

Ⅲ - A130

波浪による地盤の液状化と間隙比の鉛直分布の変化

京都大学大学院 学生会員 佐々真志  
 鹿島建設 嶋村知久  
 京都大学防災研究所 フェロー会員 関口秀雄

1. はじめに

筆者らは、遠心力場波浪実験法を活用することにより、波浪による水平細砂地盤の液状化特性を調べている。重要なことは、(a) 液状化発生の有無を決定する限界応力比が存在すること、(b) 限界応力比以上の波浪負荷を受けて地盤が液状化すると、その後続の圧密過程を経て、地盤は次第に高密度化していくことである。このような波浪による地盤の高密度化過程を例示すると、図-1のようになる。ただし、本図は実測の地表面沈下量 $s$ より求める地盤のマクロな意味での間隙比 $\bar{e}$ の変化を表すものであり、地盤内の間隙比の鉛直分布を求めるには別の計測手段が必要となる。

地盤内の土層（層厚 $l_i$ ）の間隙比を $e_i$ と表記すると、間隙比 $\bar{e}$ は次式のように表すことができる。

$$\bar{e} = \sum l_i / \{ \sum l_i / (1 + e_i) \} - 1 \quad (1)$$

一方、上記間隙比 $e_i$ と対応する透水係数 $k_i$ は、次式のように表すことができる。

$$k_i = C_f \cdot e_i^3 / (1 + e_i) \quad (2)$$

ここに、係数 $C_f$ は土要素の平均粒径及び堆積構造を表すパラメータである。筆者らは、この係数 $C_f$ が、波浪負荷の下での地盤の液状化深さに依存すると考えている（後出の図-6参照）。

本報では、まず定常上向き浸透流場のもとでの波浪による細砂地盤の液状化特性を報告する。ついで、定常上向き浸透流実験法の活用により透水係数 $k_i$ を実測し、実測の間隙比 $\bar{e}$ を介して、式(1)と式(2)の考え方に基いて波浪履歴にともなう $e_i$ と $C_f$ の変化特性を推定する。すなわち、波浪履歴にともなう地盤内の間隙比の鉛直分布と堆積構造の変化を把握する。

2. 遠心力場波浪-浸透流実験

用いた造波水槽と地盤内の間隙圧計の配置を図-2に示す。流体としては、波浪伝播と圧密に関する時間相似則を満足するために、高粘性（50cSt）のシリコンオイルを採用している。用いた試料はLeighton Buzzard 砂（ $D_{50} = 0.15\text{mm}$ ,  $e_{\max} = 1.066$ ,  $e_{\min} = 0.642$ ）である。行った実験は、定常上向き浸透流場での波浪負荷実験と上向き浸透実験の2種類である。いずれも、50gの遠心力場で行った。ストレージタンク内の液面と水槽内の液面に所定のヘッド差を設定することにより、模型地盤内に上向き浸透流を形成し、地盤内各層（I～IV層）の上下端に設置した間隙圧計より、各層の動水勾配 $i_i$ を計測した。タンク内の水位の時間変化率は微小であり、実用上、定常浸透流場を形成していることを補足しておく。

緩詰め砂地盤（ $D_r = 45.8\%$ ）に対して、定常上向き浸透流場（地盤全層の動水勾配  $\Delta h/D_0 = 0.5$ ）のもとで4ステージの進行波負荷実験（test 4-1～4-4）を行った。液深 $h$ は90mm、造波板の加振振動数 $f$ は11Hz、各ステージでの波浪負荷の継続時間は約8sである。各ケースの波浪負荷レベル $\chi_0 = \kappa u_0 / (\gamma' - i \cdot \gamma_f)$ は、0.19～0.21と、ほぼ一定であった。各波浪負荷の前後には、1g場で地表面沈下量を計測し、地盤内の平均間隙比 $\bar{e}$ を求めた。第1ステージの波浪载荷の前と、各波浪負荷の後に50g場において、上向き浸透実験を実施した。

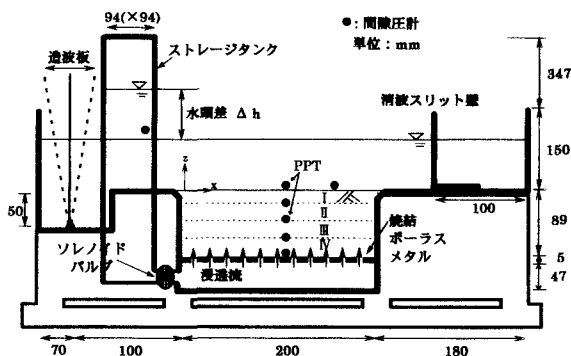


図-2 遠心力場波浪-浸透流実験で用いた造波水槽

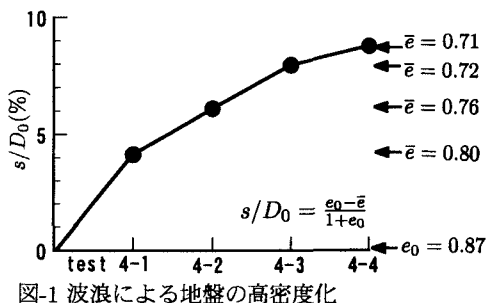


図-1 波浪による地盤の高密度化

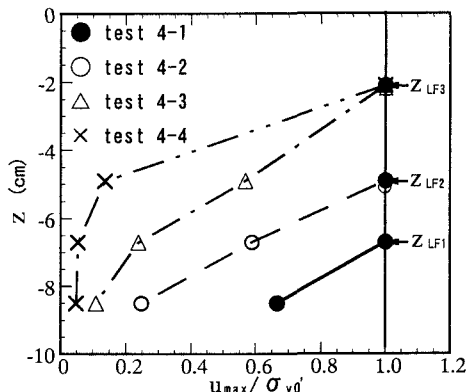


図-3 波浪負荷による地盤の再液状化特性

液状化、遠心波浪実験、間隙比分布、高密度化、浸透流

〒611 宇治市五ヶ庄、京都大学防災研究所観測実験センター、Tel: 0774-38-4309, Fax: 0774-38-4180

### 3. 実験結果

**液状化特性に及ぼす波浪履歴の影響:** 上述の波浪実験により得られた残留間隙圧比  $u_{max}/\sigma'_{v0}$  の深度分布を図-3に示す。ここに残留間隙圧は、波浪負荷により地盤内に誘起された塑性的な間隙圧成分を表す。第一ステージの波浪負荷 (test 4-1) により、地盤は深さ  $z = -6.7\text{cm}$  まで液状化に至っている。液状化フロントは、波浪再負荷 (test 4-2) の場合には、深さ  $z = -4.9\text{cm}$  まで進展し、波浪再々負荷 (test 4-3) の場合には、深さ  $z = -2.1\text{cm}$  にとどまっている。すなわち、波浪負荷を経るごとに、液状化フロントの到達深さ  $z_{LF}$  は次第に浅くなっている。

2. 液状化にともなう地盤の高密度化と透水係数の変化: 波浪による地盤の液状化にともない、地盤は高密度化していく (図-1 参照)。これに対応して地盤内における各層の透水係数の値も減少する (図-4 参照)。

#### 4. 実測透水係数を活用した地盤内間隙比分布の推定

上述の実験結果より、間隙比  $e$  と地盤内各層の透水係数  $k_i$  は既知であるので、式 (1) と式 (2) の考え方により、地盤内の間隙比  $e_i$  を決定できる。留意すべきことは、式 (2) 中の係数  $C_f$  の値が波浪負荷履歴に応じて変化し得ることである。具体的には、筆者らは、係数  $C_f$  の値は液状化深さ  $z_{LF}$  に依存すると考えている。すなわち、次の仮定をおいている。(a) 波浪負荷の前には、 $C_f$  は鉛直方向に一定である。(b) 各波浪負荷ステージにおいて、液状化深さ  $z_{LF}$  以深では  $C_f$  の値は変化しない。

このようにして同定した間隙比  $e_i$  と係数  $C_f$  の鉛直分布を、それぞれ図-5 と図-6 に示す。波浪負荷前は、仮定により  $C_f$  は地盤全層で一定であるため、透水係数  $k_i$  値が地盤内各層の間隙比  $e_i$  に直接反映される。このとき、地盤内のマクロな相対密度  $D_r$  は 45.8% である。各ケースの液状化フロントの到達深さ  $z_{LF}$  が、地盤内の高密度化と深く関わっていることに注目したい。すなわち、図-5 において最初の波浪負荷 (test 4-1) 後、液状化フロント  $z_{LF1}$  の直上部 ( $z = -5.8\text{cm}$ ) において、 $D_r$  が最も増加している。波浪再負荷 (test 4-2) にともない、液状化フロント  $z_{LF2}$  の直上部 ( $z = -3.5\text{mm}$ ) で  $D_r$  はさらに増加している。波浪再々負荷 (test 4-3) 後には、液状化フロント ( $z_{LF3} = -2.1\text{cm}$ ) 以浅においてのみ高密度化が進行し、 $D_r = 102.4\%$  にまで達している。

以上に述べた  $D_r$  の増加に対応して、係数  $C_f$  も変化している (図-6 参照)。すなわち、 $C_f$  の値は、test 4-1 後には  $z_{LF1}$  以浅において減少し、test 4-2 後は  $z_{LF2}$  以浅でさらに小さくなっている。また、test 4-3 の後、 $C_f$  が地盤のごく表層 ( $z \geq -2.1\text{cm}$ ) で再び増加していることも興味深い。

### 5. まとめ

1) 波浪による液状化を経験するごとに、地盤内の各層は密になっていく。2) 地盤内の間隙比は、液状化フロントの直上部で、著しく減少する傾向がある。

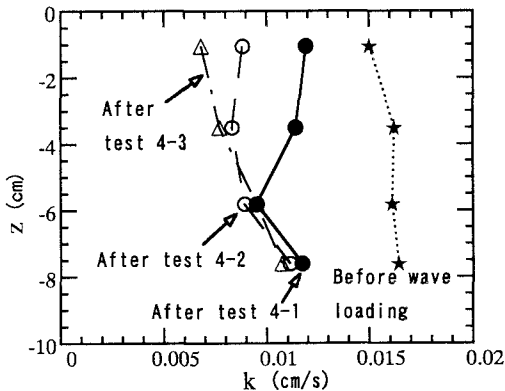


図-4 波浪負荷にともなう透水係数の変化

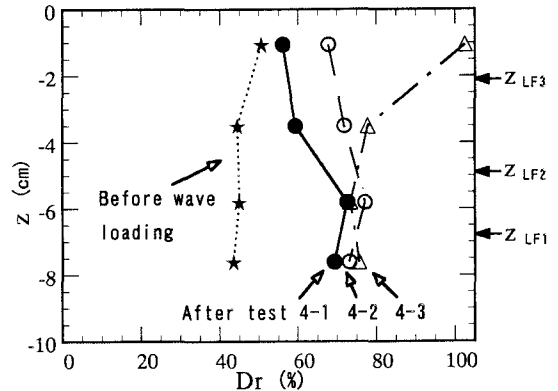


図-5 推定された相対密度の鉛直分布

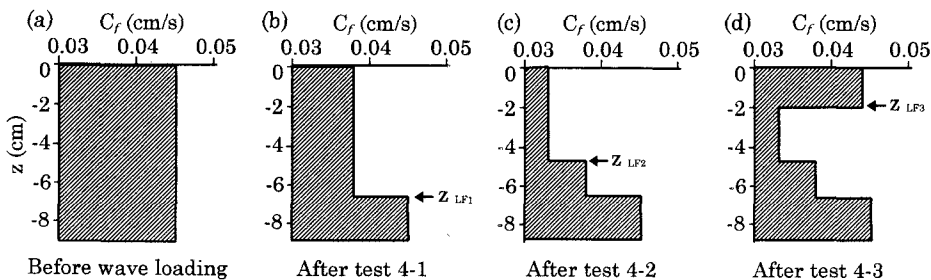


図-6 波浪による液状化にともなう  $C_f$  の変化