

## 耐震性検討のための数値解析におけるパラメータ設定についての課題

## Variation of the Determined Parameter in Numerical Analysis for Seismic Performance Evaluation

三上武子	Takeko MIKAMI	(応用地質(株) コアラボ試験センター)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学 大学院工学研究科)
植村一瑛	Kazuaki UEMURA	(広島大学 大学院工学研究科)
仁科晴貴	Haruki NISHINA	(広島大学 大学院工学研究科)

基礎や土構造物の性能設計では、変形量を精度よく評価することが求められており、FEMをはじめとした数値解析は有効な手段となる。本研究では、解析精度を支配する要因のひとつである解析技術者の判断に焦点をあて、解析技術者によって液状化を対象とした数値解析に必要なパラメータ設定にどのような差が生じるのか把握するためのアンケート調査を実施した。その結果、ゆるい砂地盤の設定パラメータは比較的一致するものの、室内試験結果にばらつきがある場合や密な砂地盤の場合には、設定パラメータが解析技術者によって異なり、要素シミュレーションで得られる変形量に大きな差が生じることが分かった。

キーワード：液状化，数値解析，パラメータ設定，ばらつき (IGC : D-07, E-08)

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震を契機として、性能設計が取り入れられるようになった。基礎や土構造物に対する性能設計では、変形量を用いて性能を評価する<sup>1)</sup>ことが多く、変形量を精度よく求める手段としてFEMをはじめとした数値解析があげられる。ところで、解析結果は解析コードの能力、地盤情報の精度および解析技術者の能力の三つの要因に作用される<sup>2)</sup>。言い換えれば、いかに地盤の挙動を精度よく表現し、いかに地盤を最適にモデル化できるかが解析結果の精度を左右することになる。地盤のモデル化においては、文献資料や地盤調査結果をもとに解析技術者が数値解析に必要なパラメータを設定することになるが、解析技術者の判断や力量によってその設定値は大きく異なるものと考えられる。設定したパラメータが異なれば、必然的に数値解析で算定される地震時における基礎や土構造物の変形量も異なるものと考えられる。

筆者らは、解析精度の向上を目指して様々な取り組みを行っているが<sup>3)~5)</sup>、その一環として、数値解析におけるパラメータ設定に関するアンケート調査を行った。ここでは、特に解析技術者の判断に着目して、同じ解析コード、地盤調査結果を用いて、回答者にパラメータを設定してもらった方法でアンケートを行い、技術者によってどの程度設定したパラメータが異なるのか調査した。なお、アンケートの対象は、広島地区の地盤工学を専門とする技術者とした。

本稿では、アンケート結果を収集整理し、パラメータ設定に関する実態と課題の現況についてとりまとめた結果

を報告する。なお、ここでは種々ある数値解析法<sup>6),7)</sup>などのうちFLIP<sup>6)</sup>を対象としているが、検討方法や結果は他の数値解析法にも適用可能な点が多いと考えている。

## 2. アンケートの概要

## 2.1 質問内容

本アンケートでは、2つの調査地を選定し、それらの地盤調査結果を示して、FLIPに必要なパラメータを設定してもらった。ここでは、調査地が特定されるため、ボーリング柱状図は割愛するが、地盤調査結果から得られた調査値の物性を表-1に示す。また、液状化試験<sup>8)</sup>の結果を図-1および図-2に示す。FLIPに必要なパラメータを表-2に示すが、①~⑩のパラメータは事務局で指定し、回答者には太枠で囲んだ液状化特性を規定するパラメータの⑪~⑯を設定してもらった。ここで、文献9)では、⑬の $p_1$ は0.5、⑯の $S_1$ は0.005とすることを標準としているが、解析上級者においては、これらのパラメータを微調整することによってより正確にフィッティングを行う場合もあるため、今回のアンケートではこれらのパラメータも設定してもらったこととした。また、実際の解析では、対象構造物や想定地震動を考慮してパラメータ設定を行うが、本アンケートの目的が実態把握と課題抽出であることから、これらの前提条件は指定しなかった。各回答者が設定したパラメータをもとに事務局で要素シミュレーションを行って、液状化試験結果の再現状況を比較した。なお、FLIPの構成則に

おける各パラメータの役割は Appendix に示す。また、本検討では FLIP Ver.3.3 相当の構成則（従来法）を用いている。

### 2.2 調査地の液状化特性

調査地 1 の液状化強度  $R_{L20}$ （両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$ 、繰返し回数  $N_c=20$  回で定義）は 0.209 でややゆるい砂地盤、調査地 2 の  $R_{L20}$  は 0.299 でやや密な砂地盤と位置づけるこ

表-1 調査地の物性

物性値	調査地 1 11.10-12.10m	調査地 2 7.00-7.80m
土質区分	細砂	細砂
平均 N 値	17	17
$\rho_t$ 湿潤密度	1.75g/cm <sup>3</sup>	1.90g/cm <sup>3</sup>
$\sigma'_v$ 土被り圧	120kN/m <sup>2</sup>	80kN/m <sup>2</sup>
$V_p$ P 波速度	1410m/s	1410m/s
$V_s$ S 波速度	152m/s	206m/s
$F_c$ 細粒分含有率	10%	7%
$D_{50}$ 50%粒径	0.29mm	0.36mm
$R_{L20}$ 液状化強度	0.209	0.299

表-2 FLIP に必要なパラメータ

分類	パラメータ		調査地 1 11.10-12.10m	調査地 2 7.00-7.80m
	特性物理	① $\rho_t$	湿潤密度	1.75g/cm <sup>3</sup>
	② $n$	間隙率	0.55	0.47
動的変形特性	③ $\sigma'_{vm}$	$G_{max}, K_{vm}$ に対応する平均有効応力(基準拘束圧)	90 kN/m <sup>2</sup>	60 kN/m <sup>2</sup>
	④ $G_{vm}$	せん断弾性係数 ( $\sigma'_m = \sigma'_{vm}$ における値)	40400 kN/m <sup>2</sup>	80600 kN/m <sup>2</sup>
	⑤ $K_{vm}$	体積弾性係数 ( $\sigma'_m = \sigma'_{vm}$ における値)	105000 kN/m <sup>2</sup>	210000 kN/m <sup>2</sup>
	⑥ $m_s$	せん断弾性係数 $G_{vm}$ の拘束圧依存性	0.5	0.5
	⑦ $m_k$	体積弾性係数 $K_{vm}$ の拘束圧依存性	0.5	0.5
	⑧ $\phi'_i$	せん断抵抗角	35°	35°
	⑨ $c$	粘着力	0	0
	⑩ $h_{max}$	履歴減衰の上限值	0.24	0.24
液状化特性	⑪ $\phi'_p$	変相角	28°	28°
	⑫ $m_l$	液状化特性全体を規定するパラメータ		
	⑬ $p_1$	液状化特性の前半を規定するパラメータ		
	⑭ $p_2$	液状化特性の後半を規定するパラメータ		
	⑮ $c_l$	液状化発生の下限値を規定するパラメータ		
	⑯ $S_l$	液状化の終局状態を規定するパラメータ		

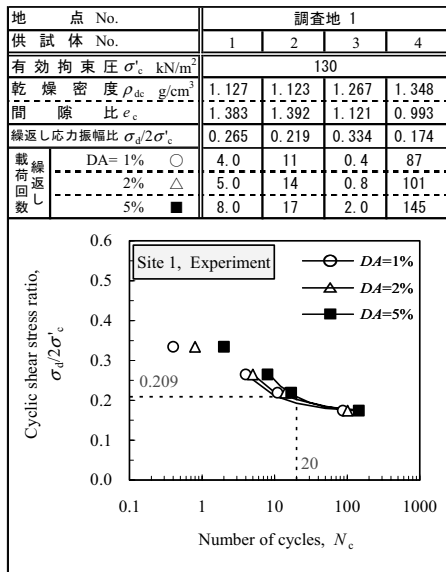


図-1 液状化試験結果(調査地 1)

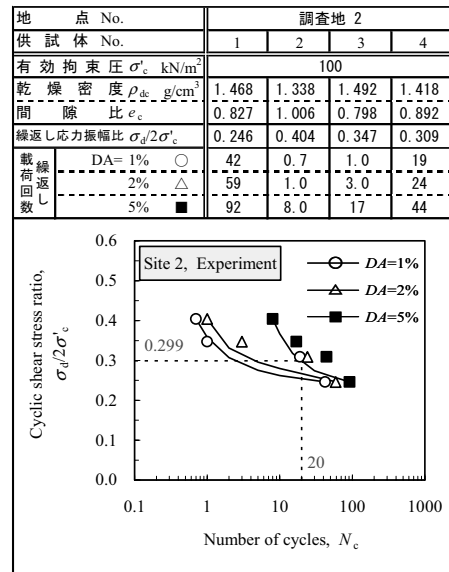


図-2 液状化試験結果(調査地 2)

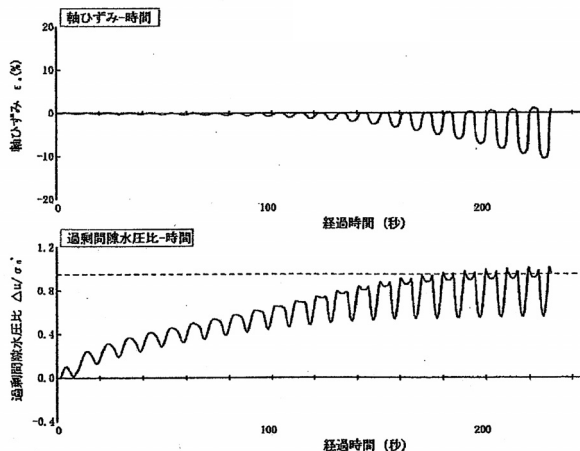


図-3 時刻歴図の一例(調査地 1)

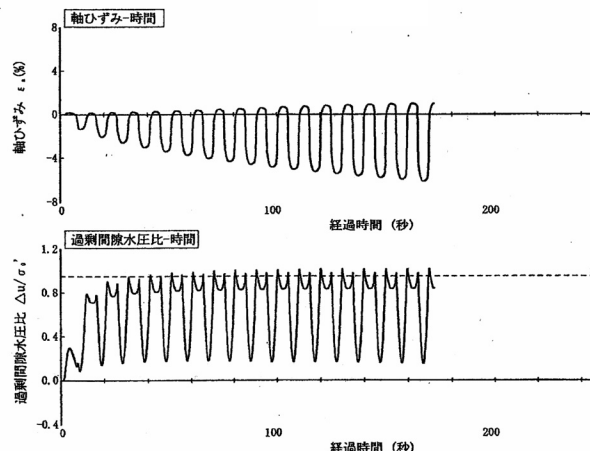


図-4 時刻歴図の一例(調査地 2)

とができる。このことは、図-3および図-4に示した時刻歴図からも読取ることができる。調査地1では過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ が1に近くなったあたりから軸ひずみ $\varepsilon_a$ が急増するのに対して、調査地2ではダイレイタンシー効果によって有効応力が回復するため、 $\Delta u/\sigma'_c$ が1に達した後も有限の軸ひずみしか生じない。このため、図-2に示したように、両振幅軸ひずみ $DA=2\%$ から5%に達するまでに多くの繰返し回数を要する。また、調査地1では液状化試験における供試体間のばらつきは比較的小さいため、技術者による液状化強度曲線や $R_{L20}$ の評価の差は小さいと考えられる。しかし、調査地2では供試体間にばらつきがあるため、技術者によってこれらの評価が異なることが予想される。なお、試験者は、試験値の下限に液状化強度曲線を設定して $R_{L20}$ を決定している。

### 3. アンケート結果

#### 3.1 回答者の性質

有効回答期間を1ヶ月に設定して、広島地区の地盤工学を専門とする技術者にアンケートの協力を依頼したところ、6名から回答があった。図-5～図-7に回答者の性質を示す。回答者の所属機関は4名がコンサルタントで、建設会社、大学が1名ずつであった。回答者の実務経験は、半数が5年以下で初級者、2名が6～10年で中堅者、11年以上の上級者は1名で、やや初級者が多い傾向にある。これを反映してか、FLIPの使用実績は3名がはじめてで、5回未満も加えると2/3が初級者と言える。

#### 3.2 パラメータの設定

パラメータの設定結果を図-8および図-9に示す。液状化特性の後半を規定するパラメータ $p_2$ および液状化発生の下限值を規定するパラメータ $c_1$ は回答者による差は小さいが、液状化特性全体を規定するパラメータ $w_1$ は回答者によって大きく異なる。図中には平均値と標準偏差も示したが、いずれのパラメータも調査地1に比べて調査地2の

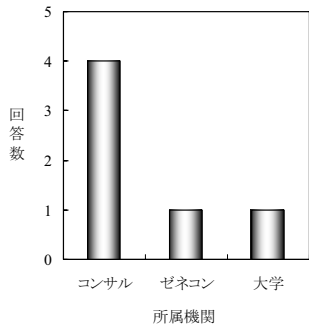


図-5 回答者の所属機関

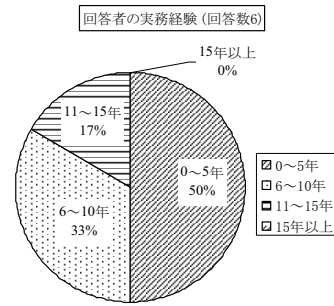


図-6 回答者の実務経験

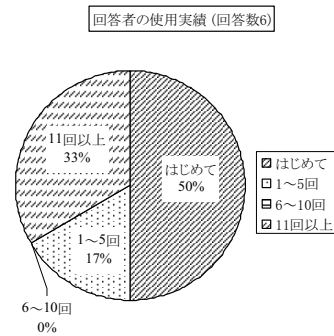


図-7 FLIP使用実績

標準偏差の方が大きく、特に $p_2$ の設定では二つのグループに分かれている。試験値にばらつきがあるため、設定パラメータにも差が生じたものと考えられる。

#### 3.3 液状化強度曲線のフィッティング

図-8および図-9に示すパラメータを用いて計算された $DA=5\%$ のときの液状化強度曲線を図-10および図-11に示す。調査地1では一部の回答者を除いて液状化強度曲線はほぼ一致している。一方、調査地2では、試験者と同じように試験値の下限に液状化強度曲線を設定したグループ（回答者 No.1, 3, 5, 6）と試験値の平均に液状化強度曲線を設定したグループ（回答者 No.2, 4）に分かれた。

$DA=5\%$ 以外の液状化強度曲線の設定状況の一例を図-12～図-15に示す。前述したとおり、調査地2は密な砂地盤のため、 $DA=2\%$ のときの繰返し回数 $N_{DA2}$ と $DA=5\%$ のときの繰返し回数 $N_{DA5}$ の差が大きい。回答者 No.2は、 $p_2$ の値を調査地1の0.800に比べて調査地2では0.530と小さく設定して液状化の後半の変形を抑制することにより、 $N_{DA2}$ と $N_{DA5}$ の差を表現している。一方、回答者 No.1の $p_2$ は調査地1が0.860、調査地2が0.870でほとんど変化がなく、 $DA=5\%$ 以外の液状化強度曲線は試験値にあまり整合していないことから、 $DA=5\%$ のみに着目してパラメータを設定したものと推察される。ゆるい砂地盤では変形が急増するため $N_{DA2}$ と $N_{DA5}$ の差は小さく、いずれの回答者も、 $DA=5\%$ 以外の軸ひずみの液状化強度曲線も試験値に比較的良好に一致している。以上より、密な砂地盤では、

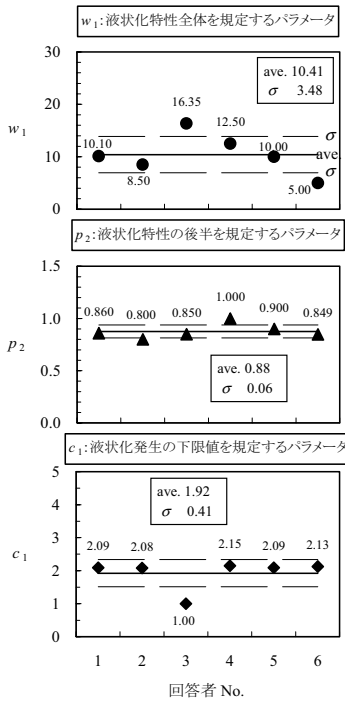


図-8 パラメータの設定結果(調査地 1)

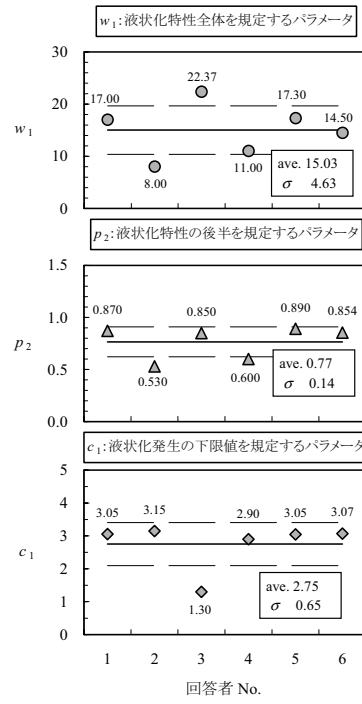


図-9 パラメータの設定結果(調査地 2)

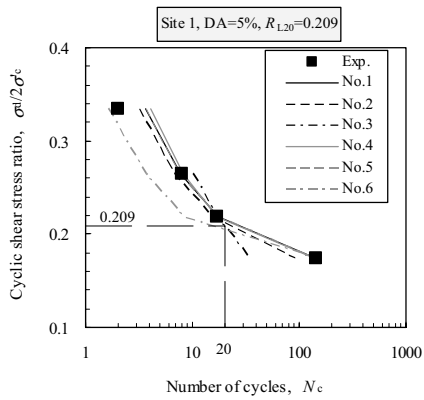


図-10 DA=5%のときの液状化強度曲線(調査地 1)

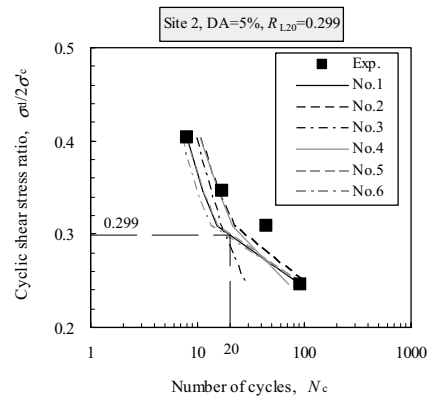


図-11 DA=5%のときの液状化強度曲線(調査地 2)

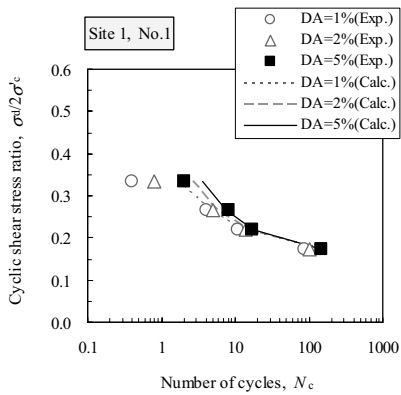


図-12 回答者 No.1 の液状化強度曲線(調査地 1)

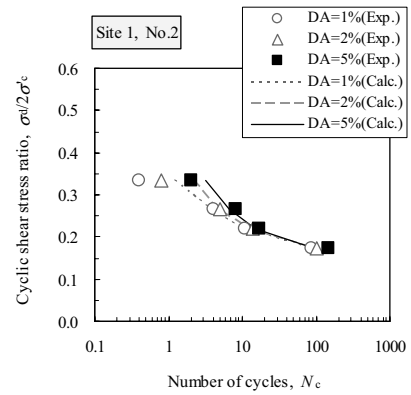


図-13 回答者 No.2 の液状化強度曲線(調査地 1)

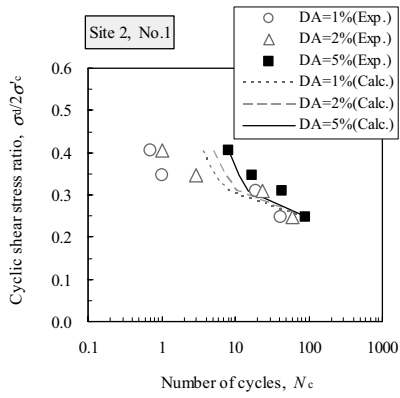


図-14 回答者 No.1 の液状化強度曲線(調査地 2)

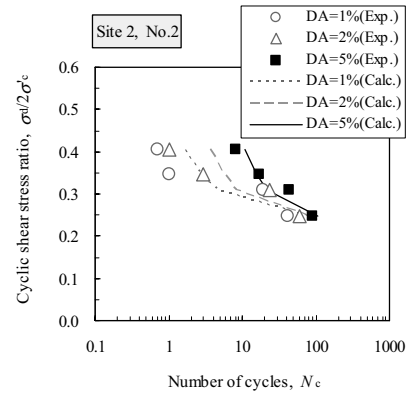


図-15 回答者 No.2 の液状化強度曲線(調査地 2)

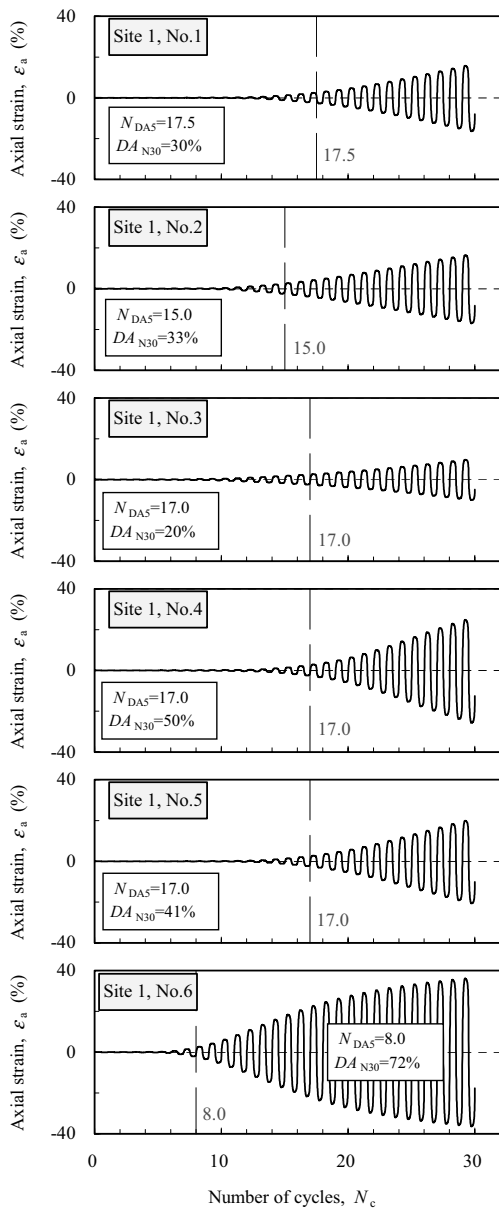


図-16 軸ひずみの時刻歴(調査地 1)

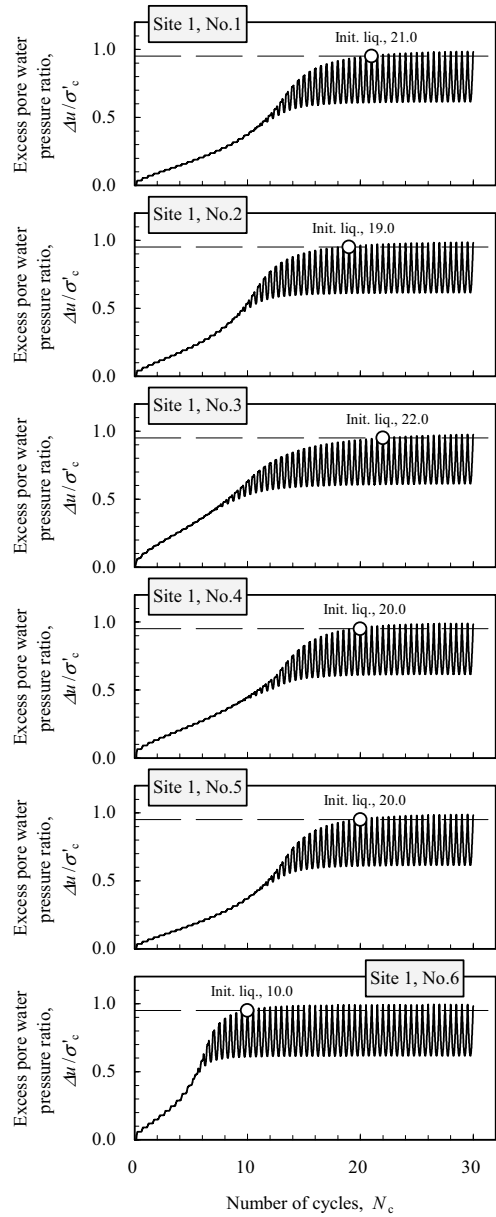


図-17 過剰間隙水圧比の時刻歴(調査地 1)

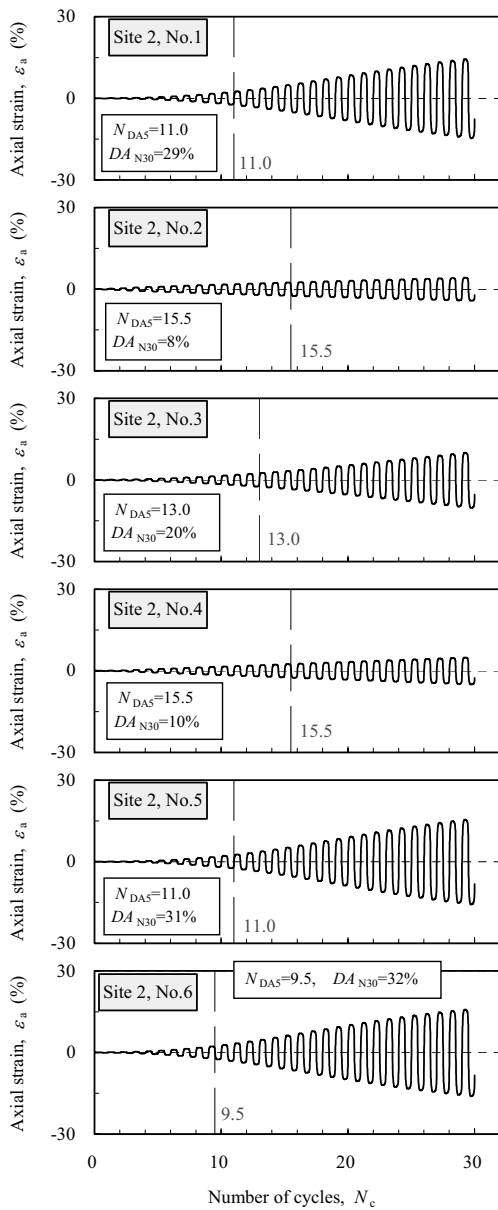


図-18 軸ひずみの時刻歴図(調査地 2)

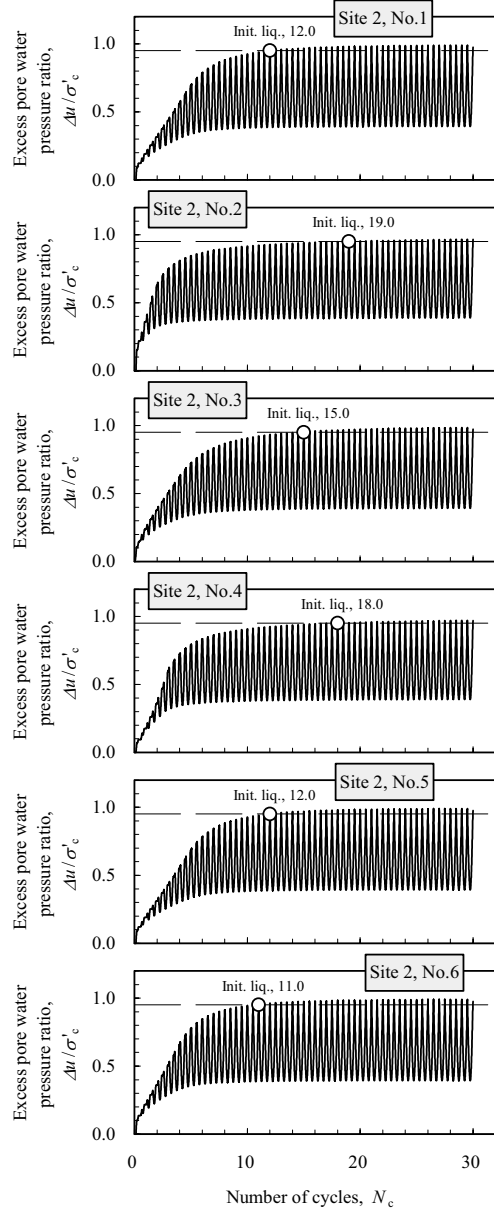


図-19 過剰間隙水圧比の時刻歴図(調査地 2)

DA=5%以外の軸ひずみにも着目してパラメータを設定する必要があることがわかる。

### 3.4 軸ひずみおよび過剰間隙水圧比の時刻歴

図-8および図-9に示すパラメータを用いて計算された軸ひずみ $\epsilon_a$ と過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ の時刻歴図を図-16～図-19に示す。軸ひずみの時刻歴には $N_{DA5}$ の位置を破線で示した。過剰間隙水圧比の時刻歴では、 $\Delta u/\sigma'_c=0.95$ を初期液状化と定義し、その到達位置を白丸で示した。調査地1の回答者No.1, 2, 4, 5の液状化強度曲線はほぼ一致していたことから、これらの $N_{DA5}$ および初期液状化の位置もほぼ一致している。ただし、軸ひずみの最終値は若干異なる。ここでは、便宜上繰返し回数30回までの時刻歴を

示したが、このときの両振幅軸ひずみ $DA_{N30}$ は、最小値(30%)と最大値(50%)で1.7倍異なる。わずかな液状化強度曲線の違いでも、変形量最終値に差が生じることから、継続時間の長い地震動を対象とした解析を行う場合などでは注意が必要となる可能性がある。調査地2では、回答者によって液状化強度曲線のフィッティングが異なっていたため、 $N_{DA5}$ および初期液状化の位置はもちろんのこと軸ひずみの最終値にも大きな差が生じている。試験値の平均に液状化強度曲線を設定したグループが軸ひずみの最終値が約10%であるのに対して、下限に液状化強度曲線を設定したグループでは約30%とその差は3倍にもなる。アンケートを実施するにあたって、対象構造物や想定地震動などの前提条件は特に示さなかったため、このよう



な大きな差が生じたと考えるが、実際の解析ではこれらの条件を十分に考慮してパラメータを設定することが大切であると考え。

調査地 2 のもうひとつの特徴である密な砂地盤の表現については、DA=5%以外の軸ひずみにも着目してパラメータを設定したと推定される回答者 No.2 および 4 の時刻歴は、図-4に示した密な砂地盤の時刻歴の特徴を比較的良好に表現できていることから、液状化特性の後半を規定するパラメータ  $p_2$  の設定に特に注意を払う必要があることが分かる。

### 3. まとめ

技術者によって数値解析におけるパラメータの設定がどの程度異なるのか実態を把握するため、アンケート調査を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 試験結果にばらつきがある場合、技術者によって液状化強度曲線のフィッティングに差が生じることが分かった。技術者の経験の差や試験結果の解釈および想定した対象構造物、地震動などが異なるために差が生じたと推察されるが、この差は液状化時のひずみの大きさにも反映し、さらに構造物の変形量の予測においても影響を与えると予想される。
- 2) 変形が急激に増大するゆるい砂地盤では、軸ひずみ DA=5%に着目するだけで、概ね他のひずみレベルに対応する液状化強度曲線も再現できる。これに対し、密な砂地盤では、DA=5%に着目するだけでは他のひずみレベルの予測精度が確保できないため、DA=5%以外の軸ひずみにも着目してパラメータを設定することが望ましい。
- 3) 液状化強度曲線がほぼ一致している場合においても、そのわずかな違いによって、変形量の最終値に大きな違いが生じることがある。

今後、今回の検討で得られた違い等が、各種の構造物・地震動の条件下で、構造物の変形量の予測精度にどのよう

な影響を及ぼすか、検討を行っていく予定である。そして、要求される耐震性能レベル等の各種の条件に応じたパラメータ設定における許容誤差の程度を明らかにしていきたい。

### 謝辞

本アンケートの実施にあたっては、匿名回答者の皆様にご協力いただきました。また、広島地区土質セミナー会員の皆様には、アンケート結果を取りまとめる上で貴重なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 例えば、国土交通省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007。
- 2) (社)地盤工学会関東支部：液状化を考慮した地盤と構造物の性能設計，pp.101-103，2008。
- 3) Mikami, T., Ichii, K., Iai, S., Ozutsumi, O., Nakahara, T. and Yokoyama, N. : Modeling of strain increase of liquefied soils in cyclic shear loading considering material characteristics, Proc., International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tsukuba, pp.1395-1401, 2009.
- 4) Uemura, K., Ichii, K., Mikami, T., and Ozutsumi, O. : Assessment of liquefaction potential against long duration shaking and its application, Proc., International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, Tsukuba, pp.1477-1482, 2009.
- 5) 仁科晴貴，一井康二，植村一瑛，三上武子，木寺寛：細粒分を含んだ砂地盤における Steady State に関する実験的研究，地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」，2009.(投稿中)
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Solis and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 7) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S. : A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 8) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説－第1回改訂版－，pp.636-642，2000。
- 9) 森田年一，井合進，Hanlong, L., 一井康二，佐藤幸博：液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法，港湾技研資料，No.869，pp.1-36，1997。

(2009年6月29日 受付)

Appendix

FLIP は有効応力法に基づく二次元地震応答解析プログラムで、その特徴は以下のようにまとめられる。

- ・ 平面ひずみ状態を解析対象とする有限要素法に基づくプログラムである。
- ・ 地盤の液状化を考慮した地震応答解析を行い、部材断面力や残留変形等を計算する。
- ・ 土のせん断応力-せん断ひずみ関係には、図 A-1に示す東畑らの多重せん断ばねモデル<sup>i)</sup>を採用している。
- ・ 液状化現象は有効応力法により考慮し、過剰間隙水圧発生モデルとして図 A-2に示す井合モデル<sup>ii)</sup>を採用している。

FLIP では、せん断ばねの特性を双曲線モデルを用いて表現する。ここで、せん断剛性  $G_m$  および体積弾性係数  $K_m$  は平均有効応力  $\sigma'_m = (\sigma'_x + \sigma'_y)/2$  に依存するため、表-2に示したパラメータを用いて次式により算定する。

$$G_m = G_{ma} \left( \frac{c \cot \phi_f - \sigma'_m}{c \cot \phi_f - \sigma'_{ma}} \right)^{m_G}$$

$$K_m = K_{ma} \left( \frac{c \cot \phi_f - \sigma'_m}{c \cot \phi_f - \sigma'_{ma}} \right)^{m_K}$$

ここで、応力の符号は、圧縮を負とする。

一方、過剰間隙水圧の上昇は、図 A-2に示した液状化フロントを用いて表現する。液状化フロントは、偏差応力  $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 = \{ \tau_{xy}^2 + ((\sigma'_x - \sigma'_y)/2)^2 \}^{0.5}$  と  $\sigma'_m$  で定義される座標をそれぞれ初期平均有効応力  $\sigma'_{ma}$  により正規化し、非排水かつ全応力一定条件下において  $\sigma'_m/\sigma'_{ma}$  に一致する状態変数  $S$  とせん断応力比  $r = q/\sigma'_m$  で定義される正規化した座標系を用いて定義する。液状化フロントの形は、基本的には図 A-2中に示されるとおり、変相線以下では鉛直、変相線を超えるとせん断破壊線に平行になるものとして、液状化フロントパラメータ  $S_0$  を正規化した塑性せん断仕事  $w$  の関数として次式により与えている。

$$S_0 = 1 - 0.6(w/w_1)^{p_1} \quad (w \leq w_1 \text{ の時})$$

$$S_0 = (0.4 - S_1)(w/w_1)^{p_2} + S_1 \quad (w > w_1 \text{ の時})$$

また、塑性せん断仕事  $w$  の計算においては、全せん断仕事  $w_1$  から弾性せん断仕事  $w_e$  に液状化発生の下限值を規定するパラメータ  $c_1$  をかけたものを差し引いて求める。

$$w = \sum R \cdot \Delta w$$

$$\Delta w = \Delta w_t - c_1 \cdot \Delta w_e$$

- ここに、 $R$  : 破壊線近傍の仕事に対する低減係数
- $\Delta w_s$  : 各ステップにおける塑性せん断仕事
- $\Delta w_t$  : 各ステップにおける全せん断仕事
- $\Delta w_e$  : 各ステップにおける弾性せん断仕事

以上のように、過剰間隙水圧の上昇を規定する液状化パラメータは、 $\phi_p, w_1, p_1, p_2, c_1, S_1$  の6つとなる。

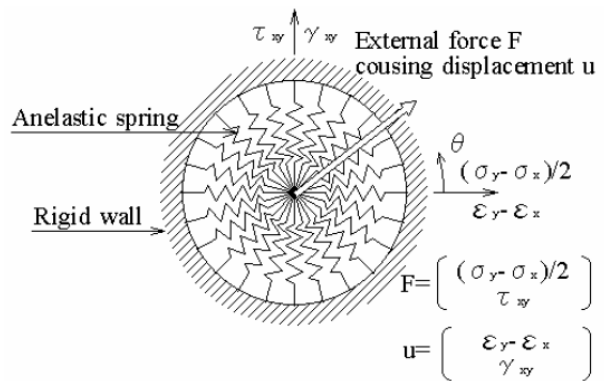


図 A-1 多重せん断ばねモデル<sup>i)</sup>

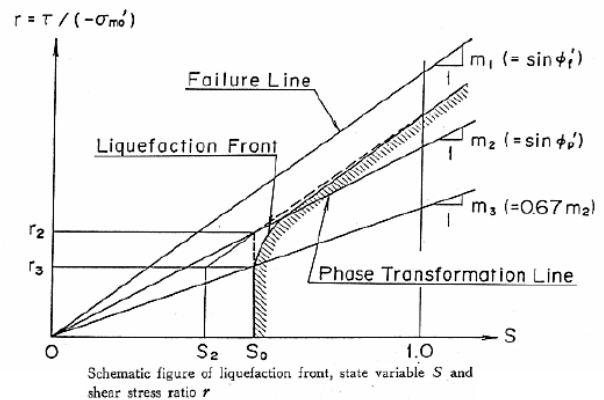


図 A-2 過剰間隙水圧モデル<sup>ii)</sup>

Reference

<sup>i)</sup> Towhata, I., and Ishihara, K., : Modeling soil behaviour under principal stress axes rotation, Proc. 5<sup>th</sup> International conference on numerical method in geotechnical, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.  
<sup>ii)</sup> Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T., : Parameter Identification for a Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbour Res. Inst. Vol.29, No.4, 1990.