

施工途中での消波工による波圧増大とその対策

三 上 信 雄*・山 本 正 昭**

1. 緒 言

漁港における防波堤では直立部本体に作用する波圧を低減することを目的の一つとして、堤体前面を消波工で被覆した消波工被覆堤の施工例が多い。しかし、消波工を堤体前面に設置する場合、堤体の天端高に比べ、消波工の天端高が十分でないと逆に波圧が増大する場合があることが、森平ら（1967）などの従来の研究により確かめられており、伊藤ら（1983）の報告のように、しばしば、現場での手戻りも報告されている。しかしながら、防波堤を施工する際には、その施工途中の段階において、堤体前面が消波工で完全被覆されていない状態は免れない。このような場合、消波工により砕波が助長され、堤体本体に作用する波圧が増大し、堤体の滑動及び転倒を生じたり、条件によっては衝撃砕波圧の発生を促し、ケーソン部の破壊を生じた例もある。

消波工の施工段階における波圧の研究には、鴻上ら（1970）の報告があるが、その実験は防波堤の完成断面ののり先まで消波工の幅を拡げておき、順に積み上げて行ったものである。しかし、本研究は、消波工の天端幅をあまりとらず、先に天端高を高くする方法を含め、種々の波浪条件及び消波工の設置条件において堤体に作用する波川を測定し、消波工による波圧の増大の現象をつかみ、施工順序により、このような施工途中での消波工による堤体に作用する波圧の増大を防止する対策を検討するものである。

2. 実験方法

実験には、図-1 に示すような長さ 100m、幅 1m、深さ 1.5m の 2 次元造波水路を使用し、水路内に勾配 1/30 斜面とそれに続く水平床を造り水平床前端に堤体模型を設置した。堤体模型は鉄筋コンクリートでケーソン部を作成しその上にコンクリート板を載せ、天端高を調整できるようにした。実験では堤体の重量を十分に重くし、滑動を起こさないようにした。模型は図-2 に示すように、捨石マウンドの上に載せ前面に 1.27 kg/個

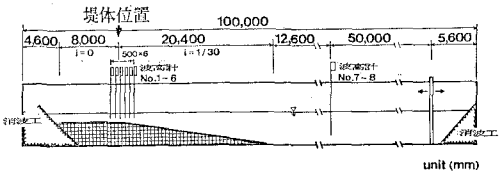


図-1 実験施設

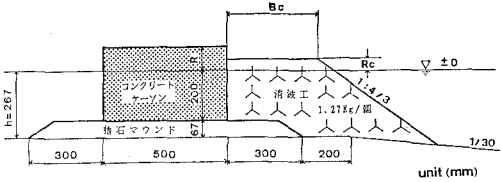


図-2 堤体模式図

表-1 実験諸元

堤体条件			
海底勾配	i	1/30	
堤脚水深	d (cm)	-20.0	
堤体設置水深	h (cm)	-26.7	
堤体天端高	R (cm)	+15.0	+10.0 5.0
消波工天端高	R _c (cm)	+15.0 +7.5, ±0.0	+10.0 +2.5, -5.0 +5.0 -2.5
消波工天端幅	B _c (cm)	0, 20, 30, 40, 50, 60, 70	
波浪条件			
造波水深	h _d (cm)	-96.7	
実験水位	S.W.L (cm)	±0.0	
周期	T (s)	1.45, 2.92	
波高	H'o (cm)	10.0, 13.3, 16.7, 20.0, 23.3	

の消波ブロックを空隙率 40~50% で乱積みにした。実験には規則波を使用し、入射波の測定は堤体設置位置から 50 cm ごとに設置した波高計を使って波高を測定し、5 波高沖まででの最大波高を入射波高 H とした。規則波の実験諸元並びに量記号を表-1 に示す。波圧の測定には、堤体前面及び底面に小型波圧センサーを取り付けて、水平波圧と揚圧力を測定した。計測方法は、波がそ

* 正会員 水産庁振興部開発課
** 正会員 農博 水産工学研究所開発システム研究室

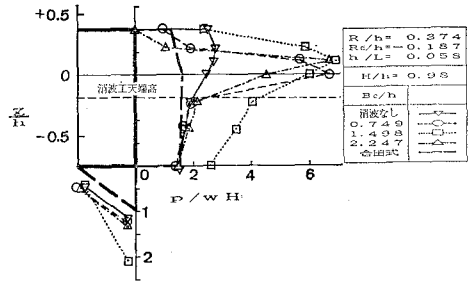
ろってから再反射が到達するまでの間で、サンプリング間隔 2 ms で30秒間測定した。解析には同時刻における波圧分布から台形積分により同時波圧合力を算定し、個々の波の最大同時波力の大きいものから、測定時間内で作用した波数の 1/3 の数を平均したものを使用した。

3. 実験結果及び考察

堤体に作用する波圧を考える場合、堤体全体にかかる波力として同時波圧合力と堤体の一部分に作用する局所的な波圧の二つが挙げられる。滑動や転倒などの堤体の安定を論じるには、堤体全体に作用する前者の同時波圧合力が問題となる。しかし、ケーソンの破壊などは全体が一気に破壊することはほとんどなく、ケーソン前壁の一部分が破壊し、そこから中詰め砂などが流出することにより破壊が広がり、ひいては全体が倒壊するものと考えられるため、後者の局所波圧が非常に大きく関係してくると思われる。そこで、ここでは堤体の安定を波圧同時合力から、堤体の部材強度の面を局所波圧から検討する。また実験では水平波圧と揚圧力を測定しているが、今回は水平波圧についてのみ検討を行うものとする。

(1) 堤体の安定の検討

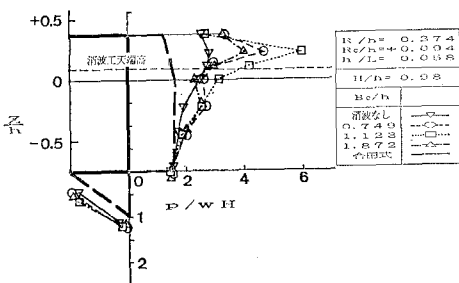
図一3, 4 は最大同時波力 F が作用したときの同時刻での各波圧センサーごとの無次元波圧強度 p/wH (w : 水の単位体積重量) の分布を消波工の天端高 R_0 を変えて示したものである。図中堤体内の破線は消波工の天端高の位置を示したものである。これらの図からわかるように、消波工が被覆してある部分では、比較的波圧の増大は少ないが、消波工天端高よりも上の部分、つまり消波工の未被覆部分での波圧の増大が大きく、波圧分布中の最大値の発生位置は静水面から上にばらついている。また、消波工天端高の高い方が分布中のピークは上方にいく傾向がある。しかし、その値は減少しており、消波工天端高の高い方が波圧の増大は小さいと言える。波圧分布のピークが上方に移動する原因としては、一つには水位上昇、またもう一つには消波工の天端上を波が乗り上げて堤体に衝突することにあると考えられる。一方、消波工天端高が高くなれば、消波効果の方が大きくなって



図一4 最大同時波力作用時の波圧分布(2)

いくために、消波工を乗り上げて堤体に衝突する水塊の量も少なくなり、波圧の増大は減少することになる。また、消波工天端幅 B_0 の拡幅によって増大した波圧は減少しており、同時に波圧分布のピーク形状も鈍化する。

図一5, 6, 7 は最大同時波力の無次元平均波圧強度 $\bar{p}/wH$ と、波高水深比 H_0/h との関係を示したものである。参考に合田式による計算値も示してある。沖波波高による波圧の変化は、どのケースも堤体位置において波が碎波するまでは波高の増加にともない波圧も増加していき、碎波後は減少している。また、消波工の有無による波圧の違いは、重複波から碎波直前までの波においては、施工途中の不十分な消波工により波圧は増大している。特に、消波工天端高が低く、周期 T の大きいつまり波長 L の長いケースで波圧の増大は大きい。図一6の $R_0/h = -0.187$, $h/L = 0.058$ の場合、堤体直前で碎波するケースで、消波工設置前に比べ波圧は2倍以上となり、 $\bar{p}/wH = 3.83$ にもなっている。けれども、碎波後の崩れ波が作用するような場合は、大半のケースにおいても消波工による波圧の増大は見られなくなり、波高水深比の小さいところで波圧のピークを示すようになる。消波工は波を強制的に碎波させることにより波高を減少させたり、消波工内部で波動エネルギーを低減させることにより波圧を減殺させる。したがって、消波工の天端高や天端幅が十分でないと、条件によっては、波を完全に碎波しきれないために、重複波や碎波直前の波などは波高が増大し碎波を促進し、逆に波圧が増大することになるのである。また、消波工天端幅と波圧との関係は、図一7の波長が短い場合は、天端幅の拡幅により消波工の設置のために増大した波圧は減少している。これに対し、図一6のように波長が長い波では、消波工天端幅を拡げるとさらに波圧の増大を引き起こしているものもある。けれども天端幅の拡幅量をさらに大きくすれば波圧は減少する傾向にある。これは、消波工を通過後の波の堤体への衝突形状に関係している。この衝突形状を4つに大別すると表一2のようになり、最も堤体に作用する波圧が大きくなるのは3つの堤体の少し手前で碎波するケースである。実験中の観察から、波長の長い波の



図一3 最大同時波力作用時の波圧分布(1)

場合、堤体に衝突するまでに完全に砕波させてしまうには、消波工の天端高が同じであれば、波長の短い波に比べかなり長い天端幅が必要である。したがって、天端幅を拡幅する段階において、波長の短い場合には、2→4又は3→4と衝突パターンが変わっていくことが多く、拡幅の最初に波圧のピークがくる。これに対し、波長の長い場合には、1→3→4又は2→3→4といった衝突パターンに変わることが多くなり、拡幅の途中において波圧のピークがくるようになるのである。

これらのことから、堤体本体に作用する波圧は、消波

表-2 堤体位置における波の衝突形状

	衝突形状
1	砕波はしていないが、波高が増大して衝突
2	直前で波が崩れ始め、波高が最大で衝突
3	少し手前で砕波して、巻波状で衝突
4	砕波後の波で、崩れ波状で衝突

工天端高と天端幅及び、波長に大きく関係するものと考えられる。そこで施工途中の消波ブロックの投入量に対する消波工断面形状と波圧を比較するため、消波工天端高 R_c と天端幅 B_c を消波工の単位幅あたりの容積 V で代表させ、これを水深 h と波長 L で除したパラメータ V/hL で $\bar{p}/wH$ との関係を表わすと図-8のようになる。ここでの波長 L は堤体設置位置におけるものである。この図は、堤体直前で砕波し、消波工の設置により波圧が最も大きくなり、堤体の安定上最も危険であるケースをプロットしたものである。この図から $V/hL < 0.25$ では V/hL の増加によって波圧が増大するものもあるが、 $V/hL \geq 0.25$ では V/hL の増加に伴い波圧は減少している。また R_c/h により波圧とその減少傾向が違い、 R_c/h の大きい方が値は小さい。図中の曲線は R_c/h による違いを示すため描いたものであり、著者ら(1990)の研究結果から求めた堤体前面を完全に被覆した場合も示してある。これらの曲線から、 V/hL が同じであれば R_c/h の大きい方が波圧強度を小さくでき、波圧の増大を防ぐことができる。またこのことは、同じブロックの投入量であれば消波工幅を拡げるよりも、消波工天端高を高くするほうが、波圧増大の緩和には効果があることがわかる。以上のことから、消波工施工途中において、堤体の滑動などを生じするような強大な波圧を発生させないためには、幅は狭くても消波工天端高を高くとり、できるだけ早く堤体前面を完全に消波工で被覆して波圧を低減させ、その後消波工を前方に拡幅し、完成断面ののり面まで拡げておき、次の堤体の嵩上げの段階

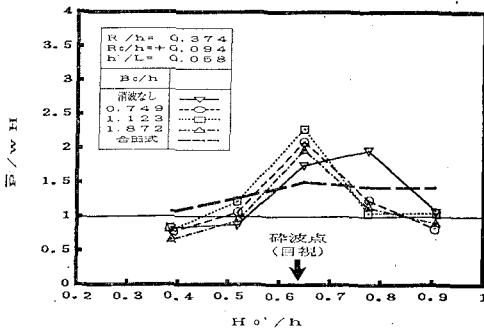


図-5 消波工天端幅による無次元平均波圧の変化(1)

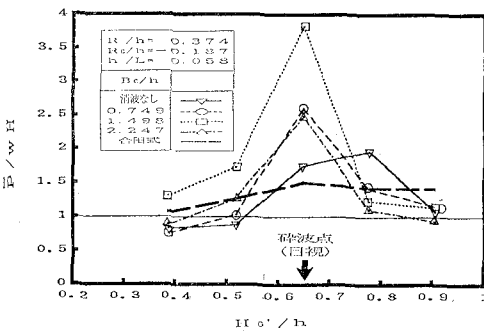


図-6 消波工天端幅による無次元平均波圧の変化(2)

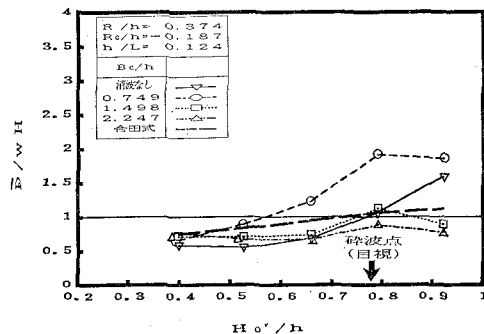


図-7 消波工天端幅による無次元平均波圧の変化(3)

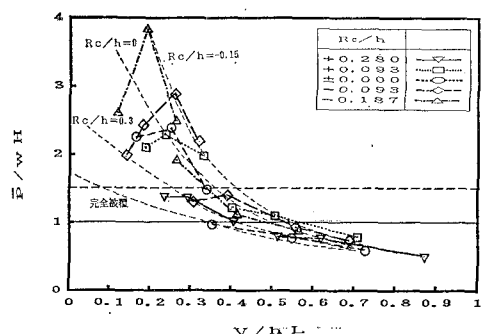


図-8 消波工断面形状による無次元平均波圧の変化

において、堤体にかかる波圧をできるだけ押えておくような施工順序が、消波工設置に伴う波圧増大を防ぐには有効であると思われる。

(2) 局所最大波圧 (p_{max}/wH) の検討

図-9, 10 は各波圧センサーごとの無次元波圧強度の最大値の分布を示したものである。なおセンサーごとの値は同時刻のものではない。消波工が被覆してある部分では、比較的波圧の増大は少ないが、消波工天端高よりも上の部分、つまり消波工の未被覆部分で波圧は急激に増大しており、ひどい場合は、消波工の無いものと比べ6倍以上に波圧が増大し、 $12wH$ もの強大な衝撃碎波圧が発生している。これは最大同時波力作用時の波圧分布のピーク値の2倍弱を示している。また、波圧分布中の最大値を示す場所は静水面から上にかなりばらついて位置しており、前項での最大同時波力作用時の波圧分布のピークよりも上にきている。そして、最大同時波力の場合と同様に、消波工天端高が高い方が最大波圧位置は上にいくが、その絶対値は減少しており、当然のことながら、消波工天端高の高い方が波圧の増大は少なくなっている。

また、消波工天端幅の拡幅によっても前述の $\bar{p}/wH$ と同様に増大した波圧は減少しており、波圧のピーク形状も鈍化する。そこで、波圧分布中最大のものを局所最大波圧 (p_{max}/wH) として、前項と同様に V/hL との関係を表わしたものが 図-11 である。図中の点線は、堤体前面を完全に消波工で被覆した場合と、施工途中での p_{max}/wH のピークを示したものである。全体的にはかなりばらつきがあるものの、 V/hL の増加に伴い p_{max}/wH は減少している。 V/hL の小さい領域では波圧の減少は大きいが、波長が長くなると波圧が増大しているものもある。値としては今回の実験範囲では2以下にはならず、特に消波工が水面に没している場合では、波圧は $4wH$ 以下にはなるが $3wH$ 以下にはならなかった。しかし、堤体前面を消波工で完全に被覆してしまい、 $V/hL > 0.55$ であれば、波圧を $2wH$ 以下に抑えることができる。

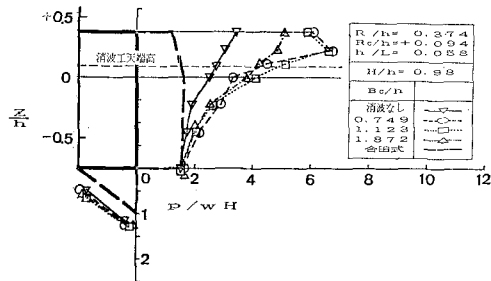


図-9 各センサー位置における最大波圧の分布(1)

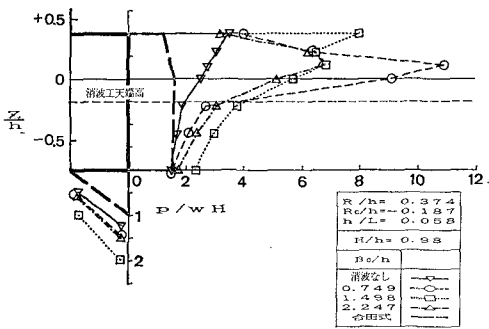


図-10 各センサー位置における最大波圧の分布(2)

このように、施工途中において、条件によっては、静水面より上方で、設計波圧の数倍の衝撃波圧が堤体に作用する可能性があり、広井式で設計しているケーソン前壁の部材強度が足りなくなり、ケーソンの破壊をも引き起こす可能性も十分有り得ると考えられ、ケーソン前壁の高さを静水面より余り高くすると、構造上の弱点となる可能性がある。したがって、施工途中で、堤体前面が完全に消波工で被覆されていないような場合は、このような強大な波圧を完全に押えることは難しい。そこで、ケーソンの破壊などの被害を避けるためには、幅は小さくてもケーソン部は完全に消波工で被覆して強大な波圧の発生を抑えることが第一である。

4. 結 論

以上より次のような結論が得られた。

- (1) 施工途中において堤体前面が完全に被覆されていないと、波圧は増大し、消波工なしに比べ、平均波圧は2倍以上の $4wH$ に、局所最大波圧は6倍以上の $12wH$ に達するケースもある。
- (2) 消波工天端高が高い方が波圧は小さくなる。
- (3) 消波工天端幅の影響は、消波工天端高が低く、波の周期が大きい場合、拡幅により波圧が増大すること

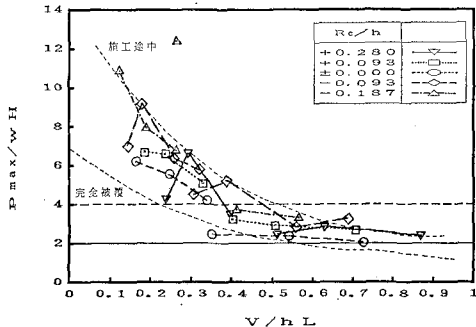


図-11 消波工断面形状による局所最大波圧の変化

もあるが、一般に天端幅が広い方が小さい値となる。

(4) 施工途中における消波工の形状を示すパラメータとして V/hL をとると、 V/hL の増加にともない波圧は減少しており、 V/hL が同じであれば、 R_c/h の大きい方が波圧は小さい。

(5) 施工途中における波圧増大を完全に防ぐことは困難であるが、波圧増大を緩和するためには以下のような施工順序にすることが望ましい。まず第1に消波工の幅は狭くても天端高を高くして、現段階での堤体天端高まで消波ブロックを積み上げて、波圧増大の期間をできるだけ短くする。次に、今の天端高での完成断面まで消波工を拡幅して、場所打ちコンクリート打設時の波圧増大を極力押える。

以上のように、堤体前面において消波工の未被覆の状態のできるだけ短期間にし、次の堤体の嵩上げ時の波圧増大を押えることが、消波工施工中の波圧増大による被害を最小限にするためには重要である。

参 考 文 献

- 伊藤勝一・中山哲蔵・山本正昭 (1983): 消波工の形状と防波堤の滑動量に関する実験的研究, 第28回全国漁港建設技術研究発表会講演集, pp. 1-12.
- 鴻上雄三・時川和夫 (1970): 施工段階における消波工の波圧減殺効果に関する実験的研究, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 205-210.
- 三上信雄・山本正昭 (1990): 消波工の天端幅拡幅の効果, 第35回全国漁港建設技術研究発表会講演集, pp. 99-120.
- 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹 (1967): 異形ブロックの波力減殺効果に関する研究, 港研報告, 6巻, 4号, pp. 1-31.