

実海域における透過性潜堤による波浪制御に関する研究

山 田 和 弘*・富 樫 宏 由**

1. はじめに

従来, 我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, 高い波浪制御効果及び堆砂効果を有し, 且つ施工・維持管理も容易であることが挙げられる。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) 或いはトンボロが形成されるが, このような離岸堤による波浪制御効果や海浜変形効果については, 既に数多くの実験・実証的或いは理論的な研究が行われている。しかし, 最近の環境保全及び沿岸景観に対する意識の高まりと共に, 従来の離岸堤の在り方を見直し, 新たな波浪制御・海岸侵食制御構造物の研究及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。潜堤を用いた波浪制御工は最近になって考え出された斬新なものではなく, むしろそのアイデアは離岸堤の登場とほぼ同時期において既に提案されていた。それにも拘らず, 潜堤を用いた波浪制御工が注目されなかった最大の理由は, 有意な波高減衰を期待するには広い堤体幅を必要とし, 従って建設費が高つくことが挙げられる。前述のように, 離岸堤の研究は現在迄に数多く行われているものの, その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予測することが難しく, と同時に, 数年間に及ぶ追跡調査を行わなければその効果を正確に把握することができない。そのような状況の下では, 建設費の高つく潜堤を十分なデータが得られる迄試験的に施工し, その波浪制御効果を検証することは現実的に不可能である。

しかし, 近年のコンピュータの目覚ましい発展と共に, この研究においてもコンピュータによるシミュレーション解析が開発され, これが波浪変形及び海浜変形などを予測するにおいて非常に有用な手段とされるようになってきた。特に「未来の離岸堤」として期待される透過性潜堤に関する研究においては, このシミュレーション解析は不可欠である。それに伴って現在迄に数多くのモデ

ル方程式が提案され, それを用いた波浪変形解析も行われてきた。しかしながら, 従来の研究の殆どは, 潜堤の反射や透過特性に関するものが多く, 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り, 平面的な波浪場の解析例は数少ない。そこで本研究においては, 現在, 九州西海域の手熊海岸 (海水浴場) 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, 様々な離岸堤周辺の平面的波浪場の解析を行い, 計画されている透過性潜堤による波浪制御効果を予測することを目的としている。

2. モデル方程式と境界条件

2.1 不透過緩勾配底面上の波浪変形解析のモデル方程式

不透過緩勾配底面上における波の運動を考える。水の粘性及び圧縮性を無視し, 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 (1) を満たす。

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

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が仮定でき, 以下の境界条件式が得られる。

底面の境界条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} + \nabla_h \phi \cdot \nabla_h h = 0 \quad (z = -h) \quad (2)$$

自由水面の境界条件:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\sigma^2}{g} \phi = 0 \quad (z = 0) \quad (3)$$

式 (1) を境界条件式 (2) 及び (3) の下で解き, それを鉛直方向へ積分し, 更に底面摩擦等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。

$$\nabla_h \cdot (cc_\sigma \nabla_h \eta) + (1 + if_d) k^2 cc_\sigma \eta = 0 \quad (4)$$

但し, h は水深, g は重力加速度, σ は角周波数, $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, $i = \sqrt{-1}$, k は波数, c は波速, c_σ は群速度, f_d は波高減衰係数であり, η は複素振幅を表す。

* 正会員 修 (工) 日本鋪道 (株)

** フェロー 工 博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科

2.2 水平透水層上の波浪変形解析のモデル方程式

波の運動を2.1と同様に仮定すると、透水層内の速度ポテンシャル Φ_s が定義でき、 Φ_s が透水層内のラプラス方程式 (5) を満足すると共に、以下の境界条件式を得る。

透水層内のラプラス方程式：

$$\nabla_h^2 \Phi_s + \frac{\partial^2 \Phi_s}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

底面の境界条件：

$$\frac{\partial \Phi_s}{\partial z} + \nabla_h h_0 \cdot \nabla_h \Phi_s = 0$$

$$(z = -h_0, \text{ 但し } h_0 = h_1 + h_p) \quad \dots\dots\dots (6)$$

界面境界条件1：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nabla_h h \cdot \nabla_h \Phi = \epsilon \left(\frac{\partial \Phi_s}{\partial z} + \nabla_h h_1 \cdot \nabla_h \Phi_s \right)$$

$$(z = -h_1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

界面境界条件2：

$$\Phi = (c_r - if_p) \Phi_s \quad (z = -h_1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

自由水面の境界条件：

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\sigma^2}{g} \Phi = 0 \quad (z = 0) \quad \dots\dots\dots (9)$$

但し、 h_1 は透水層上の水深、 h_p は透水層厚、 ϵ は空隙率、 c_r は質量係数と空隙率の関数、 f_p は線形抵抗係数をそれぞれ表す。

式 (5) を境界条件式 (6) から (9) の下で解き、それを鉛直方向へ積分し、波高減衰係数 f_d を導入すると、水平透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 (Somchai ら, 1989)。

$$\nabla_h^2 \eta + (1 + if_d) k^2 \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

尚、式 (4) 及び (10) における減衰係数に関しては、碎波領域において Yu ら (1992) の提案した経験式で与える。碎波領域を定める際には、全領域で碎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) の碎波条件式を適用する。波数 k は波の角周波数及び水深から以下の分散関係式で求める。

$$\sigma^2 = gk \left(\frac{\{(\epsilon + F_p)e^{2khp} + (-\epsilon + F_p)e^{-kh_1}\} e^{-kh_1}}{\{(\epsilon + F_p)e^{2khp} + (-\epsilon + F_p)e^{-kh_1}\} e^{-kh_1} + \{(-\epsilon + F_p)e^{2khp} + (\epsilon + F_p)e^{-kh_1}\} e^{-kh_1}} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 F_p は抵抗係数を含む関数である。

2.3 境界条件

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、護岸に相当する不透過境界及び砂浜海岸に相当する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、不透過境界及び部分透過境界においては次の境界条件式で表す。

$$cc_g \frac{\partial \eta}{\partial n} + \lambda \eta + \nu = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

但し、 λ 及び 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す。

3. 数値計算法

数値計算は変分法に基づいた有限要素法を用いて行う。有限要素法では、マトリックスを計算するために同一節点量において計算時間がやや長くなる、という短所をもつが、平面的な地形表現に優れているため、実海域を解析対象としている本研究においては後者の長所の方を優先して採用する。

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 (4) 及び (10) の解を最小化条件とする汎関数を以下のように得る。

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} [cc_g \{(\nabla_h \eta) \cdot (\nabla_h \eta) - (1 + if_p) k^2 \eta^2\}] d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_2} \left(\frac{1}{2} \lambda \eta^2 + \nu \eta \right) d\Gamma \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 Ω は対象問題の領域を、 Γ_2 は境界をそれぞれ表す。次に、計算領域を三角形要素に分割し、各要素において既知量及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。

$$\Pi = \eta^T K \eta - \eta^T r \quad \dots\dots\dots (14)$$

但し、 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、 K は係数マトリックス、 r は境界条件に関連した既知のベクトルである。式 (14) を汎関数の最小化条件に代入すると、有限要素方程式

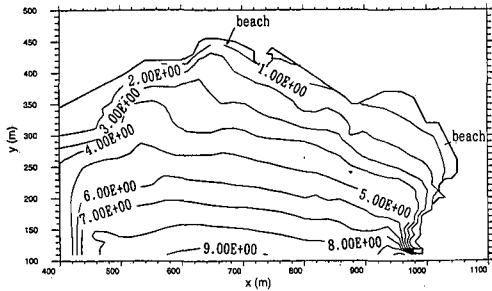
$$K \eta = r \quad \dots\dots\dots (15)$$

が得られる。式 (15) を強制境界も満たされるように修正して解くと、複素振幅則ち自由水面の振幅 (実部) と位相 (虚部) の節点値が得られる。

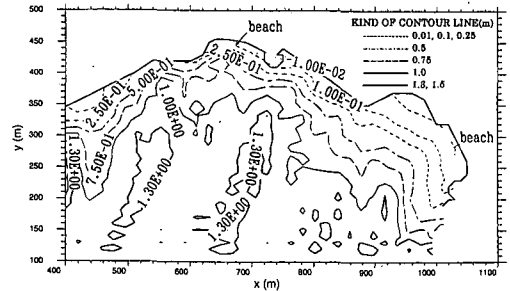
4. 波高の数値解析

4.1 解析領域と計算ケース

図-1 に構造物の無い手熊海岸の自然海浜地形を示す。沖合開境界の入射波浪としては平常時 (波高 1.27 m, 周期 4.8 s, 沖合開境界に対する波向 90° 及び 135°), 最大波時 (波高 2.55 m, 周期 6.8 s, 波向 90° 及び 135°) 及び異常時 (波高 3.6 m, 周期 16 s, 波向 90° 及び 135°) を対象としたが、こゝでは代表的に平常時の入射波浪の場合のみで比較検討を行う。これに対して (1) 離岸堤が存在しない時、(2) 現況不透過性離岸堤、(3) 計画不透過性離岸潜堤、及び (4) 計画透過性離岸潜堤、をそれぞれ設置した時の解析を行う。また、各離岸堤諸元は表-1 を参照されたい。尚、以後考察を行う上で表現を容易



図一 手熊海岸の自然海浜地形



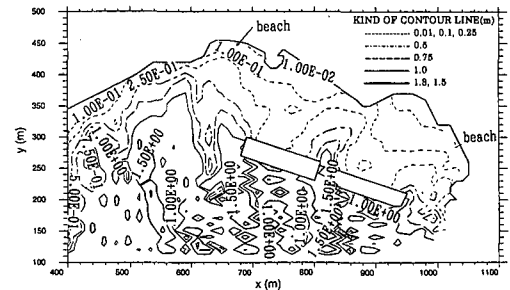
図二 離岸堤が存在しない時の波高分布 (波向 90°)

にするために便宜上海域を、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 ($800 \text{ m} \leq x$) の 3 海域に分割し, 2 箇所の砂浜は, 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, 2 堤の離岸堤は, 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。

表一 堤体寸法 (但し j は代表波諸元を表わす)

離岸堤の種類	計算ケース	堤体長	堤体幅	天端水深	空隙率(%)	堤体数	堤体間隔
存在せず	1, j	—	—	—	—	—	—
現況不透過堤	2, j	100	30	—	0	2	30
計画不透過潜堤	3, j	150	40	0(DL 時)	0	2	50
計画不透過潜堤	4, j	150	40	0(DL 時)	56	2	50

単位(m)



図三 現況不透過性離岸堤設置時の波高分布

4.2 平常時における波浪制御効果

a) 入射波向 90 度の場合

図一に離岸堤が存在しない時の解析結果 (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、及び海岸からの反射波とによる波高分布及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 箇所波高の増幅が見られる。これらは共に浅水変形と海岸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。次に屈折効果を見てみると、水深 4 m 付近から碎波及び屈折の現象が現れている。屈折は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。尚、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迄来ているのが分かる。これは波の進行を妨げるものが存在しないことに加え、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迄起こっていることと、屈折効果により波が収束してくることによる。一方、砂浜 B 付近では入射波はかなりの屈折を経過してくるのに加え、この付近の等水深線も急激に曲折しているので、浅水変形による波高の増幅も小さい。

図一に現況の不透過性離岸堤設置時の解析結果を示す。この場合、離岸堤の設置に伴い、浅水変形による波高増幅は図二ほど顕著に現れていない。但し、海域 A に関しては離岸堤の影響を受けにくいと考えられるため、浅水変形によるものと思われる波高の増幅が認められる。一方、離岸堤前面では離岸堤による反射波と浅水変形による波高増幅とが同時に作用して、波高の増幅が生じている。更に、離岸堤周辺及びその背後の海域では、屈折に加えて回折効果が同時に発生している。この時、波エネルギーは屈折・回折の影響により離岸堤後方に集まろうとしているが、この海域では離岸堤を 2 堤並べて設置していることと、離岸堤から海岸迄の距離が十分でなく、且つ水深も浅いので波エネルギーが集中する余裕がないものと考えられる。又、この時 0.5 m 等波高線は砂浜付近からかなり後退しており、従って離岸堤によって遮蔽された海域は静穏になっており、堆砂機能が働いている。

図一に計画不透過性離岸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見られ

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、図-3のそれ以上に離岸堤の影響を受けにくいのである。又、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、波高は図-3程大きくはない。むしろ、この部分は図-2で元々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、潜堤周辺及びその背後の海域では、回折現象は図-3の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。そのため、潜堤によって遮蔽されるべき海域を図-3のそれと、0.5 m 等波高線で比較すると、明らかに図-4における0.5 m 等波高線の方が海岸に近付いている。即ち、静穏海域が狭くなっていることが分かる。これは潜堤が不透過性であるため、潜堤を越える波エネルギーは砕波によってしか減少しないためである。従って、堤体背後では図-3程の堆砂効果は期待できない。

図-5に計画透過性離岸潜堤設置時の解析結果を示す。この時、図-4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。但し、この場合はそれが点在しているため、例えば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-4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

吸収及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である。一方、潜堤周辺及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。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である。次に、潜堤によって遮蔽される海域を図-4のそれと比較してみると、明らかに図-5の方が静穏海域は広がっており、堤体の大きさが違うとはいえ、図-3のそれとほぼ同等の効果が得られている。従って、堤体背後においても堆砂効果が期待できる。

b) 入射波向 135 度の場合

図-6に離岸堤が存在しない時の解析結果を示す。この場合、海域 A と B で波高の増幅が見られる。これらは共に浅水変形と海岸からの反射波によるものが大きいと考えられる。又、この図では屈折効果が顕著に現れている。従って、これによる波の発散のため、両砂浜に近付くかなり早い段階から波高が低減し、そのため静穏海域も広い。

図-7に現況の不透過性離岸堤設置時の解析結果を示す。この場合、図-6と比較して離岸堤前面の海域 A で波高の増幅が顕著である。入射波の波向と離岸堤前面部がほぼ平行に近いので離岸堤からの反射波は少ないもの

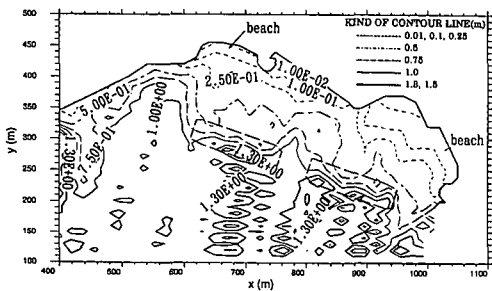


図-4 計画不透過性離岸潜堤設置時の波高分布 (波向 90°)

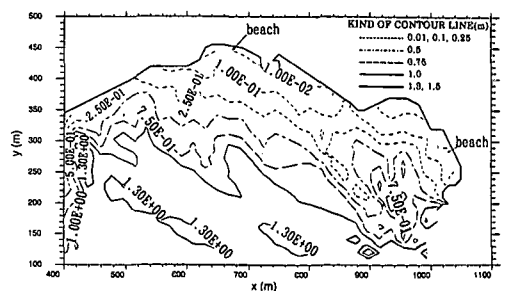


図-6 離岸堤が存在しない時の波高分布 (波向 135°)

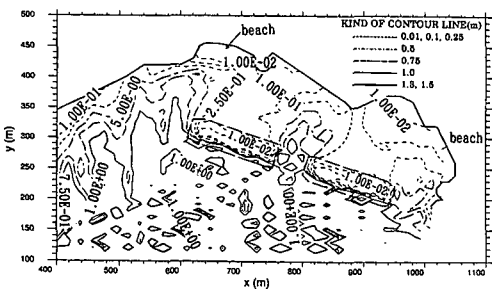


図-5 計画透過性離岸堤設置時の波高分布 (波向 90°)

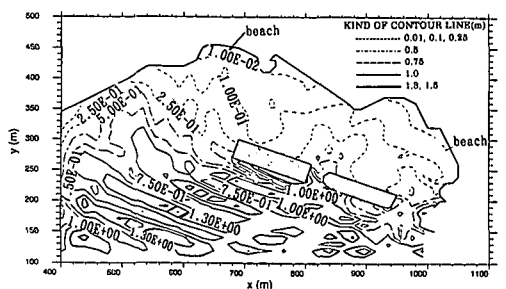


図-7 現況不透過性離岸堤設置時の波高分布 (波向 135°)

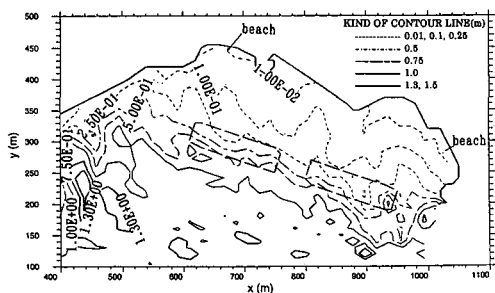


図-8 計画不透過性離岸潜堤設置時の波高分布 (波向 135°)

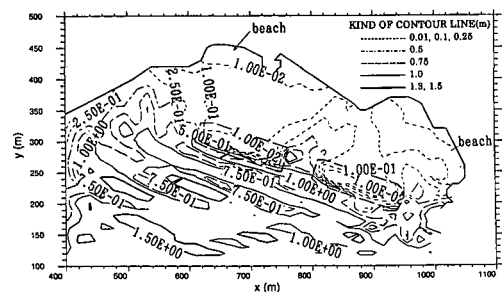


図-9 計画透過性離岸潜堤設置時の波高分布 (波向 135°)

と思われるが、やはりその影響が大きいと考えられる。これは、入射した波が屈折効果で水深の浅い方へと屈折していった所に離岸堤が設置されているので、屈折波はこれによって反射され、海域Aにおいて波高が増幅されるのである。又、離岸堤周辺及びその背後の海域では屈折と回折が同時に発生しているが、離岸堤先端付近の遮蔽域では図-3に比べて、回折効果が屈折効果を明らかに上回っているとは考えにくい。尚、離岸堤背後は完全に静穏海域となっており、堆砂機能も働いている。

図-8に計画不透過性離岸潜堤設置時の解析結果を示す。尚、ここでは計画透過性離岸潜堤設置時の解析結果である図-9も同時に示して考察する。先ず、潜堤前面の海域では両図共波高分布は似通ったもので、不透過性と透過性の差は明白でない。但し、図-7と比較すると明らかに波高分布は穏やかである。これは勿論、離岸堤を潜堤にしたことによって潜堤上を波が通過できるようになり、反射波エネルギーが減少したことによるものであ

る。次に、屈折効果を見てみると両砂浜付近で見られない。これは堤体がかなり大きくなったことにより屈折効果が現れにくかったものと考えられる。更に回折効果を見ると、不透過性では殆ど回折効果が現れないが、透過性では顕著に現れている。これは前述のように、透過性潜堤では強制砕波に加えて潜堤によるエネルギー吸収によっても波エネルギーが減少するため、潜堤背後における波エネルギーは不透過性の時よりも小さく、その結果、潜堤の両脇を通過した波エネルギーがエネルギーポテンシャルの高い方から低い方へと移動する運動も大きい。従って、回折効果が顕著に現れる。従って、潜堤によって遮蔽される海域は両図共静穏であるが、遮蔽効果はやはり透過性の方が優れており、堆砂効果も透過性潜堤の方が優れている。

5. 結 論

本研究においては、実海域に設置された離岸堤及び離岸潜堤（不透過性及び透過性）による波浪制御効果を有限要素法を用いて解析した。その結果、不透過性潜堤では堤体を大きくするだけでは従来の離岸堤並みの波浪制御効果は得られないが、潜堤を透過性にするによって従来の離岸堤と同等の波浪制御効果が得られることが分かった。則ち、少なくとも本研究の事例解析結果によれば、不透過堤より透過堤の方が、又、潜堤より離岸堤の方が波浪制御効果は優れていると言える。

謝辞：本研究を進めるに当たり、貴重な御指導を頂きました東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻の余 錫平助教に対してここに記して衷心より謝意を表します。

参 考 文 献

- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻 第3号, pp. 59-106.
- Somchai Rojanakamthorn・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643-647.
- Yu X., M. Isobe and A. Watanabe (1992): Finite element solution of wave field around structures in nearshore zone, Coastal Engineering in Japan, Vol. 35, No. 1, pp. 21-33.