

# コンクリート製卵形消化槽の解析手法の検討

中村 嶽 伊藤 雅保  
武田 寿一

## A Procedure for Analysis of Egg-shaped Sludge Digester of Concrete

Takashi Nakamura Masayasu Ito  
Toshikazu Takeda

### Abstract

Digesters of various shapes are used in sewage treatment plants. Egg-shaped sludge digesters of concrete are adopted for efficiency of the anaerobic reaction process. In analyses of the seismic responses of digesters, the main problem is coupled vibration of internal liquid sludge and the shell structure. In order to carry out dynamic analysis, an axisymmetrical finite element analysis considering the interaction between shell wall and stored liquid is conducted. From the dynamic analysis results of hydrodynamic pressure and acceleration, equivalent static loads are decided, and stresses of shell members are calculated employing a three-dimensional finite element method. From the examination of the analytical natural frequencies of the egg-shaped digester which is almost full, more than 90% of stored liquid is assumed to be attached rigidly to the shell walls.

### 概 要

下水処理施設の一部として消化槽があり、汚泥消化を高効率に行なうため、その形状として卵形が採用されることがある。一般にタンクに関しては、地震時における容器と内容液との連成振動が大きな問題となる。従って、コンクリート製卵形消化槽についても、シェル構造と内容液との連成を考慮した軸対称回転体 FEM による固有値解析と地震応答解析を行なって、その振動特性を調べ、動水圧や応答加速度を求めた。更に、これ等を擬似的な静的荷重として、3次元 FEM による静的解析を行ない、卵形消化槽の各部材の地震荷重に対する断面応力を算定した。

連成を考慮した固有値解析の結果、卵形シェルの形状特性および内容液がほぼ満杯状態であることによって、地震荷重を受けても内容液の90%以上が固定水とみなされ、自由水の割合は10%以下と少ないことが分かった。

### 1. 序

廃棄物の再資源化や、有効利用の一つとして下 wastewater 処理汚泥の再利用を目的に、下水処理施設の一部として消化槽が用いられることがある。この消化槽においては、耐久性・断熱効果の点などからコンクリート造で、しかも、汚泥の消化を高効率に行なうために、その形状として下記の特長を有する卵形消化槽が採用される場合がある。(参考文献1) 参照

〔卵形消化槽の特長〕

- ① 攪拌による液の流動・循環が均一に十分行なわれ、死角ができない。——消化効率が低い。
- ② 可燃性ガス(メタンガス)の発生量が多く、燃料

として有効利用できる。また、消化汚泥は量が少ないうえに脱水性が良いので最終処分が容易となる。——エネルギー経済上有利。

- ③ 槽底部への土砂の沈着が少なく、内容積のロスが少ない。
- ④ 消化に利用されない槽内空間が少ない。
- ⑤ 全表面積が小さいので、放散熱量が少ない。

一般に、タンクに関しては、地震時における容器と内容液との連成振動が大きな問題となる。特に、機能上長所が多い卵形という独特の形状が、地震応答に与える影響を調べることを主眼に、仮想のコンクリート製卵形消化槽を設定して地震応答解析や静的解析を行なって、その解析手法の検討を行なった。

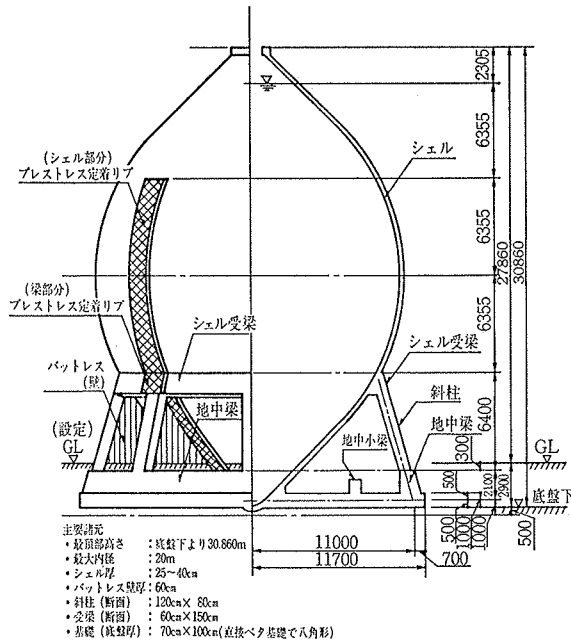


図-1 卵形消化槽の概略

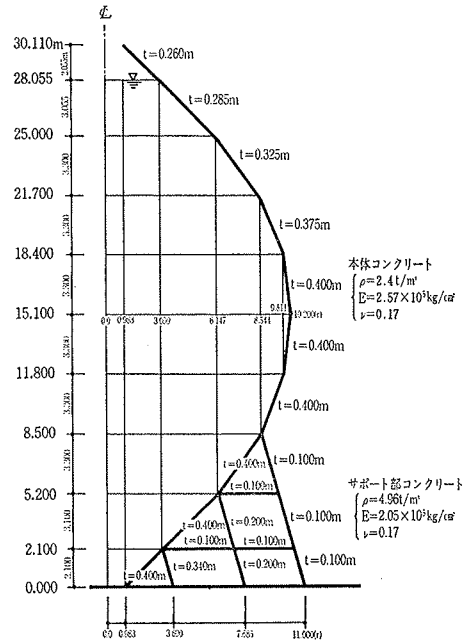


図-2 軸対称回転体解析モデル

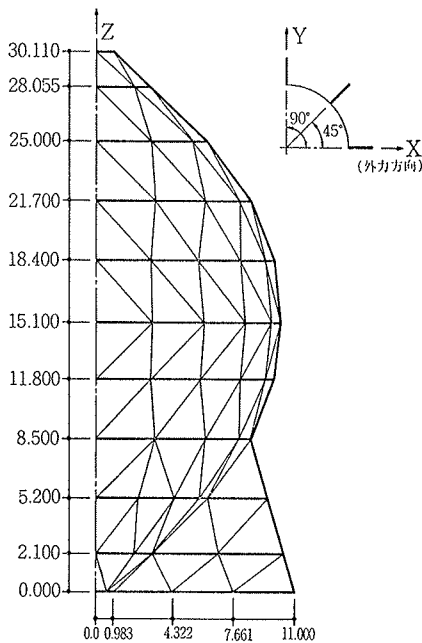


図-3 3次元立体架構モデル

## 2. コンクリート製卵形消化槽の概略

想定した消化槽(図-1参照)は、容量5,000m<sup>3</sup>のRC製地上掘置き式消化槽で、卵形シェル構造を主体に、下部架構としてリング受梁・斜柱・バットレスを配した構造体である。なお、シェル部分とリング受梁については、リング・テンションに対して長期引張応力をキャンセルするようなプレストレスを導入することが予定されている。

## 3. 解析条件と解析手法

### 3.1. 荷重

荷重は、固定荷重と地震荷重に分けて考えることにする。

#### (1) 固定荷重

固定荷重として、構造体の自重と5,000m<sup>3</sup>の内容物(汚泥:液体)による静水圧を考慮する。

#### (2) 地震荷重

地震荷重として、構造体に作用する慣性力と内容物による動水圧を考慮する。

#### (3) 荷重の組み合わせ

荷重の組み合わせは次の通りとする。

- ・ 長期荷重として、固定荷重(自重+静水圧)を考慮する。
- ・ 短期荷重として、固定荷重+地震荷重(慣性力+動水圧)を考慮する。

### 3.2. 解析手法

解析は概略次の手順に従って行なう。

- (1) 卵形消化槽の下部架構を軸対称回転体シェルに置換する。
- (2) 参考文献2)のシェル構造物と内容物(汚泥:液体)との連成を考慮した軸対称回転体FEMにより応答解析を行ない、地震荷重の動水圧・応答加速度を求める。
- (3) 擬似的な静的地震荷重を算定する。
- (4) 3次元架構としての静的解析を行ない、断面力を算定する。

#### 4. 解析結果の検討

##### 4.1. 躯体モデル（軸対称回転体シェルへの置換）

回転体シェルと液体との連成を考慮した動的解析により、構造体に作用する慣性力と動水圧を求め、擬似的な静的地震荷重を算定する。そのため、図一1に概略を示した卵形消化槽の下部架構（受梁・斜柱・バットレス部分）を軸対称回転体シェル（図一2参照）に置換する。

表一1に、3次元FEMの固有値解析で求めた3次元立体架構（図一3参照）の1次と2次の固有周期と、回転体シェルに置換した場合の1次と2次の固有周期の値を比較して示すが、両者の値はほぼ一致している。

次数	3次元立体架構モデル	回転体モデル
1	0.1249sec	0.1276sec
2	0.0384sec	0.0336sec

表一1 固有周期の比較

モード形に関しては、ここにはモード図を示さないが、1次モードについては、両者はよく一致する。しかし、2次モードについては、立体架構としてのモードに比べて、回転体シェルとしてのモードは下部架構部分のはらみ出しが大きくなっている。これは、モデルにおいて、地震力に対する抵抗要素の位置が、立体架構モデルと回転体シェルモデルでは異なるためである。

##### 4.2. 卵形消化槽の貯液時の固有値解析

回転体シェルと液体との連成を考慮した解析により、回転体にモデル化した卵形消化槽の貯液時の固有値解析を行なって、固有振動数の低下を検討し、更に正弦波入力

力およびランダム波入力の地震応答解析結果をまとめる。

##### 〔1〕固有値解析

まず、図一4に示す参考文献3)の直径10.2mの球形タンクに関して、回転体シェルと液体との連成を考慮した解析法により固有値解析を行なった。水深が球形タンクの直径の80%の場合では、スロッシング1次と2次の固有周期は実験で2.96秒と1.77秒であり、解析値は2.96秒と1.74秒と良く一致した。従って、同手法を卵形消化槽の貯液時の固有値解析にも適用した。

図一2に、回転体にモデル化した貯液時の卵形消化槽の解析モデルを示す。液体の比重は1.0と仮定している。

表一2に、回転体モデルの空と貯液時（水深28.055m）の固有振動数の結果をまとめる。

空の場合			貯液時		
次数	T(sec)	f(Hz)	次数	T(sec)	f(Hz)
-	-	-	スロッシング1次	1.865	0.536
-	-	-	スロッシング2次	1.217	0.822
1次	0.1276	7.835	バルジング1次	0.2499	4.001
2次	0.0336	29.81	バルジング2次	0.0559	17.88

表一2 固有値解析結果

空の場合の1次のモードの固有振動数7.835Hzが、貯液時には4.001Hz（バルジング1次）に、また2次については29.81Hzが17.88Hz（バルジング2次）に低下している。貯液時のスロッシング1次の固有周期は1.865秒、2次は1.217秒である。

##### 〔2〕固有値解析の結果の検討

卵形消化槽の固有振動数が、空の場合に比べて貯液時に低下することにより、貯液量全体のうち何割が固定水として、振動数の低下に寄与するかを略算的に検討する。

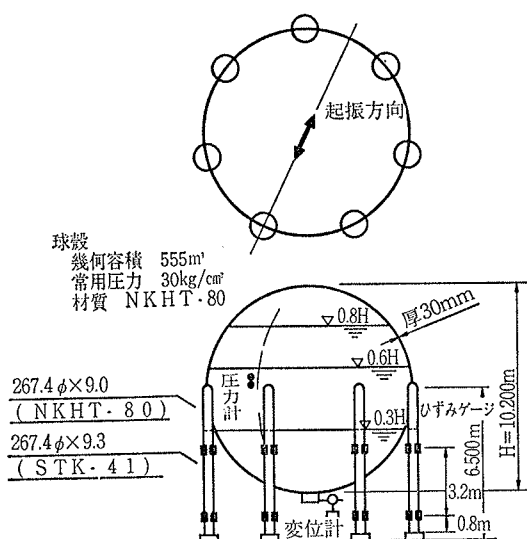
空の場合の1次の固有振動数  $f_a = 7.835 \text{ Hz}$  とコンクリートの全重量  $W_c = 1,765 \text{ ton}$  より、1質点系としたときの消化槽本体のばね定数  $K$  は次のように求まる。

$$f_a = 1/2\pi \sqrt{K} \times 9.8 / W_c$$

$$\therefore K = (2\pi f_a)^2 \times W_c / 9.8 = 4.364 \times 10^5 \text{ ton/m}$$

貯液時の固有振動数  $f_w = 4.001 \text{ Hz}$  より、バネ定数  $K$  は一定として、貯液時の消化槽の全有効重量  $W'$  を求めると、

$$W' = K \times 9.8 / (2\pi f_w)^2 = 6,767 \text{ ton}$$



図一4 球形タンクの振動実験

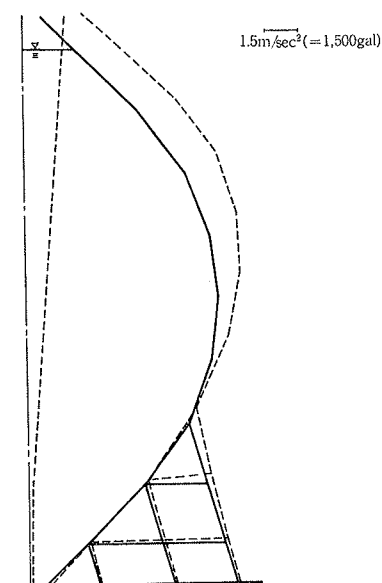


図-5 最大加速度分布 (正弦波 150 gal 入力)

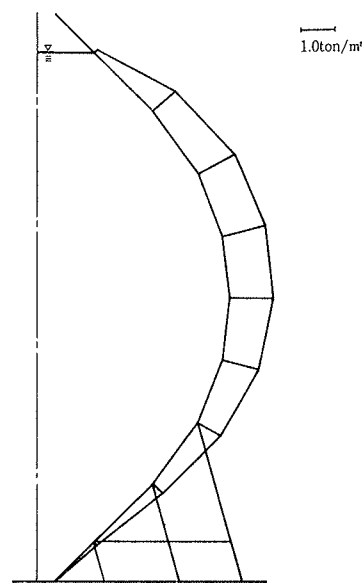


図-6 最大動水圧分布 (正弦波 150 gal 入力)

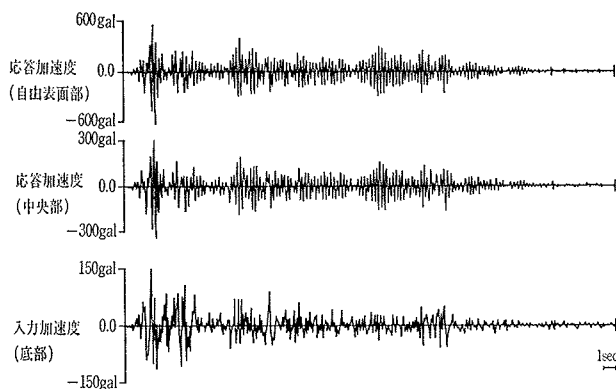


図-7 加速度波形 (El-Centro 150 gal 入力)

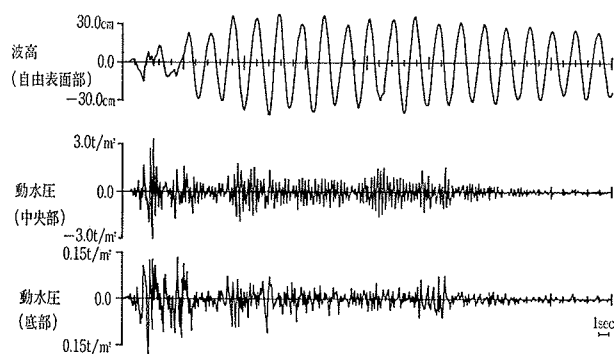


図-8 動水圧および波高の波形 (El-Centro 150 gal 入力)

$W'$  よりコンクリートの全重量  $W_c$  を引くと、固定水の全重量  $W_{w'}$  が求まり、

$$W_{w'} = W' - W_c = 6,767 - 1,765 = 5,002 \text{ ton}$$

を得る。

従って、消化槽の全貯液量のうち、固定水として作用する液の重量比は、

$$\frac{\text{固定水量}}{\text{全貯液量}} = \frac{5,002 \text{ ton}}{5,409 \text{ ton}} = 0.925$$

となる。

以上より、1次の固有振動数の変化のみを考慮した略算で求めると、全貯液量のうちで9割程が固定水として作用すると考えられる。

#### 4.3. 卵形消化槽の貯液時の地震応答解析

回転体シェルと液体との連成を考慮した解析により、最大入力加速度を 150 gal とした正弦波およびランダム波 (El-Centro 1940 NS) 入力の地震応答解析を行なった。

スロッシングの減衰定数は 0.5%、バルジングの減衰定数は 5% と仮定している。

##### 〔1〕 正弦波入力

貯水時の卵形消化槽回転体モデルに、バルジング 1 次の固有振動数  $f=4.001 \text{ Hz}$  の正弦波 150 gal を 20 波入力した応答解析を行なった。図-5 に、定常応答時の最大加速度の高さ方向分布を、また、図-6 に動水圧の最大値の高さ方向分布を示す。

図-5 より、卵形消化槽のほぼ中央部の加速度応答倍率は約 10 倍になっており、減衰定数  $h=5\%$  と仮定した時の応答倍率  $1/2h=10.0$  と対応している。

図-6 より、動水圧は卵形消化槽のほぼ中央部 (径の最大近傍) で一番大きな分布を示すのが分かる。

##### 〔2〕 ランダム波入力

貯水時の卵形消化槽回転体モデルに、El-Centro 1940 NS 波を最大加速度 150 gal で入力し、応答解析を行なった。

図-7 に代表的な位置における加速度波形を示す。

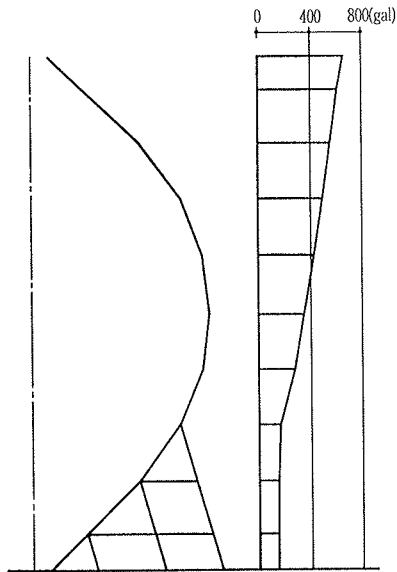


図-9 最大応答加速度の高さ方向分布

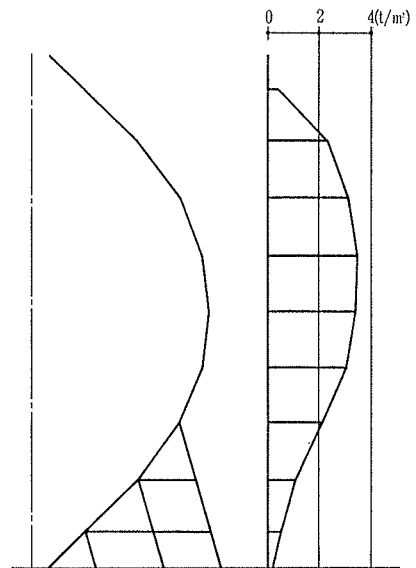


図-10 最大動水圧の高さ方向分布

シェル断面	円周方向力				上下方向力				せん断力	
	長期		短期		長期		短期		長期	短期
	N $\theta$ (t/m)	M $\theta$ (t-m/m)	N $\theta$ (t/m)	M $\theta$ (t-m/m)	N $\phi$ (t/m)	M $\phi$ (t-m/m)	N $\phi$ (t/m)	M $\phi$ (t-m/m)	Q (t/m)	Q (t/m)
K	0.3	0.0	2.2	0.0	1.2	0.0	1.7	0.0	0.4	1.0
J	9.8	0.0	20.5	0.0	1.0	0.0	2.1	0.0	0.4	2.8
I	34.6	0.0	59.5	0.0	5.5	0.0	7.0	0.0	0.5	11.9
H	68.3	0.0	103.6	0.0	9.3	0.0	13.7	0.1	0.5	21.0
G	105.4	0.0	151.9	0.2	16.3	0.1	20.6	0.3	1.1	33.2
F	139.6	0.3	191.6	0.5	14.5	0.7	34.3	1.5	4.8	52.6
E	116.3	0.7	134.3	1.9	18.9	1.4	73.0	3.0	14.7	86.7
D	88.3	0.9	161.7	2.2	5.8	0.4	12.1	0.8	10.0	68.1
C	58.8	0.7	138.0	1.3	2.6	1.2	29.8	2.5	7.4	67.8
B	11.4	0.2	46.5	0.3	8.6	0.4	49.2	1.1	1.9	53.2

表-3 シェル部分の断面力

また、図-8に、同じ位置の動水圧と波高の波形を示す。

図-7、図-8において、加速度と動水圧の波形を比べると、位相が180°ずれているが、その形は良く似ている。

図-8の、貯液の自由表面が消化槽壁面と接する位置の波高の波形を見ると、入力直後には加速度波形に似た衝撃圧の影響がみられるが、すぐにスロッシング1次の波(周期約1.88秒)が卓越するのが分かる。また、波高の最大値は約40cmであるが、これを振動圧に換算すると0.40 ton/m<sup>2</sup>となり、同じ位置の衝撃圧0.14 ton/m<sup>2</sup>の約2.8倍程度となり、スロッシングの影響は無視し得ないことが分かる。

図-9に、最大150 gal入力時の最大加速度の高さ方向分布を、図-10に動水圧の最大値の高さ方向分布を示す。

す。

動水圧分布は消化槽の底部が最小で0.19 ton/m<sup>2</sup>、中央部が最大で3.45 ton/m<sup>2</sup>となっている。静的解析の動水圧としては、この分布を採用して入力している。

#### 4.4. 静的解析

静的解析は、固定荷重と静的地震荷重に対する構造体の断面応力を算定するために行なう。そのために、卵形シェル部分とバットレスを三角形平板要素、シェル受梁と斜柱を線材要素でモデル化したうえで、3次元立体架構としての応力解析を行なう。なお、解析モデル(図-3参照)は対称条件と逆対称条件を用いることによって、全体の1/4部分を対象としたものである。

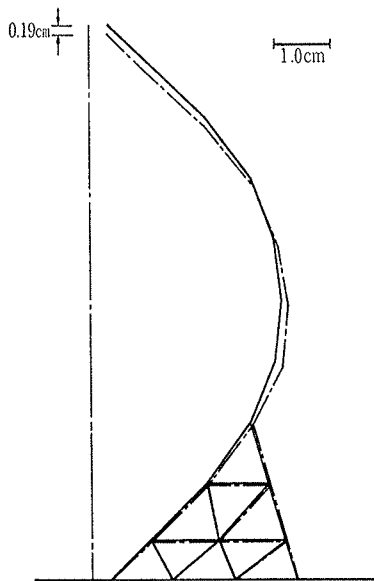
##### 〔1〕 長期荷重に対する解析

長期荷重として、(自重+静水圧)を考えたときの変形図(軸対称変形なので高さ方向変形のみ図示)を図-11に示した。なお、長期荷重による頂部の沈下量は約2mmである。

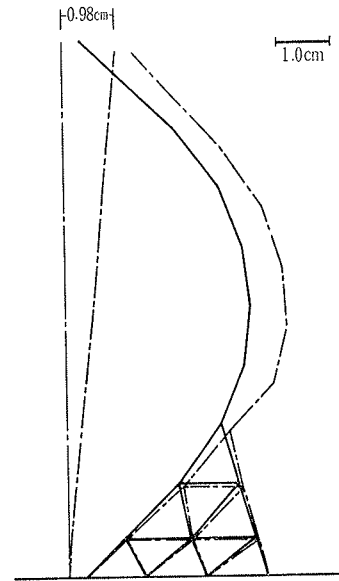
##### 〔2〕 短期荷重に対する解析

###### (1) 地震荷重

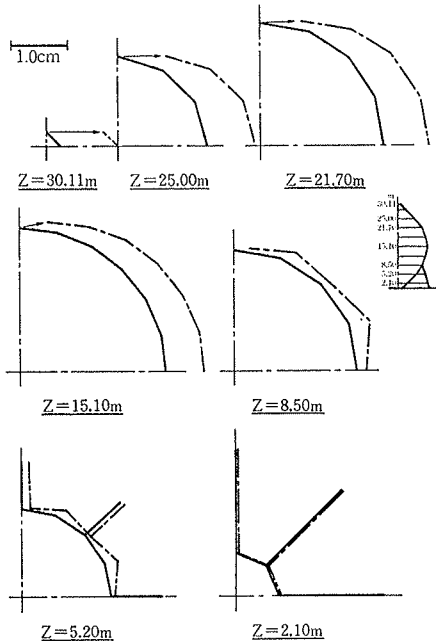
静的地震荷重として、(慣性力+動水圧)を考えているが、それらを求めるための基礎となる最大応答加速度分布(高さ方向)としては、図-9に示してあるものを用い、最大動水圧分布(円周方向はCosine分布)としては、図-10に示してあるものを用いた。なお、これらの値はEl-Centro 1940 NS( $\alpha_{max}=150$  gal)を入力地震波として用いた応答解析(回転体シェルと液体との連成を考慮した解析)によって求められた値である。



図一11 変形：長期荷重（自重+動水圧）



図一12 変形：短期荷重（長期+地震）



図一13 変形：短期荷重（長期+地震）

(2) 解析結果

短期荷重として、長期荷重+地震荷重を考えたときの変形を図一12（高さ方向）と図一13（平面）に示した。なお、短期荷重による頂部の水平変位は約 1.0 cm であった。また、参考までにシェル部分の円周方向力、上下方向力、せん断応力の値を表一3に示した。

5. まとめ

卵形消化槽の地震時応力解析を次の手順に従って行なった。地震波は、El-Centro 1940 NS ( $\alpha_{max}=150$  gal) を用いている。

(1) 3次元架構である卵形消化槽の下部架構（受梁・斜柱・バットレス）を軸対称回転体シェルに置換する。

(2) 回転体シェルと液体との連成を考慮した解析を用いて、地震荷重時の動水圧・応答加速度を求め、擬似的な静的地震荷重を算定する。

(3) 3次元架構としての静的解析を行ない、断面応力を算定する。

その結果、以下のことが確かめられた。

(1) 卵形消化槽を軸対称回転体シェルに置換した場合、1次モードはほぼ一致させられるが、バットレスの変形が卓越する2次以上の高次モードについては、周期・モード形を一致させるのは困難であった。

(2) 卵形シェルという形状特性および内容液がほぼ満杯状態（全内容積の約96%）であることによって、動的荷重を受けても内容液の90%以上が固定水とみなされ、自由水の割合は10%以下と少ない。

(3) スロッシング1次の周期は 1.865 秒で、バルジング1次の周期は 0.250 秒である。動水圧（最大値）の高さ方向の値は 0.19~3.45 ton/m<sup>2</sup> となっているが、それに含まれるスロッシングによる振動圧の最大値は 0.40 ton/m<sup>2</sup> となっており、その影響は無視できない。

参考文献

- 1) 平岡, 武田, 大隅, 奥: 下水汚泥の嫌気性消化システムに関する研究 (第2報), 環境技術, Vol. 10, No. 11, (1981. 11), pp. 15~28
- 2) 武田, 中村: 円筒タンクの地震応答に関する研究 (その2), 大林組技術研究所報, No. 27, (1983), pp. 48~53
- 3) 田川, 小島, 那須, 山下, 江藤: 球形タンクの振動実験と実機設計のあり方, 日本鋼管技報, No. 79, (1978), pp. 79~92