地中構造物の浮上がり遠心模型実験結果による液状化土の粘性抵抗のモデル化

大成建設㈱	土木技術研究所	正会員	○谷﨑	史織		
	同上	正会員	宇野	浩樹	立石	章

1. はじめに

有効応力解析では、液状化前の振動に対する数値解析上安定の目的で Rayleigh 減衰が用いられているが、 液状化後には液状化土の粘性抵抗としても働いており、Rayleigh 減衰の大きさが液状化地盤の変形量に影響 することが筆者らの検討によりわかっている¹⁾.そこで、粘性抵抗が支配的な要因となる地中構造物の浮上が り遠心模型実験を行い、シミュレーションを通じて有効応力解析への液状化土の粘性抵抗の導入を試みた.な お、以下に述べる実験結果及び解析結果は模型スケールで示している.

2. 実験条件

実験は,遠心加速度 50G 場において加振実 験を行った.実験模型及び計測器配置を図1 に示す.剛土槽(長さ 940×高さ 270×奥行 8 160mm)を用い,空中落下で作製した砂地盤 (豊浦砂,相対密度 56%)と,構造物模型 (長さ 80×高さ 60×奥行 160mm,密度 0.86g/cm³)により実験模型を作製した.地

盤は 50cSt のシリコンオイルで飽和させ,構



造物の浮上がりによる地盤のオイル面からの突出を防ぐため,液位は GL+13mm とした.既往の研究によると, 液状化土は粘性流体のような挙動を示すとされており²⁾³⁾⁴⁾,特に擬塑性流体として考えると,液状化土の粘 性係数はせん断ひずみ速度依存性を有することになる⁴⁾.そこで,液状化地盤中の構造物の浮上がり速度に対 するせん断ひずみ速度の影響を明らかにするため,入力波は,前半は振幅 75m/sec²,50Hz の正弦波とし,後 半は加速度振幅,振動数とも2倍として,速度振幅が一定,すなわち,振動によるせん断ひずみ速度が一定と なる波を用いた.なお,地盤全層を確実に液状化させるため,加振初期にテーパー波を入力した.

3. 実験結果

実験結果は、図2~図7に黒線で示す.図2は土槽の水平加速度時刻歴であり、前半は振幅80m/sec²、後半 は振幅180m/sec²と、当初の計画より大きな振幅の加速度が入力された.自由地盤浅部(図1のA点)での過 剰間隙水圧比と水平加速度の時刻歴を図3、図4に示す.過剰間隙水圧比は、加振開始後0.1秒程でほぼ1.0 に達して完全液状化状態となり、加振終了後もその状態が保持されている.完全液状化に至ると水平加速度は 低下している.図5に構造物模型の浮上がり変位量時刻歴を示す.構造物模型は完全液状化状態に至る前に浮 上がり始め、加振終了とともにほぼ止まっている.入力加速度を変化させた時刻0.37秒程で、浮上がり速度は 14mm/secから19mm/secに増加した.浮上がり速度が増加した主たる要因として、入力加速度の変化により液 状化土の粘性抵抗が低下したことが考えられる.

ここで、前述のようにせん断ひずみ速度が浮上がり挙動に及ぼす影響を調べるため、自由地盤地表面(図1のB点)の水平変位から、地盤全層の平均的なせん断ひずみγとせん断ひずみ速度ýを次式で算定する.両者とも、入力加速度の1/2周期分の移動平均としている.

$$\gamma = \frac{1}{H_0} \sum |\Delta x| \quad , \quad \dot{\gamma} = \frac{1}{H_0} \frac{\sum |\Delta x|}{\sum \Delta t}$$
(1)

キーワード 液状化土,粘性抵抗,有効応力解析,浮上がり,遠心模型実験 連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設㈱ 土木技術研究所 地盤岩盤研究室 TEL045-814-7236 ここに、 Δt :計測時間刻み、 Δx :地表面水平変位増分、 H_0 :地 盤高さ(=200mm).この方法で得られたせん断ひずみ及びせん断ひず み速度の時刻歴を図 6、図 7 に示す.入力加速度を変化させた時刻 0.37 秒程で、せん断ひずみは 0.65%から 0.45%に低下し、せん断 ひずみ速度は 65%/sec から 90%/sec に増加している.上述のよう に後半の入力加速度の振幅が前半の 2.25 倍と、計画(2倍)より大 きかったため、せん断ひずみ速度は一定とはならなかった.しかし ながら、液状化土の粘性抵抗がせん断ひずみ速度依存性を有すると 考えると、せん断ひずみ速度の増加に伴って粘性抵抗が低下し、浮 上がり速度が増加するという実験結果を説明することができる.

4. シミュレーション解析

遠心実験結果を2次元有効応力解析プログラムLIQCA⁵⁾でシミュレートする. 今回提案するせん断ひずみ速度依存型の粘性抵抗として,式(2)に示す指数関数形の粘性係数 μ_L を導入した. なお,液状化前の振動に対する数値解析安定の目的ではこれまでと同様にRayleigh減衰を用い,水圧の上昇に伴って Rayleigh減衰による粘性係数から μ_L に移行させることとした. 詳細は文献 6)を参照されたい.

 $\mu_L = \mu_{L0} \cdot \exp(-n\,\dot{\gamma}) = A\,\sigma'_{m0} \cdot \exp(-n\,\dot{\gamma}) \quad (\text{kPa} \cdot \text{sec}) \tag{2}$

図 3~図7において、 μ_L を導入した解析結果を赤線(Case_V)で、 初期剛性比例型の Rayleigh 減衰を用いた解析結果を青線(Case_R) で示す. Case_Vでは式(2)の A=0.205, n=0.9とし、Case_Rでは剛性 比例減衰用の係数 α_1 =0.003とした.図6,図7より、2ケースとも せん断ひずみ及びせん断ひずみ速度の定性的な挙動は実験と同様で あるが、図5ではCase_Rの浮上がり速度は一定のままである.一方 Case_Vでは、入力加速度が定常となる区間①、②における浮上がり 速度の変化は定量的にも実験と同程度の比率となっており、入力加 速度の変化に伴う浮上がり速度の変化を表すことができた.

5. まとめ

地中構造物の浮上がり遠心模型実験結果の分析により、入力加速 度の変化が浮上がり速度に及ぼす影響は、液状化土の粘性抵抗のせ ん断ひずみ速度依存性で評価できると考えられ、有効応力解析にお いても、せん断ひずみ速度依存型の粘性係数の導入により、浮上が り現象を再現できる可能性が示された.

参考文献 1)谷崎・立石・宇野・田中: 有効応力解析において Rayleigh 減衰 が地中構造物の液状化による浮上がりに及ぼす影響, 第 41 回地盤工学研究発表 会, pp. 1943-1944, 2006. 2)芳川・下川・東畑: 砂の高速変形時に関する中空 ねじりせん断試験, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp. 1029-1030, 1999. 3)樋口・ 安田・中村:高速載荷下における液状化した砂の粘性係数, 土木学会第 55 回年 次学術講演会, pp. 206-207, 2000. 4)濱田・島村・柳瀬・中村・田中:液状化 土の流動特性に関する研究, 第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地盤防災向 上に関するシンポジウム論文集, pp. 261-266, 2001. 5)0ka, F. et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain



dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, 49, No.5, pp.661-680, 1999. 6)谷崎・宇野・立石:液状化土の粘性抵抗 に着目した浮上がり遠心模型実験のシミュレーション (その2 有効応力解析), 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 (投稿中).