

第6話 目標免震(耐震)性能を設定しよう

6-1.免震建物の耐震性能とは？

次に目標耐震性能を設定します。免震建物の耐震性能であっても基準法の考え方を最低基準として設定できますが、免震建物としての特長を生かした設定を行います。一般に設定内容は、建物所有者の希望を反映して構造設計者が決定します。設定内容のレベルは、建設経費とも大きく関係するため、諸決定要因を含めて建物所有者に説明することが重要です。表 6-1.1 にその例を示します。

特に、中地震レベルでは、免震効果と揺れの関係があいまいで、建物に損傷が無くても“よく揺れる”ことを免震効果が発揮されていないと誤解される場合があります。大地震時の耐震性能だけでなく、中地震時の性能、免震性能が発揮される震度を確認し説明しておくことも欠かせません。

表 6-1.1 目標耐震性能(耐震クライテリア)例

構造部区分		レベル 1 (稀に発生する地震動)	レベル 2 (極めて稀に発生する地震動)
上部構造	応力	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内
	層間変形角	1/500 以内	1/200 以内
免震層	層間変位	200mm 以内	500mm 以内
	せん断歪み	100%以内	250%以内
	面圧(圧縮側)	短期許容面圧以内 *1	圧縮限界強度以下
	(引張側)	引張り力を生じない	有害な引張り力を生じない (面圧：-1.0N/mm ² 以上)
下部構造	躯体	応力	短期許容応力度以内
		支持力	短期許容支持力以内
	杭	応力	短期許容応力度以内

ここに、*1:短期許容面圧は、平 12 建告示 2009 号に準じ、 $(0.9 \times \text{圧縮限界強度}) \times 2/3$ とする。

6-2. 設計地震動を想定する

設計ルートによって、設計地震動の考え方が異なります。外力としての地震動には違いないのですが、時刻歴解析の場合は、電算プログラムを用いて地震動の入力加速度をデジタルデータで扱って振動系モデルの運動方程式に基づいて計算を行います。一方、告示2009号第六の計算方法では、基盤レベルの応答加速度をスペクトルで定義し、基盤レベル上部の表層地盤による増幅率 G_s を算定し、増幅させた応答加速度スペクトルと免震層の復元力曲線の釣合いから応答変位、応答層せん断力を算定します。

① 時刻歴解析の場合

一般に地震波の種類として、観測波、告示波、サイト波があり、計6波以上を選択します。

□観測波は、既存の観測記録地震波で、日本建築センターや地震波観測機関が保有しています。

- ・ EL Centro NS Imperial Valley 地震(1940.5.18, M7.1)NS 成分
- ・ Taft EW Kern Country 地震(1952.7.21 M7.7) EW 成分
- ・ Hachinohe NS 十勝沖地震(1968.5.16 M7.8)NS 成分
- ・ JM-Kobe NS 兵庫県南部地震(1995.1.17 M7.3)NS 成分
- ・ その他、計画地近辺で観測された地震波

図 6-2.1 に加速度観測記録の時刻歴波形を示す。ただし、極めて稀れ地震動レベルに基準化しています。

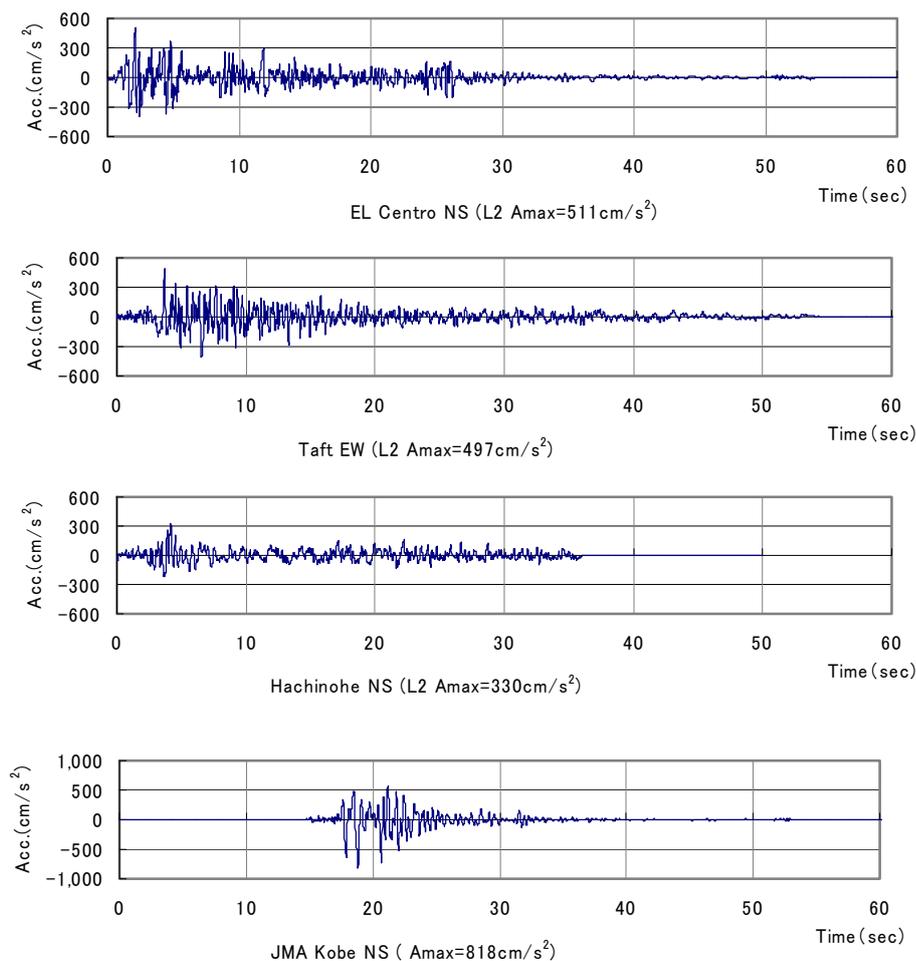
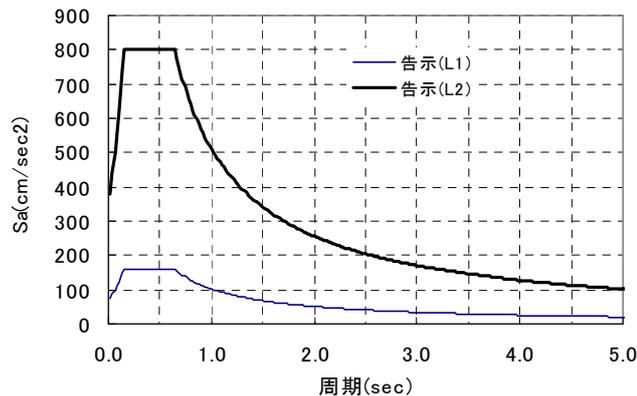


図 6-2.1 加速度観測記録の時刻歴波形

□告示波は、平 12 建告 1461 第四の規定による解放工学的基盤における加速度応答スペクトルに表層地盤の増幅を考慮したものに適合する地震波です。この解放工学的基盤の地震波の作成には位相データが必要です。一般に以下の観測地震波の位相角等が使用されます。

- ・Hachinohe NS 十勝沖地震(1968.5.16 M7.8)NS 成分
- ・JM-Kobe NS 兵庫県南部地震(1995.1.17 M7.3)NS 成分
- ・ランダム位相 (3種類作成し加速度の大きさから中央値となるものを採用します)

図 6-2.2 に平 12 建告 1461 第四の解放工学的基盤における加速度応答スペクトルを示します。



周期(秒)	加速度応答スペクトル(m/s ²)	
	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
T < 0.16	(0.64+6T)Z	(3.2+30T)Z
0.16 ≤ T < 0.64	1.6Z	8.0Z
0.64 ≤ T	(1.024/T)Z	(5.12/T)Z

図 6-2.2 平 12 建告 1461 第四の解放工学的基盤における加速度応答スペクトル

□サイト波は、将来発生する確率の高い地震源(地震基盤)の破壊を想定し、いくつかの高度な理論を用いて解放工学的基盤における加速度応答スペクトルをもとめ、告示波と同様に表層地盤での入力加速度をシミュレーションします。断層や海洋プレートの情報は、2-3 節「地盤調査と想定地震の調査」で紹介しているホームページなどをまず確認します。図 6-2.3 には断層破壊による場合の地震の発生・伝播の模式図を示しています。

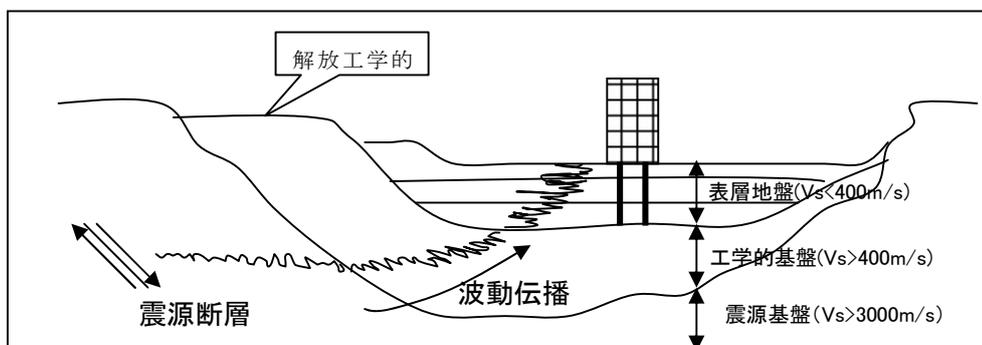


図 6-2.3 地震波動伝播の模式図

□告示波は、図 6-2.2 の解放工学的基盤における加速度応答スペクトルと適切な実地震動の位相波やランダム位相波を逆フーリエ変換(周期成分を時刻歴データに変換する操作)し、入力波を作成します。図 6-2.4 に東京都内港区の地層例を示します。この地層のデータから表層地盤モデル(M,K,C 要素)を作成し、地震応答解析を行い建物基礎レベルの応答加速度をモニターします。この加速度波が基礎固定建物モデルの入力地震波となります。この入力地震波の応答スペクトル(h=0.05,(5%))を求め図 6-2.5 に示します。

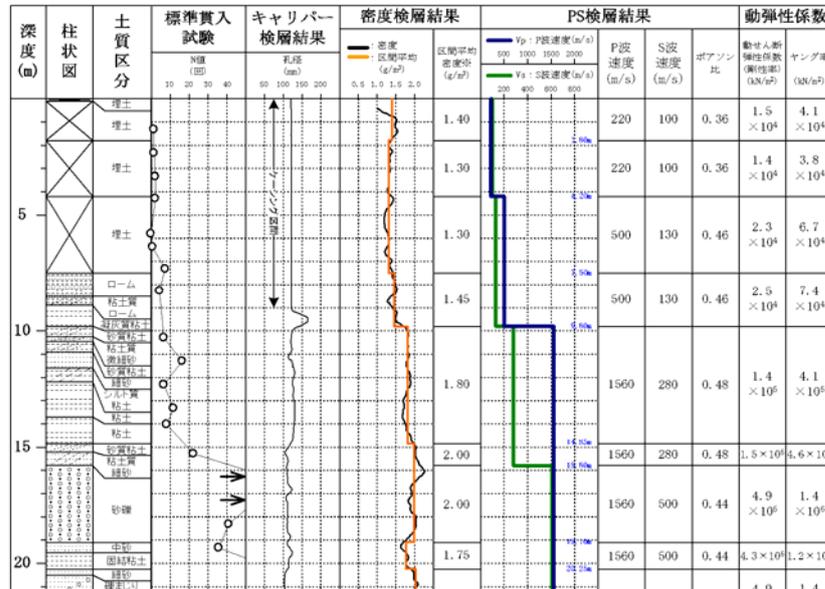


図 6-2.4 東京都内港区の例 (第2種地盤、工学的基盤GL-20m以深)

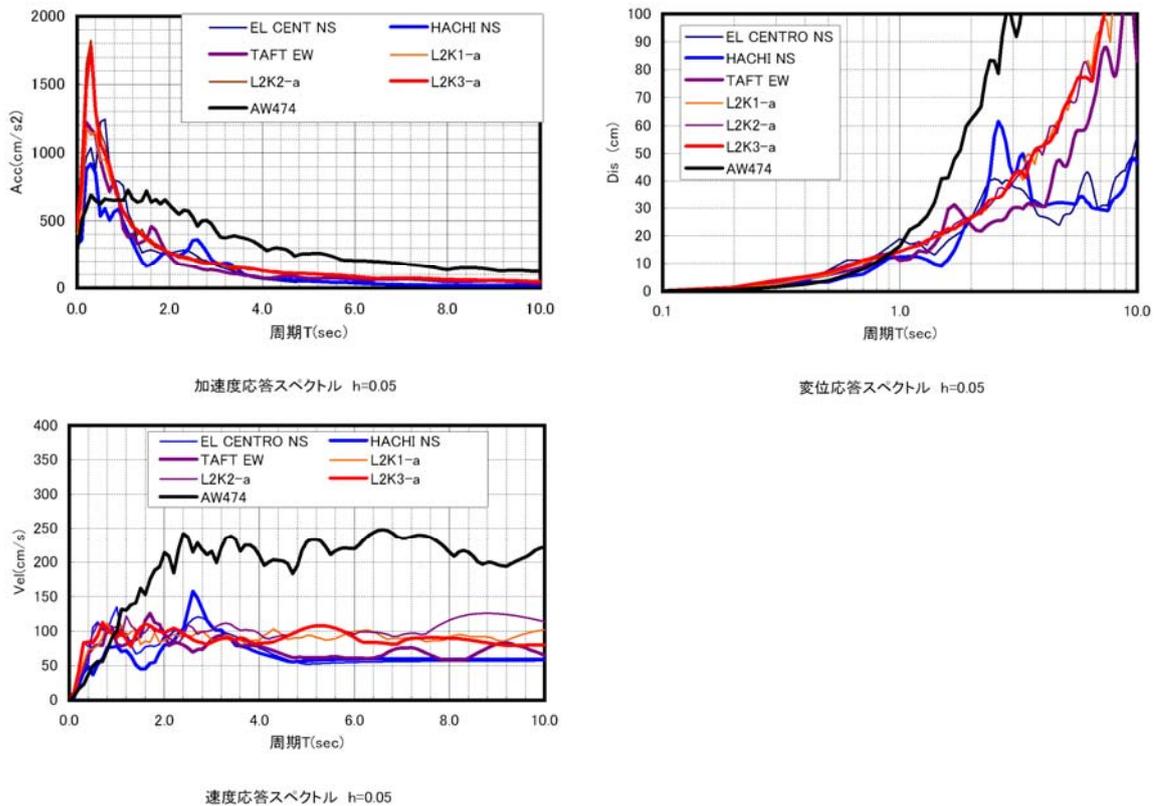
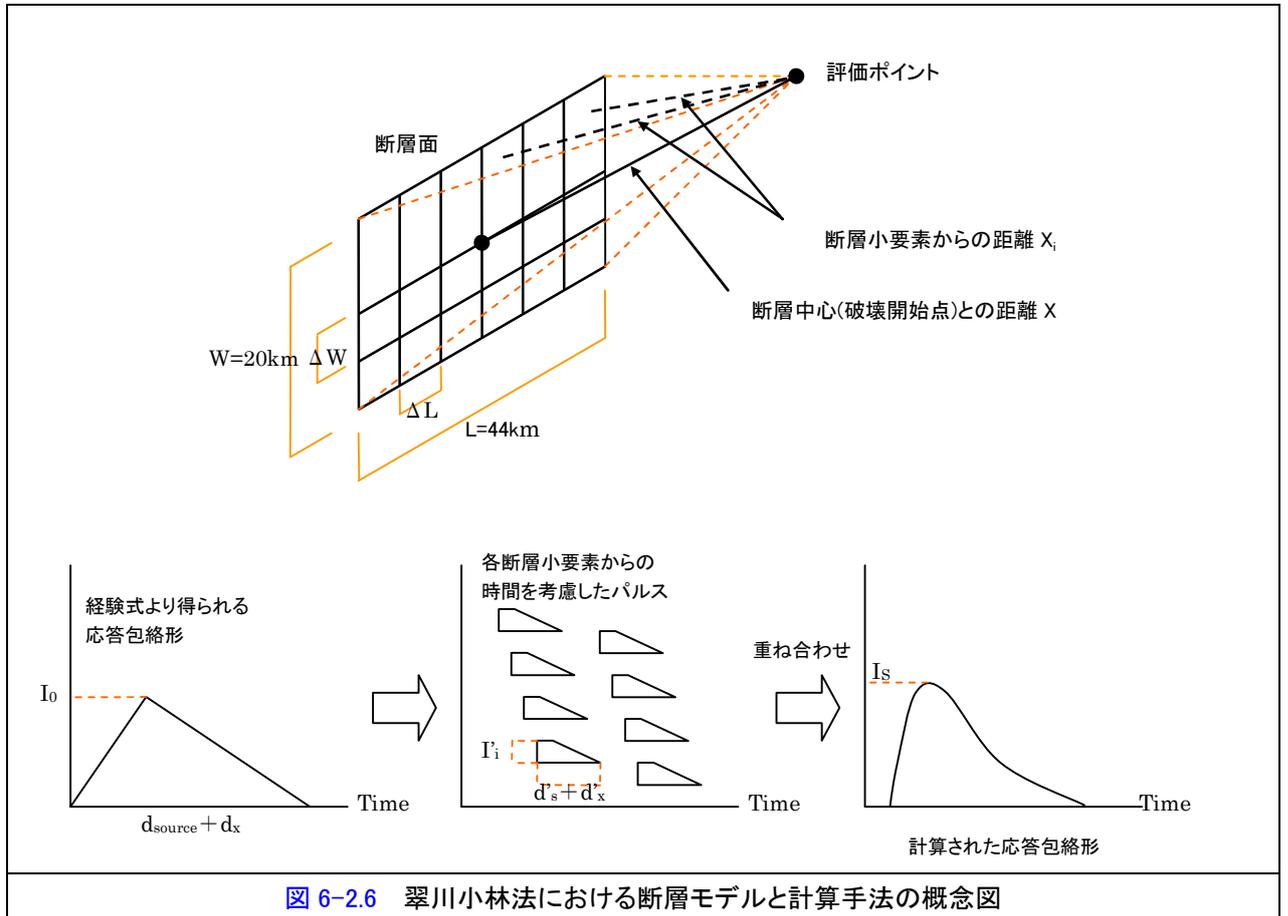


図 6-2.5 入力地震波(極まれ地震波)例の応答スペクトル(h=0.05,(5%))例

ここでは地震基盤の破壊による地震動の応答スペクトルを推定する理論として、翠川・小林の方法を用いた作成方法フローを図 6-2.7 に示します。翠川・小林の方法は地震基盤の地震スペクトルが求まるため、地震基盤での地震動をそのスペクトルに適合するように作成します。それを地震基盤への入射波とした応答解析を行い、解放工学的基盤での地震動を計算します。ただしこの場合の地盤モデル(物性)は線形とします。この概要を図 6-2.6 に示します。



参考文献) 翠川三郎ほか: 地震断層を考慮した地震動スペクトル, 日本建築学会論文報告集第 282 号

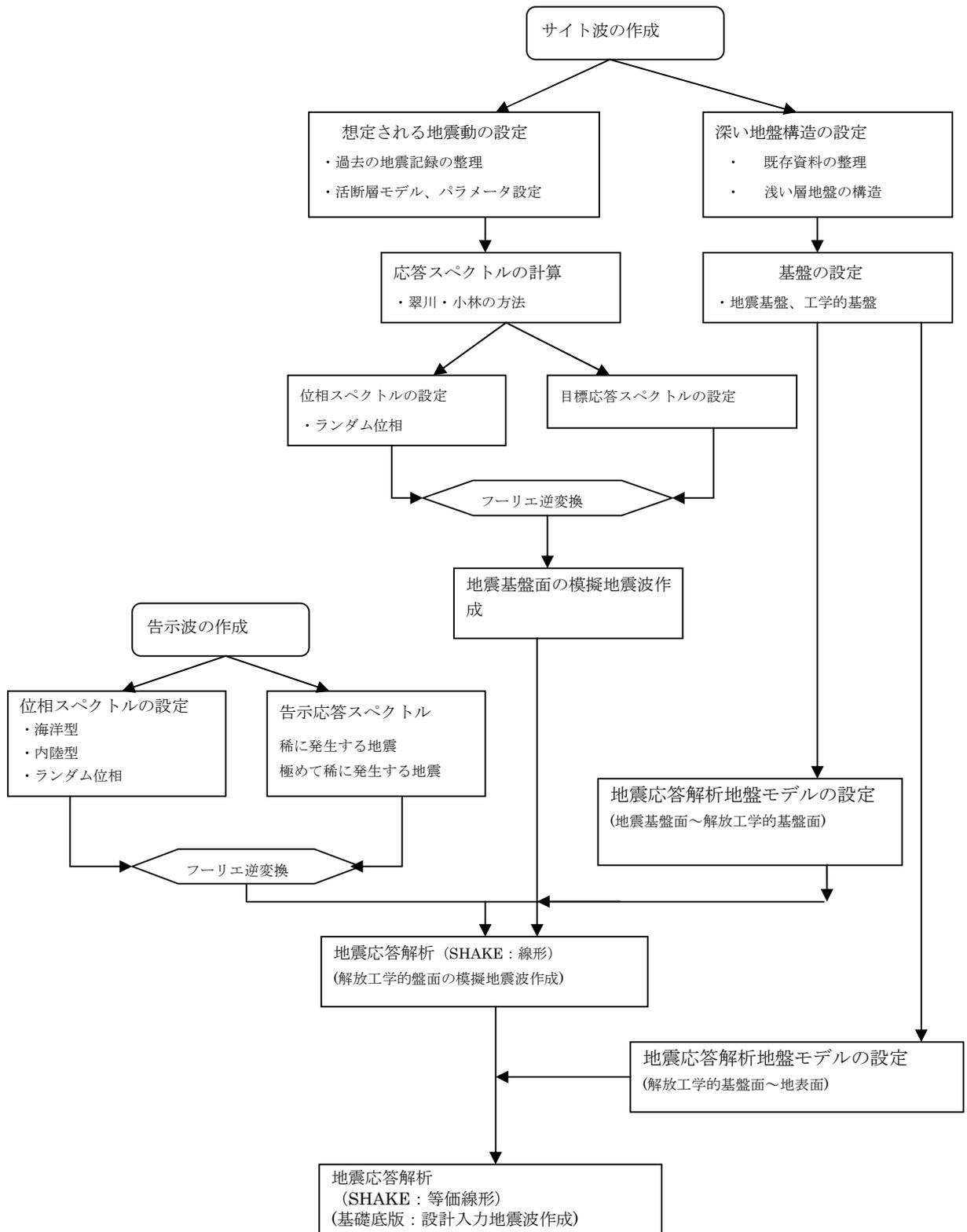


図 6-2.7 サイト波・告示波作成フロー

表 6-2.1A, 表 6-2.1B にはある免震建物の設計入力用地震動として選択したの諸元を示します。

表 6-2.1A 入力用地震動の諸元(例 1: 計画地近隣の断層を考慮)

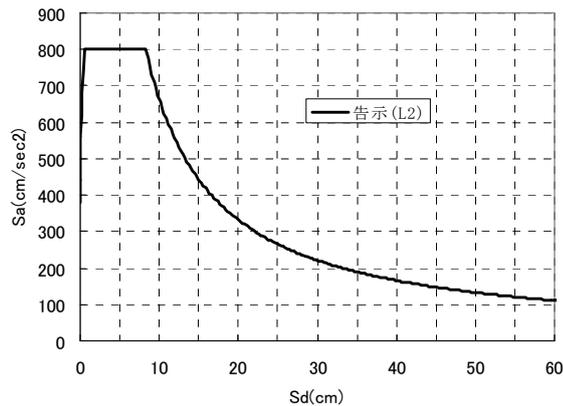
地震動	レベル	略称 *1	継続時間(秒)	入力最大加速度 (cm/s ²)
EL CENTRO 1940 NS*2	レベル 1	L1-ELCEN	50	255.0 (25)
	レベル 2	L2-ELCEN	50	510.8 (50)
TAFT 1952 EW*3	レベル 1	L1-TAFT	50	248.0 (25)
	レベル 2	L2-TAFT	50	496.8 (50)
HACHINOHE 1968 NS*4	レベル 1	L1-HACHI	35	165.0 (25)
	レベル 2	L2-HACHI	35	330.0 (50)
告示波(乱数位相) *5	レベル 1	L1K-RAN1	120	93.8
	レベル 2	L2K-RAN1	120	191.1
告示波(長野位相) *6	レベル 1	L1K-NAGA	120	119.2
	レベル 2	L2K-NAGA	120	188.4
告示波(八戸位相) *7	レベル 1	L1K-HACHI	120	93.5
	レベル 2	L2K-HACHI	120	194.5
サイト波(糸魚川・静岡断層)*8	レベル 2	JS-S3-EW	120	254.3
サイト波(信濃川断層) *9	レベル 2	SINANO-F1	120	228.5

表 6-2.1B 入力用地震動の諸元(例 2: 計算モデルの例)

種類	地震波名	記録加速度 (記録速度)	稀に発生する地震動 (レベル1:加速度)	極稀に発生する地震動 (レベル2:加速度)
観測波	EL CENTRO NS (1940)	342 (33.5)	255 (25.0)	511 (50.0)
観測波	TAFT EW (1952)	176 (17.7)	248 (25.0)	497 (50.0)
観測波	八戸 NS(1968)	225 (34.1)	165 (25.0)	330 (50.0)
告示波	L2K-HACH(位相:八戸)	---	95 (9.6)	413 (48.3)
告示波	L2K-JMA (位相:神戸)	---	100 (12.8)	407 (64.1)
告示波	L2K-RAN (位相:乱数)	---	96 (9.7)	437 (50.4)

② 告示2009号第六の計算方法の場合

告示による地震動の設定は、平 12 建告 1461 第四の規定による解放工学的基盤における加速度応答スペクトルを用います。建物に入力する地震動の加速度応答スペクトルは、表層地盤の地層の $G-\gamma$ 関係を用いて計算した増幅率 G_s を解放工学的基盤における加速度応答スペクトルに掛けたものにします。告示による応答計算は、時刻歴解析のようなデジタルデータの地震波を作成するのではなく、入力地震動の加速度応答スペクトルに建物の全質量 M と免震層の減衰による低減率 F_h をさらにかけて免震層に作用するせん断力 Q と免震層の復元力曲線との釣り合いから免震層の応答変位を求めます。即ち、[図 6-2.8](#) に加速度応答スペクトル S_a と変位応答スペクトル S_d の関係図示します。この関係を用いて免震層の復元力曲線 ($Q-d$) と免震層のせん断力応答スペクトルが1つのグラフで表現されます。

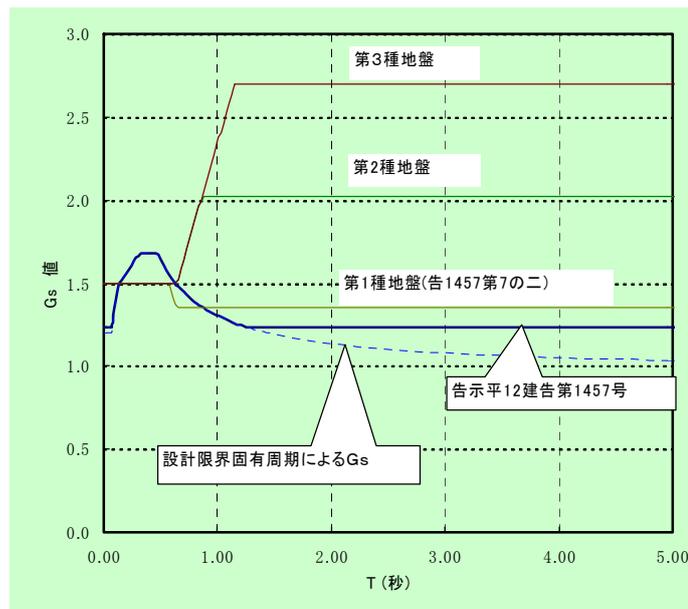


告示 (L2) 解放工学的基盤における S_a-S_d 関係

[図 6-2.8](#) 加速度応答スペクトル S_a と変位応答スペクトル S_d の関係図

[計算モデル]

[図 6-2.9](#) に表層地盤の地層の $G-\gamma$ 関係を用いて計算した増幅率 G_s を示します。一般に告示 1457 号の値より小さくなります。また、[図 6-2.10](#) に解放工学的基盤における加速度応答スペクトルと表層地盤の地層の $G-\gamma$ 関係を用いて計算した増幅率 G_s を掛けた入力地震動の加速度応答スペクトルを示します。



[図 6-2.9](#) 表層地盤の地層の $G-\gamma$ 関係を用いて計算した増幅率 G_s 曲線

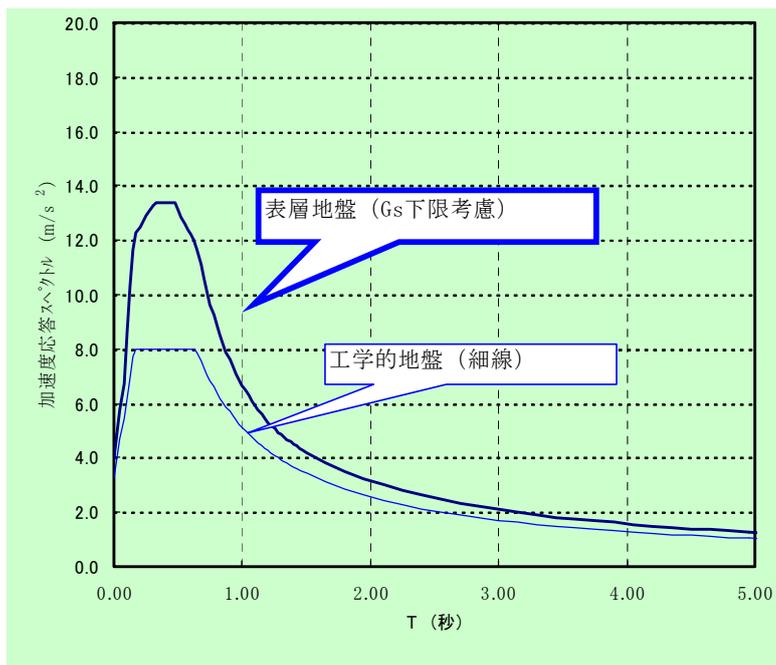


図 6-2.10 解放工学的基盤における加速度応答スペクトルと入力地震動の加速度応答スペクトル

[告示計算モデル]

① 免震層に作用する地震力 eQ の算定

免震建物の設計限界固有周期 $T_s = 4.15$ (sec) <--P. 42 より

$0.64 \leq T_s$ $eQ = (5.12 \cdot M \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s) / T_s$

$M = 29.2 \times 100$ (kN/(m/s²)) 注)単位 cm→m

$Z = 1.0$ とする (S55 告 1793 計画地 $Z=1.0$)

$G_s = 1.23$ 最小制限値 (計算値 1.047)

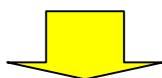
$eQ = (6.3 \cdot M \cdot F_h) / T_s = (① : 4433) \times F_h$ (kN)
 = ⑨ : $4433 \times 0.596 = 2642$

$F_h = 1.5 / (1+10(h_d + h_v))$, 本設計では $h_v = 0$ (本例は粘性系ダンパー無し)

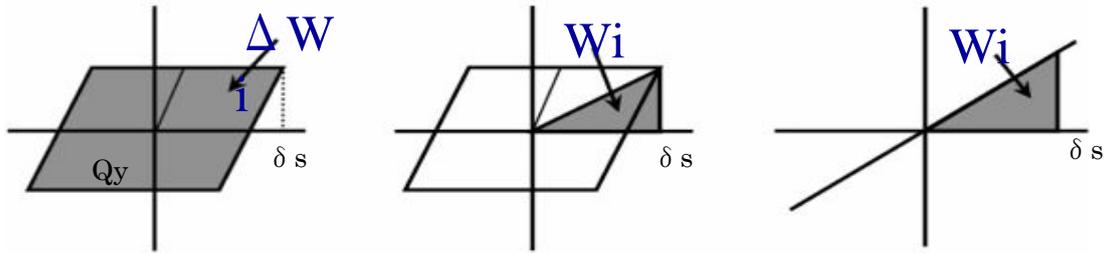
= $1.5 / (1+10 \times ⑦ : 0.152) = ⑧ : 1.5 / 2.52 = 0.596 > 0.4$ (最小制限値)

ここで、 h_d の値は、次ページで計算します。

参照: 告示 1461 解放工学的基盤の加速度応答スペクトル (h=5%)
 : $0.64 \leq T_s$ $eQ/M = (5.12 \cdot Z) / T_s$



● 免震部材の吸収エネルギーとは



(概算式)

□積層ゴム支承(RB80S)の場合

- ・歪エネルギー : $W_i = 1/2 \times Q_m \times \delta_s$, $Q_m = Q_y + K_2 \times \delta_s$
 $Q_m = Q_y + K_2 \times \delta_s = 0 + 0.99 \times 440 = 435$ (kN)
 $W_i = 1/2 \times Q_m \times \delta_s = 0.5 \times 435 \times 440 = 95700$ (kN・mm)
- ・履歴エネルギー: $\Delta W = 4 \times Q_y \times (\delta_s - \delta_y) = 0$, $Q_y = 0$

□弾性すべり支承(SC60)の場合

- ・歪エネルギー : $Q_m = Q_y + K_2 \times \delta_s = 41.2 + 0.0 \times 440 = 41.2$ (kN)
 $W_i = 1/2 \times Q_m \times \delta_s = 0.5 \times 41.2 \times 440 = 9064$ (kN・mm)
- ・履歴エネルギー: $\Delta W = 4 \times Q_y \times (\delta_s - \delta_y) = 4 \times 41.2 \times (440 - 41.2 / 11.0) = 71902$ (kN・mm)

表 6-2.2 弾塑性系部材の等価粘性減衰定数hdの概算

部材記号	基数 n	設計限界変位 δ_s (mm)	1次剛性 K1	2次剛性 K2	切片荷重	最大荷重	履歴エネルギー* $n \times \Delta W$	歪エネルギー $n \times W$
			(kN/mm)	(kN/mm)	Qy(kN)	Qm(kN)	(kN・mm)	(kN・mm)
部材 1: RB80S	3	440	0.99	0.99	0	435	0	287100
部材 2: RB80	1	440	1.09	1.09	0	480	0	① 105600
部材 3: SC60	2	440	11	0	41.2	41.2	143804	18128
部材 4: SC70	2	440	15	0	54.0	② 54.0	③ 188525	④ 23760
部材 5: SD	4	440	7.6	0.128	184.0	240	1205568	211200
合計	12	---	---	---	---	---	⑤ 1537800	⑥ 645790

概算式 $\Delta W = 4 \times Q_y \times (\delta_s - \delta_y)$, $W = 1/2 \times Q_m \times \delta_s$, $Q_m = Q_y + K_2 \times \delta_s$
 $\delta_y = Q_m / K_1$: SC60 \Rightarrow 3.7(mm), SC70 \Rightarrow 3.6(mm), SD \Rightarrow 30.5 (mm)
 SC70: =188525
 =2x4x54.0(440-3.6)

収束概算 $\delta_s = 0.9 \times m \delta_d = 440(\text{mm})$ として収束計算を試行する(0.97 \rightarrow 0.94 \rightarrow 0.90 \rightarrow)

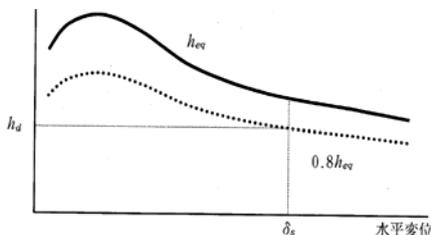
(算定) $h_d = 0.8 \times \sum (n \times \Delta W) / (4 \pi \times \sum (n \times W))$

$$= 0.0637 \sum (n \times \Delta W) / \sum (n \times W)$$

$$= 0.0637 \times (⑤ 1537800) / (⑥ 645790)$$

$$= ⑦ 0.152$$

SD: =184+0.128x440
 =238-->240 mm
 $n \times \Delta W = 4 \times 4 \times 184(440 - 30.5)$
 =1205568



6-3. 上部構造の目標耐震性能レベルを設定する

6-1 節の「免震建物の耐震性能とは？」で概要を述べましたが、免震構造とすることで、耐震構造で設計した上部構造体であれば極稀レベルの地震動(レベル 2)に対し損傷しない構造体とすることが十分可能です。

一方、基準法に準ずれば、免震構造であっても極稀レベルの地震動に対して保有耐力内の設計も通用します。一般にはこのような例はありませんが、極度に形状デザインを優先した場合にありえると考えられます。

このことは、免震構造は、従来の耐震構造に比べデザイン性を優先できる領域が広くなるともいえます。

多くの設計例を見ると、上部主構造部材の応力と層間変形角を用いて目標耐震性能(耐震クライテリア)を表 6-3.1A、表 6-3.1B のように設定しています。なお、「弾性限耐力」とは、どこかの主構造部材にヒンジが発生した時点の建物耐力としています。また、告示では層間変形角が 1/300 以下の条件が付きます。

なお、時刻歴解析では、「余裕度レベル」として、免震建物の限界性能がどの状態あり、どのような条件で決まるかを確認しておくことが重要であり、審査で要求されます。設計入力地震動の加速度を漸増させて限界性能が決まる要因を探ります。

- ・レベル 2 の目標耐震性を限界とすれば、いくつかの条件のうち、どれかに達した時点の加速度倍率を余裕率とします。

- ・余裕度レベルとして、倒壊しない限界状態を設定した場合、その条件に達した時点の余裕率としています。

表 6-3.1A RC 造上部構造の目標耐震性能(時刻歴解析の場合)の例 1

構造部区分		レベル 1(稀地震動)	レベル 2 (極稀地震動)
上部構造	応力	短期許容応力度以内	短期許容応力度又は(弾性限耐力)以内
	層間変形角	1/500 以内	1/150 以内

表 6-3.1B 上部構造の目標耐震性能(告示 2009 号第六による場合)の例 2

構造部区分		極稀地震動
上部構造	応力	短期許容応力度以内
	層間変形角	1/500 または(1/300)以内

注:高さ 13m、軒高さ 9m 以下の小規模建物では層間変形角は 1/200 以内とできます。

6-4. 免震層・免震部材の目標耐震性能レベルを設定する

4-2 節、「免震部材の基本性能・限界性能を確認する」で概要を述べましたが、免震部材の限界性能を見越して安全率をかけた設定とします。この安全率は設計者が決めることが基本ですが、告示2009号による設計では、免震部材の種類によって一定の安全率が規定されています。具体的には、以下のように考えます。

□長期荷重に関しては、特に支承部材(積層ゴム、すべり系支承、転がり系支承)では、支持荷重を認定性能の「基準面圧」、「基準支持荷重」以下にするようにします。告示2009号では、圧縮限界強度の9割以下に鉛直基準強度を設定し、長期許容面圧(荷重)を鉛直基準強度の3分の1としており、これ以下にします。かつ、水平変形は伴わないことが条件です。

$$\text{長期面圧(荷重)} \leq \text{「基準面圧」、または「基準支持荷重」}$$

告示2009号による場合

$$\text{長期面圧(荷重)} \leq \text{「鉛直基準強度」}/3 \quad (=F_c/3)$$

一方、ダンパー部材は、支持荷重がほとんどなく、荷重条件は無く変形の条件のみとなります。

□地震時に関しては、極稀レベルの地震動(レベル 2)に対し破損しないようにします。即ち、各部材の変形限界曲線を超えないようにします。ただこれでは、安全率がないため、製造メーカーが自主的に規定して「安定変形」、「性能保証変形」の曲線を用いる場合があります。

告示2009号では、短期時の面圧が長期の2倍と規定されているためこれ以下の面圧となります。かつ変形は、「設計限界変形 $m\delta d$ 」以下にすることになっており、これら2つの条件と鉛直基準強度で囲まれた範囲が設計可能領域となります。この関係を時刻歴解析に適用することも1つの設定方法です。

一般に、免震部材の水平変形(歪み)、面圧を用いて目標耐震性能を表 6-4.1A、表 6-4.1B のように設定します。なお、面圧がマイナスになる引き抜きに関しては、面圧で $-1.0\text{N}/\text{mm}^2$ までとなっています。ただし、これ以上の引き抜き性能を持つ特殊な積層ゴム、転がり支承もあります。

表 6-4.1A 免震層の目標耐震性能(時刻歴解析の場合)例1

構造部区分		レベル 1(稀地震動)	レベル 2(極稀地震動)
免震層	層間変形	200mm 以内	500mm 以内
	せん断歪み	100%以内	250%以内
	面圧(圧縮側)	短期許容面圧以内 *2	圧縮限界強度
	(引張側)	引張り力を生じない	有害な引張り力を生じない(面圧: $-1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上)

表 6-4.1B 免震層の目標耐震性能(告示 2009 号第六による場合)例2

構造部区分		極稀地震動
免震層	層間変形	設計限界変形 $m\delta d$ (mm) 以内
	面圧(圧縮側)	短期許容面圧以内 *2
	(引張側)	引張り力を生じない (面圧: $0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上)

ここに、*1:短期許容面圧は、平 12 建告示 2009 号に準じ、 $(0.9 \times \text{圧縮限界強度}) \times 2/3$ 以下とする。

6-5. 下部構造の目標耐震性能レベルを設定する

免震部材より下の耐圧版、地中梁、杭などは、上部構造から伝達する鉛直荷重と水平荷重、変形による付加荷重、および基礎部に作用する荷重に対して安全な設計を行います。耐震基準に準ずれば、上部構造と同様に保有耐力まで設計範囲とできますが、免震構造の最も重要部位である免震層が傾いたり、反力を負担できない状態になると上部構造に期待した性能を確保できません。告示 2009 号によれば、上記の荷重を第六の荷重計算を行い、それに対して許容応力度設計をすることになっています。このような主旨で時刻歴応答においても同じ耐震性能が目標とされている場合が多いようです。

なお、下部構造では、従来の耐震構造と同様に支持層のレベル、地盤種別、地層分布、液状化の有無やその層の位置、基礎工法を考慮して設定します。その例として表 6-5.1A、表 6-5.1B のように設定しています。

表 6-5.1A 目標耐震性能(時刻歴解析の場合)例1

構造部区分			レベル 1 (稀地震動)	レベル 2 (極稀地震動)
下部構造	躯体	応力	短期許容応力度以内	短期許容応力度又は(弾性限耐力)以内
		支持力	短期許容支持力以内	短期許容支持力以内
	杭	応力	短期許容応力度以内	短期許容応力度以内

表 6-5.1A 目標耐震性能(告示 2009 号第六による場合)例2

構造部区分			極めて稀に発生する地震動
下部構造	躯体	応力	短期許容応力度以内
		支持力	短期許容支持力以内
	杭	応力	短期許容応力度以内