

神戸大学工学部 正員 高田至郎
大成建設 正員 吉田 明

1. まえがき 近年、地下における土木施設の建造が盛んとなり、交通機関の面においても地下鉄道が都市における輸送の主要な手段となりつつある。それとともに従来は地表面上あるいは地上の構造物内にある振動源が周辺の地盤や構造物に与える影響が問題視されているのに加えて、地下振動源による周辺の地下構造物や地上構造物に与える影響が問題となってきた。本研究はトンネルなどの地下構造物内に列車、自動車等の振動荷重がある場合の構造物の振動とそれに伴う周辺地盤への波動伝播を明らかにすることを目的として、基礎的な振動実験を行なったものである。

2. 室内模型実験 Fig.1に示すように、アクリルアミド系のブライト剤で地盤模型を作り、その中にA1~A12に示す位置に18個の小型加速度計を埋め込んで、A1~A4のごく近傍位置に直径約10mmの載荷用の円形板を埋め込み、上下方向に衝撃を加えて波動を発生させて、そのときの地盤内各点の運動加速度を計測した。A3, A10, A12では3成分の運動と他の9点では鉛直方向のみを測定している。本実験における相似律の検討より、この振動系は次の無次元量によって表示される。

$$f(R/H, \mu/H, P\mu^2 H^2/E) = 0 \quad (1)$$

H, P, Eは地盤層の厚さ、密度、弾性定数であり、 μ は衝撃深さ、 ω は外力の振動数、 μ は応答変位である。本実験では長さ比100、密度比2.0、弾性定数比500と定めている。

波動が2測点間を伝播することによってのみ、各点で得られた加速度記録に位相差が生じているものとすれば、その位相速度 $v(\omega)$ は次式となる。

$$v(\omega) = \omega \cdot \Delta x / \{ \varphi(\omega, x_2) - \varphi(\omega, x_1) \} \quad (2)$$

Δx は2測点間の距離、 $\varphi(\omega, x_i)$ は測点 x_i における、ある振動数での位相特性である。

一方、群速度 $V(\omega)$ と $v(\omega)$ は次の関係がある。

$$V(\omega)/v(\omega) = 1/(1-\alpha) \quad (3)$$

α は両対数目盛上に示した振動数と位相速度の関係を示す直線の傾きである。Fig.2は式(2)を用いて計算した両速度で、地盤のx方向には分散性のある横波の波動の伝播があるものと推察される。Fig.3, 4はx, y方向での振動減衰の様子を最大振幅の比(振幅法)と波形式スペクトルの積分値の比(エネルギー法)で比較したものである。Fig.4では基礎面($y=0$)での波動反射の影響が見られる。Fig.5は周波数伝達関数 $H_{ij}(\omega)$ を求めたものである。 $H_{ij}(\omega) = H_k(i\omega)/H_j(i\omega)$ で衝撃

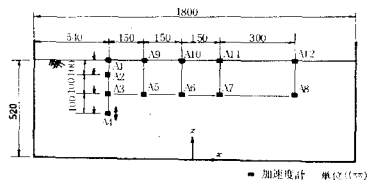


Fig.1 実験装置図

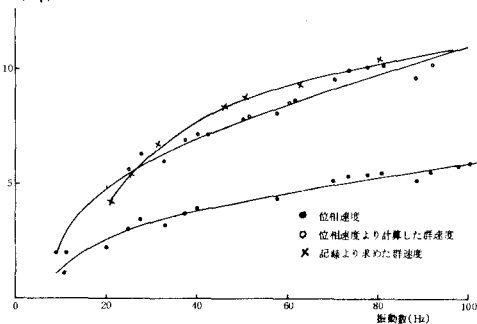


Fig.2 横波の伝播速度

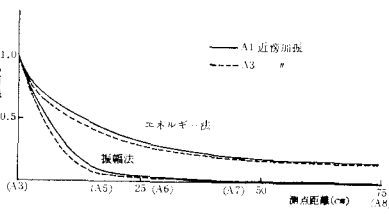


Fig.3 加速度比の減衰特性

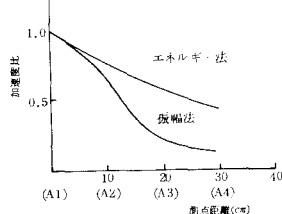


Fig.4 加速度比の減衰特性

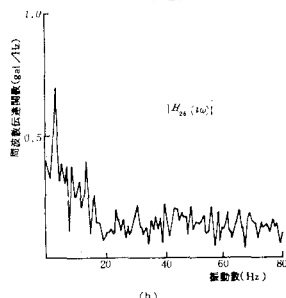
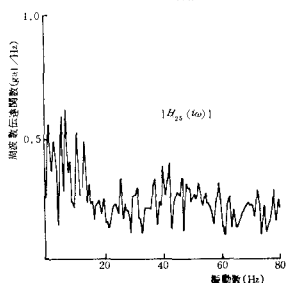


Fig.5 周波数伝達関数

を加えた点までの波形のスペクトル $H_h(i\omega)$ で各測点でのスペクトル $H_h(i\omega)$ を除したものが各周波数成分の伝達を表す。さらに、 $\alpha_{5i} = H_h(i\omega)/H_{ie}(i\omega)$ とすれば、これは振動数に無関係な定数となり、その伝播距離との関係は Fig. 6 で示される。衝撃点より出た波動は A5~A8 点に到達するが、その間の地盤は同様のフィルター効果を示し、振幅に対する減衰効果だけが異なってくることを知られる。

3. 野外実験 Fig. 7 に示す実地盤で起振機 (GL-0m, -2m), 雷管 (GL-3m) を用いて振動実験を実施した。加振位置より 3~5m 間隔で 9 台の速度型振振機を設置して地盤上の運動速度を計測した。Fig. 8 は起振機実験での振動距離減衰を調べたもので、地中加振 (GL-2m) の場合には減衰効果が小さいことが知られる。相似律を考慮して模型実験の結果を示したのが図中の破線で、波動速度および内部減衰の相違が表われているものと考えられる。Fig. 9 は、GL-2m 加振の場合について上述と同様の方法で周波数伝達関数を求めたものである。高い振動数とともに伝達率は減少しており、波動の高音波成分は減衰しやすいことが知られる。なお、この伝達関数は測点により形状が変化しており、前述のような伝達係数 α_{5i} が得られないことは明らかである。Fig. 10 は雷管を炸裂させた場合の地盤上 5 点での鉛直方向の速度記録である。この記録よりスペクトルを求めた結果、加振位置より遠方の測点ほど高音波成分が少なくなることが知られた。周波数伝達関数を求めたのが Fig. 11 である。いずれの $H_h(i\omega)$ ($h=2\sim5$) も 15~20 Hz 付近にピークを有し、他の振動数範囲では伝達関数は減少している。15~20 Hz 付近の周波数成分の波動がとくに伝達しやすいことを意味しており、検討の結果、これは地盤層の上下動卓越周期であることが分かった。Fig. 12 は雷管実験の結果を振幅法、エネルギー法を用いて振動距離減衰を調べたものである。これらの結果より系の固有振動特性が波動の伝播特性に顕著に現われてくるような場合には伝達関数法による伝播プロセスの解析が必要となってくるであろう。なお、本研究は京都大学工学部教授後藤尚男先生の助言を得て実施されたものであることを記し感謝の意を表す。

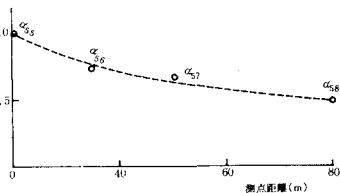


Fig. 6 α_{5i} と伝播距離の関係

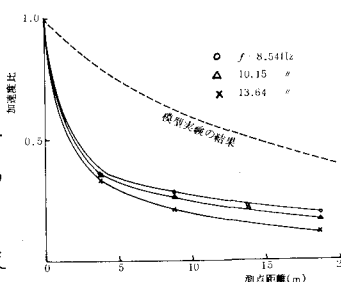


Fig. 8 速度比の減衰特性

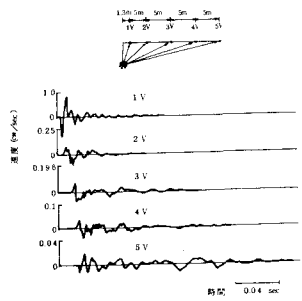


Fig. 10 地表面速度波形

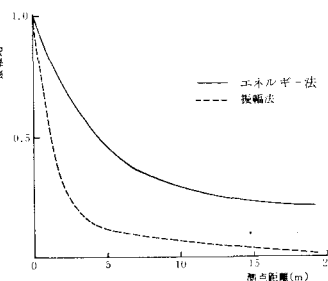


Fig. 12 地表面速度比の減衰特性

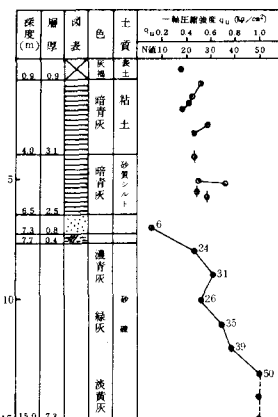


Fig. 7 実験地盤の土質柱状図¹⁰⁾

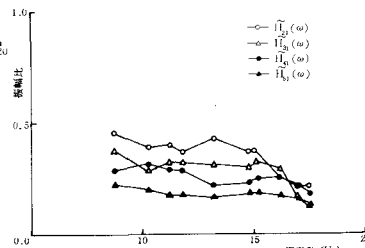


Fig. 9 周波数伝達関数 (GL-2m 加振)

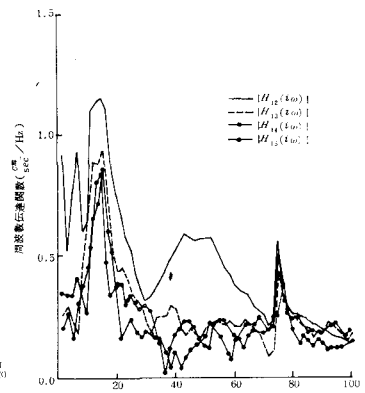


Fig. 11 周波数伝達関数

1) 後藤尚男・高田至郎・吉田明：表層地盤中にある振動源による波動伝播解析，京都大学防災研究所発表会，549.2