

捨石およびテトラポッドの移動限界について

建設省土木研究所 工学博士 佐藤 清 一
 同 細 井 正 延
 同 木 村 俊 晃
 同 三 井 宏

1. 緒 言

筆者らの研究目的は、海岸構造物の根固めや構造物本体に使われる捨石およびテトラポッドが波力により移動を始める限界を求め、構造物の合理的設計に役立てようとするものである。捨石の移動限界に関して、波の特性、構造物の位置、捨石の重量および積上げたときのノリ勾配などが重要な要素として考えられる。捨石の設計に現在しばしば使われる Hudson の式は、これらの要素を割合に合理的にふくんでいるが、その適用範囲が構造物設置水深 h と波長 L との比、 $h/L=0.1\sim0.5$ に限られており、波が構造物の位置に到達するまでに、砕けない場合を対象にしているのである。砕けた後の波が構造物に衝突する場合の現象に関しては、現在のところ全く不明であると言つて、さしつかえなからう。

筆者らは、捨石構造物を砕波点より岸側に設置した場合の捨石移動限界を求めることに主眼を置き、あわせてテトラポッドの移動限界を求めて捨石の移動限界と比較してゆくため、現在一連の実験を行なっている。これらの実験結果の一部を、ここに報告するものである。

2. 実 験

(1) 捨 石

実験に使った水槽は、長さ 37 m、幅 60 cm の両面ガラス張りのもので、水槽の一端にピストン型の波起し機を据えたものである。海岸部分の模型は図-1 に示すように、1/6 勾配の浜の上に、1/2 勾配の捨石堤を置いたものである。捨石 1 コの重量 W は 150 ± 10 g であり、これらを上下 2 層に敷きつめた。

水槽水平底部における水深 h_0 は、41, 51, 58, 66 cm の 4 種類とし、それぞれの水深において、波起し機のアーム長と周期とを変化させ、特性の異なる波を起した。波起し機から発生した波が捨石堤に到達して反射し、反射波が波起し機までふたたび帰ってくるまでに実験を止めたので、捨石の移動状況を観察したのは、5~10 コの波が捨石堤に作用する間であつた。捨石堤の移動限界を判定するには、つぎの方法で行なつた。すなわち、肉眼で見て、

- 石は動かない。
- 石はほとんど動かないが、不安定な石は振動する。
- 石はほとんど動かないことは同じであるが、一部の石は振動し、不安定な石が脱落することがある。
- 全体的に石は振動を始め、不安定な石はもちろん、ところどころ石が脱落する。
- 石の振動は大きく、波の来るたびに脱落し、しだいに大きな穴ができてくる。

の 5 種類に分けて、これらに対応する波の特性と水深とを測定した。これらの分類において c) を移動限界とした。

(2) テトラポッド

実験水槽は長さ 112 m、幅 1.5 m の鉄筋コンクリート製のもので、水槽の一端にピストン型の波起し機をすえ、他端は観測用として、片側の壁面の一部をガラス張りにしたものである。海岸構造物の模型は図-2 に示すように、水槽の他端に 1/1.5 勾配の斜面を作り、その上に砕石を一層だけ敷き並べ、その上に上下二層にわたつて図-3 に示すような方法でテトラポッドを敷き並べた。

図-1 捨石堤の模型

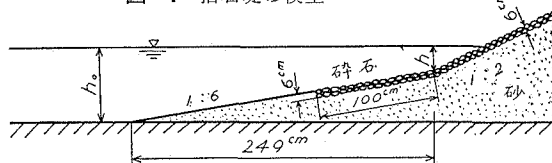


図-2 テトラポッド堤の模型

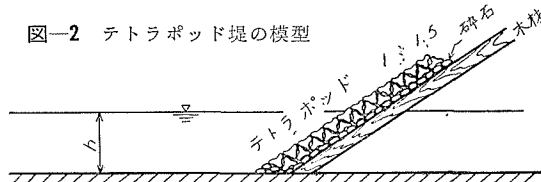
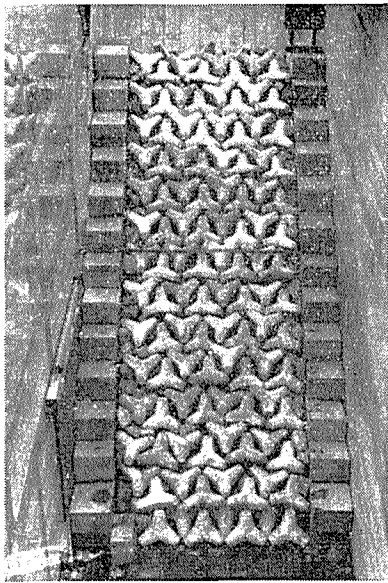


図-3 テトラポッドの敷き並べ方



現在までに実験に使用した、テトラポッドの模型1コの重量は、1.026 kg および 3.858 kg、テトラポッドの足1本の長さは中心点から測つて、それぞれ 7.69 cm および 12.21 cm の2種類で、水深 h_0 は80, 100, 120 および 150 cm の4種類であつた。実験は、波起し機で生じた波が水槽他端のテトラポッド堤に当つて反射し、ふたたび波起し機まで反射波が帰ってくるまでに波起し機を止め、水面が静まるのを待つてから、ふたたび波起し機を動かして同じ特性の波を当てたのである。このようにして、同じ特性の波を1つの実験ケースに対して 50~60 波、模型に当てたのち、テトラポッド堤の変化状況を写真に撮つた。一方、肉眼で、実験中のテトラポッドの移動状況をつぎのように判定した。

- a) まつたく動かない。
- 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、少しずつ脱落してゆく。
- e) 全体が大きく振動し、大部分が脱落する。

解析に使用したテトラポッドの移動限界は、上記の分類のうち、d)

を採用した。

捨石堤とテトラポッド堤の肉眼による判定の分類法が異なるのはつぎの理由によるものである。すなわち、テ

図-4 b), c) の状態

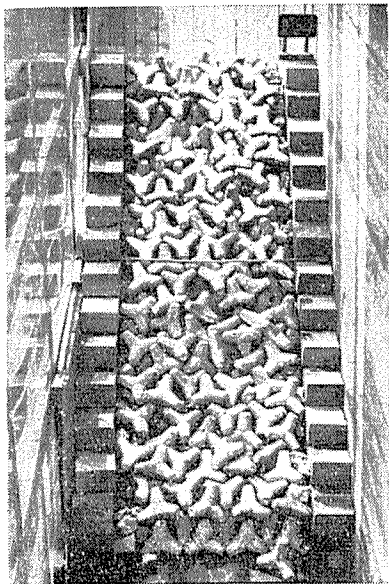
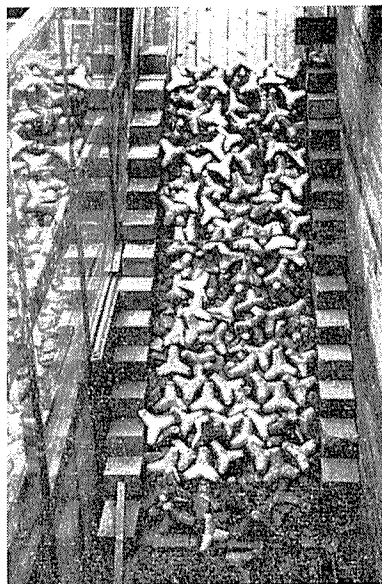


図-5 d) の状態



トラポッドは捨石よりも相互のかみ合わせがよいため、構造物の移動破壊する限界がきわめて不明瞭である。テトラポッドの場合、とくに b) のようにある程度の大きさの波により若干の移動があり、傾斜したり沈下したりして安定状態となり、それ以上波を当てても移動しないという状態が顕著に現われた。図-4 は、このような安定した状態になつたときの写真である。さらに大きな波を当てて実験を続けてゆくと、捨

石の場合とよく似た c), d), e) の状態が観察された。図-5 は d) の状態を示すものである。

3. 実験結果

現在までに行なつた実験の結果を整理すると 表-1 および 2 のようになった。

捨石の移動限界を求める Hudson の式はつぎに示すとおりである。

$$W = \frac{K' r_r r_w^3 \mu H^3}{(r_r - r_w)^3 (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)^3} \quad (1)$$

W : 捨石1コの重量, r_r : 捨石の単位体積重量, r_w : 海水の単位体積重量, α : 捨石斜面が水平線となす

角, H : 構造物前面における波高, K' : 常数, μ : 石の摩擦係数
いま, この (1) 式の両辺が無次元となるように変形すると, つぎようになる。

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

筆者らの実験では 捨石およびテトラポッドの斜面勾配をそれぞれ 1/2 および 1/1.5 とし, 勾配を限定しているので, (2) 式の右辺は捨石およびテトラポッドのそれぞれに對し常数となる。したがって波の特性や 構造物の設置水深が移動限界に どのように影響するかを調べるためには, これらの要素と (2) 式の左辺との関係を調べればよいことになる。

筆者らはつぎのような Hudson とは異なる考え方により, 沖波を使った移動限界の無次元表示法を考へてみた。すなわち, 沖波の一波形のもつ単位峯幅当りの 岸に向う運動量は $\rho H_0 L_0^2 / T$ に比例し, この運動量が 障害物などにより阻止されて 0 になるとき, 力を生じ, その力は $\rho H_0 L_0^2 / T^2$ すなわち $\rho g H_0 L_0$ に比例すると考へた。ここに, ρ は海水の密度で H_0, L_0 および T は, それぞれ沖波の波高, 波長および周期であり, 沖波の一波形がもつ岸に向う運動量は同じ一波形中にふくまれる沖に向う運動量と打ち消し合うものである。沖波のもつ, このような仮想の力に対するものとして, 単位峯幅当りの, 水平方向に 一列取つた表層の石の総重量を考へ, これらをつぎのように無次元化した。

$$\frac{\Sigma W}{B} \bigg/ r_w H_0 L_0 \quad (3)$$

ΣW : 水平方向に一列取つた表層の石の総重量。

B : ΣW のもつ水平方向の長さ。

(3) 式は運動量の考へにより得られたものであるが, エネルギー考へによつても, 移動限界の無次元表示を簡単にうることができる。すなわち, 沖波の一波形がもつ, 単位峯幅当りのエネルギーは $r_w H_0^2 L_0$ に比例するからこれと表層の石 1 コの重量 W との比を取ると, つぎのような無次元表示を行なうことができる。

表—1 捨石の移動限界

	波高 H (m)	波長 L (cm)	周期 T (sec)	移動部分 (法先より沖方 向に x (cm))
水深 $h_0 = 185$ cm	12.1	424	1.9	$\frac{1}{2}$ 勾配部
	14.3	495	2.15	"
	15.0	602	2.54	"
	1.83	590	2.50	"
	1.86	699	2.90	"
	1.92	792	3.25	"
	1.62	1098	4.42	"
	1.81	1093	4.40	"
	1.95	1125	4.52	"
	1.92	1250	5.00	"
水深 $h_0 = 66$ cm	15.0	291	1.48	$\frac{1}{2}$ 勾配部
	16.4	410	1.92	"
	17.4	507	2.30	"
	19.7	554	2.48	"
	21.3	609	2.70	"
	24.7	597	2.65	"
	21.1	930	4.04	"
	18.7	1173	5.00	"
	21.0	1137	4.85	"
水深 $h_0 = 58$ cm	13.2	284	1.52	法先部
	15.9	335	1.70	"
	16.7	422	2.16	"
	16.7	512	2.46	"
	2.30	510	2.44	"
	19.6	554	2.60	"
	20.6	597	2.77	"
	19.0	744	3.40	"
	18.0	942	4.26	"
	18.3	1021	4.60	"
水深 $h_0 = 51$ cm	12.9	257	1.44	

図-6 捨石の移動状況

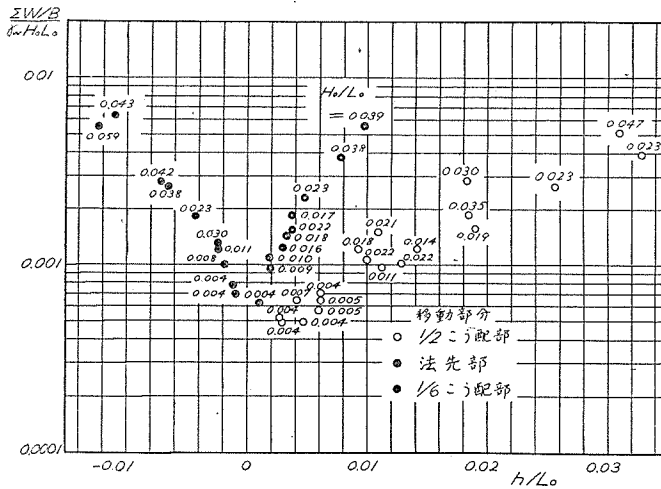
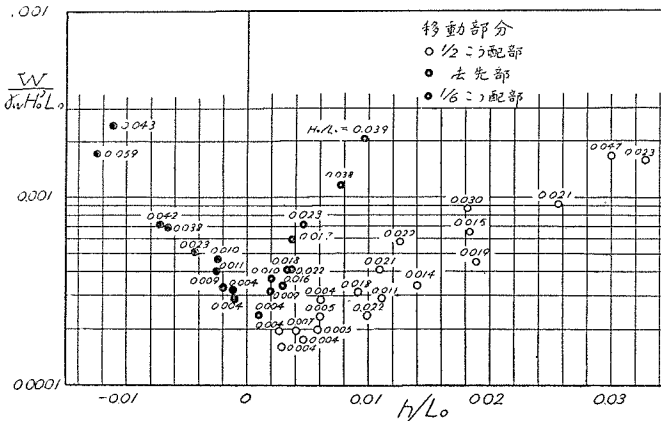


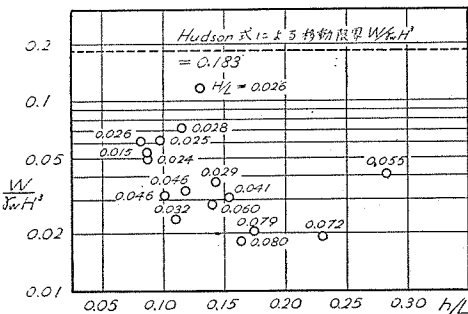
図-7 捨石の移動限界



のである。

この実験において、 $h/L_0 \approx 0 \sim 0.01$ では、沖波の波形勾配 H_0/L_0 が大きくなると、捨石の移動する部分が 1/2 勾配部からノリ先部へと移っているようである。換言すれば、ノリ先水深 h と沖波の波長 L_0 を一定にしておき、沖波の波高 H_0 をだんだん大きくしてゆくと、ある波高において 1/2 勾配部の捨石は移動を始め、それより大きいある波高においてノリ先部分が移動を始めると思われるのである。以上は実験事実の観察を述べたのではなく、図-6 および 7 にプロットした実験結果から推定したものであるが、浅水度（水深と沖波の波長との比）を一定とすれば、波形勾配の大きな波ほど沖の方で砕け、波力が強く作用する位置も変化することから、上に推定したようなことは十分ありうるものと思われる。捨石堤の移動部分を 1/2 勾配部、ノリ先部および 1/6 勾配部の 3 つ

図-8 テトラポッドの移動限界
(ハドソン式による)



に分類して実験結果を整理したのであるが、これらの移動部分の、それぞれの限界値が図上でどのような相互関係をもつかは、以上の実験結果からでは判定することができない。

図-8 は Hudson の式を変形して得られた (2) 式の左辺を縦軸にとつたもので、テトラポッドの移動限界を示す実験結果である。比較のため、図中には Hudson の式により計算した捨石の移動限界値を破線で記入しておいたが、このように捨石の場合、Hudson によれば h/L が 0.1 から 0.5 の間では $W/r_w H^3$ の値は、ほぼ一定と考えられている。しかし筆者らのテトラポッドの実験結果をこのように整理すると、波形勾配 H/L が大きいものほど $W/r_w H^3$ の値が小さくな

$$\frac{W}{r_w H_0^3 L_0} \quad (4)$$

上述のような波力による石の移動限界を示す (2), (3) または (4) 式をそれぞれ縦軸にとり、構造物の法先水深と波長との比 h/L (または h/L_0) を横軸にとり、波形勾配 H/L (または H_0/L_0) をパラメーターとして表-1 および 表-2 に示す実験結果をプロットすると、図-6, 7, 8, 9 および 10 のようになる。

捨石の移動限界を示す図-6 および 7 を見ると、ノリ先部および 1/6 勾配部は同一の波形勾配に関して比較するといずれも 1/2 勾配部よりも移動しやすいことが認められる。Hudson の観測によれば、捨石の斜面勾配が緩やかなものほど移動しにくいのであるが、それにもかかわらず上述のような現象が観察されるのは、筆者らの実験が、Hudson の使ったような単一の斜面勾配のものでなく、図-1 に示すような 1/6 および 1/2 勾配の 2 つの斜面を組合わせたものを使つたことに原因すると思われる。すなわち、1/2 勾配部に遡上した波が引くときに 1/6 勾配部およびノリ先部に与える外力は、1/6 勾配のみよりなる斜面における引き波の与える外力よりも大きいと考えられる

つているようであつて、移動限界には波の特性が関係するものと思われる。テトラポッドや捨石を移動させる波力は大きくて、衝撃的な寄せ波の波力と、掃流力的な引き波の波力とが考えられるが、実験を観察していると、波形勾配の大きい波の場合には前者の方が優勢で、波形勾配の小さい波の場合には、後者の方が優勢であることが外見的に認められた。現在テトラポッドの設計として、Hudson 式により計算した捨石重量の $1/2 \sim 1/3$ の重量を採用するケースが多いが、図-8 によれば $1/2 \sim 1/10$ の重量で済み、しかも波形勾配により、この値が限定されるように思われる。設置水深と波長との比の移動限界に対する関係の有無やその傾向は、実験データが少ないため判定できなかった。

図-9 および 10 は、それぞれ (3) 式および (4) 式を用いて 図-8 と同じ実験結果をプロットしたものであつて、いずれも波形勾配の影響は 図-8 ほどいじめるしくないようである。これらの図と捨石の場合の 図-6 および 7 は、それぞれ傾向が類似しており、(3) 式や (4) 式のような整理法を使用すれば、波形勾配がパラメーターとして影響せず、移動限界が一本の曲線で表示できるのではないかと推察される。

図-9 テトラポッド移動限界
(運動量による)

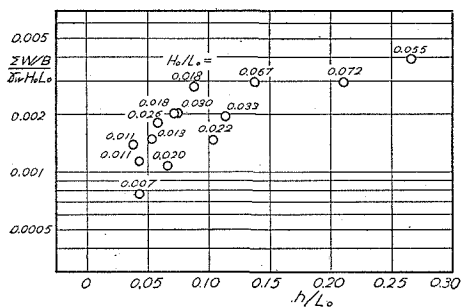
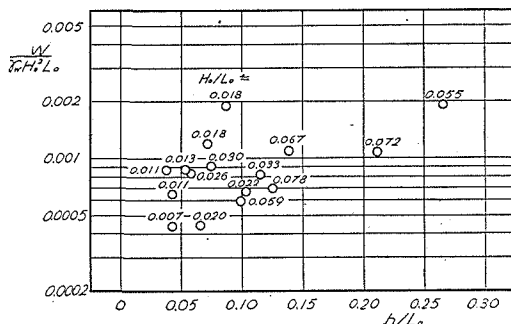


図-10 同 左
(エネルギーによる)



捨石の移動限界、とくにテトラポッドは相互のかみ合わせがよいため、その移動限界を厳密に判定することが困難であつて、実験結果は非常に散乱しており、また実験数も少ないので、これらからなんらかの関係を見出すことができなかったし、(2)、(3) および (4) 式のうち、いずれの表示法が最適であるかも見出すことができなかった。しかし、現在も進行中である捨石およびテトラポッドに関するこれらの一連の実験が終了すれば、以上の問題を解決できるものと確信している。なお、この研究の一部は三重県ならびに高知県の委託によるものであることを最後に付記する。