

混成式防波堤堤頭部根固め方塊ブロックの安定性に関する研究

国栖広志*・洞谷邦弘**・清水虎重*

1. ま え が き

台風や冬季風浪など、厳しい自然条件にさらされるわが国の港湾は、港内の静穏度維持、諸施設の保全を確保するための外郭施設として、混成式防波堤が一般的に用いられてきた。

混成式防波堤に関する設計や施工技術は、多くの試練と研究を経て進歩を重ねてきており、近年における被災率の低下にあらわれているが、いまだに未解決のまま残されている問題も多い。

被災の内容は、構造形式、設置水深、外力条件などによって異なるが、最近では防波堤堤頭部に関するものが増加している。事実、被災防波堤集覧^{1),2),3)}によると、混成式防波堤の被災位置は、約6割が堤頭部および施工途中の防波堤堤頭部である。

本研究は、これら被災例の多い堤頭部根固め工を対象として、水理模型実験を行い、根固めブロックの寸法諸元を考慮した安定重量の算定方法を示すことを目的とする。

2. 実験方法

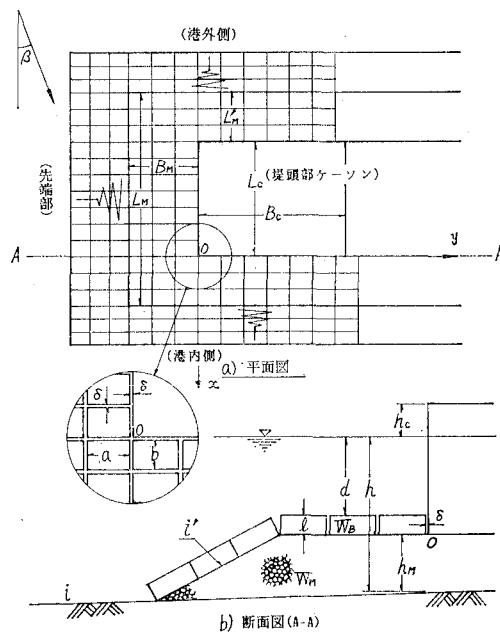
(1) 実験条件

実験に用いた水槽は 34m×5m×1.2m のもので、所定の波高を得るため、モルタル固定床による 1:30 の海底勾配を設置した。

実験縮尺は縮尺効果⁴⁾を考慮し、フルード相似則を適用して 1/25 とした。

本実験で用いた混成式防波堤堤頭部の構造と諸元を図一1と表一1に示す。各構造諸元のうち、防波堤設置水深 h 、基礎捨石マウンド高 h_m 、など海底勾配のために場所的に変わる諸元は、ケーソン港内側隅角部(図一1の0点)の位置で代表する。

実験に使用した根固め方塊ブロックの模型は、高さ 6 cm、幅 10 cm、長さ 14 cm で、空中重量が 1897±34 g に調整したモルタル製である。



図一1 堤頭部構造諸元

表一1 堤頭部寸法諸元

項 目	記号	諸 元	項 目	記号	諸 元
ケーソン	ケーソン長	L_c 70.0 cm	ブ ロ ッ ク	ブロック長	a 14.0 cm
	ケーソン幅	B_c 90.0 cm		ブロック幅	b 10.0 cm
	ケーソン高	H_c マウンド高 により変動		ブロック高	l 6.0 cm
	ケーソン天端高	h_c 20.0 cm		ブロック重 量	W_B 1897.0 ±34.0 g
基礎捨石マウンド	マウンド天端長	L_M 1.40 m	水 深 勾 配	ブロック間 隔	δ 5.0 mm
	マウンド天端幅	B_M 42.0 cm		設置水深	h 40.0 cm
	マウンド前面天端長	L'_M 30.0 cm		ブロック天 端水深	d 10.0, 20.0, 30.0 cm
	マウンド天端高	h_M 16.0, 20.0, 36 cm		海底勾配	i 1:30
	マウンド勾配	i' 1:2	備 考	・根固めブロックは方塊ブ ロックを使用	
	マウンド捨石重量	W_M 3.2~12.8 g			

(2) 計測方法

実験ではブロックに作用する波力とともに、流速と波高も同時に計測した。

波力測定用ブロックはアクリル製で、外径寸法はモル

* 正会員 五洋建設(株) 技術研究所

** 正会員 五洋建設(株) 土木設計部

タル製と同一である。ブロックの各面には波圧計(100 gf/cm²)を合計12個設置した。このうち上面と下面には波圧の空間的変動性を考慮して、対称の位置に各4個ずつ設置した。

流速は3次元超音波流速計をブロック上面から2cm離して、波高は容量式波高計をブロックの側面から10cm離れた位置に設置して計測した。なお、波力と流速の正方向は図-1の矢印の方向である。

ブロックに作用する波力は、相対する面に働く波圧の差から、鉛直力 P_V 、 x 方向水平力 P_{Hx} 、 y 方向水平力 P_{Hy} を算定する。

鉛直力 P_V は上から下への押込み力を正とし、下から上への揚圧力を負とした。

(3) 実験ケース

実験ケースは、入射角度 β (0°, 22.5°, 45°, 60°), 水深 h (40cm 一定), ブロック天端水深 d (10cm, 20cm, 30cm), 周期 T (1.0 sec, 1.5 sec, 2.0 sec, 2.5 sec, 3.0 sec), 波高 H (10cm~25cm) である。ただし入射角度が 22.5°, 45°, 60° におけるブロック天端水深は、20cm 一定の条件とした。

実験波は規則波で、波高はケーソン設置地点での通過波高である。

3. 実験結果と考察

(1) 方塊ブロックの移動形態

ブロック移動状況の観察は、図-1 に示すようにブロック間隔 δ を全て 5mm 設置するとともに、ブロックに番号をつけ、5分間ごとに造波機を停止し、目視と写真撮影により行った。波は各波高に対して20分間作用させ、ブロックが飛散(浮上回転)するまで順次高くした。

ブロックの移動状況の典型的な例を図-2に示す。この図は、波の周期 2.0 sec, 波高 24.0 cm の条件で、波の作用時間が5分と10分経過した後の移動状況である。

ブロックの移動形態は、一連の観察結果から滑動、浮上、回転の3種類に区分することができる。また、ブロックの移動は、ほとんどの場合ブロック番号が11~14の場所で発生した。したがって、以下この部分のブロックの移動状況と波の作用状況について主に述べる。

波はケーソン先端部に沿って港内方向へ進行する。碎波はブロック天端水深が浅いほど早く始まり、ブロックの天端上を走り抜けてゆく。

港内側隅角部には12番ブロックの位置($x/L_0 = -0.2$)

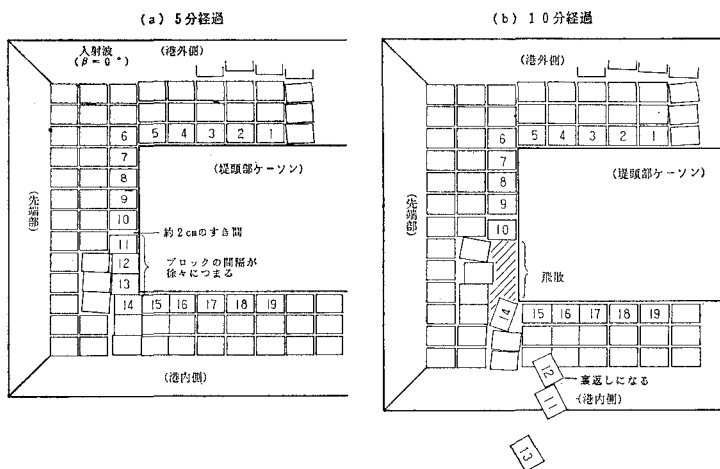


図-2 方塊ブロックの移動状況 ($T=2.0$ sec, $H=24.0$ cm)

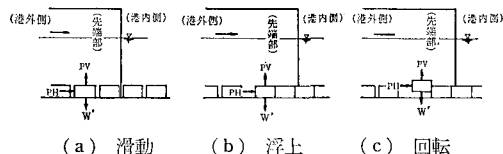


図-3 ブロックの移動形態と力の釣り合い

を中心として引き波時に強い渦が形成される。渦の規模は水深が深く、波高が高く、波の周期が長いほど大きい。

先端部のブロックのうち、ケーソンの中心法線より港外側のブロック(6~10番ブロック)は、最大波高のときでもほとんど移動せず比較的安定である。

一方、ケーソンの中心法線より港内側のブロック(11~14番ブロック)は図-2に示すように港内側へ据付面に沿って滑動し移動が始まる。このため、10と11番ブロックの間には約2cmのすき間が発生し11~14番ブロックは互いに密着した状態で静止する。さらに波高を高くすると11~14番ブロックは、浮上または回転によって抜け出し、港内方向へ移動する。

ブロックは、一般的に据付け水深が浅いほど不安定と考えられている。しかし、ブロックの抜け出し現象は、周期 2.0 sec, 波高 20.0 cm の波浪条件で、ブロックの天端水深が 30cm では発生したが、10cm と 20cm のときには発生しなかった。この理由として、堤頭部におけるブロックの抜け出しには渦が影響しており、水深が浅くなると渦の規模が小さくなるためである。

(2) 方塊ブロックの移動機構

ブロックの移動機構は各移動形態ごとに力の釣り合い式を求め、ブロックの安定性に対する危険率を定義することにより示す。また、危険率を1.0として各移動形態に対する限界状態に対するブロックの所要厚さも示す。

堤頭部のブロックには波が複雑に作用するが、ここでは移動機構を単純化して考え、図-3 に示す 2 次元モデルを用いて考察する。

a) 滑動に対する危険率 (S_{df}) と所要厚 (l_s)

$$S_{df} = \frac{p_h}{\mu_1 k \{l(\gamma_r - w_0) + p_v\}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$l_s = \frac{p_h - \mu_1 k p_v}{\mu_1 k (\gamma_r - w_0)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

b) 浮上に対する危険率 (F_{df}) と所要厚 (l_F)

$$F_{df} = \left. \begin{aligned} & \frac{-k p_v}{k l (\gamma_r - w_0) + \mu_2 p_h} & P_H > 0 \\ & = \frac{-p_v}{(\gamma_r - w_0) l} & P_H \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$l_F = \frac{-(k p_v + \mu_2 p_h)}{k (\gamma_r - w_0)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

c) 回転に対する危険率 (M_{df}) と所要厚 (l_M)

$$M_{df} = \frac{p_h l_1^2 - p_v k^2 l}{p_h (l - l_1)^2 + k^2 l (\gamma_r - w_0)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$l_M = \frac{-k^2 p_v + (2r - 1) p_h}{k^2 (\gamma_r - w_0)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 P_V : 鉛直波力、 P_H : 水平波力、 p_h : P_H/l 、 p_v : $P_V/k l$ 、 k : アスペクト比 (b/l)、 γ_r : ブロックの空中単位体積重量、 w_0 : 水の単位体積重量、 μ_1 : 捨石とコンクリートの摩擦係数、 μ_2 : コンクリート間の摩擦係数、 l_1 : ブロックの浮上量、 r : 浮上率 (l_1/l)

上式から各危険率と所要厚を算定するためには、鉛直力 P_V と水平力 P_H を求める必要がある。そこで、波圧の測定結果を用いて、鉛直力と水平力の発生機構について検討する。

(3) 鉛直力 (P_V) と水平力 (P_H) の発生機構

波力の測定結果の代表的な例を図-4 に示す。これは図-2 に示す条件 ($\beta=0^\circ$, $d=30$ cm, $T=2.0$ sec, $H=24.0$ cm) における 12 番ブロックの波圧の測定結果と波力の算定結果である。

まず、鉛直力の検討は図-4 の①~⑤を用いて行う。①は水位波形を示し、②と③は上面波圧 ($p_1 \sim p_4$) と下面波圧 ($p_5 \sim p_8$) の実測値を示す。④は上面 (実線) と下面 (一点鎖線) の波圧合力を示し、⑤は④で求めた波圧合力の差から求めた鉛直力である。

鉛直力は図に示す、(イ)、(ロ)、(ハ) のときに特徴がある。

(イ) ①の水位波形と②、③の各波圧は最大値を示し、④の波圧合力は下面より上面の方が強いので、⑤の鉛直力は押し込み力が作用する。

(ロ) ①の水位波形は波としての谷が最小のときである。このとき④の波圧合力は、上面より下面の方が大きいので⑤の鉛直力は揚圧力が作用する。

(ハ) ①の水位波形は最小値を示す。これは波の谷の

とき、引き波により逆流した流れがケーソン隅角部で剝離し、ブロック上に大きな渦が発生するためである。このとき④の波圧合力は、上面では渦が原因で大きな負圧が生ずるが、下面はすでに上昇過程にある。したがって、その差である⑤の鉛直力は最大の揚圧力を示すことになり、このときブロックは最も不安定となる。

次に、水平力は x 軸方向 (P_{Hx}) と y 軸方向 (P_{Hy}) に作用する。しかし、ブロックの移動は目視観察から x 軸方向が主であるので、ここではこの方向について述べる。

図-4 の⑥は港外側 (実線) と港内側 (一点鎖線) の波圧合力を示す。⑦は⑥の各波圧合力の差から算定した水平力である。水平力は港内方向を正港外方向を負とした。

水平力は⑥に示すように、港内側の位相が港外側より遅れるために発生しており、その方向は港内方向への力が卓越していることがわかる。

図-5 の④と⑤は x および y 方向の流速を示し⑦は x 方向の加速度の算定結果である。これから、水平力が最大になるのは水位がゼロアップクロス点で、 x 方向流速は負かゼロであり、 x 方向加速度が最大のときである。

(4) 各移動形態に対する危険率

図-5 の⑧、⑨、⑩は実測した鉛直力と水平力を式 (1)、(3)、(5) に代入し滑動 (S_{df})、浮上 (F_{df})、回転 (M_{df}) の危険率を算定した結果の一例である。

浮上の危険率は押込み力 ($P_V > 0$) のとき発生しないので零とする。また、式 (3) の第一式と二式を区別するため水平力が負の状態のときには負の危険率で示す。

波高が 15 cm のとき、全ての移動形態に対する危険率は 1.0 以下でありブロックは移動しない。波高が 20 cm のとき、滑動の危険率だけは 1.0 以上となり、正の値を示すことから、ブロックは港内方向へ移動する。波高が 24 cm のとき (図-2 参照) 滑動の危険率に加えて、浮上および回転の危険率も 1.0 以上となり、ブロックは飛散 (浮上、回転) が発生する。以上の結果は目視観察の結果とも一致しており、この方法を用いてブロックの安定性を検討することが可能であると考えられる。

(5) 波力特性

図-6 は 12 番ブロックの入射角度に対する波力特性を示した図である。この図から、鉛直力 (揚圧力) は入射角度が 0° の場合が最も大きい。この傾向は他のブロックについても同様である。

図-7 は波高に対する鉛直力と水平力の特性を示す。ただし、 h/L は 0.108 一定である。

この結果から、揚圧力係数 ($P_u/w_0 H$) は $H/h=0.38$ でピークを示し、その大きさは 0.39 程度である。

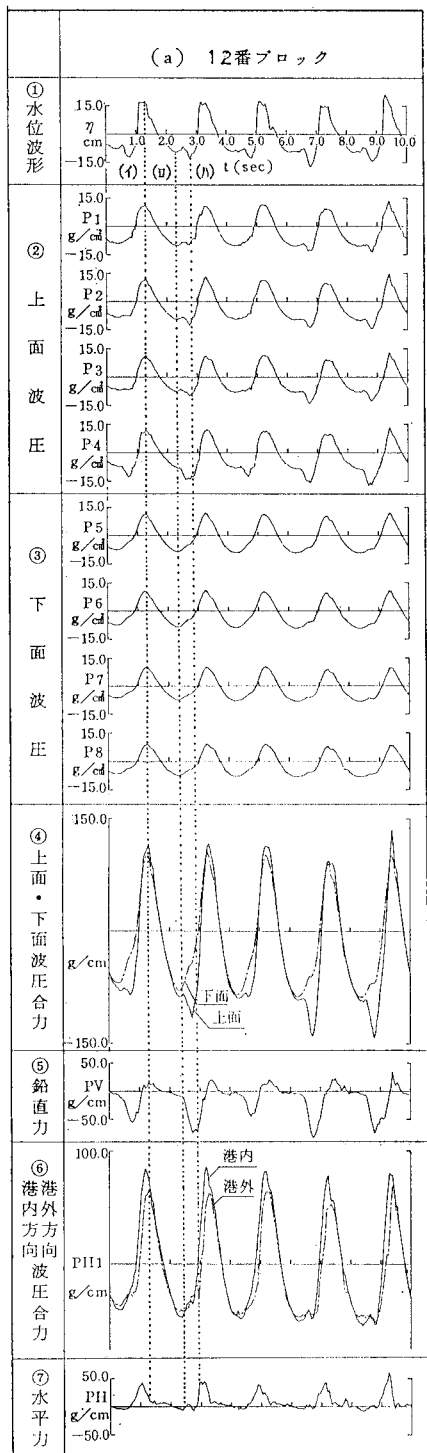


図-4 波力(鉛直と水平力)の発生機構($\beta=0^\circ$, $d=30$ cm, $T=2.0$ sec, $H=24.0$ cm)

水平力の波力係数は、港内方向の力が港外方向の力に比べて 2~3 倍程度大きい。港内方向への波力係数は場所ごとに異なり、12 番ブロックで最も大きく P_{Hx}/w_0H

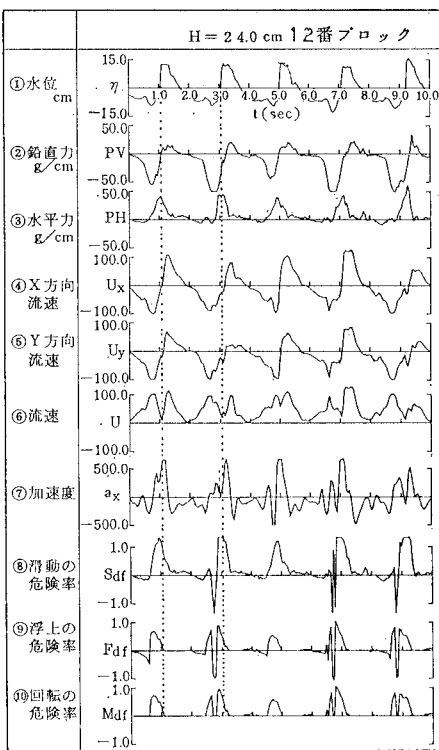


図-5 流速、加速度、危険率と波力の関係

$=0.4$ 程度である。

図-8 は波の周期に対する鉛直力と水平力の波力特性を示す。図は縦軸に波力係数を、横軸に相対水深をとり、ブロックの天端水深と水深の比、 (d/h) をパラメータに整理したものである。この実験条件は $H/h=0.25$ と比較的小波高のものであり、揚圧力に対する渦の効果が小さい場合である。

この結果から、各波力係数は相対水深 h/L が小さくなるほど増加する傾向を示すことがわかる。また、各波力係数とも d/h が小さくなるほど大きい。

(6) 根固めブロックの安定性

ブロックが安定するために必要な寸法諸元の算定方法を以下に検討する。

ブロックの移動形態は(4)の検討から、危険率の考え方をを用いて説明できることを示した。また、各危険率を 1.0 とすると、ブロックの限界状態での力の釣合式が得られ、この式を変形することにより各移動形態に対するブロックの所要高を式(2), (4), (6)から求めることができる。ただし、揚圧力と水平力(港内方向)の最大は同時に発生しないときもあるので、図-7 の各値を適用するには注意を要する。そこで、各移動形態のうち滑動は水平力、浮上と回転は揚圧力が移動を引き起こす主要な力であるとして、一方の力が最大値になっているとき、他方の力が最大値からどの程度低減しているかを実験値から調べた。

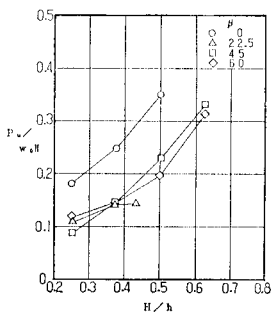


図-6 入射波の角度(β)と波力(12 番ブロック)

図-9 は滑動に対する揚圧力の低減係数 λ_1 の例を示したものである。図中の黒丸は危険率が 1.0 以上になる場合である。

各低減係数はかなりばらつきが見られるので、今回は便宜上ブロックに対して最も危険な状態を考え、浮上に対する水平方向の拘束力を零とし、その他の力は 図-7

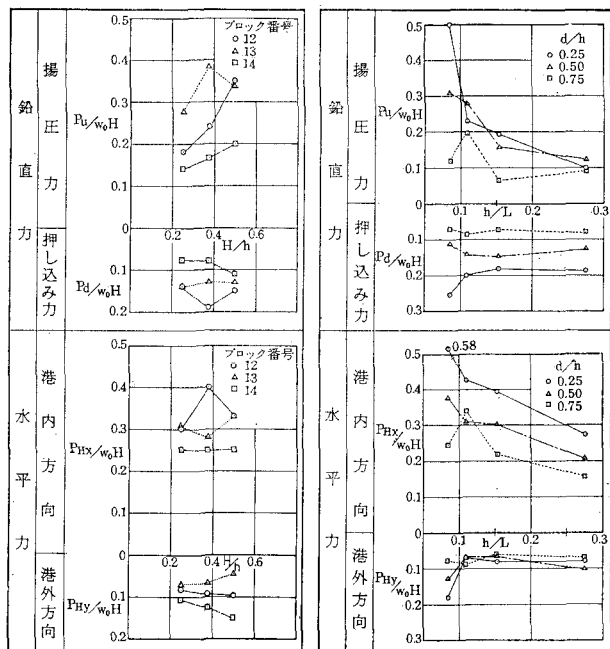
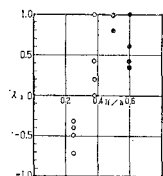

 図-7 波力特性 ($h/L=0.108$) 図-8 波力の周期特性 ($H/h=0.25$)


図-9 低減係数 (滑動)

の値をそのまま用いて算定した。

図-10 は周期 10 sec, 波高 5 m, 水深 10 m, ブロック天端水深 5 m, $\gamma r = 2.3 \text{ t/m}^3$, $w_0 = 1.03 \text{ t/m}^3$, $\mu_1 = 0.6$ としたときの, 各移動形態に対するブロックの所要高さ l の算定結果である。図中の回転に対しては浮上率 r を仮定して算定した。

この結果, ブロックの移動は滑動が最も生じ易く, 次に浮上である。回転は支点の関係で浮上のあとに発生するとして算定した。これから, 回転はブロックの高さの $1/2$ 以上浮上すると発生し易くなることがわかる。

いずれの移動形態とも, アスペクト比 k が大きくなると浮上に対する所要高さに漸近する。

堤頭部のブロックは目視観察から, 滑動によって港内側へ徐々に移動し互いに接触し一体となるため, 見かけ

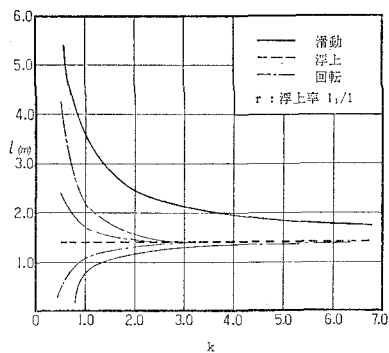


図-10 根固め方塊ブロックの所要高さの計算例

上アスペクトル比が大きくなり, $k=6.0$ 程度になると考えられる。するとブロックは滑動に対して全体で抵抗するため, ブロックが安定する所要高は浮上に対する高さの 1.2 倍程度とすれば良いものと考えられる。

4. ま と め

(1) ブロックの移動は滑動から始まり, 波高が高くなると浮上, 回転が生じる。

(2) 揚圧力はケーソン隅角部によって生ずる渦によるブロック上面に生ずる負圧が主な原因である。

(3) ブロックの各移動形態に対し安定となる寸法諸元は, 実験から求めた揚圧力と水平力を用い, 力の釣合い式から求めることができる。

(4) ブロックが安定するための寸法諸元は, 浮上に対する所要高さの 1.2 倍程度とすれば良い。

参 考 文 献

- 1) 設計基準部設計基準課編集: 被災防波堤集覧, 港研技術資料, No. 58, Sept. 1968.
- 2) 設計基準部設計基準課編集: 被災防波堤集覧(その2), 港研技術資料, No. 200, Mar. 1975.
- 3) 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一: 被災防波堤集覧(その3), 港研技術資料, No. 485, June 1984.
- 4) 藤本稔美・阿部宣行・長谷川寛: 消波ブロックの水理特性に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, 研究報告 382001, 昭和 57 年 6 月。