

捨石傾斜堤被覆石の耐波安定性に関する性能照査法

高橋 重雄*・半 沢 稔**・下迫健一郎***

港湾や海岸構造物の設計に性能設計を適用する必要性が指摘されるようになってきている。構造物の性能をより具体的に示す上では、波浪等の外力に対する構造物の変形量を取り込んだ照査手法の確立が望まれているところである。本研究は防波堤の重要な構造形式のひとつである捨石傾斜堤を対象とし、その被覆石の耐波安定性に関する性能照査法の確立を目的としている。ファン・デル・メーアの提案式を性能照査式として用い、傾斜堤被覆石の安定性能（被災度）について種々検討を行った。それら安定性能の特性を明らかにした上で、性能マトリックス等を用いた性能設計の考え方を提案するものである。

1. ま え が き

近年、港湾や海岸構造物の設計に性能照査型の設計（性能設計）を適用する必要性が指摘されるようになってきている。建設される構造物が具体的にどのような性能を持っているのかを明示する事は、利用者や納税者等に対する説明責任を考えても必要である。特に、設計条件を上回る異常波浪の発生確率は必ずあり、そうした場合の構造物の災害の程度やその被災が及ぼす影響など、総合的に性能を照査することは重要である。

著者らはこうした立場から、防波堤を対象に性能設計法を確立する研究を進めている。例えば、混成防波堤の消波ブロックの被災度や直立部の滑動量などの変形量の照査手法の検討を行っている（半沢ら、1996；下迫・高橋、1997）。また、複数の外力レベル（波高の確率年）に対して、許容される滑動量や被災度といった変形量を考える性能マトリックスの提案を行い、性能設計の枠組みについても検討を行っている（高橋ら、2000；2003）。

防波堤の重要な構造形式のひとつである捨石傾斜堤については、歴史的にも施工実績が豊富なヨーロッパを中心に研究が進められてきている。Van der Meer (1987) は捨石傾斜堤を対象とした広範囲な水理実験に基づき、従来の K_D 値を用いた手法に代わって、被害の程度、波の継続時間、波浪特性を取り込んだ、被覆石に対する新しい設計公式を提案した。ヨーロッパではこのファン・デル・メーア式をベースに信頼性設計への取り組みも行われており、部分係数を用いたいわゆるレベル 1 の設計法あるいは、安全性指標に基づくレベル 2 の設計法の検討も行われている（例えば、PIANC, 1992；Van der Meer, 1988）。しかし、これらは被災の発生確率をベースにした考え方であり、主として設計条件（例えば、50 年確率波）に対する被災発生確率をある一定値以下に抑えることを主眼にした設計法である。混成堤と同様に傾斜堤被覆石

についても、特に設計条件を超えるような波浪規模に対する変形や、耐用年数間における被害の累積値を具体量として把握することは重要である。

本研究は、捨石式傾斜堤を対象に、その被覆石の耐波安定性に関する性能設計法の確立を目的とし、被覆石の安定性能（被災度）について、様々な角度から系統的に検討を行い、その特性を明確にした上で、性能マトリックス等を用いた被覆石に対する性能設計法の構築を図るものである。

2. 傾斜堤被覆石の安定性能照査法

（1）ファン・デル・メーアの安定性能照査式

斜面の被覆材の所要質量は一般に以下の安定数 N_s を用いたハドソン式にて算定される。

$$M = \rho_r H^3 / \{N_s^3 (Sr - 1)^3\} \dots\dots\dots (1)$$

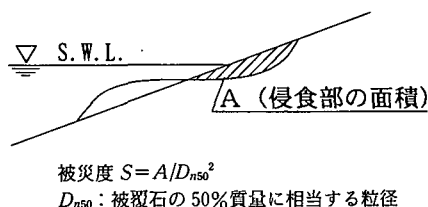
ここに、 M ：被覆材の所要質量(t)、 H ：安定計算に用いる波高(通常は有義波高)(m)、 ρ_r ：被覆材の密度(t/m³)、 Sr ： ρ_r/ρ_w (ρ_w ：水の密度)。

歴史的には $N_s^3 = K_D \cot \alpha$ (K_D ：被覆材の安定定数、 α ：斜面勾配) の関係に基づき、 K_D 値を用いたハドソン式 (Hudson, 1959) により所要質量が設計されてきていた。この手法は実績もあり現在でも簡便に所要質量を求める際には使用されている。

しかし、1980 年代以降のヨーロッパにおける構造物の信頼設計あるいは、性能設計へ向けた流れの中で、港湾や海岸等の沿岸構造物についても種々検討が始められた。そうした中で先述のように、ファン・デル・メーアは全く新しい形式の安定数算定式を構築している。

紙面の関係でここには式は示さないが、ファン・デル・メーア式は、被害の程度（変形量）を被災度 S (図-1) として表し、波浪の継続時間を波数 N として取り込んでいるのが大きな特徴である。更に、コア材、フィルター層および、被覆層による堤体構造形式の違い（透水性が小さくなるほど安定性が低減する影響）を透水指数 P として巧みに取り込んでいる。

* フェロー 工博 (独法) 港湾空港技術研究所 統括研究官
** 正 会 員 工修 (株) テトラ テトラ総合技術研究所
*** 正 会 員 (独法) 港湾空港技術研究所 耐波研究室長

図-1 被災度 S の定義表-1 二層被覆に対する各段階の変形レベル S

斜面勾配	初期被災	中間被災	被災
1:1.5	2	3~5	8
1:2	2	4~6	8
1:3	2	6~9	12
1:4	3	8~12	17
1:6	3	8~12	17

また、ファン・デル・メーアは二層被覆を想定した場合の種々段階に対する設計に用いる変形レベル S を斜面勾配ごとに表-1のように提案している (CIRIA, 1991)。勾配が緩くなるほど下層部に達するまでの変形量は大きくできるといった特性と対応している。

以上のようにファン・デル・メーア式は、種々のパラメータを含み、構造物の性能を具体的に表すような式として構成されており、それによって構造物の性能の違いを明確に表現できるという点で非常に優れた式であるといえる。更には、波数が考慮できることにより、耐用年数間における変形の累積も検討できるといった性能設計に適用可能な利点をも有している。従って、本研究においてはファン・デル・メーア式を傾斜堤被覆石の安定性照査式とし、以降の検討に用いるものとした。

(2) モンテカルロ法による被災度の算定法

傾斜堤被覆石の安定性能においては、変動性を考慮した検討も行っており、検討にはモンテカルロ法を用いた。その際、沖波波高、潮位、高潮および、波浪変形の変動性については下迫ら (1998) に準じている。また、周期については、半沢ら (1996)、高橋ら (1998) に従い、沖波の波形勾配を 0.03 とし、個々の沖波波高に対応して周期を計算している。波浪変形についてはこの波形勾配を用いて堤体位置の波高を求め、ファン・デル・メーア式で必要となる波形勾配は、この堤体位置での波高と先に設定した周期により計算される沖波波長を用いて計算している。

また、被覆石の質量の変動性については、被覆石の粒径および、比重の変動の形で取り込むものとした。本研究においては、CIRIA (1991)、荒木ら (1999) による石

の粒径に関するデータ等、また、従来のモンテカルロ法における諸パラメータの変動性の取り込みにおける値をも参考にしながら、粒径、比重ともに正規分布に従うものとし、その変動係数をそれぞれ 0.1 および、0.05 とした。表-2 に本検討で用いた平均値の偏りと変動係数の値を示す。

なお、モンテカルロ法における計算回数は 2000 回とし、その平均値および、確率分布を検討した。

表-2 変動要因の平均値の偏りと変動係数

変動要因	平均値の偏り	変動係数
沖波	0	0.1
高潮	0	0.1
波浪変形	0	0.1
粒径	0	0.1
比重	0	0.05

3. 安定性能照査例

(1) 安定性能の照査手順と対象断面

傾斜堤被覆石の安定性能照査は、以下の手順で行う。すなわち、

- ① 沖波 (確率波高の極値分布形も含む) を設定
- ② 水深、海底勾配、傾斜堤の堤体構造等を設定
- ③ 設計波 (50 年確率波) に対して変形量 S を設定、およびファン・デル・メーア式による被覆石の所要質量の算定
- ④ 種々の異常波浪 (確率波高) が作用した場合の被災度の算定
- ⑤ 耐用年数間 (50 年) における累積被災度の算定の検討を行っている。

次項に計算例を示すが、この例では沖波の極値分布はワイブル分布 ($k=2.0$, $A=1.53$, $B=1.73$) であり、設計波 (50 年確率波) は $H_0=4.76$ m, $T=10.1$ s である。また、海底勾配は 1/50、設置水深 10 m、潮位差 1.0 m (設置位置での波高は 4.65 m) とした。堤体構造は、捨石マウンドをフィルター層、更にその表層を被覆石で覆う堤体構造 (ファン・デル・メーア式では $P=0.4$ に対応) であり、斜面勾配は 1:2、設計被災度は $S=2$, $N=1000$ である。この条件によりファン・デル・メーア式で算定される所要質量は 11.7 t である。

(2) 確率波と変形量 (被災度) の関係

図-2 は、横軸に沖波の波高をとり、被災度を示したものである。横軸にはその沖波の確率年も示している。

図中の□印で示される曲線は、沖波が定まった場合にそれによって発生する被災度 S を確定論的な方法で計算したものである。これにより、どの程度の波高 (確率波) の時に、どの程度の被災が発生するのかがわかり、被覆石の耐波性能が具体的な形でイメージすることが可能で

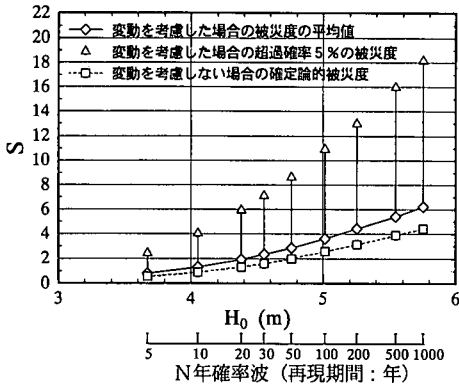


図-2 確率波高とそれによる被災度

ある。例えば、50年確率波では被災度が2であるが、500年確率波でも3.9と約2倍程度にとどまることがわかる。一方、確率年の小さな沖波条件でも被災が生じる。10年確率波でも0.9と50年確率波の1/2程度の被災度となる。

図中のもう一方の曲線(◇)は、それぞれの沖波波高に対して、波浪変形や石の粒径、比重等の変動性を考慮して計算される被災度 S の期待値(平均値)を示しており、同時に超過確率5%となる被災度までの範囲を△印にて示している。例えば、50年確率波が来襲した場合には、平均的には被災度 S は2.9となり、変動性を考慮することにより被災度は確定値の1.5倍程度となる。5%超過確率に対応する被災度は8.7と平均値の3倍となる。また、500年確率波が来襲した場合の平均値および、5%超過に対応する被災度はそれぞれ5.5、16.0となり、50年確率波の場合の2倍程度となることがわかる。

(3) 耐用年数間の累積被災度とその確率分布

図-3は、耐用年数50年間における累積被災度の確率分布であり、横軸に被災度を取り超過確率として示したものである。このような確率分布により、耐用年数間において被覆石がもつ耐波性能が、被災度により具体的に示されることになる。(図中には、質量を割増した場合についての計算結果も示している。)

割増をしない場合には、50年間の累積被災度の期待値(期待被災度) S は8.2であり、設定値である $S=2$ の約4倍となる。また、5%の超過確率に対応する被災度は16.6と設定値の約8倍と計算される。これらの値は50年間の累積値であり、1回の時化に対する被災度はそれほど大きいものではなく、ある程度被災を受けた段階で修復することを考えた場合には、実際面での問題は生じないものと考えられる。

50年間の累積被災度 $S=8.2$ は変動を考慮した1時化に対する被災度でみると5000年確率波に対する被災度

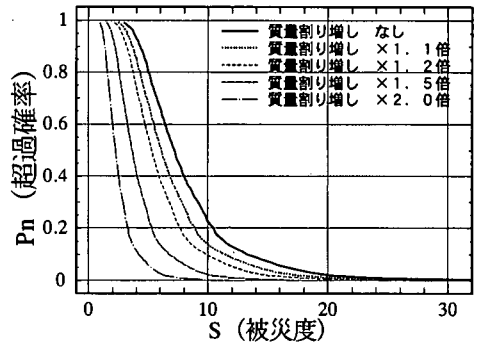


図-3 50年間の耐用年数間における累積被災度

に相当する。高橋ら(2000)の検討結果によれば、混成堤ケーソンの滑動量や、消波被覆堤のブロックの被災度では、50年間の累積値は、500年確率波1時化による変形(滑動量、被災度)に近いとされている。

ケーソンの滑動やブロックの被災は、その基にしている照査式の特長から、ある波高を閾値としてそれを超える波高領域で変形を生じることである。それに対して、本検討で使用しているファン・デル・メープ式では、ごく小さな波高によっても被災が計算されるものの、波高の増大に対する被災の変化の仕方はケーソンやブロックに比べて緩やかな傾向がある。こうした特性のため、被覆石においては50年間の累積値がより大きな確率波高に対する被災度に対応していると考えられる。

(4) 質量割増の効果

図-4は、図-2と同様に横軸に沖波の波高と確率年を取り、変動を考慮した被災度(図-2の◇印に対応)を示したものであり、被覆石の質量割増による被災度への影響を見たものである。質量を2割増すると、50年確率波に対しては被災度が2.13、500年確率波では4.03、1000年確率波では4.57と、割増しない場合の75%程度に被災を抑えることができる。更に、5割増とすると1000年確率波でも3.17と割増しない場合の50%程度に被災を抑えられることがわかる。

表-3は、質量割増の影響をまとめたものである。最上段は50年確率波に対する確定論的な被災度である。質量の割増がない場合には設定値の2.0であるが、2割増では1.48、5割増では1.02と小さくなる。

2段目は、50年確率波に対する変動性を考慮した場合の被災度の平均値を示している。質量割増のない場合には被災度は2.89と、前述したように変動を考慮しない場合(確定値)の約1.5倍となっている。質量を2割増とすると2.13、5割増とすると1.47にまで被災度を抑えることができる。

3段目は同様に500年確率波に対する変動を考慮した被災度の平均値である。質量割増がない場合には被災度

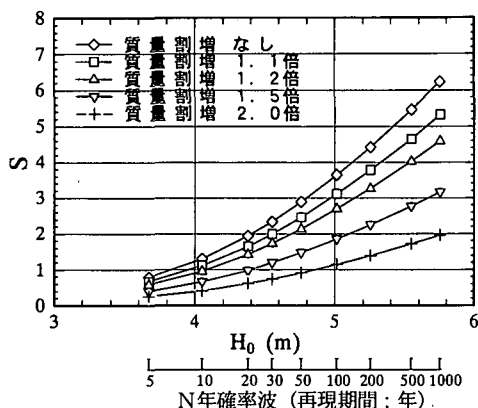


図-4 確率波高とそれによる被災度（質量割増の影響）

表-3 質量割増の影響

質量の割増	×1.0	×1.1	×1.2	×1.5	×2.0
50年確率波に対する確定論的被災度	2.00	1.71	1.48	1.02	0.63
50年確率波に対する変動を考慮した場合の被災度の平均値	2.89	2.47	2.13	1.47	0.91
500年確率波に対する変動を考慮した場合の被災度の平均値	5.46	4.66	4.03	2.78	1.72
耐用年数50年間の累積被災度（期待被災度）	8.19	6.99	6.05	4.17	2.58

は5.46と50年確率波に比べて約2倍の被災度となる。2割増で4.03、5割増で2.78である。

最下段は、耐用年数50年間の累積被災度の平均値（期待被災度）であり、最上段の確定値の約4倍となっている。質量を2割増および、5割増とすることで期待被災度はそれぞれ6.05および、4.17に抑えられることがわかる。全体的に見て2割増で75%、5割増で50%程度に被災度が低減できることがわかる。

(5) 消波ブロックとの比較

ここでは、被覆石の安定性能を消波ブロック被覆混成堤の消波ブロックのそれと比較してみる。消波ブロックについては、著者らが提案した手法（高橋ら、2000）を用いて安定性能の照査を行う。被覆石に対して設定されたのと同様条件に対して、 $N_0=0.3$ 、 $N=1000$ として算定される消波ブロック質量は10.3tである。

図-5は、この条件に対して図-2と同様に確率波高に対する被災度 N_0 を示したものである。図-2と比較すると、被覆石では比較的小規模の波高から被災が生じるのに対して、ブロックの場合はある程度大きな波高レベルになって後に被災が生じることがわかる。波高増大に対する被災の増加の傾向はブロックの方が大きいこともわかる。これは、前述したように、ブロックに対する安定

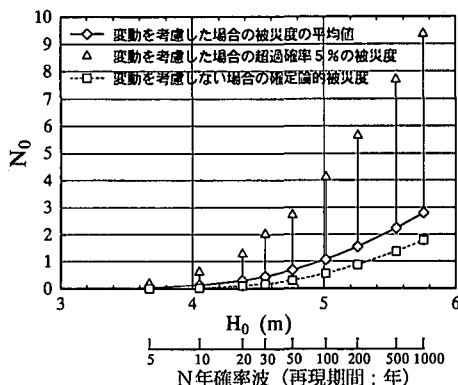


図-5 確率波高とそれによる被災度（消波ブロック）

数の式によっており、ある波高レベルまでは被災が生じないものの、その値を超える領域では波高増大に対して感度が大きくなるという、性能照査的特徴が反映されている。

4. 傾斜堤被覆石の性能設計の考え方

(1) 性能照査に基づく3つの設計法

耐波安定性の性能を照査することができると、変形量（被災度）という性能に基づく設計が可能になる。ここでは、混成堤のケーソンや消波ブロックの場合と同様に以下の3つの方法を想定する（高橋ら、2000）。

- ・方法-1：確率波とそれによる確定論的な変形量による設計
 - ・方法-2：確率波とそれによる変動を考慮した変形量の平均値による設計
 - ・方法-3：耐用年数間の累積変形量の期待値による設計
- ここで、方法-1は従来の設計に最も近い方法であり、本研究における検討初期断面の設定方法がこれにあたる。ただし、性能設計の主旨から考えると、設計条件を超える波浪（確率波高）の来襲によって生じる変形量を、種々パラメータの変動を考慮した平均値として具体的に把握することが必要である。著者らは、今後は方法-2による設計法が重要であると考えている。

(2) 性能マトリックス

表-4はその方法-2による場合の、被覆石の被災度の許容値を、縦軸に外力である確率波高のレベルを、横軸に変形のレベルをとったいわゆる性能マトリックスの形で示したものである。これらの数値は確定したものではなく、あくまでも具体的なイメージを表すために例示したものである。表では構造物の重要度に応じてB（通常）、A（高い）、C（低い）で区分している。

なお、耐用年数間の累積変形量の期待値による方法-3の設計も必要であり、方法-2による設計を検証、補完す

表-4 被覆石の被災度の許容値(性能マトリックス)(斜面勾配1:2の場合)

設計レベル (再現期間)	性能レベル (変動を考慮した被災度 S)			
	使用限界 (S=2)	修復限界 (S=4)	終局限界 (S=6)	崩壊限界 (S=8)
5年	B	C		
50年		B	C	
500年	A		B	C
5,000年		A		B

表-5 被災度の許容値(耐用年数間の累積値)

構造物の重要度	A	B	C
耐用年数間の期待被災度	4	8	12

る意味合いがある。表-5は方法-3に従う場合の変形量の許容値を示したものである。表-4と同様にこれらの数値は設計者の責任において設定されるべきものであり、表中の数字は目安を示している。

例えば、通常の構造物(重要度B)の場合には、現行の設計法に従って、50年確率波に対する確定値としての被災度Sを2として設計すれば、表中の許容値をほぼ満たすように設定されている。表-3に示したように、50年確率波、500年確率波に対応する変動を考慮した被災度はそれぞれ、2.9および、5.5であり表-4の許容値以下である。なお、表-3には示していないが5000年確率波に対する被災度は7.9でありこれも許容値を満たしている。

50年間の累積被災度は8.19であり5000年確率波に対する値と同レベルである。この累積値8.19はわずかに表-5の許容値を超えるが、実務上はあまり問題がないと考えられる。ただし、この累積値を許容値以下にすることが必要となった場合には、例えば、表-3を参考に質量を1割程度割増すことが必要である。

また、重要度がAの場合には500年確率波に対する被災度Sを2と小さく抑えることを基準として設定している。50年間の累積値の許容値は500年確率波に対する被災度の2倍と設定しており、重要度Bに比べて相対的に大きめの設定としている。重要度Aでは耐用期間中の被災に対する修復の可能性が高いことを考慮し許容値を設定している。平均値のみでなく5%超過確率の値も小さく抑えることをも考慮している。

5. あとがき

傾斜堤被覆石を対象として、ファン・デル・メーア式をその照査式とした耐波安定性能の照査方法を示し、設計に用いる性能マトリックスの提案を行った。

変形量をベースにした性能設計はまだ端緒に着いたばかりであり、先に述べたように性能マトリックス内の許容変形量や、変形レベルの定義等については更に検討を要する。今回対象とした捨石傾斜堤の被覆石についても、構造条件(透水指数)や斜面勾配による影響、水深や海底勾配等の条件による影響など、今後はより広範囲な条件についても検討を進め、様々な設計条件に対応して許容変形量の設定を行っていく必要がある。

参考文献

- 荒木進歩・藤原由康・出口一郎(1999): 確率論的手法を用いた人工リーフ被覆石の安定性の検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 901-905.
- 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・高山知司・谷本勝利(1998): 変形を許容した混成防波堤の新設計法の提案—期待滑動量を用いた信頼性設計法—, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 801-805.
- 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, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp. 1-32.
- 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳(2000): 防波堤の安定性能照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計—, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 415-420.
- 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰(2003): 性能設計の高潮対策施設への適用に関する基本的な考え方, 港空研資料, No. 1042, 27 p.
- 半沢 稔・高橋重雄・下迫健一郎(1996): モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度の計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 796-801.
- CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) (1991): Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering, 607 p.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory Investigation of rubble mound breakwater, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- PIANC (1992): Analysis of rubble mound breakwaters, PTC II, Report of Working Group No. 12, Supplement to Bulletin 78/79, 46 p.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layers—Design formulae, Coastal Engineering, 11, pp. 219-239.
- Van der Meer, J. W. (1988): Deterministic and probabilistic design of breakwater armor layers, Proc. of ASCE, vol. 114, WW1, pp. 66-80.