

重複波の水位変動特性について

三 浦 晃*・遠藤茂勝**・落合 実***

1. 結 言

海岸構造物の設計にあたっては、構造物の設置水深および水理学的特性を考慮しなければならないことはいまでもないが、海岸構造物の中でも特に防波堤では構造物の計画天端高は防波構造物としての機能を考える上で基本的な要素である。最近では計画設置水深が増大し重複波の発生するいわゆる重複波水深領域にまで構造物が設置されるようになってきた。そして構造物がケーソンのような鉛直壁である場合には、構造物前面に著しい水位変動が生じる。このような重複波の研究^{1)~10)}は多く行なわれてきたが、海底勾配や堤脚水深の影響などについての理論式との適合性や重複波が越波する場合の静水面上の峯高と天端高の影響などについての系統的な研究は比較的少ない。その上これらの現象は、重複波水深領域、碎波水深領域、そしてまたこれら中間的な水深領域によって複雑な変形形態をとるので一様に扱うことはできない。そこで本研究では鉛直壁が進行波の碎波水深より深い重複波水深領域にあるときの壁前面に生じる重複波を対象として波頂高、波底高などの水位変動特性について実験的に検討したものである。

2. 実験施設および実験方法

(1) 実験装置

実験は長さ 27.6 m、幅 0.7 m、高さ 1.0 m の両面ガラス張の二次元水路をもちいた。この水路にはピストン式造波装置が一端にあり、また他端と造波板背後には反射波を減少させるための横スリット型消波構造が、約 1.0 m の区間に 5 層設けられている。造波機は 5.5 kw の動力によって駆動されるが、造波される波の周期を確実に調整できるように造波機コントロール部に多回転ポテンシャルメーターを採用するとともに、造波周期のモニター用として光電式検出器をもちいたデジタルカウンターによって 1/1 000 sec まで検出され、所定の周期の造波が容易に確認されるようになっていて装置の再現性

が計られている。

(2) 計測装置

波高の測定には容量式波高検出器をもちい、水位計増幅器に接続し、デジタル波高記録装置に記録した。ここでもちいた波高記録装置とは、波高、周期を一波ごとに計測しメモリーできるもので、とくに波高値については静水時の水面を基準として波の峯高(+peak)と谷高(-peak)をそれぞれ検出しメモリー回路にホールドされているので、キーファンクションの選択によって、波高値(peak to peak)などもデジタル量で打ち出すことができる。そして波高および周期の表示は、それぞれ 1/100 cm, 1/100 sec まで示されるが、計測装置の総合精度がえられよう水位増幅器のポテンシャルメーターなどは、デジタル記録装置に対応できるような範囲のものに替えてある。

(3) 実験方法

実験では、水路のほぼ中央で造波板からの距離が 12.55 m 地点に堤体幅 $B=45.0$ cm の鉛直堤を設置した。このモデルは、厚さ約 4.0 mm の鋼板で製作したコの字形の枠で上下一組のものにネジ孔を開けそれによって堤体高 h_s が 1.0 cm 間隔で変えられるようになっている。実験は、波が堤体を越えて越波する場合と非越波状態に分けて行ない、越波状態の実験では堤体高が水面より低い潜堤状態の堤体から越波が生じなくなるまでの堤体高にいたるまでの実験を行なった。また非越波状態の実験では、全ての波が越波しない高さとして $h_s=58.0$ cm とした。海底勾配はいずれの実験も $\tan \alpha=0$ とし、堤脚水深は $h=40.0$ cm で一定とした。そして鉛直壁前面の重複波の波頂高、波底高および重複波高の測定は、壁面に著しい跳波が認められなかったので壁面から約 0.8 cm 離れた地点で測定した。またこの実験では、鉛直壁より沖側へ 1/2 波長離れた地点の重複波高および、越波する堤体に対して堤体背後 1.0 m 地点の伝達波高をも同時に測定した。これらの波のデーター処理法は無堤時の堤体設置地点で測定した入射波高 H_i のデーター処理法¹¹⁾に準じた。そして実験条件は、非越波を対象とした実験では比水深を $h/L_A=0.107, 0.135$, および 0.170 の 3 種類とし波形勾配を変化させた。また越波を対象と

* 正会員 理博 日本大学教授 生産工学部 土木工学科

** 正会員 工修 日本大学講師 生産工学部 土木工学科

*** 正会員 工修 日本大学副手 生産工学部 土木工学科

表-1 実験条件 (越波時)

海底勾配 $\tan \alpha$	堤脚水深 h (cm)	周 期 T (sec)	入射波高 H_i (cm)	入射波長 L_A (cm)	H_i/L_A	h/L_A	h/H_i
0	40.0	1.2	12.78	193.48	0.066	0.207	3.13
			14.69		0.076		2.72
			16.47		0.085		2.43
0	40.0	1.4	10.68	239.12	0.047	0.167	3.75
			12.16		0.051		3.29
			13.98		0.059		2.86
0	40.0	1.6	9.18	283.42	0.032	0.141	4.39
			10.26		0.036		3.90
			11.89		0.043		3.36
0	40.0	1.8	7.32	326.71	0.022	0.122	5.46
			8.53		0.026		4.52
			9.64		0.030		4.15
0	40.0	2.0	5.96	369.28	0.016	0.108	6.71
			7.21		0.020		5.55
			8.27		0.022		4.84
0	40.0	2.2	5.42	411.31	0.013	0.097	7.38
			6.48		0.016		6.17
			7.35		0.018		5.44

した実験の条件は表-1に示すとおりである。

3. 実験結果とその考察

(1) 非越波時の波頂高

鉛直壁前面に生じる重複波について、いま非越波時の静水位上の重複波の波頂高 $\eta_{\max}$ と波高についてまとめたものが、図-1 (a), (b) である。ここでもちいた波頂

高とは、重複波の峯が壁面に沿って上昇し、最高の位置に達した時の遡上高を容量式波高検出器をもちいて測定した値であり、重複波の波底高を $\eta_{\min}$ とすれば、 H は次式

$$H = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{2} \dots\dots\dots (1)$$

で示される値で壁前面の重複波高の 1/2 である。しかし厳密には、重複波の波高が進行波の入射波高 H_i の 2 倍より大きく、理論的には有限振幅重複波理論の第 3 次近似解において明らかにされており、次の式で示される。

$$\frac{H}{H_i} = 1 + \frac{(1/4)(k\epsilon_A H)^2 \{\omega - \omega^{-1} + 2 + 4(b_{31} + b_{13})\}}{2 + (k\epsilon_A H)^2 (b_{11} + b_{33})} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $k=2\pi/L$, $\omega=\tanh^2 kh$, ϵ_A , b_{11} , b_{13} , b_{31} および b_{33} は第 3 次近似解の定数。

また、実験的にも重複波の波高は、進行波の入射波高の 2 倍より大きいとされており、 H を入射波高とすることには疑問が残されるが、ここでは理論計算を行うための入射波高としてもこの値をもちいることとし、 H と H_i の検討は後述することとした。また重複波の波長についても波高同様に変化すると思われるが、ここでは微小振幅波の波長 L_A をもちいることとし、本結果は比水深が $h/L_A=0.107$ および $h/L_A=0.135$ の 2 つの図を示したものである。図に示される曲線は、静水位上の波頂高を示す理論式によるもので次式

$$\eta_{\max}/H = 1 + \delta \dots\dots\dots (3)$$

で表わされるが、 δ は非線形効果を表わす項で、有限振幅重複波の理論式によって異なり、プロットの上側の曲線は Miche 式の δ_M ,

$$\delta_M = \frac{1}{8} kH (3 \coth^3 kh + \tanh kh) \dots\dots\dots (4)$$

をもちいて計算される η_M/H で、下側の曲線は Sainflou 式の δ_s

$$\delta_s = \frac{1}{2} kH \coth kh \dots\dots\dots (5)$$

によって求められる η_s/H を示したものである。そしてこれらの結果によれば、 $\eta_{\max}/H$ と h/H に関する結果の大部分は Miche 式と Sainflou 式による 2 つの曲線のほぼ中間的な値となっている。そこで Miche 式と Sainflou 式から 2 つの平均曲線を求めたものが図中の点線で示される曲線で次式

$$\frac{\eta_{\max}}{H} = 1 + \frac{kH}{16} \{4 \coth kh + 3 \coth^3 kh + \tanh kh\} \dots\dots\dots (6)$$

のように表わされる。

静水面上の波頂高に関する有限振幅重複波理論については Miche, Sainflou の式をはじめとした第 2 次近似式、第 3 次近似式および第 4 次近似式などがあるが、

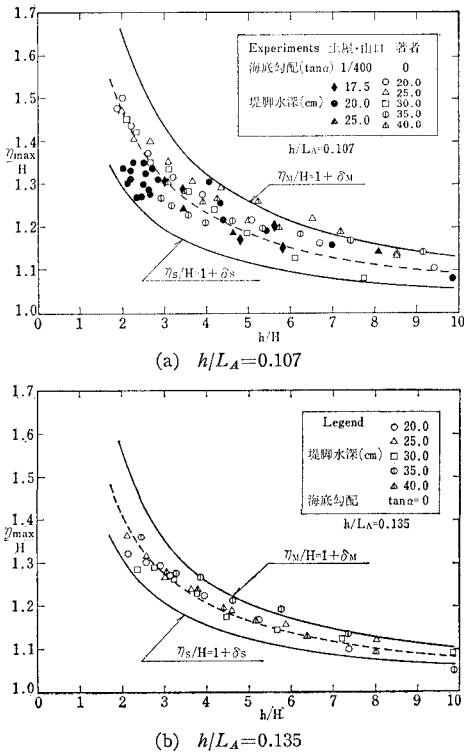
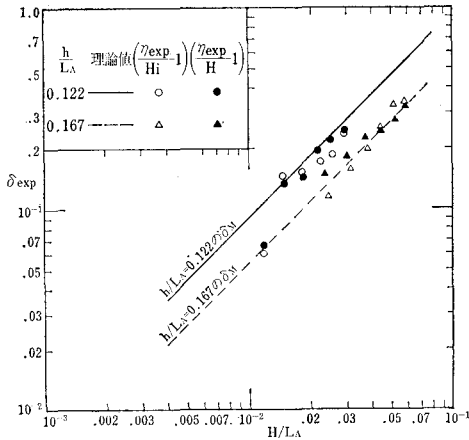


図-1 波頂高の理論値と実験値の比較

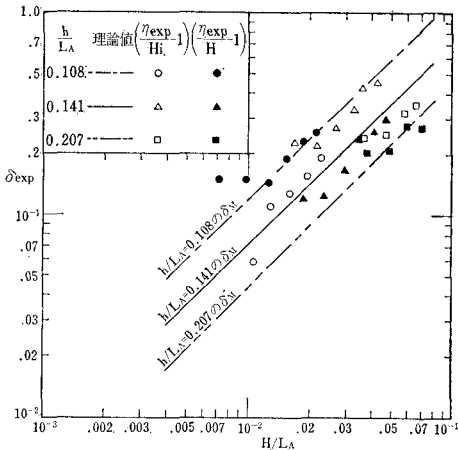
$\eta_{\max}/H$ と h/H の理論値について調べてみると $h/L_A = 0.10$ 程度の場合では、 $h/H \geq 8.0$ の範囲では理論値間の差はほとんどないが $h/H < 8.0$ になると理論値間の差が大きく第2次近似式が一番大きく第3次近似式が一番小さくなるが、実験データの平均値は第3次近似式よりもう少し小さく、 $2 \leq h/H \leq 10$ 範囲では式(6)に示される平均曲線によく一致する。

(2) δ の実験値

波頂高は式(3)に示されるように、有限振幅重複波の非線形効果を表わす δ が含まれるのでこれらについて検討する。図-2(a), (b) は、 $h/L_A = \text{const.}$ として H/L_A と δ の実験結果である δ_{exp} について、理論値との比較をしたもので図の実線および点線は Miche 式によるものでそれぞれ $h/L_A = 0.122$ と $h/L_A = 0.167$ の場合である。図中の白印は、入射波高として、堤体設置地点における無堤時の入射波高 H_i をもちい、また黒印は鉛直壁前面の重複波高の $1/2$ を入射波高 H として整理したものである。このように H_i および H をもちいた結果



(a) $h/L_A = 0.122, 0.167$



(b) $h/L_A = 0.108, 0.141, 0.207$

図-2 δ の実験値の比較

では、図-2(a) のように2つの結果がほぼ一致するものと、図-2(b) のように両者の結果が一致せず H/L_A によるバラツキが多い2つの傾向のものに分けられる。これは実験水槽が限られた長さであることや水槽内の水の固有振動などが影響するためと考えられる。

(3) 入射波波形勾配と壁前面の重複波高

次に鉛直壁前面の重複波高についてのべる。図-3 は堤脚水深 $h = 40.0$ cm 海底勾配 $\tan \alpha = 0$ の結果をまと

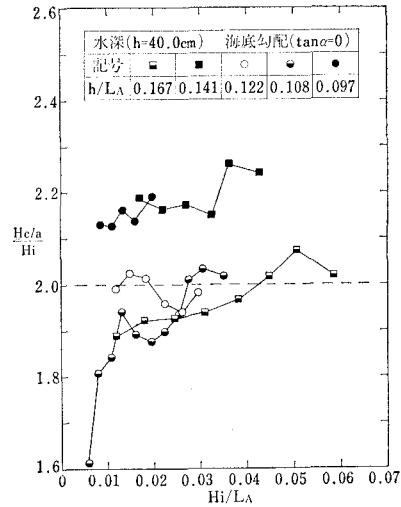


図-3 H_{c1a}/H_i と H_i/L_A の関係

めたもので h/L_A をパラメーターとして横軸には H_i/L_A をまた縦軸には重複波高 H_{c1a} と入射波高 H_i との比 H_{c1a}/H_i をとってまとめたものである。これらの結果によれば、 h/L_A によって傾向が異なり、入射波の波形勾配に対してほぼ一定ではあるが $H_{c1a}/H_i > 2.0$ のもの、また $H_{c1a}/H_i \approx 2.0$ のものおよび、波形勾配の増大とともに H_{c1a}/H_i も増大し $H_{c1a}/H_i = 2.0$ を横切ってさらに大きくなるような3つの傾向のものに分けられる。ここで入射波の波形勾配が著しく小さい波については、重複波が不完全な形となるので H_{c1a}/H_i が減少するものと考えられるが、入射波の2倍を越えるものについては前述のように理論的にも実験的にもすでに明らかにされている。しかし、このような波高増大現象の著しい波はある特定の条件の波に限られるが、同様に $H_{c1a}/H_i = 2.0$ となる波も限定され、波高の増大現象は h/L_A と H_i/L_A によってきまるものと考えられ本実験では $h/L_A = 0.167$ で $H_i/L_A = 0.0447$ のとき $H_{c1a}/H_i \approx 2.0$ となる。

(4) 越波時の波頂高

次に、堤体天端高が波頂高より低く重複波が越波するときの結果についてのべる。図-4(a), (b), (c) は横軸に堤脚水深 h と水底からの全堤体高 h_s との比 h_s/h を、また縦軸には入射波高 H_i に対する静水位上の堤体

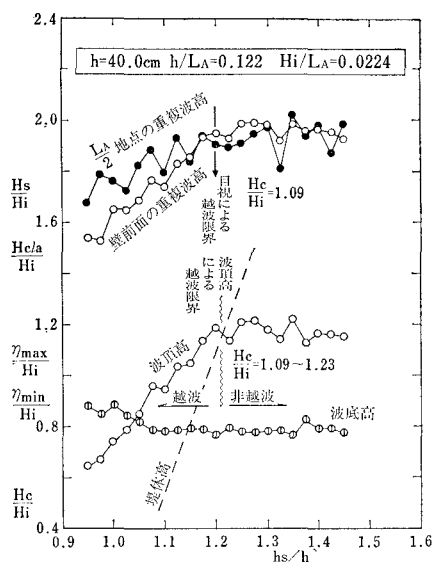
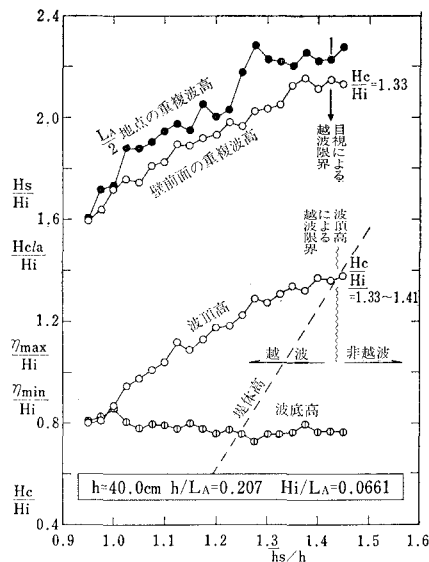
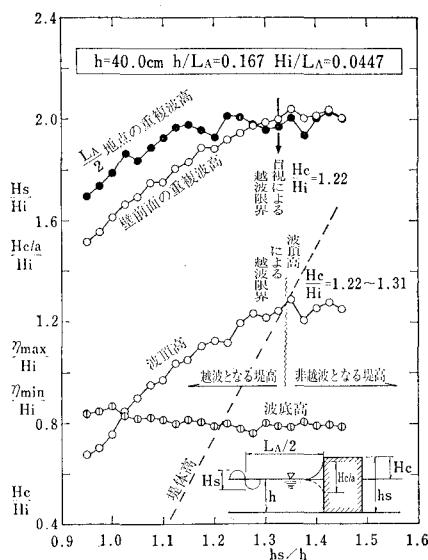
(a) $H_i/L_A = 0.0224$ (c) $H_i/L_A = 0.0661$

図-4 重複波の越波時の水位変動特性

(b) $H_i/L_A = 0.0447$

天端高 H_0 、静水面からの波底高 $\eta_{\min}$ 、波頂高 $\eta_{\max}$ 、壁前面の重複波高 H_{c1a} 、および壁面から $1/2$ 波長沖側の地点で測定した重複波高 H_s との比などを示したものである。図は $H_i/L_A = 0.0224$ 、 $H_i/L_A = 0.0447$ および $H_i/L_A = 0.0661$ の 3 種類の波について示したものであるが、 $\eta_{\min}/H_i$ は H_0/H_i の増大や H_i/L_A の変化に対して $\eta_{\min}/H_i \approx 0.8$ でほとんど変化しない。これに対して $\eta_{\max}/H_i$ および H_{c1a}/H_i は、水深と天端高が等しい堤体 $h_s/h = 1.0$ では、入射波波形勾配によって多少こととなるが、 $\eta_{\max}/H_i = 0.7 \sim 0.8$ 、 $H_{c1a}/H_i = 1.6 \sim 1.7$ であるのに対して、天端高が高く越波が生じない堤体ではそれぞ

れ $\eta_{\max}/H_i = 1.2 \sim 1.4$ 、 $H_{c1a}/H_i = 2.0 \sim 2.2$ まで変化している。また H_s/H_i の H_0/H_i に対する傾向は H_{c1a}/H_i の傾向とほぼ同様であるが、 $H_{c1a}/H_i \leq H_s/H_i$ で $1/2 L_A$ 地点の重複波高が鉛直壁前面より卓越することがわかる。

4. 結 言

鉛直壁の壁前面に生ずる重複波の水位変動について検討してきたが、これらをまとめるとおよそ次のようになる。

(1) 鉛直壁前面の重複波の波頂高に関する有限振幅重複波理論の適合性について実験結果から検討したが、2 次、3 次、4 次近似解とともに h/H が増大すると近似した値となるが、実験値は h/H が増大しても理論値に対してほぼ平行して離れそれらの平均曲線は、Miche 式と Sainflou 式で求められる式 (6) になる。

(2) 重複波の非線形効果を表わす δ は H_i/L_A および h/L_A に支配されるが h/L_A が一定でも H_i/L_A によって著しく変化し $H_i/L_A < 0.02$ の範囲では特異な傾向を示し、 δ の H_i/L_A に対する曲線は高次式になると考えられる。

(3) 鉛直壁前面の重複波の波高の $1/2$ と、無堤時の入射波高の関係は $1/2 H_{c1a} \approx H_i$ で、有限振幅重複波の第 3 次近似解では、 $1/2 H_{c1a} > H_i$ となるとされているが、本結果では $1/2 H_{c1a} = H_i$ の結果も、また逆に $1/2 H_{c1a} < H_i$ の場合も認められる。

(4) 越波時の H_0 に対する $\eta_{\max}$ の比 $\eta_{\max}/H_0$ は堤高が低いほど大きく、 $H_0/H_i = 0.08 \sim 0.14$ に対して

$\eta_{\max}/H_0=5.8\sim 12.1$ で H_i/L_A が大きいほど著しい。しかし波底高は堤体高に関係なくほぼ一定であり変化しない。

(5) 越波時の鉛直壁前面の重複波高と壁面から $1/2$ 波長離れた地点の重複波高を比較すると堤体高に関する傾向はほぼ同様であるが、それぞれの波高の入射波高に対する比を調べてみると $H_s/H_i > H_{ola}/H_i$ となり、 $1/2$ 波長離れた地点の重複波高が大きくなる。

以上、鉛直壁前面に生じる重複波について、越波、非越波の場合における水位変動等に関し検討してきたが、ここでは堤脚水深が進行波の砕波水深より深い水深に鉛直壁がある場合の壁前面の重複波の水位変動を対象としてきたが、今後は砕波水深領域の重複波についても検討を加えたいと考えている。

最後に、御指導いただいた本学理工学部、久宝雅史教授、竹沢三雄助教授に深く感謝の意を表します。

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, pp. 57~70, 1955.
- 2) 永井莊七郎・玉井佐一・西村益夫: 重複波の発生条件と重複波の波圧, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 121~126, 1962.
- 3) 合田良実・竹田英章・菊谷 徹: 防波堤の所要天端高に関する実験 (I) 直立堤の越波による伝達波高, 第 2 回港湾技術研究所研究発表会講演概要, pp. 1~7, 1964.
- 4) 合田良実・柿崎秀作: 重複波における双峯型波圧の出現について, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp. 99~105, 1965.
- 5) 土屋義人・山口正隆: セツ動解による有限振幅重複波理論の適用限界について, 第 16 回海岸工学講演会講演集, pp. 7~13, 1969.
- 6) 土木学会海岸工学委員会: 海岸保全施設設計便改訂版, 土木学会, pp. 36~38, 1969.
- 7) 土屋義人・山口正隆: 越波のある場合の重複波の特性について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 79~84, 1970.
- 8) 合田良実・吉村知司・福森利夫: 砕波移行領域における波圧の変化に関する実験, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 209~214, 1971.
- 9) 高田 彰: 有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No. 201, pp. 61~76, 1972.
- 10) 高田 彰: 波の打ち上げ空間波形と越波量の相関特性, 土木学会論文報告集, No. 212, pp. 25~39, 1973.
- 11) 三浦 晃・遠藤茂勝: ブロック積防波堤の波高伝達特性, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 261~265, 1977.
- 12) 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), 第 18 回海洋工学講演会論文集, pp. 249~258, 1971.