

断層解析入力地震動による内陸堆積盆地内の 地下式LNGタンクの動的挙動

岡井大八¹・小川安雄¹・藤田裕介¹・目堅智久¹・江尻譲嗣²・松田 隆²・香川敬生³

1正会員 大阪ガス株式会社 技術部(〒541-0046大阪市中央区平野町4-1-2)

2正会員 株式会社大林組 技術研究所(〒204-8558東京都清瀬市下清戸4-640)

3正会員 財団法人 地域地盤環境研究所(〒550-0012大阪市西区立売堀4-3-2)

内陸に立地するLNG地下式貯槽の地震時挙動の把握を目的に、数値解析による検討を行った。その特徴は、断層破壊を考慮した検討用地震動に基づき、地盤と構造物の相互作用を考慮した応答解析によって定量的な検討を行ったことである。西日本に実在する活断層を想定して、その近傍の検討対象地点の直下に存在する地震基盤の地震動を統計的波形合成法により作成した。まず、地震基盤地震動を入力とした1次元重複反射理論により深層岩盤の地震応答解析を行い、内陸堆積盆地を対象とした工学的基盤の入力地震動を設定した。その後、当入力地震動に対し、堆積盆地の不整形性の影響、非線形増幅特性、構造物との相互作用、構造物に発生する地震時応力など、LNG地下式タンクの動的挙動における特徴を検討した。

Key Words: underground LNG storage tank, seismic design, stochastic synthesis method, basin, response analysis

1. はじめに

これまで、大型の地下式LNGタンクは、臨海部の埋立地盤を中心に建設されてきたが、この形式を内陸地盤で立地させる場合、内陸直下型の地震動に対する耐震上の安全性確認が必要となる。この場合、検討入力地震動の設定や臨海部とは異なる盆地状地形などの不整形性の影響の把握が重要である。本研究では、西日本に実在する活断層を想定して、検討対象地点直下(断層線最短距離で約2km)の地震基盤の地震動を統計的波形合成法により作成し、周辺地盤の不整形性の影響を検討した上で、地盤～構造物一体解析により、構造物に発生する地震時応力など、LNG地下式タンクの動的挙動における特徴を明確にした。

2. 入力地震動の設定

敦賀断層は、走向 27.8° 、断層長さ21km、幅20km、傾斜90度の右横ずれ断層²⁾とし既往知見³⁾に従って断層面積より地震規模を設定し、 $M_0=8.2 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ [式⁴⁾ $\log M_0 (\text{dyne} \cdot \text{cm})=1.174M+17.72$ で $M=7.0$]を与えた。兵庫県南部地震の解析値⁵⁾を参考に平均応力降下量を80bar、アスぺリティ部を160barとした。アスぺリティ面積比は約24%とした。また、破壊伝播速度2.8km/s、立ち上がりは時間0.88秒とした。断層幅は地殻内の地震発生層の厚さ⁶⁾20kmとした。破壊伝播速度は、地殻深部のS波速度の8割で経験的な関係から設定した。伝播経路の地殻深部の物性値は、 $V_p=6.1 \text{km/s}$,

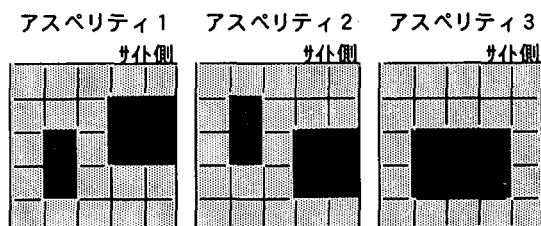


図-1 アスぺリティ配置図

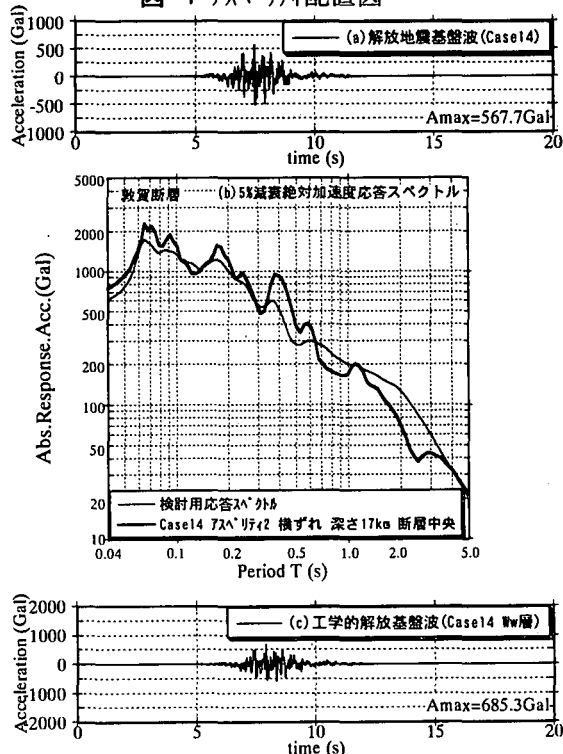


図-2 入力地震動

$V_s=3.5\text{km/s}$, 密度 2.8tf/m^3 とした。減衰は北陸地方での研究例⁷⁾を参照して $Q=110f^{0.70}$ とした。サイト近傍の深層地盤構造・物性は、地震基盤と地震が発生する地殻深部とに分け、それぞれの $V_p(\text{km/s})$, $V_s(\text{km/s})$, 密度(tf/m^3), Q 値, 層厚(km)を、 $5.50, 3.20, 2.7, 50, 1.0$ ならびに $6.10, 3.50, 2.8, 110$, 無限大に設定した。震源断層の上端は地殻深部の上面より 1km の深さに設定した。ただし、震源断層の破壊パターンについては以下の3点に関するパラメトリクスデータにより決定した。1)アスペリティ β 3通り(図1)、2)破壊開始点:深さ(8, 17km), 水平方向(サイト逆側, 中央, サイト側)6通り、3)すべり方向:純粋横ずれ, 斜め 30 度ずれ(サイトに突き上げる向き)の2通り以上に従い、36ケースの解放地震基盤の地震動を算定した。水平方向の解放地震基盤の地震動は、NSとEW成分の主軸方向合成波とした。主軸方向は、合成波の加速度振幅のRMS値が最大となる方向である。大阪府の γ - γ 毎の想定標準地震動の設定⁸⁾では、平均的な断層パラメータを用いて γ - γ 内で地震動強度が最大となる地点の地震動評価を行っている。以下これに従い、具体的には36ケースの解放地震基盤の主軸方向合成波の5%減衰絶対加速度応答スペクトルを算定し、対数平均による応答スペクトルを求めた。そして、この検討用応答スペクトルに最も近い解放地震基盤の地震動としてcase14(アスペリティ2, 純粋横ずれ, 深さ17km, 破壊開始は点断層中央)を選定した。図-2(a), (b)には、主軸方向合成波の加速度波形と5%減衰絶対加速度応答スペクトルを示す。最大加速度は、約 570Gal となる。工学的解放基盤の地震動は、解放地震基盤の地震動を入力とした岩盤の1次元線形重複反射解析法による地震応答解析により評価した。工学的基盤はWw層(図-3)とした。図-2(c)には工学的解放基盤における加速度波形を示す。

3. 堆積盆地の応答特性

地下タンクは、図-3のA点に設置することを想定する。堆積盆地の不整形性により地震動が増幅される可能性が有るため2次元FEMによる非線形地盤応答解析(FLUSH)により検討を行った。図-3には、堆積盆地の地盤構成を示す。堆積盆地の幅は 650m 、表層地盤の岩盤までの深さは最深部で 93m である。地盤構成は、表層から客土(S), 圧密改良後高有機質土(P), 粘土(C), 砂礫(G), 岩盤(WmとWw)の6層系となる。表-1には地盤物性の一覧を示す。(S), (P), (C), (G)の4層については、動的変形特性を与へ等価線形化法により非線形応答を考慮した。岩盤はすべて線形とした。工学的解放基盤の地震動は、最下層の岩盤(Ww)から入力した。2次元FEMの解析行列の要素数、節点数はそれぞれ19161, 19460である。側方境界は両側とも β -伝達境界とし底部は粘性境界

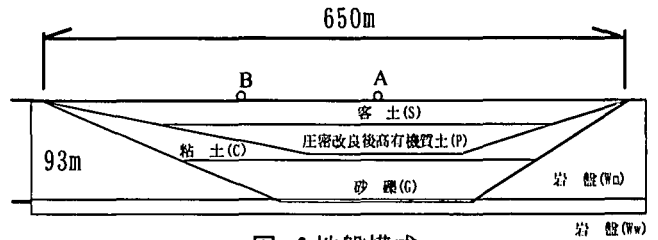


図-3 地盤構成

表-1 地盤物性

層厚 H(m)	土質名	質量密度 (t/m ³)	S波速度 Vs (m/s)	動的ポアソン比
23.0	客土(Sand)	2.1	200	0.49
24.0	圧密改良後高有機質土(Peal)	1.1	90	0.49
10.0	粘土(Clay)	2.0	200	0.49
36.0	砂礫(Gravel)	2.0	420	0.47
10.0	岩盤(Wm)	2.3	1,000	0.43
(5.0)	岩盤(Ww)	2.6	1,500	0.42
-	丹波層群(F)	2.7	2,300	0.35

とした。深さ方向の応答特性は図-3中のAとBの位置で検討した。Aは堆積盆地のほぼ中央の表層地盤が最深部となる位置に有り、Bは左側の基盤傾斜部に掛かった位置に有る。図-4には、堆積盆地の地表面水平方向応答値の地表面に沿った分布を示す。応答値は、(a)最大加速度、(b)最大速度、(c)最大変位、(d)SI値である。(c)を除く応答値は両側の基盤傾斜部が基盤平坦部に比べて大きい傾向を示す。Bの応答値は、(c)を除きAより少し大きくなる。図-5には、2次元解析によるA, B地点の地盤応答の地中分布の比較を示す。地盤応答は、(a)工学的基盤に対する最大水平相対変位、(b)最大せん断ひずみである。表層近傍の(b)は、Bがわずかに大きい、(a)の相対変位は、Aが大きくなる。図-6には、2次元解析と1次元解析(SHAKE)

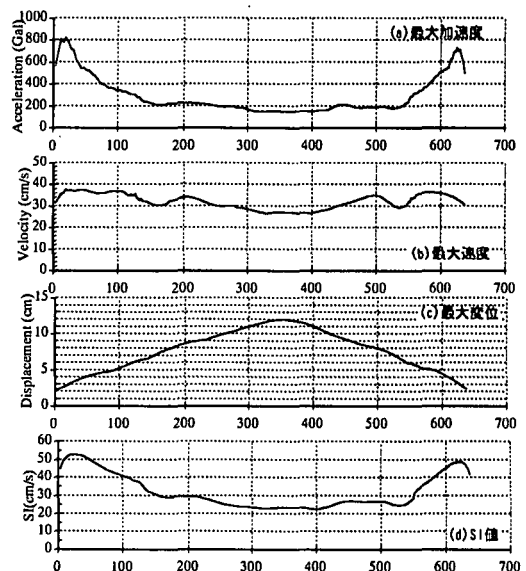


図-4 応答値の水平方向分布

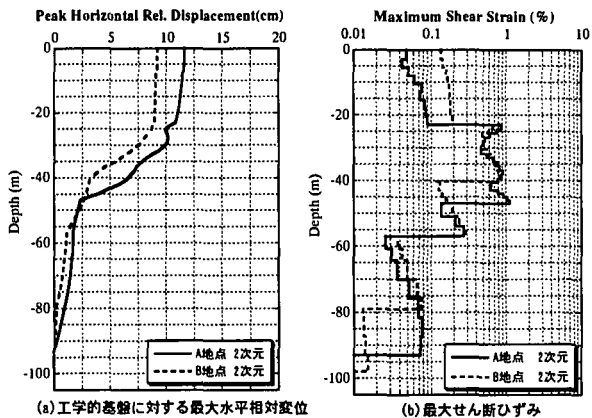


図-5 2次元応答値の比較

によるA地点の地盤応答の地中分布の比較を示す。1次元解析は、A地点の地盤構造を水平成層地盤として解析したもので不整形性の影響は考慮されていない。解析には、等価線形化法により地盤の非線形応答を考慮した1次元重複反射解析法を用いた。2次元と1次元解析の地盤応答の内、(b)はほぼ同じで、(a)は1次元の方が表層付近で大きくなっている。よって、A地点では、ほぼ水平成層地盤として応答していることがわかる。

4. 地下式LNGタンクの地震応答解析モデル

動的応答解析には軸対称FEMを用い、地盤モデルには、地盤の成層構成¹¹⁾を考慮して、1次元の重複反射解析結果による等価剛性モデルを採用した。解析モデルを図-7に、地盤モデルの物性値を表-2に示す。タンクの容量は180,000klであり、側壁の厚さは3.0m、底版の厚さ9.1mである。設計地震動は、2節の工学的解放基盤波を入力とした岩盤応答解析により $V_s=1000\text{m/sec}$ の解析用岩盤の波形を求めそこを基盤として入力した。

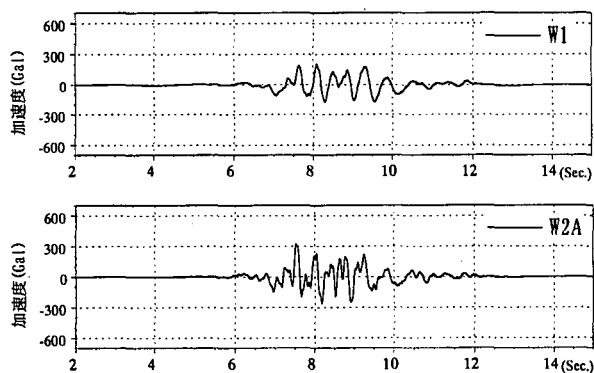


図-8 側壁加速度 (W1: 頂部、W2: 底版位置)

表-2 地盤物性値

GL (m)	土質	重量 (kN/m ³)	Vs (m/sec)	G0 (MPa)
-23	客土	21	200	85.7
-48	高有機質土	11	90	9.2
-60	粘土	20	200	81.6
-100	砂礫	20	420	360.0

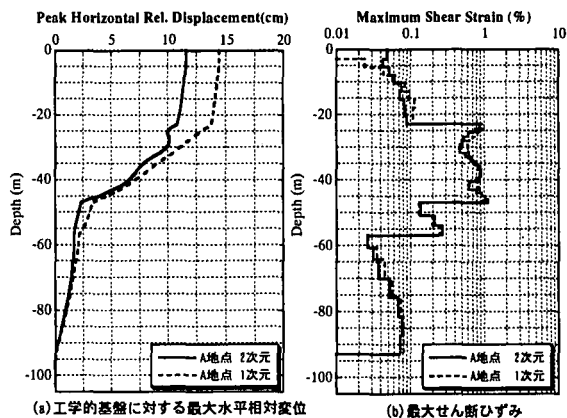


図-6 1次元と2次元応答値の比較

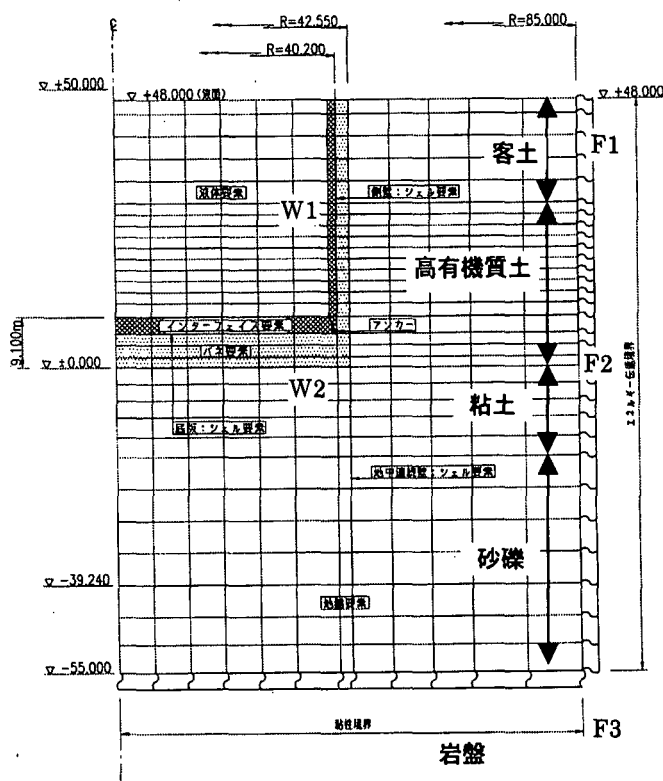


図-7 検討モデル

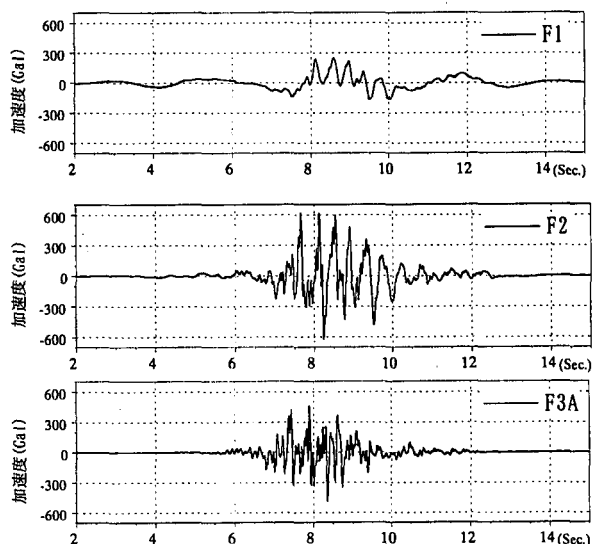


図-9 地盤加速度 (F1: 地表、F2: 底版、F3: 入力)

5. 地下式LNGタンクの応答解析結果

図-8にタンク側壁の、図-9に自由地盤の応答加速度波形を示す。入力加速度(F3)の最大値は500Gal(発生時刻8.3秒)であるのに対して、タンク底版部(W2)の最大応答加速度は約300Gal(発生時刻7.5秒)と減少している。これは、タンク底版以深での応答が減衰するためであり、軟弱地盤特有の応答現象が生じていると考えられる。タンク側壁頂部(W1)の最大応答加速度は約200Galで、さらに減衰しており、その波形も長周期の正弦波的なものとなっている。一方、自由地盤の応答加速度波形を見ると、地表面付近の波形(F1)は長周期で振幅の小さいものになっているが、タンク底版と同深度の波形(F2)はタンク底版のもの(W2)より短周期成分を含んでおり、地盤から躯体への加速度入力は複雑な状況を示していると考えられる。図-10に自由地盤と側壁の最大加速度分布を示す。一般的に自由地盤の応答が大きくなっており(GL-10~20mを除く)、特に、GL-28m以深の高有機質土層での加速度振幅は、600Gal程度の大きな値を示している。これに対してタンクの応答は、底版部から大きく減衰し、増幅の傾向は見られない。図-11に底版上部の加速度最大時の応答変位分布を、図-12に側壁頂部の加速度最大時の応答変位分布を示す。自由地盤の変位増幅は高有機質土層で顕著になっており、側壁の変位は、地盤の変形に抵抗しながらもこれに追随した形になっている。地盤に発生するせん断ひずみは、側壁周辺の地盤で比較的大きくなるが、最大でも 1.5×10^{-3} のレベルであり、1次元の重複反射解析による

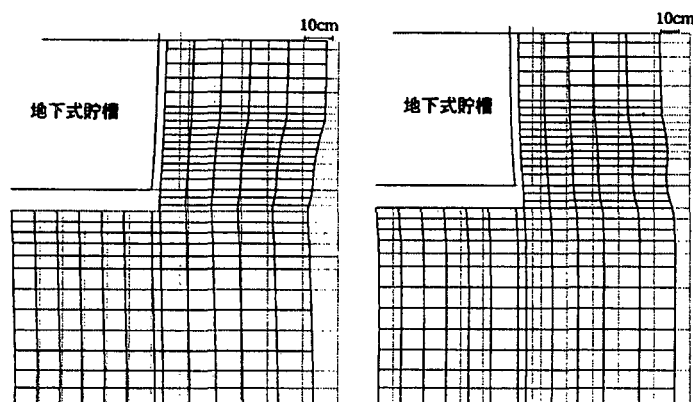


図-11 変位分布(底部加速度最大) 図-12 変位分布(頂部加速度最大)

参考文献

1) 入倉・香川・関口: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会講演予稿集, 1997年度秋季大会, B25, 1997. 2) 通産省工業技術院地質調査所: 近畿三角地帯の主要活断層の先行調査報告No. 2, 敦賀断層系地形地質調査, 地質調査所研究資料集, No. 269, 1997. 3) Paul Somerville・Kojiro Irikura・Robert Graves・Sumio Sawada・David Wald・Norman Abrahamson, Yoshinori Iwasaki, Takao Kagawa, Nancy Smith, Akira Kowada: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground motion, Seismological Research Letters, Vol. 70, No. 1, 59-80, 1999. 4) 武村雅之: 日本及びその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震, Vol. 43, 257-265, 1990. 5)

等価剛性の適用範囲内であった。図-13に側壁の周方向および軸方向の最大軸(圧縮)ひずみ分布を示す。一般的に周方向の軸ひずみが鉛直方向の軸ひずみを上回っており、ともに側壁下端部で最大値となる。最大軸ひずみは周方向の 3.0×10^{-4} であり、これは、コンクリートの終局ひずみ 3.5×10^{-3} ($f_{ck} = 30\text{N/mm}^2$)を下回る。

6. おわりに

内陸地に計画された地下式LNGタンクの、内陸直下型地震動に対する動的応答解析を実施した結果、1) 側壁の応答加速度は、軟弱地盤の減衰作用により振幅の小さい長周期的なものとなる: 2) 自由地盤の変位増幅は軟弱地盤層において顕著なものになり、側壁の変位はこれに抵抗しながらも追随した形を示す: などがわかった。

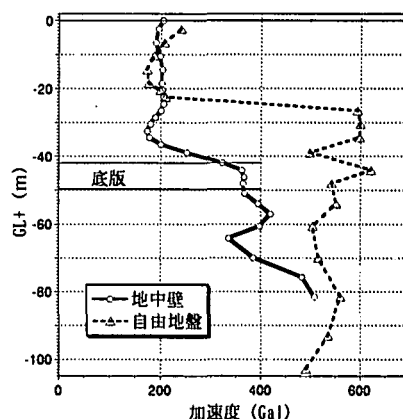


図-10 最大加速度分布

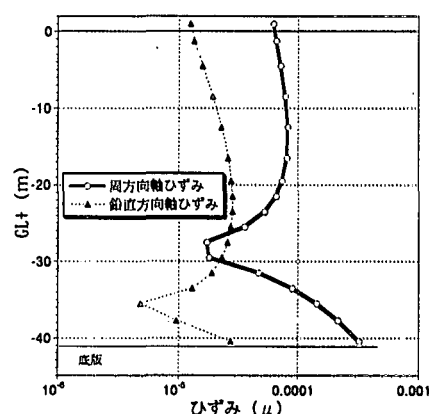


図-13 側壁ひずみ分布

釜江・入倉: 1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 500, 29-36, 1997. 6) 伊藤・中村: 西南日本内帯における地震発生層の厚さ変化と内陸大地震, 京都大学防災研究所年報, B-1, 1998. 7) Akamatsu, J.: Seismic observation at the Sumiyama seismic station (2) On the nature of attenuation and spectra of coda parts of local earthquakes, Annual Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 23B-1, 107-114, 1980. 8) 大阪府土木部: 大阪府土木構造物耐震対策委員会報告書, 1997. 3 10) 小山和夫他: LNG地下式貯槽における動土圧データのシミュレーション解析, 第48回土木学会年講 11) 岡井大八他: 敦賀断層の地震動設定と堆積盆地の応答特性, 第56回土木学会年講, 第1部門