

緩傾斜堤被覆ブロックの安定限界

Stable Limits of Concrete Armor Blocks on a Gentle Slope Seawall

中野 晋*・都 浩輔**・三井 宏*

Susumu Nakano, Kohsuke Miyako, Hiroshi Mitsui

Stability of concrete blocks 'CRABLOCK' for a gentle slope seawall were investigated experimentally in an irregular wave tank. The lift force acting on a block was measured with pressure gauges and the relationships between a damage of blocks and the lift force were studied. When the surf-similarity parameter is close to 1, the lift force becomes large and the critical wave height becomes small. The limits curves for the stability of the block were obtained in the case of both regular waves and irregular waves.

Keywords : CRABLOCK, gentle slope seawall, lift force, surf-similarity parameter

1. 緒言

近年、わが国の海岸では親水性や景観の面からよりよい環境を創出することができる海岸保全施設の1つとしてブロック被覆緩傾斜堤が採用され次々と施工されている。そのため、多くの緩傾斜堤用コンクリートブロックが開発されている。ブロックの所要重量はブロックに応じた K_b 値を用いたハドソン式に基づいて設計されている。ブロックや捨石被覆緩傾斜堤についてのこれまでの実験で砕波状態を表す surf-similarity parameter ξ が被覆材の安定に関連することがわかっている。これに対しハドソン式では砕波条件に関係する周期や波長の影響が入らないため、十分安定性を満たす小さめの K_b 値を設定して所要重量を設計することとなり、波浪条件によっては過大な所要重量を見積もることとなる。

本研究では緩傾斜堤用ブロックの1つであるクラブロック（日本テトラポッド社製）を対象として波力と安定限界について測定し、ブロックの安定限界とこれに及ぼす surf-similarity parameterの影響について調べた。

2. 実験装置と方法

(1) 実験装置

実験は長さ 30m、幅 0.8m の2次元不規則波造波水槽を用いた。この水槽の造波装置は油圧サーボ式ピストン型で無反射制御は行っていない。図-1に示すように勾配 1/20 の一様勾配海岸模型を合板で作成し、その上に表のり勾配 1/5のブロック被覆緩傾斜堤を設置した。中詰め砂の流出を防ぐために中詰め砂と裏込め石（粒径 5～10mm の碎石、厚さ1.5cm）の間に防虫ネットを敷いてから、図-2に示すコンクリートブロック（2 tモデルの1/30模型、厚さ 1.5cm、比重 2.25、重量 約82gf）で被覆して緩傾斜堤とした。緩傾斜堤の堤脚水深は0.32m、一様水深部では 60cm である。なお、実際に施工されている緩傾斜堤の堤脚水深は -3m～+4mの範囲で施工されているが、これに合わせた実験条件を設定するとより先洗掘など局所洗掘の影響を受け、ブロック自体の安定性は測定できないため、実際の施工状況とは異なるような堤脚水深を用いた。

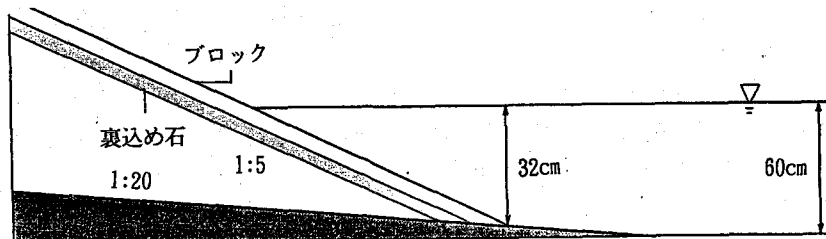


図-1 模型海岸の概略図

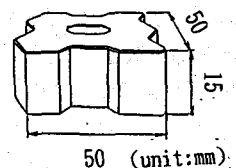


図-2 使用ブロック

*正会員 徳島大学工学部建設工学科（〒770 徳島市南常三島町2-1）

**正会員 （株）日野自動車工業

(2) 実験方法

a. ブロックの安定実験

油圧サーボ式ピストン型の造波装置により、周期 $T = 1.0s \sim 1.9s$ の規則波、有義波周期 $T_{1/3} = 1.3 \sim 1.9s$ の不規則波 (Bretschneider-Mitsuyasu型) を 1000 波あるいは有義波周期の 1000 倍の時間作用させることによりブロックの安定性を調べた。波作用終了時にブロック 1 個以上が離脱あるいはブロック厚さの $1/2$ 以上浮上したものがあれば被災と判定した。また一部のケースで 5000 波を作用させてブロックの安定を調べたところ、1000 波で層厚の $1/2$ 以上浮上した場合にはすべて離脱しており、このことから $1/2$ 以上の浮上も被災と判定した。なお、周期 $1.9s$ 、作用波数 1000 波は現地換算で周期 $10.4s$ 、作用時間 2.9 時間 (1/30 模型) に相当する。

波の測定は造波板から $14.3m$ の一様水深部で、約 $50cm$ 離れた 2 本の容量式波高計を用いて行った。実験は多重反射系の中で行われるため、入射波高は合田ら¹⁾のクロススペクトル法を用いた入射分離推定法により、入射波スペクトル $E_I(f)$ を求め、次のように波高に換算した。

$$\text{規則波} \quad H_I = 2\sqrt{2 \int_{f_{min}}^{f_{max}} E_I(f) df} \quad (1)$$

$$\text{不規則波} \quad H_{I1/3} = 4.004\sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E_I(f) df} \quad (2)$$

b. ブロックに作用する波力測定

クラブロックは図-2に示したように突起部がなく表面が平坦になるように施工されるため、ブロックの安定性には斜面に直角方向に働く波力が重要である。そこで図-3のようにブロックの上下に水圧計 (三計エンジニアリング, P310-01) を張り付け、ブロックに作用する波力を測定すると同時に直上の水位変動を測定した。この際、被災すると思われる場所のブロックはあらかじめ幅 $30cm$ 程度にわたり接着材で固定して移動しなくなったブロックに置き換えて測定した。なお、設置水深は $12.3cm$ の一カ所に限定したが、これは安定実験での被災箇所がこの位置に集中していたからである。ブロックの下側の波圧変動 P_L から上側の波圧変動 P_U を引いて揚圧力変動 L を求めた。なお以下で示す波圧の表示はすべて水頭換算された値を用いる。

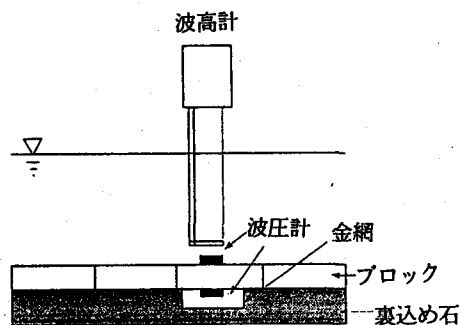


図-3 波圧計の配置状況

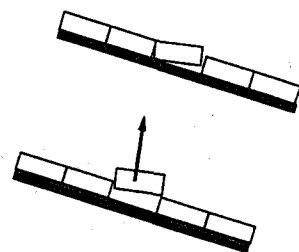


図-4 ブロックの被災状況

3. 実験結果と考察

(1) ブロックの被災の状況

実験時の surf-similarity parameter ξ

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H_0' / L_0} \quad (3)$$

$\tan \alpha$: 斜面勾配, H_0' : 換算沖波波高, L_0 : 沖波波長

は $0.7 \sim 2.1$ であり、すべて斜面上で砕ける巻き波型である。先にも述べたが、被災箇所は一定しており、突込点かその少し沖側であった。波の水塊が斜面に衝突した直後か、同時に図-4のように斜面に直角に浮き上がり引き波にさらわれて沖に流出した。つまりブロックは斜面に沿って破壊するのではなく、揚圧力の作用で浮き上がり、その後の波の作用で移動するようであった。したがってブロックの安定限界には砕波が衝突する際の揚圧力が重要であることがわかる。

(2) 揚圧力の検討

図-5～8はブロックの上側と下側に働く波力の時間波形を示したもので、各図の上から直上の水面波形、ブロックの上側波圧 P_U 、下側波圧 P_L 、次式で示す無次元揚圧力を示す。

$$L_* = \frac{L}{(\gamma_r - \gamma_w) d} \quad (4)$$

ここで、 γ_r 、 γ_w はブロックと流体の単位体積重量、 d はブロック厚さである。この式の分母はブロック単位表面積当たりの水中重量に相当する。

また P_U の波形には直上の波形から線形フィルター法²⁾を用いて海底面に作用する波圧を計算した結果も併示した。この計算では水位変動から海底における波圧変動への伝達関数 $A(\sigma)$ は微小振幅波理論による

$$A(\sigma) = \frac{\gamma_w}{\cosh kh} \quad (5)$$

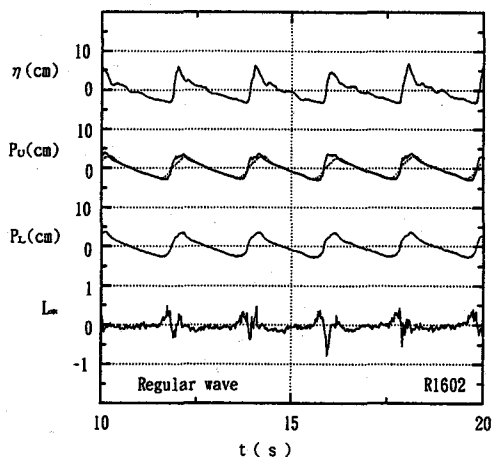


図-5 波力の時間波形（安定）

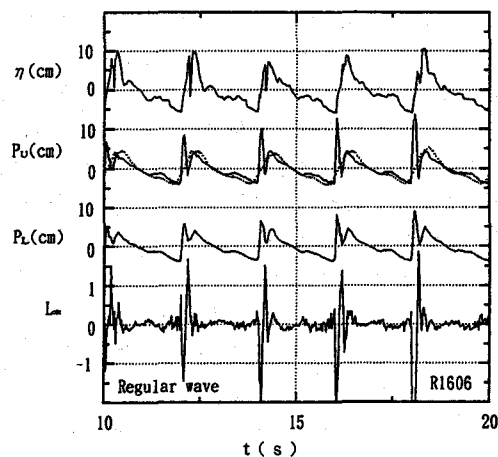


図-6 波力の時間波形（被災）

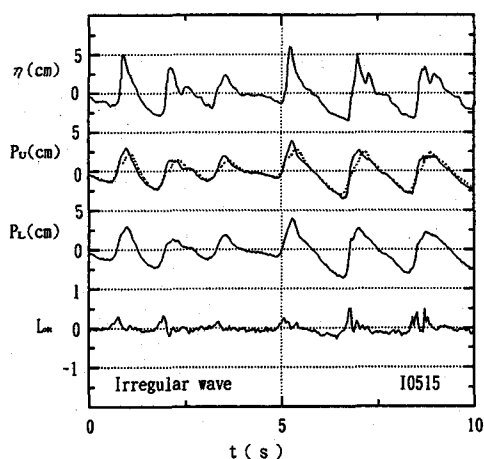


図-7 波力の時間波形（安定）

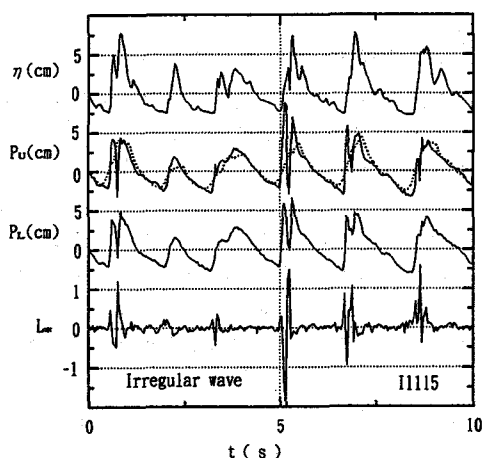


図-8 波力の時間波形（被災）

を用いた。ただし σ は角周波数で、計算に用いたサンプリング間隔は0.025s、フーリエ係数の個数 $N=100$ とした。

図-5と6は周期1.6sの規則波実験の結果で図-5は被災なしのケース、図-6は被災したケースである。両者について水面波形と上下の波圧波形の位相がほぼ一致していることがわかる。図-6の上側の波圧波形では波が斜面に衝突したための碎波圧とこれに続く波圧の急減が測定されている。下側の波圧波形も上側とほぼ同様な変動を示すが、上側に比べ波の突っ込み時と波圧の急減時の両方で変動が小さくなっており、その結果、両者の差である揚圧力には大きな変化が生じている。特に碎波の衝突した直後に衝撃的な揚圧力が働いており、これによりブロックが浮き上がることになると思われる。 L_* は単位表面積に作用する揚圧力とブロックの重力の比であり、これが1以上になる時間が長いほど被災の可能性が高くなると考えられる。図-7および図-8は不規則波（ $T_{1/3}=1.5s$ ）の場合で図-7が安定の場合、図-8が被災した場合である。不規則波の場合も規則波の場合とほぼ同様であり、巻き波型碎波が斜面に衝突した直後に $L_* > 1$ の大きな揚圧力が働き、不安定な状態になることがわかる。安定な場合には L_* は1以下と小さくなっている。線形フィルター法による波圧推定値は低周波部分に関してはある程度再現されているが、衝撃的な波圧の再現は無理のようである。これらの図からブロックの安

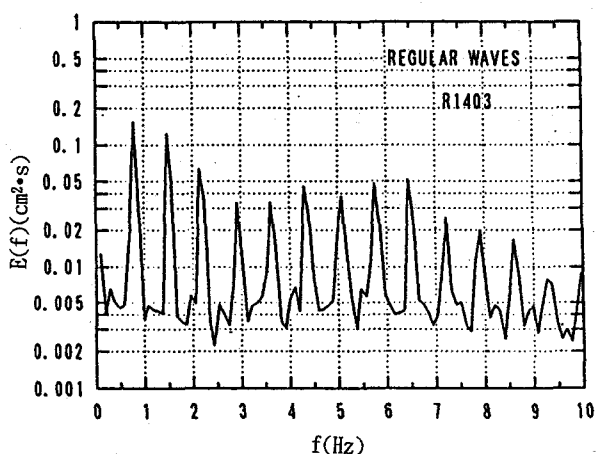


図-9 揚圧力のエネルギースペクトル

定には揚圧力 L が最も重要であることが明らかである。そこで各ケースの波の揚圧力の代表量について検討した。

図-9は揚圧力変動のエネルギースペクトルの一例である。揚圧力エネルギーはかなり高周波数領域でもエネルギーレベルが高く、10倍周波数成分でも基本周波数成分の $1/10$ 程度しか減衰が見られない。これは波圧計を取り付けているブロックの振動によるノイズや P_L から P_U を差し引いて求めたことにより、水位変動などに比べると2次オーダー以下の変動成分のみとなっていることによる。その結果、波形には小さなノイズが乗じて正確な最大揚圧力 L_{max} を求めることが難しい。波力には揚圧力強度 ($\propto \sqrt{E_L(f)} df$) と継続時間 ($\propto f^{-1}$) の積が重要であるため、同一エネルギーレベルでも周波数が10倍大きい場合にはブロックに作用する力積は約 $1/10$ になるものと考えられる。そこで基本周波数の10倍を Cut-off 周波数としたローパスの数値フィルターを通した波形をもとに最大揚圧力 L_{max} 、揚圧力強度 $L_R (= \sqrt{L'^2})$ 、揚圧力変動の r.m.s 値) を求めて代表量とした。

図-10は規則波実験の L_R と P_{UR} の比を surf-similarity parameter ξ に対し、プロットしたものである。この比は $\xi = 1.5$ 以下で急に大きくなっており、斜面上に作用する砕波圧の特性が変化することがわかる。樫木ら³⁾は $\xi = 2 \sim 3$ で打ち上げ波と引き波とが共振状態となり、水平流速変動が特に大きくなることを報告しているが、これとほぼ対応する状況になっている。この共振状態では斜面部を波が引くのに必要な時間と波の周期が一致したため、斜面上の水位が最も低くなった時に砕波が斜面に衝突する。その結果、大きな揚圧力が働いたため、傾斜構造物の安定性に重大な影響が及ぼされる。

図-11と図-12に揚圧力(水頭値)と砕波波高 H_b の比の ξ に対する変化を示す。なお、砕波波高は Le Mehaute と Koh⁴⁾ の次式より求めたものである。

$$\frac{H_b}{H_0'} = 0.76 (\tan \alpha)^{1/7} \left(\frac{H_0'}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (6)$$

L_{max} について調べた図-11では ξ が 1.5 より小さくなるとこの比は急増し、またばらつきも大きくなる。 L_R の場合も L_{max} と同様 $\xi = 1$ 付近で大きくなるが、 L_{max} よりばらつきが少ない。そこで L_R と H_b の関係を図中に示した折れ線で近似して表すことにする。その際、測定値がほとんどない ξ が 1 以下の範囲は共振現象が生じない範囲と考えて減少するようにした。

$$\begin{aligned} \text{規則波} \quad & \xi < 0.5 \quad L_R/H_b = 0.015 \\ & 0.5 < \xi < 1.0 \quad L_R/H_b = 0.06\xi - 0.015 \\ & 1.0 < \xi < 1.5 \quad L_R/H_b = -0.06\xi + 0.105 \\ & 1.5 < \xi \quad L_R/H_b = 0.015 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{不規則波} \quad & \xi < 0.5 \quad L_R/H_b = 0.013 \\ & 0.5 < \xi < 1.0 \quad L_R/H_b = 0.018\xi + 0.004 \\ & 1.0 < \xi < 1.5 \quad L_R/H_b = -0.018\xi + 0.040 \\ & 1.5 < \xi \quad L_R/H_b = 0.022 \end{aligned} \quad (8)$$

(3) ブロックの安定限界

図-13~16に L_{max} あるいは L_R を $(\gamma_s - \gamma_w)d$ で無次元化した L_{max} あるいは L_R と surf-similarity parameter ξ の関係を被災状況ごとに区別して示す。無次元揚圧力が大きいにも関わらず、被災しない2, 3のケースも含まれるが、概ね次の式で安定限界が表される。

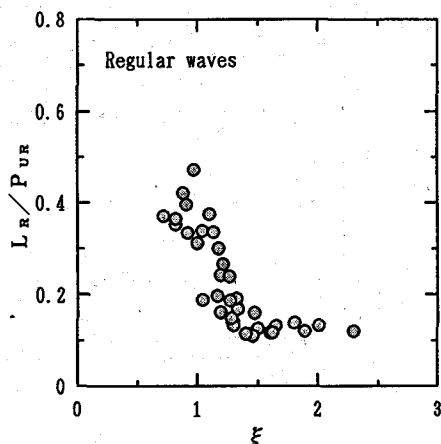


図-10 揚圧力と上側波圧の比

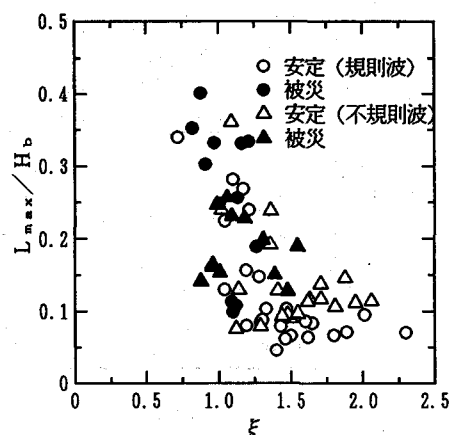


図-11 最大揚圧力と砕波波高の関係

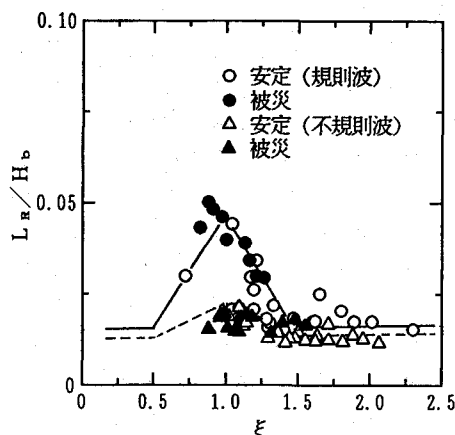


図-12 揚圧力強度と砕波波高

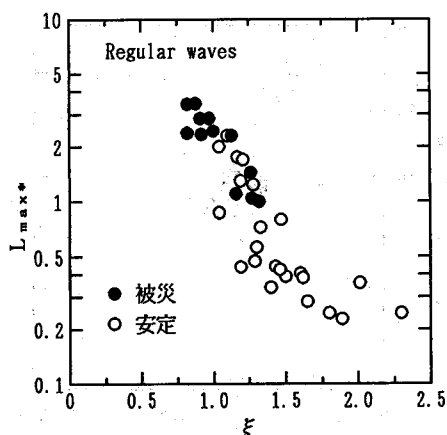


図-13 L_{max*} と ξ の関係(規則波)

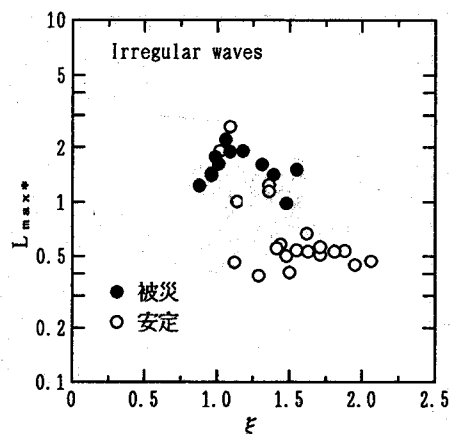


図-14 L_{max*} と ξ の関係(不規則波)

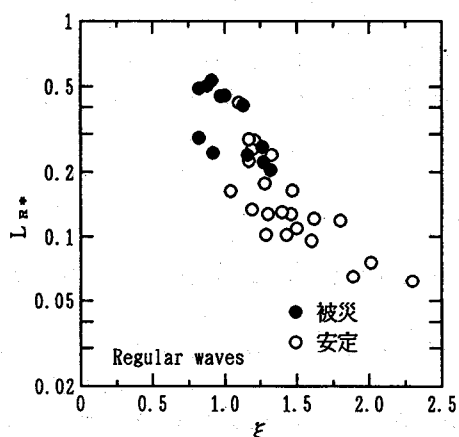


図-15 L_{R*} と ξ の関係(規則波)

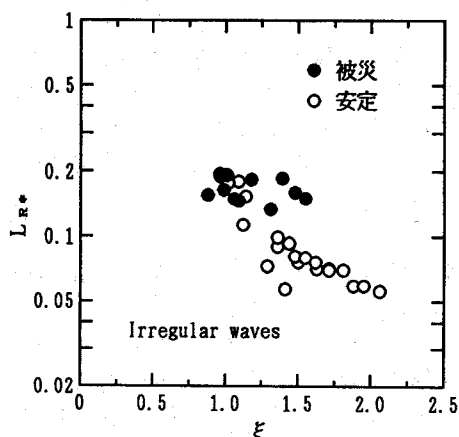


図-16 L_{R*} と ξ の関係(不規則波)

規則波 $L_{max*}=1.0$, $L_{R*}=0.20$ (9)

不規則波 $L_{max*}=1.0$, $L_{R*}=0.13$ (10)

特に L_{max*} でみると規則波, 不規則波で $L_{max*}=1.0$ と一致している. 自重による抵抗力以上の最大揚圧力が作用すると被災することから, クラブブロックではブロックの直角方向の噛み合わせによる摩擦抵抗力はほとんど期待できない.

図-17は式(6)と式(7)~(10)の実験式を用いて評価した安定限界波高 $H_0'/(S_r-1)d$ と ξ の関係について実験結果と比較したものである. ξ が1.5に近い範囲で安定限界を与える曲線は安全側の値を示しており, 十分な結果とは言えない. また図-18, 19は著者ら⁵⁾が本実験と同じ水槽で堤脚水深45cm, 斜面勾配4, 5, 6, 7割でクラブブロックの安定実験を行った結果と比較したものである. 実験結果では $\xi=1.25$ 付近で限界波高が小さいのに対し, 波力から評価した結果は $\xi=1$ で最小となり異なっているが, 定性的には良く表現できていると考えられる.

4. 結言

緩傾斜堤被覆ブロックの一つであるクラブブロックを用いて, ブロックの安定限界について実験的に検討した. 本研究では特にブロックに作用する揚圧力を測定し, ブロックの被災が自重による抵抗力を越える揚圧力が働い

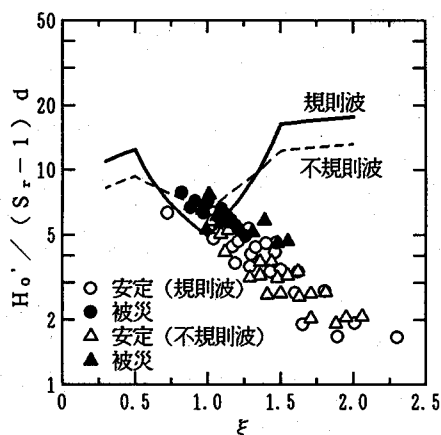


図-17 安定限界波高と ξ の関係
(堤脚水深=32cm, $\tan \alpha = 1/5$)

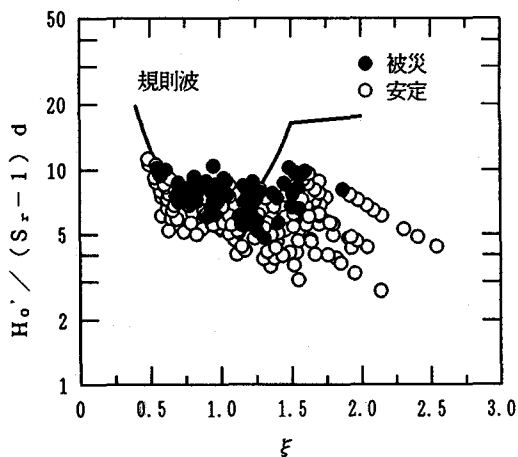


図-18 安定限界波高と ξ の関係(規則波)⁵⁾

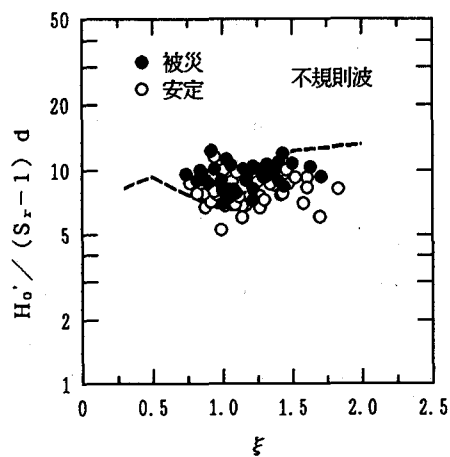


図-19 安定限界波高と ξ の関係(不規則波)⁵⁾

(堤脚水深0.45m, $\tan \alpha = 1/4, 1/5, 1/6, 1/7$)

た時に生じることを確認した。揚圧力の ξ に対する変化特性を調べ、揚圧力に対して得られた実験式をもとに安定限界波高に評価式を求め、 $\xi = 1$ 付近の共振現象が生じる碎波条件では安定限界波高が小さくなることは明らかとなったが、定量的に正確な推定を与えるには至らなかった。

本研究は日本テトラポッド株式会社の研究助成のもとに実施された。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港研資料，No. 248, pp. 1-28, 1976.
- 2) 岩垣雄一・酒井哲郎・浅野敏之・間瀬 肇・小関仁彦：不規則波の重複波圧に関する実験的研究，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 386-390, 1979.
- 3) 樫木 亨・岩田好一郎・小林 誠：防波堤斜面における共振現象の発生限界と発生確率，第28回海岸工学講演会論文集，PP. 352-356., 1981.
- 4) たとえば，本間 仁監修：海岸環境工学，75p.，東京大学出版会，1985.
- 5) 中野 晋・三島洋司・都 浩輔・三井 宏：緩傾斜被覆ブロックの水理特性，徳島大学工学研究報告，pp. 31-38., 1992.