

5. 増幅特性・固有振動数・減衰定数に及ぼす動的相互作用効果

5.1 はじめに

本章では、第4章までに得られた知見を生かして、1994年度から2004年度に渡って名古屋大学が振動実測をしてきた多数の建物の実測記録を用いて、相互作用効果が増幅特性・固有振動数・減衰定数に及ぼす影響を検討する。

5.2 多数の建物振動実測に基づく動的相互作用効果

5.2.1 振動実測の概要

表5.1に振動実測種類と建物棟数の関係を示す。但し、1棟の建物で同種の実測を複数回実施している場合は、1回としてカウントしている。振動実測は名古屋大学内の建物を中心に行われているが、大学内以外でも様々な用途の建物で振動実測を行ってことが分かる。小学校の棟数が際だって多いのは、2.2節で述べた戦略的強震観測・常時微動計測の一環で、ほぼ同一の上部構造で地盤・基礎条件の違いが相互作用効果に及ぼす影響を抽出するために、名古屋市内の小学校を対象に常時微動計測を行ったためである。ここで得られた実測記録は八木ら^{1), 2)}が詳細に分析しており、ほぼ同一の上部構造であっても、軟弱地盤上では相互作用効果が大きいことなどを指摘している。

建物用途・構造種別と棟数の関係を階数毎に図5.1、図5.2に示す。10階建て以下の建物はほぼ全てがRC系の建物で、15階建て以上の高層建物はS造が主であることが分かる。

常時微動計測は、計測目的によってグレードを下記の4つに分けて実施している。

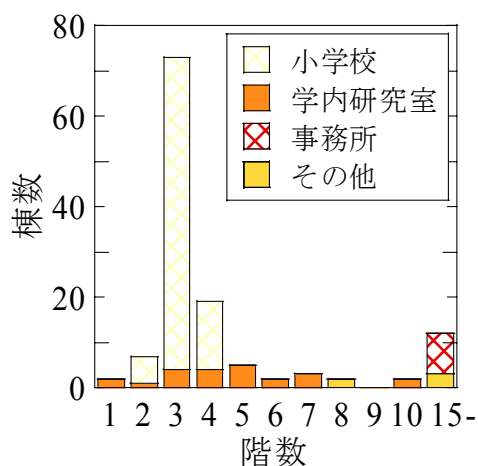
- (I) 建物応答（固有振動数と減衰定数）のみを簡易的に明らかにするための、屋上1点3成分での計測
- (II) (I)に加え、相互作用効果も明らかにするための、地盤・基礎・屋上の3点9成分での計測
- (III) ロッキングも含めた相互作用効果を明らかにするための、地盤・基礎・屋上・基礎端（上下動のみ）の4点での計測
- (IV) (III)に加え、建物の立体振動性状や地盤の波動伝播性状などを明らかにするための、高密度計測

図5.3に常時微動計測の計測地点数と棟数の関係を階数毎に示す。高層建物では、グレード(I)の実測を行い、相互作用効果が大きいと考えられる10階建て以下の建物では、グレード(II)以上の振動実測を行っていることが分かる。

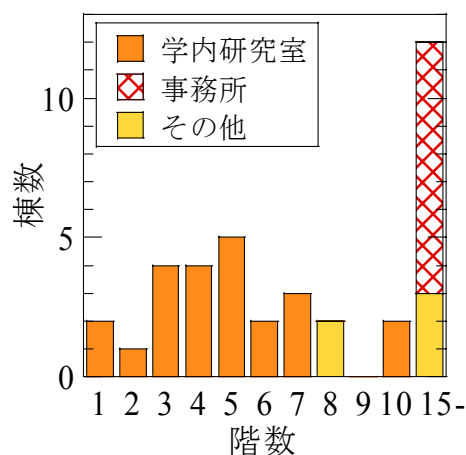
表 5.1 振動実測種類と建物棟数の関係

	小学校	研究室	事務所	病院	庁舎	住宅	寺社	宿泊施設	複合施設
常時微動計測 (微動計)	93	23	2	1	2	5	2		
常時微動計測 (強震計)		4	9	2				1	2
常時微動計測 (建設段階)		4				1			
常時微動計測 (台風)		6							
強震観測		13	2	2	3	3	1		
起振機実験						4			
振動台実験		2				1			
自由振動実験 (起振機)			1			4			
自由振動実験 (人力)		1	1						
引き綱試験						1			
静的加力試験 (免震建物)			1						

※ 1 棟の建物で同種の実測を複数回実施している場合は、
1 回としてカウントしている。

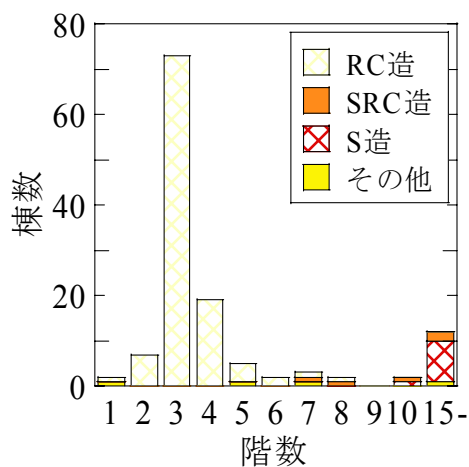


(a) 全ての建物

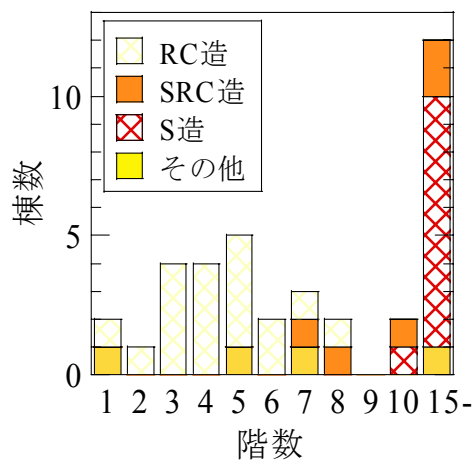


(b) 小学校を除く建物

図 5.1 建物用途と棟数の関係



(a) 全ての建物



(b) 小学校を除く建物

図 5.2 構造種別と棟数の関係

強震観測は名古屋大学内の建物を中心に行っており、常時微動計測と同様に、計測目的に合わせて以下に示すグレードに分けて実施している。表 5.2 に名古屋大学内での建物強震観測の概要を示す。

- (I) 入力損失効果のみを明らかにするための、地表・基礎の 2 地点での観測
- (II) 建物応答と相互作用効果を明らかにするための、地表・基礎・屋上の 3 地点での観測
- (III) ロッキングも含めた相互作用効果を明らかにするための、地盤・基礎・基礎端部・屋上の 4 点での観測
- (IV) (III)に加え、ねじれ応答を明らかにするための観測
- (V) (III)に加え、中間階での建物応答を明らかにするための観測
- (VI) (II)に加え、地盤の増幅特性も含めた建物応答を明らかにするための観測
- (VII) 地盤、杭も含めた建物全体の立体振動性状を明らかにするための観測

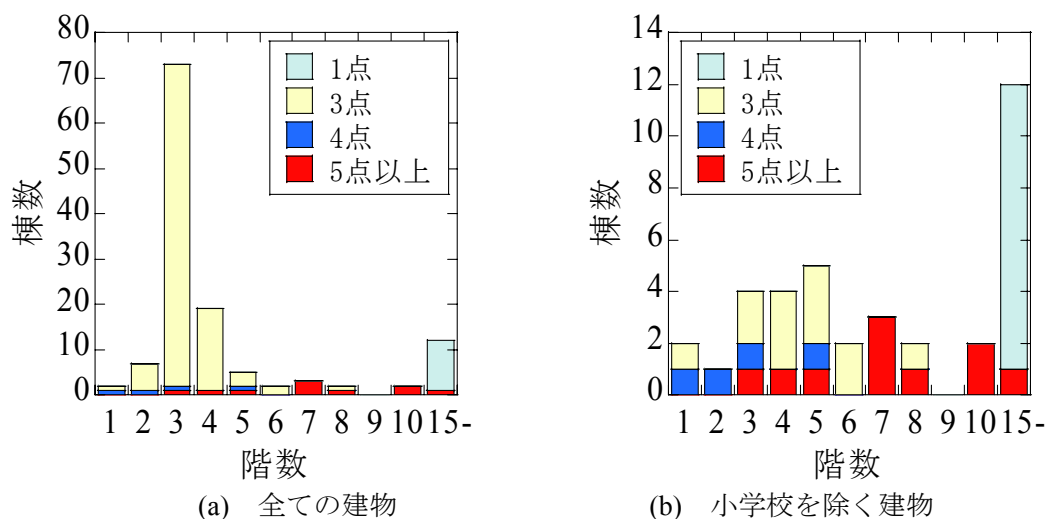


図 5.3 常時微動計測点数と棟数の関係

表 5.2 名古屋大学内の建物強震観測の概要

建物名称	階数	構造種別	建築面積 (m ²)	基礎種別	強震観測				備考
					地盤 ^{*2}	基礎 ^{*3}	建物頂部 ^{*4}	中間階	
超低温実験室	2	RC	263	杭(PC)	◎	○			
超高压電子顕微鏡実験室	1	RC	189	杭(RC)	◎	○			
先端技術共同研究センター	1	RC+S	466	直接	◎	○			
年代資料測定センター	3	RC	1,649	杭(RC)	○	○			
工学部4号館	4	RC	1,155	杭(RC)	○	○	○		
工学部9号館 (西館)	6	SRC	604	杭(PC)	○	○	○		隣接
工学部9号館 (東館)	3	RC	374	直接	○	○	○		
工学研究科新1号館 (L) ^{*1}	10	SRC	1,502	杭(PHC)	◎	○	○	○	増築前 増築後
工学研究科新1号館 (コ)	10	SRC	1,841	杭(PHC)	◎	◎	◎		
IB電子情報館 (北館)	10	S	987	杭(場所打ち)	○	◎	◎		隣接
IB電子情報館 (西館)	7	SRC+S	3,911	杭(PHC)	○	◎	◎		
IB電子情報館 (南館)	5	RC		杭(PHC)	○	◎	◎		
環境総合館	7	PCaPC	852	杭(PHC)	◎	◎	◎	◎	高密度観測

*1 工学研究科新1号館は、平面増築工事により現在はコ型の対象平面となっている。

*2 地盤の◎印は、地中の観測点もあることを意味する。

*3 基礎の◎印は、ロッキングの観測点もあることを意味する。

*4 建物頂部・中間階の◎は、ねじれの観測点もあることを意味する。

*5 上記に加え、鶴舞キャンパス内の免震中央診療棟 (建設中)、社寺1棟、木造住宅1棟、鉄骨住宅2棟、庁舎 (免震改修予定) 3棟、基礎免震建物1号で強震観測を実施中である。

また、超高層制震建物 (建設中) の強震観測を計画中である。

5.2.2 多数の建物の常時微動記録に基づく動的相互作用効果

多数の建物で得られた常時微動記録を用いて、動的相互作用効果が固有振動数と減衰定数に及ぼす影響を検討する。固有振動数と減衰定数の推定は、表 5.3、表 5.4 に示す手法により行っている。

図 5.4 に地盤－建物連成系の固有周期と軒高の関係を、文献 68 の S 造建物と RC 系建物の実測固有周期の回帰直線と共に示す。また、図 5.4 の拡大図を図 5.5 に示す。両方向とも高層建物は、S 造建物の回帰直線と比較的良く対応を示している。これに対し中低層建物は、RC 系建物の回帰直線よりも周期が短くなっている。相互作用の影響が強いと仮定した場合、回帰直線よりも周期が長くなると予想されるが、反対の結果が得られている。この原因として、文献 68 の回帰式作成に用いられたデータの半数近くが 2 次部材の少ない事務所であるため、回帰直線が長周期側にシフトしている可能性が挙げられる。逆に、名古屋大学で行った振動実測の対象建物が、3.4 節で示したように 2 次部材の剛性が、相互作用効果以上に効いたために、固有周期が高めになっている可能性も挙げられる。

図 5.6 に桁行方向と張間方向の固有周期比と軒高の関係を示す。高層建物は固有周期比がほぼ 1 であるのに対し、中低層建物 RC 系建物はばらつきが大きくなっている。これは、実測した高層建物の多くが、中低層建物に比べ平面の対称性が高いこと、図 5.1 と図 5.2 に示したように S 造事務所建物が多かった、間仕切り壁が少ないことが影響していると考えられる。

図 5.7 に地盤－建物連成系の減衰定数と軒高の関係を示す。高層建物は設計で慣用的に使用されている 2% よりも若干低めの値であるが、ばらつきは小さい。これに対して、RC 系建物は低層建物ほど減衰定数が大きな傾向が認められ、5～15% と幅を持った値を示している。建設中建物は、高層建物と RC 系建物の中間的な値を示していることも分かる。この結果は、低層建物ほど地下逸散減衰が大きいことを示しており、3 章で得られた知見と調和的である。

表 5.3 固有振動数の推定手法

分析手法（微動記録） 固有振動数	RC造		SRC造		S造	
	連成系	基礎固定系	連成系	基礎固定系	連成系	基礎固定系
フーリエスペクトルピーク	12		1			
パワースペクトルピーク	12					
伝達関数カーブフィット(振幅のみ)	12	12		2		
伝達関数カーブフィット(振幅・位相)	25	32	2	2	11	
RD法+ゼロクロッシング法	12		2			
自己相関関数法+ゼロクロッシング法	12		1			

表 5.4 減衰定数の推定手法

分析手法(微動記録) 減衰定数	RC造		SRC造		S造	
	連成系	基礎固定系	連成系	基礎固定系	連成系	基礎固定系
RD法+対数減衰率	12		3		11	
RD法+包絡線近似	12		1			
自己相関関数法+対数減衰率	12		1			
ハーフパワー法	12					
伝達関数カーブフィット(振幅のみ)	12	12		2		
伝達関数カーブフィット(振幅・位相)	23	25	1	2		

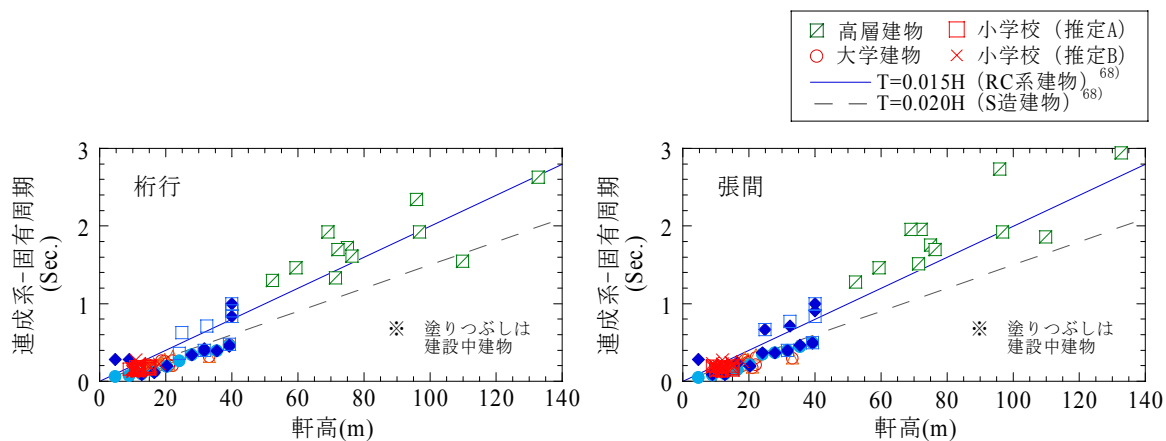


図 5.4 軒高と地盤—建物連成系固有周期の関係 (左：桁行方向，右：張間方向)

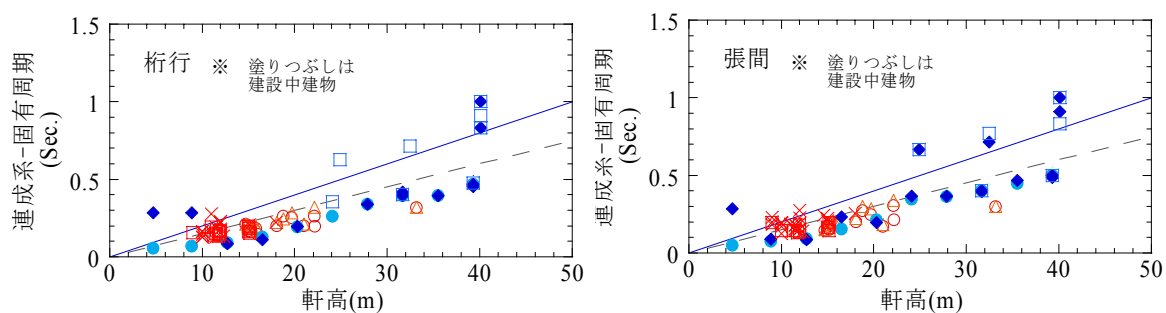


図 5.5 軒高と地盤—建物連成系の固有周期の関係 (左：桁行方向，右：張間方向)
(図 5.4 の縦軸を 1.5sec までを拡大して表示)

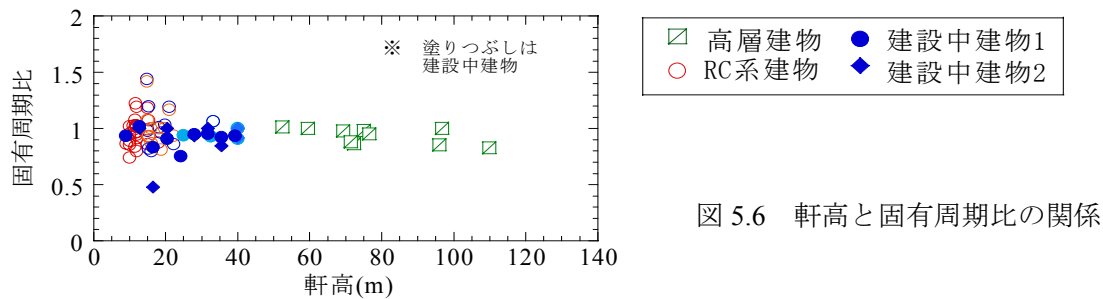


図 5.6 軒高と固有周期比の関係

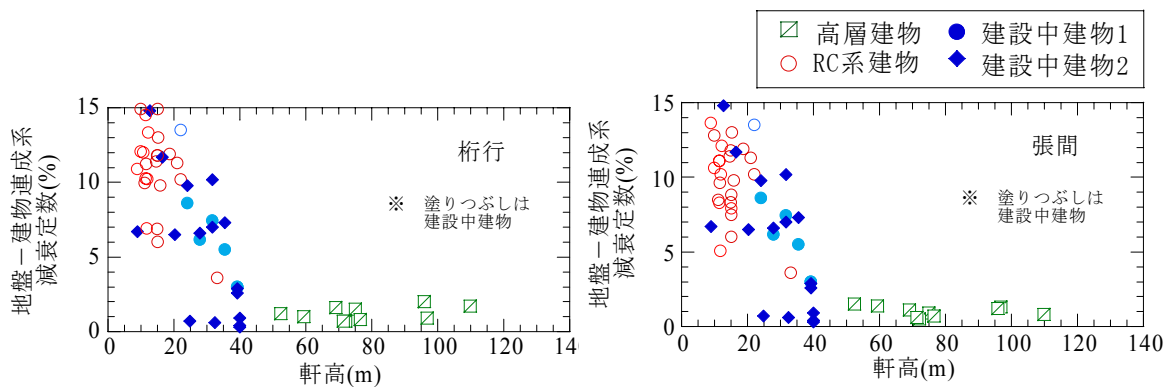


図 5.7 軒高と地盤—建物連成系の減衰定数の関係 (左：桁行方向，右：張間方向)

5.3 増幅特性に及ぼす相互作用効果

5.3 節～5.5 節では、1996 年より名古屋大学東山キャンパス内の構造種別・階数の異なる 5 棟の建物で行われている強震観測で得られた多数の中小地震記録を用いて分析を行う。対象建物は、4 章で対象とした建物①～⑤である（図 5.8、表 5.5）。構造種別・階数の違いが振動性状に及ぼす影響を分析し易くするために、これ以降は 5 棟の建物を、S 造 10 階建物、SRC 造 10 階建物、RC 造 4 階建物、SRC 造 6 階建物、SRC 造 3 階建物と略記する。

増幅特性に及ぼす相互作用効果を検討するために、表 5.5 に示す全地震記録を用いたスウェーイのみ固定した基礎固定系（RF/1F）と地盤－建物連成系（RF/GL）の平均フーリエスペクトル比を図 5.9 に示す。それぞれの建物で RF/1F と RF/GL を比較すると、RC 系建物では相互作用に起因する固有振動数の低下が認められるが、S 造 10 階建物では固有振動数の変化は認められない。1 次固有振動数での増幅度の差に着目すると、SRC 造 10 階建物と RC 造 3 階建物で相互作用に起因する応答低減効果が認められる。これに対し、他の建物では RF/GL の方が大きな増幅度を示している。この原因として、S 造 10 階建物は相互作用効果が小さく、S 造純ラーメン構造であるため曲げ変形が卓越していると考えられ、地盤－建物連成系と基礎固定系の 1 次モードが対応していない可能性がある。RC 造 4 階建物は八木²⁾らがロッキングの影響が強いことを指摘しており、SRC 造 6 階建物は、松山³⁾が入力時振動特性によって建物への振動入力システムが異なる可能性を指摘している。

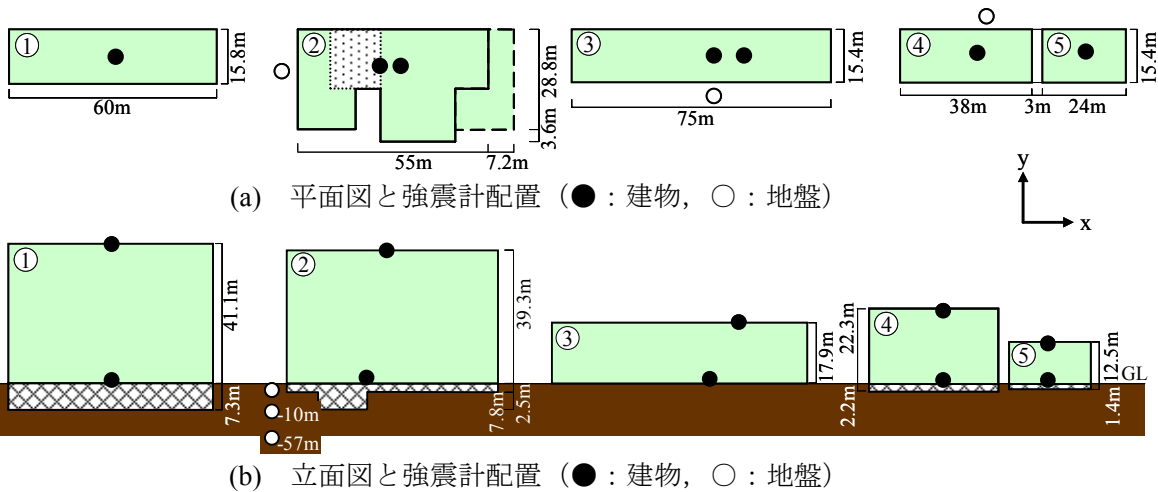


図 5.8 対象建物の平面図・断面図

表 5.5 対象建物の概要

建物 No.	構造 種別	階数	軒高 (m)	基礎・杭種別	基礎		建築面積 (m ²)	平均Vs(m/s) ^{*3}		地震 記録数	連成系固有振動数	
					杭長 (m)	根入れ (m)		N値 による	PS検層 による		x方向 (Hz)	y方向 (Hz)
1	S	10	41.1	場所打ち杭	41.7	7.3	987	243	250	28	1.0	1.0
2	SRC	10	39.3	PHC杭	45-48	2.5 (7.8) ^{*2}	1841	254	220	47	1.8	1.7
3	RC	4	17.9	RC杭	6	0	1155	244	-	49	4.2	4.4
4	SRC	6	22.3	PC杭	10, 12	2.2	604	302	-	57	3.5	3.6
5	RC	3	12.5	直接	-	1.4	374	335	-	29	5.9	4.9, 8.3

*1 Mは柱がRC造、梁がS造を意味する。

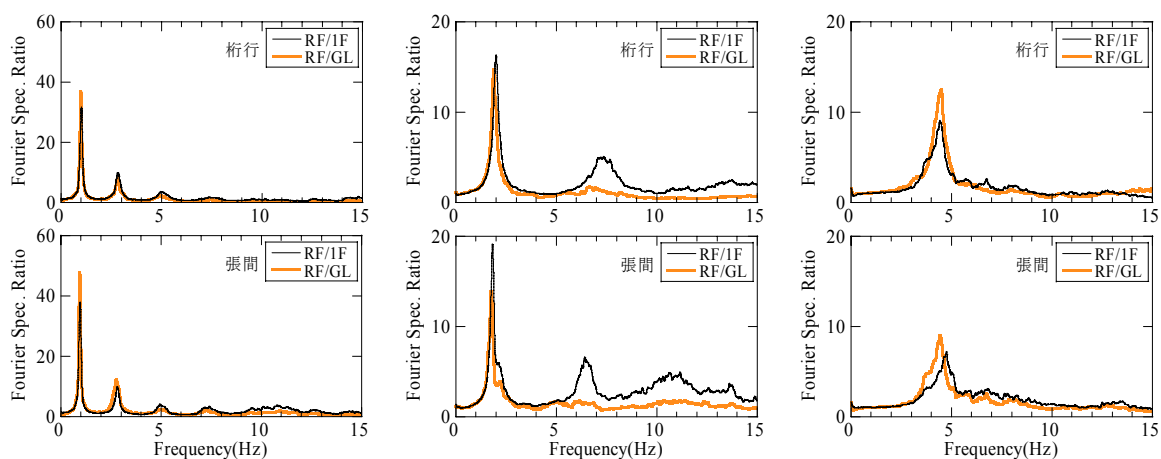
*2 根入れの括弧内は一部深い場所での深さを意味する。

*3 平均Vs (N値) は、N値から推定したVsを基礎底面から深さ10mまで層厚で重み付け平均して算出。
平均Vs (PS検層) は、板叩き法で推定されたVsを基礎底面から深さ10mまで層厚で重み付け平均して算出。
括弧内の平均Vsは、建物から約50m離れた地点でのボーリングデータから推定したことを意味する。

建物の増幅特性を簡易的に評価するために、建物屋上（RF）、建物 1 階（1F）、地表（GL）で得られた地震記録の最大加速度・最大速度に着目して分析を行う。以後、屋上・1 階・地表での最大加速度をそれぞれ PRA, PBA, PGA と略記し、最大速度をそれぞれ PRV, PBV, PGV と略記する。図 5.10 に地震動の等価卓越振動数（ $PGA/PGV/2\pi$ ）と最大加速度比 PRA/PBA（基礎固定系）、PRA/PGA（地盤－建物連成系）の関係を示す。建物によって増幅度が異なっていることが分かる。また、地震動の卓越振動数によっても増幅度が明瞭に異なっている様子も分かる。増幅度が高くなっている振動数帯域は、図 5.9 に示した平均フーリエスペクトルのピークが現れている振動数帯域と良く対応している。しかし、増幅度は平均フーリエスペクトル比の半分程度になっている。PRA/PBA と PRA/PGA を比較すると、SRC 造 10 階建物では相互作用効果による応答低減が認められるが、他の建物では PRA/PBA と PRA/PGA に差はほとんど認められない。

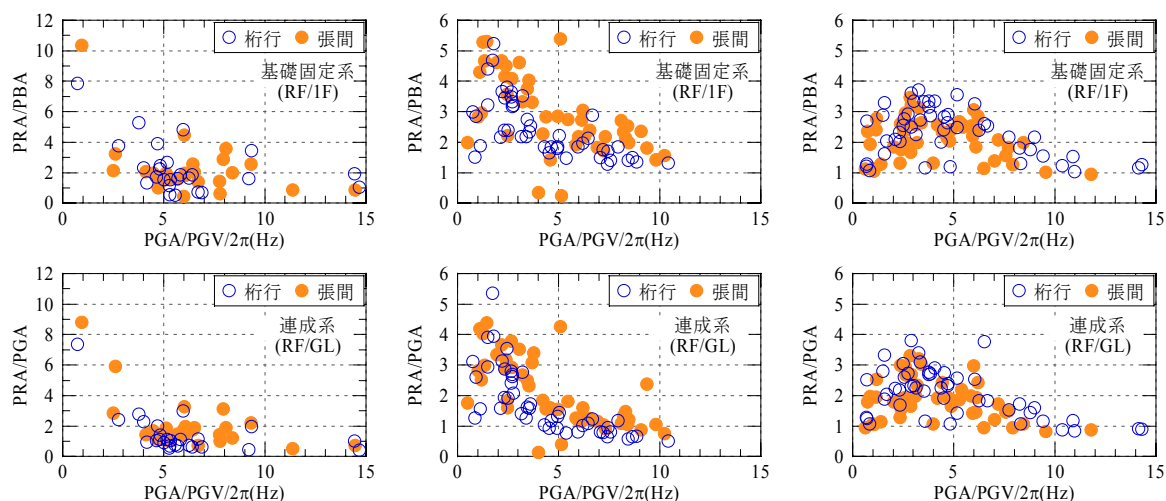
図 5.11 に地震動の等価卓越振動数（ $PGV/PGD/2\pi$ ）と最大速度比 PRA/PBA（基礎固定系）、PRA/PGA（地盤－建物連成系）の関係を示す。図 5.11 のプロットは、図 5.10 に比べ低振動数側に分布しており、階数の高い建物の平均フーリエスペクトルとの対応が良くなっている。しかし、増幅度は図 5.10 と同様に、平均フーリエスペクトルの半分程度にしかっていない。PRV/PBV と PRV/PGV を比較すると、各建物で両者に顕著な差は認められない。

図 5.10、図 5.11 に共通して、地盤－建物連成系と基礎固定系の違いが増幅度の差や、固有振動数の差には明瞭には現れていない。しかし、RC 造 3 階建物の屋上と 1 階、あるいは地表の最大値比は極めて小さくなっている。スウェイが支配的となり、上部構造物が剛体的に挙動していることが原因と考えられ、これこそが相互作用効果が増幅特性に及ぼす影響といえる。また、建物の増幅特性は建物と地盤の固有振動数のみならず、入力地震動の卓越振動数にも大きく影響されることを実測記録より明らかとなった。



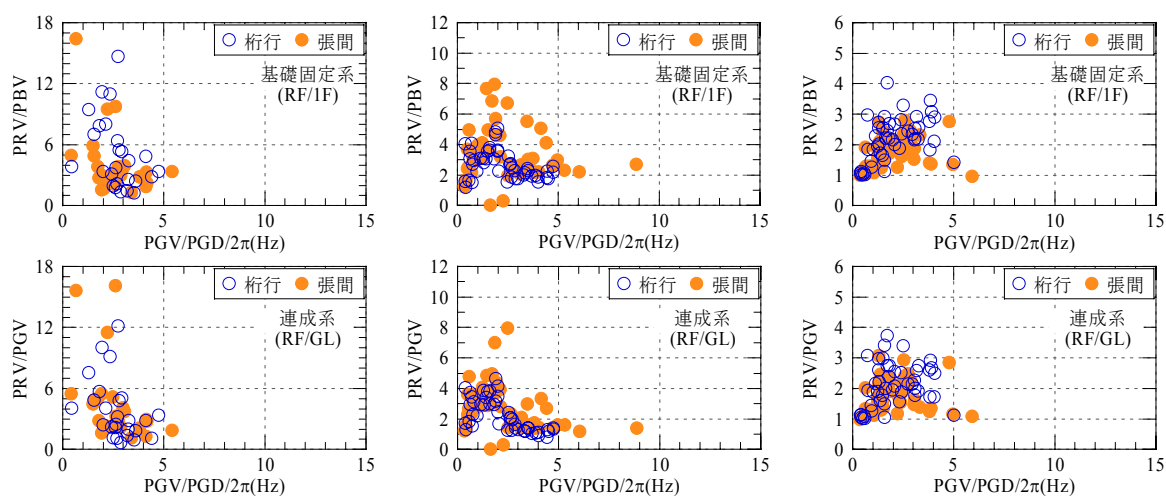
(a) S 造 10 階建物 (b) SRC 造 10 階建物 (c) RC 造 4 階建物

図 5.9 平均フーリエスペクトル比 (上段：桁行方向，下段：張間方向)



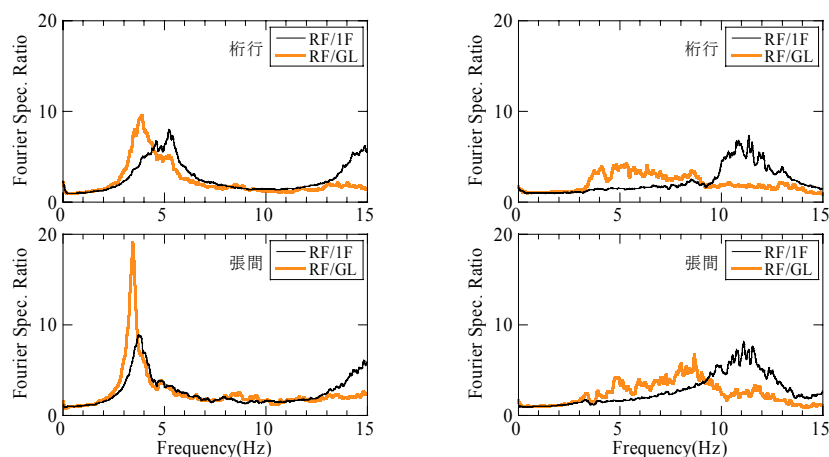
(a) S 造 10 階建物 (b) SRC 造 10 階建物 (c) RC 造 4 階建物

図 5.10 地震動の等価卓越振動数 ($PGA/PGV/2\pi$) と最大加速度比 (PRA/PBA , PRA/PGA) の関係 (上段：RF/1F，下段：RF/GL)



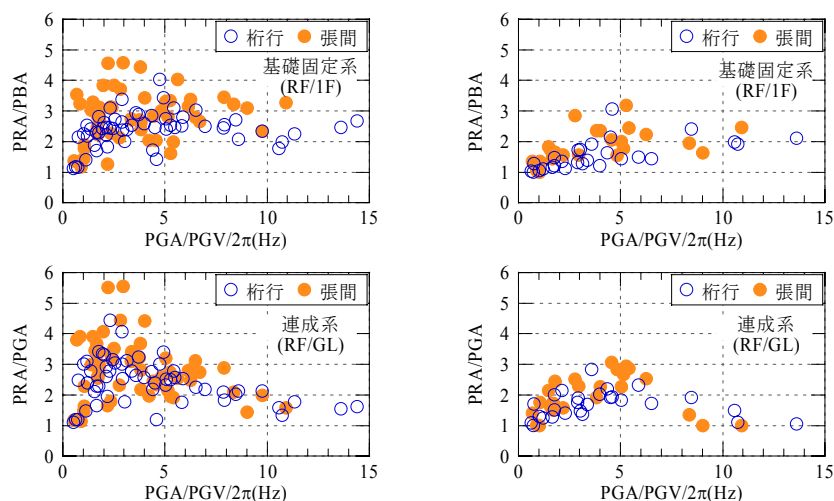
(a) S 造 10 階建物 (b) SRC 造 10 階建物 (c) RC 造 4 階建物

図 5.11 地震動の等価卓越振動数 ($PGV/PGD/2\pi$) と最大速度比 (PRV/PBV , PRV/PGV) の関係 (上段：RF/1F，下段：RF/GL)



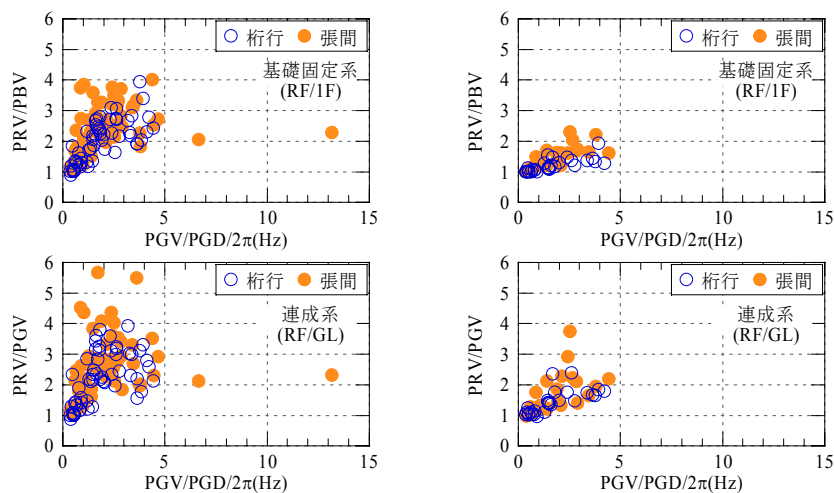
(d) SRC 造 6 階建物<隣接> (e) RC 造 3 階建物<隣接>

図 5.9 平均フーリエスペクトル比 (上段：桁行方向，下段：張間方向)



(d) SRC 造 6 階建物<隣接> (e) RC 造 3 階建物<隣接>

図 5.10 地震動の等価卓越振動数 (PGA/PGV/2 π) と最大加速度比 (PRA/PBA, PRA/PGA) の関係 (上段：RF/1F, 下段：RF/GL)



(d) SRC 造 6 階建物<隣接> (e) RC 造 3 階建物<隣接>

図 5.11 地震動の等価卓越振動数 (PGV/PGD/2 π) と最大速度比 (PRV/PBV, PRV/PGV) の関係 (上段：RF/1F, 下段：RF/GL)

5.4 固有振動数に及ぼす相互作用効果

相互作用効果が固有振動数に及ぼす影響を検討するために、5 棟の建物それぞれで、表 5.5 に示す全地震記録に対して線形多モードモデルを用いて GL, 1F を入力, RF を出力としたシステム同定⁴⁾を行い、固有振動数と減衰定数を推定した。但し、RC 造 3F 建物は、相互作用効果が大きいことや隣接する SRC 造 6F 建物の影響が大きいことなどから、システム同定を適切に行うことができなかった。

図 5.12 に 4 棟の建物の地盤－建物連成系 (RF/GL) とスウェイのみ固定した基礎固定系 (RF/1F) の固有振動数の関係を示す。S 造 10 階建物では、RF/GL と RF/1F の固有振動数はほとんど差が認められない。これに対し RC 系建物では、RF/1F の固有振動数に比べ、RF/GL の固有振動数が顕著に低くなっている。これらは慣性の相互作用に起因するものと考えられる。尚、RC 造 4 階建物の張間方向と、SRC 造 6 階建物でばらつきが大きくなっている原因は、ロッキングや隣接建物間相互作用などの影響である。

固有振動数の振幅依存性と相互作用効果の関係を検討するために、図 5.13 に屋上最大加速度と固有振動数 (RF/1F, RF/GL) の関係を示す。S 造 10 階建物では、屋上最大加速度が大きくなると、僅かに固有振動数が低下している。これに対し、SRC 造 10 階建物と RC 造 4 階建物では、振幅依存性が顕著に認められる。

図 5.13 の各建物の RF/1F と RF/GL を比較すると、S 造 10 階建物と SRC 造 10 階建物のプロットの分布傾向は両者で類似していることから、振幅依存性は主に上部構造に起因するものと考えられる。

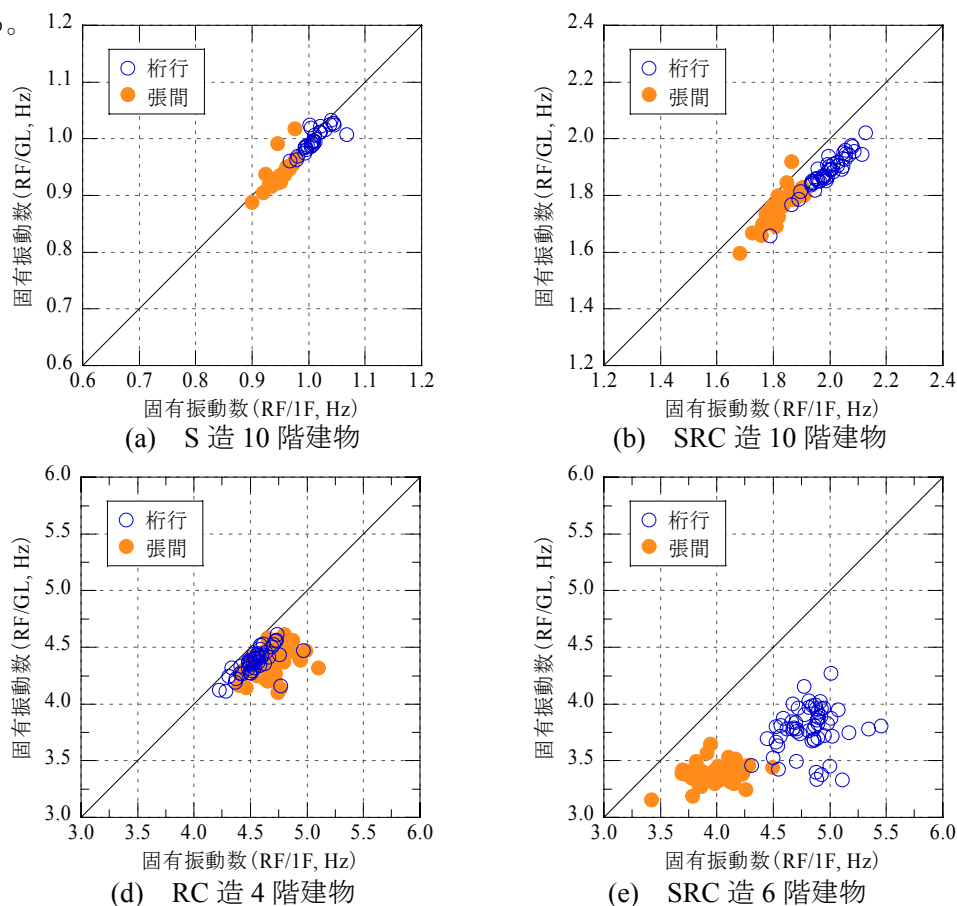
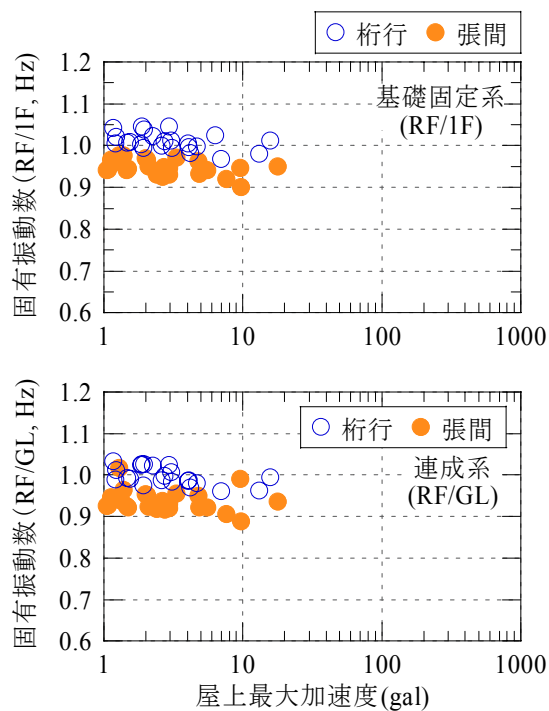
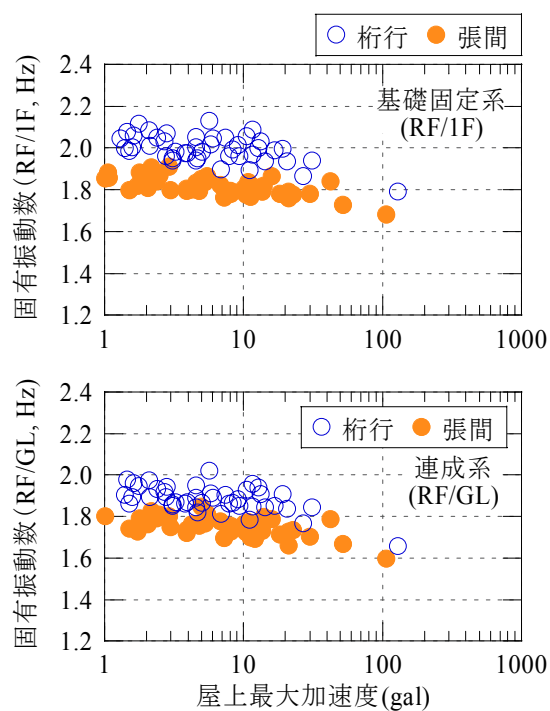


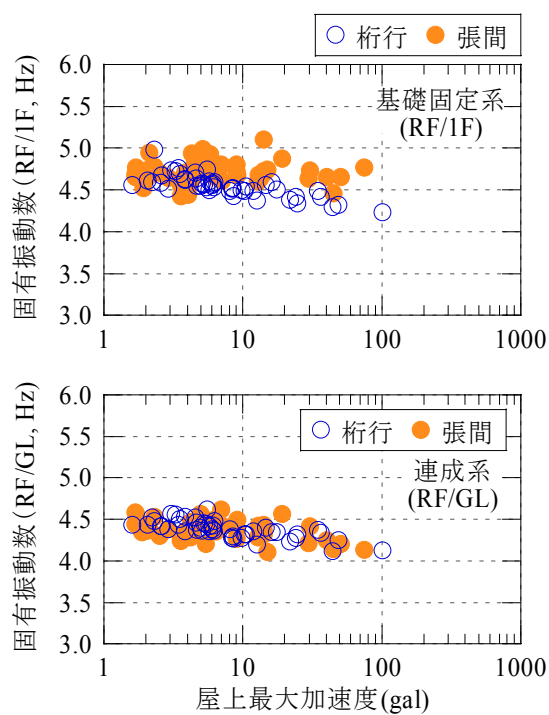
図 5.12 固有振動数に及ぼす相互作用効果



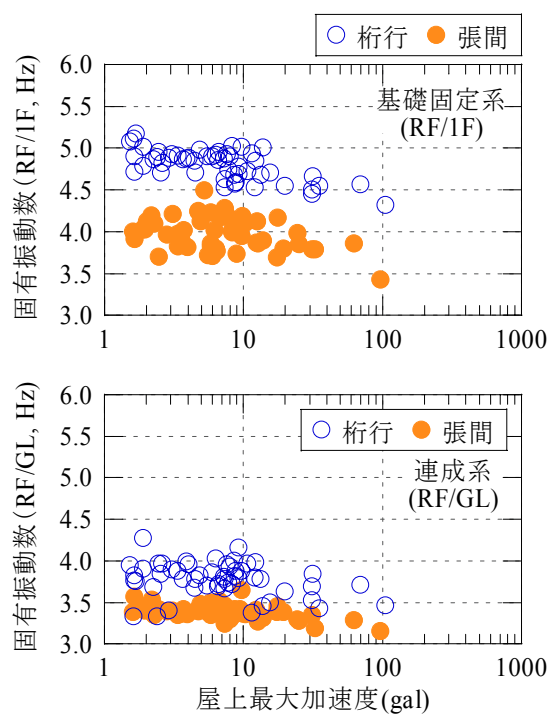
(a) S 造 10 階建物



(b) SRC 造 10 階建物



(d) RC 造 4 階建物



(e) SRC 造 6 階建物

図 5.13 固有振動数に及ぼす相互作用効果

5.5 減衰定数に及ぼす相互作用効果

5.4 節で行ったシステム同定の結果を用いて、図 5.14 に 4 棟の建物の地盤—建物連成系 (RF/GL) とスウェイのみ固定した基礎固定系 (RF/1F) の減衰定数の関係を示す。S 造 10 階建物は、RF/GL と RF/1F とともに約 1% 程度の減衰しか示しておらず、両者に差はほとんど認められない。これに対し SRC 造 10 階建物では、RF/GL の減衰定数が RF/1F よりも大きくなっており、地下逸散減衰の影響が明瞭に現れている。RC 造 4 階建物の張間方向と SRC 造 6 階建物は、ロッキングや隣接建物の影響により、システム同定の結果が乱れている。

減衰定数の振幅依存性と相互作用効果の関係を検討するために、図 5.15 に屋上最大加速度と減衰定数 (RF/1F, RF/GL) の関係を示す。SRC 造 10 階建物と、RC 造 4 階建物の桁行方向には、屋上最大加速度が大きくなるほど減衰定数が増す振幅依存性が僅かに認められる。RF/1F と RF/GL の減衰定数を比較すると、両者のプロットの分布形状は比較的よく似ている。

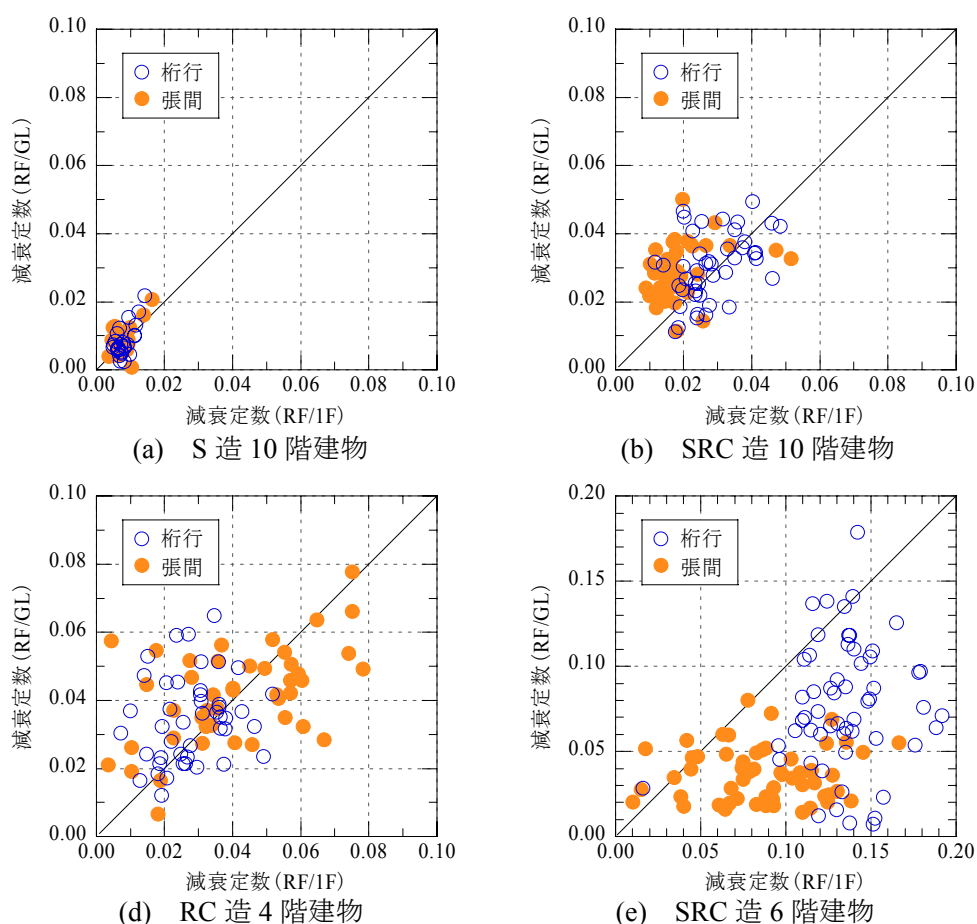
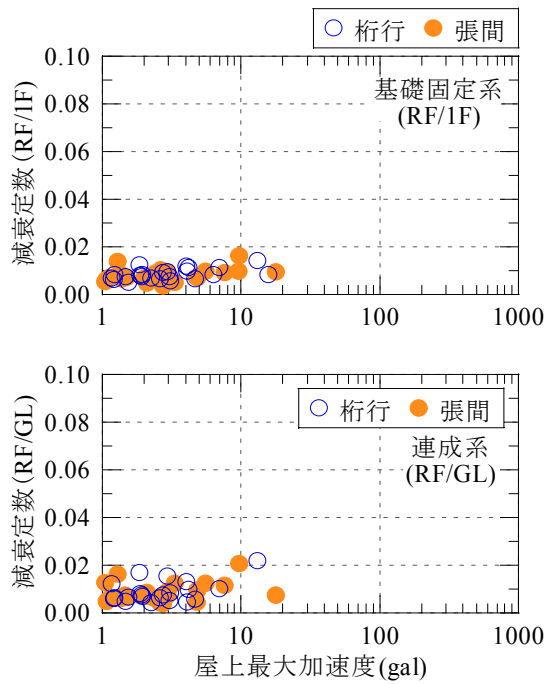
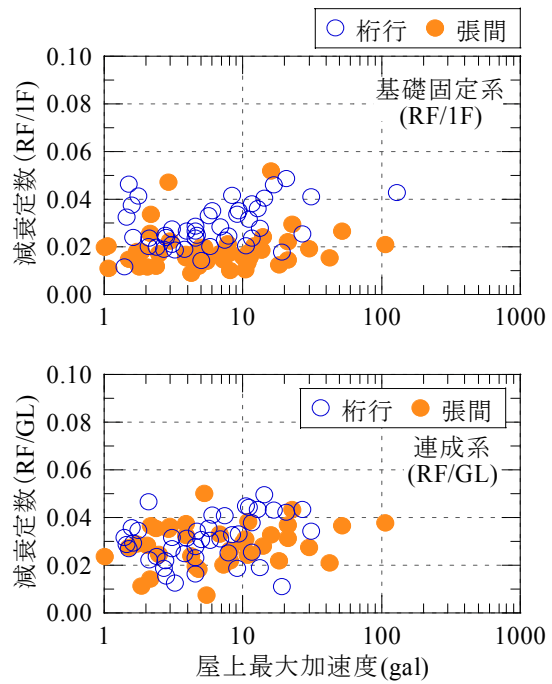


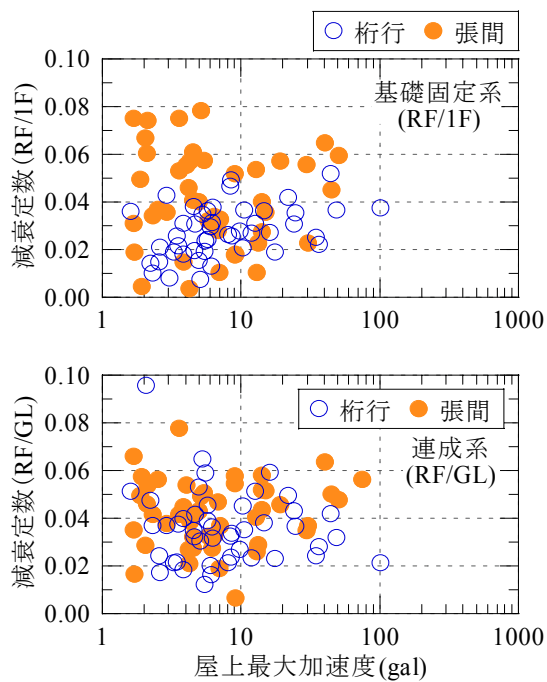
図 5.14 減衰定数に及ぼす相互作用効果



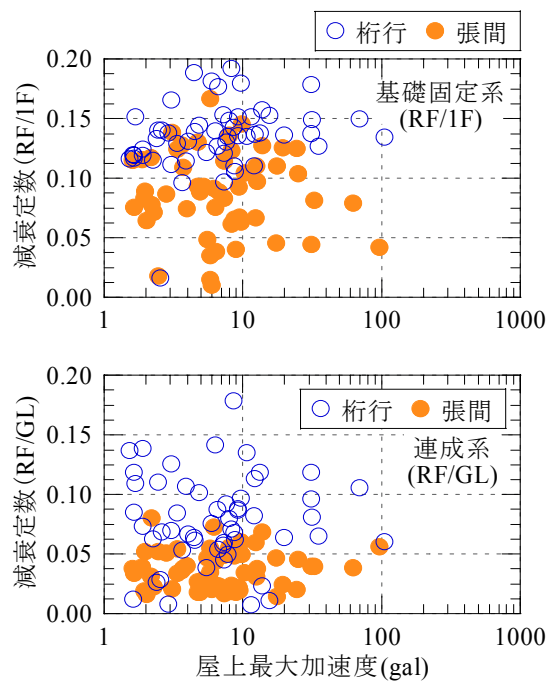
(a) S 造 10 階建物



(b) SRC 造 10 階建物



(d) RC 造 4 階建物



(e) SRC 造 6 階建物

図 5.15 減衰定数に及ぼす相互作用効果

5.6 まとめ

多数の建物で得られた常時微動記録を基に、相互作用効果が固有振動数と減衰定数に及ぼす影響を分析した。その後、構造種別・階数の異なる 5 棟の中低層建物を対象に、地震記録から相互作用効果が増幅特性・固有振動数・減衰定数に及ぼす影響を分析した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 多数の建物の常時微動記録の分析より、高層建物は固有振動数と軒高の関係がほぼ線形関係にあるが、中低層建物はばらつきが大きく線形関係にないことを示した。また、中低層建物の減衰定数は地下逸散減衰の影響により、高層建物よりも大きめの値となることを示した。(5.2 節)
- (2) 構造種別・階数の異なる 5 棟の建物の多数の中小地震記録より、建物の応答最大値の増幅特性は建物と地盤の固有振動数のみならず、入力地震動の卓越振動数にも大きく影響されることを明らかにした。また、地盤に比べ建物の固有振動数が大幅に高い建物に、長周期成分が優勢な地震動が入力する場合、スウェー成分が主となり建物は剛体的に挙動していることを示した。(5.3 節)
- (3) 多数の中小地震記録を用いて動的相互作用が固有振動数に及ぼす影響を検討した結果、RC 系建物では固有振動数が低下していることが確認された。また、分析に用いた地震動レベルでは、固有振動数の振幅依存性は、主に上部構造物に起因することを示した。(5.4 節)
- (4) 多数の中小地震記録を用いて動的相互作用が減衰定数に及ぼす影響を検討した結果、RC 系建物では地下逸散減衰に伴う減衰効果が確認された。(5.5 節)
- (5) ロッキングや隣接建物間相互作用の影響が大きい場合、固有振動数と減衰定数の推定値にばらつきが生じていたため、今後、これらの影響を考慮できる推定手法へ改良が必要である。

参考文献

- 1) 八木茂治, 飛田潤, 福和伸夫: 常時微動計測による低層 RC 造建物の伝達関数に地盤・建物動的相互作用が及ぼす影響, 構造工学論文集, pp.435-444, 2000.3
- 2) 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
- 3) 松山智恵, 福和伸夫, 飛田潤: 強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.87-94, 2001.7
- 4) Tobita, J.: Evaluation of Nonstationary Damping Characteristics of Structures under Earthquake Excitations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.59, Nos.2,3, 283-298, 1996