

杭基礎構造物の耐震一次診断手法

○福田靖大¹, 足立正信¹, 西村友次¹, 嶋田昌義², 弘重智彦²

¹正会員 東電設計(株)技術開発本部(〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

²正会員 東京電力(株)電力技術研究所(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

レベル2地震動に対する杭基礎構造物の耐震性照査では、杭と地盤の非線形性および動的相互作用が重要な要素となるが、これらの要素を考慮するには、高度な解析手法に頼る必要があり、労力を必要とする。本報告では、杭基礎構造物に対する耐震診断の効率化を図るために、応答変位法を用いて基礎の地震時挙動に及ぼす影響因子を考慮したパラメトリックスタディを行うことにより耐震一次診断手法を構築した。この耐震一次診断手法の構築では、タンクの重量、杭基礎の諸元、地盤条件から所定の耐震性を満足する地震動(水平震度)を予測することができる。耐震性能の評価指標は、杭本体および基礎全体の降伏条件を考慮して設定した。

Key Words : *Pile foundation, Steel pipe pile, Seismic diagnosis method, Expansion of response displacement method, Parametric study*

1.はじめに

兵庫県南部地震以降、杭基礎構造物についてもレベル2地震動に対する安全性を確保することが要求されるようになった。レベル2地震動に対する杭基礎構造物の耐震性能を照査するためには、地盤と構造物の相互作用や部材の非線形性を考慮した詳細な解析が必要となる場合が多い。しかしながら、詳細解析には多大な労力が必要なため、多くの基礎構造物の耐震性を効率的に照査できる耐震一次診断手法の開発が望まれる。このような手法により、精度良くよりの確な評価ができれば、補強の要否や詳細な解析を行うべきか等の情報を速やかに知ることができる。本報告では、火力発電所の燃料タンクを支持する鋼管杭基礎を対象にタンク重量、杭径、地盤特性など基礎の耐震性に影響する要因をパラメータとして、応答変位法による二次元静的非線形解析を行い、水平震度と水平変位の関係を求め、水平震度と基礎諸元の間を整理することにより耐震一次診断手法を構築した。ただし、スロッシングの影響や基礎とタンクの動的相互作用の影響および地盤の液状化については考慮していない。

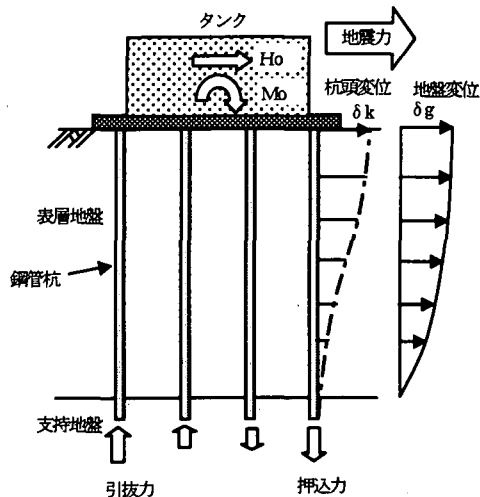


図-1 杭基礎の地震時挙動の概念

2. タンク基礎の挙動予測

(1) 解析方法

タンク基礎の地震応答解析は、図-1に示すタンク本体

の慣性力および地盤変位の影響を考慮するため、図-2に示す解析モデルを用いて実施した。ここで、杭本体の非線形性はバイリニア型の曲げモーメントと曲率の関係でモデル化している。杭と地盤との相互作用を表す地盤バネは道路橋示方書¹⁾を参考にバイリニア型でモデル化している。なお、この地盤バネモデルでは杭先端の引き抜きと押し込み力による破壊も考慮している。また、地盤構成はせん断波速度で100~200m/s (N値=1~20)の表層地盤とN値50以上の支持地盤の二層構成とした。

上部工であるタンク本体の慣性力はタンク重量に水平震度を乗じて求め、杭に作用する地震力については表層

地盤に生じる変位分布で与えており、その変位分布は一次モードを考慮して設定した。なお、地盤およびタンクに作用する水平震度は同一とした。

(2) 解析パラメータ

解析パラメータは、表-1に示すように杭基礎の地震時挙動に影響を及ぼす要因としてタンクの重量、杭の剛性および地盤剛性とした。パラメータの範囲は既設の燃料タンク基礎の調査結果に基づいて設定した。タンクの重量はタンクの大きさおよび内容物によって異なるため、ここでは重油、LNGおよび軽油タンクを対象とした。

図-3にタンクの直径と高さの関係を示すが、調査範囲においてはタンク径が大きくなるとタンクの高さが相対的に小さくなるのがわかる。この関係により、タンクの大きさに比例した地震力(水平力、曲げモーメント等)を設定した。

図-4はタンク径と使用している杭数の関係を示したものである。同図から杭数はタンク径にほぼ比例して増加することがわかる。そこで、解析ではタンク径に対応した杭数を考慮した。

杭径は、上部工、基礎の特性や地盤条件によって定められるが、調査範囲では杭の直径は400mm~800mmが用いられていることから、杭径はこの範囲を考慮して設定した。

表層地盤は沖積層を想定しており、せん断波速度100~200m/sとした。表層地盤の層厚は、既設の調査結果に基づき最大50mとした。

(3) 性能評価指標

杭基礎の一次診断に用いる耐震性能指標は、図-5に示すように杭本体の降伏と基礎全体の降伏に着目して以下のように設定した。

耐震性能1は全ての鋼管杭が降伏しないことを限界状態とし、鋼管杭の降伏は鋼管の最外縁部の応力度が降伏点に達した状態(降伏モーメント: M_y)とした。

耐震性能2は基礎の残留変位が過大にならないという観点から基礎が降伏しないことを限界状態とした。ここで、基礎の降伏は全ての鋼管杭が全塑性モーメント (M_p) に達するか、または一列の杭の杭頭反力が押し込み支持力の上限值に達することにより基礎の水平変位が急増し始める時点とした。

3. 解析結果

(1) 水平震度と水平変位の関係

図-6は応答変位法による解析結果のうち、タンク直径30mかつ杭長25mに対する水平震度と杭頭部での水平

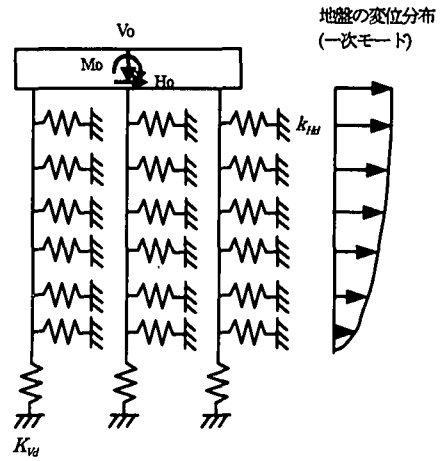


図-2 杭基礎の解析モデル

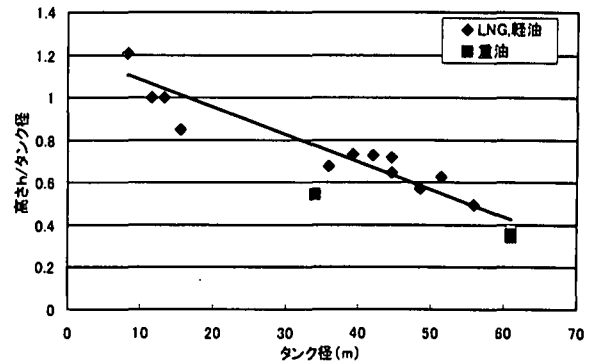


図-3 タンクの直径と高さの関係

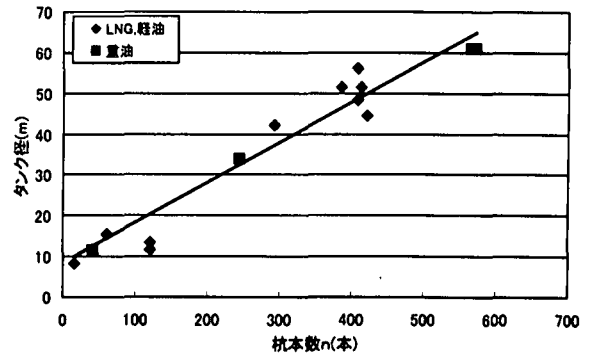


図-4 タンク径と杭本数の関係

表-1 解析パラメータ

パラメータ	パラメータの値	備考
タンク径(m)	10, 30, 50	
杭径(mm)	400, 600, 800	管肉厚 12mm SKK400 相当 杭間隔 2.4m
杭長(m)	5, 25, 50	表層地盤
地盤剛性 V_s (m/s)	100, 200	ボーリングデータを参考
タンク内容物	重油, LNG	比重の違いを考慮

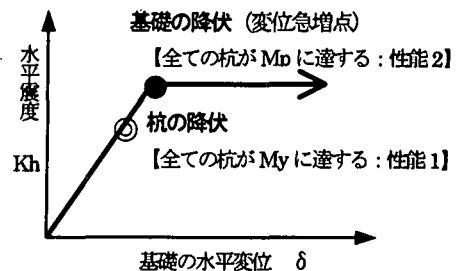
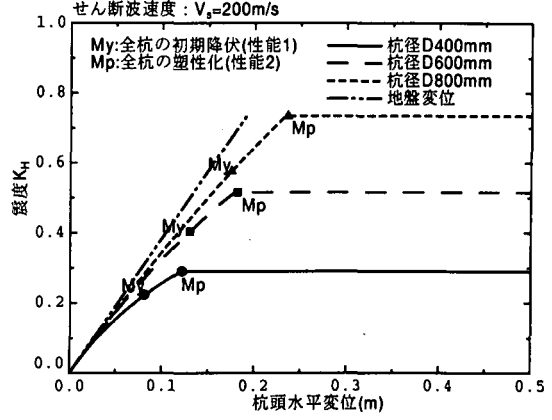
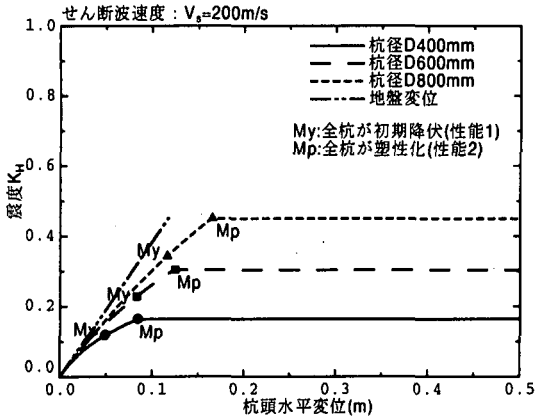
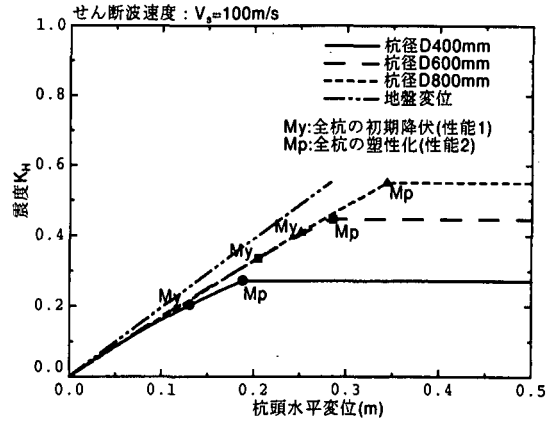
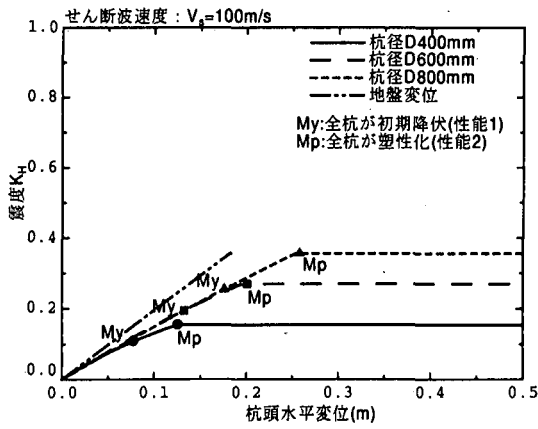


図-5 性能指標値



(a) 重油 (上段 $V_s=100\text{m/s}$, 下段 $V_s=200\text{m/s}$)

(b) LNG (上段 $V_s=100\text{m/s}$, 下段 $V_s=200\text{m/s}$)

図-6 荷重—変位関係($K_H-\delta$ 曲線) —タンク径 30m—

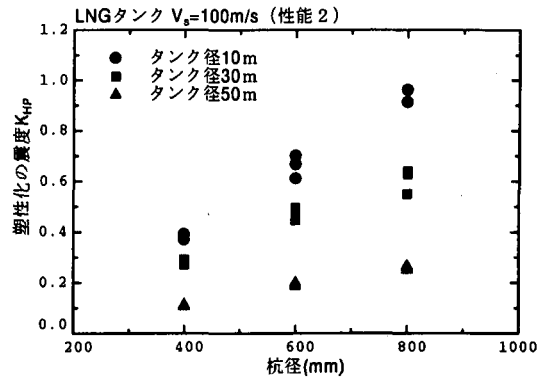
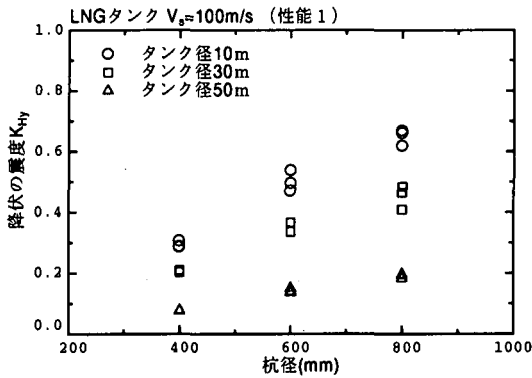


図-7 杭径と降伏および塑性化の震度の関係

変位の関係($K_H-\delta$ 曲線)を示したものである。図中の M_y および M_p は、それぞれ耐震性能 1 および耐震性能 2 に相当する点である。また、同図には杭頭位置における地盤変位も併記した。

同図から、①杭径に関らず M_p に達すると杭頭の水平変位が急増し始める、②杭径が大きいほど基礎の剛性が大きくなり M_y 、 M_p に達する水平震度および水平変位が大きくなる、③表層地盤のせん断波速度が大きい、すなわち地盤剛性が大きいと M_y 、 M_p に達する水平震度は大きくなるが水平変位は小さくなる、④重量が軽い LNG タンクの方が M_y 、 M_p に達する水平震度が大きい、⑤地盤変位よりも杭頭部の変位の方が大きく、タンクの

慣性力の影響が大きいことがわかった。また、杭径とタンク重量は M_y 、 M_p に達する水平震度に及ぼす影響が大きいといえる。

(2) 杭径およびタンク径と震度の関係

図-7 は杭径と M_y 、 M_p に達する水平震度の関係をタンク径毎に解析結果を整理したものである。同図から、杭径が大きいほど、またタンク径が小さいほど M_y および M_p に達する震度が大きいことがわかる。タンク径が小さいほど震度が大きくなるのは、杭数が少ないことによる基礎全体の耐力低下よりも、タンク重量に起因する慣性力が小さいことの影響が大きいと考えられる。

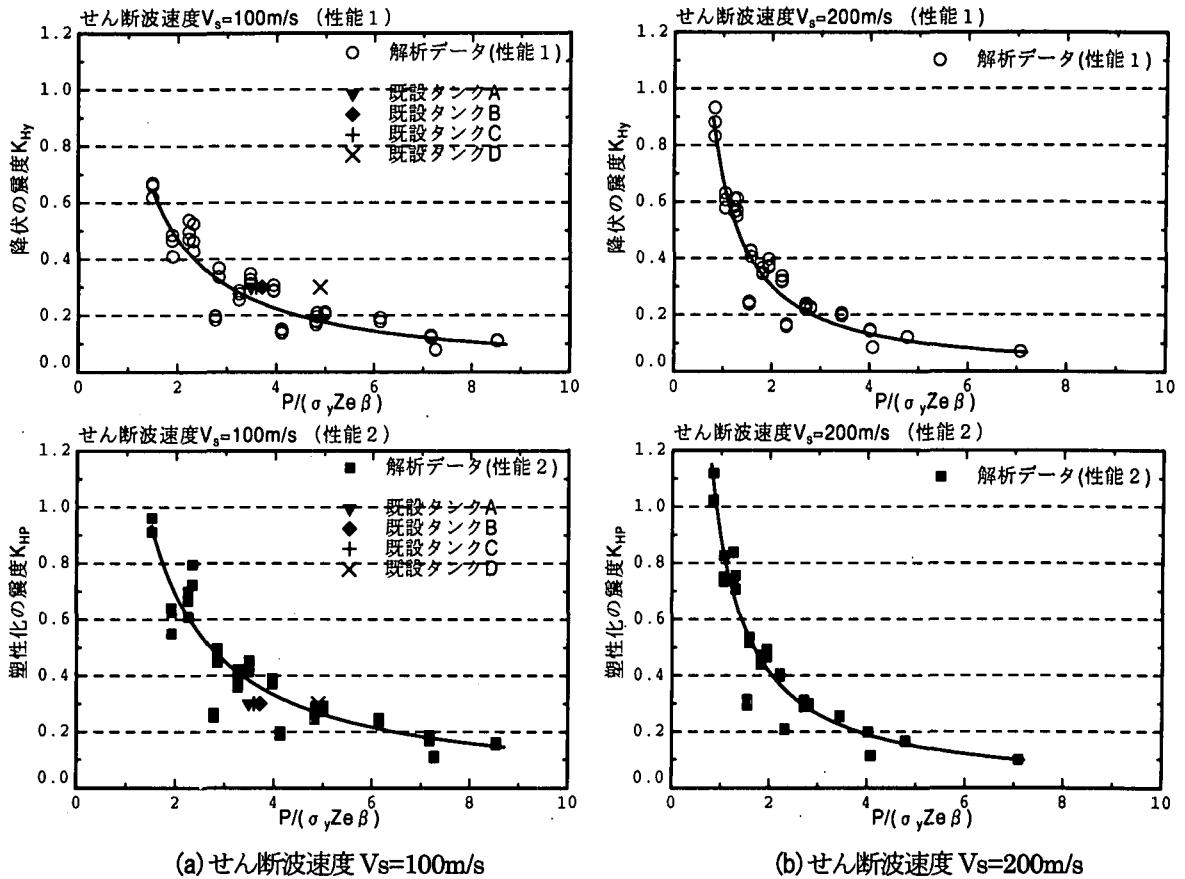


図-8 一次診断手法

4.耐震一次診断手法

以上の検討結果に基づき、杭基礎の構造特性を表す指標値 $P/(\sigma_y \cdot Z_e \cdot \beta)$ と各々の耐震性能に達する時の水平震度の関係で再整理した。

ここで、

P : 杭一本に作用するタンク自重(全自重/杭本数)

σ_y : 鋼管の降伏点強度

Z_e : 鋼管の断面係数 $(= \frac{\pi}{4} \{r^4 - (r-t)^4\} / r$

r : 半径, t : 肉厚)

β : 杭の特性値 $(= \sqrt[4]{k_H D / 4EI})$

である。この指標値の分母は杭の曲げ耐力と地盤剛性の大きさを表し、分子はタンクの重量すなわち作用荷重に關係するものである。

図-8 に基礎の構造特性を表す指標値と水平震度の關係を示す。指標値が増加すると耐震性能 1 (My) および耐震性能 2 (Mp) を満足する水平震度は大きく低下するが、指標値が 2 以上では低下の割合が小さい。指標値 2 以下では、せん断波速度の大きい方が水平震度の低下程度が大きい。せん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ の場合では、 100m/s の場合よりも全体的に指標値が小さい方向に移

っている。これは指標値に杭の特性値 β を用いており、この値が大きいためと考えられる。また、図中には既設のタンク基礎諸元から求めた指標値と設計震度を併記したが、これらの基礎は概ね耐震性能 2 を満足すると判定できる。既設のタンク基礎は弾性解析と許容応力度法に基づいて設計されていることから、この判定はやや安全側の結果を与えると考えられる。

5.まとめ

- 鋼管杭を用いたタンク基礎構造物を対象に、構造物および地盤の非線形性を考慮して応答変位法解析を行った。
- 性能評価の指標は、杭本体の塑性化および杭基礎全体の塑性化に着目して、耐震性能 1 (全ての杭が降伏した時点)、耐震性能 2 (全ての杭が全塑性モーメントに達した時点)とした。
- 杭基礎の構造特性を表す指標値 $P/(\sigma_y \cdot Z_e \cdot \beta)$ を用いることにより迅速な耐震一次診断を行うことが可能である。

参考文献

- 道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, 日本道路協会, 1996. 8