

鉛直動を考慮したタンクの地震応答解析

山口大学工学部 学生会員○榎藤義徳 正会員 麻生稔彦  
正会員 會田忠義 正会員 中村秀明

1. はじめに

タンクの耐震性の検討は、Housnerの方法をはじめとして解析的手法や有限要素法など様々な計算法を用いて行われている。しかしながら、これらの解析は水平動を対象としており、鉛直動の影響を検討した例は少ない。また、兵庫県南部地震発生以来、構造物の耐震性を検討する上で鉛直動の影響は無視できない。そこで、本研究では鉛直動を考慮した円筒タンクの地震応答性状を有限要素法を用いて解析し、鉛直動がタンクの地震時挙動に与える影響を検討する。

2. 解析手法、解析条件

本研究では、水平動入力時および鉛直動入力時の地震応答を地盤～タンク～内容液連成系で解析する。解析では、対象が円筒タンクであるため、軸対称有限要素法を用いる。軸対称有限要素法では、応答の円周方向分布を水平動入力時には逆対称分布、鉛直動入力時には対称分布と仮定する。また、タンク、地盤は弾性体と仮定し、内容液は非粘性、非圧縮、非回転の流体と仮定して速度ポテンシャルが定義できるものとした。地盤を有限要素法で解析するにあたり、地盤の境界には粘性境界を用い、解析領域外の地盤の影響は自由地盤の変形より与える。

本解析では、図-1に示す鹿児島県鹿児島市石井手配水貯水池に建設されている PC 円筒タンクを対象とする。このタンクは、内径 55.0 m、高さ 19.0 m であり、満水時の水深は 15.6 m である。このタンクの材料物性を表-1に、地盤特性を表-2にそれぞれ示す。応答計算は、図-2に示す兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された地震波の NS 成分を水平動、UD 成分を鉛直動として基盤面より入力する。なお、NS 成分の最大加速度は 812 gal、UD 成分の最大加速度は水平成分の半分である 412 gal となるように振幅調整し、いずれもサンプリング間隔は 0.01 sec、継続時間は 20 sec である。

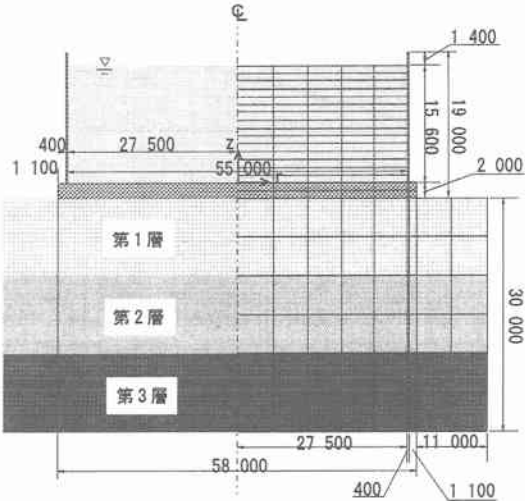


図-1 解析モデル 単位：mm

| 表-1 材料物性                     |                        |        |  |
|------------------------------|------------------------|--------|--|
| 材料名                          | コンクリート                 | 水      |  |
| 単位体積重量 (kgf/m <sup>3</sup> ) | 2500.0                 | 1000.0 |  |
| ヤング係数 (kgf/m <sup>2</sup> )  | 3.50 × 10 <sup>7</sup> | -      |  |
| ポアソン比                        | 0.20                   | -      |  |
| 減衰定数                         | 0.05                   | -      |  |

| 表-2 地盤特性 |                       |                                      |                    |      |                    |      |
|----------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------|------|--------------------|------|
| i        | V <sub>si</sub> (m/s) | γ <sub>i</sub> (kgf/m <sup>3</sup> ) | H <sub>i</sub> (m) | h    | T <sub>E</sub> (s) | 地盤種別 |
| 1        | 333.4                 | 2100.0                               | 10.0               | 0.20 | 0.34               | Ⅱ種   |
| 2        | 321.4                 | 2100.0                               | 10.0               |      |                    |      |
| 3        | 398.7                 | 2100.0                               | 10.0               |      |                    |      |

i : 第 i 層, γ : 単位体積重量, H : 層厚, h : 減衰定数  
V<sub>s</sub> : i 層におけるせん断弾性波速度, T<sub>E</sub> : 地盤の特性値

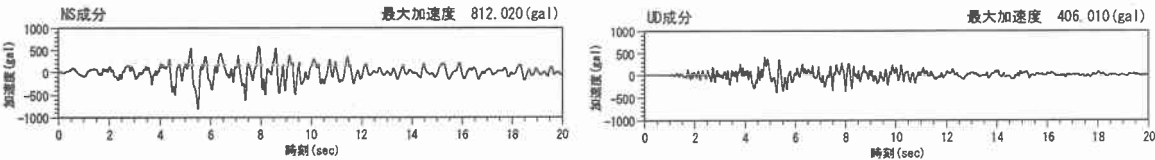


図-2 入力地震動時刻歴

### 3. 解析結果

鉛直動がタンクの挙動に与える影響を評価するために、動液圧、円周方向応力および鉛直方向応力のそれぞれについて、水平動入力時、鉛直動入力時およびこれらの応答時刻歴を重ね合わせるにより近似的に得られる水平・鉛直動2成分入力時の応答を比較する。

図-3はタンク側面に作用する動液圧の深さ方向分布である。鉛直動による動液圧は、鉛直動の最大加速度が水平動の50%であるにも関わらず、水平動による動液圧を最大応答で40%上回っている。なお、動液圧の分布形状よりスロッシングは発生していないと考えられる。図-4にタンク側面に発生する円周方向応力の分布、図-5に鉛直方向応力の分布をそれぞれ示す。これらの分布は、側面全体で最大の応答が発生した時刻における分布であり、応力は正を引張としている。鉛直動による円周方向応力は水平動による応力の72%、鉛直方向応力においては73%となっている。また、水平・鉛直動2成分による応答では、動液圧において水平動のみによる動液圧の約2倍となっており、円周方向応力および鉛直方向応力では1.5倍程度の応答を示している。したがって、鉛直動が応答に与える影響が大きいことがわかる。そのため、タンクの耐震性を検討する際には鉛直動を考慮する必要がある。

タンク壁面の応答を3次的に評価するために、水平動入力時の応答と水平・鉛直動2成分入力時の応答を円周方向について比較する。図-6は図-4において最大値が生じたタンク中腹部（高さ  $z=7.8\text{ m}$ ）におけるタンク側面に生じる円周方向応力の円周方向分布で、図-7は鉛直方向応力の分布である。水平入力時の応答分布が地震動入力方向（ $90^\circ - 270^\circ$ ）で最大値をとる逆対称分布であるのに対し、水平・鉛直動2成分入力時の応答は水平入力時の応答を囲むように分布している。これは、水平動による応答の円周方向分布を逆対称、鉛直動による応答の円周方向分布を対称と仮定しているためであり、水平・鉛直動2成分入力時の応答は水平動による応答の逆対称分布を膨らませた形状となっている。

以上のことより、鉛直動がタンクの地震応答に与える影響は大きく、今回用いた地震動程度の地震に対するタンクの耐震性を考慮する場合には無視できないことが明らかとなった。また、タンクの地震時の安全性を検討するためには、水平・鉛直動2成分入力時の地震応答解析が必要であると考えられる。

### 4. まとめ

本研究は、地震時におけるPC円筒タンクの挙動をに把握することを目的に、鉛直動がタンクの応答に与える影響を考慮して解析を行ったものである。鉛直動は応答に与える影響が大きく、PC円筒タンクの耐震設計を行う上で無視することのできないことが明らかとなった。

参考文献：清水信行，山本鎮男，河野和間：円筒タンクの耐震設計に関する研究（第1報，有限要素法による剛基礎上の円筒タンクの基礎理論），機械学会論文集C編，Vol. 48，No. 427，pp328-348，1982. 2

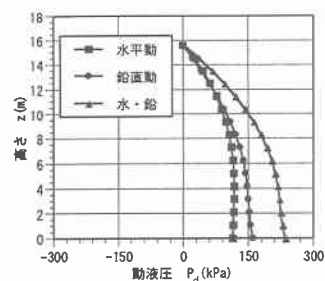


図-3 動液圧分布

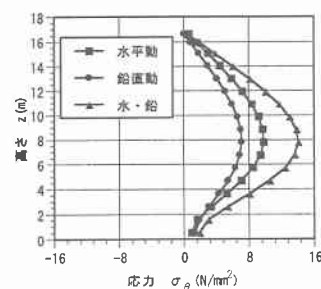


図-4 円周方向応力分布

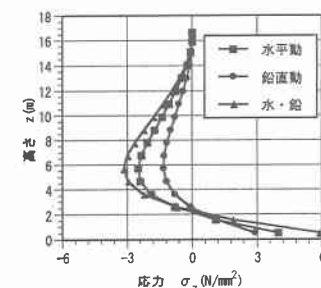


図-5 鉛直方向応力分布

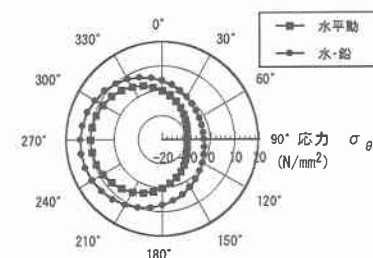


図-6 円周方向応力分布

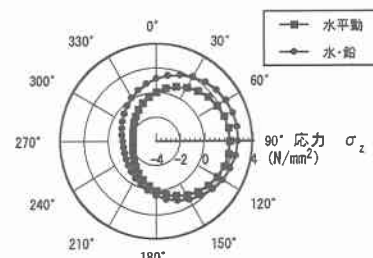


図-7 鉛直方向応力分布