

# 水～土連成有限変形解析に基づく 球形ガスホルダー基礎地盤の地震中～地震後挙動に及ぼす入力地震動の影響評価

液状化 有効応力解析法 有限要素法

東京ガス(株) 正会員 ○小林実央, 小口憲武

(一社)GEOASIA 研究会 国際会員 高稲敏浩

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 浅岡顕, 大保直人

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以降、杭基礎構造物の被害事例は液状化に起因するものを含め多数報告された。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、起きてはならない最悪の状態を回避するため、構造安全性と耐力に余裕を持たせて局部的または全体的に崩壊しない終局状態へ対応していくことが求められる。この点を踏まえ、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地震中～地震後の水～土連成有限変形解析<sup>1)2)</sup>(SYS Cam-clay モデル<sup>3)</sup>を搭載)を実施して、ガスホルダーの耐震性を評価している。既報<sup>4)</sup>では同評価を後述する LNG 指針波を用いて実施したが、本報では想定される他の地震動を用いて地震動が解析結果に与える影響を評価した。

## 2. 水～土連成有限変形解析による入力地震動の影響評価

### (1) 計算条件

検討対象地盤は、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。図2は解析に用いた有限要素メッシュを示す。地盤の初期状態は、構造<sup>3)</sup>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、工学基盤面にあたる地盤下端には、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。ガスホルダーの自重はフーチング底面に等分布荷重として地表面に与えた。

### (2) 評価に用いた地震動

図3は評価に用いた4波の地震動の時刻歴波形およびフーリエスペクトルを示す。これら波形を用いた4ケースの解析を行った。

#### ・内閣府 M7 首都直下地震動 (ケース 1)

内閣府<sup>5)</sup>より提供されている対象地区の工学基盤面の加速度波形である。最大加速度 347.0gal、地震動入力時間は 163.84 秒であり、短周期成分が卓越した地震動である。

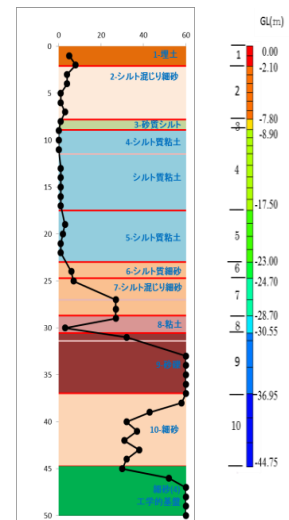


図1 柱状図 図2 一次元 FE メッシュ

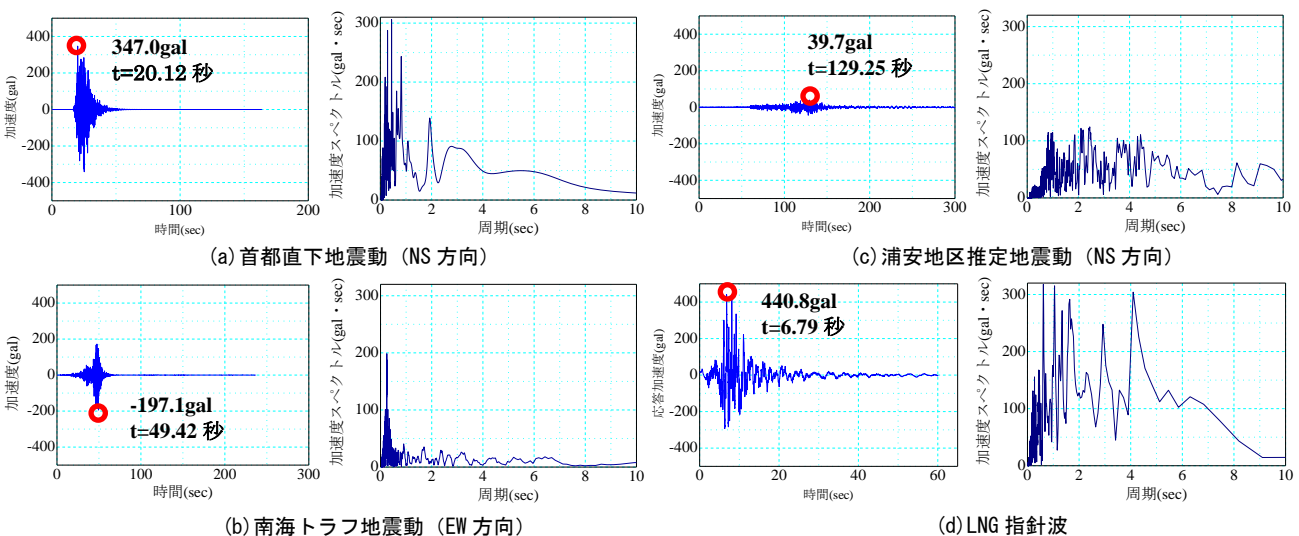


図3 解析で用いた地震動

**Evaluation of seismic wave influence to deformation of a spherical gas holder foundation based on a soil-water coupled analysis of liquefiable ground under/after earthquake:** Kobayashi, M., Oguchi, K. (Tokyo Gas), Takaine, T. (GEOASIA Research Society), Noda, T., Nakai, K., Sone, Y. (Nagoya Univ.) and Asaoka, A., Ohbo, N. (ADEP)

・内閣府南海トラフ地震動（ケース2）

内閣府<sup>6)</sup>より提供されている対象地区における工学基盤面の加速度波形である。最大加速度 197.1gal，地震動入力時間は 236.68秒である。首都直下地震動に比べると，加速度は小さい。

・浦安における推定地震動（ケース3）

文献7)で示された浦安における推定地震動である。最大加速度は 39.7gal と小さいが，長周期成分を多く含む地震波である。

・LNG 指針波（ケース4）

東神戸大橋で得られた兵庫県南部地震の観測波の位相特性を考慮した LNG 指針波<sup>8)</sup>である。最大加速度 440.8gal，地震動入力時間は，60.1秒で，短周期，長周期成分ともに上記3地震動と比べて値が大きなスペクトルとなっている。

(3) 解析結果

図4は各層の沈下量の時間変化を示す。各土層が色カーブで示されているが，各土層の沈下量はそのカーブとその一つ上のカーブの間の長さで示される。

各ケースで沈下量に差はあるものの，各土層ごとの沈下発生傾向は各ケースともほぼ同様である。また，経過時間1日（100日）までは，F層とその一つ下のYus層の沈下が卓越し，それより下の粘性土層では沈下が殆ど発生していない。加えて，地震終了付近から徐々にYus層が沈下し始め概ね0.6日で沈下は終了し，その後1日を経過したあたりから，粘性土層（Y1c(1-3)，Y1c(1-4)）の沈下が始まり，粘性土層の沈下は3000日程度で収束している。

表1は各ケースの地震中の最大水平加速度および最大地表面水平相対変位，地震終了時の地表面水平相対変位，地震後圧密終了時の地表面水平相対変位および地表面沈下量を示す。ケース4のLNG指針波を入力した場合が，いずれの項目においても最も大きい値となった。一方で，ケース3の浦安の地震動の場合は最大入力加速度が他ケースと比べ小さいにもかかわらず，沈下量はケース4の8割程度と他ケースと同等の応答となっており，地震動継続長および長周期成分の影響を受けた結果と推定される。また，ケース4のLNG指針波は，図3に

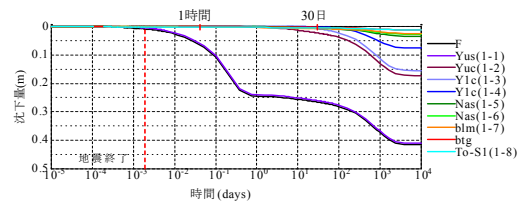
示した加速度スペクトルにおいても，その他の地震波の加速度スペクトルを包含した形の地震動となっていることから，LNG指針波による評価が最も厳しく安全側と言える。

3. 球形ガスホルダーの耐震性評価への適用

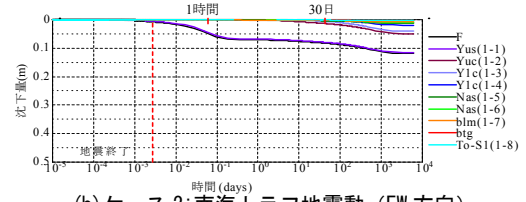
既報<sup>9)</sup>にて述べた，水～土連成有限変形解析とホルダー球殻の変形挙動を再現する詳細な非線形解析手法とを組み合わせた終局状態に対応する球形ガスホルダーの耐震性能評価を実施するにあたり，入力地震波として上記LNG指針波を用いる妥当性が示された。

謝辞：本報告では，内閣府首都直下モデル検討会および南海トラフ巨大地震モデル検討会，強震観測網K-NETで公開されているデータを使用させていただきました。記して感謝の意を表します。

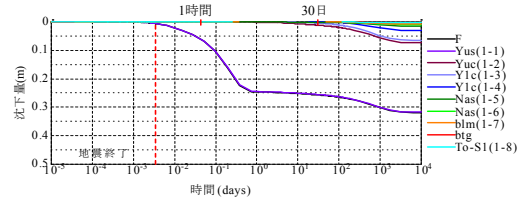
参考文献：1) Asaoka and Noda: All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on..., Hong Kong, China, pp.11-27, 2007. 2) Noda et al.: Soil-water coupled finite deformation analysis..., S&F, 48(6), pp.771-790, 2008. 3) Asaoka et al.: An elasto-plastic description of two distinct..., S&F, 42(5), pp.47-57, 2002. 4) 高稲ほか: 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, 第52回地盤工学研究発表会, 2017. 5) 内閣府首都直下地震モデル検討会: 首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高当に関する報告書, 2013. 6) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高等について(第二次報告), 2012. 7) 金田一広, 中井健太郎, 野田利弘, 浅岡顕, 澤田義博: 浦安地区の地盤材料物性の把握と東北地方太平洋沖地震におけるK-NET浦安地震記録を用いた基盤上昇の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.4, pp.155-166, 2016. 8) (一社)日本ガス協会: 製造設備等耐震設計指針, 2012. 9) 小林ほか: 地盤の液状化時不等沈下による球形ガスホルダーの終局状態に着目した耐震性評価手法の提案, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.



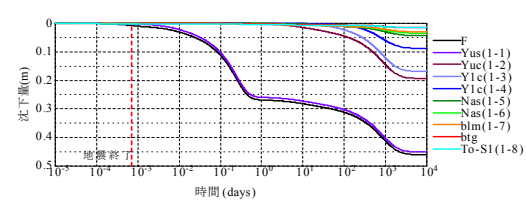
(a) ケース 1: 首都直下地震動 (NS 方向)



(b) ケース 2: 南海トラフ地震動 (EW 方向)



(c) ケース 3: 浦安地区推定地震動 (NS 方向)



(d) ケース 4: LNG 指針波

図4 地震中～地震後の各層沈下量解析で用いた地震動

表1 各ケースの解析結果の比較

|       | 最大水平加速度 (gal) |       | 地表面水平変位 (m) |       |          | 沈下量 (m)  |
|-------|---------------|-------|-------------|-------|----------|----------|
|       | 入力地震動         | 地震中応答 | 地震中最大       | 地震終了時 | 地震後圧密終了時 | 地震後圧密終了時 |
| ケース 1 | 347.0         | 373.6 | 0.383       | 0.221 | 0.221    | 0.416    |
| ケース 2 | 197.1         | 139.1 | 0.043       | 0.030 | 0.017    | 0.126    |
| ケース 3 | 39.7          | 104.1 | 0.158       | 0.107 | 0.107    | 0.318    |
| ケース 4 | 440.8         | 338.3 | 0.931       | 0.413 | 0.432    | 0.460    |