

(65) 等価線形化法における動的応答割増の検討

(株)ピー・エス 正会員 ○博 金華  
 建設省建築研究所 同 勅使川原正臣  
 建設省建築研究所 同 加藤 博人  
 (株)ピー・エス 同 林 三雄

1.はじめに

本研究は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針作成」<sup>[1]</sup>の研究調整委員会(委員長：岡本伸)のものとの設計指針作成WG(主査：町田重美)で行われたものである。

PC部材の設計種別は、純粋なPCからRCに近い力学的性状を有するPPC部材まで幅広く存在し、更に建物における部材の配置も様々であることから、PC造建物の地震応答を定量的に把握することが難しい。

そこで、日本建築学会刊行の「建築物荷重指針・同解説」の[7.2.3 加速度応答スペクトル]に基づき、等価な1質点モデルに置換した簡便な解析モデルを対象に、建物に作用する水平外力の重心位置で3レベルの変形における等価減衰定数 $h_{eq}$ を求めて等価周期Tに関する加速度応答スペクトル $S_a$ を作成した。更に、既報<sup>[2]</sup>で、建築学会の荷重指針に基づき作成した加速度応答スペクトル $S_a$ を用いて加速度 $S_a$ と応答変位 $S_d$ の関係( $S_d=S_a/\omega^2$ )より変位応答スペクトル $S_d$ を作成した。また、設計用ベースシア係数 $C_B$ —応答変位スペクトル $S_d$ を作り、RCからプレキャストPC造に至る15解析モデル(5構造設計種別と3レベル高さの1本柱モデル)を対象に等価線形化法による応答変位スペクトル $S_d$ を求めた。求めた応答変位スペクトル $S_d$ とスペクトルで想定した地震動レベルの地震応答解析による応答変位の比較から等価線形化法による応答変位スペクトル $S_d$ の精度を検討、比較的精度よく地震応答変位を推定できることが解った。

本報告は、それら15解析モデルの等価線形化法により求めた応答変位スペクトル $S_d$ に相当する各変形レベルにおける静的解析応力に対する地震応答応力の比(割増率)について、検討したものである。

2.検討方針

検討対象とした15解析モデル(5構造設計種別と3レベル高さの1本柱)は既報<sup>[2]</sup>に同じとした。表1および図1に、5構造設計種別と3レベル高さの1本柱モデルを示す。また、表1に示す各構造設計種別は、部材の履歴特性を変えることにより表現した。

解析対象モデルの耐震設計はPRESSS指針<sup>[3]</sup>を参考に実施した。動的応答応力の割増率検討に用いる静的解析応力は、既報<sup>[2]</sup>で求めた各解析対象モデルの応答変位スペクトル $S_d$ に相当する変形レベルの漸増荷重解析による

表1 各設計種別の部材の組合せ

架構名	構造と設計種別	柱	梁	接合方法	
a	PCaPC	プレキャストPC造	PCaPC	PCaPC	PC圧着接合
b	PC	場所打ちPC造	RC	PC	場所打ち接合
c	PCaPPC	プレキャストPPC造	PCaPC	PCaPPC	PC圧着接合
d	PPC	場所打ちPPC造	RC	PPC	場所打ち接合
e	RC	場所打ちRC造	RC	RC	場所打ち接合

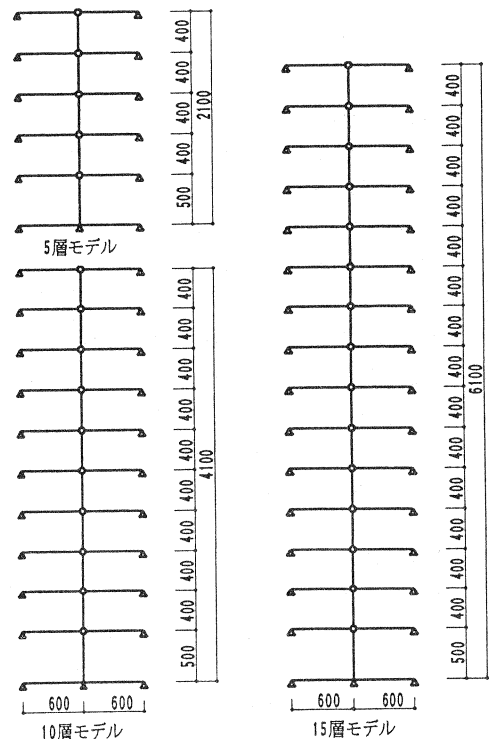


図1 解析対象モデル

柱の各応力とし、せん断力と曲げ応力に分けて検討した。せん断力は各層の静的せん断力に対する動的応答せん断力の比、曲げ応力は各層柱の柱頭と柱脚の曲げ応力の内、互いに大きい方の応力比で検討することにした。

3. 静的解析と動的解析

各解析対象モデルの応答変位スペクトル $S_d$ に相当する変形レベルの静的応力は、非線形漸増増荷解析により求めた。静的解析に用いる層せん断力の分布係数は、PRESSS指針に倣い $A_1$ モードとした。表2に、既報で求めた15解析対象モデルの各変形レベルにおける定常ループより求めた等価減衰定数 $h_{e,q}$ を示す。表3に、等価減衰定数 $h_{e,q}$ と等価周期 $T$ より求めた応答加速度スペクトル $S_a$ から計算( $S_d=S_a/\omega^2$ )した応答変位スペクトル $S_d$ を示す。

3.1 解析モデル

非線形漸増増荷解析と地震応答解析に用いる部材の解析モデルは線材置換による材端剛塑性バネモデルとし、その復元力特性をコンクリートのひび割れおよび引張鋼材の降伏を折れ点とするトリリニア型とした。また、接合部は弾性のシアパネルモデルとした。部材の初期剛性 $K_E$ 、降伏剛性低下率 $\alpha_y$ 、曲げひび割れ耐力 $M_c$ および曲げ終局耐力 $M_u$ の各式は、次式とした。

$$K_E = L\{L^2/(3E_c \cdot I_c) + k/(G_c \cdot A_c)\}$$

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot Pt + 0.043a/D + 0.33 \eta) \cdot (d/D)^2$$

$$M_c = \{0.1F_c + (N + P_e)/A_c\} Z_e$$

$$M_u = 0.9 \sigma_y \cdot a_s \cdot d + a_{pe} \cdot f_{py} (1 - 0.5q)d + 0.5(D - q \cdot d)N$$

ここに、 $\eta = (P_e + N)/(F_c \cdot b \cdot D)$ ,  $q = (f_{py} \cdot a_{pe})/(F_c \cdot b \cdot d)$ ,  
 $L$ :部材フェースから反曲点までの距離、 $E_c$ と $G_c$ :コンクリートの弾性係数とせん断弾性係数、 $I_c$ と $Z_e$ :部材の断面2次モーメントと有効断面係数、 $A_c$ :部材の断面積、 $k$ :せん断形状係数(柱1.0, 梁1.2),  $n$ :コンクリートに対する鋼材に実弾性係数比、 $a$ :シアースパン、 $d$ :部材の有効成、 $D$ :部材成、 $F_c$ :コンクリート強度、 $N$ :柱軸力、 $P_e$ :有効プレストレス力、 $\sigma_y$ :鉄筋の規格降伏強度の1.5倍、 $a_s$ :鉄筋断面積、 $a_{pe}$ :PC鋼材断面積、および $f_{py}$ :PC鋼材の規格降伏強度を表す。

3.2 地震応答解析

応答計算は、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )による数値積分とした。減衰マトリクスは瞬間剛性に比例すると仮定、減衰定数は弾性1次モードに対して5%、高次モードに対しては振動数に比例すると仮定した。

3.3 使用地震記録

使用地震記録は、地表の最大速度で50cm/secに規準化

表2 等価減衰定数

構造設計種別	5層モデル(%)			10層モデル(%)			15層モデル(%)		
	1/240	1/120	1/60	1/240	1/120	1/60	1/240	1/120	1/60
PCaPC	0.00	0.86	3.88	0.00	0.47	3.36	0.00	0.15	2.82
PC	2.32	3.31	6.89	2.79	3.04	5.26	2.50	3.31	4.95
PCaPPC	2.70	4.33	9.10	3.27	4.33	9.27	3.26	3.51	9.11
PPC	6.34	7.48	12.50	6.23	6.74	11.60	6.21	6.71	11.20
RC	6.02	7.31	15.70	5.74	5.47	14.50	5.42	5.46	13.80

表3 スペクトルによる応答変位(cm)と変形角(Radian)

構造設計種別	5層モデル		10層モデル		15層モデル	
	変位	変形角	変位	変形角	変位	変形角
PCaPC	22	1/60	40	1/70	51	1/80
PC	20	1/65	32	1/90	39	1/105
PCaPPC	18	1/70	26	1/110	34	1/120
PPC	17	1/75	22	1/130	27	1/150
RC	16	1/80	23	1/125	30	1/135

表4 使用地震波記録

記録名	最大加速度	最大速度	50cm/sec相当	継続時間
	(cm/sec <sup>2</sup> )	(cm/sec)	最大加速度	
EL CENTRO NS	342	33	511	20
TAFT EW	176	18	397	20
HACHINOHE NS	225	34	330	20
New-RC3波(1,2,3)				50

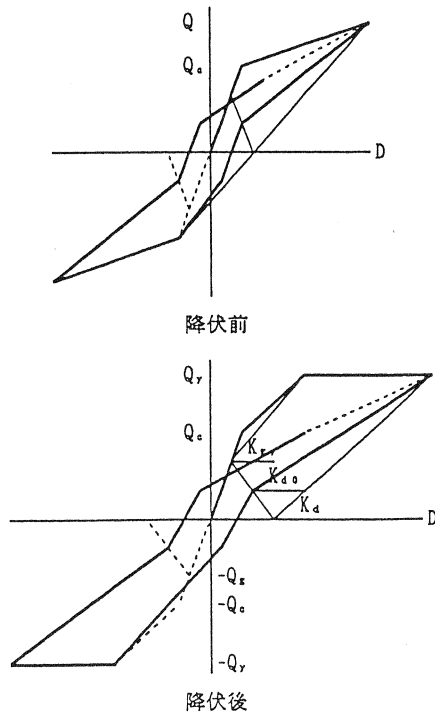


図2 PC部材の履歴モデル

した標準3地震波およびNew-RC3波とした。表4に、使用地震波と解析継続時間を示す。

### 3.3 履歴特性モデル

使用履歴特性モデルにはRC部材にTAKEDAモデルおよびPPCを含むPC部材にはPC部材モデルを用いた。また、PPC部材はPC鋼材と鉄筋による曲げ耐力比各々50%となる丁度中間の部材とした。図2に、PC部材モデルの概要を示す。

## 4.動的応答応力の検討

各解析対象モデルの静的解析による応力は、地震外力の重心位置における変位が応答スペクトル $S_d$ に相当するときのせん断力とした。動的応答応力は、静的解析に用いた各解析対象モデルを対象に、レベル2地震動を想定した標準3地震波とNew-RC3波による各層の最大応答応力として求め、静的な漸増荷重解析によるせん断力に対する地震応答応力の比から動的応答割増率を検討した。

### 4.1 応答せん断力

静的な漸増荷重解析によるせん断力に対する地震応答せん断力の比から動的応答割増率を検討した。図3に標準3波による応答比を、図4にNew-RC3波によるせん断力の応答比を示す。

各解析対象モデルの応答比は、次の通りであった。

#### 4.1.1 5層モデルの応答

**PCaPC造:**標準3波による最大応答はTaft波入力時に最上階で1.35を示し、他の層と他の記録による応答は1.1以下の小さな応答であった。New-RC3波による最大応答倍率はEQ2波入力時に2層で1.27を示し、他の波による応答は全て1.2以下の応答を示した。

**PCaPPC造:**標準3波による最大応答はTaft波入力時に5層で1.11を示した。他の層と他の標準波では何れも1.1以下の小さな応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ2波入力時2層で1.27を示すが、他の層と他の波による応答は全て1.2以下を示した。

**PC造:**標準3波による最大応答倍率はHachinohe波入力時に1層で1.1を示し、他の層と他の記録では何れも1.1に満たない小さな応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ1波入力時に5層で1.29を示し、他の層と他の波による応答は概ね1.1程度を示した。

**PPC造:**標準3波による最大応答はEl-centro波入力時に4層で1.09を示した。他の層と他の記録による応答は何れも1.1に満たない小さな応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ2波入力時に5層で1.14を示し、他の層と他の波による応答は概ね1.1程度を示した。

**RC造:**標準3波による最大応答はEl-cenentro波入力時の4層とTaft波入力時の5層で1.09を示したが、他の層と他の記録による応答は何れも1.1以下の小さな応答であった。New-RC3波の最大応答はEQ2波入力時に5層で1.12を示したが、他の層と他の波による応答は概ね1.1以下の小さな応答を示した。

#### 4.1.2 10層と15層モデルの応答

10層および15層モデルにおける応答は、標準3波およびNew-RC3波とも1.2以下の小さな応答を示していた。

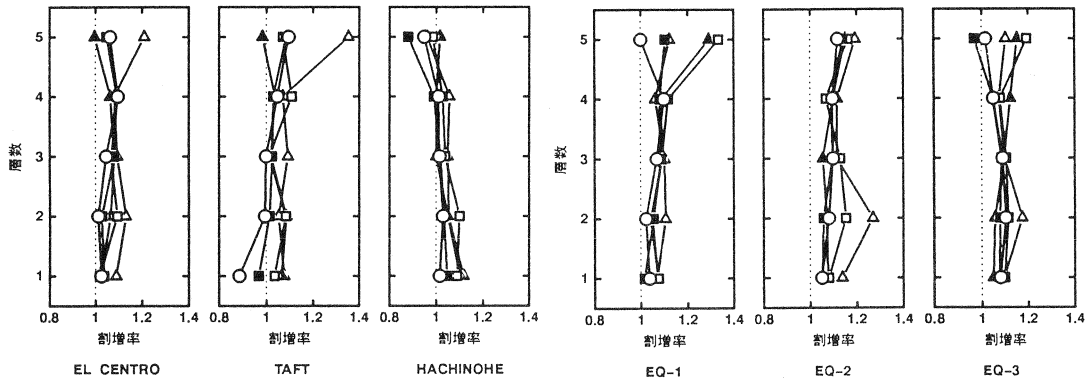
### 4.2 応答曲げ応力

静的な漸増荷重解析による柱の曲げ応力に対する地震応答曲げ応力の比から動的応答割増率を検討した。図5に標準3波による応答比を、図6にNew-RC3波による曲げ応力の応答比を示す。

各解析モデルにおける曲げ応答比率は、次の通りであった。

#### 4.2.1 5層モデルの応答

**PCaPC造:**静的解析による曲げ応力に対する標準3波による最大応答曲げ応力の比はEl-centro波入力時に3層で1.26を示し、他の層および他の記録による応答は概ね1.0~1.23程度の応答であった。New-RC3波による最大応答倍率はEQ3波入力時に3層で1.59を示し、他の波による応答比も1.0~1.4程度を示した。



EL CENTRO

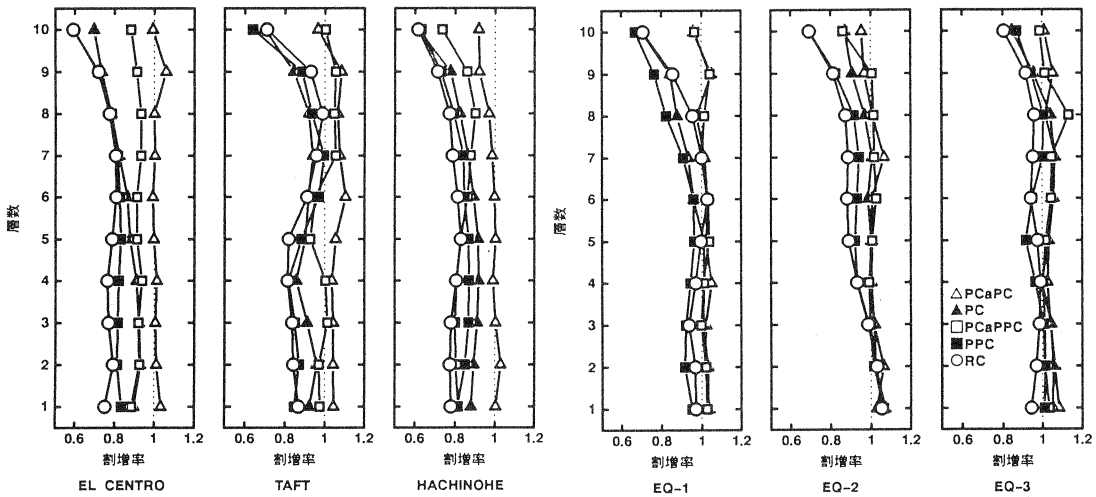
TAFT

HACHINOHE

EQ-1

EQ-2

EQ-3



EL CENTRO

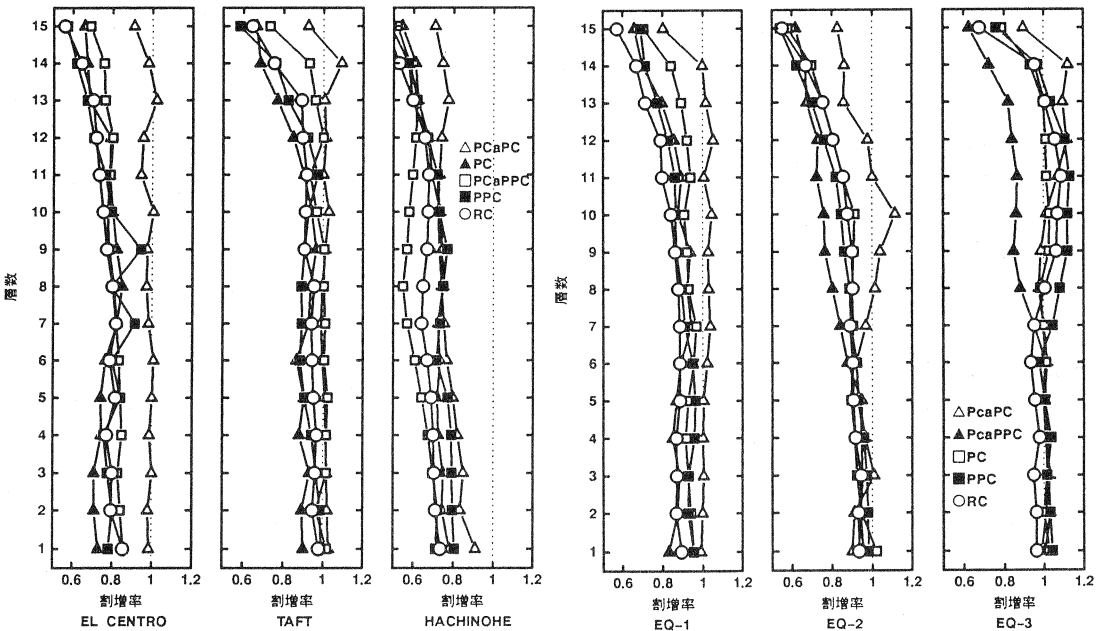
TAFT

HACHINOHE

EQ-1

EQ-2

EQ-3



EL CENTRO

TAFT

HACHINOHE

EQ-1

EQ-2

EQ-3

図3 せん断力の割増率(標準3波)

図4 せん断力の割増率(New-RC 3波)

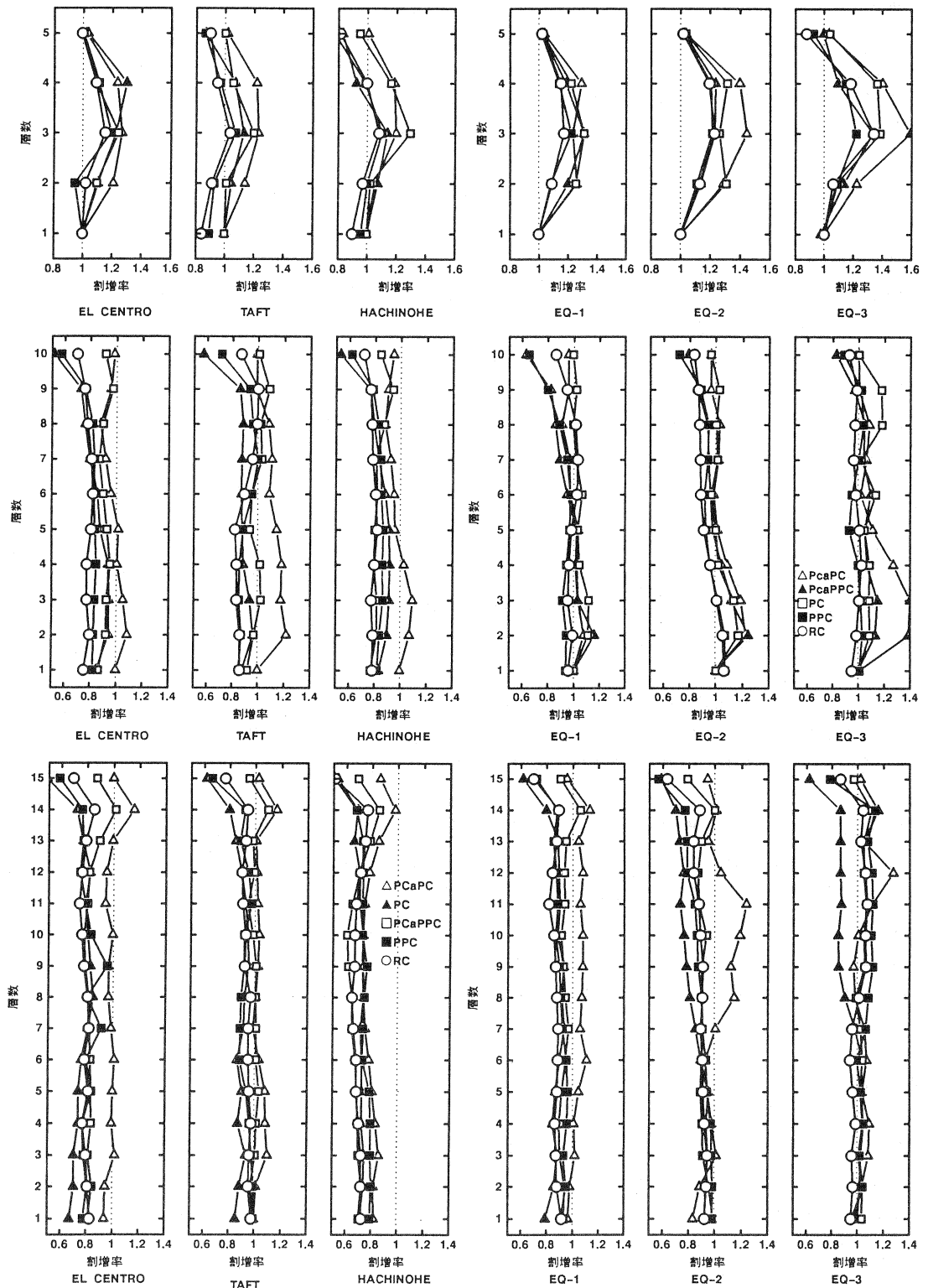


図5 モーメントの割増率(標準3波)

図6 モーメントの割増率(NEW-RC3波)

**PCaPPC造:**標準3波による最大応答はHachinohe波入力時に3層で1.29を示し、他の層と他の記録では1.0~1.24の応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ3波入力時に3層で1.39を示し、他の層と他の波による応答倍率は1.0~1.30程度であった。

**PC造:**標準3波による最大応答はEl-centro波入力時に4層で1.3を示し、他の層と他の記録では1.0~1.2前後の応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ3波入力時に3層で1.33を示し、他の層と他の波による応答は1.0~1.3程度を示した。

**PPC造:**標準3波による最大応答はEl-centro波入力時に3層で1.19を示し、他の層と他の記録では1.10程度の応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ1およびEQ3波入力時にともに3層で1.22を示し、他の層および他の記録の応答は1.2以下の応答を示した。

**RC造:**標準3波による最大応答倍率はEl-centro波入力時に3層で1.15を示し、他の層と記録では何れも1.1以下の応答であった。New-RC3波による最大応答はEQ3入力時に3層で1.34を示したが、他の層と記録の応答は概ね1.3程度以下の応答を示した。

#### 4.2.2 10層および15層モデルの応答

10層および15層モデルにおける応答倍率は5層モデルに比べ、各構造設計種別とも応答が小さく、その殆どが1.2程度を示していた。

### 5.まとめ

各設計種別15種を対象に等価線形化法に基づき応答変位スペクトルSdを求めた。求めた応答変位スペクトルに相当する静的解析による各層柱のせん断および曲げ応力に対する動的応答倍率を検討するために、レベル2の地震動に規準化した標準3地震記録とNew-RC3波を用いて地震応答解析を実施した。

解析結果の比較から動的せん断力および曲げ応答倍率について、次の事柄をまとめることができた。

1)5層モデルにおけるPCaPC造柱のせん断応答倍率は最上階で1.35を示したが、他の層では1.1~1.2程度の応答であった。他の構造設計種別についても同様に最上階の応答倍率が高いが、他の層では概ね1.1程度であった。

2)10層モデルにおける柱のせん断応答倍率は、極一部を除き、全ての構造設計種別とも1.0から1.1程度の小さな応答を示した。

3)15層モデルにおける柱のせん断応答倍率は、全ての構造設計種別とも1.0から1.1程度の小さな応答を示した。

4)5層モデルのPCaPC造柱の最大曲げ応答倍率は1.59を示したが、PCaPCおよびPC造では1.0から1.4程度の応答であった。また、PPCおよびRC造では1.2から1.3を示した。

5)10層モデルの柱の最大曲げ応答倍率は、PCaPC造およびPCaPPC造ならびにPC造では1.2程度であるが、PPC造およびRC造では1.1以下の小さな応答を示した。

6)15層モデルの柱の曲げ応答倍率はPCaPC造が最大1.2程度を示すが、他の構造設計種別はともに1.0から1.1以下の小さな応答を示した。

### 参考文献

- [1]建設省建築研究所,(社)建築業協会,(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会,(社)日本建設業経営協会,(社)日本建築構造技術者協会,住宅・都市整備公団,(財)日本建築センター,"PC共同研究「PC構造設計・施工指針作成」",1996~1998.
- [2]市澤,勅使川原,加藤,林,"等価線形化法による設計クライテリアの検討",プレストレストコンクリート技術協会 第8回シンポジウム(1998年10月).
- [3]建設省建築研究所,(社)建築業協会,(社)プレハブ建築協会,(財)日本建築センター,"共同研究「プレキャストコンクリートラーメン構造に関する研究報告書」",1990~1993.