

## 既設配水塔の耐震診断

### Estimate of Earthquake-Resistance of Existing Water Tower by Dynamic Analysis

斉藤 正忠\*  
Masatada Saitō

小宮 喜一\*\*  
Yoshikazu Komiya

山本 省吾\*\*  
Shōgo Yamamoto

#### 要 約

本文は、既設配水塔(RC造)を対象として、動的解析により耐震診断を行った結果を報告するものである。

動的解析法としては時刻歴応答解析法を採用し、解析には、構造物と地盤を含んだ2次元解析が可能なプログラム「FLUSH」を用いた。

また、入力地震波には八戸地震波とエルセントロ地震波の2波を用い、基盤入力加速度振幅は、東京大学生産技術研究所と西松建設共同開発のERISA-Gを用いて計算し、150galと設定した。

解析の結果、躯体の応力度は許容値以内であったが、杭の応力および反力は許容値を超過した。しかし、これらは降伏点や極限支持力を超過しておらず、かつ、地震力の作用時間が非常に短いため、配水塔としての機能は維持されると判断した。

#### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 配水塔の形状寸法
- §3. 解析手法および手順
- §4. 入力地震動の設定
- §5. 地盤物性値の決定
- §6. 構造モデルの設定
- §7. 地震応答解析結果
- §8. 斜面の安定検討
- §9. 配水塔の検討
- §10. あとがき

けでは耐震設計として不十分になってきている。このため、近年、特殊構造物の設計に動的解析が適用されるケースが増加している。

土木設計部ではこのような状況に対応すべく、各種の動的解析の試設計を行ってきている。この試設計の一環として時刻歴応答解析を用いた既設配水塔(昭和27年当社施工)および周辺斜面の耐震診断を行ったので、これに関する報告を行う。

#### §2. 配水塔の形状寸法

配水塔の形状寸法を Fig.1 に示す。

#### §3. 解析手法および手順

動的解析法には、応答変位法、応答スペクトル法、および時刻歴応答解析法がある。本設計で用いた時刻歴応答解析法は与えられた地震動の入力に対して時々刻々の応答を求める解析方法である。解析のフローを Fig.2 に示す。

#### §1. はじめに

土木構造物の耐震設計を行う場合、従来は構造物を剛体とみなし、震度法により設計を行ってきた。しかし、最近の構造物は複雑化、大型化してきたため、震度法だ

\*土木設計部副部長  
\*\*土木設計部設計課

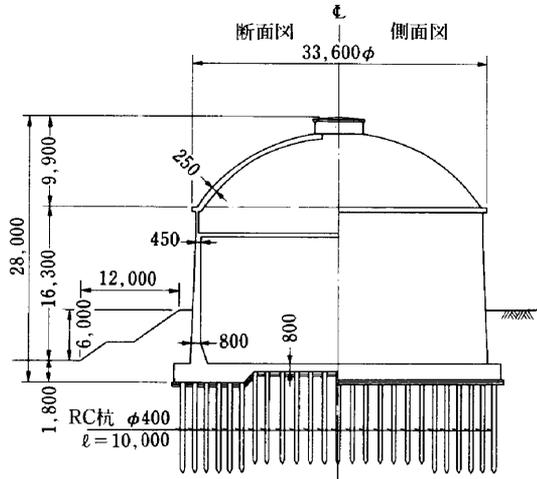


Fig.1 形状寸法

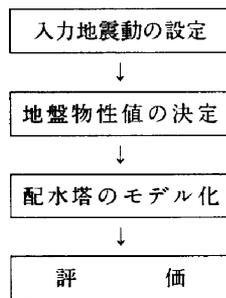


Fig.2 解析フロー

### § 4. 入力地震動の設定

#### 4-1 入力加速度振幅

当社と東京大学生産技術研究所片山研究室とで共同開発したプログラム「地震危険度解析のグラフィックシステム (ERISA-G)」<sup>1)</sup>を用いて、動的解析に用いる基盤入力加速度を設定した。このプログラムは、着目地点周辺における過去の地震例を整理し、統計的手法により将来予想される地震規模を推定して、解析上必要な基盤入力加速度を求めるものである。

着目地点を東京とし、過去200年のデータを用いて解析した結果、再現期間100年に対する加速度振幅は150 galになったため、これを基盤入力加速度振幅として採用した。

#### 4-2 入力地震波

動的解析における入力地震波として、エルセントロ地震記録を適当に振幅調整して用いている例が多い。今日では、我が国においても全国的な強震観測によって除々に記録が増えつつあり、最近では1968年十勝沖地震の八戸地震波、1978年宮城県沖地震の開北橋地震などが入力

地震波として用いられている。

しかしながら、数ある強震記録の中からどのような周波数特性の波形を選ぶか、また、強度はどのようにすればよいかなどのいわゆる入力地震動の設定方法については、いまだ定説がない。

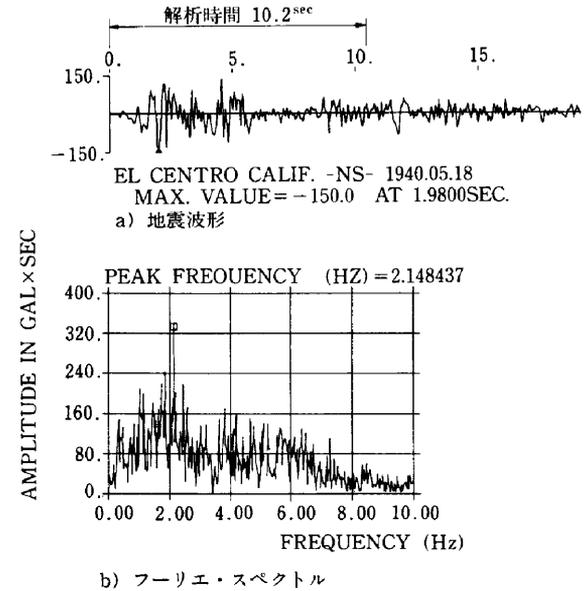


Fig.3.a 入力地震波の波形とフーリエ・スペクトル (エルセントロ地震波)

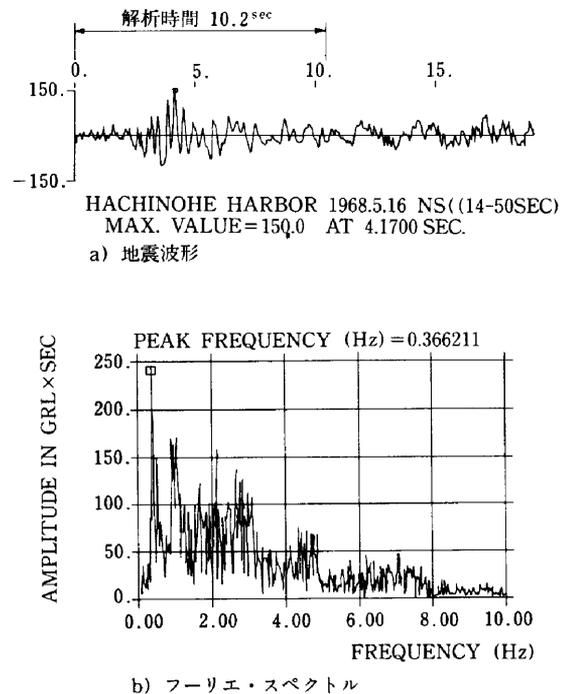


Fig.3.b 入力地震波の波形とフーリエ・スペクトル (八戸地震波)

そのため、現状では特性の異なる観測地震波を複数個併用する方法が用いられている。

したがって、本検討においても特性の異なる2地震波、すなわち、①海洋型：比較的遠方に発生する大地震（卓越周期の長い地震波）、②直下型、近距離に発生する中小地震（卓越周期の短い地震波）を考え、これを入力波とする。前者においては、十勝沖地震の八戸地震波（N-S成分）、後者においてはインペリアルバレイ地震のエルセントロ地震波（N-S成分）を用いた。

入力地震波の波形とフーリエスペクトロを Fig.3 に示す。

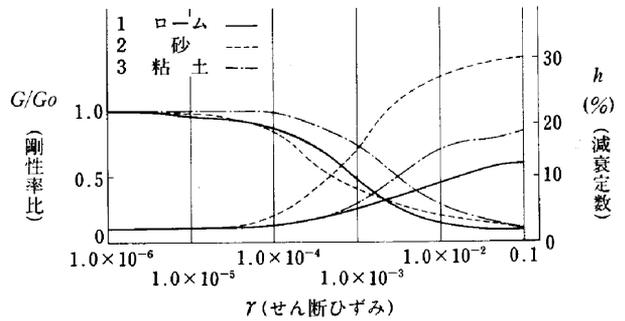


Fig.4 ひずみ依存カーブ

### § 5 . 地盤物性値の決定

動物問題で扱う土のひずみは $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 程度であり、ひずみが小さいとき、土は弾性的挙動を示すが、ひずみが大きく（大地震で $10^{-3}$ 位）なるに従い、強い非線形性を示す。このときの土の物性（剛性、減衰定数）は、ひずみの大きさにより大きく異なる。したがって、本解析ではこのような土の非線形性を等価線形化法により考慮する。配水塔と地盤を含んだ2次元解析に用いるプログラム FLUSH<sup>2)</sup>でも等価線形化法の適用ができるが、計算時間が非常に長くなる。このため、1次元成層地盤における地盤応答解析（プログラム SHAKE<sup>3)</sup>）を行い、この収束物性値を2次元モデルに適用することにより計算時間の短縮を図った。

解析に用いた初期物性値および収束物性値を Fig.4 と Table1 に示す。

### § 6 . 構造モデルの設定

#### 6-1 解析モデルの設定

配水塔は、ドーム型屋根を有する円筒形状をしているため、軸対称シェルモデルとして解析することが望ましい。しかしながら、軸対称モデルでは配水塔周辺の斜面の非対称性を表現できないため、2次元平面ひずみ問題として取り扱った。この場合、上部構造物が地震の振動に影響を及ぼす範囲を配水塔直径の2倍とし、杭および上部構造物の質量と剛性はこの範囲に均等に分布とした。横山ら<sup>4)</sup>は、このような手法を用いると、軸対称構造物を2次元モデルにより解析した場合、地震時の構造物の挙動を比較的良好に把握できるとしている。

#### 6-2 境界条件

側方の境界条件は、本来、両側とも自由地盤を表現する伝達境界とするのが望ましいが、プログラムの機能上、片側を伝達境界とし、もう一方を自由境界として水平ローラー支承とした。

ただし、水平ローラー支承側は、反射波の影響をでき

Table 1 地盤初期物性値と収束値

深度	地質	No.	層厚 (m)	初期せん断剛性 (t/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	単位重量 (t/m <sup>3</sup> )	ひずみ依存カーブ	収束値	
								せん断剛性 (t/m <sup>2</sup> )	減衰定数 (%)
-2.0	埋土	1	2.0	1,010	0.37	1.30	1	520	4.9
-11.7	ローム	2	3.2	7,160	0.48	1.45	1	4,980	3.7
		3	3.2	"	"	"	1	3,490	4.9
		4	3.3	"	"	"	1	2,760	5.9
		5	3.4	17,800	0.44	1.70	2	8,080	12.2
-18.5	砂	6	3.4	"	"	"	2	7,490	13.3
		7	2.6	12,000	0.46	1.50	3	9,260	5.5
-23.8	シルト	8	2.7	"	"	"	3	9,170	5.6
		9	2.9	23,100	0.47	1.75	2	10,200	12.5
-32.5	砂	10	2.9	"	"	"	2	10,100	12.7
		11	2.9	"	"	"	2	10,000	12.9
		12		49,800	0.47	1.95			

る限り避けるために、地盤の解析領域を十分広くとった。

また、解析領域下面の地盤波入力基盤面は、十分剛であると考へ、固定境界とした。

6-3 モデル図

構造モデルの全体図を Fig.5 に示す。

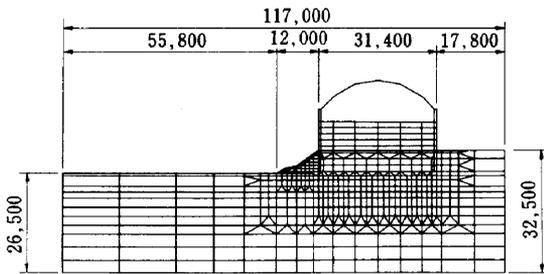


Fig.5 2次元解析の構造モデル

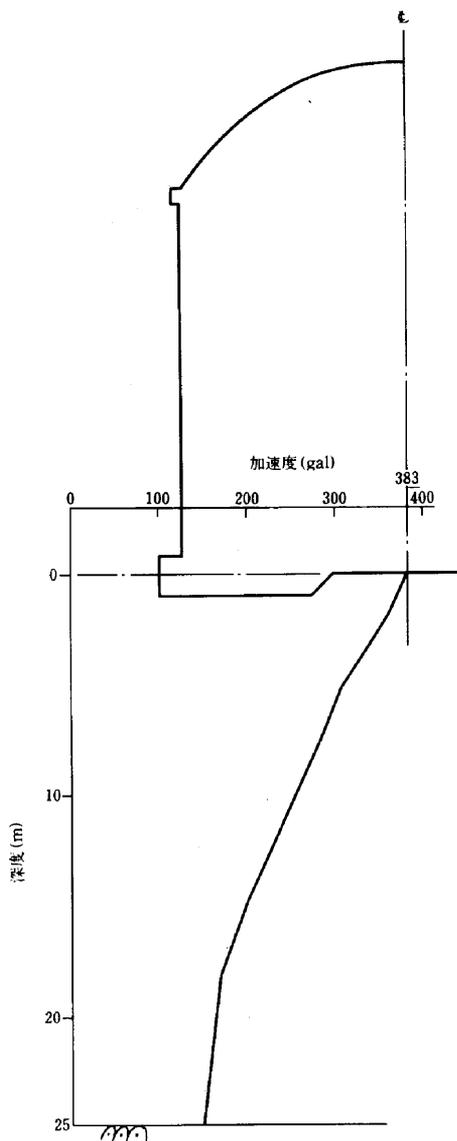


Fig.6 配水塔中心位置における地盤最大加速度分布

§7. 地震応答解析結果

紙面の都合上、エルセントロ波を用いた解析結果のみを示す。

7-1 応答加速度

(1) 地盤最大加速度

配水塔中心位置における深さ方向の地盤最大加速度分布を Fig.6 に示す。また、配水塔底版下面位置における応答加速度の波形とフーリエ・スペクトルを Fig.7 に示す。後述のスロッシング解析では、この波形を配水塔底版位置に入力する。

(2) 斜面内最大加速度

斜面内の最大加速度を Fig.8 に示す。

7-2 杭の断面力

地震力により杭に発生する曲げモーメントと軸力を Table 2 に示す。表中の  $N$  は最大曲げモーメント発生時の軸力であり、 $N'$  は最大 (あるいは最小) の軸力である。いずれも常時の杭頭反力は含まず地震力による増加軸力である。

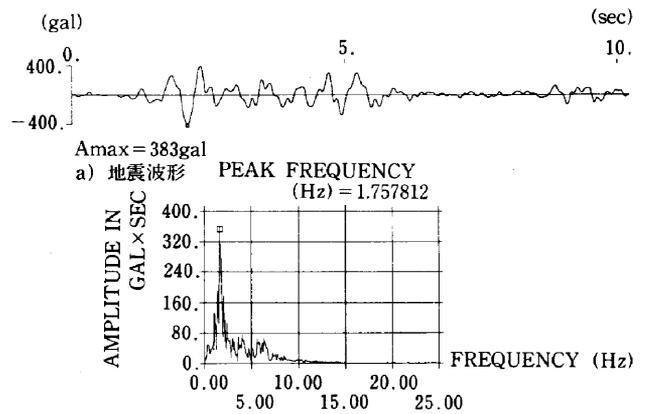


Fig.7 配水塔床版下面の応答加速度

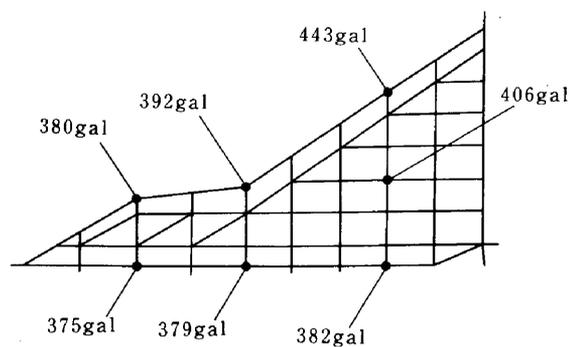


Fig.8 斜面内最大応答加速度

§8. 斜面の安定検討

斜面の安定<sup>5)</sup>は①式で定義される局所安全率により評価される。斜面内の最大応答加速度から求めた慣性力を

用いて、各要素の応力を静的 FEM 解析により求める。

$$F_s = \frac{(|\sigma_1| + |\sigma_3|) \cdot \sin\phi + 2c \cdot \cos\phi}{|\sigma_1| - |\sigma_3|}$$

.....①

ここに  $F_s$ :局所安全率

$\sigma_1, \sigma_3$ :主応力

$\phi$ :土の内部摩擦角

$c$ :土の粘着力

計算結果を Fig.9 に示す。

表層では一部所定の安全率を満足しないが、斜面全体のすべりを想定した場合、 $F_s < 1.0$ となる要素は連続せず、ある特定のすべり線を形成するには至っていないため、すべり破壊は生じないと判断した。

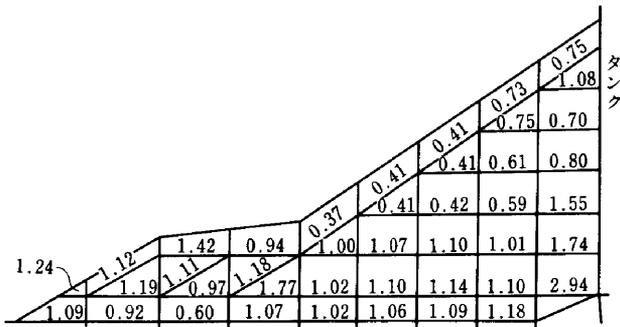


Fig.9 斜面の安定に対する局所安全率

## § 9 . 配水塔の検討

### 9-1 側壁

7-1で得られた応答加速度波を用いてスロッシング解析を行い、液面変位と動水圧を求める。結果を Fig.10 に示す。また、側壁の最大応答加速度から慣性力を求め

て、軸対称シェルモデルにより配水塔側壁の断面力を計算する。結果を Fig.11 に示す。応力照査の結果、許容応力度を満足している。

### 9-2 底版

側壁から伝達する荷重を用いて、FEM による平板曲げ解析を行う。結果を Fig.12 に示す。応力照査の結果、許容応力度を満足している。

### 9-3 杭

7-2で得られた断面力は、地震時の増分であるためこれに常時の杭頭反力を加算する。杭列 1, 13, 25について杭の最大断面力分布を Fig.13 に示す。また、杭列 25の杭頭における軸力時刻歴を Fig.14 に示す。

応力照査において第1列の杭は許容値 ( $M_r = 1.9t \cdot m$  at  $N = -13.1t$ ) を超し、また、杭支持力の照査においても許容支持力 ( $R_a = 70/本$ ) を超えている。静的解析においてははれまで、解析結果が許容値内であれば基本的に安全であると判断してきたが、動的解析においては、その結果に対する評価方向がまだ確立されていない。今回の解析では杭の応力および反力は許容値を超えたが、降伏点や極限支持力を超えておらず、かつ、地震力の作用時間が非常に短いため、配水塔としての機能は維持されると判断した。

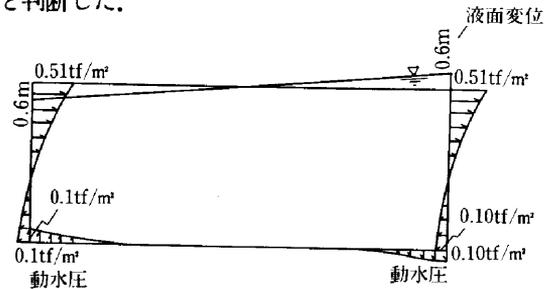


Fig.10 スロッシング解析

Table 2 杭の断面力の地震時増分

杭 No.	M (t・m/本)	N (t/本)		N' (t/本)		杭 No.	M (t・m/本)	N (t/本)		N' (t/本)	
		Max.	Min.	Max.	Min.			Max.	Min.	Max.	Min.
1	-3.15	48.1	-48.1	77.0	-77.0	14	-2.41	12.0	-12.0	14.4	-14.4
2	-2.81	41.2	-41.2	47.3	-47.3	15	-2.40	11.8	-11.8	14.3	-14.3
3	-3.88	33.8	33.8	35.2	-35.2	16	-2.37	12.1	-12.1	14.2	-14.2
4	-2.49	28.8	28.8	28.8	-28.8	17	-2.35	12.4	-12.4	14.4	-14.4
5	-2.92	24.6	-24.6	24.5	-24.5	18	2.31	14.6	-14.6	16.1	-16.1
6	-2.42	21.9	-21.9	22.8	-22.8	19	2.20	16.4	-16.4	17.1	-17.1
7	-2.43	19.6	-19.6	21.7	-21.7	20	2.24	17.5	-17.5	18.9	-18.9
8	-2.42	17.6	-17.6	20.0	-20.0	21	2.64	17.8	-17.8	19.7	-19.7
9	-2.42	15.5	-15.5	17.5	-17.5	22	2.18	20.4	-20.4	20.4	-20.4
10	-2.42	14.3	-14.3	16.6	-16.6	23	3.25	23.8	-23.8	23.8	-23.8
11	-2.42	13.4	-13.4	15.9	-15.9	24	2.23	29.3	-29.3	25.3	-25.3
12	-2.42	12.8	-12.8	15.4	-15.4	25	2.34	32.7	-32.7	38.2	-38.2
13	-2.42	12.3	-12.3	14.5	-14.5						

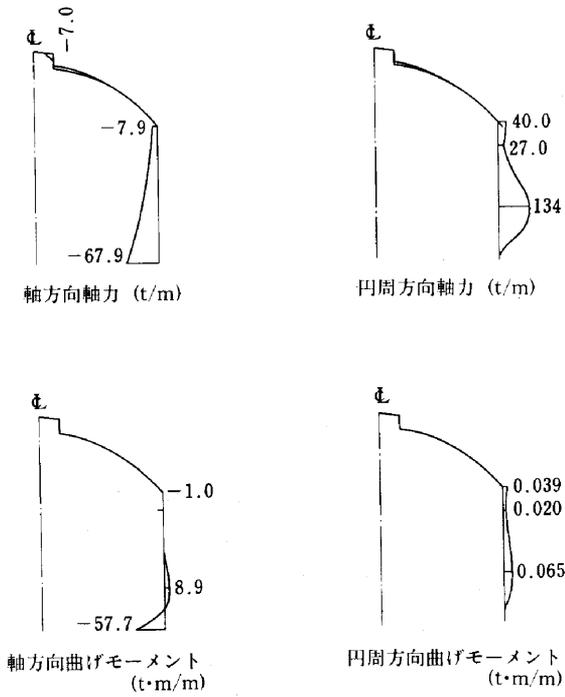


Fig.11 軸対称シェルによる解析

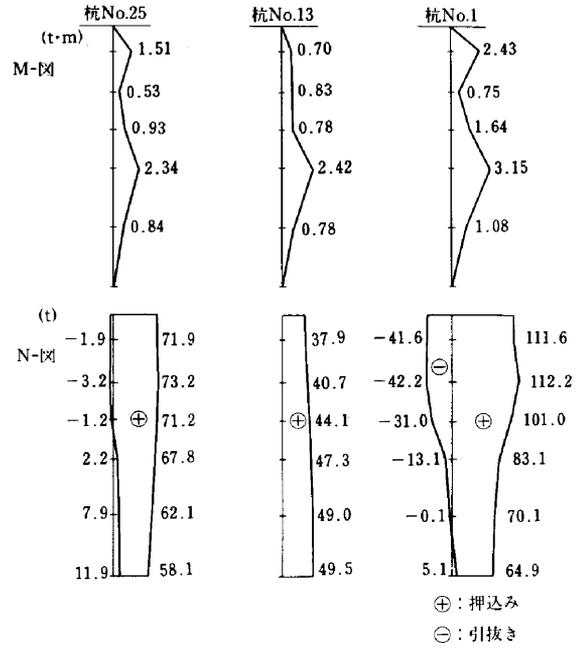


Fig.13 杭の最大断面力分布

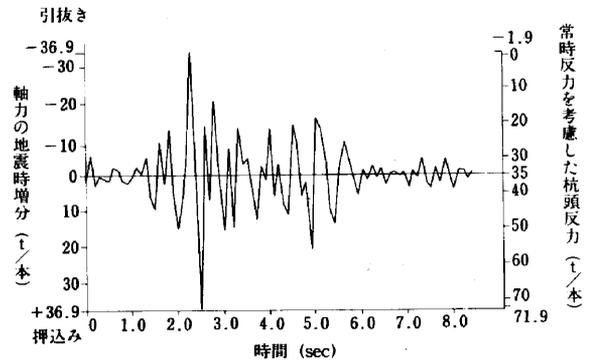


Fig.14 杭頭における軸力の時刻歴

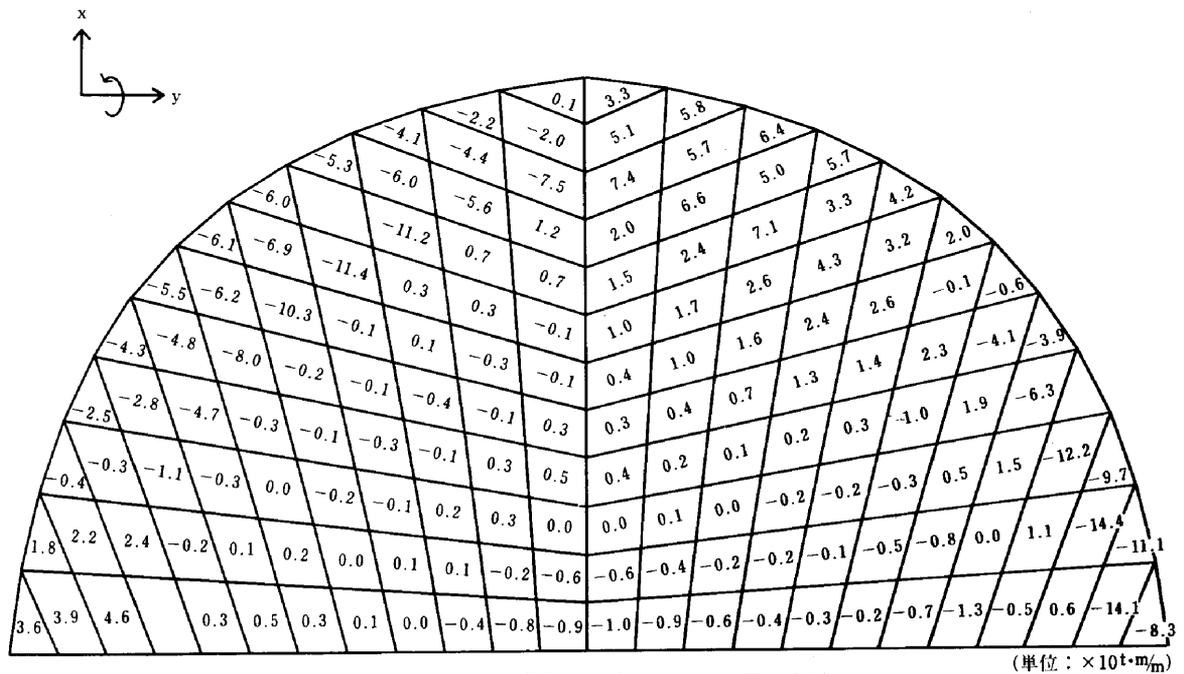


Fig.12 床版の曲げモーメント図 ( $M_x$ )

## §10. あとがき

配水タンクはその構造が軸対称であることから、当社保有の軸対称専用プログラム ASHSD2を用いた一環設計も可能である。本報告では配水塔だけではなく、その周辺斜面も解析対称としたため、2次元モデルにより解析を行った。このため、数段階の計算過程を経るやや煩雑な解析となった。

今後の設計業務において、動的解析を用いた検討が増加してくると予想される。動的解析を実施する際、時刻歴として得られる応答解析結果をどう評価するかが問題である。また、入力地震波として選んだ特定な波形に対する解析結果だけでは、将来発生する地震時の構造物動的挙動を十分に把握することができない。このため特性の異なる多数の入力波による解析が必要となるが、このような手法は経済性に欠ける。したがって、地震時挙動の把握が可能な、簡便な手法の確立が望まれる。

今後、これらの問題に対処し、より合理的な設計を行っていきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 戸松, 斉藤: 地震危険度解析グラフィックシステム <ERISA-G> の適用例, 西松建設技報第9号
- 2) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. f. and Seed, H. B. : FLUSH: A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil Structure Interaction Problems, EERC Report No.75-30, UCB, 1975
- 3) Schnable, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. : SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC Report 72-12, UCB, 1972
- 4) 横山, 西橋, 泉, 村野: 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, 第17回地震工学研究発表会, 1982
- 5) 佐々木, 古賀: 土構造物の耐震設計・その3, 土木技術資料, 26-3, 1984