

捨石潜堤の安定性に関する基礎的研究

河野 二夫*・高野 重利**

1. 緒 言

台形潜堤の表面被覆層の捨石の安定性に関し、捨石の材料として球形物体を使用し、これを潜堤表面に固定した球体群の中に独立に固定して波の作用による揚力を計測しその特性を明らかにするものである。一般に使用される異形ブロックのかわりに球体を用いた理由は George ら (1968) が提案したように捨石を shape factor で分類しておく、と球形物体を仮定して扱えるので流体力学的な取り扱いが可能になると考えた。一樣斜面上の捨石の安定性に関する研究は Iribarren (1938) を初めとして Hudson (1952) や Svee (1962) の研究などよく知られている。樫木ら (1982) は斜面の遡上波の共振現象が捨石崩壊の要因であると指摘し、Stucky and Bonnard (1937) は小さな捨石が波の作用で吸い出されるために大きな捨石が不安定になると考えたが、本論文は Svee が仮定したように斜面に垂直方向の揚力が崩壊の要因であるとした点に注目し流体力学的に扱い易い球体を用いて揚力を計測し、その鉛直成分と球体の水中重量との釣合い条件式を提案した。

他方、捨石被覆層の被害率について Hudson (1959) は波の作用で移動する捨石の個数が被覆層全体の捨石の個数に対する比率で定義し、Ouellet (1972) は捨石がその直径以上に移動する個数の比率 (unstable damage) と直径以内で移動する個数の比率 (stable damage) で定義しているが、本論文では上述のように球体に作用する揚力の鉛直成分とその球体の水中重量の比率で球体の安定性 (被害率) を定義し、この比率が 1 以上の場合を不安定であるとした。

2. 実験装置と実験方法

実験に用いた水路は長さ 15 m、高さ 1 m、幅 0.6 m の鋼製水路で水路中央は隔壁板で仕切り、一方の水路は入射波を計測し、他方は水路末端より約 5 m の位置に図-1 に示す潜堤模型を固定した。模型はタキロン板で

製作し、その表面に総数 203 個 (6 個は揚力計測用) の球体を等間隔に配置し固定した。計測用球体 (図-1 の ● 印) は潜堤棒に取り付けた隣青銅板に取り付け、隣青銅板にはり付けた 2 板の歪ゲージが球体に作用する波力で斜面に直角方向に変位する量を動歪計を通してビジグラフに記録し解析した。実験は最初 203 個の球体群を配置した場合の揚力と水面波形を同時計測し、次に計測用球体 6 個の場合について同様の計測を行なった。図-1 で○印に数字の書かれたものは容量式波高計を示し、①、②および⑦は入射波、部分重被波および通過波の波形を計測するものである。③～⑥は計測用球体近傍の水面波形を計測するものである。本実験は 2 回行ない、波高計④と⑤は 1 本の波高計を交互に使用した。球体は直径 3.75 cm のプラスチック製品を使用し、波の条件は周期 0.8 秒～3 秒、波高 2～16 cm、水深は 40 cm と 46 cm の 2 種類の実験を行なった。

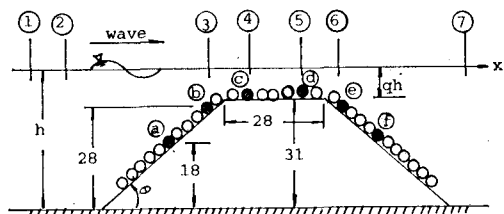


図-1 実験模型 (単位: cm)

3. 理論的考察

(1) 捨石に作用する揚力

斜面に沿う水粒子速度の鉛直分布は水深が浅くなると急増する (斜面から水面に向って速度が大きくなる) という岩垣ら (1971) の研究結果を考慮すると斜面上におかれた球体にはその中心を通り斜面に平行な面に対し流速分布は非対称になるから水粒子速度の 2 乗に比例する揚力が作用する (河野, 1970)。斜面で碎波する場合は球体群の中に落下する水塊に基因する揚力が作用する (Hudson, 1952) と考えられる。現実には捨石に作用する波力の機構は複雑であるが基本的には揚力と鉛直方

* 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 宮崎大学技官 工学部土木工学科

向の抗力および質量力のベクトル和を考えることができる。鉛直方向の水粒子速度は斜面に沿う流速に比較して無視できると仮定し、結局は上述の抗力や質量力を無視し、それらの影響は揚力係数の中に含めて考えることにした。

(2) 捨石の水中重量と揚力の関係

図-2 に示すように斜面上の水粒子速度 (u_s) の2乗に比例する揚力 (P_L) は式 (1) で与えられる。

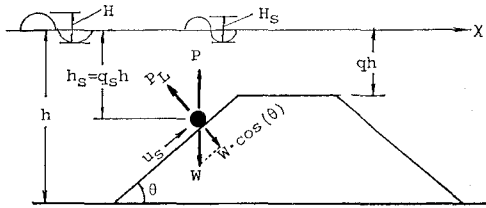


図-2 記号の定義

$$P_L = \frac{1}{8} C_L \rho \pi d^2 u_s^2 \quad (1)$$

ここに、 C_L は抗力や質量力または碎波による落下水が捨石群の中で複雑に運動することに伴う波力係数である。 ρ は水の密度、 d は球の直径である。 $u_s|u_s|$ の値は $u_s > 0$ で (+) の記号を取り、 $u_s < 0$ で (-) の記号になる条件でフーリエ級数に展開する。 u_s は現実的には評価できないので、球体のおかれた斜面上の水深 h_s の場所で一様な水深を仮想し微小振幅波理論を適用すると次式が計算される。ただし、 σ は波の角周波数、 t は

$$u_s|u_s| \div \frac{2}{3\pi} \left\{ \frac{\sigma H_s}{\sinh k_s h_s} \right\}^2 (\cos \sigma t + \dots) \quad (2)$$

時間である。式 (2) を式 (1) に代入し、 P_L の振幅の無次元量 ($\bar{P}$) を式 (3) でおけば式 (4) が得られる。

$$\bar{P} = \frac{P_L / \cos \theta}{\rho d^4 \sigma^2} \quad (3)$$

$$\bar{P} = \frac{\pi^2}{3} \frac{C_L}{\cos \theta} \left\{ \frac{H_s h}{H d k h \cdot \sinh k_s h_s} \right\}^2 \delta_i \quad (4)$$

ここに、 H は入射波の波高、 H_s は水深 h_s 上の波高、 k は水深 h における波数、 k_s は水深 h_s における波数であり、 δ_i は入射波の波形勾配である。図-2 で捨石の水中重量 (W) と P_L の斜面に直角の釣り合い条件式は式 (5) で与えられる。

$$P_L = W \cdot \cos \theta = \frac{\pi}{6} d^3 (\gamma - \rho) g \cdot \cos \theta \quad (5)$$

γ は捨石 (球形) の比重、 g は重力の加速度である。式 (6) のように無次元量 K を定義すると、式 (3) ~

$$K = \frac{6 P_L / \cos \theta}{\pi d^3 (\gamma - \rho) g} \quad (6)$$

式 (5) により式 (7) が計算される。

$$K = \frac{6 k h \cdot \tanh k h}{\pi (\gamma - \rho)} \cdot \frac{d}{h} \cdot \bar{P} \quad (7)$$

以上の式の中で次の関係がある。

$$k h \cdot \tanh k h = (h/h_s) \cdot k_s h_s \cdot \tanh k_s h_s \quad (8)$$

K の物理的意味は $K > 1$ になると捨石 (球形) に作用する波力によって被覆層の表層が不安定になる条件を示すもので Hudson らの被害率に対応するものである。

もちろん Svee の提言する様に捨石相互のかみ合せ効果の影響も考慮する必要がある。本文では K の値を被害率と定義し、 P を無次元波力と定義する。

4. 実験結果と考察

(1) 水面波形と揚力波形

水面波形 (計測球体の場所) と波力 (揚力) 波形の1例を図-3 に示した。図の中で α と β は水面波の峯の位相から波力 (揚力) 波形の上向きの波力の最大値までの位相差 (α) と下向きの波力の最大値までの位相差 (β) を示す。揚力波形は斜面に対し上下振動する①型、斜面に直角方向の上向きが卓越する②、③型および下向きが卓越する④型に大別される。図-3 の諸元を表-1 に示した。

(2) 水面波形と波力 (揚力) 波形の位相差

図-3 に示した波形の位相差 (α , β) と kh の関係を図-4 に示した。波力波形は図-3 に示したように複雑な形状のものも多いが、 α や β の値の読み取りは波力波形の1周期に亘る全体の位相の中で波力 (揚力) が最大になると思われる位相差を読み取った。図中の実線は水面波形を、点線は揚力の波形を示す。図によると水面上昇時から波峯直前にかけて潜堤斜面に直角下向きの揚が作用し、水面下降時から上昇時にかけて上向きの揚が作用するのが大部分の傾向であることがわかる。

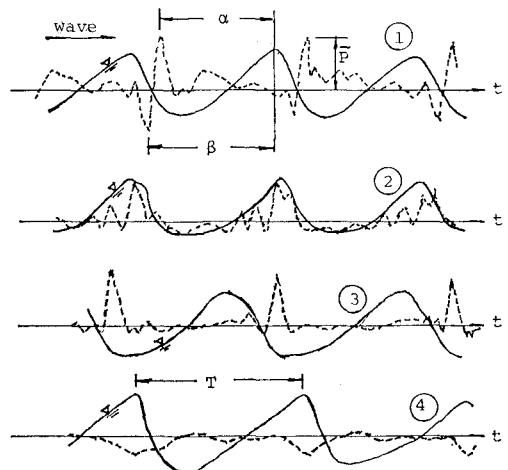


図-3 水面波形 (実線) と波力 (揚力) 波形

表-1 水面波形と揚力波形 (図-3の説明)

記号	テスト球体	球の個数	周期 T (秒)	水深 h (cm)	波形勾配 δ_i	無次元波力 $\bar{P}$
①	⑤	6	1.4	40	0.06	9.6
②	④	6	1.4	40	0.06	3.7
③	⑥	203	1.6	46	0.05	12.5
④	⑤	203	1.6	46	0.05	-3.2

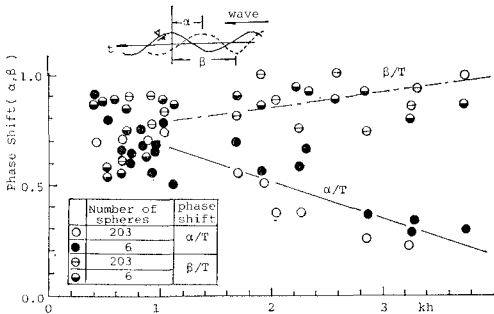


図-4 水面波形と揚力波形の位相差

(3) 捨石潜堤上の波高減衰率

図-1に示したテスト球体上の波高 (H_s) と入射波高 (H) の比率を 図-5~図-8 に示した。図中の縦軸の H の添字は s の番号 (波高計番号) を示し, q は潜堤の天端水深比を示す。図-5~図-8 に示した実験結果によると, データのばらつきも大きく, 球体の配置個数による若干の差異もあるが, 全体的には波高減衰率はどの場所でも対数分布式で整理される。なお図中の実線は平均的と思われる直線を目視で引いたものである。

(4) 無次元波力 ($\bar{P}$) について

テスト球体に作用する斜面に直角上向きの波力の振幅 $\bar{P}$ について実験値と式 (4) による計算値を比較したものの1例を図-9と図-10に示した。実験値は式 (3) で算定したものであり, 式 (4) 中の (H_s/H) は図-5と図-6の中に示した実験式を用いた。なお, d は 3.75 cm, $\gamma/\rho = 2.3$, $\theta = 40^\circ$ とした。図によると, 揚力は波形勾配 (δ_i) と水深と波長比 (kh) に大きく支配されることが判断される。

(5) 被害率について

式 (6) で定義した被害率 (K) に関する実験値と計算値の比較をしたのが 図11~図-13 である。④, ①点の揚力はかなり小さいため図示を省略した。図には水深が 40 cm の場合だけを示してあるが, 46 cm の場合はどの点の球体の被害率も半減することから, 潜堤の天端水深比が揚力に及ぼす影響は大きい。波力係数 (C_L) は球体④に対し 2.0 程度になるが, 他の球体は 1.0 程度になる。なお図中の実線は式 (7) の計算値であり, 実

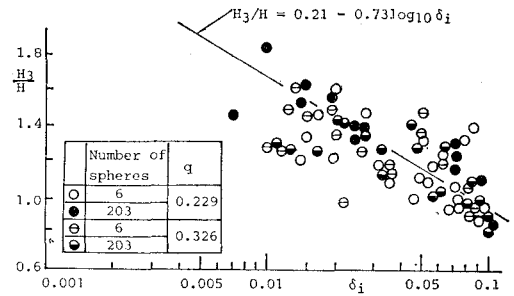


図-5 波高減衰率 (波高計, No. 3)

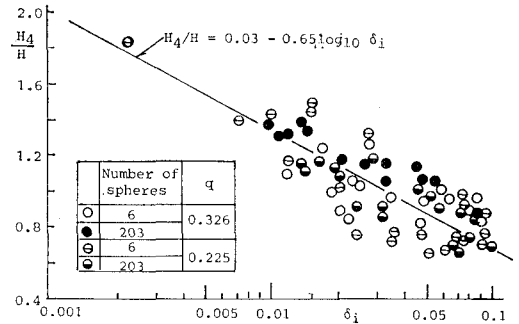


図-6 波高減衰率 (波高計, No. 4)

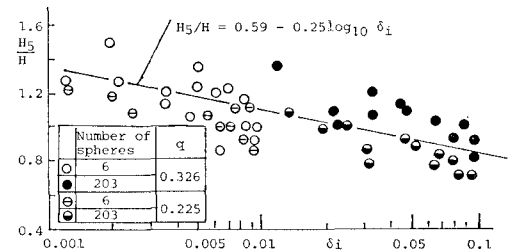


図-7 波高減衰率 (波高計, No. 5)

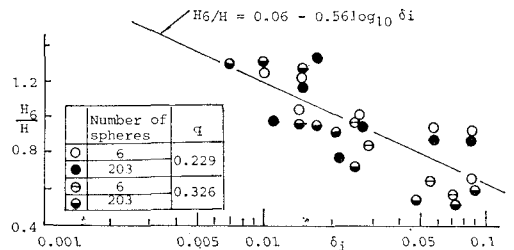


図-8 波高減衰率 (波高計, No. 6)

験値は式 (6) で算出した。全体的には球体群の場合が単一の球体の場合より若干大きな揚力が作用している。また, 潜堤天端付近の球体④, ⑥の K の値は kh が 0.8 付近で極端に大きな値になっている点は注目すべき結果である。(図-13 の実験値の記号は 図-11 に同じ)。

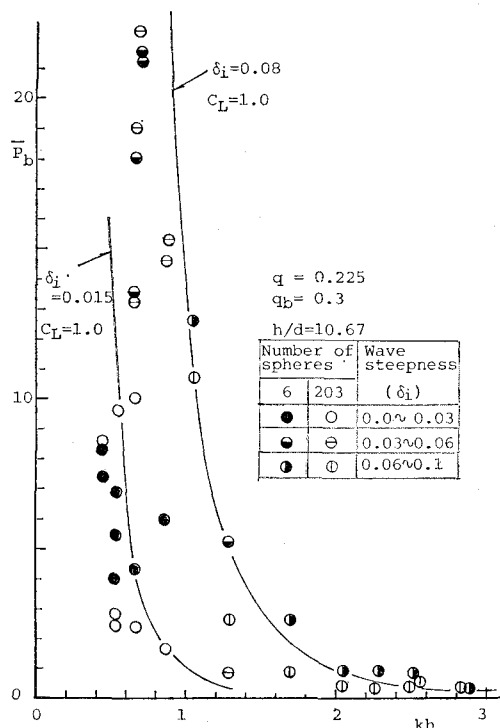
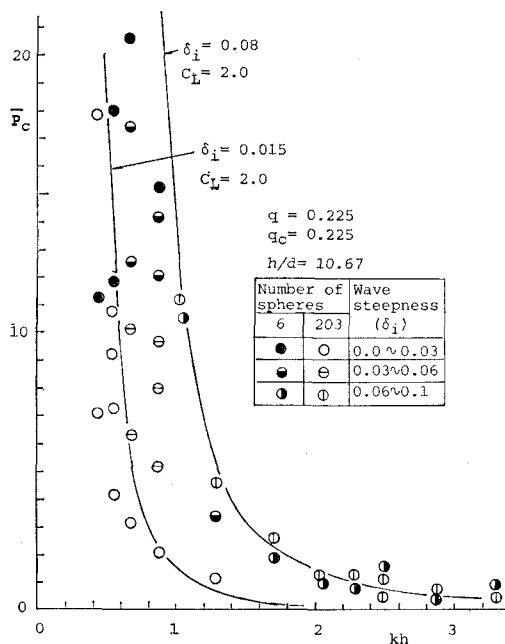
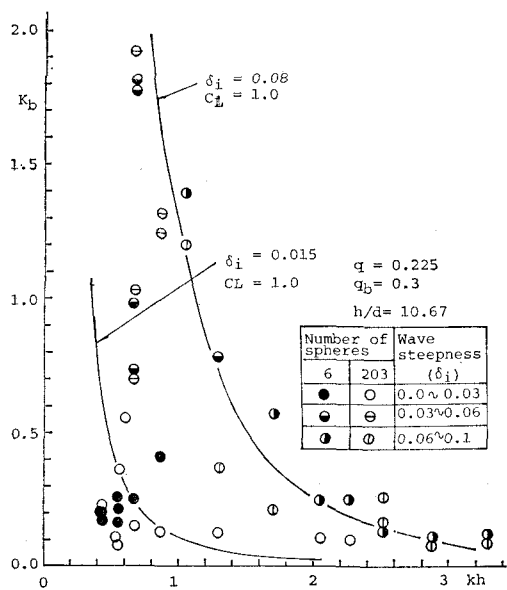

図-9 無次元波力 ($\bar{P}_b$)

図-10 無次元波力 ($\bar{P}_c$)


図-11 被害率 (① 球体)

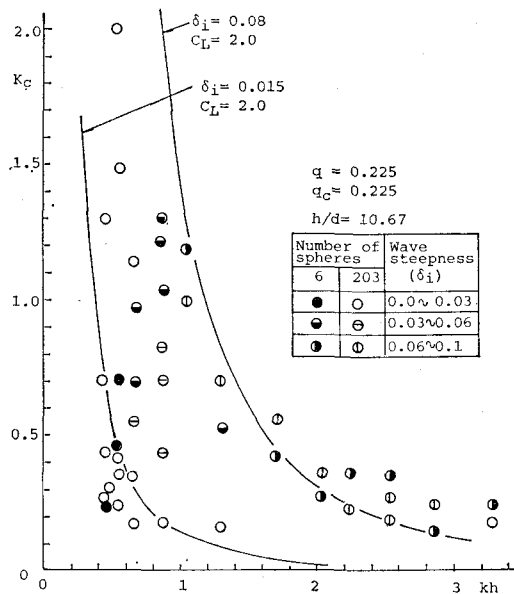
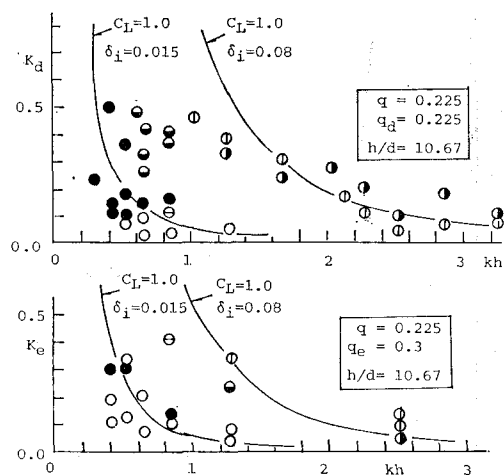


図-12 被害率 (◎ 球体)

5. 結 び

台形潜堤の表面被覆層の捨石の波による安定性に関し、捨石に作用する斜面に直角方向の波力(揚力)を計測した結果と捨石の水中重量と揚力との釣り合い条件式を誘導して得られた計算値とを比較検討した。また、潜堤による入射波の波高減衰率について実験的に検討し、波高減衰率が捨石の波力による被害率に及ぼす関係を示し



図—13 被害率 (④, ⑤ 球体)

た。以上の検討結果は次のように要約される。

(1) 揚力波形は斜面に対し直角方向上下に振動するもの、上向が卓越するもの、下向きが卓越するものに大別される。

(2) 水面下降時から上昇時には上向になり、さらに波峯時にかけて下向きの揚力が作用する傾向が強い。

(3) 潜堤の波高減衰率はほぼ対数分布則に従う。

(4) 被害率は $kh=0.8$ 付近で大きくなり、他方波形勾配に大きく支配される。

(5) 波力係数 (C_L) の値は 1~2 程度になる。

参考文献

- 岩垣雄一・酒井哲郎・川島 毅 (1971): 斜面上の波の水粒子速度の鉛直分布について, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 93-96.
- 河野二夫 (1970): 波の進行に直角水平方向の球の振動, 土木学会論文報告集, No. 179, pp. 49-60.
- 榎木 享・柳 青魯・大西明德 (1982): 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 428-432.
- George, R. A., and D. B. Simons (1968): Fall velocity of irregular shaped particles, Proc. ASCE, HY, pp. 721-735.
- Hudson, R. H. (1952): Wave forces on breakwaters, Proc. ASCE, Vol. 78, No. 113, pp. 1-21.
- Hudson, R. H. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Proc. ASCE, WW3, pp. 93-121.
- Irrivarren (1983): Hudson (1952, pp. 17-18), Hudson (1959, pp. 95-96) の文献から引用する。
- Ouellet, Y. (1972): Effects of irregular wave trains on rubble mound breakwaters, Proc. ASCE, WW1, pp. 1-13.
- Stucky, A., and D. Bonnard (1937): Wiegell, R. L. (Oceanographical Engineering, 1964, p. 292), prentice Hall. から引用する。
- Svein, R. (1962): Formulas for design of rubble-mound break-water, Proc. ASCE, WW2, pp. 11-21.