

地盤調査における 2, 3 の問題

吉川 宗 治・島 通 保・後 藤 典 俊

SOME PROBLEMS ON THE GROUND EXPLORATION

By Soji YOSHIKAWA, Michiyasu SHIMA, Noritoshi GOTO

Synopsis

Seismic prospecting using SH-waves and electric survey (Resistivity method) were carried out at the eastern part of Osaka, where the main composition of the surface layer of the ground are silt and silty sand. The ground structure obtained in this case were compared with that of the boring data, i. e., values of N (penetration index) and other results of soil tests. Thereafter a method of estimation how the dynamic characteristics of the ground as the foundation of the structure are correlated to the propagating velocity and the specific resistivity of the ground, is discussed.

In conclusion, the propagating velocity of S-waves is found to be closely connected with the strength of the material and proved to be an efficient physical property to obtain the depth of the layer forming the floor of the basin and the rigidity of the composing material.

1. 序 論

土木および建築構造物の基盤としての地盤や岩盤の力学的性質や、その地下構造の決定には、これまで物理探査法、土質試験の方法、および地質学的方法が用いられてきた。この中、地質学的方法は地下構造の全般的知見をうるには、抜きにできないものであるが、これによって地下構造についての定量的な情報を得ることはできない。そのため今日では、大規模の建設工事に際しては、基盤の土質試験や、物理探査法による定量的な物理定数、および地下構造図が不可欠のものとなってきた。土質試験法は標準貫入試験などのように現場（原位置）で実施されるときは、その試験された地点の力学的性質を表わすものと考えてよいが厳密にはその点での値であるため、相当の広がりをもつ基盤全体の性質を知るためには、非常に多くの点で測定されることが必要である。しかし実際問題として、特に地下の深部に対しては、経費、日時の関係で困難である。

物理探査法はその性格上、またこれまでの実績から見て、広がりをもつ基盤全体の、原位置における力学的性質や、地下構造の定量的決定の要求に、かなりよく応えてきたといつてよいであろう。構造物の基盤に対して有効であったのは、その中、地震探査法および電気探査法であり、弾性波伝播速度、電気抵抗によって地盤あるいは岩盤を特性づけてきた。しかしこれらの物理定数は、原位置での地盤のあるがままの状態での値という長所をもつが、土質試験によって得られる剪断強度、圧密係数などに比べてより間接的な力学的定数であり、また物理定数の種類としても少ない。このように上記 3 種の方法は、それぞれ特色をもつものであるから、各種の測定、観察の結果を結びつけて総合的判断を下すことが必要とされる。

物理探査法のうち、基盤の力学的性質を明らかにする上で、最も有効な方法は地震探査法であることが一般に認められてきているが、これまで実用として使用されている地震探査は殆んどすべて P 波初動の観測よ

り得られる P 波速度のみによって、土や岩石の力学的特性を推定しようとするものであった。土からなる都市地盤でも、また岩盤であっても、 P 波速度値のみによって求められた地下構造図と、ボーリングあるいは掘削によって得られた地下構造との間には、かなりの喰違いがみられ、土からなる都市地盤の場合でも、また岩盤の場合でも、ともに経験するところである。筆者等のうちの一人は、岩盤に対する地震探査を坑道中で試み、岩盤中の岩石の状態、とくに破碎帯の程度を表示するのに、 P 波速度の低下のみでは不充分で、 S 波速度およびその振巾の減衰を、岩石の状態に対応させることのできることを明らかにした¹⁾。さらに土の地盤に対しては、割合純粋の砂質の地盤である新潟市において地震探査が実施され、 S 波速度が最もよく土質の力学的特性に対応することが示された²⁾。すなわちこの地は、昨年新潟地震によって大きな被害の発生した地域であって、その被害の程度は部分的に非常に異っており、同じ砂質層であっても地盤の剛性の小さい地区では被害は大であった。これらの特性と地盤の弾性波速度とを対応させてみた結果、表層の水を余り含まない砂層でも、また水で飽和された地下数m以下の下層でも、 P 波速度は地区によってあまり差がなく、被害との関係は見出せない。しかし S 波速度では、上層下層とも被害を受けなかった地区の速度は、被害地よりかなり大きい値をとっており、被害状況と密接な関係が見出される。つまり S 波速度は、含水による増加はほとんど見られず、地盤のしまり具合、砂の粒子間の結合の強さを反映していると思われる。

新潟市の場合のように被害を受け地盤の耐震性の結果のでている所は、この問題の実証的研究にとって都合がよいが、このような地区は極めて稀であり、また都市の中心部に近い地区に対して地震探査を行なうことは不可能に近い。しかし都市の発展とともに、水田や旧河川敷などを埋立てた地盤に大規模の団地や、建築物が建てられる傾向が強くなっており、これらの軟弱な地盤の力学的特性を求めるのに、土質試験の方法は勿論であるが、別に、有効な地震探査法を確立することが望まれる。

今回先の砂質地盤での方法を、さらにシルト質、シルトまじり粘土質、砂礫質の地盤である東大阪地域に対して適用した。地震探査法の外、電気探査法も実施し、これによって求めた物理常数とボーリングによって得られた土質や、標準貫入試験結果(N値)との関係を調べることによって、弾性波速度その他の動力学的特性によって建築の基盤としての地盤をどのように評価できるかを調べてみた。

2. 測定実施地点および測定方法

地 点

地域は大阪市の東の境界から生駒山系の間のいわゆる東大阪で、その大部分は旧河川敷や、沼地であったが、大阪市の発展とともに埋立てられて、団地、工場用地として使用され始めており、今後さらに大規模に開発されようとしている。測定地点は Fig. 1 に示されているようにA～Hまでの8地点で、その中A～Eまでは埋立地のいわゆる軟弱地盤であり、F～Hは生駒山麓に近い比較的よい地盤と思われる地点である。

方 法

(1) 弾性波探査法

比較的浅い地下の構造を決めようとする今回の実験では、通常土木地質に対して適用されている屈折法が用いられた。測定地点付近のボーリングによる採取によって明らかにされた土質は Fig. 3～Fig. 10 に示されているように、シルト質が表層を占めており、地下数m以下では水で飽和されている。序論で述べたように、砂質層の場合でも、このような土質の力学的特性を P 波速度のみによって表示することにはいろいろ問題があった。同じことはシルト質の土質に対してもいえる。すなわちこれらの土は地下水で飽和されると P 波速度は急激に高まり、シルト質では1 km/sec 前後、粘土分をほとんど含まない砂では1.5 km/sec あるいはそれ以上になることがサンプルの速度測定や現場での測定によって得られており、報告された例がある^{3) 4)}。このような地盤では、 P 波速度の測定だけでは、地下水を含まない状態ではいくつかあった層でも、水の飽和した状態では単一の層構造のものしか得られない。それに対して砂の場合 S 波速度では、含水による速度変化の少ないという結果が、新潟地盤で得られた。このような現象はシルト質の土でも起こること

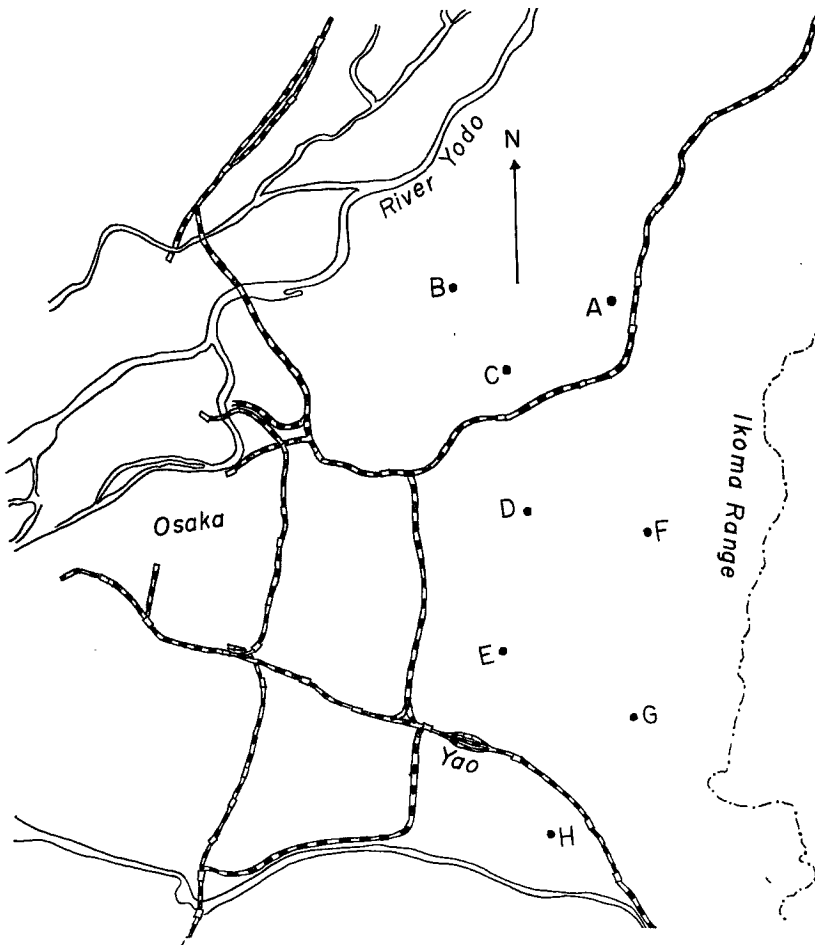


Fig. 1 Locations of measurement

が予想される。そこで今回も火薬による P 波のほかに、 SH 波を使って S 波速度を求め、それによって地盤の力学的特性や、構造を調べた。 P 波による探査は従来から用いられている方法によるもので、測線の長さは 110m~200m である。

SH 波による探査は、震源において SH 波のみを発生させる方法として、地面に長さ 3 m、巾 30 cm、厚さ 5 cm の板を水平に置き、約 1 トンの荷重をかけることによって地面に密着させ、板の端に衝撃を加え、ずれの力を地面にそって作用させるものである。測線は板の長さ方向と直角方向に 55 m とり、地震計は 5 m 間隔に 12 個設置し、すべて測線に直角で水平にして、transverse 成分の振動を測れるようにした。測定した波が SH 波であることを確認するため、すべて板の反対側の端を叩いた記録もとり、位相が反転すること、また同一地点で vertical, transverse, longitudinal の三成分をとり、transverse 成分が卓越することを確認した。さらに直接波、屈折波それぞれの位相が明瞭に現われることから、読取った位相がラブ波でなく、実体波の SH 波であると認められる。その記録の一例を Fig. 2 に示す。

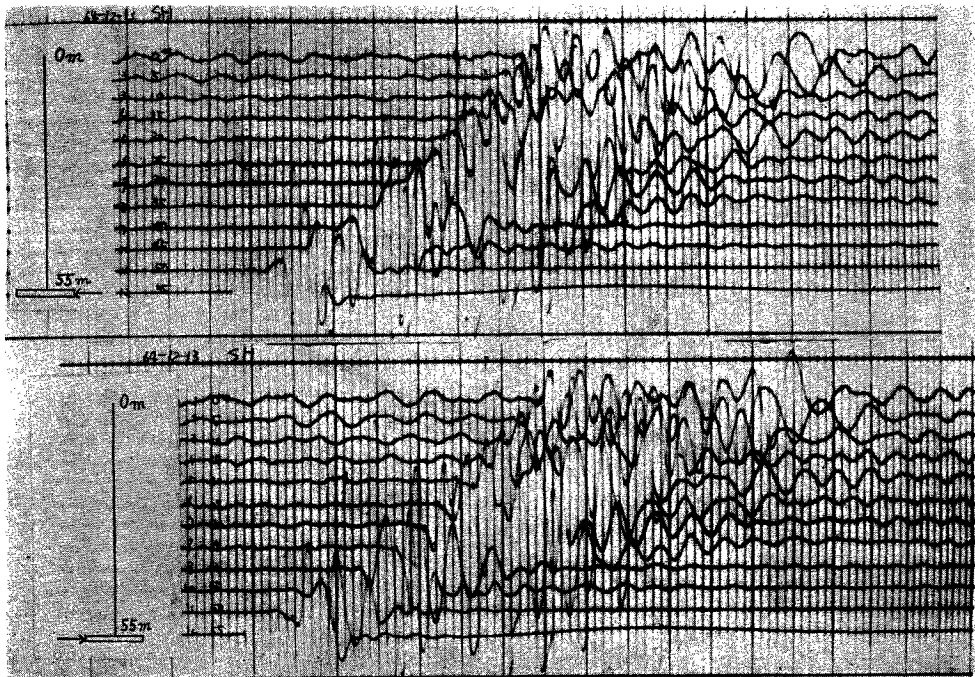


Fig. 2 Examples of Seismogram of SH-wave recorded at F_0

使用した地震計はNEC製地震探鉱用ピックアップ(固有周波数25サイクル)で、増巾器はE. T. L. 製PRA-2型、三栄測器製電磁オツシログラフMR-102A型で、ガルバノメーターG500(500サイクル)で記録した。

(2) 電気抵抗法

比抵抗法によって地盤の比抵抗値を測定し、それによって地下構造を推定した。主に垂直探査法により、電極間隔は最大50m程度にとり、深さ方向の構造を求めることに重点を置いた。使用した比抵抗器は横河製L-10型メガーである。

3. 測定結果

上記のような方法によって得られた各地点のP波速度、S波速度、および比抵抗値による地下構造を図で表わしたものがFig. 3～Fig. 10である。求める際、第1層と第2層の境界面に対しては、その凹凸も考慮に入れ、その他の不連続面の傾きはほぼ一様であると仮定して走時曲線より地下構造を計算した。各図の右端には別に求められていた土質試験の結果を引用しておいたが、地震探査の測定地点と正確には一致しないので不連続面の深さも一致しない。また測定地点の近くでボーリングしてなかったものはのせていない。

またポアソン比に対応する V_P/V_S 、剛性率(V_S より密度を1.6と仮定して求めた)、およびS波の振巾吸収係数はTable. 1に掲げてある。この中振巾吸収係数 α は次のようにして求めた。

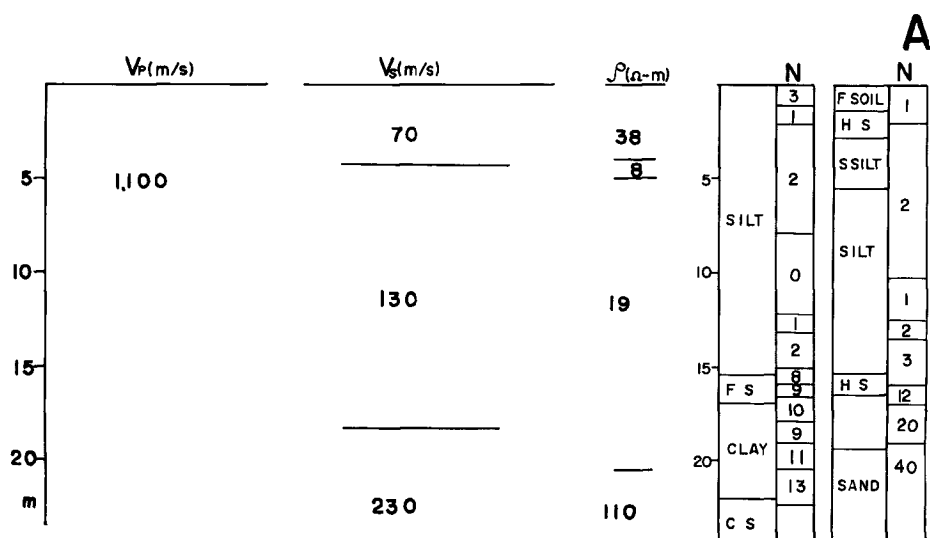


Fig. 3 Ground structure at A

V_p : P -wave velocity, V_s : S -wave velocity, ρ : Specific electric resistivity, N : Penetration index.

S SILT : Sandy silt, C SILT : Clayey silt, S SAND : Silty sand, FS : Fine sand, CS : Coarse sand, SG : Sandy gravel, SC : Sandy clay, F SOIL : Fill soil, HS : Humus soil, SHS : Sandy humus soil.

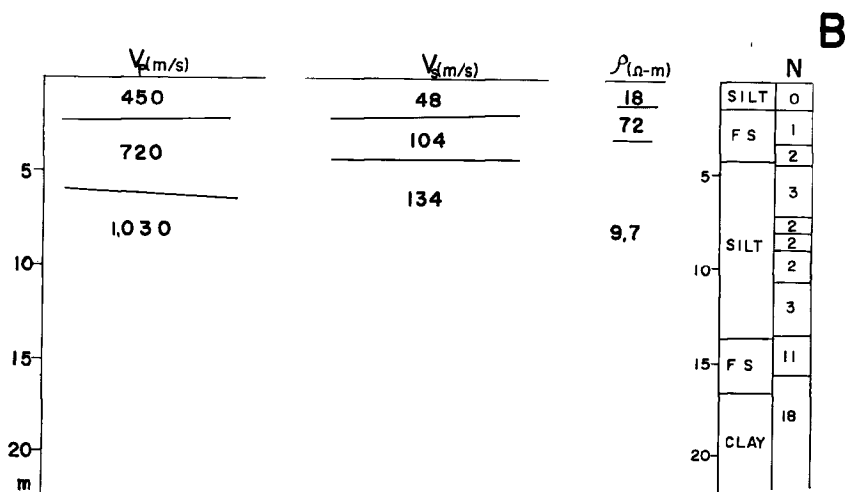


Fig. 4 Ground structure at B

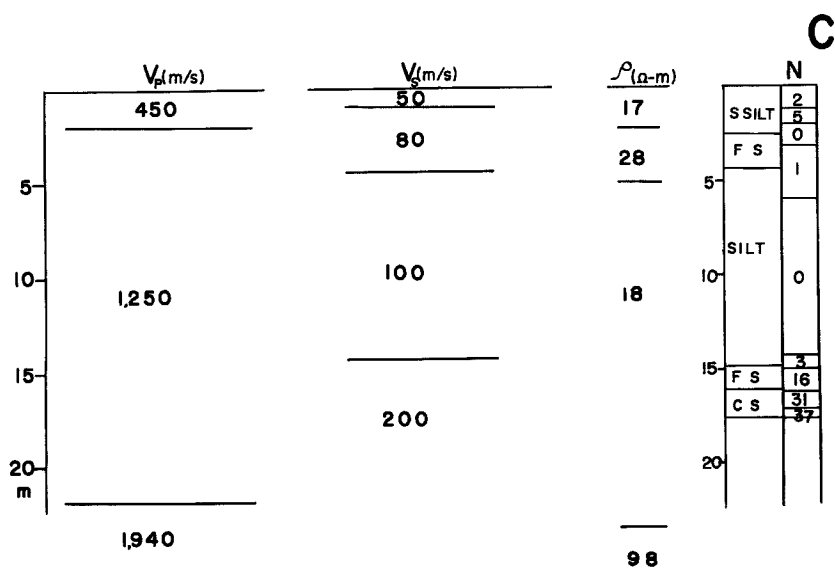


Fig. 5 Ground structure at C

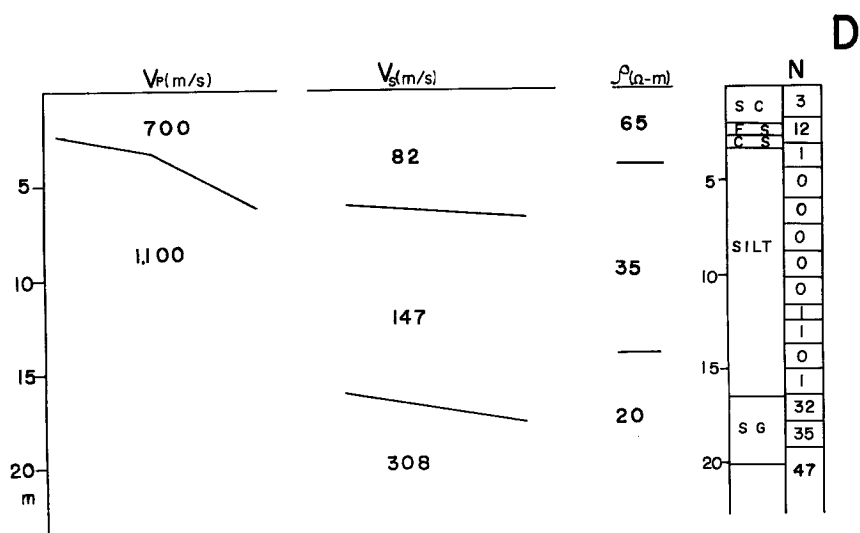


Fig. 6 Ground structure at D

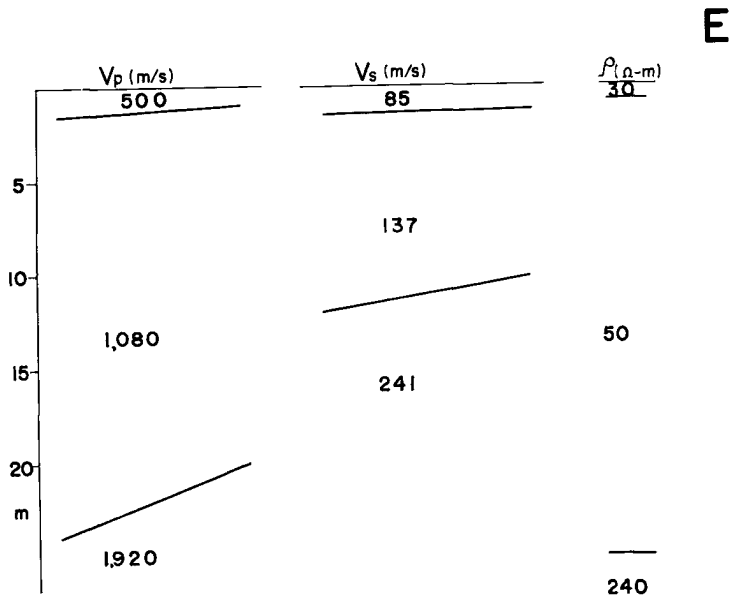


Fig. 7 Ground structure at E

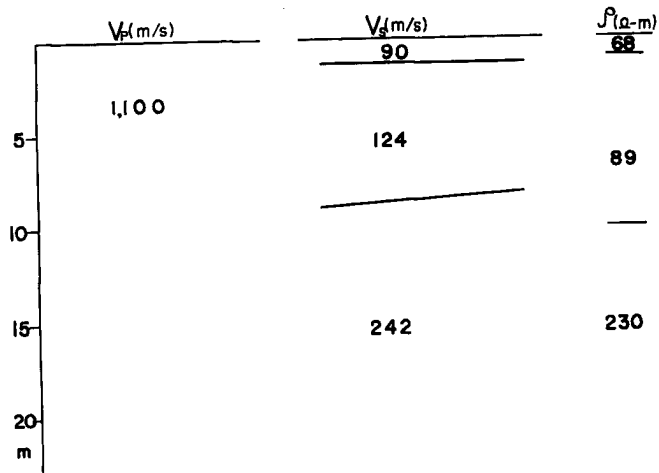


Fig. 8 Ground structure at F

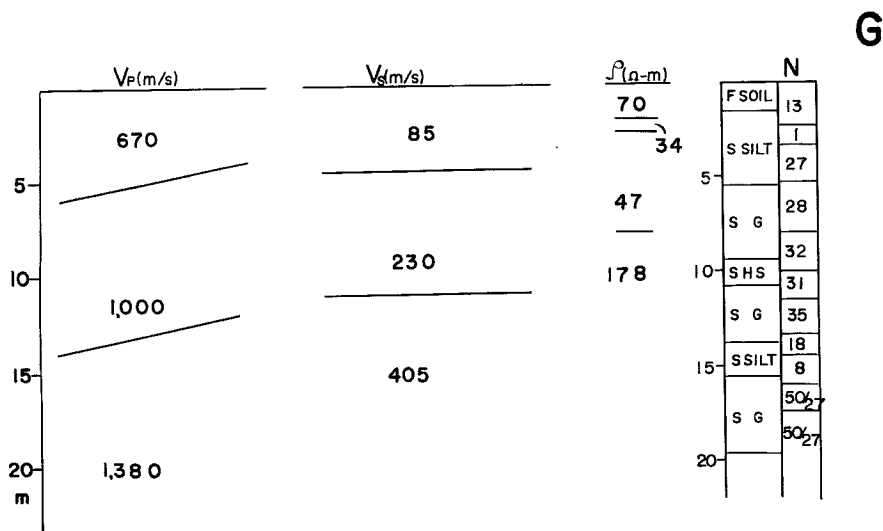


Fig. 9 Ground structure at G

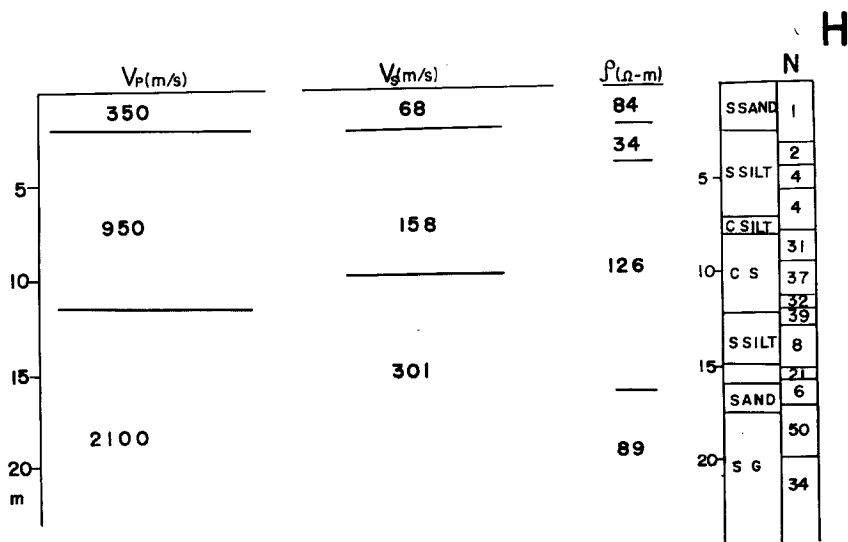


Fig. 10 Ground structure at H

Table. 1

	Upper layer			Intermediate layer			Lower layer		
	V_P/V_S	μ	α	V_P/V_S	μ	α	V_P/V_S	μ	α
		$\times 10^8$	1/m		$\times 10^8$	1/m		$\times 10^8$	1/m
A	15.0	0.88	0.032	8.4	3.0	0.02	4.8	9.5	0.0013
B	9.4	0.41		6.9	1.9	0.027	7.7	3.2	
C	12.5	0.76	0.029	12.5	1.8		6.2	7.2	0.017
D	8.5	1.2	0.028	7.5	3.9	0.024	3.6	17.0	0.01
E	5.9	1.3		7.9	3.4	0.023	4.5	10.4	0.011
F	12.2	1.5	0.028	8.9	2.8	0.0053	4.5	10.0	0.001
G	7.9	1.3	0.028	4.3	9.5	0.012	3.4	29.0	0.0055
H	5.2	0.8		6.1	4.5	0.026	7.0	16.0	0.0022

 μ : rigidity, α : absorbtion coefficient

Table. 2

	Upper layer						Lower layer					
	V_P	V_S	V_P/V_S	σ	μ	α	V_P	V_S	V_P/V_S	σ	μ	α
	m/s	m/s			$\times 10^8$ c. g. s.	1/m	m/s	m/s			$\times 10^7$ c. g. s.	1/m
Kawagishi-cho	240	95	2.5	.405	1.5	.105	1400	140	10	.495	3.3	.077
Showa-ohashi	300	95	3.2	.456	1.5		1500	150	10	.495	3.8	
Kenritsu-kōkō	240	110	2.2	.370	2.0		1400	150	9.3	.494	3.8	
Niigata-sakyu	240	140	1.7	.235	3.3							
Muramatsu-hama	280	125	2.2	.370	2.7		1450	240	6.0	.486	9.8	0.045
Muramatsu-hama sakyu	250	150	1.7	.235	3.8	.040	1600	240	6.7	.489	9.8	

すなわち震源からの距離を r , その点における振巾を A とすれば, 一般に

$$A = \frac{A_0}{r^n} e^{-\alpha r}$$

と表わせるが, 波面の空間的な拡がりによる振巾の減衰の因子の $\frac{1}{r^n}$ の n としては直接波に対してはほぼ $n=1$, 屈折波に対しては $n=2$ になることが示されているので⁵⁾, それを採用した。 α を計算する際には, 地震計の感度や設置条件による多少のバラツキの影響を除くため, reverseの測線の測定結果も併せて用いた。すべての測点での振巾を正確に読み取るのが困難であった地点(B地点の第1層など)のは数値をのせてない。吸収係数は波の周波数に関係するから相互に比較する場合には, ほぼ一定の周波数の波に対する数値をとらねばならないが, 今回の測定ではSH波の周波数は初動の部分でどの地点でも, 25サイクル前後であったから地盤の力学的特性の比較に使える。

4. 結果の考察と結論

東大阪地域の地盤の土質を大まかに分類してみると, 5m~25mあるいはそれ以上の厚さをもつシルトないしはシルト混り砂の土質の上層と, 粗砂ないし砂礫の基盤層よりなるといってよい。N値の大きさも, 砂礫層になると急に増大し30以上の値をもつ。

ところでこのような地盤は弾性波速度によってどのように表わせるかみてみよう。G, H地点を除き一般に, P波速度で, この基盤層あたりの深さでは土は既に水で飽和されているから, ほぼ一様に1,000m/sec程度の値をとって, シルト層と基盤層との境界面に相当する不連続面に見出せていない。それに対し表層の比較的水分の少ない層は400~700m/secの層として見分けることができ(B, D, G, H地点), 表面のすぐ下から水で飽和されているA, C, F地点のような地盤では, 地表下すぐに, 含水土の1,000m/sec程度の速度で始まっている。P波速度は体積弾性率 k , 剛性率 μ , 密度 d によって次式で表わせるが

$$V_P = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{d}}$$

上記のような含水の増加は主に表式中の k 部分の増加によっているとみられる。G, H地点では, P波速度によって基盤層が見出されているが, この地点は土質名の柱状図からもうかがわれるように, 生駒山麓のやや硬質層の地点で, 上層もシルト質の少ない土地自体水はけもややよい地点と考えられ, したがってP波速度の1,000m/s~2,000m/sの, 他地点よりかなり大きい値は, 含水によるのではなく, 土質の粗砂ないし砂礫などの硬質化による増大とみなせる。したがってこのような含水の少ない土質の地点では, P波速度による表示も使える。

次にS波についてみると, 第1層 70 m/s~100m/s, 第2層は150m/s 前後の値, 第3層(基盤層)では200m/s以上の値をとり, とくに硬質地盤のG, H地点では300m/s以上の値もでており, これらは粗砂ないし砂礫層に対応し, P波速度からは出なかった軟弱地盤の基盤層も, S波を使えば, 見出せることが明らかにされた。ところで基盤層より上の層は, 土質的に見れば, シルト的な土質といつてよい。また深さ10m~20mの層はそれから上にある土の重さによる圧密を受けているにもかかわらず, N値は1~3程度が大部分であつて, これらのデーターだけからはむしろ基盤層まで一層と考えられるのに対し, S波速度したがって剛性率によれば, 明らかに2層以上に分れる。地盤のあるがままの状態での測定という点では, S波による探索の方が完全で, ボーリングしたことによる標準貫入試験地点のゆるみによるN値の減少傾向ということも推察されるが, しかしながら一方標準貫入試験の方がテスト自体直接的であり, いずれを尊重するかまだ明確な結論は出せない。したがって基盤層より上の層の地下構造決定については更にいろいろ調べてみるつもりである。 V_P/V_S , 剛性率 μ , S波の吸収係数を計算したものが第1表に掲げてあるが, まずはっきりしているのは, これらの値は上層とは土質のかなり違う基盤層になると, どれも不連続的に変化している。すなわち, V_P/V_S (ポアソン比に対応する量), 剛性率は増大し, 粘弾性体から弾性体への移行に対応して吸収係数 α は減少している。しかし硬質層地盤のG, H地点では第2層と第3層(基盤層)で土質の変化が

割合小さいため、 V_P/V_S の増大率はそれほど大きくはない。

μ , α については純粹の砂質に近い新潟地盤で調べた値があり、Table. 2 にのせてあるが、それと比べてみると東大阪の上層のシルトの土質は、 S 波速度、剛性特が小さいのに α の値は砂よりかなり小さい。これはシルト質の粒子が小さく、媒質がより連続的であることによると思われる。

最後に比電気抵抗 ρ であるが、これは電気的な量であるから、ただちに力学的性質に結びつけるわけにはいかない。一般に土や岩石は含まれている水によってのみ電気伝導性をもつ。含水率を p とすれば、土の場合比抵抗は次のような実験式によって表わされる。

$$\rho = \frac{\rho_w}{p^2}$$

ここで ρ_w は土の含水自体の比抵抗である。水の飽和した土では ρ は、 P によってより ρ_w によって決まる場合が多い。例えば含水率は比較的小さいが、含水がやや電解質的な粘土では、 ρ は $10 \Omega\text{-m}$ 前後の土のうちでは低い値をとるが、砂、礫などでは割合新鮮な含水であるため、これより高く $50 \sim$ 数百 $\Omega\text{-m}$ を示すことが報告されている⁶⁾。このような事実からすれば、上層のシルト質では比較的低く、基盤層の粗砂～砂礫では $100 \Omega\text{-m}$ 以上の値をもつことが予想される。したがって土質の力学的特性自体はわからないとしても、 ρ の値から土質の違いやその境界面の深さを推定する手掛りになるかも知れない。

このような観点から ρ についての構造図と S 波速度や土質の図とを対応させてみると、A, F, G 地点では ρ の 100 以上の層に対し、 S 波速度や土質での基盤層が対応し、その深さも大体一致しているが、その他の地点では ρ より基盤層の深さを推定することはできない。この事は恐らく、含水の比抵抗値 ρ_w と土質との対応が、それほど一意的なものではないということを示すものであろう。

結論として、岩盤や砂質地盤の場合と同様、シルト、粘土、砂礫などの軟弱地盤地帯の地盤の地下構造や力学的特性を決める方法として、 S 波（とくに SH 波）速度や S 波の吸収係数による方法の有効なことが示された。またこのような土質に対しては、 P 波速度は $\sqrt{\frac{k+4\mu/3}{d}}$ のうちの μ によるよりむしろ体積弾性率 k によって決まるため、地盤の剛性、硬さを表わす指数としては不適で、したがって沖積層の軟弱地盤に対する地震探査では、測定自体面倒で、極めて慎重に進めることの必要な S 波による方法を使うことは、不可欠であるといつてよいだろう。

電気比抵抗 ρ も、簡単に土質の力学的特性に結びつけるわけにはいかないが参考資料にはなるとと思われる。

今回の東大阪地区の調査研究にあたり、色々と便宜をはかっていただいた大阪府土木部計画課の方々に対し、厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉川宗治, 狐崎長琅: 土地質に対する地震探査の適用例, 防災研究所年報, 第7号, 1964, 39頁
- 2) 吉川宗治, 島 通保, 後藤典俊: 新潟地震被災地における弾性波探査, 防災研究所年報, 第8号, 1965, 11頁
- 3) YU. I. Vasile'v and G. I. Gurich: On the Ratio between Attenuation Decrements and Propagation Velocities of Longitudinal and Transverse Waves, Bull. Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser. No. 12, 1962, pp. 1061.
- 4) L. V. Molotova: Velocity Ratio of Longitudinal and Transverse Waves in Terrigenous Rocks, No. 12, 1963, pp. 1074.
- 5) И. С. Берюн: Динамические Характеристики Сейсмических Волн в Реальных Средах, 1962, Москва
- 6) H. Guyod: Use of Geophysical Logs in Soil Engineering, Symposium on Soil Exploration (STP351), ASTM, 1964.