

観測された動特性を説明可能な 構造物の振動解析モデルの構築

STRUCTURAL MODELING BASED ON OBSERVED DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A BUILDING

榊原啓太 ————— *1
飛田 潤 ————— *3

福和伸夫 ————— *2
小島宏章 ————— *4

Keita SAKAKIBARA
Jun TOBITA

Nobuo FUKUWA
Hiroaki KOJIMA

キーワード：

数値解析モデル，強震観測，固有振動数，動的相互作用，
杭基礎，インピーダンス

Keywords：

Numerical analysis model, Seismic response observation,
Natural Frequency, Dynamic Soil-structure interaction,
Pile foundation, Impedance function

Dynamic modeling of a PCaPC seven-story building is examined with comparing observed earthquake response characteristics. Some points of structural modeling, such as the evaluation of live load, stiffness of concrete, and detailed modeling of frames and slabs, are proved to be effective in natural frequency of the building. Dynamic soil-structure interaction effect is also verified with modeling of soil, pile and embedded foundation. It is important to accumulate such modeling with observed data for the evaluation and improvement of structural modeling methods

1. はじめに

構造物の設計時の検討に用いるモデルは、荷重に対する構造物の挙動の安全性を検討するものであるが、特に振動解析モデルについては実建物の動的挙動をどの程度忠実に表現できているかが、必ずしも明確ではない。筆者らは、これまでに多数の建物での地震観測や常時微動計測を継続的に行い、構造物の振動挙動に関する知見を蓄積してきたが¹⁾、その動的特性が一般的な振動モデル化と整合していない場合も多い。

最も基本的な動特性である固有振動数に関しても、設計時のモデルによる固有値解析と実測の比較では、実測値の方が高い振動数になっている場合が多い。この理由として、実際には材料定数が設計時の値よりも大きい耐力・剛性となっていること、同様に実荷重は設計荷重よりも小さいこと、さらにモデルには考慮していない二次部材などの剛性も寄与すること、などが考えられる。このように構造物の耐力・剛性や荷重を安全側で見積もることにより、実際よりも固有振動数を小さく評価することになる。このことは、動的挙動を考慮した限界耐力計算法などでは安全側の評価になるとは限らない。

また最近の設計法で取り入れられたように、実際に中低層建物では動的相互作用の影響がかなり大きい。この場合、実測記録の方が基礎固定モデルよりも長周期になり、逸散による減衰も大きくなる。複雑な地盤や根入れ・杭基礎などの場合は、動的相互作用ばねの適切なモデル化も難しい問題となる。さらに応答振幅の増大に伴う非線形性や振幅依存性の影響、ねじれや立体挙動、床剛性の影響など複雑な挙動も考えられ、実際の建物の動的挙動を適切にモデル化するために考慮すべき点は多岐にわたる。

以上のような背景から本研究では、実際の建物の振動特性を地震記

録から把握し、その特性を適切に表現できる振動解析モデルを詳細に検討することにより、従来の振動モデルでは考慮されていない要因が、モデルの動特性の評価に与える影響を明らかにすることを目的とする。ここでは比較的整形で二次部材の少ない上部構造を持つ杭基礎構造物を対象とし、基礎固定系と相互作用系の固有振動数に着目して、多質点モデルの検討を行う。このような検討の蓄積を通じて、構造物の実挙動に即した振動モデル構築の知見を確立することが、構造設計の高度化には必須である。

2. 対象建物の概要

本論の対象建物は、名古屋大学東山キャンパス内に建つ地上7階、地下1階の建物である。上部はPCaPC造ラーメン構造で、長辺方向(桁行)5スパン 49.5m×短辺方向(張間)2スパン 16.2mの整形で偏心の少ない建物である。基準階の平面図を図1に示す。桁行方向はほぼ純ラーメン、張間方向には一部に現場打ちの連層耐震壁がある。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床版である。地下はRC造で4～8mの根入れがあり、基礎はGL-40mに達するPHC杭基礎となっている。本建物は、設計資料や施工記録が完備しており、形状は整形で偏心は小さく、二次部材が少ないため、本論の目的である基本的なモデル化の検討に適している。

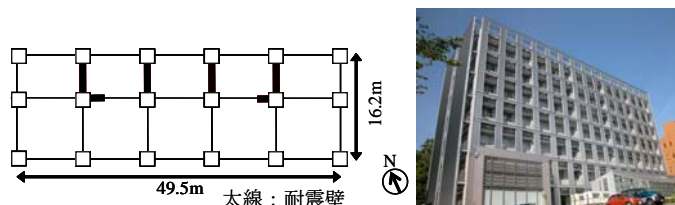


図1 基準階平面図



写真1 建物外観

*1 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生
(〒464-0814 愛知県名古屋市中種区不老町)
*2 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博
*3 名古屋大学大学院環境学研究科・助教授・工博
*4 名古屋大学大学院環境学研究科・助手・博士(工学)

*1 Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
*2 Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.
*3 Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng
*4 Res.Assoc., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.

3. 実測記録による動的特性の評価

対象建物では、上部構造、杭、周辺地表と地中の計 15 地点・36 成分の高密度強震観測、および建設過程での詳細な微動計測を行っており、多数の記録を蓄積している^{2),3)}。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)の記録を用いる。図 2 のような振動解析モデルを用いて、地盤－建物連成系 (RF/GL)、基礎固定系(RF/(1F+H0))の伝達関数を各方向について求めたものを図 3 に示し、これより推定した固有振動数を表 1 に示す。ただし、 θ はロッキング角を表し、H は建物の等価高さ⁴⁾を表す。この地震では、地表で約 30gal、屋上で約 90gal の応答が見られ、観測されたうちでは最大の記録の一つであり、地盤－建物系が十分励起されているが、顕著な非線形の影響は無い振幅範囲である。表 1 から、相互作用系よりも基礎固定系の固有振動数が高くなっており、特に張間方向でその差が大きく、相互作用の影響が大きいことがわかる。

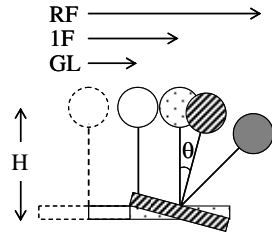


図 2 応答モデル概念図

4. 上部構造のモデル化における各種要因の影響

4.1 初期モデル

まず、設計時の質量・剛性評価による基礎固定多質点系モデル(以下、初期モデル)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。モデルは方向ごとの平面フレームモデルであり、剛床仮定、柱梁接合部分への剛域の設定を行っている。コンクリートの設計基準強度は PC 柱、梁で $F_c=60\text{N/mm}^2$ 、床で $F_c=45\text{N/mm}^2$ 、RC 部材は $F_c=30\text{N/mm}^2$ とし、積載荷重には地震用荷重を用いている。

固有値解析の結果を表 1 に示す。これより、初期モデルの固有振動数は、実測記録に比べ 20%程度低くなっていることがわかる。

4.2 モデル化において考慮する各種要因

初期モデルに十分考慮されていない構造要因について検討する。

(1)積載荷重：初期モデルの積載荷重は、地震用荷重から計算した値を用いているが、実際の積載荷重よりも大き目に評価していると考えられる。本論では、実状に近い値として、表 2 に示すように積載荷重を設定し、モデルの質量を評価しなおしたところ、初期モデルに比べ積載荷重は約 40%少なくなり、全体重量では約 10%小さくなった。

(2)コンクリート強度と剛性：初期モデルでは、前述のコンクリート設計基準強度を用いているが、実際の材料強度は設計基準強度より大

の圧縮試験結果を表 3 にまとめた。試験平均値は全部材において設計値が普通である。工場生産された PC 部材の材令 28 日時点で基準値を 1.1~1.4 倍上回り、ばらつきも小さいため、この平均値を各 PC 部材のコンクリート強度とする。また、RC 部材については施工後の強度上昇を見込み、2 割増の $F_c=36\text{N/mm}^2$ とした。これより、高強度コンクリートの設計基準強度と、ヤング係数の関係式⁵⁾を用いて剛性を評価している。

(3)柱剛域の評価：対象建物は逆梁工法を採用しており、桁行方向の梁が腰壁を兼ねているため、図 4 に示すように桁行方向と張間方向で、梁のレベルに違いが生じている。初期モデルは、方向ごとに別個のフレームモデルとしているため、直交方向の梁による剛域が評価されていなかった。2 方向について、直交方向のはりせいを考慮して柱の剛域長を設定することにより、柱のクリアスパンが小さくなる。

(4)PC 床版とリブのスラブ効果：初期モデルでは、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梁の断面に考慮しているが、ここでは、PC 床版の厚さも考慮する。また、桁行方向の PC 床版に取り付くリブの剛性も、断面二次モーメントが等価となる床厚に置換した。リブの詳細図を図 5 に示す。これにより、梁の断面 2 次モーメントは、初期モデルに比べて桁行方向の中央部の梁で約 1.2 倍、張間方向の中央部の梁で約 1.1 倍の値になった。

4.3 固有振動数の実測記録との比較

前節の 4 つの要因を個別に考慮したモデルの固有振動数を表 1 に示した。いずれも初期モデルに対して固有振動数が高くなっており、特に柱の剛域を適切に設定した影響が大きく、桁行方向の固有振動数で 10%近く大きくなり、実測から求めた基礎固定系の固有振動数に近づいていることがわかる。4 つの要因をすべて考慮したモデルでは、

表 1 固有振動数一覧

		桁行方向	張間方向
実測記録	RF/GL(相互作用系)	2.49	2.11
	RF/1F+H0(基礎固定系)	2.73	2.86
解析結果	初期モデル	2.22	2.43
	(1) 積載荷重	2.26	2.48
	(2) コンクリート強度	2.28	2.50
	(3) 柱剛域の評価	2.39	2.48
	(4) スラブ効果	2.24	2.48
	(1)~(4)全て考慮	2.67	2.70

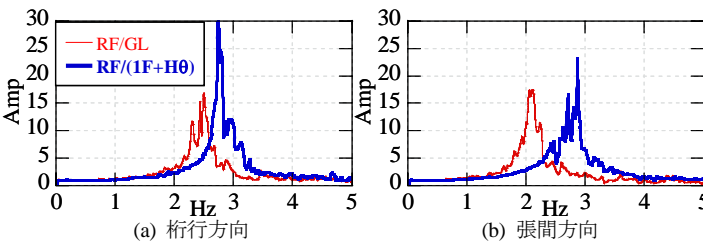


図 3 紀伊半島南部沖の地震での伝達関数

表 2 積載荷重の比較 (N/m²)

部屋名	指針	本論
屋上	600	0
廊下	1600	0
講義室	1600	500
階段室	2100	0

表 3 PC 部材圧縮試験結果まとめ (N/mm²)

部材名	圧縮試験平均	標準偏差	基準強度	試験平均/基準
PC梁	76.9	1.7	60.0	1.3
PC柱	68.9	1.6	60.0	1.1
PC床	62.4	1.7	45.0	1.4

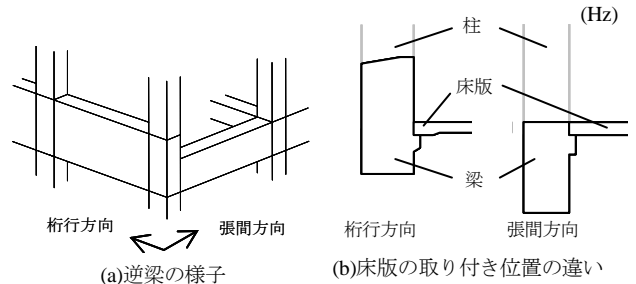


図 4 方向による剛域の違い

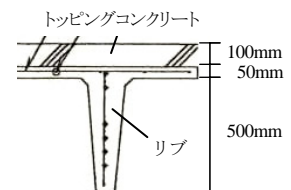


図 5 PC 床版詳細

初期モデルに比べて固有振動数が約 20%、張間方向で約 10%増加して、実測記録をほぼ正確に表現しており、上部構造の固有振動数を適切に評価できている。このように、建物の構造上の特徴を適切考慮することで、実測記録を十分に表現できることがわかる。

5. 動的相互作用の影響

地盤と建物の動的相互作用は、特に中低層建物の振動特性に大きな影響を与える。先にも述べたように、対象建物でも地盤と建物の動的相互作用の影響が大きいことが観測記録より確認できた。そこで本節では、地盤・杭・根入れを考慮して水平・回転の地盤ばねを評価し、前節で確定した上部構造モデルに組み合わせて、相互作用系の動的特性を評価した。地盤ばねの評価には、薄層要素法と有限要素法をフレキシブルボリューム法で組み合わせた方法⁹⁾を用いた。

図 6 に杭伏せ図を、図 7 に基礎部分の断面図を示す。また、表 4 に地盤条件を、図 8 に S 波速度構造を、表 5 に杭の物性値をそれぞれまとめる。基礎のモデル化の際、根入れ部分は剛体とし、杭はそれぞれのフーチングごとに 1 本の杭に縮約した⁷⁾。以上の条件から求められたインピーダンスの水平成分を図 9 に、回転成分を図 10 に示す。2 方向の特性を比べると、インピーダンスの水平成分に大きな違いは無いが、回転成分は張間方向が桁行方向に比べて 1/4 倍程度小さい値になっており、ロッキングの影響が大きいことがわかる。相互作用系の固有値解析を行い、1 次固有振動数における水平・回転インピーダンスの値を収斂計算で求めた。

表 6 に相互作用系モデルの固有振動数と、実測記録から得られた地盤・建物連成系での固有振動数との比較を示す。相互作用を考慮したモデルでは、基礎固定モデルに比べて張間方向の固有振動数が大きく低下している。これは、張間方向で地盤の回転ばね定数が小さいうえ、上部構造は連層耐震壁を含むラーメン構造で相互作用の影響が現れやすいことも影響していると考えられる。観測記録から求めた固有振動数と比較すると、桁行方向はほぼ正確に対応しているが、張間方向でやや値に差が見られ、回転インピーダンスの評価などを中心にさらに検討の余地があることがわかる。

表 6 相互作用を考慮した固有値解析

	桁行方向	張間方向
RF/GL	2.49	2.11
相互作用モデル	2.49	2.37
基礎固定モデル	2.67	2.70

(Hz)

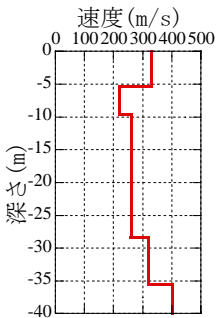


図 8 S 波速度構造

表 4 地盤物性値

上端深度 (m)	層厚 H(m)	質量密度 (t/m ³)	S波速度 Vs(m/s)	ポアソン比 ν	減衰 h
0	5.3	1.9	330	0.48	0.03
-5.3	4.3	1.9	220	0.48	0.05
-9.6	5.4	1.9	260	0.48	0.04
-15.0	13.3	1.8	260	0.48	0.04
-28.3	7.2	1.8	320	0.48	0.03
-35.5		1.9	400	0.48	0.03

表 5 杭物性値

ヤング係数	E = 3.92×10 ⁷ kN/m ²
ポアソン比	ν = 0.2
断面積	Ap = 0.2765 m ²
せん断断面積	As = 0.1382 m ²
断面二次モーメント	Ip = 0.002212 m ⁴
杭径	D = 0.8 m
杭長	l = 32.7 m / 35.9 m

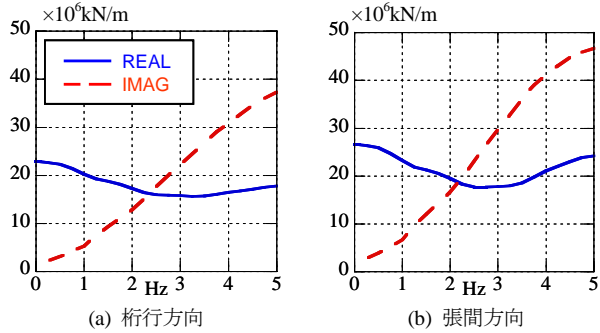


図 9 水平方向 インピーダンス

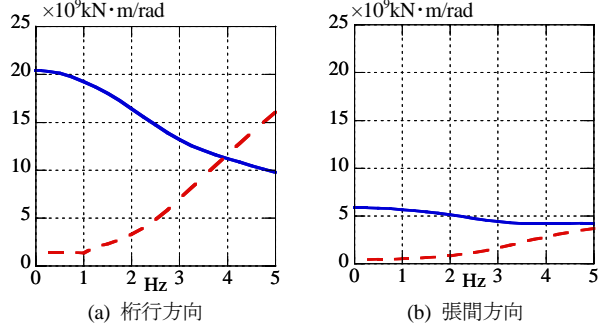


図 10 回転方向 インピーダンス

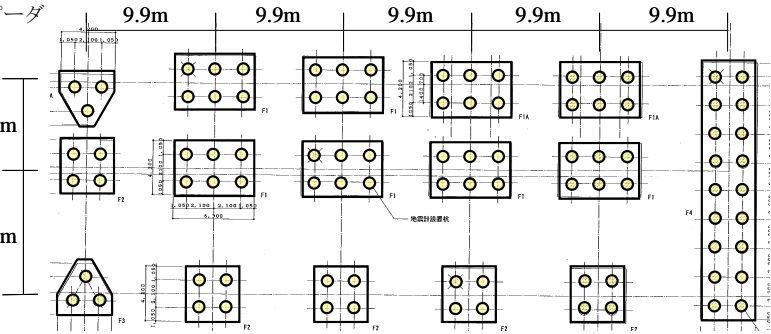


図 6 杭伏せ図

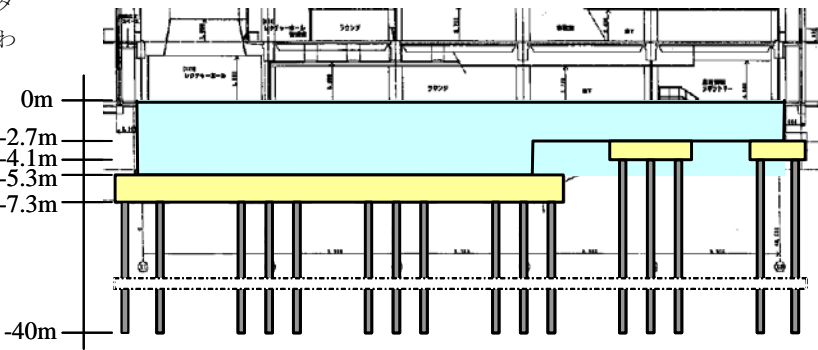


図 7 基礎部分断面図

6. 地震応答解析によるモデルの評価

前節までに、主に固有振動数に着目して、実測結果を説明できる振動モデルを構築してきた。本節では、観測地震波を用いた地震応答解析により、得られたモデルの評価を行う。相互作用を考慮したモデルと初期モデルに対して、紀伊半島南東沖の地震の観測記録を入力した場合の建物頂部の応答加速度波形の比較を図 11 に、加速度フーリエスペクトルの比較を図 12 に示す。なお相互作用を考慮したモデルには建物近傍地盤の観測波形を、基礎固定系の初期モデルには建物 1 階の観測記録を、それぞれ入力として用いている。上部構造の減衰は 3% とし、相互作用を考慮したモデルにおける水平・回転ばねの減衰は、相互作用系の 1 次固有振動数における虚部の傾きから設定した。

図 11, 12 から、桁行・張間両方向ともに、初期モデルよりも相互作用系モデルの方が実測記録をより適切に表現していることがわかる。

7. まとめ

本論文では、PCaPC 造 7 階建ての建物を例に、地震観測記録から得られた基礎固定系と相互作用系の固有振動数を評価基準として、実測記録を適切に表現できる振動モデルの検討を行った。一般的なモデル化では考慮されていない諸点について、建物の実状を反映して評価し、その影響を定量的に明らかにした。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 上部構造のモデル化について、積載荷重、コンクリート強度(剛性)、柱剛域の設定、PC 床版とリブのスラブ効果などについて検討し、影響度合いを評価した。本建物では、方向により異なる柱剛域の設定を実状に即して行うことが、最も影響が大きかった。最終的に基礎固定系の実振動特性をほぼ正確に表現できるモデルを構築した。
- 2) 根入れと杭を考慮した解析により水平・回転地盤ばねを評価し、確定した上部構造モデルと組み合わせることで、実測記録をより適切に評価できる相互作用モデルを構築した。ロッキングの影響が大きい張間方向の相互作用ばねの評価には、検討の余地がある。
- 3) 実際に観測された入力地震記録を用いて、相互作用系モデルの地震応答解析を行い、観測記録を適切に評価できることを確認した。

以上の結論は、本論で対象とした建物に関するものであり、同様の検討を観測に基づいて展開することにより、実際の振動特性を適切に評価するモデルの知見を蓄積していくことが重要である。

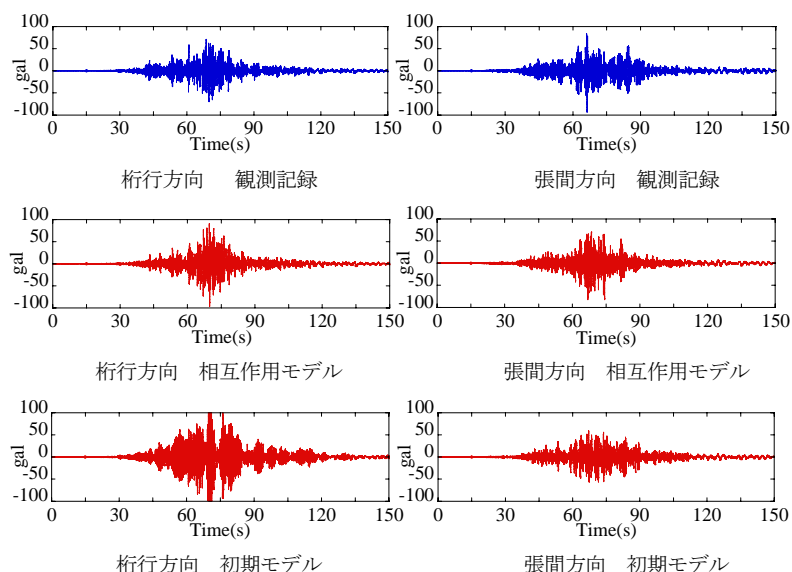


図 11 建物頂部 加速度応答波形

謝辞

本論をまとめるに当たって、(株)日総建の石井和彦氏、富安弥氏にはモデル化の検討に関してご協力を頂いた。中国湖南大学の文学章博士には、相互作用解析プログラムを提供して頂いた。さらに(株)日建設計の白瀬陽一氏には、解析検討に関して有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 飛田潤, 福和伸夫: 建物の地震時挙動に関する問題点の整理, 第 3 回強震データの活用に関するシンポジウム, 建築学会, pp.1-12, 2002.12
- 2) 小島宏章, 福和伸夫, 飛田潤: プレキャストプレストレストコンクリート造建物の建設段階に伴う振動特性の変化, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2、構造 II、pp.647-648, 2004.9
- 3) J.Tobita, H.Kojima and N.Fukuwa : Web Based Online Monitoring and Database Systems for Dynamic Response of Structures and Ground, Structural Engineering (AESE 2005), pp.687-694, 2005.7
- 4) 石橋敏久, 内藤幸雄: 基礎のロッキングを考慮した構造物の伝達関数評価法の検討, 鹿島技術研究所年報、第 42 号、pp.29-38, 1990
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説
- 6) 文学章: 地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究, 名古屋大学学位論文, 2006
- 7) 文学章, 福和伸夫, 小島宏章, 酒井理恵子: 大規模群杭の効率的な動的相互作用解析法, 日本建築学会構造系論文集、第 607 号、pp.109-116, 2006.9
- 8) 日本建築学会: プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種 PC)構造設計・施工指針・同解説
- 9) 日本建築学会: 動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006.2

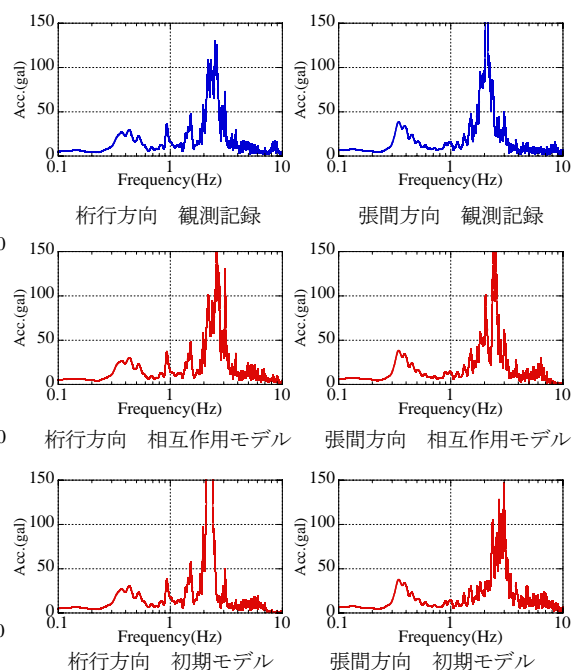


図 12 建物頂部 加速度フーリエスペクトル