

テトラポッドの安定限界

建設省土木研究所 細 井 正 延
同 上 三 井 宏

1. 緒 言

港湾構造物や海岸構造物の根固め、基礎、本体に使用される異型ブロックの一種であるテトラポッドは、施工の容易さや水理学的にすぐれた機能を有することなどにより、近年、港湾をはじめとして海岸、河川関係において脚光を浴びてきている。筆者らは、与えられた波力に対していかほどの重量を持つテトラポッドを使用すれば、その構造物は安定を保つかという問題について昨年より研究を続けている。昨年は水平底上に 1:1.5 の法勾配をもつテトラポッド堤を置いた場合の安定限界に関する模型実験結果の一部を発表した。このようなテトラポッド構造物の前面が一定水深である場合の実験は終了し、現在は、構造物前面が比較的急な浜勾配を持つ場合について実験を行っている。

ここでは、昨年その一部を発表した前面水深一定の場合の安定限界に関する実験結果のすべてと、現在行っている前面水深が比較的急勾配な場合の実験結果の一部を報告する。

2. 前面水深一定の場合の実験結果

実験装置および実験方法は昨年発表したとおりである。実験に使用したテトラポッドの模型諸元は 図-1 および 表-1 に示す。水槽における変化要素の範囲はそれぞれ、波高 5~68 cm、水深 70~185 cm、周期 1.29~4.64 sec であった。

Hudson などの粗石積み堤の安定限界に関する従来の研究によれば、粗石が波力に対して安定を保つ重量は前

図-1 テトラポッドの形状

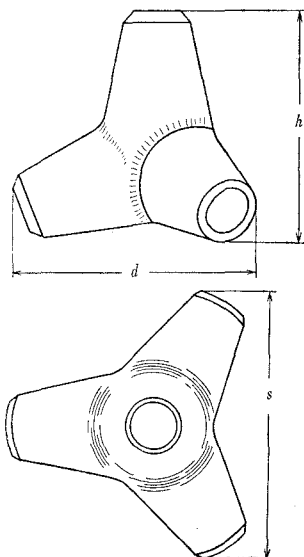


図-2 安定限界

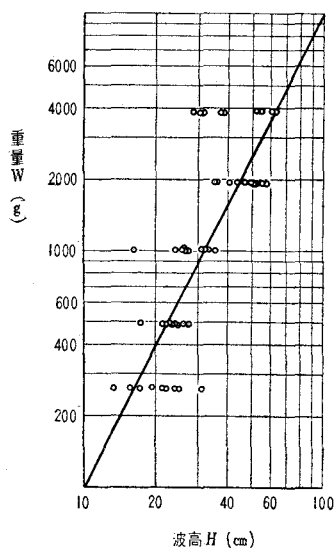


表-1

No.	1	2	3	4	5
重量 (kg)	0.250	0.500	1.000	2.000	4.000
実 際 重 量	0.264	0.496	1.026	1.940	3.858
体積 $V(\text{cm}^3)$	113.64	227.27	454.54	909.09	1818.18
h (cm)	7.42	9.34	11.77	14.83	18.68
s (cm)	8.88	11.18	14.09	17.76	22.37
d (cm)	8.09	10.18	12.83	16.17	20.37

面波高の3乗に比例するといわれている。筆者らのテトラポッドの実験において、全体的に振動し少しずつ脱落してゆく状態につれて、両対数軸の縦軸にテトラポッドの重量をとり横軸に前面波高をとってプロットすれば 図-2 のようになる。図中の実線は 1:3 の勾配をもつもので、これからみると点はそうとう散らばっているが、重量は波高の3乗に比例するように思える。したがって重量を波高の3乗で割ればその値は一定となるはずである。図-3 は両対数紙の縦軸にこの値をとってプロットしたものであるが、その結果をみると、この値は一定値とはならず、実線で示すような、ある勾配を持った傾向を示すようである。

図-3 の両軸に使用した無次元表示は次に示すような手段で得たものである。すなわち、微小振巾波理論において、時間の基準を0にとれば水粒子の水平方向速度成分は次式のとおりである。

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(z+h)}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin \frac{2\pi x}{L} \dots \dots (1)$$

単位巾当りの岸方向への水粒子のもつ運動量 M を求めると次のようになる。

$$M = \int_{-h}^0 \int_0^{L/2} \rho u dz dx = \frac{\rho HL}{T \sinh \frac{2\pi h}{L}} \int_{-h}^0 \cosh \frac{2\pi}{L}(z+h) dz = \frac{\rho HL^2}{2\pi T} \dots \dots (2)$$

(2) 式で求めたのは水深 h 、半波長 $L/2$ 、単位巾にふくまれるすべての水粒子のもつ運動量であるから、いまこの運動量 M が海中障害物により T/k_1 時間において0になるものと仮定すれば、そのとき障害物に作用する力 F は次式のようになる。

$$F = \frac{M}{T/k_1} = k_1 \frac{\rho HL^2}{T^2} = k_1 \frac{\rho g HL^2}{L_0} \dots \dots (3)$$

(3) 式においてあらわれる常数はすべて k_1 にふくませた。以下においても常数はすべて係数 k 中にふくませ、そのつど k の記号を書きかえないことにする。次に、断面積 A を持つ物体（ここでは単位巾について考えているから A は高さの次元で表わされる）に流速 v で水が作用する場合、この物体は $\rho A v^2$ に比例する力 P を受けることになる。このような力は (3) 式の F に比例すると考えれば

$$F = k_2 \rho v^2 A = k_2 \rho v^2 \left(\frac{W}{\sigma g} \right)^{1/3}$$

$$\therefore k_2 \rho v^2 = \frac{F}{\left(\frac{W}{\sigma g} \right)^{1/3}} \dots \dots (4)$$

となる。

図-4 のように、斜面上に置かれた物体がちょうど移動を開始しようとするときは、物体を斜面に沿って下に引き落そうとする力と、それに抵抗する力とがつり合っているものと考えられる。抵抗する力 R は転がり摩擦

図-3 前面一定水深の場合の安定限界

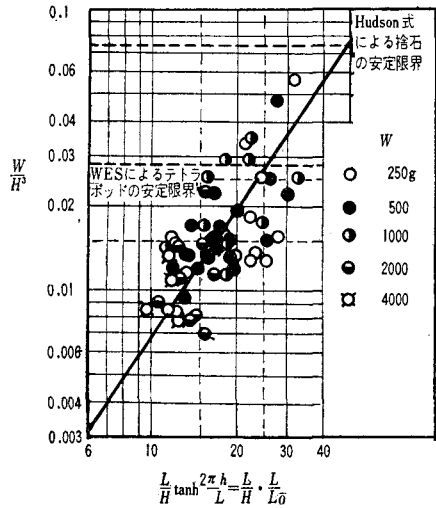
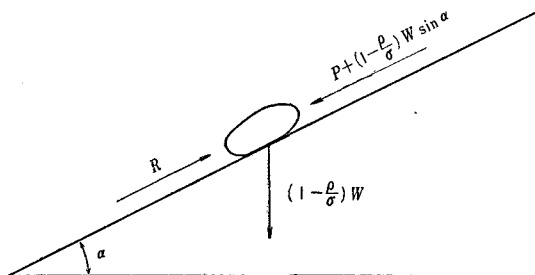


図-4 斜面上の物体に作用する力



および滑り摩擦をふくめた摩擦力と考えられるから、次式で与えることができる。

$$R = W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma} \right) \mu \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (5)$$

斜面上の物体を引き落そうとする力は、水の流れにより生ずる力 P と物体の重力成分 $(1 - \rho/\sigma) W \sin \alpha$ との合計であるから、全体の力のつり合い関係を求めると次式のようになる。

$$R = P + W \left(1 - \frac{\rho}{\sigma} \right) \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (6)$$

P は断面積を A を持つ物体に (ここに A は単位巾について考えるのではないから、面積の次元を持つ) 流速 v の水がぶつかって生ずる力であるから (3), (4) 式を用いて

$$\begin{aligned} P &= k_3 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A = k_3 \cdot \frac{F}{\left(\frac{W}{\sigma g} \right)^{1/3}} \cdot \left(\frac{W}{\sigma g} \right)^{2/3} \\ &= k_3 \left(\frac{W}{\sigma g} \right)^{1/3} \cdot \rho g H L \cdot \frac{L}{L_0} \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

(5), (7) 式の関係を (6) 式に代入して両辺を整理すれば次の (8) 式が得られる。

$$\left(\frac{W}{r_r H^3} \right)^2 = \frac{K r_w^3}{(r_r - r_w)^3 (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \cdot \left(\frac{L}{H} \cdot \frac{L}{L_0} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (8)$$

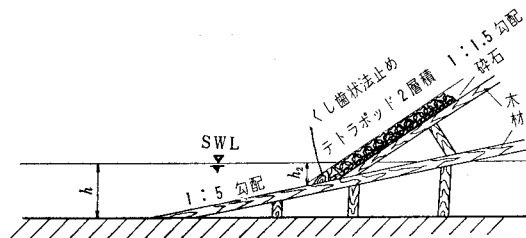
(8) 式において、 $r_w^3 / (r_r - r_w)^3 (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3$ の項は 1:1.5 の斜面上にテトラポッドを置いた場合のみを対象にすれば常数と考えてもさしつかえない。したがって、両辺のカッコ内の項を両対数紙の座標軸にとれば図—3 のようになるのであって、実線で示した直線の勾配も 1:3/2 となっている。なお、図中には Hudson による粗石堤の安定限界および米国土路部によるテトラポッド堤の安定限界を示す破線を参考のために記入した。筆者らは、テトラポッド堤が全体的に振動し少しずつ脱落してゆく状態を安定限界にとったのであるが、上記の両者による安定限界は筆者らのそれより、やや安定な状態をとったようであるから、もし安定限界を筆者らと同一にしたものとすれば、図—3 の破線はもう少し下にくるものと思われる。

3. 前面水深が急勾配である場合

(1) 実験装置

実験に使用した水槽および造波装置は、前面水深が一定の場合に使用したものと同一である。海岸の模型は図—5 に示すように水槽の一端に勾配 1:5 の斜面を作り、その上に法勾配 1:1.5 のテトラポッド構造物を置いて

図—5 海岸の模型



た。テトラポッドの配列法は、前面水深一定の場合と同じで、2層積みとした。構造物の法先には、くし歯状に切り込みをつけた木材を取りつけて法止めの役目を持たせたのであるが、この場合、法止め木材の高さは模型テトラポッドのおおのの高さの 1/3~1 倍の範囲にあるようにした。模型テトラポッドは表—1 に示すものを使用する予定であるが、現在までにこの実験に使ったのは 500, 1000, 4000 g の 3 種類である。

(2) 実験方法

この実験における変化要素は、一定水深部の水深 h 、構造物の法先水深 h_2 、テトラポッドの重量、波高および周期の 5 種類であった。これらの変化要素をいろいろ組合わせて、前面水深一定の場合と同様な方法により、テトラポッドの重量とその不安定の程度、そのときの一定水深部における波高と水深、周期、構造物法先水深を測定した。テトラポッドの不安定の程度も同様に、実験中の視察により次の 5 種類に分類判定した。

A: まったく動かない。

B: それぞれが傾いたり沈下したりして全体的に配列が乱れる。

C: 不安定なものが振動し、不安定なものが脱落することがある。

D : 全体的に振動し、少ずつ脱落してゆく。

E : 全体が大きく振動し、大部分が脱落する。

(3) 実験結果

この実験では従来の研究のように水平底上に構造物を置くのではなく、勾配 1:5 の斜面上に構造物を置くので、進行波は碎波現象をともしない、斜面上を進行するにつれて波形を変化する。したがって、前面波高の概念がはっきりせず、また構造物の設置水深によっても波力の大きさが異なるので、実験波を微小振巾波理論により換算した深海波を用い、構造物法先水深を考慮に入れて次のように次元解析を行った。

構造物法勾配 1:1.5, 海浜勾配 1:5, 並びに構造物の形状は図-5 のとおりと限定してあるので、テトラポッドの安定性に関するおもな要素は次式に示すようなものが考えられる。ただし、水の密度および一定水深部の相対水深はほとんど影響しないものと考えて省略してある。

$$W = f(H_0, L_0, h_2, r_f) \dots \dots \dots (9)$$

上式の各要素を組み合わせる無次元の項を作ると次式のようになる。

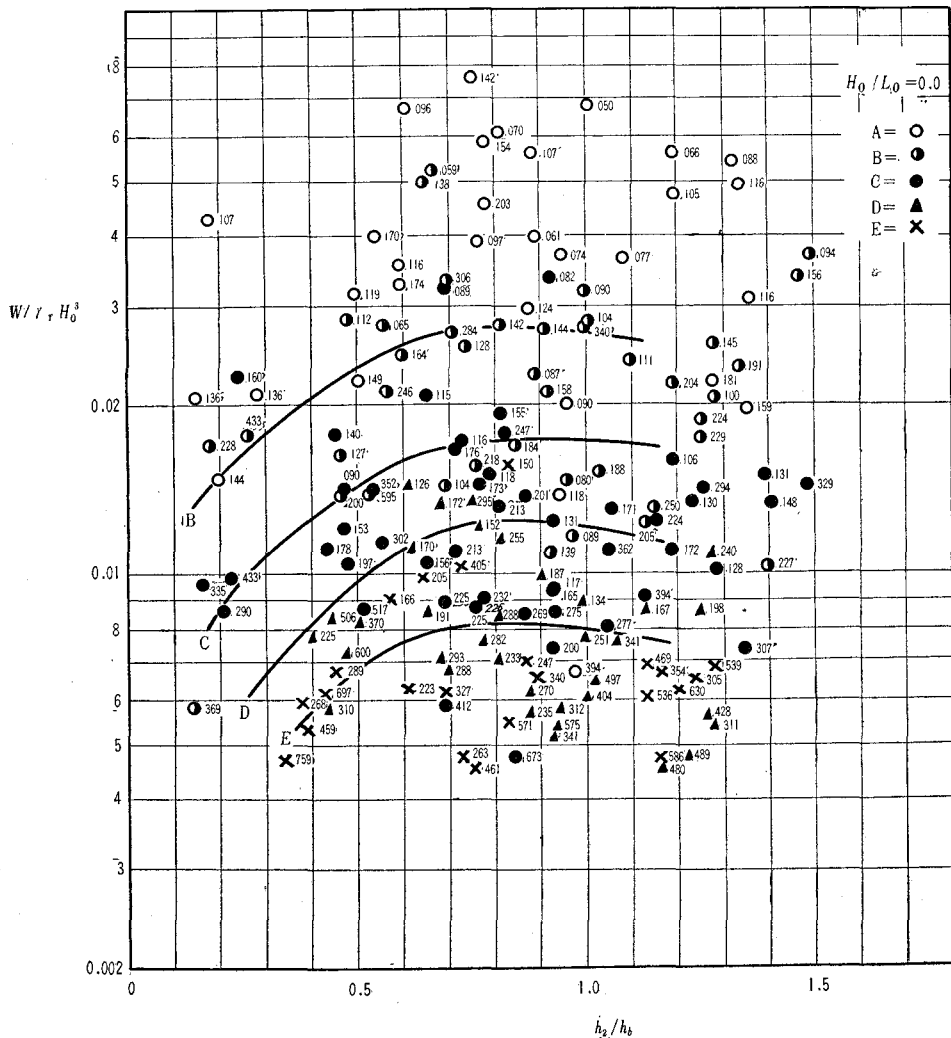
$$\frac{W}{r_f H_0^3} = f\left(\frac{H_0}{L_0}, \frac{h_2}{h_b}\right) \dots \dots \dots (10)$$

(10) 式中の h_2/h_b の項は

$$\frac{h_2}{L_0} = \frac{h_2}{h_b} \times \frac{h_b}{L_0}$$

において、 h_b/L_0 が H_0/L_0 の関数であることにより、導入したものである。

図-6 安定限界



(10) 式の無次元項にしたがって実験結果を整理すれば 図-6 のようになる。ただし、破波水深は 図-7 に示す。Iversen の破波指標を用いて計算により求めた。図-6 の実線は安定限界の各判定基準ごとに、 H_0/L_0 が 0.03 付近のものに対して記入したものである。この実験は現在進行中であり、データも十分整っていないので、よくわからないが、図-6 に示した結果だけによれば次のことがいえる。すなわち、 H_0/L_0 が大きくなるにつれ $W/\gamma_r H_0^3$ は若干小さくなる傾向にあり、Iversen による破波点より若干岸側における地点から岸の方へ行くにしたがい、 $W/\gamma_r H_0^3$ は急激に小さくなる。図-8 は前述の前面水深一定の場合の実験値を同様に深海波で表示したもので、図-6 と比較するため、 H_0/L_0 が 0.03 付近のものをプロットしてある。図-8 において、 h_2/h_0 が大きくなると $W/\gamma_r H_0^3$ の値は大体 0.01 に近づくようである。これは 図-6 の D 線に対応するものであるから、 H_0/L_0 の値が約 0.03、判定が D の場合には、Iversen による砕波点より沖側の地点においては $W/\gamma_r H_0^3$ の値はあまり変化しないようである。

図-7 砕波指標

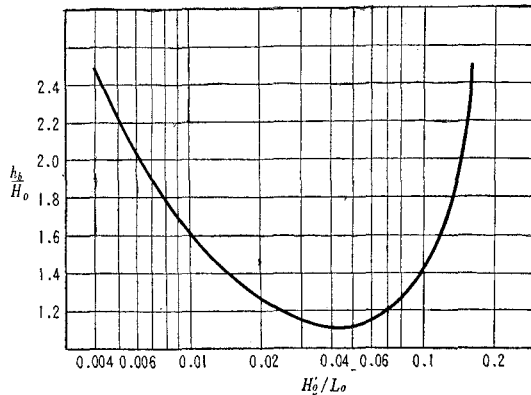
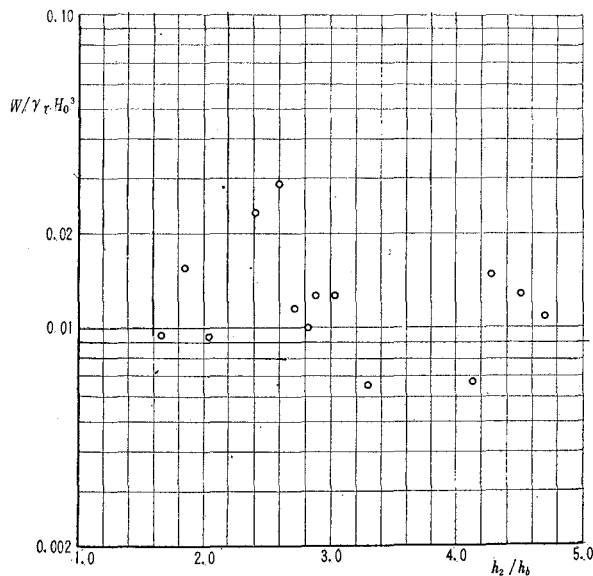


図-8 前面水深一定の場合



4. 結 言

現在までに行ってきた上述のような二つの実験と従来の研究との結果を比較して全般的にいえることは、従来の研究では粗石およびテトラポッド構造物の安定限界は前面波高のみに関係づけられていたが、筆者らの実験によれば、波の特性や構造物の設置水深も関係していることが推定される、ということである。すなわち、前述の実験範囲においては、波高を一定とすれば波長の長い波に対するほど大重量のテトラポッドが必要であり、また、砕波点より岸側に構造物を置いた場合、その設置水深は大きく影響し汀線に近づくにつれて急激に安定重量は小さくなるのである。

筆者らの実験に用いたテトラポッドの配列法は実験条件をなるべく一定にするためにとった手段で、現場では必ずしもこの方法によらないものであることを付記しておく。テトラポッドは相互のかみ合わせが良好であるという形状特性からして、乱雑に積み上げる場合に適するよう考案されたものである。

筆者らは、テトラポッドの安定限界に関する一連の実験を昨年から行ってきたが、この実験にはばく大な時間と手段を要するので、いまだに全部の結果を報告できないことを残念に思っている。しかし、今年中には実験を終了し、来年の講演会には実験結果のすべてをまとめて報告するつもりである。

記 号 表

u : 水粒子軌道における水平速度成分	L_0 : 深海波高
z : 水面を基準にして鉛直上方に測った距離	T : 周 期
x : 波の進行方向に測った距離	ρ : 水の密度
h : 水平底における水深	γ_w : 水の単位体積重量($=\rho g$)
h_a : 構造物法先水深	σ : テトラポッドの密度
h_b : 碎波水深	γ_r : テトラポッドの単位体積重量($=\sigma g$)
H : 水平底における波高	μ : テトラポッドの摩擦係数
H_0 : 深海波高	α : 構造物の法面角度
L : 水平底における波長	

千葉県長浦干拓堤防法面舗装(昭和33年施工)



日本舗道株式会社

取締役社長 川 久 保 修 吉

本 社・東京都中央区宝町 1 の 11 電話 東京(56)8956~9
 技術研究所・東京都品川区東品川 4 の 21 電話 東京(49)3820
 支 店・札幌・仙台・新潟・東京・名古屋・大阪・広島・福岡