

Ⅲ-14 部分的に不飽和化した地盤の振動台実験による液状化対策効果の検討

愛媛大学工学部 学生会員 ○増田 雅士

愛媛大学工学部 正会員 岡村 未対、二神 治

愛媛大学工学部 芳之内 信也

1. はじめに

飽和度が低下すれば液状化強度は増加することが知られており、最近では空気注入によって不飽和化することによる液状化対策法が検討されている¹⁾。本研究は模型振動台実験により、部分的に不飽和化した模型地盤を作成し、特に不飽和化された領域と飽和領域の境界での過剰間隙水圧の伝播による挙動を検討した。また、一次元透水を仮定した数値計算結果と実験結果を比較検討した。

2. 実験概要

実験には豊浦砂($\rho_s=2.64\text{g/cm}^3, e_{\max}=0.973, e_{\min}=0.609$)を用いた。模型地盤は、図-1 に示すように高さ 60cm、長さ 100cm、奥行き 20cm のアルミ製土槽を使用し、空中落下法により相対密度が約 65% となるように作成した。地盤作成中は層厚 5cm 毎に -95kPa の負圧下で水を注入し段階的に飽和地盤を作成した。地盤を部分的に不飽和化させる場合は予め厚さ 1mm の遮蔽板を地盤中に設置しておき、空気注入領域外に空気が漏れるのを防いだ上で、空気注入をして不飽和化させた。空気注入は地盤上から直径 6mm のパイプを挿し込み、約 6kPa の圧力で注入した。空気が注入されれば、間隙中の水が空気に置き換わり、水位が上昇する。この水位上昇から地盤の飽和度を求めた。

加振前に遮蔽板を取り除き、土槽に蓋をして密閉し、土槽全体に -90kPa の負圧を与えた状態で周波数 5.5Hz 、加速度振幅約 300gal の正弦波で約 30 秒間加振した。図-1 に示すように、加速度計、水圧計を地盤深さ 15cm の位置に水平方向に 5cm 間隔に設置した。

本実験の目的が不飽和地盤と飽和地盤の境界域での過剰間隙水圧の伝播の挙動を調べることから、4 種類の実験を行った。実験条件を表-1 に示す。ケース 1 は全面飽和地盤、ケース 2 は全面不飽和地盤、ケース 3、4 は地盤の半分を不飽和化させた地盤で、ケース 3、4 は飽和度を変えて実験したものである。

不飽和砂の液状化に及ぼす支配的要因は既往の研究から密度、飽和度、有効応力、空気の圧力であることが報告されている²⁾。今回の模型がある実地盤の 1/N 縮尺模型であると想定し、模型と実物の試料(土)は同じであるとする。支配的要因から導かれる無次元パラメータは飽和度、 σ'/γ_z 、 P_0/γ_z の 3 つである。ここで σ' は有効応力、 P_0 は空気の圧力、

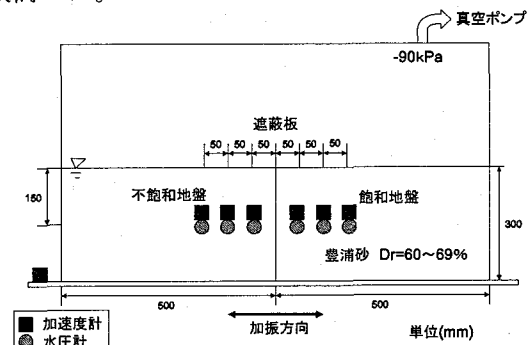


図-1 模型地盤

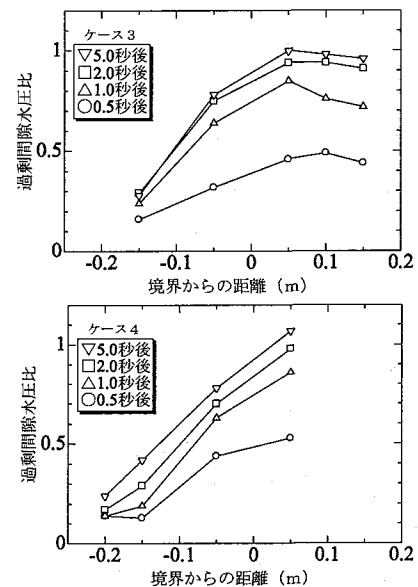


図-2 深さ 15cm での過剰間隙水圧の水平分布の時間変化

表-1 実験条件

	ケース 1	ケース 2	ケース 3		ケース 4	
	全面飽和	全面不飽和	不飽和地盤	飽和地盤	不飽和地盤	飽和地盤
相対密度(%)	67	70	69	69	60	60
飽和度(%)	100	93	95	100	97	100
有効応力(kPa)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
負圧(kPa)	90	90	90	90	90	90

z は深さである。模型と実物の対応する深さでは $\sigma'/\gamma z$ は等しくなるが、 $P_0/\gamma z = (\text{大気圧} + \gamma_w)/\gamma z$ は等しくなく、力学的に相似な模型とはならない。ここで、模型の大気圧を $1/N$ とすることにより相似性が満足される。今回の実験では $1/10$ 気圧のもとで実験を行ったので、対応する実地盤は模型の 10 倍のスケールのものである。

3. 実験結果

飽和-不飽和領域境界からの距離による、過剰間隙水圧比の時間変化の関係を図-2 に示す。時間は加振開始から 0.5 秒後、1 秒後、2 秒後、5 秒後をとっている。ケース 1 とケース 3 の飽和領域、ケース 2 とケース 3、4 の不飽和領域を比較したところ、それぞれが一番端の測定点では過剰間隙水圧の時刻歴がほぼ同じ挙動を示しており、過剰間隙水圧の伝播の影響はほぼないということが確認された。

ケース 3、4 では不飽和領域から遠ざかるにつれて過剰間隙水圧の上昇が小さくなっていることが分かる。また、ケース 3 より、飽和領域での 3 地点はいかなる時刻においてもほぼ同じ水圧比となっており、不飽和領域が近接することによって飽和領域内の過剰間隙水圧が低下することは観察されない。境界から 15cm 離れた不飽和領域の地点の水圧を比較すると、飽和度が高いケース 4 の方がケース 3 より水圧が大きくなっており、過剰間隙水圧伝播の影響が大きいことが分かる。

4. 数値計算

水平一次元透水を仮定した微分方程式をたて、過剰間隙水圧の伝播を計算した。式(1)は水の排水量は土の骨格の収縮量と空気の圧縮量に等しいという連続式を前提としたものであり、Terzaghi の圧密方程式に気相の圧縮性を考慮した形となっている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{m_v} \frac{e}{1+e} (1-S_r) \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots (1)$$

実験より飽和領域では過剰間隙水圧の伝播による水圧の低下は観察されなかったことを考慮して、数値計算は不飽和領域のみを対象とした。境界条件は飽和-不飽和境界のところを常時水圧比 1 とし、解析領域の左端を常時水圧比 0.3 とした。飽和度と間隙比は実験の値を用いた。透水係数は同じ $4.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 、体積圧縮係数は豊浦砂での圧密結果から $3.0 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{kN}$ とした。これを差分法によって解き、最大過剰間隙水圧比に対する割合を求めて、実験と比較したものを図-3 に示す。

ケース 3 の境界から 15 cm、ケース 4 の境界から 20 cm の位置では実験の水圧比も数値計算による水圧比もほとんど上昇していない。ケース 3、4 の境界から 5 cm の位置では実験の水圧比と数値計算による水圧比が似たような傾向を示している。よって、水圧が上昇しないところも、急激に上昇するところも数値計算によって、ほぼ表せているといえる。

5. まとめ

本研究では飽和、不飽和領域での境界付近の挙動の知見を得ることを目的に模型実験で過剰間隙水圧の伝播について調べた。その結果、不飽和領域では境界から遠ざかるにつれて急激に水圧の上昇が小さくなり、また飽和領域では境界近傍でも水圧が低下することはないことが分かった。また、水平一次元を仮定した数値計算により、実験で観測された水圧の伝播をある程度再現できた。

参考文献 1) 岡村未対(2005)：海岸の液状化対策・中山間部の道路の耐震、高知県地盤工学会研究会テキスト、pp1-9 2) 曾我恭匡(2005)：不飽和土の液状化強度に及ぼす空気の圧縮性の影響、第 40 回地盤工学会研究発表論文集、No.256、pp511-512

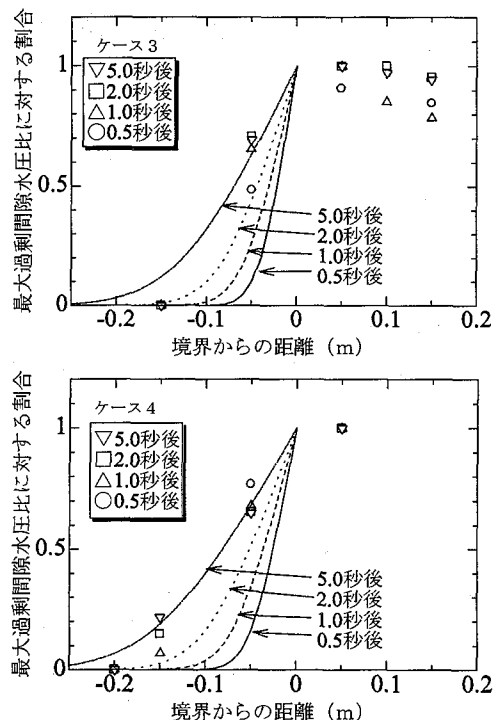


図-3 実験と数値計算の比較