

軟弱地盤におけるS波の減衰項Q(1)

正木和明・飯田汲事

Specific Attenuation Factor Q of Shear Waves in Soil (1)

Kazuaki MASAKI and Kumizi IIDA

A specific attenuation factor Q in the subsurface soil layer in Nagoya Area is obtained on the basis of the data from the P-and S-wave measurements over the range of depth from 30 m to 100 m. The results obtained are as follows:

- (1) Q is 2-16 in the subsurface soil layer.
- (2) Q is related to S-wave velocity in the equation:
 $\ln Q = 0.25 + 0.0066 V_s \text{ (m/sec)}$,
 and to standard penetration test value in the equation:
 $\ln Q = 0.79 + 0.022 N$.

These equations may be useful for the estimation of Q for the underground layers.

1. はじめに

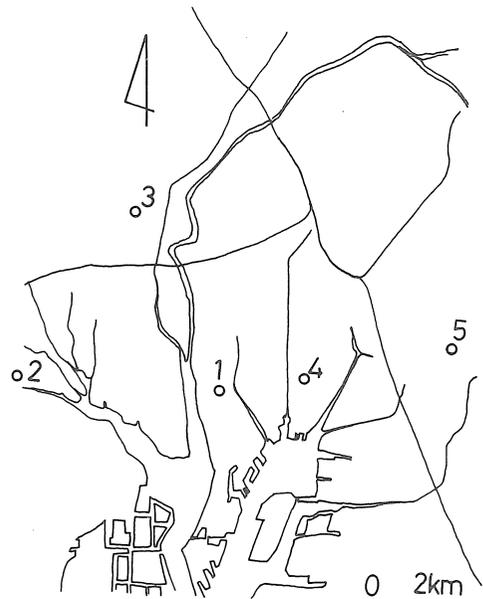
土木構造物、建築構造物の耐震設計を行う際、その基礎地盤の地震時応答を知っておくことは必要不可欠である。地盤の地震時応答を求める研究は計算手法の開発、大型計算機の普及に伴い近年著しい進歩を遂げた。しかし問題点も多い。そのひとつが地盤の諸定数に関する知識が極めて乏しいことである。地盤の諸定数のうち、減衰項Qは応答スペクトル振巾に決定的な影響を与える定数である点で特に重要であるが、測定が技術的に困難であるために今日まで余り研究されていない。原位置における地盤、特に軟弱地盤の減衰項Qの測定は最重点課題のひとつである。

著者等はここ数年名古屋地盤においてボーリング孔を利用した弾性波検層を実施してきたが^{1)~5)}、今回、その時得られたせん断波(S波)の記録を解析し、軟弱地盤内の減衰項Qを求めたので報告する。

2. S波測定方法

図1に示す5地点においてボーリング調査孔を掘削し弾性波検層(PS検層)を実施した。ボーリング孔の深度は地点によって異なるが約30m~80mであり、沖積層および洪積層上部(熱田層)に貫入されている。これらの層はほとんどが粘土質、シルト質、砂質の地層で構成され、いわゆる軟弱地盤である。

図2にPS検層の実施方法を示す。ボーリング孔径は約



1.高木小 2.十四山公園
3.千音寺小 4.港北公園 5.津賀田中

図1 Q測定地点

60mmであり、その中に孔中地震計(OYO製3320型)が挿入されている。孔中地震計にはゴムチューブが装着されており、このゴムチューブにポンプで水を送入することにより膨張させ、地震計を孔壁に圧着する。せん断波(S波)は自動車等により載荷された長さ約2mの厚板を横から「かけや」で強打することにより発生される。S波は地盤内を伝播し地震計に至り受震される。厚板下

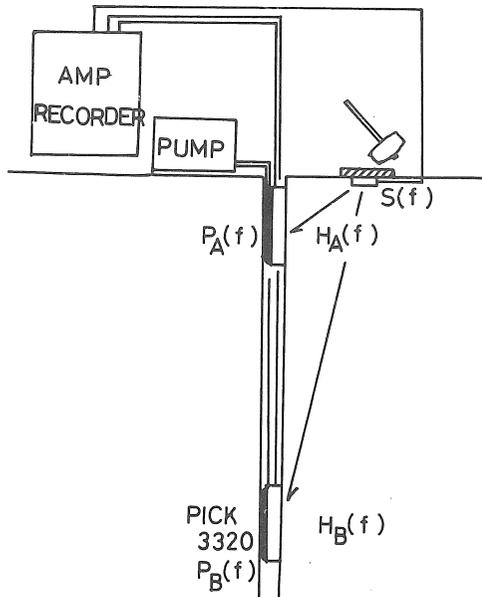


図2 PS換層実験方法

には小型換振器が圧着されており、強打時の厚板の瞬間的ずれによるせん断振動を同時に記録するようになっていいる。孔中地震計は深度2 mごとに移動設置され、各深度における伝播S波を記録する。孔中地震計と厚板下小型換振器からの信号は増巾器で一度増巾された後、電磁オシログラフにより記録される。

孔中地震計は上下、水平2成分を記録するが、後で述べる解析においては水平2成分のみを利用した。なお、孔中地震計は固有振動数30 Hzの速度型換振器である。

3. 測定結果

得られたS波記録の一例を図3に示す。厚板下の小型換振器で記録した波形の立ち上り時刻から厚板強打時刻を知ることができるが、図3はこの時刻を基準とし各深度でのS波波形記録を並べたものである。実線と破線は厚板を右側と左側から強打した時の波形を示しており、波形の上下反転からS波であることが確認される。ただし、振巾は任意に描いてあり、振巾の絶対値の比較は意味がない。なお、比較のために同時に得られたP波の記録も並記した。

S波は厚板と平行な方向に振動する波である。従って孔中地震計設置地盤は厚板と平行な方向に卓越振動する。しかし、孔中地震計の設置方向は制御できないのでこの卓越振動を測定することはできない。そこで今回は、孔中地震計水平2成分によって記録された振動の振巾をベクトル合成することによってこの卓越振動の、即ち伝播S波の振巾とすることにして解析を進めた。

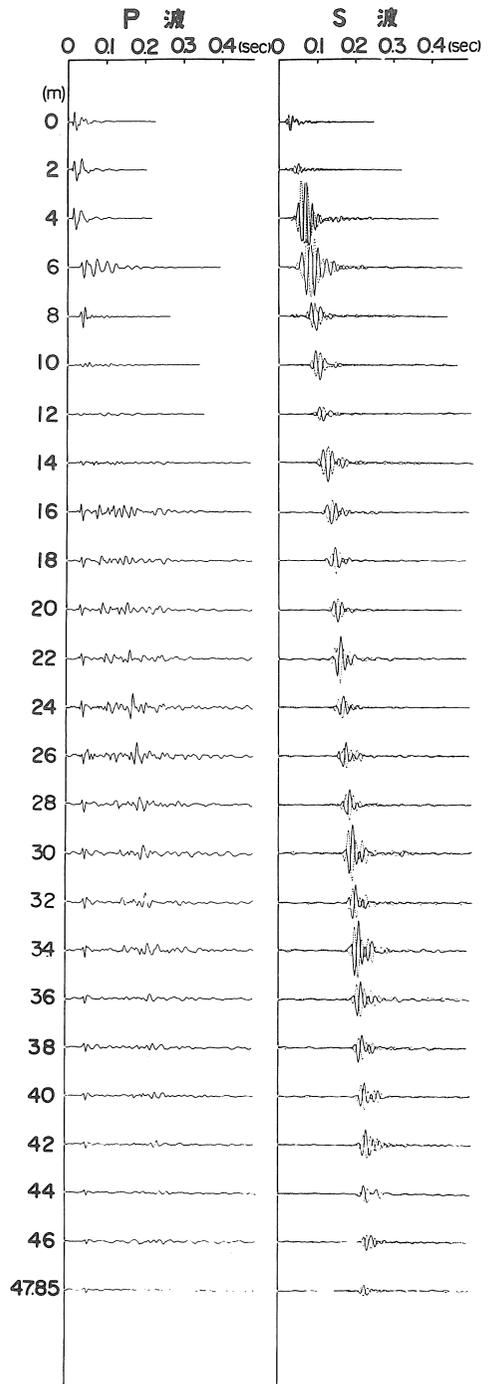


図3 深度2 mごとに得られたS波の記録例(港北公園B地点)

S波速度はS波到着時刻と震源距離(若干の補正を行うことにより深度となる)から走時曲線を求め、その勾配から計算した。

4. 減衰項Qの解析方法

4.1 解析法A：震動振巾と深度との関係を用いる方法

深度 z におけるS波最大振巾は一般に

$$r(z) = r_0 e^{-\alpha z}$$

で表わされることが知られている。ここで、 r_0 は $z = 0$ における最大振巾である。定数 α は減衰係数と呼ばれ、内部摩擦による波の減衰を示す量である。今、S波の振動数を f 、位相速度を V_s とすると減衰項 Q は

$$Q(f) = \frac{\pi f}{\alpha V_s}$$

で表わされる。

4.2 解析法B：フーリエスペクトルを用いる方法⁸⁾⁹⁾

図2に示すように、地表と地中の2ヶ所に地震計を設置し、ボーリング孔近くで発生させられたS波を同時に記録する場合を考える。地表と地中で得られた波形のフーリエスペクトルをそれぞれ $A(f)$ 、 $B(f)$ とすると

$$A(f) = H_A(f) \cdot P_A(f) \cdot S(f)$$

$$B(f) = H_B(f) \cdot P_B(f) \cdot S(f)$$

と表わされる。ここに $H(f)$ は震源と受震点との間の波動伝達関数である、また、 $P(f)$ は測定器特性、 $S(f)$ は震源特性である。添字 A, B は地表と地中を表わしている。震源特性に A, B の区別はないので添字は付けない。

均質媒体の場合、波動伝達関数は

$$H(f) = G e^{-\alpha(f)R} \quad (1)$$

で表わされる。G は幾何学的拡散係数、R は震源と受震点間距離である。 $\alpha(f)$ が減衰係数となる。

深度 z_1 に孔中地震計を設置して実験を行い、フーリエスペクトル

$$A^1(f) = H_A^1(f) \cdot P_A(f) \cdot S^1(f) \quad (2a)$$

$$B^1(f) = H_B^1(f) \cdot P_B(f) \cdot S^1(f) \quad (2b)$$

を得る。添字 1 は z_1 における実験を表わしている。計器特性 $P(f)$ は設置によらないので添字を付けない。

深度 z_2 に地震計を移動し同様の実験を行い

$$A^2(f) = H_A^2(f) \cdot P_A(f) \cdot S^2(f) \quad (3a)$$

$$B^2(f) = H_B^2(f) \cdot P_B(f) \cdot S^2(f) \quad (3b)$$

を得る。添字 2 は z_2 における実験を表わしている。地表に設置した地震計は移動させないので波動伝達関数は変らず $H_A^2 = H_A^1$ とする。

(1)より

$$H_B^1(f) = G_1 e^{-\alpha(f)R_1}$$

$$H_B^2(f) = G_2 e^{-\alpha(f)R_2}$$

であるから

$$\alpha(f) = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \left\{ \frac{H_B^1(f)/G_1}{H_B^2(f)/G_2} \right\}$$

となる。今、拡散係数を $G = R^{-1}$ と仮定すると

$$\alpha(f) = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \left\{ \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{H_B^1(f)}{H_B^2(f)} \right\} \quad (4)$$

となる。(2)より

$$\frac{A^1(f)}{B^1(f)} = \frac{H_A^1(f)}{H_B^1(f)} \cdot \frac{P_A(f)}{P_B(f)} \quad (5)$$

(3)より

$$\frac{A^2(f)}{B^2(f)} = \frac{H_A^2(f)}{H_B^2(f)} \cdot \frac{P_A(f)}{P_B(f)} \quad (6)$$

(5), (6)より

$$\frac{H_B^1(f)}{H_B^2(f)} = \frac{A^2(f)}{A^1(f)} \cdot \frac{B^1(f)}{B^2(f)} \quad (7)$$

を得る。(7)を(4)に代入すると

$$\alpha(f) = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \left\{ \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{A^2(f)}{A^1(f)} \cdot \frac{B^1(f)}{B^2(f)} \right\} \quad (8)$$

となる。即ち、震源距離 R とフーリエスペクトル $A(f)$ 、 $B(f)$ とから減衰係数 $\alpha(f)$ が得られる。

今回の実験においては地震計を地表に設置しなかった。したがって(8)の $A^1(f)$ と $A^2(f)$ とは求められていない。しかし、厚板を強打するにあたっては同じ起震力となるよう努めたので震源特性 $S(f)$ は

$$S^1(f) = S^2(f)$$

と仮定することにする。この場合、(2a)および(3a)より

$$A^1(f) = A^2(f)$$

となるので(8)は結局

$$\alpha(f) = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \left\{ \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{B^1(f)}{B^2(f)} \right\} \quad (9)$$

となり、地中に設置した地震計で得られたS波のフーリエスペクトル $B(f)$ のみから減衰係数を求めることができる。減衰項 Q は解析法Aで述べた式により減衰係数から求められる。

この方法は基本的にフーリエスペクトルを用いるので減衰係数が周波数の関数として表現され易い点で解析法Aとやや異なる。

5. 解析結果

5.1 解析法Aを用いて求めた減衰項Q

津賀田中学校、千音寺小学校、高木小学校、十四山公園、港北公園B地点で得られた結果を図4に示す。図中の白丸と黒丸はS波発生用厚板を右側および左側から強打した時の速度振巾を示している。ただし港北公園については両者の平均を示している。なお、横軸のスケールは任意にとってあり、振巾の絶対値そのものの比較は意味がない。

震動振巾と深度との関係は津賀田中学においては1本の、他の4地点においては2本の直線で近似される。最

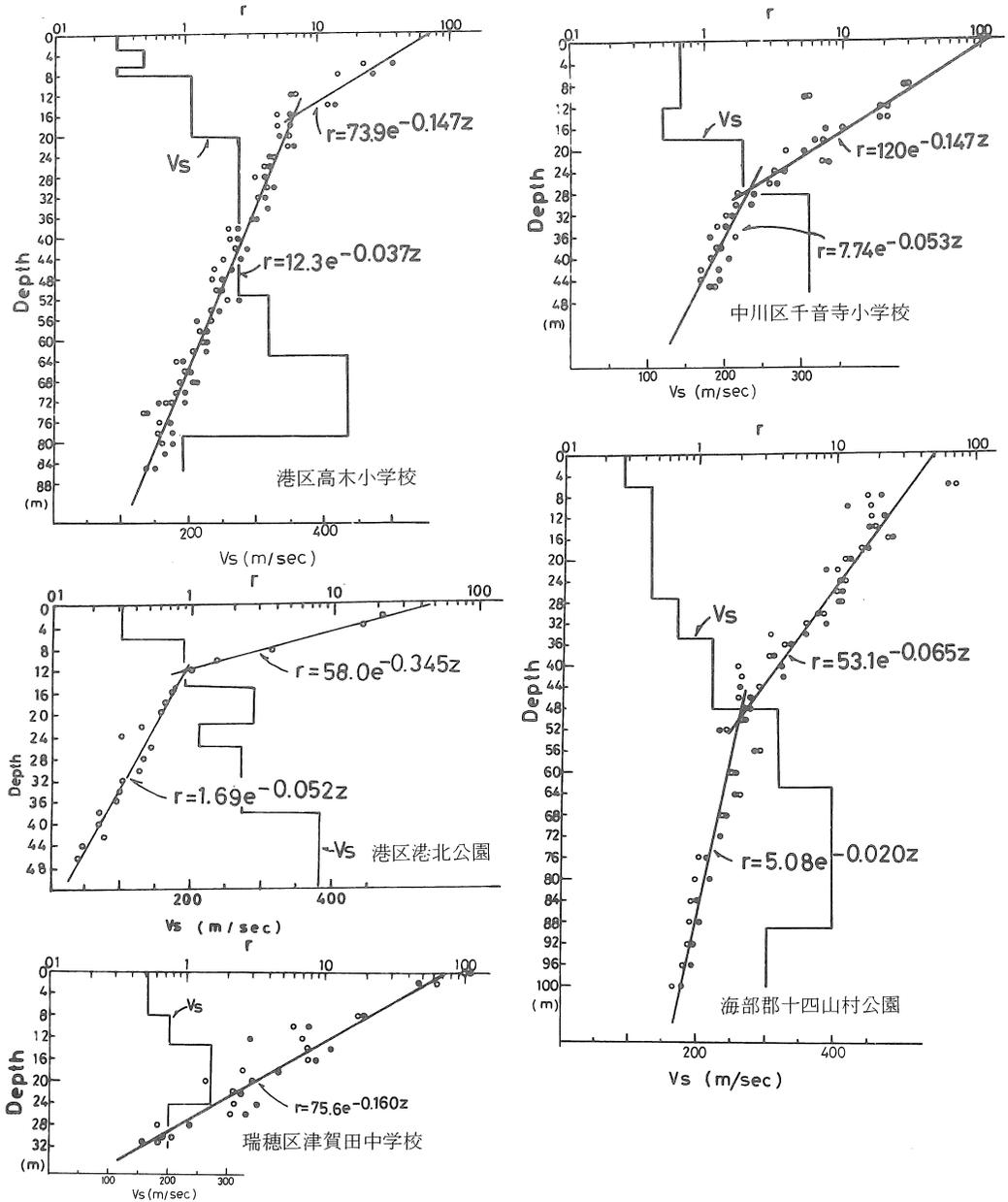


図4 S波最大振幅と深度との関係

小自乗法によりこれらの直線を求めた。図4に結果を記す。

図4にはPS検層によって求めたS波速度も並記してある。S波速度は深度によってかなり異なるが上記直線区間についてこれを平均した値をS波速度としてQを求めた。

またQを求める際には最大振幅を与える波の振動数fが必要であるが、ここでは、孔中地震計の固有振動数が30 Hzであること、後述するようにS波のフーリエスペクトル振幅は30 Hz付近で卓越することの2点から、 $f = 30$

H₂とした。即ち、ここで求めたQは振動数30 HzのS波の減衰項を表わしている。各地点について得られたS波速度、減衰係数および減衰項を表1にまとめて示す。

5.2 解析法Bを用いて求めた減衰項Q

高木小学校および千音寺小学校で得られたS波記録を解析法Bを用いて解析し減衰項Qを求めた。

高木小学校における深度40 m, 50 m, 64 m, 76 mで得られた各S波記録を図5に示す。上記深度は各深度間ではS波速度が同じとなるように決定されている。

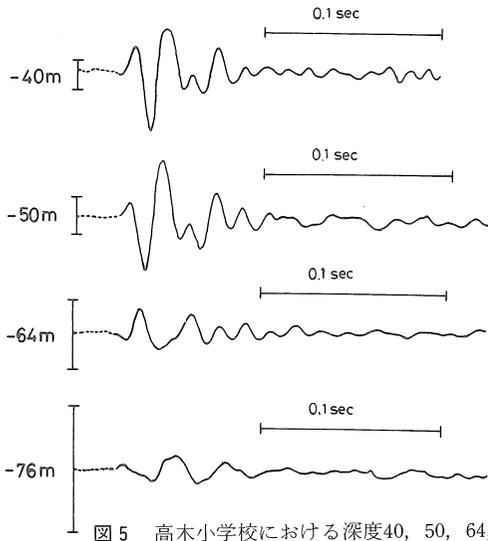


図5 高木小学校における深度40, 50, 64, 76mのS波記録

図5に示したS波記録を時間間隔0.001秒で振り巾を目読しFFTによりそのフーリエスペクトルを求めた。図6に各深度におけるS波のフーリエスペクトルと(9)式を用いて求めた減衰項 $Q(f)$ を示す。得られた $Q(f)$ は振動数に対しかなりバラつく。特に20 Hz以下と80 Hz以上で大きい。これはこの振動数領域ではフーリエスペクトル振り巾が小さく、かつ、(9)式でわかるように $Q(f)$ はスペクトル振り巾の比として表現されるために計算誤差が大きくなったと考えられる。深度40mと76mとの記録から求めた $Q(f)$ は20 Hz~80 Hzの間で5~15程度、平均7程度である。また40mと64m, 50mと76mとの記録から求めるとそれぞれ8~25, 5~7程度になる。ただし、S波速度は各深度間の平均とした。測定深度間距離を短くすると、50mと64mでは1~15, 64mと76mでは2~80とバラつきが大きくなる。特に40mと50mとでは

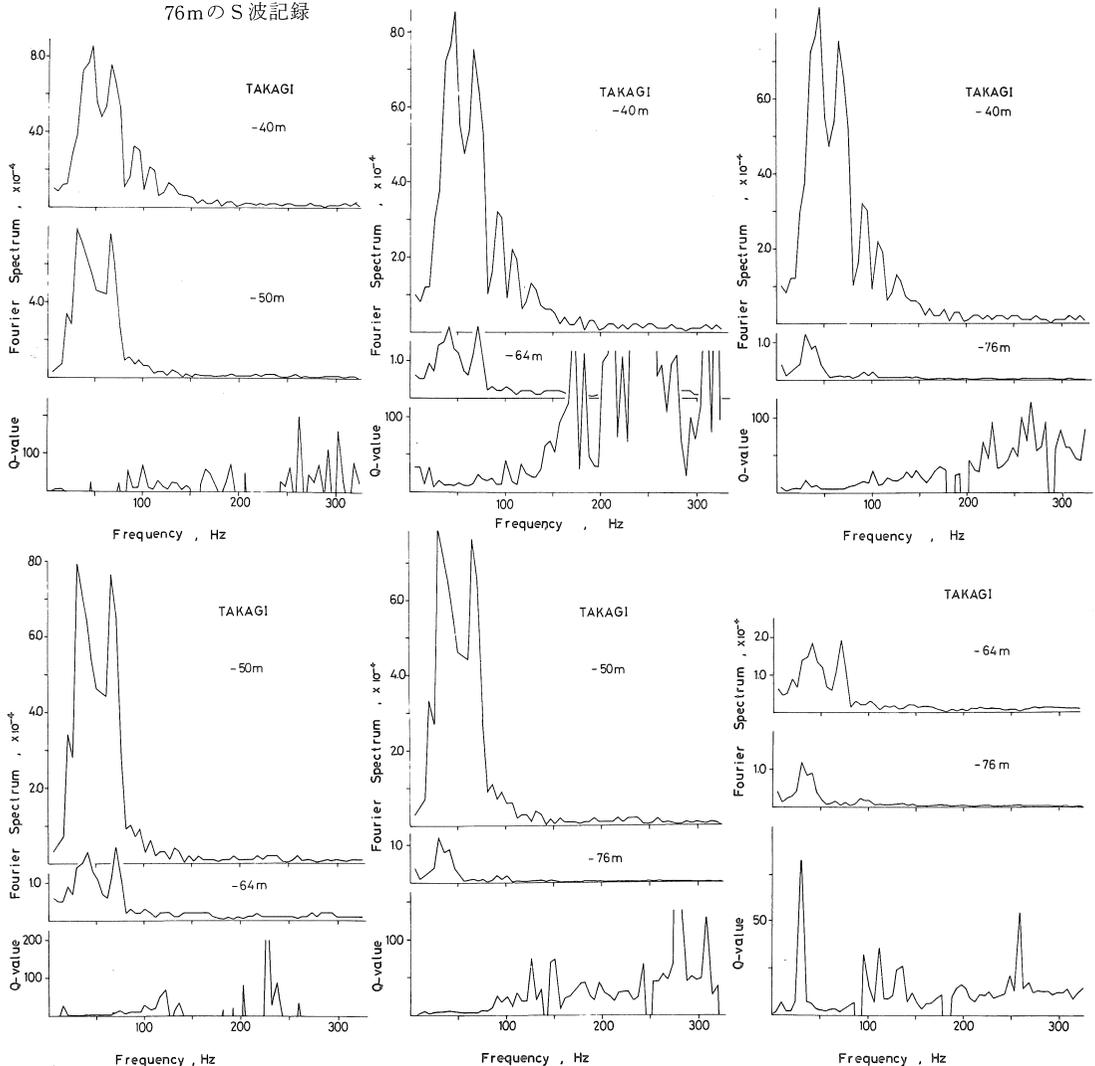


図6 高木小学校における深度40, 50, 60, 76mの各記録から得られたフーリエスペクトルと減衰項Q

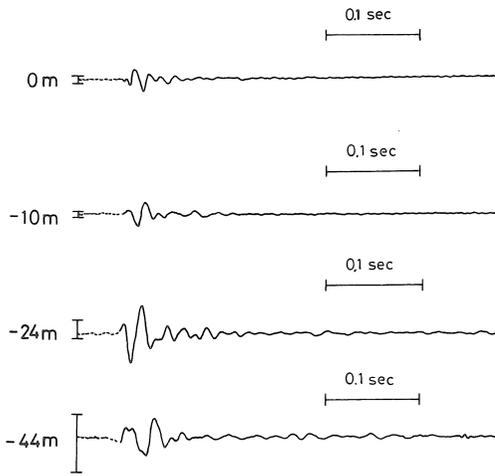


図7 千音寺小学校における深度10, 24, 44mのS波記録

負の値となることが多い。これはあまり測定間距離が短いと孔壁の破損状態，孔中地震計の圧着状態，厚板の叩き方等の違いによる測定誤差が大きくなるためと考えられよう。これらの結果から深度40mと76mとの間の地層の減衰項 $Q(f)$ は20~80 Hzの領域で5~25程度と考えられる。

千音寺小学校における深度10m, 24m, 44mでの各S波記録を図7に示す。また，各フーリエスペクトルとそれから得られた減衰項 $Q(f)$ を図8に示す。 $Q(f)$ のバラつきはやはり大きい，深度24mと44mとの記録から得られた結果が比較的良好であり，20~80 Hzの領域で10~20程度となる。

解析法Bで求めた減衰項 $Q(f)$ を表1に示す。

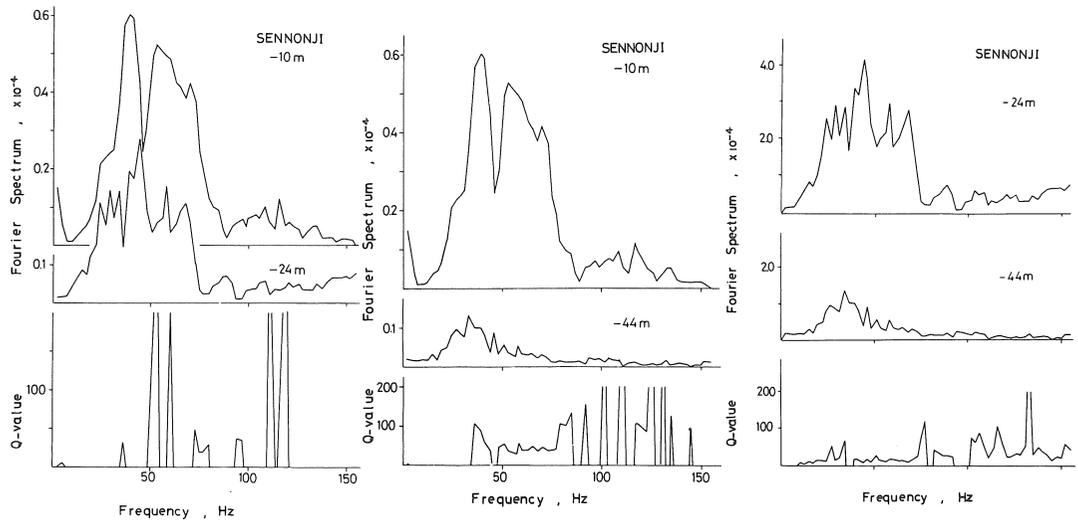


図8 千音寺小学校における深度10, 24, 44mのS波記録から得られたフーリエスペクトルと減衰項 Q

表1 解析法AおよびBで求めた減衰係数と減衰項 Q 値

	測定地	深度(m)	減衰係数	V_s (m/s)	Q 値	平均N値
解析法A	港区高木小学校	0~16	0.147	200	3.2	16
		16~85	0.037	300	8.5	61
	十四山村公園	0~50	0.065	150	9.7	
		50~100	0.020	300	15.7	
	中川区千音寺小学校	0~27	0.147	150	4.3	15
		27~46	0.053	300	5.9	56
港区港北公園	0~14	0.345	130	2.1	14	
	14~48	0.052	260	6.9	28	
瑞穂区津賀田中学	0~32	0.160	200	3.0	40	
	港区高木小学校	40~76		350 (270~430)	10 (5~25)	78
解析法B	中川区千音寺小学校	24~44		300 (230~320)	15 (10~20)	50

5.3 減衰項 Q の振動数依存性

減衰項 Q は，物質がVoigt型である時には振動数に反比例し，Maxwell型である時には振動数に比例することが理論的に知られているが，実地盤の Q の振動数依存性については諸説がある。今回求めた Q の振動数依存性について考察してみる。

解析法Bを用いれば Q は振動数の関係として求まることは図6および図8に示したとおりである。ただし，孔中地震計の固有振動数が30 Hzであること，S波の発生は厚板を強打することによったことの2点により，ここで考え得る振動数領域は20~80 Hzに限定されることは上述した。図6および図8を見る限りでは，上記振動数領域における Q の振動数依存性は顕微ではない。より広範囲な振動数領域における測定を行うことが今後の課題である。

5.4 減衰項 Q とS波速度，N値との関係

減衰項 Q とS波速度 V_s との関係の物理的背景は必ずしも明らかでない。しかし，経験上，いわゆる軟弱地盤では地盤の剛性は小さく，したがってS波速度が遅く，

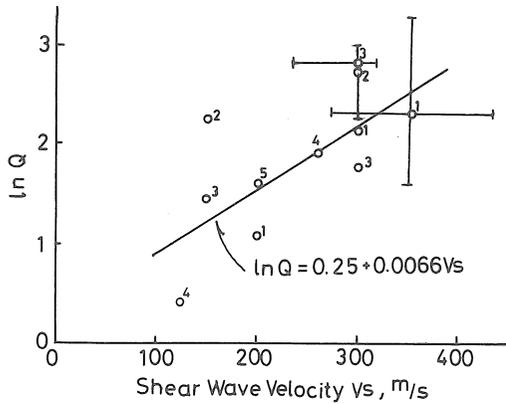


図9 減衰項QとS波速度Vsとの関係

かつ、波の減衰が大きいことが知られている。そこで、QとVsとの関係を定量的に考察してみる。

今回求められた5地点、計11のQとVsとの関係を図9に示す。縦軸にはQの自然対数がとってある。解析法Bによって求めたQは振動数によって異なるのでエラーバーを付した。バラつきは大きい両者の関係を直線とみなし最小自乗法によりこれを求めると

$$\ln Q = 0.25 + 0.0066 V_s \text{ (m/sec)} \quad (11)$$

となる。

減衰項Qと標準貫入試験値N値との関係を図10に示す。ここでN値は深度2mごとに得られる値を今考えて

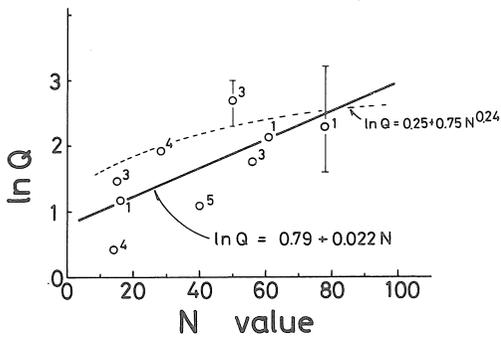


図10 減衰項Qと標準貫入試験値Nとの関係

いる深度範囲にわたって平均したものである。またN値50以上は換算N値である。図10に示された関係を直線とみなし最小自乗法によりこれを求めると

$$\ln Q = 0.79 + 0.022 N \quad (12)$$

を得る。一方、S波速度とN値との関係は飯田等¹⁰⁾¹¹⁾によって名古屋地盤35地点の測定結果から次のように求めら

れている。

$$V_s = 120 N^{0.24} \quad (13)$$

(13)を(11)に代入すると

$$\ln Q = 0.25 + 0.79 N^{0.24} \quad (14)$$

を得る。(14)はN値のべき乗となり(12)とやや異なるが、図10中に破線で示すようにN値が100以下ではQの値はほぼ一致すると言えよう。

6. まとめ

名古屋地盤の5地点において深度30m~100mのPS検層を実施して地盤内S波速度を求めるとともに、その際得られたS波波形を解析し減衰項Qを求めた。その結果、名古屋地盤の上部層のQは2~10と小さく、深度が大きくなると6~16と大きくなることがわかった。S波速度、N値とQとの関係から経験式(11)、(12)を得た。一般に原地盤においてQを測定することは技術的に極めて困難であるので、S波速度、N値からQを推定し得る(11)、(12)式は大変有益であろう。Qの振動数依存性については明らかにできなかったがこれは今回板叩き法によってS波を発生させたので測定振動数領域が限定されたためであり、今後広振動数領域での測定が望まれる。

7. 謝辞

おわりにのぞみ、測定と解析の両面にわたり助力いただいた本学土木工学科谷口仁士助手、元本学土木工学科助手楓重彦氏(土岐市役所)、本学研究生坪井利弘君、四年生の学生諸君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 飯田汲事：名古屋市地盤各層中のS波速度測定調査報告(第1報)，名古屋市防災会議，1-58，1974.
- 2) 飯田汲事，正木和明：同上(第2報)，同上，1-37，1975.
- 3) 飯田汲事，正木和明：同上(第3報)，同上，1-86，1976.
- 4) 飯田汲事，正木和明，楓重彦：同上(第4報)，1-35，1977.
- 5) 飯田汲事，正木和明，楓重彦，坪井利弘：同上(第5報)，同上，1-50，1978.
- 6) Knopoff, L. : Q, Rev. Geophys., Vol. 2, 625-660, 1964.

- 7) 工藤一嘉：波動の減衰測定，地震波の生成・伝播に関する研究，地震探鉱実験グループ，177-182, 1976.
- 8) 今井常雄，殿内啓司，兼森孝：原位置における土の減衰定数(h)の測定，第15回地震工学研究発表会講演概要，17-20, 1979.
- 9) 殿内啓司，兼森孝，科野健三：PS検層時のQ測定の試み，物理探鉱技術協会春季講演会予稿集，26-27, 1979.
- 10) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士，坪井利弘，宮永良一：名古屋地盤の地震波増巾度および地震危険度，名古屋市防災会議，1-143, 1979.
- 11) 飯田汲事他：未発表資料

(受理 昭和55年1月16日)