

(120) PCタンクの地震時挙動観測

大成建設(株) 横山 正義 岩野 政浩
大成建設(株) 岡本 晋 青木 俊彦

1. はじめに 円筒形プレストレストコンクリートタンク (PCタンク) は、水圧による円周方向の引張力をPCケーブルによって抵抗させる構造物であり、その構造上の優位性から近年大型のタンクが建設されるようになってきている。過去の大地震における土木構造物の被害を顧みるとき、上水道施設の機能障害は市民生活に直接影響をおよぼすものであり、重要な上水道施設は高度な耐震信頼性を要求される構造物のひとつとなっている。

	八戸市PCタンク	浦和市PCタンク	
タンク	内径	28.0m	42.0m
	側壁高さ	9.81m	15.60m
	側壁厚	25cm	35cm
	屋根厚	15cm	12cm
	底版厚	75cm	110cm
容量	5,000m ³	20,000m ³	
	直径	500mm	700mm
構造	全長	8.55~10.55m	29.20~33.00m
	内厚	12mm	9~14mm
	杭本数	128本	226本

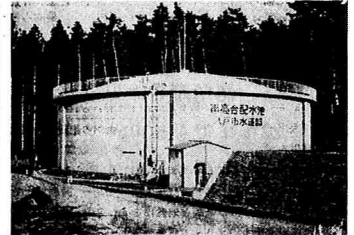


写真-1 八戸市PCタンク外観 (5,000m³)

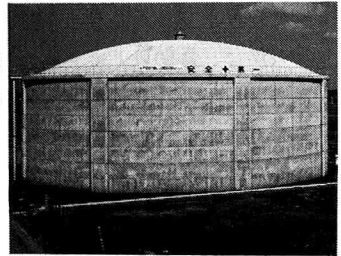


写真-2 浦和市PCタンク外観 (20,000m³)

特にこの種のPCタンクは軟弱な地盤上に建設される場合が多く、基礎形式として杭基礎形式が用いられ、その耐震設計上の要点として以下の点が挙げられる。

- ①側壁に作用する動水圧の評価
- ②軟弱地盤と構造物の連成振動の評価
- ③PCタンクの固有周期の評価
- ④基礎杭の地震時断面力の評価

1979年に建設された容量 5,000m³の八戸市PCタンク, 1983年に建設された容量20,000m³の浦和市PCタンクでは、上記の①~④の評価のために両タンクにおいて地震観測を実施し、動水圧、側壁のひずみ、地盤と構造物の応答加速度および杭のひずみを実測している。また、

- ①構造物と地盤との連成振動解析のための質点系モデル
- ②内容水と側壁の連成振動解析のための軸対称有限要素モデル

などを用いた動的応答解析を実施している。

本報は、大きさの異なるこのふたつのタンクにおける地震観測データから、両タンクに共通する地震時挙動および大きさの差異による挙動の相異などについて検討を行ったものである。

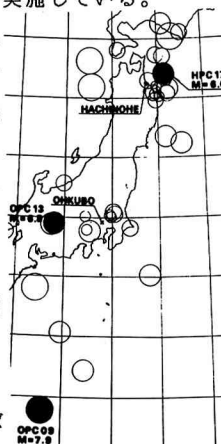


図-2 震央分布図

2. 構造の概要と観測機器 タンクの断面図および計器設置位置を図-1に示す。浦和市PCタンクは八戸市PCタンクの内径で約1.5倍、容量で約4倍で上部工はほぼ相似形をしている。一方、浦和市PCタンクの杭長は八戸市PCタンク

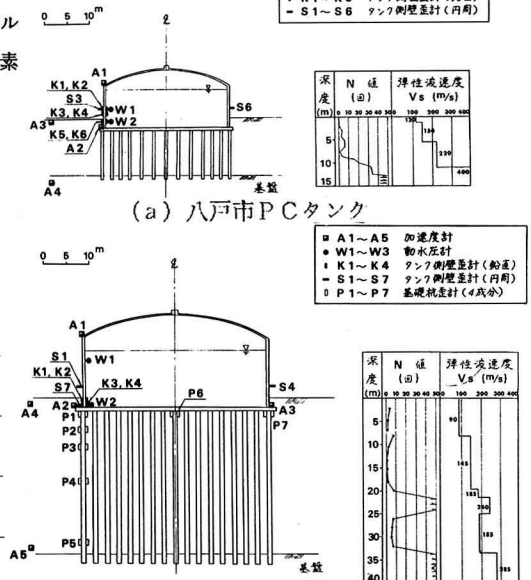


図-1 タンク形状および計器配置図

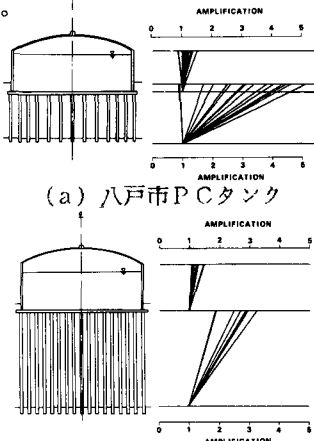
の約3倍の長さで相対的に長尺の基礎杭となっている。

(1) 八戸市PCタンクの構造概要 八戸市PCタンクは内径28m、側壁高さ9.81m、有効水深8.32mで底版厚さが35cm、側壁厚さが25cmである。建設地点の地盤はGL-11m付近までN値が1~4でせん断弾性波速度が120~220m/sのロームと砂の互層であり、GL-12m以深は岩盤となっている。タンクの基礎杭の先端はこの岩盤に達している。観測計器は、加速度計が側壁頂部；A1、底版；A2、地表；A3、基盤；A4の4測点8成分、周方向ひずみ計は底版から4.2mの高さに6成分；S1~S6、鉛直方向ひずみ計は3測点6成分；K1~K6、動水圧計は2成分；W1~W2、合計22成分設置されている。

(2) 浦和市PCタンクの構造概要 浦和市PCタンクは内径42m、側壁高さ15.6m、有効水深14.5mで底版厚さが110cm、側壁厚さが35cmである。建設地点の地盤はGL-22mまでN値0~2のシルト質層とN値7~8の砂層の互層で、せん断弾性波速度が90~145m/sの沖積層である。GL-22m以深は洪積層となっており、GL-26mまではN値50以上でせん断弾性波速度が240m/sの中間堅層が見られ、N値が7~8でせん断弾性波速度が185m/sのシルト層が現われた後にGL-34m以深にN値50以上でせん断弾性波速度が285m/sの基盤層が現われる。タンクの基礎杭の先端は中間堅層を貫通し、基盤層に達している。観測計器は、加速度計が側壁頂部；A1、底版；A2、A3、地表；A4、基盤；A5の5測点15成分、周方向ひずみ計が底版高さで底版から4.5mの高さに7成分；S1~S7、鉛直方向ひずみ計は2測点4成分；K1~K4、動水圧計が底版高さ；W2、W3と底版からの高さが10mの位置；W1に3成分、杭のひずみ計が3本の杭に7測点；P1~P7で28成分、計57成分設置されている。

3. 観測地震と加速度増幅率 これまでに両タンクで観測された地震の震央を図-2に示す。八戸市PCタンクでは1979年9月~1984年1月の期間に22個の地震が記録された。

観測地震のうち最大加速度が記録された地震は1981年12月2日のM=6.6、震央距離78kmの青森県東方沖地震(HPC17)で地表加速度が64gal、躯体最大加速度が43galであった。浦和市PCタンクでは1983年8月~1984年9月の期間に16個の地震が記録された。観測



(a) 八戸市PCタンク
(b) 浦和市PCタンク
図-3 加速度増幅率

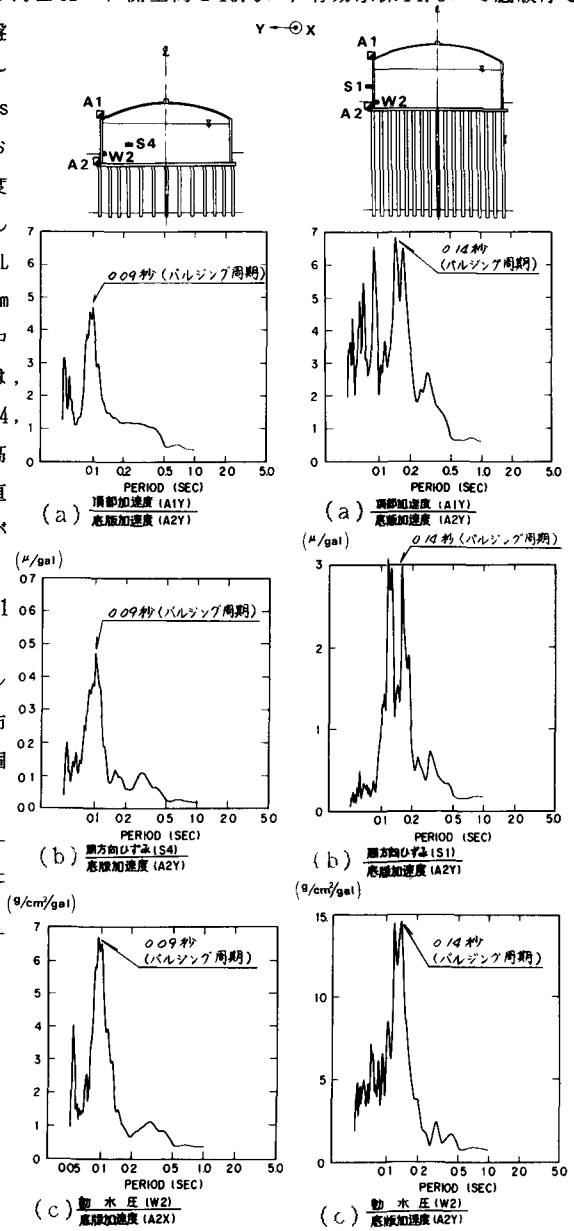


図-4 八戸市PCタンクの伝達関数

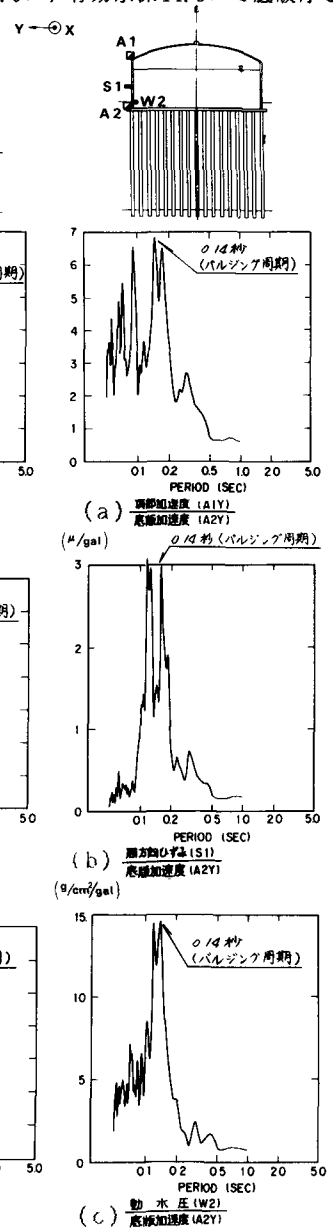


図-5 浦和市PCタンクの伝達関数

地震のうち最大加速度が記録された地震は1984年3月6日のM = 7.9, 震央距離 727kmの鳥島近海地震(OPC 09)で地表加速度が15gal, 軀体最大加速度が17galであった。

図-3に加速度の最大値の増幅率を示す。浦和市PCタンクの地盤の加速度増幅率は種々の入力地震動にもかわらず2~3倍の比較的狭い範囲に入っているが、八戸市PCタンクの地盤加速度増幅率は1~5倍の範囲にあり、入力地震動の特性により応答倍率が大きく変動している。八戸市PCタンクの地盤で大きい増幅率が生じるのは地表付近の3~4mのごく浅い層で重複反射によりごく短周期の波動が増幅するためである。タンク側壁頂部加速度の底版に対する増幅率は両タンクにおいて概ね1.2倍以下、最大1.4倍であってPCタンクはほぼ剛体的な振動をしている。

4. PCタンクの動特性 図-4に八戸市PCタンクの側壁頂部加速度, 周方向ひずみ, 動水圧の底版加速度に対する周波数伝達関数を示す。頂部加速度, 周方向ひずみ, 動水圧の3種とも周期0.09秒のところに明瞭なピークが見られ, この振動周期が内容水と側壁の連成1次周期(バルジング振動)と判断される。図-5に示す浦和市PCタンクでは頂部加速度, 周方向ひずみ, 動水圧とも0.14秒のところに同様の明瞭なピークを持ち, 0.14秒がこのタンクの内容水と側壁の連成1次周期と判断される。

両タンクの連成1次周期の比は, 材料の剛性, 単位体積重量が同一であるとすると, 相似則より

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\sqrt{\rho_2/G_2} \cdot L_2}{\sqrt{\rho_1/G_1} \cdot L_1} = \frac{L_2}{L_1} \quad (G_1 = G_2, \rho_1 = \rho_2 \text{ による})$$

ここに, T_1, T_2 はそれぞれタンク1, 2の時間の変数

ρ_1, ρ_2 はそれぞれタンク1, 2の単位体積重量の変数

G_1, G_2 はそれぞれタンク1, 2のせん断剛性の変数

L_1, L_2 はそれぞれタンク1, 2の長さの変数

となり, 長さの比と同じとなる。ここで, 両タンクの長さの比は42m : 28m = 1.5 : 1.0, 一方連成1次周期の比は, 0.14秒 : 0.09秒 = 1.5 : 1.0で一致する。以上の検討より, 両タンクは大きさの違いによる固有周期の差があるものの基本的な振動性状に差はないものとみなされる。

PCタンクのバルジング振動周期として0.09秒と0.14秒が得られたが, 軟弱地盤上に設置されている浦和市PCタンクでは図-6に示すように軟弱地盤がフィルターの効果を示し, 地表加速度には短周期成分がほとんど含まれなくなるため, このような場合にはバルジング振動の影響は設計上支配的な要因にはならないと考えられる。

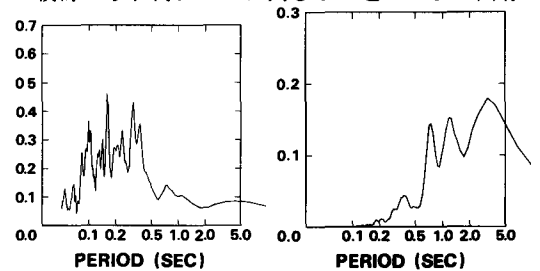
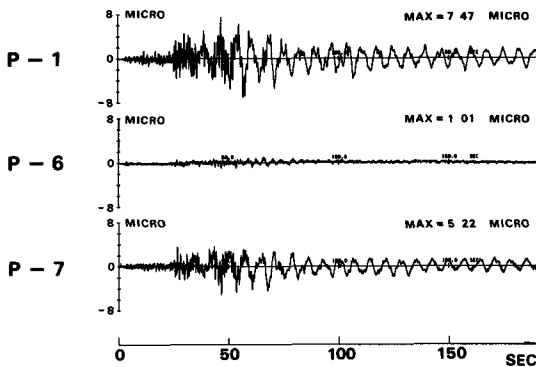


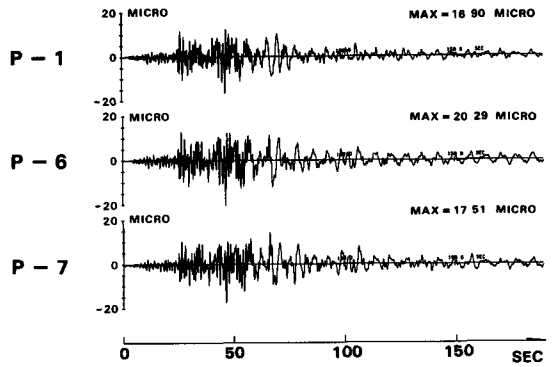
図-6 地表加速度のスペクトル (a) 八戸市PCタンク (b) 浦和市PCタンク

AXIAL



(a) 軸ひずみ

BENDING



(b) 曲げひずみ

図-7 ひずみ波形

5. 基礎杭の振動特性 浦和市PCタンクの基礎杭のひずみ計は図-1に示されるように、端部の杭にP1からP5の5測点、反対側の端部の杭の上部にP7、中央部の杭の上部にP6の計7測点である。各測点には4台のひずみ計が設置されており、軸ひずみと2軸まわりの曲げひずみが分離できるようになっている。

図-7に1984年9月14日の長野県西部地震(OPC13)における軸ひずみ波形と曲げひずみ波形とを示す。軸、曲げひずみはともに50秒付近まで短周期成分が大きい、50秒以降に表面波とみられる周期4~9秒の長周期成分が表われている。杭頭の軸ひずみは中央の杭;P6で小さく、両端部;P1, P7の杭で大きくなっている。また、P1とP7で位相がほぼ逆転していることからタンク全体の鉛直方向変形は少なく、タンクがロッキング振動をしているものと考えられる。曲げひずみは中央の杭のひずみがやや大きいもののほぼ同一の大きさ、同一の位相となっており、底版は剛体的に並進している。

図-8に杭の最大ひずみの深度方向分布を示す。曲げひずみは杭頭で著しく大きくなっているが、軸ひずみは杭頭でやや大きくなっているもののP2以深ではほぼ同一の大きさとなっている。

次に、長野県西部地震においてひずみ、加速度等が最大になる時刻付近の杭ひずみの深度方向分布の経時変化を図-9に示す。軸ひずみはP₃にやや位相差がみられるもののP₁~P₅はほぼ同位相である。これに対して曲げひずみはP₃付近が節となり、P₃の上部と下部とで位相が逆転している。図-10に杭頭の曲げひずみが最大となる46.72秒における曲げひずみの分布をChangの式と比較して示す。地震観測で得られた曲げひずみ分布はChangの式とよく一致している。

6. まとめ 大きさの異なるふたつのPCタンクの地震観測データの解析を行ないふたつのタンクに共通する振動性状について検討を行なった。内容水と側壁の連成振動周期として、0.14秒、0.09秒が得られた。また、この連成振動周期の相違はタンクの大きさの差によって生じたものであり、その基本的な振動性状には差が無いものと考えられる。

タンクの上部工はコンクリートシェル構造で剛性が大きいために上部工における加速度増幅率は概ね1.2~1.4倍程度であった。

参考文献) 貯水槽基礎杭の地震時挙動観測, 志波由紀夫 他, 第20回土質工学研究発表会, 1985

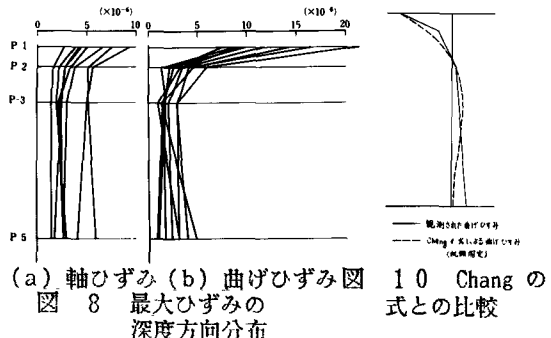


図8 最大ひずみの深度方向分布 (a) 軸ひずみ (b) 曲げひずみ 図10 Changの式との比較

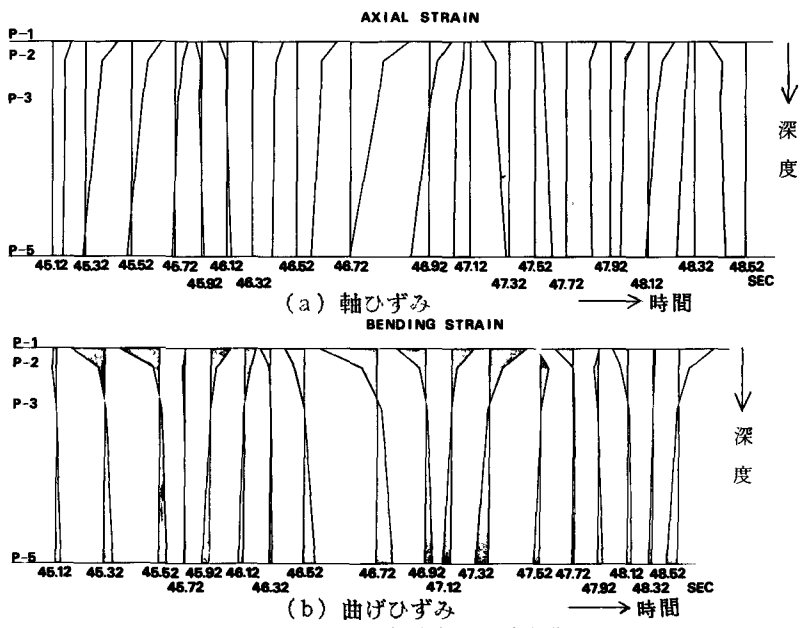


図-9 ひずみの深度方向分布の経時変化