

(27) 伝播波動初動形状による地盤の波動減衰特性の評価法

西松建設株式会社 正会員 ○平田 篤夫
熊本大学工学部 金子 勝比古
熊本大学工学部 大見 美智人

Technique for Estimation of Seismic Wave Attenuation in the Ground by the Seismic Pulse Form

HIRATA Atsuo, Nishimatsu Construction CO., LTD.
KANEKO Katsuhiko, Kumamoto University
OHMI Michito, Kumamoto University

Abstract

A simplified technique for estimation of the seismic Q of the ground is presented and discussed. At first, relations between the rise time and the propagation time and between the pulse width and the propagation time are analyzed based on the constant Q theory proposed by Kjartansson(1979). The relations are expressed by linear equations in the case that the source displacement is represented by the impulse function or the impulse response function. On the other hand, those are expressed by nonlinear equations in the case the source displacement is represented by the arbitrary continuous function. These equations indicate that Q value of the ground could be estimated by analyzing the seismic pulse-form. Secondary, how to apply the equations to the field data is discussed, introducing a new factor, namely, the pulse ratio. The pulse ratio is defined by the ratio of the rise time to the pulse width. From the theoretical analysis, it is made clear that the pulse ratio is independent to the propagation time and Q , and has a constant value 0.37 for the impulsive or impulse-responsive displacement source. However, the pulse ratio depends on the propagation time and Q for the arbitrary displacement source.

It is concluded that the linear equations are applicable only if the pulse ratio observed is constant and equal to 0.37, and that nonlinear equations should be used if the pulse ratio varies depending on the propagation time and Q .

1. はじめに

地盤の波動伝播特性は伝播速度特性と減衰特性の2因子により表現できる。通常の弾性波探査は伝播速度特性を解析対象とした方法といえる。一方、減衰特性は地球科学の分野では広く利用されているにもかかわらず、それを利用した工学的な応用等に関する研究は少ない。これは、伝播速度が伝播時間測定という簡単な作業により決定されるのに対し、減衰特性の評価のためにはスペクトル解析等の比較的煩雑な処理が必要になることに関係しているためといえる。従って、伝播速度評価と同様に時間と距離などの簡単な関係式を用いて減衰特性が表現できれば通常の弾性波探査の測定記録から減衰特性を評価することが可能となり、これを工学的に応用する機会が増大するものと思われる。

Kjartansson(1979)はGladwin等(1974)が提案したライズタイム則を Constant Q 理論に基づいて証明するとともに、その定数を理論的に明らかにし、ライズタイムと伝播時間の関係から Q 値が求められることを示

した。しかし、Tarif等(1987)はライズタイム則に基づくQ値評価法に関する数値実験および室内実験を実施し、その適用性の限界を指摘している。また、Kjartanssonの理論では入力変位波形がインパルス関数で与えられる場合を解析の対象としていて、この関係式を全ての現実問題に適用することには無理があることも指摘されている(Blair et al., 1982, 1984)。

以上の観点のもとに、筆者等(金子他)は、伝播初動波形の形状と伝播時間の関係から地盤の波動減衰(Q値)を評価する手法について検討を行った。ここでは、Q値評価法の概要を述べ、実岩盤に適用した例について示す。

2. 初動形状によるQ値評価法

通常の弾性波探査において観測される波形中には、P波初動の後にS波や表面波、あるいは反射波等の波動が重なりあって出現する。P波初動が最大振幅を示す時刻より以前にこれらの後続波が到達しなければ、初動波形の形状を定量的に表現するパラメータであるライズタイム τ_R はP波初動のみの情報を提供することになる。しかし、ライズタイムの算定のためには初動立ち上がりの微分操作が不可欠であるため、波形データのSN比が比較的低い場合にはその読み取り誤差が無視できなくなる。そこで、この問題点を考慮して、ライズタイムとともに初動形状を表現するパラメータである初動波形のパルス幅 τ_P を考える。パルス幅は初動パルスの時間幅に相当し、初動波形の見かけ周期に対応する。ただし、ここでは最大振幅の1/10以上の初動波形部分の時間をパルス幅と定義する。パルス幅はライズタイムに比較して読み取りが容易であり、読み取り誤差も相対的に小さくなるが、後続波の影響を受けやすくなる。

伝播時間は通常初動立ち上がりに対して定義するが、初動形状の定義と関連してFig.1に示すような4通りの伝播時間を考える。なお、弾性波探査では通常変位速度成分を測定対象にすることが多いため、以下では変位速度波形の初動形状について解析を行う。

Kjartansson(1979)はQ値が周波数に独立な場合の複素弾性率 $M^*(\omega)$ とその場合の一次元波動伝播の伝達スペクトルを与えている。波動の幾何学的拡散効果が内部減衰効果と独立に与えられるものと仮定すると二次元および三次元波動の伝達スペクトルは一次元波動伝播の場合の伝達スペクトルに伝播距離に対する幾何学的拡散項を付加することにより与えられる。

特に、幾何学的拡散項が周波数に独立と仮定できる場合には、波形の時間的關係には幾何学的拡散項は影響を与えないことになる。

以上の前提の元に、振源 $x=0$ に $u(0,t)=\delta(t)$ ($\delta(t)$:Diracのデルタ関数)で示されるような衝撃的変位もしくはその応答関数が作用したとすると、パルス幅 τ_P およびライズタイム τ_R と伝播時間 t_i との間には以下のような関係が成り立つ。

$$\tau_P = \tau_{P0} + 0.79t_4/Q \quad ; Q \geq 2 \quad (1)$$

$$\tau_R = \tau_{R0} + 0.30t_3/Q \quad ; Q \geq 2 \quad (2)$$

ただし、 τ_{P0} および τ_{R0} は $t_4=0$ および $t_3=0$ におけるパルス幅およびライズタイムである。この条件のもとではパルス比 τ_R/τ_P は伝播時間に独立となり、 $\tau_R/\tau_P=0.37$ ($Q \geq 5$)となる。言い換えれば(1)および(2)式はこのパルス比一定の条件を満足することを前提としている。

通常の弾性波探査の振源はハンマー打撃、重鎮落下もしくは発破等であるので、振源に作用する圧力は圧縮型のパルスあるいはステップ状の関数で近似する。そこで、簡単な関数形で表現できるType 1~3の三種類の入力変位波形 $u(0,t)$ およびそのフーリエスペクトル $U(0,\omega)$ を次式のように考える。

Type 1:

$$u(0,t) = \{1 - \cos(2\pi t/T)\}/2 \quad ; 0 \leq t \leq T$$

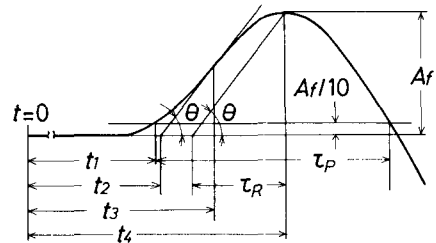


Fig.1 初動波形形状と伝播時間の定義

$$= 0 \quad ; t < 0, T < t$$

$$U(0, \omega) = (1/2) \{1 - \exp(-i\omega T)\} \cdot (i\omega)^{-1} \{1 - (\omega T/2\pi)^2\}^{-1}$$

Type 2:

$$u(0, t) = 3/8 - (1/2) \cos(2\pi t/T) + (1/8) \cos(4\pi t/T) \quad ; 0 \leq t \leq T$$

$$= 0 \quad ; t < 0, T < t$$

$$U(0, \omega) = (3/8) \{1 - \exp(-i\omega T)\} (i\omega)^{-1} \cdot \{1 - (\omega T/2\pi)^2\}^{-1} \{1 - (\omega T/4\pi)^2\}^{-1}$$

Type 3:

$$u(0, t) = A \exp(-2\pi t/T\sqrt{2}) \cdot \sin(2\pi t/T) \quad ; 0 \leq t$$

$$= 0 \quad ; t < 0$$

$$U(0, \omega) = A(T/2\pi)^{-1} \{ (1/\sqrt{2} + i\omega T/2\pi)^2 + 1 \}^{-1}$$

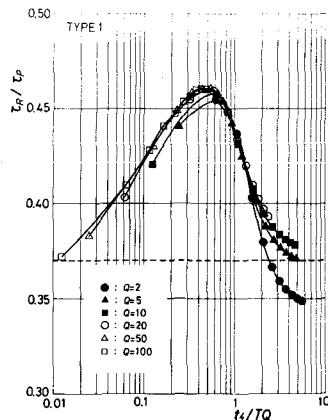
ただし、Tは入力変位の基本周期、Aは正規化定数である。

Type 1の場合についてQ値をパラメータとして τ_p/T と t_4/TQ の関係および τ_R/T と t_3/TQ の関係を Fig. 2に示す。ただし、図中の破線は(1)式および(2)式における $\tau_{p0}=0$ および $\tau_{R0}=0$ の場合の関係を示している。この図から、ともに非線形な関係にあることがわかる。Q=2の場合を除けばQ値に拘らずほぼ同一の曲線上にあり、伝播時間の増加にともなって、入力変位がインパルスの場合の値に漸近する。Q=2における不適合は伝播時間 t_4 の定義に関連している。すなわち、振源(X=0)において $t_4=kT > 0$ (k: Typeにより異なる定数であるが大略0.2(k<0.3)となるため、実質の伝播時間は t_4-kT となり、これは t_4/TQ を $t_4/TQ-k/Q$ と置き換えることに相当する。図の横軸 t_4/TQ に対してこのような補正を行えばQ=2の場合もほぼ同じ曲線で近似できる。しかも、全てのTypeに対してk<0.3となるので、Q>5ではその影響は無視可能である。そこで、 τ_p/T と t_4/TQ および τ_R/T と t_3/TQ の関係を近似する簡単な関数形を次式のように考える。

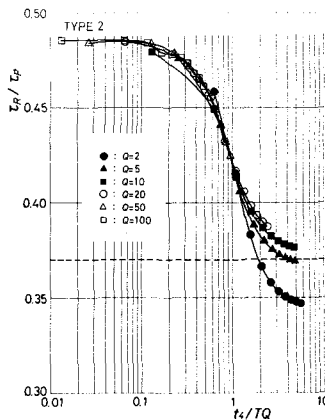
$$\tau_p = 0.79t_4/Q + \tau_{p0} \exp(-0.45t_4/Q\tau_{p0}) \quad (3)$$

$$\tau_R = 0.30t_3/Q + \tau_{R0} \exp(-0.14t_3/Q\tau_{R0}) \quad (4)$$

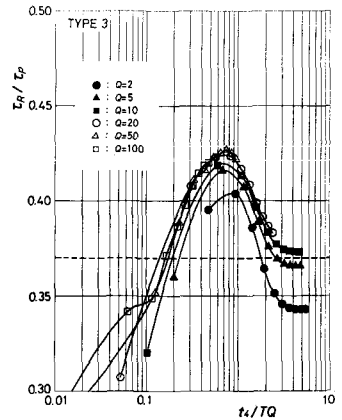
すなわち、(3)、(4)式は τ_p と t_4 との関係もしくは τ_R と t_3 との関係が実験的に定められれば、未知定数Qと τ_{p0} もしくは τ_{R0} のそれぞれの値が決定できることを示している。



(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3

Fig. 3 入力波形Typeにおけるパルス比 τ_R/τ_p と t_4/TQ の関係

(1), (2)式と(3), (4)式を比較すると, t_4/Q あるいは t_3/Q の値が十分大なる領域では両者の微係数の値はほぼ等しくなるため, どちらの式を用いても求められるQ値はほぼ等しくなる。しかし, t_4/Q あるいは t_3/Q が比較的小さな値の範囲を問題とする場合($t_4/Q < 2T, t_3/Q < 2T$)には, 両者の差は明瞭である。

次に, Type 1~3のそれぞれの場合の計算結果についてパルス比と t_4/TQ との関係を調べるとFig. 3(a), (b), (c)のようになる。Q値をパラメータとして表し, 比較のために $\tau_R/\tau_P=0.37$ を破線で示している。入力変位が有限な時間幅を有する場合にはパルス比の値は伝播時間により変化し, その変化の傾向はQ値にも依存している。さらに, パルス比と伝播時間との関係は入力変位波形によっても異なる。従って, 測定結果から求められたパルス比の値が伝播時間に依存せず, $\tau_R/\tau_P=0.37$ をほぼ満足するようであれば, 入力変位をインパルスもしくはインパルス応答波形で近似できる。しかし, そうでない場合には, 入力変位波形の影響を評価しなければならない。ここで, Type 1~3の τ_{pg} とTの関係は, Type 1では $\tau_{pg}=0.47T$, Type 2では $\tau_{pg}=0.38T$, Type 3では $\tau_{pg}=0.23T$ となる。今, 実測値のパルス幅 τ_P と伝播時間 t_4 との関係に(3)式を適用し, 未知定数Qおよび τ_{pg} の値が算定された場合を考える。それに上記の関係を適用するとそれぞれの入力について基本周期Tの値が算定できる。従ってこのようにして求めたQおよびTの値を用いると, 実測値におけるパルス比と t_4/TQ との関係を推定することが可能となり, これとFig. 3とを比較することにより入力変位の仮定が検定できる。すなわち, 実測値のパルス比と t_4/TQ との関係がFig. 3のいずれかとほぼ一致する場合には, (3), (4)式に基づいたQ値評価は妥当であると考えることができる。

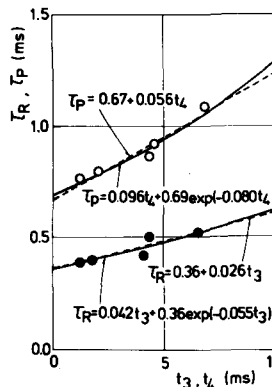
3. Q値評価法の適用例

測定は二カ所の岩盤で実施した。測定サイト1は地下空洞内の岩盤ピラーを対象にしたものであり, 発振はハンマー打撃により行なった。岩盤のP波伝播速度は $4.0 \pm 0.6 \text{ km/s}$ で, 振源と受信子との距離は5~28mの範囲である。測定サイト2はトンネル掘削にともなう発破振動を計測したものであり, 岩盤はP波伝播速度が 2.7 km/s の安山岩質の貫入岩と 2.2 km/s の火山性碎屑岩の互層からなり, 層の傾斜はほぼ鉛直である。掘進発破は段発で実施しているが, 波形の再現性の高い初段(芯抜き発破)の振動波形を解析の対象とし, 受信子との距離は60~180mである。使用爆薬はサンボックスであり, 初段の薬量は $1.8 \sim 2.2 \text{ kg}$ であった。また, 両測定で用いた受信子はいずれも動電型速度計で, 記録計を含めた総合周波数特性は対象とする振動の周波数帯域についてほぼ平坦な特性を持っている。

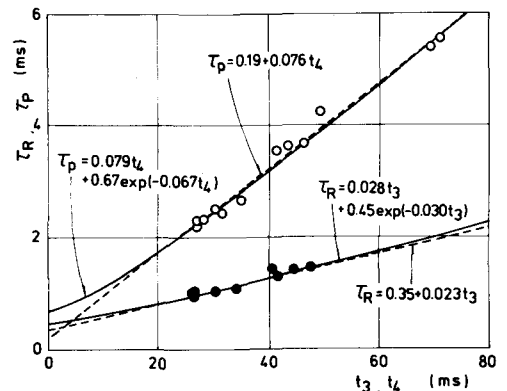
両測定サイトにおけるパルス幅と伝播時間 t_4 の関係およびライズタイムと伝播時間 t_3 の関係をFig. 4 (a) および(b)に示す。伝播時間 t_4 および t_3 の増加にともなって, 減衰の影響により初動波形が長周期化している。また, その傾きはパルス幅とライズタイムとでは異なる傾向を示している。そこで, パルス幅もしくは

ライズタイムと伝播時間の関係式を適用し, 最小自乗法によりそれぞれの場合のQ値を算定した。図中の実線は(3)および(4)式による回帰曲線を示し, 破線は(1)および(2)式による回帰直線を示している。

また, それらの解析結果をTable 1に示す。なお, 通常のQ値評価法であるスペクトル比解析法により求めたQ値の平均値も併記する。(1)および(2)式から求めたQ値は



(a) サイト1



(b) サイト2

Fig. 4 岩盤における初動形状パラメータと伝播時間の実測結果

(3)および(4)式から求めたQ値より若干大きい値を示す。この結果のみからはそれぞれの評価式の適用性およびQ値の妥当性の判断はできない。そこで、パルス比と伝播時間 t_4 の関係を求めるとFig.5(a),(b)となる。(1)および(2)式によってQ値を評価するためには図中破線で示している $\tau_R/\tau_P=0.37$ を満足する必要があるが、今回の実測

Table 1 解析結果

Relation	Equation	SITE 1			SITE 2		
		Q	τ_{Pg} or τ_{Rg}	Q'	Q	τ_{Pg} or τ_{Rg}	Q'
τ_P, t_4	eq. (1)	14.1	0.67		10.4	0.19	
	eq. (3)	8.2	0.69	8.2	10.0	0.67	10.1
τ_R, t_2	eq. (2)	11.3	0.36		12.7	0.35	
	eq. (4)	7.1	0.36		10.4	0.45	

Q' is estimated by the spectral method.

結果では入力波形としてインパルスもしくはインパルス応答波形を用いる場合にはは無理があると考えることができる。そこで、入力変位がType1~3のいずれかで表現できると仮定して、推定した τ_{Pg} の値から入力基周期Tを求め、これらの値と(4)式から推定したQ値(サイト1でQ=8.2,サイト2でQ=10.0)を用いてパルス比の理論値を求めた。図中、各Typeについて実線で示している。入力変位はサイト1ではType2で、サイト2ではType1もしくはType3で近似できる。上記の結果に基づいて、初動振幅と伝播時間の関係を、波動の幾何学的拡散が球面波拡散で表現できると仮定して、初動振幅と伝播時間 t_4 の関係をType1の関数を用いてサイト2について求めるとFig.6のとおりである。Type3についてもほぼ同様な結果になった。この結果からも推定したQ値の妥当性が確認できる。

4. まとめ

本論文では、Constant Q理論に基づいて伝播波形の初動形状と伝播時間との関係から、地盤のQ値を簡便に評価する手法について考察した。初動パルス形状を定量化するパラメータとしてライズタイムとともにパルス幅を採用するとともに、ライズタイムとパルス幅の比をパルス比と定義して、パルス比と伝播時間との関係を分析し、入力変位波形の大略の予測が可能となることを示した。この結果に基づいて、上記の関係式を利用したQ値評価法の問題点とその解決法を示した。

さらに、提案したQ値評価法について岩盤における評価例を示し、本手法の実用性を確認した。
謝辞 多大なご協力を頂いた熊本大学大学院生、柴拓海氏、中村直昭氏に心から感謝致します。

参考文献 1)Blair,D.P and A.T. Spathis (1982): Attenuation of explosion-generated pulse in rock masses, J. Geophys. Res., Vol.87,No.B5,pp.3885-3892 2)Blair,D.P. and A.T.Spathis(1984): Seismic source influence in pulse attenuation studies, J. Geophys. Res., Vol.89, No.B11, pp.9253-9258 3)Gladwin, M.T. and F.D. Stacy(1974):Anelastic degradation of acoustic pulses in rock,Phys.Earth Planet. Interiors, 8, pp.332-336 4)金子 他：地盤の波動減衰特性の評価法(I),(II),物理探査投稿中 5)Kjartansson, E.(1979):Constant Q-wave propagation and attenuation, J. Geophys. Res.,Vol.84,No. B9,pp.4737-4748 6)Tarif,P.and T.Bourbie (1987): Experimental comparison between spectral ratio and rise time techniques for attenuation measurement,Geophysical Prospecting,35,pp.668-680

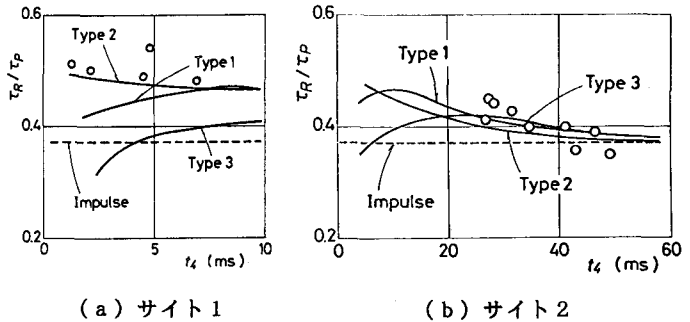


Fig.5 パルス比と伝播時間の関係

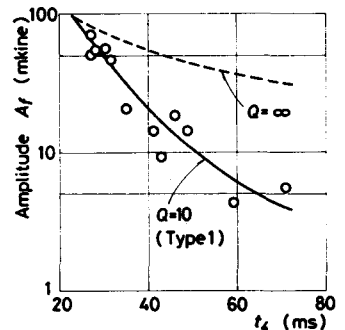


Fig.6 サイト2における初動振幅と伝播時間の関係