

建築研究資料

Building Research Data

No. 122

December 2009

常時微動等を利用した集合住宅の 振動特性の評価

Research on Dynamic Characteristics of A Residential Building Based
on Microtremor Measurement, etc.

大川出、飯場正紀、小山信、森田高市、境茂樹、藤井睦、保井美敏、渡壁守正
Izuru Okawa, Masanori Iiba, Shin Koyama, Koichi Morita,
Shigeki Sakai, Atsushi Fujii, Mitoshi Yasui and Morimasa Watakabe

独立行政法人 建築研究所

Published by

Building Research Institute

Incorporated Administrative Agency, Japan

はしがき

1998 年の建築基準法改正では、建築基準の合理化を図る目的で、構造基準の性能規定化等に向けた基準体系の見直しが行われ、その中で限界耐力計算が導入された。

限界耐力計算は、地震時における建築物の変形・耐力を計算し、建築物の損傷性や安全性を確認するものである。また限界耐力計算には、表層地盤の加速度増幅特性や地盤の影響を考慮した建築物の振動特性の設定等、地盤に関係する地震力や構造特性の評価も追加されたことから、建築物の特性に関わる地盤振動や建築物と地盤の動的相互作用についても、より詳細な特性把握が求められることとなった。

建築研究所では、研究課題「地震時における建築物の実効入力地震動の評価に関する研究(平成 17～19 年度)」及び「現行設計用地震荷重・地震動の妥当性の検討(平成 20～22 年度)」を実施し、建築物に作用する地震動や建築物の振動性状を把握する研究に力を入れている。

つくば地区周辺の建築系研究機関をメンバーとして組織された筑波建築研究機関協議会 (BRIC) に勉強会が設置され、若手研究者を対象として、研究者間の研究関連情報の共有に努めるほか、構造分野では外力特性や構造性能に関する知識の蓄積や技術の向上を目指した活動が行われている。

本資料には、BRIC 勉強会「建築物および周辺地盤の地震時挙動(平成 13～15 年度)」及び「構造物-地盤系の耐震性能のための計測 (測定、観測) 技術に関する研究(平成 16～18 年度)」において検討された成果がまとめられており、振動データの測定、解析・分析などの一連の作業が、BRIC 勉強会の参加メンバーの連携により実施され、情報・技術の共有化が図られている。

建築物の振動特性を求めるために必要となる、測定データの処理方法や分析方法が紹介されており、今後同様な検討を行う場合に、大いに利用していただきたい。今後も BRIC における勉強会をより活性化し、多くの貴重な研究成果が得られるように努力していきたいと考えている。

平成 21 年 12 月

独立行政法人建築研究所
理事長 村上周三

概要

建物と地盤の動的相互作用現象の基本性状を把握することを目的として、集合住宅とその周辺地盤において、常時微動測定・人力加振を行った。建物と地盤の動的相互作用現象の基本性状として、地盤連成系における建物の1次卓越振動数、減衰定数に注目した。地盤連成系における建物の1次卓越振動数の評価は、常時微動測定における建物頂部、1階および地盤上の測定波形の伝達関数により算定する。減衰定数は、伝達関数の位相関係から算定するとともに、常時微動結果に **Random decrement (RD)** 法を適用した自由振動波形や人力加振による自由振動波形から対数減衰率で評価した。

測定結果・解析結果の特徴・特性をまとめると、以下のようになる。

- 1) 基礎固定系に対する連成系の卓越振動数の比は、短辺方向と長辺方向で、それぞれ $0.68\sim 0.70$ 、 $0.75\sim 0.78$ となった。短辺方向では、ロッキングの影響が大きく、長辺方向では、スウェイの影響が大きいことが確認された。
- 2) FEM 解析では、短辺方向・長辺方向とも、卓越振動数での増幅率は、基礎固定系、ロッキングが含まれる振動系、連成系の順に小さくなる、すなわち減衰定数が大きくなる、一般的な建物と地盤の動的相互作用現象と整合する結果となった。一方、常時微動測定では、逆の結果を示しており、この原因として、連成系の振動モードで揺れているため、基礎固定時の特性が検出されにくいことが考えられる。また、建物への入力に対して応答が遅れている場合と進んでいる場合が同程度見られ、入力と応答が対応していないことが減衰特性に影響していることも考えられる。
- 3) RD 法により算出した連成系の1次卓越振動数における減衰定数は、短辺方向と長辺方向で、それぞれ $5.5\sim 6.0\%$ 、 $6.5\sim 6.9\%$ となり、長辺方向の減衰定数が短辺方向に比べてやや大きく評価された。RD 法より算出した減衰定数は、日本建築学会でまとめられている卓越周期と減衰定数の関係のばらつき範囲に収まり、学会の略算式とも対応した結果となった。
- 4) 人力加振における建物の短辺方向の減衰定数は、RD 法により得られた結果とほぼ同程度であったが、長辺方向については、1割程度小さい値となった。

Summary

In order to make clear fundamental characteristics of soil-structure interaction of buildings, the microtremor measurement and oscillation test by man-power are conducted in a residential building and its surrounding soil ground. As the characteristics of soil-structure interaction, fundamental frequency and damping factor of the building in the interactive system are focused. The fundamental frequencies are estimated through transfer functions of measured data between at a top of building and at 1st floor or at ground surface. The damping factors are evaluated by not only the transfer functions of measured data but also waveforms of free vibration obtained by an application of random decrement (RD) method and by man-made oscillation. The results are summarized as follows;

- 1) The ratios of predominant frequencies of the interactive system to base-fixed condition are 0.68-0.70 and 0.75-0.78 in the transverse and longitudinal directions, respectively. It is pointed out that the effects of rocking and sway motions are large, in the transverse and longitudinal directions, respectively.
- 2) In the results by FEM analysis, amplitudes at predominant frequencies are smaller with base-fixed, rocking-included and sway-rocking-included systems. The results are corresponding to the phenomena which are observed in the general soil-structure interaction. On the way, the opposite result is observed in the microtremor measurement. A reason is that the characteristics under the base-fixed condition are not predominant, as the building is vibrating under the interactive system. Another reason is that phase lags of vibration between at 1st floor and at top of building are not constant. Some phases are delayed, and some are ahead. The correlation between input motions to building responses is less in the microtremor vibration.
- 3) Damping factors obtained from free vibration waveforms by RD method are 5.5-6.0%, 6.5-6.9% in the transverse and longitudinal directions, respectively. These damping factors are within the range of scattering which is summarized in Architectural Institute of Japan.
- 4) Damping factors obtained from free vibration waveforms by man-made oscillation are almost same as those by random decrement method. The damping factors in longitudinal direction are less by 10%.

目 次

1. はじめに	1
1.1 目的と実施内容	1
1.2 検討組織	1
2. 対象建物と地盤条件	3
3. 計測内容	5
4. スウェイ・ロッキングによる建物の振動特性	6
4.1 振動系の入力と出力の関係	6
4.2 卓越振動数・減衰定数の算出方法	7
4.3 建物の卓越振動数と減衰定数	8
5. 建物のねじれ振動特性	14
6. RD法による建物の減衰特性	16
6.1 RD法の概要	16
6.2 データ処理の方法	16
6.3 建物の減衰定数	20
7. 入力加振による建物の減衰特性	32
7.1 データ処理の方法	32
7.2 減衰定数の評価方法と結果	32
8. 2次元FEMによるシミュレーション解析	37
8.1 解析モデルと材料定数	37
8.2 解析結果	39
9. まとめ	44

1. はじめに

1.1 目的と実施内容

1998年の建築基準法の改正および関連告示の制定(限界耐力計算法)等により、性能規定化に向けた動きが始まっている。このためには、建物の構造性能・地震時応答をより明確にすることが重要であり、建物に作用する外力性状や建物特性をより精度良く捉える必要がある。特に、建物への地震動や建物と地盤の動的相互作用は、地盤の影響を受けることから、地盤の影響を含めた性状の解明が必要である。

ここでは、建物と地盤の動的相互作用現象の基本性状を把握することを目的として、ある集合住宅とその周辺地盤において、常時微動測定・人力加振を行った。地震動観測があまり実施されていない、あるいは地震観測建物であっても動的相互作用現象の解明に十分な数の地震計が設置されていない一般建物においては、常時微動測定による建物の特性の把握が有効となる¹⁾。

建物と地盤の動的相互作用現象の基本性状として、建物の1次卓越振動数、減衰定数に注目した。地盤連成系における建物の1次卓越振動数の評価は、常時微動測定における建物頂部、1階および地盤上の測定記録の伝達関数により算定する。減衰定数は、伝達関数の位相関係から算定するとともに、測定記録にRD(Random Decrement)法を適用した自由振動波形や人力加振結果の自由振動波形の対数減衰率を算定した。

本検討は、筑波建築研究機関協議会(BRIC)の若手勉強会において実施された。勉強会の研究課題は以下のようなものである。

- ・建築物および周辺地盤の地震時挙動(平成13-15年度)
- ・構造物-地盤系の耐震性能のための計測(測定、観測)技術に関する研究(平成16-18年度)

また勉強会における作業として、建物の常時微動測定を平成15年度に、データ処理・解析、数値計算を平成16~17年度に実施し、さらに出版に向けたまとめを平成20~21年度に行った。

関連する建築研究所の研究課題を、以下に示す。

- ・設計外力の観測データに基づく合理的設定法の構築(平成14~16年度)
- ・地震時における建築物の実効入力地震動の評価に関する研究(平成17~19年度)
- ・現行設計用地震荷重・地震動の妥当性の検討(平成20~22年度)

1.2 検討組織

本検討に参加したBRIC若手勉強会のメンバーの氏名と所属を以下に示す。

平成13-15年度勉強会メンバー(所属はH16年3月)

氏名	所属
◎大川 出	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
飯場 正紀	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部
小川 敦	(株)熊谷組 技術研究所 建設技術研究部
鹿嶋 俊英	独立行政法人建築研究所 国際地震工学センター
北浜 雅司	住友金属工業(株) 建設技術部土木技術研究室
小山 信	国土交通省 国土技術政策総合研究所 建築研究部
境 茂樹	(株)間組 技術・環境本部 技術研究所 技術研究部
尻無濱 昭三	鉄建建設(株) 技術研究所 建築技術開発グループ
花井 伸明	大木建設(株) 技術本部 技術研究所 構造解析室
日高 徳弘	(株)青木建設 研究所 建築研究室
福田 浩司	住友金属工業(株) 鋼板・建材カンパニー 建築技術部
○藤井 睦	(株)鴻池組 技術研究所 建築技術研究部門

氏名	所属
森田 高市	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
安井 健治	奥村組 技術研究所 第5研究グループ
保井 美敏	戸田建設(株) 技術研究所 構造グループ
横内 基	(株)青木建設 研究所 建築研究室
渡壁 守正	戸田建設(株) 技術研究所 構造グループ

◎：主査、○：幹事

平成 16-18 年度勉強会メンバー(所属は H19 年 3 月)

氏名	所属
◎大川 出	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
飯場 正紀	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
小川 敦	(株)熊谷組 技術研究所 建設技術研究部
鹿嶋 俊英	独立行政法人建築研究所 国際地震工学センター
北浜 雅司	住友金属(株) 建設技術部 受託試験チーム
小山 信	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
境 茂樹	(株)間組 技術・環境本部 技術研究所 技術研究第二部
西 正晃	(株)間組 技術・環境本部 技術研究所 技術研究第二部
尻無濱 昭三	鉄建建設(株) エンジニアリング本部 建築技術部
日高 徳弘	青木あすなろ建設(株) 技術本部技術研究所 建築研究室
藤井 睦	(株)鴻池組 技術研究所 建築技術研究部門
森田 高市	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ
安井 健治	(株)奥村組 技術研究所 構造グループ
○保井 美敏	戸田建設(株) 技術研究所 環境グループ
横内 基	青木あすなろ建設(株) 技術本部技術研究所 建築研究室
渡壁 守正	戸田建設(株) 技術研究所 構造グループ

◎：主査、○：幹事

本報告書の執筆担当は、以下のようである。

全体調整：大川、飯場

第1章：飯場

第2章：飯場、小山

第3章：小山、飯場

第4章：藤井、飯場

第5章：森田、渡壁

第6章：境、渡壁

第7章：渡壁、飯場

第8章：保井、飯場

第9章：飯場

(第1章 参考文献)

- 1) 八木茂治、福和伸夫、飛田潤：常時微動計測に基づく低層 RC 造建物の伝達関数推定にレーリー波による回転入力を与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.77-84、2002

2. 対象建物と地盤条件

対象建物の基準階平面図及び短辺方向の断面図を、図 2.1 に示す。また本建物の全体の様子を写真 2.1 に示す。本建物は、茨城県つくば市に建設された、中廊下型の集合住宅である。平面は短辺方向 3 スパン、長辺方向 9 スパンの矩形であり、平面の寸法比は 1:3.2 である。また本建物は 7 階建であり、平面寸法に対する高さの比は、短辺、長辺方向でそれぞれ 1.47 と 0.46 である。本建物は、壁・床に、鉄筋コンクリート(RC)造のプレキャスト(PCa)版を用いて、梁は RC 造、柱は鉄骨鉄筋コンクリート造であり、PC 杭で支持されている。図 2.2 に、建物の配置図を示す。60m 程度離れて同一建物が 2 棟(A,B) 建設されている。建物の北側には幹線道路が、西側には片側 1 車線の道路がある。

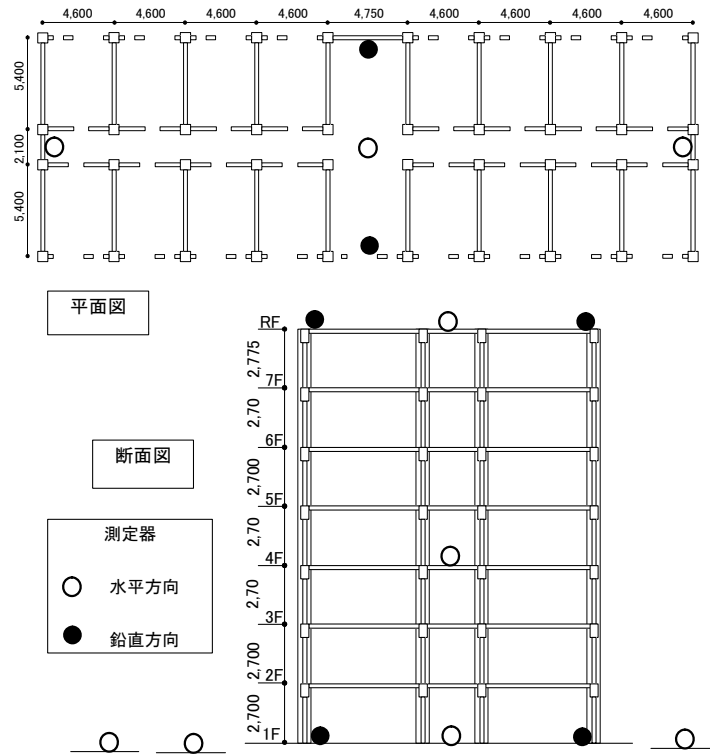


図 2.1 対象建物の形状と寸法の概要および短辺方向の測定器配置



写真 2.1 対象建物の全体概要

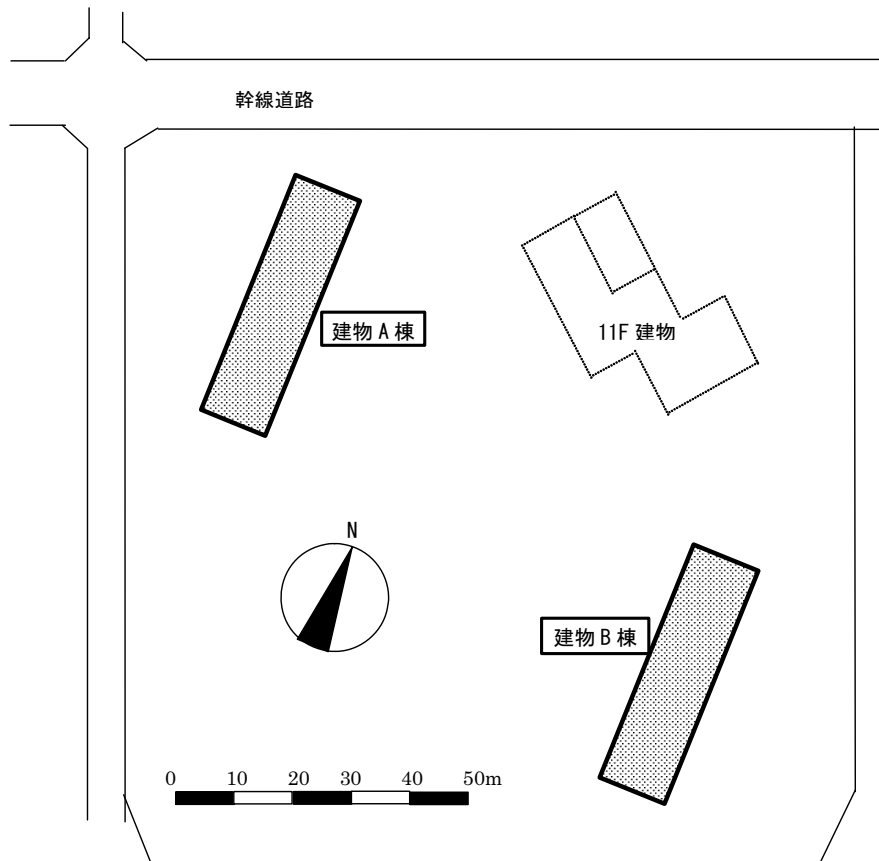


図 2.2 建物の配置図と周辺状況

図 2.3 に、周辺の地盤条件を示す。表層にローム層があり、深さ 6.6m までは N 値 5 程度のシルト質地盤、それ以降は 15m 程度まで N 値が増加し、それ以降は N 値が 30 以上の砂質地盤である。さらに、30m 以深には砂質土と粘性土が混在し、41.5m 以深には砂礫層が現れる。

(第 2 章 参考文献)

1) 筑波研究学園都市地盤図編集委員会：筑波研究学園都市地盤図、p.257、1981

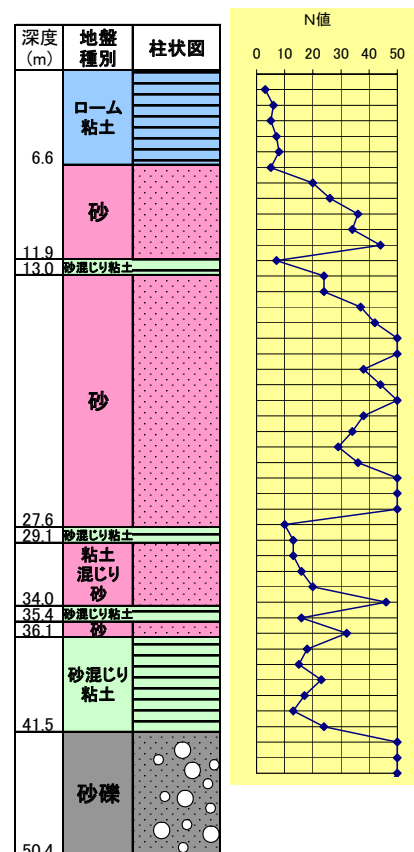


図 2.3 地盤柱状図と N 値

2. 計測内容

建物の振動性状を測定するために、以下の2通りの方法を用いた。

- a) 常時微動測定：建物および地盤上の常時微動を測定した。本測定では、600秒または500秒間の測定を連続して6~8回収録した。
- b) 人力加振：建物7階の中央部分の柱に人力(6名程度)による強制加振(連成系建物の1次卓越振動数に対応させた加振、約10秒間)に伴う、加振中および加振後の振動を数回収録した。

短辺と長辺方向の測定位置を図3.1に示す。1階とR階に水平成分3点、上下2点、4階に水平1点、周辺地盤上(建物から13mに2点、26m離れた位置)に水平3点の測定器を設置した(2棟とも共通)。

各棟で別の測定器を用い、A棟ではサーボ型速度計(VSE-15D、東京測振製)により速度波形を、B棟では動コイル型換振器(MTK-H/V、振動技研製)により速度波形を測定した。

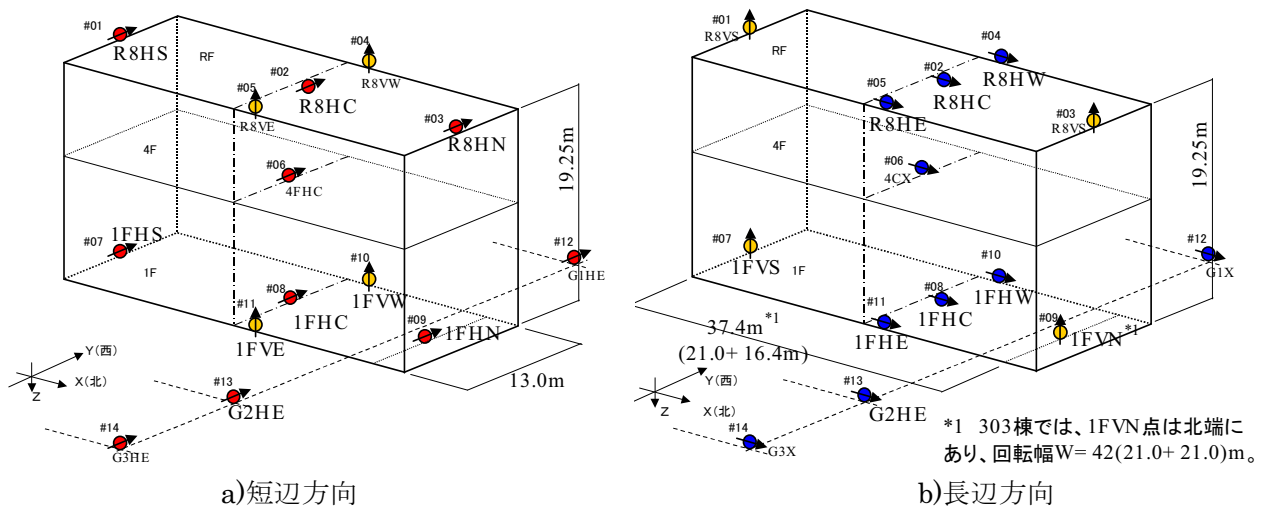


図 3.1 測定点位置と記号

3. スウェイ・ロッキングによる建物の振動特性

本章では、建物の振動特性における動的相互作用の影響を検討するため、地盤を考慮した最もシンプルな振動モデル(スウェイ・ロッキングモデル)での入出力関係をもとに、実測微動記録を用いて地盤効果を取り除いた建物の系の固有振動数および減衰定数を求め、地盤連成系の固有振動数との比較を行う。また、2棟の類似対象建物での相違、長辺と短辺の方向での相違について比較検討する。

4.1 振動系の入力と出力の関係

(1) スウェイ・ロッキングモデル

建物の周辺地盤を含む振動系のモデルには、文献^{1, 2)}を参考にして、図 4.1 に示すスウェイ・ロッキングモデルを想定している。このモデルでは、地盤効果を全て含む地盤連成系(建物+スウェイ+ロッキング, 以下 **SRB** 系), ロッキングのみ含む系(建物+ロッキング, 以下 **RB** 系)および基礎固定系に相当する建物だけの系(以下 **B** 系)の入出力関係はそれぞれ表 4.1 のように示される。

表 4.1 3系の入出力関係

	系	入力	出力
1)	SRB	u_g	$u_g + u_f + H \cdot \theta + u$
2)	RB	$u_g + u_f'$	
3)	B	$u_g + u_f' + H \cdot \theta$	

u_g : 自由地盤の変位

u_f' : 基礎入力動変位

u_f'' : 基礎スウェイ変位

u_f : 自由地盤に対する1階の変位

ここでは、 $u_f = u_f' + u_f''$ と仮定する。

u : 1階に対する建物頂部の変位(変形)

H : 建物の高さ

θ : 1階床での回転角

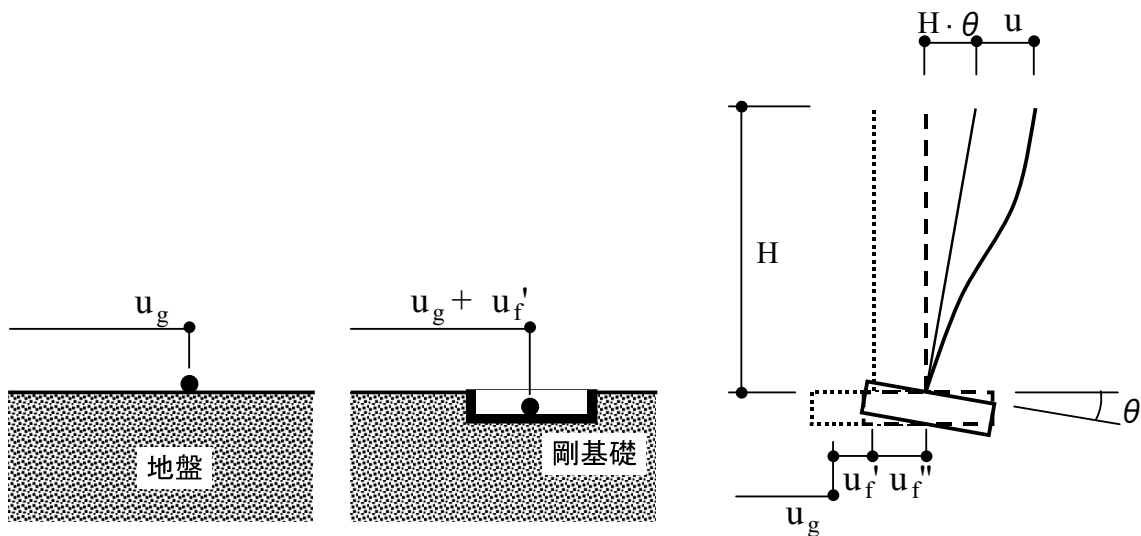


図 4.1 スウェイ・ロッキングモデル

(2) 測定における入出力

表 4.1 の入出力に対応する測定点を図 3.1 の測定位置・記号を用いて表 4.2 に示す。すなわち、表 4.2 に示す測定点の時系列記録(あるいはそれらの四則演算結果)が、各系の入出力に相当する。今回の場合、建物が平面的に長いことと近地交通振動が多いことから、頂部および基礎の水平成分はそれぞれ 3 測定点の平均を対応させている。長辺方向での回転成分については長辺両端の上下動成分をそのまま基礎の回転量とみなすにはやや疑問があるが、基礎中間部の記録を得ていないことから今回は基礎端部の上下動成分をそのまま用いている。なお、表 4.2 のうち回転成分 $H\theta$ は、振動計極性が関わるので、A棟の場合(下向き正)にはそのまま対応するが、B棟(上向き正)では減算の符号を変えることになる。

表 4.2 モデルの入出力と測定位置との関係

モデル入出力		短辺方向(A棟・B棟)	長辺方向(A棟)	長辺方向(B棟)
SRB, RB, B系出力	$u_g + u_r + H\theta + u$	$(R8HC + (R8HN + R8HS)/2)/2$	$(R8HC + (R8HW + R8HE)/2)/2$	
SRB系入力	u_g	G2HE		
RB系入力	$u_g + u_r$	$(1FHC + (1FHN + 1FHS)/2)/2$	$(1FHC + (1FHW + 1FHE)/2)/2$	
B系入力	$u_g + u_r + H\theta$	$(1FHC + (1FHN + 1FHS)/2)/2 + H(1FVW - 1FVE)/W$	$(1FHC + (1FHW + 1FHE)/2)/2 + H \cdot 1FVN/W - H \cdot 1FVS/W$	$(1FHC + (1FHW + 1FHE)/2)/2 + H(1FVN - 1FVS)/W$
測定位置間距離	高さ H	19.25m		
	回転幅 W (W1+W2)	13.0m	37.4m (21.0m+16.4m)	42.0m (21.0m+21.0m)

4.2 卓越振動数・減衰定数の算出方法

(1) 伝達関数による卓越振動数の算出

各系の卓越振動数(1次)は、前項に示した入出力関係での伝達関数振幅比スペクトルのピーク振動数とする。伝達関数振幅比の算出には、クロススペクトルとフーリエスペクトルを用いる方法の3種類があるが³⁾、位相差スペクトルとの対応をとるため、下式のうち(4.1)式の $H1(\omega)$ を用いている。

$$H1(\omega) = S_{io}(\omega) / S_{ii}(\omega) \quad (4.1)$$

$$H2(\omega) = S_{oo}(\omega) / S_{oi}(\omega) \quad (4.2)$$

$$H3(\omega) = \sqrt{S_{oo}(\omega) / S_{ii}(\omega)} \quad (4.3)$$

$$\left[\begin{array}{l} i: \text{入力} \quad o: \text{出力} \\ S_{io}, S_{oi}: \text{クロススペクトル} \\ S_{ii}, S_{oo}: \text{パワースペクトル} \end{array} \right.$$

周波数領域での計算方法⁴⁾では、まず、一定長の時系列データ窓に対してフーリエ変換(FFT法)によってクロススペクトル、パワースペクトルを求め、順次データ窓を移動させながら累加することで記録全長にわたる平均のスペクトルを求め、最後に Hanning の方法で平滑化を行って最終的なスペクトルとして、(4.1)式の絶対値から伝達関数の振幅を求めている。時系列のデータ窓長さは 80 秒であり、フーリエ変換時にはゼロを付加する。データ窓の移動ピッチは 40 秒(隣接データ窓とのラップ 50%)である。Hanning の平滑化回数は、試行分析を経て、最終的に 8 回としている。なお、微動のスペクトル計算では、時系列の良好な記録部分を用いてそれらの平均スペクトルを求めることが多いと思われるが、

今回の測定記録には近地交通振動のノイズが多いことから、時系列記録の取捨選択を行うことなく、可能な限り長い記録(時系列データファイル全数)の平均をとることとした。また前述のように複数測定点の平均をとることでノイズの影響を抑えることができると考えている。

また、上記の振幅比スペクトル(H1(ω))に加えて、累加平均で求めたフーリエスペクトル比による振幅スペクトル(H3(ω))も求めた。その結果を比率も参考として示す。

(2) 位相勾配による減衰定数の算出

減衰定数は1次卓越振動数付近で伝達関数位相差が90度前後となる振動数での位相勾配から求めることができる⁵⁾。位相差スペクトルの算出方法は、前述の伝達関数の振幅と同様であり、H1(ω)の実部と虚部の逆正接から位相角を求めた。ただし、平滑化は行っていない。位相勾配は、目視によりほぼ直線部を選び、最小二乗法によって求めた。なお、B系の位相差スペクトルにあっては、位相差(遅れ)が負側に生じているがこれも正側の値とみなして求めた。これらは下部入力での応答の理論と矛盾するが、この先の現象解明に資するため、あえて結果を残したものである。

4.3 建物の卓越振動数と減衰定数

(1) 時系列入出力成分

まず、図4.2に、微動記録の波形例(1)~(4)とそれらから求めた各系入出力に相当する波形例(5),(7)、基礎と頂部の相対応答と回転成分に相当する波形例(6)、およびそれらのフーリエスペクトル(8)~(10)を示す。図4.2(a)は短辺方向の場合、同(b)は長辺方向の場合である。これらのフーリエスペクトルは、前述のような時刻歴データファイル全数平均ではなく、10分間(1ファイル分)の平均である。

波形例によれば、建物内の水平成分の時刻歴は、長辺方向3点では測点位置に近いこともあり振幅・位相がほぼ揃っているが、短辺方向3点では振幅・位相が一致しておらず、建物のねじれ応答あるいは入力の位相差の影響が見られる。一方、上下動成分の時刻歴では地盤の上下動が卓越しており基礎の回転成分は直接確認できない。しかしながら、短辺方向では水平応答が大きい時には1階床両端の上下成分が逆位相で振動し、水平応答が小さい時には両端とも同じ挙動となっているが、回転応答が生じていることがうかがえる。長辺方向でも同様の傾向があるが、両端で常に位相・振幅が乱れており明瞭ではない。

次に、各系の入出力に相当する時刻歴を見る。長辺方向、短辺方向とも、1階床上と頂部の応答(u_g+u_r と $u_g+u_r+H\theta+u$)は位相と振幅変化が一致しており、また振幅比は数倍程度である。両者はRB系の入出力に相当するが、頂部応答が増大してゆく時にも位相差が少ない。

頂部と基礎の相対応答と基礎回転成分($H\theta+u$ と $H\theta$)の時刻歴によると、短辺方向では相対応答振幅の50~90%を回転成分が占めているのに対して、長辺方向では30%程度以下であることがわかる。

B系(基礎固定系)の入力に相当する $u_g+u_r+H\theta$ の時刻歴は、他の波形がおおむね正弦波状であるのに対して、スパイク的なピークを持つ三角波的な形状となる傾向にあり、特に短辺方向の場合に強い。

各測点、各系入出力の振動数成分を見ておくと、地盤の周波数特性は、建物1次3Hz付近では2倍程度のレベル差であり、おおむね平坦な入力である。また、交通振動による10Hz以上の高振動数成分と、長辺方向測定時の特に上下動成分に顕著な約1.3Hzのピーク(長辺方向時全記録に存在)が見られるが、建物特性の分析に支障となるようなノイズ成分は見られない。

(2) 卓越振動数の比較

前項の方法により求めた伝達関数の振幅スペクトルおよび同位相差スペクトルを図4.3(a)~(d)に、それらのピーク振動数から求めた各系の卓越振動数を表4.3(1)に示す。

a) 振幅比スペクトル形状

得られた振幅は、1質点振動系の伝達関数の振動特性とほぼ同様な形状を示し、おおむね単峰のピークを有する。ピーク近傍の詳細形状では、単純な単峰とならない場合も見られる。建物方向および棟別に比較すると、B棟長辺方向のB系での卓越振動数付近でスペクトルの拡がりや他に比べて大きく、ピ

ーク以後の振幅比の低下が緩慢であることから、ロッキング成分が上手く評価できていないことが考えられる。

各系のピークにおける振幅は、短辺方向では $SRB > RB > B$ であり、スペクトルピークの裾の広がり大きさも同様に $SRB > RB > B$ である。長辺方向での振幅比には顕著な差が見られない。

b)卓越振動数

振幅スペクトルの卓越振動数は、短辺方向では $SRB < RB < B$ であり、各系で明確に異なる。長辺方向では、 $SRB < RB \approx B$ あるいは $SRB < RB \leq B$ の関係となる。これら卓越振動数の大小関係および方向による差は、それぞれの系のスウェイバネおよびロッキングバネの有無による大小関係および長辺方向ロッキングバネに見込める相対的な大きさと整合している。ただし、長辺方向については、モデルで想定している基礎の剛体回転(ロッキング)が成立し難いと考えられ、想定したモデルで良いか検討する必要がある。また、測点間距離の長い長辺方向では微動の入力の位相差による影響を受けやすく、ロッキング成分を正しく捉え難いことも考えられる。

表 4.3(1)に示す B 系(基礎固定)の卓越振動数に対する各系の卓越振動数の比を見ると、まず、短辺方向においては、RB 系では 0.77~0.78 に、SRB 系では 0.68~0.70 に振動数が低下している。これは、基礎固定に比べて全体系の振動数の低下が 30%以上あることに相当しており、微小振幅域において対象建物は地盤による影響を大きく受けている。表右欄は簡略化した相互作用モデルに基づいて実測値から求めた系の振動数であり⁶⁾、例えば”S”系はスウェイバネ以外のロッキングおよび建物の両バネを無限大とした系に対応する。短辺方向ではロッキングの影響が大きいことがわかる。一方、長辺方向においては、RB 系では 0.87~0.99 に、SRB 系では 0.75~0.78 に振動数が低下している。全体系の振動数の低下は、短辺方向に比べてやや少ないが、やはり地盤の影響を受けている。ただし、卓越振動数の低下は主にスウェイの影響によるものとみなされる。

同表(2)に示すように、上部構造がほぼ同じである A 棟と B 棟の卓越振動数比(A 棟/B 棟)を比較すると、短辺方向では S 系等算出値を含めても 1.00~1.07 でほぼ等しい。B 系振動数がほぼ等しく(1.005)、地盤に起因する卓越振動数が系統的にわずかに高く、なかでも S 系振動数が高い(1.07)ことは、B 棟が敷地東の法面側に位置していることが差の原因の一つと考えられる。一方、長辺方向では、記録から直接に求まる SRB 系と RB 系の卓越振動数の比が 0.96~1.07 でおおむね等しいのに対して、ロッキングの評価に関わる B 系の卓越振動数の比は 1.22、S 系等算出値では 0.26~1.36 で大きな差がある。各棟で地盤と上部構造が大きくな違いがないことから、長辺方向についてはロッキングの評価方法が結果に影響していると考えられる。

表 4.3 建物方向、棟、算出方法別の卓越振動数の比較

(1)卓越振動数およびB系振動数 f_B に対する比

		f_{SRB} Hz	f_{RB} Hz	f_B Hz	f_S Hz	f_R Hz	f_{SB} Hz
短辺方向	A棟	2.87 (0.70)	3.23 (0.78)	4.13 (1.00)	6.21 (1.50)	5.21 (1.26)	3.44 (0.83)
	B棟	2.80 (0.68)	3.19 (0.77)	4.11 (1.00)	5.83 (1.42)	5.04 (1.22)	3.36 (0.82)
長辺方向	A棟	2.62 (0.78)	3.32 (0.99)	3.37 (1.00)	4.28 (1.27)	19.57 (5.81)	2.65 (0.79)
	B棟	2.76 (0.75)	3.21 (0.87)	3.70 (1.00)	5.39 (1.46)	6.47 (1.75)	3.05 (0.82)

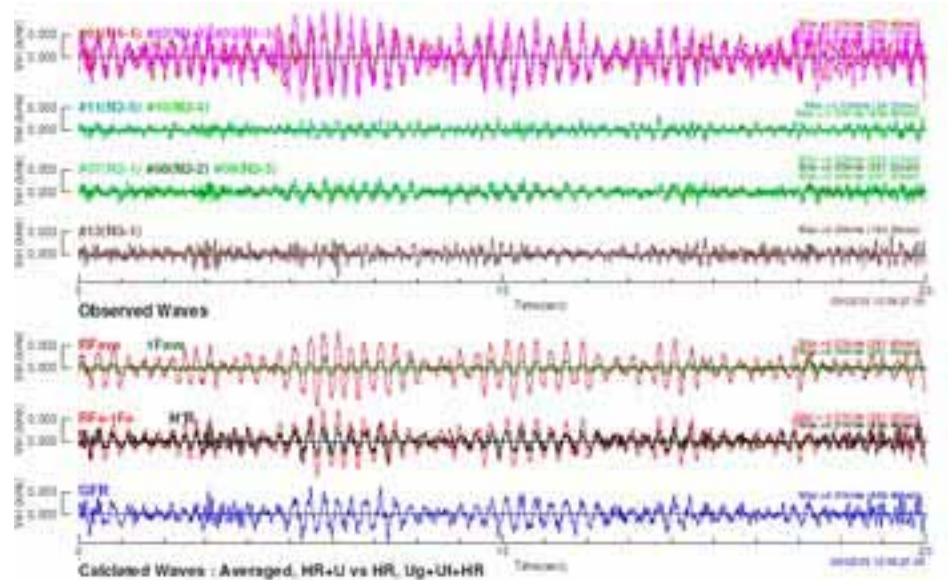
(2)B棟卓越振動数に対するA棟卓越振動数の比

		$f_{A棟} / f_{B棟}$					
		SRB	RB	B	S	R	SB
短辺方向		1.03	1.02	1.00	1.07	1.03	1.02
長辺方向		1.07	0.96	1.22	1.36	0.26	1.27

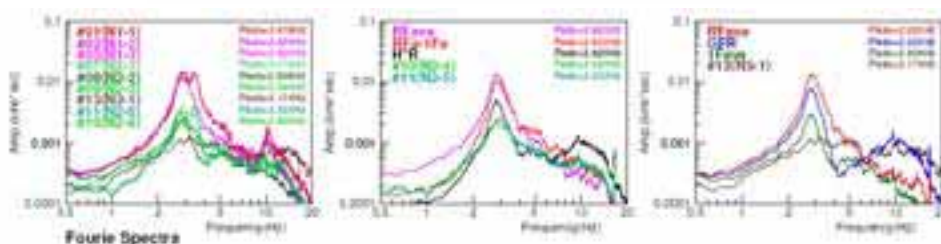
(3) $H1(\omega)$ に対する $H3(\omega)$ の卓越振動数の比

		$f_{H3(\omega)} / f_{H1(\omega)}$					
		SRB	RB	B	S	R	SB
短辺方向	A棟	1.03	1.03	1.01	1.02	1.07	1.02
	B棟	1.03	1.02	1.03	1.05	1.01	1.03
長辺方向	A棟	1.07	1.01	1.06	1.19	0.56	1.10
	B棟	1.05	1.07	1.02	1.01	1.28	1.02

- (1) 頂部水平 3 測点
- (2) 1 階床上下 2 測点
- (3) 1 階床平 3 測点
- (4) 自由地盤(u_g)

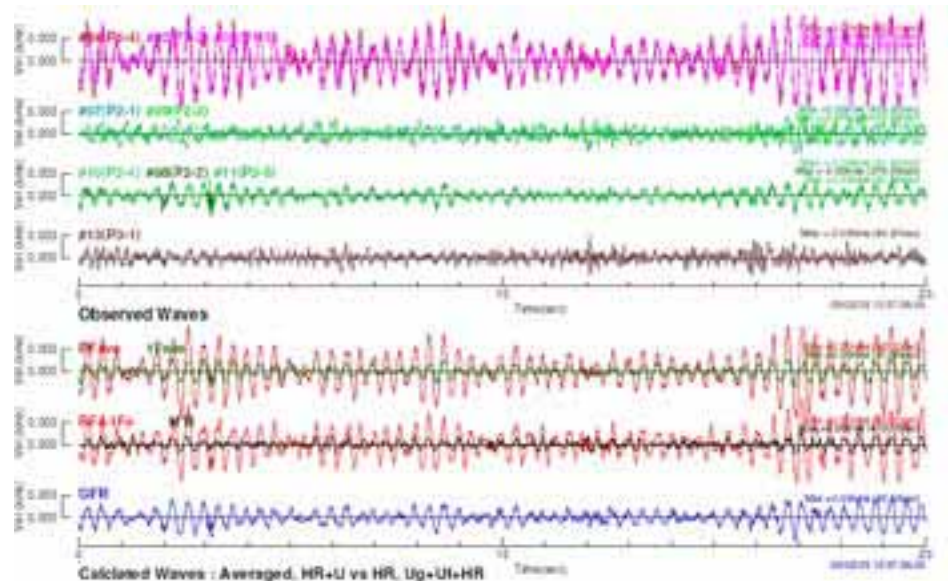


- (5) $u_g+u_f+H\theta+u$, u_g+u_f
- (6) $H\theta+u$, $H\theta$
- (7) $u_g+u_f+H\theta$

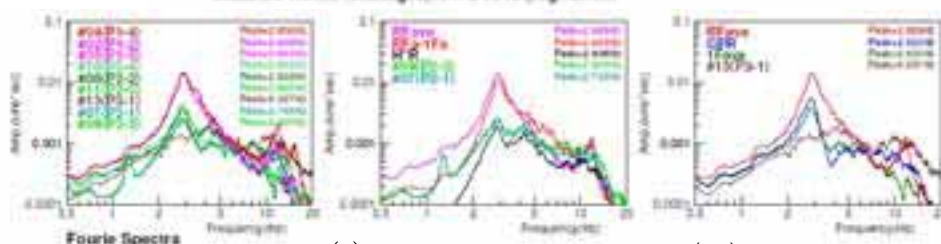


(8)各点フーリエスペクトル (9) $u_g+u_f+H\theta+u$, $H\theta+u$, (10) $u_g+u_f+H\theta+u$, $u_g+u_f+H\theta$, u_g+u_f , 自由地盤(u_g)
 (a) 短辺方向, B棟 (Data:TM01)

- (1) 頂部水平 3 測点
- (2) 1 階床上下 2 測点
- (3) 1 階床水平 3 測点
- (4) 自由地盤(u_g)

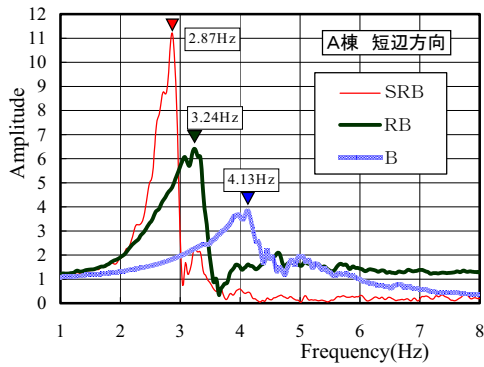


- (5) $u_g+u_f+H\theta+u$, u_g+u_f
- (6) $H\theta+u$, $H\theta$
- (7) $u_g+u_f+H\theta$

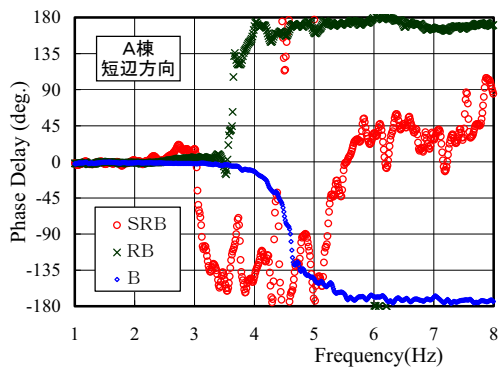


(8)各点フーリエスペクトル (9) $u_g+u_f+H\theta+u$, $H\theta+u$, (10) $u_g+u_f+H\theta+u$, $u_g+u_f+H\theta$, u_g+u_f , 自由地盤(u_g)
 (b) 長辺方向, B棟 (Data:LM04)

図 4.2 微動波形例とその入出力成分およびフーリエスペクトル

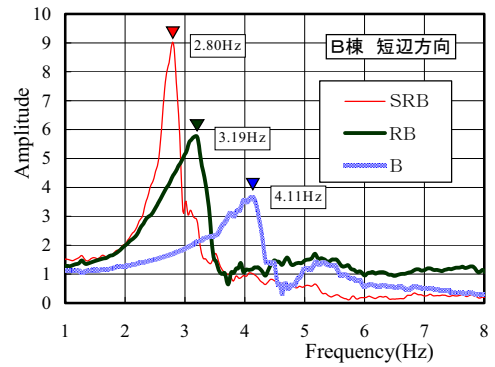


(1) Amplification

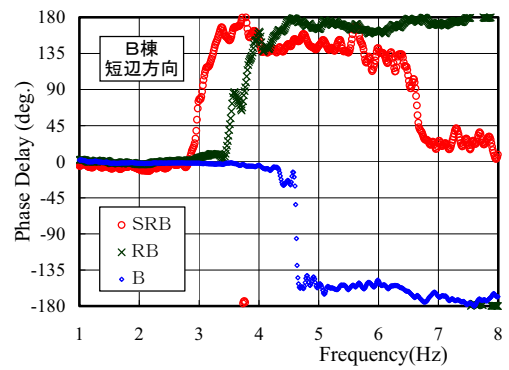


(2) Phase Difference

(a) A棟・短辺方向

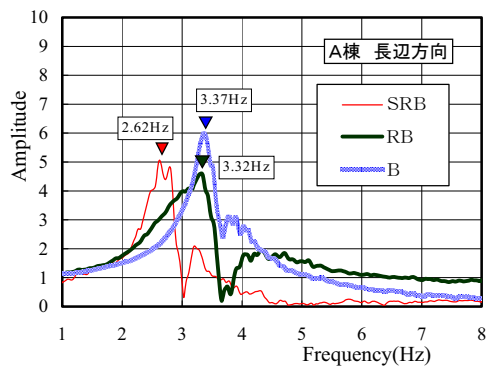


(1) Amplification

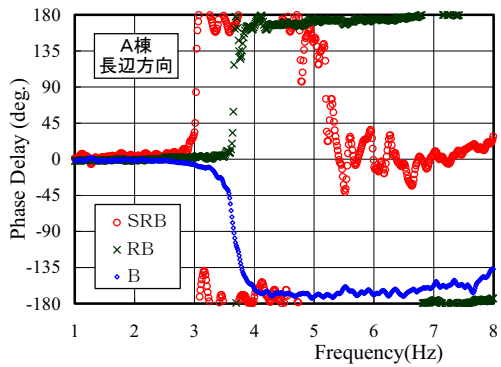


(2) Phase Difference

(b) B棟・短辺方向

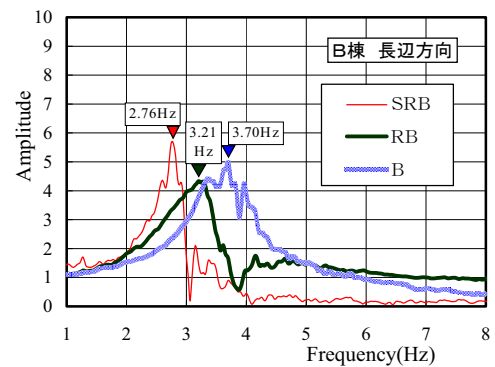


(1) Amplification

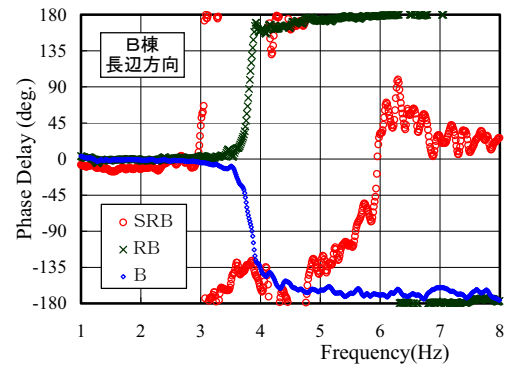


(2) Phase Difference

(c) A棟・長辺方向



(1) Amplification



(2) Phase Difference

(b) B棟・長辺方向

図 4.3 伝達関数振幅スペクトルおよび位相差スペクトル

c)伝達関数算出方法による比較

表 4.3(3)に伝達関数 $H1(\omega)$ および $H3(\omega)$ による卓越振動数の比 f_{H3}/f_{H1} を示す。計算方法の違いによる卓越振動数への影響は少なく、実測 3 系の短辺方向で 1.01~1.03、同長辺方向で 1.01~1.07 である。なお、入出力間の相関性が考慮される $H1(\omega)$ に対して、考慮されない $H3(\omega)$ の卓越振動数が系統的に高めであることは、卓越振動数付近での入出力間の相関性が強くないことを示すものである。

(3) 減衰定数の算出

a)位相差スペクトル

位相差スペクトルにおける位相遅れ 90 度となる振動数は、振幅スペクトルのピーク振動数ではなく、ピーク直後の谷となる振動数に近い。この傾向は、両棟、両方向に見られる。ただし、B 系の位相差スペクトルでは全て曲線が負側(位相進み側)に生じており、位相曲線の一般的傾向と整合しない。さらに、A 棟の短辺方向では SRB 系の位相差スペクトルが負側に生じ、また曲線も他に比べて滑らかさを欠いている。主に入出力位置での振幅の大きさに基づく振幅スペクトルに比べ、位相差スペクトルは、入力位相差および建物のねじれ(応答の位相差)の影響を受けやすいものと考えられる。なお、今回求めた位相曲線は前述のスウェイ・ロッキングモデル入出力関係に基づいており、質点系等での理論位相曲線(相対応答/入力)とは本来異なることが考えられる。

表 4.4 伝達関数位相勾配から求めた各系の減衰定数

		SRB	RB	B	
減衰定数 h_{phase} (%)	短辺方向	A棟	-	5.1	7.4
		B棟	6.0	7.5	5.8
	長辺方向	A棟	-	4.0	5.5
		B棟	2.3	3.9	4.5

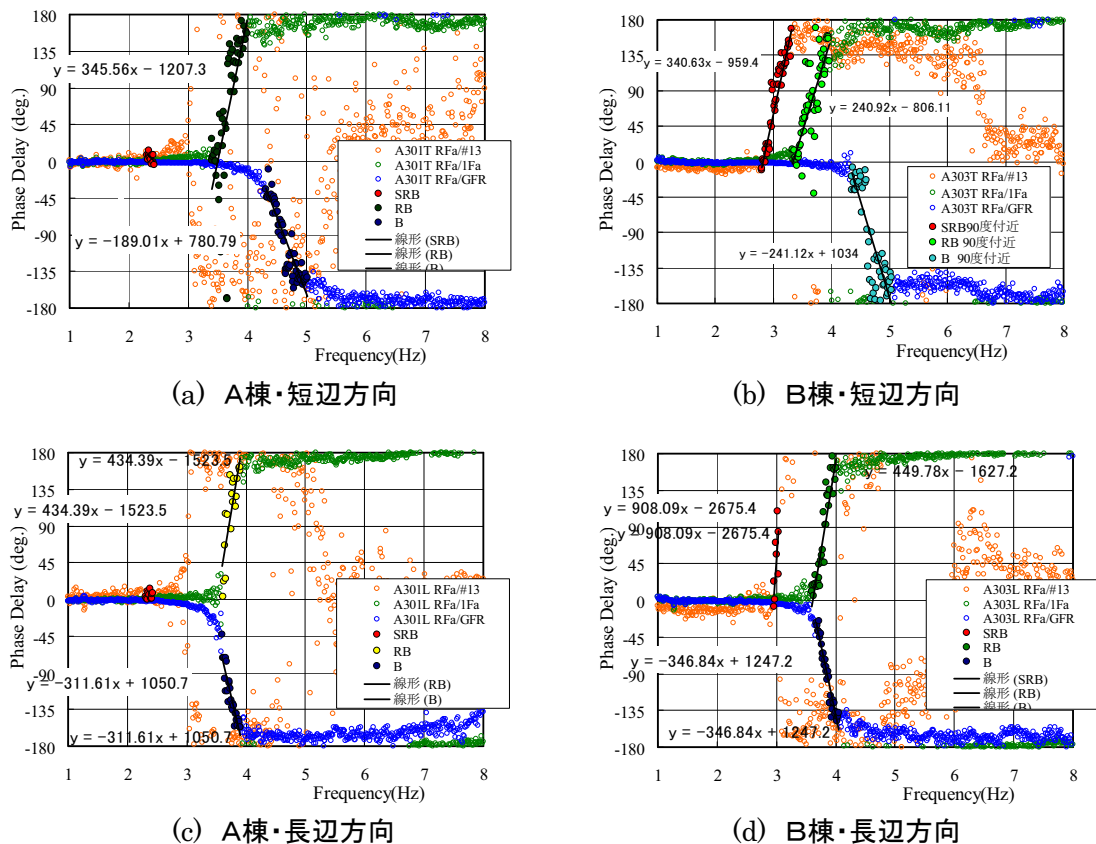


図 4.4 位相特性の評価

b)減衰定数

図 4.4 に位相差スペクトルに位相差 90 前後の位相勾配ラインをプロットして示す。また、表 4.4 に位相勾配から算出した各系の減衰定数を示す。得られた実測 3 系の減衰定数は、2.3～7.5%である。系、建物方向、A棟とB棟の比較において、系統的な傾向は見られない。強いて言えば、長辺方向の減衰定数が短辺方向に比べてやや小さめである。

(第4章 参考文献)

- 1) 八木茂治、福和伸夫、飛田潤：常時微動計測に基づく低層 RC 造建物の伝達関数推定にレーリー波による回転入力を与える影響、日本建築学会構造系論文集、No.552、pp.77-84、2002
- 2) J. P. Stewart and G. L. Fenves：System Identification for Evaluating Soil-Structure Interaction Effects in Buildings from Strong Motion Recordings, EESD, 27, pp.869-885, 1998
- 3) 日本建築学会：建築物の減衰、4.3.2 伝達関数の推定法、pp.87-89、2000
- 4) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門、1978
- 5) 日本建築学会：建築物の減衰、4.4.2 周波数応答データに基づく減衰定数評価法、p92-95、2000
- 6) 日本建築学会：入門:建物と地盤の動的相互作用、pp.17-19、1996

5. 建物のねじれ振動特性

質量または剛性が偏在している建物が振動する場合、床の回転を伴うねじれ振動が起こる。A棟のねじれ振動について検討した。

建物の両端で計測した速度の差を取ることで、ねじれ成分を抽出した。具体的には、第3章・計測内容の図3.1における両端の振動の差（R8HS-R8HN）を屋上階のねじれ成分とし、（1FHS-1FHN）を1階のねじれ成分とした。さらに、建物の幅（42m）で割ることにより、角速度とした。

1階と屋上階のねじれ成分を取り出して、図5.1にパワースペクトル密度を示した。1階と屋上階ともにピークの振動数は3.4Hzであった。3.4Hz付近がねじれの固有振動数と考えられる。ねじれのピークの左側に見られる2.7Hz付近のピークは並進の1次固有振動数である。

日本建築学会「建築物の減衰」によると並進とねじれ固有振動数の一般的な関係は $\text{ねじれ振動数} = 1.33 \times \text{並進振動数}$ であるが¹⁾、本建物では、ねじれ固有振動数が、3.4Hzであり、図4.3より、短辺方向の並進の固有振動数は約2.9Hzであり、並進に対するねじれ固有振動数の比は、1.17となる。

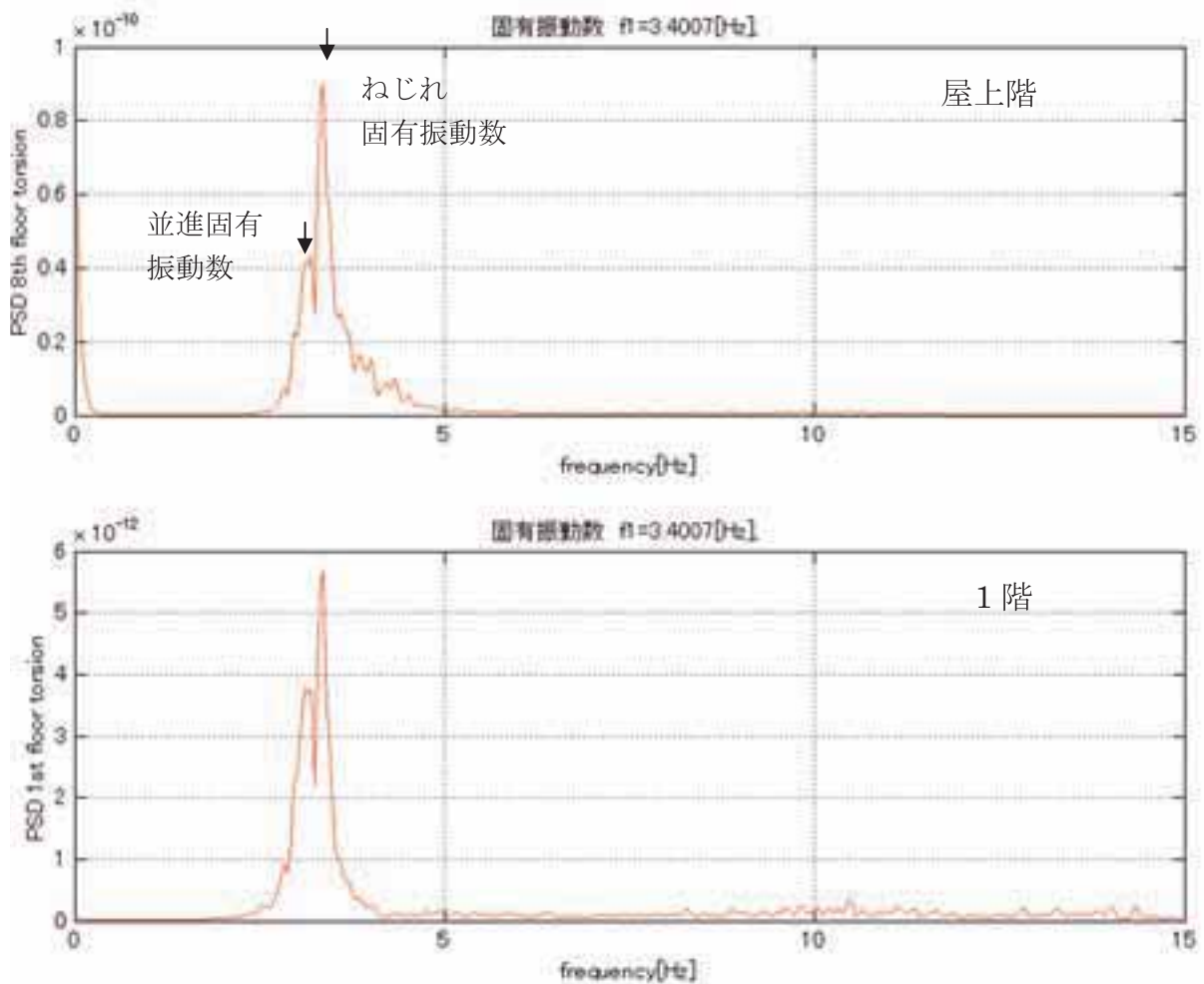


図 5.1 ねじれ成分のパワースペクトル密度

図 5.2 に、屋上階と 1 階のねじれ成分の伝達関数とコヒーレンスを示す。基礎のロックイン振動を伴う、基礎固定の条件におけるねじれ振動の伝達関数は、4Hz 付近にピークがある。図 4.3 より、短辺方向の並進の固有振動数(RB の値)は約 3.2Hz であり、並進に対するねじれ固有振動数の比は、1.25 となる。

コヒーレンスを見ると、ねじれの固有振動数である 3.4Hz 付近でほぼ 1 となっており、1 階と屋上階のねじれ振動の相関が非常に高いことが分かる。

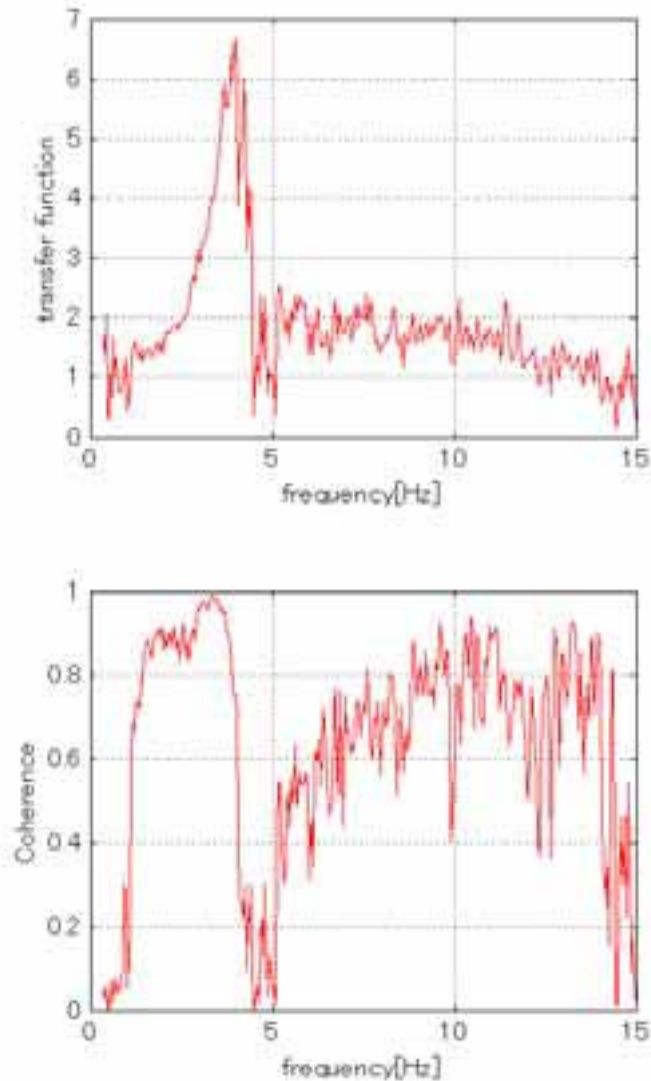


図 5.2 ねじれ成分の伝達関数とコヒーレンス

(第 5 章 参考文献)

- 1) 日本建築学会：建築物の減衰、pp.131-132、2000

6. RD法による建物の減衰特性

本章では、対象建物の減衰特性について検討するため、A棟、B棟の微動測定データから、建屋—地盤連成系の並進の1次振動数、ねじれの1次振動数ならびにロッキングの1次振動数に対する減衰定数を算出し、減衰定数の長辺方向、短辺方向の違い、類似形状である2棟の違い等について比較検討を行なった。また、得られた減衰定数の値について、既往の建物の実測結果と比較検討を行なった。

常時微動測定データによる減衰定数の推定方法としては、周波数応答データを用いる方法（カーブフィット法、ハーフパワー法、 $1/\sqrt{2}$ 法、位相勾配法）と自由振動波形を用いる方法がある²⁾。本章では、RD法による自由振動波形を用いた検討を行なった。なお、4章においてはスウェイ・ロッキング・建物系の伝達特性を算出する際、位相勾配法による減衰定数の推定を、7章では人力加振による自由振動波形を用いた方法で検討を行なっている。

6.1 RD法の概要¹⁾

建屋頂部における常時微動の応答 $X(t)$ を、建屋の自由振動 $D(t)$ とランダムな外力 $F(t)$ による強制振動 $R(t)$ との和で表現できると仮定した場合、応答 $X(t)$ の時系列波形を、図 6.1 のように $t=0$ において極大値となるように並べ時刻軸を揃えて重ね合わせると、 $\sum X_i(t)$ のうちランダムな強制振動成分の和 $\sum R_i(t)$ は 0 に近づき、自由振動成分の和 $\sum D_i(t)$ のみが残り、この重ね合わせ波形はランダムな極大値 P_i の和 $\sum P_i(t)$ を初期振幅とする自由振動波形となり次式で表せる。

$$\sum D_i(t) = (\sum P_i) \exp(-h \omega_0 t) \cdot \cos \sqrt{(1-h^2) \omega_0 t} \quad (6.1)$$

エルゴード過程では、アンサンブル平均を時間平均に置き換えることが可能である。したがって、上記のアンサンブル平均の重ね合わせを、時間軸方向に極大値を1つずつずらしながら重ね合わせで算出することができる。実際の測定データでは、エルゴード性を仮定して時間平均に基づいた確率統計解析を行なう場合がある。

本章では、測定データに建物の1次固有円振動数 ω_0 の狭帯域フィルターを施し、その重ね合わせ波形により、自由振動波形（RD波形）を算出し、その振幅の極値に最小2乗法を適用し減衰定数 h を算出した。

6.2 データ処理の方法

各減衰定数を算出する際に使用したデータは、連成系の並進の1次振動数については屋上階のセンター位置の測定結果を用いた。ねじれ振動に対しては屋上階の南側と北側の測定記録の差を、また、ロッキング振動については1階床の東側と西側の上下方向の測定記録の差を利用した。

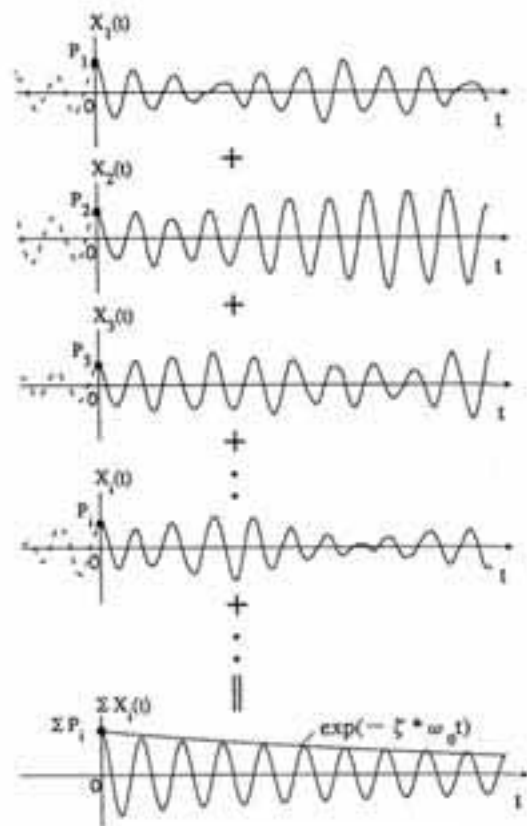


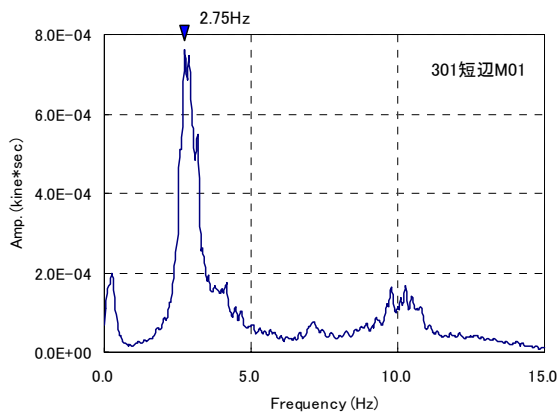
図 6.1 RD法の原理¹⁾

RD法の適用にあたっては、上記の記録に狭帯域のバンドパスフィルター（バターフィルター）を施した。フィルターの周波数範囲は、各振動成分の1次ピーク振動数を考慮し、連成系の短辺・長辺方向の並進1

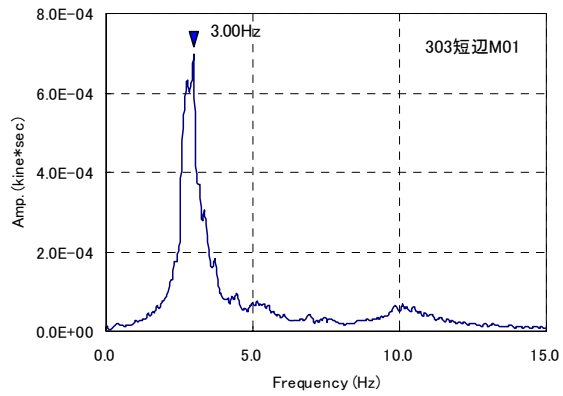
次振動成分およびロッキング成分については2～4 Hz のバンドパスを、また、ねじれ振動成分に対しては2～5 Hz のバンドパスとし、フーリエスペクトルの1次ピーク両側のスペクトルの裾野が入る程度のウィンドウ幅とした。各データのフーリエスペクトル（アンサンブル平均）の例を図 6.2 に示す。ロッキング成分のフーリエスペクトルにおいて、A 棟では10Hz 前後の高振動数成分が大きく、この成分は交通振動の影響と考えられる。このような非定常なノイズの影響を除去するため、フィルター処理は必要であると考えられる。

極大値を $t=0$ に揃えて重ね合せするデータは、各極大値から5秒間とし、全区間（301号棟は600秒間、303号棟は500秒間、 $\Delta t=0.005$ 秒）にわたって重ね合せを行なった。重ね合せにより各自由振動波形（RD 波形）は、データの最大値で基準化し、この最大値から、8個目までの極大値に最小2乗法を適用して減衰定数を算出した。RD 法は、各棟の短辺・長辺方向の並進、ねじれ、ロッキング毎に、各6回ずつの微動計測データに対し、RD 法を適用し、固有振動数、減衰定数の平均値を求めた。

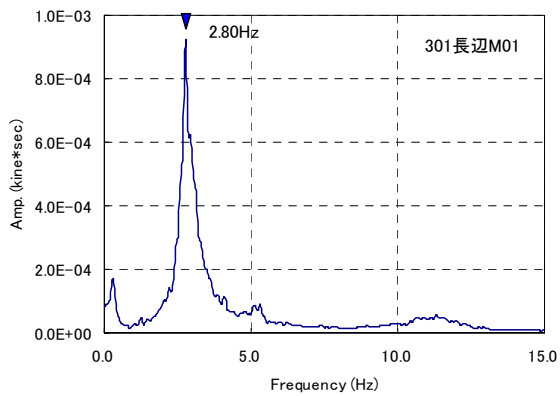
データ処理のフローを図 6.3 に示す。



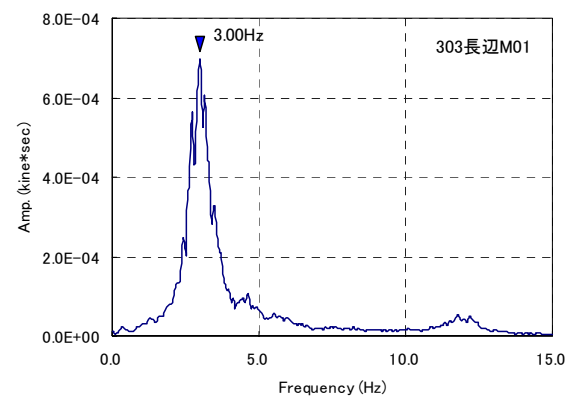
(a) A棟・並進・短辺方向



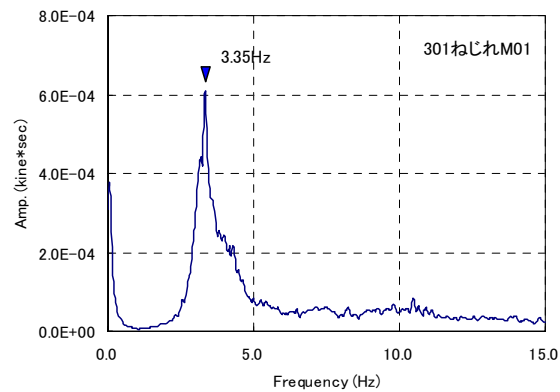
(b) B棟・並進・短辺方向



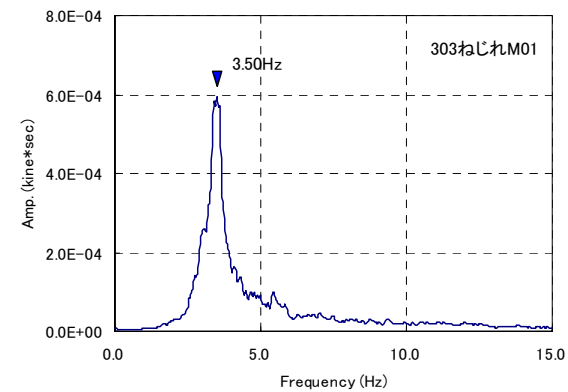
(c) A棟・並進・長辺方向



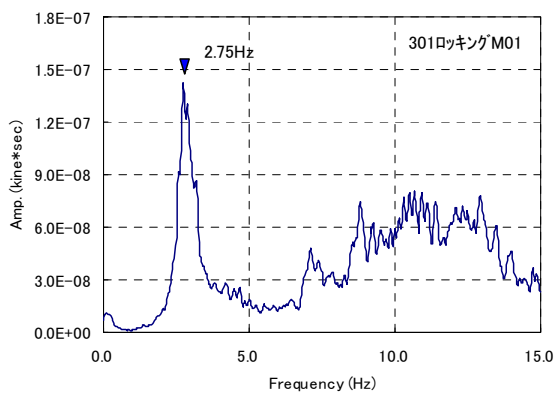
(d) B棟・並進・長辺方向



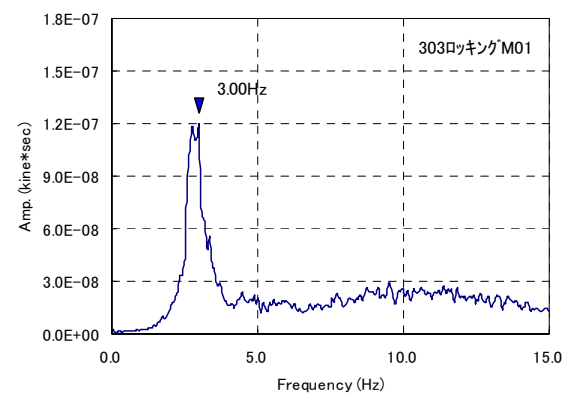
(e) A棟・ねじれ振動



(d) B棟・ねじれ振動



(f) A棟・ロッキング振動



(g) B棟・ロッキング振動

図 6.2 各微動のフーリエスペクトルの例
(バンドパスフィルターの処理前)

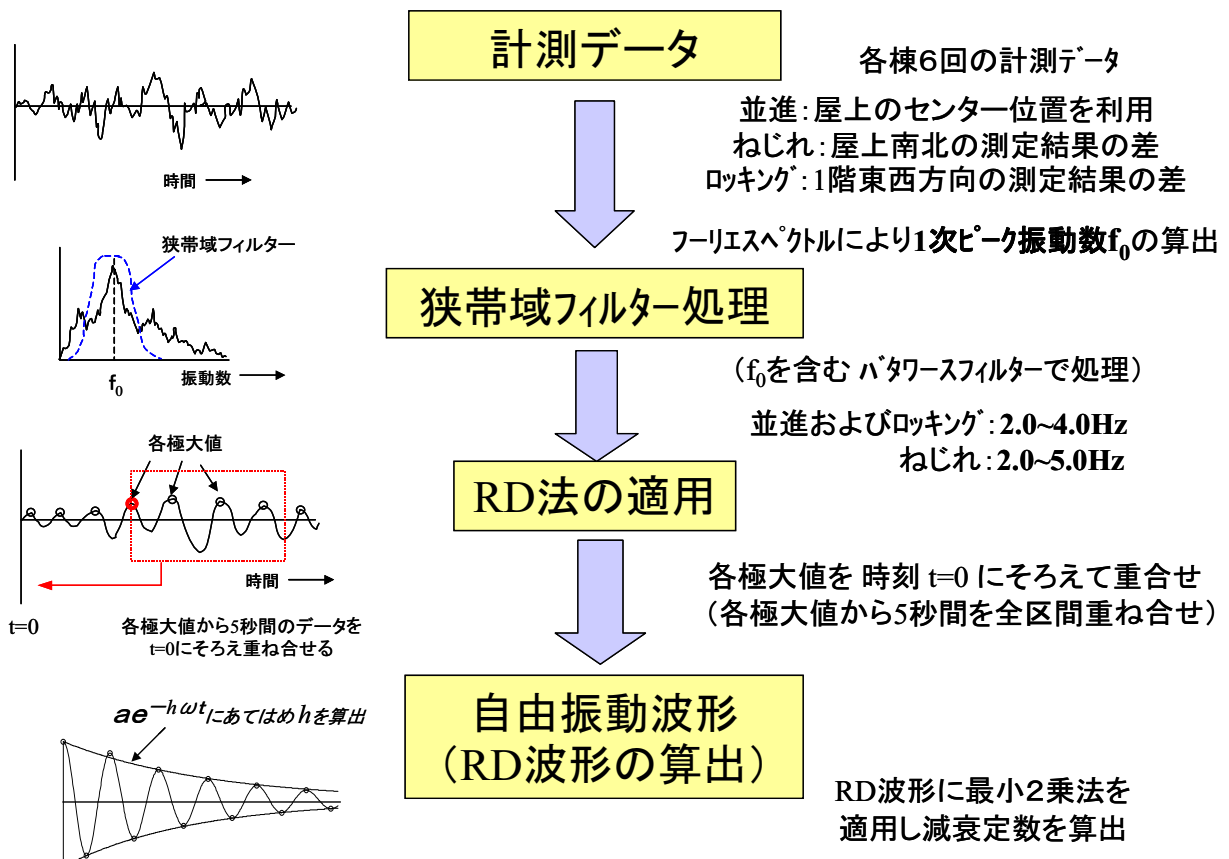


図 6.3 RD法によるデータ処理フロー

6.3 建物の減衰定数

1)RD 法による減衰定数

RD 法により求めた自由振動波形 (RD 波形、最大値に基準化) を図 6.4a~6.4h に示す。また、この図には、最小 2 乗法より求めた包絡線も図中に重ね書きした。この図から、全体的に、包絡線は RD 波形の減衰をよく表現しているが、2 番目の極大値については、包絡線から若干外れる傾向が認められる。

表 6.1 には、各計測データ毎のフーリエスペクトルから算出した 1 次振動数、RD 波形より算出した減衰定数の結果、および RD 波形算出時の重ね合せ回数を整理して示す。この表より、連成系の並進 1 次振動数に対する減衰定数は、計測データでばらつきはあるものの、平均的にみると短辺方向で 5.5~6.0%、また長辺方向で 6.5~6.9%となり、長辺方向の減衰定数が短辺方向の結果に比べてやや大きく評価された。

一方、ねじれの減衰定数は、A 棟で 4.89~7.39% (平均 6.36%)、B 棟で 4.26~5.26% (平均 4.70%) と A 棟の方が B 棟に比べばらつきが大きく、減衰定数の平均値も 1 %以上大きい結果となった。

ロッキング成分については、平均的にみると 5.59~6.11%となり、A 棟が B 棟に比べてやや大きい結果となった。

表 6.1 RD 法による減衰定数の算出結果

	A棟				B棟			
	ファイル名	F ₀ (Hz) ^{*1}	h (%)	N ^{*2}	ファイル名	F ₀ (Hz) ^{*1}	h (%)	N ^{*2}
短辺方向 1次振動	A301TM01	2.75	6.51	1801	A303TM01	3.00	5.81	1472
	A301TM02	2.95	5.97	1796	A303TM02	2.75	5.04	1478
	A301TM03	2.85	5.82	1779	A303TM03	2.90	6.17	1485
	A301TM04	2.85	5.73	1771	A303TM04	2.75	5.04	1460
	A301TM05	2.85	5.10	1777	A303TM05	2.80	5.96	1469
	A301TM06	2.90	6.67	1796	A303TM06	2.80	5.32	1468
	平均	2.86	5.97	1787	平均	2.83	5.56	1472
長辺方向 1次振動	A301LM01	2.80	5.57	1785	A303LM01	3.00	7.48	1524
	A301LM02	2.90	5.07	1772	A303LM02	2.80	7.75	1519
	A301LM03	2.80	7.40	1792	A303LM03	2.80	7.45	1520
	A301LM04	2.95	7.27	1833	A303LM04	2.80	5.99	1505
	A301LM05	2.85	7.51	1833	A303LM05	2.90	6.16	1495
	A301LM06	3.10	6.46	1823	A303LM06	2.90	6.31	1515
	平均	2.90	6.55	1806	平均	2.87	6.86	1806
ねじれ	A301TM01	3.35	7.39	2181	A303TM01	3.50	4.74	1787
	A301TM02	3.45	4.89	2137	A303TM02	3.55	4.26	1772
	A301TM03	3.35	6.01	2131	A303TM03	3.55	4.52	1772
	A301TM04	3.45	6.48	2130	A303TM04	3.55	5.16	1773
	A301TM05	3.45	6.09	2154	A303TM05	3.60	5.12	1818
	A301TM06	3.45	7.31	2198	A303TM06	3.50	4.38	1785
	平均	3.42	6.36	2155	平均	3.54	4.70	1785
ロッキング	A301TM01	2.75	6.37	1795	A303TM01	3.00	5.74	1478
	A301TM02	2.95	6.21	1802	A303TM02	2.75	4.93	1408
	A301TM03	2.85	5.86	1778	A303TM03	2.90	6.29	1409
	A301TM04	2.85	5.83	1789	A303TM04	2.75	5.05	1485
	A301TM05	2.85	5.41	1793	A303TM05	2.80	6.07	1430
	A301TM06	2.90	6.97	1813	A303TM06	2.80	5.47	1481
	平均	2.86	6.11	1795	平均	2.83	5.59	1449

*1 : F₀ は 1 次固有振動数

*2 : N は重ね合わせ数

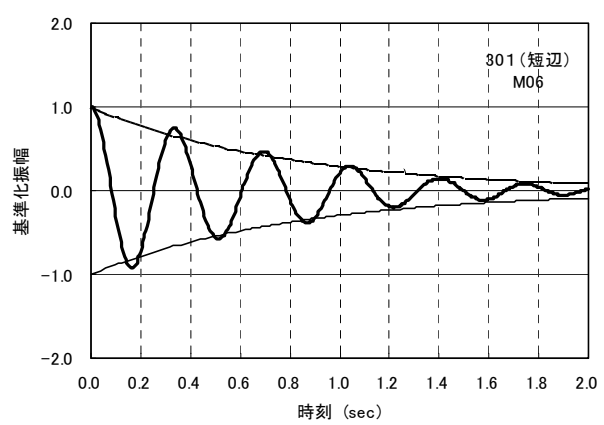
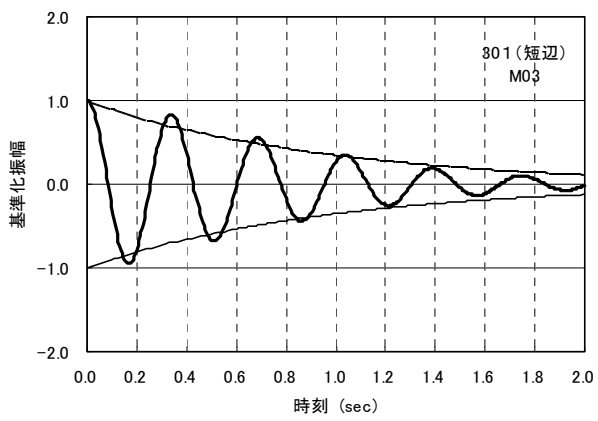
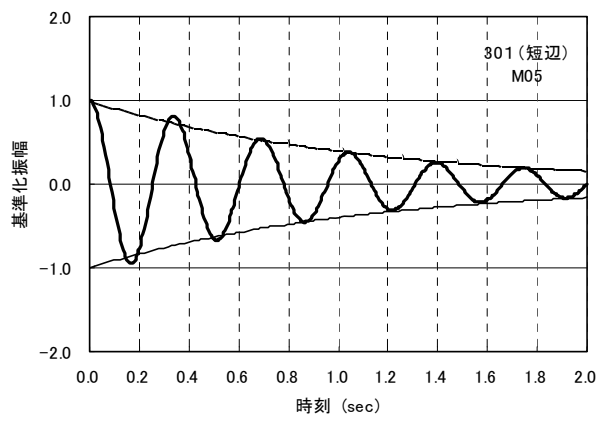
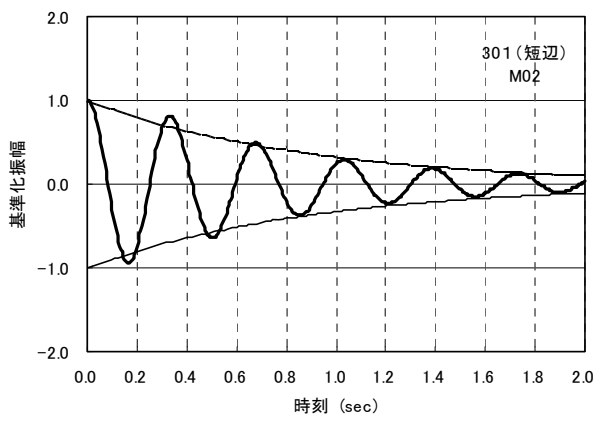
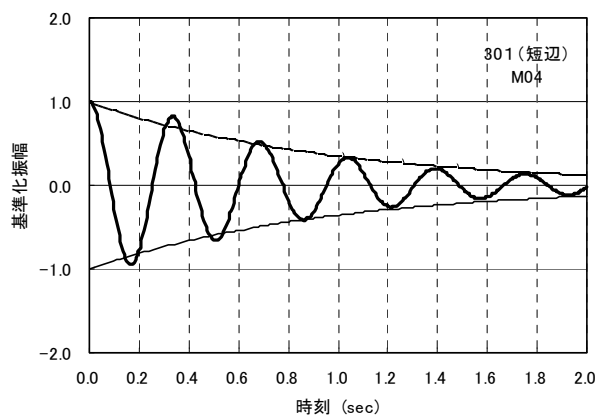
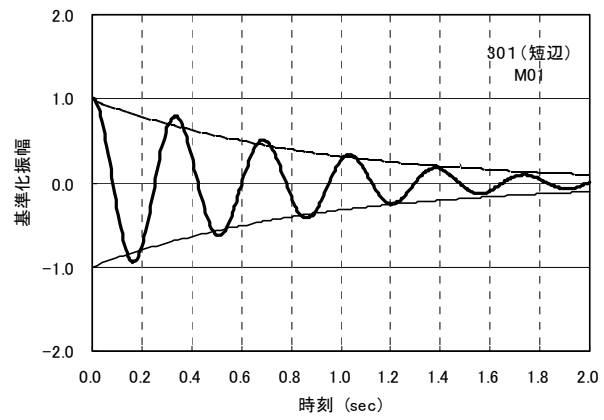


图 6.4a RD 波形 (A 棟・並進・短辺方向)

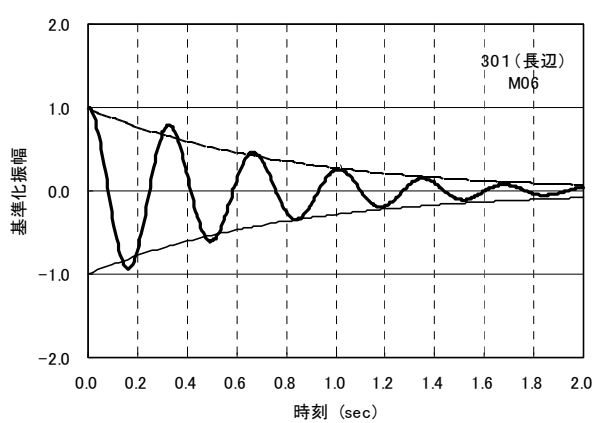
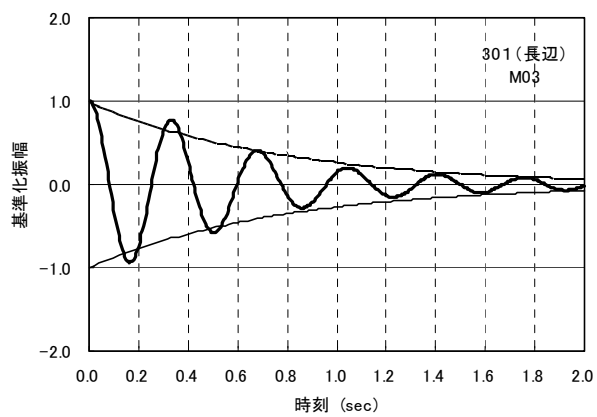
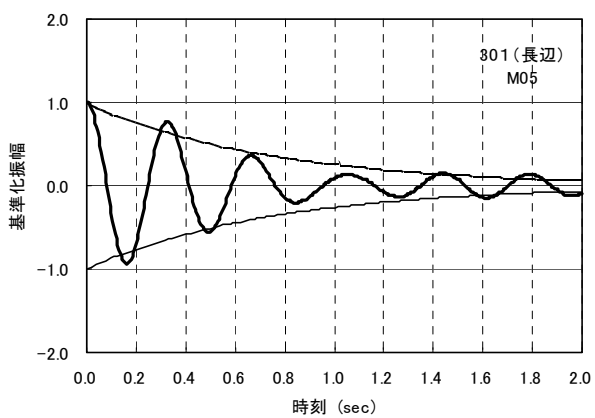
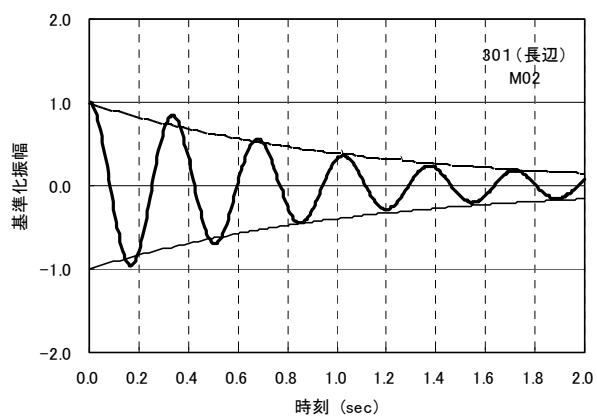
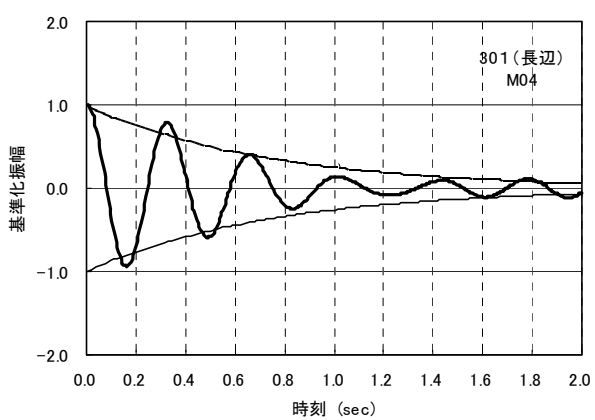
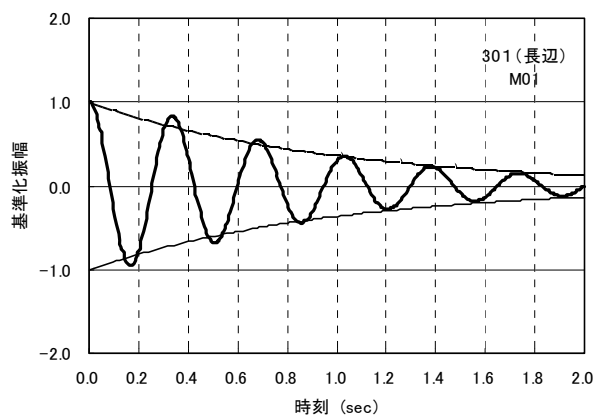


図 6.4b RD 波形 (A 棟・並進・長辺方向)

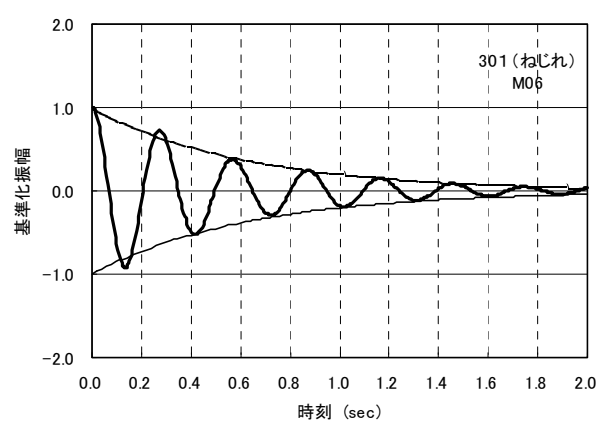
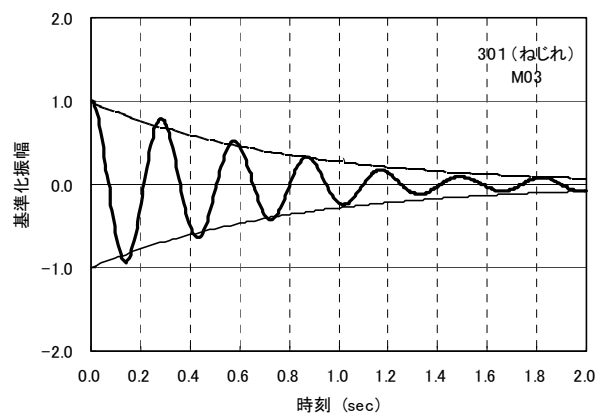
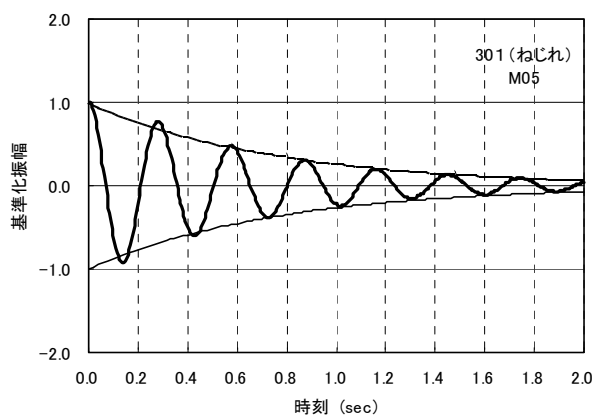
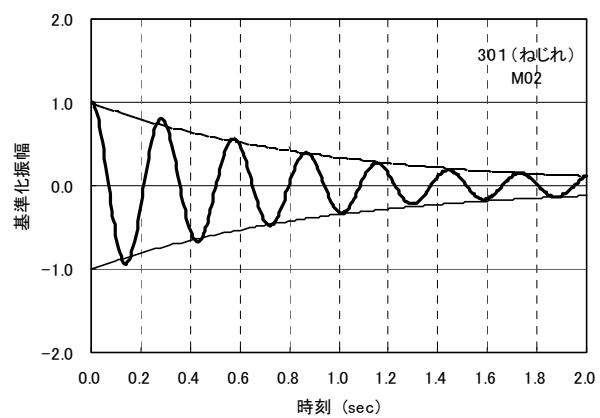
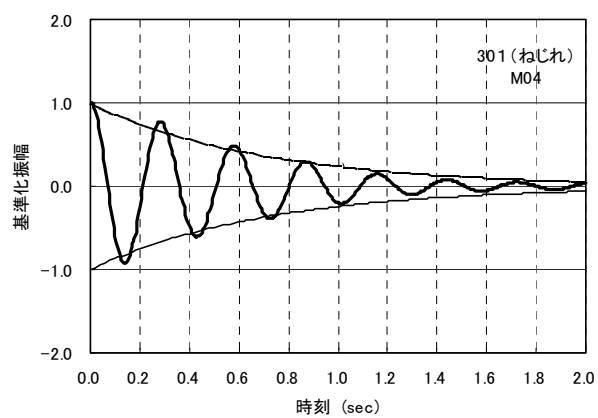
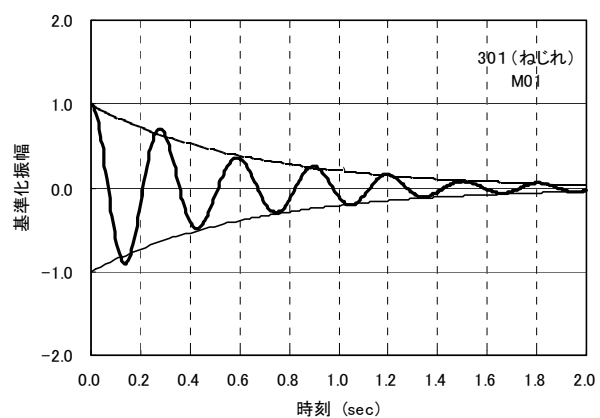


図 6.4c RD 波形 (A 棟・ねじれ成分)

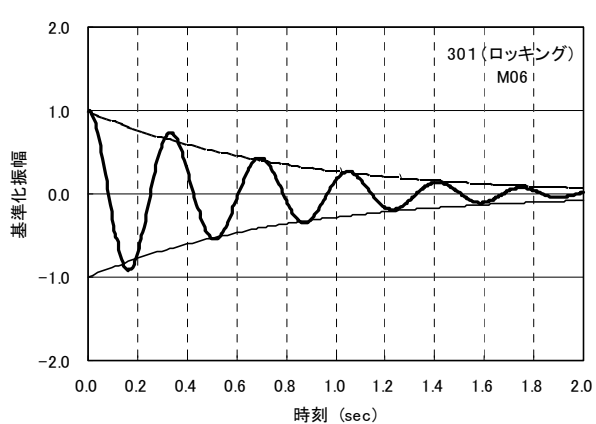
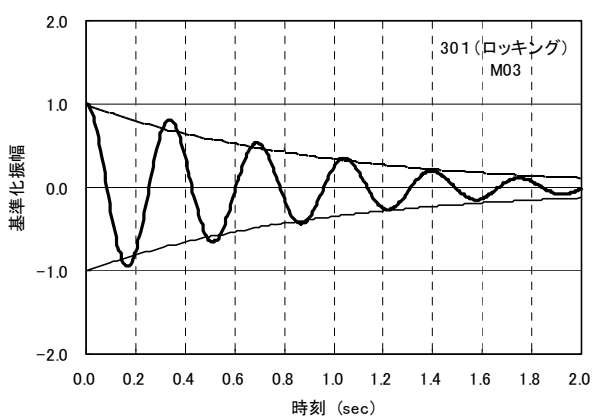
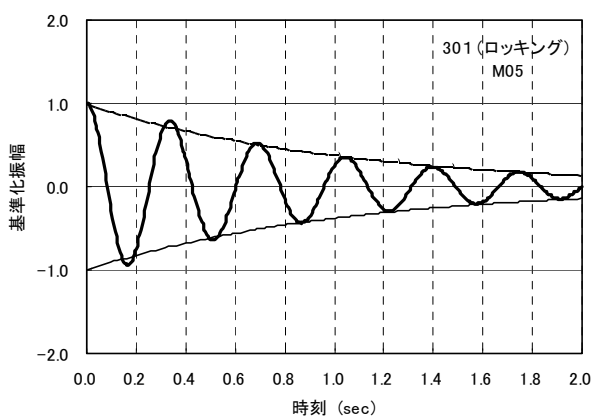
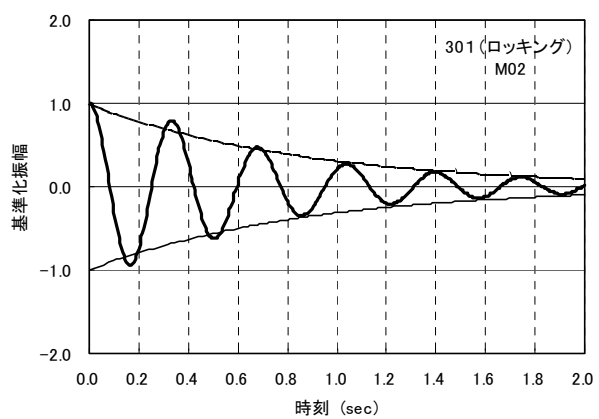
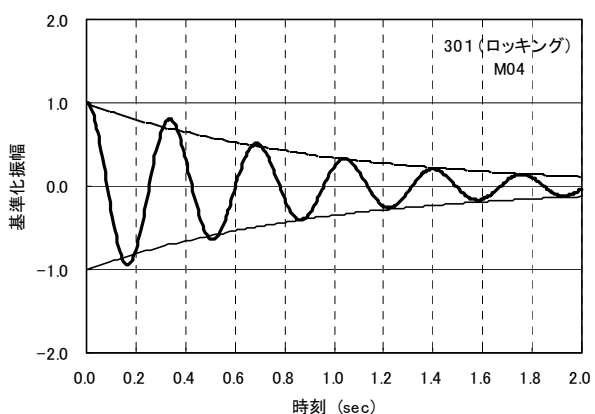
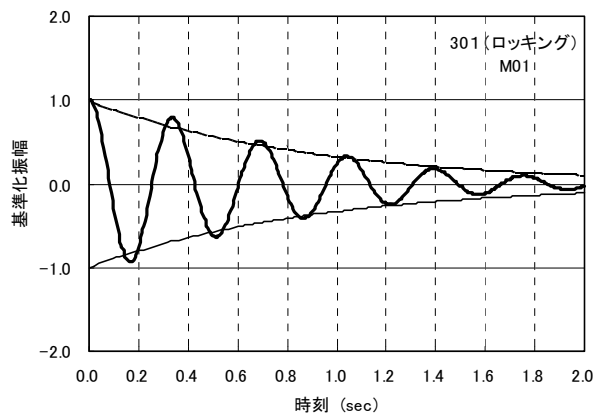


図 6.4d RD波形 (A棟・ロッキング成分)

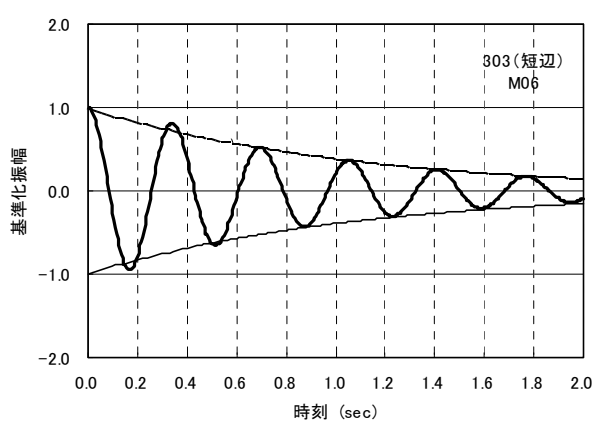
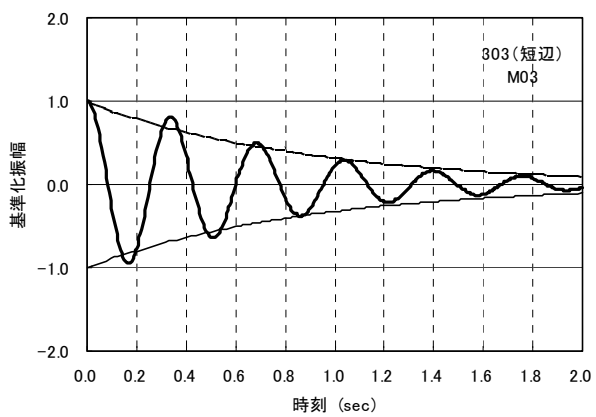
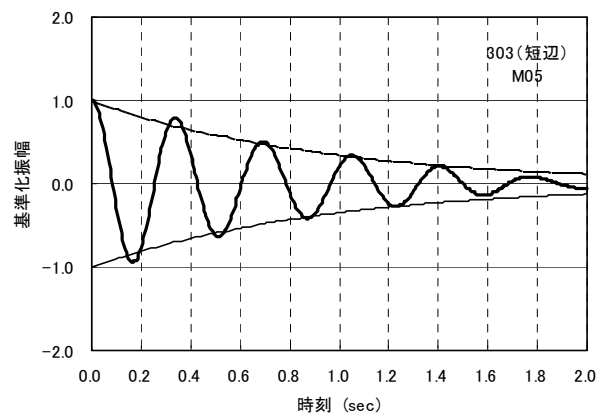
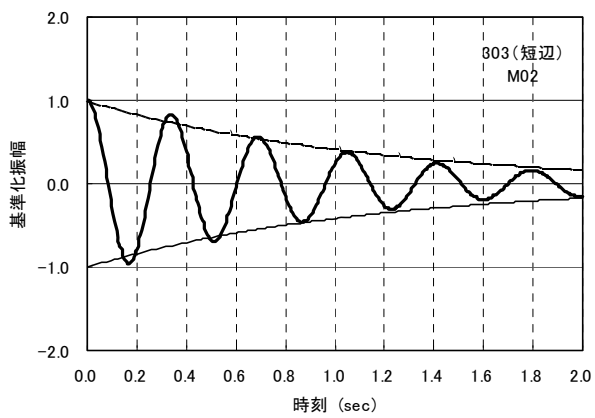
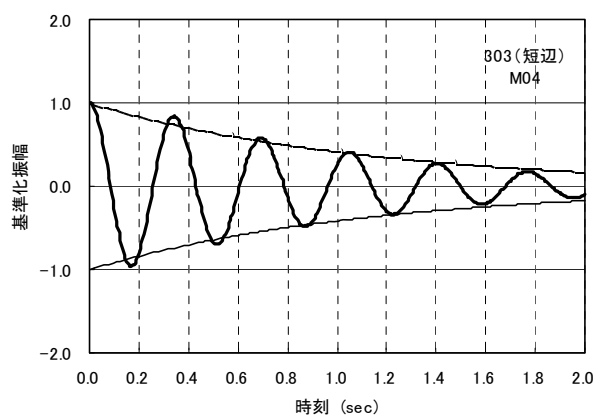
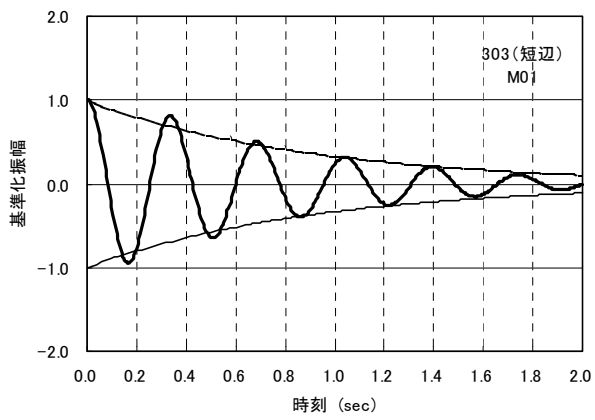


图 6.4e RD波形 (B棟・並進・短边方向)

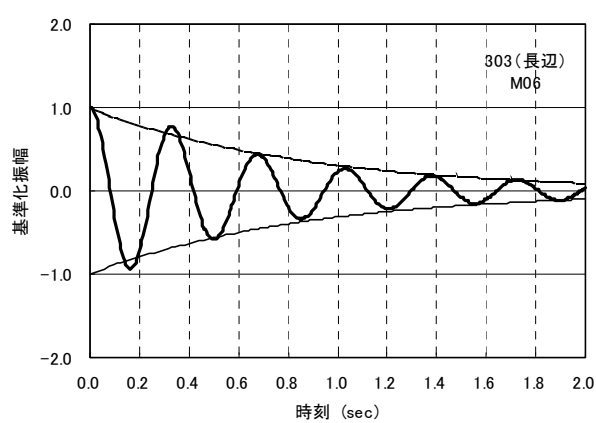
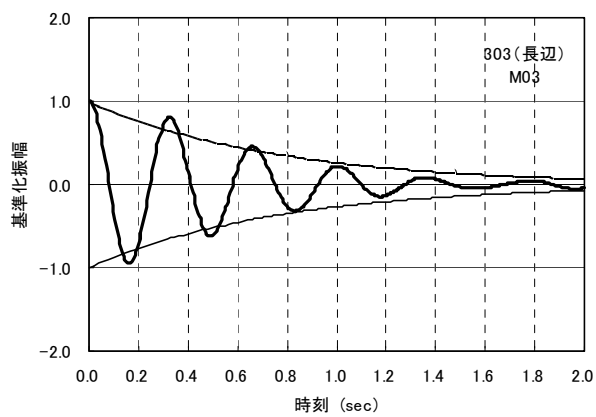
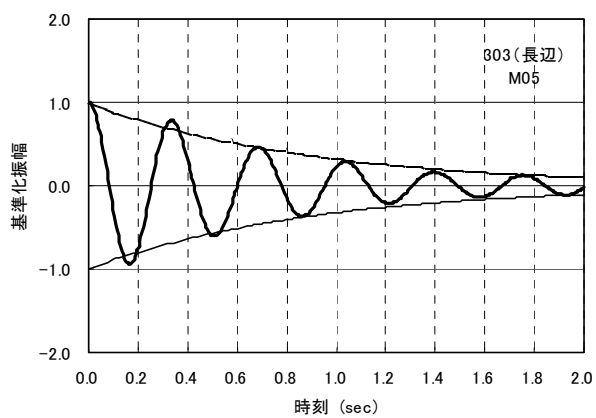
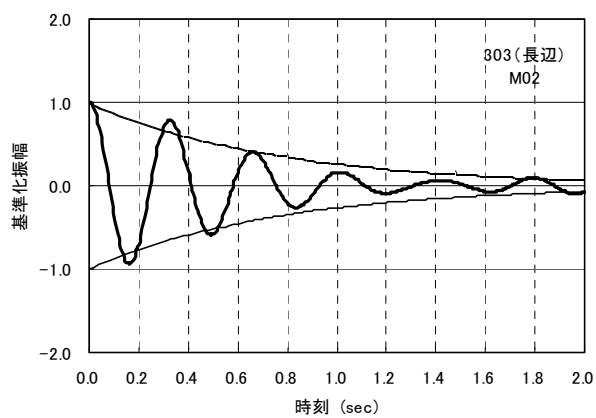
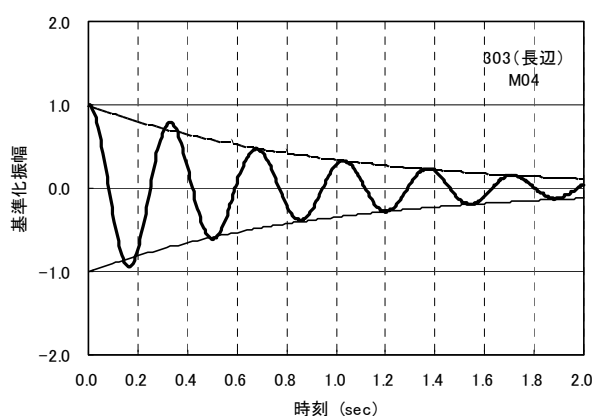
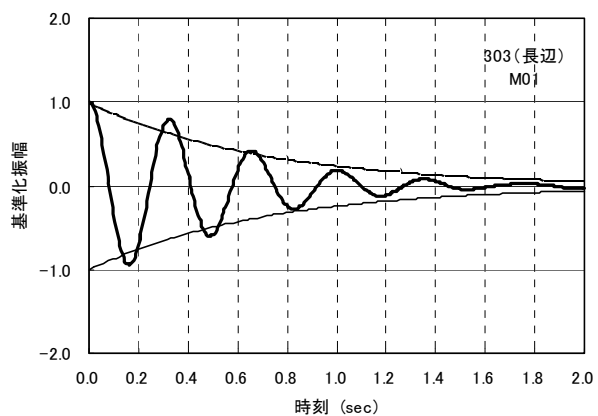


图 6.4f RD波形 (B棟・並進・長辺方向)

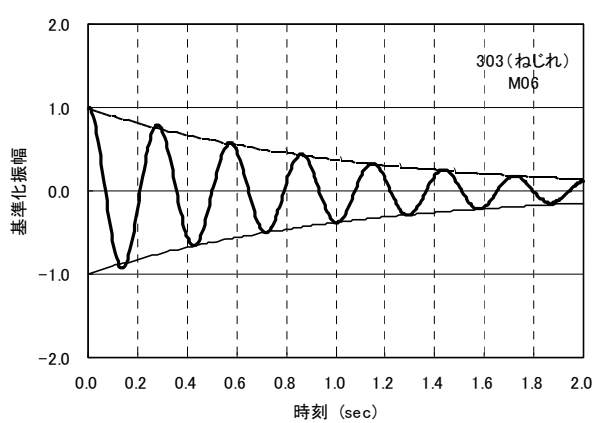
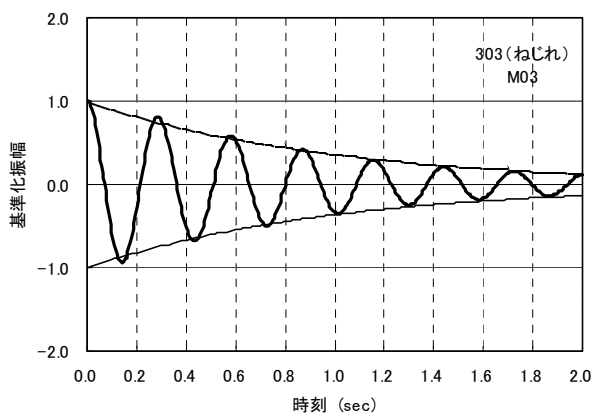
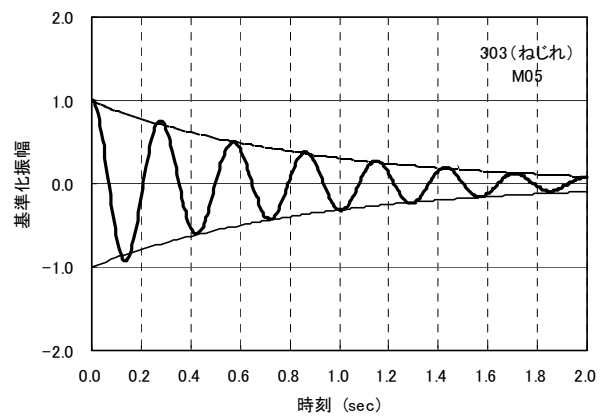
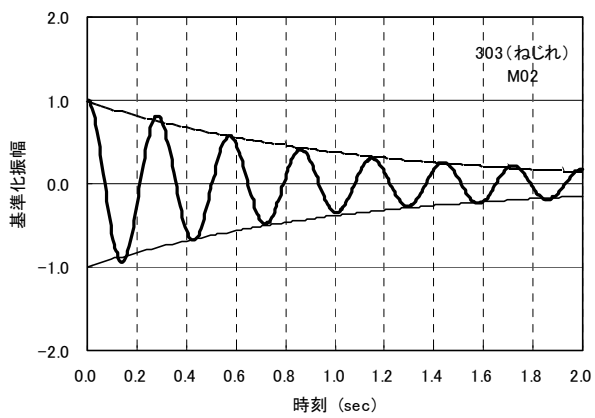
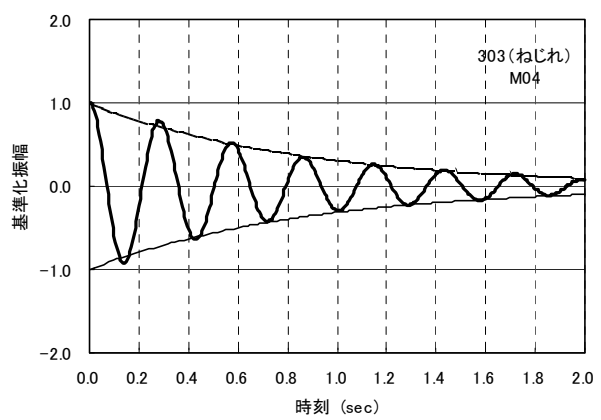
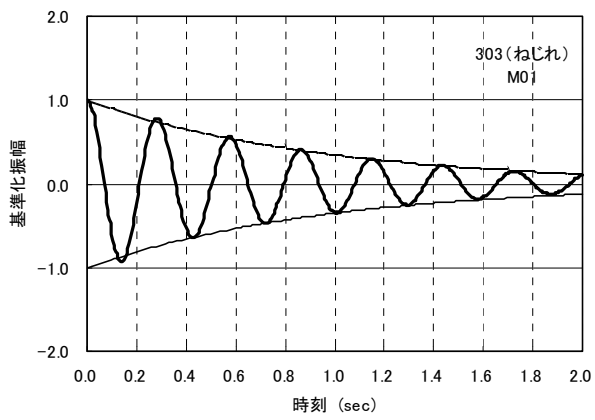


図 6.4g RD波形 (B棟・ねじれ成分)

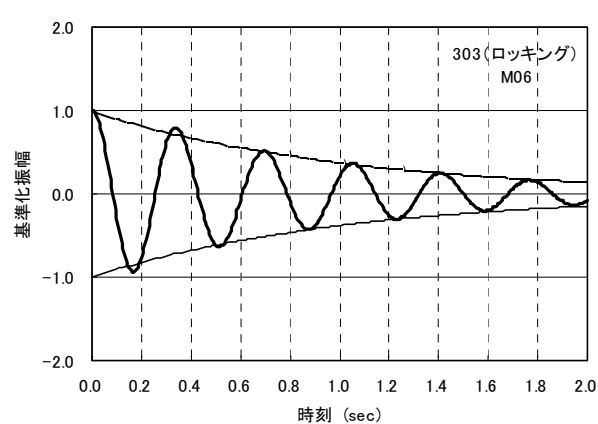
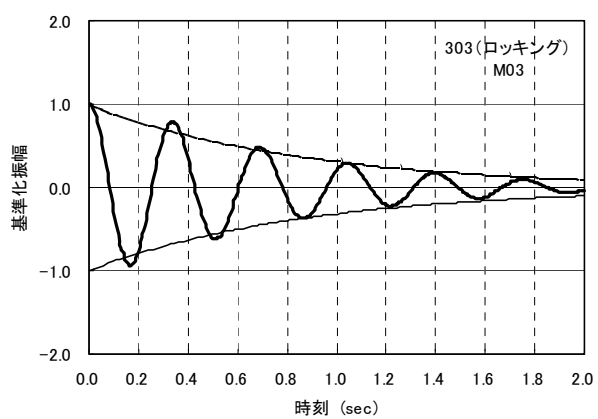
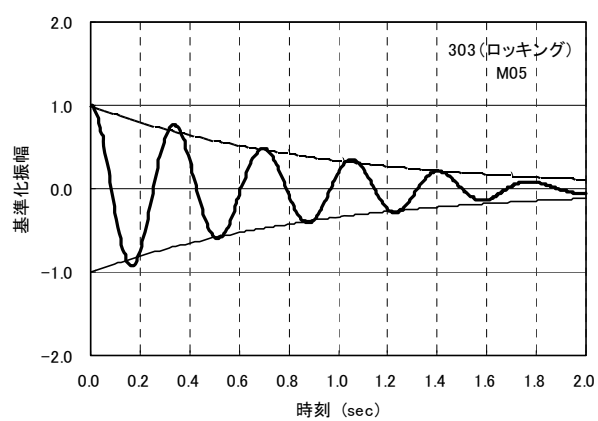
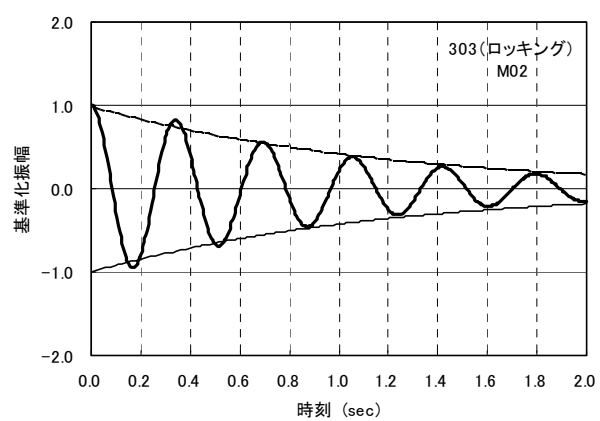
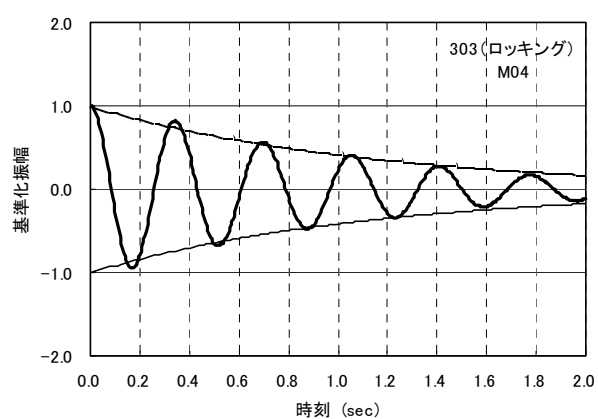
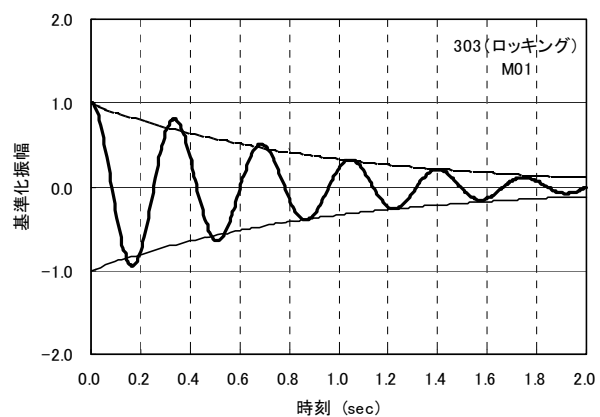


図 6.4h RD波形 (B棟・ロッキング成分)

2) 既往の研究成果との対応

日本建築学会では、建物の減衰について文献 2) で、実測データに基づく建築物の減衰定数について、構造種別毎に整理しまとめている。そこで、表 6.1 に示した RD 法による減衰定数の結果を、RC 系建物の実測データの結果と比較検討した。

図 6.5 には軒高と 1 次固有周期の関係を示し、また、図 6.6 には軒高と 1 次減衰定数の関係を示す。さらに、図 6.7 には 1 次固有周期と 1 次減衰定数の関係を示し、図 6.8 には 1 次固有振動数と 1 次減衰定数の関係を示す。これらの図に、RD 法より算出した B 棟の短辺および長辺方向の並進の 1 次減衰定数の結果を重ねてプロットした。(A 棟、B 棟の差は小さいので B 棟のみプロット)

これらの図から、日本建築学会のデータには、20m 以下の建物サンプルが非常に少なく、軒高の低い(あるいは固有周期の短い)建物で減衰定数は 2~8% とばらつきは大きい。本対象建物の RD 法より算出した結果(短辺 5.56%、長辺 6.86%)は、学会のばらつき範囲に収まり、図中に示す学会の略算式とも調和的である。

また、図 6.9 には、1 次固有振動数と 1 次減衰定数の関係を、基礎構造の違いに着目し、直接基礎と杭基礎に分けてプロットした結果を示す。本対象建物は PC 杭で支持されていることから、解析結果を杭基礎建物の図に重ねてプロットした。この図より、学会のサンプルは振動数 3Hz 程度以上のデータが少ないが、本結果はデータのばらつき範囲内にある。

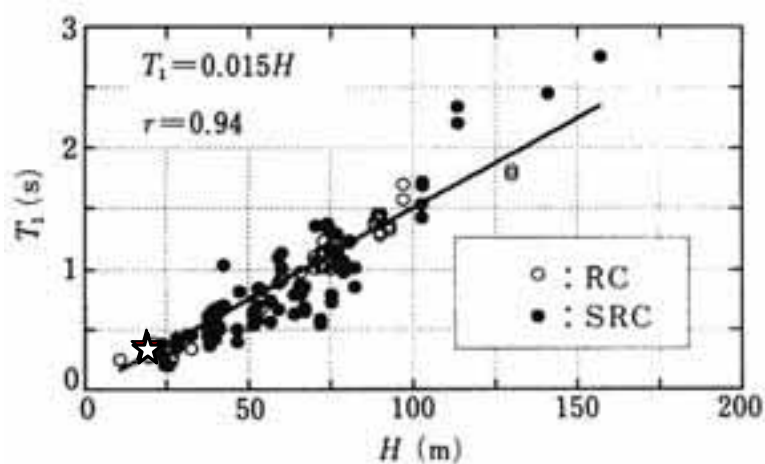


図 6.5 軒高 H と 1 次固有周期 T_1 との関係 2)

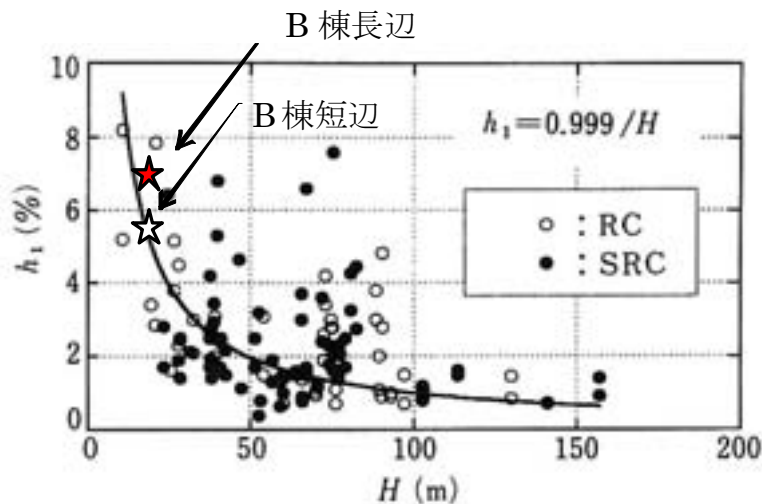


図 6.6 軒高 H と 1 次減衰定数 h_1 との関係 2)

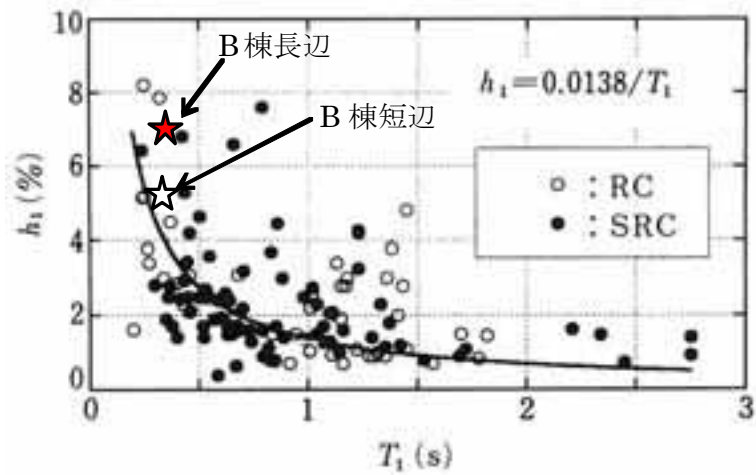


図 6.7 1次固有周期 T_1 と 1次減衰定数 h_1 との関係²⁾

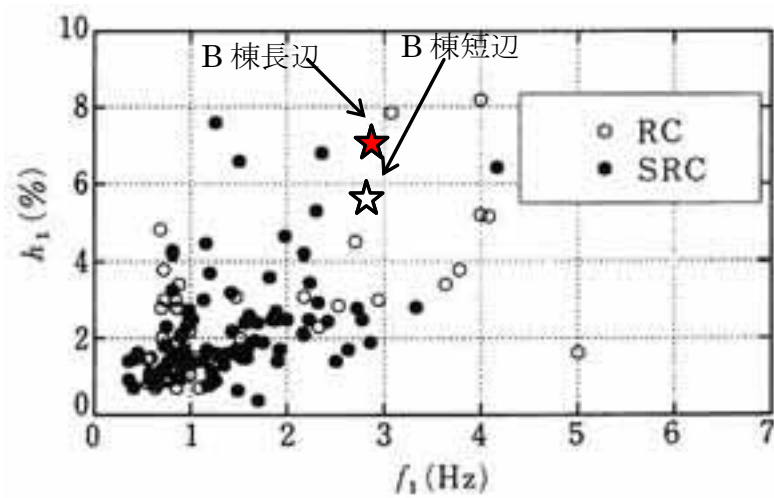
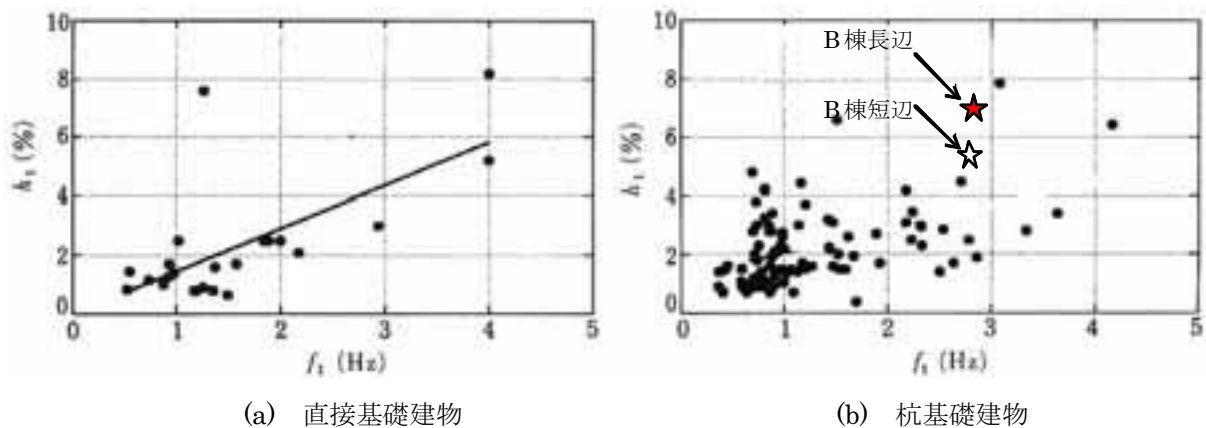


図 6.8 1次固有振動数 f_1 と 1次減衰定数 h_1 との関係²⁾



(a) 直接基礎建物 (b) 杭基礎建物

図 6.9 1次固有振動数 f_1 と 1次減衰定数 h_1 との関係²⁾

図 6.10、6.11 には、軒高とねじれ周期の関係およびねじれ振動数と減衰定数の関係を示した。これらの図より、学会のサンプルには、軒高 25m 以下の建物データはないが、本対象建物のねじれ周期は、学会の軒高とねじれ周期の略算式と調和的である。また、図 6.11 には、A 棟、B 棟の結果を重ねてプロットしたが、学会のデータはばらつきが大きく、明確な傾向は認められないが、本対象建物のねじれの振動数に対する減衰定数（A棟 6.36%、B棟 4.7%）は学会のサンプルと比較して大きめの傾向にある。

なお、文献 2)ではロッキングの減衰定数についての実測結果はまとめられていない。

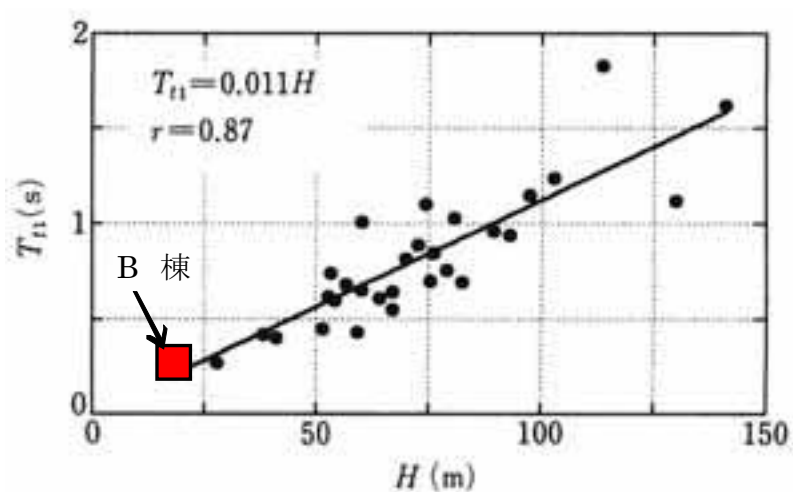


図 6.10 軒高 H とねじれ 1 次固有周期 T_{t1} との関係²⁾

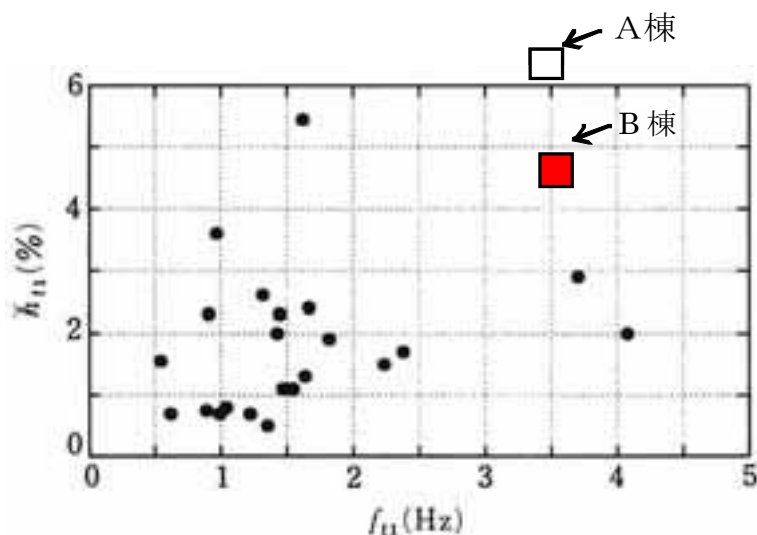


図 6.11 ねじれ 1 次固有振動数 f_{t1} と 1 次減衰定数 h_{t1} ²⁾

(第 6 章 参考文献)

- 1) 田村幸雄、佐々木淳、塚越治夫：RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価、日本建築学会構造系論文報告集、第 454 号、pp.29-38、1993
- 2) 日本建築学会：建築物の減衰、pp.137-143、2000 (一部の図に加筆)

7. 人力加振による建物の減衰特性

減衰定数を評価するための実測データの取得方法には、周波数領域のデータを用いる方法、自由振動波形を用いる方法、システム同定を用いる方法などが一般的な方法としてある。前章では、常時微動の時刻歴波形にRD法（Random Decrement Technique）を用いて求めた自由振動波形から減衰定数を評価した結果が示された。本章では、人力加振より得られた自由振動波形から減衰定数を評価した結果を示す。

7.1 データ処理の方法

人力加振は加振源の設置が不要といった長所はある反面、共振振動数を事前に予測しておく必要があるため微動測定時に実施する機会が多い。また、低層の建築物などでは高次振動数までの評価は困難であるため、1次振動数に着目した低次モードでの評価に止まる場合が多い。さらに、加振時には、建物を押す力として人の体重移動を利用するため、加振ピッチの精度を上げるため、建物の固有振動数に合ったパルス音やかけ声などに合わせて振動させるよう、加振者に周知させるなどきめ細かな事前調整が必要となる。ここで実施した人力加振方法は、建物の最上階で1人の合図のもと、6～7人程度が連成系建物の1次卓越振動数に対応させた、約10秒間の加振を数回程度行って得られた自由振動波形を実測データとした。解析対象とするデータは、建物最上階に設置したセンサーより得られた自由振動波形とし、フィルター処理は前節で述べたと同様、1次卓越振動数を中心とした狭帯域のバンドパスフィルター処理（2～4Hz バタースフィルター）を行った自由振動波形を用いることとした。

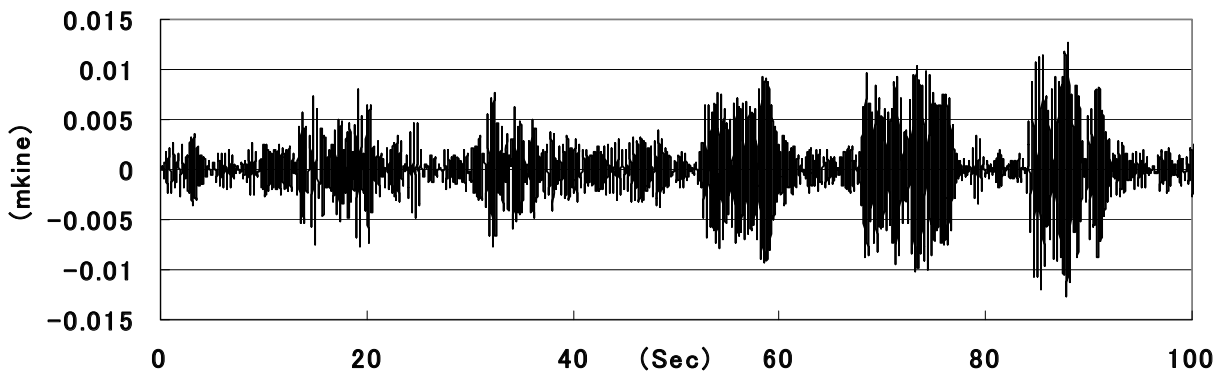
フィルター処理をした後の棟別、方向別の自由振動波形を図7.1に示す。人力加振法は、0.5～2秒程度の範囲での加振に適していると言われているが、本建物の1次卓越振動数は約4Hz程度とかなり短い周期であり、精度の良い自由振動波形として利用できる実測データはさほど多くは得られなかった。ここでは、図7.2に示すように自由振動波形として利用できるデータのみ選択し、1次卓越振動数に限定して減衰定数を評価する事とした。

7.2 減衰定数の評価方法と結果

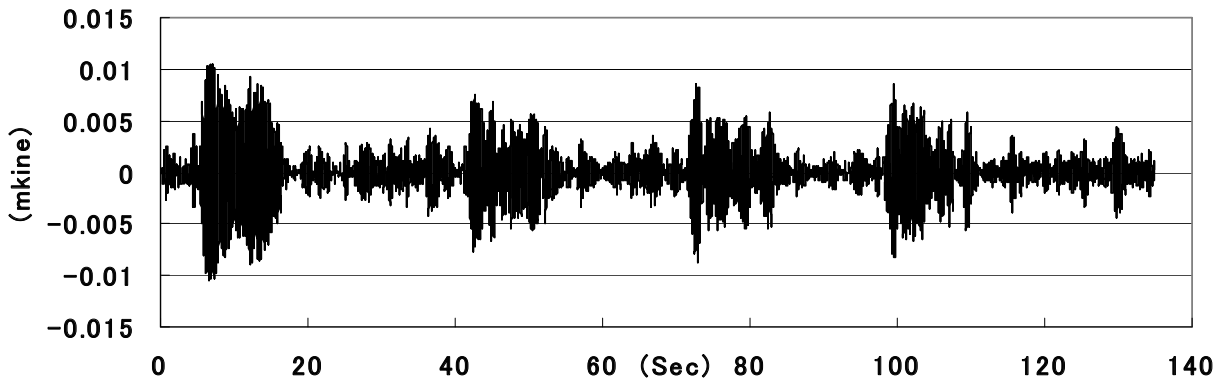
建物の振動特性の推定において、自由振動波形は、時間領域において、建物の振動特性の情報を表現しており、建物の固有振動数や減衰定数などを比較的簡単に評価する事ができる。人力加振により求めた自由振動波形から、減衰定数を評価する法について、以下に記述する。

自由振動波形から減衰定数を評価するための代表的な方法としては、振幅減衰比による方法と最小2乗法による方法が良く用いられる。振幅減衰比による減衰定数の評価法は簡便であることから良く用いられている。しかし、自由振動波形の極値のみに着目するため建物振動特性の情報の利用効率は余り高くなく、評価精度が十分かどうか疑問もある。一方、最小2乗法による評価法は、自由振動波形の情報を最大限に利用できるため評価精度は高いと言える。ここでは、最小2乗法により減衰定数の評価した結果について示す。利用できる実測データがかなり限られていることもあり、評価時間は約1秒の区間を設定し各ブロック毎で最小2乗法により減衰定数を評価した。

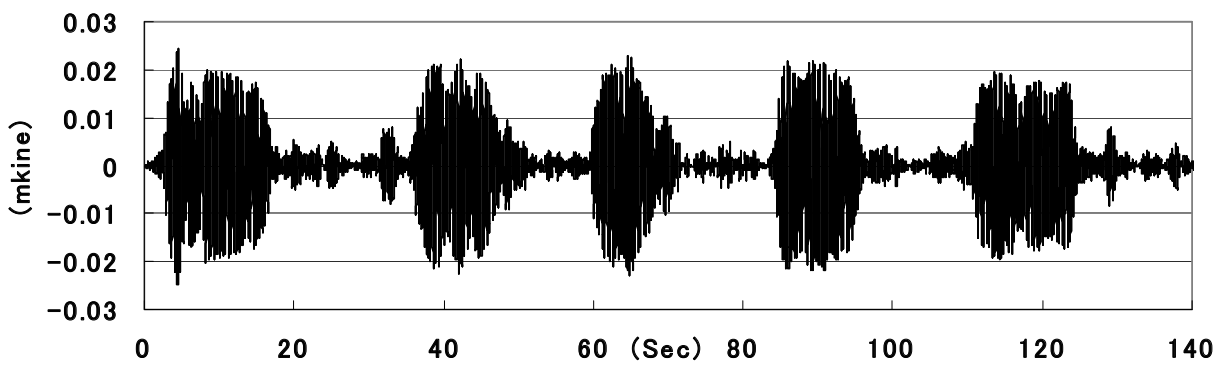
(a) A棟：短辺方向の自由振動波形



(b) A棟：長辺方向の自由振動波形



(c) B棟：短辺方向の自由振動波形



(d) B棟：長辺方向の自由振動波形

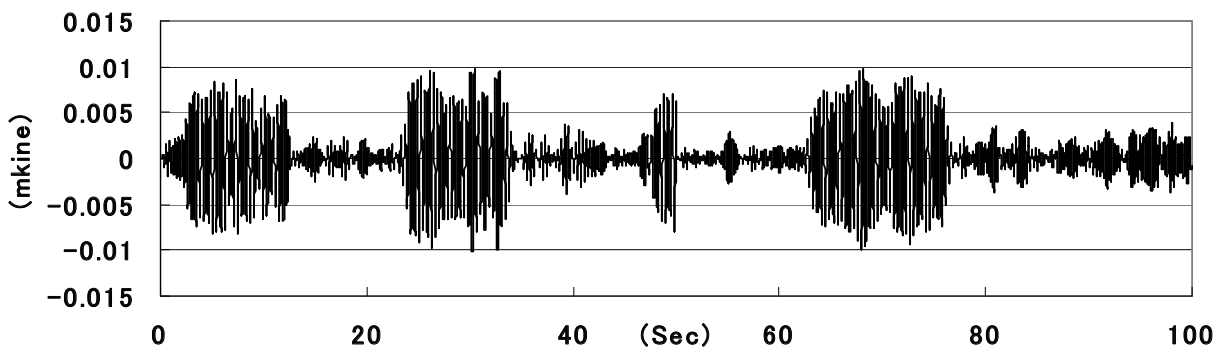


図 7.1 フィルター処理した後の自由振動波形

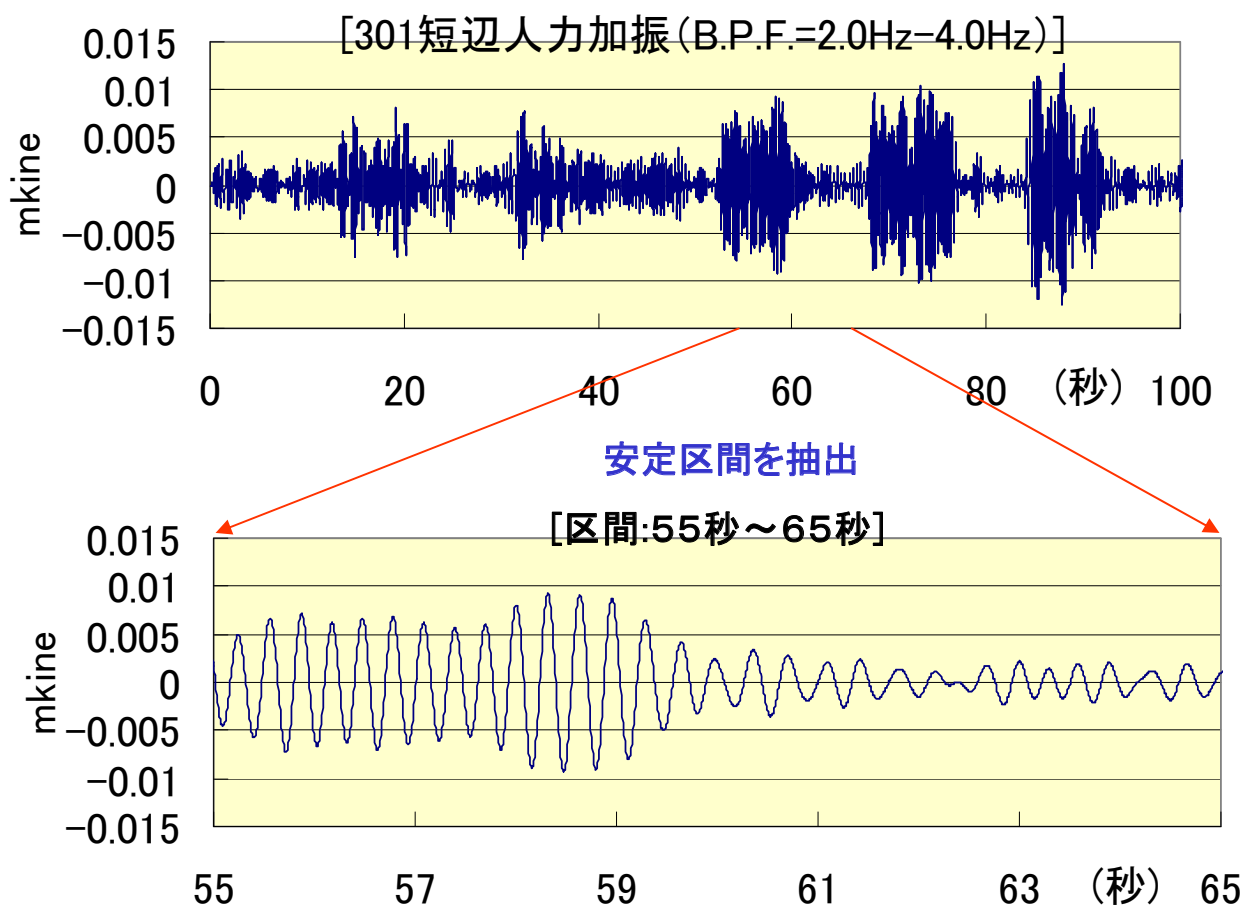


図 7.2 減衰評価を求めるデータ区間の抽出

人力加振より得られた自由振動波形に1次振動数帯域のバンドパスフィルター処理をした波形を1次の自由振動波形とみなし、以下の式を適用し、最小2乗法により振動数 f_1 、減衰 h_1 を推定した。

$$a(t) = a_0 \cdot \exp(-h_1 \cdot 2\pi f_1 \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_1 \sqrt{1-h_1^2} \cdot t) \quad \dots (7.1)$$

上式より推定した包絡形の一例を実測された自由振動波形とともに図7.3に、推定結果を表7.1にそれぞれ示した。また、上式より推定した自由振動波形と実測された自由振動波形を図7.4に比較した。得られた減衰定数は、短辺方向の減衰定数はRD法により得られた結果とほぼ同様であったが、長辺方向については、1割程度小さめに評価されている傾向にあった。短辺方向、長辺方向の減衰定数は、共に5.0~6.0%程度の範囲の値が得られた。

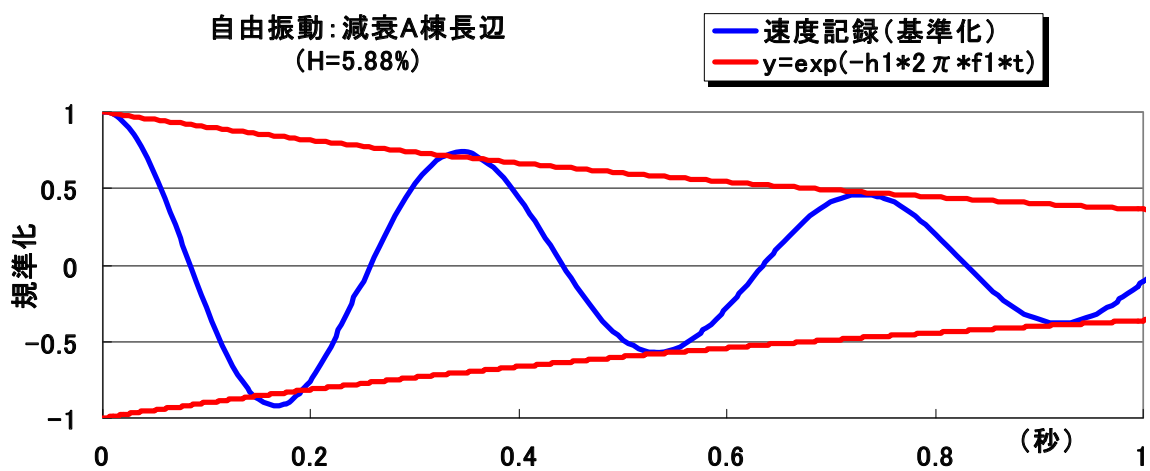
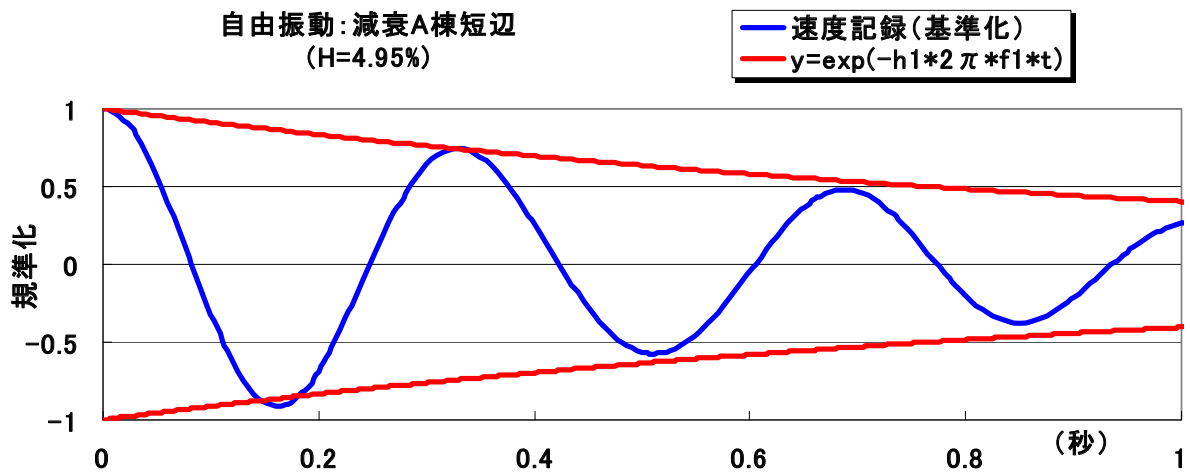
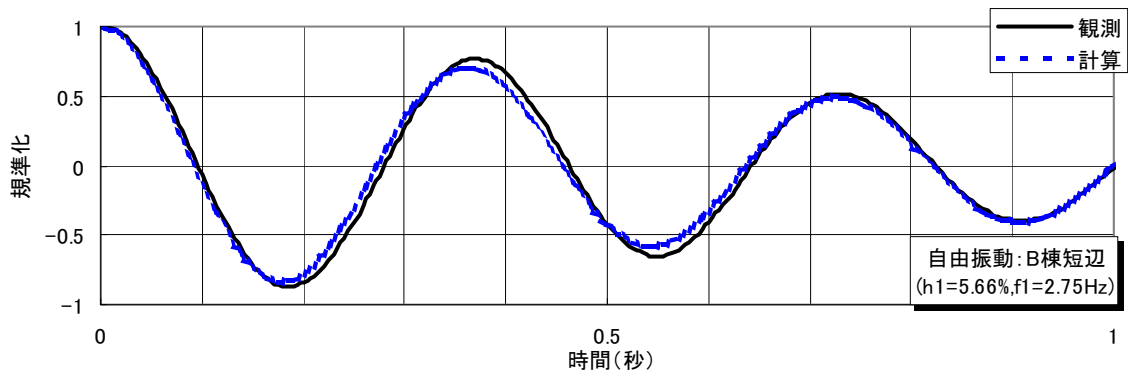
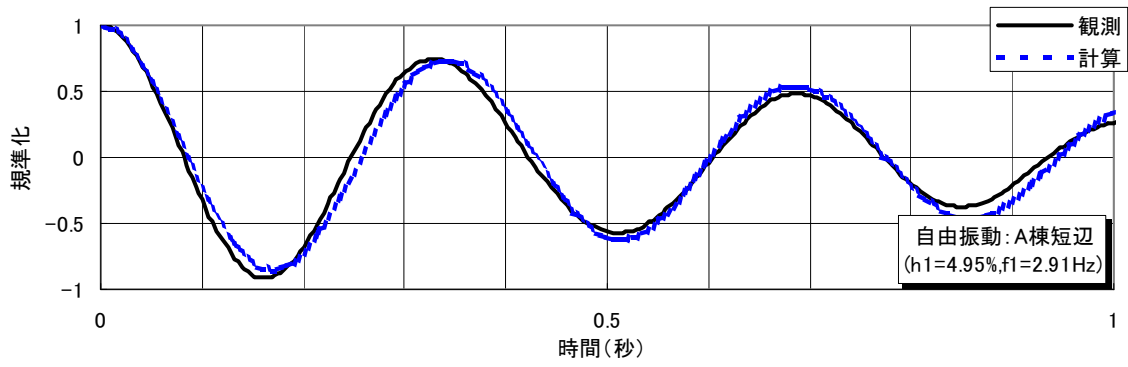


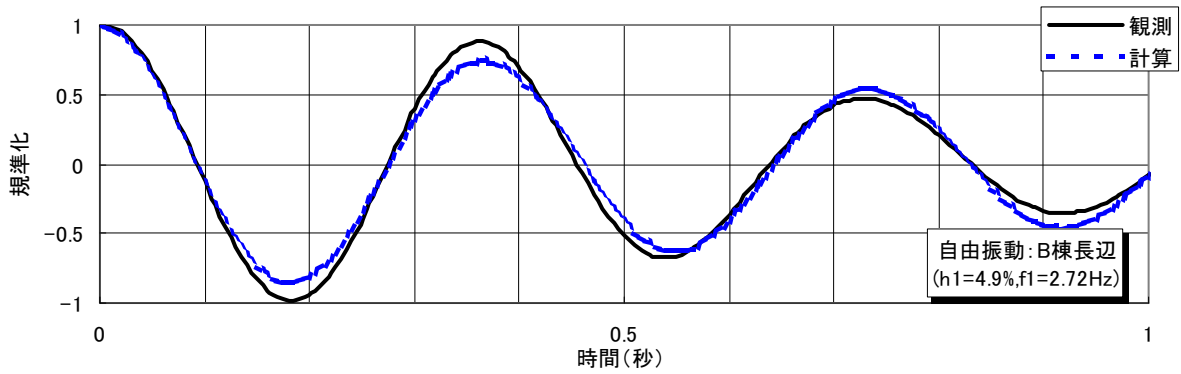
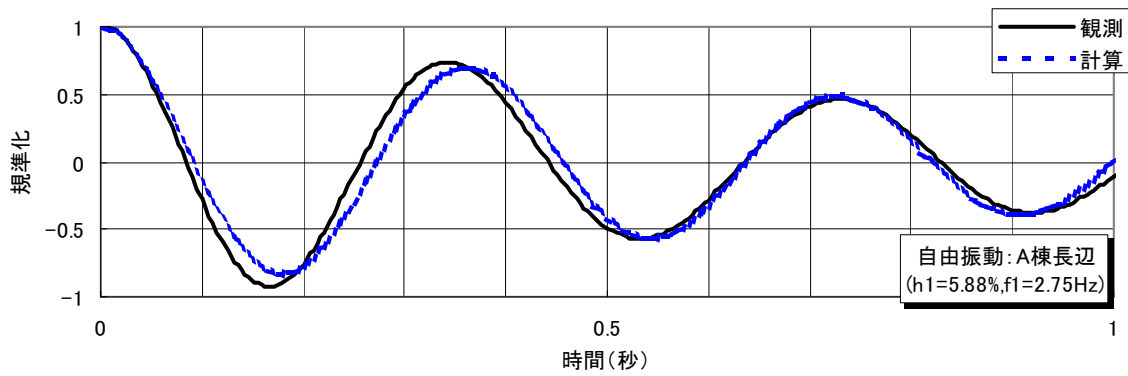
図 7.3 減衰評価結果 (A 棟)

表 7.1 人力加振による減衰定数の算出結果

	A 棟		B 棟	
	f_1 (Hz)	h_1 (%)	f_1 (Hz)	h_1 (%)
短辺方向 1 次卓越振動数	2.91	4.95	2.75	5.66
長辺方向 1 次卓越振動数	2.75	5.88	2.72	4.90



(a) 短辺方向



(b) 長辺方向

図 7.4 実測自由振動波形と推定波形の比較

8. 2次元 FEM によるシミュレーション解析

8.1 解析モデルと材料定数

建物・地盤において、2次元 FEM による弾性範囲のシミュレーション解析を実施した。解析は B 棟の短辺方向及び長辺方向について実施した。解析モデルは図 8.1 に示すとおりで、地盤は GL-41.5m までをモデル化した。上部構造の質点間は曲げせん断要素で連結し、杭は梁要素、基礎梁は剛体梁とした。基礎部は質量を各節点に振り分けることによりロッキングを考慮した。また、各ケースにおいては、基礎固定時に相当する条件として、十分剛な地盤を想定した解析も実施した。解析は下方入力による鉛直伝播を対象とした。

構造計算書及び設計図書が存在しないことから、部材などの材料・モデル定数については、以下のよう設定した。

2次元 FEM 解析であるため、建物・地盤について建物奥行き幅の質量及び剛性を合計し、建物奥行き単位幅における値を算定した。杭については、各フーチング単位で軸剛性(EA)と曲げ剛性(EI)を算定し、すべてのフーチングの合計値から建物奥行き単位幅の値を算定している。

屋上階、一般階、基礎部の単位床面積当たりの質量を、それぞれ 0.6, 1.2, 4.0 ton と設定した。曲げせん断要素のせん断剛性と曲げ剛性は、各階すべて同一とし、微動測定結果から得られた基礎固定系 1 次卓越振動数と等しくなる建物の定数を求めた、上部構造及び杭の断面積と断面 2 次モーメントなどを、表 8.1 に示す。

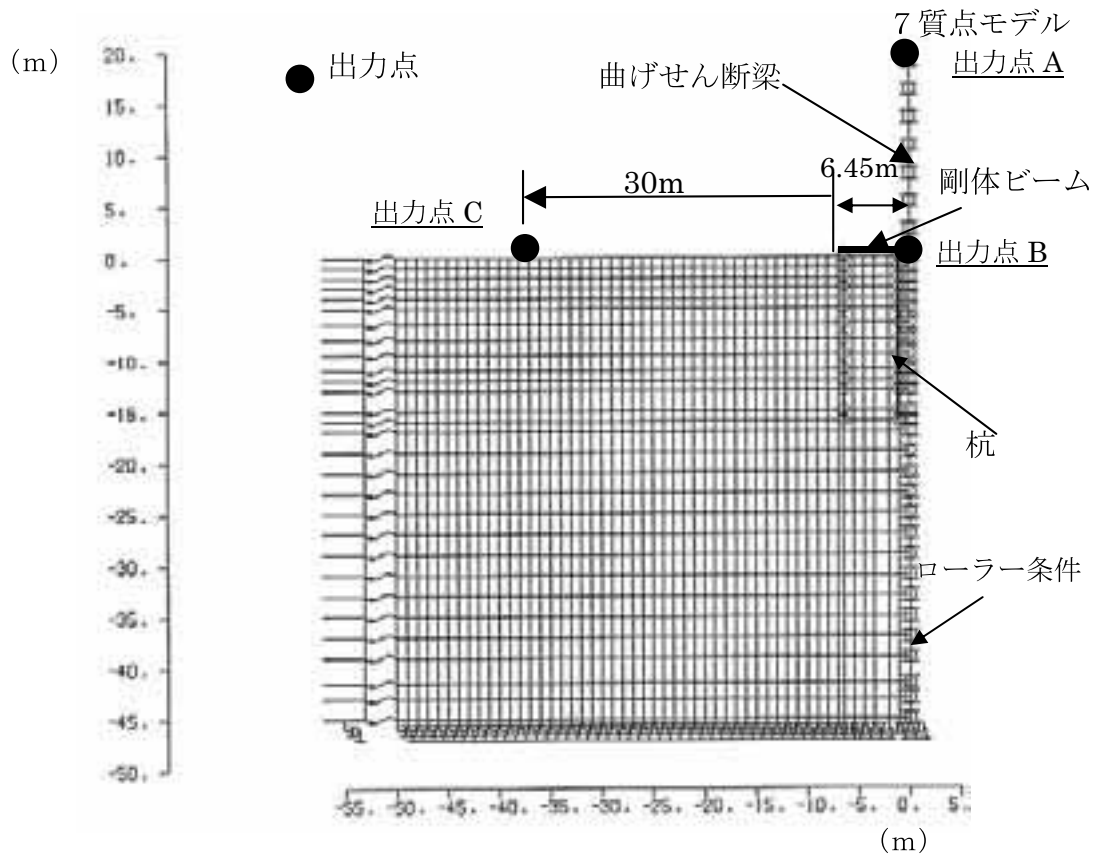
図 2.3 に示す地盤条件と近傍地盤の Vs を参考とし、表 8.2 に示す地盤定数を設定した。なお減衰定数は地盤が 3%、建物が 3%一定とした。

表 8.1 柱剛性と杭剛性

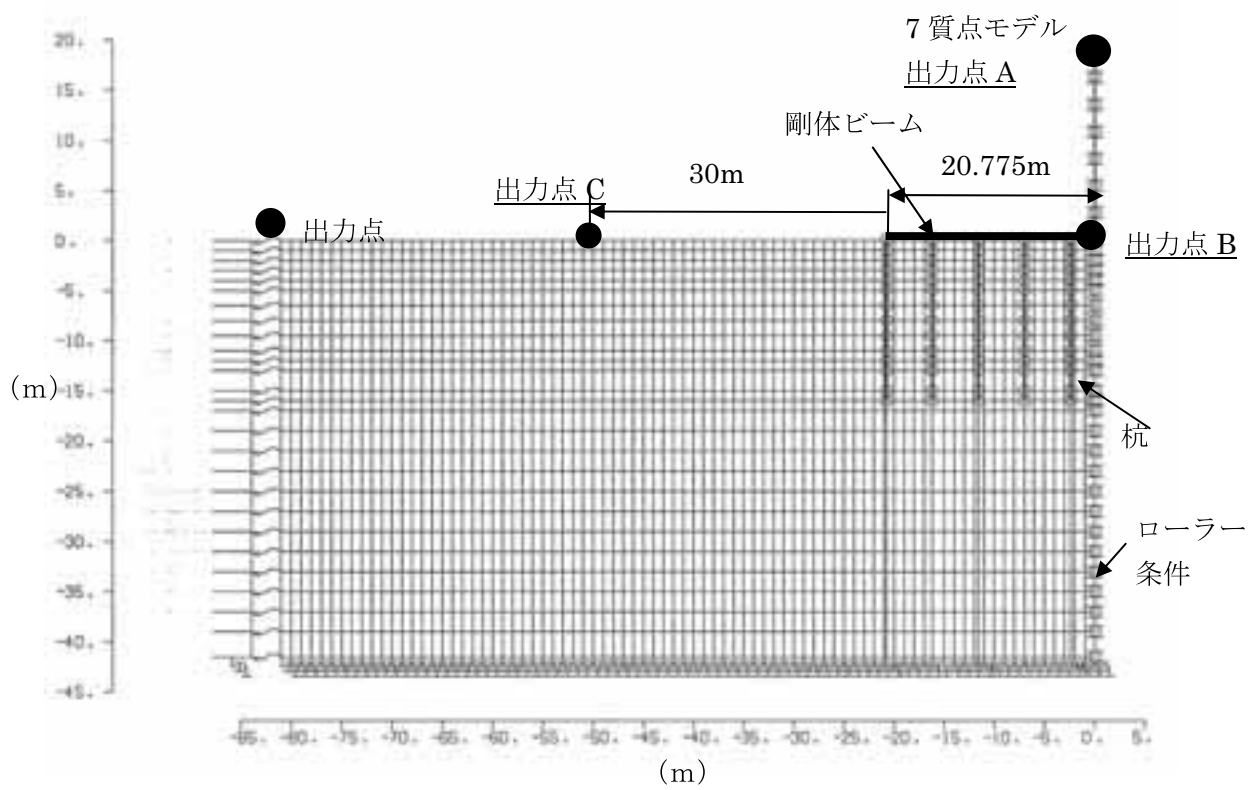
項目	短辺方向		長辺方向	
	柱	杭	柱	杭
断面2次モーメント(m ⁴ /m)	5.0	0.0239	13.0	0.0308
せん断断面(m ² /m)	0.104	0.0926	0.296	0.119
ヤング係数(kN/m ²)	3.15*10 ⁷	3.15*10 ⁷	3.15*10 ⁷	3.15*10 ⁷
ポアソン比	0.2	0.2	0.2	0.2

表 8.2 地盤定数

深さ(m)	S波速度(m/s)	単位体積質量(ton/m ³)	ポアソン比
6.5	150	1.35	0.48
13	260	1.75	0.48
29	330	1.75	0.48
41.5	310	1.55	0.48
-	430	1.80	-



(a) 短辺方向



(b) 長辺方向

図 8.1 解析モデル

8.2 解析結果

深さ 41.5m を入力面とした時の表層地盤伝達関数の振幅特性を図 8.2 に示す。1 次卓越振動数は約 2Hz、2 次卓越振動数は約 5Hz となっている。図 8.3 に、1 次卓越振動数と 2 次卓越振動数について、入力位置を解放面とした場合の入力位置の振幅に対する各深さでの振幅比をプロットして示す。

図 8.4 に、短辺方向における、基礎固定系の建物の伝達関数 (B)、1 階床に対する建物頂部の伝達関数 (RB)、および 30m 離れた地表面に対する建物頂部の伝達関数 (SRB) を示す。各方向の卓越振動数について、常時微動測定と比較した結果を表 8.3 に示す。FEM 解析と常時微動測定により得られた卓越振動数はよく対応している。

ハーフパワー法により、各伝達関数から減衰定数を求めると、伝達関数 B, RB, SRB でそれぞれ 3.0, 4.9, 6.6% となり、基礎固定における建物の 3% の減衰定数が、スウェイ・ロッキングが含まれた相互作用系では 6.6% と増大しており、相互作用系では、増幅率が減少する特性を示している。一方、図 4.3 に示す B 棟の伝達関数においては、卓越振動数における増幅率は、伝達関数 B, RB, SRB の順に大きくなっている。ハーフパワー法により、それらの伝達関数から減衰定数を求めると、伝達関数 B, RB, SRB で、7.63, 9.14, 5.37% となり、解析結果とは相反する結果が得られた。

既往の研究^{1),2)}においても、常時微動測定結果から求めた建物の伝達関数では、連成系の振幅に比べて基礎固定時の振幅が小さくなる結果が得られている。文献 1 では、種々の外乱での建物の基礎固定時特性の検討が行われており、起振機実験(建物上部加振)の場合には、基礎固定時の特性が精度良く求められている。常時微動ように建物外部からの入力の場合には、建物応答に基礎固定時の振動数成分が卓越していない、すなわち連成系の振動モードで揺れているため、基礎固定時の特性が検出されにくいことが考えられる。また、文献 3 には、建物下部からの入力により、建物が応答している場合には、基礎固定時の伝達関数が精度良く求まるが、他の入力が含まれると、基礎固定時の伝達関数が大きく乱され、振幅がかなり小さくなることも指摘されている。建物応答に及ぼす入力には、交通振動や風振動が影響していると同時に、建物への入力も一様でない。

微動測定結果を詳細に検討してみると、以下のようにになっている。図 4.3 において、伝達関数の位相の遅れを正として描いてあるが、卓越振動数付近では、短辺方向の伝達関数 B, SRB (長辺方向の伝達関数 B にも同様の結果) において、位相が進んだ結果となっている。伝達関数 SRB における 80s 間のそれぞれの伝達関数を調べてみると、位相が遅れている場合と進んでいる場合が同程度見られ、地表面のある 1 点の振動と建物頂部の振動は、常に一定の位相関係とはなっていない。平均化した伝達関数には、位相の遅れ、または進みの優勢な方が現れることになる。伝達関数 RB においては、位相の遅れを示す場合が多いことから、建物 1 階への入力により、建物頂部が振動している位相特性となったと考えることができる。

一方、図 8.5 に、長辺方向における、基礎固定系の建物の伝達関数 (B)、1 階床に対する建物頂部の伝達関数 (RB)、および 30m 離れた地表面に対する建物頂部の伝達関数 (SRB) を示す。長辺方向においても、卓越振動数は良い対応を示すが、振幅については、短辺方向と同様な傾向が見られるが、短辺方向ほどの差はないと言える。

変位分布について解析値と測定値を比較して表 8.4 に示す。短辺方向では、解析値のロッキング成分の方がやや小さいが、全体的には良く対応している。長辺方向では、ロッキング成分は解析値が測定値の 1/2 程度となり、ロッキング変形が小さい結果となった。

表 8.3 解析と常時微動測定における卓越振動数の比較

	振動数(Hz)			
	短辺方向		長辺方向	
	解析	計測	解析	計測
伝達関数B	4.03 (0.97)*	4.14	3.74 (1.12)	3.35
伝達関数RB	3.39 (1.03)	3.25	3.41 (1.02)	3.33
伝達関数SRB	2.84 (0.99)	2.87	2.61 (0.99)	2.63

*括弧内の値は、観測値に対するFEMの結果の比

表 8.4 変位分布の解析値と測定値の比較

		スウェイ	ロッキング	建物	備考
短辺	解析値	0.238	0.230	0.532	SRB卓越周期時
	計測値	0.21-0.23	0.30-0.31	0.46-0.48	
長辺	解析値	0.347	0.061	0.592	SRB卓越周期時
	計測値	0.260	0.130	0.610	

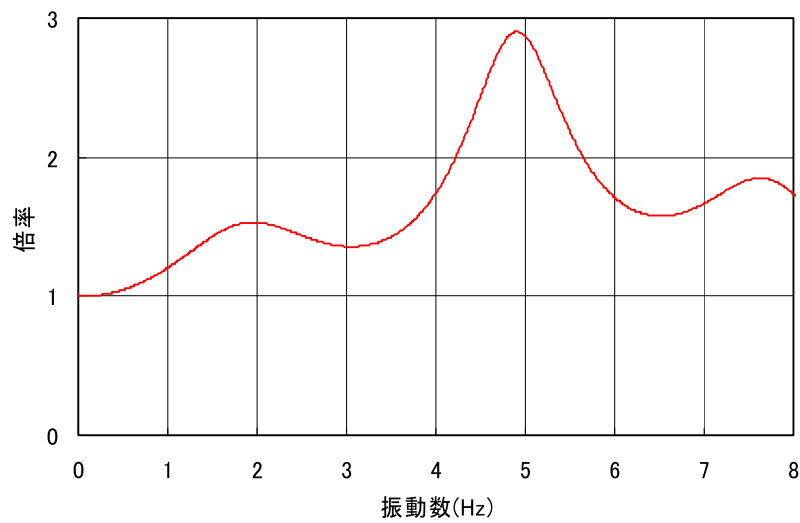


図 8.2 表層地盤の GL-41.5m 地盤に対する伝達関数の振幅特性 (2E/2E)

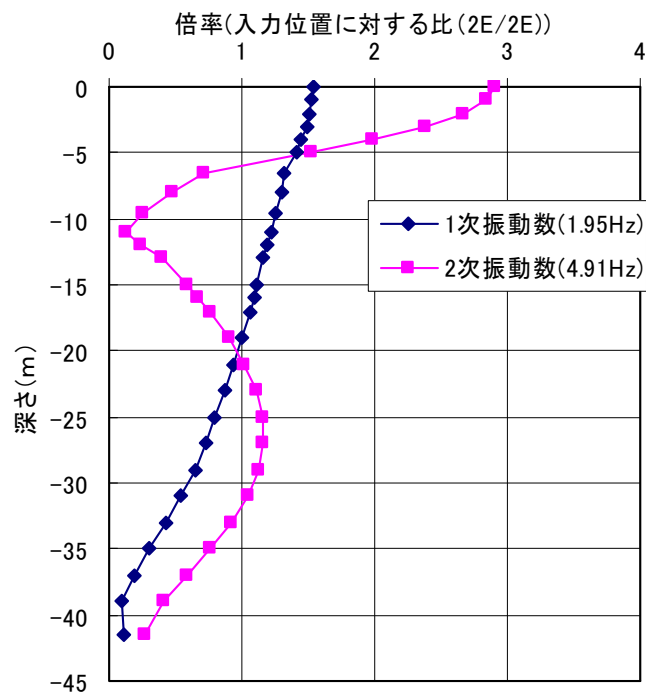
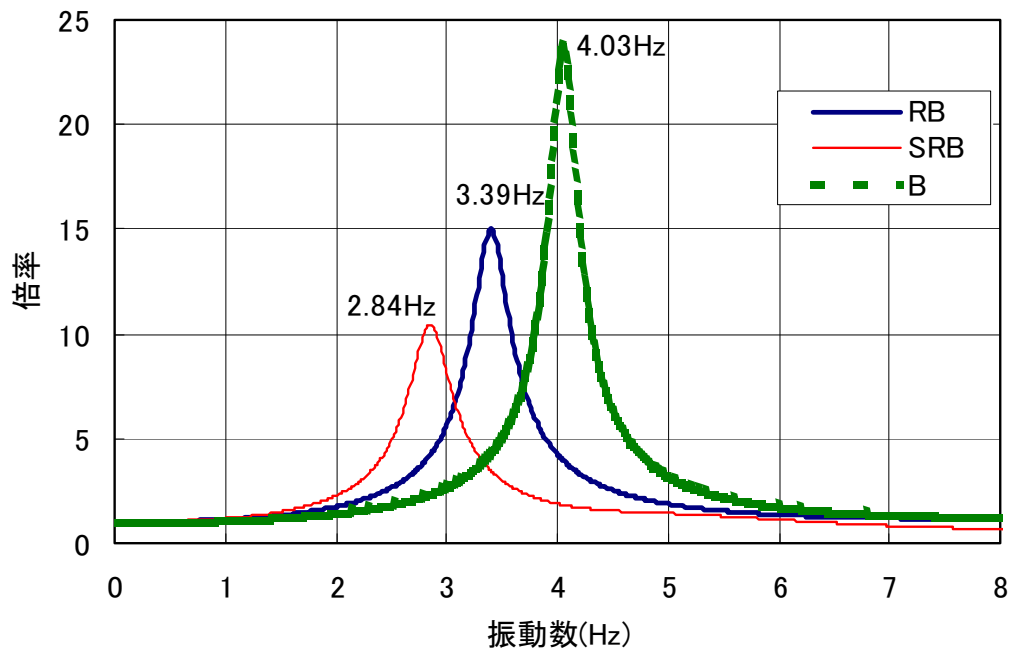
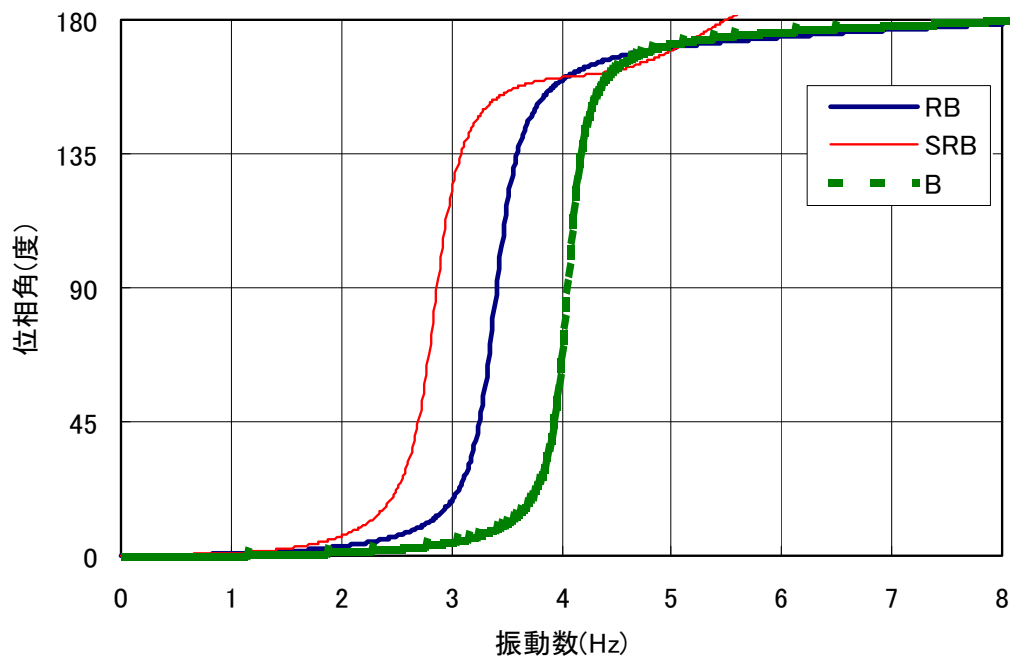


図 8.3 表層地盤の GL-41.5m 地盤に対する伝達関数の振幅特性深さ分布 (2E/2E)

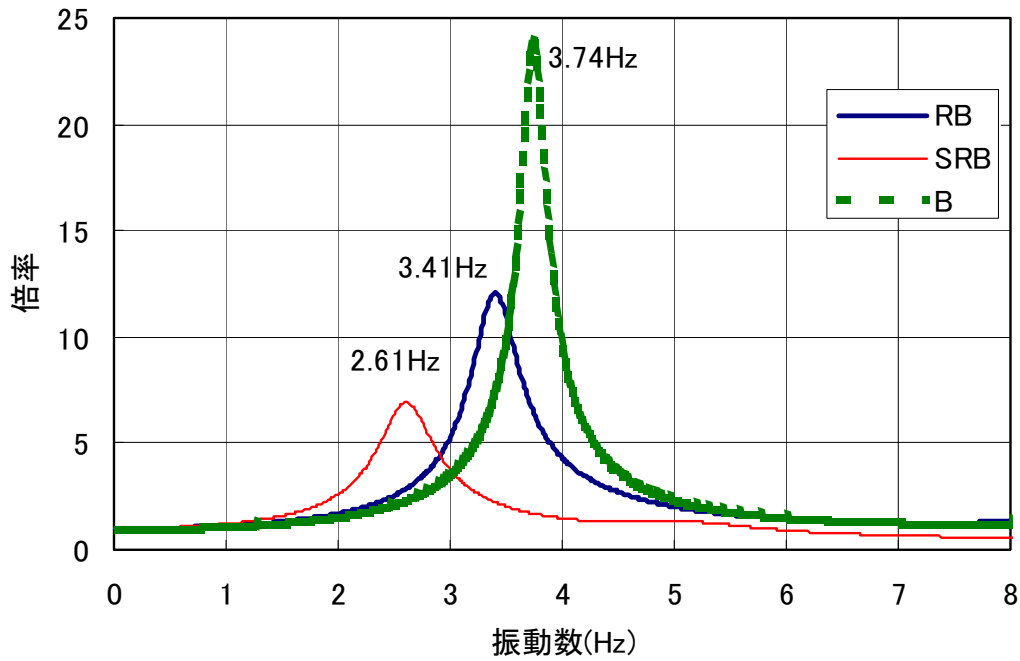


(a) 振幅特性

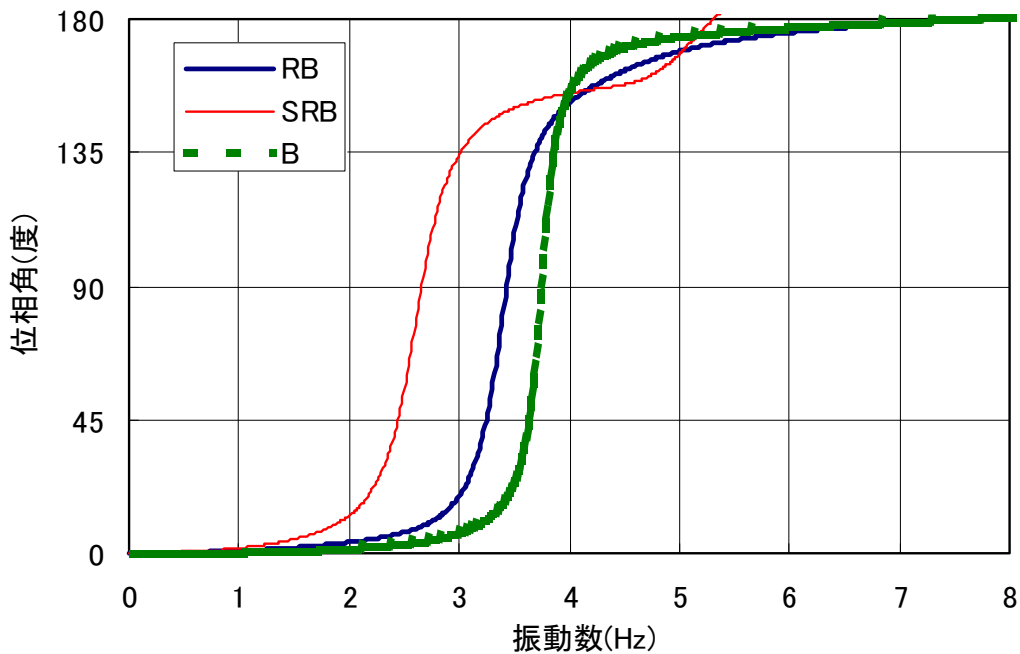


(b) 位相特性

図 8.4 RB,SRB,B の伝達関数 (短辺方向)



(a) 振幅特性



(b) 位相特性

図 8.5 RB,SRB,B の伝達関数 (長辺方向)

(第 8 章 参考文献)

- 1) 内藤幸雄、谷野達夫、井口道雄、北田義夫：建物と地盤の動的相互作用の影響を除去した場合の建物だけの振動特性推定，日本建築学会構造系論文集，No. 564，pp. 39-46，2003
- 2) 原口圭，神田順，稲垣光剛：常時微動測定による中低層建物を対象とした地盤・建物相互作用系の同定手法，日本建築学会構造系論文集，No. 564，pp. 31-37，2003
- 3) 引田智樹，内藤幸雄、アリニウシャ、原田公明：基礎のロッキングを考慮した常時微動による構造物の振動特性推定，日本建築学会構造系論文集，No. 566，pp. 37-44，2003

9. まとめ

建物と地盤の動的相互作用現象の基本性状を把握することを目的として、集合住宅とその周辺地盤において、常時微動測定・人力加振を行った。その測定結果に基づき、建物の卓越振動数および減衰定数を評価した。地盤連成系における建物の1次卓越振動数の評価は、常時微動測定における建物頂部、1階および地盤上の測定波形の伝達関数により算定した。また減衰定数は、伝達関数の位相関係から算定するとともに、常時微動結果にRD法を適用した自由振動波形や人力加振による自由振動波形から対数減衰率として評価した。

また建物・地盤において、B棟の短辺方向及び長辺方向について2次元FEMを用いて、弾性範囲のシミュレーション解析を実施した。

対象建物は、茨城県つくば市に建設されている7階建の中廊下型の集合住宅である。平面は短辺方向3スパン、長辺方向9スパンの矩形である。本建物は、壁・床に、RC造のプレキャスト版を用いて、梁はRC造、柱は鉄骨鉄筋コンクリート造であり、PC杭で支持されている。60m程度離れて同一建物が建設されている。速度型センサーを建物内および地盤上に設置し、60分間程度の記録を収録した。

測定結果・解析結果の特徴・特性をまとめると、以下のようになる。

a)伝達関数における建物の1次卓越振動数

- ・短辺方向では、基礎固定系に対する連成系の卓越振動数の比は、0.68~0.70に、ロッキングが含まれる振動系では0.77~0.78となった。また長辺方向では、基礎固定系に対する連成系の卓越振動数の比は、0.75~0.78に、ロッキングが含まれる振動系では0.87~0.99となった。
- ・卓越振動数の低下には、建物と地盤の動的相互作用が関係しており、短辺方向では、ロッキングの影響が大きく、長辺方向では、スウェイの影響が大きいことが確認された。
- ・位相角が90度となる振動数と振幅のピークを与える卓越振動数とが一致しないことや基礎固定系の位相が進み側に生じるなど、理論的な特性と適合しない結果も得られた。
- ・短辺方向・長辺方向とも、基礎固定における卓越振動数および基礎固定系に対する連成系の卓越振動数ともに、FEM解析における結果は、測定結果と良い対応を示した。

b)1次卓越振動数での増幅率

- ・FEM解析では、短辺方向・長辺方向とも、卓越振動数での増幅率は、基礎固定系、ロッキングが含まれる振動系、連成系の順に小さくなる、すなわち減衰定数が大きくなる特性を示した。この結果は、一般的な建物と地盤の動的相互作用の現象と整合するものである。一方、微動測定では、逆の結果となっており、一般的な建物と地盤の動的相互作用の現象とは異なった特性を示した。この理由を検討するために、既往の文献を調べてみると、起振機実験(建物上部加振)の場合には、基礎固定時の特性が精度良く求められるが、常時微動のように建物外部からの入力の場合には、連成系の振動モードで揺れているため、基礎固定時の特性が検出されにくいことが示されている。微動測定結果を詳細に検討してみると、連成系の伝達関数における各波形処理時間(80s)の伝達関数の場合、位相が遅れている場合と進んでいる場合が同程度見られ、常に一定の位相特性を示していないことや平均化した特性では、性状が十分に把握できないことが明らかとなった。

c)RD法を適用した建物の減衰定数

- ・RD波形より算出した連成系の1次卓越振動数に対する減衰定数は、平均的にみると短辺方向で5.5~6.0%、長辺方向で6.5~6.9%となり、長辺方向の減衰定数が短辺方向の結果に比べてやや大きく評価された。一方、ねじれの減衰定数は、A棟で4.89~7.39%、B棟で4.26~5.26%とA棟の方がB棟に比べばらつきが大きく、減衰定数の平均値も1%以上の差が見られた。ロッキング成分については、平均的にみると5.59~6.11%となり、A棟がB棟に比べてやや大きい結果となった。
- ・日本建築学会でまとめられている卓越周期と減衰定数の関係の図に今回の結果をプロットすると、

RD法より算出した減衰定数の平均値（短辺 5.56%、長辺 6.86%）は、学会における図のばらつきの範囲に収まり、学会の略算式とも調和的であった。

d) 人力加振における建物の減衰定数

- ・ 人力加振における建物の短辺方向、長辺方向の減衰定数は、共に 5.0～6.0%程度の範囲の値が得られた。短辺方向の減衰定数は、RD法により得られた結果とほぼ同様であったが、長辺方向については、1割程度小さい値となった。

e) 中低層建物の常時微動測定データの蓄積

- ・ 中低層建物の場合、参考となる実測例が少ないため、振動特性の把握や測定・評価結果の妥当性などの検討が十分に行われていない。実測および文献事例からより多くの振動特性を蓄積し、より精度の良い特性を評価する必要がある。

謝辞

建物・敷地内での常時微動測定においてご配慮いただきました、関東財務局水戸財務事務所および水戸財務事務所筑波出張所の職員の皆様にはお礼を申し上げますとともに、常時微動の測定・分析に協力いただきました筑波建築研究機関協議会・勉強会の委員の方々には、感謝致します。

© 建築研究資料 第 122 号

平成 22 年 1 月 22 日 印刷

平成 22 年 1 月 29 日 発行

編集
発行 独立行政法人建築研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは下記まで

独立行政法人建築研究所企画部企画調査課

〒305-0802 茨城県つくば市立原 1 番地

電話(029) 864-2151 (代)