

累積塑性ひずみエネルギーを用いた有効応力解析 —液状化による沈下量の検討—

Effective Stress Analysis by using Accumulated Plastic Strain Energy -Investigation of Liquefaction-Induced Settlements-

○宮澤翔¹, 山田雅一², 安達俊夫²Sho Miyazawa¹, Masaichi Yamada², Toshio Adachi²

Abstract : In this paper, the liquefaction-induced settlements are investigated by performing the effective stress analysis using the accumulated plastic strain energy. The proposed evaluation method was applied to the actual of liquefaction-induced settlements.

1.はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の本震およびその約30分後に発生した余震により、関東地方南部の埋立地を含む造成地において地震動の大きさから推定されるよりも大規模な液状化が発生し、液状化に起因する地盤変状・地盤沈下が発生した¹⁾。このような大規模な液状化が発生した原因の一つとして地震動の継続時間が長かったことが挙げられる。継続時間の長い地震動に対しては、福武ら²⁾によって浦安地区の地盤を対象とした有効応力解析による検討が報告されている。一方で継続時間の長い地震動に対する液状化挙動を評価するにはエネルギーに基づく方法³⁾が優れていると考えられる。そこで、本報では過剰間隙水圧比および体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係^{4) 5)}を用いた有効応力解析を行い、液状化による残留沈下量を評価する。本手法の適用性を検討するために、東北地方太平洋沖地震の被害調査結果による実測沈下量と有効応力解析で得られた推定沈下量を比較・検討する。

2. 累積塑性ひずみエネルギーを用いた沈下量推定法

本報では液状化に起因する地盤の残留沈下量を過剰間隙水圧比および体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係を用いた有効応力解析で検討する。解析は、1次元有効応力地震応答解析プログラム「YUSAYUSA-2」⁶⁾に、以下に述べる過剰間隙水圧比および体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係を導入することで行った。

2.1 累積塑性ひずみエネルギーを用いた過剰間隙水圧モデル

過剰間隙水圧比と累積塑性ひずみエネルギーの関係について説明する。文献4)で報告した細粒分を含む地盤を対象とした過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_a$ と基準化累積塑性ひずみエネルギー W_p/σ'_a の関係 (以下、過剰間隙水圧モデルと称する) を基に砂の最小間隙比 e_{min} と液状化強度 R_{15} をパラメータとする過剰間隙水圧モデルを用いる。 $\Delta u/\sigma'_a$ と W_p/σ'_a の関係を式(1)、式(2)で表す。

$$\Delta u/\sigma'_a = \alpha (W_p/\sigma'_a)^{0.55} \quad (1)$$

$$\alpha = 4.15 (e_{min}/R_{15}) \quad (2)$$

ここに、液状化が生じるような均等な粒径で50%粒径が0.2mm程度以下の非塑性細粒分を含む土の e_{min} は、0.6程度になる場合が多い⁷⁾。そこで本検討で e_{min} は0.6とする。

2.2 体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係

液状化に伴う残留沈下量は、体積ひずみ ε_v と累積塑性ひずみエネルギー W_p/σ'_a の関係⁵⁾ (以下、体積ひずみモデルと称する) により求める。文献5)では体積ひずみ ε_v と W_p/σ'_a の関係は、砂の種類、相対密度および細粒分含有率に関わらず液状化強度から ε_v を推定できることを示している。 ε_v と W_p/σ'_a の関係は式(3)、(4)で表される。

$$\varepsilon_v = a \times (W_p/\sigma'_a) \quad (\varepsilon_v < \varepsilon_{vmax}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{vmax} \quad (\varepsilon_v \geq \varepsilon_{vmax}) \quad (4)$$

ここに、 a は再圧密勾配 (体積ひずみ ε_v が最大体積ひずみ ε_{vmax} に至るまでの勾配) であり、 ε_{vmax} は最大体積ひずみである。再圧密勾配 a と最大体積ひずみ ε_{vmax} は液状化抵抗からそれぞれ式(5)、(6)で求められる。

$$\varepsilon_{vmax} = 0.0018R_{15}^{-1.65} \quad (5)$$

$$a = 0.0015R_{15}^{-4.09} \quad (6)$$

3. 累積塑性ひずみエネルギーを用いた有効応力解析

体積ひずみと塑性ひずみエネルギーの関係から液状化による残留沈下量を評価するために、東京湾沿岸の埋立地域を対象として浦安市における実測沈下量 S と解析で得られる推定沈下量 S_E および地表面動的変位 Dcy ⁸⁾ ($=S_E$) の検討を行う。本検討に使用した実測沈下量は千葉県環境研究センターから公表されている浦安市における実測沈下量 S ⁹⁾ である。この S は、杭基礎構造物の周辺地盤が液状化した後に生じる構造物との相対的な抜け上がり量の測定値である。図1に浦安市における S と検討地点(13地点)を示す。

3.1 解析条件

本報では地盤条件として検討地点で実施された既存資料のボーリング調査データを参照する。ここに R_{15} が記されていない場合は、 Dcy を求める過程で得られた等価な繰返しせん断応力比を R_{15} とする。地盤の沈下量は深度20m以浅

Table.1 Analysis results and soil parameters in analyzed point 11

深度 (m)	土質	単位体積重量 $\gamma(kN/m^3)$	N値	細粒分含有率 Fe(%)	初期せん断剛性 $G_0(kN/m^2)$	液状化発生	体積ひずみ ϵ_v	各層の沈下量 $\Delta S_E(cm)$
2.8	細砂	15.70	3	14	37107	-	-	-
4.3	細砂	15.70	4	14	47797	-	-	-
8.7	粘土質シルト	15.61	1	92	14112	-	-	-
14.7	細砂	15.70	6	14	68291	○	0.0206	12.4
17	粘土質シルト	15.61	4	92	47797	-	-	-
19.8	火山灰質シルト	17.64	11	96	30988	-	-	-

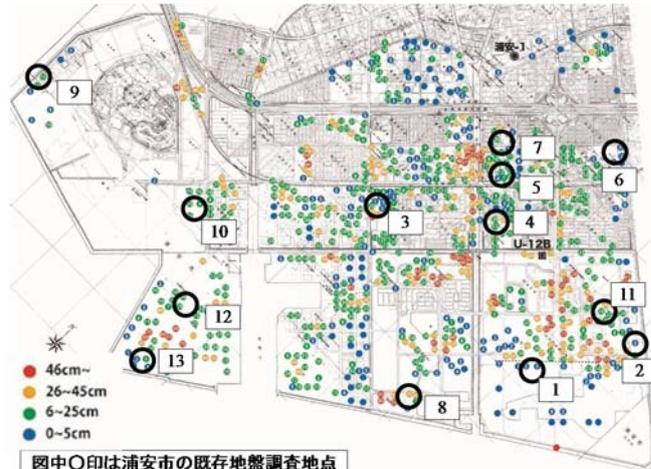


Fig.1 Analyzed points and actual settlement in Urayasu-shi

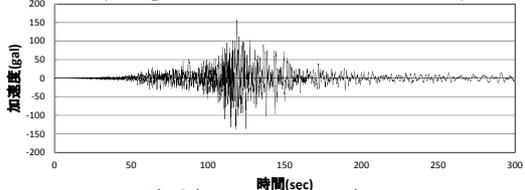


Fig.2 input seismic motion

を検討する。地盤条件と解析結果の一例として検討地点 No.11 における地盤定数と解析結果を表 1 に示す。入力地震動は K-NET 浦安で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震本震の NS 波の地表面加速度記録を SHAKE による引き戻し計算で作成した基盤波である。図 2 に入力地震動として用いた基盤波を示す。応力～ひずみ関係の構成式には H-D モデルを用いた。

3.2 実測沈下量、推定沈下量および地表面動的変位の検討

表 2 に各検討地点の実測沈下量と本解析で得られた推定沈下量および地表面動的変位を示す。図 3 に実測沈下量と推定沈下量および地表面動的変位の関係をプロットした。表 2 と図 3 より、実測沈下量 S と推定沈下量 S_E を比較すると S_E が過小評価される傾向が見られる。推定沈下量 S_E が過小評価された要因は、東北地方太平洋沖地震の余震の影響等を考慮していないことが考えられる。さらに表 2 と図 3 より、各検討地点における本解析による推定沈下量 S_E と D_{cy} による推定沈下量を比較すると、本解析による推定沈下量は、 D_{cy} による推定沈下量に比べて良い相関が得られた。このことより、埋立地を含む造成地における液状化による残留沈下量の評価法として、本報で行った液状化による沈下量の推定法が有効となる可能性が示唆された。

4.まとめ

本報では過剰間隙水圧比および体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係を用いた有効応力解析による液状化による

Table.2 Comprison of actual settlement and estimated settlement

検討地点	実測沈下量 $S(cm)$	推定沈下量 $S_E(cm)$	地表面動的変位 $D_{cy}(=S_E)(cm)$
1	5	7	7
2	60	27	15
3	40	26	15
4	30	4	21
5	20	11	8
6	5	11	16
7	20	26	12
8	5	0	13
9	15	20	5
10	15	20	5
11	30	11	12
12	20	12	20
13	9	5	20

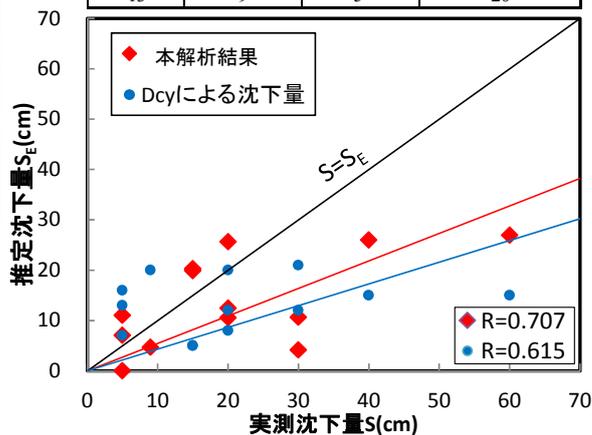


Fig.3 Comprison of actual settlement and estimated settlement

る残留沈下量を評価するために、浦安市における液状化による実測沈下量と本解析で得られた推定沈下量を比較・検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 本解析で用いた過剰間隙水圧モデルと体積ひずみモデルにおいて、主要なパラメータは液状化強度 R_{15} である。
- ② 本解析で得られた液状化による残留沈下量は、実測沈下量と比べて過小評価される傾向が見られたが、概ね液状化による残留沈下量を評価できた。

(参考文献)

- 1)日本建築学会:2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, pp.355, 2011.
- 2)福武毅芳, 張至鎬:2011 年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の地盤の有効応力解析による検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.4, pp.1293-1304, 2012
- 3)國生剛治:エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と FL 法との対比, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No. 3, pp.463-475, 2012.
- 4)道明裕毅他:エネルギーの釣合に基づく液状化地盤の損傷評価に関する研究-その 2 エネルギー-最大ひずみ関係の検討,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,pp.189-190, 2012
- 5)堂野前大貴他:中空ねじりせん断試験による砂の体積ひずみと塑性ひずみエネルギーの関係 その 2, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp.453-454, 2015
- 6)吉田望, 東畑郁生:YUSAYUSA-2, SIMMDL-2 理論と使用法(改訂版 Version2.10), 2005. 7
- 7)沼田淳紀他:細粒土に対する最小間隙比定義方法の提案, 第 11 回日本地震工学会シンポジウム, pp.287-305, 2002
- 8)日本建築学会:建築基礎構造設計指針, pp.62-64, 2001
- 9)千葉県環境センター:第 3 報 千葉県内の液状化・液状化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果-浦安地区(1)-, 2011