

個別要素法を用いた液状化時による地盤の永久変形解析

金沢大学大学院 学生員 ○安藤 康二
 金沢大学工学部 正会員 北浦 勝
 金沢大学工学部 正会員 宮島 昌克

1. はじめに

地震時の液状化による地盤の永久変形は、ライフラインや道路などの土木構造物に過度の変形を与え、多大な被害を生じさせる原因となっている。これまでに行われた調査¹⁾においても、永久変形は地震により広範囲にわたって液状化が生じた地域で必ず観測されている。今後は、永久変形の発生を予想した上での構造物の設計が望まれる。そのためには、永久変形の発生メカニズムの解明と、将来の地震における永久変位量を正確にかつ簡便に予測する方法が必要となると考えられる。

そこで本研究では、そのような予測方法の開発を目的とし、大きな変形を伴う解析にも適用が可能な個別要素法を用いて地盤液状化時の永久変形の解析を行い、永久変形の定量的な評価を試みる。

2. 解析手法

液状化地盤を土塊の集合体とみなし、各土塊自体は剛体と仮定し、土塊相互の粘弾性的および非弾性的性質を剛要素間に挿入したばねとグッシュボットによって表現することにする。この場合、土の塊すなわち個々の剛要素の並進 u 、回転 ϕ および外力（重力および地震力）の和 f について、運動方程式は次式のように与えられる。

$$m \ddot{u} + c_1 \dot{u} + k_1 u = f \tag{1-a}$$

$$j \ddot{\phi} + c_2 r^2 \dot{\phi} + k_2 r^2 \phi = f \tag{1-b}$$

ここで、 m および j は、土塊の各要素の質量および慣性モーメントであり、 k および c は、それぞれ、ばね定数と減衰定数である。また、 r は土塊の剛要素を円筒とみなしたときの半径である。なお、ドット ($\dot{\cdot}$) は、時間に関する微分を表している。しかし、通常ある土塊（剛要素）は複数の土塊（剛要素）と接触しており、式 (1) は連立微分方程式となり、解くことが非常に困難となる。

Cundall^{2), 3)} は、式 (1) を以下の形に変形し、時間増分 Δt により差分近似し、 Δt 時間ごとに逐時計算する方法を提案した。

$$m \dot{u}^t = f - (c_1 \dot{u}^{t-\Delta t} + k_1 u^{t-\Delta t}) \tag{2-a}$$

$$j \dot{\phi}^t = f - (c_2 r^2 \dot{\phi}^{t-\Delta t} + k_2 r^2 \phi^{t-\Delta t}) \tag{2-b}$$

これは上式のように、時刻 t より Δt 前の変位、 $u^{t-\Delta t}$ 、 $\phi^{t-\Delta t}$ と速度、 $\dot{u}^{t-\Delta t}$ 、 $\dot{\phi}^{t-\Delta t}$ より、現在の時刻 t の加速度 \ddot{u}^t 、 $\ddot{\phi}^t$ を求め、これらを順次数値積分することにより、速度 \dot{u}^t 、 $\dot{\phi}^t$ そして変位 u^t 、 ϕ^t を求める方法である。

3. 解析モデル

土層のモデル化は震動台実験を想定して次のように行なった。高さ 2.0m、幅 5.0m、の土層を仮定し、ここでは平面内での運動に限定しているのて、液状化地盤の二次元モデルとして単位長さの円筒要素を用いることにする。本解析では、図 1 に示すように半径 12.5cm の要素 176 個を最も密になるように配置したモデルを用いた。

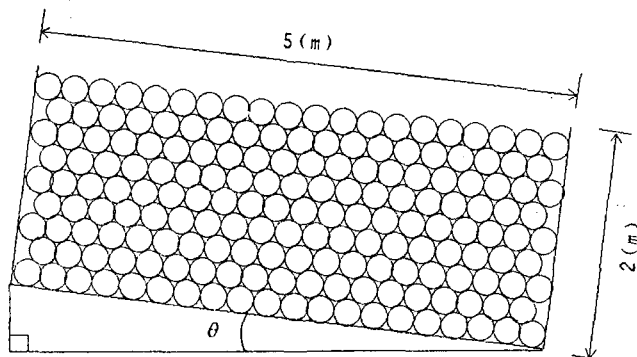


図1 要素の配列

4. 解析結果

図 2は、垂直方向に働く重力の加速度を 9.8 m/s^2 、水平方向に働く地震力の加速度を 1.6 m/s^2 、法線方向のばね定数 (K_n) を 800 tf/m^2 、接線方向のばね定数 (K_s) を 200 tf/m^2 とし、地盤の傾斜 (θ) と永久変形量との関係を検討するために、地盤の傾斜を $\theta = 16\%$ 、 32% と変化させた結果である。ただし、図にプロットした点は要素の中心の変形量を10倍にして示しており、この点に関しては他の図も同様である。この図より、傾斜が大きいほど永久変形量が大きくなっており、実際の地震に関する被害報告¹⁾ともよく合致した結果となっている。図 3、4 は、地盤の傾斜を16%、入力加速度を160gal とし、地盤ばね定数と永久変形量との関係を検討するために、地盤ばね定数のみを変化させた結果である。ただし、図 3は、法線方向のばね定数を一定とし、接線方向のばね定数のみを低減率50%として変化させ、その影響を検討した結果である。また、図4は、接線方向のばね定数を一定とし、法線方向のばね定数のみを低減率50%として変化させ、その影響を検討した結果である。これらの図より、永久変形量に対して、接線方向のばね定数の低減効果よりも、法線方向のばね定数の低減効果の方が大きい結果となっている。

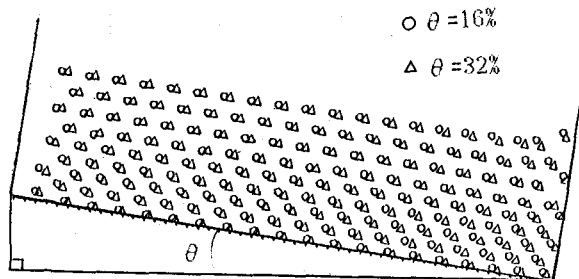


図 2 地盤の傾斜と永久変形量との関係

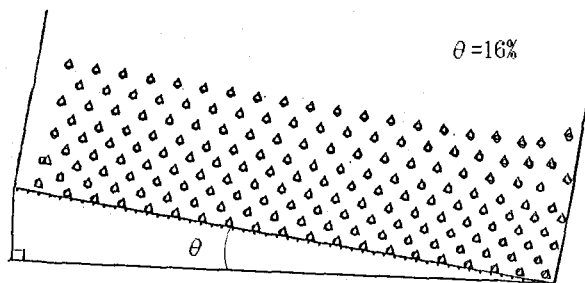


図 3 接線方向のばね定数と永久変形との関係

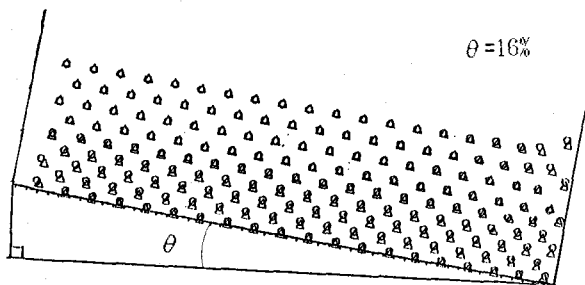


図 4 法線方向のばね定数と永久変形との関係

5. まとめ

本研究は、液状化地盤の永久変形を予測するための基礎的な知見を個別要素法を用いた解析を通して明らかにしようとしたものである。本解析においては、永久変形量に対して、法線方向のばね定数の低減効果が大きいことを示した。今後は、解析に最も適した要素の大きさなどの要素定数を決定し、さらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文報告集，No.376，pp.211-219，1986年12月。
- 2) P.A.Cundall：Explicit Finite-Difference Method in Geomechanics，International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics，Vol.1，No.1，pp.132-150，Jan.-March，1977。
- 3) P.A.Cundall，and G.D.L.Strack：A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies，Geotechnique，Vol.29，no.1，pp.47-65，Jan.，1979。