

原位置における土の減衰定数 (β) の測定

株式会社 応用地質調査事務所 正員 今井 常雄
 " 正員 ○ 殿内 啓司
 " 正員 兼森 孝

1 まえがき

地震防災的な見地から 軟弱地盤の地震時挙動を予測するために、実際の地盤をモデル化してのさまざまな解析が試みられている。しかしながら 実際の地盤は複雑であり、いかなる解析手法を用いるにしても、その結果の良否は地盤定数の与え方に大きく支配される。なかでも、軟弱地盤を構成する土のS波速度あるいは剛性率と減衰定数は不可欠の基礎データである。これらの地盤定数のうち、S波速度に関しては、原位置でこれを得るために、これまでさまざまな工夫改良がなされてきた。筆者らも、PS検波法を提案し、その実用化に努めてきた。その結果 S波速度のデータは、現在、日本全国にわたり 数多くのものが蓄積されている。しかし、今一方の減衰定数に関しては、原位置での測定データが極めて少ないのが現状である。

このような背景のもとに、ここでは、原位置での測定としてPS検波を実施し、その際得られるS波記録を用いての減衰定数の試算結果について報告するものである。

地表の、いわゆる軟弱地盤を対象とした減衰の原位置測定に関する研究は、地震探鉱実験グループとそれに関係する人々によって実験的に行われてきた⁽²⁾のが現状である。なかでも、ここに紹介するような、いわゆるS波検波の記録を用いての例は、Kudo and Shima⁽³⁾(1970)によるもののみであり、彼らは、減衰を表わす量としての無次元量Qを求めている。

2 測定方法

測定方法は、図-1の測定系統図に示すように、基本的には通常のPS検波法と変わらないが、板叩き震源の震源エネルギーを基準化するために、地表に固定の測定点が設けられている。測定に用いた受振器は、方位計付きで、上下1、水平2の直交3成分内蔵の孔中地震計(OYO製、Model 3320型)であり、測定記録は解析時の便を考慮し、データレコーダに磁気記録として収録した。測定にあたっては、地中の所定の深度に設置された地震計で、地表の板叩き震源によって発生させた波動を観測したが、この時、地表に設けられた固定の測定点でも同時に記録した。

3 解析方法

地表および地中のある深度で同時測定された記録のフーリエ変換形 $A(f)$ および $B(f)$ は、それぞれ次のように表わされる。

$$A(f) = H_A(f) \cdot P_A(f) \cdot S(f) \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$B(f) = H_B(f) \cdot P_B(f) \cdot S(f) \cdots \cdots \cdots (2)$$

ただし、 f : 周波数 (Hz)

$H(f)$: 震源～受振点間の伝達関数

$P(f)$: 測定器の周波数特性

$S(f)$: 震源の特性

一方、媒質が均質であるとするなら、伝達関数 $H(f)$ は次のように表わすことができる。

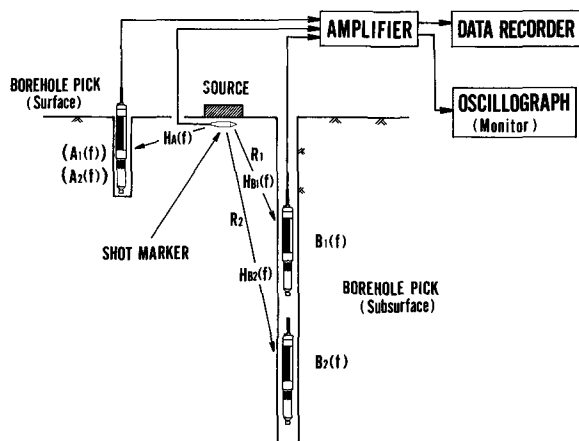


図-1 測定系統図

$$H(f) = G \cdot e^{-\alpha(f) \cdot R} \dots\dots\dots ③$$

ただし、 G : 幾何学的な拡散係数

$\alpha(f)$: 減衰係数 (m^{-1})

R : 震源～受振点間の距離 (m)

したがって、この③式より、図-1に示したような地中2深度の位相速度を用いると減衰係数 $\alpha(f)$ は次のようになる。

$$\alpha(f) = \frac{\ln \left\{ \left(\frac{H_{B1}(f)}{G_1} \right) / \left(\frac{H_{B2}(f)}{G_2} \right) \right\}}{R_2 - R_1} \dots\dots\dots ④$$

ところで、震源として用いている板の大きさに比べ、震源～受振点間の距離は充分に大きいことから球面波とみなせるので、拡散係数は、 $G = 1/R$ と近似できる。また、今回の測定に際しては地表・地中ともに同じ特性の計器が用いられていることから、①、②式より、 $P(f)$ 、 $S(f)$ を消去して $H(f)$ を求め、これを④式に代入すると結局、 $\alpha(f)$ は次のようになる。

$$\alpha(f) = \frac{\ln \left\{ \left(R_1 \cdot \frac{B_1(f)}{A_1(f)} \right) / \left(R_2 \cdot \frac{B_2(f)}{A_2(f)} \right) \right\}}{R_2 - R_1} \dots\dots\dots ⑤$$

減衰定数 α は、⑤式の $\alpha(f)$ より、位相速度 C を用いて次のように求まる。

$$\alpha = \frac{C \cdot \alpha(f)}{2\pi f} \dots\dots\dots ⑥$$

4. 解析結果

まず、PS検知結果のS波の波形記録を、発振時を基準に深度順にならべて整理し、波形一覽図として図-2に示す。同図には、板の左右両端を叩いた場合の記録が併記されているが、明らかに位相が反転しており、SH波であることを裏付けている。また、図-3には、検知結果の速度構造と土質柱およびN値を対比させて示したが、測定地点の地盤は、砂質土と粘性土の互層からなる。

このような地盤状況のもとで、ここでは、媒質が比較的一様と思われる、G.L.-13m～-21mに於て分布する砂質土層 ($V_s = 270$ m/s) と、この下位のG.L.-21m～-31mに分布する粘性土層 ($V_s = 180$ m/s) を解析の対象とした。

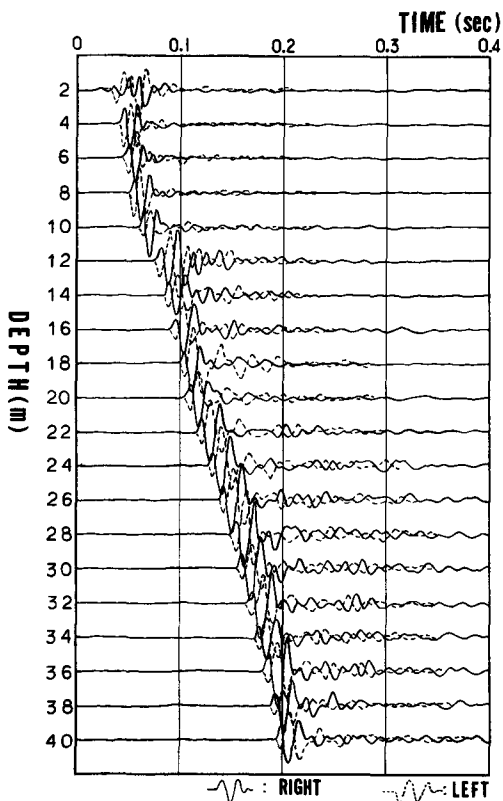


図-2 S波の記録波形一覽

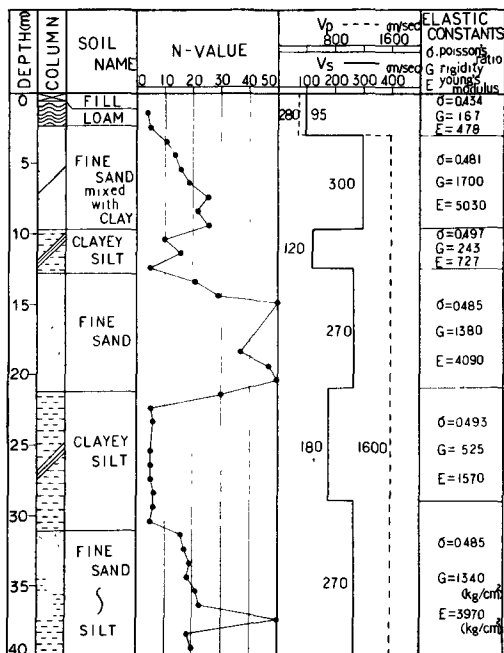


図-3 観測地点の地盤状況図

ところで、図-2に示したS波の波形一覧図において、板叩き震源の打撃方向の違いにより、位相が反転していることから、SH波の裏付けを得ているが、減衰定数 α の算出に先立ち、今一度解析に用いる波形のS位相の確認を行った。測定は地中の各深度および地表の固定の観測点とも、直交3成分で行われていることから、これら3成分の記録を用い、質点の軌跡を求めた。図-4にその一例を示す。これはG.L.-22mの測定時のものであるが、上段が地中の、下段がその時同時測定された地表の記録によるものである。地中、地表ともにH成分(板の打撃方向)の最大振幅付近で、H1方向の振動が卓越しており、S位相であることを示している。

さて、上述のようにして確認されたS波記録を用い、減衰定数 α の算出を行った。砂質土層内で得られた記録による例を図-5および図-6に示す。図-5は解析に用いた記録波形である。図の上段は板叩き震源の左叩きによるものであり、下段は右叩きによるものである。それぞれ地中2深度の記録波形と、各深度の測定時に同時測定された地表の固定点での記録波形を示してある。なお、同図の横軸時間は、各波形の対応位相を揃えているため、相対的なものとなっている。図-6は、これらの波形による解析結果である。ここに示されたフーリエスペクトルは、図-5の各波形に対応するものであり、減衰定数 α はこれらのスペクトルと先の⑤および⑥式により算出されたものである。この結果によると、右叩き、左叩きそれぞれで若干の違いはあるものの、ほぼ類似の α を示し、ともに周波数の逆数に比例する傾向を示している。

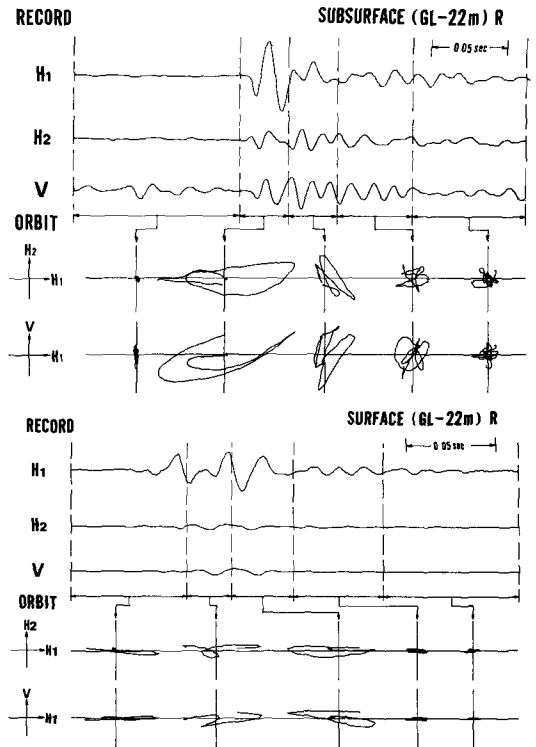


図-4 質点の軌跡

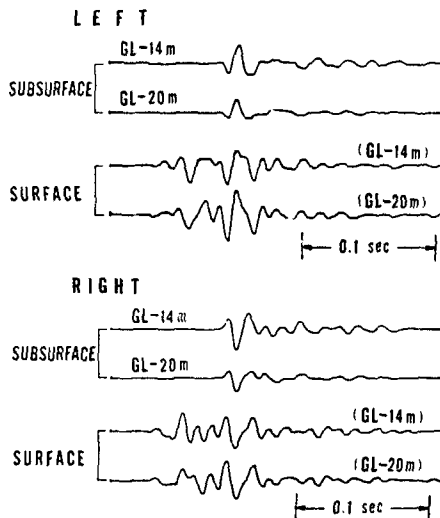


図-5 記録波形(砂質土層)

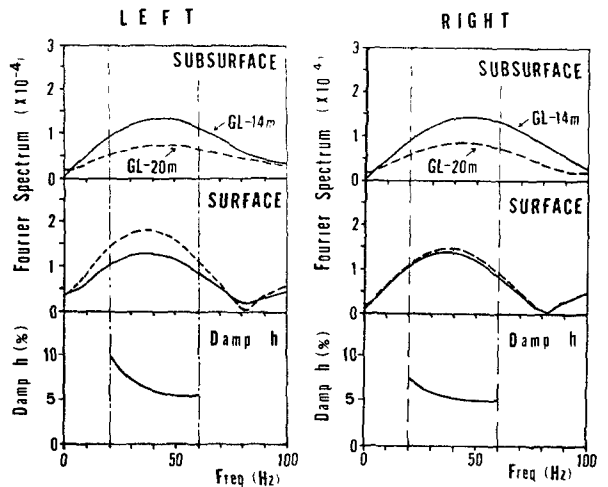


図-6 解析結果(砂質土層)

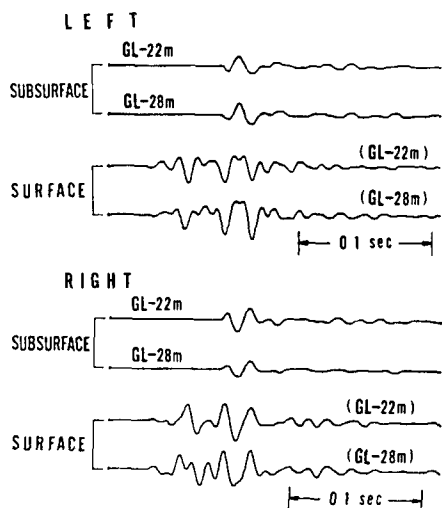


図-7 記録波形(粘性土)

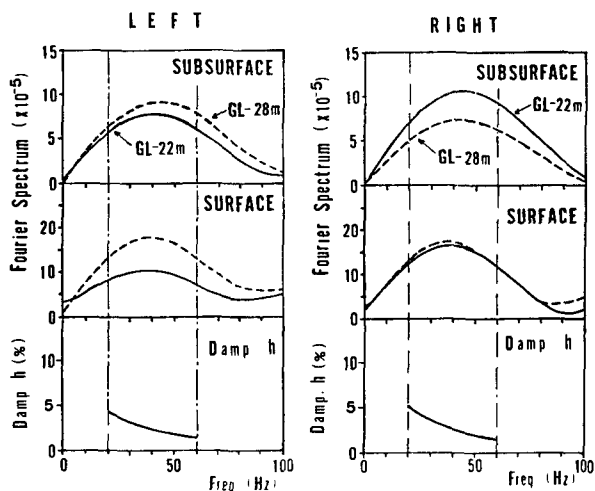


図-8 解析結果(粘性土)

一方、図-7および図-8は、粘性土内で得られた記録による例である。右叩き、左叩きによる差はほとんどなく、先の砂質土の例と同様、周波数の逆数に比例する傾向にあるが、 λ は砂質土に比べて小さくなっている。

以上の図-5から図-8に示した各局ごとの例は、地中2深度の間隔がともに6mの場合であるが、先述したように、媒質が均質であるなら結果として得られる λ は2深度の間隔には依らないはずである。このような観点から、今回解析の対象とした各局で、2深度の間隔が2mおよび4mの場合についても算出を試みてみた。その結果を上述の6mの場合もあわせて図-9に示す。これによると、確かに2深度の間隔の違いによる特徴的な差は認められない。しかし、砂質土と粘性土では、明らかに減衰定数に差があるようである。

5 あとがき

最近、サンプリングした試料を用いての室内動的土質試験が、

かなり行われるようになってきた。振動三軸試験や共振法試験によると、剛性率に関しては数少ない範囲内で精度良く求められているが、減衰定数に関しては大々領域はともかく、PS検定時の歪レベルである 10^{-6} 程度になると、精度的に若干の問題があるようである。そういった意味で、ここに紹介した方法は有効な手段といえよう。

今後、改善していかなければならない問題を数多く残しているが、先ずはデータの蓄積がオチであり、併せて測定から解析までの一連の簡便で実用的なシステムをも工夫していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Imai, T. (1977), "P- and S-Wave Velocities of the Ground in Japan", Proc. of 9-th I.C.S.M.F.E.
- 2) 工藤一嘉(1976), "波動の減衰測定 野外実験", 地震探査実験グループ編「地震波の生成・伝播に関する実験」オマ章オ2節
- 3) Kudo, K. and E. Shima (1970), "Attenuation of Shear Waves in Soil", B.E.R.I., vol. 48

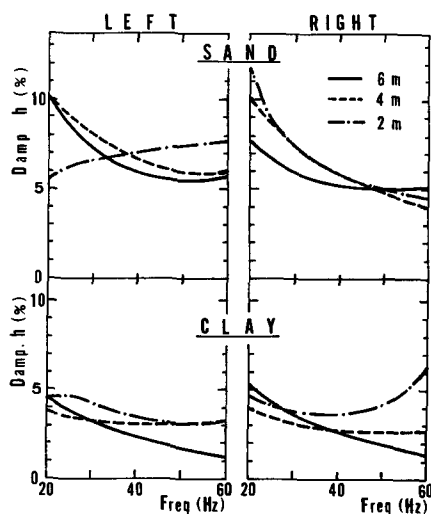


図-9 減衰定数一覧