

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

川 俣 奨*・関本恒浩*・植木一浩**
渡辺敏幸***・阪内茂記****

1. はじめに

消波ブロック被覆傾斜堤の上部工に作用する波力は、これまで消波ブロック 2 層被覆に対する規則波実験に基づく谷本・小島 (1983) による研究が唯一あるのみである。しかしながら、この研究は限られた条件での実験に基づいたものであり、広範囲の条件に対する適用性の検証は行われていない。一方、近年施工コストの安い 1 層積み被覆ブロックが考案され、現地への適用も行われ始めているが、このときの傾斜堤上部工に作用する波力については検討された例がない。本研究は 1 層積み消波ブロックで被覆された傾斜堤を対象として、上部工に作用する波力の特性について、不規則波を用いた断面実験により検討を行った。なお、本研究では、後部にパラペットを有する上部工を対象とし、上部工前面の消波ブロックの並び個数に着目して波圧の作用特性に関する検討を実施した。

2. 実験内容

実験は、図-1 に示すように、長さ 50 m、幅 0.6 m、深さ 1.2 m の 2 次元水路に、縮尺 1/50 の傾斜堤模型を設置して行った。模型の設置水深は現地スケールで 10.0 m、潮位 D.L.+2.1 m、海底勾配は 1/100 であり、堤体位置での有義波高は 6.6 m および 5.8 m、周期 16 秒相当の不規則波を作用させた (以下実験諸量は現地換算値として示す)。造波位置における波高は 8.50 m と 5.15 m であり、この位置で Bretschneider-光易型スペクトルを目標として造波した。前者の波は後者に比べて水深の深い地点から碎波が始まる著しい碎波条件であり、後者の波は堤体近くでようやく碎波する条件であった。堤体前から有義波高の 5 倍の距離だけ離れた位置での最高波高は、それぞれ 11.0 m および 9.45 m であった。堤体断面は、予備実験の結果から、最高波高 11.0 m のときの滑動安全率が 1.0 となるよう設定した (図-2)。上部工模型には 23 台の小型波圧計を配して波圧計測を行うとともに、

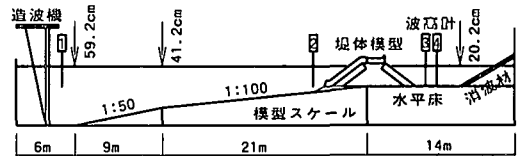


図-1 実験装置配置概略図

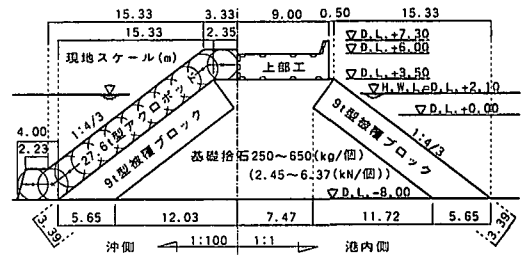


図-2 実験堤体断面図

変位計により上部工の滑動も計測した。上部工模型と基礎捨石マウンドとの間の摩擦係数は約 0.54 であった。サンプリング周波数は実験スケールで 200 Hz、継続時間は現地スケールでおよそ 35 分である。衝撃的な波力の作用によって最大波力の計測にばらつきが懸念されたため、各計測は同一条件で 3 回づつ繰り返し行った。実験では消波ブロックとして 27.6 t 型アクロポッドを用いた。空隙率は 52.5% である。アクロポッドの据え付け方法は乱積みであるが、重心位置を規定されており、堤体延長方向に隣合うブロックは互いに接触しない。波圧計の配置には 2 つの測線を設け、一方の測線は前面のブロックによって最も遮蔽される測線とし、他方の測線は隣り合うブロック間の空隙部に位置するよう設定した。また本実験では、上部工前面のマウンド天端上に並ぶ消波ブロックの個数を 0 個、1 個、2 個として実験を行った。上部工前面に消波ブロックを 1 個ならべたときの堤体断面図を図-2 に示す。

3. 波力特性

3.1 代表的な波力作用形態

後部パラペット型の上部工に作用する波力は、前面に

* 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
** 正会員 工修 東京電力(株)福島第一原子力調査所
*** 正会員 東京電力(株)福島第一原子力調査所
**** 正会員 東電設計(株)原子力土木部

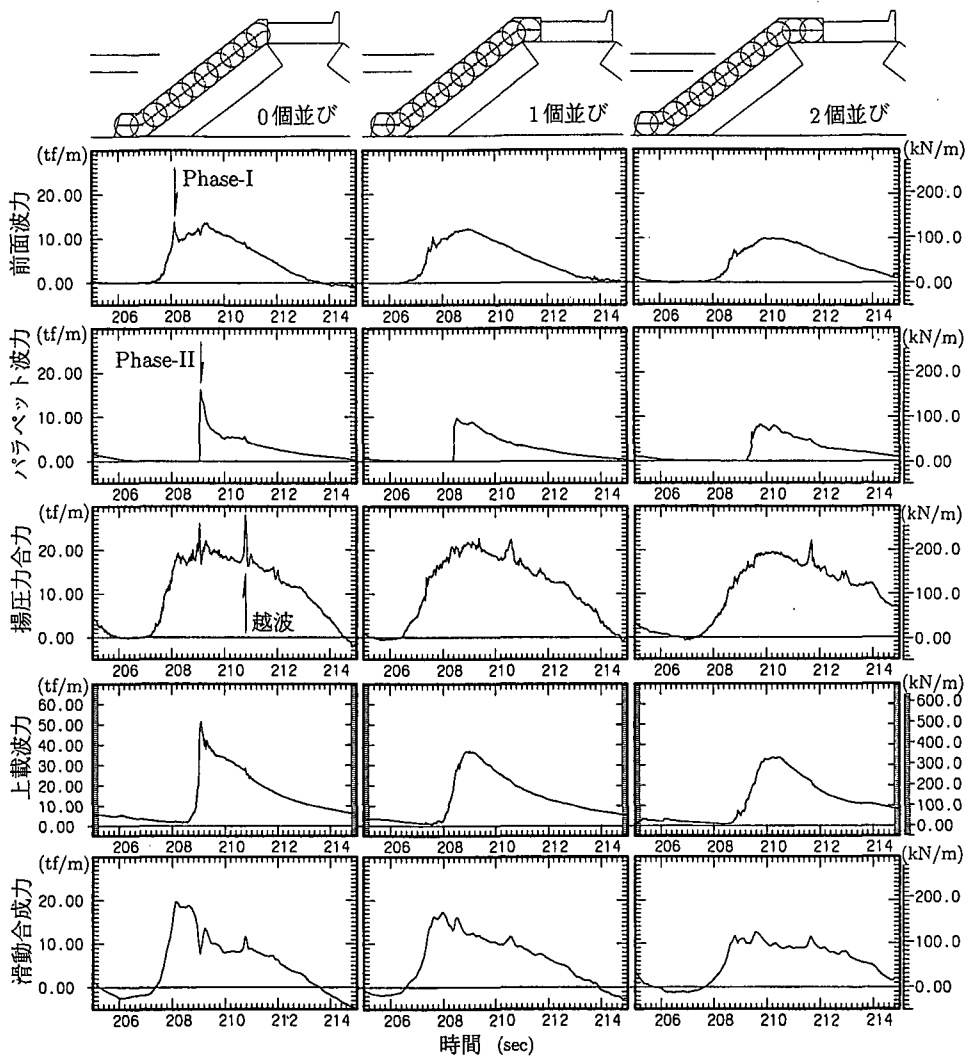


図-3 代表的な波力時系列

働く水平波力、パラペット部に働く水平波力、底面に働く揚圧力、上部工上の越波水塊による上載荷重などが考えられる。これらの波力を以下、簡易的にそれぞれ前面波力、パラペット波力、揚圧力、上載波力と称する。それぞれの波力について、代表的な計測波力時系列の例を図-3に示した。

上部工全体に働く波力のうち水平波力合力は、前面波力とパラペット波力との和となるが、波が前面部に達した時には前面波力のみが働き、パラペット部に達した時には前面波力に加えパラペット波力が出現する。したがって、パラペット付き上部工の設計波力を考える場合には、岡部ら(1997)と同様に、前面波力作用時の Phase-I とパラペット部に作用する Phase-II の2つの時点に分けて検討する必要がある。以下にこの2つの Phase を踏

まえて堤体各部へ作用する波力の特性を調べた。この時の代表的な同時波圧分布を図-4に示した。

3.2 前面波力について

前面波力は時間的に双峯型の波形として現れる傾向にあった。先に現れる峯は衝撃的であり、後に続く峯は緩やかに出現する。これは波の非線形性に起因するものと考えられる。前面波力作用時 (Phase-I) の水平波力は、この衝撃的な前面波力を考えればよい。またパラペット波力作用時 (Phase-II) の水平波力は、緩やかに出現する前面波力の peak 付近であり、全水平波力としては、これにパラペット波力を加味すればよい (図-3)。

まず、衝撃的な前面波力 (Phase-I) の最大値を波力時系列から抽出し、これを谷本・小島 (1983) による波力算定公式にあてはめ、波圧低減率 λ を求め整理した。この

表-1 波圧低減率 λ 一覧表

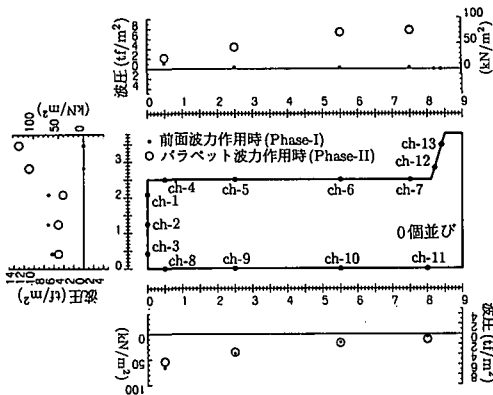
$H_{1/3}$	Phase	0個並び	1個並び	2個並び
6.6 m	Phase-I	0.96	0.66	0.53
5.8 m	Phase-I	0.87	0.70	0.71
6.6 m	Phase-II	0.66	0.60	0.50
5.8 m	Phase-II	0.63	0.60	0.53

表-2 パラペット波力最大値一覧表

$H_{1/3}$		0個並び	1個並び	2個並び	(単位)
6.6 m	計測波力	16.91 165.72	16.41 160.82	15.59 152.78	(tf/m) (kN/m)
	算定波力	10.36 101.53			(tf/m) (kN/m)
	割増係数	1.63	1.58	1.50	
5.8 m	計測波力	12.01 117.70	15.22 149.16	16.18 158.56	(tf/m) (kN/m)
	算定波力	8.34 81.73			(tf/m) (kN/m)
	割増係数	1.44	1.82	1.94	

表-3 揚圧力合力最大値一覧表

$H_{1/3}$		0個並び	1個並び	2個並び	(単位)
6.6 m	計測波力	26.34 258.13	24.03 235.49	19.90 195.02	(tf/m) (kN/m)
	算定波力	29.91 293.12	27.20 266.56	22.67 222.17	(tf/m) (kN/m)
	割増係数	0.88	0.88	0.88	
5.8 m	計測波力	20.99 205.70	18.63 182.57	17.39 170.42	(tf/m) (kN/m)
	算定波力	24.13 236.47	22.99 225.30	20.30 198.94	(tf/m) (kN/m)
	割増係数	0.87	0.81	0.86	

図-4 代表的な同時波圧分布 ($H_{1/3}=6.6$ m, 0個並び)

衝撃的な波力は消波ブロックの並び個数を増やすにつれてその被覆効果によって低減され、ブロック2個ならばでは衝撃的な波力の作用はほとんど見られなくなってしまう。

次に緩やかに出現する前面波力について同様に波圧低減率 λ を評価した。ここでは2つのPhaseを考慮することから、パラペット波力作用時(Phase-II)の前面波力値を用いたが、緩やかに出現する前面波力の最大値に概ね一致する。この場合も波圧低減率 λ に消波ブロックの被覆の効果が現れている。これらの波圧低減率一覧表を表-1に示す。本実験条件を用いて、谷本・小島による消波工を十分に設けた場合(10t型2層被覆上部工前面2個並び)の波圧低減率 λ を算定すると0.73程度であることから、27.6t型アクロポッドは1層積みでありながらも、1個ならば十分な波力低減効果を有することが確認された。

また、作用する波浪の違いによって、消波ブロック2個並びのPhase-Iにおける波圧低減率 λ に違いが生じた。2つの作用波は堤体位置での有義波高こそ1m程度の違いではあるが、造波波高の差は3m以上と大きく、碎波形態が異なった。特に波高5.8mのケースは堤体付近で碎波しているため、作用波高が不安定となったことが、波圧低減率 λ にばらつきを生じさせた原因と考えられる。

3.3 パラペット波力

パラペットに作用する波力は、図-3に示したように立ち上がり急で大きな波力が作用することが確認された。特に、パラペット基部で衝撃的な力が発生する場合がみられた。これは、消波ブロック上を駆け上がった水塊が、上部工上を伝播しパラペットによって受け止められることによると考えられる。また、パラペット基部は波の作用時に空気を閉じこめやすい構造となっており、これが衝撃力の発生の原因の一つとなっているもの

と考えられる。

パラペットに作用する波力のうち、滑動に寄与する波力を求めるため、1自由度系の振動方程式を用いた有効波力解析を実施した。ここでは、堤体に作用する水平波力を入力として、変位計で計測された振動特性に合うようにバネ係数を求めた。パラペットに作用する波力は、波がパラペットに作用しているときには、前面波力は緩やかな作用となっていることから、計算で求められた全有効波力から前面波力を差し引いたものとして定義した。

表-2にパラペット波力の最大値とパラペット位置で算定される計算波力とを比較した結果を示す。なお、割

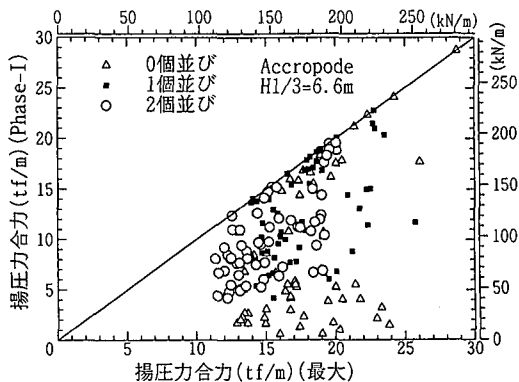
増係数は計測波力と算定波力の比で表わし、計算値は合田の波力公式を用いてパラペット位置に相当する部分の波力とした。表-2によればパラペット波力は合田の波力公式による計算波力の1.4~1.9倍となっている。特に波高5.8mのケースで係数にばらつきが見られる。これは碎波位置が堤体付近であることによるものと考えられる。そこで、パラペット波力における割増係数は、碎波に伴う不安定性の影響を勘案し、実験値の平均的なものを考え、1.6程度を考えることとした。

3.4 揚 圧 力

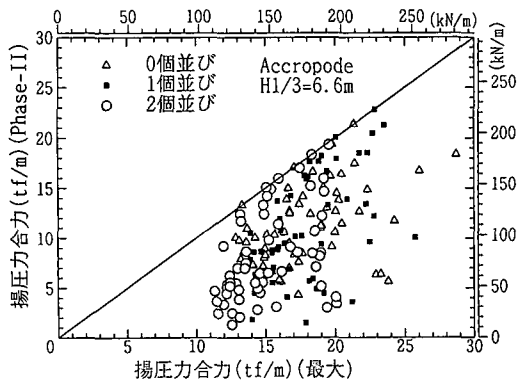
消波ブロック被覆式傾斜堤の上部工に作用する揚圧力は、一般的には上部工前面に波力が作用するとき揚圧力が追従せず、比較的小さい値を示すことが多い。しかしながら、不規則波を用いた実験結果を詳細に見ると、直前に作用した波の影響を受けることがあり、比較的水位の高い状態で後続する波が作用することがある。また、図-3に示したように、消波ブロックや傾斜堤の捨石材の影響で水位はゆるやかに下降するため、揚圧力の高い状態が比較的長く続く。

図-5は、揚圧力の最大値とPhase-I, Phase-IIの状態における揚圧力を上位20波について比較したものである。ここでは揚圧力はそれぞれの条件での瞬間値を示しているため、堤体に衝撃力が発生した場合などはその影響を受けることによって波形に細かい変動が乗る。このため図-5ではデータにかなりのばらつきが見られる。しかしながら、この図より両Phaseとも揚圧力はその最大値に一致する場合があることが分かる。したがって、設計波力算定の際には揚圧力はPhase-I, Phase-IIとも揚圧力最大値を考える必要があると思われる。

谷本・小島(1982)によれば、揚圧力の作用幅 l_u は、静水面と上部工基面との距離と波の作用高さによって異なる。しかしながら図-4に示したように、本研究における実験条件では揚圧力は上部工全体に作用し、前趾側で大きく後趾側でほぼ0となる三角形分布をしていた。表-3は、揚圧力の最大値の計測結果と、Phase-IIにおける前面波圧低減率を用いて谷本・小島の波力評価式によって求めた揚圧力、および両者の比を示したものである。この比は、すべての実験を通じて0.81~0.88であったことからその上限を考えれば、Phase-IIを基準として求めた揚圧力を約0.88倍することによって揚圧力の最大値を推定することが可能である。なお揚圧力の最大値は、谷本・小島による算定式を用いてブロック0個並びとして評価した揚圧力の1/2程度となった。谷本・小島による実験においても上部工基面が静水面上にある場合には計測された揚圧力は同様の傾向を示しており、このことから揚圧力を低減させることの妥当性が確認できる。



(a) Phase-Iと最大値との関係



(b) Phase-IIと最大値との関係

図-5 各Phaseの揚圧力合力と最大値との関係

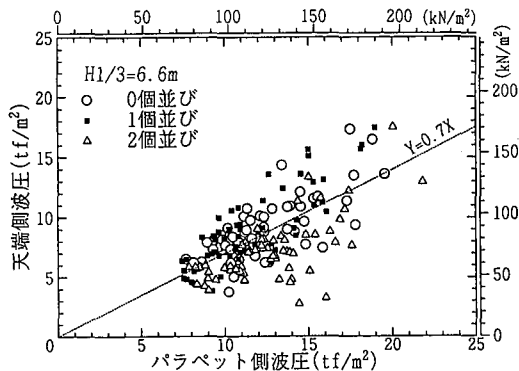


図-6 パラペット基部付近での波圧の関係

3.5 上 載 波 力

天端面上載荷重は、最大値の出現時刻がほぼパラペット波力作用時(phase-II)に一致し、このときの波力分布は、前面側で小さく、パラペット側で大きい三角形分布を呈している(図-4)。また、そのときの上載波力はパラペット波力に関係づけられる。当然のことながら、パ

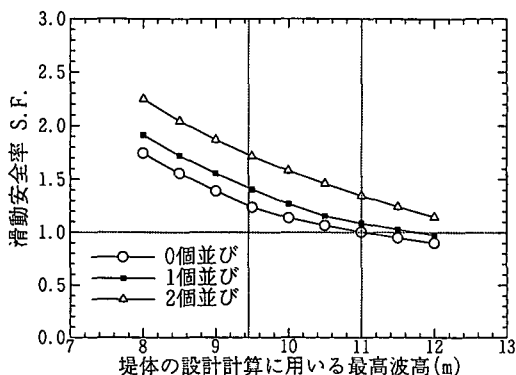


図-7 波高と滑動安全率の関係

ラベットに上部工を伝播した水塊が作用するときに、上部工に衝撃的で大きな上載波力が作用する。図-6は、パラベット波力最大時におけるパラベット基部の天端側波圧と上部工パラベット側波圧を比較したものである。衝撃力の発生によりデータはばらついてはいるものの、両者には相関が見られる。設計波力を考える場合には、上部工上パラベット側の波圧は、両者の関係の平均値をとり、パラベット基部の波圧の70%程度と考えればよい。なお、上載波力はパラベットの高さに依存するものと考えられるが、ここではその検討を行わなかった。

4. 滑動安定性

本研究では、上部工各部に作用する波力について、衝撃力が作用するものについては、滑動に対する実効の波力を求めるなど、できる限り一般性のある定式化を行ってきた。ここでは、これまでの検討結果を踏まえ本実験で用いた上部工形状を対象として、設計波高と滑動安全率の関係を求めた。

図-7は波高と滑動安全率の関係を phase-II を対象として示した。波力低減係数は、表-1に示した $H_{1/3}=6.6$ mの実験結果を用い、0個並びでは0.66、1個並びでは0.60、2個並びでは0.50を用いた。パラベットに作用する波力については、合田の波力公式を用いてパラベット位置に相当する部分に作用する波力を求め、その1.6倍とした。揚圧力については谷本・小島による波力評価式で波圧低減係数を0.88として評価した。また、天端上波力は、修正した合田の波力公式(合田の公式による値を1.6倍したもの)により得られるパラベット基部での波圧を0.7倍して平均値を評価し、この波圧を用い三角形分布を仮定して求めた。

実験で用いた堤体重量は、現地換算で53.8 tf/m (=

527.5 kN/m)であった。波高6.6 mのケース(設計波高11.0 m)では、消波ブロック0個並びの条件で、3回の実験の内2回にわずかに滑動が見られ、残りの1回は滑動が見られなかった。したがって、この条件がほぼ滑動限界と考えられる。図-7では、波高11.0 m付近で滑動安全率がほぼ1.0となっており、ブロック並び個数が増えたり、波高が小さい条件では滑動安全率が1よりも大きくなっていることがわかる。限られた条件での検討ではあるが、本研究で実施した定式化によって、堤体の滑動安定性に関する実験結果を説明することができた。

なお、この検討では phase-II のみを対象とした。本実験における波浪条件においては、パラベットが低くない限り、phase-II で設計断面が決まるものと考えられる。また、後部パラベット付上部工では、上部工後趾側の端趾圧が大きくなるので注意を要する。

5. おわりに

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を対象として、不規則波による波力実験を行い、上部工に作用する波力の出現特性について調べた。前面波力については谷本・小島式に基づく波圧低減率 λ を用いて、消波ブロックによる波力低減の効果をブロックの並び個数に着目して検討した。その結果、消波ブロック1個並びでも十分な波圧低減率が得られることが明らかになった。また、波力の作用時間差を検討に盛り込み、二つのPhaseについて各々の λ を評価した。パラベット波力は衝撃的となる場合があるため、有効波力換算を実施した。その結果パラベット波力はブロックの並び個数に影響されないと考えてよいことがわかった。揚圧力についても谷本・小島による評価式と比較し、上部工基面が静水面より上にある場合には、揚圧力は評価式のほぼ1/2となることを明らかにした。

本報告では限られた実験結果をもとに消波ブロック1層被覆式傾斜堤の後部パラベット付き上部工に作用する波力の算定法を示した。今後は実験を積み重ね、波圧低減率などのパラメータの精度を向上させることで、現地波浪条件に適した波力算定法へ発展できると考える。

参考文献

- 岡部成光・畑元浩樹・白石貴司・樺山 勉・清水琢三・片山裕之 (1997): 急勾配海岸における後部パラベット型上部斜面堤の実用的な設計法について: 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 841-845.
- 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, 港研資料, No. 450, 32 p.