

水～土連成有限変形解析に基づく 長時間強震動を受ける球形ガスホルダー - 軟弱地盤系の地震時～地震後挙動の評価

軟弱粘性土 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
(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

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をも想定した上で、地震中～地震後を対象とした3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、L2地震動入力時の基礎杭も考慮した基礎地盤・球形ガスホルダー系の耐震性を評価している。既報⁴⁾では当該評価を後述するLNG指針波(直下型地震)を用いて実施したが、今後の耐震対策においては、長時間継続する地震動に対応できることも重要であり、既に一部⁵⁾ではその対策も始まっている。そこで既報同様、南関東の沖積低地エリアに設置したホルダーを対象に、日本ガス協会指針⁶⁾の規定に従う加速度応答スペクトルが同じでかつ長時間継続する極めて強い地震動を想定して水～土連成有限変形解析を実施した。本報では、既報⁴⁾の結果と比較しつつ、当該地震動に対する地震時～地震後の挙動について評価した。

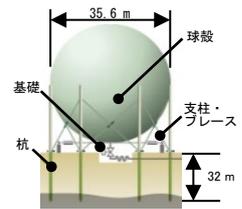


図1 解析対象
(都市ガス用球形ガスホルダー)

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

図1は南関東の沖積低地エリアに設置されている解析対象のホルダーの概要図である。検討対象地盤は、図2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2中に各層の名称を示す。図3は解析に用いた有限要素メッシュ図を示す。このメッシュを用いて「杭なし」、「杭(PHC)あり」の2ケースの解析を実施した。各材料定数および状態量は対象地点から採取した不攪乱資料の各種力学試験をSYS Cam-clayモデルで再現することで決定した。「杭あり」ケースでは、杭の破壊M-N線図に基づき、杭の損傷を考慮するように杭をモデル化した。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が負の静水圧分布として作用していると仮定し、対応する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。ガスホルダーの本体の重量は、柱一本当たりの常時反力と等しくなるよう球殻の単位体積重量として設定した。また、ホルダー全体の剛性は、頂部水平最大変位が最大となる周期が、ホルダーの固有周期0.786秒に一致するようにホルダー支柱の弾性係数を設定することで決定した。

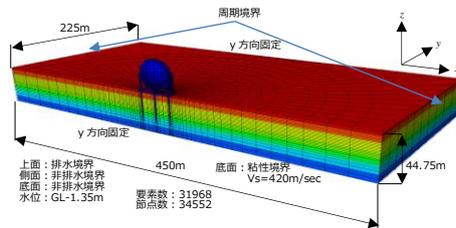


図3 3次元FEメッシュ図

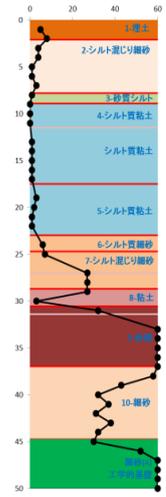


図2 柱状図

(2) 評価に用いた地震動

図4は評価に用いた地震動の時刻歴波形およびスペクトル(赤色線)を示す。東日本大震災時のK-NET浦安推定波(橙色線)を日本ガス協会指針の工学的基盤の加速度応答スペクトルに適合するように調整した波(以降、浦安スペクトル適合波と呼ぶ)である。既報で用いた兵庫県南部地震東神戸大橋波のスペクトル適合波(青色線、以降LNG指針波と呼ぶ)と比べ、継続時間が長く極めて強い地震動である。

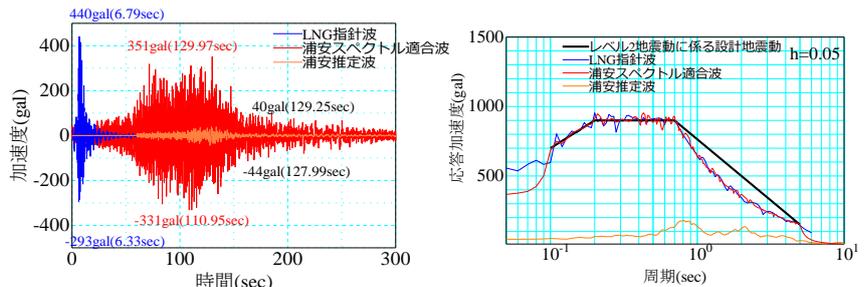


図4 評価に用いた地震動(K-NET浦安調整波(赤色線))

(3) 解析結果

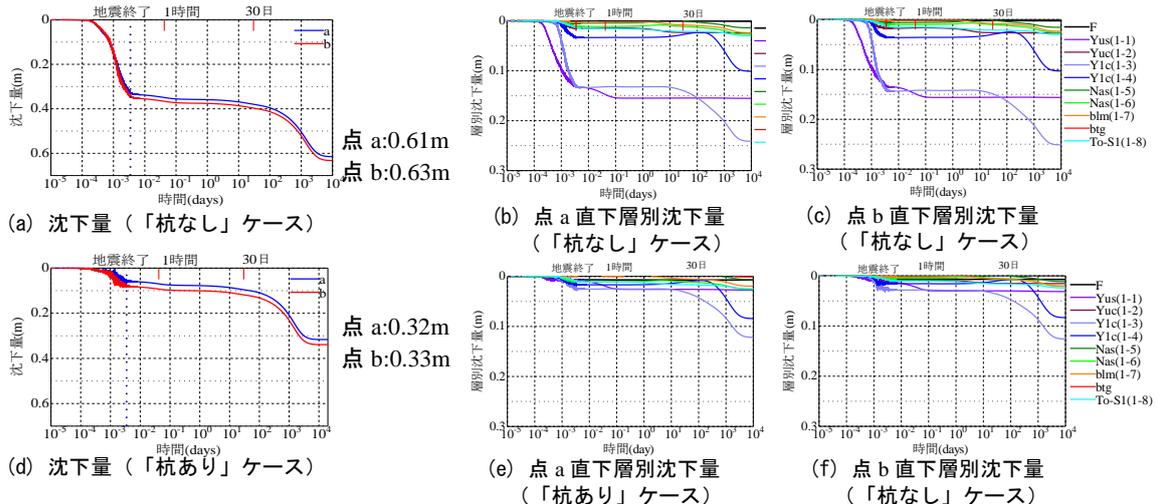


図5 地震中～地震後の沈下量・層別沈下量の比較(「杭なし」/「杭あり」)

図5は「杭なし」、「杭あり」両ケースの球形ガスホルダー基礎上の左右点 a, b の沈下時刻歴および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差で示される。ホルダー基礎上の沈下挙動は、「杭なし」ケースが「杭あり」ケースよりも約2倍の沈下となった。各層の沈下を見ると、「杭なし」では地震中に Yus 層, Ylc 層が両層とも 0.12m と大きく沈下した。「杭なし」、「杭あり」両ケースで同様な沈下量を示した既報 (LNG 指針波) ⁴⁾とは異なる結果となった。

「杭あり」ケースの杭損傷に着目すると、揺れ開始から約5秒間で全ての杭が降伏した既報 (LNG 指針波)とは異なり、時刻 34.0sec～136.9sec の約100秒間で徐々に降伏した。図6はせん断ひずみ分布を示す。

「杭なし」ケースは地震終了時にはガスホルダー基礎下の Yus 層のみならず、厚く堆積した N 値ほぼゼロの軟弱粘性土層 (Ylc 層) が大きく乱されてせん断ひずみが大きくなり、大沈下を引き起こしている。一方、「杭あり」ケースでは、Yus～Ylc 層にかけて杭周辺でせん断ひずみが大きくなっており、ホルダー荷重を杭が支持している。つまり、地震中、杭は徐々に降伏して健全性が比較的保たれたため、Ylc 層 (粘性土層) の乱れ (剛性低下) を低減したため、「杭あり」ケースでは沈下が抑えられた。

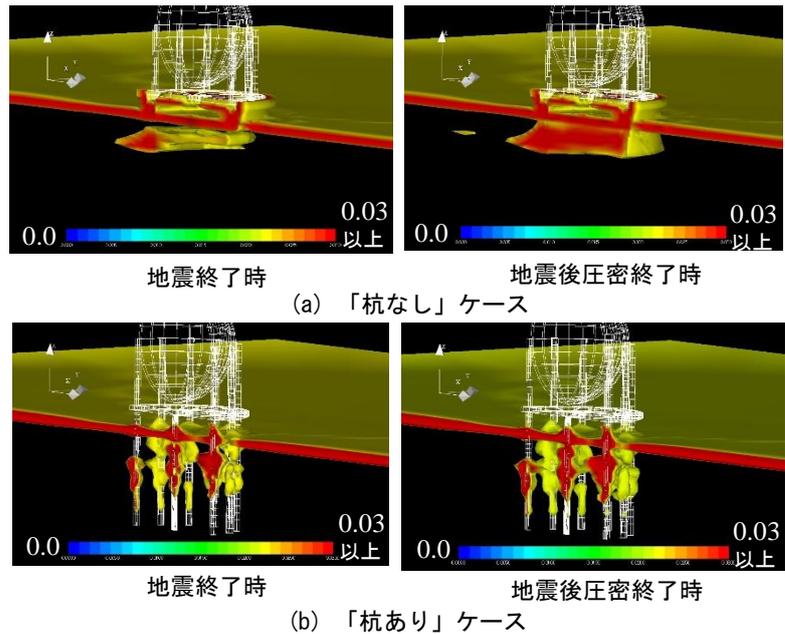


図6 せん断ひずみ分布 (0.022 以上を表示)

3. おわりに

球形ガスホルダーの終局状態の耐震性評価として、杭の存在の有無を考慮しつつ上部基礎一体モデルにより解析的検討を実施した結果、長時間強震動により球形ガスホルダー直下では厚く堆積した N 値がほぼゼロの軟弱粘性土層が地震後に大沈下を生じさせるものの、継続時間が短い直下型地震による強震動と異なり基礎杭の地震時損傷が徐々に進行し、これに起因して杭がこの沈下抑制に寄与することを明らかにした。

謝辞: 本報告では強震観測網 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) 小林 実央, 野田 利弘, 中井 健太郎, 高稲 敏浩, 浅岡 顕: 最大級の地震による激甚シナリオを想定した砂地盤上の球形ガスホルダーの3次元地震応答解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 74, No. 2, pp.1_693-1_703, 2018. 5) 田中 剛, 藤田 聡, 皆川 佳祐, 相田 清: 石炭火力発電施設ボイラ構造物の制振技術の開発と長周期長時間地震への適応性検討, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.869, p.18-00252, 2019. 6) (一社)日本ガス協会: 製造設備等耐震設計指針, 2012.