

2015.11.29 (公財)建築技術教育センター  
平成27年度普及事業 第4回勉強会  
於:大垣ガスほんのりプラザ

## 近似応答計算の要点 (1質点系の応答)

齋藤建築構造研究室  
齋藤 幸雄

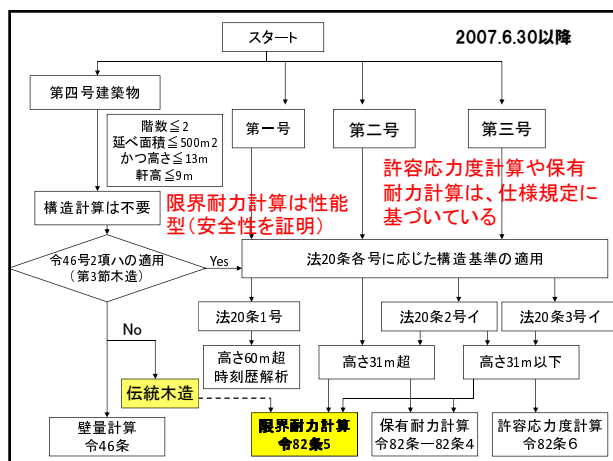
### 現行の耐震規定(耐震性能評価法)

- ・超高層建築物等を除いて、静的計算(地震時の応力計算や保有水平耐力の算定等)によっており、地震時の応答変位等を直接算定(動的応答計算)するものではない。
- ・保有水平耐力計算では、静的荷重増分解析が一般的な手法として用いられている。
- 2000年の法改正で規定された**限界耐力計算**は地震時の応答(変位)を近似的に求める手法で、時刻歴応答計算に次いで高度な計算方法である。
- RC造やS造で限界耐力計算を行う場合は、一般に静的荷重増分解析に基づいた荷重増分法によっている
- ・各種耐震診断における耐震性能評価の基本も同じで、建物の変形性能を直接評価できるものではない。

- ・2000年:建築基準法の改正で伝統構法木造の合法的な設計が難しくなる
- ・耐久性規定を除いて告示に従わなくても設計可能な**限界耐力計算**が新たに規定される
- ・2001年:建築学会大会で、限界耐力計算を用いた伝統構法の設計法の提案
- ・2002年～2003年:全国で講習会を開催
- ・2004年:限界耐力計算を用いた伝統構法に関する設計法出版(耐震補強設計にも適用可能)
- ・2007年:法改正で確認申請の厳格化の一環として**構造計算適合性判定**が導入され、設計者の負担増大
- ・2008年～2009年:伝統的構法の設計法作成委員会
- ・2010年～2012年:伝統的構法の設計法作成委員会(再)標準設計法(案)、詳細設計法(案)の作成

### 耐震性能評価法(その1)

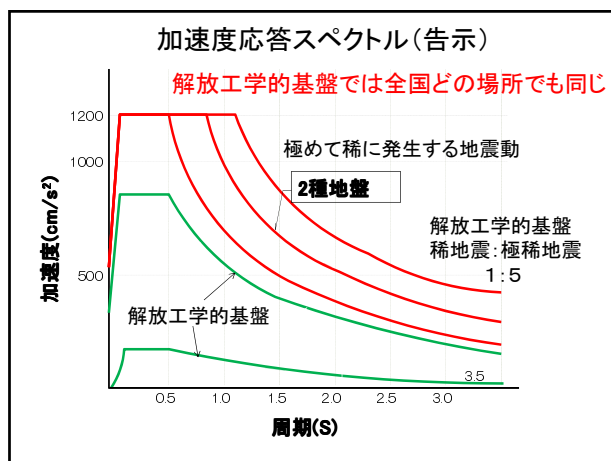
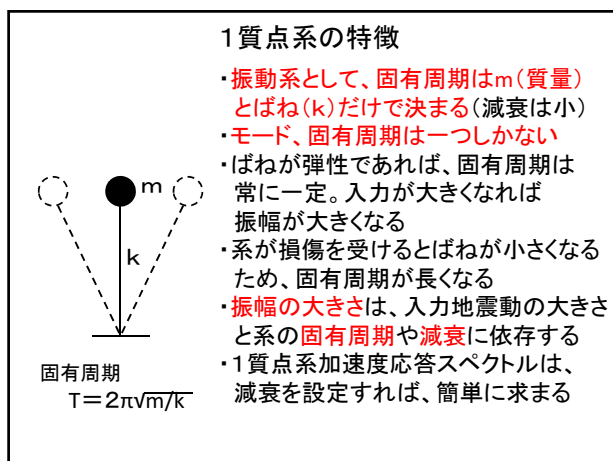
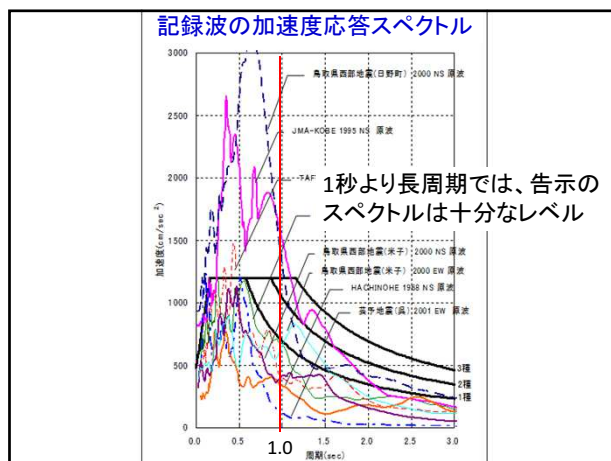
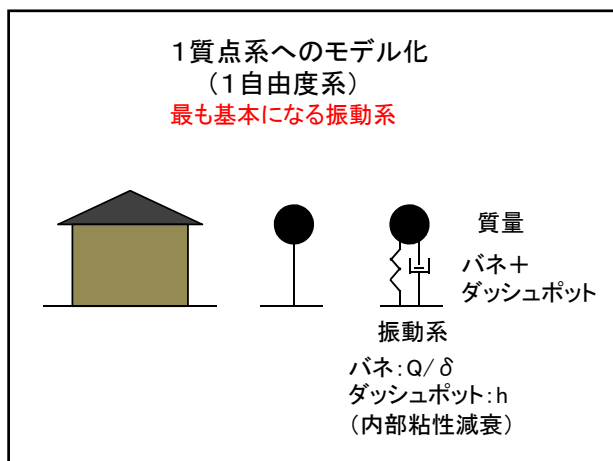
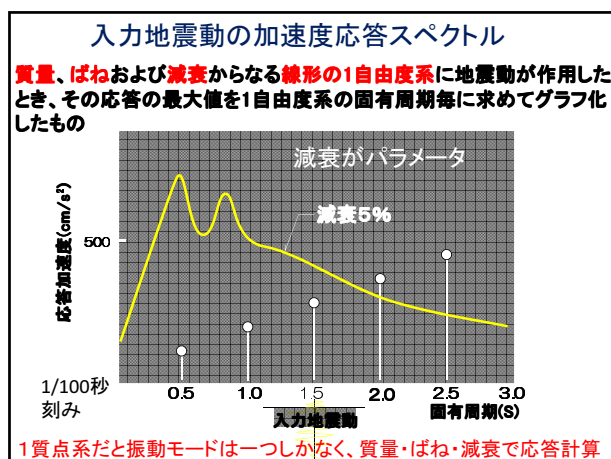
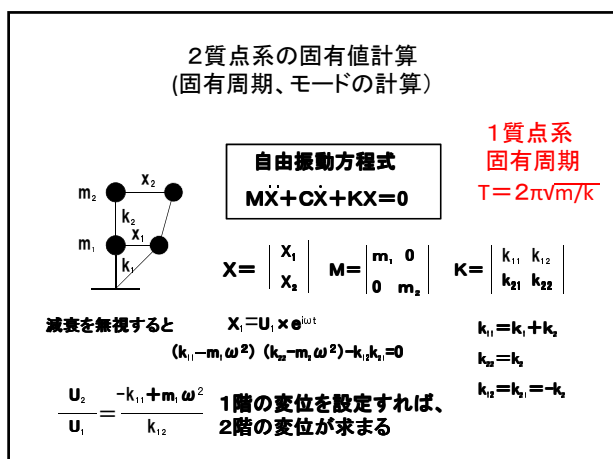
- ・伝統(的)木造建築物の耐震性能評価には、変形性能を考慮できる耐震性能評価法が必要
- このためには、地震時の応答変位を直接求める方法が有効である
- ・地震時の応答変位を求める方法としては、
  - ① 時刻歴応答解析:入力地震動⇒1/100秒刻みの加速度地震時の時々刻々の変位・加速度等が求まる(超高層建築物等に適用)
  - ② 限界耐力計算に用いられている近似応答計算  
入力地震動⇒加速度応答スペクトル  
比較的簡易に**最大応答変位**が求まる



### 耐震性能評価法(その2)

近似応答計算:1質点系加速度応答スペクトルと等価線形化法により、非線形領域の応答を求める

- ・1質点系加速度応答スペクトル(告示)  
固有周期と地盤種別から応答(加速度)を求める
- ・等価線形化法(非線形を等価な線形として扱う)  
建物が弾性なら、固有周期は常に一定で、減衰(内部粘性減衰)は5%  
建物が非線形(損傷を受けた状態)の場合、固有周期(変形に依存)は変化⇒等価周期  
減衰⇒等価減衰(履歴による減衰)  
等価周期と等価減衰から弾性と同様の扱いで応答(変位)が求まる



## 1 質点系の応答

- 地震時に質点に作用する加速度(応答加速度)によって生じるせん断力(応答せん断力)は、系の長周期化と履歴による減衰(エネルギー消費)により低減して行き、やがてある変位時の耐力(復元力)と一致する。この時の変位が最大応答変位である。  
(建物には耐力(復元力)以上のせん断力は作用しない。実大振動台実験では記録された最大応答せん断力がその建物の耐力である) 計算値より大きい場合が多い

応答せん断力と耐力(復元力)がどの変位で一致するか予測できないために、変位を少しずつ増加させ(変位増分法)作用せん断力と耐力が一致する時の変位を求めている(RC造等は荷重増分法による)

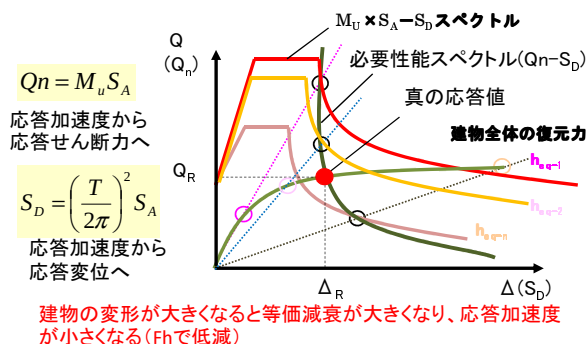
## 変形モード算定方法

線形(弾性)時はその1階・2階の剛性から固有値計算により変形モードを求める。非線形になると、1階の変位増分を行う時、2階の変位を求めるためには、

- ①前ステップの変形よりも大きい最も近傍の変位点の等価剛性を用いて変位を計算(1階と2階の剛性比で補正 : 2004年: 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル)  $C_2/C_1 \geq 2, W_2/W_1 \geq 0.7$  なら精度よく求まる
- ②前ステップの変形よりも大きい最も近傍の変位点の等価剛性を用いて固有値計算を行う(固有モードの算定)。固有モードから変位を計算。(この場合は当該ステップの等価剛性と固有モード対応していない。  
(JSCA関西レビュー委員会)

## 応答値の算出

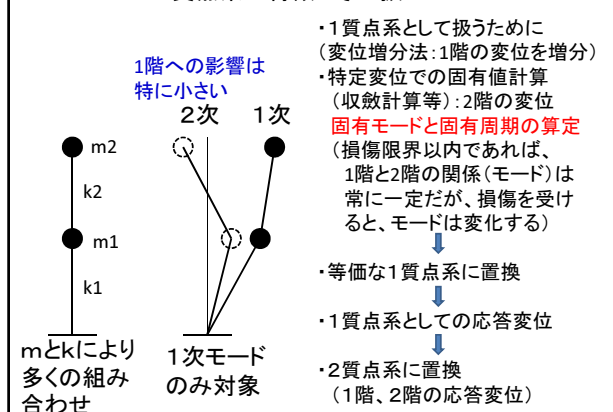
加速度応答スペクトル(加速度と固有周期の関係)を応答せん断力と応答変位の関係に変換



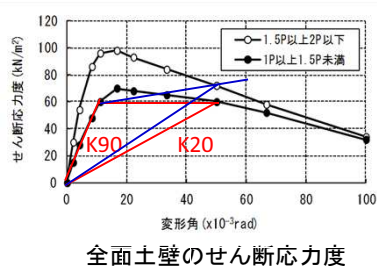
等価剛性は応答変位から求まるので、

- ③精度を上げるためには、②で求めた等価剛性を用いて固有値計算を行う。この後、固有モードから応答変位を計算し、等価剛性を算定。固有モードと等価剛性がほぼ一致するまで繰り返し計算を行う(収斂計算)
- ④収斂計算は③と同じ  
減衰の評価を等価1質点系ではなく、2質点系の1階・2階それぞれで行い、ひずみエネルギーで重み付けをして、等価減衰を算定

## 2 質点系の特徴とその扱い



## 固有周期の長周期化例

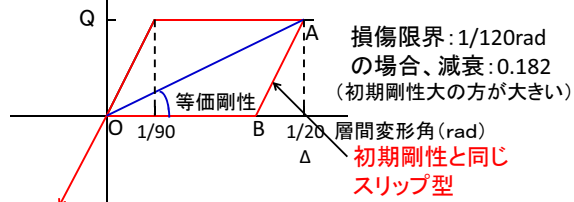


## 復元力特性と等価減衰

等価(粘性)減衰 ( $h_{eq} = (1/4\pi) \cdot OAB \times 2/OA\Delta$ )  
 1/20rad時: 0.124 (下図の場合)

減衰: 0.174 (0.124 + 0.05)

0.05: 内部粘性減衰



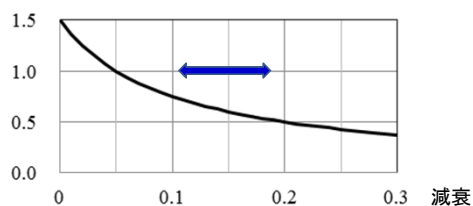
損傷限界: 1/120rad  
 の場合、減衰: 0.182  
 (初期剛性の方が大きい)

初期剛性と同じ  
 スリップ型

## 1質点系として扱うための条件

- ① 京都市や大阪府の耐震診断・耐震改修に関する簡易計算マニュアル  
 簡易に耐震性能評価ができるよう、1質点系の応答を基本にしている(適応対象を1階・2階の重量比や耐力比により規定)  
 条件: 2階の剛性・耐力を大きくし、1階のみが損傷を受ける。⇒1質点系の階高は1階の階高とする
- ② 大きな吹き抜け等で、1階の重量が2階のおよそ1/3程度以下 (2質点系との比較検討が望ましい)  
 条件: 1階と2階がほぼ同時降伏するよう補強  
 ⇒1質点系の階高は(1階+2階)の階高とする

## 低減率



減衰による加速度の低減率

## 1質点系として評価するための条件

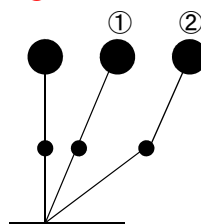
- ①: 1階・2階同時降伏 1階の重量が小さい場合、1階と2階が同じ耐力であればOK
- ②: 2階はほぼ弾性

①が望ましい

$$R_{CO} = \frac{(1 + R_w)(1 + R_h)}{1 + R_w + R_w R_h}$$

①の条件

$$1.2 R_{CO} \geq C_{u2} / C_{ub} \geq R_{CO}$$



$R_h = 1.0$ の場合 1階・2階が同じ耐力

$R_w: 0.5$   $R_{CO}=1.50$   $C_{u2} / C_{ub}=3.0$

$R_w: 1.0$   $R_{CO}=1.33$   $C_{u2} / C_{ub}=2.0$

$R_w: 2.0$   $R_{CO}=1.20$   $C_{u2} / C_{ub}=1.5$

$R_w: 3.3$   $R_{CO}=1.14$   $C_{u2} / C_{ub}=1.3$

$R_w: 5.0$   $R_{CO}=1.09$   $C_{u2} / C_{ub}=1.2$

$R_w: 10.0$   $R_{CO}=1.05$

## 減衰による応答加速度の低減

応答加速度の低減係数 ( $F_h$ )

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h)$$

$h=0.175$  (1/20rad時) の場合

$$1.5 / (1 + 1.75) = 0.55$$

固有周期の伸びによる低減係数を0.6とすると

応答加速度の低減は  $0.6 \times 0.55 = 0.330$

応答加速度:  $1.2 \times 0.330 \times p(0.85) \times q(1.0) = 0.34 \text{ (m/s}^2\text{)}$   
 (第2種地盤)

## 1階と2階の耐力バランス

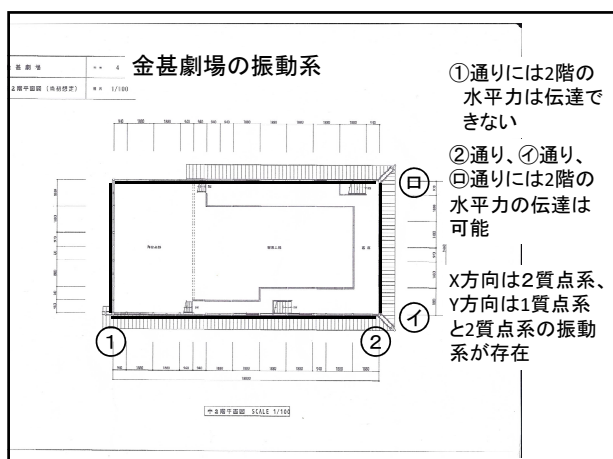
$$R_{CO} = \frac{(1 + R_w)(1 + R_h)}{1 + R_w + R_w R_h}$$

$R_{CO}$ :  $R_w$  や  $R_h$  の値に対して1階と2階の層間変形角が同じになる時の  $C_{u2} / C_{ub}$

$R_w$ : 2階の重量/1階の重量

$R_h$ : 2階の階高/1階の階高

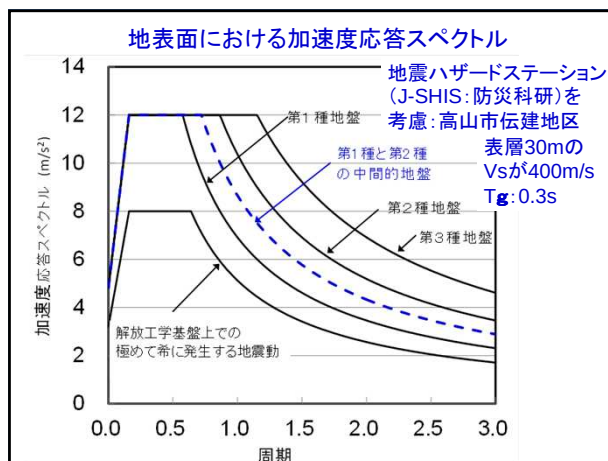
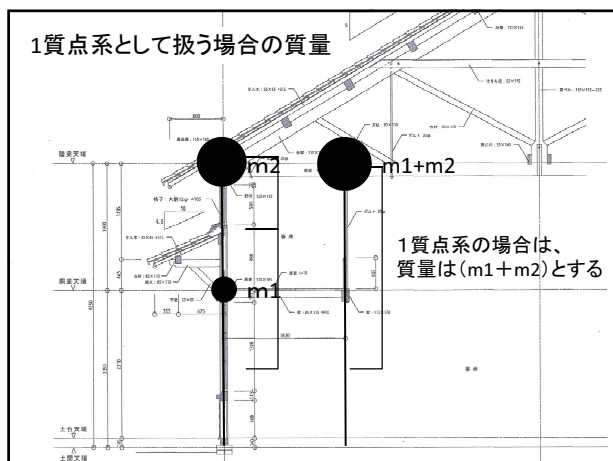
$$C_{u2} / C_{ub} \geq R_{CO} \quad 1.2 R_{CO} \geq C_{u2} / C_{ub} \geq R_{CO}$$



### 金甚劇場の耐震補強設計クライテリア (積雪荷重を考慮しない場合)

- ・ 損傷限界層間変形角(代表層間変形角)  $1/90\text{rad}$
- ・ 安全限界層間変形角(代表層間変形角)  $1/20\text{rad}$
- ・ 安全限界層間変形角(最大層間変形角)  $1/15\text{rad}$   
(積雪荷重(積雪量1m)を考慮する場合)
- ・ 崩壊・倒壊限界層間変形角(代表層間変形角)  $1/15\text{rad}$
- ・ 崩壊・倒壊限界層間変形角(最大層間変形角)  $1/13\text{rad}$

・ 地盤種別: 第2種地盤⇒1.5種地盤とする場合の根拠



### Ai(せん断力係数分布)による検討

$$A_1 = 1 + (1/\sqrt{\alpha_1} - \alpha_1) (2T/(1+3T))$$

A2: 2階のせん断力係数算定用

| $\alpha_2$ : 2階の重量/(2階+1階の重量) |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| $\alpha_2$                    |      | 0.9  | 0.7  | 0.5  |
| 固有周期                          | 0.5秒 | 1.06 | 1.20 | 1.36 |
|                               | 1.0秒 | 1.08 | 1.25 | 1.45 |

1質点(m2+m1)系  
 $Q_1 = (m_2 + m_1) \cdot 0.2$

$m_2$   
 $C_2 = 1.08 \cdot 0.2$   
 $Q_2 = m_2 \cdot 0.216$   
 $m_1$   
 $C_1 = 1.0 \cdot 0.2$   
 $Q_1 = (m_2 + m_1) \cdot 0.2$

### 層の復元力の例

