

# 過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響

応用地質 澤田俊一 三上武子 吉田望 竹島康人 藤井紀之

## 1 はじめに

地盤の地震応答解析や液状化解析では、精度よい解を得るためには応力-ひずみ関係のモデル化を精度よく行う必要がある。このために、実務では実験値のうち解析に影響を与える部分がよくシミュレートできるように応力-ひずみ関係のパラメータを決めている。

液状化解析では、ターゲットとして液状化強度曲線が用いられることが多い。これは、ランダムなせん断応力の载荷に対して液状化の発生を正しく予測するためには、最低限液状化強度曲線を幅広い繰返し数で満たしておく必要があるという考えによるものである。したがって、液状化強度曲線がよくシミュレートできているからといって液状化前後の挙動が再現できる訳ではないことに注意が必要である。

液状化強度は実務的には非排水繰返し三軸試験で求められる<sup>1)</sup>。後に示すように、この試験法で与えられる応力状態は実地盤のそれとは全く異なっているが、この試験で得られる液状化強度は成層地盤のそれと変わらないと考えられている<sup>2)</sup>。成層地盤の応力の再現ということでは、繰返し中空ねじり試験の方が実情に近い。そこで、二つの試験法を用いて液状化強度試験を行ったところ、液状化強度はほぼ一致するものの、その過程、液状化後の挙動には差があることが認められた。本論ではこれらの違いが地盤の液状化判定や液状化時の挙動に与える影響を検討する。

## 2 地盤の地震時応力と室内試験

図2.1 (a)に地震時に水平成層地盤中の地盤要素に作用する力を模式的に示すが、地震時には地盤には繰返しせん断力が作用する。一方、現在液状化強度を求めするために最も普通に行われている振動三軸試験<sup>1)</sup>では、図(b)に示すように側圧を一定に保ったまま軸力を変動させせん断応力を変動させるものであり、せん断応力の変動とともに有効拘束圧も変化する。このことは、図に示した载荷中のモールの応力円の変化からも理解することができる。

より原位置試験に近い応力状態を再現できる試験機に中空ねじり試験機がある。この試験では図(c)に示すように軸力、側圧を一定に保ったまません断応力を加えるので、試料の半径方向の応力変動が無視できるとすればほぼ実地盤に対応している。

これら二つの試験法では液状化強度には差がないと

いわれている<sup>2)</sup>。しかし、一方では各種の要因で両者には差があるという報告もある(例えば文献3)。そこで、本論ではまず、両方の試験を行い、その液状化特性を比較、検討する。

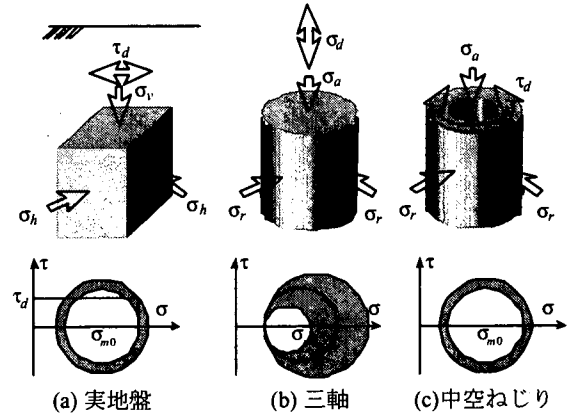


図2.1 室内試験における応力状態

## 3 液状化強度試験

繰返し三軸試験と中空ねじり試験を行う。以後図等では前者を三軸、後者をねじりとして表す。図3.1に試験装置の概要を示す。

試験に用いたのは東京湾岸の埋立地で採取したシルト質細砂で、細粒分含有率は30%以上である。採取した試料を外径7cm、高さ14cmに整形し試験に用いた。中空試験では内径は3cmとした。試料は所定の拘束圧になるように等方に圧密した後非排水状態にして繰返し载荷を行った。

図3.2に二つの試験による液状化強度曲線を比較して示す。なお、通常の繰返し三軸試験ではひずみとして軸差ひずみ両振幅を用いて結果を表すが、ここでは実地盤のせん断ひずみと対応させるためにせん断ひずみ両振幅で表している。後者は前者の1.5倍の値である。

液状化強度として繰返し三軸試験では初期液状化(過剰間隙水圧が初期有効拘束圧の95%)や軸ひずみ両振幅5% (せん断ひずみ両振幅7.5%)がよく用いられる。図3.2では、これら二つの液状化強度の指標は二つの試験法でほぼ一致している。しかしながら、他のひずみ振幅(図では1.5%, 3%を表示)を液状化の指標とした場合には二つの試験法で大きく異なる結果となっている。

キーワード 液状化, 有効応力解析, 過剰間隙水圧, 地震

連絡先 〒330-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5 応用地質(株)技術本部 Tel. 048-667-9141

図3.3に示した応力-ひずみ関係や応力経路では三軸試験とねじり試験の違いは明瞭に現れている。すなわち、よく知られているように、三軸試験では圧縮側と引っ張り側で挙動が異なり、応力経路は上下では対象ではないし、ひずみの発生量も異なる。これに対し

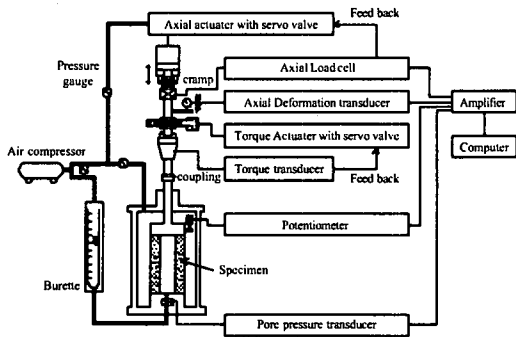


図3.1 試験装置

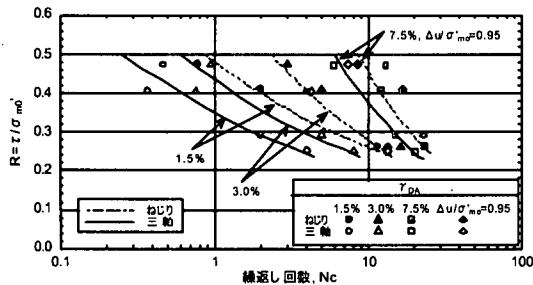


図3.2 液状化強度曲線の比較

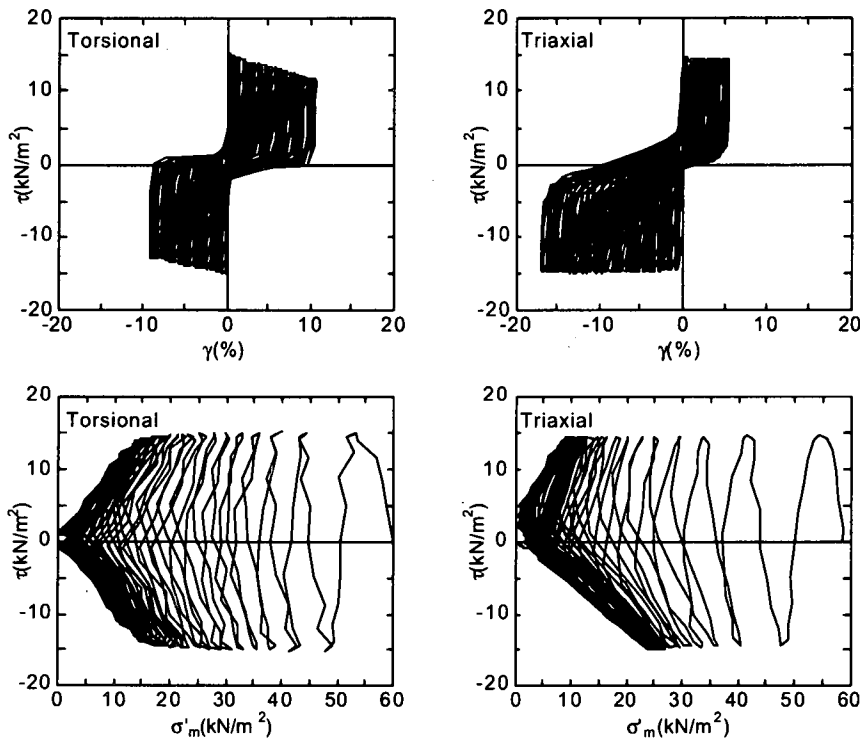


図3.3 三軸試験と中空ねじり試験の代表的な応力-ひずみ関係と応力経路

てねじり試験では応力-ひずみ関係、応力経路ともほぼ対象な形をしている。

図3.4に示した過剰間隙水圧の発生量でも両試験法に大きな違いが見える。三軸試験の過剰間隙水圧の振幅はねじり試験のそれに比べて非常に大きい。また、過剰間隙水圧の蓄積は三軸試験の方が早く現れるように見える。両試験法の差はせん断ひずみの履歴にもみることができ、荷重の初期では三軸試験の方が大きく、これが図3.2に示したひずみ両振幅1.5%や3%の液状化強度が三軸試験の方が小さくなっている原因である。また、図3.3でもみられたように、三軸試験のひずみは一方にドリフトしている。

#### 4 地震応答解析

前項でみたように、液状化強度が同じでも、液状化に至る過程は繰返し三軸試験とねじり試験では異なる。そして、実地盤の応力状態の再現という観点では繰返しねじり試験の方がずっと優れているのに対して、液状化強度を求める実務では繰返し三軸試験が用いられている。そこで、繰返し三軸試験で得られた挙動と繰返しねじり試験で得られた挙動で地震応答解析にどの程度の差が発生するかを数値計算によって調べることとした。

解析に用いたのは1964年新潟地震の際アパートが傾斜するなどの被害が発生した新潟市川岸町の地盤である<sup>4)</sup>。この地盤のGL-28mより上の部分を文献5)にしたがってモデル化した。図4.1にモデル化した地盤を示す。また、入力に用いた地震も文献5)にならい新潟

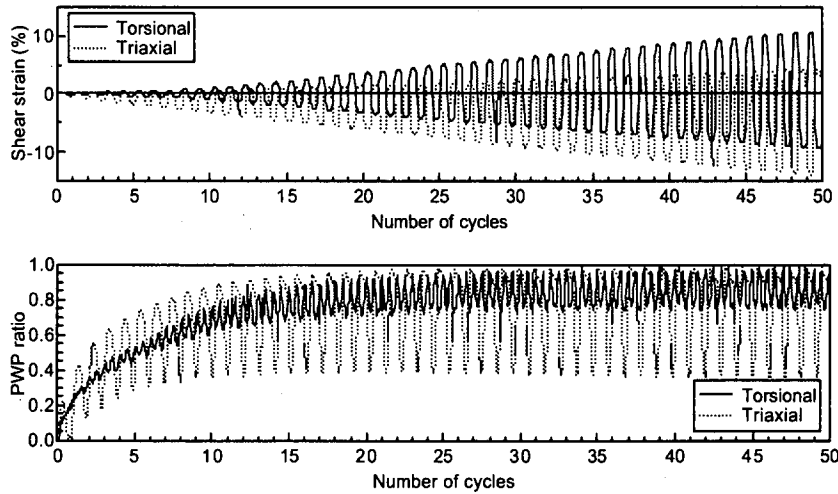


図 3.4 過剰間隙水圧の上昇度とひずみの時刻歴

地震の際に秋田県庁で観測された地震波を時間軸を短くして図4.1の地盤の下端に剛基盤として入力した。この際、最大加速度を $0.6m/s^2$ となるように振幅を調整した。なお、文献5)では7つのプログラムにより解析が行われているが、全てのコードで第2層のうちGL-3.5~5mが液状化し、その直上の層は液状化したりしなかったりであった。

解析には、有効応力解析地震応答コード FLIP を用いた。このコードではせん断応力-せん断ひずみ関係にはマルチスプリングモデルを用い、さらに、蓄積組成仕事に応じて非排水状態における有効拘束圧の変化を制御することにより過剰間隙水圧の発生量を考慮している<sup>6)</sup>。

前項の実験結果に対応させるため、過剰間隙水圧発生量を規定するモデルのパラメータを、初期液状化で定義した液状化強度曲線が一致し、かつ、液状化までの過剰間隙水圧発生履歴が異なるように設定した。図4.2には液状化強度曲線を示すが、二つのケースはほとんど同じ液状化強度となっている。一方、図4.3には過剰間隙水圧の発生の過程を示しているが、両者でかなり差があるが、これは、パラメータを調整した結果である。以後、実験結果に対応させる意味で、载荷の初期に過剰間隙水圧の発生量が多いケースを三軸、少ないケースをねじりと呼ぶことにする。

図4.4に最大加速度、過剰間隙水圧およびせん断ひずみの分布を示す。最大加速度は両者でほとんど差がないが、これは以下の時刻歴からわかるように最大加速度は液状化が発生する前に生じているからと考えられる一方、過剰間隙水圧の値も全体的には同じ傾向をしているが、CL-2~3.5mの部分ではねじりが液状化したのに対して三軸は液状化していないなど、液状化の発生の判断にも差がある。また、GL-5mより下方は液状化していないが、発生する過剰間隙水圧の量には差がある。

図4.5には主要動部分の地表の加速度時刻歴を示すが、ほぼ両者は一致している。しかし、図4.6のGL-2-3.5mの層の過剰間隙水圧発生量の時刻歴を見ると、

GL- (m)	$V_s$ (m/s)	$\rho_t$ ( $t/m^3$ )	$\sigma_{m0}$ (kPa)	$G_{m0}$ (kPa)	$\phi_f$ ( $^\circ$ )
第1層	110	1.8	110.25	21780	30
第2層	110	1.9	110.25	22990	31
第3層	150	1.9	110.25	42750	35
第4層	185	1.9	110.25	65030	37
第5層	230	2.1	110.25	111100	44

図 4.1 川岸町サイトの地盤

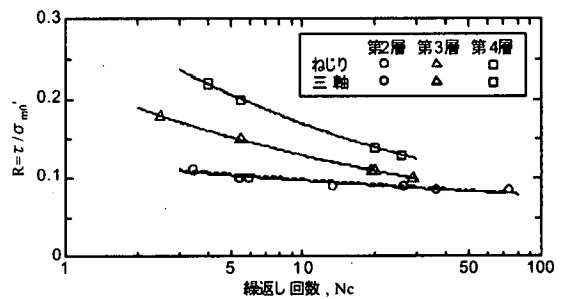


図 4.2 液状化強度曲線のシミュレーション

表 4.1 過剰間隙水圧発生モデルのパラメータ

液状化層	振動三軸試験				中空ねじり試験			
	$w_1$	$p_1$	$p_2$	$c_1$	$w_1$	$p_1$	$p_2$	$c_1$
第2層	0.8	0.3	1.5	1.54	0.32	0.6	1.3	1.5
第3層	4.5	0.3	1.5	1.4	2.4	0.6	1.3	1.3
第4層	5.2	0.3	1.5	1.5	3.5	0.6	1.3	1.2

両者で大きな差がある。

## 5. おわりに

実務で良く用いられている繰返し三軸試験の応力状態が地震時の地盤のそれとは異なることはよく知られている。本報では過剰間隙水圧の発生過程という点に着目し、二つの試験法の差を明らかにし、さらにその差が地震応答解析、特に液状化発生の判断の有無にどの程度影響を与えるかを検討した。その結果、当然のことではあるが、液状化発生の過程における過剰間隙水圧の発生量に差が出たこと、さらには要素試験では過剰間隙水圧を指標として液状化強度を全く一致させたにもかかわらず実地盤では液状化発生の有無まで異なる結果となることが示された。

### 【参考文献】

- 1) 地盤工学会 (2000) : 土の繰返し非排水試験, 土質試験の方法と解説—第1回改訂版—, pp.635-702
- 2) 石原研而 (1976) : 土質動力学の基礎, 鹿島出版, p. 264
- 3) 村松正重, 龍岡文夫, 佐々木勉, 関真一 (1981) : 振動三軸および動的ねじり単純せん断による密な砂の液状化特性, 第16回土質工学会研究発表会講演集, pp. 601-604
- 4) 時松孝次 (1989) : 1964年新潟地震による河岸町アパートの被害と強震記録, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp. 44-49
- 5) 石原研而他 (1989) : 地盤および土構造物の有効応力解析, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp. 50-136
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T., "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, 1990

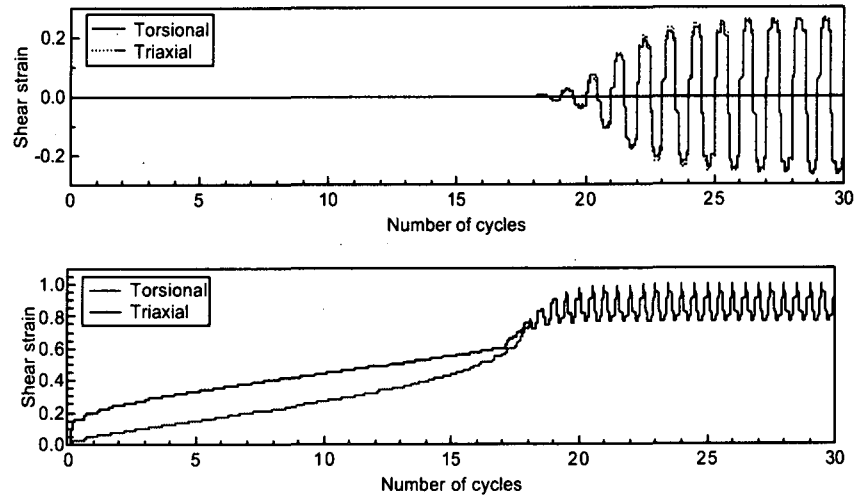


図 4.3 ひずみと過剰間隙水圧の発生量

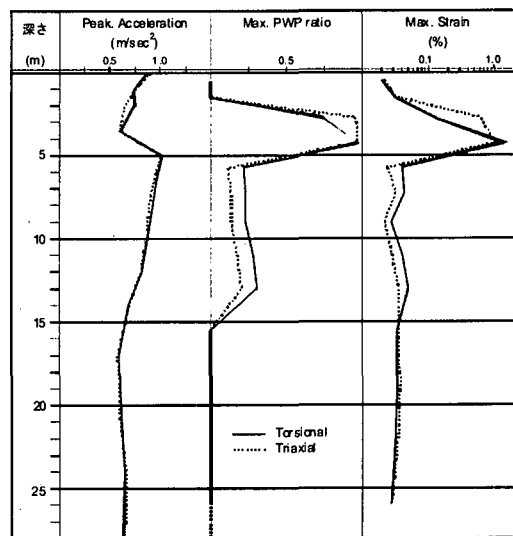


図 4.4 最大応答値

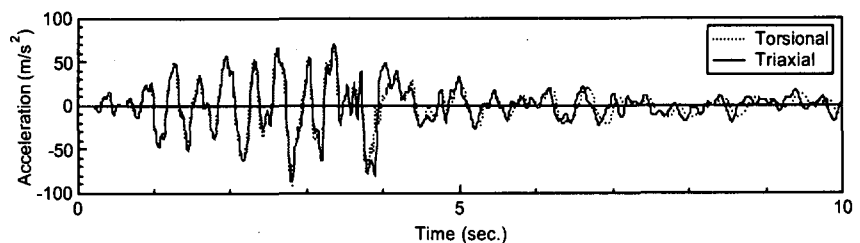


図 4.5 地表の加速度時刻歴

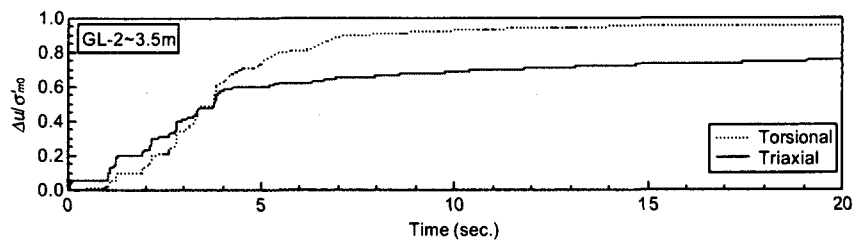


図 4.6 過剰間隙水圧時刻歴 (GL-2~3.5 m)