

波浪による海底砂質地盤の液状化に関する実海域観測

国土交通省四国地方整備局 正会員 小田幸伸
 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 正会員 水谷雅裕
 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 ○佐野正佳
 京都大学防災研究所 正会員 佐々真志
 京都大学防災研究所 フェロー 高山知司

1. はじめに

暴波来襲に起因した海岸構造物の沈下現象が顕在化しているが、その沈下原因として高波作用による地盤液状化の可能性が指摘されている。これまで、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を用いて厳しい規則波浪に対する地盤液状化特性が明らかにされてきた (Sassa & Sekiguchi, 1999)。しかし、実海域における砂質地盤の応答観測は比較的水深の浅い 5m 以下の碎波帯で波高約 1m 程度の場合に限られており、高波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。そこで、本研究では、大波浪が来襲しうる水深 15m の高知港湾において海底地盤の水圧/間隙水圧の系統的な応答観測を実施し、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、波の波群特性が間隙水圧の変動特性に与える影響も詳しく調べている。

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

2.1 観測内容

本観測は、高知港三里地区東第一防波堤サイトで実施している。当サイトでは、地盤表層 4~5m は細砂主体の沖積砂層であり、特に、地盤深さ 2m までは N 値が 10 程度の軟弱な緩詰め層となっている。したがって、夏の台風時に来襲する波高 6~8m の高波作用下において、液状化発生の可能性が高いと考えられる。本観測では、自由地盤を対象としており、観測地点には、地盤内 6 深度 (0.33m, 0.67m, 1.00m, 1.33m, 1.67m, 2.00m) に間隙水圧計を、地盤直上 0.5m に波圧測定用の水圧計を設置している。そして、有義波高 2m 以上の荒波浪時において、6 日間の連続計測 (50Hz サンプリング) を可能とした。また、防波堤沈下現象のメカニズム解明を目的として、平成 15 年の夏より上述の自由地盤の応答観測と合わせて、防波堤直下の基礎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。

2.2 観測データ解析内容

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とおりである。(1) データのグループ化—生データを、毎正時+30 分を中心前後 15 分ずつの 30 分ごとのデータにグループ化。この際、サンプリング周波数を、50Hz から 5Hz に間引く。(2) 水圧データ p_0 の成分分離—①潮位変動成分 p_{0t} : 周期 10 分長周期側の成分, ②波浪成分 $p_0^{(1)}$: 有義波周期の数倍 (40s と 80s の 2 種類) より短周期成分, ③長周期波成分 p_{01} : 残りの成分 ($p_0 - p_{0t} - p_0^{(1)}$)。 (3) 間隙水圧データ p_e の成分分離—①水圧変動成分: 潮位変動成分 p_{0t} +長周期波成分 p_{01} , ②振動成分 $p_e^{(1)}$: 間隙水圧中の有義波周期の数倍 (40s と 80s の 2 種類) より短周期側成分, ③残留成分 $p_e^{(2)}$: 残りの成分 ($p_e - p_e^{(1)} - p_{0t} - p_{01}$)。 (4) パラメタの算出—①振動成分振幅比: 水圧変動の波浪成分 $p_0^{(1)}$ に対する過剰間隙水圧の振動成分 $p_e^{(1)}$ の平均振幅比 $\bar{p}_e^{(1)} / \bar{p}_0^{(1)}$ 。 ②残留間隙水圧比: 過剰間隙水圧の残留成分の各グループにおける最大値及び平均値の当該地盤の有効土被り圧 σ'_{v0} に対する比 $p_e^{(2)} / \sigma'_{v0}$ 。

3. 観測結果

台風 9 号にともない平成 14 年 7 月 24 日 11:30 より 7 月 30 日 10:30 まで、6 日間の連続観測を実施した。代表的な観測データ特性について以下に記す。

(1) **波圧変動特性**: 本観測で計測された水圧変動波浪成分の両振幅の時刻歴を図 1 に示すと、波圧変動の平均・

最大両振幅とも観測直後より上昇し続け、1.3日目でピーク値 39kPa(波高約 4.2m)を経た後、減少し、4日目に降は最大両振幅にして 5kPa(波高約 0.6m)となっている。

(2) 残留間隙水圧特性：本観測で計測された地盤深さ 0.67m における間隙水圧の残留成分の時刻歴を図 2 に示す。図中の最大値は周期 40s で間隙水圧の振動成分を除去して得られた残留成分の各グループのピーク値に、平均値は各グループでの平均値に対応している。観測開始から約 2 日目の間に残留間隙水圧が発生しており、観測開始から波高が増大するにつれて上昇し、観測開始約 1.2 日目でピーク値約 0.8kPa(波高約 4m)を示している。その後、消散し、観測開始 2 日目以降は実質的にゼロとなっている。次に、残留間隙水圧の各グループでの最大値を当該地点における有効土被り圧で除した残留間隙水圧比 $p_e^{(2)} / \sigma'_{v0}$ と波浪負荷の厳しさを示す指標である繰返し応力比 $\chi_{0max} = \kappa p_{0max}^{(1)} / \gamma'$ の関係を図 3 に示す(κ :波数, γ' :地盤の有効単位体積重量)。観測開始より残留間隙水圧比は、繰返し応力比の増大とともに上昇過程に入り、繰返し応力比が約 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。また、観測した繰返し応力比 ($\chi_{0max} \cong 0.07$) に対する残留間隙水圧比 ($p_e^{(2)} / \sigma'_{v0} \cong 0.1$) の関係は、遠心力場波浪負荷実験の結果 (Sassa & Sekiguchi, 1999) とも整合する結果となっている。

4. 考察

本観測により、波高 2m 以上の高波浪時の海底砂質地盤において残留間隙水圧が発生することを明らかにした。この際、注目すべきことは、残留間隙水圧には波浪による不規則な繰返しせん断作用下で数百から数千波で徐々に蓄積される平均的成分の上に、数波レベルで変動する成分が 20~30% 程度重なっていることである。数波レベルの波群特性と残留間隙水圧の変動特性を詳しく調べるために、波群特性として波圧振幅の包絡波形とり、両者の関係を調べると、時系列データによる有意な相関は見られない。そこで、本研究では周波数スペクトル解析を行った。結果を図 4 に示すとスペクトルの形状が極めて似通っていることに加え、ピーク値についても 10^2 のオーダーで一致しているといえる。したがって、残留間隙水圧の変動成分と波群特性の間にはスペクトル的相関が見られ、数波レベルでの残留間隙水圧の変動と水圧波浪成分の変動の間には密接な相関関係があるといえる。

5. おわりに

台風 9 号にともなう高知港湾における水圧/間隙水圧の変動観測を通じて、得られた主要な知見をまとめると、波高 2m 以上の高波浪時の海底砂質地盤において残留間隙水圧は発生し、波高が増大するにつれて上昇して、ピークに達する。そして、波高約 1.5m 以下になると、残留間隙水圧は実質的にゼロにまで消散する。観測した繰返し応力比と残留間隙水圧比の関係は、これまでの実験的研究とも整合するものであった。また、波群特性と残留間隙水圧の変動特性の間には、密接な関係があることがわかった。

参考文献 Sassa, S. and Sekiguchi, H.: Wave-induced liquefaction of beds of sands in a centrifuge, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 621~638, 1999.

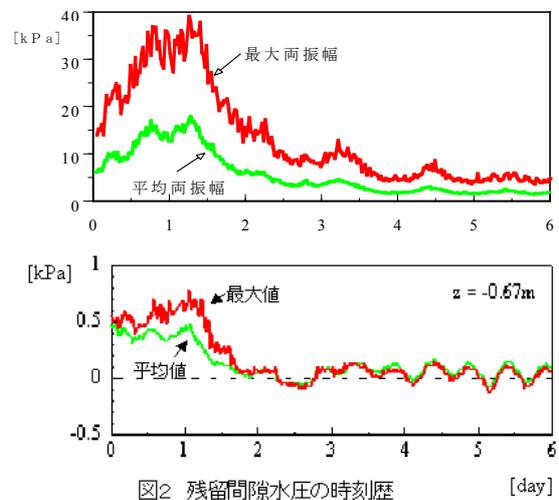


図2 残留間隙水圧の時刻歴 [day]

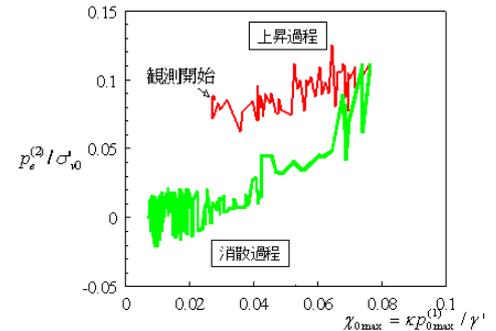


図3 繰返し応力比と残留間隙水圧比

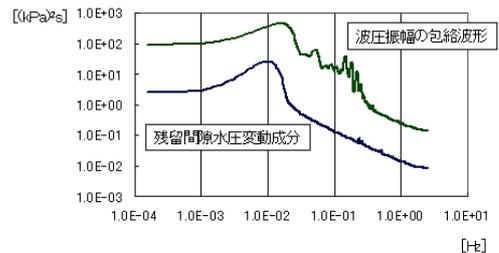


図4 波圧振幅の包絡波形と残留間隙水圧変動成分の周波数スペクトル