

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

佐々真志*・高山知司**・水谷雅裕***・辻尾大樹****

本研究では、実海域における海底砂質地盤の水圧/間隙水圧の系統的な応答観測を実施し、その観測データに基づき、高波浪が作用した場合の海底地盤表層のダイナミクスを明らかにすることを目的としている。観測は 2002 年の台風 9 号を対象として水深 15 m の高知港湾の東第一防波堤サイトにおける自由地盤部の深さ 2 m 以浅において行った。その結果、波高 2 m 以上の高波浪時の海底細砂地盤浅部において残留間隙水圧の発生と消散過程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および時系列での連成弾塑性有限要素解析を実施し、波群特性と残留間隙水圧の変動特性の間に、密接な相関関係があることを示した。

1. はじめに

暴波来襲の度に海岸構造物が基礎地盤内に沈込む問題が顕在化している。そのメカニズムとして筆者らは、海底地盤の液状化の可能性に着目している。一般的に波浪による地盤の液状化には、変動間隙水圧により波の谷近傍で生じる液状化（峰では安定化）と残留間隙水圧が蓄積することによる液状化の 2 種類がある。特に、残留間隙水圧による液状化は、砂の繰返し塑性（コントラクション）に起因するため非線形性が強い。実際、力学的相似性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しうる遠心力場波浪実験法の活用により、厳しい規則波浪による地盤液状化過程が明らかにされている（Sassa・Sekiguchi, 1999）。しかし、不規則な波群を何度も受けるような実海域の海底砂質地盤の応答観測については、比較的水深の浅い砕波帯で波高約 1 m 程度の場合に限られている（善ら, 1989 ; Fertui・Sills, 2000）。したがって、高波浪時における海底砂質地盤表層の動態については、未だ不明な点が多い。

本研究では、外洋に面して大波浪が来襲しうる水深 15 m の高知港湾の海底砂質地盤において、系統的な水圧/間隙水圧の応答観測を実施し、高波浪時の海底砂質地盤のダイナミクスを明らかにすることを目的としている。そして、波の不規則性や波群特性が残留間隙水圧の変動特性に与える影響も詳しく調べている。

本論文の構成は以下の通りである。先ず高波浪に対する海底砂質地盤の水圧/間隙水圧応答観測の方法と観測データの解析内容について述べる。そして、台風 9 号にともなう連続観測により得られた代表的な地盤応答特性を提示する。さらに、観測データの周波数スペクトル解析を通じて、波群特性と残留間隙水圧の変動特性の関係

を調べている。最後に、時系列の波群特性と現実的な細砂の繰返し塑性特性を考慮した応力・変形/浸透連成解析を実施し、高波浪による地盤液状化過程の検証を行った。

2. 高波浪に対する海底砂質地盤の水圧/間隙水圧の応答観測

(1) 観測地点の概要

観測地点は、高知港三里地区の東第一防波堤サイトである（図-1 参照）。東第一防波堤の施工は、2001 年から 2008 年にかけて毎年実施される。本観測では、図中 No. 1 の自由地盤を対象とした。当該地盤は、表層 4~5 m まで、平均粒径 $D_{50}=0.15\sim0.20$ mm の細砂主体の沖積砂層となっている。特に、地盤浅部 2 m 深さまでは、 N 値が 10 未満の軟弱な緩詰め層である。

さらに、防波堤沈下現象の解明を目的として、2003 年度から、上述の自由地盤の応答観測と合わせて、図中 No. 2 の防波堤直下の基礎地盤すなわちケーソン直下、消波ブロック下、マウンド下、及び法先の地盤における間隙水圧変動の連続観測を実施する予定である。

(2) 観測方法

自由地盤内 5 深度 (0.67 m, 1.00 m, 1.33 m, 1.67 m, 2.00 m) に間隙水圧計 (BP-C 型, 共和電業製)、また、地盤直上 0.5 m に波圧測定用の水圧計を設置した。計測信号は、海底多芯ケーブル (地盤内 5 点用) と波圧計用ケーブルを通じて、既設ケーソン上部工上に設置した観

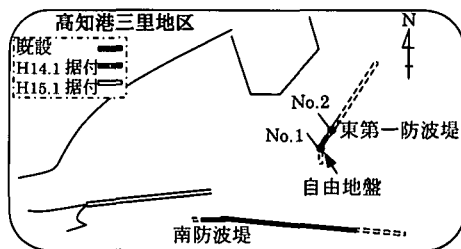


図-1 観測地点の模式図

* 正会員 博(工) 日本学術振興会特別研究員 京都大学防災研究所

** フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所

*** 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

測室内のデータロガーに記録される。計測の ON/OFF は、携帯電話を用いた無線制御とした。そして、有義波高 2 m 以上の高波浪時において、6 日間の連続観測 (50 Hz サンプルング) を可能としている。

海底地盤内の間隙水圧センサの設置方法に関しては、高波浪時の地盤の動態に可能な限り影響を及ぼさないように配慮した。具体的には、各センサを直径 25 mm のロックボルトにケーブルとともに結束し、かご状の鋼製保護カバー (3 m×3 m) から吊り下げられる形で設置した。直径約 1.5 m の同心円上に、地盤内 5 深度の計測アレイを分布させるとともに、円中心直上のカバー箇所に水圧計を結束した。保護カバー自体は、カバーの 4 辺上の鋼管杭 ($\phi=80$ mm) 8 本により地盤内に支持させている。

(3) 観測データの解析内容

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、(2)移動平均法による水圧及び間隙水圧データの成分分離、(3)パラメタの算出。生データは、30 分毎のデータにグループ化した。この際、サンプルング周波数は、50 Hz から 5 Hz に間引いている。

水圧データ p_0 は、波浪成分 $p_0^{(1)}$ と長周期波成分 p_{0L} 及び潮位変動成分 p_{0c} に分離している。潮位変動成分 p_{0c} は、周期 10 分よりも長周期側の成分、波浪成分 $p_0^{(1)}$ は、有義波周期の数倍 (40 秒) より短周期側の成分、長周期波成分 p_{0L} は、残りの成分 $p_0 - p_0^{(1)} - p_{0c}$ である。

間隙水圧データ p_e は、水圧長周期成分 (潮位変動成分 p_{0c} + 長周期波成分 p_{0L}) と振動成分 $p_e^{(1)}$ 及び残留成分 $p_e^{(2)}$ に分離している。振動成分 $p_e^{(1)}$ は、間隙水圧中の有義波周期の数倍 (40 秒) より短周期側の成分を表す。残留成分 $p_e^{(2)}$ は、過剰間隙水圧 p_e から水圧長周期成分ならびに振動成分 $p_e^{(1)}$ を引いた成分 $p_e - p_e^{(1)} - p_{0c} - p_{0L}$ に対応する。

観測データから算出したパラメタは、a) 振動成分振幅比: 地表面上における水圧変動の波浪成分 $p_0^{(1)}$ に対する、地盤内 5 深度における過剰間隙水圧の振動成分 $p_e^{(1)}$ の平均振幅比 $\bar{p}_e^{(1)}/\bar{p}_0^{(1)}$ と、b) 残留間隙水圧比: 地盤内 5 深度における過剰間隙水圧残留成分 $p_e^{(2)}$ の各グループごとの最大値及び平均値を、当該地点における有効土被り圧 σ'_{v0} で除した残留間隙水圧比 $p_e^{(2)}/\sigma'_{v0}$ の 2 種類である。

3. 観測結果

台風 9 号にともない 2002 年 7 月 24 日 11:30 分から 7 月 30 日 10:30 分まで、6 日間の連続観測を実施した。

台風 9 号は 7 月 20~27 日にかけて北西に進んだ台風である (図-2 参照)。本台風の最大中心気圧は 920 hPa であり、高知港に最接近した 7 月 25 日の中心気圧は 975 hPa であった。観測された水圧変動 p_0 と地盤深さ 0.67

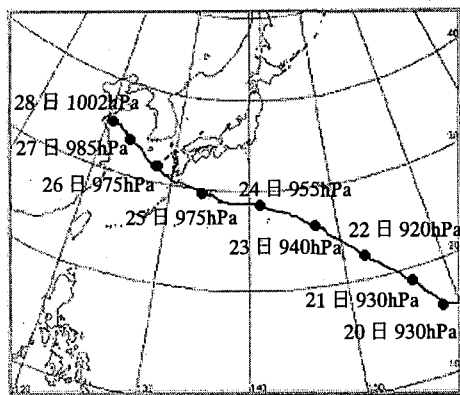


図-2 台風 9 号の経路図

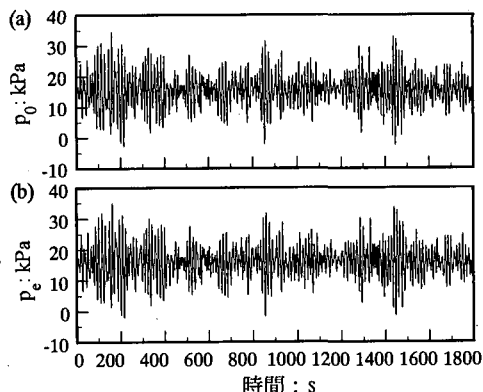


図-3 水圧/間隙水圧変動の生波形

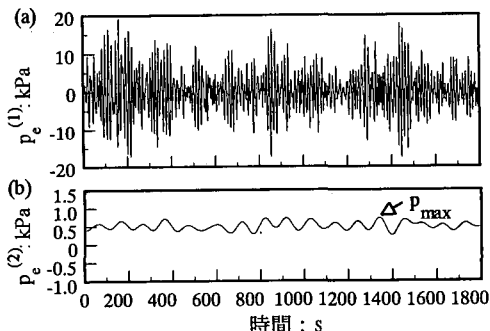


図-4 過剰間隙水圧の振動/残留成分の波形

m における間隙水圧変動 p_e の生波形例 (7 月 25 日 6 時 ~ 6 時 30 分のデータ) を図-3(a), (b) に示す。水圧/間隙水圧双方とも約 15 kPa を中心に大きく変動している。

図-3(b) に示した過剰間隙水圧の振動成分 $p_e^{(1)}$ と残留成分 $p_e^{(2)}$ の波形を図-4(a), (b) に示す。本図から、振動成分 $p_e^{(1)}$ の変動中心が 0 となっていることがわかる。残留成分 $p_e^{(2)}$ は、平均的に約 0.5 kPa 蓄積しており、その上に、数波レベルで変動する成分が重なっている。計測時

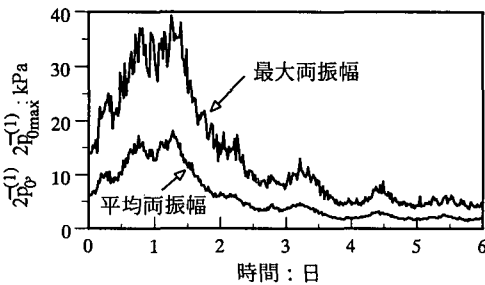


図-5 海底地盤直上における波圧変動振幅の時刻歴

間内の 1330 s においてピーク値 $p_{\max}=0.7 \text{ kPa}$ を得ている。

以下では、代表的な観測データ特性について述べる。

(1) 波圧変動特性

海底地盤直上で計測された水圧変動波浪成分 $p^{(1)}$ の各グループにおける最大及び平均両振幅の時刻歴を図-5 に示す。波圧変動の平均・最大両振幅とも観測開始直後より上昇し続け、1.3 日目までピーク値 39 kPa (波高約 4.2 m) を経た後、減少し、4 日目以降は最大両振幅にして約 5 kPa (波高約 0.6 m) となっている。

(2) 間隙水圧位相特性

地盤内 5 深度で計測された過剰間隙水圧 p_e の生波形を図-6 に示す。同図より、各深さとも、周期約 14 秒で変動していることがわかる。また、地盤内 5 深度における間隙水圧の位相は、ほぼ完全に一致している。したがって、当該地盤は、実質的に飽和状態にあると考えてよい。

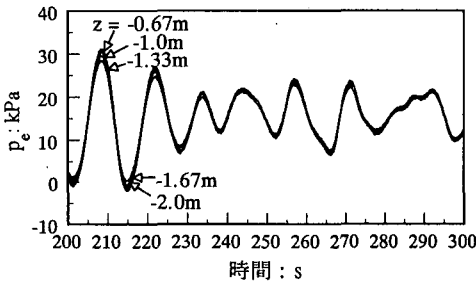


図-6 地盤内 5 深度における間隙水圧変動の生波形

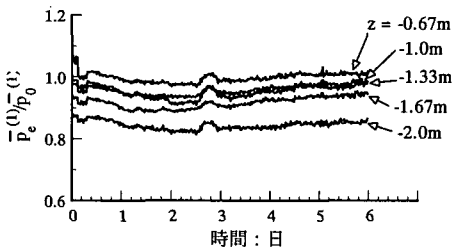


図-7 地盤内 5 深度における過剰間隙水圧の振動成分振幅比の時刻歴

(3) 間隙水圧振動特性

地盤内 5 深度で計測された過剰間隙水圧の振動成分振幅比 $\bar{p}_e^{(1)}/\bar{p}^{(1)}$ の時刻歴を図-7 に示す。地盤深さ 0.67 m より 2 m までの計 5 深度において、間隙水圧の振動成分は、深くなるにしたがって減衰していることがわかる。実際、地盤深さ 2 m では、約 85% の振幅比まで減衰している。

(4) 残留間隙水圧特性

地盤内 5 深度において計測された間隙水圧の残留成分 $p_e^{(2)}$ の時刻歴を図-8 に示す。図中の最大値は残留成分の各グループでのピーク値に、平均値は各グループでの平均値に対応している。本図より、地盤内 5 深度において、観測開始 0～2 日目の間に残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ が発生していることがわかる。すなわち、観測開始時点で各深度において $p_e^{(2)}$ は約 0.5 kPa 発生しており、その後、波高が増大するにつれて上昇し、観測開始約 1.2 日目 (波高約 4 m) でピーク値約 0.8 kPa を得ている。その後、消散を始め、観測開始 2 日目以降 (波高約 1.5 m 以下) になると実質的にゼロとなっている。

上述の観測結果は、厳しい波浪作用下において地盤最浅部の約 10 cm 深さが液状化状態にあったことに相当

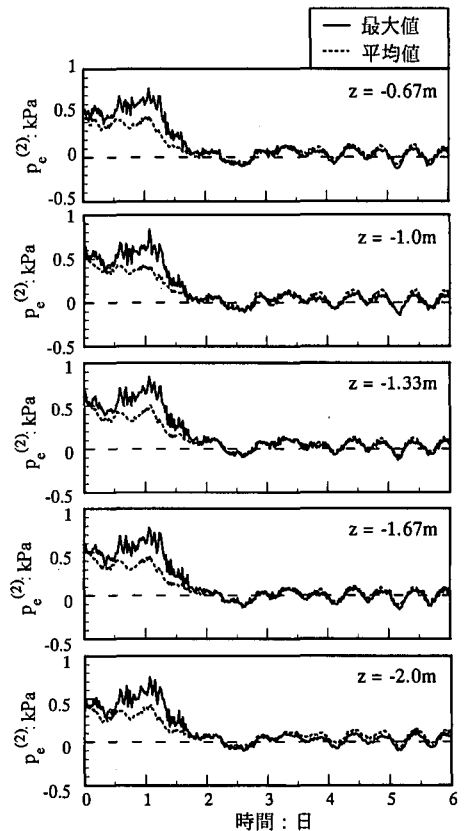


図-8 地盤内 5 深度における残留間隙水圧の時刻歴

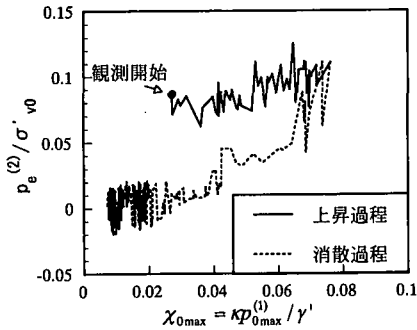


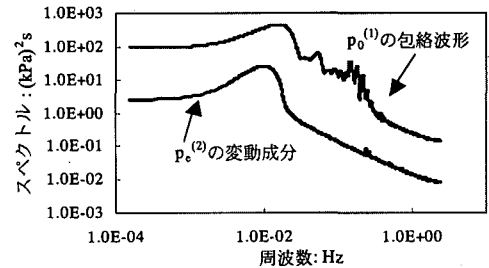
図-9 繰返し応力比と残留間隙水圧比の関係

している。地盤の液状化傾向に及ぼす波浪負荷の厳しさの影響を調べるために、地盤深さ 0.67 m における残留間隙水圧比 $p_e^{(2)}/\sigma'_{v0}$ と波浪負荷の厳しさの指標である繰返し応力比 $\chi_{0max} = \kappa p_{0max}^{(1)}/\gamma'$ の関係を図-9 にプロットした。ここに、 κ は波数、 γ' は地盤の有効単位体積重量である。観測開始より残留間隙水圧比 $p_e^{(2)}/\sigma'_{v0}$ は、繰返し応力比 χ_{0max} の増大とともに上昇過程に入り、 $\chi_{0max} \cong 0.07$ のときピーク値約 0.1 をとる。その後、消散過程に入るが、上昇過程より小さい値をとりながら減少する。これは、同じ繰返し応力比でも、継続した繰返しせん断を受けた地盤では、最大波高を経験する以前の地盤よりも砂の繰返し塑性特性が減少するためと考えられる。そして、 $\chi_{0max} \leq 0.02$ になると $p_e^{(2)}/\sigma'_{v0}$ 値はゼロまで消散している。

上述のような観測された繰返し応力比と残留間隙水圧比の関係 ($\chi_{0max} \cong 0.07$ に対して $p_e^{(2)}/\sigma'_{v0} \cong 0.1$) は、緩詰め細砂地盤に対する既往の遠心力場進行波負荷実験の結果 (Sassa・Sekiguchi, 1999) とも整合している。

4. 周波数スペクトル解析

本観測結果より、波高 2 m 以上の高波浪時の海底細砂地盤において残留間隙水圧が発生することを示した。この際、注目すべきことは、観測した残留間隙水圧には実海域波浪による不規則な繰返しせん断作用下において数百～数千波にわたって徐々に蓄積される平均的成分の上

図-11 $p_0^{(1)}$ -振幅包絡波形と $p_e^{(2)}$ -変動成分の周波数スペクトルの比較

に、数波レベルで変動する成分が約 20～30%程度重なっていることである (図-8 参照)。

上述のような数波レベルの残留間隙水圧の変動特性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、水圧変動波浪成分 $p_0^{(1)}$ の代表 1 グループ (7 月 25 日 9 時～9 時 30 分) を取上げて図-10 に示すように $p_0^{(1)}$ の振幅包絡波形を算出した。観測された $p_0^{(1)}$ 変動と算出した振幅包絡波形は概ね合致している。対応する残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ の変動成分の周波数スペクトルと上述の $p_0^{(1)}$ -包絡波形の周波数スペクトルを図-11 において比較した。本図より、両者の周波数スペクトルの形状は、ほぼ相似形となっていることがわかる。したがって、波群特性と残留間隙水圧の変動特性の間には、スペクトルの観点から密接な関係があるといえよう。

5. 連成弾塑性有限要素解析

本観測により得られた残留間隙水圧挙動の妥当性をより詳しく検証するために、現実的な細砂の繰返し塑性特性を考慮できる弾塑性有限要素解析コード (Sassa・Sekiguchi, 2001) による平面ひずみ条件下の応力・変形/浸透連成解析を行った。解析に用いた細砂の構成パラメタの決定に際しては、Leighton Buzzard 砂 ($D_{50} = 0.15$ mm) に対する構成パラメタ (Sassa・Sekiguchi, 2001) を参照した。波浪負荷前の地盤の静止土圧係数 K_0 値は 0.75 とした。また、観測地点の細砂 ($D_{50} = 0.15 \sim 0.20$ mm) の透水係数値は、Leighton Buzzard 砂に対する透水係数値 0.15 mm/s を参考に、0.20 mm/s を用いた。解

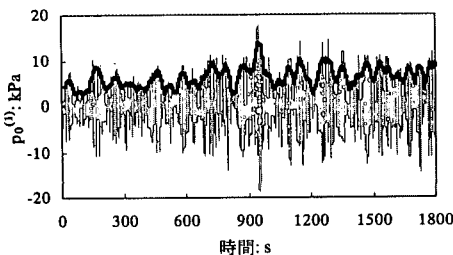
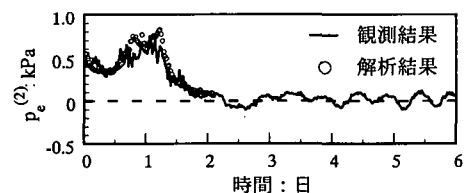
図-10 波群特性としての $p_0^{(1)}$ の振幅包絡波形

図-12 連成弾塑性有限要素解析の結果と観測結果の比較

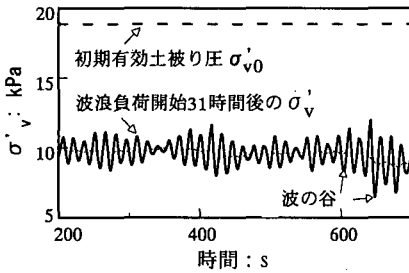


図-13 暴波来襲(波高5 m以上)を仮定した際の有効応力変動の連成弾塑性解析結果

析対象の地盤領域は、幅90 m深さ40 mとし、150有限要素に分割した。波浪負荷に際しては、観測した水圧変動波浪成分の時系列の振幅包絡波形 $\bar{p}^{(1)}(t)$ を用いて代表周期14 s、波長160 mの波圧変動 $\bar{p}^{(1)} = \bar{p}^{(1)}(t) \sin(kx - \omega t)$ を地盤表面に負荷した。

地盤深さ2 mの地点における残留間隙水圧変動の時刻歴の予測結果と対応する観測結果を図-12に示す。本図より、解析結果は観測結果の特徴を良好に再現できている。

上述の結果を受けて、より厳しい波浪作用下における地盤液状化過程を検証するために、波高5 m以上の暴波来襲の条件下における弾塑性有限要素解析を行った。具体的には、上述の解析で用いた波圧変動の1.5倍の厳しさに対応する負荷を地盤に与えた。波浪負荷開始31時間後の地盤深さ2 mの地点における有効応力変動の解析結果を図-13に示している。

地盤内の有効応力値 σ_v' は、初期土被り圧 σ_{v0}' に比べて、残留間隙水圧の蓄積により著しく低下していることがわかる。さらに、地盤の有効応力は、厳しい不規則な波浪作用下において、波の谷に対応する位相で小さくなっている。以上のことは、厳しい実海域波浪による緩詰め細砂地盤の液状化過程においては、変動間隙水圧により波の谷で生じる有効応力の減少に比べて、残留間隙水圧の蓄積による支持力低下が支配的となりうることを示している。

6. まとめ

台風9号にともない、2002年7月24日11:30分から7月30日10:30分までの6日間、高知港湾の海底細砂地盤において、水圧/間隙水圧の連続観測を実施した。本観測により得られた主要な知見を以下にまとめる。

(a) 波高2 m以上の高波浪時の海底細砂地盤において、残留間隙水圧の発生と消散過程をとらえることにはじめて成功した。(b) 地盤内の残留間隙水圧は、波高が増大するにつれて上昇し、ピークに達する。そして、波高約1.5 m以下になると、残留間隙水圧は実質的にゼロにまで消散した。(c) 観測した繰返し応力比 χ_0 と残留間隙水圧比 $p_e^{(2)}/\sigma_{v0}'$ の関係 ($\chi_{0\max} \cong 0.07$ に対して $p_e^{(2)}/\sigma_{v0}' \cong 0.1$) は、これまでの緩詰め細砂地盤に対する遠心力場進行波負荷実験の結果とも整合した。(d) 観測した残留間隙水圧には、波群による不規則な繰返しせん断作用の下で、数千波にわたり徐々に蓄積するような平均的な成分の上に数波レベルで変動する成分が重なっている。

観測データの周波数スペクトル解析によると、波群特性と残留間隙水圧の変動特性の間には密接な相関関係があることがわかった。

時系列の波群特性と細砂の現実的な繰返し塑性を考慮した連成弾塑性有限要素解析により、波高5 m以上の暴波来襲を仮定すると、残留間隙水圧の上昇は、変動間隙水圧により波の谷で生じる有効応力の減少に比べて、地盤の支持力低下により大きく寄与することを示した。

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, 28巻, 3号, pp. 29-57.
- Fergui, O. and G. C. Sills (2000): Seabed measurements on a model breakwater in Porthcawl, University of Oxford, Department of Engineering Report, Sep.
- 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. and H. Sekiguchi (2001): Analysis of wave-induced liquefaction of sand beds, Geotechnique, Vol. 51, No. 2, pp. 115-126.