

3次元6自由度振動台による強震動の再現と さまざまな地震計を用いた計測

中村 豊

正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台3-25-3)
東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻連携教授
E-mail: yutaka@sdr.co.jp

強震動の理解を深めるため、これまでに集積された強震記録を利用して、3次元6自由度振動台により震度4から震度7までの6クラスの地震動を再現するとともに、様々な強震計でこの再現地震動を計測した。これにより、基本的な問題点の把握や地震防災の啓蒙に役立つ資料の作成を試みた。実験の結果、震度6を超えると、強震動の様相がかなり異なり、想像を超える激越なものとなることがわかった。最大加速度のような地震動指標値は波形特性を規定しなければ、同じ地震動でも大きく異なることがあるので、少なくとも上限周波数を規定して議論しなければならない。震度については、極端にノイズが多いセンサで無い限り、また上下動成分を考慮しなくても、概ね ± 0.1 以内の精度で議論できることが確認された。

Key Words : *instrumental seismic intensity, realtime seismic intensity, spectral intensity, PGA, 5HzPGA, large-size three dimensional shaking table*

1. はじめに

地震計は地震の揺れを計測するものであり、地震研究に欠かせない道具であるが、一般市民にとってはなじみが薄い。しかしながら、地震被害箇所での強い地震動の記録は地震研究のみならず、構造物や施設の破壊要因を明らかにするのにも役立つ。また、建物が建っている地盤は地震のときに様々な挙動を示すが、その実態を正確に把握するのにも欠かせない。強い地震動を記録する地震計（強震計）は阪神大震災後、飛躍的に整備され、今では日本だけで5千台以上の強震計が活躍している。しかし、被災箇所またはそのすぐ近くでの強震動記録は驚くほど少ない。ほとんどないといってよい。これは地震による地盤や構造物の破壊メカニズムの解明が十分ではないことを意味する。強震計のさらなる普及が望まれる。

地震計の普及を図るためには、まず、地震計の役割や動作状況を広く周知してもらうことが必要である。そこで、地震計を一般市民に紹介するために、震度4から震度7までの地震動を強震記録に基づいて3次元震動台で再現して、さまざまな地震計で計測してみた。さまざまな観測に用いられている地震計や最近出回り始めた普及型の地震計を一堂に会して、この再現地震動を観測し、どんな警報や計測値がどのように表示・記録されるのか、などを紹介する。地震計を地震防災に役立てる方策や問題点などを考察するための資料として活用していただければ幸いである。

2. 地震動の実態と強震観測の意義

図1は、地震動波形を地震や地点ごとに並べて示したものである。強震動加速度記録のうち最大値を中心にした5秒間の波形を切り出している（中村1988）。縦の列は同じ地震による異なる地点の波形を示し、横の行は同じ地点の異なる地震の波形を示している。列は右から左にいくほど規模の大きな地震となっている。これをみると、同じ地震であっても地点が異なると観測される波形は大きく異なるのに対して、同じ地点であれば地震が違って同じような波形が記録されていることがわかる。これは、固い地盤の上に堆積した表層地盤の地震動特性が防災上、非常に重要であることを示している。

同じように、建物もその高さや何階に居住しているかにより、その地震動の様相は大きく異なる。気象庁が公表する計測震度は地盤上の観測点でのものであり、場所が建物であれば、観測点の近くであっても異なる震度となっているのが普通である。さらに、同じ建物でも階数が違えば震度は異なる。

地盤や構造物の地震動特性を把握する方法として、地震観測があるが、地震の発生を待たねばならない。すぐさま計測できるものとしては微動がある。これは、風雨、波浪など自然界で発生する震動や人間の社会活動などによる人工的な震動などが混交したもので、微細ではあるがいつでもどこでも観測できる。これを用いて、地盤や建物の地震動特性を推測することができる。図2は、新幹線沿線での常時微

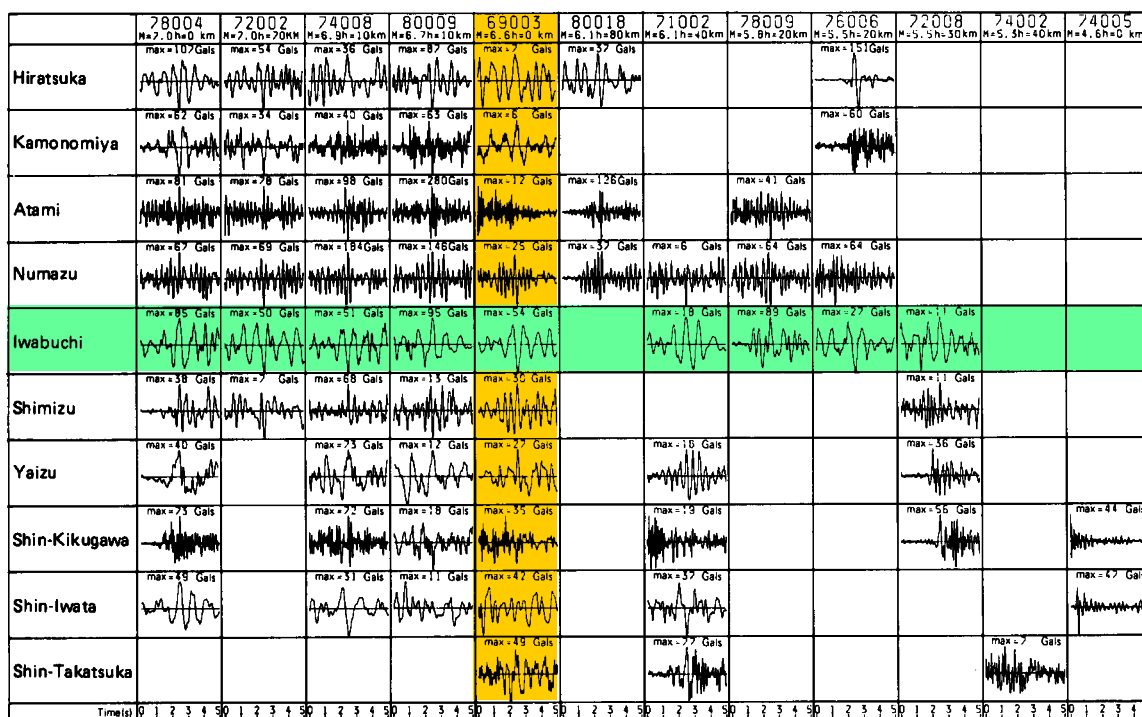


図1 地震毎および地点毎での強震波形の比較

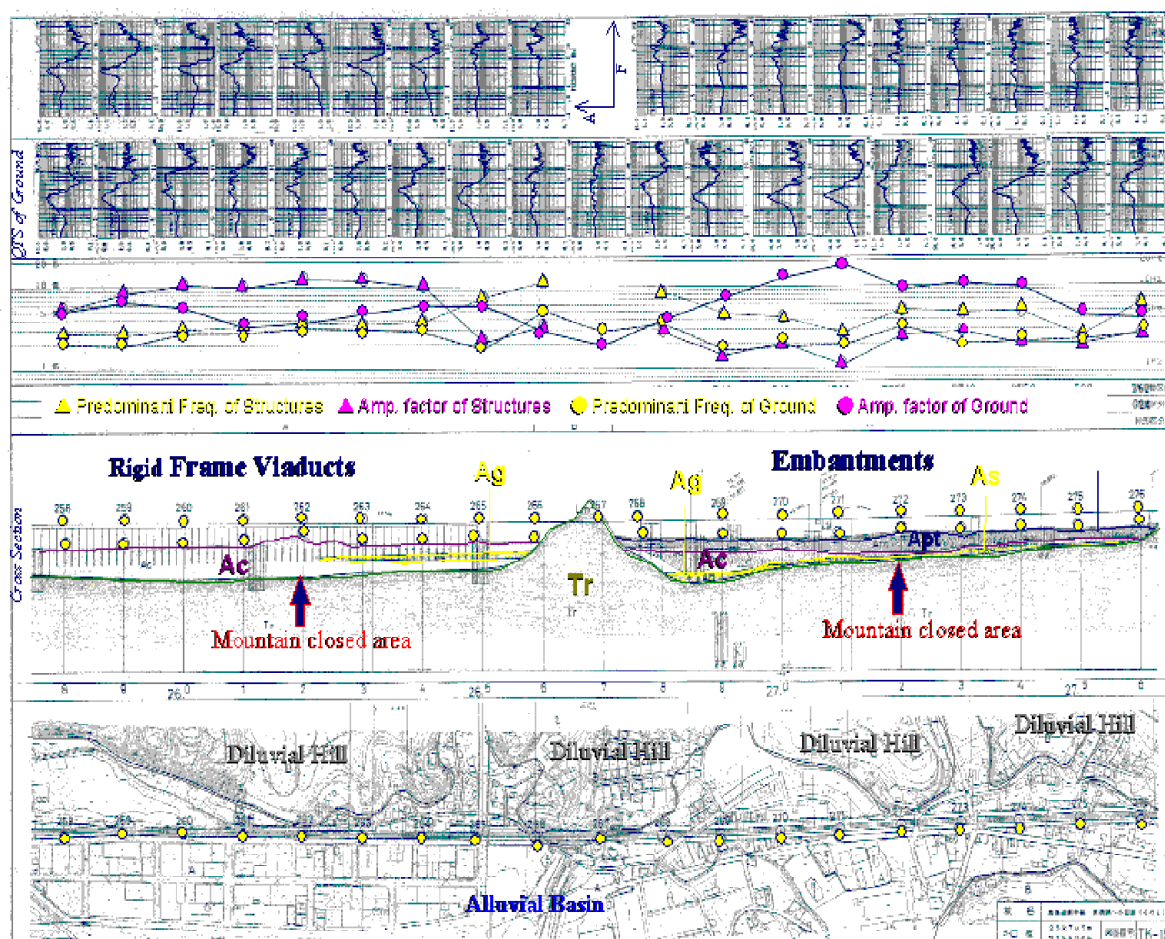


図2 常時微動による地盤および構造物の地震動特性調査結果(一例)

動を用いた地盤や高架橋・盛土の地震動特性を調査した例を示したものである（中村1993）。固い地盤では地震動の増幅はなく、堆積地盤や高架橋では明

瞭な増幅特性を示していることがわかる．これはあくまでも非常に微細な震動に対する応答特性であって，危険な箇所や建物を抽出するのに有効である．

しかしながら、破壊的な強震動で地盤や構造物は損傷し、それらの地震動特性は少なからず変化することが知られている。強震動によって地震動特性がどのように変化するかを見極めるには、強震観測が欠かせない。

昨今の緊急地震速報に関する一部の狂騒を見てみると、予測された先行時間が経過したのち、予測された震度で大きく揺れ始め、それまではほとんど揺れないとの誤解が広まりつつあるように見える。つまり、緊急地震速報が通報されてからでも効果的な防災行動がとれると期待をいだかせているようである。しかし、すさまじい揺れに対しては、ただ安定した姿勢を確保するしかできないのが実状だろう。

大きな地震のP波初動は静かにしている人なら、特別な装置がなくても、また外部から通報されるまでもなく、誰でも感じる事ができ、直ちに防災行動をとることができる。ただ、何かの作業に従事していたり、思索に没頭していたりすると、見逃してしまうことがあるかも知れない。また、P波の揺れに気付いてもそれが地震であると気付くまでに時間がかかることも実際にあったようである。

そこで、確実に地震の発生を警報するものが警報地震計であり、発生をP波の部分で探知して迅速に警報を発するのがP波警報機器である。緊急地震速報もP波警報機器を利用したものであるが、速報される数値はいずれも不確かであり、また警報処理や伝達に時間がかかるため、本当に被害が出るようなすさまじい揺れに襲われる地域には大きな揺れの前には通報されない可能性が高い。直接その場の地震

動を検知して警報を発してくれるオンサイト警報地震計の重要性をあらためて強調しておきたい。

今回の振動台を用いた強震動再現実験が、強震動の実状を目の当たりにさせ、外部からの情報に頼るのではなく自前の観測で自律的に行動し、安全で快適な生活を維持することを考えるきっかけとなれば幸いである。

3. 振動台実験の概要

3.1 使用地震計

本格的な強震観測用の地震計をはじめ、さまざまな地震計を一堂に会して、再現した強震動を観測し、相互に比較する。振動台による再現強震動を計測した地震計は以下のとおりである。

- ・ K-NET95強震計 <以下K-NETと略称、リアルタイム表示なし>
- ・ 気象庁方式計測震度計 <以下計測震度計と略称、地震後の表示：計測震度、最大加速度PGA>
- ・ WISE用速度型強震計 <以下WISEと略称、地震後の表示：計測震度、最大速度PGV、PGA>
- ・ 東京ガス方式SI地震計 <以下SIセンサと略称、地震後の表示：SI値、PGA、計測震度相当値>
- ・ E-Catcher <以下ECと略称、地震後の表示：計測震度、PGA>
- ・ AcCo <地震中および地震後の表示：RI値（計測震度相当）、最大加速度5HzPGA>
- ・ FREQL <地震中および地震後の表示：RI値（計

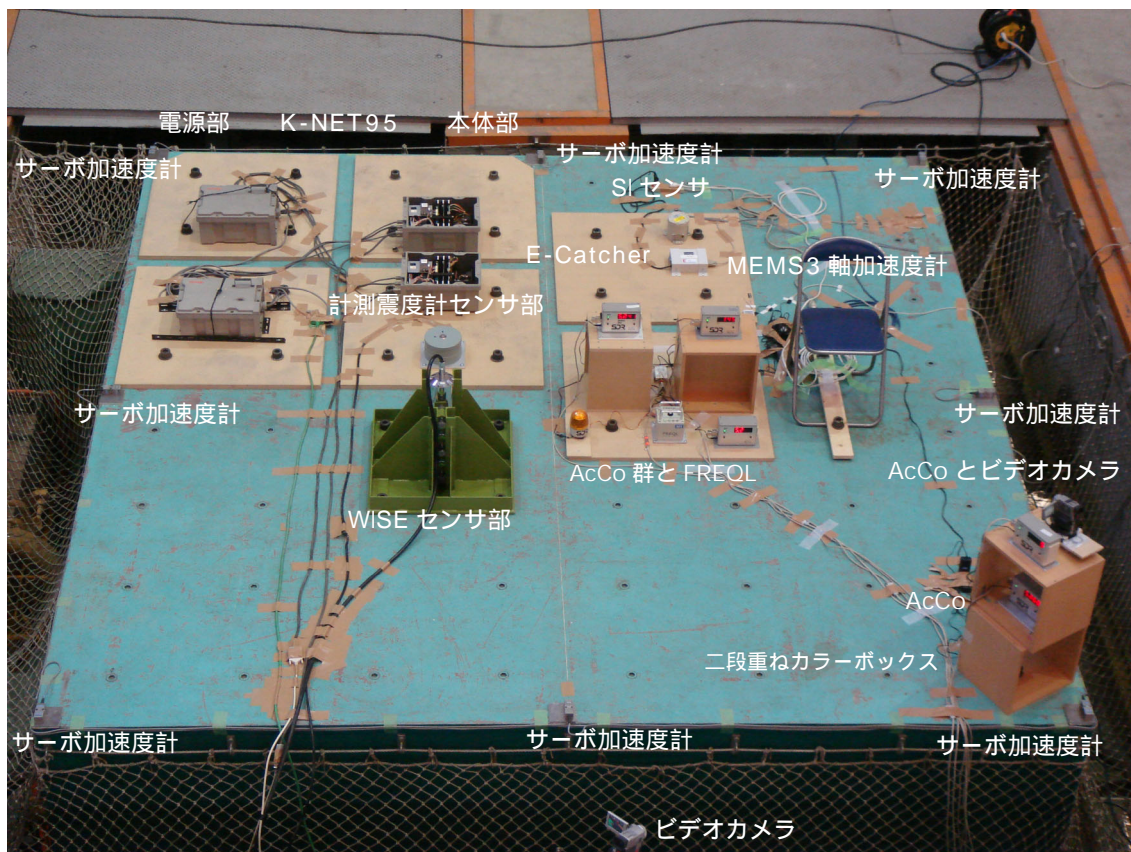


写真1 振動台の外観と地震計などの配置状況(パイプ椅子はスケール参照用)



写真2 MEMS3軸加速度計, E-Catcher および SI センサの取付状況

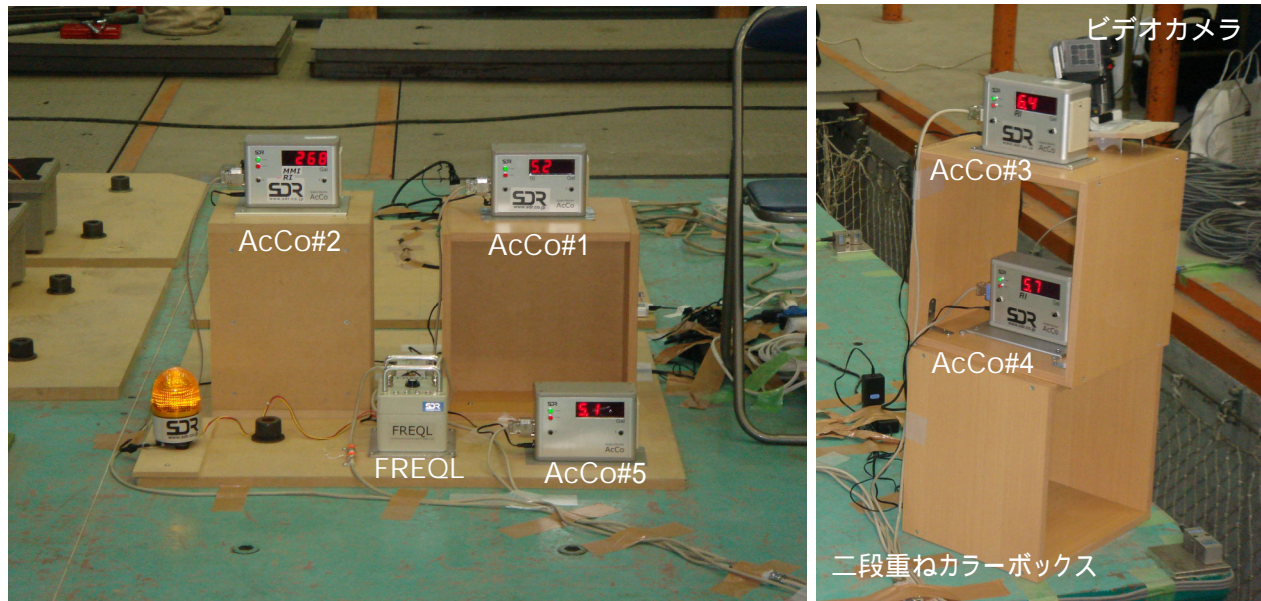


写真3 AcCo および FREQL の設置状況

(AcCo は4桁赤色 LED に RI 震度と 5HzPGA の最大値のリアルタイム変動を 0.5 秒毎に交互に表示)

測震度相当), 5HzPGA >

- ・ MEMS 3 軸加速度計 < 以下MEMSと略称, リアルタイム表示なし >

これらの地震計の設置状況は, 写真1~写真3を参照されたい. なお, 各地震計の波形は, MEMS (1/50秒サンプリング) 以外, すべて1/100秒間隔でサンプリングされている.

これらの地震計の振動台への取り付けは, 油圧装置に起因する高周波振動を少しでも緩和するため, WISE用地中センサー以外はMDF合板 (厚さ24mm または18mm) を介して行っている. 振動台と地震計の取り付け状況を写真1に示す.

3.2 振動台の概要

強震動再現に使用した振動台は東急建設株式会社技術研究所の3次元6自由度振動台である. 写真1に示すように4m x 4mの大きさで, 基本的な加振性能は表1に示すとおりである. 振動台の動きは8成分のサーボセンサーを写真1に示すように配置して計測した. これから振動台中央の動きを算出し, 各地震計の記録と比較する際の基準波形とした.

表1 実験に使用した3次元振動台の主な仕様

テーブル寸法	4m×4m
駆動方式	電気・油圧サーボ方式
供試体搭載質量	定格 30tonf 最大 50tonf
加振振動数範囲	X方向 0 ~ 30Hz、 YおよびZ方向 0 ~ 50Hz
最大加振加速度	XおよびY方向 ± 1 g、 Z方向 ± 1.8 g
最大加振変位	X方向 ± 500mm、 Y方向 ± 200mm、 Z方向 ± 100mm

3.3 加振波形

加振は正弦波と強震記録を用いて行った. 加振波形は1ケース120秒に規格化して, 1ケース最大7分のサイクルタイムで加振した. 表2に加振リストを示す.

表2 振動台実験時の表示値一覧(項目名を網掛けしたものは実験後の算定結果)

測点 番号	振動数 [Hz]	振幅 [mm]	深さ [m]	震央 距離 [km]	基準				AcCo#1		AcCo#2		AcCo#3		AcCo#4		AcCo#5		FREQL		計測履歴計		WISE		E-Catcher		Siセンサー		KNET		MEMS		
					PGA	shPGA	Rjma	SI値	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma	shPGA	Rjma
20	0.5Hz	20			29	21	3.9	3.6	6.3	3.9	21	3.9	20	3.7	4.0	28	4.0	26		3.8	22.36	25	6.5	28	3.6	3.6	4.5	6.6	27	相当	122	5.1	
20	0.5Hz	100			111	95	5.3	5.0	30.8	5.4	102	5.3	95	5.0	5.4	114	5.4	111		5.2	105.50	113	32	117	5.0	5.0	41.6	32.5	114		47.4	6.3	
20	0.5Hz	200			208	188	5.9	5.6	61.4	6.0	199	5.9	187	5.6	6.0	205	6.0	205		5.8	205.56	216	63	228	5.6	5.6	45.2	64.7	212		90.0	6.8	
20	1Hz	20			26	21	3.7	3.5	4.1	3.7	30	3.7	26	3.6	22	3.6	22		3.6	22.32	27	33	21	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	9.1		6.1	5.7
20	1Hz	100			110	97	4.9	4.6	19.6	4.9	100	4.9	90	4.6	9.7	110	5.1	111		10.2	109.40	107	103	4.0	4.0	19.8	20.2	106		90.0	6.8		
20	1Hz	450			459	435	6.4	6.2	87.6	6.4	444	6.3	417	6.2	6.4	479	6.4	478		6.3	449.62	459	71	467	6.2	6.2	91.3	90.0	463		119.0	7.4	
20	3Hz	20			30	20	3.1	3.1	1.3	3.0	18	3.0	17	3.1	3.2	29	3.2	27		3.0	19.31	26	12	28	3.1	3.0	1.9	1.3	27	3.1	5.7	5.8	
20	3Hz	100			110	88	4.5	4.4	6.1	4.4	87	4.4	81	4.4	4.6	115	4.6	105	4.4	73	44	86.45	106	54	108	4.4	4.4	6.3	6.2	106	4.4	11.0	5.8
20	3Hz	500			522	431	5.9	5.8	30.1	5.8	421	5.8	395	5.8	6.2	611	6.1	610	5.8	385	5.8	433.58	515	27	525	5.8	5.8	30.5	30.5	516	5.8	42.3	7.3
11	6Hz	100			111	67	3.9	4.1	3.0	3.8	61	3.8	55	4.1	5.8	605	5.0	246	3.7	53	5.8	62.41	107	2.8	111	4.1	4.0	2.4	2.7	109	4.1	7.9	5.5
12	6Hz	500			519	321	5.3	5.4	14.2	5.2	293	5.2	268	5.4	6.4	1142	5.7	558	5.1	259	5.2	296.55	499	14	519	5.5	5.4	14.8	13.3	508	5.5	24.9	7.2
14	10Hz	100			109	45	3.4	3.6	1.7	3.2	36	3.1	32	3.7	3.1	34	3.0	32	3.0	30	3.3	42.37	100	1.6	104	3.5	3.5	1.6	1.7	104	3.6	7.1	5.8
15	10Hz	500			522	226	4.8	5.0	8.3	4.6	184	4.5	164	5.1	4.1	116	4.3	127	4.4	155	4.6	203.51	490	8.8	494	5.1	5.0	8.8	8.6	513	5.0	28.7	7.2
16	須佐	6.7	60	115	70	54	4.0	4.0	7.7	4.0	53	4.0	49	4.0	4.3	124	4.1	76	3.9	47	4.0	50.40	67	5.9	72	4.0							
17	笠岡	7.3	11	90	113	74	4.0	4.0	7.8	3.9	70	3.9	65	4.0	4.5	175	4.3	157	3.9	63	3.9	71.40	109	6.7	114	4.0	3.9	6.2	8.2	108	4.2	4.0	10.5
18	三沢	8.0	60	263	112	81	4.0	4.1	6.5	3.9	79	3.9	75	4.1	4.8	255	4.5	174	3.9	75	3.9	77.41	116	6.6	116	4.1	4.1	4.4	5.3	110	4.0	4.1	10.5
19	白石	7.1	71	129	91	61	3.9	4.0	7.0	3.9	61	3.9	60	4.0	4.4	174	4.1	128	3.9	59	3.8	61.40	94	5.6	99	4.0	3.9	5.2	6.8	87	4.0	11.0	5.2
20	寒川谷	7.1	71	132	72	57	3.9	3.9	6.8	3.9	57	3.9	54	3.9	4.3	114	4.1	98	3.8	52	3.8	56.39	70	6.1	71	3.9	3.9	5.9	6.8	68	4.0	3.9	11.3
21	仙台	6.2	12	27	128	78	4.0	4.0	5.5	3.9	70	3.9	66	4.0	4.8	256	4.3	145	3.9	66	3.8	65.40	125	5.8	128	4.0	4.0	4.7	5.3	128	4.0	4.0	8.7
22	伊予三重	6.7	60	80	85	57	4.1	4.0	8.7	4.1	53	4.1	50	4.0	4.3	148	4.2	91	4.0	50	4.0	52.40	79	6.9	80	4.0	4.0	6.4	8.6	78	4.1	4.0	12.5
23	大分大野	6.0	60	84	162	133	4.6	4.5	15.0	4.6	129	4.5	123	4.5	5.0	267	4.9	227	4.5	122	4.4	122.45	158	13	161	4.5	4.4	10.2	14.6	160	4.6	4.5	18.7
24	徳山	6.7	60	82	152	120	4.7	4.6	17.7	4.7	125	4.7	121	4.7	4.9	231	4.8	204	4.7	121	4.6	124.47	140	14	144	4.7	4.7	13.9	18.0	142	4.7	4.7	22.6
25	北上	7.1	71	32	177	147	4.6	4.6	17.3	4.6	138	4.6	134	4.6	5.1	420	4.9	275	4.6	158	4.5	151.47	267	16	247	4.6	4.6	15.5	17.1	251	4.7	4.7	23.7
26	川井	7.1	71	86	381	246	4.7	4.7	18.8	4.7	218	4.6	202	4.8	5.0	488	5.2	376	4.6	193	4.6	191.47	376	16	376	4.6	4.6	16.8	18.3	376	4.6	4.6	20.5
27	川井	7.1	71	116	347	182	4.7	4.7	14.6	4.6	165	4.6	157	4.5	5.2	357	5.0	336	4.6	149	4.6	168.48	338	15	350	4.8	4.7	12.9	14.4	355	4.8	4.8	20.5
28	福重	7.1	71	79	195	137	4.7	4.7	15.7	4.6	129	4.6	118	4.7	5.2	382	4.9	288	4.6	115	4.6	124.48	229	14	192	4.7	4.7	13.1	15.4	180	4.7	4.8	19.9
29	仙山沼	7.1	71	107	286	5.0	5.3	21.9	5.0	272	4.9	258	5.3	6.2	1020	6.2	962	4.9	253	4.9	272.63	416	21	401	5.3	5.2	20.3	20.5	398	5.1	5.3	25.0	
30	松江	7.3	11	28	223	175	5.2	5.1	29.3	5.2	175	5.1	167	5.1	5.5	367	5.3	224	5.1	165	5.1	186.51	215	27	222	5.1	5.1	25.8	30.0	224	5.2	5.1	38.6
31	大田原湖	8.0	60	193	157	136	5.2	5.1	30.1	5.2	145	5.2	141	5.1	5.2	172	5.2	160	5.2	141	5.1	148.51	163	23	168	5.1	5.1	20.3	29.8	163	5.1	5.1	44.4
32	梅沢	6.8	13	30	360	302	5.1	5.1	26.2	5.1	290	5.1	272	5.1	5.7	799	5.7	584	5.1	266	5.0	280.51	363	27	360	5.1	5.0	20.3	25.3	363	5.2	31.7	5.5
33	呉	6.7	60	22	347	274	5.2	5.2	23.9	5.2	270	5.2	250	5.2	5.6	561	5.5	546	5.1	244	5.1	267.52	379	18	351	5.2	5.1	20.6	22.4	346	5.1	5.2	30.2
34	伊予	6.7	60	38	260	224	5.2	5.2	36.1	5.2	257	5.2	207	5.3	5.6	455	5.4	348	5.2	205	5.1	220.53	259	25	266	5.3	5.2	26.8	36.6	256	5.3	5.3	48.5
35	因島	6.7	60	48	411	262	5.3	5.3	23.4	5.2	222	5.2	248	5.3	5.6	621	5.4	507	5.2	247	5.1	256.53	387	19	411	5.3	5.2	11.8	22.8	392	5.1	5.3	30.2
36	石巻	7.1	71	55	289	232	5.2	5.3	33.5	5.2	229	5.2	222	5.3	6.0	815	5.9	712	5.2	219	5.1	226.53	294	24	295	5.3	5.3	27.4	32.9	287	5.2	42.2	5.6
37	剣路	8.0	60	84	372	319	5.7	5.6	52.4	5.7	351	5.6	328	5.6	5.9	728	5.8	593	5.6	323	5.6	370.56	401	40	406	5.6	5.6	38.3	51.3	394	5.6	71.4	6.0
38	阿婆	8.0	60	157	399	352	5.7	5.7	52.5	5.7	358	5.7	346	5.7	6.1	935	6.1	877	5.7	344	5.6	359.57	400	43	407	5.7	5.7	33.9	50.8	396	5.6	65.3	6.2
39	江府	7.3	11	8	755	527	5.7	5.8	46.8	5.7	486	5.6	473	5.8	6.4	1742	6.0	776	5.6	471	5.6	489.58	750	38	760	5.8	5.7	34.3	46.1	761	5.7	64.2	6.1
40	山形白石	7.3	18	11	508	429	5.8	5.8	49.7	5.7	426	5.7	416	5.8	6.3	1400	6.1	1108	5.7	414	5.7	417.58	506	45	515	5.8	5.7	43.4	47.4	508	5.6	61.8	5.8
41	広島	8.0	60	98	999	770	5.9	6.1	52.2	5.9	723	5.8	681	6.0	6.7	2046	6.5	1525	5.8	670	5.8	732.61	890	45	992	6.1	6.0	48.1	49.4	978	5.8	61.8	5.8
42	青森黒川	8.0	60	135	429	387	6.0	6.0	84.8	6.0	393	6.0	385	6.0	6.1	447	6.1	455	6.0	381	5.9	397.60	424	90	428	6.0	5.9	59.9	78.3	426	5.9	108.9	6.2
43	社屋	7.1	71	59	1548	1003	6.1	6.2	66.8	6.0	879	6.0	828	6.1	7.0	2476	6.3	1484	6.0	808	5.9	836.62	1482	58	1534	6.2	6.1	65.1	63.0	1514	6.1	76.3	6.5
44	十日町	6.8	13	20	1723	965	6.0	6.1	72.5	6.0	884	6.0	844	6.1	6.9	2851	6.4	1811	6.0	846	5.9	864.62	1645	89	1696	6.2	6.1	75.6	72.6	1681	6.2	87.3	6.1
45	大田原支所	6.8	13	15	913	783	6.0	6.1	69.0	6.1	810	6.0	780	6.2	6.5	1245	6.3	1597	6.0	846	6.0	700.61	907	77	928	6.1	6.0	79.7	76.9	932	6.2	118.0	6.2
46	大田原	8.0	60	131	793	698	6.4	6.3	131.3	6.4	710	6.3	670	6.5	6.7	2046	6.5	1525	6.3	683	6.3	699.63	806	66	806	6.3	6.3	74.3	130.9	803	6.3	175.8	6.3
47	JR鹿沼	7.3	18	11	74																												

(1) 正弦波

X方向のみの正弦波加振で、振動台の能力を勘案して、振幅は、振動数0.5Hzでは、20Gal、100Galおよび200Galとし、振動数1Hzでは、20Gal、100Galおよび450Gal、振動数3Hzでは、20Gal、100Galおよび500Gal、振動数6Hz、10Hzについては100Galおよび500Galとした。以上13ケースの加振波形は次のように規格化されている。すなわち、無振動部30秒＋漸増部15秒＋定常部60秒＋漸減部10秒＋無振動部5秒（合計120秒）。

(2) 強震動

国内の強震記録の中から、リアルタイム震度(RI値、計測震度にほぼ一致)が、4(4.0)、5弱(4.7)、5強(5.2)、6弱(5.7)、6強(6.2)および7(6.5以上)に対応するものをそれぞれ5～6地点、合計35ケースを選定し、三次元加振データとした。強震波形も次のように規格化されている。すなわち、無振動部30秒+強震動部85秒+無振動部5秒(合計120秒)。なお、強震部はP波初動から始まっている。

4. 振動実験の結果と分析

ここでは、実験時に各地震計により表示・記録された最大地震動を中心に議論する。記録波形の詳細な周波数分析結果などは機会を改めて報告したい。表2には各地震計による主な計測結果を示している。記録波形に基づいて実験に参加された先生方により算定された地震動指標値もあるが、表2は、地震後に機器に表示された値を中心に行っている。

4.1 地震計相互の比較

(1) 最大加速度

各地震計で計測された最大加速度と振動台上の基準最大加速度の比を算定して比較した。

図3は正弦波加振の振動数に対する振幅比である。これによると、AcCoの記録特性（LPF10Hz 印）や表示特性（LPF5Hz）が確認できる。またK-NET95やEC、WISE、計測震度計などは高い振動数まで感度があることを示唆している。MEMS（×印）はノイズのためか、安定した特性を示さない。

強震波形加振の場合の振幅比を加振番号順にすべての計測データを示したものが図4である。記録されたすべての地震計について、水平合成最大値、こ

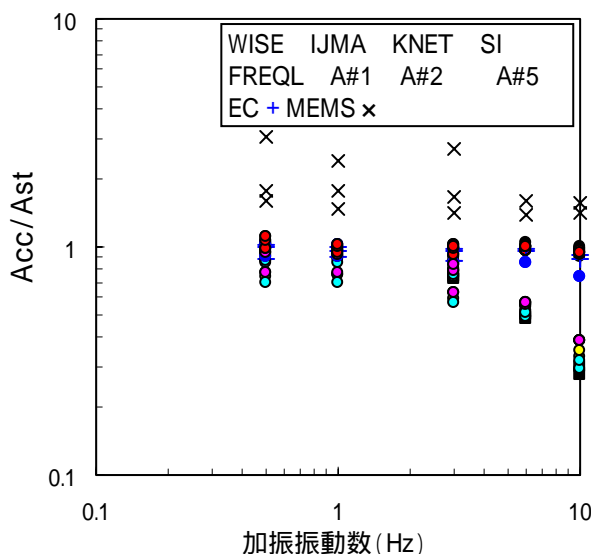


図3 正弦波加振の振幅比、感度曲線

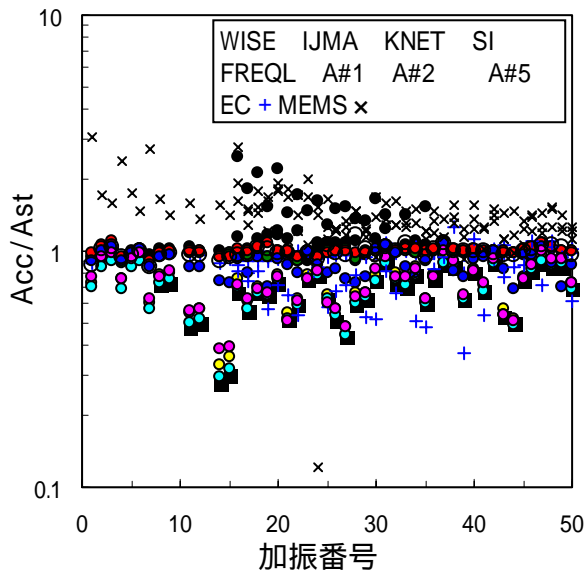


図4 加振実験結果: 振幅比 (全データ)

れがない場合は各方向成分の最大値, を比較した。

これによると, 特に被害との関連性を意識して5Hz以上をカットしたAcCo () やFREQL () による最大加速度 (表示) は, 他に較べてかなり小さな値を示すが, 相互には $\pm 10\%$ 以内で値は一致している。

K-NET95 () は他より高周波成分まで記録されているのか値が大きくなる傾向がある。特に上下動で顕著である。

WISE (), 計測震度計 () およびSIセンサ () による最大加速度は, 互いにほぼ同程度の大きさとなっている。

EC (+ 印) については, 水平成分はSIセンサ等と同程度の値を示すが, 上下成分はかなり小さい値となっている。水平動と上下動の振動数特性が異なり, しかも, 高周波が卓越しやすい上下動が低い振動数域までしか記録できない仕様は理解しにくい。

MEMS (× 印) による加速度は少なくとも50%以上大きな値を与えるような大きなばらつきがあり, 強震観測には向いていないと思われる。

以上, 最大加速度については上限周波数を規定した上でないと, 統一的に議論できないことが改めて確認された。大きな地震が発生すると, 最大加速度の値がよく報道される。しかも, 阪神大震災などの最大値と比較されることも少なくない。JRや東京メトロの警報用加速度であれば統一した規格 (5HzPGA, 1985年国鉄時代に全国統一規格化) なので相互に比較することは可能であるが, それ以外は相互に単純比較することはできない。最大加速度は報道されやすく比較されやすい地震動指標値であるため, 早急に規格化する必要があるものと考えられる。被害との関連性を重視すれば, JRと同様5HzPGAを採用するのも良いのではないだろうか。少なくともJRの発表値との比較ができるようになり, 地点毎の比較や, 過去の地震の比較も可能になる。

もちろん, これはあくまでも地震動指標値として

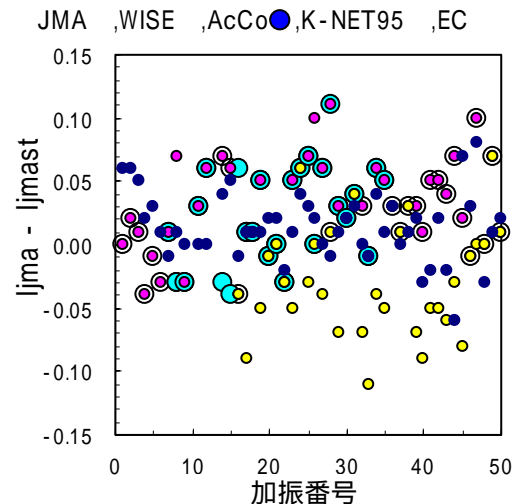


図5 計測 / 算定された計測震度群と基準計測震度の差

の最大加速度のことであり, 波形記録特性には目的によりさまざまなものがあって当然である。

なお, 地震動指標の規格化は最大加速度のみならず, 最大速度などについても望ましいことは言うまでもない。

(2) 計測震度, RI値ほか

RI値は独立した計測量であり, 計測震度の近似値ではないが, 類似の値をリアルタイムで算出するものとして, ほかの近似値 (SIセンサによる近似値: SI値と最大加速度から地震後に計測震度を統計的に推定するもの) とともに, 気象庁方式に則って震度算定する計測震度, WISEおよびECなどと比較した。このほか, K-NET95, AcCoおよびMEMSによる記録波形から算出した計測震度とも比較した。AcCo記録波形は水平方向のデータしかないが, これだけで計測震度を算定してみた。比較はすべて振動台上で計測された規準波形から規準計測震度を算定して, それとの差で比較した。図5は計測震度計, WISEおよびECによる計測結果ならびにK-NET95およびAcCo#2の記録波形から気象庁方式により計測震度を算定した結果を示した。これによると, いずれの結果も規準計測震度と ± 0.1 の誤差範囲で一致している。AcCoには上下動の記録がないにもかかわらず, 正式の計測震度計による計測結果と遜色ない算定結果が得られている。

次に, 強震動加振の場合のRI値と計測震度を比較する。これらは定義が異なるので, 本質的にばらつきは大きくなると予想されるが, 実際には, 図6にみられるように, ほとんど0.1以内の誤差で一致する。気仙沼波形でのみ0.4近くの大きな相違が生じている。これはやや深い地震の震央付近に位置しており, 地盤も良いために高周波成分が卓越したため, RI値が計測震度よりも小さな値になったものと推測される。正弦波振動実験によれば, 図7に示すように, 計測震度とRI値は3Hzでほぼ一致し, 3Hzより低い振動数ではRI値が大きく, また, 3Hzより高い

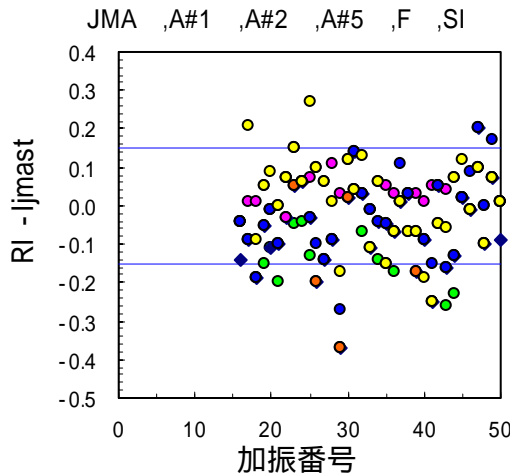


図6 強震加振時のRI値と基準計測震度の差

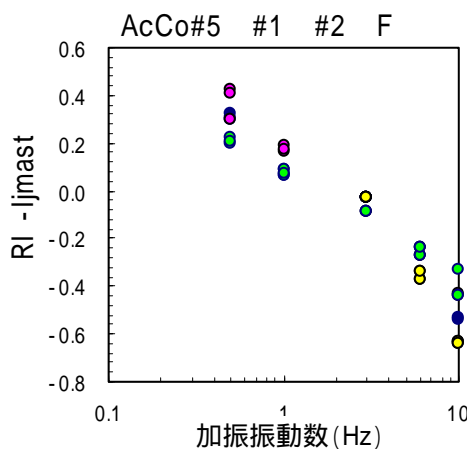


図7 正弦波加振の時のRI値と基準計測震度の差

振動数が卓越する場合には計測震度の方が大きくなる。被害は3Hz以下の振動数成分の寄与が大きいと考えられており、この帯域でRI値が大きくなるのは合理的といえる。図6には統計式（Karim・山崎2001）に基づいて推定したSIセンサの計測震度（●）も示しているが、ばらつきはやや大きいものの実用上差し支えるほどのものではない。

以上、振動実験の結果、地震動のパワーに基づいてリアルタイムに計測したRI値は気象庁方式による計測震度と概ね同じ値であり、統計式による計測震度推定値も実用上問題ないレベルであることが確認された。

このように、震度関係の指標値は、最大加速度と異なり、各所で算定されたものを同じように議論できることが確認された。ただし、SIセンサによる計測震度の統計的推定手法は、SI値と最大加速度に基づいており、使用する最大加速度の上限周波数を規定しておかないと、最大で0.2程度の相違が生じる可能性がある。

なお、MEMSの1/50秒サンプル波形から算定された計測震度は規準計測震度と大きく異なる。加速度が大きくばらついているためと思われるが、強震観測用としての実用は難しいと判断せざるを得ない。

(3) 計測震度の検定について

ここで計測震度の検定制度について付言する。現在の計測震度は、1996年（平成8年）の気象庁告示第4号で計測方法が規定されている。実際の検定要領は、以下のようになっている。すなわち、10秒毎に継続時間規定をはずした計測震度を算定し、地震トリガーを超えた10秒区間を含む1分間の地震波形を対象に告示で規定された算定方式により計測震度を算定する。この計測震度を検定対象とし、具体的には、正弦波振動に対する算定結果が規準計測震度計による値と ± 0.1 以内の誤差で一致していることをもって検定合格としている。

告示よりもさらに限定された算定方法が対象になっている。しかも、この検定方法では告示に示された条件で算出されているかどうかはチェックできない。正弦波では継続時間の規定は事実上無効となり震度算定の基礎となる最大加速度はほぼ入力した最大振幅そのままとなるからである。つまり、せっかく導入した継続時間の規定をチェックできないのである。これでは検定に合格しても、実際の地震動では大きく値が異なる事例が生じる可能性がある。

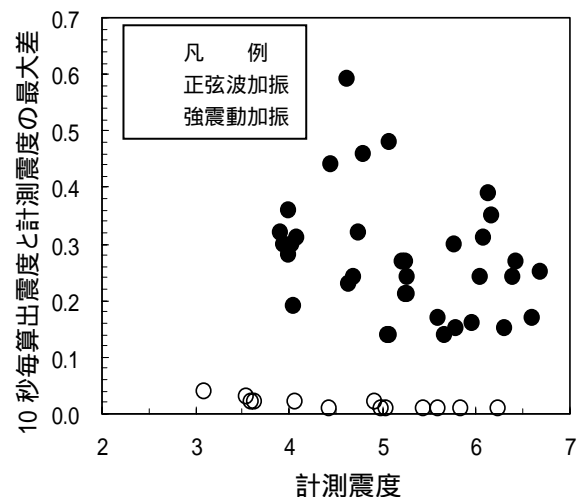


図8 10秒毎に算出される震度と地震終了後に算出される計測震度の差の最大値

図8は、振動台試験で得られた規準加速度波形を用いて、10秒毎に算定される震度と地震終了後に算出される計測震度の関係を示したものである。これによると、正弦波では10秒震度と計測震度はほとんど変わらないが、強震動の場合には、大きく変わることがわかる。この変化は継続時間を考慮することによる効果である。しかし、正弦波の場合には継続時間の効果がほとんど見られないので、継続時間が正しく設定されているか否かをチェックできない。

さらに実際の検定では、水平2方向および上下方向の3方向成分の測定が必要となる。しかし、AcCoの記録は水平2成分しかない。にもかかわらず、前節（図6）でみたように、少なくとも試験した範囲では検定された計測震度計などと遜色ない精度で計測震度を算出することができる。震度算定のために

3成分計測を指定する必要はないものとする。

気象庁が監修した「震度を知る」(1997)という本には計測震度を算定するソフトが例示・公開されている。したがって、改めて検定などしなくても、10Hzまでの加速度が正しく計測されていれば、計測震度は正しく算定することができるのではないかと。

計測震度はもともと所定のフィルタリング処理がされた最大加速度と継続時間をもとに算定されるものであるが、所定のフィルタリング処理をしない最大加速度やSI値から統計的な手法によって実用的に算定することができる(Karim・山崎2001)。

一方、リアルタイム震度は計測震度と算定方法が全く異なるが、地震動のパワーを計測するもので計測震度とは異なり物理的に明確な意味を持っている(中村2003)。これは、リアルタイムに算定できるのみならず、その最大値は計測震度にほぼ一致するように調整されている。つまり、計測震度相当値を算出する手法はいくつか提案されており、これらの値相互で大きな相違はないことが確認された。

こうした事情に鑑みれば、現在の気象庁検定は事実上特定の算定アルゴリズムのみを対象としており公正とはいえない。しかし、無条件で検定済み計測震度計でなければ導入しない組織も少なくなく、計測震度計以外は事実上閉め出されることがある。こうした障壁が、低価格の強震計の普及を阻み、自由な競争を阻んでいる。

すべての地震計が厳密な検定で精度保証されなければならないわけではなく、温度や湿度のように地震も目的に応じて手軽に計測できるようにすべきではないだろうか。しかも検定そのものが算定方法を正しくチェックできないものでは意味が無く、今後、気象庁検定制度の大幅な見直しを視野に入れた議論が望まれる。もちろん、震度と称する値が相互に比較できることを確認する方法を用意しておく必要があることは言うまでもない。

4.2 地震計設置方法による計測地震動の相違

ここでは地震計の設置方法や構造物上の地震動について検討する。

地震計は設置に留意しないと、地震計を中心にした局所的な振動が生じ、これに影響されて信頼性の高い計測ができないことがある。往年の地震計に較べると、最近の普及型地震計は小型軽量でこうした配慮はほとんど必要なくなったとはいえ、一定の配慮は必要である。

そこで、以下のようにいくつかの設置方法を試してみた。

カラーボックスの開口部にぴったり一致する合板一枚を挿入して補強した地震計台の上にシリコンゴムだけでAcCoを固定したもの(AcCo#1)。

合板を組み合わせてかなり剛な箱を作成して地震計台とし専用アルミ板でAcCoを固定したもの(AcCo#2)。

あらゆる方向に揺れやすくするため2つのカラーボックスの向きを変えて二段重ねした上部カラーボックスの下部コナをL字金具で補強して振動台上のビデオ設置台として併せて専用アルミ板でAcCoを固定したもの(AcCo#3)。

この下部カラーボックスの上にも専用アルミ板でAcCoを固定したもの(AcCo#4)。

千葉大の山崎文雄先生が持参したAcCoをシリコンゴムで振動台上の合板に直接設置した(AcCo#5)。なお、この合板上には、FREQLが専用アルミ板でしっかり固定されている。

これらの状況は写真1と写真3に示すとおりである。なお、前節で検討したSIセンサやECは、振動台上のMDF合板(厚さ18mm)にしっかりとネジ止めされている。

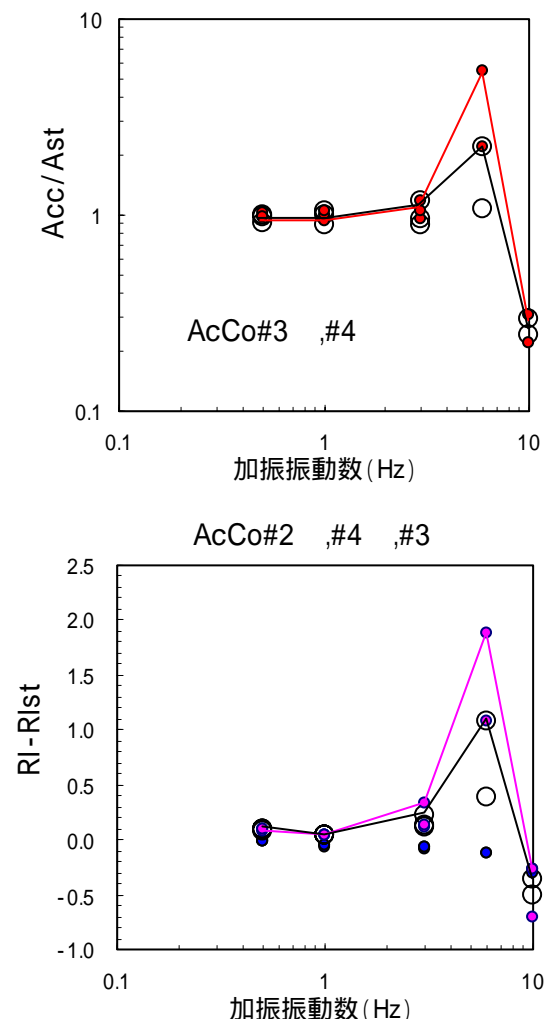


図9 カラーボックスの共振曲線

二段重ねしたカラーボックスは正弦波振動試験の結果、図9に示すように、概ね6Hzで共振することが確認された。そこで、その挙動をRC建家2階～3階に相当する振動系の共振現象をわかりやすく提示するモデルとしても利用することとした。なお、入力加速度の大きさの違いにより、ピーク位置での増幅度に違いが認められるが、これは非線形性によ

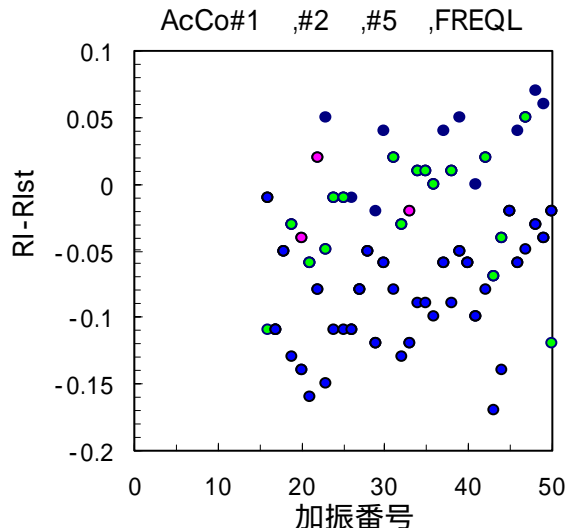


図10 強震動加振時の RI 値測定偏差

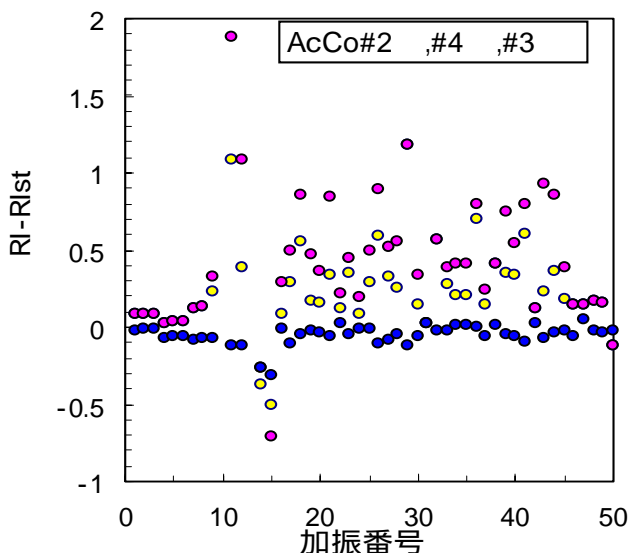


図11 二段重ねカラーボックスのRI値応答差

り入力を5倍にしても応答は2倍程度（震度差でいえば1程度）にしかならなかったことを示している。

AcCo#1, AcCo#2, AcCo#5およびFREQLは、いずれもRI値と5HzPGAを計測表示する。実験終了時に記録した値をみると、多少の相違はあるものの、図10のように、いずれも同一とみなせる値を示しており、AcCoの場合には、ここに示したような設置方法で十分であることが確認された。

二段重ねカラーボックスの加振応答結果は図11に示すとおりである。広尾波形、牡鹿波形および十日町波形に対して、強烈な共振状態を示し、カラーボックスがかなり損傷した。これらの加振の後、カラーボックスを補強したが、接合する板のネジを締め付けたり増やしたりするよりも、下部コーナーをL字金具で補強する方が補強効果は大きかった。これにより、震度7に対する地震動に対しても最後まで崩壊することなく耐え抜いた。これは実構造物ではブレースなどでせん断変形を拘束することにより耐震性を飛躍的に高めることに相当するものである。

これらの振動台実験により共振現象の恐ろしさを改めて認識させられた。地震の継続時間は地震規模に関係するので、強烈な振動で共振現象が出現しても、地震規模が小さいとすぐに震動は収束して、崩壊に到らないことがある。

巨大地震の場合、継続時間は長い、概ね長周期が卓越するので、大きく揺られるが、短周期構造物の破壊には到らないことが多いと思われる。ところが、表層地盤の影響で短周期が卓越する地域では、長い継続時間と地域で発達した短周期震動が相俟って、非常に厳しい共振現象が現出することがわかった。二段重ねカラーボックスが広尾波形に共振したのはこの理由と推測される。したがって、同じ地震であっても場所による相違が大きく、同じ2003年十勝沖地震（M8.0）の豊頃波形では二段重ねカラーボックスは全く共振せず、台と一緒に大きく動くだけで、ほとんど損傷しなかった。

4.3 見た目震度の可能性

地震動を波形だけで理解するのではなく、実際の動きとして把握したい。そこで、この実験では振動台の動きや、カラーボックスの動き、振動台上からみた動きなどをビデオに記録した。こうしたデータから人間の五感ではなく、視覚だけで震度の大きさを判断できないものかどうか検討した。

見目で震度が的確に判断できれば、地震の後、テレビ放送などを通じて震度毎にモデル的な地震動を放映することにより、各人が見た地震動を正確に震度に置き換えることができる。従来のアンケート震度よりもすばやく正確で稠密な震度分布を把握することが可能になる。そこで、振動台実験においてその可能性を検討した。

振動台を台の外から撮影したビデオ映像をみると、見た目の地震動の大きさと計測される震度は概ね相関があるように見える。しかし、振動台上に設置したビデオ映像は、設置台の震動特性に左右され、やビデオ設置台を撮影したビデオ映像とはかなり様相が異なる。設置台の地震応答により設置されたビデオの視点が動き、視線が動く。このため、映像には見かけの揺れも含まれる。映像には、カラーボックスの水平振動共振に随伴して生じた上下動がかなり卓越して現れていることがわかる。随伴する上下振動は水平振動の2倍の振動数になると思われる。しかしこの上下振動は、外から見た映像ではそれほど大きいようには見えない。

高さHの建物の先端が δ_h だけ変位した場合に随伴する上下動変位 δ_v は次のように見積もられる。この時の層変形角を θ とすれば、 $\theta = \delta_h/H$ となる。この時、 $\delta_v = H^2/2 = \delta_h \times H/2$ となる。これは全振幅であり、上下動振幅はこの半分となり、その周波数は水平動の2倍になるから、随伴上下動加速度 $\ddot{\delta}_v$ は結局、 $\ddot{\delta}_v = \ddot{\delta}_h \times H$ となる。したがって、同じ層変形角が生じるとすれば、二段重ねカラーボックスの挙動は実際の建物と同じとなる。つまり、実際にも、強烈な随伴上下動が生じることが推測さ

れる。

見た目震度を検討する場合、震動をみる視点が重要になる。振動台試験の場合、一般には視点は振動台の外にあり、現実にはあり得ない視点である。振動台上にビデオを載せた映像も地震に遭遇した人が実際に見る地震動とはかなり異なるであろうことが推測される。結局、地震時には五感を働かせて地震動を感じ取るわけであり、見た目だけから震度を推し量ることは難しいと判断せざるを得ない。

振動台の外から見た強震動ではあるが、被害が生じるような震度6弱より大きな地震動は見た目にも強烈で、それ以下の震度の地震動とはかなり様相が異なる。こうしたことは、強震波形からはなかなか実感として把握することができない。振動台などで強烈な地震動をあらかじめ経験しておけば、実際に遭遇しても、落ち着いて対処できるようになると期待される。見た目で震度を判断することはできないかもしれないが、被害がでるような地域では強烈な地震動となっていることを、映像で確認しておくだけでも防災上有益なのではないだろうか。

4.4 オンサイト警報として地震計を利用する可能性

今回の実験では、振動台の調整を十分に行う時間をとることができなかった。このため、地震が始まる前に振動台がゆらゆらと揺れているようなケースも少なくない。このような状況の中でも、AcCoによる5HzPGA10Gal警報やリアルタイム震度2警報は、概ね地震発生と同時にあった。これらの警報レベルは、日本の地震活動度では、年に1, 2回程度の過剰警報になるが、ほぼ確実にP波部分で警報を出すことができるものと期待される。もちろん大きな地震の後では小さな余震が数多く発生するので、このままでは実用的ではなく、P波の識別が不可欠となる。しかし、このままでも少なくとも最初の大きな被害地震には有効であり、一般家庭や事務所では、避難行動や防災行動のきっかけを与える地震動として良いのではないかと思う。

それでは、警報から大きな揺れが始まる直前まで、どれくらいの先行時間が稼げるのであろうか。地震の到来は細かな震動で始まる。AcCoのリアルタイム震度と加速度が認識できる画面では、数字の動き始めて地震到来を知ることができる。

震度6弱以上の再現強震動に対して、映像より見積もったオンサイト警報から大きな揺れが始まる直前までの先行時間は、M8クラスの巨大地震の震源から150km程度離れた地点では、20秒程度となることがわかる。M7クラスになると被害域は半径50km程度となるが、この領域で震度6弱以上となることが予想される。再現強震動の映像によると、先行時間はせいぜい4秒～5秒しかない。この場合はオンサイトといっても震央付近であるから、これより速い前線警報は考えられない。

これに対して、緊急地震速報は大きく揺れた後に通報されると推測されるので意味がない。海域に発生した地震に対しては検知するまでに時間がかかる

ので、震源から離れていても緊急地震速報のような前線検知方式で先行時間を稼ぐことは難しくなる。

海岸から50km沖合で地震が発生したとすれば、検知点のPS時間(6秒)に検知点から警報対象地点(震源から150km)までの主要動伝播時間(25秒)を加えたものから警報処理時間(緊急地震速報の場合、気象庁によれば平均5.4秒)と情報伝達時間(概ね2秒)を差し引いた24秒程度が前線警報方式の先行時間となる。

これに対して、オンサイト警報では、警報対象地点のPS時間(20秒)から警報処理時間(最短0.2秒、ここでは1秒とする)を差し引いた19秒が先行時間となる。もし震源から100kmの地点でしか検知出来なかった場合、緊急地震速報による先行時間はPS時間(12秒)+主要動伝播時間12秒-警報処理・情報伝達時間(7.4秒)=17秒弱と推測され、オンサイト警報による先行時間を下回る。

いずれにしても、M8の地震の震源から離れた被害地域におけるオンサイト警報でも、実際には緊急地震警報と遜色ない先行時間を稼げることがわかる。緊急地震速報には情報伝達経路のどこかに異常が生じれば、情報不達となるリスクがある。また、M7クラスの地震に対しては、緊急地震速報は全く無力でオンサイト警報しかあり得ない。

自動的に動作する機械やシステムに対するオンサイト警報は役立つ可能性が高いが、人間に対しては、オンサイト警報で稼げる先行時間で何をするか、何をすれば防災効果があがるか、などは今後の課題として残されている。

ただ、危険な状態で救出活動しているレスキュー隊員に対するオンサイト警報は、訓練されているので数秒という時間であっても有効(東京消防庁ハイパーレスキュー隊)とのことである。2005年、東京消防庁の意見を取り入れながら、P波を検知して最短0.2秒でオンサイト警報を発する消防庁仕様の可搬型FREQLが開発され、レスキュー活動支援用として普及し始めている。

5. おわりに

今回実施した振動台実験は非常に原始的なものである。しかし、共振現象と地震動の継続時間は、地盤や構造物の固有振動数とともに地震防災上非常に重要な要素であることを再認識させるに十分であった。

地震動の周波数特性は、地震規模と観測地点の特性に左右される。地震動の継続時間はほぼ地震規模に関係する。地震そのものの揺れ特性は、地震規模と卓越振動数ならびに継続時間の特性からある程度把握できるので、地震の統計的性質として周知しておくのがよいのではないかと思う。

一方、地盤や構造物の共振特性(卓越振動数、増幅倍率など)は事前に詳細に調査することが可能で、その結果によっては適切な補強対策なども行える。構造物は経年劣化するものであるから定期的に地震

動特性を調査するような習慣ができないものかと思う。これと呼応するように効果的な補強工法の開発普及が進めば、社会の地震防災強度は飛躍的に高まり、大きな地震であってもほとんど災害は発生せず、多くの人は突然の大きな揺れを楽しむという時代が到来するのではと夢想している。夢のまた夢かもしれないが。

これまで、沖積地盤、埋め立て地、河川敷など地盤が軟弱なところで、地震動が大きくなったり、地盤災害が発生していることを確認するために、直接的、間接的を問わず様々な手法を駆使して地震動分布を推定し、わかりやすいカラフルな図にしている。これは、地域の状況を把握し、今後の地震被害を適切に見積もる際の基礎資料となるなど、防災計画には欠かせない資料であり、啓蒙にも有効であると思う。

しかし、これからの強震計は、こうした詳細な地震動分布図を描くことのためにあるのではない。地震被害は特異点で生じる。特異点は、自然環境や経年劣化によって変わり得るし、外力の特性によっても変わり得る。時間や場所により変わる特異点を間接データの積み重ねだけで推定することは困難である。直接計測して特異点を見出すしかない。

強震計はこうした特異点を見出すための装置である。大きな災害をもたらす地震の前にいくつもの中小地震が発生する。こうした地震の記録を集積していけば、どのような地震に対して被災するか事前に判断して対策を施すこともできるし、適切な警報にも繋がる。もちろん、このためには地震計を進化させ、さまざまな自律的機能を備えさせることが必要となろう。いまや、個々の強震計を、数多くの観測点のひとつではなく、構造物や地盤の安全を監視し適切な警報を発する重要な防災装置として機能させることをめざすべきであろうと考える。

日本では、いつどこで地震が発生しても不思議ではない。しかし、被災するのはごく一部である。そのため、被災地の直近での地震動記録を取得しようとすれば、天文学的な数量の地震計が必要となる。地震研究の道具として使うだけの地震計を現在以上に大量に設置することは不可能であろう。

市民に役立つ何らかの機能（もちろん地震防災に関連するものであることが望ましい）を地震計に付加して、一般市民が自分のために進んで地震計を設置するようになれば、いつどこで地震による被害が発生しても、被害をもたらした地震動の克明な記録が残るようになるものと期待される。のみならず、普及型地震計と密接に結びついた地震対応マニュアルが整備されれば、地震災害を減少させることも夢ではない。こうしたことを念頭におきながら、今後の地震防災のための研究開発を進めていきたい。

謝辞: 本実験は寒地土木研究所と東急建設株式会社のご協力を得て実現することができました、記して謝意を表します。地震計を持ち寄り、振動台実験に参加して下さった、東北工業大学の神山 眞先生、東洋大学の鈴木崇伸先生、千葉大学の山崎文雄先生、京都大学の清野純史先生、寒地土木研究所の佐藤京様、長時間に亘って実験を見守って下さった、東京理科大学の森地重暉先生、弘前大学の片岡俊一先生に感謝します。また、振動台実験を強力に推進していただいた東急建設の川久保政茂様、豊島 学様をはじめ、実験を支援して下さった関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 中村 豊: 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.4.
- 2) 中村 豊, 滝沢太郎, 富田健司, 齋田 淳, 西永雅行: 常時微動による地盤変状予測の試み, 鉄道総研報告, Vol.7, No.10, pp.63-72, 1993.12.
- 3) Kazi Reza Karim, 山崎文雄: 計測震度と地震動強度指標との関係, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集1A, 2001, pp. 48-49.
- 4) 中村 豊: 合理的な地震動強度指標値の検討 - DI値を中心にした地震動指標値間の関係 -, 第27回地震工学研究発表会講演概要集, 2003.12.
- 5) 気象庁監修: 震度を知る - 基礎知識とその活用 -, (株)ぎょうせい発行, 1997年2月.

(2007年3月16日)