

神戸大学工学部 正員 桜井春輔
神戸製鋼 正員 葛西俊一郎

1. まえがき

最近、既設のトンネルに接近して、新設トンネルが建設される場合、あるいは、新設トンネルが、既設トンネルと地山内において立体交差する場合などにおいて、既設トンネルの安全性を確保するために、新設トンネルの工事用発破の薬量、パターン等の管理を必要とする場合がしばしば生じている。しかし、トンネルのような地中構造物の耐振性状については、まだ不明な点が多く、したがって、発破管理において常に問題となる振動の許容値の決定は、かなり経験的であるのが現状である。

本報告においては、このような観点から、近接発破によるトンネル覆工の動的挙動を理論的に究明し、その耐振性状の検討を行なうことによって、発破管理に関する基礎データを得ることを目的としている。

2. 理論的解析

厳密には、当然、爆発点からの波動を震源点からの衝撃波として三次元的に解析しなければならない。しかしここでは、次のような仮定を設け、問題を単純化して解析を行なうことにする。

- (1) トンネルは円形とし、その周辺の地山は無限に広く、均質であり等方性を有する弾性体とする。
- (2) 2次元平面ひずみ状態とする。
- (3) 入射波は粗密波とし、さらに正弦波とする。

トンネル中心 O から r_0 離れたところの点 $\bar{O}$ を発破地点とする粗密波の scalar potential ϕ は次のように表わされるものとする。

$$\phi = \phi_0 H_0^{(2)}(k_1 \bar{r}) e^{i\omega t} \quad (1)$$

ここで、 $H_0^{(2)}()$ は 0 次の Hankel の第 2 種関数であり、ここでは発散波を表わす。式(1)を O を原点とする極座標 (r, θ) によって表わすと次のようになる。

$$\phi = \phi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \epsilon_n H_n^{(2)}(k_1 r_0) J_n(k_1 r) \cos n\theta e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_n は $\epsilon_n = 1 (n=0), 2 (n \geq 1)$ である。 k_1 は粗

密波の波数を表わす。式(2)を入射波動と考へ、地山と覆工の相互作用を考慮して、弾性波動理論によって解析を行なう。解析の手順はすでに発表している²⁾のでここでは省略する。

3. 数値計算結果

図-2は覆工内周($r=b$)および外周($r=a$)における最大主応力分布と、内周における変位速度分布を示したものである。ただし、ここで、それぞれの値は、トンネルがない場合の点 O における $\bar{r}$ 方向の応力および変位速度の振中で無次元化してある。この図から明らかなように、覆工外周の応力分布は内周に比較して均一である。しかし、応力の最大値は必ず内壁に生じ、その発生場所は振源が覆工に近い場合は、 $\theta=0^\circ$ 、遠くなれば $\theta=90^\circ$ である。そして、この最大応力の発生場所の変化は $r_0/a = 2.0 \sim 5.0$ の間に生ずる。ただし、これは $k_1 a = 0.5$ の場合であり、 $k_1 a = 1.0$ となれば、最大応力は振源が近接しても $\theta=90^\circ$ において生ずることが確認されている。

次に、変位速度については、 $\theta=0^\circ$ において $v_{\bar{r}}$ (半全方向の速度)が最大値を示すが、ここでは $v_{\bar{\theta}}$ (接線方向)は 0 である。一方、 $v_{\bar{r}}$ の最大値は、ほぼ $\theta=60^\circ$ のところに生ずる。しかし、ここでは $v_{\bar{r}}$ は非常に小さい。なお、変位速度の最大値は 0° における $v_{\bar{r}}$ である。

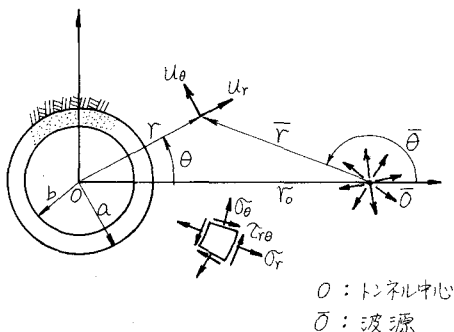


図-1 座標系

振源距離 l_0 の影響については、 $l_0/a > 5.0$ において、平面波と円筒波の差がなくなる。

4. 考察

発破による波動は、当然、衝撃波として考えなければならないが、正弦波による定常解析によっても衝撃波による結果を近似的に推定できることが確かめられているので³⁾、ここで得た定常解析の結果で発破振動を論ずることができよう。

既設トンネルに対して発破管理を行なう場合、既設トンネルにおいて振動測定を行なう必要が生ずる。その場合、覆工の安全性は発生する応力がコンクリートの許容応力以内にあることによって確保されるわけである。その場合、当然のことながら発生する最大応力を測定しなければならず、したがって、一般には $\theta = 90^\circ$ におけるトンネル内壁の応力を求めなければならない。ただし、振源距離が小さくなれば $\theta = 0^\circ$ において大きな応力の発生する場合がある。

発破振動のように周波数が数10～数100 Hzの振動では、構造物の損傷は変位速度に比例するという報告もあり、発破管理において変位速度を測定する場合が多い。しかし、ここで注意しなければならないことは変位速度の最大値と応力の最大値の生ずる位置が異なることである。したがって、振動測定時にピックアップの設置位置には充分注意しなければならない。すなわち、 $\theta = 0^\circ$ の位置で半径方向の変位速度を測定する。しかし、その場合、最大応力は一般に $\theta = 90^\circ$ において生ずる。

次に、具体例を示す。いま、覆工内壁($\theta = 0^\circ$)において、変位速度 5 cm/sec 、100 Hzが測定されたと仮定すれば、次に示すデータを用いて覆工に作用する最大応力を求めることができる。

地山： $E = 3.0 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ， $\rho_1 = 1.9 \text{ g/cm}^3$ ， $\nu_1 = 0.35$
 覆工： $a = 1.25 \text{ m}$ ， $b = 1.0 \text{ m}$ ， $E_2 = 2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
 $\rho_2 = 2.4 \text{ g/cm}^3$ ， $\nu_2 = 0.35$

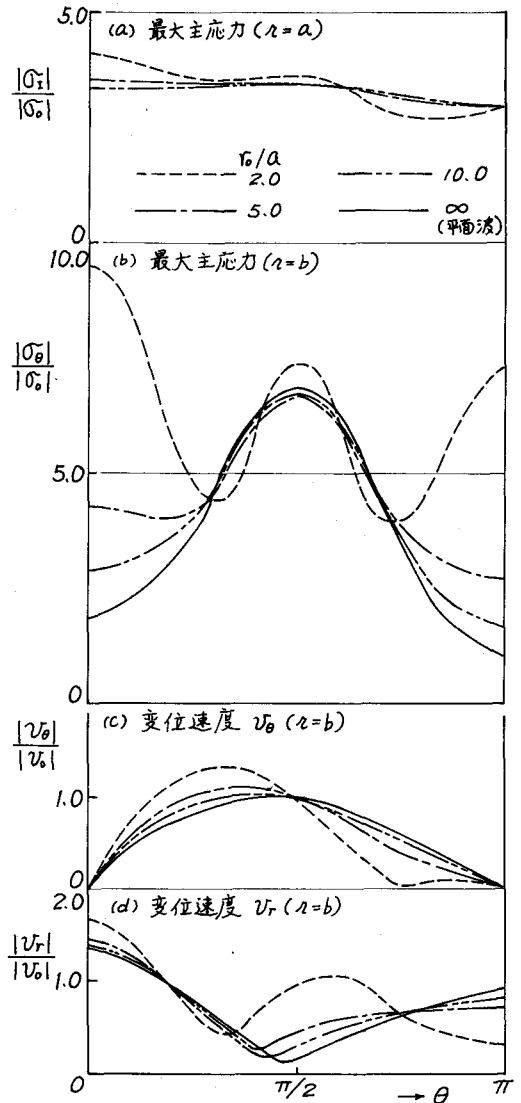
したがって、 $b/a = 0.8$ ， $\rho_1/\rho_2 = 0.8$ ， $G_1/G_2 = 0.15$ ， $l_0/a = 0.5$ であり、覆工に作用する最大応力は、 $l_0/a = 2.0$ の場合、 $\sigma_\theta = 9.5 \text{ kg/cm}^2$ ， $l_0/a = \infty$ とすれば $\sigma_\theta = 10.4 \text{ kg/cm}^2$

なお、参考までに、振動によって生ずる応力を近似的に、

$$\sigma_\theta = 2\rho C_u v \quad (3)$$

によって表わされると仮定すれば、上のデータに対して $\sigma_\theta = 8.9 \text{ kg/cm}^2$ を得る。

参考文献 (1) 榎井、梶，土木学会関西支部年次学術講演会 昭和47年，II-27，(2) 榎井、梶，河野，関西支部講演会，昭和48年，III-34，(3) 丹羽、小林、松本，材料，vol.23，no.248，1974，pp.361～367



$\rho_1/\rho_2 = 0.8$ ， $b/a = 0.8$ ， $l_0/a = 0.5$
 $\nu_1 = \nu_2 = 0.35$ ， $G_1/G_2 = 0.15$

図-2 最大主応力と変位速度