

低頻度偶発波浪を想定した混成堤の大規模変形量解析

安野 浩一朗¹・森屋 陽一²・間瀬 肇³・森 信人⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術Gr (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail:kouchirou.anno@mail.penta-ocean.co.jp

²E-mail: yoichi.moriya@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学防災研究所 気象・水象災害研究部門 准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: mori@oceanwave.jp

東日本大震災では、津波の来襲により多くの人命や資産が失われ、防災施設として大きな役割を期待された湾口防波堤などが倒壊した。近年の防波堤の信頼性設計の研究は、ケーソンの滑動に着目した定量化が行われているが、マウンドの変形も含む大規模変形の定量的な評価は取り扱っていない。本研究では、DEM法をベースとした混成堤の大規模変形量解析手法を新たに構築し、既往の水理模型実験に対する再現計算を通して、変形量評価の精度の検証とその向上を図った。その成果として、移動速度に応じた摩擦係数の不連続化を導入することで、実験時に発生するマウンドの大変形を含む転倒・傾斜などの防波堤の破壊状況をより良好に再現できることがわかった。

Key Words : tsunami, caisson, DEM, caisson sliding, mound deformation, breakwater

1. はじめに

東日本大震災では津波の来襲により多くの人命や資産が失われた。特に、防災施設として大きな役割を期待された湾口防波堤などが津波の来襲により倒壊被害を受けた。その大きな要因の一つは、これまでの防波堤の安全性照査において、静的な釣り合いを前提とした設計法が挙げられる。近年の防波堤の信頼性設計の研究においてはケーソンの滑動に着目した定量化（例えば、下迫ら¹⁾、Miguel et al.²⁾）を行うに留まり、マウンドの変形も含む大規模変形の定量的評価に関する研究は進んでいない。沿岸部の安全・安心な暮らしを守るためには、東北太平洋沖地震津波に見られるような低頻度巨大外力下での防災施設の大規模変形の定量的評価に関する理解を深め、大規模変形を考慮した設計・計画手法の導入が急務である。近年では、SPH法³⁾、MPS法⁴⁾、DEM法⁵⁾などを用いた流体・構造物連成解析の研究事例があるが、防波堤等の実構造形式を対象とした変形量の定量的な実施、評価や検証は十分に行われておらず、より一層の研究成果の蓄積が必要である。そこで本研究では、DEM法をベースとして、混成堤の大規模変形量解析手法を構築し、既往の水理模型実験に対する再現計算を通して、変形量評価の精度検証と精度向上を目的とした。

2. 既往の水理模型実験の概要

構築する解析手法の妥当性検証に用いる水理模型実験は、二次元造波水路（長さ 50 m、幅 0.6 m、高さ 1.2 m）にて実施されたものである。模型縮尺はフルード則に準じた 1/30 であり、実験断面は、捨石マウンドの支持力破壊が原因と判定される防波堤の被災事例を参考に設定されたものである。実験においては、ケーソンの変位や地盤反力などについての詳細な計測が行われている。なお、実験条件や結果の詳細については、宮田ら⁶⁾を参照されたい。図-1 および表-1 に、再現計算を行った実験ケース一覧を示す。

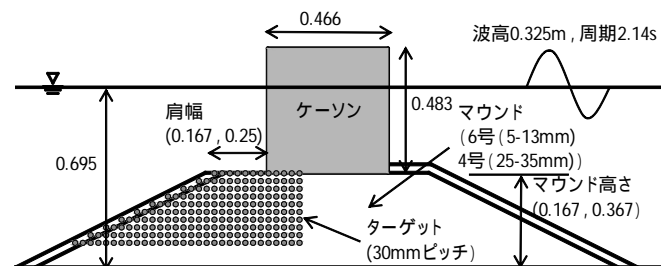


図-1 実験および解析条件 (単位:m)

表-1 検討ケース

ケース	マウンド	低		高
	肩幅	普通	大	普通
	粒径	普通		大
水深(m)	0.695			
波高(m)	規則波, 波高 0.325m, 周期 2.14s			
ケーソン	高さ 0.483×幅 0.466×奥行 0.580 (水中質量 1.47kN)			
マウンド高さ(m)	0.167		0.367	
マウンド肩幅(m)	0.167	0.25	0.167	
粒径	6号砕石 (5-13mm)		4号砕石 (25-35mm)	

*)その他, 偶発波浪以下の波を作用

実験では, マウンド背後の肩幅やマウンド高さ, および粒径などを変化させた. 作用外力は, 静的釣合に基づく滑動安全率が 0.85 相当の規則波を 20 波程度作用させて, ケーソンの傾斜やマウンドの崩壊を伴う混成堤の大規模変形を発生させた.

3. 解析手法の概要

本研究では, 後藤⁷⁾らの MBS コードに基づく高山ら⁸⁾のモデルを基本として用いる. 高山らのモデルは, マウンド要素を従来の円形ではなく楕円モデルとすることで, 捨石同士のかみ合わせ効果を期待した点に特徴がある. 本研究では, 既往の 2次元コードにさらに以下の点について拡張したモデルを用いる.

A) ケーソンは剛体の集合体とし, 波力による外力は水理模型実験で計測した波圧分布を境界要素に個別に作用させるモデルとする.

B) 剛体ケーソンの運動方程式に, 水の粘性を反映した変動型の付加質量力を導入する. 下迫ら¹⁾の成果を援用し, ケーソンの沈下や傾斜に伴う付加質量力の変化を考慮する. ケーソン重心位置の運動式は式(1)および式(2)で示され, 解析ではケーソンの平均沈下量に応じて付加質量が変動するように設定している.

$$\left(\frac{W}{g} + M_a \right) x_g = F \quad (1)$$

$$M_a = 1.0855\rho h'^2 \quad (2)$$

ここに, W はケーソン質量, M_a は付加質量, x_g は重心位置の加速度, F は外力の合力, ρ は水の密度, h' はケーソン底面から静水面までの高さをそれぞれ示している.

C) 要素同士のせん断方向力に適用するスライダ(粒子間摩擦)のパラメタ値に着目し, 静動的な変化を踏まえた簡易的な不連続摩擦モデルを導入する. これにより, マウンド石の変位速度増加によって摩擦力が低下し, マウンド変形が急激に進む現象の再現を試みる.

なお, 本研究では, 粒子間速度の増加に伴ってスライダが線形的に変化するモデルを用いることとし, 上限値を捨石の安息角から算出した粒子間摩擦角に対し 0.7~0.9 の範囲で変化させたパラメタスタディを行う. 図-2 に不連続摩擦モデルの概念図を示す.

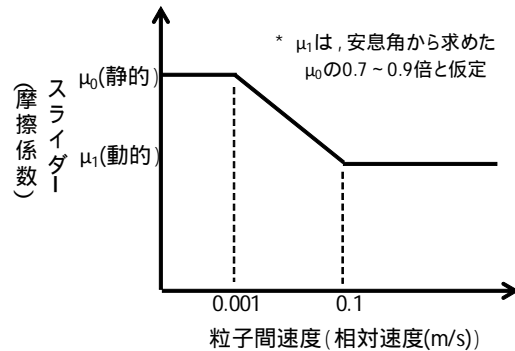


図-2 不連続摩擦モデルのイメージ

4. 解析結果

(1) 低マウンドで肩幅が普通の場合

図-3 にマウンド高さ 0.17 m, 肩幅 0.17 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を示す. 実験結果においては, 造波開始直後は押波の影響を受けて水平変位が線形的に増加しており, 30 s において沈下と回転を伴う急激な破壊が進展している. その急激な回転変位の発生に伴うその後の 40 s 付近では, 背後マウンドの盛り上がりによるカウンター効果によって, ケーソンの変位・回転の変化がほぼ停止している. なお, 宮田ら⁶⁾は, 初期の水平変位のみが発生する時間帯を初期段階, 大きな回転の発生を伴う時間帯を進行段階, 破壊が停止する時期を安定段階とそれぞれ命名している. 本研究では, 実験結果の観察を行った際に, 初期から進行段階に移行する要因として, 動的な外力の作用により捨石同士の摩擦変化が生じているのではないかと推察し, これを解析で考慮する試みとして従来の DEM におけるスライダの設定に着目し, 不連続摩擦の概念を導入するに至った. 解析結果は, 不連続摩擦モデルを設定せず付加質量のみを考慮したケースでは水平変位のみが増加する時間帯では実験結果を良好に再現できているものの, 破壊の急激な進展は再現できておらず, 開始から 60 s を経過してもなお, 一定量の水平変位のみが継続して増加する結果を

示している．不連続摩擦モデルを考慮したケースでは，上限値が 0.9 の場合，水平変位はある程度再現できているものの，沈下量や回転角は実験結果よりも小さい傾向を示している．また，急激な破壊の進展もあまり再現できていない．逆に，0.7 まで低減させると，進行段階に移行する時間帯は実験結果に近づくものの，破壊が停止するまでに実験結果の 2 倍程度の水平変位が発生する結果となっている．上限値が 0.85 や 0.8 の場合では，進行段階に移行するタイミングが実験値よりも 20 s 程度遅れているものの，最終的な水平変位や沈下量については概ね実験結果を再現できている．本検討結果からでは，不連続摩擦モデルとして，上限値を 0.85 程度とした概念を導入することで，既往の解析手法よりも実験結果の再現性がより一層向上できるものと考えられる．

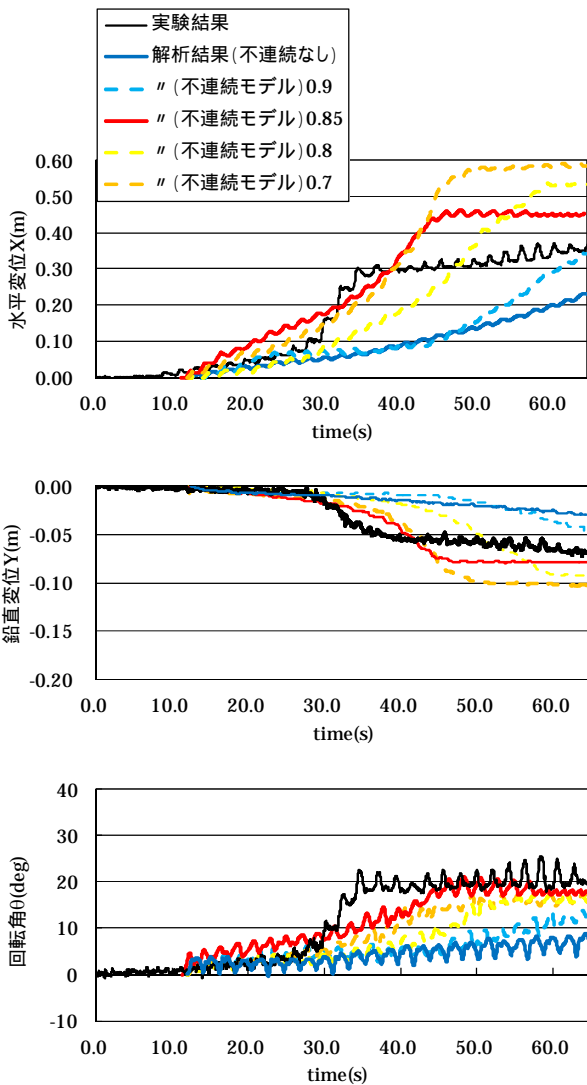


図-3 ケーソン中心変位・回転角の比較
(低マウンド 0.17 m, 肩幅 0.17 m)

上段：水平変位，中段：鉛直変位，下段：回転角

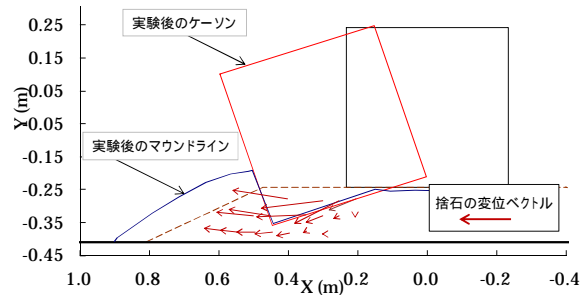


図-4 捨石移動の軌跡：実験結果，実験開始 45 s

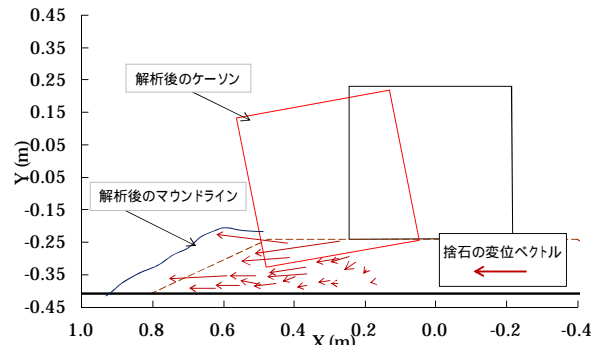


図-5 捨石移動の軌跡：解析結果 $\mu_f=0.85\mu_0$ ，計算開始 45 s

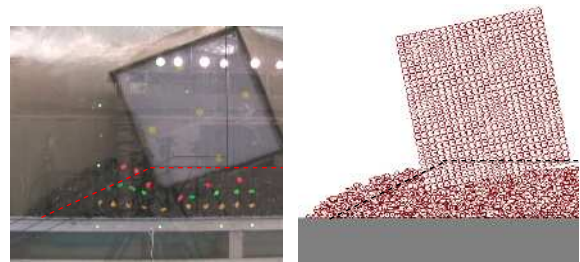


図-6 ケーソンおよびマウンド破壊状況の比較
(左：実験，右：数値計算，実験開始 45 s)

図-4 から図-6 に，経過時間 45 s における捨石の移動の軌跡および姿図の比較を示す．なお，捨石の変位ベクトルは，それぞれの初期位置と経過時間 45 s における石の中心位置を直線で結んで整理したものである．図-4 に示す実験結果では，初期に法肩付近にある石は上方方向寄りへ盛り上がるような挙動を示している．地盤境界付近の底面に配置した捨石は水平へ移動する軌跡を示しており，ケーソンの変位発生に伴う地盤反力が底面まで影響を及ぼしていることがわかる．解析結果は，概ね実験結果を再現できているものの，実験結果に比べて各捨石の移動量にばらつきがみられるとともに，法肩付近の上方方向への盛り上がる挙動があまり見られず，水平方向への移動が目立つ傾向を示している．そのため，ケーソンの変位抑制に寄与する背後に盛り上がるマウンドの量も実験結果より若干少ない．その結果，安定段階に至るま

での水平変位量が実験結果よりも大きくなったものと考えられる。この要因は、今回導入した楕円形モデルにあり、実際の捨石同士のかみ合わせの効果が完全には再現しきれないためと考えられる。実験結果と解析結果（不連続摩擦モデル 0.85）の姿図を比較した図-6によると、回転角にやや違いが見られるものの、マウンドの破壊具合やケーソンのめり込む様子など、定性的には両者は良好な対応を示している。

図-7 に押波時のケーソン地盤反力の比較を示す。なお、比較においては、ケーソンの変位発生段階毎に概ね同じ波数のタイミングで抽出している。実験結果では、初期段階（P-1）では、ケーソン後趾にピークをとる三角形の荷重分布となっている。その後、回転の発生やマウンドの崩壊の影響によって荷重のピーク位置がケーソン中心寄りに移行し、P-3 の変位がほぼ停止する段階ではケーソン両端部には殆ど荷重が作用していない。解析結果では、ばらつきが見られるものの、実験結果と同様に初期のケーソン後し側から、ケーソン中央部へ荷重の集中が移行していく様子が概ね再現できている。荷重が移行する要因はマウンドの崩壊に関係している。当初、ケーソン後趾付近の捨石が顕著であるものの、マウンドが大きく崩れ、捨石が移動することによりケーソン後しへの地盤反力が極端に低減し、そのため底面荷重が扁平化するような現象が生じていると考えられる。

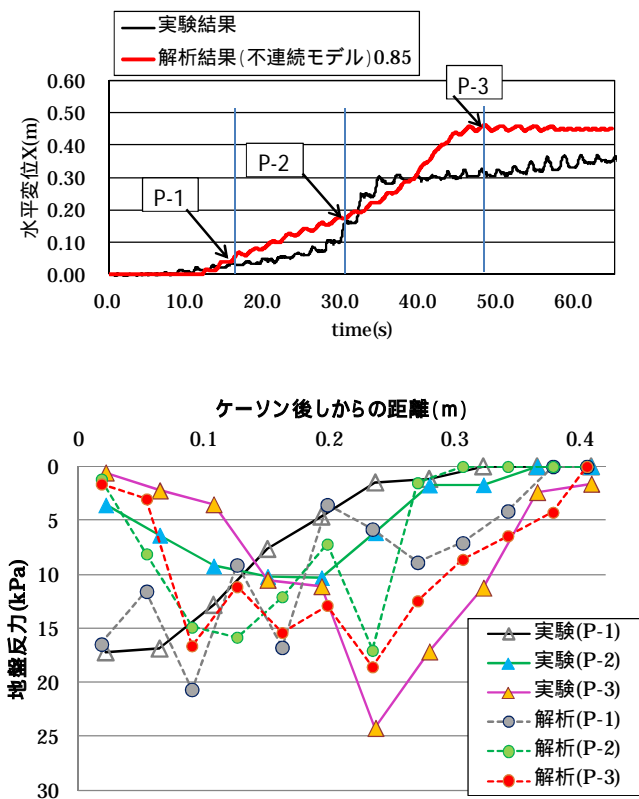


図-7 ケーソン地盤反力の比較
(低マウンド0.17m, 肩幅0.17m)

(2) 低マウンドで肩幅が広い場合

マウンド高さ 0.17 m, 肩幅 0.25 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を図-8 に示す。なお、解析では、不連続摩擦を考慮しない場合と不連続摩擦の上限を 0.85 と設定したケースのみ実施した。実験結果においては、造波開始直後は押波の影響を受けて水平変位が線形的に増加し、肩幅普通のケースとほぼ同様に 35 s 経過した後に回転を伴う急激な破壊が進展している。しかし、マウンドの肩幅が広い場合、回転や沈下などの発生量は比較的小さい結果となっている。なお、図には示していないが実験では、そのまま継続して外力を作用し続けると、肩幅が普通のケースと同じ程度まで破壊が生じた。

一方、解析においては不連続モデルを考慮しないケースで、肩幅普通のケースの検討結果と同様に線形的な破壊が進むだけで、35 s 付近での進行段階に移行する状況を再現できていない。上限値 0.85 のケースでは、以降するタイミングが遅いものの、最終的な変位量は概ね実験結果を再現できており、不連続摩擦を導入することで再現性の向上効果が得られている。

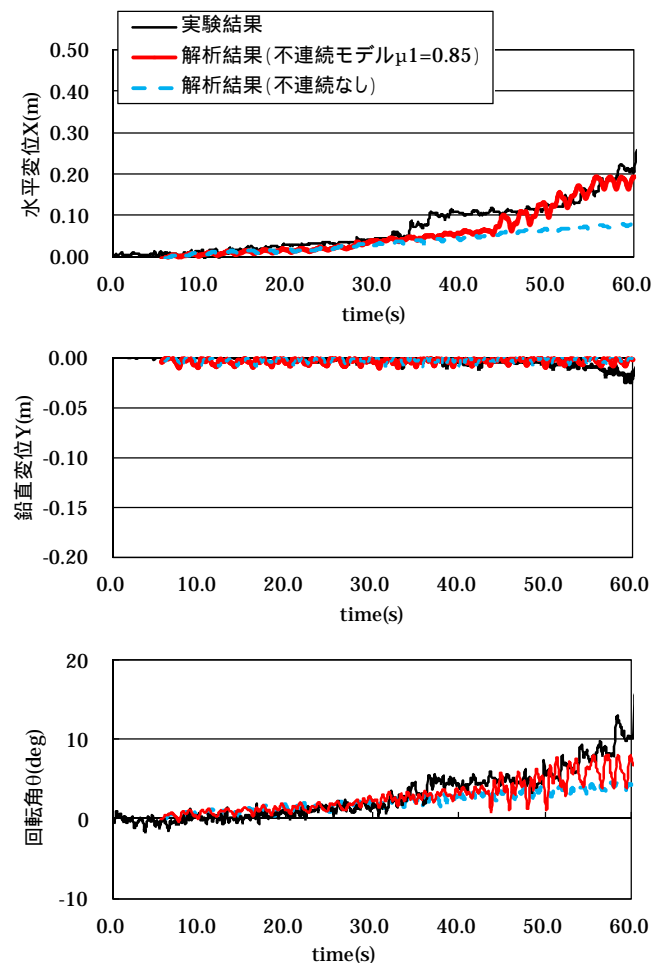


図-8 ケーソン中心変位・回転角の比較
(低マウンド 0.17m, 肩幅 0.25m)

(3) 高マウンドで捨石粒径が普通の場合

図-9に、マウンド高さ 0.37 m, 肩幅 0.17 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を示す。なお、解析は、不連続摩擦を考慮しない場合と不連続摩擦の上限を0.85 と設定したケースのみ実施した。実験結果は、低いマウンドのケースとあまり破壊状況に変化が見られないものの、やや沈下量が小さくなる傾向などを示している。一方、解析結果では、不連続モデルの設定による変形への差があまり見られない結果を示している。また、初期の回転角の発生量が実験結果よりも大きくなるなど

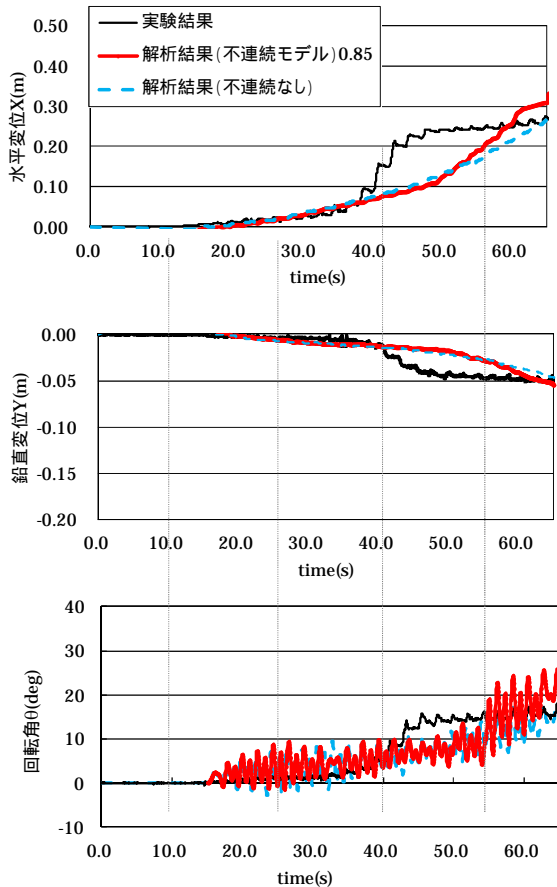


図-9 ケーソン中心変位・回転角の比較
(高マウンド 0.37 m, 肩幅 0.17 m)

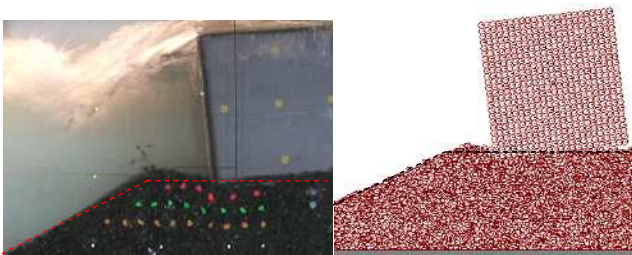


図-10 ケーソンおよびマウンド破壊状況の比較
(左: 実験, 右: 数値計算, 実験開始 40s)

の違いは生じているものの、不連続モデルを導入した方が実験結果との対応が多少は良好になっている。図-10に 40 s 経過後の実験結果と解析結果 (不連続摩擦モデル 0.85) の姿図の比較を示す。この図より、マウンドのめり込み具合などについて概ね両者は良好な対応を示していることがわかる。

(4) 高マウンドで捨石粒径が大きい場合

図-11に、粒径大のケースにおけるケーソン水平変位の比較を示す。なお、本ケースの実験においては捨石の粒径を大きくしてマウンド剛性を高めたことで、同じ外力作用下でもこれまでとは大きく異なり、ケーソンの変形は殆ど発生していない。また、回転や沈下量も同様に殆ど発生していない。解析でも同様の傾向を捉えられている。図-12に押波時のケーソン底面反力の比較を示す。実験においては、後趾よりもやや内側 (0.05 m 付近) において荷重のピーク値が現れるとともに、初期の P-1 の段階から後し付近へ荷重が偏る傾向を示している。荷重の偏りは、図-7に示したマウンド低のケースよりも顕著になっている。解析では P-1 で、ケーソン中央付近などの箇所にもややばらつきを持った底面荷重が作用しているものの、時間の経過とともに、概ね実験値と同様の地盤反力の分布特性に近づきつつある。

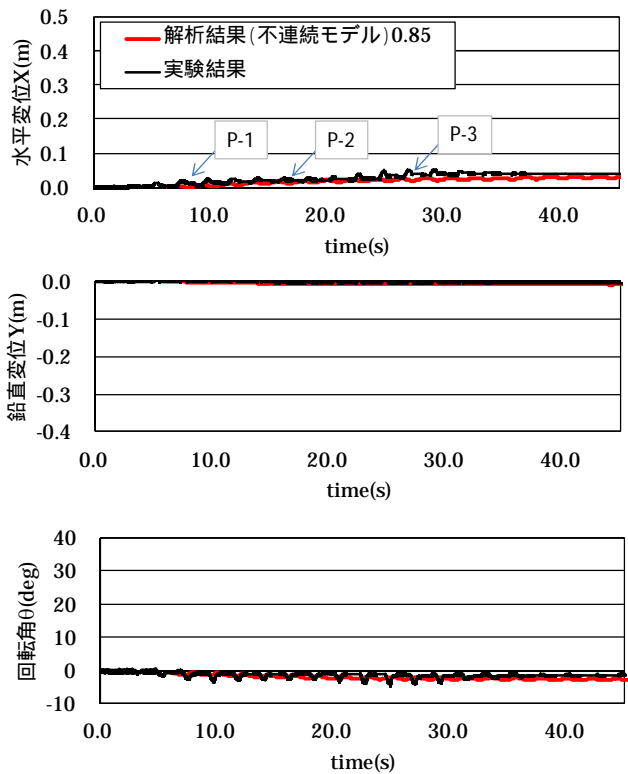


図-11 ケーソン中心変位・回転角の比較
(高マウンド 0.37 m, 肩幅 0.17 m, 捨石粒径 4号)

初期のマウンド捨石のばらつきや、複数要素に区分けした要素に接触するかしないかなどのケーソン各要素への初期接触の有無により、最初はややばらつきが生じているものの、時間の経過とともにケーソン後趾への荷重集中傾向を概ね再現できている。

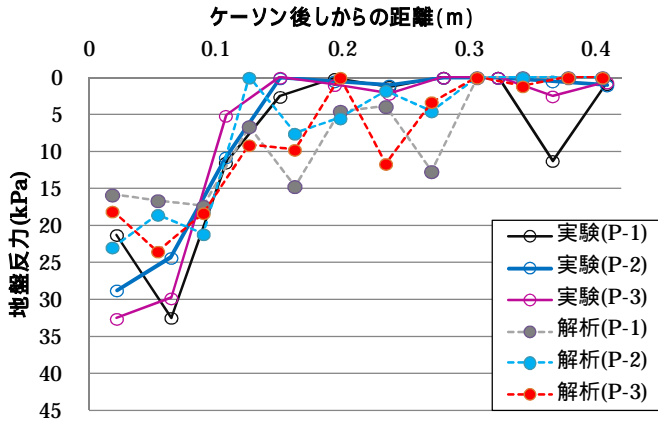


図-12 ケーソン地盤反力の比較
(高マウンド0.37m, 肩幅0.17m, 捨石粒径4号)

5. 結論

本研究では、混成防波堤のケーソンの回転やマウンドの崩壊を伴う大規模変形破壊を再現できる解析手法について検討を行った。DEM法をベースに付加質量の設定や、急激なマウンド崩壊過程をより再現できるように摩擦係数(スライダー)の不連続モデルを導入するなどの改良を行い、その適用性を検証した。その結果、粒子間摩擦の上限値を要素速度に応じた不連続化を考慮する上では、スライダーの上限値を静的値の0.85倍とすることで、実験結果の再現性が向上することがわかった。

ただし、実務適用のためには一般化とさらなる精度向上が必要であり、例えば、捨石同士のかみ合わせ効果をより詳細に評価できる粒子モデルの導入や、ケーソンの変位に伴う作用荷重の変化、マウンドへの波の透過による捨石への影響などの考慮を含め、大規模変形予測モデルの高度化を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 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, 3号, 46p., 1998.
- 2) Esteban, M., H. Takagi and T. Shibayama: Modified Heel Pressure Formula to Simulate Thilting of a Composite Caisson Breakwater, Coastal Engineering Journal, Vol.54, No4, 1250022, 21p., 2012.
- 3) 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子: 津波襲来時における海底地盤の変形に起因した防波堤の不安定化, 第22回中部地盤工学シンポジウム, 6p., 2010.
- 4) 五十里洋行, 後藤仁志, 吉年英文: ケーソン式防波堤の大変形解析のための改良型MPS法の基礎的検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第58巻, pp.731-735, 2011.
- 5) 辻尾大樹, 高山知司, 大里睦夫, 山口佑太, 鈴木信夫, 瀬良敬二: 個別要素法を用いた粘り強い防波堤の安定性照査法の検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), 第59巻, pp.841-845, 2012.
- 6) 宮田正史, 吉田誠, 安野浩一郎: ケーソン式防波堤の大規模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資料, No.564, 34P., 2010.
- 7) 後藤仁志, 酒井哲郎: 粒状体モデルによる saltation・sheetflow 共存域の数値解析, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.486-490, 1997.
- 8) 高山知司, 高橋通夫: ケーソンを単一構造とした個別要素法による混成堤の挙動計算, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.841-845, 2006.

DEVELOPMENT OF NUMERICAL MODEL FOR COMPOSITE BREAKWATER FAILURE DUE TO UNEXPECTED EXTREME WAVES

Kouichirou ANNO, Yoichi MORIYA, Hajime MASE and Nobuhito MORI

A lot of properties and lives were lost by the 2011 Tohoku Earthquake. In addition, a large tsunami breakwater (e.g. Kamaishi Port) as well as many breakwaters were collapsed by tsunami attack. There are few studies to clarify the failure process of composite breakwater consisted of a caisson and mound accompanying with large deformation. In this paper, we developed a numerical model that can analyze the large deformation of composite breakwater using DEM, and confirmed the applicability of numerical model by comparing experimental results and numerically simulated ones. It was found that the discontinuity of friction coefficient is one of important factors for reproducing the tilting and sinking of caisson and mound deformation.