

# ドーナツ状に液状化対策された地盤における杭基礎式球形ガスホルダーの地震応答解析

盛岡義郎<sup>1</sup>・砂坂善雄<sup>1</sup>・久木田真平<sup>2</sup>・内海貴志<sup>3</sup>・今井則彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部設計技術部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

<sup>2</sup>工修 京葉ガス(株) 供給部工事管理グループ (〒272-8580 市川市市川南 2-8-8)

<sup>3</sup>京葉ガス(株) 供給部工事管理グループ (〒272-8580 市川市市川南 2-8-8)

本論文では、新設の球形ガスホルダーを対象に、構造物・地盤の非線形性、ドーナツ状に地盤改良した三次元効果、地震時の地盤変形の影響等を考慮した構造物-杭基礎-地盤系の地震応答解析を実施し、耐震性の検討を行った結果について報告する。対象構造物は、直径約 35 m の球形ガスホルダーであり、円形に配置された支柱で基礎に固定されている。基礎は円形に配置された杭と地中梁から成っている。基盤層より上層の地盤は比較的軟弱であり、液状化対策のため杭周辺地盤をドーナツ状に地盤改良している。解析モデルは質点系モデルとし、三次元薄層要素法によるリング加振解により求められる群杭全体の相互作用ばねを質点に付加したモデルである。

**Key Words:** earthquake response analyses, non-linearity, pile stress, measure for liquefaction

## 1. はじめに

兵庫県南部地震後、土木構造物の設計において2段階設計法が導入され、レベル2地震動に対して部材の損傷度を考慮した安全性の照査が求められるようになってきた。兵庫県南部地震では杭基礎の被害は、杭頭付近だけではなく地中の液状化層と非液状化層の境界付近でも発生しており、地震時の上部構造物の慣性力だけでなく、地盤変形の影響が大きかったと考えられている。従って、杭基礎式構造物のレベル2地震動に対する安全性の検討においては、地震時の地盤変形の影響を考慮し、構造物・地盤の非線形性を考慮した解析を行う必要がある。

本論文では、球形ガスホルダーを対象に、構造物・地盤の非線形性、ドーナツ状に地盤改良した三次元効果、地震時の地盤変形の影響等を考慮した構造物-杭基礎-地盤系の地震応答解析を実施し、耐震性の検討を行った結果について報告する。

## 2. 球形ガスホルダー及び基礎の概要

図-2.1に球形ガスホルダーの一般構造図および地盤改良範囲を示す。本球形ガスホルダーの直径は約 35m であり、内容物は都市ガス 13A、公称貯蔵能力は 20 万 Nm<sup>3</sup> である。球形ガスホルダーは、円形に配置された支柱で基礎版に支持している。

基礎は円形に配置された 32 本の鋼管杭 (φ 711.2mm、上杭(15m) t=14mm、下杭(43m) t=9mm)

と地中梁から成っている。基盤層より上層の地盤は比較的軟弱であり、液状化対策のため杭の周囲を幅 8m、深さ 13.7m のドーナツ状に深層混合処理工法にて地盤改良を行っている。

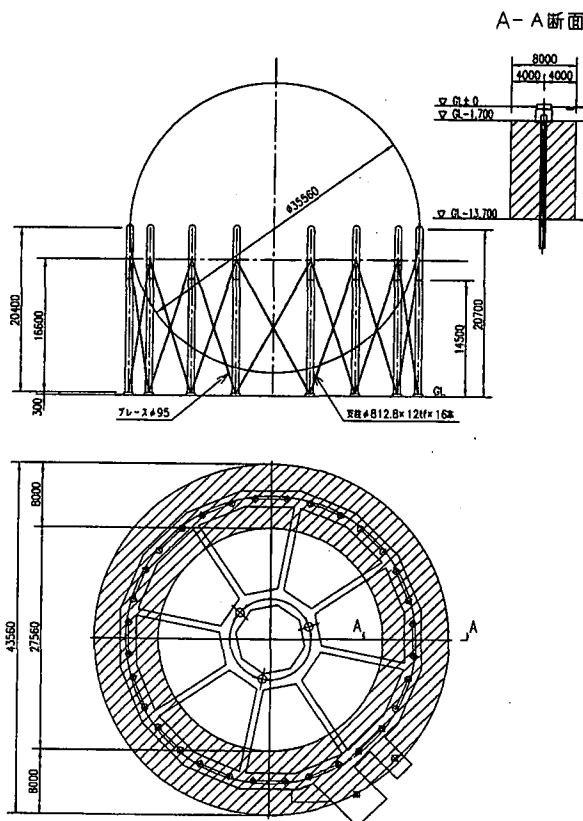


図-2.1 一般構造図と地盤改良範囲

また、図-2.2 に示すように、球殻下面には3箇所に耐震オイルダンパーを取付け、内側の基礎の上部に設置している。

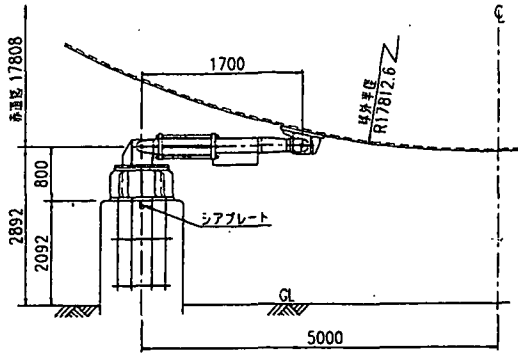


図-2.2 ダンパー詳細図

### 3. 照査方法

本球形ガスホルダーのレベル2地震動に対する安全性の照査は、以下の2項目について行う。

#### (1) 許容塑性変形量に対する安全性

球殻と基礎の相対変位の時刻歴の最大値が、76.7cm 以下となることを確認する。この値は静的な貯槽耐震計算によって算出されたもので、支柱が許容耐力に達する時の支柱の柱頭水平変位である。

#### (2) 杭の安全性

杭の曲げモーメント-曲率関係の最大応答により損傷の有無を確認する。

### 4. 解析方法

構造物-杭基礎-地盤系の地震応答解析モデルを図-4.1 に示す。球殻、基礎および杭基礎は、質点系にモデル化している。杭基礎の質点系モデルは、円形に配置された杭を1本の多質点曲げせん断棒に

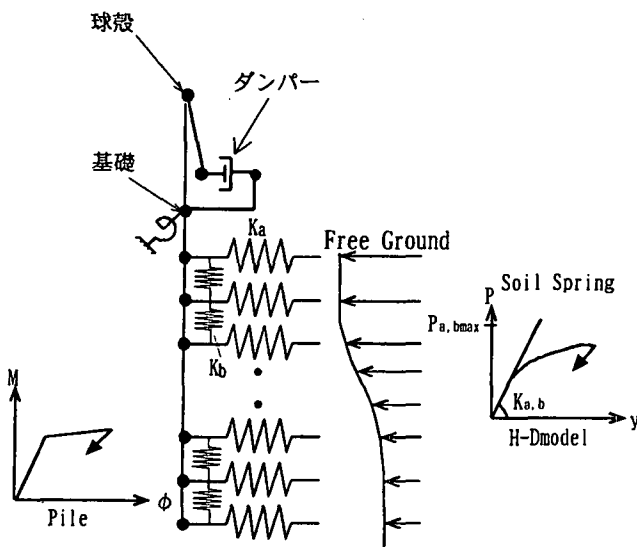


図-4.1 地震応答解析モデル

モデル化し、基礎位置に回転ばね、各質点に杭と地盤の相互作用ばねを取り付けたモデルである。また、球殻下面のダンパーはダッシュポットでモデル化し、幾何学的な効果を表すために設けた仮想質点間に取付ける。ただし、本解析では昇降階段設備、およびダンパー下部の鋼管杭はモデル化しないこととする。

本解析のフローを図-4.2 に示す。地盤の一次元地震応答解析 (SHAKE) を実施し、地盤の等価せん断弾性係数、等価減衰定数を求める。これらの等価物性値に基づいて、三次元薄層要素法により、相互作用ばねを評価する。さらに、相互作用ばねには、杭と地盤との相対変位により生じる非線形性を考慮する<sup>1),3)</sup>。全体系の地震応答解析は、自由地盤の各質点深さでの変位応答波形と速度応答波形を相互作用ばねを介して全体系モデルに入力することにより行う。自由地盤の地震応答解析は、地盤改良部分がドーナツ状に存在するため、軸対称 FEM 解析を行う。軸対称 FEM 解析において、地盤の等価物性値は SHAKE の収束物性値とする (図-4.3 参照)。表-4.1 に地盤条件を示す。地盤改良部分は一軸圧縮強度  $q_u=20.0\text{kgf/cm}^2$  程度であり、これは  $V_s=200\text{m/s}$  程度に相当する<sup>2)</sup>。

ダンパーの非線形条件を表-4.2 に示す。また、鋼管杭のM-φ関係は、長期軸力を考慮し、Bi-linear モデルを用いる。

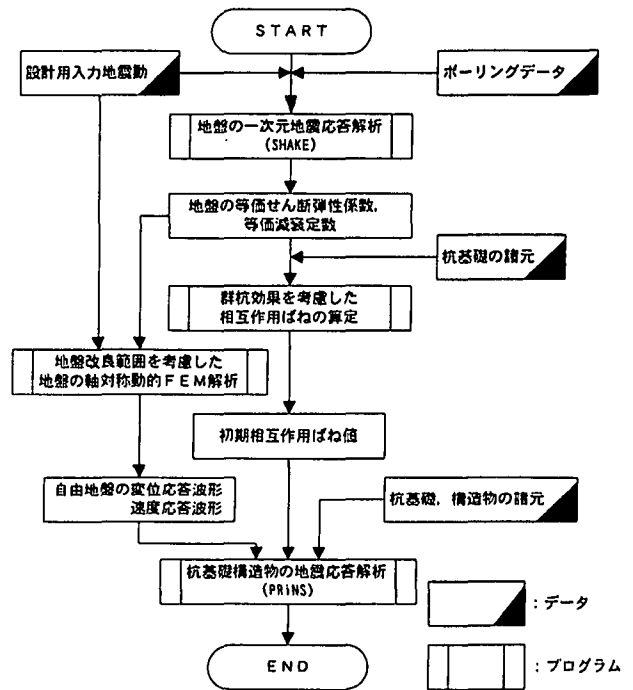


図-4.2 解析フロー

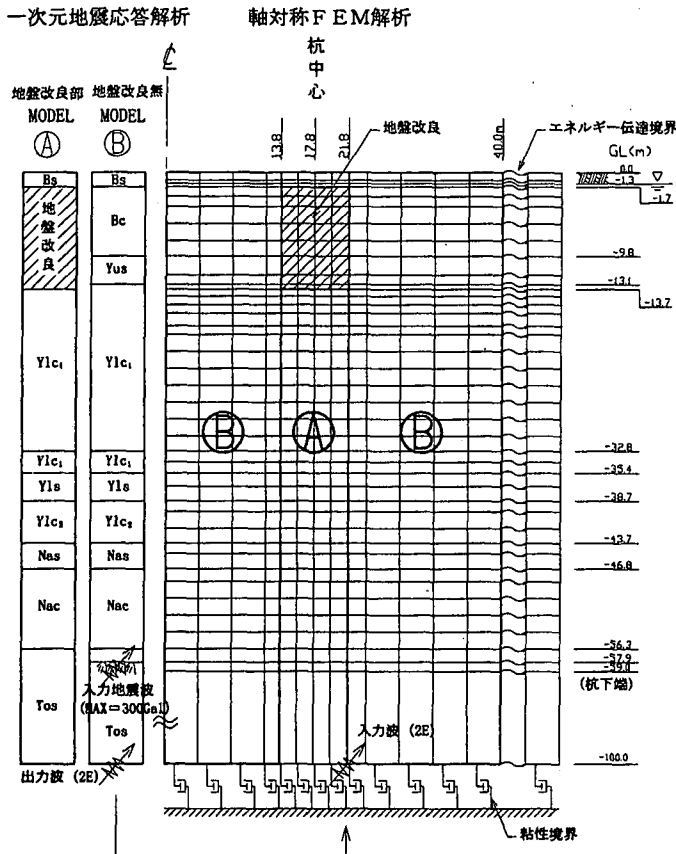


図-4.3 SHAKE から軸対称 FEM 解析への概念図

表-4.1 地盤物性値

深度 GL (m)	土質名称	単位体積重量 ( $t/m^3$ )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)
-1.7	Bs	1.65	90
-8.6	Bc	1.65	90 (200)
-13.1	Yus	1.7	140 (200)
-13.7			120 (200)
	Ylc <sub>1</sub>	1.65	120
-32.8			
-35.4	Ylc <sub>1</sub>	1.65	150
-38.7	Yls	1.75	190
-43.7	Ylc <sub>2</sub>	1.75	190
-46.8	Nas	1.8	240
	Nac	1.8	240
-56.3			
-57.9	Tos	1.85	410
-100			

は、地盤改良範囲内は、地盤改良後の物性値

表-4.2 ダンパーの非線形性

減衰係数 1 ( $tf/cm/s$ )	減衰係数 2 ( $tf/cm/s$ )	降伏荷重 ( $tf$ )
8.0	0.8	90.0

## 5. 入力地震動

入力地震動は「高圧ガス設備等耐震設計基準の運用及び解釈」(平成9年6月)に基づき、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台におけるNS方向地震波を用い、最大値は300Galとする。入力地震動を図-5.1に示す。

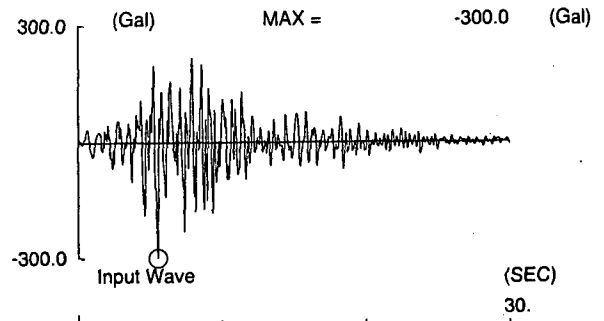


図-5.1 入力地震動

## 6. 解析結果

### (1) 自由地盤の地震応答解析結果

地盤の軸対称 FEM 解析と SHAKE より得られた地盤変形の比較を図-6.1に示す。ただし、MODEL-A は地盤改良部を含む地盤モデル、MODEL-B は地盤改良部を含まない原地盤モデルの SHAKE の結果である。軸対称 FEM 解析結果による杭位置の地盤の変形は SHAKE の結果に比べて地盤改良部分の変位の変化がなめらかであり、耐震設計上有利となっていることがわかる。

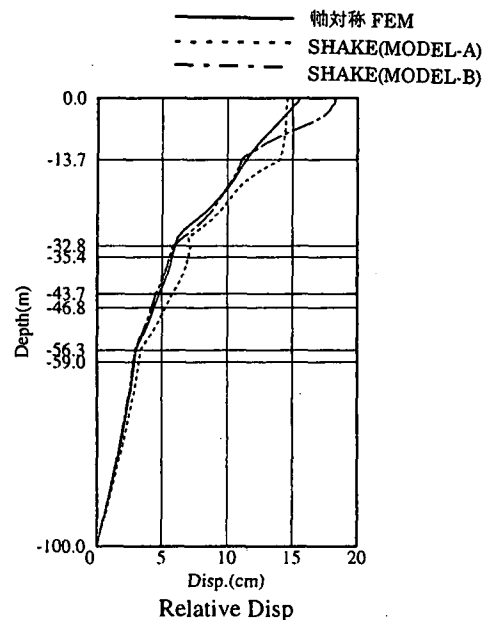


図-6.1 自由地盤の地震応答解析結果の比較

(2) ダンパーの応答

ダンパーの応答を図-6.2に示す。ダンパーに作用する力は降伏荷重 90tf を越え、非線形領域に入っている。しかし、最大変位は 8cm 程度であり、限界値以内に収まっている。

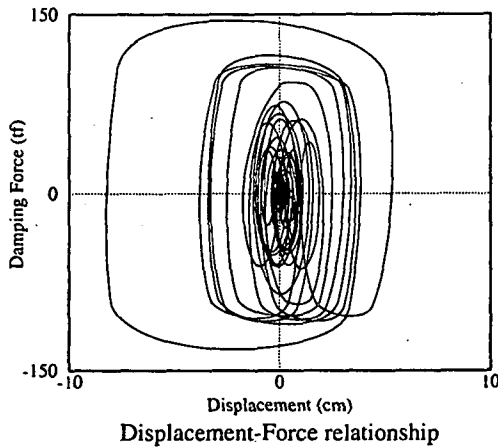


図-6.2 ダンパーの応答

(3) 許容塑性変形量に対する安全性

図-6.3に球殻の加速度時刻歴と球殻と基礎の相対変位の時刻歴を示す。相対変位の最大値は 12.4cm であり、許容塑性変形量 76.7cm より小さいため安全性が確認できた。

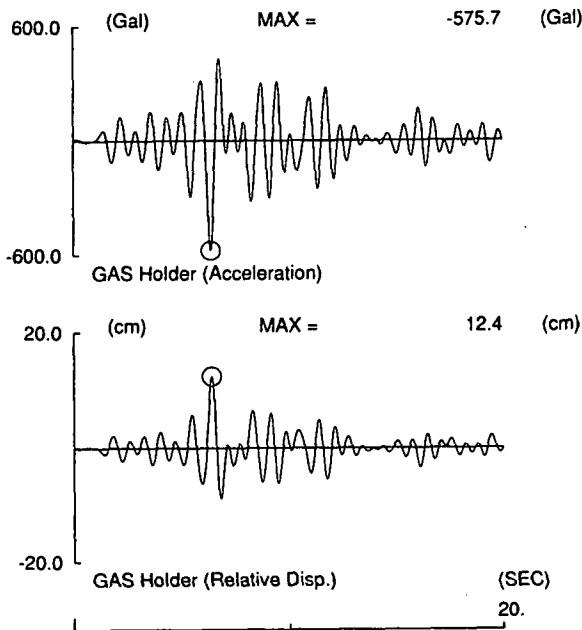


図-6.3 球殻の加速度時刻歴と基礎の相対変位の時刻歴

(4) 杭の安全性

図-6.4に杭応力の最大値の分布を示す。上部構造物の慣性力により杭頭部で、また地盤震動により地盤変位の変曲点 (GL-32.8m) で杭応力が大きくなっている。表-6.1に示すように、全塑性モーメント、降伏せん断力に対して、上杭、下杭とも余裕があるため、杭の安全性が確認できた。

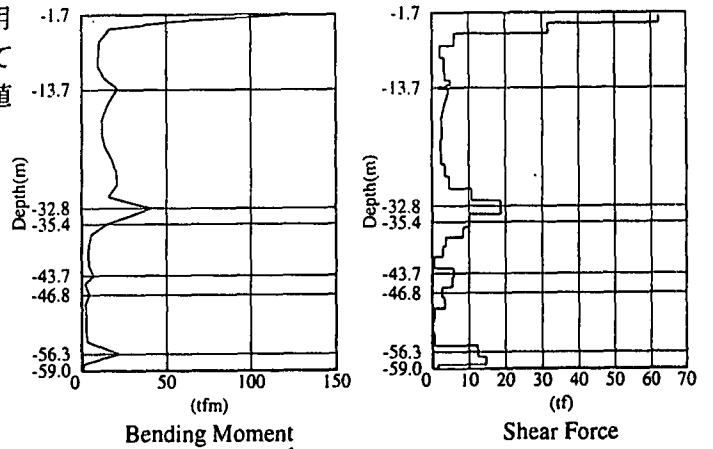


図-6.4 杭応力の分布

表-6.1 杭の発生最大応力と耐力の比較

	曲げモーメント (tf・m)		せん断力 (tf)	
	最大	全塑性	最大	降伏
上杭	123	185	62	482
下杭	41	77	19	207

7. おわりに

新設の球形ガスホルダーを対象に、構造物・地盤の非線形性、地盤改良の三次元効果、地震時の地盤変形の影響等を考慮した構造物-杭基礎-地盤系の地震応答解析を実施し、耐震性の検討を行った結果について報告した。ドーナツ状に液状化対策された地盤の効果も、軸対称 FEM 解析を行うことにより考慮した。また、球形ガスホルダー下面に設置されたダンパーの非線形性を考慮した。

解析を行うに当たり、ご助言、ご尽力いただいた鹿島小堀研究室宮本裕司主管研究員、酒向裕司主任研究員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮本裕司ほか：1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討, 日本建築学会論文報告集, 第493号, pp. 23~30, 1997.3.
- 2) 龍岡文夫ほか：東京大学生産技術研究所報, Vol. 37, No. 1, pp. 136, 1992
- 3) 宮本裕司ほか：非線形, 液状化地盤における杭基礎の地震時応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第471号, pp. 41~50, 1995.5