

中空四脚ブロックの安定限界

—— 異形ブロックの安定特性に関する一考察 ——

近藤 俊郎* 松山 方彦**

要 旨

消波用異形ブロックの一種である中空四脚ブロックの波に対する安定性に関し、このブロックを表層とした一様斜面について実験を行なって考察した。

安定実験の結果きわめて特徴的な安定性を有していることが認められたが、その理由を波力と安定条件から求めた限界重量算定式によって解明した。

1. 緒 言

絶え間なく外海から来襲する波浪から国土を保全し、海陸交通を確保するために築設される防波堤・海岸堤防などの防波構造物は、従来は不透過な壁体構造のものがほとんどを占めていた。そのような構造は耐久性、安定性などの点ですぐれているが、波浪が砕波となって作用する場合には、直接堤体に強烈な波力を受け、衝突後の波浪を高く跳ね上げる短所をもっている。

したがって砕波として作用する位置に築設されるものについては、構造物の種類・目的などによって度合は異なるにしても、越波を防ぐためにかなり高い天端が要求され、それに伴って堤体の規模も大きくならざるを得ない。

加えて、近年、わが国経済の発展に伴いそれら防波構造物背後の土地および水面の利用度が高まってきたことにより、壁体構造に代わって砕波の波力を吸収減殺する効果的かつ経済的な構造物の必要性が増大してきた。そのような消波工法として、最近目覚ましい進歩を遂げ普及しているものに、適度の粗度と空隙によって砕波の衝撃的な波力を吸収減殺する傾斜堤構造がある。

この傾斜堤構造に用いる材料としては、従来は石材がほとんどであったが、近時資源枯渇の傾向から所要の寸法、量の石材を得ることが困難になってきたことと、より大きい消波機能が要求されることからコンクリート製の異形ブロックの使用が顕著に増加している。それら消波用異形ブロックとしては Tetrapod (フランス)、Stabit (イギリス)、Tribar (U.S.A.) など諸外国で考案されたものが著名であるが、わが国においても 2・3 の異形ブロックが考案、実用化

されている¹²⁾。

これら消波用の異形ブロックに共通する特質は、それを積み重ねて形成される堤体が、ブロック相互の噛み合わせ作用によって、波力に対し一体となって抵抗することにより、従来の石あるいは方体ブロック積みの場合に比べかなり安定がすぐれ、かつ消波に有効な適度の空隙と粗度をもつところにある。それゆえに異形ブロックの水理機能は安定性と消波効果の両面からの検討が必要とされるものであり、異形ブロックに関するこれまでの諸研究^{1)~4)}はそれのいずれかに該当している。

ここで筆者らが研究の対象として取り上げた中空四脚ブロックは永井荘七郎博士らの考案になるわが国の代表的な消波用異形ブロックである^{5)~7)}。このブロックの歴史は上記した他のブロックに比べかなり浅く、その特質が十分に解明されていない。そこで筆者らは、この中空四脚ブロックを表層として用いた傾斜堤の安定性を知る目的で、一様勾配の斜面における安定実験を 2 次元水槽で行ない、その特性の解明を試みたものである。

2. 個体形状とその特質

中空四脚ブロックは図-1のような形状・寸法をとり、隅角部に 4 個の脚と中央部に空隙をもつ方形のブロックである⁷⁾。

消波用の異形ブロックは、前述のとおりそれによって形成される構造物が消波効果をもち、かつ個々のブロックが設置される位置において波力に対し安定に保たれることが必要である。図-2に示す各種の異形ブロックは、いずれも 3 個以上の脚あるいは隅角部をもっているが、これはブロック相互の噛み合わせ作用により、波力に対して抵抗力を持たせるとともに、隣接するブロック間およびブロック個体の中の空隙によって、透過性をもたせようとした結果である。

中空四脚ブロックの形状の特徴は、長さおよび幅員に比べ高さの寸法が小さいことで、そのため側面積が平面積よりかなり小さく、また重心が低くなるからブロック個体については、側面からの波力に対する受圧面積が小さく、抵

* 港湾研究室主任研究員 ** 北海道開発局港湾部港湾建設課審査第二係長 (元港湾研究室)

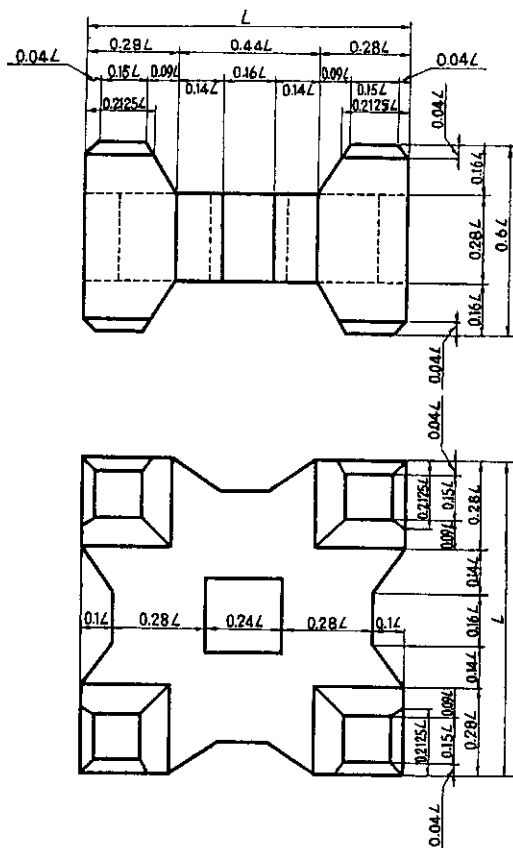


図-1 中空四脚ブロックの形状寸法

抗モーメントが大である。

しかも平滑な斜面に一樣に敷設される場合には、個々のブロックははめ込まれた状態となり、斜面と平行方向の波力に対しては安定性が大きいと推察される。

4個の脚は2層以上に積み重ねる際にブロック相互の噛み合わせに有効に仿らぎ、中央部にある空隙は半面の受圧面積を小さくするとともに、透過性を大きくするのに役立っている。

3. 実験方法

(1) 実験水路

長さ73m、高さ、幅員とも1.8mの主水路と、幅員0.8mの還流水路からなる2次元コンクリート水槽で、造波機は35IPの電動機駆動によるペンジュラム型である。

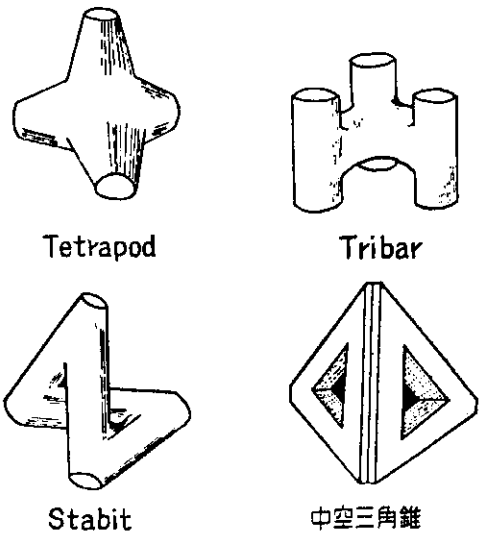


図-2 各種消波用異形ブロック

(2) 傾斜堤構造

一樣水深の水路の中に板張りの斜面を設置し、その上に厚さ60cmの碎石を主材とした内層(Core)を設け、この内層の上に中空四脚ブロックを一樣に敷設したものである(図-3)。ブロックの敷設方法は斜面と平行に設置し(傾斜積と呼称)、層数は1層である。

(3) 使用ブロック

公称1, 2, 3ton型の中空四脚ブロックの長さの寸法が1/10であるような模型を作製した。

その空中重量の平均値は1000, 1950, 2910gで、コンクリートの単位容積重量; $\gamma_c = 2.3$ である。個々のブロック重量の平均値からの偏差は5%以内であった。

(4) 実験波

実験に用いた波の諸元は表-1の範囲である。

表-1

周期; T	2.0 ~ 4.5 sec
波高; H	30 ~ 70 cm
水深; h	120 ~ 140 cm

実験方法は1つの堤体について、周期を固定して波高を順次大きくし、斜面が後述の安定限界に達したときの波の

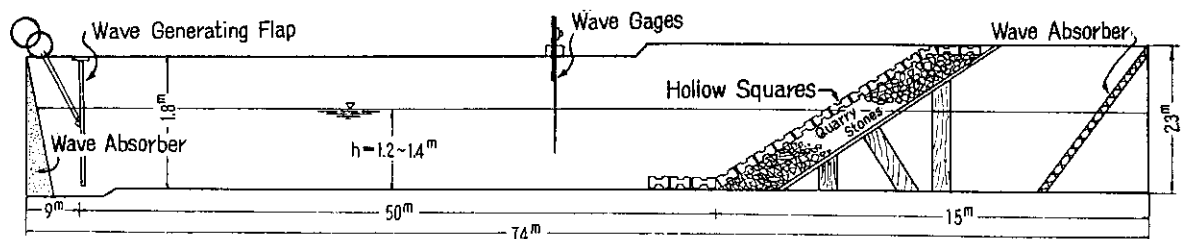
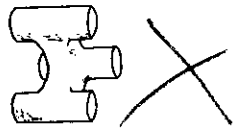
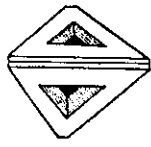


図-3 実験水槽縦断面図



Tri-bar



中空三角構

波用異形ブロック

波りの斜面を設置し、その上に
 した内層 (Core) を設け、この
 クを一緒に敷設したものである
 尖は斜面と平行に設置し (傾斜構
 造)

中空四脚ブロックの長さの寸法が
 1000, 1950, 2910 g で、コンク
 ートは 2.3 である。個々のブロッ
 クは 5% 以内であった。

表-1 の範囲である。

表-1

長さ	2.0 ~ 4.5 sec
幅	30 ~ 70 cm
高さ	120 ~ 140 cm

ここで、周期を固定して波高を
 の安定限界に達したときの波の

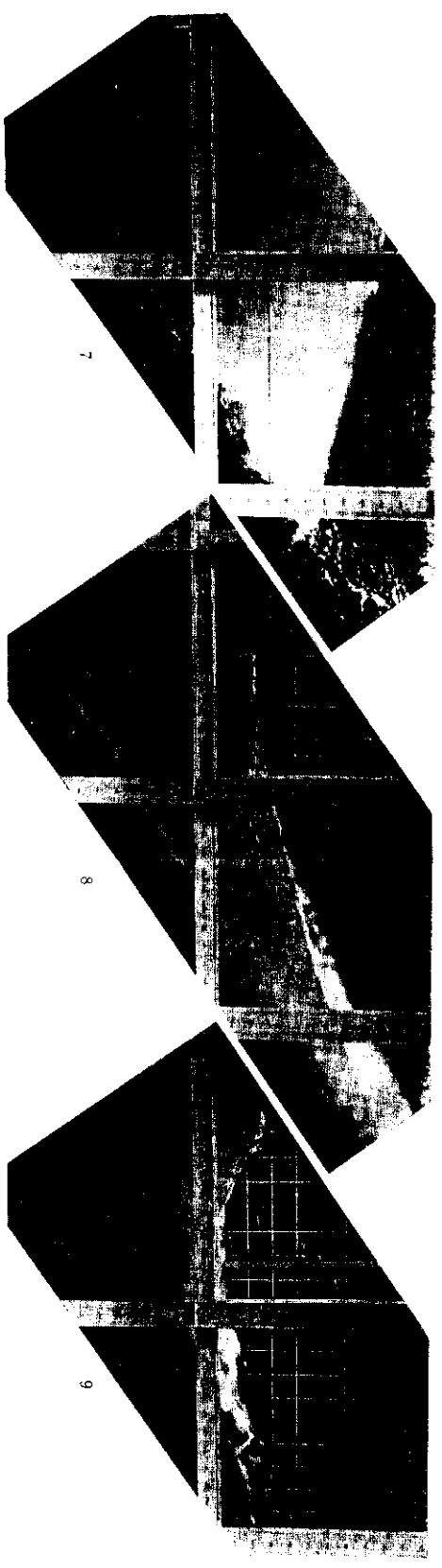
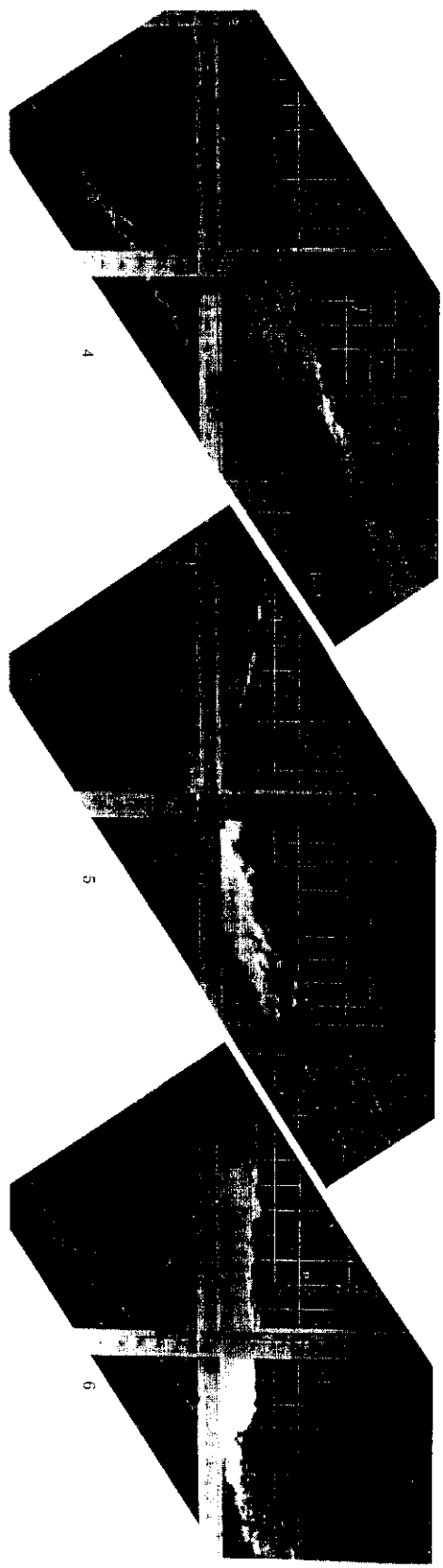
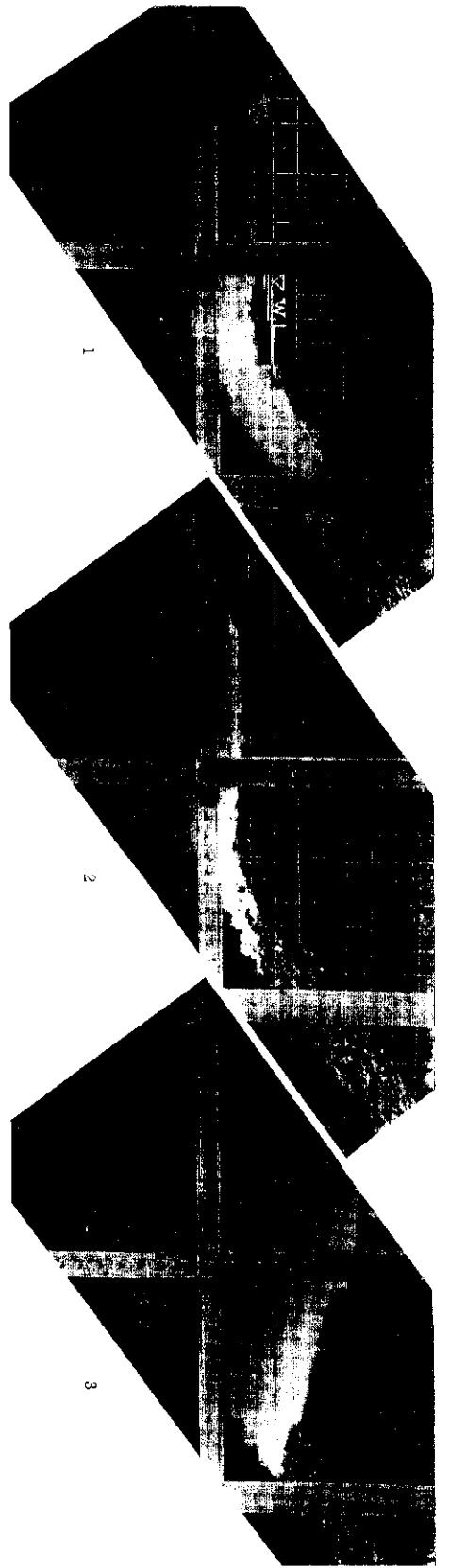
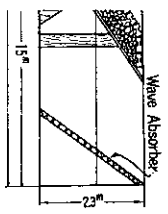


写真-3 斜面の波壊過程 (中空四脚ブロック 1kg, 斜面勾配 1:1.5, 波高 $H=65$ cm, 周期 $T=4.05$ sec, 1コマ約 1.0 sec おき)

諸元を求める方法をとった。

なお斜面勾配, $\cot \alpha = 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.75$ の5種類について行なった。

4. 破壊過程と安定限界の基準

石あるいはブロック積みの傾斜堤の波による破壊は通常次のような過程をたどることが知られている²⁾。

a) ブロック個体が波の作用により, その設置位置において上下前後方向に振動する。

b) この状態が続くとブロックが傾いたり, 沈下したりする。傾斜堤全体については当初の設置状況に比べかなり配列が乱れる。

c) 不安定な状態になったブロックが波の作用を受けると, ブロックは動揺し, 寄せ波で押し上げられた引き波で脱落する。

d) 斜面を構成する大部分のブロックが脱落する。この過程は通常, 斜面に作用する波高が大きくなるにつれて現われるものである。

中空四脚ブロックに関する当実験においてもこの過程を経て破壊に達することが認められたが, この場合の中空四脚ブロック斜面はそのうえ次のような特徴があった。

i) 平滑な斜面上にきっちりと敷き並べた場合 (写真-1) には波力に対し斜面方向のブロックの全体が一体となって抵抗するのできわめて安定が良い。この場合の斜面の安定を支配するのは斜面よりむしろ法尻の根固めおよび内層であって, 根固め部分が不安定になるか内層が沈下することは傾斜堤全体の決定的破壊につながる。

ii) いくらか間隔をあけてブロック相互の摩擦力がゆるかかないように敷設した場合には (写真-2), 作用する波力が最も大きいとみなされる静水面付近にあるブロックから移動脱落することが認められる。この場合1個のブロックが

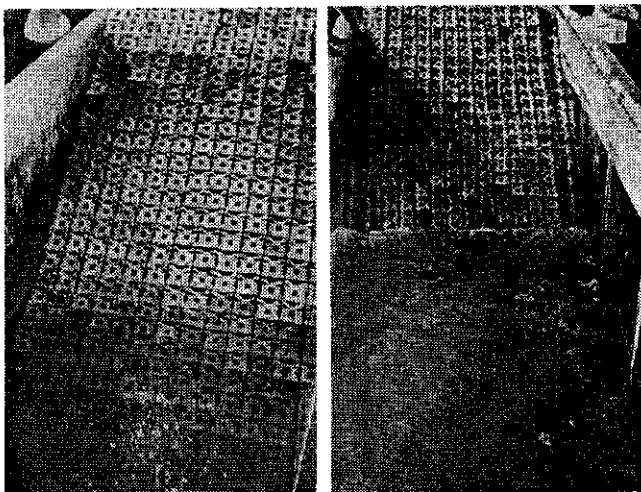


写真-1

写真-2

脱落すると, それより上のブロックは斜面と平行方向の波力を直接受けることになるので連続して脱落する。

破壊過程についてのこれらの特質は, 写真-3に良く現われている。

安定の限界をどのような状態に定めるかは上記の a)~d) の限界波高値はかなり差異があるから, 傾斜堤の安定の問題を扱う際にはきわめて重要な要素となる。

石積堤などに関する従来の研究はこの点が不明確であったが, 最近 Hudson³⁾ は石積堤の被害の程度が波高の関数となることを指摘し, 傾斜堤の安定限界に相当する無被害の基準を「傾斜堤の表層を構成する個体総数の1%が移動する」場合とすることを提唱している。

しかし本質的には, 安定限界は各々の個体および堤体の特質に応じて定められるべきもので画一的に決定することには疑問が残る。ここでは上記の i), ii) に述べたこの中空四脚ブロック堤の特質から判断して安定限界としては, c) の状態で「1個でも脱落する」状態をとることとした。

5. 安定限界重量とその特性

傾斜堤の表層で波の作用を受ける石もしくはブロックなど個体の安定限界重量は, 波力と重量の力の釣合条件から一般に次式のように表現される^{3), 9)}。

$$W = \frac{r_r \cdot H^3}{(S_r - 1)^3} \cdot \Phi \quad (1)$$

ここに W ; 個体の空中重量

r_r ; 石もしくはコンクリートの単位容積重量

$S_r = r_r / r_w$; 石もしくはコンクリートの比重

r_w ; 水の単位容積重量

H ; 波高

Φ は個体の形状と設置位置, 堤体構造, および波に関する諸要素の関数として得られる無次元数である。

したがって, 一般的には Φ は多くの要素による複雑な関数であるが, それらのすべての要素を含めることは困難であるから従来の諸公式は最も重要とみなされる2・3の要素だけの関数としている。

たとえば石積堤に関する Iribarren の改良公式は

$$W = \frac{K' r_r r_w^3 \mu^3 H^3}{(r_r - r_w)^3 (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad (2)$$

したがって Φ は次のようになり, Φ は μ と α の関数となっている。

$$\Phi_{(Iri)} = \frac{K' \mu^3}{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad (2')$$

ここで μ ; 石積の摩擦係数

α ; 斜面が水平となす角

K' ; 主として α によって定まる係数

その後 Hudson⁸⁾ は石積み、異形ブロックのいずれを問わず傾斜堤に適用される一般的な式として実験による次の公式を提唱している。

$$W = \frac{r_r \cdot H^3}{(S_r - 1)^3 K_D \cot \alpha} \quad (3)$$

ここで K_D ; 個体と波の性質などによって定まる係数したがって、この場合の ϕ は次のようになる。

$$\phi_{(Hud)} = \frac{1}{K_D \cdot \cot \alpha} \quad (3')$$

(1) 式で、 W と H との関係は、その他の条件が等しい場合には W が H^3 に比例する。

図-4 は中空四脚ブロックに関する当実験の結果を W と

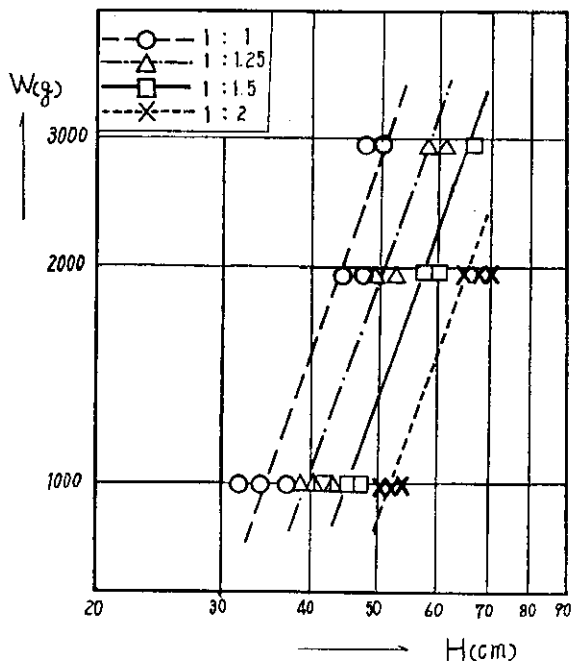
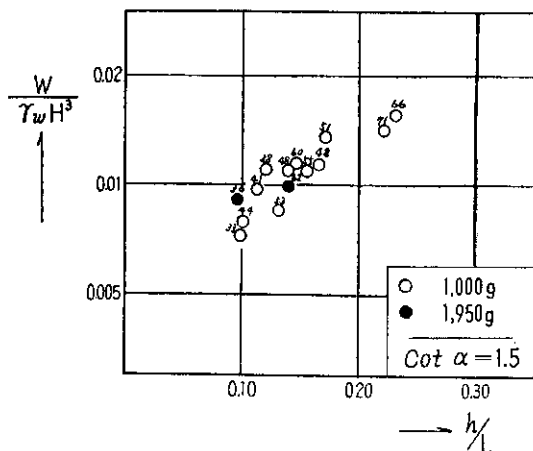


図-4 ブロック重量と限界波高



註 図中の数字は $H/L \times 1000$ の値を示す。

図-5 限界波高と h/L , H/L の影響

H をそれぞれ縦軸、横軸にとり、斜面勾配をパラメーターとして表わしたものである。この図から実験値に多少のばらつきはあるが、 W と H とは上記の関係にあることが認められる。

各々の勾配において一定の W につき H の値が変動している理由は、それぞれ異なった周期 T についての値であるからである。図-5 は $\cot \alpha = 1.5$ の場合について、入射波の性質が安定限界に与える影響を示すものである。縦軸に W/H^3 、横軸に相対水深 h/L をとったもので各実験値に付記する数字は波形勾配 H/L の値である。この図から h/L , H/L が大きいほど W/H^3 が大であることがわかる。この事實は、当実験の場合は一様水深で水底勾配がないので、波の進行に伴う波形変化が小さいことから、周期 T の長い、すなわち h/L , H/L の小さい波は短周期の波よりも斜面に作用する波力が小さいことに関連していると考えがこれについては後章において検討する。

傾斜堤の安定度を示す1つの指数として Hudson⁸⁾ は次式で与えられる無次元数 N_s (Stability Number) を用いている。

$$N_s = \frac{r_r \cdot H}{(S_r - 1) \cdot W^{1/3}} \quad (4)$$

(1) 式と (4) 式から $N_s = \phi^{-1/3}$ である。したがって Iribarren の改良式については

$$N_s, (Iri) = \frac{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{K^{1/3} \mu} \quad (2)''$$

また Hudson 新公式では

$$N_s, (Hud) = (K_D \cdot \cot \alpha)^{1/3} \quad (3)''$$

と表わされるものである。

(4) 式の表現から知れるように、 N_s 値の大きいほどその傾斜堤の安定が良い。中空四脚ブロックについてのこの実験結果から求めた N_s 値を $\cot \alpha$ との関係で表わすと図-6 のとおりである。図に石積み、テトラポッドに関する内外の実験による N_s 値を付記してある。

この図から、中空四脚ブロックを表層とした斜面の安定は、石積みおよびテトラポッド堤に比べ、かなりすぐれていることが認められる。石積み、テトラポッド堤に関する Hudson⁸⁾ と土木研究所⁹⁾ との N_s 値の差異は、i) 前者は防波堤の模型断面について行なっているのに対し、後者は当実験と同じような一様斜面についての実験であること、ii) 安定限界の基準は、前者が4章で記したような方法をとっているのに対して、後者のそれが当実験における筆者らとほぼ同じであることなどから、前者の場合の限界波高値が小さいことによるものと判断される (ただしテトラポッド

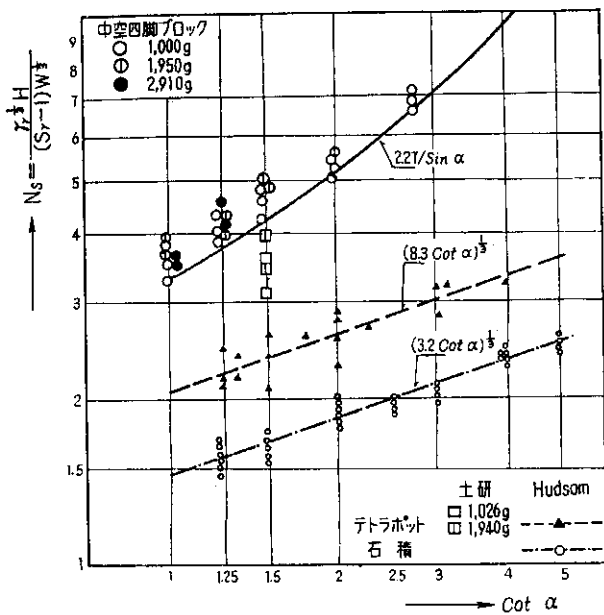


図-6 各種ブロックの N_s 値

ドに関する土研の N_s 値は実験値から計算した)。したがって、この図に表わされている各傾斜堤ごとの N_s 値の量的な関係がそのまま安定の度合の差異となるものではない。

しかし、テトラポッドについての土木研究所の実験²⁾は、実験規模、方法とも当実験と類似しており、安定限界の基準もほぼ同じであるから、当実験と比較できるものである。図-6に表われるこのブロックの傾斜堤の安定の特徴は、きわめて安定が良いことともに斜面勾配がゆるやかになるにつれて安定が良くなる度合いが顕著であることがあげられる。このことは2・4章で記したとおり、中空四脚ブロックの個体形状と、それにより構成される傾斜堤の特質に関連するものと考えられる。

6. 波力実験と考察

傾斜堤の表層に用いる個体の波に対する安定を考察するには、個体に作用する波力を知る必要がある。

この種の波力、とくに透過性斜面上の個体に作用する波力は、従来から未知の事象が多かったが、最近 Sigurdsson¹⁰⁾が、球を対象とした基礎的な実験を行なって有意義な結果を提供している。

筆者らは、安定実験に現われた中空四脚ブロックの特徴である安定性を、理論的に解明するために補助的な波力実験を行なった。

ここでは簡便のため堤体断面のうちで最大の波力を受ける個体だけを対象とすることとし、その位置を4章の破壊過程からほぼ静水面付近と推定した。

単位断面に仿らく最大波力の位置は、波力の種類・堤体構造・波浪特性などによって異なるものと考えられるか

ら、上記の推定は一般的にはあてはまらない。

この静水面にあるブロックに抵抗線歪型の圧力計を取り付けて波圧測定を行なったものである。

圧力計4個を図-7のように前後上下の4方向に受圧板を向けて設置し、その記録を電磁オシログラフで読み取るようにした。これにより斜面と平行方向の波力は①と④、また直角方向の波力は②と③の値の差から求められる。設置の都合上これらの圧力計は同じブロックに取り付けることができなかったため、平面的な位置はそれぞれ異なっているが2次元の断面としては略図のような配置となるものである。

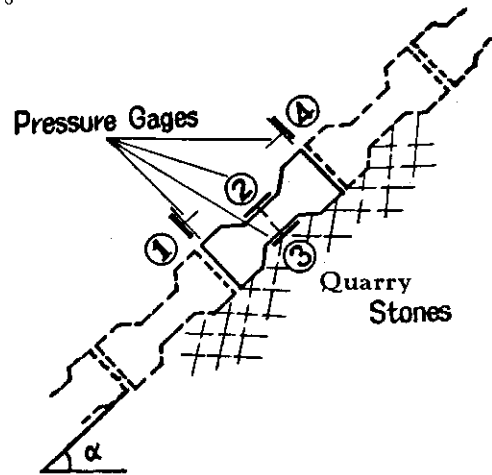


図-7 波圧計設置図

これら4個の圧力計の記録から、この傾斜堤の静水面にあるブロックに作用する斜面と平行および直角方向の波力の時間的変動は、一般に図-8のようになることが認められる。この図は横軸に時間 t を、波峯が考えるブロックの真上を通過するときを基準にとり ($t=0$)、縦軸の波力 P は直角方向についてはブロックを上向きに持ち上げるように仿らく力を、平行方向については斜面の上方に押し上げる力を (+) としている。

この図に表われる波力の時間的な変化はおよそ次のように説明される。

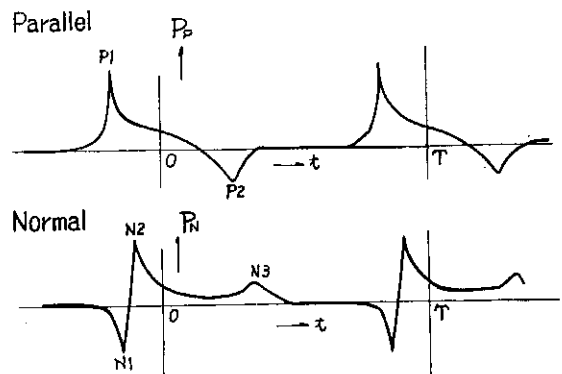


図-8 ブロックに作用する波力の時間的変動

傾斜堤の静水面に作用する直前の浅水波形はかなり非対称となっており、波峯の前部はかなり急角度で立ち上がっており、後方はなだらかである。水粒子の移動方向は波峯前面の谷を境に、後方では波の進行方向で、前方では逆方向である。境界になる谷の付近の水粒子は移動方向が著しく変化しているが、全体としては後方の水粒子速度が大であることから進行方向へ斜め上向きを有する。

図-8において $t=0$ の前にあらわれている直角方向の波力 P_N についての極値 $N1$ 、および平行方向の波力 P_P についての $P1$ は、波峯前面の水粒子が個体に衝突するときと与える衝撃的な波力である。 P_N で $N1$ に次いであらわれる正の極値 $N2$ は、波が個体に作用する際に堤体内にある水粒子は波の進行方向と逆向きな移動をするが、その速度は波峰前面の谷の付近で最大となることによる。

波が進行して個体が波に被われるにしたがって、ブロックの前後、上下の両面から波力が作用することになるから P_N 、 P_P のいずれも減少する。斜面上で砕波した後の波は流れとなって斜面を遡上してゆくが、上りきった位置から水流は後退し、引き波につれて一部は堤体内に浸透しながら斜面を流下する。この引き波の作用により P_N は正、 P_P は負となり $N3$ 、 $P2$ はその極値である。

引き波が去ってブロックが水に浸されず大気にさらされている状態では P_N 、 P_P は 0 である。

図-8 に示す波力の時間的変動は、傾斜堤の構造、波浪の性質、個体形状とその位置などによって異なってくるもので、基本的には Sigurdsson¹⁰⁾ が詳細に検討している。

個体の安定に関しては、この図に表われている波力のうちの極値が重要である。ここでは波圧実験からそれらの極値がどのような値をとるか求めた。測定方法の制約から、ここでは個体に作用する全波力： P ではなく、単位面積当たりの波圧強度： p を対象とした。

斜面上に作用する砕波の波力については、直立堤に関する広井公式から類推して、その波圧強度の極値 p は近似的に次のようにおくことができる。

$$p = \phi \gamma_w H \quad (5)$$

γ_w : 水の単位重量

H : 波高

ここで ϕ は一般的には、(i) 波力の種類および作用方向、(ii) 傾斜堤の構造形状、(iii) 個体の形状および位置、(iv) 波の性質などによって定まる無次元の係数である。

構造形式が一定の傾斜堤の静止水面付近におかれた個体に作用する波力を対象としている当実験の場合は、 ϕ を支配する (ii) (iii) の要素としては傾斜角度 α のみである。

(iv) については、水底勾配のない一様水深での実験であ

るから H/L の大きい波だけが砕波的な大きな波力を与えることから、その影響を検討するのは困難と思われる。

$H/L=0.04\sim 0.08$ の実験範囲では、波力に与える H/L の影響は、寄せ波の波力については H/L の大きいほど、引き波の場合は H/L の小さい波ほど波力が大きい傾向が認められるが、 α によってその程度が異なるようである。

したがってこの場合は、 ϕ は波力の種類と α の関数として求めることとした。 $\cot \alpha = 1.5, 2.0, 2.75$ の 3 種の勾配について求めた結果 ϕ の平均値は表-2 のように得られた。符号は前記した波力の向きによる。

表-2

波力の種類	ϕ
斜面と平行方向の波圧 (寄せ波: $P1$)	$0.75 \cot \alpha$
” (引き波: $P2$)	$-1.0 \tan \alpha$
斜面と直角方向の波圧 (寄せ波: $N1$)	$-1.3 \sin \alpha$
斜面と直角方向の揚圧 (寄せ波: $N2$)	$0.12 \sin \alpha$
” (引き波: $N3$)	$0.12 \tan^2 \alpha$

- 註 1. 上記の値は $1.5 \leq \cot \alpha \leq 2.75$ の範囲についてである。
 2. 平行方向の波力の ϕ は図-7 から知れるように斜面上に孤立している状態で受ける場合であり、一様に敷設された状態で側面に受ける波力についてではない。
 3. 揚圧力は、個体が浮力を受けている状態で作用するものとする。

表-2 の値から、平行方向の寄せ波を除いては波力の絶対値はいずれも急勾配になるほど大になることが知れる。平行方向の寄せ波による初期波圧 $P1$ が他の場合よりかなり大きい、これは註 1 で記したように斜面の表面に仿らくも波力であることから、直立堤の場合の砕波圧と比較されるのにあたる。これに比べ直角方向下方に押す力 $N1$ が小さいが、このことはこの範囲の勾配では平行方向の波力が卓越していることを表わしている。

7. 安定条件と重量算定式の一般解

石積みもしくは立方体ブロック積みの傾斜堤を対象とした安定重量の算定式は、古くから数多くの経験・実験公式が提唱されている。Iribarren の改良公式はそのうちの代表的なもので、現地経験ならびに実験によって照査・修正された半理論式であるが、ごく最近まで最も普遍的に用いられていた。

しかし、それら従来の諸公式は、石材より安定がすぐれ、かつ、急勾配の斜面を構成できることから近年目覚ましい普及を遂げた異形ブロックについては適用性が薄いことが

知られている。

図-6に示すとおりテトラポッド、トライバーらの安定重量は同じ条件下では、石材のその1/3以下であり、また中空四脚ブロックの場合はさらに小さくて済むことが知れた。

このような各個体ごとの安定度の差異は、それら個体の形状、ならびにそれによって構成される傾斜堤の特質に関連している。

したがって異形ブロック堤の安定重量の算定式は、その誘導過程において各々の場合の特質を考慮したうえで、求められなければならないと考える。

透過性構造の斜面における個体の波力による移動は、一般に斜面に平行と直角の2方向について現われる。

斜面に平行方向の移動は寄せ波、引き波に伴って前後両方の向きに起きるが、直角方向の場合、下向きの移動は内層の安定の問題に属するから、ここでは揚圧力の作用を受ける上向きの場合のみを扱うこととする。

斜面と平行方向の安定条件は 図-9 から

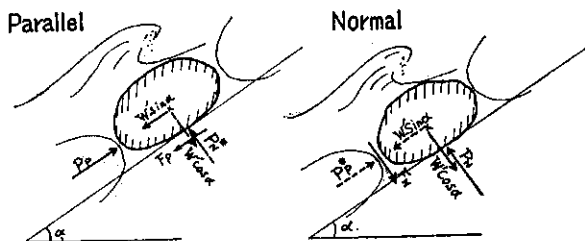


図-9 斜面上の個体に作用する力

$$|P_P - W' \sin \alpha| \leq F_P \quad (6)$$

同様に直角方向については

$$0 \leq P_N - W' \cos \alpha \leq F_N \quad (7)$$

ここで

$$W' = W \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_r} \right) : \text{個体の水中重量} \quad (8)$$

P_P, P_N : 個体に作用する斜面と平行、直角方向の波力でいずれも上向を正とする。

F_P, F_N : 斜面と平行、直角方向に個体に妨らく摩擦抵抗力で下式で与えられる。

$$F_P = \mu_P (W' \cos \alpha - P_N^*) \geq 0 \quad (9)$$

$$F_N = \mu_N |P_P^* - W' \sin \alpha| \quad (10)$$

μ_P, μ_N : 考えている個体についての斜面と平行直角方向の摩擦係数

P_N^*, P_P^* : P_P, P_N が個体に妨らく際に、それぞれの場合について同時に作用する斜面と直角、平行方向の波力 (図-9 参照)

石積堤に関する従来の諸公式は、斜面と平行方向の安定条件に基づくものであり、それらの条件式はそれぞれ (6)

式を簡略化したものである。

なお、 P と P^* の区別は、(6)(7) のそれぞれの安定条件式において P を主に P^* を従に考えていることによる (図-9 参照)。

上記の安定条件式に基づいて安定重量の算定式が得られる。波力 P は次のようにおくことができる。

$$P_P = p_P A_P \quad (11)$$

$$P_N = p_N A_N \quad (11')$$

ただし

p_P, p_N : 斜面と平行、直角方向の波圧強度

A_P, A_N : 斜面と平行、直角方向の受圧面積

同様に P^* についても $P_P^* = p_P^* A_P, P_N^* = p_N^* A_N$ とおける。

次に A はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$A_P = k_P \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

$$A_N = k_N \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12')$$

ここで

k_P, k_N : 個体形状および受圧方向による係数

また p については (5) 式のようにおけることから、

$$p_P = \psi_P \gamma_w H \quad (5)$$

$$p_N = \psi_N \gamma_w H \quad (5)''$$

のように表現することとする。 ψ_P, ψ_N はそれぞれの方向についての前記したような係数である。同様に $p_P^* = \psi_P^* \gamma_w H, p_N^* = \psi_N^* \gamma_w H$ のようにおく。

これらの関係を (6)(7) の条件式に代入し、 W について解けば、それぞれの場合についての安定限界の重量が得られる。(6)(7) 式の不等号を除いて限界の W を求める。

斜面と平行方向の安定限界重量は (6) 式から

$$W = \frac{\gamma_r H^3 (\mu_P k_N \psi_N^* \pm k_P \psi_P)^3}{(S_r - 1)^3 (\mu_P \cos \alpha \pm \sin \alpha)^3} \quad (13)$$

ただし、() 内の符号は $(P_P - W' \sin \alpha) \geq 0$ のときは+、 $(P_P - W' \sin \alpha) \leq 0$ のときは-をとる。

同様に斜面と直角方向については (7) 式から、

$$W = \frac{\gamma_r H^3 (k_N \psi_N \mp \mu_N k_P \psi_P^*)^3}{(S_r - 1)^3 (\cos \alpha \mp \mu_N \sin \alpha)^3} \quad (14)$$

ただし、() 内の符号は $(P_N^* - W' \sin \alpha) \geq 0$ のときは-、 $(P_N^* - W' \sin \alpha) \leq 0$ のときは+をとる。

石積堤の重量算定に用いられてきた Iribarren の原公式、その改良公式、Hedar¹¹⁾ 公式など、従来の諸式はいずれも平行方向の安定条件から導かれたもので、それらは (13) 式を簡略化したものにあたる。

8. 中空四脚ブロックへの適用

ここで傾斜堤の表層として敷設された中空四脚ブロックについての安定条件式を考える。敷設状態としては安定実験で扱ったようなかなり整った形状で敷設されている場合を対象とする。その場合には、斜面と平行方向については側面に受ける波力はブロック間の間隙から作用するものが主であり、平滑な斜面に孤立しておかれたときに受ける波力に比べてきわめて小さいものとみなすことができる。また平行方向の移動がある場合でも、斜面の上下でそれに隣接するブロックにより移動が阻止されるから、平行方向の波力で斜面上の個体が直接脱落することは起こり得ない。その場合は、基礎根固めおよび天端部分が引き波、寄せ波時に集中した力を受けることになるから、この部分の安定が問題となる。

したがって、斜面部にある中空四脚ブロックの安定を支配するのは斜面と直角方向の安定であり、その条件式は(7)式によって与えられる。

(7)式の右辺の摩擦抵抗力 F_N は、ブロック相互が接し合う場合に働くものであるが、接し合わない場合も当然起こり得る。その場合は $F_N=0$ とおけるから、(7)式は次式のように簡略化できる。

$$P_N - W' \cos \alpha \leq 0 \quad (7')$$

上式がこの中空四脚ブロック傾斜堤のような場合の安定条件式とみなされる。この(7)'式から得られる限界重量式は(14)式を簡略化した次式で与えられる。

$$W = \frac{r_c H^3 \cdot k_N \phi_N}{(S_c - 1)^3 \cos^3 \alpha} \quad (14')$$

ただし、上式においては前章まで用いてきた r_r 、 S_r をコンクリートに関する r_c 、 S_c に改めてある。

p_N としては5章で得た最大波圧強度をとることとすれば、 $\phi_N = 0.12 \sin 2\alpha$ である。

また、この場合の A_N は平面投影面積をとることで良いと考えるから、このブロックについては $k_N = 1.843$ である。これらの値を(14)'式に代入すると次式のようになる。

$$W = \frac{K_H r_c H^3 \sin^3 \alpha}{(S_c - 1)^3} \quad (14)''$$

ただし $K_H = 0.086$

上式が実験の対象とした中空四脚ブロックの安定限界重量を与える式となるものとする。

(14)''式から N_s 値を求めると(4)式の定義から、

$$\begin{aligned} N_{s(HS)} &= \frac{1}{K_H^{\frac{1}{3}} \sin \alpha} \\ &= \frac{2.27}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (15)$$

図-6に(22)式による N_s 値を示してあるが、これを安定実験値と比較すると急勾配の場合は実験値が大きく(安全側)表われているが緩勾配になるにつれて合致している。

このことは急勾配では F_N が妨らくことに関連していると考えられる。

9. 結 言

消波用異形ブロックの一種である中空四脚ブロックを、傾斜堤の表層に用いた場合の波に対する安定性を、実験を伴って考察したものであるが、結論は次のように要約できる。

1) 斜面に一樣に敷設した当実験のような場合は、このブロックの波に対する安定性は石もしくはその他の異形ブロックに比べてきわめてすぐれている。このことはブロック個体および形成される斜面の特質により、斜面と平行方向の波力に対する抵抗性が大であることに基因する。

2) したがって、斜面中のこのブロックの波力による脱落・崩壊は斜面と直角方向の波力、すなわち揚圧力によって個体が浮き上げられることにより不安定な状態になることによって惹き起こされるものである。

3) この傾斜堤について補助的に行なった静水面付近を対象とした波力実験によれば、斜面上の個体に作用する波力は、波の進行につれて大きさ、向きとも時間的にかなり複雑に変動する。最大波圧強度は(5)式および表-2に示すように波高 H に比例し、波力の種類および斜面勾配によって定まる。

4) 斜面上の波力に対する個体の安定条件は、斜面と平行、直角の2方向にわけて考えることができ、それぞれ次式のようになる。

$$|P_P - W' \sin \alpha| \leq F_P = \mu_P (W' \cos \alpha - P_N^*)$$

$$P_N - W' \cos \alpha \leq F_N = \mu_N |P_P^* - W' \cos \alpha|$$

上記の2つの安定条件のいずれが支配的であるかについては、それぞれの個体の種類ならびにそれが形成する斜面の特質によって決まる。

5) この場合の中空四脚ブロック斜面については、斜面と直角方向の安定条件が支配的であるから、上記の条件式に基づき下の限界安定重量の算定式を導いた。

$$W = \frac{K_H r_c H^3 \sin^3 \alpha}{(S_c - 1)^3}$$

ただし $K_H = 0.086$

上式は安定実験の結果と良い一致を示している。

以上、中空四脚ブロックの波に対する安定性を実験結果に基づいて考察した。

ここでは比較的単純な1層積み of 斜面を対象としたもの

であるが、通常このブロックは、2層積みとして用いることとされている⁶⁾。その際の安定は予備実験の結果では、この1層積みの場合よりさらにすぐれていることが認められた。

また、積み方としては今回のような傾斜積みの他に水平積みといわれる方法もある。したがって、実際の構造物へのこのブロックの適用に関しては、種々の構造断面を検討したうえで、設置目的にかなう最も適切な構造をとることが望ましい。

本報文においてはそうした実際的な問題を検討するまでに至っていないものであるが、この中空四脚ブロックで代表される異形ブロックの安定性に関する一般的な特質を理解するのに意義があると考えられる。

防波構造物に用いられる異形ブロック工法は、その歴史が新しいことから、その特質が十分に解明されておらず今後の研究にまつところが大きい¹²⁾、実地施工例の調査を含めて研究されることも必要と考える。

本研究は昭和34年度より当研究室が行ってきた消波用異形ブロックに関する一連の研究の一部として、昭和36年度以降に行なったものである。

終わりに御指導を賜った北海道大学工学部 岸 力教授ならびに当土木試験所古谷浩三所長、山岡 勲元土工研究室長(現石狩川治水事務所金山ダム建設事務所長)、有益な御助言をいただいた大阪市立大学の高田 彰氏、実験に協力された港湾研究室の各位に深く感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

1) Dannel, P.: Tetrapods, Proceedings 4th Conference

- on Coastal Eng., pp. 390-398 (1952).
- 2) 細井正延・三井 宏: テトラポッドの安定限界, 第6回海岸工学講演集, pp. 124-129, 昭34.
 - 3) 永井荘七郎: 消波用中空ブロックに関する研究, 第6回海岸工学講演集, pp. 130-144, 昭34.
 - 4) 古谷浩三・鴻上雄三・近藤俊郎: テトラポッド防波堤に関する実験的研究, 第8回海岸工学講演集, pp. 91-96, 昭36.
 - 5) 永井荘七郎・玉井佐一・上田伸三・高田 彰: 新しい消波用異形ブロックに関する研究, 第8回海岸工学講演集, pp. 71-77, 昭36.
 - 6) 永井荘七郎・久保弘一・玉井佐一・高田 彰: 防波堤および海岸堤防前面におかれた消波ブロックの効果について, 第8回海岸工学講演集, pp. 78-85, 昭36.
 - 7) 永井荘七郎: Stable Concrete Blocks on Rubble-Mound Breakwater, Proc. ASCE, Vol. 78, No. WW 3, pp. 85-115 (1962).
 - 8) Hudson, R. Y.: Laboratory Investigation of Rubble Mound Breakwater, Proc. ASCE., Vol. 85, No. WW 3, pp. 93-121 (1959).
 - 9) Jose Joaquim Reis de Carvalho e Daniel Vera-Cruz: On the Stability of Rubble-Mound Breakwaters, Proceedings 7th Conference on Coastal Engrg., pp. 633-658 (1961).
 - 10) Sigurdsson, G.: Wave Force to Breakwater Capstones, Proc. ASCE, No. WW 3, pp. 27-60 (1962).
 - 11) Hedar, P. A.: Design of Rock-Fill Breakwater, Proc. I.A.H.R., pp. 241-260 (1953).
 - 12) 土木学会文献調査委員会: 消波用異形ブロック, 土木学会誌, 第49巻第4号, pp. 77-83, 昭39.