

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

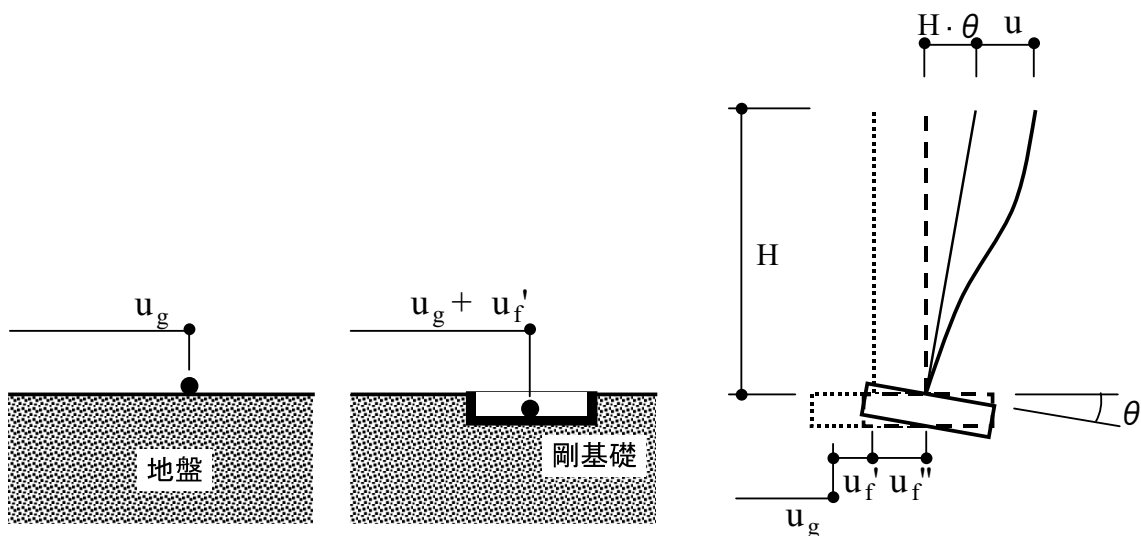


図 4.1 スウェイ・ロッキングモデル

(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($H1(\omega)$)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($H3(\omega)$)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、 $H1(\omega)$ 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つては、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。

表 4.3 建物方向，棟，算出方法別の卓越振動数の比較

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。

(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)

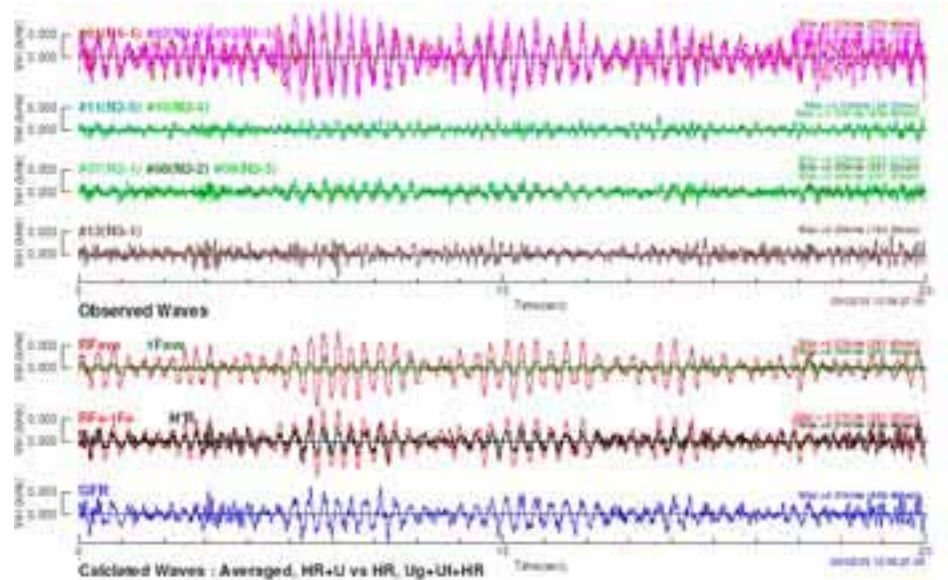
(2)B棟卓越振動数に対するA棟卓越振動数の比

		$f_{A棟} / f_{B棟}$					
		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

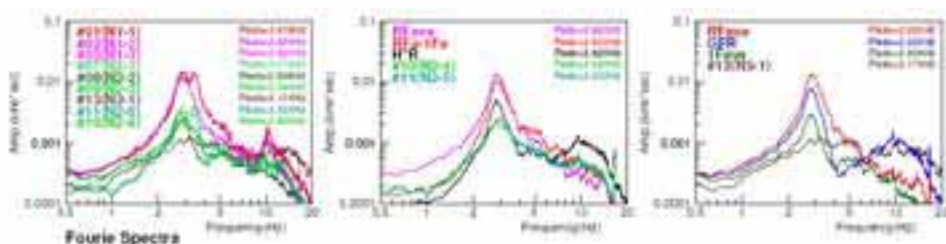
(3)H1(ω)に対するH3(ω)の卓越振動数の比

		$f_{H3(\omega)} / f_{H1(\omega)}$					
		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)

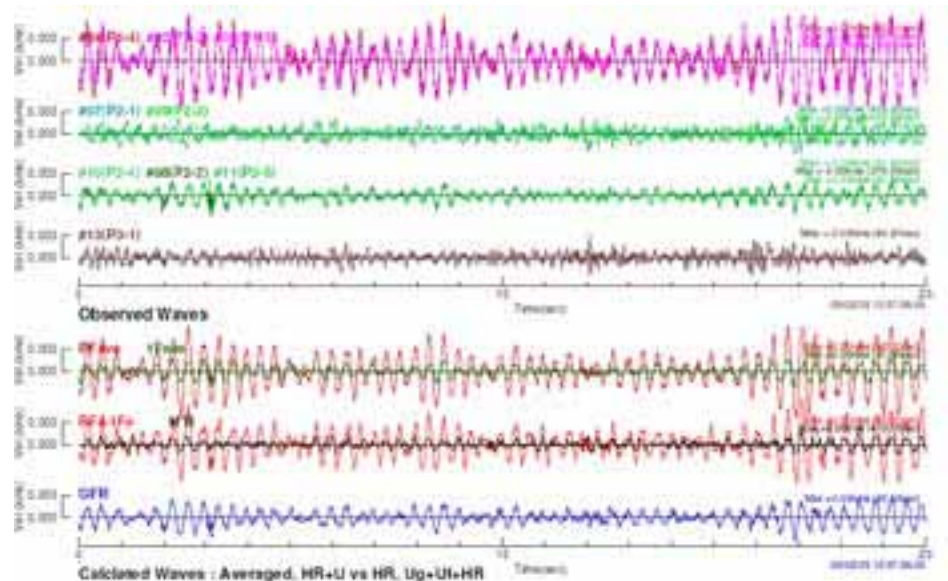


- (5) $u_g+u_f+H\theta+u$, u_g+u_f
- (6) $H\theta+u$, $H\theta$
- (7) $u_g+u_f+H\theta$

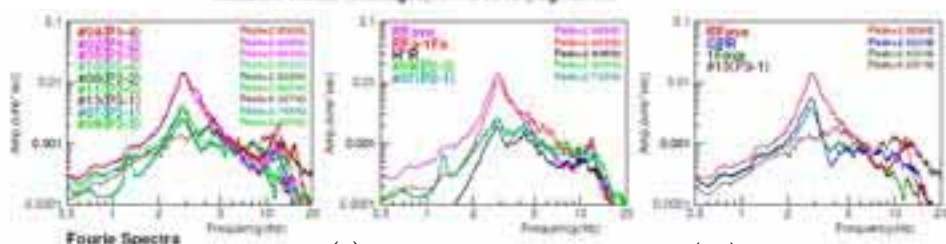


(8)各点フーリエスペクトル (9) $u_g+u_f+H\theta+u$, $H\theta+u$, (10) $u_g+u_f+H\theta+u$, $u_g+u_f+H\theta$, u_g+u_f , 自由地盤(u_g)
 (a) 短辺方向, B棟 (Data:TM01)

- (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)

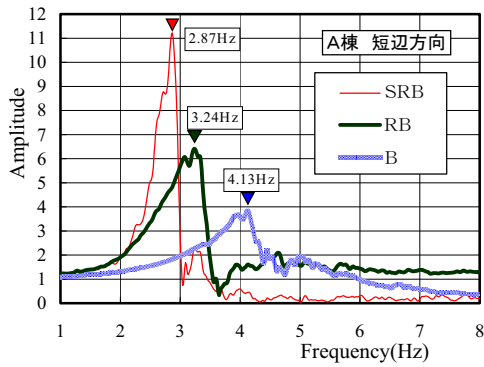


- (5) $u_g+u_f+H\theta+u$, u_g+u_f
- (6) $H\theta+u$, $H\theta$
- (7) $u_g+u_f+H\theta$

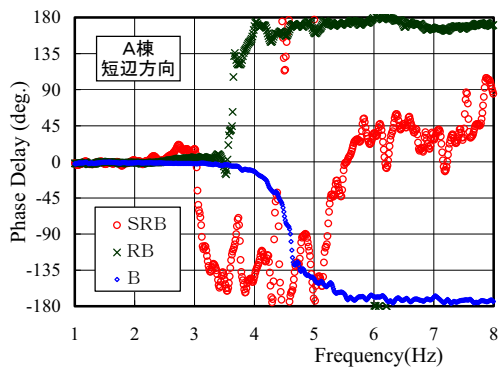


(8)各点フーリエスペクトル (9) $u_g+u_f+H\theta+u$, $H\theta+u$, (10) $u_g+u_f+H\theta+u$, $u_g+u_f+H\theta$, u_g+u_f , 自由地盤(u_g)
 (b) 長辺方向, B棟 (Data:LM04)

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

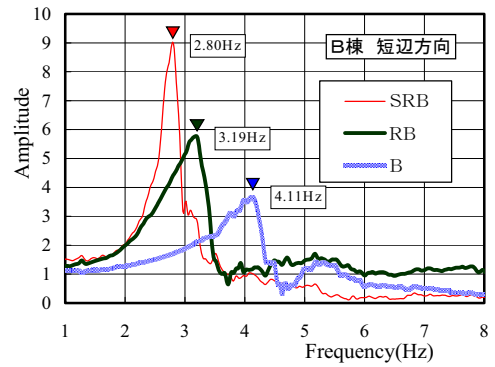


(1) Amplification

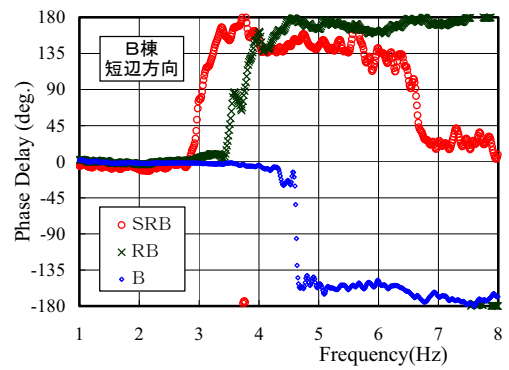


(2) Phase Difference

(a) A棟・短辺方向

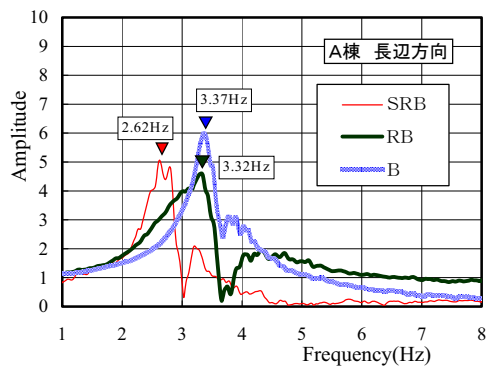


(1) Amplification

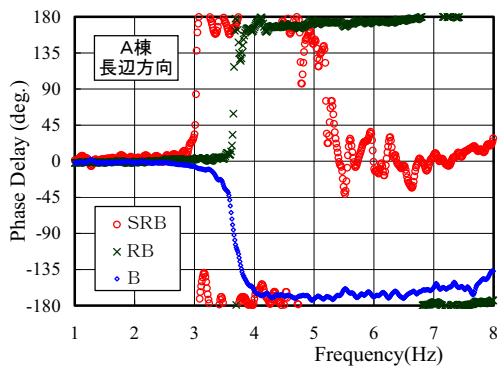


(2) Phase Difference

(b) B棟・短辺方向

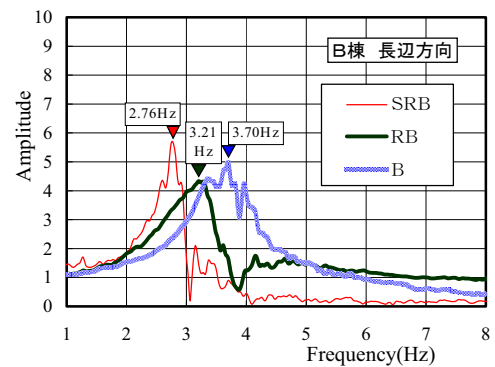


(1) Amplification

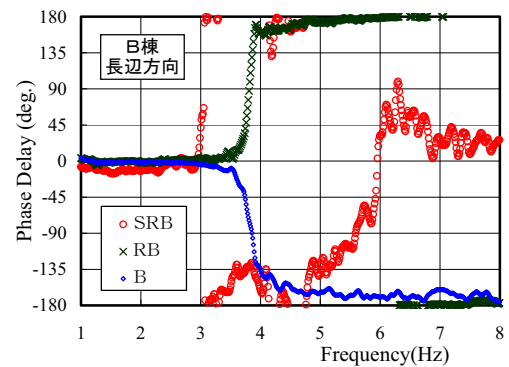


(2) Phase Difference

(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

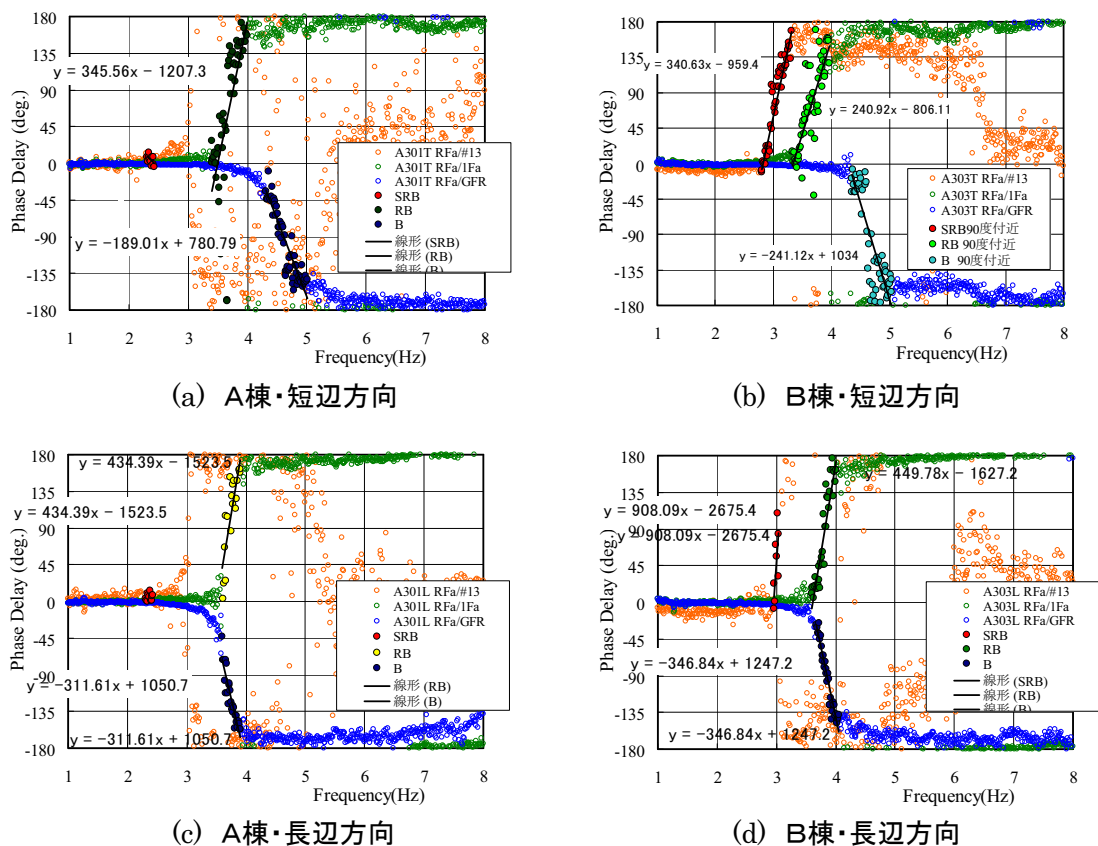


図 4.4 位相特性の評価

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