

報告番号	乙 第 7387 号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 液状化地盤に立地する球形ガスホルダーの地震時応答特性と余震簡易評価手法に関する研究
(Study on Seismic Response Characteristics and Aftershock Simplified Evaluation Method for a Spherical Gas Holder in Liquefied Ground)

氏 名 小林 実央

論 文 内 容 の 要 旨

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、今後も首都直下地震や南海トラフ巨大地震等での甚大な被害発生が予見されている。東日本大震災以降、我が国としては、国土政策・産業政策も含めた総合的な対応により、大規模自然災害に備える「国土強靱化」の理念が普及し、起きてはならない最悪の事態を回避するため、都道府県が国土強靱化に関する施策の推進に係る基本的な計画を定めると規定された。一方、日本ガス協会では、ガスホルダーの現行の耐震基準である「製造設備等耐震設計指針」のなかで、ガスホルダーのレベル 2 地震動耐震性能を「変形等が残留しても当該施設内のガスの気密性が保持されること」と定義している。これらを踏まえると、ガスホルダーについては、現行耐震基準への対応を行いつつ、国土強靱化基本計画を念頭に、構造安全性と耐力に余裕を持たせ、局部的に損傷したとしても、全体的には崩壊しない終局的な状況にも対応していくことが肝要である。ところが、1970 年代に旧耐震基準で設計されたガスホルダーの一部では、竣工後の耐震基準の改訂変遷の影響を受け、現行基準で求められる液状化に関する規定に対応しておらず、巨大地震に対する十分な耐震性を有していないことが危惧される。一方、現行耐震基準の「基礎」の章の規定には、「弾塑性挙動（非線形挙動）を考慮した設計法については、今後の技術的進展が期待できることから、構造物の特性に

応じた詳細な設計法や新しい知見から得られる設計法等の中から適切な方法を採用してもよい」との記載がある。これに則れば、液状化による地盤変状発生などの極めて厳しい終局的な状況であっても、耐震性能が担保されるレベルに基礎・球殻の変形挙動やガスホルダー応答が留まることを「適切な方法」により確認できれば、旧耐震基準で設計されたガスホルダーであっても、耐震性があると判断をすることは可能である。

そこで本研究では、上記の「適切な方法」として、土骨格の構成式として **SYS Cam-clay** モデルを搭載した静的／動的水～土連成有限変形解析コードを取り上げ、緩い砂と軟弱粘性土の互層を有する南関東の沖積低地エリアに旧耐震基準で設計・建設されたガスホルダーの耐震性評価を行った。また、上記耐震性評価の結果、ガスホルダーが不等沈下する事象は想定されうるが、ガスの気密性が保たれていたとしても余震に対する安全性が確認されないと使用を再開することは困難であり、使用継続可否判断は地震後の都市ガス供給の復旧計画に多大な影響を与える。そこで、**BCP** の観点から、不等沈下が生じたガスホルダーの使用可否を迅速に判断するための 1 質点ばねモデル計算による簡易評価手法についても提案し、ガスホルダーの維持管理に対する提言も行った。

本論文は、序論・結論含めて 8 章からなり、以下に各章の概要を示す。

第 1 章では、研究の背景として、ガスホルダーのガス事業における位置づけとガスホルダーの耐震性評価の課題について述べた。また、既往研究のレビューから、本研究の新規性・位置づけを明確にした。

第 2 章では、水～土連成有限変形解析によって球形ガスホルダーの耐震性評価を行うことを提案し、球形ガスホルダーおよび地盤のモデル化を行った。地盤は二相系弾塑性材料としてモデル化し、現位置から採取した乱れの少ない試料の力学試験を **SYS Cam-clay** モデルで再現することで材料定数を決定した。ガスホルダー、基礎および杭は一相系弾性体としてモデル化し、固有周期が実ホルダーと一致するように材料定数を決定した。また、杭は応力状態が破壊 **M-N** 曲線を超えた際に弾性係数を $1/200$ に低減することで、杭の降伏を表現した。

第 3 章では、現行耐震基準の規定に従う最大級の地震波（直下型地震）を想定して、基礎杭も考慮した当該ガスホルダーの耐震性を検証した。その結果、地震発生直後の液状化発生によって、ガスホルダー地盤が沈下するとともに全ての杭で全断面がほぼ「降伏」したが、ガスホルダーの顕著な不等沈下や変形・損傷は確認されなかった。また、不等沈下が危惧される極端な解析ケースとして、降伏しない杭が 1 本残った状態を想定した解析においても、不等沈下は殆ど生じなかった。更に、杭が全く機能しなかった場合を想定した杭がない解析ケースでは、杭の有無は水平加速度、変位といった主たる応答値に影響を与えないことを示した。一方、レベル 1 地震動の耐震照査においては、杭が部分的かつ段階的に損傷し、比較的大きな不等沈下を生じうることが確認された。このことは、ガスホルダーの事業継続性判断に重要となる不等沈下には、杭損傷の進展の仕方が重要であることを意味している。本章の解析を通して、従来はガスホルダーの基礎・上部構造を別々に耐震

性評価してきたが、今回の提案手法を用いることで、球形構造物であるガスホルダーの形状やガスホルダー基礎杭までを考慮して、ガスホルダーの構造安定性を一体的に効率よく評価でき、更なる安全性の向上に寄与できる可能性があることを示した。

第4章では、第3章で示した現行耐震基準に従う直下型地震に加えて、継続時間が長い海溝型地震に対する耐震性評価を行い、両者の比較を行った。入力地震動は、第3章で設定した強震動と同一の加速度応答スペクトルとなるように振幅調整した長時間継続強震動を用いている。その結果、入力地震動の加速度応答スペクトルが同一であっても継続時間が異なる場合、継続時間の長い地震動（地震動A）の方が短い地震動（地震動B）に比べ、地盤の揺れ（繰り返しせん断変形）による残留水平変位が大きく発生し、地盤をより大きく乱すため、地盤の沈下量がより大きくなることを示した。杭の沈下抑制効果に目を向けると、地震動Aではその効果が大きく得られた。これは地震中の砂層および粘土層の有効拘束圧低下に伴う応力再配分によって、間隙水圧の増加に加えて杭の軸力が増加し、杭の耐力（許容曲げモーメント）を増大させたためである。この結果、地震動Aのように杭の損傷が段階的に進展する場合は、最終的には杭がほぼ全域で損傷するとしても、ある程度の時間、支持機能を維持することができる。一方、地震動Bでは、杭による沈下抑制効果がほとんど得られなかった。地震動Aの場合のように、地盤の有効拘束圧低下に伴う応力再配分によって生じる杭の耐力増加が発揮される間もなく、即時に杭の支持機能を失ったためである。以上から、同一加速度応答スペクトルを有する入力地震動でも継続時間が異なると地盤応答や杭の破壊モードが異なることを示しており、今後、耐震性照査に用いる入力地震動の選択においては、継続時間を含めた地震動特性に留意することが必要であることを示した。

第5章では、地震の早い段階での液状化発生を仮定した地盤条件で、第3章および第4章に想定した直下型および海溝型地震動に対して、入力地震動の違いや杭の応答の観点からガスホルダーの耐震性について考察した。その結果、いずれの地震動においても、杭頭付近がまず損傷し、遅れて下部が損傷するなど、第3章・第4章の地盤とは異なる応答を示した。杭頭付近の損傷は、表層付近で地震直後の液状化発生により水平動が卓越し、それが杭に水平変位として蓄積されて曲げモーメントが大きくなったため、中間粘性土層で損傷が少ない点は、この液状化発生層での地震動の減衰により、深部の杭に作用する曲げモーメントが小さくなったことに起因する。また、このような杭の段階的損傷モードでは、不等沈下が生じうることに注意が必要であることを示した。

第6章では、ガスホルダーの余震時に着目した耐震性評価事例がないことから、不等沈下発生を想定した最大余震時のガスホルダーの使用可否に着目して、1質点ばねモデル計算による簡易な評価手法を提案した。なお、地盤の不等沈下が確認され、ガスホルダーに傾斜が発生する場合は、タイロッドブレースおよび支柱の不均等な荷重やブレースのスリップ型履歴を考慮することが必要である。そこで、本震後の傾斜やブレースの緩み等のガスホルダーの状態を加味して、Pushover解析から得られる非線形ばね特性を反映した1質点ば

ねモデル計算を用いた余震評価手法を提案するとともに、実ホルダーを対象にした 3 次元骨組動的解析との比較から、本評価手法の妥当性を確認した。この結果、今回対象の実ホルダーにおいては、地震動継続時間の違いによる応答性の大きな相違がなかった。また、この簡易評価手法により L2 クラスの余震が生じても緊急時に使用可能と判断できる許容傾斜量を算定したところ、第 3 章～第 5 章での検証で得られた不等沈下量は最大でもその 7 分の 1 程度と十分小さく、今回想定した地震動の範囲では、ガスホルダーの余震まで考慮した耐震性に問題が無いことを確認した。また、本震後のガスホルダーの状態を反映して余震耐震性を評価するにあたり、本評価手法が最小限の情報（最大値の採用）で評価可能であることから、事業継続性の観点からも応急的な対応に有効な手法であることを示した。

第 7 章では、対象球形ガスホルダーの耐震性を検証し確認する過程で表出した、水～土連成有限変形解析、耐震性評価方法、地震後のガスホルダー使用可否判断に関する課題について整理した。

第 8 章では、本論文の結論として、第 2 章～第 5 章に示した解析結果を総括的に考察して、ガスホルダーの終局的な耐震性能について纏めた。さらに、第 6 章の解析結果から得られた知見を踏まえ、事業継続性の観点において、ガスホルダーの地震後の使用可否判断の在り方についても提言した。

以上