

波と底版型潜堤との非線形干渉について

小島 治幸*・入江 功**・三原 泰司***・信岡 尚道****

1. はじめに

近年、海岸の景観を守るため、離岸堤の潜堤化などが採用されつつあるが、岸側の水位上昇や開口部における冲向き流れ等の発生のため、海浜の安定にとっては必ずしも有効ではない。そこで、海浜保全に有効な海浜流を起す可能性のある構造物の一形式として2枚の版を水平に並べた底版型潜堤が提案されている。この構造物は、なるべく海底近くに設置することにより碎波による平均水位の上昇を極力抑えながら、波と水平版との干渉効果による波の遮断効果と高周波成分の発生に伴う波長の低減効果を期待するものである。入江ら(1991)は、水理実験と線形理論計算によりその消波効果と平均水位の上昇量が小さいことをすでに確認している。その際、2枚の水平版の間隔を広げていくとある特定の波長帯域で通過率の実験値が、線形計算の結果よりも著しく低下する現象や版上で碎波が起こらない状態でも波形勾配が増大するにつれ通過率が減少するといった興味深い現象がみられた。これらの現象は、波と底版型潜堤の非線形干渉に起因すると思われる、高周波成分波の発生と成長の特性を解析的に調べる必要がある。

本研究は、ポテンシャル接続法の定常非線形解析法により、底版型潜堤と波との非線形干渉の現象の解明とその特性を明らかにすることを目的とする。この際、潜堤近傍で起こる渦によるエネルギー損失の効果をも考慮している。また、2次のオーダーまでの波圧および波力表示式を誘導し、水平版に作用する波力特性も検討する。

2. 理論解析法

2.1 解析法の概要

図-1に示すような海域にある底版型潜堤(2列没水水平版)を対象として、 x の正方向から有限振幅波が入射する場合を考え、1次のオーダーの波(微小振幅波)の振幅を ζ_0 、波数を k 、角周波数を $\sigma(=2\pi/T; T$ は

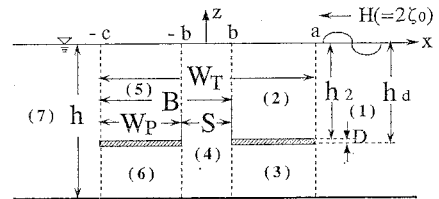


図-1 底版型潜堤の諸元と流体域

周期)で表す。解析法は、吉田ら(1991)によって提示された振動展開法によって2次のオーダーまで考慮した速度ポテンシャル $\Phi(x, z, t)$ に関する定常非線形解析法である。このとき、水平版両端で起こる渦等によるエネルギー損失の効果を取り入れるため、水平版の端点における仮想鉛直境界面での流速 v の2乗に比例する抵抗と流体の加速度に比例する抵抗によりエネルギー損失が表せると仮定する。それらの係数を C_D, C_M とすると境界面($x=a$)では、圧力 p の連続条件より次の式が得られる。なお、下付き添え字は各領域を示している。

$$\frac{1}{\rho}(p_1 - p_2) = -\frac{1}{2}C_D|v_1|v_1 - C_M\frac{\partial v_1}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

Lorentz の等価仕事則を用いて上の式の右辺の時間に関する非線形項を線形化し、流体圧力と流速を速度ポテンシャルで表すことにより、仮想鉛直境界面における境界条件が求められる。この境界条件を、水面を有する領域の1次のオーダーのポテンシャルの連続条件にのみ取り入れ、水平版の下領域および2次の連続条件には導入していない。これらの条件より得られる速度ポテンシャルに含まれる未定係数に関する連立一次方程式を解いて未定係数を決めることになるが、速度ポテンシャルの条件式には、(1)式の流速の2乗に関する非線形項が含まれることから、繰り返し計算を行って解を求めた。

1次と2次の未定係数が決まれば速度ポテンシャルが決まり、非線形のBernoulliの式より2次のオーダーまでの水面波形と波圧はそれぞれ式(2)と(3)のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{\zeta(x, t)}{\zeta_0} &= \zeta^{(1)}(x, t) + \varepsilon \zeta^{(2)}(x, t) \\ &= \text{Re} [\zeta_1^{(1)}(x) \exp(i\sigma t)] \end{aligned}$$

* 正会員 工博 九州共立大学助教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木工学科
 *** 工修 (株)JR東日本
 **** 学生会員 九州大学大学院

$$+\varepsilon\{\zeta_0^{(2)}(x)+\zeta_2^{(2)}(x)\exp(i\sigma t)\}\} \cdots \cdots (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{p(x, z, t)}{\rho g \zeta_0} &= p^{(1)}(x, z, t) + \varepsilon p^{(2)}(x, z, t) \\ &= \operatorname{Re}[p_1^{(1)}(x, z) \exp(i\sigma t) \\ &\quad + \varepsilon \{p_0^{(2)}(x, z) + p_2^{(2)}(x) \exp(i2\sigma t)\}] \quad (3) \end{aligned}$$

上の式の $\zeta_1^{(1)}$, $\zeta_0^{(2)}$, $\zeta_2^{(2)}$ と $p_1^{(1)}$, $p_0^{(2)}$, $p_2^{(2)}$ は、それぞれ水面波形と波圧の1次成分と2次の定常成分、2次の2倍周波数成分を表しており、それらの表示式は吉田ら(1991)および小島ら(1991)の論文を参照されたい。入射側に位置する水平版に作用する無次元の鉛直波力 F_z と水平波力 F_x は1次と2次の波圧分布からそれぞれ次式で与えられる。なお、下付きの添え字は各領域を意味する。

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{f_z(z, t)}{\rho g \zeta_0 W_p} = \int_b^a \{p_1^{(1)}(x, z, t) + \varepsilon p_2^{(2)}(x, z, t)\} dx \\ &\quad - \int_b^a \{p_1^{(1)}(x, z, t) + \varepsilon p_2^{(2)}(x, z, t)\} dx \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{f_x(x, t)}{\rho g \zeta_0 D} = \int_{-h_d}^{-h_2} \{p_1^{(1)}(x, z, t) + \varepsilon p_2^{(2)}(x, z, t)\} dz \\ &\quad - \int_{-h_d}^{-h_2} \{p_1^{(1)}(x, z, t) + \varepsilon p_2^{(2)}(x, z, t)\} dz \quad \cdots (5) \end{aligned}$$

波力表示式の詳細は小島ら(1992)の論文に示されているので参照されたい。上に示した式によって1次、2次の水面波形や波力を算定することができるが、2次の物理量の計算値については、微小パラメータ ε が掛かった値を表示することにする。

2.2 解析法の検証

理論解析法の検証を、まず1例の水平版について行い、抵抗係数を変えることにより1次や2次の水面変動の振幅が変化する特性を調べた。図-2は、版長 $W_p/h=2.00$ 、版上水深 $h_2/h=0.25$ 、版厚 $D/h=0.05$ の1列の水平版に振幅 $\zeta_0/h=0.04$ の波が入射するときの、相対水深 h/L に対する通過波の1次、2次の振幅と入射波の振幅との比(以後、振幅比と呼ぶ。) $|\zeta^{(1)}|/\zeta_0$, $|\zeta^{(2)}|/\zeta_0$ の実験値と理論値を示したもので、1次の振幅比は一般に言われている通過率を表している。流速の2

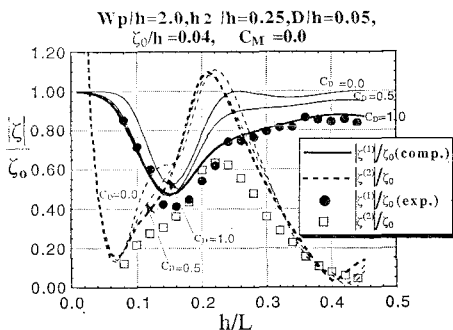


図-2 1列没水水平版における振幅比の理論値と実験値

乗に比例する抵抗係数を変えると実線で示している $|\zeta^{(1)}|$ の理論値が実験値(●)に近づき、最適な抵抗係数が存在する。しかし、 $|\zeta^{(2)}|$ の理論値(破線)は C_D と C_M の値を変えてもあまり変化はなく実験値(□)に比べ大きな値となる。このことは、摂動展開におけるさらに高次の項を考慮した解析が必要であることを示唆している。

堤体幅 $W_T/h=5.50$ 、2列の水平版の間隔 $S/h=0.5$ 、没水深度 $h_2/h=h_3/h=0.50$ 、版厚 $D/h=0.05$ の底版型潜堤に対する1次、2次の通過波の振幅と入射波の振幅の比 ($|\zeta^{(1)}|/\zeta_0$, $|\zeta^{(2)}|/\zeta_0$)、波高比 (H/H_0)、2乗平均の振幅比 ($|\zeta_{RMS}|/\zeta_0$) の理論値と実験値を図-3に示す。理論値と実験値の一致は、定性的および定量的にも十分に満足のいく結果が得られた。特に、2次成分(2倍周波数成分)波については、水平版の没水深度が深いことにより2倍よりも高周波数の成分波があまり励起されていないため相対水深が小さいところ以外は理論値と実験値のよい一致がみられる。また、3種類の異なる定義の通過率を示しているが、高周波成分が励起される場合、通過率の定義の方法によりその値がかなり異なることがわかる。

3. 底版型潜堤と波との非線形干渉の特徴

3.1 版間隔の影響

図-4に、潜堤の全長が $W_T/h=5.50$ の一定で、版間隔を $S/h=0.50$ と 1.50 と変えたときの1次の振幅比としての通過率 K_t と反射率 K_r の実験値と理論値を示す。版間隔が $S/h=1.5$ と大きい場合、相対水深が $h/L=0.23$ 付近で波と2列の水平版との線形干渉により反射率の増大とともに通過率が小さくなっている。他の相対水深における通過率の実験値と理論値の一致が良いのに比べ、この相対水深の近傍では実験値が理論値よりかなり低下していることが分かる。理論値は、版端で生じる渦等によるエネルギー減衰を考慮していることからこの低下傾向は線形干渉や渦によるエネルギー損失以外の

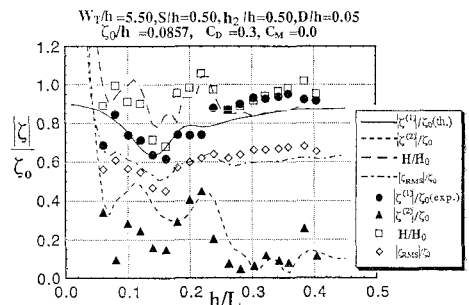


図-3 底版型潜堤における振幅比の理論値と実験値

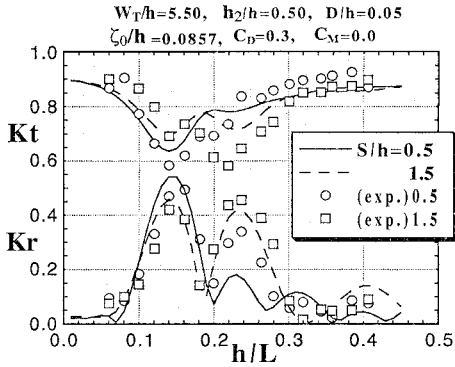


図-4 底版型潜堤の通過率と反射率の特性

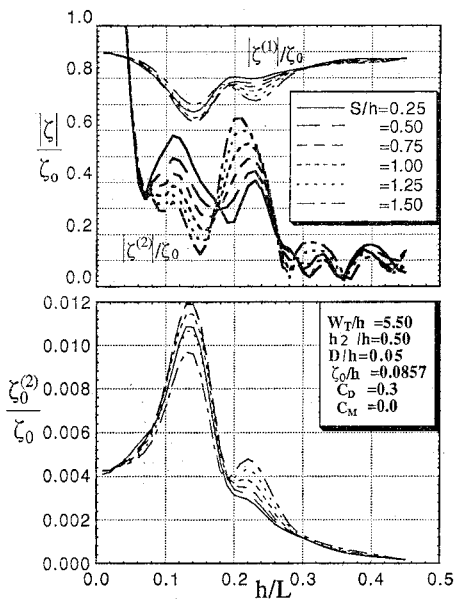


図-5 版間隔の違いによる1次、2次の振幅比と2次の平均水位の変化

原因によると考えられる。

図-5 の上図は潜堤の全長が $W_T/h=5.50$ の一定で、 S/h を変化させたときの通過波における1次、2次の振幅比を、下図は2次の平均水位上昇と入射波の振幅の比 $\zeta_0^{(2)}/\zeta_0$ を示したものである。版の間隔 S/h が広いほど $\zeta^{(1)}$ に関しては上述したように $h/L=0.14$ 付近の極小値がいったん減少してから増大するが、 $h/L=0.22$ 付近では一様に小さくなり一つの極小値を示すようになる。一方、 $\zeta^{(2)}$ について見てみると、 $h/L=0.18$ を境にそれよりも相対水深が小さいところでその値が減少し、それよりも大きいところで増大する傾向が見られる。特に、間隔が大きくなるにつれ、 $h/L=0.20\sim0.22$ で2次成分が増大する現象が顕著に現れ、一つの極大値となっている。このことより、上で述べた通過率の顕著な低下は、波が潜堤上を通過する際、基本周波数成分のエネルギー

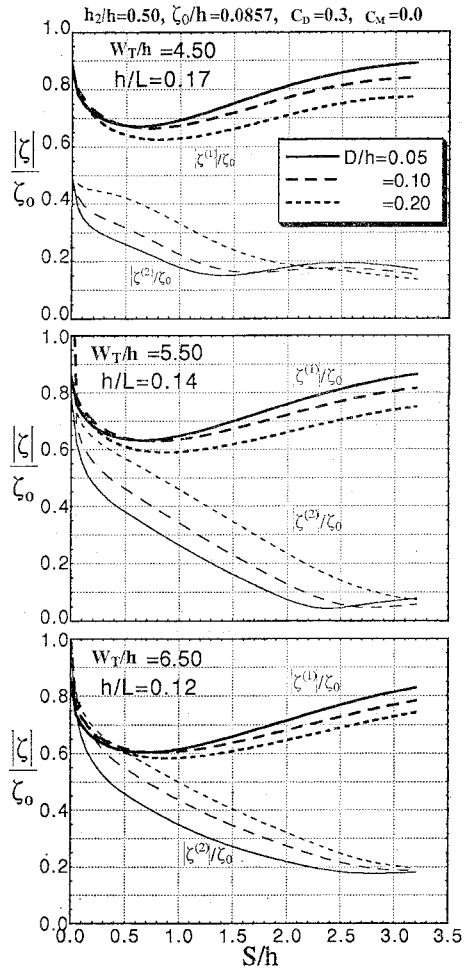


図-6 版間隔に対する1次、2次の振幅比の変化

ギーが2倍周波成分へ移行することによりその成分波のエネルギーが減衰するために起こると考えられる。なお、2次のオーダまでの理論解析では、高周波成分へのエネルギー輸送による基本波のエネルギー減衰の効果を数値的に表すことはできない。また、下図に示されている2次の水位上昇量については、その値自体は小さいが、 S/h についての変化は $\zeta^{(1)}$ と反対の傾向を示しており、版の間隔が広がるにつれ相対水深の小さいところで一度増加してから減少するが、 $h/L=0.18$ よりも大きいところでは一様に増加し、 $h/L=0.22$ 付近で一つの極大値となっている。

以上のことより、一定の堤体幅に対して1次の振幅比の低下や2次の振幅比の増大に関して最適な版間隔があることがわかる。図-6と7は、版間隔 S/h に対する1次、2次の振幅比の変化を表したもので、3種類の堤体幅に関して図-6に1次の振幅比が最初の極小値となる相対水深 $h/L=0.12, 0.14, 0.17$ の結果を、図-7

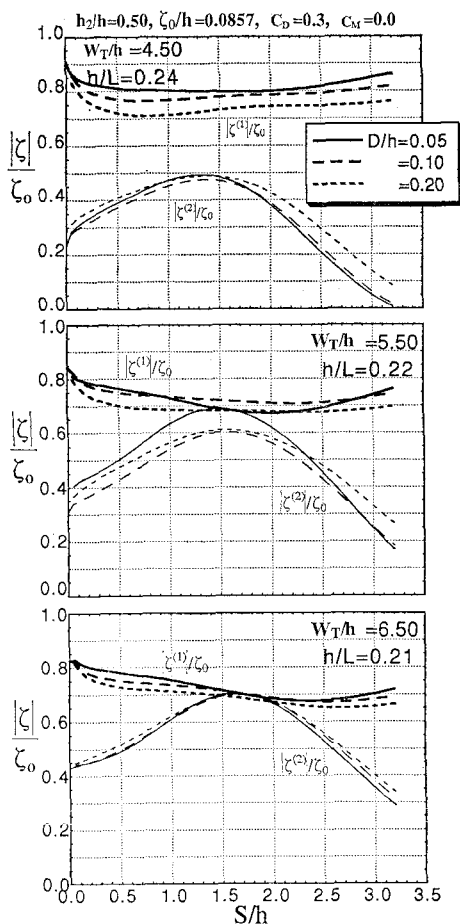


図-7 版間隔に対する1次, 2次の振幅比の変化

に2次の振幅比が増大する相対水深 $h/L=0.21, 0.22, 0.24$ の結果を示している。また、各図において3種類の版厚による影響も示している。1次の振幅比つまり通過率に関しては、2つの相対水深のところで通過率を最小とする最適な版間隔があり、例えば堤体幅 $W_T/h=5.50$ の場合、 $h/L=0.14$ (図-6) と $h/L=0.22$ (図-7) のところで最適な版間隔はそれぞれ $S/h=0.7\sim0.8$ と $S/h=1.90\sim2.1$ である。前者の版間隔は波長に対して約10%、後者は波長に対して約44%であり、これらの値は潜堤の全長 W_T を変えてみてもほぼ同じ値を示している。一方、2次の振幅比に関しては、図-6に見られるように相対水深が小さいとき、その値は版間隔が大きくなるとほぼ一様に減少しているが、図-7のように相対水深が大きいところではその振幅比を最大とする版間隔があり、その値は全堤体幅にはあまり関係なく波長の約33%である。また、版厚 D/h の影響は、相対水深が小さい方(図-6)が顕著に現れる傾向がみられ、版厚が大きくなるほど1次の振幅は減少し、2次の振幅は逆に増大する傾向がみられる。

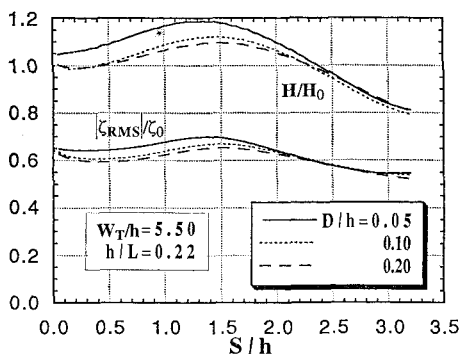


図-8 版間隔に対する波高比と2乗平均の振幅比の変化

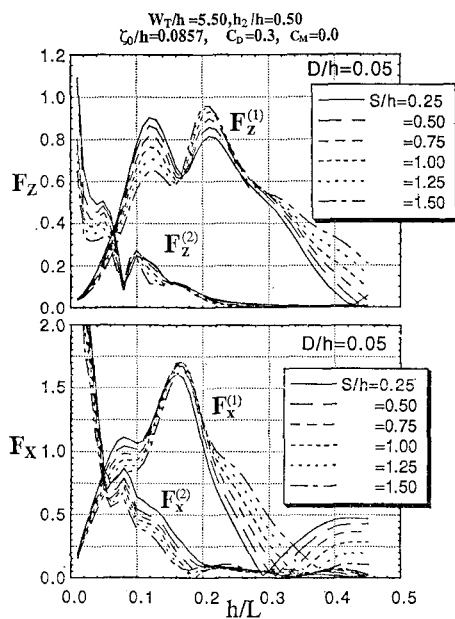


図-9 前版に作用する鉛直と水平波力の特性

全堤体幅 $W_T/h=5.50$, $h/L=0.22$ における版間隔に対する通過波の波高比 H/H_0 と2乗平均の振幅比 $|\zeta_{RMS}|/\zeta_0$ の変化を調べた結果を図-8に示す。波高比と2乗平均の振幅比とも2次の振幅比と同じような変化傾向を示し、2次の振幅比が最大となる版間隔でそれらも最大値をとる。

3.2 版に作用する波力の特性

水平版に作用する波力に関しては、通過側の版に作用する波力に比べ、どのような条件においても、入射側の版に作用する波力の方が大きいことから、図-9は入射側の版に作用する鉛直、水平波力を S/h を変化させ示したものである。1次成分については、相対水深に対して鉛直波力では二つの顕著なピークが現れるが、水平波力では一つのみである。また、鉛直波力は $h/L=0.17$, 水平波力は $h/L=0.14$ 付近を境に S/h が大きくなる

につれ、 h/L が小さいところでは波力が小さくなり、 h/L が大きいところではその逆の傾向を示している。2次成分についてはどの h/L に対しても S/h が大きくなるにつれ減少している。また、図-5 の2次成分の振幅比と比較すると、 $h/L=0.20\sim0.22$ 付近で版間隔が大きくなるにつれ2次の振幅が著しく増大することによる影響が鉛直および水平波力にはほとんど現れていないことがわかる。

3.3 後版の没水深の影響

図-10 に潜堤の全長 $W_T/h=5.50$ 、版間隔 $S/h=0.50$ 、波の入射側の版の没水深を $h_2/h=0.50$ と固定し、通過側の版の没水深 h_3/h を変化させたときの h/L に対する1次と2次の振幅比を上図に、波高比と2乗平均の振幅比を下図に示す。1次の振幅比は、後ろ側の版の没水深が深くなるにつれ2枚の水平版と波との干渉効果が薄れ相対水深の非常に小さいところを除いて全体的に増大する。2次の振幅比についてみると、 $h_2/h=h_3/h=0.50$ のときは2つの比較的小さなピークが顕著に現れ

ているが、 h_3/h が大きくなるにしたがって、一つのピークになりながらその値が急激に増大していく。この2倍周波数成分の振幅の増大にともない、 H/H_0 や $|\zeta_{RMS}|/\zeta_0$ も大きくなり、高周波成分波の発生が通過波側の消波に関して必ずしも良いとは言えない。またここには示していないが、版厚の大きい方が、相対水深全体にわたって、これらの変化の大きさを小さくする傾向にある。

4. あとがき

本研究より、次のことを明らかにした。

(1) 通過率の実験値から求めた最適な抵抗係数 C_D を用いることにより1次、2次の振幅およびそれらを重畳した波高や2乗平均の振幅の計算値は実験値を定性的、定量的によく表している。

(2) 堤体の総延長を一定としたとき、通過波における1次の振幅比を減少させる最適な版間隔は波長の約10%と44%の二つあり、これらの値は潜堤の全長を変えてもあまり変わらない。また、2次の振幅が最大値を示す版間隔は波長の約33%で、このとき基本波のエネルギーが2倍周波成分に移行され、基本波に対する通過率の顕著な低下が起こると考えられる。

(3) 波力特性については、入射側の版にかかる波力が通過側のそれよりも常に大きく、相対水深が0.1よりも大きいところでは、鉛直、水平波力の2次成分は1次成分に比べ非常に小さくなる。

(4) 波と構造物との非線形干渉により生じる高周波成分波の振幅が基本波の振幅に対してある程度の大きさになると、通過率の定義のしかたによって、その値がかなり異なることになるので注意が必要である。

参考文献

- 入江 功・信岡尚道・小島治幸・三原泰司 (1991): 底版型潜堤の波浪減殺効果, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 561-565.
- 小島治幸・吉田明德・井島武士 (1991): 没水水平版と波との非線形干渉に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 556-560.
- 小島治幸・中村哲也・入江 功・吉田明德 (1992): 没水水平版に作用する線形および非線形波力の特性, 海岸工学論文集, 第39巻, 印刷中.
- 吉田明德・小島治幸・鶴本良博 (1991): ポテンシャル接続法(選点解法)によるストークス波と構造物の非線形波動境界値問題解析法, 土木学会論文集, No. 434/II-16, pp. 57-66.

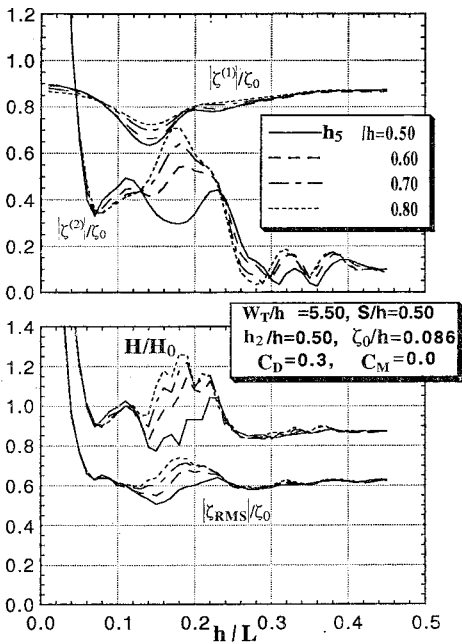


図-10 後版の没水深を変えたときの1次、2次の振幅比および波高比と2乗平均の振幅比の変化