

## I-B16

## 地盤の非線形性と有効応力を考慮した杭基礎式地上タンクの地震応答解析

東京ガス 生産技術部 正会員 小山和夫

鹿島 土木設計本部 正会員 盛岡義郎 正会員 砂坂善雄

## 1. はじめに

1995年に発生した阪神・淡路大震災では、様々な構造物が被害を受けたが、これらの構造物を支えていた杭基礎にも、地盤の影響によって被害を受けたケースが多数認められ、耐震診断の必要性が高まっている。また、戦後の高度経済成長期に整備された社会資本ストックは、建設後20～40年を経過しており、耐震診断の需要も増大することが予想される。本論文では、1974年に建設された地上タンクについて、地盤の非線形性と有効応力を考慮した地上式タンク-杭基礎-地盤系の地震応答解析に基づき杭の安全性の評価を行った。

## 2. 解析条件

図-1に示す杭で支持された杭基礎式地上タンクについて解析を行った。地盤モデルは、地盤調査結果をもとに設定した。動的物性値については、N値を用いて経験式から算定した。解析に用いた地盤物性値を表-1に

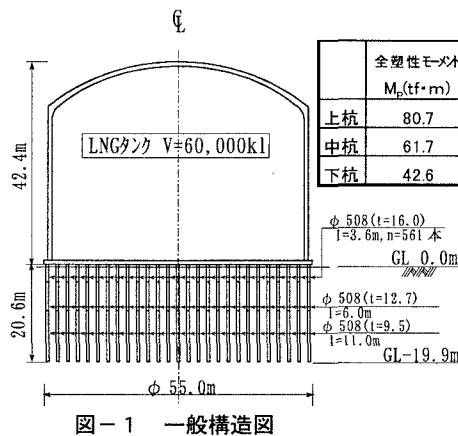


図-1 一般構造図

示す。地上タンクは、鋼管杭（直径508mm、杭長20.6m）561本で支持されている。入力地震動は兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測されたNS波とし、最大加速度を300Galに設定した。

## 3. 解析手法

地震応答解析モデルを図-2に示す。杭基礎の質点系モデルは、群杭を1本の多質点曲げせん断棒にモデル化し、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。地震応答解析は、自由地盤の解析を1次元有効応力解析法 YUSAYUSA<sup>1)</sup>を用いて行い、得られた自由地盤の各質点深さでの変位応答波形と過剰間隙水圧波形を相互作用ばねを介して入力することにより地震応答解析を行う。相互作用ばねは、群杭効果を考慮し3次元薄層要素法によりばね定数を評価し、杭と地盤との相対変位により生じる非線形性と、液状化層では更に過剰間隙水圧の発生による有効応力の低下による非線形性を考慮することができる<sup>2)</sup>。なお、本解析では上部構造物の剛性は線形、杭の剛性は非線形（パイリニア）とした。

表-1 解析用地盤物性値

| 土層     | N値    | 単位体積重量 $\gamma_t$ (t/f/m <sup>3</sup> ) | 初期せん断波速度 $V_{so}$ (m/s) | せん断強度 $\tau_f$ (t/f/m <sup>2</sup> ) | R-0モデル <sup>*)</sup> 定数 $\alpha$ | $r$ |
|--------|-------|-----------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----|
| 上杭     | 80.7  |                                         |                         |                                      |                                  |     |
| 中杭     | 61.7  |                                         |                         |                                      |                                  |     |
| 下杭     | 42.6  |                                         |                         |                                      |                                  |     |
| As, Ac | 7     | 1.98                                    | 150                     | 7.6                                  | 10.0                             | 2.6 |
| As, Ac | -13.2 |                                         |                         | 6.4                                  |                                  |     |
| As, Ac | -13.2 |                                         |                         | 7.7                                  |                                  |     |
| As, Ac | -13.2 |                                         |                         | 13.4                                 |                                  |     |
| As, Ac | -14.7 |                                         |                         | 15.1                                 | 5.0                              | 2.4 |
| As, Ac | -22.2 |                                         |                         | 19.9                                 |                                  |     |
| As, Ac | -22.2 |                                         |                         | 18.1                                 |                                  |     |
| As, Ac | -22.2 |                                         |                         | 21.8                                 | 5.0                              | 2.4 |
| As, Ac | -30.4 |                                         |                         | 21.5                                 |                                  |     |
| As, Ac | -38.4 |                                         |                         | 25.7                                 | 10.0                             | 2.6 |
| As, Ac | -38.4 |                                         |                         | 26.5                                 |                                  |     |
| As, Ac | -43.5 |                                         |                         | 28.6                                 | 5.0                              | 2.4 |
| As, Ac | -43.5 |                                         |                         |                                      |                                  |     |
| As, Ac | 62    | 1.94                                    | 320                     |                                      |                                  |     |

\*1) モーラー・クーロンの式  $\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$  より算出  
ここで、 $c$ : 粘着力、 $\sigma'$ : 有効応力、 $\phi$ : 内部摩擦角  
\*2) 経験値より砂質土  $\alpha$ : 10.0、 $r$ : 2.6  
粘性土  $\alpha$ : 5.0、 $r$ : 2.4とした。

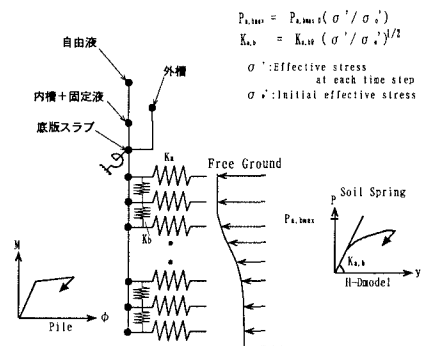


図-2 解析モデル

キーワード 地震応答解析, 非線形性, 液状化地盤, 有効応力解析, 杭応力

〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島土木設計本部 TEL 03-5561-2195 FAX 03-5561-2152

#### 4. 解析結果

##### (1) 自由地盤の有効応力解析結果

図-3 に地盤の有効応力解析による過剰間隙水圧 (P.W.P.: 破線) の最大値分布を初期有効上載圧 (Eff. Stress: 実線) とともに示す。GL - 9.5m ~ GL - 13.2m の沖積層で間隙水圧の上昇が著しく、この範囲ではほぼ液状化していると考えられる。図-4 に有効応力解析によって得られた、地盤の最大相対変位の深度分布を示す。地盤の変位応答は、間隙水圧の上昇が著しい上記範囲の沖積層で急増し、杭頭付近で約 11cm の変位が出ていることが分かる。

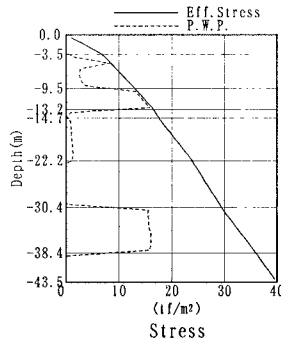


図-3 有効上載圧と過剰間隙水圧の深度分布

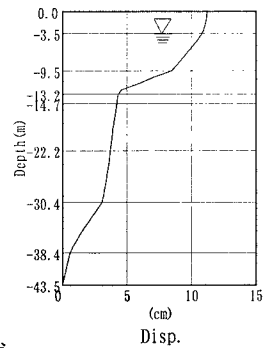


図-4 地盤の最大相対変位

##### (2) 地上タンクの地震応答解析に基づく杭の安全性の評価

図-5 に地震応答解析による杭の最大曲げモーメントの深度分布 (Total: 実線) を示す。杭頭部と地盤の剛性が大きく変化する GL - 9.5m, GL - 13.2m で大きな杭応力が発生していることが分かる。発生する杭応力は、上杭、中杭、下杭とも全塑性モーメント (図-1 参照) を上回ることがないので、杭は安全であると判断される。一般的に地震時に発生する杭の曲げモーメント (Total) は、上部構造物の慣性力によって発生する杭応力 (Inertial) と地盤震動によって発生する杭応力 (Kinematic) に分離することができる。図-5 には、上部構造物の質量を無視して求めた地盤震動のみによる曲げモーメント (Kinematic: 破線) を示している。杭頭付近においては、地盤振動による応力の割合は小さいが、地中部では地盤振動による応力がほとんどを占めている。地層境界部においてのそれは約 9 割となっている。これより、地層境界部で杭応力が大きくなるのは、地盤震動によるものと考えられる。

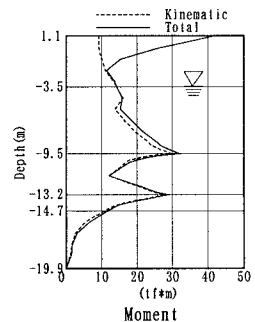


図-5 Total と Kinematic の杭応力の比較

##### (3) 従来手法との比較

本タンクにおいては阪神・淡路大震災後、CHANG の式を用いて耐震検討が行われており、その際のタンクの水平震度として 0.824 が用いられている。図-6 には地震応答解析によって求められた杭の曲げモーメント (Total: 実線) と CHANG の式を用いて求められた杭の曲げモーメントの深度分布 (CHANG: 破線) を示す。図-6 に示されるように、CHANG の式では地層境界部において発生する杭の曲げモーメントを評価できないため、特に地盤の深い位置において地震応答解析結果と大きく異なっている。

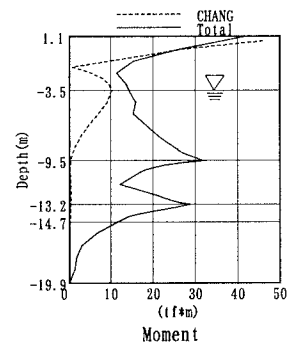


図-6 杭応力の深度分布

#### 5. まとめ

兵庫県南部地震の杭基礎の被害では、地盤震動によると考えられる地層境界部における杭の被害が報告されている<sup>3)</sup>。今後、地層境界部において発生する応力を設計に反映していく必要があると思われる。

(参考文献) 1) 石原研而・東畑郁生: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquake based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B), Vol.35, No.4, pp.655~700, 1980. 2) 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) 地盤工学会: 阪神・淡路大震災調査報告書 (解説編), 1996. 3.