

# 砕波特性による防波堤の合理的な前面勾配について

加藤 重一・高尾 聰秀

台風時における防波堤決壊があとをたない現状にかんがみ、直立堤よりも勾配堤の方がよいとする見解を一步前進させて、具体的に合理的な堤防前面勾配をいかにすればよいかについて実験的に考察した。すなわち傾斜板を $10^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ の間で変化させ、種々の入射波の砕波特性を調べることによって、最も重大な砕波点が壁面上に生起する時の砕波点衝撃発生限界について考察した。

防波堤設計に際しての基礎資料の一つとしたい。

## まえがき

防波堤（堤防も含む以下同じ）に入射する強風時の波浪、特に砕波は、その設計に際し防波堤決壊防止対策上最も重要な要因である。それは、端的に言って防波堤前面壁の傾斜度に関係する。また砕波については、従来、巻き波、くだけ寄せ波等に分類<sup>1)</sup>され、それらの特性についていろいろ研究されてはいるが、この防災上、防波堤形状（特に前面壁の勾配）にどのようにこれらの研究成果が反映されているかについては、やや不十分なところがないでもない。

本研究は、単勾配壁の実用上の傾斜 $0^{\circ}$  ( $10^{\circ}$ )より $90^{\circ}$  ( $50^{\circ}$ )までの変化に対し、種々なる水深において、網羅的に設定した波形勾配 ( $H/L$ : 波高/波長) をもつ義波としての模型入射波がどのように変形するかを入念に実験し、壁面への入射特性を調べると同時に、最も重要な（波圧強度の最大となる）砕波点衝撃の生起する限界を見きわめ、合理的な前面壁勾配についてはその形状を見いだすための基礎研究の一端を提示するものである。

## 1. 実験の方法

### (1) 実験設備

a) 実験水槽:  $19.5$  (W)  $\times$   $440$  (H)  $\times$   $1,196$  (L) (cm)

### b) 造波装置

種類: 万能ペンジュラム式規則波発生造波機  
性能

水深 $15$ (cm) に対して	水深 $25$ (cm) に対して
波高 $1.5\sim 9.9$ (cm)	波高 $4.0\sim 13.5$ (cm)
波長 $30\sim 135$ (cm)	波長 $80\sim 850$ (cm)

模型波は、各水深ごとに Steepness  $0.01\sim 0.12$  の範囲で波高、波長を種々組み合わせ<sup>2)</sup>て $24$ 個 ( $h=15$ cm) および $29$ 個 ( $h=25$ cm) の入射模型波を実験に供した。

c) 波高は、抵抗線式波高計を用いた。

以上のことがらを図. 1 に示す。

### (2) 砕波の観測について

計測、目測および VIDEO CAMERA を用い、つぎの諸現象についてブラウン管で詳細に検討した。海底勾配が緩なときは、図. 2 に示すようにくだけ寄せ波が生起するが、この砕波には、つぎのような

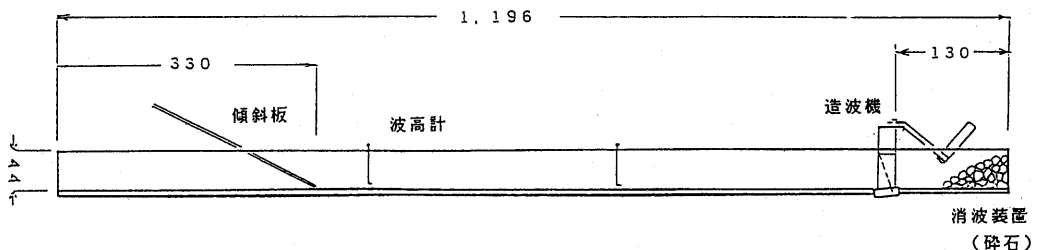


図. 1 水槽全体図 (Unit cm)

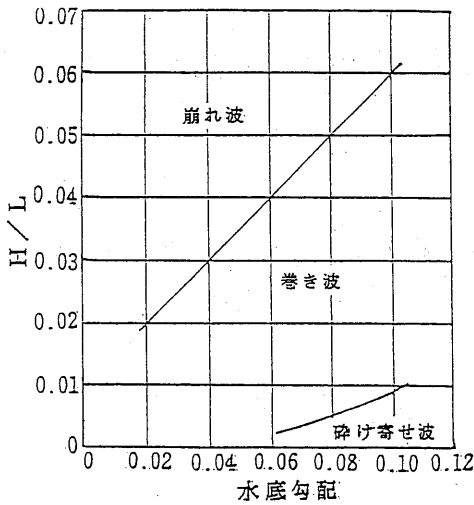


図. 2 砕波の分類<sup>1)</sup>

顕著な状態がマークできる。

砕波点 (B. P.)

いままさに砕波しようとする点をいうが、これは理論上の特異点で現象は複雑である。そこでつぎのようにきめた。すなわち、ビデオ映像を用いた波形線が切れたと思われる瞬間の点とした。

最高点 (M. P.)

第2砕波点ともいわれる<sup>2)</sup>。砕波点後もなお波高は増すが、その最高となる点をいう。

落下点 (D. P.)

バク砕点ともいわれ<sup>3)</sup>、砕波が最終的にエネルギーを放出し、あたかも砕波の渦乱状態が落下粉砕する点である。具体的には、擾乱の最も激しいところをもってした。

2. 実験結果とその考察

(1) 実験結果について

所定の、水深(15cmと25cm)および板の傾斜度(10°~50°)について、種々に設定した Steepness をもつ入射波の板上およびその付近における砕波状態を観測した。

従来、崩れ波、巻き波、くだけ寄せ波の現出する範囲は、図. 2 のように示されている<sup>1)</sup>が、本研究はこれを照査すると同時に傾斜度(横軸)を拡張し、

- ①: 巻き波とくだけ寄せ波の境界
  - ②: これらの砕波と重複波の境界
- について調べた。

その前に、術語として用いられている巻き波、くだけ寄せ波等をここではつぎのように解釈した。

崩れ波(波峰が崩れるような砕波で、これは左右

対象な波形を維持する波)は、今回の研究対象外とした。

巻き波は、文字通り波形は対象でなく巻き込むと同時に一挙に砕けるような砕波とされている。

くだけ寄せ波は、砕けつつ寄せると言う意味であろうか、十分説明がなされていないが、筆者らの見解では前述のような砕波点、最高点および落下点等、砕波生起に際して順次時間的、場所的にこれらの顕著な現象がみられるような砕波であると解釈する。これは、Steepness が比較的小さく、かつ海底勾配も小なる場合に生起する。

さて、防波堤前壁の傾斜面に入射する波は、これまで重複波と砕波に分けられて考察されているが、本研究は

- ①: どの程度の傾斜度で重複波入射となるか、
- ②: 砕波入射とは上述の巻き波、くだけ寄せ波の分類とどんな関係にあり、ひいては防波堤設計(防災)上どのような意義をもつか、

の2点について考察する。

概して言えば、防波堤前壁の傾斜度を小より大に変化させて砕波入射状態を観察検討すると傾斜度が小なる場合は、くだけ寄せ波が生起するが、傾斜度を徐々に大とすると上述した砕波点、最高点および落下点という諸現象が時間的、場所的に短縮され、ついにはこの3点がほとんど同時同箇所では生起するとみることが出来、これは巻き波である。換言すれば、傾斜度が小より大になるとくだけ寄せ波が巻き波に変化するとみることができないだろうか。

このような事実より、実験で得られたデータを各水深についてそれぞれ横軸に傾斜度、縦軸に Steepness をとり、各種砕波、重複波の起こる範囲を示せば図. 3 のようである。

図より明らかなように、概して入射波の Steepness や傾斜度がともに大となるとくだけ寄せ波より巻き波に変化し、ある程度の勾配に達すると、重複波入射となることが理解できる。

その傾向についてみると、くだけ寄せ波の生起する範囲は傾斜度は25°を越えず、Steepness は0.02~0.03以下の入射波であることがわかる。典型的なくだけ寄せ波は、10°以下の勾配に出現する。

巻き波は、Steepness	0.01	で勾配	15°	以下
	0.02	〃	20°	〃
	0.03	〃	25°	〃
	0.04	〃	30°	〃
	0.05	〃	35°	〃
	0.07	〃	40°	〃

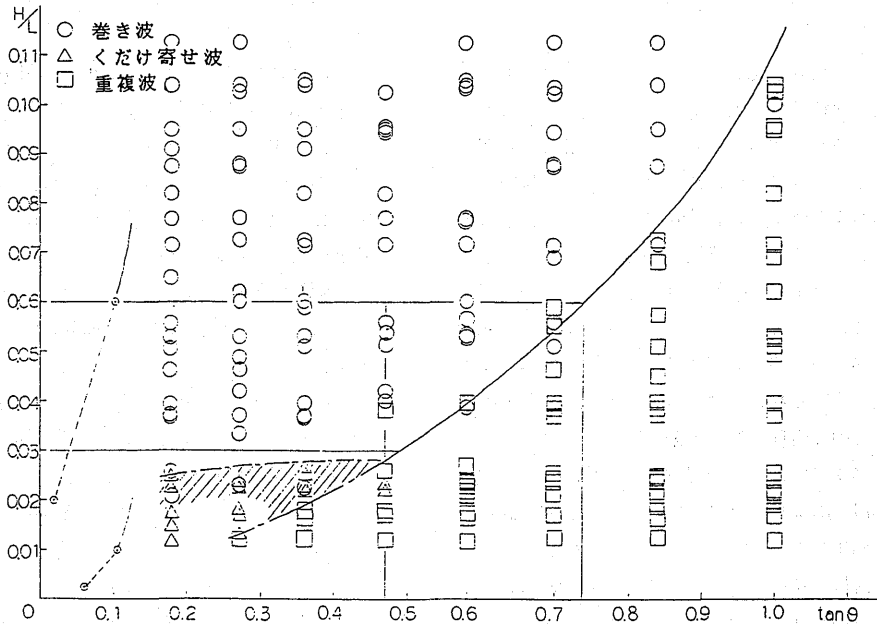


図. 3 (a) 各種砕波の発生範囲 [縮尺50分の1 ( $h = 15\text{cm}$ )]

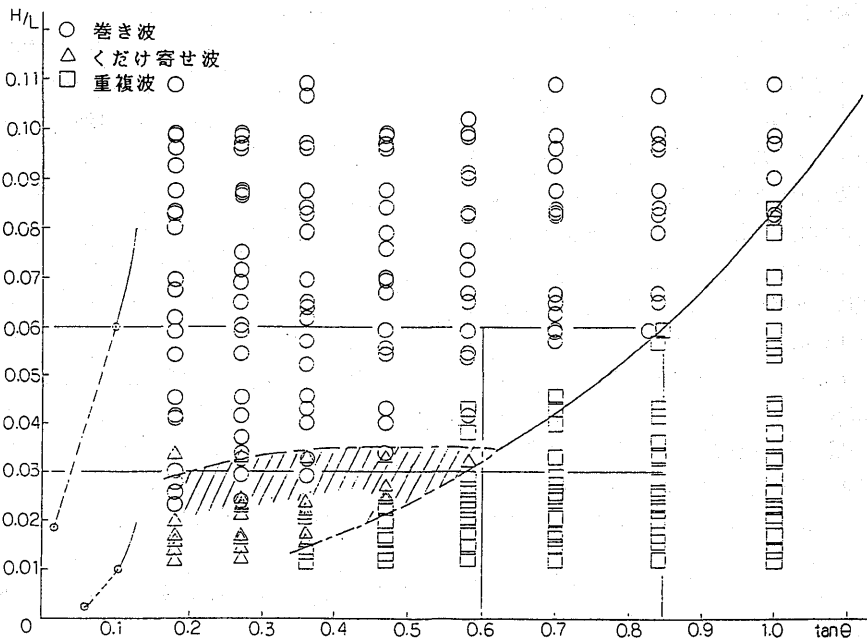


図. 3 (b) 各種砕波の発生範囲 [縮尺40分の1 ( $h = 25\text{cm}$ )]

の範囲に生じし、各 Steepness についてそれぞれの巻き波発生限界傾斜度以上はすべて重複波となるわけである。

特に、傾斜度 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ の間にあつては、Steepnessの大となるにしたがつて重複波 $\rightarrow$ くだけ寄せ波 $\rightarrow$ 巻き波と変化する傾向がみられる。しかしこの領域は、

砕波状態が複雑であり、いわばくだけ寄せ波と巻き波との遷移区間と解しうる。これを図. 3の斜線陰影の部分で示す。それらの Steepness 以上、勾配以上になると入射波はある限界で巻き波入射より重複波入射となることがわかる。さらに、ここで留意すべきことは、巻き波と重複波入射の境界付近は、砕

波点入射（最も危険な場合）となる可能性が生ずるということである。

(2) 考察

防波堤の設計に際しては、強風時の碎波入射時を最も危険な状態としてマークされる。確かに碎波圧は、重複波圧に比べてきわめて大きい値となるが、前節でみたように一口に碎波と言っても、碎波点、最高点および落下点の各状態における波圧強度は大きい異なり、ここでは碎波点すなわち碎波点衝撃が（Bagnold 効果を伴う）おきる時の波圧が最強である。これはいままさに砕けようとする重複波状態保持の限界であって、防波堤はこの碎波点衝撃を避けるように設計しなければならないということの意味する。この場合理論的に従来は定常波として検討されているので、垂直壁以外の勾配堤にあつては、Bagnold 効果は発生せず、したがって上述の碎波点衝撃も発生しない屈屈とはなるが、実際においては種々な海岸形状のため、反射率が入射毎にそれぞれ異なり、いわゆる入射波はすべて部分重複波となる。筆者の計算<sup>4)</sup>では図. 4 に示すように水分子運動軌跡の楕円は一波毎に複雑にその長軸の傾斜度が変化する。そのため、たとえ垂直壁とはみなしえない傾斜壁であっても碎波点衝撃発生は可能となるわけである。これは実験においても、実際現場においても、常に認められているところである。したがって、実際には重複波の碎波限界付近で入射する波は碎波点衝撃発生の可能性を包蔵しており、碎波点以後の碎波で入射する波よりはるかに危険だと言ひ得る。もちろん堤脚の水深が十分大で、碎波発生を全く考慮しなくてよい場合は論外であるが、実際台風時においては、部分重複波であること（これは、海岸線や海底の複雑な形状、いろいろな人工構造物の存在等による屈折、回折現象に基因する。）が、台風時の入射波の特性であるので、堤脚水深が波高の2~3倍程度では、理論上で重複波入射と断定することは危

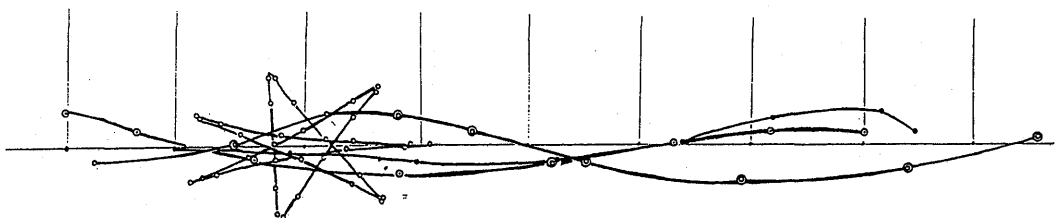
険なのである。以上のような事実は、防波堤設計に際して本研究によりつぎのように言うことが出来る。

くだけ寄せ波や巻き波入射は、傾斜面上で碎波するので Bagnold 効果を伴わず、波圧強度は比較的小さい。問題は、いままさに碎波しようとする重複波の状態に注意すべきであって、碎波点衝撃発生の可能性は、重複波と碎波（巻き波）の限界近傍に生じるといえる。ゆえにその限界をもって勾配堤の許容最大傾斜度としなければならないということであろう。図. 3 は合理的な傾斜堤前面勾配の設計における基礎データを供するものとする。

一概には言えないが、一般に設計にあたっては、台風時において最も注目すべき波の Steepness は、0.03~0.06の範囲の入射波であるとすれば、図. 3 から判定するとその許容最大傾斜度は約30° (tan  $\theta=0.6$ )、すなわち 1 : 2 (約 2 割の勾配壁堤) と言うことができよう。この場合、図. 3 において Steepness が 0.03 で tan  $\theta=0.6(28^\circ)$ 、Steepness が 0.06 で tan  $\theta=0.84(40^\circ)$  となる。Steepness 0.06 の入射波の方が 0.03 の場合より波力は大きであるが、ここでの安全側の設計としては、堤防前壁の傾斜の緩な場合の方を採るべきであろう。すなわち 0.03 の入射波の碎波（巻き波）限界における壁面勾配を許容最大傾斜度 (=30°) としてとる方が防災上合理的であろう。

なお、水深についてみると 15cm の場合と 25cm の場合とでは、15cm の方が最大傾斜度が小となっている。さらに多くの水深を変化させた場合の実験を繰り返す必要があるが、実用上の観点から模型縮尺をも考慮すると、この程度の勾配が妥当と言えよう。この実験に供した水深 2 者についていえば、水深が小さい場合の方が勾配を小としなければならない、ということである。これは一見矛盾するようであるが、波圧強度の大小と言うこととはまた別の問題であら

$$(0,0) \quad (\lambda_a/8,0) \quad (\lambda_a/4,0) \quad (3\lambda_a/8,0) \quad (\lambda_a/2,0) \quad (5\lambda_a/8,0) \quad (3\lambda_a/4,0) \quad (7\lambda_a/8,0) \quad (\lambda_a,0)$$



反射率 80%    2a=10cm    2b=8cm    h=20cm    Ta=12sec    Tb=0.9cm    λa=220cm    λb=160cm

図. 4 水分子運動の軌跡<sup>4)</sup>

う。

以上を要約すれば、防波堤は強風時の波浪に対して約2割以下の単勾配堤に設計すべきであるということになる。この程度の勾配堤は設計に際しての他の見地、たとえば軟弱地盤や砂層地盤のような悪い地盤上の築堤における破壊沈下や洗掘災害に対しても、この程度の勾配堤は妥当であるといえる<sup>5)</sup>。また堤防は単勾配堤とは限らず、他の諸条件より混成堤や消波ブロック積堤とする場合が多々ある。本論文はこれらの一般複合勾配堤の設計に際しても一つの基準ともなりえよう。

## 結 言

これまで防波堤といえば直立堤よりも勾配堤の方がより合理的であるとされてきたことは常識中の常識であるが、ではどの程度の勾配がよいかということについてはほとんど科学的な答えはかえってこなかった。堤防工学の盲点とも言うべきことがらであった。繰り返される台風時の防波堤災害はあとをたたないようにみうけられるが、今後そうあってはならないと考える。

本研究は、昭和62年12号台風による長崎県下の災害に際し頂いた文部省科研費によって行った研究成果の

一部であることを付け加える。

また、本研究の実験実施、データ整理等に際しては当時本学工学部土木工学科4年生であった城戸淳一、楠瀬一郎、浦川誠一、犬伏敏雄の諸氏の御努力に負うところがきわめて大きい。

明記して謝辞を表す。

さらにこの実験設備の作製や整備にあたっては同助教授、古本勝弘博士、一ノ瀬和雄技官らの御協力をえた。併せて感謝の意を表す。

## 引用文献

- 1) 土木会編：水理公式集，昭和60年度版，p. 510
- 2) Iversen, H. W. : Wave and Breakers in Shoa-ling water, Proc. of 3rd. Coastal Conf. of Coastal Eng. 1952.
- 3) 佐藤清一：水理学 下巻，森北出版，1955，p. 192
- 4) 加藤重一，白石英彦：部分重複波について，農業土木研究，26巻6号，1959，pp. 22-25
- 5) 加藤重一：水産土木概論，恒星社厚生閣，1984，p. 169および pp. 205~246