

消波工被覆堤下における地盤内間隙水圧の波浪応答に関する現地観測

高山 知 司* ・ 安田誠宏** ・ 辻尾大樹***
谷口昇太郎**** ・ 佐々真志***** ・ 水谷雅裕*****

本研究では、防波堤直下の基礎地盤における水圧と間隙水圧の系統的な現地観測を実施し、そのデータに基づき、高波浪が作用したときの海底砂質地盤の応答を明らかにすることを目的としている。観測は、2003年から2004年にかけて3つの台風(T0310, T0416, T0423)を対象とし、高知港の東第一防波堤サイトにおいて実施した。現地観測の結果から、残留間隙水圧の長周期変動成分は、来襲波浪の波群特性と密接な関係があることがわかった。また、液状化については、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、発生する可能性は極めて低いという結論に達した。

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。一般的に波浪による地盤の液状化には2種類あり、変動間隙水圧によって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。

規則波浪による地盤液状化のメカニズムについては、遠心力場における波浪実験法を活用することによって明らかにされてきている(Sassa・Sekiguchi, 1999)。しかし、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、善ら(1989)が5m以下の比較的水深の浅い碎波帯において、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)が自由地盤内、著者ら(2004)が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を行っている。

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から得られたデータをもとに、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. 高波浪時における間隙水圧の波浪応答観測の概要

(1) 観測地点

本観測は、図-1に示す高知港三里地区の東第一防波

堤サイトにおいて行った。観測地点は、図中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 $D_{50}=0.15\sim0.20$ 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が高いと考えられる。

(2) 観測方法

本観測では、自由地盤(P地点)と図-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、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(海底地盤表面を基準として、-0.6m, -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。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って地盤内に支持させている。さらに、防波堤の影響を受けない高知港沖水深30mのところには波高計(海象計)が設置されている。

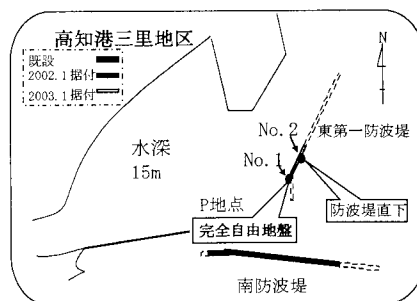


図-1 観測地点模式図

* フェロー	工博	京都大学教授 防災研究所
** 正 会 員	博(工)	京都大学助手 防災研究所
*** 正 会 員	工修	パシフィックコンサルタンツ(株)
**** 学生会員		京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
***** 正 会 員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所
***** 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

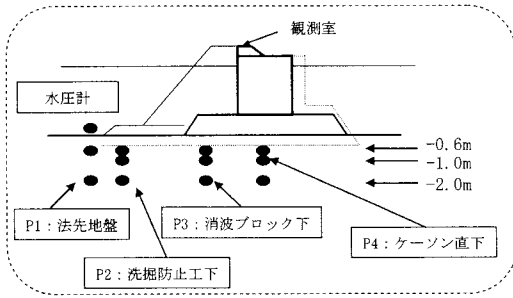


図-2 計器設置模式図

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に伝送される。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収録される。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(50 Hz サンプリング)を可能としている。

(3) 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。

a) 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、50 Hz から5 Hzに間引いている。

b) 移動平均法による水圧と間隙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_{0t} および長周期波成分 p_{0l} から成り立っていると考えた。潮位変動成分 p_{0t} 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(40 s)より短い短周期側の成分、長周期波成分 p_{0l} は上記2成分の中間の成分で、 $(p_0 - p_{0t} - p_0^{(1)})$ で求める。

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_{0t} + 長周期波成分 p_{0l})と振動成分 $p_e^{(1)}$ 、残留成分 $p_e^{(2)}$ が重なっているとした。振動成分 $p_e^{(1)}$ は一波一波の波によって生じる成分で、40 s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 $(p_{0t} + p_{0l})$ と振動成分 $p_e^{(1)}$ を差し引いた成分 $(p_{et} - p_e^{(1)} - p_{0t} - p_{0l})$ である。

3. 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図-3と4に示す。

台風0310号の来襲に伴い、2003年8月7日11時から8月11日8時にかけて4日間の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時頃にピークをむかえ、およそ10 mであった。

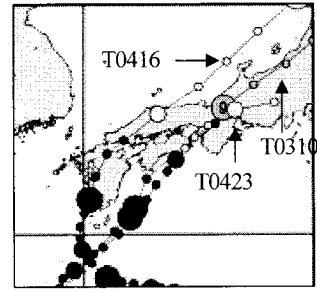


図-3 台風経路図

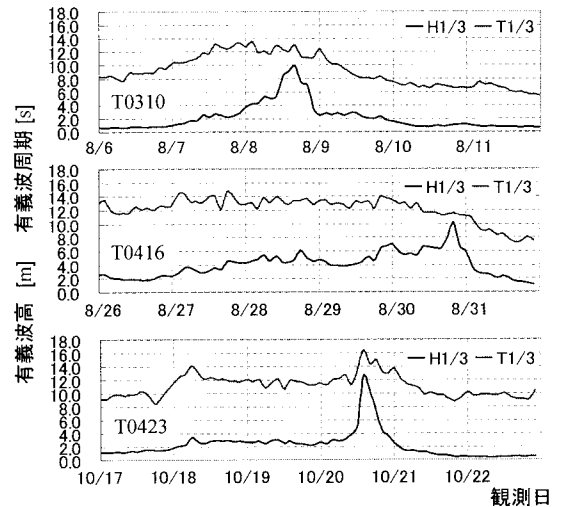


図-4 高知港沖の沖合波浪特性

また、そのとき有義波周期は13 s程度であった。また、8日22時には有義波高が4 m以下におさまった。

台風0416号の来襲に伴い、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日間の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6 mで1度目のピーク値をとった後、4 m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10 mで2度目のピークをむかえた。荒波浪時の有義波周期は13 s程度であった。

台風0423号の来襲に伴い、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日間の連続観測を実施した。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12.5 mでピークを向かえた。また、その時の有義波周期は16 s程度であった。

4. 解析結果とその考察

(1) 短周期変動特性

間隙水圧の振動成分振幅比を2ケース取り上げている。

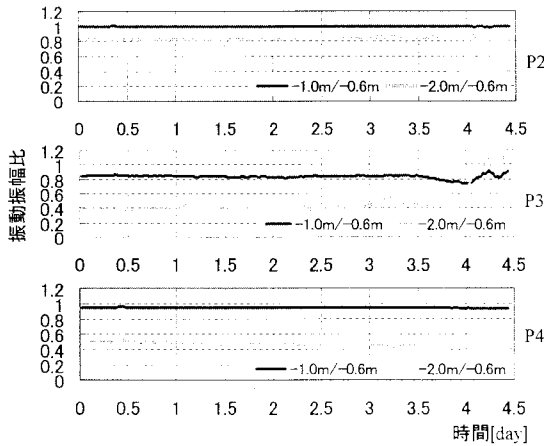


図-5 P2～P4 地点での鉛直振動振幅比(T 0416)

一つは、各地点の最も浅い水圧計または間隙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である。もう一つはP1地点の各深度の振動振幅で他地点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を考えている。

図-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た。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ことによって間隙が小さくなり、透水性が低くなったと考えられる。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の減少以降において、-0.6mに対する-1.0mの振幅比はほぼ一定であるのに対して、-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と来襲波浪の周期との関係を図-6の上图に示す。この図から周期12～16s程度では振幅の減衰が大きく、周期8s程度では減衰が小さいことが分かる。このことについてさらに検討するため、振動振幅水平方向比を求めた。P3地点の振動水平方向比と周期の関係を図-6下図に示す。P3地点は、周期12～16sの波浪では重複波の腹に、周期8s程度の波浪では重複波の節に位置することが波長との関係で示される。このようなP3地点の位置の特性は図-6下図に示す振動振幅水平方向比にも表れており、波の周期が12s以上では振幅比が大きく周期が短くなるにしたがって小さくなっており、節に近づいていることがわかる。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

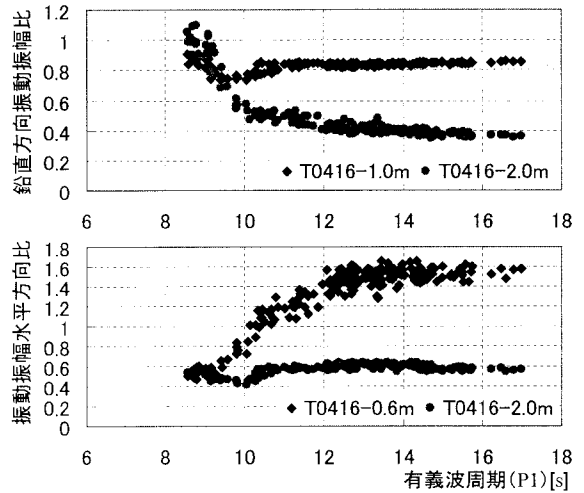


図-6 P3 地点の鉛直振幅比と振幅水平方向比(T 0416)

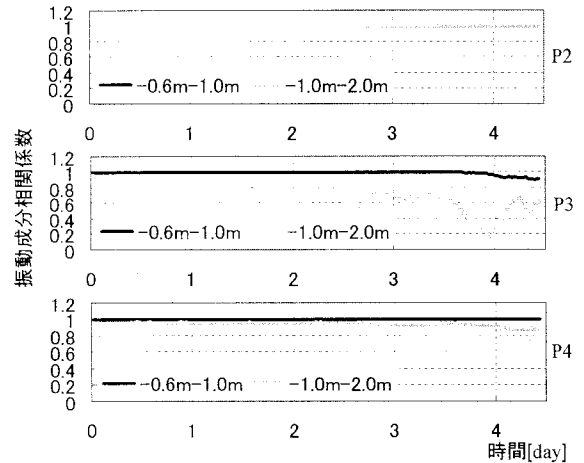


図-7 P2～P4地点での振動成分相関係数(T 0416)

に、水圧の変動が伝播し難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。

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、伝わる波の位相の関係を表している。また、各地点とも-0.6mと-1.0m、-1.0mと-2.0mの相関を求めている。図-7に台風0416号観測時のP2～P4地点の相関係数を示す。ここでは示していないが、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た。P4地

点では、 -0.6 m と -1.0 m の相関は他地点同様によい相関を示しているが、 -1.0 m と -2.0 m の相関は観測開始では0.97とよい相関であるが、波高が減少する過程では0.9程度と相関は低くなる。また、P3地点に関しては、 -0.6 m と -1.0 m の相関はよく、 -1.0 m と -2.0 m の相関が低いことは、P4地点と共通しているが、相関の変化傾向は異なる。P3地点 -1.0 m と -2.0 m 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、0.2程度を示し、その後、0.6~0.7程度の相関を持つといった挙動を示す。構造物下のP3、P4地点において、上層2深度(-0.6 m と -1.0 m)と -2.0 m 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、その振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 -0.6 m と -1.0 m 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ないが振動振幅の減衰が非常に大きい -2.0 m では、波浪による間隙水圧変動が小さくなるため、相対的に地盤骨格変形の影響が大きくなり、これが間隙水圧の変動に表れるようになった。また、波浪の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だと考える。

(2) 残留間隙水圧変動成分特性

残留間隙水圧は、40 sのウィンドウ幅で移動平均をとったものであるため、40 s以上の周期をもつ長周期変動が含まれている。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。前者を残留間隙水圧変動成分として、ここではこの成分について考察する。

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¹⁾の包絡波形を算出し、これと残留間隙水圧変動成分とのスペクトル比較をPとP3地点について図-8に示す。

P地点について考察すると観測3台風に通じて、波圧包絡波形のピークと残留間隙水圧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間隙水圧変動成分の最大値が現れる周期がそれぞれ250 sと60 sとで異なっており、残留間隙水圧変動成分が周期60 s程度の波群周期の影響を強く受けているといえる。また、わずかではあるが -2.0 m に60 sより長周期の変動(70 s~80 s)が見られる。ここでは示していないが、P1とP2地点についてもPとほぼ同様の結果になった。

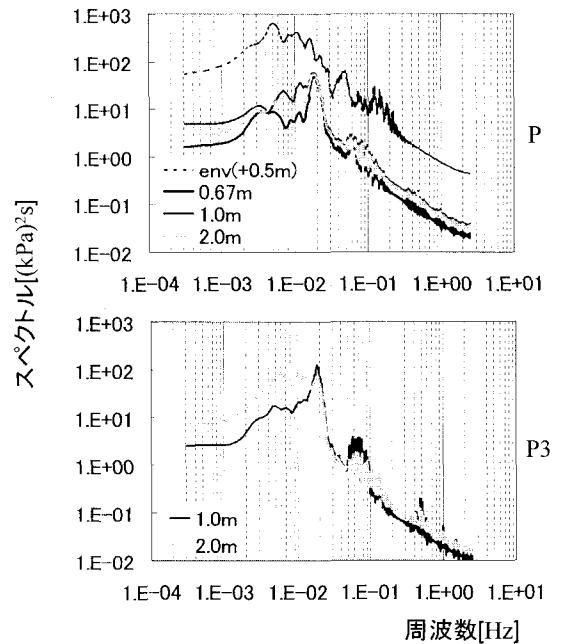


図-8 PとP3地点での残留成分の周波数スペクトル(T 0416)

次に、P3地点について考察する。観測3台風に通じて、P3地点の各深度の残留間隙水圧変動成分は、P地点に見られるように50~60 sの周期で大きく変動している。この周期50~60 sの変動は、P地点と同様に、同程度の周期の波群特性に影響を受けたものと考えられる。しかし、3台風の観測を通じてP3地点においては、 -1.0 m では全地点に見られるような50~60 sの周期変動を持つが、 -2.0 m では50~60 s周期の変動よりも、より長周期での変動がピークを持つ。ここには示していないがP4地点についてもP3地点とほぼ同様の結果となった。

以上のことから、周期80 s以上の波浪によって生じた残留間隙水圧は、 -1 m 地点より浅い地盤表面近くではすぐに消散されて、その影響は残りにくいが、 -2 m 地点では排水性能が悪く、その影響が残るために、周期70~80 sといった周期の長い成分が残るものと考えられる。また、その変動は構造物下に位置するP3地点の -2.0 m では、他地点より排水され難くなっているため、70 s~80 s程度の周期変動が他地点に比べて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 -0.6 m 、 -1.0 m では周期50~60 sの波群、各地点の -2.0 m 、特に構造物下のP3、P4地点では周期50~60 sに加えて70~80 sの波群が考えられる。

(3) 残留間隙水圧特性

上述した残留間隙水圧の数百から数千波かけて、徐々に蓄積する平均的成分について考えてみる。ここでは、

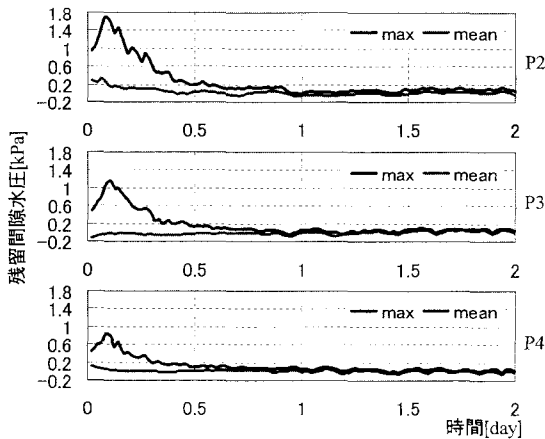


図-9 P2～P4地点での残留間隙水圧(T 0423)

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の中で最大の値である。

台風0423号観測時のP2～P4地点-1.0 mでの残留間隙水圧の時刻歴を図-9に示す。台風0310号観測時のP1地点-0.6 mを除く各地点と、台風0416号観測時の全地点では、図-9に示す台風0423号観測時のP3、P4地点のように、残留間隙水圧の平均値に変動は見られず、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いことを示している。しかし、図-9に示すような台風0423号観測時のP2地点の各深度では残留間隙水圧の平均値が0.4 kPa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ることを示している。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1.4 kPa程度重なり、残留間隙水圧の最大値を示している。残留間隙水圧の平均的成分よりも変動成分の方が卓越していることを示している。

5. おわりに

本研究では、2003年、2004年の2年間で高知港東第一防波堤観測サイトに来襲した3台風(T0310, T0416, T0423)に対して、間隙水圧の応答観測を実施した。これにより得られたデータに関して解析を行い、防波堤マウンド下における液状化の発生の可能性を検証した。ここで得られた主要な知見を以下にまとめる。

1) 全地点で深さ方向に過剰間隙水圧振動成分の減衰がみられるが、上載構造物下地盤(消波ブロック下やケーソン直下)では-2.0 mでの振幅減衰が他地点に比べるとかなり大きい。これは、構造物敷設にともなう地盤の締

め固めによって間隙が小さくなったためだと考えられる。

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、周期12～16 sの高波浪時には腹として変動し、周期8 s程度の波高減少後には変動振幅が小さい節のように変動することによって、減衰傾向が変化したと考えられる。

3) 上載構造物下(消波ブロック下とケーソン直下)地盤において、過剰間隙水圧振動成分は上層2深度(-0.6 mと-1.0 m)と-2.0 mの間に位相差を含んで変動する。特に消波ブロック下(P3)では位相差が大きく、これは波浪によって起こされる構造物の運動が影響している可能性がある。

4) 来襲波浪の波群特性と残留間隙水圧の変動成分の間には密接な関係があり、地盤浅部での残留間隙水圧は周期50～60 sの波群に影響を受けやすく、深さ-2.0 m程度での残留間隙水圧は周期50～60 sの波群に加えて、70 s～80 sの波群周期にも影響を受け、上載構造物下地盤ではその影響が大きくなる。

5) 台風0310号と台風0416号来襲時の観測では、残留間隙水圧の平均的成分はなく、残留間隙水圧変動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0.4 kPa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2 kPa以下であり、上載構造物下の地盤では液状化が発生する可能性は極めて小さい。

本観測を実施するに当たり、国土交通省四国地方整備局高知港湾空港工事事務所の皆様には、大変お世話になったことに深く感謝申し上げます。

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.
- 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.
- Ishihara, K. and Yamazaki, A. (1984): Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp. 85-100.
- Kudella, M., Oumeraci, H. and de Groot, M.B. (2004): Wave-induced transient and residual pore pressure in the sand bed underneath a caisson breakwater: Processes leading to liquefaction -, *Proc. 29th ICCE, ASCE, Lisbon, Book of Abstract* pp. 106.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sands in a centrifuge, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp. 621-638.