

流動特性の時間変化を考慮した液状化に伴う地盤の側方流動解析

千葉工業大学大学院	学生員	中村智則	
千葉工業大学	正会員	小宮一仁	渡邊勉
ケミカルグラウト(株)	正会員	高橋正光	玉野亮人
早稲田大学	正会員	赤木寛一	

1. まえがき

本研究では、液状化後の地盤の挙動を粘塑性流動と仮定し、一般化 Bingham 流動則を構成則に用いた粘塑性流動解析を、従来用いられている弾塑性動的過渡応答解析に組み込むことによって、液状化に伴う地盤の側方流動の数値解析を試みた。特に、流動特性を支配する塑性粘度の時間変化を考慮した場合の、地盤の側方流動変位挙動について考察を行った。

2. 解析の概要⁽¹⁾

本研究の解析フローは次のとおりである。まず、液状化前の地盤の挙動を一般的に用いられている陽的弾塑性動的過渡応答有限要素法によって解析する。この段階の構成則には Mohr-Coulomb の破壊規準を用いる。動的過渡応答解析によって応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した要素については液状化が発生したとし、液状化後の地盤の挙動を求めるために、次ステップから粘塑性流動有限要素法解析を行う。粘塑性流動有限要素法解析では、まず破壊規準に達した時点の要素の応力を一時的な超過応力と見なし、超過応力から得られた要素のストレッチングを Hohenemser と Prager によって提案された次式の一般化 Bingham 流動則で計算する。

$$2\eta v_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F \cdot S_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 η は塑性粘度、 v_{ij} はストレッチング、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 τ_y は降伏規準(ここでは Mohr-Coulomb の破壊基準値を用いる)、 J_2 は偏差応力テンソルの第 2 不変量、 F は次式で表される降伏関数である。

$$F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (2)$$

次に(1)式で求まる要素のストレッチングに弾性剛性マトリクスを乗じて計算される応力を生じさせるのに必要な節点力を積分により逆算し、この節点力を用いて弾性計算を行って要素の変形を決定する。粘塑性流動解析によって超過応力が消散した要素については液状化が終了したとし、次ステップからは再び通常の動的過渡応答解析を行う。

3. 塑性粘度の時間変化

服部ら⁽²⁾は、中空ねじりせん断試験によって、液状化後の土の塑性粘度の時間変化を求めた。これによると、液状化開始時から時間が経過すると液状化土の塑性粘度が増加することが示されている。本研究では、服部らの実験結果に基づき、液状化地盤の塑性粘度を次式で評価した。

$$\eta = 43.77 \cdot t \quad (\text{kPa} \cdot \text{s}) \quad (3)$$

ここに、 t は液状化発生後の時間(s)である。

キーワード：液状化，側方流動，有限要素法，塑性粘度，

連絡先：〒275-8588 習志野市津田沼 2-17-1 TEL 047-478-0449

4. 塑性粘度の時間変化を考慮した地震時の液状化に伴う地盤の側方流動の粘塑性有限要素法解析

ここでは、2. に示した粘塑性有限要素法を用いて、地震時の地盤の液状化に伴う側方流動のシミュレーションを行う。図-1に初期状態の解析モデル、また表-1に入力パラメータを示す。なお解析モデルは平面ひずみ条件にある。ここでは、長さ100m、厚さ10mの1/100傾斜の斜面を考える。液状化層は地表面から1.0m~5.0mの4.0mの範囲（図-1の破線部）にあり、その他の地盤は非液状化層とした。振動加速度は図-1に示すモデルの下端の節点に水平方向に50秒間作用させた。入力加速度波は、最大加速度4.9 m/s²、周波数4.0Hzの正弦波である。

ここでは、①塑性粘度 $\eta=100\text{kPa}\cdot\text{s}$ に固定した場合、および3. に示した②塑性粘度の時間変化を考慮した場合（ $\eta=43.77\cdot t$ kPa $\cdot\text{s}$ ）の2とおりの解析を行い側方流動変位挙動の比較を行った。

図-2は①のように塑性粘度を設定した解析によって得られた、図-1に示す地表面の変位測定ポイントの水平変位（斜面下向き正）の時間変化を示したものである。また図-3は②のように塑性粘度の時間変化を考慮した解析結果である。

両図から、塑性粘度を固定した①の場合は、加振後50秒程度で流動が収束し、水平変位は約3mと大きくなった。これは、地震時の液状化側方流動が地震終了後に遅れて生じるという実際の状況とは異なっている。一方、塑性粘度の時間変化を考慮した②の場合には、時間経過とともに塑性粘度が大きくなるため、流動には遅延が生じ、また収束時の変位は2.3m程度になった。

以上のことから、塑性粘度の時間変化を考慮することによって、実際の液状化地盤の側方流動に見られる遅延効果のシミュレーションが可能であると考ええる。

参考文献

- (1)小宮・渡邊・清水・中村：第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，土木学会，p.273-276，2001
- (2)服部ら：第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，土木学会，2002

表-1 入力パラメータ

地盤	弾性係数 E=1000.0kPa ポアソン比 $\nu=0.38$ 密度 $\rho=1.50\text{g/cm}^3$ 内部摩擦角 $\phi=30.0\text{deg}$ 粘着力 $c=1.00\text{kPa}$
地盤（液状化時）	弾性係数 E=10000.0kPa ポアソン比 $\nu=0.49$ 塑性粘度 η （本文中） 降伏値 τ_y （破壊基準）
	タイムステップ dt=0.001s

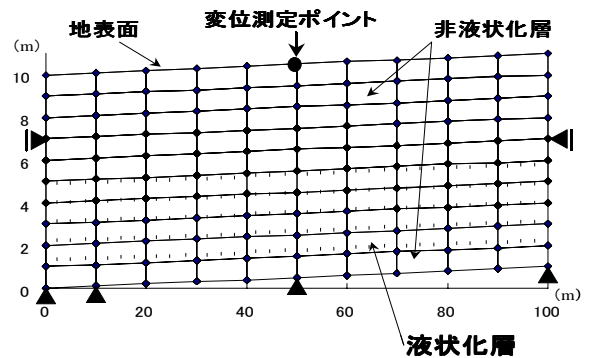


図-1 解析モデル

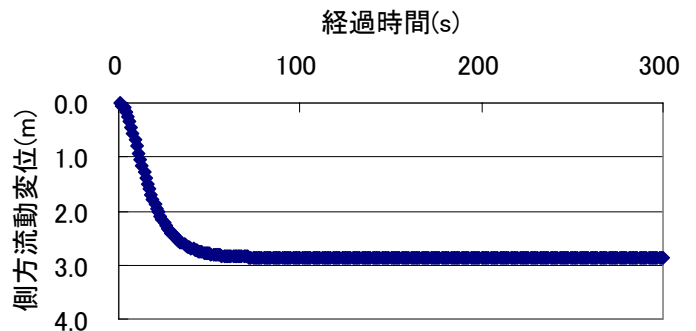


図-2 側方流動変位（塑性粘度固定）

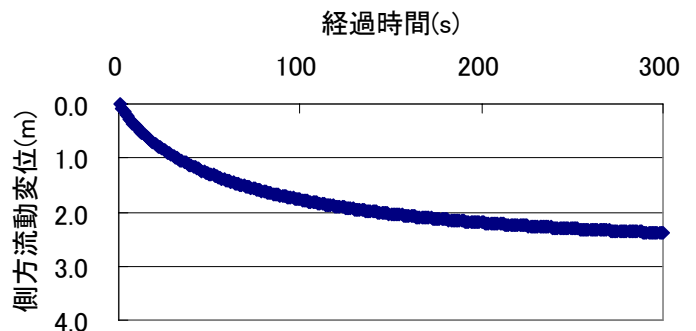


図-3 側方流動変位（時間変化考慮）