

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

高山 知 司* ・ 佐々 真 志** ・ 水谷 雅 裕***
辻 尾 大 樹**** ・ 谷口 昇 太郎*****

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察を実施し、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年の台風10号を対象とし、水深15mの高知港の東第一防波堤サイトにおける自由地盤部及び防波堤基礎地盤部の深さ2m以浅において行った。その結果、防波堤直下の基礎地盤において残留間隙水圧の発生をとらえることにはじめて成功した。さらに、観測データの周波数スペクトル解析を実施し、残留間隙水圧の変動成分が波浪による水圧の長周期成分中の特定成分の影響を強く受けることがわかった。

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。その原因として筆者らは、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ている。地盤が液状化することによって支持力を失うと、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。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、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（善ら, 1989）。また、佐々ら（2003）は水深15mの高知港東第一防波堤サイトにおいて水圧と間隙水圧の応答観測を実施しているが、自由地盤内に限られている。

本研究では、砂質地盤上に建設された高知港東第一防波堤において、自由地盤と法先自由地盤、洗掘防止工下、消波ブロック下、ケーソン直下の5地点で、水圧と間隙水圧の系統的な観測を実施した。そして、台風0310号の通過時において海底地盤内の間隙水圧を観測した結果について述べる。

2. 間隙水圧の現地観測地点と観測方法

(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、中央粒径 $D_{50}=0.15\sim0.20$ mm の細砂主体の堆積砂層となっている。特に、No.1 サイトの地盤深さ2mまでは、 N 値が10未満の軟弱な緩詰め層であり、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、水圧計と間隙水圧計を用いて計測した。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、-2.00m）に間隙水圧計を設置した。また自由地盤上には Waves Observer（波浪計）を設置し、波高と周期、波向、平均流向・流速、平均水位の観測を行った。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

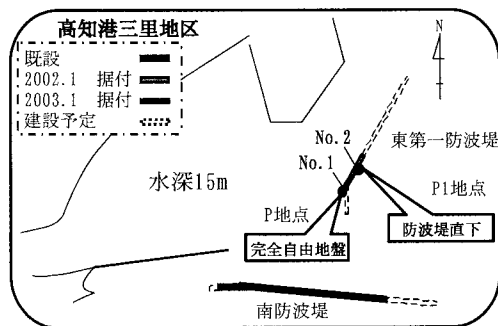


図-1 観測地点模式図

* フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所
** 正 会 員 博(工) (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
**** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
***** 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

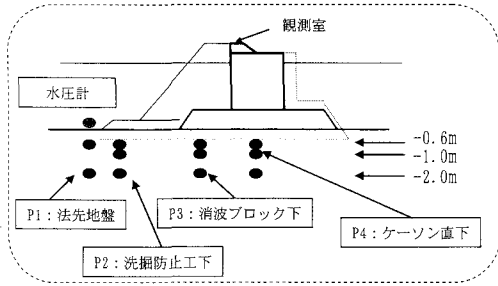


図-2 計器設置模式図

計(海象計)が設置してあった。P2とP3、P4地点においては、地盤内3深度(-0.6m, 1.00m, -2.00m)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に伝達される。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(50 Hz サンプリング)を可能としている。

3. 現地観測時の海気象条件と解析方法

(1) 現地観測時の台風条件と観測波浪の特性

今回の現地観測の対象となった台風0310号は、8月3日15時にフィリピンの東で発生し、図-3に示すように日本列島を縦断する進路をとり、最大中心気圧は950 hPaで、高知港に最も近づいた8日21時頃を中心気圧は955 hPaであった。本観測はこの台風0310号の接近にともなって、平成15年8月7日11時から8月11日8時の約4日間にわたって、連続的に実施した。高知港沖に設置した波高計(海象計)によって観測されたデータを図-4に示す。有義波高は8日16時頃におよそ10mでピークをむかえ、有義波周期は13s程度であった。そして、8日22時には波高4m以下となった。

また、4日間の連続計測において、P1地点の地盤表面上で計測された水圧変動の両振幅の時刻歴を図-5に示す。観測開始より波高は徐々に増大し、8日15時頃にピーク値(約54 kPa)を経た後、徐々に減少し、9日午前1時頃には20 kPa以下となった。

(2) 解析方法

観測データの特性を明らかにするために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

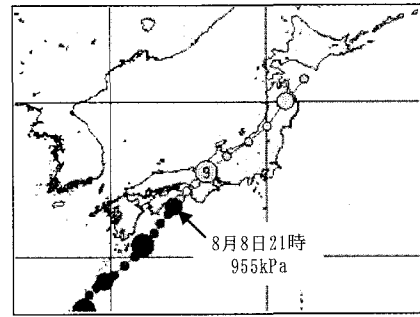


図-3 台風0310号の経路図

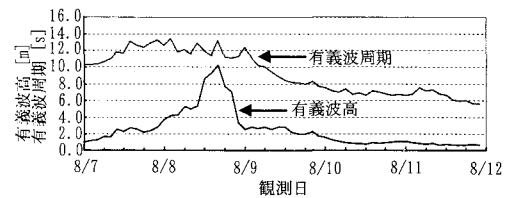


図-4 波高計(海象計)によって観測された波高、周期の時系列変化

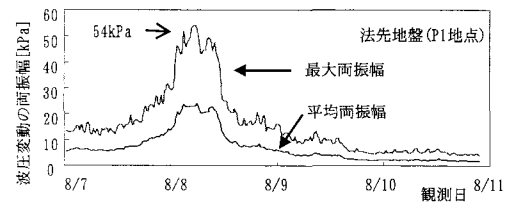


図-5 P1地点の水圧変動の最大と平均両振幅

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_{0c} 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_{0c} 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、 $(p_0 - p_{0c} - p_0^{(1)})$ で求まる。

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_{0c} + 長周期波成分 p_{0l})と振動成分 $p_e^{(1)}$ 、残留成分 $p_e^{(2)}$ が重なっていると見た。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 $(p_{0c} + p_{0l})$ と振動成分 $p_e^{(1)}$ を差し引いた成分 $(p_e - p_e^{(1)} - p_{0c} - p_{0l})$ である。

c) 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 $p_e^{(2)}/\sigma_{vo}$ の2種類である。

(3) 解析ケース

P2とP3, P4地点には水圧計を設置していないため、各地点での長周期の水圧変動成分 ($p_{0t} + p_{0i}$) が観測できない。そのため、これらの地点においては水圧変動成分を他のデータで代用する必要がある。以下の2つの方法で代表させて解析を行った。

a) Case A

P2とP3, P4地点の ($p_{0t} + p_{0i}$) としてP1地点の長周期水圧変動成分を用いる方法である。この方法では、各地点の3深度の情報を有効に活用することはできるが、P1地点とP2～P4地点の間に位相差が生じているために、位相差の影響を受ける結果となる。

b) Case B

P2とP3, P4地点の水圧変動成分として、各地点における-0.6mの間隙水圧データ p_e を用いる方法である。この方法では水圧長周期波成分 p_{0t} に位相差は生じない。しかし、水圧データとして用いる-0.6mの間隙水圧データ中の長周期波成分 p_{0t} には、-0.6mで発生した残留成分 $p_e^{(2)}$ が含まれているために、-1.0mと-2.0mの残留成分 ($p_e^{(2)} = p_e - p_e^{(1)} - p_{0t} - p_{0i}$) は実際に発生した値よりも過小評価されていることになる。また、各地点の情報は2深度のみとなる。

4. 解析結果とその考察

(1) 短周期変動特性

短周期成分として、間隙水圧の振動成分を用いた振動成分振幅比 $\bar{p}_e^{(1)}/\bar{p}_0^{(1)}$ を取り上げている。各地点の観測データを図-6に示す。図-6において振幅比が1を越えているのは、Case AではP2～P4地点の振動成分データをP1地点の水圧データで除しているため、重複波により波高が増幅されるP3とP4地点の振動成分の振幅がP1地点の水圧波浪成分の振幅より大きな値をとるためである。本図より、全地点において観測点が深くなるほど振幅比が小さくなり、深さ方向に減衰する傾向を示している。特にP3とP4地点では減衰傾向が大きくなっているが、これは消波ブロックやケーソンの直下に位置するため、土載荷重によって地盤が締固められたためと考えられる。ここでP3地点の振幅比について着目すると、観測開始直後には-0.6mで約1.5、-1.0mで約1.2、-2.0mで約0.4であり、深さ方向に対する振幅の減衰が見られる。しかし、その後、-0.6mと-1.0m

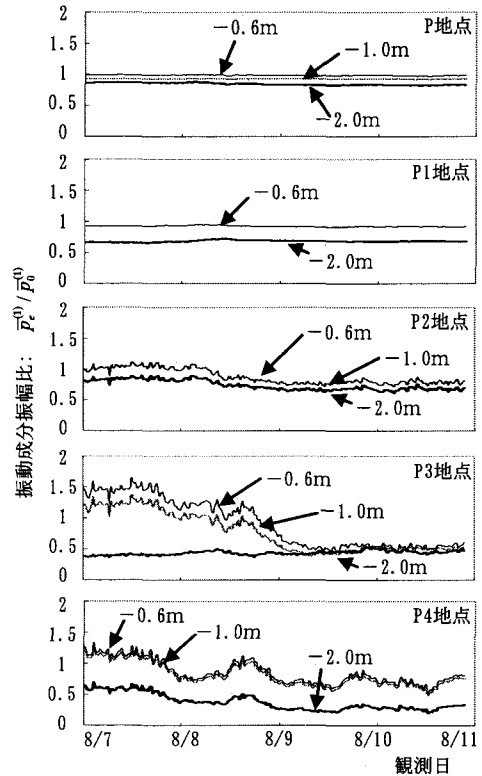


図-6 振動成分振幅比 (Case Aの方法)

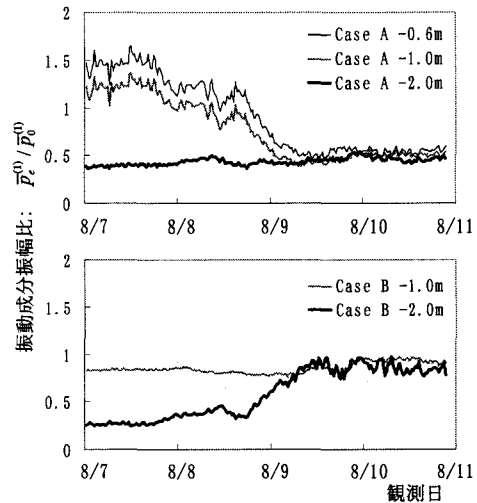


図-7 P3地点の振動成分振幅比

での振幅比の値は徐々に減少し、8月9日午前0時に-0.6mで1.2、-1.0mで1.0を記録した後、急激に減少し、9日16時以降は、3深度とも約0.5程度となり、深さ方向への減衰傾向は見られなくなった。さらに、図-7においてCase AとCase Bを比較すると、Case Aの長周期水圧変動成分にP1地点の値を用いていることを

考慮すると、 -0.6 m と -1.0 m の機器に何か変化が生じたのではないかと考えられる。しかし、台風0310号来襲前後のP3地点の3深度における計測値から、P3地点の計器が鉛直方向に移動していないことが判明している。このことから、観測機器周辺の土質状況に何らかの変化（例えば消波ブロックの不均一な沈下など）が生じた可能性がある。

(2) 長周期変動特性

間隙水圧の残留成分 $p_e^{(2)}$ の30分データを図-8に示す。図-8は8日19時30分前後30分間にP2地点 -0.6 m で観測された時系列データである。残留成分は40sのウィンドウで移動平均をとったものであるため、40s以上の周期を持つ長周期変動成分が含まれる。図-8の残留成分には、この長周期変動成分が表れている。また、残留間隙水圧の上昇に影響を与える外力要因は繰返しせん断応力であり、これは波浪作用によって地盤内に動員される。残留間隙水圧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 $p^{(1)}$ の包絡波形を算出した。P1地点 -0.6 m での観測データの代表1グループ(8月8日19時前後30分間)を取り上げ、残留間隙水圧成分の周波数スペクトルと上述の水圧波浪成分の振幅包絡波形の周波数スペクトルとを図-9において比較した。本図より、両者のピークはともに60s, 100s, 250sでほぼ一致していることがわかる。このことは、水圧波浪成分の包絡波形、つまり波群特性と残留間隙水圧特性との間に密接な関係があるということを示している。

ここで興味深いのは、振幅包絡波形と残留間隙水圧成分の周波数スペクトルの最大値の周期がそれぞれ250sと60sとで異なっているということである。振幅包絡波形の周波数スペクトルでは最大値は周期250sであり、周期60sでのピークより大きいものに対して、残留間隙水圧成分のスペクトルでは周期60sのピークが最大値で、周期250sのピーク値より大きくなっている。このことから、残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ 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。

また、残留間隙水圧成分における周期100s, 250sのピーク値は、周期60sのピーク値に比べオーダー的に見ても小さい。これは、残留間隙水圧変動成分の上に長周期の水圧変動成分($p_{oi} + p_{oi}$)の数パーセントが除去されず残っている可能性もある。このことから、残留間隙水圧の変動成分は、周期100sや250sの波浪に比べると周期60sの波浪に大きく影響されているといえよう。

以上のことから、比較的周期の長い波浪(ここでは周期100sあるいは250s)により繰返しせん断応力が地盤内に動員された場合、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、残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ が大

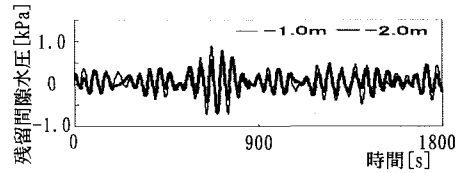


図-8 P2地点における残留間隙水圧(8月8日19時前後30分間)

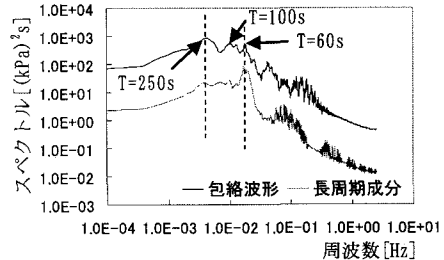


図-9 水圧波浪成分の包絡波形と残留間隙水圧成分の周波数スペクトル

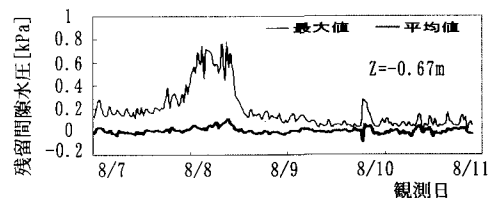


図-10 P地点 -0.67 m での残留間隙水圧の最大値と平均値

きく変動しないと考えられる。このことから、残留間隙水圧が影響を受けやすい特定の水圧波浪変動成分として、周期60s程度の波が考えられる。このことは、2002年に行った自由地盤での現地観測において、約60sの波群周期の影響が残留間隙水圧に現れていることから判断できる。

(3) 残留間隙水圧特性

P地点 -0.67 m における残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ の最大値と平均値の時刻歴を図-10に示す。図中の最大値と平均値は30分毎のグループにおける最大値と平均値を示している。最大値に関しては、観測開始約1.4日目(8日20時頃)にピーク値約0.8 kPaをとるが、平均値はほぼ0のままであまり変動していない。P地点の -1.0 m や -2.0 m 地点においてもピークの値が -0.67 m の地点よりわずかに小さいだけで、 -0.67 m での変動と大差のない変動が観測された。このことから、本観測では残留間隙水圧成分は数百波、数千波にわたり徐々に蓄積するといったようなものではなかった。

P1地点 -0.6 m 及び -2.0 m で観測された残留間隙水圧の最大値と平均値を図-11に示す。P1地点 -0.6 m については、残留間隙水圧が約1.2~1.4日目にか

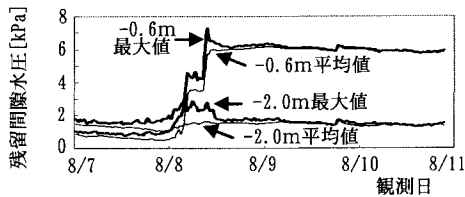


図-11 P1地点での残留間隙水圧の最大値と平均値

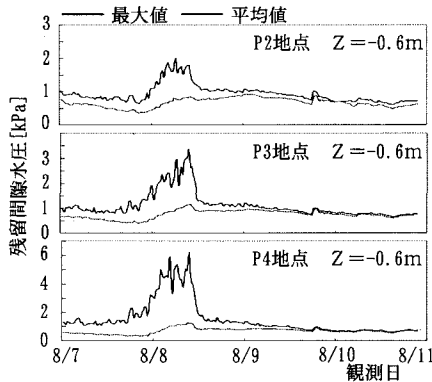


図-12 P2～P4地点-0.6mでの残留間隙水圧の最大値と平均値

て急激に上昇し、消散後も5 kPa程度生じている。これは、観測機器が鉛直下向に50 cm程度沈下していることを示している。また、-0.6 mの間隙水圧計における台風0310号来襲前後の計測値から、-0.6 mの計器が鉛直下向に移動したことを確認した。このように計器が沈下したことは、P1地点-0.6 mの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。一方、-2.0 mについては、平均値が1.5 kPa程度を維持しているが、平均値に大きな変化がないため、計器の沈下はなかったと言える。

P2とP3、P4地点における各-0.6 mで観測された残留間隙水圧の最大値と平均値を図-12に示す。各地点とも平均値が約0.5～0.8 kPaの値を維持しており、大きな変動は見られなかった。これらの値は深さ方向に換算すると約5 cm～8 cm程度であり、計器の鉛直方向の移動として十分考えられる範囲である。これは、P2～P4地点の他深度においても同様の傾向が見られた。また、P3とP4地点における最大値は、波高の増大過程ともに上昇し、ピーク値は他地点に比べて大きい値(P3地点-0.6 mで2.6 kPa、P4地点-0.6 mで5.6 kPa)をとるが、波浪消散後は残留間隙水圧も消散している。この2地点に関しては上載荷重が非常に大きいため、直下の地盤が締固められて地盤中の間隙が小さくなり、間隙からの排水が他地点に比べて少なくなったために、過剰間隙水圧の発生が大きくなったと考えられる。また、残留間隙水圧値が大きいかにも関わらず計器の移動や液状化

の可能性が見られないのは、上載荷重により有効応力が大きくなっているからである。また、台風0310号来襲前後の各計器の計測値から、P2とP3、P4地点では計器が鉛直方向に移動していないことを確認している。

5. おわりに

台風0310号にともない、2003年8月7日11時から8月11日8時までの4日間、高知港の東第一防波サイトに於いて水圧と間隙水圧の応答観測を実施した。本観測では、防波堤直下地盤内の残留間隙水圧の応答観測に成功しており、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) 台風0310号の来襲に伴って、法先自由地盤では液状化が発生した可能性がある。また、消波ブロック下では土質状況に何らかの変化が生じたと推測される。

2) 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、消波ブロック下やケーソン直下では他地点に比べると減衰が大きい。これは上載荷重による締固めの影響と考えられる。

3) 水圧波浪変動成分と、残留間隙水圧の長周期変動成分との間には密接な関係があり、残留間隙水圧は周期60秒程度の波に影響を受けやすいことが分かった。

4) 今回観測された残留間隙水圧は、数百波、数千波にわたり徐々に蓄積されたものではない。

5) 消波ブロック下とケーソン直下では、残留間隙水圧の最大値が他地点に比べて大きいにも関わらず、液状化はしていない。

本観測では、数百波、数千波による残留間隙水圧の蓄積は見られず、2002年に同サイトで実施した現地観測とは異なる解析結果となった。したがって、2002年の観測データとの比較により、残留間隙水圧を発生させる要因を検証する必要がある。

最後に、本観測を実施する当り、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多大なお世話になりましたことに対して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 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.
- 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.
- Sassa, S. and H. Sekiguchi (1999): Wave-induced liquefaction of beds of sands in a centrifuge, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 621-638.
- Sassa, S., T. Takayama, M. Mizutani and D. Tsujio (2004): Field observations of the build-up and dissipation of residual pore water pressures in seabed sands under the passage of storm waves, *Journal of Coastal Research, Special Issue* 39.