

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

—設計入力波を効果的に与えるための予備的研究—

中 川 恭 次
渡 辺 清 治
角 田 智 彦
瀬 尾 和 大
此 上 典 文

概 要

ある場所で観測される地震動には波動の伝播過程における様々な要因による影響が含まれているが、特に観測点直下の表層地盤の影響が大きいと考えられている。ところで、表層地盤に関する資料は他の要因に比して比較的豊富であるので、表層地盤の動特性（表層地盤の地震動に及ぼすフィルター効果）を観測点毎に求めることによって、地表における地震観測記録から観測点直下の基盤における地震動を推定することはある程度可能である。本研究は東松山地震（1968）の際、都内13ヶ所で得られた SMAC 強震計の同時記録をもとに基盤入力波を逆算し、表層地盤の動特性と基盤入力波の持つ性質について若干の考察を行なったものである。その結果、基盤入力波の振巾レベル、特性は推定可能であり、また他所で観測された地震記録から計算によって基盤入力波を求めることもある程度可能であることがわかり、今後設計入力波として活用が期待される。

1. まえがき

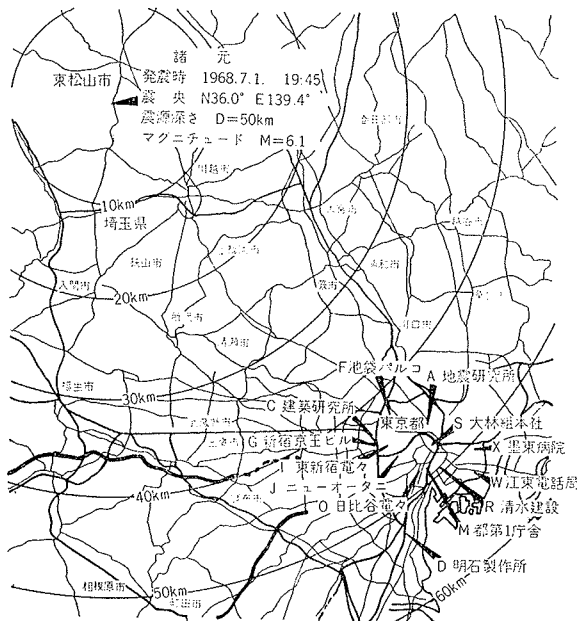
近年、建築物の動的設計に当って設計地盤を反映した入力波の選定を要求されることがしばしば見受けられる。これに対して現状は、その地盤構造、弾性定数等が定まれば表層地盤の地震動に及ぼす影響はある程度予測可能な段階にきており、一方基盤入力波には際だった特性がないとの見方が有力であるので、基盤の設定さえ誤らなければ上記の要求に応える下地はできているといっても過言ではない。しかしながら、地盤

に関する基礎資料の不足等により地盤の弾性定数の決定、基盤の設定を任意の場所で行なうことはむずかしく、実用面での問題点は未だ残されたままである。

本研究は東松山地震（1968. 7. 1.）の際、東京都内13ヶ所で得られた SMAC 強震計の同時記録をもとに、各観測点直下の基盤入力波をS波の重複反射より逆算し、表層地盤の動特性と基盤入力波の持つ特性について若干の考察を行なったものである。尚、これらの記録は建物底面で得られた波形であり建物の影響が記録中に含まれていることも充分予想されるが、ここでは建物の影響はないものと仮定した。

2. 地震動の規模・震源距離と最大振巾

東松山地震に関する諸元および観測点分布を図一1に観測点リストを表一1に示す。表一1は坂本等¹⁾によってまとめられたものの一部を引用したものである。



図一1 東松山地震諸元および観測点分布

記号	建物名	SMAC NO.	建物規模		強震計設置階	Acc-BASE (gal) max		Acc-TOP (gal) max		T TOP (sec)	
			地上	地下		NS	EW	NS	EW	NT	EW
A'	地震研究所	101-2	—	—	G.L.	102	107	—	—	—	—
A	#	#	6	B1	2, B1	47	46	68	73	0.42	0.40
C	建築研究所	116-2	3	—	1	74	114	—	—	—	—
D	明石製作所	102	3	—	1	69	105	—	—	—	—
F	池袋パルコ	113	8	B3	R, B3	40	57	167	242	0.53	0.71
G	新宿京王ビル	141	8	B2	R, B2	32	27	89	112	0.53	0.71
I	東横前電々	131	8	B2	8, B2	24	31	128	66	0.45	0.40
J	ホテルニューオータニ	134	17	B3	15, B2	25	32	105	73	1.25	1.25
M	都第1庁舎	105-1	8	B2	R, B2	24	33	140	181	0.77	0.53
O	日比谷電々	120	9	B4	R, B4	24	27	55	60	0.83	0.53
R	清水建設本社	117	8	B1	R, B1	49	72	115	199	0.50	0.71
S	大林組東京本社	123	9	B2	R, B1	20	14	86	80	0.71	0.77
W	江東電話局	119	3	B1	R, B1	52	31	63	38	1.11	0.83
X	墨東病院	121	5	B1	R, 1	43	48	61	48	0.83	1.00

表一1 観測点リスト

尚、本研究では各観測点における強震記録のうち NS 成分のみを解析に使用した。

さて、金井²⁾は基盤における地震動の速度スペクトルはほぼ平坦であるとの立場から次のような地震動のマグニチュードM、震源距離 X(km) と基盤における地震動スペクトルの間の実験式を導いた。

$$\left. \begin{aligned} d_0 &= T \times 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X}) \log_{10} X - (1.43 + \frac{1.83}{X})} \\ v_0 &= 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.60}{X}) \log_{10} X - (0.631 + \frac{1.83}{X})} \\ a_0 &= \frac{1}{T} \times 10^{0.61M - (1.66 + \frac{36.0}{X}) \log_{10} X + (0.167 - \frac{1.83}{X})} \end{aligned} \right\} (1)$$

但し d_0, v_0, a_0 は夫々変位、速度、加速度スペクトル
また金井は表層地盤を単純モデルに置換した時の表層地盤の特性 $G(T)$ と(1)式を組合せ、次のような地表の地震動スペクトルの実験式を示した。

$$G(T) = 1 / \sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_0} \right)^2 \right\}^2 + \left\{ \frac{0.2}{\sqrt{T_0}} \left(\frac{T}{T_0} \right) \right\}^2}$$

$$a = G(T) \times a_0$$

但し a; 地表における加速度スペクトル
 T_0 ; 地盤の固有周期

.....(2)

上式の T_0 に本例の観測点における常時微動(後述)の卓越周期 T_G 、および地震記録のフーリエ・スペクトルの卓越周期 T_E を代入して各観測点の最大加速度を求め、地震記録の最大加速度と比較すれば図-2(上

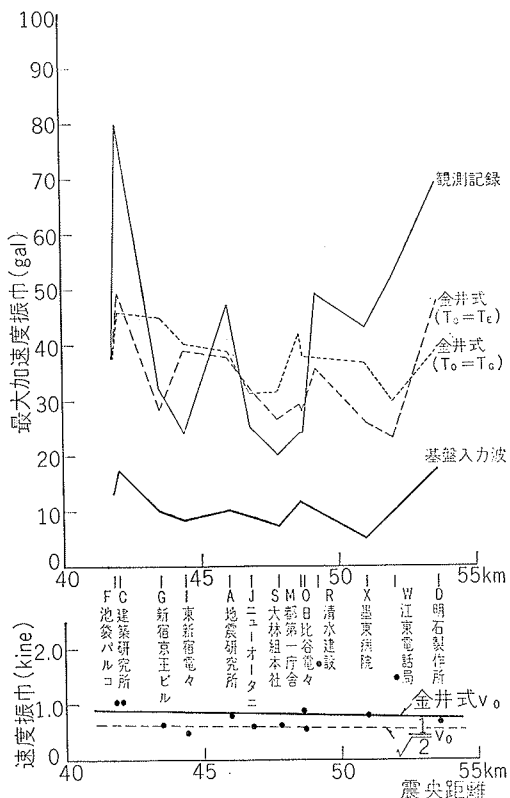


図-2 震源距離と最大振幅との関係

段)のごとくである。傾向として両者は概ね一致するが、地盤によっては表層地盤の増巾効果が予想を上回って地震時に大きな影響を及ぼす可能性があることがわかった。金井も述べているように(2)式は平均的な地盤における実験式であり、個々の地盤についてはより詳細な検討が必要である。

3. 地震動と常時微動との関連性

幸いな事に SMAC 強震計の設置場所では常時微動の測定が組織的に行なわれており、その解析結果が報告されている³⁾。そこで各観測点で地震動と常時微動との比較検討を行なった。図-3~16に地震動のフーリエ・スペクトル(実線)を、図-17~29に常時微動の周期頻度曲線(太線)とフーリエ・スペクトル(破線)とを示した。また図-30は夫々の周期特性を比較するため、特性の顕著な周期をプロットしたものである。

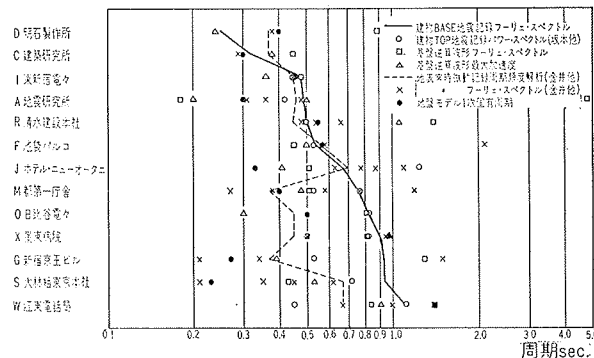


図-30 各観測点における周期特性比較

まず常時微動の解析方法の相違について周期頻度曲線とフーリエ・スペクトルの特性を比較すれば、従来指摘されているごとく周期頻度曲線では1秒より長周期が評価されないという欠点があるものの、両者の特性は概ね相似している。また地震動と常時微動との周期特性は2, 3の例外はあるが、全般的にみて対応はよ

土質名	地盤の種類	地盤密度 (t/m ³)	N 値	S 波速度 (m/sec)
表土層	埋土	1.50	0.4	70
関東ローム	粘土	1.37	4.1	132
	砂	1.50	6.0	85
沖積層	粘土	1.50	6.5	128
	砂混り粘土	1.50	7.0	133
段丘層	砂、粘土	1.45	30.0	155
	礫	1.52	35.0	400
渋谷粘土層	粘土	1.51	50.0	270
東京層	上部	1.70	80.0	450
	礫	1.70	90.0	500
第三紀層	下部	1.70	100.0	540
	土丹	1.93	200.0	1000

表-2 弾性定数の推定規準

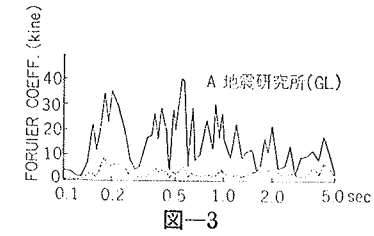


図-3

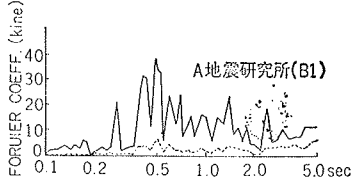


図-4

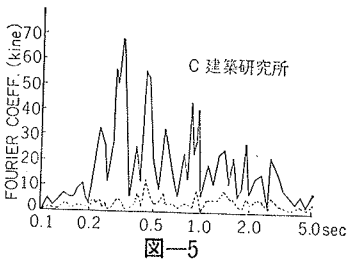


図-5

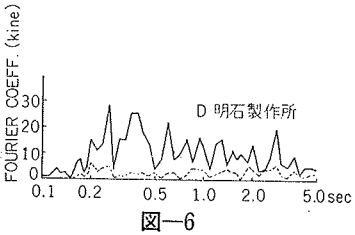


図-6

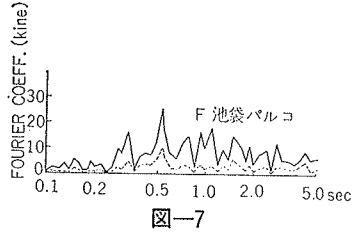


図-7

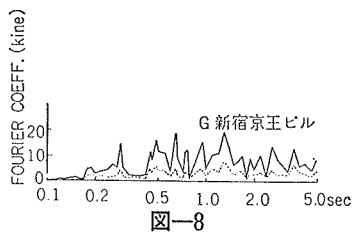


図-8

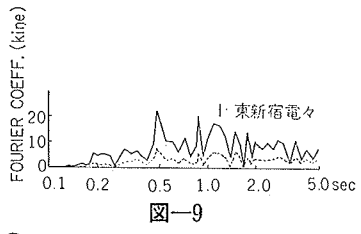


図-9

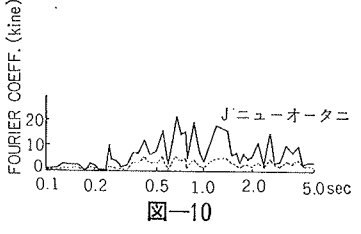


図-10

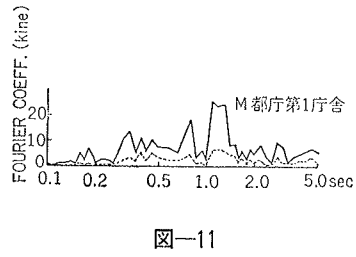


図-11

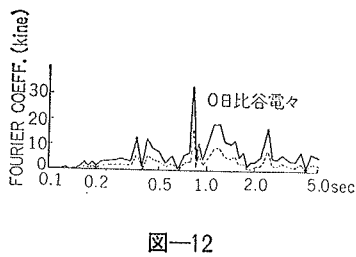


図-12

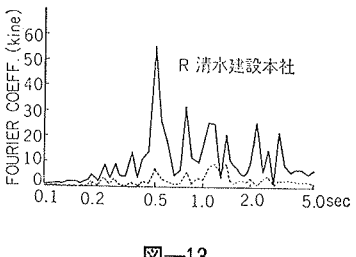


図-13

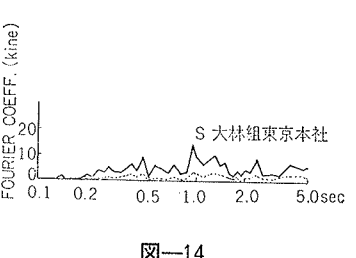


図-14

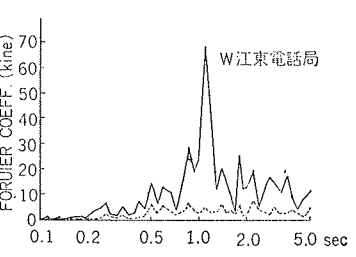


図-15

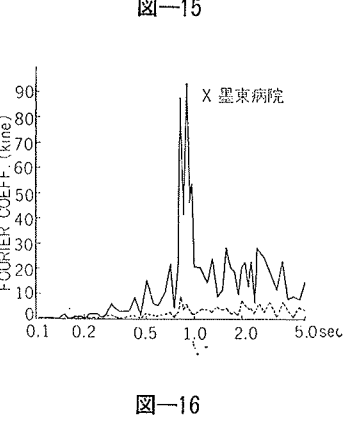


図-16

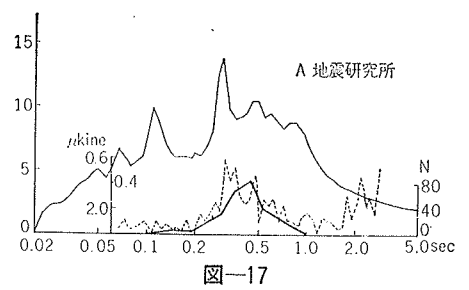


図-17

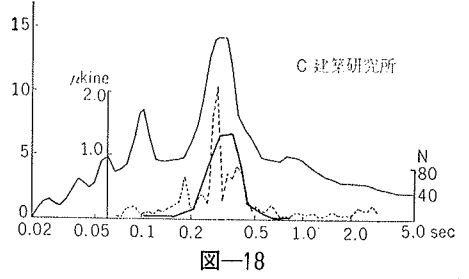


図-18

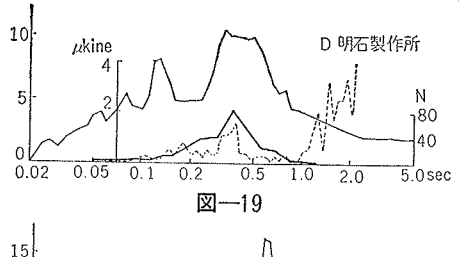


図-19

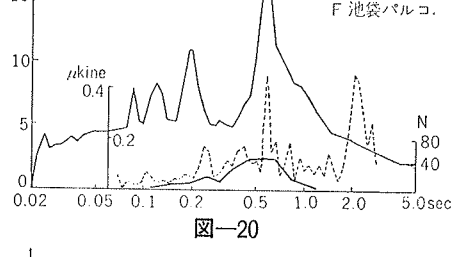


図-20

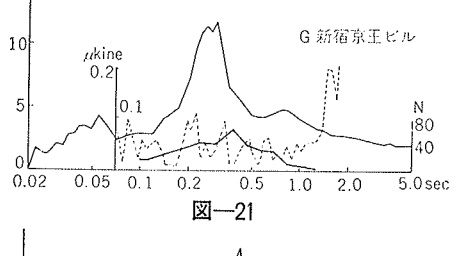


図-21

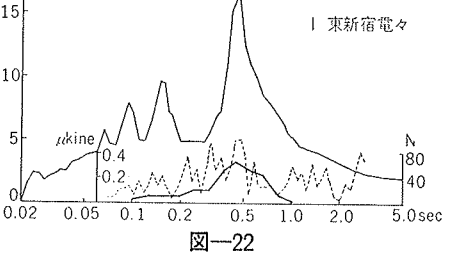


図-22

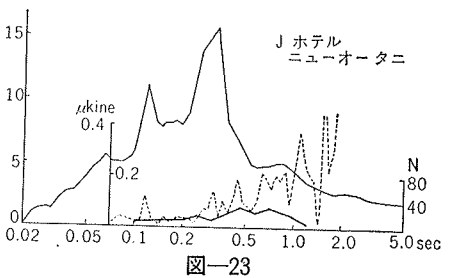


図-23

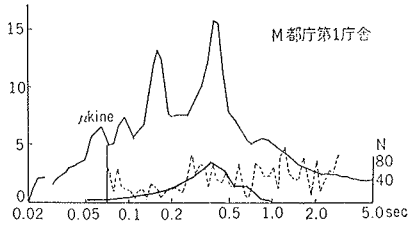


図-24

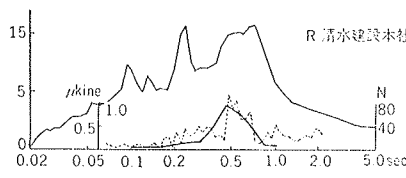


図-26

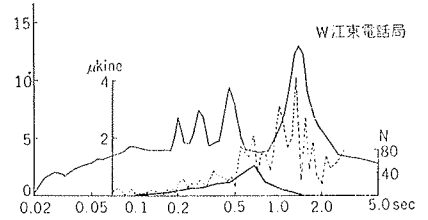


図-28

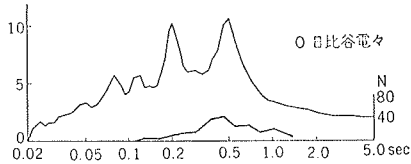


図-25

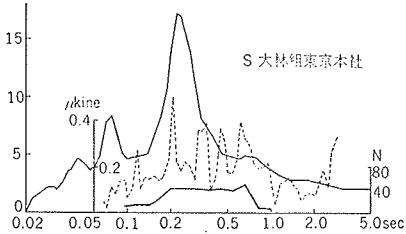


図-27

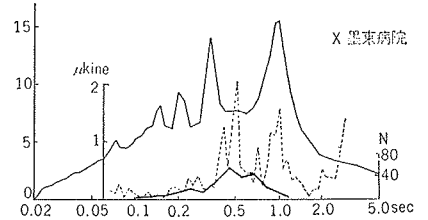


図-29

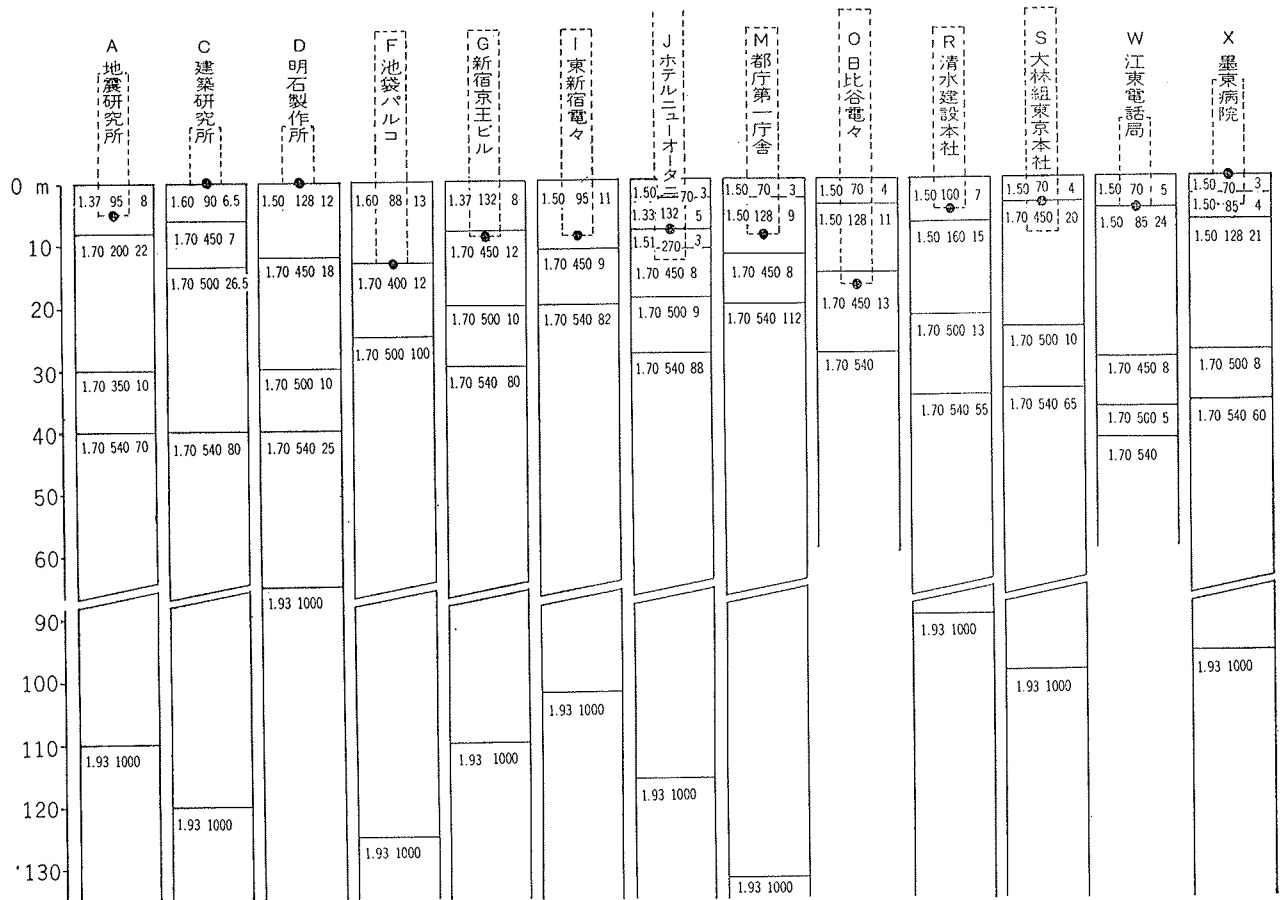


図-31 地盤のモデル化

いと云える。常時微動の卓越周期は殆どすべて地震動の中にも卓越周期として認められる。

4. 地盤のモデル化と地盤の動特性

S波の一次元重複反射による表層地盤の動的解析を前提として地盤のモデル化を行なった。各観測点の層構造は土質柱状図、地質断面図より決定したが、基盤とみなした第三紀層上面の深さはあくまでも推定値である。次に表-2のごとく地盤種別毎にS波速度、地

盤密度の推定を行ない図-31のような地盤モデルを作成した。これらの地盤モデルの推定基盤に正弦波を入射させ、S波の重複反射²⁾によって各観測点地表における表層地盤の増巾特性を求めると図-17~29(細線)のごとくである。この表層地盤の増巾特性と前述の常時微動の周期特性の傾向が一致すれば地盤のモデル化が適正に行なわれたと考えて差し支えないであろう。実際に両者の特性の比較を行なってみると常時微動の特性が顕著である程両者の対応はよいが、そうでない

ものについては周期域全般に亘る凡その傾向を把握する程度に止まった。

5. 基盤における地震動の推定

図-31の地盤モデルを用いて観測点における地震記録より基盤入力波の推定計算を次式によって行った⁵⁾。

$$\begin{aligned}
 F_1(T) &= G_1(T + H_1/V_1) \\
 F_2(T) &= \frac{1}{\gamma_1} F_1(T + H_2/V_2) - \frac{\beta'_1}{\gamma_1} G_1 \\
 &\quad \times (T - H_1/V_1 + H_2/V_2) \quad (3) \\
 G_2(T) &= \beta_1 F_2(T - H_2/V_2) + \gamma_1' G_1(T - H_1/V_1) \\
 &\quad \vdots \\
 F_k(T) &= \frac{1}{\gamma_{k-1}} F_{k-1}(T + H_k/V_k) - \frac{\beta'_{k-1}}{\gamma_{k-1}} G_{k-1}(T - H_{k-1}/V_{k-1} + H_k/V_k) \\
 G_k(T) &= \beta_{k-1} F_k(T - H_k/V_k) + \gamma_{k-1}' G_{k-1}(T - H_{k-1}/V_{k-1}) \\
 &\quad \vdots \\
 F_N(T) &= \frac{1}{\gamma_N} F_N(T) - \frac{\beta'_N}{\gamma_N} G_N(T - H_N/V_N)
 \end{aligned}$$

但し $\alpha_k = \frac{(\rho V)_k}{(\rho V)_{k+1}}$, $\gamma_k = \frac{2}{1 + \alpha_k}$, $\gamma'_k = \frac{2\alpha_k}{\alpha_k + 1}$, $\beta_k = \frac{1 - \alpha_k}{1 + \alpha_k}$, $\beta'_k = \frac{\alpha_k - 1}{\alpha_k + 1}$

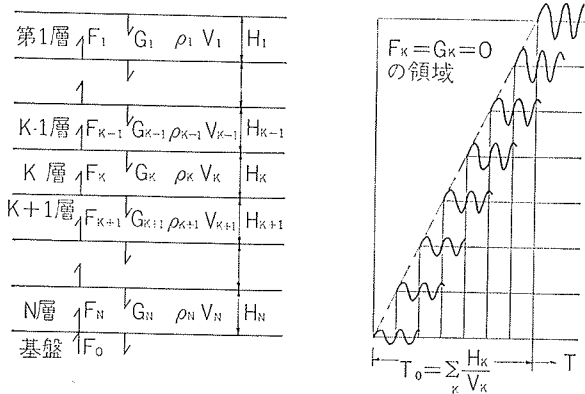


図-32 重複反射地盤模型

本来 $G_1(T)$ は地表における観測波形の振巾を1/2にしたものに等しいが、ここでは建物底面位置を自由地表面とみなして上式に適用した。得られた基盤入力波 $F_0(T)$ の最大加速度を図-2(上段太線)に、フーリエ・スペクトルを図-3~16(破線)に示す。また図-30には最大加速度およびフーリエ係数最大値に対応

する周期を示した。

次に基盤入力波のフーリエ・スペクトルをすべての観測点について重ね合せた結果を図-33に示した。地表における地震記録は周期特性においても最大加速度量においても地盤の相違により観測点間の直接の対比ができないが、各観測点に共通な基盤における地震動は表層地盤の動特性を除去することによってその傾向が明確となった。上図より各観測点の基盤入力波は速度スペクトルでほぼ同一レベルにあり、その特性も平坦であるといつてよいであろう。

次に基盤入力波の最大加速度をその角振動数で除して速度振巾を求め(1)式の V_0 と比較すれば図-2(下段)のごとくである。図中の破線は波動伝播方向による誤差を見込み(1)式に $1/\sqrt{2}$ を乗じたものである。この程度の誤差が許されるならば東松山地震についても(1)式が適用され本実験式は大変有用であるといえる。

6. まとめ

以上の結果より得られた結論および問題点をまとめると次のごとくである。

- 1) 東松山地震の例においても地震動と常時微動とは概ね周期特性において近似している。その原因は両者とも表層地盤の影響を同等に受けているためと考えられる。
- 2) 地盤のモデル化には未だ多くの問題点を残している。特にS波速度等弾性定数の決定と基盤の設

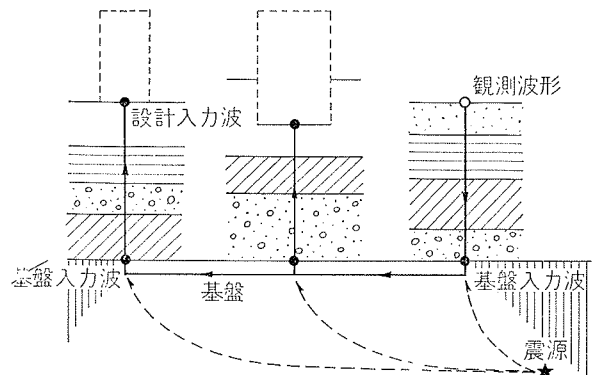


図-34 設計入力地盤波モデル

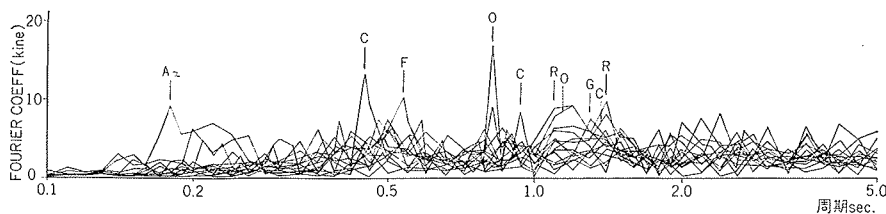


図-33 基盤入力波スペクトルの重合

定については資料が不足しており、今後この方面の調査研究が望まれる。

- 3) しかし、常時微動の卓越周期等を併用すればある程度の地盤のモデル化は可能である。
- 4) 地表の観測記録より逆算して求めた基盤入力波は振巾レベルにおいても周期特性においても各観測点間で大差ない。
- 5) 金井の地震規模・震源距離と基盤における地震動スペクトルに関する実験式は東松山地震の場合にも適用できる。また、実験式の条件である基盤入力波の速度スペクトルが平坦であることも本例の場合ほぼ満足されている。

以上のように、地盤をモデル化する際の種々の問題は残されたままであるが、ここで行なった程度の地盤のモデル化によってある程度地盤の動特性の評価が可能であると考えられる。また、一見煩雑な各観測点の地震記録もその直下の基盤に達する時点では比較的広範囲に亘って振巾、周期特性等にそれ程の相違はないものと思われる。従って設計地盤と地震観測地盤の夫々について基盤を設定し、表層地盤のモデル化を行なうことができれば図—34に示すように他所で観測された地震動から基盤入力波を逆算し、改めて設計地盤を反映した設計用入力波として使用することも可能である。尚、本研究では考慮しなかったが、建物の地震動に及ぼす影響、地震動の建物内入射時の入力損失についても今後研究を進めてゆくつもりである。

謝辞

本研究に使用した東松山地震強震記録は坂本功博士がデジタル化されたものを借用した。ここに厚く謝意を表す次第である。また研究内容について御指摘を賜った岐阜大学、村松郁栄教授に深く感謝の意を表す。波形のカード化と処理計算に当っては国土館大学の池高、鈴木、藤本、松村の諸氏と大林組東京本社機械計算部の多くの方々の労を煩わせた。ここに厚く謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 坂本他 東松山地震の強震計記録についての考察 建築学会大会学術講演集 (1969)
- 2) 金井、小林他 建築構造学大系1「地震工学」彰国社
- 3) 金井他 強震計設置場所の常時微動IV (東京都内) 文部省特定研究
- 4) 東京地盤図 東京地盤調査研究会 技報堂
- 5) 小林・鏡味 地表面での強震記録より推定した基盤の地震動について 建築学会大会学術講演集 (1967)
- 6) 日本の地震学の概観 地震第2編第20巻第4号 (1967)
- 7) MATSUSHIMA, SPECTRAL ANALYSIS OF HIGASHI-MATSUYAMA EARTHQUAKE RECORDS Proceedings of the third Japan Earthquake Engineering Symposium (1970)