

第IV章 床応答の推定

1. 既往文献の調査

ここでは、建物内の床応答推定に関する既往手法、建物の振動台実験・地震観測による建物内の床応答増幅特性に関する文献を調査した。また、高層建物内の応答増幅特性を調べるため、地震被害のアンケート調査結果を基に高層建物の各階震度を推定している文献について調査した。

① 建物内の床応答推定に関する既往手法

防災科学技術研究所(2005)で構築された簡易な床応答評価手法がある。この簡易評価手法では、地震動の最大加速度、 A/V 、建物の構造種別、建物階数の情報だけから、建物各階の最大応答加速度、最大応答速度、最大層間変形を簡易に評価できる。また、 A/V を使っていることから、地震動の周期特性の影響を考慮できるところに特徴がある。

このようにこの手法では、各階床の応答値を簡便に推定することができるが、家財の地震被害アンケートの分析に用いるという観点から考えると、高層建物を主なターゲットとしているために低層建物での推定精度が低いこと、建物を線形でモデル化しているために建物が大きな損傷を受けるレベルでの推定ができないこと、などが問題点として挙げられる。

② 建物の振動台実験・地震観測による床応答増幅特性に関する文献

木造建物の振動台実験に関する文献および RC 造建物の地震観測に関する文献を調査・整理した結果を表IV-1、表IV-2に示す。

木造建物については、2階建て建物の振動台実験に関する文献を調査し、調査した範囲では、2階の床における加速度増幅率は1～2.5倍の間でばらつくとの結果を得た。しかし、振動台実験の多くは入力と建物損傷の関係に注目しており、応答増幅特性について示されている文献は少なかった。特に、速度と震度の増幅について明記されている文献は、見当たらなかった。

RC 造建物については、いくつかの地震観測で加速度増幅率や速度増幅率が報告されているが、震度についての記述は見られなかった。また、地震動が大きく建物に損傷が発生するレベルでのデータはほとんど無かった。

表IV-1 木造建物の振動台実験に基づく応答増幅率

文献	建物種類			入力波	観測階	加速度増幅率	速度増幅率	建物被害層間変形角;R
	構造	階数	用途					
花野ら (2006) 守屋ら (2006)	木造 軸組	2階建	住宅	JMA 神戸波 25% (X154cm/s/s, Y204cm/s/s, Z83cm/s/s)	2階	1.3(X) 1.4(Y)	—	各部損傷なし R=1/917rad(X), 1/645rad(Y)
				JMA 神戸波 100% (X617cm/s/s, Y818cm/s/s, Z332cm/s/s)	2階	1.5(X) 2.0(Y)	—	接合金物ずれ等の 軽微な損傷 R=1/63rad(X), 1/40rad(Y)
				JMA 神戸波 150% (X926cm/s/s, Y1227cm/s/s, Z498cm/s/s)	2階	2.3(X) 2.4(Y)	—	1階耐力壁に大きな 損傷 R=1/44rad(X), 1/24rad(Y)
大木ら (2006) 赤城ら (2006)	木造 軸組	2階建	住宅	JMA 神戸波 100% (X617cm/s/s, Y818cm/s/s, Z332cm/s/s)	2階	1.8(X)** 1.5(Y)**	—	耐力壁に大きな損 傷 R=1/40rad(X) 1/30rad(Y)
				JMA 神戸波 100% (X617cm/s/s, Y818cm/s/s, Z332cm/s/s)	2階	1.8(X)** 1.7(Y)**	—	石膏ボード損傷 耐力壁に損傷なし R=1/30rad(X) 1/30rad(Y)
		2階建	住宅	JMA 川口波 100% (X1142cm/s/s, Y1676cm/s/s, Z870cm/s/s)	2階	1.0(X)** 1.0(Y)**	—	R=1/60rad(X)** 1/30rad(Y)**
				想定東海波 100% (X265cm/s/s, Y669cm/s/s)	2階	1.4(X) 1.4(Y)	—	R=1/60rad(X)** 1/25rad(Y)**
綿引ら (2006)	木造 軸組	2階建	住宅	JMA 神戸波 122% (1000cm/s/s, 92cm/s)	2階	1.70	—	一部でビス引き抜 け・外壁亀裂 R=1/42rad
				JMA 神戸波 122% (1000cm/s/s, 92cm/s)	2階	1.70	—	筋交い破断 R=1/20rad
星(2006)	木質 プレハブ	2階建	住宅	BCJ-L1 (X207cm/s/s, Y207cm/s/s)	2階	1.1	—	
				BCJ-L2 (X356cm/s/s, Y356cm/s/s)	2階	1.1 ~1.2	—	R=1/1039rad
				想定東海波 100% (X1330cm/s/s, Y891cm/s/s, Z356cm/s/s)	2階	1.0 ~1.3	—	一部のクロスの切 れ R=1/69rad
				想定東海波 50% (X665cm/s/s, Y446cm/s/s, Z178cm/s/s)	2階	1.1 ~1.5	—	R=1/94rad
				JMA 神戸波 200% (X1874cm/s/s, Y1517cm/s/s, Z646cm/s/s)	2階	1.1	—	クロス切れ, 仕上 材一部損傷などの 軽微な損傷 R=1/37rad

※ 図から読み取った値

表IV-2 RC造建物の地震観測に基づく応答増幅率

文献	建物種類			地震	対象地点 (地震動レベル)	観測階	加速度 増幅率	速度 増幅率	建物被害
	構造	階数	用途						
沢井ら (1995)	RC造	31階建	住宅	1995年兵庫県南部地震	大阪市此花区 (地表加速度 NS222, EW267, UD255cm/s/s 地表速度 NS36, EW34, UD13cm/s)	31階	1.71 1.54	2.82 2.82	最上階と最下階を除く各階の梁に最大0.1mm幅の曲げひび割れ一本以上
						16階	1.08 0.88	1.52 1.76	
原田ら (2006)	SRC造	23階建	住宅	2005年千葉県北西部の地震	(地表加速度 NS35, EW42, UD17cm/s/s) (1階震度4)	23階	3.25 4.47	—	損傷に関する記述なし(被害なしと推測される)
						11階	1.67 2.00	—	
井上ら (1992)	RC造	21階建	住宅	1991~92年に関東地方で発生した5地震	(地表最大加速度 7.7, 7.0, 10.9, 18.3, 45.8cm/s/s, 5つめは震度5)	R階	2.9** 2.1** 2.0** 1.8** 3.0**	—	損傷に関する記述なし(被害なしと推測される)
						15階	2.0** 1.7** 1.3** 1.1** 2.0**	—	
						8階	1.3** 1.4** 1.1** 1.4** 1.6**	—	
佃ら (2006)	RC造	4階建	事務所	2003年宮城県沖の地震	仙台 (1階加速度 X131, Y161, UD45cm/s/s, 1階速度 X11, Y14, UD4cm/s)	4階	2.14 1.98	1.39 1.86	損傷に関する記述なし(被害なしと推測される)
				2005年宮城県沖の地震	仙台 (1階加速度 X106, Y108, UD56cm/s/s, 1階速度 X7.5, Y9.1, UD3.8cm/s)	4階	2.42 2.30	2.47 1.67	
木村ら (2007)	SRC造	11階建	住宅	1978年宮城県沖地震	東京周辺 (1階加速度 X59, Y33cm/s/s)**	屋上	2.1 ~2.2	—	
井川ら (2007)	RC造	4階建	事務所	1990~2002年に観測された246地震	市川 (基礎加速度 0.5~70cm/s/s)	屋上	0.9~ 3.6	—	
	RC造	3階建	事務所	1997~2002年に観測された102地震	つくば (基礎加速度 0.5~70cm/s/s)	屋上	0.9~ 3.8	—	

※ 図から読み取った値

③ 高層建物内のアンケート震度に関する文献

表ら(1979)および岡田(1989)を調査した。2つの文献調査の結果、高層建物では、最下階に比べて上階の震度が0.5～1程度大きくなる傾向が見られた。但し、調査された震度はアンケート震度であり計測された震度ではないこと、調査された地震や建物のケース数が少ないこと、などの問題がある。

2. 建物応答解析による床応答増幅特性の検討

前節の文献調査の結果，建物各階の速度増幅率や震度増分を，建物構造や階数ごとに適切に設定するための十分なデータは無いことがわかった．そこで，前章で示したアンケート調査の回答世帯について居住階での床応答を求めるため，建物応答解析により地表地震動（速度および震度）に対する各階の床応答増幅特性について検討する．

2-1. 建物モデル

以下の建物を，非線形多質点せん断ばねモデルでモデル化した．

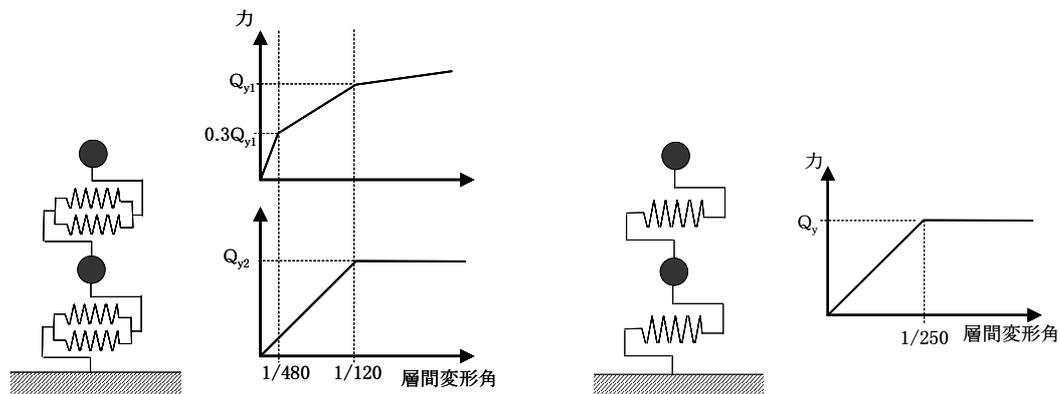
- 木造 2 階建て（木造軸組）
- 木造 2 階建て（2×4・木質プレハブ）
- 軽量 S 造 2 階建て
- RC 造 5 階建て
- RC 造 10 階建て
- RC 造 15 階建て

ここでは平均的な耐力のみを設定し，各建物で建築年代 1981 年以降，1971～1980 年，1970 年以前で耐力を変えて 3 種類ずつのモデルを作成した．設定した建物モデルを図 IV-1 に，その諸元を表 IV-3 に示す．

表 IV-3 検討で用いた建物モデルの諸元

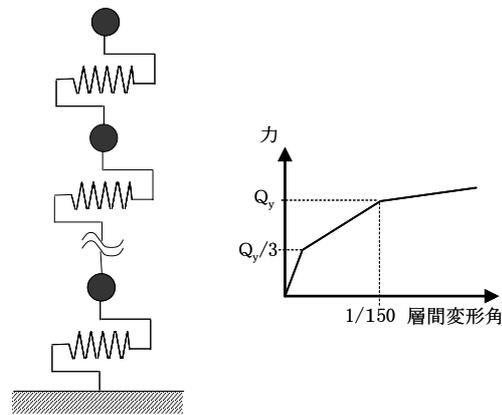
	木造		軽量 S 造	RC 造		
	木造軸組	2×4 木質プレハブ		5 階	10 階	15 階
質点数 N	2	2	2	5	10	15
階高 h [m]	2.8	2.8	3.0	3.5	3.5	3.5
一次固有周期 [sec] *1	0.50 0.60 0.63	0.37 0.44 0.47	0.32 0.37 0.45	0.07 N (N は建物階数)		
一次固有周期の A/V 換算値 *2	12.6 10.5 10.0	17.0 14.3 13.4	19.6 17.0 14.0	18.0	9.0	6.0
重量分布 *3	2/3	2/3	0.36	1.0 (各階一様)		
剛性分布	耐力に比例			1 階:最上階が 1:2 の台形分布		
耐力分布 *4	1.5	1.5	1.56	Ai 分布		
復元力特性 *5	トリリニア+バイリニア		バイリニア	トリリニア (武田モデル)		
第一折点の層間 変形角	1/480	1/480	—	周期から定まる剛性と 第一折点の力から設定		
第一折点の力 *6	0.3Qy	0.275Qy	—	Qy/3		
降伏時の層間変 形角	1/120	1/120	1/250	1/150	1/150	1/150
降伏時のせん断 力係数 *7	0.45 0.45×0.71 0.45×0.64	0.9 0.9×0.71 0.9×0.64	0.6 0.6×0.75 0.6×0.5	0.90 0.74 0.54	0.59 0.49 0.36	0.50 0.41 0.30
減衰 *8	5%		3%	2%		

- *1 木造，軽量S造の周期は，耐力に応じて設定された値．上から，建築年代 1981 年以降，1971 から 1980 年，1970 年以前
- *2 $A/V = 2\pi/T$ (T は周期)
- *3 1 階に対する各階の重量の比
- *4 木造，軽量S造の数値は，1 階に対する最上階の比
- *5 木造のトリリニアとバイリニアの耐力比は，木造軸組で 6 : 4，2×4・木質プレハブで 3 : 7 とした．
- *6 Q_y は耐力
- *7 耐力 Q_y は，(降伏時のせん断力係数) × (対象階および対象階より上の階の総重量) で求められる．上から，建築年代 1981 年以降，1971 から 1980 年，1970 年以前
- *8 瞬間剛性比例型とした．数値は，1 次モードの減衰定数



(a) 木造

(b) 軽量 S 造



(c) RC 造

図IV-1 建物モデル

2-2. 入力地震波

本検討では、表IV-4 に示す9地震 42 波の観測記録を入力地震波として用いた。各波の最大速度が1 cm/s, 25cm/s, 50cm/s, 100cm/s, 150cm/s になるように基準化して建物の1階に入力した(以下、入力速度)。1 cm/s 入力では、建物が線形の範囲内での応答増幅を調べることができる。但し、最大加速度 2000cm/s² を超える波は稀であることから、本解析に用いる入力波の最大加速度の上限は 2000cm/s² とした。

表IV-4 入力地震波

地震	観測点		観測機関	観測位置	方位	A (cm/s ²)	V (cm/s)	A/V	計測震度
1995年 兵庫県南部	FKI	葺合	大阪ガス	地表	EW	802	123	6.5	6.44
	TKT	JR 鷹取駅	鉄道総研	地表	EW	657	127	5.2	6.19
	TKZ	JR 宝塚駅	鉄道総研	地表	EW	601	80	7.5	5.97
2000年 鳥取県西部	TTRH02	日野	KiK-net	地表	NS	925	108	8.6	6.40
	E9E	境港市東本町	気象庁	地表	EW	749	84	8.9	5.94
	TTR007	江府	K-NET	地表	NS	726	42	17.2	5.72
	SMNH01	伯太	KiK-net	地表	NS	720	37	19.6	5.69
	OKY004	新見	K-NET	地表	EW	816	25	32.6	5.60
2001年 芸予	HRS009	湯来	K-NET	地表	EW	830	31	26.8	5.68
	HRS014	大野	K-NET	地表	EW	441	32	13.9	5.56
	EHM003	東予	K-NET	地表	EW	459	29	15.6	5.47
	590	三原市円一町	気象庁	地表	NS	243	20	12.1	5.10
	HRS017	三原	K-NET	地表	NS	651	12	53.2	4.95
2003年5月 宮城県沖	DB8	大船渡市大船渡町	気象庁	地表	EW	1106	32	34.3	5.83
	8A4	涌谷町新町	気象庁	地表	NS	443	43	10.4	5.42
	E08	石巻市泉町	気象庁	地表	NS	943	30	31.4	5.50
	IWT007	釜石	K-NET	地表	EW	1039	25	41.8	5.37
	IWTH27	陸前高田	KiK-net	地表	NS	888	17	53.0	5.38
2003年7月 宮城県北部	8A4	涌谷町新町	気象庁	地表	EW	513	44	11.8	5.64
	E08	石巻市泉町	気象庁	地表	EW	489	19	25.5	5.20
	4B9	古川市三日町	気象庁	地表	EW	213	20	10.8	4.81
	MYG004	築館	K-NET	地表	EW	349	10	35.1	4.61
2003年 十勝沖	HKD086	直別	K-NET	地表	EW	801	112	7.1	6.28
	HKD100	広尾	K-NET	地表	EW	972	51	19.0	5.94
	TKCH07	豊頃	KiK-net	地表	NS	367	74	5.0	5.78
	HKD092	池田	K-NET	地表	EW	609	52	11.7	5.91
	HKD098	大樹	K-NET	地表	EW	346	76	4.5	5.80
	HKD077	釧路	K-NET	地表	EW	407	42	9.6	5.54
	D5A	釧路市	気象庁	地表	EW	288	34	8.6	5.38
	HKD129	苫小牧	K-NET	地表	EW	73	28	2.6	4.36
2004年 新潟県中越	65042	川口町川口	気象庁	地表	EW	1676	133	12.6	6.49
	532	小千谷市城内	気象庁	地表	EW	898	92	9.8	6.22
	NIG021	十日町	K-NET	地表	NS	1716	59	29.2	6.02
	65057	新潟小国町法坂	気象庁	地表	EW	692	65	10.7	6.00
	NIG017	長岡	K-NET	地表	NS	468	39	11.9	5.41
2005年 福岡県西方沖	FK0006	福岡	K-NET	地表	NS	277	54	5.1	5.49
	FK0011	久留米	K-NET	地表	EW	239	27	8.8	5.11
	FK0007	前原	K-NET	地表	EW	261	19	14.0	4.97
	FK0015	柳川	K-NET	地表	EW	179	15	11.9	4.88
2007年 能登半島	ISK005	穴水	K-NET	地表	EW	782	99	7.9	6.26
	ISK006	富来	K-NET	地表	EW	849	44	19.3	5.78
	ISK004	能都	K-NET	地表	NS	622	26	24.2	5.41

※各波の最大速度 V は、加速度波を一自由度系(周期 20 秒, 減衰 h=0.707)に入力したときの相対速度応答として求めた。

2-3. 応答解析結果

2-1で設定した建物モデルに2-2の地震波を入力し、時刻歴応答解析を行った。応答解析で得られた各階の床応答加速度波のうち、2階建て建物では2階と1階、5階建て建物では5, 4, 3, 2, 1階、10階建て建物では10, 8, 5, 3, 1階、15階建て建物では15, 12, 8, 4, 1階について最大速度と震度を計算した。各階の最大速度は、周期20秒、減衰 $h=0.707$ の一自由度系に加速度波を入力したときの相対速度応答として求めた。各階の震度は、加速度波形から気象庁の計測震度算定方法に基づいて計算した。但し、通常、計測震度は水平2成分と上下成分の計3成分から算定されるが、ここでは水平1成分のみから計算した。

(1) 速度増幅率

図IV-2は、速度増幅率（各階の最大速度／1階の最大速度）の高さ方向分布の42波の平均値を表したものである。図IV-2(d)には、RC造4階建て建物の地震観測による速度増幅率を○印で表している。この地震観測では1階の速度が7～14cm/sと小さいため、1cm/s入力および25cm/s入力の解析結果と比較すると、1cm/s入力の解析結果は観測値より若干大きい、25cm/s入力の解析結果は観測値のばらつきの範囲内にあることがわかる。この図から、以下のことが読み取れる。

- ▶ 各建物の速度増幅率の高さ方向分布は、ほぼ直線で近似できる。

入力速度別、建築年代別に、各建物最上階の速度増幅率と入力波のA/Vとの関係を求めた。図IV-3～図IV-8は、全解析結果のうち各構造および建築年代別に入力速度を25cm/sおよび150cm/sとした場合の結果である。これらの解析結果より、以下のことが読み取れる。

- ▶ 入力波のA/Vの大きさによって、最上階の速度増幅率に違いがある。
- ▶ 入力速度が大きくなるにしたがって速度増幅率は小さくなる傾向がある。
- ▶ いずれの建物においても、建築年代による速度増幅率の差は小さい。

(2) 震度増分

図IV-9は、震度増分（各階の震度－1階の震度）の高さ方向分布の42波の平均値を表したものである。図IV-9(d)に示した○印は、岡田(1989)で推定された14階建て高層住宅におけるアンケート震度の調査結果を基に、各階震度の2階震度からの増分を計算した値である。アンケート震度の2階における値は4.4（藤本ら(2005)の換算式で速度10cm/s）と小さいため、1cm/s入力および25cm/s入力の解析結果と比較すると、アンケート震度の調査結果と解析結果はよく合っている。また、表ら(1979)の研究でも、5階建て～50階建て建物の最上階のアンケート震度は最下階より0.5～1.0程度大きく

なっており，1 cm/s～50cm/s 入力解析結果と同程度になっている．この図から，以下のことが読み取れる．

- ▶ 各建物の震度増分の高さ方向分布は，ほぼ直線で近似できる．

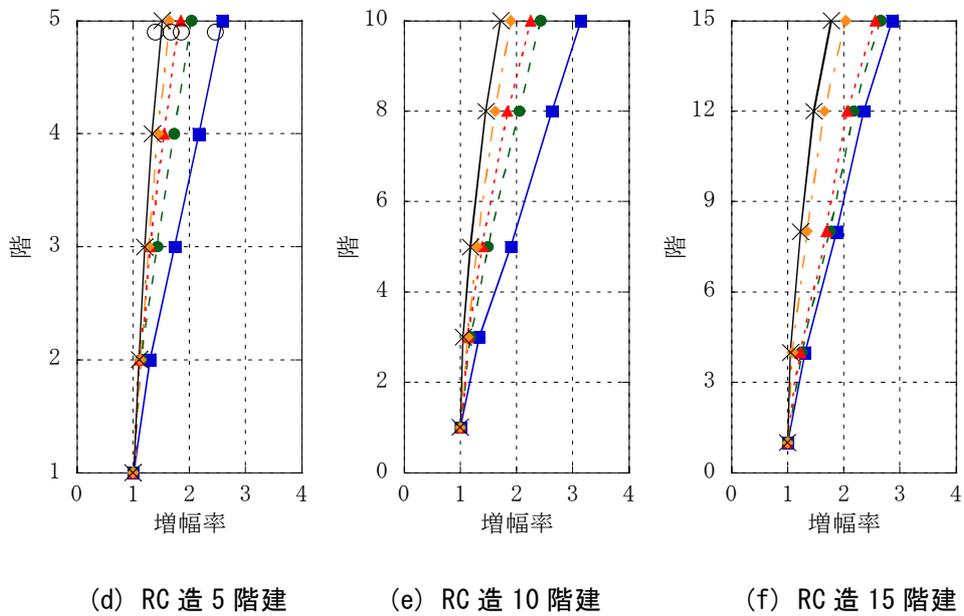
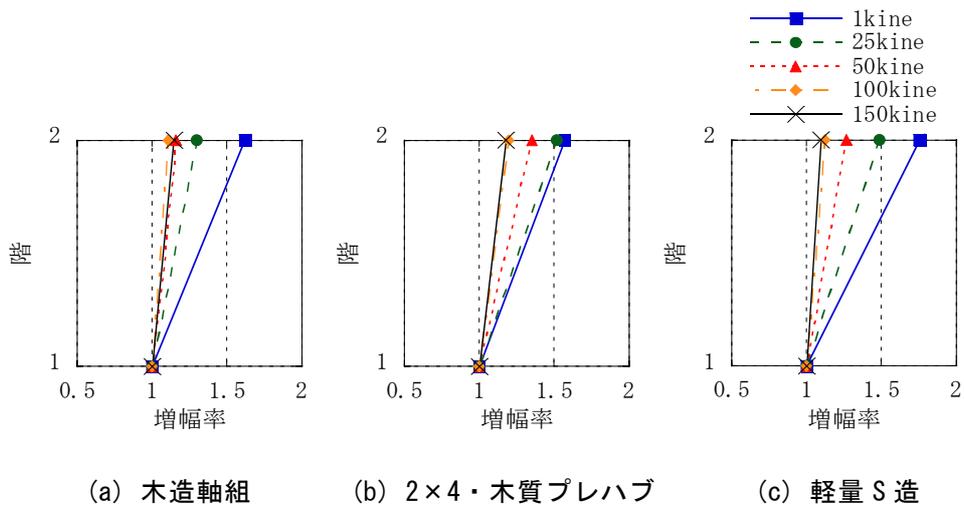
入力速度別，建築年代別に，各建物最上階の震度増分と入力波の A/V との関係を求めた．図IV-10～図IV-15 は，全解析結果のうち各構造および建築年代別に入力速度を 25cm/s および 150cm/s とした場合の結果である．これらの解析結果より，以下のことが読み取れる．

- ▶ 入力波の A/V の大きさによって，最上階の震度増分に違いがある．
- ▶ 入力速度が大きくなるにしたがって震度増分は小さくなる傾向がある．
- ▶ いずれの建物でも建築年代による震度増分の差は小さい．

図IV-16 に，建物を一自由度系と仮定した場合の速度増幅特性を模式的に示す．図の縦軸は一自由度系の速度増幅率，横軸は入力波の A/V ($=2\pi/T$; Tは周期) である．

図IV-16 (a)は，建物の固有周期による速度増幅率の違いを表している．建物の一次固有周期の A/V 換算値と入力波の A/V が近いところで，速度増幅率は大きくなる．例えば表IV-3 に示すように，RC 造 5 階建て，10 階建て，15 階建て建物の一次固有周期の A/V 換算値は，それぞれ 18.0，9.0，6.0 であり，図IV-6～図IV-8 の 25cm/s 入力の速度増幅率を見てもそれぞれ A/V が 15～20 付近，10 付近，5～10 付近で大きくなっている．

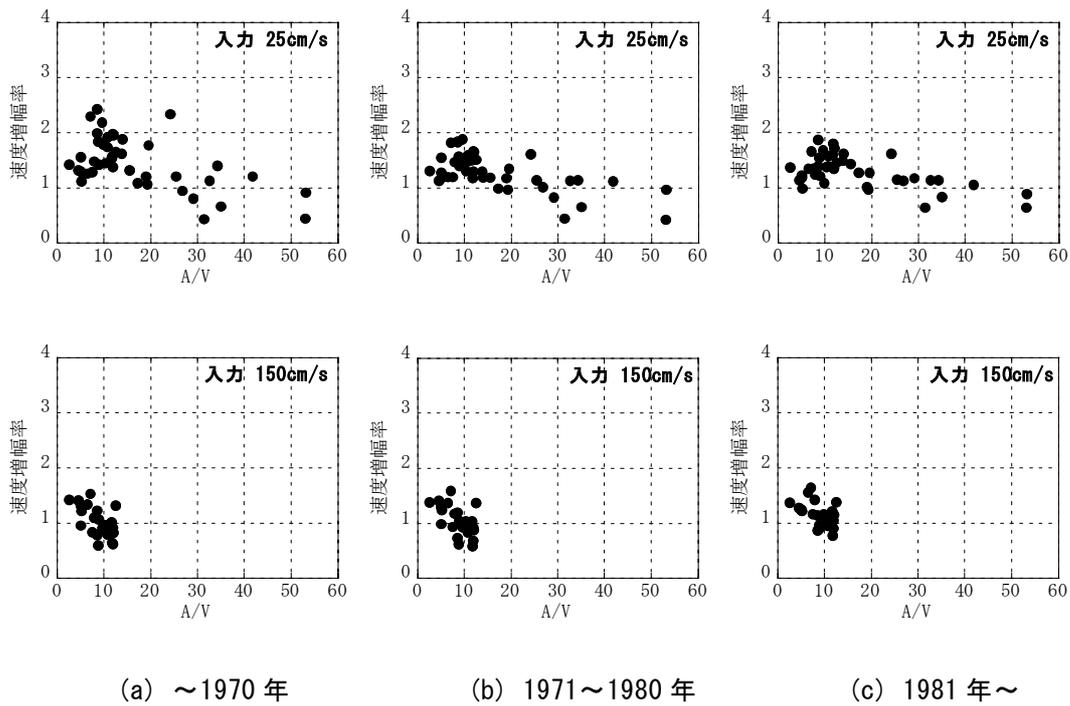
図IV-16 (b)は，入力速度による速度増幅率の違いを表している．入力速度が大きくなると建物の損傷が進むため，見掛けの固有周期が伸びて減衰が増加する．このため，増幅率のピークは長周期側 (A/V の小さい側) に動き，かつピークの値が小さくなる．図より，もともとの建物一次固有周期の A/V 換算値に近い A/V をもつ入力波では，入力速度が大きくなると増幅率は急激に小さくなる (図中の赤い矢印) が，建物一次固有周期の A/V 換算値から離れた A/V をもつ入力波では，入力速度が大きくなっても増幅率はあまり変化しない (図中の青い矢印) ことがわかる．



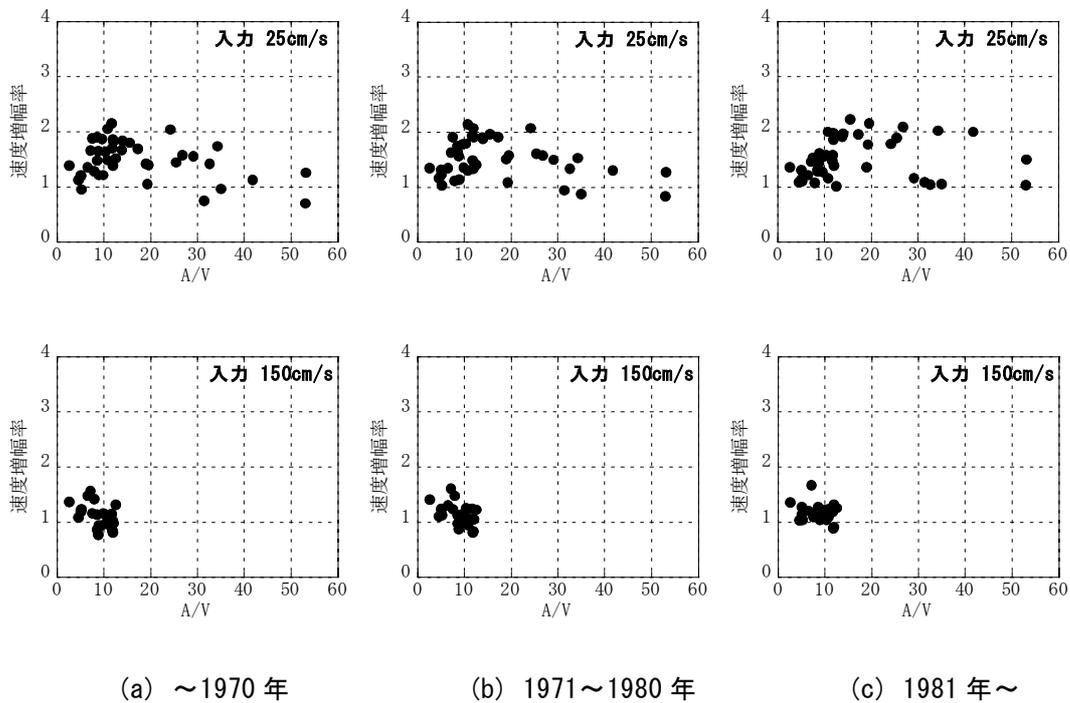
※ 1階速度はX方向11cm/s, Y方向14cm/sと, X方向7.5cm/s, Y方向9.1cm/s)

※ (d)の○印は, 佃ら(2006)のRC4階建て4階の地震観測結果

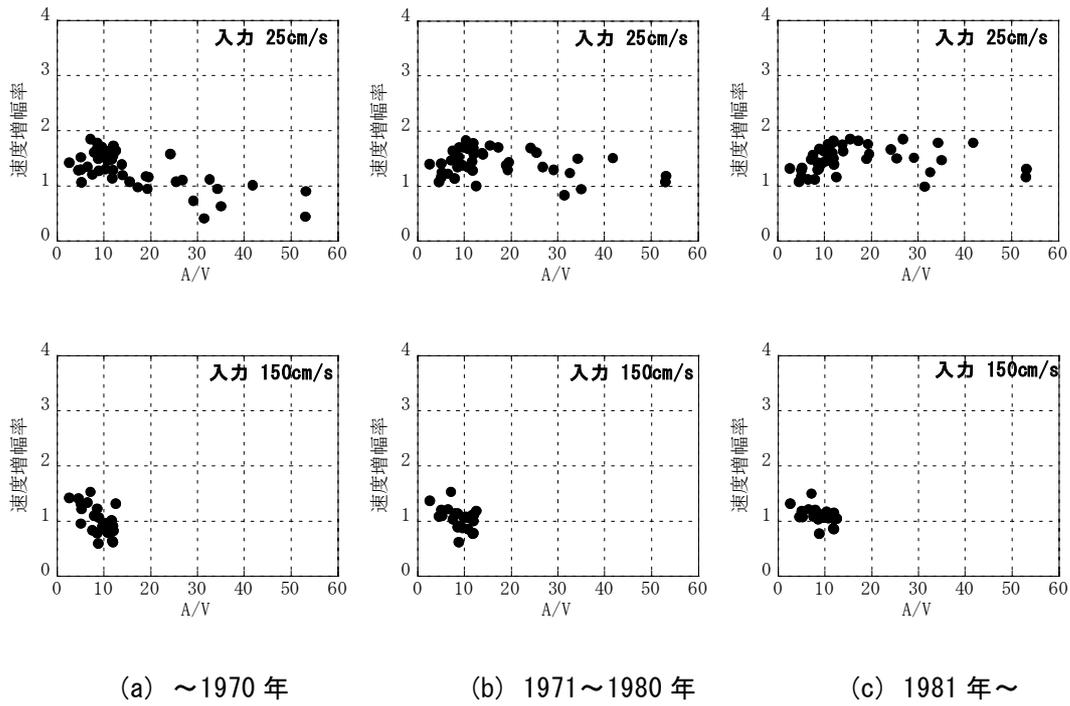
図IV-2 速度増幅率の高さ方向分布の42波の平均値(建築年代; 1981年~)



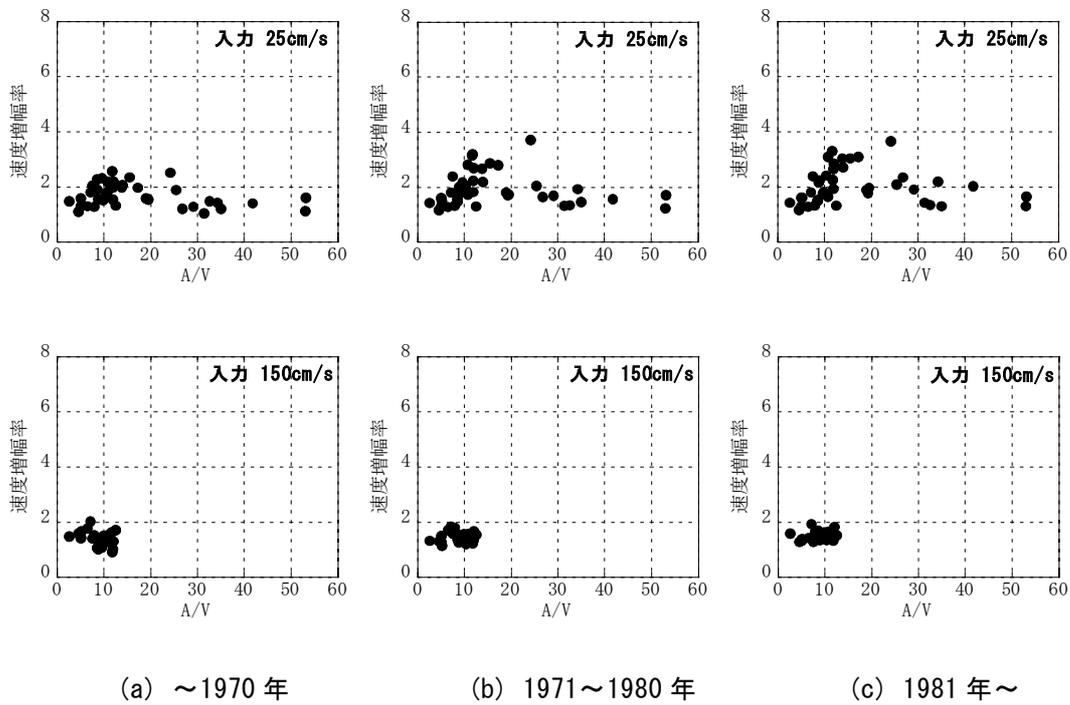
図IV-3 木造軸組2階建ての2階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



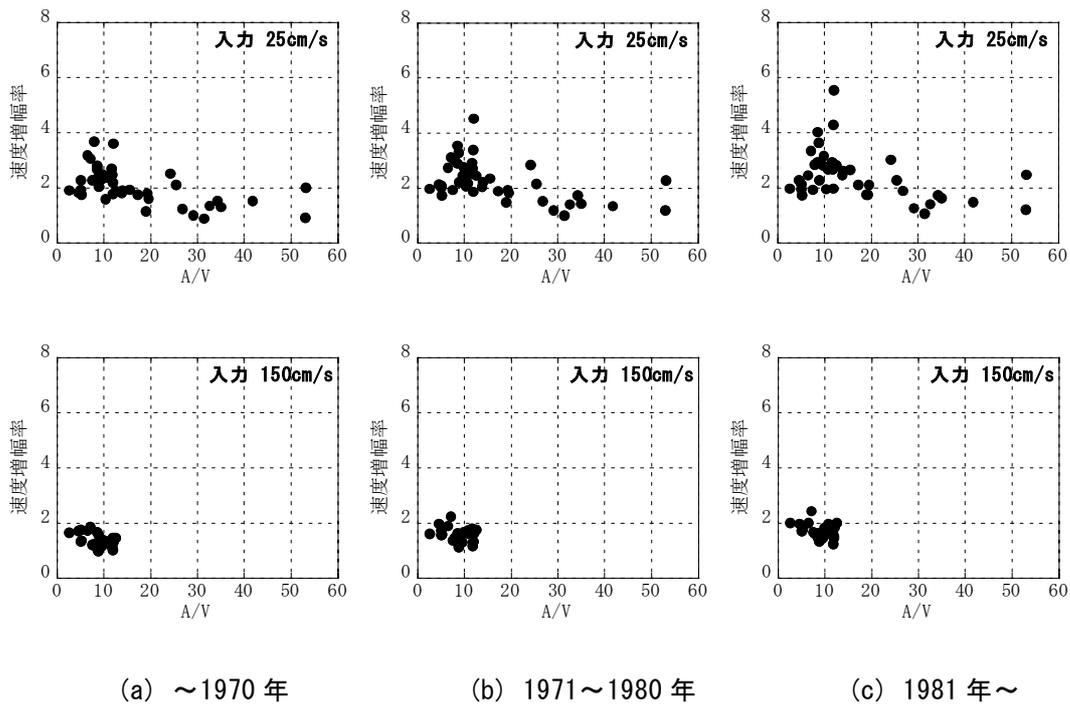
図IV-4 2×4・木質プレハブ2階建ての2階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



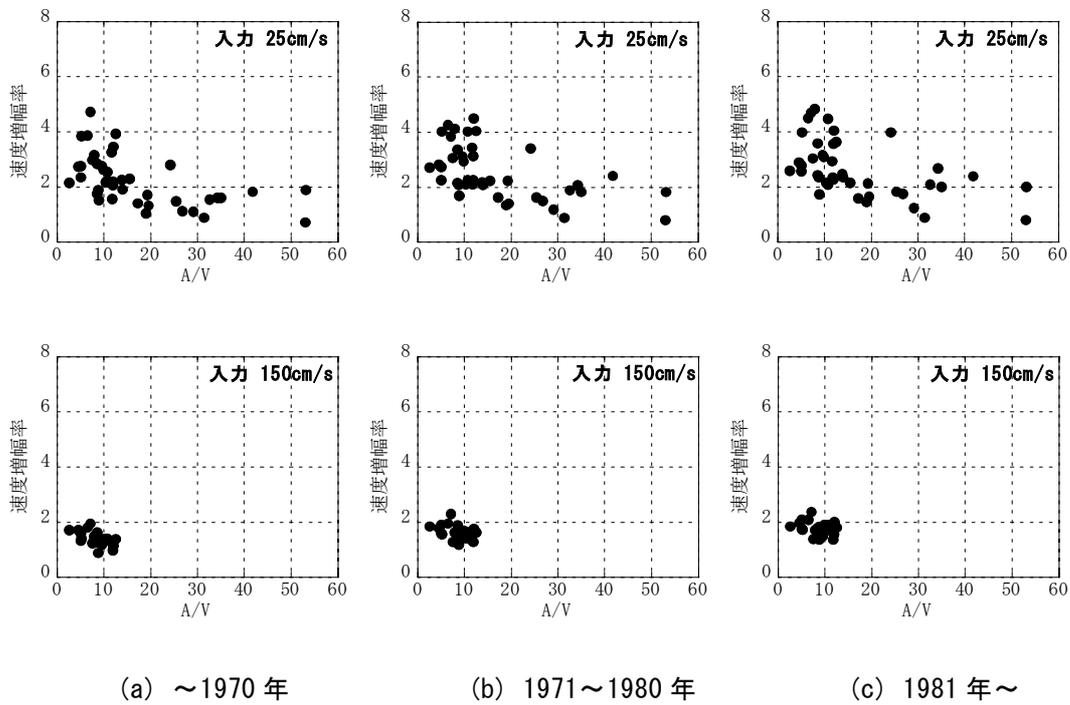
図IV-5 軽量S造2階建ての2階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



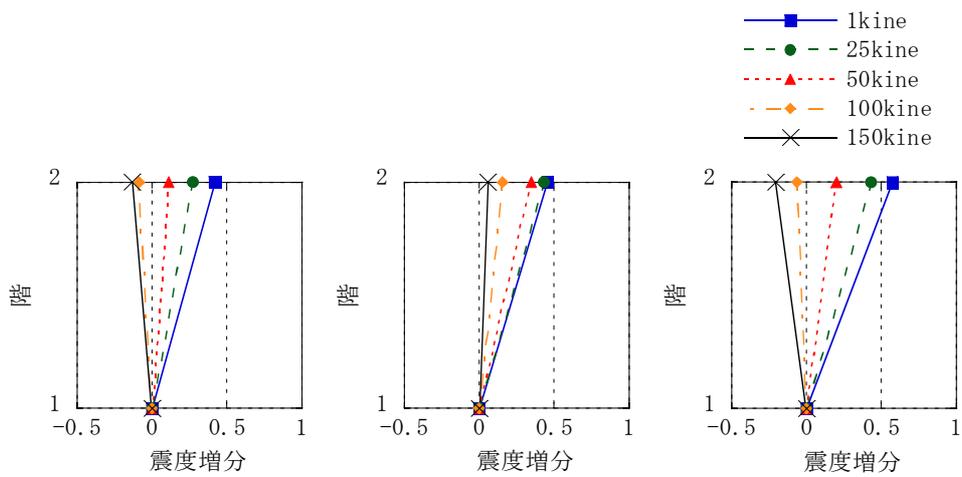
図IV-6 RC造5階建ての5階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



図IV-7 RC造10階建ての10階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



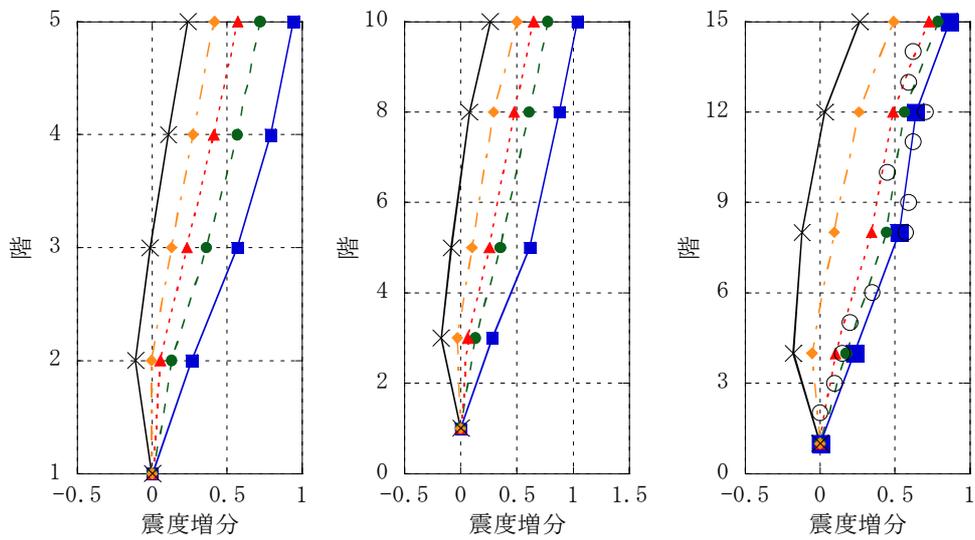
図IV-8 RC造15階建ての15階の速度増幅率（建築年代・入力速度別）



(a) 木造軸組

(b) 2×4・木質プレハブ

(c) 軽量S造



(d) RC造5階建

(e) RC造10階建

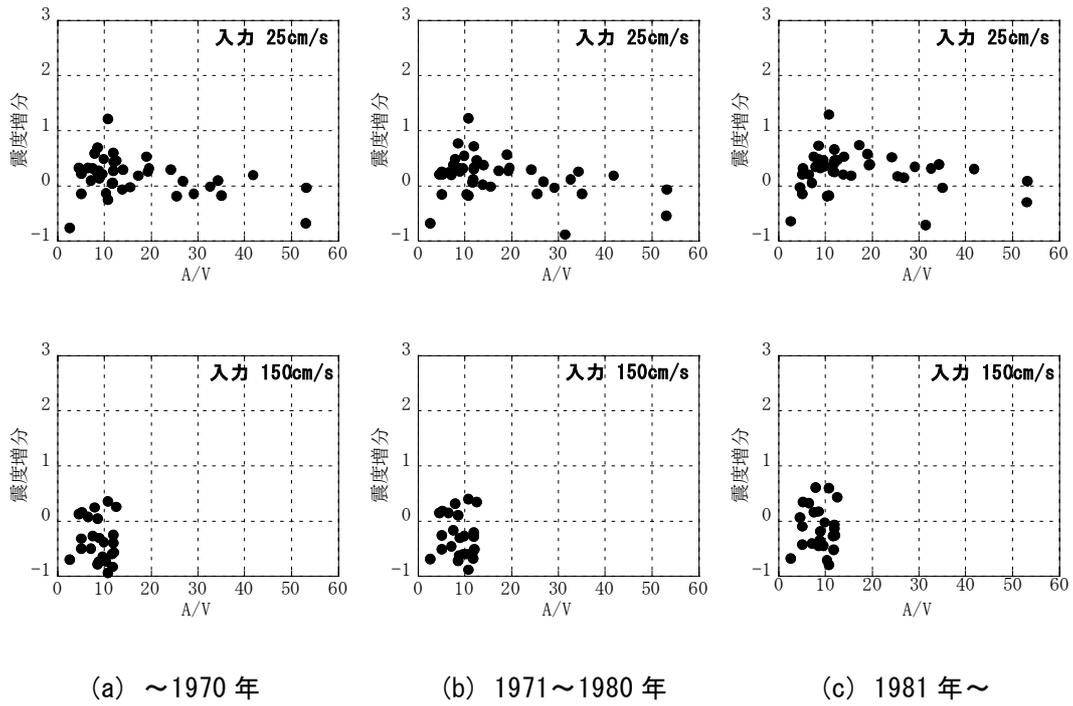
(f) RC造15階建

※ (d)の○印は、岡田(1989)の14階建て高層住宅のアンケート震度*の増幅

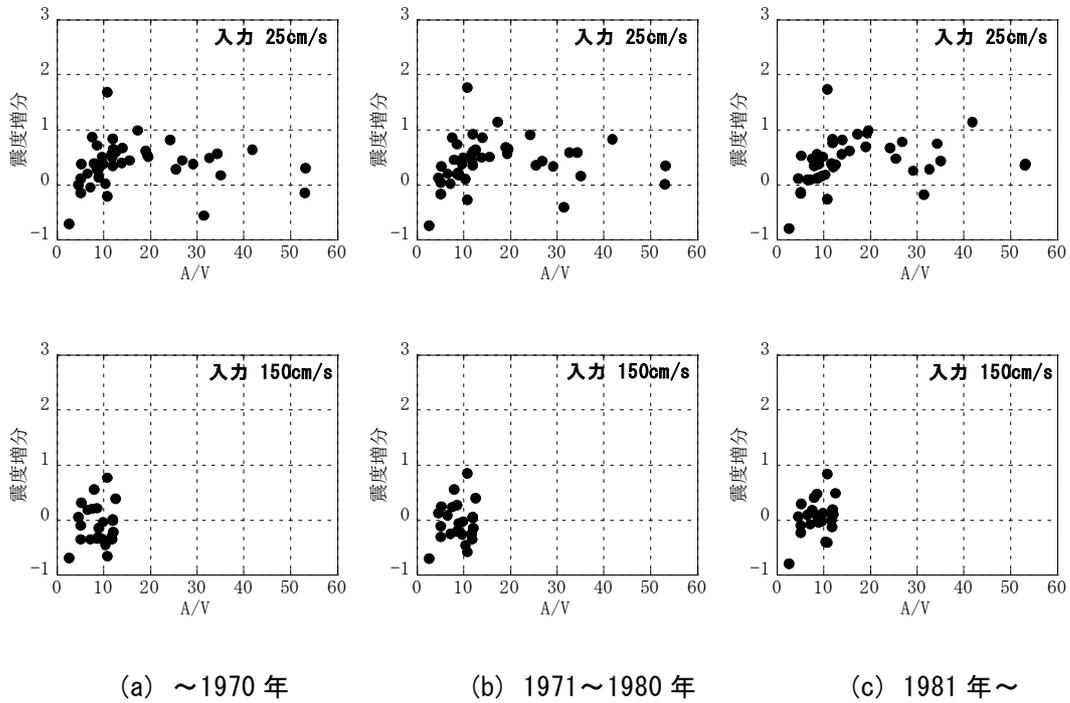
※ 2階の震度4.4に対する増幅

* アンケート震度：地震時の被害や体感のアンケート調査結果を基に、推定される震度

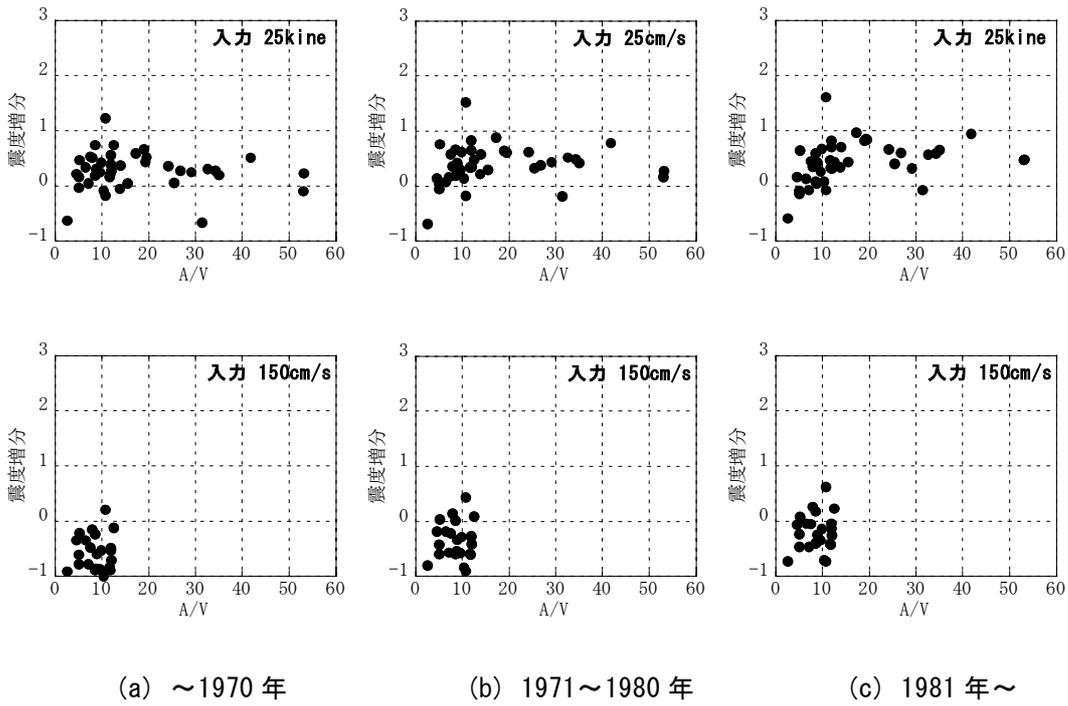
図IV-9 震度増分の高さ方向分布の42波の平均値（建築年代；1981年～）



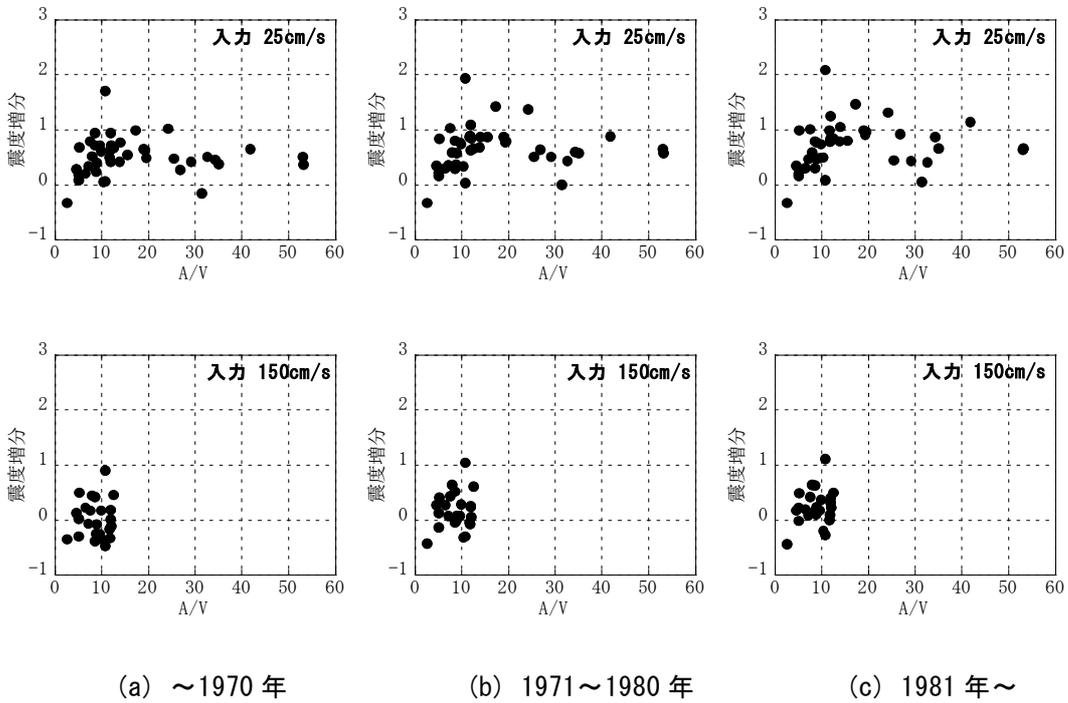
図IV-10 木造軸組2階建ての2階の震度増分（建築年代・入力速度別）



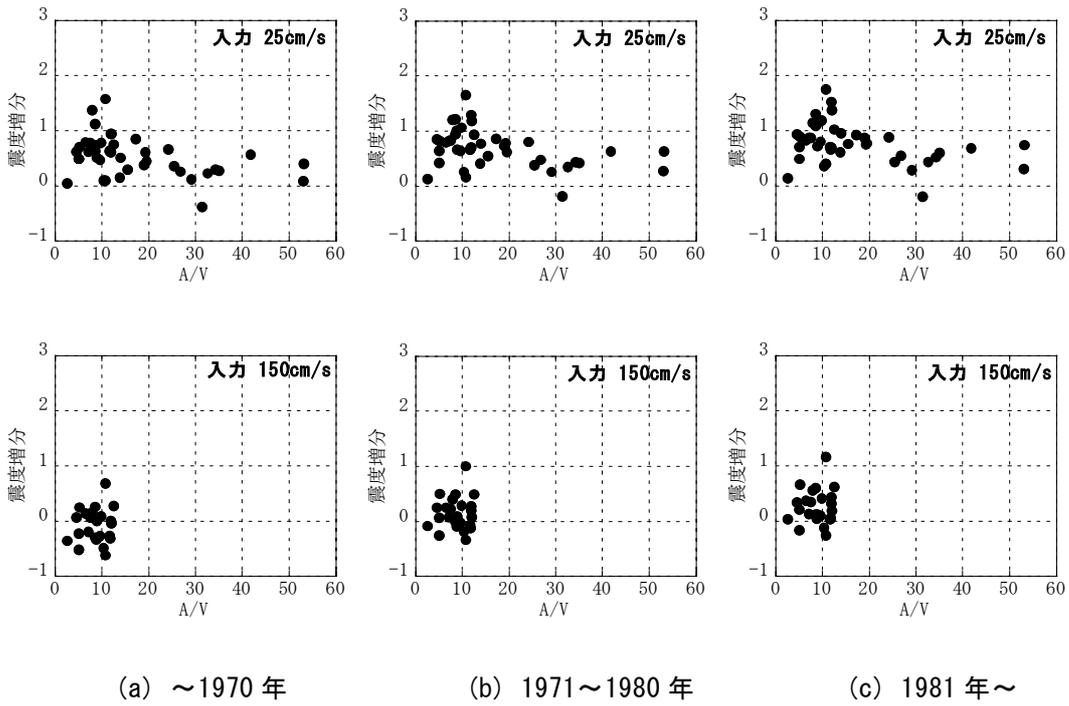
図IV-11 2×4・木質プレハブ2階建ての2階の震度増分（建築年代・入力速度別）



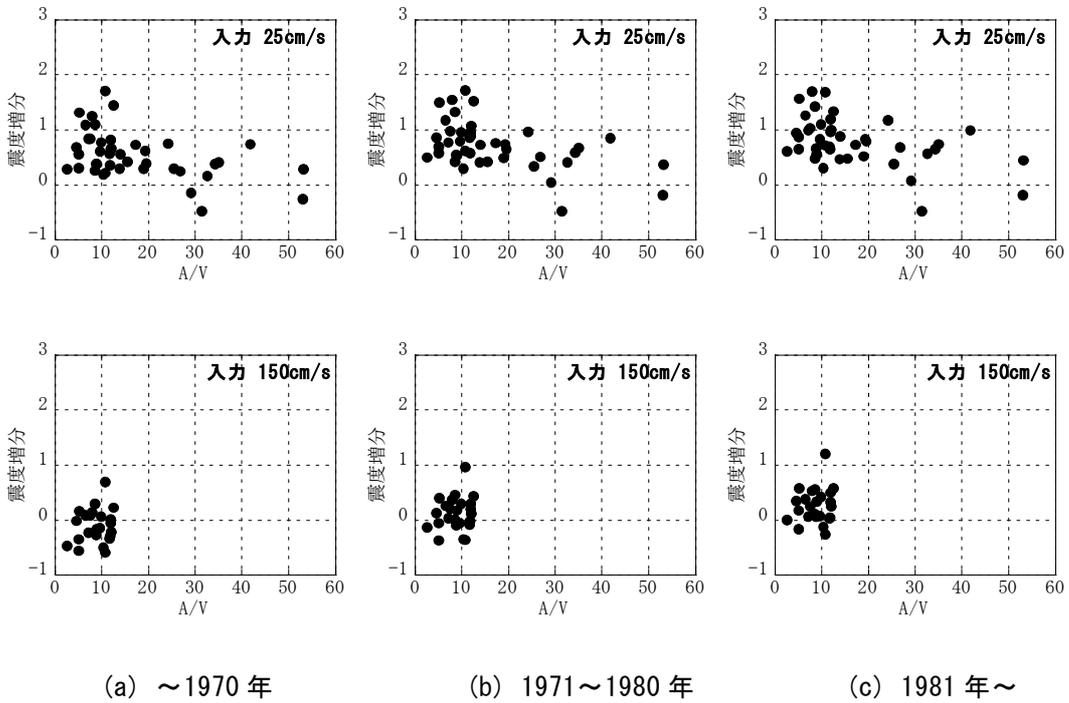
図IV-12 軽量S造2階建ての2階の震度増分（建築年代・入力速度別）



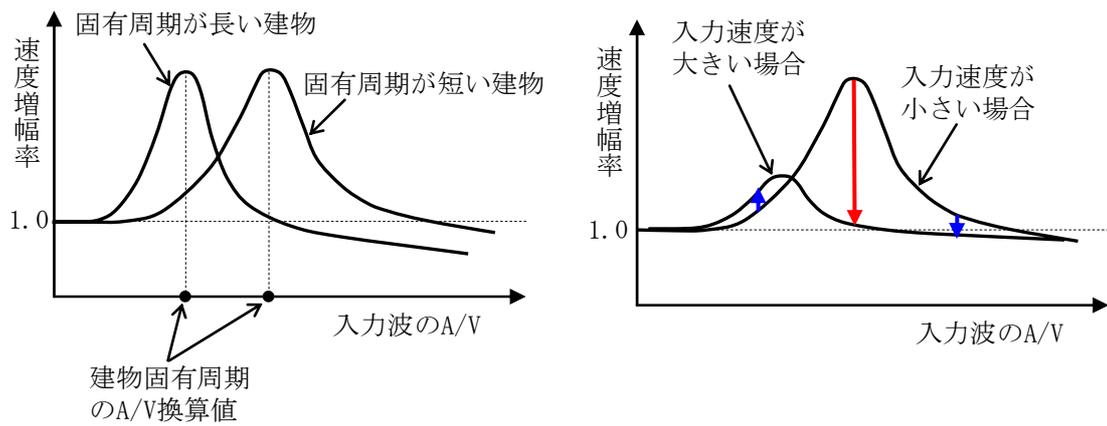
図IV-13 RC造5階建ての5階の震度増分（建築年代・入力速度別）



図IV-14 RC造10階建ての10階の震度増分（建築年代・入力速度別）



図IV-15 RC造15階建ての15階の震度増分（建築年代・入力速度別）



(a) 建物の固有周期による速度増幅率の違い (b) 入力速度による速度増幅率の違い

図IV-16 速度増幅特性の模式図
(建物を一自由度系と仮定した場合)

3. 家財の被害率算定に用いる床応答増幅モデルの設定

前節の解析結果をもとに、以下の方針で家財の被害率算定に用いる速度増幅率モデル（各階の最大速度/1階の最大速度）および震度増分モデル（各階の震度-1階の震度）を設定した。

3-1. 床応答増幅モデルの設定方針

高さ方向および最上階の速度増幅率および震度増分を下記の方針により設定した。

(1) 高さ方向分布の設定方針

- 速度増幅率モデルおよび震度増分モデルの高さ方向は直線分布とする。したがって、中間階の最大速度（または震度）は、1階の最大速度（または震度）と最上階の速度増幅率（または震度増分）が設定できれば、線形補間で推定できる。
- 1階の速度増幅率は1.0、震度増分は0とする。

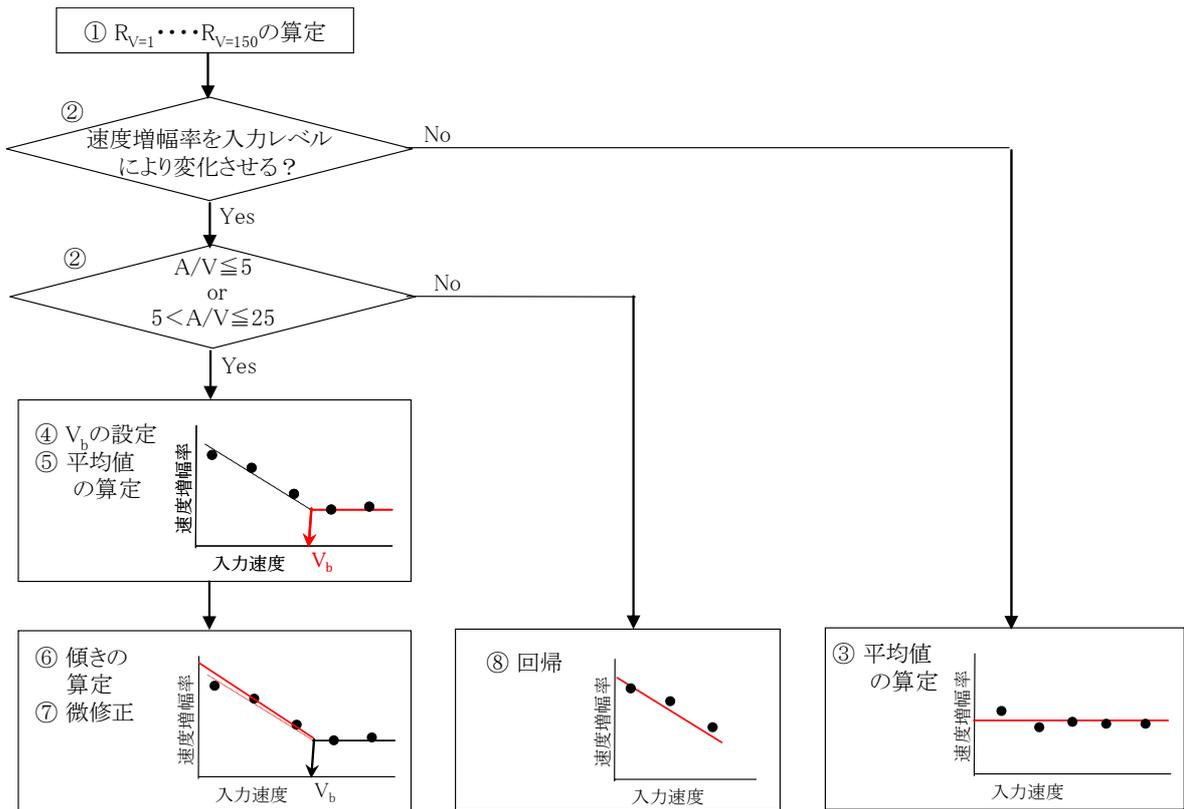
(2) 最上階の速度増幅率と震度増分の設定方針

- 速度増幅率および震度増分の建築年代による違いは小さいため、建築年代では分類しない。
- 入力波の A/V と入力速度により速度増幅率および震度増分は変化するため、速度増幅率モデルおよび震度増分モデルの設定にあたっては、入力波の A/V と最大速度（または震度）による違いを考慮する。
- A/V 区分は、 $A/V \leq 5$ 、 $5 < A/V \leq 25$ 、 $25 < A/V$ の3区分とする。 A/V を5と25のところに分けた理由は、表IV-3からわかるように、ほとんどの建物の一次固有周期の A/V 換算値は5~25の範囲にあり、この範囲外では、応答増幅が小さいと考えられるためである。
- 実際の被害予測で利用する場合には、入力波の A/V が精度よく求められない場合もあるので、 A/V で分類しない場合のモデルも設定する。
- 最上階の速度増幅率モデルと震度増分モデルは、一定値、または速度および震度の一次関数で与える。

3-2. 最上階の速度増幅率モデル

最上階の速度増幅率モデルは以下の手順で設定した。設定フローを図IV-17に示す。

- ① 入力速度(1 cm/s, 25cm/s, 50cm/s, 100cm/s, 150cm/s)ごとに、42 波の速度増幅率の平均値 $R_{V=1}$, $R_{V=25}$, $R_{V=50}$, $R_{V=100}$, $R_{V=150}$ を算定する。
- ② 速度増幅率モデルを入力速度によらず一定とするのか、入力速度により変化させるのかを判断する。一定とする場合は③, 入力速度により変化させる場合で $A/V \leq 5$ または $5 < A/V \leq 25$ では④~⑦, 入力速度により変化させる場合で $25 < A/V$ では⑧を実施する。
- ③ 入力速度によらず一定とする場合, ①で算定した各入力速度の速度増幅率の平均を求め, 速度増幅率モデルとする。→ $(R_{V=1} + R_{V=25} + R_{V=50} + R_{V=100} + R_{V=150}) / 5$
但し, $A/V > 25$ の入力波では, 加速度が 2000cm/s^2 を超えるため, 入力速度 100cm/s と 150cm/s の解析を実施していない。このため, $A/V > 25$ の場合には, $R_{V=1}$, $R_{V=25}$, $R_{V=50}$ の3つの平均値とする。
- ④ 入力速度により変化させる場合で入力波の A/V が $A/V \leq 5$ または $5 < A/V \leq 25$ の場合には, ある入力速度 V_b を設定し, 入力速度が V_b 以上の速度増幅率は一定値, V_b 以下の速度増幅率は入力速度の一次関数で与えることとする。
- ⑤ V_b より大きい入力速度の速度増幅率の平均 $R_{V=L}$ を求める。
例えば, $V_b = 75\text{cm/s}$ の場合には $R_{V=L} = (R_{V=100} + R_{V=150}) / 2$ を算定する。
- ⑥ ④で設定した入力速度 V_b 以下の速度増幅率を与える一次関数の傾きを, ⑤で用いた速度増幅率以外の値(例えば, $R_{V=1}$, $R_{V=25}$, $R_{V=50}$)を用いて最小二乗法で算定する。
- ⑦ 直線の傾きは有効数字1桁で表すこととし, $(V_b, R_{V=L})$ を通る直線となるように微修正する。
- ⑧ 入力速度により変化させる場合で $25 < A/V$ の場合には, 入力速度が 1 cm/s, 25cm/s, 50cm/s の計算ケースしかなく, 速度増幅率が一定値とみなせる入力速度 V_b が設定できないため, 速度増幅率を入力速度の一次関数で与える。この場合の一次関数は, $R_{V=1}$, $R_{V=25}$, $R_{V=50}$ を用いて最小二乗法で算定する。但し, 速度増幅率の最小値は1.0とする。



図IV-17 最上階の速度増幅率モデルの設定フロー

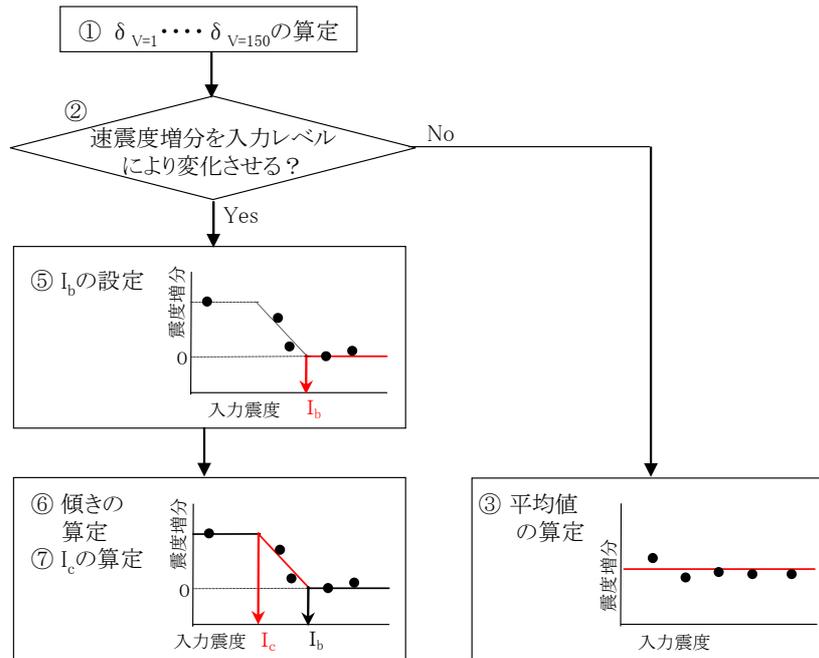
3-3. 最上階の震度増分

最上階の震度増分モデルは以下の手順で設定した。設定フローを図IV-18に示す。

- ① 入力速度 (1 cm/s, 25cm/s, 50cm/s, 100cm/s, 150cm/s) ごとに, 42 波の震度増分の平均値 $\delta_{V=1}$, $\delta_{V=25}$, $\delta_{V=50}$, $\delta_{V=100}$, $\delta_{V=150}$ を算定する。
- ② 震度増分モデルを入力震度によらず一定とするのか, 入力震度により変化させるのかを判断する。一定とする場合は③, 入力震度により変化させる場合は④~⑧を実施する。
- ③ 入力震度によらず一定とする場合, ①で算定した各入力速度の震度増分の平均を求め, 震度増分モデルとする。→ $(\delta_{V=1} + \delta_{V=25} + \delta_{V=50} + \delta_{V=100} + \delta_{V=150}) / 5$
 $A/V > 25$ の場合には, $(\delta_{V=1} + \delta_{V=25} + \delta_{V=50}) / 3$
 平均値が負の値になるときは, 震度増分モデルの値を 0 とする¹。
- ④ 入力震度により変化させる場合, 入力震度が小さく建物が線形とみなせる範囲では一定値, ある入力震度以上は 0, その中間は入力震度の一次関数で与えることとする。

¹ 震度増分が負の値になる理由としては, 建物応答が非線形化して応答波の卓越周期が長くなったために, 周期1秒付近にピークのあるフィルター特性をもつ計測震度が小さく算定されるようになったことが考えられる。しかし, 非線形化が大きく進んだ領域での建物モデルの設定根拠は十分でない (例えば, 軽量S造の復元力モデルの第二勾配は, 便宜上0.01としている) と考えられるため, 震度増分に負の値を設定するだけの積極的な根拠はないと考え, 震度増分モデルの最小値は0とした。

- ⑤ 震度増分モデルが0となる入力震度 I_b を設定する.
- ⑥ $(I_b, 0)$ を通る直線の傾きを, I_b より小さい入力震度 (1 cm/s 入力の場合を除く) の震度増分を用いて, 最小二乗法で算定する. 直線の傾きは有効数字1桁で表すこととする.
- ⑦ 1 cm/s 入力の際の震度増分値と⑥の直線が交差する震度 I_c を求める.
- ⑧ 震度 I_c 以下では, 1 cm/s 入力の際の震度増分の値を用いる.



図IV-18 最上階の震度増分モデルの設定フロー

3-4. 床応答増幅モデルと解析結果の比較

各建物最上階の入力に対する速度増幅率の平均値と標準偏差を表IV-5, 表IV-7, 表IV-9, 表IV-11, 表IV-13, 表IV-15に示す. 平均値と標準偏差の計算は, 建築年代1981年~の解析結果を基にしている. これらの値を基に, 上記の方法で設定した速度増幅率モデルを表IV-6, 表IV-8, 表IV-10, 表IV-12, 表IV-14, 表IV-16に示す. 図IV-19~図IV-24には, 建物種別別, A/V区分別に, 速度増幅率モデルと解析結果の平均を比較して示す. これらより, 解析結果と速度増幅率モデルがよく合っていることがわかる.

同様に, 各建物最上階の震度増分の平均値と標準偏差とこれらの値を基に上記の方法で設定した震度増分モデルを表IV-17, 表IV-19, 表IV-21, 表IV-23, 表IV-25, 表IV-27に示す. 図IV-25~図IV-30には, 建物種別別, A/V区分別に, 震度増分モデルと解析結果の平均を比較して示す. これらより, 解析結果と震度増分モデルがよく合っていることがわかる.

■ 速度増幅率モデルと解析結果の比較

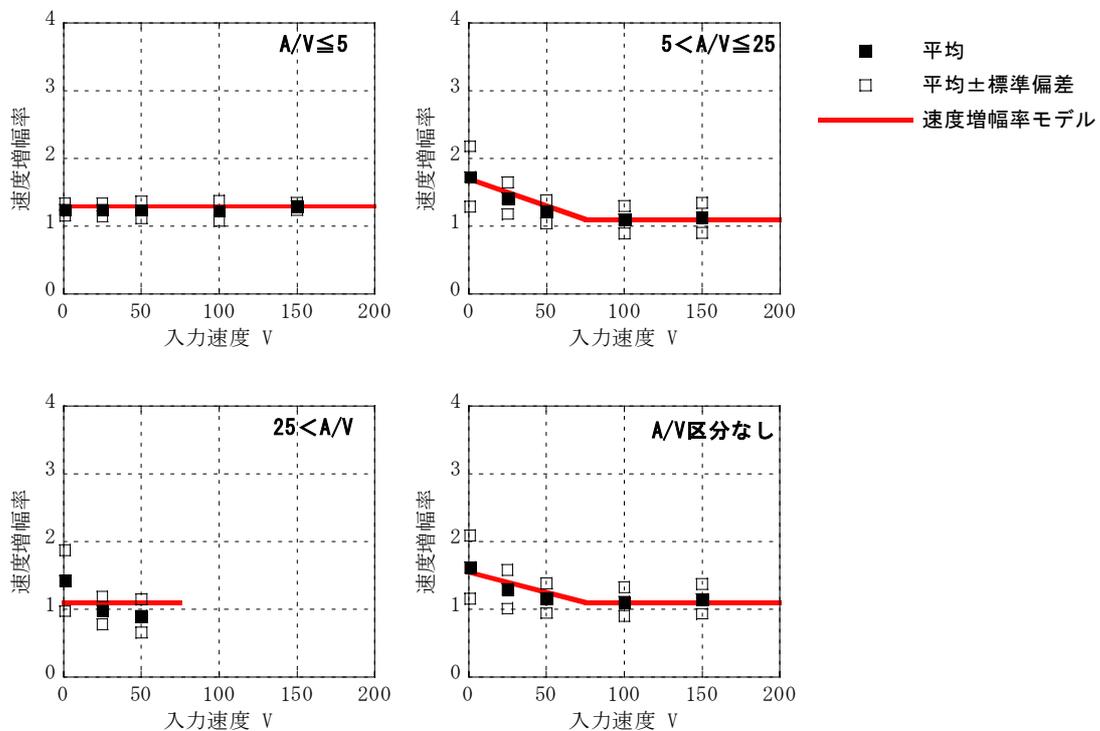
表IV-5 木造軸組2階建て2階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	1.25	0.09	1.73	0.45	1.42	0.45	1.62	0.46
25cm/s	1.25	0.09	1.41	0.23	0.98	0.20	1.30	0.28
50cm/s	1.24	0.12	1.22	0.18	0.90	0.25	1.16	0.22
100cm/s	1.23	0.14	1.10	0.21	—	—	1.11	0.21
150cm/s	1.30	0.06	1.13	0.22	—	—	1.15	0.22

※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-6 木造軸組2階建て2階の速度増幅率モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
1.3	1.7-0.008V (V < 75)	1.1 (V < 75)	1.55-0.006V (V < 75)
	1.1 (V ≥ 75)	—	1.1 (V ≥ 75)



図IV-19 木造軸組2階建て2階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

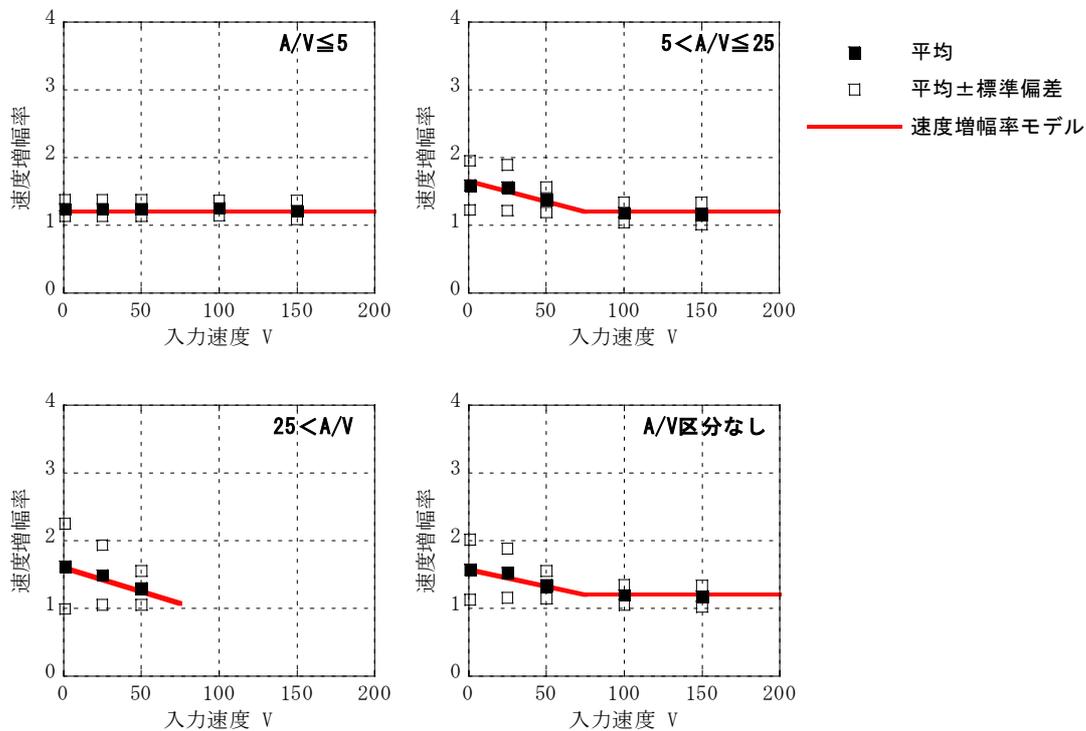
表IV-7 2×4・プレハブ2階建て2階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	1.25	0.12	1.59	0.36	1.62	0.63	1.57	0.44
25cm/s	1.25	0.12	1.56	0.34	1.49	0.44	1.52	0.36
50cm/s	1.25	0.11	1.38	0.19	1.30	0.25	1.35	0.20
100cm/s	1.26	0.11	1.19	0.15	—	—	1.20	0.15
150cm/s	1.22	0.14	1.17	0.16	—	—	1.18	0.16

※ 平均値と標準偏差は、建築年代 1981 年～の解析結果を基に計算した

表IV-8 2×4・プレハブ2階建て2階の速度増幅率モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
1.2	1.65-0.006V (V < 75) 1.2 (V ≥ 75)	1.6-0.007V (V < 75) —	1.575-0.005V (V < 75) 1.2 (V ≥ 75)



図IV-20 2×4・プレハブ2階建て2階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

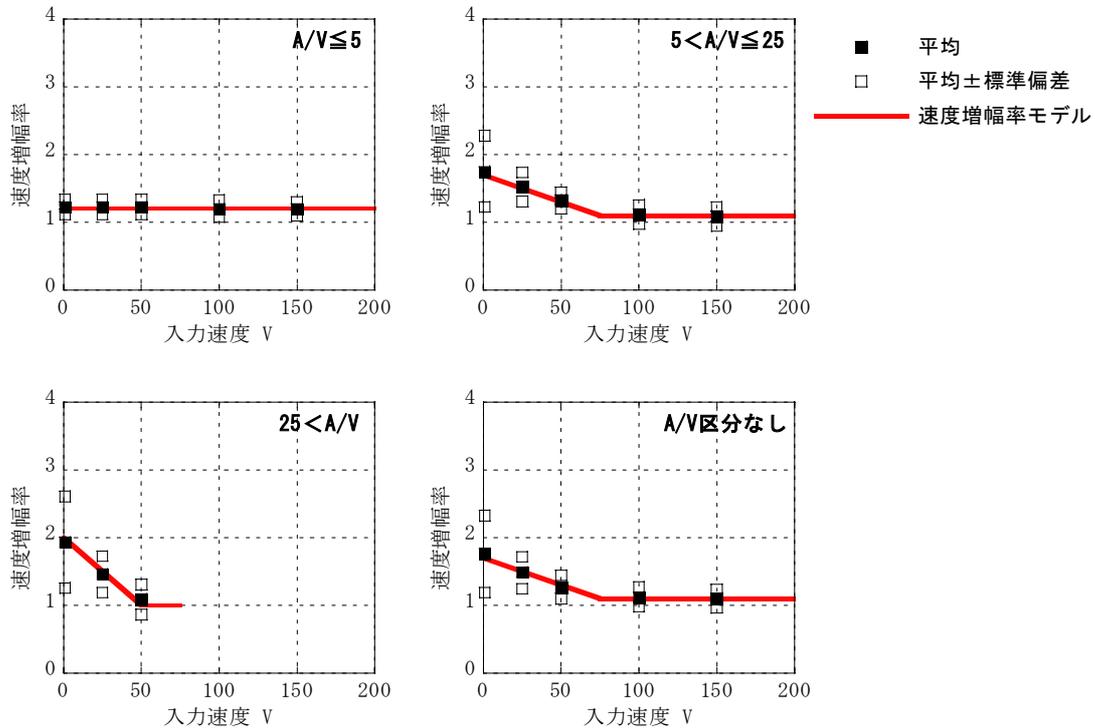
表IV-9 軽量S造2階建て2階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	1.23	0.11	1.75	0.52	1.93	0.67	1.76	0.57
25cm/s	1.23	0.11	1.52	0.22	1.46	0.27	1.49	0.24
50cm/s	1.23	0.11	1.32	0.12	1.09	0.22	1.27	0.17
100cm/s	1.20	0.12	1.12	0.15	—	—	1.12	0.14
150cm/s	1.20	0.10	1.09	0.14	—	—	1.10	0.14

※ 平均値と標準偏差は、建築年代 1981 年～の解析結果を基に計算した

表IV-10 軽量S造2階建て2階の速度増幅率モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
1.2	1.7-0.008V (V < 75) 1.1 (V ≥ 75)	2-0.02V (V < 50) 1.0 (50 ≤ V < 75)	1.7-0.008V (V < 75) 1.1 (V ≥ 75)



図IV-21 軽量S造2階建て2階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

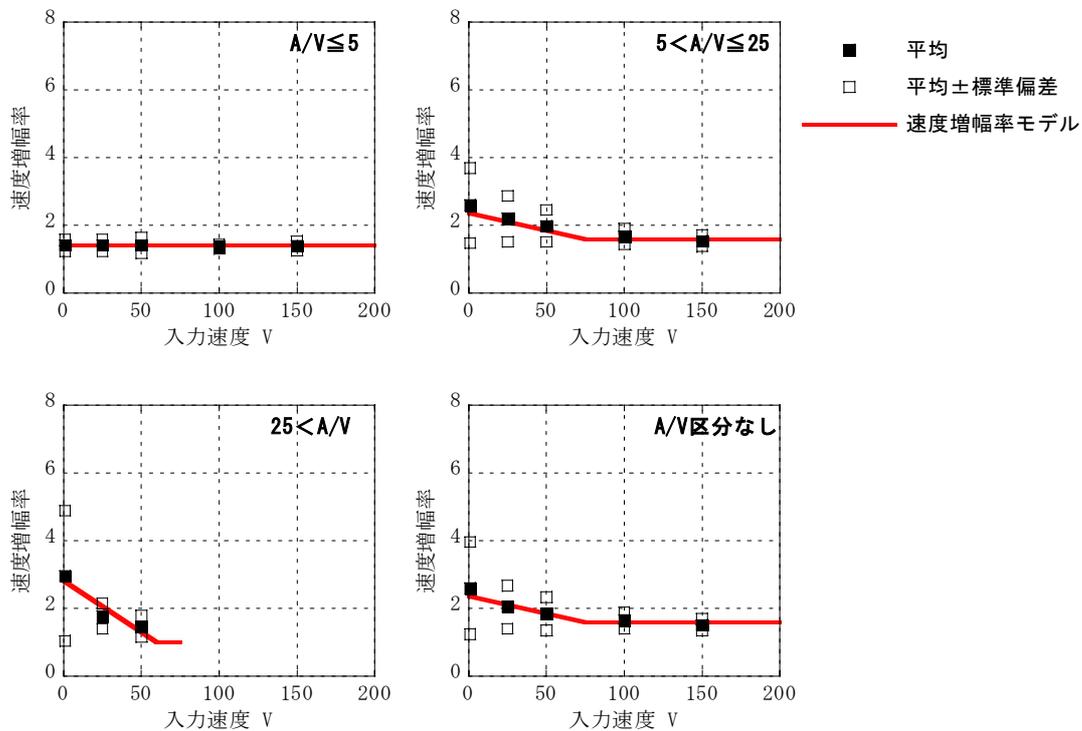
表IV-11 RC造5階建て5階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	1.41	0.18	2.59	1.11	2.96	1.92	2.59	1.37
25cm/s	1.41	0.18	2.19	0.67	1.77	0.38	2.04	0.64
50cm/s	1.41	0.22	1.99	0.47	1.46	0.32	1.85	0.49
100cm/s	1.37	0.06	1.67	0.24	—	—	1.65	0.24
150cm/s	1.40	0.14	1.53	0.17	—	—	1.52	0.17

※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-12 RC造5階建て5階の速度増幅率モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
1.4	2.35-0.01V (V < 75)	2.8-0.03V (V < 60)	2.35-0.01V (V < 75)
	1.6 (V ≥ 75)	1.0 (60 ≤ V < 75)	1.6 (V ≥ 75)



図IV-22 RC造5階建て5階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

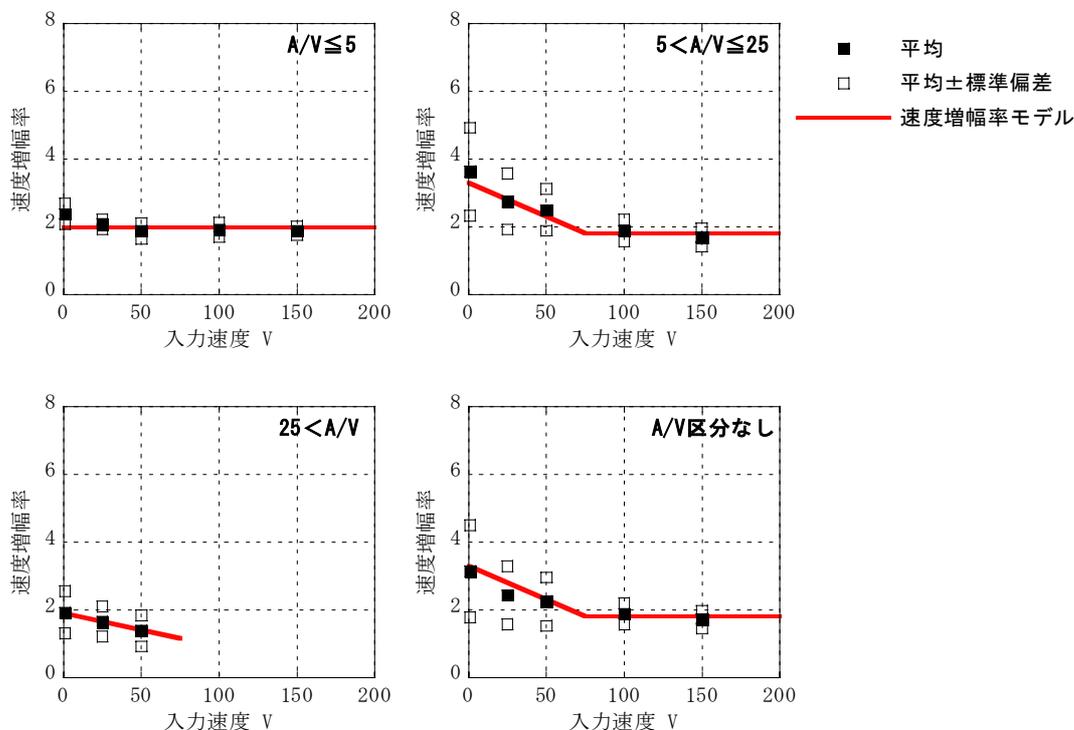
表IV-13 RC造10階建て10階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.38	0.31	3.64	1.30	1.93	0.62	3.14	1.35
25cm/s	2.08	0.15	2.74	0.82	1.65	0.43	2.43	0.86
50cm/s	1.88	0.22	2.50	0.61	1.39	0.46	2.25	0.71
100cm/s	1.92	0.21	1.89	0.32	—	—	1.89	0.32
150cm/s	1.89	0.13	1.69	0.27	—	—	1.72	0.26

※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-14 RC造10階建て10階の速度増幅率モデル

A/Vを考慮する場合			A/Vを考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
2.0	3.3-0.02V (V < 75) 1.8 (V ≥ 75)	1.9-0.01V (V < 75) —	3.3-0.02V (V < 75) 1.8 (V ≥ 75)



図IV-23 RC造10階建て10階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

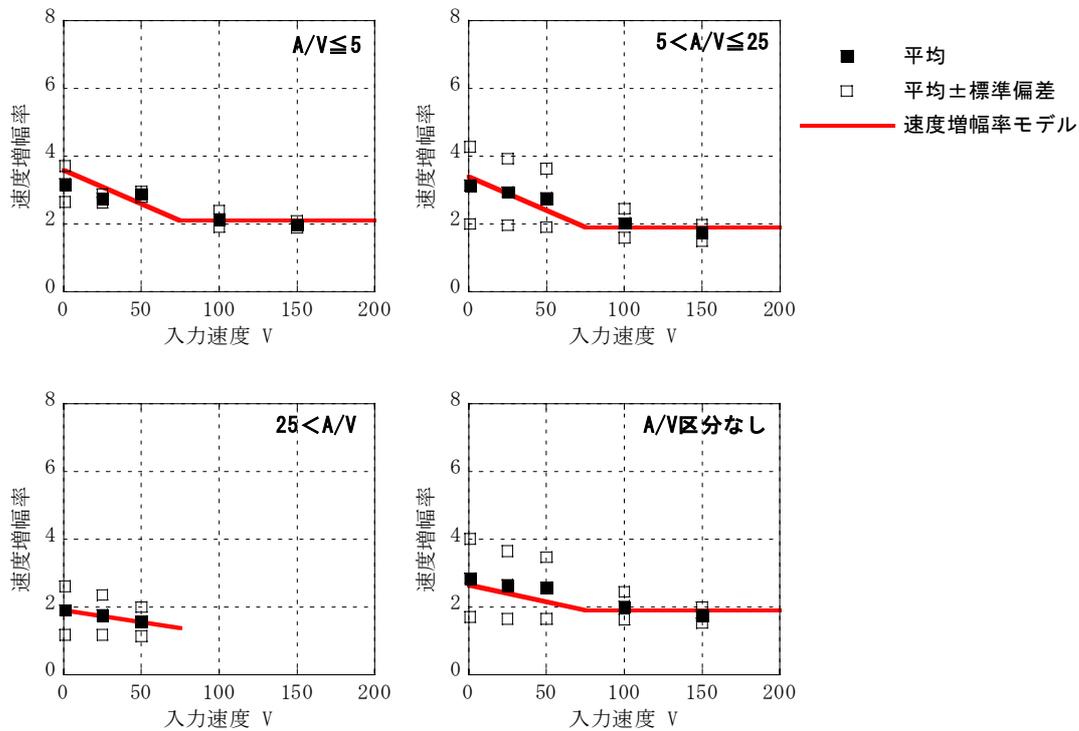
表IV-15 RC造15階建て15階の速度増幅率の平均値と標準偏差

入力速度 V	A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	3.18	0.54	3.15	1.13	1.91	0.72	2.85	1.15
25cm/s	2.75	0.13	2.95	0.98	1.77	0.58	2.65	1.00
50cm/s	2.89	0.08	2.77	0.87	1.57	0.43	2.57	0.90
100cm/s	2.15	0.25	2.02	0.43	—	—	2.03	0.42
150cm/s	1.98	0.10	1.74	0.24	—	—	1.77	0.24

※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-16 RC造15階建て15階の速度増幅率モデル

A/Vを考慮する場合			A/Vを考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
3.6-0.02V (V < 75) 2.1 (V ≥ 75)	3.4-0.02V (V < 75) 1.9 (V ≥ 75)	1.9-0.007V (V < 75) —	2.65-0.01V (V < 75) 1.9 (V ≥ 75)



図IV-24 RC造15階建て15階の速度増幅率モデルと解析結果の平均との比較

■ 震度増分モデルと解析結果の比較

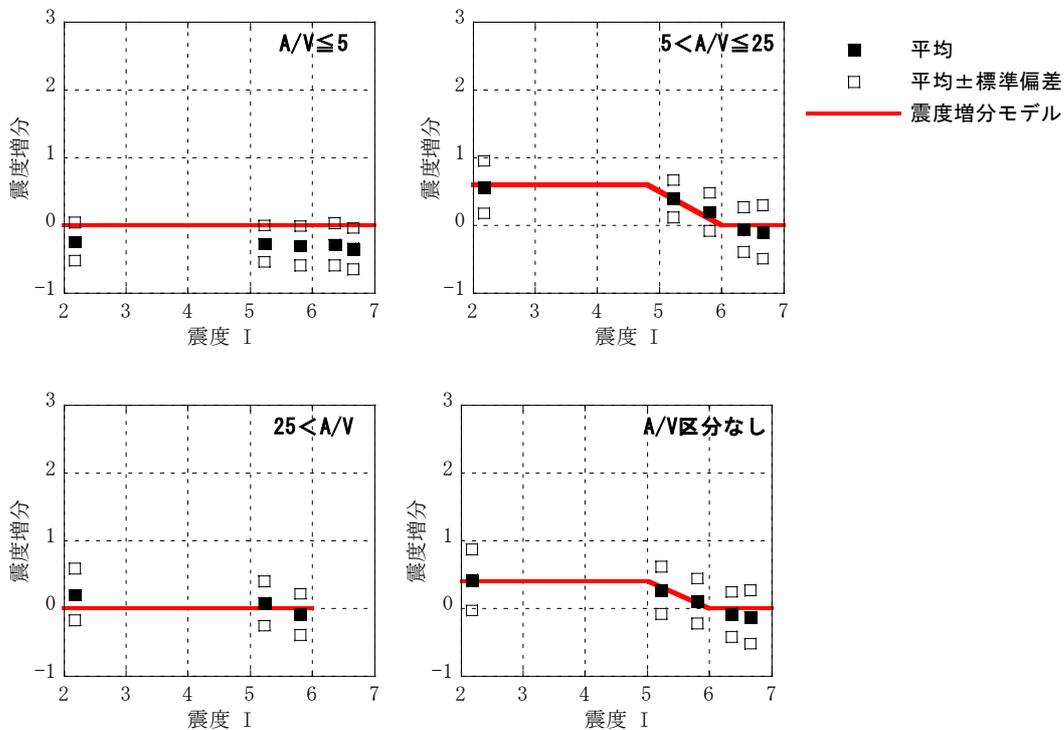
表IV-17 木造軸組2階建て2階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	-0.24	0.28	0.56	0.38	0.20	0.39	0.42	0.45
25cm/s	5.22	-0.27	0.27	0.40	0.28	0.08	0.33	0.27	0.35
50cm/s	5.81	-0.30	0.29	0.20	0.28	-0.09	0.30	0.11	0.33
100cm/s	6.36	-0.28	0.31	-0.06	0.33	—	—	-0.08	0.34
150cm/s	6.66	-0.34	0.31	-0.10	0.40	—	—	-0.13	0.39

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-18 木造軸組2階建て2階の震度増分モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
0.0	0.6 (I < 4.8) 3-0.5I (4.8 ≤ I < 6) 0.0 (6 ≤ I)	0.0	0.4 (I < 5) 2.4-0.4I (5 ≤ I < 6) 0.0 (6 ≤ I)



図IV-25 木造軸組2階建て2階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較

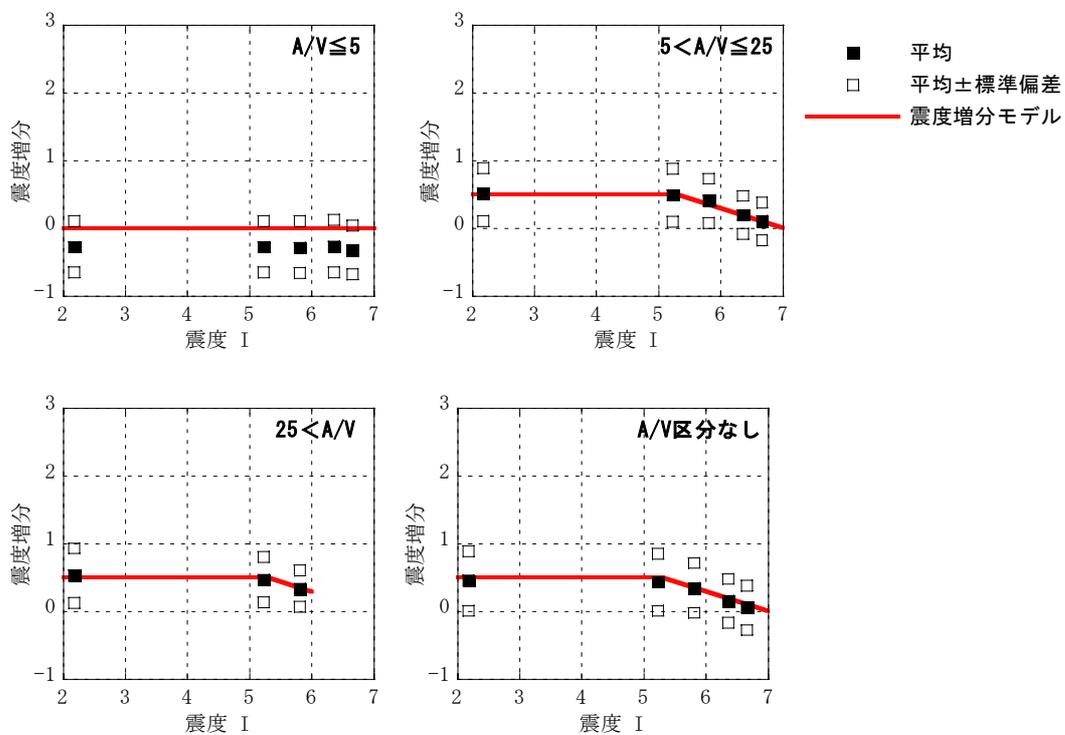
表IV-19 2×4・プレハブ2階建て2階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	-0.27	0.38	0.51	0.40	0.53	0.40	0.46	0.44
25cm/s	5.22	-0.27	0.38	0.49	0.39	0.47	0.34	0.43	0.43
50cm/s	5.81	-0.28	0.38	0.41	0.33	0.34	0.27	0.35	0.37
100cm/s	6.36	-0.26	0.39	0.20	0.28	—	—	0.16	0.32
150cm/s	6.66	-0.32	0.36	0.11	0.28	—	—	0.06	0.32

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-20 2×4・プレハブ2階建て2階の震度増分モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
	0.5 (I < 5.3)	0.5 (I < 5.3)	0.5 (I < 5.3)
0.0	2.1-0.3I (5.3 ≤ I < 7)	2.1-0.3I (5.3 ≤ I < 6)	2.1-0.3I (5.3 ≤ I < 7)
	0.0 (7 ≤ I)	—	0.0 (7 ≤ I)



図IV-26 2×4・プレハブ2階建て2階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較

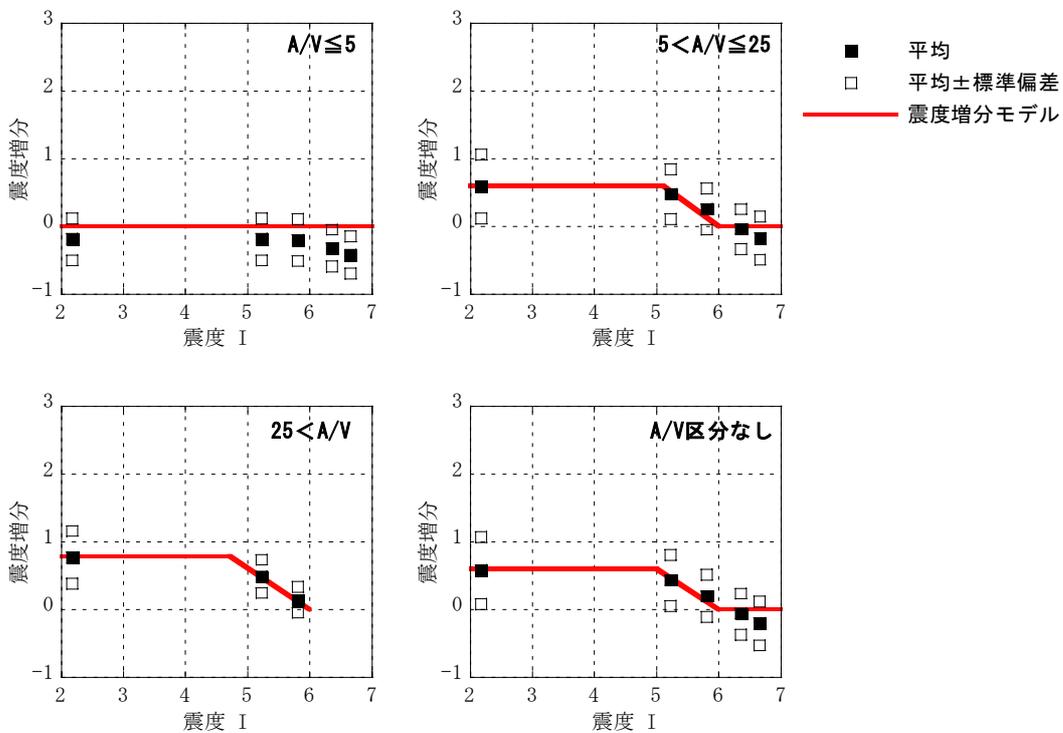
表IV-21 軽量S造2階建て2階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	-0.19	0.31	0.59	0.47	0.77	0.39	0.58	0.50
25cm/s	5.22	-0.19	0.31	0.48	0.37	0.49	0.25	0.43	0.38
50cm/s	5.81	-0.20	0.31	0.26	0.30	0.14	0.19	0.20	0.31
100cm/s	6.36	-0.32	0.27	-0.04	0.30	—	—	-0.06	0.31
150cm/s	6.66	-0.42	0.27	-0.17	0.32	—	—	-0.20	0.32

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-22 軽量S造2階建て2階の震度増分モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
	0.6 (I < 5.1)	0.8 (I < 4.7)	0.6 (I < 5)
0.0	4.2-0.7I (5.1 ≤ I < 6)	3.6-0.6I (4.7 ≤ I < 6)	3.6-0.6I (5 ≤ I < 6)
	0.0 (6 ≤ I)	—	0.0 (6 ≤ I)



図IV-27 軽量S造2階建て2階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較

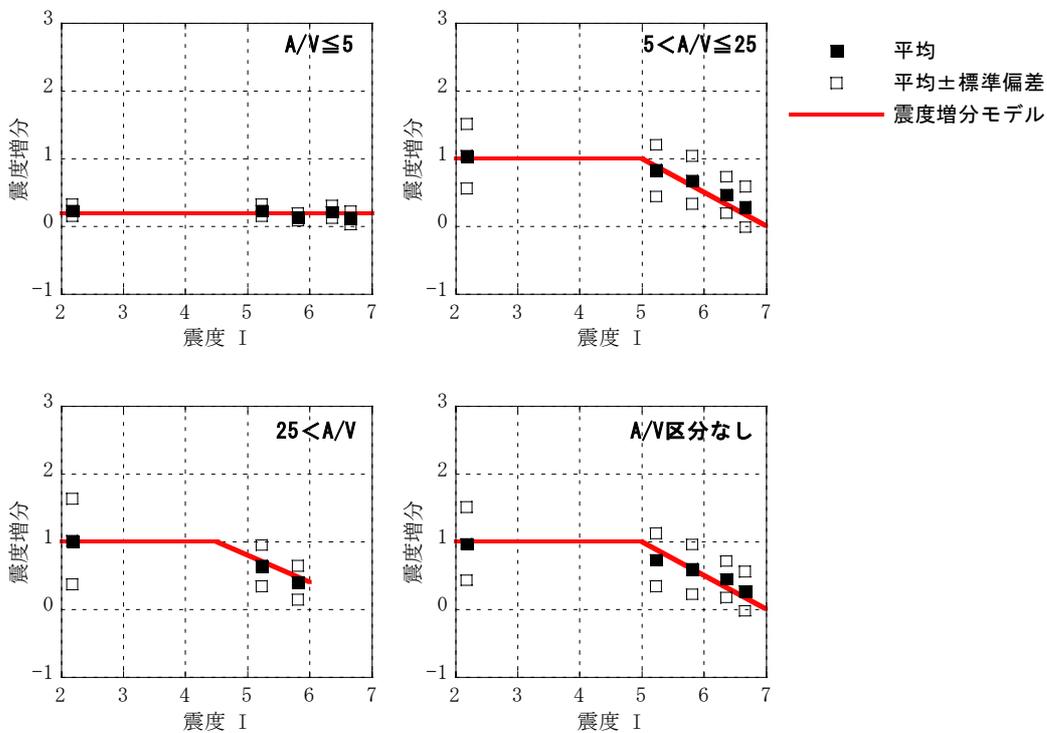
表IV-23 RC造5階建て5階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	0.24	0.08	1.04	0.48	1.01	0.64	0.97	0.54
25cm/s	5.22	0.24	0.08	0.83	0.39	0.65	0.30	0.74	0.39
50cm/s	5.81	0.14	0.05	0.68	0.36	0.40	0.25	0.60	0.37
100cm/s	6.36	0.22	0.09	0.47	0.27	—	—	0.45	0.27
150cm/s	6.66	0.13	0.10	0.29	0.30	—	—	0.27	0.29

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-24 RC造5階建て5階の震度増分モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
	1.0 (I < 5)	1.0 (I < 4.5)	1.0 (I < 5)
0.0	3.5-0.5I (5 ≤ I < 7)	2.8-0.4I (4.5 ≤ I < 6)	3.5-0.5I (5 ≤ I < 7)
	0.0 (7 ≤ I)	—	0.0 (7 ≤ I)



図IV-28 RC造5階建て5階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較

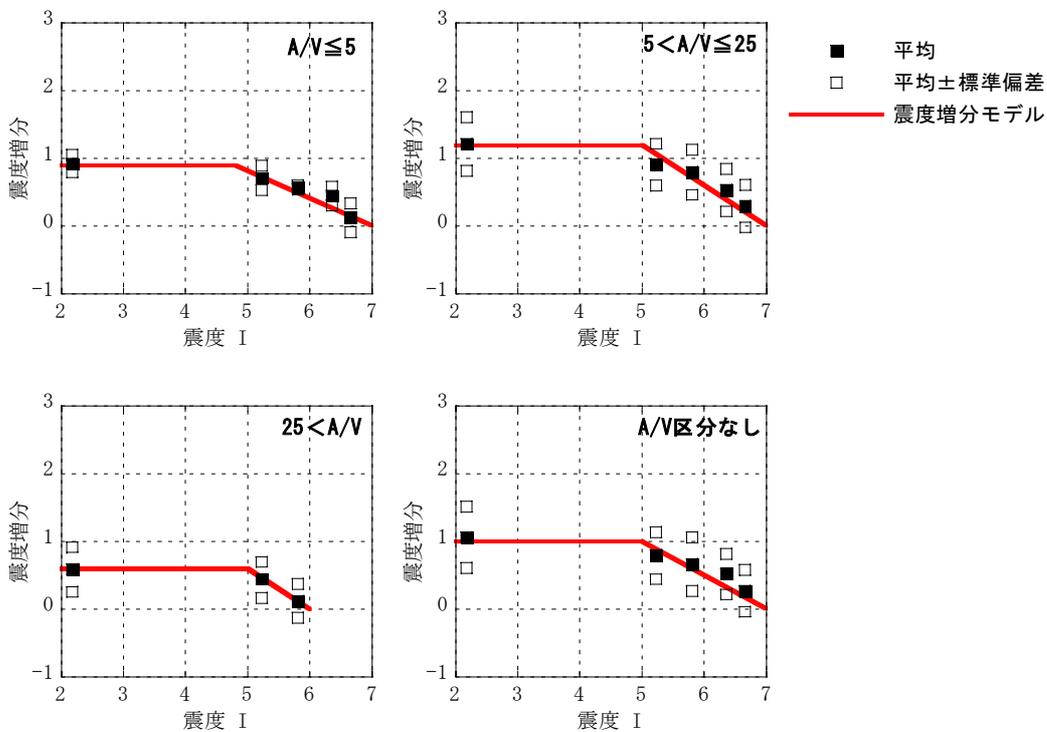
表IV-25 RC造10階建て10階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	0.92	0.13	1.22	0.39	0.59	0.32	1.06	0.45
25cm/s	5.22	0.71	0.18	0.91	0.31	0.44	0.27	0.79	0.35
50cm/s	5.81	0.57	0.03	0.79	0.34	0.12	0.25	0.67	0.40
100cm/s	6.36	0.45	0.14	0.53	0.31	—	—	0.52	0.30
150cm/s	6.66	0.13	0.21	0.30	0.32	—	—	0.27	0.31

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-26 RC造10階建て10階の震度増分モデル

A/V を考慮する場合			A/V を考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
0.9 (I < 4.8)	1.2 (I < 5)	0.6 (I < 5)	1.0 (I < 5)
2.8-0.4I (4.8 ≤ I < 7)	4.2-0.6I (5 ≤ I < 7)	3.6-0.6I (5 ≤ I < 6)	3.5-0.5I (5 ≤ I < 7)
0.0 (7 ≤ I)	0.0 (7 ≤ I)	—	0.0 (7 ≤ I)



図IV-29 RC造10階建て10階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較

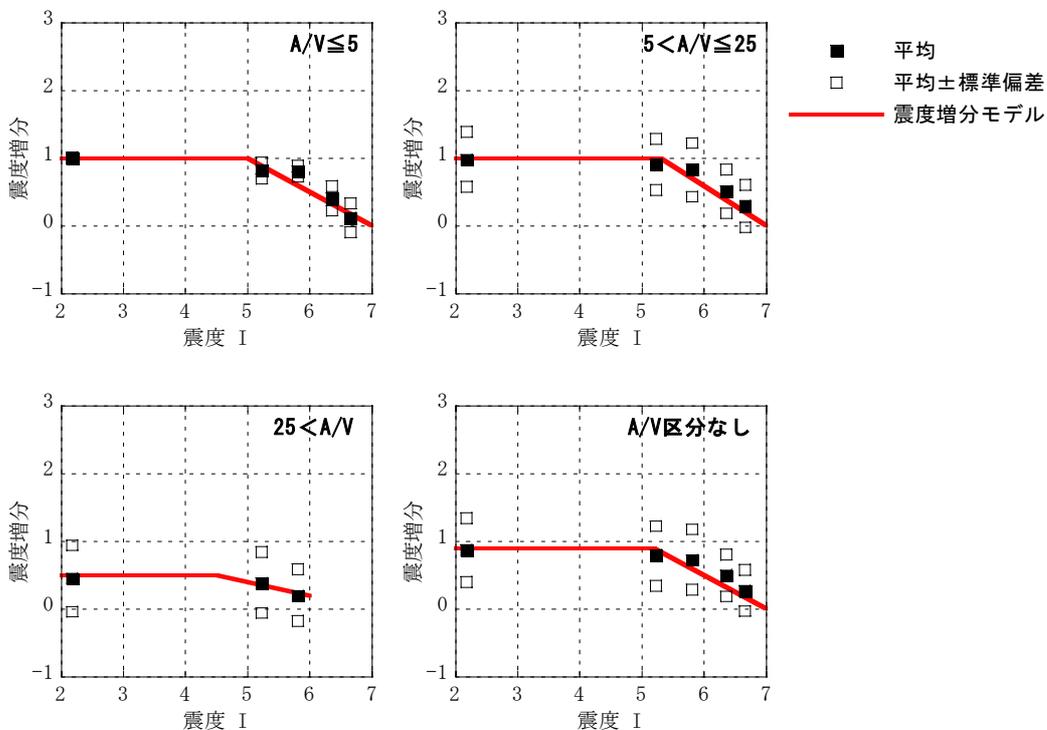
表IV-27 RC造15階建て15階の震度増分の平均値と標準偏差

入力レベル		A/V ≤ 5		5 < A/V ≤ 25		25 < A/V		全体	
速度	震度*	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
1cm/s	2.17	1.00	0.01	0.98	0.41	0.45	0.49	0.87	0.47
25cm/s	5.22	0.82	0.12	0.91	0.38	0.39	0.45	0.79	0.44
50cm/s	5.81	0.81	0.09	0.83	0.40	0.20	0.39	0.73	0.45
100cm/s	6.36	0.41	0.18	0.51	0.32	—	—	0.50	0.31
150cm/s	6.66	0.12	0.21	0.30	0.32	—	—	0.27	0.31

* 藤本ら(2005)の経験式により速度を震度に換算した値
 ※ 平均値と標準偏差は、建築年代1981年～の解析結果を基に計算した

表IV-28 RC造15階建て15階の震度増分モデル

A/Vを考慮する場合			A/Vを考慮しない場合
A/V ≤ 5	5 < A/V ≤ 25	25 < A/V	
1.0 (I < 5)	1.0 (I < 5.3)	0.5 (I < 4.5)	0.9 (I < 5.2)
3.5-0.5I (5 ≤ I < 7)	4.2-0.6I (5.3 ≤ I < 7)	1.4-0.2I (4.5 ≤ I < 6)	3.5-0.5I (5.2 ≤ I < 7)
0.0 (7 ≤ I)	0.0 (7 ≤ I)	—	0.0 (7 ≤ I)



図IV-30 RC造15階建て15階の震度増分モデルと解析結果の平均との比較