

(66) 中低層PC骨組構造の上下動特性に関する基礎的研究

(株)大林組本店建築設計部 正会員 ○吉橋 秀和
 (株)大林組本店建築設計部 深野 慶
 大阪大学大学院工学研究科 岸本 一蔵

1. はじめに

建物の耐震設計には水平及び上下方向を併せた多次元的な応答評価が必要とされているが^{2~4)}、上下振動については設計用震度に関する提案²⁾や、大スパンの床や架構、高層建物の下層の柱等に関する具体的な留意事項の指摘³⁾が見られるのみで、上下地震動の入力条件、建物・基礎の構造特性評価・減衰条件、応答量の評価指標等に関する基本的な研究成果は水平振動に比べて十分とはいえない。そのため既報^{6,7)}では、一般に大スパン構造が採用されることが多いプレストレストコンクリート以下PCと略記一構造の上下動特性について、試設計中低層1スパンPC骨組構造モデルによる中小地震時の基本的な検討結果を報告した。

本報では、PC梁の基本振動特性を把握するための梁モデル、建物スパン数を主要因とした多スパンモデルをそれぞれ新たに試設計し、中小地震時の弾性状態における上下動特性のさらなる検討として、①基本振動特性—固有値解析による一次固有周期 T_1 の検討及び定式化、②基本入力特性—最大応答軸力係数による入力量評価、さらに③基本応答特性—最大応答加速度及び変位、等の耐震設計に関する基礎的な検討を行い、既報^{6,7)}の結果を含めて行った考察結果を報告する。

2. 検討条件

2.1 試設計モデル ①モデル群

試設計モデルは事務所ビルを想定した高さ4.5m以下(層の高さは1階が4.5m、基準階が3.6m)の試設計中低層PC骨組構造群(1から8、10、12層の全10モデルで、鉄筋コンクリート以下RCと略記—造柱及びPC造梁より構成)である。PC梁のスパンは

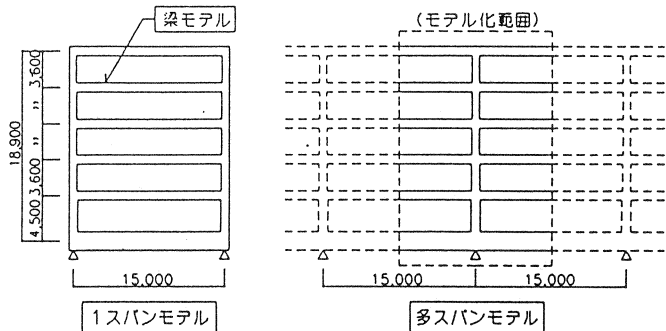


図-1 試設計モデル例(5層モデル)

15mとし、パラメータとしてスパン数を両極端である1(既報⁷⁾に同じ)及び多(無限)スパンとした。図-1に5層のモデルを例示する。②モデルの柱・梁断面諸元 PC梁はせいをスパン長さの約1/17である90cmとし全モデル共通とした。梁巾は層によって55から70cmとした。RC柱は骨組性能を直接支配する要因である柱軸力比及び曲げ・せん断耐力に着目し、設計用ベースシア係数を0.30、分布形をAi分布¹⁾として得られる設計用せん断力を基に設定した。コンクリート材料は柱をFC27、梁をFC36とした。

2.2 振動解析モデル化 試設計モデルを以下の3つの振動解析モデルに置換した。①梁モデル(GD、図-2(a)) PC梁自体の振動特性を検討するために、試設計モデルを構成するPC梁を取り出して線材置換し、材軸方向に10分割して質点を設け、負担面積による質量と上下方向の自由度を与えたモデルである。パラメータは梁端部の拘束条件で、固定、ピン支持、剛性低下(参考用:部材の塑性化による剛性低下の影響を見るために梁端部の剛性を初期剛性の1/3に低下させたもの)とした。②骨組系モデル(1スパンを1FR、多スパンをMFR、図-2(b)) 骨組構造としての挙動を把握するためのモデルで、RC柱を線材置換してGDモデルを接続したモデルである。また、③質点系モデル(同1LM、MLM、図-2(c)) 建物全体の挙動を簡略的に把握するためのモデルで、各層を1質点とし、層重量と柱の軸方向剛性のみから得られる上下方向の層剛性によるモデルである。

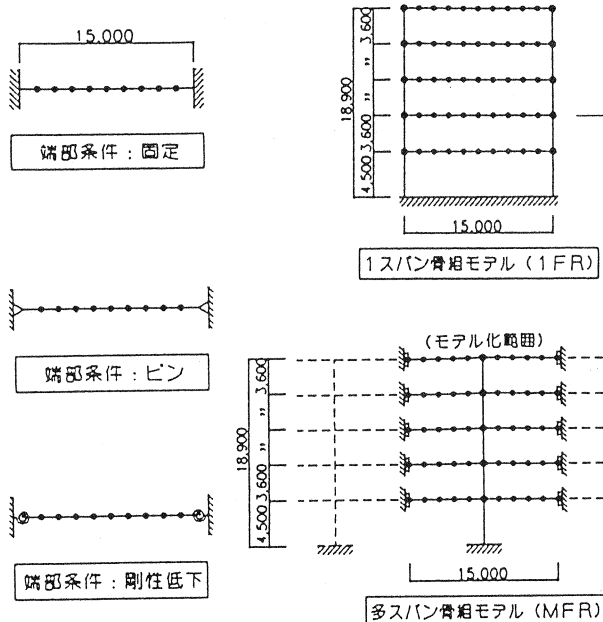


図-2(a) 梁モデル

図-2(b) 骨組系モデル例(5層モデル)

表-1 地震動入力条件

地震波名称	最大入力加速度	略称
EL-CENTRO 1940UD	50cm/s ²	ELCN波
TAFT 1952UD		TAFT波
HACHINOHE 1968UD		HACH波

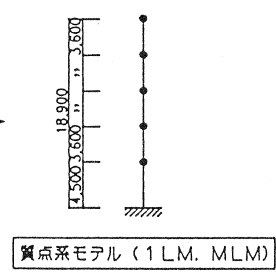


図-2(c) 質点系モデル例(5層モデル)

2.3 地震動入力条件 現行法規定における中小地震時の水平方向入力レベルは、最大入力加速度で80~100cm/s²である¹⁾。また、水平と上下方向の入力加速度の大きさの比率は0.5から0.7とされている⁵⁾。そのため、本検討では中小地震時の上下方向入力条件を加速度で規定し、最大入力加速度を100cm/s²の0.5倍である50cm/s²とし、地震動波形を表-1に示す標準波3波とした。

3. 基本振動特性

3.1 検討方針 固有値解析によって得られる一次固有周期T₁から、PC梁(GDモデル)、骨組系(FRモデル)及び質点系(LMモデル)の基本振動特性を考察する。

3.2 解析結果及び考察 ①PC梁の一次固有周期

図-3のGDモデルによるPC梁の中(cm, せいは90cmで共通)と一次固有周期T₁(秒)の関係(梁中が55cmで2点あるのは、屋上階(大きな値)と基準階で質量条件が異なるため)によると、全体に梁中が大きいほどT₁は小さくなる傾向が見られるが顕著ではない。これはPC梁の曲げ剛性に考慮した床スラブの有効巾(RC規準による)の影響の方が、梁巾の変動(55から70cmの15cm)の影響よりも大きいと推察される。また、梁端部の拘束条件について見ると、固定支持; T₁は0.111~0.092秒(振動数F₁=1/T₁では、9.0~10.9Hz)、剛性低下; T₁は0.137~0.114秒(同7.3~8.8Hz)、ピン支持; T₁は0.242~0.201秒(同4.1~5.0Hz)で、端部の固定度が低下するにつれてT₁は大きくなる傾向が明瞭である。以上より、T₁が固定支持で0.10秒程度であり、固定度が低下することによる最大変動は約1/2であることにPC梁の特性を見ることができる。

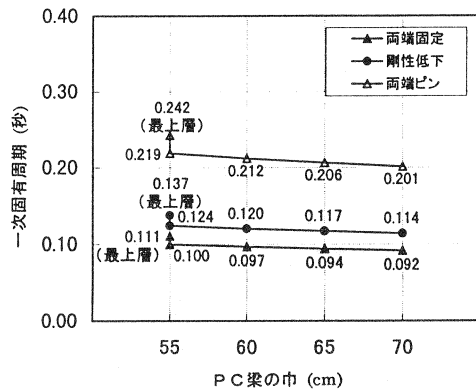


図-3 GDモデルによるPC梁の一次固有周期

②質点系モデルの一次固有周期 図-4のLMモデルによる一次固有周期 T_1 (秒)と建物高さ h (m)の関係にはおおよそ線形関係が見られ、 h が大きくなるほど T_1 は大きくなる。同じ高さのモデルで1LMとMLMを比較すると、MLMが全体に1LMの結果より大きい傾向(約1.3倍)を示している。両モデルがスパン数に関する条件の両極端であることから、同図の結果にスパン数の違いによる T_1 の変動領域が建物高さ毎に示されている。また、同図に併記した T_1 の h に関する直線の傾き(最小自乗法による)は0.00219(1LM)と0.00274(MLM)で、既報⁸⁾に示す水平方向の一次固有周期提案式 $T_1=0.03h$ に比べると、その約1/11~1/14である。

③骨組系モデルの一次固有周期 図-5に、FRモデルによる一次固有周期 T_1 (秒)と建物高さ h (m)の関係を示す。同図にはLMとFRモデルの振動解析モデル化の違いによる T_1 の差異を明確にするために、図-4のLMモデルの結果も併記した。FRモデルの結果を見ると、1FRの方がMFRモデルよりも大きな値を示し、1FRでは h に関係せずおおよそ一定値0.16秒である。

これは1FRの全体一次モードは各モデル共に最上層の梁の卓越モードで、その梁の固有周期が共通に現れるためである。一方、MFRでは1FRのような傾向が薄れ、 h の増加につれて値は漸増する。また、LMとFRモデルと比較すると、LMモデルでは梁の卓越モードが評価されないことからFRモデルに見られる傾向は得られず、その差は低層モデルで顕著であることがわかる。以上より、LMモデルとFRモデルの T_1 の差異にPC梁の振動特性の影響が顕著に見られたことから、LMモデルを用いて上下動の検討を簡略的に行うにはPC梁の卓越モードを併せて評価する必要があることがわかる。

4. 基本入力特性

4.1 検討方針 質点系(LM)モデルを用いて、表-1に示す地震動入力条件による時刻歴弾性応答解析を行い、得られた最大応答値から基本入力特性を考察する。なお、3.の検討によればLMモデルの結果には梁の卓越モードの影響を考慮する必要があるため、ここでの結果は5.のFRモデルによる基本応答特性を考察するための基礎資料と位置づける。

4.2 解析方法 ①振動解析モデル 検討対象は質点系(LM)モデルで、1スパン-1LMモデル及び多スパンモデル-MLMの全20モデルである。②解析手法 時刻歴弾性応答解析とし、解析刻みは0.002秒とした。減衰条件は振動数比例型の内部粘性減衰とし、一次の h を2%と仮定した。③検討対象は、最大応答加速度、変位、最大応答軸力係数(水平動においてせん断力係数に対応するもの)とした。

4.3 解析結果及び考察

①モデル頂部の最大応答加速度と建物層数 図-6(a)の1LM及びMLMモデルのモデル頂部の最大応答加速度(cm/s^2)と建物層数の関係によると、全体に応答値は建物層数が大きくなるにつれて漸増する傾向を示し、各波共に8層以下の低層モデルではMLMの応答値が大きい。波形別ではELCN波が卓越し最大値は1LMで10層モデルの 447cm/s^2 、MLMで6層モデルの 402cm/s^2 である。最大入力加速度 50cm/s^2 に対して加速度応答倍率は8~9である。

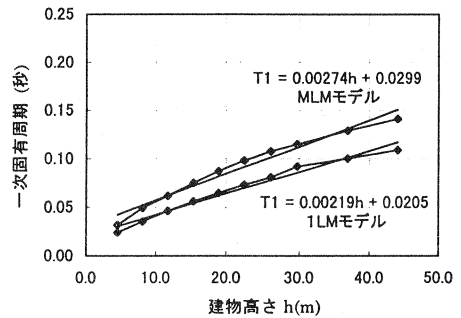


図-4 LMモデルによる一次固有周期

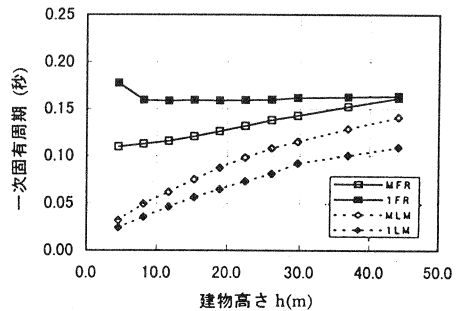


図-5 FRモデルによる一次固有周期

②モデル頂部の最大応答加速度と建物一次固有周期

図-6(b)のモデル頂部の最大応答加速度と建物一次固有周期 T_1 (秒)の関係は、(a)の建物層数による傾向とは大きく異なる。各波共に両モデルの結果は T_1 で表示することによって重なり、各波形の最大値は入力波形の卓越周期帯に相関するものと推察される。特に ELCN 波の結果では $T_1 = 0.10$ 秒近傍でのピーク値に入力波形特性が明瞭に示されている。

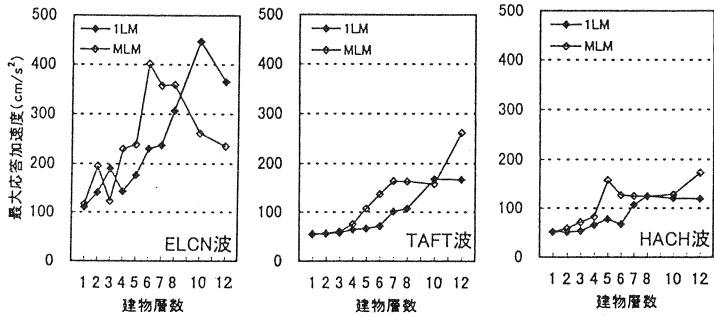


図-6(a) LMモデルによるモデル頂部の最大応答加速度と建物層数

③モデル頂部の最大応答変位

図表示は省略するが、最大応答変位は建物層数が大きくなるにつれて滑らかに増大し、1LMとMLMを同一層で比較すると一部を除きMLMが1LMより応答変位量が大きい傾向が得られた。1LMの最大値はELCN波の10層モデルの0.10cm、MLMはTAFT波による0.14cmである。

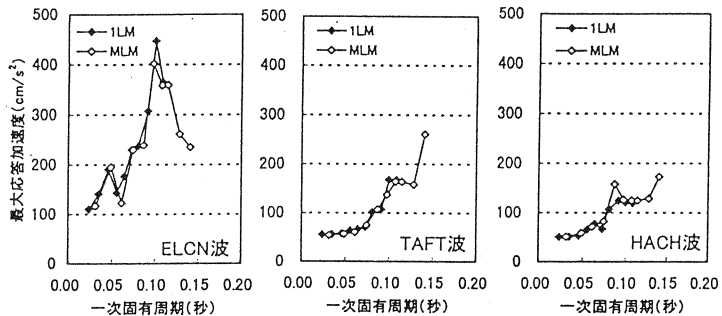


図-6(b) LMモデルによるモデル頂部の最大応答加速度と建物一次固有周期

④1層の最大軸力係数と建物一次固有周期 本検討で定義した軸力係数は、最大応答柱軸力を長期柱軸力で除した値で、水平動におけるせん断力係数に対応するものである。特に1層の応答量はベースシア係数と同様に直接基本入力特性を示すものと考えられる。図-7に1LM及びMLMで得られた1層の最大応答軸力係数と建物一次固有周期 T_1 (秒)の関係を示す。全体傾向はモデル頂部の最大応答加速度の傾向と同様であり、両モデルの結果は各波共に T_1 による表示によって重なっている。波形別では ELCN 波の結果が卓越し、最大値は1LMで10層モデルの0.27、MLMで6層モデルの0.27であり、最大入力加速度 50cm/s^2 で生じる基本入力量である。

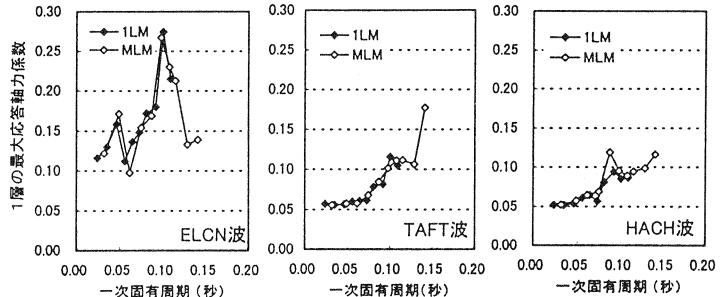


図-7 LMモデルによる1層の最大軸力係数と建物一次固有周期

5. 基本応答特性

5.1 検討方針 骨組系(FR)モデルを用いて、4.に同じく表-1の地震動入力条件下での時刻歴弾性応答解析にて得られた最大応答加速度、変位及び軸力係数から骨組の基本応答特性を考察する。

5.2 解析方法 ①振動解析モデル 検討対象は骨組系(FR)モデルで、1スパン-1FRモデル及び多スパンモデル-MFRの全20モデルである。②解析手法 時刻歴弾性応答解析とし、解析刻みは0.002秒とした。減衰条件は振動数比例型の内部粘性減衰とし、骨組系モデルであることから4.のLMモデルより大きな $h_1 = 3\%$ を仮定した。③検討対象は、最大応答加速度、変位、最大応答軸力係数とした。

5.3 解析結果及び考察

①最大応答加速度と建物層数

図-8(a)の1FR及びMFRモデルの梁中央に生じた最大応答加速度(cm/s^2)と建物層数の関係によると、ほぼ一定値を示すELCN波のMFRを除き、建物層数が大きくなるにつれて漸増する傾向を示す。波形別ではELCN波が大きく卓越し、最大値は1FRの12層の 414cm/s^2 で、加速度応答倍率では約8倍である。4.のLMモデルの結果と比較すると最大値は同程度であるが、全体にここでの結果の方が大きい値が得られた。モデルによる差異はTAFT波及びHACH波にはほとんど見られず、ELCN波の結果に顕著で、その傾向は建物層数の増大につれて1FRの値が増大することで大きくなるのがわかる。

②最大応答加速度と建物一次固有周期 図-8(b)の1FR及びMFRの梁中央に生じた最大応答加速度と建物一次固有周期 T_1 (秒)の関係によると、MFRの結果はモデルの T_1 に従って分布し、波形の入力特性が顕著に見られる(特にELCN波の $T_1=0.10$ 秒近傍)が、1FRの場合には図-5に示したようにモデルによらず T_1 はほぼ一定であるために、結果は縦軸におおよそ平行で応答値の変動のみが示されている。

③最大応答変位と建物層数 図-9の最大応答変位(cm)と建物層数の関係によると、最大応答変位は建物層数が大きくなるにつれて漸増する傾向があり、最大値は、TAFT波による1FRの12層で 0.22cm (鉛直荷重による長期変位は 1.05cm)である。

④1層の最大応答軸力係数と建物層数 図-10(a)の最大応答軸力係数の全体傾向を見ると、TAFT波及びHACH波では、1FRでは建物層数の大小による差異が見られずおおよそ一定値を示すが、MFRでは建物層数が大きくなるにつれて漸増傾向が見られる。また、ELCN波では、1FR及びMFR共に建物層数が大きくなるにつれて減少傾向が見られる。最大値はMFRでTAFT波による12層モデルの 0.133 、1FRでTAFT波による1層モデルの 0.120 である。このことから中小地震時に対応すると仮定した 50cm/s^2 入力で、建物全体で見ると最大で長期鉛直荷重の約14%程度、平均的に約10%程度の変動が生じることがわかる。

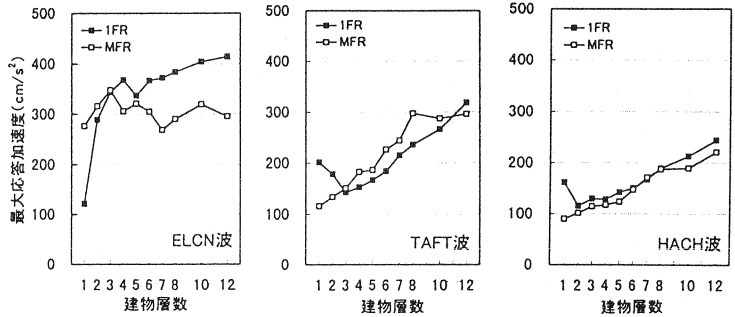


図-8(a) FRモデルによる梁中央の最大応答加速度と建物層数

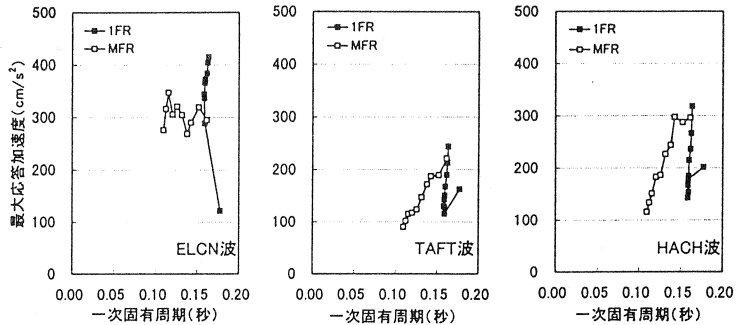


図-8(b) FRモデルによる梁中央の最大応答加速度と建物一次固有周期

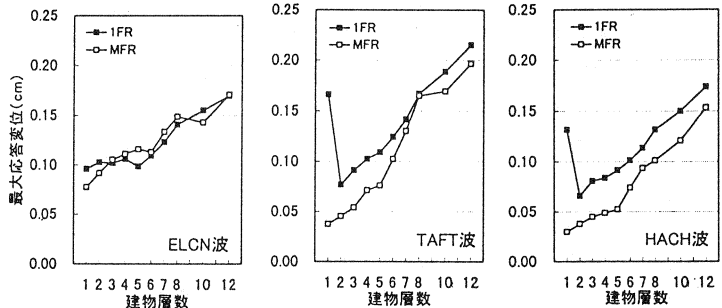


図-9 FRモデルによる梁中央の最大応答変位と建物層数

⑤ 1層の最大軸力係数と建物一次固有周期

図-10(b)によると、ELCN波を除いて、全体的に建物一次固有周期 T_1 (秒)が大きくなるにつれて最大軸力係数は漸増するが、ELCN波では漸減する傾向が見られる。これは低層モデルの応答値が $T_1=0.10$ 近傍での入力波形のピーク値に対応するものと推察される。

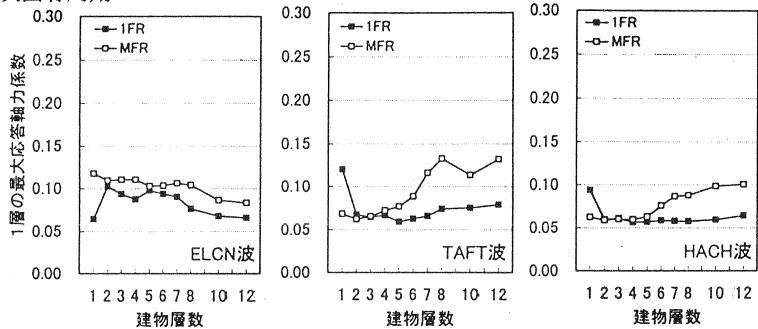


図-10(a) FRモデルによる1層の最大応答軸力係数と建物層数

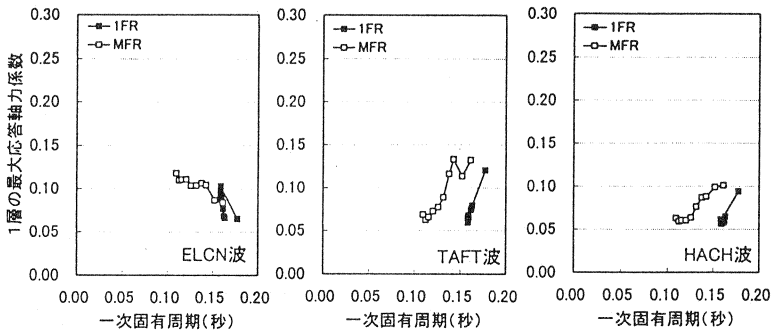


図-10(b) FRモデルによる1層の最大応答軸力係数と建物一次固有周期

6. まとめ

中小地震時(入力レベル: 50cm/s^2)のPC骨組構造の上下動応答特性について、基本振動、入力及び応答特性に関する検討を行った。限られた検討ではあるが、得られた結果を以下に要約する。

- 1) 基本振動特性を示す上下方向一次固有周期 T_1 は、PC梁が0.10秒程度である。スパン数をパラメータとした質点系モデルによる建物高さ h に関する定式の係数は0.0022から0.0027で、水平方向に関する既提案の係数0.03に対して約 $1/11 \sim 1/14$ である。
- 2) 基本入力特性を直接示す柱の最大応答軸力係数(水平振動のベースシア係数に相当)から中小地震時(50cm/s^2)の入力特性を見ると、参考とすべき質点系モデルによる基本値は0.27程度であるが、骨組系モデルの場合は平均的に0.10程度が得られた。
- 3) 基本応答特性を代表する最大加速度応答値は、 T_1 によって波形毎の入力特性に相関して得られた。基本値である質点系モデルの最大値は 450cm/s^2 程度、PC梁の振動モードを考慮した骨組系モデルで 420cm/s^2 程度である。これらの値を加速度応答倍率で見れば約9程度である。

謝辞: 本研究に際して、大阪大学 大野義照教授および中塚佑助教の各先生方、株式会社大林組本店建築設計部の橋本康則部長には終始変らぬご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築センター;「建築物の構造規定」 1997年
- 2) 日本建築学会;「地震荷重—その現状と将来の展望」 1987年
- 3) 日本建築学会;「建築物荷重指針・同解説」 1993年
- 4) 日本建築学会;「多次元入力地震動と建造物の応答」 1998年
- 5) 日本建築学会;「動的外乱に対する設計—現状と展望—」 1999年
- 6) 吉橋秀和 他;「中低層PC骨組構造の上下動応答特性に関する基礎的検討 その1、2」 日本建築学会大会学術講演梗概集 1998年9月
- 7) 吉橋秀和 他;「プレストレストコンクリート骨組構造の上下動応答特性について」プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 第8回論文集 1998年10月
- 8) 深野慶 他;「PC構造の終局強度型設計法に関する基礎研究(その4、5)」 日本建築学会大会学術講演梗概集 1996年9月