

# 設計用入力地震波のアプローチについて

角 田 智 彦      若 松 邦 夫  
瀬 尾 和 大      泉      定 一  
此 上 典 文

## An Approach to Input Earthquake Motions of Structures

T. Tsunoda    K. Wakamatsu  
K. Seo        T. Izumi  
N. Konoue

### Abstract

In the dynamic design of a tall structure, how to determine input earthquake motion is one of the principal factors. Naturally, no matter how they should be determined, input earthquake motions used in these dynamic analysis should satisfy the characteristics of earthquake motions expected at the site both qualitatively and quantitatively. From this standpoint, an example of the process to determine the input earthquake motions at a certain site is presented in concrete form in this study. This paper contains the following items: dynamic soil tests at the site, dynamical characteristics of soils, earthquake motions modified from actual strong earthquake records, earthquake records observed at the site, linear response analysis of a structure model subjected to these earthquake motions, and considerations of these studies from the viewpoint of evaluation of earthquake intensity.

### 概 要

高層建物の動的設計においてはどのような地震波を入力波として与えるかが重要な要素の一つとなる。当然ながら解析に用いられる入力地震波は、どのような方法に基づいて設定されるにしろ、将来起こるやも知れぬ大地震時に設計地盤で予想される地震動を質的、量的にともに満たしたものでなければならない。このような観点に立って本研究ではある設計地盤での入力地震波を設定する際の過程を一つの具体的な例をもって示したものである。その主な内容は設計地盤における動的地盤調査と地盤の動的特性の把握、修正地震動の作成、設計地盤における自然地震観測、各種地震波による建物質点系モデルの線型応答解析、地震動の強さに注目した解析結果の考察などである。

#### 1. まえがき

高層建物の動的設計においては設計地盤の動的特性によって支配される面が多く、更にこれを分類すれば建物支持地盤あるいは側壁にかかる表層地盤等周辺地盤の強度ならびに動的特性、更には地震基盤に至る広域の地盤の動的特性、およびそれらの特性に基づくであろう入力地震波の特性、大きさ等が考えられる。

特に入力地震波の問題については従来のように既存の強震記録に依存するのではなく、近年設計地震の動的特性を加味した設計用入力地震波が考えられはじめたことにより徐々に進歩しつつある。

本研究はある設計地盤における入力地震波をより効果的に与えるための一つの過程を東京都内の具体的な地盤例に基づいて示し、そこに生ずる諸問題の考察を

行なったものである。

ここではまず設計地盤の動的特性を明らかにする為弾性波試験、常時微動測定等の地盤調査を行なった。最初に弾性波試験の結果より地盤各層の動的諸定数を設定し、設計地盤のモデル化を行なった。次にこれらの定数を用いてS波の重複反射理論による地盤各層の増幅特性の計算を行ない、常時微動測定結果との比較検討を試みた。

次に設計地盤の動的特性を入力地震波の特性の中に考慮するため修正地震動の作成を行なった。修正地震波は既存の地震波をフーリエ級数に展開して得られる振幅スペクトルのある周期成分に修正を加え、再び既存地震波の位相スペクトルをもとに波動の合成を行なう方法によって求めた。

また本設計地盤では併せて地震観測も行っており、幸いなことに震度 I ~ IV に亘る数種の現地における観測波形を記録することができた。

更にこれらの各種地震波を具体的な超高層建物の質点系モデルに入力させることによって線型応答解析を行ない、その結果に基づいて各種入力地震波の建物モデルに及ぼす強さに関する考察を行なった。

## 2. 地盤調査および設計地盤の動的特性

設計地盤は Fig.-1 (a) の土質柱状図に示すように粘土質の表層、砂礫層、土丹層（固結シルト）から成っており、想定建物の Base は砂礫層中 GL-18M の深さにある。現地において検層法、屈折法による弾性波試験を実施したところ Fig.-1(b), (c) のような走時曲線が得られた。(b) の S 波走時曲線は板叩きによって生じる SH 波より、また(c) の P 波走時曲線は火薬爆発によって生じる P 波より夫々求めたものである。その結果 Fig.-1 (d) に示す地盤構造が得られた。S 波速度の値は表層粘性土で約 70~180m/sec, 砂礫層で 400m/sec, 土丹層で約 700m/sec とごく常識的な数値を示しており、東京山手の代表的地盤であると考えられる。

一方、Fig.-1(a) に示す地表、-18M, -26.5M の 3 点に設置された加速度型地中地震計を利用して測定された常時微動の周期特性は Fig.-2 のごとくであった。その結果 0.1sec から 0.3sec に至る短周期部分に表層の固有周期とみられる卓越周期が顕著にあらわれた。また -18M と -26.5M における周期特性の相異は殆どないことが判明した。

しかしながら設計の対象となる建物の振動性状からみて重要な意味を持つ 1sec 以上の長周期成分の特性が本加速度計による測定では甚だ不明瞭であるため、更に長周期変位計（5 秒計）による地表の常時微動測

定も併せて行なった。その結果 Fig.-3 にその周期特性を示すように 1~2 sec に非常に顕著な卓越周期が存在することが判明した。明らかにこの卓越周期はごく表層のみの影響によるものではないので入力地震波を地中数 10M で考える場合にも考慮されるべき問題を含んでいるものと思われる。

次に弾性波試験の結果得られた地盤構造と各層の弾性諸定数を用いて地盤の増幅特性を S 波の重複反射理論に従って求めれば

Fig.-4 (a), (b) のごとくである。(a) は土丹層上面以深を基盤と仮定し、基盤の鉛直下方より各周期の単位正弦波が入射した時の地盤各層の増幅率と入射波周期との関係を示したものである。この結果を Fig.-2 の常時微動の周期特性と比較すれば両者の対応が非常によいことがわかる。また Fig.-3 で得られた 1~2 sec の卓越周期を上記の方法で説明するべく推定基盤を更に深い位置に仮定した場合、

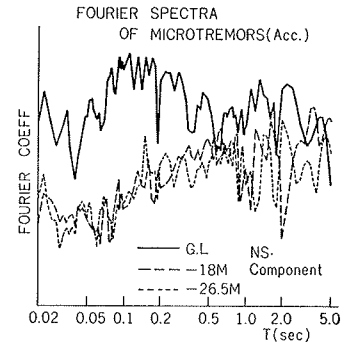


Fig.-2

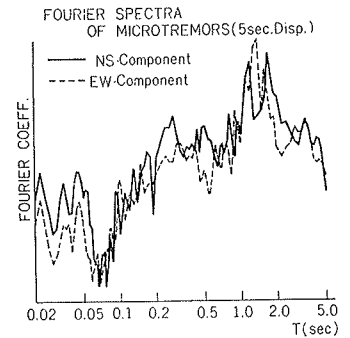


Fig.-3

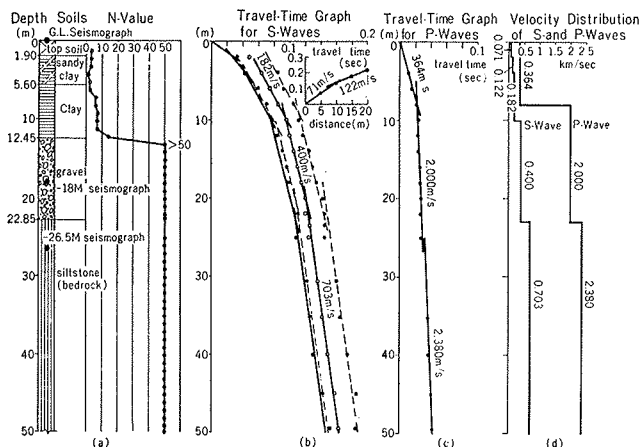


Fig.-1 Results of Soil Tests at the Site

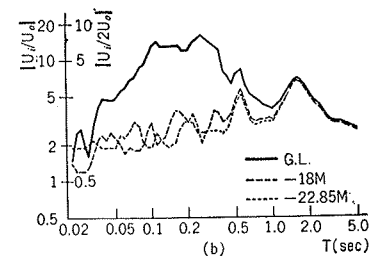
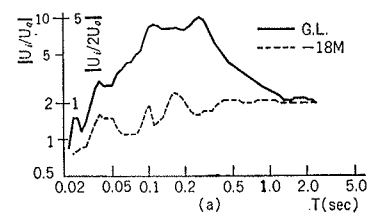


Fig.-4 Amplification Ratio

(b)のような増幅特性を得るためには土丹層の厚さを260mとしてその下に更にS波速度2km/sec程度の基盤層を設定しなければならないことになるが、現段階ではこれを証明する資料は皆無に等しい。

### 3. 修正地震動の作成

地盤の動的特性が前述のごとく明らかになれば、既存の地震動の周期特性に修正を加えることによってその地盤の特徴を生かした地震動を模擬的につくることは可能である。田治見博士は次のような手順によって修正地震動を作成することを提案している。

今、 $F_n$ ,  $\psi_n$  を夫々フーリエの振幅、位相スペクトルとすれば地震波形  $x(t)$  は次式のごとく有限のフーリエ級数で近似できる。

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \left\{ F_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T} - \psi_n\right) \right\} \quad (0 \leq t \leq T)$$

但し

$$F_n = \frac{2}{M} \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \psi_n = \tan^{-1}(b_n/a_n)$$

$$a_n = \sum_{k=1}^M \left\{ x_k \cos \frac{2n\pi t_k}{T} \right\}, \quad b_n = \sum_{k=1}^M \left\{ x_k \sin \frac{2n\pi t_k}{T} \right\}$$

ここでは具体的な例として EL CENTRO 1940 NS の強震記録を原波形として用いて  $F_n$ ,  $\psi_n$  を求め、得られた  $F_n$  に Fig.-5 に示すような修正を加えることとした。これは Fig.-3 の常時微動の卓越周期が地震時にも影響を及ぼすであろう（少なくとも特性が谷間になることはないであろう）との想定に基づいて原波形の特性の谷間を補ったものである。次に修正された  $F_n$  と原波形の  $\psi_n$  より再合成された修正地震波を Fig.-6 に示した。

### 4. 設計地盤における地震観測と記録波形

上述の修正地震動の作成と平行して現地では常時微動と同様の測点において自然地震の観測を行っており、その中の代表的な5個の地震記録 (Fig.-7) について周期特性の検討を行なった。ここに示す地震波形はいずれも -18M における観測記録である。OBS8-1NS 以下の地震記録は同一地震（記録継続時間約3分）の0~20sec, 30~50sec, 90~110secの区間を取り出したものである。また Fig.-8 の(a), (b), (c) は夫々上記地震波の加速度、速度、変位の各最大振幅を EL CENTRO 1940NS の最大振幅により正規化した時の1質点最大速度応答スペクトルを示す。尚、図中には1968年十勝沖地震の八戸港湾EWの強震記録のスペクトルも参考ま

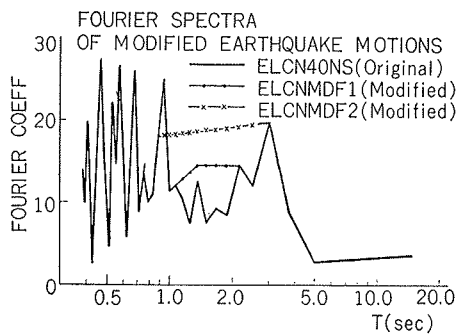


Fig.-5 Modified Fourier Spectra

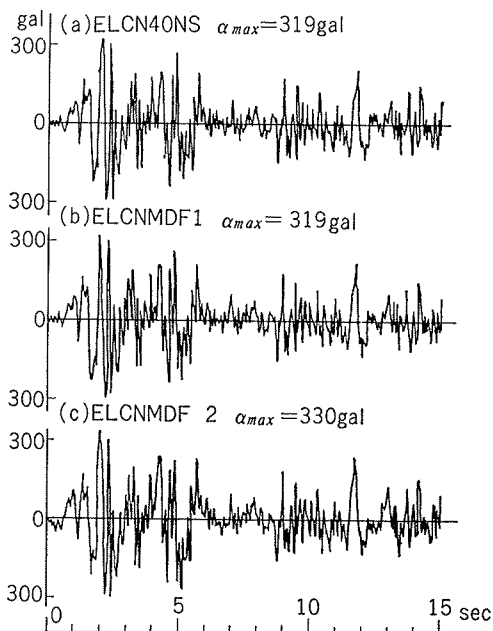


Fig.-6 Earthquake Motions Modified in This Study

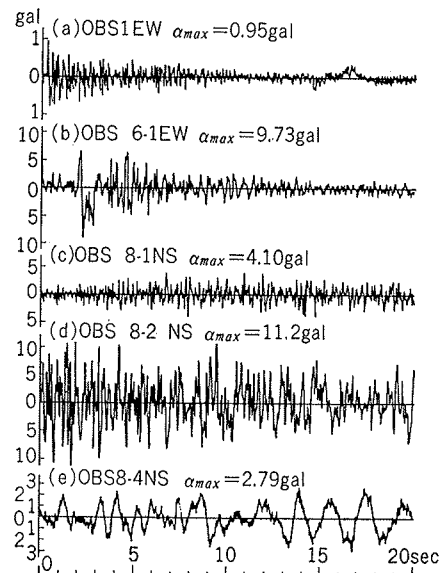


Fig.-7 Earthquake Motions Observed at the Site

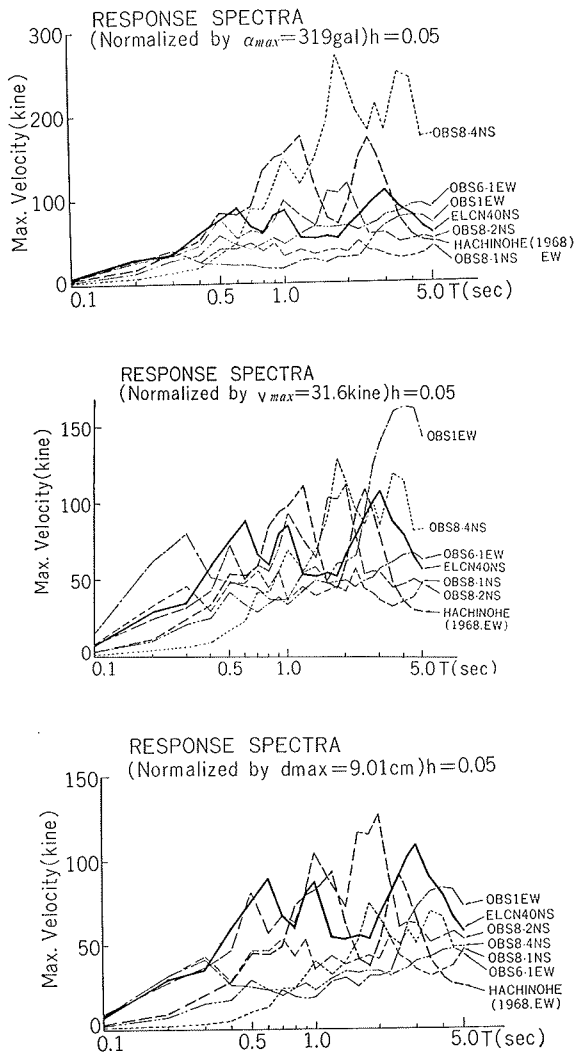


Fig.-8 Velocity Spectra of Input Earthquake Motions

でに上記の方法で書き入れておいた。各波形の最大速度，最大変位振幅は夫々固有周期 5sec，減衰定数  $h=1$  の振子の速度および変位応答量の最大値をもって表示した。

### 5. 超高層建物質点系モデルの線型地震応答解析

以上の結果得られた EL CENTRØ 1940NS 原波，2 種類の EL CENTRØ 修正波，および 5 種類の観測地震波を用いてこれらを具体的な超高層建物の質点系モデルに入力させることによりその地震応答を求めた。ここでは問題を単純にするため応答計算をすべて線型範囲内に限定することとした。建物モデルは 16 質点から成り，その諸元は Fig.-9 に示すごとくである。次に結果として得られた最大層間変位分布，最大層せん断力分布を Fig.-10, Fig.-11 に示した。両図の (a), (b), (c) は夫々各入力波の最大加速度，速度，変位振幅を前述

の方法で正規化して EL CENTRØ 原波との各振幅レベルの統一をはかったものである。また Table-1 には最大層間変位の建物モデル基準階における最大値，ベースシャー係数，および上記層間変位の最大値が 2cm なる時の入力波のレベルを逆算した結果を示した。

### 6. 建物に及ぼす入力地震波の強さに関する考察

入力地震波の強さを表わす絶対的な尺度を定めることが現時点では困難であるため，本研究では設計入力波として最も多く使用されている EL CENTRØ 1940 NS を一つの目安として各種入力地震波に対する応答結果の比較検討を試みた。

まず入力地震波設定時の大変重要な要素として地震波振幅の正規化の問題があげられる。特に小地震の振幅を大地震なみに引き上げて使用しようとする場合，地震波特性の保持あるいは正規化倍率の持つ意味などその根拠は甚だあいまいなものとならざるを得ない。最も極端な好ましくない例として ØBS8-4NS 地震波を他の地震波同様最大加速度振幅を 300gal として用いた場合，Fig.-8(a), Fig.-10(a), Fig.-11(a) から明らかのように我々の想像する地震動のレベルをはるかに上回る大地震波を想定したことになる。このような例は非常に稀なケースで，通常は観測された小地震の周期特性の方が既存の強震記録のそれよりも短周期側で卓越しているため，最大加速度で正規化を行なって建物の応答量を求めると，後者に比して前者の応答量は非常に小さいものとなることが多い。ØBS1EW 等はその一例である。いずれにしても現段階では入力波の振幅レベルを一義的に決定することは困難であり，また設計入力波の振幅レベルの適否を判断する上で既存の地震動を規準とすることも，一応の目安としてならばともかく，左程意味があることとは思われない。

そこで入力地震波の強さを評価するもう一つの方法としてこれらの地震波入力時の建物モデルの応答量を用いた検討を行なってみた。Table-1 に示した基準階最大層間変位を 2cm ならしめる時の入力波最大振幅はその一例である。即ちここに得られた各入力波の最大振幅は想定した建物モデルにほぼ同等の影響を及ぼすわけである。各入力波の最大振幅の変動幅に注目すれば，最大加速度では ØBS1EW の 612gal が最も大きく，ØBS8-4NS の 92.0gal が最も小さく，その比は 6.7 倍である。同様にして最大速度と最大変位の変動幅を求めてみると夫々 2.4 倍，2.2 倍となり最大加速度に比してその比率は小さい。このことは本建物モデルに及ぼす各入力地震波の強さを評価するには最大加速度より

も最大速度を、また最大速度よりも最大変位を尺度として用いるのが適切であることを示している。特に本例の場合、最大加速度振幅は地震動の強さの尺度としては全く使用できないことが明らかとなった。

地震動の強さの評価に関しては小林・長橋両博士の研究があり、その中で著者らは構造物に作用する地震動の強さを評価する簡便な尺度として地震動の最大振幅（最大加速度、最大速度、最大変位）を用いる場合、そのいずれを用いるべきであるかは地震動の作用する構造物の周期によると述べている。その結論として、弾性周期  $T=0.2\text{sec}$  以下の短周期の構造物に作用する地震動強さを評価する簡便な尺度としては最大加速度

が  $T=0.3\sim 1\text{sec}$  程度の周期を有する構造物には最大速度が、また  $T=1\text{sec}$  よりも長周期の構造物には最大変位が夫々適切であるとしている。

本例の場合、建物、地盤に関する動的特性の中で問題となる

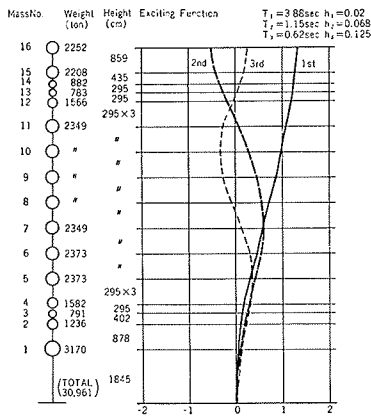


Fig-9 Analytical Model

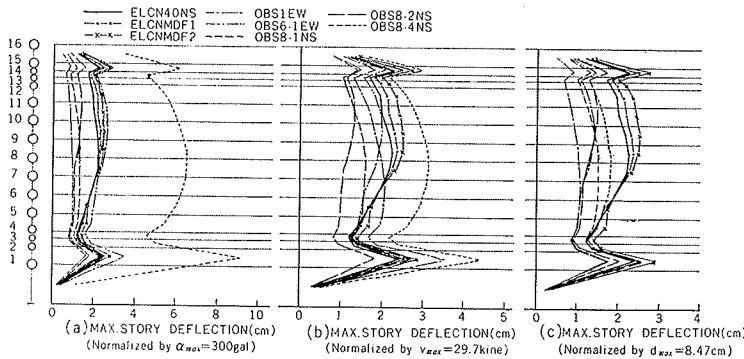


Fig-10 Max. Story Deflection (cm)

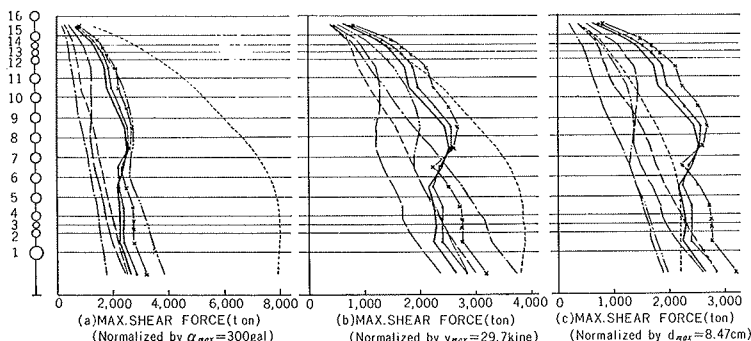


Fig-11 Max. Shear Force (ton)

NAME	Max. Amplitude of Original Data			Normalize	Normalizing Ratio	Max. Amplitude of Normalized Data			Max. Story Def. (cm)	Max. Amplitude of Input Data at Dmax=2cm			Base Shear Coeff.
	ACC (gal)	VEL (kine)	DISP. (cm)			ACC (gal)	VEL (kine)	DISP. (cm)		ACC (gal)	VEL (kine)	DISP. (cm)	
ELCN40NS (Original)	319	31.6	9.01	-	0.94	300	29.7	8.47	2.26 (1/131)	265	26.3	7.50	0.0853
ELCNMDF1 (Modified)	319	31.9	11.1	-	0.94	300	30.0	10.4	2.36 (1/125)	254	25.4	8.84	0.0915
ELCNMDF2 (Modified)	330	50.2	11.4	-	0.91	300	45.6	10.4	2.51 (1/118)	239	36.4	8.26	0.103
OBS 1EW 47.10.11 Ghiba pref. (middle) I				ACC	316	300	14.1	7.93	0.929 (1/301)				0.0572
	0.95	0.0445	0.0251	VEL	667	634	29.7	16.7	2.07 (1/143)	612	28.8	16.2	0.121
				DISP.	337	320	15.0	8.47	1.05 (1/281)				0.0611
OBS6-1EW 47.11.6 Ibaragi pref. (South-west) II				ACC	30.8	300	40.0	16.6	2.70 (1/109)				0.124
	9.73	1.30	0.533	VEL	22.8	222	29.7	12.3	2.00 (1/148)	222	29.7	12.3	0.0917
				DISP.	15.7	153	20.4	8.47	1.38 (1/214)				0.0632
OBS8-1NS 47.12.4 Hachijo-isl. IV M=7.3				ACC	73.2	300	25.0	7.54	1.35 (1/219)				0.0818
	4.10	0.342	0.103	VEL	86.8	356	29.7	8.94	1.59 (1/165)	444	37.0	11.2	0.0655
				DISP.	82.2	337	28.1	8.47	1.51 (1/193)				0.0916
OBS8-2NS 47.12.4				ACC	26.8	300	30.8	7.85	1.37 (1/215)				0.0782
	11.2	1.15	0.293	VEL	25.8	289	29.7	7.56	1.33 (1/222)	438	45.0	11.5	0.0758
				DISP.	28.9	324	33.2	8.47	1.48 (1/159)				0.0845
OBS8-4NS 47.12.4				ACC	108	300	62.0	30.9	6.52 (1/45)				0.255
	2.79	0.574	0.286	VEL	51.7	144	29.7	14.8	3.14 (1/94)	92.0	19.0	9.48	0.123
				DISP.	29.6	82.6	17.0	8.47	1.80 (1/164)				0.0765

Table-1 Input Earthquake Motions and Analytical Results

のは  $1\sim 4\text{sec}$  の長周期領域であるので上記文献の結論からみても、またここで行なった若干の検討例からみても、入力地震波の強さの評価に入力波の最大振幅を用いるとするならば最大変位振幅が尺度として最も適当であることとなる。

Fig-12 は上記の最大層間変位を  $2\text{cm}$  ならしめる時の入力波最大振幅を 3 方向対数表示スペクトルで模式的に示したものである。この表示によればスペクトルが低位置にあるものほど想定建物の地震応答には不利な入力地震波であるということができよう。図中の  $500\text{gal}-50\text{kine}-45\text{cm}$  の線は先程廃案となったロス市の耐震規定改訂案中の Ground Motion Spectrum を示したものであるが、本例の入力波レベルと比較する意味で参考までに掲げてみた。

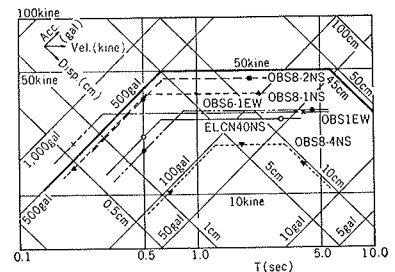


Fig-12 Input Earthquake Motion Spectra, Provide Common Maximum Story Deflection for the Structure Model

## 7. まとめ

以上の結果より得られた結論および問題点を要約すと次のごとくである。

- 1) 地盤調査については弾性波試験、常時微動測定とも良好な資料が得られた。特に高層建物を対象とする場合、弾性波試験のみの調査には限界があるので、1秒より長周期の地盤特性を補なう意味で長周期計による常時微動観測は一つの有力な手段となり得る。
- 2) 幸いなことに現地において数種の地震動を観測することができたが、その中の $\emptyset$ B58（震度Ⅳ）の地震動には常時微動にみられたと同様1~2secの長周期成分を多分に含んでいた。震度Ⅲ以下の地震と震度Ⅳ以上の地震とではその重要度において格段の差があるものと思われる。
- 3) 筆者らは既報の文献<sup>4)</sup>において1968年東松山地震の際の東京都内の基盤（土丹層）入力波の特性が速度スペクトルにおいてほぼ平坦であるとの解釈を行なったが、1~2secの周期域に注目すると卓越周期らしきものが存在しないでもなかった。その意味からも今回得られた同様の卓越周期がはたして重要な意味を持つものかどうか併せて今後の課題としたい。
- 4) 仮に設計地盤における小地震の観測記録があったとしても地震波振幅の正規化の妥当性の有無については種々の問題が含まれており、これのみで設計入力波の問題を処理することはできない。それを補なう意味で修正地震動が大地震としての性格を備えていること、および設計地盤の動的特性をある程度考慮していること等により現段階では設計用入力波として有用ではないかと考える。

- 5) EL CENTRO $\emptyset$  1940NS 地震波の1~2secの周期域にあるスペクトルの谷間を埋めるような修正地震波を作成したところ、本建物モデルの応答値は原波形に比して最大層間変位で4~11%、ベースシャー係数で7~21%の増加をみた。
- 6) 本建物モデルに作用する入力地震波の強さを入力波の最大振幅で評価する場合には入力波の最大変位振幅を用いるのが最も適当である。
- 7) 入力地震波の大きさを設定するに当たってはその規準が定まっていないのが現状であり、特に地震波振幅を拡大して使用する場合には上記の地震動強さの評価方法を目標建物とも考え併せて考慮する必要がある。

## 謝辞

本研究の地震動の強さの評価については前記参考文献より得るところが多であった。ここに小林啓美・長橋純男両博士に厚く感謝の意を表明する。また本建物モデルの地震応答解析は当社東京本社建築本部設計部の高木正敏主任・伊庭力職員に御援助を戴いた。両氏に深く謝意を表明する次第である。

## 参考文献

- 1) 長橋・小林「構造物の破壊作用を対象とした地震動の強さの評価」日本建築学会論文報告集第160号 1969. 6.
- 2) 小林・長橋「木造建築物地震被害率による地震動の強さの評価」同上 第163号 1969. 9.
- 3) 長橋・小林「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」同上 第181号 1971. 3.
- 4) 中川・渡辺・角田・瀬尾・此上「東松山地震の強震記録を用いた地震動と地盤の動的特性に関する研究」大林組技術研究所報 No. 6 1972