

数量化理論による大阪地盤の震動予測

土 岐 憲 三・戸 早 孝 幸

PREDICTION OF SEISMIC GROUND MOTION IN OSAKA BY QUANTIFICATION THEORY

By Kenzo TOKI and Takayuki TOHAYA

Synopsis

This study presents the predicted values of peak acceleration and velocity in Osaka by applying the Quantification theory to a number of calculated ground responses. The responses of ground at surface were calculated by the multi-reflection theory considering the strain-dependent properties of soil. Model ground were constructed from the data base for the dynamic ground properties, which incorporates the P-S wave velocity data performed to actual ground at about 100 sites in Osaka area.

Items considered in the analyses are the shear wave velocity of surficial layer, that of the base ground, the depth of the base ground, the lowest shear wave velocity in the layers and its associated depth and the peak acceleration of incident wave. Most governing item was the depth of the layer of which the shear wave velocity is the lowest in the layers.

1. ま え が き

地震時における地表面近くでの加速度の大きさを推定することは、構造物の耐震設計や地震応答解析を行うに際して最も重要な要素である。しかしながら、地動の強さは地盤構成やその良否に強く影響されることは周知のとおりであり、この両者の関係については古くから多くの研究が行われてきた。こうした多くの成果を包含するような普遍性のある結論として、嶋¹⁾は東京23区の多数の地盤調査のデータに基づいた解析結果から、基盤に対する地表面での加速度振幅の比は、基盤に対する地表面の横波速度 V_s の比にほぼ比例的であることを見出した。これは、同一地震を受ける一つの都市を想定した場合、その都市における地震の基盤がほぼ同じであるとみなせるならば、地表面と基盤との間の地盤構成に無関係に、地表層の横波速度だけで地表面上での加速度振幅のおよその推定が可能であることを述べたものであり、地震防災計画の策定などの実際面への応用という面では大変有用性の高いものである。また、伯野・井上²⁾も重複反射法による地盤の震動解析を行い、その結果から前述の嶋らによるものと同様に、基盤入力に対する地表面での応答倍率は、基盤と地表層の波動インピーダンスの比でほぼ決定されるという結論を得ている。

井上・伯野³⁾は上述の研究を進展させて、適宜設定したいくつかの地盤モデルに対して同様な検討を行い、その結果に対して数量化理論Ⅰを適用して要因分析を実施し、応答に最も大きな影響を持つのは基盤と地表層との波動インピーダンス比であることを再確認している。しかしながら、ここでは数量化理論の適用に際してのアイテムとしてはインピーダンス比と地盤の層厚を取り上げているのみであって、他の要因についての検討は行われていない。また、地盤モデルも実在の地盤ではない。また、上に述べた諸研究はいずれも地盤を線形弾性体として取り扱っているが、強い地震動作用下では地盤を構成する土は非線形挙動をすることも知られており、地表面での強度の定量評価に際してはこの影響を無視することはできない。

以上のような観点から、本報告においては、地盤特性のひずみ振幅依存性を考慮した震動解析を実在の地盤モデルの多数を対象として実施し、それらの結果に対して多くのパラメータを含めた数量化理論を適用し

て、地表面での地動振幅の予測式の提示を行った。ここで用いた地盤モデルは大阪市域を中心とする動的地盤定数のデータベース⁴⁾に基づいており、いずれもボーリング孔を利用して行った P.S 検層資料を集積してデータベースとしたものであり、これにより大阪における実際の地盤特性を反映した予測式が可能となった。

2. 地盤定数のデータベースと地盤モデル

大阪地盤のモデルは、土木学会関西支部と土質工学会によって構築され、関西情報センターがユーザーサービスに当たっているデータベースに基づいて設定した。このデータベースは、PS 検層結果を中心として作成されており、データの項目としては、土質柱状図 (N 値、深度)、PS 検層結果 (P 波、S 波の速度もしくはポアソン比等) が含まれる。しかし、調査項目中には、現時点では密度が明らかにされていないので、密度については N 値と土質との組合せにより Table 1 に示される値を用いた。また、地盤の震動解析に際

Table 1 Specific density assigned to soil.

	N-value	Density ρ (g/cm ³)
Sand	0 ~ 4	1.70
	5 ~ 9	1.80
	10 ~ 29	1.85
	30 ~	1.90
Clay	0 ~ 3	1.60
	4 ~	1.70

して設定する基盤としては、対象地域に共通する広がりを持ち、その層以深では力学的性質の変化が少なく、かつ上位に分布する地層に比べて波動インピーダンスが大きいという望ましい条件に合致する層が少なく、共通な基盤を見出す事は困難であった。そこで今回の応答計算では、せん断波速度が 250 m/sec 以上、かつ N 値が 50 (回/30 cm) 以上の洪積層を基盤として採用した。収集された資料中に、上記の条件を満足する層を含むものは 61 地点であった。これらの地点の Vs の柱状図の例を Fig. 1 に示す。

なお以下においては地点名の代わりに同図中に示したような地点番号を用いる。

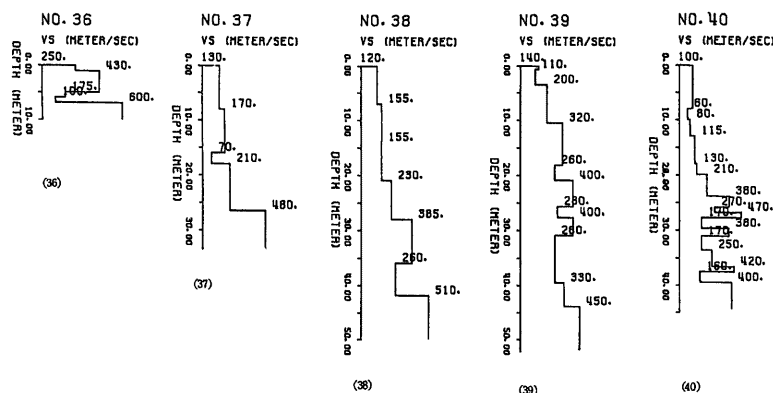


Fig. 1 Examples of ground model treated in the analyses.

3. 地盤の震動解析

上述の61個の大阪地盤のデータに、基盤より地震波を入射して地表面の加速度及び速度振幅の最大応答値を求めた。入力としては、Taft (1952)⁵⁾ と開北橋 (1968)⁶⁾ の記録を用いた。これらの記録はいずれも地表面近くでの記録であり、最大振幅なども異なるが、ここでは入射波動の波形の影響を知るのが目的であるので、加速度振幅の最大値を 50, 100, 150 gal の 3 通りに、また FFT による応答解析に際してのリンク効果を防

ぐため継続時間20秒の地震記録を17秒以降は0とした。応答計算を進めるに際しては、一つの層内でのひずみの分布が問題となる。今回の応答計算では同一の V_s の値を持つ層が厚いときにはその層をいくつかの薄い層に分割し、層の上面でのせん断弾性係数と減衰定数によって分割された層内でのそれらを代表させた。したがって応答結果には、分割する層の厚さが影響すると思われる。そこで、分割する層の厚さと応答値との関係を検討した結果が Table 2 である。Table 2 は地点 2, 地点 47 に Taft (1952) の波形を最大値を 100 gal に修正して入射し、各層を区切る厚さを 1, 2, 5 m と変化させたときの応答の最大値である。Table 2 より各層を 1, 2, 5 m に区切っても応答値に顕著な変化は見られない。層を細かく区切った方が精度は良いと思われるが、数値計算に要する時間との関連上、以下の応答計算を行うに際しては層の区切り方を次のように定めた。すなわち、層厚が 5 m 以下のものは層を区切らず、5 m 以上のものは 2 ~ 3 等分する。

Table 2 Effect of thickness of the discretised soil layer with the same property.

Thickness (m)	Peak acc. (gal) site 2	Peak acc. (gal) site 47
1	182	307
2	182	295
5	183	300

地盤モデルに対する地盤応答計算にはひずみ依存性を考慮した重複反射法を用いた。ひずみ振幅とせん断弾性係数および減衰定数との関係は石原⁷⁾ による代表的な土に対する測定値の平均値を用いた。また、各層内での最大ひずみ振幅の 1/2 を上述のひずみ振幅と地盤定数との関係に対応させたがこれは以下の理由によるものである。すなわち、地盤定数とひずみ振幅の関係を表わす際のひずみ振幅は正弦波を対象としたものであり、これを ϵ_s とする。また、応答解析によるものは不規則な応答波形を示し、その最大値を ϵ_r とする。このとき、 ϵ_r の実効値 (r. m. s) $\bar{\epsilon}_r$ とは次のような関係にある。

$$\bar{\epsilon}_r \doteq \frac{1}{3} \epsilon_r \quad \dots \dots \dots (1)$$

また、正弦波の実効値 $\bar{\epsilon}_s$ は

$$\bar{\epsilon}_s \doteq 0.7 \epsilon_s \quad \dots \dots \dots (2)$$

である。これらの実効値を等置すれば

$$\frac{\bar{\epsilon}_r}{\bar{\epsilon}_s} \doteq 0.5 \quad \dots \dots \dots (3)$$

となる。すなわち、正弦波における最大値は不規則波の約 1/2 に相当することになる。

上述の諸条件、設定の下での応答計算結果の頻度分布を Figs. 2~5 に示す。Figs. 2, 3 は Taft (1952) の波形を、最大値を 50, 100, 150 gal に修正して基盤から入射した際の地表での加速度及び速度振幅の最大値であり、Figs. 4, 5 は開北橋 (1968) の波形

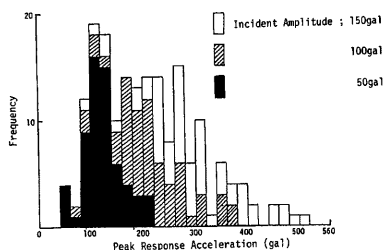


Fig. 2 Histogram of peak response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

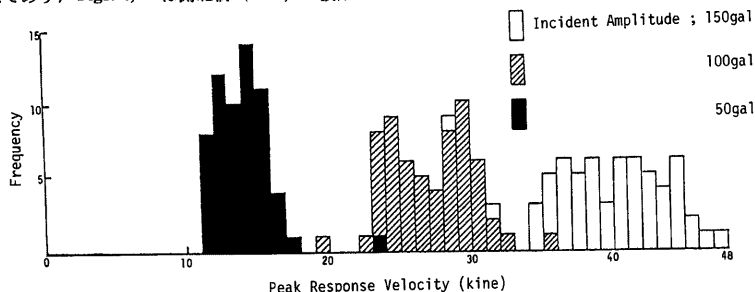


Fig. 3 Histogram of peak response velocity for Taft (1952) velocity.

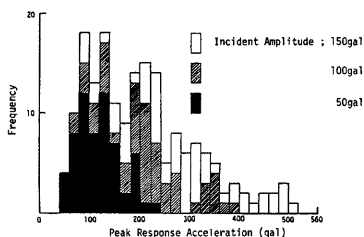


Fig. 4 Histogram of peak response acceleration for Kaihoku (1968) accelerogram.

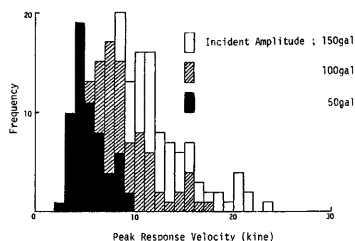


Fig. 5 Histogram of peak response velocity for Kaihoku (1968) velocity.

で同様の手順を行った際の計算結果である。これらの図より読み取れる傾向を示すと次のようになる。

- (1) 応答加速度の最大値に及ぼす入射波の波形の影響は顕著ではなく Taft, 開北橋のいずれの波形においても、地表面での最大応答値は入射波の最大振幅の1～4倍程度の範囲にある。
- (2) 応答速度においては入射波の波形の影響が明瞭である。Taft 波形を入力とした場合には、最大速度が長周期成分に起因しており、表層地盤の震動特性が速度応答に関与する程度の小さいことを示している。

一方、開北橋波形においては短周期成分が卓越することから、加速度応答の場合と同様な傾向を示している。

- (3) 入力加速度の大きな場合で、かつ地表面から深い場所に軟弱層がある場合には、ここでの地盤ひずみが非常に大きな値となって降伏状態に達するため、地表面の応答加速度は入射波より減少する結果となる。

4. 数量化理論 I による応答予測

Fig. 1 の地盤モデル図を見てもわかるように、実際の地盤の構成はかなり複雑な構造をしている。前節では応答値の大概の傾向を調べたが、本節では応答結果を数量化によって多変量解析し、応答値を左右する要因と地盤構造の関係を見い出そうとするものである。ここでは、林の数量化理論 I 類⁸⁾ (量的な外的基準を予測するためのモデル)を使用した。

まず、外的基準 i に、 R 種の項目 (アイテム) があり、その j 項目は k_j 個の分類 (カテゴリー) を持つものとする。その時 $\delta_i(j, k)$ を次式のように定義する。

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1: \text{個体 } i \text{ が } j \text{ 項目の } k \text{ カテゴリーに反応しているとき} \\ 0: \text{個体 } i \text{ が } j \text{ 項目の } k \text{ カテゴリーに反応していないとき} \end{cases} \quad (4)$$

ただし、各アイテムでは唯一のカテゴリーに反応するという条件

$$\sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(j, k) = 1 \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, R) \quad (5)$$

がある。ここで外的基準の予測値を α とすると、 α は次のようになる。

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{k_j} \delta_i(j, k) x_{jk} \quad (6)$$

数量化理論 I 類は、外的基準を最適に再現できるよう、アイテムおよびカテゴリーに重み係数 x_{jk} ($j=1, \dots, R; k=1, \dots, k_j$) を与えるものである。すなわち、外的基準 Y と予測値 α との相関を最大にする (α と Y の相関係数を1に近づける) ような x_{jk} を求めることであり、重回帰分析の一種とみなせる。このような重み係数 $\{x_{jk}\}$ が求まれば、この $\{x_{jk}\}$ を式(6)に代入すると予測値が求まることになる。ここで、各アイテムに対して $\{\max_k x_{jk} - \min_k x_{jk}\}$ という量を求める。通常この値はレンジ (range) と呼ばれているが、このレンジは外的基準 Y に各アイテムが及ぼす影響の大きさを表わす尺度となる。そこで、ここでは、このレンジと偏相関係数を、各アイテムの影響の程度を評価する指標として採用する。また、予測値と外的基準の

Table 3 Combination of items to be treated in the analysis.

CASE	Vs of surficial layer	Vs of base ground	Depth of base ground	Lowest value of Vs	Depth of layer with lowest Vs
1	○	○	○		
2	○	○	○	○	○
3	○	○	○	○	
4	○	○	○	○	○
5		○	○	○	
6	○	○	○		○

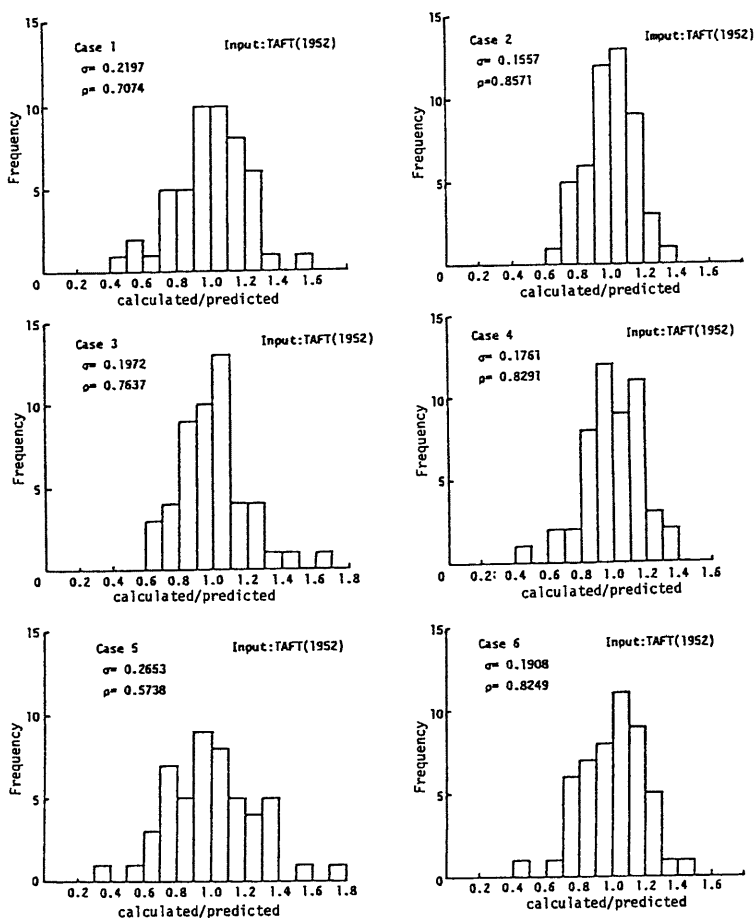


Fig. 6 Comparison of histograms of the ratio of the calculated peak response acceleration to the predicted value for different combination of items corresponding to Table 3.

全体的な精度の評価としては、相関係数 ρ を用いる。

まず、数量化による多変量解析を行う準備として、アイテムの組合せを変えて予測値の精度の検討をした。対象とするアイテムとしては、第一層（最も地表に近い層）の V_s 、基盤の V_s 、表層厚（地表面から基盤までの深さ）、 V_s の最小値、最小の V_s が出現する層の地表面からの距離、を採用し、この5つの要因を Table 3 のように選択別に 6 case に分けて予測値の精度を検討した。なお、アイテムの中で V_s の最小値は、同じ V_s が 2m 以上の層厚にわたってみられるものを選択し、それより薄い層は無視した。最小の V_s の深さは、最小の V_s が現われる層の中央部から地表面までの距離とした。外的規準としては、Taft の波形の最大加速度を 100 gal に調整して、これを入射波として用いた場合の地表面での最大応答加速度振幅を用いた。50の地盤モデルに対して応答計算を実施し、それらの地盤モデルごとに定まるアイテムを Table 3 の組み合わせケースのように選択して、式 (6) による重み係数 x_{jk} を定めた。次に、この重み係数を用いて、逆に 50の地盤モデルにおける加速度値を式 (6) により定め、これと先に求めた応答の計算値との比の頻度を定めた。この結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 を見ると、視察によってもまた、図に付した標準偏差、相関係数からも読み取れるように、case 2 が最も良く予測値を再現しているといえよう。このことは各 case で使用しているアイテム数が case 1, case 5 では 3, case 4, case 6 では 4, case 2 では 5 と差がありアイテム数を増やせば精度が良くなるのは当然の結果であろう。しかし一般に 0.85 以上が良いと言われる相関係数に達しているのは case 2 の場合のみであるので以下の検討では case 2 すなわち 5 つのアイテムを全て用いた。

5. 大阪地盤における予測式

本節では、4. で定めた 5 つのアイテムに、入射波の強さのレベル (50 gal, 100 gal, 150 gal) もアイテムとして取り入れ、2 種類の地震記録すなわち Taft (1952) と開北橋 (1968) の波形について、数量化理論 I 類

Table 4 Result of analysis for the first combination of category; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~120	57	173.2	49.9	0.349
	120~150	51	151.7		
	150~250	45	123.3		
	250~	30	156.0		
Vs of base ground (m/s)	250~350	42	0.0	48.7	0.429
	350~400	36	7.1		
	400~450	36	20.3		
	450~	69	48.7		
Depth of base ground (m)	6~20	33	0.0	76.6	0.557
	20~35	54	-10.8		
	35~50	54	-51.6		
	50~	42	-76.6		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	47.7	0.369
	100~120	51	17.5		
	120~150	54	47.7		
	150~	33	36.2		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	0~4	66	0.0	90.2	0.597
	4~7	45	-51.4		
	7~2	33	-51.6		
	12~	39	-90.2		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	173.2	0.860
	100	61	90.3		
	150	61	173.2		

Table 5 Result of analysis for the second combination of category; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~110	42	184.4	43.5	0.266
	110~140	45	151.4		
	140~200	45	147.5		
	200~	51	140.9		
Vs of base ground (m/s)	250~360	60	0.0	55.6	0.418
	360~410	42	15.4		
	410~500	42	26.6		
	500~	39	55.6		
Depth of base ground (m)	6~20	33	0.0	74.0	0.515
	20~35	54	-14.5		
	35~50	54	-45.2		
	50~	42	-74.0		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	46.9	0.305
	100~120	51	13.5		
	120~140	39	31.8		
	140~	48	46.9		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	0~4	66	0.0	92.3	0.573
	4~7	45	-49.6		
	7~12	33	-48.7		
	12~	39	-92.3		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	173.2	0.857
	100	61	90.3		
	150	61	173.2		

Table 6 Result of analysis for the third combination of category; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~110	42	207.045	47.578	0.297
	110~140	45	183.140		
	140~200	45	168.027		
	200~	51	159.467		
Vs of base ground (m/s)	250~360	60	0.0	55.577	0.454
	360~410	42	4.797		
	410~500	42	10.626		
	500~	39	55.577		
Depth of base ground (m)	6~22	39	0.0	70.207	0.477
	22~35	48	-31.294		
	35~50	54	-36.536		
	50~	42	-70.208		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	50.988	0.340
	100~120	51	13.440		
	120~140	39	30.271		
	140~	48	50.988		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	0~3	48	0.0	98.431	0.602
	3~6	42	-65.766		
	6~11	45	-69.235		
	11~	48	-98.431		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	173.256	0.872
	100	61	90.279		
	150	61	173.256		

を適用して、入射波形別に最大応答加速度及び最大応答速度の予測値を算出し、応答計算値と比較してその精度について検討し、さらに各因子が応答に影響を与える割合についても検討する。

まず Taft を入射波とし、カテゴリーの分類を3通りに変えたときの加速度応答値に対する解析結果をそれぞれ Table 4~6 に示す。これらの諸表では、それぞれのアイテムごとにアイテムの諸値に該当するカテゴリー値を、5つのアイテムに対してすべて加え合わせたものが予測値を与える。こうして得られる予測値に対する応答計算値の比の頻度分布を示したのが Figs. 7~9 である。これらによるとカテゴリーの分け方によって多少の変化を生じるが、図中に示した重相関係数が最も大きいのは Fig. 9 の場合であり、これに該当する Table 6 の分け方がよい近似を与えることがわかる。また、Table 6 の各アイテムが応答値に与える影響は、同表中のレンジ及び偏相関係数を比較することにより入射波の大きさ、最小の Vs の深さ、表層厚、

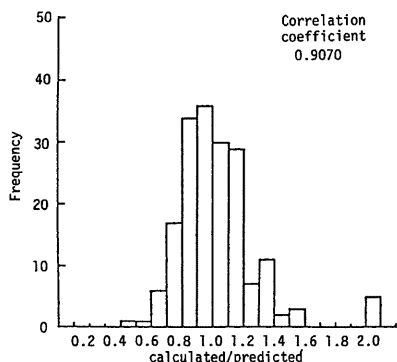


Fig. 7 Histogram of the ratio of the calculated peak response acceleration to the predicted value for the first combination of category shown in Table 4; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

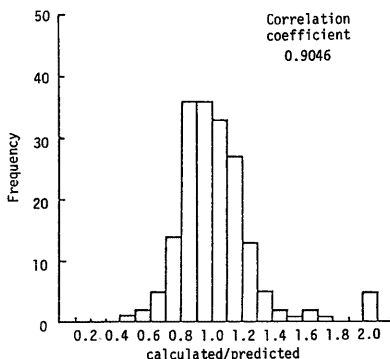


Fig. 8 Histogram of the ratio of the calculated peak response acceleration to the predicted value for the second combination of category shown in Table 5; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

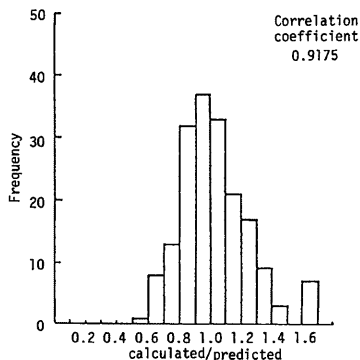


Fig. 9 Histogram of the ratio of the calculated peak response acceleration to the predicted value for the third combination of category shown in Table 6; response acceleration for Taft (1952) accelerogram.

基盤の Vs, 最小の Vs, 第一層の Vs の順で大きくなっていることがわかる。また、アイテム内のカテゴリー値を見ると、第一層の Vs は小さいほど、基盤の Vs は大きいほど、表層厚は薄いほど、最小の Vs は大きいほど、最小の Vs の地表面からの距離は浅いほど、入射波の最大値は大きいほど、最大応答加速度値を大きくすることがわかる。カテゴリーの分類によってこのような差異が出ているのはそれぞれの分類ごとの反応数、すなわちサンプルの数に差があるためと考えられ、Table 3 の場合が、各分類に入るサンプル数が近くなっていることから、予測値の精度を上げるためにはそれぞれの反応数ができるだけ等しくなるようにカテゴリーを分類することが必要と思われる。

レンジの幅はカテゴリー値の最大値と最小値の差であり、これは各アイテムの数値の変動域内での変化による予測値の変動を表わしている。したがって、このレンジは実際の地盤の構成や諸特性、入力強度などが地表面での加速度応答値に及ぼす影響の相対的な大きさを表現していることになる。このような観点からすれば、Table 7～9 のいずれにおいても入射波の最大値が最も大きな影響度を持つのは当然としても、最小の Vs の出現する深さが他の諸要因より大きな影響を持つことに注目される。また、この最小の Vs の現われる深さが大きい程、カテゴリー値は小さいことから、より深い所に低速度の横波速さを持つ層があれば、地表面での加速度応答はそれぞれ小さな値となることを意味しており、マイクロゾーニング等に関連して興味ある現象を示唆している。

次に Table 6 と同じカテゴリーの分け方で入射波を開北橋とした場合についても同様の検討を行った。このときの加速度の応答値に対する結果 Table 7 及び、計算値と予測値の比 Fig. 10 によれば、応答値に与える影響は、Taft の場合とは少し違い、入射波の強さ、最小の Vs の深さ、第 1 層の Vs, 表層厚、最小の Vs, 基盤の Vs の順で強くなっている。しかしながら、全体としては Taft 波形の場合と大差はなく、これらの 2 波に関しては予測結果に対する入射波形の影響は小さいといえよう。

以上の結果より、加速度応答値については、入射波の最大振幅、最小の Vs が現われる層の地表面からの深さの 2 つの要因が支配的なパラメータであり、次に表層厚が支配的であるといえる。他のアイテムについては、入射波形の別で多少の変化はあるが、上述の 3 つのアイテムより影響の度合いが小さい。また、各アイテムのカテゴリーについては第 1 層の Vs は小さいほど、基盤の Vs は大きいほど、加速度応答値に与える影響が顕著であることがわかる。これは、従来から知られている、基盤と地表面付近での波動インピーダンス比が大きい程応答値が大きいという結果に対応しているものと考えてよい。

次に速度応答値を外的規準値とした場合の結果を Table 8, 9 ならびに Figs. 11～12 に示す。まず、Table 8 の Taft を入射波とした場合は入射波の大きさ、基盤の Vs, 第 1 層の Vs, 最小の Vs, 表層厚、最小の Vs の深さの順で影響が強く、特に入射波の大きさがかなりの比重を占めていることに注目される。これは、Fig. 3 の内容と対応しており、応答速度の最大値は入射波のレベルによりほぼその値が定まり、その他の要因の変動の影響による応答速度の変化の幅が狭いことを定量的に示すものにほかならない。また、Fig. 11 に示す予測値と計算値の比の分布は非常に 1.0 に近い部分に集中しており、予測精度が極めて高いことを示している。アイテム内のカテゴリー数値は、第 1 層の Vs は小さいほど、入射波は大きいほど応答値を大きくしているが、最小の Vs や最小の Vs の深さには一定の傾向が見られない。また、表層厚については加速

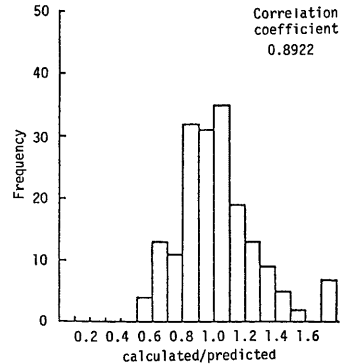


Fig. 10 Histogram of the ratio of the calculated peak response acceleration to the predicted value for the combination shown in Table 7; response acceleration for Kaihoku (1968) accelerogram.

Table 7 Result of analysis for the third combination of category; response acceleration for Kaihoku (1968) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~110	42	221.157	68.454	0.433
	110~140	45	209.302		
	140~200	45	158.738		
	200~				
Vs of based ground (m/s)	250~360	60	0.0	55.595	0.382
	360~410	42	-5.810		
	410~500	42	8.468		
	500~	39	49.785		
Depth of base ground (m)	6~22	39	0.0	66.246	0.433
	22~35	48	-31.422		
	35~50	54	-14.066		
	50~	42	-66.246		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	76.274	0.405
	100~120	51	26.252		
	120~140	39	38.091		
	140~	48	76.274		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	0~3	48	0.0	108.776	0.657
	3~6	42	-99.561		
	6~11	45	-94.758		
	11~	48	-108.776		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	162.901	0.812
	100	61	91.656		
	150	61	162.901		

Table 8 Result of analysis for the third combination of category; response velocity for Taft (1952) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~110	42	13.897	3.826	0.503
	110~140	45	12.037		
	140~200	45	11.127		
	200~	51	10.072		
Vs of base ground (m/s)	250~360	60	0.0	3.953	0.564
	360~410	42	1.147		
	410~500	42	1.474		
	500~	39	3.953		
Depth of base ground (m)	6~22	39	0.0	1.685	0.283
	22~35	48	0.831		
	35~50	54	1.335		
	50~	42	1.685		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	1.879	0.306
	100~120	51	0.563		
	120~140	39	-0.272		
	140~	48	-1.316		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	1~3	48	0.0	1.713	0.265
	3~6	42	0.311		
	6~11	45	0.688		
	11~	48	-1.045		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	26.242	0.984
	100	61	13.309		
	150	61	26.242		

Table 9 Result of analysis for the third combination of category; response velocity for Kaihoku (1968) accelerogram.

	Category	Number of data	Category value	Range	Partial corr. coeff.
Vs of surfacial layer (m/s)	70~110	42	0.949	1.964	0.316
	110~140	45	8.403		
	140~200	45	7.551		
	200~				
Vs of base ground (m/s)	250~360	60	0.0	2.215	0.425
	360~410	42	-0.001		
	410~500	42	0.514		
	500~	39	2.215		
Depth of base ground (m)	6~22	39	0.0	2.315	0.413
	22~35	48	-1.359		
	35~50	54	-0.589		
	50~	42	-2.315		
Lowest value of Vs (m/s)	60~100	45	0.0	1.461	0.257
	100~120	51	0.547		
	120~140	39	1.286		
	140~	48	1.461		
Depth of layer with lowest Vs (m/s)	0~3	48	0.0	4.234	0.661
	3~6	42	-3.393		
	6~11	45	-3.818		
	11~	48	-4.234		
Incident amplitude (gal)	50	61	0.0	7.926	0.878
	100	61	4.203		
	150	61	7.927		

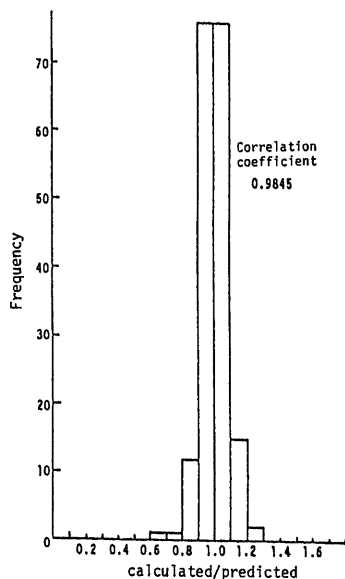


Fig. 11 Histogram of the ratio of the calculated peak response velocity to the predicted value for the combination shown in Table 8; response velocity for Taft (1952) accelerogram.

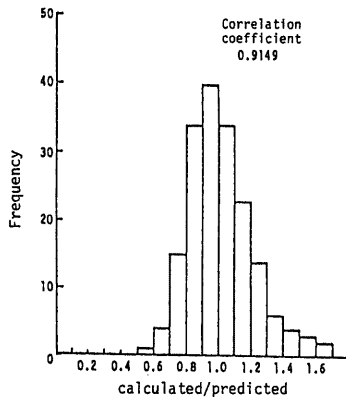


Fig. 12 Histogram of the ratio of the calculated peak response velocity to the predicted value for the combination shown in Table 9; response velocity for Kaihoku (1968) accelerogram.

度の場合と逆の傾向を示している。

開北橋を入射波としたときは、入射波の大きさ、最小の V_s の深さ、基盤の V_s 、表層厚、第1層の V_s 、最小の V_s の順で影響が強く、各アイテムが応答速度に及ぼす影響の度合は偏相関係数の欄を比較すれば明らかのように、加速度の場合とほぼ同様である。開北橋波形の場合には Taft 波形に比較して短周期成分が卓越しており、地盤内での増幅の結果が地表面に現われるため、加速度応答の場合と同様の結果になるものであろう。

6. 結 論

大阪を中心とする61個所で行われた PS 検層結果に基づいた地盤モデルに対して、入力波形を2種類、それらの強度を3通りに変えて、合計366の地震応答計算を実施し、それらに対して数量化理論Ⅰ類を適用して地動加速度および地動速度の予測値を提示した。予測値は入射波形ごとに提示したが、それに含まれる影響因子は

- i) 地表面でのせん断波速度
- ii) 基盤のせん断波速度
- iii) 地表面から基盤までの表層厚さ
- iv) 表層内での最小のせん断波速度
- v) 最小のせん断波速度を持つ層の地表面からの深さ
- vi) 入射波の最大加速度

の6つである。これらの因子のうち、予測式における影響の最も大きいのは vi) の入射波の最大加速度であり、これは加速度応答よりも速度応答において顕著となる傾向がある。

入射波の強度以外で最も支配的な要因は v) の最小のせん断波速度を持つ層の出現深度であり、これが深い程地表面での応答、特に加速応答が減少することが明らかにされ、その影響度の定量評価が行われた。従来の地震震動の解析では地表面と基盤との波動インピーダンス比が地表面応答に対しては支配的であり、その間の地層構成は大きな影響を持たないと考えられてきた。しかるに、本解析の結果は、地表面と基盤とのせん断波速度よりも最小のせん断波速度の出現深さがより大きな影響因子であることを示しており、マイクローニング等において興味ある結果である。Table 6 において地表面層のせん断波速度と基盤のせん断波速度の変動域における予測値の最大変動量はレンジの45.6と55.6の和である101.2であるが、これは最小の V_s の深度のレンジ98.4とほぼ同程度であり、最小の V_s の出現深さの影響の大きさが明らかである。

しかしながら、このような結論は実際の地震時に、観測により確認されたものではなく、さらにこの意義についてより詳細に検討を行わねばならない課題であらう。

参 考 文 献

- 1) 嶋 悦三：東京の地盤，予防時報（季刊），第99巻，1974，pp. 62-68.
- 2) 伯野元彦・井上涼介：地震継続時間ならびに最大加速度に対する軟弱地表面の影響，第4回日本地震工学シンポジウム論文集，1975，pp. 73-80.
- 3) 井上涼介・伯野元彦：地盤の鉛直剛性分布が地表面震動特性に及ぼす影響，土木学会論文報告集，第310号，1981，pp. 1-10.
- 4) 土質工学会関西支部，「関西地盤の動土質特性調査」委員会：関西地盤の動土質特性調査業務報告書，昭和57年3月。
- 5) Hudson, D. E. and et al.: Strong Motion Earthquake Accelerograms, Digitized and Plotted Data, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- 6) 岩崎敏男・川島一彦・高木義和・相沢 興：開北橋における地盤とケーソン橋脚の動的相互作用の解析，土木学会論文報告集，NO. 322, 1982.

- 7) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976.
- 8) 林知己夫・樋口伊佐夫・駒沢 勉：情報処理と統計数理，産業図書，1970.