

トンネル内動荷重による地表面の地盤振動について

神戸大学工学部 正員 高田至郎
清水建設 正員 〇稲垣智彦

1. まえがき：近年、土地利用の高度化に伴い、都市域では地下鉄や地下高速道路の建設が進み、また土地開発によって列車トンネル上に住宅地などを建造することが盛んとなってきている。それに伴い、地中あるいは地表面上にある周辺構造物や人に与える振動の影響が改めて問題とされてきている。本研究は、野外実測例および数値解析結果より、トンネル内動荷重による地表面の地盤振動について検討を加え、上述の振動問題を解明していくうえでの基礎的な資料を提供せんとするものである。

2. 野外測定：測定は、Fig.1に示すように、民間鉄道沿線の上被り厚の異なるA, B 2箇所で行なった。両地点はいずれも地山を切り崩してなした宅造地域で比較的硬い地質である。Fig.2は、測点Aでの速度振幅の上下成分の距離減衰を示している。トンネル直上の値よりも、2.5m離れた測点で最大値 0.85 mm/sec を示し、地盤振動としては小さな値ではない。これは、トンネル構造物が振動することの影響であると考えられる。また、地表面に振動源がある

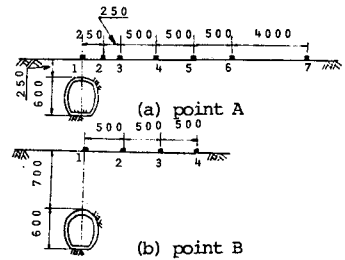


Fig.1 Field experiment

場合の距離減衰が、逆2乗則に従うことが一般に指摘されているが、本実験の測定結果はかなり異なる。たものである。Fig.3は、測点Bの距離減衰を示している。上下動に関しては、測点Aと同様の傾向が見られる。一方、水平動についてはトンネル軸および軸直角方向とも、減衰割合は小さく、しかも上下動より大きな振動値となっている。地中の深い位置にある振動源の場合、このような傾向が予想される。Fig.4は、測点Aの3点での上下動のパワースペクトルを示している。各マレベルは異なるが、卓越する周波数などにおいて特性は相等しい。地表面振動源の場合、測定

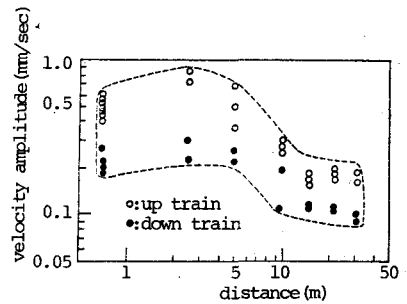


Fig.2 Ground vibrations at point A

距離とともに高振動成分が比較的早く減衰するのに対し、地中振動源の場合の特徴と思われる。次に理論解析を行ない野外測定結果と、比較検討する。

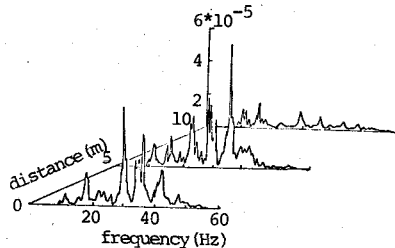


Fig.4 Power spectra at point A

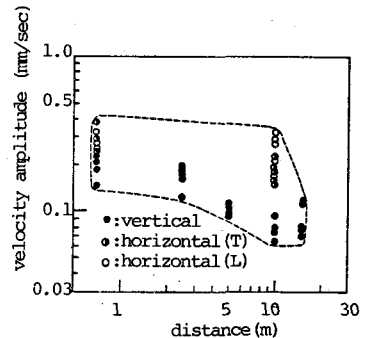


Fig.3 Ground vibrations at point B

3. 理論解析: Fig. 5 に示されたトンネル構造物内の $\theta = \pi/2$ の点に動的集中荷重が作用する時の地盤表面変位を、波動反復法を用いて解析した。(なお以下の物理変数および定数における添字 1, 2 は各々、構造物と地盤を意味する。) 縦波および横波の変位ポテンシャルを ϕ_i^j, ψ_i^j ($i=1, 2$) とし、かかる解析モデルの全ての境界条件を満足する変位ポテンシャル ϕ^j, ψ^j ($i=1, 2$) が次式の級数で表示されるものとする。

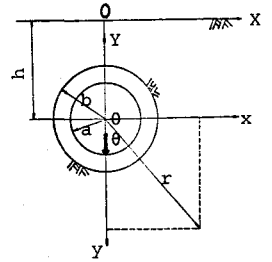


Fig. 5 Analytical model

$$\phi^j = \phi_0^j + \phi_1^j + \phi_2^j + \dots, \quad \psi^j = \psi_0^j + \psi_1^j + \psi_2^j + \dots \quad (1)$$

なお、各変位ポテンシャルは波動方程式を満足し円筒座標を用いて次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \phi_m^{(1)} &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n^{(1)} H_n^{(1)}(\alpha_n r) \cdot \sin n\theta \cdot e^{i\omega t}, & \psi_m^{(1)} &= \sum_{n=0}^{\infty} b_n^{(1)} H_n^{(1)}(\beta_n r) \cdot \cos n\theta \cdot e^{i\omega t}, \\ \phi_m^{(2)} &= \sum_{n=0}^{\infty} c_n^{(2)} H_n^{(2)}(\alpha_n r) \cdot \sin n\theta \cdot e^{i\omega t}, & \psi_m^{(2)} &= \sum_{n=0}^{\infty} d_n^{(2)} H_n^{(2)}(\beta_n r) \cdot \cos n\theta \cdot e^{i\omega t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{地盤内;} \quad \phi_n^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} e_n^{(1)} H_n^{(1)}(\alpha_n r) \cdot \sin n\theta \cdot e^{i\omega t}, \quad \psi_n^{(1)} = \sum_{n=0}^{\infty} f_n^{(1)} H_n^{(1)}(\beta_n r) \cdot \cos n\theta \cdot e^{i\omega t}. \quad (3)$$

ここに、 $H_n^{(1)}(z), H_n^{(2)}(z)$ は第 1 種、第 2 種 ハンケル関数、 α_i, β_i は縦波、横波の波数であり、(i), (1) は後退波と進行波を意味する。なお各ポテンシャルの係数は $r=a, r=b, Y=0$ の 3 個の境界条件より決定され、円筒波と平面波の相互変換を行なって、最終的に地表面変位 u_0, v_0 は次式のように求まる。

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{4\beta_1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\sum_{m=0}^{\infty} e_{2m+1}^{(1)} \right) \int_0^{\infty} e^{-\alpha_n x} \frac{\alpha_n \beta_1}{\Delta(\beta_1)} \cdot i \cdot \left[\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{\alpha_2} \right)^{2m+1} + \left(\frac{-\alpha_2}{\beta_1 + \beta_2} \right)^{2m+1} \right] \cdot \sin kx \, dk \\ &\quad + \frac{2\beta_2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\sum_{m=0}^{\infty} f_{2m+1}^{(1)} \right) \int_0^{\infty} e^{-\alpha_n x} \frac{(2\beta_1^2 - \beta_2^2)}{\Delta(\beta_1)} \cdot i \cdot \left[\left(\frac{-\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \right)^{2m+1} - \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_2} \right)^{2m+1} \right] \cdot \sin kx \, dk, \\ v_0 &= -\frac{2\beta_1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\sum_{m=0}^{\infty} e_{2m+1}^{(1)} \right) \int_0^{\infty} e^{-\alpha_n x} \frac{(2\beta_1^2 - \beta_2^2)}{\Delta(\beta_1)} \cdot i \cdot \left[\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{\alpha_2} \right)^{2m+1} + \left(\frac{-\alpha_2}{\beta_1 + \beta_2} \right)^{2m+1} \right] \cdot \cos kx \, dk \\ &\quad - \frac{4\beta_2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\sum_{m=0}^{\infty} f_{2m+1}^{(1)} \right) \int_0^{\infty} e^{-\alpha_n x} \frac{\alpha_n \beta_2}{\Delta(\beta_1)} \cdot i \cdot \left[\left(\frac{-\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} \right)^{2m+1} - \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{\beta_2} \right)^{2m+1} \right] \cdot \cos kx \, dk. \end{aligned} \quad (4)$$

なお記号の説明は講演時に行なう。

4. 解析結果: Fig. 6 は以上の解析結果より求めた距離減衰を示す。一定の距離まで減衰割合が小さく、それ以上になると減衰が大きくなる傾向が見られ、野外測定の結果

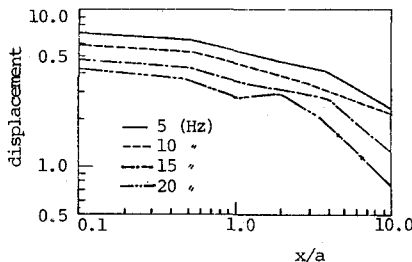


Fig. 6 Decrease of displacement

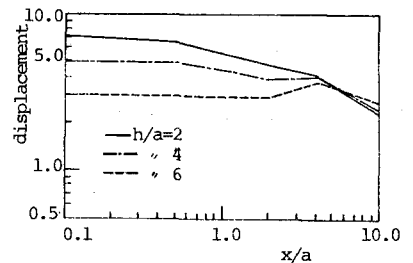


Fig. 7 Decrease of displacement

とほぼ同様の傾向を示しているといえる。また Fig. 7 は土被り厚の違いによる影響を示している。トンネルが深くなるほど振動の距離減衰は小さくなる傾向が見られる。なお実測値との比較検討および周波数伝達関数を用いてトンネル内でのスペクトル特性を検討した結果の詳細については講演時に行なう。