

### 5.4.3 提案方法の検証

#### (1) 層間変位に関する推定値の精度

固有周期を変動因子とした構造物群の各層の層間変位について、地震応答解析による最大応答値を提案方法による推定値で除した推定値比  $r$  を求める。地震動時刻歴ごとの  $i$  層の層間変位に関する推定値比  $r_{i,eq}$  は式5.4.11で表される。

$$r_{i,eq} = \frac{\delta_{i,eq}}{\delta_{i,s}} \quad (5.4.11)$$

ここに、 $\delta_{i,eq}$ ：地震動時刻歴  $eq$  による  $i$  層の最大応答層間変位、 $\delta_{i,s}$ ：提案方法による  $i$  層の最大応答層間変位の推定値である。

1 種類の構造物と応答スペクトルの組み合わせに対して、層数12層、地震動時刻歴数 5、全体塑性率数20を掛け合わせた合計1200個ずつの推定値比  $r_{i,eq}$  が算定される。この推定値比のとり値を数領域に分けたときの、度数の分布を図5.4.7に示す。推定値比が大きいほど、推定値が過小評価であることを示す。

すべての構造物に対して、50%以上の推定値比は0.75～1.25の範囲に含まれている。構造物12eよりも固有周期の短い構造物では、推定値比が1.25を超える例はまれである。構造物12b や構造物12c と応答スペクトル Sa4の組み合わせで、0.75～1.0の範囲にある推定値比の度数が大きく、最も推定がうまくいっていると言える。一方、構造物12f や構造物12g においては、推定値比が1.5を超える例も見られる。同時に、0.25～0.5の範囲にある推定値比の度数も増大する。図5.4.3(8)(9)に示した解析例のように、推定値比が大きくなるのは、全体塑性率が大きい場合の6層付近であり、推定値比が小さくなるのは、全体塑性率が大きい場合の上層部および下層部である。

全体塑性率1.0、2.0および3.0について、構造物と応答スペクトルの組み合わせごとの推定値比の最大値  $r_{\max}$  を図5.4.8に示す。最大推定値比  $r_{\max}$  は、全12層、5種類の地震動時刻歴中の最大値であり、式5.4.12で表される。最大推定値比  $r_{\max}$  が1.0に近いほど、良好な推定であることを示す。

$$r_{\max} = \max_{ieq} \left( \max_j \left( \frac{\delta_{j,ieq}}{\delta_{j,s}} \right) \right) \quad (5.4.12)$$

ここに、 $\delta_{j,ieq}$ ： $ieq$  個目の地震動時刻歴による  $j$  層の最大応答層間変位、 $\delta_{j,s}$ ：提案方法による  $j$  層の最大応答層間変位の推定値である。

全体塑性率1.0では、構造物12d よりも固有周期の短い構造物において最大推定値比は1.2未満であり、固有周期が長くなるほど増大する傾向がある。例外的に、構造物12e と応答スペクトル Sa1 および Sa2の組み合わせにおいて最大推定値比は1.5を超えて大きい。図5.4.3(6)に示したように、5種類の地震動時刻歴のうちの1種類のみにおいて、上層部の変形が突出した変形分布となり、モードの差分による推定値を大きく超えたためである。全体塑性率2.0においては、全構造物において最大推定値比は1.2～1.4程度である。固有周期によらず、概ね推定が良好である。全体塑性率3.0については、固有周期の長い構造物ほど、最大推定値比が大きい。図5.4.3(8)(9)に示した解析例のように、6層付近の推定値比が増大するためである。

3種類の構造物と応答スペクトルの組み合わせについて、層ごとの推定値比  $r_{i,\max}$  と全体塑性率の関係を図5.4.9に示す。同図は、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 Sa2の組み合わせ（12c-Sa2）、および構造物12g と応答スペクトル Sa1の組み合わせ（12g-Sa1）の3種類の組み合わせについて、1層の推定値比  $r_{1,\max}$ 、5層および6層の推定値比の大きい方  $r_{5,6,\max}$ 、および12層の推定値比  $r_{12,\max}$  を示している。なお、層ごとの推定値比  $r_{i,\max}$  は、5種類の地震動時刻歴における最大値であり、式5.4.13で表される。

$$r_{i,\max} = \max_{ieq} \left( \frac{\delta_{i,ieq}}{\delta_{i,s}} \right) \quad (5.4.13)$$

ここに、 $\delta_{i,ieq}$ ： $ieq$  個目の地震動時刻歴による  $i$  層の最大応答層間変位、 $\delta_{i,s}$ ：提案方法による  $i$  層の最大応答層間変位の推定値である。

12a-Sa4では、すべての全体塑性率において、1層の推定値比が全層の最大に相当する。1層の推定値比は、全体塑性率に関わらず、概ね1.25未満である。一方、12層の推定値比は、つねに1.0未満であり、全体塑性率が増大するほど小さくなる。全体塑性率が増大するほど、モードの差分による漸増載荷解析が上層部における過大な推定値を与えていることを示している。これに対し12c-Sa2および12e-Sa3では、概ね、5層あるいは6層の推定値比が全層の最大値であり、1層の推定値比や12層の推定値比は概ね1.0未満である。特に、12g-Sa1では、全体塑性率が大きい領域で、5層および6層の推定値比が大きく、1.6程度に達する。また、12g-Sa1では、全体塑性率1.2でのみ12層の推定値比が著しく大きい。これは、図5.4.3(6)に示した解析例と同類であり、5種類の地震動時刻歴のうちの tns1に対してのみ、上層部の変形が突出した応答である。

## (2) 層せん断力の割り増し係数

層せん断力と曲げモーメントの分布の一例として、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）を採り上げ、地震応答解析結果と提案方法による推定値の比較を図5.4.10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。

地震応答解析による最大応答層せん断力は、9層および10層を除くすべての層において、モードの直和および差分の大きい方の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提案方法による推定値の比は、1層で1.18、5層で1.22、12層で1.59であり、特に最上層において大きい。高次モードによる各層の応答層せん断力の上昇は、2モードの絶対値和では考慮するものよりも大きい。柱の曲げモーメントについても、地震応答解析による最大応答値は提案方法による推定値を上回る場合がある。特に、各層の柱の上下端のうち、曲げモーメントの小さい方の端で、推定値が小さい傾向がある。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は、12層柱脚で3.18、1層柱頭で1.90である。柱の片端が曲げ降伏に至る1層および12層（12層柱頭は曲げ降伏しないが、梁の曲げ降伏により、その曲げモーメントは頭打ちになる）では、最大応答層せん断力の比率の2.0倍程度の差が生じることになる。中間層の柱においては、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は、0.78～1.57倍である。

各層の最大応答層せん断力に関する推定値比  $q_{i \cdot \max}$  を図5.4.11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。図5.4.11(1)は、1層から10層までのうち、5層および6層を除く8つの層の中の最大推定値比  $q_{1-4, 7-10 \cdot \max}$  を示し、(2)は12層の推定値比  $q_{12 \cdot \max}$  を示している。なお、最大応答層せん断力に関する層ごとの推定値比  $q_{i \cdot \max}$  は、式5.4.14で与えられ、最大応答層せん断力の推定に際してはこれに相当する割り増し係数が必要となる。

$$q_{i \cdot \max} = \max_{ieq} \left( \frac{Q_{i \cdot ieq}}{Q_{i \cdot s}} \right) \quad (5.4.14)$$

ここに、 $Q_{i \cdot ieq}$ ： $ieq$  個目の地震動時刻歴による  $i$  層の最大応答層せん断力、 $Q_{i \cdot s}$ ：提案方法による  $i$  層の最大応答層せん断力の推定値である。

1～4および7～10層の最大推定値比は、構造物の固有周期が短い構造物12aから12dまででは、1.0～1.1程度である。構造物12eから12gまでについても概ね1.0～1.2であるが、構造物12gと応答スペクトル Sa1あるいは Sa2との組み合わせの全体塑性率2.8以上でのみ1層の推定値比が1.4に達する。構造物12eより固有周期が長い構造物においては、短周期における加速度応答の大きい応答スペクトルほど最大推定値比が若干ながら大きい。なお、5層および6層の推定値比は、1～4および7～10層の最大推定値を若干上回る場合が多く、構造物12aから12dまででは1.0～1.2程度、構造物12eから12gまででは1.0～1.4程度である。11層の推定値比については、1～4および7～10層の最大推定値を上回る場合もあるが、概ね、それと大差はない。

12層の推定値比については、全体塑性率が増大すると、他の層の推定値比に比べて著しく大きくなる場合が多い。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との組み合わせにおいては、全体塑性率が大きい領域でも推定値は1.0程度と割り増しの必要がない。構造物の固有周期が長いほど推定値比は大きく、1.5を超える場合が多く、最大で1.9程度に達する。構造物12dや12eでは、全体塑性率が0.8～1.4程度の比較的小さい領域においても、推定値比が大きくなる場合がある。これは、最大応答層間変位でも見られたように、5種類の地震動時刻歴のうち、上層部に図抜けて大きい応答を与える地震動時刻歴が1波存在するためである。

本来、最大応答層せん断力の推定においても、最大応答層間変位と同様に、割り増し係数を用いない推定方法が理想的である。しかし、モードの直和および差分の2種類の漸増載荷解析結果のみでは、それは不可能である。3.3.4(2)における検討のように、最大応答層せん断力の分布に関しては、3次や4次以上の成分も無視し得ないほど大きいためである。

$i$  層の最大応答層せん断力の推定値を  $N$  次までのモードの応答層せん断力の絶対値和とすれば、1次モードの応答層せん断力に対する推定最大応答層せん断力の増幅率  $\omega_{q \cdot i}$  は式5.4.15である。

$$\omega_{q \cdot i} = \frac{\sum_{m=1}^N \left| \sum_{k=i}^n m_k \beta_m u_{k \cdot m} S_a \right|}{\sum_{k=j}^n m_k \beta_1 u_{k \cdot 1} S_a} \quad (5.4.15)$$

ここに、 $m_k$ ： $k$  階の質量、 $\beta_m u_{k \cdot m}$ ： $k$  層の  $m$  次刺激関数、 $n$ ：階数である。なお、 $N$  は考慮する次数である。また、 $m S_a$  は、弾塑性域における  $m$  次モードの加速度応答値であり、弾性応答スペクトルを用

いて推定する。等価周期の与え方は、5.4.1(3) 2次モードの係数 に示した方法4 とする。これは、高次モードによる層せん断力の増大は、最大応答点付近の周期特性の影響を強く受けると考えられるからである。

今、モードの直和および差分の2種類の漸増載荷解析を行うことを前提としているので、1次モードの最大応答層せん断力を2種類の漸増載荷解析結果の平均値として算出し、これに割り増し係数として式5.4.15による増幅率 $\omega_{q,i}$ を乗じて最大応答層せん断力の推定値とする。すなわち、 $i$ 層の最大応答層せん断力の推定値 $\hat{Q}_{i,s}$ は、式5.4.16となる。

$$\hat{Q}_{i,s} = \omega_{q,i} \times \frac{Q_{i,SUM} + Q_{i,DIF}}{2} \quad (5.4.16)$$

ここに、 $Q_{i,SUM}$ 、 $Q_{i,DIF}$ ： $i$ 層の層せん断力に関する漸増載荷解析結果であり、前者はモードの直和、後者はモードの差分による。

考慮する次数  $N$  を変化させた場合の各層の最大応答層せん断力に関する推定値比  $q_{i,max}$  の変化を図5.4.12に示す。まず、構造物と加速度応答スペクトルの組み合わせごとに、各全体塑性率における1層から11層までの最大推定値比  $q_{1-11,max}$  および12層の推定値比  $q_{12,max}$  を算出する。図5.4.12では、28組の構造物と応答スペクトルの組み合わせのうちの最大値および最小値のみを示している。これは、図5.4.11における上側の包絡線と下側の包絡線に対応する。なお、最大応答層せん断力に関する層ごとの推定値比  $q_{i,max}$  は式5.4.17による。

$$q_{i,max} = \max_{ieq} \left( \frac{Q_{i,ieq}}{\hat{Q}_{i,s}} \right) \quad (5.4.17)$$

ここに、 $Q_{i,ieq}$ ： $ieq$ 個目の地震動時刻歴による  $i$ 層の最大応答層せん断力である。

1～11層の最大推定値比は、2次モードのみの考慮では最大1.5程度に達するが、3次モードを考慮に入れることにより最大は1.3程度に減少し、さらに4次モードを考慮に加えると最大は1.14である。それ以上に次数を増大させても、最大推定値比の最大はほとんど変化がない。最大推定値比の最小は、考慮する次数を増大させても変化が小さい。4次モードまで考慮すれば、すべての構造物と応答スペクトルの組み合わせで最大推定値比が1.0程度になる。

12層については、2次モードまでの考慮では推定値比の最大は1.5を超える。図5.4.11において、全体塑性率3.0～4.0程度では、固有周期の長い構造物12g ほど推定値比が大きかった。しかし、ここでは、増幅係数 $\omega_{q,i}$ の算定における等価周期の与え方を5.4.1(3)に示した方法4 としているので、構造物12g や12f では2次モードのみの考慮でも増幅係数が大きく、推定値比は構造物12g で1.1程度、構造物12f で1.3程度に縮小される。最大は、構造物12d と応答スペクトル Sa1の組み合わせによって与えられる。この組み合わせでも3次モードを考慮に入れば、推定値比は1.25程度に大幅に減少する。4次モードまで考慮すれば、すべての構造物と応答スペクトルの組み合わせについて、推定値比は概ね1.1未満に収まるようになる。一方で、構造物12g や12f では次数を増大させるごとに過大評価の度合いが増し、構造物12g の推定値比は3次モードまででは0.75程度、4次モードを加えると0.6程度である。もともと推定値比が小さい構造物12a と応答スペクトル Sa4の組み合わせでは、高次モードの影響が小さいので、次数の増大による推定値比の変化は比較的小さい。推定値比は、2次まででは0.97、3次まででは0.89、4次まででは0.85である。なお、全体塑性率1.4について推定値比が大きいが、これは構造物12d と応答スペクトル Sa1および Sa2の組み合わせによるも

のである。4次モードまでの考慮が妥当であるが、固有周期の長い構造物では最上層の最大応答層せん断力を過大評価することになる。

#### 5.4.4 諸因子の影響

##### (1) 設計外力分布形の影響

設計外力分布形を変動させた3種類の構造物における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5.4.13に示す。応答スペクトル Sa2と全体塑性率2.0との組み合わせ(12c-Sa2-2.0)、および応答スペクトル Sa4と全体塑性率4.0の組み合わせ(12c-Sa4-4.0)を採り上げて示している。また、3種類の構造物と応答スペクトル Sa2および Sa4の組み合わせにおける最大応答層間変位について、1層の推定値比  $r_{1\cdot\max}$ 、5層および6層の推定値比の大きい方  $r_{5,6\cdot\max}$ 、および12層の推定値比  $r_{12\cdot\max}$  を比較して図5.4.14に示す。

設計外力分布形における2次の成分を変化させることにより、最大応答層間変位は、特に上層部で変化する。モードの差分による漸増載荷解析結果がこれに追従する必要があるが、地震応答解析結果の変化に比べると漸増載荷解析結果の変化は若干鈍い。

最大応答層間変位に関する推定値比は、下層部や中層部では、3種類の構造物間ではほとんど差が無い。12層では、どちらの応答スペクトルに対しても、設計外力分布形における2次の係数を負側にシフトした構造物12cNの方が小さい。上層部の設計層せん断力係数が大きく、上層部の応答が相対的に小さくなるほど、上層部の推定値は過大になりがちである。

##### (2) 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5.4.12に示す。いずれも、応答スペクトル Sa1との組み合わせであり、全体塑性率を1.60とする。また、5種類の構造物と応答スペクトル Sa2および Sa4の組み合わせにおける最大応答層間変位について、1層の推定値比  $r_1$ 、5層および6層の推定値比の大きい方  $r_{5,6}$ 、および12層の推定値比  $r_{12}$  と全体塑性率の関係を図5.4.13に示す。

すべての構造物において、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漸増載荷解析結果に近く、上層部ではモードの差分による漸増載荷解析結果に近い。基準となる構造物12cについては、中層部の梁と13(R)階および12階の梁において、地震応答解析結果の最大値が漸増載荷解析結果を若干上回っている。これは、上層部の部材の強度を高めた構造物12c1および上層部の部材の強度を弱めた構造物12c2でも全く同様である。最上層の最大応答層間変位に関する推定値比は、構造物12cでは1.05、構造物12c1では1.09、構造物12c2では1.11である。上層部の部材の強度を変化させれば、地震応答変形の分布も大きく変化するものの、漸増載荷解析結果も追従して変化するため、推定値比  $r$  の変化は小さい。中層部や下層部の部材の強度を変化させた場合も同様で、変形の分布自体は変化しても、推定値比の変化は小さい。部材の強度の分布に関わらず、2種類の漸増

載荷解析を用いた推定方法は有効である。

### (3) 弾性剛性の分布の影響

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5.4.17に示す。応答スペクトル Sa1と全体塑性率1.6との組み合わせ(12c-Sa1-1.6)、および応答スペクトル Sa2と全体塑性率4.0の組み合わせ(12c-Sa2-4.0)を採り上げて示している。また、3種類の構造物と応答スペクトル Sa2および Sa4の組み合わせにおける最大応答層間変位について、1層の推定値比  $r_{1\cdot\max}$ 、5層および6層の推定値比の大きい方  $r_{5,6\cdot\max}$ 、および12層の推定値比  $r_{12\cdot\max}$  を比較して図5.4.18に示す。

5.3.2(4)においては、弾性剛性の分布の違いによって最適外力分布形にも大きな差が生じる場合があった。これに対して、2種類の漸増載荷解析を行うことにすれば、推定値比に多少の差があるものの、すべての構造物において、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漸増載荷解析結果に近く、上層部ではモードの差分による漸増載荷解析結果に近い。

Sa2-4.0に対しては、構造物12cB ほど最適外力分布形の2次の係数がゼロに近かった。これに対して、モードの直和およびモードの差分における2次の係数は、各構造物でほとんど差がない。そのため、Sa2-4.0に対する推定値比の分布は構造物によって異なり、上層部では構造物12cB ほど小さく、下層部では構造物12cB ほど大きい。

### (4) 剛性分布の変化の影響

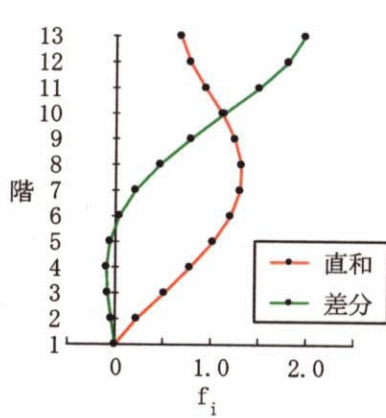
これまで検討してきた構造物では、すべての部材の降伏点割線剛性低下率が等しいため、塑性域において想定する振動モードが弾性の振動モードと等しいと仮定してきた。降伏点剛性低下率が変化する構造物12cYや想定する崩壊機構を変化させた構造物12cZにおいては、外力分布形を設定する際にどのような振動モードを使用するかが検討事項となる。そこで、各部材の剛性低下を考慮した等価振動系を設定し、その振動モードと弾性振動モードを比較することにする。ここで設定する等価振動系モデルは4.2.1(2)におけるものと同様であり、構造物12cYでは、降伏ヒンジを計画しない部材には初期剛性を与え、降伏ヒンジを計画する部材に対しては降伏点割線剛性を等価剛性として与える。構造物12cZでは、1層の柱頭および柱脚のみが降伏強度に達することを想定し、これらの部材には降伏点割線剛性を与え、それ以外の部材に対しては初期剛性を与える。等価振動系モデルの振動モードと弾性振動モードの比較は図4.2.4に示している。

2種類の構造物における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5.4.19に示す。外力分布形を求める際の刺激関数として、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2通りを比較している。構造物12cYに対しては、応答スペクトル Sa1と全体塑性率1.6との組み合わせ(12cY-Sa1-1.6)、応答スペクトル Sa2と全体塑性率4.0の組み合わせ(12cY-Sa2-4.0)、および応答スペクトル Sa4と全体塑性率2.0の組み合わせ(12cY-Sa4-2.0)とし、構造物12cZに対しては、応答スペクトル Sa1と全体塑性率1.4との組み合わせ(12cZ-Sa1-1.4)

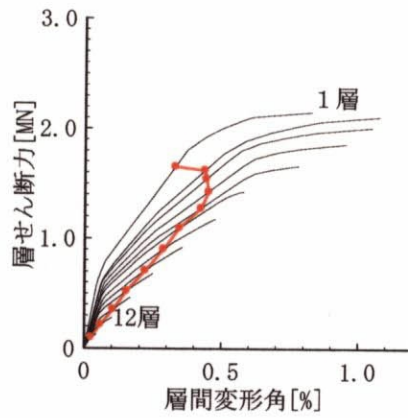
および応答スペクトル Sa4と全体塑性率1.6の組み合わせ(12cZ-Sa4-1.6)を採り上げて示している。また、2種類の構造物と応答スペクトル Sa2の組み合わせにおける最大応答層間変位の推定値比について、弾性剛性による振動モードおよび等価剛性による振動モードの2通りをそれぞれ用いた場合を比較して図5.4.20に示す。

構造物12cYにおいては、等価剛性による振動モードの方が上層部の刺激関数大きい。そのため、漸増載荷解析結果は、上層部の算定値は等価剛性による方が大きくなり、下層部の算定値は弾性剛性による方が大きい。12cY-Sa1-1.6においては、弾性剛性による上層部の算定値は地震応答解析結果を下回っており、12cY-Sa2-4.0においては、等価剛性による下層部の算定値の方が地震応答解析結果を下回る度合いが大きい。弾性剛性と等価剛性のいずれを用いる方が相応しいかの判断は難しい。応答スペクトル Sa2との組み合わせにおける最大応答層間変位に関する推定値比を見ると、弾性剛性を用いた方が各層の推定値比は1.0により近い。

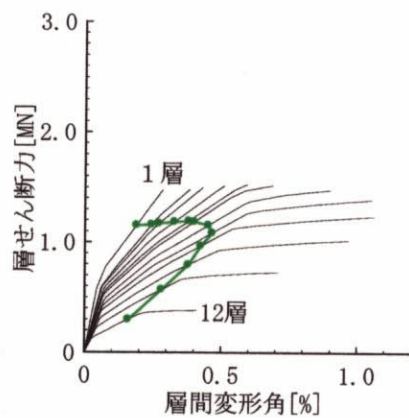
構造物12cZは、想定する崩壊機構が他の構造物と異なるが、構造物12cZにおいても、下層部の上限値はモードの直和により与えられ、上層部の上限値はモードの差分により与えられる。ただし、全体塑性率が大きい時の1層の推定値比が大きくなる傾向がある。構造物12cZでは、等価剛性による振動モードの方が下層部の刺激関数大きい。そのため、漸増載荷解析による下層部の算定値は等価剛性による方が大きい。12cZ-Sa4-1.6においては、1層柱頭および柱脚の塑性率に関する弾性剛性による算定値は過小評価の程度が大きく、この点に関しては等価剛性を用いる方が相応しい。



(1a) 外力分布

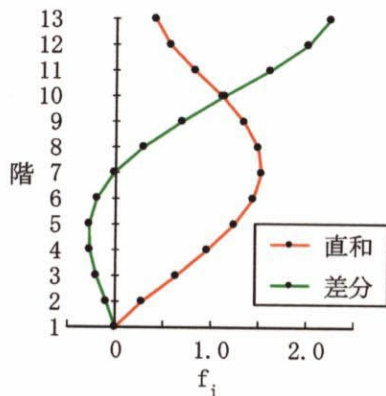


(1b) モード直和

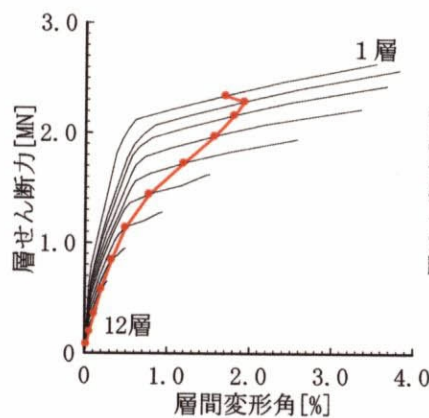


(1c) モード差分

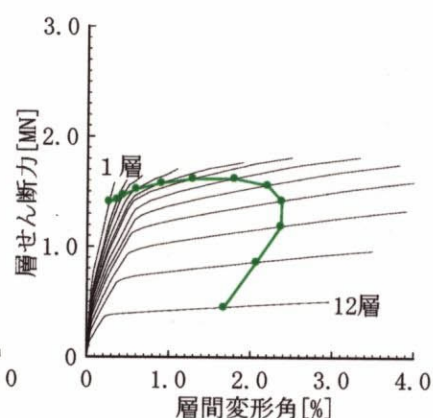
(1) 12c-Sa2-0.6



(2a) 外力分布

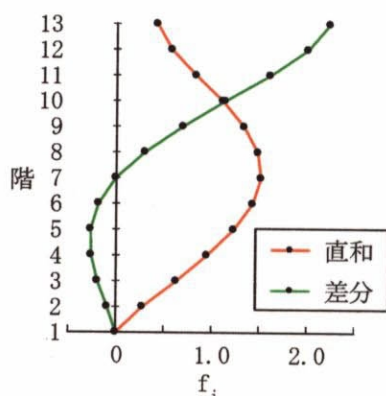


(2b) モード直和

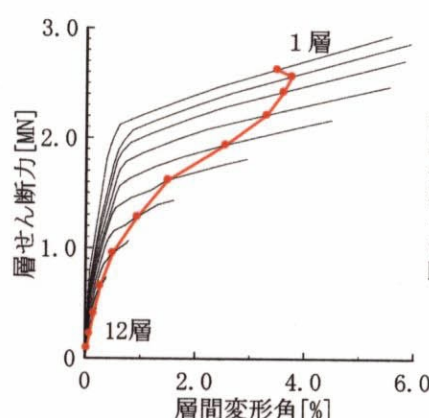


(2c) モード差分

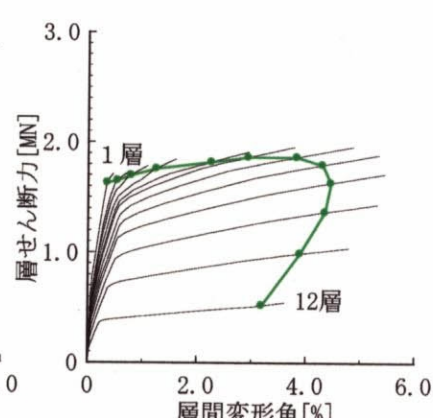
(2) 12c-Sa2-2.0



(3a) 外力分布



(3b) モード直和



(3c) モード差分

(3) 12c-Sa2-4.0

図5.4.1 漸増载荷解析の実行例



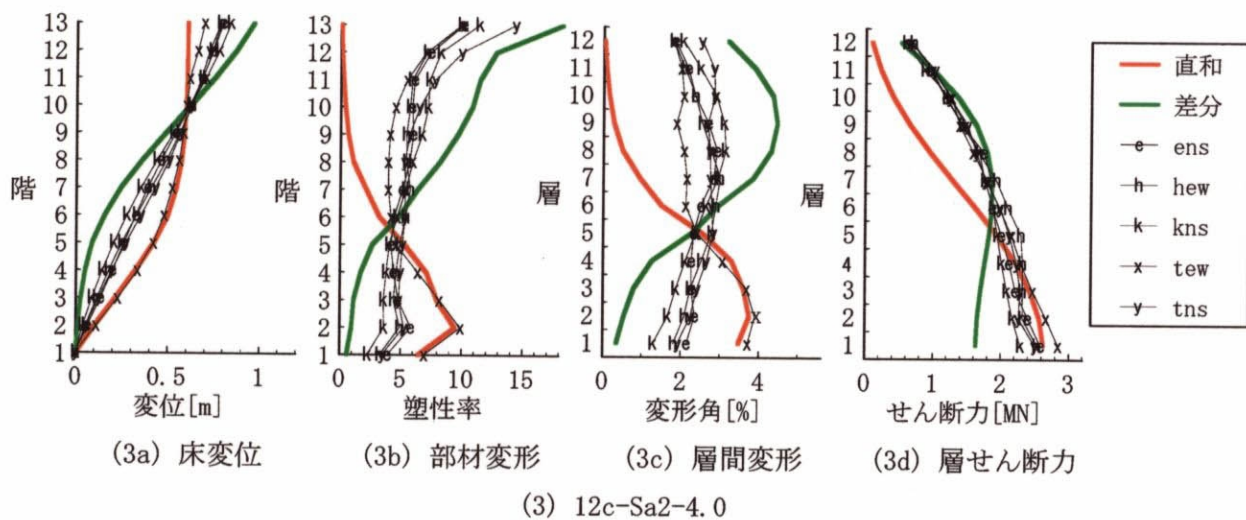
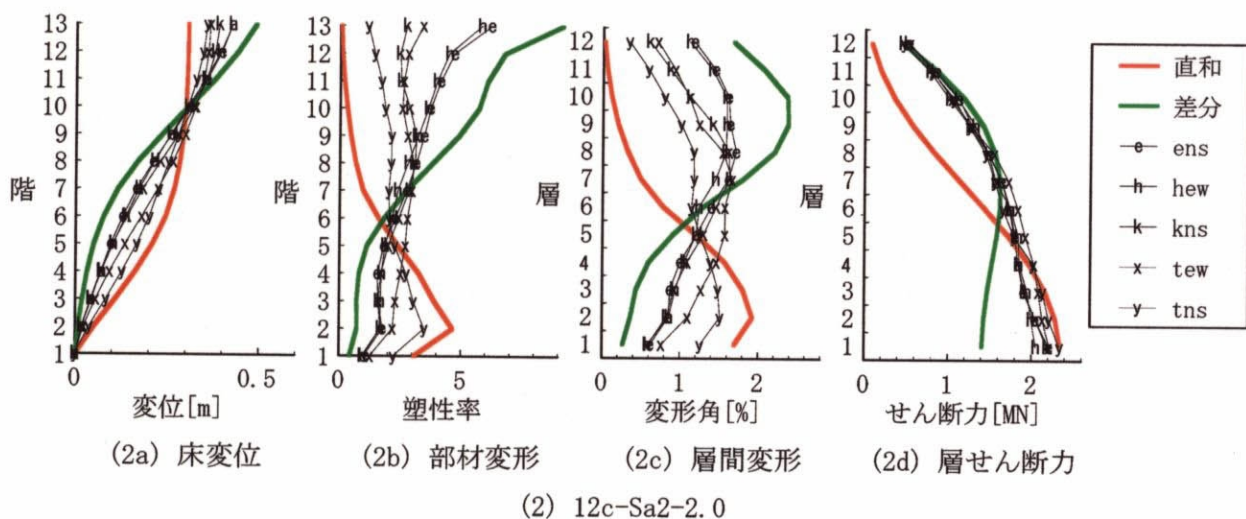
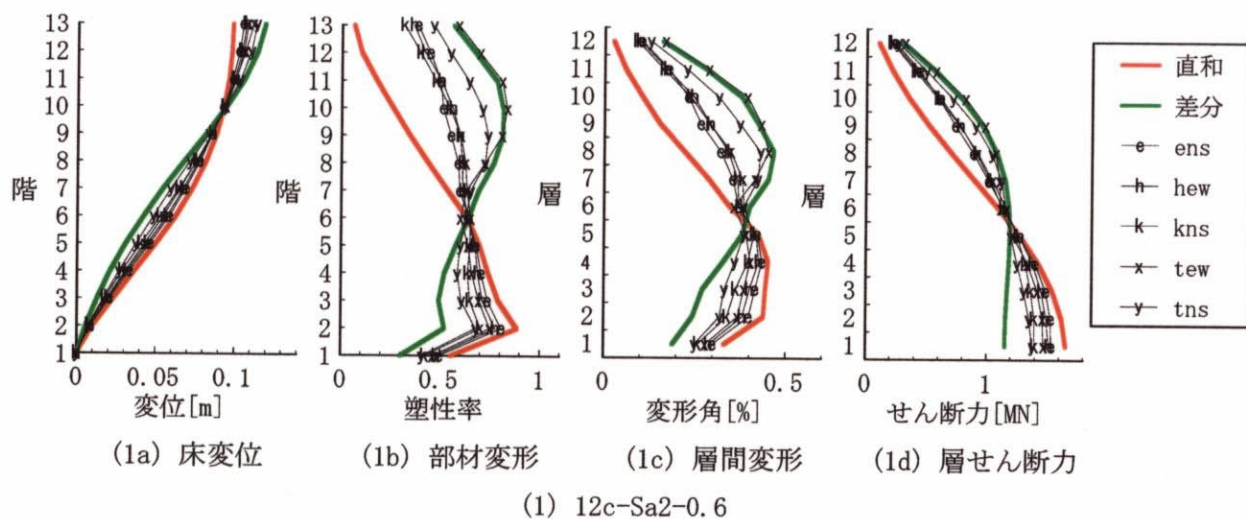


図5.4.2 地震応答解析結果と漸増载荷解析結果の比較例

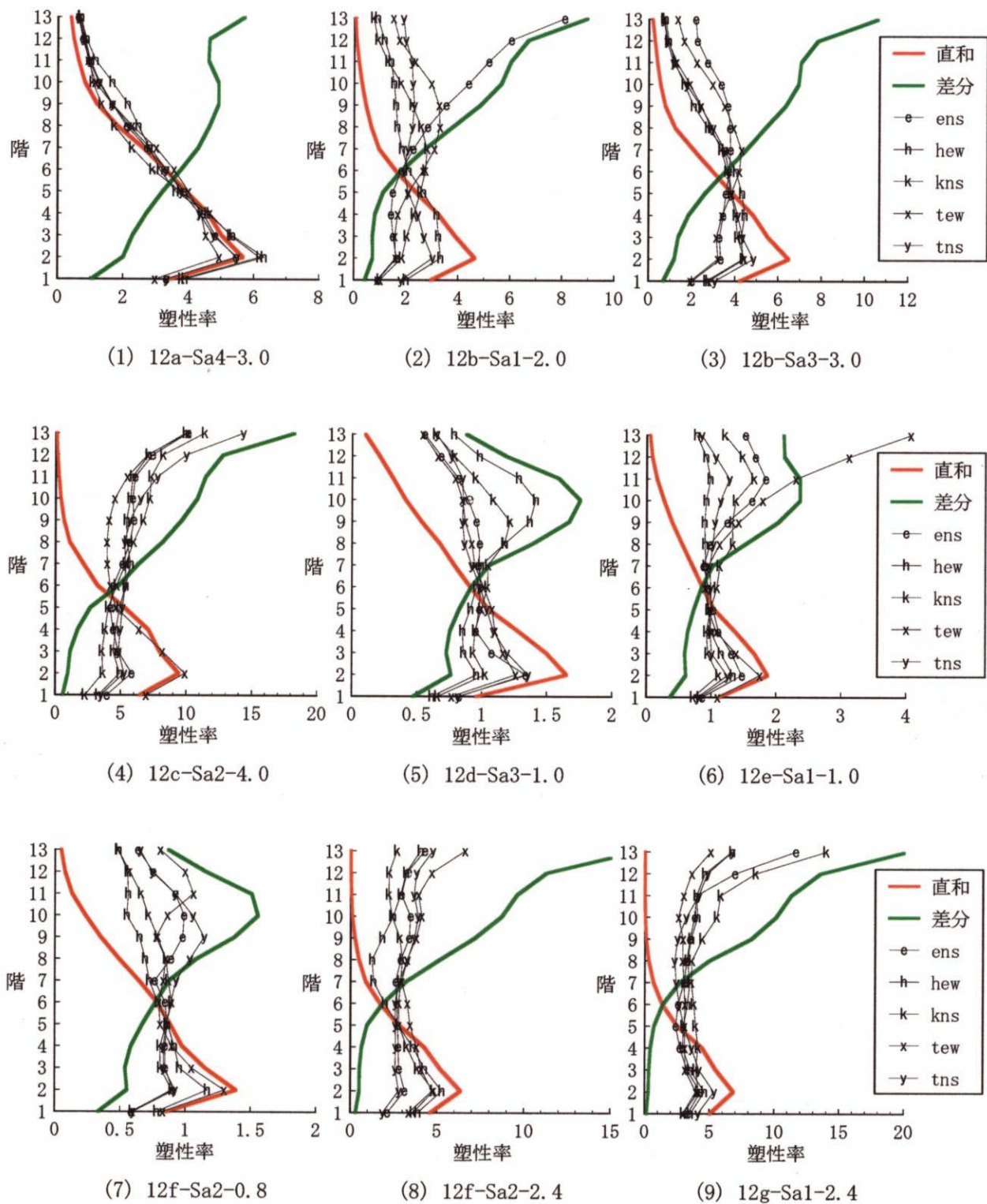


図5.4.3 部材塑性率の分布 一固有周期の影響一



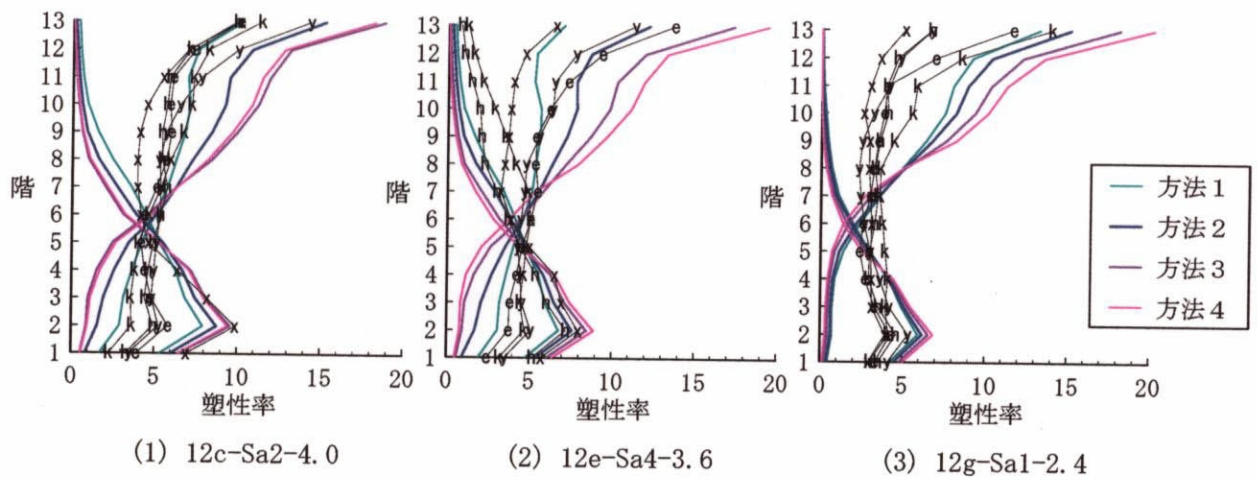


図5.4.4 部材塑性率の分布 - 2次モードの係数の影響 -

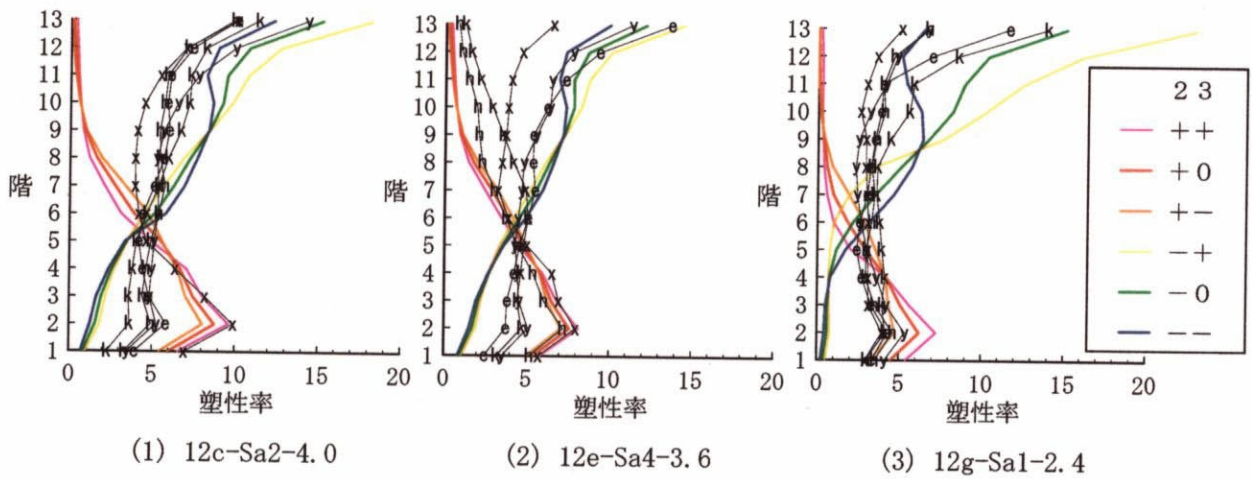


図5.4.5 部材塑性率の分布 - 3次モードの考慮 -

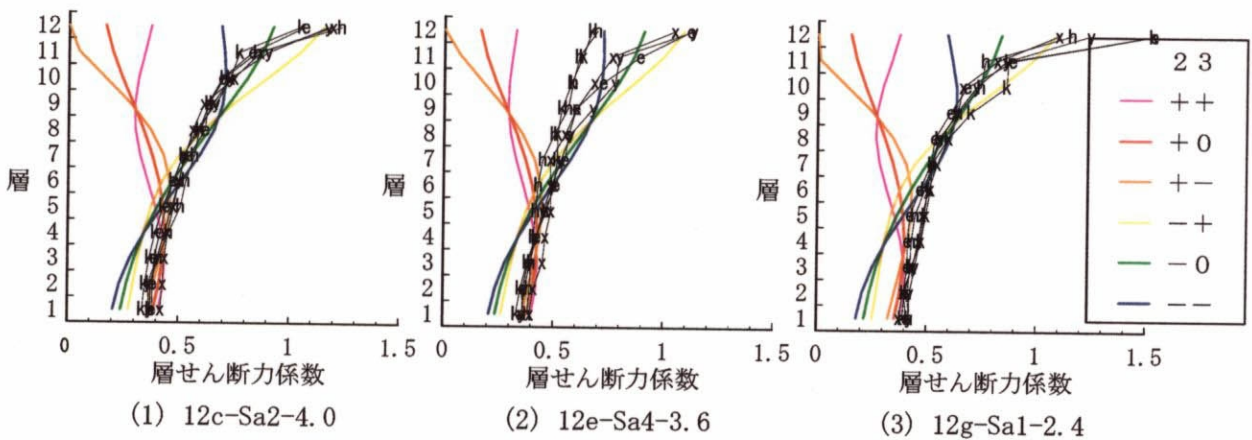


図5.4.6 層せん断力の分布 - 3次モードの考慮 -

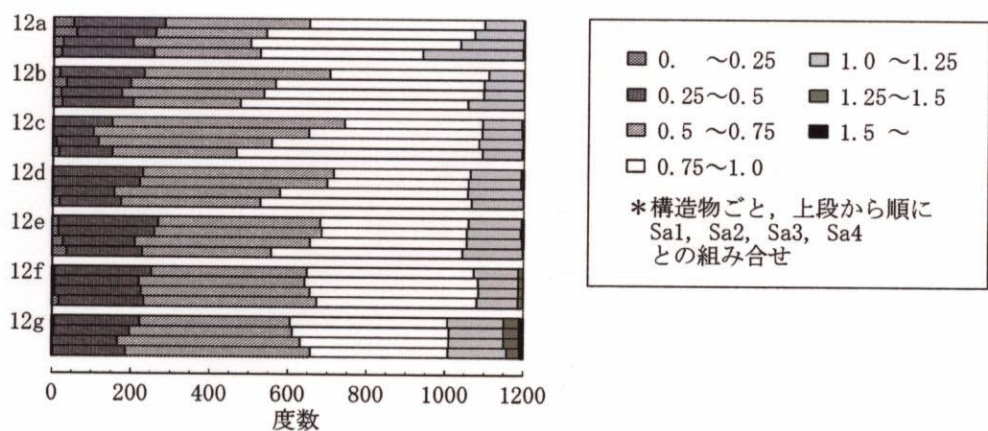


図5.4.7 最大応答層間変位に関する推定値比の度数分布 一固有周期の影響一

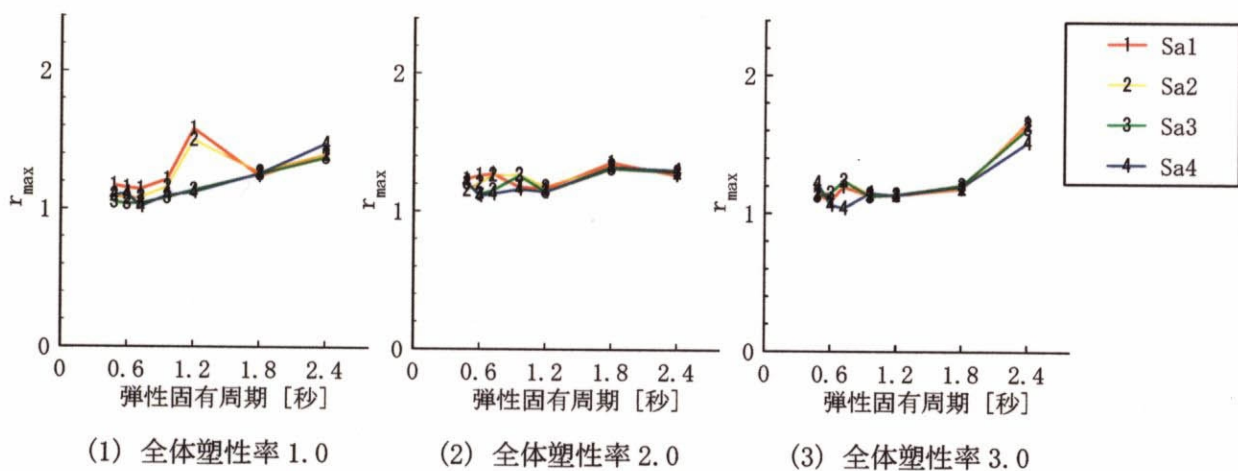


図5.4.8 最大応答層間変位に関する最大推定値比 一固有周期の影響一

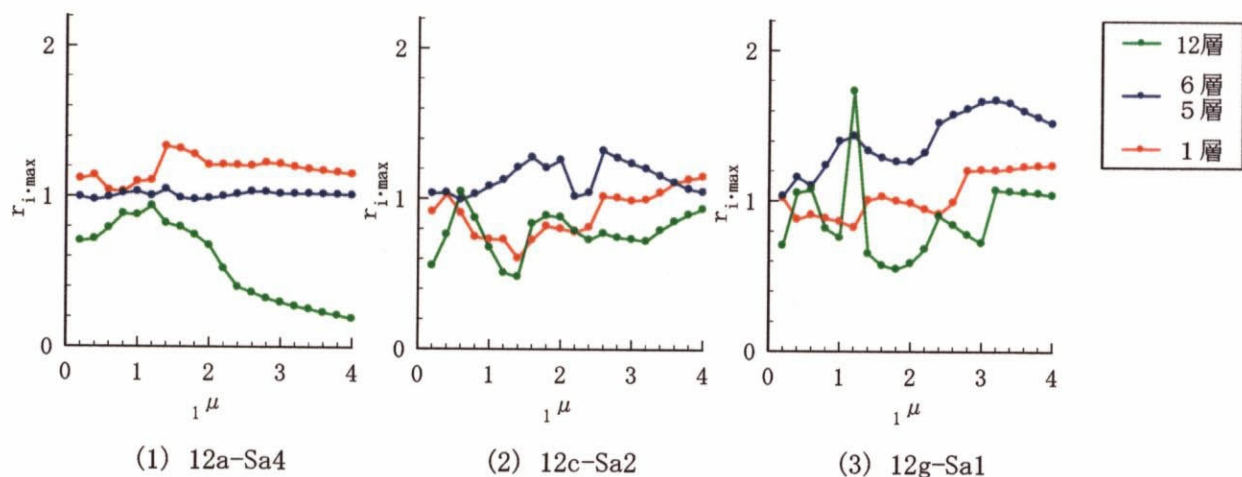
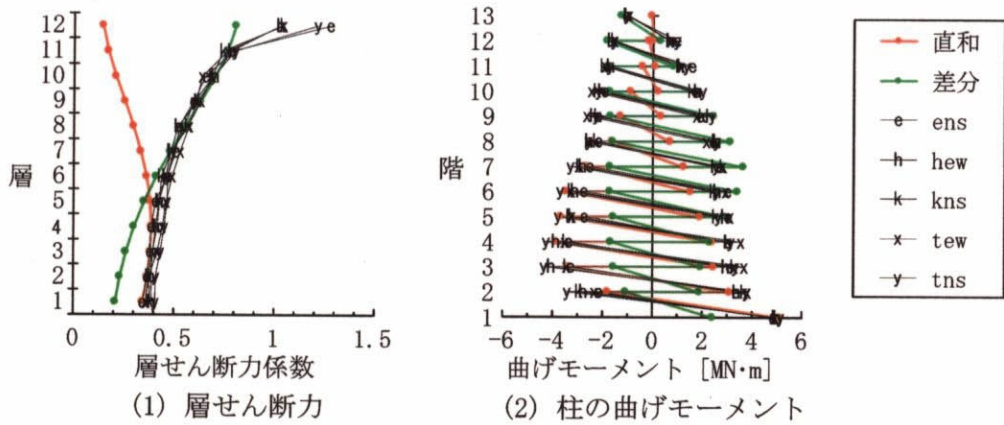
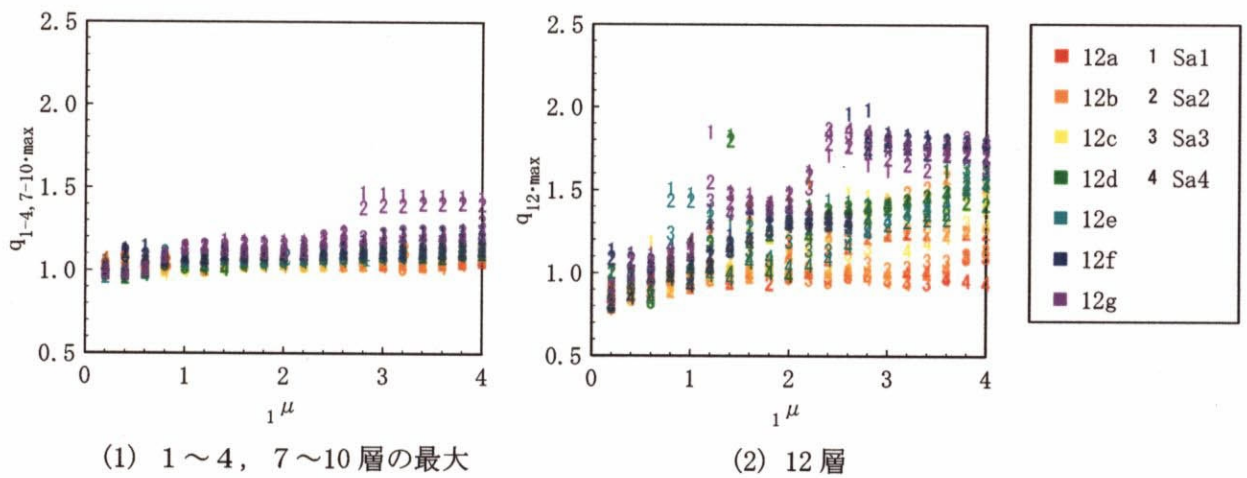


図5.4.9 最大応答層間変位に関する推定値比 一固有周期の影響一



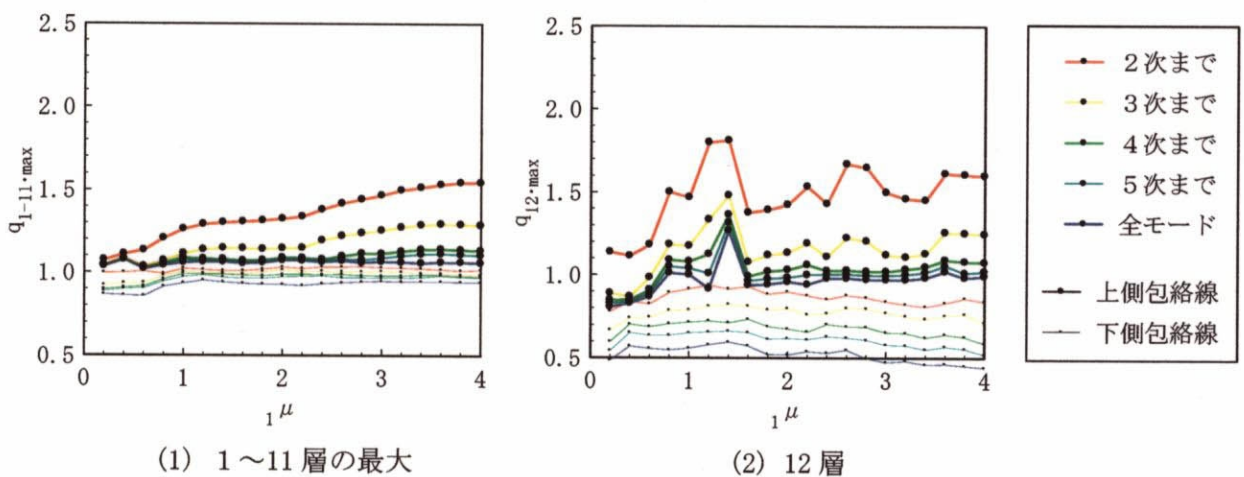
12g-Sa1-2.0

図5.4.10 層せん断力と柱の曲げモーメントの分布



(2次モードの係数：方法2)

図5.4.11 層せん断力に関する推定値比 — 2モードの直和および差分—



(各次モードの係数：方法4)

図5.4.12 層せん断力に関する推定値比 — 考慮する次数の影響—



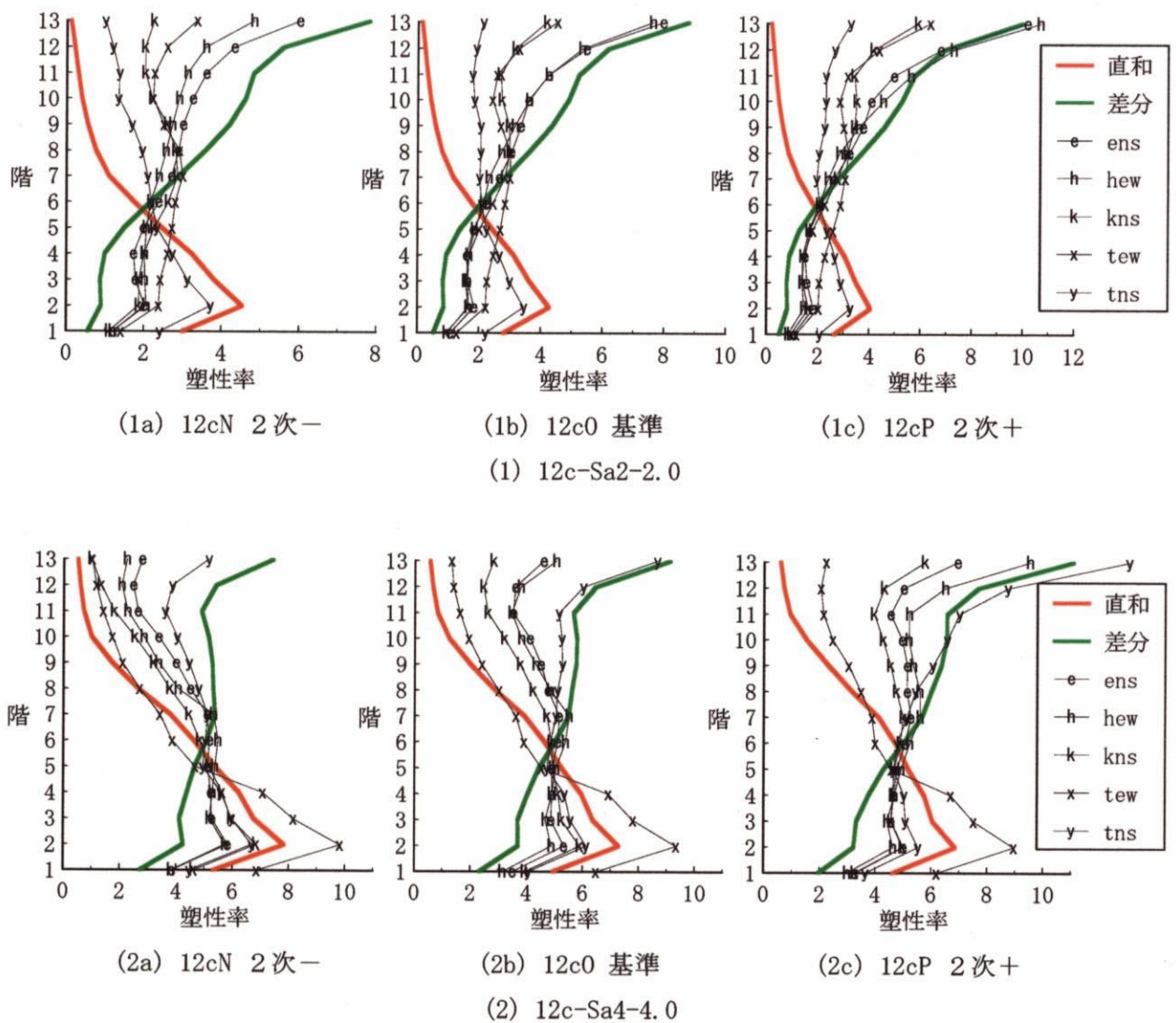


図5.4.13 部材塑性率の分布 —設計外力分布形の影響—

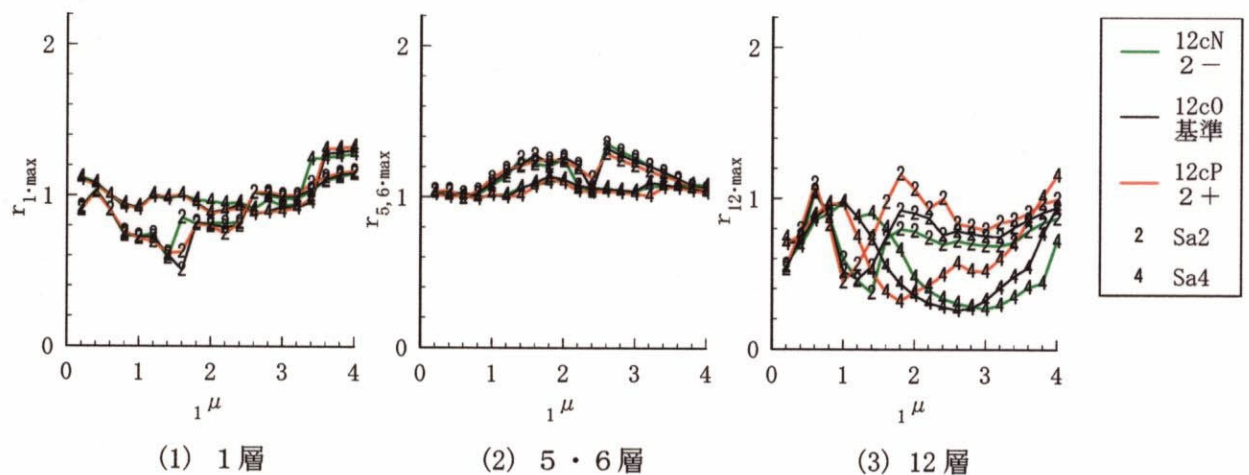


図5.4.14 最大応答層間変位に関する推定値比 —設計外力分布形の影響—

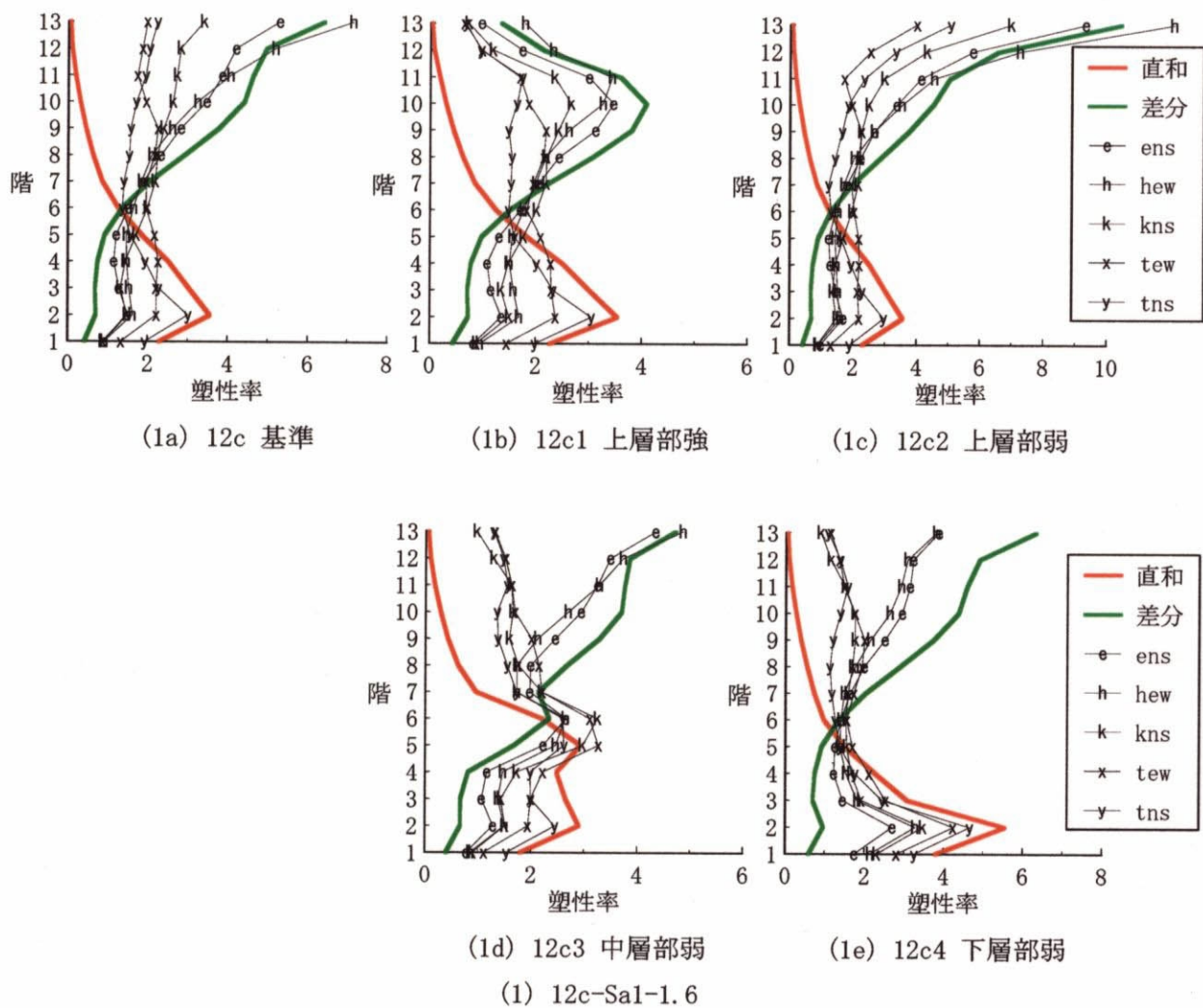


図5.4.15 部材塑性率の分布 一部材の耐力の分布の影響一

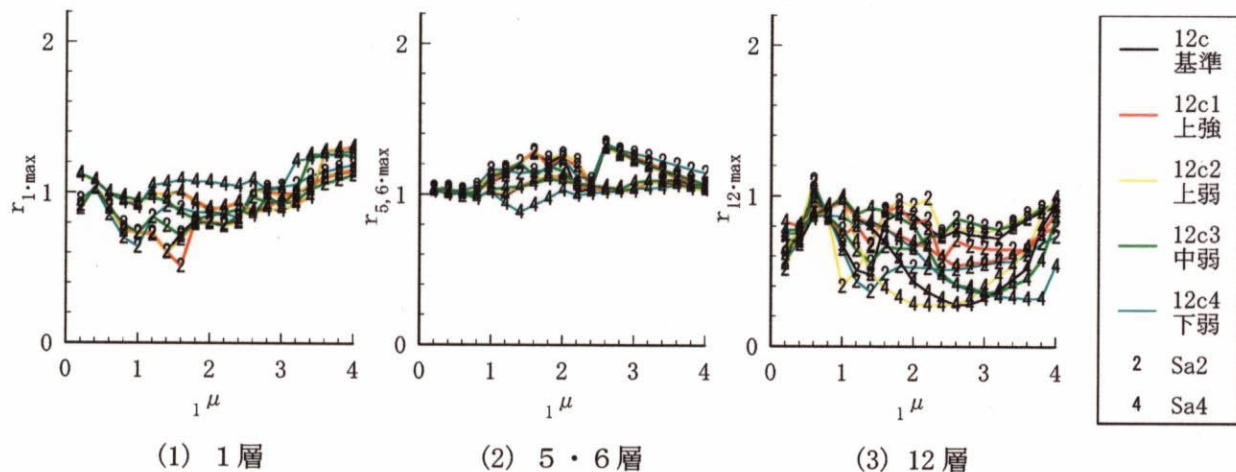


図5.4.16 最大応答層間変位に関する推定値比 一部材の耐力の分布の影響一

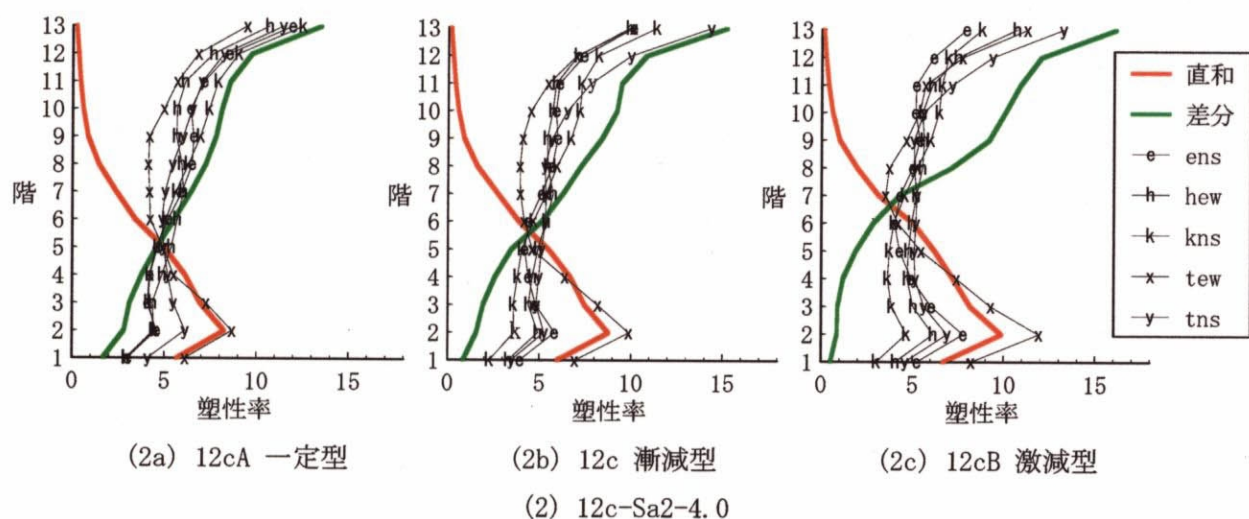
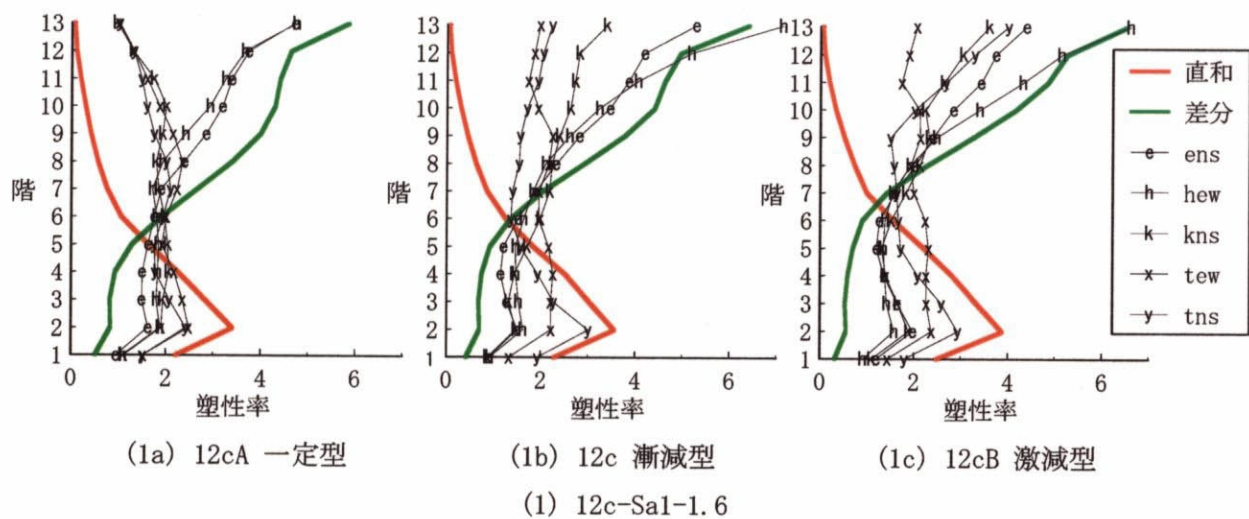


図5.4.17 部材塑性率の分布 —弾性剛性の分布の影響—

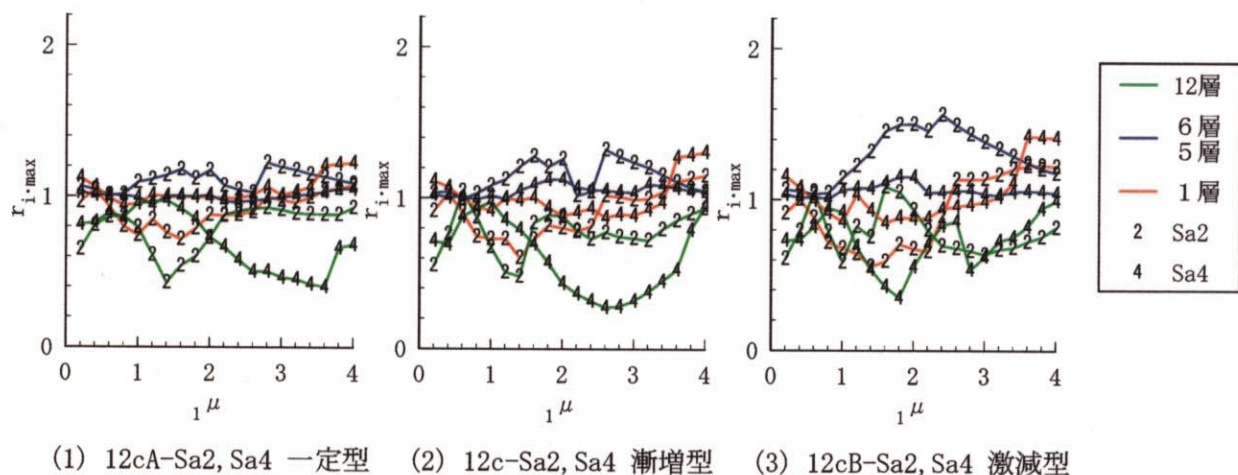


図5.4.18 最大応答層間変位に関する推定値比 —弾性剛性の分布の影響—



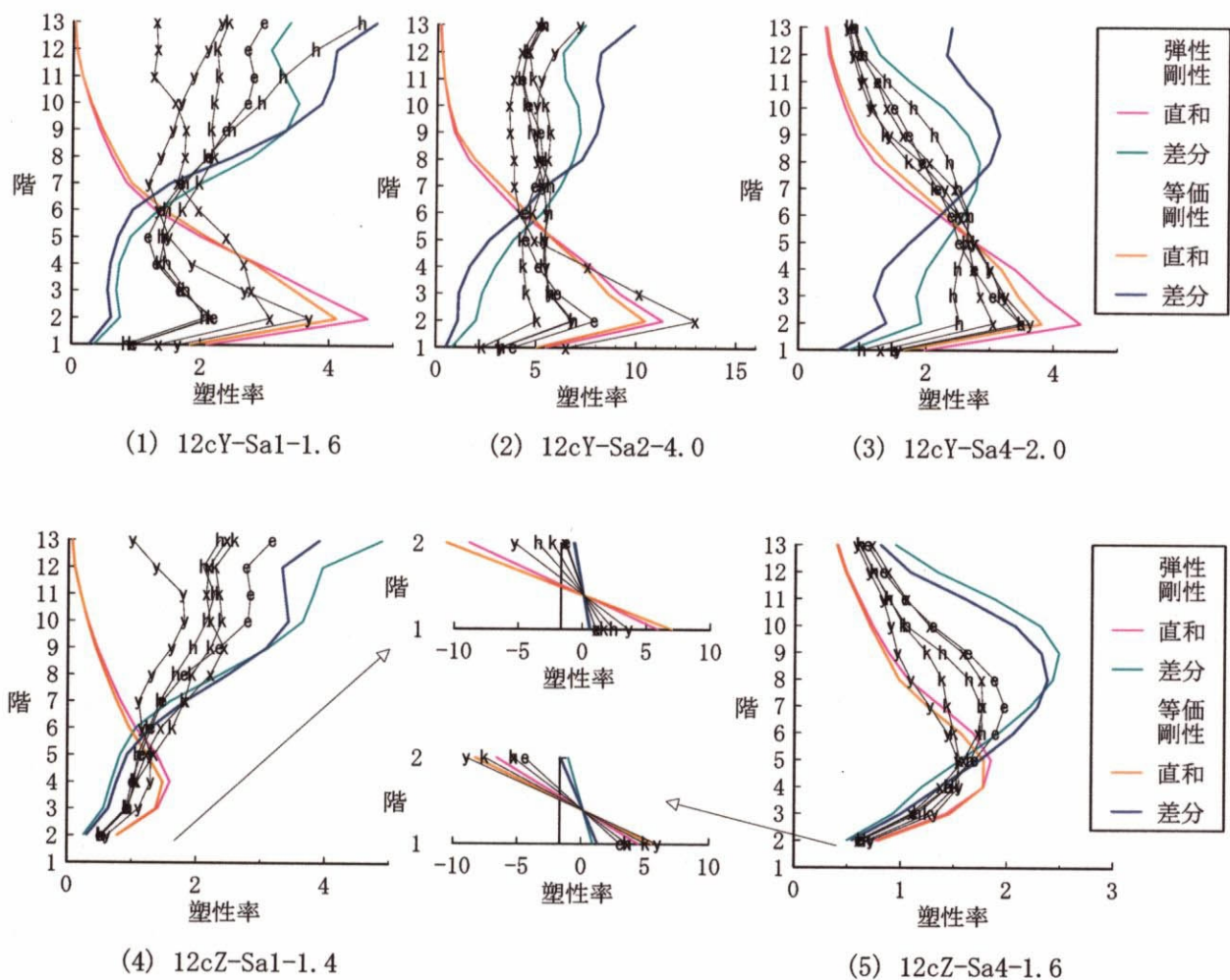


図5.4.19 部材塑性率の分布 ー剛性分布の変化の影響ー

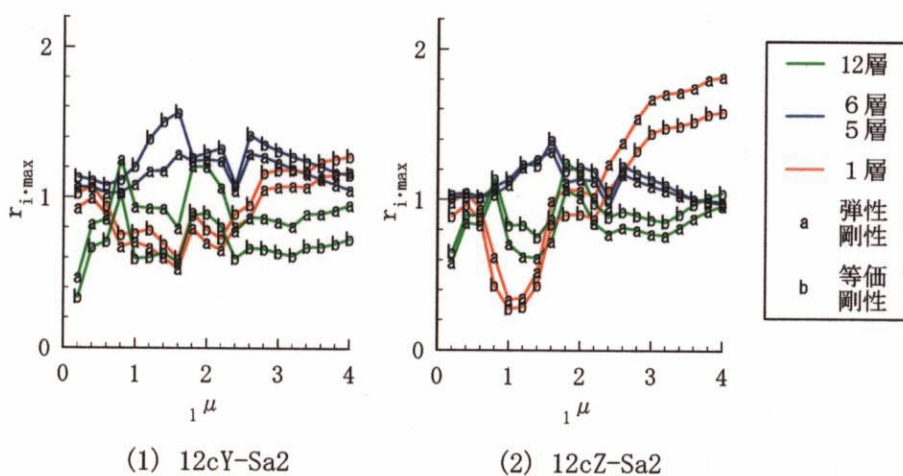


図5.4.20 最大応答層間変位に関する推定値比 ー剛性分布の変化の影響ー

## 5.5 まとめ

本章では、与えられた設計スペクトルに対する鉄筋コンクリート構造物の各部位に生じる地震最大応答を合理的に推定する方法について検討した。

5.1節では、同一の応答スペクトルを有する地震動に対する最大応答のばらつきについて検討した。

まず、2.2節で設定したフーリエ位相を既往の強震観測記録から定めた5種類の模擬地震動を用いて、同一応答スペクトルを有する入力地震動における最大応答の変動係数を定量化した。小変形における最大応答層間変位に関する変動係数は全層で15%程度であった。各層の最大応答層間変位のばらつきは、その層に隣接する部材の平均塑性率が1.0を超えると急増する傾向があり、上層部ほど顕著であった。隣接する部材の平均塑性率が1.0を超える領域では、中下層部の変動係数は25%程度で一定であり、上層部では上層ほど変動係数が大きい。12階建て構造物の12層では47%程度、30階建て構造物の30層では89%程度であった。また、最大応答1次等価変位の変動係数10~20%程度であり、最大応答層せん断力の変動係数は、最大応答層間変位の変動係数に比べて小さく、全体塑性率の大小に関わらず2.0~15%であった。

次に、位相特性をランダムに定めた100種類の模擬地震動、および El Centro NS(1940)と同一のフーリエ位相差分スペクトルを有する100種類の模擬地震動を用いて検討した。これらの模擬地震動を用いた検討でも、変動係数は5種類の模擬地震動を用いた場合と同程度であった。すなわち、応答スペクトルが同一で、かつ、フーリエ位相差分スペクトルも同一であっても、最大応答のばらつきは大きい。本研究では、位相特性と地震最大応答の関係の解明できず、サンプルとすべき地震動時刻歴の選択に関する提言をするには至らなかった。

5.2節では、平面骨組モデルよりも容易な地震応答解析方法として、せん断型多質点系モデルを用いる方法を探り上げ、その問題点と改善方法について検討した。

既往のモデル化方法による多質点系地震応答解析では、特に、降伏変形を超える領域における最大応答層間変位の分布について、平面骨組モデルによるものと著しく異なる場合がある。多質点系モデルの解の精度は、第一に、層のせん断バネの復元力特性に大きく関わってくる。梁降伏先行型の構造物においては、漸増載荷解析における上層部の層せん断力係数が相対的に大きいほど上層部の降伏層せん断力を過大に評価することになる。上層部の層せん断力係数が過度に大きければ、上層部の応答の過小評価につながる。第二に、多質点系モデルのそのものの問題点として、層間の連成効果を考慮できず、動的な層せん断力の増大を考慮できないことが挙げられる。その結果、多質点系モデルによる地震応答解析では、特定の層に変形が集中する、応答が正負のいずれかに偏る、という傾向がある。

多質点系モデルを用いた地震応答解析による推定方法の改善案として、(1)漸増載荷解析における外力分布形は層せん断力係数  $A_i$  分布とする、(2)各層の降伏後剛性は、漸増載荷解析結果をモデル化して得られる値に対して4.0倍に増幅する、(3)漸増載荷解析結果を用いて部材の最大応答値を求める際に、最上層部の解析参照ステップを割り増す、という方法を提案した。提案方法は、細部の精度には依然問題も残るが、30階建て構造物の大変形の応答に対しても適用可能であり、既往に比べれば大幅に推定精度が増す。

5.3節および5.4節では、縮約1自由度系の最大応答と漸増載荷解析を組み合わせる方法について検討した。まず、1次等価変位の最大応答を算出し、次に、静的非線形解析により1次等価変位がそれと等しくなるまで漸増載荷を行い、得られた解を構造物の各部位の最大応答の推定値とする方法である。ここでは、後半の漸増載荷解析方法に的を絞って検討を行った。

ここでは、推定方法の目標を、2.2節で設定した5種類ずつの模擬地震動による地震応答解析結果の最大値を評価することに設定した。これは、位相特性ごとにばらつきが生じる最大応答の80%上限値程度に相当する値を推定することに相当すると考えた。

5.3節では、高次モードを考慮した最適外力分布形による漸増載荷解析結果に全層に一律な増幅係数を乗じる方法を検討した。

最適外力分布形は、低次3モードのモードに比例した外力分布形の線形和で表すことにし、固有周期を変動因子とする構造物群について、応答スペクトルと全体塑性率の組み合わせごとに導出した。最適外力分布形における2次および3次の係数は、モードの加速度応答スペクトル値の比率より推定することができた。ここで、モードの加速度応答スペクトル値は、弾性応答スペクトル、固有周期の伸びを考慮した等価周期、および減衰の増大を考慮した等価減衰を用いて算定した。2次モードの加速度応答スペクトル値の比率が増大するほど、最適外力分布形における2次の係数は減少し、3次の比率の増大に伴って3次の係数は増大した。

最大応答層間変位の推定のために全層に一律に乘じる増幅係数は、全体塑性率0.6以下では1.8程度、全体塑性率1.6以上では2.5程度であった。全体塑性率0.6より大きく1.8未満では、増幅係数は概ね2.0程度であるが、3.0を超える増幅係数を必要とする解析例も多かった。層せん断力係数 $A_i$ 分布、1次モード比例外力分布あるいはモードの2乗和平方に比べれば、概ね、小さい増幅係数に納まっている。しかし、大きな増幅係数を必要とする解析例も少なくなく、また、構造物に関する別の因子の影響を考慮するためにはさらなる検討を必要とする。

5.4節では、外力分布形をモードの直和および差分とした2種類の漸増載荷解析を行い、そのうちの大きい方を地震最大応答の推定値とする方法について検討した。

構造物、応答スペクトルおよび全体塑性率の組み合わせごとに推定方法の適用性を検討した結果、いずれの解析例においても、モードの直和による漸増載荷解析結果により下層部の上限値が与えられ、モードの差分による漸増載荷解析結果により上層部の上限値が与えられた。ただし、推定精度に関しては、外力分布形における2次モードの係数の設定方法に関わってくる。この2次の係数は、モードの加速度応答スペクトル値の比率により与えることにし、弾性応答スペクトルと、固有周期の伸びと減衰の増大を考慮した等価周期および等価減衰により算定する。等価周期として、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のが最も適当である。また、3次モードを考慮することは、面倒さが増す割に効果が小さい。

2種類の漸増載荷解析による推定方法は、最適外力分布形では考慮することが難しかった諸因子を変動させた構造物についても有効である。また、剛性分布が変化する場合、弾性振動モードよりも、剛性低下を考慮した等価振動系による振動モードを用いる方が若干であるが推定精度が増した。

最大応答層せん断力に関しては、4次までのモードの層せん断力応答の絶対値和で推定できる。