

内容液充填時における円筒形タンク模型の壁面応力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRESS IN WALL OF CYLINDRICAL TANK MODEL DURING LIQUID FILLING

吉岡 民夫*、廣瀬 茂*、高西 照彦**

Tamio YOSHIOKA, Shigeru HIROSE and Teruhiko TAKANISHI

*オリエンタル建設 技術研究所 (〒321-43 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘5)

**工博 九州工業大学工学部教授 設計生産工学科 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)

A prestressed concrete tank normally consists of dome roof, cylindrical wall and circular bottom floor, which belong to shell structures. Each structure component such as dome, cylinder or floor has been theoretically analyzed independently each other, especially when they are subjected to axi-symmetrical loadings. Finite Element Analysis is most useful to analyze such structures, when they are subjected to anti-symmetrical loadings such as hydrodynamic pressure during earthquake. In any case, each structure component has been analyzed independently without deep consideration for the mechanical interaction between the wall and the bottom floor. It is very interesting to know the interaction between the wall and the bottom floor. A small tank model made of acryloid plastic was used to investigate the interaction. The model was tilted to generate anti-symmetrical pressure which simulates hydrodynamic pressure during earthquake. Results which were calculated in accordance with authors' proposal were well agreed with experimental results.

Keywords: prestressed concrete tank, cylindrical wall, anti-symmetrical loading

1. はじめに

プレストレストコンクリート (PC) タンクは、水道用配水池に広く用いられており、最近ではLNG、LPGなどの液化ガス貯槽容器の一部としても用いられるようになってきた。

一般のPCタンクは、ドーム屋根、円筒側壁および円形底版から構成されており、これらの構成要素は、それぞれ軸対称シェル構造の分野に属している。この分野では、古くから理論的な構造解析が行われており、これらの構造に軸対称荷重が作用する場合の解析については、タンクの各構成要素毎に、理想的な境界条件の下での解析解が得られている。

軸対称シェル構造に、地震時動液圧などの逆対称荷重が作用する場合は、荷重、変位などを円周方向にフーリエ級数展開した後、軸対称要素を用いて有限要素法 (FEM) 解析するのが最も汎用的な方法と言えるであろう。著者らは、軸に対して逆対称な荷重が作用した場合の、円筒側壁および円形底版の断面力を求めるための等価構造モデルおよび等価荷重を求め、従来から広く用いられている平面骨組構造解析プログラムを利用して、容易に数値解析できる方法を示した^{1),2)}。

いずれの解析方法の場合でも、PCタンクを屋根、側壁および底版に分割し、解析することが実用的である

が、その時、それぞれの構造要素間での力学的相互作用についての詳細な検討を行わず、例えば側壁については、側壁下端完全剛結というような理想的な境界条件で解析するのが一般的である。そこで、実際の構造物において、その構造要素間がどのような応力状態にあるのかを知り、PCタンクを各構造要素に分割して解析した場合に、各構造要素がそれに接する構造要素からどの程度の影響を受けるのかを知ることは興味深いことであるし、その上それは、今後のPCタンクの設計手法の改善にも大いに役立つことである。

実際に施工された実機のPCタンクにおいて、現場におけるひずみ測定を行った例はいくつかある^{3),4)}。これらの実施例では、ひずみ測定がプレストレス力や水圧などの設計上の荷重下で行われているために、発生するひずみが小さかったり、繰返し載荷することができなかつたりして、概ね安全側にあることを確認する程度で、実験による詳細な構造解析が行われた例はほとんど無いと言ってよいであろう。

著者らは、内径1.8m、壁高1.8m、壁厚10cmのコンクリート製タンク模型を製作し、タンク内に油圧ジャッキを設置し、できるだけ広い範囲に荷重が分布して加力することができるような載荷装置を作り、タンク模型が破壊に至るまで載荷実験を行った経験がある。この実験で

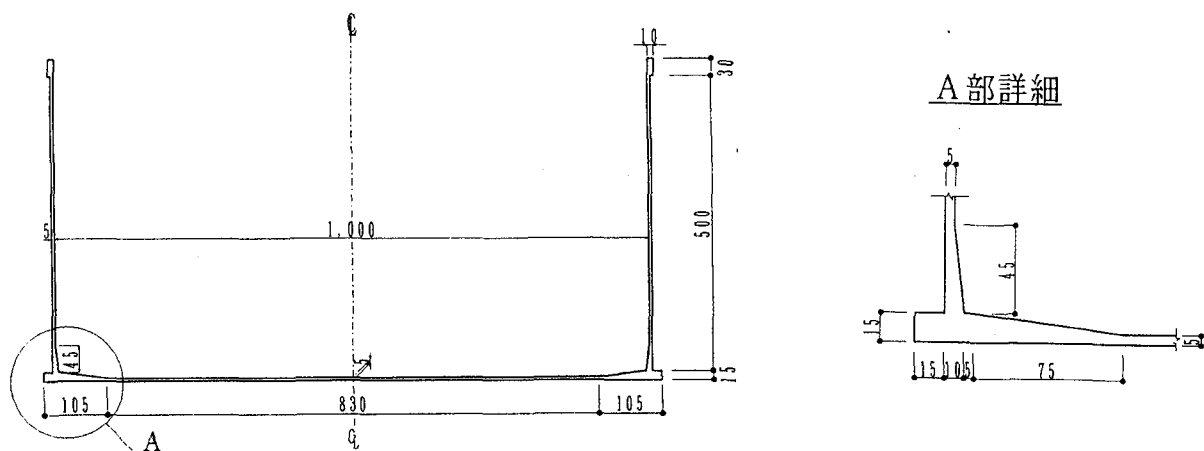


図-1 タンク模型 (単位: mm)

は、側壁が円周方向の軸引張破壊および鉛直方向の曲げ破壊を起こすように载荷装置を工夫したにもかかわらず、2体製作した模型の試験体は2体共パンチングシアで破壊してしまった。

坂井らは、大型相似模型タンクを用い、タンクを傾斜させることにより、地震時に作用する液圧に相当する逆対称荷重をタンクに作用させ、その時のタンクの挙動に関する研究を行っている^{5),6),7)}。この実験は、タンクが逆対称荷重を受けたときの挙動を、静的に実験できることを示しており、非常に興味深いことである。

そこで、著者らはアクリル製の小型タンク模型を製作し、これに水圧を荷重として加える実験を行った。本論では、その実験結果のうち、主として側壁のひずみと変位に関する測定結果とその理論的検討結果について述べることにする。

2. 模型実験

2.1 模型

模型タンクは、図-1に示すように、内径 1m、壁高 53cm、壁厚 (等厚部) 5mm、底版厚 (等厚部) 5mm のアクリル製で、側壁下端部内側には実機と幾何学的に相似なハンチを設け、また、増厚された底版の外周部と等厚の底版中央部の間は、やはり実機と幾何学的に相似な傾斜を設け、剛性の変化が実機の PC タンクと同じになるようにした。ただし、力学的相似則は考慮されていない。また、不測の破壊事故を防ぐために、側壁上端に厚さ 1cm、高さ 3cm のリングを設けてタンクを補強した。

模型タンクは、溶接による不陸を除去するためにプレーナ (平滑) 仕上げされた、非常に剛な支持プレートの上に設置した。この支持プレートは、型鋼で補強されており、プレートの 4 隅に取り付けた長尺のボルトにより、その高さを調整することによって、プレート面を傾斜させることができる。傾斜装置を図-2に示す。

タンク模型を弾性支持の状態にセットするために、タンク模型と支持プレートとの間になにを敷くべきかについては、事前に内径 50cm のアクリル製模型を用いて、予備実験を行った。予備実験では、厚さ 25mm のゴムおよびスポンジを、それぞれ 1 枚敷く場合と 2 枚敷く場合、ゴムもしくはスポンジの径を、模型タンク底版の外径より大きめにする場合と同じにする場合について、軸対称荷重を载荷したときに、底版の鉛直変位が均等に発生するかどうかを知ることを主眼として行った。その結果、底版径と同じ大きさのスポンジを 1 枚敷く場合が最も良い結果が得られたので、本実験でもそれに倣った。また、底版剛支持の場合の側壁の力学的挙動を明らかにする目的で、模型タンクを支持プレート上に直接設置する実験も行った。支持プレート、スポンジおよびタンク模型の間は、薄く石膏を敷いて不陸調整を行った。

2.2 測定方法

模型タンクには、設置された方向に従って、南(S)、北(N)、西(W)、東(E)、南西(SW)および南東(SE)の位置に、表面ゲージを貼付した(図-3参照)。主たる

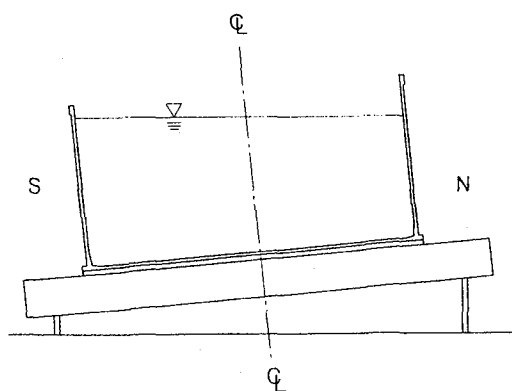


図-2 傾斜装置

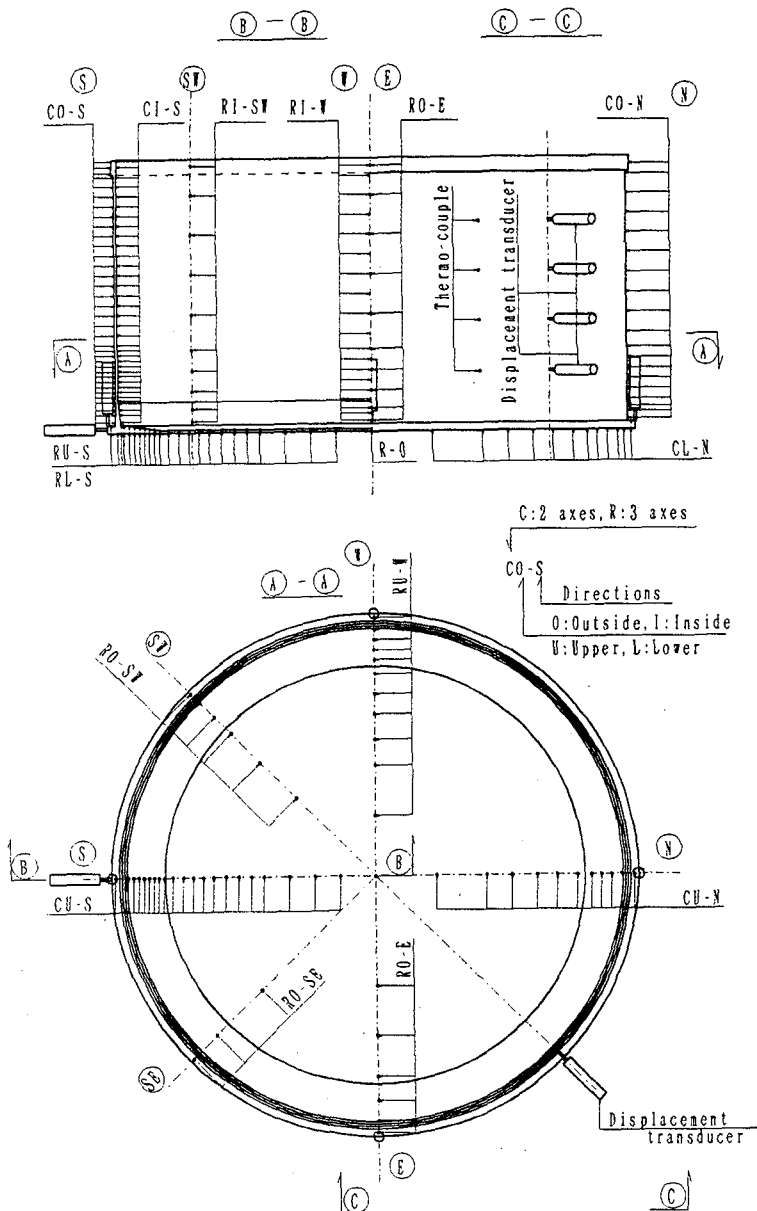


図-3 ゲージ位置

測定点はS、WおよびSWの位置で、その対面であるN、EおよびSEの位置には、主測定点の半分の数のゲージを貼付した。SおよびNの位置には、ゲージ長1mmの2軸ゲージを、側壁内外面および底版上下面に、合計で186枚貼付した。このうち、特に側壁下端内外面および側壁ハンチと側壁等厚部の境界の外側には、1cm内に5枚のゲージがセットされた集中ゲージを用いた。W、E、SWおよびSEの位置には、側壁内外面および底版上下面に、ゲージ長1mmの3軸ゲージを、合計で154枚貼付した。底版下面に貼付したゲージには、非常に径の小さな特殊なリード線であるイミドリード線を用い、リード線が底版の支持条件に影響を与えないように配慮した。また、リード線の重量が側壁のひずみに影響を与えないように、リード線は上から吊って、直接側壁に触れないようにした。

側壁内外面には、下端から10cm毎に、合計8ヶ所に熱電対を貼付し、実験中の側壁内外面温度を測定した。

模型タンク外側には、側壁下端から10cm毎に、合計4つの変位計を側壁に垂直に設置し、側壁の半径方向変位を測定した。また、底版の外周にはそれに垂直に変位計を設置し、底版の半径方向変位を測定した。スポンジ基礎の場合には、さらに底版4ヶ所に変位計を鉛直に設置し、基礎の沈下量を測定した。

2.3 載荷方法

載荷はタンクに水を充填することにより行った。この場合、水深10cm毎に測定を行った。逆対称荷重に相当する傾斜実験では、図-2に示すように、W-E方向を回転軸として予め支持プレートを傾斜させておき、プレート上に置かれたタンクに順次水を充填することによって載荷した。この場合、図-2のSの位置での水深（壁に沿って計った長さ）が10cm増す毎に測定を行った。載荷に用いた水は、外気温との差をできるだけ小さくするために、あらかじめ別の水槽に貯留し、加温を行ったものである。水深の管理は、予め模型タンクにマークされた標識を基準にして、目視により行った。

2.4 載荷ケース

載荷は、模型を水平に設置して水を充填することによって軸対称荷重を加える載荷実験と、模型を傾斜して水を充填することによって逆対称荷重を加える載荷実験とを、直接支持およびスポンジ基礎の場合について、それぞれ3回ずつ行った。支持条件や載荷方法を

変更したすぐ後に行った実験では、測定データにばらつきが大きかったので、ここでは同じ条件で3回行った時の、最後の実験結果のみを採用した。

軸対称載荷時には、図-3のS-Nを通る鉛直面上に貼付したすべてのゲージを、逆対称荷重載荷時にはS-Nを通る鉛直面上に貼付したゲージのうち、原則としてひとつおきのゲージと、その他の位置に貼付したすべてのゲージを用いて、側壁内外面および底版上下面のひずみを測定した。

2.5 アクリルの材料特性

アクリルの弾性係数 E_a および線膨張係数 α_a は、温度による影響が大きいため、次式により実験毎に補正した。

$$E_a = 3 \times 10^4 - \frac{1 \times 10^4}{30} (t - 20) \text{ kgf/cm}^2 \quad \dots \dots \dots (1-a)$$

$$\alpha_a = \{70 + 0.75(t - 20)\} \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \dots \dots \dots (1-b)$$

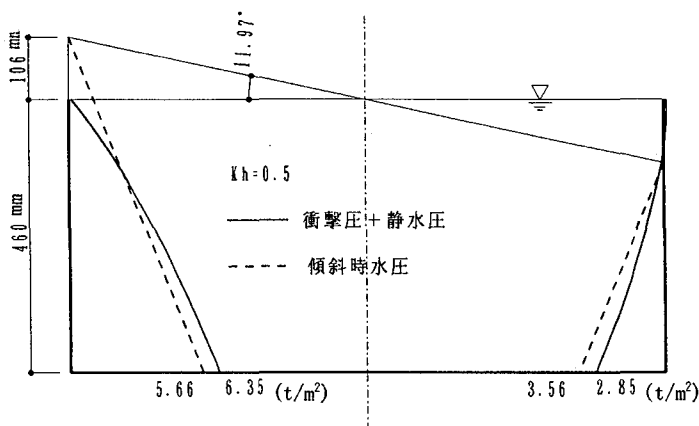


図-4 地震時動液圧とタンク傾斜による逆対称静水圧荷重

ここに、 t は実験中のタンク壁面の温度($^{\circ}\text{C}$)である。なお、実験中の温度が一樣になるように、前述した熱電対により測定した側壁内外面温度差が、 0.3°C 程度以下になるように水温を管理した。

アクリルのポアソン比は、実験の温度の範囲では、 0.35 である。

3. 静水圧による逆対称荷重と理論解析に用いた荷重

タンクを傾斜させることにより、地震時に作用する液圧(静水圧+地震時動液圧)を模擬した逆対称荷重を作用させることができることを、模式的に示すと図-4のようである⁹⁾。傾斜したときのタンクの内壁に生ずる内容水による転倒モーメント M_t は、次式で得られる。

$$M_t = \frac{\pi}{8} D^4 \gamma \sin \phi \left\{ \left(\frac{H}{D} \right)^2 + \frac{1}{16} \tan^2 \phi \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 D はタンクの内径、 γ は水の単位体積重量、 ϕ は傾斜角、 H は対称軸上での水深である。いま、地震の短周期成分に応答する衝撃圧を、速度ポテンシャル理論に従って求め、この衝撃圧による転倒モーメントと式(2)により求められた転倒モーメントを比較することにより、傾斜角と水平震度の関係が得られる。図-4では、水平震度 $K_h = 0.5$ とすると、傾斜角 $\phi = 11.97^{\circ}$ 、水深差(最大水深とタンク中心軸上での水深の差)は 10.6 cm となる。同図から判るように、傾斜したときの静水圧による荷重とポテンシャル理論によって得られた衝撃圧の分布形状は、傾斜角 ϕ が小さいときには比較的良く一致していると言える。実際の実験では傾斜角 5.03° としたので、 $K_h = 0.21$ に相当する逆対称荷重を載荷したことになる。

タンクを傾斜させることによりタンク作用する液圧が、速度ポテンシャル理論を用いて求めた地震時動液圧を、どの程度正確に模擬できるかを知るために、タンクを傾斜したとき、タンク側壁に生じるひずみを、FEM(NASTRAN)を用いて計算した。その結果を図-5に示す。同図には、ポテンシャル理論によって得られた地震時動液圧がタンクに作用した場合に、著者らの提案する

方法¹⁾で応力解析して得られた結果も同時に示す。図中における凡例の記号は、 ϵ はひずみ、添字 c および v は側壁の円周方向および鉛直方向、添字 o および i は側壁面の外側および内側、添字 fem および frm はFEMおよび著者らの提案する平面骨組解析プログラムを用いる方法を意味する。同図より、両者の結果はよく一致しており、地震時に側壁に作用する液圧を傾斜静水圧で模擬できると言ってよいであろう。よって、本論ではポテンシャル理論によって得られる地震時動液圧を外力として用い、著者らの提案する方法で求めたひずみを計算値として採用することにした。

4. 実験結果と考察

図-6および7に、軸対称載荷では水深 50 cm (満水)の場合の、逆対称載荷ではタンク中心軸における水深が 46 cm で S 側に 5.03° 傾斜させた場合の、タンク側壁のひずみの測定値と計算値を、縦軸に側壁下端からの距離、横軸にひずみをとってプロットした。図-6は軸対称な静水圧荷重を載荷したときの結果を、図-7は軸に対して逆対称な静水圧荷重を載荷したときの結果をそれぞれ示している。図-6における軸対称載荷時の場合の計算値は、ハンチ部の剛性増加を考慮した理論解で⁹⁾、図-7における逆対称載荷時の場合の計算値は、3.で述べた著者らの提案した方法¹⁾で求めたものである。どちらの場合も、側壁下端は完全剛結として解析している。解析結果(断面力)からタンク内外面でのひずみを求める式は付録に示した。図中における凡例の記号は、図-5の場合と同様で、 exp. および com. は測定値および計算値を意味する。また、各図においてサブタイ

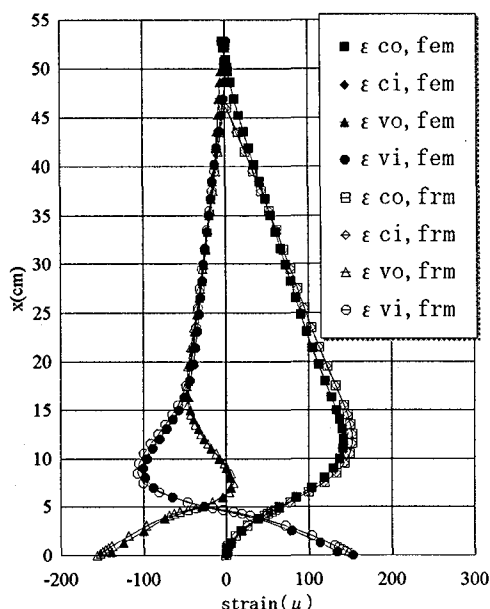
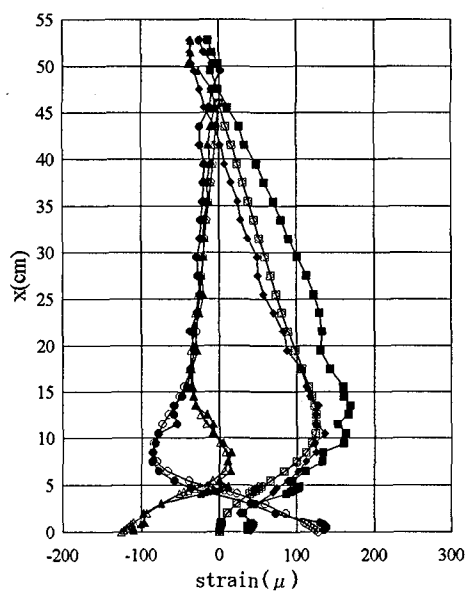
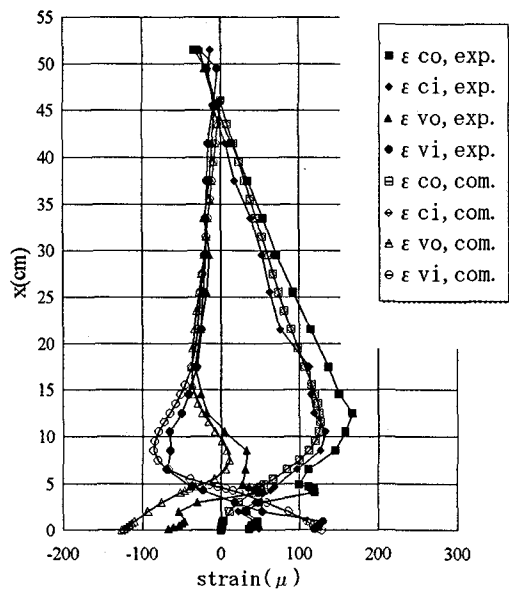


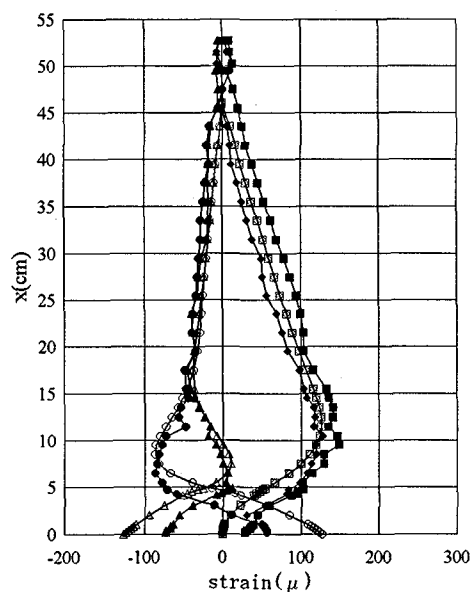
図-5 それぞれ傾斜静水圧および地震時動液圧により側壁に生ずるひずみの比較



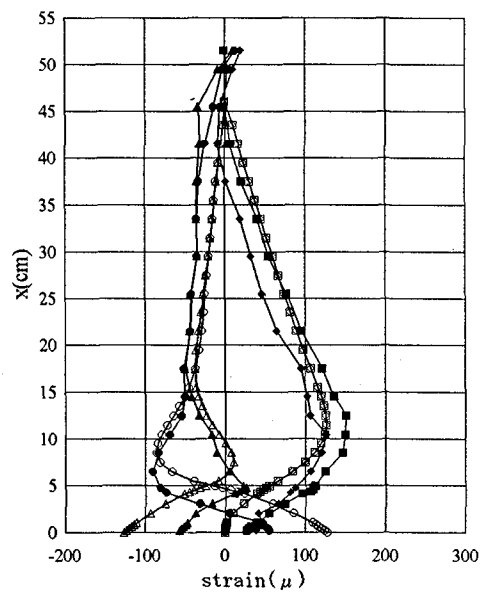
(a) 直接支持 (S)



(b) 直接支持 (N)



(c) スポンジ基礎 (S)

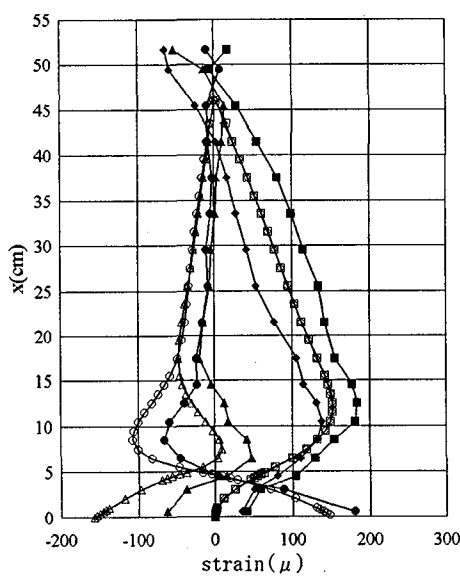


(d) スポンジ基礎 (N)

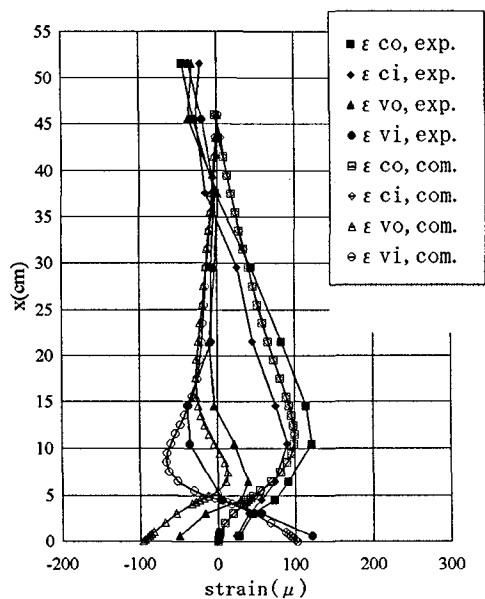
図-6 軸対称載荷時の側壁のひずみ分布図

トル(a)(b)等で説明されている直接支持はタンクが支持プレート上に直接設置されている場合、スポンジ基礎はタンクが支持プレートにスポンジを介して設置されている場合を表し、(S)および(N)は図-3においてそれぞれS方向およびN方向上の側壁のひずみであることを意味している。これらの図より、以下のことが考察される。

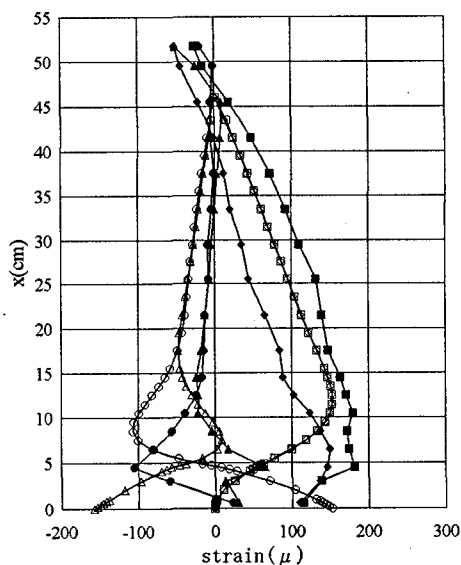
(1)軸対称載荷で直接支持の場合は(図-6(a)(b))、(3)で述べる問題を除き、測定値と計算値のひずみ分布形状はよく一致している。円周方向ひずみが側壁下端近傍で僅かに計算値と異なっているが、これは底版が僅かに水平変位したことがその原因であると考えられる。一方、軸対称載荷でスポンジ基礎の場合は(図-6(c)(d))、やはり(3)で述べる現象と鉛直方向ひずみのう



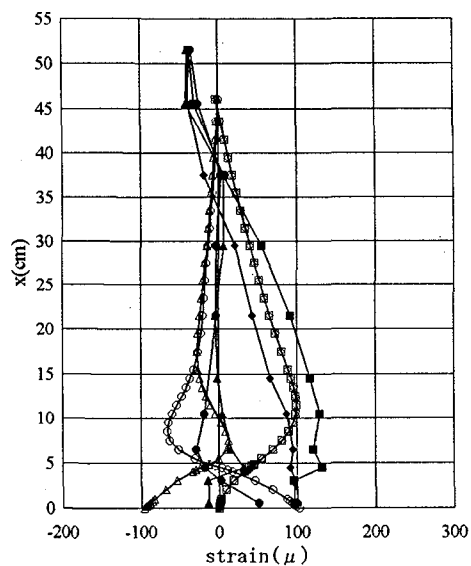
(a) 直接支持 (S)



(b) 直接支持 (N)



(c) スポンジ基礎 (S)



(d) スポンジ基礎 (N)

図-7 逆対称載荷時の側壁のひずみ分布図

ち側壁下端付近を除けば、測定値と計算値はよく一致していると言える。測定値と計算値の間に生じた側壁下端付近の鉛直方向のひずみの差異については、それはスポンジ基礎が軟弱であることから、側壁下端の固定度が低下したことによって底版端部に半径方向の回転が生じ、これが側壁下端の曲げモーメントの減少を引き起こ

したのが原因であると考えられる。したがってそのために側壁下端を完全剛結として算出した計算値との間に差異が生じたものであろう。しかし、ひずみ分布図の形状については、それは定性的に測定値と計算値はよく一致しているといってもよいであろう。下端付近の円周方向ひずみについては、直接支持の場合と同様の現象が観察

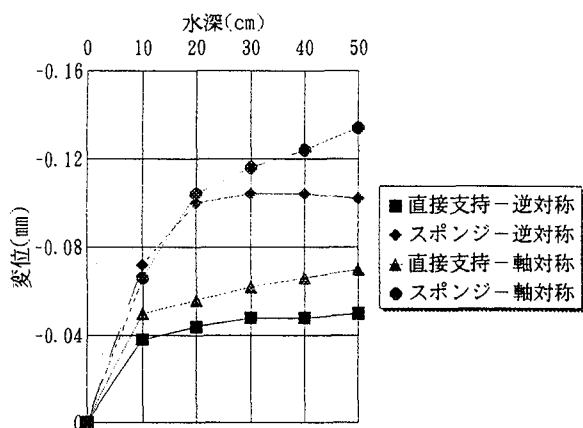


図-8 底版の半径方向変位と水深の関係

されるが、それは定量的には直接基礎の場合と大差のない結果になっている。このことから軸対称載荷の場合には、側壁下端が水平方向に僅かな変位を生ずることにに対して、底版の支持条件の違いが側壁下端部のひずみの分布形状に及ぼす影響は小さいと考えてよいであろう。一方、側壁下端の鉛直方向モーメントへの影響が大きい底版端部の半径方向の回転については、タンクを支持する基礎の剛度の大きさの違いによる影響が大きいものと考えられる。

(2) 逆対称載荷で直接支持の場合(図-7(a)(b))、円周方向ひずみ分布には、やはり(3)で述べるのと同じ現象が観察される。また、鉛直方向のひずみ分布図では、その形状は測定値と計算値とで定性的には良く一致していると言えるが、両者間には、上端から下端に行くにつれて大きくなるような差が生じている。このことについては現在検討中である。

逆対称載荷でスポンジ基礎の場合(図-7(c)(d))、円周方向ひずみには、やはり(3)で述べる現象がみられ、また鉛直方向ひずみには上述の直接支持の場合と同じ現象が観察される。さらに、側壁下端付近の円周方向には、他の場合に比べてほぼ2倍の引張りひずみが生じている。また、側壁下端の鉛直方向の測定ひずみは、計算値に比べてかなり小さい。これはタンクが傾斜した状態で載荷されているために、タンクの下に敷かれた柔らかいスポンジがせん断変形を生ずることによって、側壁下端の固定の条件が変化したのがその原因であろうと考えられる。したがって、側壁下端を完全固定と仮定して理論解析することには無理があると考えられる。より一層精度の高い解析を行うためには、例えば底版の軸剛性と地盤のせん断ばねから決定される等価水平ばねや底版の曲げ剛性と地盤の鉛直ばね定数から決定される等価回転ばねを、側壁下端に付与するなどして、構造モデルを改善する必要があると考えられる。

逆対称載荷の場合にも、全般的には測定値と計算値のひずみ分布の形状は、概ね一致していると言ってもよい

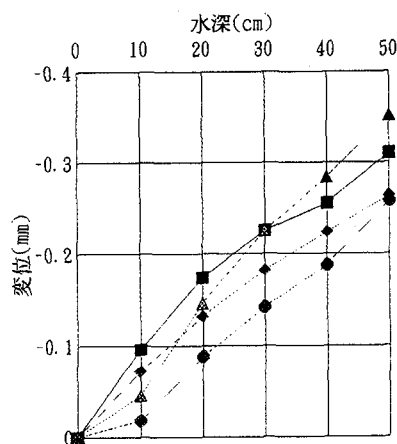
ことが判ったので、このことから円筒タンクに対しては、静水圧の傾斜載荷と逆対称に作用する地震時動液圧を考慮した地震時の液圧載荷とがほぼ等価であること、著者らの提案する計算方法が妥当であることが同時に示されたことになる。これらの2つの載荷が等価であるということは、地震時動液圧を静水圧の傾斜載荷により静的に模擬できることを示しており、タンクを傾斜することによって静水圧を載荷するという実験方法は、極めて有用な方法であると考えられる。

(3) タンク側壁の円周方向の内外面の測定ひずみの間には、ひずみの最大点(側壁下端より約10cm程度の所)より上部ではほぼ一定で、それより下部では次第に小さくなり、側壁下端にいたって0になるひずみの差が観察される。このひずみは、常に外側のひずみが内側のひずみより大きい。これは円周方向のひずみにのみ観察され、鉛直方向のひずみ分布には一切見られない現象であるから、それは側壁内外面の温度差による影響とは考え難い。その原因については、著者らは現在までのところこれを明らかにするには至っておらず、検討中である。

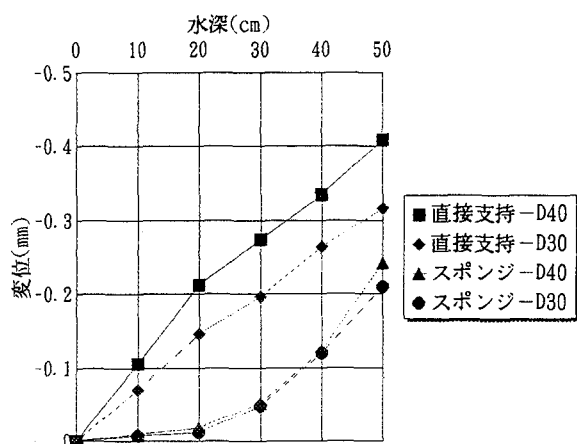
図-2に示すように、タンクを傾斜させて静水圧を載荷したとき、底版のS方向縁部で測定した底版の傾斜方向変位と水深の関係を図-8に示す。同図より、直接支持の場合は、水深10cmで大きく変位し、その後は水深に対して線形に増加していることがわかる。坂井らの実験では、基礎が剛な場合には、水の充填に伴い、タンク底版の側壁内側近傍で底版が浮き上がる現象が生じたが、その原因に対する検討の結果、水充填初期において、底版に初期変位があったことや底版と基礎との接触が完全でなかったことが測定結果に現れたものとの報告がなされている。PCタンクの場合、坂井らが用いた鋼製タンクのようにその底版が薄いものではなく、底版端部(側壁下)は大幅に増厚してあるので(図-1参照)、PCタンクにおいては、上述のような底版の浮き上がりが生ずるとは考え難い。また、当実験では、底版と基礎との間に不均一な接触が発生しないように、底版と基礎との間に薄く石膏を敷いてある。にもかかわらず、充填初期において、静水圧載荷に対する底版の傾斜方向の変位の増加割合が大きくなっている。これは、載荷荷重が小さい初期には、まだ底版と石膏との間のなじみが悪いために底版が石膏の上を僅かに滑るのではないかと考えられる。

同図のスポンジ基礎の場合、直接支持の場合とは異なり、その水平変位が大きくなっているが、これは載荷に伴ってスポンジのせん断変形が生じたためそれが底版の水平変位に加算されたものと考えられる。

図-9には、水深と側壁の半径方向変位の関係を示す。凡例のD40およびD30は、それぞれ側壁下端から40cmおよび30cmの位置の変位計であることを示している。同図(a)の軸対称載荷の場合には、直接支持とスポンジ基礎の差はあまりみられないが、同図(b)の逆対

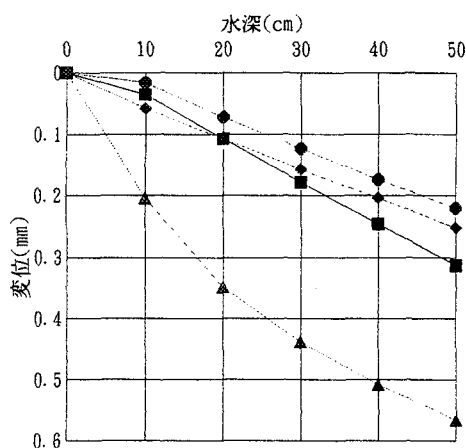


(a) 軸対称載荷

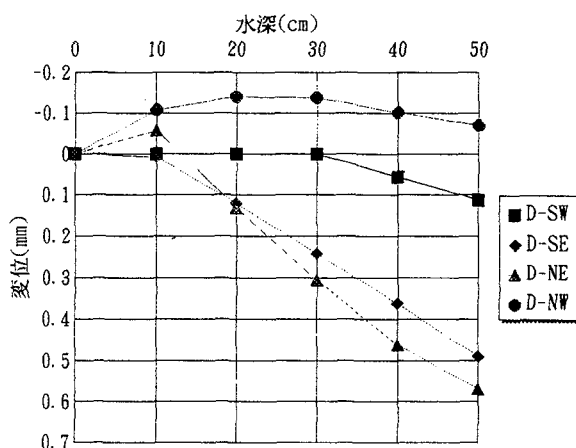


(b) 逆対称載荷

図-9 側壁の半径方向変位と水深の関係



(a) 軸対称載荷



(b) 逆対称載荷

図-10 底版の鉛直方向変位（基礎の沈下量）と水深の関係

称載荷の場合には、両者間で側壁の半径方向変位の挙動の差が顕著である。

図-10にスポンジ基礎の場合の、水深と底版外周の鉛直方向変位（基礎の沈下量）の関係を示す。同図(a)の軸対称載荷では、NEの位置を除くと基礎の沈下量は均等で、水深に対して線形である。一方、同図(b)の逆対称載荷の場合には、載荷荷重の増加に伴って、SEおよびNE方向では底版外周の沈下量はほぼ荷重に比例して大きくなっているが、SWおよびNW方向については載荷荷重に関係なくほとんど底版外周は沈下していないという結果になっている。実験はS-N線に対して左右対称に荷重が載荷されるように計画し、初期高さ調整を行っているので、図-10(b)の結果は全体としてスポンジの強さが一様でなく、E側の強さの方が多少弱かったものと考えられる。

以上、実験によって得られた側壁のひずみ分布と側壁および底版の変位について観察してきたが、変位に関しては、側壁や底版の変位が載荷に伴って2、3の測定において予想と異なる挙動を示すことが観察された。これはタンク底版の基礎であるスポンジの不均一さにその原因があるのではないかと考えられる。側壁のひずみ分布図に関しては、計算では側壁下端完全剛結の条件を採用したにもかかわらず、一部の例外を除けば、測定値と計算値が比較的良く一致していると言える。測定値に対する計算値の近似度をより一層高くするためには、例えば、底版と地盤の力学的特性を考慮した等価ばねを導入し、これを側壁下端に設けるといような解析に用いる構造モデルに対する改善を施すことが必要であろう。このようにすれば側壁と底版を分離して解析を行っても、そ

れによって十分な精度で側壁の解析ができると言っても良いであろう。

5. まとめ

P Cタンクを屋根、側壁および底版の各構造構成要素に分割して解析した場合に、各構造要素がそれに接する構造要素からどの程度の影響を受けるかを知るために、アクリル製の小型タンク模型を製作し、水平もしくは傾斜して設置して、水を充填することにより載荷したときの円筒形タンクの挙動に関する実験より、以下の結論を得た。

(1) アクリル製の模型に表面ゲージを貼付して実験を行ったために、アクリルと表面ゲージの線膨張係数の違いによる計測上の差が発生したが、これを補正すれば、測定値と計算値は全般的に良く一致した。

(2) 著者らの提案する方法で計算した地震時動液圧（衝撃圧）を受ける円筒形タンクの側壁のひずみと、静水圧の傾斜載荷により地震時の液圧を模擬した逆対称荷重を加えたときに発生する側壁のひずみの測定結果とを比較すると、側壁下端の境界条件の違い（計算は完全固定）が計算結果に及ぼす影響を除いて、両者の結果は良く一致したと言つてよいであろう。このことはまた、地震時の液圧を傾斜載荷により静的に再現できることを示しており、この実験方法は極めて有用であると言える。

(3) 基礎や底版の変形が、2、3の測定時において予想と異なる挙動を示す場合でも、側壁のひずみ分布図については測定値と計算値がよく一致しており、P Cタンクをその構成要素に分割して解析するという従来の方法に従ってP Cタンクの解析を行っても、解析上の問題はほとんどないと言える。ただ、地盤が非常に軟らかい場合などでは、側壁下端を完全剛結として側壁の解析をするには多少の無理があると考えられる。このような場合には底版や地盤の力学的特性を考慮した等価ばねを定め、このばねを側壁下端に設置するなどの、解析に用いる円筒タンク構造のモデル化に対する改善が必要であると考えられる。

6. 付録¹⁾

シェル応力はその厚さ方向には線形に変化しているという仮定の下に

$$\varepsilon_{c,0} = \frac{1}{E_a t} \left(N_\varphi - \nu N_x - \frac{M_\varphi}{a} \right) - \frac{1}{E_a Z} \left(M_\varphi - \nu M_x - \frac{t^2}{12a} N_x \right)$$

$$\varepsilon_{c,j} = \frac{1}{E_a t} \left(N_\varphi - \nu N_x - \frac{M_\varphi}{a} \right) + \frac{1}{E_a Z} \left(M_\varphi - \nu M_x - \frac{t^2}{12a} N_x \right)$$

$$\varepsilon_{x,0} = \frac{1}{E_a t} \left(N_x - \nu N_\varphi + \frac{M_x}{a} \right) - \frac{1}{E_a Z} \left(M_x - \nu M_\varphi + \frac{t^2}{12a} N_x \right)$$

$$\varepsilon_{x,j} = \frac{1}{E_a t} \left(N_x - \nu N_\varphi + \frac{M_x}{a} \right) + \frac{1}{E_a Z} \left(M_x - \nu M_\varphi + \frac{t^2}{12a} N_x \right)$$

ここに

$\varepsilon_{c,0}, \varepsilon_{c,j}$: 側壁円周方向の外側および内側のひずみ

$\varepsilon_{x,0}, \varepsilon_{x,j}$: 側壁鉛直方向の外側および内側のひずみ

N_x : 円筒シェルの鉛直方向軸力

N_φ : 円筒シェルの円周方向軸力

M_x : 円筒シェルの鉛直方向曲げモーメント

M_φ : 円筒シェルの円周方向曲げモーメント

E_a : アクリルのヤング係数

t : 壁厚

a : 円筒タンクの半径

Z : 側壁の断面係数 $\left(= \frac{t^3}{6} \right)$

参考文献

- 1) 吉岡民夫, 大谷悟司, 高西照彦: 逆対称荷重が作用するP Cタンク側壁の断面力計算法, 土木学会論文集, 第502号/V-25, pp. 113-122, 1994. 11.
- 2) 吉岡民夫, 大谷悟司, 高西照彦: 逆対称荷重を受ける直接基礎P Cタンク底版の断面力算定法, 構造工学論文集 Vol. 39A(1993年3月)
- 3) 吉岡民夫, 鈴木素彦: P Cタンクの現場応力測定, プレストレストコンクリート技術協会第18回研究発表会講演概要
- 4) 斎藤利一郎, 内谷保, 榎並利征, 渡辺明, 小深田信照: 固定式P Cタンクの現場実験と考察, プレストレストコンクリート, Vol. 26, No. 2, Mar. 1984
- 5) 坂井藤一, 磯江暁, 平川長, 面谷幸男: 大型相似模型による平底円筒貯槽の内液充填時挙動に関する実験研究, 土木学会論文集第398号/I-10, 1988年10月
- 6) 坂井藤一, 磯江暁, 平川長, 面谷幸男: 大型相似模型による平底円筒貯槽の傾斜実験, 土木学会論文集第404号/I-11, 1989年4月
- 7) 坂井藤一, 磯江暁: 大型相似模型傾斜実験による円筒貯槽の浮き上がり挙動に関する研究, 土木学会論文集, 第432号/I-6, 1991. 7
- 8) 吉岡民夫, 久松光世, 出光隆: ハンチを有する壁下端固定P Cタンクの断面力簡易計算法, 土木学会論文集第433号/V-15, 1991. 8

(1994年9月14日受付)