

水理模型実験結果によるケーソン式混成堤の波浪による変形特性に関する一考察

国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅

国土技術政策総合研究所 正会員 ○橋本 淳

1. 研究の目的

ケーソン式混成堤の耐波設計においては、計算される波力に対して滑動・転倒・支持力に関する安定性の検討が行われるが、性能設計において重要な変形という観点からは、滑動以外の変形モードについては変形量の算定方法が確立されていないのが現状である。

本研究では、水理模型実験によってケーソンの変形特性の議論を行った既往の研究結果¹⁾に着目した。既往の研究では、1m 程度までの初期段階では水平変位が卓越し、支持力破壊の可能性は示唆されるもののマウンド肩幅などの違いによる変形挙動の違いはないと結論されている。本研究では、この既往の水理模型実験の結果を入手し、初期段階におけるケーソン式混成堤の波浪による変形特性を議論するとともに、安定性を評価する上で重要と考えられる貫入角（港内側端しがマウンドに貫入する角度）を簡易に推定する方法を提案した。

2. 研究の内容

2.1 既往の実験データの整理

(a) ケーソン変位履歴と角度

ケーソン中心と港内側端しの挙動に着目した整理を行い（図-1,2）、マウンド条件（表-1）の違いによる変形特性の違いを把握した。数値は実物大換算値である。図-1 の中心①②③はケーソン中心変位履歴の上端・中間・下端を近似した直線であり、中心①は波力最大時、中心②は押し波から引き波への変化時、中心③は波の作用開始時付近のケーソン中心位置を示している。端しの近似線は波力最大時である。図-3 は同じ波数作用時のケーソン中心水平変位と近似線の傾き（角度）の関係である。

(b) 見かけの摩擦係数

マウンド仕様と見かけの摩擦係数の関係を整理した（図-4）。見かけの摩擦係数は、1 波でのケーソン変位量が理論値と実験値で等しくなるような摩擦係数を試行錯誤で算出した。理論値は期待滑動量の算出方法²⁾を参考に計算している。図中の数値は水平変位 0.5m～3.0m 間の摩擦係数の平均値である。

2.2 マウンドの変形に関する有限要素解析

有限要素法を用いマウンド仕様の違いによる変形特性を評価した。マウンド仕様の違いを考慮するために各要素の剛性を以下のように設定した。手順①：初期状態での有効拘束圧からせん断強度と初期せん断剛性係数を算出し、マウンドの非線形特性を双曲線モデルで求める。手順②：ケーソン滑動時相当のせん断応力から双曲線モデルをもとにしてせん断ひずみを求め、割線剛性でケーソン滑動時相当のせん断剛性を求める。以上の手順で設定したせん断剛性を用いた有限要素解析で、端しの節点に有効鉛直荷重と水平波力を作用させた時の変形を求めた。変形特性は端し直下の要素に着目しその最大傾斜角で評価した（図-5）。ただし、波力による変形を把握するため自重による変形は除いている。

表-1 マウンド仕様

Case	基本	肩幅狭	肩幅広	粒径大
肩幅 (m)	5.00	3.75	18.00	5.00
粒径 (mm)	150-390	150-390	150-390	600-900

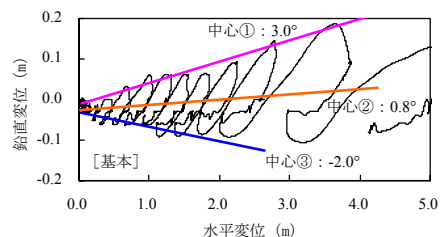


図-1 ケーソン中心変位履歴と角度

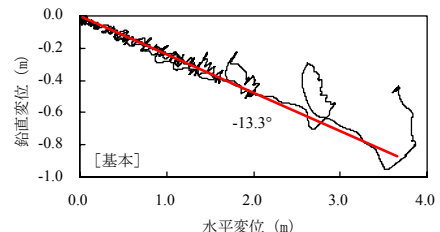


図-2 港内側端し変位履歴と角度

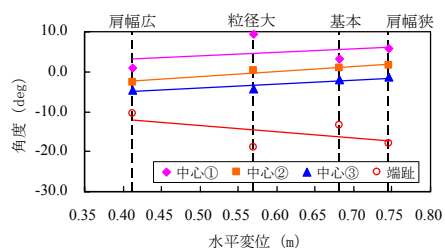


図-3 中心変位量と貫入角等の関係

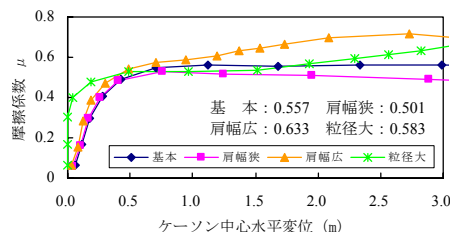


図-4 見かけの摩擦係数算出結果

キーワード ケーソン式混成堤、変形特性、支持力破壊、貫入角

連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 TEL 046-844-5029

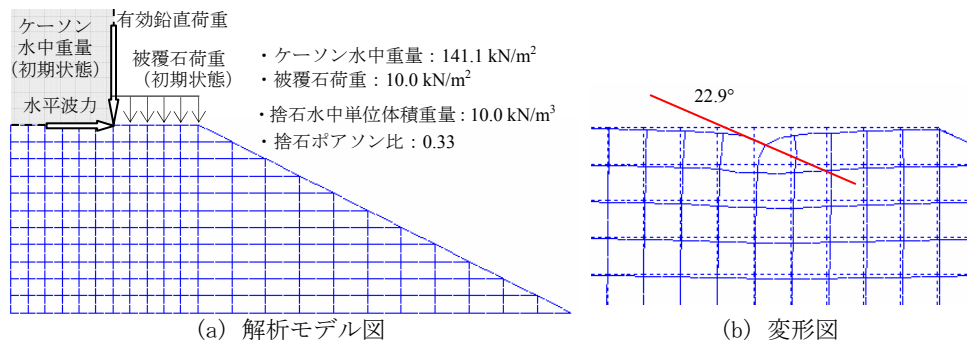


図-5 有限要素法の解析モデル図と変形図 (基本)

2.3 貫入角の推定

貫入角を簡易に推定する式を構築すべく、貫入角を目的変数とした重回帰分析を実施した。重回帰分析に用いたデータは既往の水理模型実験結果で、データ数は先の検討で使用したものを含む9ケース(22データ)である。説明変数は、マウンド条件(港内側肩幅・天端幅・高さ・水中単位体積重量)、外力条件(水平波力・有効鉛直荷重・端趾圧・偏心率)、ケーソン条件(幅・高さ・重量)、その他(説明変数候補の組合せなど、例えば偏心傾斜荷重)など様々な条件の中から、多重共線性に注意し決定係数・t値・P値を参考に適当なものを抽出した。

表-2 マウンド仕様と変形の関係

Case	肩幅	要素の傾斜角	実験値貫入角
基本	5.00m	22.9°	13.3°
肩幅狭	3.75m	23.1°	18.0°
肩幅極狭	2.50m	23.2°	16.1°
肩幅広	18.00m	21.7°	10.4°

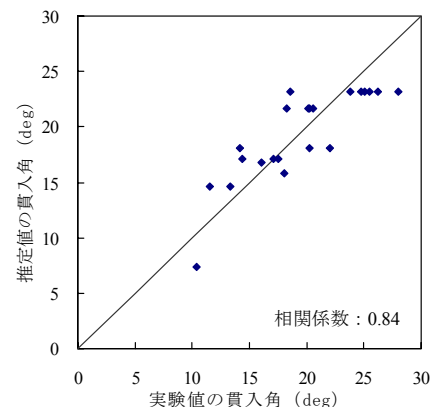


図-6 推定値と実験値の貫入角の関係

3. 結 論

(1) ケーソン中心は図-1のように楕円状の回転を伴いながら変形する。これはケーソンがマウンドの上を単に水平方向に滑動するのではなく、マウンドへ貫入を繰り返しながら変形していることを意味する。ケーソン端し部分の変形(図-2)からは、ケーソン端しが直線状に基礎マウンドへ貫入することが分かる。

(2) マウンドの肩幅を広げたり、マウンドを構成する基礎石の粒径を大きくすることで水平変形量は減少する。これは、水平力と摩擦抵抗力のバランスでケーソンがマウンドの上を水平方向に滑動するという枠組みからは説明できない。基礎マウンドへの端しの貫入による変形という観点から説明可能であり、マウンド仕様、換言すると基礎の支持力特性が水平変形量に密接に関係している。基礎マウンドを強固にすることにより貫入角度は減少し、同じ波数作用時の変形量も減少する(図-3)。

(3) マウンド仕様の違いにより10%以上の見かけの摩擦係数の差がある(図-4)。これは、肩幅広・粒径大で基礎が強固であれば、端し前面の捨石の受働抵抗が発揮されるとともに、端し部分の拘束圧が高くせん断強度が高い層に接することになるため変位が抑制され、摩擦係数が大きくなると考えられる。逆に肩幅が狭く基礎の拘束が小さければ、基礎の変形に伴い支持力が減少するため変位が促進され摩擦係数が小さくなることを示している。

(4) 有限要素法を用いて波力による変形を求めた結果、マウンド肩幅が広いほど端し直下の要素の傾きが小さくなることが分かる(表-2)。この傾きの値は実験の貫入角と値の差はあるが、マウンド仕様の違いによる変形特性と傾向は解析と実験で一致しており、有限要素法で貫入の傾向を定性的に評価できるといえる。

(5) 貫入角の簡易推定式を作成した。提案式によって推定された値と実験による値の相関係数は0.84と高く(図-6)、設定した変数で貫入角を良く評価できている。提案式: $\theta_p = 8.77(B_c/B_m) + 20.39(H_m/B_m) + 0.25q_v - 29.03$ ここに、 θ_p : 貫入角(deg), B_c : ケーソン幅(m), B_m : マウンド天端幅(m), H_m : マウンド高(m), q_v : 有効鉛直等分布荷重(kN/m²)である。

参考文献

- 1) 宮田正史, 吉田誠, 安野浩一郎: ケーソン式防波堤の大変形メカニズムに関する実験的研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.564, pp.1-28, 2010
- 2) 下迫健一郎, 高橋重雄: 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第37巻第3号, pp.3-30, 1998