

プレストレストコンクリート貯槽の振動実験に関する報告

安部二郎*

1. はじめに

今日まで、プレストレストコンクリート貯槽（以下PCタンクと称する）は、上水道施設のうちの貯水、配水などを目的とする貯槽として多用されてきた。しかし、近年になってPCタンクを他の各種容器に応用しようとする傾向が現われ、検討が加えられるようになった。特に我が国のように地震多発国である条件を考えると、構造物に関する種々の検討事項のうちで、耐震安全性に関する検討は大変重要な事柄となる。

従来から、PCタンクは耐震安全性に優れていると言われていたが、我が国においては実際に振動実験が行われた例はなく、今回初めて、科学技術庁、国立防災科学技術センター所属の大型加振装置を用いて検討が加えられたのである。

検討項目としては、

1) PCタンク（平底円筒形貯槽）の振動特性および耐震強度

2) 内容液（水）の水面動揺現象

を対象としており、ここに実験で得られたPCタンクの特徴等を紹介するものである。

2. 実験概要

2.1 PC製供試体タンクの概要

実験に使用されたPCタンクは図-1に示すように実際に施工されている形状を考慮して、内径：5.50m、壁高：6.00m、壁厚：10cm、幾何容積：119m³として、スケールダウンとともにより実物大に近い物となるよう工夫がなされた。ただし、加振台の入力を供試体タンクに完全に伝達させるために、PCタンクの底版と加振台の結合方法を検討した結果、図示するような断面形状を採用することにした。そして水面の動揺現象を観察するために無蓋とした（図-1参照）。

PCタンクを構成するPC材の決定は、円筒シェル下端部固定条件で解析したものに基づいて、図-2に示すように横締めは、PCストランド（7-φ9.3）、縦締めはPC鋼棒（φ17A種1号）を用いてプレストレスが導入された。配筋、PC材の組立て、型枠作業、コンクリ

*（株）安部工業所技術研究所所長

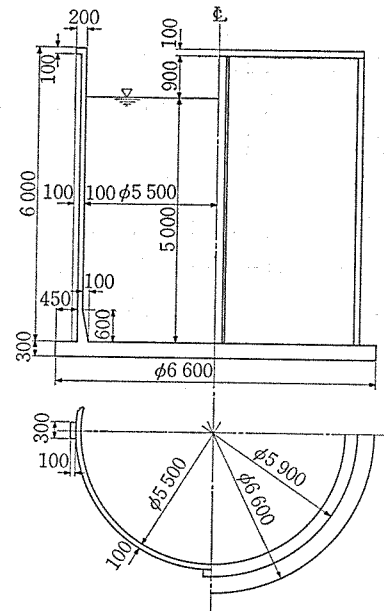


図-1 PC製供試体タンクの一般図

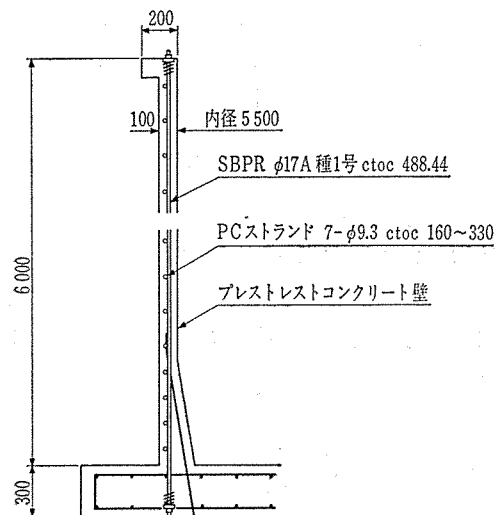


図-2 PC製供試体タンク断面図

表-1 供試体に使用した鋼材

材料名	規格	基本径 (mm)	引張強さ (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)
PC鋼棒	JIS G 3109 A-1	17	95	85	5以上
PC鋼より線	JIS G 3536 SWPR 7A	7-φ9.3	175	150	3.5以上
鉄筋	JIS G 3112 SD 30	10, 13, 19	49~63	30	14以上

耐震設計

表-2 供試体に使用したコンクリート

強度 (kg/cm ²)	スランプ (cm)	最大骨材寸法 (mm)	空気量 (%)
400	10	10	4

表-3 PC の材料特性値

材令養生方法	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	ポアソン比	クラック発生引張強度 (kg/cm ²)
65日 空気中	462	3.65×10 ⁵	0.185	50

ート打設などは、従来どおりで行われた。供試体タンクを構成する諸材料の数値は表-1, 2, 3 に示す。

2.2 計測システム概要

計測対象は歪、加速度、水圧、水位とし、図-3 に示すように歪計、加速度計、水圧計、水位計を取り付け、各測定値をデータレコーダーに記録させ、また、ビジュグラフ、ペンレコーダーも併用して解析に使用した。

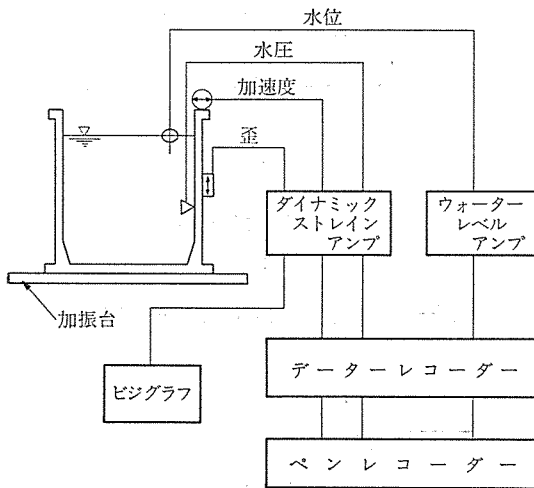


図-3 計測システム

2.3 実験条件

供試体タンクを写真-1 に示すように加振台にのせ、アンカーボルトを用いて供試体タンクと加振台を緊結し、加振入力完全に PC タンクに伝達するようにす

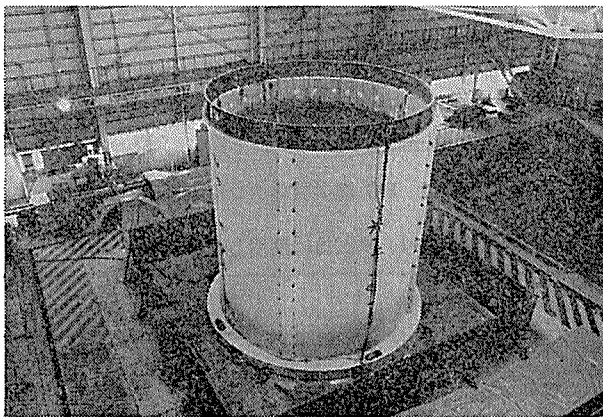


写真-1 加振台上に据え付けられた PC 製供試体タンク

る。

加振条件としては、表-4, 5 に示すものとし、図-4 に示す方向の振動を与えた。

表-4 加振条件

加振波形	注水率=0, 50, 100 (%)
正弦波スイープ	$F=0.1\sim 0.8, D=1\sim 2$
正弦波スイープ	$F=1\sim 20, A=100$
正弦波定常	$F=0.2\sim 2.0, D=1\sim 2$
正弦波定常	$F=2.0\sim 40.0, A=300$
ステップ	$A=100$
エルセントロ	$A=200\sim 300$
八戸	$A=200\sim 300$
タフト	$A=300$
東京 101	$A=300$

注) F : 振動数 (Hz), D : 変位 (cm), A : 加速度 (gal)

表-5 実験に用いた模擬実地震波の原記録

場所	日付	震源地	成分	最大加速度
アメリカ カリフォルニア エルセントロ	1940 5月18日	32.7 N, 115.5 W インペリアルバレイ	NS	0.33 G 326 gal
アメリカ カリフォルニア タフト	1952 7月21日	35.0 N, 119.02 W アーヴィンタハチャビ	EW	0.15 G 147 gal
日本 東京 101	1956 2月14日	35.37 N, 139.47 E 東京	NS	0.076 G 74 gal
日本 青森 八戸	1968 5月16日	40.7 N, 143.6 E 十勝沖	NS	0.23 G 225 gal

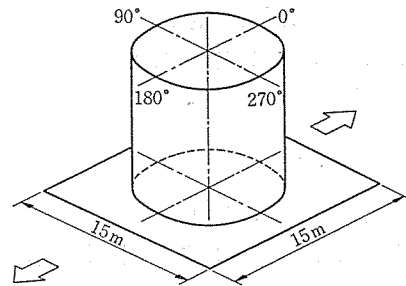


図-4 加振台上の供試体タンクと加振方向

3. 実験結果

各測定値を収録する前に供試体タンクと加振台の緊結状態が良好であるか否かを判断するために、加速度計の記録(加振台上加速度計と PC タンク基底部の加速度計)を検討し、加振台からの入力パワーが十分満足できる状態で供試体タンクに伝達されていることを確認した。

3.1 パワースペクトル

正弦波定常加振(正弦波定静定態加振)では、供試体タンクの加振方向下部はほとんど入力振動数に対応して線形応答を示したが、加振方向頂部では、二次、三次の高調波が現われ、また、加振方向と直角位置の頂部では、

注水率 50%, 100% とともに、二次（偶数次）の高調波が現われた。この加振方向と直角位置、すなわち、90°, 270° 位置の入力に対応しない応答で顕著なものは、注水率 0% の場合で 35 Hz 近傍、50% で 18 Hz 近傍、100% で 12 Hz 近傍の値を得た。

3.2 振動数応答特性

判定基準応答を A_4/A_2 , A_7/A_2 として、応答倍率から判断した共振振動数を表-6 に示す。

正弦波定常加振時と模擬実地震波加振時とを検討してみると、いずれも水の付加質量（水量）が増加するとタンク自体との連成振動に影響を与え、タンクの見かけの固有振動数は低下する。この時、水にスロッシング（共振による水面動揺現象）現象以外の衝撃的な動揺が生ずると固有振動数に影響が現われる。この影響等を考慮して共振点を振動数応答特性および表-6 から推定すると注水率 0% で 18~35 Hz, 50% で 18~30 Hz, 100% で 12~偶数次高調波発生振動数と考えられる（図-5 参照）。

表-6 供試体タンクの共振振動数

注水率 (%)	応答系	共振振動数 (Hz)	
		正弦波定常加振	エルセントロ波加振
0	A_4/A_2	18, 21	18, 35
	A_7/A_2	18, 21	18, 22, 35
50	A_4/A_2	18, 20, 30	18, 35
	A_7/A_2	17, 20, 32	17, 20, 33
100	A_4/A_2	12, 14, 22	12, 22, 26
	A_7/A_2	12, 14, 22	12, 14, 24

注) A_2 : 加振方向下部, A_4 : 加振方向頂部, A_7 : 加振直角方向頂部

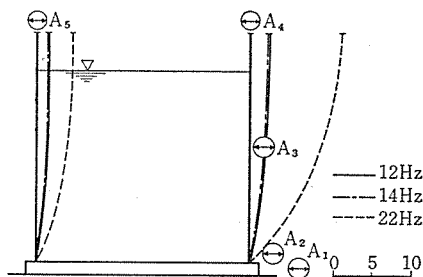


図-5 正弦波定常加振時（注水率 100%, 300 gal）の加速度応答倍率

3.3 振動モードと固有振動数

正弦波定常加振時の縦断方向振動モードおよび円周方向振動モードを整理してみると、縦断方向振動モードは片持梁の一次曲げおよびせん断モードで近似できることになり、円周方向振動モードは、楕円変形が現われる。

また、振動数応答特性の項で触れたように、水の量が増加するほど、その衝撃圧による仮想質量が増大して共振振動数は相対的に減少する。

3.4 供試体タンクの減衰率

注水率を 100% にして、ステップ波加振を行い、過渡応答記録を収録し、これにより、水-タンクの減衰率を求めた。この記録によると、タンク頂部の減衰率は、5.1% であり、タンク下部の減衰率は 10.5% となった。このことは、前に触れたことと同様、水がタンクの下部には単なる質量として作用し、減衰を助長するのに対しタンク壁頂部（水面近く）では、水が付加質量として作用し、減衰を抑制することになるからである。

3.5 水面動揺現象

正弦波定常加振実験で、加振方法を変位制御、加速度制御のそれぞれで行い観察および測定をした波形、波高などの概略を表-7 に示す。波形、波高は加振条件と非常に明確な関係にある。

表-7 供試体タンク内の水の波形

名称	スロッシング波	角錐波	同心円波	衝撃波	さざ波
波形					
波高 (mm)	150~420	100~300	100~150	1000以上	100以下
振動数 (Hz)	0.35~0.45	0.6~0.8	1.0~2.0	1.0~2.0	5.0~40.0

次に、発生波順に説明を加える。

- 1) 振動数を 0.35~0.45 Hz 近傍にするとスロッシング波を生じ、波高が 15~42 cm ぐらいになる（写真-2 参照。これは、スロッシング波の波長の約 1/2 波長の状態を示す）。また、スロッシング波の減衰を測定した結果によると、水の減衰は、構造物の減衰に比較して非常に小さく、減衰率として表わすと、注水率 50% で変位幅を 2 cm としたときで 0.38%, 注水率 100% 変位幅 1 cm で 0.161% が得られた。



写真-2 正弦波定常加振（振動数 0.45~0.5 Hz, 300 gal）

- 2) スロッシング波発生後、振動数 0.6~0.8 Hz あたり

耐震設計

でランダムな角錐波が生ずる。

- 3) 次に、振動数を1.0~2.0 Hzにすると同心円波が現われる。この時、タンクのブリージングにより発生するエネルギーが大きい場合は、タンク周辺壁部より、中心部に向かって送り出される波は影響を受けて、波高を高くし、中央部で水柱を発生させ崩壊消滅によるエネルギー発散現象をひきおこす。
- 4) その後、再び波高は小さくなり、再度角錐波を生じ振動数5.0~40.0 Hzの間ではさざ波が発生し、波高はほとんど生じないようになる。ただし、振動数が増すにつれて、さざ波の波長は短くなり、波高が小さくなることは明確な現象として現われる(写真-3 参照)。

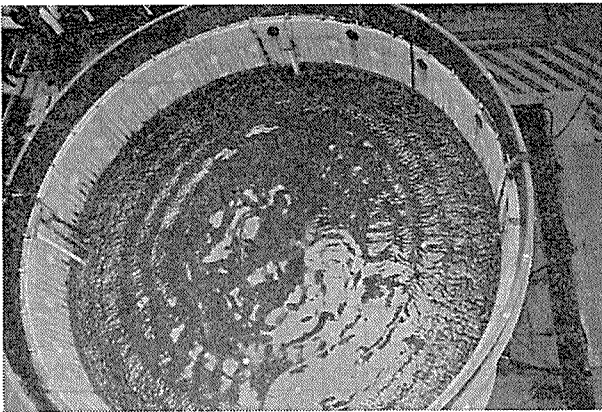


写真-3 正弦波定常加振（振動数 5.0~10.0 Hz, 300 gal）

ここで、模擬実地震波加振による波形、波高を観察、検討してみると、発生する波の主要部分は上記の3)あたりの領域の波形、波高に非常に類似しており、同心円波と衝撃波がみうけられる(写真-4 参照)。

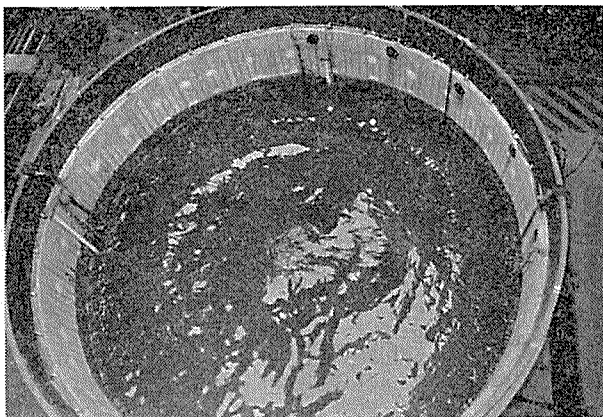


写真-4 模擬実地震波（エルセントロ波 300 gal）加振

3.6 水圧（増加分）の変化

注水率100%時の変位制御、加速度制御による正弦波定常加振実験で測定された増加分水圧の値を図-6と図-7に示す。水圧と水面動揺形状は密接な関係がありスロッシング波が発生する変位制御の範囲では、水面近

くで水圧の増加がみられ、衝撃波、さざ波が発生する加速度制御の範囲では、水底部に近づくにつれて水圧の増加がみられるようになる。

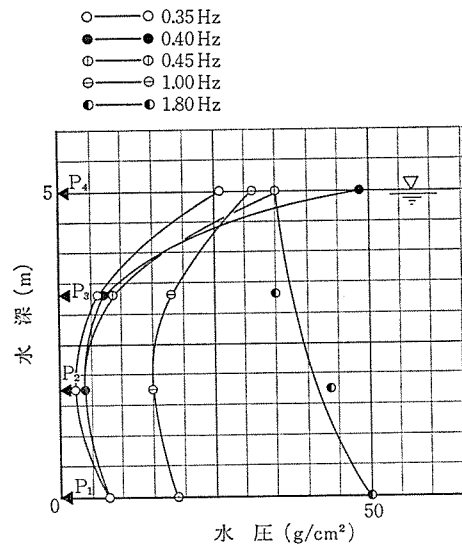


図-6 正弦波定常加振時の水圧分布図（変位 1 cm, 注水率 100%）

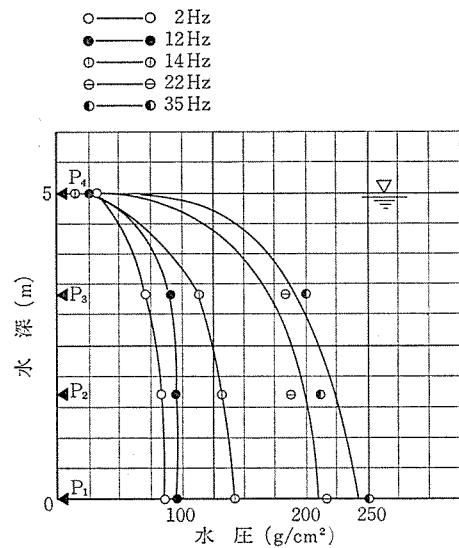


図-7 正弦波定常加振時の水圧分布図（加速度 300 gal, 注水率 100%）

3.7 供試体タンクの発生応力

正弦波定常加振実験の測定値のうちで、注水率0%の場合は、共振点でタンク頂部（加振と直角位置）で16 kg/cm²の値を得たが、その他の部分ではほとんど5 kg/cm²以下であった。また、正弦波定常加振による注水率100%の場合は図-8で示すような値を得た（いずれも加速度は300 galである）。実験を通して測定された値のうちで最大値を示すものは強加振時で加振と直角位置の頂部で61 kg/cm²を得たが、これは、別途実験による

検討値と比較してみても十分、弾性範囲内にあると考えられる。

この形式のタンクの殻変形モードは図-8からわかるように殻壁下部には曲げモーメントが発生し、殻壁頂部では円周方向引張力または曲げモーメントによる応力が発生し支配的となりタンクの形状特性を明確に示す。特に、二次の楕円モードが発生する振動域では各部に最大応力を生じた。

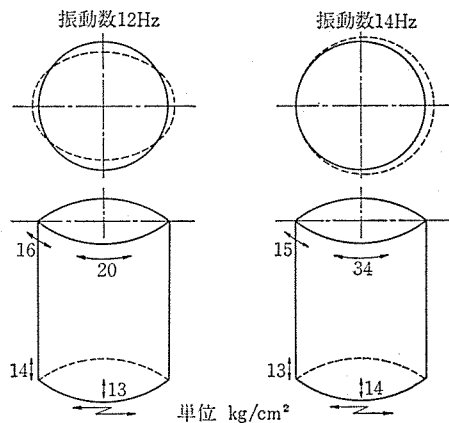


図-8 振動モード応力図 (正弦波定常加振加速度 300 gal, 注水率 100%)

3.8 PC 鋼材の緩み

コンクリートに応力を導入した PC 鋼材に振動の影響による緩みが発生しうるか否かを知るために、PC 鋼棒に歪ゲージを取り付け、測定を行った結果、各実験を通して、実験の前後で、最大値は -20μ から $+79\mu$ の範囲における変動が収録された。

4. 考 察

PC タンクの耐震安全性に関する大型加振実験で得られた測定値に考察を加えると次のようになる。

- 1) スペクトル解析¹⁾によると、正弦波定常加振時において、振動数応答で非線形応答が顕著に現われ、特に槽頂部では、満水時(注水率 100%)に二次高調波が卓越し、偶数次分波が入力振動数となる時、非線形応答が現われた。また、模擬実地震波加振時においても、満水時はそれ以外の状態のときに比べ、偶数次高調波の出現が顕著であり、付加質量の影響が非常に大きいことがわかった。
- 2) PC タンクでは、タンクの固有振動特性を加振と直角方向加速度計による記録が明確に示すことがわかった。
- 3) 縦断面振動モードに壁体と底版の結合方法の特性が現われ、拘束条件の緩やかな槽頂部に近づくにつれて、横断面振動モードに一次、二次の楕円モードが発

生することがわかった。

- 4) 振動数応答特性から、この槽の一次固有振動数は、注水率 0% で 35 Hz, 50% で 18 Hz, 100% で 12 Hz であると推定できた。
- 5) この PC タンク本体の減衰率は注水率 100% の場合で 5% 程度であり、スロッシング波の減衰率は従来から使用されている大型貯槽用の 0.1% が得られた。
- 6) 波高増幅の因子は、共振振動数と変位であり、加速度にはあまり影響されない。スロッシング時の波高についても図-9に示すように共振点でも上限があり、水の粘性、表面張力、構造物との摩擦力などの影響を考慮する必要がある。ただし、共振点近傍の変位応答に関しては曾我部式²⁾が大型貯槽にも有効であることがわかった。

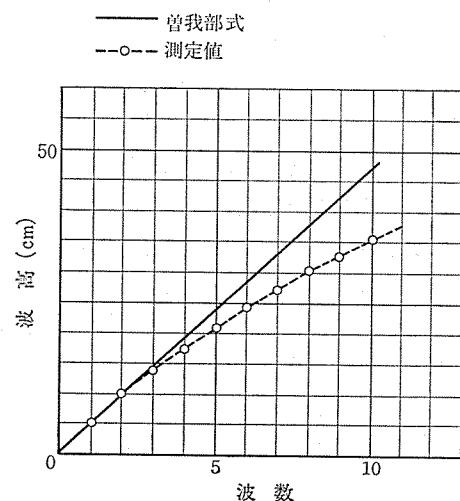


図-9 スロッシング波の測定値と曾我部式

- 7) 波の形態は加振振動数によって異なり、壁上部への影響はスロッシング波、デッキ屋根部への影響は衝撃波が検討対象となる。
- 8) 模擬実地震波加振では、このタンク内の水の固有振動数に近い成分を多く有する八戸波加振で、各種応答が顕著に現われた。この測定結果は、正弦三波擬共振での評価とかなりよく一致した。
- 9) 水圧は、正弦波定常加振時の共振点近くで振動圧が水位増加分と一致し、振動によるモードは曾我部の正弦波定常加振時応答と一致した。また、5 Hz 以上の振動では、衝撃力が支配的となった。これは殻壁と水の衝突運動により生ずる慣性力の増大に起因する(衝撃圧は、壁自体の固有振動数と密接な関係にある)。模擬実地震波加振では、波形、水圧などに対して加速度が支配的となった(図-10 参照)。
- 10) PC 鋼棒の歪測定結果より $-20\mu \sim 79\mu$ の変動が

耐震設計

----- 曾我部式300gal 変位2.5cm	○ エルセントロ 363gal
— 曾我部式0.4Hz 変位2.5cm 3波	● 八戸 226gal
— ハウスナー式0.3G	○ タフト 282gal
----- ハウスナー式0.4Hz 変位2.5cm	

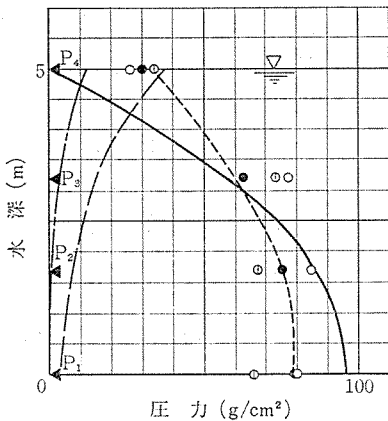


図-10 模擬実地震波による測定値と曾我部式、ハウスナー式

確認されたが、これはプレストレス力導入時における歪量の値である 2028μ に対して数%の値であり、誤差範囲と考えると差し支えないと思われるため、現在の工法および施工法で十分振動に対し、対処できる構造物を造ることが可能であると判断された。また、横締めにも緩みはみうけられなかった。

- 11) 実験に使用した供試体タンクは、水平震度 0.3G で設計されたものであるが、正弦波定常強加振時に最大応力 61 kg/cm^2 、模擬実地震波 300 gal 加振時に最大応力 7.1 kg/cm^2 を記録した。また、各実験終了後、供試体タンクを子細に点検したが、わずかなクラック

も認められず完全に無傷であった。このことから判断しても、この形式の PC タンクは実地震波に対してはかなりの耐震安全性を有しているものと判断される。

5. おわりに

この実験に使用された供試体タンクの寸法は、加振台に載る範囲でより実物大に近いものを用いたものであり、振動実験結果と数値解析など（紙面の都合上説明は省略する）を比較検討してみると、一般形状寸法タンクは、普通の耐震設計法で設計して差し支えないと思われるが、超大型タンクについては、今後検討を重ねる必要があると思われる。また、この実験は、東大生研；川井忠彦教授、柴田碧教授、岡田恒男助教授、中央大学；中沢晶平氏、国立防災センター；大谷圭一氏、木下繁夫氏、株式会社石井鉄工所、株式会社安部工業所の関係者によって計画実施されたものであり、本文は、Proceedings of the Fifth Japan Earthquake Engineering Symposium -1978 で発表されたものであり、そのなかで PC タンクに関する部分を簡略に紹介したものである。

参考文献

- 1) BRANDTS: "Statistical and Computational methods in Data Analysis, 2nd Edition." North-Holland 1976.
- 2) 曾我部: 液体貯槽の耐震設計に関する研究, 東京大学大学院博士論文 (1974)
- 3) SOGABE, K. and SHIBATA, H.: Proceeding of the fourth Japan Earthquake Engineering Symposium (1975)

◀刊行物案内▶

プレストレスコンクリート構造の高層建築設計例

本書は、プレストレスコンクリート構造の普及発展のため、1977年10月より11月に至り、日本建築学会関東支部と当協会が共催して行った建築の PC 技術講習会に使用されたテキストであります。

内容は15階建のオフィスビルを想定し、構造体の設計に当ってはできるだけ実際に建てる場合に無理のない、経済的で、かつ工法的にも特に難しい点のないようなものを選んであります。

若干余分があります。ご希望者は料金を添え、下記へお申し込み下さい。

体 裁: B5判 63頁

頒布価格: 1,000円 送 料: 200円

申 込 先: 社団法人 プレストレスコンクリート技術協会