

・	正会員	修(工)	東亜設計(株)	第二土木本部	港湾・海岸部
・	正会員		東京電力(株)	技術開発研究所	建設技術G
・			東京電力(株)	技術開発研究所	建設技術G
・	正会員		東亜設計(株)	第二土木本部	港湾・海岸部

表-2 規則波計算ケース ($H=6.46\text{ m}$, $T=16\text{ s}$)

case No.	天端ブロック並び個数 M	上部工幅 B (m)	上部工天端高 h_e (m)	コア ロック	ガンマ エル	基礎 捨石	消波・被覆ブロック 基礎捨石		比較 実験 対象	
				空隙率 e			慣性力 係数 C_M	抗力 係数 C_D		
1-1	1	7.00	4.70	0.60	0.50	0.40	0.4	1.0	コア ロック 傾斜堤	
1-2							2.0			
1-3							1.2			0.5
1-4										1.0
1-5										1.5
1-6	2.0									
1-7	1.0									
1-8	1.5									
1-9	2.0									
1-10	1.0									
1-11	1.5									
1-12	2.0									
2-1	1			0.50	1.2	1.0				
2-2				0.55						
2-3				0.60						
2-4				0.70						

表-3 不規則波計算ケース ($H_{1/3}=6.46\text{ m}$, $T_{1/3}=16\text{ s}$)

case No.	天端ブロック並び個数 M	上部工幅 B (m)	上部工天端高 h_e (m)	パラベット天端高 h_p (m)	実験との比較項目		比較実験対象	計算時間 (s)
					上部工波力	伝達率及び越流量		
3-1	0	7.00	3.90	—	○	○	アクロボッド傾斜堤	100 $T_{1/3}$
3-2	1							
3-3	2							
3-4	1	12.15		5.20	—			62 $T_{1/3}$
3-5				6.50				100 $T_{1/3}$
3-6				—				

総延長1,800 mとした。また1/20および1/100の海底勾配を設置し、水深20 mの沖側から造波ソースにより造波し、堤体位置で波高検定を行った。発生波は、修正Bretschneider-光易スペクトルを目標波とし、不規則波生成方法は中野ら(2001)に依った。目標値 $H_{1/3}=6.46\text{ m}$, $T_{1/3}=16\text{ s}$ に対し、検定値 $H_{1/3}=6.66\text{ m}$, $T_{1/3}=17.0\text{ s}$ で6.25%の相違であった。また水路内の残留水位を完全には除去できなかったため、堤体設置水深領域における水量増分から水位時系列を補正した。 Δz は、海底勾配部1.0 m, その他を0.5 mとし、 Δx は減衰帯部2.0 m, 水路部1.0 mとした。計算時間は100 $T_{1/3}$ としたが case 3-5 は計算途中で発散したため62 $T_{1/3}$ まで処理した。

3. 消波ブロック被覆傾斜堤の波力特性

(1) 上部工に作用する波力の形態

図-3にコアブロック傾斜堤上部工各面波力時系列の規則波実験値と case 1-4 ($C_M=1.2$, $C_D=1.0$, 天端ブロック1個並び)の計算値の比較を示す。滑動合成波力 F_s は前面波力 F_H と底面波力 F_U から次式で求めた。

$$F_s = F_H + \mu F_U \quad (\mu: \text{静止摩擦係数}=0.6)$$

実験は、まず前面波力において衝撃的ピークが現れ最大となり、ほぼ同時に滑動合成波力が最大となる。このとき天端面波力はほぼ零であり、前面波力のピークが下がり始めて $t/T \approx 0.1$ 遅れて天端面波力が最大となる傾向にある。また底面波力は波形が丸く最大値が明瞭でな

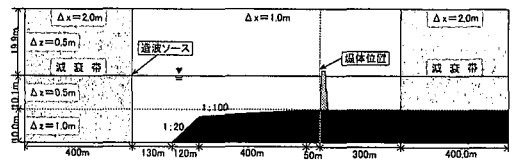


図-2 計算領域

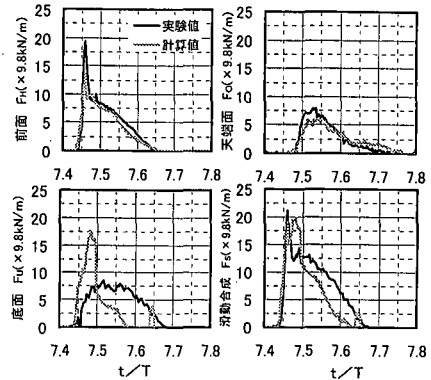


図-3 上部工波力時系列の比較 (case 1-4)

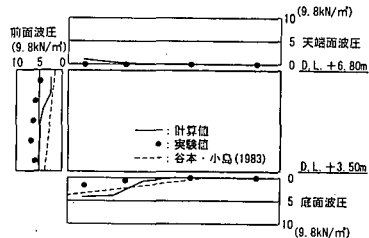


図-4 前面波力最大時同時波圧分布 (case 1-4)

い。計算は、底面波力は前面波力より $t/T \approx 0.25$ 遅れて最大となり、実験の丸い波形に比べ作用時間も短く、切り立った波形となっているが、前面波力および天端面波力はピーク位置および波形とも実験と良く一致している。滑動合成波力は底面波力の影響で2ピーク現れているが前面波力とほぼ同時にピークが現れる波形などは実験と良く一致している。図-4に図-3と同ケースにおける前面波力最大時の各面同時波圧分布を示す。また図には谷本・小島式(1983)を併記した。計算は、上部工の天端に向けて前面波圧が小さくなるが、中段から下部における分布形状は実験と良く一致する。谷本・小島式は、実験および計算より小さい。これは谷本・小島式がテトラポッド2層積みであるのに対し、本実験および計算ではコアブロック1層積みであるためと考えられる。底面波圧は実験と計算で分布形状は良く一致しており、谷本・小島式は実験と計算の中間程度にある。

(2) 消波ブロック法面および内部の流速状況

図-5に図-3と同ケースにおける流速ベクトルを示

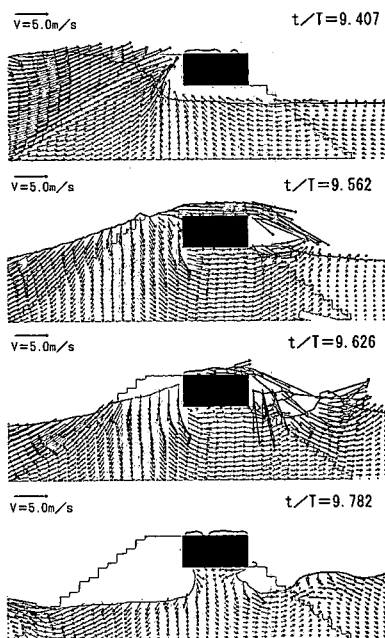


図-5 流速ベクトル (case 1-4)

す。沖側ブロック法面を早い流速で波が遡上し、それに追従するようにブロック内部の水位がやや遅れて上昇する ($t/T=9.407$)。その後ブロック内部の波が上部工に衝突し、堤体内部を透過する波とそれより早い流速で遡上してきた上部工を越流する流れが生じ ($t/T=9.562$)、越波した波が堤体背後に突っ込み、透過波と複雑に干渉している様子がわかる。このとき沖側法面は早い速度で波が引いているのが確認される ($t/T=9.626$)。その後水位が下降するが、堤体内部上部工下側の水位は応答が遅れている様子が確認される ($t/T=9.782$)。ブロック安定性を検討するにはこのような流速ベクトルの状況を把握することが重要である。図-6に水平流速時系列計算結果を示す。左図では静水面付近における法面と捨石内部の流速を、右図では、沖側法面における水深位置の相違を比較した。静水面における流速を比較すると、沖側法面のピーク値が最も大きく、捨石内部のピーク値は沖側法面の約半分程度で最も小さい。岸側法面は、堤体の透過波による最初のピークと越波水塊によるピークの2つであるが、堤体内部のピーク値よりやや大きい。沖側法面に着目するとボトム値はピーク値より大きい。右図での水深位置の比較においても、水深位置によるピーク値の相違は小さいのに対し、静水面でのボトム値は法先、水深中央部のそれより2倍程度大きい。よって堤体ブロック安定性を検討するには、静水面位置法面での引波時の流速が最も大きいことに着目する必要がある。

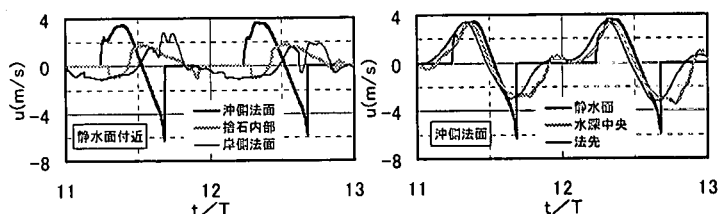
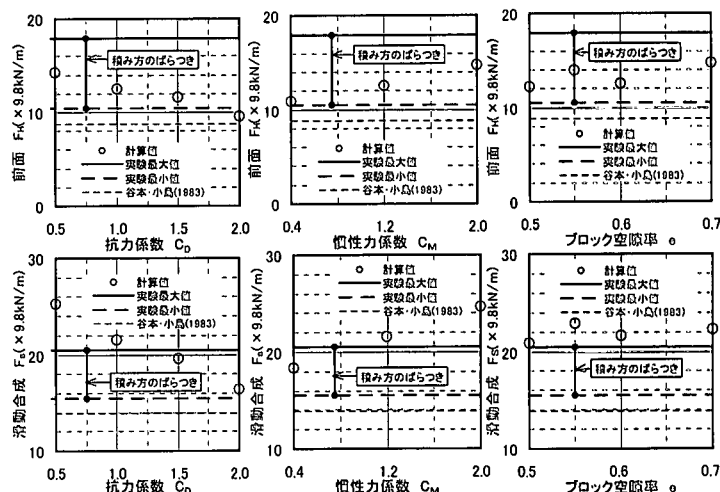
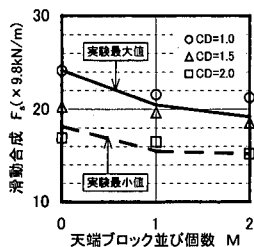


図-6 水平流速時系列計算結果 (case 1-4)

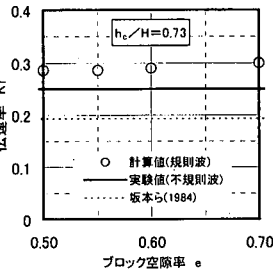
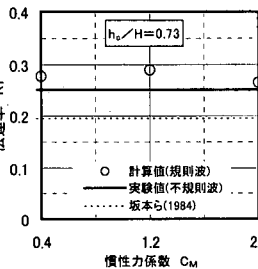
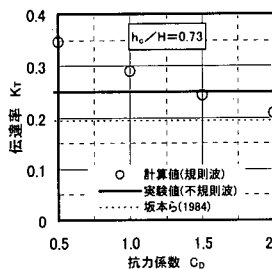
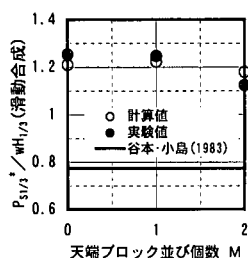
図-7 $F \sim C_M, C_D, e$ 関係 (case 1-1~1-6, 2-1~2-4)

(3) C_M, C_D, e のパラメトリックスタディ

図-7に天端ブロック並び個数 $M=1$ における前面波力 F_H および滑動合成波力 F_s と慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D 、ブロック空隙率 e の関係を示す。左図は C_M を一定 ($=1.2$) とした C_D の変化を、中央は C_D を一定 ($=1.0$) とした C_M の変化を示し、 C_M, C_D は、堤体全体 (消波ブロック、被覆ブロック、基礎捨石) を一律変化させ、空隙率は固定とした (case 1-1~1-6)。右図は消波ブロックおよび被覆ブロックの空隙率を変化させ、捨石空隙率および堤体全体の C_M, C_D は一定とした (case 2-1~2-4)。実験ではブロックの積み方を変えた複数のケースを実施し、図には積み方の相違による実験最大値・最小値および谷本・小島式を示した。前面波力および滑動合成波力のいずれも抗力係数 C_D と共に減少する傾向にある。実験最大値と一致する C_D は着目する波力により異なるが、滑動合成波力では $C_D=1.0$ が最も実験最大値と一致する。このとき前面波力計算値は実験最大値と最小値の間にある。一方、前面波力および滑動合成波力は慣性力係数 C_M と共に増加する傾向にあり、 $C_M=1.2$ において最も良く実験最大値と一致する。このとき同様に前面波力計算値は実験最大値と最小値の間にある。これらのことからブロック空隙率による検討では $C_M=1.2, C_D=1.0$ に一律設定した。前面波力、滑動合成波力ともブロック空隙率の変化による波力値の変化は小さく、前面波力

図-8 $F_s \sim M$ 関係

(case 1-4~1-12)

図-10 $K_T \sim C_M, C_D, e$ 関係 (case 1-1~1-6, 2-1~2-4)図-9 平均波力 $\sim M$ 関係

(case 3-1~3-3)

は実験値の中間を、滑動合成波力は実験最大値付近を最大で $2t$ (19.6 kN) 程度の変動であった。よって、消波・被覆ブロックの空隙率としては各ブロックの標準値を採用すれば良いことがわかる。以上より、堤体全体(ブロック、基礎捨石)のポーラス値としては、

$C_M=1.2$, $C_D=1.0$ に設定すれば滑動合成波力と良く一致し、空隙率は各ブロックの標準値を採用すれば良いと考えられる。

(4) 天端ブロック並び個数の影響

図-8 に滑動合成波力 F_s と天端ブロック並び個数 M の関係を示す。図には実験最大・最小値および堤体全体の抗力係数 C_D を変化させたケースも示した。実験値・計算値ともブロック個数 M と共に滑動合成波力がやや減少するが $M=1, 2$ では変化は小さい。また $C_D=1.0$ の計算値は実験最大値と良く一致し、 $C_D=1.5, 2.0$ の計算値は M による滑動合成波力の変化はほとんどない。これらのことから $C_D=1.0$ に設定すれば、天端並び個数による滑動合成波力を精度良く再現できると考えられる。

(5) 不規則波による波力特性

図-9 に不規則波による滑動合成波力と天端ブロック並び個数 M の関係を示す (case 3-1~3-3)。ここで前述 3. (3) より $C_M=1.2$, $C_D=1.0$ に設定し、空隙率は表-1 における標準値を用いた。実験対象はアクロポッド傾斜堤矩形上部工で、天端高 $h_c=3.9$ m である。滑動合成波力 $F_{s1/3}$ から平均波力 $P_{s1/3}=F_{s1/3}/d^*$ を求めた。 d^* は上部工高である。滑動合成波力は、規則波の結果と同様にブロック個数 M による変化は小さく、計算/実験=0.97~1.05 と良く一致している。これより、規則波におけるパラメトリックスタディにより設定したポーラス値並びに空隙率を用いて不規則波解析に適用することにより、滑動合成波力を精度良く計算できることが確認できた。

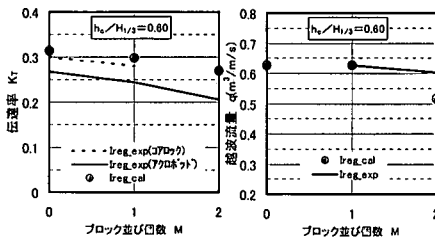
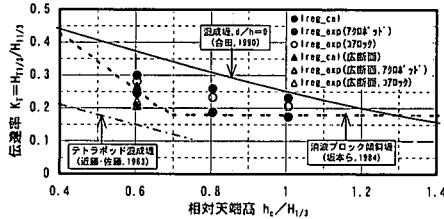
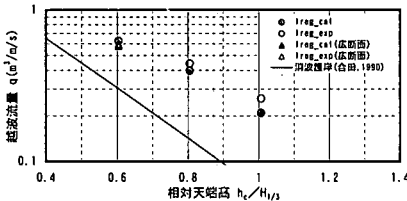
4. 消波ブロック被覆傾斜堤の越波伝達波特性

(1) C_M, C_D, e のパラメトリックスタディ

図-10 に天端ブロック並び個数 $M=1$ における波高伝達率 K_T と慣性力係数 C_M , 抗力係数 C_D , ブロック空隙率 e の関係を示す。図には不規則波実験値並びに表-1 のブロック諸元による坂本ら (1983) の算定値も示した。不規則波実験値は、相対天端高 $h_c/H_{1/3}=0.60$ (case 3-2) と $h_c/H_{1/3}=0.81$ (case 3-4) のコアロック実験値から $h_c/H_{1/3}=0.73$ の値を内挿して求めた。波高伝達率は C_D と共に減少し、波力と同様の傾向を示した。また坂本ら (1983) による算定式は相対天端高 $h_c/H=0.73$ では、非越波の値となるため、計算値および実験値に比べてやや小さめとなった。不規則波実験値との比較では、 $C_D=1.5$ が実験値と最も近いが、 $C_D=1.0$ においても、計算/実験=1.15 である。 C_M による変化は波力の増加傾向と異なり、波高伝達率の変化は 0.03 程度しかない。ブロック空隙率による波高伝達率変化は 0.01 程度しかなく波力と同様の傾向を示した。これより波力と同様にポーラス値は、 $C_M=1.2$, $C_D=1.0$, 空隙率を表-1 の標準値に設定すれば波高伝達率を精度良く再現できると考えられる。

(2) 天端ブロック並び個数の影響

図-11 に不規則波による波高伝達率 K_T , 越波流量 q と天端ブロック並び個数 M との関係を示す。図には不規則波実験・計算値を示し、計算でのポーラス値は前述 3. (3) の波力設定値に合わせた。またコアロックの実験値を参考に示した。波高伝達率計算値は、ブロック並び個数 $M=0, 1$ で大きな相違はないが、 $M=2$ で低下する傾向にあり、アクロポッド実験値と同様な傾向を示した。波高伝達率実験値は、アクロポッドがコアロックより波高伝達率が 0.05 程度小さく、計算/実験 (アクロポッド)=1.17~1.31 である。アクロポッド、コアロックとも 1 層積みであり、波高伝達率は大きな相違がないものと想定されるが、今回の計算では、コアロック実験値と一致しており、計算/実験 (コアロック)=1.05~1.07 である。波高伝達率については、多少精度は落ちるものの実

図-11 $K_T, q \sim M$ 関係 (case 3-1~3-3)図-12 $K_T \sim h_c/H_{1/3}$ 関係 (case 3-2, 3-4~3-6)図-13 $q \sim h_c/H_{1/3}$ 関係 (case 3-2, 3-4~3-6)

験精度を勘案すると比較的良く一致するものと考えられる。また越波流量計算値は、波高伝達率と同様に $M=2$ の値が $M=0, 1$ に比べやや減少し、計算/実験 $= 0.86 \sim 1.00$ で良く一致している。

(3) 不規則波による越波・伝達率特性および評価

図-12 に不規則波による波高伝達率 K_T と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ の関係を、図-13 に越波流量 q と $h_c/H_{1/3}$ の関係を示す。図にはパラベット天端高を変えたケース (case 3-2, 3-4~3-5) と上部工矩形断面 (case 3-6) の実験値および計算値と既往算定式を示した。坂本ら (1984) は狭断面での算定値である。広断面の波高伝達率は、実験・計算とも狭断面より伝達率は小さくなり、計算/実験 $= 1.21 \sim 1.28$ である。これは広断面では、狭断面に比べて堤体内を透過する波が減衰するためと推察される。狭断面に比べ、広断面のアクロポッドとコアブロックの波高伝達率実験値はほぼ同程度の値を示した。坂本ら (1984) の算定値は $h_c/H_{1/3} > 0.7$ で非越波の値となり、狭断面のアクロポッド実験値はこれに近いが、計算・実験に比べやや小さめの値を与えている。一方、 $d/h=0$ とした合田 (1990) は全体的に大きめの値となり、テトラポッド混成堤 (近藤・佐藤, 1964) は、最も小さい伝達率を

与える。越波流量においては相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が大きくなると越波流量が減少する傾向が再現できており、計算と実験は良く一致する。広断面における越波流量は波高伝達率と異なり、狭断面より僅かに小さくなる程度で、堤体幅の相違による越波流量の影響は小さいことが実験・計算とも再現されている。また合田 (1990) の算定図は、実験・計算より小さくなった。これより $C_M=1.2$, $C_D=1.0$, ブロック空隙率は標準値を用いることにより、不規則波での波高伝達率、越波流量を精度良く再現でき、その適用性が確認された。

5. まとめ

消波ブロック被覆傾斜堤を対象に、数値波動水路 (CADMAS-SURF, 2001) を用いて規則波・不規則波解析を行い、実験値との比較からその適用性を検討した。

本研究で得られた成果を以下に示す。

①規則波解析のパラメトリックスタディにより傾斜堤上部工に作用する波力は堤体の慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D により変化し、ブロック空隙率やブロック天端個数による変化は小さいことが確認された。また滑動合成波力に着目すると $C_M=1.2$, $C_D=1.0$, ブロック空隙率は標準値を用いることにより実験値と最も良く一致した。

②これらのポラス値、ブロック空隙率を用いて不規則波解析に適用した結果、波力有義値、波高伝達率、越波流量は実験値と良く一致し、その適用性を確認した。

③不規則波解析では波数とともに水量が増加するため、水位上昇の補正方法が今後の課題である。

参考文献

- 沿岸開発技術研究センター編 (2001): 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296 p.
- 川俣 奨・関本恒浩・植木一浩・渡辺敏幸・阪内茂記 (1998): 消波ブロック 1 層被覆式傾斜堤のパラベット付き上部工に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 766-770.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 78-125.
- 近藤徹郎・佐藤 功 (1963): 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第 117 号, pp. 1-15.
- 榊山 勉・鹿島遼一・阿部直行 (1991): 傾斜堤周辺の波動場へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 546-550.
- 坂本洋一・宮地洋輔・上西隆広・武田英章 (1984): 傾斜堤の水利機能に関する実験的研究, 北海道開発局土木試験所報告, 第 82 号, 31 p.
- 谷本勝利・小島明史 (1983): 傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力, 港湾技術研究所資料, No. 450, 32 p.
- 中野 修・興野俊也・藤井直樹・榊山 勉・大熊義夫 (2001): 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 731-735.
- 沼田 淳 (1975): ブロック堤の消波効果に関する実験的研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 501-505.