波浪場における有脚式構造物と支持地盤への 波力載荷特性に関する数値波動水路を用いた検討

松田 達也¹・三浦 均也²・澤田 弥生³

¹正会員 豊橋技術科学大学講師 大学院工学研究科建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 D808)
E-mail: t.matsuda@ace.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学教授 大学院工学研究科建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 D803)
E-mail: k-miura@ace.tut.ac.jp

⁴学生会員 豊橋技術科学大学 大学院工学研究科博士前期課程建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

本稿では、上部工と杭基礎から成る有脚式構造物を対象に、波浪外力が杭基礎に与える影響について、支持地盤の不安定化に関するこれまでの知見も踏まえて、解析的に検討を行った。その結果、上部工に波力が作用する際には、沖側で引き抜き、岸側で押し込みとなる外力が杭基礎に作用するが、支持地盤の有効応力が増加傾向にあり、支持力強度を有した状態にあると考える。その後は、沖側・岸側の杭基礎ともに地中へ押し込むような外力が作用する際は、地盤表層の水圧が減少傾向になることから、地盤の支持力強度が低下し、沈下を促進される可能性があることがわかった。また、上部工の構造形式により、杭基礎に作用する外力が沖側と岸側で不均一となり、構造体にひずみを生じられる可能性があることを示唆した。

Key Words : detached breakwater, wave force, seabed, stability

1. はじめに

四方を海に囲まれる我が国においては、海岸侵食は防災面・景観面・環境面において、重要な課題である。海岸侵食の主な要因として、次に示す問題点が指摘されている¹⁾。① 沿岸漂砂の連続性の阻止、② 波の遮蔽域の形成、③ 深海への土砂流出、④ 供給土砂量の減少、⑤ 浚渫・土砂採取、⑥ 地盤沈下である。このなかでも上記①と④は全国の代表的な海岸において共通する問題となっている。我が国では海岸侵食問題に対して様々な対策がとられているが、そのなかのひとつに離岸堤の設置がある。例えば、駿河湾に面する静岡県の駿河海岸では浸食を防ぎ、さらには高潮・波浪、そして地震による津波災害を防ぐ目的²⁾と、消波ブロックの埋没による劣化が進行する潜堤形式の離岸堤の代替として、上部工を杭基礎で支持する有脚式離岸堤が開発されてきた。

その有脚式離岸堤において、駿河海岸で建設された有脚式離岸堤群の一部が平成24年に損傷し、平成25年の台風26号接近時に上部工のコンクリート構造物が杭基礎から離脱するという被災が生じた³⁾。詳細な被災メカニズムは十分には明らかとなっていないが、波浪による外力と杭の支持力の関係を再検討する必要性を示唆している。

海岸構造物の安定性については、本来、構造物が波浪による過大な水圧（外力）を受けることにより、力学的な安定性が失われることが直接的な被災要因と考えられ、各種の構造物がそのような条件下でも十分な耐波機能を有するように設計されている。一方、波浪による変動水圧は構造物のみならず同時に海底地盤にも作用しており、これにより海底地盤の強度が低下し、構造物を支持する地盤が不安定化することで耐波機能が損なわれる事例も少なくない^{4),5)}。前述した有脚式離岸堤においても、波浪の作用により変動する構造物への外力特性と同様に、波浪による水圧変動に応答して変動する地盤支持力および杭基礎支持力も十分配慮された設計とすべきであろう。

本研究では構造物－波浪－地盤から成る複合的な力学系システムとして捉え、力学的挙動が本質的に異なる三者間の相互作用を適切に評価する必要があると考え、設計への導入を念頭において、まず、上部工と杭基礎から成る有脚式構造物の構造形式を対象に、上部工に作用する外力と関連する杭基礎に作用する荷重特性を把握することを目的とした研究を行ったので報告する。また、既往の研究成果⁶⁾を踏まえて支持地盤の不安定化についても明記し、構造物の外力特性と支持地盤の不安定化の両要因から構造物の安定性に及ぼす影響を議論する。

図-1 検討に用いた構造形状 (表示数値の単位 : m)

図-2 解析領域の全体図

2. 検討概要

(1) 対象構造物

対象とする構造物はコンクリート方塊の上部工と杭基礎から成る有脚式構造物であり、杭基礎は砂質地盤に施工されていると仮定した。本検討では、杭基礎上に設置される上部工の形状を、凹型 : Case-1, L 型 : Case-2, 逆 L 型 : Case-3, フラット型 : Case-4, そして、スリット式凹型 : Case-5 の 5 つ形状を設定し、その上部工に作用する外力を求め、上部工を支える杭基礎への影響を支持地盤に作用する外力特性を合わせて検討する。各ケースの躯体形状を図-1 に示す。また、構造物を設けていない場合を比較対象として Case-0 とした。

(2) 解析手法の概要

本研究ではCAMAS-SURF2Dを用いて、波浪場におけ

る構造物への外力特性を検討する。CAMAS-SURF2D (数値波動水路) とは、従来の2次元造波水路の模型実験に変わりうる解析手法とされており、海域施設の耐波設計への適用を目的として設立された「数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会」で開発された⁷⁾。本手法は、2次元非圧縮流体粘性流体を対象とした連続式と Navier-Stokes 方程式が採用されている。

$$\frac{\partial \gamma_x v_x}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z v_z}{\partial z} = S_p \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x v_x v_x}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z v_z v_x}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right\} - D_x v_x + S_x - R_x$$

(2)

$$\lambda_v \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x v_x v_z}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z v_z v_z}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_z - R_z - \gamma_v g \quad (3)$$

ここに, t : 時間, v_x, v_z : 水平および垂直方向の流速成分, ρ : 流体密度, p : 圧力, v_e : 分子動粘性係数と渦動粘性係数の和, g : 重力加速度, γ_x, γ_z : 水平および鉛直方向の面積透過率である. 数値解法では, スタガード格子を採用し, 連続の式と運動方程式の連成に SMAC (Simplified Marker and Cell) 法が用いられている. また, 自由表面解析モデルとして VOF (Volume of Fluid) 法が用いられており, 数値計算上の安定性の問題から, 時間刻み幅は CFL 条件を満足させている.

(3) 解析条件

図-2に解析領域を示す. 解析領域は水平方向に全長 500m, 鉛直方向に全長 25m とした. 海底面勾配および構造物設置水深は, 駿河海岸の状況を参考に, また, 将来実施する模型実験の条件を踏まえ, 海底勾配を設けず, 水深 7.000m のフラットとした³⁾. 構造物の設置位置は, 波長を考慮して躯体断面中央が $x=105\text{m}$ となるよう統一的に設定した. 造波境界と対面の境界付近には, 波の反射を低減させるため, 減衰領域を設けた. 計算格子間隔は推奨されている条件に則り⁴⁾, 鉛直方向: $\Delta z=0.20\text{m}$, 水平方向は, 構造物周囲を $\Delta x=0.20\text{m}$ として, それ以外は等比級数を用いて変化させ, 最大で $\Delta x=1.00\text{m}$ と設定した. 時間の制御は CFL 条件とし, 連立1次元方程式の解法は, M-ILUBCGSTAB法を用いた. その他の解析条件については, デフォルト設定とした. 外力条件は, 駿河湾における高波浪時の沖合計測結果をもとに³⁾, 波高 $H=6.0\text{m}$, 周期 $T=16.0\text{s}$ の規則波を造波境界より与えた.

図-3は構造物がない Case-0 における $x=105\text{m}$ 地点の波高変化を示す. 計測した 70 秒までは反射波の影響が十分小さいと考え, 70 秒までの 3 波分のデータを解析対象とした. Case-1~Case-5 においては, 上部工は不透水格子でモデル化した. また, 杭基礎については本検討が断面二次元の検討であることから透水性が無限の構造物とした.

(4) 位相によるデータの整理方法

解析結果の時刻歴データをフーリエ変換により周波数分析を行い, 波の周期をもとに位相角でデータ整理することで, 解析結果に一般性を持たせた. 位相の考え方について述べる. 水位レベルで位相を定義することとし, 水位レベル η は以下のように定義する.

$$\eta = a \cos(\lambda x - \omega t) = ae^{i(\lambda x - \omega t)} \quad (4)$$

図-3 Case-0における $x=105\text{m}$ 地点での波高変動

図-4 位相による構造物近傍の水位レベルの定義

ここで, λ は波数 ($1/\text{m}$), ω は角振動数 (rad/s) または ($1/\text{s}$), L は波長, T は周期である. 波長 L と周期 T は以下のような関係にある.

$$\lambda = \frac{2\pi}{L} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

また, 位相 θ (rad) を以下のように定義する.

$$\theta = \lambda x - \omega t \quad (7)$$

式(7)より式(4)は次式となる.

$$\eta = ae^{i\theta} \quad (8)$$

ただし, ここでは波浪解析との整合性を持たせた符号を定義した. 図-4 に位相で定義した水位レベルのイメージ図を示す. 本定義をもとに次章で解析結果を示す.

(5) 構造物への外力の算出方法

a) 上部工に作用する外力

上部工に作用する外力は, 水平波力, 垂直波力およびモーメントを算出した. 水平波力と鉛直波力は, 構造物近傍の計算格子の水圧を単位奥行あたりの断面で積分し

た. モーメントは, 各計算格子の波力に, x 軸は構造物断面中央を, z 軸は構造物底面を原点とした位置 $(x_s, z_s) = (0, 0)$ から各格子中心までの距離を掛けて求めた.

b) 杭基礎に作用する外力

杭基礎に作用する外力は, a)で求めた上部工に作用する外力を用いて, 杭地表面 (以下, 杭頭) に作用する軸力, せん断力およびモーメントを算出した. 算出にあたり, 杭基礎は地盤面に対し垂直に設置され, 上部工と杭の接合はヒンジ結合であると仮定した.

c) 支持地盤に作用する外力

波浪外力により海底地盤の有効応力が変動することが知られている⁴⁾⁶⁾. 例えば, $u-p$ formulationを用いた数式解における, 一波長分の波浪場における地盤表層流速と地盤内の有効応力の変化をみると, 地盤内には地盤表層と地盤内部で波浪外力による水圧伝播に位相差が生じることによって地盤内部に過剰間隙水圧が発生し, 地盤の有効応力が減少する⁶⁾. そこで, 本稿では構造物に作用する外力と支持地盤に作用する水圧の時刻歴特性を把握するため, 杭基礎周辺および構造物断面中央付近における地盤表層の水圧変動についても着目した. ただし, 地盤内の応力変化まで詳細に検討しておらず, これまでの知見をもとに, その影響の可能性を述べており, 詳細な検討については今後の課題とする.

3. 解析結果と考察

図-5に Case-1 において2.(5)に示した算出方法によって求めた杭に作用する軸力; 図-5(a)と支持地盤表層の水圧・水平流速関係; 図-5(b)を示す. 軸力 R_a は沖側の杭, 軸力 R_b は岸側の杭にそれぞれ作用する軸力である.

例えば, $-30^\circ \sim -90^\circ$ までは地盤表面の水圧が減少することから地盤が透水力の影響で強度が低下する可能性があり, この際, 杭には地中へ押し込むような力が作用していることから, 杭が沈下する可能性がある. このような傾向を分析するため, 同様の計算により求めた力の分布を可視化した各ケースにおける位相角 90° から -90° までの結果を図-6 に示す. ここで, $90^\circ \sim -90^\circ$ 以外の位相角においては, 外力の変動は大きくないので, 本稿では紙幅の関係で割愛した.

まず, 上部工に作用する外力は, x 軸は構造物断面中央を, z 軸は構造物底面を原点とし, ベクトル (赤色実線) で波力を, ベクトル始点の x 座標の変化でモーメントを示している. 次に, 杭頭に作用する軸力, せん断力およびモーメントは, 軸力を地盤面下の杭中心にベクトル (赤色実線) で, せん断力を杭頭付近にベクトル (青色実線) で, モーメントを杭頭付近に曲線ベクトル (緑色実線) でそれぞれ示している. 最後に, 地盤表面に作

図-5 Case-1における杭基礎に作用する軸力; (a)と周辺海底面の水圧-水平流速の関係; (b)

用する水圧および水平方向の流速を上部工と地表面の間に, 水圧は円グラフで, 流速はベクトル (紫色点線) でそれぞれ示している. 符号の正負は, 図-6 の最下部に説明している. ただし, 杭の軸力については, 反力ではなく杭に作用する荷重の方向を示していることから, 2.(5) b)で算出した反力と符号を逆転して示している. 各外力記号の大きさ (ベクトルの長さおよび円グラフの幅) によって, それぞれの外力規模を示している. また, 同図には構造物周辺の波形分布も示している.

Case-1 では, 構造物に外力が作用する $30^\circ \sim -30^\circ$ においては, 構造物に時計回りのモーメントが生じるため, 沖側杭に引き抜き方向, 岸側杭には押し込み方向の力が作用している. この際, 地盤表面の流速が岸向き方向に非常に卓越していることから, 洗掘の影響を受けやすいと考える. 一方で, $-30^\circ \sim -90^\circ$ までは地盤表面の水圧が減少しており, 砂質地盤の場合, 水圧伝播に位相差が生じると有効応力が減少し, 地盤強度が低下すると考える. この際, Case-1 の躯体のようにスリット等の通水性がない場合は, 上部工内の水塊により杭には地中へ押し込むような力が作用するため, 沈下が促進される可能性がある. Case-2 では Case-1 と同様に, 沖側の躯体鉛直壁

図-6 各ケースの位相角 $90^\circ \sim -90^\circ$ における構造物および周辺地盤に作用する力の可視化；(a) Case-1, (b) Case-2, (c) Case-3, (d) Case-4, (e) Case-5

で波力を大きく受けることから、力の流れについても Case-1 と類似しているが、鉛直方向の外力が小さく、沈下への影響要因が少ないと考える。Case-3 では、岸側の躯体鉛直壁で波力を受けることから、Case-2 に比べ、躯体への外力の向きやタイミングが異なる。Case-4 では、躯体に作用する波外力が小さいことから、杭基礎への載荷外力も小さくなった。

Case-5 では、力の流れは Case1 と類似しているが、躯体にスリットが設けられていることで、作用する波力が低減している。また、Case-1 で見られた、 $-30^{\circ} \sim -90^{\circ}$ までの地盤強度が低下すると考えられる位相区間においても、スリットを有することで躯体内の水塊の影響が少なくなり、杭を地中に押し込む外力が低減されている。ただし、水平波力を大きく受ける位相角 0° 地点では、Case-1 では杭に作用する軸力が沖側と岸側で大凡均等で同一方向に作用していたが、Case-5 では不均一に作用する現象が生じた。この場合、構造体にひずみを生じされる可能性がある。同様な現象が Case-2 でも生じた。

以上の結果から、位相角 $30^{\circ} \sim -30^{\circ}$ (上部工に波力が作用する際) には、杭基礎には沖側で引き抜き、岸側で押し込み方向の外力が作用することがわかった。この際、地盤表層の水圧が上昇傾向にあり、有効応力が増加傾向しているため支持力強度を有した状態と考える。一方で、位相角 $-30^{\circ} \sim -90^{\circ}$ (上部工に波力が作用した後) には、沖側・岸側の杭基礎ともに地中へ押し込むような外力が作用し、その際、地盤表層の水圧が減少傾向になることから、水圧伝播の位相差が生じた際には地盤の支持力強度が低下し、沈下を促進される可能性がある。

4. 結言

本稿では、コンクリート方塊の上部工と杭基礎から成る有脚式構造物を対象に、上部工に作用する外力から杭

基礎に作用する外力特性について、支持地盤の不安定化に関する既往の知見も踏まえて CADMAS-SURF2D を用いた解析検討を行った。その結果、上部工の構造形式に伴う外力規模の違いはあるが、力の流れは同様の傾向を示した。ただし、上部工の構造形式によっては、杭基礎に作用する外力が沖側と岸側で不均一性が確認され、構造体にひずみを生じされる可能性があり、構造物に損傷を与える可能性がある。今後は本解析結果の妥当性の確認を含め、模型実験等も実施し、損傷メカニズムの要因等を総合的に検討する。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金研究活動スタート支援 26889035 の助成を受けています。また、豊橋技術科学大学学長裁量経費の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸侵食，山海堂，1997.
- 2) 浦田健一，中村瑛佳，大石英男，宇多高明，村井禎美：駿河海岸における新型離岸堤の建設とその後の追跡調査，海洋開発論文誌，Vol.5，pp.309-314，1989.
- 3) 中部地方整備局静岡河川事務所：駿河海岸有脚式離岸堤損傷に関する対策検討報告書，2013.
- 4) Zen, K. and Yamazaki, H.: Mechanism of wave-induced liquefaction and densification in seabed, Soils and Foundations, Vol.30, No.4, pp.90-104, 1990.
- 5) Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S., and Kamata, A.: Settlement of Breakwater on Submarine Soil due to Wave-Induced Liquefaction, 5th International Symposium on Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.237-242, 1995.
- 6) 三浦均也，浅原信吾，大塚夏彦，上野勝利：波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化，地盤工学シンポジウム論文誌，Vol.49，pp.233-240，2004.
- 7) 財団法人 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，沿岸技術ライブラリー，No.12，2001.

(2017.2.2 受付)

CHARACTERISTIC OF WAVE FORCE FOR THE DETACHED BREAKWATER AND SEABED BY USING CADMAS-SURF2D

Tatsuya MATSUDA, Kinya MIURA and Yayoi SAWADA

This study investigated the effects of wave forces on the detached-breakwater that consisted of an upper structure and a pile foundation. In this study, structure stability was also considered on the results obtained from previous studies on the instability of seabed induced by wave force. When a wave force acted on the structure, an external force acted on the pile foundation as if pulling out the foundation on the outer harbor side and pushing it in on the inner harbor. The effective stress in seabed was increase so the pile foundation was considered to maintain sufficient bearing capacity. Subsequently, when the bearing capacity of the ground was decreased because the water pressure in the ground surface layer was decrease, the pile foundation will be aggravated settled down. The external force acting on the pile foundation was not same on outer harbor and inner harbor with the form of the upper structure. As a result, we found that the strain will be generated on the structure.