

波による海底地盤の液状化に関する調査研究

Study of Wave-induced Liquefaction of Seabed

増山琢也*

MASUYAMA Takuya

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

It's sometimes reported that under the sever wave conditions, breakwatre's caissons are damaged by impulsive breaking wave forces mainly caused by settling of wave dissipating concrete blocks. The settlement of breakwaters in seabed sands due to severe wave loading is one of the long-standing problems, calling for closer examination on the mechanism of wave-induced seabed instability. We performed systematic field measurements of the changes of pore water pressures in a bed of fine-grained sands at Higashi Daiichi Breakwater site of Kochi port under the passage of storm waves generated by Typhoon No. 9 in 2002. The present paper describes the field observations to investigate the liquefaction process at the toe of breakwater slope paying attention to the measured pore water pressure distributions.

Key Words : liquefaction, breakwater, seabed

1. はじめに

大波浪が来襲する港湾域に設置された防波堤等において、消波ブロック等が沈下しており、ケーソンへの衝撃砕破力の発生や、消波ブロックの沈下に伴うケーソン側壁の損傷等の被害が見られることから、原因の検討および対策が必要とされている。沈下の原因は、防波堤前面が波浪により洗掘される、あるいは消波ブロック設置マウンドの砂の吸出しの可能性が指摘されているが、海底地盤の液状化の可能性も指摘されている。

本論文は、高波浪来襲の頻度が高い太平洋に面する高知港東第一防波堤において実施した現地観測の結果と今後検討すべき項目についてまとめたものである。

2. 現地観測の概要

本年度の調査フローを図-1 に示す。

調査内容は、I. 沈下原因の検討とII. 沈下被害の把握に大別できる。Iは海底地盤の液状化の有無を把握することを目的に、現地海底地盤に水圧計・間隙水圧計を設置し、大波浪来襲時の海底地盤の挙動を計測し、液状化の可能性およびそのメカニズムを把握するものである。IIは防波堤断面、法先の洗掘状況、消波ブロックの沈下状況等を計測し、大波浪来襲前後の断面変化を把握するものである。最終的に、両者の検討結果より液状化と沈下現象の関連を解明し、液状化による被災予測およびその対策の立案を行うものである。

図-2 に計器設置位置図を示す。平成14年度は、防波堤近傍(以下「自由地盤部」)の計測を行った。防波堤直下については、平成14年度のケーソン据付工事に合わせ平成14年12月に計器を設置したため、計測は平

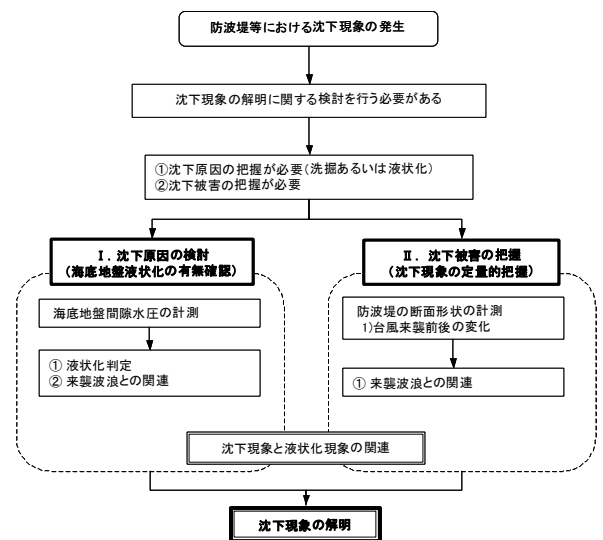


図-1 調査フロー

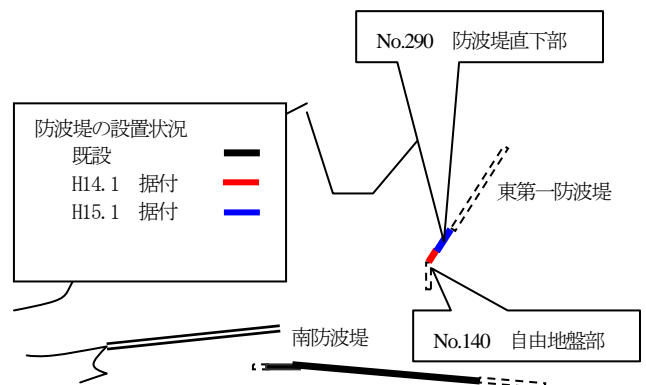


図-2 計器設置位置図

成15年度から行う予定である。計器設置状況の詳細を図-3 に示す。

平成14年度は、自由地盤のみの計測を行い、水圧計および深さ方向に6深度の間隙水圧計を設置し、7chの計測を行った。平成15年度以降は、防波堤直下での観測も行うため、自由地盤の間隙水圧計のうち3深度のものはスイッチボックスから外し、自由地盤3深度、防波堤直下もそれぞれ3深度（法先のみ2深度）および自由地盤と防波堤直下断面の水圧計各1箇所の計16chの計測を行う予定である。

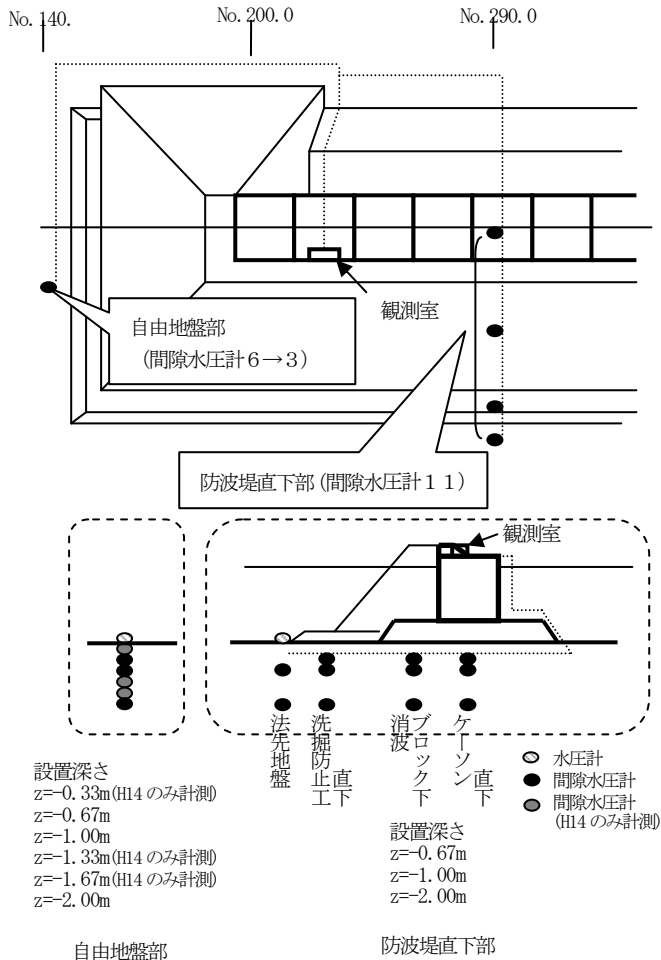


図-3 計器設置状況

3. 計測結果とデータ解析結果

3.1 データ一次処理

計測した水圧の生データには、①潮位変動成分 p_{01} 、②長周期波成分 P_{01} 、③波浪成分 $p_0^{(1)}$ が含まれているため、潮位変動成分は周期10分よりも長周期側の成分、波浪成分は有義波の数倍（40秒）より短周期側の成分とし、長周期波成分は水圧データより潮位変動成分と波浪成分を引いた残りの成分として分離した。

一方、取得した間隙水圧の生データには、①潮位変動成分 p_{01} 、②長周期波成分 P_{01} 、③波浪成分 $p_0^{(1)}$ 、④残留間

隙水圧成分 $p_e^{(2)}$ が含まれているため、潮位変動成分および長周期波成分は水圧データから求めた成分とし、波浪成分は有義波の数倍（40秒）より短周期側の成分とし、間隙水圧データより潮位変動成分、長周期波成分および波浪成分を引いた残りを残留間隙水圧成分として分離した。

なお、計測した6深度のうち最浅部 ($z = -0.33\text{m}$) のデータにはノイズが含まれていたため、これを除外した5深度のデータを対象に検討を行った。

平成14年台風9号来襲時の水圧および間隙水圧データを図-4に、分離した間隙水圧の振動成分および残留間隙水圧を図-5に示す。

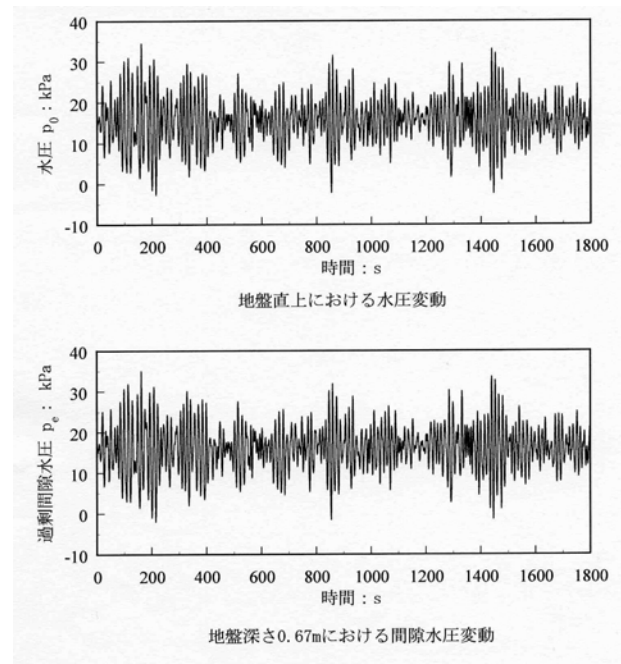


図-4 平成14年9号台風時の水圧・間隙水圧データ

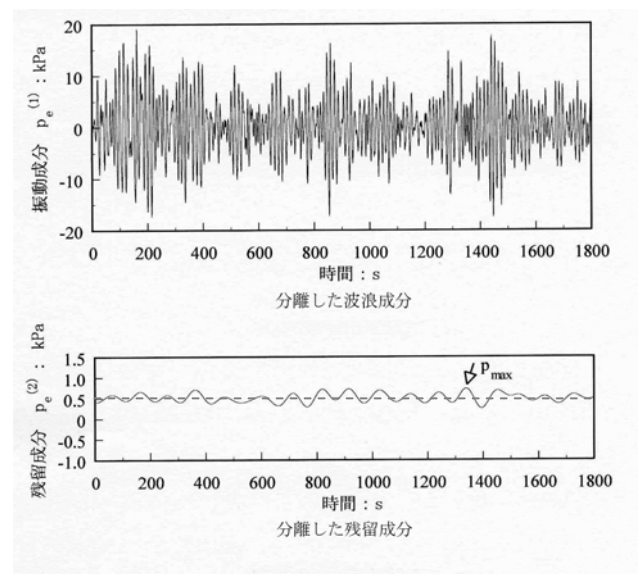


図-5 分離した波浪成分・残留成分

水圧・間隙水圧とも約 15kPa を中心に大きく変動しており、間隙水圧の波浪成分は 0kPa を中心とした変動をしており、残留成分は平均的に 0.5kPa 蓄積していることが判る。

3.2 データ解析結果

取得したデータを解析するにあたり以下のパラメータを設定した。

- ① 振動成分振幅比：海底面における水圧の波浪成分 $p_0^{(1)}$ に対する各深度における間隙水圧の波浪成分 $p_e^{(1)}$ の平均振幅比 $(= \overline{p_e^{(1)}} / \overline{p_0^{(1)}})$
- ② 残留間隙水圧比：各深度における間隙水圧残留成分 $p_e^{(2)}$ の各グループ毎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'_{vo} で除した残留間隙水圧比 $(= p_e^{(2)} / \sigma'_{vo})$

これらのパラメータを用い、取得したデータを基に、各々の特性について解析を行った。

1) 水圧変動特性

水圧の波浪成分 $p_0^{(1)}$ の最大及び平均両振幅の時刻歴を図-6 に示す。水圧変動は、平均・最大両振幅とも観測開始直後より上昇し、最大両振幅は 1.3 日でピーク値 39kPa (波高約 4.2m) を経た後減少し、4 日目以降は最大両振幅で約 5kPa (波高約 0.6m) に収束している。

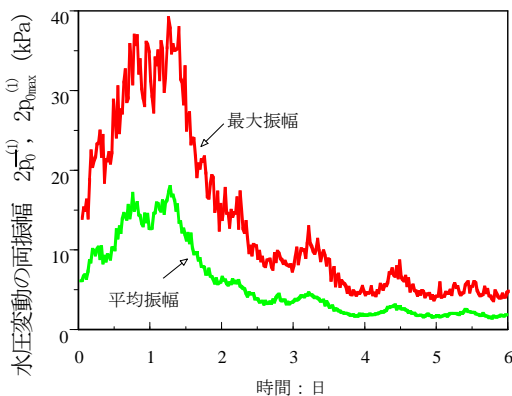


図-6 海底地盤直上における水圧変動振幅の時刻歴

2) 間隙水圧位相特性

地盤内 5 深度で計測された間隙水圧 p_e の生データを図-7 に示す。各深さとも周期約 14 秒で変動していることが判る。また、各深度の位相もほぼ一致していることから、当該地盤は実質的に飽和状態にあると考えられる。

3) 間隙水圧振動特性

地盤内 5 深度で計測された間隙水圧の振動成分振幅比 $p_e^{(1)} / p_0^{(1)}$ の時刻歴を図-8 に示す。振動成分は深さ方向に減衰しており、深さ 2.0m で約 85% の振幅比まで減衰していることが確認できた。

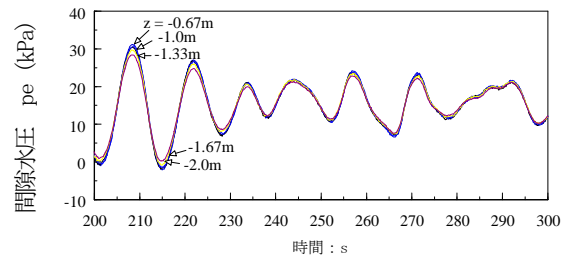


図-7 地盤内 5 深度における間隙水圧変動の生波形 (2002 年 7 月 25 日 6 時~6 時 30 分のデータ)

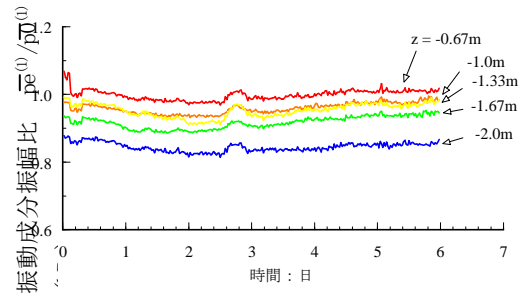


図-8 過剰間隙水圧振動成分の振幅比 (z: 海底面から上方を正で表示)

4) 残留間隙水圧特性

図-9 に -0.67m における間隙水圧の残留成分 $p_e^{(2)}$ の時刻歴を示す。観測開始時点で約 0.5kPa の残留間隙水圧 $p_e^{(2)}$ が発生しており、その後、波高が増大するにつれて上昇し、観測開始 1.2 日目でピーク値約 0.8kPa を記録した後消散し始め、観測開始 2 日目以降には実質 0 となっている。

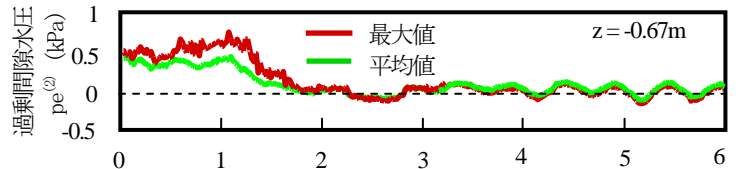


図-9 過剰間隙水圧の時刻歴

この結果は、厳しい波浪作用下において、地盤最浅部の約 10cm が液状化状態にあったことに相当している。そこで、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、地盤深さ 0.67m における残留間隙水圧比 $p_e^{(2)} / \sigma'_{vo}$ と波浪負荷の厳しさの指標である繰返し応力比 $\chi_{0max} = \kappa p_0^{(1)max} / \gamma'$ の関係をプロットした結果を図-10 に示す。

観測開始より残留間隙水圧比 $p_e^{(2)} / \sigma'_{vo}$ は、繰り返し応力比 χ_{0max} の増大とともに上昇過程に入り、 $\chi_{0max} \doteq 0.07$ の時ピーク値約 0.1 に達する。その後、消散過程に入るが、上昇過程より小さい値を取りながら減少する。これは、同じ繰り返し応力比でも、継続して繰り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り返し塑性特性

が減少するためと考えられる。 $\alpha_{0max} \leq 0.02$ で $p_e^{(2)}/\sigma'_{vo}$ 値は0まで消散している。

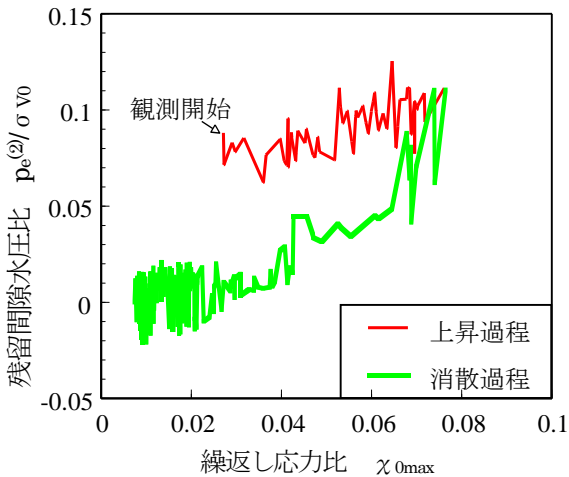


図-10 繰返し応力比と残留間隙水圧比

3.3 波浪特性

観測した水圧は、圧力変化しか捉えておらず、波向きは把握できないため、国土交通省港湾局が設置した高知港（桂浜）波浪観測機器（海象計）（以下「高知海象計」）の波浪データを基に波浪変形解析を行い波向きについて検討を行った。

図-11に高知海象計位置図を、図-12に平成14年台風9号来襲時の高知海象計の波向きと観測位置での波向きの推定値を示す。海象計位置ではS～SSEの波が来襲しているが、観測位置ではほぼSSEの波が来ている。

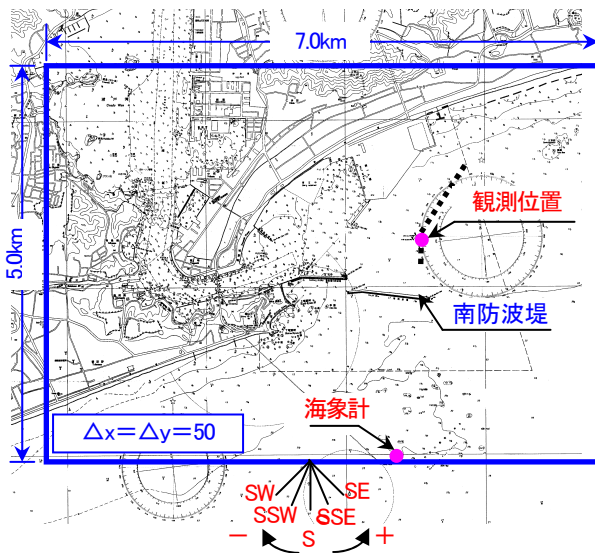


図-11 海象計位置と変形計算領域

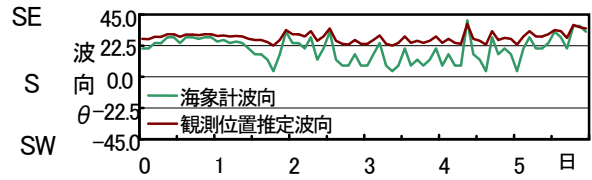


図-12 海象計と観測位置の平均波向

観測位置の南側には南防波堤が設置されており、SW～Sの波は南防波堤により遮断される。また、S～SEの波が来襲しても南防波堤により波が回折し、東よりの波向きとなる。平成15年度には、間隙水圧の蓄積・消散過程のシミュレーションを行う予定であるが、波の来襲状況を把握するには、高知海象計のみでは、詳細な波浪状況を把握することは困難であるため、平成15年度には自由地盤近傍に新たに海象計を設置し、現地の波浪状況を観測することとした。

4. 今後の予定

平成14年度は、自由地盤での水圧・間隙水圧の観測を行い、上載荷重のない地盤の液状化について検討を行った。その結果、高波浪来襲による過剰間隙水圧の発生と消散過程を捉えることに成功するとともに、海底地盤の浅部で液状化している可能性について把握することができた。

平成15年度は、自由地盤に加え、防波堤直下の間隙水圧も観測するとともに、大波浪来襲による断面変状を把握するために、①マルチソナーによる先部深浅測量、②水圧計による消波ブロックマウンドの沈下状況の測定、③写真撮影による消波ブロックの沈下状況の調査を行う。

平成15年度は、得られたデータを基に数値シミュレーションを実施し、海底地盤の液状化のメカニズムを把握するとともに、大波浪来襲時の断面変状についても検討を行い、それらを再現する数値シミュレーション手法を開発し、液状化による被災予測を行う予定である。

謝辞：

本論文は、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発注の「海底地盤液状化に関する調査検討業務」の検討結果についてまとめたものである。検討事項については、「海底地盤液状化に関する調査委員会（委員長：高山知司 京都大学防災研究所水災害分門教授）」においてご助言、ご指導を頂いた。ここに記して心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐々真志他：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，2003。

