

消波ブロック被覆堤の断面変形に関する確率シミュレーション

大成建設株式会社 正会員 ○伊藤 一教 東江 隆夫

1. 目的

海域構造物の照査手法の一つに性能設計という概念が注目されている。消波ブロック被覆ケーソン堤を例にとるならば、要求性能は防波堤背後の静穏度確保であるから、供用期間中に要求性能を満足する範囲で断面変形を許容できる。ここでの断面変形とはケーソンの滑動や消波ブロックの移動である。

さて、消波ブロックの断面変化は越波伝達波に直接影響を与える要因であり、断面変化形状の評価は性能設計に必要不可欠である。ゆえに評価はブロックの移動個数で表現する被災度¹⁾より、断面変化の形状や変形面積として評価する変形モード形式が望まれる。そして、設計条件の不確定性を考慮するため断面変形を確率的に評価することが合理的である。そこで本研究では消波ブロック被覆堤を対象に、その断面変化形状の確率的評価を可能にする数値解析を提案する。

2. 数値解析手法

数値解析は確率理論で拡張した個別要素法(SDEM)²⁾を用いた。個別要素法は離散要素間の力の釣合をバネとダンッショポッドでモデル化する手法である。要素*i*の運動方程式は式(1)および(2)によって表される。

$$m_i \ddot{X}_i + F_i^{(c)} + F_i^{(k)} = f_i^{(f)} + F_i \quad (1) \quad I_i \ddot{\phi}_i = M_i^{(f)} + M_i \quad (2)$$

ここで、 m_i は要素の質量(水中要素の場合には付加質量を含む)、 X_i は変位ベクトル、 $\ddot{}$ は2階の時間微分、 I_i は慣性モーメント、 ϕ は回転変位である。式(1)左辺第2項はダッショポッドによる減衰項を表す。左辺第3項はバネによる作用力、いわゆる要素*i*に接触する要素との有効応力である。式(1)の右辺は要素*i*に作用する流体力ベクトル、第2項は重力と浮力といった定常外力である。式(2)の右辺第2,3項は流体力および有効応力によるモーメントである。

個別要素法の拡張は、確率理論における1次近似2次モーメント法を用いた。ここでは、要素に作用する外力を抗力のみとし、抗力係数を確率変数として定式化した。抗力係数 C_d が式(3)のように期待値0の微小確率変数 ε で表されるならば、変位ベクトル X_i は式(4)のようにテーラー展開できる。ただし、 C_{dm} は平均値である。そして、式(4)の1次のオーダーまで考慮すると変位ベクトルの期待値および分散は式(5)と(6)となる。式(5)は C_{dm} を用いて算出でき、式(6)は C_d に対する微係数を算定できれば求められる。

$$C_d = C_{dm}(1 + \varepsilon) \quad (3) \quad X_i(C_d) = X_i^{(0)} + \varepsilon \partial X_i / \partial C_d + 0.5 \varepsilon^2 \partial^2 X_i / \partial C_d^2 + \dots = X_i^{(0)} + \varepsilon X_i^{(1)} + \varepsilon^2 X_i^{(2)} + \dots \quad (4)$$

$$E[X_i] = X_i^{(0)} \quad (5) \quad \text{Var}[X_i] = \text{Var}[C_d] \left(\partial X_i / \partial C_d \right)^2 = \text{Var}[C_d] \left(X_i^{(1)} \right)^2 \quad (6)$$

そこで、式(4)を運動方程式(1)と(2)に代入し ε の2乗以上の項を無視すると、 ε の各オーダーに対する摂動展開式が得られる。ちなみに、式(1)については式(7)のようになる。0次オーダーについては C_{dm} を用いた個別要素法で算定できる。1次オーダーは0次オーダーの結果から決まる関数であるからこれも算定できる。

$$O(0): m_i \ddot{X}_i^{(0)} + c \dot{X}_i^{(0)} + k \sum_n \Delta X_n^{(0)} = f_i^{(0)} + F_i, \quad O(1): m_i \ddot{X}_i^{(1)} + c \dot{X}_i^{(1)} + k \sum_n \Delta X_n^{(1)} = f_i^{(1)} \quad (7)$$

その結果、式(6)の微係数が得られ、変位ベクトルの期待値および分散が確定する。そして、変位ベクトルの確率分布関数として正規分布を仮定し、要素の許容変位 δ を設定すれば要素*i*毎に移動確率を確定できる。

3. 解析内容と結果

まず、手法(SDEM)の妥当性を検証するため、凹凸のある底面に消波ブロックを置き、振動流が作用するとき

キーワード 消波ブロック, 確率, 変形, 個別要素法, シミュレーション

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社 技術センター TEL 045 - 814 - 7234

のブロック移動を対象に数値実験を行った．そして，期待値および標準偏差を本手法とモンテカル口法で比較した．数値実験における外力は抗力のみとし， C_d を正規確率変数とした． C_{dm} は0.67とし標準偏差を変化させた．消波ブロックは円形要素で構成し，ひとつのブロックを構成する円形要素間は剛結条件である．図-1は C_d の変動係数が0.12の場合であり，期待値，標準偏差とともに良好な一致を示す．本手法は近似解法であるが，モンテ

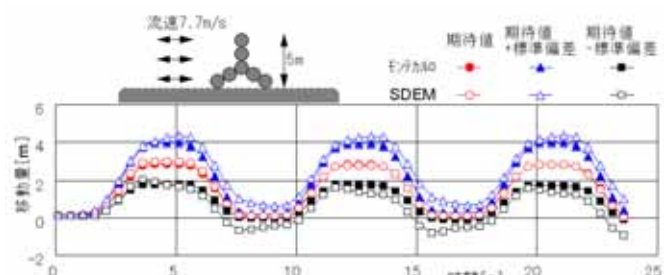


図-1 数値実験による手法の検証

カル口法と同等の結果を算定することがわかる．次に，高天端の場合にはSカーブの断面変形が生じることが知られているが，低天端の場合にはSカーブとはならず，明確な断面変化モードが明らかになってない．そこで，図-2に示す低天端の消波ブロック被覆ケーソン堤を対象とした．水深は20mで80tテトラを設定し，勾配1:4/3の乱積とした．ブロックの比重は2.3, 3.5, 4.6t/m³とした．波浪条件は波高12と15mで，共に周期は20sの規則波とした．消波ブロックに作用する波浪場の算定は数値波動水路（CADMAS-SURF）を用いて行った．

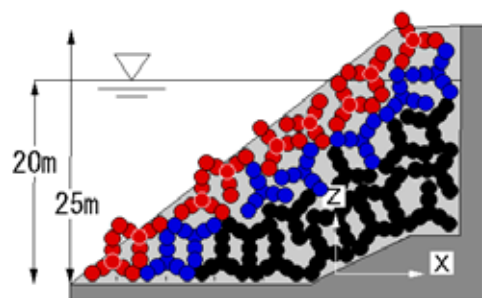


図-2 解析対象断面

図-3は，許容変位 $\delta=2.5$ m上回る移動確率を示した図である．図は表層（図-2赤色ブロック）と2層目（図-2青色ブロック）を対象に，鉛直分布を示す．消波ブロックの比重や波の条件にかかわらず，2層目の移動確率は表層に比べて小さい．静水面近傍の移動確率が大きい．このことは全てのケースで共通している．消波ブロックの比重が2.3で作用波高が異なるケースを比較すると波高が小さい方が移動確率も小さい．作用波高が同じで比重が異なるケースを比較しても，高比重のブロックほど移動確率が小さい．これらの傾向は容易に理解できるところであり，本解析が定性的に妥当なものであることを示唆している．ここで示した結果は，外力として慣性力を無視していたり，確率変数の設定などに研究の余地が十分あるため定性的な範囲にとどまる．しかし，移動確率は断面変化の発生率と一致するので，法先から法肩に向かって移動確率が増加する移動確率の分布形状が断面変化モードに対応すると考えられる．本手法は，任意の断面形状を対象に解析が可能であるため，断面変形モードを算定する方法として有用であると考えられる．

4. 結論

確率理論で拡張した個別要素法を用いて，消波ブロックの断面変形を解析する方法を示した．確率変数などの設定には研究の余地が多いため，解析結果の妥当性は定性的な範囲にとどまった．しかしながら，従来，実験でしか確認できなかった断面変形モードを算定する手法として，その有用性を十分確認することができた．

参考文献

- 1) 半沢 稔, 高橋 重雄, 下迫 健一郎: モンテカル口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 Vol. 43 巻 年: 1996 年 pp796-800
- 2) 伊藤 一教, 東江 隆夫, 勝井 秀博: 被覆石の被災率に対する確率個別要素法の適用性 海岸工学論文集 Vol. 50 巻 2003 年 pp706-710

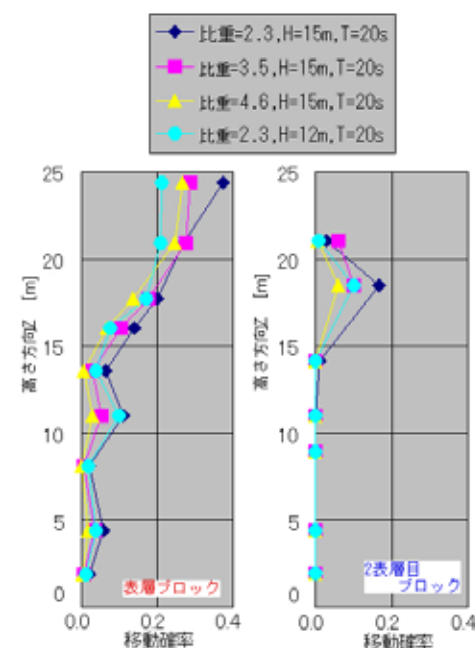


図-3 移動確率の鉛直分布図