

# 地震観測記録を説明可能な構造物の振動解析モデル構築に関する研究

名古屋大学工学部 社会環境工学科  
建築学コース福和研究室 榎原啓太

## 1. 研究の背景と目的

構造物の振動特性は、構造種別、構造形式、建物階数、平面形状、地盤条件などに大きく影響を受ける。中低層建物は、平面形状や構造特性が複雑なものが多く、解析のみから振動性状を把握することは困難である。例えば1995年兵庫県南部地震では、地動入力設計レベルを遥かに超える1000gal以上と推定される地域でも中低層建物の被害は少なかった。この事例からも設計段階における構造物の振動特性や耐力の正確な把握は困難であることが分かる。そこで本研究では、実際に観測された地震記録を説明可能な解析モデルの作成を通して、設計で十分に考慮されていない要因が建物の振動特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 対象建物及び強震観測の概要

対象建物は名古屋大学構内に立地する地上7階、地下1階の環境総合館である。構造は、地上PCaPC造、地下RC造の壁付きラーメン構造、長辺方向5スパン(49.5m)×短辺方向2スパン(16.2m)の長方形平面で整形な偏心の少ない建物であり、張間方向には現場打ちの耐震壁が取り付けられている。床は、リブ付きのPC床版をトッピングコンクリートで一体化させたハーフPC版になっている。

強震観測は、建物内8地点、地盤地表2地点、地中1地点、杭中4地点の計15地点32chの高密度観測を行なっている。観測開始から、現在までに58の地震記録が得られている。本論では、2004年9月5日23時57分に発生した紀伊半島南東沖の地震(Mj.7.4)の観測記録を用いる。



図1 対象建物外観

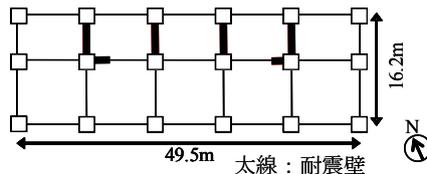


図2 基準階平面図

表1 建物概要

延床面積	5956㎡		
階数	地上7階	地下1階	
最高部高さ	33.4m	軒高	29.7m
用途	教室	実験室	
構造種別	地上PCaPC造	地下RC造	
骨組構造	桁行方向	ラーメン構造	
	梁間方向	耐震壁付きラーメン構造	
構造種別	杭基礎	PHC杭	
	セメントミルク工法		
	杭径	800φ	本数 92本
	杭長	36m, 32m	
	根入れ深さ	GL-4.0m, GL-7.2m	
柱サイズ	1000mm×1000mm		
梁サイズ	外周部	桁行方向	750mm×1500mm
		張間方向	600mm×1300mm
	中央部	750mm×1300mm	

## 3. 実測記録からみる振動特性

地震記録から確認される振動特性として構造物の固有振動数に注目する。地盤地表・1階中央・1階西端部・1階北端部・屋上中央の5点の記録から伝達関数を算出した。紀伊半島南東沖の地震における地盤-建物連成系(RF/GL)、スウェイのみを固定した基礎固定系(RF/1F)、スウェイ・ロッキングを固定した基礎固定系(RF/(1F+H0))の伝達関数を図3に示し、ピーク位置から推定された固有振動数を表2に示す。表2から、連成系とスウェイ固定系では、桁行方向の方が高い振動数であるが、ロッキングも拘束した基礎固定系では張間方向の方が高い。よって、ロッキングの振動特性への影響が大きいことがわかる。

## 4. 設計モデルによる解析

ここではまず、設計段階で作成されたモデル(以下、設計モデルと呼ぶ)の固有振動数が、実測値とどの程度異なっているかを確認する。本論中の解析には、市販ソフトウェアのRESPシリーズ(構造計画研究所)を使用する。設計では、コンクリートの設計基準強度をPC部材は柱、梁で $F_c=60\text{N/mm}^2$ 、スラブで $F_c=45\text{N/mm}^2$ 、RC部材は $F_c=30\text{N/mm}^2$ とし、剛床仮定、柱梁接合部分への剛域の設定を行っている。積載荷重には、地震用荷重を用いている。

ここでは基礎固定系としての固有値解析を行った。結果を表3に示す。これより、設計モデルと実測値の固有振動数に2割程度の大きな差があることがわかる。実測値が設計モデルよりも高い振動数を示している理由として、材料定数などが、実際には設計基準値よりも大きいこと、モデルに考慮されていない部材の剛性が効いていることなどが考えられる。これらの影響について考察していく。

表2 地震記録から推定した固有振動数

	桁行方向	張間方向
RF/GL	2.49	2.11
RF/1F	2.60	2.23
RF/(1F+H0)	2.73	2.86

(単位:Hz)

表3 設計モデルの固有値解析結果

	桁行方向	張間方向
設計モデル	2.18	2.34
実測値	2.73	2.86

(単位:Hz)

(実測値は基礎固定系での値)

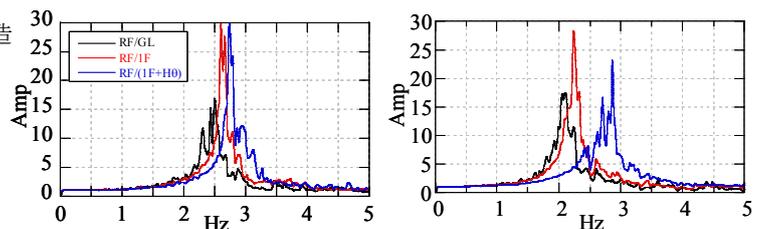


図3 紀伊半島南東沖の地震の伝達関数

## 5. モデル化における各種要因が振動特性に与える影響

設計モデルには十分考慮されていない各種要因が構造物の振動特性に与える影響を検討する。

(a) **プレストレス力**: 図4にプレストレス力の導入前後での1層目、梁間方向のスケルトンカーブの変化を記す。弾性範囲において、直線の傾きに変化は見られないことから、初期剛性は変化していないことが分かる。この傾向は全ての層について見られるため、本論中の解析では、プレストレス力導入による振動特性への影響は無いと考えられる。

(b) **積載荷重**: 設計モデルの固定荷重はコンクリート比重(25kN/m<sup>3</sup>)と各部材の体積から求め、積載荷重は地震用荷重を用いている。しかし、この値は実際の積載荷重よりもかなり大き目に評価している。本論では、地震用荷重の値を実状に近い値に置き換え積載荷重を検討した。その結果、積載荷重が設計モデルの約0.6倍になり、この値で検討する。

(c) **コンクリート強度**: 工場生産されたPC部材の材令28日時点でのコンクリート圧縮試験の結果を調査し、その平均値をPC部材のコンクリート強度として採用する。図5に例としてPC梁部材の強度分布を、表4に全部材の平均圧縮強度の調査結果をまとめる。全部材において設計基準値より大きい値であった。また、RC部材については施工後の強度上昇を見込み、2割増加させて $F_c=36\text{N/mm}^2$ として計算する。

(d) **逆梁の影響**: 対象建物は逆梁工法で建てられており、桁行方向の梁が腰壁を兼ねているため、桁行方向と梁間方向で、柱のクリアスパンと柱の剛域長に違いが生じている。これを表現するために解析モデルでは、桁行方向と梁間方向で、柱の剛域長の違うモデルを作る。図6に略図を示す。

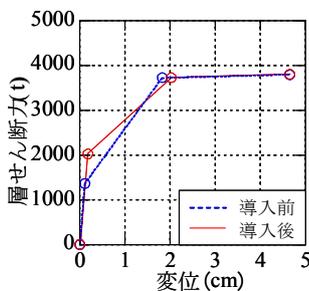


図4 プレストレス力の影響

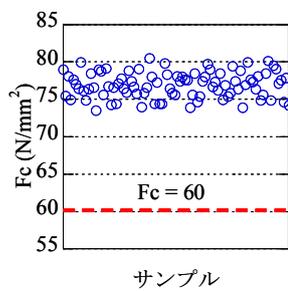


図5 梁部材のFc分布

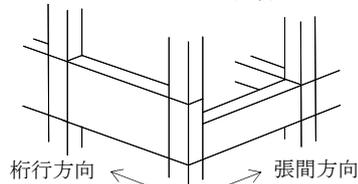


図6 クリアスパンの違い

部材名	圧縮試験平均
PC梁	76.9
PC柱	68.9
PC床	62.4

(N/mm<sup>2</sup>)

表5 各種要因が振動特性に与える影響

	桁行方向		張間方向	
	f (Hz)	剛性比	f (Hz)	剛性比
実測値	2.73	-	2.86	-
設計モデル	2.22	-	2.43	-
(b) 積載考慮	2.26	1.00	2.48	1.00
(c) コンクリート強度	2.28	1.06	2.50	1.06
(d) 逆梁の影響	2.39	1.14	2.48	1.04
(e) スラブ効果	2.24	1.03	2.48	1.04
全て考慮	2.67	1.20	2.70	1.11

(e) **スラブ効果**: 設計モデルでは、ハーフ PC のトッピングコンクリート厚さのみをスラブ厚として考慮しているが、ここでは、PC床板の厚さも考慮する。また、設計モデルでは考慮されていない、桁行方向のPC床版に取り付くりブの剛性を、断面二次モーメントが等価となる床厚に置換して考慮する。これらの要因により、断面2次モーメントは、設計モデルに比べて桁行方向の中央部の梁で約1.2倍、梁間方向の中央部の梁で約1.1倍の値になる。

(f) **動的相互作用**: 中低層構造物の振動に、特に大きく影響を及ぼす要因として地盤と建物の動的相互作用が挙げられる。表2に示したように、実測記録を見ても、相互作用を考慮することにより、固有振動数の傾向に大きな違いが表れることがわかる。そこで、杭・根入れを考慮した解析より動的地盤バネを求め、地盤-建物連成系での解析を行う。図7に動的地盤バネの解析結果を示す。Swayバネ定数に大きな違いは無いが、Rockingバネ定数は張間方向の方が1/4倍程度の値になっている。

連成系での解析は、(b)~(e)の要因を全て反映させた解析モデルに地盤バネを付加したモデルで行う。

## 6. 固有値解析の結果

以上の要因を設計モデルに反映させた解析モデルで、固有値解析を行なった。表5に、各種要因を考慮したことによる固有振動数と、設計モデルに対する層剛性の比の平均値を示す。逆梁を正確に考慮することにより、桁行方向の層剛性が大きく変化していることがわかる。方向による柱のクリアスパンの違いが大きく影響していると考えられる。

表6に連成系の解析結果を示す。張間方向の振動数が大きく低下している。これは、張間方向の方が、Rockingバネ定数が小さいことに加え、張間方向は耐震壁付きラーメン構造であるため、ラーメン構造の桁行方向よりも相互作用の影響が現れやすいことが考えられる。

## 7. まとめ

設計段階で十分考慮されていない要因を反映させて解析モデルを構築することで、地震記録から推定できる建物の実際の挙動をある程度表現できた。実建物の耐震性能を適切に評価するためには、現状で検討しきれていない要因を加え、数値解析モデルの精度を高めていく必要がある。

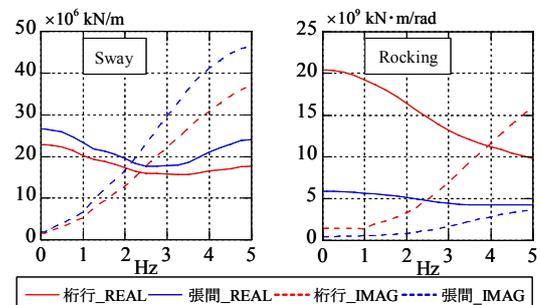


図7 地盤インピーダンス

表6 連成系での結果

	桁行方向	張間方向
実測値	2.49	2.11
解析値	2.49	2.37

(Hz)