

4 章 各種基準におけるレベル 2 地震動と適用例

4.1 道路橋示方書

4.1.1 レベル 2 地震動の定義

耐震設計で考慮する地震動としては、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動および供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動の 2 段階の地震動を考慮する。ここで、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動としては、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震による地震動とし、従来の耐震設計において震度法に用いる設計震度として規定されてきた地震力を踏襲するものである。また、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動としては、平成 2 年の道路橋示方書において規定された大正 12 年の関東地震の際の東京周辺における地震動のように発生頻度が低いプレート境界型の大規模な地震による地震動（タイプⅠの地震動）に加え、平成 7 年兵庫県南部地震のように発生頻度が極めて低いマグニチュード 7 級の内陸直下型地震による地震動（タイプⅡの地震動）を考慮するものである。

4.1.2 対象構造物

道路法に規定する高速自動車国道、一般国道、都道府県道および重要な市町村道における支間 200m 以下の橋の設計および施工に適用する。ただし、支間 200m をこえる橋についても、橋種、構造形式、架橋地点の実状などに応じ必要かつ適切な補正を行って、準用することができる。

4.1.3 耐震設計の基本方針

橋の耐震設計は、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを目標として行う。

4.1.4 構造物の重要度ランクと耐震性能

重要度は、道路種別および橋の機能・構造に応じて表 4.1.4-1 に示すように区分する。また、表 4.1.4-2 に耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能、およびこれを検討するための耐震計算法を示す。

表 4.1.4-1 重要度の区分

重要度の区分	対象となる橋
A 種の橋	下記以外の橋
B 種の橋	・高速自動車国道、都市高速道路、指定都市高速道路、本州四国連絡道路、一般国道の橋 ・都道府県道、市町村道のうち、複断面、跨線橋、跨道橋および地域の防災計画上の位置付けや当該道路の利用状況等から特に重要な橋、高架の道路等

表 4.1.4-2 耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

耐震設計で考慮する地震動		目標とする橋の耐震性能		耐 震 計 算 法	
		重要度が標準的な橋 (A 種の橋)	特に重要度が高い橋 (B 種の橋)	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動		健全性を損なわない		震 度 法	時刻歴応答解析法
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動	タイプⅠの地震動 (プレート境界型の大規模な地震)	致命的な被害を防止する	限定された損傷にとどめる	地震時保有水平耐力法	応答スペクトル法
	タイプⅡの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)				

4.1.5 定義位置

耐震設計で考慮する地震動の定義位置は、耐震設計上の地盤面である。耐震設計上の地盤面とは、その面より上方の構造部分には地震力を作用させるが、その面より下方の構造部分には地震力を作用させないという耐震設計上仮定する地盤面のことである。

4.1.6 表現方法

耐震設計で考慮する地震動は、震度法及び地震時保有水平耐力法の場合は設計水平震度として、動的解析の場合は加速度波形または加速度応答スペクトルとして表される。

4.1.7 設定方法

(1) 震度法に用いる設計水平震度

震度法に用いる設計水平震度は、従来からの震度法による耐震設計で用いられてきた設計震度と同等であり、式(1)により算出する。

$$k_h = c_z k_{h0} \quad (1)$$

ここに、

k_h : 震度法に用いる設計水平震度 (小数点以下2けたに丸める)。ただし、 $k_h \geq 0.1$

k_{h0} : 震度法に用いる設計水平震度の標準値で、図 4.1.7-1による。

c_z : 地域別補正係数 (1.0、0.85、0.7)

地震動による橋の応答は、地震動の強さ、周期特性、継続時間、地盤種別、橋の構造形式、特に基礎構造形式の種別などによって異なる。これらの要素を考慮して、設計水平震度の標準値は、従来からの慣行と経験上の事実を総合した上で、我が国で観測された394成分の強震記録を解析して求められた地盤種別ごとの加速度応答スペクトル曲線や近年の地震による橋の被災の特徴、観測と実験上の事実等を考慮して定められたものである。

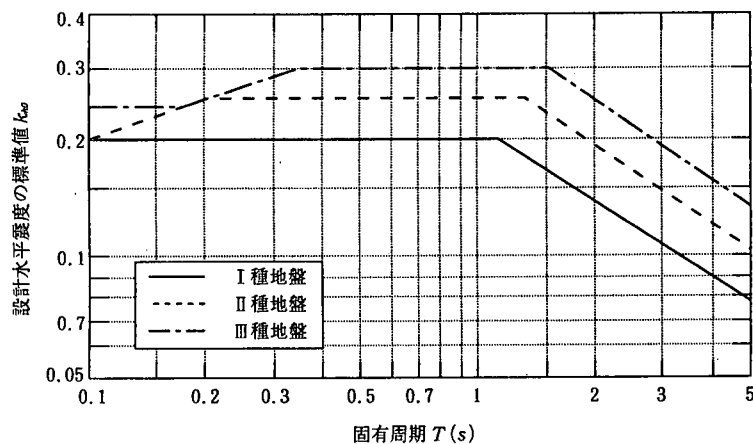


図 4.1.7-1 震度法に用いる設計水平震度の標準値

(2) 地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度

(a) 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度

地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度は、平成2年の道路橋示方書に規定された鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度と同等であり、式(2)により算出する。

$$k_{hc} = c_z k_{hc0} \quad (2)$$

ここに、

k_{hc} : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度 (小数点以下2けたに丸める)。

ただし、 $k_{hc} \geq 0.3$

k_{hco} ：地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度の標準値で、図 4.1.7-2による。

c_z ：地域別補正係数（1.0、0.85、0.7）

地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度は、発生頻度が低いプレート境界に生じる海洋性の大規模な地震を想定した地震力を与えるものである。道路橋示方書では、大正12年の関東地震に際して、東京周辺で生じた地震力をこのタイプの地震動の例としてとらえ、これを地震時保有水平耐力法による耐震設計に取り入れたものである。関東地震当時には、強震観測が行われていなかったため、強震記録のように科学的な根拠に基づく地震動の評価はできないが、距離減衰式等により地盤上の加速度は0.3～0.4G程度と推定されている。地盤種別ごとに橋の固有周期や減衰特性によって変化するが、地盤にある振動が生じた場合に橋に生じる加速度は、一般には、地盤の加速度の2～3倍程度になる。したがって、0.3～0.4Gの地震動に対して橋が弾性挙動するとすれば、その橋に生じる加速度はおおむね0.7～1G程度となる。

図 4.1.7-2に示した設計水平震度の標準値は、我が国で観測された394成分の強震記録の加速度応答スペクトルの統計解析結果を基本に、これに固有周期ごとの減衰定数の補正を加えて定められたものである。

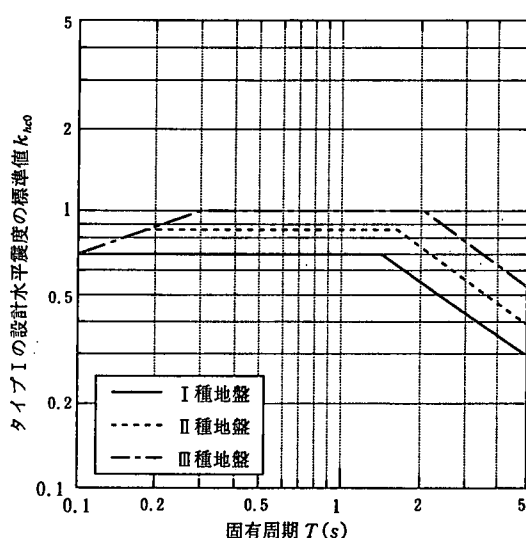


図 4.1.7-2 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠの設計水平震度の標準値

(b) 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅡの設計水平震度

地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅡの設計水平震度は、内陸直下型地震として構造物に与える影響という観点で現在までに観測された中で最も強い地震動を与えた兵庫県南部地震による地震動に基づき設定されたものであり、式(3)により算出する。

$$k_{hc} = c_z k_{hco} \quad (3)$$

ここに、

k_{hc} ：地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅡの設計水平震度（小数点以下2けたに丸める）。

ただし、 $k_{hc} \geq 0.6$

k_{hco} ：地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅡの設計水平震度の標準値で、図 4.1.7-3による。

c_z : 地域別補正係数 (1.0、0.85、0.7)

タイプⅡの設計水平震度は、兵庫県南部地震により地盤上で実測された加速度強震記録に基づき、この加速度応答スペクトルを地盤種別ごとに分類して定められたものである。すなわち、兵庫県南部地震では、神戸海洋気象台（Ⅰ種地盤）、ＪＲ西日本鷹取駅（Ⅱ種地盤）、東神戸大橋周辺地盤上（Ⅲ種地盤）等において加速度が大きく構造物に破壊的な影響を与えた地震動加速度が観測されている。これらの加速度応答スペクトルを計算し、特別に大きなピークは平滑化して求めたスペクトルに、固有周期ごとの減衰定数による補正を加えて求めたものが、図 4.1.7-3に示す設計水平震度である。

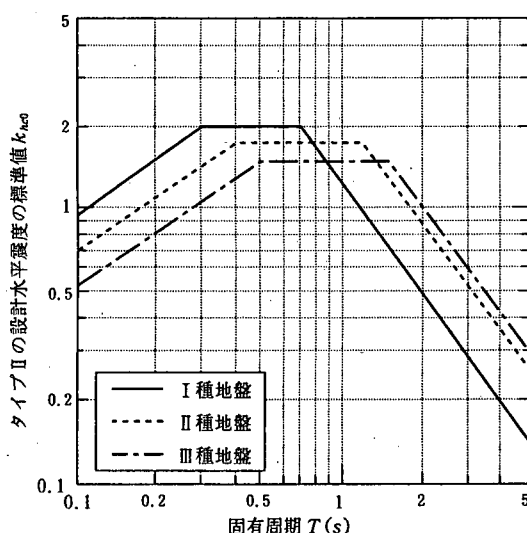


図 4.1.7-3 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅡの設計水平震度の標準値

(3) 動的解析に用いる地震入力

(a) 時刻歴応答解析に用いる地震入力

時刻歴応答解析に用いる地震入力としては、既往の代表的な強震記録を(b)または(c)に規定する加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振動数領域で振幅調整した加速度波形を用いることを原則とする。

時刻歴応答解析に用いる地震入力としては、架橋地点で観測された強震記録を用いるのが望ましいが、一般にはそのような記録は得られていないのが普通である。したがって、動的解析では、地震動の強度、周期特性、継続時間、ならびに橋の固有周期、減衰定数などを考慮して既往の代表的な強震記録を(b)または(c)に規定する加速度応答スペクトルに近い特性を有するように振動数領域で振幅調整した強震記録を用いることを原則とする。

(b) 震度法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力

震度法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力の加速度応答スペクトルは、式(4)により算出する。

$$S = c_z c_d S_0 \quad (4)$$

ここに、

S : 震度法による耐震設計結果の照査に用いる加速度応答スペクトル (1 gal単位に丸める)。

c_z : 地域別補正係数 (1.0、0.85、0.7)

c_D : 減衰定数別補正係数であり、モード減衰定数 h_i に応じて式(5)により算出する。

$$c_D = \frac{1.5}{40h_i + 1} + 0.5 \quad (5)$$

S_0 : 震度法による耐震設計結果の照査に用いる標準加速度応答スペクトル(gal)であり、地盤種別および各振動モードの固有周期 T_i に応じて、図 4.1.7-4による。

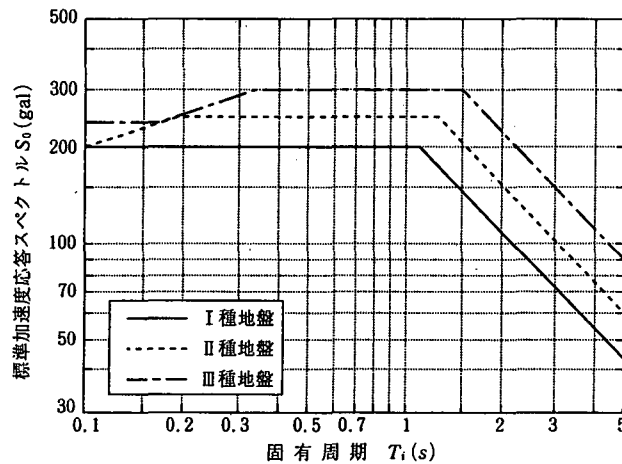


図 4.1.7-4 標準加速度応答スペクトル S_0

標準加速度応答スペクトル S_0 は、わが国の地盤表面において観測された394成分の強震記録から求めた減衰定数0.05の加速度応答スペクトルの重回帰分析結果に基づき、これに既往の地震被害の特性、地盤の振動特性、その他の工学的判断を加えて地盤種別ごとに定めたものである。また、減衰定数別補正係数 c_D は、減衰定数0.05の加速度応答スペクトルをモード減衰定数 h_i の加速度応答スペクトルに補正するための係数である。

(c) 地震時保有水平耐力法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力

地震時保有水平耐力法による耐震設計結果の照査に用いる地震入力の加速度応答スペクトルは、地震動のタイプに応じて、式(6)および(7)により算出する。

$$S_I = c_z c_D S_{I0} \quad (6)$$

$$S_{II} = c_z c_D S_{II0} \quad (7)$$

ここに、

S_I : タイプ I の加速度応答スペクトル (1 gal単位に丸める)。

S_{II} : タイプ II の加速度応答スペクトル (1 gal単位に丸める)。

c_z : 地域別補正係数 (1.0、0.85、0.7)

c_D : 減衰定数別補正係数であり、モード減衰定数 h_i に応じて式(5)により算出する。

S_{I0} : タイプ I の標準加速度応答スペクトル(gal)であり、地盤種別および固有周期 T_i に応じて、
図 4.1.7-5による。

S_{II0} : タイプ II の標準加速度応答スペクトル(gal)であり、地盤種別および固有周期 T_i に応じて、
図 4.1.7-6による。

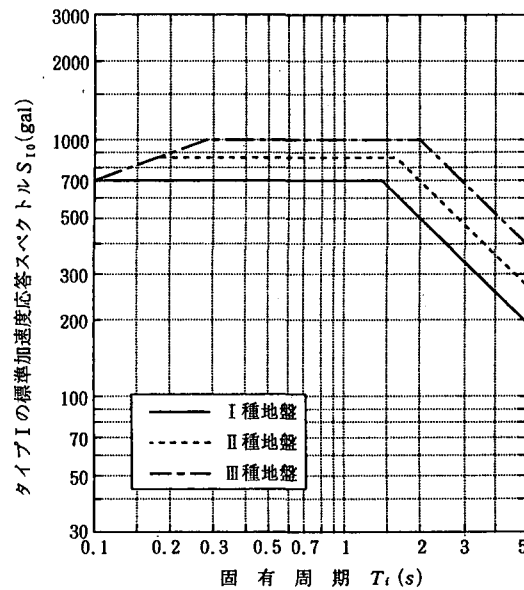


図 4.1.7-5 タイプ I の標準加速度応答スペクトル S_{I0}

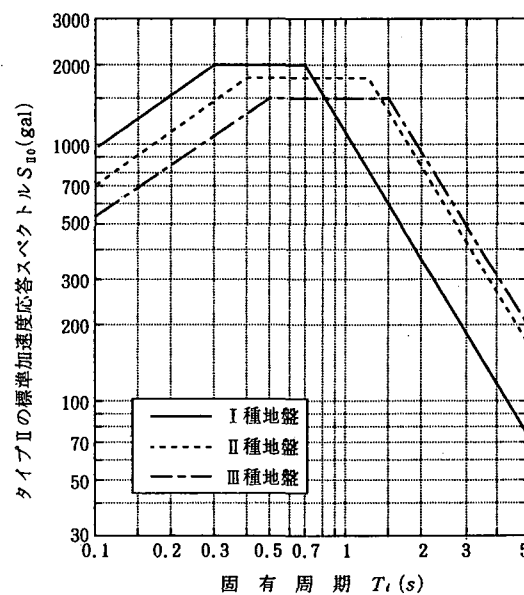


図 4.1.7-6 タイプ II の標準加速度応答スペクトル S_{II0}

4.1.8 地域別補正係数

地震の発生状況は地域によって異なり、地震発生頻度の少ない地域において、地震発生頻度の高い地域と同一の地震動の強度を用いることは合理的ではないため、橋の耐震設計で考慮する地震動の強度は地域別補正係数によって補正する。図 4.1.8-1に地域区分を示す。本地域区分は、4.1.7に示したように、橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動並びに供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（タイプⅠの地震動およびタイプⅡの地震動）のいずれにも適用されるが、この理由は、地域区分を設定する際の基礎となった地震危険度の解析結果が、プレート境界で起こる大規模な地震や内陸の活断層で起こる地震など、わが国に影響を及ぼす地震について工学的に利用可能な資料を取り入れて総合的に求められたものであるためである。

地域別補正係数の値は、従来の道路橋の耐震設計の慣例、新耐震設計法（案）などを参考にして、A地域1.0、B地域0.85、C地域0.7と定められている。

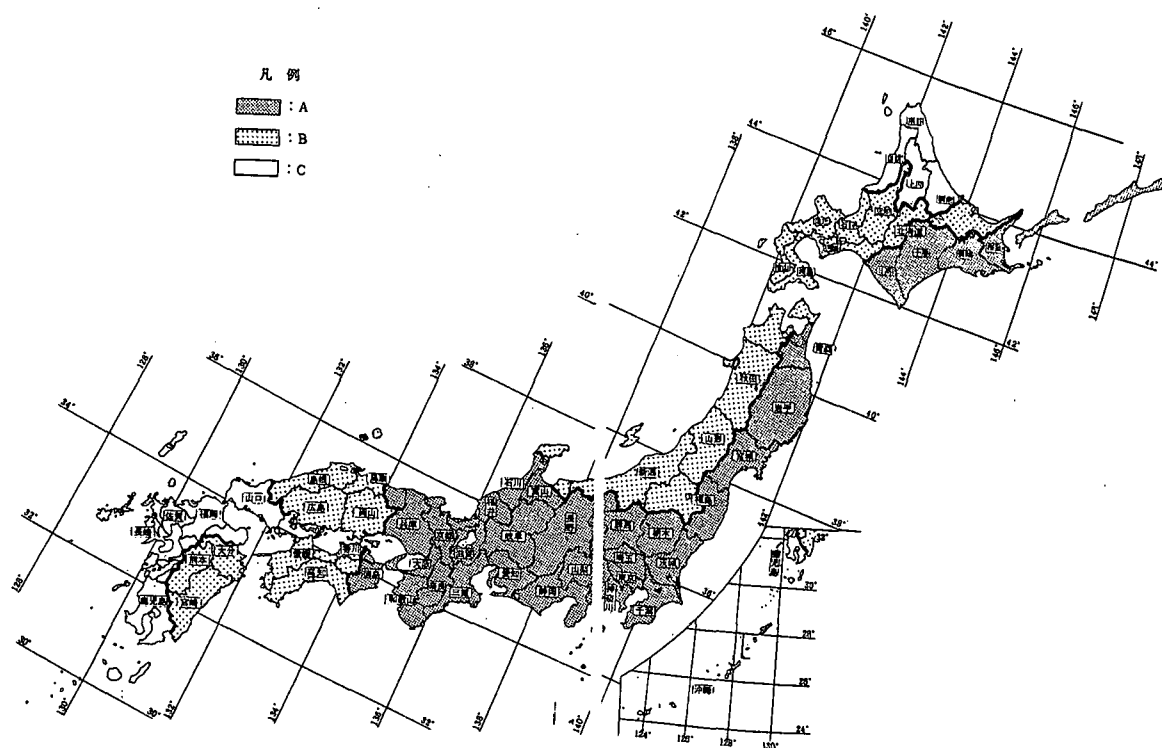


図 4.1.8-1 地域区分

4.1.9 耐震性能の照査方法

震度法や地震時保有水平耐力法は、地震時の挙動が複雑ではない橋に対しては、実用上十分な精度で地震時の橋の挙動を簡便に表わすことができる。このため、原則として震度法および地震時保有水平耐力法により耐震設計を行う。

しかしながら、特殊な形状、構造を有する橋などでは、震度法や地震時保有水平耐力法では地震時の橋の挙動を十分に表すことができない場合がある。このため、このような地震時の挙動が複雑な橋

に対しては、震度法や地震時保有水平耐力法によって耐震設計した結果を動的解析により照査するのがよい。

また、非線形性が複数箇所に生じる橋等でエネルギー一定則の適用性が限定される場合など、地震時の挙動が複雑で、地震時保有水平耐力法による耐震設計法の適用性が限定される橋については、動的解析結果に基づいて適切に耐震設計するものとする。

4.1.10 その他

(1) 活断層の考慮

個々の活断層の特性を直接設計に反映するためには、活断層の位置や活動時期を特定しなければならず、また、その活動性や活断層に基づく地震動の予測等を全国的な規模で行うためには、現状では未解明な点が多く残されている。こうした点については、今後の調査研究の進展に応じて適切に対応していくことが必要とされることに鑑みて、道路橋示方書では、内陸直下型地震として構造物に与える影響という観点で現在までに観測された中で最も強い地震動を与えた平成7年兵庫県南部地震による地震動を考慮している。

(2) 重要度の扱い

従来の道路橋示方書（平成2年2月）では、橋の重要度に応じて設計水平震度を変化させたが、現行の道路橋示方書では、重要度に応じて目標とする耐震性能を確保するために構造部材の地震時保有水平耐力や許容塑性率に重要度を反映させている。

(3) 液状化判定に用いる設計地震動

液状化の判定は、液状化に対する抵抗率 F_L を用いて行うが、そのために地盤面における設計水平震度が設定されている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅴ耐震設計編）・同解説、1996

4.2 鉄道構造物等設計標準・同解説^{1),2)}

4.2.1 レベル2地震動の定義

設計想定地震動として、L1地震動とL2地震動の二つのレベルの地震動を考慮しており、それぞれ以下のように定義されている。

L1地震動：構造物の設計耐用期間内に数回程度発生する確率を有する地震動

L2地震動：構造物の設計耐用期間内に発生する確率は低いが非常に強い地震動

L2地震動に関しては、対象地震のイメージが記載されており、「陸地近傍に発生する大規模な海洋型地震と内陸型地震を対象とするものである」としている。

4.2.2 対象構造物

鉄道の橋梁、高架橋、基礎構造物、抗土圧構造物、開削トンネルおよび重要度の高い鉄道（新幹線や大都市旅客鉄道など）の盛土を対象としている。仮設構造物や簡易な構造物には適用しなくてもよい。

4.2.3 耐震設計の基本方針

耐震設計は、基盤で設定した地震動を用いて、表層地盤の応答計算を行い、その地震動を構造物に入力して応答を求め、その耐震性能を照査することを基本とする。

4.2.4 構造物の耐震性能と重要度ランク

(1) 耐震性能の区分

構造物の耐震性能は、主に構造物の損傷および地震後の機能の復旧の程度を考慮して

耐震性能Ⅰ：地震後にも補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない

耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能が回復できる

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない

の3つに区分されており、表4.2.4-1に示すように、L1地震動に対しては耐震性能Ⅰを、L2地震動に対しては、重要度の高い構造物は耐震性能Ⅱを、その他の構造物は耐震性能Ⅲを満足することとなっている。ただし、重要度の高い構造物とは、原則として、

新幹線鉄道および大都市旅客鉄道の構造物

開削トンネル等被害が生じた場合の復旧が困難な構造物

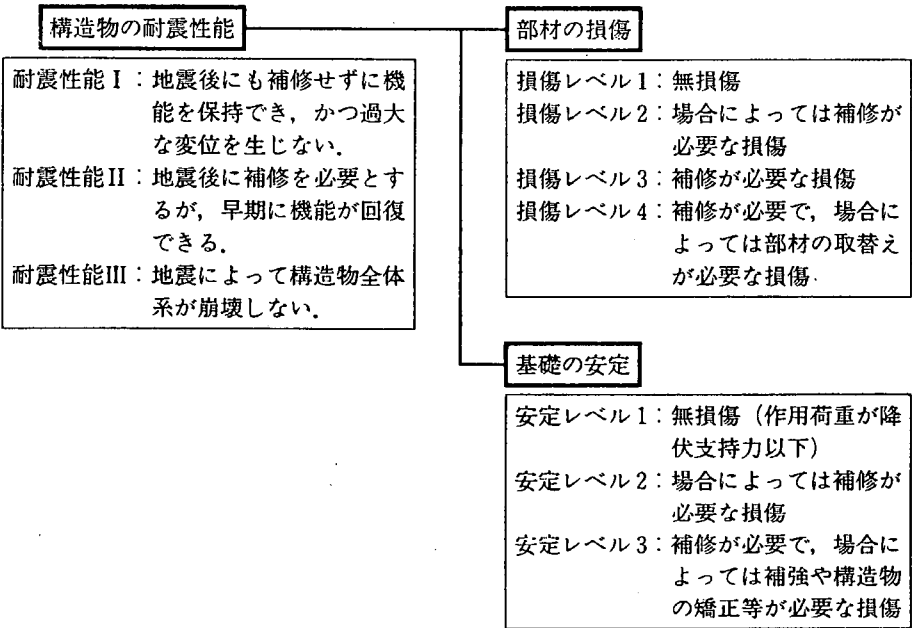
のことをいう。

表 4.2.4-1 設計地震動と満足すべき耐震性能

設計地震動	満足すべき耐震性能	
	重要度の高い構造物	その他の構造物
L1地震動	耐震性能 I	耐震性能 I
L2地震動	耐震性能 II	耐震性能 III

(2) 耐震性能の設定

上記で区分された耐震性能は、耐震性能ごとに部材の損傷レベル、支承部の損傷レベル、基礎の安定レベル等によって表されている。例えば、橋梁、高架橋の耐震性能は、図 4.2.4-1 のように部材の損傷レベルと基礎の安定レベルによって表され、ラーメン高架橋では、耐震性能 I ～ III それぞれについて図表 4.2.4-1 のような制限値が設けられている。

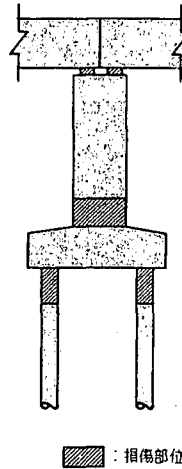


解説図 2.2.3 橋梁、高架橋の耐震性能

図 4.2.4-1 構造物の耐震性能（橋梁、高架橋の場合）¹⁾

(3) 耐震性能と重要度ランク

(1)に示されているとおり、構造物の重要度の違いは、満足すべき耐震性能の違いとして表されており、対象とする設計地震動の大きさは重要度によらず同一としている。



解説図 2.2.4 単柱式橋脚の損傷部位のイメージ

解説表 2.2.1 単柱式橋脚の耐震性能と部材の損傷レベルおよび基礎の安定レベルの制限値の目安

構 造 物	耐震性能Ⅰ	耐震性能Ⅱ	耐震性能Ⅲ
部材の損傷レベル	1	3	3
基礎の安定レベル	1	2	3

※部材の損傷レベルのうち、支承部の損傷レベルは、「7.11 支承部」によるものとする。

図表 4.2.4-1 構造物の耐震性能と損傷レベル・安定レベル（単柱式橋脚の場合）¹⁾

4.2.5 定義位置

(1) 定義位置

4.2.1の設計地震動は、耐震設計上の基盤面を解放基盤面として設定される。ただし、耐震設計上の基盤面は、連続した硬い地層（以下のいずれかの条件を満足する基盤層）の上面に設定することとなっている。

砂質土でN値50以上、粘性土でN値30以上の連続地層

地層のせん断弾性波速度が400m/s以上の連続地層

(2) 地表面設計地震動

耐震設計では、耐震設計上の基盤面で定義される設計地震動を用いて表層地盤の応答を算定し、その波形または応答スペクトルから定まる荷重を構造物に作用させる。実際には、地表面設計地震動を算定する方法として以下の2つがある。

- ・ G0からG7までの8種類の地盤種別に応じて定められている弾性加速度応答スペクトルを地表面設計地震動とする方法
- ・ 動的解析により地表面設計地震動を算定する方法

なお、地表面設計地震動を設定する場合には、必要に応じて液状化や不整形の影響を考慮することとなっている。

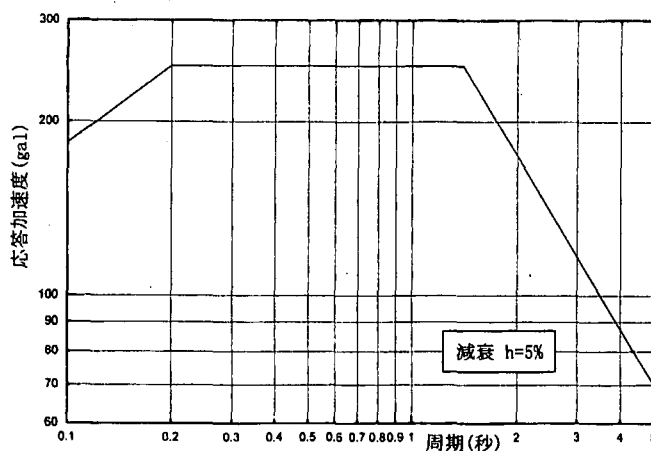
4.2.6 表現方法

設計地震動の基本的な特性は、弾性加速度応答スペクトルで表すこととし、時刻歴応答解析をする場合に用いる入力地震波は、地震動の非定常性を考慮して、設計地震動の弾性加速度応答スペクトルに適合させる。

4.2.7 設定方法

(1) L1地震動の設定方法

L1地震動は、従来より設計で用いられてきた地震動を基本として設定されており、図 4.2.7-1 の弾性加速度応答スペクトルに、図 4.2.8-1（後述）の地域別係数を乗じたものとする。



解説図 3.3.1 L1地震動の弾性加速度応答スペクトル

図 4.2.7-1 L1地震動の弾性加速度応答スペクトル¹⁾

(2) L2地震動の設定方法

L2地震動は、図 4.2.7-2 のフローに基づき設定する。すなわち、活断層の調査結果により、以下の1)～3)のいずれかによって設定する。

- 1) 建設地点近傍に活断層（東海地震や関東地震など陸地近傍に発生する大規模な海洋型地震の断層面も含む）が存在し、その位置を特定できる場合
次の地震動のうち大きい地震動を設計地震動とする。

- ① スペクトルⅠに地域別係数を乗じたもの。
- ② スペクトルⅡを距離補正したもの。ただし断層の詳細な情報が得ることができる場合には、スペクトルⅢとすることができる。

- 2) 建設地点近傍に活断層がないと判断できる場合

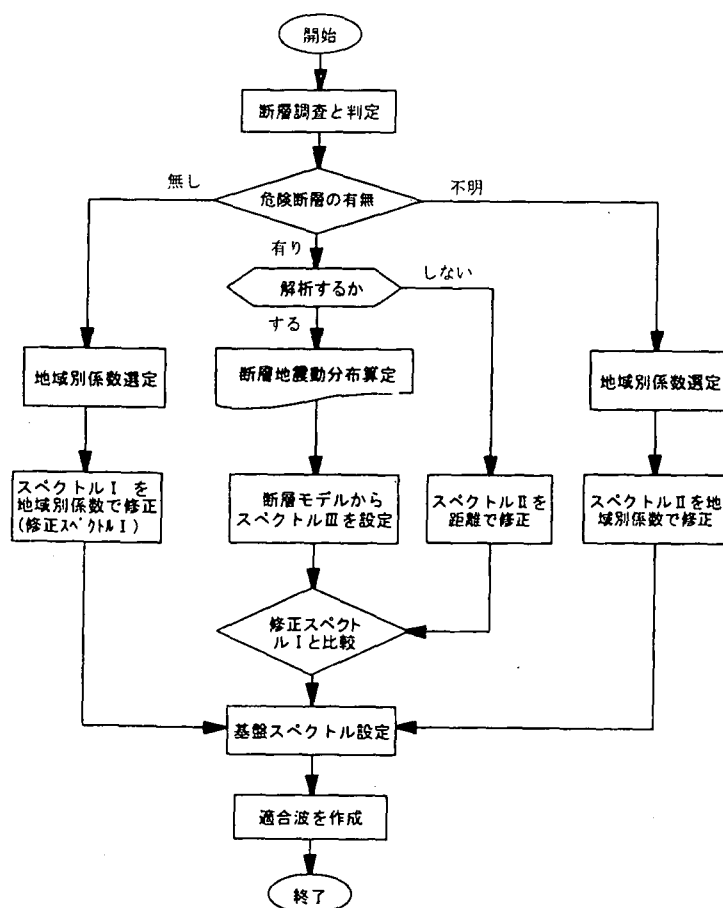
スペクトルⅠに地域別係数を乗じたものを設計地震動とする。

- 3) 建設地点近傍に活断層の存在が不明な場合、または活断層の位置が特定できない場合

スペクトルⅡに地域別係数を乗じたものを設計地震動とする。

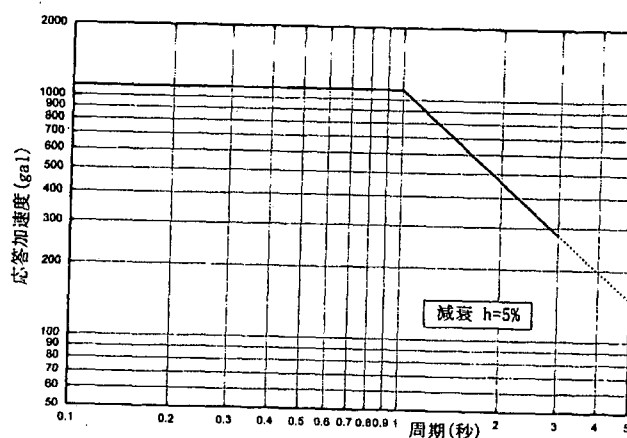
ただし、スペクトルⅠ～スペクトルⅢは、それぞれ、以下の通りである。

- ・スペクトルⅠ：これまでの設計で考慮されていた弾性加速度応答スペクトル（図 4.2.7-3）。鉄道施設の耐震設計で最低限考慮すべき地震動で、マグニチュード8クラスの海洋型地震による地震動を主な対象とし、断層を発見しにくいマグニチュード6.5クラス以下の内陸地震による地震動も考慮して定められている。



解説図 3.3.3 設計地震動の一般的な設定手順

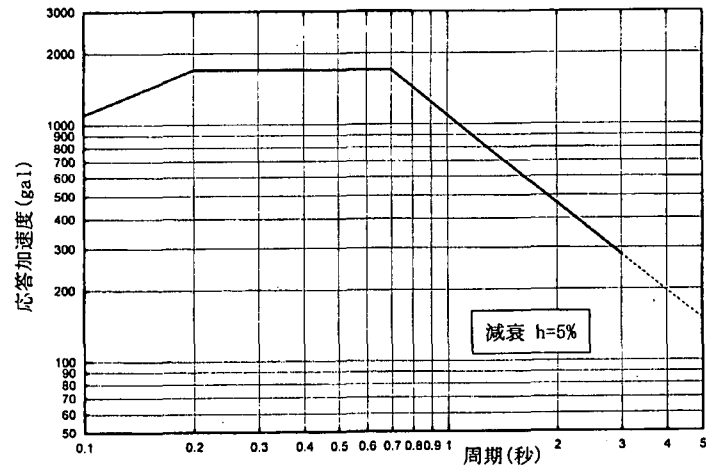
図 4.2.7-2 L2地震動の一般的な設定フロー 1)



解説図 3.3.2 L2地震動の弾性加速度応答スペクトル 1

図 4.2.7-3 L2地震動の弾性加速度応答スペクトル 1)

- ・スペクトルⅡ：内陸型地震を対象として、既往の断層近傍の解放基盤面での地震観測記録に基づいて統計解析等により設定した弾性加速度応答スペクトルで、断層直上では図 4.2.7-4とし、建設地点から断層までの距離に応じて距離補正をする。
- ・スペクトルⅢ：断層の詳細な情報に基づき、断層モデルにより解析から定めた弾性加速度応答スペクトル。



解説図 3.3.4 L2地震動の弾性加速度応答スペクトルⅡ

図 4.2.7-4 L2地震動の弾性加速度応答スペクトルⅡ¹⁾

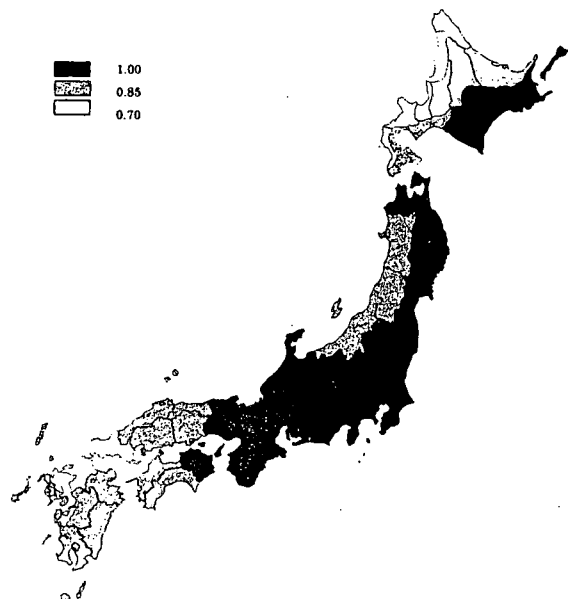
(3) 鉛直地震動の設定方法

設計鉛直地震動は、弾性加速度応答スペクトルまたは加速度波形において設計水平地震動の値の 1/2 とする。

4.2.8 地域係数

地震活動度の地域特性を考慮するために、L1地震動の設定および震源位置を特定できない場合のL2地震動の設定には、図 4.2.8-1に示される地域別係数を用いる。L2地震動で、震源位置を特定して地震動を評価する場合には、地域別係数は考慮しない。

図 4.2.8-1の地域別係数は、過去の歴史地震資料と内陸活断層情報を用い



解説図 3.5.1 地域別係数

図 4.2.8-1 地域別係数¹⁾

た地震危険度解析結果をもとに、従来考慮されていた地域特性や隣接地域との連続性を考慮して決められている。

地域別係数は、L1地震動とL2地震動に対して同一のものをを用いているが、これに関しては、「本来は対象とする地震動の再現期間の違いにより、その地震危険度に関する地域特性は異なることが考えられるが、それらに大きな差異がないことおよび設計の利便性を考え、全ての設計地震動に対して同一の地域別係数を用いることとした」としている。

4.2.9 耐震性能の照査方法

耐震設計における地盤および構造物の応答値の算定は、動的解析法によることを原則とする。ただし、構造物の種類によっては、静的解析法によることができる。

L1地震動に対する応答値の算定では、構造物の剛性は線形として扱ってよい。動的解析法としては、時刻歴応答解析法を用いるのがよいが、応答スペクトル法を用いてもよい。

L2地震動では構造物の非線形性を評価して応答値を算定する。L2地震動に対する応答値の算定は、構造物の種類に応じて次のように行うものとする。

- ・ 橋梁、高架橋：動的解析法
- ・ 基礎構造物：動的解析法、なお地盤が軟弱な場合の深い基礎は応答変位法
- ・ 抗土圧構造物：静的解析法または動的解析法
- ・ 盛土：静的解析法および動的解析法
- ・ 開削トンネル等地中構造物：動的解析法または応答変位法

4.2.10 その他

(1) 下限基準の有無

4.2.7 に示したL2地震動のスペクトルのうち、スペクトルⅠが実質的な下限基準となっている。

(2) 活断層の考慮の有無

4.2.7 に示されているとおり、L2地震動の設定では、建設地点の近傍の活断層の調査結果から、活断層（危険断層）が存在してその位置を特定できる場合には、スペクトルⅡを断層からの距離で補正したもの、もしくは断層モデルにより算定されたスペクトルⅢを用いることとなっている。

活断層の調査は、まず周辺の確実度ⅠとⅡの活断層を抽出した上で、基本的に路線の片側10kmの範囲について詳細調査を実施することとしている。断層の危険度の判断のための指標としては、鉄道施設の多くが線状構造物であること、現段階で詳細な活動性、再来期間等が明らかな断層がかなり限られていることから、断層と路線の位置関係を主体とし、確実度、活動度等から総合的に検討することとしている。

(3) 重要度の扱い

構造物の重要度の違いは、満足すべき耐震性能の違いとして表されており、対象とする設計地震動の大きさは重要度によらず同一としている。

(4) 液状化の検討に用いる地震動

液状化の可能性がある地盤については、液状化抵抗率による方法あるいは地震応答解析による方法を用いて液状化の判定を行うこととしている。また、建設予定地点の地盤が河川、海等の水際線背後地盤または地表面が傾斜している地盤で、液状化すると判定された場合は、原則として側方流動の影響を考慮するものとしている。

液状化の判定に用いる地震動に関しては、特に記述はないことから、構造物の設計地震動と同一と考えられるが、液状化すると判定された地盤における地表面設計地震動（L2地震動）は、液状化指数 P_L の値に応じて設定されている。

(5) 詳細な方法と簡易な方法の併記

設計地震動の設定、表層地盤の応答解析、構造物の応答値の評価の各ステップにおいて、時刻歴応答解析法などの詳細な方法と簡易な方法の両者が併記されている。簡易な方法の例としては、

- ・ L2地震動のスペクトルⅡの提示
- ・ 地盤種別ごとの地表面地震動の弾性加速度応答スペクトルの提示
- ・ 液状化の可能性がある地盤における地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトルの提示
- ・ 構造物の応答値の評価における非線形スペクトル法

などが挙げられる。

参考・引用文献

- 1) 鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等設計標準・同解説―耐震設計，467pp.，丸善株式会社，1999.
- 2) 西村昭彦・王海波：鉄道施設における耐震基準のレベル2地震動への対応，「レベル2設計地震動：現状と展望」シンポジウム講演概要集，pp.85-93，土木学会地震工学委員会，1999.

4.3 港湾の施設の技術上の基準・同解説 1999年版¹⁾

4.3.1 レベル2地震動の定義

港湾のすべての施設は、レベル1地震動に対して、安定性確保と機能保持が必要とされる。他方、港湾の施設のうち耐震強化施設は、レベル2地震動に対しても、所期の機能保持が必要とされる。すなわち、レベル2地震動は、主として耐震強化施設の設計時に考慮される地震動として位置づけられる。

- ① レベル1地震動：施設の供用期間中に発生する確率が高い地震動であり、再現期間75年の地震動を考慮する。
- ② レベル2地震動：施設の供用期間中に発生する確率が低いが大きな強度を持つ地震動であり、再現期間が数百年以上のプレート内地震による地震動、あるいは陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震による地震動を考慮する。

4.3.2 対象構造物

レベル2地震動を用いるケースは施設により指定される。それらの施設は耐震強化施設(特に重要な施設でその耐震性能を強化する施設)、および橋梁や沈埋トンネル等でレベル2地震動を考慮すべき港湾の施設である。

地盤の液状化の予測・判定に際しても、レベル2地震動を用いることがある。これは、港湾の施設の耐震設計における液状化対策の重要性を踏まえたものである。

4.3.3 耐震強化施設の設計の基本方針

耐震強化施設のレベル2地震動に対する設計方針は、図4.3.3-1の手順に従う。レベル2地震動はまず基盤で定義し、基盤最大加速度を設定する。これを基にして、重複反射モデル等の地盤応答計算により地盤最大加速度を求める。耐震強化施設の水平震度は、地盤最大加速度から次の換算式を用いて算出する²⁾。

- ① α が200gal以下の場合

$$k_h = \alpha / g$$

- ② α が200galを越える場合

$$k_h = 1 / 3 (\alpha / g)^{1/3}$$

ここで k_h ; 水平震度

α ; 地表面における地盤の最大加速度(gal)

g ; 重力加速度(gal)

上式で算定される水平震度、および震度法の算定式において重要度係数を1.5として得られる震度に基づいて、総合的に判断して設計震度を設定する。

震度法に基づいて施設の初期断面を決定する。ここで、耐震強化施設が所期の機能を保持しているかどうかの判断を行うためには、施設の変位量をレベル2地震動に対して計算し、許容変位量と比較する(4.3.9項「耐震性能の照査方法」参照)。変位に基づく照査結果を踏まえ初期断面を変更し、再び変形照査する。このプロセスを、施設が所期の機能を有していると判断されるまで繰り返す。

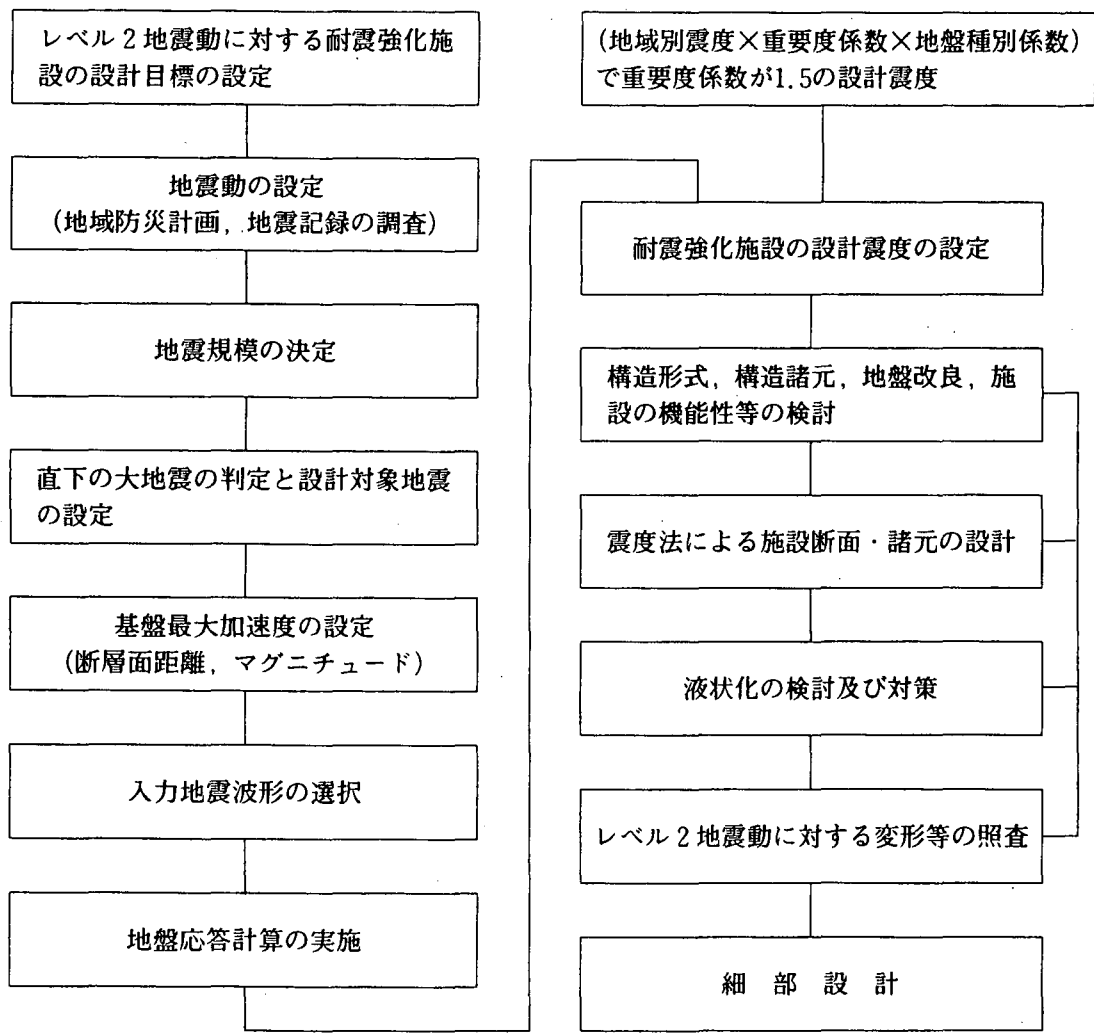


図4.3.3-1 レベル2地震動に対する耐震強化岸壁の設計手順

4.3.4 構造物の耐震性能

耐震強化施設は、レベル2地震動に対して、生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能の回復が可能なものであり、当該施設の所期の機能を保持するものとされる。ここで所期の機能を保持するとは、施設に被害が生じたとしても、それが軽微であり、地震後に速やかに機能の回復が行える状態を指す。所期の機能を保持しているかどうかの判断は、4.3.3項に述べた手順により、構造安定性、機能性および応急復旧の難易度等を総合的に勘案して決定する。

4.3.5 定義位置

地震動は基盤で定義し、基盤最大加速度を設定する。これを基にして、地盤の応答計算により地盤最大加速度を求める。基盤とは、岩盤(第1種地盤)、N値50以上の砂質土層、一軸圧縮強度 q_u が 650kN/m^2 以上の粘土層、あるいはせん断弾性波速度 V_s が 300m/s 以上の土層をいう。

4.3.6 表現方法

レベル2地震動は、地震動の振幅を規定するものである。その波形については既往の強震記録を採用する場合が多い。

想定地震にプレート内地震を想定した場合の、地盤の地震応答計算の入力地震波形には、兵庫県南部地震の際のポートアイランド基盤入射波形等を用いる。また、想定地震にプレート境界地震を想定した場合の入力地震波形には、1968年十勝沖地震の際の八戸基盤入射波形、あるいは、1978年宮城県沖地震の際の大船渡基盤入射波形等を用いる。これらの波形を図4.3.6-1に示す。

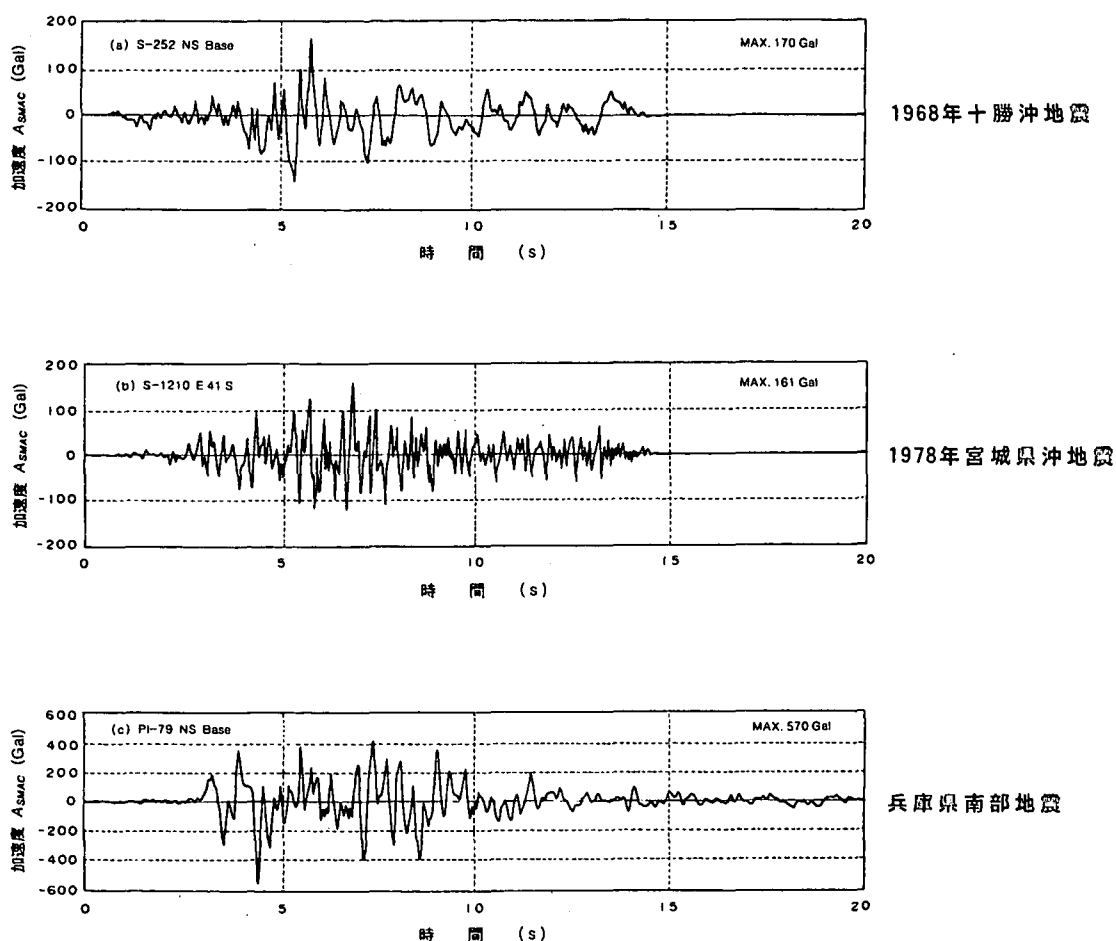


図4.3.6-1 基盤入射波形

耐震強化施設の建設地点が震源域に近く、対象とする地震が直下の大地震と考えられる場合(4.3.10項(4)参照)には、この地震がプレート境界地震であっても、入力地震波形には、ポートアイランド基盤入射波形等を用いる。

4.3.7 設定方法

地域地震防災計画で想定地震等が定められている場合には、この想定地震に対して建設地点の基盤の入力地震動を設定する。

耐震強化施設の設計に用いる地震を別途に検討することが適当な場合には、既往最大地震、「确实度Ⅰの活断層」³⁾及び「要注意活断層」を震源とする地震のうちから建設地点に最も大きな地震動を与える地震を想定する。

4.3.8 地域係数

レベル2地震動に対しては、4.3.7節の設定方法を決めており、地域係数を用いることはない。他方、レベル1地震動に対しては、地域係数を次のように定めている。

地域係数は、重力式岸壁、矢板式岸壁の地震被災例を解析し、地震時に発生した地震動強さに対応する震度を求めると同時に、地震学、地震工学の成果を応用して、被災港湾に生じたと予想される地盤最大加速度を求めた結果から図4.3.8-1のように決める。ただし、この結果は重力式岸壁および矢板式岸壁についての検討結果であるので、その他の構造形式にこの図を適用する場合は注意が必要である。

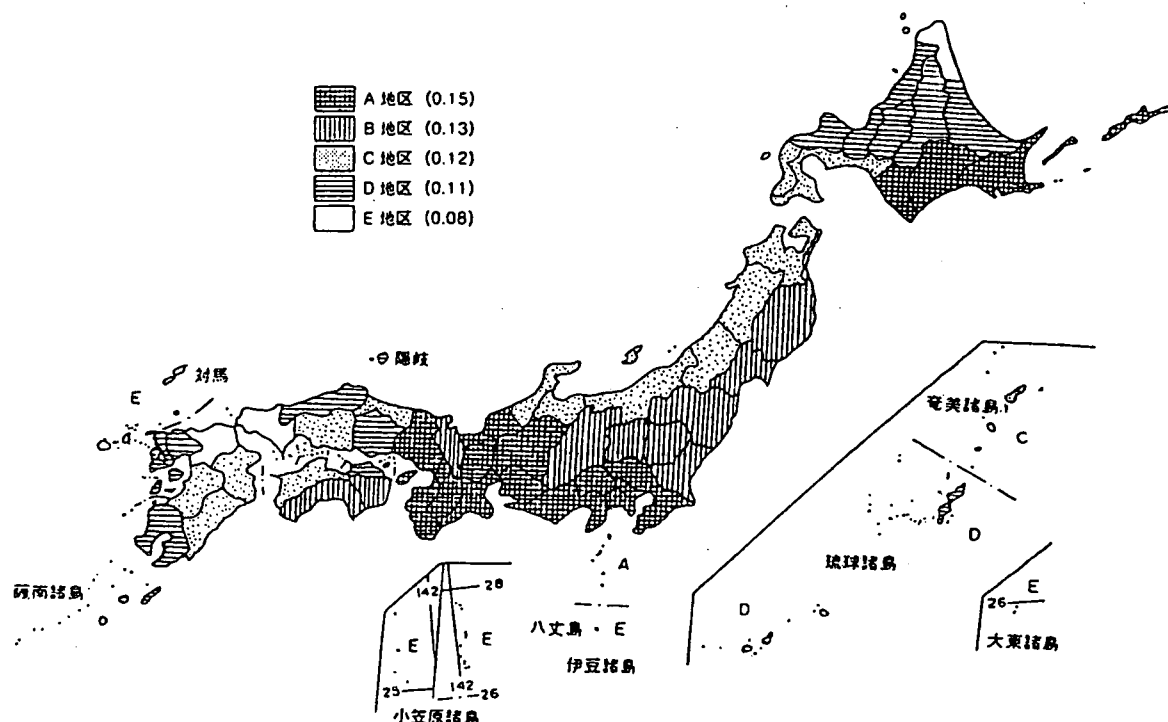


図4.3.8-1 地域別震度

4.3.9 耐震性能の照査方法

耐震強化施設の耐震性能は、レベル2地震動を用いて、適切な地震応答解析により、施設の地震時挙動をより正確に把握し、変形等を照査して保証する。変形等を照査する理由は、レベル2地震動のように大きな強度を有する地震動に対する構造物や地盤等の安定性の検討が、震度法のみでは不十分な場合があると考えられるためである。

変形照査は4.3.3節「設計の基本方針」に述べた方法で行い、結果の判断には岸壁等の許容変位量と比較することが必要となる。しかし、許容変位量を明確に定めることは現時点で困難なため、「地震後の暫定利用を可能とする変位の目安」を載せている。

4.3.10 その他

(1)設計上の下限

断層面に近い地点に耐震強化施設を建設する場合(本項(4)参照)には、震度法の設計震度の下限值を0.25とする。

また、レベル2地震動に対して震度法以外の方法で設計することが適当と考えられる場合には、震度法と併せて適切な地震応答解析に基づき、施設の耐震性を検討することが望ましい。この場合、施設はレベル1地震動に対して、施設の健全性を確保するための安全率等を確保しなければならない。

(2)活断層の考慮

活断層による地震のマグニチュードは次式により推定することができる⁴⁾。

$$\log_{10} L = 0.6M - 2.9$$

ここで、 L ；地震断層の長さ、 M ；マグニチュード
上式によるマグニチュードの推定が困難な場合には、便宜的にそのマグニチュードを兵庫県南部地震に準じて7.2とすることができる。

活断層の分布図をみると、いくつかの活断層が近接して存在している場合がある。このような活断層を1つの活断層帯とみるかどうかの判断は、それらの相互距離が5 km以内であるかどうかを目安とする。

(3)基盤加速度の算定式

耐震強化施設の地盤の地震応答計算で用いる基盤加速度は、次式により算定することができる⁵⁾。

$$\log_{10} A_{SMAC} = 0.53M - \log_{10}(X + 0.0062 \cdot 10^{0.53M}) - 0.00169X + 0.524$$

ここで、 A_{SMAC} ；SMAC型強震計の最大基盤加速度(gal)

M ；マグニチュード X ；断層面距離(km)

(4)直下の大地震を考える範囲

耐震強化施設の建設地点が断層面に近いかな否かにより、設計に用いるレベル2地震動が異なる(4.3.6項参照)。直下の判断には図4.3.10-1を用い、図中の領域Aに属する地震は、直下の大地震とみなす。

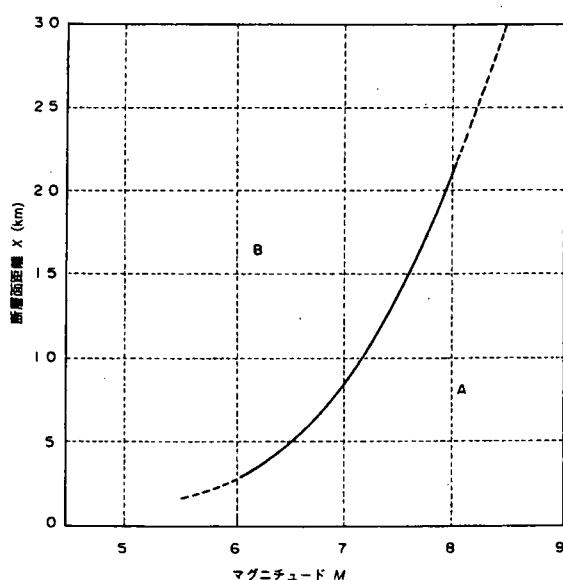


図4.3.10-1 直下の大地震発生の有無を判断するための活断層の分類

(5)重要度の扱い

構造物の重要度係数は施設の用途、構造、規模などにより一律に適用されるべき性格のものでなく、施設の持つ社会的、経済的性格などから考慮するとともに、次の各項に配慮して決定する必要がある。

①施設の用途に応じた耐震性能

②施設が地震被害を受けた場合における被害の程度、復旧の難易度および地震後の残存耐力

③対象とする施設が被災した場合における当該港湾の貨物の処理能力

したがって、同一港湾において、用途が同じ施設が複数存在する場合などには、上記の各項を検討した上で、異なる重要度係数を採用してもよい。

参考・引用文献

- 1)運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、(社)日本港湾協会、1999.4
- 2)野田節男、上部達生、千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度、港湾技術研究所報告、第14巻、第4号、1975
- 3)活断層研究会：新編日本の活断層 分布図と資料、東京大学出版会、1991
- 4)松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について、地震、第28号、1975
- 5)野津厚、上部達生、佐藤幸博：工学的基盤における最大加速度の断層面からの距離減衰の検討、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、土木学会、1997.1

4.4 高圧ガス設備等耐震設計基準¹⁾

4.4.1 レベル2地震動の定義

耐震設計構造物に対する地震の影響を評価するための設計地震動として以下の2つのレベルの地震動が定義されている。

レベル1地震動：耐震設計構造物の供用期間中に発生する確率の高い地震動

レベル2地震動：耐震設計構造物の供用期間中に発生する確率の低い高レベルの地震動

4.4.2 対象構造物

耐震設計構造物と総称する塔及び貯槽とその支持構造物、配管系及びそれらの基礎であるが、関連規則により細かくそれらの仕様が規定されている。

4.4.3 耐震設計の基本方針

耐震設計は、基本的に基準に示された設計地震動に対して行う。

4.4.4 構造物の耐震性能と重要度ランク

レベル1耐震性能：有害な変形等が残留せず、かつ、当該耐震設計構造物内の高圧ガスの気密性が保持されること

レベル2耐震性能：重要度Ⅰa及びⅠに係わる耐震設計構造物内の高圧ガスの気密性が保持されること
重要度係数は、4.4.7(2)の β_1 ：耐震設計構造物の重要度に基づく係数に同じ。

4.4.5 定義位置

地表面または地震基盤面

4.4.6 表現方法

地表面における弾性加速度応答スペクトル

4.4.7 設定方法

(1)地表面における水平加速度及び鉛直加速度

次の算式により計算する。

$$\alpha_H = 150 \mu_k \beta_1 \beta_2 \beta_3$$

$$\alpha_V = 75 \mu_k \beta_1 \beta_2 \beta_3$$

(水平・鉛直震度は、震度 1.0=1000gal として換算する。震度 $K_H = \alpha_H / 1000$)

α_H : 地表面における第 1 設計地震動の水平加速度(単位 gal)

α_V : 地表面における第 1 設計地震動の鉛直加速度(単位 gal)

μ_k : 地震動のレベルに基づく係数であって、レベル 1 地震動にあつては 1.0、レベル 2 地震動にあつては 2.0 以上の値

(高圧ガス設備等耐震設計基準の運用及び解釈について(平成 9 年 6 月 12 日)の第 3 条関係の 1 で、レベル 2 地震動に対する値については、当分の間「2.0」とする記述有り。)

(2) β_1 : 耐震設計構造物の重要度に基づく係数

重要度	I a	I	II	III
β_1	1.00	0.80	0.65	0.50

(3) β_2 : 地域に基づく係数

地域区分	特 A	A	B	C
レベル 1 地震動 β_2	1.0	0.8	0.6	0.4
レベル 2 地震動 β_2	1.0	0.8	0.7	0.7

(4) β_3 : 表層地盤増幅係数

地盤種別	β_3
第 1 種地盤(第三紀以前の地盤)	1.4
第 2 種地盤(洪積層地盤)	2.0
第 3 種地盤(第 1 種、第 2 種及び第 4 種地盤以外の地盤)	2.0
第 4 種地盤(埋土又は沖積層の厚さが 25m 以上の地盤)	2.0

(5) 設計修正水平震度及び設計修正鉛直震度(地上耐震設計設備の応答)

(震度は、震度 1.0=1000gal として換算する。震度 $K_H = \alpha_H / 1000$)

$$K_{MH} = \beta_5 K_H$$

$$K_{MV} = \beta_6 K_V$$

β_5 : 水平方向の応答倍率であつて、地域区分と地盤種別に応じて次の図 4.4.7-1 又は図 4.4.7-2 により求められる基準応答倍率(減衰定数 0.05)に、減衰定数の補正係数を乗じて得られる値とする。尚、レベル 2 地震動の基準応答倍率は、地域区分に拘わらず図 4.4.7-1 に示す特 A 及び A 地区のものをを用いる。図 4.4.7-3 には以上の手順により算定されるレベル 2 地震動の地表面における弾性加速度応答スペクトル(重要度 Ia, 地域区分特 A, $\mu_k=2.0$)を示す。

但し、水平方向応答倍率の下限值は、耐震設計設備の固有周期が 0.3 秒未満の時には 1.5、0.3 秒以上の場合は 0.75 とする。 β_6 : 鉛直方向の応答倍率であつて、スポート支持の塔類にあつては 1.5、その他の耐震設計設備にあつては 2.0 とする。

4.4.8 地域係数

4.4.7(3)の β_2 :地域に基づく係数に同じ。

4.4.9 耐震性能の照査方法

レベル1 耐震性能評価：通常の運転状態における設計地震動に関する応答解析を行い、耐震上重要な部材に生ずる応力等(算定応力等)が部材に応じて定められた許容応力等(耐震設計用許容応力等)を越えないことを確認すること。

レベル2 耐震性能評価：通常の運転状態における設計地震動に関する応答解析を適切な計算方法により行い、耐震上重要な部材に関してレベル2 地震動に係わる当該部材の応答塑性変位を降伏変位で除した値(応答塑性率)が当該部材の許容できる最大の塑性変位を降伏変位で除した値(許容塑性率)を越えないことを確認すること。

レベル2 耐震性能の評価は、設計地震動をレベル2 地震動に0.5 を乗じた値として、レベル1 耐震性能の評価を行うことにより替えることができる。

応答解析は、構造物の種類・仕様・条件及び解析のために得られる情報に応じて、基準に定められた静的震度法、修正震度法、モード解析法、時刻歴応答解析法により行う。

4.4.10 その他

告示のため設計地震動の設定根拠についての解説がなく詳細は不明であるが、断片的な情報によれば、レベル1 地震動の地震基盤面(N 値 50 以上及び Vs300m/s の基盤と考えられる。)での地震動強度150gal(式 α_H の右辺第1 項)及び地域係数は歴史地震の地震危険度解析結果から、表層地盤増幅係数は観測波(最大加速度 150gal)を地震基盤面に入力とした複数の地盤応答解析結果に工学的判断を加えたものから、基準応答倍率は、約 1000 の観測波の最大加速度で正規化した 5%減衰絶対加速度応答スペクトルを統計処理した結果から設定されているようである。レベル2 地震動については、兵庫県南部地震の観測記録を参照して決めたようであるが、 $\mu_k=2.0$ で地震基盤面の地震動強度を 300gal としたもので、地域係数を除けば修正震度等の算定方法は、レベル1 地震動のそれと同じである。

参考・引用文献

- 1) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針 別冊 耐震設計関係省令・告示・通達，高圧ガス設備等耐震設計基準 平成9 年3 月25 日告示第143 号, pp.14-87, 1997

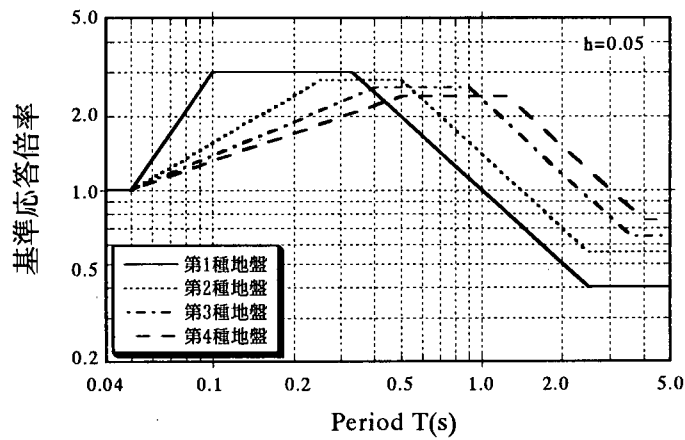


図4.4.7-1 特A及びA地区の基準応答倍率

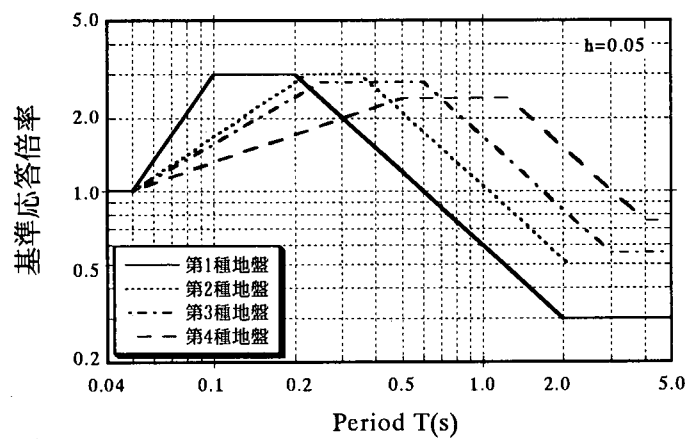


図4.4.7-2 B及びC地区の基準応答倍率

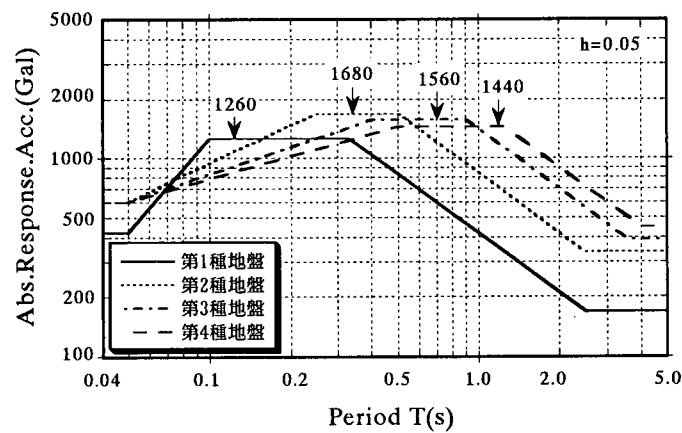


図4.4.7-3 高圧ガス設備等耐震設計基準のL2設計地震動 π° トル
(重要度1a, 地域区分特A, $\mu k=2.0$ の場合)

4.5 LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針¹⁾

4.5.1 レベル2地震動の定義

耐震性能を照査するための地震動を次のように多段階で設定している。

レベル1地震動：地下タンクの供用期間中に1～2回程度遭遇すると考えられる大きさの地震動

レベル2地震動：供用期間中に遭遇する確率は小さいが、タンク地点に起こり得る強い地震動

レベル2地震動は、「大規模なプレート境界地震による地震動および地点近傍の活断層地震による地震動を対象とする」としている。また、「レベル2地震動は、必要に応じてさらに複数段階に分けて設定する」としている。

(解説) では2段階に分けて設定する例を下記のように示している。

レベル2L地震動：供用期間中の遭遇確率が比較的小さい強い地震動

レベル2H地震動：供用期間中の遭遇確率が非常に小さい極めて強い地震動

4.5.2 対象構造物

表題の通り「LNG地下タンク鉄筋コンクリート製躯体」を対象としている。

4.5.3 耐震設計の基本方針

指針の目的として下記の2点を挙げている。

- (1) 重要構造物であるLNG地下タンクについて、高レベル地震動を含む諸作用に対して所要の安全性と使用性を付与する躯体の構造設計が確実に行われるようにする。
- (2) 対象タンクの固有条件に応じて、また、最新の技術知見に基づいて、より合理的な躯体設計が効率的に実現されるようにする。同時に、設計の合理化に向けての技術進歩が促進されるようにする。

4.5.4 構造物の耐震性能と重要度ランク

(1) 耐震性能の区分

耐震性能は次のように3つに区分されている。

耐震性能1：地震時および地震後の構造性能は、タンクの安全性を十分有し、使用性の低下も大きくなく、ごく軽微なものを除いて補修しないで利用できる。

耐震性能2：地震によって生じる構造性能の低下は、タンクの安全性を損なうものではなく、補強しないで利用できる。

耐震性能3：地震によって躯体が崩壊せず、LNGの貯液空間が保全されている。補強を行えば、再利用は可能である。

耐震性能は、タンクの要求性能に従い、照査用地震動のレベルに応じて適切なものを設定すると

し、以下を標準としている。

レベル1地震動に対しては、耐震性能1を満足する

レベル2地震動に対しては、耐震性能2または耐震性能3を満足する

(解説) ではさらに、標準的な条件のもとでの地下タンクについては、レベル2L地震動に対し耐震性能2を、レベル2H地震動に対し耐震性能3を満足させることを標準としている。

(2) 耐震性能の設定

解説では、要求性能を表4.5.4-1のように、目標性能である構造性能を表4.5.4-2のように示している。表4.5.4-1から表4.5.4-2を設定する過程の考え方は図4.5.4-1に示されている。

(3) 耐震性能と重要度ランク

「標準的な条件」のもとでの耐震性能と地震動の対応は(1)に示した通りであるが、「タンクの重要度あるいは設置環境が標準条件と異なる場合には、標準よりも高レベルあるいは低レベルに耐震性能を割り付けることが合理的な場合もあり得る」とし、割り付けを完全には固定していない。

「タンクの重要度あるいは設置環境」とは、「タンクの規模および発電・ガス製造機能維持の必要性の程度に加えて、近傍設備との離隔、敷地境界までの距離、防災保安設備の整備水準等の諸条件を総合的に考慮して設定されるものである」している。

地下タンクの重要度の評価方法については、本文ではなく資料編Ⅲ（指針作成にあたっての審議事項）に、参考として表4.5.4-3のように記載されている。重要度の記述は次の通りである。

S^+ ：特に重要なLNGタンク

人家・公共施設が近接している、特に重要な基地等基地運用上の重要性がとりわけ大きいなど重要度が標準よりさらに高い地下タンクの場合

S ：重要なLNGタンク（標準）

標準的な条件（タンクのレイアウト、保安設備等）における地下タンクの場合

S^- ：重要性が標準を下回るLNGタンク

人家・公共施設との距離が十分に離れている、基地機能あるいは基地運用への影響が低いなど重要度が標準より低い地下タンクの場合

4.5.5 定義位置

照査用地震動は、適切な基盤面で設定する。現状ではS波速度が300m/s程度以上の適切な工学的基盤面で設定するのが現実的としている。

4.5.6 表現方法

照査用地震動の特性は、加速度応答スペクトルで設定し、時刻歴波形は、設定したスペクトルを目標スペクトルとし、それに適合する波形として設定するとしている。

資料編I-1では、模擬地震動作成の際の位相特性の与え方として、実記録の位相を用いる方法、経験的グリーン関数法による波形の位相を用いる方法、包絡関数を用いる方法の3つが示されている。

4.5.7 設定方法

(1) レベル1地震動の設定方法

レベル1地震動は、当該地点における供用期間中の地震動の発生確率に基づき設定するとしている。

供用期間中の地震動の発生確率に基づき確率論的に設定する方法を採用する理由として、レベル1地震動程度の大きさの地震動を生じる可能性のある地震の震源は特定しにくいことを挙げている。

確率論的に応答スペクトルを設定する手法として、一様ハザード応答スペクトルを用いる手法と、特定周期の応答加速度値とスペクトル形状を組み合わせる方法を挙げている。

資料I-1では供用期間（50年間）の超過確率が80%（再現期間約30年）の地震動が、資料IVでは供用期間の超過確率が50%（再現期間約70年）の地震動がレベル1地震動として示されている。

(2) レベル2地震動の設定方法

レベル2地震動は、供用期間中の発生確率を考慮して当該地点に強い地震動を生じる可能性のある想定地震を定め、その想定地震による当該地点における地震動の評価に基づき設定するとしている。

想定地震にはプレート境界を震源とする巨大地震に加え、地点近傍の活断層に起因する地震も考慮している。

想定地震に基づく方法を採用する理由として、強い地震動を生じる可能性がある地震は、地震動が強くなるほど限定される傾向がある（想定地震として設定できる）ことを挙げている。

想定地震による地震動に不確実性が存在すること、不確実性に対する評価材料として確率論的手法による評価も有用であることが指摘されている。

レベル2L地震動とレベル2H地震動については、プレート境界を震源とした想定地震の場合、想定地震から予測される平均的な地震動をレベル2L地震動、平均+標準偏差をレベル2H地震動とする考え方もあるとしており、この例が資料編I-1に示されている。資料編I-1に示されているレベル2L地震動の再現期間は約300年、レベル2H地震動の再現期間は約1000年となっている。

(3) 照査用地震動設定手順の例

照査用地震動設定手順の例が図4.5.7-1のように示されている。地震動特性の評価では、当該地点で得られている地震観測記録があれば、これを有効に活用するとしており、それにより経験的手法及び半経験的手法における地震動の推定精度を向上させることができることが指摘されている。

4.5.8 地域係数

地域係数は用いられていない。

4.5.9 耐震性能の照査方法

耐震性能に応じて基本となる解析法を次のように定めている。

耐震性能1：地下タンク躯体の断面力あるいは応力を解析する手法として、準動的等価線形解析手法を用いることを基本とする。

耐震性能2：地下タンク躯体の断面力、応力あるいは変形を解析する手法として、部材の非線形特性を考慮した動的非線形解析手法を用いることを基本とする。

耐震性能3：地下タンク躯体全体の変形や構成要素の損傷度を解析する手法として、躯体の構成材料の非線形特性を考慮した動的非線形解析手法を用いることを基本とする。

解析法は表4.5.9-1のように分類されており、適用法が表4.5.9-2のように例示されている。

4.5.10 その他

(1) 下限基準の有無

指針の中では直接の言及はないが、資料I-1では、レベル1地震動に関して全国的な下限を設定すること（数字は示していない）、レベル2地震動に関して発生確率の目安との関係を考慮することが求められている。レベル2地震動の発生確率の目安として、プレート境界地震が支配的な南関東地域への適用を念頭に置いた数値として、レベル2L地震動が再現期間140年～308年（50年30%～50年15%）、レベル2H地震動が再現期間308年～975年（50年15%～50年5%）が示されている。

(2) 活断層の考慮の有無

レベル2地震動を設定するための想定地震として、プレート境界を震源とする巨大地震に加え、地点近傍の活断層に起因する地震も考慮されている。

(3) 重要度の扱い

資料編III（指針作成にあたっての審議事項）では、地震動と耐震性能の組み合わせを変える例が示されている。基本的には、重要度に応じてそれぞれの耐震性能を満足させる地震動を変えていると考えられる。

(4) 液状化検討に用いる地震動

構造物の地震動と同じである。

(5) 鉛直方向の地震力の影響

鉛直方向の地震力は、地中に埋設された地下タンクの躯体の側壁の断面力に及ぼし影響としては、一般には小さいものと考えられるので、詳細な動的検討を省略することが多いとしており、資料I-2で上下地震動の影響の評価例を示している。ただし、屋根や付帯構造物などで鉛直地震力の影響が無視できない場合にはこの限りではないとしている。

参考・引用文献

1) 土木学会エネルギー土木委員会LNG地下タンク設計合理化小委員会：LNG地下タンク躯体の構造的な性能照査指針，コンクリートライブラリー98，1999。

表4.5.4-1 地震時に確保すべき地下タンクの要求性能

性能設定の分類		性能の水準		
		耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
要求性能	所有者・管理責任者の意図	安全性	・基地内外の人身と設備の安全を損わない ・基地内外の日常活動が制約されるような危険を生じない	・基地外の人身安全を損わない ・基地内の人身安全に重大な影響を与えない(人命保護) ・基地外の日常活動が長期に制限されるような直接的な危険を生じない
	使用性 (LNG 基地機能への影響)	・発電・ガス製造機能に支障を与えない 〔・液の受入れ、貯蔵供給に支障なし〕 ・耐久性の低下は、軽微である	・発電・ガス製造機能に重大な支障を与えない(短期間で機能復旧) 〔・短期間の対策後、通常の受入れ、供給開始可能。補強は不要。〕 ・継続的に貯液可能 ・気化ガス量の増加は許容内 ・耐久性の著しい低下はない	・発電・ガス製造機能への支障は除去することが可能 〔・補強により再利用も可能〕 ・当面の貯液は可能

表4.5.4-2 地震時のタンク躯体の構造性能 (表4.5.4-1 の要求性能を満足するための目標性能)

性能設定の分類		性能の水準		
		耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
目標性能	躯体の構造性能	〔健全〕	〔機能維持〕	〔崩壊せず(液拡散なし)〕
		○地震作用時および地震後の躯体の変位・変形*1は次の条件を満たす程度に十分小さい ・貯液容量(躯体内空容積)の変化は微小(実用上無視し得る程度) ・メンブレン・屋根の液密・気密性能の低下はない	○地震後の躯体の変位・変形*1は次の条件を満たす程度である ・貯液容量(躯体内空容積)の変化は一定の許容量以下 ・メンブレンの液密・気密性能および屋根の気密性能の低下は一定の許容量(継続使用が可能な範囲)以下	○地震後の躯体の変位・変形*1は次の条件を満たす程度である ・貯液容量(躯体内空容積)の変化は LNG が流出しない程度以下 ・地震後の作用荷重によって躯体の変位・変形が進行しない ・メンブレンの液密性能は著しく低下しない(構内の保安設備により安全性確保が可能) ・屋根の気密性能は著しく低下しない(構内の保安設備により安全性確保が可能)
目標性能	止水性能	○地震後の躯体の耐力低下はない ○地震後**の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度に十分小さい ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、躯体内面に接する保冷層の断熱性能は低下しない	○地震後の躯体の耐力低下はない ○地震後**の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度である ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、躯体内面に接する保冷層の断熱性能が一定の許容範囲内(気化ガスの安定した処理が可能)	○地震後**の周辺地下水の躯体内浸透は次の条件を満たす程度である ・躯体内外の水位の運用条件と、それを維持する地下水管理システムの条件また凍結温度線の運用条件のもとで、メンブレンに大変形を生じるような水圧が作用しない

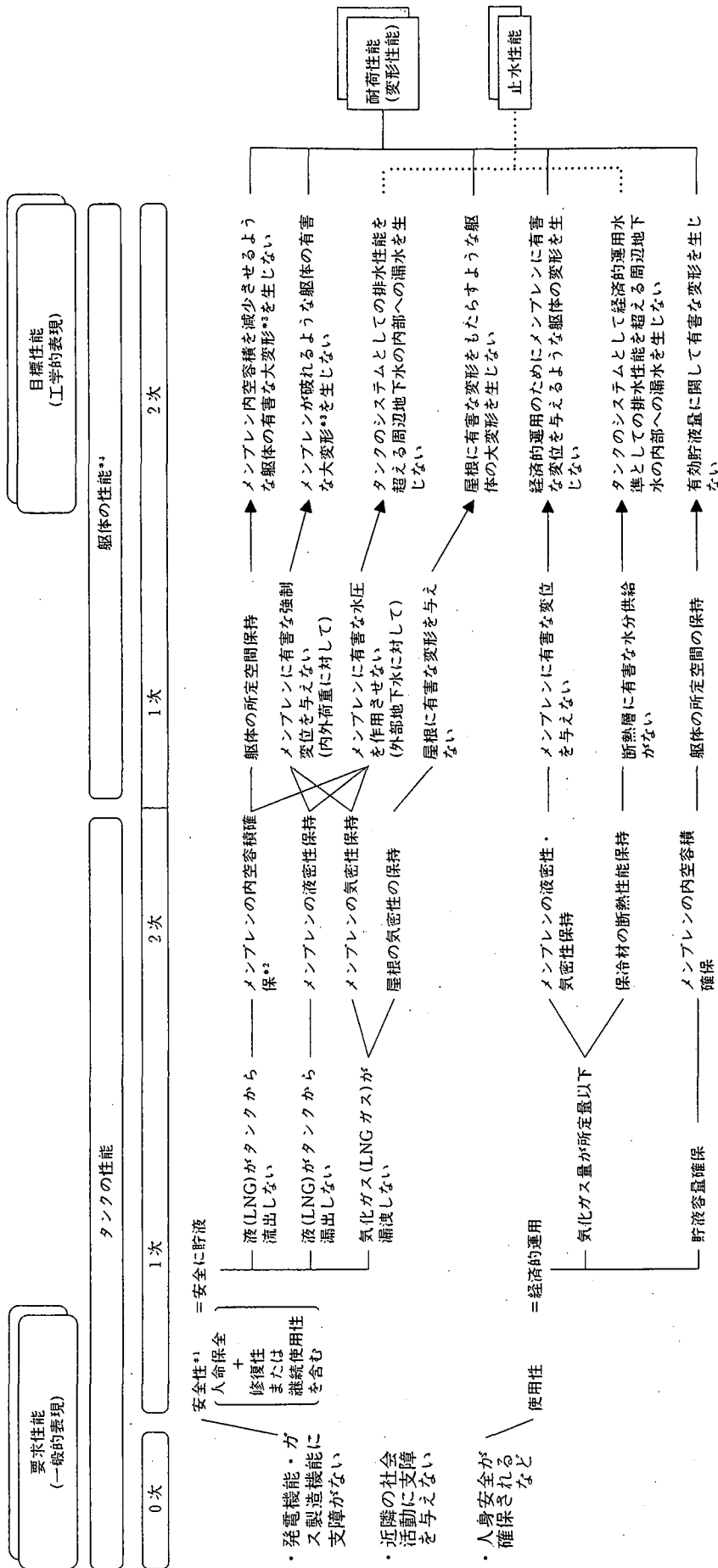
* 1 躯体の変位・変形には、側壁と底版間の相対変位、側壁頂部の円形の変形(半径方向)を含む。

* 2 地震作用時の地下水浸透については、地震の作用時間は限定されるので、その間の浸透量は少なく保冷層断熱性能に大きな影響は与えないと考えられる。このため、地震作用時間中の地下水浸透は許容するものとした。

表4.5.4-3 地震動レベルとタンクの耐震性能の組合せ (参考例)

地震動レベル	タンクの耐震性能レベル			備考
	耐震性能 1 (健全)	耐震性能 2 (機能保持)	耐震性能 3 (崩壊せず)	
(レベル 1 L 地震動)	S ⁻			一般構造物照査時のレベル 1 地震動
レベル 1 H 地震動	S	S ⁻		本文で示したレベル 1 地震動
レベル 2 L 地震動	S ⁺	S	S ⁻	
レベル 2 H 地震動		S ⁺	S	

注) S⁺: 特に重要な LNG タンク, S: 重要な LNG タンク (標準), S⁻: 重要性が標準を下回る LNG タンク



- *1 復旧可能性, すなわち貯液機能の継続性 (地下構造物故に補修・補強が容易でないことを前提として) は安全性を含む。
- *2 メンブレンが外からの水圧により押しつぶされる (LNGの比重は水よりも小さいことから) ことのないようにする必要性があることから設定した。
- *3 有害な (許容を超える) 大変形とは、
 (1) 貯液容量が許容量 (液があふれるような) 以上に減少するような変形のこと (通常時・L₁地震時の許容量は0.5%以下、L₂地震時の許容量は3%以下など)。
 (2) メンブレンが所定 (安全上・使用上) の液密性・気密性を保持できなくなるような変形のこと。
- *4 「常時」は、通常運用時における安全性と使用性に関する要求性能を満足するように構造性能を設定する。また、「地震時」は、地震時および地震後の安全性 (耐震性能) と地震後の使用性に関する要求性能を満足するように構造性能を設定する。

図4.5.4-1 タンクの要求性能から展開される躯体に必要な構造性能

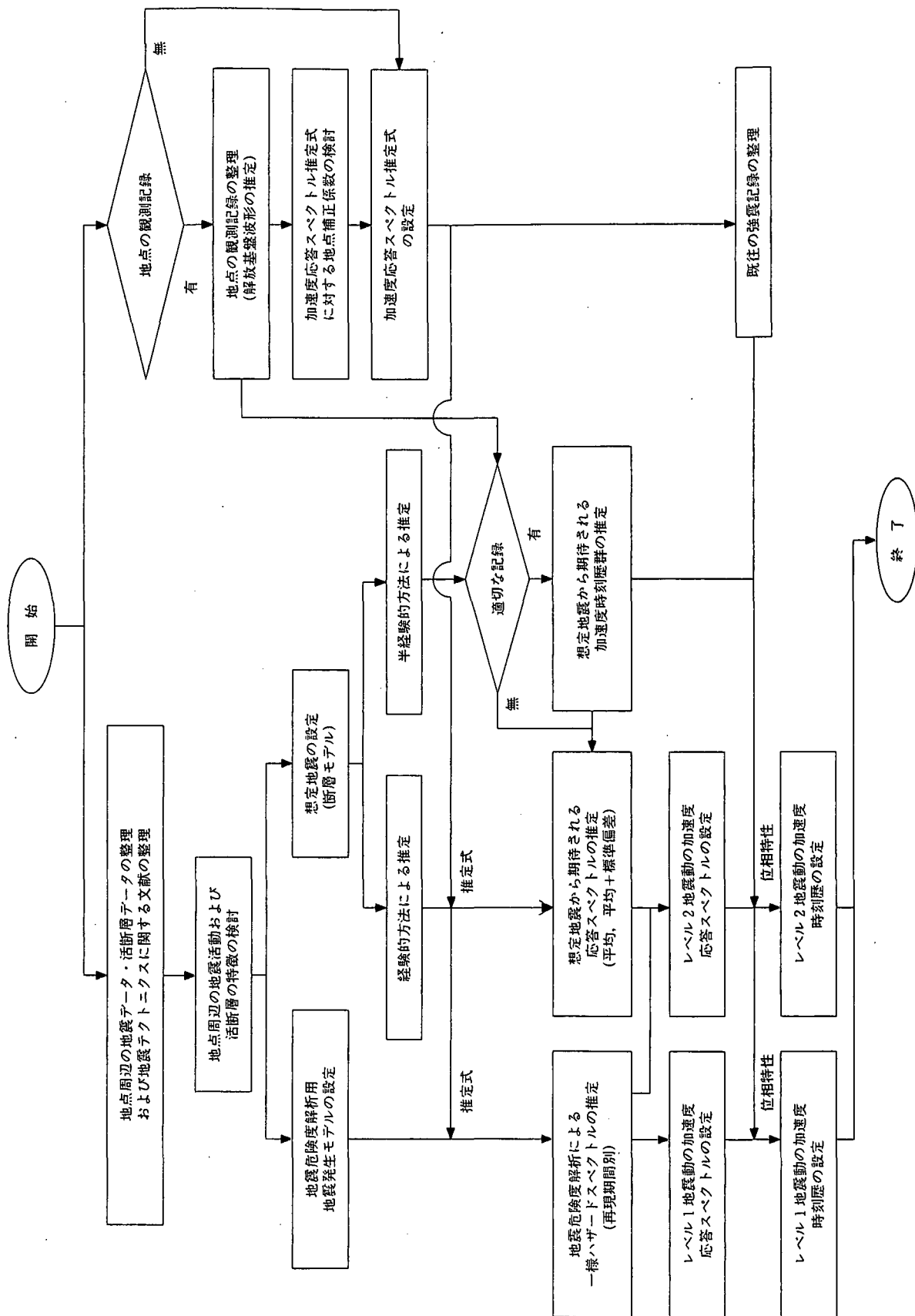


図4.5.7-1 照査用地震動の設定手順

表4.5.9-1 動的解析手法の分類

手法の名称		手法 1	手法 2	手法 3	手法 4
		準動的線形解析手法	準動的等価線形解析手法	動的非線形解析手法 (構造物:部材非線形 地盤:全応力)	動的非線形解析手法 (構造物:材料非線形 地盤:有効応力)
設定入力地震動		1段階	多段階設定		
解析に用いる入力値		地盤の応答変位 (地盤の応答解析で算出した同時刻分布)		加速度時刻歴波形 (設計基盤に入力)	
静的・動的解析の区分		応答変位法(静的解析)		時刻歴応答解析(動的解析)	
解 析 モデル	個別・連成の区分	地盤と構造物は個別解析		地盤と構造物の一括解析(連成解析)	
	地盤特性	地盤ばね:弾塑性型モデル		非線形 履歴依存モデル(全応力)	非線形 履歴依存モデル(有効応力)
	構造特性	線形 初期剛性 (温度応力:1/2 $E_0 I_0$)	線形 等価剛性(剛性低下)	非線形 部材レベル履歴依存マクロモデル ひび割れ, 鉄筋降伏等を間接考慮	非線形 材料に非線形性を考慮した構成則 ひび割れ, 鉄筋降伏等を直接考慮
解析される主な応答値		断面力		要素の曲率・ひずみ, 断面力	構造物全体の变形(残留変位) 損傷を直接示す指標
躯体の照査項目		断面力 (許容応力度照査)	断面力 (限界状態照査)	要素のひずみ 断面力(面外せん断)	構造物全体の安定性

※) 温度応力を考慮する場合には, 初期剛性 ($E_0 I_0$) を 1/2 に低下することを意味する。

表4.5.9-2 解析手法と適用する性能照査のレベル(例)

解析手法	地震動 耐震性能	レベル 1 地震動	レベル 2 地震動	
		耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
手法 1		○	△ 1	△ 1
手法 2		◎	○	○
手法 3		◎	◎	○
手法 4		△ 2	○	◎

注) ◎ : 合理化を最も追求できる(直接的な照査)
 ○ : 適用可能
 △ 1 : 合理化に適切でない(過大設計となる)
 △ 2 : 解析手間が過大である(合理化効果を得られない)

4.6 下水道の耐震対策指針と解説

4.6.1 レベル2地震動の定義

想定地震として、レベル1地震動とレベル2地震動の二つのレベルの地震動を考慮しており、それぞれ以下のように定義されている。

レベル1地震動：施設の供用期間内に1～2度発生する確率を有する地震動をいう。

レベル2地震動：陸地近傍に発生する大規模なプレート境界地震や、直下型地震による地震動のように、施設の供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動をいう。

4.6.2 対象構造物

下水道の管路、及び処理場・ポンプ場を対象とする。

なお、管路施設は「重要な幹線等」と「その他の管路」に区分し、「重要な幹線等」は、既設、新設ともにレベル1地震動に対して設計流下能力を確保するとともに、レベル2地震動に対して流下機能を確保する。「その他の管路」に対しては、新設を対象にレベル1地震動に対して設計流下能力を確保する。

4.6.3 耐震設計の基本方針

管路は、レベル1地震動に対して設計流下能力を確保するとともに、レベル2地震動に対して流下機能を確保する（表4.6.3-1）。

処理場・ポンプ場施設の耐震設計に当たって、地域特性、地盤特性及び施設の特性や規模並びに類似施設の震害経験を考慮する。

レベル2地震動に対しては、ある程度の構造物損傷は許容するが、構造物全体としての破損を防ぐとともに、最低限、表4.6.3-1に示す機能確保を原則とする。即ち、処理場・ポンプ場においては、一時的な停止はあっても復旧を要しないものとする。

表 4.6.3-1 管路の耐震設計の考え方

対 象 管 路		設 計 対 象 地 震 動		要 求 さ れ る 耐 震 性 能	
		レベル 1	レベル 2	レベル 1	レベル 2
既 設	重 要 な 幹 線 等	○	○	設計流下能力の確保	流下機能の確保
	そ の 他 の 管 路	—	—	—	—
新 設	重 要 な 幹 線 等	○	○	設計流下能力の確保	流下機能の確保
	そ の 他 の 管 路	○	—	設計流下能力の確保	—

〔備考〕

- ① 設計流下能力とは、流量計算書に記載された当該管きょの流下能力をいう。
 ② 流下機能の確保とは、地震によって本管部のクラックや沈下等の被害が生じ設計流下能力の確保が困難となるが、補修や布設替等の対策を講じるまでの間は、管路として下水を上流から下流に流せる状態をいう。

表 4.6.3-2 処理場・ポンプ場の耐震設計化の基本的考え方

対象地震動	耐 震 水 準		対 象 施 設	
	構 造 面	機 能 面	新 設 処理場・ポンプ場	既 設 処理場・ポンプ場
レベル 1	構造物に損傷を生じさせない。	処理場・ポンプ場の本来の機能を確保する。	全ての処理場・ポンプ場を対象。	全ての処理場・ポンプ場を対象。
レベル 2	ある程度の構造的損傷は許容するが、構造物全体としての破壊を防ぐ。	一時的な停止はあっても復旧に時間を要しないものとする。	全ての処理場・ポンプ場を対象。	最終的には全ての処理場・ポンプ場を対象とするが、当面の目標として地域特性等によって重要と判断された処理場・ポンプ場における該当施設を対象。

4.6.4 構造物の耐震性

管路施設においては、重要な幹線等について、既設、新設ともにレベル 2 地震動に対して流下機能を確保し、震災時においても処理場・ポンプ場への下水の収集を可能にする。

処理場・ポンプ場は、既設、新設を問わずすべての施設を対象に、既設の施設については、表 4.6.4-1 に示す地域特性からみた処理場・ポンプ場の重要度ランクの当面の目標に示された施設を対象とし、構造物が破損したり塑性変形が残留しても比較的早期に復旧が可能であることを原則とする。なお、最終的には、既存施設も含め全ての処理場・ポンプ場でのレベル 2 地震動対応を図る。

表 4.6.4-1 既設の処理場・ポンプ場における当面の目標

地域特性等から みた重要度ランク	耐震性の向上（レベル2地震動対応）を図るべき施設	
	処 理 場	ポ ン プ 場
A	全ての処理場施設 （高度処理施設を含む）	全てのポンプ場
B	高級処理に必要な施設	重要な幹線等のポンプ場
C	簡易処理に必要な施設	重要な幹線等のポンプ場
D	消毒処理に必要な施設	重要な幹線等のポンプ場

注記：① 本表は最低限の耐震性向上の当面の目標を示したものであり、処理場の全面的な改築がなされるなどの合理的な理由がある場合は、下水道管理者の判断により、より高いレベルまで耐震性を確保しても差しつかえない。

② 耐震性の向上においては、目標別に時間的優先度の差はないものとする。すなわち、当面の目標がBレベルの処理場において高級処理に必要な施設の耐震性の向上を図ることと、当面の目標がCレベルの処理場において簡易処理に必要な施設の耐震性の向上を図ることは同等の緊急性があり、優先度の差はないものとする。

③ 処理場で耐震性の向上を図るべき施設としては、該当する処理レベルに応じて必要な汚泥処理施設等を含む。

④ 「重要な幹線等」とは、次に掲げるものをいう。

- a. ポンプ場及び処理場に直結する幹線管路。
- b. 河川・軌道等を横断する管路で地震被害によって二次災害を誘発する恐れのあるもの、及び復旧が極めて困難と予想される幹線管路等。
- c. 相当広範囲の排水区を受け持つ吐き口に直結する幹線管路。
- d. 防災拠点や避難所等からの排水をうける管路。
- e. その他、下水を流下収集させる機能面から見てシステムとして重要な管路。

4.6.5 定義位置

特に記載はされていないが、レベル1地震動は、共同溝設計指針（昭和61年3月、（社）日本道路協会）を用いることとなっているため、地表面および工学的基盤面が基本となる。

4.6.6 表現方法

基盤面における速度スペクトル。

4.6.7 設定方法

レベル 2 地震動に用いる設計地震外力は、兵庫県南部地震等をもとに次のように設定した応答速度と地盤の永久ひずみを用いる。なお、それぞれの地域において影響を受ける活断層を同定して地震規模を想定し、地震動を推定することが可能な場合には、それをもちいることができる。設定根拠は、兵庫県南部地震等による管路の被害から、差し込み継手構造をもつ円形管きよや矩形きよのクック発生状況から、本管継手部の管軸方向ズレは、主として地盤の永久ひずみ（引張り）により発生していることから、兵庫県南部地震で観測された強震記録のうち、基盤地震動とみなすことのできる図 4.6.7-1 の水平記録の速度応答応答スペクトル（ $h=15\%$ ）に基づき、固有周期 0.7～3.0 秒応答速度の確率密度関数（図 4.6.7-2）を算定した。固有周期が 0.7 秒以上の周期帯域において非超過確率 80%とすると 80cm/s となり、処理場・ポンプ場の設計水平震度と同程度の地震外力となる。

よって、設計に用いる応答速度は図 4.6.7-3 に示すように固有周期 0.7～10.0 秒の間は 80cm/s に、0.7 秒以下では、両対数グラフ上において直線的に減じ、0.1 秒で 8cm/s になるように設定する。

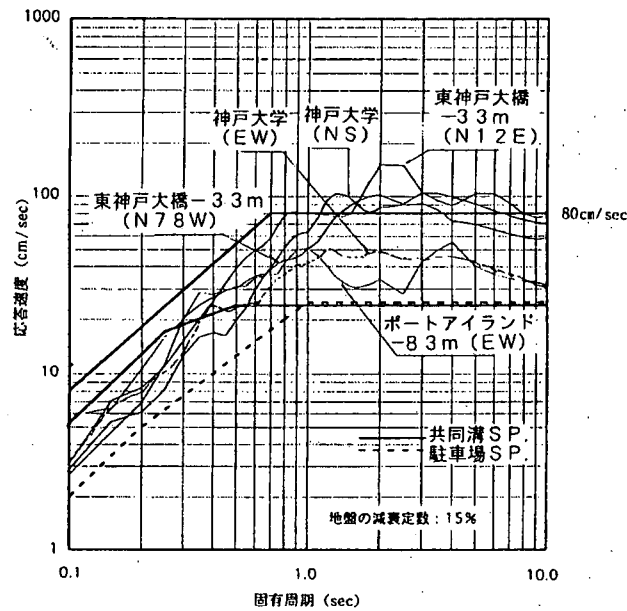


図 4.6.7-1 応答速度（基盤）

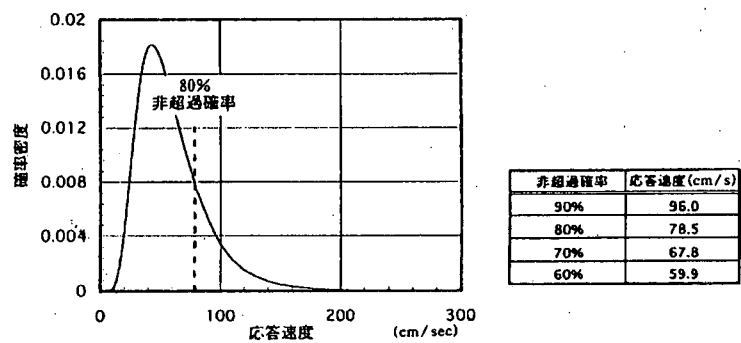


図 4.6.7-2 応答速度の頻度分布

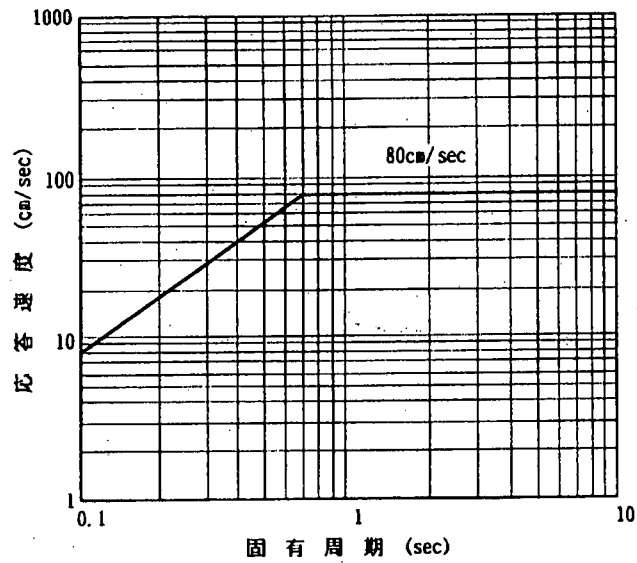


図 4.6.7-3 設計用応答速度

4.6.8 地域係数

レベル 2 地震動に用いる地域係数は設定されていない。

4.6.9 耐震性能の照査方法

レベル 2 地震動における地上部の設計水平震度算定式 3・13 及び 3・14 は、兵庫県南部地震の地震動の大きさを想定して定めている。

レベル 2 地震動における地下部の設計水平震度は、レベル 2 地震動における地上部の設計水平震度 K_{hf-2} を基本として求める。式 3・15 では、補正係数を考慮しない。

1) 地上部の設計水平震度

① (一般構造物)

$$\left. \begin{array}{l} K_{N-2}=0.8 \text{ [第Ⅰ種地盤]} \\ K_{N-2}=0.6 \text{ [第Ⅱ種及び第Ⅲ種地盤]} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3 \cdot 13)$$

ここに,

k_{N-2} : レベル2地震動における地上部の設計水平震度

② (特殊構造物)

$$\left. \begin{array}{l} K_{N-2}=1.2 \text{ [第Ⅰ種地盤]} \\ K_{N-2}=0.9 \text{ [第Ⅱ種及び第Ⅲ種地盤]} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3 \cdot 14)$$

(標準設計水平震度 $K_{h0}=0.3$ として設計する構造物) の定義

$$1.0 \leq (H/D) \text{ 且つ } (H/h) \leq 3 \text{ 且つ } 10\text{m} \leq H \leq 15\text{m}$$

高さ15mを越える構造物については、動的解析等による設計も考慮する。

2) 地下部の設計水平震度

$$K_{hb-2} = K_{N-2} \cdot (1 - 0.015z) \dots\dots\dots (3 \cdot 15)$$

ここに,

K_{hb-2} : レベル2地震動における地下部の設計水平震度

4.6.10 その他

(1) 下限値の有無

4.6.7 に示したスペクトルは固有周期が0.7秒以上の周期帯域において非超過確率80%とする
と80cm/sのみであり、レベル2地震動に用いる下限値としては設定されていない。

(2) 活断層の考慮の有無

レベル2の設定においては、それぞれの地点において影響する活断層を同定して地震規模を
想定し、地震動の大きさを推定することが可能な場合には、これを用いるとするが、活断層の
特定には十分な地盤調査を行い、慎重に評価する必要がある。

(3) 重要度の扱い

既存の処理場・ポンプ場の耐震性の向上において、施設の立地条件や重要度に対する配慮の
必要性から、処理区の地域特性等を考慮した重要度ランクを設定している。

下水道施設が地震の被害を受けた場合の放流先の公共用水域における様々な利水に与える影
響のうち、飲料水、生活用水の確保が必要とされ、継ぎに生活活動の維持の確保が重要とされ
ている。このような考え方に基づいた手順を図4.6.10-1に示す。

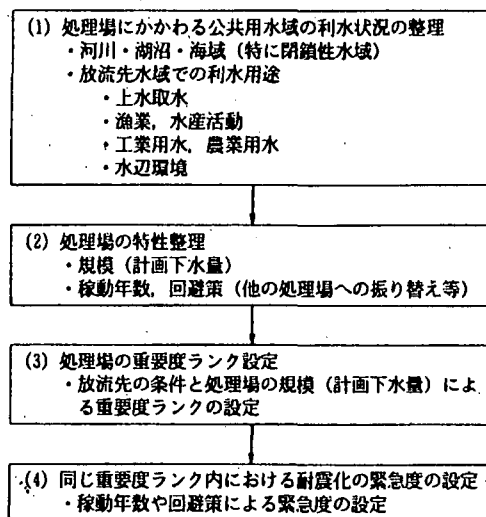


図 4.6.10-1 処理場・ポンプ場の重要度ランク設定手順

(4) 液状化判定に用いる地震動

液状化の判定及び土質定数を低減させる土層とその扱いは道路橋示方書・同解説、Ⅴ耐震設計編（平成 8 年 12 月，（社）日本道路協会）により行う。

参考文献

下水道施設の耐震対策指針と解説－1997 年版－，（社）日本下水道協会

共同溝設計指針，（社）日本道路協会，昭和 61 年 3 月

道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，（社）日本道路協会，平成 8 年 12 月

4.7 水道施設耐震工法指針・解説¹⁾

4.7.1 レベル2地震動の定義

本指針では以下のように地震動レベル1と地震動レベル2が定義されている。

地震動レベル1(L1)：施設の供用期間中に1回～2回発生する確率を有するレベルの地震動

地震動レベル2(L2)：陸地近傍に発生する大規模なプレート境界地震や、1995年兵庫県南部地震のようなプレート内地震（いわゆる内陸の直下地震）による断層近傍域の地震動であり、一般に水道施設がそのような地震動に遭遇する確率は低い、水道施設に与える影響は極めて大きいと考えられる地震動

4.7.2 対象構造物

水道システムに含まれる構造物は多種にわたり、構造特性も様々である。それらを大別すると、以下のようになる。

- 1) ダム・取水堰・地下貯水槽及び池状構造物等の剛な施設
- 2) 埋設管路・暗渠及び共同溝等のような地中の線状構造物、及びシールドトンネル立坑のように地盤の変形の影響を受ける度合いの大きい施設
- 3) 高架水槽・取水塔・配水塔・配水池及び水道橋等、地震動に対して固有の応答を示す施設
- 4) 水道事業体庁舎・浄配水場本館等の建築物

4.7.3 耐震設計の基本方針

耐震設計に用いる地震動のレベル及び施設の重要度の組合わせに対して、地震時にそれぞれの施設が保持すべき性能を確保できるように設計しなければならない。

4.7.4 構造物の耐震性能と重要度ランク

(1) 構造物の重要度

水道施設を重要度の高い施設(ランクA)及びその他の施設(ランクB)の2つに分けることを原則とする。

ランクAの施設は、水道事業者の供給システムの実態を踏まえ、以下に挙げる事項を総合的に判断して、それぞれの事業体が責任をもって決定する。

- 1) 重大な二次災害を起こす可能性のある施設
- 2) 水道システムのなかでも上流に位置する施設
- 3) 基幹施設であって代替施設のないもの
- 4) 重要施設等への供給管路
- 5) 復旧困難な基幹施設

6) 被災時の情報収集の中心となる施設

(2) 水道施設が地震時に保持すべき耐震水準

水道施設は、地震動のレベル（L1、L2）と施設の重要度（ランク A、ランク B）の組合わせに対して次のいずれかの耐震水準を維持することを基本とする。

重要度 地震動レベル	地震動レベル 1（L1）	地震動レベル 2（L2）
ランク A	無被害であること。	人命に重大な影響を与えないこと。個々の施設に軽微な被害が生じて、その機能保持が可能であること。
ランク B	個々の施設に軽微な被害が生じて、その機能保持が可能であること。	個々の施設には構造的損傷があっても、水道システム全体としての機能を保てること。また、早期の復旧が可能なこと。

4.7.5 定義位置

水道施設には 4.7.2 に示すように地中構造物を含むことから、本指針では基盤地震動、地表地震動および地上構造物への作用地震動を定義しており、基盤地震動と地表地震動を内挿することにより地中構造物の設計用地震動も評価できるようになっている。

4.7.6 表現方法

地震動レベル 1 は、これまでの設計で使用されてきた入力地震動の考え方を生かして設定されており、各位置の震度や応答スペクトルが定義されている。

また、地震動レベル 2 については、各定義位置の地震動の最大値もしくは応答スペクトルの値の統計処理を行ない、これらの地震動の最大値や応答スペクトル値として、いずれも 70% 非超過確率（下限値）と 90% 非超過確率（上限値）の値を示している。設計に当たり、対象とする施設の重要度に応じて上記の下限値と上限値の間の範囲内で設計地震動を設定することとしている。

4.7.7 設定方法

(1) 地震動レベル 1 の設定方法

(a) 基盤地震動

基盤面における基準水平震度は、1979 年発行の「水道施設耐震工法指針・同解説」や、他の基準を参考に決定した。

(b) 地中地震動

基盤から地表まで直線的に地震動の大きさが変化するものとして、(a)に示した基盤地震動と(c)に示す地表地震動の大きさを内挿して決定した。

また、応答変位法による設計のため、地中の地震入力としてトンネル深度における応答変位が定義されている。この応答変位算出用の速度応答スペクトルは、図 4.7.7-1 に示すような減衰定数 20% の速度

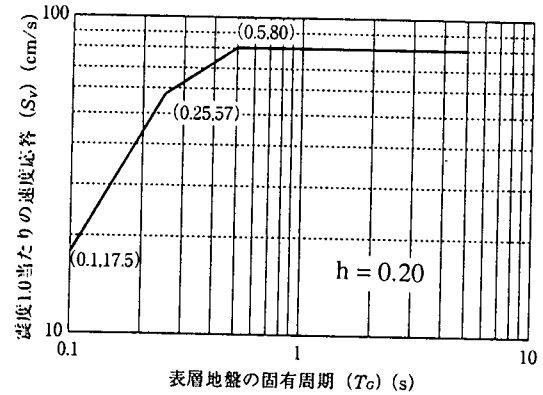


図 4.7.7-1 地中構造物の設計用速度応答スペクトル
(地震動レベル 1)

(c) 地表地震動

それぞれの地盤種別毎に決定した。

(d) 地上構造物への作用地震動

道路橋示方書のレベル 1 地震動に準拠して図 4.7.7-2 に示すように基準水平震度を決定した。

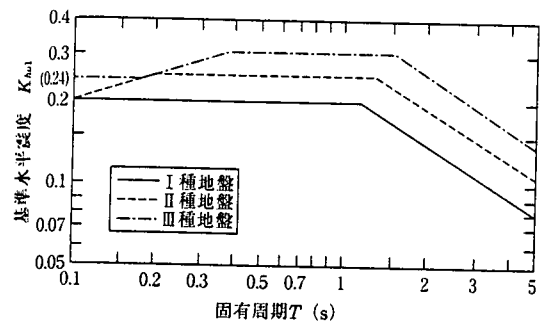


図 4.7.7-2 震度法に用いる基準水平震度

(2) 地震動レベル 2 の設定方法

地域毎に活断層の位置や地震動予測のための各種

断層パラメータが明らかな場合は、活断層から地震動レベル 2 を直接評価できる。また、地震動レベル 2 を評価する際に、地域防災計画による最大規模の想定地震も考慮していくことが望ましい。活断層の同定が困難な場合や地震動予測のための情報が不十分な場合は、兵庫県南部地震等による観測記録や数値解析による地震動の評価報告書を基に標準的な地震動レベル 2 を定める。なお、この場合、マグニチュード 8 クラスのプレート境界地震による影響は内陸直下型マグニチュード 7 クラスの地震動に包含されるものとする。

以下に、活断層の位置や地震動予測のための各種断層パラメータが明らかな場合の設定法を示す。

(a) 基盤地震動

基盤地震動は兵庫県南部地震で観測された工学的基盤における地震動の記録とみなすことができる 3 地点 (神戸大学 GL±0m、東神戸大橋 GL-33m およびポートアイランド GL-83m) の 5 つの地震記録をもとに評価しており、これらの地震動の最大値の 70% 非超過確率と 90% 非超過確率から決定した。

(b) 地中地震動

基盤から地表まで直線的に地震動の大きさが変化するものとして、(a)に示した基盤地震動と(c)に示す地表地震動の大きさを内挿して決定した。

また、応答変位法による設計のため、地中の地震入力として、トンネル深度における応答変位が定義されている。この応答変位算出用の速度応答スペクトルは、(a)の基盤地震動から算出される減衰定数 15% の速度応答スペクトルをもとに決定されている。これらの応答スペクトルも、70% 非超過確率と 90% 非超過確率の 2 種類のスペクトルが定義されている。

(c) 地表地震動

神戸周辺の 150 地点のボーリング資料をもとに設定した地盤に対して、(a)で使用した基盤地震動 5 波が入力した時の地表面の応答加速度から地表地震動を決定した。この解析では地盤の非線形性を等価線形手法により考慮している。地表面地震動としては道路橋示方書と同様に地盤種別をⅠ種からⅢ種まで分け、それぞれの地表地震動の大きさを定義している。地表地震動の大きさも、70%非超過確率の値と 90%非超過確率の値の範囲で決定することになる。

(d) 地上構造物への作用地震動

本指針では地上構造物の設計用地震動を地盤種別毎の加速度応答スペクトルの形で定義している。

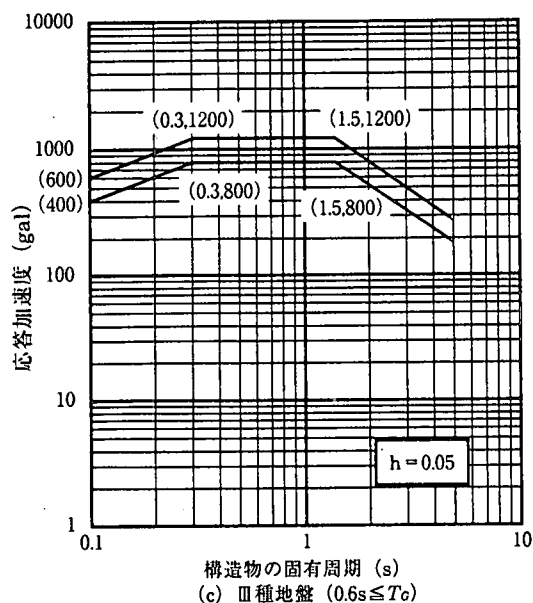
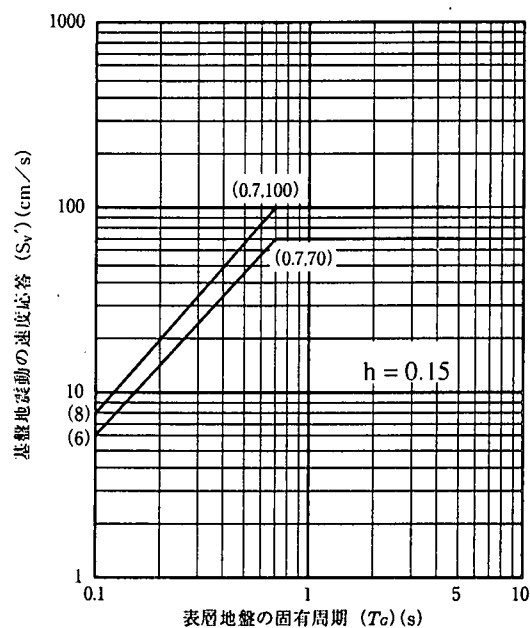
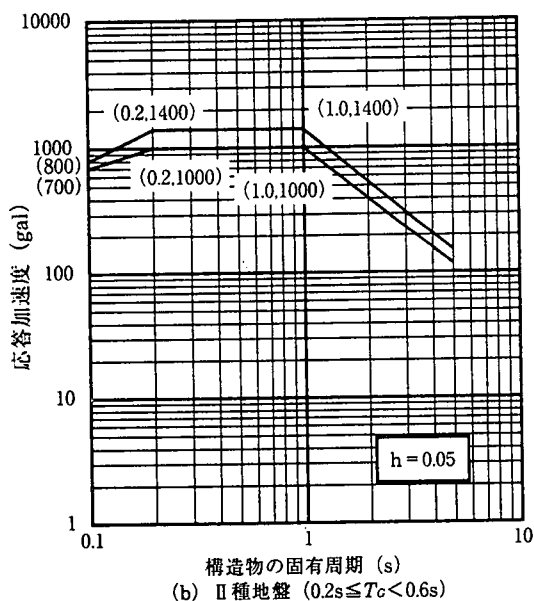
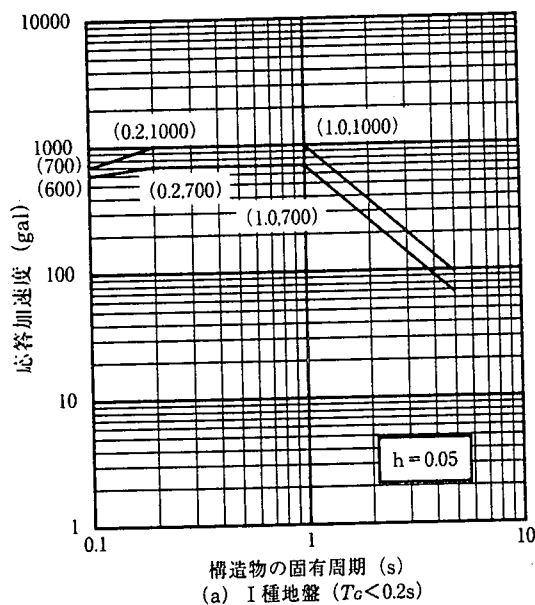


図 4.7.7-4 加速度応答スペクトル (地震動レベル 2)

地盤種別毎に、(c)で求めた地表地震動の減衰定数 5%の加速度応答スペクトルを算出し、これらのスペクトル値を統計分析し、70%非超過確率と 90%非超過確率の値から設計用スペクトルを決定した。なお、設計水平震度はこのスペクトル値に減衰特性値と塑性変形特性値の積で表される構造物特性係数をかけることにより評価する。

4.7.8 地域係数

地域別補正係数は地震動レベル 1 を設定する時だけ考慮する。なお、地域別補正係数は道路橋示方書と等しく、地域区分も同一である。

4.7.9 耐震性能の照査方法

水道施設は地中構造物と地上構造物に分類することができる。

地中構造物は震度法または応答変位法によって耐震設計を行なうこととする。地震時の挙動が複雑な構造物の地震動レベル 2 の耐震設計を行なう場合は必要に応じて動的解析を行ない、震度法または応答変位法による耐震設計結果を照査する。

地上構造物においては、原則として震度法によって耐震設計を行なうこととする。満水時の慣性力および動水圧の影響は無視できないため、震度法に加えて動的解析により安全性を照査することが望ましい。

4.7.10 その他

(1) 鉛直地震動の設定方法

通常の構造物の耐震設計においては、水平地震動の影響のみを考えておけば、十分に耐震性のある構造物を建設できる。しかし、構造物の種類や部分によって、鉛直方向の地震動の影響を検討しておくことが望ましい場合もある。このような場合、地震動レベル 1 および地震動レベル 2 とともに水平地震動の 1/2 の鉛直地震動を考慮する。

(2) 基盤の不整形の影響

地震動レベル 2 を考慮する場合、基盤の不整形性によって地震動が大きく増幅される可能性がある場合は、1.2 倍を上限として設計震度を割り増しものとする。なお、本指針では設計震度の割り増し率 (1.2) の根拠は具体的に示されていない。

(3) 動的解析による設計に用いる地震入力

地震動レベル 2 に対する動的解析に用いる地震波は、基盤の速度応答スペクトルもしくは地表の加速度応答スペクトルにフィットした地震波、あるいは 1995 年兵庫県南部地震による地震動など内陸断層近傍域において観測された地震波とする。

(4) 液状化判定用の設計用地震入力

液状化判定のためのせん断力を算定する時に使用する加速度は、地震動レベル 1、地震動レベル 2 とともに地面最大加速度を使用する。

(5) 側方流動による地盤ひずみ

側方流動による地盤ひずみを考慮する場合は、地盤ひずみの値を兵庫県南部地震と新潟地震による実測値から定めており、地盤ひずみの値は地震動の大きさとは直接関連しない。

(6) 下限基準の有無

地震動レベル 2 は非超過確率 70% から非超過確率 90% の間の値を取ることにしており、地震動の大きさには幅がある。これは、一見すると本委員会（土木学会、レベル 2 地震動小委員会）で提案した、いわゆるレベル 2 地震動の下限基準として 70% 非超過確率の値を示しているとも考えられる。しかし、本指針では対象とする構造物の重要度に応じて、設計震度の値を加減するために設計用入力地震動の大きさに幅を設けているのであって、本委員会で提案したレベル 2 地震動の下限基準とは意味合いが異なる。

(7) 活断層の考慮の有無

地震動レベル 2 は、4.7.7(2) に示したように陸地近傍に発生する大規模なプレート境界地震や、兵庫県南部地震のようなプレート内地震による断層近傍域の地震動であると定義されている。本指針では、設計用入力地震動の大きさやスペクトルは兵庫県南部地震の観測記録をもとに作成されており、活断層の影響を考慮している。ただし、兵庫県南部地震以外の地震動は考慮していないため、将来発生するであろう活断層に伴う地震動をすべて考慮しているとは言い切れないことに注意を要する。

参考・引用文献

- 1) 水道施設耐震工法指針・同解説：（社）日本水道協会、1997

4.8 電力ダムの耐震設計におけるレベル2地震動の作成例¹⁾

4.8.1 レベル2地震動の定義

ダムの耐震性評価を目的とした地震時挙動解析を行うための入力地震動として、土木学会の提言に習い下記のようなレベル2地震動が考慮されている。

【レベル2地震動】 供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ内陸の断層破壊に起因する断層近傍の地震動。

4.8.2 モデル地点と対象構造物

関西電力（株）金居原水力発電所（最大出力228万kWの揚水発電所）地点に計画されている、上部ダム（堤高148.5mのコンクリート重力式ダム）と下部ダム（堤高108.2mの中央遮水壁型ロックフィルダム）を対象構造物としている。計画場所は、滋賀県と岐阜県の県境に位置している（図4.8.2-1）。

4.8.3 耐震性評価の基本方針

地震観測が行われているモデル地点を選定した上で、そのモデル地点においてレベル2地震動に相当する周辺活断層に起因する地震動の作成を行い、それを用いてダムの地震時挙動解析を行い、ダムの耐震性評価について検討する。

4.8.4 構造物の耐震性能と重要度ランク

構造物（ここでは上部ダムと下部ダムの2つが該当すると考えられる）の重要度の違いについては特に触れられていない。

4.8.5 定義位置

4.8.1のレベル2地震動は、ダム基礎岩盤表面で定義される。

4.8.6 表現方法

入力地震動は加速度時刻歴波形で表現される。また波形の特性を吟味するために加速度度応答スペクトルも併せて表現されている。ダムの地震時挙動解析に用いる地震動としては、作成された200波の合成波形の中から、解析の対象とするダムの固有周期を勘案した上で、地震が起こった場合にダム地点に生ずる最も可能性が高い波形として、加速度応答スペクトルがその平均値に近い合成波形（水平動のS波部分、最大加速度286Gal）が用いられる。

4.8.7 設定方法

レベル2地震動は、図4.8.7-1のフローに基づき設定する。すなわち、小地震の観測波形を経験的なグリーン関数として利用する半経験的な方法を用いて、レベル2に相当する地震動の作成を行う。

(1) 対象断層の選定及び震源パラメータの設定

モデル地点の周辺活断層について断層の長さから松田の式 ($\log L = 0.6M - 2.9$, L : 断層の長さ (km)、 M : マグニチュード) を用いてマグニチュードを推定し、距離減衰式 (福島・田中による岩盤に対する式、図4.8.7-2) によりダム地点における最大加速度を推定し、対象断層の選定を行う。活断層は、「新編 日本の活断層」(活断層研究会編、1991、東京大学出版会) に記載されているモデル周辺の活断層 (図4.8.7-3) で、確実度がIまたはIIかつ活動度がAまたはBのものを選定する。

対象断層として、表4.8.7-1に示す通り両ダムとも最大加速度が最も大きくなる柳ヶ瀬断層を選定する。柳ヶ瀬断層の長さは、「新編 日本の活断層」より37kmとし断層全体が同時に動くものと仮定する。柳ヶ瀬断層の震源パラメータを表4.8.7-2に示す。

(2) 要素地震の選定及び震源パラメータの設定

モデル地点の地震計で観測された60個の地震記録の中から、次の条件①～③に該当するものを要素地震として選定する。

- ①震央位置が対象断層 (柳ヶ瀬断層) の近傍に位置すること。
- ②要素地震の震源で想定される地震のメカニズムが対象断層において想定されるもの (柳ヶ瀬断層は左横ずれ) と近いこと。
- ③観測記録のS/N比が大きいこと。

上記の3条件より、要素地震の諸元は表4.8.7-3、要素地震震源パラメータは表4.8.7-4のように設定されている。

(3) 波形合成

対象断層及び要素地震の震源パラメータより重ね合わせ条件を表4.8.7-5のとおり設定し、水平動のS波部分について波形合成を行う。波形合成を行う際、文献⁹⁾では以下のような方法が採られている。

「波形合成では、重ね合わせで得られた大地震の強震動において低周波数域と高周波数域では ω^2 モデルに従うが、中間周波数域においては振幅の落込みが見られることがある。この落込みは人工的な断層分割によるもので強震動予測の際、課題となる。本検討ではこの中間周波数域での落込みを解決する方法として、自己相似 (フラクタル) な不均質断層モデルを導入した。このモデルでは、大地震が成長する過程で種々のサイズのクラックが形成され、それらのクラックが結合して最終的には1つの大きなクラック、大地震になるとする考えに基づいている。

フラクタルに基づく断層分割は、乱数を用いて作成するため一義的には決まらない。そこで、この断層分割を200通りの乱数に対して定義し、合成波形を200波作成した。次にこれらの合成波形の中から、解析の対象とするダムの固有周期を勘案した上で、地震が起こった場合にダム地点に生ずる最も可能性が高い波形として、加速度応答スペクトルがその平均値に近い合成波形（水平動のS波部分、最大加速度286Gal）を地震時挙動解析に用いる入力地震動として選定した。」

フラクタルを利用した200通りの合成波形の加速度応答スペクトルを図4.8.7-4に、地震時挙動解析に用いる合成波形（水平動のS波部分）を図4.8.7-5に示す。

(4) 使用する耐震設計用入力地震動の特性

合成波形の特徴としては、入倉の方法による200波合成波形と既往強震波形（開北橋波、一庫波、箕面川波）の関係（図4.8.7-6）から、「3波の既往強震波形が今回作成した200波合成の最大及び最小の包絡の範囲にはほぼ入っていること、更にモデル地点の重力ダムの一次固有周期である0.45s付近では一庫波が、モデル地点のフィルダムの一次固有周期である0.85s付近では箕面川波が200波の最大の包絡に近いことが分かった」としている。

4.8.8 地域係数

地域係数に相当するものはない。

4.8.9 耐震性能の照査方法

(1) 地震時挙動解析

解析を行うダムの断面形状は、強震帯に位置すること及び、周辺ダムとの比較検討により重力ダムは設計震度0.12として設定し、フィルダムは設計震度0.15及び、修正震度法での地盤震度0.18での結果を比較して、修正震度法により設定した。二つのダムの解析物性値は、設計条件や他ダムの実績より表4.8.9-1、4.8.9-2、フィルダムの安定性評価に用いた強度定数は表4.8.9-3のように設定されている。

地震応答は、振動数領域における複素応答解析に基づくSuper-FLUSHを用いて2次元FEM解析より求めている。

(2) 耐震性評価

地震時挙動解析の結果に基づき、重力ダムについては堤体内の最大圧縮・引張応力、及び堤体底面に生じるせん断力とせん断摩擦抵抗力の比（滑動抵抗の比）と用い、フィルダムについてはすべり円弧に対して、すべり面に沿って生じる力とその抵抗力の比（すべり抵抗の比）の内、最も小さいすべり抵抗の比を与える円弧を抽出し、これを用いて、ダムの安定性を評価する。解析結果（図4.8.9-1、4.8.9-2）より、重力ダム、フィルダムとも近傍活断層によるレベル2相当の地震動に対して、十分な耐震性能を有しているが照査できたという結論が得られている。

4.8.10 その他

(1) 下限基準の有無

下限基準は無し。

(2) 活断層の考慮の有無

レベル2対象地震は、最大加速度の距離減衰式による値から選定している。上部ダムと下部ダムで、加速度が最大となる地震動をもたらす活断層が同一（柳ヶ瀬断層）であるため、対象地震（活断層）は一つとしている。

(3) 重要度の扱い

構造物の重要度については、言及されていない。

(4) それ以外の特徴

(a)レベル2対象地震、レベル2地震動の発生頻度は言及していない。

(b)波形合成における重ね合わせにおいて、中間周波数域での落込みは、自己相似な不均質断層モデルを導入している。

参考文献・引用文献

1)土岐憲三、橋本 昭、川西正夫、山田雅行：周辺活断層を考慮したダムの耐震設計について、大ダム No.162（1998-1）、pp.55-63

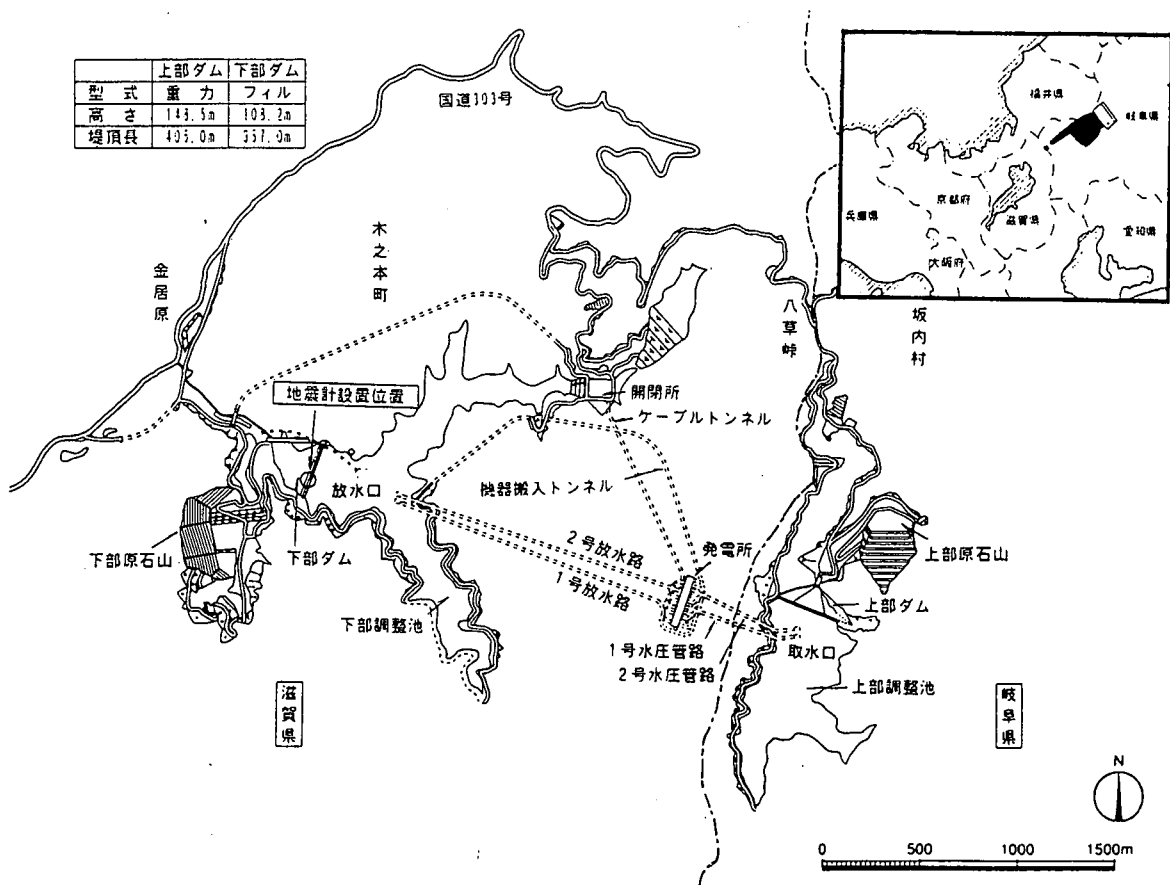


図4.8.2-1 モデル地点概要¹⁾

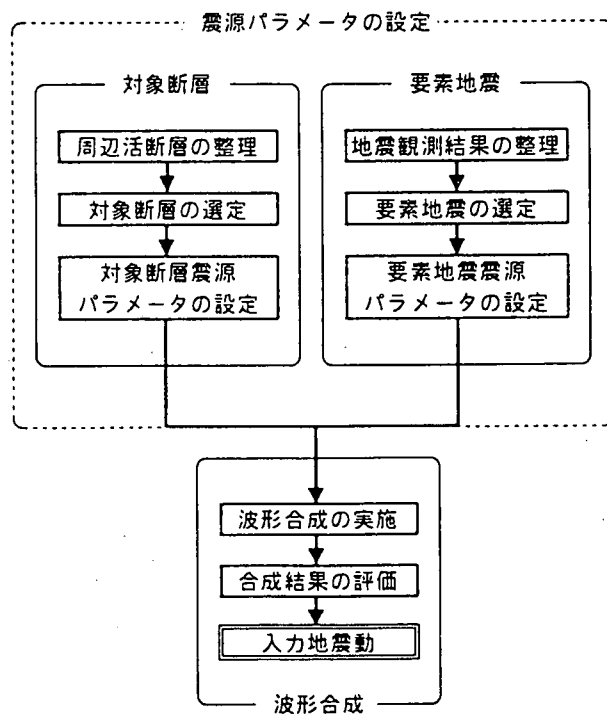
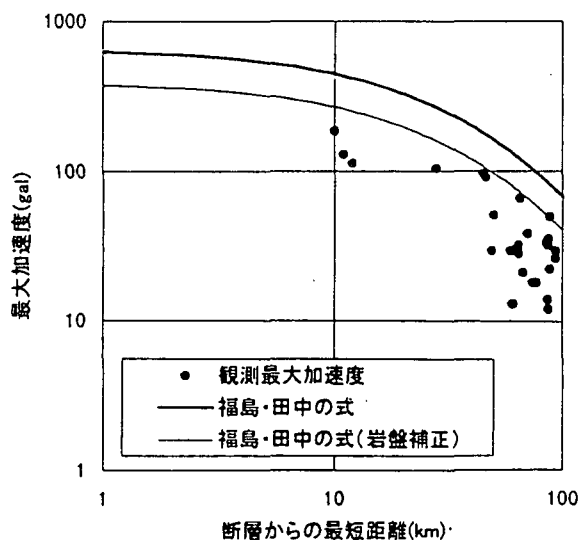


図4.8.7-1 入力地震動作成フロー¹⁾



福島・田中の距離減衰式は、
 $\log A_{max} = 0.51M - \log(R + 0.006 \times 10^{2.51M}) - 0.0033R + 0.59$
 岩盤に対しては、上記 A_{max} に 0.6 を乗じて補正を行う
 ここで、 A_{max} : 最大加速度 (gal)
 M : マグニチュード
 R : 断層からの最短距離 (km)

図4.8.7-2 兵庫県南部地震のダムサイト岩盤での観測記録と福島・田中の岩盤に対する距離減衰式 ($M=7.2$) との関係¹⁾

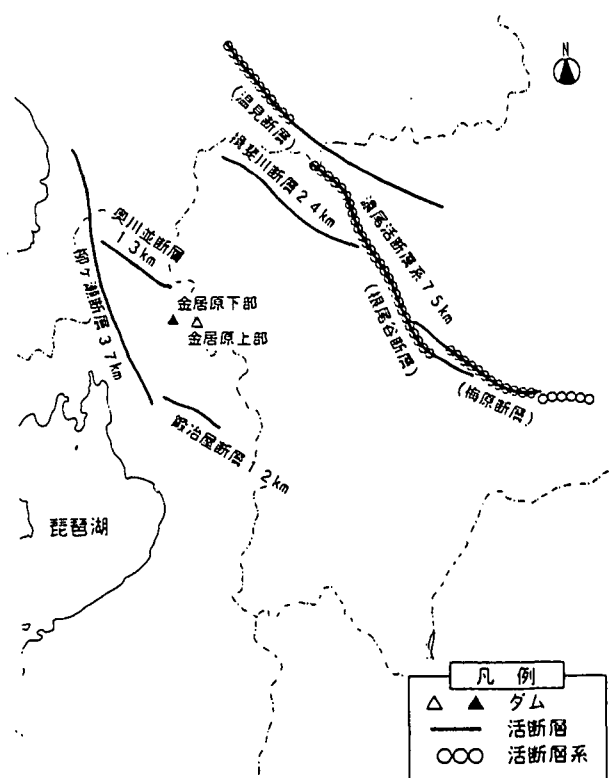


図4.8.7-3 モデル地点と周辺活断層の位置関係¹⁾

表4.8.7-1 想定される最大加速度¹⁾

断層名	確実度	活動度	最大加速度 (gal)	
			上部	下部
柳ヶ瀬断層	I～Ⅲ	B	284	302
奥川並断層	Ⅱ	B～C	268	286
濃尾活断層系	I～Ⅱ	A～B	231	225
揖斐川断層	I～Ⅱ	B	190	180
鍛冶屋断層	I～Ⅱ	B	212	216

表4.8.7-3 要素地震の諸元¹⁾

地震発生日、時刻	1996年7月30日、午前4時36分
震源地	滋賀県
マグニチュード	M4.1
緯度、経度	35.4°, 136.3°
深さ	20.0km
震央距離	18.9km
震源距離	27.5km
最大加速度	4.359gal
最大速度	0.128kine

表4.8.7-2 対象地震震源パラメータ¹⁾

パラメータ	設定値	備考
長さ L	37km	「新編 日本の活断層」より
幅 W	20km	地震の深さ分布 ¹³⁾ より
マグニチュード	M7.4	松田の式より算出
ストレスドロップ $\Delta\sigma$	80bar	既往の地震 ¹⁴⁾ の平均より
地震モーメント M_0	6.6×10^{26} dyne·cm	Esheby の式 ($\Delta\sigma = 7/16 \times M_0 / r^3$ ($\pi r^2 = L \times W$))より算出
S波伝播速度 V_s	3.5km/s	一般値
破壊伝播速度 V_R	2.45km/s	$0.7 \times V_s$ ¹⁵⁾ より算出
ライズタイム τ	1.5s	Somerville の式 ($\tau = 1.72 \times 10^{-3} \times M_0^{0.4}$) ¹⁶⁾ より算出

表4.8.7-4 要素地震震源パラメータ¹⁾

パラメータ	設定値	備考
フラットレベル Ω_0	$0.682 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}$	波形データより
コーナー周波数 f_c	2.78Hz	
地震モーメント M_0	$4.3 \times 10^{21} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$	$M_0 = 4 \times \pi \times \rho \times X \times V_s^3 \times \Omega_0 / R(\theta, \phi)$ より算出 ここで、密度: $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, ラディエーションパターンの補正係数: $R(\theta, \phi) = 0.63$, 震源距離: X
断層面積	0.69 km^2	Bruneの式(円形断層の半径: $r = 2.34 \times V_s / (2\pi \times f_c)$) より算出
ストレスドロップ $\Delta\sigma$	18.4bar	Eshebyの式より算出

表4.8.7-5 重ね合わせ条件¹⁾

対象断層地震モーメント M_0	$6.6 \times 10^{25} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$
要素地震地震モーメント M_{0e}	$4.3 \times 10^{21} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$
対象断層ストレスドロップ $\Delta\sigma$	80bar
要素地震ストレスドロップ $\Delta\sigma_e$	18.4bar
ストレスドロップ補正係数 c	$c = \Delta\sigma / \Delta\sigma_e = 4.35$
重ね合わせ数算定式	$N^3 = M_0 / (c \times M_{0e})$
重ね合わせ数 N	33

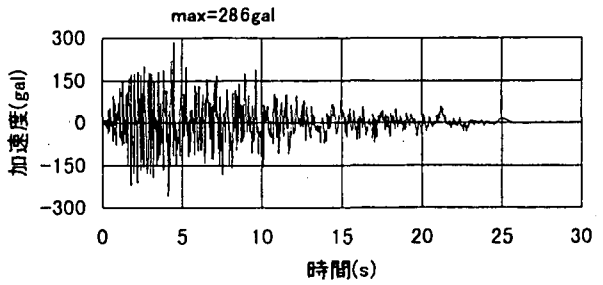


図4.8.7-5 地震時挙動解析に用いる合成波形
(水平動のS波部分)¹⁾

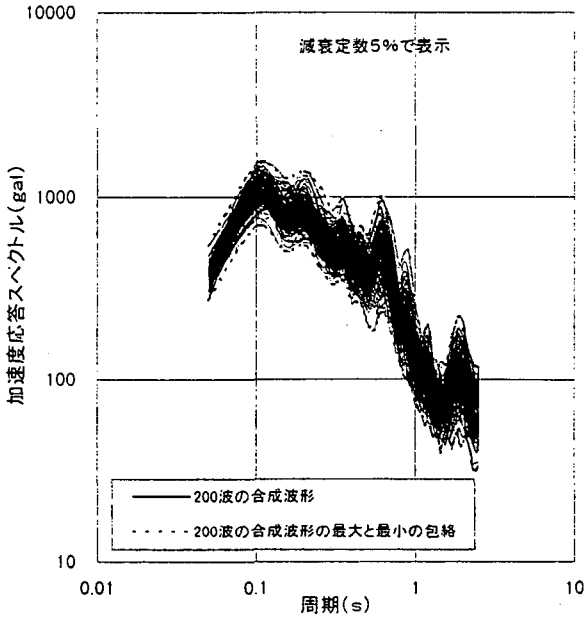


図4.8.7-4 フラクタルを利用した200通りの合成波形の
加速度応答スペクトル¹⁾

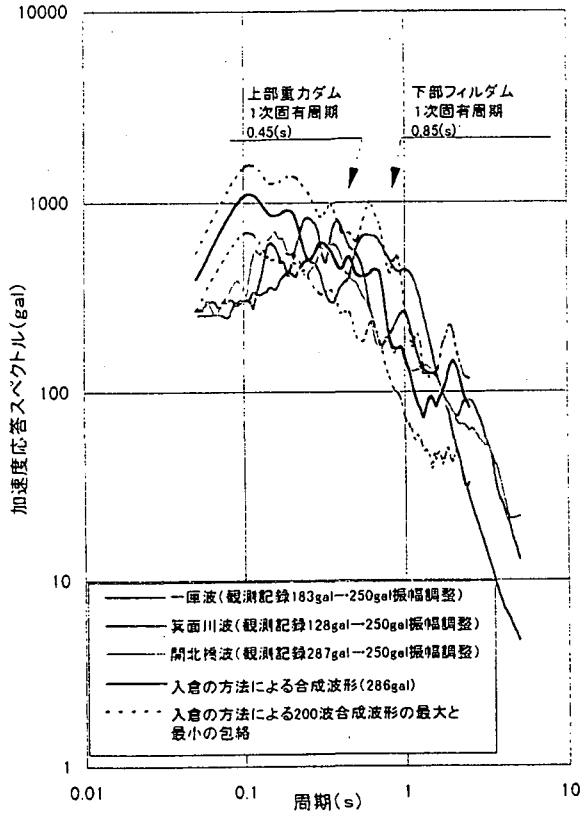


図4.8.7-6 入倉の方法による200波合成波形
と既往強震波形の関係¹⁾

表4.8.9-1 重力ダム動的解析物性値¹⁾

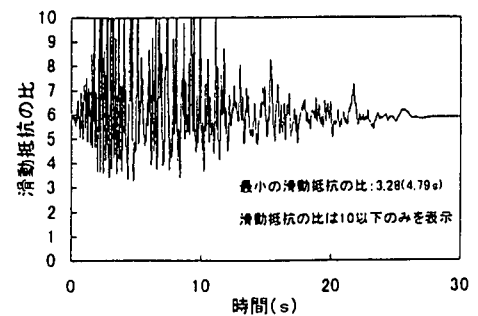
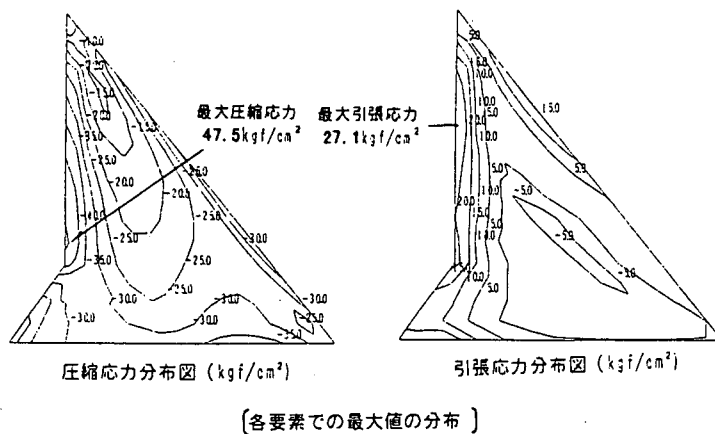
単位体積重量	γ	2.4tf/m ³
ポアソン比	ν	0.20
せん断弾性係数	G	104,200kgf/cm ²
減衰定数	h	10.0%

表4.8.9-2 フィルダム動的解析物性値¹⁾

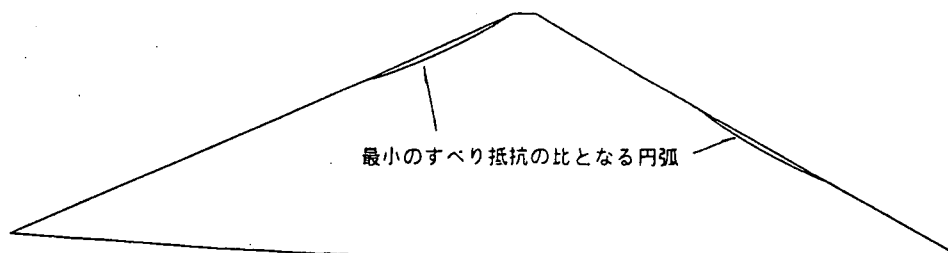
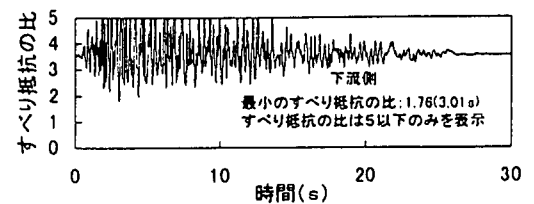
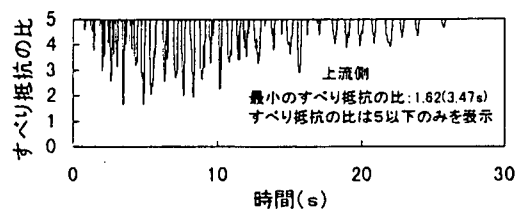
S波速度	V_s	沢田モデル ^{1a)}
ポアソン比	ν	
初期せん断弾性係数	G_0	$G_0 = \rho \times V_s^2$
せん断弾性係数～ひずみ関係		動的三軸試験結果より

表4.8.9-3 フィルダム安定性評価に用いた強度定数¹⁾

		A	b
ロック材	R1	2.169	0.837
	R2(R2')	1.813	0.866
	R3	1.579	0.883
トランジション材	T	1.376	0.904
フィルター材	F	2.714	0.722
		c (kgf/cm ²)	ϕ (°)
コア材	C	0.26	33.6



$$\left[\text{滑動抵抗の比} = \frac{\text{せん断摩擦抵抗力}}{\text{堤体底面に生じるせん断力}} \right]$$

図4.8.9-1 重力ダム解析結果¹⁾

$$\left[\text{すべり抵抗の比} = \frac{\text{すべりに対する抵抗力}}{\text{すべり面に沿って生じる力}} \right]$$

図4.8.9-2 フィルダム解析結果¹⁾

4.9 大阪府の地震動設定例¹⁾

大阪府土木部¹⁾に基づいて、大阪府による「レベル 2 地震動(以下、想定標準地震動)」の設定事例の概要を以下に示す。

大阪府土木部では、兵庫県南部地震の観測記録との比較や各種パラメータスタディを実施するなどして、活断層に基づく強震動予測手法の工学的妥当性などを検証した上で、大阪府域において脅威となる 4 つの活断層を想定し、大阪府を 19 ゾーンに分割して、各ゾーンにおける想定標準地震動を設定した。同時に、主に既設の橋梁・モノレール、河川、港湾、海岸、ダム・砂防、地すべり・急傾斜地対策、下水道など、各種の土木施設に対して、耐震対策に関する点検・補強方針と施設ごとの優先度等についての提言が行われている。同様に、新設の構造物に対する耐震設計のあり方についても提言されている。

4.9.1 レベル 2 地震動の定義

土木学会提言による「レベル 1 地震動」、「レベル 2 地震動」を参考にしつつ、大阪府の想定すべき地震動を以下のように定めている。

大阪府土木構造物耐震対策検討委員会においては、

- 1) 大阪地域の活断層の調査が比較的進んでおり、地震動予測に必要なデータの入手が可能である
- 2) 活断層にもとづく地震動予測手法の工学的妥当性が、今回の兵庫県南部地震等の観測記録で立証された

ことに加えて、

- 3) 直下型地震という比較的局所的な地震動を対象に、兵庫県南部地震などの記録にもとづく地震動という、いわば既往最大地震により府下すべての土木施設の耐震対策を行うことの工学的かつ経済的不合理性

等の理由から、大阪府では特に影響が大きいと予想される 4 つの活断層による直下型地震と南海道沖で発生する海溝型地震を対象に地震動の大きさを府下全域で予測し、各サイトでの地震特性(地域ごとの地震動の強弱等)を明らかにした上で耐震対策の検討を進めることにする、としている。

検討対象とする活断層とそれによる想定地震

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">○ 有馬・高槻構造線の断層活動による内陸直下型地震○ 上町断層系の断層活動による内陸直下型地震○ 生駒断層系の断層活動による内陸直下型地震○ 中央構造線の断層活動による内陸直下型地震○ 南海道で発生する海溝型地震 |
|--|

ただし、大阪府土木部による想定標準地震動は、最終的に上記の 4 つの内陸直下型地震を用いて設定されている。4 断層の選定条件は、過去の調査研究によってその存在の確実度が高い活断層の内活動度が高いと推定されること、断層の大きさや検討対象構造物との距離関係からみて非常に大きな被害を及ぼす可能性があることとしている。

4.9.2 対象構造物

想定標準地震動を受けた場合における構造物の地震時挙動や地盤の液状化状況に関わる耐震性評価手法を提案するに当たって、橋梁・モノレール、河川、港湾、海岸、ダム・砂防、地すべり・急傾斜地対策、下水道など、各種土木構造物を対象としている。

4.9.3 耐震設計の基本方針

主に既設の土木施設に対して、耐震補強対策の方針と施設ごとの優先度等についての提言が行われており、新設の構造物に対する耐震設計のあり方についても示している。

4.9.4 構造物の耐震性能と需要度ランク

「構造物が損傷を受け、かつ機能が低下することを前提に、その損傷過程まで立ち入って、地震発生時の挙動を明らかにする。その上で、各施設の地震防災上の特性に応じた耐震強化の目標水準を設定し、耐震対策を講じる。」というように、レベル 2 地震動に対して土木構造物が保有すべき耐震性能の考え方を示し、都市防災システムとの関わりの中で各土木構造物が如何なる耐力を保持すべきかということで、以下に示す流れで、各施設の対象構造物ごとに対応する耐震区分と耐震強化の目標水準の内容を検討・整理している。なお、各施設の対象構造物の分類、耐震性能の区分、耐震強化の目標水準等、詳しくは大阪府土木部¹⁾を参照されたい。

- 1) 地震により連鎖的に発生する被害の状況を把握する。
- 2) 次に示す「地震被害の重みの視点」と「土木施設の構造的・機能的特性の視点」から、都市防災システム全体系の中で捉えた場合に、各土木構造物が保有すべき耐震性能の考え方を「耐震強化の目標水準」として整理する。なお、「耐震強化の目標水準」は、各施設の地震防災上の重要度を評価した後、被災した場合の影響の程度を目安とする耐震性に関連づけて分類される。
- 3) 「耐震強化の目標水準」にもとづき、各土木構造物が「保有すべき耐震性能」を検討する。

「地震被害の重みの視点」[詳しくは大阪府土木部¹⁾参照]

第 1 の視点：	人命の保護と生存の確保
第 2 の視点：	避難・救援・救急活動の確保
第 3 の視点：	二次災害発生の防止
第 4 の視点：	地域の生活機能と経済活動の確保
第 5 の視点：	財産の保全と環境の維持

「土木施設の構造的・機能的特性の視点」[詳しくは大阪府土木部¹⁾参照]

第 1 の視点：	代替施設の充実の度合い
第 2 の視点：	施設の復旧・修繕(機能回復・本復旧)の難易の度合い
第 3 の視点：	応急復旧(応急対策・暫定的な機能確保)の難易の度合い

「耐震強化の目標水準」

区分 A：	比較的早期に修復できる程度の損傷や変形に留める。 ただし、防災機能上特別な耐震レベルが要求される施設については応急復旧等の手当で所期の機能を確保させる。→区分 As
区分 B：	修復不可能となっても構造全体系は崩壊させない。あるいは、二次災害への影響が少なく、都市防災システム上当面の機能を確保する。
区分 N：	南海道地震に対しては所期の機能が維持できる耐震性能を確保する。
区分 G：	構造的、機能的特性から緊急には耐震補強を必要としないもの。

4.9.5 定義位置

想定標準地震動は地表面で設定されている。想定標準地震動の適用に当っては、表層地盤の非線形性などを考慮する場合、必要に応じて想定標準地震動を設定し直すことが推奨されている。その場合、対象地点で想定した地盤モデルを用いて想定標準地震動(線形解)から工学的基盤における地震動を求め、対象地点の表層地盤モデルを用いて地表面における地震動を推定することとなる。ただし、対象地点の地盤モデルが想定されていない場合は、想定標準地盤による非線形波を用いてもよい。

4.9.6 表現方法

19 ゾーンに分割した大阪府の各ゾーンごとに、水平成分に対する加速度、速度、変位の波形および 5%減衰の加速度応答スペクトルで表されている。

4.9.7 設定方法

地盤区分および想定断層からの距離に基づいて、想定標準地震動を推定する 19 ゾーンを設定し、各ゾーン内の数 km おきの地点で上町断層、有馬・高槻構造線、生駒断層、中央構造線の 4 つの断層による地震動を推定している。各ゾーンに対する想定標準地震動は、固有周期が 0.1 秒～1.5 秒の加速度応答スペクトル平均値を指標としてこの指標が最大となる地点のものとし、その時の断層を支配的断層としている。ただし、震源からの放射特性による特異な加速度値を示す断層極近傍の地点は対象外とし、岩盤サイトでの想定標準地震動は、対象断層から 3～5km の地点において最大のものを与え、それ以遠に関しては、福島(1994)²⁾による最大加速度の距離減衰式から得られる次式で、加速度振幅を補正している。

$$\log_{10} K = -\log_{10} \left(\frac{R + 0.025 \cdot 10^{0.42M_w}}{R_0 + 0.025 \cdot 10^{0.42M_w}} \right) - 0.0033(R - R_0)$$

ここで、 K は加速度振幅の補正倍率、 R_0 および R は各々断層による想定標準地震動が与えられた地点および地震動予測地点までの最短距離(km)、 M_w はモーメントマグニチュードである。

地震観測記録により短周期地震動の増幅特性(小地震の観測記録から震源特性と伝播特性を取り除いたもの)を推定し、Boore(1983)³⁾による統計的小地震波にそれを加味した上で、断層破壊を考慮した大

地震動を作成している。長周期地震動は、Bouchon(1981)⁴⁾による水平成層構造の理論解を用いて推定している。ここで、盆地構造の解析解と水平成層構造の理論解を比較し、湾岸部では両者にほとんど差がなく、地盤傾斜の急変部では固有周期が2.0秒以上で加速度応答スペクトルが過小評価されているが、固有周期が2.0秒以下では問題なく、通常規模の土木施設ではこのような長周期領域が問題となることはないので、結果的に想定標準地震動は一般土木施設に対して充分汎用性を持つと判断している。

図4.9.8-1に4つの活断層の位置、図4.9.8-2に想定標準地震動のゾーン分割、表4.9.8-1に想定標準地震動の設定に用いた地盤区分、府域、支配的断層、標準地盤などを示す。ここで、ゾーン13～15に関しては大阪市による検討結果を採用している。

以上を踏まえて、大阪府土木部では19ゾーンにおける想定標準地震動を設定した。想定標準地震動の推定には表層地盤の非線形性を無視しているが、ゾーン9～16の沖積および埋立地盤に関しては、地震基盤相当層まで地表面波形を線形仮定で戻し、Sugito(1993)⁵⁾による非線形地盤応答解析法により、表層地盤の非線形性を考慮した結果も示している。ただし、対象地点において詳細な地盤構造が得られている場合は、その地盤モデルで計算した非線形波を用いることが推奨されている。

4.9.8 地域係数

地域係数により地域ごとの相対的な地震動特性を表すということではなく、大阪府域を19ゾーンに分割して各ゾーンごとに想定標準地震動が与えられている。

4.9.9 耐震性能の照査方法

上記の各種土木構造物に対して、期待されるべき耐震強化の目標水準が設定され、各々耐震性能の照査方法が提案されている。各論は大阪府土木部¹⁾を参照されたい。

4.9.10 その他

(1) 下限基準の有無

下限基準については特に記述されていない。

(2) 活断層の考慮の有無

図4.9.8-1に示す上町断層、有馬・高槻構造線、生駒断層、中央構造線の4つの断層を考慮している。

(3) 重要度の扱い

想定した地震動に対して、都市防災システム全体の中で防災機能の向上を図るといった観点から、各土木施設に要求される機能や構造特性を勘案しながら、期待されるべき耐震強化の目標水準(重要度)を設定している。

参考・引用文献

- 1) 大阪府土木部：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会 報告書, (財)大阪府都市整備センター, 1997.
- 2) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, 東京工業大学博士論文, 1994.
- 3) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 4) Bouchon, M. : A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.71, pp.959-971, 1981.
- 5) Sugito, M. : Frequency dependent equivalent strain for earthquake response analysis of soft ground, 3rd R.O.C.and Japan Joint Seminar on National Hazard Mitigation, Taiwan, 1993.

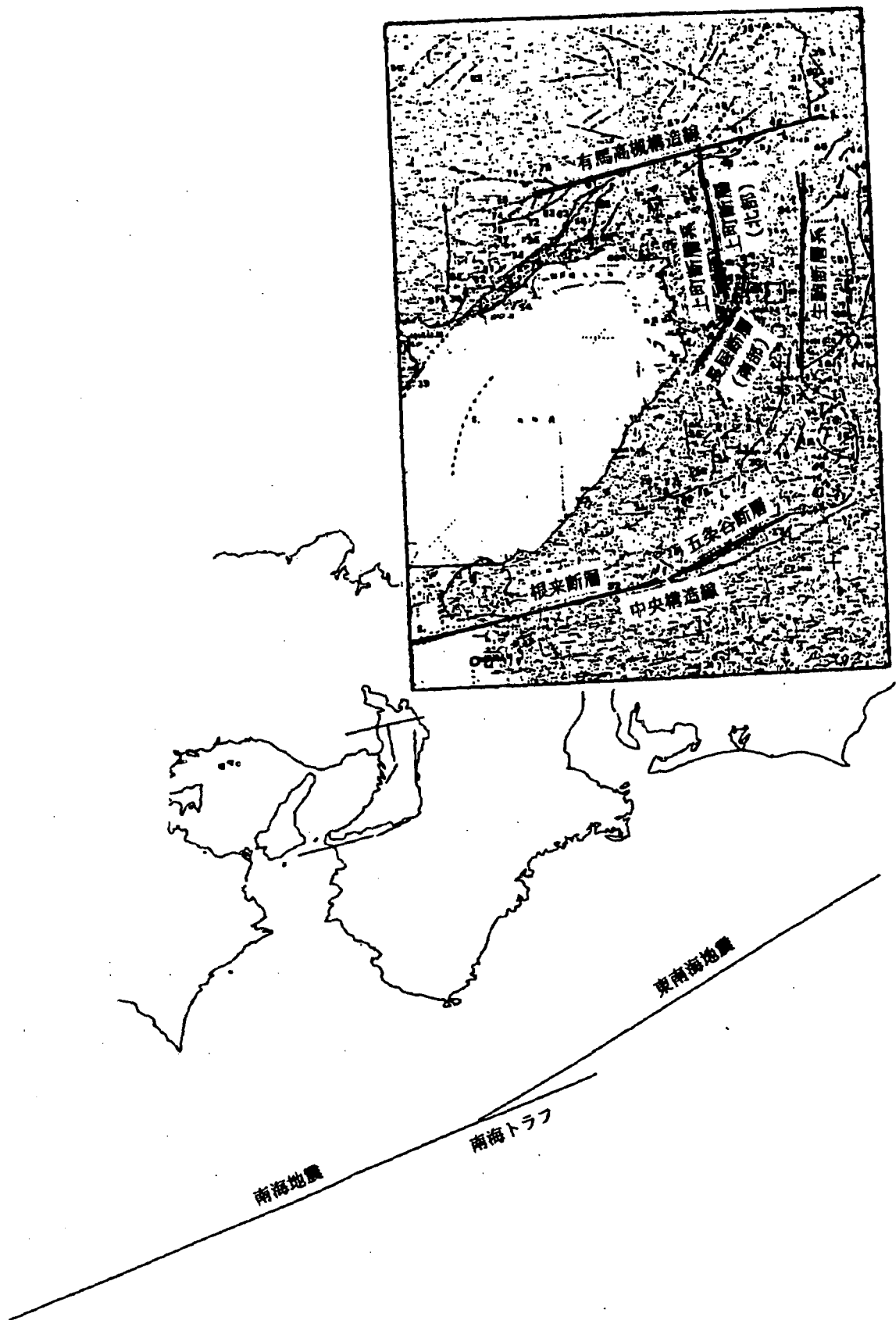


図 4.9.8-1 想定活断層の位置

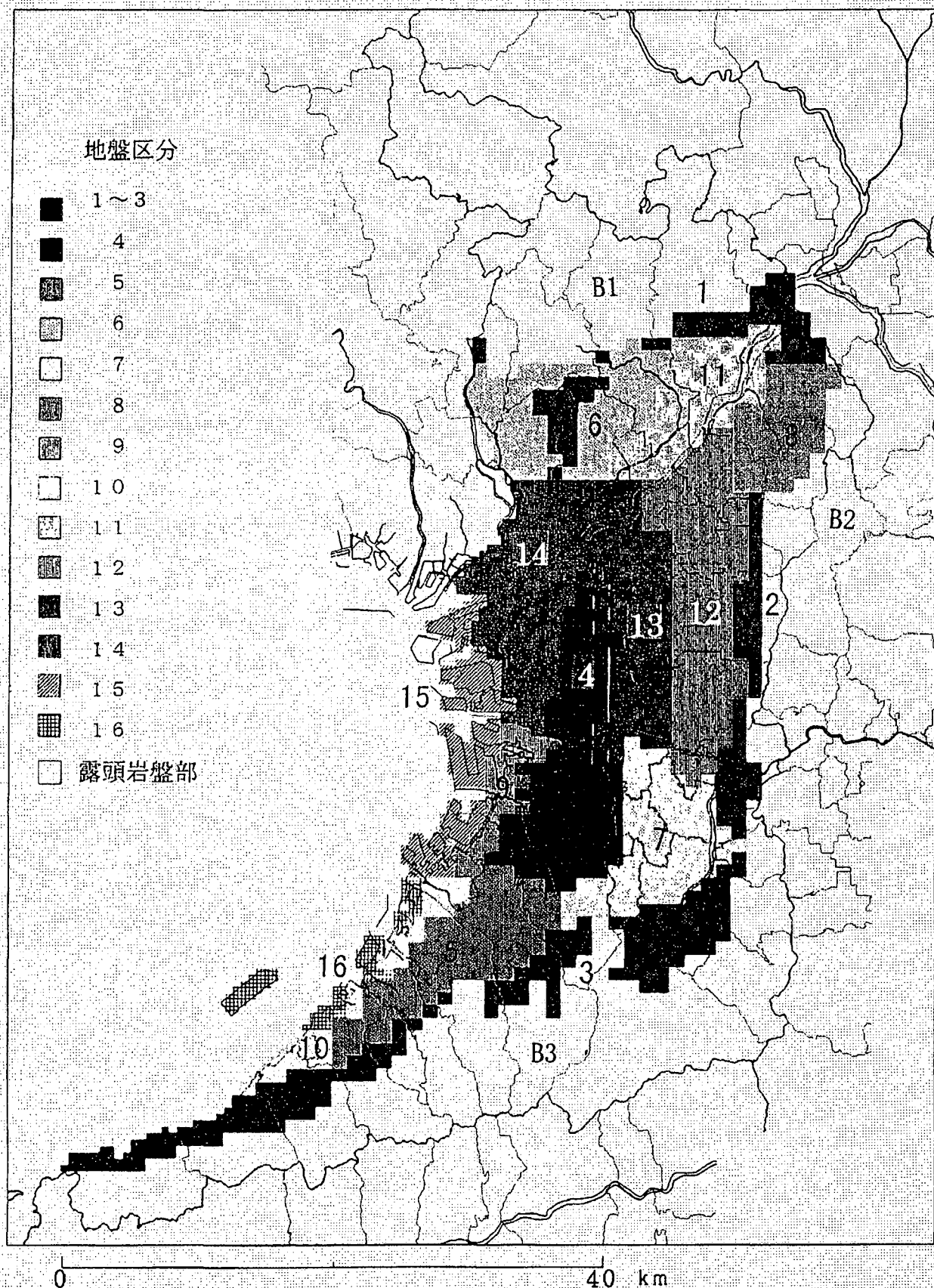


図 4.9.8-2 想定標準地震動のゾーン区分

表 4.9.8-1 大阪府想定標準地震動(直下型地震)

基本区分	ゾーン番号	地盤区分 (注 1)	府域	支配的断層	標準地盤 (注 2)	最大加速度 (gal) (注 4)	最大速度 (kine) (注 4)	計測震度 (注 4)	備考
山地境界型	1	II a	北部	有馬高槻構造線	本山	545	60	5.8(6 弱)	
	2	II b	東部	生駒断層	本山	701	66	5.9(6 弱)	
	3	II c	南部	中央構造線	本山	613	64	5.9(6 弱)	
洪積型	4	III-1	中南部	上町断層	阿倍野	770	118	6.2(6 強)	
	5	III-0,3	南部	中央構造線	豊中	454	69	6.1(6 強)	
	6	III-6,2	北西部	有馬高槻構造線	阿倍野	699	116	6.3(6 強)	
	7	III-4	南東部	上町断層	阿倍野	521	65	5.9(6 弱)	
	8	III-5	北東部	有馬高槻構造線	阿倍野	504	74	6.1(6 強)	
沖積型	9	IV-2	南西部	上町断層	堺	403	64	5.7(6 弱)	
	10	IV-0	南部	中央構造線	尼崎	406	71	5.8(6 弱)	
	11	IV-9,3,5,6,7	中東部	有馬高槻構造線	森河内	487	66	6.0(6 弱)	
	12	IV-9,3,5,6,7	中東部	生駒断層	森河内	613	143	6.2(6 強)	(注 3)
	13	IV-9,3,5,6,7	中東部	上町断層	尼崎	727	67	6.2(6 強)	(注 3)
	14	IV	中西部	上町断層	尼崎	664	93	6.4(6 強)	(注 3)
埋立型	15	V	湾岸部北部	上町断層	福島	433	67	5.9(6 弱)	
	16	V	湾岸部南部	中央構造線	福島	359	74	5.8(6 弱)	
露頭岩盤型	B1	I a	北部	有馬高槻構造線	神戸大	324	45	5.5(6 弱)	
	B2	I b	東部	生駒断層	神戸大	338	63	5.6(6 弱)	
	B3	I c	南部	中央構造線	神戸大	334	70	5.7(6 弱)	

- (注 1) 常時微動より求められた地盤区分[詳しくは大阪府土木部¹⁾参照]
(注 2) 地盤増幅特性を求めた地震観測地点名[詳しくは大阪府土木部¹⁾参照]
(注 3) ゾーン 13, 14 については大阪市の最大速度を用いた。
(注 4) これは線形応答解析の結果である。