

消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について

谷 本 勝 利*・大 里 睦 男**

1. ま え が き

防波堤背後への伝達波は堤体を通過する波と越波の打込みにより造波される波から成る。このうち、直立壁を有する混成堤などでは、通常越波による伝達波が支配的であり、天端高をある程度高くする必要がある。しかし、これを完全に阻止するためには相当の高さを必要とし、大きな波に対してはある程度越波を許容するのが普通である。そのため、防波堤の伝達波については、たとえば通常の混成堤に対する合田の実験¹⁾、混成堤および消波ブロック被覆堤に対する近藤・佐藤の実験²⁾ などが、波高伝達率の推定式が提案されている。

しかしながら、これらは規則波による実験結果を整理したもので、不規則波による検討は通常の混成堤に対する若干の例³⁾、および傾斜堤に対する諸外国での実験例⁴⁾ などがあるものの、消波ブロック被覆堤についての検討例はまだ報告されていない。そのため、消波ブロック被覆堤の設計上の諸問題に対して模型実験を実施したのを機会に、不規則波による伝達波の検討を行ってみた。本論はその結果をとりまとめたものである。

2. 実験の方法

(1) 実験水路および模型

実験に用いた水路は長さ 30 m、幅 5 m の水槽中央部を二つの仕切り壁により幅 50 cm とした仮設水路で、造波板と仕切り壁始点との間は 6.6 m の距離を設けてある。水路床は模型のマウンドのり尻から沖へ 5 m 区間が 1/100 こう配、さらに沖へ 5 m 区間が 3/100 こう配としてあり、あとは水平床である。水路の岸側は碎石を消波ブロックで被覆した消波斜面としており、仕切り壁後端から波が回り込むことはない。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、磁気テープから入力する信号に追従して任意波形の波を発生することができる。造波板の幅は水槽幅一杯の約 5 m である。

図-1 は堤体模型の断面図を示したもので、直立壁体

の天端高はコンクリートケーソンに木製の上部工を固定して調節する。実験に用いた模型消波ブロックは高さ 10.5 cm、空中重量 743.3 gf、体積 320.3 cm³ の異形ブロックで、空隙率が約 50% のものである。この消波工の天端高は常に直立壁体の天端高と一致させている。消波工の天端幅 B_b は 15.8 cm とし、水深 h は 39, 42, 48 cm の 3 種に変化させた。

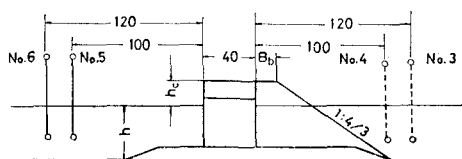


図-1 模型および波高の測定

(2) 入射波および伝達波の測点

入射波は堤体模型を設置する以前の状態で、直立部前壁から沖へ 1.2 m 地点での測点 No. 3、および 1.0 m 地点での測点 No. 4 の 2 点で予め測定しておき、その平均値を入射波の諸元とする。さらに、実際には反射波の影響をチェックするために、直立壁面から 8.3 m 地点を中心として 20 cm 間隔で No. 1, No. 2 の 2 台の波高計を設置している。これによって 2 点位相差法⁵⁾ で求めた反射率は、今回の実験の場合、模型設置以前の状態で 15% 以下である。また、模型を設置した状態の分離入射波高は模型設置以前の測定波高とほとんど一致することを確認しており、模型と造波板の間の多重反射の影響はほとんどないと考えられる。

伝達波の測定は直立壁背面から岸側に 1.0 m および 1.2 m 地点の測点 No. 5, No. 6 において行い、伝達波の諸元はこの 2 点の結果の平均値とする。なお、直立壁背面から消波斜面のり尻までの距離は約 3 m である。また、波形の測定にはすべて容量式波高計を用いた。

(3) 実験波

今回の実験に用いた不規則波の入力信号は Bretschneider・光易型スペクトルを目標としたもので、同一スペクトルに対し作成した G1~G4 の 4 種の信号である。波高は入力に際して基準電圧 e を調節することによって変化させる。解析の対象とする時間は初期の非定常性

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

** 運輸省第二港湾建設局八戸港工事事務所むつ小川原工場
(前港湾技術研究所水工部)

の強い波を除いて、G1~G4 に対し同一とした。そうしてゼロアップクロス法により求めた入射波の平均周期 $\bar{T}_i$ は 1.8~2.2 s, 有義波周期 $T_{i1/3}$ は 2.3~2.8 s に変化し、それによって波数は 100~120 波となった。このばらつきは G1~G4 の波列の違いによる不規則波特有の変化にもよるが、入力電圧 e が大きくなるにつれてやや長くなる傾向を示しており、砕波の影響の程度の違いにもよると考えられる。このように、入射波の周期は波列の種類および入力電圧によって異なるけれども、後述の解析では平均周期 2.0 s, 有義波周期 2.5 s として整理することにした。

なお、波形の解析はデータレコーダに収録したアナログデータを高速データ処理装置でデジタル化したのち、電子計算機で行っている。A・D 変換時の実時間に対するサンプリング周波数は入射波に対し 9 Hz, 伝達波に対し 20 Hz で、1 測点に対しデータ数はそれぞれ 2048 個, 4096 個である。したがって、伝達波の解析対象時間は入射波の 0.9 倍とやや短い。

3. 実験結果

(1) スペクトルおよび伝達波の解析

図-2 および 図-3 は $h=42$ cm, $e=0.55$ V のときの入射波および伝達波のスペクトルを例示したものである。入射波のスペクトルは波列によって多少形状が変化しているが、エネルギー最大のピーク周波数はいずれも 0.35 Hz 付近にある。ゼロアップクロス法で求めたこのときの有義波高は波列により 23.2~24.0 cm で砕波の影響をかなり受けている。

伝達波のスペクトルは $h_c/H_{i1/3}=0.66$ のときの波 G1 に対するものを示したものであるが、入射波のスペクトルとは著しく違っている。その一つは、低周波数側に高いエネルギーが生じていることである。0.2 Hz 付近で一度極小となり、入射波のピーク周波数 0.35 Hz 付近で極大値を示す。もう一つは、これの 2 倍周波数付近に

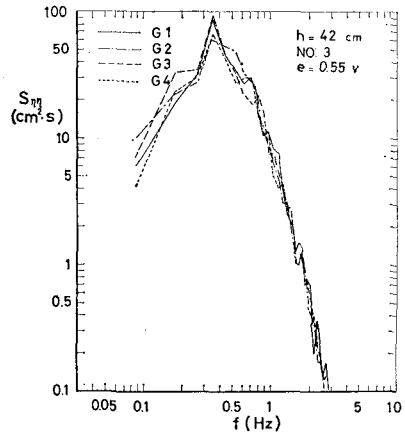


図-2 入射波のスペクトル

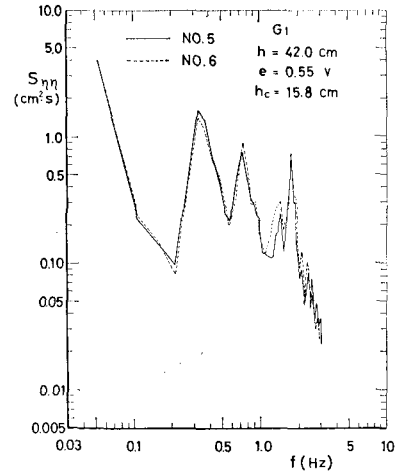


図-3 伝達波のスペクトル

極大が認められ、さらに 1.4 Hz, 1.7 Hz 付近でも顕著な極大が認められることである。他の例では、入射波のピーク周波数の 3 倍付近にも極大が現われている。

一方、図-4 は測点 No. 6 における伝達波形の一部

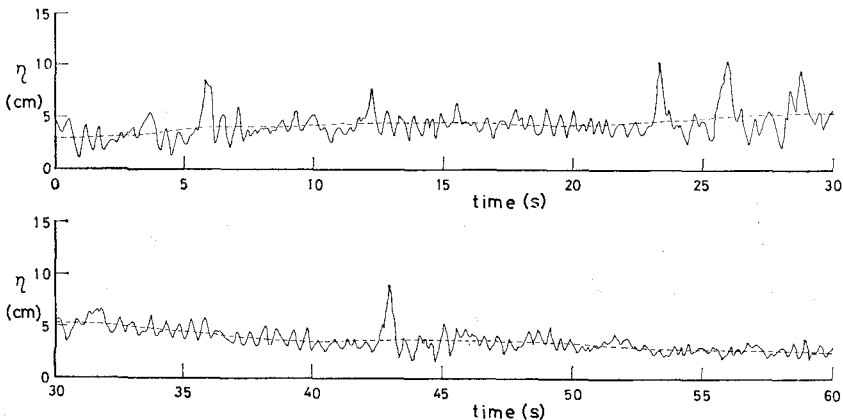


図-4 伝達波の波形と長周期変動

を示している。このように伝達波形は断続的に生じる越波の打込みによる大きな波と、小さな攪乱波から成っており、相対天端高が大きい条件ではほとんど水面が変動しない時間帯も現われる。先のスペクトルで認められた高周波側のピークは、こうした波形における攪乱波に対応しているものと考えられる。また、堤背後の平均水位は越波の打込みによって上昇し、特に相対天端高が小さいとき、顕著な長周期変動となる。スペクトルにおける低周波数側の高いエネルギーはこれに対応したものである。

さて、不規則伝達波の解析においてこうした長周期変動と小さな攪乱波をどう扱うかが問題となる。これについては、伝達波が背後の何に対して問題となるかということにも関連してくる。今回の解析においては、とりあえず長周期変動成分をカットし、小さな攪乱波はそのまま残すことにした。この長周期成分のカットは、波形をFFTにより分解したのち、0.1 Hz 以下の成分は完全カット、0.1~0.2 Hz の間は直線変化による部分カットとすることによって行っている。このように 0.2 Hz 以下をカットの対象としたのは、スペクトルにおいて 0.2 Hz 付近に極小が認められ、これより低周波側で増大することによる。先に示した図-4 中の破線はこのカットした長周期成分による波形である。

しかしこの方法では、相対天端高が大きい場合、越波が相当時間ないのにもかかわらず小さな攪乱波が残っており、波数が著しく多くなるなどの問題がある。これについては、伝達波の生因である越波の回数との関連などとあわせて今後の検討課題としたい。

(2) 波高と周期の分布

図-5 および 図-6 はスペクトルの例示と同じく、 $h=42$ cm, G1 波, $e=0.55$ V について、入射波と伝達波の波高と周期の結合分布の例を示したものである。ただし、度数はそれぞれの総波数に対するパーセンテージで表わしてい

る。入射波は測点 No. 3 でのものであり、平均波高は 16.8 cm, 平均周期は 1.96 s, 波数は 113 である。 $H/\bar{H}$, $T/\bar{T}$ はともに 2.0 以下に分布しており、波高と周期の相関はかなり高い。

一方、伝達波は $h_0/H_{t1/3}=0.66$ のときの測点 No. 6 における波形から求めたもので、平均波高は 3.36 cm, 平均周期は 0.619 s であり、波数は 329 と入射波に比較して著しく多くなっている。また、 $H/\bar{H}$ は 3.4 以下、 $T/\bar{T}$ は 5.0 以下と広い範囲に分布しており、波高と周期の相関も低くなる。

図-7 は伝達波の有義波高に対する比を後述の有義波高の伝達率 $K_{T1/3}$ に対して示したものである。特に、最高波高 $H_{t\max}$ の比がばらついており、 $H_{t\max}/H_{t1/3}$ の値は 1.8~5.2 に広く分布している。しかし、平均的には有義波高の伝達率に対し傾向的变化が認められ、 $K_{T1/3}$ が大きくなるにつれて $H_{t\max}/H_{t1/3}$ は小さくなるようである。これに対し、1/10 最大波高 $H_{t1/10}$ の比は 1.4~1.8, 平均波高 $\bar{H}_t$ の比は 0.5~0.6 程度でばらつきは小さい。これらの代表波高間の比は通常のものと比較すると幅が広く、合田⁶⁾が指摘しているように不規則伝達波の波高分布はレーリー分布とは異なることがわかる。

(3) 波高の伝達率

最高波高, 1/10 最大波高, 有義波高, 平均波高など、

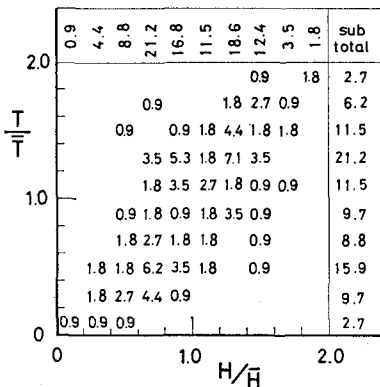


図-5 入射波の波高と周期の相対度数

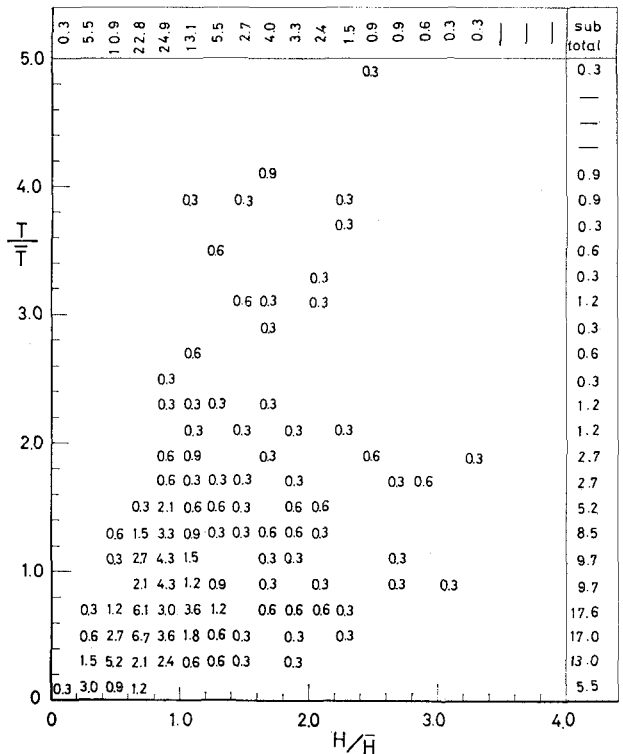


図-6 伝達波の波高と周期の相対度数

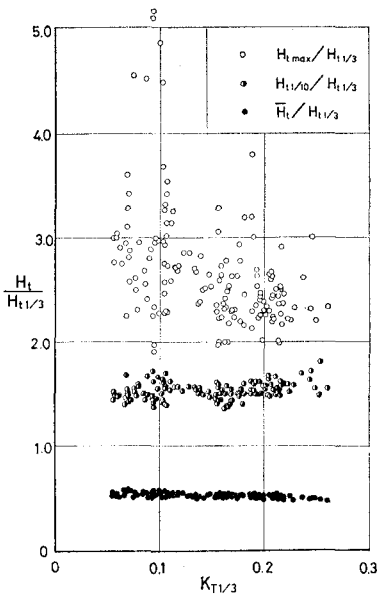


図-7 伝達波の代表波高比

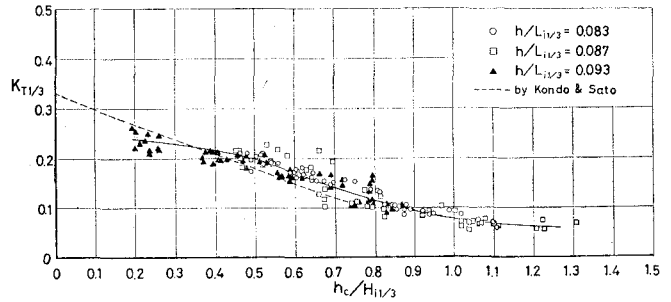


図-8 有義波高の伝達率

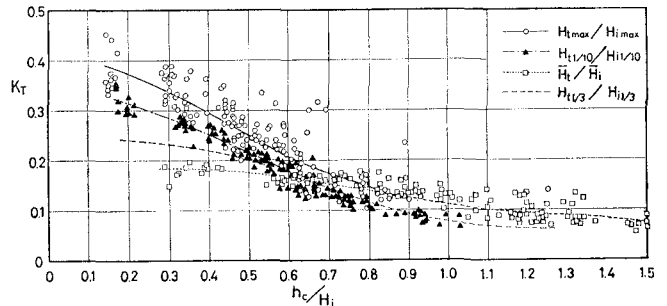


図-9 各代表波高の伝達率

各代表波高同志の伝達率を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \text{最高波高の伝達率} & K_{T \max} = H_{t \max} / H_{i \max} \\ \text{1/10 最大波高の伝達率} & K_{T 1/10} = H_{t 1/10} / H_{i 1/10} \\ \text{有義波高の伝達率} & K_{T 1/3} = H_{t 1/3} / H_{i 1/3} \\ \text{平均波高の伝達率} & K_{T \text{mean}} = \bar{H}_t / \bar{H}_i \end{aligned}$$

ここに、添字 t は伝達波、 i は入射波の諸元であることを表わす。

まず、図-8 は有義波高に対する相対天端高 $h_c / H_{i/3}$ と伝達率 $K_{T 1/3}$ を示したものである。水深 $h = 39 \text{ cm}$, 42 cm , 48 cm の結果をまとめてプロットしてあるが、水深による変化は顕著でない。図中の実線は今回の実験による平均的關係、破線は近藤・佐藤⁷⁾による規則波実験による關係を表わす。 $h_c / H_{i/3}$ が小さい領域ではやや今回の結果が小さく、 $h_c / H_{i/3}$ が 0.4 程度より大きくな

るとやや大きいようであるが、その差は小さい。有義波高の伝達率については規則波の結果とそれほど違わないといえる。これは通常の混成堤の場合にもそのようである⁸⁾。

次にその他の代表波高の伝達率をみてる。図-9 は最高波高、1/10 最大波高、平均波高の伝達率をプロットしたものである。横軸の h_c / H_i の H_i はそれぞれ入射波の最高波高、1/10 最大波高、平均波高である。ばらつきはあるが、各代表波高同志の伝達率は異なっており、特に最高波高の伝達率は有義波高の伝達率より大きくなるようである。

(4) 周期の変化

図-10 は有義波高に対する天端高 $h_c / H_{i/3}$ を横軸にとり、入射波の周期に対する伝達波の周期の比を示したものである。有義波の周期比と平均周期比の両方をプロットしてある。結果はばらついてはいるけれども、相対天端高が 0.8 程度で極小となる変化を示している。図中の線は平均的關係を示したもので、有義波の周期比が平均周期比より全体にやや大きい。 $h_c / H_{i/3} = 0.6$ に対して $T_{t 1/3} / T_{i 1/3}$ は 0.38 , $\bar{T}_t / \bar{T}_i$ は 0.35 程度で、伝達波の有義波周期は入射波の約 $1/2.5$, 平均周期は約 $1/3$ と小さくなる。

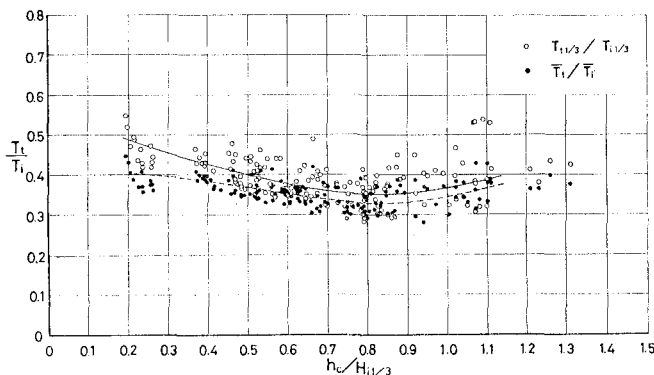


図-10 伝達波と入射波の周期の比

4. あとがき

以上、特定断面の消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について、 $h / L_{i/3} = 0.083 \sim 0.093$,

$h_0/H_{t1/3}=0.19\sim 1.3$ の範囲で行った実験結果を述べた。入射波の有義波周期の 2~4 倍以上の長周期成分を数値フィルターによりカットした伝達波についての主要な結果は以下のとおりである。

(1) 伝達波の波高分布は入射波のものと著しく異なる。本実験の範囲において、伝達波の有義波高に対する各代表波高の比は次のようになった。

$$\frac{H_{t\max}}{H_{t1/3}}=1.8\sim 5.2, \quad \frac{H_{t1/10}}{H_{t1/3}}=1.4\sim 1.8, \\ \frac{\bar{H}_t}{H_{t1/3}}=0.5\sim 0.6$$

特に、 $H_{t\max}/H_{t1/3}$ の値が大きく、かつ広く分布する。平均的には、有義波高の伝達率が小さくなるにつれて、この値は小さくなる傾向にある。

(2) 各代表波高同志の伝達率は、それぞれの代表波高に対する相対天端高が同じであってもやや異なる。特に、最高波高の伝達率は有義波高の伝達率に比較して大きい。

(3) 有義波高の伝達率は既往の規則波による伝達率と大差ない。 $h_0/H_{t1/3}=0.6$ のとき、 $H_{t1/3}/H_{t1/3}$ は 0.17 程度である。

(4) 伝達波の周期は入射波の周期に比較して短くなる。本実験の範囲では、有義波周期、平均周期ともに入

射波の 1/2 以下となった。 $h_0/H_{t1/3}=0.6$ のとき、有義波周期は約 1/2.5、平均周期は約 1/3 で、伝達波の波数は約 3 倍となる。

なお、本実験は運輸省第五港湾建設局の要請で行ったものの一部である。実験の実施およびデータの整理に際しては、港湾技術研究所水工部北谷高雄技官、和泉田芳和技官、および同所昭和 53 年度研修員石川 卓氏（技研興業株式会社）の協力を得た。ここに記して厚くお礼を申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) Goda, Y.: Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters. Rept. of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3~18, 1969.
- 2) 近藤俊郎・佐藤 功: 防波堤の天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第 117 号, pp. 1~15, 1964.
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治: 不規則波実験とその特性について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 237~242, 1974.
- 4) たとえば, Seeling W. N., Effect of breakwaters on waves: Laboratory tests of wave transmission by overtopping, Coastal Structures '79, pp. 941~961, 1969.
- 5) 前出 3) に同じ
- 6) 前出 3) に同じ
- 7) 前出 2) に同じ
- 8) 前出 3) に同じ