

Ⅲ-A159

波浪による液状化と地盤変動予測

京都大学大学院 学生会員 佐々真志
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、これまでに、波浪による砂質地盤の液状化過程を明らかにすることを目的として、水平細砂地盤に対する一連の遠心力場進行波及び重複波負荷実験を実施するとともに、両波浪様式の下で観測された地盤液状化特性を再現し得る非線形有限要素解析コードを開発している[1]。

ただし、上述の有限要素法による応力・変形/浸透連成解析では、厳しい波浪負荷の下で地盤内残留間隙圧の上昇に起因する液状化のオンセットまでは精度良く予測しう一方、液状化後の地盤挙動すなわち液状化フロントの鉛直下方への伝播の再現は今後の課題となっている。このような問題意識から、筆者らは、有限要素解析とは異なる一つの簡易予測手法として、外部流体域と液状化土層を密度の異なる2層流体域ととらえるモデル(2層流体-多孔質弾性体モデル)を提案している[2]。

本研究では、波浪による地盤液状化の物理的内容をさらに詳しく調べるために、液状化にともなう地盤変動特性に焦点をあてている。すなわち、本報告では、弾塑性有限要素解析と2層流体モデルによる地盤変動の予測結果を述べた後に、遠心力場波浪実験における観測結果との比較を行う。

2. 弾塑性有限要素解析による液状化と地盤変動の予測

2次元平面ひずみ有限要素解析[1]で用いた有限要素メッシュを図-1に示す。対象地盤領域及び波浪条件は、50g場のもとで実施したLeighton Buzzard 砂に対する遠心力場波浪実験と同一である(図-1参照)。進行波負荷は、当該波浪によって地盤表面に動員される液圧変動 u_0 を全応力変動として与えている。

地盤領域の代表鉛直アレイ ($x = 100\text{mm}$) における解析結果のまとめを図-2に示す。地盤内の各深さにおける最大残留間隙圧 $u_{\max}$ の値を、波浪負荷の厳しさの指標である繰返し応力比 $\chi_0 = u_0 \kappa / \gamma'$ に対してプロットしている。応力比 χ_0 の増加にともなって、地盤内各深さにおける塑性挙動は顕著になっている。応力比 χ_0 が0.14以上になると、地盤浅部 ($z \geq -1.5\text{cm}$) における $u_{\max}$ 値は、対応深度の初期鉛直有効土被り圧 σ'_{v0} の値に一致しており、当該深度まで液状化に至ったとみてよい。実際、代表土要素の有効応力が応力原点に縮退していく過程は、図-3より明らかである。

このような厳しい進行波負荷 ($\chi_0 = 0.14$) のもとにおける地盤表面と地盤内部の変動を図-4に示す。具体的には、地盤中央部 ($x = 106.6\text{mm}$) の3深度 ($z = 0\text{mm}, -40\text{mm}, -90\text{mm}$) における水平変位 u_x と鉛直変位 u_z の軌跡を示す。地表面 ($z = 0$) の動きに着目すると、波の進行に対応して時計まわりの楕円軌道を描きながら、その長径および短径は繰返し回数の増加とともに著しく大きくなることがわかる。地盤浅部における液状化の発生時点となる16波目には、水平変動振幅は0.13mm、鉛直変動振幅は0.04mmとなっている。また、変位楕円の回転中心は原点よりシフトしており、水平、鉛直方向とも残留変位が生じていることがわかる。液状化フロント以深 ($z = -40\text{mm}, z = -90\text{mm}$) の応答をみると、変位の変動傾向は急速に減衰している。このことは、液状化の発生と地盤変動の大きさが密接に関わっていることを意味している。

3. 二層流体モデルによる地盤変動の予測

液状化地盤領域 ($0 \geq z \geq z_{LF}$) を、外部流体域 ($0 \leq z \leq h$) とは密度の異なるポテンシャル流体域と考える[2]。有限層

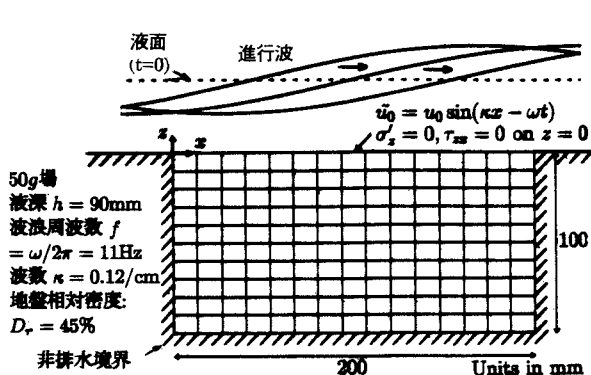


図-1 進行波負荷と有限要素メッシュ

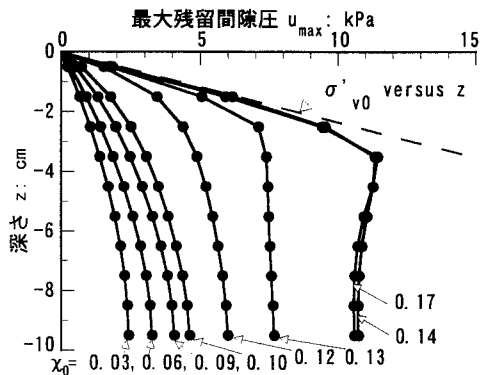


図-2 弾塑性有限要素解析結果のまとめ

液状化、遠心力場波浪実験、地盤変動、有限要素解析、2層流体モデル

〒611-0011 宇治市五ヶ庄、京都大学防災研究所附属災害観測実験センター、Tel: 0774-38-4309, Fax: 0774-38-4180

厚の2層流体域に対する波浪伝播理論を援用すると、遠心力場 Ng において、波長 L 、周期 T の微小振幅波が2層流体域（液厚： $h - z_{LF}$ ）を伝播する場合、波の分散関係は次式で与えられる。

$$\left\{ 1 - \left(\frac{Ng\kappa}{\omega^2} \right)^2 \right\} \cdot \tanh(\kappa h) \cdot \tanh(\kappa z_{LF}) = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \left(1 - \frac{Ng\kappa}{\omega^2} \cdot \tanh(\kappa h) \right) \left(1 + \frac{Ng\kappa}{\omega^2} \cdot \tanh(\kappa z_{LF}) \right) \quad (1)$$

ここに、 κ は波数（ $= 2\pi/L$ ）、 ω は波の円振動数（ $= 2\pi/T$ ）、 ρ_1 は外部流体の密度、 ρ_2 は液状化土の密度である。

2層流体の境界面すなわち液状化土の表面（ $z = 0$ ）における鉛直変位の変動振幅 a_0 は、液面の変動振幅 η_0 と次式によって関係づけられる。

$$a_0 = \eta_0 \cdot \cosh(\kappa h) \cdot (1 - Ng\kappa \cdot \tanh(\kappa h) / \omega^2) \quad (2)$$

式(1)に、遠心力場波浪実験におけるパラメタ（ $N = 50$ 、 $h = 90\text{mm}$ 、 $\omega = 69.1/\text{s}$ 、 $\rho_2/\rho_1 = 1.88$ ）と、最終液状化深さ $z_{LF} = -70\text{mm}$ を代入し、波数 κ について解くと、 $\kappa = 0.107/\text{cm}$ となる。液面変動振幅 η_0 は、造波板のストロークを介して、当該波浪条件の下で $\eta_0 = 17.1\text{mm}$ と算出される。その際、液状化層の生成による波浪場への影響は考慮していない。

結局、式(2)に基づいて、液状化土の表面（ $z = 0$ ）における鉛直変動振幅 a_0 の予測値として、4.6mmを得る。

4. 遠心力場波浪実験における地盤変動の観測結果と考察

水平細砂地盤（珪砂7号）に定常上向き浸透流場を動員した状態で、一連の進行波負荷実験を実施した。その際、カラーCCDカメラ（30コマ/秒）を用いることにより、波浪による液状化にともなう地盤変動の追跡観測を実現し、ビデオキャプチャボードを介してパソコン上でデジタル化した。液状化が発生した実験ケース（ $\chi_0 \geq 0.14$ ）では、地表面（ $z = 0$ ）の鉛直変動振幅は最大で2.1mmであった。一方、液状化発生前には地盤変動は無視し得るほど小さかった。

上述の観測結果を、弾塑性有限要素解析及び2層流体モデルによる予測値と対比してみよう（表-1）。本表には、参考として弾性FEM解析の結果も合わせて示している。これらの結果によると、実測変位振幅2.1mmは、弾性解析に比べて350倍、弾塑性FEMの結果と比べても50倍大きくなっている。それに対して、2層流体モデルによる予測値4.6mmは、実測値の2倍程度であることは興味深い。

5. まとめ

(1) 波浪による液状化にともなう地盤の鉛直変動を予測するために、遠心力場進行波実験（ $\chi_0 = 0.14$ ）と対応する解析を、土の繰返し塑性を考慮した弾塑性有限要素法と、二層流体モデルによって行った。（表-1参照）。(2) その結果、二層流体モデルによる予測値が、観測による地盤変動値を比較的良好に近似する結果となった。このことは、完全液状化すなわち有効応力がゼロ近傍の地盤挙動が極めて流体的であることを示唆している。

今後の課題：波浪による地盤の液状化のメカニズムをトータルとして理解するには、弾塑性有限要素解析が有望である。今後、有効拘束圧が限りなくゼロに近づいた状態での粒状土地盤の力学挙動のモデル化が課題である。

参考文献 [1] 佐々・関口（1999）；第34回地盤工学研究発表会発表講演集（投稿中） [2] 佐々・関口（1998）；第33回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 937-938。

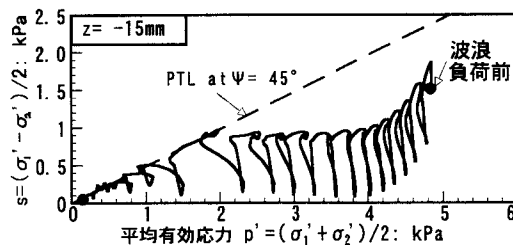


図-3 代表土要素の有効応力経路：有限要素解析結果

表-1 遠心力場波浪実験における地表面の鉛直変動振幅 a_0 の実測値と各種解析法による予測結果の比較

解析法	a_0 : mm
弾性FEM	0.006
弾塑性FEM	0.04
二層流体モデル	4.6
実測値*	2.1

* 地盤表層が液状化状態にあるときの実測値

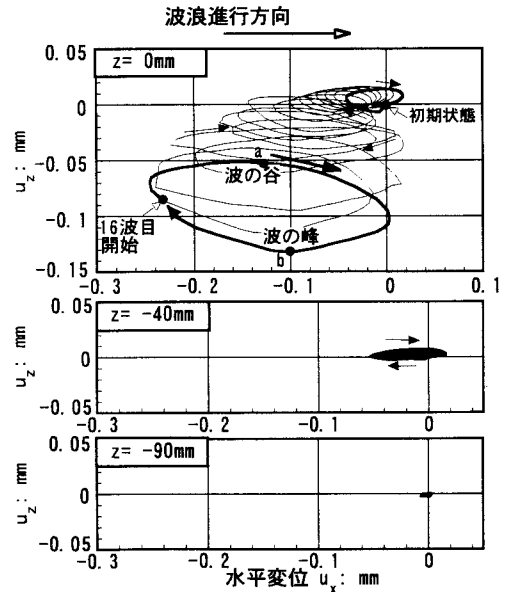


図-4 進行波負荷（ $\chi_0 = 0.14$ ）にともなう地盤変動の解析結果