

Ⅲ - A 69 過剰間隙水圧発生メカニズムに関する一考察

基礎地盤コンサルタンツ 正会員 鶴見 哲也  
 基礎地盤コンサルタンツ 正会員 水本 邦男

1. はじめに

新潟地震を契機に精力的に液状化現象とその被害に関する研究が進み、先の兵庫県南部地震の経験から、様々な構造物について液状化とそれに伴って生じる流動化に対する設計が必要となり種々の指針に取り込まれている。今般では、砂地盤内に発生する過剰間隙水圧は非排水条件であると仮定されているが、巨礫材料の様に透水性の非常によい材料にまでこの仮定を適用することに問題があるのではないであろうか。本論では、なぜ過剰間隙水圧が上昇するのかという液状化現象の根本的な問題について、土粒子と水の相互作用を手がかりに理論を導き、過剰間隙水圧が土粒子の沈降によって発生することを説明した。

2. 過剰間隙水圧の定式化

著者等は、材料が液状化（浮遊）状態にあり、かつ地震外力のない状況を考えた。この場合、重力以外の力は考えられないので、土粒子は沈降する以外の運動をし得ない。そこで、図-1の様な地盤を想定し、第j層の沈降について考えた。先ず、第j層は水平面内で等しく沈降するとすれば、第j層の微小要素(dx,dy,dz)に作用する力の釣合いに関する次式を得る。

$$\rho_d \frac{d^2 u}{dt^2} = \gamma' - \left( \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \frac{F}{dx dy dz} \right) \dots\dots(1)$$

ここに、u：土粒子の沈降変位量、 $\rho_d$ ：材料の乾燥密度、 $\gamma'$ ：材料の水中単位重量、 $e_0$ ：材料の間隙比、P：過剰間隙水圧、 $\sigma'$ ：有効応力、F：土粒子の沈降に伴って生ずる間隙水の粘性抵抗、である。上式中、土粒子の沈降に伴って生ずる間隙水の粘性抵抗 F は、図-2の様な円筒にモデル化された間隙内の流れ（ポアズイユの流れ）が発揮する粘性抵抗力として考えた。その結果、次式が導かれる。

$$\rho_d \frac{d^2 u}{dt^2} = \gamma' - \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) \dots\dots(2)$$

ここで、一つの円筒間隙内を流れる水の平均速度と土粒子の沈降速度が等しく、更に、土粒子の沈降現象は土粒子から見れば透水現象であると考えて、次の様な土粒子の沈降に関する方程式が得られる。

$$\rho_d \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{\gamma_w}{k} \frac{du}{dt} = \gamma' - \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \dots\dots(3)$$

ここに、k：透水係数、 $\gamma_w$ ：水の単位重量、であり、i：動水傾度、 $\mu$ ：水の粘度として、

$$k = \frac{\gamma_w}{8\mu} R^2, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\gamma_w i \dots\dots(4)$$

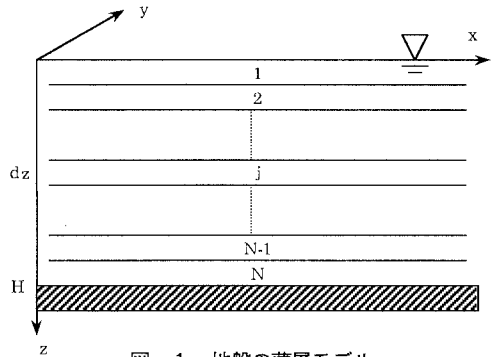


図-1 地盤の薄層モデル

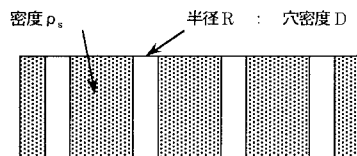


図-2 微小要素に空けた穴のモデル

キーワード 液状化, 過剰間隙水圧, 土粒子の沈降, 土粒子と水の相互作用

連絡先 (関東支社 東京都江東区東陽 3-22-6 東陽町 AXIS ビル 6F, TEL.03-5632-6824, FAX.03-5632-6816)

初速度ゼロで沈降を始めた土粒子はいずれ等速沈降運動の状態になる。式(3)で有効応力項考えない場合、その時の速度は、

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} k \approx k \dots\dots(5)$$

である。等速沈降速度と重力加速度のオーダーから、土粒子が等速沈降状態になるまでの時間のオーダーは、透水係数を  $10^{-4} \sim 10^{-6}(\text{m}/\text{sec})$  と考えれば、初速度ゼロから  $\Delta t$  後の速度を  $v = a\Delta t$  と表して次のように推定でき、

$$O(\Delta t) = \frac{O(v)}{O(a)} = \frac{O(k)}{O(a)} = 10^{-5} \sim 10^{-7}(\text{sec}) \dots\dots(6)$$

沈降開始後直ぐに等速状態になることが分かる。この時、土粒子の運動加速度はゼロであるから、式(2)より、

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \gamma' \dots\dots(7)$$

なる関係が示され、模型実験等で観測される通り、過剰間隙水圧分布の勾配が初期有効土被り圧相当になることが示される。

### 3. 考察

以上のように、土粒子と水の相互作用により過剰間隙水圧が生じることを説明した。つまり液状化現象は透水（排水）を伴う現象であり、非排水状態における  $\sigma = \sigma' + u$  の成立とは意味合いが違うことを意味する。振動三軸試験の液状化状態は、土粒子骨格体積が密になって拘束圧を供試体内の水が全て分担した状態を示しており、载荷を中断しても継続して過剰間隙水圧比は1である。载荷中断後暫くして土粒子が安定した状態になれば有効応力を生じることになり、供試体内の水圧は静水圧勾配を示していることになる。従って、試験前には圧密圧力相当に深い位置の地盤要素を想定していたのに対して、振動三軸試験で液状化した場合、地表面に堆積しているような状態に急変することになってしまう。また、通常の振動三軸試験の载荷レート（0.1Hz程度）では、土粒子に十分な再堆積のための時間を与えることになりかねないため、繰返し载荷中に既に再堆積している場合も想定される。従って、過剰間隙水圧比が1になっても供試体内の水圧勾配は  $\gamma_{\text{sat}}$  の勾配になっていないかも知れない。上記に関連して、礫のように透水性の良い材料であるほど、再堆積までの時間が早いので、振動三軸試験の適用そのものに疑問を抱かざるを得ない。つまり、如何なる未固結材料でも振動三軸試験を実施すれば繰返し応力比～繰返し回数関係が得られるので、本来なら液状化する筈のない材料もFL法による液状化判定では、この試験結果の存在により液状化してしまうことになってしまう場合が考えられる。このため、土粒子と水との相互作用を考慮した液状化強度評価法が今後必要であると考えている。

### 4. 結論

本論から結論されることは、1)土粒子骨格が密に変化しなければ沈降を生じないので液状化しないこと、2)ある時刻における土粒子骨格の体積変化に伴う地盤内要素の排水と下位の地盤からの流入量を含めた間隙水の流出が、等速沈降時の土粒子速度から得られる間隙水の流速を上回った場合に液状化が起きること、3)地震後の再堆積は、深部再堆積の基面から時間の1次関数的に順次終了すること<sup>1)</sup>、であろう。現在は、今回導いた理論の妥当性を検証するための実験を計画している。

### 謝 辞

本研究で導いた理論展開について埼玉大学工学部の渡辺啓行教授に貴重なご意見・ご指導を賜りましたので、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1)国生・澤野・河合・杉山：砂地盤の側方流動に関わる水膜の生成に関する研究、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、pp.317-320、1998.10