

# 不飽和砂質土における乾燥密度及び含水比のばらつきが地震時地盤沈下量推定に与える影響

北爪 貴史<sup>1</sup>・後藤 聡<sup>2</sup>・荒木 功平<sup>3</sup>・佐藤 博<sup>4</sup>・佐藤 正行<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 東電設計株式会社 土木本部 新領域開発部(〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲)

E-mail: dkita@tepsco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 社会システム工学系(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: goto@yamanashi.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 社会システム工学系(同上)

E-mail: karaki@yamanashi.ac.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 東京電力株式会社 技術開発研究所(〒035-0076 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎4-1)

E-mail: sato.hiro@tepcoco.jp

<sup>5</sup>正会員 東電設計株式会社 土木本部(〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲)

E-mail: sato@tepsco.co.jp

排気排水条件下において繰返しせん断を受ける不飽和砂質土の体積ひずみを応力制御方式による中空ねじり繰返しせん断試験から求めた。乾燥密度及び含水比を変化させた幾つかのケースを実施した結果から、乾燥密度が小さいほど体積ひずみが大きくなること、含水比が大きいほど体積ひずみが大きくなること、これら物理特性の変動による体積ひずみの変化率はせん断応力比に応じて異なること、がわかった。乾燥密度及び含水比のばらつきを考慮した地震時地盤沈下量推定に関する信頼性解析(モンテカルロシミュレーション)を実施し、地震時地盤沈下量の損傷度曲線を算出した結果、大きな沈下量を想定した損傷度曲線ほどばらつきが大きくなることを示した。

**Key Words :** *unsaturated soil, volumetric compression, cyclic shear, settlement, fragility curve*

## 1. はじめに

大規模地震時における不飽和地盤の沈下による機器や基礎の損傷を防止するためには、繰返しせん断に伴う地盤材料の体積収縮特性の把握とそれらを考慮した沈下量の推定が重要である。筆者らは、2007年新潟県中越沖地震で地盤沈下を生じた東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所の不飽和埋戻し地盤(砂質土)<sup>1,2)</sup>に対して、排気排水条件の中空ねじり繰返しせん断試験(応力制御方式)を行い、同試験結果から繰返し回数～せん断応力～体積ひずみの関係(等体積ひずみ曲線)を設定し、地震応答解析で求めたせん断応力時刻歴を累積損傷の考え方に基づいて等体積ひずみ曲線に適用することで沈下量を推定してきた<sup>3)</sup>。推定沈下量は概ね実測値と整合することが認められた。一方、推定沈下量を用いる地震応答解析手法によって30%程度の相違が認められることもあった<sup>4)</sup>。

このような既往の検討背景を有しつつ、今後、地盤の性能評価(ここでは地震時地盤沈下量評価)を行う上では、適用する解析手法の相違だけでなく、当然のことな

がら地盤物性値のばらつきも加味すべきであると考えている。

本検討で実施した主な内容は、埋戻し地盤物性値のばらつきを示す指標として選定した乾燥密度及び含水比の変化に伴う体積ひずみの変動に関する分析、それらを考慮した信頼性解析による地震時地盤沈下フラジリティの評価、の2点である。これらの検討に先立ち、まず第2章において、既往検討の排気排水条件中空ねじり繰返しせん断試験による不飽和砂質土の体積収縮特性とそれらの特性を等体積ひずみ曲線として設定した結果について、また、等体積ひずみ曲線に対し、地震応答解析で求めたせん断応力時刻歴を累積損傷度法を適用して沈下量を推定する方法について概説する。その後、第3章において、不飽和砂質地盤の地震時沈下量に影響を与える物理特性として乾燥密度と含水比を選定し、平均的な物理特性のもとで求めた体積ひずみに対し、乾燥密度と含水比が異なる状態で生じる体積ひずみを比較する。また、乾燥密度と体積ひずみ、含水比と体積ひずみの関係をそれぞれ整理し、これらの相関関係を示す。第4章では、乾燥密

度及び含水比のばらつきを考慮した地震時地盤沈下量推定に関する信頼性解析を行い、不飽和砂質地盤の地震時沈下性能を損傷度曲線として評価した結果を示す。

## 2. 繰返しせん断による不飽和砂質土の体積収縮特性と地震時地盤沈下量推定<sup>3)</sup>

### (1) 不飽和砂質土の体積収縮特性

検討対象地点の不飽和砂質地盤の乾燥密度及び含水比の平均はそれぞれ $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ,  $w_n=20\%$ 程度である<sup>3)</sup>。これらの値を目標として作製した密度調整試料（外径70mm, 内径30mm, 高さ70mm）に対し、中空ねじりせん断試験機（二重セル式装置）により排気排水条件下で繰返しせん断変形（応力制御方式, 0.1Hzの正弦波加振）を与え、その際の体積収縮量を測定する試験を実施した。

試験実施ケース一覧を表-1に示す。試験における平均拘束圧 $\sigma'_m$ は、埋戻し地盤の深さ(25m)を考慮して $\sigma'_m=50,100,300\text{ kN/m}^2$ の3種類とし、各々の拘束圧に対してせん断応力比 $\tau_d/\sigma'_m$ を4種類変えた12個の供試体について実施した。

繰返し回数50回までの体積ひずみの推移について、拘束圧ごとに整理して図-1に示す。これらから、いずれの拘束圧条件下でも、繰返し回数及びせん断応力比 ( $SR_d = \tau_d/\sigma'_m$ ) の増加にともなって体積ひずみが増加することがわかる。ただし、試験番号1-4 ( $\sigma'_m = 50\text{kPa}$ ,  $SR_d = 0.58$ )

のケースは繰返し回数8回、せん断ひずみが約8.8%、体積ひずみが約4.8%生じた時点で、試験番号3-4 ( $\sigma'_m = 300\text{kPa}$ ,  $SR_d = 0.65$ ) のケースは繰返し回数18回、せん断ひずみが約7.9%、体積ひずみが約9.4%生じた時点でそれぞれせん断破壊している。また、平均拘束圧 $\sigma'_m = 100\text{kPa}$ の条件で実施したケース（試験番号2-1~2-4）の体積ひ

表-1 繰返しせん断試験 実施ケース一覧  
—平均物理特性 ( $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ,  $w_0=20\%$ )—

荷重方式 (せん断荷重の種類)	試験番号	拘束圧 $\sigma'_m$ (kPa)	圧密後 乾燥密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	最大せん断 応力比 $SR_d$
応力制御 (正弦波)	1-1	50	1.673	0.23
	1-2		1.667	0.35
	1-3		1.708	0.50
	1-4		1.665	0.58
	2-1	100	1.686	0.26
	2-2		1.718	0.39
	2-3		1.706	0.52
	2-4		1.706	0.60
	3-1	300	1.833	0.21
	3-2		1.832	0.42
	3-3		1.815	0.55
	3-4		1.797	0.65

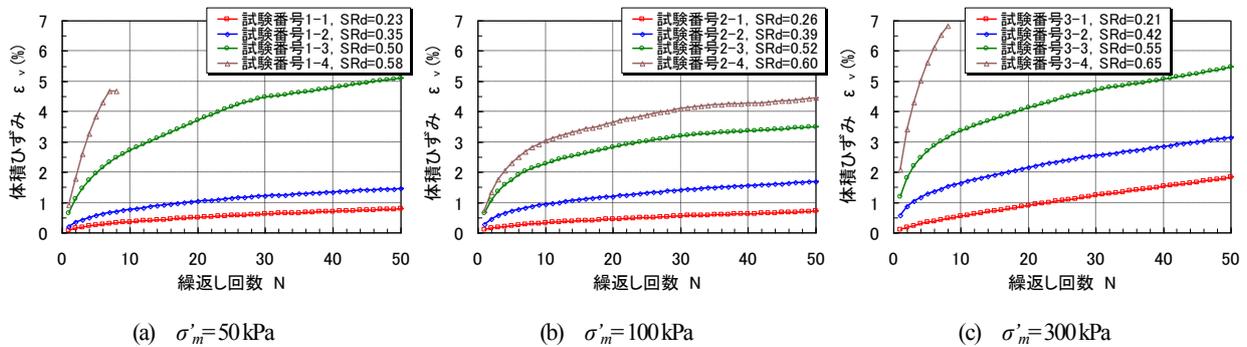


図-1 拘束圧ごとの繰返し回数と体積ひずみの関係 ( $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ,  $w_0=20\%$ )

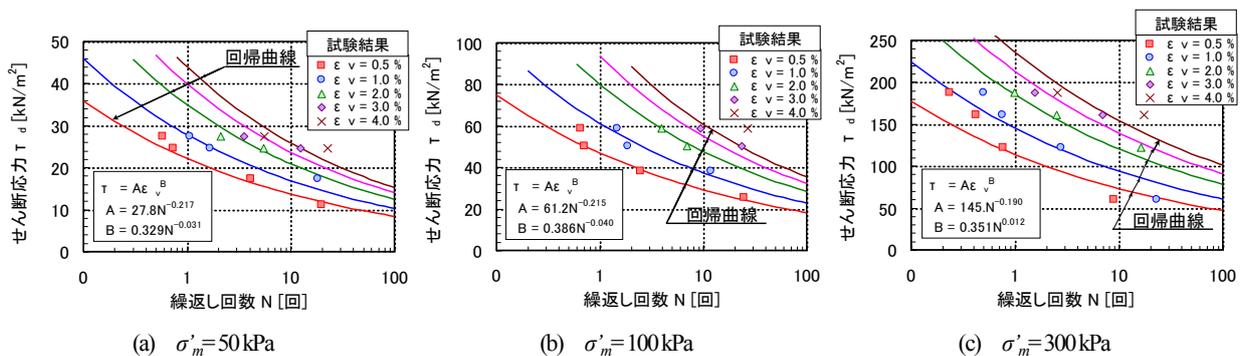


図-2 拘束圧ごとの等体積ひずみ曲線 ( $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ ,  $w_0=20\%$ )

ずみ量は、平均拘束圧  $\sigma'_m = 50\text{kPa}$  及び  $300\text{kPa}$  の条件で実施したケース（試験番号1~14, 試験番号3-1~3-4）のそれらに比べて小さい傾向にある。これは、試料の選定位置や供試体作製におけるばらつきなどが含まれるものと考えられる。

体積ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) が等しくなるような繰返し載荷回数 ( $N$ ) とせん断応力 ( $\tau_d$ ) の関係（等体積ひずみ曲線）を拘束圧ごとに整理した結果を図-2に示す。図-2には試験結果をべき乗関数で近似し、最小二乗法で係数を定めた実験式(1)を示した。さらに、これらの関係式を拘束圧を変数として再整理すると式(2)に統合できる。式(2)は拘束圧も考慮した等体積ひずみ曲線を示し、この実験式に対し、地震応答解析から求めたせん断応力時刻歴を用いた累積損傷度解析を行うことで沈下量が算定できる。

$$\tau_d = A \cdot \varepsilon_v^B, \quad A = \alpha \cdot N^a, \quad B = \beta \cdot N^b \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \left[ \frac{\tau_d}{(0.464\sigma'_m + 9.81)N^{-0.207}} \right]^{0.355N^{-0.0199}} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon_v$ : 体積ひずみ(%),  $\tau_d$ : せん断応力 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\sigma'_m$ : 平均拘束圧 ( $\text{kN/m}^2$ ),  $N$ : 繰返し載荷回数(回),  $\alpha, \beta, a, b$ : 回帰係数である。

## (2) 地震時地盤沈下量の評価

柏崎刈羽原子力発電所1号機原子炉建屋基礎盤上で観測された地震動を用いた応答解析から求めたせん断応力に対し、ここで整理した不飽和地盤の体積収縮特性（等体積ひずみ曲線）を適用し、累積損傷の考え方に基づいて不飽和地盤の体積ひずみを算定する。

地震応答解析の地盤モデルを表-2に示す。この地盤モデルは柏崎刈羽原子力発電所1号機原子炉建屋南東部における不飽和状態の埋戻し土層25mとその下位の原子炉建屋設置岩盤である西山層泥岩をモデル化したものである。せん断波速度 ( $V_s$ ) が  $700\text{m/s}$  以上を示しているTP-284.0m (G.L.-289.0m) を基盤とし、それ以浅の西山層ならびに埋戻し土層については図-3に示すような剛性及び減衰定数のせん断ひずみ依存特性を考慮した。地震応答解析手法としては、強震動に対する精度の課題はあるが、沈下のオーダーの再現性を見ることに主眼を置いて重複反射理論による等価線形解析<sup>9)</sup>を用いた。

入力地震動は1号機原子炉建屋基礎盤上 (G.L.-37.5m = T.P.-32.5m) で観測された加速度時刻歴 (図-4) とし、この波を表-2に示した地盤モデルの同深度においてE+F入力した (E: 入射波, F: 反射波)。

累積損傷の考え方に基づく体積ひずみ  $\varepsilon_v$  の算定は、館山ら<sup>9)</sup>の方法を参考に以下のとおりとした。このうち算定手順c)~g)について図-5に示す。

a) 地震応答解析から当該深度のせん断応力時刻歴

表-2 地震応答解析 地盤モデル

地層	T.P.(m)	$\rho_t$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ (m/s)	せん断ひずみ依存特性	体積ひずみ特性
埋戻し地盤	+5.0 -20.0	1.90	100~350	せん断ひずみ依存特性 図-3(上)	(2)式で体積ひずみを算定
西山層 (泥岩)	-32.5 -62.0 -77.0 -103.0 -128.0 -192.0 -284.0	1.72	540	せん断ひずみ依存特性 図-3(下)	-
	地震動入力		590		
	620				
	650				
	670				
	690				
基盤(泥岩)		1.72	730	線形	-

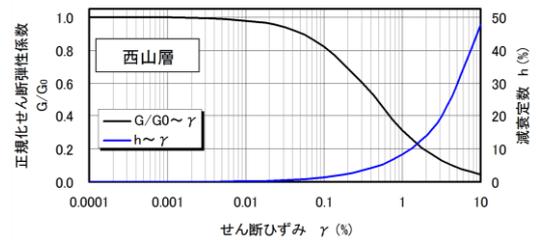
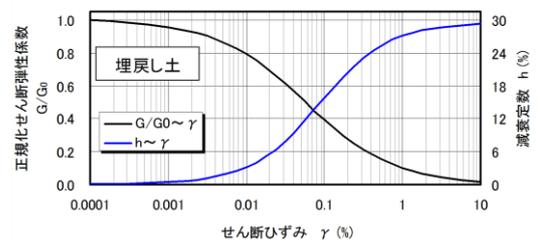


図-3 剛性(初期せん断弾性係数  $G_0$ ) と減衰定数  $h$  のせん断ひずみ依存特性

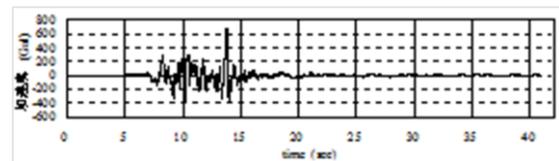


図-4 検討用地震動(加速度時刻歴)

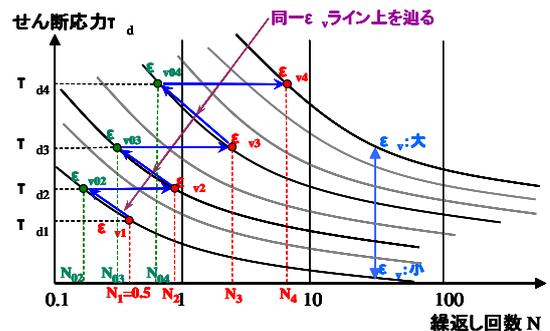


図-5 累積体積ひずみ算定の概念図

波形を求める。

- b) せん断応力時刻歴波形に対し、ゼロクロッシング法によって片振幅(半パルス)ごとのせん断応力  $\tau_{d1}, \tau_{d2}, \dots$  を求める。
- c) 最初の半パルス(せん断応力  $\tau_{d1}$ ) に対する体積ひずみ  $\varepsilon_{v1}$  は、等体積ひずみ曲線式(2)に  $\tau_{d1}$  と  $N_1$  ( $= 0.5$  回) を代入して求める。
- d)  $\varepsilon_{v1}$  を  $\tau_{d2}$  が作用する前に既に発生している体積ひずみであるとして、 $\tau_{d2}$  に対する初期値  $\varepsilon_{v02}$  とする。すなわち  $\varepsilon_{v02} = \varepsilon_{v1}$ 。
- e)  $\tau_{d2}$  が作用した状態で  $\varepsilon_{v02}$  が発生するために必要な繰返し回数  $N_{02}$  について、 $\varepsilon_{v02}$  と  $\tau_{d2}$  を等体積ひずみ曲線式(2)に代入して求める。
- f) 実際に  $\tau_{d2}$  によって発生する体積ひずみ  $\varepsilon_{v2}$  は、 $N_2$  ( $= N_{02} + 0.5$ ) と  $\tau_{d2}$  を等体積ひずみ曲線式(2)に代入して求める。
- g) 以降のせん断応力  $\tau_{d3}, \tau_{d4}, \dots$  に対する体積ひずみ

$\varepsilon_{v3}, \varepsilon_{v4}, \dots$  は、d) ~ f) の手順を繰り返して求める。

- h) 各深度の体積ひずみに層厚を乗じ、その総和から地表沈下量を算定する。

地震応答解析による埋戻し地盤の加速度、せん断応力及びせん断ひずみの最大応答値を図-6に示す。図-7に示した最大(残留)体積ひずみの深度分布は上記 a) ~ h) の手順に従って算定したものである。同図には地表面の沈下量の時刻歴を入力地震動の加速度波形と併せて示した。地表面の沈下量は約50cmと算出され、1号機原子炉建屋周辺地盤の一般部で実測された沈下量30~40cm<sup>23)</sup>におおよそ整合した結果である。また、入力地震動の13秒付近に表れているパルス状の瞬間的な大きな振動によって全体の80%にあたる沈下が引き起こされているという特徴がみられた。

### 3. 乾燥密度及び含水比と体積収縮特性の関係

上述した既往の検討結果は、検討対象地点の平均的な物理特性(初期乾燥密度  $\rho_{d0} = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、初期含水比  $w_0 = 20\%$ )のもとで生じる体積収縮特性(等体積ひずみ曲線)を反映した地震時地盤沈下量評価である。しかし、埋戻し地盤の物理特性及びそれらに影響される体積収縮特性(体積ひずみ)はばらつきを有することから、地震時の地盤沈下性能を評価する際にはそれらを加味することが望ましい。

本章では、埋戻し地盤の物理特性のばらつきを示す指標として乾燥密度及び含水比を選定し、それらの相違による体積ひずみの変動に関する分析を行い相関性を導く。

#### (1) 乾燥密度及び含水比と体積ひずみの関係

初期乾燥密度を平均  $1.6 \text{ g/cm}^3$  として初期含水比を10%とした試料、初期含水比を平均20%として初期乾燥密度

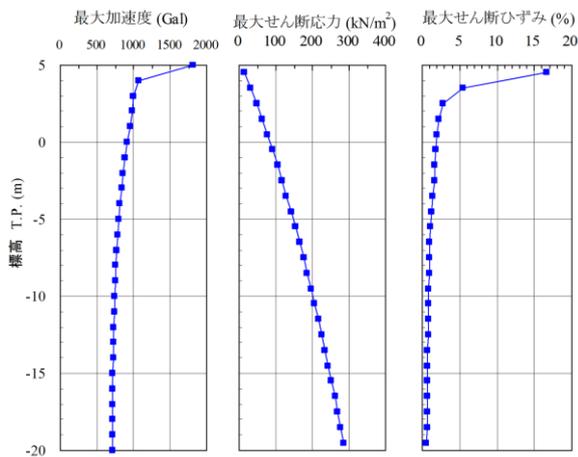


図-6 地震応答解析結果、最大応答値の深度分布

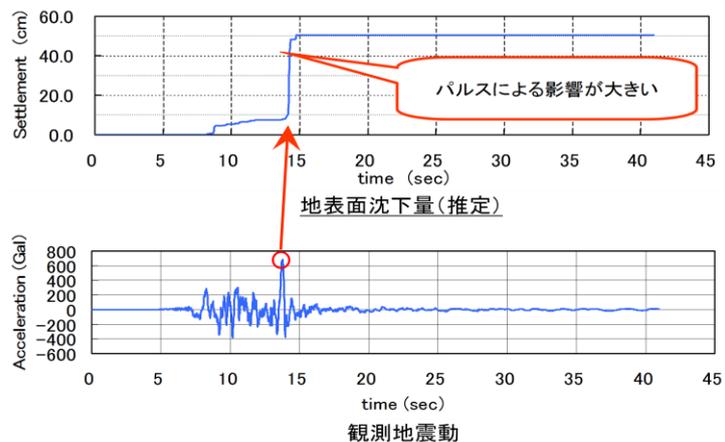
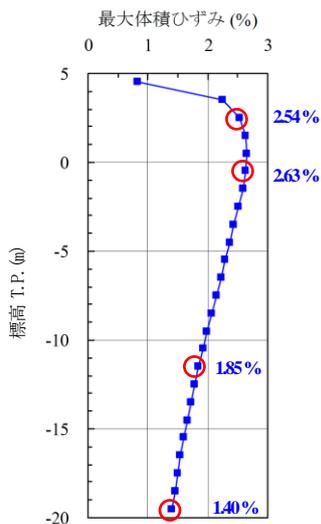


図-7 最大(残留)体積ひずみの深度分布、地表面沈下量と観測地震動の加速度の時刻歴

を1.52 g/cm<sup>3</sup>及び1.7 g/cm<sup>3</sup>とした試料，それぞれに対して排気排水条件下の中空ねじり繰返しせん断試験を実施した．拘束圧 $\sigma'_m=100$  kN/m<sup>2</sup>とした．表-3に試験条件一覧と繰返し回数20回及び50回時の体積ひずみ ( $\varepsilon_{v,20}$ ,  $\varepsilon_{v,50}$ )を示す．同表には，同じ拘束圧のもとで平均物理特性の

試料に対する試験結果(表-1における試験番号2-1~2-4)も併記した．試料の初期含水比を平均の20%とし，初期乾燥密度を変化させた場合の繰返し回数と体積ひずみの関係を図-8に，試料の初期乾燥密度を平均の1.6 g/m<sup>3</sup>とし，初期含水比を変化させた場合の繰返し回数と体積ひずみの関係を図-9に示す．

表-3 初期乾燥密度及び初期含水比を変化させた試験条件と繰返し回数20回，50回時の体積ひずみ

初期乾燥密度 $\rho_{d0}$ (g/m <sup>3</sup> )	初期含水比 $w_0$ (%)	拘束圧 $\sigma'_m$ (kPa)	最大せん断応力比 $SR_{cr}$	体積ひずみ $\varepsilon_{v,20}$ (%)	体積ひずみ $\varepsilon_{v,50}$ (%)
1.6 <sup>※)</sup>	20 <sup>※)</sup>	100	0.26	0.444	0.708
			0.39	1.199	1.689
			0.52	2.814	3.499
			0.60	3.630	4.441
1.6	10	100	0.26	0.212	0.276
			0.41	0.533	0.647
			0.52	0.854	1.067
1.52	20	100	0.62	1.607	2.047
			0.25	0.961	1.363
			0.41	2.269	3.122
1.7	20	100	0.51	4.409	5.308
			0.51	1.591	1.856
			0.60	1.833	2.087

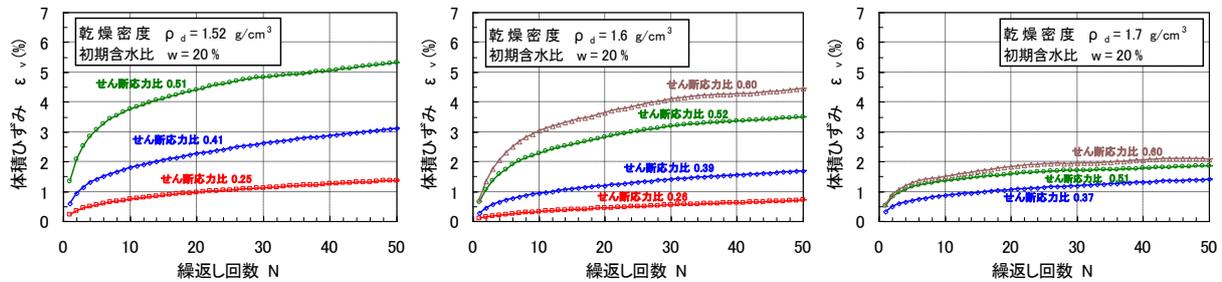
※)  $\rho_{d0}=1.6$ (g/m<sup>3</sup>),  $w_0=20$ (%)の状態が平均物理特性を呈する試料

図-8より，同等のせん断応力比の条件では，初期乾燥密度が小さいほど体積ひずみが大きくなるのがわかる．図-9からは，同等のせん断応力比の条件では，初期含水比20%の状態が生じる体積ひずみが，初期含水比10%の状態が生じる体積ひずみよりも大きいことがわかる．また，表-3から，繰返し回数20回及び50回時での体積ひずみは後者が前者の2~3倍程度であることがわかる．

初期含水比と体積ひずみの関係，初期乾燥密度と体積ひずみの関係に対して，それぞれせん断応力比ごとに比較した結果を図-10に示す．同図からは，せん断応力比が異なると初期乾燥密度や初期含水比の変化に対する体積ひずみの変化率が異なることが認められる．

## (2) 相関関係の設定

上記のデータから，繰返しせん断を受けた際の不飽和砂質土の体積ひずみは，初期乾燥密度や初期含水比などの物理特性の相違に応じて異なることが認められた．そこで本節では，後述する地盤物性のばらつきを考慮した地震時地盤沈下量評価のために，これらの物理特性と体

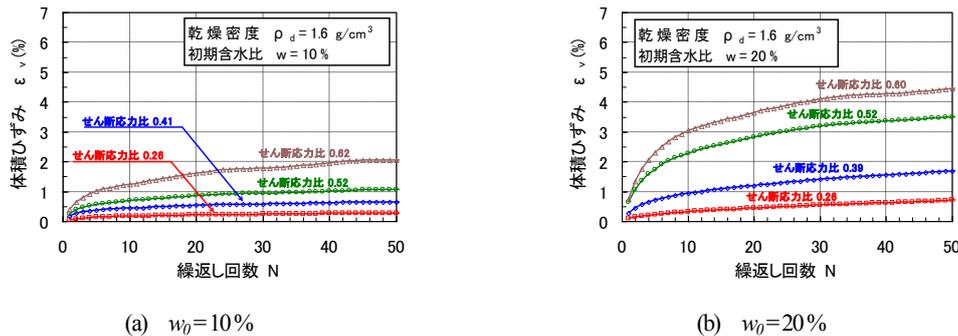


(a)  $\rho_{d0}=1.52$  g/m<sup>3</sup>

(b)  $\rho_{d0}=1.6$  g/m<sup>3</sup>

(c)  $\rho_{d0}=1.7$  g/m<sup>3</sup>

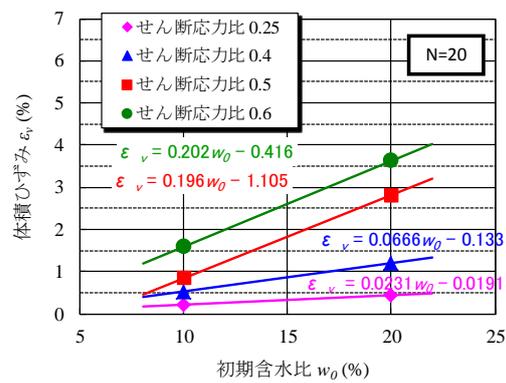
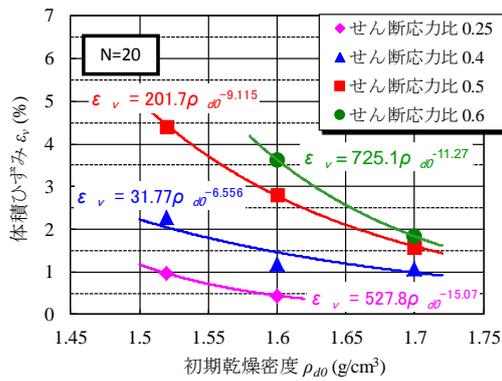
図-8 試料の初期乾燥密度を変化させた場合の繰返し回数と体積ひずみの関係 (拘束圧 100kPa,  $w_0=20\%$ )



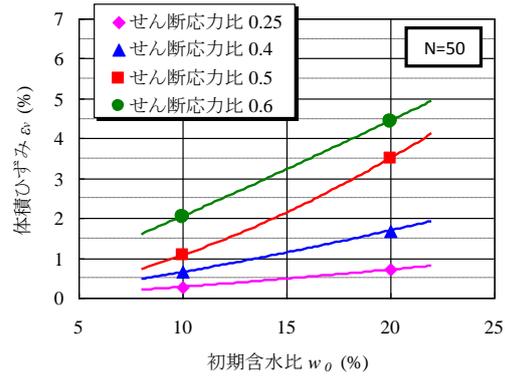
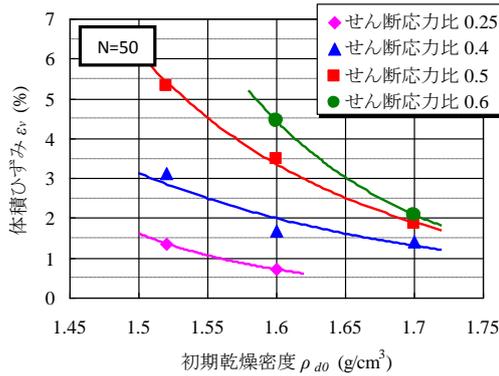
(a)  $w_0=10\%$

(b)  $w_0=20\%$

図-9 試料の初期含水比を変化させた場合の繰返し回数と体積ひずみの関係 (拘束圧 100kPa,  $\rho_{d0}=1.6$  g/m<sup>3</sup>)



(a) 繰返し回数 N=20



(b) 繰返し回数 N=50

図-10 セン断応力比ごとに比較した初期乾燥密度と体積ひずみの関係及び初期含水比と体積ひずみの関係

積ひずみの関係を規定する。具体的には、初期乾燥密度と体積ひずみの関係式(係数 $\alpha 1$ )、初期含水比と体積ひずみの関係式(係数 $\alpha 2$ )を設定する。

はじめに、初期乾燥密度と体積ひずみの関係を規定する係数 $\alpha 1$ について設定する。図-10(a)の左図に示した繰返し回数 $N=20$ におけるせん断応力比ごとの初期乾燥密度と体積ひずみの相関式に対し、それぞれ平均の初期乾燥密度で生じる体積ひずみで基準化し、次のように設定する。

$$\begin{aligned} \alpha 1 &= 725.05 \cdot \rho_{d0}^{-11.27} / 3.63 & (\tau_d / \sigma'_m > 0.6) \\ \alpha 1 &= 201.67 \cdot \rho_{d0}^{-9.115} / 2.81 & (0.6 \geq \tau_d / \sigma'_m > 0.5) \\ \alpha 1 &= 31.765 \cdot \rho_{d0}^{-6.556} / 1.20 & (0.5 \geq \tau_d / \sigma'_m > 0.4) \\ \alpha 1 &= 527.80 \cdot \rho_{d0}^{-15.07} / 0.444 & (0.4 \geq \tau_d / \sigma'_m) \end{aligned} \quad (3)$$

次に、初期含水比と体積ひずみの関係を規定する係数 $\alpha 2$ について設定する。図-10(a)の右図に示した繰返し回数 $N=20$ におけるせん断応力比ごとの初期含水比と体積ひずみの相関式に対し、それぞれ平均の初期含水比で生じる体積ひずみで基準化し、次のように設定する。

$$\begin{aligned} \alpha 2 &= (0.202 \cdot w_0 - 0.416) / 3.63 & (\tau_d / \sigma'_m > 0.6) \\ \alpha 2 &= (0.196 \cdot w_0 - 1.105) / 2.81 & (0.6 \geq \tau_d / \sigma'_m > 0.5) \\ \alpha 2 &= (0.0666 \cdot w_0 - 0.133) / 1.20 & (0.5 \geq \tau_d / \sigma'_m > 0.4) \\ \alpha 2 &= (0.0231 \cdot w_0 - 0.0191) / 0.444 & (0.4 \geq \tau_d / \sigma'_m) \end{aligned} \quad (4)$$

なお、繰返し回数 $N=20$ での相関式を適用したのは、本検討で用いる地震動(図-4)の主要動部分の振幅がゼロクロスする回数を考慮したことによる。

本節では、平均的な物理特性(初期乾燥密度 $\rho_{d0} = 1.6 \text{ g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0 = 20\%$ )のもとで生じる体積ひずみに対し、係数 $\alpha 1$ 及び $\alpha 2$ を乗じることにより、初期乾燥密度や初期含水比が変動した際の体積ひずみを帰納的に規定する方法を示した。今後の課題として、不飽和砂質土の物理特性と体積ひずみの関係を演繹的に導く必要があらう。

#### 4. 物性値のばらつきを考慮した沈下量の評価

正規乱数を発生させて物性のばらつきを模擬した沈下量推定に関する信頼性解析(モンテカルロシミュレーション: MCS)を行い、損傷度曲線として評価した事例を示す。地震時地盤沈下に関する損傷度曲線の算出方法は次のとおりである。

- ① 正規乱数を発生させる(図-11)。本検討では100ケースとした。検討対象地点で調査・測定された乾燥密度と含水比それぞれの標準偏差を考慮して、地盤物性のデータセット100ケースを作成する。

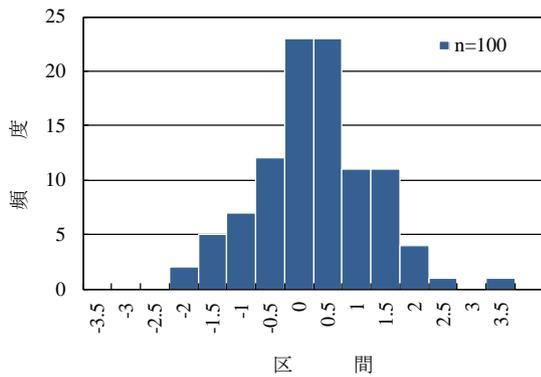


図-11 正規乱数 (100 ケース)

② 前章3. (2) では、初期乾燥密度と体積ひずみの関係及び初期含水比と体積ひずみの関係から、それぞれの相関関係を示す係数を $a1$ 及び $a2$ とした。物性値のばらつきを考慮した沈下量の算定にあたっては、平均物理特性のもとで設定した等体積ひずみ曲線(1)式にこれらの係数を乗じる。すなわち、

$$\varepsilon_v' = (a1 \cdot a2) \cdot \varepsilon_v \quad (5)$$

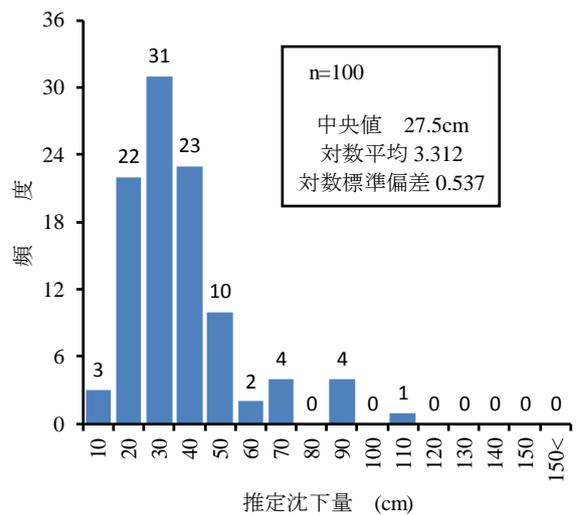
ここに、 $\varepsilon_v'$ ：物性のばらつきを考慮して算出される体積ひずみ(%),  $\varepsilon_v$ ：(1)式から算出される平均物理特性のもとでの体積ひずみ(%),  $a1, a2$ ：前章3. (2)で設定した相関係数, である。

③ 任意の地震動のPGA (Peak Ground Acceleration) を変化させ、それぞれの地震動を入力した地震応答解析及び累積損傷度解析を100ケースずつ実施する。本検討では、平均物理特性のもとで沈下量約50cmとなったPGA680Galの地震動(図-4)と、この前後のPGA450Gal及びPGA900Galの地震動に対してそれぞれ100ケースのMCSを実施した。

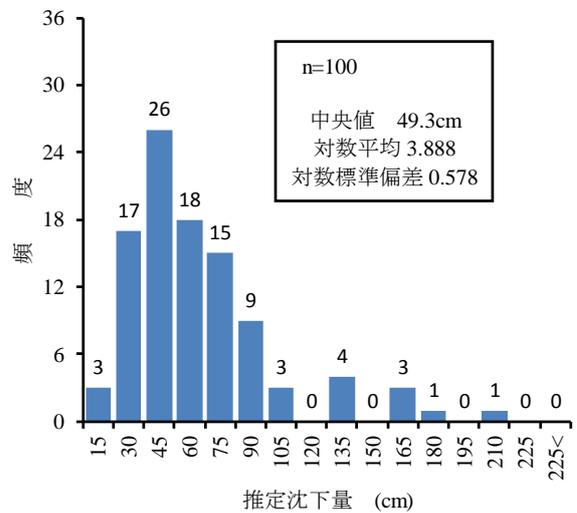
④ 任意の限界状態(沈下量)を設定する。各PGAの地震動を入力して算定した推定沈下量100ケースのうち、その限界状態(沈下量)を超過する確率を求める。本検討では、限界状態(沈下量)を25, 50, 100cmとした。

⑤ 限界状態(沈下量)ごとに、3種類のPGAの地震動による超過確率データに対して、対数正規分布を仮定した累積分布関数、すなわち損傷度曲線を求める。

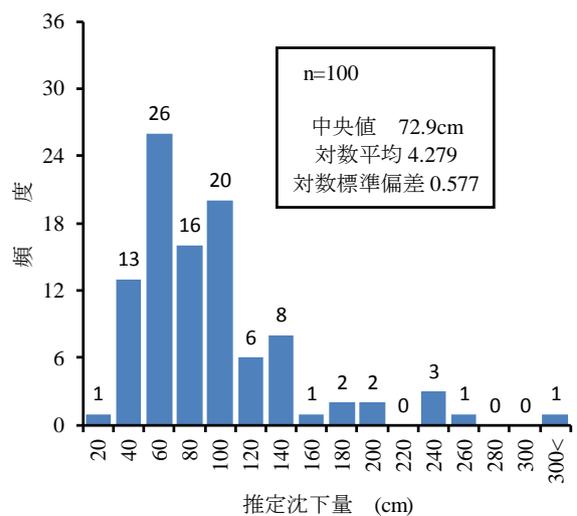
3種類のPGAの地震動を用いて算定した100ケースの推定沈下量のヒストグラムを図-12に示す。同図中には、対数正規分布を仮定した場合の中央値、平均値及び標準偏差を記している。平均的な物理特性のもとで設定した等体積ひずみ曲線(1)式を適用して算定した地震時地盤沈下量が50.6cmであった(図-7)のに対し、PGA680Gal地震動による100ケースの推定沈下量の中央値は49.3cmである。PGA450Gal地震動による100ケースの推定沈下量の中央値は27.5cm、PGA900Gal地震動による100ケースの推定沈下量の中央値は72.9cmである。



(a) PGA=450Gal



(b) PGA=680Gal



(c) PGA=900Gal

図-12 推定沈下量のヒストグラム

3種類のPGAの地震動ごとに実施したMCS結果から限界状態(沈下量)に対する超過確率を算出し表-4に示す。これらの結果を用いて、対数正規分布を仮定して回帰算定した限界状態(沈下量)ごとの損傷度曲線を図-13に、統計値を表-5に示す。限界状態(沈下量)の相違に着目して比較すると、当然のことながら沈下量の小さい順に左側に損傷度曲線が位置している。すなわち限界状態を損なう条件付き確率が高くなっている。また、限界状態(沈下量)を大きく設定するほど損傷度曲線の勾配が緩やかになり、沈下量推定結果のばらつきが大きくなることが認められる。

## 5. おわりに

本報では、乾燥密度及び含水比が異なる状態の不飽和砂質土試料を用いて応力制御方式による排気排水条件の中空ねじり繰返しせん断試験を行い、体積ひずみを計測した。乾燥密度と体積ひずみ、含水比と体積ひずみ、それぞれの相関関係を求め、これら二つの物理特性のばらつきを加味したMCSを実施し、地震時地盤沈下量に関する損傷度曲線を算出した。主な結論を以下に示す。

- 1) 不飽和砂質土の初期乾燥密度が小さいほど繰返しせん断によって生じる体積ひずみが大きくなること、また、初期含水比が大きいほど体積ひずみが大きくなること、がわかった。
- 2) せん断応力比が異なると、初期乾燥密度及び初期含水比の相違による体積ひずみの変化率も異なることがわかった。
- 3) 乾燥密度及び含水比のばらつきを考慮した地震時地盤沈下量推定に関するMCSから限界状態(沈下量)ごとの損傷度曲線を算出した。限界状態(沈下量)を大きく設定するほど損傷度曲線の勾配が緩やかになり、沈下量推定結果のばらつきが大きくなることがわかった。

不飽和砂質土の繰返しせん断時の体積収縮特性(体積ひずみ)について、乾燥密度及び含水比との関係も含めて室内試験結果をもとに考察したが、今後は三相系媒体としての動的挙動について、数理モデルとして把握、理解する必要があると考える。

### 参考文献

- 1) Sakai, T., Suehiro, T., Tani, T., and Sato, H.: Geotechnical performance of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station caused by the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake, *Case History Volume for Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Technical Committee No.4, ISSMGE, pp.1-29, 2009.
- 2) Sato, H., Momose, K., Suehiro, T., Tani, T., Sato, M., Ozeki,

表-4 MCS から得られた限界状態(沈下量)の超過確率

限界状態(沈下量)(cm)	PGA (Gal)	当該沈下量の超過確率
25	450	0.55
	680	0.90
	900	0.96
50	450	0.11
	680	0.49
	900	0.74
100	450	0.01
	680	0.10
	900	0.24

表-5 対数正規分布を仮定した場合の損傷度曲線

限界状態(沈下量)	中央値 (Gal)	対数標準偏差	平均値 (Gal)	変動係数
25cm	428.7	0.373	459.7	0.387
50cm	696.8	0.376	747.9	0.390
100cm	1254.6	0.472	1402.6	0.500

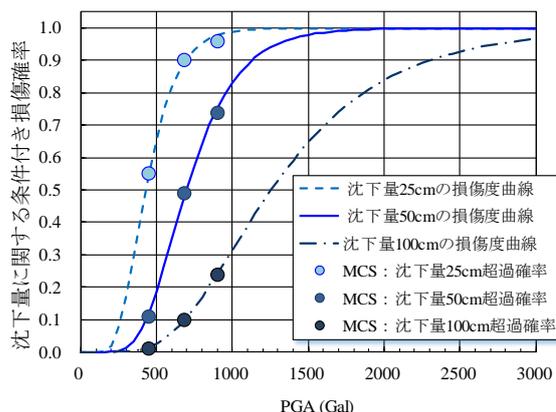


図-13 限界状態(沈下量)ごとの損傷度曲線  
(対数正規分布を仮定)

K., and Kitazume, T.: Characteristics of subsidence of unsaturated ground and subsidence mechanism in the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007, *Proc. of the Inter. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (IS-Tokyo2009)*, pp.1387-1394, 2009.

- 3) 北爪貴史, 酒井俊郎, 佐藤博, 佐藤正行: 繰返しせん断による不飽和砂質土の体積収縮特性と沈下量推定に関する基礎的検討, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.68, No.2, pp.410-421, 2012.
- 4) 北爪貴史, 佐藤正行, 佐藤博: 異なる地震応答解析手法による不飽和砂質土の推定沈下量, 第48回地盤工学

研究発表会, pp.551-552, 2013.

- 5) Schnable, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.

- 6) 館山勝, 堀井克己, 小島謙一: 盛土の耐震性能と耐震設計, 鉄道総研報告, Vol.13, No.3, 1999.

## INFLUENCE OF DRY DENSITY AND WATER CONTENTS ON THE SETTLEMENT OF UNSATURATED SANDY SOIL DURING EARTHQUAKE

Takashi KITAZUME, Satoshi GOTO, Kohei ARAKI, Hiroshi SATO  
and Masayuki SATO

It was found from the result that some stress-controlled torsional cyclic shear tests under drained conditions which changed dry density and water contents of unsaturated sandy soils, and a volumetric strain becomes big so that dry density is small, a volumetric strain becomes big so that water contents is big, a rate of change of the volumetric strain by the changes of these physical characteristics are different things according to the shear stress ratio. As a result of having calculated a fragility curve of the settlement during the earthquake by reliability analysis in consideration of uncertainty of dry density and water contents, it was found that uncertainty becomes big as a fragility curve of the big settlement.