

不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定 におけるモデル化誤差

北爪 貴史¹・佐藤 恭兵²・兵頭 順一³・荒木 功平⁴・後藤 聡⁵

¹正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲)

E-mail: dkita@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲)

E-mail: kyouhei.satou@tepsco.co.jp

³正会員 東電設計株式会社 土木本部 技術開発部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲)

E-mail: hyoudou@tepsco.co.jp

⁴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: karaki@yamanashi.ac.jp

⁵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

不飽和砂質土について排気排水条件下の繰返しせん断試験を行い、同試験結果から繰返し回数～せん断応力～体積ひずみ関係を考慮した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地震時の地盤沈下量を推定する方法を提案している。このような沈下量推定方法は、地震応答解析の精度に依存する。本報では、複数の異なる地震応答解析手法を用いて沈下量を推定し、それらと実際の地震で生じた沈下量実測値との差異からモデル化誤差に関する検討を行った。地盤の非線形性や地震動特性(継続時間やキラーパルス存在)の影響を反映した変位量(沈下量)評価問題であるにもかかわらず、今回の検討ではモデル化誤差はそれほど大きくない結果が得られた。

Key Words : *unsaturated sandy soil, volumetric compression, cyclic shear, settlement, model error*

1. はじめに

原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全性評価を行う場合、認識論的不確実さと称される知識および認識の不足に関係する不確実さを考慮する必要があるとされている¹⁾。認識論的不確実さの要因として、評価に用いるデータの不足や複数の専門家の解釈の相違などと共に「モデルの詳細度」が挙げられている。原子力施設の安全性評価に限らず、一般の地盤構造物の性能設計において信頼性解析を実施する場合にも、物理現象のランダム性に係わる偶然的不確実さ(例えば、地盤物性値のばらつき)に加え、認識論的不確実さを考慮することは必要であると考えられる。

筆者らが提案する不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定手法²⁾には地震応答解析が介在するため、推定した予測沈下量の精度は地震応答解析手法や地盤モデルの精度に依存することになる。性能設計では不確実さを含む諸量を扱う際にモンテカルロシミュレーション(MCS)に代表

される信頼性解析を行うことがあるが、そうした信頼性解析を実施する上では、解析手法や計算モデルの精度が「モデル化誤差」として定量化されている必要がある。モデル化誤差が定量化されることにより、原子力の安全性評価分野で定義されるところの認識論的不確実さを低減させることににも繋がるものと考えられる。

本報では、不飽和砂質地盤の地震時沈下量に関して、4種類の異なる地震応答解析手法を用いて推定した結果と実際の地震で生じた沈下量実測値との差異から、沈下量推定に及ぼすモデル化誤差について検討する。さらに、既往検討において地盤物性のばらつきを加味した不飽和砂質地盤の沈下量をフラジリティ曲線として評価した結果³⁾に、本検討で求めたモデル化誤差を含めたコンポジットフラジリティ曲線の算定事例を示す。

2. 沈下量の推定方法および地震応答解析手法

(1) 不飽和砂質地盤の地震時沈下量の推定方法

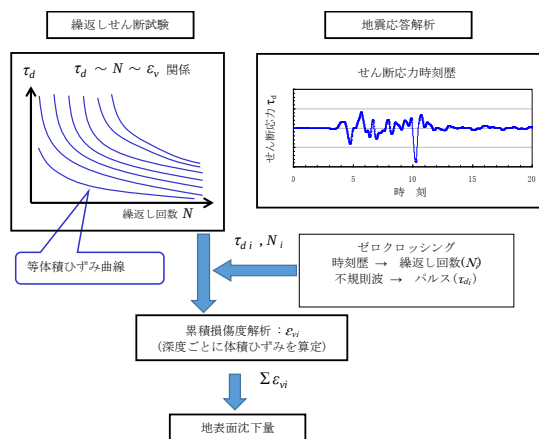


図-1 不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定フロー

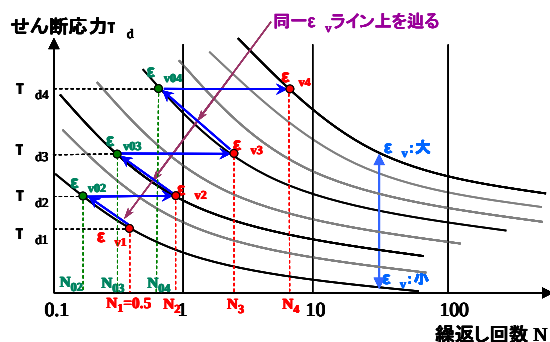


図-2 累積体積ひずみの算定手順²⁾

不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定に際しては、図-1のフローに示すように、①排気排水条件下の中空ねじり繰返しせん断試験(応力制御方式)を行い、②同試験結果から、繰返し回数(N)～せん断応力(τ_d)～体積ひずみ(ε_v)の関係(以下、等体積ひずみ曲線と称す)を設定し、③累積損傷の考え方に基づいて地震応答解析で求めたせん断応力時刻歴を等体積ひずみ曲線に適用して累積体積ひずみを算定する(図-2)、という方法を既報²⁾において提案した。既報における等体積ひずみ曲線は式(1)のとおりである。

$$\varepsilon_v = \left[\frac{\tau_d}{(0.464\sigma'_m + 9.81)N^{-0.207}} \right]^{0.355N^{-0.0199}} \quad (1)$$

ここに、 ε_v : 体積ひずみ(%), τ_d : せん断応力(kPa), σ'_m : 平均拘束圧(kPa), N : 繰返し回数(回)である。

そこでは、表-1に示す地盤モデルを対象とし、地震応答解析手法として重複反射理論に基づく等価線形解析を用いており、図-5に示すような大加速度振幅を有する地震動を入力したことにより、25m層厚の不飽和埋戻し地盤の表層部では、大きな加速度、せん断ひずみおよびせん断応力が生じた。提案する沈下量推定手法では、累積損傷度法においてせん断応力時刻歴を考慮することから、過大なせん断応力応答が生じた場合は沈下量(体積ひず

表-1 地震応答解析 地盤モデル²⁾

地層 T.P.(m)	ρ_t (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	1.90	100～ 350	せん断ひずみ 依存特性 を考慮	(2)式で 体積ひずみ を算定
西山層 (泥岩)	1.72	540 590 620 650 670 690	せん断ひずみ 依存特性 を考慮	—
基盤(泥岩)	1.72	730	線形	—

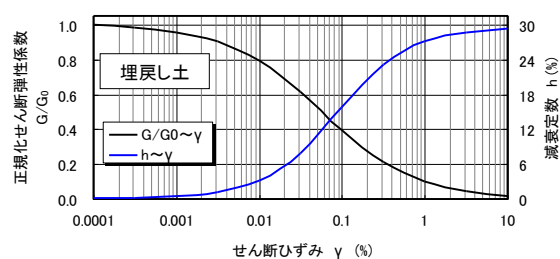


図-3 初期せん断弾性係数(G_0)と減衰定数(h)のせん断ひずみ(γ)依存特性(埋戻し土)²⁾

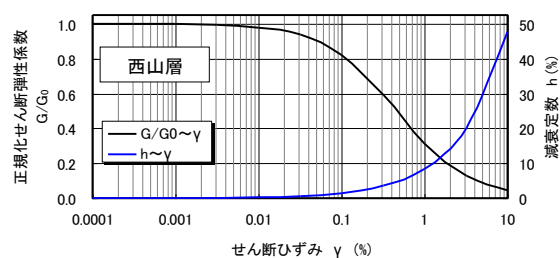


図-4 初期せん断弾性係数(G_0)と減衰定数(h)のせん断ひずみ(γ)依存特性(西山層泥岩)²⁾

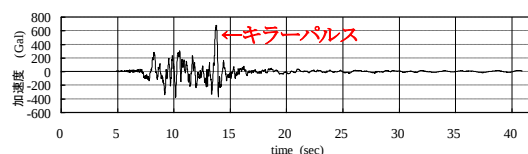


図-5 入力地震動(加速度時刻歴)²⁾

み量)も過大評価することになる。実際、既報²⁾における推定結果は実測沈下量に対してやや過大な評価を行った。また、逐次非線形解析手法の適用によって改善される可能性について言及した。

(2) 沈下量推定に用いる地震応答解析手法

本検討では、地震応答解析手法として、表-2に示す4種の解析手法、すなわち、(a)重複反射理論に基づく等価

表-2 地震応答解析手法一覧

解析手法
(a) 重複反射理論に基づく等価線形解析
(b) 逐次非線形FEM解析 (R-Oモデル)
(c) 逐次非線形FEM解析 (H-Dモデル)
(d) 逐次非線形FEM解析 (多重せん断ばねモデル) ⁴⁾

線形解析, (b)逐次非線形FEM解析(R-O応力ひずみモデル), (c)逐次非線形FEM解析(H-D応力ひずみモデル)および(d)逐次非線形FEM解析(多重せん断ばねモデル⁴⁾)を用いて沈下量の推定を行う。なお, (b)と(c)は同一の解析コードである。

地震応答解析の対象としたのは, 東京電力柏崎刈羽発電所(以下, KK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から構成されている地盤をモデル化したものであり(表-1, 図-3, 図-4参照)²⁾, 入力地震動は同発電所において観測された13秒付近に大振幅のパルス(キラールパルス)を有する地震動(図-5)である²⁾。等価線形解析では地震計設置深度であるT.P.-32.5m位置にE+F波を入力し, 他の逐次非線形FEM解析ではモデル下端をT.P.-60.0mとし, 当該深度における引戻波を作成し, 2E波を入力している。

3. 地震応答解析結果の比較

4種の地震応答解析による加速度, せん断応力およびせん断ひずみの最大応答値の深度分布と, 累積損傷度解析によって算出した体積ひずみの深度分布を図-6に示す。最大(残留)体積ひずみの総和が地表面沈下量である。

図-6に丸印で示した4深度(elm03, elm06, elm17, elm25)において, 4種の地震応答解析によるせん断応力の時刻歴を抽出し, 5~25秒部分を図-7に示した。4種のせん断応力時刻歴の形状は類似しており, 繰返し回数は概ね同様である。

しかし, キラールパルス部分の応答せん断応力振幅は, 等価線形解析による場合が他の逐次非線形FEM解析による場合に比べて全ての深度において大きく, 特に浅部ほど相違は拡大している。そのため, 等価線形解析による場合は体積ひずみを大きく算出している。T.P.±0.0m以浅では, 等価線形解析による最大せん断ひずみは2%を超えており, 解析手法や地盤物性値(せん断ひずみ依存特性)の適用範囲外である可能性が考えられる。

4. 沈下量推定におけるモデル化誤差の検討

モデル化誤差の特性は, 以下に記すように, 大竹・本

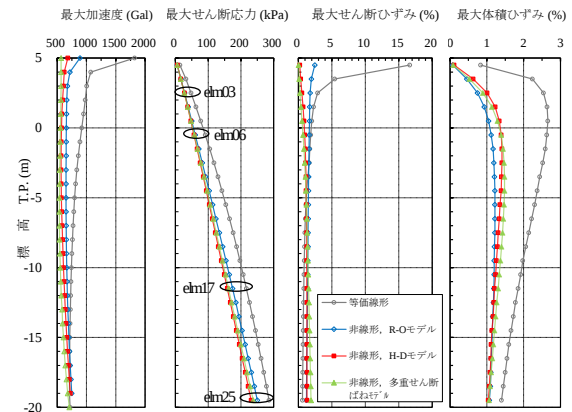


図-6 各地震応答解析による最大応答値と推定最大(残留)体積ひずみの深度分布 (KK 発電所: 不飽和砂質地盤)

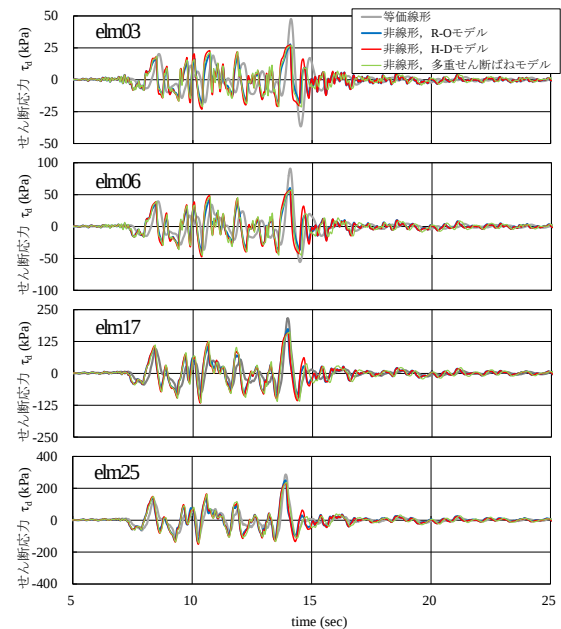


図-7 各種地震応答解析によるせん断応力の時刻歴 (KK 発電所: 不飽和砂質地盤)

城(2014)⁵⁾ による**bias**と**COV**の2つの指標を用いた表現方法に倣った。

ここで, **bias**とは計測値Aを計算値Bで除した値(A/B)の平均であり, 計測値に対する計算値の偏りを表している。1.0より大きい場合には計算値が計測値を過小に評価していることを示し, 1.0より小さい場合には計算値が計測値を過大に評価していることを示す。COV は変動係数であり, A/Bの標準偏差/ **bias** で定義される。誤差の大きさを**bias**で基準化して表した指標である。

本検討において, 計測値A は2007年新潟県中越沖地震後にKK発電所内の埋戻し不飽和砂質地盤を対象とした実測沈下量であり, 前出の表-1に示した地盤構成を呈する地点における実測沈下量30~40cm^{2) 6)}の中央値35cmと

表-3 推定沈下量およびモデル化誤差の特性

解析手法	実測沈下量 A(cm)	推定沈下量 B(cm)	A/B	bias	COV
(a)	35	50.6	0.69	1.09	0.25
(b)		26.7	1.31		
(c)		29.3	1.19		
(d)		30.3	1.16		

した。計算値Bは各地震応答解析より算定したせん断応力時刻歴を用いて累積損傷度解析を実施して得られた推定沈下量である。

推定沈下量およびモデル化誤差の特性を表-3に示す。等価線形解析を用いた推定沈下量50.6cmは、実測値に対してやや過大評価となった。他の逐次非線形FEM解析を用いた推定沈下量26.7～30.3cmは、実測値を若干下回りやや過小評価となった。これら4種の地震応答解析手法を用いて算定した不飽和砂質地盤の地震時推定沈下量におけるモデル化誤差の特性を示す指標は、 $bias=1.09$ 、 $COV=0.25$ である。

以上の結果は、4種類の地震応答解析手法(応力ひずみモデル)の違いを反映したモデル化誤差の検討であり、ここでの数値に一般性はない。しかし、地盤の非線形特性や地震動特性(継続時間やキラーパルスの存在)の影響を反映した変位量(沈下量)を推定する問題であるにもかかわらず、ばらつきはそれほど大きくない($COV=0.25$)と考えられる。大竹・本城(2014)⁹⁾が整理した、仮設土留め($COV=0.43\sim0.62$)、直接基礎の鉛直支持力($COV=0.17\sim0.47$)、杭基礎の先端支持力($COV=0.53\sim0.63$)や周面摩擦力($COV=1.01\sim1.21$)、斜面安定円弧すべり計算($COV=0.067\sim0.087$)、液状化判定($COV=0.40$)や液状化変形解析($COV=0.27$)などの各種地盤構造物設計におけるモデル化誤差と比較しても小さい範囲に収まっている。

次に、既検討において地盤物性のばらつきを考慮した不飽和砂質地盤の沈下量を fragility 曲線として評価した結果³⁾に、ここで求めたモデル化誤差を含めたコンポジット fragility 曲線の算定事例を示す。

地震時地盤沈下に関する fragility 曲線は、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平均値および標準偏差を考慮して、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)を行って作成したものである。既検討では、3種のPGA(Peak Ground Acceleration)、すなわち、PGA680Galの地震動(図-5)とその前後のPGA450GalおよびPGA900Galに振幅調整した地震動に対して地震応答解析および累積損傷度解析を100ケースずつ実施している。任意の限界状態(沈下量)を設定し、各PGAの地震動を入力して算定した推定

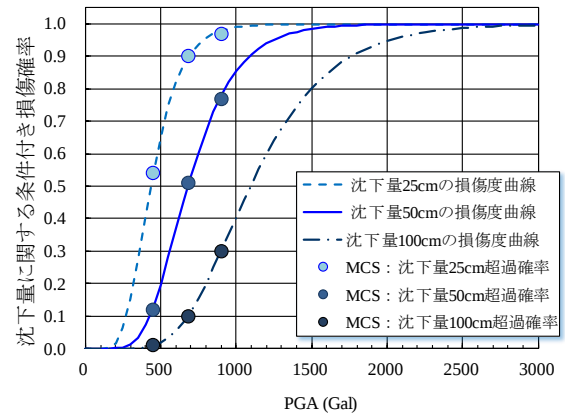


図-8 限界状態(沈下量)ごとの fragility 曲線³⁾
(対数正規分布を仮定)

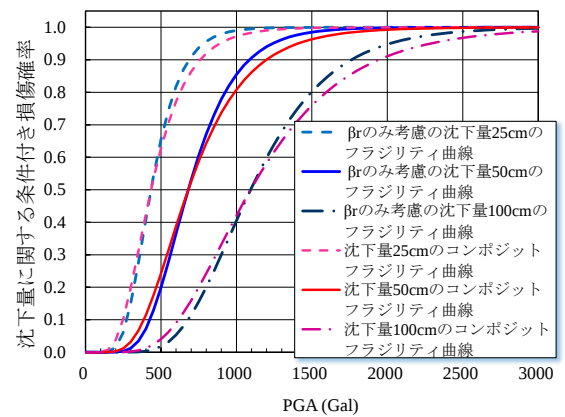


図-9 限界状態(沈下量)ごとの
コンポジット fragility 曲線

表-4 限界状態ごとのコンポジット対数標準偏差

限界状態 (沈下量) (cm)	中央値 (Gal)	地盤物性の ランダム性 β_r	コンポジット 対数標準偏差 β_c
25	433.8	0.357	0.436
50	680.4	0.364	0.442
100	1093.9	0.372	0.448

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。既検討では、限界状態(沈下量)を25、50、100cmとしている。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式(2)の累積分布関数、すなわち fragility 曲線を求める。

$$P_f(A) = \phi\left(-\frac{\ln(A) - \ln(A_m)}{\zeta}\right) \quad (2)$$

ここに、 $P_f(A)$: 沈下量に関する損傷確率、 ϕ : 標準正規確率分布関数、 A : PGA、 A_m : 中央値PGA、 ζ : 対数標準

偏差, である.

対数正規分布を仮定して回帰算定した限界状態(沈下量)ごとのフラジリティ曲線を図-8に示す.

不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定におけるモデル化誤差の検討で算出された変動係数 $COV0.25 \approx$ 対数標準偏差 β_u とすると, 各限界状態(沈下量)におけるコンポジット対数標準偏差は表-4のとおりである.

ここに, β_r : 地盤物性のランダム性, β_u : モデル化誤差, β_c : コンポジット対数標準偏差 $\beta_c = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2}$,

である. 限界状態(沈下量)ごとのコンポジットフラジリティ曲線は図-9に示すとおりである. 地盤物性のばらつき(偶然的不確実さ: β_r)のみを考慮したフラジリティ曲線に対して, コンポジットフラジリティ曲線の勾配がわずかに緩やかになったことがわかる.

5. おわりに

筆者らが提案する不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定方法を用いる場合, 地震応答解析を行って地盤の各深度におけるせん断応力時刻歴を算定する必要がある. しかし, 地震応答解析手法にはいくつかの方法があり, それぞれの方法ごとに実現象に対する仮定や単純化がなされてモデル化あるいはコード化されている. したがって, 用いる地震応答解析によって算定されるせん断応力時刻歴は異なることになる. 性能設計ではこのような不確実性(モデル化誤差)を加味した評価・判断を行えることが望ましいと考え, 本報でその検討例を示した.

今回実施した不飽和砂質地盤の地震時沈下量推定問題におけるモデル化誤差の検討では, 地盤の応力ひずみモデルを規定するパラメータや非線形解析におけるレイリー減衰の設定などに関し, 解析手法およびモデル間の整合性を考慮している. しかし, 同一問題に対して異なる

組織, 異なる解析担当者が対応した場合, モデルのパラメータ設定などは独立した判断の下で行われることになり, 推定値のばらつきは本検討結果より大きくなるものと考えられる. 今後, データの拡充とともに更なる分析, 検討が必要である.

参考文献

- 1) 日本原子力学会: 日本原子力学会標準 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準: 2015, 2015年12月25日.
- 2) 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.
- 3) 北爪貴史・後藤聡・荒木功平・佐藤博・佐藤正行: 不飽和砂質土における乾燥密度およ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, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp. I_953- I_962, 2015.
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameda, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 5) 大竹雄, 本城勇介: 地盤構造物設計におけるモデル化誤差の定量化, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.2, pp.170-185, 2014.
- 6) Sato, H., Momose, K., Suehiro, T., Tani, T., Sato, M., Ozeki, 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.

MODEL ERROR IN ESTIMATION SETTLEMENT OF UNSATURATED SANDY SOILS

Takashi KITAZUME, Kyohei SATO, Junichi HYODO,
Kohei ARAKI and Satoshi GOTO

A method is presented for assessing the amount of settlements at the surface of the unsaturated backfill, by using the relationships between number of cycles, shear stresses and volumetric strains, obtained from stress-controlled cyclic shear tests under exhaust drained conditions. The method is based on the cumulative damage theory in which shear stress time histories based on seismic response analysis of the ground are taken into consideration. Such an estimated method of settlement depends on the precision of seismic response analysis. In this report, we estimated settlement using four different seismic response analyses and considered about the model error from differences between those estimates and actual survey settlements.