

高層建築物の耐震設計用入力地震動について

Reserch on Design Earthquake Ground Motions for High-Rise Buildings

長谷部 廣行*
Hiroyuki Hasebe

要 約

現在高層建築物の耐震計算（応答計算）には、実地震動の加速度記録が適宜スケールリング（基準化）された上で、建物モデルへの入力として使用される。このスケールリングは、加速度の最大値又は速度の最大値で行うなどの方法があるが、高層建築物と一般に呼ばれるような長周期の建物においてはどちらが良いか、その検討を試みた。その結果、一次固有周期が1.5秒程度以上の建物にあっては、速度成分の最大値で地震動の強さ（大きさ）を評価する方が、応答計算結果に地震動固有の特性による影響が少ないことがわかった。また、加速度より速度の最大値を評価する簡便な方法の一つに振り子法と呼ばれるものがあるが、この方法を使用する場合、振り子の固有周期は10～15秒程度の振り子を使用することが、適正な速度値の評価には適していると判断された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 設計用入力地震動
- § 3. 入力地震動の基準化
- § 4. 加速度、速度基準化による応答結果
- § 5. 振り子法による速度値の評価
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

高層建築物の耐震設計にあたっては、建物の建てられる敷地地盤の状態や、構造物の形状諸特性等を十分に考慮し、入力となる地震動の最大振幅、継続時間、スペクトル特性を十分に把握したうえで構造解析を行うことが重要である。具体的には、対象となる敷地地盤において、将来に経験すると思われる地震動の諸特性を想定しなければならないが、震源の位置、震源規模の大きさ（マグニチュード）、発震構造、震源から敷地までの伝播径路、地震動の大きさ（震度）などを考慮した場合、現在の工学的レベルでは、多分に統計的・確率的手法に頼らざる

を得ない。

そこで設計者は、対象とする敷地地盤に適切と思われる数波の実地震動（希少な過去の地震記録）を選定し、適宜スケールリングして応答解析を行うことになる。応答解析においては、これらの入力地震動は、加速度の最大値か又は速度の最大値でスケールリングして使用されるが、この基準化の方法によっては、入力となる地震動を過大又は過少評価する結果となり、確率的に建築物の安全性を評価する上において、より一層信頼性の低い応答解析結果となる。しかし、地震動を基準化するには、その手法も規格化されておらず、従って応答計算結果もそれぞれの基準化方法（加速度か速度か）によって、かなりの差が生じてくるのが実状である。¹⁾²⁾

入力地震動は一般に加速度で与えられるため、加速度の最大値で基準化する場合には、そのままある定数（目標最大値／もとの地震動の最大値）を乗ずればよく問題はないが、速度で基準化する場合には、加速度波を一度積分してから最大値を評価しなければならない。

加速度データの地震動から速度値を評価する方法には、線形加速度法に代表される直接積分法、Trifunac³⁾などの方法がある。線形加速度法などは初期値を0と仮定し

*技術研究部原子力室係長

て計算するため、データによっては発散する場合もあり、また、Trifunacの方法では繰り返し計算などを行わなければならない、解析にやや手間がかかるといった問題が残る。

そこで本論においては、これらの入力地震動の最大値の評価方法によって、応答計算結果にどの程度の影響を与えるか、応答解析を行うにあたって入力地震動を評価するには、加速度、速度、変位（試みに行う）のいずれを用いるべきか、またこれらの最大値を評価するのに、最近では長周期の振り子の応答速度から最大速度値を評価する簡易法がよく使われるようになったが、この振り子の適切な周期はどの程度がよいかなどの検討を試みた。

§ 2 . 設計用入力地震動

高層建築物の耐震設計を行う場合、数種類の強震記録をコンピュータにインプットし、モデル化された建物の時刻歴応答を計算して行く。ここで使用される強震記録とは、主にTable 1にあるようなもので、これらは昭和41年～57年の間に日本建築センターで評定認可された高層建築物（煙突、タワー等を除く352棟）の耐震設計に使用された地震波の内、使用頻度の高い地震波を列記したものである。この表から、耐震設計に使用される強震記録は、ほとんどのケースで同じような数種類の地震動を使用しており、これらは耐震設計の標準入力地震動とし

て、波形の最大加速度または最大速度振幅が一定値となるように基準化している。

この波形を基準化するには、最大加速度か最大速度か種々議論の別れるところであるが、昭和41年以降の評定認可建築物では、Fig.1にあるような割合で地震動を基準化して使用している。日本建築センターの評定建築物の中で使用される強震記録を、速度で基準化するようになったのは昭和49年からであるが、これ以降の件数を見ると速度基準化は30%以上あり、近年になってその割合は大きくなる傾向にある。

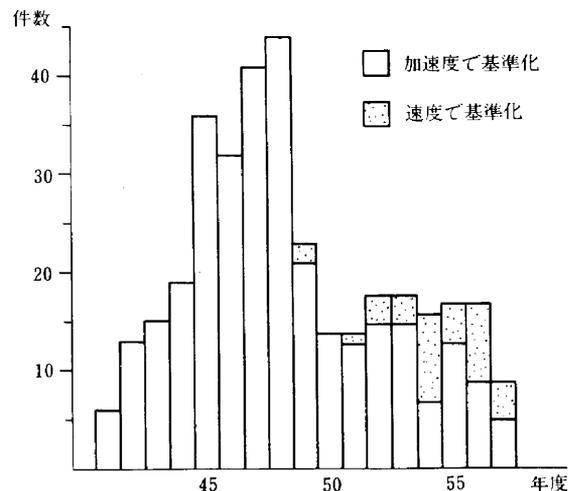


Fig.1 基準化方法別評定件数

Table 1 地震波の使用頻度

Earthquake		n	100	200	300
EL CENTRO	1940 NS	329	#####	#####	#####
TAFT	1952 EW	301	#####	#####	#####
TOKYO-101	1956 NS	174	#####	#####	#####
SENDAI-501	1962 NS	70	#####	#####	#####
TAFT	1952 NS	58	#####	#####	#####
OSAKA-205	1963 EW	47	#####	#####	#####
EL CENTRO	1940 EW	40	####	####	####
HACHINOHE	1968 NS	28	###	###	###
ARTIFICIAL EARTHQUAKE		14	#	#	#
AKASI-804	1963 EW	12	#	#	#
HACHINOHE	1968 EW	11	#	#	#
OSAKA-206	1963 NS	10	#	#	#
NAGOYA-306	1963 NS	10	#	#	#
SENDAI TH030-1	1978 EW	8	#	#	#
TOKYO-141	1968 NS	6	#	#	#
TOKYO-141	1968 EW	6	#	#	#
OSAKA-201	1963 NS	6	#	#	#
TOKYO-120	1968 NS	5	#	#	#
TOKYO-132	1968 EW	5	#	#	#
TOKACHI OKI	1968 NS	5	#	#	#

§ 3. 入力地震動の基準化

入力となる地震動はある一定のレベルに基準化してから使用し、建物の応答量の変化を観察しなければならない。ここで言う一定のレベルとは地震動の強さについてであり、地震動の強さには、最大加速度、最大速度、最大変位、およびスペクトル強度⁴⁾等が考えられる。しかし建物の強度を検証するには、これらにも一長一短があり一義的に定められない。

最大加速度振幅についてみた場合、瞬間的に大きな値を記録するような（パコイマダムの例では1055galを記録したがダムへの影響は少なかった）場合があり、これらは入力しても建物の応答にはほとんど影響することはなく、耐震工学の面から見た地震動の強さを表わす尺度としては適切とは言えない。

地震動の速度振幅については、これは加速度成分を一度積分したものであるため前述のような瞬間的に大きな値を記録することもない。また、地震動を建物への入力振動エネルギーと考えると、エネルギー E は

$$E = mV^2/2$$

で表わされる。従って便宜的に最大速度振幅で地震動の速さを表わすことは妥当といえよう（ただし適用範囲は地震動の周波数範囲である数ヘルツ～数十ヘルツ）また、現実に最近の耐震工学においても、地震動の強さを最大速度値によって評価する傾向にある。

次に基準化のレベルに関しては、一般には2種類の値を用いている。1つは弾性設計用のレベルであり、これは数年に一度は受ける可能性のある地震動の強さを想定したもので、建物はこの地震動によって損傷は受けないように設計される（弾性範囲内の応答解析）。もう1つは、まれに起こるような大地震の強さを表わすレベルで、この地震に対しては構造物は損傷を受けても崩壊しないように設計しなければならない（塑性域の応答解析）。

これら2つのレベルの地震動を用いて建物の時刻歴応答解析は行われるが、弾性解析・弾塑性解析では、一般にはTable 2の値に最大値を基準化して解析を行っている。

Table 2 応答解析用地震波の基準化レベル
(gal = cm/sec², kine = cm/sec)

	弾性解析用	弾塑性解析用
主に関東地方	250gal (25kine)	400gal (40kine)
関西地方	200gal (20kine)	350gal (35kine)

()内は速度基準化の場合

§ 4. 加速度、速度基準化による応答結果

加速度または速度の基準化による時刻歴応答解析結果が、各地震動の種類によってどの程度変化してくるのかを検討してみた。

実施設計された14階から35階までの、19棟の高層建物

Table 3 建物概要

基準化方法	建物No.	階数	軒高 m	基準階		固有周期			
				階高 m	面積 m ²	1次		2次	
						X	Y	X	Y
速度	1	14	56.70	3.90	799.0	0.97	0.91	0.25	0.26
	2	15	51.15	3.35	1629.3	1.07	1.10	0.38	0.38
	3	18	72.86	3.75	2132.0	1.89	1.89	0.64	0.64
	4	19	85.00	3.88	1542.8	1.94	1.97	0.62	0.61
	5	20	81.00	3.87	1219.0	2.14	2.12	0.60	0.61
	6	22	90.15	3.75	3314.9	2.16	2.28	0.76	0.76
	7	26	97.34	3.65	1407.4	2.37	2.31	0.79	0.76
	8	30	121.50	3.65	4458.0	2.46	2.60	0.90	0.98
	9	35	132.05	3.30	999.8	3.00	2.80	0.98	0.83
加速度	10	14	50.70	3.50	366.8	1.70	1.87	0.59	0.62
	11	15	61.52	3.80	2248.4	1.47	1.45	0.53	0.52
	12	16	63.80	3.50	908.5	1.98	2.01	0.68	0.69
	13	18	48.80	2.65	341.1	0.81	0.95	0.28	0.32
	14	20	81.64	3.10	923.6	2.01	1.86	0.69	0.64
	15	21	75.82	3.10	1095.6	1.22	1.32	0.36	0.36
	16	23	60.76	2.59	634.5	1.58	1.52	0.53	0.29
	17	25	71.37	2.83	825.9	1.29	1.29	0.47	0.43
	18	26	96.00	3.60	1490.0	2.61	2.67	0.88	0.89
	19	32	151.20	4.00	2916.0	4.30	4.34	1.53	1.55

の応答値の変動について調査を行った。内訳は加速度で入力地震動を基準化したもの10棟と、速度で基準化したもの9棟の計19棟であるが、これらの建物概要をTable 3に示す。

調査の結果をFig.2, 3に示すが、Fig. 2は最大弾性応答層間変形角について、Fig.3は最大弾性応答層せん断力について調査したものである。これらの図は横軸に各建物の一次固有周期、縦軸に応答量のバラツキを表わす一指標として、応答量の標準偏差を平均値で割った値、すなわち変動係数で表わしてある。これらの図によると、最大速度で基準化したほうが、最大加速度で基準化したものに比べ、最大弾性応答値の変動が少なくなっている。

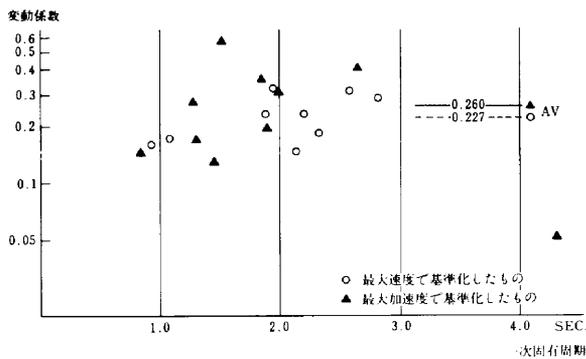


Fig.2 最大弾性応答層間変形角の変動

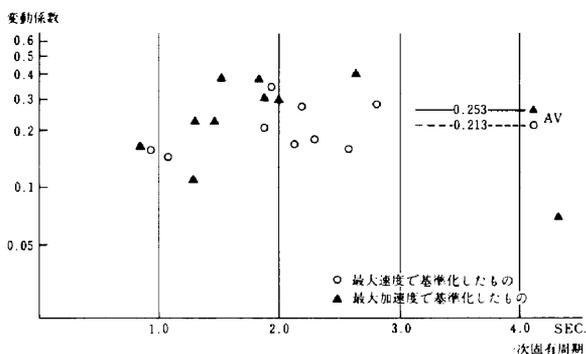


Fig.3 最大弾性応答層せん断力の変動

しかし、これはサンプル数が少ないこと、特定の設計者によるサンプルであること、最大速度、最大加速度による基準化の比較をする際の建物モデルが異なっていること、及び設計段階においては多くの地震動を用いて応答計算を行っていても、設計図書を作成する段階では、そのうちいくつかの代表的な地震動による応答値のみをとりあげ、それらと応答値の差の大きな地震動については資料に掲げない場合があることなどから、このデータのみで結果を断定することは必ずしも適切ではない。

そこで次に、一定の特性を持ったモデルを作り、これ

に加速度と速度で基準化した種々の地震動を入力して応答解析を行い、再度検討をしてみた。

Fig.4は、昭和57年までに評定認可を受けた高層建築物の高さと一次固有周期をプロットしたものである。図中の式は、これらのデータから高さとの関係を回帰したもので、これを参考に一次固有周期がそれぞれ1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0秒の七つの多質点せん断型振動モデルを作成した。

このモデルに対して、Table 1の中から使用頻度の高いものとそれらの上下動成分をも含めて(計15波)、最大加速度、最大速度が一定となるように基準化し、基準化方法ごとの最大弾性応答値の変動を計算してみた。結果をFig.5からFig.10に示す。これによると、建物の一次固有周期が1.5ないし2.0秒以上のものにあつては、最大速度によって地震波を基準化するほうが、最大弾性応答値の変動は少ないことがわかる。なおこの検討では、Trifunacの方法により最大速度値及び最大変位値を計算して基準化を行った。

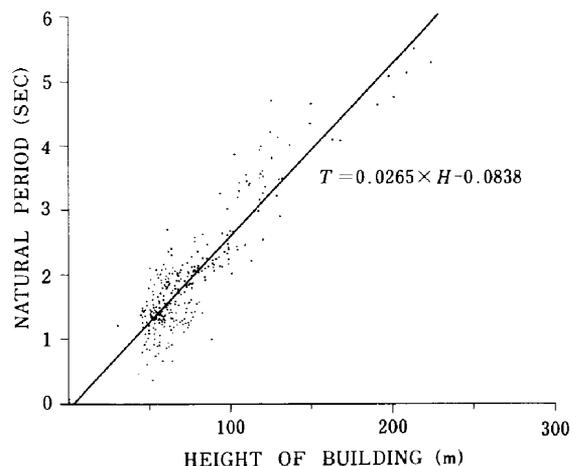


Fig.4 建物高さと1次固有周期

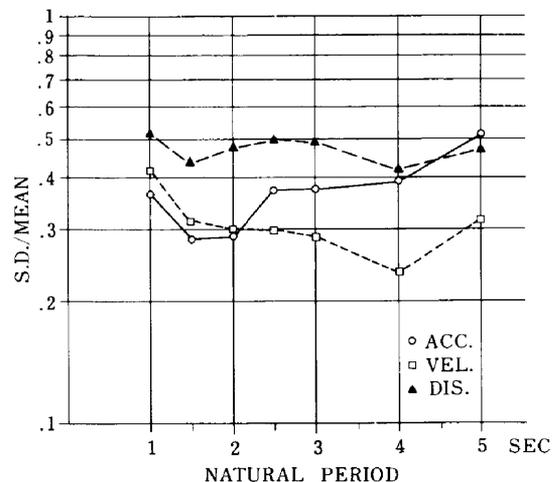


Fig.5 最大応答加速度の変動

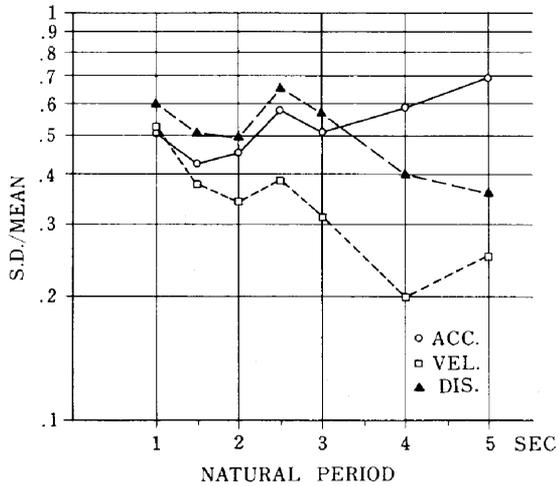


Fig.6 最大応答速度の変動

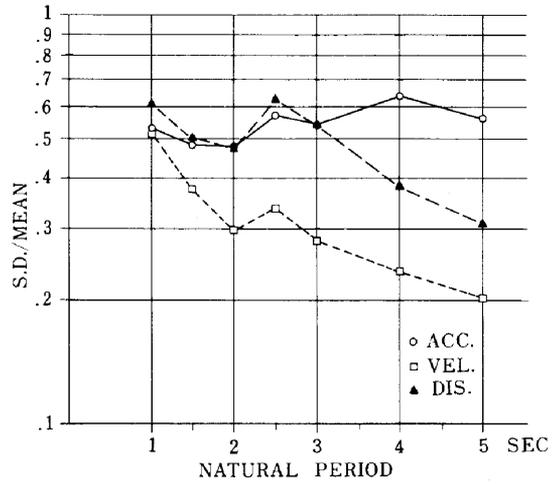


Fig.9 最大応答せん断力の変動

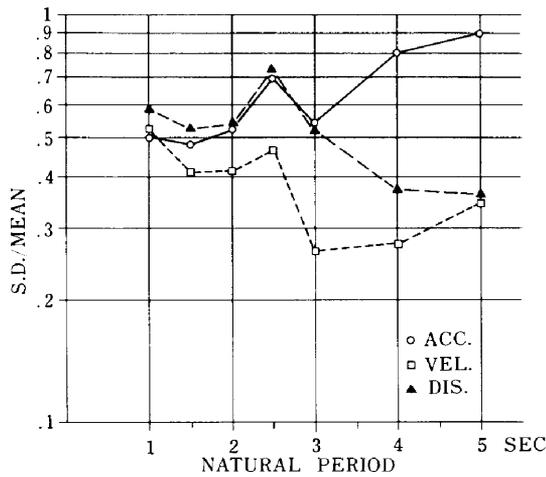


Fig.7 最大応答変位の変動

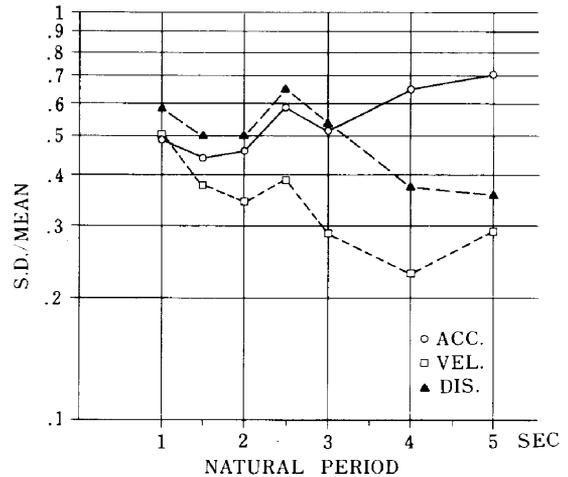


Fig.10 全データの平均

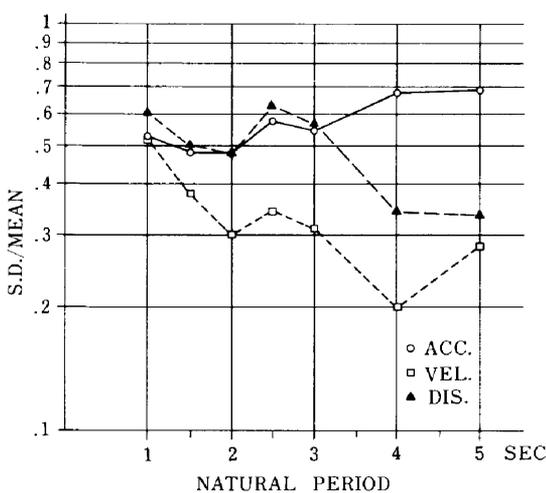


Fig.8 最大層間変位の変動

§5. 振り子法による速度値の評価

一般に振り子法と呼ばれるものは、質量 m 、バネ定数 k とする下式のような一質点系に地震動 (加速度) を入力したときの、系の相対速度応答量で速度値を評価しようとするものである。

$$\ddot{x} + 2h\omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{y}$$

\ddot{y} : 入力地震動 (地動加速度)

\ddot{x}, \dot{x}, x : 質点の応答加速度, 応答速度, 応答変位

h : 減衰定数 (臨界減衰比)

ω_0 : 固有振動数, $= \omega \sqrt{1-h^2}$, $\omega = \sqrt{k/m}$

これは $h=0.707 (1/\sqrt{2})$ の場合、上記振動系の固有周期 (T_0) に比べ入力地震動の周期が短いと、応答量は入力と 1 : 1 の関係になることを利用したものである。そこで、振り子の周期を 5 秒から 50 秒まで 5 秒毎に変化させた場合、速度応答量の最大値がどのように変化するか、前述の 15 波の地震動を使って速度値を計算してみた。振

り子の周期の変化による速度応答量の変化を比較するために、Trifunacの方法によって求めた値との比で表わしたものをTable 4に掲げた。また、総てのデータの平均値(実線)と±σ(破線:標準偏差)の値をFig.11に示した。

Fig.11より、振り子の周期が長くなると速度評価値(最大速度応答量)はTrifunacの値に対して約1.04倍に収束してくる。一般の耐震設計などでこの振り子法を使用して速度評価をする場合は、 $T_0 = 5 \sim 10$ 秒程度の振り子を使用しているようであるが、 $T_0 = 5$ 秒ぐらいではかなり小さな速度評価をすることになり、あまり適切とはいえない。むしろ10秒ないしは15秒以上の周期の振り子の使用が望まれる。

Fig.12に、EL CENTRO(NS)のデータをTrifunacの方法と振り子法($T_0 = 15$ 秒)とによって計算した速度波形、変位波形を掲載する。

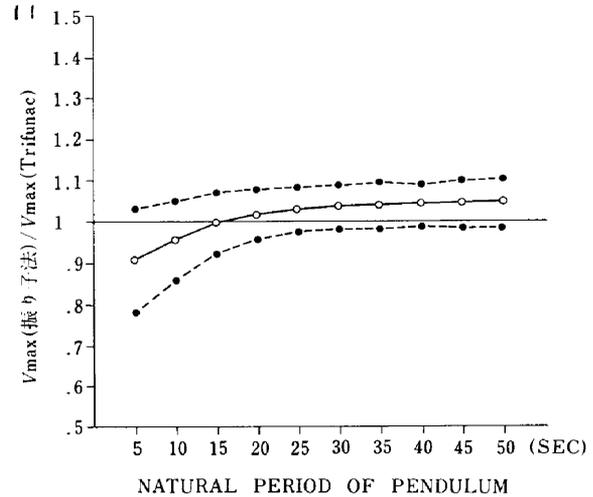


Fig.11 振り子の固有周期と地震波の速度評価誤差

Table 4 振り子法による最大速度(Trifunac's=1.0)

地震名	方向	最大加速度 (gal)	Vel or Disp	Trifunac (kine) (cm)	振り子の固有周期と最大速度 (h=0.707)										
					5sec	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
EL CENTRO. 1940.05.18	NS	341.7	V	33.6799	0.9675	0.9543	0.9927	1.0083	1.0174	1.0179	1.0219	1.0306	1.0372	1.0436	
			D	12.8013	0.5528	0.7683	0.8689	0.9826	1.0195	1.0103	0.9843	1.0562	1.0861	1.0519	
	EW	210.1	V	36.8060	0.8433	0.9773	0.9422	0.9526	0.9950	1.0238	1.0449	1.0612	1.0736	1.0837	
			D	23.3551	0.5465	0.9835	1.2378	1.3844	1.4832	1.5487	1.5965	1.7094	1.7473	1.7109	
UD	206.3	V	10.6272	0.9123	0.7694	0.8343	0.8984	0.9419	0.9742	0.9979	1.0181	1.0335	1.0462		
		D	5.7206	0.4847	0.9757	1.3225	1.5300	1.6988	1.8077	1.8871	2.2712	2.3614	2.1409		
TAFT LINCOLN SCHOOL TUNNEL 1952.07.21	NS	152.7	V	15.5633	0.8485	0.8480	0.9331	0.9778	1.0052	1.0233	1.0367	1.0462	1.0536	1.0599	
			D	5.1903	0.8884	1.2817	1.4562	1.5368	1.6013	1.6245	1.6425	1.9123	1.9527	1.7547	
	EW	175.9	V	17.5363	0.9544	0.9703	0.9952	0.9979	0.9957	0.9915	0.9881	0.9842	0.9808	0.9783	
			D	6.1547	0.7208	0.8772	1.0604	1.1752	1.4056	1.6124	1.7894	2.1040	2.3227	2.3675	
UD	102.9	V	6.5854	1.0964	1.1174	1.1304	1.1356	1.1335	1.1327	1.1298	1.1268	1.1252	1.1261		
		D	3.8408	0.5260	0.9754	0.9223	1.1203	1.2961	1.4045	1.4945	1.7353	1.8070	1.6886		
OFF MIYAGI PREF. EARTHQ. TOHOKU UN. 1F 1978.06.12	NS	258.1	V	36.1703	1.1197	1.1498	1.1333	1.1112	1.0929	1.0795	1.0699	1.0626	1.0570	1.0532	
			D	14.4107	0.6957	0.6426	0.8298	0.9118	0.9458	0.9606	0.9883	1.1316	1.1587	1.0637	
	EW	203.5	V	27.7698	0.9224	0.9739	1.0082	1.0131	1.0117	1.0070	1.0032	0.9976	0.9940	0.9913	
			D	8.4121	0.8900	1.1147	1.1093	1.2908	1.4332	1.5125	1.5582	1.7282	1.7464	1.6028	
UD	152.8	V	12.0944	1.0998	1.0329	1.0453	1.0344	1.0177	1.0040	0.9969	0.9960	0.9946	0.9931		
		D	3.5867	0.7621	1.0420	1.1748	1.3464	1.4253	1.6313	1.9030	2.2861	2.5076	2.5731		
HACHINOHE HARBOR 1968.05.16	NS	226.9	V	34.1514	0.8287	0.8864	0.9343	0.9467	0.9493	0.9493	0.9479	0.9471	0.9456	0.9444	
			D	9.0944	0.9670	1.0502	0.9813	1.0880	1.1708	1.2237	1.3055	1.4643	1.5697	1.6242	
			EW	183.6	V	35.8120	0.8217	0.9869	1.0485	1.0798	1.0985	1.1109	1.1198	1.1270	1.1321
TOKYO-101 1956.02.14	NS	73.7	V	7.6327	0.8827	0.9500	1.0080	1.0528	1.0860	1.1122	1.1319	1.1492	1.1625	1.1737	
			D	3.9037	0.5539	0.9055	1.3133	1.6308	1.8738	2.0738	2.2802	2.4822	2.6239	2.7132	
			SENDAI-501 1962.04.30	NS	57.5	V	3.4623	0.8960	0.9749	1.0175	1.0156	1.0010	0.9937	0.9815	0.9891
D	1.9279	0.5009	0.8885			0.9191	1.0727	1.3113	1.5365	1.7576	2.0939	2.2557	2.2304		
OSAKA-205 1963.03.27	EW	24.8	V	5.0848	0.8003	0.8722	0.9660	1.0056	1.0633	1.0781	1.0722	1.0564	1.0346	1.0108	
			D	4.1584	0.4181	1.0367	1.3125	1.5035	1.8628	2.1677	2.4346	2.7413	2.9640	3.0932	
NIIGATA-701 1964.06.16	NS	158.7	V	67.8584	0.6249	0.8700	0.9634	1.0054	1.0256	1.0359	1.0411	1.0444	1.0455	1.0459	
			D	34.2016	0.7421	1.1637	1.3319	1.3769	1.3726	1.3471	1.3212	1.3128	1.2981	1.2753	
速度波形 (V)					平均値 (M)	0.9079	0.9556	0.9968	1.0157	1.0290	1.0356	1.0389	1.0424	1.0450	1.0471
					標準偏差 (S)	0.1257	0.0958	0.0738	0.0599	0.0532	0.0529	0.0546	0.0559	0.0577	0.0606
					変動係数 (S/M)	0.1385	0.1002	0.0740	0.0590	0.0517	0.0511	0.0526	0.0536	0.0552	0.0579
変位波形 (D)				平均値	0.6852	1.0019	1.1560	1.3114	1.4577	1.5797	1.6926	1.9206	2.0227	1.9879	

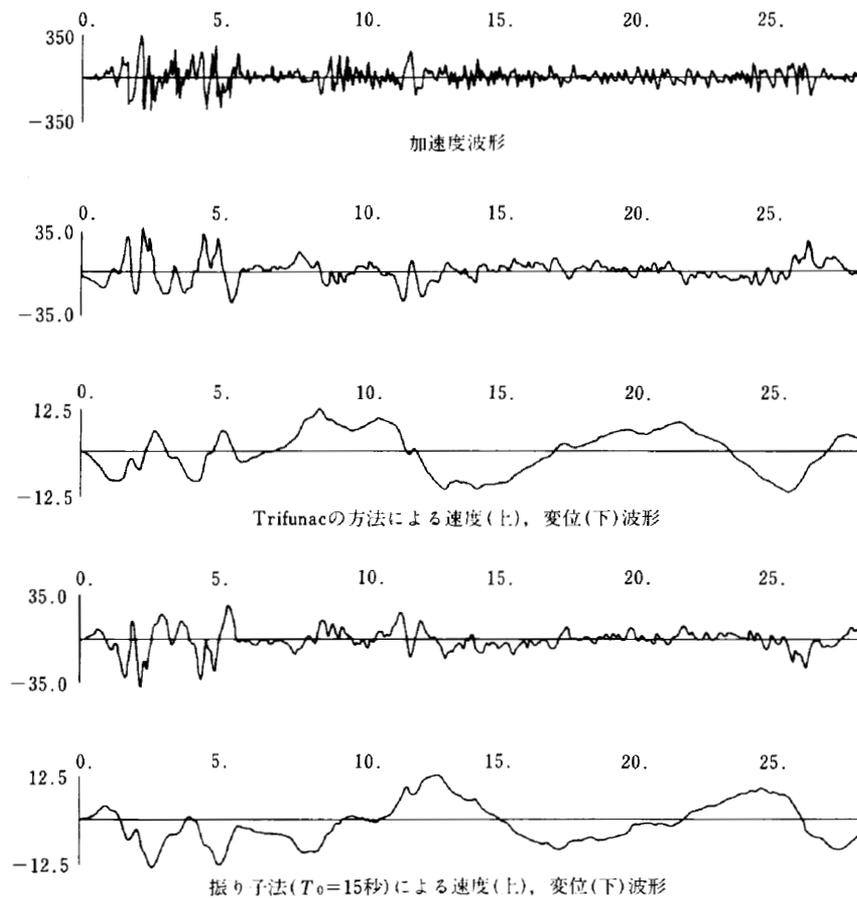


Fig.12 EL CENTRO NS 1940.05.18

§ 6. まとめ

以上のことから、高層建築物のような長周期構造物の応答解析に使用される地震動は、加速度振幅の最大値で基準化するよりも、速度振幅の最大値で基準化を行った方が良い結果が得られた。

また、加速度波形より速度値を計算する簡便な振り子法においては、 $h=1/\sqrt{2}$ 、 $T_0=10\sim 15$ 秒の振り子を使用すれば、ほぼ適切な速度の値が得られることがわかった。

また、これらの研究は、東京都立大学工学部渡部丹教授の御指導によったもので、ここに慎んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林, 長橋, “地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅”, 日本建築学会論文報告集第181号・昭和46年3月
- 2) 小林, 長橋, “重層構造物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅”, 日本建築学会論文報告集第210号・昭和48年8月
- 3) Trifunac, M.D., “Low frequency digitization errors and a new method for zero baseline correction of strong-motion accelerograms” EERL 70-07
- 4) Housner, G.W., “Behavior of Structures during Earthquakes”, Proc. ASCE, Vol. 85, No. EM4, 1959