

地上式LNG貯槽を対象とした各種耐震解析手法の適用性検討

松田 隆 伊藤 英芳
大内 一

Applicability of Seismic Analysis Methods to a Pile Supported LNG Storage Tank

Takashi Matsuda Hideyoshi Ito
Hajime Ouchi

Abstract

Seismic response analyses were conducted for a strong input motion, the L2 earthquake wave, to a pile supported LNG storage tank. The object of the analyses was to investigate the applicability of each analysis method to a seismic design code. For the ground motion response analysis, the equivalent linear method and the non-linear time integration method were compared. The equivalent linear method yields responses that are almost equal to those obtained from the detailed method, and somewhat larger accelerations at the ground surface. Therefore, this method could be adopted for the seismic design on the basis of safety. For the soil-structure interaction analysis, four methods were compared, including the Penzien model and the FEM model. It was indicated that taking into account ground nonlinearity, the interaction model gives relatively large section forces, as do more detailed methods such as 3D FEM and axial symmetry FEM. Finally, it was determined that the existing PC-LNG tank had satisfactory seismic safety against the L2 earthquake wave.

概要

群杭を有する地上式PC-LNG貯槽を対象に、レベル2地震動を入力とする種々の地震応答解析を行い、同種構造物の耐震設計に対する適用性を検討した。地盤の応答解析として、等価線形化手法と逐次積分非線形手法とを適用した結果、地表面の加速度応答はやや等価線形化手法の方が大きくなり、安全側の評価を与えることがわかった。地盤～貯槽の連成解析には、Penzien系モデル、2次元、軸対称及び3次元のFEMモデルを適用した。杭の断面力に関しては、地盤の非線形性を相互作用系で考慮した方が大きな応答を与えること、地盤物性が同様の場合にはより詳細な幾何モデルを用いた解析の方が大きな応答を与える傾向があること、などがわかった。最終的には限界状態設計法によって杭及び基礎版の断面力を照査した結果、既存のPC-LNG貯槽はレベル2地震動に対して十分な耐震安全性を有することが示された。

1. はじめに

LNG貯槽に関する各種設計指針類¹⁾などでは許容応力設計法から性能照査型設計法へ移行するとともに、レベル2地震動(L2)に対する耐震設計が必要になってきた。この場合、設計照査には動的応答解析を用いた耐震計算が主流になる。このとき、国内にある地上式LNG貯槽は数百本から千本台の大型の群杭を有しており、実設計においては杭を一本毎にモデル化する事は非現実的であるため、簡略化された相互作用系の解析モデル²⁾などがまず必要になる。また、強震時を想定した群杭基礎と周辺地盤との複雑な動的相互作用及び構造物と地盤の非線形性を考慮できる解析手法が要求される。すなわち、地震時の材料非線形性を合理的に取り入れた実務対応の耐震計算法の整備が必要となる。これまで実務の耐震設計に用いられている軸対称FEMやPenzien系モデルは、

個別に実験や地震観測記録を基に解析手法の妥当性が検討されているが、それぞれの解析法を比較した例は少ない。そのため、採用した解析法によって照査結果が異なり、耐震性評価上問題が生じる可能性がある。

本研究では、解析手法によって応答値がどの程度差異が生じるかを明確にし、安全側かつ合理的な照査結果を与える手法を抽出するものである。具体的には簡易手法としてのPenzien系モデルから、詳細手法としての3次元FEMモデルまでの4種類の耐震計算法を地上式PC-LNG貯槽に適用し、それらの解析手法の特質を求めると共に、各応答解析結果を定量的に比較した。

最終的には地震時断面力照査の観点から、各種解析手法を用いる場合の留意点をまとめる。また、実存する貯槽を対象に、地震時断面力を限界状態設計法³⁾によって照査していることから、既存PC-LNG貯槽の耐震安全性を示すことになる。

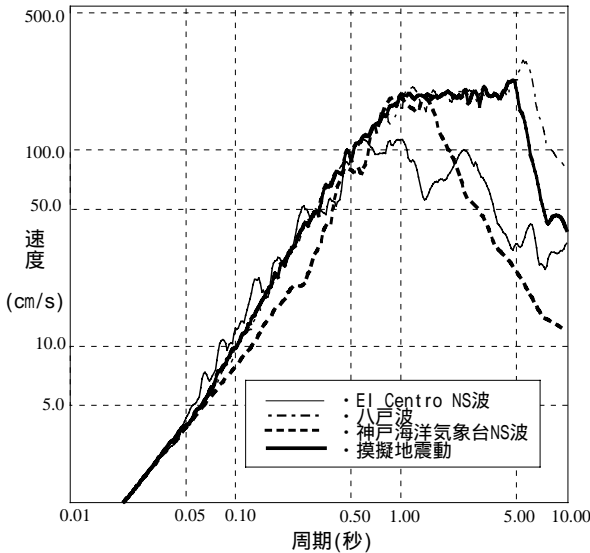


Fig. 1 検討用地震動の加速度応答スペクトル
Response Spectra of Seismic Waves for Analysis

2. 地盤応答解析

2.1 解析条件

2.1.1 入力地震動 地震応答解析に用いる、入力地震動は製造設備等耐震設計指針⁴⁾に基づき、地表面で最大480Galとなるように最大加速度を設定した。この設定では、地上式PCLNG貯槽が多く存在する関西地区の地域係数を用いている。また、波形の振動数特性が応答結果に及ぼす影響を把握するため、解析的に工学的基盤波の振幅を調整した4つの地震動[1)1940El Centro NS, 2)1968十勝沖地震八戸EW, 3)1995兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS, 4)同地震大阪ガス泉北基地NS=模擬地震動]を用いた。このうち、2)4)はスペクトル特性を製造設備等耐震設計指針での基準応答倍率を用い位相特性を観測波形に合わせた。Fig.1に地表面での加速度応答スペクトルを示す。

2.1.2 地盤モデル 地盤モデルは実存する地上タンクの立地地点のデータを参考にした (Table 1及びFig.1参照)。工学的基盤はGL-55.4mに、地下水位は地表面に設定した。

2.1.3 解析手法 Table 2にここで採用した解析手法の主なメリットと留意点をまとめる。等価線形化法は、適用実績が多く各種解析モデルでのパラメータが設定しやすい長所がある。更に、相互作用系の解析手法において等価剛性を用いる場合、その設定が容易である。一方、非線形解析法は、強地震動による非線形振動あるいは残留変形が直接評価できる。一般的に、地震時のせん断ひずみ振幅が1%を超える場合、等価線形化法の適用性は困難とされている。このとき、非線形解析法が適切となるが、前述したように相互作用系モデルで等価剛性を

Table 1 地盤モデルの諸物性値
Soil Properties of Model Ground

土質	深度 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	S波速度 (m/s)	非線形特性
礫混り砂	1.1	17.64	220	A
砂混り粘土	2.0	16.17	140	B
礫混り砂	8.3	17.64	220	A
シルト質粘土	12.0	16.17	140	B
シルト混り砂	14.8	17.64	170	C
粘土	16.9	16.68	260	D
粗砂	22.1	18.62	240	E
シルト質粘土	26.4	15.68	330	D
粗砂	31.4	18.62	270	E
砂質粘土	33.4	16.66	240	F
砂質粘土	34.8	16.66	240	F
砂質土	36.5	18.62	290	E
粘性土	43.7	15.68	230	G
砂質土	47.4	18.62	370	E
粘性土	55.4	15.68	260	H
工学基盤		18.62	450	

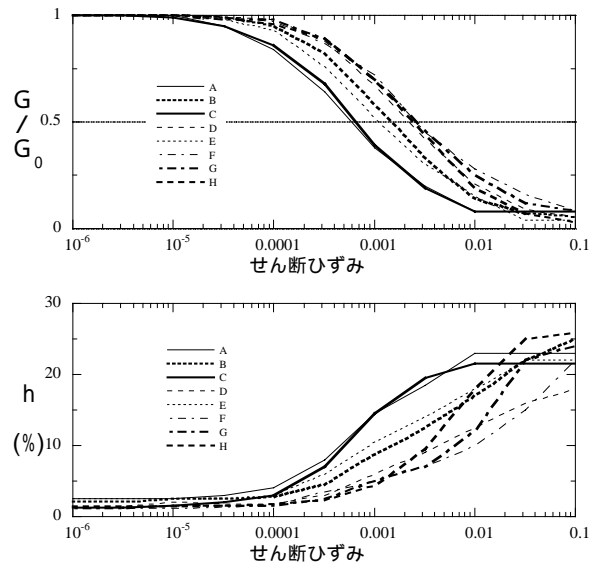


Fig. 2 地盤の動的変形特性
Nonlinear Characteristics of Soil Layers

Table 2 地盤の非線形性を考慮できる解析手法
Characteristics of Analytical Methods
for Nonlinear Ground Response

	実績	メリット	適用上の留意点
等価線形化法		<ul style="list-style-type: none"> 詳細な地盤情報が無い場合でも、地盤定数が設定できる 連成解析モデルへの等価剛性の設定が可能 	<ul style="list-style-type: none"> せん断ひずみが大くなる場合は、逐次積分非線形解析との比較によって使用の妥当性を確認すべき
非線形解析法		<ul style="list-style-type: none"> 強地震動時の地盤応答が正確に求められる 液状化や滑りなどの強非線形現象が直接考慮できる 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤定数設定にあたっては、詳細なデータが必要 解析法毎に妥当性を確認しておく必要がある

設定せざるを得ない解析法では、等価線形化法の適用性を個別に確認した上で使用の是非を決めることになる。等価線形化法の適用性確認に非線形解析法の解析結果が比較データとして用いられることがある。

本研究では、等価線形化法として重複反射解析(以下、SHAKEと称す)を、逐次積分非線形化法としてR-0モデル(以下、R-0と称す)を採用した。SHAKEでは、収束条件5%、有効ひずみ率を0.65に設定した。R-0では、時間刻みを0.001秒に、内部減衰としてレーリー型減衰を1%に設定した。非線形特性に関しては、Fig.2の動的変形特性を近似するように非線形パラメータを設定した。

2.2 解析結果

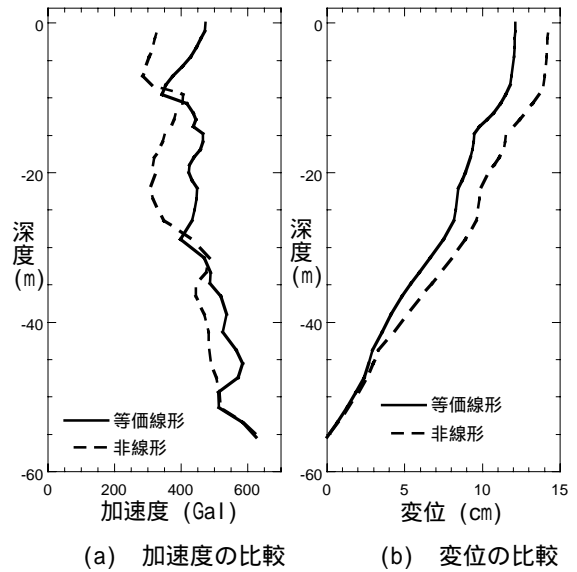
地震応答解析結果のうち、最大値の深度分布をFig.3に示す。加速度応答は等価線形化法SHAKEの方が大きく、変位応答は非線形解析R-0の方が大きい。これは、SHAKEでは実効値となる最大応答値の0.65倍のひずみに対応する剛性を採用していることから、R-0の最大応答時に比べ剛性が大きくなっていることに起因している。この傾向が耐震設計に与える要因としては、加速度応答が支配的となる上部構造物の入力にはSHAKEでの応答結果を用いた方が安全側の評価になることである。これに対して地中構造物は地盤変位に支配されることからSHAKEの変位応答は、危険側の評価を与える可能性がある。ただし、この点については、その差が13%程度あり構造物設計時の安全率の中で吸収できると考えられる。また、この解析における地盤の最大せん断ひずみは1.5%であり、等価線形化法の適用性を検討する必要がある。その評価として、Fig.3の非線形解析法R-0を基準とした場合、等価線形化法の最大加速度応答との差異は30%以内であり、最大変位応答との差異は20%以内となる。この差異は最終的な耐震安全性評価における安全率としての荷重係数の範囲で吸収できることから、この解析例では等価線形化法を適用できるものとした。

Fig.3(c)に各波形の最大加速度応答分布を示す。この検討では地表面で480Galになるように調整している。海洋気象台波は、上層に増幅する分布であるが、El Centro波は下層の方の振幅が大きい。これは、高振動成分が大きいとその成分に対する減衰が大きいことが原因している。そのため、地表面で加速度値を規定した場合、基盤の加速度振幅はかなり大きくなることもある。また、地中の加速度応答や変位分布は波形種別によって異なることから、耐震設計においては特性の異なる複数の波形で照査する必要がある。

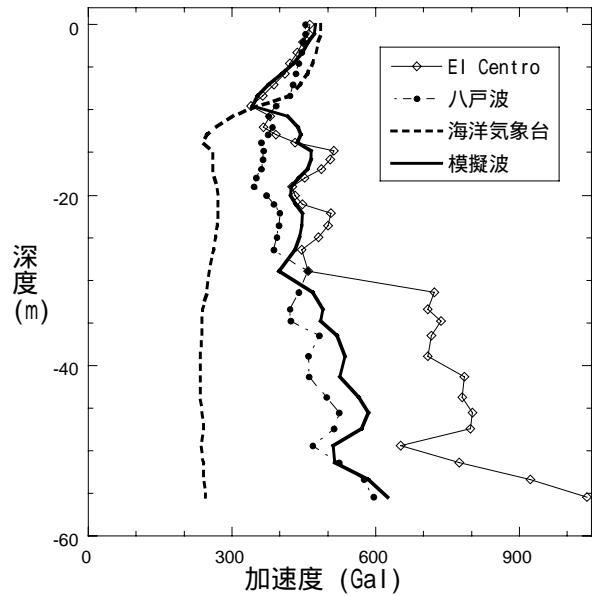
3. 貯槽～地盤連成系モデルでの応答解析

3.1 解析手法

解析手法は、実績、解析次元等を考慮してTable 3に示す4つの方法を選択した。実績が多いのはPenzien系と軸対称解析である。Penzien系で代表される簡易モデ



(a) 加速度の比較 (b) 変位の比較



(c) 波形種別の加速度応答比較 (SHAKE)

Fig. 3 地盤の加速度変位応答値分布
Distributions of Maximum Response of Ground

Table 3 貯槽地盤連成系の解析手法
Analytical Methods for Interaction Response

[]:実績	メリット	適用上の留意点
Penzien モデル []	・連成モデルの自由度は小さい	・基礎スラブや防液堤の照査方法 ・群杭効果
2次元 動的FEM []	・強振動時の地盤非線形応答が直接反映できる	・円筒状構造物の2次元モデル化 ・基礎スラブや防液堤の照査方法
軸対称 動的FEM []	・2次元モデルと同等の自由度で円筒構造物のモデル化 ・群杭効果が直接評価できる	・構造物の非線形性評価 ・地盤の等価剛性の評価
3次元 静的FEM []	・オーバーリングモードなどの3次元性と非線形が直接反映可能	・無限地盤の設定 ・杭の縮約モデル

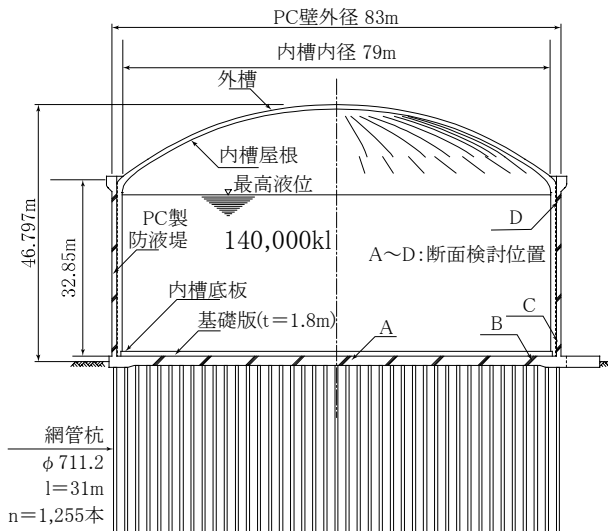


Fig. 4 解析対象PCLNG貯槽
Profile of Analysis Model (PCLNG Tank)

ルは、幾何モデル自体の作成は容易であるが、相互作用ばねの設定や群杭の諸特性を与えるのに他の解析や計算が必要になるため、計算に要する時間はFEMよりかかる可能性がある。このうち、3次元解析は、静的FEM解析であり、地震力は他の動的応答解析における最大応答値から算定した。

解析対象は、Fig.4に示す14万KJ地上式PCLNGである。この貯槽は、1255本の鋼管杭を有し、基礎スラブは地盤に接する形式の一重床タイプである。

3.1.1 Penzien系モデル 解析モデルをFig.5に示す。修正Penzienモデルはオリジナルモデルに基礎直下地盤に対応した質点系を追加したものである。自由地盤と相互作用ばねはSHAKEの収束剛性から算定した。

杭は1本に集約したはり要素でモデル化するが、鉛直方向の軸剛性は回転ばねに変換しモデル化した。基礎版は剛版とし、杭は基礎版に剛接とした。杭先端は、回転変位を自由にした。相互作用ばねはMindlin解を用い杭一本当たりの値を算定し、群杭効果を考慮して杭本数の平方根を乗じた。

貯槽内容液はHousnerモデルとし、設計用固有周期（内槽0.357秒）から諸パラメータを設定した。ただし、減衰は自由液部で0.5%、固定液部で2%、躯体コンクリート部で3%とした。

構造物系は、上部タンクを内槽の2質点曲げせん断型モデルとPC防液堤を10質点曲げせん断型モデルでモデル化した。

入力に関しては、基礎杭系および自由地盤系の底面位置は同じ深さにあり、同一の地震動を受けるものとした。手順は、自由地盤系の応答を工学基礎の入力地震動2E（E：入射波）に対して計算し、次に構造物系の応答を底面入力地震動（自由地盤系の工学基礎実応答E+F：F：反射波）と側方から相互作用ばねを介して入力

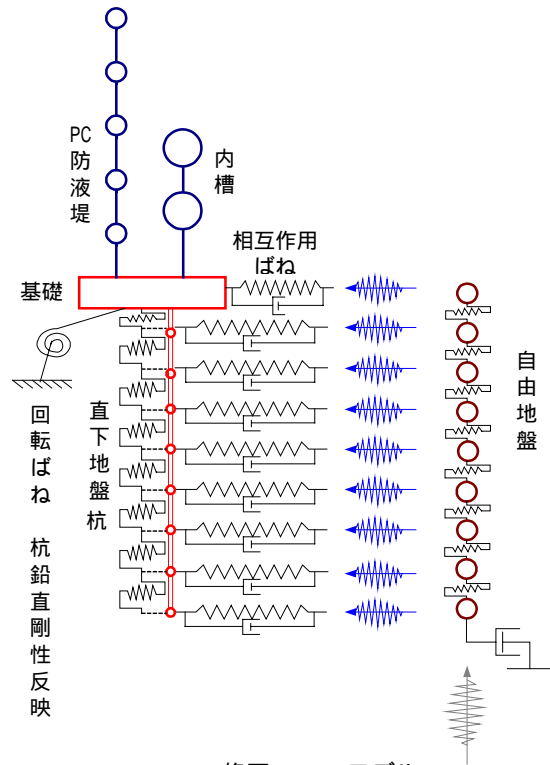


Fig. 5 修正Penzienモデル
Schematic of the Modified Penzien Model

される自由地盤系の応答変位、応答速度とを同時に考慮した。時刻歴解析は、ニューマーク法（ $\alpha=1/4$ ）による直接積分法で行い、積分時間刻みは1/500秒とした。

3.1.2 2次元FEMモデル 2次元FEMモデルは、非線形解析が可能であるため、実務設計では広く用いられている。ただし、平面ひずみ状態でない貯槽の解析では中央断面での応答特性のモデル化になる。ここでは、地盤の非線形性のみをR-0モデルで考慮した。地盤モデルの境界は遠方地盤の無限性を考慮して側方と底面に粘性境界を設けた。

構造物及び内容液はPenzien系モデルと同様にした。具体的には、基礎版厚さを中央の1.8mとし、解析モデルの単位幅は基礎版外径(83m)とし、貯槽質点の諸量と杭剛性は基礎幅で除した値を用いた。Fig.6に解析モデルを示す。

3.1.3 軸対称FEMモデル 軸対称モデルは、円筒構造物を再現するのに適しており、鉛直動に対しては軸対称荷重を、水平動に対しては非軸対称荷重を作用させる。ただし、一般的には1次のフーリエ展開成分を外力とするため、オーバリングや花びらモードは再現できない。基本的には、3次元の非線形解析には適用できないことから、材料非線形性は等価線形化法が用いられる。

地盤の等価剛性は、SHAKEの収束剛性を用いることも考えられるが、ここでは相互作用系の解析で収束計算を行なった。このとき、収束計算に用いる各要素のひずみは最大値 \max の0.65を用いている。比較のため、SHAKE

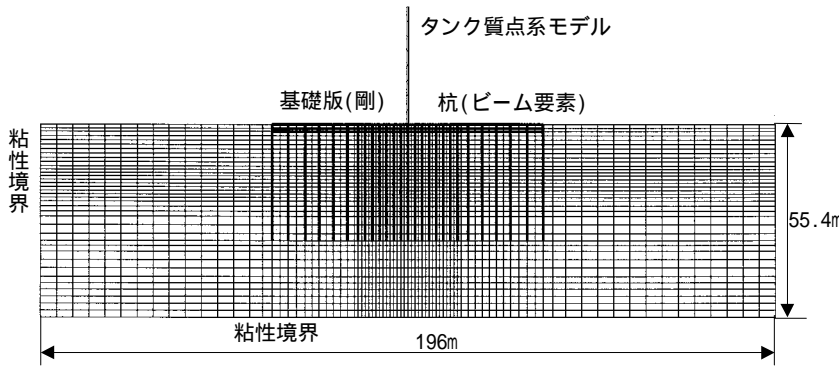


Fig. 6 2次元FEMモデル
2D - FEM Model

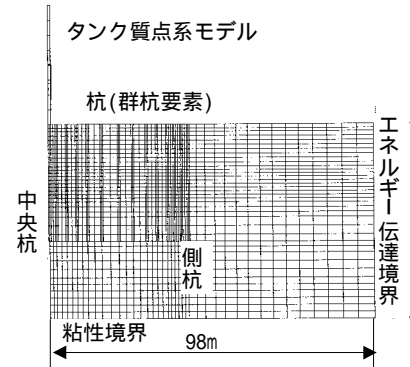
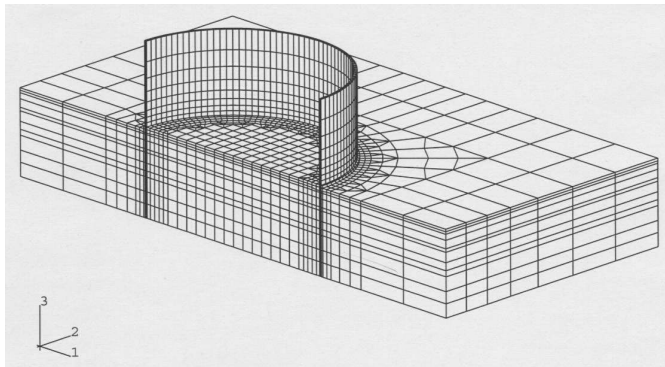
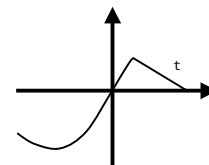


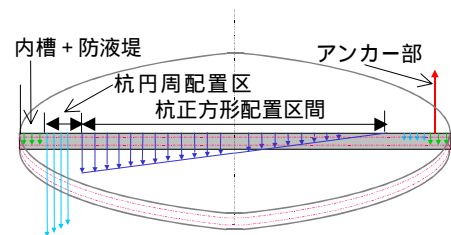
Fig. 7 軸対称FEMモデル
Axisymmetric FEM Model



(a) 全体モデル



(b) コンクリート非線形モデル



(c) 基礎版荷重分布

Fig. 8 3次元FEMモデル
3D - FEM Model

の収束剛性を用いた応答解析も行ったが、相互作用系での収束計算による応答値より小さく危険側の評価となった。

杭はリングパイル要素⁵⁾でモデル化した。貯槽に関しては、液体を含め軸対称シェルとソリッド要素でもモデル化⁶⁾できるが、ここでは他の手法との比較を行なうため、Penzienモデルと同様の質点モデルを用いた。Fig.7に解析モデルを示す。

3.1.4 3次元FEMモデル 解析モデルは、構造物及び外力の対称性を考慮して1/2対称条件を用いた(Fig.8(a))。そのため境界条件は、水平端部を自由に、鉛直端部は水平ローラーとした。解析対象となる周辺地盤領域は、タンク直径の2.5倍、深さ方向は杭先端より15mまでモデル化した。地盤剛性は、SHAKEの収束剛性を用いた。

基礎版周辺部に配置された杭は実本数でモデル化し、基礎版中央部は杭4本分を1本に集約した。P C 防液

堤、基礎版はソリッド要素でモデル化し、基礎版はコンクリート非線形モデルとして扱った。コンクリート非線形モデルの概念図をFig.8(b)に示す。

荷重条件は、構造物及び地盤に静的荷重としての水平力を漸増作用させた。解析手法としては増分法による静的非線形解法を採用した。水平地震力分布は、軸対称FEM解析で貯槽本体の加速度が最大となった時刻での慣性力を採用した。ただし、基礎版に作用する液圧等の荷重は、水平地震動0.974Gを想定して算定した。Fig.8(c)に(通常運転時常時荷重+水平地震力+鉛直下向き地震力)での基礎版に作用する荷重分布を示す。

3.2 杭応答

杭の耐震性は、発生断面力の耐力照査と水平変位で評価できる。このうち、水平変位に関しては地盤の応答変位(Fig.3(b)参照)とほぼ同様になり、周辺地盤と杭基礎の相対変位は最大で1.2cmと小さいことがわかった。

Fig.9に曲げモーメントの深度分布を示す。曲げモーメントは杭頭部の他、地中部でも大きな分布を示す位置があるが、これは地層の剛性が急変する部分で、GL-14m付近では杭頭部より大きな値になっている。このように、震度法の設計では杭頭部で断面力照査が行われてきたが、地震応答解析では地中部の照査も必要になることが明確になる。

(a)は、地盤の剛性をSHAKEの収束値を用い成層仮定のモデル、すなわち地盤の剛性評価に関して同一の手法を比較したものである。幾何モデルに関してより詳細な3次元モデルが簡易なPenzenモデルより大きな値を与えている。これは、3次元モデルの方が2次元モデルに比べ基礎構造物に接続される地盤ばねは大きくなることに起因している。同様に、(b)は、地盤の剛性を相互作用系での応答解析結果に依存する手法を比較しているもので、応答値は2次元FEMの方が軸対称解析より大きな断面力を算定している。これは、Fig.3(b)で示したように、非線形解析(2次元FEM)の方が等価線形化法(軸対称)より大きな応答変位を示していることに対応している。(c)は解析次元の比較をしているが、地盤剛性の評価法と外力の与え方が異なることから、純粋な比較にならないが、杭頭部以外は3次元解析の方が大きな断面力を与えている。幾何モデルを詳細にすることで、この場合は安全側の評価を与えることになる。ただし、要素分割の精度や動的解析と静的解析の差異はあるため、個々の検討対象タンクによって解析手法の違いによる応答結果の大小は変化する。

(d)は照査結果を示すもので、図中の耐力が11m以深で小さくなっているのは、杭の肉厚が減少しているためである。いずれの深度においても発生断面力は耐力を下回り、耐震安全性は確保できていることがわかる。すなわち、L1レベル地震動で設計したPCLNGタンクの杭基礎においても、L2地震動入力時の耐震性は確保されることがわかる。

(e)は群杭の外周にある側部杭と中央部の杭の断面力を比較している。杭頭部及び地盤剛性急変部では側部杭の断面力は大きく、また、深さ方向の曲げモーメントの変化は激しい。後者が意味することは、側部杭のせん断力が大きくなることであり、このように杭位置による応答の差が明確になる解析法が望ましいことが分かる。この点Penzenモデルは杭一本に集約しているため、平面方向の断面力分布が評価できず合理的な設計にかける。

3.3 貯槽及びPC防液堤の応答

Fig.10に貯槽の応答加速度分布を示す。Penzienモデル以外は上部の応答の方が大きい。上部の応答値は軸対称解析が最大となった。これに対して、下部の応答は2次元FEMのほうが大きくなった。これらの応答の差は、杭を含めた基礎の回転剛性の評価の違いによるもので、Penzienモデルの回転剛性が過大に評価していると推定できる。Penzienモデルでは、杭端部を固定したと

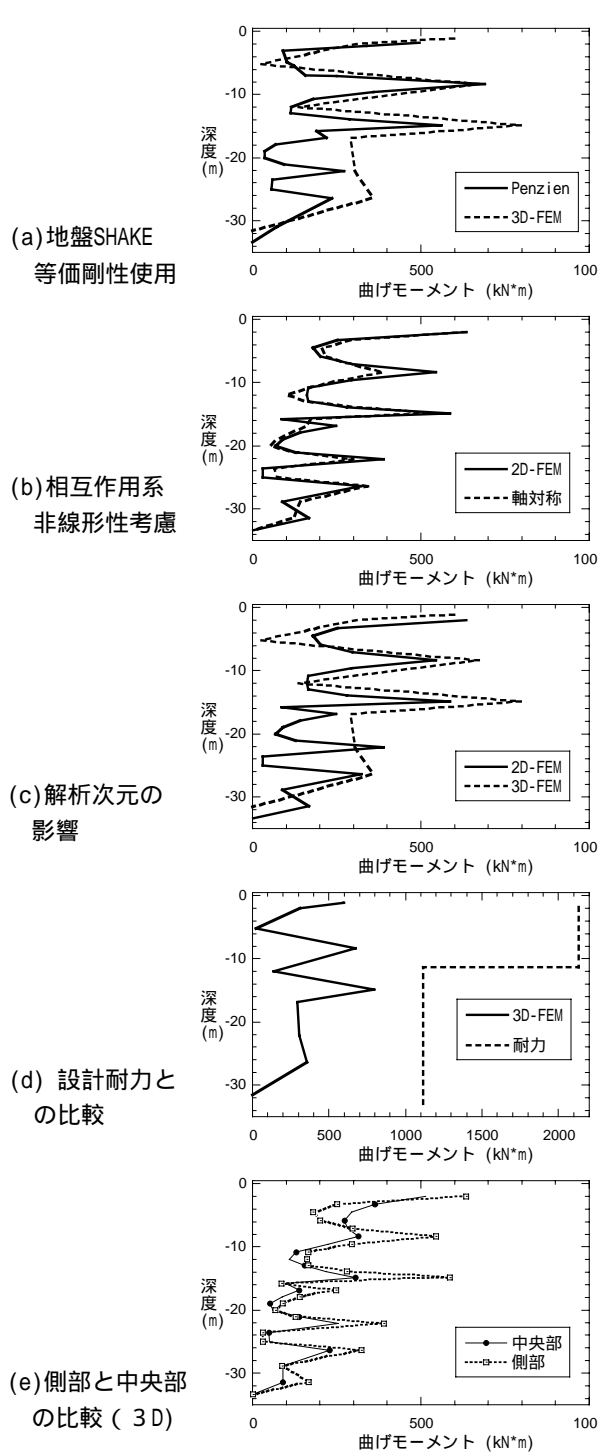


Fig. 9 杭の地震時曲げモーメントの比較
Comparisons of Bending Moment of Piles

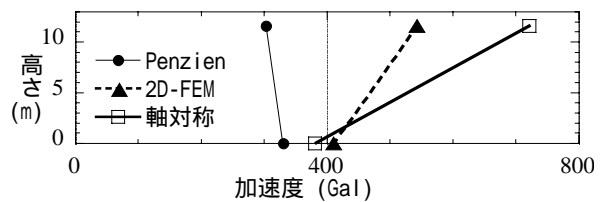


Fig. 10 貯槽加速度応答の比較
Comparisons of Acceleration Response at Inner Tank

きの鉛直剛性と基礎中央部からの距離から回転剛性を算定しているが、実際は杭端部は周辺地盤とともに振動することから、相対的に剛性が低下することに原因していると考えられる。2次元FEMと軸対称解析では2次元FEMの方が相対的に大きな回転剛性を与えることになる。これは、2次元FEMは基礎の中央部の幅でモデル化しているため、その中心軸周りの断面2次モーメントは軸対称モデルの1.7倍になることが原因している。軸対称解析で基礎版での応答が小さくなっているのは、前述した回転剛性の関係で2次元FEMより回転変位が大きくなったためと考えられる。

耐震性照査の面から解析手法の適用性をみた場合、幾何モデルの精度が高い軸対称解析の応答が安全側の結果を与えた。特に、Penzienモデルで頂部の応答を求める場合、危険側の評価になる可能性がある。同様に内槽に発生する層せん断力は、Penzien系及び2次元FEMモデルは167MNであるのに対して、軸対称モデルは208MNになった。このことから、幾何形状が実物に近いモデルを用いた方が安全側の断面力を評価することがわかる。

Fig.11にPC防液堤の加速度とせん断力分布を示す。頂部の加速度応答は2次元FEMと軸対称モデルとではほぼ一致しているが、高さ方向の最大値分布は異なる。断面力照査に用いられるせん断力は、軸対称モデルが大きく安全側の評価を与える。

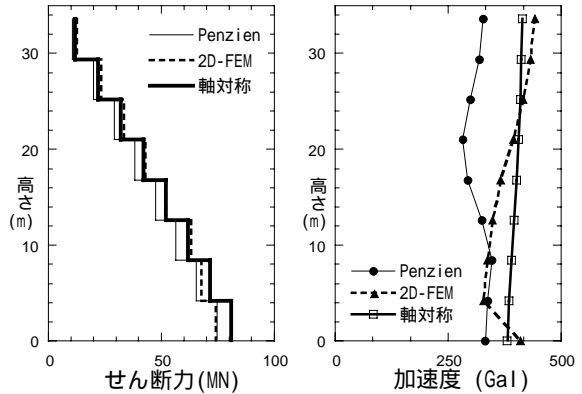


Fig. 11 PC防液堤応答加速度・断面力の比較
Comparisons of Response at PC Outer Tank

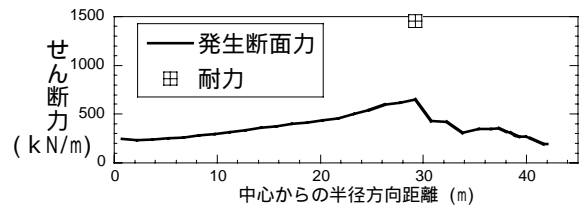


Fig. 12 基礎版のせん断力分布と耐力
Distribution of Shear Force at Base Mat

4. 基礎版とPC防液堤の断面力照査

4.1 基礎版断面力分布特性と断面力照査結果

断面力の照査は常時荷重（自重 + プレストレス力 + 温度応力）と地震時動的成分を加えた地震時断面力で行う。

Fig.12に半径方向のせん断力分布と、最大せん断力発生位置におけるせん断耐力を示す。基礎版のせん断力は中心から約30mの位置で最も大きくなっている。この位置は、杭配置が変化する部位である。最大地震時せん断力の耐力に対する比率は46%であり、十分な耐震安全性を有することがわかる。

Fig.13に半径方向及び円周方向の曲げモーメントと軸力の分布を示す。軸力及び曲げモーメントは、端部近傍Bの位置で大きな値を示しており、この部分のせん断力も大きいことから、安全性を照査すべき部位と考えられる。これらの分布で折線状になっているのは、杭が基礎版に埋込まれているため、特に、端部でその影響が大きい。このような詳細な断面力分布を基に設計する場合、ここで示した3次元解析が有効になる。

Fig.14に軸力～曲げモーメント相関限界曲線と地震時断面力の関係を示す。耐震性の照査に関しては、この限界曲線内に発生断面力が入っていれば安全性が確保できていることになる。いずれの部位も耐震安全性は確保されており、前述したように基礎版においても平成3年度版土木学会コンクリート示方書に基づきL1レベル地震動を外力として設計した貯槽は、L2地震動入力時の耐

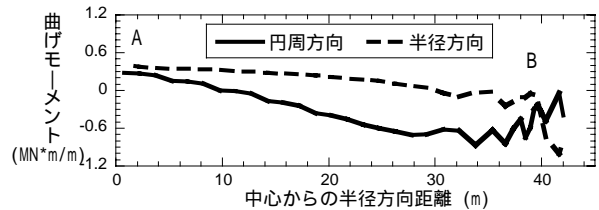


Fig. 13 基礎版の断面力分布
Distributions of Section Force at Base Mat

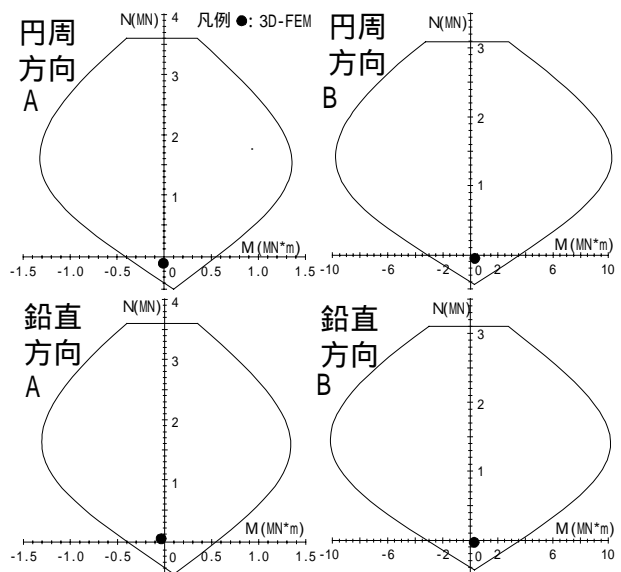


Fig. 14 基礎版の軸力～曲げモーメント限界相関関係
Interaction Curves of Limit Design at Base Mat

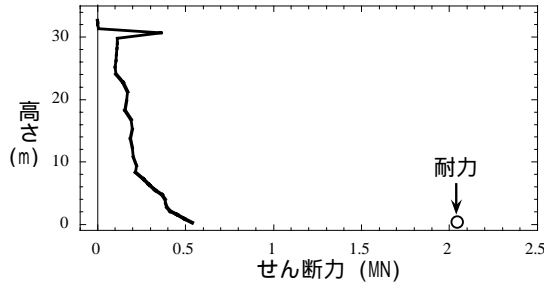


Fig. 15 PC 防液堤のせん断力分布と耐力
Distribution of Shear Force at Base Mat

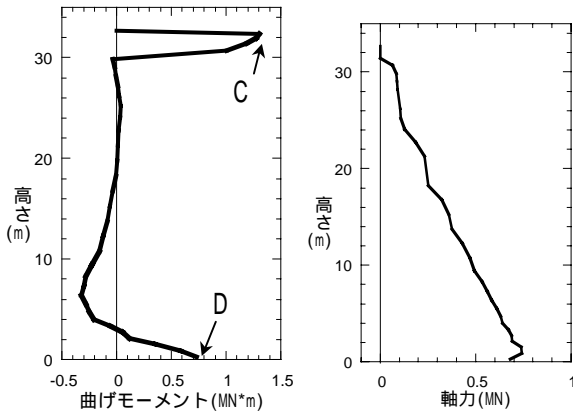


Fig. 16 PC 防液堤の断面力分布
Distributions of Section Force at PC Outer Tank

震性が確保されることになる。

4.2 PC 防液堤断面力分布特性と断面力照査結果

Fig.15にせん断力分布と、最大せん断力発生位置におけるせん断耐力を示す。PC 防液堤のせん断力は最下層が大きくなっている。この位置でのせん断耐力比は26%であり、十分な耐震安全性を有している。

Fig.16に鉛直方向の曲げモーメント分布と軸力相関分布を示す。せん断力と同様に最下層Dに大きな断面力が発生する。上部Cの大きな曲げモーメントはPC 緊張力によるものである。Fig.17に示す軸力～曲げモーメント相関限界曲線と地震時断面力の関係から、いずれの部位も耐震性を確保できるが、最も耐力上厳しいのは防液堤上部であることがわかる。

5. まとめ

既存のPC LNG貯槽を対象に、L2地震動に対する耐震性を種々の地震応答解析法を用いて照査し、それら解析手法の適用性に関する検討を行なった。

その結果、

- 1) 解析方法の選択と安全性評価：解析法が詳細になるに従い予測精度が上昇するが、特に貯槽杭基礎の場合、3次元性を考慮した手法によって断面力や応答加速度の値は大きくなり安全側の設計になる。
- 2) 地盤のモデル化：自由地盤の等価剛性を用いるよ

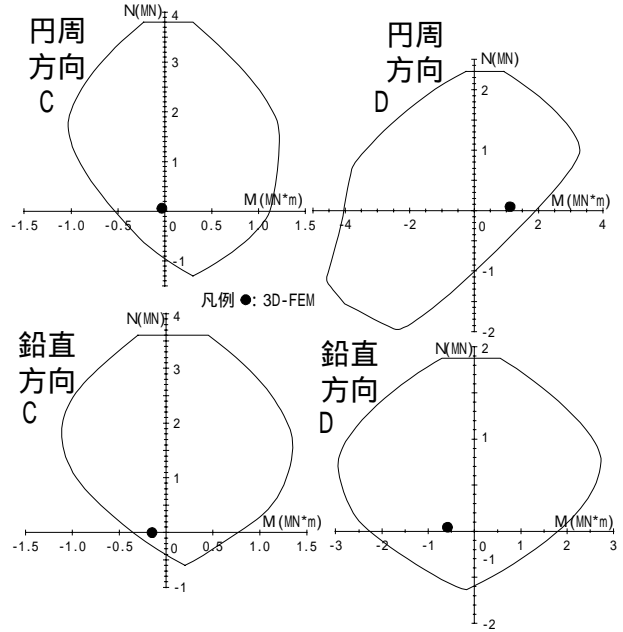


Fig. 17 PC 防液堤の軸力～曲げモーメント限界関係
Interaction Curves of Limit Design at PC Outer Tank

り地盤構造物相互作用系モデルで地盤の非線形性を直接考慮した方が断面力や応答加速度の値は大きくなる。

- 3) 断面力照査：3次元解析等によって求められたL2地震時断面力は、限界状態設計法によって照査することで合理的に耐震性が評価できる。
- 4) 平成3年度版土木学会コンクリート示方書等の従来指針に従い設計されたPC LNGタンクにおいてものL2地震動に対する耐震性安全性は確認できた。

謝辞

この研究をまとめるにあたり、株式会社大阪ガス御担当各位には有益なご助言を頂いたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会編：LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針，コンクリートライブラリー98，（1996）
- 2) 土質工学会編：構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム発表論文集，（1996）
- 3) 土木学会編：コンクリート標準示方書[平成3年版](設計編)，（1991）
- 4) 日本ガス協会：製造設備等耐震設計指針[平成13年版]，（2001）
- 5) 松田隆，後藤洋三，徳永正博：大規模群杭基礎の地震応答特性の解析，大林組技術研究所所報 No.48，pp.31-36，（1994）
- 6) 土質工学会編：構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム発表論文集，pp.29-31，（1990）