

5.3 縮約1自由度系応答と漸増載荷解析を用いる方法(1)

構造物に対して設計スペクトルが与えられた時に構造物の各部位に生じる地震最大応答を評価する方法として、縮約1自由度系の最大応答と静的漸増載荷解析を組み合わせる方法を検討する。本節では、何らかの外力分布形を用いた漸増載荷解析結果に対して、適宜、割り増し係数を乗じて推定値を与える方法について検討する。

地震最大応答の推定に際して地震動時刻歴が与えられれば、骨組モデルの地震応答解析が、一般的には、現状における最も精度の高い推定値を与え得る解析手法であると考えられる。しかし、地震動の位相特性は未解明な点が多く、地震動時刻歴を特定できないのが現状であり、耐震設計においては、従来から、入力地震動を応答スペクトルという形で規範化してきた。縮約1自由度系の等価線形化法と漸増載荷解析を組み合わせる方法は、地震動時刻歴を必要とせず、従来の設計体系を踏襲できる点で有利である。また、漸増載荷解析は、地震応答解析に比べて、手法が簡便であるというのみならず、解として与えられる情報量が格段に少なく、感覚的にも明快に解を把握し得る。一方で、漸増載荷解析においては、4.2.3における検討のように、得られる応力と変形の分布は外力分布形に大きく依存し、外力分布形の選択が重要になってくる。

5.3.1 推定方法の概要

本節で提案する推定方法の具体的な手順は次の1から4までである。

手順1：1次等価変位の最大応答の算定

この部分は、既存の手法を用いるものとする。縮約1自由度系の地震応答解析、等価線形化法、あるいはエネルギーに基づく方法などによって、精度良く算定されることを想定している。

手順2：漸増載荷解析における外力分布形の設定

構造物と応答スペクトルの組み合わせに応じて、漸増載荷解析に用いる外力分布形として、最適外力分布形 $\{f\}_{\text{opt}}$ を設定する。最適外力分布形 $\{f\}_{\text{opt}}$ は、弾性振動モードに比例した外力分布形の線形和とし、式5.3.1で表す。固有振動モードは、1層の刺激関数が正となるよう符号を考慮する。

$$\{f\}_{\text{opt}} = [M] \sum_{i=1}^n (\alpha_i \beta_i \{u_i\}) \quad (5.3.1)$$

ここに、 β_i : i 次刺激係数、 $\{u_i\}$: i 次振動形、 $[M]$: 質量マトリクス、 n : 階数である。係数 α_i は1.0とし、係数 β_i は外力分布形における i 次等価加速度と1次等価加速度の比率に相当する。

手順3：漸増載荷解析の実行

最適外力分布形 $\{f\}_{\text{opt}}$ を用いた漸増載荷解析を行う。漸増載荷解析における解の参照点は、1次等価変位が、手順1で算出した最大応答と等しくなる点とする。この参照点における各層の層間変位、部材の変形、層せん断力、部材の応力などを求める。

手順4：漸増載荷解析結果の割り増し

ばらつきや動的効果を考慮して、手順3で得られた解析結果に増幅係数 ω を乗じる。高次モードの影響は外力分布形の係数 ${}_j\alpha$ で取り込むことにし、増幅係数 ω は全層で一律の値とする。

以上の手順において、係数 ${}_j\alpha$ および増幅係数 ω が変動因子であり、構造物に関する諸因子、与えられた応答スペクトルの特性、1次等価変位の大きさ、などに依存して最適な係数も変化すると考えられる。

5.3.2 最適外力分布形

手順2においては、漸増載荷解析に用いる外力分布形として、最適外力分布形 $\{f\}_{\text{opt}}$ を導入している。最適外力分布形は、構造物に対して設計応答スペクトルが与えられた時、構造物に生じると予想される地震最大応答を最も合理的に与え得る外力分布形と定義する。簡単のため、式5.3.1においては、3次モードまでの弾性振動モードに比例した外力分布形の線形和で表すことにし、それより高次モードは採り入れないことにする。

(1) 誘導方法

2.1節で設定した構造物と2.2節で作成した模擬地震動を対象に、最適外力分布形を算定することにする。1つの加速度応答スペクトルに対して、異なる位相特性を有する模擬地震動が5種類しかないが、この5種類の地震応答解析結果の最大値を評価することを目標に設定し、最適外力分布形を誘導することにする。地震動時刻歴が5種類のみというのは必ずしも十分な数とは言えないが、5.1.1(2)における検討より、5種類の最大値が、対応する応答スペクトルに対する応答の80%上限値程度に相当すると考えている。本節では、厳密な最適外力分布形を求めることよりも、構造物や応答スペクトルに関する諸因子が最適外力分布形に及ぼす影響を解明することを目的とする。

まず、構造物と加速度応答スペクトルを1種類ずつ選ぶ。1つの加速度応答スペクトルに対して、異なる位相特性を有する5種類の模擬地震動があるので、5個の地震応答解析結果が得られることになる。地震応答解析においては、全体塑性率 ${}_1\mu$ が所定の値になるように入力地震動の倍率を調整する。全体塑性率 ${}_1\mu$ は、0.20, 0.40, …, 4.0 (0.20刻み) に設定する。全体塑性率が同一になる入力地震動の倍率が複数存在する場合には、最小の倍率のものを検討対象とする。各層の層間変位に関して、5種類の地震応答解析による最大応答層間変位の最大値 $\delta_{j,d\text{max}}$ を推定目標とする。

次に、外力分布形を変化させた漸増載荷解析を反復して実行することにより、最適外力分布形を探索する。以下に示す1から3までを反復し、誤差 ε が最小となる係数 ${}_2\alpha$ 、 ${}_3\alpha$ の組を求める。

反復1：漸増載荷解析の実行

係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ を適当に設定し、これに対応する外力分布形 $\{f\}$ を用いた漸増載荷解析を行う。解の参照点を全体塑性率が地震応答解析結果と等しくなる点とし、 j 層の層間変位 $\delta_{j,s}$ ($j=1, 2, \dots, n$) を求める。

反復2：増幅係数 ω の計算

j 層の層間変位について、推定目標値 $\delta_{j,d,max}$ を漸増載荷解析結果 $\delta_{j,s}$ で除した値を算出する。増幅係数 ω は、それらの全層における最大値とする。

$$\omega = \max_j \left(\frac{\delta_{j,d,max}}{\delta_{j,s}} \right) \quad (5.3.2)$$

反復3：誤差の計算

誤差 ε を式5.3.3により算出する。

$$\varepsilon = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\omega \cdot \delta_{j,s}}{\delta_{j,d,max}} - 1.0 \right)^2 \quad (5.3.3)$$

(2) 算出結果

地震応答解析による最大応答値と最適外力分布形による漸増載荷解析を用いた推定値の比較例を図5.3.1に示す。同図は、構造物12c、加速度応答スペクトル Sa2を対象にしたものであり、全体塑性率は0.6, 2.0, 4.0の3種類とする。同図では、最適外力分布形による漸増載荷解析結果を青線で、それに増幅係数 ω を乗じて得られる推定値を水色線で示している。

最適外力分布形を用いた漸増載荷解析による層間変位は、5種類の地震応答解析結果による最大応答層間変位の包絡線を縮小した分布形状であり、5種類の地震応答解析結果の平均的な分布を与えている。漸増載荷解析結果に全層で共通の増幅係数 ω を乗じることにより、すべての層について、5種類の地震応答解析結果の最大値に近い値となる。今回は5種類の地震応答解析結果の最大値を推定目標としているが、いずれかの層でそれを上回る別の地震応答解析結果があるとすれば、それを考慮に入れた場合、最適外力分布形も変化してしまうことは否めない。

部材の変形についても、漸増載荷解析結果に増幅係数 ω を乗じた推定値は地震応答解析による最大応答値と近い値である。増幅係数 ω は、部材の最大応答変形の推定においても有効である。一方、床変位や層せん断力については、漸増載荷解析結果に増幅係数 ω を乗じた値は、5種類の地震応答解析結果の最大値を上回る値を示す。特に、層せん断力については、別途、割り増し係数を定義する必要がある。

構造物12c、加速度応答スペクトル Sa2の組み合わせについて、全体塑性率2.0のときの係数 ${}_2\alpha$ 、係数 ${}_3\alpha$ 、増幅係数 ω 、誤差 ε を表5.3.1に示す。同表では、1種類の入力地震動ごとに、その最大応答層間変位を推定目標値 $\delta_{j,d,max}$ に設定して算出した最適外力分布形における各係数を比較して示している。なお、1種類の入力地震動ごとに導出した最適外力分布形は、4.3節における等価外力分布形と同様の意味を持つ。

係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ は、最適外力分布形における2次および3次モード比例外力分布形の割合を示す訳であるが、両モードの刺激関数の符号により、下層部に比べ上層部の応答が大きければ係数 ${}_2\alpha$ は負の値となり、中間層に比べて上・下層部で応答が大きければ係数 ${}_3\alpha$ は正の値となる。

1種類の地震応答解析結果ごとに係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ を算出した場合、地震波ごとのばらつきが大きい。4.3節でも検討したように、同一の応答スペクトルを有する場合でも、地震動時刻歴が異なれば、等価外力分布形も大きく変わる。

5種類の地震応答解析結果の最大値を推定目標に設定して算出した係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ は、1種類の地震応答解析結果ごとに算出した係数の平均的な値を示す。しかし単純な平均値ではなく、単に、5種類の地震応答解析結果の最大値に合わせるための便宜的な意味合いも強い。特に、係数 ${}_3\alpha$ については、便宜性が強く、1種類の地震応答解析結果ごとに算出した係数よりも大きくなる傾向がある。同一の応答スペクトルのもとで、地震動時刻歴の違いにより、下層増大型の応答と上層増大型の応答が混在する時、推定目標とする層間変位は上層部および下層部増大型となり、係数 ${}_3\alpha$ が正側に大きくなる。すなわち、係数 ${}_2\alpha$ において地震波ごとの差が大きいほど、係数 ${}_3\alpha$ が増大する。

1種類の地震応答解析結果ごとに算出した増幅係数 ω は動的効果を表す。構造物の地震応答において、高次モードの影響により、1次等価変位の最大応答時に各層の最大応答層間変位が生じるとは限らない。すなわち、1次等価変位の最大応答時の各層の層間変位は、最大応答層間変位以下である。そのため、漸増載荷解析において、1次等価変位が最大応答値と等しくなる点を参照することにより得られる層間変位は、いずれかの層においても地震応答解析による最大応答値以下となる。よって、1.0より大きい値の増幅係数 ω が必要である。1次等価変位の最大応答と全層の最大応答層間変位が同時に生じれば、増幅係数 ω は1.0となる。

これに対して、5種類の地震応答解析結果の最大値を推定目標に設定して算出した増幅係数 ω は、地震動時刻歴の違いによる応答変形の分布のばらつきに因るところが大きい。最適外力分布形による漸増載荷解析結果は、5種類の地震応答解析結果の中央値に近いが、地震動時刻歴の違いによる応答変形の分布形状のばらつきによって、5種類の地震応答解析結果うちの最大値と中央値の比が大きくなるほど、増幅係数 ω は大きくなる。

表5.3.1 最適外力分布形における各係数の算定例

	全体*1	ens2	hew2	kns2	tew2	tns2
係数 ${}_2\alpha$	-0.39	-0.68	-0.64	-0.55	-0.43	-0.14
係数 ${}_3\alpha$	1.46	0.99	1.10	0.31	0.70	1.08
増幅係数 ω	1.48	1.13	1.07	1.08	1.25	1.20
誤差 ϵ	0.13	0.089	0.031	0.082	0.26	0.12

*1：5個の地震応答解析結果の最大値を推定目標に設定して算出した結果

弾性固有周期を変動因子とした7種類の12階建て構造物のうちの4種類の構造物について算出した係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ を図5.3.2に示す。同図では、各構造物について、応答スペクトルの違いによる係数の違いを示しており、横軸を全体塑性率としてプロットしている。

係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ は、全体塑性率1.0前後で変動が大きく、全体塑性率2.0以上では、比較的变化が少ない。全体塑性率1.0前後では、構造物内で降伏が生じる部位は、地震動の時刻歴や位相特性に大きく依存する。そのため、地震動時刻歴が異なれば応答変形の分布性状も異なり、また、地震動の倍率を微妙に変化させれば応答変形の分布性状も大きく変わる。それに対し、変形レベルが大きくなれば、地震動時刻歴が異なっても比較的類似した応答変形分布性状になり、地震動の応答スペクトル特性の影響が強くなると言える。

構造物12a および構造物12c においては、応答スペクトルごとの係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ の相対関係には、明確な特性が見られる。短周期の加速度応答の大きい Sa1 ほど、係数 ${}_2\alpha$ は負側に大きく、係数 ${}_3\alpha$ は正側に大きい。また、同一の応答スペクトルについて構造物12a と構造物12c を比較すると、

固有周期の長い構造物12cほど、係数 ${}_2\alpha$ は負側に大きく、係数 ${}_3\alpha$ は正側に大きい。係数 ${}_2\alpha$ に関する大小関係は、図3.3.9に示した等価最大応答層間変位に関する2次と1次の比の大小関係とほぼ対応している。3次の係数 ${}_3\alpha$ に関してこれはあてはまらない。係数 ${}_3\alpha$ は、2次モードのばらつきによって増大するためである。

構造物12e および構造物12g においては、応答スペクトルの違いによる係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ の差が顕著でない。これら2つの構造物における係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ は、構造物12c と加速度応答スペクトル Sa1あるいは Sa2の組み合わせにおける係数と近い値である。

固有周期を0.72秒として算出した層せん断力係数 A_i 分布に対応した外力分布形は、4.1.2節で示したように、式5.3.4で表される。

$$\{f\}_{Ai} = [M](1.0{}_1\beta \{{}_1u\} - 0.27{}_2\beta \{{}_2u\} + 0.84{}_3\beta \{{}_3u\}) \quad (5.3.4)$$

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

A_i 分布における2次および3次の係数は、構造物12c と加速度応答スペクトル Sa3の組み合わせ、あるいは構造物12a と加速度応答スペクトル Sa1の組み合わせにおける全体塑性率2.0前後における最適外力分布形における係数 ${}_2\alpha$ および係数 ${}_3\alpha$ と最も近い。逆に言えば、これらの組み合わせにおける最適外力分布形は A_i 分布に比較的近いと言える。構造物12e および構造物12g における最適外力分布形の係数は、2次および3次とも絶対値が A_i 分布の係数より大きい値である。

(3) 応答スペクトルとの関係

構造物と応答スペクトルの各組み合わせについて、各次モードの振動の生じやすさを検討するため、弾塑性域における各次モードの加速度応答スペクトル値 ${}_iS_a$ を、弾性応答スペクトルを用いて推定する。1次モードの加速度応答スペクトル値 ${}_1S_a$ の計算では、全体塑性率 ${}_1\mu$ に応じた等価周期 ${}_1T$ と等価減衰 ${}_1h$ を考慮する。ここで、全体塑性率 ${}_1\mu$ は、1次等価変位に関する塑性率である。

粘性減衰に起因する減衰定数は振動数比例型とし、履歴減衰に対する等価粘性減衰定数 h_{eq} は式4.1.13と同様に式5.3.5とする。

$$h_{eq} = 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1\mu}} \right) \quad (5.3.5)$$

等価減衰 ${}_1h$ に応じて、加速度応答スペクトル値に減衰補正係数 F_h を乗じる。減衰補正係数 F_h は式5.3.6とする。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10{}_1h} \quad (5.3.6)$$

2次モードの等価周期 ${}_2T$ は、1次等価周期 ${}_1T$ に比例して変化するものと仮定し、粘性減衰に起因する減衰定数は振動数比例型とし、履歴減衰に対する等価粘性減衰定数は1次モードと同一とする。

1次モードに対する2次モードあるいは3次モードの加速度応答スペクトル値の比率 ${}_iS_a / {}_1S_a$ を算出し、固有周期を変動因子とする4種類の構造物について図5.3.3に示す。図5.3.2と図5.3.3を比

較すると、同一全体塑性率における各曲線の相対関係が類似である。すなわち、2次モードについては、加速度応答スペクトル値の比が大きくなるほど、係数 ${}_2\alpha$ が小さくなる傾向がある。3次モードについては、加速度応答スペクトル値の比が大きくなるほど、係数 ${}_3\alpha$ は大きくなる傾向がある。また、構造物12eの2次の比や、構造物12gの2次および3次の比は、応答スペクトルの種類の違いによる差が無い。

加速度応答スペクトル値の比 ${}_iS_a / {}_1S_a$ と最適外力分布形における係数 ${}_i\alpha$ の関係を図5.3.4に示す。同図は、7種類の構造物と4種類の加速度応答スペクトルを掛け合わせた合計28通りの組み合わせについて、全体塑性率2.0を対象としたプロットである。記号について、構造物は色で区別し、加速度応答スペクトルは数字で区別している。

構造物12eよりも固有周期が短い構造物においては、加速度応答スペクトル値の比が増大すれば、その変化と線形に近い関係で係数 ${}_2\alpha$ は減少し、係数 ${}_3\alpha$ は増大する。 ${}_2S_a / {}_1S_a$ が小さいほど、係数 ${}_2\alpha$ は大きく、固有周期が短い構造物と長周期が卓越した地震動の組み合わせでは、下層部の外力を割り増しした外力分布形が最適であることを意味している。係数 ${}_2\alpha$ は、 ${}_2S_a / {}_1S_a = 1.0$ 付近を境に符号が反転している。これよりも加速度応答スペクトル値の比の大きい領域では、上層部の外力を割り増しした外力分布形が最適である。一方、構造物12fや構造物12gでは、加速度応答スペクトル値の比が大きいわりには、係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ の絶対値は大きくない。両構造物の係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ は、それぞれほぼ等しい値である。

28通りの解析例のすべてに関して、加速度応答スペクトル値の比 ${}_iS_a / {}_1S_a$ と係数 ${}_i\alpha$ の相関係数は、2次では-0.59、3次では0.74であり、2次に関しては相関が弱い。そこで、構造物12aから構造物12eまでと、構造物12fおよび構造物12gの2領域に分けて相関係数を求めてみる。構造物12aから構造物12eまでについては、相関係数は2次で-0.87、3次で0.86であり、強い相関が見られる。この領域における線形回帰直線は、式5.3.7および式5.3.8である。

$${}_2\alpha = 0.39 - 0.40 \frac{{}_2S_a}{{}_1S_a} \quad (5.3.7)$$

$${}_3\alpha = 0.30 + 0.65 \frac{{}_3S_a}{{}_1S_a} \quad (5.3.8)$$

式5.3.7および式5.3.8を簡略化し、構造物12fおよび構造物12gの領域における係数 ${}_i\alpha$ を丸めた一定値とすることにより、加速度応答スペクトル値の比 ${}_iS_a / {}_1S_a$ と係数 ${}_i\alpha$ の関係式として式5.3.9および式5.3.10を設定する。図5.3.4中の黒細点線は、これらの関係式を示している。

$${}_2\alpha = \begin{cases} 0.40 - 0.40 \frac{{}_2S_a}{{}_1S_a} & \left(\frac{{}_2S_a}{{}_1S_a} \leq 1.75 \right) \\ -0.30 & \left(\frac{{}_2S_a}{{}_1S_a} > 1.75 \right) \end{cases} \quad (5.3.9)$$

$${}_3\alpha = \begin{cases} 0.30 + 0.60 \frac{{}_3S_a}{{}_1S_a} & \left(\frac{{}_3S_a}{{}_1S_a} \leq 2.50 \right) \\ 1.80 & \left(\frac{{}_3S_a}{{}_1S_a} > 2.50 \right) \end{cases} \quad (5.3.10)$$

全体塑性率0.6および3.0を対象に、加速度応答スペクトル値の比 ${}_i S_a / {}_1 S_a$ と最適外力分布形における係数 ${}_i \alpha$ の関係を図5.3.5に示す。同図中の黒細点線は、式5.3.9および式5.3.10を示している。

全体塑性率0.6および3.0について、加速度応答スペクトル値の比 ${}_i S_a / {}_1 S_a$ と係数 ${}_i \alpha$ の関係において見られる傾向は、全体塑性率2.0と同様である。全体塑性率2.0に関する回帰式である式5.3.9および式5.3.10との関係についても、特に著しくこの関係線より外れるということはない。全体塑性率ごとに関係式を設定するのは煩雑さを増すので、すべての全体塑性率に対して式5.3.9および式5.3.10を適用することにする。

(4) 諸因子の影響

最適外力分布形における係数 ${}_2 \alpha$ および ${}_3 \alpha$ について、設計外力分布形を変動因子とした3種類の構造物における比較を図5.3.6に、弾性剛性の分布を変動因子とした3種類の構造物における比較を図5.3.7に示す。応答スペクトル Sa2および Sa4との組み合わせを採り上げて示している。

4.3.2(5)では、等価外力分布形については、構造物の設計外力分布形の影響は比較的小さい。図5.3.6では、設計外力分布形の変動により各構造物の係数 ${}_2 \alpha$ および ${}_3 \alpha$ に差が生じているものの、その差は比較的小さい。設計外力分布形が異なっても同一の最適外力分布形が適用できるものとする。

一方、弾性剛性の分布の影響は無視できない。係数 ${}_2 \alpha$ が負の値になる時に、上層部の刺激関数が大きい構造物12cBの方が係数 ${}_2 \alpha$ の絶対値が小さくなる。弾性剛性の分布が異なる場合には係数の換算が必要になってくるが、本研究では省略する。

5.3.3 提案方法の検証

(1) 増幅係数と推定誤差

誤差 ε を最小となるように係数 ${}_2 \alpha$ および ${}_3 \alpha$ を精算した際の増幅係数 ω および誤差 ε と、式5.3.9および式5.3.10により略算した係数 ${}_2 \alpha$ および ${}_3 \alpha$ を用いて再計算した増幅係数 ω および誤差 ε を図5.3.8に示す。同図は、7種類の構造物、4種類の加速度応答スペクトルおよび20種類の全体塑性率を掛け合せた合計560通りの組み合わせについて、横軸を全体塑性率としてプロットしている。記号は、構造物を色で区別し、加速度応答スペクトルを数字で区別している。

係数 ${}_2 \alpha$ および ${}_3 \alpha$ を精算した場合には増幅係数 ω は2.0未満に収まっている。固有周期が短い構造物と短周期の加速度応答の小さい応答スペクトルの組み合わせほど、増幅係数は小さい。増幅係数が小さいほど、地震動時刻歴の違いによる応答変形の分布のばらつきが小さいことを示している。構造物12gにおいて、全体塑性率1.2と全体塑性率2.8以上において増幅係数は最も大きい。誤差 ε については、最適外力分布形にて考慮する弾性モード比例外力分布形を全12モードまでとすれば、誤差 ε は0.0になるはずであるが、4次モード以上を考慮しないために誤差 ε は0.0ではなくなる。それでも、すべての解析例において誤差 ε は小さな値であり、最大は構造物12g、応答スペクトル Sa1、全体塑性率1.2の組み合わせで1.21である。これは、全層平均で30%程度の残差が生じていることに相当する。

係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ を簡略化した算定式5.3.9および式5.3.10で与えることにより、増幅係数 ω は増大する。両式は、本来、全体塑性率2.0に関する回帰式である。全体塑性率2.0における増幅係数を見ると、構造物12b、構造物12cおよび構造物12dと、応答スペクトルSa1からSa3までの組み合わせで増幅係数は大きく、最大は構造物12bと応答スペクトルSa2の組み合わせで2.54である。全体塑性率2.0に関する回帰式を他の全体塑性率に対して転用しても、全体塑性率0.6以下、あるいは全体塑性率1.6以上においては、全体塑性率2.0に比べて増幅係数が著しく増大するということはない。全体塑性率0.6のすべての解析例で増幅係数は1.8未満である。全体塑性率2.0以上3.0未満では、増幅係数が2.5を超える解析例があるが、構造物12dと応答スペクトルSa4の組み合わせや、構造物12fと応答スペクトルSa1の組み合わせなどであり、増幅係数が大きくなる組み合わせに関する傾向は特に明確ではない。全体塑性率3.0以上では構造物12gを除く大部分で増幅係数は2.0未満である。増幅係数 ω をおおまかに与えれば、全体塑性率0.6以下に対しては1.8、全体塑性率1.6以上では2.5である。

全体塑性率1.0前後では、増幅係数が著しく増大する場合がある。全体塑性率0.8以上1.6以下では、総解析例数140のうち、増幅係数が2.0未満に収まるのは84%であるが、8個の解析例で増幅係数が3.0を超える。最大は、構造物12dと応答スペクトルSa2、全体塑性率1.6の組み合わせで、増幅係数は6.0を超える。全体塑性率1.0前後では、地震動時刻歴の違いにより、降伏する部位やその変形の大きさに大きなばらつきが生じることがあることが伺える。

(2) 他の外力分布形との比較

最適外力分布形を、層せん断力係数 A_i 分布(A_i 分布)、モードの層せん断力の2乗和平方(SRSS)に対応する外力分布形あるいは1次モード比例外力分布形(1st)と比較する。4種類の構造物と応答スペクトルの組み合わせに対して、外力分布形の比較を図5.3.9に、部材塑性率の分布の比較を図5.3.10に、増幅係数 ω の比較を図5.3.11に示す。最適外力分布形は、係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ を精算した場合と、算定式5.3.9および式5.3.10により略算した場合の2種類とする。検討対象は、構造物12aと応答スペクトルSa4の組み合わせ(以下、12a-Sa4と略記)、構造物12cと応答スペクトルSa1の組み合わせ(12c-Sa1)、構造物12cと応答スペクトルSa3の組み合わせ(12c-Sa3)、および構造物12gと応答スペクトルSa2の組み合わせ(12g-Sa2)の4種類である。図5.3.9は、全体塑性率2.0に関する比較であり、図5.3.10では、全体塑性率2.0について、5種類の地震応答解析結果と5種類の漸増載荷解析結果を示している。図5.3.11に示す増幅係数 ω は、層間変位に関して地震応答解析結果を漸増載荷解析結果で除した値の全層における最大値である。なお、層せん断力係数 A_i 分布において、 A_i の算定には構造物ごとの弾性1次固有周期を用いている。ちなみに、構造物の設計層せん断力係数は、固有周期を0.72秒として算定した A_i 分布である。

略算した最適外力分布形では、大部分の解析例で増幅係数 ω は2.50未満である。地震動時刻歴の違いによる応答変形の分布のばらつきが少ない12a-Sa4では、すべての全体塑性率に対して増幅係数は1.35未満である。それ以外の組み合わせ、すなわち12c-Sa1、12c-Sa3および12g-Sa2では、地震動時刻歴の違いによる応答変形の分布のばらつきや、最適外力分布形の略算方法の影響を受け、増幅係数が2.0を超える例が見られる。

A_i 分布による漸増載荷解析結果は、固有周期の短い構造物12a では下層部増大型の変形分布であり、固有周期の長い構造物12g ほど上層部増大型の変形分布である。変形分布は、構造物にのみ依存し、与えられた応答スペクトルには依存しない。変形分布が上層増大型と下層増大型のどちらであるかは、設計層せん断力係数の分布と漸増載荷解析における層せん断力係数の分布の関係に依存する。両者が等しい分布である構造物12c においては、梁の塑性率はほぼ均等に分布する。また、弾性1次固有周期の長い構造物ほど漸増載荷時の上層部の層せん断力係数が大きくなり、上層部増大型の変形分布となる。このような A_i 分布による漸増載荷解析結果は、12a-Sa4では下層部増大型の応答が多く、12g-Sa2では上層部増大型の応答が多い、という点においては、地震応答解析結果と対応している。しかし、構造物12c における応答スペクトルの違いによる応答変形の分布の違いを考慮することはできない。構造物12c は、Sa1に対する応答は上層部増大型の変形分布であり、Sa3に対する応答は均等分布型である。これに対し、 A_i 分布による漸増載荷解析結果は、応答スペクトルに関係無く、均等分布型である。

増幅係数 ω については、多くの解析例において、略算した最適外力分布形よりも一回り大きい値が必要である。12a-Sa4に関しては、増幅係数は1.50未満と小さい。12c に関しては、上層部増大型の応答変形の分布を考慮できないため、Sa1に対して増幅係数は大きく、4.0を超える場合がある。均等分布型の応答となる Sa3に対しては、増幅係数はすべての全体塑性率において2.0未満と小さく、略算した最適外力分布形よりも小さい場合もある。12a-Sa3は、最適外力分布形が層せん断力係数 A_i 分布と比較的近い。12g-Sa2においては、 A_i 分布の増幅係数は略算した最適外力分布形の増幅係数と比べて、0.3~0.8程度大きい。

概して、層せん断力係数 A_i 分布は、最適外力分布形よりは劣るものの、地震動時刻歴ごとにばらつく地震最大応答の平均に近い推定値を与え得ると言える。ただし、応答スペクトルの影響を考慮できないのが難点である。固有周期が比較的短い構造物と短周期の加速度応答の大きい応答スペクトルの組み合わせにおいて、上層部増大型の変形分布となる地震応答とは対応せず、大きな増幅係数を必要とする。

1st による漸増載荷解析結果は、いずれの構造物においても、上層部の変形の小さい応答変形分布である。増幅係数 ω については、下層部増大型の応答変形分布である12a-Sa4に関しては、最大1.80であり、比較的小さいと言える。それ以外の組み合わせでは、全体塑性率が1.0を超えると増幅係数が激増する。均等分布型や上層部増大型の地震応答が出現するためである。

SRSS は構造物と応答スペクトルに応じて高次モードの影響を考慮できる外力分布形であるが、1st と同様に、12a-Sa4を除く解析例においては、全体塑性率が1.0を超えると増幅係数が増大している。これらの解析例において、SRSS では高次モードの効果がほとんど表れていない。これは、加速度応答スペクトル値の高次と1次の比が小さいこと、2乗和平方することにより2次あるいは3次の効果が薄れることに因る。全体塑性率が大きい領域や、固有周期の長い構造物においては、加速度応答スペクトル値の2次あるいは3次と1次の比が増大することにより、増幅係数が比較的小さい値で収まっている。

(3) 層せん断力の割り増し係数

構造物12g、加速度応答スペクトル Sa1、全体塑性率2.0の組み合わせ（以下、12g-Sa1-2.0と略記）における層せん断力と曲げモーメントの分布について、地震応答解析結果と略算した最適外力分布形による漸増載荷解析結果の比較を図5.3.12に示す。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。

すべての地震動時刻歴のすべての層について、最大応答層せん断力は、略算した最適外力分布形による漸増載荷解析結果を上回っている。5種類の地震応答解析結果の最大値と略算した最適外力分布形による漸増載荷解析結果の比は、1層で1.26、6層で1.27、12層で1.63である。最上層のみ比率が大きく、その他の層では1.10~1.30程度である。最上層では、高次モードによる応答層せん断力の上昇は非常に大きい。柱の曲げモーメントについても、すべての部位で、地震応答解析による最大応答値は、略算した最適外力分布形による漸増載荷解析結果を上回っている。地震応答解析による最大応答値と漸増載荷解析結果の比は、12層柱脚で2.81、1層柱頭で1.92であり、この2箇所特に大きく、中層部の柱では1.30~1.50程度である。

略算した最適外力分布形および層せん断力係数 A_j 分布を用いた漸増載荷解析について、最大応答層せん断力に関する増幅係数を図5.3.13に示す。同図は、7種類の構造物、4種類の加速度応答スペクトルおよび20種類の全体塑性率を掛け合わせた合計560通りの組み合わせについて、横軸を全体塑性率としてプロットしている。記号は、構造物を色で区別し、加速度応答スペクトルを数字で区別している。増幅係数は層ごとに算出し、図5.3.13の一方の図では1層から11層までの増幅係数の最大値を示し、もう一方では12層の増幅係数を示している。 j 層の増幅係数 ω_{sj} は式5.3.11とする。

$$\omega_{sj} = \frac{Q_{j,d,max}}{Q_{j,s}} \quad (5.3.11)$$

ここに、 $Q_{j,d,max}$ ：地震応答解析による j 層の最大応答層せん断力の最大値、 $Q_{j,s}$ ：略算した外力分布形を用いた漸増載荷解析による j 層の層せん断力である。

最適外力分布形を A_j 分布と比較すると、1層から11層までの増幅係数の最大値は減少し、12層の増幅係数は増大する。最適外力分布形は、最大応答変形の分布に適合するよう定めたものであり、高次モードによる瞬間的な層せん断力の増大を考慮しようとするものではない。そのため、高次モードの影響が特に大きい最上層部においては、大きな増幅係数を必要とする。

最適外力分布形による1層から11層までの増幅係数は、固有周期が長い構造物ほど大きくなり、全体塑性率が増大するほど微増する。増幅係数は、概ね、構造物12aでは1.10程度、構造物12gでは1.30程度である。構造物12gと応答スペクトル Sa1あるいは Sa2との組み合わせでは、全体塑性率が2.80を超えると、増幅係数は1.60程度とやや大きい。12層の増幅係数は、固有周期の長い構造物ほど大きく、全体塑性率が大きいほど増加する傾向にあるが、全体塑性率1.0付近でも大きい場合がある。増幅係数は、構造物、応答スペクトル、全体塑性率により様々であり、1.0~2.15の広い範囲に分布している。敢えて簡略的な数値を与えるならば、構造物12aでは1.20、構造物12dでは1.50、構造物12gでは全体塑性率2.0以上で1.70、全体塑性率2.0を超える領域で2.10となる。

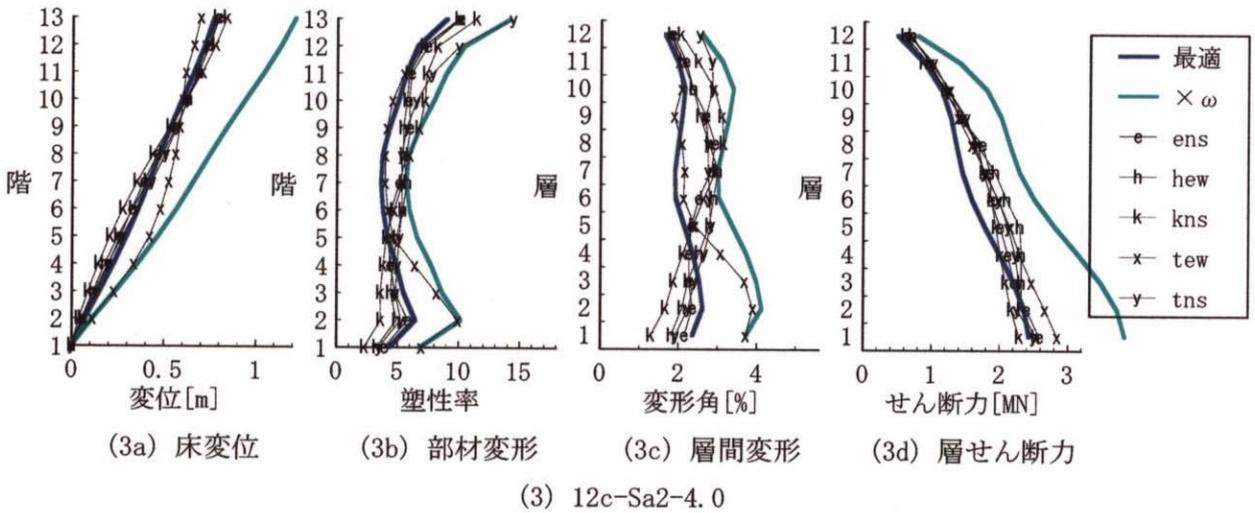
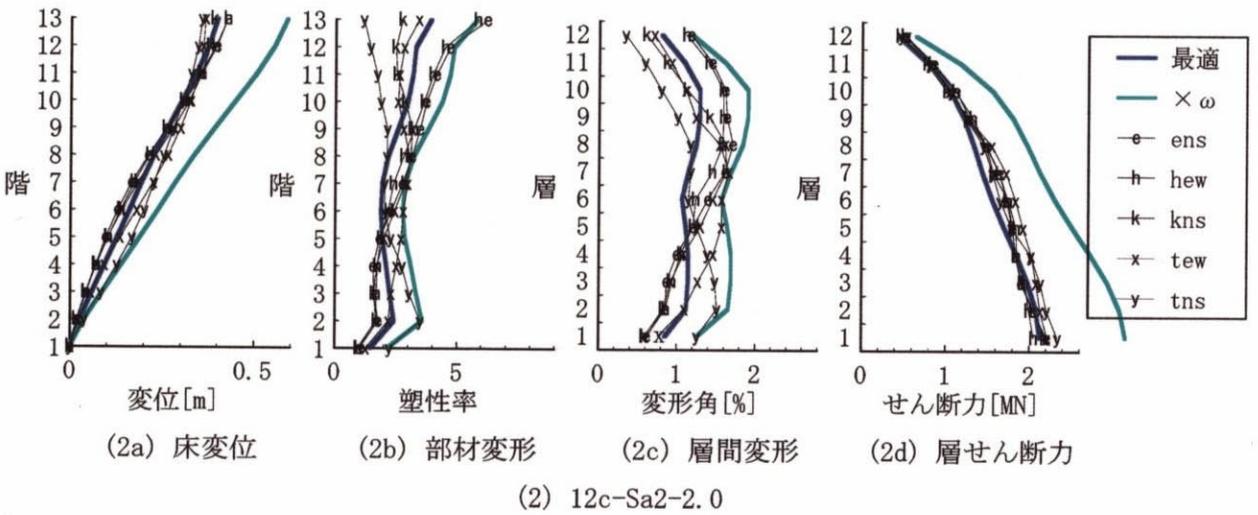
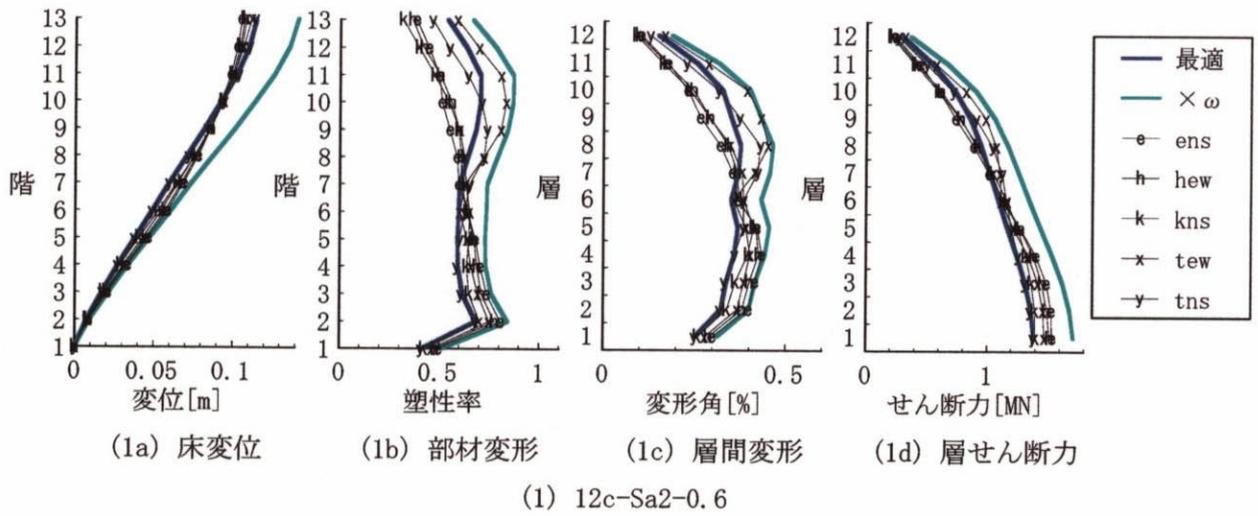
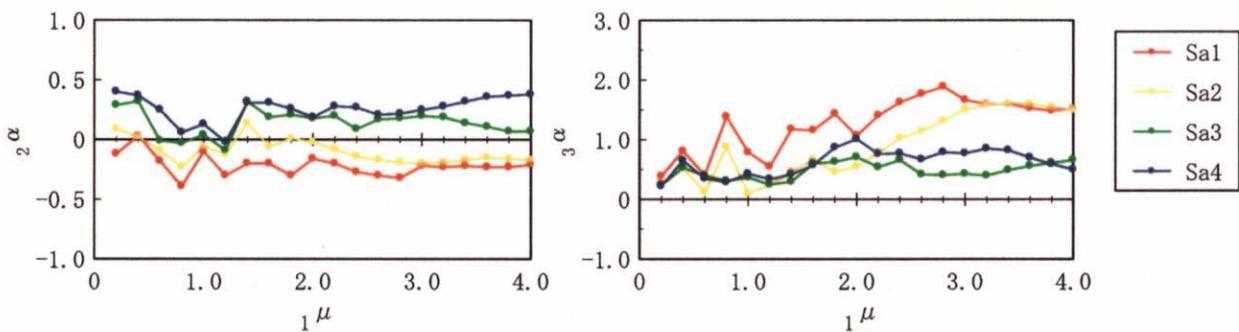
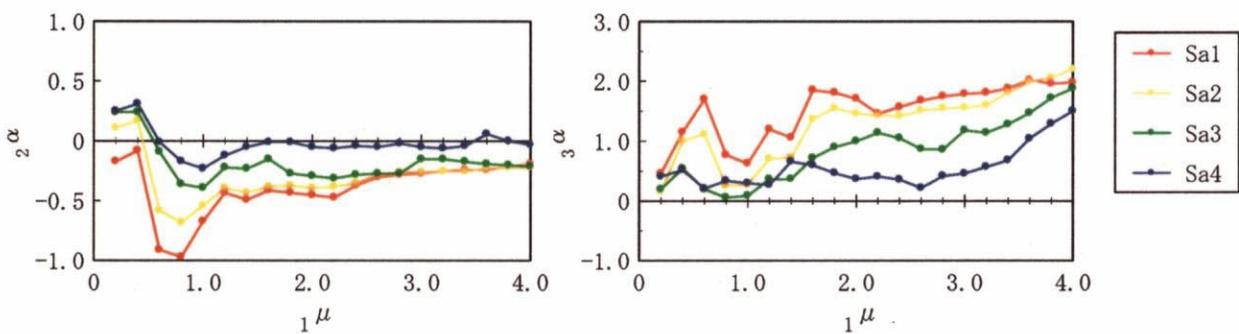


図5.3.1 地震応答解析結果と漸増载荷解析結果の比較例



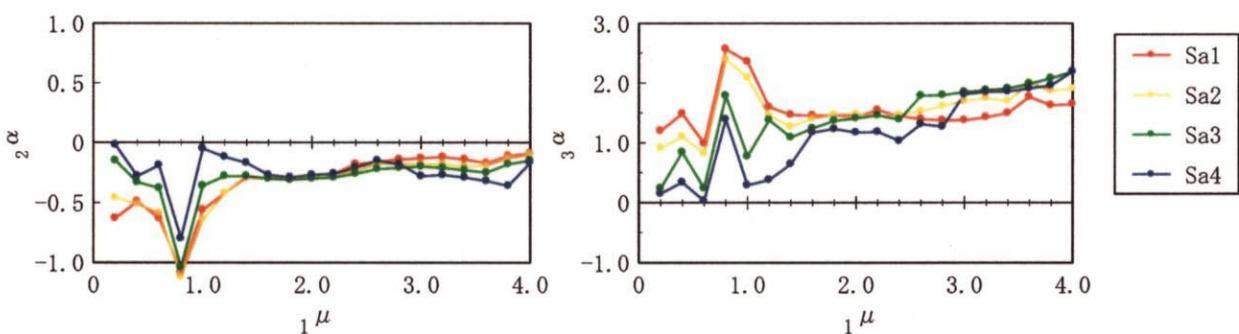
(1a) 構造物 12a, 2 次の係数

(1b) 構造物 12a, 3 次の係数



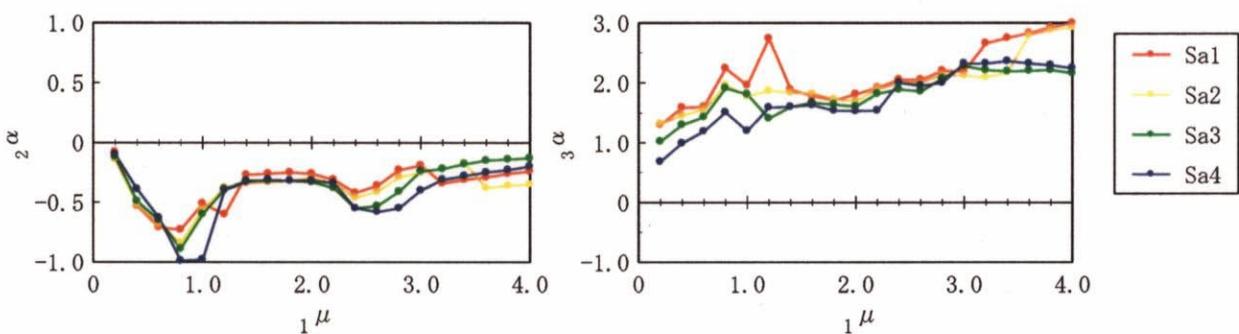
(2a) 構造物 12c, 2 次の係数

(2b) 構造物 12c, 3 次の係数



(3a) 構造物 12e, 2 次の係数

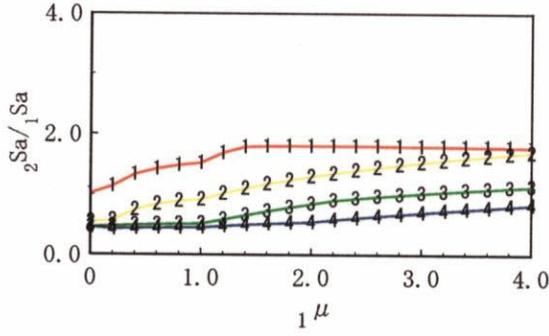
(3b) 構造物 12e, 3 次の係数



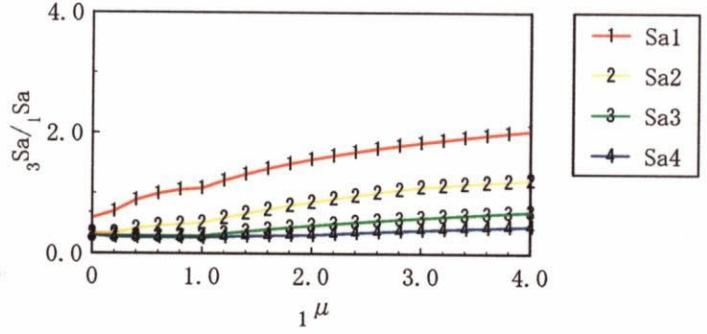
(4a) 構造物 12g, 2 次の係数

(4b) 構造物 12g, 3 次の係数

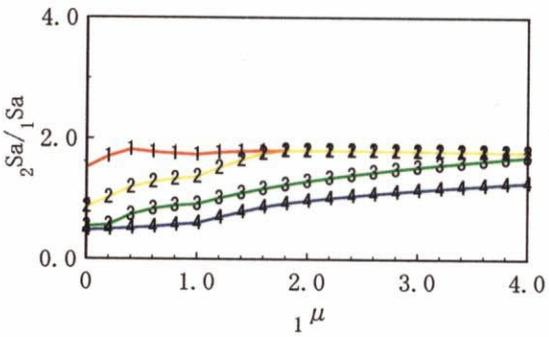
図5.3.2 最適外力分布形における係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ —固有周期の影響—



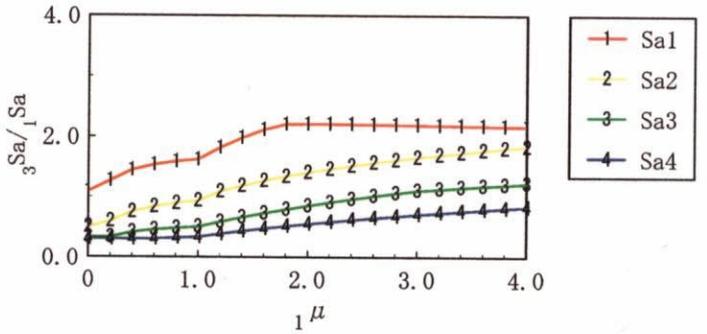
(1a) 構造物 12a, 2 次の比



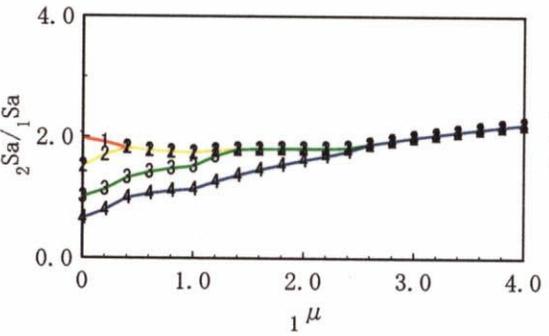
(1b) 構造物 12a, 3 次の比



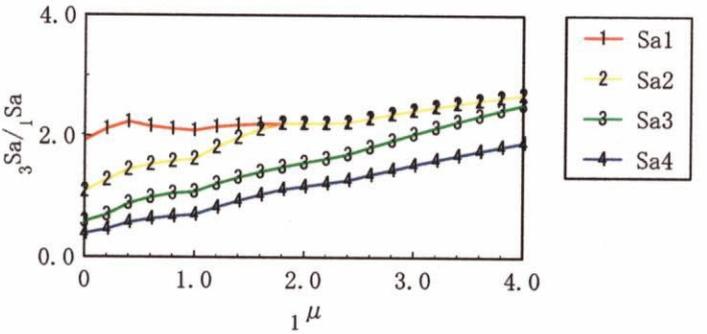
(2a) 構造物 12c, 2 次の比



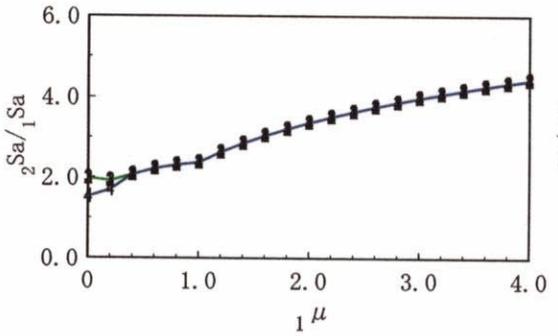
(2b) 構造物 12c, 3 次の比



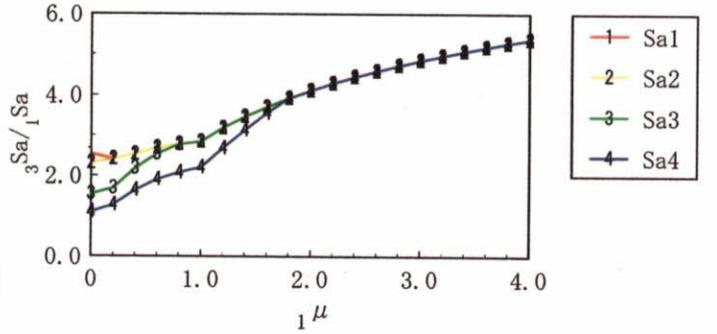
(3a) 構造物 12e, 2 次の比



(3b) 構造物 12e, 3 次の比



(4a) 構造物 12g, 2 次の比



(4b) 構造物 12g, 3 次の比

図5.3.3 加速度応答スペクトル値の比 —固有周期の影響—

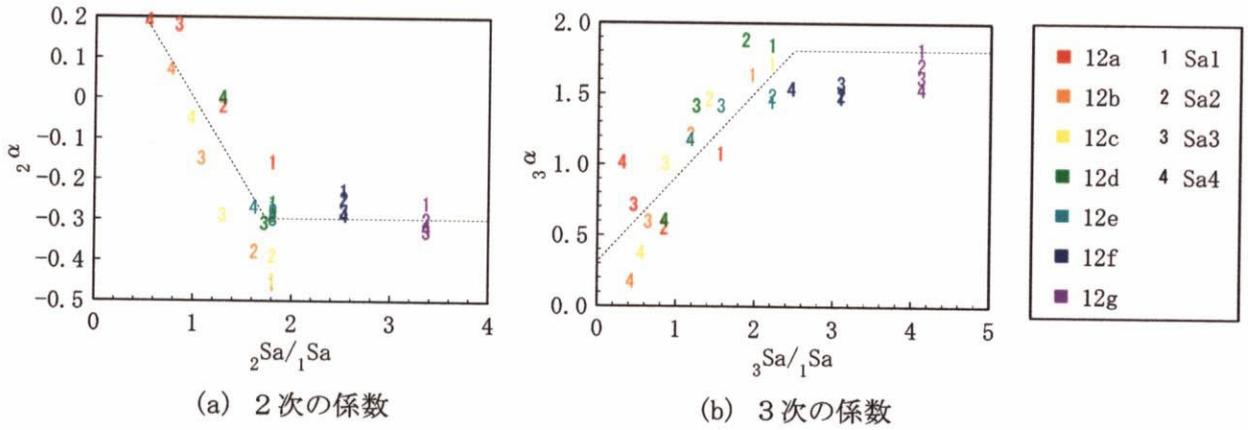
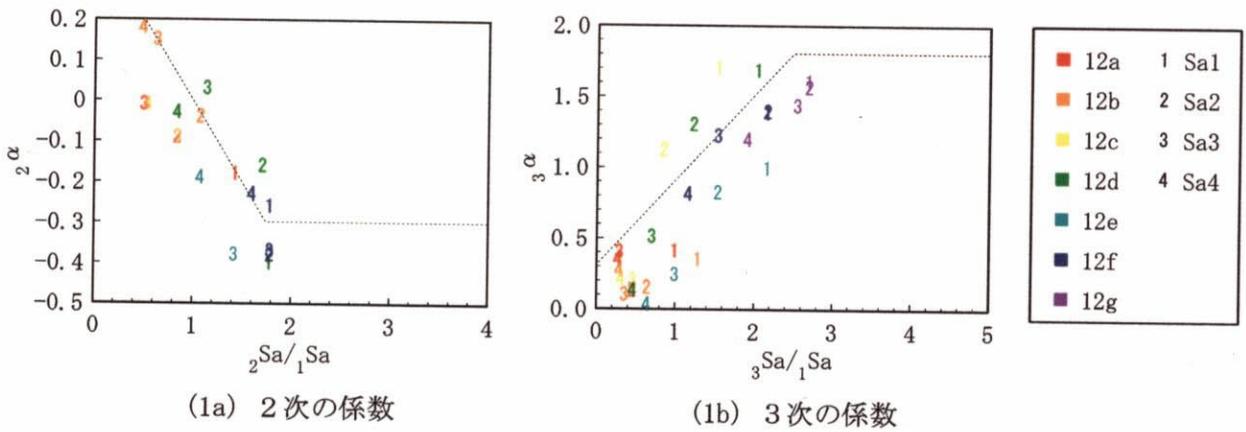
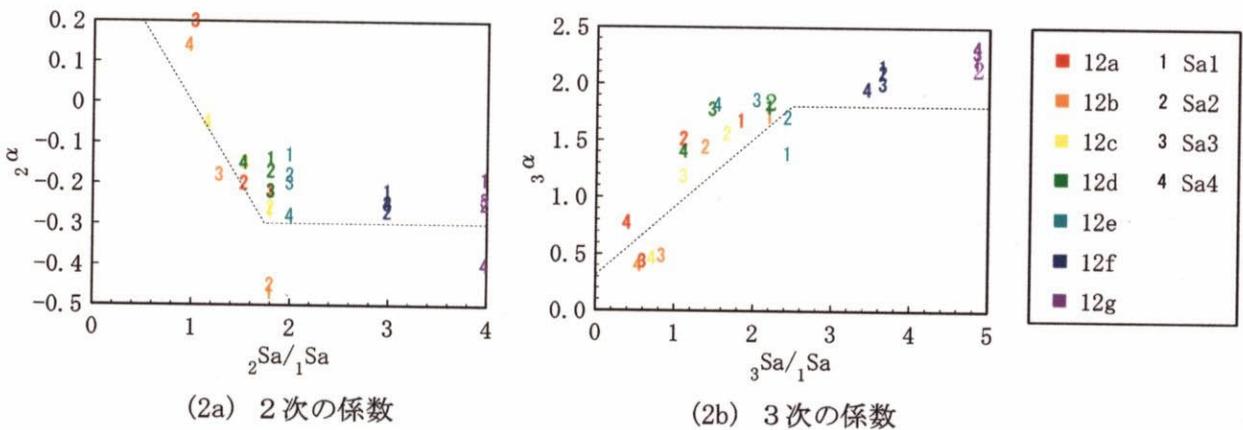


図5.3.4 加速度応答スペクトル値の比と係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ の関係 —全体塑性率 2.0—



(1) 全体塑性率 0.6



(2) 全体塑性率 3.0

図5.3.5 加速度応答スペクトル値の比と係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ の関係 —全体塑性率 0.6, 3.0—

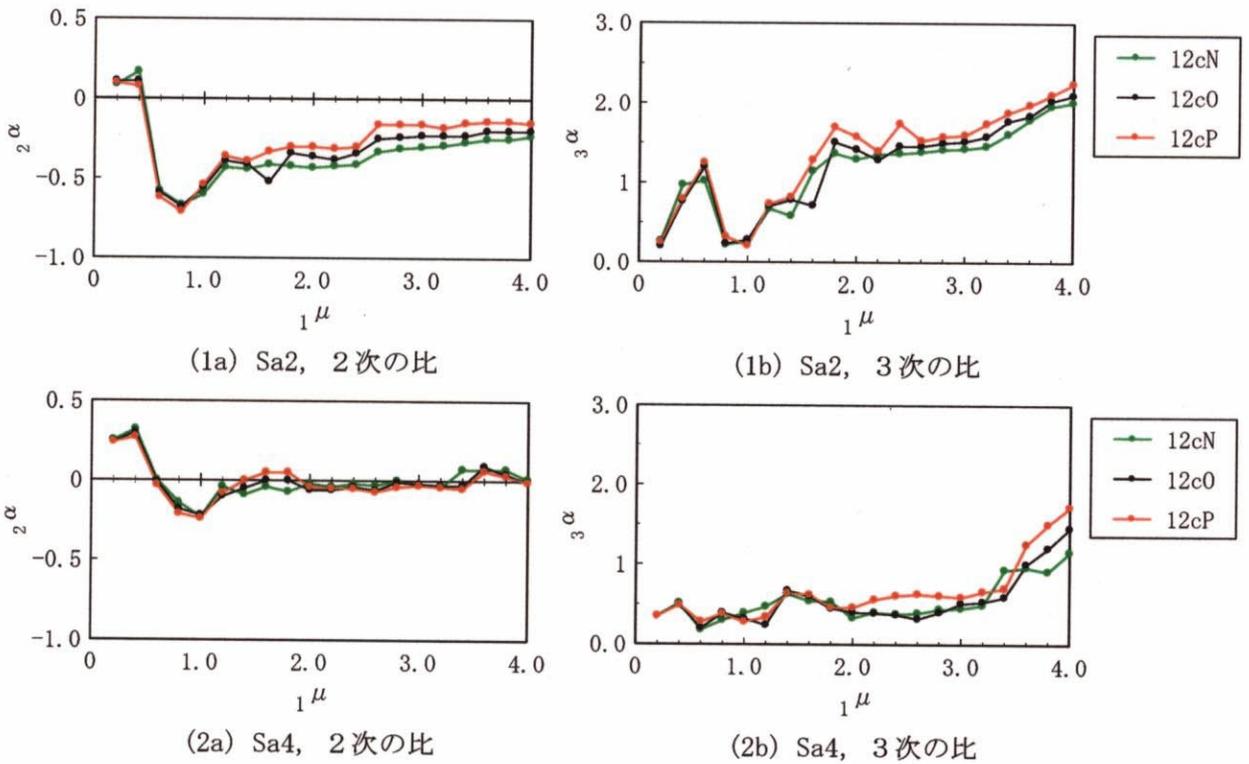


図5.3.6 最適外力分布形における係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ —設計外力分布形の影響—

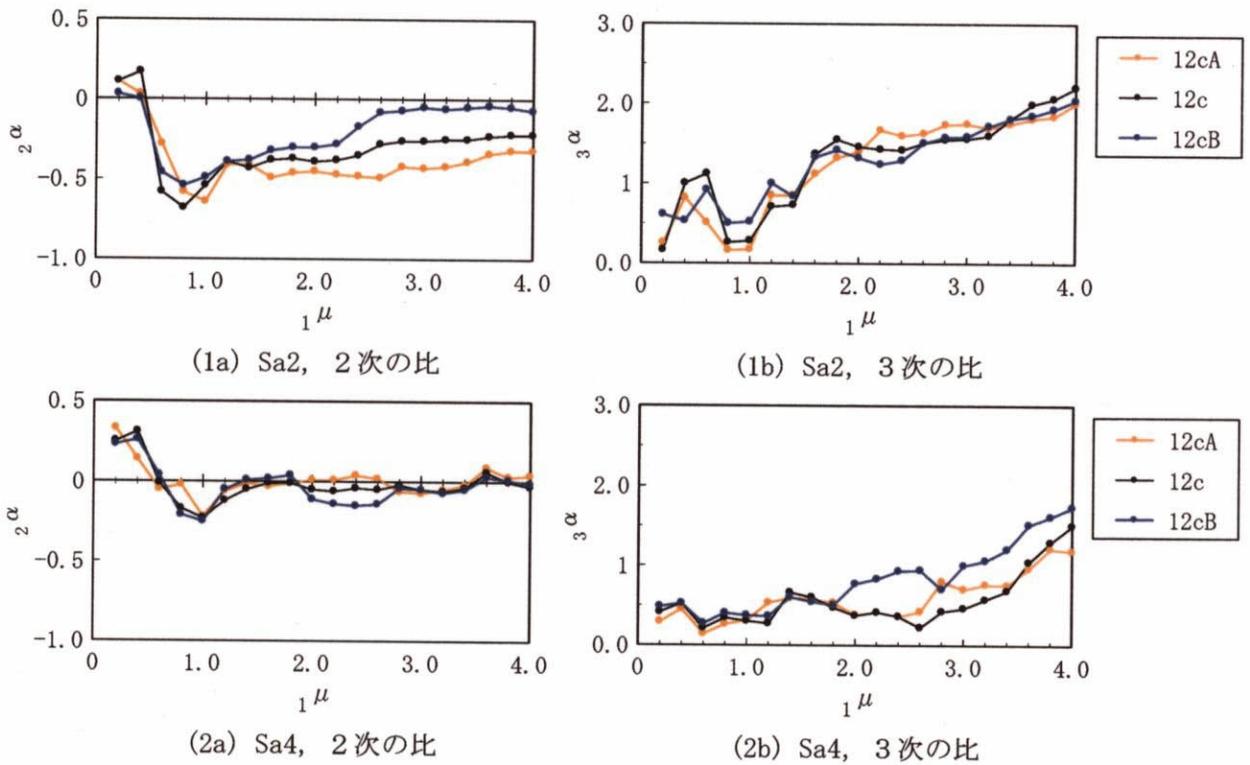
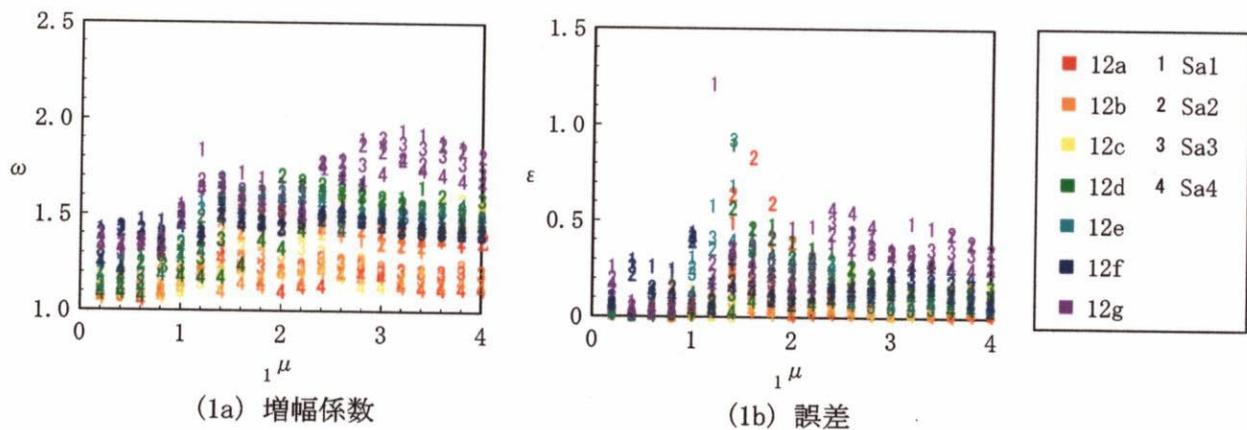
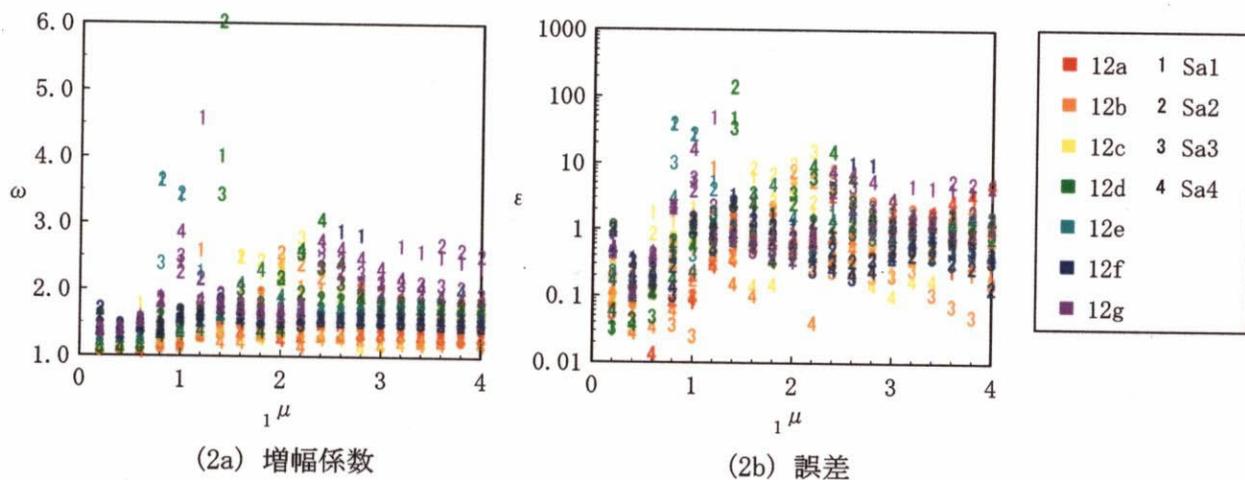


図5.3.7 最適外力分布形における係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ —弾性剛性の分布の影響—



(1) 係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ を精算した場合



(2) 係数 ${}_2\alpha$ および ${}_3\alpha$ を略算した場合

図5.3.8 増幅係数と誤差

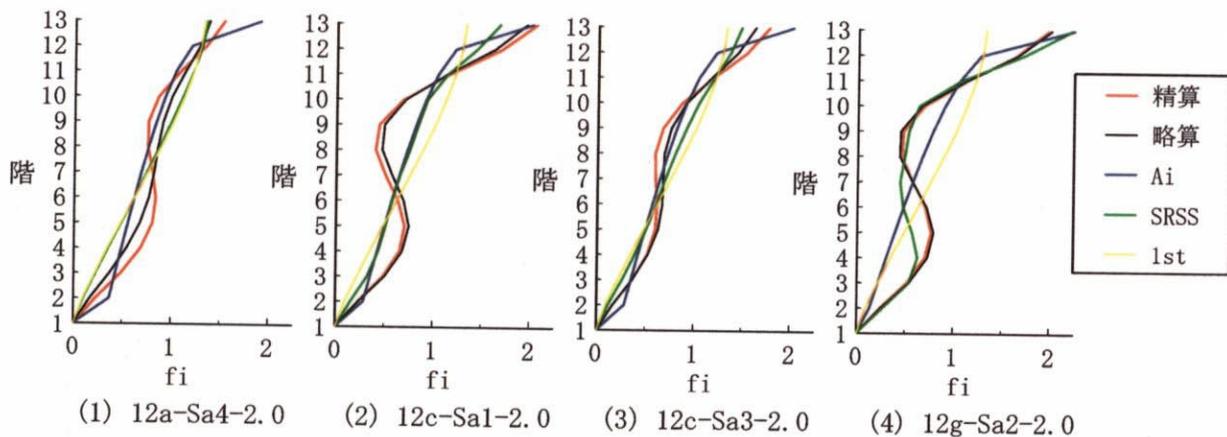


図5.3.9 外力分布形 —他の外力分布形との比較—

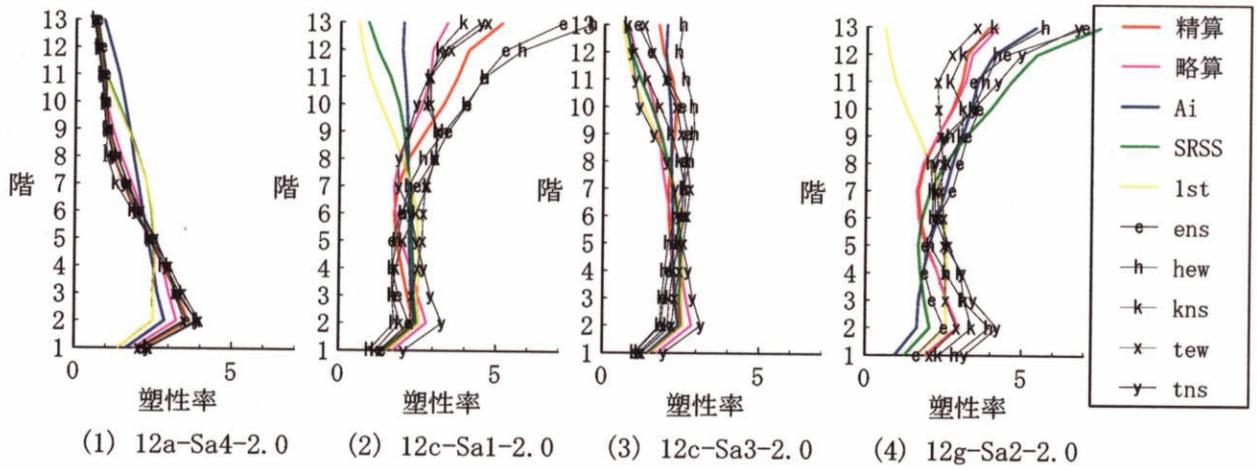


図5.3.10 部材塑性率の分布 —他の外力分布形との比較—

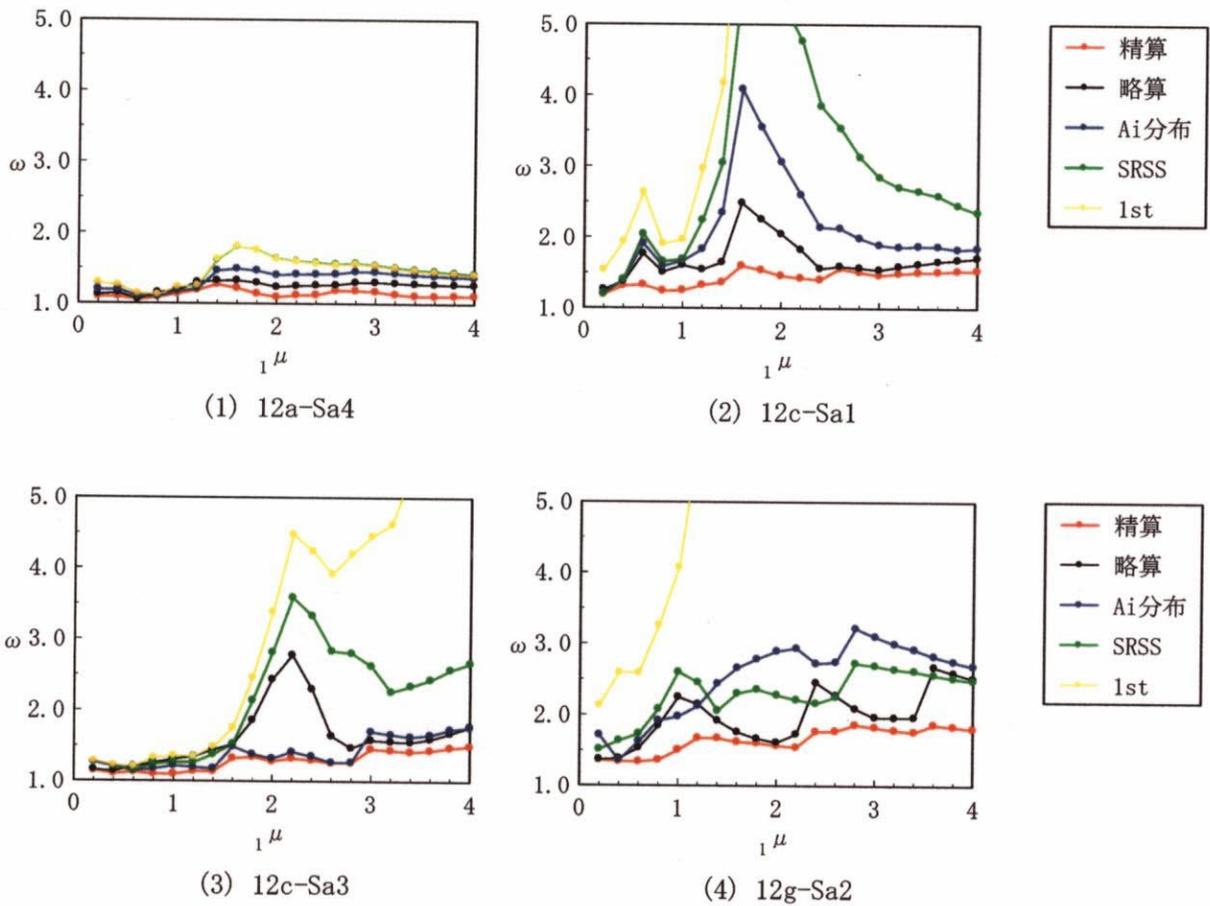
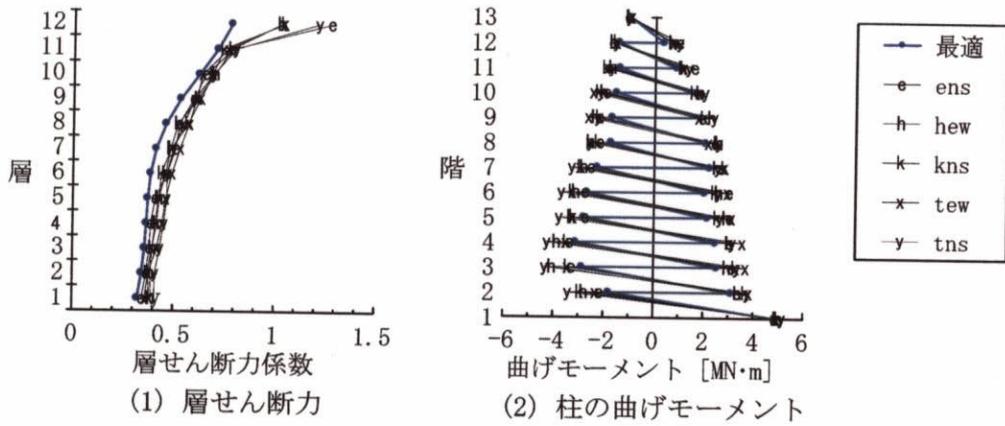
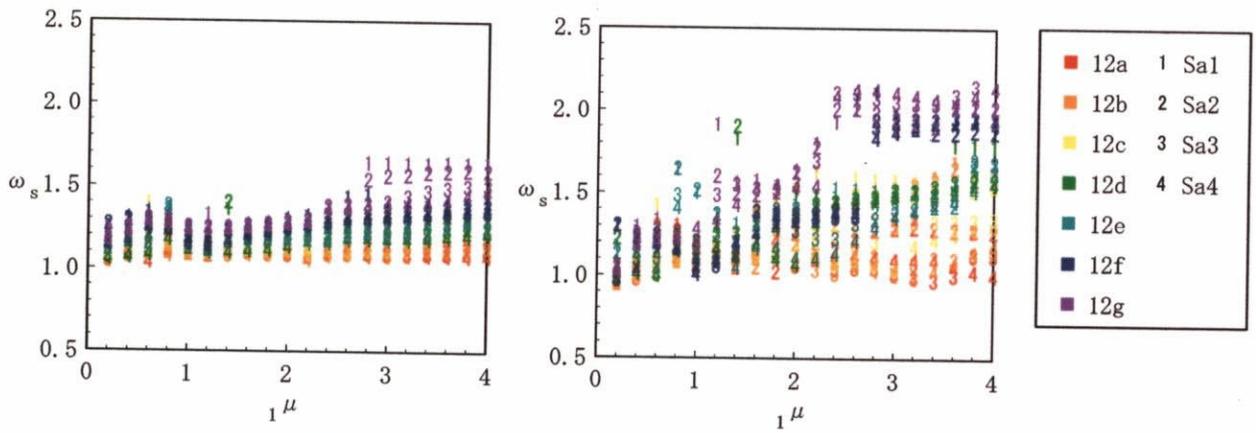


図5.3.11 増幅係数 —他の外力分布形との比較—

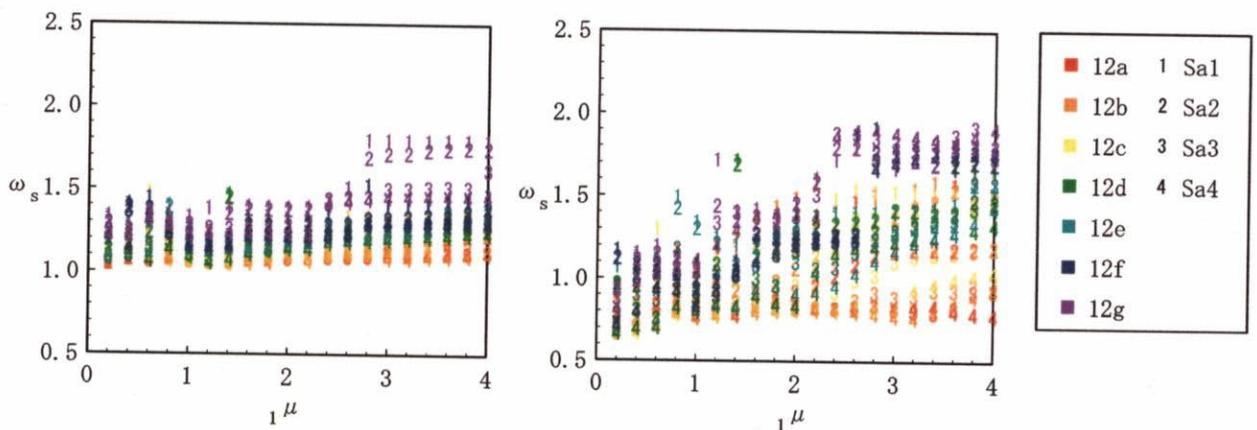


12g-Sa1-2.0

図5.3.12 層せん断力と柱の曲げモーメントの分布



(1) 最適外力分布形



(2) 層せん断力係数 A_i 分布

図5.3.13 層せん断力の割り増し係数

5.4 縮約1自由度系応答と漸増載荷解析を用いる方法(2)

前節と同様に、構造物に対して設計スペクトルが与えられた時に構造物の各部位に生じる地震最大応答を評価する方法について検討する。本節では、縮約1自由度系の最大応答と複数の静的漸増載荷解析を組み合わせて推定する方法を検討する。

1種類のみを漸増載荷解析を用いる方法では、前節で検討したように、地震動時刻歴ごとにさまざま異なる地震最大応答の分布性状に対応することが難しく、最適な外力分布形を用いたとしても、算定値に対して複雑な割り増し係数を乗ずる必要がある。そこで本節では、外力分布形を変えた複数の漸増載荷解析を行うことにより、割り増し係数の必要のない推定方法の確立を目指す。

5.4.1 推定方法の概要

本節で提案する推定方法の具体的な手順は次の1から3までである。

手順1：1次等価変位の最大応答の算定

この部分は、既存の手法を用いるものとする。縮約1自由度系の地震応答解析、等価線形化法、あるいはエネルギーに基づく方法などによって、精度良く算定されることを想定している。

手順2：漸増載荷解析における外力分布形の設定

漸増載荷解析に用いる外力分布形として、モードの直和 $\{f\}_+$ およびモードの差分 $\{f\}_-$ の2種類を設定する。これら2種類の外力分布形は4.1.1(3)で既出であるが、1次および2次の固有振動モードに比例した外力分布形の線形和として式5.4.1で表す。各次の固有振動モードは、1層の刺激関数が正となるよう符号を考慮する。

$$\begin{aligned}\{f\}_+ &= [M] \left({}_1\beta \{ {}_1u \} + \alpha_+ {}_2\beta \{ {}_2u \} \right) \\ \{f\}_- &= [M] \left({}_1\beta \{ {}_1u \} + \alpha_- {}_2\beta \{ {}_2u \} \right)\end{aligned}\tag{5.4.1}$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリクス、 ${}_i\beta$ ： i 次刺激係数、 $\{ {}_i u \}$ ： i 次振動形である。係数 α_+ および α_- は、外力分布形における2次等価加速度と1次等価加速度の比率に相当し、係数 α_+ は正の値、係数 α_- は負の値をとる。係数 α_+ および α_- の決定方法は検討事項である。

手順3：漸増載荷解析の実行

2種類の外力分布形 $\{f\}_+$ および $\{f\}_-$ を用いた漸増載荷解析をそれぞれ行う。漸増載荷解析における解の参照点は、1次等価変位が、手順1で算出した最大応答と等しくなる点とする。この参照点における各層の層間変位、部材の変形、層せん断力、部材の応力などを求める。2種類の漸増載荷解析により算定値が2種類ずつ得られるが、そのうちの大きい方を地震最大応答の推定値とする。

5.4.1 2種類の外力分布形

(1) モードの直和と差分

ある構造物に対して、応答スペクトルが同一な複数の入力地震動に対する地震応答を考えれば、地震動の時刻歴特性の違いにより、地震最大応答変形の分布の性状も異なる。この応答変形分布のばらつきは、高次モードの振動に因るものであるが、特に、2次モードの変位応答の特性の違いに起因するところが多い。2次モードの位相特性の影響については、2次モードの変位応答が1次モードと同じ向きで生じれば、下層部の変形が増大することになり、逆向きで生じれば、上層部の変形が増大する。このような位相特性は、入力地震動の時刻歴に大きく依存するが、その関係を明確にするのは難しい。そこで、2次モードの変位応答が1次モードと同じ向きで生じる場合に対して、外力分布形をモードの直和とした漸増載荷解析により評価し、逆向きに生じる場合に対して、モードの差分により評価することにする。

モードの直和 $\{f\}_+$ およびモードの差分 $\{f\}_-$ を表す式5.4.1の中で、係数 α_+ および α_- は変動可能な係数であり、その決定方法は検討事項となり得る。4.1.1(3)のように加速度応答スペクトル値の比で与えようとすれば、 α_+ および α_- は式5.4.2で表される。

$$\begin{aligned}\alpha_+ &= +\gamma_+ {}_2S_a / {}_1S_a \\ \alpha_- &= -\gamma_- {}_2S_a / {}_1S_a\end{aligned}\quad (5.4.2)$$

ここに、 ${}_iS_a$ は、 i 次固有周期における加速度応答スペクトル値である。係数 γ_+ および γ_- は変動可能な係数であるが、ともに1.0とする。

仮に、構造物の応答が1次モードおよび2次モードのみで構成され、構造物の応答が弾性域にとどまれば、係数 $+\alpha_+$ および $-\alpha_-$ は ${}_2S_a / {}_1S_a$ 以下である。1次モードと2次モードの変位応答が完全に同位相で生じる場合に $\alpha_+ = +{}_2S_a / {}_1S_a$ が対応し、逆位相の場合に $\alpha_- = -{}_2S_a / {}_1S_a$ が対応する。実際には、同位相あるいは逆位相であることはまれであるし、さらに、3次モード以上の振動の影響や、構造物の塑性化の影響もある。

係数 γ_+ および γ_- を理論的に決定するのは困難であるが、係数 γ_+ を増大させれば、下層部の算定値が増大し、係数 γ_- を増大させれば、上層部の算定値が増大する。2種類の漸増載荷解析結果の大きい方を取ることにすれば、係数 γ_+ および γ_- を大きくするほど、構造物のほぼすべての部位で安全側の評価が得られる。そこで、簡略的に係数 γ_+ および γ_- は1.0に設定する。

(2) 推定値の算定例

5.4.1項に示した提案方法を、2.1節で設定した構造物と2.2節で作成した模擬地震動に適用してみる。まず、構造物と加速度応答スペクトルを1種類ずつ選ぶ。1種類の加速度応答スペクトルに対して、異なる位相特性を有する5種類の模擬地震動があるので、5個の地震応答解析結果が得られることになる。地震応答解析においては、全体塑性率 μ が所定の値になるように入力地震動の倍率を調整する。全体塑性率 μ は、0.20, 0.40, …, 4.0 (0.20刻み) に設定する。全体塑性率が同一になる入力地震動の倍率が複数存在する場合には、最小の倍率のものを検討対象とする。

次に、2種類の漸増載荷解析を行うが、解の参照点は全体塑性率が地震応答解析で設定したもの等しくとなる点とする。5種類の地震応答解析結果における最大応答1次等価変位と、2種類の漸増載荷解析における1次等価変位は、すべて等しい値となる。すなわち、応答変形の分布のみが検

討対象となる。

弾塑性域における各次モードの加速度応答値 ${}_1S_a$ は、弾性応答スペクトルを用いて推定する。1次モードの加速度応答値 ${}_1S_a$ の計算では、全体塑性率 ${}_1\mu$ に応じた等価周期 ${}_1T_e$ と等価減衰 ${}_1h_e$ を考慮する。

1次等価周期 ${}_1T_e$ は、弾性1次固有周期 ${}_1T_0$ より、式5.4.3により算出する。

$${}_1T_e = {}_1T_0 \sqrt{\frac{E_0}{{}_1Q/{}_1Y}} \quad (5.4.3)$$

ここに、 ${}_1Q$ および ${}_1Y$ は、全体塑性率 ${}_1\mu$ に対応する1次等価せん断力および1次等価変位である。 E_0 は、1次等価せん断力-1次等価変位関係における弾性剛性である。

粘性減衰に起因する減衰定数は振動数比例型とし、履歴減衰に対する等価粘性減衰定数 h_{eq} は式4.1.13と同様に式5.4.4とする。

$$h_{eq} = 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{{}_1\mu}} \right) \quad (5.4.4)$$

等価減衰 ${}_1h_e$ に応じて、加速度応答スペクトル値に減衰補正係数 F_h を乗じる。減衰補正係数 F_h は式5.4.5とする。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10{}_1h_e} \quad (5.4.5)$$

2次モードの等価周期 ${}_2T_e$ は、1次等価周期 ${}_1T_e$ に比例して変化するものと仮定し、粘性減衰に起因する減衰定数は振動数比例型とし、履歴減衰に対する等価粘性減衰定数は1次モードと同一とする。

まず、弾性固有周期を変動因子とした7種類の12階建て構造物を対象に検討を行う。各構造物は、質量分布、剛性分布、耐力分布などにばらつきの少ない全層降伏型建物（全層同時降伏を指向して設計した建物）であるので、塑性域におけるモード形が、弾性の振動モードと等しいと仮定できるものとする。

2種類の漸増載荷解析の実行例を図5.4.1に、地震応答解析による最大応答値と提案方法による推定値の比較例を図5.4.2に示す。両図とも、構造物12c、加速度応答スペクトル Sa2を対象にしたものであり、全体塑性率は0.6, 2.0, 4.0の3種類とする。図5.4.1では、2種類の外力分布形の比較と、モードの直和およびモードの差分による層せん断力-層間変位関係を示している。層せん断力-層間変位関係の図において、黒細線は層ごとの層せん断力-層間変位関係であり、赤線あるいは緑線は、全体塑性率が所定の値であるときの各層の層せん断力-層間変位関係を連結したものである。図5.4.2では、各階床の変位、各階梁および1層柱脚の塑性率、各層の層間変位、各層の層せん断力について、地震応答解析による5種類の最大応答値と2種類の漸増載荷解析結果を比較している。

加速度応答スペクトル Sa2は、構造物12cの2次固有周期に対応する周期における加速度応答が比較的大きいため、2次モード比例外力分布形の影響が強く、モードの直和は下層部の割り増しが大きく、上層部の低減が大きい外力分布形となり、モードの差分はその逆である。構造物12cでは、全体塑性率の増大に伴い加速度応答スペクトル値の比も増大するので、2種類の外力分布形にお

る偏りもより顕著になる。モードの直和は、等分布に近いが、あるいは中層部が突出した外力分布形であり、モードの差分は、著しく上層部が突出した外力分布形である。

漸増载荷解析結果では、1次等価変位が地震応答解析による最大応答と等しくなる点を解として抽出する。2種類の漸増载荷解析による床変位と、地震応答解析による床変位の最大応答を比較すると、10層付近の変位が等しくなっている。これは、10層付近で2次刺激関数 ${}_2\beta_2u_i$ が0.0となるためであり、それより上層ではモードの差分が大きく、下層ではモードの直和が大きい。地震応答解析による最大応答は、概ね、2種類の漸増载荷解析結果の間に収まっている。2種類の地震応答解析結果について、部材塑性率、層間変形、層せん断力の分布を比較すると、いずれも6層付近で等しい値となっている。これは、2次刺激関数の隣り合う層間の差 ${}_2\beta_2u_{i+1}-{}_2\beta_2u_i$ が6層付近で0.0となるためであり、それより上層ではモードの差分が大きく、下層ではモードの直和が大きい。部材塑性率や層間変形に関して、地震応答解析による最大応答は、6層付近を除けば、概ね、2種類の漸増载荷解析結果の間に収まっている。層せん断力に関する地震応答解析結果は、各層で、2種類の漸増载荷解析結果の大きい方に近い。

固有周期を変動因子とした構造物群の部材の塑性率の分布について、地震応答解析結果と提案方法による推定値の比較を図5.4.3に示す。構造物、加速度応答スペクトル、および全体塑性率を掛け合わせた組み合わせは、全部で560通りであるが、そのうちの代表的な9通りについて示している。

図5.4.3(2)(4)(5)に示す解析例は、2種類の漸増载荷解析を行うことの有効性を示す例である。5個の地震応答解析結果の最大値は、下層部ではモードの直和による推定値によって近似され、上層部ではモードの差分による推定値によって近似される。ほぼ全層で推定値が地震応答解析結果を上回るが、6層付近のみ推定値が下回る。2次モード比例外力による層せん断力は6層付近で0.0であるため、6層付近の応答の推定に関しては、2通りの漸増载荷解析を行う利点がない。6層付近の推定値に対する地震応答解析結果の最大値の比は、大部分の解析例において1.0を上回るが、概ね1.30未満である。

図5.4.3(3)に示す解析例でも、5個の地震応答解析結果の最大値は、2種類の漸増载荷解析による推定値より小さい値に収まっているが、上層部において過大な推定値が与えられる。図5.4.3(2)に示す解析例と比較すると、図5.4.3(2)の例において1種類だけ上層部増大型の応答を示したens1のような応答が無い分、図5.4.3(3)に示す解析例ではモードの差分による推定値が過大である。

図5.4.3(7)に示す解析例でも、5個の地震応答解析結果の最大値は、下層部ではモードの直和より小さい値に収まり、上層部ではモードの差分より小さい値に収まっているが、中上層部においてやや過大な推定値が与えられている。最上層部の推定値が地震応答解析結果の最大値とほぼ等しい値となる解析例では、その下の8~10層で推定値が過大となる場合が多い。これらの解析例では、3次以上の高次モードにより最上層部の応答が特に増幅されると考えられるが、提案方法では、3次モード以上の比例外力を考慮せず、その分の影響を見込んで2次モード比例外力を増大させている。そのため、2次モードの過大な見積りが、最上層部を除く上層部の過大評価につながる。

図5.4.3(6)に示す解析例では、tew1に対する応答のみ上層部の変形が突出し、他の4種類の地震応答解析結果とは異なる変形分布である。上層部において、tew1を除く4種類の地震応答解析結果はモードの差分による推定値よりも小さい値であるが、tew1のみ12階および13(R)階においてモードの差分による推定値を大きく超えている。全体塑性率1.0程度では、構造物内で降伏が生じる部位は、

地震動の時刻歴特性に大きく依存し、それゆえ、時刻歴特性の違いによる変形分布のばらつきも大きくなる場合がある。

図5.4.3(1)に示す解析例では、上層部の推定値が過大である。固有周期の短い構造物と長周期卓越型地震動の組み合わせでは、各次モードは短周期であるため、地動慣性力が静的に作用し、モードの応答は同位相に近い。そのため、入力地震動の位相特性に依存せず、いずれの地震応答解析結果もモードの直和に近く、モードの差分による漸増载荷解析が余分となる。

図5.4.3(8)(9)に示す解析例では、2種類の漸増载荷解析による推定値は、特に上層部で過大であり、逆に6層付近における過小の度合いが他の解析例に比べて大きい。全体塑性率が大きい場合に同様の傾向が見られる。これは、外力分布形における2次モード比例成分が大き過ぎるためであると考えられる。

このように、2種類の漸増载荷解析を行うことは極めて有効であると言えるが、外力分布形における2次モード比例分の割合を示す係数 $+\alpha_+$ および $-\alpha_-$ に関しては検討の余地を残している。

(3) 2次モードの係数

2次モードの係数 α_+ および α_- を式5.4.2のように加速度応答スペクトル値の比で与えることにすれば、係数 α_+ および α_- に影響を及ぼす因子として、係数 γ_+ および γ_- 、応答スペクトル値を算出する際の等価周期、等価減衰、および減衰補正の4項目が挙げられる。これらはいずれも理論的に決定するのは難しい項目であるので、係数 γ_+ および γ_- は簡略的に1.0に固定し、等価減衰および減衰補正係数については、(2)推定値の算定例に示した方法とし、ここでは、等価周期の採り方についてのみ検討することにする。等価周期の採り方として、以下の4種類の方法を検討する。

方法1：弾性固有周期 ${}_1T_0$ とする。

$${}_1T_e = {}_1T_0 \quad (5.4.6)$$

方法2：全体塑性率1.0未満では最大応答点に対応する周期とし、全体塑性率1.0以上では降伏点に対応する周期とする。

$${}_1T_e = \begin{cases} {}_1T_0 \sqrt{\frac{E_0}{{}_1Q/{}_1Y}} & ({}_1Y < {}_yY) \\ {}_1T_0 \sqrt{\frac{E_0}{{}_yQ/{}_yY}} & ({}_1Y \geq {}_yY) \end{cases} \quad (5.4.7)$$

方法3：方法4の0.8倍の周期とする。ただし、それが弾性固有周期より短くなる場合には、弾性固有周期とする。

$${}_1T_e = \max \left({}_1T_0, 0.8{}_1T_0 \sqrt{\frac{E_0}{{}_1Q/{}_1Y}} \right) \quad (5.4.8)$$

方法4：最大応答点に対応する周期とする。(2)推定値の算定例で用いた方法と同じである。

$${}_1T_e = {}_1T_0 \sqrt{\frac{E_0}{{}_1Q/{}_1Y}} \quad (5.4.9)$$

方法1および方法2は、変形の分布は最大点における周期特性ではなく、弾性時あるいは降伏点付近の周期特性の影響をより強く受けるであろう、という推測に基づいている。構造物内のどの部位で最初に曲げ降伏に達するかが、変形の分布を決定する重要な要因であると考えられるからである。方法3は、構造物の弾塑性地震応答では、最大応答点に対応する周期ではなく、それよりやや短い周期の応答スペクトル特性の影響を最も強く受ける、という一般的な考えに基づいており、ここでは等価周期の縮小係数を0.80としている。

等価周期の与え方を変えた解析例について、部材の塑性率の推定値の比較を図5.4.4に示す。ここでは、構造物12c、加速度応答スペクトル Sa2、全体塑性率4.0の組み合わせ（以下、12c-Sa2-4.0と略記）、構造物12e、加速度応答スペクトル Sa4、全体塑性率3.6の組み合わせ（12e-Sa4-3.6）、構造物12g、加速度応答スペクトル Sa1、全体塑性率2.4の組み合わせ（12g-Sa1-2.4）の3種類の解析例を採りあげる。なお、方法4による解析結果は図4.3.3に対応する。

等価周期の与え方の違いは、全体塑性率の変化に伴う加速度応答スペクトル値の比の変化が大きいほど、大きな影響を与えると考えられる。構造物12g とすべての加速度応答スペクトルの組み合わせや、構造物12e と加速度応答スペクトル Sa4の組み合わせなどがこれに相当する。

図5.4.4に示した3例の中では、12e-Sa4-3.6において、等価周期の違いによる推定値の差が最も大きい。最上階の梁の塑性率に関して、方法4を基準にすると、方法1は0.36倍、方法2は0.63倍、方法3は0.89倍である。2階の梁の塑性率については、方法1は0.76倍、方法2は0.85倍、方法3は0.95倍である。等価周期の違いは、上層部に対してより大きな影響を与える。12g-Sa1-2.4においても、上層部の推定値は方法4 3 2 1の順に大きく、12e-Sa4-3.6と比較すると全体塑性率が小さい分、各方法の差が小さい。

各方法による推定値と地震応答解析結果とを比較すると、方法4では上層部の推定値がかなり過大であるが、等価周期を方法2で与えられる値程度まで縮小することにより、5種類の地震応答解析結果の最大値により近い推定値が得られている。

(4) 3次モードの考慮

モードの直和および差分においては2次モードまでのモード比例外力しか考えていないが、ここでは、3次モード比例外力分布形を考慮することについて検討する。3次モードを考慮することは、より細かい分布形に対応できる、あるいは、より上層部突出型または下層部突出型の分布の応答に対応できる、などの利点が考えられる反面、3モードの符号の組み合わせが倍増する、2次モードと同様に係数の設定方法が難しい、などの難点もある。

3次モードまで考慮することにより、式5.4.10に示す4種類の外力分布形ができる。

$$\begin{aligned}
\{f\}_{++} &= [M] \left({}_1\beta \{1u\} + {}_2\alpha_+ {}_2\beta \{2u\} + {}_3\alpha_+ {}_3\beta \{3u\} \right) \\
\{f\}_{+-} &= [M] \left({}_1\beta \{1u\} + {}_2\alpha_+ {}_2\beta \{2u\} + {}_3\alpha_- {}_3\beta \{3u\} \right) \\
\{f\}_{-+} &= [M] \left({}_1\beta \{1u\} + {}_2\alpha_- {}_2\beta \{2u\} + {}_3\alpha_+ {}_3\beta \{3u\} \right) \\
\{f\}_{--} &= [M] \left({}_1\beta \{1u\} + {}_2\alpha_- {}_2\beta \{2u\} + {}_3\alpha_- {}_3\beta \{3u\} \right)
\end{aligned}
\tag{5.4.10}$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリクス、 ${}_i\beta$ ： i 次刺激係数、 $\{i u\}$ ： i 次振動形である。係数 ${}_i\alpha_+$ および ${}_i\alpha_-$ は、外力分布形における i 次等価加速度と1次等価加速度の比率に相当し、係数 ${}_i\alpha_+$ は正の値、係数 ${}_i\alpha_-$ は負の値をとる。

3次モードまでを考慮した4種類の外力分布形による漸増載荷解析結果と、2次モードまでのモードの直和および差分の2種類による漸増載荷解析結果について、部材の塑性率の推定値の比較を図5.4.5に、層せん断力の比較を図5.4.6に示す。係数 ${}_2\alpha_+$ および ${}_2\alpha_-$ は、(3)2次モードの係数に示した方法2により与え、係数 ${}_3\alpha_+$ および ${}_3\alpha_-$ についても同様の方法で、3次モードと1次モードの加速度応答スペクトル値の比率により与えている。なお、式5.4.10に示した4種類の外力分布形を上から順に、 $++$ 、 $+-$ 、 $-+$ 、 $--$ と略記し、モードの直和を $+0$ 、モードの差分を -0 と略記している。解析例は、図5.4.4と同じ3種類である。図5.4.6において、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。

部材塑性率と層せん断力のいずれについても、9層以上では $-+$ が最も大きく、6層から8層までは $--$ が最も大きい。モードの差分は、 $-+$ および $--$ のほぼ平均値である。下層部については、1層から3層までは $++$ が最大であり、4層および5層は $+-$ が最大である。モードの直和は、 $++$ および $+-$ のほぼ平均値である。3次モードまで考慮することにすれば、構造物の全部位について、2モードの直和および差分による推定値を上回ることになる。

梁の塑性率や層間変位について、12c-Sa2-4.0や12e-Sa4-3.6では、3次モードを考慮した場合の推定値の増大の割合は小さい。最上層の層間変位について $-+$ の -0 に対する比は、12c-Sa2-4.0で1.37、12e-Sa4-3.6で1.29であり、1層の層間変位について $++$ の $+0$ に対する比は、12c-Sa2-4.0で1.15、12e-Sa4-3.6で1.12である。上層部の方が3次モードの影響は大きい。12g-Sa1-2.4では、先の2例に比べると、3次モードを考慮することによる推定値の増大の割合が大きい。構造物12gにおいては、1次等価周期が変位一定領域に入るため、他の構造物と比べて3次モードと1次モードの加速度応答スペクトル値の比率が大きくなるのである。3次モードを考慮した場合、最上層の層間変位は1.56倍、1層の層間変位は1.18倍である。地震応答解析結果と比較すると、上層部でかなり過大である。

このように、部材の塑性率や層間変位に関しては、3次モードを考慮することによる効果は少なく、むしろ2次モードまでの考慮にとどめる方が地震応答解析結果との適合性が良い。

一方、層せん断力について、特に最上層においては、2モードの差分による推定値を上回る最大応答層せん断力を示す地震応答解析結果が多い。地震応答における高次モードによる上層部の応答層せん断力の上昇は、2モードの差分で考慮し得るものよりも大きい。この場合、3次モードを正側に足し合わせた $-+$ によって、上層部の層せん断力の推定値はさらに増大し、より近い推定値を得ることができる。なお、層せん断力の割り増し係数に関しては、次項にて検討する。