

高波浪時における海底地盤内の残留間隙水圧の数値解析

高山知司・谷口昇太郎*・安田誠宏・佐々真志**・野田 巖***

* (株) シンカ

** (独法) 港湾空港技術研究所

*** 国土交通省四国整備局高松港湾空港技術調査事務所

要 旨

本研究の目的は、地盤内間隙水圧の波浪応答に関する数値計算の結果と、防波堤での現地観測によって得られたデータとを比較することによって、高波浪時における地盤内間隙水圧の波浪応答を明らかにすることである。本研究では、波と構造物、地盤の動的挙動を同時に解析することができる VOF-FEM 法を改良し、地盤部の弾塑性解析を可能にした。土の塑性に起因して生じる残留ひずみを表すことができたが、土の繰り返し塑性に起因して生じる残留間隙水圧を再現するには到らなかった。

キーワード: 地盤内間隙水圧, 波浪応答, VOF-FEM 法, 弾塑性, 残留ひずみ, 残留間隙水圧

1. はじめに

海岸構造物が暴波来襲時に支持地盤内に沈み込む被害が顕在化している。その原因として高波浪による防波堤前面の洗掘が挙げられているが、高波浪の作用によるマウンド直下地盤の液状化の可能性も指摘されている。地盤が液状化すると支持力を失い、その直上の海岸構造物は容易に地盤内に沈み込む。また、液状化によって砂の移動抵抗は著しく小さくなるため、構造物まわりの砂移動や洗掘が助長されることも考えられる。著者らは高波浪の作用によるマウンド直下地盤の液状化の可能性に着目した。

本研究は、高知港東第一防波堤において、2003 年および 2004 年に実施した、自由地盤と防波堤直下地盤（法先自由地盤、洗掘防止工下、消波ブロック下、ケーソン直下）における水圧と間隙水圧の系統的な応答観測に加え、VOF-FEM 法による間隙水圧の波浪応答に関する数値計算を行い、高波浪時における地盤内間隙水圧の波浪応答を明らかにするものである。

2. 既往の研究

一般的に波浪による地盤の液状化には 2 種類あり、変動間隙水圧により波の谷付近で生じる液状化（峰では安定化）と、残留間隙水圧が蓄積することによって生じる液状化である。特に、残留間隙水圧による液状化は、砂の繰り返し塑性（コントラクタンシー）に起因するため非線形性が強い。力学的相

似則に加えて、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則を同時に満足させることができる遠心力場波浪実験法を活用して、厳しい規則波浪による地盤液状化のメカニズムが明らかにされてきている（Sassa・Sekiguchi(1999)）。

しかしながら、不規則な波群を何度も受けるような、実際の高波浪作用下における海底地盤表層の動態については不明な点が多い。これまでの実海域における砂質地盤の応答観測は、5m 以下の比較的水深の浅い砕波帯に限られている（例えば、善ら(1989)）。また、水深 15m の高知港東第一防波堤サイトにおいて、佐々ら(2003)によって自由地盤内、高山ら(2004)によって防波堤直下地盤内における、高波浪時の間隙水圧の応答観測が行われている。

また、波浪と構造物の相互作用のみならず、構造物直下の基礎地盤を含めた総合的な検討として、これまでに多くの水理模型実験がなされているが、その適応性に限界があり、波浪と構造物、地盤の相互作用を検討する数値計算法が開発されている。その中でも、蔣ら(2000)や高橋ら(2002)は、波浪場として砕波等を含んだ非線形性が考慮できる VOF-FDM 法で解析し、それに伴う構造物と地盤の応答を FEM 法で計算する非線形数値計算法（VOF-FEM プログラム）を開発している。また、本研究で著者らは、高橋らの数値計算プログラムに弾塑性理論を導入して改良し、数値計算を行った。

3. 高波浪時における間隙水圧の波浪応答観測の概要

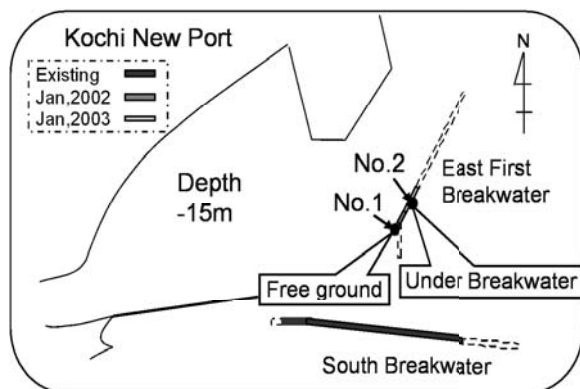


Fig. 1 Field observation point

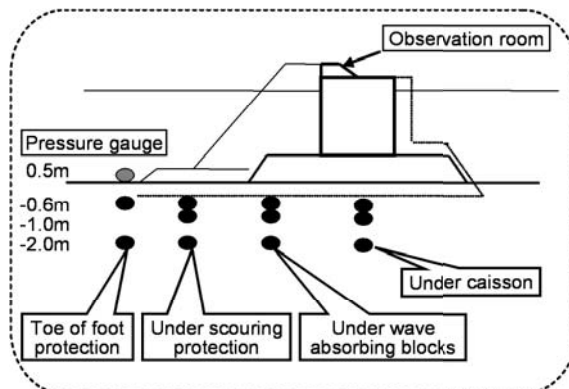


Fig. 2 Installation of pressure sensors

3.1 観測地点の概要

本観測は、Fig.1 に示す高知港三里地区の東第一防波堤サイトにて行った。観測地点は、図中のNo.1 が自由地盤、No.2 が防波堤基礎地盤である。当サイトでは、地盤表層4～5mまで、平均粒径 $D_{50}=0.15\sim0.20\text{mm}$ の細砂主体の堆積砂層となっている。特に、No.1 地点では地盤深さ2mまでは、 N 値が10未満の軟弱な緩詰め層である。したがって、夏の台風時に来襲する波高6～8mの高波浪作用下において、液状化発生の可能性は高いと考えられる。

3.2 観測方法

本観測では、自由地盤（P 地点）と Fig.2 に示す防波堤基礎地盤（法先自由地盤：P1、洗掘防止工下：P2、消波ブロック下：P3、ケーソン直下：P4）を対象とし、水圧計と間隙水圧計を用いて自由地盤直上の水圧と地盤内の間隙水圧を計測した。自由地盤 P 地点には、地盤直上0.5mに波圧測定用の水圧計を設置し、地盤内3深度（海底地盤を基準として、-0.67m、-1.0m、-2.0m）に間隙水圧計を設置した。P1 地点には、地盤直上0.5mに水圧計を設置し、地盤内2深度（-0.6m、-2.0m）に間隙水圧計を設置した。防波堤の影響を受けない高知港沖の水深30mのところには、ナウファスの波浪計（海象計）が設置してある。P2 と P3、P4 地点においては、地盤内3深度（-0.6m、1.0m、-2.0m）に間隙水圧計を設置した。これら3地点の間隙水圧計の設置については、保護カバーを取り付けることができないため、鋼製ネットに取り付けた鋼管杭により地盤内に支持させている。

観測によって得られたデータは、既設ケーソンの上部工上に設置した海上観測室内で記録される。計測信号は、海底多芯ケーブル（地盤内6点用）と波圧計用ケーブルを通じて、観測室内のデータロガーに伝達される。計測のON/OFFについては、携帯電話を用いた無線制御とした。そして、有義波高2m以上の高波浪時において、6日間の連続観測（サンプリング周波数50Hz）を可能としている。

3.3 データ解析方法

観測データの特性を明らかにするために行った、データ解析の内容は次の通りである。

(1) データのグループ化

生データは30分毎のデータにグループ化した。この際、サンプリング周波数は、50Hz から5Hzに間引いている。

(2) 水圧データの成分分離

水圧データ p_0 は、波浪成分 $p_0^{(1)}$ と潮位変動成分 $p_{0\alpha}$ および長周期波成分 $p_{0\omega}$ から成り立っていると考えた。潮位変動成分 $p_{0\alpha}$ は周期10分より長い長周期側の成分、波浪成分 $p_0^{(1)}$ は有義波周期の数倍（40s）より短い短周期側の成分、長周期波成分 $p_{0\omega}$ は上記2成分の中間の成分で、 $(p_0 - p_{0\alpha} - p_0^{(1)})$ で求まる。

(3) 間隙水圧データの成分分離

間隙水圧データ p_e は、長周期の水圧変動成分（潮位変動成分 $p_{0\alpha}$ と長周期波成分 $p_{0\omega}$ ）と振動成分 $p_e^{(1)}$ 、残留成分 $p_e^{(2)}$ が重なっているととした。振動成分 $p_e^{(1)}$ は40sより短い成分のことである。残留成分 $p_e^{(2)}$ は、間隙水圧データから長周期水圧変動成分（ $p_{0\alpha} + p_{0\omega}$ ）と振動成分 $p_e^{(1)}$ を差し引いた成分（ $p_e - p_e^{(1)} - p_{0\alpha} - p_{0\omega}$ ）である。

(4) パラメータの算出

観測データから算出するパラメータは、①振動成分振幅比：地表面上における水圧変動の波浪成分に対する地盤内の間隙水圧振動成分の平均振幅比 $\bar{p}_e^{(1)} / \bar{p}_0^{(1)}$ と、②残留間隙水圧比：当該地点における有効土被り圧に対する地盤内各深度における間隙水圧残留成分の各グループの最大値及び平均値の比 $p_e^{(2)} / \sigma'_{v0}$ 、の2種類である。

4. 観測時の気象条件と波浪特性

本研究で観測対象とした台風の経路と台風通過時の沖合波浪特性をそれぞれFig.3および4に示す。

台風0310号来襲に伴い、2003年8月7日11時から8月11日8時にかけて、4日間にわたり連続観測を実施した。台風0310号観測時における沖合波浪の有義波高は2003年8月8日16時頃におよそ10mでピークを迎え、有義波周期は13s程度であった。また、8日22時には4m以下におさまった。

台風0416号来襲に伴い、2004年8月27日9時00分から8月31日19時00分にかけて、約4.5日間にわたり連続観測を実施した。台風0416号観測時における沖合波浪の有義波高は2004年8月27日より徐々に上昇し、28日18時に約6mで1度目のピーク値をとった後、有義波高は4m程度に減少するが、29日10時頃より再び上昇し始め、30日20時に約10mで2度目のピークを迎えた。荒波浪時の有義波周期は13s程度で

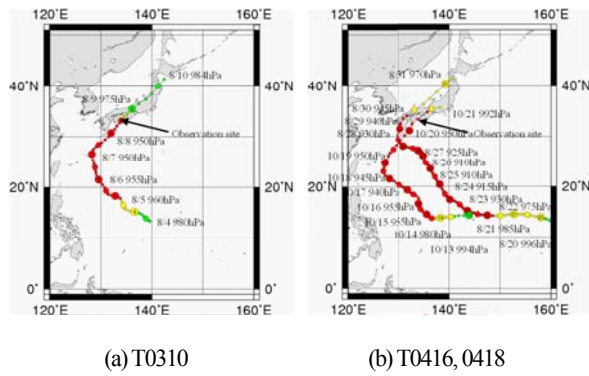


Fig. 3 Tracks of observed typhoons

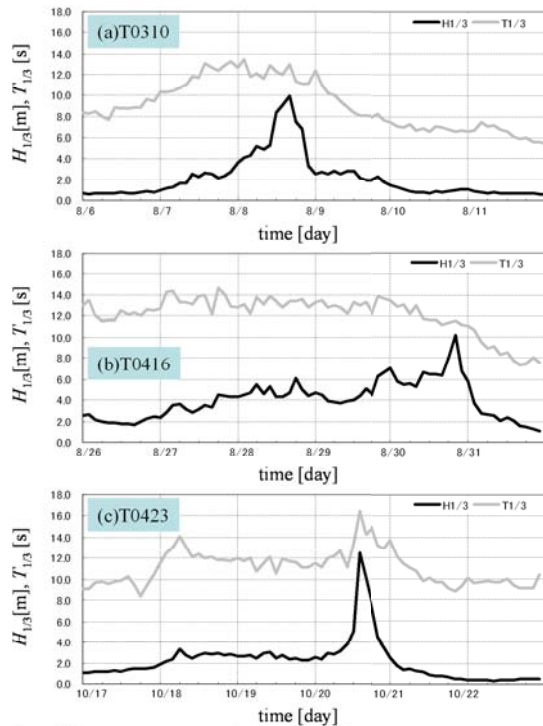


Fig. 4 Time series of significant wave height and period during the typhoons at the offshore observation point of Kochi Port

あった。

台風0423号来襲に伴い、2004年10月20日13時00分から10月22日13時00分にかけて、約2日間にわたり水圧と間隙水圧の応答観測を行った。台風0423号観測時における沖合波浪の有義波高は2004年10月20日12時頃より急上昇し、20日14時頃に約12.5mでピークを迎えた。また、その時の有義波周期は16s程度であった。

5. 現地観測結果と考察

観測した過剰間隙水圧データを変動周期別に分類し、短周期変動特性と残留間隙水圧変動特性、残留間隙水圧特性を示す。

5.1 短周期変動特性

(1) 振動振幅比特性

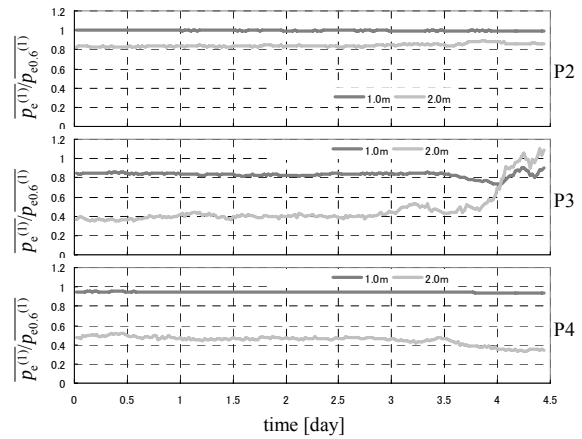


Fig. 5 Vertical fluctuating amplitude ratio during typhoon 0416

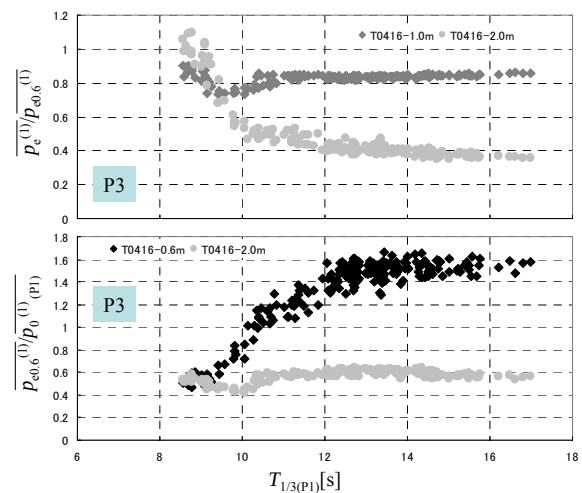


Fig. 6 Vertical and horizontal fluctuating amplitude ratio at P3

間隙水圧の振動成分を用いた振動成分振幅比 $\bar{p}_e^{(1)} / \bar{p}_0^{(1)}$ を2ケース取り上げている。一つは、各地点の最も浅い水圧計で計測された振動振幅で、他の深度の振動振幅を除いて得られる鉛直方向振動振幅比 $\bar{p}_e^{(1)} / \bar{p}_{e0.6}^{(1)}$ 、もう一つはP1地点の各深度の振動振幅で、他地点の同深度の振動振幅を除いて得られる振動振幅水平方向比 $\bar{p}_e^{(1)} / \bar{p}_0^{(1)(P1)}$ を考えている。

はじめに、鉛直方向振動振幅比について述べる。Fig.5に台風0416号観測時のP2～P4地点の振動振幅比の時刻歴を示す。観測3台風に共通して、図のP2とP4のように、P3地点以外の振動振幅比はほぼ一定であり、各地点とも鉛直方向に一定の割合で減衰している。また、P3、P4地点の-0.6mに対する-2.0mの振幅比が0.4程度であり、P2地点の0.8に比べて減衰が非常に大きい。これは、P3、P4地点が消波ブロックやケーソンの直下に位置するため、構造物を敷設する際に地盤が締め固められたために間隙が小さくなり、透水性が低くなったものと考えられる。さらに、P3地点に関しては、観測3台風に共通して来襲波浪が減衰した後において、-0.6mに対する-1.0mの振幅比はほぼ一定であるにもかかわらず、-2.0mの振幅比が大きく変化している。このP3地点の振幅比の変化を来襲波浪の周期との関係をFig.6に示す。この図から、周期が長

い12~16s程度では振幅の減衰が大きく、周期が短い8s程度では減衰が小さい。

次に、振動振幅水平方向比について、P3地点の振動水平方向比と周期の関係を図6に示す。P3地点は、周期12~16sの波浪では重複波の腹に位置し、周期8s程度の波浪では重複波の節の様な変動となる。また、-2.0mでは、来襲波浪の周期に関わらず、一定して0.5程度を示しており、地盤が締め固められていたために、あまり水圧が伝播していなかったと推定される。このことから、前述したP3地点の鉛直方向振動振幅比の変化は、来襲波浪の周期によって重複波モードが変化したために、上層部(-0.6mと-1.0m)の振幅は変化するが、-2.0mの振幅はその影響を受けず、あまり変化しなかったために生じたと考えられる。

(2) 振動位相特性

各地点における振動成分中の鉛直方向の位相差を明確にするために、同一地点における異なる2深度間の相関係数を調べた。相関係数とは、異なる2深度において、振幅の大きさには関係なく、伝わる波の位相の相関のみを表している。また、各地点-0.6mと-1.0m、-1.0mと-2.0mの相関を求めている。

Fig.7に台風0416号観測時のP2~P4地点の相関係数を示す。PとP1の相関係数はP2と同様に、3台風に共通して、ほぼ1.0でよい相関を示している。P4地点では、-0.6mと-1.0mの相関は他地点同様によい相関を示しているが、-1.0mと-2.0mの相関は観測開始では0.97と相関はよいが、波高減少過程には0.9程度と相関は低くなる。また、P3地点に関しては、-0.6mと-1.0mの相関がよく、-1.0mと-2.0mの相関が低いことは、P4地点と共通しているが、相関の変化傾向が異なる。P3地点-1.0mと-2.0mの相関は、観測開始時より0.7~0.8程度とP4地点より低く、最大波高来襲後の相関は著しく低下し、0~0.2を示し、その後、0.6~0.7程度の相関を持つという挙動を示す。構造物下のP3、P4地点において、上層2深度(-0.6mと-1.0m)と-2.0mの振動成分が位相差を含んで変動するのは、波浪により上載構造物が振動し、その運動がマウンドを介して地盤骨格の変形として間隙水圧の変動に影響を及ぼしているものと考えられる。波浪により変動する間隙水圧の減衰が小さい-0.6mと-1.0mでは、間隙水圧が大きく変動するため、地盤骨格変形による間隙水圧変化の影響はあまり表れてこない。しかし、振動振幅の減衰が非常に大きい-2.0mでは、波浪による間隙水圧変動の影響が小さくなるため、相対的に地盤骨格変形の影響が大きくなり、間隙水圧変動に表れるようになる。また、波浪減少過程で相関が低くなるのは、構造物振動の影響が相対的に大きくなるからである。

5.2 残留間隙水圧変動成分の特性

残留間隙水圧は、40sのウィンドウ幅で移動平均をとったものであるため、40s以上の周期をもつ長周期変動が含まれる。また、残留間隙水圧には、数波で蓄積し消散するような長周期で変動するものと、数百から数千波かけて徐々に蓄積するものがある。これより前者を残留変動成分とし、ここではこの成分について考察する。

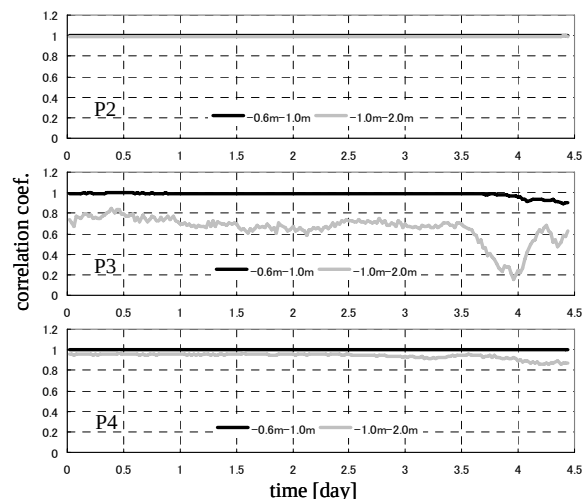


Fig. 7 Correlation coefficient of fluctuating component at P2~P4 during typhoon 0416

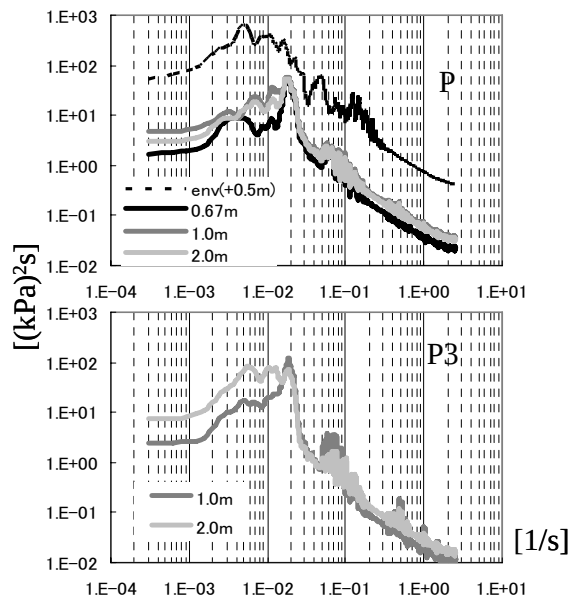


Fig. 8 Frequency spectrum of residual component at P and P3

残留間隙水圧変動成分と波群特性の関係を調べるために、周波数スペクトル解析を行った。波群特性として簡易的に水圧波浪成分 $P_0^{(1)}$ の包絡波形を算出し、これと残留変動成分とのスペクトル比較をPとP3地点についてFig.8に示す。

P地点について考察すると観測3台風に共通して、波圧包絡波形のピークと残留変動成分のピークは、ほぼ同じ周波数のところに現れている。これは、水圧波浪成分の包絡波形、つまり波群と残留間隙水圧の変動成分との間に、密接な関係があるということを示している。また、包絡波形の最大値と残留変動成分の最大値が現れる周期がそれぞれ250sと60sとで異なっており、残留間隙水圧変動成分が周期60s程度の波群周期の影響を強く受けているといえる。P1地点についてもPとほぼ同様の結果になった。

次に、P2~P4地点について調べると、観測3台風に共通して、P2地点の各深度の間隙水圧長周期変動成分は、P、P1地

点に見られるように 50~60s の周期で大きく変動していることがわかり、また、わずかではあるが-2.0m に 60s より長周期の変動 (70s~80s) が見られる。この周期 50~60s の変動は、P, P1 地点と同様に、同程度の周期の波群特性に影響を受けて変動したものと考えられる。しかし、3 台風の観測を通じて P3, P4 地点においては、-1.0m では全地点に見られるように 50~60s 程度の周期変動を持つが、-2.0m では-1.0m と同様に 50~60s 周期の変動よりも、より長周期での変動がピークを持つ。以上のことから、各地点の-1.0m では、比較的周期の長い波浪 (周期 80s や 100s) により繰返しせん断応力が地盤内に動員されても、間隙水が地盤の間隙から排水するだけの時間的な余裕があるため、残留変動成分が大きく変動せず、周期 50~60s 程度の波群変動に強く影響されると考えられる。しかし、-2.0m では地盤表層では排水される比較的長周期の波浪 (周期 80s や 100s) により地盤内に動員された繰返しせん断応力の影響を受け、70~80s 程度の変動までは排水されずに残留変動成分が変動すると考えられる。また、その変動は構造物下に位置する P3, P4 地点の-2.0m では、他地点より排水されにくくなっているため、70s~80s 程度の周期変動が大きくなると考えられる。このことから、残留間隙水圧変動成分が影響を受けやすい特定の水圧波浪変動成分として、各地点の-0.6m, -1.0m では周期 50~60s 程度の波群、各地点の-2.0m, 特に構造物下の P3, P4 地点では周期 50~60s に加えて 70~80s 程度の波群が考えられる。

5.3 残留間隙水圧特性

上述した残留間隙水圧の数日から数千波かけて、徐々に蓄積する平均的成分について考える。ここでは、残留間隙水圧の 30 分間最大値と平均値を考える。30 分平均値とは、残留間隙水圧の平均的成分を表し、30 分最大値とは、残留間隙水圧の平均的成分と数波で変動する残留変動成分が重なり合ったものである。

台風 0423 号観測時の P2~P4 地点-1.0m での残留間隙水圧の時刻歴を Fig.9 に示す。台風 0310 号観測時の P1 地点-0.6m を除く各地点と、台風 0416 号観測時の全地点、台風 0423 号観測時の P3, P4 地点においては、残留間隙水圧の平均値に変動が見られず、ほぼ 0 を示していた。これは、残留成分に数百波、数千波にわたり徐々に蓄積するような平均的成分は存在しなかったことを示している。しかし、図に示すような台風 0423 号観測時の P 地点、P2 地点の各深度では残留間隙水圧の平均値が 0.4kPa 程度上昇していた。これは、数百波、数千波にわたり徐々に蓄積するような平均的成分が存在していたことを示している。このような残留間隙水圧の平均値の増大は台風 0423 号によって発生した波が、Fig.4 に示すように急激に増大していることに関係しているのかもしれない。また、その残留間隙水圧の平均的成分の上に、数波で変動する残留変動成分が 1kPa 程度重なり、残留間隙水圧の最大値を示している。したがって、残留成分の平均的成分よりも残留変動成分の方が卓越していることになる。

また、台風 0310 号来襲にともなって、P1 地点-0.6m の計器が観測期間中に 50cm 程度鉛直下方に沈下しているが、これは

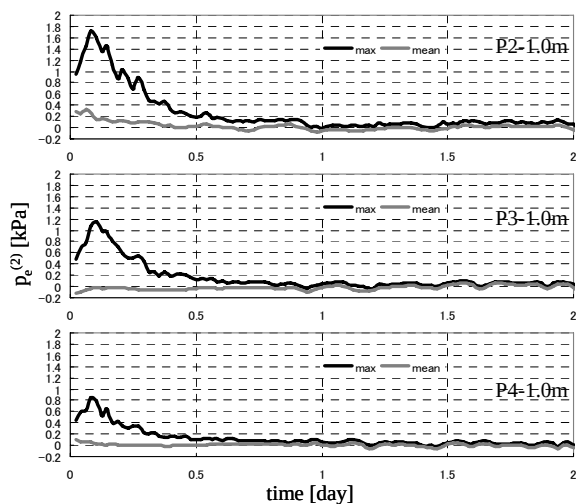


Fig. 9 Time series of residual pore water pressure during typhoon 0423

間隙水圧計の周辺の地盤で液状化が発生した可能性を示している。間隙水圧計周辺の地盤が液状化し、間隙水圧計はその自重によって沈んでいったと推定できる。

6. 間隙水圧の波浪応答に関する数値計算の概要

6.1 基礎方程式

流体部では、碎波や越波等の非線形波動現象を数値的に扱えるように、複雑な自由表面が解析可能な VOF 法からなる数値波動水路を用いている。数値波動水路では、2 次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式と Navier-Stokes 方程式を用いており、これを多孔質体中流れに拡張したものを基礎方程式としている。また、水と空気の間自由境界面の解析については、複雑な表面形状を比較的精度よく解析できる VOF 法を用いている。

地盤部については、Biot の 2 相弾性体理論に基づいてモデル化を行っている。間隙水には海底地盤に気泡が混入したことを考慮して圧縮性流体としている。また、砂粒子と間隙水の運動方程式を定式化する際、土粒子の変位 U と間隙水圧 π を従属変数とする U - π form を採用しており、 U - π form 定式化の有限要素法によるモデルである。本研究では、地盤の弾性モデルを改良して、地盤内の主応力軸の回転を考慮した弾塑性理論 (Sassa・Sekiguchi(2001)) を導入した。

6.2 流体部と地盤部の連成方法

本モデルは、流体部から求めた境界の水圧を地盤部の境界値に接続し、地盤部で計算された境界流速を流体部の境界値に接続する弱連成の形式を採っている。また、流体部と地盤部の時間刻み幅 Δt は同一であるが、流体部から地盤部へ、地盤部から流体部へ接続する際、 $\Delta t/2$ ずつずらしながら交互に解いている。具体的には、流体部で時刻 t の計算で得られた境界値を時刻 $t+\Delta t$ の境界値と平均し、時刻 $t+\Delta t/2$ の境界値として地盤部へ接続するという接続方法を採っている。

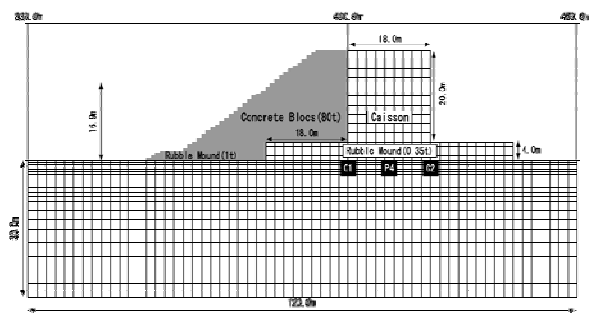


Fig.10 Simulation grid on movable caisson mode

6.3 計算方法

本研究では、波浪によって引き起こされる構造物（ケーソンや捨石マウンド）の運動を考慮するケーソン運動モードで計算した。計算領域を Fig.10 に示す。計算結果出力点として、P～P4 までの観測点と同じ位置と、ケーソン沖側および岸側端の C1 および C2 を設定した。

7. 計算結果と考察

波浪条件としては①波高 2.0m, 周期 8.0s (H2T8), ②波高 2.0m, 周期 12.0s (H2T12), ③波高 4.0m, 周期 12.0s (H4T12) の 3 ケースで数値計算を行った。本研究では、地盤に弾塑性モデルを導入した結果、土の塑性に起因する地盤ひずみの蓄積である、残留ひずみを表すことができた。しかしながら、地盤中の間隙水圧の算出方法の改良が不十分であったため、土の繰返し塑性に起因して生じる過剰間隙水圧の長周期成分である残留間隙水圧を再現することはできなかった。過剰間隙水圧の短周期成分である振動成分と、残留ひずみの特性について以下に示す。

7.1 防波堤前面の重複波モード

重複波モードについて調べるため、波高と周期を変えて波浪を作用させた。Fig.11 は、P1 地点の水圧変動振幅に対する各地点の水圧変動の振幅比を示している。当観測サイトにおける高波浪来襲時に該当する H4T12 の条件で波浪を作用させた場合、P1 地点付近を重複波の節とし、P3 地点付近を重複波の腹とする変動モードを確認した。また、波高減少過程に該当する H2T8 の条件で波浪を作用させた場合、P1 地点付近を重複波の腹とし、P3 地点付近を重複波の節とする変動モードになることを確認した。したがって、本モデルによって、観測で得られたような重複波モードを再現できたとえる。

また、現地観測で見られた、鉛直方向の減衰が重複波の腹と節とで異なることについて調べた。異なる周期 (8 秒と 12 秒) で、同一地点において調べたところ、減衰率の差が見られた。Fig.12 に、各地点の-0.25m の振動振幅に対する-0.75m の振動振幅の比を示す。P3 地点に着目すると、周期 8 秒に比べて、周期 12 秒の方が減衰が大きいことが分かる。これは、P3 地点が周期 8 秒で重複波の節になり、周期 12 秒では重複波の腹のようになることから、重複波の腹の時と節の時では、

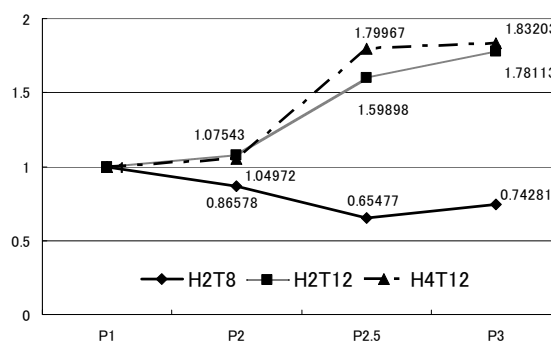


Fig. 11 Ratio of fluctuating pore water pressure to P1

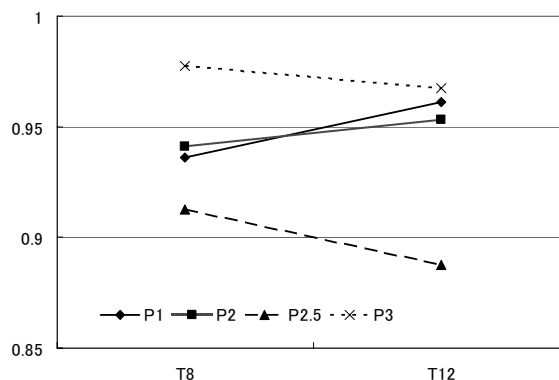


Fig. 12 Vertical fluctuating pore water pressure ratio in relation to wave period

腹の方が減衰は大きくなるといえる。このことは、他地点にもいえることである。ここで H4T12 を高波浪来襲時、H2T8 を波高減少過程に該当する波浪であることを考えると、現地観測の P3 地点で、観測期間の後半、つまり波高減少過程において振幅比の傾向に変化が生じていたことを再現できたといえる。

7.2 ケーソン運動による間隙水圧への影響

ケーソン運動モードの計算では、現地観測によって得られた構造物下地盤に見られた位相変化特性について、本モデルで再現を試み、現地観測結果との比較を行った。なお、消波ブロック下地盤 (P3 地点) における消波ブロックの不規則な沈下の間隙水圧変動に対する影響を、数値計算で再現することは非常に困難なため、本研究では、ケーソン直下地盤 (P4 地点) におけるケーソン運動による間隙水圧変動について詳しく検証している。その際、ケーソン中央部下地盤を P4 地点としているのは現地観測と同じであるが、さらにケーソン沖側端を C1 地点として解析をした。

C1 地点では、波浪によって一定以上の (ケーソンの抵抗力よりも大きい) 波力がケーソン前面に作用したとき、ケーソンは底面のある点を中心に回転モーメントを受けて岸側に傾き、ケーソン下端は鉛直上方に変位する。その影響で、過剰に発生していた間隙水圧は減少する。しかし、ケーソンに大きなモーメントが作用するのは波の峰付近がケーソン前面に達したときであり、その時に水圧から動員される変動水圧も

大きくなる。したがって、水圧から受け取って地盤表層部に発生する間隙水圧は大きくなる。C1 地点では、水圧から受け取って地盤中を伝わるものと、ケーソンの変位によって減少するものとを併せて相殺された間隙水圧が発生している。C1 地点におけるケーソン運動モードでの計算結果を Fig.13 に示す。波浪条件は H4T12 で、地盤内の計 4 深度の間隙水圧変動とケーソンの鉛直方向変位を示している。ここで、-0.25m は、ケーソン変位とほぼ同様に変動しているが、-2.25m とほぼ逆位相になっているがわかる。これは、-2.25m の間隙水圧変動は、水圧伝播による変動より、ケーソン変位による変動の影響が上回っていると言える。

P4 地点の①H2T8 条件下での計算結果を Fig.14 に示す。P4 地点では、C1 地点のようにケーソンの変位は顕著に起きない。しかし、図より、地盤内深さが増すにつれて間隙水圧の振幅が減少し、位相差を生じていることがわかる。これは、間隙水圧変動がケーソンの変位に影響されているものと思われる。具体的には、-0.25m の間隙水圧が正方に変動しているとき、ケーソンは少し位相差をもって正の方向（鉛直上方）に変位する。ケーソンが上方に変位すると間隙水圧は減少するが、その影響が深さが増すにつれて大きくなり、-4.50m ではその影響が顕著に表れている。

次に、台風 0423 号通過に伴う現地観測によって得られた観測結果と比較する。2004 年 10 月 22 日 00 時頃の P4 地点における各深度の振動成分の時刻歴（30 秒間）を Fig.15 に示す。図のように、波高が減少した時には、P4 地点の振動成分に位相差が生じている。Fig.13 と比べると、-2.0m の変動に位相差を含んでいる点を非常によく再現している。これは、波力によるケーソン変位の影響で、-2.0m の間隙水圧が -0.6m の間隙水圧に対して位相差を生じていることを表している。これによって、観測結果にあった P4 地点において -2.0m と他の深度との間に位相差を含んで変動しているのは、波浪によるケーソンの運動がマウンドを介して及ぼす地盤骨格の動的変形によるものであったと考えられる。また、ケーソン直下（P4 地点）と同様の消波ブロック下（P3 地点）における振動成分の位相差は消波ブロックの不規則な運動が招いたものだと考えられる。ケーソン直下についてはある程度一定の骨格変形が地盤内に発生するが、テトラポッドのようないびつな形式をした消波工であれば、局所的に地盤変形を加え、数 10cm 離れるだけで異なった骨格変形が発生していることが考えられる。将来的には、消波ブロックの波浪による運動も考慮に入れた数値計算を行って、構造物の動的変形が間隙水圧に及ぼす影響を考慮する必要がある。

7.3 残留ひずみ特性

本研究では、地盤に弾塑性モデルを適用している。そのため、土の塑性に起因する地盤ひずみの蓄積を表すことができた。ケーソン直下地盤における地盤ひずみを Fig.16 に示す。ケーソン沖側下端を C1 地点とし、岸側下端を C2 地点とした。C1 地点の地盤ひずみは負の方に蓄積し、C2 地点は正の方に蓄積していることが分かる。これは、初期の状態に比べて、C1 地点の地盤は膨張し、C2 地点の地盤は圧縮していること

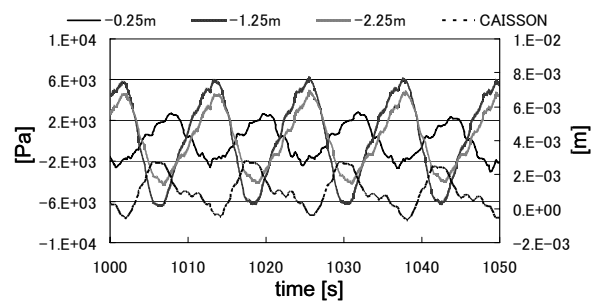


Fig. 13 Computed fluctuating pore water pressures at C1 compared with the caisson motion

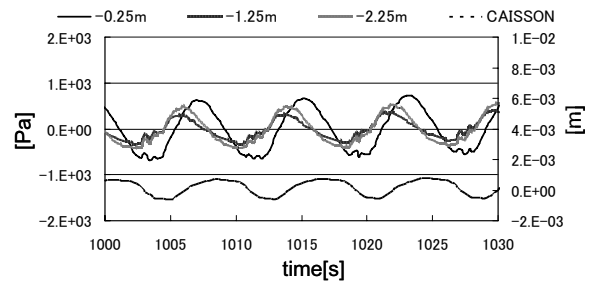


Fig. 14 Computed fluctuating pore water pressures at P4 compared with the caisson motion

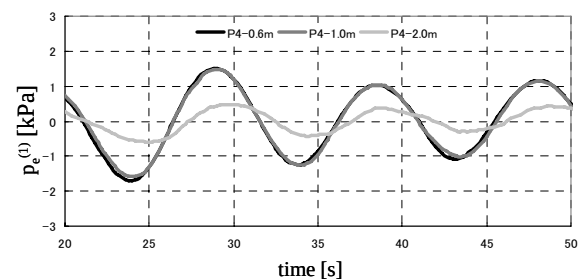


Fig. 15 Observed fluctuating pore water pressures at P4

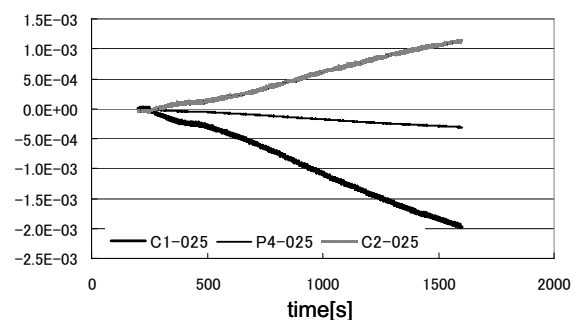


Fig.16 Residual strain beneath a caisson

を意味している。さらに、ケーソンの運動が単純な振り子運動ではなく、岸側に偏った運動であることを示している。ただし、C1 地点に関して、現地とは異なり、本モデルではマウンドとケーソンを結合しているため、現地の状況を必ずしも再現できているとはいえないが、ケーソンの運動が偏っているという特性を表していることは明らかである。

8. 結論

本研究では、高橋ら(2002)によって提案された VOF-FEM プログラム (CADMAS GEO-SURF) を改良して、弾塑性理論を導入した。防波堤下地盤の波浪応答に関して数値計算を行い、防波堤基礎地盤内の間隙水圧の波浪応答に関する現地観測結果と比較した。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 台風 0310 号来襲時に、法先自由地盤 (P1) の -0.6m の計器に 50cm 程度の沈下が見られ、液状化等によって地盤が不安定化した可能性がある。
- 2) 消波ブロック下 (P3) での振動振幅比の減衰傾向の変化は、来襲波浪の周期に依存する重複波モードの変化であると考えられる。数値計算によって来襲波浪の周期による重複波モードの変化を再現している。
- 3) 観測結果で得られた上載構造物 (消波ブロックとケーソン) 下地盤内の過剰間隙水圧振動成分中に表れる上層 2 深度 (-0.6m と -1.0m) と -2.0m との間の位相差を含んだ変動は、波浪による上載構造物の運動によって生じることを数値計算によって明らかにした。
- 4) 来襲波浪の波群特性と残留間隙水圧の長周期変動成分の間には密接な関係があり、残留間隙水圧は周期 50~60s 程度の波群周期に大きく影響を受ける。また、上載構造物下地盤の深さ -2.0m の残留間隙水圧は 70s~80s 程度の波群周期にも大きく影響を受けることがわかった。
- 5) 台風 0310 号と台風 0416 号来襲時の観測では、残留間隙水圧は平均的な成分はなく、長周期で変動する成分のみであったが、台風 0423 号来襲時の観測では、残留間隙水圧の平均的成分が最大で 0.4kPa 程度発生していた。
- 6) 防波堤基礎地盤内で発生する残留間隙水圧は最大でも 2kPa 以下であり、構造物による上載圧の増加を考慮すると法先自由地盤を除いて防波堤基礎地盤では液状化が発生する可能性は極めて小さい。
- 7) ケーソン前後の地盤ひずみの蓄積の特性から、ケーソンの運動は岸側に偏っていることが分かった。

本研究では、防波堤直下地盤内の残留間隙水圧の平均的な成分と長周期で変動する成分を観測することに成功し、波群と残留間隙水圧の長周期変動成分との密接な関係も判明した。しかしながら、数百波、数千波による残留間隙水圧の蓄積が

表れている場合と全く存在せず、長周期変動成分のみが表れている場合があり、残留間隙水圧が蓄積する要因を特定する必要がある。また、数値計算については、土の繰り返し塑性に起因して生じる残留間隙水圧を再現するため、間隙水圧の算出方法を改良する必要がある。さらに、地盤パラメータ (せん断弾性係数や透水係数、間隙比等) の感度分析を行い、現地地盤の特性を把握すると共に、現地観測結果を再現し、計算モデルの妥当性を検証する必要がある。

謝辞

現地観測を実施するにあたり、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所の不動雅之前技術開発係長をはじめ関係各位、ならびに高知港湾・空港整備事務所の皆様には、多大なるご助力を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 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.
- 蔦勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦 (2000) : 波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.51-55.
- 善 功企・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, 第 28 巻, 3 号, pp.29-57.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・村西佳美・磯部雅彦 (2002) : 波・地盤・構造物の相互作用に関する $U-\pi$ 形式 VOF-FEM (CADMAS GEO-SURF) の開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.881-885.
- 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.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sands in a centrifuge, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp. 621-638.
- Sassa, S. and Sekiguchi, H. (2001): Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds, *Geotechnique*, Vol.51, No.2, pp.115-126.

Response Properties of Residual Pore Water Pressures in a Seabed during a Storm

Tomotsuka TAKAYAMA, Shotaro TANIGUCHI*, Tomohiro YASUDA,
Shinji SASSA** and Iwao NODA***

* Shinka, Co., Ltd.

** Port and Airport Research Institute

*** Takamatsu Port and Airport Technical Investigation Office, MLIT

Synopsis

The present study investigates the response properties of pore water pressures in the seabed beneath a composite breakwater armored by concrete blocks. In order to compute residual pore water pressures, the VOF-FEM model is modified by introducing the elasto-plastic constitutive model which involves the rotation of principal stress axes. It has been revealed that the motions of the coastal structures due to wave loads strongly affect the response properties of pore water pressures in the seabed beneath the coastal structures like the caissons and the concrete blocks.

Keywords: residual pore water pressure, composite breakwater, VOF-FEM model,
elasto-plastic constitutive model