

(42) プレストレストコンクリート貯槽の動的応答解析に関する一試案

大成建設(株) 正員 横山 正義 ○西橋 秀一
正員 泉 博允 村野 正明

1. はじめに

上水用の貯水タンクはその機能上高い耐震性を要求される構造物であり、設計時には動的耐震解析による検討を行っている。著者らはこれらの動的応答解析の妥当性を検証するために完成後の貯槽において地震観測を継続し、その動特性の把握を試みている。本報告では、実地震記録の分析から得られた主要な結果と上部構造・杭・地盤系連成振動解析モデルの妥当性について、実測値と対比しつつ検討を行った。また、昭和58年5月26日の日本海中部地震の観測記録について考察を加えた。

2. 地震観測の概要と観測結果から得られた知見

図-1.2に著者らが青森県八戸市において地震観測を行っている5000kℓP.C貯槽の全景と計器配置図を示す。表層はGL-11mに基盤面を持つ $V_s=120\sim220(m/s)$ のロームと砂の互層である。図-3には観測記録による貯槽頂部、貯槽底版、遠方表盤地表(GL-1.2m)の基盤加速度に対する周波数伝達関数を示す。貯槽頂部で最も卓越する周期0.25秒の振動は貯槽底版でもほぼ同じ倍率で卓越しておりこれは杭基礎を含めた貯槽の並進運動である。この振動は地盤のせん断一次周期0.3秒に比べ底版下の地盤に杭が打設されたために固有周期が短くなったものと解釈される。貯槽頂部で二番目に卓越する周期0.085秒の振動は底版においては存在していないことから貯槽側壁部において増幅したものである。この振動は側壁と貯水の連成作用によって生じるバルジング振動¹⁾であると考えられるが、本貯槽のようなプレストレストコンクリート貯槽では側壁の剛性が高いためにバルジング周期は一般に耐震設計で入力する地震動の卓越周期の範囲より短周期であり貯槽の耐震設計では支配的な振動とはならない。遠方地盤地表では深度3~4mの浅い土層内の重複反射により周期0.2秒以下の短周期成分が大きく増幅している。一方貯槽底版は地表下3m



図-1 貯槽外観図

貯槽頂部で二番目に卓越する周期0.085秒の振動は底版においては存在していないことから貯槽側壁部において増幅したものである。この振動は側壁と貯水の連成作用によって生じるバルジング振動¹⁾であると考えられるが、本貯槽のようなプレストレストコンクリート貯槽では側壁の剛性が高いためにバルジング周期は一般に耐震設計で入力する

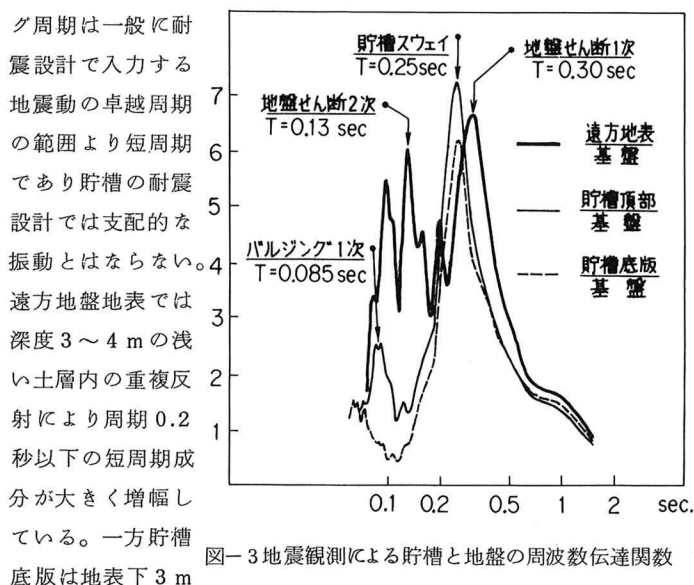


図-3 地震観測による貯槽と地盤の周波数伝達関数

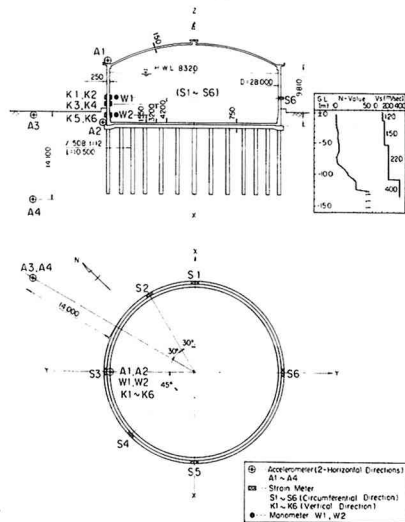


図-2 計器配置図

に根入れされていることおよび底版の剛性が地盤の剛性よりはるかに大きいことにより地盤の振動で見られる0.2秒以下の短周期成分の応答は遠方地盤地表より小さくなっている。

3. 動的応答解析法の比較検討

動的応答解析

法は現在のところ

確立された手法を目指して研究が進められている段階であり、本研究でも実地震観測などの知見を参照し図-4に示す解析フローと解析モデルを設定した。

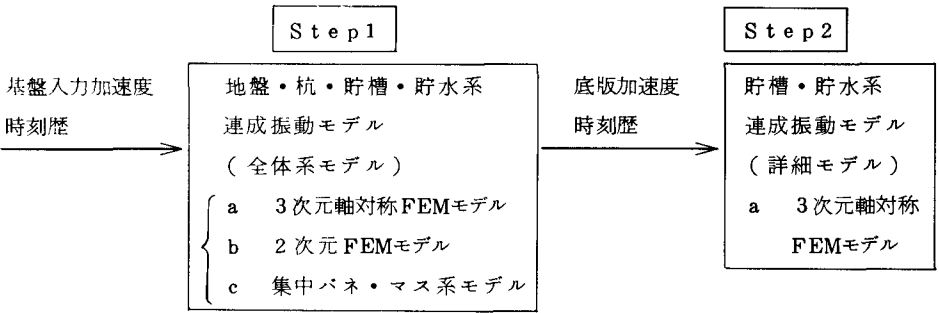


図-4 動的応答解析フローと解析モデル

ローと解析モデルを設定した。STEP1は地盤・杭・貯槽・貯水系の動的相互作用の結果として貯槽底版での応答加速度が算定されるが、ここでは全体の振動系の応答に影響を及ぼさない範囲で個々の振動系は単純化される。STEP2はSTEP1の結果を用いて側壁厚および鉄筋量等の詳細設計を行うためのモデルである。本研究はSTEP1でこれまで用いられている3次元軸対称FEMモデル、2次元FEMモデル、および集中バネ・マス系モデルについて実測の記録をもとに解析を行い、それぞれの特徴を明らかにした。

(1) 解析モデル

① 3次元軸対称FEMモデル

図-5に3次元軸対称FEMモデルを示す。この中で貯槽底版と地盤はそれぞれ拡がりをもつソリッド要素で表わされる。地盤の側方境界では波動の逸散を考慮した粘性境界²⁾が用いられている。また、貯槽側壁と貯水とは相互の連成作用によって生じるバルジング振動と固有振動周期および質量が等価なソリッド要素にモデル化している。貯槽底版下の地盤と杭の部分については、杭で補強された地盤と考え貯槽底版に作用する水平力、鉛直力および転倒モーメントに対して等価な変形を生しうような弾性体要素にモデル化する。

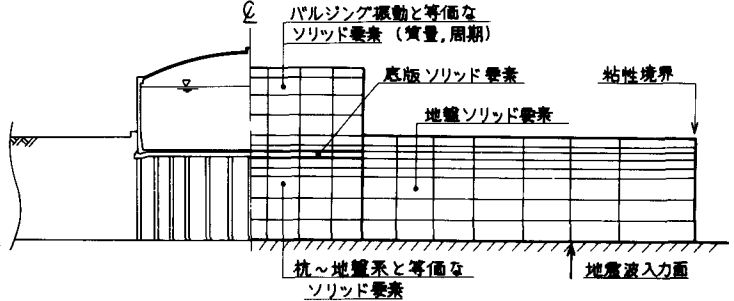


図-5 3次元軸対称FEMモデル図

つまり、図-6に示す如く杭と地盤の

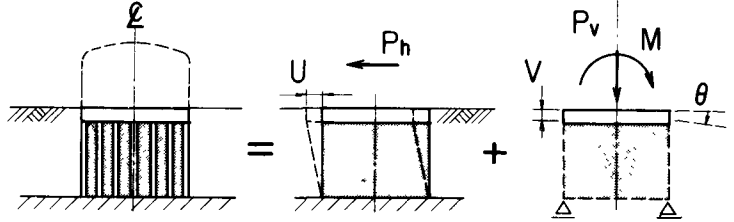


図-6 3次元軸対称FEMモデルにおける底版下地盤と杭のモデル化

水平抵抗に等価なソリッド要素と、鉛直抵抗および回転抵抗に等価なソリッド要素とに分けてモデル化する。

② 2次元FEMモデル

軸対称構造物としての円筒形貯水タンクを2次元平面内でモデル化し、近似的に解析しようとするものである。2次元FEMモデルの利点は、杭を梁要素として表わせること、地形の起伏を考慮できること等である。そこで、図-7に示す如く構造物が地盤の振動に影響を与える領域を有効幅Wと考え杭および貯槽の剛性はこの有効幅Wに均等に分布していると考え、このようにして図-8に示すような2次元問題に置換することが可能となる。図-8の中で貯水と貯槽はバルジング振動と固有周期および質量が等価なソリッド要

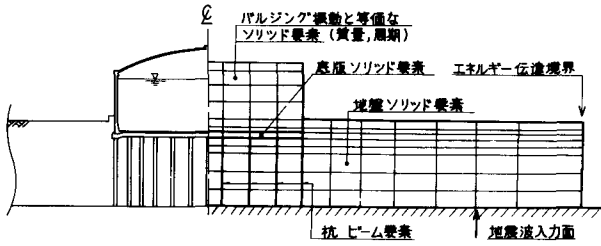


図-7 2次元FEMモデル

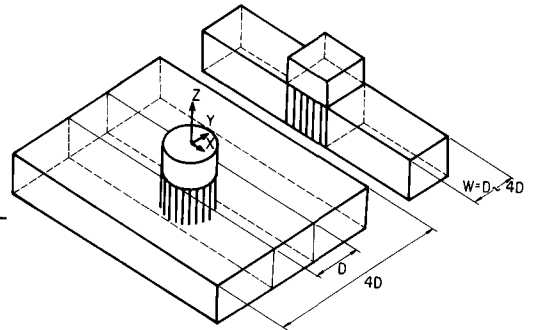


図-8 2次元FEMモデルの概念図

素にモデル化する。杭の剛性は奥行き当りの本数で評価している。また、側方境界は遠方への波動逸散を考慮したエネルギー伝達境界³⁾を用いている。解析上、地盤の有効幅 W を大きくするとと構造物に対する地盤の相対的重量が大きくなり地盤自体が卓越してくるがここでは $W=2D$ (D は貯槽径)として解析を行った。

③ 集中バネ・マス系モデル

図-9に示す如く、貯槽と貯水は既往の研究に基づいてバルジック振動およびスロッシング振動と等価なバネに支えられた固定水と自由水にモデル化する。解析は基盤加速度に加えて地盤の強制変位を地盤バネを介して基礎杭より入力するものである。

(2) 解析条件

入力加速度は1981年12月2日青森県東方沖地震(マグニチュード6.6、震央距離78km、八戸市震度Ⅳ)で観測された基盤加速度波形を、それぞれのモデルの基盤面から入力した。この地震の最大加速度は13galである。また、地盤の剛性は当該地盤のボーリング調査および弾性波探査より求めた剛性を用い地盤の非線形性を考慮して地盤のひずみに依存した物性で解析した。地盤ひずみと地盤剛性および減衰定数の関係性は日本の土の平均的な値を用いた。

(3) 解析結果

①～③のモデルにより解析した結果を表-1に示す。表-1の中で実測値を1.0とした場合のそれぞれの解析モデルの応答値の比率を示してあるが、3次元軸対称FEMモデルの応答値が最も実測値と良く一致している。図-10は3次元軸対称FEMモデルの貯槽底版での時刻歴応答加速度波形を実測の時刻歴波形と並べて示したもので両者は良い一致を示している。2次元FEMモデルおよび集中バネ・マス系モデルによる応答結

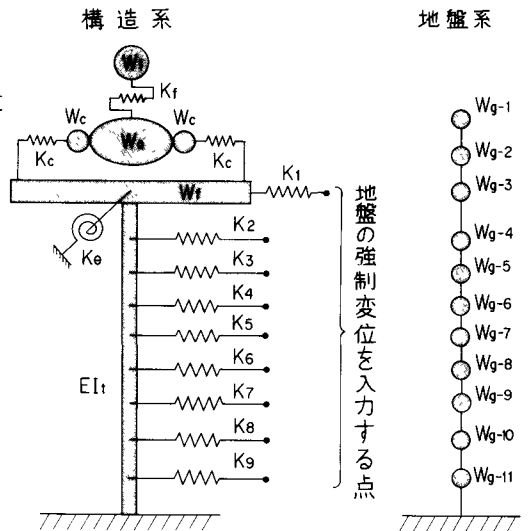


図-9 集中バネ・マス系モデル

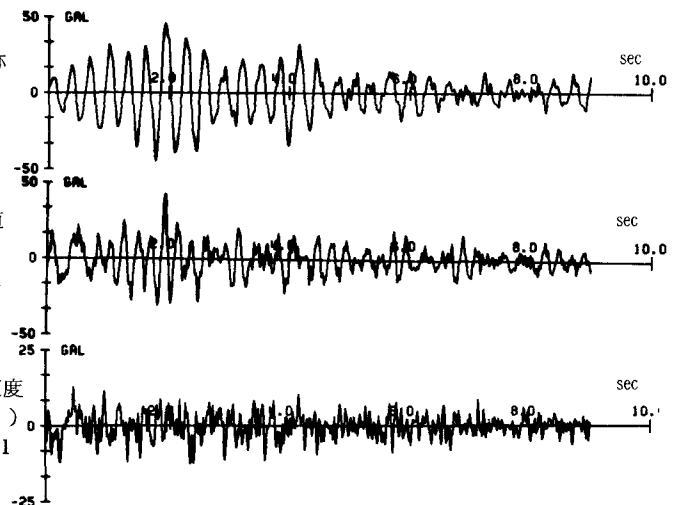


図-10 貯槽底版の時刻歴応答加速度

果の実測値との誤差は最大で30%程度であり、設計の観点から見ればこれらの解析値もほぼ十分な精度を持っているといえる。集中バネ・マス系モデルの底版加速度は他のモデルに比べやや大き目であるが、この理由として底版の空間的広がりや剛性が考慮されていないこと、基礎と側方地盤からの多入力系であることおよび構造物から地盤への逸散エネルギーが考慮されていないことなどが考えられる。

4. 日本海中部地震の記録

昭和58年5月26日秋田県沖で発生した日本海中部地震(M=7.7)は東北地方の日本海側に甚大な被害をもたらした。図-11は震源から約220km離れた八戸市P Cタンクで観測された記録である。地表面での加速度(A3Y)の最大値は約20galであり主要動と見られる部分は6.0秒程度続いた。また、側壁の円周方向歪(S-6)および動水圧(W-2)の記録には内容液のスロッシング1次周期と一致する6.3秒の振動成分が見られた。スロッシング液高はおよそ80cmと推定された。

5. まとめ

i) 地震観測記録の分析より、貯槽の運動は貯槽側壁および底版を含めた並進運動が支配的であり側壁のバルジング振動の影響は小さいことがわかった。 ii) 3種類の解析モデルによるそれぞれの応答値を実測値と比較した結果、3次元軸対称FEMモデルが一番精度良く一致することが確認できた。しかしながら、設計者の判断により他の2つのモデルによる応答値も十分有効に使えることが示された。 iii) 日本海中部地震による側壁の円周方向ひずみ記録には内容液のスロッシング現象による影響が見られた。

参 考 文 献

- 1) 坂井, 迫田: 大型液体タンクの地震応答に関する研究, 第四回日本地震工学シンポジウム講演論文集, 1975.
- 2) Lysmer, J. and Kuhlemyer, R.L.: Finite Dynamic Model for Infinite Media, ASCE EM4, 1969.8.
- 3) Kausel, E., Roësset, J.M. and Waas, G.: Dynamic Analysis of Footings on Layered Media, ASCE EM5, 1975.10.
- 4) G.W. Housner: Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, B.S.S.A, 1957.1.
- 5) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会

表-1 連成振動解析による最大応答値の比較

解析モデル \ 応答加速度※	遠方地盤地表		貯槽底版		固定水		底版下面での※※※ 水平せん断力	
	gal	比	gal	比	gal	比	ton	比
3次元軸対称FEMモデル	5.1	0.96	4.5	1.05	5.2	1.13	17.9	1.10
2次元FEMモデル	5.8	1.09	3.9	0.91	4.0	0.87	14.4	0.88
集中バネ・マスモデル	4.3	0.81	5.5	1.28	6.1	1.33	21.3	1.31
実 側 値	5.3	1.0	4.3	1.0	※※※ 4.6	1.0	16.3	1.0

※ 基礎入力加速度13galに対する値

※※ 頂部加速度と底版加速度から換算した値

※※※ 固定水加速度と底版加速度から換算した値

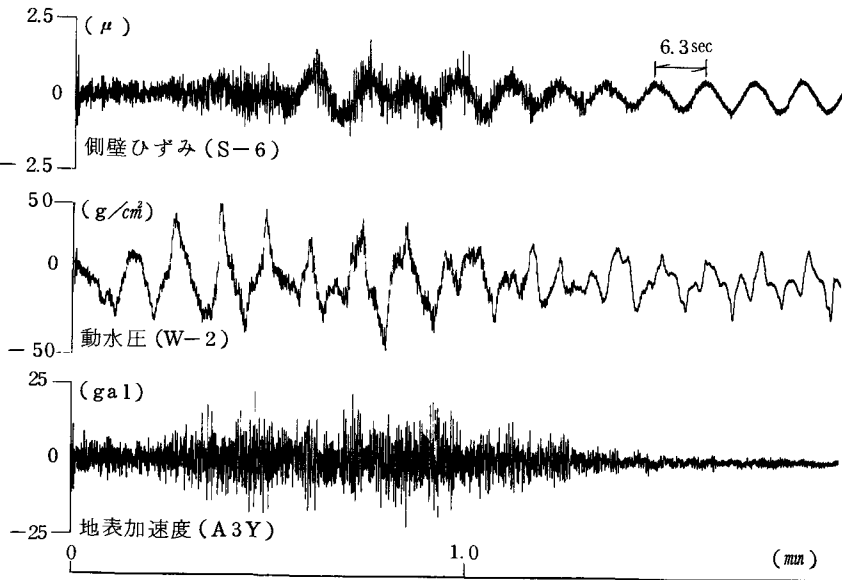


図-11 日本海中部地震観測記録