

砕波帯の海底地盤の液状化

京都大学 正員 ○酒井哲郎, 間組(株) 服部明彦, 京都大学 正員 間瀬 肇

1. まえがき 海洋構造物の安定性に関しては、従来構造物に作用する波力に対する安定性が考慮されている。実際には異型ブロックの沈下などの例が示すように、波浪による構造物周辺の海底地盤の、間隙水圧や有効応力の変化に対する検討も最近重要視されてきている。さらに地震時の液状化とは異なり、波浪にのみ起こりうる一種の液状化が生じる可能性も報告されている

(名合(1982), 善ら(1987))。この波浪による液状化は、地盤骨格の変位にはよらず、波の一周期の特定の位相区間でのみ生じるものである。すなわち波浪による海底面の波圧の変動に対して、地盤内部の間隙水圧の変動が大きく減衰しかつ位相のずれを生じるために、とくに波の谷の位相で間隙水が余分に変動波圧を受け持つことになって地盤内の有効応力が減少するものである。ここでは、波浪による海底地盤内の間隙水圧に関する近似解(Mei and Foda, 1981)を用いて、現地スケールでの砕波帯における地盤表面付近の液状化深さの位相変化と、それに及ぼす波浪および地盤条件の効果を検討する。

2. 波浪による海底地盤内の変動間隙水圧 海底地盤が波浪による波圧変動を受ける場合、地盤骨格の有効応力は、有効土被り圧、地盤表面の変動波圧 p_b 、地盤内部の変動間隙水圧 p_m を用いて式(1)で与えられる(善ら, 1987)。

$$\sigma_v' = \gamma' \cdot z + (p_b - p_m) \quad \text{-----(1)}$$

ここで、 σ_v' は地盤骨格の有効鉛直応力、 γ' は砂の水中単位体積重量、 z は地盤深度(海底面を原点に鉛直下向き座標)である。式(1)より、 $\sigma_v' \leq 0$ が起こりやすい条件は、波の谷の位相($p_b < 0, p_m < 0$)で、地盤内の間隙水圧が z 方向に大きく減衰し、位相が遅れることである。 p_b は、微小振幅波理論で与える(式(2), (3))。ただし、 $p_b = p_m \cdot \cos(\lambda x - \omega t)$ 、---(2)
 p_m は海底面での微小振幅波の波圧の振幅、 ρ_w は水 $p_m = \rho_w \cdot g \cdot A / \cosh(\lambda h)$ ---(3)
の密度、 g は重力加速度、 A は半波高 $H/2$ 、 h は水深、 λ は波数、 ω は角周波数、 t は時間である。

地盤内の変動間隙水圧 p_m は、次式の Mei and Foda (1981) による境界領域近似解を用いる。

$$p_m = p_0 \left[\frac{1}{1+m} \exp\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \cos(\lambda x - \omega t) + \frac{m}{1+m} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \times \left\{ \cos\left(-\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \cos(\lambda x - \omega t) - \sin\left(-\frac{z}{\sqrt{2}\delta}\right) \sin(\lambda x - \omega t) \right\} \right] \quad \text{-----(4)}$$

$$m = \frac{nG}{\beta} \frac{1}{1-2\nu} \quad \text{-----(5)}$$

$$\delta = \left(\frac{KG}{\omega} \right)^{1/2} \left\{ \frac{nG}{\beta} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \right\}^{-1/2} \quad \text{-----(6)}$$

ここで n は間隙率、 G は地盤の土粒子骨格のせん断弾性率、 β は間隙水の有効体積弾性率、 K は透水係数 k を $\rho_w \times g$ で除したもの、 ν はポアッソン比、 L は波長である。 δ は、間隙水の速度が地盤骨格の速度と等しくない地盤表面付近の境界領域の厚さである。式(4)で与えられる変動間隙水圧式では、右辺第1項の外部領域解と第2項の境界領域解の相対的な大きさはパラメータ m に依存している形になっており、 m の値が大きくなるほどすなわち β の値が小さくなるほど境界領域解が相対的に大きくなる。境界領域解が相対的に大きい場合は、 $\delta \ll L$ および z に関する三角関数の存在により、間隙水圧は外力である波圧に対して急激な減衰および位相のず

Tetsuo SAKAI, Akihiko HATTORI, Hajime MASE

れを生じ、液状化が起こりやすいと考えられる。

3. 液状化領域の計算 実際の碎波帯を想定して、表-1 で示したものを基本条件とする。 β の値については、現地を想定した善ら(1987)の文献では間隙水の飽和度を $S=0.98$ としており、ここでは $S=0.99$ すなわち $\beta=1.0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ とした。液状化に影響を及ぼす要因を検討するために、 γ' , β , k , h , H , T (波の周期) のそれぞれを、表-1 に示す基本条件から変化させて、一周期間の任意の位相 θ ($\theta=0^\circ$: 波の山の位相) における液状化($\sigma_v' \leq 0$)深さ z_L を計算した。ただし k は m/s の次元を有し、式(6)の K と $k=K \times \rho_w \cdot g$ の関係にある。図-1 は β を変化させた場合のものである。他の量については図を示していないが、以下のことがわかった。

すでに述べたように、間隙水の有効体積弾性率 β の値が小さいほど近似式の境界領域の解が支配的になり、地盤内の間隙水圧の急激な減衰および位相のずれが大きくなる。図-1 が示すように、 $\beta > 10^7 \text{ N/m}^2$ では表-1 に示した条件下では、液状化領域は存在しない。

式(1)からわかるように、土の水中単位体積重量 γ' が大きくなると有効土被り圧が増加し液状化深さは減少する。一方透水係数 k については、その値が大きいすなわち地盤が間隙水を通しやすいほど液状化領域は減少する傾向にある。水深 h が大きくなると液状化領域は減少する傾向にあるが、後述の H , T の影響に比べるとかなり小さい。波高 H の増大に伴い、液状化領域は増加する傾向にある。周期 T が3秒〜7秒ぐらいまでは、周期が長くなるにつれて液状化領域は増加する傾向にあるが、9秒以上になると増加の度合は小さくなる。

4. 参考文献

- Mei, C. C. and Foda, M. A. (1981), Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 66, pp. 597-631.
 名合宏之(1982), 水工研修会講義集, pp. A-9-1~A-9-15.
 善功企・山崎浩之・渡辺篤(1987), 港湾技術研究所報告, 第26巻 4号, pp. 125-180.

表-1 液状化領域を検討する基準の計算条件

間隙率	n	0.33
土粒子の水中単位体積重量	$\gamma' \text{ (gf/cm}^3\text{)}$	0.91
地盤骨格のせん断弾性率	$G \text{ (N/m}^2\text{)}$	1.0×10^8
ポアソン比	ν	0.33
透水係数	$k \text{ (m/sec)}$	2.8×10^{-4}
間隙水の有効体積弾性率	$\beta \text{ (N/m}^2\text{)}$	1.0×10^6
水深	$h \text{ (m)}$	4.0
周期	$T \text{ (sec)}$	7.0
波高	$H \text{ (m)}$	3.0

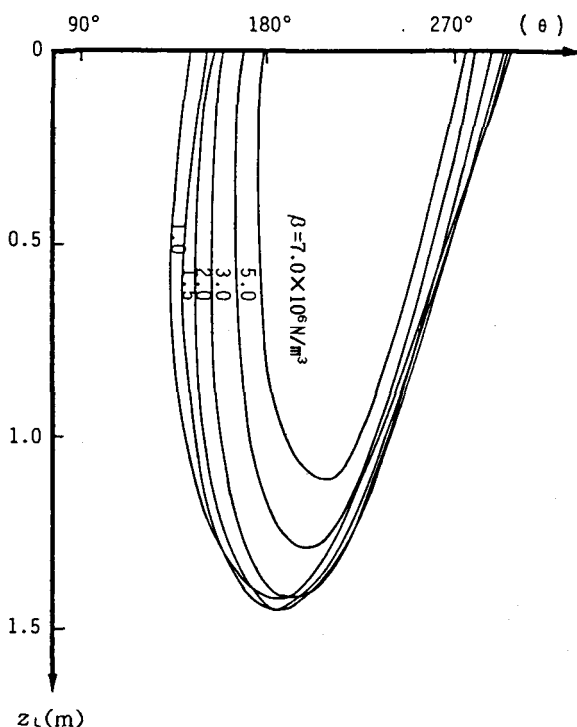


図-1 波浪による海底地盤の液状化に及ぼす有効体積弾性率の効果