

潜堤背後の水位上昇の抑制効果を有する新形式潜堤開発のための基礎的研究

Basic Study of New-type Submerged Breakwater Effective in Preventing Rise in Water Level

和田 信*・坂本光信**・原口芳樹***・入江 功****・廣畑彰一*****

Makoto Wada, Mitunobu Sakamoto, Yosiki Haraguchi, Isao Irie, Shoichi Hirohata

It has been reported that construction of a submerged breakwater results in a higher mean water level and generates offshore currents and currents toward the coast, causing erosion of the seashore. To prevent this phenomenon, development of a new-type submerged breakwater is necessary. To prepare for such development, we determined the characteristics of currents behind the conventional submerged breakwater, and propose a method of quantitatively evaluating effects of a new-type submerged breakwater on currents, based on the results of experiments with a two-dimensional hydraulic model.

Keywords: New-type submerged breakwater, Seashore preservation

1. はじめに

近年、沿岸域における景観や親水機能、環境などへの配慮から海岸侵食や越波を防止するために、各地で潜堤が建設される事例が増えている。しかし、潜堤の設置により潜堤背後に静穏な海域が創出された反面、背後海域で平均水位が上昇、冲向きや沿岸方向の流れが発生することによって海浜が侵食を受ける事例が報告されており、これらの現象を抑える新形式潜堤¹⁾の開発が求められている。そこで、開発の前段階として従来から広く用いられている潜堤における潜堤背後の流れの特性を把握するとともに、新形式潜堤が流れに及ぼす効果を2次元水理模型実験の結果より、定量的に評価する手法の提案を試みた。

2. 通常潜堤による波浪・平均水位の変化

2.1 2次元計算

潜堤背後（岸側）での平均水位の上昇は、潜堤前面、天端上、潜堤背後で波の諸量に変化することにより、波による過剰運動量フラックス（ラディエーションストレス）の場所的な不均衡が生じ、これが外力となることにより発生する。ここでは、2次元断面における潜堤背後の平均水位変化の特性を把握するため、図-1に示す通常の潜堤（幅広潜堤）を対象とした断面モデルを用いて波浪変形計算を行い、その結果を用いて潜堤背後の平均水位の変化量を算定した。

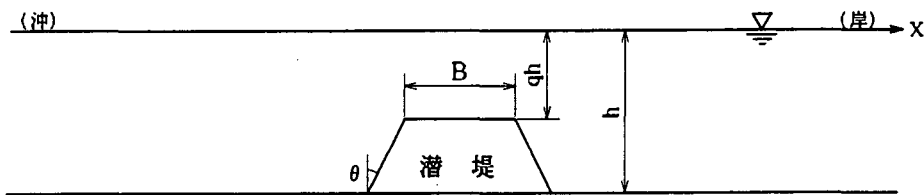


図-1 2次元潜堤モデル

(1) 波浪変化および水位変化の計算

潜堤周辺の波浪変化は、式(1)、(2)に示す渡辺他²⁾による2次元の非定常緩勾配方程式を差分化した式を用いて計算した。

$$\frac{\partial Qx}{\partial x} + \frac{1}{n} c^2 \frac{\partial}{\partial x} (n \zeta) + f_0 Qx = 0 \quad (1)$$

* 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所（750 下関市竹崎町四丁目6-1）

** 運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所

*** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所

**** 正会員 九州大学工学部建設都市工学科

***** 正会員 三井共同建設コンサルタント㈱

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Qx}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$n = 1/2 \cdot (1 + 2kh/\sinh 2kh) \quad (3)$$

ここに、 Qx は波の進行方向(X 方向)の線流量、 ζ は水面変動量、 k は波数、 h は水深、 c は波速、 f_0 は砕波等による波の減衰項の係数である。また、 f_0 については、既往の研究事例からあらかじめ設定した透過率 Kt が得られるように潜堤天端の計算点で与えた。

平均水位 η は、波浪変形計算の結果として得られるラディエーションストレスを用いて、ラディエーションストレスの勾配と平均水位の勾配とのつりあいの式(4)を差分化した式で算定した。(次元の区別のため η_2 :2次元、 η_3 :3次元とする。)

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial x} = - \frac{1}{\rho g(h + \eta_2)} \cdot \frac{\partial Sxx}{\partial x} \quad (4)$$

ここに、 Sxx はラディエーションストレス、 ρ は水の単位体積重量、 g は重力加速度である。また、 Sxx は、渡辺他³⁾の方法により算定した。

(2) 計算ケース

波浪及び平均水位上昇の計算は、水深 h 、潜堤天端水深比 q 、入射波高 Hi の3要素を $h = 4, 6, 8\text{m}$ 、 $q = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 、 $Hi = 1.0, 2.0, 3.0\text{m}$ の組み合わせで行った。このとき、天端幅 $B = 40\text{m}$ 、潜堤法勾配 $\tan \theta = 0.5$ 、周期 $T = 8\text{sec}$ とした。

(3) 潜堤透過率 Kt

潜堤の透過率に大きな影響を及ぼすと考えられるパラメータ B/L (あるいは B/L_0)、 qh/Hi (あるいは qh/H_0')、および Hi/L (あるいは H_0/L_0)が今回の計算範囲に近い田中⁴⁾の透過率算定図を用いて Kt を設定した。

(4) 2次元計算結果

波高・天端水深の比 qh/Hi と波高・潜堤背後平均水位の比 η_2/Hi との関係は、 Hi 、 h に依存せず qh/Hi の増大とともに η_2/Hi が0に漸近していくほぼ1本の曲線で表される。また、 h の相違により多少の差異が認められるものの、 Kt と η_2/Hi との関係も、 Kt の増大とともに η_2/Hi が小さくなる近似的にほぼ1本の曲線で表される。

2.2 3次元計算

(1) 波浪、流れ、平均水位の計算

図-2に示す潜堤が設置されている海域で、波が潜堤法線に直角入射する場合を対象とし、2次元計算における基礎方程式(1)、(2)に沿岸方向の成分を加え、差分化した。また、潜堤天端上における波の減衰項の係数 f_0 は2次元の場合と同値とした。流れ、平均水位についてはラディエーションストレスを外力とした平面流の岸沖方向、沿岸方向の運動方程式および連続方程式を差分化し、ADI法により求めた。

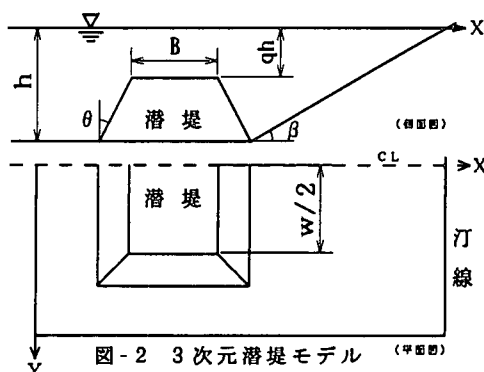


図-2 3次元潜堤モデル (平面図)

(2) 計算ケース

水深 $h = 6.0\text{m}$ 、海底勾配 $\tan \beta = 0.5$ 、入射波高 $Hi = 2.0\text{m}$ 、周期 $T = 8.0\text{sec}$ で、潜堤断面は2次元計算における平均水位が $\eta_2/Hi = 0.3, 0.2, 0.1$ の3段階となる断面(この時 Kt はそれぞれ $Kt = 0.32, 0.38, 0.48$ となる)とし、潜堤長 W は $W = 200, 400, 600, 800\text{m}$ の4段階とした。

(3) 3次元計算結果

潜堤周辺の代表流速を潜堤天端上の流れを除く流速の最大値 $U_{\max}$ で、 η_3/Hi を平均水位がほぼ一定となる範囲の平均値で定義した。 $U_{\max}$ は潜堤端部付近の直背後の海域で発生する。

潜堤長 W と最大流速 $U_{\max}$ 、 η_3/Hi との関係では、 W が長くなるに伴って $U_{\max}$ 、 η_3/Hi が大きくなる。 η_2/Hi と $U_{\max}$ の関係では、 η_2/Hi が大きいほど $U_{\max}$ が大きくなり、 $U_{\max}$ の変化の割合は W が長いほど大きくなっている。また、 Kt と $U_{\max}$ との関係では、 Kt の増加とともに $U_{\max}$ が減少するがその割合は W が長いほうが大きい。

次に、 η_2/H_i と η_3/H_i との関係では、 η_2/H_i が大きいほど η_3/H_i は大きくなるが、その差異は η_2/H_i が大きいほど、また W が短いほど大きい。

3. 新形式潜堤が流れに及ぼす効果

3.1 検討概要

新形式潜堤は通常の潜堤とは波浪制御や平均水位変化の機構が異なるものと考えられるが、ここでは新形式潜堤の制御メカニズムには直接触れず、便宜的に潜堤背後の平均水位上昇量をコントロールする係数を導入して流れの計算を行い、平均水位上昇量を制御しなかった場合（通常の潜堤）と比較することによって、新形式潜堤が周辺海域の流れに及ぼす効果を把握した。さらに、通常の潜堤の流速を基準として新形式潜堤の周辺における代表流速の推定方法を提案する。

3.2 数値計算

(1) 2次元計算

波浪変化の計算は、通常の潜堤と同様の方法とした。水位変化の計算は、同じ透過率で平均水位が変化した場合の効果を見るため、図-3の様に潜堤沖側天端端～岸側境界の範囲では式(4)の代わりに、式(4)の右辺に係数 α を乗じた式(5)で η_2 を算定することとした。この係数 α を水位制御係数と呼ぶことにする。

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho g(h + \eta_2)} \cdot \alpha \cdot \frac{\partial S_{xx}}{\partial x}$$

(5)

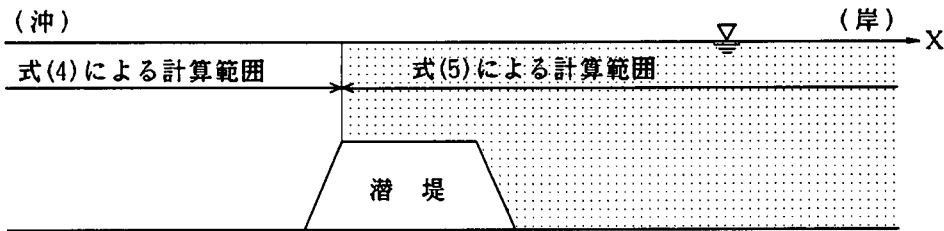


図-3 水位計算式の適用範囲（2次元モデル）

表-1 計算ケース（2次元計算）

計算ケースは、 $\eta_2/H_i = 0.3, 0.2, 0.1$ に対して表-1に示す η_2/H_i となる α をトライアルにより求めた。また、結果の比較のため、 η_2/H_i が大きくなるケース（ $Kt = 0.39$ における $\eta_2/H_i = 0.3$ 及び $Kt = 0.48$ における $\eta_2/H_i = 0.2$ ）も含めた。

h (m)	H _i (m)	q	K _t	η_2/H_i			
				0.05	0.1	0.2	0.3
6.0	2.0	0.18	0.32	—	○	○	◎
		0.25	0.39	○	○	◎	○
		0.42	0.48	○	◎	○	—

◎：通常の潜堤の η_2/H_i

(2) 3次元計算

図-4に示す範囲で運動方程式に α を付加した式を用いた。 α は2次元計算で求めた値とし、計算ケースは、2次元の計算ケースに潜堤長（ $W = 200, 400, 600, 800\text{m}$ ）を組み合わせたものとした。

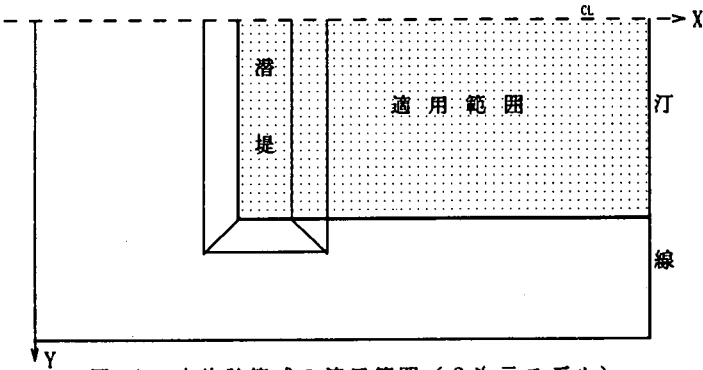


図-4 水位計算式の適用範囲（3次元モデル）

3.3 潜堤周辺の流況と平均水位の分布

図-5は、水位制御を行った計算例として $W = 400\text{m}$ 、 $Kt = 0.39$ における潜堤周辺の流況を η_2/H_i と比較して示したものである。

この図では η_2/H_i を小さくすることにより卓越した流れの流速が低下する。また、全般的な流れのパターンには大きな変化がないが、 η_2/H_i の低下とともに汀線近傍で潜堤中心部に向かう沿岸方向の流れが顕著になる傾向が認められる。これらの計算では η_3/H_i の分布は潜堤背後では η_2/H_i の変化に伴って変化するものの、潜堤がない海域では η_2/H_i による差違はほとんどなく、 η_2/H_i を小さくすると汀線近傍では潜堤背後と潜堤がない海域との水位差が大きくなる。このことが汀線近傍の流況に影響を及ぼしているものと推察される。なお、他の

W と Kt についても同じような傾向が得られている。

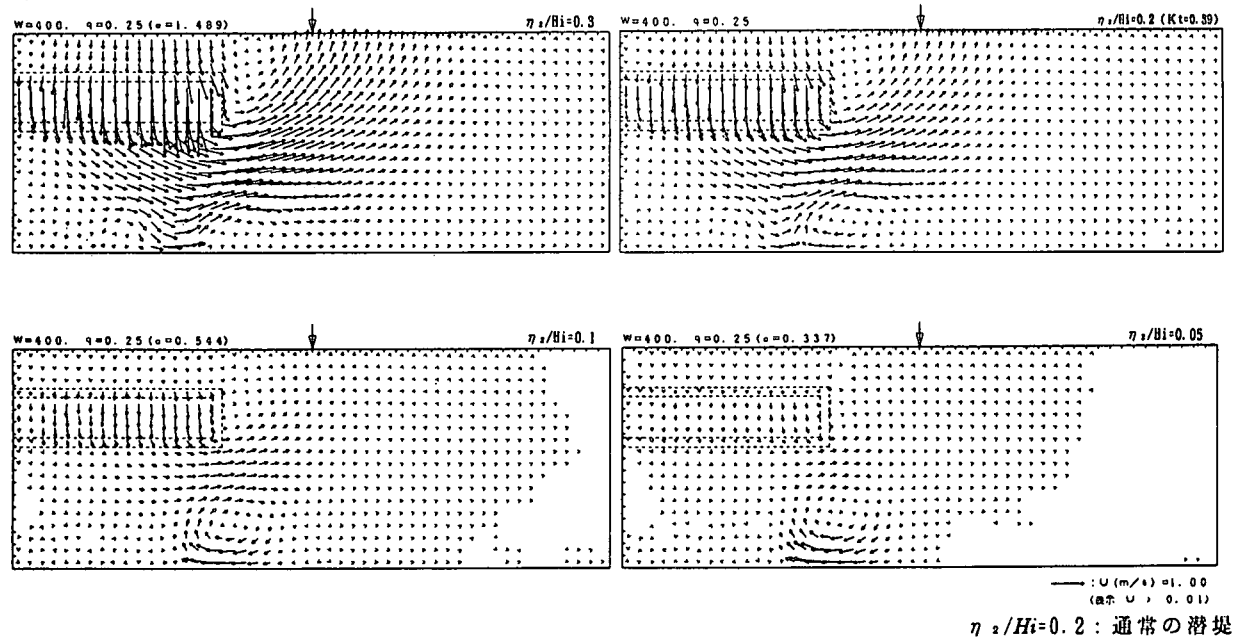


図-5 η_z/H_i の制御による潜堤周辺域の流況の変化 ($Kt = 0.39$, $W = 400\text{m}$)

3.4 潜堤周辺の流れと平均水位の特性

(1) η_z/H_i の制御が $U_{\max}$ に及ぼす効果

図-6 は、 $Kt = 0.39$ における η_z/H_i と $U_{\max}$ の関係を潜堤長 W をパラメータとして示したものである。 η_z/H_i の低下に伴って $U_{\max}$ がほぼ直線に低下することがわかる。この傾向は他の Kt についても同様である。

次に η_z/H_i の制御が W と $U_{\max}$ の関係に及ぼす影響をみるため、 $W = 800\text{m}$ の $U_{\max}$ を基準として、式(6)で定義した無次元流速 U_w と η_z/H_i との関係 ($Kt = 0.39$) を図-7 に示す。

$$U_w = \frac{U_{\max}}{W=800\text{mの}U_{\max}} \quad (6)$$

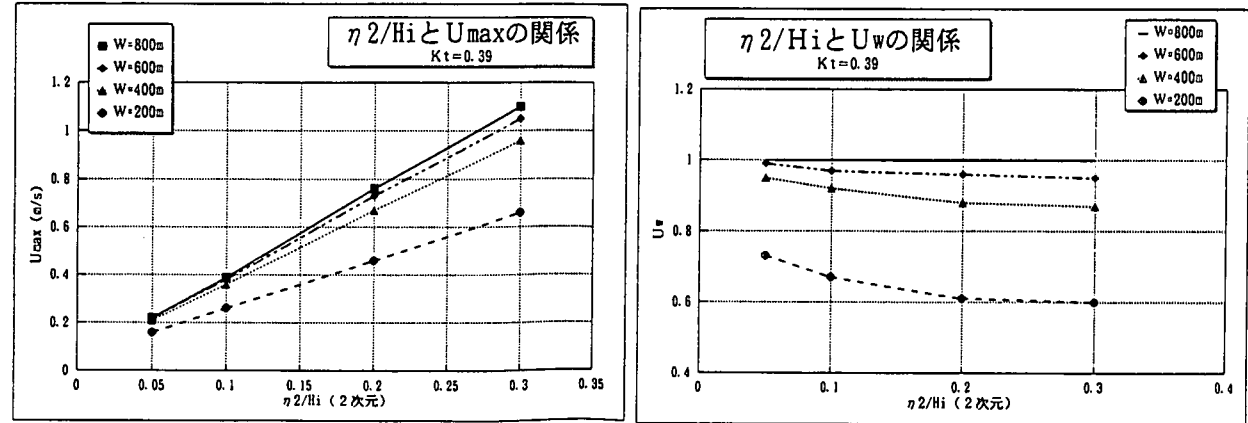


図-6 η_z/H_i の制御による流速 $U_{\max}$ の変化 ($Kt=0.39$) 図-7 η_z/H_i の制御による相対流速 U_w の変化 ($Kt=0.39$)

この図では、 η_z/H_i の低下とともに U_w は増加する傾向を示している。これは、 η_z/H_i が低くなると堤長による流速変化が、絶対値だけではなく比率的にも小さくなることを表している。

また、 η_z/H_i を制御した場合の制御しなかった場合に対する $U_{\max}$ の変化の割合をみるため、通常の潜堤 ($\alpha = 1.00$) の $U_{\max}$ を基準として、式(7)で定義した無次元流速 U_α と W との関係 ($Kt = 0.39$) を図-8 に示す。

$$U_\alpha = \frac{\eta_z/H_i \text{ を制御した場合の } U_{\max}}{\text{通常の潜堤の } U_{\max}} \quad (7)$$

この図によると、 U_α は W によりほとんど変化しない。また、他の Kt についても U_α の値はあまり変化しない結果を得ていることと合わせると、 η_z/H_i の抑制に伴う代表流速の変化は、 η_z/H_i の制御量だけで表現できそうである。このことを明らかにするため、同じ Kt について式(8)で η_α を定義し U_α との関係を示したものが図-9 である。

$$\eta\alpha = \frac{\text{制御後の}\eta_2/H_i}{\text{通常の潜堤の}\eta_2/H_i} \quad (8)$$

図-9では、 $\eta\alpha$ と $U\alpha$ とは他のパラメータに関係せずほぼ1本の直線で表される。

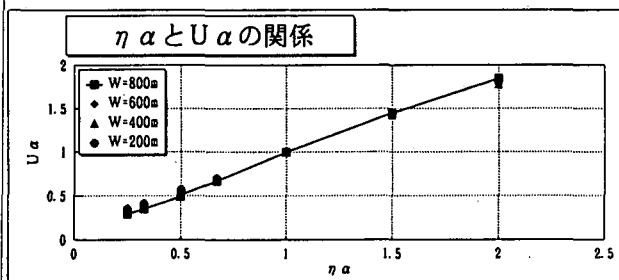
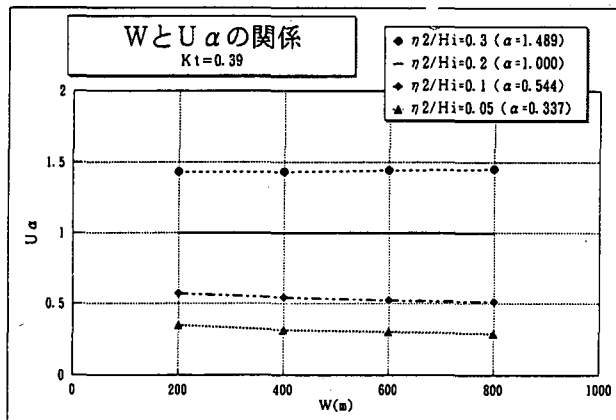


図-8 η_2/H_i の制御による無次元流速 $U\alpha$ の変化($Kt=0.39$)

図-9 $U\alpha$ と $\eta\alpha$ との関係

(2) η_2/H_i の制御が η_3/H_i に及ぼす効果

各 Kt とも、 η_2/H_i の変化に伴って η_3/H_i がほぼ線形に変化し、その勾配は W が長い程大きくなる。 η_2/H_i を低くした場合には、 W による η_3/H_i の差異は小さくなり、また η_3/H_i と η_2/H_i の差がほとんどなくなる。

3.5 新形式潜堤周辺の代表流速の推定方法

今回の数値計算の結果より、通常の潜堤とは Kt と η_2/H_i とが異なる新形式潜堤の周辺海域における代表流速 U_{max} を推定する方法を提案する。なお、ここでは、潜堤諸元、入射波浪及び海浜地形が数値計算ケースの範囲内であり、かつ2次元水理模型実験等により新形式潜堤の Kt と η_2/H_i とが得られていることを前提としている。

(1) 推定方法1

通常の潜堤では、 Kt と η_2/H_i との関係が一義的であるため、これらのいずれかと W の関係で U_{max} が求められる。しかし、新形式潜堤では採用した構造様式や形態により、 Kt と η_2/H_i との関係が変化するため、 U_{max} を求めるには Kt 、 η_2/H_i 及び W の3要素と U_{max} との関係が得られていなければならない。

水位制御係数 α を導入した今回の計算では、同じ Kt で異なる η_2/H_i についての U_{max} が得られている。図-10は、 Kt 、 η_2/H_i 及び U_{max} の関係を W 別にグラフにしたもので、2次元水理模型実験等で新形式潜堤の Kt と η_2/H_i が得られれば、これらのグラフを用いて U_{max} を推定する。

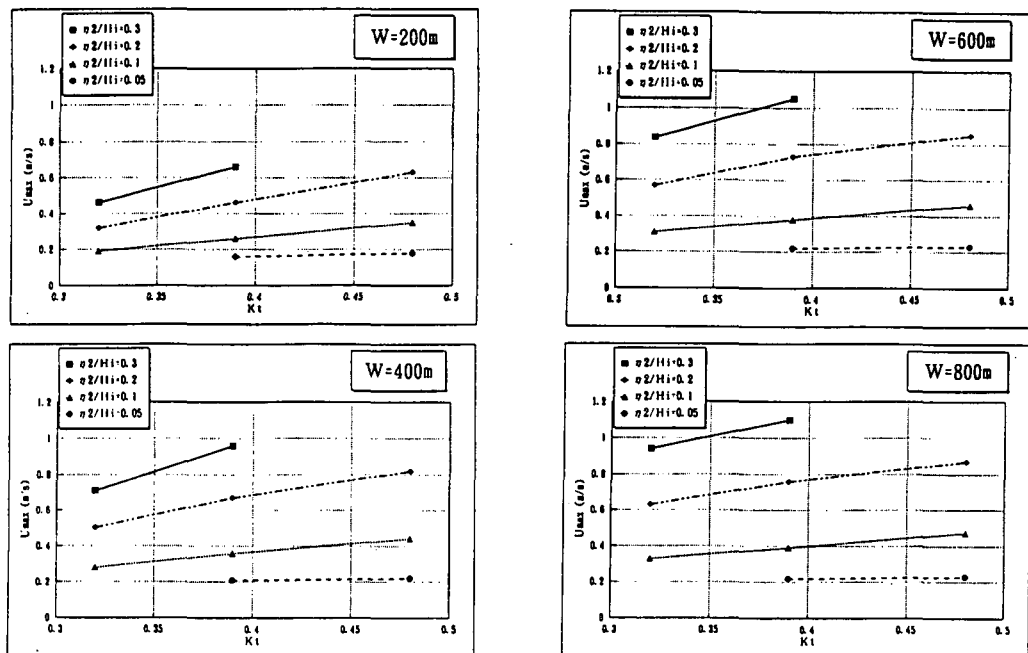


図-10 潜堤構造物周辺における代表流速 U_{max} の推定図

(2) 推定方法 2

数値計算結果では、式(7)で定義される U_{α} が Kt や W の変化にあまり関係せず、通常の潜堤の η_2/H_i に対する制御後の η_2/H_i の割合に応じて変化することから、このことを利用した $U_{\max}$ を推定する手順を示す。

まず、2次元計算の結果より、通常の潜堤の Kt と η_{02}/H_i は図-11の関係にある（以下、通常の潜堤の η_2 を η_{02} と表す）。

また、3次元計算の結果より、通常の潜堤における η_{02}/H_i と $U_{\max}$ の関係は潜堤長 W をパラメータとして図-12で示される（以下、通常の潜堤の $U_{\max}$ を $U_{0\max}$ と表す）。

2次元水理模型実験等により新形式潜堤の Kt と η_2/H_i とが得られたとすると、図-11より Kt に対応する η_{02}/H_i が求まる。次に、図-12よりこの η_{02}/H_i に対する $U_{0\max}$ を求める。一方、 η_{02}/H_i が判れば式(8)で定義される η_{α} が求まるので、前掲の図-9より U_{α} が求まり、式(7)で示しているように U_{α} と $U_{0\max}$ の積から $U_{\max}$ を推定する。

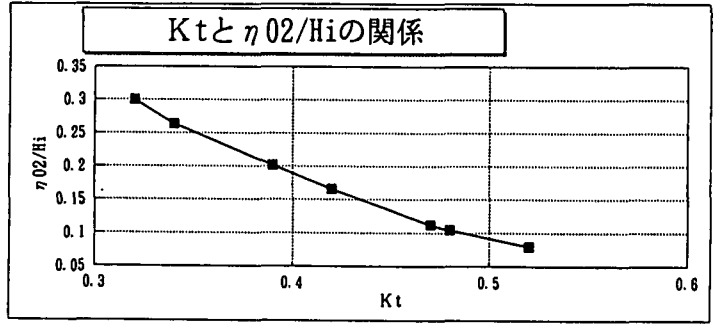


図-11 通常の潜堤における Kt と η_{02}/H_i の関係

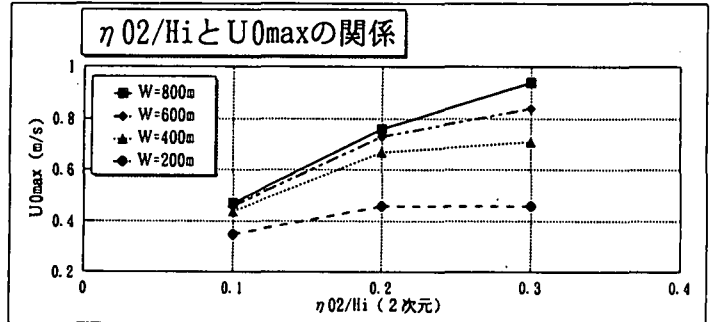


図-12 通常の潜堤における η_{02}/H_i と $U_{\max}$ との関係

4. 結論

一般海浜に潜堤背後の平均水位上昇量を抑制できる新形式潜堤が設置された場合における、潜堤周辺の流れに及ぼす効果をみるため、便宜的に水位を制御する係数を導入し、流れ、水位の計算を行い以下の結論を得た。

- ① Kt を固定して、 η_2/H_i を変化させた場合、流況、平均水位の分布状況はあまり変化しないが、 $U_{\max}$ は η_2/H_i の低下に伴って小さくなる。
- ② η_2/H_i を制御した $U_{\max}$ と、通常の潜堤 (η_2/H_i を制御しない) での $U_{\max}$ との比 U_{α} は、 W 、 Kt にはあまり依存せず、ほぼ通常の潜堤の η_2/H_i に対する制御後の η_2/H_i との比 η_{α} と線形関係にある。
- ③ 2次元の水理模型実験等で新形式潜堤の Kt と η_2/H_i が得られれば、潜堤周辺海域の $U_{\max}$ が推定できる。

参考文献

- 1) 信岡尚道・村上啓介・入江 功・松永厚彦・木原康成・牛房幸光(1993): 潜堤構造物の海浜流制御と海岸保全機能、海岸工学論文集、第40巻、pp. 261~265
- 2) 渡辺 晃・磯部雅彦・泉宮尊司・中野英樹(1988): 非定常緩勾配方程式による不規則波の浅水砕波変形の解析、第35回海岸工学講演会論文集、pp. 173~177
- 3) 渡辺 晃・塩崎正孝(1982): 構造物周辺の波浪・海浜流場について、第29回海岸工学講演会論文集、pp. 110~114
- 4) 田中則男(1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺効果及び砂浜安定効果について、第23回海岸工学講演会論文集、pp. 152~157