

急傾斜支持地盤における地上式タンク杭基礎の耐震設計

渡辺英市¹ 青木剛夫¹ 津田剛¹ 加治左近² 出羽克之³ 鈴木康夫³

¹正会員 日石エツ・エリツ・株式会社エツ・エリツ 本部建築土木設計部(〒220横浜市西区北幸二丁目8-29)

²正会員 清水建設株式会社横浜支店土木技術部(〒231横浜市中区吉田町65)

³正会員 工修 清水建設株式会社土木本部設計第一部(〒105-07東京都港区芝浦一丁目2-3)

横浜市臨海部における2万KL地上式タンクの建設にあたり、基盤層である土丹層上面の起伏が激しいため基礎工法として急傾斜支持地盤に対する施工性に優れた場所打ち杭工法を採用した。

タンク基礎の耐震設計にあたっては、従来の震度法に加えて二次元動的非線形解析を実施し、不整形地盤の応答変位が杭基礎に及ぼす影響を評価し場所打ち杭の設計に反映させた。また、レベル2地震動に対しても沖積砂質土層の液状化を評価できる動的有効応力解析を併せて実施し、杭基礎の安全性を確認した。

Key Words : タンク基礎, 場所打ち杭, 不整形地盤, 応答変位, レベル2地震動, 有効応力解析

1. はじめに

横浜市臨海部に位置する日本石油精製(株)根岸製油所内において、2万KL地上式タンク5基の建設工事が平成7年11月に着工され平成9年10月に竣工の予定である。建設地は基盤層である上総層群泥岩層上面の起伏が激しく、最も傾斜の大きいタンクでは傾斜角が最大70度、平均30度となっているため、基礎工法として急傾斜支持地盤における施工性、経済性に優れた場所打ち杭工法を採用した。

タンク基礎の耐震設計にあたっては、上部工の慣性力に加え地層構成の急激な変化に伴う応答変位の影響が大きくなることが予想されたため、震度法に加えて動的非線形解析を実施し場所打ち杭の断面設計に反映させた。また、GL-4～-13mに存在する沖積砂質土層は限界N値法に基づく判定では液状化しないと判断されたが、レベル2地震動に対しては過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤の水平抵抗が低下する可能性が考えられたため、動的有効応力解析を実施し杭基礎の安全性照査を行った。

2. 構造物および地盤概要

地上式タンクの主な諸元は以下のとおりである。

タンク本体：内径36.6m、高さ20.0m

基礎スラブ：直径39.1m、厚さ1.5m

場所打ち杭：杭径1.2m、杭本数105本/基
杭長16m～52m(全タンク)

タンク基礎構造図を図-1、杭伏図および支持層

コンター図を図-2に示す。場所打ち杭はオールケーシング工法で施工し、急傾斜部は全旋回式を併用し泥岩層に確実に根入れした。

解析対象タンクの地層構成を図-3に示す。基盤層(Tm)は最浅部でGL-24m、最深部でGL-46mに現れる。沖積砂質土層(As)はほぼ成層で平均N値15、平均細粒分含有率30%であり、液状化強度は高いと推定される。層厚が大きく変化するのには沖積粘性土層(Ac)で、上部と下部で強度および変形特性が大きく異なっている。

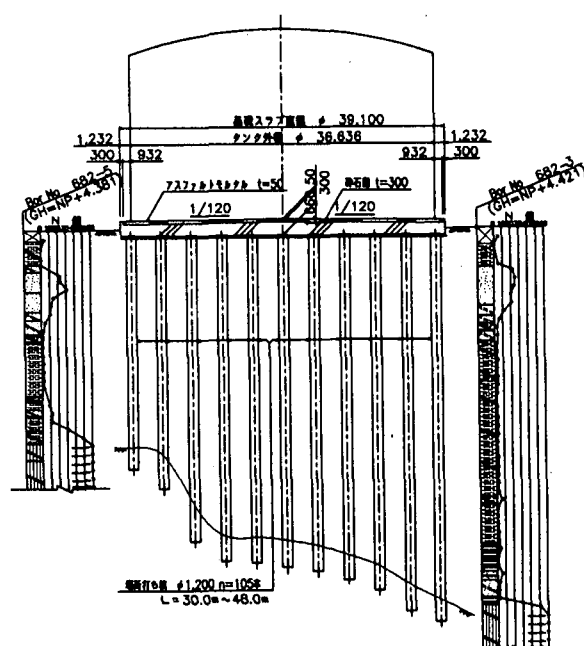


図-1 タンク基礎構造図

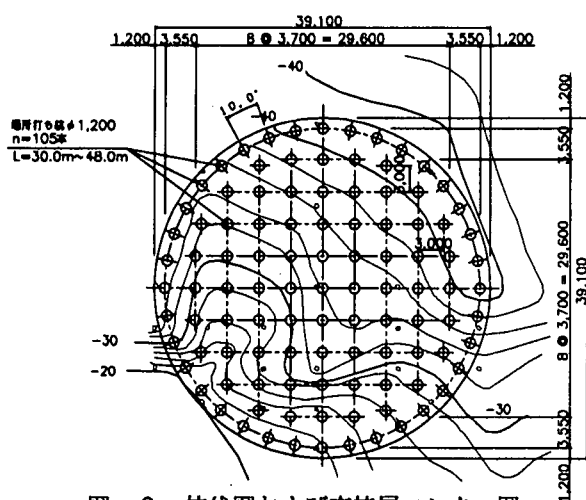


図-2 杭伏図および支持層コンター図

3. 動的解析

(1) 解析目的および解析手法

解析には地盤の非線形応答と構造物と地盤の連成応答を時刻歴で計算できる動的二次元非線形FEM解析プログラム(ALiSS)^{1) 2)}を用いた。

レベル1地震動に対しては当該地盤は液状化しないと考え全応力法による解析を実施し、解析結果を場所打ち杭の断面設計に反映させた。レベル2地震動に対しては液状化を評価できる有効応力解析を実施したが、液状化強度をN値等から推定したため杭基礎の安全性照査に用いた。有効応力解析では液状化現象を非排水条件下で評価し、せん断変形モデルに修正Ramberg-Osgoodモデル³⁾、間隙水圧モデルにおわんモデル⁴⁾を使用している。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

動的解析は支持層の傾斜が最も大きいタンクを対象とした。解析モデル図および解析結果出力位置を図-3に示す。タンク側板および底板ははり要素でモデル化した。タンク内容液は固定液と自由液に分離し、固定液は平面ひずり要素で、自由液はバネ要

素で側板に支持された質点でモデル化した。基礎スラブは面積が等価な矩形に換算し、杭群は奥行き方向の杭を1本の線形はり要素に集約してモデル化した。地盤の側方境界は鉛直方向固定、水平方向ローラーとし、底面は粘性境界とした。

b) 地盤定数

地質調査は1タンクあたり5本のボーリングに加え、当該タンクでは杭長の決定に際し支持層の傾斜を詳細に把握するため20本の追加ボーリング実施した。解析に用いた地盤定数および土の構成式のパラメータを表-1に示す。平均せん断波速度はP S検層結果に基づいて設定した。レベル2地震動に対する過剰間隙水圧の上昇は沖積砂質土層(As)のみ考慮し、液状化強度は「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」⁶⁾に基づいて推定した。

表-1 地盤定数および土質パラメータ

土層	基本地盤物性値						修正R-Oモデルパラメータ		
	γ (t/m^3)	N	V_s (m/s)	G_0 (t/m^2)	FC (%)	σ'_{ms} (t/m^2)	$G_{0.1}$ (t/m^2)	$\gamma_{0.1}$ $\times 10^{-4}$	$h_{0.1}$
Bc	1.59	1	110	1960	81	0.87	2100	9.35	0.190
As	1.92	15	180	6350	30	4.36	3040	1.53	0.260
Ac ₁	1.74	3	140	3480	73	8.69	1180	5.16	0.190
						12.15	1000		
						15.51	880		
Ac ₂	1.71	9	220	8450	73	11.48	2490	5.02	0.190
						14.44	2220		
						18.31	1970		
						21.27	1830		
Tm	1.85	50	450	38230	56	24.08	7790	2.02	0.265

As層おわんモデルパラメータ: A=-2, B=1.6, C=10, D=40, $Cs/(1+e_0)=0.012$, $X1=0.22$

c) 入力地震動

入力地震動として周期特性の異なる2波を用いた。

EL CENTRO NS (短周期型)

HACHINOHE EW (長周期型)

入力加速度波形を図-4に示す。入力加速度は基盤層上面の最深部(NP-41.7m)において、レベル1で150Gal(E+F)、レベル2で300Gal(E+F)と設定し、継続時間は10秒間とした。

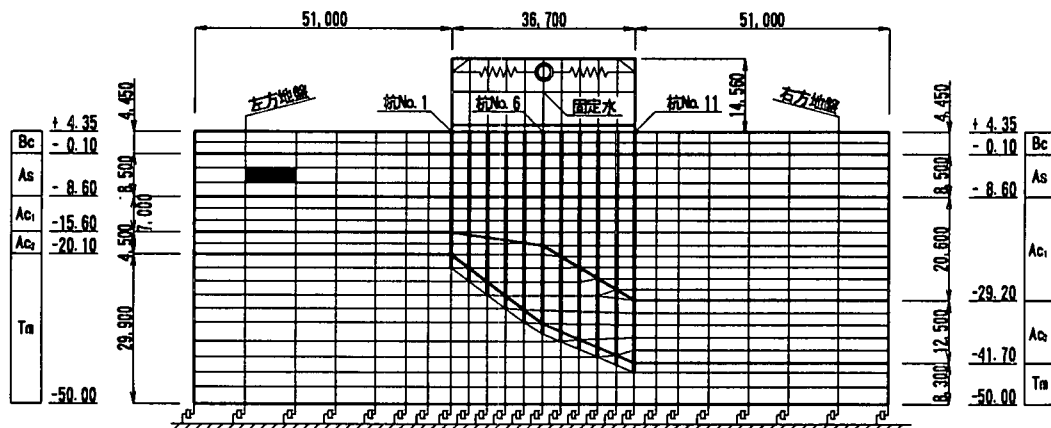


図-3 地層構成および解析モデル図

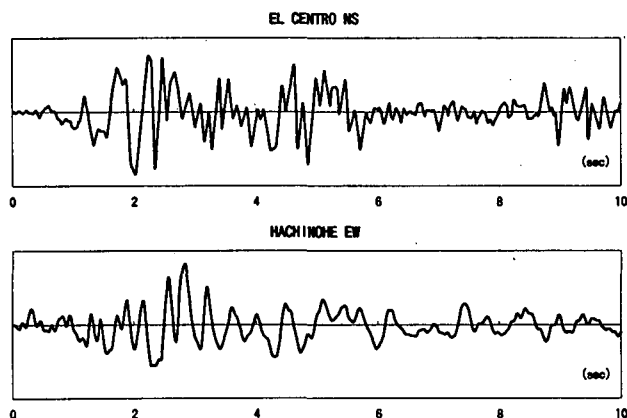


図-4 入力地震動

(3) 解析結果

a) 応答加速度

基盤層が浅い左方地盤、タンク中央部、基盤層が深い右方地盤の最大応答加速度の深度分布を図-5に示す。地表面応答加速度は基盤層の深い方が大きくなっている。基礎スラブ上面ではレベル1で291Gal(EL CENTRO)、281Gal(HACHINOHE)、レベル2で520Gal(EL CENTRO)、517Gal(HACHINOHE)となり、表層地盤の増幅が大きくなっている。固定水重心では、レベル1で312Gal(EL CENTRO)、317Gal(HACHINOHE)、レベル2で492Gal(EL CENTRO)、604Gal(HACHINOHE)となり、自由水の応答は固定水重心の1/10程度となっている。上部工慣性力に最も寄与する固定水重心の応答加速度の時刻歴を図-6に示す。

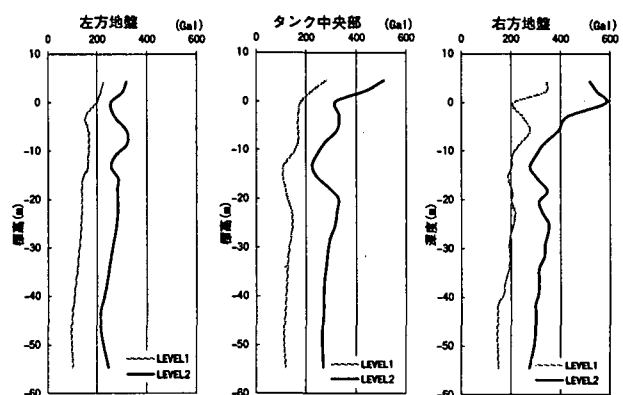


図-5 最大応答加速度の深度分布(HACHINOHE)

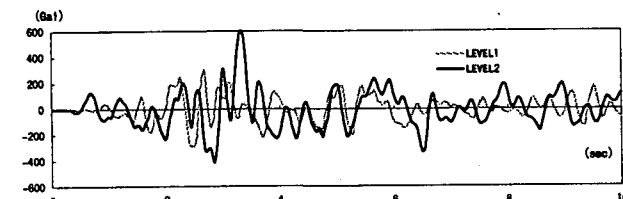


図-6 固定水の応答加速度の時刻歴(HACHINOHE)

b) 過剰間隙水圧比

レベル2における沖積砂質土層(As)の過剰間隙水圧比の時刻歴を図-7に示す。過剰間隙水圧の上昇過程は左方地盤、杭間地盤、右方地盤ともほぼ同様となり、杭によるせん断変形抑制効果は見られない。

過剰間隙水圧比は主要動のピーク時(2~3秒後)で30%(EL CENTRO)、20%(HACHINOHE)程度となり、10秒後には70%以上となるが完全液状化には至らないと考えられる。

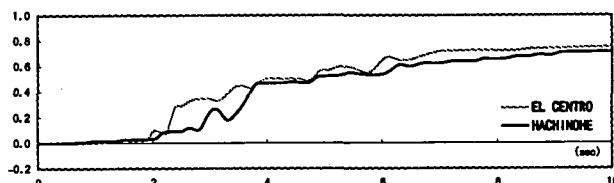


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴(HACHINOHE)

c) 杭の断面力

基盤層の浅い左外周杭(No.1)の軸力(杭頭)および曲げモーメント(杭頭および地層境界)の時刻歴応答を図-8に、各杭列(No.1,2,6,10,11)の曲げモーメントの深度分布を図-9に示す。

レベル1においては、基盤層の浅い左外周杭の杭頭および剛性変化の大きいAc₁層とAc₂層の層境界(NP-15.6m)で曲げモーメント、せん断力が大きくなり、中央部の杭および基盤層の深い右外周杭では地中部の断面力が小さく深度分布も概ね一様となる。レベル2においては、過剰間隙水圧が上昇するAs層より上部で曲げモーメントが急増する傾向を示し、上部工慣性力の増加とともに地盤の水平抵抗の低下の影響が現れている。Ac₁層とAc₂層の層境界(NP-15.6m)では相対的に断面力の増加幅が小さくなっている。

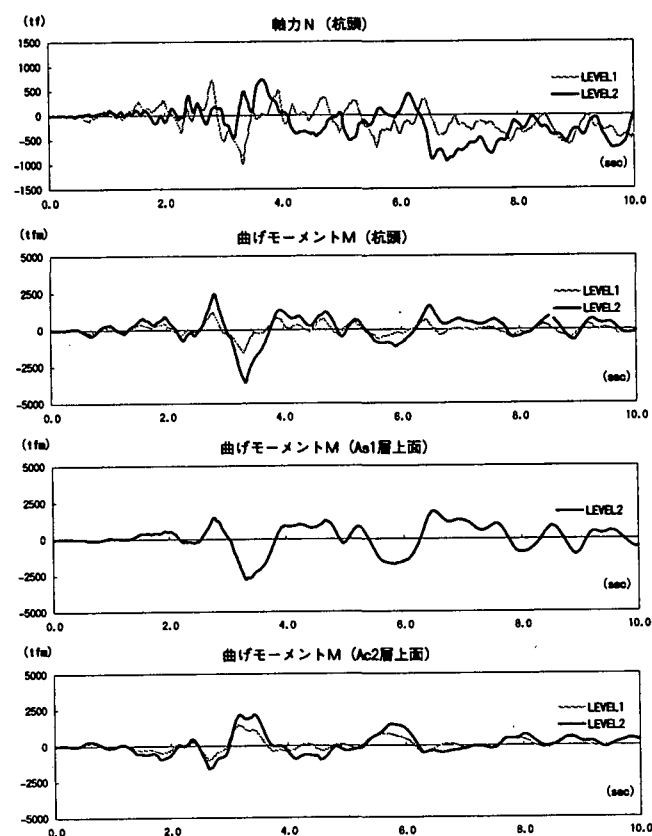


図-8 杭の断面力の時刻歴波形(HACHINOHE)

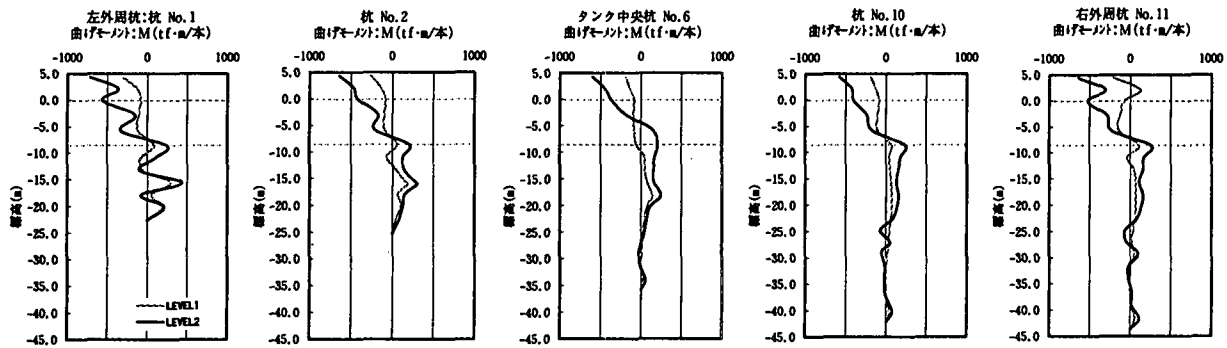


図-9 杭の断面力の深度分布(HACHINOHE)

4. 杭の耐震設計

(1) 設計方針

杭基礎の耐震設計は震度法を基本とし、動的解析結果は主として支持層の傾斜が大きいタンクの外周部杭を対象として以下の検討に用いた。

- ①杭頭部の補強検討
- ②主鉄筋の段落し位置の検討
- ③帯鉄筋の補強検討

また、動的解析による照査における設計クライテリアは地震動レベルに応じて以下のように設定した。

- レベル1：発生断面力 $\leq$ 降伏耐力
- レベル2：応答塑性率 $\leq$ 許容塑性率

(2) レベル1地震動に対する耐震設計

震度法により決定した断面配筋に対してレベル1地震動に対する照査を行った結果、外周杭の杭頭部および地中部(Ac_1 層と Ac_2 の層境界)、格子杭最外縁の地中部で降伏耐力を越えたため主鉄筋を補強した。また、地中部の応答変位により過大なせん断力が生じる範囲には帯鉄筋を密に配置し、せん断耐力および靱性の向上を図った。場所打ち杭の断面配筋図を図-10に示す。

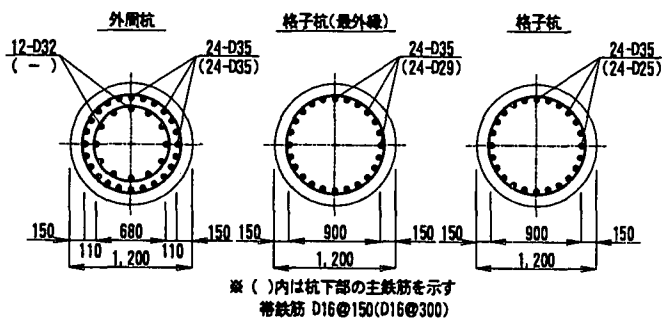


図-10 場所打ち杭配筋図(杭頭部)

(3) レベル2地震動に対する安全性照査

応答塑性率は場所打ち杭の復元力特性および動的解析により得られた弾性応答値より算定した。許容塑性率は「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」に

基づき安全係数 $\alpha=1.5$ として算定した。

杭頭部および地中部の最大応答塑性率を以下に示す。降伏点は越えるものの、十分な変形性能を有しており過大な損傷には至らないと考えられる。

- 押込み側 杭頭部： $\mu_r=1.4 < \mu_s=3.4$
地中部： $\mu_r=1.1 < \mu_s=2.3$
- 引抜き側 杭頭部： $\mu_r=3.2 < \mu_s=7.8$
地中部： $\mu_r=2.5 < \mu_s=5.5$

5. まとめ

急傾斜支持地盤における杭基礎の設計にあたり、地層構成の急変による応答変位の影響を動的解析により定量的に把握し、杭の断面設計に反映させた。不整形地盤の影響は基盤層の浅い側の端部杭の断面力に顕著に現れた。レベル2地震動に対しても過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の水平抵抗の低下の影響を考慮して杭基礎の安全性を確認した。

施工面では支持層の傾斜に応じて揺動式と全旋回式工法を使い分けることにより支持層への根入れを確実にし、杭先端のすべり、孔曲りを防止した。

参考文献

- 1)大槻明、渡辺浩平、竹脇尚信：不整形地盤における二次元建屋地盤系液状化解析，土木学会論文報告集，368，1-5，363-372，1986。
- 2)Fukutake, K., A. Ohtsuki, M. Sato, and Y. Shamoto: Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 977-992, 1990.
- 3)龍岡文夫、福島伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力-ひずみ関係のモデル化について，生産研究，第30巻，9-10，1978。
- 4)福武毅芳、松岡元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的理解，土木学会論文報告集，412，Ⅲ-12，240-248，1989。
- 5)道路橋示方書・同解説IV下部構造編(平成8年12月 日本道路協会)