

不規則波に対する消波ブロック傾斜堤の 安定性に関する実験的研究

范 期 錦*・渡 辺 晃**・堀 川 清 司***

1. ま え が き

消波ブロックの安定性に対する波の不規則性の影響の重要性が認識され、不規則波による安定性実験も増えてきたが、不規則波と規則波の対比実験は数少ない。しかも、有義波相当の規則波による実験で傾斜堤の安定性を評価すれば不規則波に対する堤体の安定性を適切に判定できるとするもの¹⁾、互いに反する結論が出されているのが現状である。また、従来使われている Hudson 公式中の安定係数 K_D の変動性が大きく、波の周期の影響についても明らかにされていない。

本研究は、不規則波と規則波の対比実験によって、消波ブロックの安定性に対する波の不規則性の影響を検討し、周期の影響をも調べたものである。

2. 実 験 条 件

本実験に用いた水路と模型の配置を図-1に示す。長さ 23.5m、深さ 1.0m、幅 0.8m の二次元水槽の中に、造波板から 11m の位置から勾配 1/30、長さ 6m の斜面を設け、その岸側の水平床部に図-2に示す傾斜堤模型

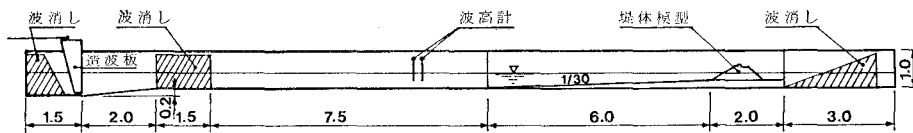


図-1 実験水路と模型の配置 (単位: m)

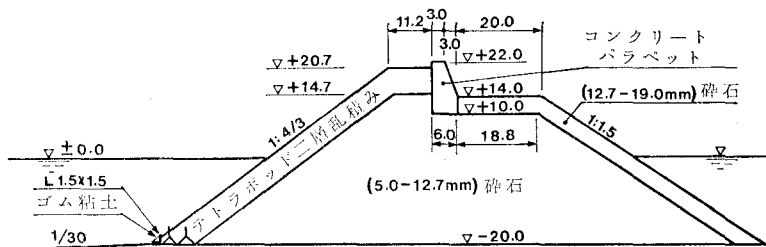


図-2 堤体模型断面 (単位: cm)

を設置した。のり先のブロックの滑動により、被覆層全体がくずれれることを防ぐために、のり先に 15mm×15mm のアングルを固定した。実験に用いたブロックはテトラポッドで、総数 663 個、二層乱積みで、法面勾配は 1:4/3 である。その諸元を表-1に示す。

表-1 テトラポッド模型の諸元

平均空中重量 (gf)	重量の標準偏差 (gf)	高 さ (cm)	体 積 (cm ³)	単位体積重量 (gf/cm ³)
63.0	0.57	4.50	26.8	2.35

造波機は、ミナーシャモータ駆動で、不規則電圧信号の入力により不規則波を発生できる。波高計は容量式で、入・反射波分離用の 2 本は造波板から約 9m の一様水深部に設置した。堤体前面 1m の位置にもう 1 本の波高計を設置し、さらに、規則波実験の時には 1 本の波高計を台車に載せて造波板から (4.5m~7.1m) の間を走らせて、Healy の方法による入・反射波分離も行った。

水深は全ケースについて、一様水深部 40cm、堤前 20cm に統一した。

不規則波は Bretschneider・光易型のスペクトルを目標として、3 種類の有義波周期 (実測有義波周期は波高により若干異なるが、それぞれ平均 1.92s, 2.14s, 2.28s と なった) の信号を作成し、データレ

コードから造波機に入力した。各周期について波高を小さい方から順次 (5~10) 段階に増大し、さらにこれを (6~9) 回繰返して実験を行った。規則波実験は周期 1.24s, 1.92s, 2.14s, 2.28s の 4 種類、波高は (5~6) 段階とし、全て 5 回繰返した。なお、波の作用時間は全ケースについて 40 分

とした。

堤体設置位置での入射波高を求めるために、堤体模型を置く前に一様水深部と堤体位置に 1 本の波高計を設置

* 正会員 中国交通部第一航務工程局 工務師
** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

して予備実験を行い、両位置での波高の関係を求めた。

3. 入・反射波の分離

一様水深部の2本の波高計によって得た同時波形記録から、合田³⁾による分離推定法で入・反射波の分離を行った。不規則波の記録時間は40分、読み取り間隔は、0.08s、解析に使ったデータ数 $N=16384$ 、スペクトル計算における平滑化関数は放物線型で、平滑化本数は59とした。規則波の分離計算はHealyの方法で行ったが、不規則波と比べるために同じ方法をも用いた。ただし、記録時間は15分、 $N=8192$ 、平滑化本数は29とした。

なお、入・反射波の波高分布および反射波周期等を調べるために、不規則波の成分波の位相をも求め、入・反射波の波形をシミュレートして検討を加えた。

分離用波高計の間隔 Δl は不規則波の場合に有効波数範囲内に含まれるエネルギーが全エネルギーの90%以上になるように決めた。規則波の場合には波長の1/4にした。

4. 不規則波の特性

図-3は、不規則波スペクトルの一例である。入・反射波の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ は分離計算の結果を用いてシミュレートした入・反射波の波形から求めたもので、同じ入力信号で行った検証実験（堤体なし）のデータから求めたスペクトルも同図に示してある。

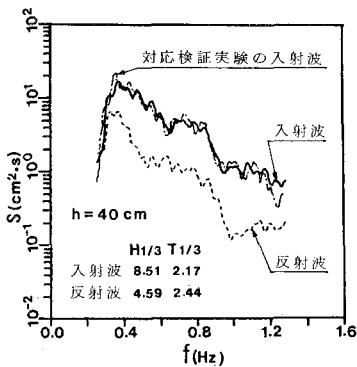


図-3 実験波スペクトルの一例

入・反射波波高分布の一例が図-4である。全ケースに対する各代表波高間の比を図-5に示す。 $H_{\max}/H_{1/3}$

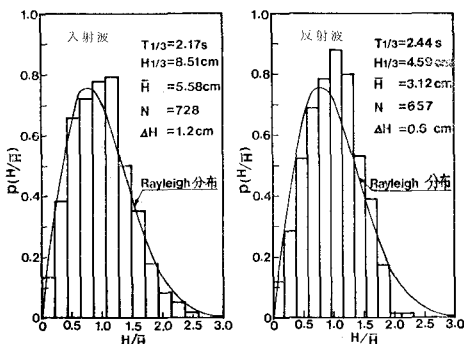


図-4 入・反射波高の度数分布

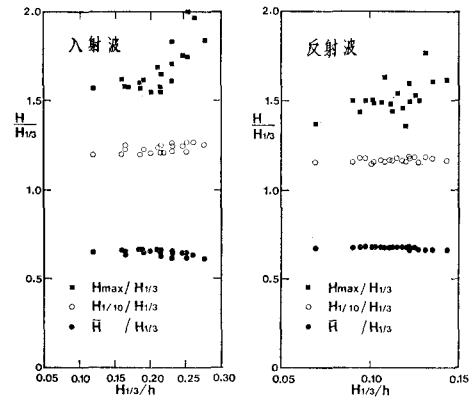


図-5 各代表波高間の比（一様水深部）

のばらつきは大きい、平均して入射波に対して $H_{\max}/H_{1/3}=1.68$, $H_{1/10}/H_{1/3}=1.23$, $\bar{H}/H_{1/3}=0.65$ 、反射波に対して $H_{\max}/H_{1/3}=1.52$, $H_{1/10}/H_{1/3}=1.17$, $\bar{H}/H_{1/3}=0.68$ で反射波の方が入射波よりも Rayleigh 分布から離れていることがわかる。

5. 消波ブロックの安定性について

5.1 被害の判定基準

本実験では、元の位置より1個以上移動したブロックの累積数 n_d と全被覆層ブロックの総数 N (663個) の比率を被害率 n とした。すなわち

$$n=(n_d/N) \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、隣接している下の列のブロックの移動によってその移動したブロック位置の穴に落ちたブロックは n_d に入れないこととした。

5.2 実験結果

(1) 被害率と K_D 値

不規則波の入射波波形から求めた一様水深部の入射波高 H_I を用いて、予備実験による H_I と堤体設置位置の波高との関係を利用して堤体設置位置の通過波高に換算し、Hudson 公式によって K_D 値を求めた。この際、代表波としては有義波を用いた。

規則波の場合には、Healy の方法で見かけの入射波高と反射率を求め、合田・阿部⁴⁾により提案された補正曲線を利用して、波の有限振幅性に関する補正を行った。さらに不規則波と同じ方法で、堤体位置の入射波高に換算し K_D 値を求めた。

図-6, 7 は不規則波と規則波の K_D 値と被害率 n との関係である。多くの研究者により指摘されているように K_D 値の変動はかなり大きい。今回は、 K_D の n による変化の傾向を把握するため、また、実際の工事設計に際しての安全性を考慮して、図中に示した包絡線でブロックの安定性に対する評価を試みた。これによって被害率 $n=(0\sim1)\%$ の場合に不規則波の有義波高による

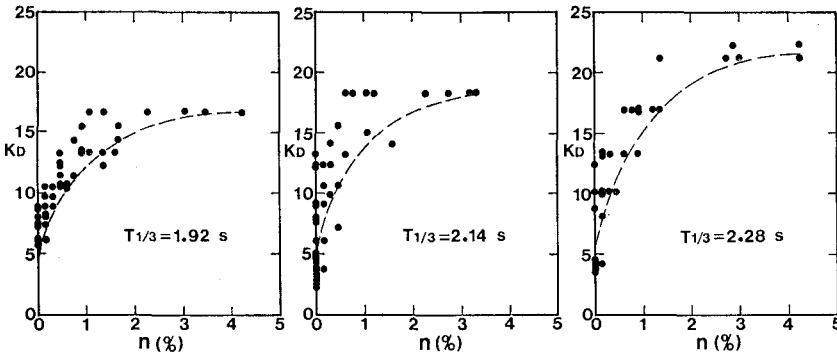


図-6 K_D 値と被害率 n の関係 (不規則波)

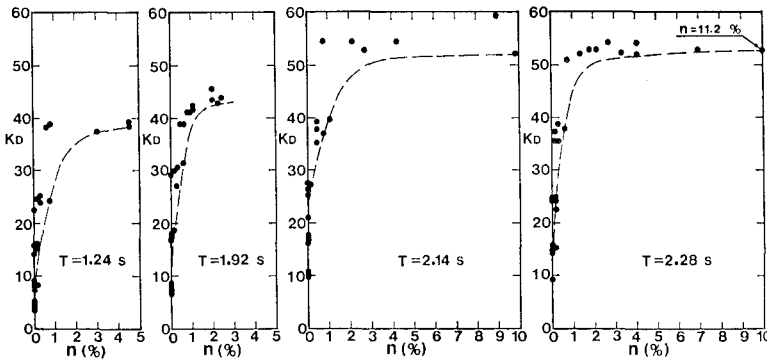


図-7 K_D 値と被害率 n の関係 (規則波)

K_D 値は (5~12) で、従来のテトラポッドに対する研究結果とほぼ一致しているが、規則波の場合にははるかに大きい値がでている。今度の実験におけるブロック移動の判別基準がきびしいことがその理由の一つと思われる。

(2) 不規則波と規則波の比較

(a) 波高の比較

図-8 の左側は、図-6, 7 から各被害率に対する規則波の波高 H および有義波高 $H_{1/3}$ を求め、一つの図に示したものである。右側はさらに H と $H_{1/3}$ の相関と比率

が、次の諸点をも指摘しておく必要がある。

i) ここで用いた規則波の波高は、Healy の方法にもとづいて得たもので、同じ波について入射波波形のシミュレーションによる推定入射波高との比較を 図-9 に示してある。後者の波高は前者より平均 10% 小さい。そうすると、式 (2) は次のようになる。

$$H \approx 1.3H_{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

ii) 図-6, 7 に示したように最初の一つのブロックを移動させる波高の変動が大きい。これは積み直しによ

を示す。この結果によれば周期および被害率とほぼ無関係に、同じ被害率に対する H と $H_{1/3}$ の間に次式が成立するといえよう。

$$H \approx 1.4H_{1/3} \dots\dots (2)$$

つまり、有義波相当の規則波による実験でテトラポッド被覆傾斜堤の安定性を評価するのは安定性を過大に評価することになる。言い換えれば有義波よりも大きな波高をもった規則波を使う必要があるという結論になる。

Borsen ら²⁾のドロスに対する実験では $H = 1.25H_{1/3}$ という結果がでている。これは実験波のスペクトルやその他の実験条件が異なっていることにもよると思われる

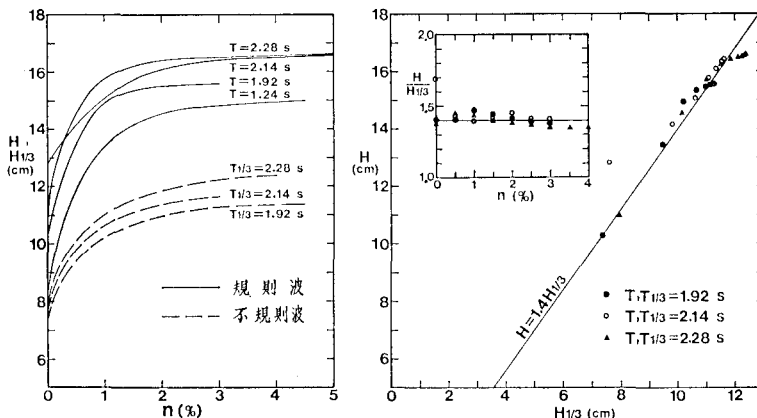
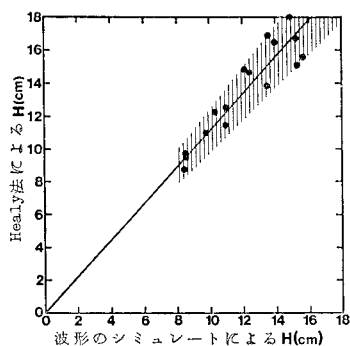


図-8 規則波と不規則波の波高の比較

ってブロックの噛み合わせ具合に微妙な差があるためと思われる。図-8 で $n=0\%$ に対する $T=2.14$ s の規則波波高 H の値がかなり大きいことが説明できよう。

(b) ブロック移動の特徴

図-8 の左側に示したように、不規則波の場合は波高の増大につれて被害が徐々に増加していくのに対して、規則波の場合



図—9 波高計算方法の比較

合には、波高があまり大きくない段階では波高の増大につれての被害の発達は遅く、ある大きな波高になると被害が著しくなる。同一条件の波に対する繰り返し実験よりブロックの平均累積移動個

く前後の各一連の波形データを読み取って、このケースに対応する反射率を用いて、入射波高に換算し、順番に示したのが下の図である。 H_{ZD} は当有義波周期 1.92 s と同じ周期の規則波における $n=0\%$ の時の波高であり、 H_c は式 (2) によって $H_{1/3}$ から換算したものである。L1 の場合には $H > H_{ZD}$ の長さ 6 の波の連が堤体に作用してから 2 つのブロックが移動した。L2 では顕著な連になっていないが H_c よりも大きい一波の作用で 1 つのブロックが動いて、次の H_{ZD} より大きい波の作用によってもう一つのブロックも動いた。このように連および極端に高い波によってブロックが動く現象は不規則波の実験中にしばしば認められた。不規則波によるブロックの安定性を評価するときに、高波の連の影響と最高波をパラメーターとして取り入れる必要性が示されていると言える。

(c) 周期の影響

図—6～8 に示しているように同じ被害率に対する K_D 値 (あるいは H) は規則波、不規則波ともに周期の長い方が大きい。つまり短い周期の波のブロックにもたらす被害が大きい。しかし、本実験に用いた波の周期は範囲が狭く、しかも模型の諸元の割に比較的長い方に集中しているため、これは一般的な結論とは言えない。

Bruun ら⁵⁾と Losada ら⁶⁾は周期の効果を考慮するため Iribarren 数 $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H_0/L_0}$ ($\tan \alpha$: 法面勾配) をパラメーターとして傾斜堤被覆層の安定性を評価した。実験条件が異なるため直接に彼らの結果と比べることは難しいが、今度の実験条件では (3～8) の範囲にあり、この範囲で ξ の増大につれて K_D 値が増大する傾向は彼らの結果と一致している。

6. 入・反射波の分離推定法について

6.1 波高の分離計算

今回の実験に対して、二つの方法で波高の分離を行った。一つは 2 本の波高計による同時波形記録を解析して入・反射波のエネルギー E_I, E_R を求め、次式で反射率を求める方法である。

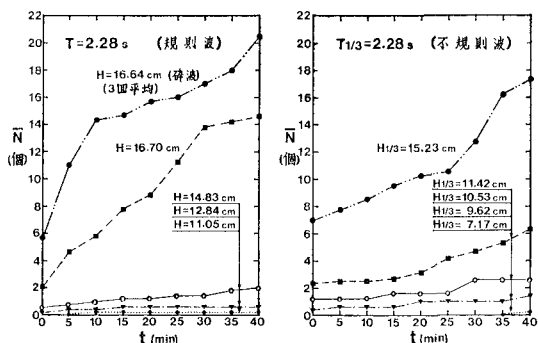
$$K_R = \sqrt{E_R/E_I} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この平均的な反射率を用いれば、入・反射波の各代表波高 H_I, H_R は 2 本の波高計の位置の合成波の代表波高の平均値 H_s によって次式で求まる。

$$H_I = \frac{1}{(1+K_R^2)^{1/2}} H_s, \quad H_R = \frac{K_R}{(1+K_R^2)^{1/2}} H_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

もう一つは入・反射波の時間波形までシミュレートしてその波形から代表波高および周期を求める方法である。

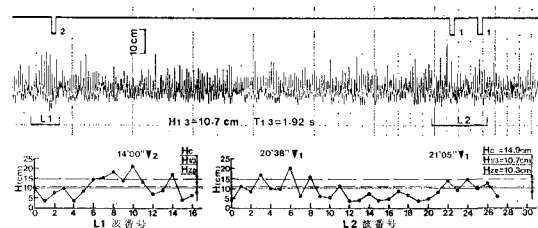
不規則波の場合にこの二つの方法で求めた入射波高の値は 2% 以内の差しかないが、規則波の場合に前法で求



図—10 ブロックの平均移動個数と経過時間との関係

数の 5 分間隔の時間的変化を求め、図—10 に示した。間隔を 5 分間にしたことと平均移動個数を取ったため、変化の傾向もある程度平均化されているが、図より次のことが言えよう。

規則波の場合には、最初 5 分間以内にブロックが良く動き、その後、波高の小さい時には安定になってゆき、波高の大きい時には、時間とともに被害は徐々に大きくなっていく。これに対し、不規則波の場合には、波高を増大させた初期のブロックの動きは明白ではなく、その代りに、ある時間帯によく動く。図—11 は、さらに一つの例として、モニターへの連続出力の一部を取り出したものである。上のパルスは実験中、ブロックの動く瞬間に入れたもので、下の図にある矢印はそれに対応する波を発生し始めてから経過した時間を示し、右につけた数字は移動したブロックの個数である。波形は堤体前 1 m に設置した波高計の記録で、これより、ブロックが動



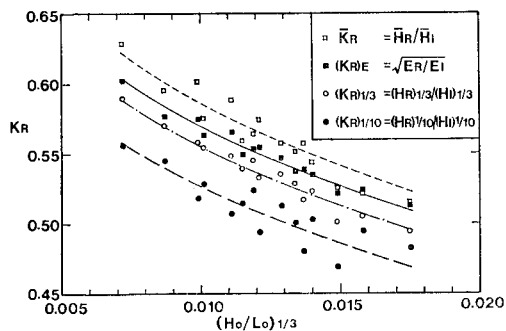
図—11 ブロック移動時の波形記録の一例

めた入射波高は常に小さく、その差は 11% にも達している。しかも波形から求めた波高の方は Healy の方法による結果を補正した値に近い。これは 2 本の波高計による合成波高の平均値は真の合成波高より小さくなりやすく、そして、波高計の位置と間隔、周期等によって変動しやすいからである。不規則波の場合には種々の周期を持つ成分波（その反射率も違う）の総合効果であるから、見かけ上はこういう影響が見えなくなったにすぎないと考えられる。

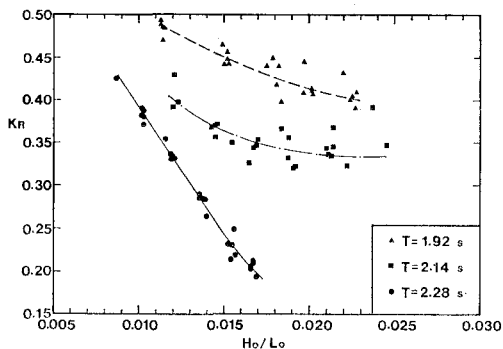
6.2 堤体の反射率について

図—12, 13 は、不規則波と規則波に対する堤体の反射率の実験結果である。図—12 は、式 (4) で求めた反射率 $(K_R)_E$ および入・反射波の各代表波高間の比を反射率としたものと換算深海有義波波形勾配の関係を示している。周期にはほぼ無関係に、高い代表波高の方の反射率は小さい（図中、周期によって分けていない）。 $(K_R)_E$ が $\bar{K}_R$ より小さいのは次のように考えられる。

一連の不規則波中の波高と周期が異なる個々の波に対しては反射率も違い、波形勾配の大きい波は堤体材料の間での流速が大きいため渦によるエネルギーの損失が大きく、反射波のエネルギーは一般に小さくなるであろう。



図—12 不規則波の各代表波高に対する反射率



図—13 規則波の反射率

図—4 に示しているように、その結果として、反射波の波高分布は Rayleigh 分布からはずれ、波高の大きい方と平均波高より小さい方の波の数は減少し、平均波高よりやや大きい波の数が増え、ゼロダウンクロス法で定義した波の数も少なくなって、周期が長くなる（今度の実験により、反射波周期 $T_{1/3}$ と $\bar{T}$ は入射波より平均 10% 大きくなることがみとめられた）。こうして定義された平均波高の値は大きくなって $\bar{K}_R$ は $(K_R)_E$ より大きくなったのであろう。

一方、図—13 の規則波の反射率は同じように波形勾配の増大につれて減少しているが、周期によって明らかに違っている。これは造波板からの再反射波の影響と考えられるが、さらに検討の必要がある。

7. あとがき

主な結果をまとめると次のようである。

(a) Bretschneider・光易型のスペクトルを使った本実験の条件では、消波ブロックに同じ被害率をもたらす規則波波高と不規則波有義波高の間に $H=1.4H_{1/3}$ という関係が認められた。また、不規則波の連と最高波がブロックの安定性に大きな影響を及ぼすことが明らかにされた。

(b) Iribarren 数 $\xi=3\sim 8$ の範囲では周期の長い波に対するブロックの安定性が大きい。

(c) 不透過滑面に対する Miche の理論によると、本実験の波形勾配の条件では、反射率は波形勾配によらずに一定値になるはずであるが、透過堤に対する本実験では規則波と不規則波ともに波形勾配の増大につれて反射率は減少している。

参考文献

- たとえば、伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究、港湾技術研究所報告、第 5 巻、第 14 号、134 p., 1966.
- たとえば、Brorsen, M., H. F. Burcharth and T. Larsen: Stability of Dolose slope, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 1691~1701, 1974.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技研資料、No. 248, 24 p., 1976.
- Goda, Y. and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol. 7, No. 3, pp. 3~58, 1968.
- Bruun, P. and A. R. Günbak: Stability of sloping structures in relation to $\xi=\tan \alpha/\sqrt{H/L_o}$ risk criteria in design, Coastal Engineering, 1, pp. 287~322, 1977.
- Losada, M. A. and L. A. Gimenez-Curto: The joint effect of the wave height and period on the stability of rubble mound breakwaters using Iribarren's number, Coastal Engineering, 3, pp. 77~96, 1979.