

風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1)

——風洞水槽の特性と鉛直堤の越波に関する二、三の実験——

岩 垣 雄 一*・土 屋 義 人**・井 上 雅 夫***

1. 緒 言

海岸堤防に関する研究の必要性は、最近の相つぐ大型台風の来襲と臨海工業地帯の造成にともなう、いっそう重要視されるようになってきた。海岸堤防の設計に際しては、経済効果を考慮して、被害のない程度の越波量を許し、堤防の有効高さを低くするという考え方がある。この場合、背後地の危険度の推定や堤内の排水設備、潮遊びなどの規模決定において、越波量を適確に推定することが重要な問題となってくる。一般に、この越波に影響する要素としては、来襲波の特性、堤防の形式、静水面よりの堤高、堤防設置位置、海岸地形、風などが考えられる。従来は、ほとんど風をともしない様な波による研究が行なわれ、それぞれ諸要素間の関係については、かなり明確にされてきたが、実際に越波が問題となる台風来襲時における海岸堤防の越波の状況を調べてみると、その越波におよぼす風の影響は見のがすことはできない重要な要素であることが指摘される。

こうしたことから、最近越波やのり面への波の遡上の現象におよぼす風の影響について、実験的な検討が加えられてきたのであって、たとえば Sibul¹⁾ および Paape²⁾ によって若干の実験が行なわれ、またわが国においても永井³⁾によって二、三の実験が実施されてきたが、まだ適確な結論を得るまでには至っていない。ただ、こうした実験の重要性を指摘し、また若干の問題点を明らかにした程度であるといつてよい。このような現状において、台風来襲時における海岸堤防の越波量を測定し、越波量におよぼす風の影響を正確に把握して、堤防高、断面形状、排水施設の合理的な決定を行なうための基礎および、応用実験を実施することを目的の一つとして、京大防災研究所では昭和35年度に高速風洞水槽を建設した。本文では、この高速風洞水槽の主要な二、三の特性と、これを用いて行なった鉛直堤の越波に関する若干の実験結果について述べる。

2. 高速風洞水槽の構造と特性

(1) 構造の概要

この風洞は、前述の目的のほか、波の発生発達に関す

る研究において、とくに高速の風が水面におよぼすせん断応力が、風速が大きくなるにしたがっていかに変化するかを調べることに、構造物の耐風設計に関する実験の3つの目的のために建設されたものである。そこで風洞水槽の特性を述べる前に、まず風洞の全体的構造および送風機と造波機の概要について簡単に述べよう。

a) 風洞の全体的構造 前述の3つの目的のために、この風洞は高速風の下での波浪の性質を調べる波浪風洞と構造物の耐風に関する研究のための煙風洞の2つの部分に分けられる。この風洞の特色は、この2つの風洞を一つの送風機によって操作できるようにしたことである。風洞は①送風機部分、②波浪風洞風路部分、③煙風洞部分、の3つに大別され、また①は電動機、動翼、静翼、内筒、②拡散洞、整流格子、分岐洞、吹き口、③胴体、整流格子、観測筒、吹き口から構成されている。電動機は100 HP の3相分巻整流子型の変速電動機であって、風速を2点から遠隔操作によって連続的に調節できるようになっている。また送風機構のうちの動翼は送風機の停止中にそのピッチ角を変えうるように設計されている。

波浪風洞は延長40 m、高さ2.3~4.0 m の水槽部に取りつけられている。この水槽は0.3 m だけ地下にもぐる半地下構造で、越波量の実験は水深を1.0 m にして実施するが、この場合、水槽の他端にある勾配の傾斜海浜部分に模型の構造物をおくため、この水槽部分のアルミニウム板で作った天蓋を徐々に高くしてある。なお、この水槽には後述の造波機を付設し、風洞とは別に造波機のみによっても波を発生させることができる。図-1は風洞水槽の概略図である。

b) 送風機の概要 送風機の諸元を一括すれば、形式：軸流1段、口径：入出口とも1200 mm φ、ボス径：780 mm φ、風量25 m³/sec、有効全圧：230 mm Aq、回転数：1800 rpm、回転方向：左（入口側より見て反時計まわり）、翼枚数：動翼16枚、静翼11枚である。

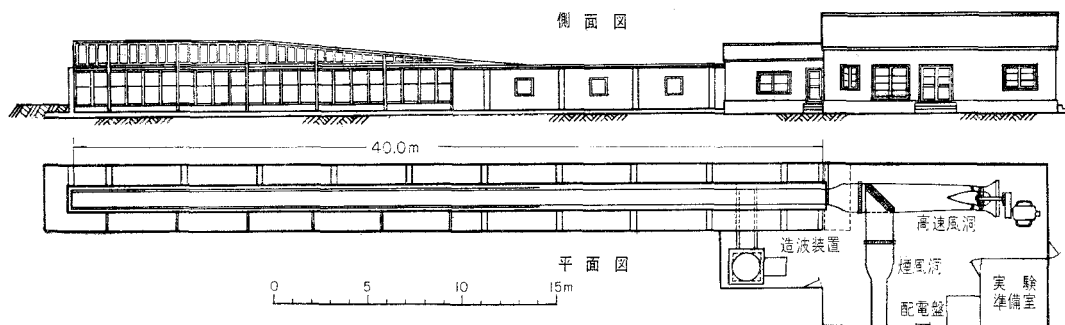
c) 造波機の概要 造波装置は実験目的がさしあたり構造物の越波に関するものであるため、当然その構造物による反射が予想される。したがって、従来のフラッターおよびブランジャーなどの形式の造波装置では造波板による反射が問題となる。この欠点をさけるため、水槽の底部からピストン装置を用いて周期的に水を吹き出し

* 正員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正員 工修 京都大学助教授 防災研究所

*** 正員 京都大学助手 防災研究所

図-1 風洞水槽概略図



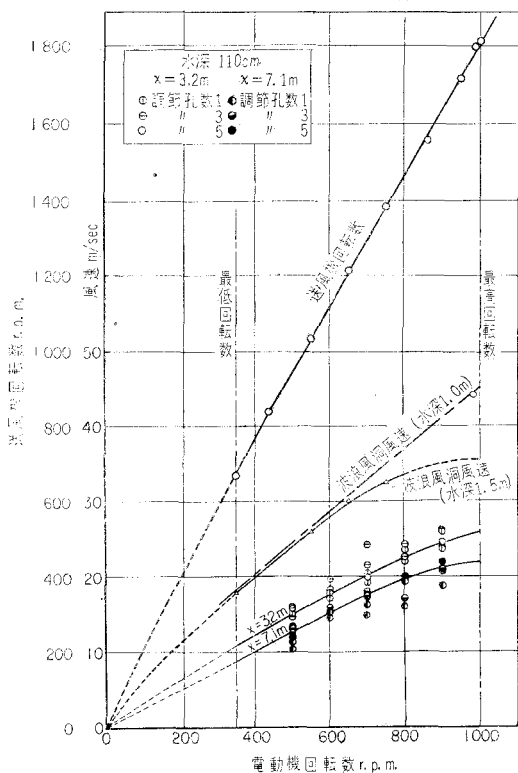
たり、吸い込んだりして波を発生させるようにした。なお、造波機の諸元を一括すれば、形式：ピストン式、シリンダー径：1500 mm ϕ 、ストローク：最大 500 mm、周期 0.75~3.0 sec (20~80 rpm)、駆動機形式：バイエルサイクロ可変減速機、駆動機容量 7.5 kW である。

(2) 風洞水槽の特性

実験施設の適確な特性を知ることは今後の研究を進めらうに有効である。著者らはこの風洞水槽の特性を知るために、つぎのような若干の実験を行なった。

まず、計測装置について簡単に述べよう。風速はピトー管を用い、風洞吹口と水槽内の任意の点の2点で測定したが、精度がほかの諸量にくらべて若干劣るように思われた。波高は電気抵抗線式波高計を用い、自動平衡型の記録計に連結して自記させた。この場合、水位変化

図-2 電動機回転数と風速との関係



に必ず記録計の応答速度は良好であり、また水位変化に対する記録紙上の値は十分直線性を確保することができた。

a) 電動機および送風機の特性 電動機の回転数は 350 rpm から 1000 rpm まで自由に変わることができる。図-2 は電動機回転数と吹口風速などの関係を示したものであり、これによると吹口風速は電動機の回転数が同じでも水深の大小によって相違し、特に回転数が大きくなると吹口風速におよぼす水深の影響が大きくなる。これは水深によって風路断面が変化するが、風速が大きくなると波による抵抗のため風路断面の影響がいちじるしく影響するためと思われる。また、図中には水深が 110 cm の場合の、電動機回転数と傾斜海浜部の先端から岸側へ 3.2 m、および 7.1 m の位置での水面上 45 cm のところの風速との関係も同時に示しておいた。ここでは、パラメーターとして造波機の波高調節孔の数をとったが、波高の相違による風速の変化はこうした測定方法では、測定誤差の範囲に入り明確には表われてはいない。

b) 造波機の特性 造波機はピストンのストロークを変えるほか、シリンダー中の受圧板にある孔の数を調節することによっても波高を変化させることができる。この波高調節孔は直径 20 cm のもので 12 個あり、孔を

図-3 波高と周期との関係

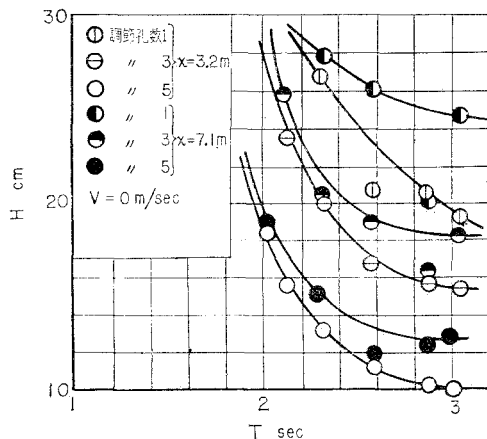
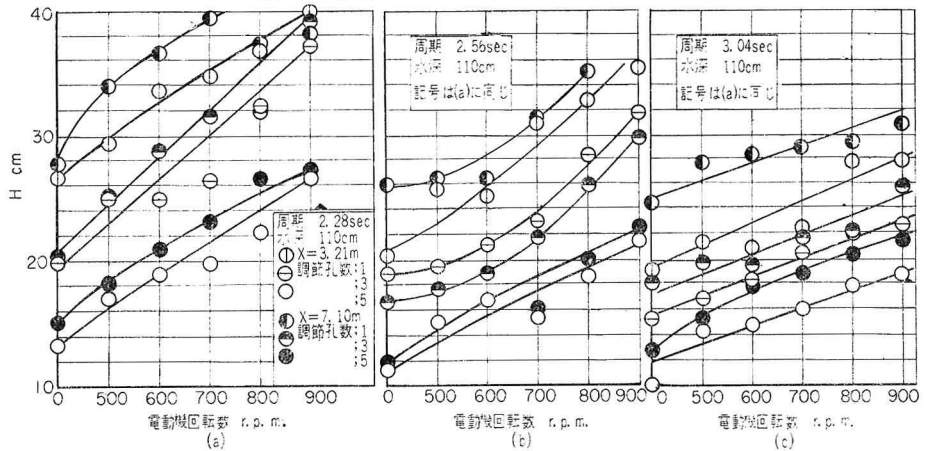


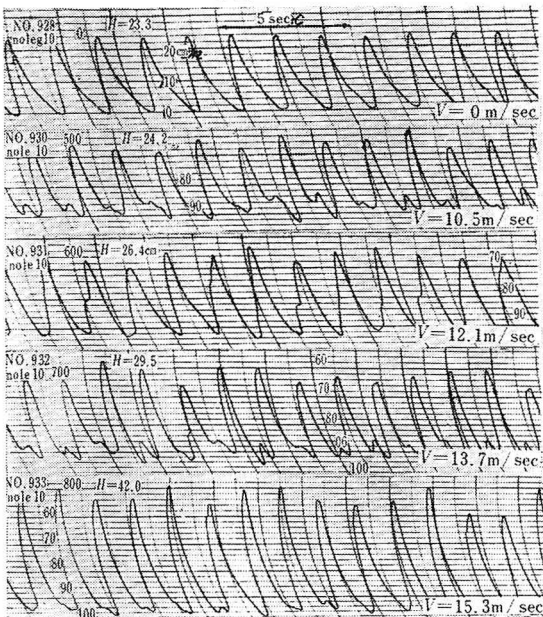
図-4 波高と電動機回転数との関係



ふさぐほど大きい波高の波が発生するようになっていいる。一方、周期は無段変速機により 0.75~3.0 sec まで変えることができる。図-3 は水深が 110 cm の無風状態の場合における傾斜海岸部の先端より岸側へ 3.2 および 7.1 m

における波高と周期の関係を波高調節孔をパラメーターとして示したもので、一般に周期が短くなると波高は大きくなることわかる。図-4 は水槽部の前述の 2 点における波高と風速との関係を水深 110 cm, 周期 2.28 sec, 2.56 sec および 3.04 sec の各場合について示したものである。一般に風速の増加とともに波高は増大し、波形はくずれるが、その度合は造波機だけで起こされた初期波の特性に依存することはいうまでもない。図-5 は波高記録の一例であり、風速の増加とともに波形のくずれる状態がよくわかるであろう。

図-5 波高記録の一例 (周期 1.7 sec, のり先水深 30 cm の場合)



3. 鉛直堤の越波に関する実験

(1) 実験設備および実験方法

a) 実験設備 用いた実験設備は高速風洞水槽であるが、ここでは測定装置についてのみ述べる。鉛直堤の

模型は鋼板製のもので最大高さ 60 cm であり、上部をとりかえることによって 5 cm 間隔に堤高を変化させることができ、最小 30 cm の高さにすることが可能である。波高および風速は前述したものと全く同じ電気抵抗線式波高計とピトー管を用いて測定した。越波量は堤防背面に水槽を設け、これに入った水を自吸式のエルゲポンプで風洞水槽外へ引き出し、これを一定断面の越波量測定用の水槽に導き、その水位上昇の時間的変化を波高計と同様な水位計によって自記させた。さらに越波量の距離的分布は金網を張ったわくにロト状の容器をとりつけ、これに入った水を自然流下させて測定した。

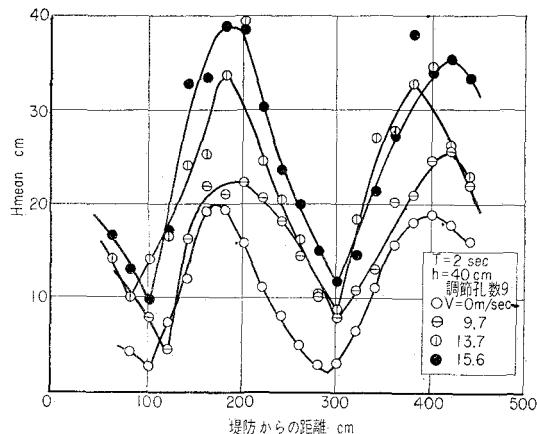
b) 実験方法 まず、模型を配置して所定の周期の波を造波機によって起こし、それに模型前面における平均風速を 0~20 m/sec の風を 5~6 段階にわけて吹かせ、全越波量や越波量分布の測定と同時に風速をも測定した。そして、そのときの入射波としては、模型をすべて取り除き、模型のあるときと全く同一の条件のもとに堤防前面に相当した位置で波高を測定して、これを入射波高として用いることにしたが、これについての考察は次節で述べる。こうした入射波の推定にもとづいて一連の実験を進めたが、この場合、越波におよぼす風の直接的影響を適確に把握するために、入射波の特性を同一にして風速の増加にともなう越波量の変化を検討しようとするような方法をとった。まず、造波機の周期を一定にし、造波機の波高調節孔の数を変えることによって初期波高を変化させ、また風速もそれぞれに応じて 5~6 段階変えた場合の波高記録から、波高と風速との関係をあらかじめ求めておく。一方、風速と越波量の関係も求めておき、これら 2 つの図から波の特性が同じで風速が異なる場合の越波量を求めることにした。なお、越波量の距離的分布は前述した方法によって測定し、これらを距離的に累加して全越波量とした。

(2) 実験結果とその考察

a) 入射波の推定に関する考察 風波の反射に関する

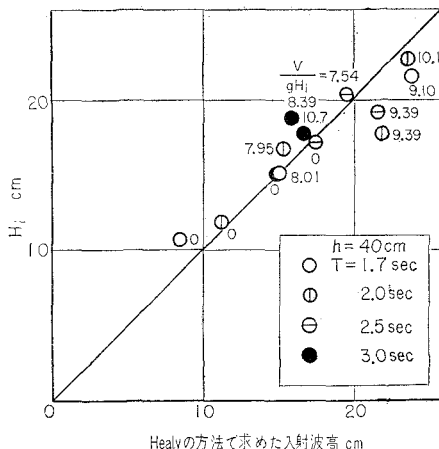
研究はほとんど行なわれておらず、その水理学的機構はきわめて複雑である。しかしながら、越波の現象とか、あるいは波の遡上といったような海岸構造物周辺における波の性状を究明する場合には、まず最初にこうした問題の解明が必要になってくる。著者らはいまのところこの問題に対して本質的な研究は進めていないが、この場合どうしても入射波を推定しなければならないので、一つの便宜的な方法として、前述したように、越波量を測定したと同一条件のもので模型をとり除き、そのときの波高を入射波高としたのである。しかしながら、模型堤防を設置した場合はそれによって反射波を生じ、その波は入射波と反対方向に進み、ある距離進行すると反射波は減衰消滅するものと考えられる。しかしながら、実験水槽の長さには限度があり、反射波が進んでいく距離は風洞吹口から模型設置箇所までの距離、すなわち fetch にくらべて十分小さいとはいいがたいので、その場合の発達過程と進行波のみの場合の発達過程とは本質的に相違するはずであるから、適確な入射波高の推定は困難なわけである。しかし、なんらかの方法によって、入射波高を推定しなければならないので、部分重複波の記録を用い、Healy の方法⁹⁾を適用して、周期 1.7、2.0、2.5、および 3.0 sec、のり先水深 40 cm の場合で、風速をそれぞれ 0~15 m/sec の 3~4 段階に変えた場合について入射波高を推定することにした。図-6 は周期 2.0 sec の場合について、堤防前面からの波高の距離の変化の一例を示したものである。これによると風速が大きくなるにしたがって最大波高付近がとがってくるようであり、これは図-5に見られるように波形が対称でなく、波の峰が

図-6 堤防前面部の波高変化の一例



風速の増加とともに、とがってくるためと考えられる。これらの結果から最大波高を H_{max} 、最小波高を H_{min} とすると、入射波高 H_i は $H_i = (H_{max} + H_{min})/2$ によって算定することができる。図-7 は同一の条件で上式を用いて計算される重複波の入射波高と、著者らの用いた進行波としての入射波高とを比較したものである。図

図-7 Healy の方法で求めた入射波高と進行波としての入射波高との関係



中の数字は風速を無次元表示した Froude 数 $V/\sqrt{gH_i}$ の値であり、 V は模型前面から沖側へ 65 cm、水面上 45 cm のところの風速、 g は重力の加速度、 H_i は進行波の入射波高である。これによると、無風時の場合には当然著者らの採用した波高をそのまま入射波高としてもほとんど変わらないようであり、風速が大きくなっても、実験値はばらつくが、波の反射の機構は大きく変わるとは考えられず、著者らが対象としたような場合にはこうした入射波の推定方法が近似的に採用できるようなのである。しかしながら、この点に関する適確な結論は、さらに詳細な実験にもとづいて、一般の風波の反射に関する研究を行なわなければ解決されないであろう。

b) 波の特性と越波量に関する考察 波ののり面への遡上や越波現象は前述したように多数の要素に支配され、こうした現象を理論的に処理することは困難であって、ここではさしあたり次元解析によって検討することにした。まず、越波量 Q の無次元表示の一つとして、石原ら⁶⁾が提案した深海において1周期に単位幅あたり岸側に輸送される水量 Q_0 と同じく1周期あたりの越波量 Q の比をとった次式の関係を用いることにした。

$$Q/Q_0 = (2\pi Q)/(H_0 L_0) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 沖波波長である。

越波量に関しては式(1)の無次元量を用い、風波の越波現象について次元解析を行なうと、つぎの関係を仮定することができる。

$$(2\pi Q)/(H_0 L_0) = F_1\{H_0/L_0, H_c/H_0, h/L_0, V/\sqrt{gH_0}, \nu H_0/\nu, K/H_0\} \dots\dots (2)$$

ここに、 H_c : 堤防の静水面よりの高さ、 g : 重力の加速度、 ν : 動粘性係数、 K : 堤防壁面の粗度を表わす代表的な大きさである。

式(2)で表わされる関係を実験結果について検討するまえに、風波が模型堤防を越波する状況について簡単に述べよう。無風時のときに模型前面において波が完全に

反射し、局所的な遡上現象が現れない場合には、静水面上の堤高が波高より高いときには越波せず、またそれより堤高が低くなると、ダムの越流のような形で越波するようになる。一方、風的作用がある場合には、堤高が波高より大きいときでも越波することがあり、風速の小さい間は、前述した越流をより促進させる程度であるが、風速の増加とともにその越波現象は非常に複雑になり、越波量そのものも増加する。堤防前面付近における水粒子は多少とも水平方向の速度をもっているが、その大部分のものは鉛直方向に上昇し、やがて、もとの波動運動にもどってしまうわけであるから、その間においてある部分が越波することになる。そして、その越波する部分は風速の増大とともに増大すると考えられるが、その場合、越波を促進するものとして、つぎの2つが考えられる。一般に風速の増大とともに波高が増加するので、この波高の増大によって越波量が増加するという、いま一つは越波におよぼす風の直接的な作用であって、前述した波動運動において越波可能な水量のうち、越波する割合を増加させる作用とである。これらの2つの作用のうち、とくに重要なのはむしろ後者であるから、著者らの研究の対象ももっぱらこの作用の究明においた。

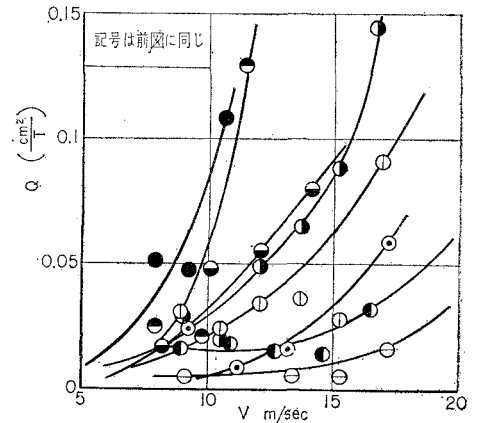
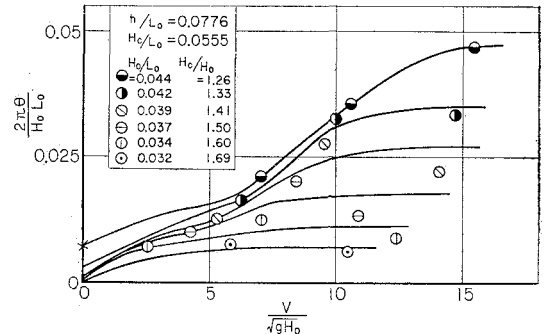
図-8 および図-9はそれぞれ造波機の調節孔数をパラメーターとして、波高と風速および風速と越波量との関係を示したものである。この両者の結果から、波の特性を一定にした場合の越波量と風速との関係

が求められるので、こうした結果を式(2)にもとづいて無次元表示する。

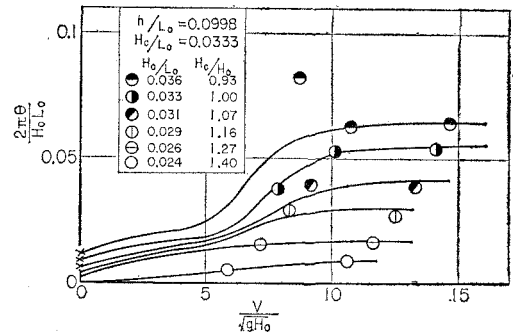
まず式(2)において、いまの場合、堤防壁面の粗度は滑面なので省略し、さらに風波の遡上に関する著者らの結果⁷⁾を参考にして Reynolds 数の効果をも省略すれば、式(2)はつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} (2\pi Q)/(H_0 L_0) &= F_2 \{ H_0/L_0, H_c/H_0, \\ &h/L_0, V/\sqrt{gH_0} \} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

図-9 風速と越波量との関係 (周期 1.7 sec の場合)


図-10 鉛直堤の越波に関する無次元表示
(a) 周期 1.7 sec, のり先水深 35 cm の場合


(b) 周期 1.7 sec, のり先水深 45 cm の場合



(c) 周期 2.5 sec, のり先水深 45 cm の場合

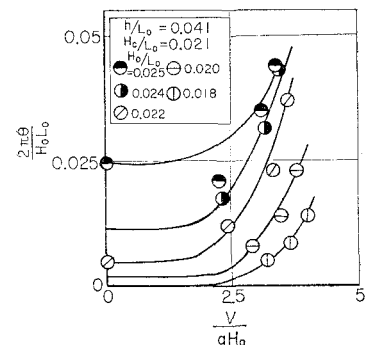


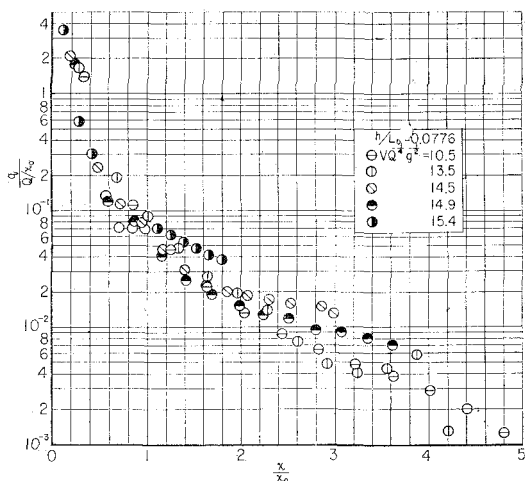
図-8 および 図-9 の結果から式(3)中の諸量を計算し、 H_0/L_0 , H_c/H_0 , および h/L_0 をパラメーターとして $(2\pi Q)/(H_0 L_0)$ と $V/\sqrt{gH_0}$ との関係を示したものが図-10 である。図-10 から明らかなように、鉛直堤の越波におよぼす風の影響は Froude 数 $V/\sqrt{gH_0}$ によって表わされるようで、無次元越波量 $(2\pi Q)/(H_0 L_0)$ はこの Froude 数の増加とともに増大することが見出される。そして、その増加の傾向は h/L_0 の値によって相違するようで、図-10 (a), (b) の場合には大体 $V/\sqrt{gH_0} \approx 5 \sim 8$ 付近を境として急増し、10 付近以上になると $(2\pi Q)/(H_0 L_0)$ の値は一定値に近づく傾向を示している。この傾向は同一の h/L_0 の場合に対しても、 H_0/L_0 または H_c/H_0 によって相違しているようであるが、その詳細は明確でない。ただ H_0/L_0 が大きく、したがって H_c/H_0 が小さくなると、 $(2\pi Q)/(H_0 L_0)$ の値が急増する限界の Froude 数は若干小さくなり、また一定値に近づく限界の値も小さくなることからわかる。前述したように Froude 数が一定値に近づくことから、鉛直堤に対する波の打上高も風速に関係なく、与えられた風波に対しては一定値に近づくことが推察されるので、今後は鉛直堤における風波の打上高の実験を行なってこの点を明確にしていこうつもりである。

c) 越波量の距離的分布に関する考察 風速がかなり大きくなると、越波した水がほとんど水平に飛散する場合が少なくなく、また飛散する水粒子は越波のみでなく、堤防より沖側において波頭が砕け、そのためにかなりの水粒子が飛散するので、越波量にはこうした水粒子が加わっていることになる。したがって著者らの実験値には、以上述べたようなほとんど水平に飛散していく水粒子は測定されていないことになるわけであり、もう少し正確に越波量を測定するためには、越波の鉛直方向の分布も測定する必要がある。しかしながら越波量の水平方向の距離的分布を測定した結果によると、水平に飛散する水粒子の量はきわめて少なく、越波量そのものにはあまり影響はないものと考えられる。図-11 は越波量の距離的分布の測定結果より、単位面積に落下する水量 q と、全越波量を越波分布を決める代表的距離 x_0 で割ったものとの比 $q/(Q/x_0)$ を縦軸に、堤防からの距離 x と x_0 との比 x/x_0 を横軸にとって越波の分布を表わしたものの一例である。ここに、 x_0 としてどのような距離をとるべきかは明らかでないで、ここでは越波量の距離的累加において総越波量の 95% に相当する距離、すなわち堤防から距離 x_0 までは総越波量の 95% が落下してしまう距離をとることにした。また図中に示した一つの Froude 数 $VQ^{-1/4}g^{-1/2}$ は飛散距離におよぼす風速の効果を表わすものと考えられるが、実験結果はこのパラメーターによってあまり変化しないようである。なお、実際問題に適用するにはこの x_0 についてなんらかの検討が必要であり、改めて考察を進めていくつもりである。

4. 結 語

以上、著者らは海岸堤防に関する研究においては、風の影響は無視できない重要な要素であることを述べた。

図-11 越波量の距離的分布



風洞水槽を用いた海岸堤防に関する一連の研究を行なうにあたり、まず、鉛直堤を対象とした海岸堤防の越波に関する実験をとりあげて、越波量におよぼす風の直接的な影響などについて二、三の興味ある結果を得た。しかし、まだ実験が緒についたばかりであって問題点を明らかにすることに終ったが、今後はこうした実験を大いに進めて、海岸堤防の合理的設計の基礎的資料を得たいと考えている。

最後にこの高速風洞水槽は昭和35年度機関研究費によって製作されたもので、現徳島大学助教授 植木 享氏の努力によるところが大きいことを記し深謝の意を表したい。また研究を遂行するにあたり、熱心な協力をいただいた日本鋼管KKの亀井敏雄氏、大学院学生 坂井順行君に謝意を表するとともに、この研究が文部省科学研究費および大阪府の委託によって行なった研究の一部であることを付記して、関係方面に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Sibul, O.J. and Tickner, E.G.: Model Study of Overtopping of Wind Generated Waves on Levees with Slopes of 1:3 and 1:6, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 80, 1956, pp. 1~27.
- 2) Paape, A.: Experimental Data on the Overtopping of Seawalls by Waves, Proc 7th Conf. Coastal Engineering, 1961, Vol. 2, pp. 674~681.
- 3) 永井莊七郎・土田伸三: 風と波を考慮した海岸堤防の形状と構造に関する研究, 第7回海岸工学講演会講演集, 昭 35. 11, pp. 245~273.
- 4) 国司秀明: 電気抵抗式波高計の設計について, 京都大学防災研究所年報, 第3号, 昭 34. 12, pp. 65~73.
- 5) Healy, J.J.: Wave Damping Effect of Beaches, Proc. Minnesota Intern. Hydraulics Convention, 1953, pp. 213~220.
- 6) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏: 海岸堤防の越し波防止効果について, 第4回海岸工学講演会講演集, 昭 32. 11, pp. 99~109.
- 7) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫・亀井敏雄: 波の遇上におよぼす風の影響について, 昭和36年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 昭 36. 11, pp. 144~146.