

(17) LNG地下タンクの地震時挙動観測について

東京電力(株) 正員 鈴木 英世
同 上 正員 宮本 幸始

1 まえがき

LNG(液化天然ガス)の貯蔵用タンクに地下式が選ばれる理由として、耐震性に関して高い信頼感が得られることがあげられている。筆者らは地下タンクの地震時挙動について検討するため、弾性材料を用いた振動台実験(1)、並びに屋外地盤中に起振機を設置した水平方向伝播波動によるRCタンク模型の振動実験(2)などを行い、SH波による挙動と表面波のような水平方向伝播波動による挙動の再現実験を試み、それらの比較検討(3)を行ってきた。また、上記2種のタンクの地震時挙動は設計指針(4)の中にも両波動を考慮するよう解説されている。本報文では、基盤入力波形のタイプの異なる2地震によるタンクへ地盤系の実機観測データについて考察した結果を述べる。

2 観測装置と地下タンクの概要

本報文で観測対象とした地下タンクは千葉県東京湾岸に建設された袖ヶ浦火力発電所構内の6・7号タンクである。タンクの概要と地震計の配置は図-1に示すとおりであり、タンク躯体は内径64.3m、側壁厚は2~2.5m、底板厚は5.5mの鉄筋コンクリートの構造部材を有している。この図に示すとおり、2基タンクは連続した盛土で覆れているが、図中には天井部並びに法面部の点検自動車用道路など詳細部は省略されている。

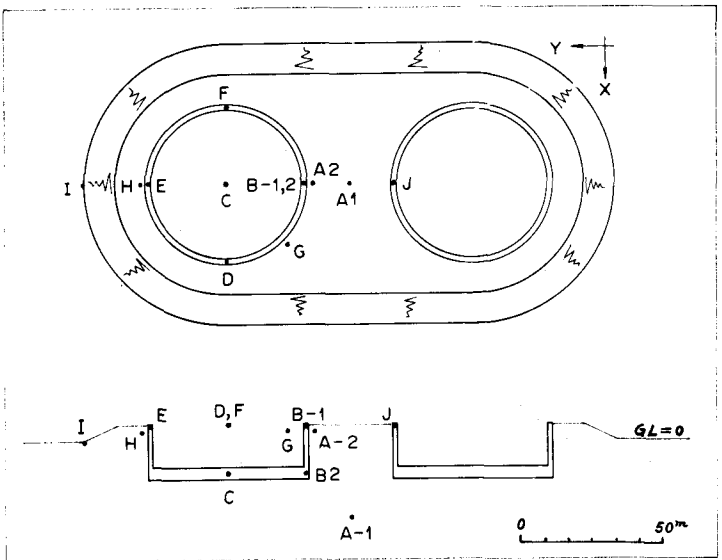


図-1 タンク概要と加速度計配置図

周辺地盤部は図-2に示すような地盤構成であるが、法尻周辺地盤と盛土部は、鉋さい混入と入念な展圧締固めによって、 $E = 2500 \text{ Kg/cm}^2$ 程度に施工管理されている。周辺地盤の詳細なボーリング調査によると地層は、ほぼ水平に成層しているとみなされる。

観測点は図-1、表-1に示すとおり、12点の観測点にそれぞれ1~3成分の加速度計を配置している。換振器にはサーボ型を用いているので、0.2~30Hzの範囲では10%以内の平坦な出力特性を有している。観測信号は、3秒のデジタルメモリー方式の遅延装置を経て24チャンネルのアナログデータレコーダに記録する。また感度切替装置も設置し強震時のスケールアウトを防いでいる。なお、解析にあたってはA/Dコンバータを直結するミニコンによってデータ処理を行った。

| 標高 DL(m) -(GL0 ^m) | SOIL | γ (t/m^3) | E_0 (kg/cm^2) | G_0 (kg/cm^2) |
|----------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 5 | F _s | 1.8 | 1,100 | 380 |
| 2 | F _c | 1.6 | 930 | 320 |
| 0 | A _s | 1.9 | 1,700 | 590 |
| -6 | D _s | 1.9 | 7,000 | 2,400 |
| -10 | D _c | 1.7 | 3,500 | 1,200 |
| -14 | D _s | 1.8 | 4,900 | 1,700 |
| -16 | D _c | 1.8 | 8,100 | 2,800 |
| -20 | D _s | 1.9 | 6,100 | 2,100 |
| -26 | | | | |

図-2 周辺部の地盤構成

3 観測結果の概要と考察

現在までに得られた主な観測記録の一覧は表一に示すとおりである。この表に示すように震央距離とマグニチュードの異なる多数の記録があるが、中でも伊豆半島東方沖の群発地震のひとつ(1980-6-29)と千葉県中部(1980-9-25)の2記録は、前者が比較的浅発で遠距離型であるのに対し後者は震源が深く直下型に属することにそれぞれの特色がある。

表一には上記両地震における全測点の最大加速度を示してある。基盤の最大加速度は千葉中部によるもののはるかに大きく、またこの地震時はX成分が大きい。基盤各成分に対する各位置での応答倍率は、加速度規模の大きい千葉中部地震の方が大きく歪依存を考慮すると奇異に感ぜられるが、この点については波形の相異に着目した考察を後述する。注目すべきは、応答倍率の全体傾向は位置よりも地震波に支配される点であり波動種別の相異を明確にする必要がある。またいずれの地震でもタンク各部の最大加速度の間に若干の相異があるが、直近の盛土部と比べるとタンク部の加速度は概して小さい。

図一・四に両地震における主な水平方向成分の加速度波形と、亀田の方法(5)による非定常スペクトルを示す。伊豆半島東方沖地震では、基盤の加速度の最大値が40秒以降に現われているのに対し盛土部の最大値の出現時刻はこれよりも早い。この時の盛土タンク系の応答波形の卓越周波数は別途模型振動実験によって得た1次共振周波数にほぼ等しい約1.5Hzである。また、これに近い周波数は基盤部の非定常スペクトルに示されるとおり、盛土タンク系の最大加速度発生時刻付近に含まれている。長周期の加速度波形が基盤と上部各部の後半時刻に見られ、いずれの波形も酷似している。これに対し前半部は基盤と上部各部とに波形の類似がない。

千葉中部地震における波形は、基盤～盛土～タンクのすべての波形に共通してほぼ10秒目に最大値が発生し主要動の継続時間は短い。非定常スペクトルを見るとほぼ1～2Hzの卓越周波数が基盤とタンクに共通して含まれている。これはXY両成分に共に見られる点であり、伊豆地震の前半部の傾向に似た応答である。

表一 加速度計位置

| 記号 | 位置 | 成分 | 記号 | 位置 | 成分 |
|-----|----------------------|----|----|----------------------|----|
| A-1 | 2タンク間中心、DL-30m | X | E | 側壁上部 | X |
| | | Y | | | Y |
| | | Z | | | X |
| A-2 | 盛土、DL12m 側壁から6.5m | X | F | 同上 | Y |
| | | Y | | | X |
| B-1 | 側壁下部 | X | G | 盛土、DL12m 側壁から6.5m | Y |
| | | Y | | | X |
| | | Z | | | Y |
| B-2 | 側壁上部 | X | H | 同上 | X |
| | | Y | | | Y |
| C | 底版中心 | X | I | 盛土法尻 GL=DL5m | X |
| | | Z | | | Y |
| D | 側壁上部 | X | J | 6号タンク | X |
| | | Y | | | Y |

注：B-1にはSMAC併設

表二 主な地震観測例

| 地震発生年月日時分 | M (J.M.A.) | 震源深さ (Km) | 震央距離 (Km) | 基盤最大加速度 A-1 (DL-30m) | | 震央位置 |
|------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------|--------------------|
| | | | | X(gal) | Y(gal) | |
| 1979-10-28 14:39 | 5.5 | 90 | 90 | 4.4 | 3.6 | 房総半島南東沖 |
| 1980- 3-12 12:21 | 5.6 | 80 | 90 | 6.5 | 4.2 | 同上 |
| 4-22 14:34 | 6.6 | 400 | 500 | 2.8 | 3.4 | 東海遠はるか沖 |
| 5- 8 17:03 | 5.7 | 60 | 90 | 4.1 | 4.7 | 房総半島南東沖 |
| 6-18 16:25 | 4.6 | 80 | 40 | 5.3 | 5.6 | 千葉県中部 |
| ⇒ 6-29 16:20 | 6.7 | <u>10</u> | <u>100</u> | <u>6.8</u> | <u>7.7</u> | 伊豆半島東方沖(群発) |
| 8-15 6:07 | 5.0 | 90 | 90 | 3.5 | 2.8 | 房総半島南東沖 |
| ⇒ 9-25 2:54 | 6.1 | <u>80</u> | <u>20</u> | <u>52.3</u> | <u>31.7</u> | 千葉県中部 (ほかこの日4回) |
| 10-13 19:55 | 4.2 | 70 | 20 | 2.3 | 2.3 | 同上 |
| 1981- 1-19 3:17 | 6.9 | 30 | 500 | 2.4 | 1.6 | 宮城県沖 |

表三 2地震における最大加速度と基盤の同一成分に対する応答倍率

| 成分 | 地震 | (伊豆半島沖) '80-6-29 16:20 | | (千葉県中部) '80-9-25 02:54 | |
|---------------|----|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
| | | gal | 倍率 | gal | 倍率 |
| A-1 (基盤) | X | 6.8 | (1.0) | 52.3 | (1.0) |
| | Y | 7.7 | (1.0) | 31.7 | (1.0) |
| | Z | 5.4 | (1.0) | 11.8 | (1.0) |
| A-2 (盛土部) | X | 10.5 | (1.54) | 116.9 | (2.24) |
| | Y | 12.5 | (1.62) | 64.0 | (2.02) |
| B-1 (側壁下部) | X | 8.3 | (1.22) | 76.7 | (1.47) |
| | Y | 9.5 | (1.23) | 50.8 | (1.60) |
| B-2 (側壁上部) | X | 8.5 | (1.25) | 14.5 | (1.23) |
| | Y | 10.7 | (1.39) | 93.6 | (1.79) |
| C (底版) | Z | 8.0 | (1.11) | 56.9 | (1.79) |
| D (側壁上部) | X | 10.5 | (1.54) | 104.4 | (2.00) |
| | Y | 11.6 | (1.51) | 54.8 | (1.73) |
| E (*) | X | 9.0 | (1.32) | 105.8 | (2.02) |
| | Y | 12.0 | (1.56) | 104.7 | (3.30) |
| F (*) | X | 8.6 | (1.26) | 104.6 | (2.00) |
| | Y | 9.6 | (1.25) | 58.2 | (1.84) |
| G (盛土) | X | 11.0 | (1.62) | 114.8 | (2.20) |
| | Y | 11.4 | (1.48) | 78.3 | (2.47) |
| H (法尻) | X | 12.2 | (1.79) | 126.1 | (2.41) |
| | Y | 13.0 | (1.69) | 51.9 | (1.63) |
| I (法尻) | X | () | () | () | () |
| | Y | 15.4 | (2.00) | 58.7 | (1.85) |

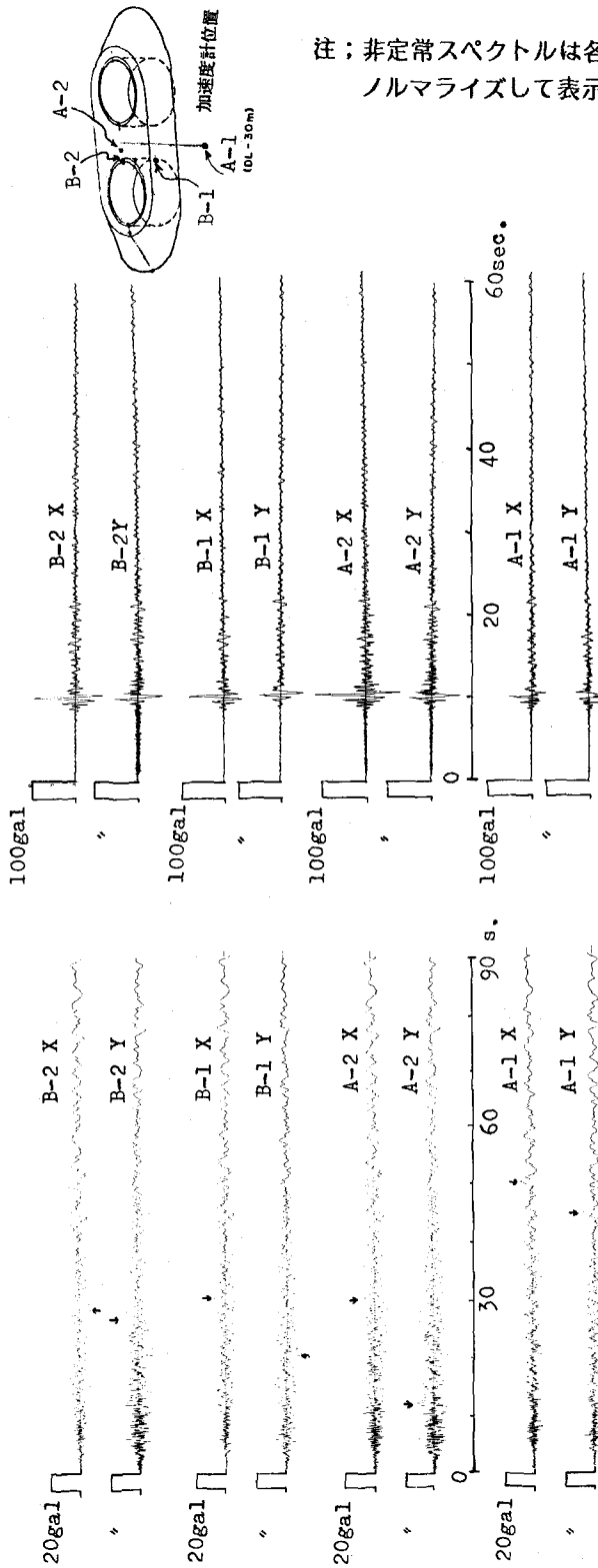


図-3 伊豆半島東方沖地震(1980-6-29)における
加速度波形並びに非定常スペクトル図

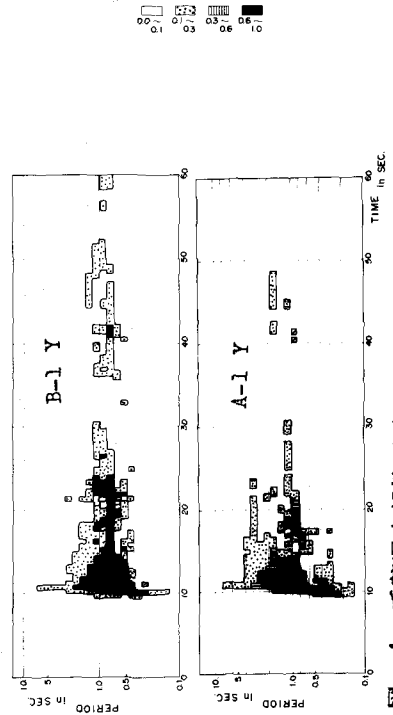


図-4 千葉県中部地震(1980-9-25)における
加速度波形並びに非定常スペクトル図

注：非定常スペクトルは各成分ごとの最大値に対し
ノルマライズして表示してある。

図-5・6は、観測された加速度原波形を2階積分して得た変位曲線である。伊豆半島東方地震の際の最大変位は後半の長周期波部分にあるが、前半の30秒目付近にSH波と推定される小ピークもある。また、基盤とタンクの波形の位相は常にほぼ同一である。前半部の振幅は深さ方向の増幅が明らかなのに対し後半部は各深さの振幅がほぼ等しい。なおこの観測地点近傍で筆者らが観測したアレー観測では、この後半の長周期波動の水平方向波長は5000m以上であった。このことと関連し、タンク各点の水平方向の相対変位は明瞭には観測されていない。

千葉中部地震では、基盤・タンク共にほぼ10秒目に大きなピークが発生し以下後半部は振幅が減衰するパターンである。タンクの波形はX成分に大きなピークが含まれており、基盤波形とは若干の位相遅れを伴った極めて類似したものである。

図-7は、千葉中部地震による変位波形を用いたローカス図を5秒間ずつ示したものである。これによると、入力基盤を含め卓越した振動方向は認められない。ローカスパターンは基盤のみ異ったものであり、それより上部のタンク～盛土の各部分はほぼ同様な変位挙動を示している。

なお基盤から盛土への時間遅れが主要動付近で約0.16秒であり、これはSH波動の進行速度が反映されていると考えられる。

4. あとがき

主に2地震の観測結果を用いて若干の考察を試みたが、その結果を要約すると次のとおりである。

- ① 地震波動の種別を問わず、タンクの挙動は周辺地盤に支配されている。
- ② 震央距離の近い地震ではSH波が卓越した挙動を示すのに対し、遠距離型の長周期入力による応答も大きいことがある。
- ③ SH波型応答と表面波型応答をともに含む地盤～タンク系の挙動の場合、それぞれの発生時刻は分離している。

今後は観測データの蓄積をふまえ、波動の種別を考慮した工学的な取扱い方をより明確にしてゆきたい。

<参考文献>

- (1) 鈴木, 江川, 高比良「海岸埋立地に設けられる地下タンクの模型振動実験(1)」第33回土木学会年講, I-170
- (2) 鈴木, 江川, 高比良「海岸埋立地に設けた地下タンクの模型振動実験(2)」第33回土木学会年講, I-171
- (3) 鈴木, 伏見, 坂本「地震波動種別を考慮したLNG地下タンクの地震時挙動の考察」, 『電力土木-昭56年5月号』No.172, PP.3~19
- (4) 電事連LNG地下タンク研究委員会「LNG地下式貯槽(土木設備)設計指針昭53
- (5) 亀田弘行「強震地震動の非定常スペクトルの算出法に関する一考察」土木学会論文報告集, No.235, 1975-3月

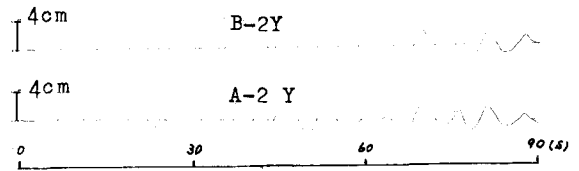


図-5 伊豆半島東方沖地震における変位波形

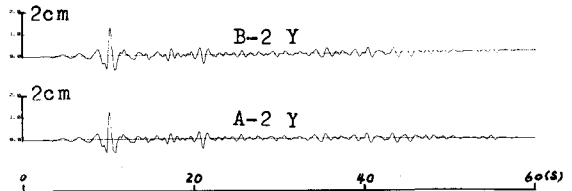


図-6 千葉県中部地震における変位波形

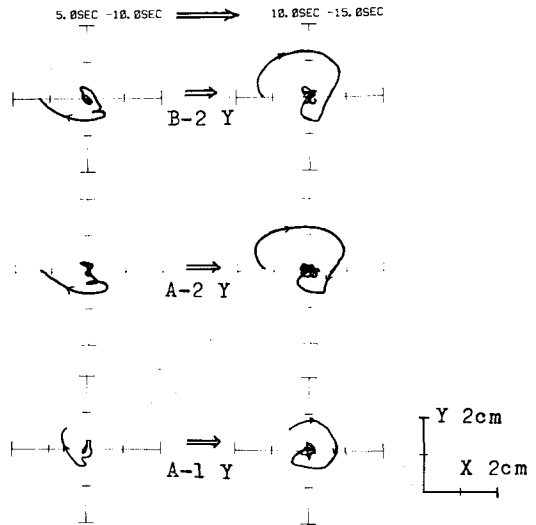


図-7 千葉県中部地震における変位ローカス図