# 日本沿岸の観測波浪を用いた液状化の危険度評価

東洋建設(株)	正会員	○宮本	順司
港湾空港技術研究所	正会員	佐々	真志

#### 1. はじめに

今後,海洋構造物の建設が増加する中で,構造物の基礎となる海底地盤の安定性問題が重要性を増している. 筆者らは、これまで厳しい波により砂地盤が残留間隙水圧の上昇により液状化することを遠心力場の波浪実 験により明らかにしてきた<sup>1)</sup>.また、波による地盤液状化過程を解析モデルにより再現している<sup>2)3)</sup>.しかし これまでは、観測波に対しての地盤応答を評価していない.本研究では、実海域で観測された暴波に対する地 盤液状化リスクを評価するとともに、詳細評価として暴浪時の過剰間隙水圧応答を予測した例を示す.

#### 2. 液状化リスクの評価

全国港湾海洋性波浪観測年報(ナウファス)<sup>4)-6)</sup>に示されている3年間の 観測地点(沖合の観測点を除いた 60 地点)の年最大有義波 H<sub>1/3</sub> および対応 最高波 H<sub>max</sub>を用いて,各地点の液状化の危険度を評価した.評価フローを図 -1 に示す.観測された波高 H と周期 T,観測地点の水深 h より微小振幅波 理論を用いて,地表面に作用する波圧振幅 uo 求め,次式で,地盤に作用す る繰返しせん断応力比 χ<sub>0</sub>を求める.

$$\chi_0 = \left(\frac{\tau}{\sigma'_{\nu_0}}\right)_{z=0} = \frac{\kappa u_0}{\gamma'} \tag{1}$$

ここで、 $\tau$ : 波浪負荷によって地盤にもたらされる最大せん断応力(= $u_0\kappa z \cdot \exp(\kappa z)$ )、 $\sigma_{v0}$ : 初期有効応力(=- $\gamma z$ )、 $\kappa$ : 波数(= $2\pi/$ 波長 L)、 $\gamma$ : 地盤の有効単位体積重量、z: 鉛直座標(図-3参照)である. この繰返し応 力比  $\chi_0$ が限界値  $\chi_{cr}$ を超える場合に液状化が発生するため<sup>1)</sup>、これが液状化 発生の評価基準となる. 限界値  $\chi_{cr}$ は液状化強度に相当するが、既往の遠心 模型実験結果<sup>1)2)</sup>より緩い砂地盤では進行波に対しておよそ  $\chi_{cr}$ =0.11~0.14 程度(砂の種類による)である.





検討結果を図-2に示す.同図(a)はナウファスの波高データ,図(b)は式(1)で算定したχ₀である.液状化の危険性の評価基準である限界繰返し応力比χ๓=0.11~0.14を図中に重ねている(図中の赤紫ライン).最高波 H<sub>max</sub>でχ₀を評価した場合に限界値χ๓を超えるものが多くあり,地盤が緩ければ,液状化をおこしうる厳し さの高波がたびたび日本周辺で発生していることがわかる.ただし本評価では,波の波高や周期の時間的な変 化の影響を考慮できないことや液状化深度や継続時間の影響を評価できない.そのため,詳細評価では,実波 浪データを用いた地盤内間隙水圧の時系列解析を行うことになる.本報ではその解析例を示す.

## 3. 実観測波浪による地盤間隙水圧応答予測

解析モデル<sup>2)3)</sup>を図-3 に示す.解析モデルは上部から外部流体域,液状 化領域,非液状化領域で構成される.液状化領域は高密度流体と仮定し外部 流体と合わせ二層流体の波浪伝播理論を適用している.地盤領域は繰返し塑 性を組込んだ弾塑性土としてモデル化している.弾塑性土の支配式は次の繰 返し塑性を考慮した圧密方程式で表される:

$$\frac{\partial u_e}{\partial (\omega t)} = \frac{k \cdot M}{\gamma_f \cdot \omega} \kappa^2 \frac{\partial u_e^2}{\partial (\kappa z)^2} + M \frac{\partial v^p}{\partial (\omega t)}$$
(2)

ここで, u<sub>e</sub>:過剰間隙水圧の残留成分, v<sub>p</sub>:繰返しせん断に基づく塑性体積 ひずみ, ω:波の角周波数, γ<sub>f</sub>:水の単位体積重量,k:地盤の透水係数, M:地盤の体積剛性率である.右辺第二項が繰返しせん断に基づく過剰間隙 水圧の発生項である.液状化の発生や拡大は,二層流体域と弾塑性土の支配



式を連立することで求められる.既往研究<sup>2)3)</sup>では規則波浪のみ扱ったが,観測データを用いた評価を行うために,不規則波浪に対する地盤応答解析が可能となるよう改良し,遠心模型実験で確認している.

暴波浪時の水位変動データとして(2017/1/27 秋田)を用いて地盤内の間隙水圧応答を予測した(図-4). 同図より,波が厳しくなるにつれ,過剰間隙水圧が蓄積と消散を繰り返すようになり,厳しい波が連続する際 に過剰間隙水圧が有効上載圧σ<sub>v0</sub>'に達し液状化が発生

していることがわかる.

## 4. まとめ

ナウファスデータを用いて,日本周辺で実際に観測 された暴波浪に対する液状化の危険性を評価し,地盤 が緩ければ液状化を発生させる厳しさの波浪がたびた び日本周辺で発生していることが得られた.また,詳細 評価として実波浪観測データを用いた過剰間隙水圧の 時系列解析例を示した.

謝辞:本稿で用いた波浪観測データは、国土交通省港湾局によっ て観測され港湾空港技術研究所で処理されたものである.

参考文献: 1) Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999). Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, Géotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 621-638. 2) Sassa, et al. (2001). Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem. Géotechnique, 51(10), 847-857, 3) Miyamoto et al. (2004). Progressive solidification of a liquefied sand layer during continued wave loading, Géotechnique, 54(10), 617-629. 4)川口ら(2019). 全国港湾海洋波浪観測年報

(NOWPHAS 2017), 港空研資料, No. 1357. 5) 川口ら(2018). 港空研資料, No. 1342. 6) 川口ら(2017). 港空研資料, No. 1333.



図-4 観測暴波浪時を用いた地盤内過剰間隙水圧応答の 予測結果