

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

下迫健一郎*・増田慎太郎**・高橋重雄***

1. ま え が き

混成防波堤直立部の耐波設計においては、これまで滑動を許容しないことを前提として、設計波高に対して安全率を 1.2 以上とする設計法が用いられてきた。しかしながら、近年では、多少の滑動は許容するものとして、耐用期間全体での滑動量の期待値（期待滑動量）を一定の値以下とする信頼性設計法が提案されており、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（1999）においても現行設計法の代わりに用いることができる設計法として紹介されている。

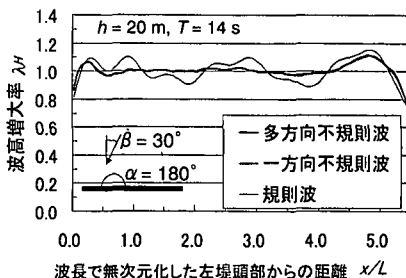
期待滑動量を用いる設計法については、これまでに数多くの研究が行われている（下迫・高橋, 1994；谷本ら, 1996；河合ら, 1997；下迫・高橋, 1997；下迫・高橋, 1998；阿部ら, 1999；合田・高木, 1999；池末ら, 1999）。しかしながら、いずれも二次元的な検討であり、防波堤の法線形状による平面的な影響は検討されていない。一方、実際の被災は、ほとんどが堤頭部付近や隅角部などの波高増大が生じる箇所や、消波ブロックの不完全被覆部で衝撃波力による波力増大が生じる箇所など、特定の位置で発生しており、新しい設計法によって経済的な断面を採用する場合、法線形状の影響について十分に考慮する必要がある。

本研究では、このような波高増大や波力増大による期待滑動量の変化について定量的に検討するとともに、現地の被災事例を対象として、波高増大や波力増大の影響を考慮した滑動量の再現計算を行い、期待滑動量を用いた設計法における防波堤の法線形状の影響について検討した。

2. 防波堤法線方向の波高分布と期待滑動量

2.1 法線形状による波高分布の変化

現地における防波堤の滑動は、全延長にわたって一様に生じることはなく、滑動量は法線方向に沿って波状に分布することが多い。伊藤・谷本（1971）はこれを「蛇



図一 防波堤法線沿いの波高増大率（一文字堤）

行災害」と名付け、防波堤での回折波の影響による波高変動が主な原因であるとして、規則波が半無限堤に入射した場合の波高の変動と滑動量の関連について検討している。また、川崎ら（1996）は、多方向不規則波の場合の回折現象について統計的に検討し、滑動量の変動が波力分散の変動とよく一致することを示している。

図一は、延長 1000 m の一文字堤における法線沿いの波高増大率 λ_h について、小舟・大里（1976）の方法を用いて計算したもので、規則波、一方向不規則波、多方向不規則波のそれぞれの結果を示している。計算条件は水深 h が 20 m、入射波の周期 T が 14 s、法線直角方向に対する波向き β が 30° であり、不規則波における成分波の数については、周波数と波向きそれぞれ 7 成分としている。

規則波の場合、法線方向に波高が大きく変動しており、最大で 16% の波高増大が生じている。これに対して、一方向不規則波と多方向不規則波はほぼ一致しており、堤頭部付近以外では波高の変動はほとんどなく、波高増大率は最大で 12% である。このように、規則波と不規則波では計算結果に大きな違いが生じている。本論文においては、以後の波高増大率の計算はすべて多方向不規則波を用いるものとする。なお、ここには示していないが、防波堤の延長や波向きを変えた場合についても計算を行い、ほぼ同様の結果が得られている。

図二は、隅角部を有する防波堤の堤体前面での合成波高分布について、多方向不規則波で計算した結果を示したもので、入射波高 H_i で無次元化して示している。なお、現地においては、隅角部に消波ブロックを設置して

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長
** 運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室
*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 特別研究官

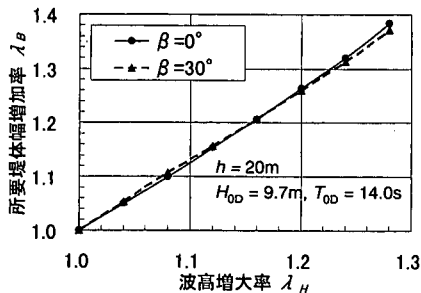


図-5 波高増大を考慮した場合の所要堤体幅の増加率

大きくする必要がある。ただし、前述したように、隅角部の波高増大は消波ブロックの設置により抑えることができる。

3. 不完全被覆部の波力増大と期待滑動量

3.1 不完全被覆部の波力算定法

防波堤隅角部に消波ブロックを設置した場合や、消波ブロック被覆堤の施工途中でケーソンの延伸を先行し、ブロックの設置が遅れる場合など、ケーソンが局所的に不完全被覆となり、波力増大が生じる場合がある。上久保ら（1998）は、施工時を対象とした消波ブロック被覆堤の不完全被覆部における波力および滑動特性について検討している。また、高橋ら（1990）も不完全被覆時の波力増大について検討を行っている。今回、これらの実験結果等を参考にして、以下のような波力算定法を提案する。

1) 被覆されていない部分に作用する水平波力

消波ブロックをマウンドとみなし、静水面からブロック天端までの深さ d_b を合田式におけるマウンド上水深 d 、ブロック天端幅 b をマウンド前肩幅 B_m に置き換え、衝撃碎波力係数（高橋ら、1992）を用いて波力を求める。ただし、 $d_b < 0$ の場合は $d_b = 0$ とする。

2) 被覆されている部分に作用する水平波力

通常の消波ブロック被覆堤と同様に、合田式による波力に波力低減係数 λ をかける。 λ は以下の式で定義される。

$$\lambda = 1.0 - \frac{d - d_b}{d} (1.0 - \lambda) \quad (1)$$

ここに、

λ : 通常の消波ブロック被覆堤での波力低減係数。

1) と同様に、 $d_b < 0$ の場合は $d_b = 0$ とする。

3) 揚圧力

2) と同様に、波力低減係数として λ を用いる。

なお、この算定法は、滑動量の計算に用いるためのものであり、必ずしも実際に作用する衝撃碎波力をそのまま評価しているわけではない。

3.2 不完全被覆部の期待滑動量の計算法

不完全被覆部における滑動量については、3.1 で求められる波力をもとに、下迫・高橋（1998）の提案した消波ブロックのない通常の混成堤に対する波形の時間変化モデルを、以下のように修正して計算する。

1) 被覆されていない部分に作用する水平波力

通常の混成堤と同様に、衝撃力成分（三角波形）と重複波力成分（正弦波形）を重ね合わせた波形を用いる。ただし、衝撃力成分の作用時間 τ は、消波ブロックがない場合の断面で計算される値を用いる。

2) 被覆されている部分に作用する水平波力

波形としては、三角波成分のみを考える。作用時間 τ については 1) と同じとする。

3) 揚圧力

1) と同様に、三角波と正弦波を重ねた波形を用いる。作用時間 τ についても同様とする。

消波ブロック被覆堤の場合、水平波力の波形においては重複波成分のピークはほとんどなくなるため、滑動量の計算上は三角波成分のみを考慮すればよい。したがって、不完全被覆の場合における被覆されている部分の水平波力についても、この考え方を適用している。

図-6 は、消波ブロックの高さを変化させた場合の滑動安全率、波力および滑動量の変化を示したもので、横軸にはブロック天端水深とマウンド上水深の比 d_b/d をとっている。計算条件は、水深 h が 20 m、堤体位置における設計波（50 年確率波）は有義波高 $H_{D1/3}$ が 8.94 m、最高波高 H_{max} が 15.09 m、有義波周期 $T_{D1/3}$ が 14.0 s で、消波ブロックがない場合に 50 年間の期待滑動量が 30 cm となる断面と、設計波に対する滑動安全率が 1.2 となる断面を対象としている。

図において、滑動安全率 $S.F.$ および水平波力 F_h については、設計波（ H_{max} ）に対する値であり、 F_h についてはブロックがない場合（ $d_b/d = 1.0$ ）の波力で無次元化している。また、期待滑動量については、設計有義波相当の波が 2 時間作用したときの滑動量 S_{ED} の値を示している。なお、 d_b および d は LWL 時を基準として示しているが、波力については最も大きくなる HWL 時（+2.0

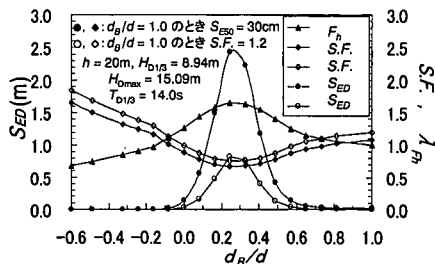


図-6 ブロックの高さと波力および期待滑動量の関係

m)で計算しており、また、滑動量の計算ではLWLからHWLまでの潮位変動と、波高に比例した大潮による水位上昇を、ばらつきの影響も含めて考慮している。

今回の条件においては、水平波力 F_h および期待滑動量 S_{Ed} は $d_B/d=0.25$ のとき最大であり、ブロックなしのときに比べて波力は約1.65倍となる。これは、上久保ら(1998)の実験結果とほぼ一致している。また、滑動量については、ブロックなしのときの100倍(2.4 cm → 2.42 m)になっている。

図-6においては、消波ブロックの天端水深 d_B は1函のケーソンについては一定で、また、 d_B の値によって天端幅 b は変化しないと仮定して計算している。しかしながら、実際の不完全被覆部では d_B および b は連続的に変化していることが多く、その場合、滑動量は1函当たりの平均的な波力で検討するべきである。

図-7は、図-6の計算条件において、ケーソン1函の長さを20 m、消波ブロック端部の法線方向の勾配を1:2と仮定し、ブロックの高さを変化させたときの期待滑動量を示したものである。波力については、まずケーソンを法線方向に5分割し、各断面ごとに波力を求め、その合力を用いている。横軸は、ケーソン中央でのブロック天端水深 d_{BC} をマウンド天端水深 d で無次元化している。なお、図にはブロック天端幅 b を一定とした場合と、天端が低くなるにつれて b が大きくなる場合の2通りの結果を示している。 b を変化させた場合、波力が平均化されるため、図-6のケースと比較すると滑動量がやや小さくなるが、 d_{BC}/d の広い範囲で比較的大きな滑動量となる。一方、 b を一定とした場合には滑動量はかなり小さい。

4. 被災事例の検証

期待滑動量の計算において波高増大および波力増大を考慮することの重要性を確認するため、現地における被災事例を対象として、今回の検討結果をもとに滑動量の再現計算を行った。

図-8は、計算の対象とした、ある港の被災時の平面図と被災箇所を示したものである。この被災では設計波高

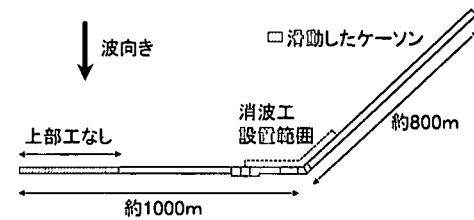


図-8 対象とした防波堤の平面図

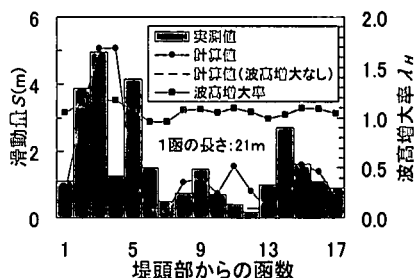


図-9 堤頭部付近における滑動量の計算値と実測値

を3割以上も上回る波が発生したが、被災したのは上部工が未施工で重量が不足していた堤頭部付近と、不完全被覆部のあった隅角部付近のみであり、他の部分では滑動は生じなかった。

滑動量の再現計算に当たっては、入力データとして被災時に計測された1時間ごとの沖波波高および周期を確定値として用い、それ以外の波浪変形計算等には通常の計算と同様にばらつき等を考慮している。波の継続時間は、高波のピーク時を含む24時間であり、乱数を変えて計算を1万回繰り返し、その平均値を期待滑動量と定義して実際の滑動量と比較した。

堤頭部については、まず法線方向の波高増大率を求め、波高増大を考慮した場合の滑動量を計算した。図-9は、波高増大率、各ケーソンの滑動量の実測値および計算値を示したものである。波高増大を考慮しない場合の計算値は、0.27 mと実際の滑動量に比べてかなり小さい。一方、波高増大を考慮した計算結果と実際の滑動量は、多少のばらつきはあるものの、平均的にほぼ同じくらいの値となっており、堤頭部から3函付近で滑動量が最大となるなど、全体的な分布形もかなりよく一致している。

隅角部については、現地ではもともと波力増大を考慮して、不完全被覆部については断面を大きくしており、この部分ではほとんど滑動が生じなかった。ところが、隣接する隅角部側のケーソン2函で大きな滑動が生じている。これは、設計波を大きく上回る波が作用したため消波ブロックが移動し、本来は完全に被覆されていた部分が不完全被覆状態となり、波力増大が生じたためと考えられる。

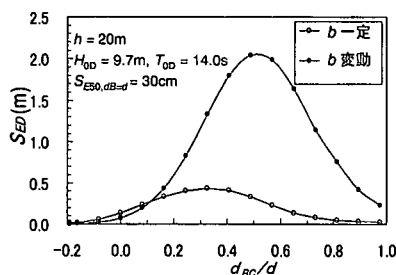


図-7 不完全被覆部における期待滑動量

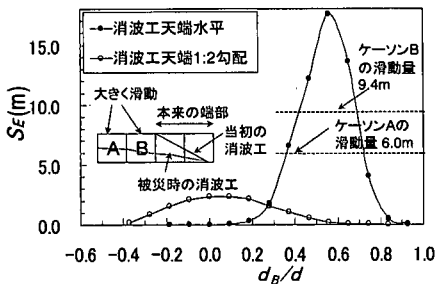


図-10 隅角部における滑動量の計算値と実測値

図-10は、ブロックが移動してブロック天端が低下したと仮定して、滑動量を計算したもので、横軸にブロック天端水深とマウンド上水深の比 d_b/d 、縦軸には滑動量の計算値をとっている。滑動時にブロックがどのような状態であったかは明らかでないが、ここではブロック天端が水平になった場合と、1:2勾配のまま低下した場合について計算を行った。実際にはブロック天端はかなり水平に近かったと考えられる。図には滑動量の実測値も示しているが、計算値の範囲内にあり、不完全被覆部の滑動量算定法がある程度適用可能であることがわかる。

5. まとめ

期待滑動量を用いる設計法によって、これまでの滑動安全率を用いた設計法よりも経済的な断面とする場合、従来の設計において、2割の安全率の余裕によって被災を免れていた部分で被災が生じやすくなる。したがって、堤頭部、隅角部、不完全被覆部など法線形状の影響により他の部分よりも大きな波力が作用する箇所については、十分な検討が必要である。こうした問題に対する対策として、以下のような方法が考えられる。

- 1) 堤頭部：完成断面において波高増大が生じる箇所については、ケーソン幅を大きくするなどして重量を増やし、期待滑動量を同じにする必要がある。ただし、法線の延伸途中における暫定的な断面であって、堤頭部である期間が短く大きな滑動が生じる可能性が低い場合には、特に対策を考えなくてもよい。
- 2) 施工途中における不完全被覆部：可能であれば、ブロックを堤頭部の港内側まで巻くか、ケーソンを前にずらしたり方塊などを用いたりすることでブロックの法止めとするなど、不完全被覆部を作らない工夫を行う。やむを得ず不完全被覆部を設ける場合、できるだけ堤頭部に近づくようブロックを延ばすことが望ましい。これは、堤頭部から少し離れた位置では波高増大が生じるが、堤頭部に近い場所では逆に波高が減少するので、波力増大の影響を小さくで

きるためである。

- 3) 隅角部：波高増大を防ぐためには消波ブロックを設置するのが有効であるが、端部の不完全被覆部については、波力増大を考慮してケーソン重量を増やし、滑動抵抗を大きくする必要がある。また、消波ブロックの安定性についても十分考慮する必要がある。

なお、著者らは消波ブロックの安定性についても変形を考慮した信頼性設計法を提案しており(高橋ら, 1998)、今後は、ブロックの変形とケーソンの滑動を連動して計算する方法についても検討を進める予定である。

参考文献

- 阿部光信・興野俊也・長舩 徹・貝沼忍男 (1999): 防波堤の信頼性設計法における時化のモデル化について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 916-920.
- 池末俊一・高山知司・下迫健一郎 (1999): 混成防波堤の滑動信頼性に及ぼす波浪の波向変化特性の影響, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 926-930.
- 伊藤喜行・谷本勝利 (1971): 混成防波堤の蛇行災害, 港湾技研資料, No. 112, 20 p.
- 上久保勝美・木村克俊・藤池貴史・明田定満・竹田英章・遠藤 強 (1998): 消波ブロック被覆堤の施工時における直立部の滑動特性, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 339-344.
- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港研報告, 第36巻第4号, pp. 3-41.
- 川崎俊正・磯部雅彦・渡辺 晃・横木裕宗・小竹康夫・藤原隆一 (1996): 防波堤先端付近における多方向不規則波の統計的性質, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 771-775.
- 合田良実・高木泰士 (1999): 信頼性設計法におけるケーソン防波堤設計波高の再現期間の選定, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 921-925.
- 小舟浩治・大里睦男 (1976): 防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究, 港研報告, 第15巻第2号, pp. 55-88.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1994): 混成防波堤の期待滑動量の計算法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 756-760.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 831-835.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1998): 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, 第37巻第3号, pp. 3-30.
- 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関する波力とブロック荷重, 港研報告, 第29巻第1号, pp. 53-75.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三 (1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680.
- 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内 潔・高山知司・谷本勝利 (1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港研報告, 第37巻第1号, pp. 3-32.
- 谷本勝利・古川浩司・中村廣昭 (1996): 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 846-850.
- 日本港湾協会 (1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1181 p.