

マウンド形状による衝撃碎波力の発生について

谷 本 勝 利*・高 橋 重 雄*・轟 正 彦**

1. ま え が き

混成防波堤に作用する重複波から通常の碎波に対する設計波力は、たとえば合田¹⁾による算定式によってかなりの精度で推定することができる。しかしながら、波力に及ぼす要因は多く、マウンドの形状いかんによっては平均波圧強度が波高相当の静水圧の数倍といった強大な衝撃碎波力が生じることがある。設計上、こうした強大な波力が作用する恐れのある断面の採用は避けることが望ましく、その危険範囲を明らかにすることが必要である。本研究はこうした観点から、混成防波堤のマウンド形状による強大な衝撃碎波力の発生特性について、実験的に検討を行うものである。

なお、本稿で共通して用いる記号の定義は以下のとおりである。

- h : 堤体設置位置での水深
- d : マウンド上の水深
- B_1 : マウンドの前肩幅
- i_S : 海底勾配
- i_M : マウンド勾配
- h_c : 堤体の天端高
- γ_0 : 水の単位体積重量
- l : 水平波力の作用範囲
- T : 波の周期
- L : 水深 h における波長
- H : 水深 h における波高
- P : 水平波力 (合力)
- p : 波圧強度
- $\bar{p}$: 平均波圧強度
- $p_{\max}$: 最大波圧強度

2. 従来の研究

久保・玉井²⁾、鴻上・時川³⁾、あるいは加川・片山・江口⁴⁾らは、マウンドの形状あるいは消波工の形状によって波力が大きく変化することを示し、マウンドの前肩

幅やマウンド上の水深によっては強大な波力が生じること指摘している。また実際に波圧の算定式を提案した永井・大坪⁵⁾、伊藤⁶⁾、合田¹⁾も、それぞれマウンドの影響による波力の変化をその式の内にとり入れている。

永井らは、広範な模型実験を実施して B_1/h と d/h による $p_{\max}/\gamma_0 H$ の分布を5種類の h/H について図示している。また、 $h/H \geq 1.8$ および $B_1/h = 0 \sim 0.25$ の条件に対し、 $p_{\max}/\gamma_0 H$ の最大値の d/h による変化を示し、 $p_{\max}/\gamma_0 H$ の値は $d/h = 0.3$ 付近にピークをもち、 $d/h > 0.75$ ではマウンドの影響は小さくなく、直立堤とみなしうると述べている。伊藤は $\bar{p}/\gamma_0 H$ が $H/d < 1$ では一定で、 $H/d > 1$ で H/d について単調増加する式を与えた。この関係では d が小さくなるとき波圧が著しく大きくなるので、合田はこれを改良し、 $d/h = 0.3 \sim 0.4$ でピークをもつような H/d を含んだかたちでマウンド高の影響を考慮した。

このようにマウンドの影響を波圧算定式にとり入れる試みがなされているが、本稿は強大な衝撃碎波力の発生条件を検討する観点から、さらにマウンド形状による波力変化の特性を実験的に明らかにしようとするものである。

3. 実験方法

(1) 水路および模型

実験は図一1に示す水路で行った。混成防波堤の模型は図一2に示すとおりで、ケーソンの底面と接するマウンドの部分は常に一定の状態とするため、碎石を接着剤で固めた厚さ 10 cm の碎石版を用いている。この碎石版と堤体との摩擦係数 μ は水平載荷試験により求める。また、マウンドの表面の部分はマウンドの形状を変えごとにセメントのペーストで固着し、波の作用による変形を防ぐこととした。

(2) 水平波力の求め方

この実験は波力による堤体の滑動量を測定し、滑動量がちょうど0となる堤体重量 (滑動限界重量 W_{0c}) により、水平波力を逆算する滑動実験の方法によっている。

* 正 会 員 運輸省港湾技術研究所 水工部

** 学生会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

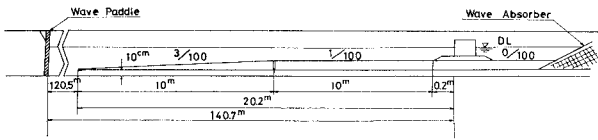


図-1 実験水路

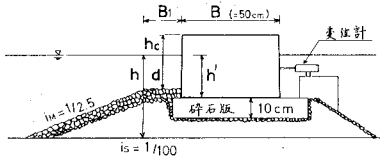


図-2 模型諸元

差動トランス式の変位計により1波1波の波に対する滑動量を測定し、同一の波の条件に対し堤体重量を広く変えて繰り返し実験を行い、図-3のような堤体重量と滑動量のグラフを作成した。この図は、例として重複波、砕波、衝撃的な砕波が作用する場合の関係を示したもので、 B_1 の値のみが異なり他の条件は同じときのものである。図からわかるように滑動限界重量は重複波的な波では割合簡単にとらえられる。しかし、波が衝撃的であればあるほど、堤体重量を増加しても容易に滑動量は0

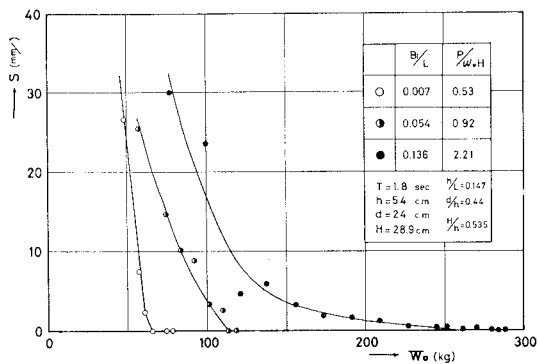


図-3 堤体重量と滑動量の関係

とならず、滑動限界重量を決定することはむずかしくなる。今回の実験では、このような図上に全体的な滑動量の傾向から線を引き、これによって滑動限界重量を求めた。

こうして滑動限界重量が与えられると、水平波力 P はそのときの揚圧力を U とすれば、滑動させようとする力と摩擦抵抗力の静的つりあい条件を考えて、次式により求められる。

$$P = \mu(W_{0c} - U) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、揚圧力 U もまた波による力であり未知量である。したがって、 P を求めるためには U を別に測定するか、波圧分布を仮定しなければならない。ここでは後者により、 P と U の割合が一般の場合の合田による算

定式により与えられるものと等しいとして求めることにした。このとき、式(1)は次のように書き換えられる。

$$P = \frac{\mu W_{0c}}{1 + \mu U_G / P_G} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 U_G / P_G は合田による波圧算定式¹⁾から得られる計算上の揚圧力 U_G と水平力 P_G の比である。

(3) 実験ケース

波力に影響を与える要因は

$$P = f(L, H, h, d, B_1, i_s, i_m, h_c) \dots \dots \dots (3)$$

である。本実験では、とりあえずマウンドの高さおよび前肩幅の影響を把握することを目的とし、 i_s , i_m , h_c は一定とした。その他のパラメーターを無次元化すれば、

$$\frac{P}{w_0 H L} = f\{h/L, (H/h \text{ または } H/d), d/h, B_1/L\} \dots \dots \dots (4)$$

となる。これらのパラメーターについて通常の防波堤の諸元や作用する波を考慮して、表-1に示すような実験条件を考えた。実験を実施するにあたっては、まずシリーズⅠとしてマウンドの高さの影響を調べる実験を行い次にシリーズⅡとしてマウンドの前肩幅の影響を調べる実験を行った。シリーズⅠの実験では、 $h/L=0.113$ ($T=1.98 \text{ sec}$, $h=42 \text{ cm}$), $B_1/L=0.054$ を一定とし、マウンドの高さ d/h については $0.167 \sim 0.643$ の範囲で5ケースを検討した。シリーズⅡの実験では、 $h/L=0.147$ の場合は $d/h=0.630$ と 0.444 , $h/L=0.113$ の場合は $d/h=0.523$ と 0.286 , $h/L=0.071$ の場合は $d/h=0.523$ と 0.286 の各条件において、 B_1/L を3から4ケース変化させた。

波高については、いずれのケースについても、重複波から砕波後の波が作用するまで広く検討することを原則とした。しかし、造波機と水路の特性により、 $h/L=$

表-1 実験条件

$T \text{ sec}$	1.80	1.98	3.00
$h \text{ cm } (h/L)$	54 (0.147)	42 (0.113)	42 (0.071)
$B_1 \text{ cm } (B_1/L)$	2.5 (0.007)	2.5 (0.007)	2.5 (0.004)
	20 (0.054)	20 (0.054)	20 (0.034)
	50 (0.136)	50 (0.134)	50 (0.085)
	100 (0.272)	100 (0.268)	100 (0.170)
$d \text{ cm } (d/L)$	14 (0.259)	7 (0.167)	7 (0.167)
	19 (0.352)	12 (0.286)	12 (0.286)
	24 (0.444)	17 (0.404)	17 (0.404)
	29 (0.537)	22 (0.523)	22 (0.523)
	34 (0.630)	27 (0.643)	27 (0.643)
$H \text{ cm}$	18.0~32.2	17.4~37.8	17.4~30.2
$h_c \text{ cm}$	13	10	10
i_s, i_m	$i_s=1/100$ $i_m=1/2.5$		

0.147 の波では偏心量を大きくしても造波板付近で碎波してしまい、堤体設置位置では碎波直前の波高までしか検討することができなかった。造波機の偏心量と水深 h での通過波高の関係は、碎波にいたるまではほぼ比例している。本実験における結果の整理に用いる波高は、碎波後の波に対してもこれをそのまま延長した仮想通過波高によった。これは、一般に最も大きな波力を及ぼすのは直立壁のやや沖側で碎ける波であり、そのときの碎波限界波高は同一偏心量に対するこの仮想通過波高と大差ないことによる。碎波後の波による実験は、波高による波力の変化でこうした最大波力が生じる条件を実験に含んでいることを確認するためのものである。

4. 実験結果および考察

(1) マウンド上の通過波

碎波の状況と波力の関連について検討するために、滑動実験に入る前に、マウンド上の天端の長さが1波長程度で、堤体を設置しない場合の波(マウンド上の通過波)の碎波の状況を観察した。図-4 はマウンドの天端の沖側の先端から測った碎波点の位置 D_b の変化を示すものである。ただし、負の値はマウンドののり面で碎波することを表わし、波高 H はマウンドがないときの水深 h における通過波高である。

波高 H がごく小さいときはこの波はマウンド上でも碎波しない。波高が大きくなるにつれて碎波しはじめるが、これに近い波は崩れ波で D_b の値もかなり大きい。このマウンド上で碎波し始める水深 h での通過波高 H を $H_b^{(d)}$ と表わす。この $H_b^{(d)}$ より波高が大きくなるに従って碎波は次第に巻き波に近くなり、 D_b の値も小さくなる。波高がある程度以上大きくなると巻き波型の碎波となり、典型的な巻き波碎波を示すようになる。こうした状態における D_b の値は波高が大きいかほど小さくなるが、それほど大きくは変わらず、波高に対してほぼ直線的に変化する。この D_b の線は d/h が同じでも、 h/L が大きいほど全体的に沖側に移動する。 h/L が同じとき

には、 d/h が大きいほど同様に沖側に移動し、かつこの直線部分の勾配が急となっていることが認められる。

以上マウンド上での碎波状況について述べたが、 $H_b^{(d)}$ や D_b はそれぞれ d や B_1 との関係で衝撃碎波力の発生に関連してくる。すなわち、 $H_b^{(d)}$ は d が小さくなればなるほど小さくなり、この値が小さいほどはげしい巻き波型の碎波をする波の範囲が大きくなることを意味し、衝撃碎波力が発生する波の範囲が広がっていくものと思われる。

一方 D_b については、同じマウンドの高さでも B_1 によって波力は大きく違い、どの位置に堤体をおけば波力が最も大きくなるかは D_b の値と密接に関係すると思われる。 D_b の位置は d/h や h/L によって大きく変わっており、したがって最も波力が大きくなる B_1 の位置もこれらにより変ると考えられる。このように D_b 値は B_1 による波力の変化を表わす1つの基準となると考えられる。

(2) d/h による波力の変化

図-5 は H/h を横軸に、 d/h を縦軸にとって、 $\bar{p}/w_0H$ の分布を示したものである。実験値の分布から $\bar{p}/w_0H$ の等値線を求め、これを実線で示してある。この図により $\bar{p}/w_0H$ に及ぼすマウンドの高さの影響が把握できる。たとえば、直立堤に対しては重複波的な作用と考えられる $H/h=0.5$ についての波力の変化をみると、 $d/h=0.40$ あたりから波力が急増し、 $d/h=0.3$ 付近で $\bar{p}/w_0H$ が2を越す強大な波力を生じている。また、 $H/h=0.73$ の波は直立堤に作用する場合にも碎波で、多少大きな波力を生ずるのであるが、この波では $d/h=0.5$ あたりから $\bar{p}/w_0H$ の値が急に大きくなり、やはり $d/h=0.3$ 付近でピークとなって、 $\bar{p}/w_0H$ が3を越す強大な波力を生じている。この $H/h=0.73$ の波は、どのような d/h に対しても最大の波力を与える波となっており、 d/h が変わっても最大の $\bar{p}/w_0H$ を与える波高はほぼ一定であり、直立堤においてやや沖側で碎ける波であることがわかる。

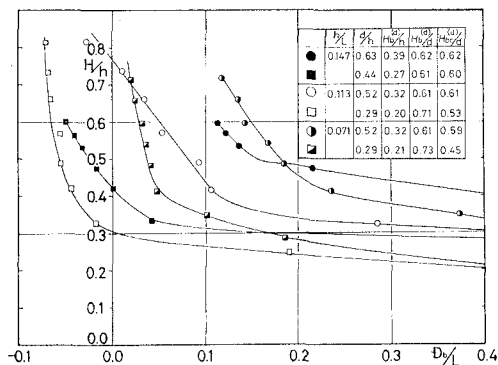


図-4 マウンド上の通過波の碎波点

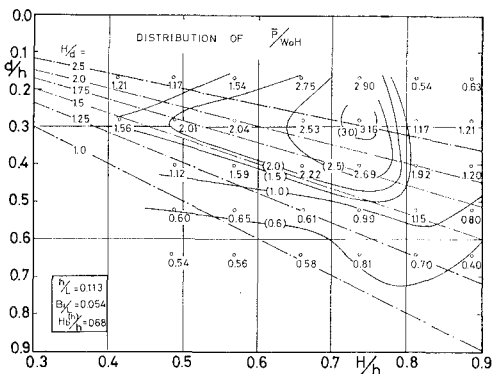


図-5 d/h による波力の変化

同図には、 $H/d=C$ となる直線を $C=1.0\sim 2.5$ に対して併せて示してある。これらの直線は波力変化の傾向をよく表わしている。すなわち、 H/d が大きくなるに従って波力は漸増し、 $H/d=1.25$ 付近から急に増加して、2.5 でピークとなり、それ以上のところでは減少している。この波の条件 ($h/L=0.113$) とマウンドの前肩幅 ($B_1/L=0.054$) では、たとえば $\bar{p}/w_0H \geq 1.5$ という強い波力を発生させるのは $H>1.3d$ で、かつ $d/h \geq 0.5$ のときである。

(3) B_1/L による波力の変化

図-6~8 はそれぞれの h/L や d/h に対して、 B_1/L を横軸にとり、 H/h を縦軸にとって $\bar{p}/w_0H$ の分布を示したものである。また縦軸は H/d でも表わすことができ、この値を図の右端に記入した。図中の実線は図-4 の砕波点の位置 D_0 を示したものであり、点線は $\bar{p}/w_0H$ の等値線を示す。各図をみれば、波力は B_1/L が違えばかなり異なり、その最大値を与える B_1/L と、ある値以上の波力を発生させる B_1/L の上、下限のあることがわかる。各々の h/L や d/h の条件に対し、 $\bar{p}/w_0H$ の分布はかなり異なり、最大値を与える B_1/L の値や強い砕波力を発生させる B_1/L の範囲も違っている。 d/h が小さいほど、また h/L が大きいほど全体的に波力の大きい領域は B_1/L の小さいところに移行する傾向にあることが認められる。

ここで、図-6~8 の各図に引くことができる2つの直線によってさらに検討を加える。図が煩雑になるため実際には引いてないが、おのこの図に各波高に対し最大の波力を生じさせる B_1/L を結んだ線 (P_H 線) を引く。この P_H 線は d/h が小さいほど、 h/L が大きいほど $B_1=0$ に近いところにおいて、このような d/h や h/L では B_1/L が小さくても強大な波力が生ずることを表わし、逆に d/h が大きい場合には B_1 が長いときに強大な波力を生じることを示している。またこの P_H 線は D_0 の線とほぼ平行になり、マウンド上の通過波の砕波点の位置と波力が密接に関係することがわかる。 P_H 線と D_0 線は h/L が小さくなるほど接近し、 $h/L=0.147$ や $h/L=0.113$ では D_0 より堤体が前にあるとき重複波的となり強大な波力を生じることはないが、 $h/L=0.071$ では D_0 より前に堤体があってもかなり大きな波力を生じている。次に、各 B_1/L に対し最大波力を生じさせている波高を結んだ線を P_B 線とする。 B_1/L によって $\bar{p}/w_0H$ の値が増加する範

囲では、 B_1/L が異なっても水深 h での砕波限界波高より少し大きい波高がつねに最大波圧を生じさせているので、この P_B 線は P_H 線の左側では横軸とほぼ平行となる。

P_H 線は見方を変えれば、ある $\bar{p}/w_0H$ に対しその値

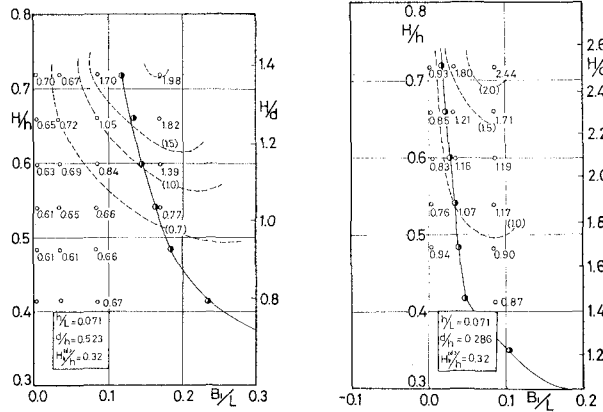


図-6 B_1/L による波力の変化 ($h/L=0.071$)

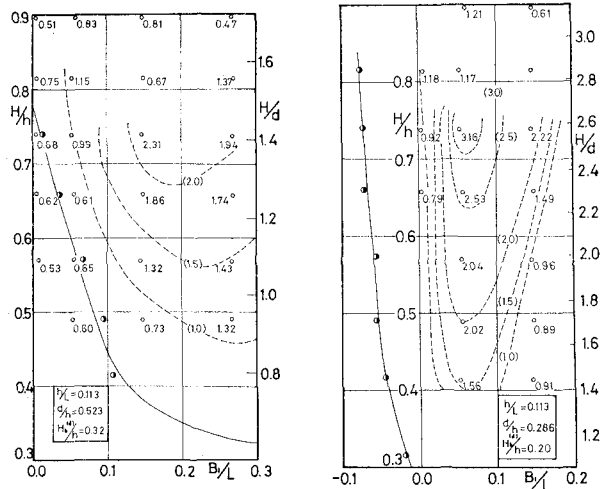


図-7 B_1/L による波力の変化 ($h/L=0.113$)

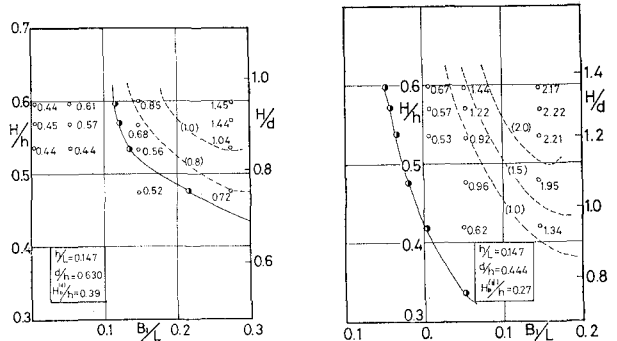


図-8 B_1/L による波力の変化 ($h/L=0.147$)

以上の $\bar{p}/w_0H$ となる波高の範囲を示す線でもある。いま $\bar{p}/w_0H=1.0, 1.5, 2.0$ についてこの P_B 線より $\bar{p}/w_0H$ がその値以上となる波高の範囲を求め、その下限値を d で割ったものを $(H/d)_M$ で表わすことにする。図-9 はそれぞれの $\bar{p}/w_0H$ に対する $(H/d)_M$ の値を示したもので、横軸に h/L をとりパラメーターを d/h としてプロットしたものである。 $(H/d)_M$ の値は h/L が大きいほど小さくなり、かつマウンドが低いほど小さな値となっている。この図より、今回の実験範囲では $\bar{p}/w_0H \geq 1.5$ の波力を発生しうるのは $H > 0.9d$ の波であるといえる。

同じように P_B 線の見方を変えれば、この線はある $\bar{p}/w_0H$ に対しその値以上の $\bar{p}/w_0H$ となる B_1/L の範囲を示す線でもある。いま $\bar{p}/w_0H=1.0, 1.5, 2.0$ についてこの P_B 線より $\bar{p}/w_0H$ がその値以上となる範囲を求め、その下限値を $(B_1/L)_M$ で表わす。図-10 に、横軸に d/h をとり、パラメーターを h/L にして、それぞれの $\bar{p}/w_0H$ に対する $(B_1/L)_M$ をプロットした。 $(B_1/L)_M$ の値は h/L が大きいほど小さな値となり、 d/h の増加にともなう増加し、 $d/h=0.63$ ではかなり大きな値となる。これはマウンドが低い場合 ($d/h > 0.63$) では通常の B_1 においては強大な波力が生じないことに対応している。

また、マウンドが高くなれば B_1 が少し増加しても波力は急増し、 B_1 の変化に敏感となる。また $B_1=0$ 付近においてもマウンドがさらに高くなれば衝撃的な碎波力が生じることがあると考えられる。

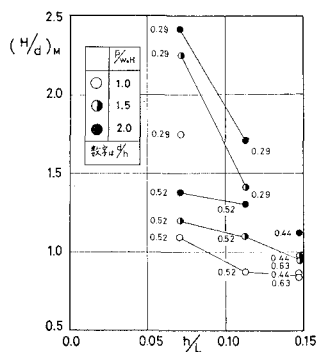


図-9 $(H/d)_M$ と波力

