



- (2) 群杭基礎は地盤の側方流動の影響を押さえている(タンクB(直接基礎)よりも南側護岸に近いタンクA(杭基礎)の沈下がほとんどゼロである)。
- (3) タンクBとタンクCについては建設当時の設計基準に従ってパイプフローテーションによる地盤改良が実施された(深さ7m、タンク外周5m)にも拘わらず、かなりの沈下が生じた。その第1の理由としては、地震荷重が設計地震動をはるかに越えたことが考えられる。第2は、地盤改良深度が当時の施工法の制限から7m程度であり、今回の地震に対しては改良深さが十分でなかったためと考えられる。

### 3. 動的有効応力解析による検討

本節ではCタンクの被災原因を検討するために、動的有効応力法に基づく二次元有限要素法解析を実施した結果を示す。解析には解析コードMuDIANを用いた<sup>4)</sup>。

#### (1) 地盤のモデル化

地盤の弾性定数、せん断波速度は地震後の地盤調査結果よりモデル化した。内部摩擦角は文献<sup>5)</sup>の式よりN値で推定した<sup>9)</sup>。埋土層の粘着力は解析の都合上小さな値を用い、G.L.-19mの砂質シルト層の粘着力は近傍の地盤の土質試験結果を参考に設定した。地下水位はG.L.-0.75mに設定した。液状化強度特性は、地震前のスウェーデン式貫入試験結果より換算して原地盤及び改良地盤のN値求め、さらに有効上載圧で正規化した $N_v$ 値を求め、 $N_v$ 値と三軸試験で得られる液状化強度との関係(吉見, 1991)により、15回での繰り返しせん断強度を設定した<sup>6)</sup>。以上の方法で設定した地盤定数を表-2に示す。解析では液状化層をDensificationモデル<sup>7)</sup>を用い、非液状化層をHardin-Drmovichモデルを用いてモデル化した。

#### (2) 構造物のモデル化

Cタンクの地震時LPガス貯蔵量より、バルジングを考慮した評価式<sup>8)</sup>を用いてタンクの地震時の固有周期を求めた(0.102秒)。その固有周期を満たすように重心位置(G.L.3.25m)に1質点の集中質量を持つ

曲げせん断梁でタンクをモデル化した<sup>9)</sup>。また基礎マットはコンクリートの剛性をもつ曲げせん断梁でモデル化した。諸元を表-3に示す。

#### (3) 解析モデルと解析ケース

Cタンクは南側護岸から最も遠方にあるため、護岸の影響は少ないと考え、境界条件が周期境界の解析モデルを考えた。図-1に解析メッシュを示す。解析は液状化対策としての地盤改良の効果を見るために表-4に示す5ケースを実施し、比較検討した。CASE-1が被災時の液状化対策状況を示す。

CASE-3及びCASE-4は液状化対策工を埋土層全層で実施した場合であり、G.L.-7m以深の改良地盤の液状化強度はG.L.-7m以浅の層と同等とした。

解析においては、CASE毎の1次・2次モードに対して2%のレイリー減衰を設定して用いた。

#### (4) 入力地震動

入力地震動は東神戸大橋観測波形(GL-33m)のN12°E相当の地震波<sup>10)</sup>を用い、解析モデルの底面(GL-32m)にE+F入力した。用いた加速度波形を図-2に示す。

表-2 設定した地盤の物性値

##### (1) 原地盤

| 深度(m) | 土質    | 単体重量(kN/m <sup>3</sup> ) | S波速度(m/s) | 粘着力(kpa) | 内部摩擦角 | N値 | 換算N値(N <sub>v</sub> ) | 15回繰返強度比 |
|-------|-------|--------------------------|-----------|----------|-------|----|-----------------------|----------|
| 0.75  | 埋土    | 19.6                     | 110       | 0.1      | 35°   | 8  | -                     | -        |
| 7.0   | 埋土    | 19.6                     | 110       | 0.1      | 35°   | 8  | 12                    | 0.19     |
| 17.5  | 埋土    | 19.6                     | 170       | 0.1      | 36°   | 15 | 13                    | 0.20     |
| 19.0  | 砂質シルト | 17.15                    | 150       | 76.44    | 11°   | 8  |                       |          |
| 28.0  | 細砂    | 18.62                    | 210       | 0.1      | 38°   | 25 |                       |          |
| 32.0  | 砂礫    | 19.6                     | 320       | 0.1      | 40°   | 50 |                       |          |

##### (2) 改良地盤

| 深度(m) | 土質  | 単体重量(kN/m <sup>3</sup> ) | S波速度(m/s) | 粘着力(kpa) | 内部摩擦角 | N値 | 換算N値(N <sub>v</sub> ) | 15回繰返強度比 |
|-------|-----|--------------------------|-----------|----------|-------|----|-----------------------|----------|
| 0.75  | 改良土 | 19.6                     | 120       | 0.1      | 40°   | 20 | -                     | -        |
| 7.0   | 改良土 | 19.6                     | 175       | 0.1      | 40°   | 20 | 25                    | 0.45     |

表-3 構造物の諸元

|       | ヤング率(kPa)            | せん断剛性(kPa)          | 断面積(m <sup>2</sup> ) | 断面2次モーメント(m <sup>4</sup> ) | 重量                 |
|-------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|
| タンク   | $2.058 \times 10^8$  | $7.915 \times 10^8$ | 1.3506               | 0.145                      | 648 <sup>*1</sup>  |
| 基礎マット | $1.7052 \times 10^7$ | $7.35 \times 10^8$  | 1.4                  | 0.018736                   | 19.6 <sup>*2</sup> |

\*1: 総重量(kN), \*2: 単位体積重量

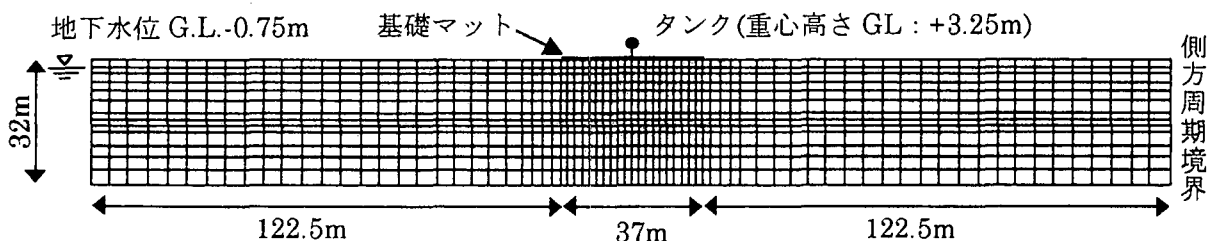


図-1 解析メッシュ図

表-4 解析ケース

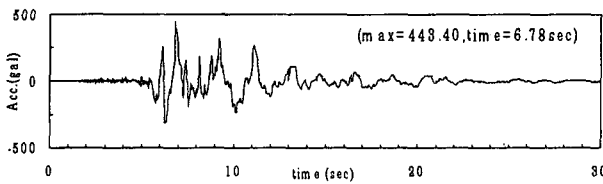
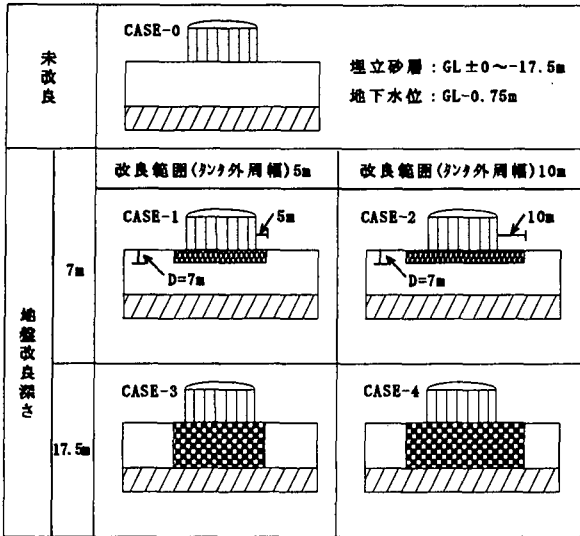


図-2 解析に用いた入力地震動

(5) 解析結果

① 最大せん断ひずみの  $((\gamma_{xy})_{max})$  深度分布

図-3は基礎中心直下の地盤の最大せん断歪分布である。図から以下のことが言える。

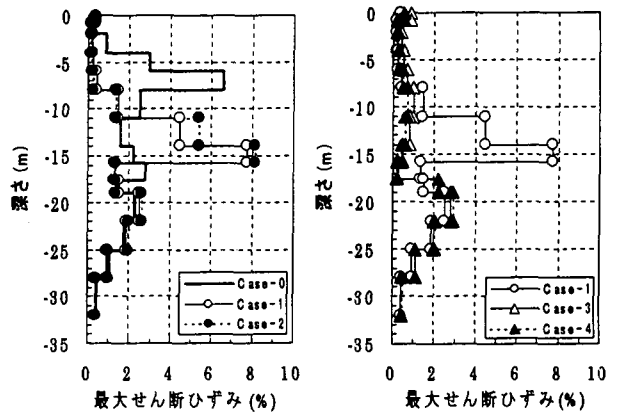
- a. 改良の有無の影響 (CASE-0とCASE-1,2の比較)  
地盤改良により改良深さ(7m)の範囲においては、未改良の場合に比べて地盤のひずみが大幅に押さえられている。しかし、7m以深の埋土層では逆に地盤改良がある場合の方がひずみが大きい。
- b. 改良幅の影響 (CASE-1とCASE-2の比較)  
CASE-1とCASE-2による地盤ひずみの差はほとんど見られない。つまり、改良深度が7mの場合改良幅は5mでほぼ妥当である。
- c. 改良深さの影響 (CASE-1とCASE-3,4の比較)  
埋土地盤全層を改良した場合は、埋土地盤全体のひずみがかなり押さえられていて、地盤改良深さを大きくした方が有効であることがわかる。

② 過剰間隙水圧

a. タンクの自重の影響 (CASE-0の側方境界と基礎直下の比較)

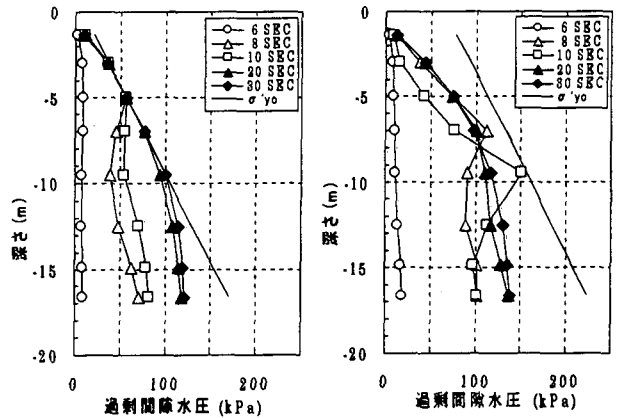
図-4はCASE-0の場合の埋土層中の過剰間隙水圧の推移である。図中(1)は側方境界上の地盤要素の値であり、自由地盤の応答に近いものである。(2)はタンク中心直下のものである。

(1)と(2)とを比較するとタンク直下はタンクの



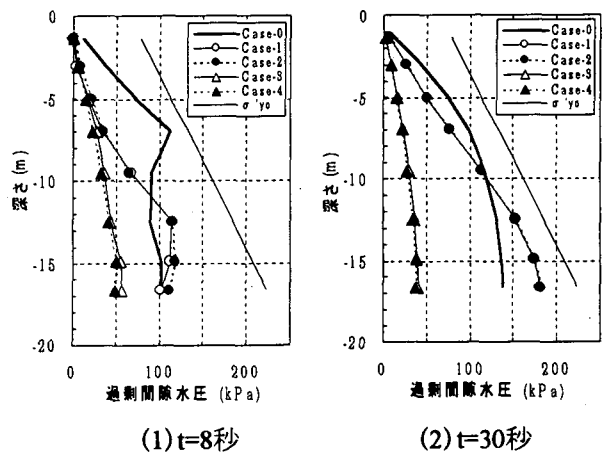
(1) CASE-0,1,2の比較 (2) CASE-1,3,4の比較

図-3 地盤の最大せん断ひずみ



(1) CASE-0の境界地盤 (2) CASE-0の基礎直下

図-4 過剰間隙水圧の推移



(1) t=8秒 (2) t=30秒 図-5 各解析ケースの過剰間隙水圧の比較

自重による初期有効上載圧の影響により、自由地盤に比べて過剰間隙水圧が小さく押さえられていることがわかる。

図-5はt=8秒と30秒における各解析ケースの過剰間隙水圧分布を示している。図から以下のことがわかる

- b. 改良の有無の影響 (CASE-0とCASE-1,2の比較)  
地盤改良により改良深さ(7m)の範囲において

は、未改良の場合に比べて過剰間隙水圧をある程度押さえられている。しかし、7m以深の埋立層では逆に地盤改良がある場合の方が水圧が大きい。

c. 改良幅の影響 (CASE-1と2、CASE-3と4の比較)

CASE-1と2、CASE-3と4における過剰間隙水圧の差はほとんどない。つまり、改良深度が7mの場合改良幅は5mでほぼ妥当であると言える。

d. 改良深さの影響 (CASE-1と3、CASE-2と4の比較)

埋土地盤全層を改良した場合は、埋土地盤全体の過剰間隙水圧がかなり押さえられていて、地盤改良深さを大きくした方が有効であることがわかる。

以上のb,c,d項に示す過剰間隙水圧の特徴は①のa,b,c3項に示す最大せん断ひずみの特徴と定性的によく対応している。

③タンク直下の沈下量

図-6に応答30秒後のタンク基礎スラブの鉛直変位(沈下量)を示す。沈下量は、「CASE-0>CASE-1,2>CASE-3>CASE-4」であり、液状化対策による沈下の抑制の効果が確認された。また対策効果は地盤改良の改良範囲をタンク外周側方に伸ばすよりも、深さ方向に改良深度を増やす方が効果が大きい。

なお、未改良地盤の沈下量(≒20cm、CASE-0)とCASE-1の場合(≒10cm、被災時の地盤改良状況)の沈下量の計算値は被災調査報告書に示されている実測値よりも小さくなっている。しかし、紙面の関係で図は示していないが、「タンク直下の沈下量>周辺改良地盤の沈下量>その外周の沈下量」の相対的な関係は解析においても認められた。

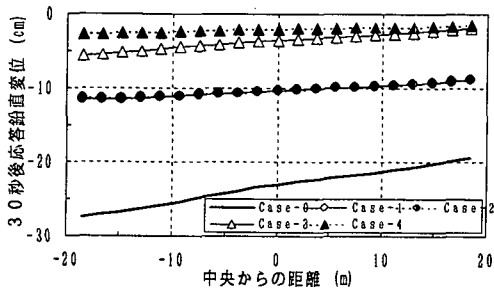


図-6 応答30秒後のタンク直下の沈下量の比較

4. まとめ

震害調査結果および二次元有効応力解析結果をまとめると以下の様になる。

- (1) 形状・寸法・地震時内容積量がほぼ同等のタンクBとタンクCの平均沈下量と沈下形状(傾斜の有無)の比較から、タンクの沈下・傾斜には地盤の液状化に伴う側方流動が影響していると考えられる。
- (2) 群杭基礎は地盤の側方流動の影響を押さえている(タンクB(直接基礎)よりも南側護岸に近いタンクA(杭基礎)の沈下がほとんどゼロである)。

(3) タンクBとタンクCについては建設当時の設計基準に従ってパイロフローテーションによる地盤改良が実施された(深さ7m、タンク外周5m)にも拘わらず、かなりの沈下が生じた。その第1の理由としては、地震荷重が設計地震動をはるかに越えたことが考えられる。第2は、地盤改良深度が当時の施工法の制限から7m程度であり、今回の地震に対しては改良深さが十分でなかったためと考えられる。

(4) 数値解析の結果によれば、タンクの沈下の抑制に対しては、基礎地盤の改良深さを十分にすることがタンク外周地盤の改良幅を大きくすることよりも効果的であることがわかった。改良幅についての考え方は今の設計基準でほぼ妥当であると考えられる。

(5) 直接基礎のタンク直下の地盤の沈下が周辺地盤よりも大きくなっている地盤変状は解析結果と定性的に対応している。これは支持地盤が液状化するとタンクの大きな接地圧により、タンクが周辺地盤よりも大きく沈下すると理解できる。

謝辞：LPGタンク基礎および周辺地盤の被害状況をまとめた報告書(参考文献1)および他の貴重な調査結果を提供していただいた高圧ガス保安協会の関係者の皆様に深謝の意を表します。なお、本研究は建設省建築研究所と民間21グループからなる「建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会」(委員長:時松孝次東京工業大学教授)の活動の一環として行ったものである。東神戸大橋の地震記録は上記委員会を通じて、建設省土木研究所の許可を得て用いたものである。

参考文献

- 1) 高圧ガス保安協会:兵庫県南部地震に伴うLPGガス貯蔵設備が漏液調査 最終報告書、1995。
- 2) 吉岡照男:LPGタンク基礎の調査報告、基礎工、pp.100-104、1995。
- 3) 浜田政則、磯山龍二、若松加寿江:1995年兵庫県南部地震、阪神地域における液状化、地盤変位および土質条件、(財)地震予知総合研究振興会、1995。
- 4) Zienkiewicz,O.C. and Shiomi T.: Dynamic Behavior of Saturated Porus Media; The generalized Biot Formulation and its Numerical Solution", Int. J for Num. and Anal. Methods in Geomech., 1984
- 5) 畑中宗憲、内田明彦、加倉井正昭、青木雅路:砂質地盤の内部摩擦角  $\phi$  dと標準貫入試験のN値の関係についての一考察、建築学会構造系論文集、投稿中、1997。
- 6) 吉見吉昭:砂地盤の液状化(第2版)、技報堂、pp.81、1991。
- 7) Zienkiewicz,O.C.,Chang,C.T. and Hinton,E.: Nonlinear seismic responce and liquefaction, Int. Num. and Anal. Methods in Geomech. Vol.2, pp381-404,1978。
- 8) 酒井藤一、小川浩:円筒形液体タンクの簡易動的解析法について、日本鋼構造協会第13回大会研究集会マトリクス解析法研究発表論文集、pp.411-416、1979。
- 9) 寺田昌史、伊藤浩二、後藤洋三:兵庫県南部地震で被災した貯油タンク基礎の解析的検討、土木学会第51回年次学術講演会講演集Ⅲ、pp342-343、1996
- 10) 田村敏一、二宮嘉朗、濱田禎:液状化を考慮した簡易な地震応答解析、土木学会第51回年次学術講演会講演集Ⅲpp336-337,1996。