

海岸堤防の形状特性ならびに波の陸岸への遡上

建設省土木研究所, 工学博士 佐藤 清 一
建設省土木研究所 岸 力

Part. I. 海岸堤防の形状特性

I. 緒 言

筆者らは第1回講演会において直立堤について堤高算定法を示した。更に第2回講演会においては京都大学での実験結果が発表され、直立堤については、かなりその性質が明らかになって来た。

しかし堤防の形状は地形、堤防前面の水深、波の特性および基その状態に応じて決定されるべきであるに拘わらず、直立堤以外の堤防形状に対する資料は殆んど整っていない。我が国各地の堤防をみても直立堤あり、傾斜堤ありまた傾斜堤でも法の急なものあるいは緩やかなものありで極めて多種多様である。これらは長年月の経験と設計者の創意と苦心の結果ではあるが、その力学的な特性が分析されていないため、ある場所に最適な堤防形状を考える一般的な基準は容易に把握する事が出来なかつた。

堤防の形状特性を考える場合の問題点としては、(1) 法勾配と衝突波高、(2) 法勾配と波力の分布、(3) 法勾配と前面洗掘などが主なものと考えられる。本文はこれらの問題に関する第一段階として、先づ我国の堤防のうちでは勾配が緩な例に属する2割勾配の堤防について衝突波高に関連した問題を論じたものである。

実験は水深 25cm の水路の一端に勾配 1/17 の海底斜面を作り、その上に法勾配 2 割の堤防を設けておこなつた。波の週期を 0.8sec~2.25sec に変化させ、波形勾配が 0.004~0.068 のはんいで変り得る様にした。

また最後に、浜斜面における波の遡上の問題に触れた。

図-1

II. 堤防を設けた場合の砕波

堤防に波が衝突するとき(1) 波が衝突前に既に砕けている場合、(2) 堤防法面の上で砕ける場合、(3) 砕けない場合の三種の状態が考えられる。波が衝突前から既に砕けている場合は勿論の事、堤防法面の上で砕ける場合にも圧力の性質は衝撃的になる事が考えられるので、上記3種の状態を区分する事を試みた。

実験結果は図-1において横軸に初期波形勾配 H_0/λ_0 、縦軸に浅水度 h/λ_0 (h は堤脚水深) をとり、(1) の状態を完全砕波として○で、(2) の状態を砕波時の巻き込みの大小によつて更に2分して巻き込みの比較的大きいものを●で、小さいものを×で示した。

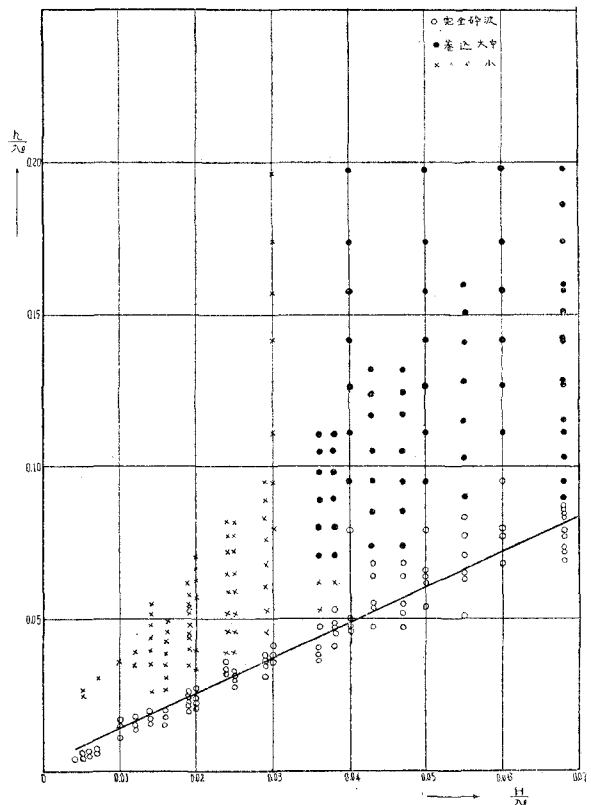
1. 完全 砕 波

堤防の設置が砕波に影響を及ぼすか否かをしらべる目的で、無堤時の砕波と比較してみる。

無堤時の砕波については $H_b/\lambda_b = f(h_b/\lambda_b)$ の関係がしらべられている¹⁾。 H_b/λ_b を H_0/λ_0 に換算した

$$h_b/\lambda_b = (h_b/\lambda_0) (\lambda_0/\lambda_b)$$

から h_b/λ_b に対応する h_b/λ_0 を求むれば



1) 岸力：海岸の波浪，第2回海岸工学講演会，1955。

図 2

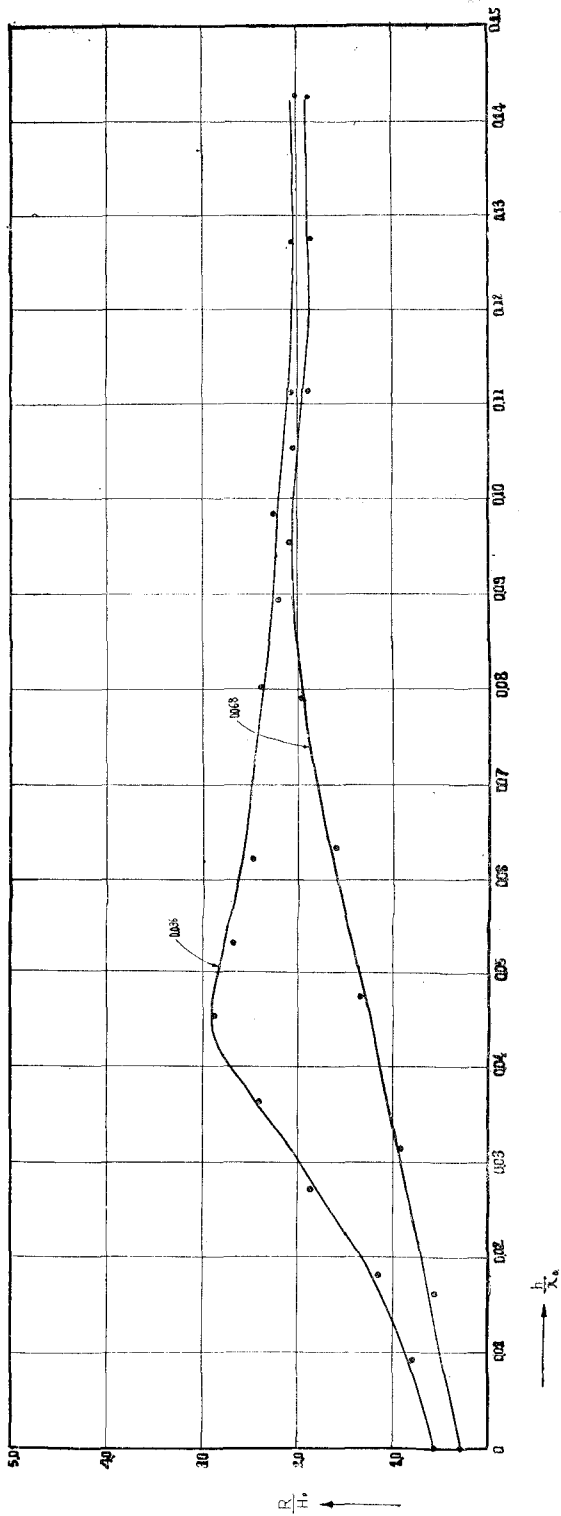
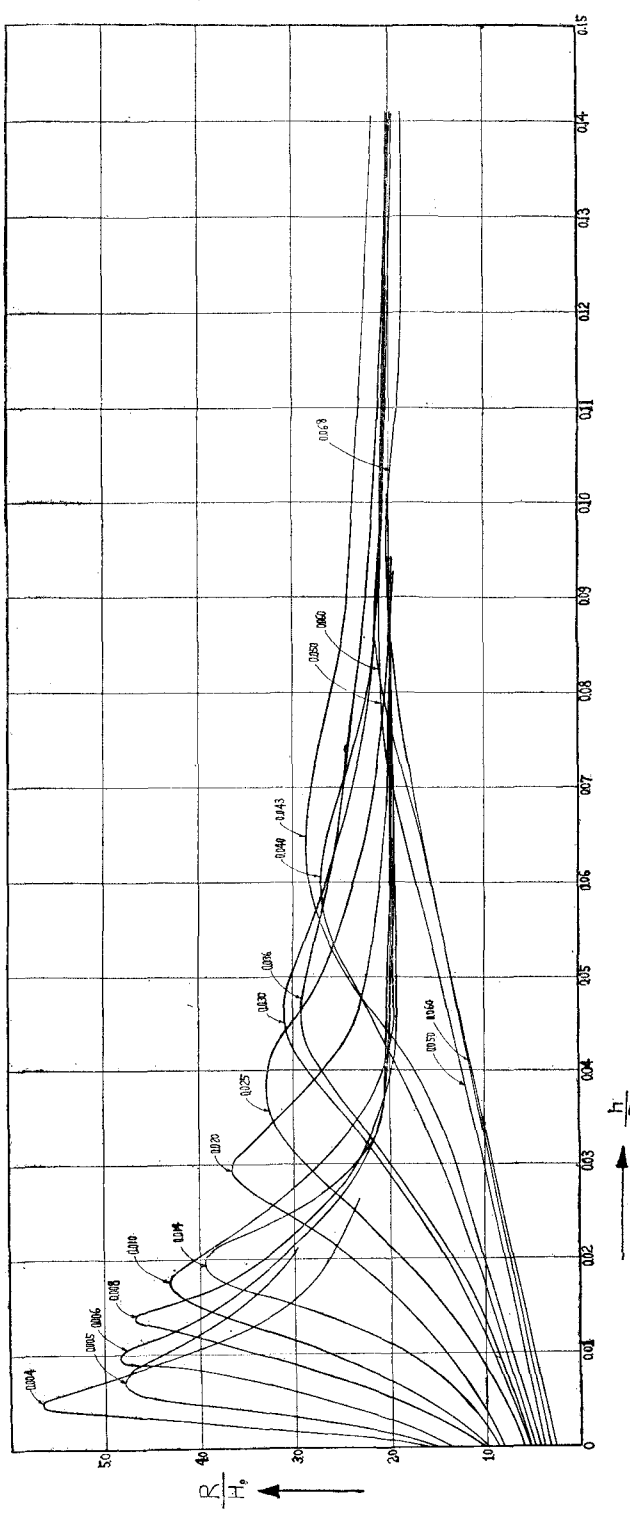


図 3



$h_b/\lambda_0 = F(H_0/\lambda_0)$ の関係が定まる。これを図-1に実線で示した。完全碎波の測定値は、ほぼ実線で示した理論値と一致している。図にあらわれた測点のばらつきは、堤防が完全碎波に及ぼす影響とみられ、無堤時の実験と比較すれば多小碎波の理論値より浅い所で碎ける傾向が認められるが、図-1から判断してこの効果は実際上は無視出来る程度である。

2. 堤防法面上で碎ける場合

この場合は、図-1から明らかな様に波形勾配によって性質が2つに分けられる様である。初期波形勾配が0.03より小さな波ではあまり著しい巻き込みはあらわれず波形も重複型であり、堤脚水深が前述の碎波水深に達して急に完全碎波に移る。

これに反し、初期波形勾配が0.03より大きな波では、巻き込みは始めからかなり大きくあらわれ、やがて完全碎波の状態に移る。参考のため、重複波の碎波限界線²⁾も記入したが、巻き込みは重複波の限界より水深の大なる所で始まっている事がわかる。

堤防法面に働く波圧は、巻き込みの部分では衝撃的な作用が加わるものと考えられるので、波形勾配の大きな波では注意を要する。巻き込みが法面上如何なる位置で生ずるかは現在検討中である。

III. 潮 上 高

静水面から測った潮上高 R は堤脚水深 h および波形勾配によって変るので、 R および h を沖波々高 H_0 および波長 λ_0 で無次元化し初期波形勾配 H_0/λ_0 をパラメーターとして実験結果の一例を示すと図-2の如くである。 R/H_0 の値は h/λ_0 が同一でも波の初期勾配 H_0/λ_0 の値によって著しく異なる。一般に2割の堤防を $h=0$ すなわち汀線から順次沖側に移動せしめるとき R/H_0 の値は次第に増加し、ある水深で最大値に達し、更に水深が増すときは再び R/H_0 が減じてやがて波の性質に無関係に一定値に近づく。(およそ2と推定される)

このとき波の初期勾配が小さい程 R/H_0 が最大となる水深は小となる。実験結果をまとめて図-3に示した。同様な実験は京都大学でも行われたが、測点数が小さいので図-3の様に明確な関係は得られていない。

1. 波の初期勾配および堤脚水深と R/H_0 の最大値との関係

図-3から波の初期勾配と R/H_0 の最大値 $(R/H_0)_{\max}$ との関係をしらべると図-4の如くなり、波形勾配が小さい波程 $(R/H_0)_{\max}$ が大きく、例えば $H_0/\lambda_0=0.01$ のとき $(R/H_0)_{\max}=4.25$ であるに対し波形勾配が大きい波では $(R/H_0)_{\max}$ が小さく、 $H_0/\lambda_0=0.07$ のときには $(R/H_0)_{\max}=2.1$ である。

また図-4によれば $(H_0/\lambda_0) < 0.02$ のはんいでは $(R/H_0)_{\max}$ の値の変化が急激であるが、 $(H_0/\lambda_0) > 0.02$ では比較的緩慢である。

次に $(R/H_0)_{\max}$ が生ずる水深をしらべると図-5の如くなる。図には無堤時の碎波線を記入したが、 $(R/H_0)_{\max}$ の位置は無堤時の碎波線よりやや沖側にある事がわかる。しかし (H_0/λ_0) が小となるにつれて、 $(R/H_0)_{\max}$ の位置と碎波線とは接近して来る性質がある。

2. 波の初期勾配および堤脚水深と R/H_0 との関係

O. Sibut³⁾ は2割勾配の堤について行つた実験から、任意の堤脚水深について潮上高が最大になる波形勾配が存在する事を述べ、例えば $h/\lambda_0=0.21$ のとき波形勾配0.03で潮上高が最大になると云っているが、図-3から

図-4

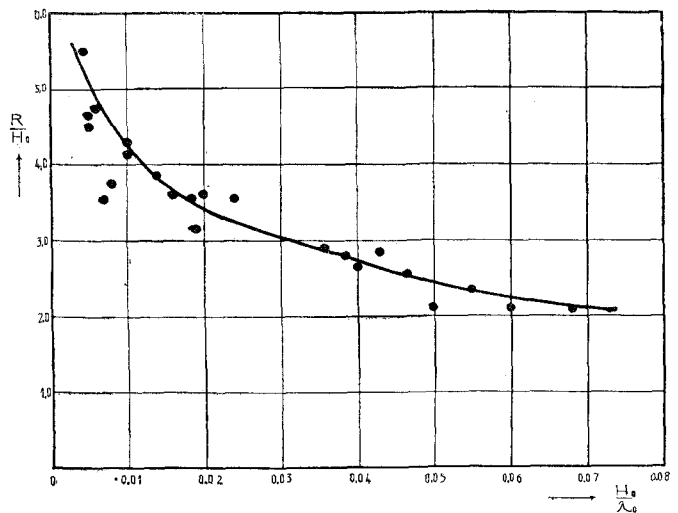
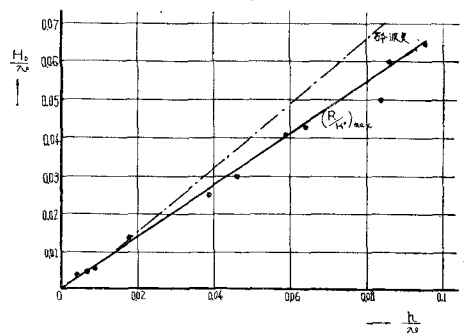


図-5



2) 岸 力：浅水重複波，土木研究所報告。

3) Sibul, Osavald, Flow over reefs and structures by wave action, Trans. A. G. U., Feb., 1955.

図-6-1

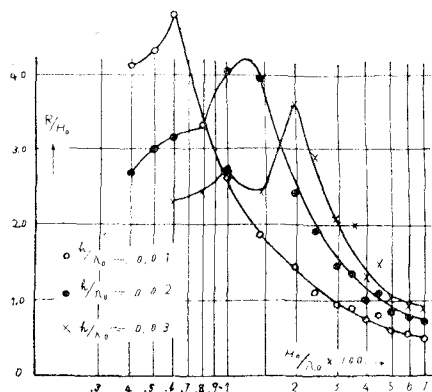


図-6-2

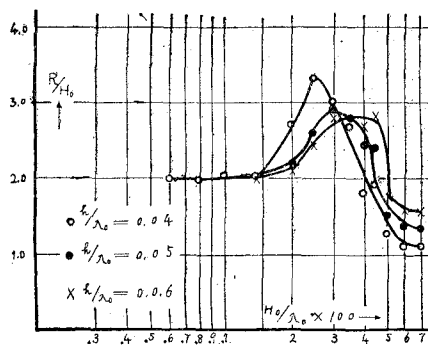


図-6-3

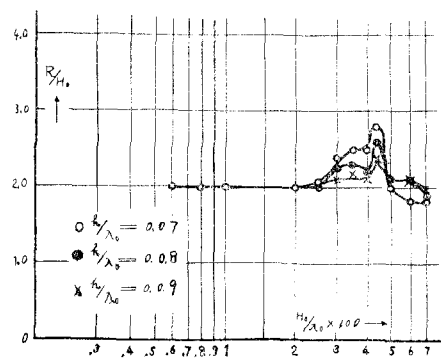
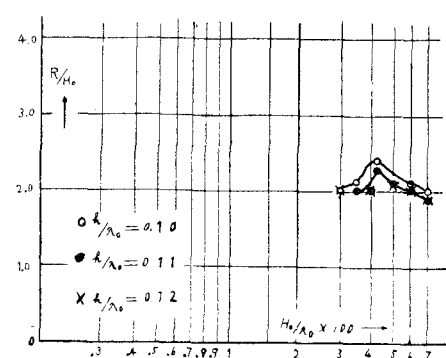


図-6-4



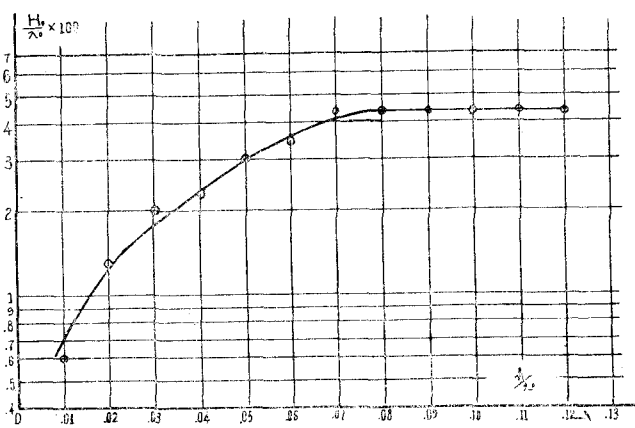
その関係をしらべてみる。

図-6-1, 2, 3, 4 は縦軸に R/H_0 をとり、横軸に H_0/λ_0 をとつて、 h/λ_0 をパラメーターとして、波形勾配が溯上高に及ぼす影響をしらべたものである。Sibul の云う様に各水深毎に R/H_0 が最大になる波形勾配が存在し、特に h/λ_0 が小さい程波形勾配の影響が大きい点は注意する必要がある。逆に $h/\lambda_0 > 0.12$ では R/H_0 は波形勾配による差異がなく $R/H_0 \approx 2$ の関係にあると考えてよい。

ある h/λ_0 の値において、 R/H_0 が最大となる H_0/λ_0 の値を求めると図-7 の如くである。 h/λ_0 が大となるに従つて R/H_0 が最大となる波形勾配も大となるが、 $h/\lambda_0 \geq 0.07$ では $H_0/\lambda_0 \approx 0.044$ のとき R/H_0 が最も大きくなる。

図-7

このように、ある水深において R/H_0 が最大になる波形勾配が存在する事は、堤防の法勾配によつて $R/H_0 \sim H_0/\lambda_0$ との関係が相反的である事を意味しているとも考えられる。例えば Granthem*) の実験によれば、 $h/\lambda_0 \approx 0.20$ の所に法勾配 15° (約4割) の堤防と法勾配 30° (約1割8分) および 45° (1割) の堤防とを設けて溯上高と波形勾配との関係をしらべると、前者にあつては波形勾配 $0.02 \sim 0.08$ の間で溯上高が波形勾配とともに減ずる傾向があるに對



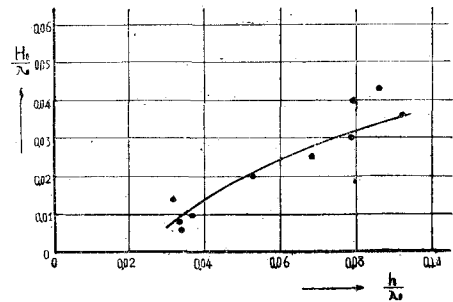
*) Granthem, K. N., : Wave run-up on sloping structures, Trans. A. G. U. 1953, No. 5.

し、後者にあつては溯上高は波形勾配とともに増加する傾向がみられる。また同様の傾向は昨年発表された京大の実験でも指摘されている。法勾配 2 割の堤防は丁度 15° と 30° との中間に位するので、 $h/\lambda_0 \approx 0.20$ では $R/H \approx 2.0$ なる一定値に近くなつたのであろう。また水深がより小となれば同様の理由で R/H_0 が最大となる波形勾配の存在が推定される。

以上の事からすれば、溯上高の性質は堤防の法勾配によつてかなり大きく変化する事が考えられる。

次に図-3 あるいは図-6 で、 h/λ_0 が大となるにしたがつて R/H_0 はおよそ 2 に近い一定値に近づいて行く性質が看取されるので、図-6 から R/H_0 が漸近値の 1.1 倍になる点の h/λ_0 を読みとると図-8 の如くなり、波形勾配の大きい波程 R/H_0 が一定となる h/λ_0 は大となる。

図-8

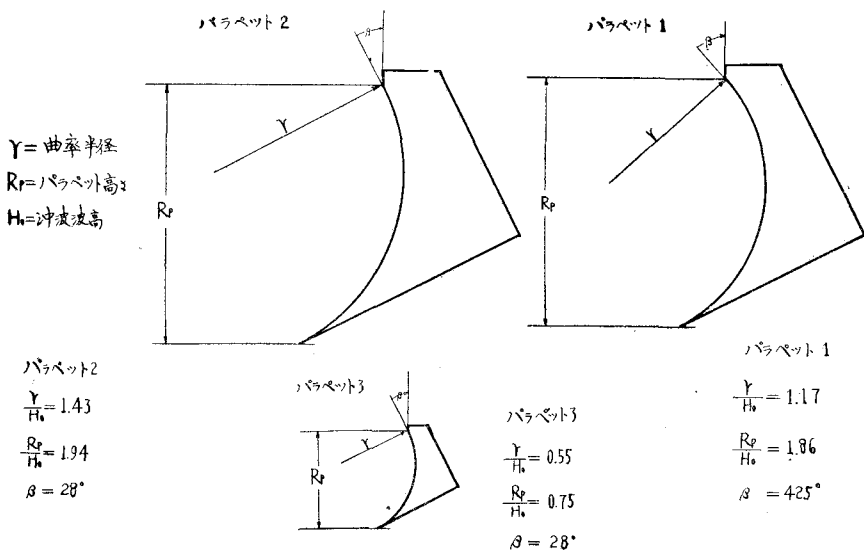


IV. 波返しを設けた場合の衝突波高

前章にのべた溯上高が波返しによつて如何に減少するかをしらべる。

用いた波返しは図-9 に示した 3 種で、いずれも法面に切する一つの円弧で出来ている。従つてこの波返しの形は円の半径と波返しの高さで指定される。1, 2 は高さの高いもの、3 は低いものであり、1 と 2 とは曲率半径 (すなわち波返しの方向角 β) が異なる。

図-9



一樣水深 25cm の所で波高を 7cm と定め、週期を変えて波形勾配を変化させた。ある水深に前法勾配 2 割の堤防をおき、その法面の種々の場所に図-9 に示した波返しをとりつけ、波が波返しの上を越流し始める時の波返し天端高を以て衝突波高とした。

静水面から測つた衝突波高を R' とし、縦軸に R'/H_0 、横軸に h/λ_0 をとり、初期波形勾配をパラメータとして実験結果を示すと図-10-1 ~ 図-10-7 の如くである。図には一昨年の第 1 回講演会において、筆者の 1 人佐藤が発表した直立堤における堤高算定曲線 (衝突高) をも記入した。

図にみられる通り、堤防の前法勾配および堤脚水深が同一でも波返しによつて衝突高 R'/H_0 の値は異り、図-10 全般を通じて、 R'/H_0 の値は図-9 の波返し番号 1, 2, 3 の順に小となる。しかも 1, 2 の間には些程大きな差はみられないが、3 の場合はいずれも著しく大きい。

これは波が堤防法面を溯上して波返しに衝突すれば溯上波形が変化して波面が上昇するためであらう。図-11 は、 $H_0 = 10\text{cm}$ 、 $T = 1.1\text{sec}$ の波の堤防法面上における溯上波形を示すもので、波返しがない場合と、溯上高の約 1/2 の所に波返しを設けた場合とが比較してある。後者の波面が前者のそれより高い事が明らかである。従つて波返しの機能を発揮するためには、先づある程度の高さが必要で、曲率半径はその後の問題であらう。

図-10-1

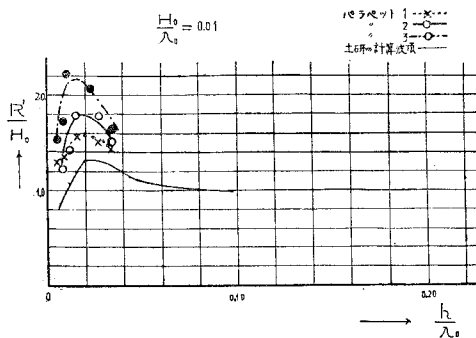


図-10-2

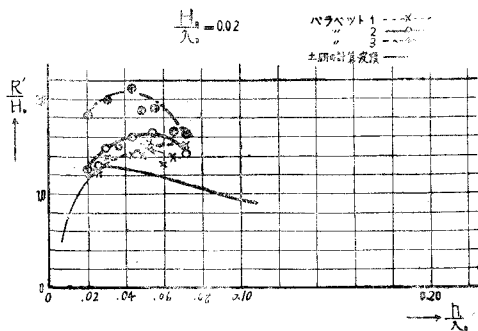


図-10-3

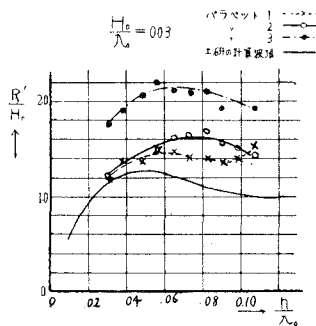


図-10-4

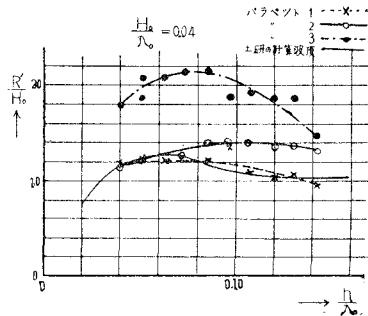


図-10-5

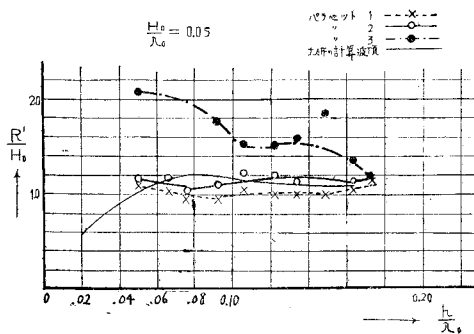


図-10-6

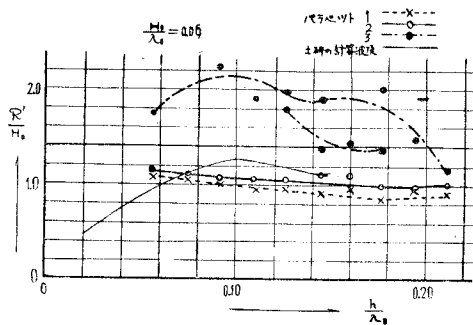
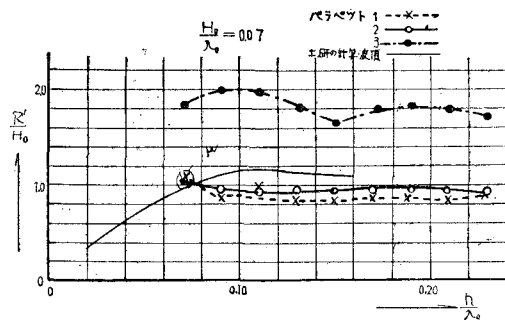


図-10-7



波返し1と2とは角 β が異なるのみで1は $\beta=43^\circ$ 、2は $\beta=28^\circ$ であるが、勿論 β が大きいもの程 R'/H_0 は小となっている。しかし β が大となれば、波返しのうける力も大となるであろうから、波圧の分布状態が明らかになれば余り大きな β を採用するわけに行かぬが、現在実際施工されている例に倣しておよそ $\beta=45^\circ$ 程度までは可能であると考えられる。この実験では $\beta=43^\circ$ の場合と $\beta=28^\circ$ の場合とでは R'/H_0 の値に10~20%差がある。たゞし波形勾配が大となるにつれて β による R'/H_0 の差は小さくなる傾向はある。

次に波形勾配と R'/H_0 の関係であるが、衝突高と同様に、波返しを設けた場合でも波形勾配の小さな波程 h/λ_0 による R'/H_0 の変化が大きく、また $(R'/H_0)_{\max}$ の値が大きい。この事は、波形勾配が小さい波程、堤防の構築位置が重要性を増す事を意味する。 $(R'/H_0)_{\max}$ の水深は図-5に示した $(R/H_0)_{\max}$ の水深より多小大である。

図-12-1~図-12-7は波返しがない時の溯上高 R と波返しを設けた場合の衝突高 R' との比を図-10と同様のあらわし方で示したものである。波返し3即ち波返しの高さが沖波々高より低いものは衝突高を低下せしめる機能は殆んどないに対し、波返し1および2、すなわち高さが沖波々高の2倍程

度のものであれば、波形勾配が0.04より大きな波では衝突高を溯上高の1/2程度にまで減少せしめ得る事がわかる。実際に1,2に相当する様な波返しを胸壁として作る事は出来ないから、護岸の形を波返し曲面に仕

図-11

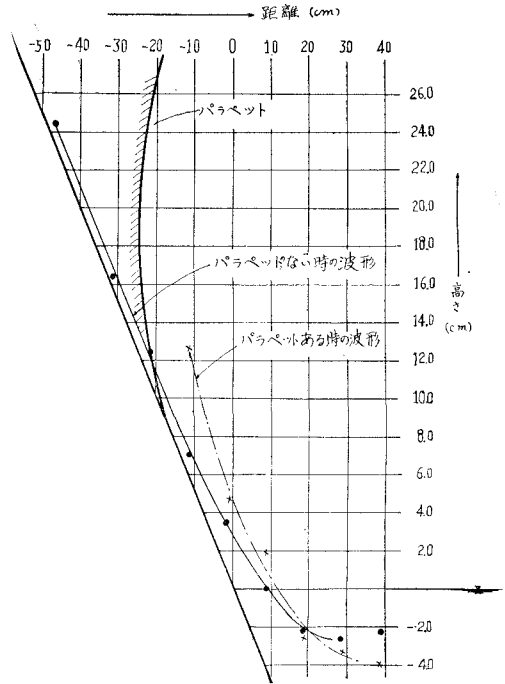


図-12-1

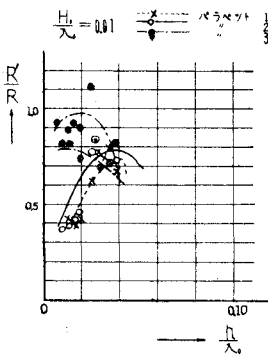


図-12-2

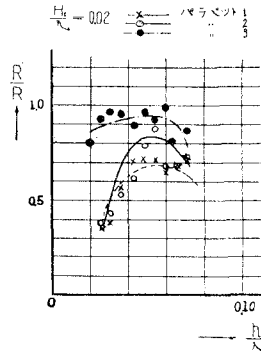


図-12-3

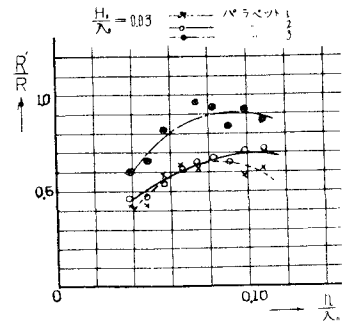


図-12-4

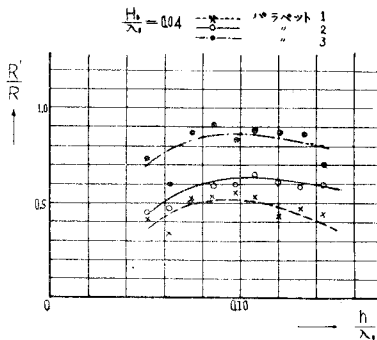


図-12-5

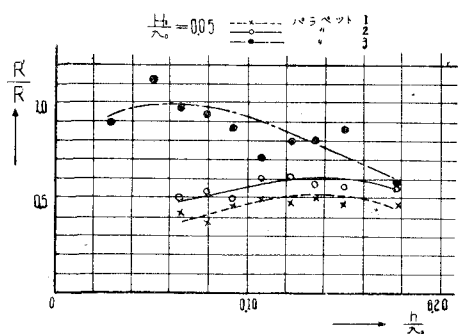


図-12-6

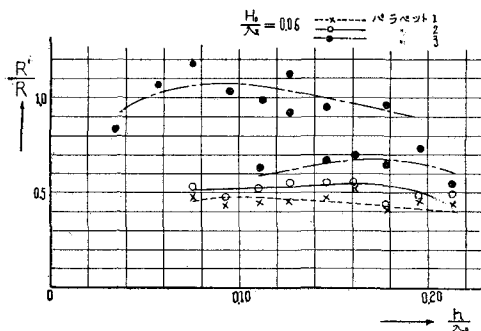
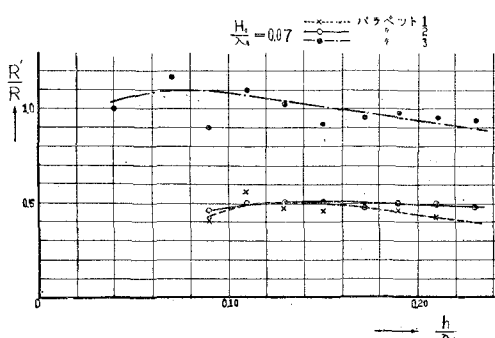


図-12-7



上げ、上の部分を胸壁として護岸曲面に接続させる事となろう。

V. 反 射 率

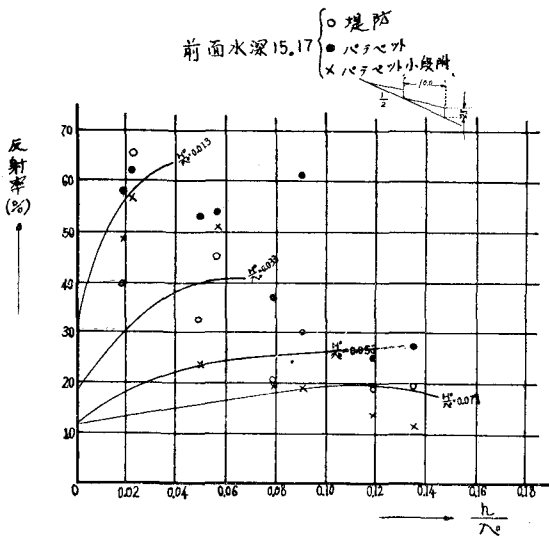
反射率は、衝突波が重複性であるか進行性であるかの指標であるとともに、堤防前面の洗掘を考える場合、堤防を設けた事による擾乱の程度をあらわすものとも考えられるので、堤防の形状特性をしらべる上に一つの重要な要素である。

反射率は昨年の講演会において京都大学の実験結果が報告されたが、今回の実験は波返しあるいは小段を法面に設けた場合の影響をしらべる事を目的とした。一樣水深 25cm の所で波高 10cm とし、週期をかねて $H_0/\lambda_0 = 0.013, 0.033, 0.053, 0.071$ の 4 種の波を用いた。

図-13

京都大学の実験から法勾配 30° および 20° の結果をみると、(1) h/λ_0 が大となるにつれて反射率がたまる。(2) 波形勾配がまれば反射率は減ずる(3) 勾配 30° と 20° とをくらべると 20° の場合は概して反射率が小さいが、特に波形勾配が大きい場合その傾向が著しいなどの特長が見られる。

図-13の実線は以上の点を考慮に入れて、京大実験値から推定した 2 割勾配に対する反射率曲線である。波返しをつけた場合は反射率が大きくなり、波返しと小段とを併用すれば反射率は、法面単独の場合程度まで減小する。前述の Sibul あるいは Granthem の実験では小段などで法面を粗にしたときの遡上高の減少を見積っているが、小段がこれと同時に反射率を減小させる作用をもつ事は興味ある性質である。



Part. II. 波の陸岸への遡上

I. 緒 言

第 1 回講演会において筆者らは直立堤(法勾配 1 割程度までは適用可能と思われる)の堤高算定法を示し今回更に法勾 2 割のものについて補足した事は前述の通りである。しかしこれらの方法は汀線より沖側に堤防を設ける場合であつて、汀線のごく近くや陸上に堤防を設ける場合には触れなかつた。

汀線より陸側に堤防を設ける必要が生ずるのは、次の 3 つの場合が考えられる。

(1) 波高が非常に大きくて、技術的にも経済的にも堤防を陸側にひかねばならぬ場合、この例は三重県、高知県の太平洋岸にみられ海岸の砂丘の上に堤防が作られている。

(2) 堤防による海岸線の擾乱を軽減し、あわせて工費の節減を計る事を目的とする場合。

(3) 河口処理に防砂堤を用いる場合。

(2) および (3) の項目は従来やゝもすれば等閑視されるきらいがあつたけれど、今後はこの目的に沿つた研究が必要になるであらう。

II. 連続波の陸岸への遡上

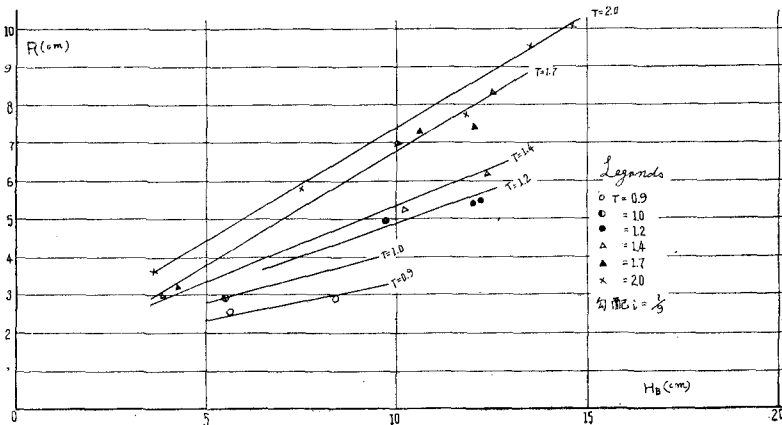
1. 遡上高

波がみちはまを遡上する状況は次の如くである。波がくだけ落下点ではげしく崩れ落ちるとき、多量の水を極めて短時間の間に落下点附近の水域に供給する事となるので、落下に次いで段波状の水の膨れ上りが出来それが汀線に向って前進する。段波の波高は水深の減少とともに急激に減少し、汀線より上では薄い楔状を呈して遡上するのが観られる。従つて遡上高を支配する要素は次の3つであろう。(1) 浜勾配、(2) 段波の高さ——遡上速度に関係すると思われる、(3) 波の週期——遡上時間に関係すると思われる。

実験は勾配 $1/9$ および $1/17$ の2種の斜面において、初期勾配が大概 $0.003 \sim 0.06$ の波について行つた。

先づ落下点に続く段波の波高は碎波々高と関係をもつと考えられるから、波高と遡上高との関係をみると図-14の如くなる。遡上高は碎波々高に直線比例するが、同一碎波々高では週期の長い波程遡上高が大である。その理由としては

図-14



(1) 週期が長い程遡上時間が長い。

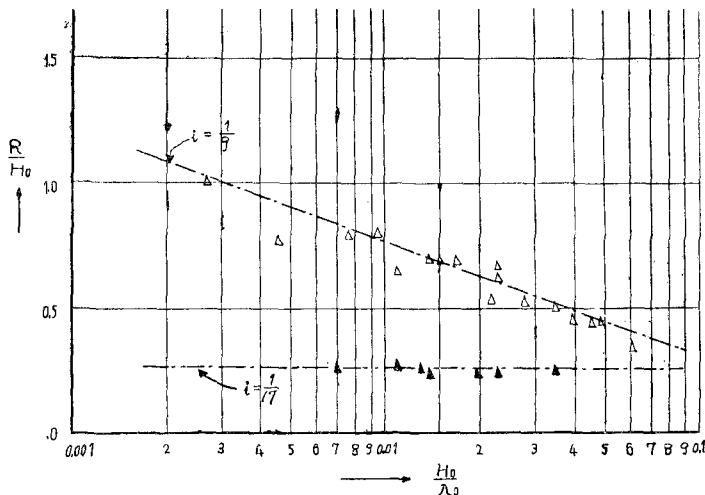
(2) 同一碎波々高でも週期が長い程浅い所で碎け、従つて汀線までの距離が短いからエネルギー損失が少い。

(3) 週期が長い波程同一波高でも質量輸送が大きく、遡上速度が大となる。

などの点が考えられる。(2)の点は碎波の特性に関係することであり、(1)および(3)は沖波々長の長短と考えてもよいから、遡上高は波の初期勾配の函数としてあらわされるであろう。図-15は静水面から測つた遡上高 R を碎波々高 H_b で無次元化し、初期波形勾配との関係をしらべたものである。

勾配 $1/9$ の例では R/H_b の値は H_b/λ_0 によつてかなり変化し、波形勾配が小さい程 R/H_b は大となる。

図-15

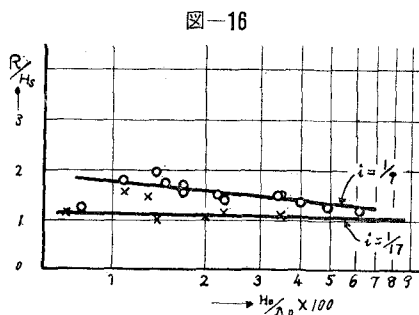


これに対し、勾配 1/17 の例では R/H_0 は H_0/λ_0 に関係なくほぼ一定値に近く、しかもその値は勾配 1/9 の場合にくらべて小さい。

2. 汀線における段波の波高

汀線における段波の高さは、溯上高の特性を解析する上にあるいは汀線より陸側に設けた堤防の堤高を算定する上に重要な要素である。

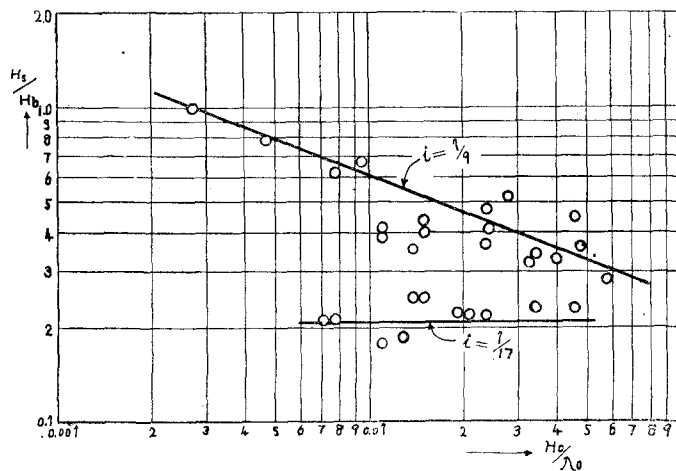
溯上高が初期波形勾配と浜勾配との函数であつた様に、汀線における段波の高さ H_s も同じくこれら 2 量



の函数であろう。前と同様に H_s/H_0 と初期波形勾配 H_0/λ_0 との関係をしらべると図-16 の如くなる。勾配 1/9 の場合は、初期勾配によって H_s/H_0 の値はかなり変化し、初期勾配の小さい波程砕波点から汀線の間における段波の減衰が小である事がわかる。勾配 1/17 の場合には、 H_s/H_0 の値は初期勾配に拘わらず殆んど一定値で、その値は勾配 1/9 の場合より小さい。

次に汀線における段波の高さ H_s と溯上高との比をしらべると図-17 の如く、勾配 1/9 の場合でも図-15 の場合と比較して R/H_s の値は波形勾配によつて影響される処少ないと云える。従つて溯上高にあらわれる波の性質の差異は、砕波点と汀線との間にみられるであろう。

図-17



この性質を更にふへんする意味で、浜勾配 1/9 の例について、汀線より陸側における段波の波高変化をしらべてみた。汀線における段波の高さ H_s および溯上距離 L を用いて任意の点の段波の高さ H_x および距離 x を無次元化し実験結果を整理すると図-18 の如くなる。たゞこの実験は波形勾配 0.008~0.04 のはんいで行われた。これによると溯上段波の高さは波形勾配に関係なく図中実線で示した一つの曲線であらわれる様である。またこの曲線は汀線と溯上点とを結んだ直線より下側にある。溯上点附近で段波高が 0 ではなくある有限値をもつのは摩擦さつの影響と考えられる。

III. 津波の陸岸への溯上

B. E. B. の K. Kaplan* は1946年および1952年にハワイを襲つた津波の対策実験として、津波の溯上高をしらべている。

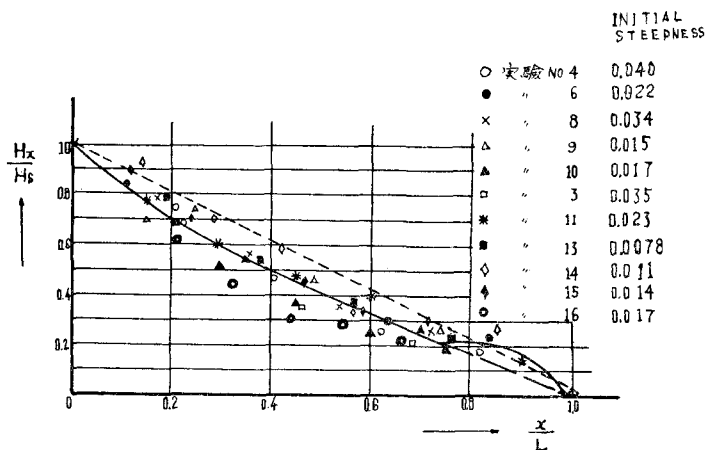
前の筆者らの実験と異なる点は、波を連続波列とせず孤立波を用いた事で、Kaplan によれば連続波列のときには前の波のひき波が次の波の溯上高に大いに影響しその結果同一波高でも孤立波の溯上高は連続波列の場合の 2 倍程度にも達するという。

Kaplan の実験結果の主なる点を列挙すれば次の通りである。

(1) 溯上高を R 、津波々高を H 、波長を λ とするとき溯上高 R/H は波形勾配 H/λ のみの函数となる。

* Kaplan, K : Technical Memorandum, No. 60, July. 1955.

図-18



- (2) 浜勾配が急な程溯上高は大である。すなわち、
 浜勾配 1:30 のとき、 $R/H=0.381 (H/\lambda)^{-0.316}$
 浜勾配 1:60 のとき、 $R/H=0.206 (H/\lambda)^{-0.315}$
- (3) 汀線波高 H_s は浜勾配 1:60 のとき
 $H_s/H=0.068 (H/x)^{-0.407}$
- (4) 汀線に直立壁および前法勾配 2 割の堤防を設けたときの衝突高 R' はそれぞれ
 $R'/H=0.418 (H/\lambda)^{-0.283}$ (直立壁)
 $R'/H=0.436 (H/\lambda)^{-0.285}$ (2 割壁)
- (5) 従つて汀線波高と、堤防を設けたときの衝突波高との比は浜勾配 1:60 のとき
 $R'/H_s=6.15 (H/\lambda)^{0.124}$ (直立壁)
 $R'/H_s=6.40 (H/\lambda)^{0.122}$ (2 割壁)
 例えべ $H/\lambda=4.85 \times 10^{-6}$ とすれば $R'/H_s \approx 1.3$ となる。
- (6) 溯上高と汀線波高との比は浜勾配 1:60 のときと
 $R/H_s \approx 2$
 推定される。

() この結果では R'/H_s は H/λ を測定する位置を指定しなければ一義的に定まらない事となる不合理があり、更に検討が必要であらう。