

直立式消波堤の波力に対する安定性

尾崎 晃*・鴻上雄三**・中込國喜**
荻谷広見***・田崎邦男****

1. まえがき

直立式消波堤を外郭防波堤として実用化する一連の実験を継続中であり、消波特性および波圧減殺効果についての結果の一部は報告済みである¹⁾。この報文は、

- 消波堤（天端床版）が波力を受けて滑動する（浮き上がる）ときの限界波高の測定
 - 堤体（床版）の滑動（移動）を支配する力の要素の測定とその寄与率の検討
- を行って堤体の安定性を解析し、消波堤を設計する場合の波圧式を求め、さらに、
- 実験結果に含まれる模型の縮尺効果について考察を加えたものである。

2. 模型実験による波力の測定法

堤体の安定性を検討するためには、作用する波力を把握しておく必要がある。模型実験により波力を調べるには次の三つの方法がある。

- 多数の波圧計によって堤体の各部に作用する波圧分布を測定し、その合力を求める。
- 堤体をマウンド上にバネ等を用いて支持し、作用する全波力を変位から換算して求める。
- 堤体の比重、マウンドとの接触状態を相似にした模型に波を作用させ、その滑動限界波高を求めて解析する。

このうち a. は、この消波堤の構造上の特徴から多数の波圧計を設置することは堤内の水理条件を異なったものにする。b. は、混成堤のような捨石マウンドとの接触面である底版に揚圧力が作用する構造物では、底版とマウンドとの接触状態が揚圧力に影響するなどの問題がある。したがって、以下の実験では c. の方法を採用した。

3. 安定性に関する実験

安定性の解析方法は、前節 c. の滑動実験の手法によ

り得られる消波堤の波圧式の波圧係数を、次の二つの方法によるものと比較、吟味する方法によっている。

- 堤体の滑動限界時に作用する外力の各要素を、できるだけ直接測定する。
- 外力の各要素を、滑動限界時の波の打上げ高から近似的に求める。

(1) 限界波高実験

この実験は、①直立堤と消波堤の滑動限界波高の測定と、②消波堤の床版の浮き上がりに対する移動限界波高の測定とに分けられる。

①では、滑動限界波高を直立堤と消波堤とについて比較し、広井公式で与えられる直立堤の波圧式 ($p_2 = \alpha w_0 H$; $\alpha = 1.5$) に対して、滑動限界波高比が波圧比に等しいと考え、消波堤の波圧式 ($p_1 = \beta_H w_0 H$) を求めるものである。また、②では、床版の重量を変えて、床版のクリヤランスと浮き上がりの移動限界波高の関係の変化を求めるものである。

a) 実験設備と実験条件

実験に用いた水路は、長さ 60 m、幅 0.7 m、高さ 1.5 m の鋼製片面ガラス張り、造波装置は固定式フラップ型である。測定装置は、波高に容量式波高計 2 台、堤体の滑動距離および床版の浮き上がり高にダイヤルゲージ 1 台を用い、記録に電磁オシログラフを用いた。実験は規則波により縮尺 1/30 で行った。図-1 に堤体の概要

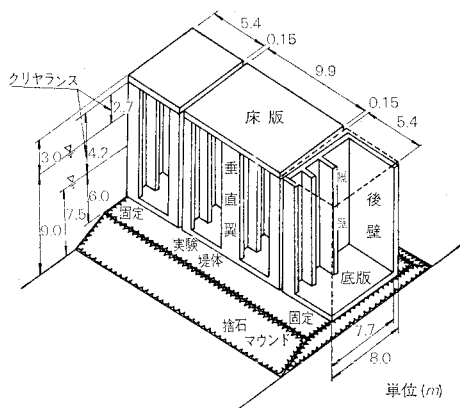


図-1 直立式消波堤概要図

* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 鹿島建設技術研究所
*** 日本海上工事(株) 常務取締役
**** 正会員 日本海上工事(株)技術研究所

表—1 実験条件

水深 h (m)	周期 T (sec)	堤 体			床 版		
		種 類	標準	1.33倍	種 類	標準	1.56倍 2.12倍
7.5	8, 9, 10	軽重量 $W(t)$	518.4	691.2	軽重量 $W(t)$	53.2	82.9 112.6
9.0	12, 14, 16	単位幅重量 (t/m)	52.4	69.8	単位幅重量 (t/m)	5.4	8.4 11.4

および各部の名称を、表—1 に実験条件を示す。

b) 測定方法

図—1 のように捨石マウンド上に固定された堤体に挟まれた中央の堤体および床版について行った。堤体は、実物と比重 ($\rho=2.50$) を合わせ、マウンドとの接触面には摩擦係数 ($\mu=0.6$) を等しくするためにモルタル板を接着してある。比較対象の直立堤は、消波堤を逆向きに設置したものである。

滑動限界波高は、連続5波の入射波により滑動距離がゼロを示すときの波高とし、床版の移動限界波高についても同様である。入射波高は構造物設置位置での無堤時の波高を用いた。実験は変動を伴いやすいので、条件ごとに3回以上繰り返し、その平均値を代表値とした。

c) 実験結果と考察

1) 滑動限界波高

図—2 に滑動限界波高と周期の関係を示す。直立堤と消波堤を比較すると、後者のほうが波高が1.3~1.8倍大きい。また、天端高に対する滑動限界波高の割合を見ると、直立堤が5~7割で越波しやすいのに比べ、消波堤は7~10割で、水塊が堤内の空間に包含されるため越波を生じにくくしている状況が認められた。

このように、消波堤の波高が大きくなる原因としては、滑動時に堤内水位が上昇し、垂直翼と隔壁で仕切られた空間で渦流や砕波が促進され、さらに波が各垂直翼に位相差を生じながら作用することなどが考えられる。

2) 波圧式 $\bar{p}_1=\beta_H w_0 H$

消波堤に対する直立堤の滑動限界波高の比は、0.55~0.75 である。この比を γ で表わし広井公式の波圧係数

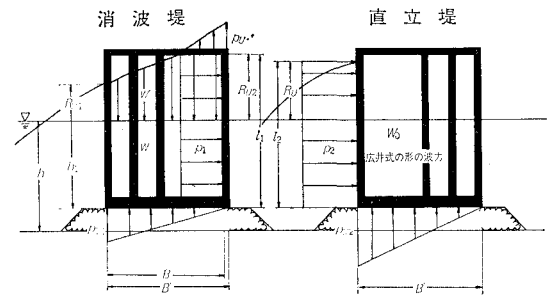
α との積を β_H とすれば、消波堤の波圧係数 $\beta_H=\alpha \cdot \gamma=1.5 \times (0.55 \sim 0.75)$ が求まる。また、波圧式は $\bar{p}_1=\beta_H w_0 H=(0.83 \sim 1.13) w_0 H$ として表わすことができる。

3) 床版の浮き上がりに対する移動限界波高

図—3 に床版の浮き上がりに対する移動限界波高と周期との関係を示す。標準重量の場合、移動限界波高はクリヤランスに対し0.7~0.9倍の大きさであり、重量を1.56, 2.12倍にすると、これらの値のそれぞれ1.1~1.2, 1.2~1.3倍になる。しかもこの傾向は浮き上がり高の基準を3段階変化させても大きな差はなかった。

(2) 堤体の安定性に寄与する要素の考察

滑動限界時における堤体と外力との平衡状態は、直立堤と消波堤について図—4 に示すように考えれば、その平衡条件は式(1)で表わされる。



図—4 外力の比較

$$P_i = \mu(W - U_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

- P_i : 堤体に働く水平方向外力の合力(=波力)
- W : 堤体の空中重量
- U_i : 堤体に働く垂直方向外力の合力
- μ : 堤体とマウンドとの摩擦係数
- i : 1. 消波堤, 2. 直立堤

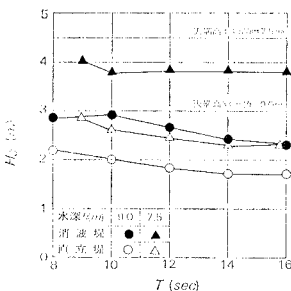
消波堤では、堤体内の各部に波が侵入するためいくつかの外力が働くと考えられ、さらに隔壁や垂直翼によって渦流や砕波が生じるためのエネルギー損失も、その大きな要素として考えられる。しかし、この損失を定量的に表現できないので、 U_1 を5種類の要素で表わし式(2)で与えることにする。

$$U_1 = f(B_v, B'_v, P_v, P'_v, W') \quad \dots\dots\dots (2)$$

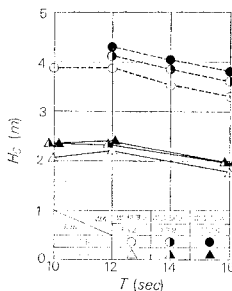
ここに、

- B_v : 堤体に働く静水時の浮力
- B'_v : 堤内の水位上昇により新たに水中に没する部材に働く浮力(=付加浮力)
- P_v : 底版に働く揚圧力
- P'_v : 床版に働く揚圧力
- W' : 堤内の水位上昇により静水面より上に包含される水量(=付加重量)

直立堤の U_2 は式(3)で与えられる。



図—2 堤体の滑動限界波高



図—3 床版の浮き上がりに対する移動限界波高

$$U_2 = f(B_U, P_U) \dots\dots\dots (3)$$

(3) 要素の測定とその結果による波圧係数(β_M)

消波堤では、式(2)で示される要素を、①付加重量(W)、付加浮力(B_U)、②揚圧力-底版(P_U)、床版(P_B)、波圧合力(P_1)に分け、①は水位測定、②は波圧測定によって求める。これらの要素から式(1)によって求める波圧合力を P_1' とし、後壁前面の打上げ高と堤脚水深の和を波圧の作用高 l_1 として、平均波圧 $\bar{p}_1 = P_1'/l_1$ の関係から平均波圧係数を $\beta_M = \bar{p}_1/w_0H$ で表わす。

a) 実験設備と実験条件

実験設備は限界波高実験に用いたもののほか、測定装置として堤内水位に容量式波高計6台、各部材の波圧測定に波圧計10台、変位計1台を新たに用いた。

実験条件は(1)の実験と同様で、各条件ごとに得られた堤体の滑動限界波高を用いた。

b) 測定方法

測定は、床版の後壁側に変位計、堤体の各部に波高計、波圧計を取付け、各条件ごとに波圧計の配置を3回変えて全体の波圧分布を調べ、測定は2回以上行い、得られた値の平均値を代表値として用いた。

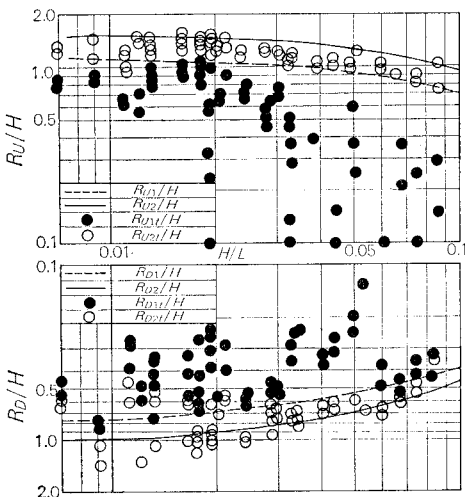


図-5 波の打上(下)げ高

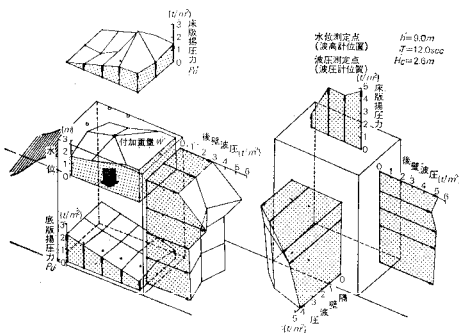


図-6 滑動限界時の堤内の状態

滑動時の堤内水位、波圧分布は、堤体の水平変位速度が急増するときのそれぞれの値の同時記録から求めた。

c) 実験結果と考察

図-5 に波の打上(下)げ高(—, ---印)および滑動限界時の水位(●, ○印)と波形勾配の関係を、図-6 に堤内水位と各部材に働く波圧分布の一例を示す。

1) 堤内水位

堤内水位は、堤体の中央部と隔壁沿いで得られた値に大きな差が見られないので、これらを平均した値である。図-5 により、滑動限界時の水位は後壁前面ではほぼ打上げ高と等しいが、堤体前面では、打上げ高より低く、静水面付近にあるものもある。

したがって、滑動限界時に堤内の水量は増加し、堤体の付加重量となり、新たに水中に没した部材に付加重量の8~13%の付加浮力が働くことがわかった。

2) 波圧分布

波圧分布は、後壁および床版の中央部についてはすでに縮尺1/15の模型実験で把握できているが、本実験では、後壁、隔壁および床版の隔壁沿いのものも得られた。

堤体の延長方向の断面では、平均的に分布するもの、および凹型、凸型に分布するものがあるが、顕著な差はみられなかった。また、底版前端では、開口部の直下で若干小さな揚圧力を示すものと予測したが、ほとんど変化がみられず、前端で打上げ高の水頭の0.4~1.0倍の大きさ、後端ではほとんどゼロの三角形分布となり、後壁、床版に働く波圧とともに堤体の延長方向にもほぼ一様であることがわかった。

図-6 によれば、堤体内の波圧分布が、堤内での波力の分散、位相差が生じていることを示している。後壁前面から堤体前面までは、垂直翼の影響があるため複雑な分布と思われるが、測定点ごとの値はほぼ堤内水位に比例した関係のあることがわかった。

3) 波圧係数(β_M)

堤内水位、波圧分布の測定結果から、それぞれの合力を算出し、これらの関係から、 β_M の範囲を求めると、0.65~1.05の値が得られた(図-9参照)。

(4) 打上げ高による波圧係数(β_R)

前報の実験結果¹⁾から、消波堤に作用する外力を滑動時の各要素を波の打上げ高を用いて近似的に表わす方法を考察し、この結果から平均波圧係数(β_R)を求める。

a) 堤内水位

堤内水位は、図-5 に示す後壁前面と堤体前面の打上げ高まで上昇し、堤体の延長方向にも一様な分布とし、増加した水量は付加重量として考えられる。また、付加浮力についても各要素の実験結果と同様に考え、打上げ高の平均値まで新たに部材が没するものとして考えた。

b) 波圧分布

底版に働く揚圧力は、堤前の水位上昇に伴う圧力であるので、堤体前面の打上げ高と圧力測定値を比較するとほぼ等しい値となるから、底版前端で打上げ高の水頭、後端でゼロの三角形分布とし、堤体の延長方向に様な分布とした。

床版に働く平均揚圧力は、①波圧計による圧力測定値と、②浮き上がりに対する移動限界における単位面積あたりの重量から算出した。①、②と波高の関係を 図-7 に示し、その結果を揚圧力係数で比較すると、①の方が②より2～5倍程度大きい。

伊藤ら²⁾は、棧橋下面に働く揚圧力は衝撃的であるため、その挙動を、④部材の自重をもって対抗するもの、⑥部材強度をもって対抗するものに分け、④に対しては落下および振動限界に対応する安定重量を、⑥に対しては等価静荷重をそれぞれ実験式で示した。このうち④の振動限界重量と、圧力測定による揚圧力のピークの平均値とを比較し、前者は後者の約1/5であると報告している。

本実験の床版の浮き上がりに対する限界波高の測定は、④の振動限界に相当する。この関係から、①の圧力測定値を1/5倍すると、②の結果にほぼ等しくなるので、平均揚圧力強度の上限値として $\bar{p}_U = 0.5w_0H$ が得られる。

c) 波圧係数 (β_R)

外力の要素を 図-5 の打上げ高の関係で表わし、打上げが床版に達する場合には、床版の揚圧力を算出して合力を求める。これから β_R の範囲を求めると 0.50～0.90 の値が得られた (図-9 参照)。

(5) 各要素の寄与率

図-8 に、 β_M の算出に用いた各要素と堤体の静水中重量の割合を寄与率として示す。これより、合力としては -20～+30% になり、同様な関係を β_R について見ると

-(5～15)% となる。ここで、直立堤に働く底版揚圧力の寄与率を滑动限界波高から求めると、広井公式の場合 図-8 に示すように -(25～32)% となる。

したがって、滑动時の堤体重量は、直立堤の場合 (0.68～0.75) W_0 、消波堤の場合、 β_M のとき (0.80～1.30) W_0 、 β_R のとき (0.85～0.95) W_0 となり、消波堤の付加重量の効果が大きいことがわかる。

(6) 波圧係数 ($\beta_H, \beta_M, \beta_R$) の比較

波圧係数の比較にあたって、波圧係数の相違に作用高さの違いの影響がどの程度あるか考察する。作用高さを $\beta_H, \beta_M, \beta_R$ に対応して l_H, l_M, l_R とすれば、 l_H, l_M はそれぞれ堤体の滑动時、固定時の相違はあっても堤内の状態に顕著な差がないことは、両者の場合の堤前、堤内における各要素の測定結果 (滑动時の同時記録) から確認された。 l_M, l_R はそれぞれ実測値と波形勾配により求めた打上げ高と堤脚水深の和である。両者の打上げ高の関係は 図-5 によって明らかなように、ほぼ等しい。したがって、作用高さが、波圧係数におよぼす影響はほとんどない。

図-9 に各波圧係数と周期の関係を示す。 β_H の変化の原因は前述の要素とエネルギー損失によるものと考えられ、 β_H を β_M と比較することで、測定できなかったエネルギー損失を説明できる。さらに、 β_H が β_M より大きな値を示し、その差が短周期ほど大きいことがわかるが、短周期の波ほど渦流、砕波によるエネルギー損失が大きいためによるものと考えられる。

β_R は β_M に比較的近い値を示すことから、波の打上げ高により近似的に求める方法によっても、堤体の状態

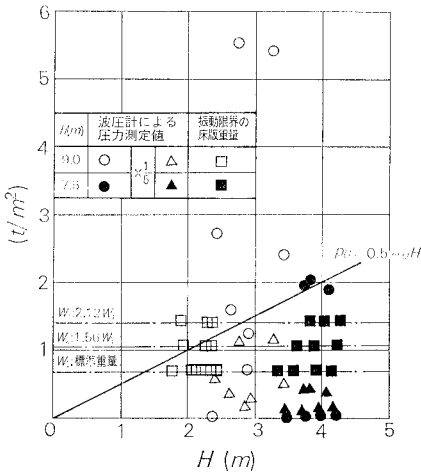


図-7 床版に働く揚圧力

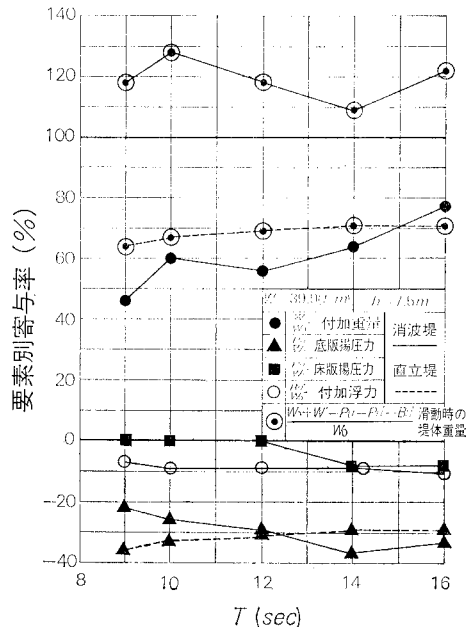


図-8 各要素の寄与率

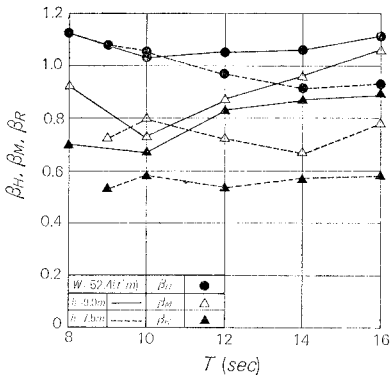


図-9 波圧係数の比較

をよく把握できたものと考えられる。

4. 安定性実験に伴う模型の縮尺効果

直立式消波堤は、大水深用低反射率防波堤として開発されたが、実験は施設の都合上、縮尺 1/30 の模型により堤前水深 25, 30 cm, 周期 1.1~2.9 sec の条件で行われた。したがって、得られた結果がそのまま現地に適用できるか、縮尺効果の検討が必要である。

(1) 縮尺効果に関する一般的考察

この実験の測定項目およびその現象を主として支配する外力と適用される相似律は、次のとおりである。

a) 反射率, 堤内水位, 打上(下)げ高, 波圧

これらの項目は、一般に重力支配下の現象であり、波の変形に伴う水面変動や圧力変化を追跡することにより解析される。縮尺が 1/100 以下でも、 $T=0.35$ sec, $h=2$ cm 以上あれば、粘性、表面張力は省略され、Froude の相似が適用される。しかし、この消波堤の場合は、垂直翼により形成される渦が消波機構に関連するから、粘性の影響を検討する必要がある。

b) 底版の揚圧力

消波堤前面の水面変動による動圧が、マウンド捨石の空隙を通して伝達される現象では、一般に Froude の相似によって行われるが、縮尺がある程度大きくても、捨石空隙内における粘性の影響は無視できないものとなる。

(2) 縮尺効果の検討

a) 渦を伴う消波効果実験における縮尺効果

Hudson は³⁾、捨石堤の安定性に関する多くの実験結果を整理し、被覆体の安定数 N_s と Reynolds 数 R_N の関係を調べ、 N_s に対して縮尺効果を示さない限界 Reynolds 数 $(R_N)_c$ を与えている。

$$(R_N)_c = g^{1/2} H_c^{1/2} l / \nu \approx 3 \times 10^4 \quad (4)$$

ここで、 H_c : 安定限界波高、 l : 捨石の代表径、 g : 重力の加速度、 ν : 水の動粘性係数。

消波堤の場合も放散性模型であるから、この関係が適

用できるものとして限界縮尺 E_c を求めると次のとおり。

$$(R_N)_c = g^{1/2} H_c^{1/2} E_c^{1/2} l / \nu \approx 3 \times 10^4$$

$$\therefore E_c = (3 \times 10^4 \nu / g^{1/2} H_c^{1/2} l)^{2/3} \approx 1/45 \quad (5)$$

ここで、 H_c : 滑動限界波高、 l : 後部垂直翼の幅員。

b) 捨石マウンドの揚圧力実験における縮尺効果

筆者の一人⁴⁾は、捨石堤のような透過性媒質を通過する流れを、空隙が連続する仮想的な管路内の流れとして扱い、その摩擦による損失水頭と Reynolds 数および縮尺効果の関係を解析した。すなわち、縮尺 $E=1/30$ では

$$(R_N)_c = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2 \frac{\Delta H}{\Delta L} \frac{2gd^3}{\nu^2} \frac{p^3}{(1-p)^3}}}{2c_2} \approx 2 \times 10^5 \quad (6)$$

ここで、 ΔH : 損失水頭、 ΔL : 透過性媒質の長さ、 d : 捨石の代表径、 p : 空隙率、 c_1, c_2 : 定数 (1000, 4.3)。

いま、式 (3) に $\Delta H/\Delta L=0.3$, $d=50$ cm, $p=0.5$ を与えて計算すれば、

$$R_N = 4.3 \times 10^5 > (R_N)_c \quad (7)$$

消波堤の滑動限界時における堤体と外力との平衡状態には式 (1) の関係があり、式 (2) の各要素の寄与率が検討された。

すなわち、縮尺 1/30 で行われた安定性実験の各要素には、前項の検討から明らかなように、縮尺効果が含まれていないから、全体系としての安定実験にも縮尺効果が含まれていないことがいえる。

5. む す び

直立式消波堤の安定性について、3. (1). 2) に示す波圧式を得ることができ、また、安定性を支配する力の要素の寄与率を調べた結果、滑動時にみかけ上堤体の重量が増加する効果が大きく、直立堤よりも優れていることがわかった。さらに、安定性実験に含まれる縮尺効果を検討した結果、全体系としての実験に縮尺効果が含まれないことが示された。

今後は、消波堤の三次元消波特性および越波特性に関する実験を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 尾崎 晃・鴻上雄三・永田 慧・荻谷広見・松崎勝夫: 直立式消波堤の開発と水理特性, 第24回海講論文集 (1977. 11)
- 2) 伊藤喜行・竹田英章: 棧橋に作用する波の揚圧力, 運輸省港湾技術研究所報告, 第6巻第4号 (1967. 3)
- 3) Hudson: Reliability of rubble-mound breakwater stability models, Miscellaneous Paper H-75-5, Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1975. 6)
- 4) 鴻上雄三・松崎勝夫・坪田健一・小松及十: 捨石堤の安定性に関する二, 三の問題, 第23回海講論文集 (1976. 11)