

L 型消波防波堤の被災再現実験による現行設計法の改良

佐藤孝夫*・諫山貞雄**・山本 悟***
竹田春美**・添田 宏****・山崎耕嗣*****

1. ま え が き

周防灘西岸に位置する苅田港では、国内で初めて沖合防波堤に L 型塊を活用した L 型消波防波堤による港湾整備が 1990 年から進捗中である。この防波堤は、L 型塊を通常の護岸とは逆向きに用い、その底版上に中詰石・消波ブロック・上部工を設置する大潮位差・軟弱地盤対応型の新形式防波堤であり、中程度の波浪かつ水深の浅い場所に適する。L 型塊上のすべての重量を抵抗側へ加算できるとともに、堤体幅が小さいため地盤改良幅も小さくて済み、ケーソンを用いた消波ブロック被覆堤に対しておよそ 20% のコストダウンを実現している。また、数度にわたって台風による高波を受けたが、特に変形は生じていなかった。

そのような中、1999 年 9 月 24 日、台風 18 号（以下、単に台風 18 号と記す）の来襲によって九州・中国地方には甚大な災害がもたらされた。周防灘沿岸では、特に高潮による護岸の被災（高橋ら、2000；山本ら、2000 など）がクローズアップされているが、L 型消波防波堤も一部で L 型塊の滑動・傾斜等が生じ、建設着手後およそ 10 年で初めて防波堤機能が損なわれる事態となった。

ところで、L 型消波防波堤の設計時の滑動安全率は 1.70 であった。L 型塊の底版上に載る中詰石・消波ブロックの重量や底版上面に働く下向き波力の効果で、耐波安定性は非常に高い。台風 18 号の高波についても滑動安全率は 1.3 程度となり、現行設計法では被災を説明できず、汎用化を目指した開発調査計画において基本となる設計法の妥当性に疑問が生じることとなった。

本報告は、被災状況調査と被災再現実験と波力実験等によって被災原因を明らかにするとともに、現行設計波力（運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所、1989）の照査を行い、設計法の改良点を考察するものである。

2. L 型消波防波堤の被災状況

（1）被災パターン

L 型消波防波堤部分は南北方向の直線法線で、延長が約 600 m ある。途中に幅 30 m の船通しが設けられ、島堤 320 m 区間および 280 m 区間に分かれており、後者は従来型の消波ブロック被覆堤と同一法線で接続されている。島堤端および船通し側には小口止めのケーソンが据えられている。図-1 は L 型消波防波堤の基本断面である。（旧）運輸省第四港湾建設局、苅田港湾工事事務所による被災調査では縦断・横断測量等が行われ、断面の変形パターンや法線に対する出入りが把握されている。

写真-1 は、典型的な被災パターンの例として、島堤の船通し付近の状況を示したものである。小口止めケーソンは動いておらず、側面の上部工の痕跡等から、L 型塊と上部工が一体となって背後へ移動かつ傾斜していることがわかる。写真-2 は船通し部のケーソンから 280 m 区間の法線方向を望んだものである。L 型塊の傾斜が小さいこと、消波ブロックの飛散がひどくないことは、L 型塊が背後に抜け出したことを示唆している。手前のケーソンは動いていない。写真では示していないが、上部工のパラベットが飛散したのは、75 函中 2 函であった。

図-2 は被災断面を例示したものであり、写真-1 の

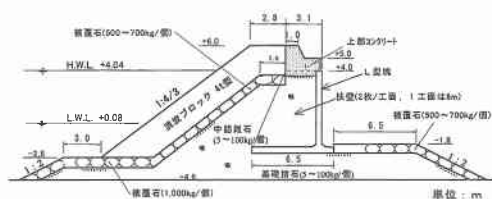


図-1 L 型消波防波堤の基本断面



写真-1 背後に傾斜した L 型塊と無被災のケーソン

* 正会員 国土交通省（前下関調査設計事務所）
** 正会員 国土交通省 下関港湾空港技術調査事務所
*** 国土交通省（前下関調査設計事務所）
**** 国土交通省 下関港湾空港技術調査事務所
***** 正会員 （株）三洋コンサルタント下関出張所



写真-2 L型塊および消波工の移動状況

ケーソンから2箇目の断面である。L型塊には水平変位・傾斜だけでなく、後し端のマウンドへの潜り込みが生じている。なお、当時の調査では、消波ブロックの堤体背後への飛散は確認されていない。また、消波工の法先洗掘等が生じていたかは不明である。

表-1は、苅田での高潮・高波および風況の観測値であり、波浪諸元と波向は確定値、他は速報値である。7時36分に最大潮位+5.58 mとなり、8時に有義波高3.46 m、同周期8.1 sの高波が観測されている。このような設計条件（有義波高3.0 m、同周期6.4 s、潮位 H.W.L.+4.04 m）を超える潮位と高波で被災に至ったことは間違いない。波向は、欠測があるものの、防波堤にほぼ直角入射となる E~ESE である。ただし、風向は台風の接近時と通過後では大きく異なっており、短い間では斜め入射状態となった可能性がある。

(2) 被災箇所の平面分布

図-3は、島堤部320 m区間の上部工法線の出入りを示したものである。縦横比を変えていることに留意する必要があるが、端部あるいはやや中央に寄った部分で変位が大きいことがわかる。この傾向は船通しの反対側でも同様である（写真-2）。

下迫ら（2000）は、防波堤端部などでは法線形状の影響で合成波の波高が増大することを指摘し、期待滑動量もそれに応じて大きくなることを示している。図-4は、図-3に示した島堤部前面の波高分布を（前）国土交通省、港湾空港技術研究所所有のプログラムを用いて計算した結果であり、合成波の波高 H_s を入射波高 H_i で無次元化している。南側のケーソン近傍では、堤幹部より1割程度波高が大きくなっている。また、北側でも波向によって端部から約30 m~50 mに小さなピークがあり、

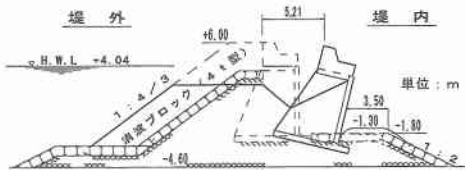


図-2 被災断面の例

表-1 高潮・高波および風況の観測値

時刻	潮位	有義波諸元		波向	風向	平均風速 (m/s)	備 考
	(m)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)				
0:00	2.35	1.40	4.7	ESE	E	13.95	
1:00	1.86	—	—	—	E	13.31	
2:00	1.58	1.59	5.0	ESE	E	15.52	
3:00	1.73	—	—	—	E	16.73	
4:00	2.30	2.08	5.5	E	E	21.71	
5:00	3.02	—	—	—	E	24.71	
6:00	3.89	3.39	6.9	—	E	30.62	
7:00	4.91	—	—	—	E	39.54	接近時最大風速
7:30	—	—	—	—	ESE	32.84	
7:36	5.58	—	—	—	—	—	最高潮位
7:50	—	—	—	—	SW	13.22	
8:00	5.23	3.46	8.1	—	SW	20.72	
8:50	—	—	—	—	WNW	28.83	通過後最大風速
9:00	5.05	—	—	—	WNW	27.01	
10:00	4.02	1.10	4.2	—	WNW	23.01	
11:00	3.04	—	—	—	W	17.45	
12:00	1.74	0.46	2.7	E	W	12.43	

図-3に示した法線の出入りにほぼ対応した分布となっている。一方で島堤中央部には無被災箇所もあり、台風18号による高い潮位および高波によって、L型塊はほぼ滑動限界状態にあったと考えることができる。つまり、わずかな波高増大でも、滑動限界を超える波力となって



図-3 上部工法線の出入り（島堤部320 m区間）

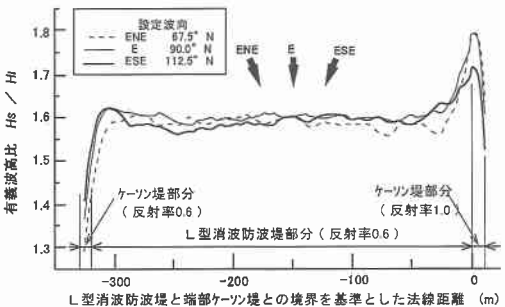


図-4 防波堤前面の合成波高分布（島堤部320 m区間）

被災が生じたと考えられる。また、船通し側の小口止めケーソンとL型塊の接合部では上部工法線が不連続になっており、斜め入射時には波の収斂による波力増大が生じた可能性が高い。

3. 実験の方法

長さ50mの二次元水路で縮尺1/20の模型を用い、以下に示す3種類の水理模型実験を実施した。

① 被災過程再現：前掲図-1の基本断面を対象に、表-1の9月24日、05:30~08:30の海象を再現して被災過程を再現した。ただし、消波工の変形や回折波の影響を調べるため、消波工天端を0.6m下げた断面および堤体前後に1mの水頭差をつけた断面についても実験を行っている。水路端に堰を設け、堰落ちした水をポンプで沖側に回流して堤体前後の水頭差を実現した。この方法を準用し、通常の水位の試験でも越波による堤体背後の水位上昇を防止している。また、規則波を用いた滑動実験で、波高とL型塊の波別変位量との関係を把握した。

② 破壊耐力測定：現行設計法におけるL型塊の抵抗側荷重の考え方の妥当性を検証するため、静的水平力載荷実験によって破壊限界耐力の測定を行っている。基本断面・設計潮位+4.04mについて、三分力計を用い、ワイヤーを介してL型塊を背後から水平に引っ張った。荷重の載荷点は水平波圧合力の作用高さとした。

③ 波力測定：基本断面について、三分力計によって背後からL型塊を支持し、潮位+4.40mで周期8sの規則波を作用させ、上部工とL型塊に働く透過波力と動的消波工荷重の合力を測定した。消波工の変形が波力に及ぼす影響を明らかにするため、消波工天端を0.3mおよび0.6m下げた断面についても波力を測定している。また、現行設計法における抵抗側荷重の有効範囲の妥当性を検討するため、水中あるいは空中で堤体模型を積み上げ、静水時に中詰石などから受ける静的消波工荷重の鉛直成分および水平成分（以下、それぞれ消波工の有効重量 W_r ・寄りかかり荷重 F_{BHS} と記す）を測定している。

4. 実験結果

(1) 被災再現実験

写真-3は、基本断面における被災再現状況を示すものである。L型塊の変位・後傾・マウンドへの潜り込みは、写真-1, 2および図-2に例示した現地被災状況と良く一致している。基礎マウンドや中詰石の変形等には相似則の影響もあるが、定性的な被災パターンの再現性は高い。観察では、滑動で生じるL型塊の微小な変位が消波工の沈下・変形さらに波力増大を誘発する悪循環のきっかけとなり、大きな被災に至る過程が明らかになった。

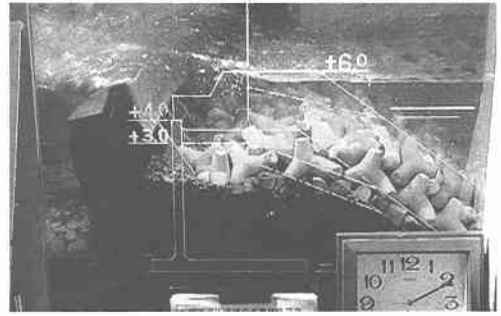


写真-3 L型塊の変化状況

一方、同じ有義波高でも、波群によって最大潮位+5.58m、最大波高 $H_{1/3}=3.46$ mの条件まで波を作用させても被災に至らない場合がある。台風18号来襲時に、L型塊が滑動限界付近にあったことの例証といえる。なお、消波工天端を下げたり水頭差を付けた場合、L型塊の安定性は著しく低下し、+4.04mの時点で被災した。

高潮の影響については、上部工天端高が+6.0mで最大潮位とあまり変わらないため越波が著しく、波力を受け止めていない。ここには示していないが、規則波による滑動実験では、必ずしも潮位が高いほど波別滑動量が大きいあるいは滑動限界波高が小さいとは限らず、少なくともL型消波防波堤に関して高潮は被災の直接の原因になっていないと思われる。パラペットの飛散がほとんど見られないことも上記を示唆する結果といえる。護岸の被災例の多くが、高潮による不完全消波部の出現で、パラペットに衝撃的波力が働いたことと対照的である。

(2) 破壊耐力実験

転倒限界モーメントは、後述の波力実験時に実測した全有効重量 W と寄りかかり荷重 F_{BHS} による抵抗モーメント M_{BR} の1.06倍となった。転倒限界の見定めは観察によったが、合田(1973)と同様にして求めた、水平力とマウンドの弾性変形によるL型塊の変位量との関係を実験結果と比較し、変位量で転倒限界を定義した場合でも、前記モーメント比はほぼ1.0となった。この結果は、L型塊の安定性の検討に寄りかかり荷重を考慮する必要があることを示している。

一方、L型塊が後傾してからの滑動限界荷重は全有効重量の0.86倍となり、予め測定した摩擦係数 $(\mu)_{exp}=0.54$ の値を上回った。これにはマウンドの直線滑り破壊(摩擦係数 $\tan \phi=0.84$)が関係していると考えられ、性能照査における変形量算定には考慮が必要になる。なお、この場合、寄りかかり荷重は主働土圧的に作用すると考えられるので無視できると思われる。

(3) 波力実験

a) 静的消波工荷重

抵抗側荷重となる消波工の有効重量 W_r を測定したところ、有効範囲は L 型塊前し端を通る鉛直面までの範囲となり、現行設計法の考え方の妥当性が確認された。

堤体模型を積み上げて有義波高 1 m の不規則波を 200 波程度作用させた後の寄りかかり荷重 F_{BHS} は、L 型塊の重量も含めた全有効重量 W の約 2 割のオーダーである。寄りかかり荷重を土圧と同様に考えると、上部工があるため消波ブロック重量を便宜上有効範囲における等分布荷重 q に換算し、式 (1) で求めることができる。

$$F_{BHS} = K_s \{ 1/2 \gamma (1 - \varepsilon) h^2 - 1/2 w_b (1 - \varepsilon) h^2 + q h \} \quad (1)$$

ここに、 K_s は土圧係数に相当する係数、 γ は中詰石の単位体積重量、 ε は同空隙率、 h は L 型塊の基面水深、 w_b は水または海水の単位体積重量であり、中詰石は没水状態である。測定された寄りかかり荷重から、 $K_s = 0.50 \sim 0.57$ (平均値 0.52) となった。なお、消波工の締め固まり状態の影響を十分考慮していないことに注意を要す。

b) 滑動合成波力と滑動安全率

図-5 は、入射波高 H_i と滑動合成波力 F_c の関係を示したものであり、パラメータは消波工の沈下量 d である。滑動合成波力は L 型塊の滑動安定性の検討に用いる波力で、滑動限界時の釣合式から導かれ次式で定義される。

$$F_c = \pm (F_H + \mu F_V) \quad (2)$$

ここに、 F_H 、 F_V は静水時を基準とした水平力と鉛直力である。 $\pm$ は F_H の正負に対応している。 μ は摩擦係数 (= 0.6) である。消波工天端を 0.6 m 下げた場合の F_c はほぼ波高に比例して増大するのに対して、基本断面あるいは 0.3 m ほど天端を下げた場合は必ずしも波高に比例しないことがわかる。これは、L 型塊の変位あるいは消波工内部の変形によって L 型塊前し端付近に働く抵抗側の荷重(ここでは噛み合わせ力と呼ぶ、バネのイメージ)が生じるためと考えられる。ここでの変位は滑動ではなく、三分力計センサーやアクリル樹脂製模型等の歪みによる瞬間的な変位である。消波工天端を 0.6 m 下げた条

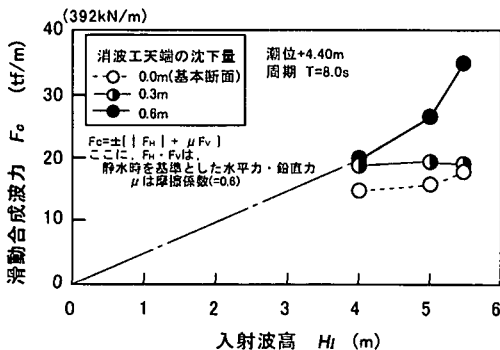


図-5 入射波高 H_i と滑動合成波力 F_c の関係

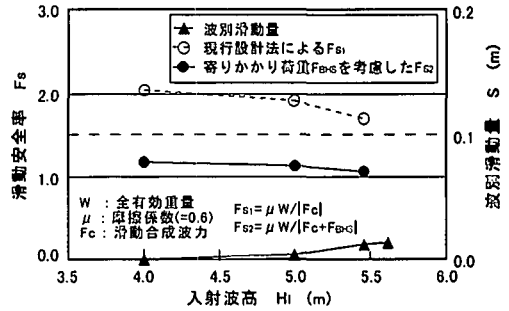


図-6 滑動安全率 F_s と波別滑動量 S

件では、波高に対する波力の増加の割合が比較的直線的であり、噛み合わせ力は発生していないようである。不完全消波となって衝撃的波力が作用し、消波工内部の破壊(噛み合わせバネの破断)が生じているのかもしれない。また、消波工の天端が低いほど大きい波力を示す。消波工の沈下によって著しく波力が変化することは、設計上の問題点となる。

図-6 は、入射波高 H_i と滑動安全率 F_s および波別滑動量 S の関係を示したものである。安全率 F_{s1} 、 F_{s2} は、図中に示す式で定義した。ここに、 F_c は今回の実験で得られた滑動合成波力、 μ は摩擦係数 (= 0.6)、 W は L 型塊の自重を含む全有効重量である。波別滑動量の変化から滑動限界波高は 5 m 程度と見なせる。寄りかかり荷重を考慮しない現行設計法の場合では波高 5 m で F_{s1} がほぼ 2 であるのに対して、寄りかかり荷重を考慮した場合は F_{s2} が 1.1 となり、後者はほぼ妥当な結果を与える。

以上、波力実験の結果でも、L 型塊の安定性検討には寄りかかり荷重を考慮する必要があることが示された。

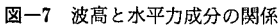
5. 設計法の改良

(1) 現行設計波力算定法の照査

現行の設計波力算定図表は、その作成当時、動的消波工荷重の変動が大きいことから、大きさ・作用点について安全側の設計とする配慮がなされている。この安全代に寄りかかり荷重相当分が含まれている可能性があるの

で、以下のように現行設計波力算定法の照査を行った。台風 18 号来襲時の条件を、波高 $H = 5.46$ m、周期 $T = 8.1$ s、水深 $h = 9.0$ m として、基本断面における滑動合成波力の平均波力強度を求めると、現行の波力算定図表では $0.36 w_b H$ 、寄りかかり荷重 F_{BHS} を含まない今回の実験値では $0.38 w_b H$ となり、両者はほぼ等しい。現行設計波力の安全代に F_{BHS} は含まれないことが確認された。したがって、L 型塊の安定性検討においては、 $K_s = 0.52$ 程度(暫定値)の寄りかかり荷重を設計体系に取り入れる必要があることが明らかになった。

また、現行の設計波力算定図表は、荻田港の設計条件



図一7 波高と水平力成分の関係

(2) 設計波力の考え方

まず第1に、図-7は、高橋ら(1990)が示した消波ブロック被覆堤の波高と水平力の関係図に、噛み合わせ力 F_{MS} を加えて再整理したものである。実際の現象として噛み合わせ力は発生すると考えられるが、中詰石や基礎マウンドの変形等には相似則の影響もあり、模型実験による噛み合わせ力の定量的な評価は困難と考えられる。現実には、噛み合わせ力を無視すなわち消波工荷重($F_{BMS} + F_{BND}$)は負にならないとして安全側の設計を行うべきである。図-7中の太い実線が波高と設計波力の関係を表す。なお、領域Ⅲの太い実線は、寄りかかり荷重を零として全水平力 F_{HT} が水平波力 F_{PH} に等しいと考えるものであり、設計体系への取り入れには注意を要す。

第3に、消波工の沈下等が波力に与える影響が大きい
については、現場でのメンテナンスが事業面でも容
れでないことを考慮して対応する必要がある。すなわち、
消波工の締め固まりによる沈下量と波力の関係を実験的

6. あとがき

③ 微小変位が消波工の沈下・変形さらに波力増大を誘発するという悪循環に陥り、被災に至った。

汎用防波堤を目指した次のステップでは、寄りかかり荷重の標準値を把握するとともに、消波工の締め固まり沈下による危険側条件での波力測定を行う必要があり、今後も水理模型実験を主体とした開発調査を逐次実施していく予定である。なお、本研究の遂行にあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所、耐波研究室下迫室長ならびに海洋・水工部高橋部長に、有益なご助言および波高分布計算に関するご指導を頂きました。また、福岡県新北九州空港連絡道路事務所、(旧)運輸省港湾技術研究所海象調査研究室ならびに(旧)運輸省第四港湾建設局苅田港湾工事事務所から高波や風況および現地測量結果などのデータを提供していただきました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所 (1989): L 型消波防波堤波力特性実験報告書, 204 p.
- 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所・(株)三洋コンサルタント (2000): L 型消波防波堤の水理特性調査報告書, p. 101.
- 合田良実 (1973): 衝撃的波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察, 港研報告, Vol. 12, No. 3, pp. 3-29.
- 下迫健一郎・増田慎太郎・高橋重雄 (2000): 期待滑動量を用いた防波堤の信頼性設計法における法線形状の影響, 海岸工學論文集, Vol. 47, pp. 821-825.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港研報告, Vol. 29, No. 1, pp. 53-75.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石賀国朗 (2000): 防潮護岸の高潮時の衝撃波力による被災とその再現実験—台風 9918 号による高潮・高波災害に関する検討—, 海岸工學論文集, Vol. 47, pp. 801-805.
- 山本哲朗・瀬原洋一 (2000): 山口県西部で被災した護岸の調査報告, 土木学会誌, Vol. 85, May, pp. 68-72.