

高波浪による消波ブロック群高密度化のメカニズム

後藤仁志*・原田英治**・高山知司***・水谷雅裕****
不動雅之*****・岩本晃幸*****

本稿では、大波浪の襲来を受ける外洋に直面する防波堤周辺に設置された消波ブロック群の沈下機構の一つとして、波力によるブロック群の高密度化に関して、現地計測と数値シミュレーションの両面から検討する。水面下のブロック群低脚部の時化後のブロック配置をマルチビームソナーにより計測し、消波ブロック群支持層の沈下の有無を明らかにするとともに、個別要素法型の 3D ブロックモデルを用いた数値シミュレーションによって、ブロック群の高密度化過程を計算力学的に検討する。

1. はじめに

外洋に直面する防波堤は大波浪の襲来によって大きな波浪外力の作用を繰り返し受ける厳しい海象条件に建設される。防波堤前面に設置される巨大な消波ブロックはしばしば顕著な沈下を呈するが、その原因としては波浪による防波堤前面砂地盤の液状化（善ら，1989）や波圧変動による防波堤前面砂の吸い出しによる局所洗掘（鈴木ら，2002）など漂砂過程と関連するメカニズムが指摘され、室内実験を軸とした種々の検討が行われてきた。高知港三里地区では外洋に面した防波堤の周辺および直下の砂地盤において地盤内間隙水圧の実測が行われ、時化の際の防波堤周辺砂地盤の液状化の可能性が実証的に検討されてきた（佐々ら，2003；高山ら，2004）。対象地点の地盤は細砂主体の沖積砂層（平均粒径 $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$ ）であるが、これまでに蓄積された一連の地盤内間隙水圧の計測結果からは大規模かつ明瞭な液状化の発生は確認されていない。その一方で、消波ブロックの天端は時化の前後で比較的に明瞭な沈下傾向を示しており、砂地盤の液状化以外の原因についても詳細な検討が必要である。

本稿では、マルチビームソナーによる現地測量結果を通じて消波ブロック層の挙動特性を確認するとともに、大波浪による高波圧の作用に起因する消波ブロック群の高密度化に関して個別要素法型の 3D ブロックモデルを用いた数値シミュレーションによって検討する。

2. 消波ブロック群低脚部の現地観測

観測は、図-1 に示す高知港三里地区の東第一防波堤サイトで実施した。防波堤断面および消波ブロック群配置の概略を図-2 に示す。東第一防波堤は、2001 年から順次施工され、おおそ北東の方向に延伸されていくが、ブロック群の変化は 2003 年 8 月の 10 号台風による時化の前後において、施工区間の先端部で観測された。時化前後の消波ブロック群の天端の状況は測量船からの写真撮影によって把握した。写真判読によって得られた沈下量を図-3 に示す。

さらに、時化後の水面下のブロック群の状況を正確に把握するため、マルチビームソナー（レソン社製 seabat8125 型マルチビーム測深ソナー）による 3D デジタル細密地形計測を実施した。使用したマルチビームソナー

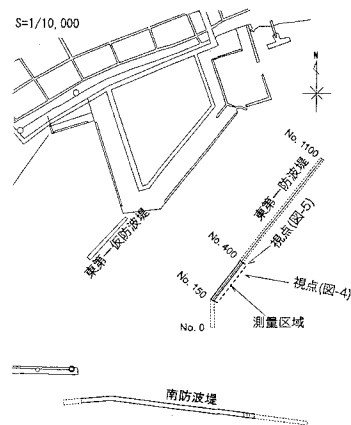


図-1 現地観測地点

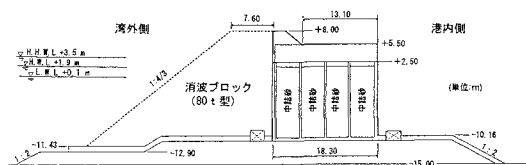


図-2 防波堤断面と消波ブロック群配置

- | | | |
|-------------|-----|-----------------------------|
| * 正 会 員 | 工 博 | 京都大学助教授 工学研究科都市環境工学専攻 |
| ** 正 会 員 | 工 博 | 豊田工業高等専門学校講師 環境都市工学科 |
| *** フェロー | 工 博 | 京都大学教授 防災研究所水災害研究部門 |
| **** 正 会 員 | 工 修 | 国土交通省四国整備局 高松港湾空港技術調査事務所 所長 |
| ***** 正 会 員 | | 水産庁 漁港漁場整備部整備課 |
| ***** 学生会員 | 工 修 | 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 |

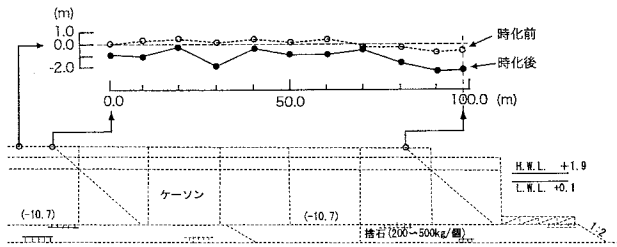


図-3 時化前後の沈下量

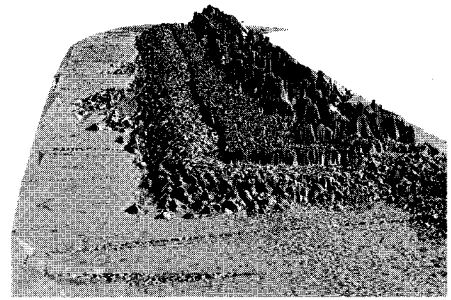


図-5 消波ブロック群の低脚部(側面)

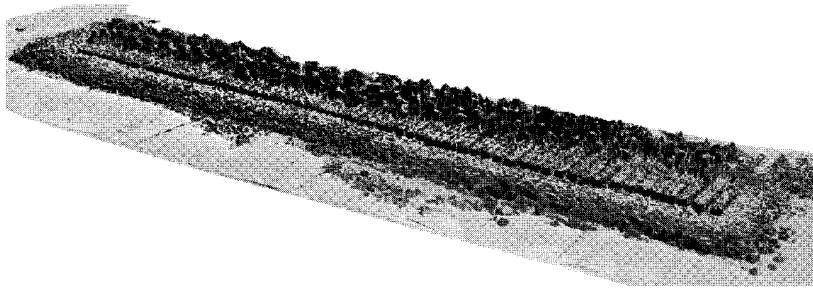


図-4 消波ブロック群の低脚部(正面)

は、最高分解能 6 mm (455 kHz ビーム), スワッス幅 120° (240本のビームを 0.5° 間隔で発射) であり、水深の 3.4 倍の幅の海底面地形 (現地水深を 15.0 m とすれば海底面における計測幅は約 52.0 m) を一度に取得できる。測量船を防波堤に沿って船速約 3 ~ 4 ノットで進行させつつ、サンプリング速度 40 回/s (最大) で縦断面形状を取得し、東第一防波堤の低脚部全体の 3D 画像を得た。

図-4 および図-5 に時化後の消波ブロック群の低脚部の計測結果を示す。法先の消波ブロックは上部の脚を鉛直方向に向けた状態を維持しており、法先の大規模な沈下やそれに伴う消波ブロックの転倒は生じていない。さらに、ブロック層から外れて沖側に転落しているブロックも存在しない。このように、観測地点では液状化によるブロックの大規模な沈下は確認されず、砂の吸い出しによる局所洗掘の発生も顕著ではない。

3. ブロック群高密度化のシュミレーション

(1) シュミレーションモデル

数値シュミレーションには、3 次元個別要素法 (後藤ら, 2002) であり、消波ブロック構成要素間には、Koshizuka ら (1998) の passively moving solid model に基づく剛体連結モジュールを導入した。シュミレーションモデルの概略を以下に示す。

個々の要素の運動は、隣接粒子との接触力に起因する並進および回転の運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \frac{\mathbf{F}_{pint}}{M_i} - \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \phi_i}{dt^2} = \frac{T_{pint}}{I_i} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{\sigma \pi d_i^3}{6}; I_i = \frac{\sigma \pi d_i^5}{60} \quad (3)$$

で記述される。ここに、 $\mathbf{x}_i$ 、 ϕ_i : グローバル座標系 $\mathbf{x}$ 上での要素 i の位置と回転角、 $\mathbf{F}_{pint}$: グローバル座標系上での要素間接触力、 M_i : 要素 i の質量、 T_{pint} : グローバル座標系上での要素間作用モーメント、 I_i : 要素 i の慣性モーメント、 d_i : 要素 i の直径、 $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル、 σ : 要素の密度である。

要素間接触力に関しては、2 要素間接平面の法線方向および接平面内に採ったローカル座標系において、弾性スプリング (バネ定数 k_n , k_s) およびダッシュポット (粘性定数 c_n , c_s) を配置してモデル化する。要素の運動はグローバル座標系で追跡され、要素間接触が生じると接触力の評価がローカル座標系で行われる (例えば、後藤ら, 2004)。個別要素法で使用したモデル定数は、後藤ら (2001) の設定法に準じて、計算時間ステップ $\Delta t = 0.0001$ s に対して、法線および接線方向のバネ定数および粘性定数をそれぞれ $k_n = 9.27 \times 10^{10}$ N/m, $k_s = 3.75 \times 10^{10}$ N/m, $c_n = 8.35 \times 10^7$ Ns/m, $c_s = 5.18 \times 10^7$ Ns/m に設定した。なお、本計算では要素間の接触面に生じる法線方向まわりの回転に対するねじりモーメント

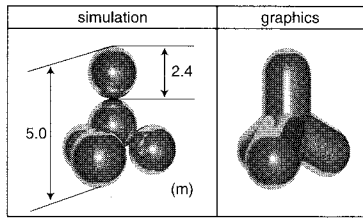


図-6 消波ブロックの構成

は考慮していない。

消波ブロックは直径2.4 mの均一球形要素5個で構成し、核になる球形要素の周囲に4個の球形要素を配置して、要素間を剛体連結した。周囲の4個の要素は、それらの中心を結んで得られる正四面体の重心と核になる球形要素の中心が一致するように配置した(図-6参照)。なお、スナップショット等のグラフィクスでは見易さに配慮して、消波ブロックを構成する個々の球形要素間の接点部分を連結して表示した。要素間の剛体連結には、Koshizukaら(1998)のPassively moving solid modelを準用し、剛体の重心回りの角運動量が保存されるように相対回転角を算定して、ブロック要素間の相対位置に変化が生じないように座標修正が施される。シミュレーションでは、最初にブロック構成要素間の連結はないものとして、全要素を個別要素法で追跡する。その結果、ブロック構成要素の相対位置関係が崩れてブロックは変形するが、ブロック構成要素間の初期の相対位置を変化させないように座標修正計算が施される。

座標修正計算は以下の通りである。まず、ブロック構成要素の時刻 $t+\Delta t$ での仮速度と仮座標より重心座標 r_g と重心座標での並進速度ベクトル T 、重心回りでの角速度ベクトル R を算定する。

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N u_i \times (r_i - r_g) \quad (5)$$

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i; I = \sum_{i=1}^N |r_i - r_g|^2 \quad (6)$$

ここに、 I :ブロック構成要素の重心回りの慣性モーメント、 N :ブロック構成要素の総数である。次に、並進速度ベクトル、角速度ベクトルを用いて、剛体的挙動を満足するためのブロック構成要素 i の移動速度

$$u_{Bi} = T + (r_i - r_g) \times R \quad (7)$$

を求める。そして、これを用いてブロック構成要素 i の座標は、

$$r_i(t+\Delta t) = r_i(t) + u_{Bi} \Delta t \quad (8)$$

と修正される。個別要素法による全要素の座標の更新が行われる度に、ブロック構成要素に対する座標修正が施

される。

(2) 波浪による駆動力のモデル化

消波ブロックの駆動力は、言うまでもなく来襲波の波力であるが、ブロック群の高密度化に貢献するのは、ブロック単体の移動限界を越える高波浪の波圧に限定される。厳密な動的解析を行うには波圧の時空間分布の推定が不可欠で、個々のブロック周辺の局所的流れ場を正確に評価するには超高解像度の3次元非定常自由表面流解析が必要となる。しかし、CFDの現時点の水準では、単一ブロック周辺流れの流速・圧力の分布を推定して流体力を評価する直接計算は実現性に乏しい。そこで、本稿ではブロックの群体としての挙動に重点を置いた取り扱いを行い、流れ場(すなわち波力)の評価には最も簡便な方法を導入した。個々の消波ブロックに作用する波圧は、合田(1973)式を用いて評価した。合田式から推定される波圧は時間変動値ではなく、ピーク値に相当するものであるから、何らかの変動パターンを与える必要が生じる。そこで、ここでは載荷・除荷を規則的に反復する矩形波型の変動パターンを与えることとした。ブロックを構成する個別の要素に対する作用力は、合田式の算定値に球形要素の投影面積を乗じたものを用い、作用点は球形要素の中心とした。波圧は水平力のみを作用させるが、消波ブロックが傾くと中心周りのトルクが生じてブロックの回転が駆動されることとなる。

東第一防波堤の西端付近の海底地盤に設置された海象計の記録によると、計算対象とした2003年8月の10号台風の通過時の有義波の波高と周期は、図-7のように推移した。時化のピークに相当する値として、周期 $T = 12.0$ s、波高 $H = 10.0$ m(水深15.0 mとして波長135.2 m)を選択し、防波堤前面水深15.0 mとして、合田式から波圧を推定した。波圧の時間変動パターンに関しては、前述のように最も単純な載荷1.0 sと除荷4.0 sを規則的に反復する矩形波型の波形を5.0秒周期で与えた(図-8)。なお、載荷・除荷の作用周期の設定については、載荷によって生じたブロック群の運動が除荷位相中に完全に停止し、前回の載荷の影響が次の載荷位相にまで残存しないように、十分な長さの除荷位相を確保した。載荷位相終了後の単体ブロックの運動の追跡によると、1 s程度で全てのブロックの運動が停止することから、消波ブロック高密度化の追跡に関しては、周期は5.0 s(4.0 s間の除荷位相)で充分であると判断した。

4. ブロック群の高密度化過程

(1) 計算条件・境界条件

現地の消波ブロック群は、捨石マウンド上に乱積みで設置されており、個々のブロックの設置には施工誤差や

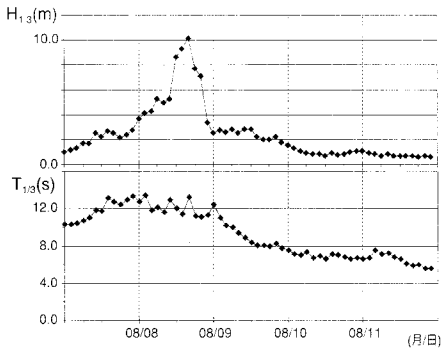


図-7 波高・周期の海象計記録

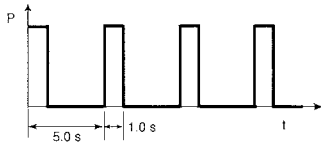


図-8 波圧変動パターン

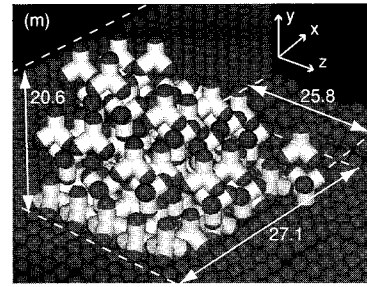


図-9 ブロック群の初期配列

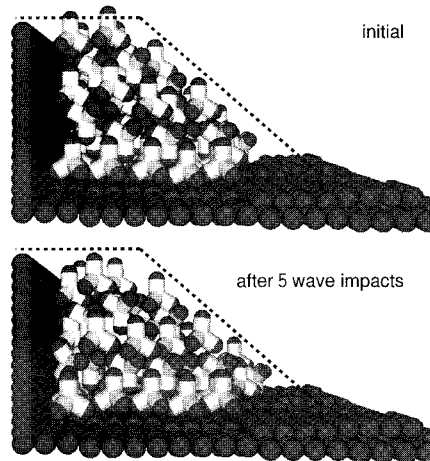


図-10 消波ブロック群の高密度化過程

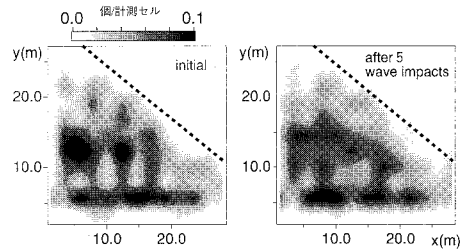


図-11 球形要素数密度分布

マウンドの小規模な凹凸などが影響すると考えられる。さらに、従来の観測（高山ら，2004）から可能性が示唆されている砂地盤表層付近の小規模な液状化が加わると、マウンド表面の凹凸はより顕著となる可能性がある。そこで、ブロック群の底面境界は、ランダムな凹凸を有する固定壁とした。底面には、消波ブロックの投影面積よりやや大きい矩形領域（基準粒子3個分の距離を1辺として、9個の粒子で構成）を単位に、高さにはばらつき（標準偏差 $d/3$ ； d は球体要素径）を与えて、チェックボード状の凹凸を設けた。背面は直立壁、側方は周期境界とした。初期配列後に重力を作用させて行ったパッキング計算直後の消波ブロック群（個数70）の配置を図-9に示す。

(2) シミュレーションの結果

以上の条件で消波ブロック群の高密度化過程が追跡された。初期配列および波浪外力が5周期作用した後のスナップショットを図-10に、スナップショットと同一時刻における球形要素数密度分布を図-11に示す。なお、球形要素数密度は、計測セル（要素径と等しい長さの立方体格子）内に存在する球形要素数で定義した。スナップショットでは極値的な波力の作用の反復によってブロック群の天端が低下する様子が明瞭に示され、数密度分布からはブロック層の深部の高密度化が生じていることが理解できる。波力の直撃を受ける表層のブロックだけでなく、ブロック層深部のブロックの噛み合わせにまでも変化が及び、ブロック群全体の高密度化が生じることが示された。今回の検討で得られたブロック群天端の沈下量（天端ブロックの中で最も高い場所にあるブロック

の座標をパッキング直後と5周期の波浪外力の作用後において比較して得られる差）は、1.866 mであり、沈下量の現地測定結果の最大値約2.0 m（図-3参照）と良好に対応し、現地でのブロック沈下の要因としての高密度化の妥当性を裏付けている。

次に、底面のランダムな凹凸が消波ブロック群の高密度化に与える影響を明らかにするため、チェックボード状の凹凸のない底面境界条件でシミュレーションを実施した。初期配列および波浪外力が5周期作用した後のスナップショットを図-12に、スナップショットと同一時刻における球形要素数密度分布を図-13に示す。法先が

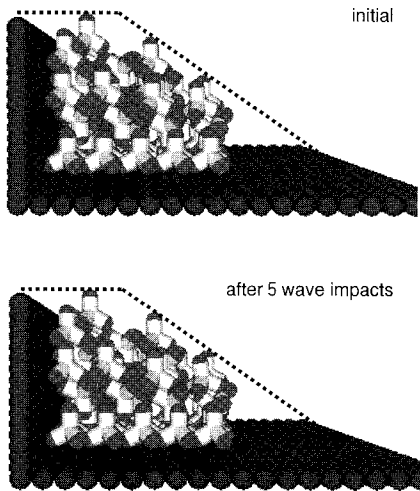


図-12 平坦床上の消波ブロック群

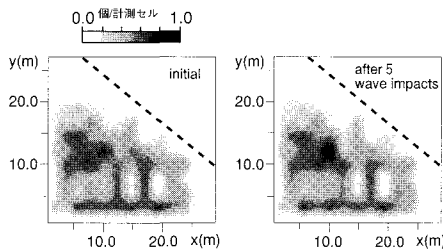


図-13 平坦床上の球形要素数密度分布

切り立った配列としているにもかかわらず、ブロック群の高密度化は顕著に生じない。先の結果と比較すると、消波ブロック群底層のブロックの配列の僅かな不規則性がブロック群全体の高密度化に重要な役割を果たすことが示されたと言える。

5. おわりに

本稿では、外洋に直面する防波堤前面に設置される巨大な消波ブロックの沈下機構の一つとして、ブロック群の高密度化に関して検討した。はじめに、マルチビームソナーによる現地観測によって、消波ブロック層低脚部のブロックに著しい沈下や転倒が生じていないことを確認した。次に、高波圧の作用に起因する消波ブロックの高密度化過程を、個別要素法型の3Dブロックモデルを用いた数値シミュレーションによって再現し、捨石マウ

ンド表面の不規則な凹凸の存在が、高密度化に重要な役割を演じていることを明らかにした。

現地の継続的観測からは、消波ブロックの脚折れや消波ブロックの衝突によるケーソンの破損などが確認されているが、今回の数値モデルはこの種の破壊を表現できない。消波ブロック構成要素間の引張限界を導入して脚折れを表現可能とすることやケーソン壁面の構成要素間に破壊限界を導入することなど、より現実に即したシミュレーションモデルへと改良を進める必要がある。また、多数の剛体が複雑に接触する消波ブロック層のシミュレーションは陽解法に基づく個別要素法の標準コードでは不安定と成り易く、計算の安定化を目的とした陰解法あるいは高次精度の陽解法の導入が焦眉の課題でもある。

本稿の執筆に際しては、『海底地盤の液状化に関する調査委員会』において、九州大学工学研究院・善功企教授、京都大学防災研究所・関口秀雄教授、(独)港湾空港技術研究所・高橋重雄研究主監をはじめとする諸氏より頂戴したコメントが有用であった。また、データの取りまとめについては、(財)沿岸技術研究センター・小野幸一郎氏にお世話になった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 合田良実(1973)：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp. 31-69.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎(2001)：個別要素法に基づく移動床シミュレーターのモデル定数の最適化，土木学会論文集，No.691/II-57，pp. 159-164.
- 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎(2002)：三次元個別要素法による数値移動床の一般化，水工学論文集，第46巻，pp. 613-618.
- 後藤仁志(2004)：数値流砂水理学，森北出版，223p.
- 佐々真志・高山知司・水谷雅裕・辻尾大樹(2003)：実海域における海底砂質地盤の残留間隙水圧の発生と消散過程，海岸工学論文集，第50巻，pp. 846-850.
- 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎(2003)：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について，港湾技術研究所報告，41巻，1号，pp. 51-89.
- 善巧企・山崎浩之・佐藤泰(1989)：海底地盤の波浪による液状化，港湾技術研究所報告，28巻，3号，pp. 29-57.
- 高山知司・佐々真志・水谷雅裕・辻尾大樹・谷口昇太郎(2004)：防波堤マウンド下における残留間隙水圧の応答に関する現地観測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 821-825.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka(1998)：Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.