

海岸堤防の越波実験における縮尺効果について

岩 垣 雄 一*・井 上 雅 夫**・金 田 孝 之***

1. 緒 言

石原・岩垣らは、海岸堤防あるいは護岸の設計に際しては、背後地の状況や堤防の構造、排水施設などにより越波を差し支えない程度まで許容するという立場から、堤防の天端高さを決めるべきであることを主張してきた¹⁾。このような観点から、著者らは、海岸堤防の越波に関する従来の実験や著者らが行ってきた実験の結果にもとづいて、越波量におよぼす波の特性や潮位、のり先水深、堤防の天端高さ、傾斜角などの影響を明らかにするとともに^{2), 3)}、これまでまったく、未知のままであった風の影響についても実験を行ない、二、三の興味ある結果を得た⁴⁾。

しかしながら、越波の機構が複雑なため、実際の海岸堤防の設計にあたっては、越波量を模型実験によって推定するのが現状であり、著者らも、数年来、各地の海岸堤防や護岸の越波に関する模型実験を行ってきた。

一般に、こうした模型実験において最も重要なことは模型と実物の力学的相似関係を見出すことであり、もし、この力学的な相似関係がはっきりしないまま、模型実験の結果を用いて構造物を設計すると、危険な構造物やむだな過大の構造物を作ったりする恐れがある⁵⁾。従来の越波実験は Froude の相似則によって行なわれているが、その結果を実際問題に適用する場合に、模型縮尺を変えた実験によって実物大のときの値を推定したり、あるいは、現場資料との比較をするといった検討はほとんどの場合実施されていない。ただ W.E.S. の Hudson らによるオキチョビ湖岸の堤防に対する模型縮尺を1/17と1/30に変えた実験結果⁶⁾、あるいは、岩崎・沼田による庄内海岸堤防の現地観測と模型実験の結果とを比較したもの⁷⁾、さらに、榎木による由比海岸堤防の現地観測の報告⁸⁾が見られる程度である。

したがって、越波の力学的な機構が明らかにされていない現状では、模型実験を行なうにあたり、その相似律を検討することが、いっそう重要な問題であるといえる。

この論文は、こうした見地から海岸堤防の越波実験に

おける縮尺効果を明らかにするために、鉛直堤を対象とした縮尺の異なる一連の越波実験を行ない、その結果を示すとともに、それに対して若干の考察を行なったものである。

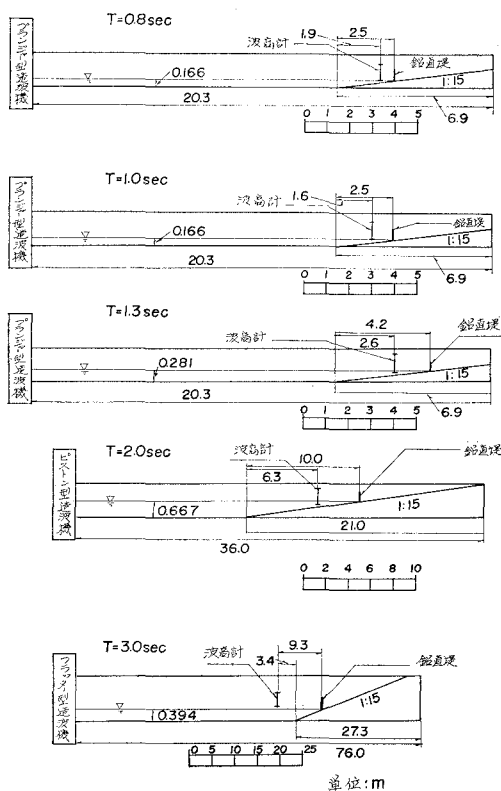
2. 実験設備および実験方法

(1) 実験設備

この実験では、京都大学防災研究所宇治川水理実験所の河口閉塞実験水槽、高速風洞水槽および長水路の3つの実験施設を用いた。

河口閉塞実験水槽は、長さ21.8 m、幅50 cm、深さ60 cmの鋼製で、プランジャー型造波機が取り付けられている。高速風洞水槽は、長さ40 m、幅80 cm、高さ2.3～4.0 mの片面ガラス張りの鉄筋コンクリート製で、ピストン型造波機が付設してある。長水路は長さ80 m、幅1 m、深さ1.5 mの一部ガラス張りの鉄筋コンクリート製

図一 実験水槽概略図



単位: m

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部

** 正会員 関西大学講師 工学部

*** 学生会員 京都大学大学院

で、フラッター型造波機がついている。それぞれの水槽に勾配 1/15 の模型海浜をつくり、その上に鉛直堤を設置した。図-1 は、各実験水槽における堤防と波高計の設置位置を図示したものであり、波の周期が 0.8 sec, 1.0 sec および 1.3 sec の場合の実験は河口閉塞実験水槽により、2.0 sec の場合は高速風洞水槽で、3.0 sec の場合は長水路を用いて実験した。なお、図中の実験水槽の水深は堤防ののり先水深が 0 cm のときの値である。

(2) 実験方法

越波量の縮尺効果を明らかにするためには波の周期とともに模型の大きさを変えて実験を行なわなければならない。この実験では、波の周期 T を 0.8 sec, 1.0 sec, 1.3 sec, 2.0 sec および 3.0 sec とした。実験波の沖波波形勾配 H_0/L_0 は、それぞれの周期について、0.01, 0.02 および 0.03 とし、同一の波形勾配について比水深 h/L_0 (h はのり先水深) の値を 0.01, 0.02, 0.03 および 0.04 に変化させ、堤防の沖側で碎波して越波する場合、堤防前面で碎波して越波する場合、激しい碎波現象は起きないが重複波にもならないで越波する場合および重複波の状態で越波する場合のそれぞれを含むようにした。相対堤高 H_c/H_0 (H_c は堤防の静水面上の天端高さ) の値は、ある程度の越波量が期待されるように、つねに 0.8 とした。なお、堤防の幅については、従来の水槽を二つに分割して使用する方法は用いず、水槽の全幅にわたって堤防を設置した。このようにしたのは、堤防付近だけ分割すると、左右両側の反射率が極端に異なる波が干渉しあい、入射波が一樣でなくなり、越波量が変化する場合があるためである。

実験はまず、堤防をとり除き、所定の波を得るようにしたのち、堤防を設置して、造波機始動後の比較的波が一樣な 4～6 波までの越波量を堤防背後で直接測定し、同じ測定を 5～10 回くり返した。波高は勾配 1/15 の模型海浜のはじまる位置より岸側に 1/3 波長以上離れたところで測定した。このことは、波の shoaling に関する岩垣・酒井の実験⁹⁾によれば、水槽底面と斜面の間げきから水が出入して波高が減少する場合があります、こうした影響が入射波の波高測定に入らないようにするためである。波高を測定した位置の水深は、0.8 sec～2.0 sec までの実験についてはすべて相似にした。

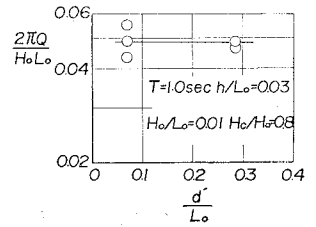
3. 実験結果とその考察

(1) 波高測定位置および水槽水平部の水深が越波量におよぼす影響

越波実験における縮尺効果を明らかにするためには、各実験での波高測定位置や水槽水平部の水深をできるだけ相似にすることが望ましいが、やむをえないときは、こうした影響がどの程度あるかを明らかにしておかなければならない。

図-2 は、周期が 1.0 sec の場合について無次元越波量と波高測定位置の水深 d' と沖波波長 L_0 の比 d'/L_0 との関係を示したものの一例であり、 d'/L_0 の値がほぼ 0.1～0.3 の範囲であれば、波高を

図-2 波高測定位置の水深が越波量におよぼす影響



どの位置で測定しても、沖波波高が一定である限り、越波量はあまり変化しないことがわかる。しかし、この実験では前述したように、周期が 0.8 sec～2.0 sec の実験については、波高を測定する位置の水深を相似にすることにし、こうした影響が入らないように留意した。

図-3 水槽水平部の水深が越波量におよぼす影響 (1)

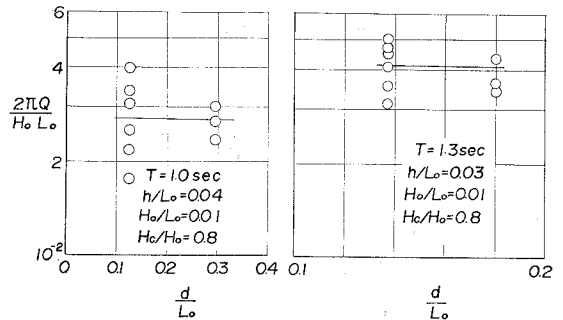
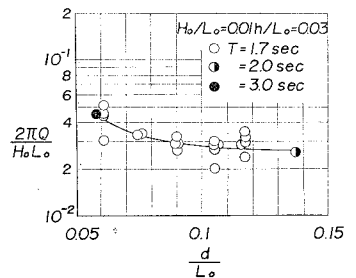


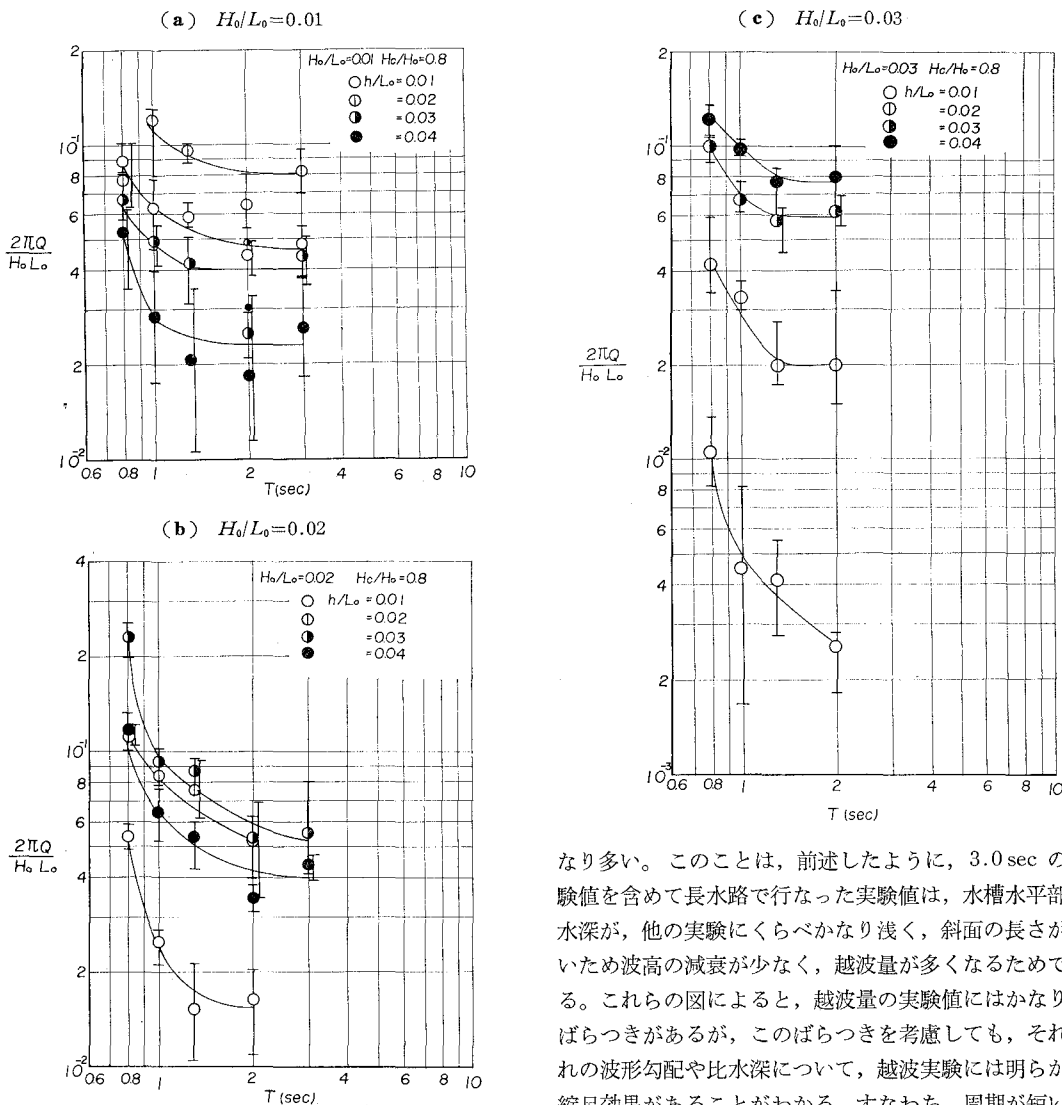
図-3 は、堤防を斜面上で移動させ、水槽水平部の水深 d のみを変化させて、越波量がどのように変化するかを、周期が 1.0 sec と 1.3 sec の場合について調べたものである。この図によると、

図-4 水槽水平部の水深が越波量におよぼす影響 (2)



d/L_0 の値が 0.1 以上であれば、あまり水槽水平部水深の影響を受けないようであり、むしろこの影響は実験値のばらつきに含まれるようである。しかし、周期が 3.0 sec の実験を行なう場合に、水槽水平部の水深を他の周期の実験と相似にすると非常に深くなるため、 d/L_0 の値を 0.1 以下にした。そのため後述するように、3.0 sec の越波量は 2.0 sec のものより多いことがわかった。図-4 は、このように d/L_0 が 0.1 以下になったときの水槽水平部の水深が越波量におよぼす影響を示したものである。この図からわかることは、 d/L_0 の値を 0.1 以下より小さくすると、斜面の長さが短くなり、そこでの波高の減衰が少なくなって、越波量が多くなるものと考えら

図-5 越波実験における縮尺効果



れる。したがって、今後は縮尺効果を調べるまに、こうした検討を必ず行なわなければならない。

(2) 鉛直堤の越波実験における縮尺効果

実験結果は次元解析によって導かれる次式によって整理した²⁾。

$$\frac{2\pi Q}{H_0 L_0} = F\left\{\frac{H_0}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{H_c}{H_0}\right\} \dots\dots\dots (1)$$

図-5は、縦軸に無次元越波量を、横軸に周期をとり、越波量と周期との関係を実験値のばらつきの範囲と平均値とで表わし、越波実験における縮尺効果を示したものである。図-5 (a), (b) および (c) は沖波波形勾配が 0.01, 0.02 および 0.03 の場合であり、パラメータは比水深である。なお、図-5 (a) の周期が 2.0 sec の実験値のうち小円でプロットしたものは長水路での実験値であり、大円でプロットした風洞水槽での越波量よりもか

なり多い。このことは、前述したように、3.0 sec の実験値を含めて長水路で行なった実験値は、水槽水平部の水深が、他の実験にくらべかなり浅く、斜面の長さが短いいため波高の減衰が少なく、越波量が多くなるためである。これらの図によると、越波量の実験値にはかなりのばらつきがあるが、このばらつきを考慮しても、それぞれの波形勾配や比水深について、越波実験には明らかに縮尺効果があることがわかる。すなわち、周期が短い波ほど越波量は増加する。この越波量が増加する傾向は周期が短いほど顕著にあらわれる。いま、2.0 sec の場合の越波量を基準にとると、波形勾配や比水深の値によってかなり異なるが、1.3 sec, 1.0 sec および 0.8 sec の場合の越波量はそれぞれ約 1.2~1.7 倍, 1.4~2.0 倍, 2.0~4.0 倍になる。また、3.0 sec の実験値は 2.0 sec の実験値よりも若干大きいようであるが、これは前述した水槽水平部の水深の違いによるものと考えられるので、2.0 sec よりも長い波を用いれば縮尺効果はあまりないものとしてよいであろう。

このように、周期が 1.0 sec よりも短い波では縮尺効果が顕著にあらわれ、越波量は急激に増大することがわかる。このことは、越波実験では波の周期が 2.0 sec 程度以上になるように模型縮尺を決定することが必要であることを示している。

図-6 $2\pi Q/L_0^2$ と H_0/L_0 との関係

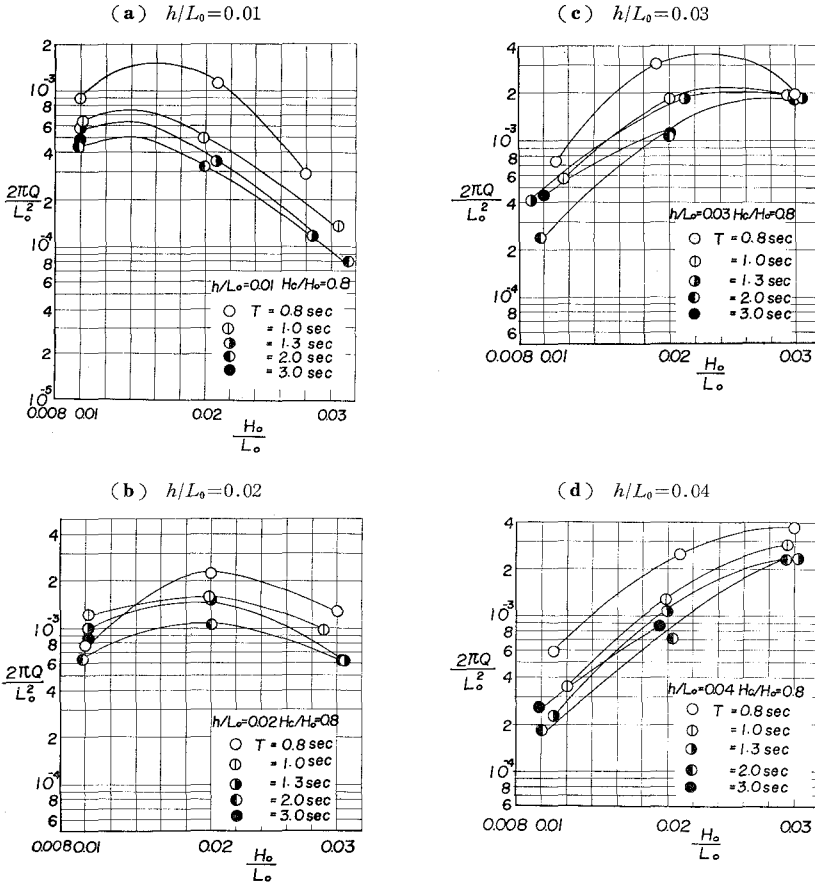


図-6 は、式 (1) を変形したつぎの関係

$$\frac{2\pi Q}{L_0^2} = F\left\{\frac{H_0}{L_0}, \frac{h}{L_0}, \frac{H_c}{H_0}\right\} \dots\dots\dots (2)$$

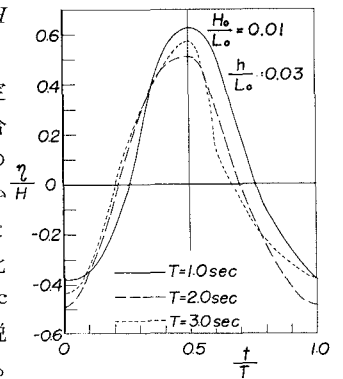
を用いて、実験結果を整理し越波量におよぼす波高の影響を調べるとともに、縮尺効果がどのような越波状況のとき、最も顕著にあらわれるかを調べようとしたものである。図-6 (a), (b), (c) および (d) は、それぞれ比水深が 0.01, 0.02, 0.03 および 0.04 の場合である。これらの図によると、波高の影響については実験値が少なく明確な傾向はわからないが、いずれの周期についても、すでに著者らが指摘しているように、越波量が最大になるのは、堤防前面より少し沖側で砕けるような波の場合である。さらに、越波量における縮尺効果があまりみられないのは、 h/L_0 の値が 0.01, 0.03 および 0.04 のとき、 H_0/L_0 の値がそれぞれ 0.01, 0.03 および 0.04 であり、 h/L_0 が 0.02 の場合は明らかでない。このときの h/H_0 の値を調べると 1~1.3 であり、堤防前面で砕波する場合であることがわかる。このように越波実験において縮尺効果が最もあらわれないのは、エネルギーの消散が最も著しい砕波して越波する場合であり、これは常識的には逆のように思われるが、その理由については

明らかでない。なお、豊島らは3割ののり勾配斜面への周期波の遡上の縮尺効果に関する実験を行ない、0.7 sec と 1.0 sec の実験結果を比較している¹⁰⁾。それによると、1.0 sec 以下の周期では縮尺の効果があらわれ、遡上高がやや小さくなると述べているが、実験結果を詳細にみると、堤防より沖側で砕ける波については、むしろ逆に、0.7 sec の波の遡上高が大きくなっている場合がある。このことは、著者らの実験の傾向と一致して興味深い。

このように鉛直堤の越波実験には、かなりの縮尺効果があることがわかった。しかしながら、この原因については、実験において越波量と入射波高の測定しか行なわなかったため、明確な結論は得られないが、著者らの実験の観察などからつぎのようなことが推論できよう。

一般に、エネルギーの消散や損失の少ない現象では、縮尺効果はあまりないとされている。しかし、越波の場合には、エネルギー損失の少ない重複波の状態で越波するときにもかなりの縮尺効果があることがわかった。この実験においては、堤防天端幅も狭く、そこでの粘性や表面張力の影響とは考えられないため、重複波の状態で越波する場合については、越波するまでの波形について調べた。図-7 は、越波量を測定したときの入射波の波形を比較したものであり、横軸は時間 t と周期 T との比、縦軸は静水面からの水位 η と波高 H との比である。図中、3.0 sec の波形は、測定位置の水深が他の場合と異なるため、直接の比較はできない。しかし、周期が 1.0 sec と 2.0 sec との波形を比較してみると、1.0 sec の波形は峰の部分鋭く、静水面上の水位も

図-7 実験波形の比較



越波実験における縮尺効果を定量的に明確にするとともに、その原因を明らかにするため、堤防前面の波の特性や碎波の縮尺効果などについて、さらに詳細な検討を進めていかなければならない。

最後に、本研究に際し実験に大いに助力していただいた京都大学防災研究所海岸災害研究室の諸氏に感謝するとともに、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを明記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・岩垣雄一・鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，第2回海岸工学講演会講演集，昭30.11，pp.57~70.
- 2) 石原藤次郎・岩垣雄一・三井 宏：海岸堤防の越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.
- 3) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：海岸堤防の越波防止に関する二，三の問題，京都大学防災研究所年報，第7号，昭39.3，pp.387~399.
- 4) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一：風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(2)，第12回海岸工学講演会講演集，昭40.11，pp.186~192.
- 5) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，昭36.3，pp.21~42.
- 6) Hudson. R.Y., R.A. Jackson and R.E. Cuckler : Wave Run-up and Overtopping, Levee Sections, Lake Okeechobee, Florida, Hydraulic Model Investigation, Waterways Experiment Station, Tech. Rep. No. 2-449, 1957, pp. 1~29.
- 7) 岩崎敏夫・沼田 淳：海岸護岸の越波に関する実験の Scale Effect について——庄内海岸の場合——，土木学会第22回年次学術講演会概要Ⅱ，昭42.5，pp.117-1~4.
- 8) 樫木 亨：台風24号による中部地区海岸災害について，昭和40年9月の豪雨および24号台風による風水害の調査とその防災研究報告，昭41.3，pp.162~164.
- 9) 岩垣雄一・酒井哲郎：水深変化にともなう波の変形に関する研究，昭和43年土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭43.5，pp.Ⅱ-39-1~2.
- 10) 豊島 修・富永正昭・橋本 宏：海岸堤防に関する研究(8)——波のうちあげ高——，建設省土木研究所報告，第131号，昭42.11，pp.1~30.
- 11) Diephuis, J.G.H.R. : Scale Effect Involving the Breaking of Waves, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 194~201.
- 12) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫：由比海岸堤防の越波に関する模型実験，第10回海岸工学講演会講演集，昭38.10，pp.132~137.
- 13) 豊島 修・橋本 宏：由比海岸堤防模型実験について，海岸，第5号，昭39. pp.89~95.