

東北学院大学工学部 学生会員 ○加茂 謙一

東北学院大学工学部 学生会員 佐藤 貴之

東北学院大学工学研究科 学生会員 日野 田育子

東北学院大学工学部 正会員 飛田 善雄

1.はじめに

強震時に、飽和砂地盤において液状化現象が生じた時、液状化に引き続いて大きな水平流動、沈下が生じることがある。1964年の新潟地震を契機として液状化に関する研究が行われるようになった。しかし、液状化に伴う流動現象については、1980年に入ってから、その実体が報告されるようになり、構造物に甚大な被害を与えることも明かとなっているが、このような現象が生じるメカニズムはまだ明らかとなっていない。

本研究では、固→液→固挙動の概念に基づき、安定な繰り返し載荷時の構成モデルと、粒状柱の崩壊の程度を表す構成モデルを組み合わせ、飽和砂地盤の非排水時の挙動を表現することを目的とし、解析を行った。

2.固→液→固挙動の提案

今回の研究では吉田<sup>1)</sup>が提案した仮説メカニズムに基づき、以下のような固→液→固挙動の概念を取り入れた<sup>2)</sup>。『粒状柱はせん断初期において、負のダイレイタンシーを生じ、過剰間げき水圧の上昇をもたらす。やがて、ある時点に達すれば正のダイレイタンシーを示す。その結果、過剰間げき水圧は減少に転じ、有効拘束圧は回復する。初期液状化後、粒状柱は大きく乱され、粒子間の衝突などを繰り返し、ある瞬間に粒状柱の再形成が生じ、固体としての性質を示すようになる。』しかし、固→液→固挙動の表現をすることは極めて難しいため、流動部分を極めて剛性の低い固体として考え、定式化した。

3.定式化

定式化は弾塑性理論を基に行う。ここでは、境界曲面モデルと呼ばれている定式化を考え、非関連流動則に基づいた飛田・吉田モデル<sup>3)</sup>を用いて定式化した。以下に抜粋して示す。

$$\dot{\sigma}_{ij} = E_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}$$

$$E_{ijkl} = E_{ijkl}^e - \frac{E_{ijmn}^e M_{mn} N_{pq} E_{pqkl}^e}{H_p + N_{ij} E_{ijmn}^e M_{mn}}$$

ここに、

$$E_{ijkl}^e = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\delta_{ij}\delta_{kl}$$

$$M_{mn} = \frac{S_{mn}}{2\sigma_e} - \frac{1}{3}\beta\delta_{mn}$$

$$N_{ij} = \frac{S_{ij}}{2\sigma_e} + \frac{1}{3}\mu\delta_{ij}$$

そして、正規載荷時、繰り返し載荷時の塑性係数を次のように定義した。

$$H_p = p' \left( \frac{\partial u_M}{\partial \gamma^p} \right) \quad \text{---(1)}$$

$$H_p = H_R - (H_R - H_p^*) \left( \frac{p}{p^*} \right)^m \quad \text{---(2)}$$

また本研究では、液状化以後の粒子間力が消失するという挙動（コラプス）を、コラプスパラメータとして、以下のように定義した。

$$\xi(i) = (c \times \gamma_{flow(i-1)})^d \times 10 \quad \text{---(3)}$$

$\gamma_{flow(i-1)}$  : 流動が開始から停止するまでに生じたせん断ひずみ

流動時には、粒状柱の崩壊に応じたせん断弾性係数を用いる。剛性を低減させるために、コラプスパラメータを考慮した以下のせん断弾性係数を用いて計算した。

$$G = \frac{G_0 \left( \frac{p'}{p'_0} \right)^{0.5}}{\xi} \quad (4)$$

#### 4. 解析手法

解析においては以下の条件を設定した。1)主応力軸は変化しないものとする。2)初期応力は  $x_1$ 、 $x_2$  方向共に等しい等方圧状態とする。3)一定振幅  $\tau_0$  を有する繰り返し荷重が周期的に作用する。4)非排水条件が満足される。正規荷重時と繰返し荷重時では塑性ひずみ増分が違ってくる。そこで塑性係数を、現在の応力比が過去の応力面内にある時を(2)式で、外にある時を(1)式で計算した。また、せん断弾性係数を、変相線に達した後、現在の応力比が変相線を超えていない時に(4)式を用いてせん断弾性係数を計算した。

#### 5. 解析結果

定式化したものを基に、飽和砂の非排水時の繰り返し荷重時・流動時挙動の解析を行った。図1は繰返し回数と過剰間隙水圧の変化を示したグラフである。繰返しに伴い過剰間隙水圧が増加している。図2は有効応力経路である。有効応力が減少し、変相線に達した後、定常ループを描いている。図3は式(3)に基づく、繰返し回数とコラプスパラメータの変化を表し、図4は応力ひずみ曲線である。剛性の減少を取り入れた時、流動を表現できた。以上の解析結果より、次の結論が得られる。

- ①繰返し荷重時の有効応力経路を表現できた。
- ②繰返しに伴い粒状柱の崩壊が進行していく挙動を表現するコラプスパラメータを用いることにより流動の表現ができた。

本研究では、あくまでも繰返し荷重試験結果により近い挙動を、解析により定性的に表現することを目的としている。今回解析は単調経路について行った。今後は一般経路については慎重な研究と考察が必要である。

参考文献1) 吉田望(1998):液状化に伴う流動のメカニズム、地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp.53-70

2)日野 東北学院大学土木工学科修士論文「飽和砂地盤の液状化に伴う地盤流動の構成モデルに関する研究」(2000)

3) Tobita, Y. and Yoshida, N. (1994): An isotropic bounding surface model for cyclic behavior of sand; Limitation and modification, Proc. of Int. Conf. On Prefailure behavior of sands, Sapporo, Balkema, pp.457-462

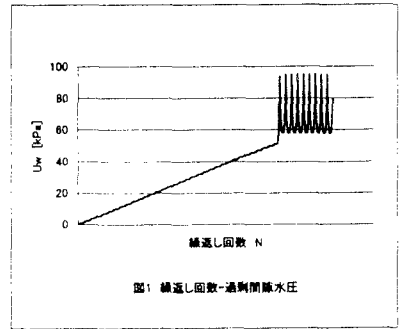


図1 繰返し回数-過剰間隙水圧

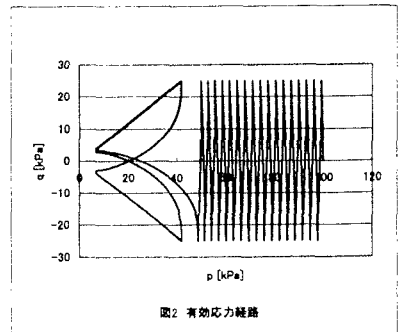


図2 有効応力経路

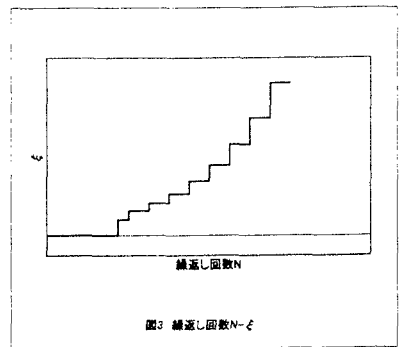


図3 繰返し回数-ξ

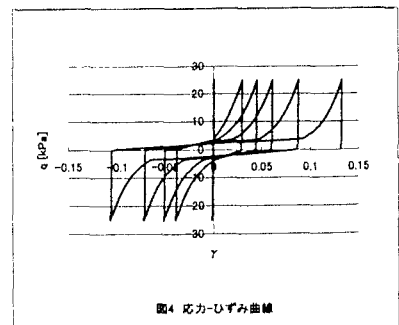


図4 応力-ひずみ曲線