

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

下 迫 健 一 郎*・高 橋 重 雄**

1. ま え が き

混成防波堤の現行設計法においては、ケーソンがわず
かでも滑動した場合は被災と考えている。しかしながら、
仮に滑動した場合でも、その滑動量が大きくない限り、
防波堤の機能自体が損なわれるわけではない。著者らは
現在、より経済的な防波堤の設計法の確立を目指し、多
少の滑動を許容することにより、従来の設計で用いら
れている滑動安全率の値 1.2 を引き下げることを検討し
ている。そのためには、耐用期間中の防波堤の挙動をで
きるだけ正確に予測する必要がある。確率論に基づく期待
滑動量の計算が不可欠である。

伊藤ら (1966) は、「防波堤の安定性は設計を上回る外
力が作用した場合の挙動も含めて検討するべきである」
という考えに基づいて、初めて期待滑動量の概念を提唱
した。その後、堀川ら (1972) も期待滑動量に関する検
討を行っている。ただし、当時は波力の推定精度に問題
があり、滑動量を適切に計算することは困難であった。
近年、著者ら (1994) は種々の波力に対するケーソンの
滑動特性を明らかにし、滑動モデルを用いた期待滑動量
の計算法を提案した。その後、青木ら (1996) や谷本ら
(1996) は、より厳密な滑動モデルの検討を行っている。

一方、耐用期間中の期待滑動量を求めるためには、期
間中の全ての波を対象として滑動量を計算し、その総和
を求めなければならない。高山ら (1994) は、信頼性理
論に基づいた防波堤の被災遭遇確率の計算を行っており、
河合ら (1996) は、既設の防波堤について著者らの
滑動モデルを用いた期待滑動量の試算を行っている。

本報告は、期待滑動量の予測を実際的设计に導入する
ことを目的として、既往の滑動モデルの改良を行い、滑
動量の計算精度を向上させるとともに、モンテカルロ法
を用いた期待滑動量の計算方法について検討するもので
ある。

2. 1 波での滑動量の計算

2.1 滑動モデルの改良

著者ら (1994) は、波力の時間変化を三角形波形で近
似した滑動モデルを考案し、滑動量の計算を行った。こ
のモデルは、碎波圧のように作用時間の短い場合には波
形を比較的正確に再現できるが、重複波圧のように作用
時間の長い波形ではやや誤差が大きくなる欠点があっ
た。

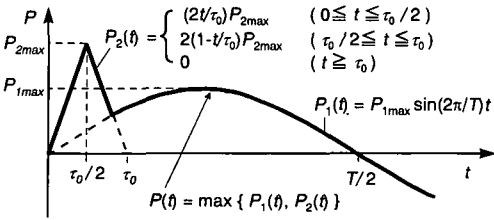
図一は、谷本ら (1996) が提案した、三角形波形と正
弦波形を組み合わせた新しい波形モデルを示したもので
ある。重複波成分を表す正弦波形を加えることにより、
実際の波形に近くなっている。本研究では、このモデル
を用い、さらに付加質量の影響も考慮した計算を行った。

図二は、滑動時のケーソンの状況を模式的に示した
ものであり、滑動時の運動方程式は次式で表される。

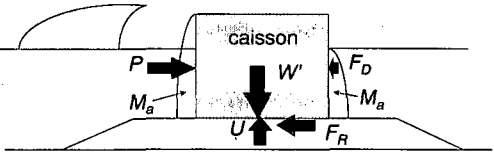
$$(W/g + M_a)\ddot{x} = P - F_R - F_D \cdots \cdots (1)$$

ここに、

- W : ケーソンの空中重量
- g : 重力加速度
- M_a : 付加質量



図一 波力の時間波形モデル



図二 滑動時のケーソンの運動

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長

$\ddot{x}$: ケーソンの加速度
 P : 水平波力
 F_R : 摩擦抵抗力 ($=\mu(W'-U)$)
 μ : 摩擦係数
 W' : ケーソンの水中重量
 U : 揚圧力
 F_D : 造波抵抗力

である。この式を2回数値積分することにより、ケーソンの変位を計算できる。なお、実際の滑動現象においては、滑動量が非常に大きい場合以外は F_D の影響は小さい。そのため、今回の計算でも F_D については考慮していない。

2.2 規則波実験による検証

図-3(1), (2) は、規則波を用いた模型実験による滑動量の測定値と、新しい滑動モデルによる計算値を比較したもので、図-3(1) が重複波の場合、図-3(2) 碎波の場合の結果である。実験条件は、水深 h が 104.4 cm, マウンド上水深 d が重複波の場合で 80 cm ($d/h=0.766$), 碎波の場合で 40 cm ($d/h=0.383$), 周期 T が 3.04 s, 波高 H が 42.8~61.9 cm である。実験に用いたケーソンの模型は、コンクリート底版付きの亚克力製で大きさは一定である。ケーソン内部に入れた鉛の重錘の数を調整し、いろいろな重量に対して実験を行った。

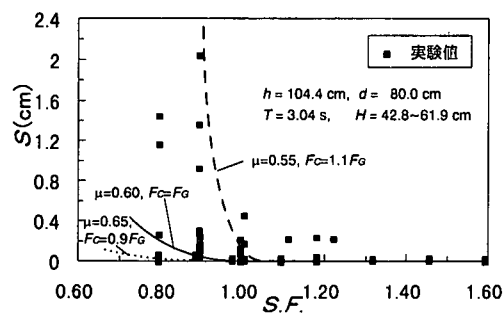


図-3(1) 模型実験による滑動量の計算値と実測値 (重複波)

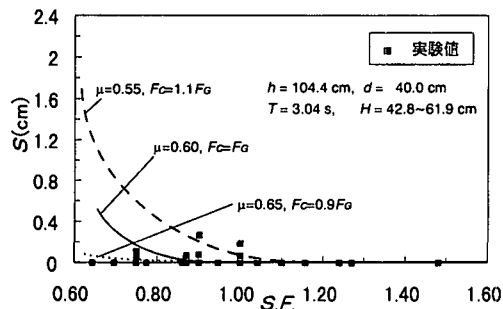


図-3(2) 模型実験による滑動量の計算値と実測値 (碎波)

図の縦軸は1波ごとのケーソンの滑動量であり、横軸は合田式による計算波力から求めた滑動安全率である。マウンドとケーソンの摩擦係数 μ を 0.6 とし、波力については合田式による値をそのまま用いた標準的な計算結果 (実線) は、実測値のほぼ平均的な値となっている。実測値にはかなりばらつきがみられるが、そのほとんどは、 $\mu=0.55$, 波力を合田式の値の 1.1 倍とした計算結果 (破線) と、 $\mu=0.65$, 波力を合田式の値の 0.9 倍とした計算結果 (点線) の間に含まれている。実際の設計においては、このような摩擦係数や波力のばらつきも考慮する必要がある。

なお、碎波の場合についても、実験結果と計算結果はよく一致している。また、碎波の場合、今回のモデルによる計算結果は以前の三角形波形の滑動モデルによる結果とほとんど同じである。

2.3 波圧の形態と滑動量の関係

図-4 は、新しい滑動モデルを用いて、現地スケールでの1波による滑動の計算結果を示したもので、上から順に、衝撃碎波圧、通常の碎波圧、重複波圧の例である。図中にも示しているようにいずれも水深 h は 20 m, 周期 T は 12 s であり、マウンド上水深 d および波高 H を変えることによって波力を変化させている。また、3つのケースとも滑動安全率が 0.76 になるように、ケーソン幅を変えることによって重量を調整している。それぞれのケー

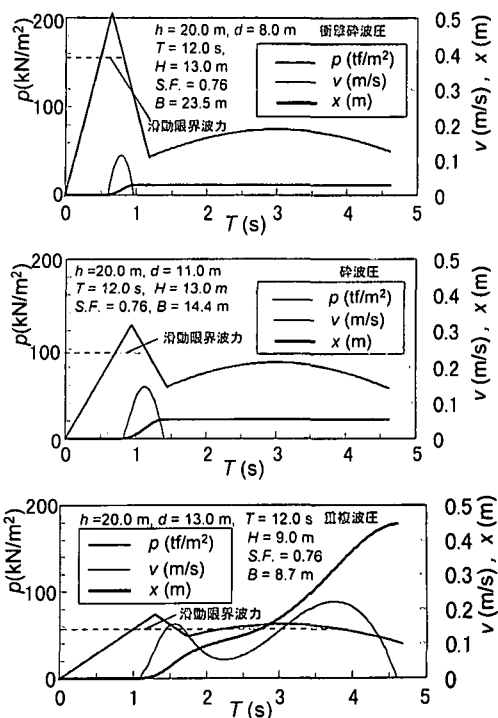


図-4 滑動波形の計算例

ソル幅 B は、衝撃砕波圧の場合 23.5 m、砕波圧の場合 14.4 m、重複波圧の場合 8.7 m である。

図には、水平波力、ケーソンの速度および変位の時間変化とともに、滑動限界となる波力の値も破線で示している。衝撃砕波圧の場合、波力の作用時間が短いため滑動の継続時間も 0.44 s と短く、滑動量は 2.8 cm に過ぎない。砕波圧の場合、滑動継続時間は 0.66 s で、滑動量は 5.4 cm である。これに対して、重複波圧の場合は、波力の作用時間が長く、しかもこの例の場合、波力の 2 番めのピーク部分も滑動限界波力を超えている。そのため、ケーソンは再び速度を増しており、トータル継続時間は 3.6 s と非常に長く、滑動量も 44.5 cm と大きくなっている。実際には、本例のように 2 番めのピークが滑動限界波力を上回るケースはあまりないが、いずれにしても同じ安全率の場合、重複波の滑動量は、砕波の場合に比べて大きくなるのがわかる。こうした結果は、模型実験や現地における滑動現象の傾向と一致している。

3. モンテカルロ法による期待滑動量の計算法

3.1 期待滑動量の計算フロー

図-5 は、実際の設計における期待滑動量の計算フローの例を示したものである。1 回の異常波浪 (1 波群) における滑動量を求めるには、まず有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ および主波向き β から、1 波ごとの波高 H 、周期 T および波向き θ を計算する。次に、前述の滑動モデルにより 1 波ごとの滑動量を計算し、これらの合計から総滑動量を求める。さらに、耐用期間中の総滑動量を求めるには、耐用期間中の異常波浪すべてについての滑動量を計算し、その合計を求める。

今回の計算では、波高についてはレーリー分布に基づくものとし、さらに砕波による変形も考慮している。また、潮位、波の周期、波力、摩擦係数の値については、高山ら (1994) の研究などをもとに、平均値と分散を考慮した確率分布を仮定している。ただし、潮位について

はすべて設計潮位を用いており、変動を考慮していない。また、1 波ごとの波向きについては適切な分布形が明らかでないため、すべての波の波向きが主波向きと同じであると仮定して計算した。

実際の計算では、これらの確率分布を考慮するために、何回も繰り返し計算を行う必要があり、その計算結果の平均値を期待滑動量と定義する。これらの確率分布を考慮した計算には、計算機の中で乱数を用いて現象を繰り返し試行するモンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法は複雑で多くの段階にわたる現象を取り扱うのに適した方法であり、パソコン程度の計算能力でも実用性の高い計算法である。繰り返し計算の回数については、計算結果のばらつきを検討して、最低 1000 回の試行の平均を用いるものとした。

3.2 不規則波実験による検証

図-6 は、不規則波を用いた滑動実験による総滑動量と、モンテカルロ法を用いて計算した期待滑動量を比較したものである。実験条件は、水深 h が 45 cm、マウンド上水深 d が 25 cm、有義波周期 $T_{1/3}$ が 2.14 s と 2.45 s、有義波高 $H_{1/3}$ がそれぞれ 17.6~25.4 cm、14.9~25.7 cm である。実験で用いたケーソンはコンクリート製で、内部に入れた鉛の重錘によって重量を調整している。横軸は 1000 回の試行による計算結果の平均値であり、縦軸は 1 波群 (120 波) による総滑動量について、波群を変えて行った 8 回の実験結果の平均値である。計算においては、二次元模型実験の再現であるので、潮位と波向きは一定とし、1 ケースごとの摩擦係数と、1 波ごとの波高、周期、波力について確率分布を考慮している。計算値と実験値はよく一致しており、今回の計算法が、不規則波に適用できることがわかる。

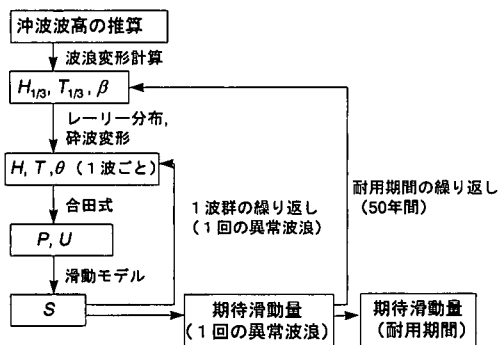


図-5 期待滑動量の計算フロー

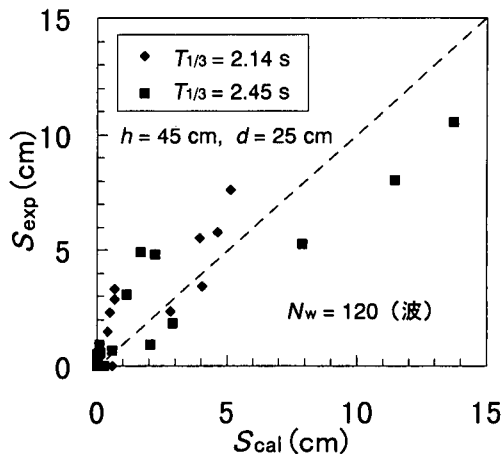


図-6 模型実験における期待滑動量と実測値

4. 現地における期待滑動量の計算例

4.1 計算条件

現行の設計法によって設計される防波堤の期待滑動量がどの程度になるのかを検討するために、仮想の防波堤を設定して期待滑動量の計算を行った。図一7および表一1は、対象とした防波堤の断面形状と設計波等の条件を示したものである。マウンドが低く波高も小さい重複波の場合と、マウンドが高く波高も大きい碎波および衝撃碎波の場合について、それぞれ滑動安全率 $S.F.=1.2$ と $S.F.=1.0$ で設計した断面を対象としている。

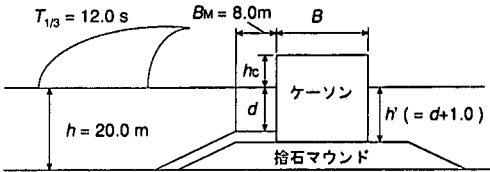
計算においては、防波堤の耐用期間は50年とし、1年に1回、継続時間が2時間の異常波浪がくるものと仮定して、ワイブル分布に基づいて異常波浪を発生させた。また、計算の繰り返し回数は原則として1000回とした。なお、実際の設計においては、このほかに沖波波高の推算精度や防波堤設置点までの波浪変形計算の誤差についても考慮しなければならないが、今回はこれらについては考慮せず、便宜上、設置位置における有義波高に対してワイブル分布を適用した。

4.2 1回の異常波浪に対する期待滑動量

図一8は、1回の異常波浪における期待滑動量と波高の関係を示したもので、主波向き β が 0° の直角入射の場合の計算結果である。図では、横軸に有義波高と設計有義波高の比 $H_{1/3}/H_{D1/3}$ をとり、縦軸には期待滑動量をとっている。重複波の場合、 $S.F.=1.2$ で設計した断面では、設計波相当の波高に対する期待滑動量は約8cmであり、設計波高の1.1倍の波高でも、約16cmである。これに対して、 $S.F.=1.0$ の断面では、設計波相当の波高で約42cm、設計波の0.9倍の波高でも約19cmであり、期待滑動量の値がやや大きい。平均的にみると、 $S.F.=1.0$ の場合の期待滑動量は、 $S.F.=1.2$ の場合の約5倍となっている。

一方、碎波の場合には、期待滑動量は重複波の場合のほぼ半分の値となっている。また、衝撃碎波の場合には、期待滑動量の値は碎波の場合のさらに1/10程度と非常に小さくなる。ただし、表一1に示したように、衝撃碎波の場合、滑動安全率1.2を確保するためには、37.2mの堤体幅が必要であり、碎波の場合に比べて1.63倍にもなり、きわめて不経済な断面となる。

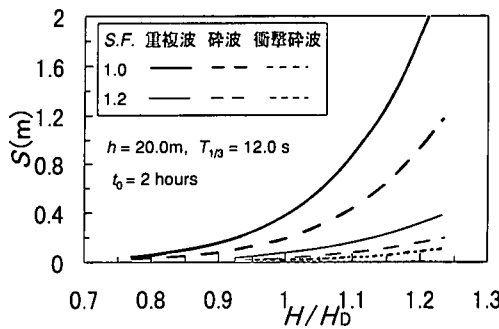
なお、ここには示していないが、斜め入射波の場合、入射角が大きくなるにつれて期待滑動量はやや大きくなる傾向がある。これは、斜め入射波の場合には波力の衝撃的成分が小さくなり、結果的に波力の作用時間が長くなるためである。しかしながら、実際の設計において用いる波向きは、主波向きを 15° 危険側へシフトさせるのが普通であり、たとえば、計算上の主波向きが 45° であれば、



図一7 対象とした防波堤の断面形状

表一1 実験条件

波の種類	d (m)	d/h	h_c (m)	B (m) ($S.F.=1.2$)	$H_{1/3}$ (m)
重複波	13.0	0.65	3.9	18.58	6.5
碎波	11.0	0.55	5.1	22.82	8.5
衝撃碎波	8.0	0.40	5.1	37.20	8.5



図一8 波高と期待滑動量の関係

表一2 期待滑動量の比較

滑動安全率 $S.F.$		1.0		1.2	
計算期間		1回の異常波浪	50年間	1回の異常波浪	50年間
期待滑動量	重複波	0.435 m	2.392 m (2.22, 3.33)	0.084 m	0.445 m (0.64, 1.09)
	碎波	0.219 m	1.418 m (4.13, 6.42)	0.043 m	0.247 m (1.37, 2.32)
	衝撃碎波	0.021 m	0.126 m (1.81, 3.65)	0.004 m	0.025 m (0.47, 1.08)

※ () 内は1cm以上および1mm以上の滑動が生じた高波の回数の平均値

設計においては波向きを 30° として波力を算定する。このことを考慮して計算すると、逆に入射角が大きくなるほど期待滑動量は小さくなる。いずれにしても、今回の計算においては1波ごとの波向きの変動を考慮していないため、波向きと期待滑動量の関係については今後更に検討が必要である。

4.3 50年間の期待滑動量

表一2は、表一1における重複波、碎波および衝撃碎波の条件について、1回の異常波浪に対する期待滑動量と、50年間の耐用期間全体での期待滑動量を示したもので

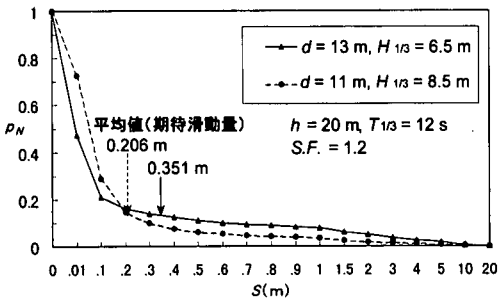


図-9 総滑動量の超過確率

ある。また、表中には50年間で1 cm以上および1 mm以上の滑動が生じる異常波浪の回数の平均値も示している。1回の異常波浪による期待滑動量については、前節でも述べたとおり、重複波、碎波、衝撃碎波のいずれについても、 $S.F.=1.0$ のときの値は、 $S.F.=1.2$ のときの値の約5倍である。また、碎波の場合は重複波の場合のほぼ半分であり、さらに衝撃碎波の場合は、碎波の場合の1/10の値である。

一方、50年間の期待滑動量は、碎波の場合は重複波の場合の半分よりもやや大きくなっており、1 cm以上および1 mm以上の滑動が生じる異常波浪の回数については、碎波の場合が重複波の場合の約2倍となっている。これは、碎波の場合は1波あたりの滑動量は重複波の場合に比べて小さいが、滑動の生じる頻度が多いことを意味している。1波あたりの滑動量の違いについては、第2章において述べたように波力の作用時間の違いが原因であり、滑動の頻度の違いについては、碎波によって波高が頭打ちとなるため、碎波の場合のほうが相対的に設計波高に近い大きな波が発生しやすいためである。

図-9は、50年間の総滑動量の超過確率を示したもので、重複波と碎波それぞれの $S.F.=1.2$ の場合の断面について、各5000回計算した結果である。実線が重複波、破線が碎波の場合を表しており、期待滑動量はそれぞれ35.1 cm、20.6 cmである。図より、滑動量が1 cmおよび10 cmを超える確率は碎波のほうが高いが、30 cm以上の大きな滑動が起こる確率は重複波のほうが高いことがわかる。これは、すでに述べたように、碎波のほうが設計波高に近い波が発生しやすいため、比較的小さい滑動は起こりやすいけれども、波高の上限がほぼ決まっており、あまり大きな滑動は起こりにくいためである。

このように、碎波の場合と重複波の場合とでは滑動の現象は大きく異なっており、同じ滑動安全率であっても、必ずしも同じ滑動安定性が保証されるわけではないこと

に注意する必要がある。なお、今回の検討では潮位の変化を考慮しておらず、すべて設計潮位を用いて計算している。そのため、50年間の期待滑動量の値は、やや過大になっていると考えられる。

5. あとがき

本研究では、混成防波堤直立部の滑動量を求めるモデルについての検討を行うとともに、モンテカルロ法を用いて、1回の異常波浪に対する期待滑動量および50年間の期待滑動量の検討を行った。その結果、現行設計法において用いている滑動安全率は、同じ値であっても必ずしも同じ滑動安定性を保証するものではないことが明らかになった。

実際の設計に期待滑動量の考え方を導入するためには、期待滑動量の許容値をどの程度とするかが重要な問題となる。これについては、たとえばケーソンが1函だけ滑動した場合、となりのケーソンの側面が露出すると、その部分が波により破壊される可能性があるため、滑動距離としてはケーソン前面の版厚(40 cm程度)までが限界であるとする考え方もあれば、マウンドから転落しない限り問題ないとする考え方もある。現在、一般に防波堤が被災したとみなす基準としては、滑動量30 cm程度が目安となっているようである。

なお、今回の研究では沖波波高の推算精度、波浪変形計算の誤差、1波ごとの波向きのばらつき、潮位変動の問題などについては考慮しなかったが、今後はこれらの点についても検討が必要である。また、防波堤堤頭部や隅角部、消波工端部など、平面的な影響を考慮した計算法についても、今後さらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄 (1966): 防波堤の安定性に関する研究, 港研報告, 第5巻第14号, 134 p.
- 青木伸一・奥部綾子 (1995): 防波堤直立部の滑動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 861-865.
- 河合弘泰・藤咲秀可・鈴木康正・高山知司 (1996): 既設の防波堤堤体の被災遭遇確率および期待滑動量, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 836-840.
- 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.
- 高山知司・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可 (1994): 防波堤の信頼性設計に向けて, 港湾技研資料, No. 785, 36 p.
- 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.
- 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫 (1972): 高基混成堤直立部の期待滑動量について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 351-356.