

プレストレストコンクリート構造タンクの 応力測定と振動実験

平野 舜一* 小島 雅樹*
土橋 吉輝* 土岐 崇**
神谷 宏*** 長谷部広行***
角田 伸二*** 岡田 隆治***

要 約

プレストレストコンクリート構造の大型タンクを対象にした応力測定と振動測定を試みた。特に振動実験は、土木構造物での実施例はほとんどないと思われるが、引き綱法を応用してみた。

結果は、実測値とFEMによる計算値とを対応させてあり、両者は一致する傾向にあることがわかった。今後は、この実験結果をもとに、機会のあるごとに実験を重ね、FEM(有限要素法)をプレストレストコンクリート構造タンクの設計に活用してゆきたい。

目 次

- § 1. まえがき
- § 2. タンクの施工概要
- § 3. 応力測定
- § 4. 振動実験
- § 5. まとめ

§ 1. まえがき

最近、石油備蓄や燃料そして給水用貯蔵槽として、プレストレストコンクリート構造のタンク(以下PCタンクと略称)の建設が次第に多くなってきており、その規模も大型化されつつある。同時に構造設計の分野においても、RC構造物と比較して所要断面が非常に薄いために、水密性および耐久性が要求される。あるいは耐震設計においても諸条件の採り入れ方に論議がなされている。

本文は、これらの問題点の基本的要素を把握することを目的として、昭和54年5月12日～昭和54年6月30日の間、実物による振動実験と施工段階における応力測定を行った結果を報告するものである。

§ 2. タンクの施工概要

実験に使用したPCタンクは、名古屋市水道局第8期拡張事業の一環として、春日井浄水場構内に建設した有効容量17,000m³の地上式配水池である。

タンクの構造は、地上部(配水池)が円筒形PC構造(直径40m、高さ17.5m)で、また基礎部は、連続フーチング基礎RC構造となっている(図-1)。

次に基礎部と地上部の施工について説明する。基礎部は8.5mのフーチングを築造するため、2段掘削を行った。地下水がGL-3.5mに位置するために、1段目はウェルポイントを仮設し、水位の低下をはかり、法面はラス入りモルタルを吹付けて安定させた。地上部のタンクの施工は、フーチング上に底板部を築いたあと、1リフトごとにコンクリートを打設した。1リフトは1.8mの高さとし、全部で10リフトに分割した。各リフトの打継は、コンクリートの打設後4時間位経過してから、レイタンスを十分に取除き、ブラシで粗骨材がみえる程度にこすり取り、打継目を完全なものとしてから打設した。コンクリートの打設は、1日の打設数量を80m³として、2台のポンプ車を使用し6時間ほどかけて入念に行った。

PC鋼棒およびPCストランドの配置は図-2に示すとおりである。この緊張方法は、鋼棒の場合60tf油圧ジャッキを常に対称の位置に設置しながら緊張した。またPCストランドの場合は、定着部を6ヶ所設けて、1本1周ごと交互に60tf油圧ジャッキを使って3ヶ所の定着部を同時に行った。

*技術研究部
**中部(支)名古屋(出)主任
***技術研究所

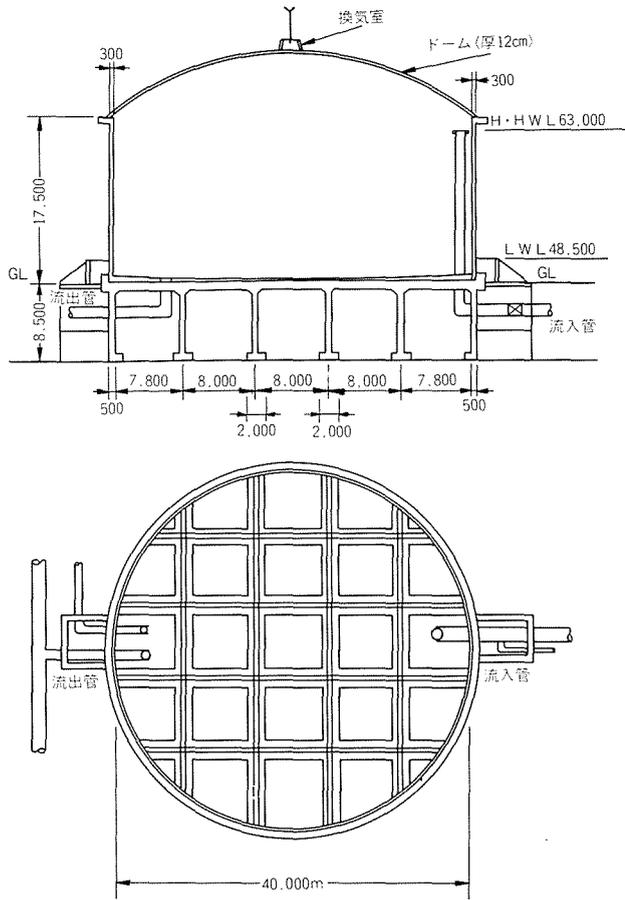


図-1 PCタンクの構造

緊張作業が完了したのち、ドーム（屋根）を施工した。施工は内側の単管足場を利用し、上部2.5 m部分にパイプサポートを使用し、特別にアングルで製作した大引き受けをパイプサポートに取付け、椽木と帯鉄で傘のように骨付けしてから、合板パネルを張って鉄筋を組み、コンクリートを打設した。この支保工の組立てからコンクリート打設までは約30日を要した。

コンクリート構造物が完了したのち、内外面の塗装を行った。内側はエポキシ樹脂（積水コートWE）を3回塗り、外側はセメント系のものを吹付け、そしてドームにはアクリル弾性材を吹付けた。

塗装完了後にタンクの漏水試験を実施し、竣工した。

§ 3. 応力測定

3-1 測定項目

- (1) 縦方向プレストレス導入による応力
- (2) 円周方向プレストレス導入による応力
- (3) 注水時の応力
- (4) 満水放置時の温度応力

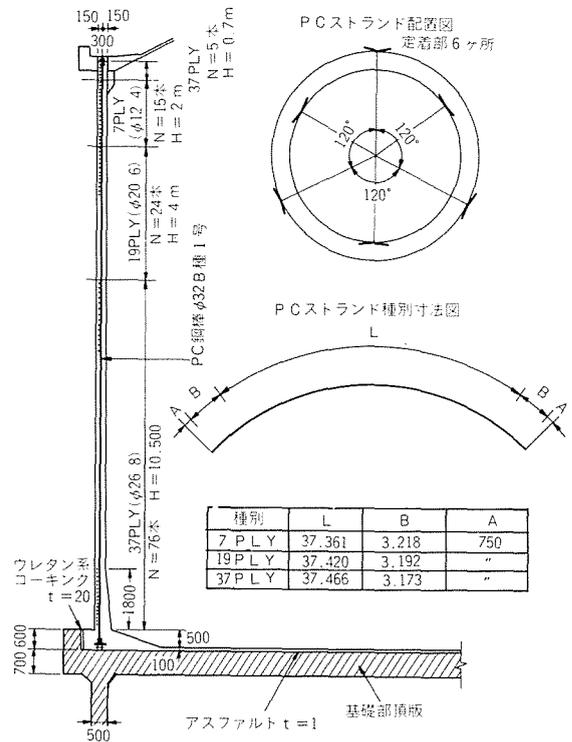


図-2 PC鋼棒およびPCストランドの配置図

(5) 減水時の応力

3-2 測定計器

- | | |
|------------------|---------------|
| (1) ゲージ式ひずみ計 | K M100 T |
| (2) スイッチボックス | A S W-324 B |
| (3) 自動デジタルひずみ測定器 | T D S-256 D C |
| (4) デジタルプリンタ | D P12-02 |

3-3 測定方法

ひずみ計を図-3に示すように壁表面から5cm内部の位置に埋設した。

計測にあたっては、各荷重ケースごとに自動デジタル

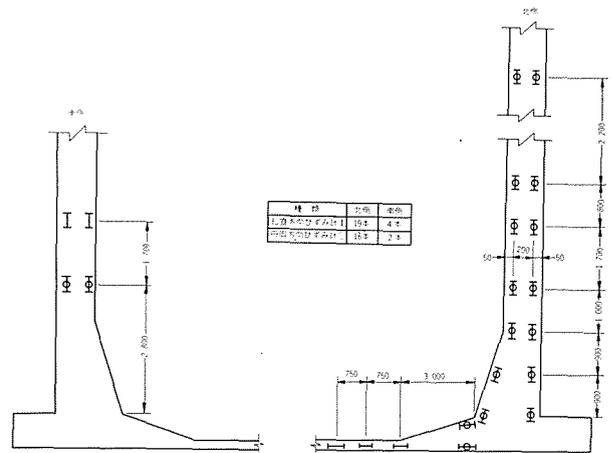


図-3 埋込みひずみ計埋設位置

ひずみ測定器に備っているイニシャライズ機構を用いて初期設定し、計測中モニタリングを行った。データサンプリング間隔は30分を原則とし、タイマにより自動記録とした。なお、壁体の温度変化はひずみ計の温度センサにより求めた。

3-4 測定結果およびその考察

測定結果の整理にあたっては、可能な限り壁体の温度分布が軸対称状態になるような場合を選んだ。図-5~13に示した応力計算値はFEMによる軸対称シェル構造解析プログラムを用いて数値解析した結果である。なお、FEMによる応力計算は頂部シェルを無視して底板・側壁部分について行い、底板支持条件は弾性バネ支承として取扱った。

上記計算では温度応力を考慮して行ったが、熱ひずみの取扱いについての概要を次に述べる。なお、ここでは温度応力に関してのみ述べるが、軸対称シェルの有限要素化についての詳細は参考文献⁽¹⁾⁽²⁾に譲る。

まず無ひずみ無応力状態（測定ではイニシャライズした状態）からの温度変化量をつぎのように円周方向にフーリエ展開できると定義する（図-4参照）。

$$T = \sum_{n=0}^m (t, s) \cos n\theta \dots\dots\dots(1)$$

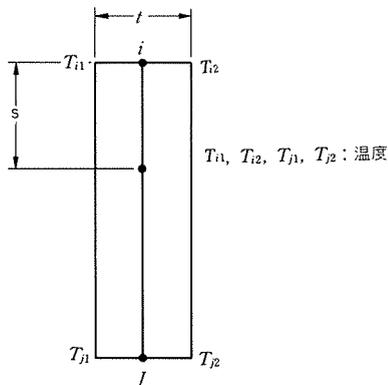


図-4 軸対称シェル要素

これを用いると熱ひずみベクトル $\{\epsilon_0\}$ はつぎのように与えられる。

$$\{\epsilon_0\} = \{ \alpha N_T \quad \alpha N_T \quad 0 \quad \alpha M_T \quad \alpha M_T \quad 0 \}^T \dots\dots\dots(2)$$

ここに

$$N_T = \sum_{n=0}^m \frac{1}{t} \int_{-1/2}^{1/2} T_n(t, s) \cos n\theta ds \dots\dots\dots(3)$$

$$M_T = \sum_{n=0}^m \frac{12}{t^3} \int_{-1/2}^{1/2} T_n(t, s) \cos n\theta ds \dots\dots\dots(4)$$

α ; 線膨張係数

t ; 板厚

である。このあとの手順は熱ひずみベクトル $\{\epsilon_0\}$ より、

熱ひずみによる節点力

$$\{F\}_{\epsilon_0}^c = - \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV \dots\dots\dots(5)$$

を求め、他の荷重による節点力と重ね合わせて熱ひずみを考慮しない場合の手順と同様に多元連立方程式を解くことになる。なお、軸対称温度分布状態の場合には $n=0$ として解けばよい。

コンクリートの静弾性係数およびポアソン比に関して、実際に応力計算で用いた値は各測定時における弾性係数試験の結果を採用した。

(1) 縦方向プレストレス導入による応力

図-5は縦方向プレストレス導入による鉛直方向応力の計算値と実測値とを比較したものである。図中の実線は壁外側を、破線は壁内側の応力を示している。縦方向プレストレスの導入は、円周方向プレストレスの導入時の曲げ応力に対して配慮するものであるが、実測値からプレストレスは十分に確保されたことがわかる。計算値と実測値とを比較すると、実測値は計算値を最大で約25kgf/cm²(2.5MPa)上回っている。これはこの場合だけ応力計算に温度応力を考慮していないことが多少影響していると考えられる。

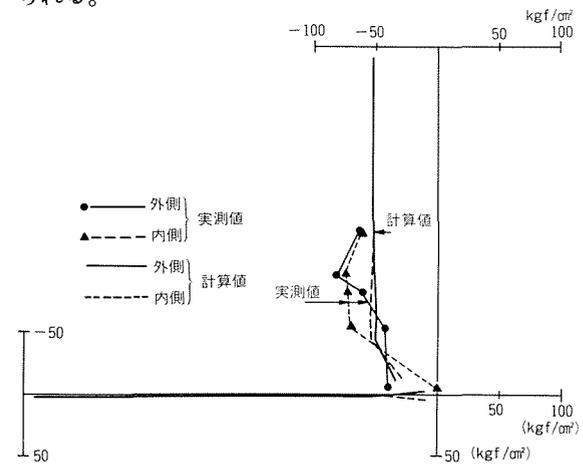


図-5 縦方向プレストレス導入時の鉛直方向応力

(2) 円周方向プレストレス導入による応力

(a) 円周方向

図-6は緊張完了後の値を示している。実測値から判断して、PCストランドのリラクゼーションなどの影響により多少応力が緩和するが、壁体のプレストレスは十分に確保されている。また後述する注水時の応力と合成しても設計上の残留圧縮応力度10kgf/cm²(1MPa)が確保され緊張方法の妥当性がうかがえる。計算値と実測値とを比較

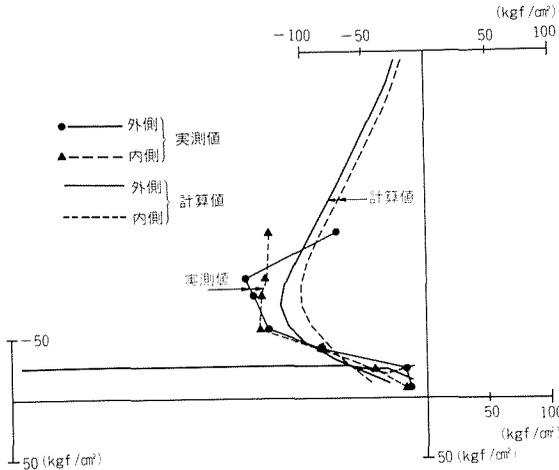


図-6 円周方向プレストレス導入時円周方向応力 (緊張完了後)

すると定性的な傾向はよく一致しているにもかかわらず、実測値が計算値を最大30kgf/cm² (3 MPa) 上回っている。これはコンクリートの静弾性係数の選定や、PCストランドの緊張力による誤差が少なからず影響していると考えられる。

(b) 鉛直応力

図-7は緊張後の値を示している。計算値と実測値との比較では、応力レベルで多少差が認められるものの定性的な傾向はよく一致している。

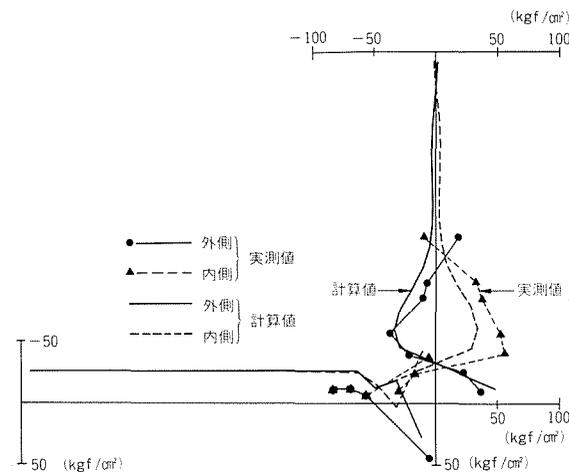


図-7 円周方向プレストレス導入時鉛直方向応力 (緊張完了後)

(3) 注水時の応力

(a) 円周方向応力

図-8は注水時(水深15.5m)における値を示している。計算値と実測値との比較では、応力レベルやその傾向はともによく一致している。

(b) 鉛直方向応力

図-9は注水時(水深15.5m)における値を示している。底版における曲げ応力の計算値と実測

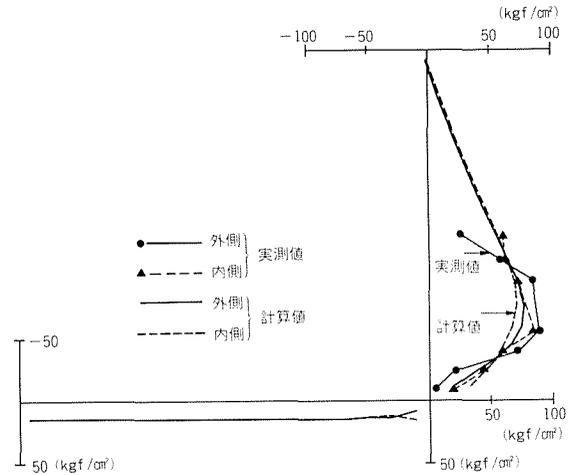


図-8 注水時円周方向応力(水深15.5m)

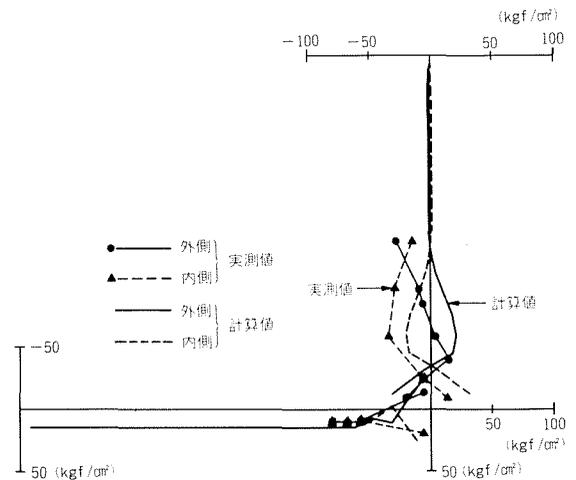


図-9 注水時鉛直方向応力(水深15.5m)

値の比較において、応力レベルやその傾向はともに比較的よく一致している。一方、側壁においても同じような傾向である。

(4) 満水放置時の温度応力

図-10, 11はそれぞれタンク内を満水にして放置した状態における円周方向および鉛直方向応力を示している。この場合、実測値は必ずしも温度応力だけによるものではなく、クリープなどの影響もあると考えられるが、温度応力が支配的であると考えて応力計算を行った。計算値と実測値を比較すると、円周方向応力に関しては、傾向においてよく一致しているものの、外側応力度において実測値は計算値の約2倍を示している。鉛直方向応力に関しては応力レベルにおいて計算値と実測値との差異は明確ではない。

(5) 減水時の応力

図-12, 13は減水時の水深12.5mの状態における

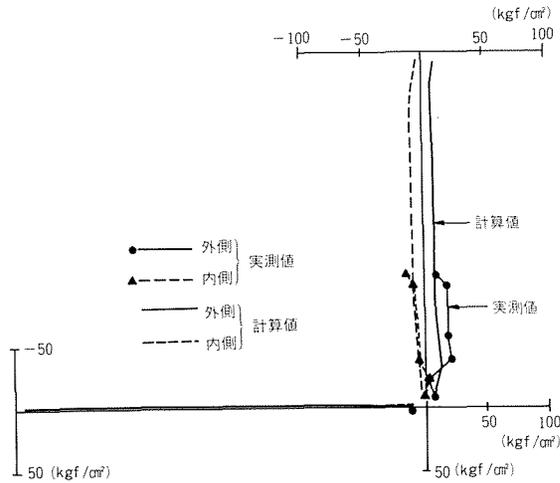


図-10 満水放置時円周方向応力

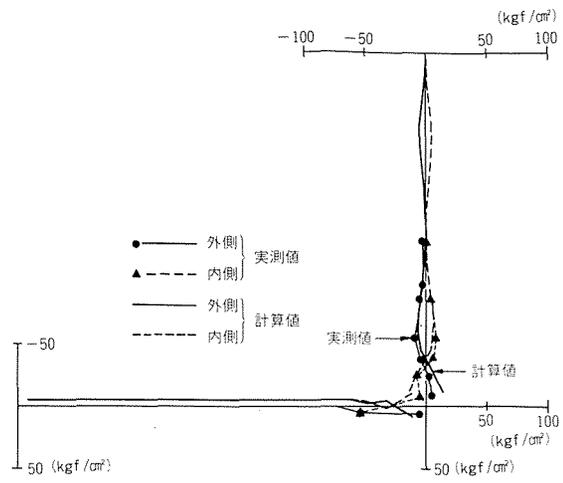


図-13 減水時鉛直方向応力(水深12.5m)

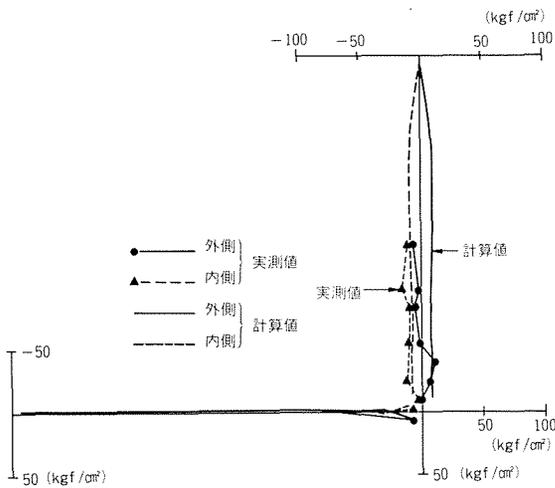


図-11 満水放置時鉛直方向応力

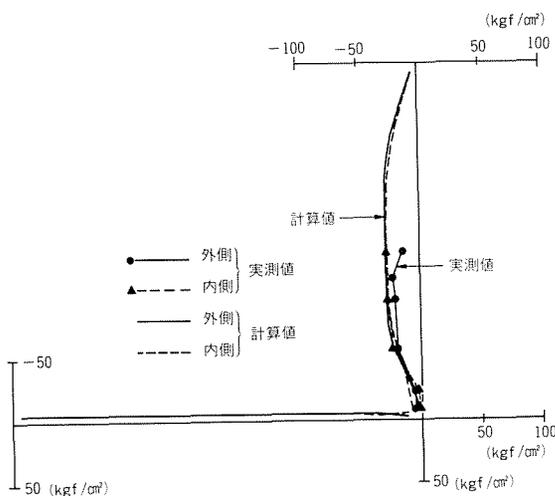


図-12 減水時円周方向応力(水深12.5m)

円周方向応力、鉛直方向応力を示している。注水時と比較して応力の符号が逆になっているが、このことは満水状態に初期値を設定したことによる。両計測時とも、計算値と実測値との比較では、円周方向および鉛直方向ともよく一致しており、タンクの挙動をよくとらえている。また初期値と測定時における温度変化がほとんどなかったことにより、温度による曲げ応力は生じていないと考えられる。

§ 4. 振動実験

4-1 加振方法

本実験に利用した方法は、①強制振動、②自由振動、③常時微動の3つであるが、これらの方法について説明する。

- (1) 強制振動……PC杭 ($\phi = 400\text{mm}$, $l = 12.0\text{m}$) をディーゼルハンマで打撃し、地盤に強制振動を発生させて、これをタンクに伝播させた。
- (2) 自由振動……タンクに自由振動を与える方法に一般に引き綱法とよばれる方法を用いた。これはワイヤロープでタンクを引張り、引張破断装置(写真-1)を使ってロープを切断し、タンクを自由振動させるものである(写真-2)。タンクの側壁上部に特殊な引張破断装置を取付け、この一端にワイヤロープを結び付けた。ワイヤはこの装置から下方へ $\phi 23^{\circ} 5' 45''$ の角度で、地上のレッカー車と結ばれている。引張破断装置に使った破断用鋼材は、引張時の伸び量をできる限り小さくする必要があるので、材質は炭素含有量の多いS45Cを使用した。その形状は $\phi 30\text{mm}$, $l = 195\text{mm}$ の棒鋼で、中央にV形の切欠きを設けたもので、所要の引張力で破断する。

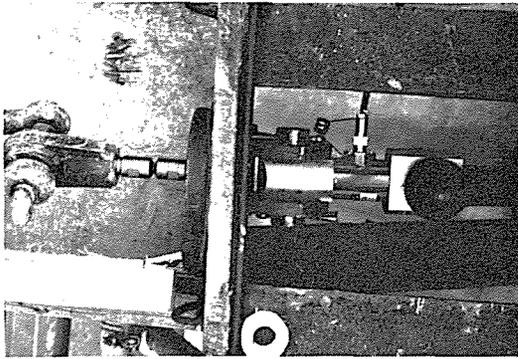


写真-1 引張破断装置

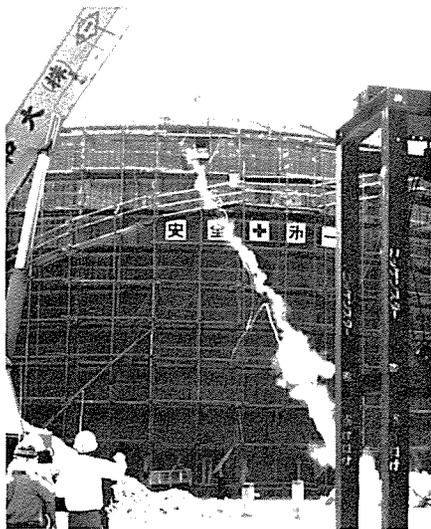


写真-2 引き綱法((破断の瞬間)

破断引張力の確認は、破断用鋼材と一体に取付けたロードセルを使用し、検出値を動平衡指示器に出力させる方法で行った。本実験の場合、安全を考慮して10tf前後の引張力で破断するようにした。

(3) 常時微動・地盤の脈動、地盤の振動あるいは風などによって、構造物に常時発生しているものである。

4-2 計測器の構成

本実験に使用した計測器類は、表-1のとおりである。

4-3 測点の設定

測点は図-14に示すとおりである。これらの測点に取付けた振動計は、すべてタンクの水平半径方向の挙動を検出できるように固定した。

4-4 実験結果とその考察

実験結果は次に示す5項目について整理した。

- ① 振動モード
- ② 固有振動数
- ③ 減衰定数
- ④ 液面動揺現象
- ⑤ 実験値と計算値との比較

表-1 測定機器
杭打・引き綱法用

ピックアップ	VP-3300LL	IMV	5cH
	VP-4122	IMV	9cH
	VP-3114	IMV	1cH
増幅器	VM-3303LL	IMV	5cH
	VA-4122	IMV	9cH
	6V06	三栄	1cH
データレコーダ	R-70A	TEAC	12cH
ビデグラフ	5L31	三栄	6cH
	5M12C	三栄	16cH
	5M21	三栄	6cH

引張応力測定用

引張応力計 (自動平衡指示器)	LM-1B (15t)	東京測器	1台
ロードセル	TLP-10 (15t)	東京測器	1台

常時微動測定用

ピックアップ	MTK-H-1C MTK-V-1C	保坂	2cH
アンプ	6V06	三栄測器	2cH

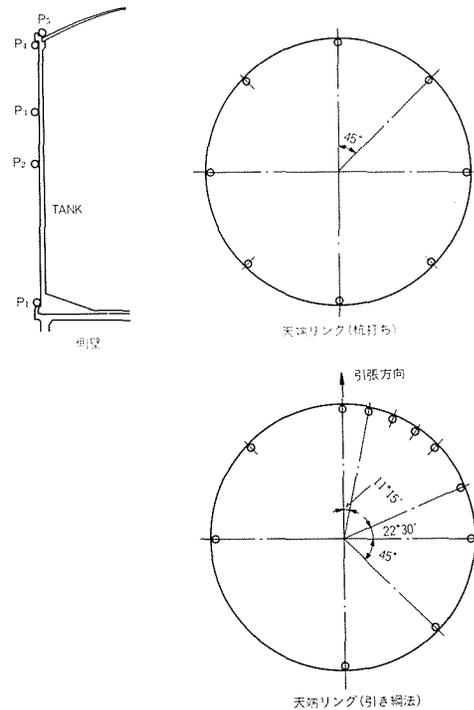


図-14 測点設定位置

(1) 振動モード

波形はすべて変位振幅で記録した。この波形から挙動発生後のある時点における各測点の変位状況を示したのが図-15の振動モードである。このモードは側壁上部の測点(P5)に対する各測点の測定値との比率を図化したものである。

まず杭打ち時の側壁と天端リングについて、空液と満液に分けてみると、側壁では空液の状態では1次モードに、満液の状態では2次または3次モードにな

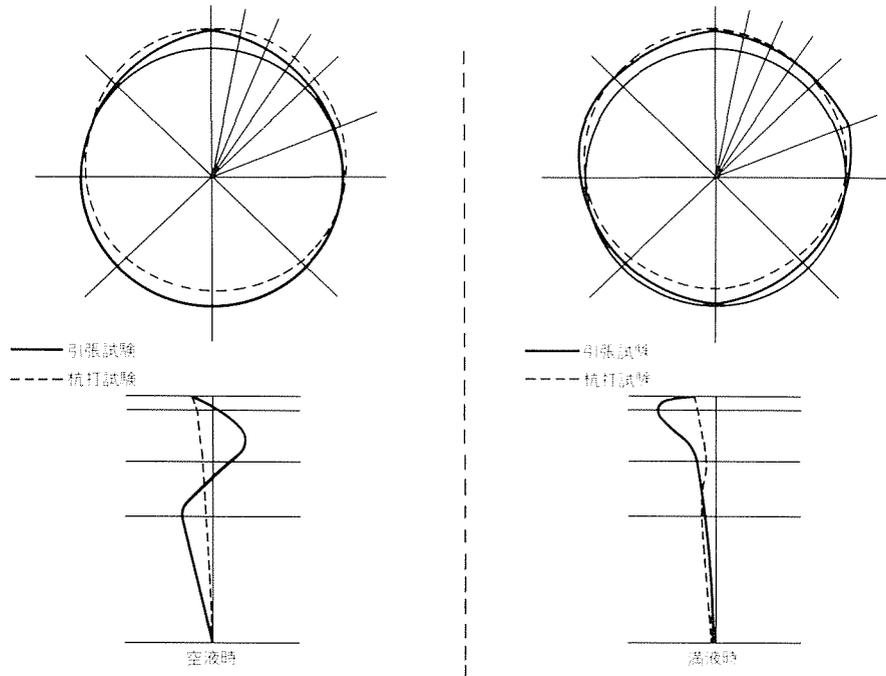


図-15 振動モード(振幅比・P 5 = 1)

っている。天端リングではどちらの状態でも1次モードとなっている。

次に引き綱法で行った場合、側壁では空液の状態では2次または3次モードに、満液の状態では1次または2次モードが現われている。天端リングでは引張側の半断面が変位し、引張点付近に大きく発生している。

(2) 固有振動数

表-2はFFT分析を行った結果である。杭打ちの場合はタンク全体が揺れ、空液で5Hz、満液で3~4Hzとなっている。

引き綱法では空液で0.7~1Hz、満液で0.7~0.9Hzとなっている。

表-2 固有振動数

測点	杭 打 ち		引 き 綱 法		常 時 微 動	
	空 液	満 液	空 液	満 液	空 液	満 液
P1	5.1 ^{Hz}	3.8 ^{Hz}	0.8 ^{Hz}	0.7 ^{Hz}	4.8 ^{Hz}	— ^{Hz}
P2	5.1	3.8	0.7	—	4.8	—
P4	5.8	3.9	1.1	0.8	4.8	—
P5	5.8	3.9	0.7	0.9	4.8	3.4

常時微動では、空液で5Hz、満液で3~4Hzとなっている。

(3) 減衰定数

表-3は減衰定数を示したものである。それによると、構造物としての減衰定数は大きな値であり、

剛性の高い特性をもっている。その特性は、タンクの下部より上部の方が若干大きく現われている。空液と満液とを比較してみると、タンクが満液の状態になっていけば、水が付加重量として作用し、一般に減衰を抑制するような挙動が現われなければならないが、そのような特性は明確には得られなかった。

表-3 減衰定数

測点	杭 打 ち		引 き 綱 法	
	空 液	満 液	空 液	満 液
P1	0.14	0.23	0.22	0.19
P2	0.15	0.10	0.22	0.19
P4	0.19	0.16	0.26	0.25
P5	0.17	0.17	0.23	0.25

(4) 液面動揺現象

タンク内に液体が満たされていると強制外力を与えた場合、あるいは自由振動を発生させた場合に液面動揺現象が見られる。この現象は振動数によって発生する波形が変化する。大別すると低振動時のスロッシング波から始まり徐々に振動数を増加させると角錐波、同心円波、衝撃波にかわり高い振動数ではさざ波が発生する。

本実験では実験規模が小さいので、構造物と共振することもなく、スロッシング波も見られなかった。

(5) 実験値と計算値の比較

解析は、固有振動数、最大変位振幅、振動モード

について行った。

計算上の仮定条件は

- a. 側壁の下端を固定とする。
- b. 底版は考慮しない。
- c. ドームの換気孔を考慮する。
- d. 地盤は上下方向バネとして考慮しない。
- e. 液は慣性力として自重に加算する。

要素は、側壁を16分割に、ドームを13分割にした。

入力波は杭打ち時の記録波形を再生した加速度波形を、タンク底版全体に水平力として作用するように与えた。

固有振動数および最大変位振幅について、実測値と計算値とを比較したのが、表-4である。杭打ちの場合、1次モードは大体一致している。実験値では2次モード以上は求められなかったので計算値とは比較できなかった。最大変位振幅については、計算値の方が若干大きくなっている。

次に振動モードについては、図-16に示すとおりである。それによると、側壁の変形は1次および3

次に発生している。ドームについては、1次以外は変形している。この傾向は空液および満液について同じことがいえる。

§ 5. まとめ

- (1) 応力計算をFEMによって行ったが、全般的に計算値と実測値とがほぼ一致していて、満足する結果が得られた。従来のFEMによらない計算では、壁下端部の境界条件の取扱いが難しく、タンクの実際の挙動と一致しない点が見られたが、FEMによりこれらの点が解消できたものと思われ、FEMによる応力計算は有効であると考えられる。
- (2) 振動実験においては、今回のような方法では高次の挙動が得られないために、FEMによる計算値との対応ができなかった。今後は起振機を利用して大型タンクの動的挙動を実測し、諸条件を組入れた計算値との対応をはかりたい。

参考文献

- (1) O. C. Zienkiewicz, Y. K. Cheung “The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics” Mcgraw-Hill 1967
- (2) 千葉敏郎, 塩屋繁松, 川股重也 “有限要素法による回転殻の応力解析” 日本鋼構造協会 1969
- (3) 田巻雅, 芳村仁, 三上隆 “弾性基礎上の円筒形タンクの非軸対称温度応力について” 土木学会年次講演会 1977
- (4) 和久田弘, 神谷宏, 吉田弘, 平野舜一 “PCタンクの振動実験について” プレストレストコンクリート技術協会第19回研究発表会 1979

表-4 実測値と計算値との比較

特性	試験結果(杭打ち)		FEM解析		
	空液	満液	空液	満液	
固有振動数(HZ)	1次	5.8	3.9	4.9	3.9
	2次	—	—	7.0	6.7
	3次	—	—	10.8	7.8
	4次	—	—	12.9	12.9
	5次	—	—	13.2	13.2
最大変位(μm)	測点 P ₃	14.0	7.4	20.4	12.8
	P ₅	12.8	7.3	21.4	12.3

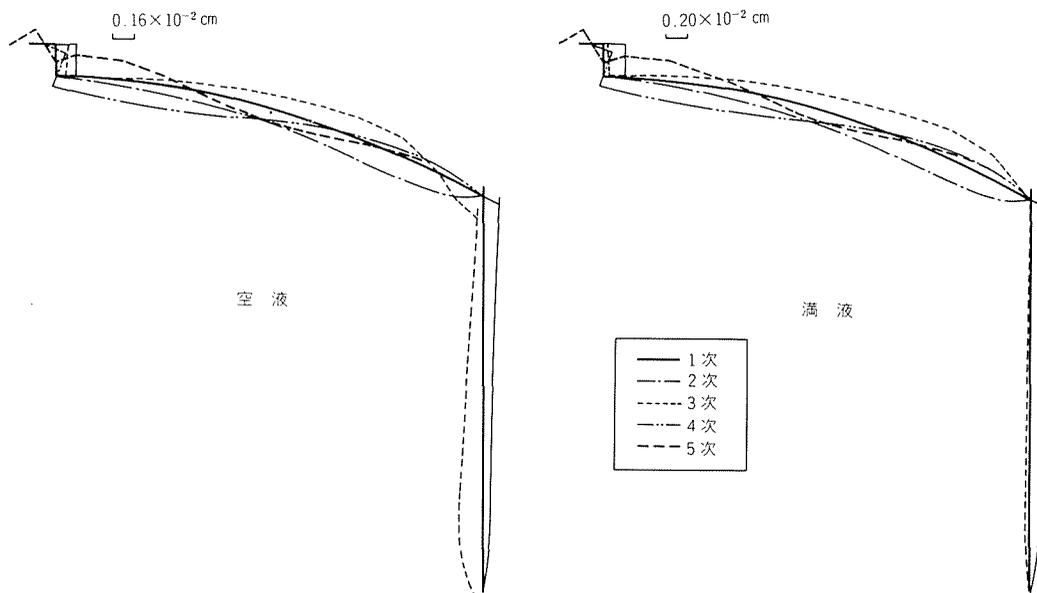


図-16 振動モード