

海岸堤防の越波量について

富 永 正 照*・佐 久 間 襄*

1. ま え が き

海岸堤防の高さは越波量も考慮して決められるようになってきたので、越波量を正しく見積めることは堤防を計画する上に非常に重要である。越波量に関する研究は10年以上前から行なわれてきたが、うちあげ高に比較すると、計画に使える資料はなお少ないようである。

越波量は堤高、設置水深、表のりの形状、風の有無、沖波の性質、海底勾配などの種々の要素に影響されるので非常に複雑な現象である。したがって、解析的な取扱いは困難で、一般に模型実験により研究されている。

土木研究所では、海底勾配 1/30 の海浜上に種々の堤防を設置して越波量を測定し、計画に使える資料の整備をはかるとともに、その適用性を広めるために、波の打ち上げ高と越波量との相関を調べた。また、のり勾配の影響、波返しの効果、風の影響などについても検討し、越波量の特性の把握に努めてきた。以下にこれらの結果の概要を報告し、一般の参考に供することにする。

2. 実験方法および実験条件

実験に用いた施設は、長さ 35m、幅 0.6m、深さ 1.5 m の風洞付造波水路と、長さ 110m、幅 1.5m、深さ 2.5m の大型造波水路である。

水路の一端に 1/30 の海床をつくり、その上に種々の堤防を設置して波をあて、越波量を測定した。堤防は適当な厚さの板をつみ重ね、その枚数を変えることにより高さを加減する。越波量は堤防の背後に箱をおき、その中に流入した水量をメスシリンダーで測定した。1 回の実験で 5 波程度越波させ、その平均値を越波量とした。越波量が著しく大きく、2 ～ 3 波で箱が一ぱいになる場合は同一の実験を数回くり返して平均した。風速はピトー管およびアルコールを用いた傾斜式マノメーターにより測定した。風速は水槽内より鉛直方向にある分布をなすので、堤防の天端上約 30 cm の位置で所要の風速に合わせた。なお、風洞付水路では波を機械的に発生させたが、その上に風を吹かせると波の不規則性が強くなるので、これを避けるために、堤防の位置から約 10m 手前で風を入れるように送風口を配置した。

実験条件をまとめると表—1 のとおりである。大型水路における実験は周期の影響を調べるために行なったもので、大部分の実験は風洞付水路で実施した。

表—1 実験条件

	風 洞 付 水 路	大 型 水 路
波 高 (H_0)	5~25 cm	20~60 cm
周 期 (T)	1.1, 1.5, 1.9 sec	2.0, 3.0 sec
波形勾配 (H_0/L_0)	0.02~0.06	0.04
堤防のり先水深 (h)	0~21 cm	6~30 cm
比 水 深 (h/L_0)	0~0.06	0.01~0.04
風 速 (V)	0~10 m/sec	0
無次元さ れた風速 ($\frac{V}{\sqrt{gH_0}}$)	0~8	
堤 防 の 形 状	鉛 直 波返しなし 5分~3割 波返し付 5分~3割	鉛 直
比 堤 高 (H_c/H_0)	0.2~2.5	0.4~2.5

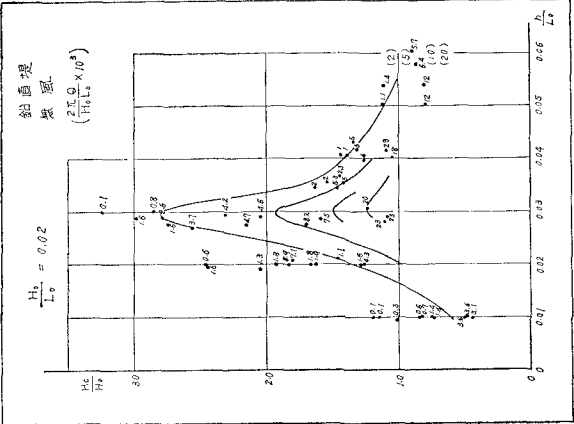
3. 1/30 の海底勾配上の鉛直堤の越波量

図—1 (a)~(e) は無風時の鉛直堤の越波量を示したものである。越波量 Q は堤防の単位幅当り、一波当りの値で、無次元化した形で与えられている。

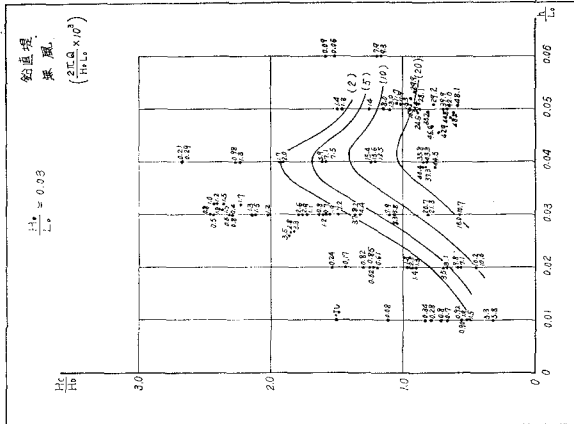
これらの図によると、越波量は堤防を進行波の碎波点付近においた場合に最大となり、設置水深がそれより浅くなくても深くなくても越波量は小さくなる。とくに碎波領域では減少の程度が大きい。したがって、越波量が問題となるのは一般に設置水深が大きい場合である。しかし、海底勾配が著しく急で、波が大きい場合は、堤防が汀線より陸側にあっても越波量が問題になる場合がある。昭和 41 年 9 月の駿河湾奥の吉原海岸における災害¹⁾はこの例で、堤防は汀線から約 130m 陸側にあったが、越波により背後地が大きな被災を受けた。この海岸の海底勾配は 1/4~1/5 という急勾配である。

また、海底勾配が非常にゆるくなると、越波量の変化状況は図—1 と若干異なった様相をとる。たとえば、岩崎・沼田の海底勾配 1/60 の場合の実験結果²⁾によると、設置水深を一定にして、波を大きくしてゆくと、越波量の極大値が 2 カ所あらわれる。第 1 のピークは図—1 に認められるものと同じであるが、第 2 のピークは波が沖で砕けているにもかかわらず発生する。これは海底勾配

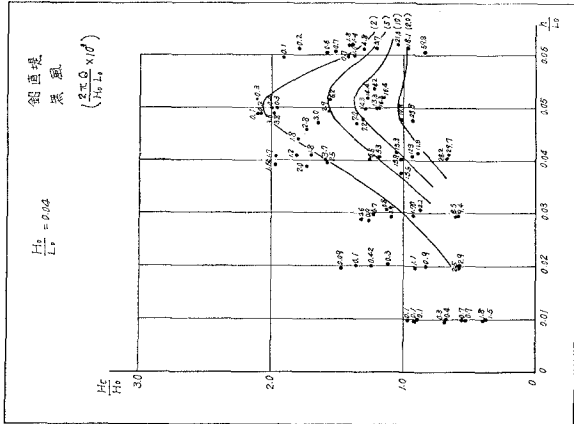
* 正会員 建設省土木研究所河川部海岸研究室



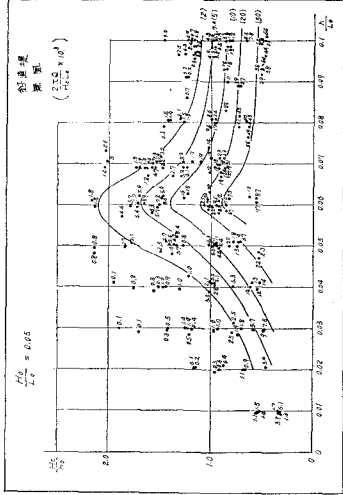
(a)



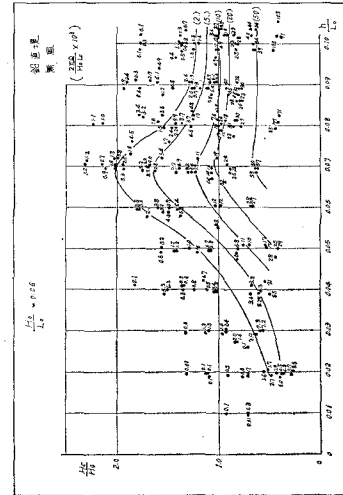
(b)



(c)



(d)



(e)

図-1 鉛直堤の越波量

がゆるい場合は、波がいったん砕けても、ある距離進んだ後にふたたび浅海波として再生し、ちょうど砕けた状態で堤防に当たるからであろうと説明されている。

4. うちあげ高と越波量との相関

越波は波のうちあげ高が堤防より高くなるときに生ずるものであるから、うちあげ高と越波量とはかなり密接な関係があるものと予想される。両者の間に簡単な相関があることがわかれば、うちあげ高の資料は相当に豊富なので、それが越波量の推定に生かされることも考えられる。また、このような関係を用いると、堤防の形状、風などの越波量に対する影響がより明瞭になると考えられる。

(1) 碎波領域における相関

波のうちあげ高は堤防前面の波の形態に左右される面が大きい。碎波後に堤防に当たる場合は、沖波の影響が小さくなり、堤防ののり先水深のみによりほぼうちあげ高がきまると考えられる。一方、設置水深が大きく、重複波または部分重複波が生ずる場合には、沖波の影響が大きくなり、うちあげ係数は波形勾配の関数となる。

碎波領域では、図-2に示すように、越波量は堤防天端より上に飛び出す部分の高さに密接に関係すると思われる。この高さは波のうちあげ高 (R) と堤防の高さ (H_c) との差にほぼ等しいので、 $R-H_c$ と越波量との関係を調べてみる。

表-2は土木研究所において実施したうちあげ高の実験³⁾に基づいて作成したものである。うちあげ高をこの表を用いて算定し、越波量との関係を調べた結果を図-3(a)に示す。これを見ると、かなりばらつきはあるが、越波量は $R-H_c$ のほぼ2乗に比例している。

$$Q = \alpha(R-H_c)^n \dots \dots \dots (1)$$

とにおいて、平均的に引いた実線について、 α と n とを求めてみると、 $\alpha = 1.5 \times 10^{-2}$ 、 $n = 2$ となっている。

表-2 鉛直堤への波の打ちあげ高

R/H_0					
H_0/L_0	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
h/L_0					
0.01	1.5	1.05	0.85	0.77	0.70
0.02	4.0	2.1	1.4	1.1	0.95
0.03	4.2	3.0	1.9	1.4	1.2
0.04	2.3	3.3	2.9	2.0	1.6
0.05	1.5	2.2	3.4	2.8	1.8
0.06	1.3	1.65	2.2	3.0	2.3
0.07			1.7	2.15	2.65
0.08			1.5	1.8	2.1
0.09				1.6	1.8
0.10				1.5	1.65

この式は具体的には、堤防より上に飛び出す部分の断面形状が、図-2に示すようにほぼ三角形で、しかも、その単位幅当りの水量と越波量との比が一定であることを

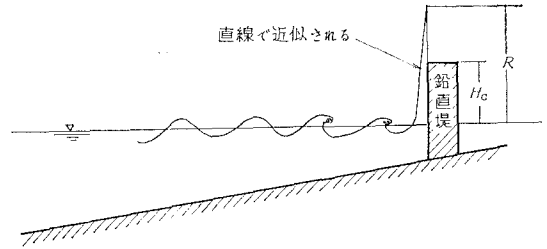
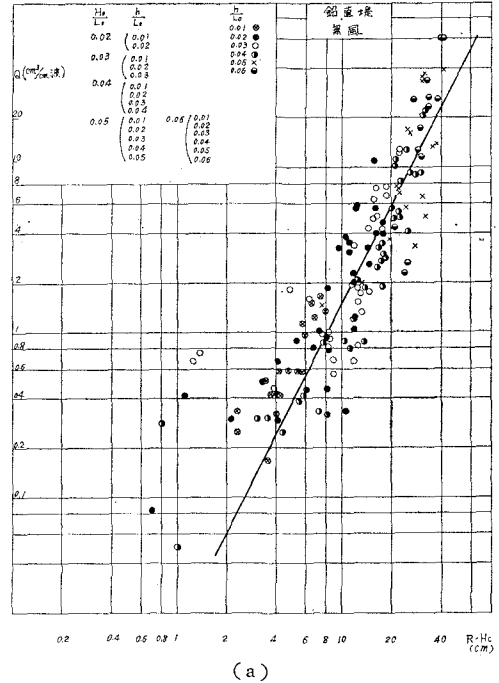
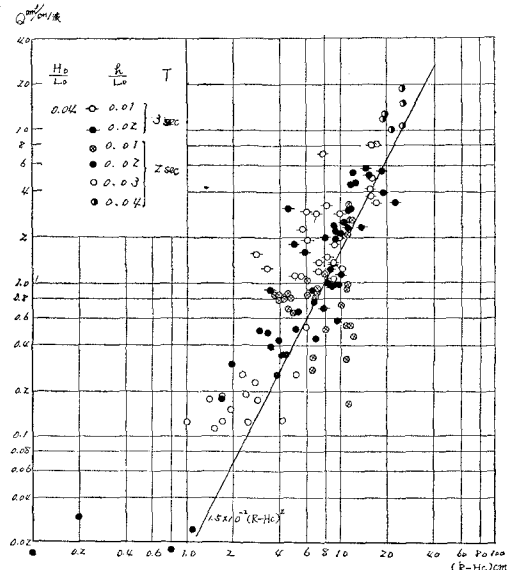


図-2 碎波のうちあげ状況



(a)



(b)

図-3 越波量とうちあげ高との関係

表わしていると考えられる。

以上の結果は風洞付造波水路で得られたもので、周期は 1.1~1.9 sec の範囲である。砕波を含む領域では、周期が 2 sec 以下になると縮尺の影響が表われるといわれているので、大型水路で周期の長い波を用いてこの点を検討した。

図-3 (b) はこの結果を示したものである。この場合うちあげ高の算定には、実験値をそのまま用いた。実線は周期の短い場合の結果であるが、両者の差は小さく、周期の影響はあまり大きくないと考えられる。

(2) 重複波領域における相関

この領域においては、沖波の影響が強いので、うちあげの波形はのり先水深、波形勾配などにより変化し、砕波領域のように一定の形にならないと考えられる。

重複波の波形は Tadjbakhsh と Keller の 3 次の近似式によると次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \eta' = & \left[1 + \frac{\varepsilon^2}{256} (9\omega_0^{-8} + 6\omega_0^{-4} - 15 + 8\omega_0^4) \right] \cos x \\ & + \frac{1}{8} \varepsilon (\omega_0^{-2} + 3\omega_0^{-6}) \cos 2x \\ & + \frac{3}{256} \varepsilon^2 (9\omega_0^{-12} + 6\omega_0^{-6} + 30\omega_0^{-4} - 16 \\ & + \omega_0^4 + 2\omega_0^8) \cos 3x \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここに、 $\varepsilon = ka$, $\omega_0 = gk \tanh kh$, $k = 2\pi/L$

$$\eta' = a^{-1} \eta$$

a = 深海における重複波の振幅

η = ある水深における波峰高

上式を用いて計算した堤防前面部の重複波を波形勾配 0.02 の場合を例にとって示すと 図-4 のようになる。図中には同条件の波形勾配、比水深におけるうちあげ高の実験値が記入されている。計算値と比較してみると、波高に対して水深の十分に大きい場合、すなわち、 $h/L_0 = 0.05$ の場合は両者はよく一致しているが、0.04 の場

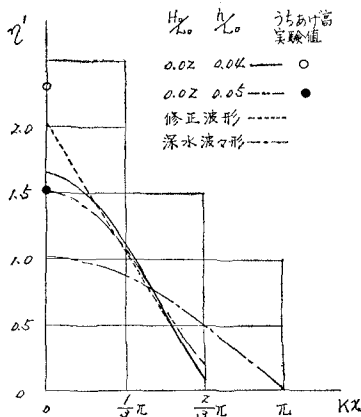


図-4 重複波のうちあげ波形

合は実験の方がかなり大きい。これはこの領域では上式の近似度が十分でなく、波形が堤防付近で下に凸のような形状をなしているためと考えられる。

以上の結果からみて、堤防前面の波形は上式で完全に表わせるものではないが、うちあげ高の実験値を参考にすれば、おおよその形状は推定されよう。これらの結果を利用すると、堤防上に飛び出す単位幅当りの水量を計算できるが、波形をそのまま生かして計算するのは、計算の複雑さ、精度などの面で必ずしも適当でないので、図-5 に示すように、三角形の面積 A を計算して、これと越波量との関係を調べてみた。その場合、先にのべた波高に対し、のり先水深の小さい場合は 図-4 に示すように若干修正した波形を用いた。

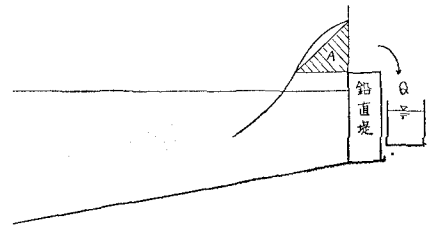


図-5 重複波のうちあげ水量

Q と A との関係は 図-6 のようになり、ほぼ

$$Q = \beta A \dots\dots\dots (3)$$

とみなすことができよう。ここで係数 β は 8×10^{-2} 程度となっている。

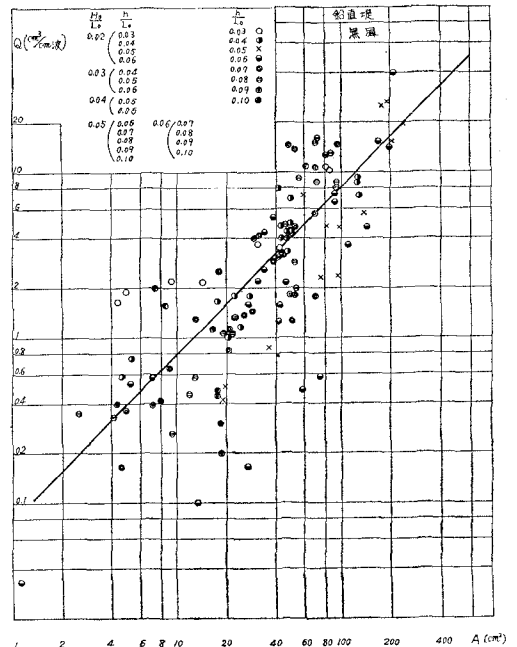


図-6 重複波領域におけるうちあげ水量と越波量との関係

5. 堤防ののり勾配の影響

5分, 1割, 2割, 3割の各堤防について, 無風時の越波量を測定した結果を式(1)のような形式で図示すると図-7 になる。傾斜堤の場合には, うちあげ高の変化が越波量におよぼす影響が大きいため, 表-2のような近似値でなく, 実験値をそのまま使用した。また, 堤防が碎波領域の中にある場合について検討したので, 波形勾配は 0.04 とし, 比水深のみを変化させた。

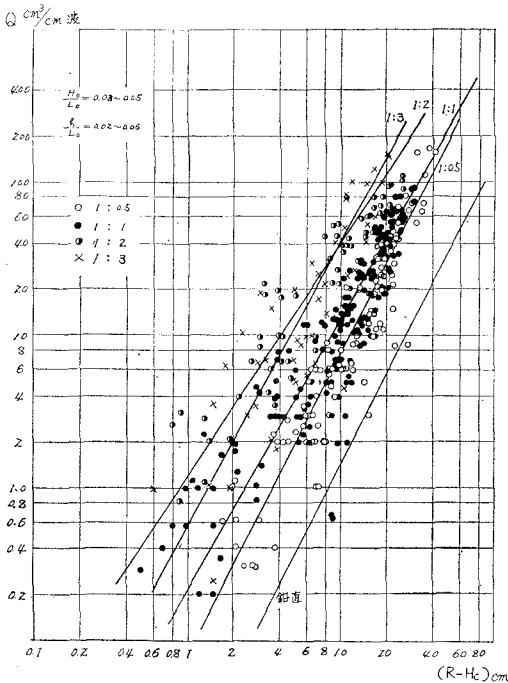


図-7 傾斜堤の越波量

これをみると, のり勾配がゆるくなると, 同一条件でも越波量は増大する。2~3割の堤防では鉛直堤に比較して10倍程度の越波量となる。

3割以上ののり勾配については実験していないのでよくわからないが, 2割と3割の場合の越波量がほとんど等しいことからみて, これ以上越波量が大きくなることはないと推定される。碎波領域では, うちあげ高は鉛直堤の場合がもっとも大きく, のり勾配がゆるくなると小さくなる。越波の場合は, 傾斜堤の方が, 鉛直堤より当然入りやすくなるわけであるが, 上述のように, 傾斜がゆるくなると, うちあげ高が小さくなるので, あるのり勾配でピークとなり, それ以上勾配がゆるくなると越波量は減少すると考えられる。

図-7 をみると, のり勾配がゆるくなれば, n が2より小さくなる傾向がみられる。のり勾配がゆるい場合は, 堤防より上に飛び出した水量は全部越波すると考えられる。したがって, 鉛直堤の場合と同様に, のり面上

のそ上水面がほぼ直線で示されるなら, n の値はやはり2となり, 越波量は堤防上に飛び出す水量に等しくなるはずである。

図-8 は2割勾配の場合について, のり面上をそ上する水面形を調べたものである。これはのり面上のある位置における水脈の厚さを y , そ上波の頂点からその位置までののり面に沿う距離を x として各実験値をプロットしたものである。これによると, $y=50$ cm 程度の範囲では, y と x との間には近似的に直線関係のあることが認められる。すなわち,

$$y = mx \cdots \cdots (4)$$

ここに, $m = 6.5 \times 10^{-2}$

そこで, 越波してもうちあげ高は不変として越波量を計算すると,

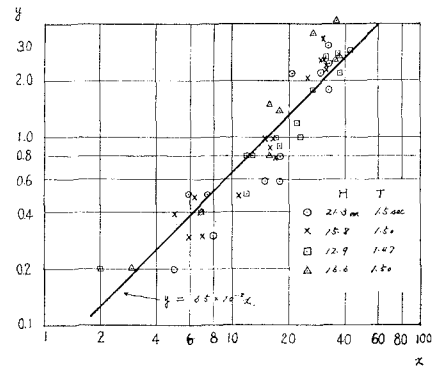


図-8 2割勾配をそ上する波の水面形

$$Q_c = \frac{1}{2} \times \sqrt{5} (R-H_c) \times 6.5 \times 10^{-2}$$

$$\times \sqrt{5} (R-H_c) = 0.163 (R-H_c)^2 \cdots \cdots (5)$$

同一条件でうちあげ高と越波量とを測定して, 式(5)による計算値と実験値とを比較すると図-9 になる。これによると, 実験値の方が計算値より大きいことがわかる。これは, 越波する場合は x の値が $\sqrt{5} (R-H_c)$ より大きくなるためと考えられる。したがって, 越波す

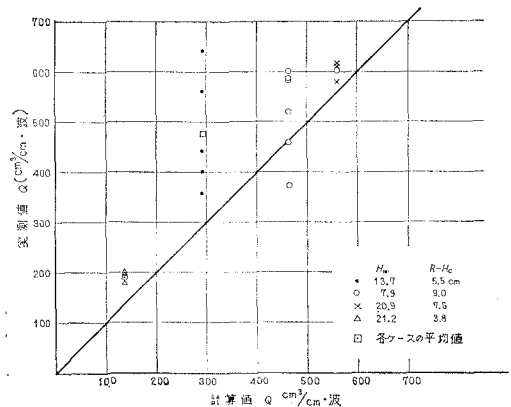


図-9 越波量の実験値と計算値との比較 (のり勾配2割)

る場合の R の値が修正できれば、式(1)と同様 n の値はほぼ ∞ をとるものと考えられる。

6. 波返しの効果

図-8に示したように、のり勾配がゆるくなると越波量は増大するが、波返しを設けると、それによってその波の先端が垂直に近い状態であらうため、鉛直堤の越波量に近くなると推定される。

図-10は波返しの効果を調べたものである。かなり

のばらつきはあるが、全般的にみて、砕波後も砕波前も波返しが効果的に作用し、のり勾配と無関係に越波量は鉛直堤の越波量に近づくことが認められる。

波返しの効果の点で問題なのは、その高さや形状である。図-11は実験に用いた波返しで、現地で実際に用いられるものに似た形状である。高さや沖波波高との比が0.65程度であるが、とくに小さな波返しでない限りその機能はあまり変わらないと思われる。

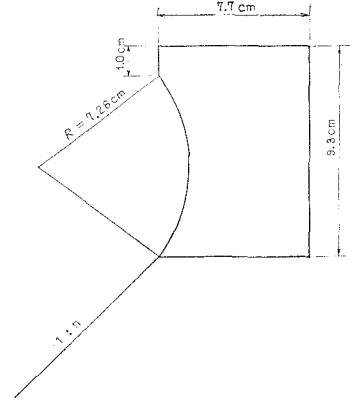
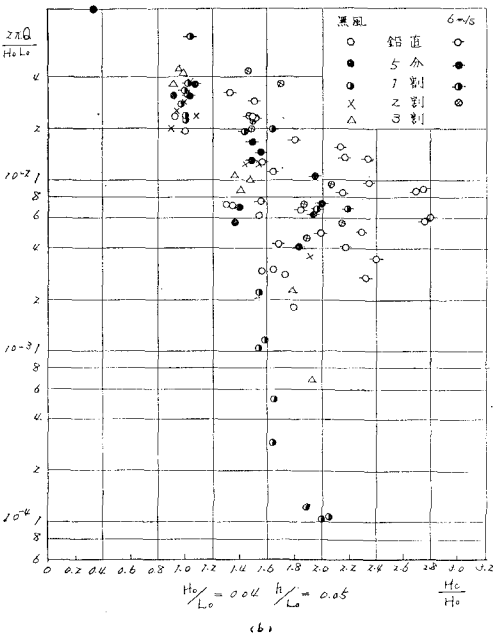
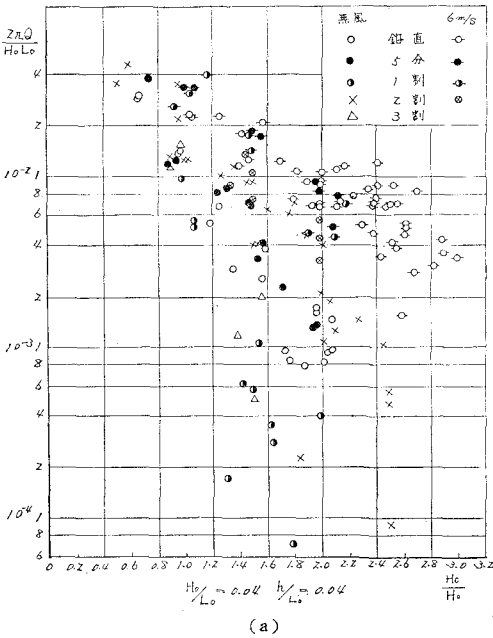


図-11 実験に用いた波返しの形状

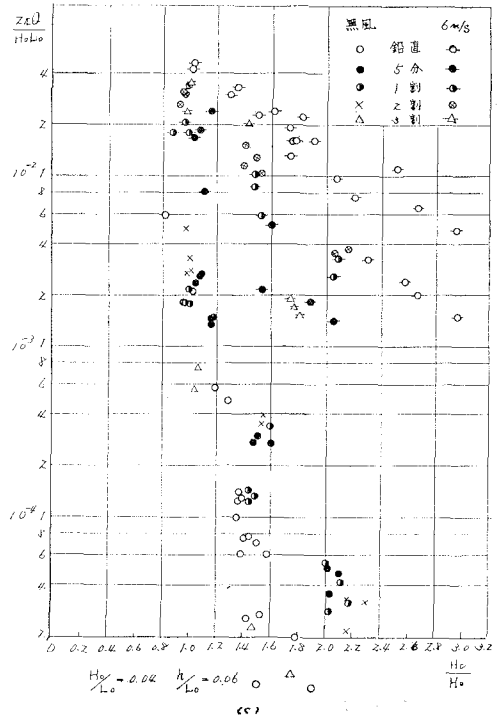
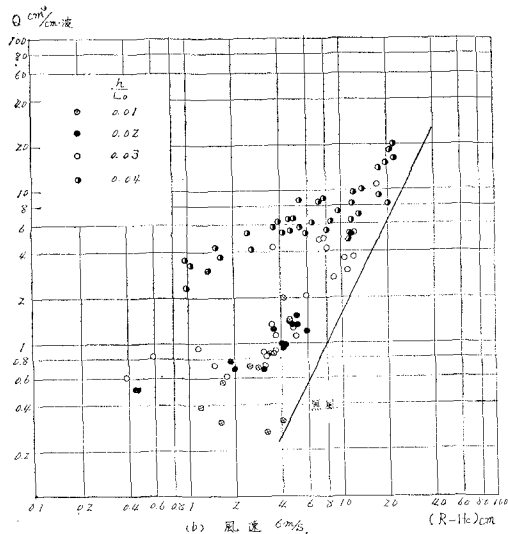
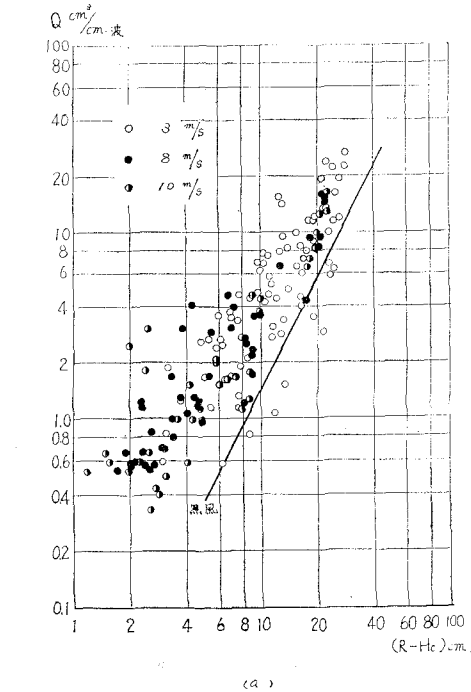


図-10 波返しの効果

7. 風の影響

越波量は風の影響を強く受けるので、3~10 m/sec の風を与えて越波量の変化を調べてみた。図—12 は鉛直堤の風のある場合の越波量を示したものである。これによると、風速が 3 m/sec 以上の場合、風速がましても越波量はほとんど変化しないことが認められる。実際、越波状況を観察すると、堤防上に飛び出した水量は全部堤内に持ち込まれ、風速の大小は主として飛散距離の大小に関係するのみである。



図—12 風のある場合の鉛直堤の越波量

図—12 をみると、式 (1) の n の値は 2 より小さい。とくに、越波量の小さい場合が無風との差が大きい。しかし、 $R-H_c$ が 10 cm 以上の場合には n が 2 に近く、この領域では R におよぶ風の影響は小さく、越波量は次式で与えられると推定される。

$$Q = \frac{1}{2} k (R-H_c)^2 \dots \dots \dots (6)$$

この値を無風の場合と比較すると、約 2.3 倍なので

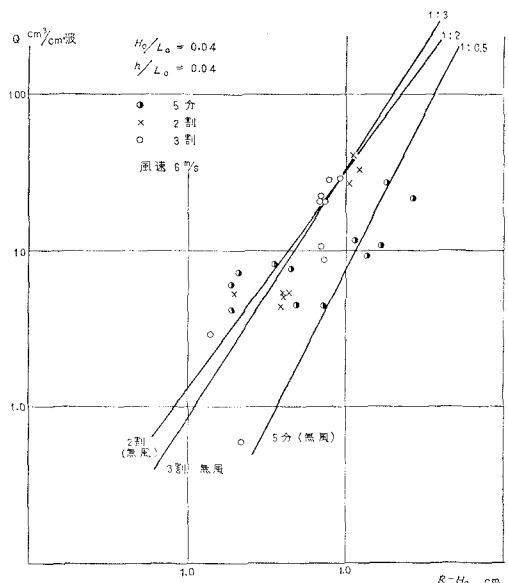
$$2.3 \times 1.5 \times 10^{-2} (R-H_c)^2 = \frac{1}{2} k (R-H_c)^2$$

$$k \approx 7 \times 10^{-2}$$

となる。すなわち、ある点の水脈の厚さは、その点から波頂までの高さの約 7 % であると推定される。2 割勾配の場合は $m=0.065$ と推定されているので、それよりやや大きく、ほぼ妥当な値と考えられる。

$R-H_c$ の小さい領域の越波量が無風時に比較してとくに大きくなるのは、風のために、波あるいはうちあげ高が多少大きくなることが原因と考えられる。実験水路の吹送域は 10 m 程度なので、うちあげ高の増加の程度は数 cm くらいであろうと考えられる。したがって、 $R-H_c$ の小さい場合に影響が大きく、 $R-H_c$ が大きくなるとその影響が減少してくると推定される。

風速 6 m/sec で、 $h/L_0=0.04$ 、 $H_0/L_0=0.04$ の場合、 $R-H_c$ の小さい領域で越波量が大きくなっている。この条件では波は砕けてから堤防に当るが、ちょうど堤防に衝撃圧を与える条件に近いので、飛沫なども多く、堤防上に飛び出す水量が多くなっている結果と考えられる。このような現象は、岩垣・井上・大堀りによっても指摘されている。のり勾配が 5 分、2 割、3 割の場合について風の影響を調べた結果を図—13 に示す。点の数



図—13 風のある場合の傾斜堤の越波量

は少ないが、一般に無風時の越波量とほぼ一致しており、風の影響は小さいようである。この場合の $V/\sqrt{gH_0}$ はほぼ5なので、これ以上風速が大きくなると影響の出ることも考えられる。

図-10には風のある場合の波返しの効果についても図示されている。これによると、無風時と同様、勾配にあまり関係なく鉛直堤の越波量にほぼ等しい。ただ、堤防の設置水深が深い場合、鉛直堤の越波量がのり勾配のゆるい場合に比較して若干大きい。これは風の影響による波の変化が鉛直堤の場合に大きくでてきたためと思われる。すなわち、波が大きくなることにより、砕波条件に近づいたことが原因であろう。

8. 結 論

越波現象は非常に複雑なので、以上の検討ではなお不十分な面もあるが、一応明らかとなった点を要約すると次のとおりである。

- (1) 波が砕波してから堤防に当たる場合は、越波量は堤防上に飛び出す波の高さ $(R-H_c)$ の2乗に比例する。無風時の鉛直堤の場合、堤防上に飛び出す水量の約40%が越波する。また、堤防に当たってうちあがる波形はほぼ三角形で近似され、ある点の水脈の厚さは、その点からうちあげの頂点

までの距離の約7%であると推定される。

- (2) 重複波領域においては、無風時の鉛直堤の越波量は堤防上に飛び出す水量の約8%である。
- (3) のり勾配がゆるくなると越波量は増加するが、2~3割勾配でピークに達すると考えられる。
- (4) 波返しを設けると、のり勾配に無関係に鉛直堤の越波量に近くなる。
- (5) 模型風速にして 3 m/sec ($V/\sqrt{gH_0} \approx 2.5$) 以上になると、堤防上に飛び出した水量は全部堤内に入る。したがって、それ以上風速が増しても越波量は変わらない。

今後の主な問題点としては波の不規則性に関する検討と考えられる。この点については、現在製作中の不規則波造波水路が完成しだい実験的に検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) 富永正照・橋本宏・中村隆：台風26号による吉原海岸の災害について、第14回海岸工学講演会講演集，昭和42年
- 2) 岩崎敏夫・沼田淳：消波工の越波防止効果の一実験，第14回海岸工学講演会講演集，昭和42年
- 3) 豊島修・富永正照・橋本宏：海岸堤防に関する研究(8)―うちあげ高一土木研究所報告，Vol. 131，昭和42年
- 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，昭和40年