

高波浪場における海岸堤防周辺地盤の動的挙動に関する研究

前野詩朗*・小谷裕司**・坪田裕至***・名合宏之****

1. はじめに

毎年のように高波浪により、多くの海岸堤防が被災している。被災の原因としては、根固工の被災による堤防下部からの土砂の流出や、目地の老朽化による堤体材料の吸い出しなどがあげられる。このような構造物周辺地盤における土砂の流動現象の発生原因の一つとして、高波浪の影響を受けて堤防周辺地盤内の間隙水圧が時間的に変化することにより地盤内に過剰間隙水圧が発生し、それに伴って地盤の支持力が低下することが考えられる。このように波などが変動水圧として砂地盤上に作用することによる地盤の動的挙動に関して、名合(1982)や善(1984)は、一様な変動水圧場における模型実験を行い、地盤の有効応力が周期的に減少することや変動水圧条件が厳しい場合や地盤条件によっては液状化が発生することなどを明らかにしている。また、善ら(1989)や前野ら(1992)は、現地においても波浪による海底地盤の液状化が発生することを確認している。

以上のような背景のもと、著者ら(Nagoら, 1993; 名合ら, 1995)は、護岸基礎周辺地盤の液状化により裏込め材料が吸い出される現象を2次元実験により確認しているが、この実験は、一様な変動水圧場で行われた実験であった。現地地盤では波浪による地盤の支持力低下のみならず、波浪に伴う流れによる洗掘の影響も考慮に入れる必要があるとの観点から、岩崎ら(1995)は現地に近い条件で、縮尺1/5程度の大規模の堤防模型を用いた実験を行い、波浪による堤防裏込め土砂の空洞化を確認している。本研究は、この大規模模型実験の際に堤防前面の砂地盤で観測された液状化現象に着目し、これまでの研究で明らかにされていなかった堤防前面における波と間隙水圧と地盤の動的相互応答を波高・間隙水圧データおよびビデオ画像より明らかにする。また、有限要素解析を用いて、堤防基礎工周辺地盤の間隙水圧分布および液

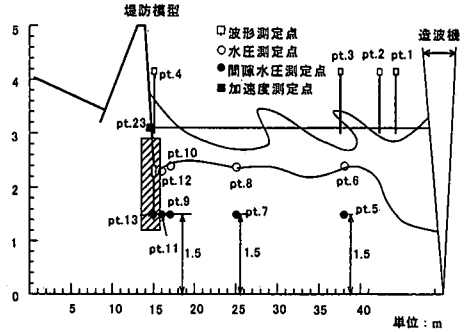


図-1 実験水路と堤防模型

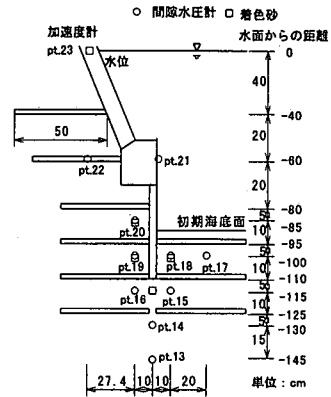


図-2 基礎工周辺部の計測点位置

状化の様子を数値解析的にとらえることにより、高波浪場における堤防周辺地盤の動的挙動を明らかにしようとするものである。

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験装置の概要

岩崎ら(1995)の実験は、全長150m、深さ5mの造波水路に図-1に示すような縮尺1/5程度の大規模堤防模型を設置して行われている。堤防模型の表法下端部には、基礎工を設け、止水工には厚さ0.05m、鉛直方向長さ0.4mの木製矢板を用いている。実験は、入射波高90.0cm、周期4.0s、堤防前面初期水深90.0cmの条件下で行

* 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科

** 正会員 工修 (株)エイトコンサルタント

*** 学生会員 岡山大学大学院自然科学研究科環境システム専攻

**** 正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科

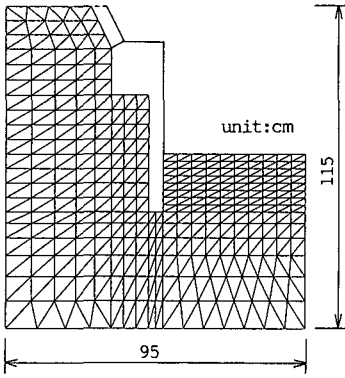


図-3 要素分割図

ここに、 β :水の圧縮率、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 λ_w, λ_a :水および空気の体積含有率、 P_0 :大気圧、 h :変動間隙水圧水頭、 u_x, u_z : x, z 方向の砂層の変位、 k :透水係数、 G :せん断弾性係数、 ν :ポアソン比である。

解析は、堤防基礎工周辺の幅 0.95 m×高さ 1.10 m の範囲を対象とした。図-3は解析に用いた要素分割図を示している。解析に用いた地盤の計算条件は、以下のようである。

$G: 3.5 \times 10^7$ (N/m²), $\beta: 4.2 \times 10^{-10}$ (m²/N), k : 透水係数: 0.033 (cm/s), $\lambda_a: 0.003$, $\lambda_w: 0.4$, ポアソン比: 0.45, また、基礎工前面砂地盤面上における水圧は計測されていないため、本研究では pt. 21 の水圧を基礎工前面地盤面上に一樣に与えた。

3. 結果及び考察

3.1 波と間隙水圧との関連性

図-4は、波と地盤の挙動が顕著に現れている Case 2 の一周分 (造波開始後 8 波目) の堤防前面水位 (pt. 4), 基礎前面水圧 (pt. 21), 基礎前面間隙水圧 (pt. 17, pt. 18) の変化を示している。図-5は、同じ時間帯のビデオ画像から読みとった海底地盤面の変位 (太い実線の矢印) を 0.2 秒置きに示している。また、図中には、画像から観察された基礎工周辺の波の挙動 (細い実線の矢印) も合わせて示している。これらの図より以下のことがわかる。

堤防前面 (pt. 4) の水位より、波が急激に上昇あるいは減少するときには、波は一樣に増減しているが、波の峰や谷の付近では不規則な状態になっているのがわかる。これは周期 4.0 秒の波に、不規則な小さい波が載ったために生じたと考えられる。この不規則な小さい波が基礎工前面水圧および間隙水圧に与える影響をみると、波の谷ではほとんどその影響はないが、波の峰では、波のピークが 2 つ生じる現象が起きていることがわかる。基礎工前面水圧 (pt. 21) についてみると、振幅は波高よりも減衰しているが、位相に関しては波高とほぼ一致していることがわかる。

つぎに、間隙水圧についてみる。振幅については pt. 21

われている。しかし、実験条件はあくまでも目標値であり、実際は多重反射が生じ非常に乱れた波浪場であった。実験ケースは矢板に透水性が無い Case 1 と、矢板工に透水性を持たせて裏込め土砂の流出防止工としての効果を検討することを目的とした Case 2 の 2 ケースについて行っている。この Case 2 で用いた矢板には 10 cm 格子の交点に直径 1 cm の孔を設けることにより透水性を持たせている。実験開始直後の有義波高は Case 1 で 92.1 cm で Case 2 で 115.8 cm であり、Case 2 の方が堤防前面の有義波高が大きかった (加藤ら, 1996)。実験で使用した砂は粒度が割合均一な砂であり、地盤は緩めで間隙率は 0.39~0.49 と幅を持っていた。図-2 に基礎工周辺の計測点の位置を示す。実験では、波高・間隙水圧等の多点測定を行うとともに、2 台のビデオカメラを用いて基礎部全体と矢板工周辺を撮影している。本研究では、画像が比較的鮮明に撮影されている Case 2 を対象として、波と間隙水圧と地盤の動的挙動を明らかにする。

2.2 解析方法

波浪場における堤防周辺地盤の間隙水圧および地盤の応力状態を解析するにあたり、本研究では、Maeno ら (1991) が防波堤周辺地盤の解析に用いた有限要素法による方法を採用した。用いた基礎式は以下のようである。

$$\rho g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{P_0 + \rho g h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right)$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial z}$$

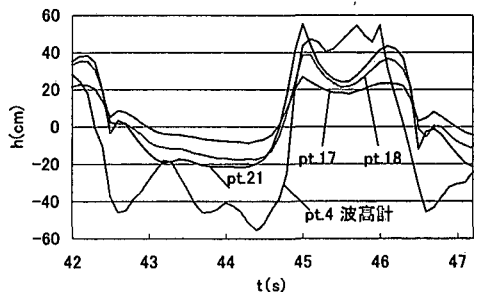


図-4 水位・水圧・間隙水圧分布

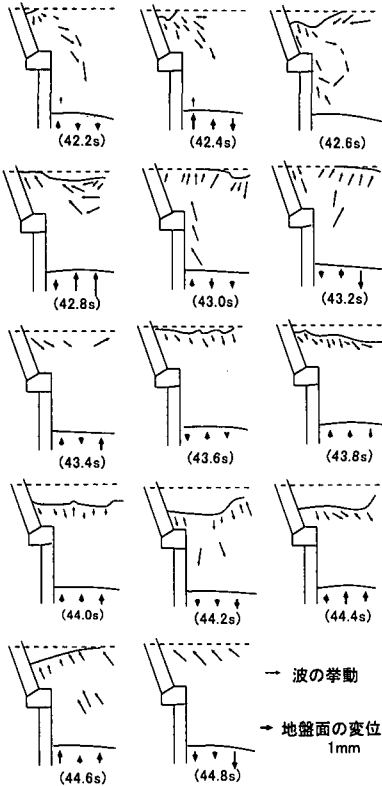


図-5 基礎工前面の波と地盤の挙動

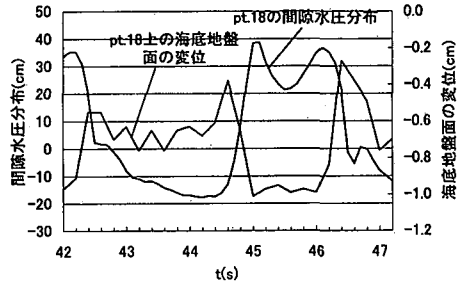
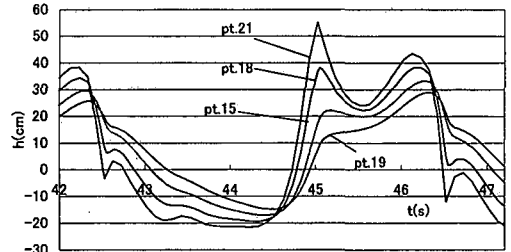
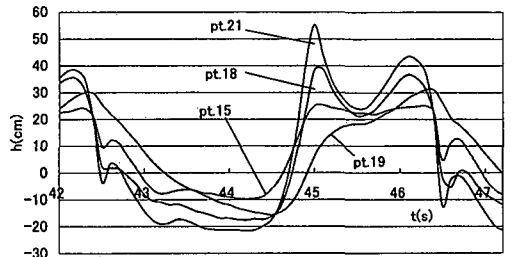


図-6 海底地盤面の変位と間隙水圧



(a)解析結果



(b)実験結果

図-7 基礎工周辺の間隙水圧

の基礎工前面水位よりも pt. 17, pt. 18 の間隙水圧の方が減衰しているが、全体的な変化傾向は基礎工前面水圧とほぼ一致していることがわかる。なお、間隙水圧が急激に減少するとき (42.6 秒および 46.6 秒付近) に、間隙水圧が減少傾向にあるにもかかわらず、わずかに上昇する現象がみられる。この時には、図-5 からわかるように堤防基礎前面付近で渦が発生していることがわかる。この渦は、堤防前面の水位が減少するときに、基礎工上部に水流が衝突する際に生じるものであり、この渦の影響で間隙水圧が減少傾向にあるにもかかわらず水圧が上昇したものと考えることができる。

3.2 波・間隙水圧と地盤の動的相互挙動

図-5 より堤防前面の水位変動と海底地盤の変形の関係をみると、概して水位が減少傾向にある場合には海底地盤は上昇し、逆に、水位が上昇傾向にある場合には海底地盤は沈下する様子が確認できる。しかし、堤防前面の波の動きは複雑で、しかも渦も発生しているため海底地盤は非常に複雑な挙動を示していることもわかる。以下では、この複雑な地盤の挙動を図-6 に示す pt. 18 の間隙水圧とその上部の海底地盤面の変位 (初期海底面からの絶対量) に着目して検討する。

まず、間隙水圧が急激に減少する時間帯 (42.2 秒～

42.4 秒) に地盤は上向きに変形することがわかる。このことは一周期後の 46.2 秒～46.4 秒においても確認できる。逆に、間隙水圧が急激に上昇する時間帯 (44.6 秒～45.0 秒) には海底地盤は下向きに変形することがわかる。地盤が上向きに大きく変形する時間帯は、上記の間隙水圧が急に減少する時間帯以外にも 44.4 秒～44.6 秒付近においてもみられる。この時間帯は、図-5 からわかるように、pt. 18 の上部の水位が下がった状態から急に上昇する瞬間にあたる。このことより、水位が急に上昇するときにその下にある地盤が引っ張り上げられたことがわかる。このように、間隙水圧が急に上昇する時間帯に発生する地盤の挙動は、これまでの研究では明らかにされていなかった現象である。

3.3 解析結果

図-7 は、基礎工に透水性を有する Case 2 の場合について、基礎工周辺部の測点 (pt. 15, pt. 18, pt. 19) における変動間隙水圧の変化について解析結果と実験結果を

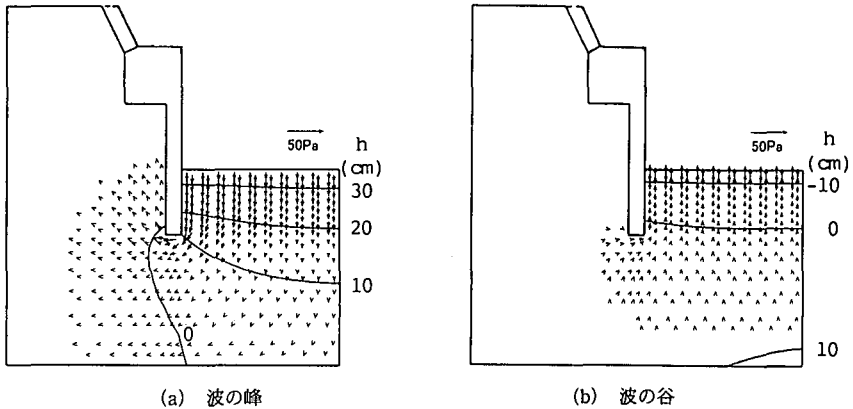


図-8 等間隙水圧および浸透圧分布 (Case 1)

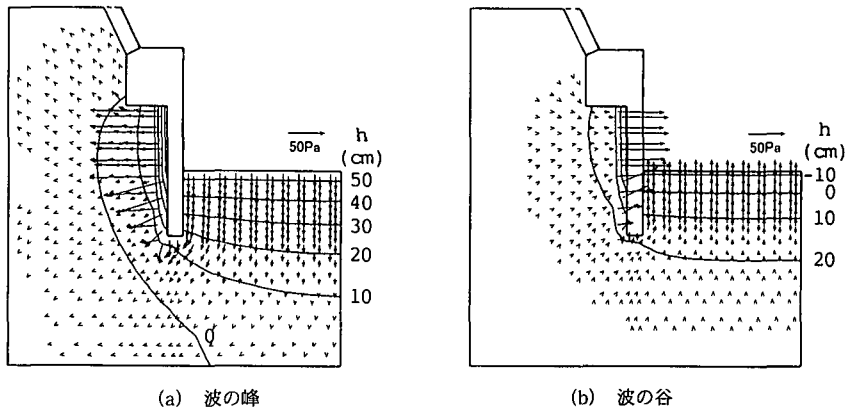


図-9 等間隙水圧および浸透圧分布 (Case 2)

示したものである。なお、図中の pt. 21 は境界条件として基礎工前面砂層面上に与えた変動水圧である。これらの図より、pt. 18 の間隙水圧の解析結果は実験結果とよく一致していることが分かる。とくに、波の峰の部分に現れる二つのピークの時間帯における間隙水圧の変化もよく再現されている。Pt. 15 および pt. 19 についてみると、波の峰に現れる二つのピークの後半部分の時間帯の解析値と実験値とが逆になることを除いて、解析結果による間隙水圧の変化傾向は実験結果をよく説明していることが分かる。以上のことより、本解析法は妥当である判断される。

図-8 および図-9 は、解析結果より得られた Case 1 と Case 2 の堤防周辺地盤の浸透水圧分布および等間隙水圧線を示したものである。それぞれ波の峰および波の谷がさしかかったときについて示している。これらの図より、基礎工に透水性の無い Case 1 の場合は基礎工下部を回り込むように間隙水圧が伝播しているのに対して、基礎工に透水性がある Case 2 の場合には、裏込め部分に直接水圧が伝播していることが分かる。浸透水圧の大き

さをみると Case 2 の方が Case 1 よりもかなり大きくなっていることがわかる。これは、先にも述べたように Case 2 の方が有義波高が大きかったためである。実験においても、裏込め土砂の流出を防止することを目的とした Case 2 の場合の方が Case 1 よりも堤防前面の洗掘および裏込め土砂の流出が早かったが、これについても Case 2 の方が Case 1 よりも基礎工周辺部の浸透圧が大きかったことから説明できる。

図-10 は、解析結果より得られた堤防前面地盤の液状化領域(鉛直有効応力が負となる領域で実線で示す)とビデオ画像より観察された液状化領域(点線)を示している。実験による液状化領域は、波の谷がさしかかったときに地盤が上側に持ち上がり、反対に波の峰がさしかかったときに砂層内の間隙水が排水され、砂層が締め固まる状況が画像から顕著にみられる範囲とした。この図より、堤防基礎工から離れるにしたがって液状化深さが大きくなることがわかる。また、実験においては、基礎工からやや離れた場所の方が地盤の洗掘が進んでいたことより、液状化と洗掘とは密接な関係があるものと考え

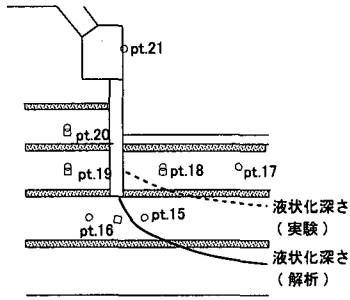


図-10 基礎工周辺の液状化領域

られる。このように、基礎工からやや離れた場所の方が液状化領域が大きくなるという傾向は、解析結果と実験結果とでよく一致している。しかし、解析結果より得られた液状化領域は、実験結果による液状化領域よりも大きくなるのがわかる。これは、実験のビデオ画像においては、実際には上向きに地盤が変形する領域は、図-10で示した液状化領域よりも大きかったが、ビデオ画像からその領域を判定することは困難であったため、前述のように液状化領域を定義したことにより、その領域を小さく捉えたことが原因ではないかと考えられる。

4. 結 論

本研究では、大型の造波水路を用いた模型実験の際に堤防前面の砂地盤で観測された液状化現象に着目し、堤防前面における波と間隙水圧と地盤の動的相互応答を検討した。得られた主要な結論は以下のようである。

(1) 地盤が上向きに大きく変形する時間帯は、堤防基礎に作用する波圧および間隙水圧が急に減少するときと、逆に急に上昇するときの二通りあることが明らかにされた。前者の現象はこれまでの研究で明らかにされた結果と一致するが、後者の現象は波が急に上昇するとき地盤が引っ張り上げられるもので、これまでの研究では明らかにされていなかった現象である。

(2) 基礎工前面地盤の間隙水圧と基礎工前面の水圧の変化傾向はよく一致しており、非常に関連性が強いこ

とが明らかにされた。

(3) 有限要素解析の結果、透水性の有無による地盤内の間隙水圧分布の相違が明らかにされた。

(4) 有限要素解析およびビデオ画像による砂の動きから推定された液状化領域より、液状化深さの大きな領域と洗掘の進行が早い領域とが一致することが明らかにされた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、岩崎ら(1995)が行った模型実験の際に観測された間隙水圧データおよびビデオテープを建設省土木研究所海岸研究室より提供していただいた。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 岩崎福久・田中茂信・佐藤慎司・名合宏之・前野詩朗・小谷裕司(1995): 海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1026-1030.
- 加藤史訓・佐藤慎司・田中茂信(1996): 波浪による海岸堤防周辺地盤の間隙水圧変動, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1011-1015.
- 善 功企(1984): 海洋開発における波と海底地盤の動的問題, 昭和59年港湾技術研究所講演会講演集, pp. 77-133.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰(1989): 海底地盤の波浪による液状化一現地観測および解析一港湾技術研究所報告・第28巻第3号, pp. 29-57.
- 名合宏之(1982): 変動水圧による砂層の液状化に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 589-594.
- 名合宏之・前野詩朗・小谷裕司・西平福宏(1995): 変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出機構に関する研究, 本工学論文集, 第39巻, pp. 721-726.
- 前野賢彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一(1992): 海底地盤の波浪による液状化と底質浮遊の現地観測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 576-580.
- Maeno, S. and H. Nago (1991): Numerical analysis on the dynamic behavior of sea bed around breakwater, Proc. of Geo-Coast '91, pp. 591-596.
- Nago, H. and S. Maeno (1984): Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, Memoirs of the School of Engineering, Okayama University, Vol. 19, No. 1, pp. 13-32.
- Nago, H. and S. Maeno (1993): Visualization of the movement of back-filling sand under cyclic loading of water pressure, Proc. of 25th IAHR Congress, Vol. 4, pp. 248-253.