

透過性潜堤による平面波浪場の制御に関する研究

富 樫 宏 由*・山 田 和 弘**

Study on the Control of the Plane Waves Field by a Submerged Permeable Breakwater

by

Hiroyoshi TOGASHI* and Kazuhiro YAMADA**

In recent years, as the consciousness for environmental protection and coastal scenery rises, the waves control technique using submerged permeable breakwaters has become of major interest lately. Consequently, some model equations have already been presented so far, and the vertical two-dimensional analysis or the model analysis as the characteristics of the reflection or the permeability by them have been carried out. However, the plane waves analyses on the real coastal area are indispensable because the waves control effects using breakwater are influenced by the various factors.

So, this study aims to analyze the plane wave fields around a submerged permeable breakwater using the model equation considering presence of a permeable layer under the assumption of mild slope.

1. まえがき

従来、わが国における海岸防災構造物として、数多くの離岸堤が施工されてきた。その理由として、高い波浪制御効果および堆砂効果をもち、かつ施工・維持管理も容易であることがあげられる。通常、離岸堤背後には、舌状に張り出した海浜地形（舌状砂州）、あるいはトンボロが形成されるが、このような離岸堤の波浪制御効果あるいは海浜変形制御効果については、すでに数多くの実験・実証的、あるいは理論的な研究が行われている。しかし、最近の環境保全および沿岸景観に対する意識の高まりと共に、従来の離岸堤のありかたを見直し、新たな波浪制御・海岸侵食制御構造物の研究および開発が求められるようになってきた。その中でも、人工リーフや大規模潜堤と呼ばれるものに代表される透過性潜堤を利用した波浪制御工が注目されている。それに伴って、潜堤の反射や透過特性に関して数多くの研究が行われてきたが、従来の研究の殆どは鉛直2次元もしくはモデル解析といった限られ

た条件下のものである。しかしながら、潜堤を含めた離岸堤による波浪制御効果は、設置される海岸の様々な要因に左右されるために、上述のような限られた条件下での解析だけでは不十分で、実海域における平面的波浪場の解析が不可欠である。そこで本研究においては、現在、長崎市西部の手熊海岸で透過性潜堤による波浪制御工が計画されている実海域を対象とし、透過性潜堤周辺の平面的波浪場を、緩勾配の仮定の下に透水層の存在を考慮したモデル方程式を用いて数値シミュレーション解析する。

2. 平面波浪場の計算法

緩勾配底面上における波の運動を考える。水の粘性および圧縮性を無視し、波の運動が渦無し運動であると仮定すると速度ポテンシャル Φ が定義でき、 Φ がラプラス方程式を満たす。次に、潜堤周辺の波は微小振幅波であると仮定すると、速度ポテンシャルの鉛直方向への分布を仮定できる。それを基に速度ポテンシ

平成10年4月24日

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**日本鋪道 (Nippon Hodo, Co.)

ャル Φ に関するラプラス方程式を鉛直方向へ積分し、更に底面摩擦などによる波の減衰を流体運動に抵抗力が働く場合のそれで模擬すると、不透過底面上の海面変動を支配する緩勾配方程式は以下のように書ける。

$$\nabla \cdot (cc_g \nabla \eta) + (1 + if_D) k^2 cc_g \eta = 0 \quad (1)$$

一方、水平透過水層上の海面変動を支配する緩勾配方程式は以下のように書ける。

$$\nabla^2 \eta + (1 + if_D) k^2 \eta = 0 \quad (2)$$

ただし、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 、 $i = \sqrt{-1}$ 、 k は波数、 c は波速、 c_g は群速度、 f_D は波高減衰係数であり、 η は複素振幅を表わす。減衰係数に関しては、砕波領域において Yu ら (1992) の提案した経験式で与える。砕波領域を定める際には、全領域で砕波しないことを仮定した試算を行い、その計算結果に合田 (1975) の砕波条件式を適用する。波数は波の角周波数および水深から以下の分散関係式で求める。

$$\sigma^2 = gk \frac{\{(\varepsilon + F_P)e^{2kh_P} + (-\varepsilon + F_P)e^{kh_1} - \{(-\varepsilon + F_P)e^{2kh_P} + (\varepsilon + F_P)e^{-kh_1}\}}{\{(\varepsilon + F_P)e^{2kh_P} + (-\varepsilon + F_P)e^{kh_1} + \{(-\varepsilon + F_P)e^{2kh_P} + (\varepsilon + F_P)e^{-kh_1}\}} \quad (3)$$

ここに、 σ は角周波数、 g は重力加速度、 h_1 は堤体上の水深、 h_P は堤体高さ、 ε は空隙率、 F_P は抵抗係数を含む関数である。式(3)において、透水層の空隙率 ε を 0 とすれば、水深 h_1 での通常の微小振幅波と一致する。

境界条件に関しては、自由水面の変位を既知とする強制境界、不透過境界および部分透過境界を考える。強制境界においては η を直接与え、不透過境界および部分透過境界においては次の境界条件式で表わす。

$$cc_g \frac{\partial \eta}{\partial n} + \lambda \eta + \nu = 0 \quad (4)$$

ただし、 λ および ν は実際の境界の物理的な状況を反映する係数であり、 n は境界の法線方向を表わす。

3. 数値モデル

数値計算は変分法に基づいた有限要素法を用いて行う。幸いにも、形の上で式(1)は式(2)を満たしているの、式(1)についてのみ考えればよい。有

限要素方程式を導く際に、まず対象問題の境界条件で式(1)の解を最小化条件とする汎関数を以下のように得る。

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} [cc_g \{(\nabla \eta) \cdot (\nabla \eta) - (1 + if_D) k^2 \eta^2\}] d\Omega + \int_{\Gamma_2} \left(\frac{1}{2} \lambda \eta^2 + \nu \eta \right) d\Gamma \quad (5)$$

ここに、 Ω は対象問題の領域を、 Γ_2 は境界をそれぞれ表わす。計算領域を三角形要素に分割し、各要素において既知量および未知量を共にその節点値と内挿関数の線形組み合わせで近似することにより、汎関数 Π は下式のように書き換えられる。

$$\Pi = \eta^T \mathbf{K} \eta - \eta^T \mathbf{r} \quad (6)$$

ただし、 η は未知の複素振幅の節点値で構成されるベクトルであり、 \mathbf{K} は係数マトリックス、 \mathbf{r} は境界条件に関連した既知のベクトルである。式(6)を汎関数の最小化条件に代入すると、有限要素方程式

$$\mathbf{K} \eta = \mathbf{r} \quad (7)$$

が得られる。式(7)を強制境界条件も満たされるように修正して解くと、複素振幅すなわち自由水面の振幅(実部)と位相(虚部)の節点値が得られる。

4. 解析結果と考察

(1) 解析領域と計算ケース

図-1 に構造物のない手熊海岸の自然海浜地形を示す。

次に、与える入射波諸元として平常時、最大波時および異常時の波浪(表-1 参照)を考える。これらに対して、まず構造物が存在しないときの当海岸の波浪

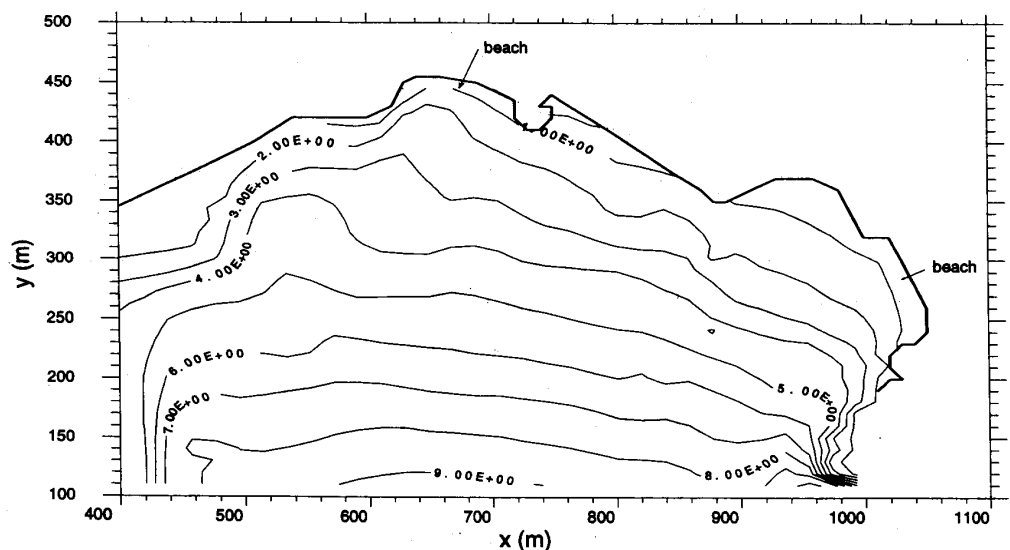


図-1 手熊海岸の自然海浜地形

表-1 代表波諸元

代表波	入射波高(m)	周期(sec)	波向(角度)
平常時	1.27	4.8	90
最大波	2.55	6.8	90
異常時	3.60	16.0	90

特性を把握した上で（平常時）、計画されている離岸潜堤（堤体長150 m, 堤体幅40 m, 天端水深1.66 m, 堤体数2基, 堤体間隔50 m）を①不透過性（空隙率0）、および②透過性（空隙率56%）にしたとき、の計6ケースにおける解析結果を掲載する。

また、今後考察を行う上で表現を容易にするために便宜的に海域を、海域A（ $400\text{ m} \leq x \leq 600\text{ m}$ ）、海域B（ $600\text{ m} \leq x \leq 800\text{ m}$ ）、海域C（ $800\text{ m} \leq x$ ）に分割し、2箇所の砂浜を、砂浜A（ $620\text{ m} \leq x \leq 720\text{ m}$, $y=450\text{ m}$ ）、砂浜B（ $x=1020\text{ m}$, $230\text{ m} \leq y \leq 320\text{ m}$ ）と名付け、更に2堤の離岸堤を、砂浜Aを護るべき離岸堤を離岸堤A、砂浜Bを護るべき離岸堤を離岸堤Bと名付ける。

（2）解析結果と考察

a) 平常時における波浪制御効果

まず、手熊海岸の自然海浜地形による波浪特性を把握するために、図-2に離岸堤が存在しないときの解析結果（波高分布）を示す。これは基本的に、水深の変化のみによって生じた浅水変形と屈折効果、および海岸からの反射波とによる波高分布および波向の様子である。ただし、2箇所の砂浜からの反射波は無視する。この場合、大きく分けて海域A、Bの2箇所で波高の増幅がみられる。これらはどちらも水深が小さくなっていくに伴う浅水変形による波高増幅と、海岸

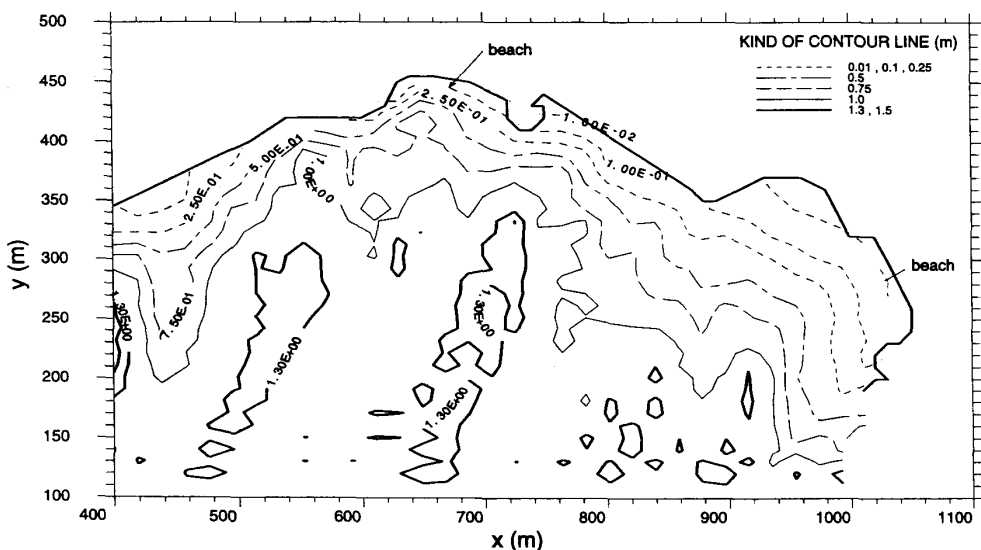


図-2 離岸堤が存在しないときの波高分布（平常時）

からの反射波が集まってくる位置、という2つの要素が重なり合うことによって生じる波高増幅領域である。次に屈折効果をみてみると、水深4 m付近から碎波および屈折効果が現れている。屈折は浅海域でみられる現象なので、もっと水深の深い所でも起こっているものと考えられるが、浅水変形による波高増幅の限界と碎波地点を過ぎてから、屈折効果は顕著に現れるようになる。碎波帯内では、等波高線はほぼ等水深線に沿った形になっている。なお、2箇所の砂浜に注目すると、砂浜A付近では静穏海域の目安とされる0.5 m等波高線はかなり砂浜近くまでできているのが分かる。これは、直角に入射してきた波は何も障害物が無い場合、その運動の方向に運動を続けようとするし、等水深線も砂浜の方に向かって徐々に浅くなっていることから、浅水変形による波高の増幅が砂浜近くまで起こっていることに加え、屈折効果により波が収束してくることによるが、砂浜では波は発散し、波高は低減している。一方、砂浜B付近は、入射波が直接砂浜に打ち寄せず、かなり屈折を経過してくるので砂浜Aに比べて比較的静穏な海域になっている。また、この付近の等水深線は急激に曲折しているの、浅水変形による波高の増幅も砂浜A付近より後退している。

図-3に計画不透過性離岸潜堤設置時の解析結果を示す。まず、海域Aに関しては所々で波高の増幅がみられるものの、比較的安定している。これは離岸堤が潜堤であるため、離岸堤の影響を受けにくいものと考えられる。また、潜堤では完全な遮蔽体とならないので、潜堤前面では部分重複波の領域となり、波高はそれ程大きくはない。むしろ、この部分は図-2でもともと波高の増幅している海域であることから、その現象が大きく反映されているものと考えられる。一方、

潜堤周辺およびその背後の海域では、回折現象はそれ程顕著に現れていない。むしろ屈折効果による影響をより大きく受けているものと考えられる。また、潜堤によって遮蔽されるべき海域を0.5 m等波高線で見ると、潜堤を設置したことにより静穏海域が広がっているのが分かる。従って、堤体背後では堆砂効果が期待できる。

図-4に計画透過性離

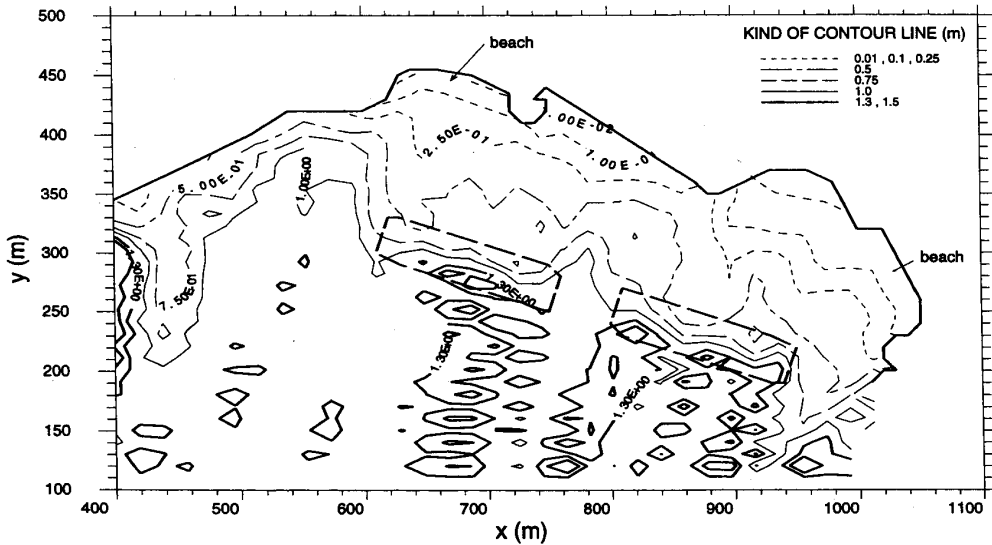


図-3 不透過性潜堤設置時の波高分布 (平常時)

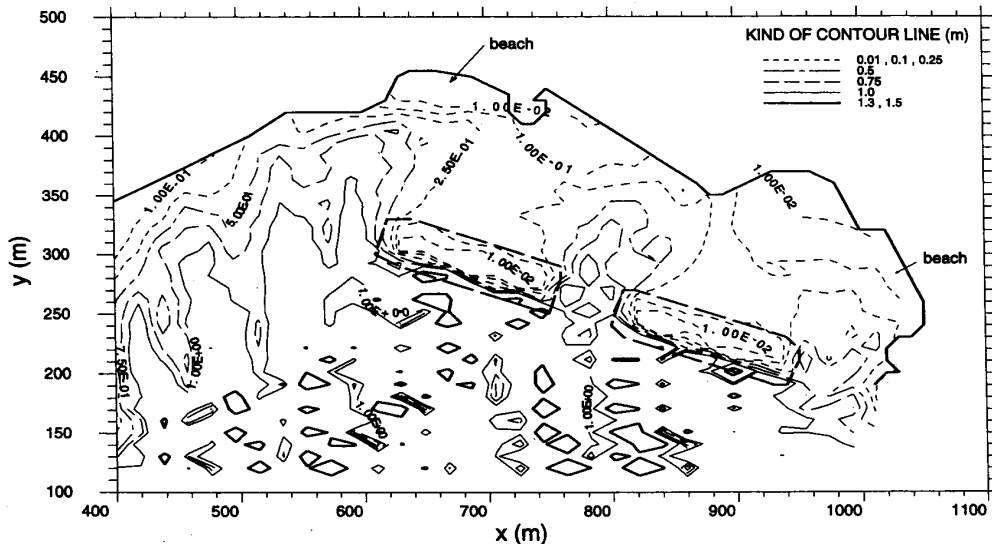


図-4 透過性潜堤設置時の波高分布 (平常時)

岸潜堤設置時の解析結果を示す。このとき、図-3で述べたように、潜堤では完全な遮蔽体とならないので潜堤前面では部分重複波の領域となり、波高の増幅している箇所が認められる。ただし、この場合はそれが点在しているため、たとえそれが潜堤からの反射波と浅水変形による波高の増幅との相互作用であっても、明らかに図-3のそれよりも波高は小さくなっている。これは潜堤を透過性にしたことによるエネルギー吸収およびエネルギー透過によって、反射波エネルギーが減少したためと考えられる。一方、潜堤周辺およびその背後の海域では、前述のように潜堤では完全な遮蔽体とならないので回折効果は現れにくいと考えられるが、この場合においては回折効果が非常に大きく現れているように見受けられる。これは、潜堤を越える波が潜堤上で砕波を生じて波エネルギーが減少す

ることと、潜堤を透過性にしたことによるエネルギー吸収によって波エネルギーが減少したためと考えられる。次に、潜堤によって遮蔽される海域を図-3のそれと比較してみると、明らかに図-4の方が静穏海域は広がり、堤体背後においてもそれ以上の堆砂効果が期待できる。

b) 最大波時における波浪制御効果

図-5に計画不透過性離岸潜堤設置時の解析結果を示す。このとき、潜堤を設置することによって等波高線が全体的に後退している。従って静穏海域も広がり、遮蔽域では波浪制御効果が得られている。一方、屈折効果は水深が急激に変化する箇所と砂浜付近で現れている程度である。また、不透過性潜堤では回折効果は殆どみられない。

図-6に計画透過性離

岸潜堤設置時の解析結果を示す。潜堤全面の海域における波高分布は前述の図-5と大差はない。しかし注目すべきは、潜堤上および潜堤周辺とその背後の海域における波高分布である。特に、潜堤を越える波が潜堤上で砕波し、急激に波高が低減しているのが分かる。つまり、砕波による急激なエネルギー減少と潜堤の透過性によるエネルギー吸収が同時に起こるため、潜堤上および潜堤内を通過した波はエネルギーポテンシャルの低い状態にある。それを補うために、潜堤先端付近において波の回折が起こっていると考えられる。このとき、潜堤によって遮蔽される海域の静穏度は高く、堆砂効果も期待できる。

c) 異常時における波浪制御効果

図-7に計画不透過性離岸潜堤設置時の解析結果を

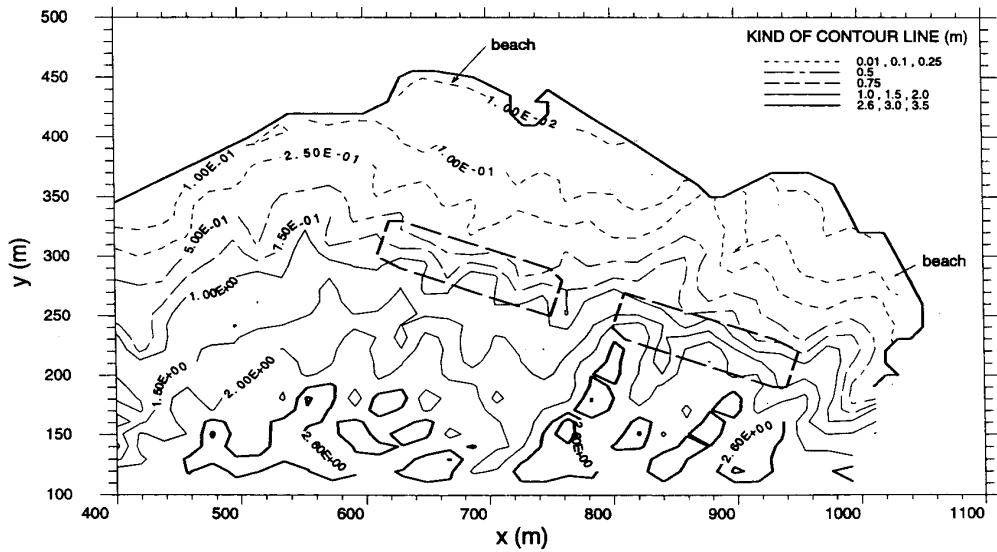


図-5 不透過性潜堤設置時の波高分布 (最大波時)

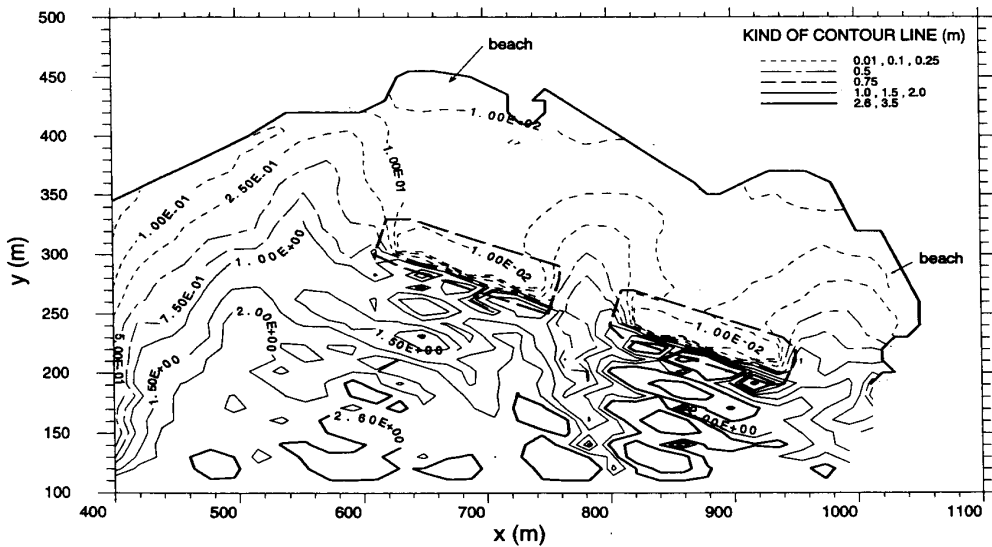


図-6 透過性潜堤設置時の波高分布 (最大波時)

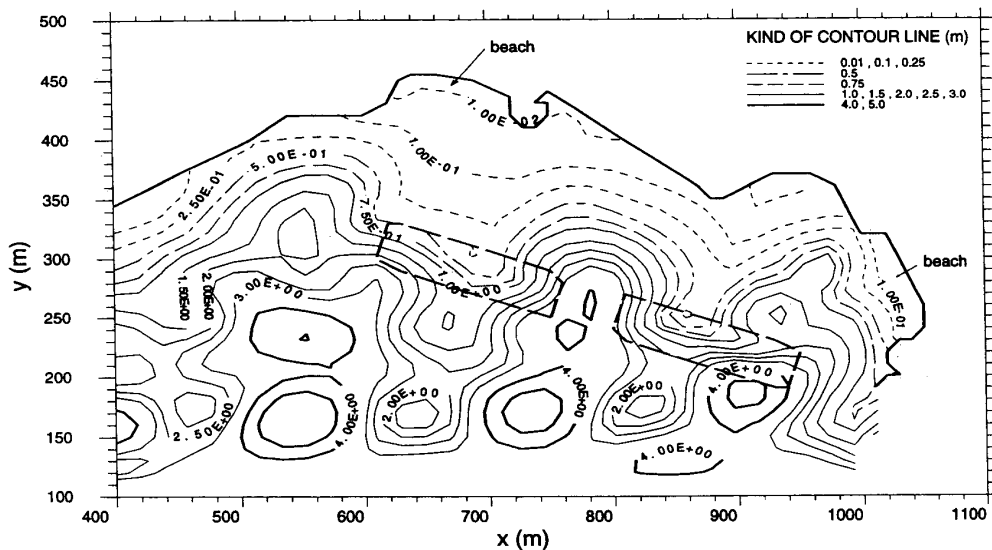


図-7 不透過性潜堤設置時の波高分布 (異常時)

示す。ここでは、今までの不透過性離岸潜堤による波高分布では現れにくかった潜堤による回折効果が顕著に現れている。これは、入射波が元々大きいために潜堤上での急激な水深変化により急激な碎波が起こり、その分回折効果が大きく現れるものと考えられる。次に、潜堤によって遮蔽される海域に注目してみると、砂浜A付近の海域は静穏になっており、堆砂効果も期待できるが、砂浜B付近の海域は0.5 m 等波高線がかなり砂浜に近づいており、静穏になっているとは言い難い。

図-8 に計画透過性離岸潜堤設置時の解析結果を示す。これは、実際よりかなり早い段階で碎波が生じているため、全体的に等波高線が後退している傾向にある。従って、潜堤によって遮蔽される海域の静穏域に関しては厳密なことは言えない。しかし、砂浜B付近の海域に注目すると、潜堤Bによる回折効果と水深変化による屈折効果が共存し、0.5 m 等波高線はかなり砂浜に接近しているのが分かる。

5. まとめ

本研究では、手熊海岸の景観の保全に焦点を当て、不透過性および透過性潜堤周辺の海域における波浪制御についての検討を行った。得られた成果を要約すると、以下の

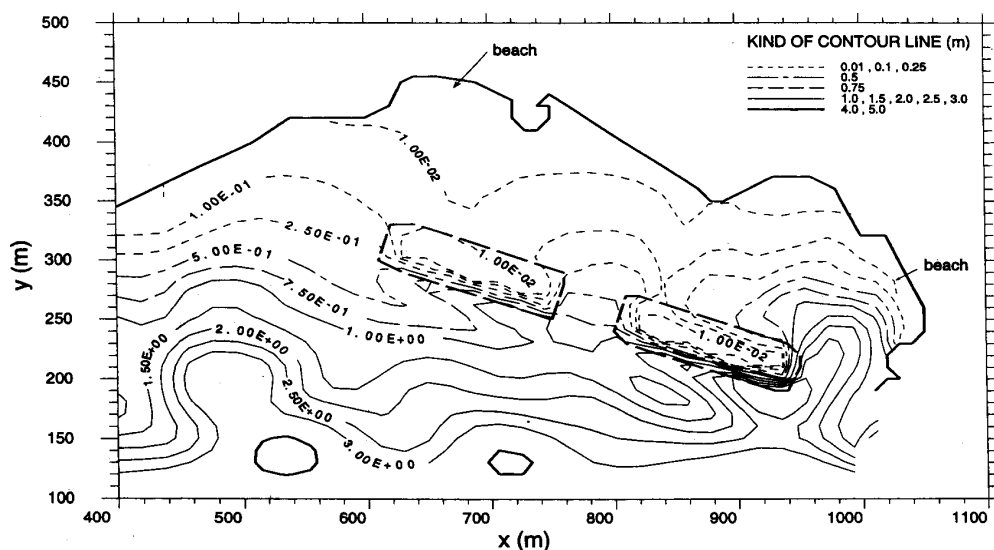


図-8 透過性潜堤設置時の波高分布（異常時）

ようになる。

まず、潜堤による水深の急変に伴う強制碎波は、入射波の諸元によるところが大きく、入射波高が大きいほど碎波による波高減衰も大きい。透過性潜堤では入射波高が小さくても潜堤の透過性による波エネルギー吸収により、潜堤背後に比較的広い静穏域が造られる。従って、潜堤においても堆積土砂の沖方向への流出を防止する効果のあることが分かった。

次に、潜堤は完全な遮蔽体とならないので、潜堤による回折効果は離岸堤ほどではないが、潜堤背後における波エネルギーが潜堤上での碎波によるエネルギー逸散やエネルギー吸収によって減少し、それを補うために潜堤先端付近および開口部において回折現象が現れる。従って、潜堤背後の海域においても砂が堆積しやすくなっているのが分かった。ただし、これは透過性潜堤の場合において顕著である。

以上に、潜堤による波浪制御効果を検討してきたが、その効果は不透過性潜堤よりも透過性潜堤の方が優れているといえる。しかし、潮位変動および入射波浪の変化の激しい海岸では天端水深が大きく変動し、従ってその波浪制御効果も大きく変動することが考えられる。また、船舶の航行安全上大きな障害になるなどの問題点も残されているが、景観保全と波浪制御のみに

目的を絞れば、透過性潜堤でも十分その役割を果たすことができるものと考えられる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻の余 錫平助教授には適切な御指導、助言を賜った。また、復建調査設計株式会社の橋口 剛氏には参考資料の提供等において御協力頂いた。ここに、以上の方々に対し

て心から御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Xiping Yu, Masahiko Isobe and Akira Watanabe: Finite Element Solution of Wave Field around Structures in Nearshore Zone, Proceedings of JSCE, Vol.35, No.1, pp.21-33, 1992.
- 2) 東京大学工学部土木教室：土木工学研究会平成2年度第6回 沿岸域波浪場の解析手法とその応用, (財)総合研究奨励会 東京大学工学部土木教室, 1991.
- 3) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：海岸波動（波・構造物・地盤の相互作用の解析法）, 社団法人 土木学会, 1994.
- 4) 余 錫平, 富樫宏由：湾水振動に対する河川の影響について, 海岸工学論文集 第43巻, pp.271-275, 1996.
- 5) 余 錫平：ポアラス境界条件について, 平成5年度 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.210-211, 1994.
- 6) Xiping Yu and Hiroyoshi Togashi: Irregular Waves over an Elliptic Shoal, Proc. 24th ICCE, pp.746-760, 1994.
- 7) 技研興業株式会社：六脚ブロック, 1983.