

液状化の残留変形を求める 3次元静的解析手法の適用例

大成建設（株） 正会員 忠野 祐介
大成建設（株） 正会員 立石 章
大成建設（株） 正会員 宇野 浩樹

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸部を含む広域で液状化に伴う地盤の変形が問題となった。

液状化に伴う地盤の変形を完全に抑止しようとすると、対策費用が莫大となり不経済な設計となる。経済的な対策工の検討を行うためには、液状化に伴う地盤の変形量を予測し、許容可能な変形量と対策工の費用対効果を明確にすることが重要である。

液状化による地盤の変形量を予測する手法としては、大別すると二種類の解析手法が開発されてきた。

一つは、液状化する地盤と構造物の動的挙動を時刻歴で解いていく動的解析法である。この手法は、地震中・地震後両方の変形量を求められる利点があり、2次元解析だけでなく、3次元解析も実用段階になりつつある。しかし、入力するパラメータが多い上にパラメータ設定に熟練を要し、また解析結果の評価も容易ではないという難点がある。

もう一つの手法は、地震後の液状化による残留変形に限定して算定する静的解析法である。この手法は、液状化による被害の大半が地盤の残留変形であることに着目したもので、動的解析法と比較すると、パラメータの設定や結果の評価が容易であり、地盤や地震動に関する詳細な情報が乏しい段階から適用可能な解析手法である。東京電機大学の安田進教授が開発した2次元静的解析プログラムALID¹⁾は、この手法の代表的なプログラムであり、河川堤防の耐震性照査をはじめとして多くの実績を有している。一方で、ALIDは2次元解析であるため、例えば、円筒形タンクのような3次元的な構造物を2次元でモデル化した場合は、構造物と地盤の力の相互作用は合理的な近似とはならず、必ずしも経済的な設計とはならない可能性があるという課題がある。

そこで著者らは、ALIDで用いられている解析手法を、汎用の3次元解析プログラムに導入することで、液状化に伴う残留変形解析手法の3次元化に取り組んだ。ここに、3次元解析プログラムとしては、地盤の変形解析の分野で多くの実績を有し、豊富な構造要素を有する3次元有限差分法地盤解析プログラムFLAC3Dを用いた。

本報では、まずALIDで用いられている残留変形解析手法の概説を行う。次に、宅地の液状化被害のシミュレーション解析を行い、3次元に拡張した解析手法の妥当性を検証した結果について述べる。

2. 残留変形解析手法の概説

2.1 ALIDの概要

ALIDでは、液状化による地盤の残留変形を以下の二つの現象に分類して計算している²⁾。

- i) 液状化時の剛性低下に伴う流動変形
- ii) 液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う圧密沈下

以下、上記2つの手法について概説する。

2.2 液状化時の剛性低下に伴う流動変形

安田ら¹⁾は、中空ねじりせん断試験装置を用いた実験結果より、地震前と流動時の τ - γ 関係を図-1 a)のように模式的に表した。

ALIDでは、安田ら¹⁾の実験結果から得られた図-1 a)の τ - γ 関係を図-1 b)のように単純化してモデル化し、流動時の土の挙動を表現している。以下、これをALIDモデルと呼ぶ。

ALIDモデルでは、A点にあった地震前の応力状態から、要素の体積変化を拘束した状態で流動時の τ - γ 関係を用いてB点まで応力を低下させる。それによって生じる不釣り合い力($\tau_A - \tau_B$)を要素に作用させることで、C点を求める。ここで示した流動時

の τ - γ 関係のうち、限界ひずみ γ_L までの微小抵抗領域における流動時のせん断剛性 G_1 は、安田・稲垣³⁾により作成されたチャート(図-2)より求める。限界ひずみ γ_L および剛性回復時のせん断剛性 G_2 は安田ら^{1),2)}の実験結果から与えられる。

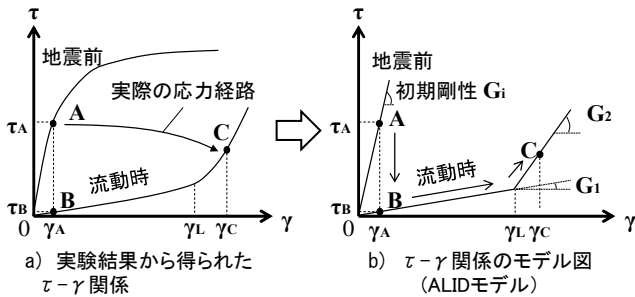


図-1 液状化した土の τ - γ 関係

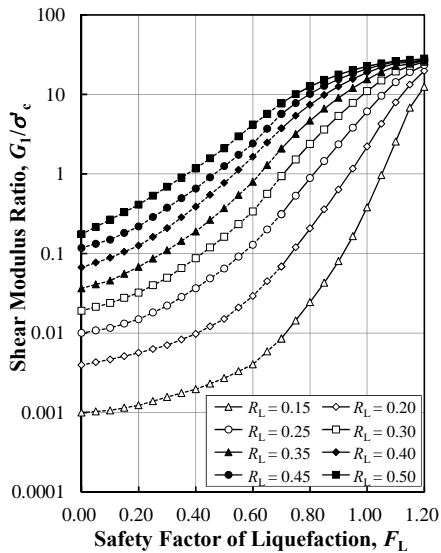


図-2 安田・稲垣によるチャート
(文献²⁾より転載し修正)

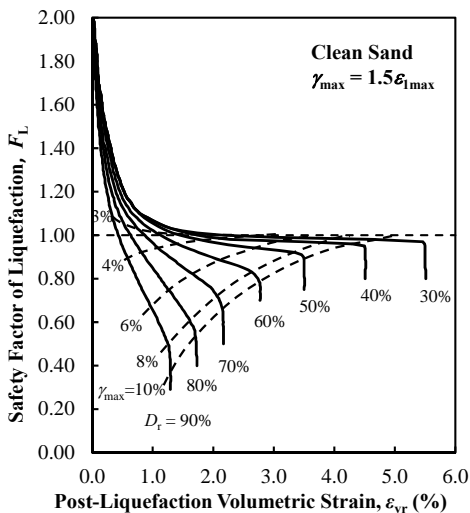


図-3 石原・吉嶺によるチャート
(文献²⁾より転載し修正)

2.3 過剰間隙水圧消散に伴う圧密沈下

Ishihara and Yoshimine⁴⁾は、単純せん断試験機を用いた実験により、せん断中の最大せん断ひずみ γ_{max} と再圧密後の体積ひずみ ϵ_{vr} の関係を求め、液状化後に残留する体積ひずみ ϵ_{vr} を液状化安全率 F_L と相対密度 D_r から求められるチャートを作成した。(図-3)

FLAC3Dにおける圧密沈下解析は、ALIDの解析手法を基に、石原・吉嶺のチャートを用いて、各要素の残留体積ひずみ ϵ_{vr} を求める。そして、その残留体積ひずみ ϵ_{vr} が発生するような体積弾性係数 \tilde{K} を各要素に付与し、流動解析後の有効応力から、地震前の有効応力に回復するまでに生じる不釣り合い力を要素に作用させることで、過剰間隙水圧消散に伴う圧密沈下量を求める。

3. 東北地方太平洋沖地震における被害事例の

シミュレーション解析

本解析プログラムにより得られる解析結果の妥当性を検証するため、東北地方太平洋沖地震における浦安市の液状化による被害調査結果とFLAC3Dによる3次元モデルでの解析結果の比較を行った。

3.1 解析モデル

図-4にFLAC3Dの解析モデルを示す。解析モデルは8棟の住宅が近接したモデルである。浦安市による「液状化対策実現可能性技術検討委員会⁵⁾」(以下、浦安市委員会と表記)に基づき、住宅同士の間隔は2.0mとした。境界条件は、モデル側面は鉛直ローラー、モデル下面は完全固定とした。

3.2 物性値の設定

表-1に地盤モデルの物性値を示す。地盤モデルは、浦安市委員会⁵⁾の検討で使用された、浦安市内で液状化の被害が確認された地域の平均的な地層構成、地盤物性値である。初期自重解析に用いるせん断剛性 G_1 は、初期せん断剛性 G_0 を用いて、せん断ひずみ $\gamma = 0.1\%$ のときのせん断剛性を「埋立地の液状化ハンドブック⁶⁾」で示されている方法により求めた。地下水位面はG.L.-1.0mである。

3.3 地震外力

地震外力は、浦安市委員会⁵⁾における地震応答解析の結果⁵⁾を参照した。浦安市委員会では、東北地方太平洋沖地震において夢の島で観測された解放基盤波を用いて地震応答解析を行った結果、地表面最

表-1 地盤モデルの物性値

土質名	層厚 (m)	細粒分 含有率 F_c (%)	飽和 密度 ρ_{sat} (g/cm^3)	相対 密度 D_r (%)	粘着力 c (kN/m^2)	内部 摩擦角 ϕ (度)	ポアソン比 ν	初期せん断 剛性 G_0 (kN/m^2)	せん断 剛性 * G_i (kN/m^2)	液状化 強度 R_{L20}
Bs (不飽和)	1	18.0	1.8	55.0	0	31	0.3333	38,000	6,100	0.266
Bs (飽和)	1	18.0	1.8	55.0	0	31	0.3333	38,000	7,500	0.247
Fs	6	22.0	1.8	76.3	0	30	0.3333	29,000	6,800	0.188
As1	2	21.9	1.8	62.1	0	35	0.3333	70,000	18,400	0.330
As2	2	31.0	1.7	72.9	0	30	0.3333	40,000	10,900	0.228
Ac1	4	93.6	1.5	-	13	0	0.3333	27,000	15,700	0.218

* 著者が設定した初期自重解析に用いるせん断剛性

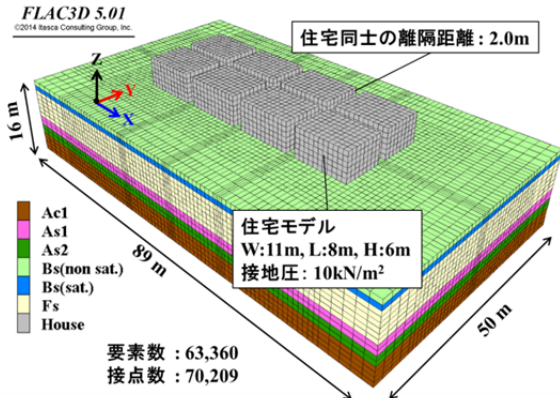


図-4 解析モデル

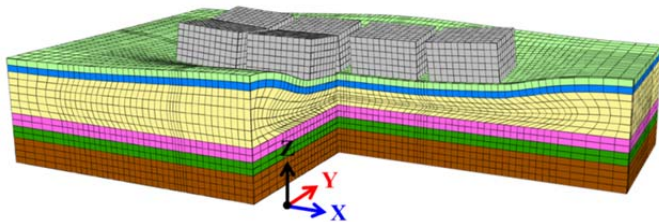


図-5 残留変形図 (変形倍率 5 倍)

大加速度 161Gal が得られたため、検討用水平加速度を $\alpha_{max}=170Gal$ とした。本検討では、検討用水平加速度を重力加速度で除した水平震度 $k_{hg}=0.175$ を地震外力として地表面に設定した。

3.4 地盤の構成モデル

非液状化層である埋土層 Bs (不飽和) ならびに沖積粘土層 Ac1 については全ての解析ステップで線形弾性モデルとした。埋土層 Bs (飽和) から沖積砂層 As2 までの液状化層については、初期自重解析では Mohr-Coulomb モデル、流動変形解析では、ALID モデル、圧密沈下解析では、線形弾性モデルとした。

4. 解析結果

図-5 は、解析によって得られた液状化に伴う地盤の残留変形を描画したものである。住宅は沈下し、住宅直下の液状化層が側方に押し出されるように変

形している。特に、液状化強度が小さい Fs 層 (図-5 黄色の層) は、大きく変形している。

図-6 は、地表面の鉛直変位のコンター図に、各住宅の傾斜ベクトルを併記したものである。ここで、傾斜ベクトルの色は、傾斜角の大きさを表し、矢印の向きは、傾斜の方向を表している。同図中には、8 棟の住宅の「内側」の 4 棟と「外側」の 4 棟の平均沈下量、不等沈下量、最大傾斜角を併記している。住宅の平均沈下量、不等沈下量、最大傾斜角は、下記の式によって求めた。

$$S_{av} = (s_1 + s_2 + s_3 + s_4) / 4 \quad (1)$$

$$S_{dif} = S_{max} - S_{min} \quad (2)$$

$$\theta = S_{dif} / B \quad (3)$$

ここに、 s_1, s_2, s_3, s_4 : 住宅隅角部での沈下量 (cm)

S_{av} : 平均沈下量 (cm)

S_{dif} : 不等沈下量 (cm)

θ : 最大傾斜角

S_{max}, S_{min} : 最大沈下量, 最小沈下量 (cm)

B : S_{max}, S_{min} を算出した点同士の距離 (cm)

図-5, 図-6 より、8 棟の住宅の中央部が大きく沈下している。この解析モデルでは、住宅同士が非常に近接している。そのため、地盤に作用する地震前の上載荷重は、荷重の重ね合わせにより 8 棟の住宅の中央部直下が最も大きくなる。一方、液状化に伴う地盤の流動変形は、地震時にせん断剛性・強度が低下し、地震前に作用していた上載荷重による軸差せん断応力が不釣り合い力 (図-1 中の $\tau_A - \tau_B$) として作用する。よって、8 棟の住宅の中央部に向かって、各住宅が傾斜した。

図-7 は、時松・勝間田⁷⁾による、浦安市内の液状化被害を受けた街区で計測された戸建住宅の傾斜ベクトル図である。実際の液状化による住宅の被害で

も、図-6 と同様に街区の中央に向かって住宅が傾斜する傾向が認められる。また、最大傾斜角についても、解析結果は 1/75~1/43 であり、被害調査結果を概ね再現する結果が得られていた。

図-8 は時松・勝間田⁷⁾が東北地方太平洋沖地震翌日から液状化の被害調査および戸建住宅の被害状況の調査を行い、住宅の平均沈下量毎に住宅の傾斜角の分布について整理したものである。時松・勝間田⁷⁾の調査によると、地盤の沈下量は最大で 60cm 程度であり、平均沈下量が大きくなるのに伴い、傾斜角が大きくなる傾向があると報告されている。この被害調査結果に、解析により得られた結果を重ねると、平均沈下量・傾斜角はいずれも被害調査結果の範囲内にあることが分かった。

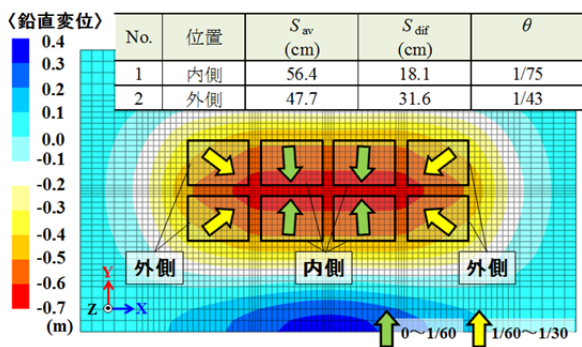


図-6 地表面の鉛直変位のコンターと傾斜ベクトル

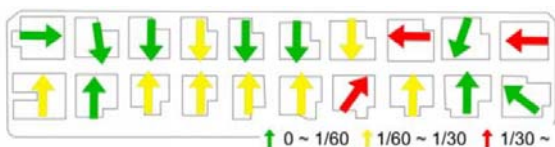


図-7 浦安市内の液状化被害を受けた街区での戸建て住宅の傾斜ベクトル図 (文献⁷⁾より転載)

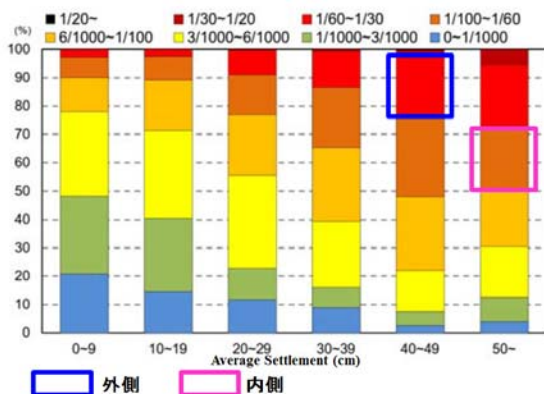


図-8 浦安市における戸建住宅の液状化被害 (文献⁷⁾より転載し加筆)

5. まとめ

本研究では、ALID の残留変形解析手法を、3次元有限差分法地盤解析プログラム FLAC3D に導入した。開発したプログラムを用いて、浦安市内での住宅の液状化被害のシミュレーション解析を行い、実際の被害調査結果と比較した。その結果、液状化の残留変形を求める 3次元静的解析手法は、住宅の平均沈下量、傾斜角を被害調査結果の範囲内で再現可能であり、住宅の傾斜方向についても実際の被害事例を概ね再現できることが分かった。

6. 今後の課題

本報では、地震外力が地表面で 200Gal 程度の条件下で、3次元静的解析手法の妥当性を検証できた。しかしながら、地震外力がレベル 2 地震動相当を設定した本報での設定値の 2 倍以上の場合、変形量が大きくなりすぎるという結果が得られている⁸⁾。今後は、流動変形解析時の剛性算出方法の見直しを行うことにより、想定する地震外力が大きい場合における解析手法のさらなる精度向上を図る。

参考文献

- 1) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638, III-49, pp.71-89, 1999.
- 2) ALID 研究会: 2次元液状化流動解析プログラム ALID/Win マニュアル第四版, 2007.
- 3) 安田進, 稲垣太浩, 長尾和之, 山田眞一, 石川敬祐: 液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.525-526, 2005.
- 4) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992.
- 5) 浦安市液状化対策事業 HP : <http://www.city.urayasu.lg.jp/todokede/anzen/shinsai/kijoka/index.html>, (2016/08/25 アクセス).
- 6) 沿岸開発技術研究センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), pp.66-69, 1997.
- 7) 時松孝次, 勝間田幸太: 2011 年東北地方太平洋沖地震における浦安市での液状化による戸建住宅被害, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.1489-1490, 2012.
- 8) 小林真貴子, 立石章, 広重敬嗣, 原祐介: 地下水位低下工法を適用した遠心模型実験のシミュレーション解析 (その 2 3次元静的残留変形解析), 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.25-26, 2014.