防波堤被覆ブロック群の安定性評価のための ワイヤー連結ブロック群シミュレーションの開発

Numerical Simulation for Collapse Process of Armor Blocks Connected with Wire under High Waves

後藤仁志¹ · 原田英治² · 五十里洋行³ · 安岡恒人⁴ · 有光 剛⁵ · 大江一也⁶ · 鶴田修己⁷

Hitoshi GOTOH, Eiji HARADA, Hiroyuki IKARI Tsunehito YASUOKA, Tsuyoshi ARIMITSU, Kazuya OOE and Naoki TSURUTA

To repair armor blocks damaged by high waves, an expensive in-water repair work using a crane barge must be done. A wire connection with among blocks can be effective to save maintenance cost. But, to conduct hydraulic experiment of among blocks connected by wire is considerably difficult because of a lack of a physical model of wire satisfying dynamic similarity. In the present study, simple wire model based on the distinct element method has been developed to investigate the effect of wire connection of armor blocks as a resistance of damage under high waves. Validation of developed wire model is conducted by comparing model predictions with field observations.

1. はじめに

近年、大型台風の襲来頻度が増加傾向を示し海岸構造 物の被災ポテンシャルは増加していると言える.防波堤 前面マウンドの被覆ブロックが顕著に移動した場合に は、クレーン船を用いた水中部での復旧作業等が必要と なり、維持管理費の負担が増加する(有光ら、2008). 簡便な被覆ブロックの被災対策として, ブロック同士を ワイヤー連結する方法がある. ワイヤー連結に関する基 礎情報の収集には,水理実験の実施が考えられるが,ワ イヤーの力学相似を満たす模型の作成が困難であること から、その実施は困難を伴う.数値シミュレーションに おいても、ワイヤーの材料特性を十分に模擬可能なワイ ヤーモデルの構築は困難であるからか、ワイヤーモデル を対象とした既往の研究は見当たらない.本研究では, ワイヤー連結されたブロック群の被災抑制効果を検討す るために、個別要素法の要素間力モデル(後藤,2004) に改良を加えた簡易型ワイヤー連結モデルを開発した. また, ワイヤー連結ブロック群の被災過程の数値シミュ レーションを実施して,現地観測結果との比較からその 再現性を確認した.

1	正会員	博(工)	京都大学教授 工学研究科社会基盤工学
2	正会員	博(工)	京都大学准教授 工学研究科社会基盤工 学真政
3	正会員	博(工)	京都大学助教 工学研究科社会基盤工学 専攻
4 5 6 7	正会員 正会員 正会員 学生会員	博(工) 工修	周西電力株式会社 火力事業本部 関西電力株式会社 電力技術研究所 関西電力株式会社 電力技術研究所主幹 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工 学専攻

2. シミュレーション手法

本研究では、計算負荷の軽減のために2D-MPS法と 1D-Boussinesq方程式のカップリング(後藤ら,2006)を 参考にして、越波現象のような水塊の分裂・再合体を含 む複雑な水面変動に対して安定な計算が可能なCMPS法 (Khayyerら,2008)を構造物周辺の小領域に適用し、ま た、エネルギー散逸以外の波浪の性質の再現に優れ、か つ計算負荷の比較的軽いBoussinesqモデルを中領域に適 用して波浪場を模擬し、ここから得られた流速場から、 DEM(後藤,2004)で追跡されるブロック運動に作用さ せる流体力を算定する.

(1) CMPS法の概要

標準MPS法 (Koshizuka ら, 1996) では, 粒子*j*に粒子 *i*から作用する圧力勾配力は,

と書ける (w:重み関数, D_s :次元数, ρ :流体の密度, n_0 :基準粒子数密度, \hat{p}_i :粒子iとその近傍の粒子jの中 での最低圧力, m:粒子1個あたりの質量, $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$). 一方, 粒子iに粒子jから作用する圧力勾配力は,

と書けて,

となり, 圧力勾配力がanti-symmetricとならないので, 運動量が保存されない.



CMPS法(Khayyerら, 2008)では, 粒子*i*, *j*の中点に 仮想的圧力定義点を設けて,この点を媒介とした局所圧 力勾配評価を行うことにより,標準MPS法(Koshizuka ら,1996)の圧力勾配モデルを変形し,

$$\langle \nabla \boldsymbol{p} \rangle_i = \frac{D_*}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_i + p_j) - 2\hat{p}_i}{|\boldsymbol{r}_{ij}|^2} (\boldsymbol{r}_{ij}) w(|\boldsymbol{r}_{ij}|) \quad \dots \dots \dots (4)$$

を導出する.さらに圧力の局所(影響円内)最小値の対 象性を保証するため、 $\hat{p}_i \epsilon (\hat{p}_i + \hat{p}_i)/2 で置換した$

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{(p_i + p_j) - (\hat{p}_i + \hat{p}_j)}{|\mathbf{r}_{ij}|^2} (\mathbf{r}_{ij}) w(|\mathbf{r}_{ij}|) \quad \dots \dots (5)$$

を圧力勾配評価式として用いることにより,運動量保存 性が確保される.

(2) CMPS法-Boussinesqモデルカップリング

Boussinesqモデルにより推定された水理条件(水位, 一様流速)を入力値として,CMPS法の造波壁を運動さ せる.造波壁(座標 x_{wall} ,速度 v_{wall})がBoussinesqモデル の計算点(x_{Boff}, x_{Bon})の間に存在する状況を考えて,造 波壁の移動速度をBoussinesqモデルの計算点における速 度から内挿して与える(図-1参照).

造波壁の高さに関しては、Boussinesqモデルの計算点に おける水深を内挿して与え、かつ、反射波を抑制するた めに、造波壁の天端から越流を許容するものとして、さ らに造波壁の高さを下げる.

$$h_{wall} = \frac{|x_{Bon} - x_{wall}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} h_{Boff} + \frac{|x_{wall} - x_{Boff}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} h_{Bon} - h_{of} \cdots (7)$$

(*h_{of}*: 越流を促進し, 造波壁前面に位置する観測点にお ける水位をBoussinesqモデルの計算値に近づけるための 造波板天端調整値). 越流を許容したことによる水槽の 水位低下に関しては, 後藤ら (2006) にしたがって水粒 子の再配置を行う簡便な質量保存の充足法を適用した.

(3) 被覆ブロックモデルの概要

要素補運動は,剛体連結モデルを組み込んだ拡張型の 3次元個別要素法を基礎としたモデルで表現され,ブロ ックは要素を連結して構成される.個別要素法では,要 素間相互作用力がスプリング-ダッシュポット系で表現 され,個々の要素の運動は,球の並進及び回転の運動方 程式

$$\rho(s+C_M)A_3d^3\frac{d\boldsymbol{u}_b}{dt}=\boldsymbol{F}_{colp}+\boldsymbol{F}_g+\boldsymbol{F}_f\quad\cdots\cdots\cdots(8)$$

$$I\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = T \cdots (9)$$

$$F_{f} = \frac{1}{2} C_{D} \rho A_{z} d^{z} | \boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{b} | (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{b}) \cdots (10)$$

を用いて表現される(s:要素比重, C_M:付加質量係数 $(C_M=0.5)$, u_b : ブロック要素の移動速度ベクトル, F_{coln} :ブロック要素間相互作用力, F_{o} :体積力ベクトル, F_t :流体力ベクトル, I:慣性テンソル, ω :回転速度ベ クトル, T:トルク, C_p :抗力係数, v:動粘性係数, *A*₂, *A*₃: それぞれ2次元, 3次元形状係数 (*A*₂=π/4, $A_3=\pi/6$), u:ブロック要素近傍流速ベクトル, d:要素 径). また、ブロックは複数の要素で構成されるが、そ の挙動は個々の要素運動の追跡後に, Passively Moving Solid Model (Koshizukaら, 1998) を用いて、複数の球形 要素の重心座標周りの運動量を保存しつつ追跡する. な お、個別要素法で用いる弾性バネ定数(法線および接線 方向はぞれぞれk,, k) についてはヘルツの弾性接触理論 (後藤, 2004) によって、要素の材料特性であるヤング 率とポアソン比を関連付けて与えた. ここでは、ヤング 率 E=1.0×10⁷N/m²およびポアソン比 v_b=0.3を与えた.粘 性ダッシュポット係数(法線および接線方向はそれぞれ c_n, c_s) については、1次元減衰振動系の振幅減衰特性の 臨界減衰条件と関連付けて評価した.

(4) ワイヤーモデル

ワイヤーが配置されたブロック間には、引張に対して 抵抗力を発現するジョイント(仮想ワイヤー)を配置す る.引張抵抗力が発現するのは要素間距離が仮想ワイヤ ー長であるr₀から最大r_{max}までとし、それ以外の伸縮に は抵抗しないとしてワイヤーをモデル化した(図-2参照). また、ワイヤーには弾性スプリングを法線方向のみに配 置し、要素間距離rに対して、弾性バネ定数k_{nume}は

$$k_{n\,wire} = k_n \cdot \left(1 - \frac{r_0}{r}\right); \ r_{max} = r_0 + \psi \cdot d \quad \dots \quad (13)$$



のように評価し、要素問距離が r_{max} を超過すると、抵抗 力が作用しないモデルとした.なお、引張に対して抵抗 する最大の距離 r_{max} を越えるとワイヤーが破断するとし、 その後の計算では通常の要素問力のモデルが適用され る.式(13)の ψ はパラメータであり、ここでは後述す る観測結果との比較から ψ =0.3とし、 r_0 はパッキング完 了直後のブロック構成要素問の距離とした.

3. 数値解析の適用評価

(1) 波浪場の再現性

図-3に示す水路全長50m,水路幅1m,水路深さ1.2m の2次元造波水路に,入射条件:沖波波高0.183m,周期 1.65sの規則波を発生させ,H5-1,H6-1,H6-2に設置さ れた波高計によって水位の時系列を計測した.同条件の 数値シミュレーション結果は,図-4のように測定結果と 良好な一致を示した.また,図-5に示す瞬間画像の比較 からも数値シミュレーションは良好に実験結果を再現す ることが理解され,ブロックに作用する流体力の評価に 関して,この計算結果を利用することは妥当であると判 断される.

(2) 計算条件

模型スケールでの対象計算領域の初期ブロック群配置 を図-6の上段に示す.また、図中にはワイヤー連結箇所 も示した.現地観測では、台風来襲後に図-6の中段に示 すような被覆ブロック群の被災が確認されている.本研 究では数値シミュレーションによって観測結果と類似し た被災が再現できるようにワイヤーモデルのチューニン グを実施し、ψ=0.3と設定した.なお、マウンド構成要 素、境界要素、ブロック構成単一球形要素は全て同一の





図-6 初期(上),被災後(中),単一ブロックの鳥瞰図(下)

直径d=0.008m,比重s=3.689である.また,被覆ブロッ クは、凹凸のあるマウンド要素の上に配置され、凹凸の レベルはBox-Müller法によって生成した正規乱数を用 い,マウンド平均高さ周りに標準偏差σωがブロック高さ H_{R} の1/3 ($\sigma_{M}=H_{R}/3$) になるように設定した. 被覆ブロッ クは20tビーハイブ(1/60スケール)である.図-6下段に 示すように数値シミュレーションでは96個の球形要素 (直径 d=0.008m)を用いて、ビーハイブの幾何形状の特 徴を表現できるように形成した. ワイヤーを配置するブ ロック構成要素の詳細を図-7に示す.なお、図-6のブロ ック番号78の岸沖方向のワイヤーが1本配置されている ことを考慮して、岸沖方向にはブロック側面の全粒子に 配置せず,部分的にワイヤーを配置した.ワイヤーモデ ルで使用するr₀は、パッキング完了直後の分布より0~ 6.7dの範囲であった. なお, 波浪条件は3.(1)で述べた条 件と同じであり、動粘性係数v=10-6m²/sである。

2D-CMPS法によって計算された被覆ブロック周辺の流 速場を用いて,個々のブロック構成要素に作用する流体 力を計算するため,奥行き(z軸)方向には一様流速分 布を仮定し,ブロック混入による波浪場への影響は無い としたOne-way法によるカップリング計算とした.



(3) ワイヤー連結ブロックの被災過程

シミュレーション case1 によって得られた代表的なス ナップショットを図-8の上段に示す.シミュレーション 開始後, 徐々に外側の被覆ブロックが沖側に向けて迫り 出す過程が見て取れる.また,時刻*t*=9.99s以降のスナッ プショットからは, ワイヤー連結されていないブロック の沖側への移動量が, ワイヤー連結されたブロックの移 動量と比較して大きいことが明瞭に確認され, ワイヤー 連結のブロック移動に対する抑制効果がうかがえる.時 刻*t*=11.67sのワイヤー連結ブロック群の沖側への孕み具 合は, 図-6で示した現地で観測された被災後の様子を概 ね良好に再現している.

次に、図-8上段に示した casel の時刻 t=11.67s の状態か ら、岸側の2列目のブロックの据え直しとワイヤー連結 部を増設した条件のシミュレーション case2 を実施した. 作用波は部分的にワイヤー連結した場合のシミュレーシ ョン casel と同様とし、被災過程を追跡した結果を図-8に 下段に示す. casel と同時刻のスナップショットを比較す ると、ワイヤー連結箇所の増設によるブロック群の移動 量が抑制され、ブロック全体の挙動として孕み難くなる ことが分かる.

図-9に時刻 = 9.99sにおけるワイヤーで連結されたブロ ック間の引張力の分布を、ワイヤー連結ブロック間に配 置した円要素の色の違いによって示す.ただし、fmax: 最大引張力、fmin:最小引張力である.ワイヤー連結箇所 が増設された case2 では、アーチ状の引張力分布が示さ れ、部分的にワイヤー連結した case1 の分布と比較して、 ブロックの沖側への移動抑制効果が強く働いている様子 がうかがえる.また、双方の case において、岸沖方向に 配置されたブロック番号 78 のワイヤーには引張力が認め られる.この引張力は、ワイヤー連結ブロック群の孕み が顕在化する時刻以降に継続して確認され、ワイヤー連 結ブロックの被災抑制に対して重要な連結ポイントにな ると考えられる.



4. おわりに

本研究では、被覆ブロックの簡易な被災対策として、 ブロック同士をワイヤー連結する手法に注目した.水理 模型実験でのワイヤー連結ブロック群の被災過程の検討 は、ワイヤーの材料強度の力学的相似を満足させること が非常に困難であることから、数値シミュレーションに よってワイヤー連結ブロック群の被災過程を検討するこ とを試みた.簡易ワイヤー連結モデルではあるが、ワイ ヤーモデルのパラメータを適切に設定すれば、現地観測 結果を良好に再現できることを示した.この種の数値シ ミュレーションの枠組みによるワイヤー連結対策後の被 災予測や、被災抑制に効果的なワイヤー配置等の検討の 可能性が示唆された.

参考文献

- 有光 剛・安岡恒人・川崎浩司 (2008):防波堤マウンド法先 部被覆ブロックの被災メカニズムの検討,海岸工学論文 集,第55巻,pp.946-950.
- 後藤仁志(2004):数值流砂水理学,森北出版,223p.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥田一弘 (2006): 粒子法 と Boussinesqモデルのハイブリッド化に関する基礎的研 究,水工学論文集,第50巻, pp. 1453-1458.
- Khayyer, A. and Gotoh, H. (2008): Development of CMPS method for accurate water-surface tracking in breaking waves, Coastal



Eng. Jour. 50, No.2, pp. 179-207.

- Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996): Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, Nucl. Sci. and Eng. 123, pp. 421-434, 1996.
- Koshizuka, S., Nobe, A. and Oka, Y. (1998): Numericl analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Mech. Fluids 26, pp. 751-769.