

地震中の排水の影響を考慮した堤体内液状化判定法の構築と検証

愛媛大学大学院 学生会員 ○林秀太郎
愛媛大学大学院 学生会員 井上洋
愛媛大学大学院 正会員 岡村未対

1. はじめに

現行の液状化判定法は、地震中の過剰間隙水圧の消散について考慮しておらず、堤体内の薄い飽和層の液状化判定を行う場合には、過度に安全側の液状化判定となる可能性がある。そこで、本研究では地震中の排水の影響を考慮した液状化判定法を検討することを目的とし、遠心模型実験および数値解析を行った。また、その結果を基に構築した判定法を用い、2011年の東北地方太平洋沖地震で被災した河川堤防の判定を行い、妥当性を検証した。

2. 実験概要

図1に遠心模型の概略を示す。豊浦砂を用い、空中落下法により相対密度 $Dr=45\%$ または、 $Dr=70\%$ で層厚 $H=4\text{cm}$ (原型 1m) の水平地盤を作成し、十分に脱気したあと通水を行い飽和させた。間隙流体に水、または異なる粘度のメチルセルロース溶液を用いて透水係数 k の異なる模型を作成し、 25g の遠心場にて加振実験を行った。実験条件を表1に示す。各ケースでは複数の模型を作成し、異なった加振加速度の実験を行った。以後、本論文では物理量を全て原型スケールに換算して示す。

3. 実験結果

本研究で行った実験結果を図2に示す。図の横軸には透水係数 k と体積圧縮係数 m_v 、最大排水距離および過剰間隙水圧比の上昇から1に達するまでに要した時間 t_d からなる時間係数 T をとり、縦軸には実験での最大加速度 $A_{\max}$ と、非排水状態で20波で液状化するときの加速度 A_1 の比をとってある。ここで A_1 は、田中ら¹⁾の中空ねじりせん断試験結果を用いて計算した。透水係数が大きくなると、加振中に地盤からの排水が生じて液状化しにくくなるため、液状化させるためには大きな加速度を与えることが必要になった。 $T < 0.1$ の範囲では、 $t_d = 7\text{--}15\text{s}$ (波数 $N=15\text{--}30$ 波) で液状化した実験結果の加速度は中空ねじりせん断試験の20回強度から求めた加速度とほぼ一致し ($A_{\max}/A_1 \approx 1$)、 $A_{\max}/A_1$ は T の増加と共に増大している。これより T がおよそ 0.1 より大きい範囲では加振中に排水の影響が現れることがわかる。また t_d が小さいほど $A_{\max}/A_1$ は全体的に大きくなっている。これは少ない回数で液状化させるためにはより大きな加速度での加振が必要となるためである。

4. 数値解析

過剰間隙水圧は、加振による水圧発生項と透水現象による水圧消散項の和で表される。発生項は簡単のため時間に共に一定の割合で過剰間隙水圧比が増加するものと仮定し、次式を用いた。

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{\sigma'_{v0}}{t_d} \quad (\text{式1})$$

ここに、 σ'_{v0} : 初期有効上載圧。 t_d は非排水状態で液状化に達するまでの時間であり、入力加速度 (せん断応力比) の関数である。田中ら液状化強度曲線を図3に示す。試験結果を図中の曲線で近似し、任意の繰返しせん断応力比 (加速度 $\times \sigma_v / \sigma'_v$) に対応する繰返し回数 N_c から t_d を次式によって求めた (実験での入力加速度周波数

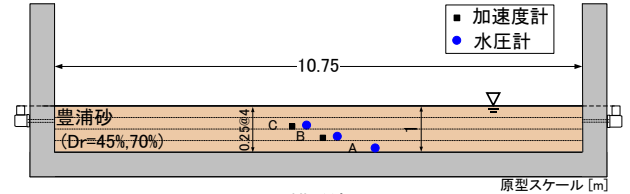


図1. 模型概要図

表1. 実験条件

Case 1	
$Dr = 45\%$, $m_v = 1.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$	
$k = 3.2 \times 10^{-3}, 6.6 \times 10^{-4}, 3.2 \times 10^{-4},$ $1.3 \times 10^{-4}, 2.7 \times 10^{-5}, 6.3 \times 10^{-6},$ $3.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	
Case 2	
$Dr = 70\%$, $m_v = 7.54 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$	
$k = 3.5 \times 10^{-4}, 1.8 \times 10^{-4}, 1.2 \times 10^{-4},$ $1.1 \times 10^{-4}, 6.3 \times 10^{-5}, 4.6 \times 10^{-5},$ $1.5 \times 10^{-5}, 3.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$	

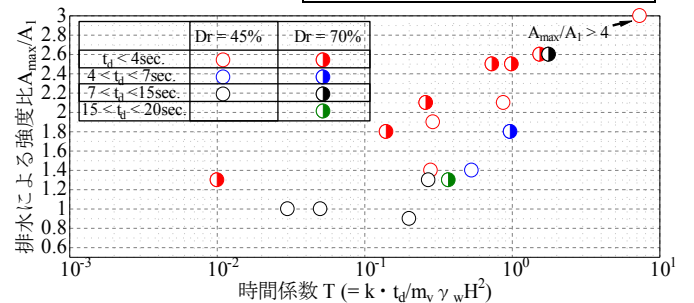


図2. 排水による液状化強度比と時間係数 T の関係

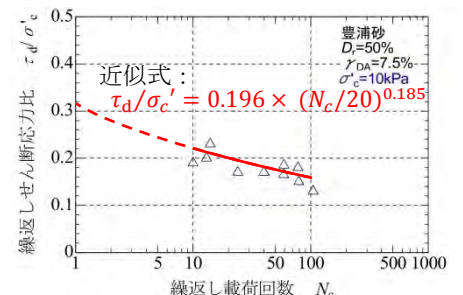


図3. 液状化強度曲線¹⁾

はおよそ 2.2Hz)。

$$t_d = N_c / 2.2 \quad (\text{式 2})$$

また、消散項は Terzaghi の圧密理論に基づき次式を用いた。

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (\text{式 3})$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量である。

相対密度 $Dr=45\%$ での体積圧縮係数は圧密試験から求め

た $m_v = 1.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{kN}$ を使い、透水係数および、入力加

速度を変化させ、 $t_d=1, 5, 10, 25 \text{ s}$ で過剰間隙水圧比が 1 となる加速度 $A_{\max}$ を解析で求めた。数値解析の結果と実験結果をあわせて図 4 に示す。数値解析の結果と実験結果は良い対応を示している。 $t_d=10\text{s}$, $N_c=20$ 波で液状化した結果を近似曲線で示した。以上より、図 4 の縦軸に示す排水による強度増加比を液状化強度に乘ずることにより、排水によって見かけの液状化強度が増加することを考慮することができる。

5. 検証

2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震では、河川堤防が約 2,000 箇所被災し、うち 7 割以上が、薄い飽和層を有する堤防内の液状化が原因であると詳細な調査の結果明らかとなった。東北地方整備局²⁾のデータを用いて現行の F_L 法(道路橋示方書)と本研究で構築した F_L 法を比較した。本研究で構築した方法とは、液状化強度に上述の「排水による強度増加比」を乗じたものである。検証に用いた箇所は、阿武隈川、鳴瀬川、吉田川、江合川、新江合川、北上川の 6 河川、被災箇所 21 地点と被災箇所近傍の無被災箇所 19 地点である。体積圧縮係数 m_v は、判定箇所の土質がシルト質細砂であったことから、一般的に用いられる $m_v=5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$ を用いた。また、透水係数 k は各地点の土の粒径加積曲線から、Hazen の式で求めた。K-NET³⁾で記録された被災地点に近い地震計の加速度(図 5)を見ると、加速度が 50gal 以上となった時点から、1 回目の加速度のピークまでの時間がおよそ 10~20s であったので、 t_d を 10s とした。飽和層厚 H は各被災地点における観測水位と堤防横断面図より決めた。

図 6 に被災地点と無被災地点で判定した結果を示す。本研究の方法は、排水を考慮していない道路橋示方書の方法より F_L を大きく評価する。被災地点では 2 地点を除く 19 地点で F_L を 1 以下と正しく判定した。無被災地点では、道示の判定法が全地点で $F_L < 1$ と判定しているのに対し、本研究の判定法では大半の地点で F_L を 1 以上と判定しており、大幅な改善が認められる。

まとめ

本研究では、地震中の排水現象を考慮した液状化判定法を構築することを目的とし、透水性の違いによる液状化強度比の変化を知るため、遠心模型実験および数値解析を行った。また、構築した液状化判定法が妥当であるかを判断するため、2011 年の東北地方太平洋沖地震で被害を受けた河川堤防に対し判定を行い検証した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 比較的薄く透水性の飽和層では、短時間の地震中でも排水が生じ、見かけの液状化強度が増加する。液状化強度増加比は時間係数 T と液状化するまでの時間及び繰り返し回数で表される。
- 2) この液状強度増加比を用いて液状化判定を行ったところ、被災地点及び無被災地点のほとんどで正しい判定となり、その妥当性が確認された。

参考文献

- 1) 田中智宏、安田進、直井賢治：種々の珪砂の低拘束圧下における液状化および液状化後の変形挙動、第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集、2009
- 2) 国土交通省東北地方整備局北上川等堤防復旧技術検討会：第 4 回、北上川等堤防復旧技術検討会、堤防被災箇所詳細調査結果、参考資料-1、平成 23 年 10 月 7 日
- 3) 防災科学技術研究所 強震観測網(K-NET,KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

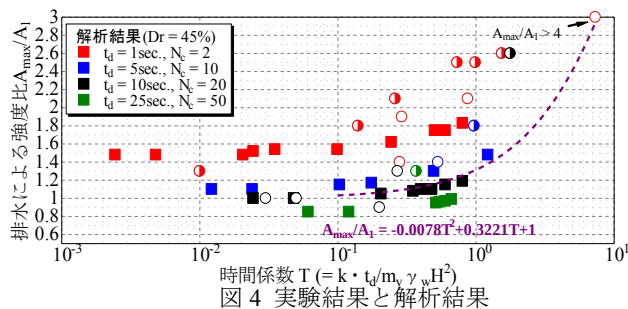


図 4 実験結果と解析結果

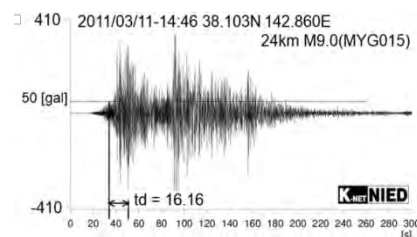


図 5. K-NET 観測記録³⁾

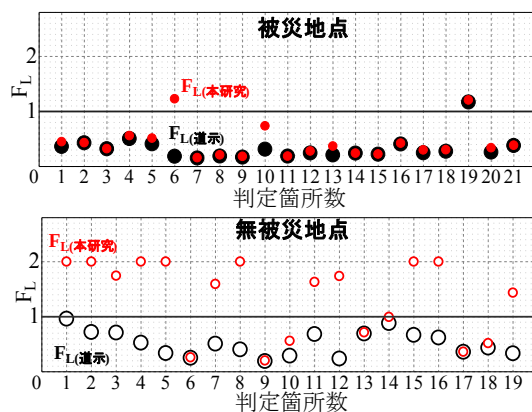


図 6. 判定結果