

深水波と碎波後の波の関連性に関する若干の考察

久宝雅史*・竹沢三雄**・藤田雄治***

1. 概 説

波を規則波とみなし、その1波が深水域より浅水域、碎波点、碎波区域、うちあげ(廻上)に移行する場合にそれぞれの区域における波高、波長などに関する研究はきわめて多い。しかしこれらを合理的に連結するために、当然考えなければならない碎波限界水深前後の波高、波のうちあげなどが必要であるので、本研究では主としてその波高について考察したものである。ただし、海底勾配($i=1/10, 1/20, 1/30, 1/50$ およびそれ以下)は一定とする。そこで、波高 H が最大になる位置を碎波点(B.P.)とし、その水深を碎波限界水深 h_b 、波高を碎波波高 H_b 、それより低い沖側および浜側のそれぞれ碎波前後の波高を H とする。また、碎波後の波は水面上昇をきたすので、水面上のうちあげ高 R とその点の波高 H_R とは等しく

$$R = H_R$$

と仮定する。こうして、横軸に水深と深水波波長の比(h/L_0)、縦軸に波高と深水波波高との比(H/H_0) または(R/H_0) をとり、パラメータとして深水波波形勾配(H_0/L_0)を用い、各海底勾配 i について、1規則波の波高変化を連続的に示すことにした。ここに、その波高の変化について若干の考察を述べ、海岸構造物の設計上、仮想海底勾配を設定しなければならぬ点について述べることにする。

2. 碎波について

碎波をその碎波後の形状によって、Iversen が示したように、崩れ波(spilling)、巻き波(plunging)、碎け寄せ波(surging)の3種とする¹⁾。この碎波形に関して、Iversen¹⁾、Wiegel²⁾、速水³⁾らにより、海底勾配によって表一のような波形勾配(H_0/L_0)で分けられるとされている⁴⁾。これらの値については若干差があるとも考えられるが、後述するようになりかなり妥当な値と思われる。すなわち、碎け寄せ波($i=1/10$ のみの特殊な場合)を除く除外すると、波形勾配(H_0/L_0)が大きい場合に崩れ波にな

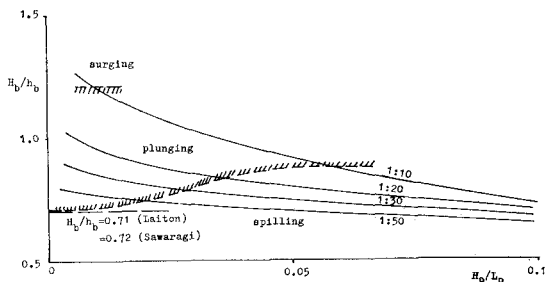
表一 碎波形式と海底勾配 i による深水波の波形勾配の範囲

海底勾配	崩れ波 (H_0/L_0)	巻き波 (H_0/L_0)	碎け寄せ波 (H_0/L_0)
$i=1/10$	0.06 以上	0.06~0.009	0.009 より小
$i=1/20$	0.035 以上	0.035 より小	(Iversen は特 殊な場合のみと されている)
$i=1/30$	0.028 以上	0.028 より小	
$i=1/50$ (以下)	0.02 以上	0.02 より小	

り、小さい場合に巻き波になり、その限界の波形勾配は海底勾配が大きいほど大である。これらはあくまで小水路の実験によるものであるから、

- 1) i が一定で、護岸などの構造物が水中にない場合
- 2) 離岸流がなく、波が汀線に直角に進む場合

でなければならない。しかし、それでは海岸構造物の設計に役立たないので、これについては後述の仮想海底勾配を設定する方法によるものとする。次に深水波の波形勾配 H_0/L_0 と碎波波高 H_b と深水波波高 H_0 との比(H_b/H_0)、碎波限界水深 h_b と H_0 との比(h_b/H_0)が各海底勾配ごとに Iversen¹⁾、W.E.S.⁵⁾、合口⁶⁾らによって求められ、水理公式集⁴⁾に示されているが、これらの図より H_b/h_b と H_0/L_0 との関係を各海底勾配($i=1/10 \sim 1/50$)ごとに示し、それに前述の巻き波と崩れ波との境界の値を示すと図一のとおりになる。この図において、海底勾配がなく水平床の場合については、Laiton⁷⁾は $H_b/h_b=0.71$ 、榎木⁸⁾は $H_b/h_b=0.72$ としているが、表一の碎波(巻き波と崩れ波)の境界が滑らかな曲線となるので、表一の結果は、一応信頼されてよいように思われる。また、巻き波の生ずる波形勾配(H_0/L_0)の範囲は、海底勾配が大きいほど広くなり、海底勾配が小



図一 H_b/h_b と H_0/L_0 による碎波形式

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工修 日本大学理工学部土木工学科
 *** 正会員 工修 東洋建設(株)

さくなくなると崩れ波を生じ、また、砕け寄せ波を生ずる波形勾配および海底勾配はきわめて小範囲である。これらの結果を用いて、砕波前後の波高変化について説明する。

3. 砕波前後の波高について

(1) 砕波前の波高

従来の方法では浅水係数 $K_s^{4)}$ を用いて、浅水域内の波高が推定されていたが、砕波点の波高 H_b が砕波限界水深 h_b において求められないで、一般に h_b の波高は H_b より小さくなる。したがって、有限振幅波理論による hyperbolic waves⁹⁾ および Stokes¹⁰⁾ の第3近似解による波高変化を Stokes waves として説明すると、上記の H_b が h_b の水深において推定されることがわかった。それら hyperbolic waves および Stokes waves はすでに

岩垣⁹⁾ らが発表し、水理公式集⁴⁾ に示されている。砕波後の波高については、すでに中村・白石・佐々木¹¹⁾ および堀川・郭¹²⁾ の実験研究があり、Hwang¹³⁾、Street¹⁴⁾、Collins¹⁵⁾ らによって理論的にその合理性が示されている。いま、砕波波高 H_b を求めるために、Iversen¹⁾、豊島¹⁶⁾ らの実験研究とそれらを組合わせて、実験値を plot し、これを曲線で結び、前記の hyperbolic waves および Stokes waves の砕波限界を示す曲線との交点に関する波高を砕波波高 H_b 、その位置の水深を砕波限界水深 h_b とすることにした。これらの関係を示したのが図-2(a)~(d) である。砕波前の波高に関して、波が深水域から浅水域に移る場合の変化については、上記の hyperbolic waves および Stokes wave で十分に連続していて問題は生じない。しかし、ある深水波の波形勾配 (H_0/L_0) の波高が砕波する限界の曲線上に達した位置が実験

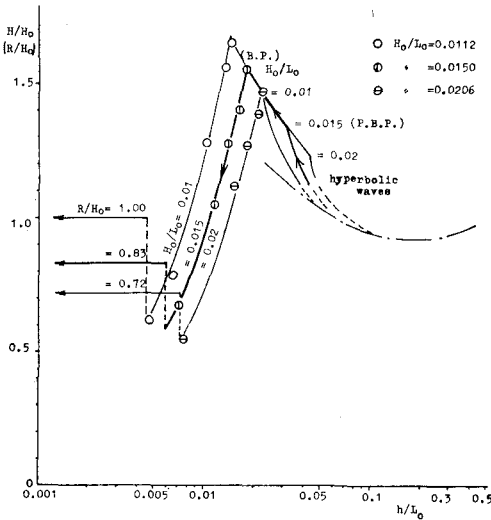


図-2(a) 砕波後の波高 ($i=1/10$)

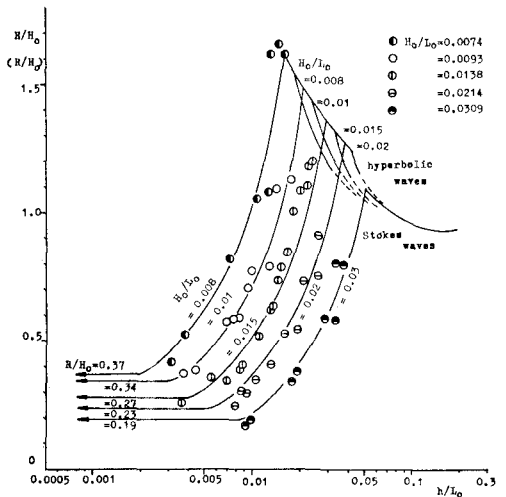


図-2(c) 砕波後の波高 ($i=1/30$)

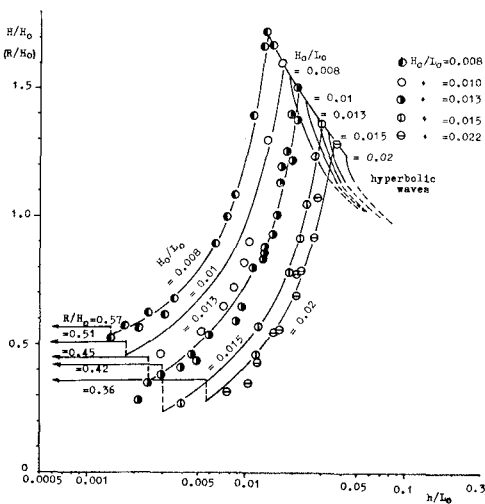


図-2(b) 砕波後の波高 ($i=1/20$)

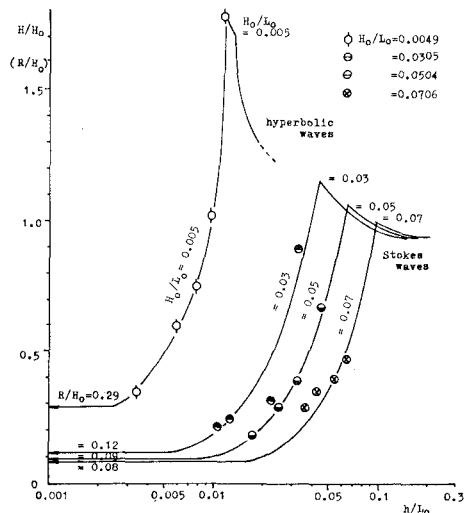


図-2(d) 砕波後の波高 ($i=1/50$)

によると必ずしも波高 H_b および水深 h_b と一致しない
 で、一定の海底勾配では最大波高を与える H_b の位置より
 も沖側に生ずることが多い。たとえば、**図-2(a)~(c)**
 の砕波波高 H_b はその波高 (かりに H'_b) より大きく、
 海底勾配 $i=1/30$, $H_0/L_0=0.03$ の場合のみが $H_b \approx H'_b$
 である。ここに、 H'_b とそれに応ずる水深 h'_b を前砕波
 限界波高および水深 (pre-breaking point, P.B.P.) とよ
 ぶことにする。この H_b と H'_b との差は海底勾配 i が
 大きい場合および深水波の波形勾配 (H_0/L_0) が小さい場
 合に大きくなる。したがって、**表-1** などに示す波形勾
 配と海底勾配とによる砕波形式 (砕け寄せ波は除く) の
 うち、**図-2(a)~(d)** に示すように巻き波は hyperbolic
 waves の範囲で生じ、崩れ波は Stokes waves の範囲で
 生じやすいことになる。ところが hyperbolic waves の
 範囲は波形勾配が小さいので、 H_b と H'_b との差は大き
 いが、Stokes waves の範囲ではその差がほとんどないこ
 とになる。いいかえると、

$H_b > H'_b$: 巻き波: hyperbolic waves の範囲

$H_b \approx H'_b$: 崩れ波: Stokes waves の範囲

ということになる。

実際の海岸で巻き波と崩れ波を観測すると、巻き波の
 波峰が最高に達する以前に波峰がかなり急に高くなるこ
 とが多く、波の膨れ上りが見られるが、崩れ波ではそれ
 が判然とは観測されない。そこで巻き波は一応 hyper-
 bolic waves により浅海で波高が大きくなり、前砕波限
 界波高 H'_b に達し、砕波限界波高にそってさらに若干膨
 れ上り、最大の波高 H_b に達するものとし、崩れ波は
 Stokes waves で砕波限界波高 H_b に達すると考えるのが
 妥当である。これらの波高の変化については後に計算例
 で示すものとするが、その前砕波限界と砕波限界との距
 離は、深水波波長に比してかなり小さい間になされるこ
 とがわかる。

(2) 砕波後の波高

最大の波高 H_b に達した波は、砕けてその波高が減じ
 ていく。これを示したのが **図-3** の模式図である。その
 砕波が backwash などに支配され、その波高の減衰が海
 底勾配、波形勾配、砕波の種類、水深(位置と進行距離)
 によることは **図-2(a)~(d)** に示す実験のとおりであ
 る。しかもこの波高変化により砕波の最大波高 H_b はか
 なり小さくなる。その距離は、波が砕波する前に最大波
 高に達する距離に比して小さく、かなり短距離で短時間
 に減衰を終わる。**図-2(a)~(d)** はその砕波の砕波限界

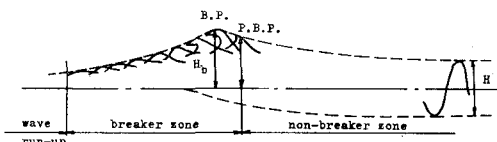


図-3 波の変形模式図

から浜側の砕け方を砕波波高として示したものと見るの
 がよいであろう。いいかえると、この波高減衰の区域も
 また砕波中の状況を示すもので、砕波限界後の波は非砕
 波ではない。そのような意味でこの区域を砕波区域とし
 たのである。

(3) うちあげ

波は浜の上のうちあげるが、それは砕波の状態のまま
 うちあげることが多い。しかも砕波により静水位はかなり
 上昇し、最高では波底位まで上昇する。その場合には、
 うちあげ高 R とその波高 H_R とは近似的に等しく、

$$H_R \approx R$$

とせられる。ただし、一般には H_R と R とは一致しな
 い。こうすると、**図-3** に示したようなうちあげ領域で砕
 波とうちあげ高とが連続することになる。いま、Hunt¹⁷⁾
 によるうちあげ高の式

$$\frac{R}{H} = \frac{2.3i}{(H/T^2)^{1/2}} \quad (\text{ft 単位})$$

において、 $H \approx H_0$ とすると、

$$\frac{R}{H_0} = \frac{1.01i}{(H_0/L_0)^{1/2}} \quad (\text{m 単位})$$

となり¹⁸⁾、**図-2(a)~(d)** に示されているとおりになり、
 これを模式図に示すと **図-3** のようになる。これらのう
 ちあげに関する汀線および浜の区間をうちあげ区域とよ
 ぶことにする。**図-2(a)~(d)** における R はこれを示
 したものである。必ずしも最小波高 H_{min} と R とが一
 致しないが、 H_{min} はゼロにはならない。

図-4 (a), (b), (c) は実験結果をプロットした例で、

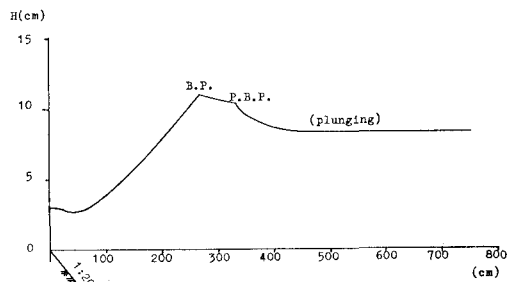


図-4(a) 波高変化例; $i=1/20$, $H_0/L_0=0.02$
 (巻き波)

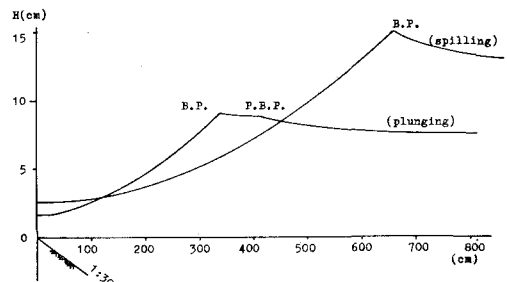
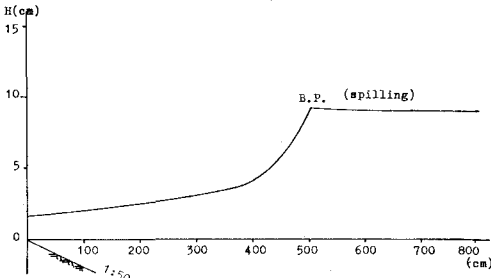


図-4(b) 波高変化例; $i=1/30$, $H_0/L_0=0.02$
 (巻き波), $H_0/L_0=0.03$ (崩れ波)



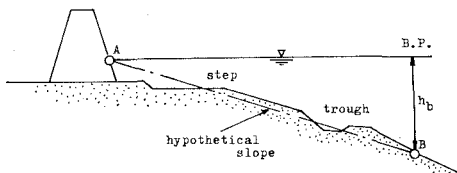
図—4(c) 波高変化例; $i=1/50$, $H_0/L_0=0.07$
(崩れ波)

波高変化や波のうちあげを示したものである。図—4(a)は巻き波で碎波限界点 (B.P.), 前碎波限界点 (P.B.P.) を示したものである。図—4(c) は崩れ波で碎波限界点 (B.P.) のみの場合であり、図—4(b) は巻き波と崩れ波とを重ねて示したもので、またうちあげ高については Hunt¹⁷⁾ の式で計算したものである。こうして、これらの図から巻き波と崩れ波との差、碎波波高へのかなり緩やかな上昇と急激な減衰などが明白になる。

4. 仮想海底勾配

hyperbolic waves および Stokes waves の碎波限界水深より深いところの前述の前碎波限界水深 h_b' より沖の方では、海底勾配に無関係に波高が定められるので、この区間に設けられる構造物の波高はそれぞれの波により波高を推算することができる。また、崩れ波では碎波限界水深 h_b より沖合の水深における構造物に作用する波高は、同じく hyperbolic waves および Stokes waves で非碎波として計算すればよい。

碎波後の波 (碎波) の作用する区域に構造物を設けた場合に、海底勾配 i を一般に大きくみて設計しなければならない。しかも、一般の海岸では trough や step があってかならずしも海底勾配は一定ではなく、波の進行方向も汀線に直角とは限らない。ここに、仮想海底勾配 i' の考え方を設定しなければ、図—2(a)~(d) が設計に用いられなくなる。そこで、図—5 のような仮想海底勾配 i' を図—2(a)~(d) の i のかわりに用いることが提唱される。すなわち、図—5 の A 点と碎波限界水深 h_b の海底 B 点とを結ぶ直線の勾配を仮想海底勾配とする方法である。この i' を用いて、碎波後の波高 H およびう



図—5 仮想海底勾配

ちあげ区域のうちあげ高を前述の Hunt¹⁷⁾ の式で算出することができることになる。こうして、波高などが算出されると、波高で示されている波圧 (波力) の計算が可能になる。たとえば広井公式⁴⁾に用いられる碎波の波圧を算出する波高 H にこの碎波波高を用いることができるはずである。

5. むすび

本研究のように、一連の波の波高変化を示すことによって、碎波の領域、碎波の種類による特性、hyperbolic waves および Stokes waves の妥当性 (浅水係数 K_s の批判)、碎波前後の波高の状況など、設計上かなり多くの点について考察することができた。また、碎波および碎波後の波が海底勾配に関連することから、ここに仮想海底勾配に関する提案を示し、実際の海岸構造物の設計に、図—2(a)~(d) を役立たせることにつとめた。特に、碎波点より浜側の波は碎波現象の一部という考え方を導入して、この区域の波もまた碎波であるとした。ただ、実際の海岸で第一次碎波あるいは第二次碎波などの現象があるが、これはおそらく海底勾配がきわめて小さい前浜に波が達した場合に生ずる現象で、本研究の範囲では、碎波が進行中に非碎波に戻る現象については明白にすることができなかった。また、実際の海岸における不規則波に対して、この研究結果を応用するには、問題が残されていると思う。最後にこの研究の資料作製をお手伝下さった大学院学生樋口豊久君に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Iversen, H.W.: Waves and breakers in shoaling water, Proc. 3rd Conf. on Coastal Eng., 1952.
- 2) Wiegell, R.L.: Oceanographical engineering
- 3) 速水頌一郎: 碎波の機構(II), 第2回海岸工学講演会講演集
- 4) 土木学会: 水理公式集(昭和49年改訂版)
- 5) U.S. Navy Hydrographic Office: Breaker and surf; principle in forecasting, H.O. No. 234, Nov., 1944.
- 6) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, 1970.
- 7) Laiton, E.V.: Limiting condition for cnoidal and Stokes wave, Jour. of Geophysical Research, Vol. 67, No. 4
- 8) 榎木 亨・岩田好一朗・松本 昇: 碎波後の波の変形について, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 9) Iwagaki, Y.: Hyperbolic waves and their shoaling, Coastal Eng. in Japan, Vol. 11, 1968.
- 10) Le Méhauté, B. and L.M. Webb: Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order of approximation, Proc. 9th Conf. on Coastal Eng., 1964.
- 11) 中村 充・白石英彦・佐々木泰雄: 碎波による波の変形に関する研究, 第13回海岸工学講演会講演集, 1964.
- 12) Horikawa, K. and C.T. Kuo: A study on wave transformation inside surf zone, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.

- 13) Hwang, Li-San and D. Divoky: Breaking wave setup and decay on gentle slopes, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., 1970.
 - 14) Street, R.L. and F.E. Camfield: Observations and experiments on solitary wave deformation, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., 1966.
 - 15) Collins, J. I.: Probabilitier of breaking wave characteristics, Proc. 12th Conf. on Coastal Eng., 1970.
 - 16) 豊島 修・富永正照・橋本 宏: 砕波後の波の変形に関する実験的研究, 建設省土木研究所報告, 133号, 昭和43年.
 - 17) Hunt, I.A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. of A.S.C.E., Vol. 85, No. WW3, Sep., 1959.
 - 18) 高田 彰: 波の遡上, 越波および反射の関連性について, 土木学会論文報告集, 第182号, 1970.
-