敷地地盤の微振動調査に基づく 免震建物の微振動応答予測手法

MICRO-VIBRATION PREDICTION METHOD IN A BASE ISOLATED BUILDING BASED ON MICRO- VIBRATION RECORDS IN CONSTRUCTION SITE

深澤尚宏 — * 1 北村春幸 — * 2
藤田隆史 — * 3 浅野美次 — * 4
安田正志 — * 5 吉江慶祐 — * 6

Takahiro FUKAZAWA — * 1 Haruyuki KITAMURA — * 2
Takafumi FUJITA — * 3 Mitsugu ASANO — * 4
Masashi YASUDA — * 5 Keisuke YOSHIE — * 6

キーワード：

微振動, 免震建物, 応答予測, 基礎入力動, 減衰定数

Keywords：

Micro-vibration, Base-isolated building, Response prediction method, Foundation input motion, Damping factor

In recent years, the base isolated structure is adopted as the building of various uses, with the apparatus which should be prevented from micro-vibration. Base-isolated buildings are divided from ground. Accordingly it's said that base isolated buildings may be disadvantageous in term of micro-vibration and it's important to predict the characteristics of vibration easily in term of planning of buildings.

This paper describes a method of response analysis of micro-vibration in base-isolated buildings, adopting simple model which based on same value of planning and using it to simulate vibration responses.

1. はじめに

近年、1994 年ノースリッジ地震、1995 年兵庫県南部地震、1999 年台湾集集大地震など、都市部の建築物や産業施設に大きな被害を与える大地震が頻繁に起きるとともに、様々な用途の建物に免震構造が採用されるようになってきた。微振動を嫌う精密機器類を持つ研究所や工場などにも、生産設備の地震被害を回避する目的で免震構造が採用され始めている。

免震構造は地盤と縁を切った構造であるため、1) 地盤への逸散減衰が期待できず、微振動レベルでは減衰の少ない構造であること、2) 免震層による振動の増幅が考えられること、3) 1) により内部振動源に対して揺れやすくなることなど、微振動に不利な側面が考えられる。このため、一般建物と異なる免震建物特有の微振動特性を把握しておくことは重要であると考えられる。また、建物内の微振動レベルが精密機器の要求する微振動レベルを満足できない場合、機器免震などで除振を行う必要があり、建設計画時点において建物床面の微振動レベルや微振動特性の概略の把握が必要となってくる。

そこで、筆者らは精密工場などに関与する振動として、振動加速度レベルにして 50dB 以下、振動数において 0.5Hz から 30Hz までの微振動を対象として、種々の地盤、基礎、構造形式を持つ実在免震建物の微振動調査を実施し、微振動の地盤から免震建物への伝達特性、免震建物における微振動の応答性状について分析、評価を行ってきた。¹⁾²⁾³⁾本報告は、これらの調査、研究で得られた成果をまとめ、計画中の免震建物の微振動レベルを把握することを目的に、敷地地盤の微振動測定データを基に、免震建物の床応答を予測する

手法を提示し、実建物の微振動調査に基づき、その応答予測手法の妥当性を評価する。

2. 免震建物の微振動予測手法と微振動測定

本研究での微振動予測手法は、計画中の免震建物の微振動予測を行うことを目標としている。計画時点で予測を行う場合、ある程度の予測精度を確保した上で、出来るだけ簡便なモデルとすることが望ましい。本研究では、簡便なモデルによる応答予測手法を提案し、

図1 微振動予測概念図

*1 元東京理科大学大学院(現静岡県庁)
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

*2 東京理科大学 教授・工博

*3 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*4 日建設計東京本社 工博

*5 特許機器(株) 工博

*6 日建設計東京本社

*1 Former, Graduate School of Tokyo University of Science

*2 Prof., Tokyo University of Science, Dr. Eng.

*3 Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

*4 Nikken Sekkei Ltd., Dr. Eng.

*5 Tokkyokiki Corp., Dr. Eng.

*6 Nikken Sekkei Ltd.

図2 建物平面図

表1 地盤構成

土質	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	Vp (m/sec)	Vs (m/sec)
ローム、礫混りの黒ボク ローム	2.5	2.5	1.44	480	140
礫混りローム	3.2	0.7	1.73	1000	400
砂礫、礫混り砂	4.7	1.5	1.84	1430	390
砂礫	7	2.3	1.89		670
粘土混り砂礫	9	2	1.99	1630	680
礫混りシルト質砂	10.4	1.4	1.91		

実建物の微振動測定値と予測値を比較検討することにより、その予測精度を検討する。

自由地表面の微振動から免震建物内床面の微振動を予測する手法として、(1)地盤から基礎への伝達 (2)基礎を入力とする免震建物の応答予測に分ける。(図1)

(1)では、地盤に対する基礎の幾何学的拘束効果を減衰フィルタとして扱う方法の検討、(2)では、簡便な解析モデルとして建物をスウェイ・ロッキングモデルとしたときの予測値の精度を検討する。

なお、本報告では、建物の振動源は地盤の微振動のみとし、検討に当たり水平動のみを対象としている。風力や建物内部の振動に対する応答並びに上下動については別途考慮するものとした。

評価建物としてここでは、静岡県磐田市にある精密作業工場を選んだ。地上5階、塔屋2階、建築面積4,710㎡、延べ面積14,615㎡の免震建物である。基礎は独立フーチング基礎直接地盤であり、上部構造のX(長辺)方向は、内側に架構を組まず、外周部のRC造耐震壁付きラーメン架構のみで水平力を負担する。Y(短辺)方向内側はRCラーメン架構と外周部のRC造耐震壁付きラーメン構造となっている。床スラブは、RCプレキャスト板である。免震層は、天然ゴム系積層ゴムに鉛ダンパーと鋼棒ダンパーを組み合わせ、1階床下に配置している。図2,3に測定建物の平面図、断面図を示す。表1に敷地の地盤構成を示す。基礎は、Vs=400m/sの礫混りローム層に直接支持されている。

本報告で比較検討に用いた実測波は、竣工直前の2001年1月16日8:00~18:00に行った微振動測定記録を採用した。天候は、弱風・曇天、建物内及び敷地内の外乱振動は、ほぼ無い状態であった。波形No.1からNo.4が測定時間600秒、サンプリング時間128Hz、波形No.5,6が測定時間180秒、サンプリング時間100Hzで5または6チャンネルを同時測定した。測定点一覧を表2に示す。なお、

図3 建物断面図(6通り)

表2 測定点一覧

波形No.	測定方向	同時測定点						T(sec)	ΔT(Hz)
1	X	GND	6A-PIT	6D-PIT	6A-1F	6D-1F		600	128
2	Y	GND	6A-PIT	6D-PIT	6A-1F	6D-1F		600	128
3	X	GND	6D-PIT	6D-1F	6D-3F	6D-4F	6D-5F	600	128
4	Y	GND	6D-PIT	6D-1F	6D-3F	6D-4F	6D-5F	600	128
5	X	11D-PIT	6D-1F	11D-1F	11D-3F	11D-4F	11D-5F	180	100
6	Y	11D-PIT	6D-1F	11D-1F	11D-3F	11D-4F	11D-5F	180	100

T:データ長さ ΔT:サンプリング間隔

図4 円形基礎での位相差による動き

Gnd は建物近傍の地表面、Pit・1F は上下免震基礎面、3F・4F・5F は各階柱際床面である。

3. 地盤から基礎への伝達特性の評価

地震時と同様に微振動においても、地表面上の振動がそのままその地点に建つ構造物への入力動にはならず、位相差により水平動では高振動数側で伝達特性の落ち込みが起こる。また、通常の水平2成分の他、垂直軸に関する捩れ成分も構造物に作用する。この為、自由地表面からの応答予測を行う場合、地盤に対する基礎の幾何学的拘束効果を考慮する必要がある。地震動に位相差を考慮したときの、自由地表面と基礎の入力動との関係を表す周波数伝達関数が井口⁴⁾により求められており、本論ではそれを微振動に適用し基礎の入力動の算出を試みる。

(1) 微振動記録に基づく水平動と捩れ動の算出

図4の様な理想的な円形の基礎の場合、基礎全体の水平動と捩れによる基礎端部の加速度は、以下のように表せる。

$$\ddot{U} = (\ddot{U}_1 + \ddot{U}_2)/2 \quad \text{水平動} \quad (1)$$

$$r_0 \ddot{\phi} = (\ddot{U}_1 - \ddot{U}_2)/2 \quad \text{捩れ動} \quad (2)$$

この式を本物件の波形 No.1 の 6-D と 6-A に適用し、回転中心を C 通りと D 通りの中間と仮定すると以下のような式に変形し、基礎全体の水平動・6-A での振れ動を求める。

$$\ddot{U} = (23.25 \times \ddot{U}_{6-D} + 4.65 \times \ddot{U}_{6-A}) / 27.9 \quad \text{水平動} \quad (3)$$

$$r\ddot{\phi} = 23.25 \times (\ddot{U}_{6-D} - \ddot{U}_{6-A}) / 27.9 \quad \text{振れ動} \quad (4)$$

ここで、 $\ddot{U}_{6-D}$ ・ $\ddot{U}_{6-A}$ は 6-D、6-A での加速度、 r は回転中心から端部までの距離である。

波形 No.1 の地盤・基礎での微振動波形と式(3)(4)より求めた基礎部の水平動成分・振れ動成分の 40 秒から 50 秒までの時刻歴加速度波形を図 5 に示す。

自由地表面上での加速度に比べて、基礎での加速度の大きさは約 1/10 にまで減っており、微振動においても位相差による影響があることがわかる。水平動と振れ動を比較すると、基礎端部での振れ動が無視できないことがわかる。

(2) 入力損失フィルタ

ラブ波、SH 波の斜め入射による矩形基礎の自由地表面上での地震動と基礎の運動との周波数伝達関数は、井口によって次式⁴⁾で示されている。

$$\ddot{U}_{Xi} = F_H(\omega) \ddot{U}_{Xo}, \quad \ddot{U}_{Yi} = F_H(\omega) \ddot{U}_{Yo} \quad (5)$$

$$\ddot{\phi}_i = F_{\theta X}(\omega) \ddot{U}_{Xo} + F_{\theta Y}(\omega) \ddot{U}_{Yo} \quad (6)$$

$$F_H(\omega) = \frac{\sin(\tilde{a}_0 \cos \alpha)}{\tilde{a}_0 \cos \alpha} \quad (7)$$

$$F_{\theta X}(\omega) = i \cdot \left(\frac{6Lx}{Lx^2 + Ly^2} \right) \cdot \left\{ \frac{\cos(\tilde{a}_0 \cos \alpha)}{\tilde{a}_0 \cos \alpha} - \frac{\sin(\tilde{a}_0 \cos \alpha)}{(\tilde{a}_0 \cos \alpha)^2} \right\} \quad (8)$$

$$\tilde{a}_0 = \frac{\omega \cdot Lx}{2Vs} \quad F_H(\omega), F_{\theta}(\omega): \text{水平、振れ回転の伝達関数}$$

Lx, Ly : 基礎幅 α : 地表面から見た入射角 Vs : 地盤のせん断波速度

今、微振動における振れを誘起させる波は地表面を伝わってくると仮定し入射角 $\alpha = 0$ とすると、式(7),(8)は以下のように書き表される。

$$F_H(\omega) = \frac{\sin \tilde{a}_0}{\tilde{a}_0} \quad (9)$$

$$F_{\theta X}(\omega) = i \cdot \left(\frac{6Lx}{Lx^2 + Ly^2} \right) \cdot \left\{ \frac{\cos \tilde{a}_0}{\tilde{a}_0} - \frac{\sin \tilde{a}_0}{\tilde{a}_0^2} \right\} \quad (10)$$

図 6 に、実測波を用いて式(3),(4)により分離した水平動成分、振れ動成分と自由地表面上での実測波との伝達特性を細実線で、各方向の諸元を式(9),(10)に代入して得られた並進動、振れ動の理論値を太実線で示す。細実線で示す実測値の伝達特性は、それぞれのデータを 8192 点に分割し 4096 点をオーバーラップさせながら各小サンプルを高速フーリエ変換(FFT)し、それを加算平均して求めた。せん断波速度は、表層地盤の $Vs=140\text{m/s}$ と建物基礎接地地盤の $Vs=400\text{m/s}$ の値が考えられることから、両者について検討を行った結果、建物基礎接地地盤の $Vs=400\text{m/s}$ を使用した方が、予測精度を確保することができることより、 $Vs=400\text{m/s}$ とした。

水平動では、4Hz を境に実測値の伝達特性が落ち込んでおり、理論値の方が低い振動数で落ち込みが見られる。これは理論値が剛体基礎として解かれているのに対し、実際には基礎の変形により拘束

図 5 Pit・Gnd と算出された水平動・振れ動成分の加速度波形

図 6 実測より求まる基礎と地表面の伝達と入力損失フィルタ

図 7 基礎入力動 (速度応答スペクトル)

効果が低下するからである。実測値は理論値の基礎幅を 1/3 程度にした値とよく合った。伝達関数を求める際には、基礎柔性の効果を考慮し基礎幅を低減させる必要があり、基礎柔性の程度により基礎幅を低減する指標の作成が今後の課題である。振れ動では、水平動ほど明確に特徴が見られないが、理論値とよく似た形状となっている。

図 7 に実測波の水平動成分と、基礎幅を 1/3 としたときの水平動伝達関数を自由地表面上の実測波に掛け、逆 FFT によって求めた予測波の速度応答スペクトルを示す。実測波の水平動成分の概略を概ね掴めることが分かる。

4. 減衰定数

免震建物の微振動応答における減衰定数をどの程度に設定すればよいのかは、過去のデータがあまりないため地震応答解析における慣例に頼ることが多い。そこで本章では、免震建物の微振動測定データに基づき減衰推定を行う。

本研究では建物の減衰を推定するために入出力データを用いる ARMAX モデル⁵⁰⁾によって減衰定数を同定した。測定を行った日は無風であり、風の影響はごく微小である。

同定の対象とする範囲は、X・Y 方向とも 1.6Hz 付近に見られる各方向の 1 次と、5.5Hz 付近に見られる 2 次を対象として行った。なお、X 方向の 2.2Hz 付近に見られるピークは同年 2 月 10 日～4 月 13 日、9 月 10 日の測定では見られず、建物の振動特性に起因するものではない内部振動によるものと考えられる為、このピークでの減衰は今回の同定の対象から外した。同定は、データ長さ 300 秒を 1 セットとし、波形 No.3 から No.6 を用いて XY 方向各 3 セットについて行った。

ARMAX モデルでの推定では、シミュレーションデータの時間長さを固定し、データの間引きにより同定の際の時間刻み ΔT を調節する。この際、エイリアジングを防止するため、ナイキスト振動数 Δf_N に対し、 $0.8\Delta f_N$ をカットオフ振動数とするフィルタにより高振動数成分を除去する。モデル次数は、スペクトルの形状を FFT による伝達と比較することにより 30 次に決定した。図 9 に波形 No.1(X 方向)と波形 No.2(Y 方向)それぞれの 0 秒から 300 秒までの 6D-PIT と 6D-5F との ARMAX モデルによる推定結果を実線で、高速フーリエ変換(FFT)による結果を点で示した。FFT による推定は、300 秒の入出力データを時間長さ 32 秒間で 50%オーバーラップさせながら 18 セットのサンプルに分割して、それらのアンサンブル平均を推定値とした。図 9 に推定された減衰定数と振動数を示す。

推定された減衰は X 方向の 1 次で 1.7% から 2.1%、2 次では 1.8% から 2.3% の減衰であった。Y 方向の 1 次では 1.9% から 2.4%、2 次では 1.6% から 2.4% であった。数少ないサンプルであるが、減衰の値は、2% 前後の値をとると思われる。これより免震建物の微振動解析では、定値減衰 2% を採用して行うのが精度と簡便さから妥当であると考えられる。

5. 建物床面の微振動予測

建物床面の微振動予測は、基礎 Pit の微振動を入力とする建物の応答解析によって行う。その際、建物計画時の応答予測では、建物振動諸元が精度良く確定しているわけではないので、比較的簡便な

図8 ARMAX モデルの同定結果

図9 減衰推定結果

図10 解析モデル概念図

表3 解析モデル概要

	解析モデル	減衰タイプと減衰定数
Aモデル	上部構造:等価せん断型モデル	定値減衰
	水平:3質点 免震層:ロッキング・スウェイ	上部構造:2% 免震層:ロッキング12% スウェイ2%
Bモデル	部材レベル立体骨組みモデル	定値減衰
	水平:4質点	上部構造:2% 免震層:2%

解析モデルを用いることが望まれる。そこで本章では、応答予測手法で用いる簡易モデル(Aモデル)とその予測手法の精度を検証するための詳細モデル(Bモデル)を用いた時刻歴応答解析を行い、2つのモデルの解析値と実測値を比較検討する。なお、応答解析では、地盤からの振動のみを考慮し、風や内部振動などの外力は作用しないと仮定している。

応答解析は、応答予測手法で用いる簡易モデル(Aモデル)とその予測精度を検証するための詳細モデル(Bモデル)で行う。

Aモデル:上部構造を各階1自由度、免震層にスウェイとロッキングを考慮した多質点モデル

Bモデル:部材レベルの立体モデル。水平方向は各階1質点、3自由度(X, Y, R₂)

部材のモデル化は設計図書に基づいたが、免震層鉛ダンパーの水平剛性は微小振動を考慮して3.7倍とし、積層ゴムの鉛直剛性は地盤を考慮し0.78倍としている。⁷⁾減衰は定値減衰とし、上部構造・免震層水平を $h=0.02$ とした。入力波として、波形No.3、No.4の6D-Pitにおける実測波を用いた。図10に解析モデル概念図を、表3に解析モデルの概要を示す。

表4にAモデル・Bモデル、実測波から得られる固有周期を示す。図11に各方向のPitの入力波、Aモデル・Bモデルの3Fと5Fの時刻歴応答結果と実測波を示す。X・Y方向の3Fと5Fの実測波には、水平方向の最高次固有周期である33Hz(Aモデル)のローパスフィルターをかけた。図12に、X・Y方向のPit・1F・3Fと5Fの速度応答スペクトルを示す。

A・Bモデルとも加速度時刻歴波形は、加速度の絶対値、1次周期は比較の実測値と一致している。しかし、高振動数領域では詳細モデルにおいても振幅がかなり小さくなっている。また、速度応答スペクトルでは、概ねピークを捉えているが、X方向で0.46(sec)のピークが両モデル共に評価できなかった。このピークは減衰推定の際に述べたように他の測定日では見られず、内部振動によるものと考えられる。モデル化の違いは、Aモデルでは評価することが出来ない高振動数領域を、Bモデルでは若干であるが捉えることが出来ている点である。

設計時には加速度の絶対値が問題になるので、簡易なモデル化での解析で十分と考えられる。内部振動が計画時点で特定できる際には、別途内部振動を評価する必要がある。

6. まとめ

本研究では計画中の免震建物の微振動レベルを把握することを目的に、振動源を地盤の微振動のみとし、風力や建物内部の振動は作用しないという仮定とした上で、敷地地盤の微振動測定データを基に、免震建物の床応答を予測する手法を提示し、その応答予測手法の妥当性を評価してきた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 地盤から基礎への伝達では、井口により示された地震動に位相差を考慮したときの、自由地表面と基礎の入力動との関係を表す周波数伝達関数を用いることにより、微振動時の入力動も比較的良好に予測を行うことが出来た。その際には、基礎柔性を考慮し、基礎幅を低減することにより実測と良い一致を示した。
- (2) 微振動時の免震建物の減衰は、1次で1.5%から2.5%にあり、微振動の応答予測の解析においては、定値減衰2%を設定す

表4 固有周期

	X方向周期			Y方向周期		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
実測波	0.62	0.18	0.12	0.62	0.19	0.13
Aモデル	0.64	0.14	0.06	0.64	0.14	0.07
Bモデル	0.64	0.16	0.06	0.63	0.16	0.10

図11 応答解析結果(時刻歴加速度波形)

図12 応答解析結果(速度応答スペクトル)

ることが精度と簡便さから妥当である。

- (3) 建物基礎部の微振動波形から建物床面の微振動予測を行う解析モデルは簡易なロッキング・スウェイモデルで振動レベルの概略の把握が十分行えた。

これらの結果をふまえて、免震建物の微振動応答予測の為のフローチャートを図13に示す。①②③では、微振動を予測する上で必要となる基本データの取得、④⑤において、諸元値から入力損失フィルタを決定し、基礎入力動の算出。⑥⑦では、簡便なモデルを用いた水平動の応答解析をし、最終的に⑩建物床面の微振動とする。なお、本報告の評価建物では、微振動時においても剛心と重心が比較的一致し、振れの影響が少ないとし振れの解析を行わなかったが、微振動時に剛心と重心が極端に離れる場合には、⑧⑨で示すように別途振れを解析により求める必要がある。

今後の課題としては、本研究では対象建物を1物件に絞って考察をしてきたため、対象建物を増やし一般性を持たせる必要がある。特に、入力損失フィルタの影響が大きく、これらの定数設定方法の一般性が求められる。また、精密機器では水平方向の微振動と同様に上下方向についても微振動レベルが厳しく設定されているため、上下方向に対する免震建物の微振動応答予測手法の提案、検証を行っていきたい。

参考文献

- 1) 江利川俊明, 吉江慶祐他: 免震建物の常時微動振動性状(その 1, 2), 日本建築学会大会学術梗概集 no.40149, no.40150(2000)
- 2) 竹内真次, 深澤尚宏, 吉江慶祐他: 免震建物の常時微動振動性状(その 3, 4, 5), 日本建築学会大会学術梗概集 no.21279, no.21280(2002)
- 3) 深澤尚宏, 北村春幸他: 免震建物の常時微動振動性状(その 6), 日本建築学会大会学術梗概集 no.21253 (2003)
- 4) 井口道雄: 地震動の位相差及地盤一構造物の相互作用を考慮した地震応答, 日本地震工学シンポジウム論文集, pp.211-218, 1973 年
- 5) 足立修一: MATLAB による制御のためのシステム同定, 東京電機大学出版局 1996 年
- 6) 齊藤知生: モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第 508 号, pp.47-53, 1998 年 6 月
- 7) 田治見宏: 建築振動学, コロナ社, 1965 年

図13 免震建物の微振動応答予測フローチャート

謝辞

本研究は、DIS 研究会における成果をまとめたものです。貴重なご助言、ご指導賜りました関係各位に厚く御礼申し上げます。

DIS 研究会

委員長 藤田隆史（東京大学生産技術研究所 教授）

委員 嶋崎守（東京大学生産技術研究所）

浅野美次 吉江慶祐 寺田隆一、江利川俊明、鍋沢斤吾（日建設計）

安田正志、松田隆司（特許機器）

北村春幸、深澤尚宏、浮田一志、森清宣貴（東京理科大学）

減衰推定における同定手法では、電力中央研究所の金澤健司博士に貴重なご助言を賜りました、厚く御礼申し上げます。

[2003年10月20日原稿受理 2004年2月23日採用決定]