

(34) 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

(株)大林組本店建築設計部 正会員 ○ 吉橋 秀和
 大阪大学大学院生 池宮 学
 大阪大学大学院助手 岸本 一歳
 (株)大林組本店建築設計部 深野 慶

1. はじめに

建物の地震時の動的挙動は、水平振動及び上下振動を併せた多次元的な評価が必要である⁴⁾。このうち上下振動については、設計用鉛直震度等に関する提案²⁾や、大スパン床構造及び架構、張出しの大きな片持ち梁等に関する具体的な留意点の指摘等³⁾が見られるものの、上下地震動の入力条件、建物・基礎の構造性能評価及び減衰条件の設定、応答量の評価尺度、さらには水平・上下応答量の合成等に関する基本的な研究成果は水平振動に比較すると十分とはいえない。

本研究は、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)構造の上下振動に関する基礎的検討を、中低層PC骨組構造の中小地震時を対象に試みたものである。すなわち、試設計モデル群を用いた第一段階の解析的検討として、①基本振動特性-支持地盤特性を考慮した固有値解析による一次固有周期 T_1 の定式化、②基本応答特性-最大応答加速度及び変位、さらに③基本入力特性-最大応答軸力係数による入力量評価、等について考察したものである。

2. 中低層PC骨組モデル

2.1 試設計モデル 本研究で対象とした建物は、事務所ビルを想定した高さ4.5m以下(1層高さ4.5m、基準層高さ3.6m)、1スパン(スパン長1.5m)の試設計中低層PC骨組構造モデル群(1から8、10及び12層の全10モデル、梁はPC造、柱は鉄筋コンクリート(以下RCと略記)造、断面諸元及び設定方法は文献7、8参照)である。これらのモデル群を以下の検討目的によって、質点系及びフレームモデルによる振動解析モデル群に置換した。図-1に5層のモデルを例示する。

2.2 振動解析モデル ①質点系モデル 質点系モデルは、建物全体の挙動を把握するためのモデルで、上部構造を各層1質点とし、上下方向の層剛性を柱の軸方向弾性剛性としたものである。基礎部分には、基礎固定条件に加えて、基礎上下方向スウェイ重量と支持地盤特性による上下方向地盤バネ(2.3参照)を考慮したモデル群(全40モデル)である。②フレームモデル フレームモデルはPC梁の挙動を主として把握するためのモデルで、試設計モデルの中の5、8及び12層モデルを、基礎固定条件、柱・梁部材

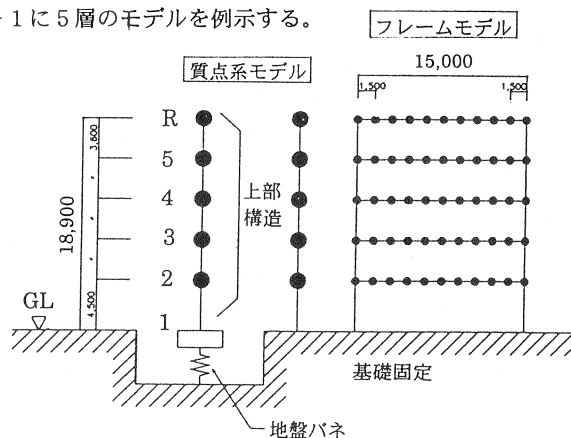


図-1 振動解析モデル(5層)

を曲げ・軸力・せん断弾性剛性を有する線材に置換したモデルである。PC梁の振動性状を把握するために、各層の梁を長さ方向に10分割(各層11質点)し、梁剛性を断面諸元によるもの-フレームモデル、梁を剛(解析的には剛性を1000倍)と仮定したもの-フレーム(梁剛)モデル、の2種とした。

2.3 上下方向地盤バネ 上下方向地盤バネは、各柱毎に直接基礎を次の3種の地盤条件について試設計しバネ定数を求めたものである。①支持地盤条件 地盤の許容支持力レベル毎に設定することとし(建築

基準法施行令第93条を参考)、岩盤(長期許容支持力度 100 t/m^2 、せん断波速度 600 m/s と仮定)、固結砂(同 50 t/m^2 、 350 m/s)及び砂礫(同 30 t/m^2 、 200 m/s)の3種とした。②基礎形状とバネ定数 図-2に各モデルの基礎形状(正方形の一辺)及びバネ定数を示す。一辺の大きさは、最小値が 1.1 m (1層モデル、岩盤)、最大値が 5.1 m (12層モデル、砂礫)である。バネ定数の算定式には種々の提案が見られるが、ここでは地盤状態を半無限完全弾性体(理想地盤)と仮定した实用計算式⁶⁾によって算定した。

得られたバネ定数の最小値は 359 t/cm (1層モデル、砂礫)、最大値は

4159 t/cm (12層モデル、岩盤)である。図-2によると、バネ定数は支持地盤の支持力が大きいほど大きく、層数の増加にほぼ比例して増大することがわかる。これらの傾向を検討するために、図-3に地盤-基礎の相互作用を周波数領域において考慮した薄層要素法による結果(s)で表示、薄層分割数は20とし、基礎の深さ、耐震基盤面をそれぞれ地盤面より2及び20mと仮定)を併記した。ここでの实用計算式の結果と比較すると、薄層要素法の結果は同一地盤で約2倍程度の値であり、解析仮定の差異の割には両者に比較的良好な対応が見られた。③基礎上下方向スウェイ重量 試設計した基礎の形状に対応して求めた。

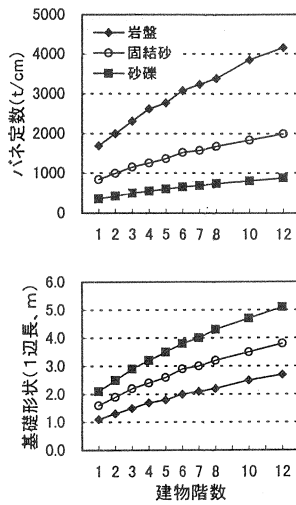


図-2 基礎形状及びバネ定数

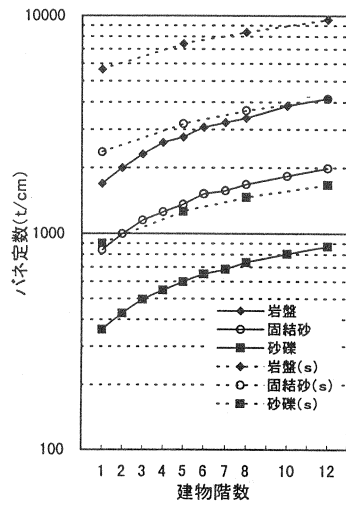


図-3 バネ定数の比較

3. 基本振動特性

3.1 上下方向一次固有周期 T_1 の検討 上下方向の基本振動特性を把握するために、指標値と考えられる一次固有周期 T_1 について検討する。1~12層の質点系モデル、5、8及び12層のフレームモデル及びフレーム(梁剛)モデルを対象に、弾性固有値解析を行って T_1 を求めた。図-4に各モデルの T_1 と建物高さ h との関係を示す。同図によると、全体に一次固有周期 T_1 は建物高さ h の増加と共に滑らかに単調増加する傾向が見られ、フレーム(梁剛)モデルと質点系モデルの間には梁の剛性(両者ともほぼ梁は剛の設定、剛性無限大が質点系モデル)を介して良好な対応が見られる。一方、フレームモデルの T_1 は 0.186 秒 (5層)~ 0.194 秒 (12層)であり、他のモデルと異なった値が得られた。これは同モデルにおいて、大スパンPC構造の特徴として、柱の軸変形を含んだ形で最上層の梁のモードのみが部分的に卓越することに対応する値である(文献9参照)。このことは図-4において、同モデルの場合 h の増大による T_1 の増加傾向が小さいことから裏付けられる。従って、水平振動と同じように、 T_1 を簡便的に h による指標値とするためには、ここでの質点系モデルで得られた T_1 を基本値とすることが有用と考えられるが、それにスパン長さ等の種々の条件下での梁の振動モードの影響を別途併せて評価する必要があると推察される。

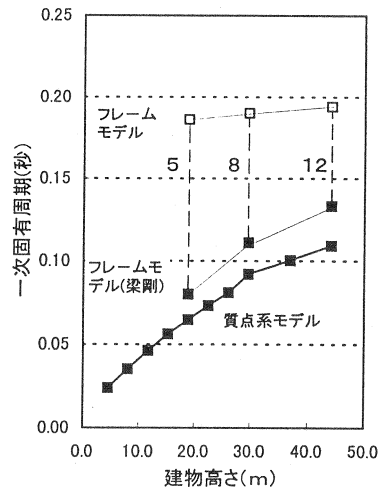


図-4 一次固有周期の比較(基礎固定)

3.2 上下方向一次固有周期T1の定式化 質点系モデル
 で得られた一次固有周期T1(秒)と建物高さh(m)値について
 回帰分析を行い、T1の定式化を試みた。得られた結果を図-
 5に示す。各直線は、

$$T1 = 0.00219 h + 0.0205 \quad (1) \text{式 基礎固定}$$

$$T1 = 0.00194 h + 0.0491 \quad (2) \text{式 岩盤}$$

$$T1 = 0.00191 h + 0.0722 \quad (3) \text{式 固結砂}$$

$$T1 = 0.00209 h + 0.1158 \quad (4) \text{式 砂礫}$$

で示される。同図によると、hの係数である直線の傾きには支持地盤条件の影響は顕著でなく、おおよそ0.002と見ることができる。一方、切片には支持地盤条件による差異(地盤剛性が大きい程切片の値は小さい)が明確に見られ、その影響はhに独立で、且つここでの検討範囲(4.5m以下)でのhによる変動とはほぼ同等である(4式の砂礫の場合)。また、既報⁷⁾に示す水平方向の提案式である $T1 = 0.03 h$ に比べると、上下方向のT1に係るhの係数は、その約1/15程度の値である。

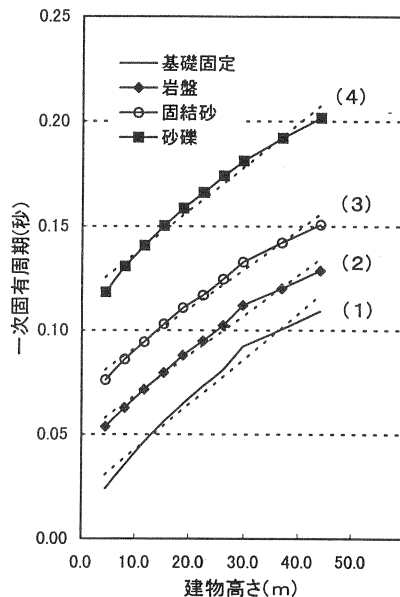


図-5 一次固有周期の定式化

4. 基本応答特性及び入力特性

4.1 時刻歴応答解析 時刻歴応答解析を行い、基本応答特性及び入力特性を検討するための最大応答量等を求める。①振動解析モデル 質点系モデル(全10モデルに、地盤バネを基礎固定を含めて4種類とした全40モデル)及びフレームモデル(5、8及び12層の全3モデル、基礎固定)を対象とする。

表-1 地震動入力条件

地震波名称	記録時間(sec)	解析時間(sec)	最大入力加速度(cm/s ²)	略称
EL-CENTRO 1940UD	53.78	20.0	50.0	ELCN波
TAFT 1952UD	54.26	20.0		TAFT波
HACHINOHE 1968UD	19.99	19.9		HACH波

②地震動入力条件 現行法規定における短期許容応力度設計に対応する水平方向地震動入力レベルは、最大入力加速度で80~100 cm/s²である¹⁾。また水平と上下方向の地震動の入力加速度の大きさの比率については0.5から0.7との研究成果が示されている⁵⁾。そのため、ここでは中小地震時上下方向入力条件を加速度で規定し、最大入力加速度を100 cm/s²の0.5倍である50 cm/s²とし、地震動波形を表-1に示す標準波(上下方向成分の3波)とした入力条件を設定した。なお、フレームモデルには、質点系モデルで応答が卓越したELCN波及びTAFT波の2波を入力条件とした。③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。質点系モデルの減衰条件は、上部構造を振動数比例型の内部粘性減衰とし、一次のh1を2%、地盤バネは10%の各部減衰を仮定した。また、フレームモデルは質点系モデルと同じく上部構造を振動数比例型の内部粘性減衰とし、一次のh1を3%と仮定した。④検討対象 最大応答加速度、変位、最大応答軸力係数(水平動において層せん断力係数に対応するもの)とした。

4.2 基本応答特性 最大応答加速度及び変位から基本応答特性を検討する。①最大応答加速度 図-6に質点系モデルのモデル頂部最大応答加速度と一次固有周期T1の関係を示す。同図には、各波の加速度応答スペクトル(h=2%)を併記した。最大値は同じモデルでも支持地盤条件(基礎固定から砂礫)によるT1の変動で得られる周期帯が異なり、加速度応答スペクトル値に前後する形であることがわかる。すなわち、TAFT波及びHACH波の結果は最大値で250 cm/s²程度であるが、ELCN波の結果では、最大値は10層モデルの基礎固定で450 cm/s²程度(加速度応答倍率では約9倍)となり、T1=0.10秒近傍で

のピーク値に対応していることがわかる。一方、図-7のフレームモデルによる梁中央の最大及び最小応答加速度とT1の関係による

と、各値はモデル層数によらずPC梁によって規定される周期(図-4)に集中する形である。ELCN波の結果は併記した加速度応答スペクトル値を上回り、100から200 cm/s^2 程度の値を示し、併記した質点系の最大値を下回った値が得られている。TAFT波による結果では、12層フレームモデルで370 cm/s^2 程度の値が得られ、加速度応答倍率は約7.5倍で、併記した質点系の最大値を大きく上回った値が得られている。このように、PC構造のような大スパン構造の梁の最大応答加速度を求めるためには、柱軸剛性による建物全体の上下方向基本振動特性だけでなく、PC梁の特性を直接評価する形での検討が必要であると推察される。

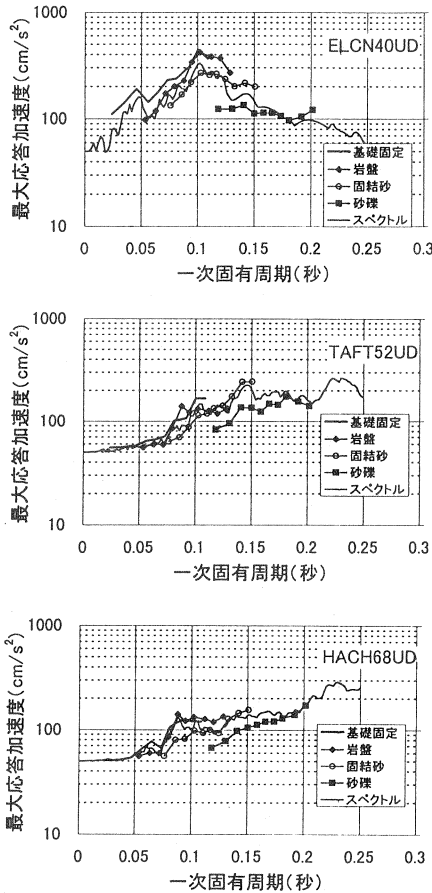


図-6 モデル頂部最大応答加速度分布 (質点系モデル)

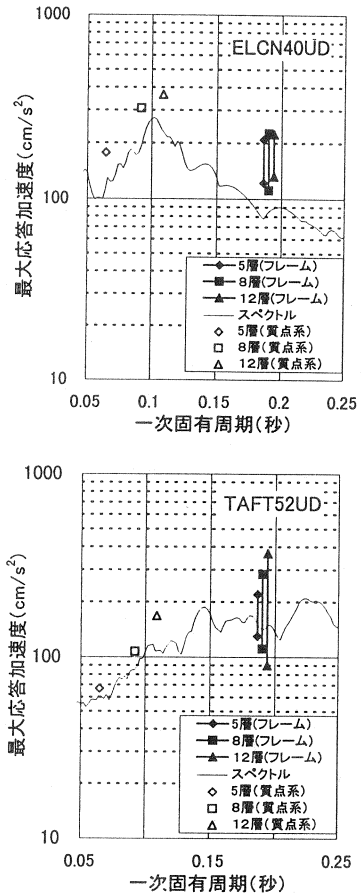


図-7 梁中央応答加速度分布 (フレームモデル)

②最大応答変位 図-8に質点系モデルのモデル頂部最大応答変位とT1の関係を示す。全体的に、ELCN波によるT1=0.10秒近傍でのピーク値を除き、高さが高くなるほど大きな値を示し、波形毎の最大値は

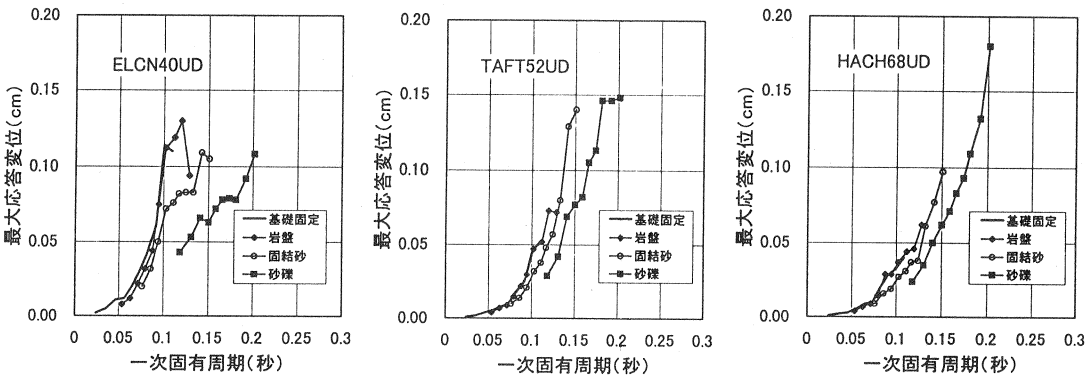


図-8 モデル頂部最大応答変位分布 (質点系モデル)

12層モデルの HACH 波による 0.18cm である。一方、図-9のフレームモデルにおける梁中央の最大及び最小応答変位と T1 の関係によると、最大値は TAFT 波による 12層フレームモデルで約 0.35 cm (鉛直荷重による長期変位は 0.86 cm) である。全体傾向は併記した変位スペクトルの傾向に関連しているが、最大加速度分布の結果のような近接した対応関係は見られない。

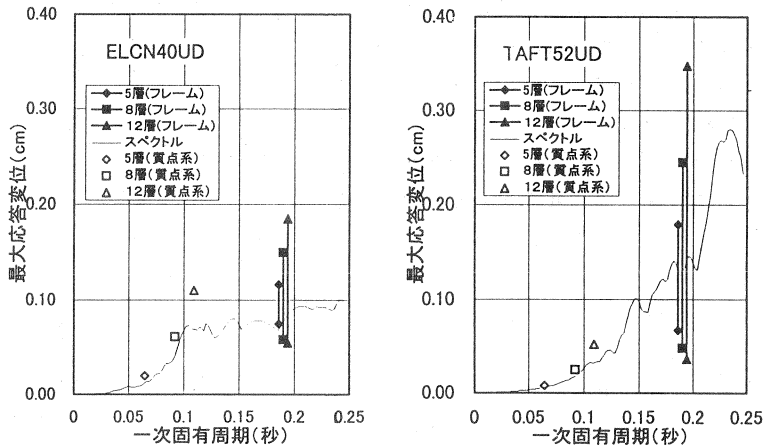


図-9 梁中央応答変位分布 (フレームモデル)

4. 3 基本入力特性 モデル各層の柱に生じる最大応答軸力を鉛直荷重時軸力で除して軸力係数を求め、同係数の傾向から基本入力特性を検討する。①最大応答軸力係数 図-10は、モデル頂部応答加速度の最大値を示した10層の質点系モデル (図-6参照、最大値は基礎固定、ELCN 波) の最大応答軸力係数を、モデルの高さ方向の分布として地盤種別毎に示したものである。軸力係数は高さ方向に滑らかな増大傾向を示し、係数値には地盤種別による明瞭な差異、すなわち、全層で基礎固定の結果が最大値、砂礫が最小値を示し、その大小の差異は 3.0~4.5 倍程度であることがわかる。頂部の最大値は 0.45 (図-6 の最大応答加速度約 450 cm/s^2 に対応) で、鉛直荷重による軸力係数が 1.0 であることを考慮すると、本研究の中小地震時入力 (50 cm/s^2 入力) の基では各層の柱に引張力は生じずに、最大で約 45% 程度の柱軸力変動が生じていると見ることができる。(10層質点系モデル)

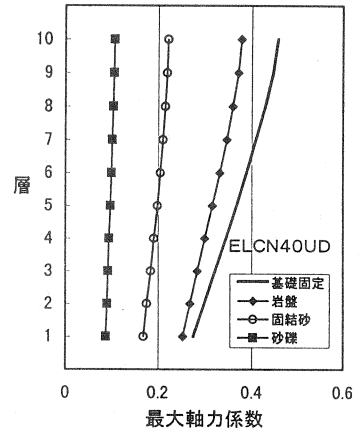


図-10 最大応答軸力係数 (10層質点系モデル)

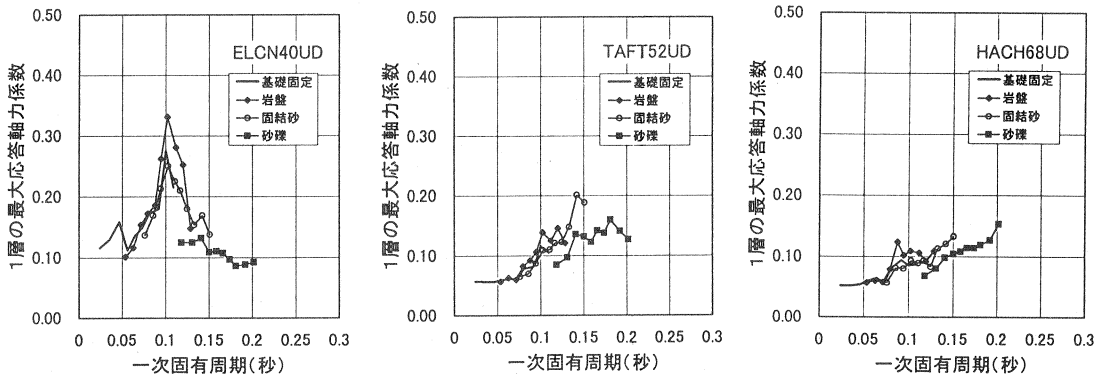


図-11 1層の最大応答軸力係数 (質点系モデル)

②1層の最大応答軸力係数 図-11は、質点系モデルの1層の最大応答軸力係数と T1 の関係を各波形別に示すもので、水平振動評価におけるベースシア係数に対応するものである。全体の傾向は図-6 に示し

たモデル頂部最大応答加速度分布に相関するもので、軸力係数の最大値は7層モデルの ELCN 波による $T_1=0.10$ 秒近傍での約 0.30 である。従って同じく中小地震時入力においては、PC 梁の振動モードを考慮しない建物全体としての基本入力特性は、最大で鉛直荷重の約 30% 程度であると考えられる。一方、図-12の基礎固定条件での質点系モデル、フレームモデル及びフレーム(梁剛)モデルの1層の最大応答軸力係数と T_1 の関係においては、フレームモデルの

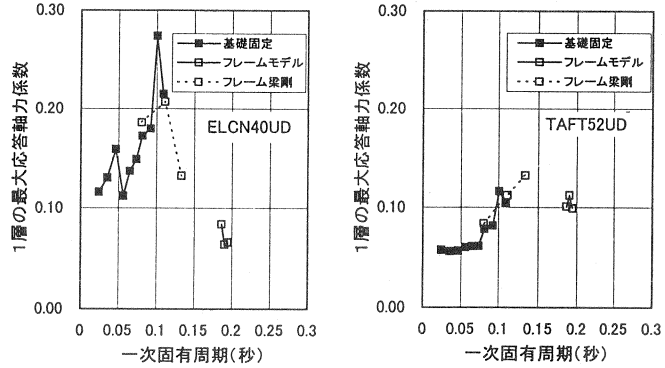


図-12 1層の最大応答軸力係数比較
(質点系モデルとフレームモデル)

値が約 0.10 程度 (TAFT 波) であり、図-4 の関係を介して図-6 及び 11 のスペクトルによる傾向に相関している。従ってここでのスパン長さ 15m の PC 構造においては、水平振動のベースシア係数に同じ考え方をすると、同係数にて上下方向の基本入力特性は約 0.10 程度であると考えられる。

5. まとめ

中低層 PC 骨組構造の上下動特性に関する基礎的検討として、中小地震時の上下動基本振動特性、応答特性および入力特性に関する検討を行った。限られた検討ではあるが、得られた結果は以下に要約される。

- 1) 基本振動特性の指標値として、支持地盤条件をパラメータに加えた固有値解析から、柱剛性に立脚した上下方向一次固有周期 T_1 の建物高さ h に関する基本算定式の定式化を試みた。これらの式で h に関する係数は約 0.002 で、 T_1 に対する支持地盤の影響は h に独立で且つ h による変動とほぼ同等である。
- 2) 基本応答特性を代表する最大加速度応答値は、建物高さ h 及び支持地盤条件によって定まる T_1 によって、波形毎の加速度応答スペクトル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約 450 cm/s^2 (10層)、PC 梁の振動モードを考慮した最大値は約 370 cm/s^2 (12層、梁中央) である。これらの値を加速度応答倍率から見れば、約 9 および 7 である。
- 3) 基本入力特性を直接示す柱の応答軸力係数の検討から、中小地震時の入力レベル (50 cm/s^2) に対する入力特性として建物総重量に対する係数 (水平振動のベースシア係数に同じ係数) を見ると、質点系モデルによる基本値として約 0.30 程度、PC 梁の振動モードを考慮した場合 (本研究での PC 梁のスパン長さが 15m の場合) 約 0.10 程度がそれぞれ得られた。これらの値は 2) の加速度応答値と共に、耐震設計上での考慮すべき値である。

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授の各先生方、株式会社大林組本店建築設計部の橋本康則部長、守安一平氏には終始変わらぬご指導を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築センター；「建築物の構造規定」平成 6 年 9 月
- 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の展望」1996 年
- 6) 例えば 山原浩；「環境保全のための防振設計」1974 年
- 7) 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 1~5)」日本建築学会大会学術講演梗概集 1996 年 9 月 他
- 8) 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
- 9) 池宮学 他；「プレストレストコンクリート骨組構造の上下動特性に関する研究 その 2」日本建築学会大会学術講演梗概集 1998 年 9 月