

論文

[2213] 梁降伏型立体 RC 造骨組の地震時における柱応力増幅率

渡辺浩平\*1・傅金華\*2・井上範夫\*3・柴田明德\*4

1. はじめに

終局強度型耐震設計指針[1]では、梁降伏型の全体降伏機構を実現するために、降伏ヒンジ位置(梁端部、および1階柱脚)では曲げ降伏を許容するが、これ以外の部位(1階柱脚以外の柱)では種々の可能性を考慮して曲げ降伏しないように十分な強度を確保するとしている。そこで、降伏機構が形成される時の上限の応力に対して柱が曲げ降伏やせん断破壊しないように、外力分布を仮定した静的な非線形解析からその応力を算定している。しかし、地震時には、動的な効果や2方向地震力の同時性のために、高さ方向の外力分布が仮定したとおりではないので、部材応力は静的非線形解析により算定された値から変動する。終局強度型耐震設計指針では、この応力の変動を動的増幅率や2方向地震力に対する増幅率として扱っているがいまだに不明点が多い。

本研究では、地震動を動的に受けた場合にも、梁崩壊型の全体降伏機構を保証するための柱の曲げ、あるいはせん断設計応力が、静的非線形解析から算定された部材応力に対してどのくらい割増されなければならないかを検討する。

2. 建物の概要

本研究での解析対象骨組は5層、10層、15層の純ラーメンの鉄筋コンクリート造建物から、中柱1本とそれに連なる梁を中央で切出した立体骨組モデルである。建物高さ、階高、部材寸法などの建物諸元は表-1のようである。

表-1 建物諸元

階数 (F)	建物高さ (m)	階高 (m)	スパン (m)	重量 (t/F)	柱 (cm)	梁 (cm)	ベースシア ー 係数	弾性周期 (sec)	降伏時周期 (sec)
5	21	5(1F), 4(2F-)	8	72	80×80	40×90	0.300	0.67	1.22
10	41	5(1F), 4(2F-)	8	72	90×90	55×95	0.292	0.99	1.81
15	61	5(1F), 4(2F-)	8	72	95×95	60×100	0.236	1.28	2.34

各建物における必要保有水平耐力は、建築基準法施行令に従い標準せん断力係数を1.0、構造特性係数を0.3とし、振動特性係数を考慮しAi分布を想定して定めた。また、各建物モデルに対して、必要保有水平耐力に相当する地震力を作用させ部材剛性に立脚した線形応力解析を行い部材応力を算定し、これを部材耐力とした。この時、梁降伏型を想定しているため、梁にひび割れによる剛性低下を考慮して梁部材の初期剛性を0.3倍に低下させ、柱の強度は梁に比べて十分大きいものとして大きく塑性化しないように弾性剛性のままとした。ただし、1階柱脚に関しては塑性化することを許容するが、過大な塑性化を防ぐため剛性を低下させない。なお、学会規準の最小配筋の規定に従い、最小配筋量は柱の全主筋量を0.8%、梁の引張鉄筋比を0.4%とした時の部材耐力の最小値とした。コンクリート圧縮強度は360kg/cm<sup>2</sup>、鉄筋降伏強度を3500kg/cm<sup>2</sup>とした。

\*1 東北大学大学院 工学研究科建築学専攻(正会員) \*2 (株)ピー・エス技術部(正会員)  
\*3 東北大学助教授、工博(正会員) \*4 同教授 工学部建築学科、工博(正会員)

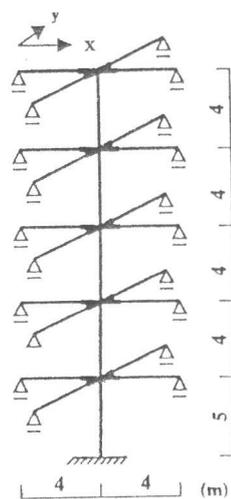


図-1 立体骨組モデル

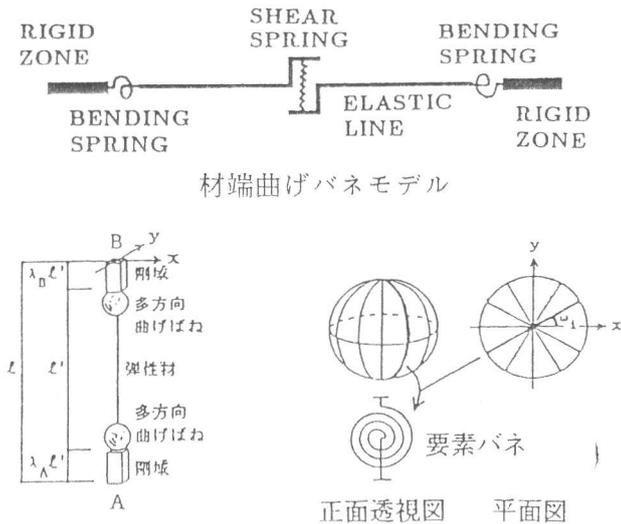
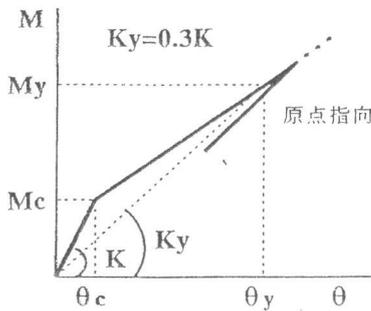
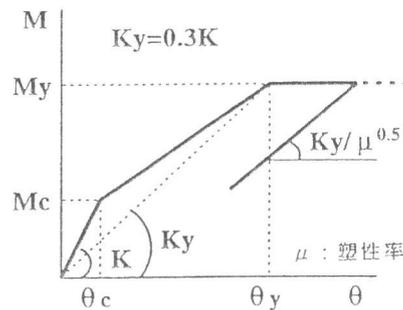


図-2 多方向曲げバネモデル



(a)一般の柱



(b)梁、1階柱脚

図-3 材端の曲げモーメント-回転角の関係

### 3. 骨組および部材のモデル化

地震時に2方向地震動を受ける建物の弾塑性挙動をできるだけ忠実に捉らえるために、本解析では建物を図-1に示すような立体骨組としてモデル化した。骨組モデル解析には、立体動的弾塑性解析プログラムTERAPを用いた[2]。ここで、全ての部材はその端部に剛域を持った線材に置き換え、剛域の長さはその部材の接合部の面までとした。また本解析では、中柱1本のみの骨組を用いたので軸力の変動を生じない。従って、本解析では柱部材の軸力変動は考慮していない。解析においては、床スラブを剛とみなし、各層の質量は床位置に集中するものとした。全ての基礎支持は固定とする。図-2に部材モデルを示す。梁には部材の曲げ塑性変形を端部に集中する材端曲げバネモデル、柱には2方向曲げの相互作用を考慮できる多方向曲げバネモデルを用いた。多方向曲げバネモデルは、図-2に示すように、材端曲げバネを多方向に配置したモデルである。各要素バネのパラメータの定め方は文献[2]の方法に従った。部材の復元力特性は柱・梁とも修正Takedaモデルとする。部材の曲げ降伏モーメントは設計用モーメントとし、ひび割れモーメントは降伏モーメントの1/3とした。曲げ降伏時の剛性低下率は0.3とし、降伏後剛性は初期剛性の1/1000とする。ただし、梁降伏先行型を想定しているため、1階柱脚以外の柱には十分大きな降伏耐力を仮定して、ひび割れのみを考慮して降伏させないものとする(図-3)。各部材のせん断は弾性とする。

#### 4. 静的非線形解析

水平外力に対する骨組の耐力と変形の関係を調べるため静的1方向弾塑性解析を行った。解析においては、水平外力を $A_i$ 分布として骨組に作用させ、その分布を常に一定に保ちながら骨組の平均変形角（最上階変位／建物高さ）が1/50になるまで解析を行った。

#### 5. 弾塑性地震応答解析

本解析においては、骨組への地震動の入力としてEl Centro(1940)及び八戸港湾(1968)の2種を用いた。入力レベルは、El Centro(NS成分)、八戸港湾(EW成分)の最大速度を50Kineあるいは仮想的に大きくした100Kineに規準化し、2方向同時入力時にはNS成分とEW成分の比が実記録と同じになるようにした。地震動の入力方向としては、1方向、2方向、45°方向の3つをとり、図-4のように入力した。1方向、45°方向入力の場合、El CentroのNS成分、八戸港湾のEW成分を建物のX軸方向、45°方向に入力した。2方向入力の場合は地震動の1方向成分を建物のX軸方向から入力し、別の成分を直交方向に入力した。図-5に減衰定数が5%の時の加速度応答スペクトルを示す。応答解析の時間刻みは0.002秒とし、数値積分法はNewmark- $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )を用いた。減衰定数は5%とする。

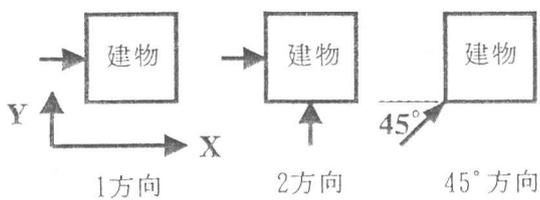


図-4 地震動の入力方向

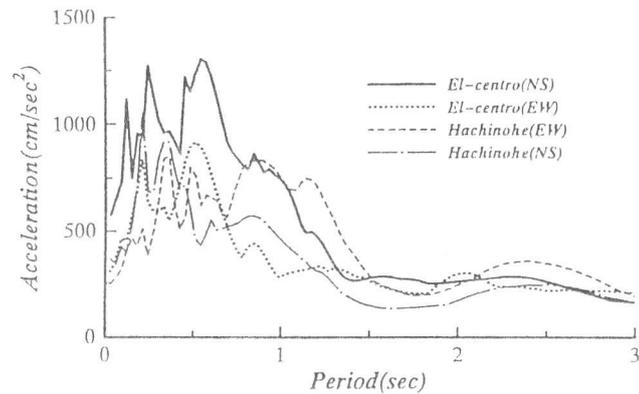


図-5 加速度応答スペクトル

#### 6. 柱応力増幅率

終局強度型耐震設計法の目標として、予想される地震動に対して梁降伏型全体降伏機構が形成されるようにする、という考え方がある。地震時の高さ方向の外力分布が仮定したとおりであれば降伏ヒンジ以外の部材応力の上限值は静的な解析でかなりよく算定できる。しかし、地震応答時の外力分布は一定ではなく、従って部材応力も静的解析により算定された値から変動する。本解析では、その変動分を柱応力増幅率として次のように定義した。

まず、1方向入力、2方向入力、45°方向入力それぞれに対して、動的解析の結果より、柱せん断力・柱曲げモーメントの最大値を下記の定義によって求める。この時、柱曲げモーメントに関しては、柱頭と柱脚のうち大きい方の値を取ることにする。

DY1：1方向入力時のX軸方向の応力最大値

DY2：2方向入力時の任意の方向における応力ベクトルの最大値

DY45：45°方向入力時の45°方向における応力ベクトルの最大値

柱応力増幅率を求めるにあたっては、まず1方向入力時の動的解析の結果から各建物の重心位置に最も近い階(5層の場合3階、10層の場合6階、15層の場合10階)の最大変形を求めて、同じ骨

表-2 静的解析と動的解析で合せた変形(変形角)とその時のベースシア係数 $C_b$

	5Fモデル			10Fモデル			15Fモデル		
	動的 $C_b$	静的 $C_b$	変形(cm)*	動的 $C_b$	静的 $C_b$	変形(cm)*	動的 $C_b$	静的 $C_b$	変形(cm)*
El Centro 50Kine	0.293	0.297	14.0(1/93)	0.201	0.211	15.2(1/164)	0.192	0.177	24.8(1/166)
El Centro 100Kine	0.298	0.303	24.6(1/53)	0.321	0.294	40.1(1/62)	0.246	0.238	61.5(1/67)
Hachinohe 50Kine	0.296	0.303	17.4(1/75)	0.183	0.200	14.3(1/175)	0.182	0.199	30.2(1/136)
Hachinohe 100Kine	0.314	0.303	26.6(1/49)	0.299	0.293	36.1(1/69)	0.256	0.238	69.1(1/59)

\* ( )内の数値は変形角を表す

組を静的非線形解析を行って、その階での変形が1方向動的解析の結果から得られたものと同じになる加力レベルの応力をSTとする。静的解析と動的解析の対応関係を図-6に示す。図中の点線は、建物の重心位置に近い階において、動的解析から得られた最大変形と静的解析における変形が同じになる時点を示す。その時の変形の値とベースシア係数を表-2に示す。

柱応力の増幅率を入力方向に対応して、以下の3種類を定義する。

$$\begin{aligned}
 & DY1/ST \quad (1\text{方向}) \\
 \text{柱応力増幅率} &= DY2/ST \quad (2\text{方向}) \\
 & DY45/ST \quad (45^\circ\text{方向})
 \end{aligned}$$

このように、基準となる静的結果を、X方向入力時の動的結果における建物の重心位置に最も近い階での変形を合わせて求めることにより、1方向で応答レベルを概ね揃えた場合における「動的効果」あるいは、「動的効果+入力方向の影響」が及ぼす高さ方向の応力変動を求めることができる。

なお、基準となる静的応力については、終局強度型耐震設計指針では震度逆三角形分布を考えているのに対して、本研究ではAi分布を考えており、現行法における分布に対する柱応力増幅率であることが特徴である。

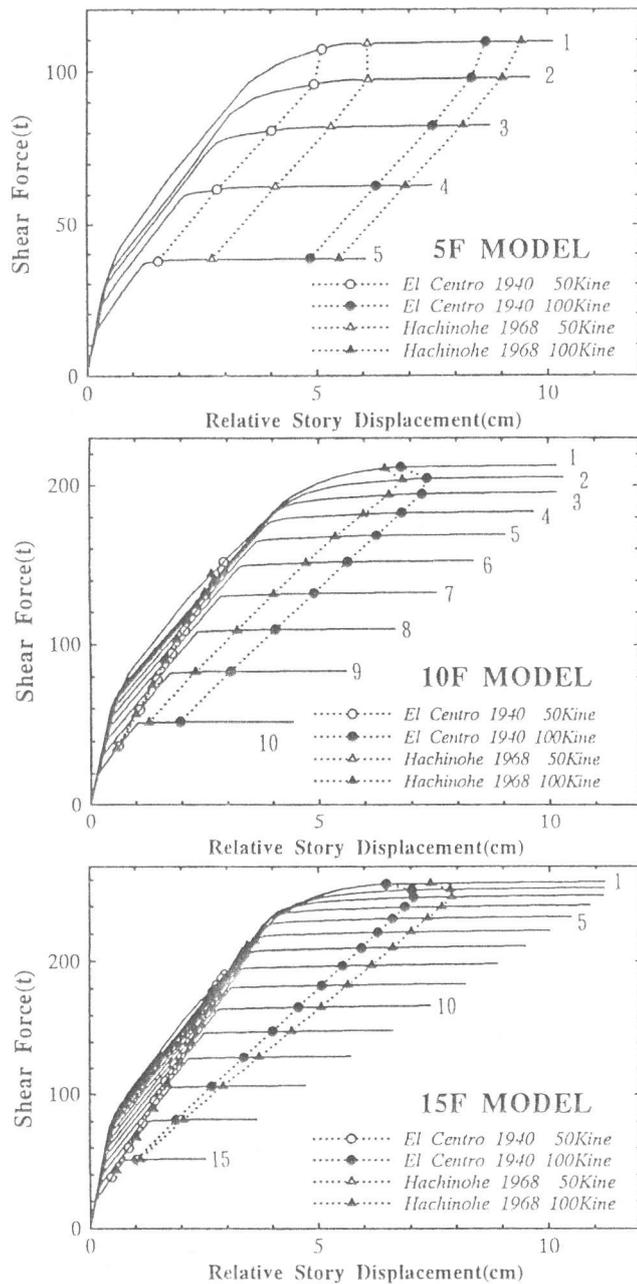


図-6 層間変形角-せん断力の関係

## 7. 柱応力増幅率の検討

本解析では、上に述べた定義に従って柱応力増幅率を求めた。図-7、図-8に柱せん断力、柱曲げモーメントの増幅率を示す。

### 7-1. 動的効果(1方向入力)

#### (1)地震動レベル 50Kineの時

部材の塑性率をみると、5層モデルではEl Centro、八戸港湾のどちらの時も1階柱脚、梁端はすべて降伏していたが、10層モデル、15層モデルでは、1階柱脚、梁端ともに降伏していなかった。柱の静的せん断力に対して10%、静的曲げモーメントに対して20%くらい柱応力を割増さなければならなかった。ただし、八戸港湾では15層モデルで柱応力の増幅はほとんどなかった。

#### (2)地震動レベル 100Kineの時

5層、10層、15層モデルで1階柱脚、梁端ともにほとんど降伏していたが、10層モデル、15層モデルの上層部での梁端に一部まだ降伏してない箇所もあった。これは設計用応力を算定するための水平外力として高次モードの影響を考慮したAi分布を用いたためと思われる。ここでも、地震動固有の特性による違いはあるが、柱せん断力に関して20%、柱曲げモーメントに関して30%くらい割増す必要がある。

#### (3)地震動レベルの違いによる比較

10層モデル、15層モデルでは1階柱脚降伏後、剛性低下に伴い、柱せん断力が増大せず、静的解析時と応力が変わらなくなり柱応力増幅率が1.0に近い値になっている。2階、3階の柱曲げモーメント増幅率がかなり大きくなって、これは1階柱脚が降伏してしまったために反曲点が下がり、2階、3階の柱に負担がかかったためと思われ、設計上かなり耐力を割増す必要がある。

### 7-2. 2方向効果+動的効果(2方向入力)

#### (1)全体的傾向

ここでは、地震動の特性によって異なるが、地震動レベルに依らず、1方向入力時と比べて2方向効果の影響がでて増幅率として大き

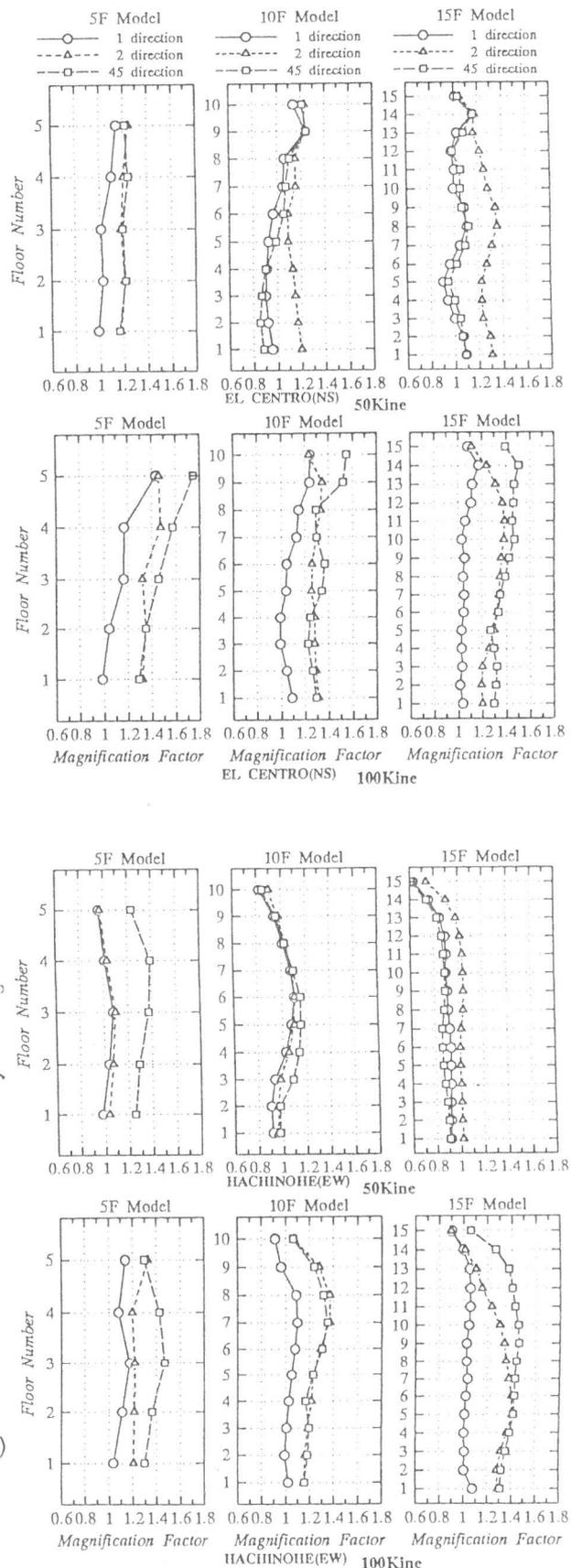


図-7 柱せん断力増幅率

いものとなっている。

(2)地震動レベル 50Kineの時

地震動によって異なった結果がでたが、柱せん断力に関しては5層モデル、10層モデルで20%、15層モデルで40%の増幅率となった。柱曲げモーメントに関しては20%~40%くらいの割増が必要である。

(3)地震動レベル 100Kineの時

建物の上層部になるに従って増幅率は小さくなる傾向があった。せん断力に関して各層とも20%~40%の増幅、曲げモーメントに関しては、1方向入力時と同様に2階、3階での増幅率が大きくなるが、他の柱では30%~40%の増幅率となった。

7-3. 45°方向入力について

45°方向入力時に1階柱脚、梁端が降伏しない場合(10層、15層の50Kine入力時)、柱応力増幅率の値は1方向解析時のものに近くなった。1階柱脚、梁端が降伏した場合、梁2本の総耐力がX軸方向の $\sqrt{2}$ 倍になるために、柱応力増幅率の値はかなり大きな値になり、2方向解析時のものに近くなった。

8. まとめ

本解析では、地震動、地震動レベル、建物高さ、地震動の入力方向などのパラメータを用いて、柱応力増幅率を検討した。同じ変形レベルでも動的効果および2方向効果により柱応力が静的解析時と比べかなり増幅することが分かった。今後の課題として、今の中柱モデルを軸力変動の考慮できる、より詳細な立体骨組に拡張し、柱応力の増幅率について更に検討したい。

[参考文献]

- 1)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説
- 2)佐武, 柴田, 渋谷:2軸曲げ相互作用を考慮した立体骨組の弾塑性地震応答解析, 東北大学建築学報, 第26号, 1987. 3
- 3)本田佳久:RC造立体骨組の弾塑性地震時挙動と終局強度型耐震設計, 東北大学, 平成4年度修士学位論文

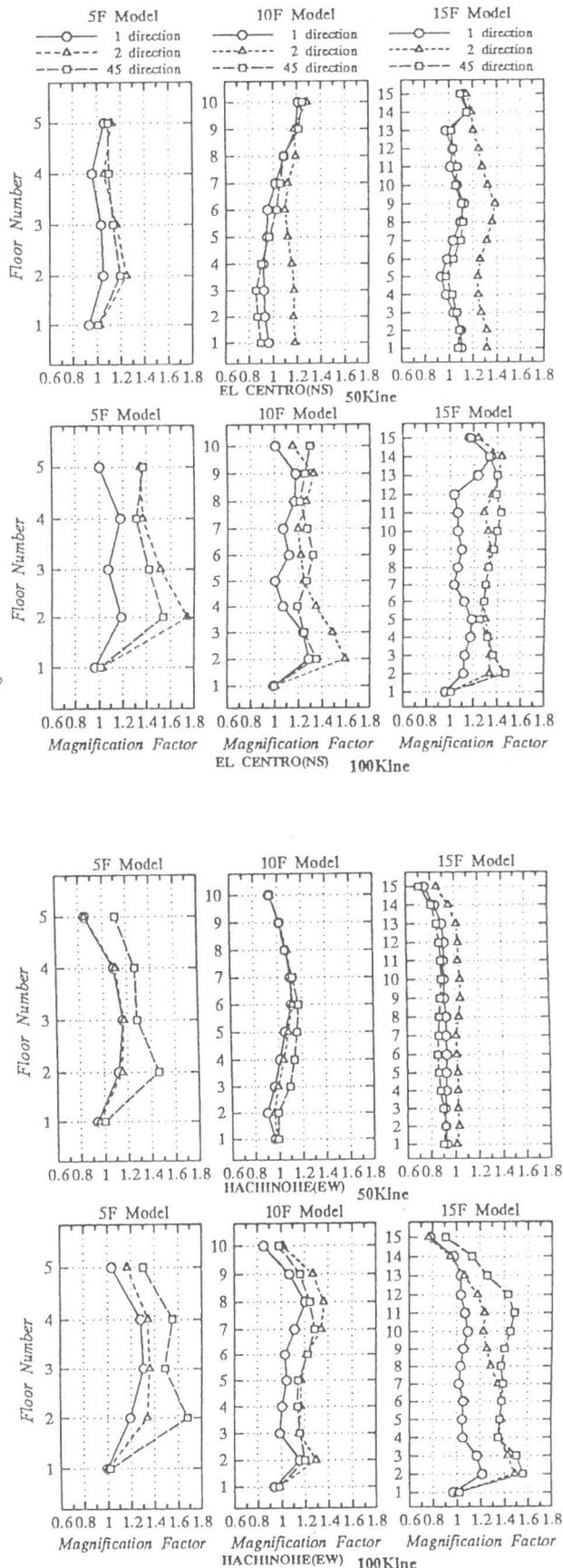


図-8 柱曲げモーメント増幅率