

越波とはい上がり

橋 本 宏

1 まえがき

日本は入り組んだ海岸線を持っており国土の面積に対する海岸線の長さは諸外国に比較するとかなり長くなっている。海岸線の全延長は約 27,000km あり、このうち約半分の 13,000km が何らかの防護を必要とするとしてされており、海岸保全区域に指定されている。また実際に保全のための構造物が造られているのはこのうちの 6,300 km である。

防護施設のうちで最も多いのは海岸堤防および護岸であって、これらに関連して波のはい上がりや越波は海岸工学におけるテーマとなってきた。この水工学に関する夏期研修会においても第 1 回の岩垣博士の海岸堤防論以来 4 回にわたってはい上がりや越波が取り上げられてきている。

一般の海岸堤防の設計に際して、はい上がりや越波は高さや位置を決定する際の一つの基準になっている。すなわち堤防や護岸の高さは計画波浪に対して生じる波のはい上がりの高さによって決定されている。ここで使用されている波の高さは有義波高であって、はい上がりの高さを求めるに際しては規則的な波による模型実験の結果が利用されている。このような基準によって堤防の高さが決定されているために堤防は越波を防止するのに十分な高さを有していない。海の波は波高、周期ともに不規則であって有義波よりも大きい波も存在する。それ故上記のように決定された堤防高を越える波もあり、これに対しては堤防の天端や裏法もコンクリートやアスファルトにより被覆されている。

最近になって海岸堤防の背後地の利用が進み、また海岸線に沿って道路が設けられるようになると、上記のような基準で設計したのでは不十分となってきている。このような理由から近年は越波量によって堤防の高さを決める考え方が表われてきた。また同時に波の不規則性を考慮する必要も生じている。

ここでは以上述べたような問題を背影に海岸堤防への波のはい上がりや越波が不規則な波の場合にどのようなかという点について検討してみたい。主要なテーマとなるのは沖から浅い場所に波が進むにしたがって水深の影響によって変形を生じるのであるが、これが不規則な場合にどのようなか、また変形した波が堤防にはい上がるとその高さはどうなるか、越波する場合にはその量はいくらになるかなどである。ここでは不規則な波の浅海における変形、波のはい上がり、越波の三つに分けて論ずる。

2 浅海における不規則波の変形

不規則な波の浅海における変形について述べる前に簡単に深海における不規則な波の性質について述べてみたい。不規則な波形の平均水面からの差は正規分布をするといわれている。また波高についてはスペクトルのバンド幅がせまければレーレー分布をしている。これに関連して有義波高 $H_{1/3}$ 、 $1/10$ 最大波高 $H_{1/10}$ 、平均波高 H_m の間には次のような関係が存在する。

$$H_{1/3}/H_m = 1.60 \quad H_{1/10}/H_{1/3} = 1.27 \dots\dots\dots (1)$$

波のスペクトルについては一般には一つのピークを持っており、そのエネルギーの集中している範囲

は周波数で0.05から0.3 Hz, 周期で2.0から3.0 secである。また風からエネルギーを受けて波が発達している場合には、波のスペクトルの高周波側においては平衡状態に達している。Phillips¹⁾によれば風によって十分にエネルギーが飽和した波は不安定状態に達し、砕波しているものとし、この場合には風速は関係せず重力の加速度によってのみスペクトル密度 $S(\sigma)$ は決定されるものとして次元解析より次の関係を求めた。

$$S(\sigma) = \beta g^2 \sigma^{-5} \dots\dots\dots (2)$$

ここで σ は角周波数、 β は無次元定数でPiersonによれば $\beta = 0.00810$ である。

浅海に波が入ってくると波形がひずみ、高次成分波を含むようになる。波形の分布においても波の山はとがり谷は浅くなるために非対称になる。スペクトルの形状としては主となるピークの周波数の2倍、3倍の周波数でもピークを持つようになる。この現象は2次干渉といわれ、Tick²⁾や浜田³⁾によって一次のスペクトルの形状が与えられた場合に2次のスペクトルの形状がどのようなになるかが解かれている。浜田によると一次のスペクトルを $S_1(\sigma)$ で、2次のそれを $S_2(\sigma)$ で表わすと水深 h の位置における両者の関係は次のようになる。

$$S_2(\sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\omega, \sigma) S_1(\sigma - \omega) S_1(\omega) d\omega$$

$$K(\omega, \sigma) = \frac{1}{4} \left[\frac{g k k(\sigma - \omega)}{\omega(\sigma - \omega)} + \frac{\omega(\sigma - \omega)}{g} - \frac{\sigma^2}{g} + \frac{\sigma^2 \left\{ \frac{g(\sigma - \omega) k^2 + g \omega k^2(\sigma - \omega)}{\omega(\sigma - \omega)\sigma} \right\}}{g |k + k(\sigma - \omega)|} \right. \\ \left. + \frac{2g k k(\sigma - \omega)}{\omega(\sigma - \omega)} + \frac{\omega(\sigma - \omega)}{g} - \frac{\sigma^2}{g} \right] \times \tanh \left| \frac{k + k(\sigma - \omega)}{h} - \sigma^2 \right| \dots\dots\dots (3)$$

但し $\omega^2 = g k \tanh k h$ で $k(\sigma - \omega)$ は $\sigma - \omega$ の関数としての k を意味する。ここで、 g : 重力の加速度、 k : 波数である。

実際例として昭和38年8月6日20時に由比海岸の水深2.6 mの位置において階段抵抗式波高計によって観測された波のスペクトルを図-1に示す。これには式(3)によって求めた2次のスペクトルも示してある。

さらに浅い場所に波が進むと高次の成分波を生じるとともに砕波し始める。砕波している場合のスペクトルについても深海におけるのと同様に井島・松尾⁴⁾によって平衡スペクトルが求められている。その考え方はまず不規則な波が砕波している場合にその見かけの波高と周期の間には規則波におけると同様に次式の関係があるとする。

$$\frac{\tilde{H}}{\tilde{L}} = a \tanh \frac{2\pi h}{\tilde{L}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\tilde{H}$: 見かけの波高、 $\tilde{L}$: 見かけの周期、 a : 定数である。この見かけの波高をスペクトル密度と関係づけることによって平衡スペクトルとして次の式を得た。

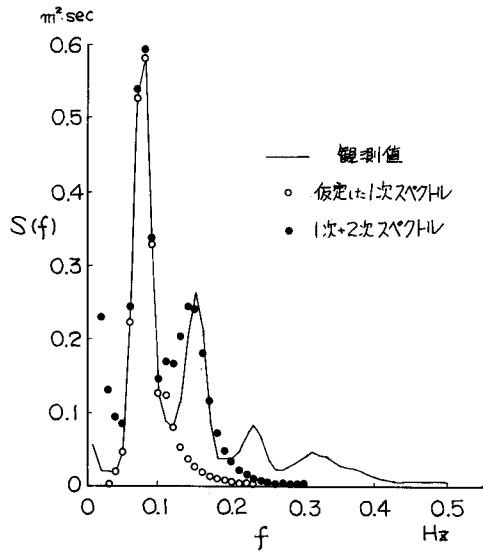


図-1 浅海での波スペクトル

$$S(\sigma) = \beta \frac{h^{5/2}}{g^{1/2}} \cdot F \left[\left(\frac{\sigma^2 h}{g} \right)^{1/2} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F \left[\left(\frac{\sigma^2 h}{g} \right)^{1/2} \right] = \frac{(\tanh \frac{2\pi h}{L})^2}{(\frac{2\pi h}{L})^2 \cdot (\frac{\sigma^2 h}{g})^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

深海では $h \rightarrow \infty$ となりPhillips の式(2)になり、浅海では $h \rightarrow 0$ として

$$S(\sigma) = \beta h^2 \sigma^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。すなわち深海では重力の加速度が、浅海では水深がスペクトル形状を支配する変数となっている。

砕波現象も含めて浅海での不規則波の変形を統一して理論的に取扱う試みはまだ成功していない。ここでは実験的に調べられた結果について述べる。

不規則波造波装置を備えた二次元水路において海底勾配 1/70 の斜面上を進む波形を各水深ごとに示したのが図-2である。深海においては対称であった波形は水深が浅くなるにしたがって非対称となり、波の山はとがり、谷は浅くなっている。また波の前面はきつく、背面ではゆるくなっている。堤防への波のはい上がりや越波は堤防前面における波の状態によって支配されており、まず浅海での変形が明らかにされなければならない。特に波高や波形の分布が重要な意味を持っている。波高をゼロアップクロス法によって定義し、その分布を各水深ごとに描いたのが図-3である。深い場所ではレーレー分布をしていたものが浅くなるにしたがって対称な分布となっている。奈多海岸や宮崎海岸において井島・松尾⁶⁾によって観測された砕波帯における波についても同じ傾向がある。さらに浅くなってほとんどの波が砕波するようになると分布の幅はせまくなるが平均水面附近に発生する二次波によって波高の小さい波を生じるようになる。分布の形状がレーレー分布からはずれてくることによって式(1)で表わされる代表波の間の関係は当然異なってくる。それぞれの波高の水深による変化を示したものが図-4であって最大波高や1/10最大波高は浅くなるにしたがって減少し、一方平均波高は規則波の変形と同様に増加の傾向を示している。しかし規則波におけるような砕波前のいちじるしい波高の増大はみられない。また不規則な波では砕波点は明らかではなく、徐々に波高が減衰している。この例では有義波高の2倍の水深から砕波の影響がいちじるしくなっている。

波のスペクトルの水深による変化を示したものが図-5である。スペクトルのピークのエネルギー密度が砕波にともない減衰し、その大きさは井島・松尾による式(5)の値をとっている。またピークの低周波側では水深が67cmから20cmに変化する間でいちじるしいエネルギーの増大がある。この増大は通常の線形理論から得られる値よりはるかに大きく現在存在する理論では説明のできない現象

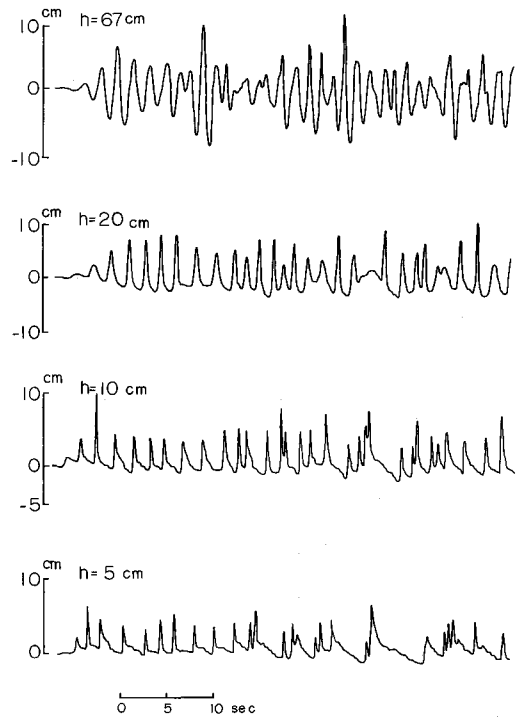


図-2 各水深における波形

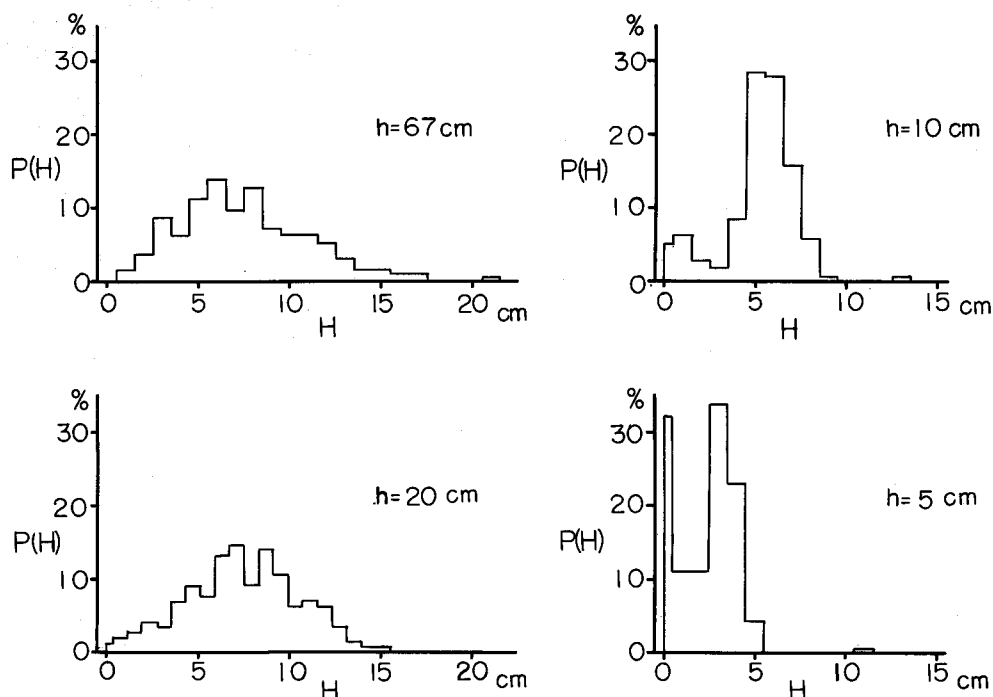


図-3 波高分布

である。海底勾配 1/30 の場合に、同じ波を発生させて同じ水深で測定した結果との比較が図-6 に示されている。この場合にはピークの低周波側のエネルギーの増大はあまり大きくないことから海底勾配が影響していることは明らかである。またこの増大はピークのエネルギー密度が減衰し始めると生じていないことから碎波によるエネルギーの減衰は全体として生じていると推定される。

3 波のはい上がり

日本における海岸堤防は比較的浅い場所に直立に近い勾配を持ったもので造られる場合が多く、緩勾配の堤防は少ない。規則波によるはい上がりについては種々の海底勾配上に堤防を設置した場合の実験的な結果がかなり得られている。これらの成果はいづれも深海波と関係づけられており、深海波高 H_0 、波長 L_0 、堤脚水深 h 、うちあげ高 R によって表示されている。不規則な波のはい上りを考える場合には浅海での波の変形と堤防への入射波とうちあげの関係の二つに分離して考える必要がある。まず初めに一般的な性質について述べる。図-7 には海底勾配 1/70 の上にのり勾配 1 割の堤防が設置された場合の規則波の波高とうちあげ高の関係を周期 T をパラメータとして示したものである。波高の増加にともなううちあげ高も増加するが、ある波高でピークとなり、それをすぎると波高の増加にともなううちあげの増加はいちじるしくはない。波高が小さい場合には堤防前面においては重複波が形成され、うちあげ高は重複波の波峰高

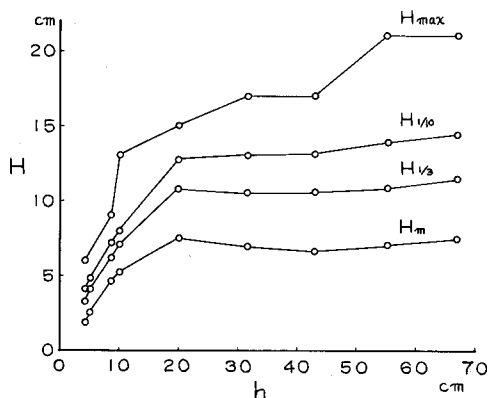


図-4 水深による波高変化

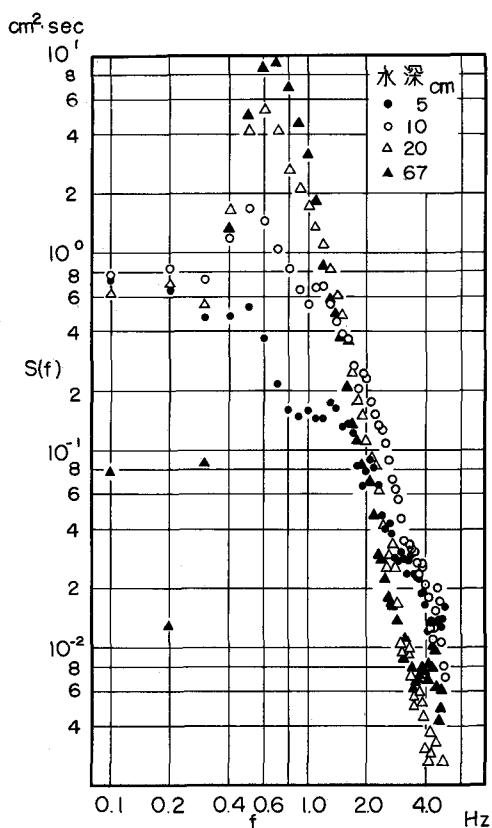


図-5 波スペクトルの水深による変化

と等しくなる。波高が大きくなると堤防の前面に到達する波高はすでに碎波しているためにその大きさに制限があり、うちあげても当然その影響をうけて大きくならない。ピークの生じる条件は堤防ののり勾配にもよるがほぼ進行波の碎波限界に一致している。

碎波領域における波のはい上りの状況は bore の反射としてモデル化されて、その高さの推定が行なわれている。⁷⁾ ⁸⁾Stoker によれば bore の一般式は次のように表わされる。図-8 に示すように bore の前面における高さを h_0 、後面の高さを h_1 、前面の流速を u_0 、後面のそれを u_1 とし、bore の速度を C とする。図のように検査面を設けて運動量および質量保存の式を求めると次のように表わされる。なおこの場合に水平流速は高さ方向に変化せず、また圧力は静水圧分布をするものと仮定する。

連続の式は
$$u_1 h_1 - u_0 h_0 = C (h_1 - h_0) \dots\dots\dots (8)$$

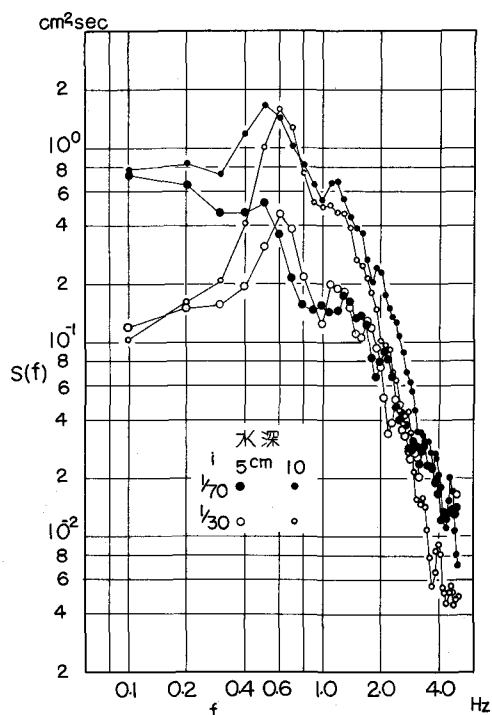


図-6 海底勾配によるスペクトルの変化

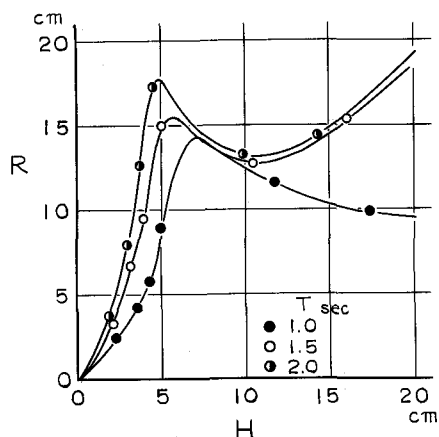


図-7 波高とうちあげ高の関係

運動の式は

$$-\rho u_1^2 h_1 + \rho u_0^2 h_0 + \rho (h_1 - h_0) C^2 = \frac{1}{2} \rho g h_1^2 - \frac{1}{2} \rho g h_0^2 \dots\dots\dots (9)$$

静水中をboreが進んで行き、壁で反射する場合には図-9に示すように入射boreについては $u_0=0$
 $u_1 = \bar{w}$, $C = C_0$ とおくと式(8)と(9)は次のようになる。

$$w = C_0 \left(1 - \frac{h_0}{h_1} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$C_0^2 = \frac{1}{2} g \frac{h_1}{h_0} (h_1 + h_0) \dots\dots\dots (11)$$

w と C_0 が同じ符号をとる故 C_0 は次のようになる。

$$C_0 = \sqrt{g \frac{h_1}{h_0} \frac{(h_1 + h_0)}{2}} \dots\dots\dots (12)$$

一方反射boreについては $u_0 = w$, $u_1 = 0$,
 $h_0 = h$, $h_1 = h_2$, $C = C_1$ とおくと式(8)と(9)は次のようになる。

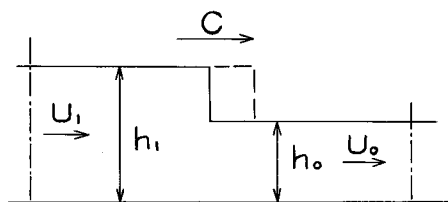


図-8 Bore

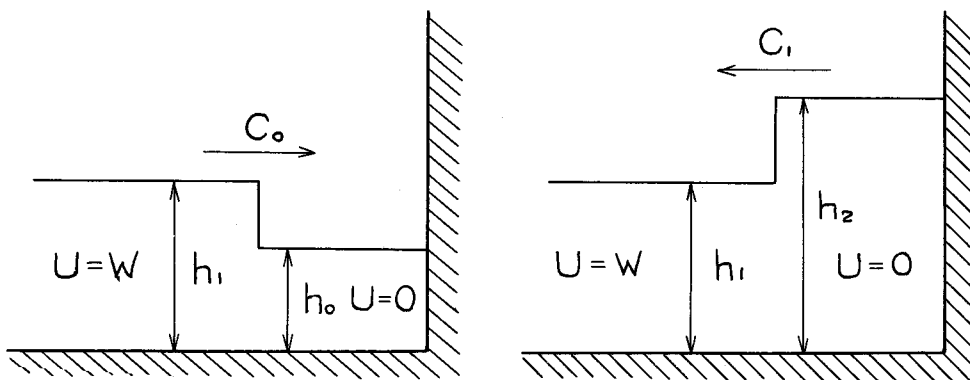


図-9 Bore の反射

$$w = -C_1 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$C_1 = -\sqrt{g \frac{h_1}{h_2} \frac{(h_2 + h_1)}{2}} \dots\dots\dots (14)$$

なおここで w と C_1 は異符号となることを用いている。以上の結果を用いると h_1/h_0 と h_2/h_1 の関係を求めることができる。これを描いたのが図-10であり、また図-11には $(h_2 - h_0)/(h_1 - h_0)$ と h_1/h_0 の関係が示されている。図-11によれば入射波高と反射波高の比は2から2.5になっている。

不規則な波に関してのはい上がりについては一様勾配についての実験結果がほとんどである。SibulとTicknerによるのり勾配 $1/3$ と $1/6$ の上のはい上がりの実験は、規則波による結果との比較のために風波を使用して行なわれたが、風速が小さい場合には $R/H_{1/3}$ は規則波の値に一致するとしている。ここでの R はうちあげの分布で R を越えるものが10%であるとして決められた値である。

WebberとBullock¹⁰⁾は $1/10$, $1/4$, $1/2$ の斜面上ではい上りを風波によって実験的に調べた。その結果、規則波の関係と比較したものが図-12であるが、B. E. B.¹¹⁾の結果とは一致するが実際に規則波で同じ水路で行なった結果とは一致していない。

¹²⁾ Saville および ¹³⁾ 首藤は深海波の波高と周期の分布として ¹⁴⁾ Bretschneider の式を使用し、波高、周期とはい上りの関係は規則波の実験結果を用いて不規則波のはい上がりについての計算を行なった。これらの計算は不規則波の場合にもはい上がりについては規則波の結果が適用されるとしているがこの点については問題がある。

¹⁵⁾ von Oorschot と d'Angremond は造波機で発生した不規則波を用いて、 $\tan \alpha = 1/4$ と $1/6$ の勾配上でのはい上りを実験的に検討した。波高と周期の結合分布に規則波の波高、周期とはい上りの関係を適用してはい上りの分布を計算した。図-13にスペクトルのバンド幅がせまい場合と広い場合についてはい上りの頻度分布を示す。

von Oorschot 等は実験値と計算値と一致していると述べているが、よく調べてみると一致しているのははい上りの値が大きい場合であり小さくなるとずれてきている。また実験値は計算値に比較して小さい値の頻度が多いことを示している。この結果によれば単純に規則波の関係を適用することはかなり問題があると思われる。

一方緩勾配の斜面上に置かれた鉛直堤へのはい上がりについては実験結果があまりないが我々の行なった模型実験結果について述べてみる。

海底勾配 $1/70$ の上にのり勾配が 1 割の海岸堤防が堤脚水深 8.6 cm の位置に設けられ、この堤防上への波のはい上がりについて検討を行なっている。ここでうちあげ高としてはゼロアップクロス法によって一波を定め、波の存在しない場合の静水面からの高さを採用している。堤防前面での波が重複波となる波高 5 cm、周期 1.0 sec の場合と碎波となる波高 10 cm、周期 1.5 sec の場合についてうちあげ高の分布を示したのが図-14である。

この分布形は堤防がない場合の堤防の位置における波高分布とよく似ており、堤防に入射する波と密接な関係にある。図-14(a),(b)には一様斜面におけるはい上りの分布と同様に沖の波の波高分布から、規則波の波高とうちあげの関係として図-7を使用してうちあげ高の分布を計算した結果も合せ

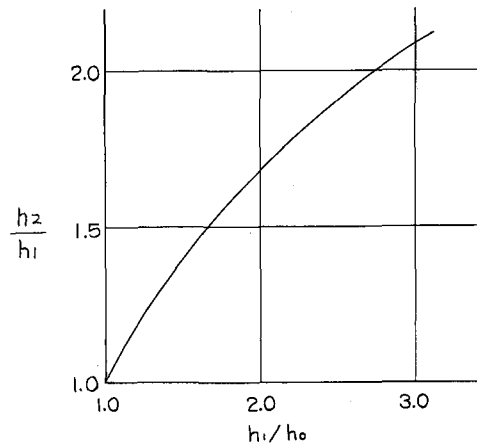


図-10 h_1/h_0 と h_2/h_1 の関係

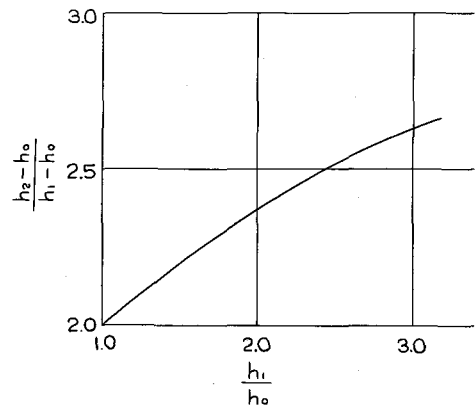


図-11 h_1/h_0 と $\frac{h_2-h_0}{h_1-h_0}$ の関係

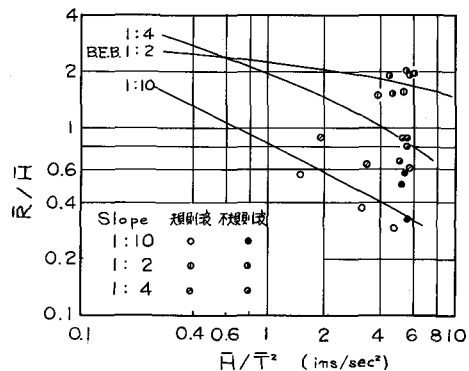


図-12 規則波と不規則波によるうちあげ高の比較

て示されている。実験値と計算値を比較するとあまりよい一致は示しておらず、規則波の結果を用いることには無理があると考えられる。一様勾配へのはい上がりについては波高の増加にともなううちあげ高の変化はかなりゆるいものであるが、堤防のある場合には堤防前面で碎波するかしないかがかなり重要な意味を持っている。

図-14(a)に示されるように重複波となる場合は実験値と計算値の差はあまり大きくない。しかし碎波となる場合には図-14(b)に示されるように異なっている。実験値は広く分布しているが計算値はある波高以上になるとうちあげ高はほぼ一定になるため分布の幅はせまくなっている。この傾向はさきに示した図-13のvon Oorschotの結果でも表われている。

以上述べたのは沖の波とうちあげの関係であるが堤防前面の波とうちあげにはかなり明確な関係が存在する。堤防の設置されていない場合の堤防の位置での波形とうちあげ波形の応答を調べたのが図-15と図-16である。図-15では重複波となっている場合であり、図-16は碎波となっている場合である。図で S_w, S_r はそれぞれ波とうちあげのスペクトル密度を示し、 $A(f)$ は両者の応答で次式によって求められた値である。

$$A(f) = \frac{S_{WR}(f)}{S_W(f)} \quad \text{.....(15)}$$

ここで $S_{WR}(f)$ は波とうちあげのクロススペクトルである。またコヒーレンシーは次式で定義され、相関の度合を表わすものである。

$$C(f) = \frac{|A(f)|^2 S_W(f)}{S_R(f)} \quad \text{(16)}$$

波とうちあげのスペクトルは図-17と図-18に示されている。応答を調べるとスペクトルのピーク付近におけるコヒーレンシーはかなり大きい。堤防前面における波が重複波となっている図-15においては応答は2に近い値をとっている。すなわち規則波の場合と同様にうちあげは入射波の2倍の振幅を持っていると考えられる。一方堤防前面で碎波している場合には図-16に示すようにその応答は3~4であって重複波の場合よりも大きくなっている。この場合に、さきに述べたboreの反射として取扱えるかどうかについて検討した結果が図-19に示されている。ここで h_0, h_1 としては堤防のない場合の堤防位置での波の谷と山の水底からの高さをを用い、 h_2 としては水底からのうちあげ高を用いている。実験値はかなりばらついてはいるが平均的にはStokerの結果と一致している。

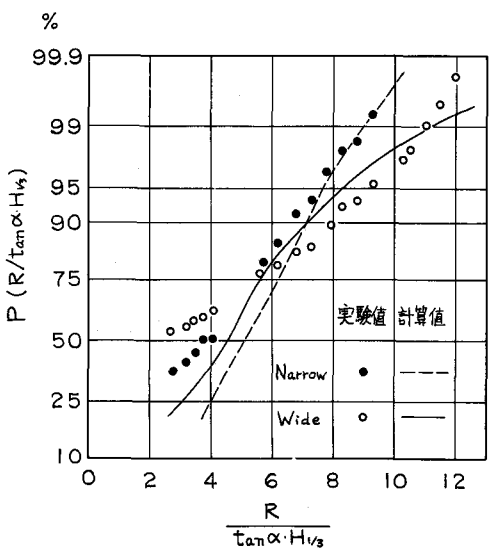


図-13 うちあげ高の分布

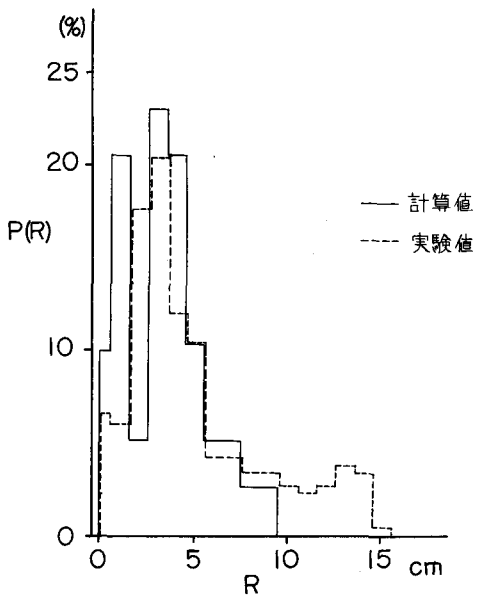


図-14(a) うちあげ高の分布 ($H_{1/3} = 5\text{cm}$, $T = 1.0^{\text{sec}}$)

以上述べた結果によれば堤防へのうちあげ高またはうちあげ波形については堤防位置での入射波と関係があり、入射波からうちあげの推定が可能なことを示している。

4 越 波

海岸堤防への越波についても主として実験的な検討が行なわれてきている。不規則な波の越波を考える場合においてはさきのはい上がりの場合におけると同様に沖の波と越波量の関係を求めるのではなく堤防前面における波形と越波量の関係を調べるのがあいまいさを残さない方法と考えられる。このような意味において吉川、椎貝、河野¹⁶⁾による堤防をせきと考えると越流量によって越波量を表わすという考え方は興味あるものである。

堤防をせきと考えた場合の単位幅当りの越流量 q は次のように表わされる。

$$q = \frac{2}{3} m \sqrt{2g} (Z - H_c)^{3/2} \quad (17)$$

ここで Z : 堤防前面での波形, H_c : 堤防高, m : 越流係数, g : 重力の加速度である。

不規則波の場合には Z として堤防前面での波形を用いることになるが、もし越波量が少なく越波によって波形があまり変化しなければ Z としてうちあげ波形を使用することができる。現在のところこの点についての検討は行なわれていない。

規則波の場合には式 (17)は次のように表わすことができる。

$$\frac{Q}{T \cdot H_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{4}{3} M \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_0} (F - K_0)^{3/2} dt \quad (18)$$

ここで Q : 単位幅 1 周期当りの越波量, H_0 : 深海波高, T : 周期, $M = \frac{1}{mk^{\frac{3}{2}}}$, $k = Z_{max}/H_0$, $K_0 = H_c/kH_0$ である。

吉川等によって式 (18)の適用性について実験的な検討が行なわれた。波形としては正弦波および三角波形を使用し、直立堤、 30° の勾配を持つ斜面、およびその斜面上に直立堤が置かれた場合について検討を行なった。

その結果波形としては三角波形を使用し、 $M = \text{const.}$ とおくと図-20に示すように統一的に説明

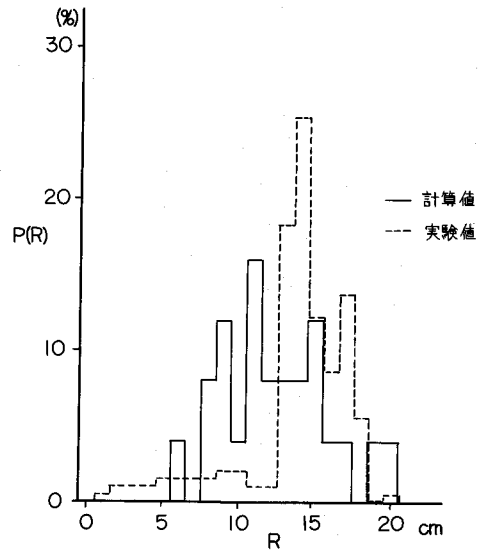


図-14 (b) うちあげ高の分布

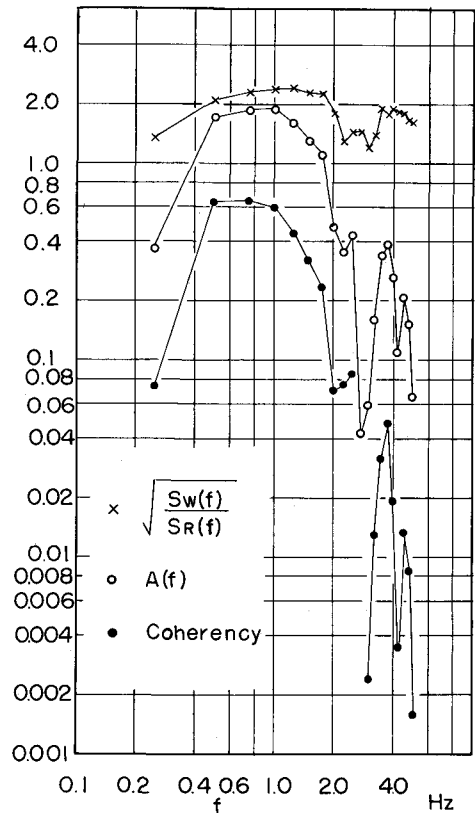


図-15 うちあげの応答

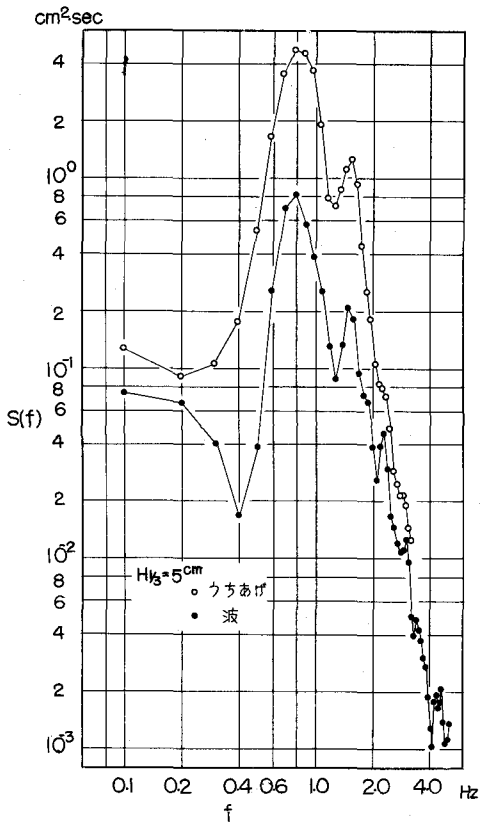


図-17 波とうちあげのスペクトル

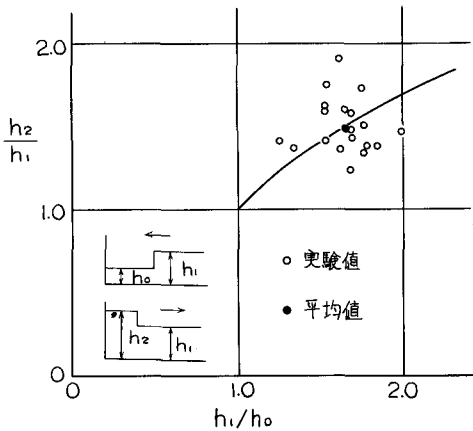


図-19 Bore 反射高とうちあげ高の比較

できるとしている。この場合 k はのり勾配, H_o / L_o , 風速によって変化する値である。

堤防前面における波形やうちあげ高と越波量を結びつける同様な試みが富永, 佐久間¹⁷⁾および高田¹⁸⁾によって行なわれている。富永, 佐

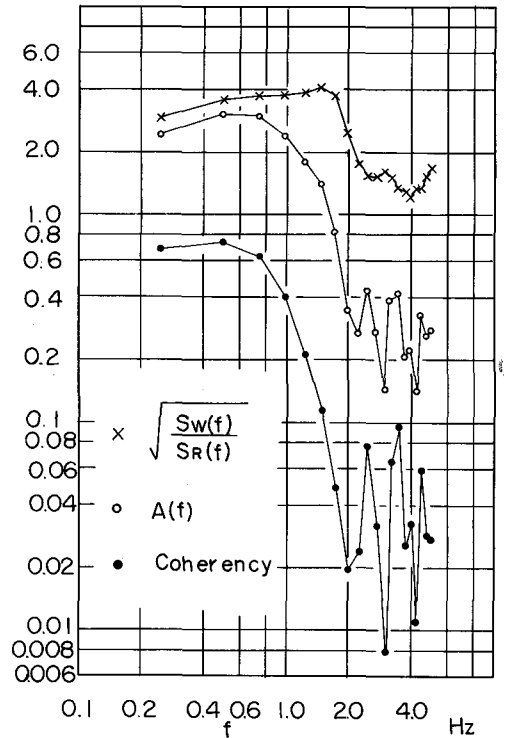


図-16 うちあげの応答

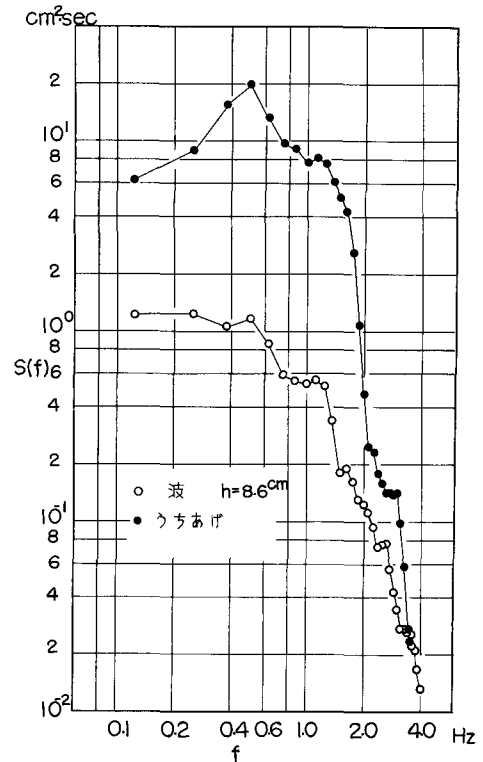


図-18 波とうちあげのスペクトル

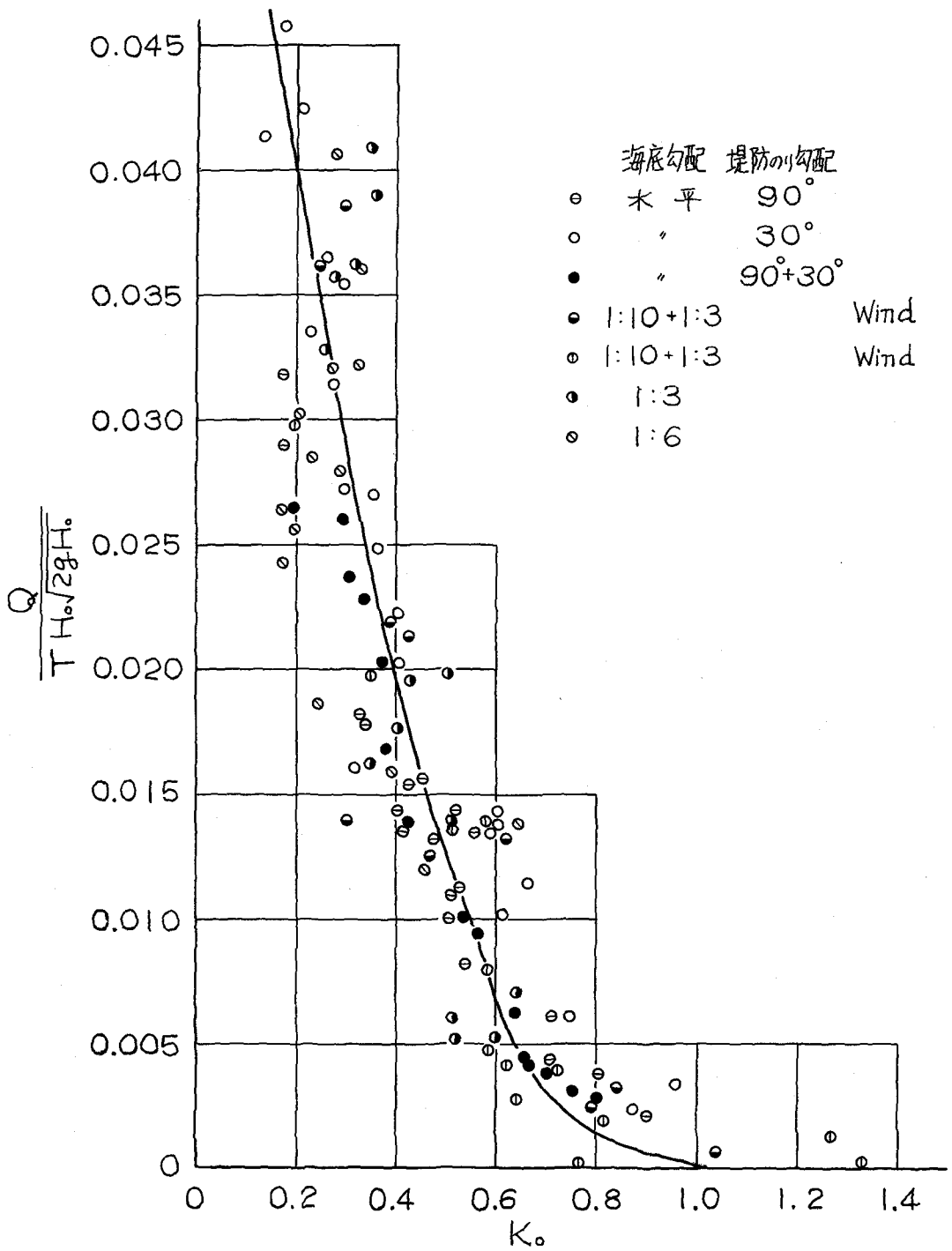


図-20 せきと考えた場合の越波量

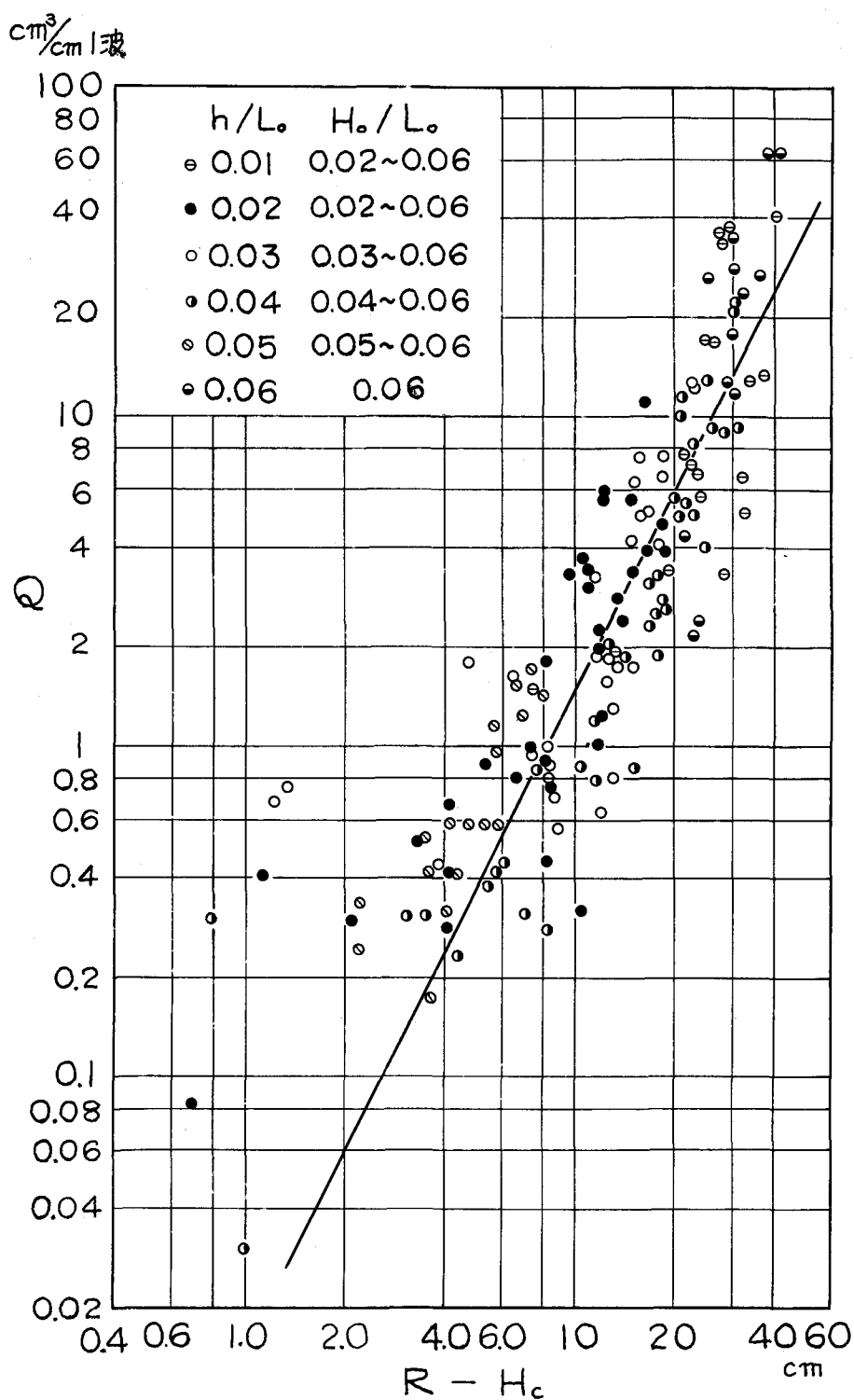


図-21 越波量とうちあげ高の関係

久間によると碎波後の波が作用する場合の越波量としては図-21に示すように $(R-H_c)$ の2乗に比例している。

高田は堤防前面の波形は重複波の場合には第3次近似で表わし得ることを実験的に検討し、この時間波形および空間波形を用いたときのある体積と越波量の間の関係について詳細な検討を行なっている。時間波形を使用した場合の一周期当りの越波量は次のようになる。

$$Q = \frac{4}{3} \sqrt{2g} K \int_{t_c}^T \{Z(t/T) - H_c\}^{3/2} dt \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで t_c は $Z=H_c$ となる時間である。 $Z(t/T)$ に重複波の3次近似式を用い K の値について海底勾配 1/10 に鉛直堤が設けられた場合を実験的に検討した。その結果 k は H_c/H と H/L の関数で次のように表わされる。

$$K = 0.65 \times 10^{\{0.23(H_c/H) - 3.3(H/L)\}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

越波するために波形が理論値と異なる点についての補正は行なっていない。越流係数に相当する k の値が波の性質によって変化することは、不規則波にこの方法を用いる際にかかなりの困難をとまうと推察される。

不規則な波による越波量に関して深海波と越波量の関係を直接求めた結果が合田、竹田¹⁹⁾および合田²⁰⁾によって求められている。基本的な考え方は深海波の波高分布に規則波の波高-越波量の関係を適用して越波量を求めるものでこれを期待越波流量と呼んでいる。すなわち次式のようなになる。

$$q_{exp} = \int_0^\infty q(H) \cdot p(H) dH \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで q_{exp} : 期待越波流量, $q(H)$: 波高 H の規則波の越波量, $p(H)$: 波高出現確率密度である。

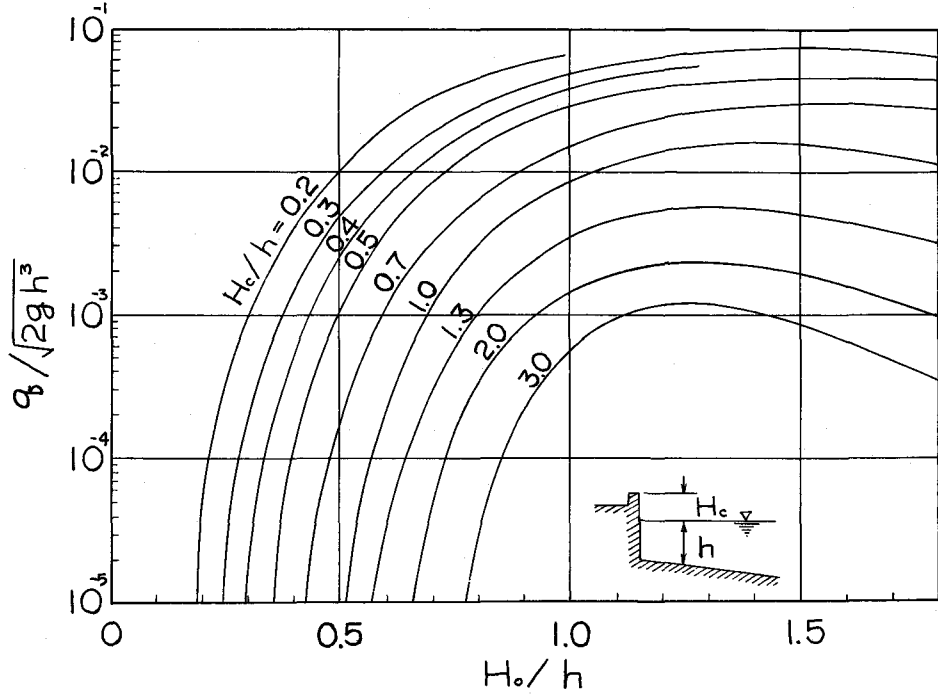


図-22 規則波の越波量

$q(H)$ としては海底勾配が1/10から1/30の範囲で、周期が越波量に影響しないと考えられる $h/L_0 = 0.01$ の実験値から図-22に示すような関係を使用している。すなわち周期についてはある範囲の平均値を使用していると考えることができる。波高分布をレーレー分布とし式(21)を用いて q_{exp} を求めた結果は図-23に示されている。

21)
著者等も海底勾配1/30の場合の直立堤への不規則な波による越波量について、模型実験による検討を行なったが規則波による波高と越波量の関係は図-24に示すように合田による結果より小さいにもかかわらず不規則波による実験値は合田による図-23によく一致していた。すなわち式(21)による方法で計算した値は実験値より小さくなっていた。このことは式(21)を用いて不規則波の越波量を推定することが必ずしも妥当でないことを示していると考えられる。うちあげの場合には波高分布に規則波の波高とうちあげの関係を適用して求めた分布は実験値と一致していなかったことから考えると越波の場合にも問題があるであろう。式(21)では1波ごとの越波量の分布は問題とならず平均値で考えているためにこれらの点がかくれてしまっていると思われる。平均値ではなく一波ごとの越波量の分布についての検討が必要であろう。

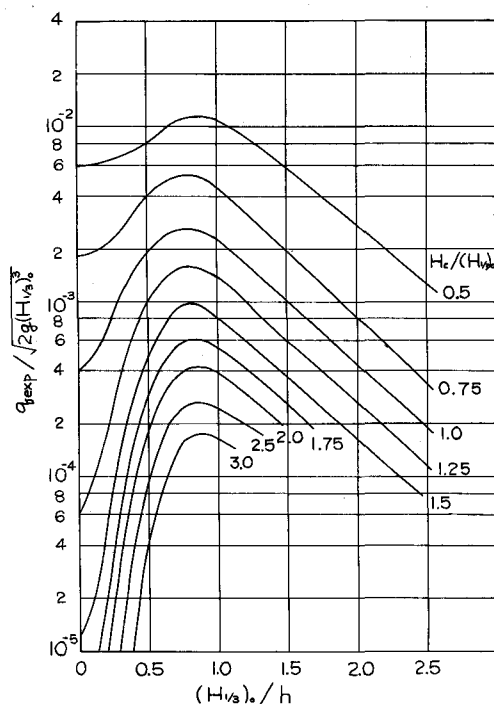


図-23 不規則波による期待越波流量

5 まとめ

不規則な波についての越波とはい上がり調べてきたが、これらの現象はある入力に対する応答と考えることができる。すなわち深海における波と浅海における波の関係、浅海の波とうちあげ波形の関係、堤防前面の波形と越波量の関係はいずれも入力と出力の関係を明らかにすること、すなわち応答を求めることによって確立される。

浅海における波の変形については高周波および低周波成分の増大と碎波が主な現象であるが、いずれも非線形性の強いものである。高周波成分の増大については理論的な取扱いがなされているが他の問題についてはこれから検討をしなければならない。浅海の波、すなわち堤防を設置しない場合の堤防位置での波形とうちあげ波形の関係については線形な取扱いができると考えられる。堤防前面における波形と越波量の関係については1.5~2乗回路とみなすことができよう。このようにみえてくると越波やうちあげではなく浅海での不規則な波の変形が明らかにされなければ問題は解決されないと考えられる。

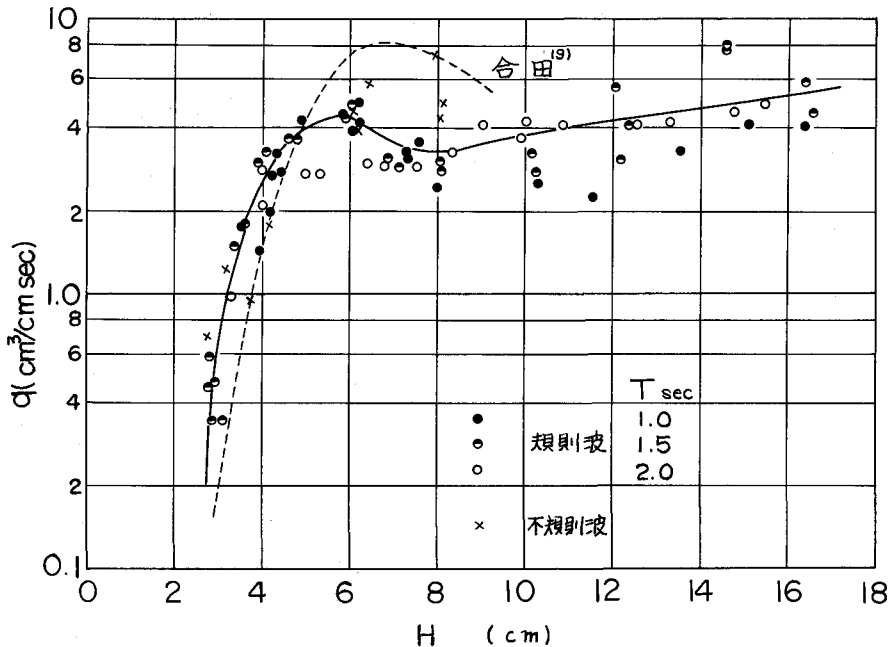


図-24 越波量と波高の関係

参 考 文 献

- 1) Phillips, O.M.: The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, J. Fluid Mech., vol.4, 1958
- 2) Tick, L.J.: Nonlinear probability models of ocean waves, Ocean Wave Spectra. Prentice Hall, 1963.
- 3) 浜田徳一, 表面波の2次干涉(2), 第12回海岸工学講演会講演集, 1965,
- 4) 井島武士, 松尾隆彦: 砕波帯の波の研究(2) 周波数スペクトルの平衡領域および2次元スペクトルの観測例, 第16回海岸工学講演会講演集, 1969
- 5) 富永正照, 橋本宏, 高松幹夫, 本間利夫: 海岸堤防の断面形状に関する調査, 昭和46年海岸事業調査費報告, 建設省土木研究所, 1972
- 6) 井島武士, 松尾隆彦: 砕波帯の波の研究(1) — 観測法および例 —, 第15回海岸工学講演会講演集, 1968
- 7) 佐藤清一, 岸 力: 海岸堤防に関する研究(1) — 海岸堤防に衝突する高さについて —, 土木研究所報告第88号, 1954
- 8) Stoker, J.J.: Water Waves, Interscience Pub. New York, 1957.
- 9) Sibul, O.J. and E.G. Tickner: A model study on the run-up of wind generated waves on levees with slopes of 1:3 and 1:6 : B.E.B. Tech. Memo. No.67, 1955.
- 10) Webber, N.B. and G.N. Bullock: A model study of the distribution of run-up of wind-generated waves on sloping sea walls, Proc. 11th Conf. on Coastal Engineering, 1968.
- 11) Shore Protection Planning and Design: Tech Rep. No.4. C.E.R.C. 1966.

- 12) Saville, T.: An approximation of the wave run-up frequency distribution, Proc. 8th Conf. on Coastal Engineering, 1963.
- 13) 首藤伸夫：有義波とうちあげ高の関係，土木研究所報告，第 126 号 1965
- 14) Bretschneider, C.L.: Revisions in wave forecasting: Deep and shallow water, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng. 1958.
- 15) von Oorschot, J.H. and K. d'Angremond: The effect of wave energy spectra on wave run-up, Proc. 11th Conf. on Coastal Engineering, 1968.
- 16) 吉川秀夫，椎貝博美，河野二夫：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)，第 14 回海岸工学講演会講演集，1967
- 17) 富永正照，佐久間襄：海岸堤防の越波量について，第 17 回海岸工学講演会論文集，1970
- 18) 高田 彰：波の遡上，越波および反射の関連性について（第 3 報）——水面波形と越波量の相関特性——第 18 回海岸工学講演会論文集，1971
- 19) 合田良実，竹田英章：不規則波に対する護岸の期待越波流量について，第 15 回海岸工学講演会講演集，1968
- 20) 合田良実：不規則波に対する護岸の期待越波流量について（第 2 報），第 17 回海岸工学講演会論文集 1970
- 21) 富永正照，橋本宏：不規則波による海岸堤防の越波量，第 18 回海岸工学講演会論文集，1971