

規則波・不規則波による傾斜堤の波力・越波伝達波への数値波動水路の適用性について

中野 修*・興野俊也**・安田勝則***・藤井直樹****

本研究では、消波ブロック被覆式傾斜堤を対象に、数値波動水路(CADMAS-SURF)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上部工波力、越波伝達波への適用性を検討した。規則波解析によるパラメトリックスタディ結果から、上部工波力や伝達率などは堤体の慣性力係数および抗力係数により変化し、消波ブロック空隙率や天端ブロック並び個数による影響は小さいことが確認された。また規則波解析において滑動合成波力に着目した堤体のポーラス値の提案値を示し、不規則波解析に適用した結果、実験と解析は良く一致し、その妥当性が確認された。

1. はじめに

消波ブロック被覆式傾斜堤を設計する際には、越波量や伝達波の特性および上部工に作用する波力特性を知る必要がある。伝達率に関しては、沼田(1975)の単一断面傾斜堤や坂本ら(1984)の複合断面傾斜堤による算定式があり、傾斜堤上部工波力に関しては、谷本・小島(1983)の2層被覆式傾斜堤矩形上部工や川俣ら(1998)の1層被覆式傾斜堤パラペット付上部工がある程度である。またこれら算定式はごく限られた実験条件で求められたものであるため、波浪場における消波ブロック被覆式傾斜堤の水理特性は水理模型実験などにより検証しているのが一般的である。これに対し水理模型実験を代替する手法として数値波動水路(CADMAS-SURF, 2001)が開発されているが、消波ブロック被覆式傾斜堤への適用例は、榎山ら(1991)がある程度で、上部工の波力に適用した例はない。そこで本研究では消波ブロック被覆式傾斜堤を対象に、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上部工の波力、越波伝達波への適用性を検討した。

2. 実験内容および計算条件

(1) 実験内容

計算の対象とした実験断面形状を図-1に示す。これは東京電力(株)で実施した消波ブロック1層被覆式傾斜堤の上部工波力および越波・伝達波に関する実験である。表-1に堤体構造の諸元を示す。消波ブロックは27.6t(270.7kN)型アクロボッドおよびコアロックの2種類とし、被覆ブロックは9t(88.3kN)型ガンマエルで同一とした。堤体設置位置は1/100斜面勾配上の現地換算値で水深10.1mの位置である。波浪条件は堤体位置で $H_{1/3}=6.46\text{ m}$, $T_{1/3}=16\text{ s}$ 相当の不規則波を対象とした。またコアロック傾斜堤では $H=6.46\text{ m}$, $T=16\text{ s}$ の規則波も作用させた。本実験では、天端上に並ぶ消波ブロック

ク個数 M を0, 1, 2個と変化させ、その影響を調べた。図-1に示した断面形状は $M=1$ の場合である。天端高は上部工、パラペットとも2種類とした。上部工は狭断面と広断面の2種類とし、天端幅の相違の影響も調べた。模型縮尺は消波ブロック種類で異なるため(アクロボッド1/55, コアロック1/50), 計算是現地換算値を行った。

(2) 計算条件

表-2に規則波解析の、表-3に不規則波解析の計算ケースを示す。規則波解析では、堤体全体の慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D を変化させたケースおよび消波・被覆ブロックの空隙率 e を変化させたケースとし、矩形上部工でのコアロック被覆傾斜堤の規則波実験との比較から、ポーラス値を設定することとした。不規則波解析では、表-2の規則波解析によるパラメトリックスタディにより慣性力係数 C_M 、抗力係数 C_D を一律に設定し、アクロボッド被覆傾斜堤の実験値と比較した。規則波・不規則波とも計算領域は図-2に示すように水平1000m水路の両端に放射境界+減衰帯 $2L_{1/3}=400\text{ m}$ を付加し

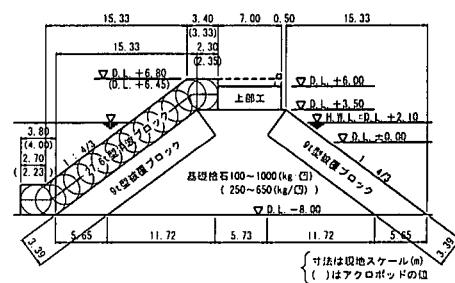


図-1 断面形状(消波ブロック天端1個並び)

表-1 堤体ブロック構造諸元

項目	消波ブロック	被覆ブロック	
ブロック種類	アクロボッド	コアロック	ガンマエル
重量 W	27.6tf (270.7kN)	27.6tf (270.7kN)	9.0tf (88.3kN)
体积 $V(\text{m}^3)$	12.000	12.000	3.894
型枠面積 $A(\text{m}^2)$	31.460	38.090	14.511
空隙率 $e(\%)$	52.5	60.0	50.0
ブロック高 $d(\text{m})$	3.280	3.793	1.938

* 正会員 修(工) 東電設計(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 東電設計(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.	天端プロック並び個数 M	上部工幅 B (m)	上部工天端高 h_e (m)	コアロック		基盤捨石	消波・被覆ブロック基礎捨石	慣性力係数 C_M	抗力係数 C_D	比較実験対象
				空隙率 e	被覆率					
1-1	1	7.00	4.70	0.60	0.50	0.40	1.2	0.4	1.0	コアロック傾斜堤
1-2								2.0		
1-3								0.5		
1-4								1.0		
1-5								1.5		
1-6								2.0		
1-7	0	7.00	4.70	0.60	0.50	0.40	1.2	1.0		コアロック傾斜堤
1-8								1.5		
1-9								2.0		
1-10	2	7.00	4.70	0.60	0.50	0.40	1.2	1.0		コアロック傾斜堤
1-11								1.5		
1-12								2.0		
2-1	1	7.00	4.70	0.60	0.50	0.40	1.2	1.0		コアロック傾斜堤
2-2								0.50		
2-3								0.55		
2-4								0.60		

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.	天端プロック並び個数 M	上部工幅 B (m)	上部工天端高 h_e (m)	バラベット		実験との比較項目 上部工波力	伝達率 及ぶ 越波量	比較実験対象	計算時間 (s)
				天端高 h_e (m)	上部工 波力				
3-1	0	7.00	3.90	—	○	○	アクロポッド傾斜堤	100 $T_{1/3}$	100 $T_{1/3}$
3-2									
3-3									
3-4	1	7.00	12.15	5.20	—	—	62 $T_{1/3}$	62 $T_{1/3}$	62 $T_{1/3}$
3-5									
3-6									

総延長 $1,800\text{ m}$ 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 ($C_M=1.2$, $C_D=1.0$, 天端プロック 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 $t/T=0.1$ 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

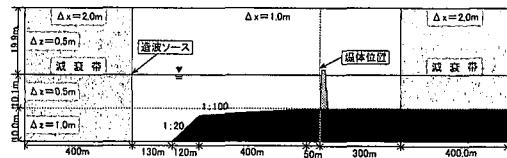


図-2 計算領域

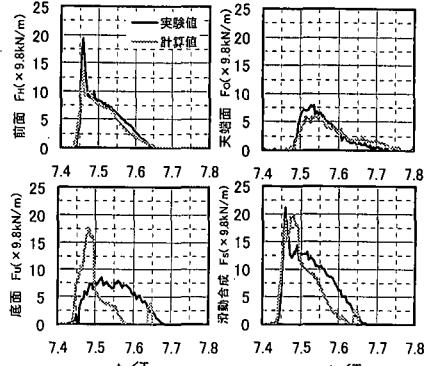


図-3 上部工波力時系列の比較 (case 1-4)

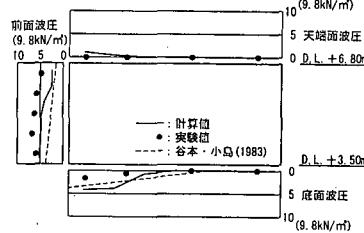


図-4 前面波力最大時同時波压分布 (case 1-4)

い。計算は、底面波力は前面波力より $t/T=0.25$ 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压分布を示す。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压が小さくなるが、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ロック 1 層積みであるためと考えられる。底面波压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

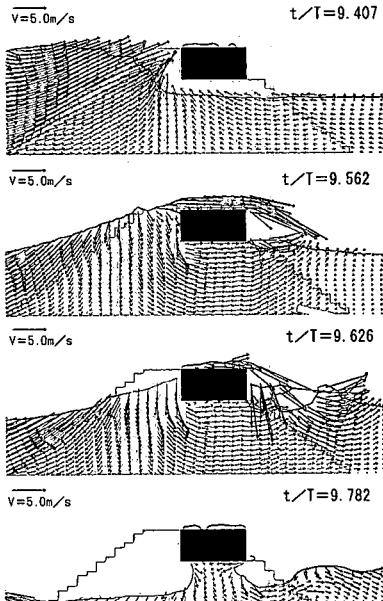


図-5 流速ベクトル (case 1-4)

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。

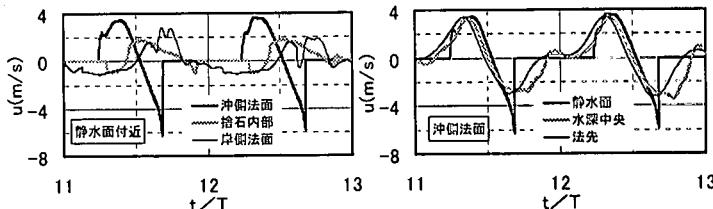
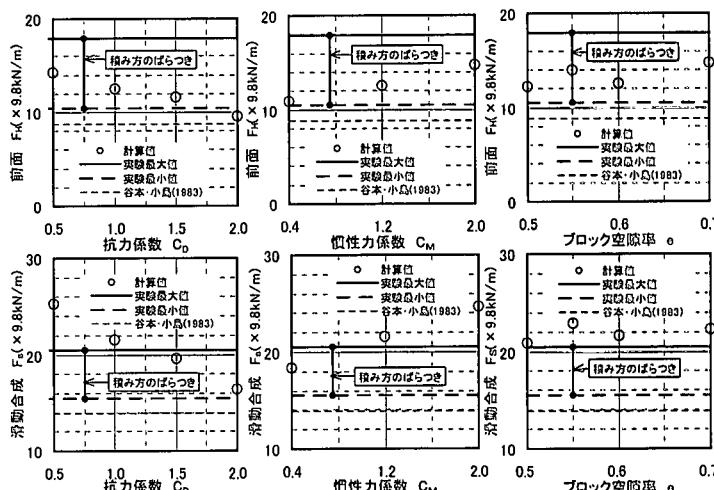


図-6 水平流速時系列計算結果 (case 1-4)

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。このときも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

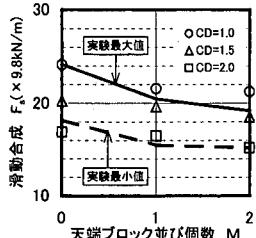


図-8 $F_s \sim M$ 関係
(case 1-4~1-12)

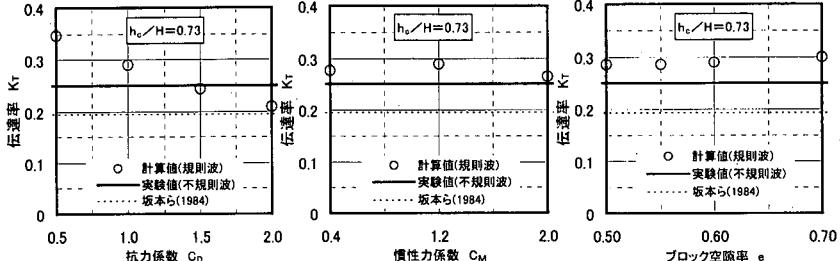


図-10 $K_T \sim C_M, C_D, e$ 関係 (case 1-1~1-6, 2-1~2-4)

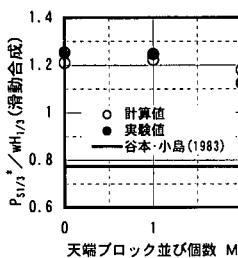


図-9 平均波力～ M 関係
(case 3-1~3-3)

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。

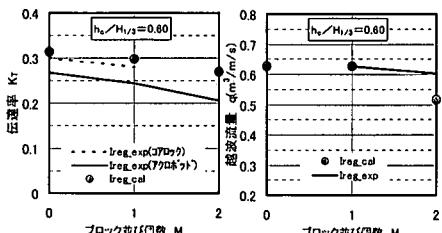
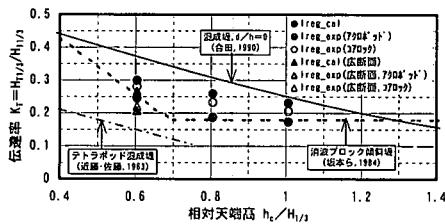
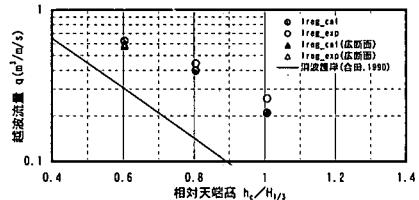
4. 消波ブロック被覆傾斜堤の越波伝達波特性

(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 度程しかない。ブロック空隙率による波高伝達率変化は 0.01 度程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 度程小さく、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実

図-11 $K_r, q \sim M$ 関係 (case 3-1~3-3)図-12 $K_r \sim h_c/H_{1/3}$ 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 = 0.86~1.00 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_r 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。図にはパラペット天端高を変えたケース (case 3-2, 3-4~3-5) と上部工矩形広断面 (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 = 1.21~1.28 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ている。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これらのポーラス値、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 妥・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ペ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.
- 近藤俊郎・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.
- 柳山 勉・鹿島道一・阿部宜行 (1991): 傾斜堤周辺の波動場へのポー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): 傾斜堤の水理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・小島朗史 (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・柳山 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.