

# 地上式 LNG タンクと周辺地盤の地震観測結果

西崎丈能<sup>1</sup>・牛田智樹<sup>1</sup>・松田隆<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 大阪ガス(株) 技術部 土木建築技術チーム (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株)大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

18万kLPCLNGタンク及び周辺地盤に地震観測システムが設置され、2000年鳥取県西部地震での記録が観測された。地震計は、内槽、基礎スラブ、防液堤及び周辺地盤に設置されているほか、躯体にはひずみ計を設置することで地震時断面力の評価を可能にした。特に、地盤の加速度に関してはGL-206mの深層での観測が行われている。今回の観測の結果、基礎スラブ上の記録からは水平及び鉛直成分ともに3Hz以下が主要であること、有効入力動は6Hz以下で顕著に低減していること、杭のひずみは基礎の加速度と地盤のひずみに支配されること、地震時杭ひずみは曲げ成分が卓越すること、などがわかった。

**Key Words:** LNG storage tank, earthquake observation, group pile, ground shear strain

## 1. はじめに

大阪ガスでは、既に7.5万kl金属二重殻の地上式LNGタンクの地震観測を行っており、観測結果の分析を実施している<sup>1),2)</sup>。1995年兵庫県南部地震での経験から、入力地震動を設定する上での深層地盤のモデル化と、耐震安全性を評価する上での構造物の力学的なモデル化の重要性が指摘された。そこで、大型の18万klのPCLNGタンクを大阪府高石市の臨海部に建設する際、GL-206mの深層にいたる地盤アレー観測を含む大型の18万klPCLNGタンクの地震観測システムが設置されることになった。2000年7月から観測を開始し、これまで比較的小さな地震での記録が取れている。本論文は、そのうち最大の加速

度振幅を示した2000年10月6日発生鳥取県西部地震での記録の分析結果を報告するものである。ただし、この時は空液状態であり、液体の影響はない状態である。主な検討は、地盤及びタンクの増幅特性、杭ひずみ発生要因、有効入力動特性などである。

## 2. 地震観測方法

地震観測(図-1)を実施しているタンクは、最大貯液量18万kl、内径82m、最大液深34mのPC防液堤形式の地上式タンクである。基礎杭は、1299本の鋼管杭(φ800mm、l=35m)で構成されている。

地震計は、内槽、基礎スラブ、防液堤及び周辺地盤に3成分のサーボ式加速度計が設置されている(図

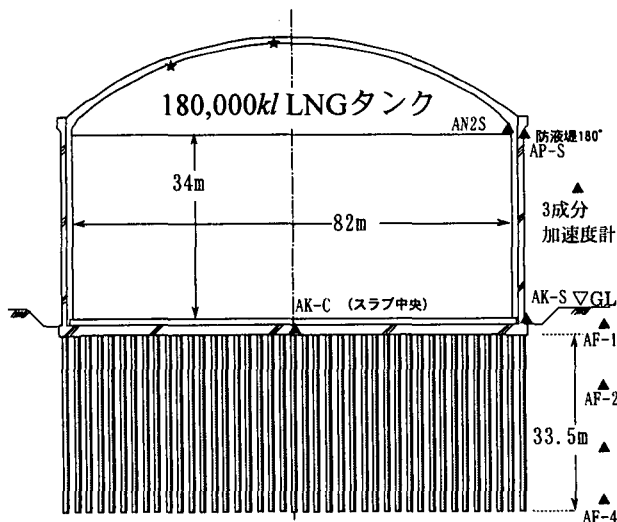


図-1 観測対象の地上式 LNG タンクの断面

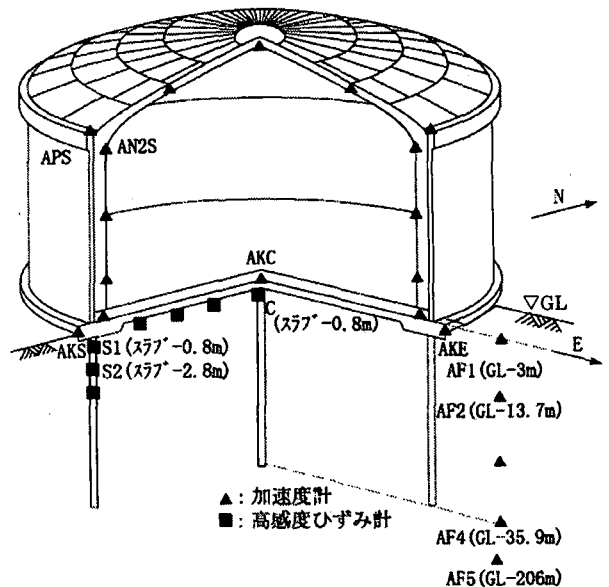


図-2 観測計器配置

-2)。地盤の加速度計は、基礎スラブ上面位置 (AF1:GL-3m)、地層境界 (AF2:C13.7m, AF3:GL-24.7m)、杭基礎下端位置 (AF4:GL-35.9m)、深層 (AF5:GL-205.6m) に、タンクから約20m離し設置している。このうちAF1は、タンク周辺の管理通路用の盛土内に設置されているが、深度は基礎スラブの位置であり、ここでは地表面として表現する。

スラブ下-5m以浅の杭ひずみ計測には高感度 (直流差動トランス型、最小分解能 $0.01\mu$ ) を用い、杭頭付近の平面分布と深度方向分布が把握できるように配置されている。深層の杭ひずみ計は杭に設置してから打設することから耐衝撃性に優れた (交流差動トランス型、最小分解能 $1\mu$ ) を用い、地層境界部の影響を把握できるように配置した。各位置で杭ひずみ計測は、南北方向の曲げ成分が抽出できるよう、杭の内部の対向する位置に2個の計器を設置した。

基礎スラブの鉄筋応力の計測は、大規模平板構造と杭の相互作用を把握することが目的で、曲げ、軸方向、せん断の各成分が抽出できる。ただし、今回の地震では分解能の関係から分析はできなかった。

### 3. 周辺地盤震動

図-3に地表面 (AF-1) と基礎GL-206m (AF-5) の観測波形を示す。(a) 水平最大加速度は、深層12.3Gal、地表23.1Galであり、鉛直動を受信してから約25秒後に最大値が記録されている。これは、震央距離が196kmとかなり遠方のためである。主要動 (図中のA区間) の終了後、表面波と考えられる成分の影響で徐々に長周期化しており、特に90秒 (同B区間) 付近からが顕著である。鉛直 (Z) 最大加速度は、深層で3.8Gal、地表で6.8Galであり、初期動の短周期成分が卓越している時間帯の増幅が大きいことが特徴である。地表面の変位は加速度記録を2回積分することで求めているが、最大6cmであり105秒のB区間で生じている。浅層の地盤ひずみはAF1とAF2の変位差から求めているが、最大 $85\mu$ でありやはり105秒のB区間で生じている。ただし、主要動 (A) では加速度波形と同様に短周期成分があることが特徴的である。

図-4に示す、基礎スラブ上 (AKC) の主要動A区間におけるフーリエスペクトルからは、水平及び鉛直成分ともに3Hz以下が卓越している。特に、0.5Hzに大きな成分が有るがこれは後述する、工学的基礎から上の深層地盤の増幅特性によるものと考えられる。

図-5に、基礎GL-206m (AF5) に対する地表面 (AF1) 及び杭下端部 (AF4) の伝達関数を示す。図から、0.5Hzのピークは、杭下端部 (AF4) と地表面 (AF1) の両者に有ることから、このピークは深層地盤での増

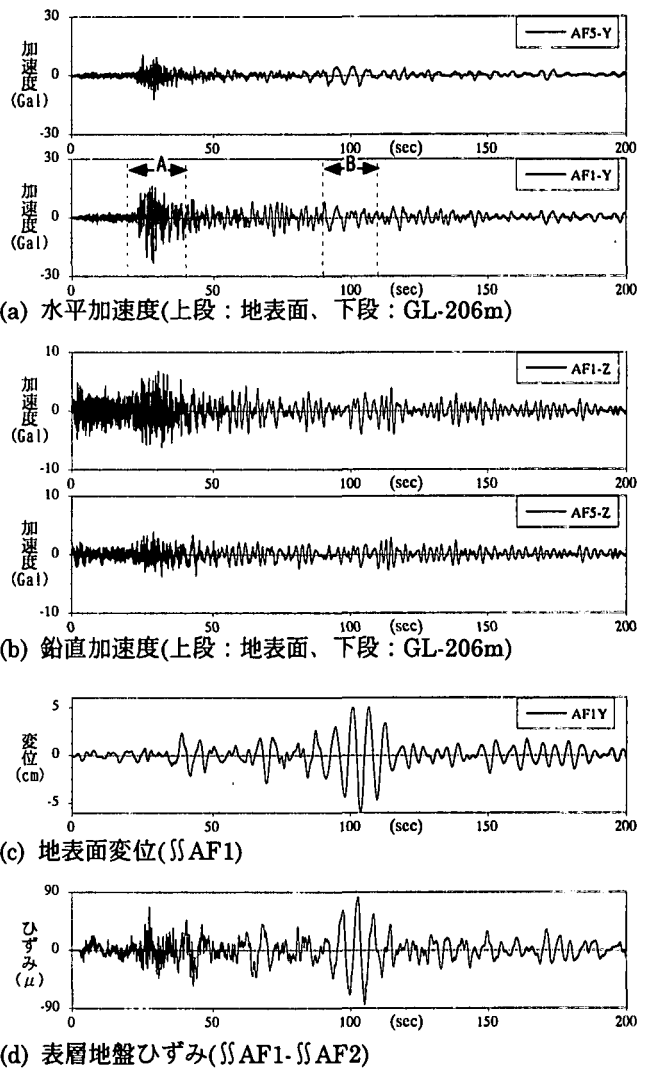


図-3 地盤の加速度・変位・せん断ひずみ

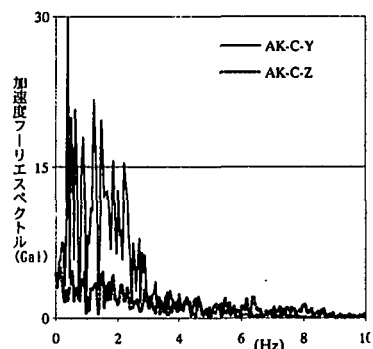


図-4 基礎スラブの応答波形の振動数成分

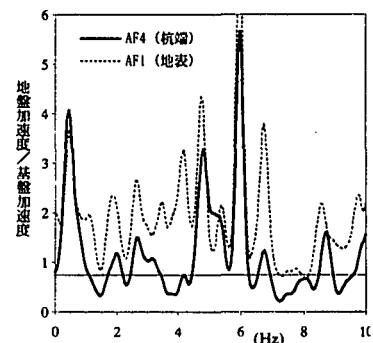


図-5 地盤の増幅率 (伝達関数)

幅によるものと考えられる。これに対して、0.9、1.8、2.6Hzなどのピークは、地表面(AF1)の方が大きく、杭が設置されている区間での増幅によるものと考えられる。実際のタンクの耐震検討に關与する周辺地盤の振動特性は、後者のピークの方が重要になる。

#### 4. 杭ひずみと地盤震動との相関

図-6に中央部杭(C)と南側端部杭(S)の杭頭部及び杭頭-1mS部の曲げと軸成分に關するひずみ波形を示す。端部杭は地盤ひずみと相関するような位相特性を有し、108秒のB区間で最大を示している。これに対して、中央部杭は加速度波形の位相と類似しており、端部杭ほど表面波の影響を受けないと考えられる。端部杭の主要成分は曲げであり、ここでは図示していないが中央部杭の軸成分は出ていない。これは、軸成分はタンクのロッキングによって生じており、上下動の影響は少ないためと考えられる。ただし、今回の計測時は空液であり重量が小さい状態であったため、上部構造物の慣性力が大きく影響するロッキング振動が小さかったことが考えられる。

図-7に、A・B区間の加速度およびB区間の地盤ひずみと杭ひずみとの相関を示す。主要動部A区間ではスラブ加速度との相関が、表面波卓越B区間では周辺地盤ひずみとの相関がみられる。このことが示唆することは、加速度が卓越する場合と地盤の変形が卓越する場合とでは、杭頭部の変形あるいは断面力の発生要因が異なり、上部工の反力としての加速度と地盤変形の両者を考慮する必要があることになる。杭ひずみの最大値の平面分布に關しては、端部を基準にすると、中央部から半径の3/4の範囲で35~37%であった。また、深度方向分布に關しては杭頭(接合部から-0.8m)を基準にすると、1m深度が増す毎に、基準の42%, 21%, 18%, 3%に低下していった。

#### 5. タンクと防液堤の増幅特性

図-8に地表面(AF1)に対する基礎スラブ(AKC)の伝達関数を示す。これは、一般に有効入力動を示すもので、6Hz以下で顕著に低減している。1.5、2.7、6.7Hzのピークは構造物の慣性力の影響によるものと考えられる。

図-9に、基礎スラブ(AKC:中央、AKE:端部東側、AKS:端部南側)の観測波形を示す。水平(Y)加速度は、AKC:中央がやや小さいもの、観測位置によらずほぼ同一の動きを示している。これに対して、鉛直(Z)加速度は、振幅、位相ともに中心部と端部では異なる

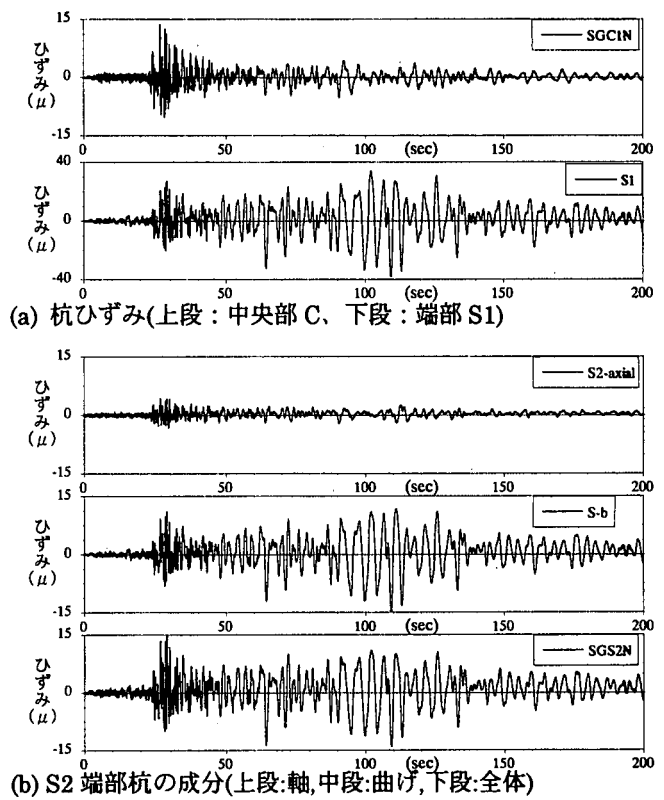


図-6 杭のひずみ

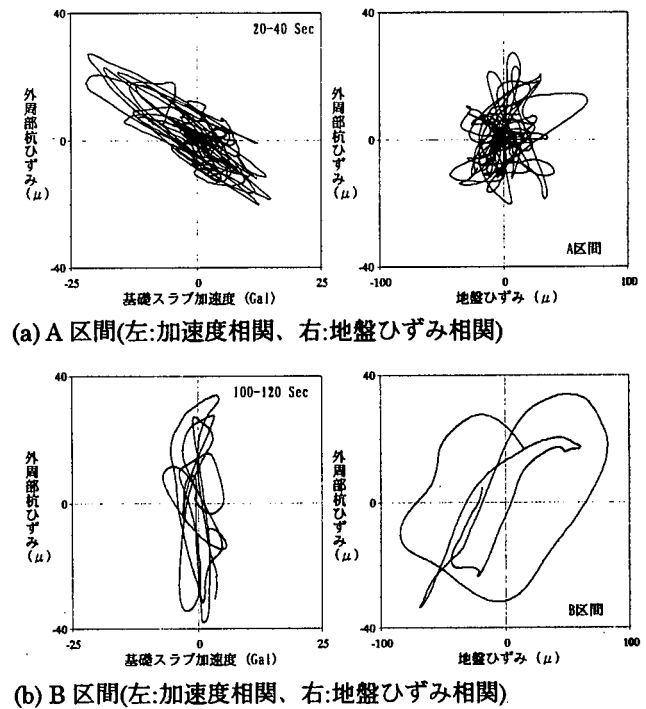


図-7 杭のひずみに關する相関關係

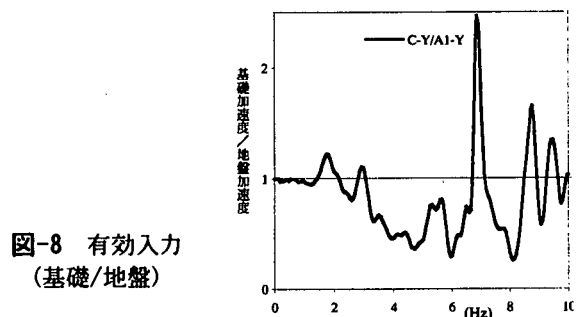


図-8 有効入力 (基礎/地盤)

る。中央部と端部が異なるのは、基礎のロッキングによる上下動が端部では生じるためである。ただし、平面的に直行する位置にあるAKEとAKSで異なるのは、基礎スラブが必ずしも剛体的に振動していないためと考えられる。

図-10に、基礎スラブ(AKS)と防液堤頂部(APS)の観測波形を示す。防液堤頂部及び基礎スラブの最大水平加速度はそれぞれ28.6Galと21.9Galで、最大加速度での倍率は1.3になる。また波形図から、基礎と防液堤は同位相であることと、大きな増幅は示さないことがわかる。図-11は、基礎スラブ(AKS)に対する防液堤頂部(APS)の伝達関数である。3.8、4.9Hzにピークがあり、応答倍率は6を超えている。ただし、今回の地震に当該振動数成分が小さいため、大きな増幅を示さなかったものと考えられる。

図-12に内槽肩部(AN2S)とほぼ同一高さの防液堤頂部(APS)の加速度波形を、図-13に(APS)に対する内槽肩部(AN2S)の振動数領域における比をそれぞれ示す。これらより、内槽の振動とその外部の防液堤の振動は、4Hz及び7.1Hzをピークとする内槽の共振振動数と考えられる成分を除きほぼ一致している。図-13で4.9Hz付近の低下は防液堤の共振振動数にあたり、振動エネルギーの分散が行われていると考えられる。ただし、これはLNGが入っていない状態での結果であり、特に、内槽と液体の連成振動の影響は今後の観測記録の分析による。

## 6. おわりに

本報告では、基礎、防液堤、内槽及び地盤の応答加速度と杭のひずみに関してまとめた。当該地盤特有以外の一般的な分析結果から、

- 1) 杭のひずみは上部構造物の加速度と周辺地盤のせん断ひずみの相関で発生し、それらが卓越する時刻は異なる。
  - 2) 内部杭と外周部杭の地震時ひずみの特性は異なる。
  - 3) 防液堤の加速度増幅は小さく1.3倍程度である。
  - 4) 内槽と外周防液堤の最大加速度応答に関しては大きな差は生じていない。
- などが分かった。

今後、近傍地震、液深状態、地盤の非線形性の影響、などに関してデータを蓄積し、地上式LNGタンクの地震時挙動に関する分析を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 岡井大八ほか：地上式LNG貯槽の多点強震観測記録の分析とその考察、土木学会論文集(投稿中)

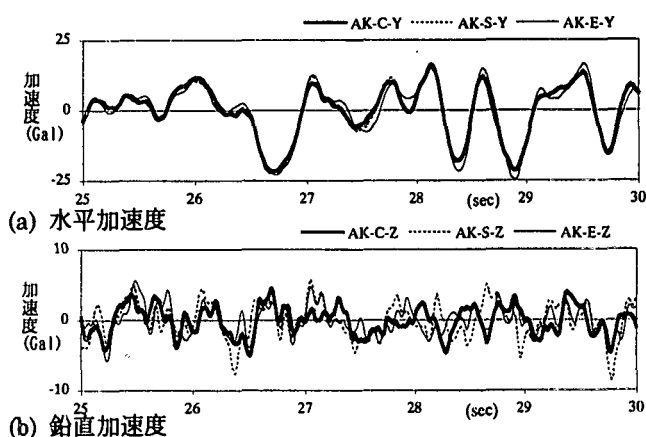


図-9 基礎スラブ (AKC:中央, AKE:東端, AKS:南端)

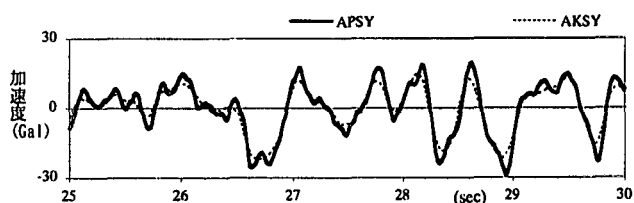


図-10 防液堤 (APS:頂部, AKS:底部スラブ上)

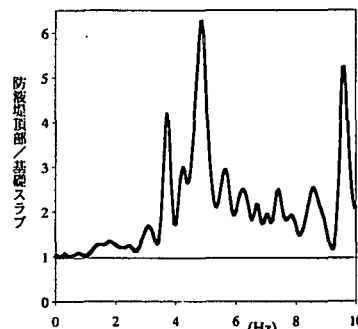


図-11 防液堤の伝達関数 (APS:頂部/AKS:底部)

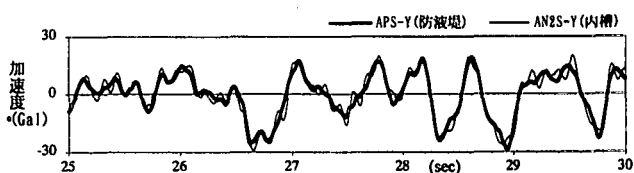


図-12 防液堤と内槽の比較 (APS:防液堤, AN2S:内槽)

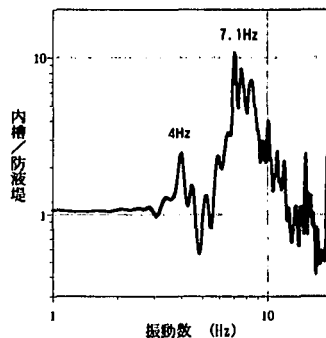


図-13 内槽の防液堤に対する倍率 (AN2S/APS)

- 2) 中島一夫ほか：群杭基礎を有するLNG地上貯槽の動的相互作用効果について、第47回土木学会年次講演会1、1992年