

混成防波堤捨石部の形状効果に関する研究 (第2報)

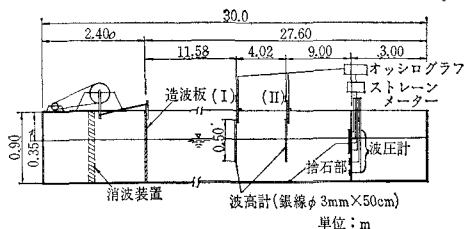
久保弘一*・玉井佐一**

1. 緒 言

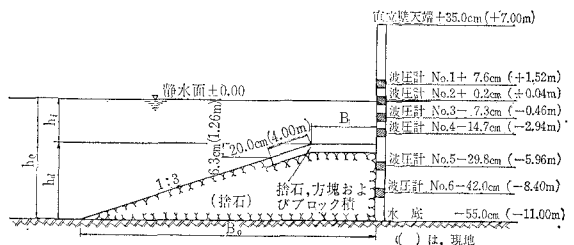
従来の混成防波堤に作用する砕波の波圧式は一般に波の特性と前面水深の変化に主眼がおかれているものが多い。しかし捨石部の天端が静水面下にあるような防波堤では捨石部の高さ、すなわち前面水深のみでなく、天端幅のいかんによっても砕波現象自体がかなり変化し、それによって直立部に働く波圧もいちじるしく変化する。したがって捨石部天端幅は防波堤設計に際しては非常に重要な要素であるにもかかわらず、これの合理的な決定方法はない。また捨石部天端が静水面上にある場合については、捨石部に保護された部分の波圧や直立壁面の波のはいりなどが捨石部天端幅によって変化することが考えられ、さらに天端を方塊または消波ブロック積とした場合にも、砕波状態や波圧にも大きな変化が見られることは明らかである。

この研究では捨石部天端幅を種々変化させて碎波形態の変化や波圧分布におよぼす影響などを調べて最適の天端幅を見出すとともに、天端に設置した捨石、ブロックなどが波圧および碎波形態にいかにか影響するかを検討した。つぎに捨石部天端が低い混成防波堤すなわち重複波領域において、波圧計算の基準となる水深のとり方についてもいまだ明確な解答が示されていない。水深をいかにとるかはいいかえれば直立部が捨石などで被覆された部分の波圧をどのように評価するかという問題に帰着するわけであり、以上の観点から筆者らは昭和 39 年 3 月より 1/20 の縮尺実験を実施し、その一部を土木学会第 20 回年次講演会において発表し、若干の結論を報告した。しかしこれらの実験は全水深 11 m、前面水深 2 m、4 m および 6 m、捨石天端幅 2 m、4 m、6 m および 10 m の場合で、波浪として周期 $T=5\sim 12$ sec、波高 $1.2\sim 3.0$ m

図-1 実験装置



図一2 波圧計取付位置



表—1 波浪，構造物の諸元

全水深 h_0	8.5 m, 11.0 m, 11.5 m
前面水深 h_1	11.0 m, 6.0 m, 4.0 m, 3.0 m, 2.0 m, 1.5 m, 1.0 m, 0, -1.0 m
捨石天端高 h_d	直立堤, 5.0 m, 7.0 m, 9.0 m, 11.0 m, 12.0 m
捨石天端幅 B	1.0 m, 2.0 m, 2.4 m, 3.0 m, 4.0 m, 4.2 m, 4.7 m, 6.0 m, 8.0 m, 10.0 m
港外側のり面勾配	1 : 3
周期 T	5 sec~12 sec
波高 H	1.20 m~3.50 m
波長 L	38.6 m~120.0 m
波形勾配 H/L	0.010~0.077

* 正会員 大阪工業大学 助教授 土木工学科

**** 正会員** 大阪工業大学 講師 土木工学科

る。なお現地と模型との縮尺は 1/20 とした。

3. 実験結果の考察

(1) 捨石部天端幅 B の影響

a) 捨石部天端が静水面下にある場合 各種実験のうち代表的な場合における最大同時波圧分布を示すと図-3 (a), (b), (c), (d) および 図-4 (a), (b) のごとくである。図にはマウンドが捨石(砂利)のみの場合と天端に方塊, 中空三脚ブロックおよび中空三角ブロックを設置した場合(図-2 参照)の測定結果を示した。マウンドが捨石, 方塊および中空三脚ブロックの場合, 波圧強度 $p_{\max}$ および波圧合力 P は波形勾配が大きい範囲

図-3 (a) 最大同時波圧分布

$T=6.0 \text{ sec}$ $H=2.87 \text{ m}$ $L=48.97 \text{ m}$ $H/L=0.059$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=10.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=4.7 \text{ t/m}^2$ $P=30.14 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=7.8 \text{ t/m}^2$ $P=26.52 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=3.5 \text{ t/m}^2$ $P=18.70 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=4.3 \text{ t/m}^2$ $P=21.64 \text{ t/m}$

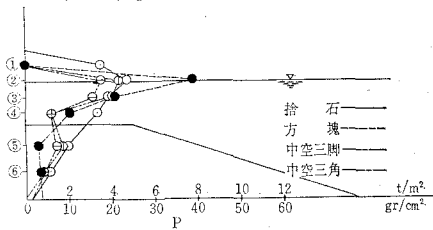


図-3 (b) 最大同時波圧分布

$T=6.0 \text{ sec}$ $H=2.87 \text{ m}$ $L=48.97 \text{ m}$ $H/L=0.059$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=6.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=12.6 \text{ t/m}^2$ $P=79.70 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=9.5 \text{ t/m}^2$ $P=39.11 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=4.4 \text{ t/m}^2$ $P=23.83 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=3.3 \text{ t/m}^2$ $P=16.99 \text{ t/m}$

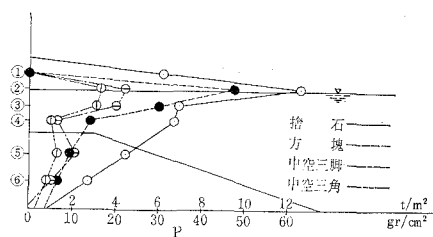


図-3 (c) 最大同時波圧分布

$T=6.0 \text{ sec}$ $H=2.87 \text{ m}$ $L=48.97 \text{ m}$ $H/L=0.059$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=4.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=5.8 \text{ t/m}^2$ $P=48.41 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=6.7 \text{ t/m}^2$ $P=32.29 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=4.6 \text{ t/m}^2$ $P=22.16 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=3.4 \text{ t/m}^2$ $P=18.00 \text{ t/m}$

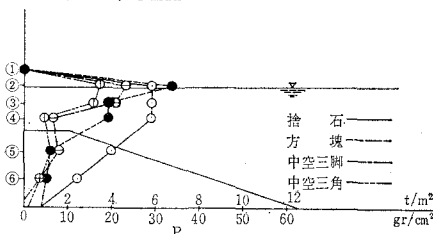


図-3 (d) 最大同時波圧分布

$T=6.0 \text{ sec}$ $H=2.87 \text{ m}$ $L=48.97 \text{ m}$ $H/L=0.059$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=2.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=4.9 \text{ t/m}^2$ $P=39.84 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=4.0 \text{ t/m}^2$ $P=19.29 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=3.2 \text{ t/m}^2$ $P=18.67 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=3.8 \text{ t/m}^2$ $P=19.00 \text{ t/m}$

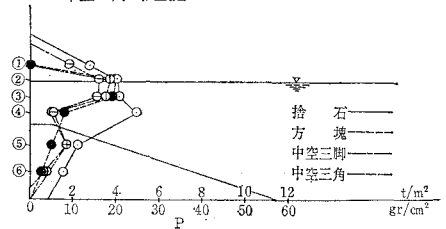


図-4 (a) 最大同時波圧分布

$T=5.0 \text{ sec}$ $H=2.69 \text{ m}$ $L=38.66 \text{ m}$ $H/L=0.070$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=4.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=10.3 \text{ t/m}^2$ $P=53.05 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=6.6 \text{ t/m}^2$ $P=30.34 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=3.6 \text{ t/m}^2$ $P=15.35 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=2.5 \text{ t/m}^2$ $P=13.82 \text{ t/m}$

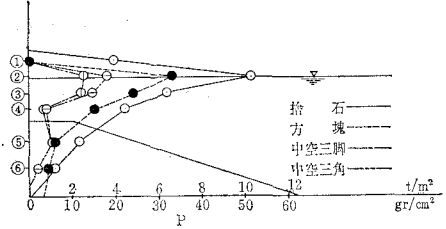
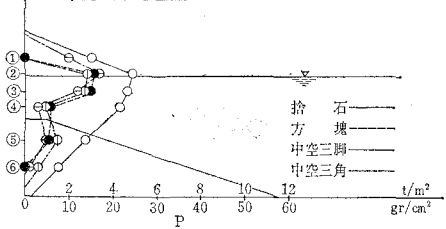


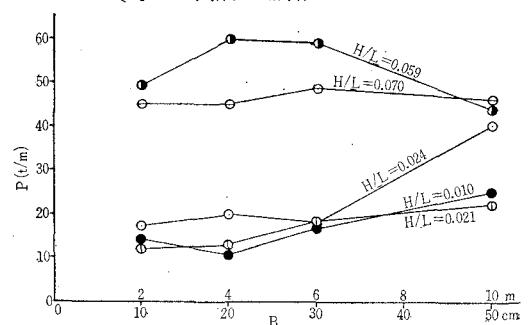
図-4 (b) 最大同時波圧分布

$T=5.0 \text{ sec}$ $H=2.69 \text{ m}$ $L=38.66 \text{ m}$ $H/L=0.070$
 $h_0=11.0 \text{ m}$ $h_1=4.0 \text{ m}$ $B=2.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{\max}=4.8 \text{ t/m}^2$ $P=40.91 \text{ t/m}$
 方塊 $p_{\max}=3.2 \text{ t/m}^2$ $P=12.98 \text{ t/m}$
 中空三脚 $p_{\max}=3.3 \text{ t/m}^2$ $P=17.18 \text{ t/m}$
 中空三角 $p_{\max}=2.8 \text{ t/m}^2$ $P=15.62 \text{ t/m}$



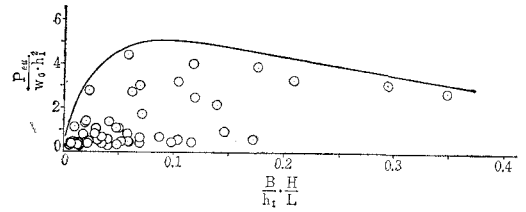
($H/L=0.059 \sim 0.070$) では天端幅 $B=4 \sim 6 \text{ m}$ の場合が他の天端幅の場合と比較して大きな値を示している。図-5 はマウンドが捨石のみの場合における天端幅 B と

図-5 マウンド天端幅 B と 波圧合力 P との関係 ($h_1=2 \text{ m}$, 捨石の場合)



波圧合力 P との関係を示したもので、上記の傾向をよく表わしている。この傾向は波形勾配が小さい範囲 ($H/L=0.010\sim0.024$) では明確ではなくかえって幅 B が大きくなるにしたがって P は増大する。これは大きな天端幅を与えてかえって砕波を助長すると考えられる。波形勾配が大きい範囲では天端幅の影響は顕著である。現象的に見れば幅 B が小さい場合には波浪はあまり変形を受けずに直立壁に作用すること、および前面水深が比較的深い場合には捨石のり面上の水深が影響し重複波の要素が強くなる。つぎに幅 B に波の特性に関連させた $B/h_1 \cdot H/L$ と最大同時波圧の合力 (ただし、捨石部天端以上に働く波圧合力) を無次元化した $P_{eu}/w_0 h_1^2$ との関係を示すと 図-6 (a), (b), (c), (d) のごとくである。これらの図によると捨石の場合 $B/h_1 \cdot H/L \approx 0.2$ 付近で $P_{eu}/w_0 h_1^2$ が最大になり、方塊の場合 $B/h_1 \cdot H/L \approx 0.1$, 中空三角ブロックの場合 $B/h_1 \cdot H/L=0.15$, 中空

図-6 (d) $\frac{P_{eu}}{w_0 \cdot h_1^2}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(中空三角ブロックの場合)



三角ブロックにおいては $B/h_1 \cdot H/L=0.08$ で $P_{eu}/w_0 h_1^2$ の値が最大となり、 $B/h_1 \cdot H/L$ の値が上記の値より大きくなると $P_{eu}/w_0 h_1^2$ は減少の傾向を示し、また $B/h_1 \cdot H/L$ の値が 0 に近づくとも $P_{eu}/w_0 h_1^2$ は減少して重複波圧に近づくことが認められる。さらに波圧強度を無次元化した $p_{max}/w_0 h_0$ と $B/h_1 \cdot H/L$ との関係を図示すると 図-7 (a), (b), (c), (d) のごとくであり、図-6 の波圧合力をもって示した場合とほとんど同じ傾向を示している。

図-6 (a) $\frac{P_{eu}}{w_0 \cdot h_1^2}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係 (捨石の場合)

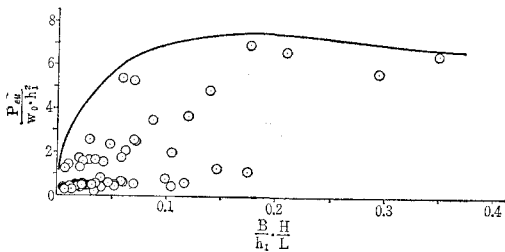


図-6 (b) $\frac{P_{eu}}{w_0 \cdot h_1^2}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係 (方塊の場合)

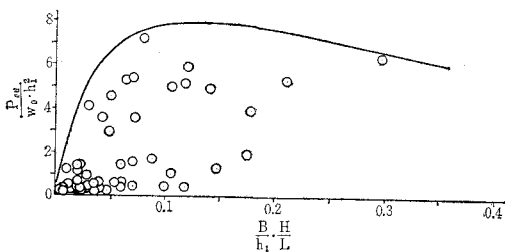


図-6 (c) $\frac{P_{eu}}{w_0 \cdot h_1}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(中空三角ブロックの場合)

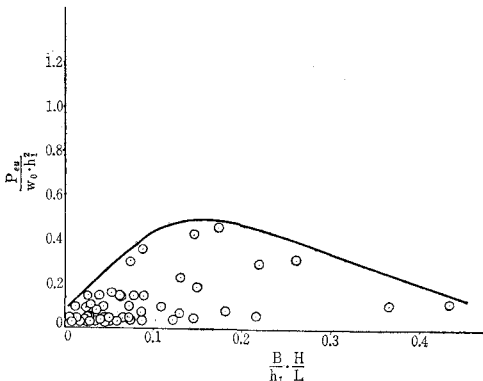


図-8 より明らかなように捨石部天端が上記 (a) の場合より高くなって h_1 が 0 に近づくとも直立壁前面におかれた捨石の消波効果により、波圧強度および波圧合力の減少が

図-7 (a) $\frac{p_{max}}{w_0 \cdot h_0}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(捨石積みの場合)

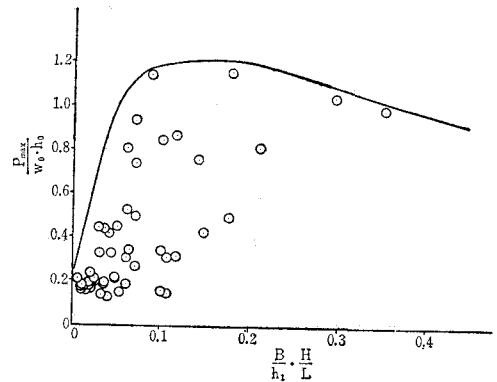


図-7 (b) $\frac{p_{max}}{w_0 \cdot h_0}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(方塊積みの場合)

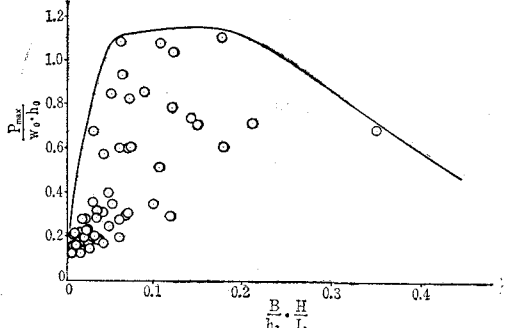


図-7 (c) $\frac{P_{max}}{w_0 \cdot h_0}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(中空三脚ブロックの場合)

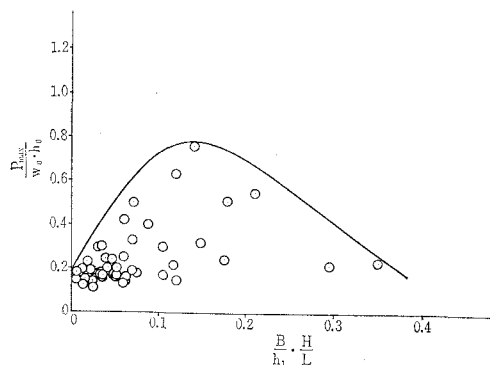


図-7 (d) $\frac{P_{max}}{w_0 \cdot h_0}$ と $\frac{B}{h_1} \cdot \frac{H}{L}$ との関係
(中空三角ブロックの場合)

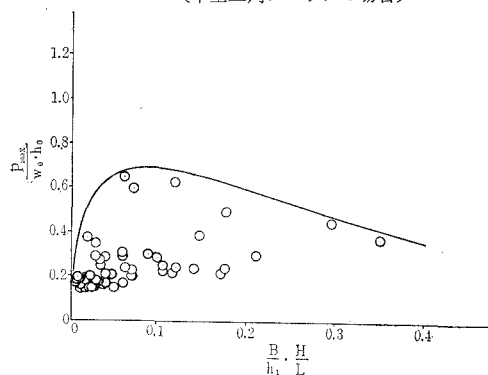


図-8 最大同時波圧分布

$T = 6.0 \text{ sec}$ $H = 2.44 \text{ m}$ $L = 51.03 \text{ m}$ $H/L = 0.048$
 $h_0 = 11.0 \text{ m}$ $h_1 = 0$ $B = 1.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{max} = 4.57 \text{ t/m}^2$ $P = 21.08 \text{ t/m}$

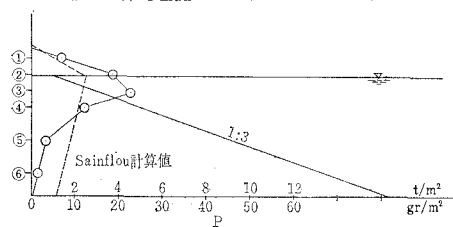


図-9 マウンド天端幅 B と波圧強度 p_{max} との関係
($h_1 = 0$, 捨石の場合)

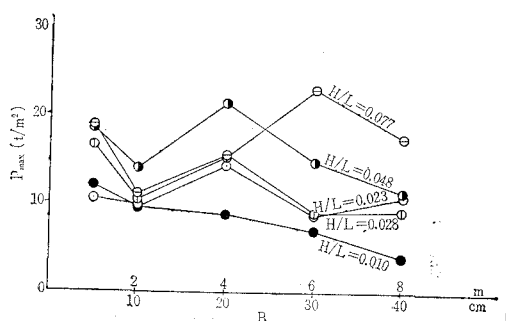
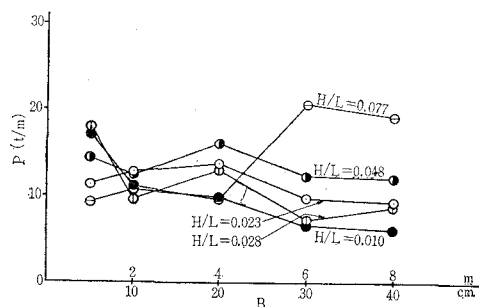


図-10 マウンド天端幅 B と波圧合力 P との関係
($h_1 = 0$, 捨石の場合)



みられる。したがって天端幅 B の影響については B が小さいほど波圧は大きく、 B が大きいほど、波圧は小さくなるのが考えられるが、図-9 および 10 より明らかに、波形勾配が小さい範囲 ($H/L = 0.010 \sim 0.048$) においては、天端幅 B が長くなると波圧は減少の傾向を示すが、波形勾配が急な場合 ($H/L \approx 0.077$) には天端幅 B が長くなると ($B \approx 6.0 \text{ m}$) 波圧は増大の傾向を示す。これは天端幅が大きくなるとこの場合かえって碎波を助長するためであると考えられる。いま $T = 5 \text{ sec}$, $H/L = 0.077$ および $T = 6 \text{ sec}$, $H/L = 0.048$ の場合について Sainflou 式の合力 P_s と実験値合力 P とを比較するとそれぞれ $P/P_s = 1/1.3 \sim 1/2.8$, および $1/1.1 \sim 1/2.0$ となる。

c) 捨石部天端が静水面上にある場合 図-11 に一例を示したごとく波圧は非常に減少する。天端幅 B と波圧強度 p_{max} との関係を図示すると 図-12 のごとくで、天端幅 B が大きいほど p_{max} は小さく、捨石による消波がいちじるしい。 $T_p = 5 \text{ sec}$, $H/L = 0.077$ および $T_p = 6 \text{ sec}$, $H/L = 0.048$ における Sainflou 式の合力 P_s

図-11 最大同時波圧分布

$T = 6.0 \text{ sec}$ $H = 2.44 \text{ m}$ $L = 51.03 \text{ m}$ $H/L = 0.048$
 $h_0 = 11.0 \text{ m}$ $h_1 = 0.0 \text{ m}$ $B = 1.0 \text{ m}$
 捨石 $p_{max} = 1.61 \text{ t/m}^2$ $P = 7.96 \text{ t/m}$

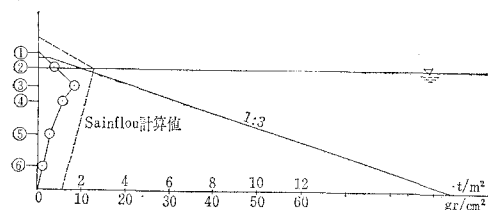
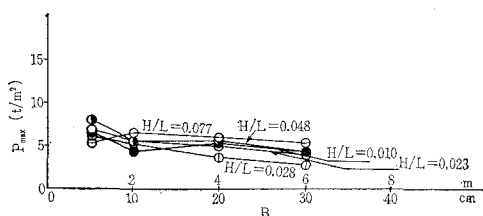


図-12 マウンド天端幅 B と波圧強度 p_{max} との関係
($h_1 = -1 \text{ m}$, 捨石の場合)



と実験値合力 P の比はそれぞれ $P/P_s=1/5\sim 1/10$, および $P/P_s=1/3\sim 1/8$ である。したがって砕波の衝撃をうける混成防波堤の捨石部の天端はでき得る限り静水面上にあるようにするとともに、天端幅についても、設計時に十分考慮する必要がある。

(2) ブロックの消波効果

直立壁に作用する波圧を軽減するには、上述のように捨石部天端を静水面上にとることが有利であるが、しかしやむを得ず捨石部天端を静水面下にとる場合については極力消波ブロックを使用することが望ましい。すなわち消波ブロックを設置した場合の波圧の減殺効果については図-6 (a), (b), (c), (d) で明らかなように波圧合力 P は 40~60% 減少している。また図-3 および 4 に示したように最大波圧分布が消波ブロックの効果によって砕波型から重複波型の波圧分布に遷移している場合が多いことなどに消波ブロックの利点を見出すことができる。

(3) 直立壁前面の被覆部の波圧

前面が捨石などで被覆されている直立壁の部分に働く波圧は図-3, 4, 8 および 11 のごとくである。図-3 および 4 の捨石部空げき率は 50% であり、図-8 および 11 の捨石部空げき率は 40% である。図-3, 4 と 8, 11 とを比較すると、空げき率 40~50% の範囲では直立壁に作用する波圧にはあまり差異はない。しかしいづれにしても被覆による波圧の減少効果は少ない。特に消波効果が少ない捨石および方塊積み堤に砕波が作用する場合にはなおさらである。

いま捨石で被覆された部分の波圧合力 P_l (捨石部天端以下の波圧合力) を Sainflou 式による計算値 (被覆部分の波圧合力) P_{sl} と比較すると表-2 のとおりで、重複波領域では実験値と計算値とが比較的近似するが、砕波領域では計算値より大きく、3~4 倍に達する場合もある。いいかえれば上部に砕波が作用すれば空げき率 40~50% の範囲では被覆部分にも衝撃的な要素をもつ波圧が作用することになる。もちろんこれは捨石部天端が静水面下にある場合で、捨石部天端が静水面上にあるときは被覆部分の波圧も非常に減少する。

表-2 P_l/P_{sl} の値 ($h_0=11$ m)

h_d T	12 m	11 m	9 m	7 m	5 m
12 sec	—	—	0.30~0.85	0.57~0.72	0.72~0.85
10 sec	—	—	0.41~1.30	0.67~0.74	0.64~0.69
8 sec	—	—	0.63~1.08	0.59~0.98	0.76~0.88
6 sec	0.10~0.20	0.53~1.10	1.20~2.73	0.83~1.90	0.46~0.89
5 sec	0.12~0.33	0.60~1.15	1.40~1.75	0.69~3.90	2.66~3.46

以上著者らは混成防波堤捨石部の形状が波圧におよぼす影響について実験を行なった結果つぎのような結論を得た。

(1) 捨石部天端が静水面下にある場合の砕波の波圧強度および波圧合力はともに天端幅 $B=4\sim 6$ m で最も大きい。波形勾配が小さい範囲 ($H/L=0.010\sim 0.024$) では天端幅が大きくなると波圧合力はやや増大する。すなわち天端幅が大きくなるにしたがって砕波を助長する傾向がある。

(2) 捨石部天端が静水面下にある場合 $B/h_1\cdot H/L$ と $P_{eu}/\omega_0 h_1^2$ との関係は、 $B/h_1\cdot H/L$ がある一定値のとき最大になる傾向を有している。すなわち捨石堤の場合 $B/h_1\cdot H/L \approx 0.2$, 方塊積みの場合 $B/h_1\cdot H/L \approx 0.1$, 中空三角ブロック積みの場合 $B/h_1\cdot H/L \approx 0.15$, 中空三角ブロック積みでは $B/h_1\cdot H/L=0.08$ で $P_{eu}/\omega_0 h_1^2$ は最大値をとる $B/h_1\cdot H/L$ が上記の各値より大きくなると $P_{eu}/\omega_0 h_1^2$ は減少の傾向があり、 $B/h_1\cdot H/L$ の値が 0 に近づくとも波圧は重複波に近づく。

(3) 捨石部天端が静水面にある時、短周期の波 ($T=5\sim 6$ sec) において、波圧合力は Sainflou 式による計算値の 36~88% に減少する。

(4) 捨石部天端が静水面上にある場合は捨石等による波圧減殺効果がいちじるしく、波圧合力は $T=5$ sec, $H/L=0.077$ および $T=6$ sec, $H/L=0.048$ の波において 10~20% および 13~33% に減少する。また波圧分布型も重複波の分布型を示す。

(5) 混成防波堤の設計においては、砕波現象下ではでき得る限り、捨石部天端は静水面上にとり、天端幅を広くとることが波圧の面からは望ましい。なおまた捨石部天端を静水面下深い位置にとって重複波になるようにとることが有利である。また重複波が作用するような条件下では捨石部天端を高くして砕波を助長するようなことはさけるべきである。

(6) 捨石部天端が静水面下にあつて、捨石や消波ブロックなどで被覆された部分の波圧は、重複波では、前面の被覆による影響は直立堤の場合と比較してあまり変わらない。したがって混成堤の場合の重複波の波圧計算においてはのり先水深を波圧計算の基準にとり、被覆部分も計算値程度の波圧分布を考慮すべきである。砕波の場合には被覆部分の波圧は無視すべきでなく、考へうる砕波条件に応じて、重複波圧の 2~4 倍程度まで考慮すべきであろう。

(7) 被覆部分の直立壁に働く波圧は前面の空げき率が 40~50% の範囲では、空げき率の変動による波圧の差異はあまりない。

4. 結 論