捨石マウンドー海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化

Instability of caisson-type breakwater due to seepage of tsunami into rubble mound and seabed

今瀬達也¹・前田健一²・三宅達夫³・鶴ヶ崎和博⁴・澤田 豊⁵・角田紘子⁶

Tatsuya IMASE, Kenichi MAEDA, Michio MIYAKE, Kazuhiro TSURUGASAKI
Yutaka SAWADA and Hiroko SUMIDA

The instability of the caisson-type breakwater due to seepage of tsunami into the rubble mound and the seabed ground was focused. The breakwater slid due to the action of the initial impulsive force, then shear deformation occurred in the rubble mound and the seabed ground, and the bearing capacity decreased. Subsequently, the hydraulic gradient increased in the breakwater at the shore side due to the continuous wave pressure. The safety factor of the breakwater bearing capacity, which had decreased due to the initial impulsive force, decreased further due to the degradation of the ground caused by an increase in the excess pore water pressure in the ground at the shore side of the breakwater.

1. はじめに

世界各地で発生した津波災害は、沿岸域において多くの人命を奪い、また多大な物的損害を与えてきた。我が国でも過去幾多に渡り津波被害が発生している。特に、2011年3月には東北地方の広域な沿岸域に致命的な被害をもたらした東北地方太平洋沖地震が発生した。今後も東海・東南海・南海地震によって巨大な津波が発生すると予想されており、被害を最小限に抑える対策が急務である。特に、湾内への津波侵入を抑制するための津波防波堤は、何度も迫りくる津波や引き波に対して堅固でかつ粘り強く構造を維持する必要がある。

我が国において、津波に対する防波堤の安定性に関する検討は、過去に発生した津波の再現実験などにより津波外力の算定方法が確立してきた。数値計算においても津波と構造物との相互作用を考慮した解析例がある（例えば陸田・土井、2006）。津波と構造物に着目した多くの研究成果が設計に反映されている。しかし、1993年に発生した北海道南西沖地震により防波堤が被災した事例では、防波堤の安定性を考える上で重要な検討項目が見逃されていることが指摘された（稲富ら、1994）。それは、防波堤を支持する捨石マウンドや海底地盤の安定性である。この地震津波では、防波堤岸側の捨石マウンドや海底地盤が変状し、大きく洗掘していることが確認されている。

そこで、津波－防波堤－捨石マウンドおよび海底地盤

の相互作用を考慮した防波堤の安定性検証が極めて重要であると考えた。特に捨石マウンドや海底地盤への浸透やダイレイタンスに伴う過剰間隙水圧の上昇が、地盤の剛性や支持力を低下させると考えられる。

本論文では、土の重力効果による応力～ひずみ～強度関係を十分反映できない重力場（1g）の実験ではなく、流体－地盤－構造物の挙動において相似則が満たされる遠心力場での実験を行うとともに、粒子法の一つで大変形解析に適用可能なSPH法を用いた数値シミュレーションの開発を試みた。模型実験結果や解析結果に基づいた検討成果をまとめる。

2. 遠心場における津波実験および考察

(1) 実験概要

本実験では、東洋建設（株）が所有する直径2.2mのド

図-1 実験装置概要：(a) 実験装置平面図；(b) 混成堤模型；(c) 計測機器の配置図（P：圧力計；PWP：間隙水圧計）

1 学生会員	修(工)	名古屋工業大学大学院工学研究科
社会工学専攻
2 正会員	博(工)	名古屋工業大学准教授 都市社会工学科
3 正会員	工博	東洋建設(株) 総合技術研究所 所長
4 正会員	博(工)	東洋建設(株) 総合技術研究所
5 正会員	博(農)	東洋建設(株) 総合技術研究所
6		東洋建設(株) 総合技術研究所

図-2 防波堤に作用する波圧分布

ラム型遠心力载荷装置を用いた。図-1に示すように実験領域内にケーソン防波堤、捨石マウンド、海底地盤（豊浦砂、相対密度40%）で構成した混成堤模型を設置している。地盤内の間隙流体に関しては、波浪伝播と地盤圧密の時間相似則を満たされるように遠心加速度比に等価な動粘性係数を有する粘性流体で飽和させた。津波力はダムブレイクにより段波を発生させ再現している。実験の詳細および相似則に関しては三宅ら（2009）に詳しい。間隙水圧は図中の各PWP点で測定した。

(2) 実験結果および考察

本稿では、32G場において入射波高0.7m、重複波高2.5mの津波が混成堤に作用した実験ケースについて述べる。

a) 流体挙動の検証

まず、防波堤に作用した波圧 P_d について検証する。ここでは、津波算定式としてよく用いられる谷本ら（1984）の式と比較した。

実験結果は、静水面以下では谷本らの式に比べて1割程度大きいが概ね津波力を再現できていることがわかった。また、今回の実験ケースでは静水面以上において、圧力が大きくなり、防波堤を越流した。越流量については、確認が困難であり、定量的に評価が行えなかった。

b) 防波堤および捨石マウンド、海底地盤への影響

図-3に実験時の混成堤周辺の様子と発生した現象を防波堤に作用した波力をもとに時刻歴でまとめたものを示す。はじめに、最大段波圧が作用したA～Bにかけて防波堤が滑動した。さらに、防波堤の挙動に連動して防波堤直下から岸側においてマウンドおよび海底地盤にせん断変形が発生した。その後、最大持続波圧および持続波圧が作用する際のB～Eにおいて、捨石マウンドおよび海

図-3 実験時に生じた現象のまとめ：(a) 実験時に撮影した混成堤の様子と発生した現象の表記；(b) および防波堤に作用した波力；(c) 図(b)内の各A～E時点に生じた現象の詳細

図-4 地盤・捨石マウンド内に生じたせん断ひずみ分布と円弧すべり線の決定

底地盤の噴石・噴砂が生じた。

まず、防波堤の変動に伴う捨石マウンドおよび海底地盤に生じたせん断変形について考察する。変形量を定量化するため、粒子画像速度測定法（PIV）を用いて、変位ベクトルを求め、せん断ひずみを算定した（図-4）。

防波堤中央から捨石マウンド先端にかけて、円弧状の変形をしていることを確認した。この変形に対し、水平波力を考慮した簡易ビショップ法を用いて、支持力に対する検討を行った。水平波力は防波堤に作用した波力

$P_{\text{Hd}}=73.03\text{kN/m}$ を用いている。滑り線は、PIVで得られたせん断ひずみ分布の外接線を通して決定している。この結果、安全率は0.9となり基準である1.0を下回っており、津波力により防波堤が地盤の支持破壊力によって安定性を失い、津波力が大きい場合は転倒する可能性が考えられる。

次に、捨石マウンドや海底地盤の噴出現象について考察する。地盤内の間隙水圧計および防波堤底面の圧力計をもとに動水勾配を算出した(図-5)。計測機器の設置箇所は図-1に示している。動水勾配は過剰間隙水圧から圧力水頭を求め、計測器間の距離で除した。この結果、防波堤中央から後方岸側にかけて動水勾配が上昇し、持続波圧が作用する間、動水勾配も上昇した状態が続くことがわかった。数値に関して、鉛直上向き1次元流れの限界動水勾配 $i_{\text{cr}}=0.89$ と比較するとマウンドの最大値が0.8程度、地盤の最大が0.65程度となり不安定な状態が継続することがわかった。

3. 津波一防波堤一海底地盤の連成解析および考察

(1) SPH法の概要

SPH法は、宇宙物理分野から発達した手法で、物理量を有して運動する粒子素片(半径 h)を格子とした

図-5 津波浸透が及ぼす透水性構造への影響：(a) 防波堤に作用した波力；(b) 捨石マウンド内の動水勾配変化；(c) 海底地盤表層の動水勾配変化

Lagrange的手法である(Lucy, 1977; Gingold・Monaghan, 1977)。注目する粒子素片の中心 $\mathbf{x}$ (位置ベクトル)における物理量 $f(\mathbf{x})$ は、影響範囲内にある粒子素片 $\mathbf{x}'$ の物理量 $f(\mathbf{x}')$ を平滑化関数 W によって内挿して計算する。

$$\langle f(\mathbf{x}) \rangle = \int f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、式(1)について有限個(総数 N 個)の粒子素片に離散化するため、次式のように近似式を考える。

$$f_i = \langle f_i \rangle = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、評価する素片粒子 i の位置ベクトル、質量、密度を $\mathbf{x}_i$, m_i , ρ_i とし、近接する素片粒子を j とした。また、 W は半径 $2h$ の領域内での積分値が1であり、ここでは3次のスプライン関数を用いた(Gingold・Monaghan, 1977)。

(2) 連続の式および運動方程式

SPH法はLagrange的計算アルゴリズムであるため、系に存在する粒子素片の質量の総和が増減しない限り、系の連続条件が満たされる。密度算定式においては、いくつか提案されているが、本研究では連続の式の微分形を用いて算出している。

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla_i W_{ij}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 Δ_i は粒子素片 i の座標に関する微分演算子、 $\mathbf{v}_i$ は粒子素片 i の中心の並進速度である。運動方程式は、応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}$ 、体積力ベクトル $\mathbf{f}$ および流体圧 p を用い、流体の粘性(Morris, 1997)と固体における人工粘性(Monaghan・Gingold, 1977)を考慮すると次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = & - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} \right) \nabla W_{ij} \\ & + \sum_j \frac{m_j (\mu_i + \mu_j) \mathbf{v}_{ij}}{\rho_i \rho_j} \left(\frac{1}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} \right) + \mathbf{f}_i \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_j}{\rho_j^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \mathbf{I} \right) \cdot \nabla W_{ij} + \mathbf{f}_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 μ は流体の粘性係数、 $\mathbf{r}_{ij} = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|$, Π_{ij} は固体相用の人工粘性項である。

(3) 固体相と流体相の連成

SPH法において土-流体連成を表現するため、土からなる固体相と、水および空気からなる流体相に分離し、各々について計算し、それらを重ね合わせることで土-水連成解析を可能としている(前田・坂井, 2004; Maedaら, 2006; Maeda・Sakai, 2010)。重ね合わせをする際、ダルシー則が成り立つとし、両相間に間隙率 n

図-6 ダムブレイク解析における流体挙動の検証: 流体の先端到達距離と時間の関係

と透水係数 k を考慮した物体力を作用させる。この物体力は、両相の速度差に比例した摩擦力に起因する力と考え、Biot (1941) の方法にならって定義した。

(4) 解析結果と考察

a) ダムブレイク解析による流体検証

流体挙動について検証するため、ダムブレイク解析を行い、よく参照されている実験結果 (Martin・Moyce, 1952) および本実験装置による結果と比較した結果を図-6に示す。図中の L , Z , t はそれぞれ崩壊水柱の幅、崩壊後の流れの先端位置、崩壊後の経過時間である。SPH法では流体の疑似的圧縮性を非圧縮性流体に適応しているため、XSPHと呼ばれる速度修正を行っており、同時にXSPHの補正パラメータ ϵ_{XSPH} ($0 \leq \epsilon_{XSPH} \leq 1$) による挙動の違いについても検証した。図から、XSPHの補正パラメータ ϵ_{XSPH} による差はないが、0.3~0.5程度の値がよいことがわかった。本論文の計算では、0.3に統一して用いた。

b) 沿岸域の津波流動モデル化と捨石マウンドおよび海底地盤への浸透影響評価

図-7のような海岸モデルを用いて、津波流による影響について考察した。段波津波を発生させるため、沖に水位差+15mの水塊を設置した。岸側は1/15勾配の傾斜を設けて陸域を模擬することで、混成堤に作用する押し波(沖側からの作用)と引き波の作用(陸側からの作用)とに分けて検討した。図-7(b)のPWPは地盤中の間隙水圧の計算点であり、各点間の平均的な動水勾配を算出した。捨石マウンド、海底地盤の透水係数はそれぞれ $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$, $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ とした。

図-8に押し波に着目した場合の防波堤に沖側から作用する波圧による総モーメント(a)、地盤岸側の動水勾配(b)、防波堤の支持力に対する安全率(c)の経時変化を示す。支持力に対する安全率の算出は、実験と同様に簡易ビショップ法を用いて陸側円弧滑りの安全率を算出した。円弧すべり線は、実験時に発生したすべり線を考慮し防波堤中央から捨石マウンドの法先にかけて引いた(図-8(c)中の実線)。さらに、地盤内の過剰間隙水圧の

図-7 沿岸域における津波流動モデル化; (a) 広域図; (b) 混成堤周り詳細図

図-8 押し波による防波堤の安定性: (a) 防波堤沖側に作用する波圧による総モーメント; (b) 岸側地盤表層の動水勾配; (c) 防波堤の支持力に対する安全率(陸側円弧滑り)の経時変化

上昇に伴う地盤の不安定化を考慮した計算も行った(図-8(c)中の破線)。

まず、防波堤に作用する初期の衝撃波圧によって、防波堤の安全率が一気に低下した($t=18\text{s}$ 付近)。この時点では、動水勾配については防波堤直下付近が上昇するが、岸側においては上昇が見られない。その後、長周期波の特有である持続波圧が作用する際に、防波堤直下中央から後方岸側において動水勾配が大きく変動する傾向を示した。また、上昇後も高い値が持続し、 $t=42\text{s}$ 付近では過

図-9 引き波における防波堤の安定性：(a) 防波堤陸側に作用する波圧による総モーメント；(b) 沖側地盤表層の動水勾配；(c) 防波堤の支持力に対する安全率（沖側円弧滑り）の経時変化

剰間隙水圧の上昇による地盤の不安定化を考慮した防波堤の安定率が著しく低下している。地盤中の過剰間隙水の流体力の影響を考慮した場合、支持力低下が顕著であり、それが持続することで防波堤の安全率が一層低下することが分かった。以上のことは実験で観察された砂の噴出や地盤の変形と定性的であるが一致しているものと考えられる。

図-9には引き波時について、図-8と同様に防波堤の安定性を検討した結果を示す。引き波時においても、波の影響を受けて防波堤の安全率が低下しており、特に地盤内の過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の不安定化を考慮した場合（図(c)中の破線）の方が顕著である。

4. 結言

本論文では、津波力を受ける捨石マウンドや海底地盤が防波堤の安定性に与える影響を検討するため、遠心力場における津波実験の実施およびSPH法を用いた数値シミュレーション手法の開発を行った。以下に実験および数値解析によって得られた成果についてまとめる。

・ 模型実験では、津波力を受けた防波堤の挙動に連動し、防波堤中央から捨石マウンドの法先にかけて円弧状にせん断変形が生じた。この際、防波堤の支持力に対す

る安全率が低下し、支持力を失い不安定になることがわかった。さらに、重複波圧作用以降、防波堤の上載荷重がない岸側の捨石マウンドおよび海底地盤において砂の噴出が生じた。この際、捨石マウンド内や地盤表層内では動水勾配が上昇しており、津波浸透の影響を受けていることがわかった。

・ 数値解析においても、実験同様に、重複波圧作用以降、特に押し波の影響を受けて、防波堤下中央から後方岸側にかけて動水勾配の上昇が確認された。したがって、防波堤の支持力に対する安全率は、防波堤自体に作用した初期段階波圧作用時に急激な低下が見られるとともに、地盤内の過剰間隙水圧を考慮した場合、継続波圧作用時に著しい低下が生じることがわかった。また、引き波時でも、安全率の低下が生じ、防波堤周辺の地盤の支持力は押し波および引き波により低下し不安定になることがわかった。

参考文献

- 稲富隆昌・上部達生・井合 進・風間基樹・山崎浩之・松永康男・関口信一郎・水野雄三・藤本義則 (1994)：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港研報告，No.791，pp.38-64.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984)：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被害原因の検討，第31回海溝論文集，pp.257-261.
- 前田健一・坂井 守 (2004)：Smoothed Particle Hydrodynamics法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発，応用力学論文集，Vol.7，pp.775-786.
- 三宅達夫・角田絃子・前田健一・坂井宏隆・今瀬達也 (2009)：津波の遠心力場における実験手法の開発とケースン式防波堤への適用，海洋開発論文集，第25巻，pp.87-92.
- 陸田秀美・土井康明 (2006)：碎波による衝撃圧の直接推定と構造物の動的解析，土木学会論文集B，Vol.62，No.3，pp.224-237.
- Biot, M. A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, Vol.12, pp.152-164.
- Gingold, R. A. and Monaghan, J. J. (1977): Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181, pp.375-389.
- Lucy, L. B. (1977): A numerical approach to the testing of the fission hypothesis Astronomical Journal, 82, pp.1013-1024.
- Maeda, K., Sakai, M. and Sakai, M. (2006): Development of seepage failure analysis method of ground with Smoothed Particle Hydrodynamics, Journal of Structural and earthquake engineering, JSCE, Div. A, Vol. 23, No. 2, pp.307-319.
- Maeda, K. and Sakai, H. (2010): Seepage failure and erosion of ground with air bubble dynamics, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics, GSP204, pp. 261-266.
- Martin, J. C. and Moyce, W. (1952): Part V. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane, Mathematical and Physical Science, Vol. 224, No.882, pp.312-324.