

## 論文審査の結果の要旨および担当者

|      |              |
|------|--------------|
| 報告番号 | ※ 乙 第 7387 号 |
|------|--------------|

氏 名 小林 実央

### 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)

### 論文審査担当者

|    |         |       |     |        |
|----|---------|-------|-----|--------|
| 主査 | 名古屋大学   | 工学研究科 | 教授  | 野田 利弘  |
| 委員 | 名古屋大学   | 工学研究科 | 教授  | 中野 正樹  |
| 委員 | 名古屋大学   | 工学研究科 | 准教授 | 中井 健太郎 |
| 委員 | 名古屋工業大学 | 工学研究科 | 教授  | 張 鋒    |

## 論文審査の結果の要旨

小林実央君提出の論文「液化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」では、液化化地区に設置された都市ガス用の球形ガスホルダーを対象に、レベル2地震動に対する耐震性を検証することを目的として、特に、地震発生直後の液化化発生によるガスホルダー地盤の不等沈下に着目して、数値解析的研究を行っている。まずは、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ている。続いて、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ている。本論文は以下に示す全8章で構成される。

第1章では、本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の整理や既往研究のレビューを行い、本研究の新規性・位置づけを明確にしている。

第2章では、水～土連成有限変形解析によってガスホルダーの耐震性評価を行うことを提案し、解析に用いる地盤の物理的・力学的特性を明らかにするとともに、地盤、ガスホルダー、基礎および杭のモデル化の方法について示している。

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、基礎杭も考慮したガスホルダーの耐震性を検証している。その結果、地震発生直後の液化化発生によって、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」するが、ガスホルダーの顕著な不等沈下や変形・損傷は確認されないことを明らかにしている。また、不等沈下が危惧される極端なケースとして行った降伏しない杭が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いこと、杭が全く機能しなかった場合を想定した杭がない解析においても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明らかにしている。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、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示している。

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、両者の比較を行っている。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明らかにしている。また、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ており、これが、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とを明らかにしている。一方、地震動Bでは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うため、杭による沈下抑制効果がほとんど得られないことを明らかにしている。これらの結果から、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ている。

第5章では、地震の早い段階での液化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を行っている。その結果、この地盤条件では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すことを明らかにしている。また、この杭頭付近の損傷は、表層付近で地震直後の液化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るためであることを明らかにしている。さらに、中間粘性土層では、表層付近の液化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るため、杭の損傷が少ないことを明らかにしている。加えて、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ている。

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ている。本震後の傾斜やタイロッドプ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について考察を行っている。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明らかにしている。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ている。

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まとめている。

## 論文審査の結果の要旨

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まとめている。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ている。

以上のように本論文では、液状化地区に設置された都市ガス用の球形ガスホルダーを対象にレベル2地震動に対する耐震性を明らかにした点で学術的な成果をあげている。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簡易な手法を提案したことに加えて、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今後の課題を明確にした点において、工学的にも有用な成果を挙げている。よって、本論文の提出者である小林実央君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。