

# 地震の話

1

## 地震と震動と振動

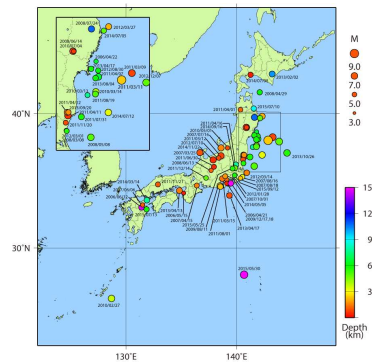
- 三省堂国語辞典
  - 地震 地殻(チカク)の変動によって起こる、地球の表面の震動。
  - 震動 地震などの自然現象で大地が震え動くこと。
  - 地震による大地の震動」「火山の震動」「轟音(こうおん)とともに激しい震動を感じる」
  - 振動 揺れ動くこと。また、揺り動かすこと。
  - 「汽車の振動が伝わる」「振り子の規則正しい振動」「弦を振動させる」
- 制震 制振
- 地面が動く
  - 以前はプレート境界型の巨大地震 M9クラス
  - 最近では、活断層の直下型巨大地震 M7クラスでも破壊力大



2

## 日本付近で発生した主な被害地震の震央分布 (平成18年～平成27年5月)

- さて地震 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html>



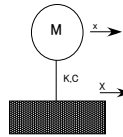
3

## エポックな地震と被害, 振動問題

- 大正関東地震・関東大震災
  - 1923/9/1 M7.9-8.1 深さ0-10とか23kmとか
  - 死者・行方不明 10万5千余
  - 強風を伴った火災による死傷者
- 日本海中部地震
  - 1984/5/26 M7.7 深さ14km
  - 長周期地震動
    - 東北電力秋田火力発電所内の原油の浮層根タンクで火災
- 兵庫県南部地震・阪神淡路大震災 震度7
  - 1995/1/17 M7.3 深さ16km
  - 死者: 6,434名・行方不明者: 3名・負傷者: 43,792名
  - 圧死が中心 関東大震災では焼死、東日本大震災では水死
  - 住家被害: 全壊104,906棟・半壊144,274棟・全半壊合計249,180棟(約46万世帯)、一部損壊390,506棟
  - 火災被害: 全壊7,036棟・焼損棟数7,574棟・罹災世帯8,969世帯
- 十勝沖地震 震度7
  - 2003/9/26 M8 深さ45km
  - 長周期地震動
    - 出光興産北海道製油所で2基の石油タンクの火災
- 新潟県中越地震 震度7
  - 2004/10/23 M6.8 深さ13km
  - 家屋の全半壊はおおよそ1万7000棟
  - 山崩れや土砂崩れなどで鉄道、道路が約6000カ所で分断
- 東北地方太平洋沖地震・東日本大震災 震度7
  - 2011/3/11 M9.0 深さ24km 動いた断層は500kmNS×200kmEW
  - 場所によっては波高10m以上、最大週上帯40.1mの巨大な津波
  - 津波による浸水面積 - 561km<sup>2</sup>
  - 震災による死者・行方不明者は18,455人、建築物の全壊・半壊は合わせて400,326戸
  - 溺死: 90.6% (14,308体)
- 熊本地震
  - 二つの震度7 2016/4/14 21:26 M6.5 深さ11km 2016/4/16 1:25 M7.3 深さ12km

4

### 地面が動く



• 減衰のある一自由度系の振動

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

⇒

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X) = 0$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + ckx = kX + c\dot{X}$$

$$s \triangleq x - X$$

$$m(\ddot{s} + \ddot{X}) + cs + ks = 0$$

$$m\ddot{s} + cs + ks = -m\ddot{X}$$

$$= mX_0\omega_e^2 \sin(\omega_e t) \leftarrow X = X_0 \sin(\omega_e t)$$

5

### 刺激係数, 有効質量

• 多自由度系に拡張

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

⇒

$$[m]\{\ddot{s}\} + [c]\{\dot{s}\} + [k]\{s\} = -[m]\{\ddot{X}\}$$

$$s = [\Phi]\{q\}$$

$$[\Phi]^T [m][\Phi]\{\ddot{q}\} + [\Phi]^T [c][\Phi]\{\dot{q}\} + [\Phi]^T [k][\Phi]\{q\} = -[\Phi]^T [m]\{\ddot{X}\}$$

$$[\Phi]^T [m][\Phi] \triangleq [I] \rightarrow$$

$$[I]\{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} 2h_1\omega_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \{q\} = -[\Phi]^T \{1\} \ddot{X}$$

• 地震加速度の影響である右辺の和を各モードの地震動に対する寄与を示し刺激係数/モード寄与率と呼ぶ

• 刺激係数の自乗和と一般化質量との比が有効質量

• 質量マトリクスが規格化した単位行列なら、自乗和

6

### 一自由度系で耐震



• 現実には、橋桁が地震力で壊れることは少ない

• →橋台, 橋脚からの落下

• →橋脚の被害 新潟地震1964の昭和大橋

• 桁掛かりの追加と落橋防止工



• 桁を大きな質量, 橋脚をバネとみたSDOFでの対処

7

### 桁の被災 阪神淡路大震災の例



• 橋脚が崩壊し, それに伴う落橋例は多い

8

## 耐震設計の区分

表 5.3 橋の重要度の区分

橋の重要度の区分	対象となる橋
A 種の橋	下記以外の橋
B 種の橋	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>

表 5.4 目標とする橋の耐震性能

設計地震動		A 種の橋	B 種の橋
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能 (耐震性能1)	
レベル2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)	地震による損傷が橋としての致命的とならない性能 (耐震性能3)	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復がすみやかに行い得る性能 (耐震性能2)
	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)		

9

## 震度法・修正震度法 p131 p135

- 動的な地震力を静的な水平力に換算し作用させる方法
- 初期は  $k_h = 0.2$  であった震度法を固有周期と地盤を考慮した修正震度法に改め吸収した
- F: 水平力
- W: 自重
- $k_h$ : レベル1 設計水平震度
- $k_{h0}$ : レベル1 設計水平震度の標準値
- $c_z$ : 地域別補正係数 (A地区:1.00, B地区:0.85, C地区:0.70)

$$F = k_h W$$

$$k_h = c_z k_{h0}$$

表 5.10 レベル1地震動の設計水平震度の標準値  $k_{h0}$

地震種別	固有周期 T [s] に対する $k_{h0}$ の値		
	$T < 0.1$ $k_{h0} = 0.431 T^{0.8}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.16$	$0.15 \leq T \leq 1.1$ $k_{h0} = 0.2$	$1.1 < T$ $k_{h0} = 0.213 T^{-0.5}$
I 種			
II 種	$T < 0.2$ $k_{h0} = 0.427 T^{0.8}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.20$	$0.25 \leq T \leq 1.3$ $k_{h0} = 0.25$	$1.3 < T$ $k_{h0} = 0.286 T^{-0.5}$
III 種	$T < 0.34$ $k_{h0} = 0.430 T^{0.8}$ ただし、 $k_{h0} \geq 0.24$	$0.34 \leq T \leq 1.5$ $k_{h0} = 0.3$	$1.5 < T$ $k_{h0} = 0.393 T^{-0.5}$

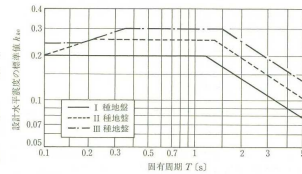


図 5.39 レベル1地震動の設計水平震度の標準値  $k_{h0}$   
(注) 日本道路協会：道路標示方書・同解説 V 耐震設計編、p.84、2002年

10

## $c_z$ : 地域別補正係数 p132 (A地区:1.00, B地区:0.85, C地区:0.70)

- 熊本は高くない
- 神戸も震災前は高くない

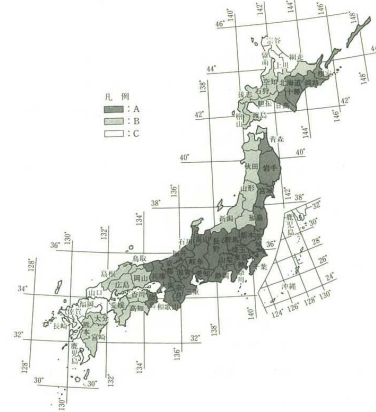


図 5.34 地域別補正係数  $c_z$

11

## 動的応答解析

- 基本は、複雑でないなら応答スペクトル法
  - 非線形が強くなければ
  - まずは固有値解析
  - モーダルアナリシス
  - そして、応答スペクトル
- 運動方程式の直接時間積分
  - 橋脚着目なら自由度の少ない非線形モデル
  - 確定的と考えられるもの
    - 質量
    - 線形範囲だったら剛性がおおむね
  - 不確実性が強いもの
    - 減衰
    - 外力としての地震力 地震波
    - 反力としての変位依存の非線形剛性

12

## 応答スペクトル

- 変位応答スペクトル
- 速度応答スペクトル
- 加速度応答スペクトル

減衰付一自由度系に地震動が作用した場合の振動応答

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

$$\Rightarrow m\ddot{s} + c\dot{s} + ks = -m\ddot{X}$$

いわゆるエネルギー分布を示すスペクトルではないが、構造物の固有振動数が $\omega_0$ とか、 $\omega_0$ で与えられたときの最大応答を調べるには都合が良い

$$x(t) = \int_{-\infty}^t x_{uni}(t, T) f(T) dT$$

$$s(t) = \int_{-\infty}^t x_{uni}(t, T) (-m\ddot{X}(T)) dT$$

$$S_d(t) = \left| \int_{-\infty}^t x_{uni}(t, T) (-m\ddot{X}(T)) dT \right|_{\max \text{ at } \omega_d}$$

$$S_v(t) = \frac{1}{\omega_d} \left| \int_{-\infty}^t x_{uni}(t, T) (-m\ddot{X}(T)) dT \right|_{\max \text{ at } \omega_d}$$

$$S_a(t) = \frac{1}{\omega_d^2} \left| \int_{-\infty}^t x_{uni}(t, T) (-m\ddot{X}(T)) dT \right|_{\max \text{ at } \omega_d}$$

13

## レベル1地震動p132 設計用の応答スペクトル

- $S$ : レベル1 加速度応答スペクトル
- $S_0$ : レベル1 加速度応答スペクトルの標準値
- $c_z$ : 地域別補正係数 (A地区:1.00, B地区:0.85, C地区:0.70)
- $c_D$ : 減衰定数補正係数,  $h$  は1%とか5%とか

$$S = c_z c_D S_0$$

$$c_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5$$

表5.7 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$

地震種別	固有周期 $T$ (s) に対する $S_a$ (gal)		
I類	$T < 0.1$ $S_a = 43.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 160$	$0.1 \leq T \leq 1.1$ $S_a = 200$	$1.1 < T$ $S_a = \frac{200}{T}$
	$T < 0.2$ $S_a = 42.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 200$	$0.2 \leq T \leq 1.3$ $S_a = 250$	$1.3 < T$ $S_a = \frac{250}{T}$
II類	$T < 0.18$ $S_a = 162.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 70$	$0.18 \leq T \leq 1.6$ $S_a = 80$	$1.6 < T$ $S_a = \frac{80}{T}$
	$T < 0.29$ $S_a = 152.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 70$	$0.29 \leq T \leq 2.0$ $S_a = 180$	$2.0 < T$ $S_a = \frac{180}{T}$

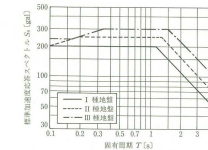


図5.7 レベル1地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$   
(注)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, p.36, 2002年

14

## レベル2地震動p134-5設計用の応答スペクトル

- $S_I$ : タイプI 加速度応答スペクトル
- $S_{II}$ : タイプII 加速度応答スペクトル
- $S_{I0}$ : タイプI 加速度応答スペクトルの標準値
- $S_{II0}$ : タイプII 加速度応答スペクトルの標準値
- $c_z, c_D$ : 地域別補正係数, 減衰定数補正係数 レベル1と同じ

$$S_I = c_z c_D S_{I0}$$

$$S_{II} = c_z c_D S_{II0}$$

表5.8 タイプI地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$

地震種別	固有周期 $T$ (s) に対する $S_a$ (gal)		
I類	$T \leq 1.4$ $S_a = 700$	$1.4 < T$ $S_a = \frac{700}{T}$	
	$T < 0.18$ $S_a = 162.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 70$	$0.18 \leq T \leq 1.6$ $S_a = 80$	$1.6 < T$ $S_a = \frac{80}{T}$
II類	$T < 0.29$ $S_a = 152.7^{**}$ ただし、 $S_a \geq 70$	$0.29 \leq T \leq 2.0$ $S_a = 180$	$2.0 < T$ $S_a = \frac{180}{T}$

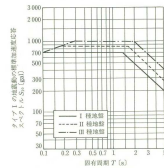


図5.8 タイプI地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$   
(注)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, p.36, 2002年

表5.9 タイプII地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$

地震種別	固有周期 $T$ (s) に対する $S_a$ (gal)		
I類	$T < 0.3$ $S_a = 483.7^{**}$	$0.3 \leq T \leq 0.7$ $S_a = 2,000$	$0.7 < T$ $S_a = \frac{2,000}{T}$
	$T < 0.4$ $S_a = 224.7^{**}$	$0.4 \leq T \leq 1.2$ $S_a = 1,750$	$1.2 < T$ $S_a = \frac{1,750}{T}$
II類	$T < 0.3$ $S_a = 2,247.7^{**}$	$0.3 \leq T \leq 1.5$ $S_a = 1,000$	$1.5 < T$ $S_a = \frac{1,000}{T}$
	$T < 0.5$ $S_a = 2,247.7^{**}$	$0.5 \leq T \leq 1.5$ $S_a = 1,000$	$1.5 < T$ $S_a = \frac{1,000}{T}$

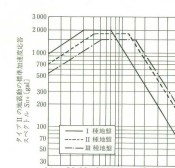
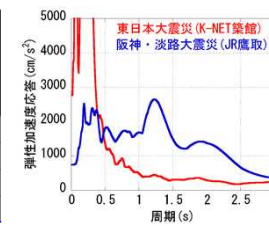
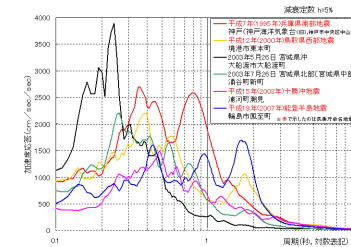


図5.9 タイプII地震動の標準加速度応答スペクトル $S_a$   
(注)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, p.36, 2002年

15

## 観測された応答スペクトル

- 東北地方太平洋沖地震/兵庫県南部地震 = 地震エネルギーでは900倍弱
- 応答スペクトルの違いで被害の状況差がある。



16

## 地震波形

- 標準的な応答スペクトル
  - レベル I
  - レベル II
- 刺激係数の大きな振動モードに着目
- 代表的な観測波形をスケールして用いることも多い
  - エルセントロ1940
  - 八戸1968
  - 神戸鷹取1995
  - 十勝沖1998
  - とか
- 経験的伝達関数 グリーン関数
  - 断層面（アスペリティ）から発生する小地震の重ね合わせ

17

## 破壊に伴う剛性の非線形性

橋脚根元の塑性変形は、曲げ破壊に伴う非線形性が生じる

大破害 判定 小破害

As	A	B	C	D
柱地盤面位置での曲げ破壊 全面的破壊	2面の破壊	1面程度の破壊	一部の剥離程度	被害なし
柱地盤面位置での曲げせん断破壊 内部崩壊	2面程度の破壊	1面程度の破壊	一部のみ	被害なし
軸方向鉄筋伝達し部の曲げせん断破壊 内部崩壊	内部破壊			被害なし
柱地盤面位置でのせん断破壊 全断面破壊	貫通した破壊	部分破壊		被害なし

<http://www.hanshin-exp.co.jp/earthquake/classifying.html>

18

レイリー（Rayleigh）減衰と質量比例減衰、剛性比例減衰

- 質量項、剛性項に比べ、減衰項は決めがたい
- モード減衰とモード形から逆算する方法もあるが、地震解析では以下の方法が一般的
- 質量項、剛性項に係数をかけた形で定義
  - 減衰あってもモード形への影響は小さいといえれば右の展開は厳密ではないが悪くはない
- 質量比例減衰
  - 高次モードで減衰が小さくなる
- 剛性比例減衰
  - 高次モードで減衰は大きくなる
- 二つを合わせたレイリー（Rayleigh）減衰
  - その中間
  - 係数二つで自由度は増える
- 剛性比例減衰が質量比例減衰と比べれば尤もらしい
  - 普通は高次モードの方が減衰が高いと考えられている
- モードを限定できれば、精度は悪くない
- モード毎に減衰比で1%から数%の設定

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = f$$

$$u = \sum \{\phi_j\} q_j(t)$$

$$M_j = \{\phi_j\}^T [M] \{\phi_j\} \triangleq 1 \text{ normalized}$$

$$K_j = \{\phi_j\}^T [K] \{\phi_j\} = \omega_j^2$$

$$C_j = \{\phi_j\}^T [C] \{\phi_j\} = 2h_j \omega_j$$

$$[C] = \alpha [M]$$

$$C_j = \{\phi_j\}^T \alpha [M] \{\phi_j\} = 2h_j \omega_j$$

$$h_j = \frac{\alpha}{2\omega_j}$$

$$[C] = \alpha [K]$$

$$C_j = \{\phi_j\}^T \alpha [K] \{\phi_j\} = 2h_j \omega_j^2$$

$$h_j = \frac{\alpha \omega_j}{2}$$

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

$$C_j = \{\phi_j\}^T (\alpha [M] + \beta [K]) \{\phi_j\} = 2h_j \omega_j^2$$

$$h_j = \frac{\alpha}{2\omega_j} + \frac{\beta \omega_j}{2}$$

19

## 弾塑性復元力特性

- 構造物（橋脚を特にイメージ）の復元力と変形の関係
- 変形制御の復元力
- 履歴ループのモデル化
  - M-φ関係の弾塑性復元力モデル化

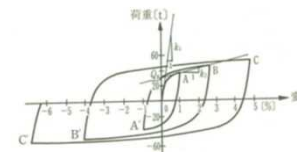


図 5.24 弾塑性復元力特性

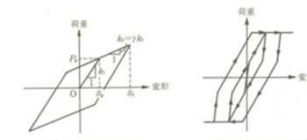


図 5.25 バイリニア型の復元力特性

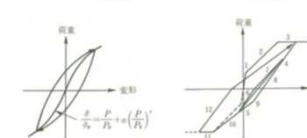


図 5.26 トリリニア型の復元力特性



図 5.27 ランバード・オズグッド型の復元力特性

$$M = EI \kappa$$

$$\kappa = -\frac{d^2 w}{dx^2} = -\varphi$$

φ: 曲率

20

## 課題

- 意味をまとめよう
- プレートテクトニクス
- 第三種地盤
- 応答スペクトル
- 動的解析
- レイレイ減衰