

参考資料 3-1 設計地震動の補足資料

3-1-1 レベル 1 地震動の設計水平震度

従来の手法を用いてレベル 1 地震動を設定する場合には、水道施設耐震工法指針・解説の総論解説編Ⅲに従うものとする。以下に抜粋を示す。

1.3.2 地上構造物の震度法による設計に用いる設計震度（地震動レベル 1）

1. 地震動レベル 1 に用いる設計水平震度 (K_{h1}) は以下による。

$$K_{h1} = C_z \cdot K_{h01} \dots\dots\dots (1.3.1)$$

ここに、 C_z ：地域別補正係数で、表-1.3.3による。

K_{h01} ：構造物の重心位置における基準水平震度で、その値は地盤種別ごとに表-1.3.2による。

ただし、地表面における基準水平震度 K_{h01} は地盤種別Ⅰ種、Ⅱ種、Ⅲ種に対して、それぞれ0.16、0.2、0.24とする。

2. 耐震設計上の地盤種別は、原則として式 (1.3.2) で算出される地盤の固有周期 T_G を基に区別することとする。地表面が基盤面と一致する場合は、Ⅰ種地盤とする。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \dots\dots\dots (1.3.2)$$

ここに、

T_G ：地盤の固有周期 (s)

H_i ：i 番目の地層の厚さ (m)

V_{si} ：i 番目の地層の平均剪断弾性波速度 (m/s)

3. 設計鉛直震度 (K_{v1}) を考慮する場合には、 $K_{v1} = \frac{1}{2} K_{h1}$ とする。

表-1.3.2 地上構造物の震度法による設計に用いる基準水平震度（地震動レベル 1）

地盤種別	構造物の固有周期 T (s) に対する K_{h01} の値		
Ⅰ種地盤 [$T_G < 0.2$] T_G は地盤の固有周期 (s)	$T < 0.1$ $K_{h01} = 0.431T^{1/3}$ ただし、 $K_{h01} \geq 0.16$	$0.1 \leq T \leq 1.1$ $K_{h01} = 0.2$	$1.1 < T$ $K_{h01} = 0.213T^{-2/3}$
Ⅱ種地盤 [$0.2 \leq T_G < 0.6$]	$T < 0.2$ $K_{h01} = 0.427T^{1/3}$ ただし、 $K_{h01} \geq 0.20$	$0.2 \leq T \leq 1.3$ $K_{h01} = 0.25$	$1.3 < T$ $K_{h01} = 0.298T^{-2/3}$
Ⅲ種地盤 [$0.6 \leq T_G$]	$T < 0.34$ $K_{h01} = 0.430T^{1/3}$ ただし、 $K_{h01} \geq 0.24$	$0.34 \leq T \leq 1.5$ $K_{h01} = 0.3$	$1.5 < T$ $K_{h01} = 0.393T^{-2/3}$

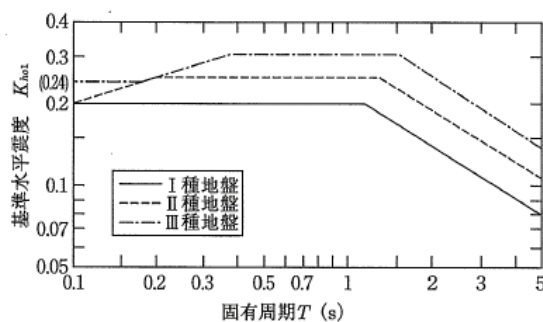


図-1.3.1 震度法に用いる基準水平震度 (K_{h01})

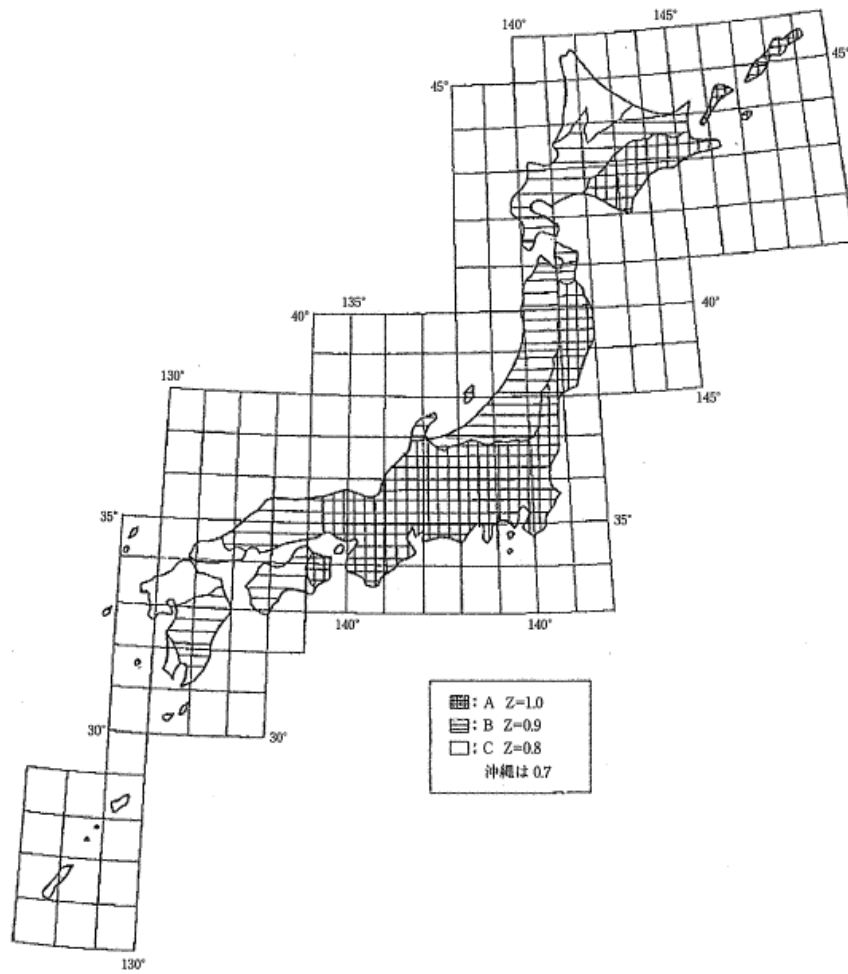


図-1.3.2 地域区分

1.3.4 地中構造物の震度法による設計に用いる設計震度（地震動レベル1）

1. 地中構造物の耐震設計を震度法で行う場合の基準水平震度は、耐震計算上の基盤面における基準水平震度 (K'_{h01}) と地表面の基準水平震度 (K_{h01}) を用いて求める。基盤面における基準水平震度 (K'_{h01}) と地表面の基準水平震度 (K_{h01}) の値は、表-1.3.6による。

なお、対象深さにおける基準水平震度は、 K_{h01} と K'_{h01} を直線補間し求めて良い。

2. 地震動レベル1に用いる設計水平震度は以下による。

1) 地表面における設計水平震度

$$K_{h1} = C_z \cdot K_{h01}$$

2) 基盤面における設計水平震度

$$K_{h1} = C_z \cdot K'_{h01}$$

ここに、 C_z は地域別補正係数で、表-1.3.3による。

3. 設計鉛直震度 (K_{v1}) を考慮する場合には、 $K_{v1} = K_{h1}/2$ とする。

表 -1.3.6 地中構造物の震度法による設計に用いる基準水平震度（地震動レベル1）

地盤種別	地表面における基準水平震度 (K_{h01})	基盤面における基準水平震度 (K'_{h01})
I種地盤 [$T_G < 0.2$ (s)]	$K_{h01} = 0.16$	$K'_{h01} = 0.15$
II種地盤 [$0.2 \leq T_G < 0.6$ (s)]	$K_{h01} = 0.20$	
III種地盤 [0.6 (s) $\leq T_G$]	$K_{h01} = 0.24$	

1.3.6 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動（地震動レベル1）

地中構造物のように、地震時における挙動が主として周辺地盤の変位に支配される構造物の耐震計算は、原則として応答変位法によるものとし、地震時における地盤の変位または変形から、「2.3.2 応答変位法による埋設管路の耐震計算法」～「2.3.4 応答変位法による継手構造管路の耐震計算法」によって構造物に作用する断面力、応力及び歪みなどを算定する。

地震動レベル1によって発生する地盤の変位振幅は、地表面から x (m) の位置において次式で求める。

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G K'_{hl} \cos \frac{\pi x}{2H} \dots\dots\dots (1.3.5)$$

ここに、

$U_h(x)$: 地表面からの深さ x (m) における地盤の水平変位振幅 (cm)

x : 地表面からの深さ (m)

S_v : 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル (cm/s) (図-1.3.4)

T_G : 表層地盤の固有周期 (s)

K'_{hl} : 耐震計算上の基盤面における設計水平震度（「1.3.4 地中構造物の震度法による設計に用いる設計震度（地震動レベル1）」の2.による）

H : 表層地盤の厚さ (m)

また、地盤の鉛直方向変位振幅 U_v を考慮する場合には、 $U_v = \frac{1}{2} U_h$ とする。

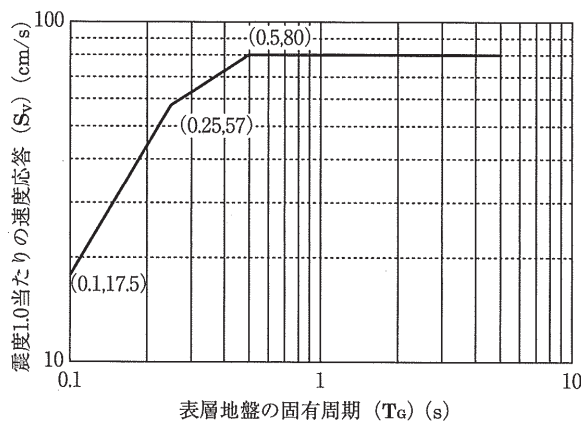


図 -1.3.4 設計用速度応答スペクトル（地震動レベル1）

3-1-2 レベル 2 地震動の設計水平震度

方法 4 を用いてレベル 2 地震動を設定する場合には、水道施設耐震工法指針・解説の総論解説編Ⅲに従うものとする。以下に抜粋を示す。

1.3.3 地上構造物の震度法による設計に用いる設計震度（地震動レベル 2）

1. 地震動レベル 2 に用いる設計水平震度 (K_{h2}) は以下による。

$$K_{h2} = C_s \cdot K_{h02} \dots\dots\dots (1.3.3)$$

ここに、 C_s ；構造物特性係数で、構造物の応答による減衰と靱性による塑性変形能力の程度において適切に定める。

K_{h02} ；構造物の重心位置における基準水平震度で、その値は地盤種別ごと、構造物の重要度別ごとに表 -1.3.4 及び表 -1.3.5 による。

ただし、 K_{h2} は 0.3 を下回らないものとする。

地表面における基準水平震度 K_{h02} は地盤種別が I 種、II 種、III 種に対して、それぞれ 0.7（上限値）～0.6（下限値）、0.8～0.7、0.6～0.4 とする。

2. 設計鉛直震度 (K_{v2}) を考慮する場合には、 $K_{v2} = \frac{1}{2} K_{h2}$ とする。

3. 基盤の傾斜などの不整形性によって地震動が大きく増幅される可能性のある場合は、1.2 倍を上限として設計震度を割増すものとする。

表 -1.3.4 地上構造物の震度法による設計に用いる基準水平震度の上限値（地震動レベル 2）

地盤種別	構造物の固有周期 T (s) に対する K_{h02} の値		
I 種地盤 [$T_G < 0.2$] T_G は地盤の固有周期 (s)	$T < 0.2$ $K_{h02} = 2.291T^{0.515}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.70$	$0.2 \leq T \leq 1.0$ $K_{h02} = 1.0$	$1.0 < T$ $K_{h02} = 1.000T^{-1.465}$
	II 種地盤 [$0.2 \leq T_G < 0.6$]	$T < 0.2$ $K_{h02} = 5.130T^{0.807}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.80$	$0.2 \leq T \leq 1.0$ $K_{h02} = 1.4$
III 種地盤 [$0.6 \leq T_G$]	$T < 0.3$ $K_{h02} = 2.565T^{0.631}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.60$	$0.3 \leq T \leq 1.5$ $K_{h02} = 1.2$	$1.5 < T$ $K_{h02} = 2.003T^{-1.263}$

表 -1.3.5 地上構造物の震度法による設計に用いる基準水平震度の下限値（地震動レベル 2）

地盤種別	構造物の固有周期 T (s) に対する K_{h02} の値		
I 種地盤 [$T_G < 0.2$] T_G は地盤の固有周期 (s)	$T < 0.2$ $K_{h02} = 1.000T^{0.222}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.60$	$0.2 \leq T \leq 1.0$ $K_{h02} = 0.7$	$1.0 < T$ $K_{h02} = 0.700T^{-1.605}$
	II 種地盤 [$0.2 \leq T_G < 0.6$]	$T < 0.2$ $K_{h02} = 2.291T^{0.515}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.70$	$0.2 \leq T \leq 1.0$ $K_{h02} = 1.0$
III 種地盤 [$0.6 \leq T_G$]	$T < 0.3$ $K_{h02} = 1.710T^{0.631}$ ただし、 $K_{h02} \geq 0.40$	$0.3 \leq T \leq 1.5$ $K_{h02} = 0.8$	$1.5 < T$ $K_{h02} = 1.297T^{-1.193}$

1.3.7 地中構造物の応答変位法による設計に用いる設計地震動（地震動レベル2）

地震動レベル1と同様に、地中構造物のように、地震時における挙動が主として周辺地盤の変位に支配される構造物の耐震計算は、原則として応答変位法によるものとし、地震時における地盤の変位又は変形から、「2.3.2 応答変位法による埋設管路の耐震計算法」～「2.3.4 応答変位法による継手構造管路の耐震計算法」によって構造物に作用する断面力、応力及び歪み等を算定する。

地震動レベル2によって発生する地盤の変位振幅は、地表面から x (m) の位置において次式で求める。

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v' T_G \cos \frac{\pi x}{2H} \dots\dots\dots (1.3.6)$$

ここに、

- $U_h(x)$: 地表面からの深さ x (m) における地盤の水平変位振幅 (cm)
- x : 地表面からの深さ (m)
- S_v' : 基盤地震動の速度応答スペクトル (cm/s) (図-1.3.5)
- T_G : 表層地盤の固有周期 (s)
- H : 表層地盤の厚さ (m)

また、地盤の鉛直方向変位振幅 U_v を考慮する場合には、 $U_v = \frac{1}{2} U_h$ とする。

基盤の傾斜などの不整形性によって地震動が大きく増幅される可能性のある場合は、1.2倍を上限として設計震度を割増すものとする。

表-1.3.7 地中構造物の震度法による設計に用いる設計水平震度（地震動レベル2）

地盤種別	地表面における設計水平震度 K_{h2} の下限値～上限値	基盤面における設計水平震度 K'_{h2} の下限値～上限値
I種地盤 [$T_G < 0.2$] T_G は地盤の固有周期 (s)	$K_{h2} = 0.60 \sim 0.70$	$K'_{h2} = 0.40 \sim 0.50$
II種地盤 [$0.2 \leq T_G < 0.6$]	$K_{h2} = 0.70 \sim 0.80$	
III種地盤 [$0.6 \leq T_G$]	$K_{h2} = 0.40 \sim 0.60$	

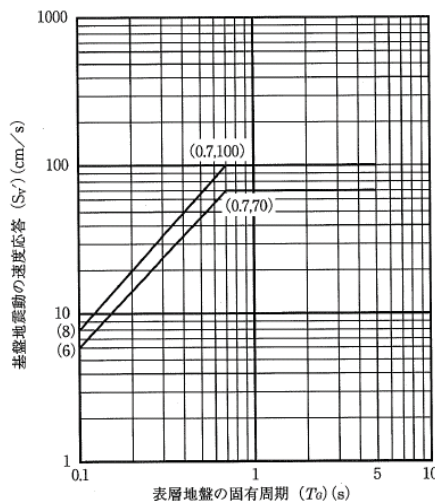


図-1.3.5 設計用速度応答スペクトル（地震動レベル2）

参考資料 3-2 耐震計算法の概要

3-2-1 動的解析法

動的解析は、動力学モデルを用いて、動的な応答値を算定するものである。動的な応答値を求める方法には時刻歴応答解析法と応答スペクトル法がある。このなかで時刻歴応答解析法には直接積分法、周波数応答解析法、モード解析法がある。

(1) 解析手法の種類

代表的な動的解析法とその概要を参考表 3.2.1 に示す。この中で解析に要する時間は①直接積分法が最も長く、④応答スペクトル法は簡単な構造物であれば手計算でも解析が可能な手法である。

参考表 3.2.1 動的解析法の概要

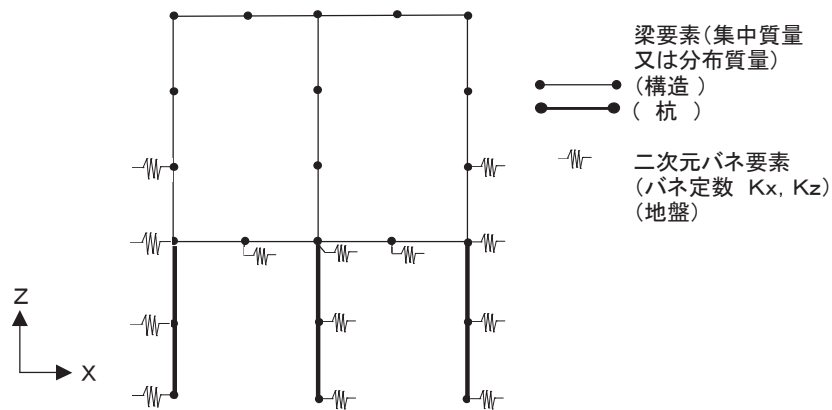
解析手法	解析手法の概要
①直接積分法	直接積分法は、運動方程式を数値積分により応答を求めるものである。数値積分の計算法には陽解法と陰解法があるが繰り返し計算による陰解法が多く用いられる。陰解法ではニューマーク (Newmark) の β 法、ウィルソン (Wilson) の θ 法、線形加速度法、平均加速度法などがありそれぞれに特徴がある。地震応答の計算では、その精度も確認されているニューマークの β 法 ($\beta=1/4$) がよく用いられる。
②周波数応答解析法	周波数応答解析法は、周波数領域で運動方程式を解いて応答値を求める方法である。周波数領域と時間領域の相互の変換は、一般に高速フーリエ変換 (FFT) が用いられる。地盤の剛性や減衰が周波数に依存する複素剛性で表現されるモデルなどの場合にはこの方法が用いられる (代表的な解析コード: SHAKE,FLASH)。
③モード解析法	モード解析法は、固有値解析を行い固有モードと刺激係数を求め、固有モード毎に求めた時刻歴応答を重ね合わせて算出する方法である。
④応答スペクトル法	応答スペクトル法は、固有値解析を行い、各モードの最大応答値を重ね合わせて、構造物の最大応答値を求める方法である。

水道耐震工法指針総論 p.52~53 より転載

(2) 解析モデル

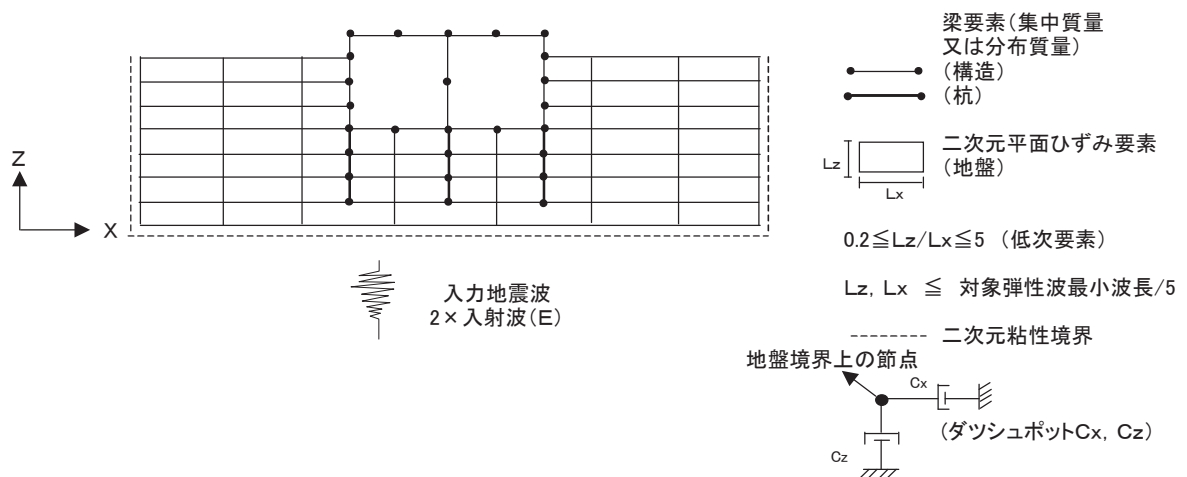
動的解析の解析モデルには、構造物のみモデル (フレームモデル、FEM モデル)、地盤・構造物を一体でモデル化するモデル (一般には 2 次元 FEM モデルを適用) がある。

池状構造物の場合には地盤の影響を受けるので、地盤・構造物を一体でモデル化する 2 次元 FEM モデルを用いられることが多い。



水道耐震工法指針総論 p.56 より転載

参考図 3. 2. 1 2次元フレームモデルの例



水道耐震工法指針総論 p.56 より転載

参考図 3. 2. 2 2次元 FEM モデルの例

(3) 手法の選定

動的解析法では解析方法によって得られる応答の種類が異なり、参考表 3.2.2 のとおり分類される。

重要施設（ランク A1、ランク A2）では、レベル 2 地震動に対して耐震性能 2 あるいは耐震性能 3 を確保することとしており、構造物の非線形性を考慮した解析を行う必要があるため、基本的には直接積分法を適用する。

ただし、地盤の動的解析においては、等価線形化法により地盤の非線形性を考慮できるので、周波数応答解析法を用いても良い（解析コード；SHAKE、FLASH 等）。

参考表 3.2.2 動的解析法によって得られる応答の種類

動的解析法		応答の種類		応答値の種類
		線形	非線形	
時刻歴応答解析法	直接積分法	●	●	時刻歴応答値
	周波数応答解析法	●	—	時刻歴応答値
	モード解析法	●	—	時刻歴応答値
応答スペクトル法		●	—	最大応答値
非線形スペクトル法		●	●	最大応答値

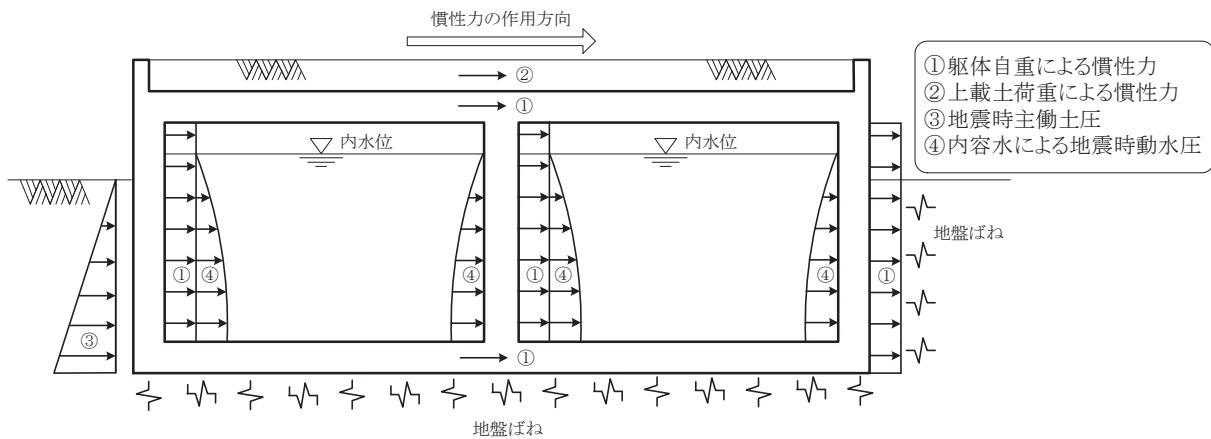
水道耐震工法指針総論 p.53 より転載

3-2-1 静的解析法

主な静的解析法には、震度法と応答変位法があり、対象とする構造物や地盤の地震時挙動を考慮し、解析手法を選定する。各計算法の特徴は以下に示すとおりである。

(1) 震度法

震度法とは、構造物に対する地震作用を、設計震度より求められる静的な荷重に置き換えて、構造物の地震時応答を求める耐震計算法である。



水道耐震工法指針総論 p.126 より転載

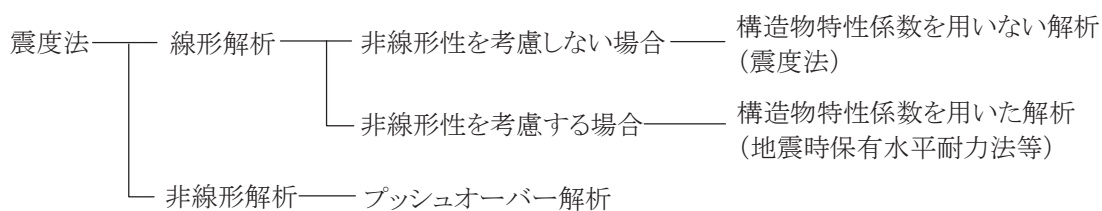
参考図 3.2.3 震度法による地震力の作用 (イメージ)

■適用する構造物の目安

- ・ 構造物の一部または大部分が地上に存在する場合
- ・ 周辺地盤の地盤変形による影響よりも地震動による構造物の慣性力や動水圧の影響が支配的になる場合

■解析方法の体系

(慣性力が支配的な耐震計算法)



水道耐震工法指針総論 p.126 より転載

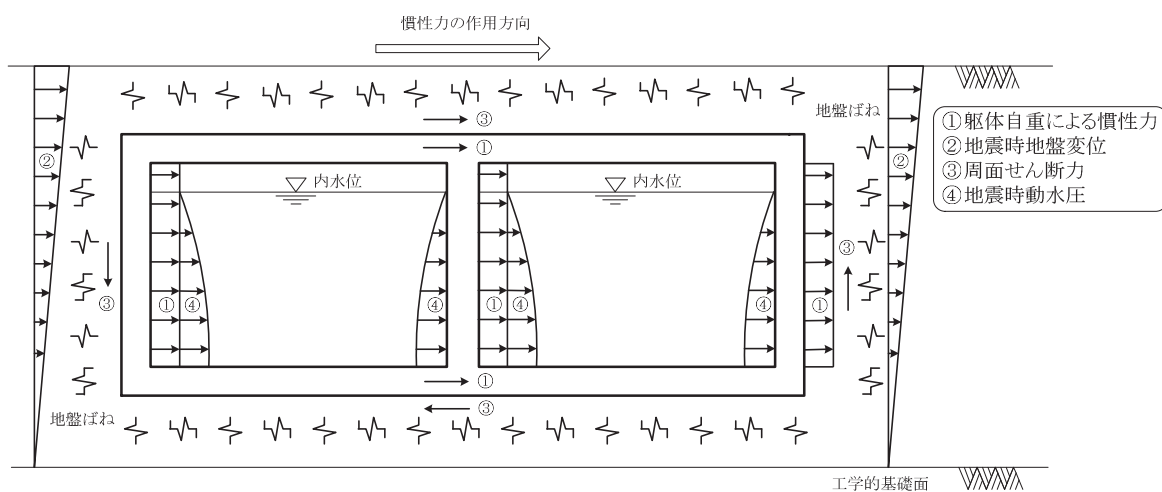
参考図 3.2.4 震度法の耐震計算法の体系

- ・水道施設耐震工法指針・解説（2009年版）では、プッシュオーバー解析等の非線形解析を適用することを原則としている。暫定的に地震時保有水平耐力法等、構造物の塑性変形によるエネルギー吸収能力を構造物特性係数 C_s により考慮した線形解析を用いても良いとされている。この場合、地上構造物の RC 構造の場合、 $C_s=0.45$ を用いることが一般的である。
- ・1997年版の水道施設耐震工法指針・解説では、構造物特性係数 C_s を用いた線形解析が記載されており、工業用水道施設においても従来は当該手法を主流としている。

(2) 応答変位法

応答変位法とは、地震作用を周辺地盤の地震時応答（地盤変位、周面せん断力、加速度など）を基に設定し、構造物の地震時応答を求める耐震計算法である。

解析モデルは、構造物をはりにモデル化し、これを周辺地盤との相互作用を表すばねで支持するモデル（はり・ばねモデル）を基本とする。



水道耐震工法指針総論 p.127 より転載

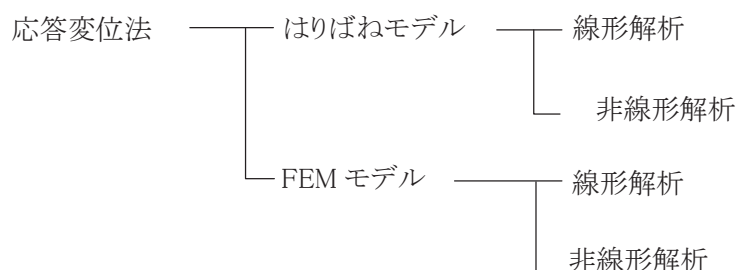
参考図 3.3.5 応答変位法による地震力の作用（イメージ）

■適用する構造物の目安

- ・ 構造物全体が完全に地中にある場合
- ・ 地震動による慣性力の影響よりも、周辺地盤の地震時挙動（地盤変形等）に支配される傾向が強い場合

■解析方法の体系

(地盤の影響が支配的な耐震計算法)

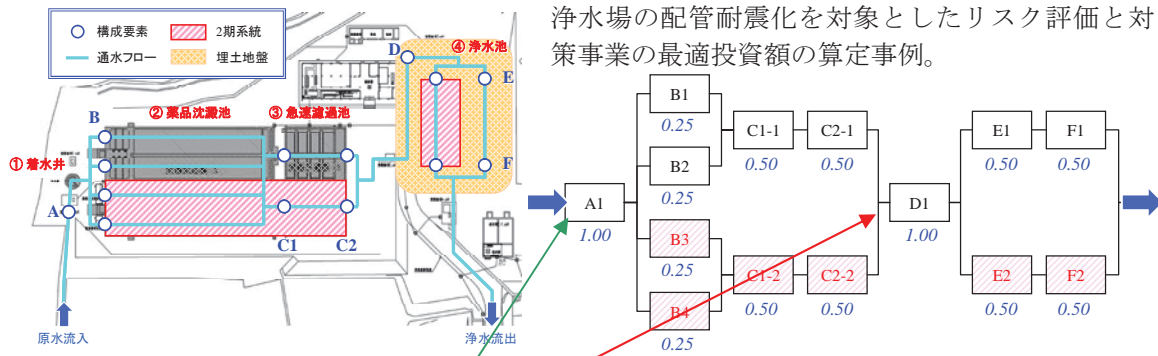


水道耐震工法指針総論 p.126 より転載

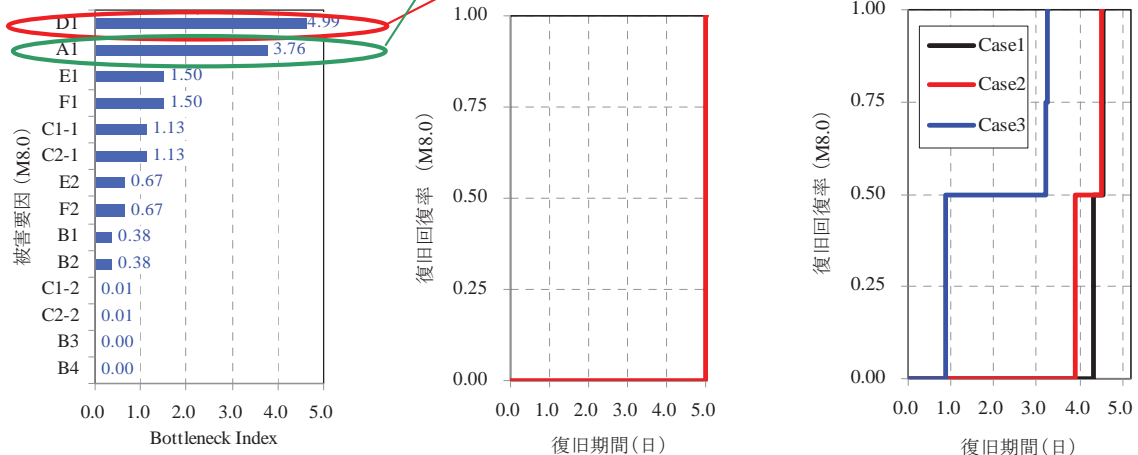
参考図 3.3.6 応答変位法の耐震計算法の体系

- ・ 地中構造物は、塑性変形の評価が困難であるため、構造物特性係数 C_s を用いない。
- ・ 応答変位法では地盤構造物の非線形性を考慮することも可能であるが、一般的には線形解析に適用される耐震計算法である。
- ・ 応答変位法概念を発展させ、より詳細に解析する手法として応答震度法がある。これは、2次元 FEM でモデル化した地盤・構造系の全体モデルを用いて、地盤応答解析結果に基づいた慣性力、地盤変位を作用させて、構造物の地震時応答を静的に求める耐震設計法である。

参考資料 3-3 地震リスクマネジメントの検討事例

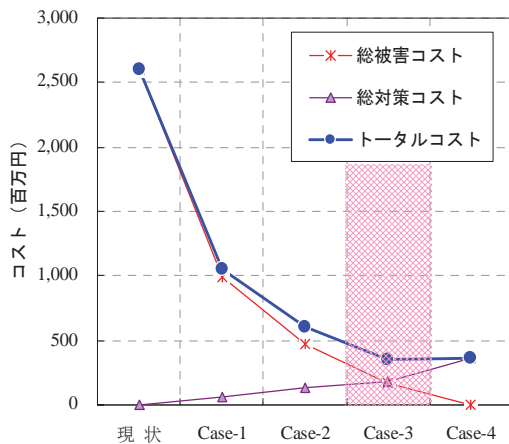


※数値は、システム全体としての通水能力（以下、性能）を1.00とした構成要素ごとの性能を示す。



ボトルネックインデックス

復旧曲線（左側；現況、右側；対策後）



- Case-1: 「D1」配管のみを補強
- Case-2: 「D1,E1,F1」配管を補強
- Case-3: 「D1,A1,E1,F1」を補強
- Case-4: 全てを補強

検討ケース	総被害コスト (百万円)	総対策コスト (百万円)	トータルコスト (百万円)	改良投資 (百万円)
現状	2,599	0	2,599	0
Case-1	988	62	1,050	55
Case-2	472	132	604	117
Case-3	171	176	347	156
Case-4	0	366	366	324

ケース 3 はトータルコストが最小となり、最適な投資となる。

図 最適投資額の算定結果