

水平板式防波堤の水利特性に関する研究

田 渕 幹 修*・木 原 力**・滝 川 清***・中 島 重 旗****

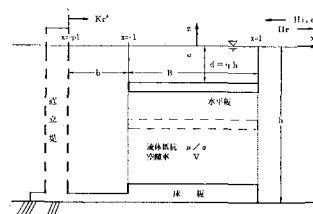
1. ま え が き

近年港湾構造物の設置条件が多様化し、特に大水深域や軟弱地盤上への防波堤設置に関係し多くの技術的課題が提起されている。本研究ではそうした課題の1つとして、水平波力の小さい防波堤の開発を目的とし、水平板式防波堤をとりあげて、その基本的水利特性を調べるものである。

この水平板式防波堤は、水面下に設置された1枚の水平板による潜堤と、その背後の直立堤よりなる。これは水平板の幅と深さを適当にとったときの潜堤の働き、すなわち、水平板上下の流体運動の干渉効果により通過率、従ってまたその背後、直立堤前面の水面変動が小さくなる事、または水平板後端と直立堤間の距離が適当な時、直立堤前面の水面変動が、水平板前面の水面との共振関係で極小値をとる事によって、直立堤に作用する水平波力（と越波）を水平板がない時に比し減少させようとするもので、さらにまた水平板上で波が容易に碎波することによって、直立堤には碎波力は作用せず、かつ低反射の構造物としても期待できる。

水平板をもつ防波堤については、井島ら¹⁾は詳しい計算を行なってその特性を調べ、またその後水平板を透過層と組み合わせ、あるいは透過層に置きかえて、波の反射の小さい遊水部を有する直立消波堤等の構造様式へと発展させている。しかしながら、ここでとり上げるような低波力を目的とした防波堤としての議論は十分でなく碎波の効果についても調べられていない。（低反射を主目的とした遊水部を持つ直立消波堤と、低波力を主目的とした水平板式防波堤では、直立不透堤前面と外海の水面共振の利用視点は全く逆で、またエネルギー損失を期待する機構も、前者は透過層の流体抵抗、後者は碎波にあり、後者にとって流体抵抗の存在は不利となる事も多い。）

背後の直立堤を考えない水平板のみの構造様式につい



図—1 水平板式防波堤

ては、服部^{2),3)}の研究や潜堤としての機能に注目した著者ら⁴⁾の報告がある。特に服部ら³⁾は碎波の効果を考慮した計算も行なっているが、長波近似の解析であり、また碎波減衰を入射波特性と直接関係づける等、実際現象の機構との対応は必ずしも十分ではない。

また、谷本ら⁵⁾は大水深波浪制御構造物の1つとして水平板付立体骨組構造をとり上げて、反射・伝達および波圧等の特性を調べている。

ところで、水面下に水平板を有する構造物の水利特性を計算によって明らかにしようとする場合、水平板上の波の碎波による減衰、および水平板上の波の強い非線形性（有限振幅性）を考慮しなければならない。

波の有限振幅性を考慮した計算は、滝川ら⁶⁾による有限要素法の非定常計算により可能であり、またポテンシャル接続法の拡張も考えられる。特に有限要素法の場合、波の有限振幅性に起因する問題のほとんどは計算システム内で自動的に解決され、また碎波減衰を考慮した計算も可能⁷⁾で、有力な数値シミュレーション手法といえる。しかし、本報告では、計算負担の小さい井島⁸⁾による線形のポテンシャル接続法をベースにして、これに、この計算の精度に応じた簡単なモデルにより碎波減衰を考慮し、また有限振幅性の効果としては最も影響が大きいと思われる板上波の波長の波形勾配による変化のみを考えた。

2. 解析手法

図—1に示すように、水深 h の水域に水面下 $d (=gh)$ に設置された幅 B の水平板式潜堤と、その背後の、水平板後端から b だけ離れた位置の直立堤との複合タイプの

* 正会員 熊本大学講師 工学部環境建設工学科

** 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長

*** 正会員 工博 熊本大学講師 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境建設工学科

防波堤を考える。

これの理論展開については、井島による詳しい解説⁸⁾や多くの報告⁹⁾があり、これらの簡単な応用で可能であるので、ここでは説明を省略する。

ただし、水平板上の速度ポテンシャルは、進行・後退の両波を分離し、かつ碎波減衰により速度ポテンシャルの振幅が変化することを、また、直立堤と水平板間の水域では直立堤の任意反射率 K_r' を考慮した表現とする。

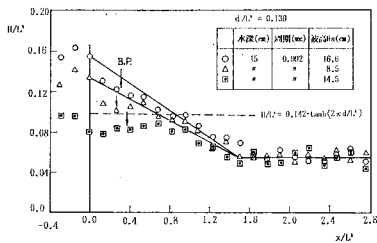
碎波減衰特性については次章で考察する。また水平板上の波の、波形勾配を考慮した波数は、著者らの解析解¹⁰⁾により計算した。

なお、理論解析は 図-1 に示すモデルを設定しているが、本報告の計算では、直立堤の反射率 K_r' は 0 (潜堤のみ) または 1 (不透過直立堤) の場合で、水平板及び床版の厚さ、水平板下の流体抵抗等は無視し、水平板は 1 枚のみとしている。

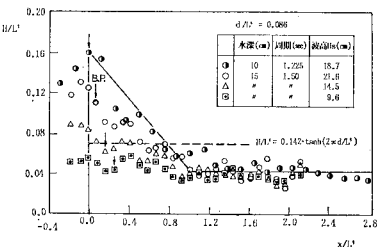
3. 水平板上の波の碎波減衰について

水平板上の波の碎波減衰特性を定式化する目的で実験を行った。実験は、逆行波の影響を無視でき、また碎波がほぼ完了するまでの特性を得るために、長い (4 m) 水平板を用い、これを水路床上 50 cm の位置に設置、板上水深を 10 cm および 15 cm とし、入射波の周期・波高を変化させて板上の波高変化を調べたものである。実験結果の例を 図-2、図-3 に示す。これらの図で横軸は水平板始端を $x=0$ として x/L' で示している。ここで L' は水平板上の波の線形理論による波長である。

図-2 は、波形勾配 H/L' の波の進行に伴う変化を示している (図の凡例中 H_s は $x=0$ における波高)。図中に浜田(1951)による碎波指標を破線で示している。また



(a) $d/L' = 0.139$



(b) $d/L' = 0.086$

図-2 水平板上の波の碎波による波高減衰

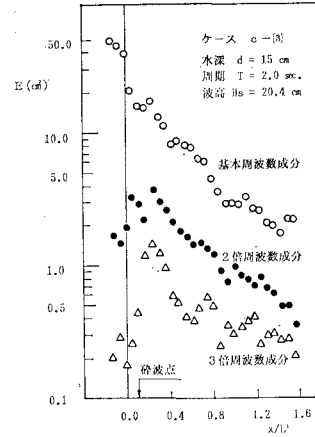


図-3 碎波による成分波エネルギーの減衰

目視による砕波点を、その位置に近い測点値に矢線を付して示した。

また、図-3 には、基本波およびその高調成分波のもつエネルギーの場所的变化を示した。図-2 より分るように、水平板上では通常の碎波指標を越える波形勾配の大きい波が出現すること、また、このような波が水平板始端付近で必ずしも碎波の状態にあるとは限らない事が特徴的である。また、碎波 (空気泡の混入) が、波峯からではなく波の前面の静水面に近い部分から始まる例も多く観察によって確認される。これらに関連して、水平板始点の波の高調成分波の成長度 (エネルギー占有率) は入射波のそれにかかなり依存しており、水平板始端付近ではいわゆる定形波に到る過渡状態にある事、また定形波に比し高調成分の成長度が小さい波の碎波限界は定形波のそれより大きく、このような波が定形波に変形する過渡状態の途中で碎波限界に到った時、碎波が始まることが推察される。

ところで、図-2 より分るように、上記の過渡状態の過程および碎波の過程での波形勾配の変化は、詳細にみると複雑であるが、本研究の意図と、採用する計算方法より期待できる計算精度 (現象に対する) に対応した表現を考えると、過渡過程の存在は無視して、図-2 に実線で例を示しよように、碎波により直線的に波高が減少するとした、次式で示すような簡単なモデルで十分であると考えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{L'} &= \alpha \left(\frac{H}{L'} \right)_b + \left(\frac{H_s}{L'} \right) \left\{ 1 - \alpha \left(\frac{H}{L'} \right)_b / \left(\frac{H_s}{L'} \right) \right\} \\ &\times \left\{ 1 - \left(\frac{x}{L'} \right) / \left(\frac{x}{L'} \right)_b \right\} \\ \left(\frac{x}{L'} \right)_b &= \begin{cases} 0.06 + 5(d/L') & d/L' > 0.08 \\ 1.0 & d/L' \leq 0.08 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上式で $(x/L')_b$ は主要な碎波による減衰が終了する距離である。また、碎波限界 $(H/L')_b$ には浜田の碎波指標を用い、 $\alpha=0.6$ とする。

4. 水平板式潜堤の通過率に関する実験と計算結果の検証

図-1 において直立堤が存在しない ($K_r'=0$)、いわゆる水平板式潜堤について通過率特性を実験的に調べた¹¹⁾。なお通過率 K_t は、高次の自由波の発生等により水面が乱れているため、エネルギーの 1/2 乗の比で定義している。

図-4 に実験結果の一部を示す。また図中の実験は計算結果である。計算結果において、入射波の波形勾配 H_i/L が 0 の点の値が線形解で、この点から K_t は H_i/L の増加とともに変化しつつ途中で実線と破線に分岐している。この分岐点は水平板上の波の碎波と非碎波の分岐に対応しており、これより H_i/L の小さい所の実線は非碎波で波長の変化を、これより大きい所の実線は碎波でさらに碎波減衰を考慮したものとなっている。

現象の複雑さの割には実験と計算結果の一致は良く、この計算方法による結果によって水理特性を議論することは可能であるといえる。なお、さらに計算精度を上げるためには、既述の板上波の定形波への遷移過程や高次の自由波の発生等を含んだ非線形処理と碎波過程の詳細なモデル化が必要と思われる。

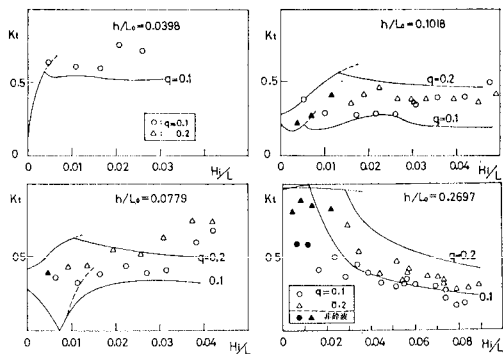


図-4 水平板式潜堤の通過率に関する実験値と計算値の比較 ($B/h=2.0$)

5. 計算結果

1) 水平板式潜堤

図-5, 図-6 に、 $B/h=2.0$ で $q=0.1$ と 0.2 の場合の通過率 K_t を、横軸に相対水深 h/L_0 (L_0 は線形沖波長) をとって、入射波の波形勾配 H/L が 0 (線形) および浜田による限界波の 0.2, 0.5, 1.0 倍について示す。

潜堤の通過率は、水平板上と板下のエネルギー流束の比と位相差に關係しているが、 $H/L=0.2(H/L)_b$ の場

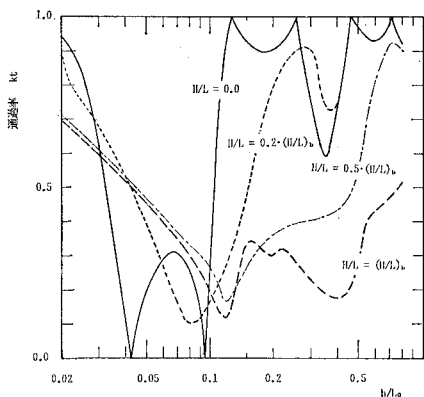


図-5 水平板式潜堤の通過率 K_t ($B/h=2.0$, $q=0.1$)

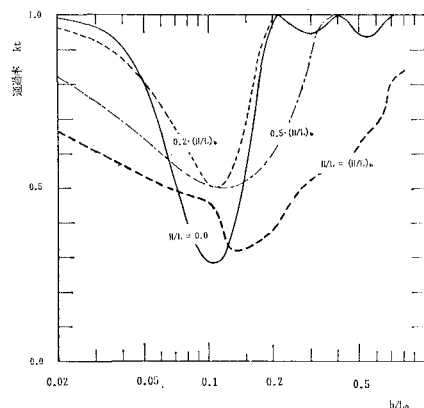


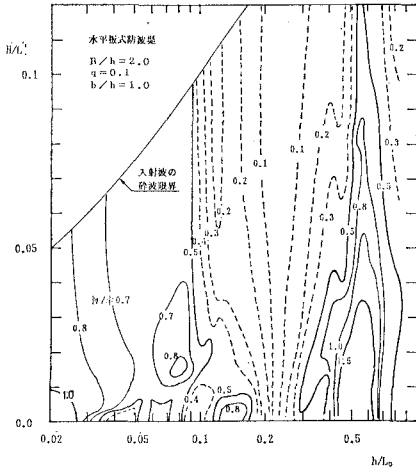
図-6 水平板式潜堤の通過率 K_t ($B/h=2.0$, $q=0.2$)

合、板上波の波長増大の効果が効いて B/h が小さくなる時と同様の变化を示している。さらに H/L が大きくなると、碎波によるエネルギー減衰のため全般的に通過率は減少する。しかし極小値の値は、線形解がそれよりやや大きな値をとり、大きな変化はない。碎波域における H/L の増加はエネルギー損失の増加に対応するにもかかわらず H/L の増加に比し K_t の減少が小さい場合は、反射率が減少している事を示す。

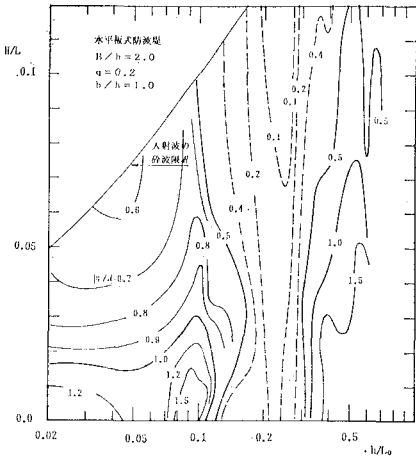
なお、線形解では、水理特性は相対水深の変化に非常に鋭感であるが、入射波の波形勾配 H/L が大きいときは、碎波によってこの傾向が緩和され、実用化を考える上では好都合となっている。

2) 水平板式防波堤

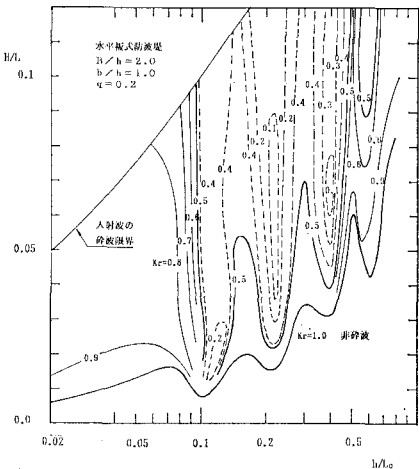
図-7, 図-8 に、直立堤前面(壁面)での水面変動量 $| \eta/a |$ の等値線を示した。ここに a は入射波の振幅である。水平板が無い場合は $| \eta/a |$ の値は 2.0 となる。また、 B および b が極端に小さい場合を除き、直立堤には碎波圧は作用しないので、直立堤に作用する水平波力は、入射波の相対水深と波形勾配に対応した完全重複波の波圧に、図中の数値の 1/2 を乗じればよい。



図—7 直立堤前面の水面変動量 $|\eta/a|$ ($q=0.1$)



図—8 直立堤前面の水面変動量 $|\eta/a|$ ($q=0.2$)



図—9 等反射率(K_r)線

図—9 は反射率の計算例である。これらの図より、一般に水面変動量(従って波圧も)、反射率とも水平板の存在によって非常に小さくなり、特に反射率は入射波の波形勾配が大きい程その効果が大きいことが分る。

6. 最適断面決定の考え方

1) 水平板幅およびその設置深さ

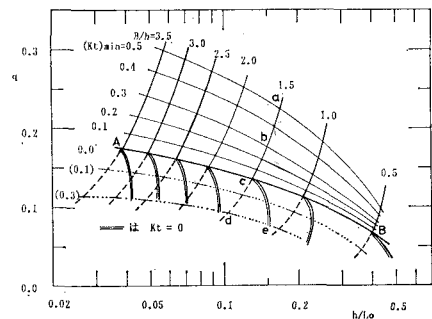
水平板式防波堤で、水平波力を小さくする為の一つの考え方は、通過率を極小とするような幅と設置深さの水平板式潜堤を、直立堤前面に設けることである。この、最適な水平板幅 B/h と設置深さ q の目安を得る概略的な考え方を示す。

潜堤の通過率 K_t は、図—6 に示されるように K_t が 1 つの極小値を取る場合から、 q が小さくなり B/h が大きくなる時 K_t が折り返し点をもち 2 つの 0 点と 1 つの極大値をもつ状態(図—5)へと変化してゆく(ただし線形解の特性。また h/L_0 の大きい所は考えない)。

この線形解の特性と、 H/L が大きくなる時の特性を対応させてみると(図—5, 図—6 参照), 最適断面の目安は線形解を用いて次の考え方で得られる。すなわち, K_t の極小値を 1 つ有する時は、この点の相対水深と K_t の値を目安とし, K_t が折り返しとなり 2 つの 0 点を有する時は h/L_0 の大きい方の 0 点が現われる相対水深を基準として、2 つの 0 点に挟まれた部分の K_t の値を参照しつつ最適値に幅をもたせる。この考えで、入射波の h/L_0 , B/h および q の最適な関係を図—10 に示す。

例えば $B/h=1.5$ で K_t を約 0.3 程度まで許容する時は、図—10 で bc 上および cd と ce で挟まれる部分が目安として得られる。

なお、実際にはこの後、対象海域の波浪特性、例えば周期別最大波の出現傾向や潮位変動による h の変化を考慮した詳細な検討が必要となる。



図—10 水平板の最適な幅および設置水深の推定図

2) 水平板端と直立堤間の距離 b について

図—11, 図—12 は直立堤前面の水面変動量 $|\eta/a|$ の b/h による変化を示した計算例である。また、図—11 に

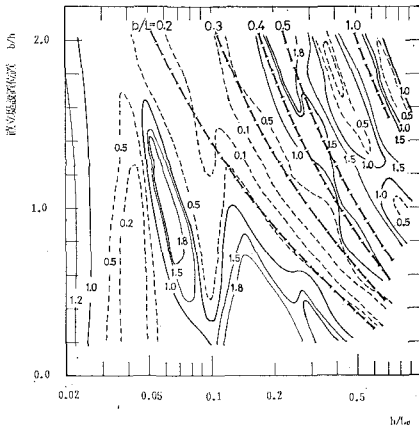


図-11 直立堤前面の水面変動量 $|\eta/a|$
($B/h=2.0$, $q=0.2$, $H/L=0.0$)

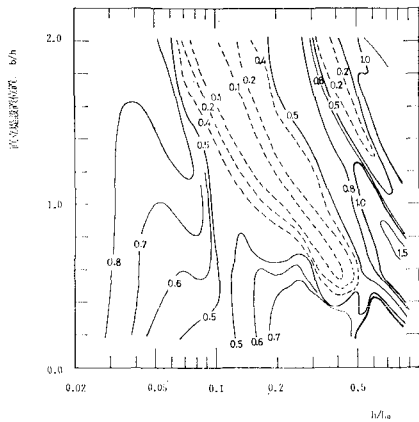


図-12 直立堤前面の水面変動量 $|\eta/a|$
($B/h=2.0$, $q=0.2$, $H/L=0.5(H/L)_b$)

は b/L の代表的な値を太い破線で示した。図-11 より $|\eta/a|$ は b/L が $1/4, 3/4, \dots$ の時小さく、この特性は、図-12 に示すように H/L が大きい場合も同様である。これは、直立堤前面水域で形成される重複波が水平板後端で節を持って、この点の水面変動を抑制するため、水平板の存在により波が反射されることによる。

結局、最適な b は $b/L=1/4$ として決定される。なお、 b/L が $1/8, 1/2, 1, \dots$ の時は逆に水面の共振が生じるので避けるべきで、この点は遊水部を有する直立堤と最適断面の考え方を異にする所である。

図-13 に、図-12 の条件に対応する反射率特性を示す。

7. あとがき

これまで水平板式潜堤の最適断面決定の資料はほとんど無く、防波堤タイプに関するまとまった研究も皆無であったが、本報告では、水平板上の碎波と波長の波形勾

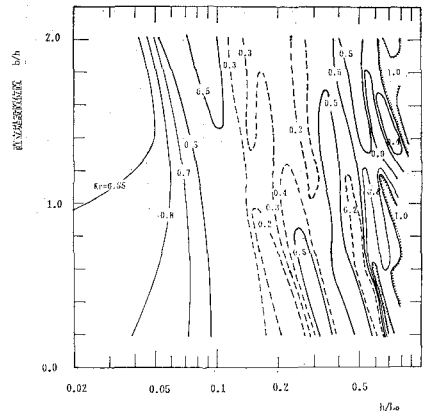


図-13 等反射率線
($B/h=2.0$, $q=0.2$, $H/L=0.5(H/L)_b$)

配による変化を考慮した計算を行い、諸特性図及び、最適断面を決める考え方と方法を示すことができた。特に防波堤タイプについては、潜堤の最適断面と直立堤前面水域の最適幅の2つの原理が独立に成り立つことが分りこれにより現実的対応の幅を広げられるものとする。

なお、潮位変動や大水深対応のバリエーションの検討や、今回は大局的特性の把握を目的とし、計算が重くなる事を避けたため無視した、興味ある諸現象の解明等、残された課題について今後も研究を継続する予定である。

参考文献

- 1) 井島武士・尾崎重雄・江口泰彦・小林 彰：水平板による防波堤と岸壁に関する理論的研究(2)，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 97~106，1970。
- 2) 服部昌太郎：水平板式透過性防波堤の波高伝達，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 513~517，1975。
- 3) 服部昌太郎・松本文信：水平板式透過性防波堤の水理特性，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 266~270，1977。
- 4) 田淵幹修・滝川 清：離岸防波堤の消波機構に関する一考察，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 367~371，1981。
- 5) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1)，港湾技研資料 No.516，39p，1985。
- 6) 滝川 清・田淵幹修：有限要素法による波動解析について，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 1~5，1980。
- 7) 滝川 清・田淵幹修・山田文彦：碎波による波高減衰に関する一考察，昭和61年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 214~215，1987。
- 8) 井島武士：最近の波浪理論における境界値問題の解法とその応用，水工学シリーズ，71-B-1，土木学会水理委員会，pp. B-1-1~B-1-31，1971。
- 9) 例えば，前出(1)や井島武士・田淵幹修・湯村やす：水限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文集，第202号，pp. 33~48，1972。
- 10) 田淵幹修・滝川 清：有限振幅波の新しい理論解に関する研究，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 6~10，1985。
- 11) 田淵幹修・滝川 清・山田修三：干渉型潜堤の消波効果について，昭和57年土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp. 126~127，1983。