) 高天端部中央の AA 測線



(b) 低天端部中央の CC 測線

図—6 縦断面地形変化図 (実験②, Case SM-1, 5, 6)

認できた。即ち、低天端部長が長い Case SM-5 では低天端部背後の堆積が幅広いものの、低天端部長が短い Case SM-6 ではやや細長くなる。しかし、天端長比による中間域や岸側域の大きな地形変化は認められない。このことから、天端長比の値により砂留潜堤直背後（人工干潟の沖側域）の地形変化を推測可能であると言える。本研究の範囲では、高天端部長と低天端部長が同じである Case SM-1 ($W_H/W_L=1.0$) の場合の地形変化が最も小さくなった。

(3) 地形変化の計算値と実験値の比較

地形変化の数値計算を行う上で、様々な物理量の影響を含む式(8)の無次元定数 A の値は計算結果に大きく影響する。本研究では、予備計算を行い、最も実験値と整合性が良い値 ($A=0.3$) を決定し、採用した。

図-7 に実験①の Case HM-1 の場合における3断面での縦断面地形の実験結果と計算結果の比較を示す。なお、(a), (b), (c) はそれぞれ低天端部中央断面(CC測線)、境界部断面(BB測線)及び高天端部中央断面(AA測線)の地形を示す。入射波の進行方向を X の正軸にとり、縦軸と横軸は、それぞれ無次元距離 X/L と無次元地形変化量 $(z-z_0)/H_L$ である。図-7 から、 $X/L > 2.5$ においては、計算値は比較的精度よく地形変化量、侵食及び堆積傾向を予測していることが認められる。しかし、 $X/L < 2.5$ で特に $X/L < 1.0$ では実験値を再現するには至っていない。これは、水理実験では、人工干潟上の場所によって砂の移動形態が異なっているのに対し、数値計算においては、砂の移動形態に関わらず同じ標砂量式(8)及び一定値の無次元定数 A を使っているのが一因であると考えられる。

5. 結 論

本研究では、波の作用による不陸型砂留潜堤を持つ人工干潟の地形変化特性を調べるために固定床及び移動床の3次元水理模型実験を行った。さらに、新たな3次元地形変形計算モデルを提案し、その適用性について検討した。次に本研究で得られた主要な結論を示す。

(1) 砂留潜堤付近の流況は、波形勾配に依存し、波形勾配が大きくなるほど3次元性の強い循環流が形成される。

(2) 人工干潟の地形変化は、潜堤付近の碎波・戻り流れの影響が強い“沖側域”、鉛直壁からの反射波の強い影響により波動性の地形が発達する“岸側域”、及び地形変動の小さい“中間域”の3領域に大別される。

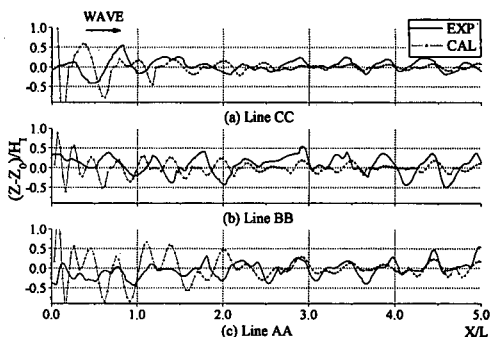


図-7 地形の縦断面変化量の計算値と実験値の比較(実験①, Case HM-1)

(3) 潮流がある場合は、①潮流及び②潮流変化に伴う作用波長の時間変化の影響で、堆積域の砂が侵食域に移動し、堆積域や侵食域を平滑化される傾向、すなわち、潮流の“地形平滑化作用”を見出した。

(4) 不陸型砂留潜堤の天端長比 W_H/W_L は潜堤背後付近の沖側域の地形変化に大きく影響し、天端長比の調節により潜堤背後付近の地形変化の予測が可能である。

(5) 直接数値計算法を組み込んだ3次元地形変化モデルを提案した。実験値との比較より、侵食及び堆積傾向の再現性の高いことを確認した。

参 考 文 献

- 加藤一正・近藤隆道・入江 功 (1985): 浚渫底泥を覆砂して造成する人工干潟の安全性に関する二次元実験, 港湾技術研究所資料, No. 0527, pp. 1-32.
- 姜 関寿・高橋重雄・野々村治・奥寺敦彦・黒田豊和 (2001): 自然および人工干潟における地盤安定性に関する現地調査, 海洋工学論文集, 第48巻, pp. 1311-1315.
- 許 東秀 (2000): 潜堤による多方向不規則波の碎波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 177 p.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・楠山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 海岸工学論文集, 第31巻, pp. 406-410.
- Havens, K. J., L. M. Varnell and J. G. Bradshaw (1995): An assessment of ecological conditions in a constructed tidal marsh and two natural reference tidal marshes in coastal Virginia, *Ecol. Eng.*, Vol. 4, pp. 117-141.
- Hur, D. S., and N. Mizutani (2003): Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater, *Coastal Eng.*, Vol. 47, pp. 329-345.
- Lee, J. G., W. Nishijima, T. Mukai, K. Takimoto, T. Seiki, K. Hiraoka, and M. Okada (1998): Factors to determine the functions and structures in natural and constructed tidal flats, *Wat. Res.*, Vol. 32, No. 9, pp. 2601-2606.