

### 3. 地震最大応答の特性

本章では、平面骨組モデルによる弾塑性地震応答解析を行い、地震時最大応答について検討する。地震動時刻歴波形に対する応答を数値積分法により逐次算出する弾塑性地震応答解析は、現状において、真の応答に最も近い値を算出し得る方法であると考えられる。

多自由度系の地震応答は、縮約した等価 1 自由度系の最大応答と、構造物内の最大応答の分布との掛け合せとして捉えることができる。1 自由度系の地震応答については古くから研究が行われ、弾塑性系においてもその最大応答を精度良く推定する方法も確立されてきている。一方で、構造物内の最大応答の高さ方向の分布については、高次モードが及ぼす影響は未解明な部分が多い。そこで、本章では特に地震最大応答の高さ方向の分布に着目し、構造物や入力地震動に関する諸因子の影響について検討する。

#### 3.1 解析方法

2.1 節で設定した構造物を対して、2.2 節で設定した模擬地震動を水平 1 方向に入力した弾塑性地震応答解析を行う。模擬地震動は、加速度の倍率を様々に変化させて用いる。振動系モデルは、2.1.2 項に示したキの字形の平面骨組モデルとする。

##### 3.1.1 地震応答解析

地震応答解析においては、減衰を適切にモデル化する必要がある。しかし、減衰については、未だ現象として十分に解明されておらず、実現象に忠実な減衰の設定を行うためには多くの課題が残されている。多自由度系の応答の分布に着目する場合、特に、高次の減衰の与え方が大きな影響を及ぼすと考えられる。本研究では、地震応答解析における減衰の与え方は、現状で最も頻繁に用いられる方法を採用する。すなわち、減衰は、速度に比例する粘性減衰を考慮し、減衰マトリクス $[C]$ は、塑性化後の時間とともに変化する瞬間的な剛性マトリクス $[K]$ のみに比例するものとする。減衰マトリクス $[C]$ は、式3.1.1で表される。

$$[C] = \beta_K [K] \quad (3.1.1)$$

比例定数 $\beta_K$ は式3.1.2により設定し、弾性 1 次モードに対する減衰定数 ${}_1h$ を3.0%とする。

$$\begin{aligned} \beta_K &= 2 \frac{{}_1h}{{}_1\omega} \\ &= \frac{{}_1h {}_1T}{\pi} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

ここに、 ${}_1\omega$ ：弾性 1 次固有円振動数、 ${}_1T$ ：弾性 1 次固有周期である。

上述のように、高次減衰モデルとしては剛性比例型が最も一般的に用いられるが、現実の鉄筋コンクリート構造物の実測によれば、高次モードの減衰定数は剛性比例型と減衰定数一定型の間中間的な傾向を示す<sup>3.1.1)</sup>とも言われている。本研究において剛性比例型の高次減衰モデルを採用すること

は、減衰定数一定型あるいは質量比例型と比較すれば、高次の減衰を大き目に見積もり、高次振動の影響を小さ目に評価することになる。

数値積分は、Newmark  $\beta$  法で $\beta$ を0.25とする平均加速度法を用い、時間刻みは0.005秒とする。

### 3.1.2 モードへの展開

地震最大応答の分布をより定量的に捉えるために、地震応答解析で得られた応力と変形の分布を固有モードに展開して検討する。構造物の地震最大応答を代表点の最大応答と構造物内の分布の掛け合せとして捉えようとした時、1次モードの応答が前者の指標となり、高次モードの応答と1次モードの応答の比が後者の指標となる。

剛床を仮定した多層構造物の水平1方向の振動においては、構造物の階数分の自由度が存在する。 $n$ 層建ての構造物の各階の床の応答変位 $\{y\}$ は、 $n$ 個の固有モードの線形和として式3.1.3で表せる。

$$\{y\} = \sum_{m=1}^n {}_m y \cdot {}_m \beta \{ {}_m u \} \quad (3.1.3)$$

ここに、 ${}_m \beta$ :  $m$ 次刺激係数、 $\{ {}_m u \}$ :  $m$ 次固有関数である。 ${}_m y$ は  $m$ 次等価変位であり、式3.1.3に対して前から  ${}_m \beta \{ {}_m u \}^T [M]$ を掛け、固有ベクトルの直交性を利用すれば式3.1.4である。

$${}_m y = \frac{{}_m \beta \{ {}_m u \}^T [M] \{y\}}{{}_m M} \quad (3.1.4)$$

ここに、 ${}_m M$ :  $m$ 次等価質量である。 $m$ 次等価質量  ${}_m M$ は、式3.1.5である。

$$\begin{aligned} {}_m M &= {}_m \beta \{ {}_m u \}^T [M] \{1\} \\ &= {}_m \beta \{ {}_m u \}^T [M] {}_m \beta \{ {}_m u \} \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

弾塑性系において弾性域を超える応答を生じる場合、剛性の変化に伴って  $m$  次固有関数 $\{ {}_m u \}$ も変化する可能性がある。そのため、弾性時の振動形を用いる式3.1.4による  ${}_m y$ は、厳密の意味で  $m$  次モードの応答とは言えない。しかしながら、1次の算定値 ${}_1 y$ により1次モードの応答を大略的に知ることができ、また、高次の算定値と1次の算定値の比  ${}_m y / {}_1 y$ により応答変位分布の弾性1次モード比例形からのずれを評価することができる。以後、特に断りがない限り、塑性域における  $m$  次等価変位  ${}_m y$ の算出においても、弾性時の振動形を用いることにする。

床の変位と同様に、各層の応答層せん断力 $\{Q\}$ から式3.1.6により算出される震力 $\{P\}$ も、 $n$ 個の固有モードの線形和として式3.1.7で表すことができる。

$$\begin{aligned} P_i &= Q_i - Q_{i+1} & (i=1, 2, \dots, n-1) \\ &= Q_i & (i=n) \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

$$\{P\} = [M] \sum_{m=1}^n {}_m a \cdot {}_m \beta \{ {}_m u \} \quad (3.1.7)$$

ここに、 ${}_m a$  は  $m$  次等価加速度であり、式3.1.7に対して前から  ${}_m \beta \{ {}_m u \}^T$  を掛け、固有ベクトルの直交性を利用すれば式3.1.8のようになる。

$${}_m a = \frac{{}_m \beta \{ {}_m u \}^T \{ P \}}{{}_m M} \quad (3.1.8)$$

$m$  次等価加速度  ${}_m a$  に  $m$  次等価質量  ${}_m M$  を乗じたものを  $m$  次等価せん断力  ${}_m Q$  と定義する。

$$\begin{aligned} {}_m Q &= {}_m a {}_m M \\ &= {}_m \beta \{ {}_m u \}^T \{ P \} \end{aligned} \quad (3.1.9)$$

震力  $\{ P \}$  と各階の床の変位  $\{ y \}$  の関係は式3.1.10である。

$$\{ P \} = [K] \{ y \} \quad (3.1.10)$$

ここに、 $[K]$ ：剛性マトリクスである。

式3.1.10にして  ${}_m \beta \{ {}_m u \}^T / {}_m M$  を前から掛ければ、左辺は  $m$  次等価加速度  ${}_m a$  であり、右辺は式3.1.11のように変形できる。

$$\begin{aligned} \frac{{}_m \beta \{ {}_m u \}^T [K] \{ y \}}{{}_m M} &= \frac{{}_m \beta \{ {}_m u \}^T [K] \left( \sum_{m=1}^n {}_m y \cdot {}_m \beta \{ {}_m u \} \right)}{{}_m M} \\ &= {}_i \omega^2 {}_i y \end{aligned} \quad (3.1.11)$$

ここに、 ${}_m \omega$ ： $m$  次固有円振動数である。

$m$  次等価加速度  ${}_m a$  と  $m$  次等価変位  ${}_m y$  の関係式として式3.1.12が得られる。

$${}_m a = {}_m \omega^2 {}_m y \quad (3.1.12)$$

## 参考文献

3.1.1) 日本建築学会：建築物の減衰、pp.138、2000年10月。

### 3.2 代表点の最大応答

本研究では、構造物の地震最大応答を代表点の最大応答と構造物内の分布という2つに分けて捉え、特に後者の構造物内での分布に着目しようとしている。過去の研究では、構造物の代表点の応答は縮約1自由度系応答との対応関係については十分論じられてきており、さらに、弾塑性1自由度系の地震応答の簡略的な評価方法としては等価線形化法、エネルギーに基づいた方法などさまざまな方法が提案されてきている。そのため、本研究では、代表点の応答に関する新しい評価方法を提案することを目的とはしていない。しかし、代表点の応答の基本的な特性の検討と、それが縮約1自由度系の地震応答解析で評価可能であるかについては改めて確認する必要がある。

#### 3.2.1 1次等価変位と全体塑性率

式3.1.3で算出される1次等価変位 ${}_1y$ に対し、その最大値 ${}_1y_{\max}$ を最大応答1次等価変位とする。この大きさを規準化して捉えるために、全体塑性率 ${}_1\mu$ を導入する。全体塑性率 ${}_1\mu$ は、1次等価変位 ${}_1y$ に関する塑性率であり、最大応答1次等価変位 ${}_1y_{\max}$ を降伏1次等価変位 ${}_1y_y$ で除した値である。

##### (1) 降伏1次等価変位の算出

降伏1次等価変位 ${}_1y_y$ は構造物ごとに固有の値であり、当該構造物の静的漸増載荷解析結果により算出することにする。1次等価降伏変位 ${}_1y_y$ の具体的な算定手順は以下の1から3までである。

手順1：外力分布形を弾性1次モード比例分布形とする漸増載荷解析を行う。弾性1次モード比例外力分布形 $\{f\}_{1st}$ は式3.2.1により表される。

$$\{f\}_{1st} = [M] {}_1\beta \{ {}_1u \} \quad (3.2.1)$$

ここに、 ${}_1\beta$ ：1次刺激係数、 $\{ {}_1u \}$ ：1次固有関数、 $[M]$ ：質量マトリクスである。

手順2：各荷重ステップにおいて、各階の床の変位 $\{y\}$ および外力 $\{P\}$ より、1次等価変位 ${}_1y$ と1次等価せん断力 ${}_1Q$ を式3.2.2および式3.2.3を用いて算出する。

$${}_1y = \frac{{}_1\beta \{ {}_1u \}^T [M] \{y\}}{{}_1M} \quad (3.2.2)$$

$${}_1Q = {}_1\beta \{ {}_1u \}^T \{P\} \quad (3.2.3)$$

ここに、 ${}_1M$ ：1次等価質量である。

手順3：1次等価せん断力 ${}_1Q$ －1次等価変位 ${}_1y$ 関係をトリリニア型に置換する。トリリニア型へ置換する際には、1次等価降伏変位 ${}_1y_y$ のおよそ2倍の変位までの歪エネルギーの総和が等しくなるように設定する。トリリニア型曲線への置換例を図3.2.1に示す。置換後の第2折れ点の変位が1次等価降伏変位 ${}_1y_y$ である。

固有周期を変動因子とした7種類の構造物に対して算出した1次等価降伏変位 ${}_1y_r$ は、構造物12aから構造物12gまで順に、0.0610, 0.0958, 0.137, 0.226, 0.304, 0.457, 0.607mである。全構造物で質量の分布が等しく、各構造物の剛性は弾性1次固有周期 ${}_1T$ の2乗に反比例し、耐力は振動特性係数 $R_t$ に比例するので、1次等価降伏変位は $R_t{}_1T^2$ に比例する。

## (2) 固有周期の影響

固有周期を7種類の構造物の模擬地震動 ens2に対する最大応答1次等価変位および全体塑性率を図3.2.2に示す。入力地震動の加速度を0.05倍, 0.20倍, 0.40倍…と0.20倍刻みで増大させて用いる。各図は、入力地震動の加速度の倍率と最大応答1次等価変位または全体塑性率の関係を示している。

同一の地震動倍率において、最大応答1次等価変位は固有周期の長い構造物12gほど大きい。これは変位応答スペクトルの特性と関係があり、ens2は固有周期が長いほど大きなスペクトル値を示すためである。一方、全体塑性率は固有周期の短い構造物12aほど大きい。固有周期の長い構造物では振動特性係数 $R_t$ により強度を低減させているが、依然、固有周期の短い構造物に比べて相対的に強度が高いことを示している。

構造物が弾性域に収まる入力地震動倍率においては、構造物間の最大応答1次等価変位の比率は、構造物の弾性1次固有周期の変位応答スペクトル値の比率とほぼ等しい。例えば、減衰5.0%の目標加速度応答スペクトルにおける弾性1次固有周期の応答スペクトル値は、構造物12cを基準にすれば、構造物12aは1.29倍、構造物12gは0.30倍であり、これに固有周期の比率の2乗を乗じ、変位応答スペクトル値の比率に変換すれば、構造物12aは0.67倍、構造物12gは3.33倍である。一方、地震動倍率0.05倍に対する最大応答1次等価変位の比率は、構造物12aは0.60倍、構造物12gは3.82倍と、弾性応答スペクトルの比から予測される値とは若干異なる。これは、構造物の地震応答解析では1次モードに対する減衰定数を3.0%としているので、固有周期の違いにより減衰の効果が異なるためである。

地震動の倍率を増大させるほど、構造物間の最大応答1次等価変位の比率は1.0に近づいていく。構造物の塑性化に伴い固有周期が伸びることにより、応答スペクトルの加速度一定領域から速度一定領域へ、速度一定領域から変位一定領域へ遷るためである。また、固有周期の短い構造物ほど、小さい地震動倍率で降伏強度に達し、固有周期の伸びも大きい。構造物12cを基準にすると、地震動倍率1.0では、構造物12aは0.63倍、構造物12gは2.01倍であり、地震動倍率2.0では、構造物12aでは0.83倍、構造物12gでは2.19倍である。

## (3) 応答スペクトルの影響

位相特性をensとした4種類の模擬地震動に対する構造物12cおよび構造物12eの全体塑性率を比較して図3.2.3に示す。模擬地震動の加速度は、0.05倍, 0.20倍, 0.40倍…と0.20倍刻みで増大させる。図は、模擬地震動の加速度の倍率と全体塑性率 ${}_1\mu$ の関係を示している。また、各模擬地震動の加速度の倍率を2.0として入力した時の構造物12cにおける最大応答層間変位、および、加速度の倍率を2.4として入力した時の構造物12eにおける最大応答層間変位を図3.2.4に示す。

4種類の模擬地震動の弾性加速度応答スペクトルは、構造物12eの弾性1次固有周期である1.20秒においては等しい値を示し、構造物12cの弾性1次固有周期である0.72秒においては異なる値を示す。そのため、弾性域において、構造物12eでは4種類の入力地震動に対する塑性率はほぼ等しい値となり、構造物12cでは全体塑性率の比率は加速度応答スペクトル値の比率とほぼ等しい。構造物12cにおいて、入力地震動倍率を増大させ、倍率0.6あるいは0.8程度とすると、4種類の入力地震動に対する全体塑性率は近い値となる。構造物の塑性化の影響により、固有周期が伸びるためである。このように、弾性1次固有周期、あるいは固有周期の伸びを考慮した1次等価周期よりも短い周期帯での応答スペクトル特性が異なっても、最大応答1次等価変位はその影響を受けない。これは、構造物12eの地震動倍率2.0未満、および構造物12cの地震動倍率0.6または0.8程度においてあてはまる。

両構造物において入力地震動の倍率をさらに増大させると、4種類の入力地震動に対する全体塑性率に差が生じる。構造物12cにおいて加速度の倍率を2.0とした時、全体塑性率が最も小さいens1は最も大きいens4の81%である。構造物12eにおいて加速度の倍率を2.4とした時、ens1はens4の88%である。このような差が生じる要因として2つの要因が考えられる。一つ目として、短周期の応答スペクトル特性の違いそのものにより、1自由度系の最大応答値が変動する可能性がある。もう一つは、弾性の振動モードで展開して算出した1次等価変位は、1次モードの真の応答変位とは異なることである。構造物が塑性化し、塑性化する部位が偏在すれば、振動モードが変化する。図3.2.4によれば、ens1に対する応答はどちらも上層部に応答変形が偏っている。これを無視して弾性振動モードで展開すれば誤差が生じることになる。振動モードの変化を考慮した展開は困難であるので、その誤差がどの程度であるかは不明である。一つ目の要因については、次の項で検討することにする。

### 3.2.2 縮約1自由度系モデルとの比較

縮約1自由度系モデルの地震応答解析により得られる最大応答変位と、平面骨組モデルによる最大応答1次等価変位との対応関係について検討する。

#### (1) 縮約1自由度系モデルの作成

縮約1自由度系モデルにおいて、系の質量は1次等価質量 $M$ とし、系の復元力特性は、降伏1次等価変位 $y_y$ を算出する際の手順3においてトリリニア型に置換した1次等価せん断力－1次等価変位関係とする。減衰定数は3.0%とする。

なお、縮約1自由度系モデルの設定方法については、4.2.1項にて検討を行う。

#### (2) 最大応答1次等価変位の比較

縮約1自由度系モデルによる最大応答変位と平面骨組モデルによる最大応答1次等価変位の比を図3.2.5に示す。構造物12cおよび構造物12eを対象に、位相特性をensとした4種類の模擬地震動を

用い、加速度の倍率を0.05倍, 0.20倍, 0.40倍…と0.20倍刻みで増大させている。また、模擬地震動 ens1, ens4の加速度の倍率を2.0とした入力（以下、ens1(2.0)およびens4(2.0)と略記）に対する構造物12cの応答、および模擬地震動ens1およびens4の加速度の倍率を2.4とした入力（ens1(2.4)およびens4(2.4)）に対する構造物12eの応答に関して、1自由度系モデルの塑性率と平面骨組モデルの全体塑性率を比較して表3.2.1に示す。さらに、構造物12cのens1(2.0)およびens4(1.0)に対する1自由度系モデルによる応答せん断力ー応答変位関係と、平面骨組モデルによる応答1次等価せん断力ー応答1次等価変位を比較して図3.2.6に示す。

図3.2.5によれば、1自由度系モデルの最大応答変位と平面骨組モデルの最大応答1次等価変位の比はほぼ1.0程度であり、縮約1自由度系モデルの最大応答変位により最大応答1次等価変位は概ね推定可能であると言える。4種類の模擬地震動の中では概してens4が最も1.0に近く、1自由度系モデルによる最大応答1次等価変位の推定精度が良い。ens4では、構造物12cの加速度の倍率0.4の時と、構造物12eの加速度の倍率が3.0を超える時を除いて、1自由度系モデルに対する平面骨組モデルの比は0.94から1.03までの間に収まっている。最も推定精度が悪いens1でも、比率は概ね0.9から1.1までの間に収まっており、構造物12cの加速度の倍率0.2の時と、構造物12eの加速度の倍率2.6から3.2までにおいて比率が1.0からやや大きく外れている。

図3.2.6によれば、12c-ens4(2.0)では平面骨組モデルによる履歴ループと1自由度系モデルによる履歴ループは非常に良く似ている。これに対して、12c-ens1(2.0)では、平面骨組モデルは極大点付近で丸みを帯びたループ形状となり、1自由度系の角張ったループ形状とは異なっている。最大応答変位のみに着目すれば大差はないが、各サイクルの極大点の変位に大きな差がある場合もある。12c-ens1(2.0)は、塑性化する部位が偏在し、振動モードの変化が大きい応答である。このような応答に対しては、1次等価変位の応答の推定を必ずしも十分精度良く行えるわけではない。

縮約1自由度系モデルの最大応答変位に関して、構造物12cではens1(2.0)とens4(1.0)の比は0.86であり、構造物12eではens1(2.4)とens4(2.4)の比は0.91%である。前者には、弾性固有周期における応答スペクトルの違いの影響も含まれるが、後者にそれはあてはまらない。1次固有周期より長い周期帯での応答スペクトル特性が同一でも、短い周期帯での応答スペクトル特性が異なる場合、弾塑性1自由度系の最大応答変位も異なってくる。平面骨組モデルにおける全体塑性率の差の大部分もこれによるものであり、振動モードの変化の影響は小さいと考えられる。

ここで採りあげた例では、短周期の加速度応答の小さいens4の方がens1よりも最大応答変位が10%程度増大しているが、別の位相特性を有する模擬地震動に関して同様の検討を行えば、大小関係も比率も異なってくる。この違いに関しては未検討である。

表3.2.1 平面骨組モデルと縮約1自由度系モデルによる全体塑性率の比較

		ens1 (2.0)	ens4 (2.0)	$\frac{\text{ens1}}{\text{ens4}}$			ens1 (2.4)	ens4 (2.4)	$\frac{\text{ens1}}{\text{ens4}}$
構造物 12c	平面骨組	2.49	3.08	0.81	構造物 12e	平面骨組	2.24	2.54	0.88
	1自由度	2.62	3.04	0.86		1自由度	2.38	2.61	0.91
	平／1	0.95	1.01			平／1	0.94	0.97	

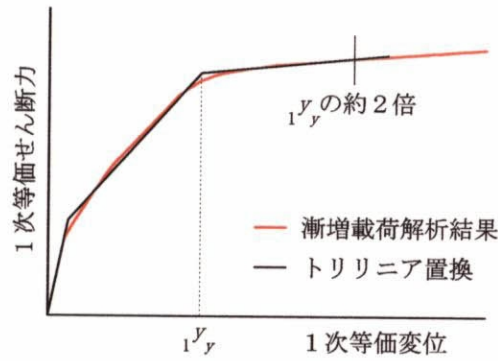
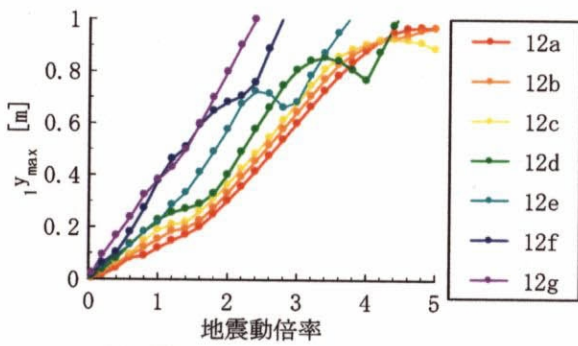
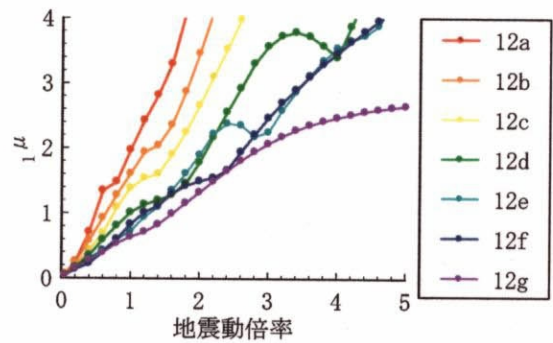


図3.2.1 1次等価せん断力ー1次等価変位関係



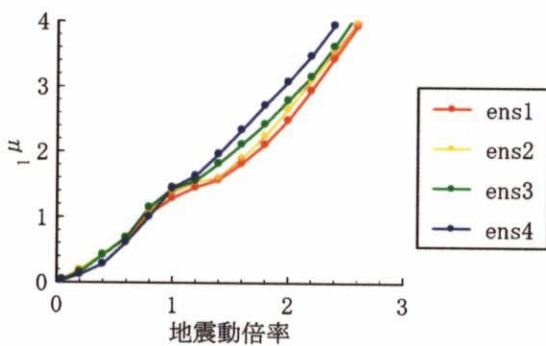
(a) 最大応答1次等価変位



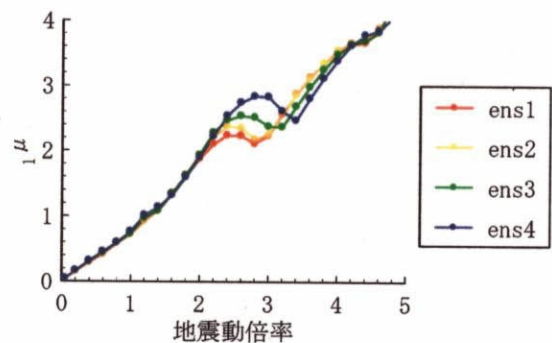
(b) 全体塑性率

(1) ens2に対する応答

図3.2.2 最大応答1次等価変位と全体塑性率 ー固有周期の影響ー



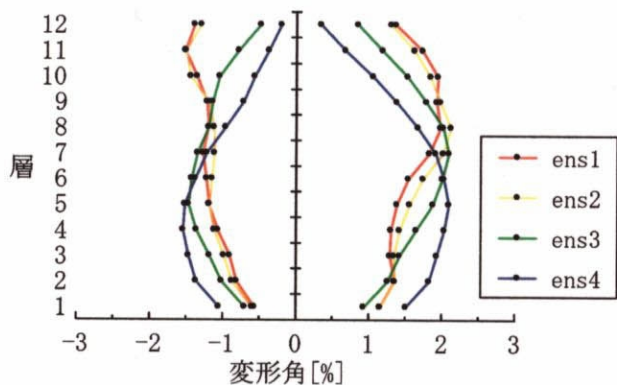
(1) 構造物12c



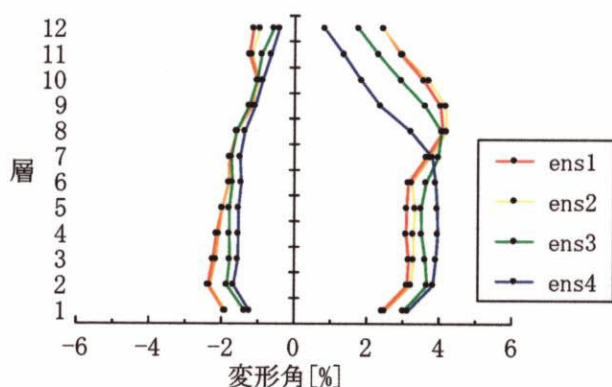
(2) 構造物12e

図3.2.3 全体塑性率 ー応答スペクトルの影響ー



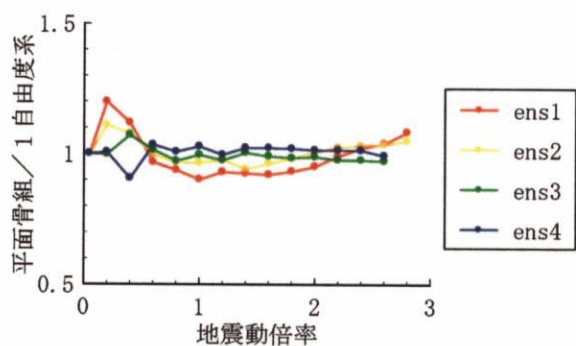


(1) 構造物12c×地震動倍率2.0

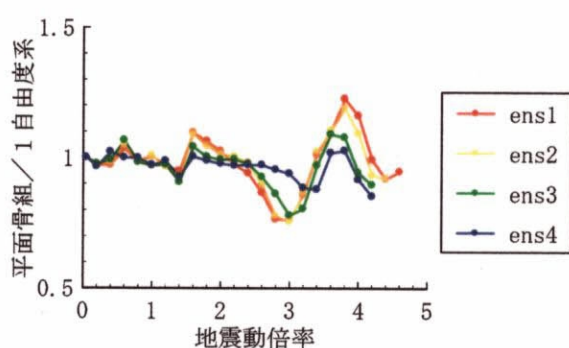


(2) 構造物12e×地震動倍率2.4

図3.2.4 最大応答層間変位 — 応答スペクトルの影響 —

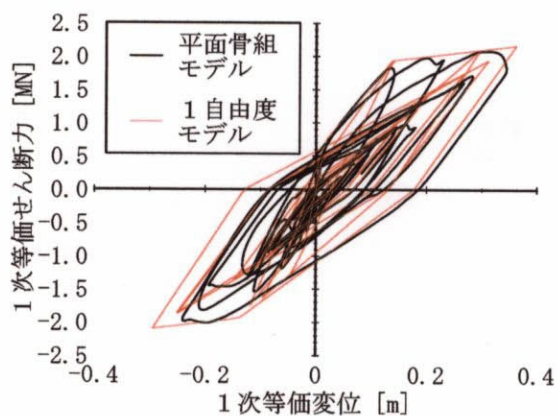


(1) 構造物12c

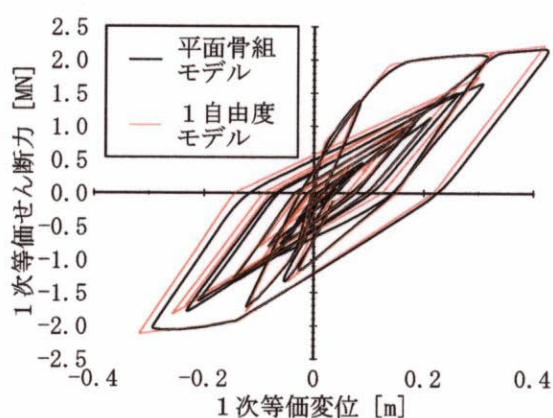


(2) 構造物12e

図3.2.5 最大応答1次等価変位の比較



(1) 12c-ens1(2.0)



(2) 12c-ens4(2.0)

図3.2.6 応答1次等価せん断力—応答1次等価変位の比較

### 3.3 最大応答の分布

本節では、層間変位、部材の変形、層せん断力あるいは部材の応力などの地震最大応答について、構造物内での高さ方向の分布に着目し、構造物や入力地震動に関する諸因子の影響を検討する。

#### 3.3.1 変形分布の指標

##### (1) 最大応答層間変位と部材の塑性率の分布

3例の構造物と入力地震動の組み合わせを取りあげ、地震応答解析で得られる各層の最大応答層間変位の分布および部材の塑性率の分布を図3.3.1に、12層および1層の応答層せん断力－応答層間変位関係を図3.3.2に示す。例は、模擬地震動 ens4の加速度を1.0倍にした入力地震動に対する構造物12aの応答（以下、12a-ens4(1.0)と略記）、ens2の加速度を1.2倍にした入力地震動に対する構造物12cの応答（12c-ens2(1.2)）、および、ens1の加速度を1.6倍にした入力地震動に対する構造物12eの応答（12e-ens1(1.6)）である。解析結果は、応答の正負を区別し、柱および梁の変形の正は、層間変形を正方向へ増大させる向きとする。部材の塑性率の分布図において、縦軸は階を示し、1階については1層柱脚の塑性率を示し、2階から13(R)階については対応する階の梁端の塑性率を示す。部材の塑性率は、部材端の最大応答回転角を降伏回転角で除した値と定義する。また、応答層せん断力は、該当層以上の重量で除した層せん断力係数として示している。

各構造物の設計は、各階の梁の塑性率が同一になることを指向しているものであると言える。これは、各階の梁の降伏強度を、層せん断力係数  $A_f$  分布の静的外力による設計応力のちょうど1.0倍としているためである。部材の塑性率の分布図によれば、3例とも、応答の正負で梁の塑性率の分布性状が異なっている。負側について比較すれば、12a-ens4(1.0)では下層部で相対的に大きく、12c-ens2(1.2)では中上層部で大きく、12e-ens1(1.6)では上層部で大きい。以上から、梁の塑性率の分布により、12a-ens4(1.0)では下層増大型、12c-ens2(1.2)では中上層部増大型、12e-ens1(1.6)では上層部増大型の応答であると判断できる。

各層の層間変位は、各階の梁あるいは1層柱脚の塑性変形に大きく支配されるため、部材の塑性率の分布と連動して考えることができる。例えば、隣接する部材の塑性率が大きい12c-ens2(1.2)の12層や、12a-ens4(1.0)の1層では、応答層せん断力－応答層間変位関係においても降伏現象が確認できる。簡単に考えれば、層間変位は、剛比に応じた梁の変形と曲げ降伏しない柱の変形の和であるので、層間変位に関する塑性率は、隣接する梁の塑性率を若干下回る程度である。ただし、降伏変位層間変位は、4.2.2項において検討したように外力分布形の影響を受け、入力地震動ごとに変化する可能性もあるので、層間変位に関する塑性率は導入しにくい。

各構造物の設計において、部材断面寸法を上層漸減型としているものの、層間変位の分布を特に強く意識していない。そのため、最大応答層間変位の分布図によれば、各構造物とも、上層部の最大応答層間変位は下層部に比べて相対的に小さい。また、部材断面が小さく、固有周期の長い構造物ほど、最大応答層間変位が大きい。部材の塑性率の分布図により、応答変形分布の性状がより簡明に表現され、分布の定性的な性状を把握することができる。

## (2) 等価最大応答層間変位

本節では、層間変位に関する最大応答の分布の検討が目的であるので、これを固有モードに展開することを試みる。各層の最大応答層間変位 $|\delta|_{\max}$ を足し合わせて求める各階床の仮の最大応答変位 $\{y'\}$  (式3.3.1)を用いて、 $m$ 次等価最大応答層間変位 ${}_m\delta$ を式3.3.2により算定する。

$$y_j' = \sum_{k=1}^j |\delta_k|_{\max} \quad (3.3.1)$$

$${}_m\delta = \frac{{}_m\beta \{ {}_m u \}^T [M] \{ y' \}}{{}_m M} \quad (3.3.2)$$

ここに、 ${}_m\beta$ :  $m$ 次刺激係数、 $\{ {}_m u \}$ :  $m$ 次固有関数、 ${}_m M$ :  $m$ 次等価質量、 $[M]$ : 質量マトリクスである。

振動論的に言えば、等価最大応答層間変位 ${}_m\delta$ の意味は希薄であるが、床の応答変位により算出した等価変位 ${}_m y$ と同様に、高次と1次の比 ${}_m\delta/{}_1\delta$ は、最大応答層間変位の分布の弾性1次モード比例形からのずれの指標となる。

仮に、最大応答 $m$ 次等価変位 ${}_m y_{\max}$ とすべての層の最大応答層間変位 $|\delta|_{\max}$ が同じ時刻に生じると仮定すれば、 $m$ 次等価最大応答層間変位 ${}_m\delta$ は最大応答 $m$ 次等価変位 ${}_m y_{\max}$ と等しい値である。構造物の振動は1次振動が卓越すると考えれば、各層の最大応答層間変位は最大応答1次等価変位と近い時刻に生じると考えられるので、1次等価最大応答層間変位 ${}_1\delta$ は最大応答1次等価変位 ${}_1 y_{\max}$ とほぼ等しい。高次振動の影響により各層の最大応答層間変位の生じる時刻に差が生じれば、両者の間に差が生じる。一方、高次等価変位と1次等価変位が同時刻に最大応答を生じるとは限らないので、高次の等価最大応答層間変位 ${}_m\delta$ は、最大応答等価変位 ${}_m y_{\max}$ とはかけ離れた値になる可能性が高い。このことから、高次の等価最大応答層間変位は高次振動の大きさを示すものではなく、最大応答層間変位の分布の弾性1次モード比例形からのずれの指標でしかない。

等価最大応答層間変位の高次と1次の比 ${}_m\delta/{}_1\delta$ 、および全体塑性率 $\mu$ の算出結果を表3.3.1に示す。例として、12a-ens4(1.0)、12c-ens2(1.2)、および12a-ens4(1.6)の3例を採り上げる。図3.3.1と対応する組み合わせである。

下層部の部材塑性率が相対的に大きい12a-ens4(1.0)では、 ${}_2\delta/{}_1\delta$ は0.2程度の値を示し、逆に、中上層部の部材塑性率が相対的に大きい12c-ens2(1.2)では、 ${}_2\delta/{}_1\delta$ は-0.25程度の値を示す。2次の刺激関数は下層部で正の値、上層部で負の値であるので、 ${}_2\delta/{}_1\delta$ は、下層部の変形が相対的に大きい場合に正の値をとり、上層部の変形が相対的に大きい場合には負の値をとる。12a-ens4(1.0)および12c-ens2(1.2)の2例では、 ${}_3\delta/{}_1\delta$ 、 ${}_4\delta/{}_1\delta$ はごく小さい。上層部の部材の塑性率が大きく、かつ、中層部の部材塑性率が小さい12e-ens1(1.6)の負側では、 ${}_2\delta/{}_1\delta$ は0.0に近く、 ${}_3\delta/{}_1\delta$ は0.2程度である。3次の刺激関数は下層部および上層部で正の値、中層部で負の値であるので、12e-ens1(1.6)の3次等価最大応答層間変位 ${}_3\delta$ は正の値として計上される。

このように、下層部に変形が偏るほど ${}_2\delta/{}_1\delta$ は正側に大きく、逆に、上層部に変形が偏るほど ${}_2\delta/{}_1\delta$ は負側に大きくなる。上層部および下層部の変形がともに大きければ、 ${}_3\delta/{}_1\delta$ が正側に大きくなる。

表3.3.1 全体塑性率と等価最大応答層間変位

構造物	入力地震動	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$	${}_4\delta/{}_1\delta$
12a	ens4(1.0)	1.38 -1.52	0.24 0.20	0.095 0.028	0.007 -0.036
12c	ens2(1.2)	1.33 -1.54	-0.26 -0.27	0.031 -0.002	0.043 0.025
12e	ens1(1.6)	1.35 -0.97	-0.034 -0.033	0.057 0.17	0.086 -0.083

### 3.3.2 変形分布の要因

構造物の振動は、モードの振動の重ね合わせである。モードの弾性時の最大応答は、モードの固有周期と入力地震動の応答スペクトル特性の関係のみによって決定される。各モードの応答を足し合わせれば、構造物の応答になる訳である。構造物の応答の最大値を問題の対象とする時、各モードの最大応答が常に同時に生じるとは考えにくいので、モードの応答の位相特性、すなわち複数のモードの重なり方も最大応答を決定する因子になってくる。さらに、構造物が塑性化することを考えれば、別の因子も絡み問題が複雑化するが、依然、モードの固有周期と応答スペクトル特性の関係が構造物の応答を決定する第一の因子であると考えられる。

#### (1) 固有周期と応答スペクトル

まず、構造物の最大応答変形の分布における応答スペクトル特性の影響について検討する。固有周期の異なる3種類の構造物に対して、応答スペクトルの異なる地震動を入力した時の部材塑性率の分布の違いと等価最大応答層間変位の違いを図3.3.3に示す。

図3.3.3(1)は、位相特性を ens とした4種類の模擬地震動に対する構造物12e の応答の比較である。各模擬地震動の加速度の倍率は2.0とし、正側の応答について検討する。構造物12e の弾性1次固有周期である1.20秒は、4種類の模擬地震動の弾性加速度応答スペクトル値が等しい領域にある。そのため、構造物の応答における全体塑性率も4種類でほぼ等しい値となる。短周期における加速度応答スペクトル値は、大きい順に ens1, ens2, ens3, ens4であり、弾性2次固有周期である0.43秒は、4種類の応答スペクトル値が異なる値を示す領域にある。梁の塑性率の分布に関しては、上層部で大きな差が見られる。短周期における加速度応答スペクトル値が大きいほど、上層部の梁の塑性率が大きい。最上層の最大応答層間変位に関して、ens4に対する応答を基準にすれば、ens1では2.75倍、ens2では2.52倍、ens3では1.57倍である。中層部より下の層では4種類の応答に大差はない。等価最大応答層間変位の比 ${}_2\delta/{}_1\delta$ は、ens1では負の値、ens4では正の値である。短周期における加速度応答スペクトル値が小さいほど、正側に大きい値である。

図3.3.3(2)は、位相特性を ens とした4種類の模擬地震動に対する構造物12a の応答の比較である。構造物12a の弾性1次固有周期である0.48秒付近では、4種類の模擬地震動の弾性加速度応答スペクトル値が異なる。そのため、模擬地震動の加速度を等倍として入力した場合、構造物の応答における全体塑性率も4種類で異なる値となる。そこで、応答変形分布の違いをより明確にするた

めに、模擬地震動の加速度の倍率を微調整して、4種類の応答における全体塑性率がほぼ等しくなるようにする。ここでは、全体塑性率を2.0に設定する。ens4を除く3波の倍率はほぼ1.0であり、ens4の倍率は若干大きく1.21である。正側の応答について検討するが、ens1は負側で全体塑性率2.0に達し、正側の全体塑性率は1.86である。梁の塑性率の分布に関しては、6階付近で4種類の応答はほぼ等しく、それより上層部ではens1, ens2, ens3, ens4の順に大きく、下層部では逆の順で大きい。すなわち、短周期における加速度応答スペクトル値が大きいほど上層部の梁の塑性率が大きく、応答スペクトル値が小さいほど下層部の梁の塑性率が大きい。最大応答層間変位に関して、最上層におけるens1のens4に対する比は2.88、1層のens4のens1に対する比は2.00である。6層では4種類の最大応答層間変位はほぼ等しい。等価最大応答層間変位の比 $\delta_2/\delta_1$ は、ens1では負の値、ens4では正の値である。その大小関係は、(1)に示した構造物12eの例と同じであるが、地震動間の値の差は構造物12eの例より大きい。

図3.3.3(3)は、位相特性をensとした4種類の模擬地震動に対する構造物12cの応答の比較である。(2)に示した構造物12aの例と同様に、4種類の応答における全体塑性率が1.6となるように、模擬地震動の加速度の倍率を調整している。正側の応答について検討する。梁の塑性率の分布における4種類の応答の大小関係は、構造物12aと全く同じであり、6階付近を境に、それより上層部ではens1が大きく、下層部ではens4が大きい。最大応答層間変位に関して、最上層におけるens1のens4に対する比は5.06、1層のens4のens1に対する比は1.39である。構造物12aの例と比較すると、最上層での差が大きい。等価最大応答層間変位の比 $\delta_2/\delta_1$ に関して、4種類の値の大小関係は構造物12aの例と同じであるが、各値は構造物12aの例と比べて負側にシフトしている。

以上の3例においてはいずれも、短周期における加速度応答スペクトル値が大きい入力地震動に対して上層部増大型の応答であり、逆に、短周期における加速度応答スペクトル値が小さい入力地震動に対して下層部増大型の応答である。

## (2) モードの変位応答の重なり合い

応答スペクトルの違いによる応答変形の分布の違いについて詳細に検討するため、ens2の加速度を1.40倍にした入力地震動に対する構造物12cの応答（以下、12c-ens2(1.40)と略記）、および、ens4の加速度を1.17倍にした入力地震動に対する構造物12cの応答（12c-ens4(1.17)）を採り上げる。これらは、図3.3.3(3)に示した例である。12c-ens2(1.40)は上層部増大型であり、12c-ens4(1.17)は下層部増大型である。

2種類の地震応答について、各次等価変位 $y$ の時刻歴応答を図3.3.4に示す。同図は、時刻0.0秒から10.0秒までの時刻歴応答である。なお、2種類の地震応答において、すべての層の最大応答層間変位は、時刻5.0秒から7.0秒までの間で生じている。

1次等価変位の応答と2次等価変位の応答を比較すると、2次等価変位の方が多くの短周期成分を含むものの、時刻約5.0秒以降については、両者の卓越周期に大差はなくなる。これは2種類の地震応答ともにあてはまる。12c-ens2(1.40)においては、2次等価変位は1次等価変位と逆位相、すなわち、上層部の応答を増幅する向きで生じる。12c-ens4(1.17)では、2次等価変位は1次等価変位と同位相であり、下層部の応答を増幅する向きで生じる。このように、2種類の地震応答におい

て、2次等価変位は全く逆に生じている。

2種類の地震応答の違いを検討するために、固有周期0.72秒と0.26秒の弾性1自由度系の地震応答解析を行う。これらの固有周期は、構造物12cの弾性1次固有周期および弾性2次固有周期に対応する。2種類の弾性1自由度系のens2(1.40)およびens4(1.17)に対する応答変位を図3.3.5に示す。減衰の設定方法は、構造物の平面骨組モデルによる地震応答解析におけるものと対応させる。すなわち、1自由度系の地震応答解析における減衰は、系の振動数に比例するものとする。減衰定数は、固有周期0.72秒については3.0%とし、固有周期0.26秒については8.3%とする。1自由度系については、線形弾性系の応答と合わせて、弾塑性系モデルの地震応答解析結果も示している。弾塑性系モデルの復元力特性は、3.2.1項において全体塑性率を求める際の1次等価せん断力-1次等価変位関係をトリリニア型に置換したものとする。この弾塑性系の変位応答波形は、1次等価変位の応答波形と酷似したものが得られるが、これについては、3.2節で検討を行った。

一般に、固有周期の短い系では、長周期が卓越した入力地震動に対して、地動慣性力は静的に作用し、入力地震動とはほぼ逆位相の変位応答を生じる。これにあてはまるのが、ens4(1.17)に対する固有周期0.26秒の1自由度系の応答である。その変位応答は、微小振幅の短周期成分を含むものの、正負交番回数(変位0.を跨ぐ回数)が少なく、長周期成分が卓越している。固有周期0.72秒の1自由度系の変位応答との重ねあわせを試みると、固有周期のより長い0.72秒の系の応答の方が位相は若干遅延するが、2種類の系の変位応答はほぼ同じ向きに生じる。これを多自由度系に置き換えて考えれば、1次モードの変位応答の上昇域では、正の2次モードの変位応答が生じることになる。すなわち、2次モードは、下層部の変位を増大する向きで生じる。

一方、ens2(1.40)については、入力地震動の短周期成分によって、固有周期0.26秒の1自由度系の変位応答は大振幅の短周期成分を多く含む。固有周期0.72秒の1自由度系の変位応答の半サイクル(変位0.から極大値あるいは極小値に達し、再び0.に戻るまで)の間に、固有周期0.26秒の1自由度系の応答は正負に振動し、ens4(1.17)ほど明確な影響は伺えない。

12c-ens2(1.40)については、1次振動および2次振動に対応する弾性1自由度系の変位応答の重ね合わせによる検討では現象の解明が困難であった。そこで、12c-ens2(1.40)の地震動の序盤における応答性状を詳細に検討する。時刻1.0秒から4.0秒までの2階と13(R)階の床の速度応答および変位応答を図3.3.6に示す。

入力地震動の波形において、加速度の傾きが急増する時刻がある。この時刻を $t_x$ と置く。時刻 $t_x$ までは、比較的長周期の波により、1次モードが卓越した応答が生じる。この例では、時刻 $t_x$ 付近で各階床の変位は負へ向かう。時刻 $t_x$ において、加速度の変化率に急激な変化があり、短周期成分の加速度が加わる。加わった分を過渡外力とみなせば、過渡外力は負の加速度である。負の地同加速度により、各次モードは正の向きの応答を生じる。時刻 $t_x$ 直後の床の応答速度の分布の略図を図3.3.7に示す。振動は、時刻 $t_x$ 以前から引き続く定常応答と、過渡外力により生じる応答の組み合わせであると考えられる。定常応答による床の速度の分布形は1次振動形に近く、負の向きである。過渡外力による床の速度の分布形は、全次数の振動形を足し合わせた形で、正の向きである。足し合わせれば、下層部の変位は過渡外力による高次モードの応答により打ち消され、上層部では定常の1次モードが卓越する。下層部の変位が低減される結果となる。

上述の現象は、1次振動を励起させる比較的長周期の波の後に、短周期の波が続く時に生じる。ただし、入力地震動の時刻歴特性に依存し、下層部の応答変位は低減されたり、増幅されたりする。仮に、時刻  $t_x$  まで完全に定常な1次振動であれば、地動と応答変位の位相差は  $\pi + \alpha$  ( $\alpha$  は非減衰のとき0.であり、減衰がある場合ほぼ90度未満であると思われる) であるので、ほぼ下層部の応答が低減される。

### (3) 高次等価変位の増大

2次振動に対応する固有周期を有する弾性1自由度系の最大応答変位は、1次振動に対応する弾塑性1自由度系の最大応答変位に対して、ens2(1.40)で8.8%、ens4(1.17)で3.1%とごく少ない。一方で、最大応答2次等価変位は、最大応答1次等価変位に対して、ens2(1.40)で41.2%、ens4(1.17)で19.0%と大きい。2次等価変位が増大する原因として、固有周期の延びと振動モードの変化が考えられる。

構造物の地震応答において、瞬間剛性により算出した固有周期の変化を図3.3.8に示す。固有周期の延びにより、1次振動と同様に、高次振動の応答も増大すると考えられる。1次振動に関しては、弾塑性地震応答解析のように、系に弾塑性の復元力特性を与えることにより固有周期の延びを考慮した応答の評価が可能である。しかし、高次振動に関しては、固有周期の延びを斟酌して応答を定量化するのは難しい。ただし、最大応答2次等価変位は、2次振動に対応する固有周期を有する弾性1自由度系の最大応答変位の5.0倍から6.0倍に増大しており、固有周期の延びのみではその増大を説明することはできない。

振動モードの変化は、曲げひび割れ、曲げ降伏による剛性低下や速度の反転などの諸現象に部材ごとの時間差が生じることにより生じる。剛性の低い層に変形が集中する振動モードとなる。仮に、応答が1次振動のみで構成されているとしても、1次振動形が変化すれば、応答変形の分布形は弾性1次振動モード比例形から外れ、ずれは高次の等価変位として計上されることになる。瞬間剛性は時々刻々変化するものであるので、応答変形の分布の弾性1次振動モード比例形からずれのうち、振動モードの変化に起因する分を定量化するのは困難である。

瞬間剛性より算出した振動形の例を図3.3.9に示す。最大応答付近の時刻5.38秒における瞬間剛性より算出したものである。ens4(1.17)に対する応答については、前述の如く、高次モードが下層の変位を増幅する側で作用する。そのため、下層部の梁のみ曲げ降伏し、下層部の変形が集中する振動モードとなる。ens2(1.40)に対する応答では、下層部の梁から順に曲げ降伏が生じるが、短周期成分に富んだ2次振動の影響により上層部と下層部の応答に位相差が生じるため、上層部の梁で塑性進展域、下層部の梁で除荷域になる瞬間があり、塑性進展域側の上層に変形が集中する振動モードとなる。

$m$ 次振動による  $i$ 層の応答層間変位  ${}_m\delta_i$  は、 $m$ 次応答等価変位  ${}_m y$  を用いて式3.3.3により表される。

$${}_m\delta_i = {}_m y {}_m\beta \left( {}_m u_i - {}_m u_{i-1} \right) \quad (3.3.3)$$

ここに、 ${}_m\beta {}_m u_i$  :  $i$ 層の  $m$ 次刺激関数である。

1次振動と $m$ 次振動の応答層間変位を比較した場合、 $({}_m u_i - {}_m u_{i-1}) / ({}_1 u_i - {}_1 u_{i-1})$ が大きいほど、その層の応答層間変位における $m$ 次振動の割合が大きいことになる。構造物12cについて、各層の2次の $({}_2 u_i - {}_2 u_{i-1}) / ({}_1 u_i - {}_1 u_{i-1})$ を比較すると、最上層で-2.86、1層で1.10であり、絶対値は上層部の方が大きい。3次についても、最上層で4.30、1層で1.13である。また、弾性剛性の分布を変えた構造物12cAおよび構造物12cBでも、同様に、上層部の方が大きい。仮に、高次振動が下層の変位を増幅する向きおよび減少する向きの両方で生じる場合、高次振動による層間変位の増大効果は上層部の方が大きく、上層部の塑性化がより促進され、上層部増大型の変形分布となる傾向が高い。入力地震動の短周期における加速度応答が増大するほど、高次振動は増大するので、その傾向も強くなる。

以上のように、地震応答の変形分布は地震波ごとに異なり、上層部増大型、あるいは、下層部増大型などがある。両者の違いは高次モードの影響であり、高次モードには、下層部の変位を増大させる作用と、下層部の変位を減少させる作用の2種類の作用がある。固有周期の短い構造物と長周期が卓越した入力地震動の組み合わせにおいては、前者の作用が生じる傾向が強い。短周期成分を多く含む入力地震動については、地震動の時刻歴特性に大きく依存して、いずれの作用も生じる可能性があると考えられる。地震応答ごと個別に高次モードの影響を検討することにより、変形分布がいずれの型となるか定性的に解明することはできる。また、高次モードによる応答層間変位の増大効果は上層部の方が大きいため、高次振動の応答が大きいほど、上層部増大型の変形分布になる傾向が強い。高次モードの作用に加えて、部材の塑性化が構造物内の局所で生じるため、変形分布は一層複雑な問題となり、それを定量的に捉えるのは困難である。

### 3.3.4 諸因子の影響

構造物の最大応答変形の分布における諸因子の影響について検討する。入力地震動側の因子として、応答スペクトル特性のほか、加速度の倍率、位相特性が挙げられ、構造物側の因子として、弾性固有周期のほか、階数、設計外力分布、部材の耐力の分布、弾性剛性の分布、降伏点剛性低下率の分布、などが挙げられる。最大応答変形の分布の指標として、梁の塑性率の分布、および等価最大応答層間変位の高次と1次の比の2種類を検討する。

#### (1) 入力地震動の倍率の影響

構造物12a, 12c, 12e および12gを対象に、位相角特性をensとした4種類の模擬地震動の加速度の倍率を様々変化させた入力に対する地震応答解析を行い、それぞれについて、全体塑性率 $\mu$ と等価最大応答層間変位 ${}_m \delta$ を算出する。入力地震動の加速度の倍率は、正負の応答のいずれかの全体塑性率 $\mu$ が4.0を超えるまで、0.20倍, 0.40倍…と0.20倍刻みで増大させる。算出した全体塑性率 $\mu$ と等価最大応答層間変位の高次と1次の比 ${}_m \delta / {}_1 \delta$ の関係を図3.3.10に示す。等価最大応答層間変位の比は、2次および3次について示している。

構造物12a および構造物12c では、全塑性率に渡って、2次の比 ${}_2 \delta / {}_1 \delta$ は、短周期における加速度



応答スペクトル値が小さい  $\text{ens4}$  ほど、正側に大きい値である。 $\text{ens4}$  について、2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  は、常に正の値であり、入力地震動の倍率の変化による値の変動は比較的小さい。構造物12a では0.20～0.30程度、構造物12c では0.10程度である。 $\text{ens1}$  については、全体塑性率が1.0を超えると、2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  が大きく減少し、全体塑性率1.5から3.0程度までの間で極小値をとる。全体塑性率1.0前後では、構造物内で降伏に達した部材と、達していない部材が混在する。それよりも全体塑性率が微小に大きくなれば、降伏に達した部材に変形が集中し、2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  も絶対値の大きい値が計上されることになる。3 次の比  $\delta_3/\delta_1$  については、構造物12a および構造物12c の各地震動とも比較的小さい値である。

構造物12e では、構造物12a や構造物12c と比べて、入力地震動の倍率の変化による2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  の値の変動が複雑である。特に、負側の応答の2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  については、これまで挙げてきた例とは逆に、短周期における加速度応答スペクトル値が大きい  $\text{ens1}$  ほど、正側に大きい値となっている。また、正側の応答の全体塑性率2.0から3.0までにおいて、2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  の値の変動が特に大きい。構造物12e では、入力地震動の倍率を2.0とした時、4種類の地震応答の全体塑性率は正側で1.9程度、負側で1.0程度であり、図3.3.3(1)に示したように、正側の応答の2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  は、短周期における加速度応答スペクトル値が大きい  $\text{ens1}$  ほど負側に大きい値である。 $\text{ens1}$  の倍率を3.0とした時、全体塑性率は正側で2.0、負側で2.2であるが、上層部が正側に著しく偏った応答を示し、残留変形により負側の応答が比較的小さくなる。そのため、負側の応答の2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  は、正の値を示すことになる。 $\text{ens4}$  については、加速度の倍率を増大させるほど、上層増大型へ移行していく。

構造物12g では、2 次の比  $\delta_2/\delta_1$  および3 次の比  $\delta_3/\delta_1$  に関して、入力地震動の違いによる値の差は、全塑性率に渡って小さい。構造物12g の弾性2次固有周期は0.86秒であり、 $\text{ens4}$  を除く3種類の模擬地震動の加速度応答スペクトル値は等しく、 $\text{ens4}$  のスペクトル値は他の3種類に対して77%である。そのため、 $\text{ens4}$  を除く3種類の模擬地震動に対して、構造物における2次モードの応答にほとんど差がなく、 $\text{ens4}$  のみ2モードの作用が若干異なると考えられる。

## (2) 位相特性の影響

目標加速度応答スペクトルが同一で、異なる位相特性を有する5種類の模擬地震動に対する部材塑性率の分布を比較した例を図3.3.11に示す。例として、(1)応答スペクトル  $\text{Sa2}$  の模擬地震動の加速度の倍率を1.4とした入力に対する構造物12c の応答（構造物12c と応答スペクトル  $\text{Sa2}(1.4)$  の組み合わせ、以下、12c- $\text{Sa2}(1.4)$  と略記）、(2)構造物12e と応答スペクトル  $\text{Sa3}(2.0)$  の組み合わせ、および、(3)構造物12a と応答スペクトル  $\text{Sa4}(1.2)$  の組み合わせの3種類を採り上げる。正負の最大応答のうち、全体塑性率の絶対値の大きい方について比較している。

構造物12c と応答スペクトル  $\text{Sa2}(1.4)$  の組み合わせにおいては、5種類の地震動に対する全体塑性率は、最小1.52から最大1.92までと、比較的変動の幅が小さい。これに対して、等価最大応答層間変位の2次と1次の比  $\delta_2/\delta_1$  は、 $\text{ens2}$  で-0.30、 $\text{tns2}$  で0.14と変動の幅が大きい。最も上層部増大型の  $\text{ens2}$  と最も下層部増大型の  $\text{tns2}$  の最大応答層間変位を比較すると、12層では前者は後者の3.48倍、1層では後者は前者の2.01倍である。

構造物12e と応答スペクトル  $\text{Sa3}(2.0)$  の組み合わせにおいて、全体塑性率は  $\text{tew3}$  で1.26、 $\text{kns2}$  で

2.19と変動の幅が大きい。等価最大応答層間変位の2次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ は、hew3を除く4種類では0.に近いが、hew3のみ-0.33と離れた値である。

このように、位相特性の違いにより、全体塑性率と変形の分布の両方にばらつきが生じているわけであるが、全体塑性率の大小関係と分布特性の違いとの関連は見出せない。例えば、等価最大応答層間変位の2次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ の絶対値が大きいと全体塑性率が小さい、などという関係は見られない。位相特性の違いによる1次等価変位のばらつきと変形の分布のばらつきは、それぞれ別に無相関に生じていると考えられる。

構造物12aと応答スペクトル Sa4(1.2)の組み合わせにおいては、全体塑性率はkns4で1.39、tew4で2.46と変動の幅が大きい。一方、等価最大応答層間変位の2次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ は、5種類についてすべて0.30程度である。(3)変形分布の要因において検討したように、固有周期の短い構造物と長周期が卓越した入力地震動の組み合わせに対しては、高次モードは下層部の変位が増大する向きで作用する。固有周期の短い系においては、長周期が卓越した入力地震動に対して慣性力が静的に作用し、極端に言えば、入力地震動と逆位相の変位応答が生じ、各次モードの応答が同じ向きで生じる訳である。この性質は、地震動の応答スペクトル特性によるものであり、地震動の位相特性とはあまり関係が無い。それ故、固有周期の短い構造物と長周期が卓越した入力地震動の組み合わせにおいては、位相特性の違いによる変形の分布のばらつきは、比較的小さい。構造物12a, 12bと応答スペクトル Sa4の組み合わせがこれにあてはまり、構造物12aの方がさらに変形の分布のばらつきは小さい。

例として採り上げた3種類の他の多くの解析例において、応答スペクトル特性が同一であっても位相特性が異なれば、応答変形の分布もかなり異なる。位相特性の違いによる最大応答変形のばらつきについては、5.1.1項で検討する。

### (3) 階数の影響

固有周期が等しく、階数が異なる構造物に関して、最大応答層間変位と部材の塑性率の分布を比較して図3.3.12および図3.3.13に示す。ここでは、構造物12cに対応する構造物群に対しては、ens1を加速度の倍率を1.5として入力し、構造物12gに対応する構造物群に対しては、ens2を加速度の倍率を1.5とした入力している。各図の縦軸は、高さを最上階の高さで除した規準化高さとする。部材の塑性率の分布の図では、規準化高さ0.は1層柱脚の塑性率を示し、規準化高さ1.0は最上階梁端の塑性率を示す。なお、固有周期の等しい構造物群では、階数に関わらず、降伏1次等価変位もほぼ等しい値である。

最大応答1次等価変位は階数の違いによる大きな差はないので、全体塑性率も階数によらずほぼ等しい。それに対して、最大応答層間変位に関しては、低層の構造物では、弾性1次固有周期を所定の値にするために断面寸法を著しく小さく設定しているため、最大応答層間変位は非常に大きくなる。階数の異なる構造物間の応答の比較の際には、等価変位や等価加速度のようなモードの応答値は比較の対象となり得るが、層間変位や層せん断力のように階数に依存し比較の対象にはなり得ない。

一方、部材の塑性率に関しては各構造物で同程度の値である。特に、30階建てと12階建ての部材の塑性率の分布は良く似ており、塑性率が增大する部位とその部位の塑性率の値は近い結果が得られる。しかし、2階建てや3階建てのように自由度が少なすぎると、局所的な変形の増大を表現できない。等価最大応答層間変位の2次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ についても、30階建てと12階建てはほぼ等しい値が得られる。2階建てや3階建ては、等価最大応答層間変位の2次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ の絶対値は小さい。自由度の少ない2階建てや3階建てで、層間の連成効果が強い梁降伏先行型の構造物では、いずれかの層に変形が集中することはほとんどなく、高次等価最大層間変位が増大することはない。例えば、2階建てで2層に変形を集中させるためには、13(R)階梁と2階梁の曲げ降伏が必要であるが、2階梁の曲げ降伏が生じれば、同時に1層の層剛性も低下するため、2層のみに変形が集中するモードには成り得ない。

このように、高層の構造物の応答変形の分布の問題は、モードの振動特性が等しい低層の応答変形分布の問題に帰着できる。ただし、自由度はある程度（6より大きい数）以上必要である。ここでも言う、モードの振動特性には、弾性固有周期と設計外力の分布が関連している。

#### (4) 設計外力分布形の影響

設計外力分布を変動因子とした構造物群12cN, 12c0, 12cP について全体塑性率 $\mu$ と等価最大応答層間変位の高次と1次の比 $\delta_2/\delta_1$ の関係を図3.3.14に示す。これは、2種類の模擬地震動 ens2および ens4を用い、正負の応答のいずれかの全体塑性率 $\mu$ が4.0を超えるまで、加速度の倍率0.20倍, 0.40倍…と0.20倍刻みで増大させて得られた解析結果である。等価最大応答層間変位の比は、2次および3次について示している。

構造物12c0に関する等価最大応答層間変位の比と、図3.3.10に示した構造物12cに関する等価最大応答層間変位の比を比較すると、両者の間にはほとんど差は見られず、非常に近い応答特性を示していると言える。ただし、構造物12c0では、設計外力分布形における4次モード以上のモード比例外力を無視することにより、特に最上層では設計層せん断力係数が低下しているため、構造物12c0の13(R)階と11階の梁の塑性率は、構造物12cに比べて若干増大することになる。ens2(1.40)に対して、13(R)階の梁の塑性率は、構造物12cでは4.0、構造物12c0では5.6である。

設計外力分布形を変動させた3種類の構造物における等価最大応答層間変位の2次と1次の比を比較すると、全体塑性率1.0付近から3種類の比に差が生じ、構造物12cNほど正側にシフトした値である。この構造物12cNでは、設計外力分布形における2次の係数の絶対値を増大させたものであり、結果的に上層部の設計層せん断力係数が大きい。上層部が相対的に強いほど応答は下層部増大型となり、逆に、上層部が弱いほど上層部増大型となることを示している。ens2(1.60)に対して、3種類の構造物の全体塑性率は約1.90であり、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は、構造物12cNで-0.31、構造物12c0で-0.37、構造物12cPで-0.41である。同様に、ens4(1.40)に対して3種類の構造物の全体塑性率は約1.90であり、構造物12cNで0.16、構造物12c0で0.10、構造物12cPで0.043である。設計外力分布形における2次の係数の絶対値を0.15増やすことにより、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は0.06程度増加している。

#### (5) 部材の耐力の分布の影響

部材の耐力の分布を変動因子とした5種類の構造物群に対して、模擬地震動 ens1の加速度の倍率を1.42とした入力した時の部材の塑性率の分布の比較を図3.3.15に示す。

部材の塑性率の分布は、降伏強度を変化させた部位の塑性率が大きく変化し、それ以外の部位の塑性率はほとんど変化しない。構造物12cを基準に、構造物12c1の13(R)階の梁の塑性率は0.19倍、構造物12c2の13(R)階の梁の塑性率は1.69倍、構造物12c3の5階の梁は1.91倍、構造物12c4の2階の梁は2.04倍である。特に、上層部の部材の強度を高めた時に、その部材の塑性率が劇的に減少している。等価最大応答層間変位の高次と1次の比については、耐力の分布の違いに応じて変化するが、下層部を弱めた場合以外は変動が小さい。

#### (6) 弾性剛性の分布の影響

弾性剛性の分布を変動因子とする3種類の構造物について、模擬地震動 ens2の加速度の倍率を1.0とした入力に対する最大応答層間変位と部材の塑性率の分布の比較を図3.3.16に示す。

弾性剛性の分布を変動は、構造物の応答変形の分布に対して2つの効果を与える。一つ目は固有周期の変化によるものである。3種類の構造物の弾性1次固有周期が等しくなるように設定しているので、高次の固有周期は、断面寸法を全層一定とした構造物12cAが最も短く、上層部の断面寸法の減じる割合を大きくした構造物12cBが最も長い。模擬地震動 ens2の変位応答スペクトルは右肩上がり（周期が長くなると、応答スペクトル値が増大する）であるので、構造物12cAと構造物12cの比較では、1次モードの応答は等しく、高次モードの応答は後者の方が大きいことになる。よって、上層部の断面寸法を減じる割合が大きいほど、高次モードの影響が強くなる。ただし、弾性2次固有周期の差は微小であるし、入力地震動の位相特性の影響や構造物の塑性化の影響もあるので、この効果が顕著に表れるとは考えにくい。

二つ目の効果は振動モードの変化によるものである。振動モードは、上層部の断面寸法の減じる割合を大きくした構造物12cBの方が、上層部の刺激関数が大きくなる。これを設計外力分布形という観点から見れば、モードの降伏せん断力が変化することになる。構造物は共通に設計層せん断力係数分布は  $A_i$  分布であるが、これに対応する外力分布形  $\{f\}$  を、各構造物の弾性振動モードを用いて式2.1.12によるモード比例外力の合成で表せば、式3.3.4になる。4次モード以上は省略して示している。

$$\begin{aligned}\{f\}_{12cA} &= [M] \left( 1.0_1 \beta \{1u\} - 0.40_2 \beta \{2u\} + 0.95_3 \beta \{3u\} \right) \\ \{f\}_{12c} &= [M] \left( 1.0_1 \beta \{1u\} - 0.27_2 \beta \{2u\} + 0.84_3 \beta \{3u\} \right) \\ \{f\}_{12cB} &= [M] \left( 1.0_1 \beta \{1u\} - 0.13_2 \beta \{2u\} + 0.74_3 \beta \{3u\} \right)\end{aligned}\tag{3.3.4}$$

ここに、 ${}_m\beta$ :  $m$ 次刺激係数、 $\{{}_mu\}$ :  $m$ 次振動形、 $[M]$ : 質量マトリクスである。

上層部の刺激関数が大きい構造物12cBほど、高次の係数の絶対値が小さく、弾性1次モード比例外力分布形により近い。逆に、断面寸法を全層一定とした構造物12cAにおいて、高次の係数の絶対

値が大きくなる。設計外力分布形を変動因子とした構造物群で検討したように、2次の係数が負で絶対値が大きい構造物12cAほど上層部が相対的に強く、構造物12Bほど上層部の強度が相対的に低いことになる。よって、構造物12cBほど上層部増大型の応答になりがちであり、他の2種類の構造物と比べて、上層部の部材の塑性率が増大し、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は負側へシフトし、3次と1次の比は正側にシフトすると考えられる。

図3.3.16(b)の部材塑性率の分布の比較によれば、構造物12cAと構造物12cの比較では、構造物12cの方が上層部増大型であり、等価最大応答層間変位の高次と1次の比の関係は構造物12cの方も小さく、部材の塑性率の分布もこれに対応している。構造物12cと構造物12cBの関係は微妙であるが、この両者の比較でも、上層部の部材の塑性率は構造物12cBの方が大きい。構造物12cを基準とした梁の塑性率の比較では、構造物12cAの13(R)階の梁は0.85倍、2階梁は1.29倍であり、構造物12cBの13(R)階の梁は1.28倍、2階梁は0.94倍である。ただし、高次の固有周期の違いによって、位相特性の影響が異なってくるので、部材の塑性率の分布や等価最大応答層間変位の比に明確な違いが表れない場合もある。

最大応答層間変位の分布に対しては、さらに、振動モードそのものの変化による効果がある。仮に、弾性剛性の分布の異なる構造物間でモードの最大応答変位が同一であっても、振動モードの違いにより最大応答層間変位の分布は異なってくる。上層部の断面寸法の減じる割合を大きくした構造物12cBの方が、上層部の刺激関数が大きく、上層部の層間変位が大きくなる。図3.3.16(a)によると、最大応答層間変位に関する構造物間の差異は、部材塑性率の差異よりも大きい。構造物12cを基準にすると、構造物12cAの最上層は0.52倍、2層は1.49倍であり、構造物12cBの最上層は1.93倍、2層は0.75倍である。各構造物間の2次等価最大応答層間変位の差は微小であっても、最上層の最大応答層間変位は倍半分の差が生じる。

#### (7) 降伏点剛性低下率の影響

降伏点剛性低下率を変化させた構造物における地震最大応答の分布について比較する。模擬地震動 ens2および tns2の加速度の倍率を1.0とした入力に対する構造物12cおよび構造物12cYの応答について、最大応答層間変位と部材の塑性率の分布の比較を図3.3.17に示す。

上層部における部材の降伏点割線剛性低下率を低めることは、2種類の影響を与える。一つ目は、弾性剛性の分布を変動因子とした構造物群において上層部の断面寸法を減じる割合を大きくした構造物12cBと同様である。構造物12cYにおける曲げびび割れ後の剛性分布は、構造物12cBと同様に、上層部が低い分布となる。この観点から、構造物12cYは、構造物12cよりも上層部増大型の応答になる傾向が高まると考えられる。図3.3.16(b)の部材塑性率の分布の比較によれば、ens2(1.0)に対する構造物12cYの応答は、構造物12cよりも11階および13(R)階の梁の塑性率が大きく、13(R)階の梁の塑性率は1.41倍である。tns(1.0)に対する応答については、7階以上の梁の塑性率が大きく、13(R)階の梁の塑性率は2.50倍である。いずれも上層部増大型の応答になりがちであるという予測に対応しているが、増大の程度は大幅異なっている。

二つ目の影響として、部材の降伏変形が変化することが挙げられる。部材の降伏変形が変化するので、図3.3.16(b)の部材の塑性率の分布図よりも、図3.3.16(a)の最大応答層間変位の分布図の方が、上層部の変形の増大の程度は大きく表れる。構造物12cYにおける最上層の最大応答層間変位を構造物12cと比較すると、ens2(1.0)では1.96倍、tns2(1.0)では3.42倍である。

以上のように、上層部の応答については、最大応答層間変位と部材の塑性率のいずれで比較しても、地震動時刻歴ごとに程度の差はあるが、構造物12cYの方が構造物12cに比べて増大している。

下層部の応答については、構造物12cと構造物12cYの差はもっと微妙である。tns(1.0)では最大応答層間変位と部材の塑性率のいずれで比較しても、構造物12cYの方が減少しているのに対し、ens2(1.0)では最大応答層間変位は同程度であり、部材の塑性率は構造物12cYの方が増大している。下層部の剛性が高まることにより、下層部の応答が小さくなる場合と、下層部の塑性化が早まる場合の両方がある。

これまで検討してきた構造物では、すべての部材の降伏点割線剛性低下率が等しいため、塑性域において想定する振動モードが弾性の振動モードと等しいと仮定することは妥当であると言えた。降伏点剛性低下率を変化させた構造物12cYでは、これは当てはまらない。そこで、各部材の剛性低下を考慮した等価振動系に対して振動モードを算出する。等価振動系モデルでは、降伏ヒンジを計画しない部材には初期剛性を与え、降伏ヒンジを計画する部材に対しては降伏点割線剛性を等価剛性として与える。なお、この等価剛性による振動モードは図4.2.4に示している。

等価最大応答層間変位を求める際の式3.3.2において、弾性剛性による振動モードおよび等価剛性による振動モードのそれぞれを用いて、等価最大応答層間変位の高次と1次の比を算出し、図3.3.16中の表に示している。2次と1次の比はens2(1.0)およびtns2(1.0)とも、弾性剛性では-0.31、等価剛性では-0.1程度と大きく異なる。構造物12cとの最大応答層間変位の分布の比較においては、構造物12cと同一な振動モードとして弾性剛性による振動モードを用いる方が相応しい。弾性剛性による等価最大応答層間変位の2次と1次の比により、ens2(1.0)およびtns2(1.0)とも、構造物12cよりも上層部の最大応答層間変位が大きいことが表される。一方、単に構造物12cYの応答変形の分布の指標とするならば、等価剛性による振動モードを用いる方が相応しい。部材塑性率の分布は、ens2(1.0)およびtns2(1.0)とも全階で比較的均等であり、等価剛性による等価最大応答層間変位の2次と1次の比もゼロに近い。

### 3.3.4 応力の分布

#### (1) 層せん断力と柱の曲げモーメントの分布

固有周期の異なる3種類の構造物に対して、応答スペクトル特性の異なる地震動を入力した時の最大応答層せん断力の分布と柱の塑性率の分布の比較を図3.3.18に示す。構造物と入力地震動の組み合わせは図3.3.3の一部と対応し、(1)構造物12e、(2)構造物12a、および(3)構造物12cのそれぞれに対して、ens1およびens4を入力している。入力地震動の加速度の倍率も図3.3.3に示した解析例と同一であり、構造物12eに対しては倍率を2.0倍に揃え、構造物12aおよび構造物12cに対しては、全体塑性率がそれぞれ2.0および1.6になるように倍率を調整している。正負の最大応答を区別

し、図3.3.3に対応する側の最大応答を検討対象としている。最大応答層せん断力は、それを該当層以上の重量で除した層せん断力係数として示している。また、設計層せん断力も比較として示している。

各構造物について ens1と ens4を比較すると、5層または6層以上で ens1の最大応答層せん断力が大きく、それより下層部の最大応答層せん断力はほとんど差がない。短周期における加速度応答の大きい ens1ほど、高次モードの影響による上層部の応答層せん断力の上昇が顕著である。最上層の最大応答層せん断力の ens4に対する ens1の比は、構造物12e で1.33、構造物12a で1.37、構造物12c で1.38である。最大応答層間変位の比率が2.0を超えていたのに対して、いずれも小さい比率である。設計層せん断力と比較すると、各構造物とも ens4に対しては上層部の最大応答層せん断力が小さい分布形状であり、ens1に対しては最大応答層せん断力の分布形状は設計層せん断力の分布形状と良く似ている。上層部の応答層せん断力が設計層せん断力に比べて小ければ、下層部増大型の変形分布となる。

柱の曲げモーメント、あるいは塑性率について、ens1に対する応答と ens4に対する応答を比較すると、ens1の方が、上層部の層せん断力の増大に伴って、柱の塑性率も増大している。しかし、必ずしも最大応答層せん断力の大小と柱の曲げモーメントの大小が一致するわけではない。中層部の柱の反曲点は ens4の方が下側にあり、柱頭の曲げモーメントは ens4の方が大きい場合もある。

## (2) 等価最大応答加速度

最大応答層せん断力の分布についても固有モードに展開してみる。各層の最大応答層せん断力  $|Q|_{\max}$  から求めた仮の最大震力の分布  $\{P'\}$  (式3.3.5) を用いて、 $m$ 次等価最大応答加速度  ${}_m a'$  を式3.3.6により算定する。

$$\begin{aligned} P'_i &= |Q_i|_{\max} - |Q_{i+1}|_{\max} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \\ &= |Q_i|_{\max} \quad (i = n) \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

$${}_m a' = \frac{{}_m \beta \{ {}_m u \}^T \{ P' \}}{{}_m M} \quad (3.3.6)$$

ここに、 ${}_m \beta$ :  $i$ 次刺激係数、 $\{ {}_m u \}$ :  $m$ 次固有関数、 ${}_m M$ :  $m$ 次等価質量、 $[M]$ : 質量マトリクスである。

$m$ 次等価最大応答加速度  ${}_m a'$  は、 $m$ 次等価最大応答層間変位  ${}_m \delta$  と同様の意味合いを持ち、高次と1次の比  ${}_m a' / {}_1 a'$  は、最大応答層せん断力の分布の弾性1次モード比例形からのずれの指標となる。また、式3.1.8による  $m$ 次等価加速度  ${}_m a$  の最大応答値  ${}_m a_{\max}$  と  $m$ 次等価最大応答加速度  ${}_m a'$  の関係は、最大応答  $m$ 次等価変位  ${}_m y_{\max}$  と  $m$ 次等価最大応答層間変位  ${}_m \delta$  の関係とも類似であり、最大応答  $m$ 次等価加速度  ${}_m a_{\max}$  とすべての層の最大応答層せん断力  $|Q|_{\max}$  が同時刻に生じれば、 $m$ 次等価最大加速度  ${}_m a'$  は最大応答  $m$ 次等価加速度  ${}_m a_{\max}$  と等しい値である。

ens2の加速度を1.40倍にした入力地震動に対する構造物12c の応答 (以下、12c-ens2(1.40)と略記)、および、ens4の加速度を1.17倍にした入力地震動に対する構造物12c の応答 (12c-ens4(1.17))

について、各次等価加速度  ${}_m a$  の時刻歴応答を図3.3.19に、等価最大応答加速度の  $m$  次と 1 次の比を図3.3.20に示す。

各次の最大応答等価加速度は、12c-ens2(1.40)では、1 次から 5 次まで、順に0.22, 0.65, 0.72, 0.63, 0.55であり、12c-ens4(1.17)では0.22, 0.25, 0.21, 0.21, 0.25である。両者の最大応答 1 次等価加速度は等しく、高次の応答等価加速度は、短周期の加速度応答の大きい ens2の方が大きい。

$j$  層の  $m$  次モードの応答層せん断力  ${}_m Q_j$  は、 $m$  次応答等価加速度  ${}_m a$  を用いて式3.3.7により逆算できる。

$${}_m Q_j = \sum_{i=j}^n {}_m a {}_i m_i \beta {}_m u_i \quad (3.3.7)$$

ここに、 $m_i$  :  $i$  階の質量、 $\beta {}_m u_i$  :  $i$  層の  $m$  次刺激関数、 $n$  : 階数である。

各次モードの最大応答層せん断力の 1 次モードの最大応答層せん断力に対する比は、最上層において、2 次から 5 次まで順に1.17, 0.74, 0.42, 0.25であり、1 層においては、順に0.44, 0.18, 0.084, 0.038である。特に上層部においては、4 次以上も無視し得ないほど大きい。12c-ens4(1.17)の最上層においては、順に0.44, 0.21, 0.14, 0.12であり、12c-ens2(1.40)に比べれば、高次モードの影響は少ない。短周期の加速度応答スペクトルが大きい入力地震動に対しては、高次のモードの応答層せん断力の増大により、上層部で大きな層せん断力を生じる。その結果、上層部の曲げ降伏が先行し、上層部増大型の変形分布となる。

図3.3.20に示す等価最大応答加速度の比を見ても、12c-ens2(1.40)および12c-ens4(1.17)とも、最高次の12次まで、等価最大応答加速度は比較的に大きな値を示しており、最大応答層せん断力の分布に関しては、4 次以上のモードの影響が大きい。最大応答層間変位の分布においては、4 次モード以上の分布形を無視できたのとは対象的である。

図3.3.20には、各次モードに対応する加速度応答スペクトル値について高次と 1 次の比を合わせて示している。なお、応答スペクトル値の算出においては、弾性固有周期を用い、減衰による補正はしていない。等価最大応答加速度の比と弾性加速度応答スペクトル値の比に明確な関係は見出せないが、両者は同程度の位取りである。

### (3) 位相特性の影響

目標加速度応答スペクトルが同一で、異なる位相特性を有する 5 種類の模擬地震動に対する最大応答層せん断力の分布を比較して図3.3.21に示す。例として挙げるのは、図3.3.11と同一で、(1) 構造物12c と応答スペクトル Sa2(1.4)の組み合わせ、(2) 構造物12e と応答スペクトル Sa3(2.0)の組み合わせ、および、(3) 構造物12a と応答スペクトル Sa4(1.2)の組み合わせである。ここでも、正負の最大応答のうち、全体塑性率の絶対値の大きい方について比較している。

各組み合わせにおいて、位相特性の違いによる最大応答層せん断力のばらつきは比較的小さい。構造物12c と応答スペクトル Sa2(1.4)の組み合わせにおいて、変形分布が最も上層部増大型である ens2と最も下層部増大型の tns2の最大応答層せん断力を比較すると、最上層では前者は後者の1.37倍、1 層では後者は前者の1.14倍である。構造物12e と応答スペクトル Sa3(2.0)の組み合わせにお



いては、tew3のみ中層部における応答が小さく他の4種類の応答との差が見られる。構造物12aと応答スペクトルSa4(1.2)の組み合わせにおいて、上層部の部材は曲げ降伏に至っていないため、最大応答層せん断力の最大値と最小値の比は比較的大きく、最上層で1.30である。一方、4層以下では最大応答層間変位あるいは部材の塑性率に関する最大値と最小値の比は2.0程度であるのに対して、最大応答層せん断力の最大値と最小値の比は1.05と小さい。

#### (4) 等価最大応答層間変位との比較

ens2の加速度を1.40倍にした入力地震動に対する構造物12cの応答（以下、12c-ens2(1.40)と略記）、および、ens4の加速度を1.21倍にした入力地震動に対する構造物12aの応答（12a-ens4(1.21)）について、最大応答層間変位の分布と最大応答層せん断力の分布を図3.3.22に示す。同図では、全体塑性率を同一とした時の弾性1次モードに比例した分布形を比較して示している。

層せん断力に関する最大応答値の弾性1次モード比例成分との比率は、12c-ens2(1.40)では最大は12層で1.56、最小は3層で0.92であり、12a-ens4(1.21)では最大は12層で1.27、最小は7層で0.95である。層間変位に対する最大応答値の1次モード比例成分との比率は、12c-ens2(1.40)では最大は12層で4.64、最小は3層で0.51であり、12a-ens4(1.21)では最大は1層で1.48、最小は8層で0.65である。最大応答層間変位の分布に比べて、最大応答層せん断力の分布の方が、弾性1次モード比例形からのずれが小さいことを示している。最大応答層せん断力については、上層部のみ、ずれが若干大きい。

2種類の組み合わせについて、式3.3.6による等価最大応答加速度の $m$ 次と1次の比 ${}_m a' / {}_1 a'$ 、および、式3.3.2による等価最大応答層間変位の $m$ 次と1次の比 ${}_m \delta / {}_1 \delta$ を図3.3.22中の表に示している。さらに、弾性加速度応答スペクトルによるモードの弾性加速度応答の比 ${}_m S_a / {}_1 S_a$ 、および、それを固有円振動数の比 ${}_m \omega / {}_1 \omega$ の2乗を除して算出したモードの弾性変位応答の比 ${}_m S_d / {}_1 S_d$ を比較して示している。弾性加速度応答の算出において、減衰は各モードとも簡単に一律5.0%としている。構造物が弾性範囲の応答であれば、 ${}_m a' / {}_1 a'$ および ${}_m \delta / {}_1 \delta$ は、それぞれ、 ${}_m S_a / {}_1 S_a$ および ${}_m S_d / {}_1 S_d$ 以下となる。

等価最大応答加速度の比 ${}_m a' / {}_1 a'$ の絶対値は、弾性加速度応答の比 ${}_m S_a / {}_1 S_a$ に比べて小さいか同程度である。これに対して、等価最大応答層間変位の比 ${}_m \delta / {}_1 \delta$ の絶対値は、特に2次について、弾性変位応答の比 ${}_m S_d / {}_1 S_d$ と比べて著しく大きい。ここでも、最大応答層間変位の方が、最大応答層せん断力の分布に比べて、弾性1次モード比例形からのずれの大きいことが示されている。

2次モードが微小に生じることにより、部材の降伏の偏在が生じ、振動モードの変化が生じる。そのため、本来の1次振動のうちの振動モードの変化による弾性1次モードからのずれが、弾性2次モード比例分として計上される。一方で、固有周期の伸びにより、1次固有円振動数は小さくなる。そのため、振動モードの変化による弾性2次モード比例分を弾性固有円振動数で換算すれば、加速度よりも変位においてその影響が大きくなる。

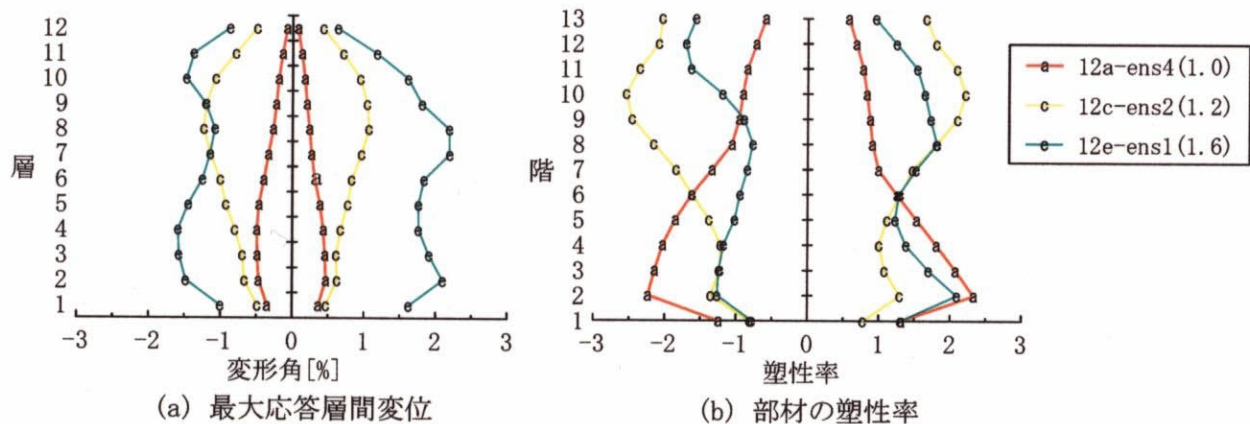


図3.3.1 最大応答層間変位と部材の塑性率の分布

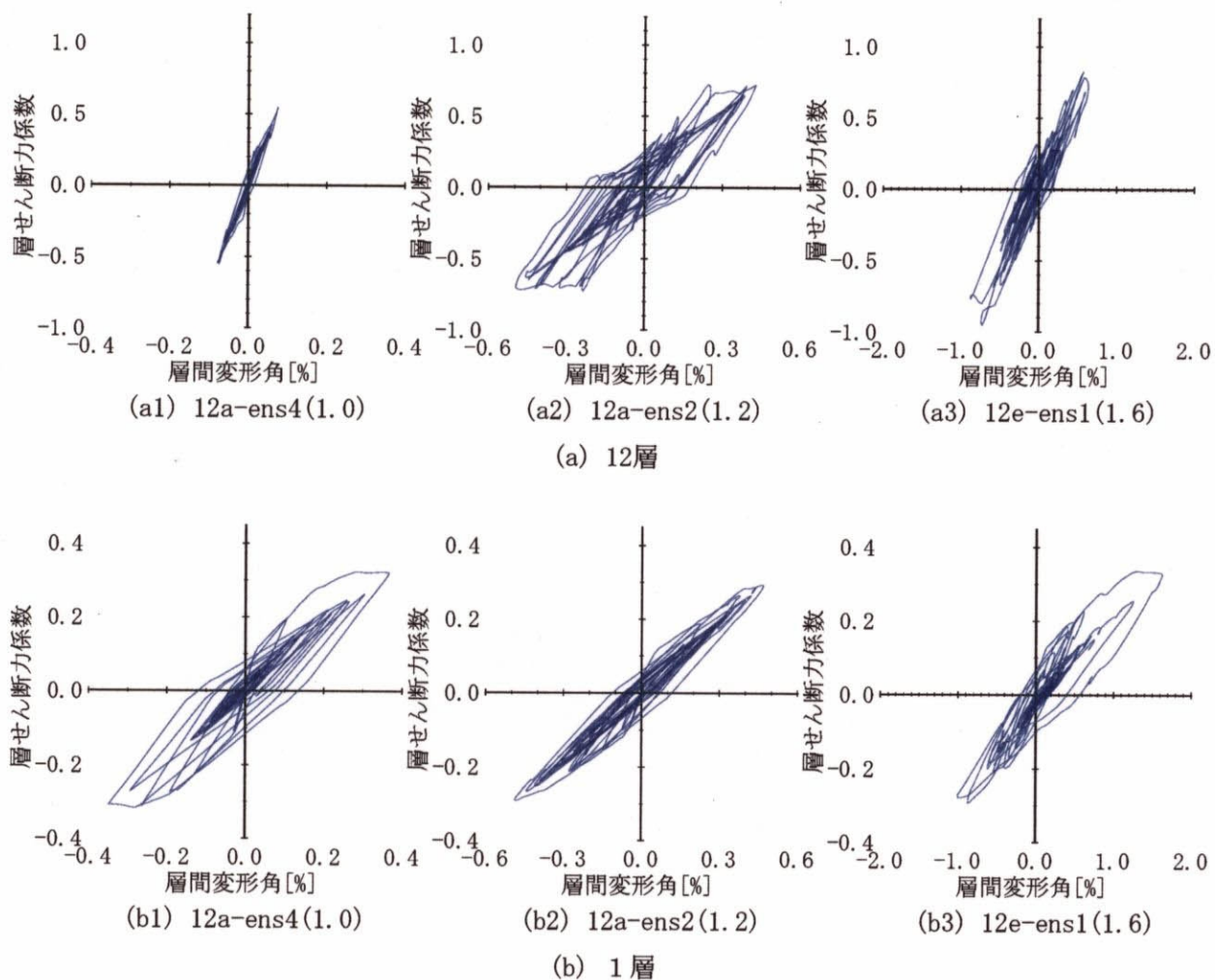
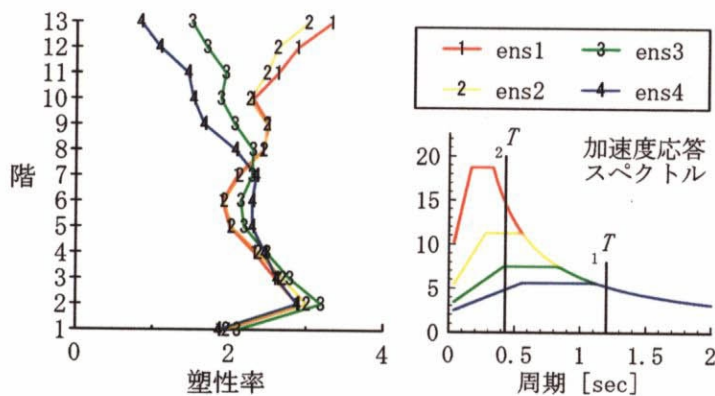


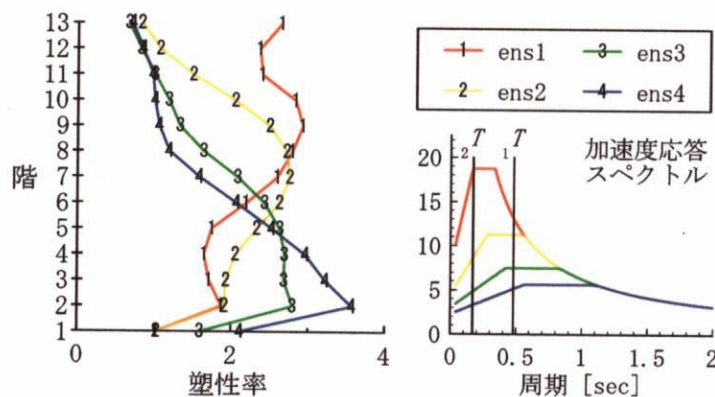
図3.3.2 応答層せん断力-応答層間変位関係



(1) 構造物12e

地震動倍率  $a_0$  を2.0に設定

	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$
ens1	1.88	-0.040
ens2	1.89	-0.018
ens3	1.93	0.065
ens4	1.89	0.11

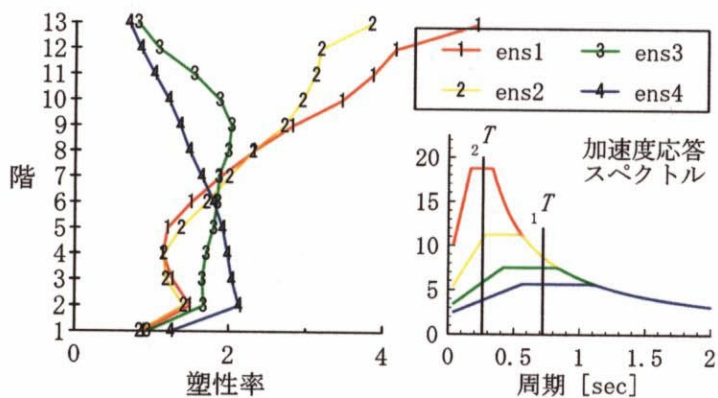


(2) 構造物12a

全体塑性率が2.0になるように  
地震動倍率  $amp$  を調整

	$amp$	${}_2\delta/{}_1\delta$
ens1	1.04*	-0.21
ens2	1.01	-0.072
ens3	1.03	0.18
ens4	1.21	0.29

\*ens1は全体塑性率1.86 反対側で2.0



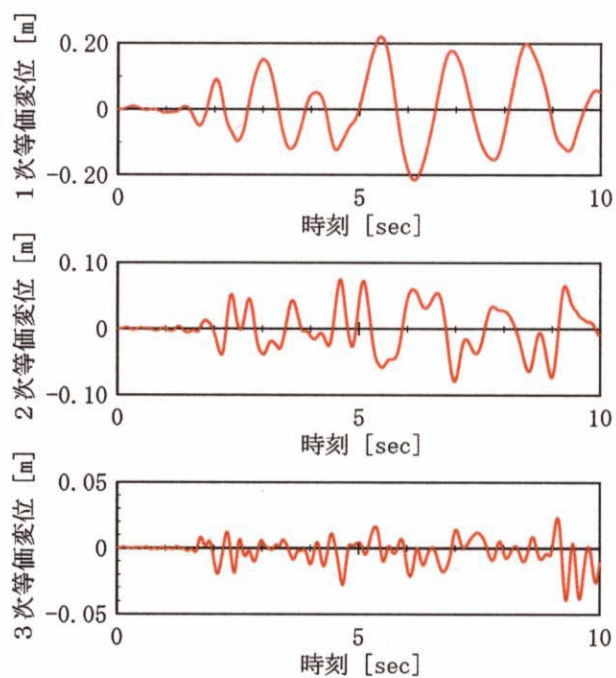
(3) 構造物12c

全体塑性率が1.6になるように  
地震動倍率  $amp$  を調整

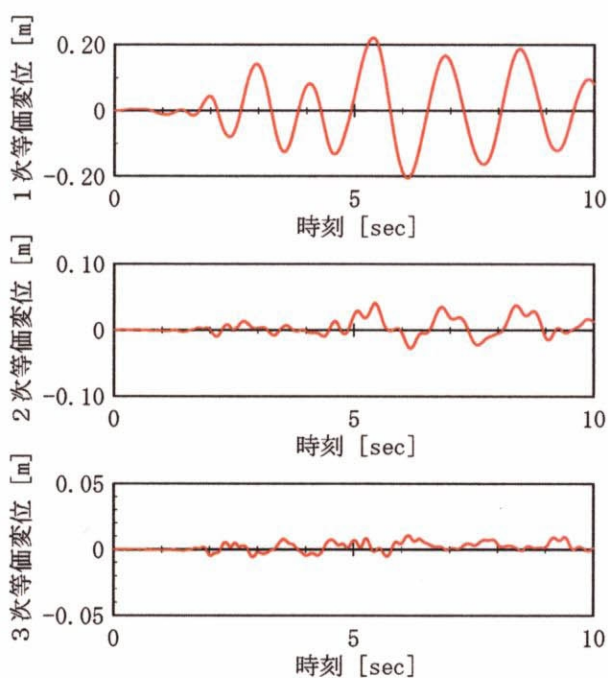
	$amp$	${}_2\delta/{}_1\delta$
ens1	1.42	-0.41
ens2	1.40*	-0.35
ens3	1.27	-0.072
ens4	1.17	0.11

\*ens2は全体塑性率1.59 反対側で1.6

図3.3.3 部材塑性率の分布 —応答スペクトルの影響—

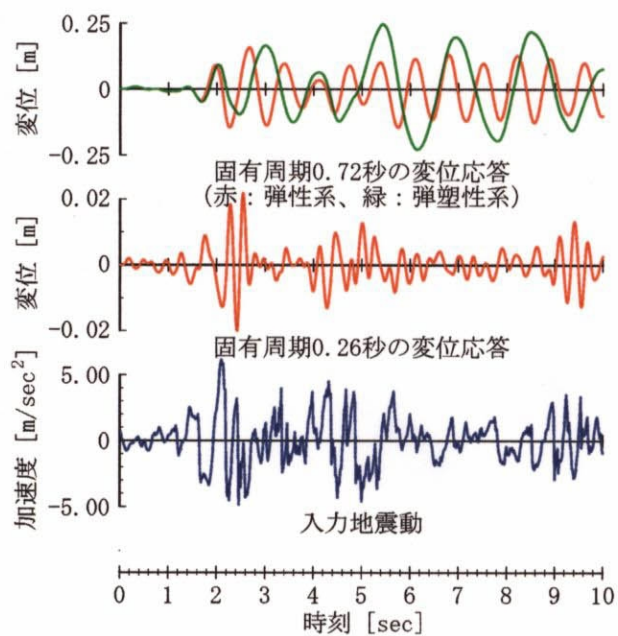


(1) 12c-ens2(1.40)

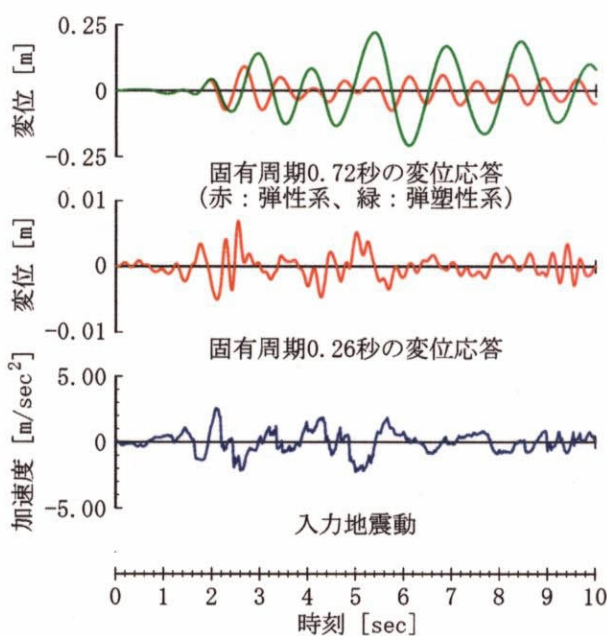


(2) 12c-ens4(1.17)

図3.3.4 等価変位の時刻歴



(1) 12c-ens2(1.40)



(2) 12c-ens4(1.17)

図3.3.5 1自由度系の応答



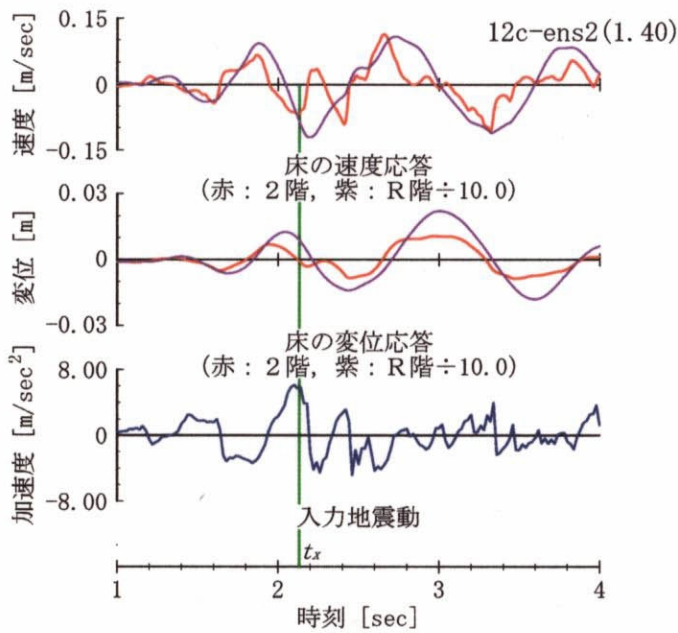


図3.3.6 床の速度応答と変位応答

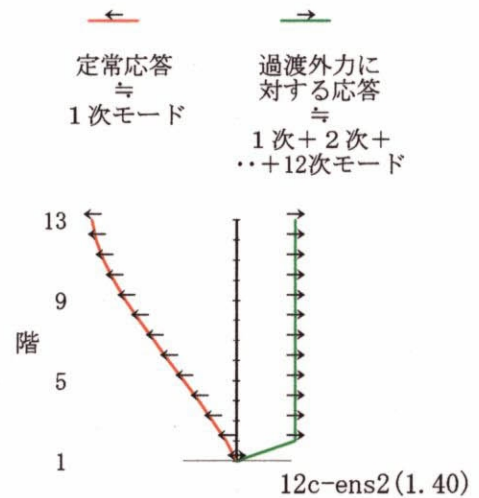
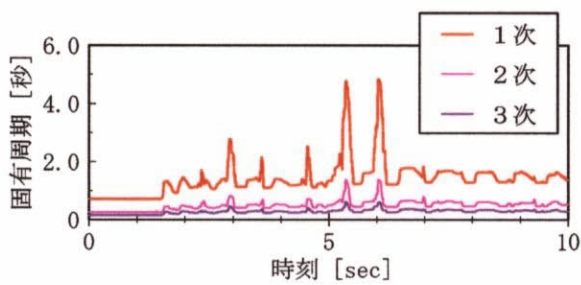
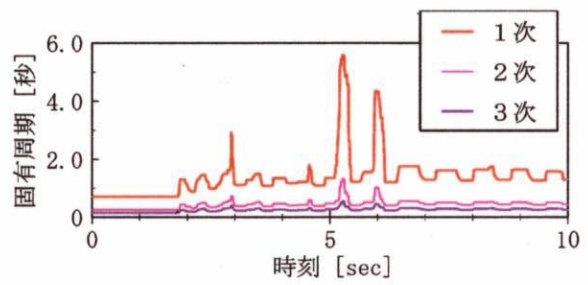


図3.3.7 床の速度の分布



(1) 12c-ens2(1.40)



(2) 12c-ens4(1.17)

図3.3.8 瞬間剛性による固有周期

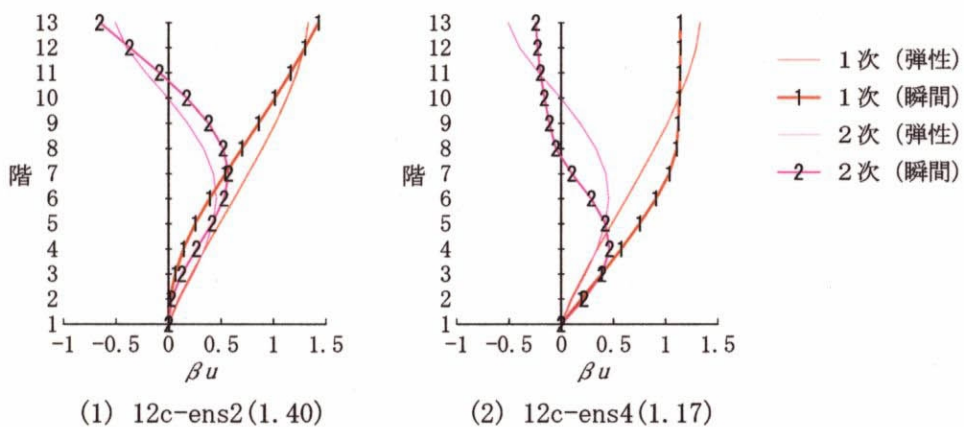
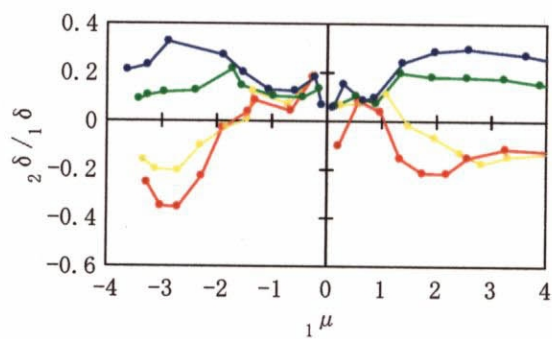
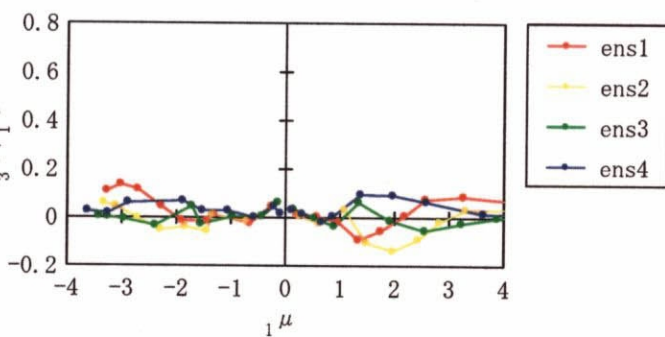


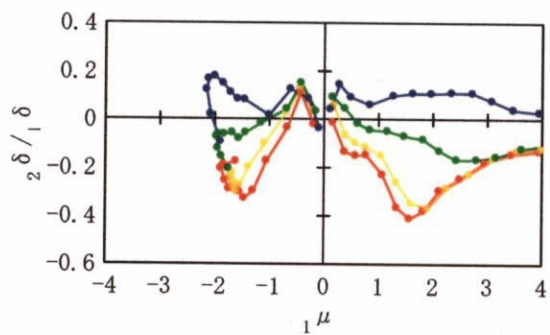
図3.3.9 瞬間剛性による振動モード



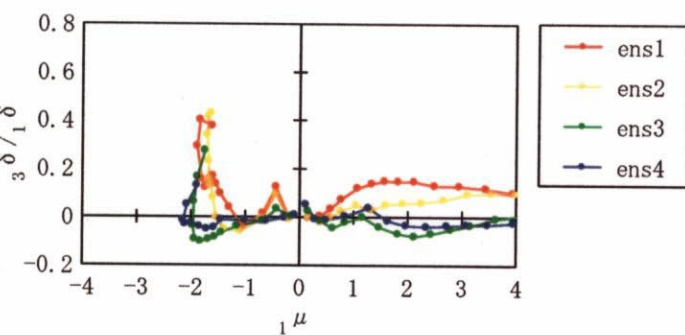
(1a) 12a-ens, 2次モード



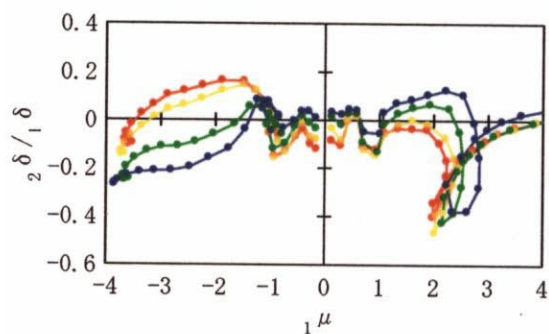
(1b) 12a-ens, 3次モード



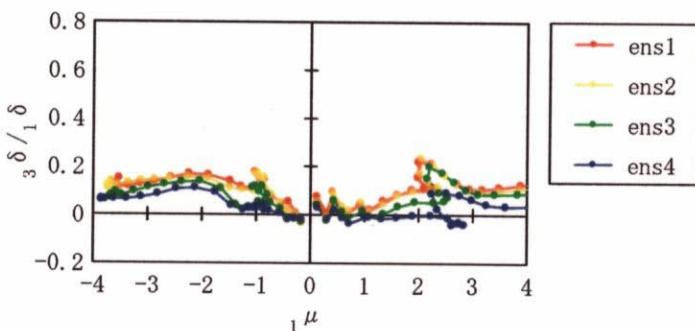
(2a) 12c-ens, 2次モード



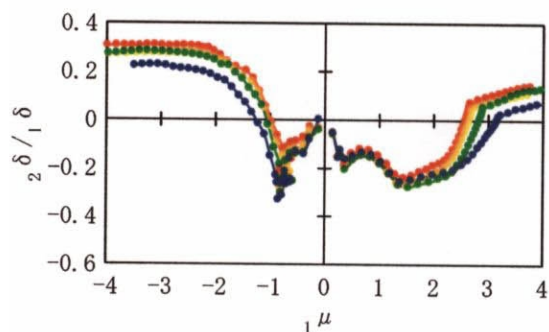
(2b) 12c-ens, 3次モード



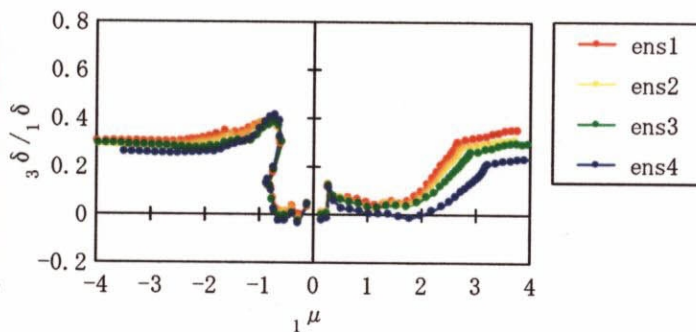
(3a) 12e-ens, 2次モード



(3b) 12e-ens, 3次モード

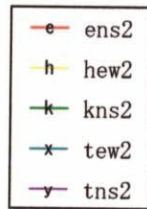
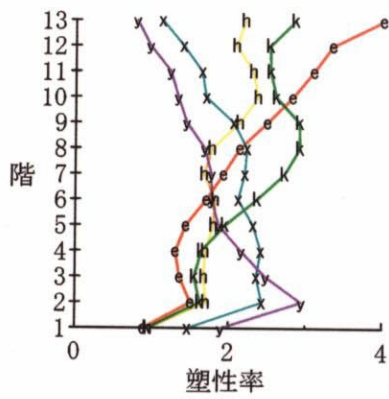


(4a) 12g-ens, 2次モード



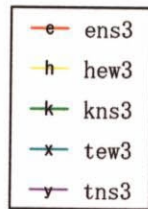
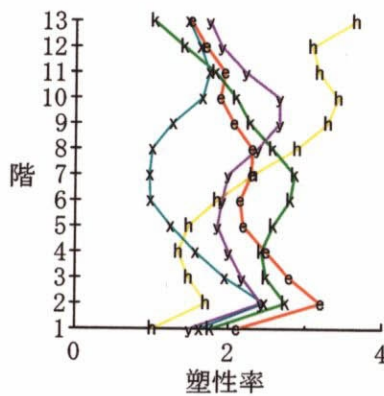
(4b) 12g-ens, 3次モード

図3.3.10 等価最大応答層間変位の比 — 応答スペクトルの影響 —



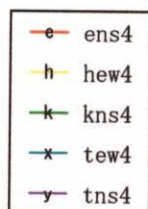
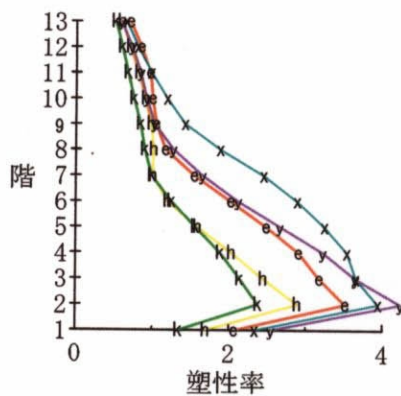
	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
ens2	1.60	-0.30	0.080
hew2	1.52	-0.14	0.043
kns2	1.92	-0.23	-0.071
tew2	1.75	0.030	-0.019
tns2	1.70	0.14	0.059

(1) 12c-Sa2(1.4)



	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
ens3	1.93	0.065	0.053
hew3	1.71	-0.33	0.030
kns3	2.19	0.013	-0.050
tew3	1.26	0.075	0.23
tns3	1.58	-0.090	0.045

(2) 12e-Sa3(2.0)



	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
ens4	1.97	0.29	0.091
hew4	1.48	0.27	0.14
kns4	1.39	0.27	0.090
tew4	2.46	0.25	0.010
tns4	2.19	0.34	0.11

(3) 12a-Sa4(1.2)

図3.3.11 部材塑性率の分布 一位相特性の影響一

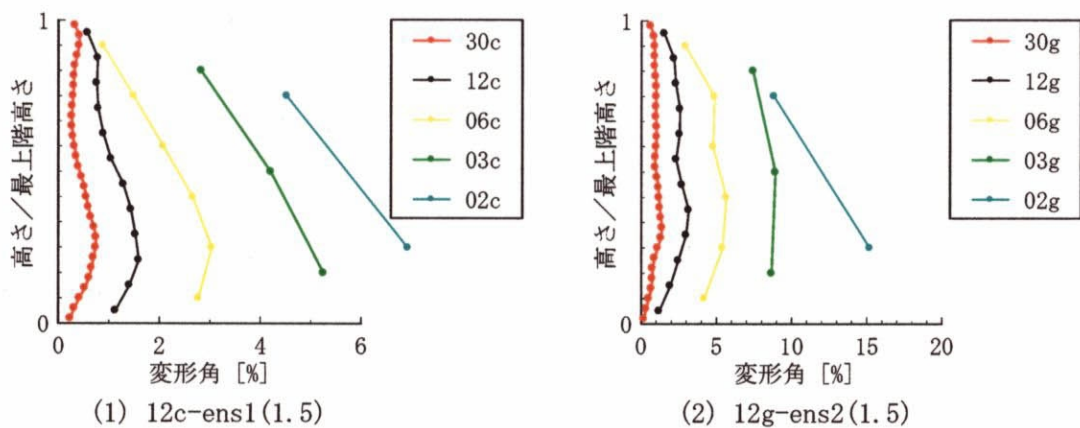


図3.3.12 最大応答層間変位 一階数の影響

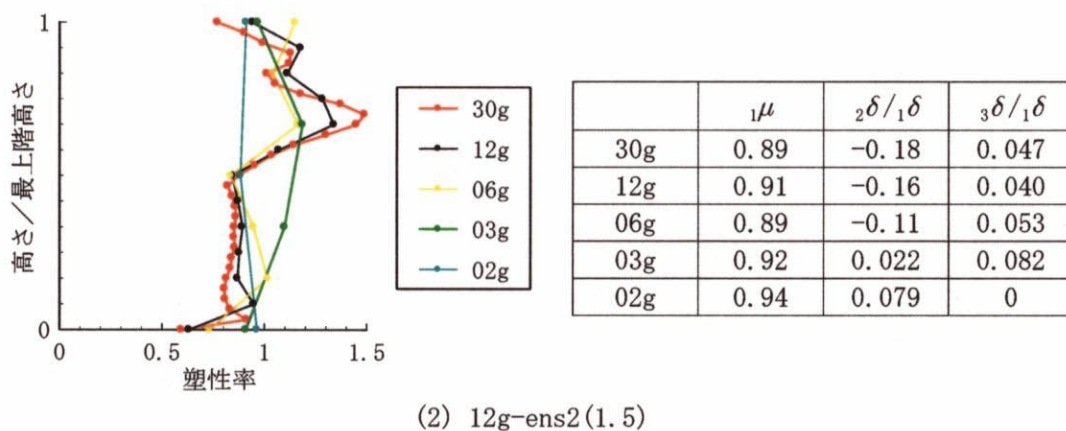
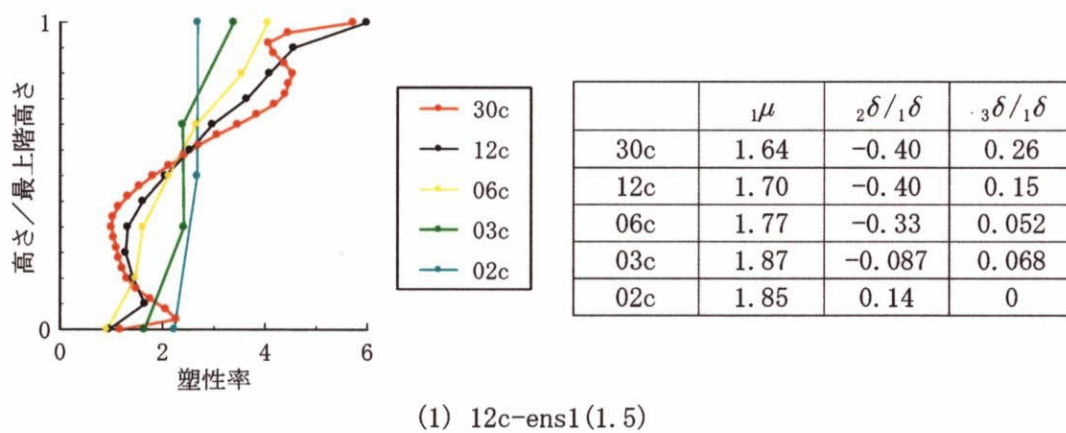


図3.3.13 部材塑性率の分布 一階数の影響



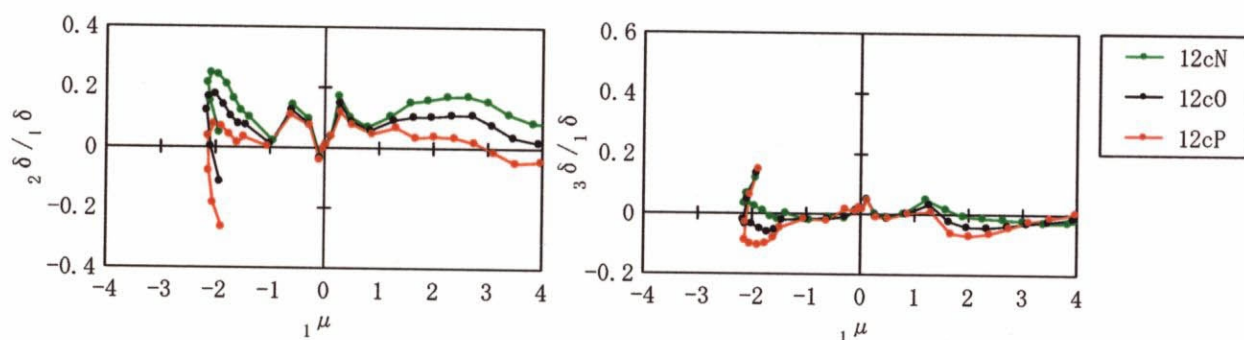
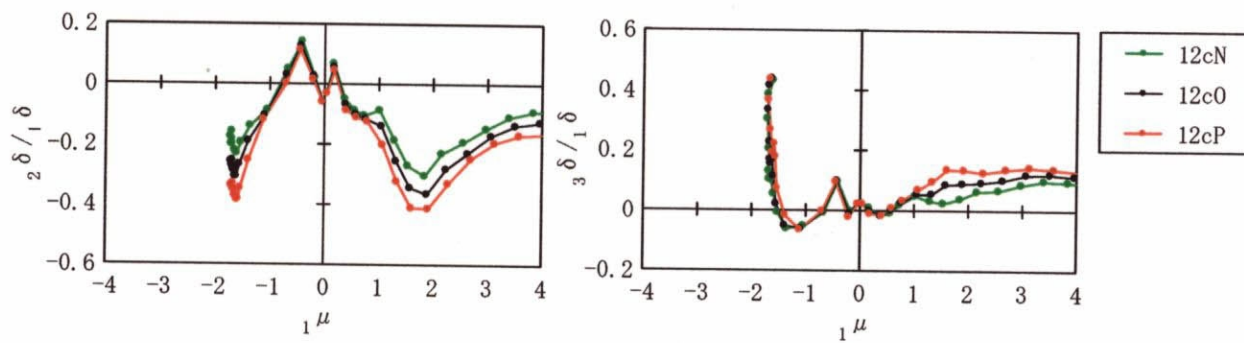
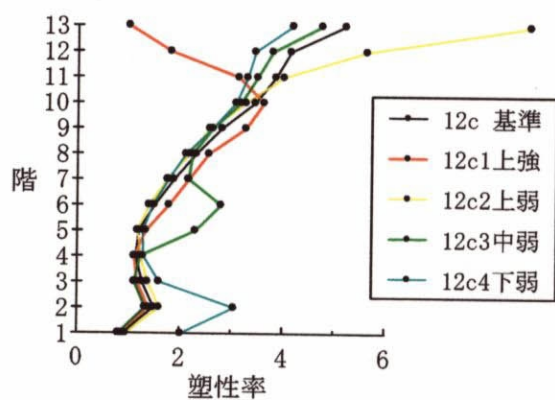


図3.3.14 等価最大応答層間変位の比 —設計外力分布形の影響—

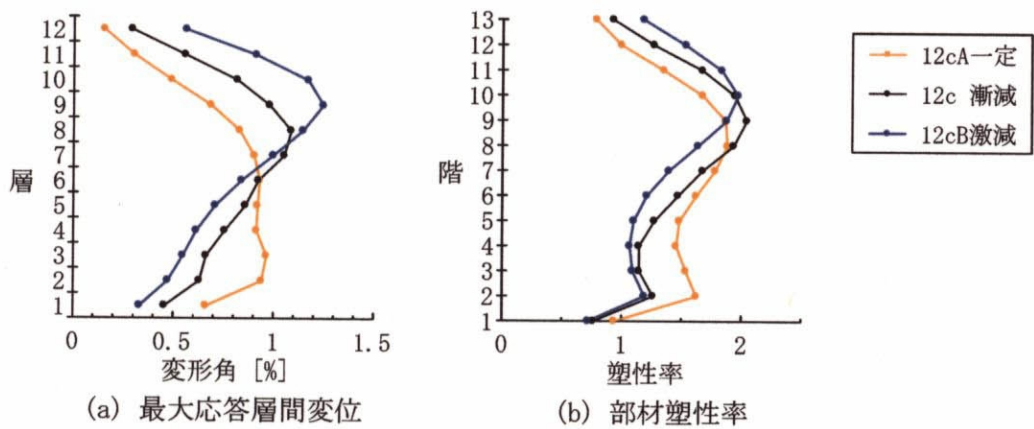


入力地震動: ens1(1.42)

	$1\mu$	$2\delta/1\delta$	$3\delta/1\delta$
12c	1.60	-0.41	0.15
12c1	1.65	-0.39	0.007
12c2	1.56	-0.39	0.21
12c3	1.69	-0.36	0.043
12c4	1.70	-0.24	0.18

図3.3.15 部材塑性率の分布 —部材の耐力の分布の影響—

	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
12cA	1.38	-0.11	-0.025
12c	1.39	-0.20	-0.051
12cB	1.33	-0.19	-0.021



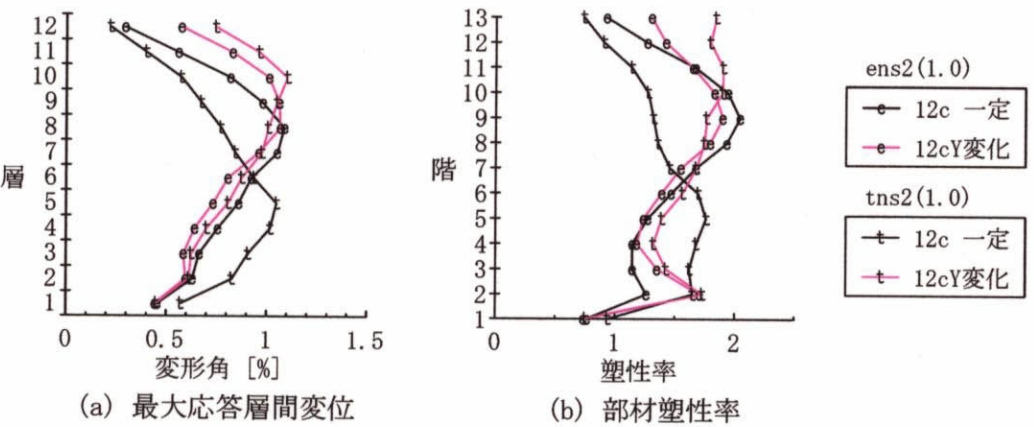
(1) 12c-ens2(1.0)

図3.3.16 最大応答層間変位と部材塑性率の分布 ー弾性剛性の分布の影響ー

ens2(1.0)	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
12c	1.39	-0.20	-0.051
12cY	1.40	-0.31	-0.067
		-0.084	0.006

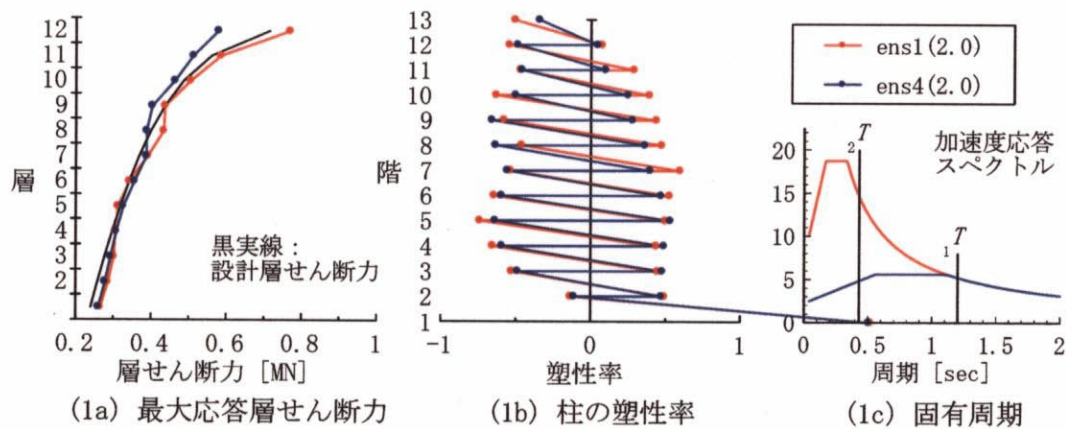
tns2(1.0)	${}_1\mu$	${}_2\delta/{}_1\delta$	${}_3\delta/{}_1\delta$
12c	1.40	0.040	-0.032
12cY	1.38	-0.31	0.095
		-0.088	0.037

12cY の上段：弾性剛性を用いた値、下段：等価剛性を用いた値

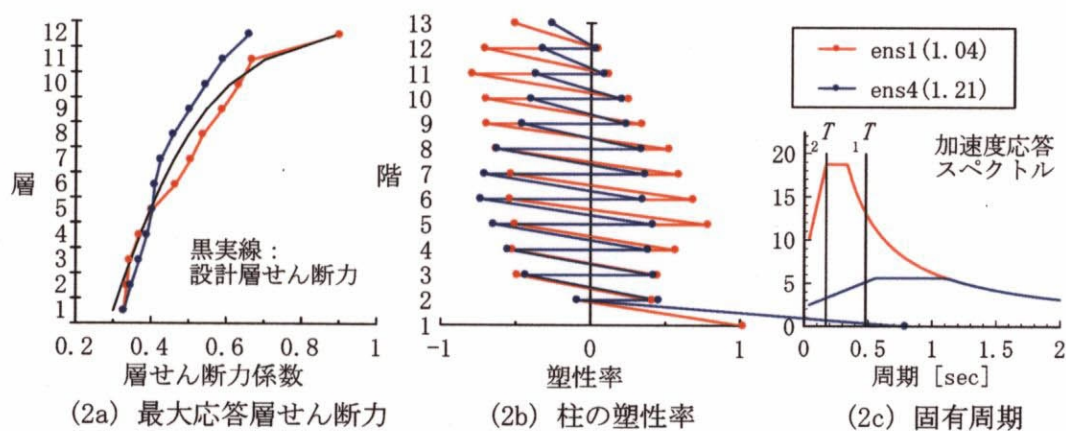


(1) 12c-ens2(1.0), tns2(1.0)

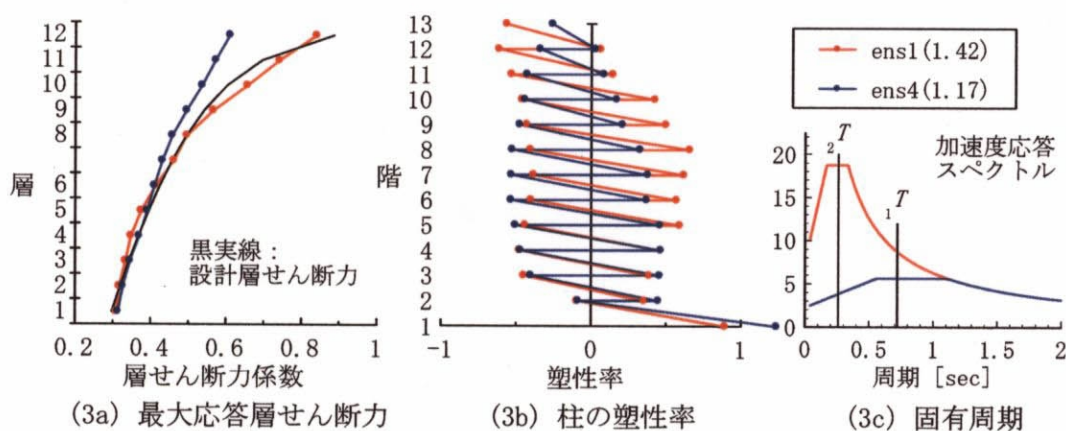
図3.3.17 最大応答層間変位と部材塑性率の分布 ー降伏点剛性低下率の影響ー



(1) 構造物12e



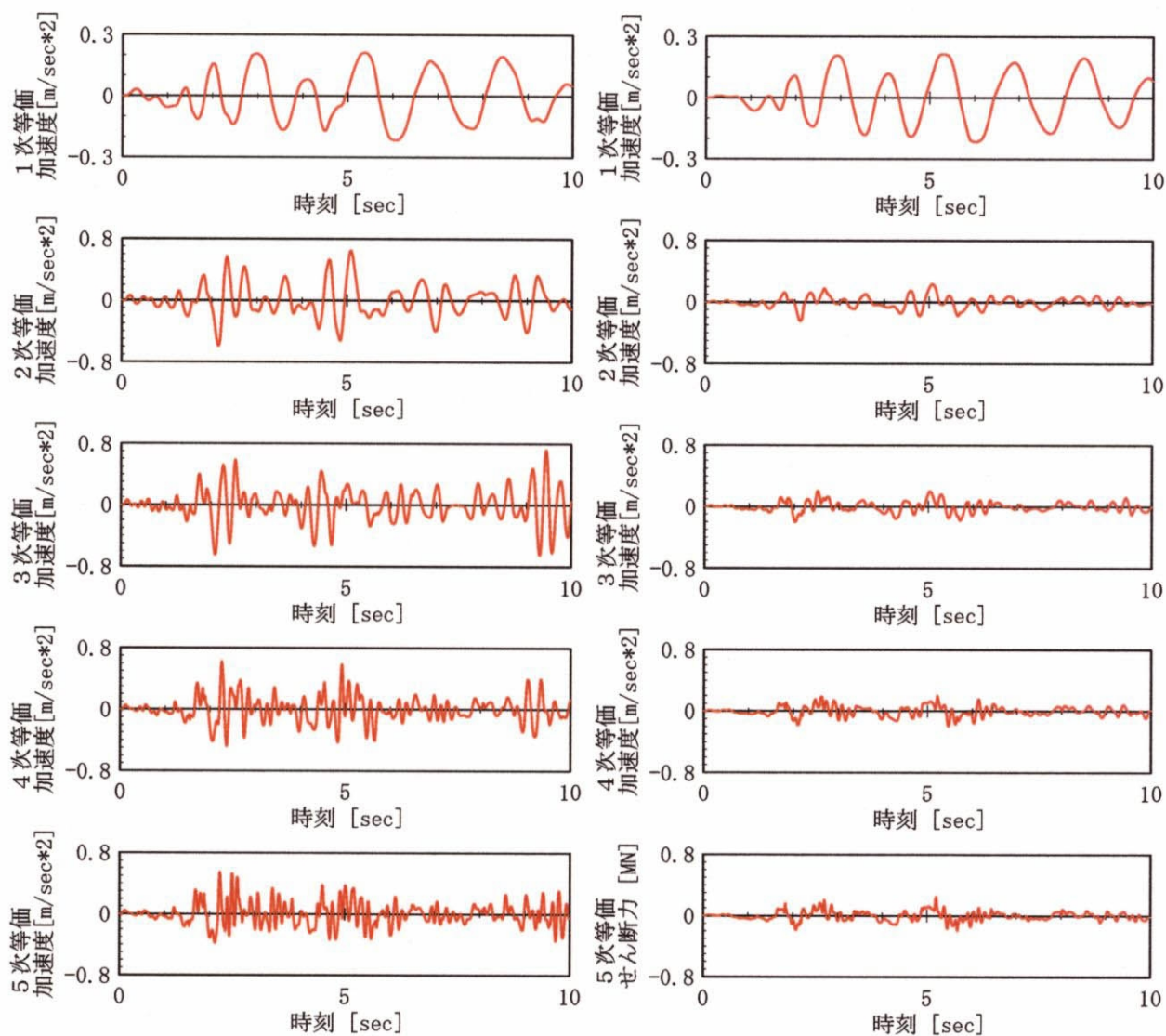
(2) 構造物12a



(3) 構造物12c

図3.3.18 最大応答層せん断力と柱の塑性率の分布 — 応答スペクトルの影響 —





(1) 12c-ens2(1.40)

(2) 12c-ens4(1.17)

図3.3.19 等価加速度の時刻歴

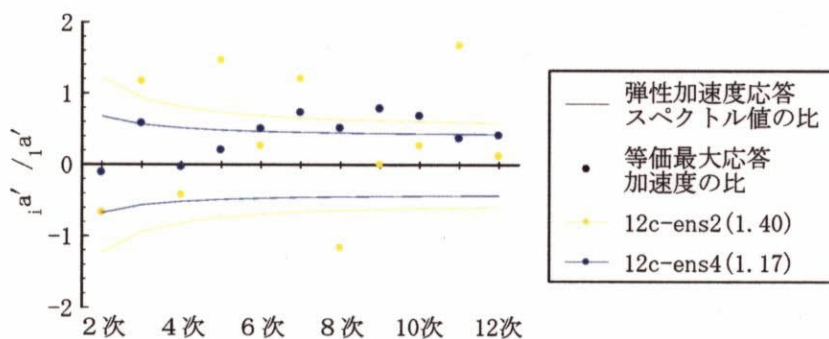
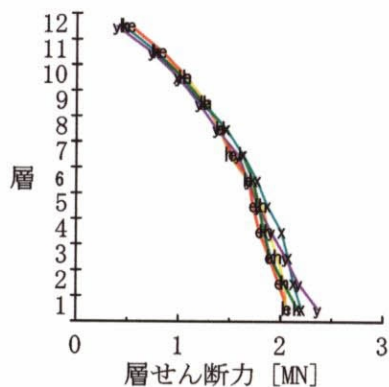


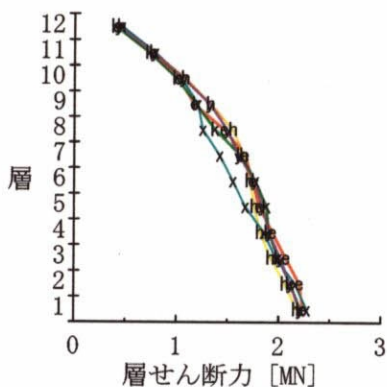
図3.3.20 等価最大応答加速度の比



e	ens2
h	hew2
k	kns2
x	tew2
y	tns2

	${}_1\mu$	$\frac{{}_2a'}{{}_1a'}$	$\frac{{}_3a'}{{}_1a'}$
ens2	1.60	-0.67	0.88
hew2	1.52	-0.51	0.95
kns2	1.92	-0.54	0.67
tew2	1.75	-0.31	0.59
tns2	1.70	-0.17	0.99

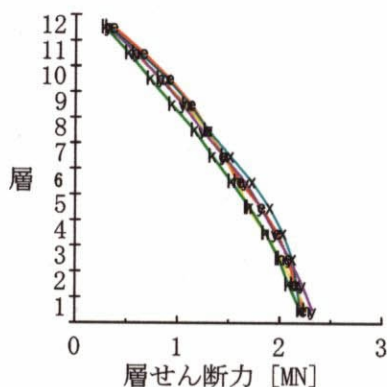
(1) 12c-Sa2(1.4)



e	ens3
h	hew3
k	kns3
x	tew3
y	tns3

	${}_1\mu$	$\frac{{}_2a'}{{}_1a'}$	$\frac{{}_3a'}{{}_1a'}$
ens3	1.93	-0.28	0.68
hew3	1.71	-0.65	0.72
kns3	2.19	-0.29	0.51
tew3	1.26	-0.25	1.83
tns3	1.58	-0.49	0.74

(2) 12e-Sa3(2.0)

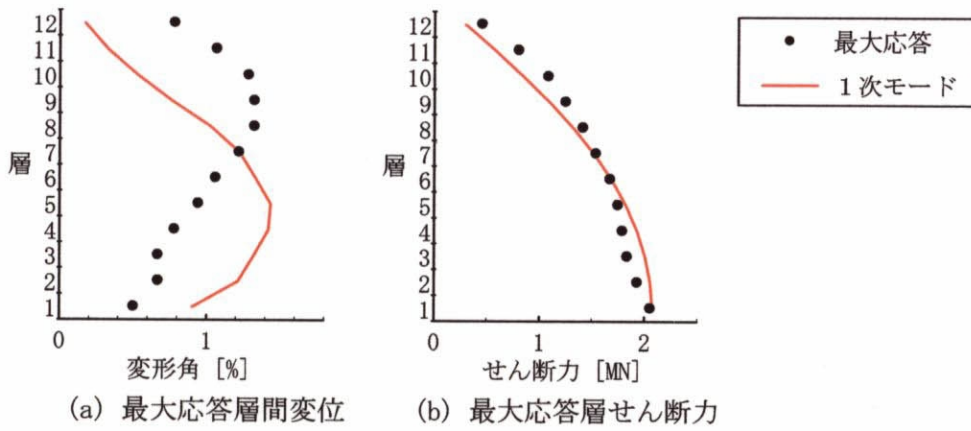


e	ens4
h	hew4
k	kns4
x	tew4
y	tns4

	${}_1\mu$	$\frac{{}_2a'}{{}_1a'}$	$\frac{{}_3a'}{{}_1a'}$
ens4	1.97	0.027	0.88
hew4	1.48	0.14	0.71
kns4	1.39	0.42	0.58
tew4	2.46	0.086	0.37
tns4	2.19	0.30	0.65

(3) 12a-Sa4(1.2)

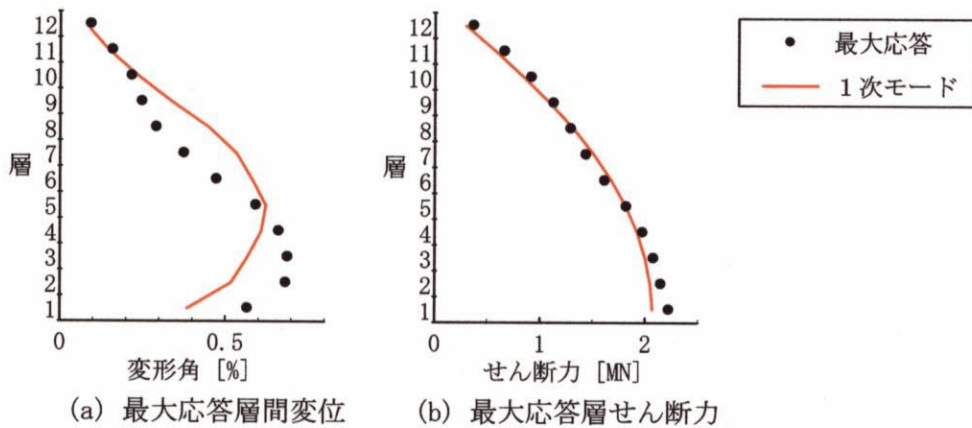
図3.3.21 層せん断力の分布 一位相特性の影響一



(c) モードの応答の比

	$\frac{{}_m\delta}{{}_1\delta}$	$\frac{{}_mS_d}{{}_1S_d}$	$\frac{{}_ma'}{{}_1a'}$	$\frac{{}_mS_a}{{}_1S_a}$
$m = 2$	-0.35	0.16	-0.68	1.23
$m = 3$	0.052	0.042	0.88	0.94
$m = 4$	-0.0043	0.017	-0.15	0.81

(1) 12c-ens2(1.40) 全体塑性率1.60



(c) モードの応答の比

	$\frac{{}_m\delta}{{}_1\delta}$	$\frac{{}_mS_d}{{}_1S_d}$	$\frac{{}_ma'}{{}_1a'}$	$\frac{{}_mS_a}{{}_1S_a}$
$m = 2$	0.29	0.056	0.028	0.99
$m = 3$	0.089	0.016	0.88	0.80
$m = 4$	-0.014	0.0068	-0.21	0.71

(2) 12a-ens4(1.21) 全体塑性率2.0

図3.3.22 最大応答層間変位と最大応答層せん断力

### 3.4 まとめ

本章では、模擬地震動を用いた時刻歴地震応答解析により、鉄筋コンクリート構造物における地震最大応答の構造物内での高さ方向の分布特性について検討した。

最大応答層間変位の絶対値は、構造物の固有周期や階数に依存するので、等価最大応答層間変位を定義し、等価最大応答層間変位の高次と1次の比を応答変形分布の指標とした。これらの値は、応答変形分布における弾性1次モード比例形からのずれを示し、2次と1次の比が正であれば下層部増大型の変形分布であり、負であれば上層部増大型の変形分布である。多くの構造物と入力地震動の組み合わせにおいて、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は-0.4~0.3程度、3次と1次の比は0~0.4程度の間であり、特に2次の絶対値は、モードの弾性変位応答スペクトル値の比を大きく上回る。4次モード以上の影響は小さい。

最大応答層せん断力の分布と最大応答層間変位の分布は関連が深い。下層部増大型の応答変位に対しては、上層部の最大応答層せん断力が設計層せん断力に比べて小さくなり、上層部増大型の応答変位に対しては、最大応答層せん断力の分布は設計層せん断力の分布に近くなる。

最大応答層せん断力の分布についても、分布の指標として等価最大応答加速度を定義した。等価最大応答加速度は最高次まで無視し得ないほど大きい。最大応答層間変位の分布および最大応答層せん断力の分布について弾性1次モード比例形からのずれを考えれば、最大応答層間変位は弾性2次モードに比例したずれが大きいものに対して、最大応答層せん断力は上層部でのみずれが大きい。

構造物の応答変形の分布を決定する第一の要因は、モードの固有周期と応答スペクトル特性の関係である。固有周期の短い構造物と長周期が卓越した入力地震動の組み合わせにおいては、地動慣性力が静的に作用し、基本モードと高次モードが同じ向きで生じるため、下層部の変位を増大する。入力地震動の短周期における加速度応答が増大するほど、あるいは、構造物の固有周期が長くなるほど、高次モードの応答が増大し、上層部増大型の変形分布に遷る。弾性時であればこれら高次モードの影響は微少であるが、部材の塑性化が伴えば、第二の要因と相俟って高次モードの影響は増大することになる。

第二の要因は、構造物における部材の耐力の分布である。構造物をある外力分布形のもとで全層の部材が同時に曲げ降伏に至るように設計したとしても、第一の要因によって下層部増大型となる入力地震動との組み合わせにおいては、下層部の部材の曲げ降伏が先行し、一層、下層部の変形を増大させる。上層部増大型となる入力地震動との組み合わせにおいては、逆に、上層部の変形がさらに増大する。降伏する部材が偏在することによって応答変形の偏りも大きくなり、等価最大応答層間変位の高次と1次の比の絶対値も増大する。

設計外力分布形をモード比例外力の線形和で表した時、2次の係数の絶対値を増大させる（負側にシフトさせる）ほど、上層部の強度が高まり、その結果、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は正側にシフトし、下層部の変形が増大する。

弾性剛性や降伏点剛性低下率の分布の変動の影響についても、設計外力分布形の問題に帰着できる。弾性剛性の分布が異なる構造物で、設計層せん断力係数の分布が等しい場合、上層部の剛性が高い構造物ほど、上層部の強度が相対的に高いことになる。すなわち、断面寸法が全層一定な構造物に比べて、上層部の断面寸法を絞った構造物ほど、上層部増大型の応答変形分布になりがちであり、等価最大応答層間変位の2次と1次の比は負側へ、3次と1次の比は正側にシフトする。付随して、振動モードそのものの形状の違いにより、上層部の断面寸法を絞った構造物ほど、同一等価最大応答層間変位における上層部の応答層間変位が大きい。2つの効果により、上層部の剛性が低い構造物の上層部の応答層間変位は著しく増大することになる。

以上の応答変形分布の特性は、同一のフーリエ位相を有し、フーリエ振幅スペクトルのみが異なる地震動に関しては明快である。しかしながら、入力地震動の位相特性の影響は、先に挙げた2つの要因以上に大きい場合もある。ある構造物に対して、同一の応答スペクトルを有し、位相特性の異なる複数の入力地震動を与えて比較した場合、等価最大応答層間変位の2次と1次の比が、ある地震動時刻歴に対しては-0.30、別の地震動時刻歴に対しては0.14となるというように、大きく変動する例も見られた。本研究では、応答変形分布に及ぼす地震動の位相特性の影響については解明できなかった。