

## 12.7 耐震設計手法

### 12.7.1 耐震設計の基本

耐震設計は、レベル1地震動、レベル2地震動の大きさの異なる二つの設計地震動に対し、重要度に応じた所定の耐震性能を有するよう照査することを基本とする。なお、レベル2地震動を考慮する場合は、レベル1地震動、レベル2地震動の2段階照査を行う。

耐震性能は、頭首工構成要素ごとに、1)健全性を損なわない 2)限定された損傷に留める 3)致命的な損害を防止する、の三つの耐震性能を設定する。

#### (1) 耐震性能の損傷度と照査方法

##### ア 損傷度の考え方

目標とする耐震性能を満足するためには、構造物の損傷度をどの程度に留めておくべきか表示することが求められる。例えば、機能が完全に保持されるためには、構造物は健全性を損なわない、つまり、降伏状態を超えるような損傷を受けずに補修が不要である状態に留めておく必要があり、人命の安全性を確保するためには、補修が必要となる損傷を許容するが、構造部材の耐力が維持され、構造物全体の崩壊を防止しなければならない。このように、目標とする耐震性能を満足するには、構造物の損傷度を明瞭にわかりやすく表現しなければならない。表-12.7-1 にそれらの関係を示す。

表-12.7-1 耐震性能の定義と損傷度との関係

耐震性能	定義（損傷度）
1. 健全性を損なわない。	降伏状態を超えるような損傷を生じないこと。（補修不要）
2. 限定された損傷に留める。 （機能維持）	施設の機能の回復をより速やかに行うために、3.の状態より余裕を持った状態にあること。（頭首工堰柱等の場合）。（場合により、補修必要）
3. 致命的な損傷を防止する。 （修復容易）	塑性化を考慮する部材にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る状態にあること。（補修必要）

##### イ 照査項目

表示された耐震性能を満足しているか否かを判断する照査項目とその具体値を決めておく必要がある。本基準では、構成要素ごとに要求する耐震性能を示した。そして、照査項目として、次のように分類した。

特に、計画上レベル2地震動を考慮すべき AA 種及び A 種の構造物では、部材の塑性化を許し、塑性変形能力を考慮した設計を行う。このために、力に着目するだけでなく変位（若しくは部材の曲率）についての照査が必要となる。

表-12.7-2 から表-12.7-3 にレベル1地震動及びレベル2地震動に対する照査項目を示す。

##### ウ レベル1地震動に対する照査項目

レベル1地震動に対しては、地震後においても地震前と同じ機能を保持することができるよう、健全性を損なわない耐震性能を確保する。

レベル1地震動に対する照査は、部材の力学特性が弾性域を超えないかの照査を行う。ここで、部材の力学特性が弾性域を超えていない状態は、部材のコンクリート又は鋼材に生じる応力度が許容応力度内となる状態である。

また、基礎の支持に対しては、実変位量が許容変位量以下及び軸方向力が許容支持力（押込力・引抜力）以下となるようにする。

表-12.7-2 構造物と照査項目(レベル1地震動)

構成要素	耐震性能	損傷度	照査項目と照査基準		照査法
			応力度	変形、支持力	
堰 柱	健全性を損なわない	鉄筋の降伏状態を超えるような損傷を生じない(補修は不要)	応力度 <許容応力度	残留変位を許容しない	許容 応力度法
取入口					
魚 道					
沈砂池					
護 岸					
基礎工				変位量 <許容変位量 軸方向力 <許容支持力	

注) レベル1地震動に対しては、すべての構造物において弾性域の範囲で行うため、力のつり合いのみの照査で安全性を確保することにする。固定堰、ゲートの耐震設計法については、「12.2.4 構成要素ごとの耐震設計法」を参照のこと。

エ レベル2地震動に対する照査項目

レベル2地震動は、12.7.1(2)に示すとおりレベル1地震動に比べ5~10倍(タイプIIの場合)の加速度応答スペクトルを想定するので、従来からの部材の耐力や基礎の支持力を弾性域に留める設計は、部材寸法や配筋量が増大し現実的ではなく、部材が弾性域を超えることを前提とした上で、部材にじん性を与えエネルギーを吸収させる設計を行う必要がある。

そこで、レベル2地震動の設計は、構造体(躯体及び基礎)としての弾塑性を明確にできる地震時保有水平耐力法を用い、部材が弾性域を超えて崩壊していく過程(ひび割れ耐力、降伏耐力、終局耐力)を適切に把握していく。

ここで構造体の弾塑性設計として留意すべき点は、部材が塑性化した場合に図-12.7-1に示すように力の増分に対して変形の増分の割合が大きくなり非線形な特性が顕著になることである。そのため、部材の耐力を保持しながら最大変位や残留変位などの塑性変形をどこまで許容させながら、また、エネルギーの吸収をいかに図るかという判断が必要である。この点において、許容応力度法による照査は、弾性域を前提としているため、基本的に地震時保有水平耐力法を用いて照査する。

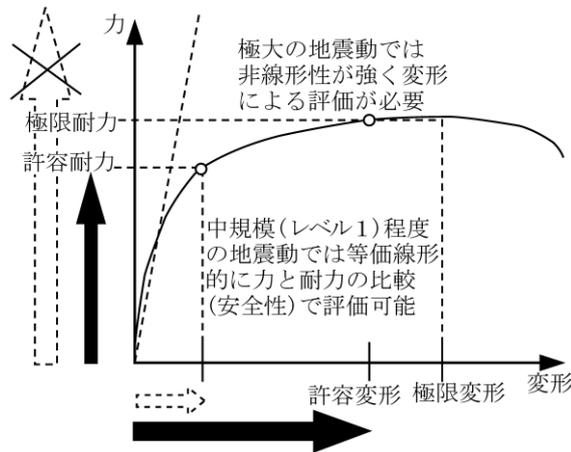


図-12.7-1 力の体系から変形の体系へ（塑性変形を考慮する）

表-12.7-3 構造物と照査項目（レベル2地震動）

重要度区分	構成要素	耐震性能	損傷度	照査項目と照査基準		照査法
				耐力	変形、支持力	
AA種	堰柱	限定された損傷に留める（機能維持）	施設の機能の回復をより速やかに行うために、「致命的な損傷を防止する」の状態より余裕を持った状態にあること。	慣性力 ＜地震時保有水平耐力	残留変位 ＜許容残留変位	地震時保有水平耐力法
	堰柱基礎		副次的な塑性化に留める。*	設計水平耐力 ＜基礎の降伏耐力 作用せん断力 ＜せん断耐力	変位量 ＜許容変位量 押込力・引抜力 ＜極限支持・引張力	
A種	堰柱	致命的な損傷を防止する（修復容易）	塑性化を考慮する部材にのみ塑性変形が生じ、その塑性変形が当該部材の修復を容易に行い得る状態にあること。	慣性力 ＜地震時保有水平耐力	残留変位 ＜許容残留変位	地震時保有水平耐力法
	堰柱基礎	限定された損傷に留める（機能維持）	副次的な塑性化に留める。*1)	設計水平耐力 ＜基礎の降伏耐力 作用せん断力 ＜せん断耐力	変位量 ＜許容変位量 押込力・引抜力 ＜極限支持・引張力	

注 1) \* 基礎の損傷度として副次的な塑性化に留めるとは、基礎に 12.7.2(2)イ. (イ) に示す荷重が作用したとき基礎本体と地盤を考慮した降伏耐力（構造物毎の基礎の許容塑性率）以下にすることである。

オ 照査に用いる解析方法と解析モデル

部材の非線形を考慮したレベル2地震動の耐震設計には、地震時保有水平耐力法を基本とする。ただし、剛性や質量が極端に異なる部材で構成された複雑な施設の場合や施設形状が左右非対称である場合、振動単位内で地盤条件が著しく異なる場合等の理由により、必ずしも1次振動モードが卓越せず高次振動モードが卓越する場合や2次以上の次数の固有周期が比較的大きい場合、または、2次以降のモードの有効質量比が大きい場合や主たる塑性化の生じる部位

が明確ではない場合等には、構造物全体を1自由度系と置き換えることが困難になるため、動的照査法を用いて耐震設計を行う必要がある。

なお、土地改良施設であるファームポンド(PC、RC)、暗渠(ボックスカルバート)等のレベル2地震動の破壊に対する安全性の照査は、限界状態設計法により行われている。

レベル2地震動の耐震設計法の基本は、部材が塑性化することにより、荷重と変形の関係が線形関係から非線形関係の弾塑性を考えている。このことは、各限界状態での変形の基準(限界状態：ひび割れ時、降伏時、終局時)を明確にして、部材又は構造物としての耐力と変形を分離しないで行う照査法となる。

弾塑性の非線形特性は、エネルギー一定則が成り立つとしたバイリニア型でモデル化しエネルギー吸収特性(構造物特性補正係数)や変形性能(最大変位量や残留変位量)を評価していく。

各設計法の特徴は、以下のとおりである。

#### (7) 地震時保有水平耐力法

エネルギー一定則を適用し、終局限界状態時の許容残留変位  $\delta_{Ra}$  (m) で規定する。変位は曲げモーメント( $M$ )-曲率( $\phi$ )の関係から、許容応答塑性率  $\mu_a$ 、応答塑性率  $\mu_R$  より残留変位を算定し、許容残留変位  $\delta_{Ra}$  と比較照査を行う。残留変位は、地震発生後でもゲートを確実に開閉でき、修復が容易に行うことができるよう、14.2.2 レベル2地震動に示す重要度区分に応じた許容残留変位以下であることを照査する。

地震時保有水平耐力法は、弾塑性応答と弾性応答の両者の入力エネルギーが同量となるエネルギー一定則という考え方のもとで、弾性応答変位から簡易に非線形応答変位を推定する方法であるが、一般に構造系の振動周期が長くなると、推定精度が悪くなることに留意が必要である。

#### (4) 動的照査法

動的照査は、地震力を実際と同様に時々刻々動的に変化する波として入力し、振動方程式に基づいた動的解析法にて、地震動に対する構造物各部位に生じる変位や断面力などの応答値と許容値を比較して照査を行う。

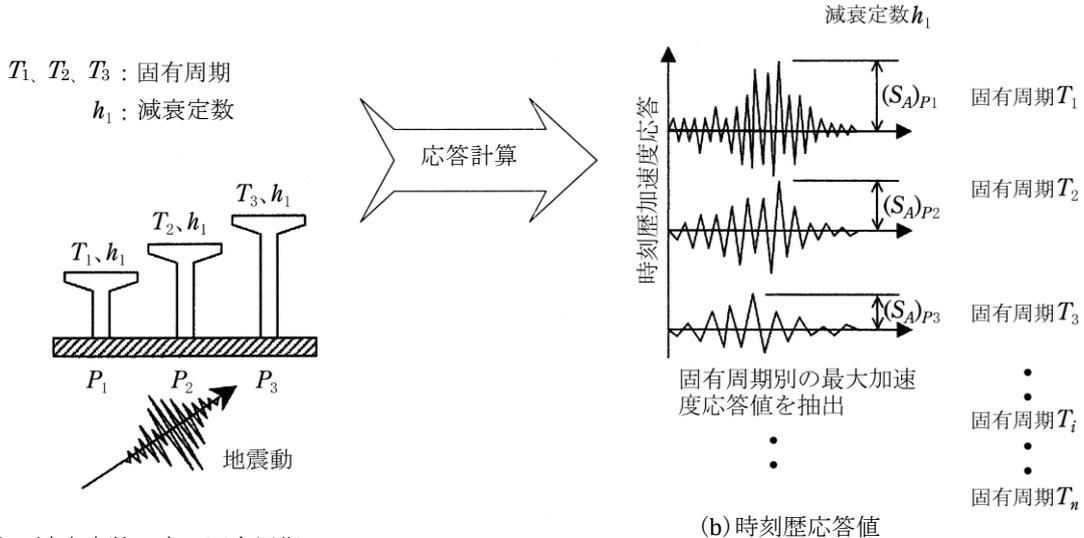
#### (2) 加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトルは、ある地震動における1質点系の応答値を、絶対加速度の最大値を縦軸に、固有周期を横軸に、減衰定数をパラメータとして表したものであり、静的解析にて1自由度系構造物の耐震設計を行う上で地震動の動的な挙動を静的な荷重に変換するという重要な意味をもっている。これは、静的解析に用いる設計水平震度が、減衰定数の補正を行った加速度応答スペクトルを重力加速度にて除し無次元化した値と定義されるからである。

応答スペクトルには、加速度応答スペクトルのほかに変位応答スペクトル、速度応答スペクトルなど着目する応答値がある。この中で、加速度応答スペクトルは、1質点系振動モデルに置換可能な構造物の応答特性を表す重要な指標であるが、加速度に着目し、固有周期を有する1自由度振動系にある地震動を作用させた場合の構造物の減衰定数をパラメータとして最大応答値を求め、これと固有周期との関係をプロットしたものである。

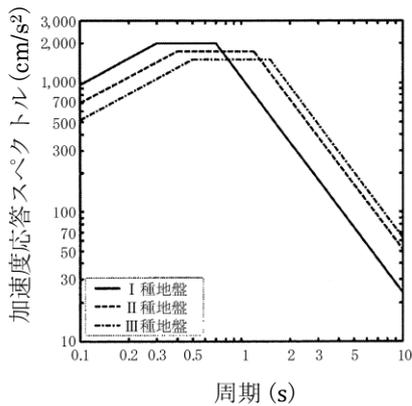
以下に加速度応答スペクトルの概念とその意味を示す。まず、図-12.7-2(a)のように同一の台の上に1自由度系(1質点系)を並べる。これらは、固有周期が  $T_1, T_2, T_3 \cdots T_n$  であり、減衰定数はいずれも  $h_1$  である。次に、ある加速度波形でこの基盤を振動させると、図-12.7-2(b)のよう

な時刻歴応答が求められる。これらの最大応答加速度を求め、固有周期と、最大応答加速度、 $(S_A)_{p1}$ 、 $(S_A)_{p2}$ 、 $(S_A)_{p3} \dots (S_A)_{pn}$ の関係をプロットすると、図-12.7-2(c)のように応答スペクトルが得られる。さらに、固有周期の異なる多くの1自由度系について同様に最大応答加速度を求めると、減衰定数 $h_1$ の加速度応答スペクトルと固有周期の相関関係として加速度応答スペクトルを得ることができる。なお、異なる減衰定数について同様なことを繰り返せば、材質が異なるなどに応じて減衰定数に対する曲線を得ることも可能である。

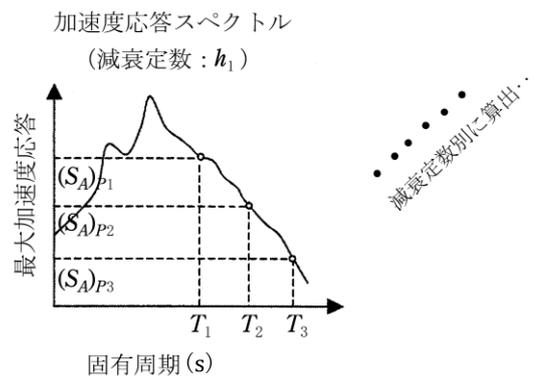


(a) 減衰定数一定、固有周期の異なる1質点系群  $i=1 \sim N$

(b) 時刻歴応答値



(d) 設計に用いる応答スペクトルの作成



(c) 加速度応答スペクトル



ア 加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトルは、12.7.2 設計水平震度に示す震度法や 12.7.3 震度法に示す地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度のもととなるので以下に示した。

(ア) レベル 1 地震動

レベル 1 地震動の加速度応答スペクトルは、耐震設計上の地盤面において与えるものとし、式(12.7-1)により算出する。

$$S = C_Z C_D S_0 \dots\dots\dots (12.7-1)$$

ここに、 $S$  : レベル 1 地震動の加速度応答スペクトル (1cm/s<sup>2</sup> 単位に丸める)

$C_Z$  : 地域補正係数

$C_D$  : 減衰定数補正係数で、各構造の減衰特性により補正する。

$S_0$  : 減衰定数を 0.05 としたときのレベル 1 地震動の標準加速度応答スペクトルであり、地盤種別及び固有周期に応じて表-12.7-4 の値とする。

表-12.7-4 レベル 1 地震動の標準加速度応答スペクトル

地盤種別	振動単位の固有周期 $T(s)$ に対する $S_0 (cm/s^2)$		
I 種	$T < 0.10$ $S_0 = 431 T^{1/3}$ ただし $S_0 \geq 160$	$0.10 \leq T \leq 1.10$ $S_0 = 200$	$1.10 < T$ $S_0 = 220/T$
II 種	$T < 0.20$ $S_0 = 427 T^{1/3}$ ただし $S_0 \geq 200$	$0.20 \leq T \leq 1.30$ $S_0 = 250$	$1.30 < T$ $S_0 = 325/T$
III 種	$T < 0.34$ $S_0 = 430 T^{1/3}$ ただし $S_0 \geq 240$	$0.34 \leq T \leq 1.50$ $S_0 = 300$	$1.50 < T$ $S_0 = 450/T$

本表は、減衰定数を 0.05 とした場合の標準加速度応答スペクトルである。

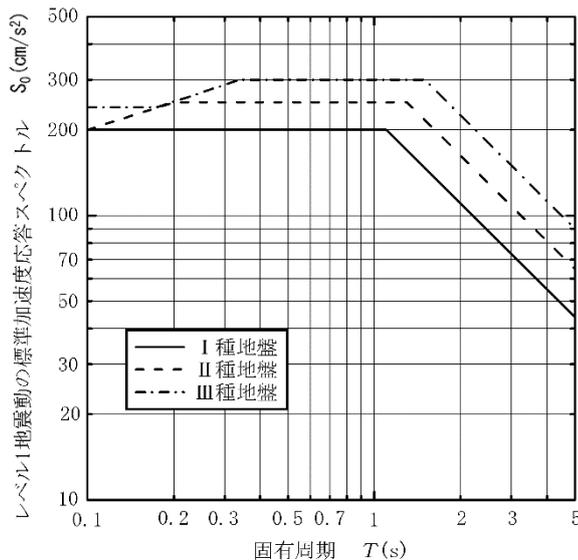


図-12.7-3 レベル 1 地震動の標準加速度応答スペクトル  $S_0$

## (イ) レベル2地震動

レベル2地震動の加速度応答スペクトルは、耐震設計上の地盤面において与えるものとし、地震動のタイプに応じてそれぞれ式(12.7-2)及び式(12.7-3)により算出する。

$$S_I = C_{1Z} C_D S_{I0} \dots \dots \dots (12.7-2)$$

$$S_{II} = C_{2Z} C_D S_{II0} \dots \dots \dots (12.7-3)$$

ここに、 $S_I$ ：レベル2地震動(タイプI)の加速度応答スペクトル(1 cm/s<sup>2</sup>単位に丸める)

$S_{II}$ ：レベル2地震動(タイプII)の加速度応答スペクトル(1 cm/s<sup>2</sup>単位に丸める)

$C_{1Z}$ ：レベル2地震動(タイプI)の地域補正係数

$C_{2Z}$ ：レベル2地震動(タイプII)の地域補正係数

$C_D$ ：減衰定数補正係数で各構造の減衰特性により補正する。

$S_{I0}$ ：減衰定数を0.05とした場合のレベル2地震動(タイプI)の標準加速度応答スペクトルであり地盤種別及び固有周期に応じて表-12.7-5の値とする。

$S_{II0}$ ：減衰定数を0.05とした場合のレベル2地震動(タイプII)の標準加速度応答スペクトルであり地盤種別及び固有周期に応じて表-12.7-6の値とする。

表-12.7-5 レベル2地震動(タイプI)の標準加速度応答スペクトル

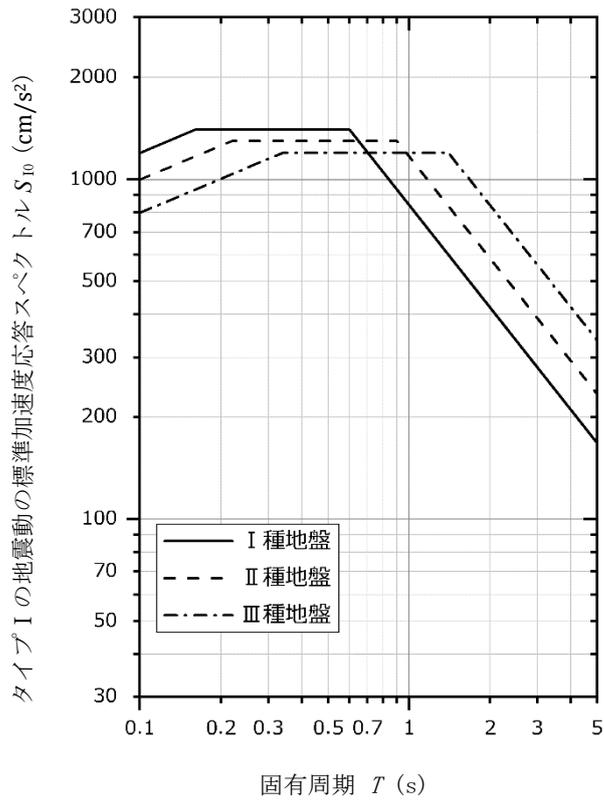
地盤種別	振動単位の固有周期 $T$ (s)に対する $S_{I0}$ (cm/s <sup>2</sup> )		
I種	$T < 0.16$ $S_{I0} = 2579 T^{1/3}$	$0.16 \leq T \leq 0.60$ $S_{I0} = 1400$	$0.60 < T$ $S_{I0} = 840/T$
II種	$T < 0.22$ $S_{I0} = 2153 T^{1/3}$	$0.22 \leq T \leq 0.90$ $S_{I0} = 1300$	$0.90 < T$ $S_{I0} = 1170/T$
III種	$T < 0.34$ $S_{I0} = 1719 T^{1/3}$	$0.34 \leq T \leq 1.40$ $S_{I0} = 1200$	$1.40 < T$ $S_{I0} = 1680/T$

本表は、減衰定数を0.05とした場合の標準加速度応答スペクトルである。

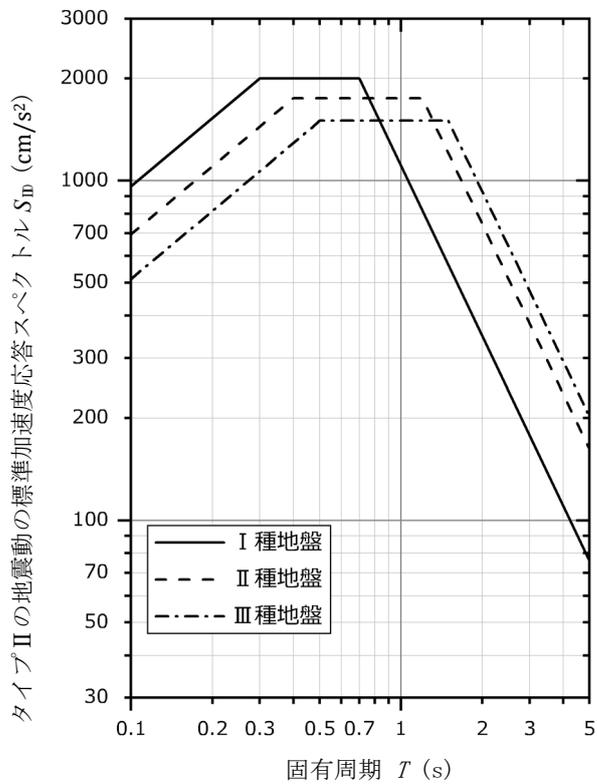
表-12.7-6 レベル2地震動(タイプII)の標準加速度応答スペクトル

地盤種別	振動単位の固有周期 $T$ (s)に対する $S_{II0}$ (cm/s <sup>2</sup> )		
I種	$T < 0.30$ $S_{II0} = 4463 T^{2/3}$	$0.30 \leq T \leq 0.70$ $S_{II0} = 2000$	$0.70 < T$ $S_{II0} = 1104/T^{5/3}$
II種	$T < 0.40$ $S_{II0} = 3224 T^{2/3}$	$0.40 \leq T \leq 1.20$ $S_{II0} = 1750$	$1.20 < T$ $S_{II0} = 2371/T^{5/3}$
III種	$T < 0.50$ $S_{II0} = 2381 T^{2/3}$	$0.50 \leq T \leq 1.50$ $S_{II0} = 1500$	$1.50 < T$ $S_{II0} = 2948/T^{5/3}$

本表は、減衰定数を0.05とした場合の標準加速度応答スペクトルである。



(a) タイプ I の地震動の標準加速度応答スペクトル  $S_{10}$



(b) タイプ II の地震動の標準加速度応答スペクトル  $S_{10}$

図-12.7-4 レベル 2 地震動の標準加速度応答スペクトル

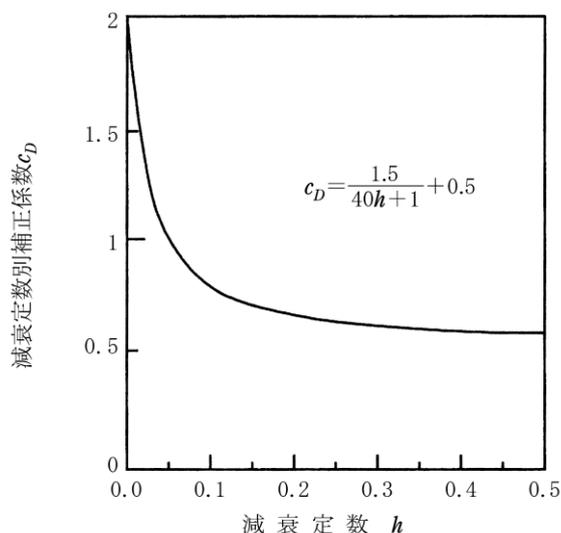
## (ウ) 減衰定数の標準値

減衰定数は、部材の粘性特性により生じる粘性減衰、部材の塑性的性質から生じる履歴減衰、振動エネルギーの地下逸散減衰などからなり、構造物を構成する部材等の構造特性によって変化する。以下に各構造要素の等価減衰定数の参考値を表-12.7-7に示す。

表-12.7-7 各構造要素の等価減衰定数の標準値

応答範囲	線形部材としてモデル化する場合		非線形履歴によるエネルギー吸収を別途考慮するモデルを用いる場合	
	鋼構造	コンクリート構造	鋼構造	コンクリート構造
管理橋などの上部構造	0.02	0.03	—	
管理橋ゴム支承	0.03 (使用する支承の実験より得られた等価減衰定数)		—	
管理橋免震支承	有効設計変位に対する等価減衰定数		0	
堰柱構造	0.03	0.05	0.01 : コンクリートを充てんしない場合 0.02 : コンクリートを充てんする場合	0.02
基礎構造	0.1 : I種地盤上の基礎及び II種地盤上の直接基礎 0.2 : 上記以外の条件の基礎		—	

※上部構造、管理橋ゴム支承及び基礎構造については、一般には線形要素によりモデル化され、非線形要素によるエネルギー吸収を解析上では考慮しないため、非線形履歴によるエネルギー吸収を別途考慮するモデルを用いる場合の減衰定数の標準値は示していない。

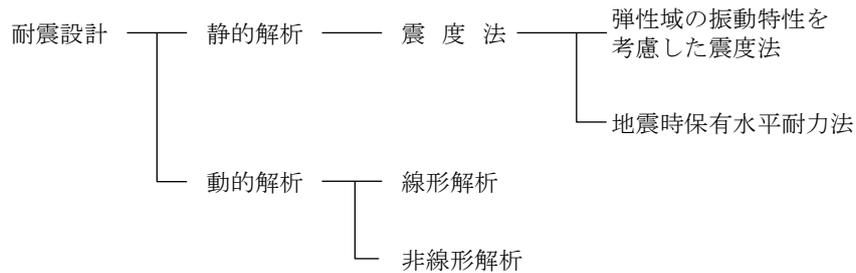
図-12.7-5 減衰定数別補正係数  $c_D$

イ 耐震設計の区分

平成 14 年度以前の道路橋示方書では、構造物の弾性域の振動特性を考慮して、地震による荷重を静的に作用させて設計する耐震設計法を震度法、構造物の非線形域の変形性能や動的耐力を考慮して、地震による荷重を静的に作用させて設計する耐震設計法を地震時保有水平耐力法とそれぞれ定義されていた。平成 14 年 3 月の道路橋示方書の改定から地震時保有水平耐力法も、震度を用いて静的な値に置き換えて耐震設計を行うという観点では、構造物に動的に作用する地震力を震度と構造物の重量の積として与えられる静的な力に置き換える震度法の一つの手法とすることができ、地震時保有水平耐力法も震度法に基づいて行うものとなっており、平成 24 年 3 月の道路橋示方書及び河川構造物の耐震性能照査指針（令和 2 年版）においても同様である。

一方、本基準では、**図-12.7-6** に示すように従来の本基準における耐震設計の区分を踏襲することとし、レベル 1 地震動では震度法を適用し、レベル 2 地震動では基本的には地震時保有水平耐力法を適用する。

河川構造物の耐震性能照査指針・解説（令和 2 年版）（道路橋示方書（H24.3 版））



頭首工基準

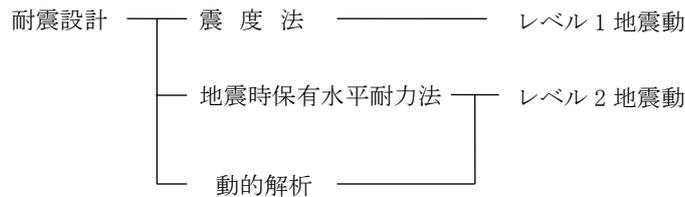


図-12.7-6 耐震設計の区分