

水～土連成有限変形解析による球形ガスホルダー基礎地盤の地震中～地震後挙動の検討

液状化 有効応力解析法 有限要素法

(一社)GEOASIA 研究会 国際会員 ○高稲敏浩

東京ガス(株) 正会員 小林未央、小口憲武

名古屋大学 国際会員 野田利弘、中井健太郎、正会員 曾根好徳

(公財)地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡頭、大保直人

1. はじめに

各種構造物の杭基礎の液状化耐震設計においては、杭基礎構造物の被害事例を加味した設計がなされてきているが、高度な安全性が要求される球形ガスホルダーではさらなる「激甚」シナリオに対する対応が求められる。この点を踏まえ、本研究では、杭が損傷し機能しない状態も想定した上で、L2 地震動入力時の球形ガスホルダー基礎地盤に対して一次元・二次元水～土連成有限変形解析^{1) 2)} (SYS Cam-clay モデル³⁾を搭載)を実施した。本報では、地震中～地震後の基礎の不等沈下の可能性などについて述べる。

2. 一次元解析

(1) 計算条件

検討に用いた地盤は、図1の表層から10層で構成される地盤で、深さ2~8mがN値10以下の緩い砂層、その下15mにわたってN値がほぼゼロの軟弱な粘性土層が存在する。図1中に各層の名称を示す。一次元解析では、図2の一次元の有限要素メッシュを用いて、次の3ケースを実施した。①ガスホルダーを考慮しない水平地盤の挙動を調べる場合(ケース1)。杭が機能しない状態を設定するため、杭の損傷時期(ガスホルダー荷重を地盤に作用させるタイミング)を②地震開始時とした場合(ケース2)および③地震終了直後とした場合(ケース3)。地盤の初期状態は、構造³⁾の程度および比体積を各層で均一として、土被り圧に応じて過圧密比を鉛直方向に分布させた。水理境界は、地下水位をGL-1.35m、地表面は排水境界、地下水は浅は間隙水圧を負圧として、それらに応じて平均有効応力を増加させた。両側面、下面は非排水境界とした。また、工学的基盤面にあたる地盤下端は、底面粘性境界($V_s=420\text{m/sec}$)を設定し、地盤両端要素において同じ高さにある節点に等変位条件を課した。ガスホルダー荷重は分布荷重とした。

(2) 解析結果

地盤底面の全節点の水平方向に LNG 地上式貯槽指針に基づく L2 地震⁴⁾ (図3) を入力した後、圧密終了まで解析を実施した。図4に沈下の時刻歴を示す。地震終了時付近から第2層の沈下が始まり、1日を経過した頃から第3,4層の粘性土層の沈下が始まる。10000日後にほぼ沈下は終了し、地表面で0.460mの沈下量となった。表1に各層の最終沈下量を示す。図5に初期、地震終了時、圧密終了時のせん断ひずみ分布を示す。沈下挙動に対応して第2層でせん断ひずみが大きくなっていることが確認できる。また、図6に地震終了時の平均有効応力減少比と第2層最下端の要素の平均有効応力減少比を示すが、第2層ではほぼ1.0となって液状化し、水平変位が大きくなっている。第2層シルト混り細砂について、液状化後の沈下を既往の研究⁵⁾から $Dr=40\%$ として算定した結果、0.217m(表2参照)となり、本解析結果の0.259mと概ね一致した。

図7は、ケース2、3の地表面沈下の時刻歴を示す。ケース2では、地震初期に0.1m程度の沈下が生じるが、第2層の沈下が収束する1日付近ではケース2、3とも同じ沈下量となり、最終沈下量もほぼ一致している。地震中に基礎のゆすり込み沈下などが想定されるため、ケース2の方が危険側と判断し、ケース2の解析手順で二次元解析を実施した。

3. 二次元解析

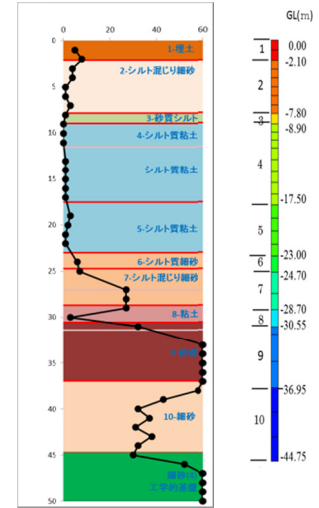


図1 柱状図

図2 一次元 FE メッシュ

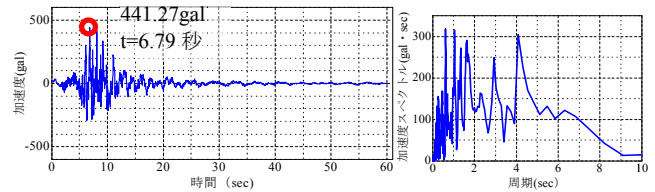


図3 入力地震動

表1 各層の最終沈下量

地層	層厚(m)	沈下量(m)	層別沈下量(m)
1	2.10	0.460	0.009
2	5.70	0.451	0.259
3	1.10	0.192	0.024
4	8.60	0.168	0.081
5	5.50	0.087	0.083
6	1.70	0.004	0.001
7	4.00	0.003	0.000
8	1.85	0.003	0.002
9	6.40	0.002	0.001
10	7.80	0.001	0.001

表2 液状化後の沈下量の算定

地層	-GL	層厚	最大せん断ひずみ	体積ひずみ	層別沈下量(m)	累積沈下量(m)
1	2.100	2.100				
	3.050	0.950	0.0483	0.0275	0.026	0.217
	4.000	0.950	0.0583	0.0332	0.032	0.191
2	4.950	0.950	0.0635	0.0362	0.034	0.160
	5.900	0.950	0.0993	0.0440	0.042	0.125
	6.850	0.950	0.1286	0.0440	0.042	0.084
	7.800	0.950	0.1655	0.0440	0.042	0.042

(1)解析条件

二次元解析では、水平成層地盤と傾斜地盤について計算を実施した。図8にメッシュ図を示す。層区分および地盤の境界条件などは、前述と同一である。傾斜地盤は、第2層がガスホルダー下の幅59.53mで1/31傾斜している地盤である。また、ガスホルダーは、有限要素を追加することで再現し(図9)、载荷と同時に水平方向にL2地震⁴⁾(図3)を入力した上で、圧密終了まで解析を実施した。球形ガスホルダーのモデル化は、図9に示すように荷重が等価となるようにし、剛性については、支柱下端に300galの種々の周期の正弦波を40サイクル与え、頂部水平変位が最大となる周期が、ガスホルダーの固有周期0.786秒に一致するときの弾性係数を支柱の弾性係数とした(図9(b)参照)。

(2) 解析結果

ガスホルダー基礎
 下端の点a, b(図8参照)における沈下および点bに対する点aの沈下量の差を図10に示す。水平成層地盤では、点aの最終沈下量が0.663m

となり、一次元解析の場合に比べて0.1m程度小さい。不等沈下については、水平成層地盤で最大0.019m、傾斜地盤で最大0.093mとなった。沈下量は比較的大きいものの不等沈下が小さく、傾斜地盤でも傾斜角度は約1/400と小さい結果となった。

4. おわりに

想定したL2地震に対し、地震後にホルダー基礎の地盤の沈下が0.7m程度生じるものの、杭が全損して全く支持機能を果たさないとした今回の二次元平面ひずみ解析では、基礎の不等沈下量が僅かであった。一方で杭の損傷具合に応じて不等沈下量は異なると考えられ、また、ガスホルダーが球形であることから、杭のモデル化も考慮した三次元解析による検証も必要であると考えている。

参考文献: 1) Asaoka and Noda:

All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on..., Hong Kong, China, pp.11-27, 2007. 2) Noda et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis..., S&F, 48(6), pp.771-790, 2008. 3) Asaoka et

al.: An elasto-plastic description of two distinct..., S&F, 42(5), pp.47-57, 2002. 4) 日本ガス協会: LNG地上式貯槽指針, 2012.

5) Ishihara and Yoshimine : Evaluation of settlements in sand deposits..., S&F, 32(1), pp.173-188, 1992.

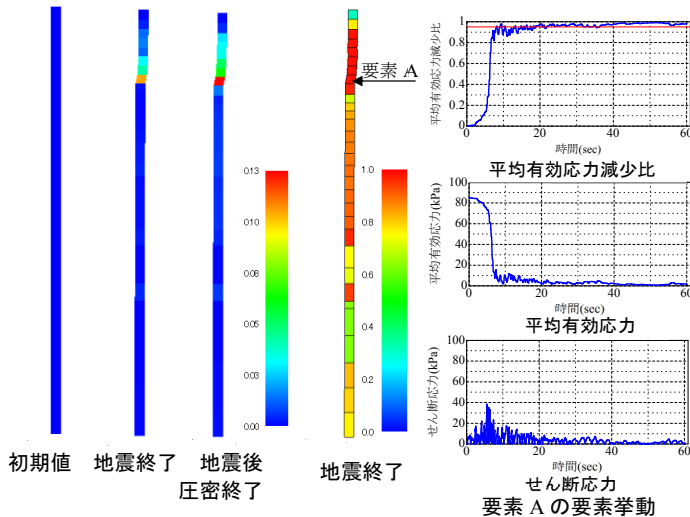


図5 せん断ひずみ

図6 平均有効応力減少比と土要素の挙動

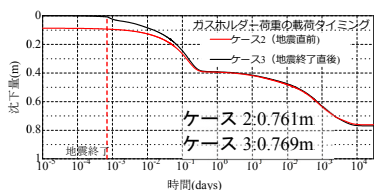


図7 一次元解析(ケース2,3)の地震中～地震後の沈下量

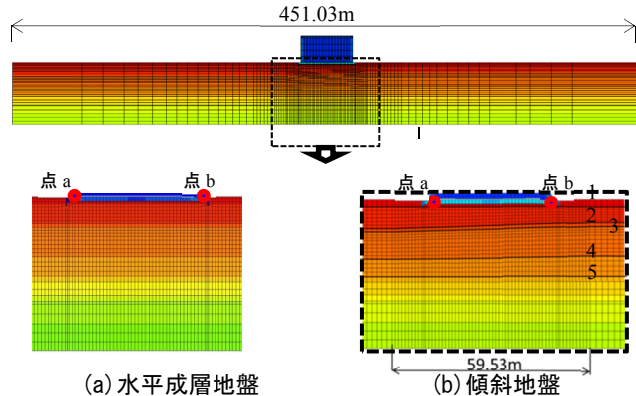
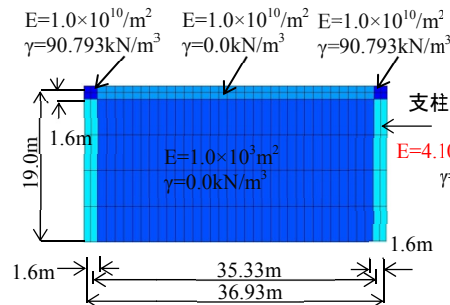
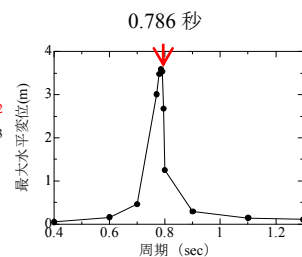


図8 二次元有限要素メッシュ

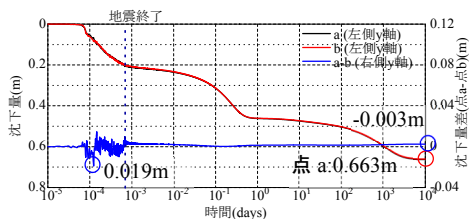


(a) 有限要素メッシュ図

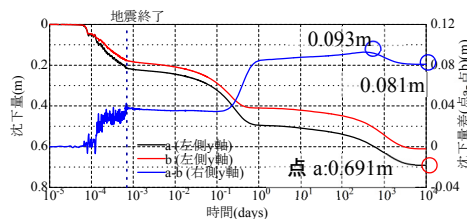


(b) 正弦波周期と最大水平変位関係

図9 ガスホルダーのモデル化



(a) 水平成層地盤



(b) 傾斜地盤

図10 地震中～地震後沈下量とその差