

10. 耐震計算法

構成

1. 震度法と修正震度法
2. 応答スペクトル法
3. 時刻歴モーダル応答解析法
4. 直接積分による時刻歴応答解析法
5. 非線形応答スペクトル解析法
6. 非線形時刻歴応答解析でのモデル化
7. 設計基準で規定される耐震計算法
8. 設計基準で規定される地震動

1. 震度法と修正震度法

震度法と修正震度法

■ 震度法

$$P_h = \alpha W$$

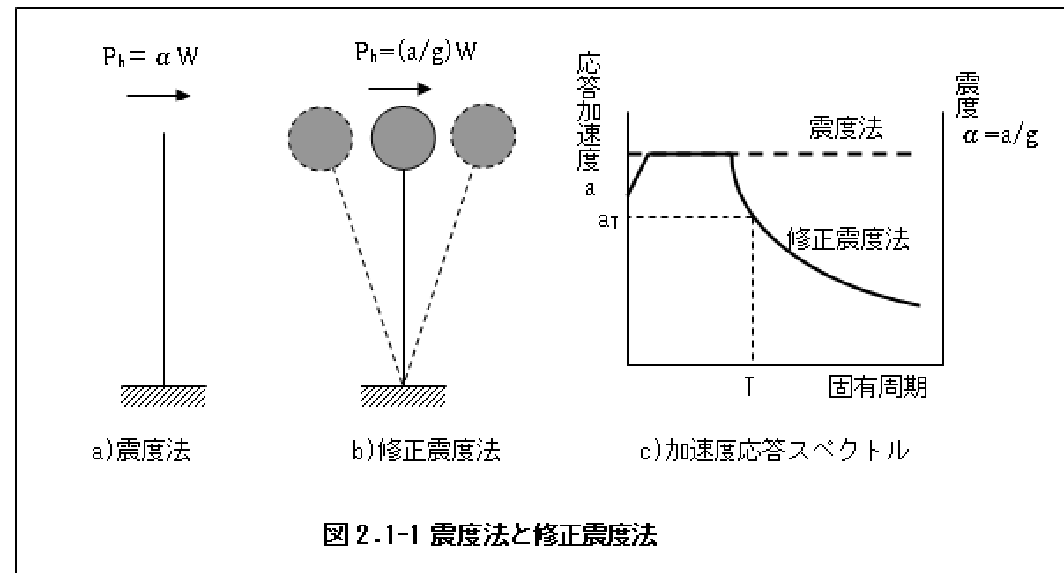
α : 過去の経験から定めた
水平震度

W : 構造物の重量

■ 修正震度法

$$P_h = a(W/g) = (a/g)W$$

a : 構造物の固有周期から
定まる最大応答加速度



2. 応答スペクトル法

応答スペクトル

■ 特定の地震波入力に対する応答変位

$$x(t) = \frac{1}{\omega} \int \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau$$

■ 応答変位の最大値：変位スペクトル

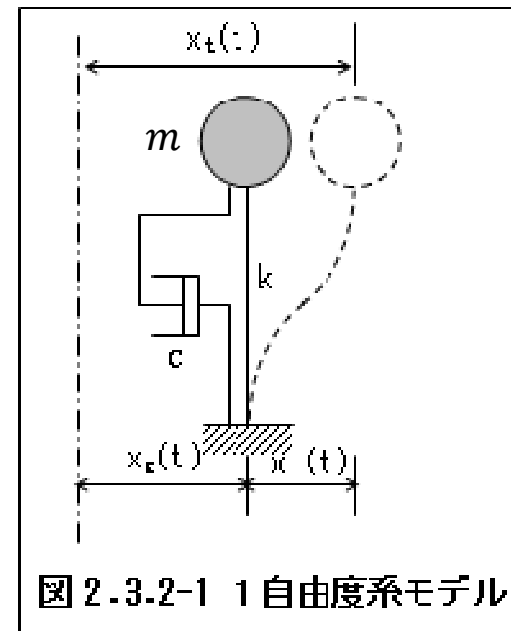
$$S_d = x_{max} = \frac{1}{\omega} S_v = \frac{T}{2\pi} S_v$$

ここに、 S_v は速度スペクトルで以下の式で表わされる。

$$S_v = \left| \int \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega(t-\tau) d\tau \right|_{max}$$

■ 応答加速度の最大値：加速度スペクトル

$$S_a = \omega S_v = \frac{2\pi}{T} S_v$$



$$c = 2h\omega m$$
$$\omega = \sqrt{k/m}$$

速度応答スペクトルの例と 応答スペクトルの傾向

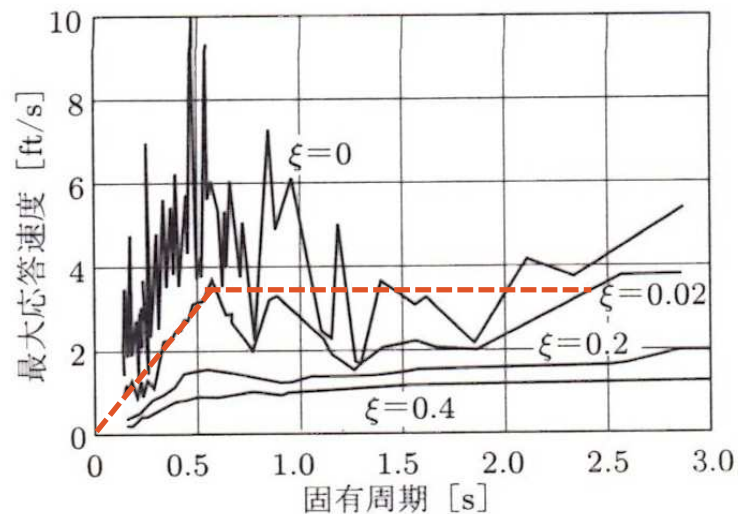


図 2.14 速度応答スペクトルの一例 (El Centro 地震, 1940 年)

R.W.Clough and J.Penzien : Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Company, 1975

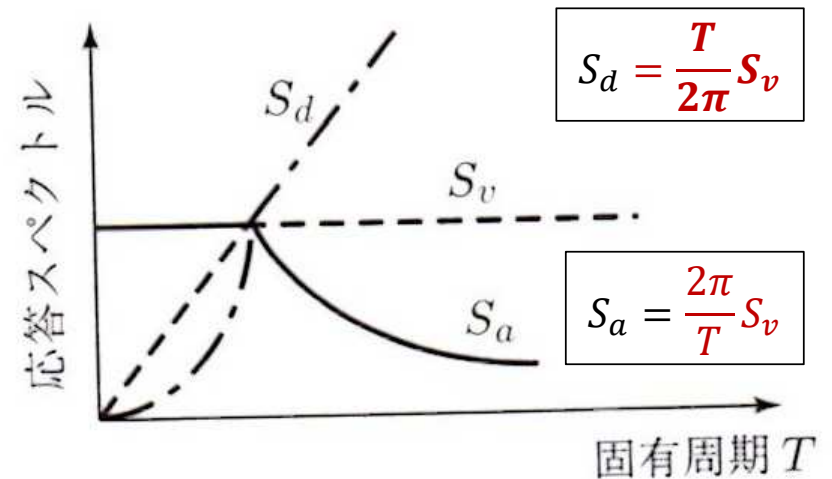


図 2.15 応答スペクトルの傾向

高次モードを考慮した応答スペクトル法

■ 多自由度系の振動モードと地震荷重

■ 固有周期 T_1 、 T_2 に対する最大応答加速度： S_{a1} 、 S_{a2}

■ 1 次モード

$$\text{荷重：} P(S_{a1}) = m_1 S_{a11} + m_2 S_{a12}$$

$$\text{断面力：} R(S_{a1})$$

■ 2 次モード

$$\text{荷重：} P(S_{a2}) = m_1 S_{a21} + m_2 S_{a22}$$

$$\text{断面力：} R(S_{a2})$$

■ 合成した断面力 R

$$R = \sqrt{\sum R(S_{ai})^2} \quad : \text{二乗和平方根法}$$

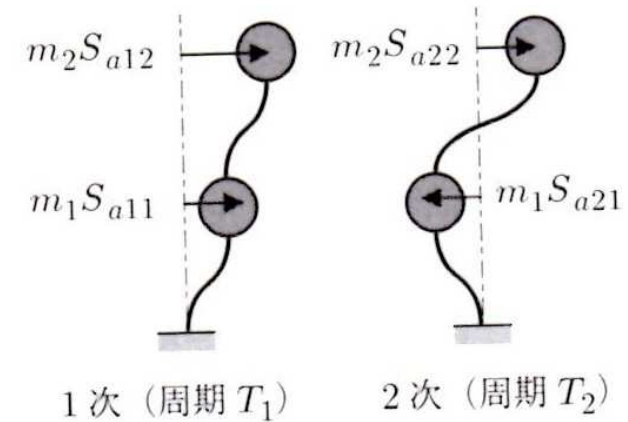


図 2.16 多自由度系の振動モードと作用力

3. 時刻歴モード 応答解析法

時刻歴応答解析法— 1) モーダル解析

- 多自由度系の応答解析
- N 元の連立運動方程式 $\Rightarrow$ N 個の独立したモードの運動方程式
- 各モードを重ね合わせ



線形構造物の動的応答を評価

モーダル解析—モード変位の重ね合わせ

■応答変位

$$\{x(t)\} = [\phi]\{Y_n(t)\} = \{\phi_1\}Y_1(t) + \{\phi_2\}Y_2(t) + \{\phi_3\}Y_3(t) + \dots$$

ここに、

$Y_n(t)$: 各モードに対する応答変位

■応答復元力

$$\{f_s(t)\} = [k]\{x(t)\} = [k][\phi]\{Y_n(t)\}$$

$$= [k]\{\phi_1\}Y_1(t) + [k]\{\phi_2\}Y_2(t) + [k]\{\phi_3\}Y_3(t) + \dots$$

4. 直接積分による 時刻歴応答解析法

時刻歴応答解析法—直接積分

- 連続的に変化する線形解析の繰返し⇒非線形応答を数值的に計算
- ステップバイステップの直接積分法
- 自由度が非常に大きくなる複雑系の解析
 - 振動モードや振動数を計算する必要がない
- 短時間の応答を評価すればよい衝撃的荷重に対する複雑構造物の応答
 - 高次の振動モードを刺激する場合

直接積分による時刻歴応答解析₁

■増分釣合い方程式

$$[m]\{\Delta\ddot{x}(t)\} + [c(t)]\{\Delta\dot{x}(t)\} + [k(t)]\{\Delta x(t)\} = \{\Delta p(t)\}$$

■線形加速度法

加速度に線形変化を仮定すると

$$\left. \begin{aligned} \{\Delta\dot{x}(t)\} &= \{\ddot{x}(t)\}\Delta t + \{\Delta\ddot{x}(t)\}\frac{\Delta t}{2} \\ \{\Delta x(t)\} &= \{\dot{x}(t)\}\Delta t + \{\ddot{x}(t)\}\frac{\Delta t^2}{2} + \{\Delta\ddot{x}(t)\}\frac{\Delta t^2}{6} \end{aligned} \right\}$$

上式を連立にして $\{\Delta\ddot{x}(t)\}$ と $\{\Delta\dot{x}\}$ に関する式を導く。

$$\{\Delta\ddot{x}(t)\} = \frac{6}{\Delta t^2}\{\Delta x(t)\} - \frac{6}{\Delta t}\{\dot{x}(t)\} - 3\{\ddot{x}(t)\}$$

$$\{\Delta\dot{x}\} = \frac{3}{\Delta t}\{\Delta x(t)\} - 3\{\dot{x}(t)\} - \frac{\Delta t}{2}\{\ddot{x}(t)\}$$

直接積分による時刻歴応答解析₂

- $\{\Delta\ddot{x}(t)\}$ と $\{\Delta\dot{x}(t)\}$ に関する式を増分釣合い方程式に代入する

$$[m]\{\Delta\ddot{x}(t)\} + [c(t)]\{\Delta\dot{x}(t)\} + [k(t)]\{\Delta x(t)\} = \{\Delta p(t)\}$$

- 増分釣合い方程式

$$[K(t)]\{\Delta x(t)\} = \{\Delta P(t)\}$$

ここに、

$$[K(t)] = [k(t)] + \frac{6}{\Delta t^2} [m] + \frac{3}{\Delta t} [c(t)]$$

$$\{\Delta P(t)\} = \{\Delta p(t)\} + [m] \left[\frac{6}{\Delta t} \{\dot{x}(t)\} + 3\{\ddot{x}(t)\} \right] + [c(t)] \left[3\{\dot{x}(t)\} + \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{x}(t)\} \right]$$

5. 非線形応答 スペクトル解析法

非線形応答スペクトル解析

(a) 荷重－変位関係

対象とする構造物の荷重－変位関係を仮定

(b) 復元力特性のモデル化

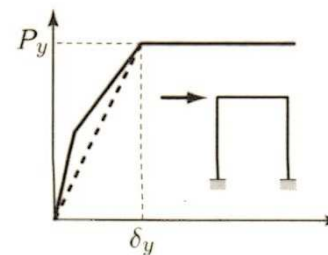
上記で仮定した耐力と剛性を有する構造物の正負繰返し荷重に対する復元力特性を仮定

(c) 1 自由度系の時刻歴非線形応答解析

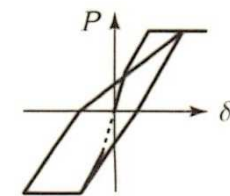
設計用地震動に対して固有周期をパラメータとした時刻歴非線形応答解析を行ない、最大応答値を求める

(d) 非線形応答スペクトル

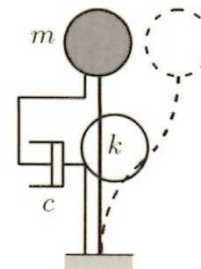
着目する物理量（加速度、速度、変位）に関する最大応答値を固有周期に対してプロット



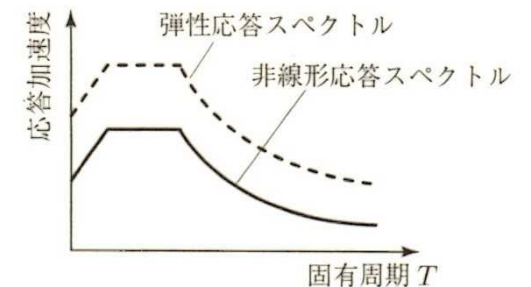
(a) 荷重－変位関係



(b) 履歴特性モデル



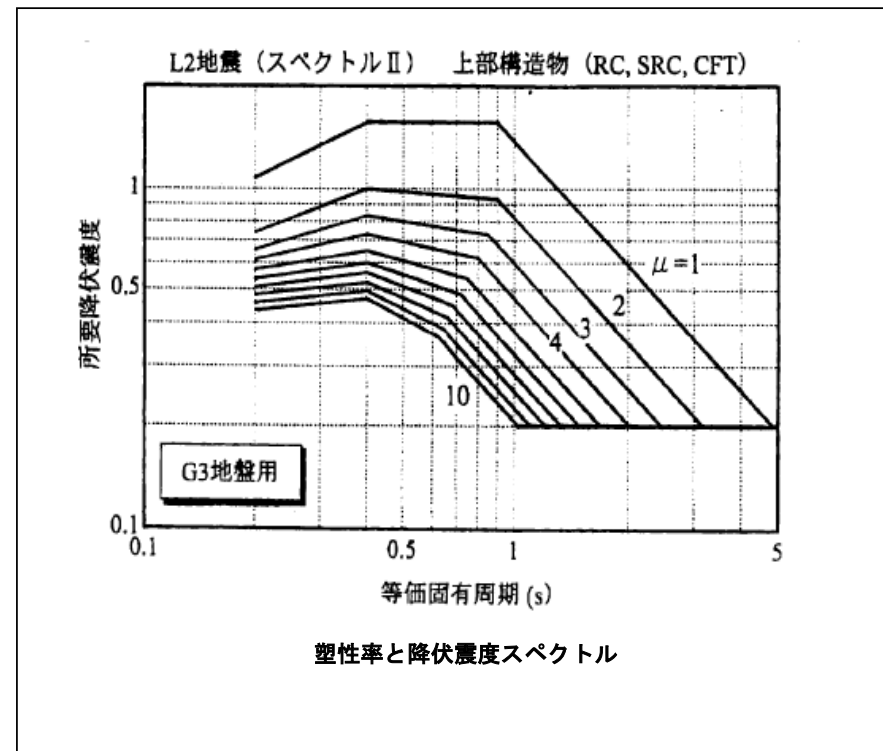
(c) 1 自由度系非線形応答解析



(d) 非線形スペクトル

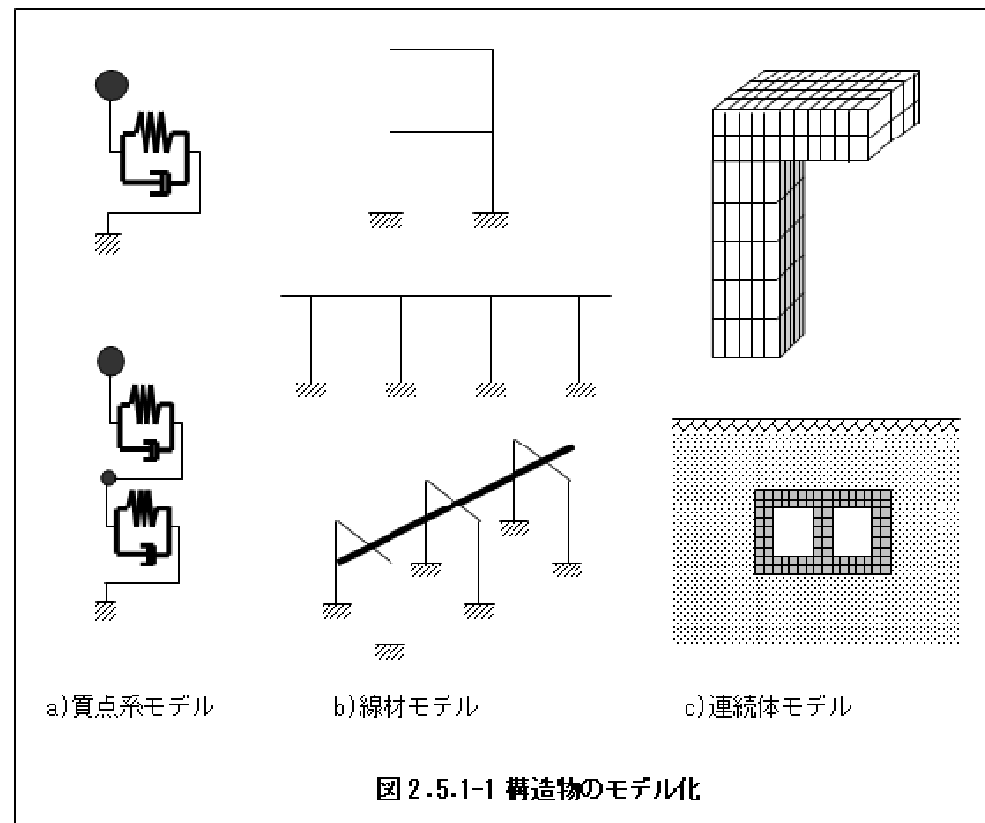
非線形応答スペクトルの例

- 降伏耐力(震度)をパラメータに時刻歴非線形応答解析を行い、同じ応答塑性率のスペクトルを求めたもの

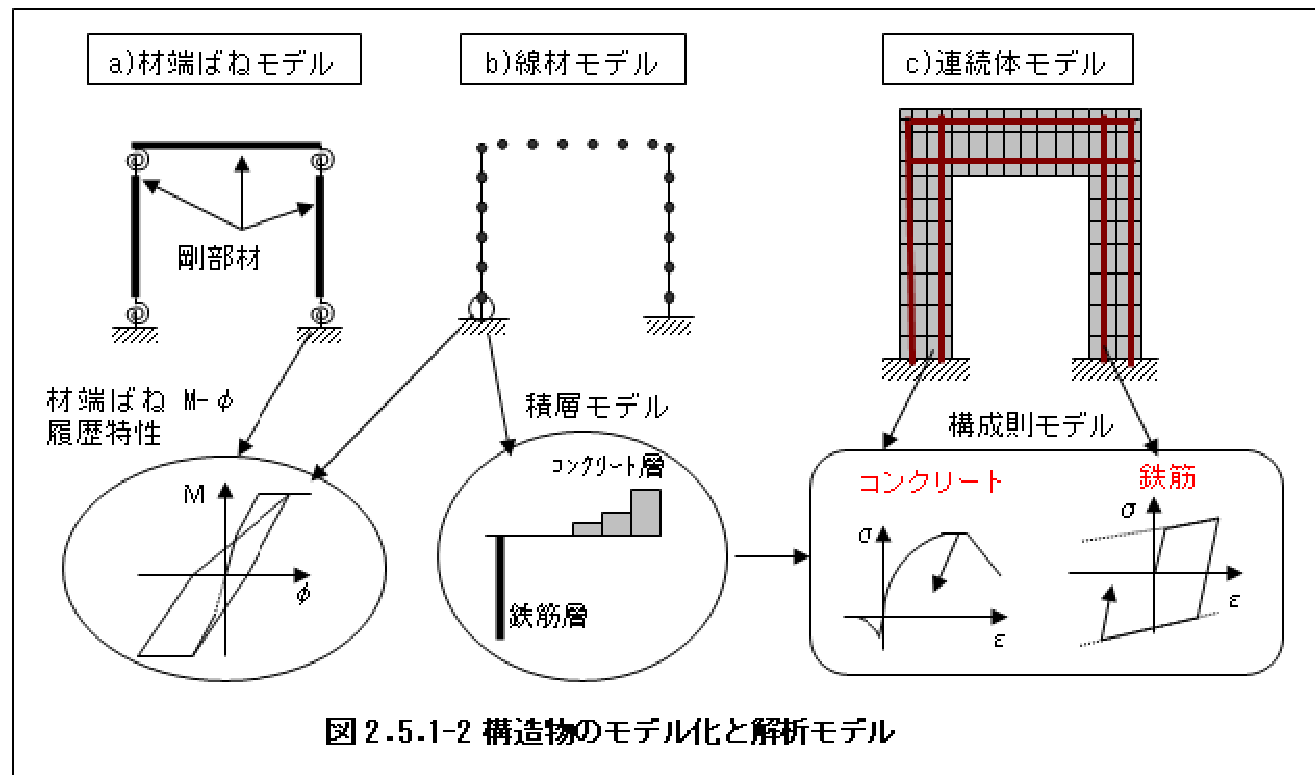


6. 非線形時刻歴応答 解析でのモデル化

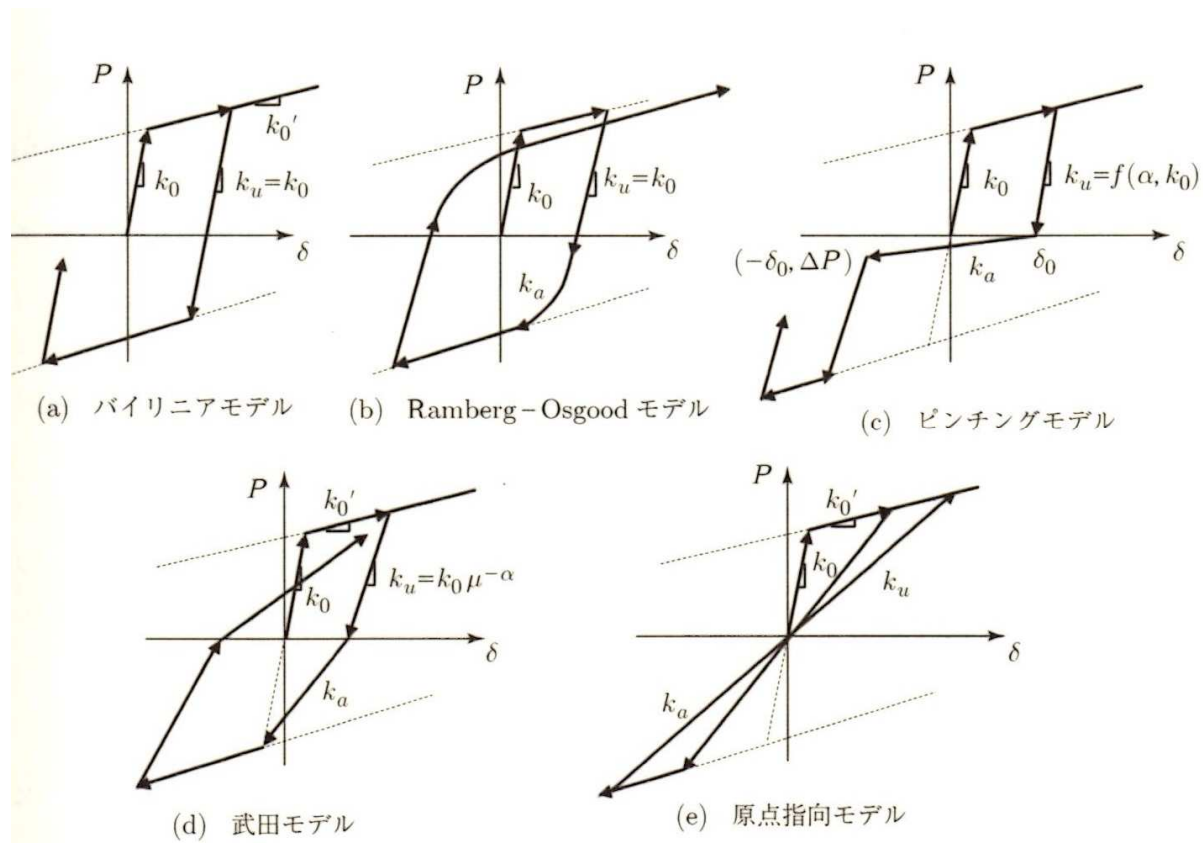
構造物のモデル化



構造物のモデル化と解析モデル



部材の履歴モデル



7. 設計基準で規定される耐震計算法

動的解析

項目	土木学会	鉄道標準	道示
動的解析	(a)時刻歴応答解析法 ・材料非線形性 ・必要な場合構造物と地盤の相互作用	(a)時刻歴応答解析法 ・同左 ・同左	(a)時刻歴応答解析法 レベル2地震動に対して ・非線形履歴モデルを用いた時刻歴応答解析 ・等価線形化法を用いた時刻歴応答解析
	(b)非線形応答スペクトル法 ・1次モードが卓越し、主たる塑性化領域が限定される構造物 ・静的非線形解析⇒等価固有周期、破壊形態の判定⇒応答塑性率	(b)非線形応答スペクトル法 ・同左 ・構造物の破壊形態を確認するための解析（プッシュオーバー解析＝静的非線形解析）⇒等価固有周期⇒応答塑性率	(b)応答スペクトル法 ・入力地震動レベルと解析目的に応じて使用

静的解析

項目	土木学会	鉄道標準	道示
静的解析	(c)震度法 ・1次モードが卓越し、主たる塑性化領域が限定される構造物 ・線形解析⇒等価固有周期 ・一般に $V_{yd}/V_{mu}=2.0$ とした場合の所要降伏震度スペクトル⇒設計水平震度⇒設計断面力		(b)震度法 ・構造系が単純で1次の固有振動モードが卓越、主たる塑性化の生じる部位が明確な場合。 ・ラーメン橋のような不静定構造の場合は静的非線形解析⇒降伏変位、耐震性能に応じた限界状態での水平変位 ・レベル2地震動に対する動的非線形応答はエネルギー一定則により推定

動的解析に於ける減衰の取扱い

項目	土木学会	鉄道標準	道示
時刻歴応答解析 法の場合	・履歴減衰：材料非線形モデルにより自動的に考慮 ・逸散減衰：周辺地盤を介したエネルギーの逸散を考慮する場合 ・粘性減衰：考慮しない。ただし、弾性範囲内の場合には粘性減衰を設定してよい。	・履歴減衰：同左 ・逸散減衰：同左 ・粘性減衰：一般にレーリー減衰を適用。コンクリート部材の粘性減衰定数は$h=0.03\sim0.05$	・履歴減衰：同左 ・逸散減衰：同左 ・粘性減衰：同左。線形部材の場合は上部構造および橋脚の粘性減衰定数は$h=0.03$、および$h=0.05$。非線形履歴によるエネルギー吸収を考慮する場合、上部構造の粘性減衰は考慮せず、橋脚は$h=0.02$。

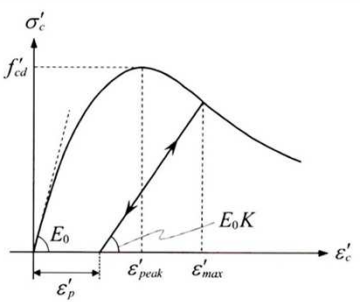
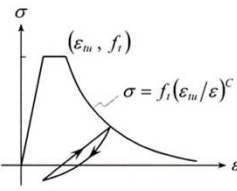
塑性化する部材の解析モデル

項目	土木学会	鉄道標準	道示
(a)材料の応力－ひずみ関係から直接求める場合（ファイバーモデル）	・断面内層分割は主鉄筋位置に配慮、外周部は細かくする。 ・軸方向要素寸法：最大曲げモーメントの作用する部材端部等では有効高さ以下、200mm程度とするのがよい。		

部材の力学モデル

項目	土木学会	鉄道標準	道示
(b)部材の力学モデルを用いる場合	・ 骨格曲線は原点と降伏点、最大耐力点、軟化勾配を考慮したトリリニアモデル ・ 降伏点以降の応答に対しては履歴モデルを設定。除荷後剛性は変形増大とともに低下、逆側への再載荷時は最大点を指向	・ 非線形性および減衰特性を適切に表現する	・ 単柱式鉄筋コンクリート橋脚の骨格曲線 (a) 水平力-水平変位関係を定義するモデル (b) 曲げモーメント-曲率関係を定義するモデル

履歴モデルー材料の応力・ひずみ関係から直接求める場合（ファイバーモデル）

項目	土木学会	鉄道標準	道示
(a)材料の応力-ひずみ関係から直接求める場合（ファイバーモデル）	 解説 図5.3.1 簡略化したコンクリートの履歴モデル  解説 図5.3.2 コンクリートの引張領域での平均応力-平均ひずみ関係の例		

履歴モデル—部材の力学モデルを用いる場合

項目	土木学会	鉄道標準	道示
(b)部材の力学モデルを用いる場合	剛性低下型モデルの除荷剛性 $k_r = k \left \frac{\theta_{max}}{\theta_y} \right ^{-\beta}$ β: 剛性低下率 (一般に0.5)	$d_n = d_p + (d_{max} - d_{min}) \cdot \chi$ χ: 剛性低下係数	Takeda Model 除荷剛性 $k_{un} = K_1 \left \frac{\phi_{max}}{\phi_y} \right ^{-\alpha}$ α: 除荷時剛性低下指数 (0.5)

8. 設計基準で規定される 地震動

耐震設計上の地盤種別

鉄道標準

地盤種別	地盤の固有周期 $T_G(s)$	備考
G0	—	岩盤
G1	—	基盤
G2	~0.25	洪積地盤など
G3	0.25~0.5	普通地盤
G4	0.5~0.75	普通~軟弱地盤
G5	0.75~1.0	軟弱地盤
G6	1.0~1.5	軟弱地盤
G7	1.5~	極めて軟弱な地盤

道示

地盤種別	地盤の固有周期 $T_G(s)$	備考
I 種	~0.2	良好な洪積地盤及び岩盤
II 種	0.2~0.6	I、III種に属さない洪積地盤及び沖積地盤
III 種	0.6~	沖積地盤のうち軟弱地盤

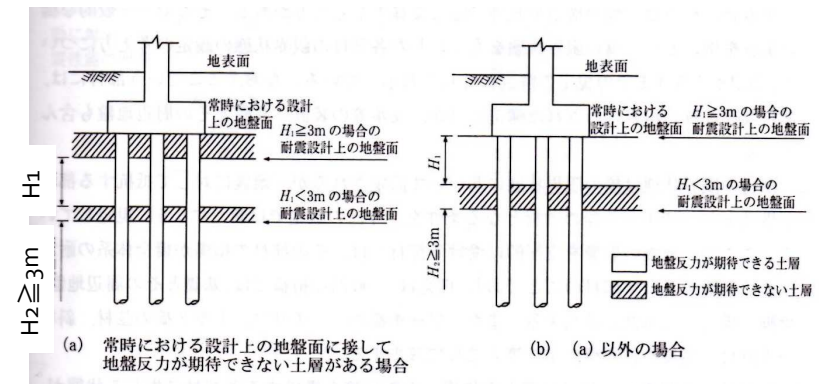
特殊地盤の取扱い

■適用範囲外とする一鉄道標準

- ・ 極軟弱な粘性土層およびシルト質土層
- ・ 液状化や側方流動のある地盤
- ・ 地層構成により地震動の増幅が予想される地盤
- ・ 不整形地盤

■耐震設計上の地盤面を变化一道示

- ・ 地震時に地盤反力が期待できない土層のある場合はその影響を考慮して耐震設計上の地盤面を設定



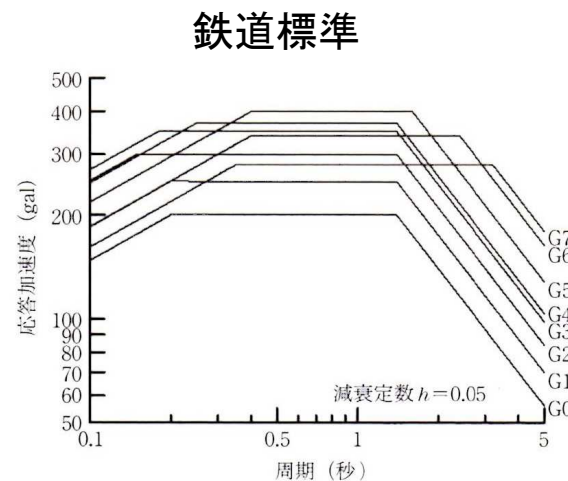
レベル1地震動—耐震設計上の地盤面で定義する標準加速度応答スペクトル

■鉄道標準

- ・土質柱状図から地盤モデル
- ・基盤面で定義される設計地震動を入力⇒表層地盤の動的解析⇒地表面での弾性加速度応答スペクトル
- ・観測記録によるスペクトルやこれまでの設計スペクトルの特性を加味して設定。

■道示

- ・観測強震記録から求めた $h=0.05$ の加速度応答スペクトルの統計解析結果に基づき地盤種別ごとに規定。



解説図 7.3.4 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル (L1 地震動)

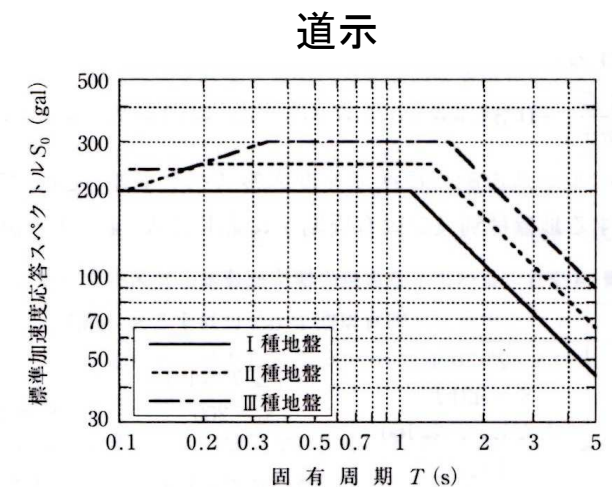
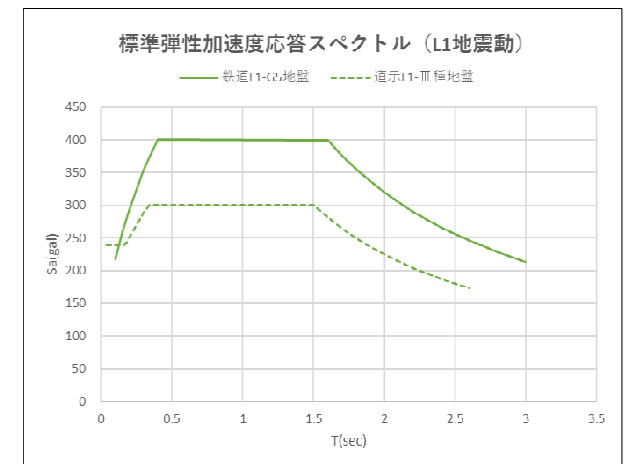
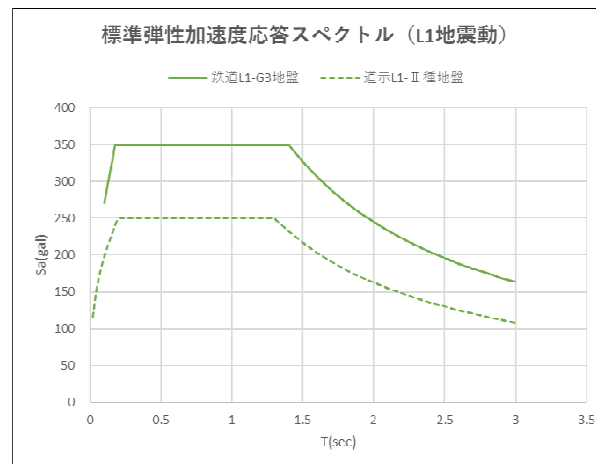
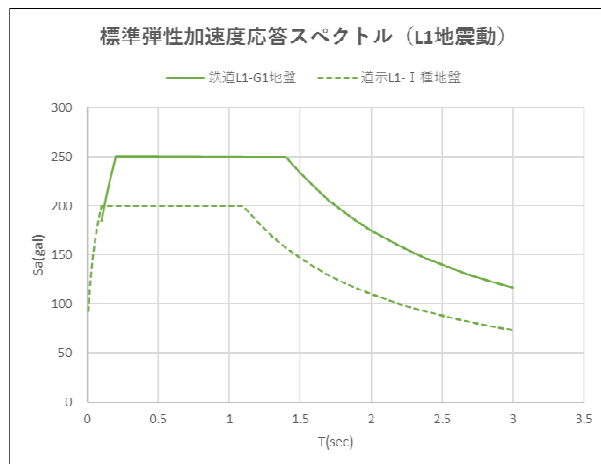


図-解4.2.1 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル S_0

標準加速度応答スペクトルの比較： L1地震動

■ 軟弱地盤 > 硬質地盤

■ 鉄道標準 > 道示



レベル2地震動（海溝型）—地盤面で定義する標準加速度応答スペクトル

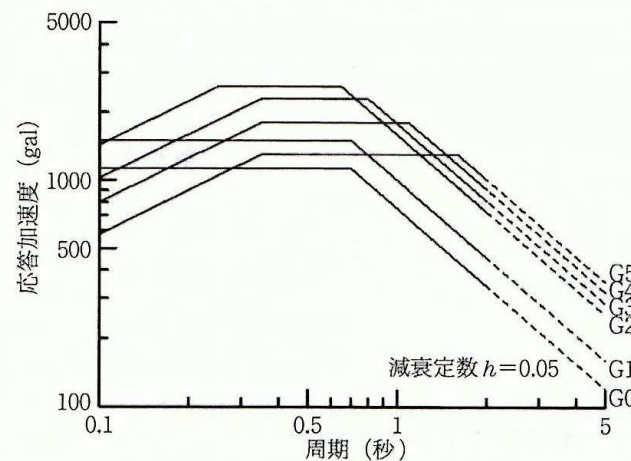
■鉄道標準

・スペクトルI：Mw8.0程度の海溝型地震が60km離れた地点で発生した場合の地震動を想定

■道示

- ・スペクトル S_{I0} ：関東地震での東京周辺で生じた地震動をこのタイプ例
- ・多数の観測記録を考慮した距離減衰式による加速度応答スペクトルを推定
- ・地震強度が大きい場合柔らかい地盤では非線形性が強くなる傾向を考慮

鉄道標準



解説図 7.3.5 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル (L2地震動：スペクトルI)

道示

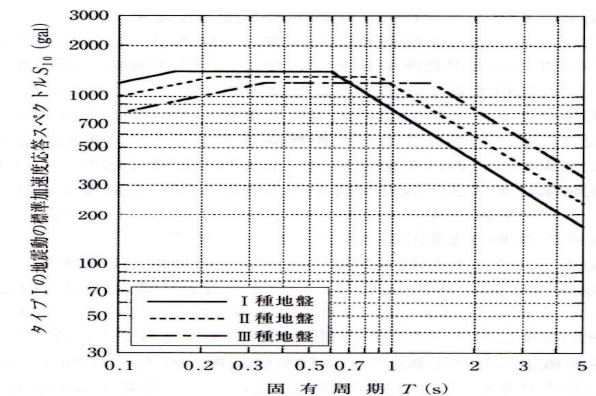


図-解4.3.1 タイプIの地震動の標準加速度応答スペクトル S_{I0}

レベル2地震動（内陸型）—地盤面で定義する標準加速度応答スペクトル

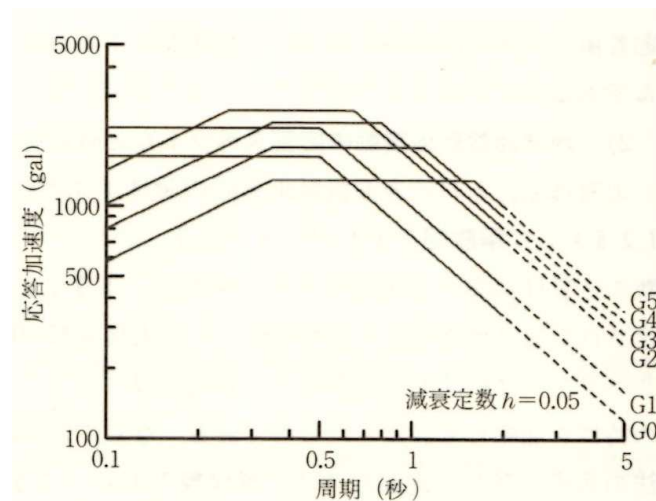
■鉄道標準

Mw7.0程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合の地震動を想定

■道示

スペクトル S_{II0} ：兵庫県南部地震での強新記録に基づき、地盤種別ごとに加速度応答スペクトルを規定。

鉄道標準



解説図 7.3.6 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル (L2地震動：スペクトルII)

道示

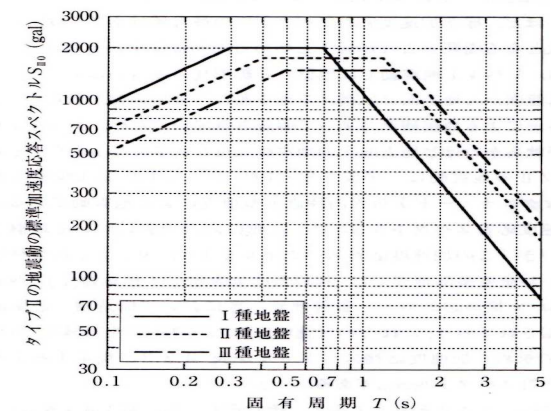


図-解4.3.2 タイプIIの地震動の標準加速度応答スペクトル S_{II0}

標準加速度応答スペクトルの比較： L2地震動—G1地盤

■鉄道標準

短周期側：内陸型＞海溝型

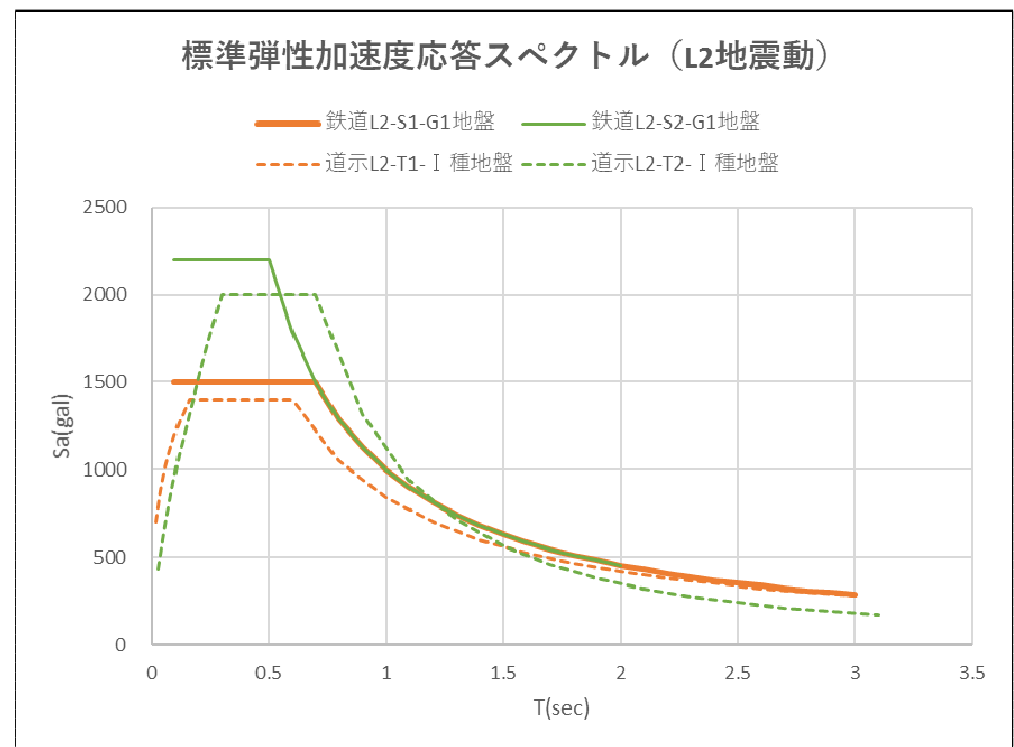
長周期側：内陸型＝海溝型

■道示

短周期側：内陸型＞海溝型

長周期側：内陸型＜海溝型

■総じて鉄道標準＞道示



標準加速度応答スペクトルの比較： L2地震動—G3地盤

■鉄道標準

内陸型＝海溝型

■道示

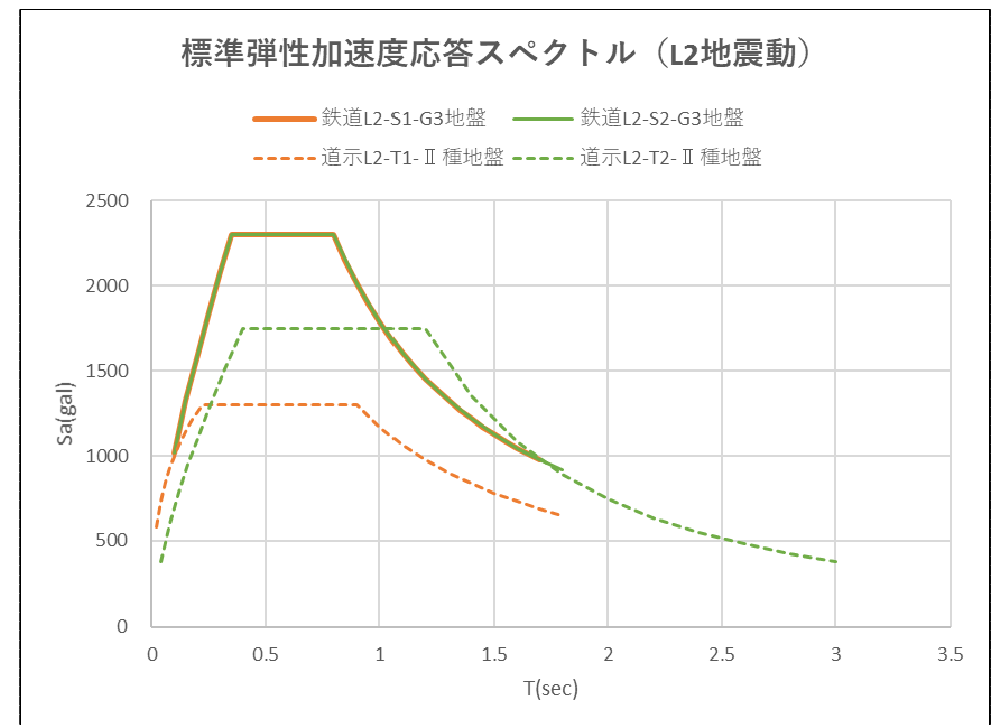
極短周期側：内陸型＜海溝型

長周期側：内陸型＞海溝型

■総じて鉄道標準＞道示

■鉄道標準と道示の差異

鉄道標準G4地盤の $S_{max}=1800\text{gal}$ は道示と大差ない



標準加速度応答スペクトルの比較： L2地震動—G5地盤

■ 鉄道標準

内陸型＝海溝型

■ 道示

極短周期側：内陸型＜海溝型

長周期側：内陸型＞海溝型

■ 海溝型

総じて鉄道標準＞道示

■ 内陸型

$T=0.5\sim 2.3\text{sec}$ では道示＞鉄道標準

