

(32) 液状化に起因した構造物の沈下に関する簡易解析法

横浜国立大学 工学部 正会員 ○規矩大義
九州工業大学 工学部 正会員 安田 進

※はじめに※

地震時に液状化が生じると、地盤の支持力が大きく失われたり、地盤全体が数メートルのオーダーで大きく移動する“永久変位”といわれる現象が生じる。また、それらに起因して、多くの構造物が被害を受けてきたことも周知の事実である。特に、新潟地震や日本海中部地震では、鉄筋コンクリート造のビルや石油タンク等が、液状化によって大きく沈下・傾斜したり、橋脚が破損したりして、甚大な被害をもたらしている。さらに、地盤や構造物の被害が地震動の終了後に生じていたという報告もなされている。しかし、このような液状化後の構造物の沈下量や移動量を推定する方法については、未だ十分に確立されているとは言い難い。液状化時の地盤と構造物の挙動を予測する方法としては、2次元の有効応力解析を行う方法や残留変形解析手法などが挙げられる。しかし、これらの手法を用いるためには、複雑な室内試験や十分な予備解析が必要な上に、一般には、計算量も膨大なものとなりやすい。これまでに、筆者ら¹⁾は、静的な有限要素解析と液状化前後の地盤の物性値を用いて、液状化した地盤の永久変位を予測する手法を考案している。そこで本研究では、小・中規模住宅のような直接基礎を有する構造物を対象に、前述の永久変位解析手法を拡張して適用し、液状化した地盤内の構造物の沈下量を簡便に予測する方法について検討した。

※解析手法※

液状化した地盤内にある構造物の沈下量を推定するため、既往の永久変位予測手法を拡張して適用した。この手法は残留変形解析手法を簡略化したもので、液状化に伴う地盤の軟化を变形係数の低下という形で表現し、液状化前後で2段階の有限要素解析を行って得られた変形量の差分をもって最終変形量とするものである。Fig. 1には解析手法のラフチャートを示し、以下に解析手順を示す。

- ① 対象とする地盤～構造物系の断面に対し自重解析を施し、地盤の初期応力および初期ひずみ（変位置）を算定する。
- ② 求めた初期応力から各節点の等価節点力を算定する。
- ③ 自重解析時と同じ断面に対して、各要素の变形係数として液状化後の地盤の物性値を用い、外力として②で算定した等価節点力を加えて地震後の応力解析を行う。
- ④ 求めた変位置から初期変位置を差し引いて最終変形とする。

※アパートモデルの解析※

解析対象として、新潟地震の際に被害を受けた川岸町の県営アパートをモデル化した。このアパートは、ほぼ水平に堆積した厚さ約7mの液状化層を有する地盤の上に建てられ、新潟地震の際には液状化に起因してペントハウス側に2～8°傾いて不等沈下したことが報告されている。Fig. 2にはアパートのモデルと下層地盤の断面図を、Table. 1にはその初期の地盤定数を示す。

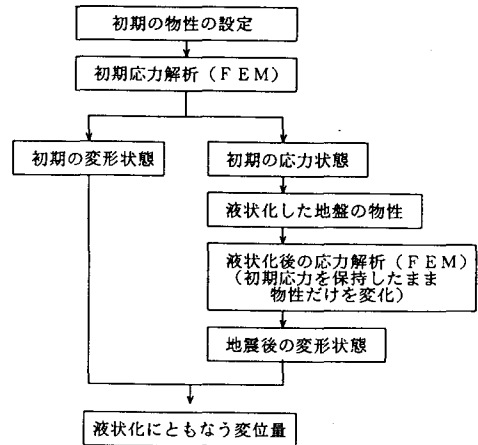


Fig. 1 解析のラフチャート

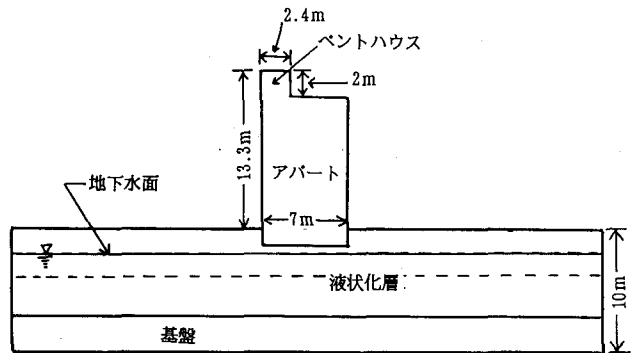


Fig. 2 モデル地盤の断面図

また、液状化後の解析段階で用いる変形係数には、繰返しねじり試験の結果²⁾から、せん断弾性係数 G を液状化前の $1/1000$ に低下させて用いている。さらに、液状化時の等体積変形条件を満たすように、ポアソン比を $\nu = 0.499999$ と仮定している。

Fig. 3 (a) は、地下水水面以下の液状化層が完全に液状化したと仮定した場合の解析結果である。アパート全体が若干沈下してはいるが、表層の非液状化要素に拘束されて変形量は少ない。アパート天端の変位量は、水平方向が 2.93cm 、沈下が 21.1cm で、傾斜率も $1/481$ と非常に小さく、実際の被害を十分に説明するには至っていない。

次に、地下水水位以下で構造要素に隣接する要素の剛性も $1/1000$ に低下させて解析を行った。Fig. 3 (b) には結果を示すが、不等沈下が大きく発生し、アパートが傾斜している様子が伺える。アパート天端の沈下量も約 2m となり非常に大きい。アパートの沈下によって周辺地盤が引張られて、幾分不自然な変形形状である。さらに、アパート直下の要素が、等体積変形を保つために周囲の要素を押し出し、逃げ場を失わない上方に隆起してしまっている。

そこで、アパート周囲に薄肉要素を配し、この要素に対して疑似的なジョイント効果を導入した。このジョイント特性は、地盤の変形に伴って引張り応力が働いた場合にのみ、さらに剛性を低下させ、地盤と構造物との間の滑りを表現できるようにしたものである。

Fig. 4 には、アパートの階下部分の側壁の周囲の4つの要素にジョイント特性を導入したケースでの解析結果である。変形図を見ると、アパートはペントハウス側に大きく傾き、沈下も大きく発生している。アパートの周辺地盤は、圧縮側で地盤内部に若干引き込まれるような挙動を示しているが、引張り側では摩擦が切れたように開きが生じている。アパート天端左端の変位量、傾斜率に注目すると、水平変位が 145cm 、沈下量 161cm 、となり、それよりアパートの傾斜率が $1/10$ 、傾斜角 5.9° となった。実測された川岸町アパートの傾斜角は $2\sim 8^\circ$ であるので、比較的良好に実現象を再現していると考えてよい。

Table. 1 解析に用いた地盤の初期定数

	単位体積重量 (γ) (tf/m^3)	せん断弾性係数 (G) (tf/m^2)	体積弾性係数 (K) (tf/m^2)
地下水水位以下	1.8	2222	5796
液状化層上部	1.9	2346	6117
液状化層下部	1.9	4362	11377
基盤層	2.0	6636	17305
アパート部	0.7	ヤング率 E	ポアソン比 ν
		5.3×10^5	0.3

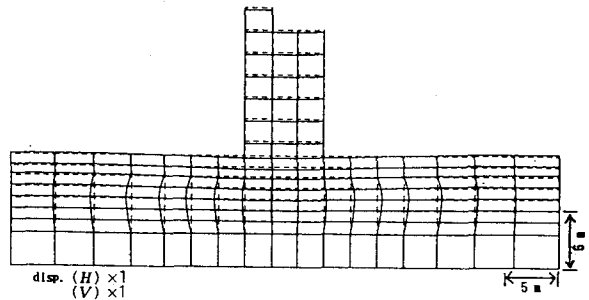


Fig. 3 (a) 変形解析の結果
(地下水水位以下が液状化したと仮定)

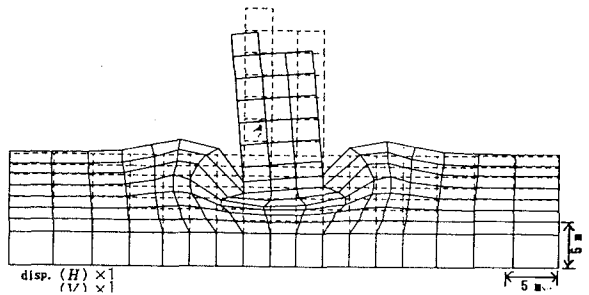


Fig. 3 (b) 変形解析の結果
(表層まで液状化したと仮定)

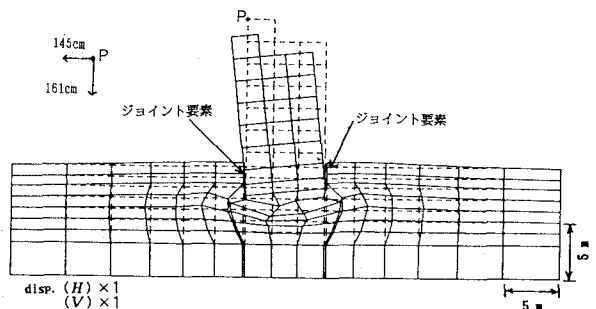


Fig. 4 アパート周囲にジョイント要素を用いた解析結果

※タンクのモデルの解析※

次に、日本海中部地震の際に被害を受け、宮本ら³⁾によって残留変形解析が行われている石油タンクの事例に対して本解析手法を適用した。Fig. 5には、宮本らが残留変形解析を行った断面図と、その時に用いた初期の地盤定数を示す。

本解析では同じ断面に対して形状を合わせて要素分割を行い、護岸背面、タンクの周囲に薄肉要素を配した。3基のタンクの重量は、内部に原油が貯蔵されていたものと仮定して、その貯蔵率は既往の報告より各々 38%、55%、64%としている。また、液状化にともなう地盤の剛性の低下率は $G_0, 1/G_0, 1=1/1000$ 、液状化時のポアソン比は $\nu=0.499999$ とした。さらに、地下水面以下で $GL-6m$ 以浅の要素が全層にわたって均一に液状化したものと仮定している。

Table. 2 解析で用いられた地盤定数³⁾

層	単体重量 γ_i (tf/m ³)	変形係数 E (tf/m ²)	ポアソン比 ν
①	1.8~2.0	1680~2800	0.4
②	1.8	3920~7840	0.4
③	1.7	5320	0.4
④	1.8	7840	0.4
⑤	2.1	14000	0.3

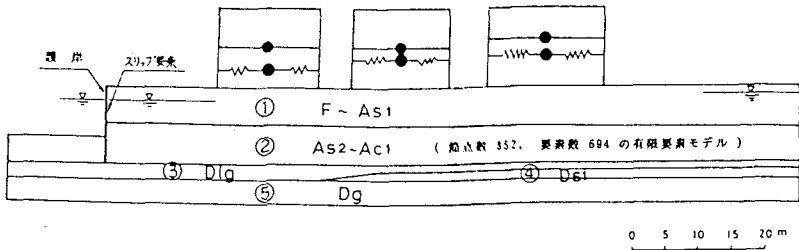


Fig. 5 残留変形解析で用いられた断面図 (宮本ら 1986)

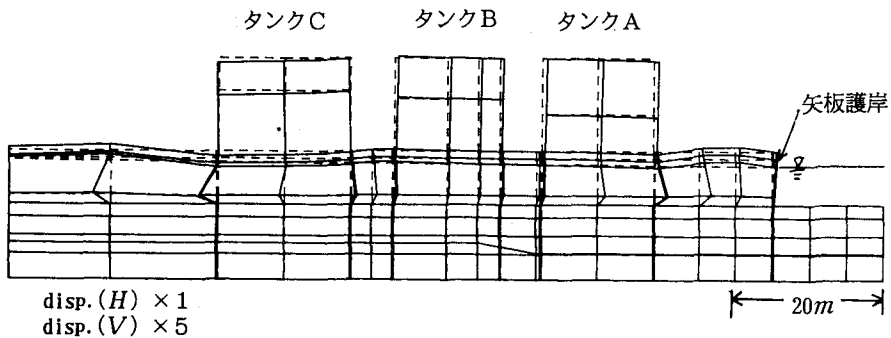


Fig. 6 変形解析の結果

($G/G_0=1/1000$ 、 $\nu=0.499999$)

タンク貯水率は、A 38%・B 55%・C 64%としている)

Fig. 6には、解析によって得られた変形図を示す。タンクAが護岸側に、タンクCが内陸側に傾斜して不等沈下している。また、タンクBも護岸側に若干不等沈下している様子が伺える。タンク周辺の地盤は引き込みによって沈下しているが、さらに外側では逆に隆起したような変形となっている。特に、境界部とタンク、タンクと護岸によって囲まれた地盤にその傾向が強いが、これは要素分割の粗さにも原因がある。

Table. 2、Fig. 7には、解析によって得られた各タンクの沈下量を、実測値ならびに、前述の残留変形解析によって求められた値とともに示す。各節点の沈下量の値は、実測値に比べて小さい。これは本解析手法が、過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮を考慮していないためであろう。本解析から得られたタンクAの不等沈下量は、約9cm、Cでは約-6cmであった。これに対して実測値⁴⁾は、タンクAで7.9cm、Cで-7.0cmであるので、傾斜の方向、不等沈下量ともに良く一致していると言えそうである。この後、過剰間隙水圧の消散に伴う体積変化が生じたと仮定した場合にも、対象断面では、液状化層厚がほぼ一定であるから、沈下は地盤全体で、ほぼ均一に生じると予想される。地盤の剛性低下に伴う沈下の傾向としては、現実の現象をかなり良く再現しているものと考えてよい。

一方、タンクBに関しては、実測値では、ほぼ一様に沈下しているのに対して、解析では約5cmの不等沈下が発生した。沈下量の絶対値も、他のタンクに比べて極端に小さい。これは、タンクの沈下に伴って圧縮力を受けた要素が逃げ場を失って、逆に沈下に抵抗したものと考えられる。この働きが、タンクBに対しては沈下量の抑制に、タンクの周辺では地盤の隆起に現れている。さらに、要素分割の粗さも大きく影響しているものと考えられる。こうした傾向は、残留変形解析の結果にも現れているようである。

残留変形解析の結果との比較を行うと、Fig. 7でも示したように、本解析で得られたタンクの沈下量が、実測値と残留変形解析のほぼ中間に位置していることが分かる。また、沈下量の絶対値もさることながら、タンクの傾斜方向や不等沈下量に関しては、本解析手法の方が実測変位との整合性が良い。

※おわりに※

本研究では、地盤～構造物系のモデル地盤に対して永久変位解析手法を適用し、その有効性を検証してきた。対象構造物としては、直接基礎を有する住宅構造物や燃料タンク等を選び、新潟地震や日本海中部地震において被害を受けた事例に対して、永久変位解析手法を適用した。その結果、構造物の変形を比較的良好に再現でき、液状化時の構造物の挙動をうまく説明できることが分かった。また、既往の詳細解析との比較も行い、永久変位解析手法を利用した簡易解析でも十分に、液状化時の構造物の沈下量が予測でき、実用性も高いことが分かった。

※参考文献※

- 1) S. Yasuda, et. al : The Mechanism and A Siplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 149~160, 1992.
- 2) 安田 他：ねじりせん断試験による液状化砂の強度・変形特性，第22回地震工学研究発表会（投稿中）
- 3) 宮本 他：地震時の液状化による構造物基礎地盤の残留変形解析，第21回土質工学研究発表会，1986.
- 4) 危険物保安協会：NHKだより特集～日本海中部地震～，第2号，pp. 21~58，1984.

Table. 3 タンクの沈下量（実測値、残留変形解析、本解析）

		タンク A		タンク B		タンク C	
		護岸側	内陸側	護岸側	内陸側	護岸側	内陸側
実測値	沈下量	15.6	7.7	19.3	19.6	10.2	17.2
	不等沈下量	7.9		-0.3		-7.0	
残留変形解析	沈下量	18.5	4.8	6.3	10.4	8.9	6.1
	不等沈下量	13.7		-4.1		2.8	
本解析手法	沈下量	11.0	1.2	-3.6	2.2	4.8	11.0
	不等沈下量	9.8		-5.8		-6.2	

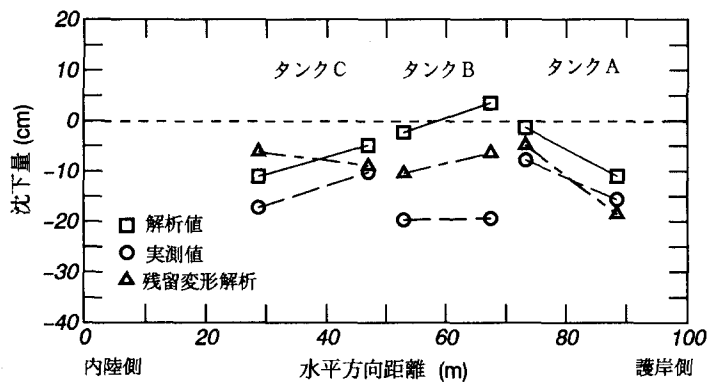


Fig. 7 タンクの沈下量の実測値との比較