

# 斜板を有する新型潜堤 (SURF) の開発

小山文男\*・清水正巳\*・中塚健司\*  
宇多高明\*\*・村井禎美\*\*\*

## 1. ま え が き

外洋に面した沿岸域の海岸保全を目的として、ブロック等を用いた離岸堤が広く用いられている。この種の離岸堤は設置水深に限界があり、離岸堤により囲まれる水域が狭いという欠点がある。また、天端が静水面より突出しているため美観が損われる。一方、潜堤は景観の面で優れており、ケーソン構造を採用すれば大水深域にも建設が可能であるため、広い静穏域を確保できる。しかし、離岸堤と同程度の消波性能を得るためには、天端幅を広くする必要があり、不経済な断面となる。

本研究では、潜堤の天端面を傾斜させ、斜面上で波を強制碎波させることにより、小断面でも消波性能の優れた潜堤(図-1 参照)を開発した。また、この種の潜堤の耐波設計法は、現在十分に確立されていないため、本研究では、設計波力の算定法の検討を行った。さらに、潜堤には大きな揚圧力が作用するので、堤体の滑動安定性を向上させるため、低波力型の潜堤を開発した。

## 2. 実験方法

本構造物の消波性能と滑動安定性を調べるために、消波、波力、滑動実験を行った。実験は、二次元水槽( $L=47 \times B=0.8 \times H=1.6$  m)に高さ 40 cm の水平床を設け、その上に縮尺1/25の模型を設置して行った。実験に用い

た模型タイプを図-2 に示す。

消波実験では、タイプ1, 2の透過率  $K_T$ 、反射率  $K_R$  を求めた。実験波は周期  $T=1.2 \sim 2.8$  s、波高  $H=4.0 \sim 16.0$  cm の13種類である。タイプ1は基本形として台形型の構造とした。タイプ2は消波効果を高めるために斜板上に突起を取り付け、碎波を促進する構造とした。また、斜板上で碎波した水塊の堤内側への打ち込みを防ぐため、斜板の岸側に開口部を設け、さらに流入水の排水と反射率の低減を目的として前面壁にも開口部を設けた。開口率は10%、斜板の勾配  $i_B$  は1/10、堤体幅  $B$  は80 cm、没水深  $R$  は4 cm、設置水深  $h$  は40 cmである。

波力実験では、タイプ3～6に作用する水平力  $F_X$ 、鉛直力  $F_Z$  および部材波圧  $p$  を測定した。水平力、鉛直力は、防水型の3分力計を用いて測定した。ただし、模型は、水路床に取り付けられた3分力計に固定した。また、部材波圧は、堤体表面上に波圧計を取り付け測定した。模型は、幅  $B=80$  cm、長さ  $L=30$  cm のアクリル製である。堤体の滑動安定性を向上させるために、タイプ3～6の下部には砂を中詰できる構造とした。タイプ3は、波力実験での基本形である。タイプ4は、底版に圧力開放のための孔(圧抜孔)を設けた。圧抜孔の開口率は5.2%である。タイプ5では前面壁を傾斜させた。タイプ6は、タイプ4, 5を組み合わせたものである。実

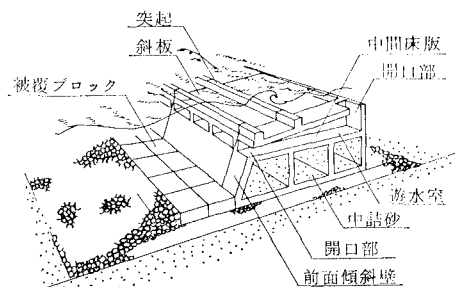


図-1 斜板消波潜堤 (SURF) の概念図

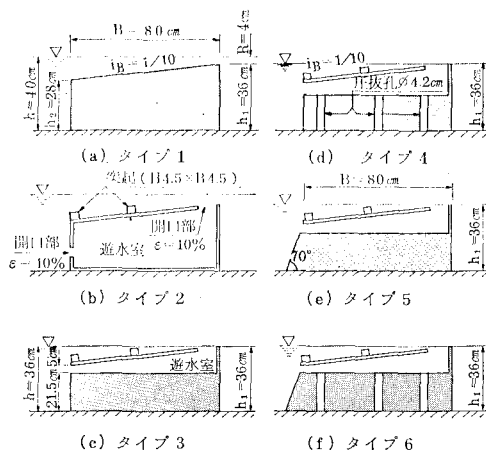
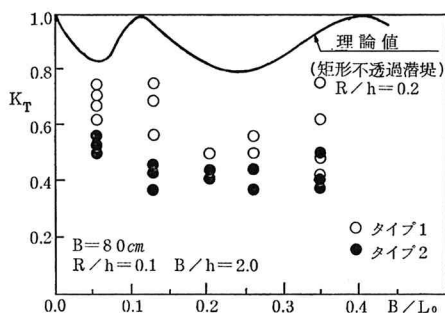
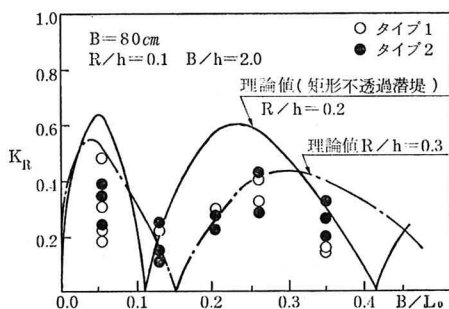


図-2 模型タイプ

\* 正会員 大成建設(株) 技術研究所  
\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長  
\*\*\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

図-3 透過率  $K_T$ 図-4 反射率  $K_R$ 

験波は、 $T=1.6\sim 2.8$  s,  $H=10\sim 40.2$  cm の 28 種類である。設置水深  $h$  は、 $L.W.L.$  を想定して 36 cm とした。また、高波高時に堤体に巻き波砕波が作用するように、堤体の沖側を 1/10 勾配とした。

滑動実験では、タイプ 3, 6 について、堤体が滑動を始める時の限界重量  $W_0$  を測定した。実験波は、 $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm である。堤体の下には、層厚 10 cm の碎石層 (粒径 16~18 mm) を設けた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 消波性能

$R/h=0.1$ ,  $B/h=2.0$  の場合について、タイプ 1, 2 の  $K_T$ ,  $K_R$  を図-3, 4 に示す。矩形不透過潜堤 ( $R/h=0.2$ ) に対する井島ら<sup>1)</sup>の理論値とタイプ 1 の  $K_T$  を比較する。ただし、理論値では微小振幅波を仮定しており、水の乱れや砕波に起因したエネルギー損失の項を考慮していない。タイプ 1 の実験値では、斜板上での砕波に起因したエネルギー損失により、 $B/L_0 \geq 0.1$  で  $K_T$  は理論値に対して 0.3 程度小さくなっている。しかし、 $B/L_0$  に対して極値が現われる傾向は両者で共通している。タイプ 2 の場合、斜板上の突起により砕波が促進されるため、タイプ 1 よりも  $K_T$  が 0.1~0.25 小さく、 $B/L_0$  に対して単調減少となり、極値はみられない。 $K_R$  については、タイプ 1, 2 で大差がない。また、反射率については、井島らによる理論値 ( $R/h=0.2, 0.3$ ) とタイプ 1,

2 の  $K_R$  を比較すると、タイプ 1, 2 のいずれも  $K_R$  の極小値、極大値が現われ、理論値と実験値の  $K_R$  の傾向が一致している。

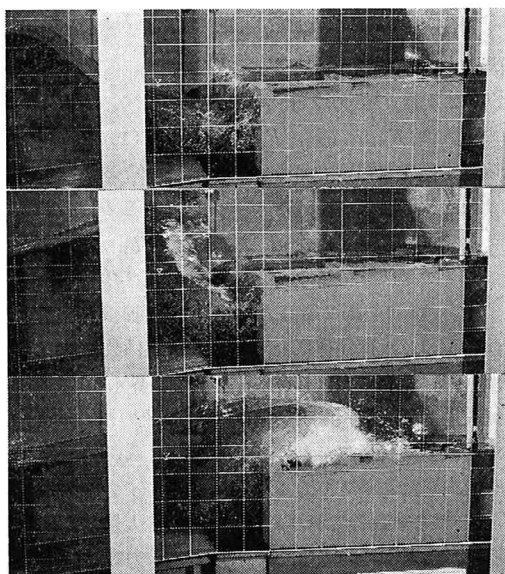
#### 3.2 滑動安定性

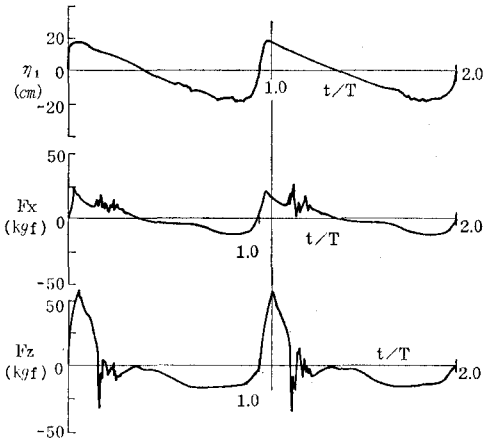
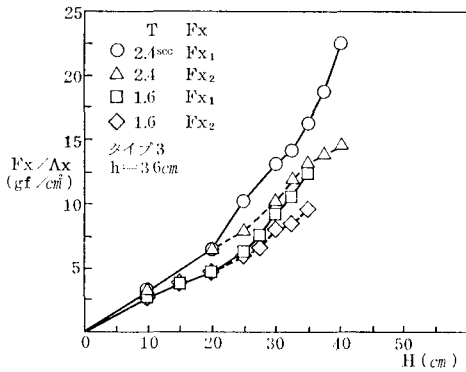
##### (1) 水平力と鉛直力の位相

堤体に作用する波の状況は、周期、波高により大きく異なる。堤体に巻き波砕波が作用する周期と波高の組み合わせは、①  $T=1.6$  s,  $H \geq 30$  cm, ②  $T=2.0$  s,  $H \geq 35$  cm, ③  $T=2.4$  s,  $H \geq 37.5$  cm であった。ただし、堤体の設置位置は、堤体に作用する波力が最大となるように、水路斜面の法肩より 20 cm の位置とした。また、没水深の小さい方が、堤体に作用する波力が大きいため、波力、滑動実験では、 $L.W.L.$  を想定して  $h=36$  cm とした。波の作用状況の例 ( $T=2.0$  s,  $H=37.5$  cm,  $h=36$  cm) を写真-1 に示す。波は堤体の沖側で巻き波となり、波峰部分の水塊が堤体に衝突している。

堤体より 10 cm 沖側の水面波形  $\eta_1$  と水平力  $F_x$ 、鉛直力  $F_z$  の測定記録例 ( $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm,  $h=36$  cm) を図-5 に示す。 $F_x$  は波の進行方向を正、 $F_z$  は鉛直上向き方向を正としている。堤体の前面壁に波面が衝突する時に発生する水平力と鉛直上向き力のピークには、位相差がみられる。鉛直上向き力が最大となる時、水平力はその直前に現れるピーク値の約 70% であり、この位相差を堤体の滑動安定上考慮することができれば、堤体重量を低減することができる。

$T=1.6, 2.4$  s の場合について、波高  $H$  とタイプ 3 に作用する平均水平波圧  $F_x/A_x$  の関係を図-6 に示す。ここに、 $A_x$  は堤体の波の進行方向の投影面積を表わしている。ただし、 $F_x$  については、鉛直上向き力が最大

写真-1 波の作用状況 ( $T=2.0$  s,  $H=37.5$  cm)

図-5 測定記録例 ( $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm)図-6 水平力のピーク値  $F_{X1}$  と鉛直力ピーク時の水平力  $F_{X2}$  の比較

になる直前に現れる水平力のピーク値 ( $F_{X1}$ ) と鉛直上向き力が最大になる時の水平力 ( $F_{X2}$ ) を各波高毎にプロットした。  $H \geq 25$  cm では  $F_{X1} > F_{X2}$  となり、波高の増加と共に両者の差は大きくなる。

$T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm の場合について、鉛直上向き力の最大値  $F_{Z1}$  と  $F_{X1}$ ,  $F_{X2}$  より、式 (1) を用いて滑動限界水中重量  $W_{C1}$ ,  $W_{C2}$  を算定した結果を図-7 に示す。

$$\frac{W_C}{w_0 A_Z H} = \frac{A_X}{\mu A_Z} \times \frac{F_X}{w_0 A_X H} + \frac{F_Z}{w_0 A_Z H} \quad \cdots (1)$$

ここに、 $A_Z$  は斜板の鉛直方向の投影面積、 $w_0$  は水の単位体積重量、 $\mu$  は堤体底面と捨石の摩擦係数で、 $\mu=0.6$  とする。さらに、滑動実験による滑動限界水中重量  $W_{C3}$  も比較のためにプロットした。ただし、タイプ7は圧抜孔が底板まで貫通したタイプ、タイプ8は斜板前側の突起を撤去したタイプである。 $W_{C3}$  は、タイプ5を除いて  $W_{C1}$  とよく一致しており、 $W_{C2}$  よりも大きいことがわかる。したがって、水平力と鉛直上向き力のピーク値の位相差は堤体の滑動安定に関与せず、設計上考慮しては

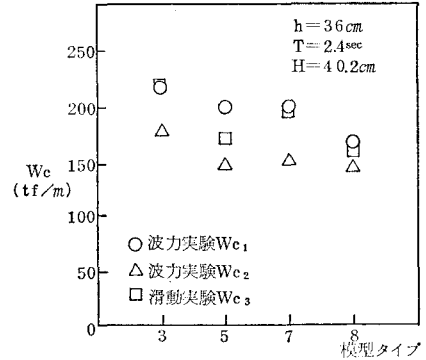


図-7 波力実験と滑動実験の堤体重量の比較

ならないことがわかった。

## (2) 各タイプの水平力と鉛直力の比較

$T=1.6, 2.0, 2.4$  s,  $H=35 \sim 41.2$  cm の場合について、各タイプの平均水平波圧強度  $F_X/w_0 A_X H$ , 平均鉛直波圧強度  $F_Z/w_0 A_Z H$  の関係を図-8 に示す。 $F_X/w_0 A_X H$  については、各タイプで大差がないため、タイプ3の実験値のみを示す。一方、 $F_Z/w_0 A_Z H$  については、各タイプで顕著な傾向がみられる。タイプ4, 5, 6は、タイプ3より鉛直上向き力をそれぞれ35~45%, 20~30%, 55~70%低減することができる。タイプ3, 6の鉛直力の波形を図-9 に示す。圧抜孔の効果により、鉛直上

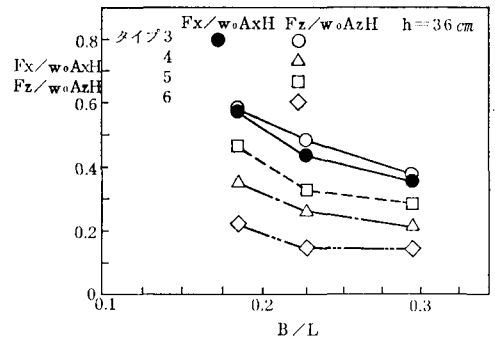
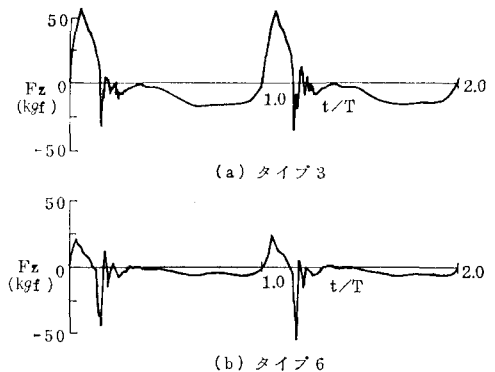


図-8 各タイプの波圧強度の比較

図-9 鉛直力  $F_Z$  の比較 ( $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm)

向き力は大きく低減しているが、逆に、鉛直下向き力は増加していることがわかる。

### (3) 設計波力

波高、周期の変化に対する水平力、鉛直力および部材波圧を調べることで、本構造物の設計波力について検討を行った。ここでは、堤体が滑動に対して最も危険となる水平力と鉛直上向き力のピーク値を示す。

$T=1.6, 2.0, 2.4$  s の場合について、 $F_x/A_x$  と波高  $H$  の関係を図-10 に示す。タイプ 3, 6 に作用する水平力はほぼ一致しているため、タイプ 3 の実験値のみを示した。 $H$  が大きくなると  $F_x/A_x$  は増加するが、その増加の割合は、 $H \geq 25$  cm の方が  $H < 25$  cm の場合よりも大きい。 $H \geq 25$  cm では、 $F_x/A_x$  は  $0.25 \sim 0.55 w_0 H$  に分布しており、 $H < 25$  cm では  $0.2 \sim 0.3 w_0 H$  である。また、タイプ 3, 6 の  $F_z/A_z$  と波高  $H$  の関係を図-11 に示す。 $F_z/A_z$  は  $H$  に比例して増加し、 $F_x/A_x$  の場合のように、 $H \geq 25$  cm で波力の増加の割合が大きくなる現象はみられない。タイプ 3 の場合、 $F_z/A_z$  は  $0.4 \sim 0.6 w_0 H$  であるのに対し、タイプ 6 では  $0.1 \sim 0.25 w_0 H$  に低減していることがわかる。さらに、圧抜孔の効果を調べるために、鉛直上向き力が最大になる時のタイプ 3,

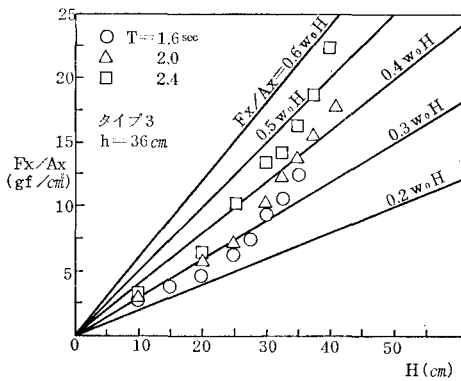


図-10 平均水平波圧  $F_x/A_x$  (タイプ 3)

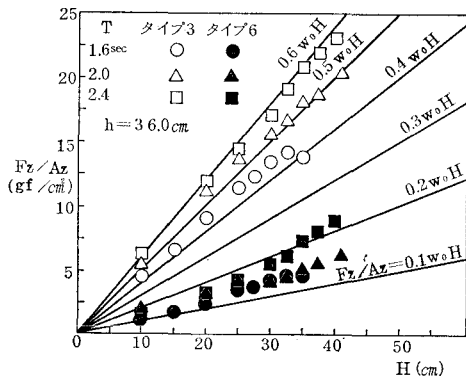


図-11 平均鉛直波圧  $F_z/A_z$  (タイプ 3, 6)

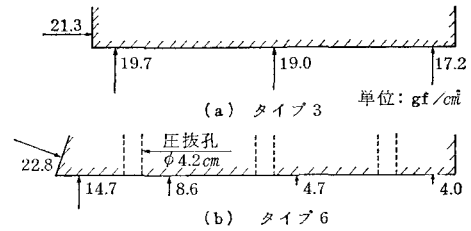


図-12 底版の波圧分布の比較 ( $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm)

6 の底版の波圧分布値を 図-12 に示す。タイプ 3 の場合、波圧分布はほぼ矩形分布に近いが、タイプ 6 では圧抜孔により底版の圧力が開放されるため、波圧分布は岸側ほど小さくなり、三角形分布に近くなっている。

式 (1) を用いて、図-10, 11 の  $F_x/A_x$ ,  $F_z/A_z$  から  $W_c/A_z$  を算定した結果を図-13 に示す。タイプ 3, 6 の  $W_c/A_z$  は、それぞれ  $0.6 \sim 1.0 w_0 H$ ,  $0.3 \sim 0.7 w_0 H$  に分布している。 $F_z/A_z$  のように大きな低減はみられないが、タイプ 6 は、タイプ 3 よりも  $W_c/A_z$  を 40 ~ 50% 低減することができる。したがって、波の周期、波高が与えられれば、図-13 より堤体の所要重量を求めることができる。また、タイプ 3, 6 について、 $T=2.4$  s,  $H=40.2$  cm の場合の堤体の水中重量  $W$  と平均滑動量  $Sm$  の関係を図-14 に示す。 $Sm$  は 6 波の滑動量を平均

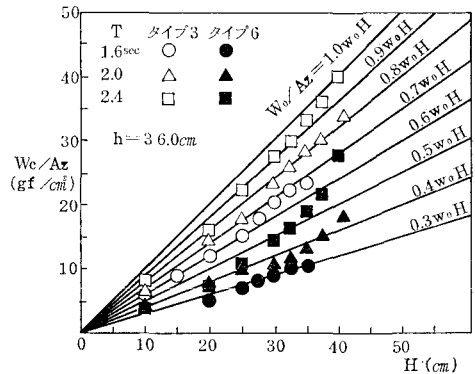


図-13 滑動限界水中重量  $W_c/A_z$  (タイプ 3, 6)

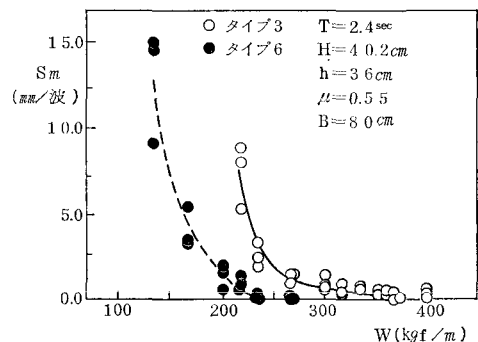
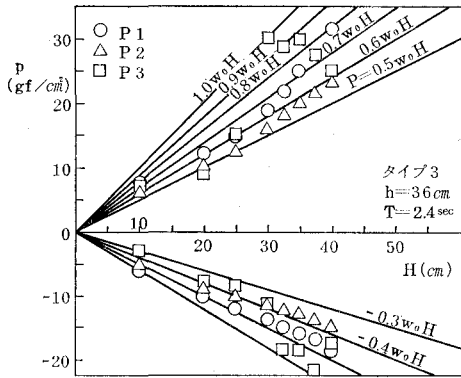


図-14 堤体の水中重量  $W$  と平均滑動量  $Sm$  の関係

図-15 部材波圧  $p$ 

した。静止摩擦係数  $\mu$  の実験値は、0.45~0.6 の範囲にばらついていたが、平均的には0.55であった。タイプ3の場合、堤体重量が滑動限界に近づくと直ぐには  $Sm=0$  に収束しない。一方、タイプ6の場合、堤体重量が滑動限界に近づくと直ぐに  $Sm$  に収束する。堤体の各部材に作用する波圧を図-15に示す。P1は、底版より3cm上方の前面壁の最大波圧値、P2は前面壁より5cm岸側の底版の最大波圧値、P3は前面壁より48.9cm岸側の斜板の最大波圧値である。P1、P2は波圧計を圧縮する値を正、P3は斜板の表側と裏側の差圧を取り、鉛直下向きを正としている。 $H$ が大きくなると、P1、P2は増加し、波圧の正值は  $0.5 \sim 0.8w_0H$ 、負値は  $-0.35 \sim -0.5w_0H$  に分布している。一方、P3は  $H=30$  cmで波圧値の急激な増加がみられるが、波高がさらに大きくなると、波圧値は小さくなる。これは、観察によれば、碎波した水塊の打ち込み位置が、波高の増加に伴って岸側に

移動することによる。

#### 4. 結 論

- ① 小断面で消波性能の優れた斜板を有する新型潜堤を開発した。消波性能は、実験対象波に対して  $K_T \leq 0.6$ ,  $K_R \leq 0.45$  であった。
- ② 基本型(タイプ3)に改良を加え、低波力型(タイプ6)の潜堤を開発した。低波力型の限界滑動水中重量  $W_c$  は  $0.25 \sim 0.7w_0HB$  ( $H$ : 波高,  $B$ : 斜板幅) となり、基本型に比べ  $W_c$  を40~50%低減できた。
- ③ 水平力と鉛直上向き力のピーク値の位相差は、堤体の滑動安定の観点から設計上無視すべきである。

なお、本研究は、東急建設(株)、(株)間組との共同研究により実施されたものであり、藤川富夫氏、渡会英明氏、湊隆次郎氏、本田陽一氏の御協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 井島武士・佐々木富夫: 潜堤に関する理論的研究-1. 不透過潜堤, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 141~147, 1971.
- 2) 宇多高明ほか: 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(2), 土木研究所資料, No. 2510, pp. 111~123, 1987.
- 3) 宇多高明ほか: 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(4), 土木研究所資料, No. 2577, 1988.
- 4) 若ヶ原義彦ほか: 海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(5), 土木研究所資料, No. 2609, 1988.
- 5) 小山文男ほか: 斜板を有する新型潜堤(SURF)の消波特性, 第43回土木学会年次学術講演会概要集, 第2部, 1988.
- 6) 清水正巳ほか: 斜板を有する新型潜堤(SURF)の滑動安定性, 第43回土木学会年次学術講演会概要集, 第2部, 1988.