

名古屋地盤の振動特性に関する研究

飯田 汲事 ・ 正木 和明 ・ 楓 重彦

Vibration Characteristics of the Ground in Nagoya Area

kumizi IIDA, Kazuaki MASAKI

and Shigehiko KAEDE

名古屋市およびその近辺の地盤を対象に、昭和48年以来弾性波速度P波、S波を測定してきた。昭和52年度に港区高木小学校、北区水草団地、名東区猪高町、海部郡十四山村公園の4地点を追加したので、測定地点が合計35地点となり、資料を豊富にすることができた。今回は資料解析に重点をおき、過去の資料をもとに弾性波の振動特性、また既往の地震被害との関係も分析してみた。さらにS波速度を推定する式も確立できたので、それらの成果を報告する。

1. まえがき

名古屋市地盤を対象として、地中地層内の弾性波P波、S波速度を求め、地震時における地盤の振動特性を総合的に解明してきた。^{1) 2) 3) 4) 5)}地震動災害を想定する上で重要なことは、地盤の動力学的特性および地上構造物の振動特性を解明し、両者の相互作用等を考察判断することである。名古屋市地盤は濃尾平野南東部に位置し、南西部ほど沖積層の厚い地盤であり軟弱である。そのため地震時における地盤災害の増大が考えられ、その対策として地盤の地質状況を工学的に把握する必要がある。以上の観点より、地盤内のP波、S波速度は防災対策を考える上での重要な基礎資料になると思われる。

今回はボーリング時に採取した試料をもとに、室内実験でP波、S波速度を求めてみた。またS波の波動記録をもとに、地層内のS波の減衰およびせん断ひずみについても論じた。さらに地盤のS波速度と既往の地震被害との関係も、前回の資料をもとに調べてみた。⁵⁾また今まで求められたS波速度値は、現場でのP、S検層により実測されたものであり、多くの日時と経費を要し、その測定は容易でないので統計学における重回帰分析法を利用し、S波速度の推定式を提案した。この式により将来は名古屋市地盤を対象に全地点、全深度でのS波速度値が容易に求められ、防災対策に役立つものと思われる。

2. 名古屋地盤の地質概況

名古屋は濃尾平野南東部に位置する沖積平野である。前回でも報告したように、図1、2を見ると、名古屋市南西部ほど沖積層が厚く堆積していることがわかる。約1万年前に堆積した沖積層(南陽層)の厚さは、深い所で60m前後である。洪積層は時代の古い順に大きく分けて、八事期層、後八事期層、熱田層、大曾根層などがあ

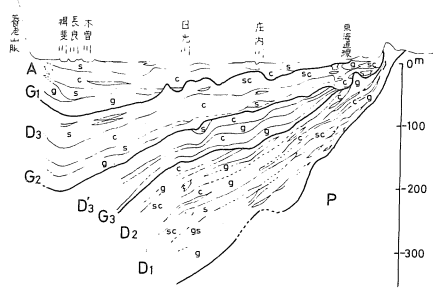


図1 濃尾平野南部東西断面図

- | | | | |
|----------------|-------|------------------|------|
| A | 南陽層 | G ₁ | 第1礫層 |
| D ₃ | 熱田層 | D ₃ ' | 海部累層 |
| G ₂ | 第二礫層 | G ₃ | 第三礫層 |
| D ₂ | 後八事期層 | D ₁ | 八事期層 |
| P | 東海層群 | | |

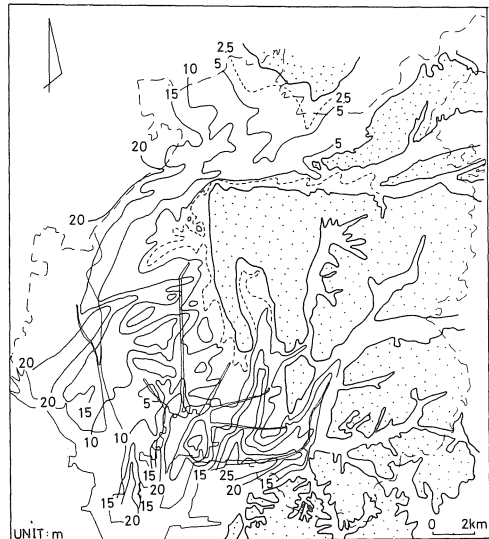


図2 沖積層基底面等深線図

(点在部分は洪積層あるいは第三紀層である。)

る。後八事期層が約 100 万年前に、熱田層が約 20 万年前から 3.5 万年前に形成しており、大曾根層は約 2.7 万年前に形成されている。名古屋各地点で、それぞれの深度は異なるが、南西部ほど厚く堆積している。第三紀（矢田川累層）においては、約 200 万年前であり、深い所で深度 300m 以下の所もある。以上の概略的な形成過程からわかるように、名古屋地盤は南西部ほど軟弱であり、地盤沈下、地震時の液状化等が心配されている現状である。

3. 室内実験による P 波および S 波速度の測定

現場で P、S 検層を実施することにより求められる P 波および S 波速度と、ボーリング時に採取した試料をもとに室内実験より求めた P 波、S 波速度とを比較してみた。今回は港区高木小学校および海部郡十四山村公園の場合である。

3-1 P 波速度の測定結果

ボーリングコアを円柱型に整形し、その高さを測り、伝達時間を超音波速度測定器を用いて計測し、P 波速度を求めた。P 波速度は含水比に影響されやすいので含水比も調べた。その結果を表 1、2 に示した。そして室内

表 1 港区高木小学校における P 波速度室内実験値

深度 (m)	含水比 (%)	室内 実験値 V _P (m/sec)	現場 実験値 V _P ' (m/sec)	備 考	
				含水比 (%)	V _P (m/sec)
4	24.6	1702	470	0	{ 909 749
12	19.8	394	1950	0	—
16	30.0	1139	1220	0	1278
20	35.2	660	1990	0	585
26	15.5	558	1990	0	{ 634 576
28	20.3	1212	1990	0	—
30	28.6	1235	1990	0	—
32	22.2	540	1400	0	—
34	23.9	857	1400	0	—
36	26.7	830	1960	0	820
38 I	57.8	1563	1960	0	1741
38 II	53.0	{ 1452 1483	1960	0	1040
40 I	55.0	1167	1260	0	836
40 II	37.6	1009	1260	0	594
42 I	62.1	1441	1260	0	1321
42 II	61.2	1129	1260	0	871
44	65.4	1132	1260	0	944
50 I	41.7	1470	1940	0	1054
50 II	40.1	{ 1457 1055	1940	0	1050
55	11.8	678	1940	0	733
60 I	26.7	1574	2840	0	{ 1398 1294
60 II	25.5	1675	2840	0	880
70	45.1	659	1880	0	431

表 2 海部郡十四山村公園における P 波速度室内実験値

深度 (m)	含水比 (%)	室内 実験値 V _P (m/sec)	現場 実験値 V _P (m/sec)	備 考	
				含水比 (%)	V _P (m/sec)
4 I	24.2	1593	890	0	—
4 II	24.2	1458	890	0	670
8	33.6	844	890	0	908
25	47.3	1143	1130	0	1050
27.5	75.5	1535	1130	0	1014
30	62.4	1449	1480	0	1184
32.5	56.7	1477	1480	0	1132
86	34.4	1294	1630	0	610
92	41.3	1592	1630	0	680
96	52.8	1346	1630	0	847
99 I	50.9	1417	1630	0	780
99 II	50.9	1140	1630	0	—
101.5	58.9	1354	1630	0	840

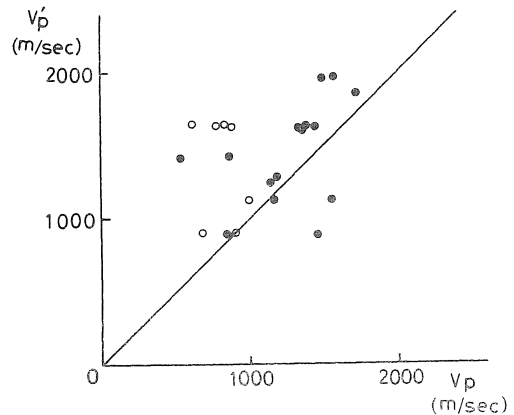


図 3 P 波速度の室内実験値 V_P と現場実験値 V_P' との比較 (黒丸は含水比が任意の場合であり、白丸は 0% のときである。)

実測値 V_P と現場実験値 V_P' とを比較したのが図 3 である。傾き 1 の直線上に点がのれば V_P = V_P' である。図中白丸は含水比が 0% のときの比較で、黒丸は含水比が任意の場合である。高木小学校においては、室内実験値の方が小さめに出ている。十四山村公園では、やや室内実験値が現場実験値に近いことがわかる。

3-2 S 波速度の測定結果

S 波速度の測定原理は、一端自由、一端固定を条件とする土柱共振法である。これは飯田汲事の考案によるもので、その実験装置概略図を図 4 に示す。ボーリング試料を円柱に整形し、試料のまわりをセロハンでつつみ、下端を土台に接着剤で固定する。試料の上端に電磁石を接着固定し、発振器からコイルに電流を流し、周期的な強制ねじり応力を加える。そのときの共振周波数をカウ

ンターで読み取り、次の理論式より S 波速度を算出する。

$$V_s = \frac{4 \cdot \ell \cdot f}{2n + 1}$$

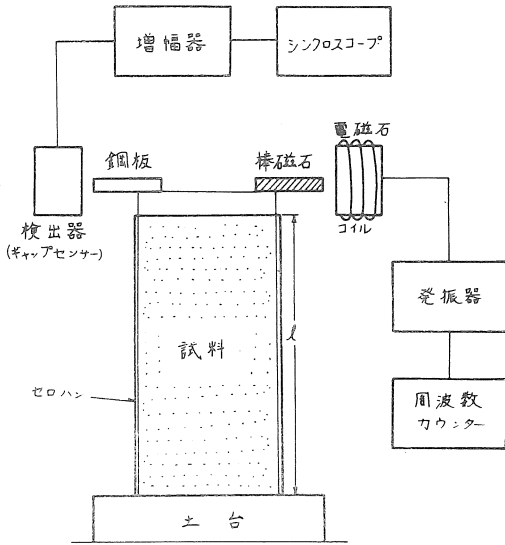


図 4 土柱共振法実験装置概略図

ただし ℓ は試料高、 f は共振周波数、 n はモードナンバーである。測定時のひずみ領域は約 10^{-6} である。

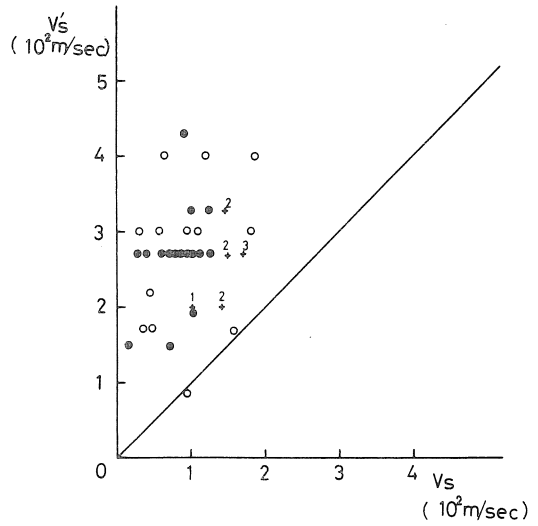


図 5 S 波速度の室内実験値 V_s と現場実測値 V_s' との比較 (黒丸は港区高木小学校、白丸は海部郡十四山村公園、+印は高木小学校において測圧をかけた場合であり、数字は Kg/cm^2 が単位である。)

表 3 港区高木小学校および海部郡十四山村公園における S 波速度室内実験値

高 木 小 学 校				十 四 山 村 公 園			
深 度 (m)	室内実験値 V_s (m/sec)	現場実験値 V_s (m/sec)	測 圧 時 (m/sec)	深 度 (m)	室内実験値 V_s (m/sec)	現場実験値 V_s (m/sec)	
4	17.0	130	100.6 (1Kg/cm ²) 142.6 (2Kg/cm ²)	4	95.9	90	
	70.6	130		8	57.8	130	
16	100.6	200		25	91.1	130	
	20	102.3		270	27.5	38.7	170
26		38.2		270	30	46.9	170
28	26.9	270			161.5	170	
30	84.7	270		150.2 (2Kg/cm ²) 171.7 (3Kg/cm ²)	32.5	46.4	220
	112.8	270			86	65.0	400
34	63.1	270				120.0	400
	63.1	270				185.5	400
36	85.6	270	92		31.5	300	
	93.7	270			110.7	300	
40	76.1	270			180.8	300	
	78.5	270	96		98.2	300	
42	124.7	270	101.5		58.2	300	
	112.7	270			107.9	—	
50	73.8	270					
	92.5	270					
55	123.0	330					
60	99.9	330					
70	88.4	430					

その測定結果を表3に示し、室内実験値 V_s と現場実測値 V_s' との比較を図5に示した。図中黒丸は高木小学校、白丸は十四山村公園における比較で、+印は高木小学校における試料に側圧をかけた場合である。表および図からわかるように、室内実験値の方が現場実測値より小さく半分以下である。側圧をかけることによって土柱共振法によるS波速度が大きくなる傾向にあるが、真の地盤地層内のS波速度を求めるには地層内自然圧の影響その他を考究するなど今後の研究の余地がある。

4. 地震波の波動特性

4-1 地層内のS波の減衰

地盤の媒質には内部摩擦があるため、弾性波の振巾は時間的にも距離的にも減衰する。いわゆる地質の深度方向に対する減衰性を知ることは地震工学的に重要である。今回は、現場P、S検層時に得られたS波の波動記録をもとに、地盤の減衰について論じた。解析した場所は昭和52年度に実施した港区高木小学校および海部郡の十四山村公園、また昭和51年度に実施した中川区千音寺小学校と瑞穂区津賀田中学校の合計4地点である。

(i) 解析方法

S波は「板たたき法」により発生させているため、地表での起振エネルギーを一定にしておいて、地中で得られるS波の振巾を深度別に比較すれば減衰が考えられる。ボーリング孔内で深度2m毎にS波の波動記録をとり、その最大振巾の全振巾とアダプターを通して得られる較正電圧波形(Calibration)の全振巾との比を求め、その比の減少を調べた。

(ii) 解析結果

解析結果を図6、7、8、9に示した。図中縦軸は深

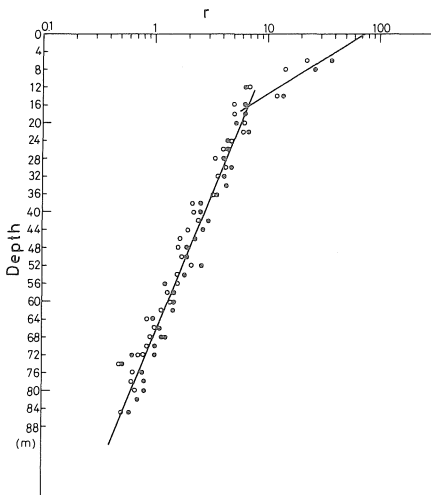


図6 港区高木小学校におけるS波の減衰と深度との関係

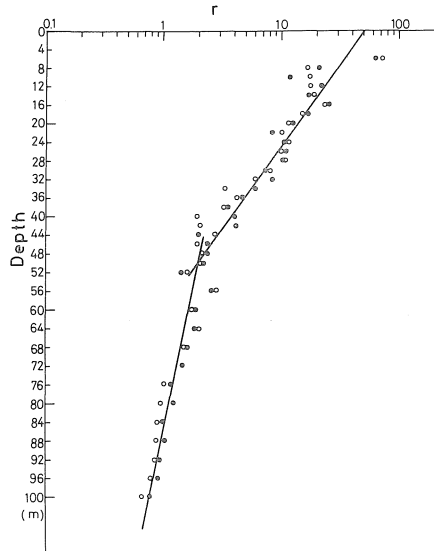


図7 海部郡十四山村公園におけるS波の減衰と深度との関係

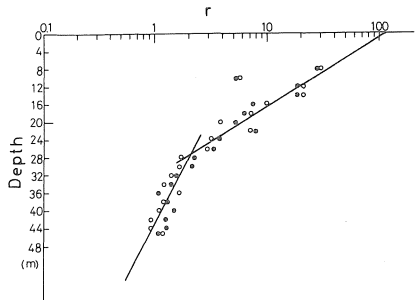


図8 中川区千音寺小学校におけるS波の減衰と深度との関係

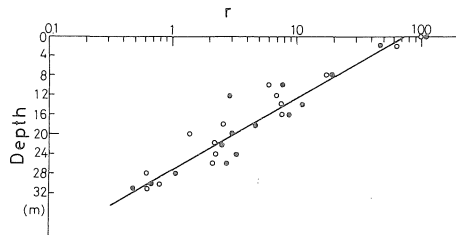


図9 瑞穂区津賀田中学校におけるS波の減衰と深度との関係

度、横軸は振巾の比を対数でとったものである。白丸は板を左から強打した場合、黒丸は右から強打した場合の結果である。振巾の比の深度別変化をみるため、最小二乗法により下記の関係式を求めた。ここでは振巾の比を r 、深度を D (m) と表示してある。

(I) 港区高木小学校の場合(図6)

$$0 < D < 16.4 \quad r = 73.87 \cdot e^{-0.147D}$$

$$16.4 < D < 85.0 \quad r = 12.30 \cdot e^{-0.037D}$$

- (II) 海部郡十四山村公園の場合 (図7)
 $0 < D < 50.0 \quad r = 53.10 \cdot e^{-0.065D}$
 $50.0 < D < 100.0 \quad r = 5.08 \cdot e^{-0.020D}$
- (III) 中川区千音寺小学校の場合 (図8)
 $0 < D < 27.0 \quad r = 120.39 \cdot e^{-0.147D}$
 $27.0 < D < 46.0 \quad r = 7.74 \cdot e^{-0.053D}$
- (IV) 瑞穂区津賀田中学校の場合 (図9)
 $0 < D < 32.0 \quad r = 75.61 \cdot e^{-0.160D}$

- $49 < D < 85 \quad D = -24.8 \log r - 80.0$
- (II) 海部郡十四山村公園の場合 (図11)
 $0 < D < 26 \quad D = -39.2 \log r - 137.8$
 $26 < D < 48 \quad D = -20.6 \log r - 59.7$

これを見ると全体的には振巾の比は距離により減少していることがわかる。高木小学校においては、深度16.4m付近で勾配が変わり、上層では減衰が大きいことがわかる。これは沖積層であって、ポアソン比の平均が0.493であり、軟弱であるためと考えられる。それ以深では勾配が一定である。十四山村公園においては、点のばらつきはあるが、深度50mあたりから勾配が急になっている。上層のS波速度は90~220m/secで小さく、沖積層のシルトが多い。千音寺小学校では深度27m付近で勾配が変化している。ここの沖積層厚は22mである。洪積台地である津賀田中学校においては、地表より傾きが一定である。このようなことからS波の減衰特性は地盤形成の時代区分の判定要素にもなるものと考えられる。

4-2 地層内のせん断ひずみ

地盤地層内のせん断ひずみの分布を調べた。今回は港区高木小学校、海部郡十四山村公園および北区水草団地の合計3地点である。

(i) 解析方法

「板たたき法」により測定されたS波波動記録の最大速度 V_{max} を次式より求める。

$$V_{max} = \frac{A \cdot V_c}{A_c \cdot V} \text{ATT}$$

ここでAは最大振巾、 A_c は校正電圧の振巾、Vは孔中感震器の電圧感度、 V_c は校正電圧、ATTは増巾器の減衰率である。孔中感震器は直交水平2成分であるため、それぞれの最大速度を V_{1max} 、 V_{2max} とすると、最大速度振巾 V_{max} は次のようになる。

$$V_{max} = \sqrt{(V_{1max})^2 + (V_{2max})^2}$$

この最大速度振巾 V_{max} を地層内のS波速度 V_s で除せば、最大せん断ひずみ r が求められる。

(ii) 解析結果

最大せん断ひずみの解析結果を表4および図10, 11, 12に示した。またせん断ひずみの深度別分布の関係を次式で表示した。深度をD(m)、せん断ひずみをrとしてある。

- (I) 港区高木小学校の場合 (図10)
 $0 < D < 19 \quad D = -17.4 \log r - 61.4$
 $19 > D > 49 \quad D = -47.8 \log r - 202.2$

表4 せん断ひずみの地層内分布

高木小学校		十四山村公園		水草団地	
深度(m)	せん断ひずみ r	深度(m)	せん断ひずみ r	深度(m)	せん断ひずみ r
12	5.02×10^{-6}	6	3.51×10^{-5}	2	2.41×10^{-5}
16	3.31×10^{-6}	8	1.62×10^{-5}	4	1.34×10^{-5}
18	3.09×10^{-6}	10	1.47×10^{-5}	6	6.07×10^{-6}
20	1.60×10^{-6}	12	1.64×10^{-5}	8	3.65×10^{-6}
22	2.88×10^{-6}	14	1.37×10^{-5}	10	2.82×10^{-6}
24	1.50×10^{-6}	16	1.31×10^{-5}	12	1.06×10^{-6}
26	1.43×10^{-6}	18	1.12×10^{-5}	14	8.13×10^{-7}
28	1.31×10^{-6}	20	8.26×10^{-6}	16	4.25×10^{-7}
30	1.45×10^{-6}	22	7.82×10^{-6}	18	3.65×10^{-7}
32	1.01×10^{-6}	24	8.31×10^{-6}	20	1.93×10^{-7}
34	1.33×10^{-6}	26	7.16×10^{-6}	22	1.49×10^{-7}
36	1.01×10^{-6}	28	5.88×10^{-6}	24	1.22×10^{-7}
38	8.48×10^{-7}	30	4.52×10^{-6}	26	7.54×10^{-8}
40	8.33×10^{-7}	32	3.35×10^{-6}	28	4.06×10^{-8}
42	8.33×10^{-7}	34	2.62×10^{-6}	30	3.39×10^{-8}
44	7.93×10^{-7}	36	2.14×10^{-6}		
46	6.96×10^{-7}	38	1.47×10^{-6}		
48	4.85×10^{-7}	40	1.19×10^{-6}		
50	6.78×10^{-7}	42	1.44×10^{-6}		
52	4.76×10^{-7}	44	8.39×10^{-7}		
54	2.73×10^{-7}	46	9.54×10^{-7}		
56	2.55×10^{-7}	48	6.85×10^{-7}		
58	2.67×10^{-7}	50	3.83×10^{-7}		
60	2.64×10^{-7}	52	3.44×10^{-7}		
62	2.58×10^{-7}	56	5.36×10^{-7}		
64	1.10×10^{-7}	60	4.27×10^{-7}		
66	1.10×10^{-7}	64	3.09×10^{-7}		
68	1.46×10^{-7}	68	2.45×10^{-7}		
70	1.22×10^{-7}	72	2.65×10^{-7}		
72	7.40×10^{-8}	76	1.67×10^{-7}		
74	5.19×10^{-8}	80	1.65×10^{-7}		
76	8.31×10^{-8}	84	1.40×10^{-7}		
78	8.71×10^{-8}	88	1.29×10^{-7}		
80	2.03×10^{-7}	92	1.57×10^{-7}		
82	5.13×10^{-7}	96	1.53×10^{-7}		
85	1.33×10^{-7}	100	1.17×10^{-7}		

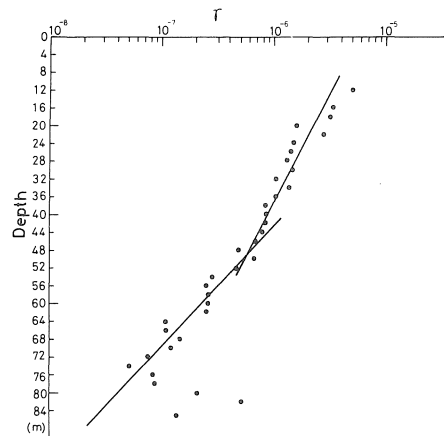


図10 港区高木小学校における地層内のせん断ひずみと深度との関係

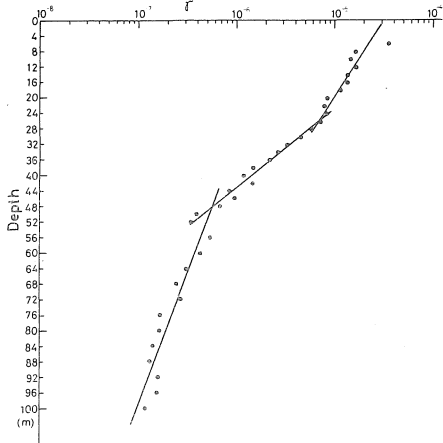


図11 海部部十四山村公園における地層内のせん断ひずみと深度との関係

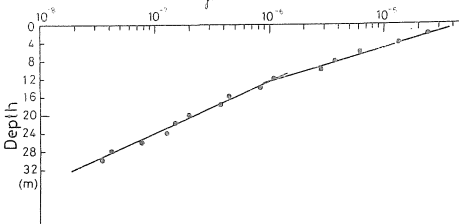


図12 北区水草団地における地層内のせん断ひずみと深度との関係

$48 < D < 100 \quad D = -67.1 \log r - 304.0$

(Ⅲ) 北区水草団地の場合 (図12)

$0 < D < 12 \quad D = -7.4 \log r - 24.8$

$12 < D < 30 \quad D = -11.4 \log r - 44.4$

以上3地点のせん断ひずみの結果より言えることは、深度が増すごとにせん断ひずみは減少し、そのオーダーは約 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ である。高木小学校では深度12mでの 5.02×10^{-6} が最大で、深度74mでの 5.19×10^{-8} が最小である。全体的に点がばらついているが、深度80m以降 2.03×10^{-7} とせん断ひずみが急に大きくなっている。これはN値が14と急に小さくなっていることからわかるように軟弱な層であるためである。十四山村公園においても、深度方向にせん断ひずみは減少し、 $3.51 \times 10^{-5} \sim 1.17 \times 10^{-7}$ の深度分布を示す。水草団地では深度2mで 2.41×10^{-5} の値をとり、深度30mで 3.39×10^{-8} と最小値をとる。このように浅層でせん断ひずみのオーダーが 10^{-8} となるのは、この地点は洪積層であり、硬質な地盤であるためである。

5. S波速度と地震被害との関係⁹⁾

名古屋市における既往の地震、特に濃尾地震(1891年10月28日, $M=8.4$)および東南海地震(1944年12月7日, $M=8.0$)による震害とS波速度との関係を分析し

てみた。

5-1 S波速度と住家被害率との関係

濃尾地震および東南海地震による住家被害率とS波速度との関係をグラフ化したのが図13, 14である。縦軸に

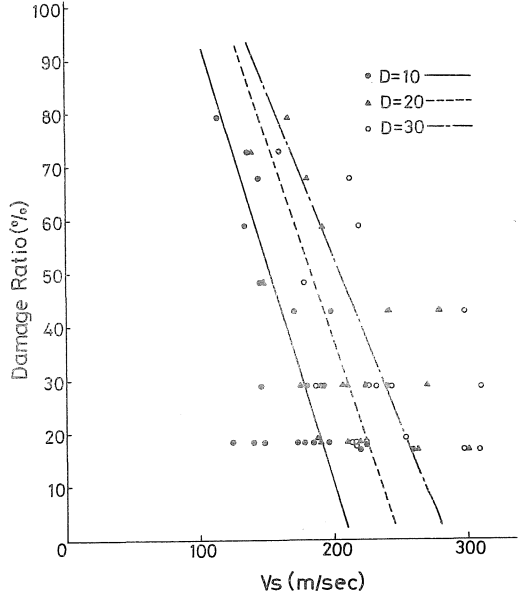


図13 濃尾地震(1891年)による住家被害率とS波速度との関係

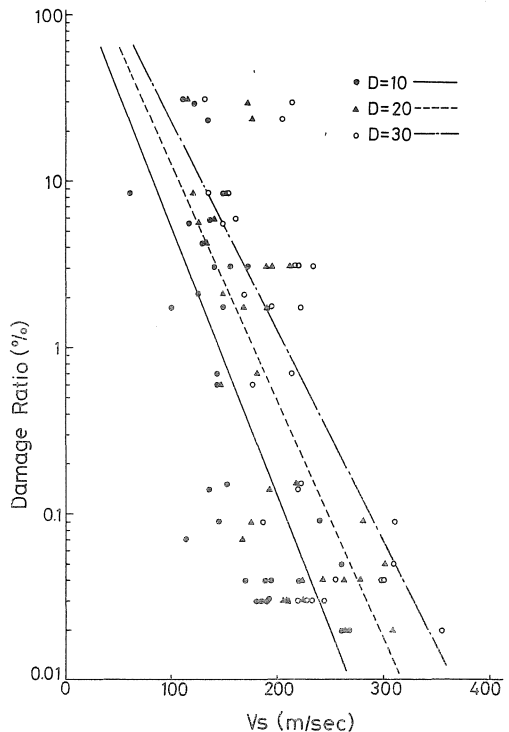


図14 東南海地震(1944年)による住家被害率とS波速度との関係

住家被害率，横軸に平均S波速度 V_s をとった。図中黒丸は地表より深度10mまで，三角印は深度20mまで，白丸は深度30mまでのそれぞれの平均S波速度と住家被害率との関係を示している。これらの図において点のばらつきはあるが，大体の傾向としてS波速度が大きくなるに従い，住家被害率は小さくなっている。これはS波速度の遅い地域すなわち比較的軟弱地盤地域において住家被害が大きいことを示している。しかし地盤のS波速度を150m/secとしたとき，濃尾地震の被害率20~70%，東南海地震では0.1~30%の分布を示していることから，地震被害が1つの地盤パラメーターのみで定まるものでないことがわかる。各地震での住家被害率Rと各深度までの平均S波速度 V_s との関係は表5ようになる。

5-2 V_s/V_p と住家被害率との関係

各測定地点の沖積層基底面までの平均S波速度 V_s と平均P波速度 V_p との比 V_s/V_p を求め，住家被害率と比較してみた。濃尾地震による住家被害率と V_s/V_p との関係を図15に示す。縦軸に被害率，横軸に V_s/V_p をとってある。この図より V_s/V_p が大きくなるほど住家被害率が小さくなる様子がわかる。これは V_s/V_p がポアソン比 σ によって，

$$V_s/V_p = \sqrt{\frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}}$$

のように表され，ポアソン比が $1/2$ に近づくと， V_s/V_p は小さくなり0に近づく。すなわち V_s/V_p が小さくなるに従い地盤が軟弱性を示すことになる。軟弱地盤において地震被害が大きいことが V_s と V_p との比を求めることによっても認められる。濃尾地震の場合の両者の関係を一

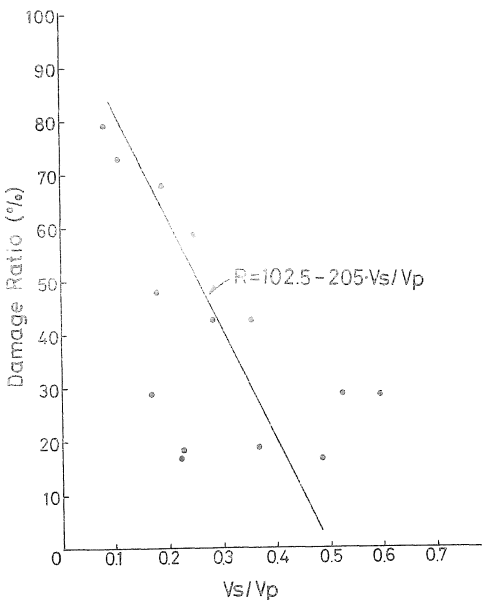


図15 濃尾地震 (1891年) による住家被害率と V_s/V_p との関係

次式で近似すると， $R = 102.5 - 205V_s/V_p$ となる。沖積層内の V_s/V_p の比が0.3の地盤では被害率40%になっている。

東南海地震による住家被害率と V_s/V_p との関係を図16に示す。全体的には V_s/V_p が減少すると被害率が増加している。しかし濃尾地震の場合とは分布が多少ちがいが，被害率が0.1%以上とそれ以下の場合に二分できるのである。2本の直線によって近似した。住家被害率が0~0.1%の間では， $R = 0.07 \times 10^{-0.8V_s/V_p}$ となり，0.1~100%の間では， $R = 5754 \times 10^{-22.8V_s/V_p}$ となった。後者の場合急勾配の直線式になっている。東南海地震では， V_s/V_p の値が0.1の地盤で30%の被害率，0.3では0.04%の被害率を生じていることになる。

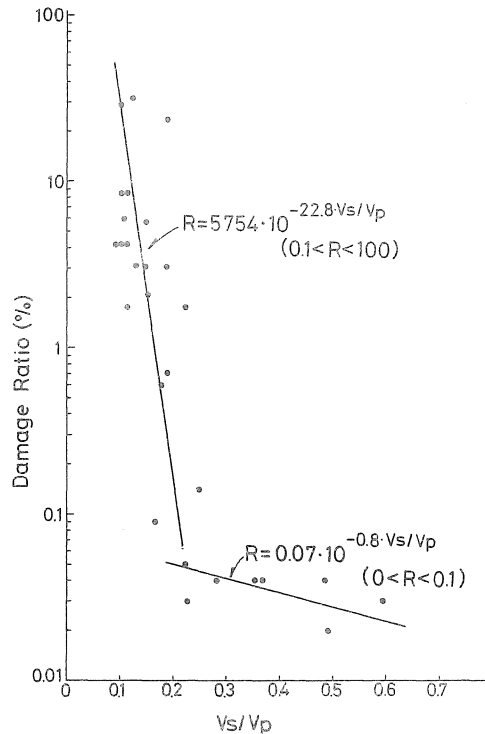


図16 東南海地震 (1944年) による住家被害率と V_s/V_p との関係

6. S波速度の推定式

地震時の地盤の振動特性を解明する上でのS波速度は，現在現場実測により求められている。しかし，S波速度の現場測定は容易でなく，経済的にも時間的にも損失が多い。そこで前回，地層別S波速度とN値との関係を調べ相関がみられたが，まだかなりのばらつきがあった。これはN値のみがS波速度を左右するものではなく，地盤の色々な要素が影響を及ぼしているものと考えられる。以上の観点より，ボーリング時に比較的容易に得られる土質指標を考慮して，N値，深さ，時代区分，

土質区分を用い、これらからS波速度を推定する式を提案することを試みた。

6-1 解析方法

色々な要素から1つ(10)の結果を導く場合に、統計分野における重回帰分析法を利用する。まず地盤地質の要素である土質指標を、標準貫入試験より求められたN値、またその深度を考える。これらを統計的に〔数値〕の項とよぶ。次に地層の時代を大きく三つに分けて、沖積、洪積、第三紀とする。さらに地層の地質を四つに分ける、粘土分、シルト分、砂分、砂礫分である。後者二つの区分を〔分類〕の項とよぶ。以上〔数値〕、〔分類〕の項合わせて9項目を、重回帰分析に適用しS波速度を推定する。

〔数値〕で表現できる土質の指標がP個あって、 x_1, x_2, \dots, x_p , Weightを b_1, b_2, \dots, b_p とおく。次に〔分類〕に属する項目がq個あり、それぞれの項目の中で K_j ($j=1, 2, \dots, q$) 個に細分されているものとする。そこでj項のk部類に z_{jk} なる値を与える。また α 番目のサンプル(S波速度)が(j, k)に反応しているとき、 $\delta_\alpha(jk) = 1.0$, そうでなければ $\delta_\alpha(jk) = 0.0$ を与えるものとする。そうすると実験式は次のようになる。

$$y_\alpha = \sum_{i=1}^p b_i \cdot x_{\alpha i} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \cdot \delta_\alpha(jk) + \varepsilon \quad (1)$$

これは、〔数値〕〔分類〕混合の場合の一般式である。(1)式中の未知量は b_i ($i=1, 2, \dots, p$) および z_{jk} ($j=1, 2, \dots, q; k=1, 2, \dots, K_j$) であり、その総数は $(p+r)$ 個ただし $r=K_1+K_2+\dots+K_p$ である。 y_α は観測値であり、予測値を Y_α とすると、その残差の2乗和Qは次のようになる。

$$Q = \sum_{\alpha=1}^n (y_\alpha - Y_\alpha)^2 = \sum_{\alpha=1}^n \left[y_\alpha - \left\{ \sum_{i=1}^p b_i \cdot x_{\alpha i} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \cdot \delta_\alpha(jk) \right\} \right]^2 \quad (2)$$

このQを最小にする条件として

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_i} \equiv 0 & (i=1, 2, \dots, p) \\ \frac{\partial Q}{\partial z_{jk}} \equiv 0 & (j=1, 2, \dots, q; k=1, 2, \dots, K_j) \end{cases}$$

があり、これを満足するように(2)式を書き下すと、次式のような $(p+r)$ 個からなる正規方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^p \left\{ \sum_{\alpha=1}^n x_{\alpha i} \cdot x_{\alpha m} \right\} b_i + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{K_j} \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \delta_\alpha(jk) x_{\alpha m} \right\} z_{jk} = \sum_{\alpha=1}^n y_\alpha \cdot x_{\alpha m} \quad (m=1, 2, \dots, p)$$

$$\sum_{i=1}^p \left\{ \sum_{\alpha=1}^n x_{\alpha i} \cdot \delta_\alpha(st) \right\} b_i + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{K_j} \left\{ \sum_{\alpha=1}^n \delta_\alpha(jk) \delta_\alpha(st) \right\} z_{jk} = \sum_{\alpha=1}^n y_\alpha \cdot \delta_\alpha(st) \quad (3)$$

$(s=1, 2, \dots, q; t=1, 2, \dots, K_s)$

ただし、 $\sum_{\alpha=1}^n x_{\alpha i} \equiv 0$ ($i=1, 2, \dots, p$)とおいてある。(3)式を解いて、最適値(b_i, z_{jk})が求まると、所望の実験式は(4)式のようなになる。

$$Y_\alpha = \sum_{i=1}^p b_i \cdot x_{\alpha i} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^{K_j} z_{jk} \cdot \delta_\alpha(jk) \quad (4)$$

また重相関係数Rは、

$$R = \frac{\sum_{\alpha=1}^n y_\alpha \cdot Y_\alpha}{\sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^n y_\alpha^2}{n}} \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^n Y_\alpha^2}{n}}} \quad (5)$$

により求められる。これで、得られた実験式を評価する。

土質指標の〔数値〕の項として、N値、深度H、また分類項として、時代区分(沖積、洪積、第三紀)E、地質(粘土、シルト、砂、砂礫)Fを考える。次に数値項は平均値からのズレを考え、S波速度 V_s 、N値、Hの対数値の平均を $\log \bar{V}_s, \log \bar{N}, \log \bar{H}$ とすると、(4)式より、S波速度を推定する実験式は次のようになる。

$$\log V_s - \overline{\log V_s} = C_N (\log N - \overline{\log N}) + C_H (\log H - \overline{\log H}) + \sum_{k=1}^3 E_k \delta_E(k) + \sum_{k=1}^4 F_k \delta_F(k) \quad (6)$$

ここで9個の未知係数 $C_N, C_H, E_1, E_2, E_3, F_1, F_2, F_3, F_4$ が前述した解法手順で求められる。解法の結果を指数表示に変換して、S波速度 V_s' を推定する式を表わすと、

$$V_s' = 10^A \cdot N^{C_N} \cdot H^{C_H} \cdot \begin{pmatrix} 10E_1 \\ 10E_2 \\ 10E_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 10F_1 \\ 10F_2 \\ 10F_3 \\ 10F_4 \end{pmatrix} \quad (7)$$

のようなになる。ただし $A = \overline{\log V_s} - C_N \overline{\log N} - C_H \overline{\log H}$ である。この計算は多大な労力を要するため、電子計算機により処理した。

6-2 解析結果

使用したデータは過去に調査した資料より、総計777枚である。この資料を120枚、235枚、360枚、480枚、

777枚の5通りに分け解析した。また〔分類〕の項において、時代区分の沖積を1.0、地質区分の粘土を1.0として見易い式とした。また推定式は式(7)の中の各変量のS波速度に対する寄与、影響の度合を考えて、4種類の土質指標、N値、深さ、時代、地質区分の任意の組み合わせ15通りについてそのすべてを求めてみた。以上の結果において、360枚のデータの組が全体的に一番相関がよかつたため表5に示す。この表は相関の低い順に番号がつけてある。さらに指標の組み合わせとその相関係数の関係をグラフ化したのが図17である。

以上の解析結果S波速度の推定式を分析してみると、まず四つの土質指標を取り入れた場合の推定式の相関係数が0.886と最も高く、N値のみでS波速度を推定する場合の0.780と比較して、いっそう相関がよくなっていることがわかる。また全体的には土質指標が増えるにしたがって、相関度もよくなっている。時代区分において沖積層を1.0とすると、洪積層、第三紀となるに従い、その係数が大きくなっている。しかし地質区分いわゆる粒径別にみた場合、粒径が大きくなって、係数の様な増加がみられない。細かい点を見ると、S波速度をN値で推定するよりも、時代区分のみで推定した方が相関がよくなっている。これはデータ枚数が360枚の場合のみでなく、他の場合もすべて同様である。これは注目に

値することである。

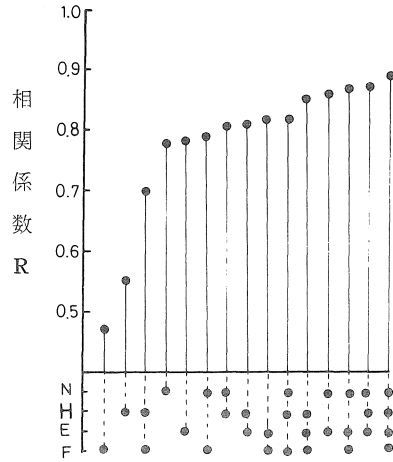


図17 土質指標の組み合わせとS波速度推定式の相関係数との関係 (N, H, E, FはそれぞれN値、深さ、時代区分、地質区分を表わす。)

表5 土質指標より求めるS波速度推定式 (データ枚数360枚の場合)

No.	S波速度推定式 (m/sec)	標準誤差	相関係数
I	$V_s = 214.22 \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.088 \\ 1.086 \\ 1.746 \end{pmatrix}$	118.5	0.472
II	$V_s = 103.28 H^{0.328}$	111.2	0.554
III	$V_s = 88.17 H^{0.317} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.101 \\ 1.137 \\ 1.705 \end{pmatrix}$	95.1	0.700
IV	$V_s = 103.62 N^{0.312}$	83.1	0.780
V	$V_s = 143.52 \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.939 \\ 2.749 \end{pmatrix}$	82.8	0.782
VI	$V_s = 112.29 N^{0.337} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.844 \\ 0.780 \\ 0.862 \end{pmatrix}$	81.2	0.792
VII	$V_s = 78.25 N^{0.257} H^{0.159}$	78.0	0.808
VIII	$V_s = 109.35 H^{0.140} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.656 \\ 2.328 \end{pmatrix}$	77.9	0.809
IX	$V_s = 150.72 \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.837 \\ 2.604 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.902 \\ 0.923 \\ 1.151 \end{pmatrix}$	76.6	0.816
X	$V_s = 85.36 N^{0.258} H^{0.152} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.901 \\ 0.836 \\ 1.005 \end{pmatrix}$	76.2	0.819
XI	$V_s = 106.15 H^{0.163} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.481 \\ 2.075 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.950 \\ 0.984 \\ 1.271 \end{pmatrix}$	69.2	0.853
XII	$V_s = 108.44 N^{0.179} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.451 \\ 1.842 \end{pmatrix}$	66.9	0.863
XIII	$V_s = 117.88 N^{0.202} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.423 \\ 1.810 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.832 \\ 0.787 \\ 0.887 \end{pmatrix}$	64.5	0.873
XIV	$V_s = 89.29 N^{0.166} H^{0.111} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.305 \\ 1.665 \end{pmatrix}$	64.3	0.874
XV	$V_s = 98.04 N^{0.170} H^{0.104} \begin{pmatrix} 1.000 & 1.000 \\ 1.292 & 0.871 \\ 1.659 & 0.840 \\ & 0.984 \end{pmatrix}$	61.4	0.886

7. ま と め

名古屋市およびその近辺の地盤を対象に、弾性波速度P波、S波を測定してきた。昭和52年度までに、35地点の測定を実施でき、資料も豊富になった。今回は資料解析に重点をおき、今までの資料をもとに、弾性波の振動特性、また過去の既往の地震被害との関係についても分析した。S波速度を推定する式も確立でき一応の成果を収めた。以上の研究成果を項目別にまとめると次のようになる。

P波、S波速度の室内実験では、室内実験値の方が現場実測値より小さめに出ている。試料の含水比の変化、また側圧付加の問題等があり、まだ今後の研究の余地がある。

地盤地層内のS波の減衰が地質といかに対応しているか調べてみた。深度による減衰曲線が数本の直線式で表わされるが、その勾配は地盤の時代区分を判定する要素になるものと考えられる。地中方向のせん断ひずみについては、地盤が軟弱であるか硬質であるかの特性によって、深度方向の直線の勾配に変化のあることがわかった。すなわち深度が増すにつれてせん断ひずみが小さいことがわかった。

名古屋市における既往の地震、濃尾地震(1891年)および東南海地震(1944年)による被害と、地盤の弾性波速度との間にかなりの相関のあることがみられた。P波、S波速度の比 V_s/V_p を知ることにより、ある程度の地震被害を想定することも可能と考えられるが、地震災

害の想定を行うには他の要素をも同時に考慮する必要がある。

S波速度を推定する式は、大きく四つの土質指標、N値、深度、時代、地質区分を取り入れ、次式を確立した。実測値と予測値の相関係数は0.886である。

$$V_s = 98.04 \cdot N^{0.170} \cdot H^{0.104} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.292 \\ 1.659 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.871 \\ 0.840 \\ 0.984 \end{pmatrix}$$

この式により名古屋地盤の各地点、各深度でのS波速度を計算によって求めることができ、さらにS波速度のデータをもとに、地震応答の解析や、地震動地盤災害の想定を行うための基礎資料になるものとする。

終りにのぞみこの調査の実施にあたり、種々御配慮いただいた名古屋市民局災害対策課、各測定場所での学校当局ならびに測定、解析に協力された本学土木工学科防災研究室諸員に深く感謝する。また既知調査資料の使用許可をいただいた各社^{13) 14) 15) 16) 17)}に深甚の謝意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 飯田汲事：名古屋地盤各層中のS波速度測定調査報告，名古屋市防災会議地震対策専門委員会，1—58，昭和49年3月
- 2) 飯田汲事，正木和明：名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第2報），名古屋市防災会議地震対策専門委員会，1—37，昭和50年3月
- 3) 飯田汲事，正木和明：名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第3報），名古屋市防災会議地震対策専門委員会，1—86，昭和51年3月
- 4) 飯田汲事，正木和明，楓重彦：名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第4報），名古屋市防災会議地震対策専門委員会，1—35，昭和52年6月
- 5) 飯田汲事，正木和明，楓重彦：名古屋市域におけるS波速度分布および地盤の振動特性，愛知工業大学研究報告，第12号B，Vol. 12 Part B，1977年3月，P111～P125
- 6) 桑原徹：濃尾傾動盆地の発生と地下水の第四系，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書，愛知県地盤沈下研究会，156頁，昭和50年3月
- 7) 西垣好彦，中川康一，奥田庸雄：砂の横波速度の圧力効果，第11回土質工学研究発表会，土質工学会，昭和51年6月，P319～P322
- 8) Iida, K. : The Velocity of Elastic Waves on Sand. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ., Vol. 16. 131—144, 1938
- 9) 飯田汲事，正木和明，楓重彦，坪井利弘：名古屋地盤のS波速度分布と震害との関係，第14回自然災害科学総合シンポジウム，1977年札幌，P327，328
- 10) 太田裕，後藤典俊：S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み，物理探鉱，第29巻，第1号，昭和51年8月，P31～P41
- 11) 林知巳夫：数量化理論とその応用例（V），統計数理研彙報，第8巻，1961年P149～151
- 12) 奥野忠一，久米均，芳賀敏郎，吉沢正：多変量解析法，日科技連出版，1971年
- 13) 応用地質調査事務所，未発表資料
- 14) 川崎地質調査事務所，未発表資料
- 15) 日本物理探鉱株式会社，未発表資料
- 16) 興亜開発株式会社，未発表資料
- 17) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社，未発表資料