

1 質点ばね動的非線形解析を用いた本震による傾斜ガスホルダーの耐震性評価

東京ガス	正会員	○小林 実央
IHI プラント		田附 英幸
名古屋大学	正会員	中井 健太郎
名古屋大学	フェロー会員	野田 利弘

1. はじめに

東日本大震災では浦安市など東京湾エリアの広範囲で液状化が生じ、今後も首都圏直下地震や南海トラフの巨大地震などの発生が想定されている。また、東京都においては、国土強靱化地域計画¹⁾の推進目標の一つに「産業施設の安全対策の強化」が掲げられ、球形ガスホルダー（以下「ホルダー」）を重要な産業施設と位置づけて安全対策を万全にするための取り組みを進めることが述べられている。

一方、ホルダーの耐震性評価は評価対象設備の1次固有周期を考慮した近似的設計手法である修正震度法による評価²⁾であり、通常基礎・地盤の残留変形・傾斜やそのホルダーへの影響といった終局的な耐震性能までを評価するものではない。地震で不等沈下による傾斜が発生すると、ホルダーのタイロッドブレースには不均等な荷重が作用した状態となるため、耐震性に影響を及ぼす可能性がある。しかしホルダーについて、不等沈下時の余震に対する耐震性への影響を検討した例はないため、地震復旧時の使用可否の判断のための維持管理基準もない。

著者らはこれまで、液状化による不等沈下やその状態での最大級の地震への対応を安全側に評価することが必要として、ホルダーに対して、3次元水～土連成有限変形解析を行ってきた³⁾。この結果、南関東沖積低地の代表的ホルダーでは、直下型地震により、液状化が生じホルダー地盤が沈下するとともに全ての杭が損傷するものの、ホルダー本体や基礎に影響を及ぼすような変形は確認されなかったこと、等を示してきた。

本報では、上記維持管理基準策定のために、既報³⁾で照査したホルダーを対象に、当該ホルダーが地震で傾斜したとして、震度7クラスの余震が生じて倒壊にはいとらないと判断できる傾斜量を把握するための、1質点ばね解析を用いた簡易な評価手法を提案する。

2. 解析方法（余震耐震性の簡易評価手法）

評価対象のホルダーの構造を図-1に示す。ホルダーの各部材を評価する解析は、支持構造部（脚柱、ブレース）の材料・幾何学的非線形性および応答機構を考慮し、かつ非線形ダンパーを扱うため極めて非線形性が強いものになり、3Dモデル解析には多大な労力が必要となる。そこで、汎用有限要素コードを用いた非線形解析を2ステップで行う。その解析方法概要を図-2に示す。地表面で与える入力地震動は「2011年東北地方太平洋沖地震：K-NET 浦安波(EW)」を耐震設計基準³⁾のスペクトルで調整したものを用いた。

第1ステップでは、構造物をPushover解析の結果で1自由度系に置き換え応答を求める宇佐美ら⁴⁾の方法を参考に、ホルダー各部材を3D骨組モデルに置換して静的非線形解析を実施し、傾斜毎に+x方向、-x方向の非線形ばね特性を求める。ここでばねとは、図-2のようにホルダーに水平力が作用した際のホルダー支持構造部の剛性であり、ホルダー部材の材料非線形性、幾何学的非線形性、重力の影響が考慮されている。球殻は剛体とみなし、荷重－変位関係は、降伏変位以降の荷重の平均値を代表値として、バリエアモデルとして定めた。

第2ステップでは、第1ステップで求めたばね特性を反映したばね質点系の1次元動的非線形解析を実施

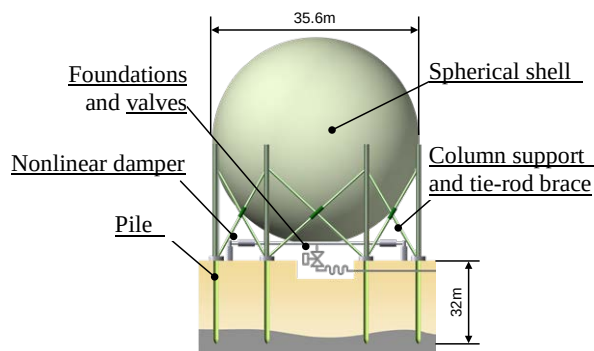


図-1 球形ガスホルダー概要

耐震性評価、余震、球形ガスホルダー、傾斜、液状化、水～土連成有限変形解析

〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20 東京ガス（株） TEL 03-5400-7567

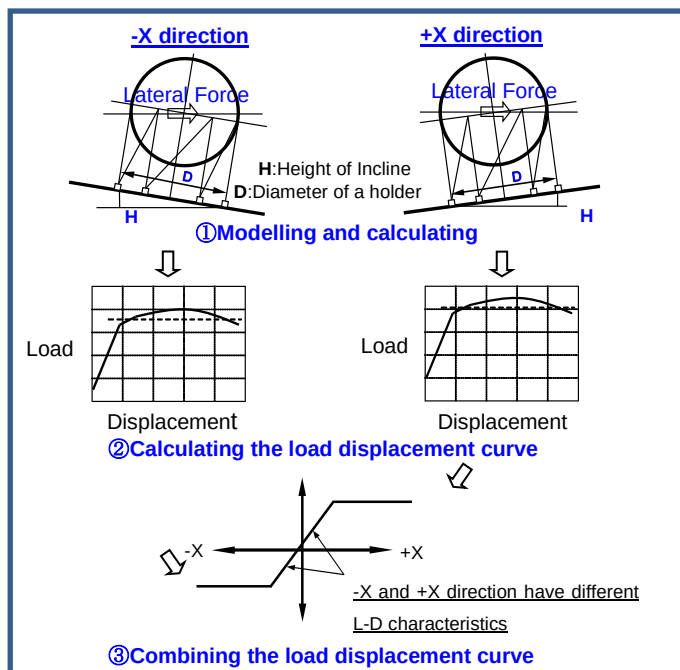


図-2 傾斜ホルダーの支持構造部の剛性の設定法

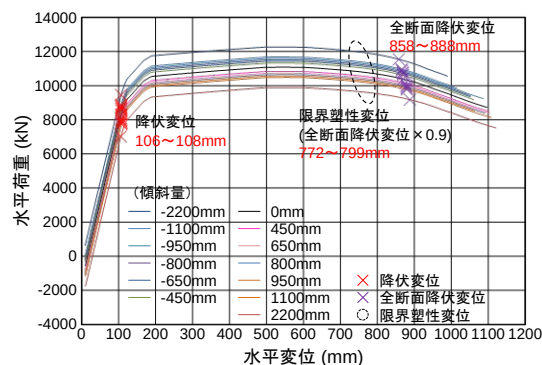


図-3 ホルダー傾斜毎の荷重—球殻中心変位関係曲線

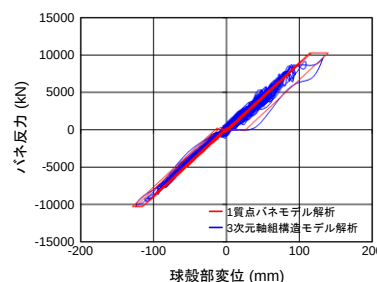


図-4 3D 骨組非線形解析と1質点ばね解析の比較 (傾斜量 0.95 m)

する。ばね質点系の解析モデルとしては、水平設置された通常のホルダーの構造評価に適用する1質点ばねモデルに図-2で求めた傾斜を考慮したばねを用いることで、傾斜地盤上のホルダー挙動を再現するものである。

3. 解析結果とまとめ

以上の解析条件に基づき、3D 骨組非線形解析により得られた解析対象ホルダーの傾斜毎の荷重—球殻中心変位関係曲線を図-3に示す。傾斜量は、対象ホルダー地盤の地震後圧密終了時の沈下量が最大で0.4m程度³⁾と算出されたことを踏まえその5倍程度まで0.45m～2.2mの範囲で6パターン定めた。同図に示すように、荷重—変位関係は傾斜量の増減に連動して平行移動するように増減し、各caseの限界塑性変位はほぼ同レベルとなった。つまり、同図で示した範囲(傾斜量2.2mまで)であれば、ホルダーの傾斜が進行してもホルダーの塑性変形性能はほとんど損なわれないことがわかった。なお、同図の荷重—変位関係において、限界塑性変位は、ホルダーの耐震設計基準²⁾に基づき脚柱の全断面降伏変位の0.9倍として示している。

今回のホルダー支持構造部反力～球殻部変位関係についての3D 骨組非線形解析と1質点ばね解析の比較を図-4に示す。両者の結果は概ね同等で1質点ばね解析が若干大きい。グラフは省略するが速度・加速度・減衰力においても同様に1質点ばね解析が若干大きい。同解析が耐震性評価としてより安全側で妥当であるといえる。

表-1は、第2ステップの1質点ばね解析における、耐震性評価項目の代表傾斜量ケースの応答および許容値である。ダンパーの減衰力および発生速度は、すべて許容値内に収まることがわかった。一方、支持構造物の球殻中心変位は、限界塑性変位に比して裕度はあるものの、ダンパーの許容最大ストローク(170mm)を考慮すると余震耐震評価上許容される最大傾斜は0.95m(傾斜角約2°)であることがわかった。今後この結果を対象ホルダーの地震復旧時の使用判断に活用するとともに、この簡易な評価手法による維持管理基準の策定を目指し、同基準を他のホルダーにも適用していく。

表-1 傾斜ホルダーの簡易評価手法による応答

Inclination (m)	0.00	0.95	2.20	Allowable limit
Spherical Shell disp. (mm)	131	166	207	< 170
Damping Force (kN)	344	337	350	< 700
Damping velocity (mm/s)	919	970	961	< 1360

参考文献 1)東京都：東京都国土強靱化地域計画，p.63，2016。2)(一社)日本ガス協会：製造設備等耐震設計指針，2012。3)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...，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol. 74, No. 2, pp. I-693-I-703, 2018。4)宇佐美 勉，鄭 沂，葛 漢彬：Pushover 解析と等価1自由度モデルによる鋼製...，土木学会論文集，No.626/I-48, pp.231-240, 1999