

## 既設トンネルの振動挙動に及ぼす近接発破の影響

EFFECTS OF ADJACENT BLAST OPERATION ON VIBRATION  
BEHAVIOR OF EXISTING TUNNEL

久 武 勝 保\*・桜 井 春 輔\*\*・伊 藤 富 雄\*\*\*

By Masayasu HISATAKE, Shunsuke SAKURAI and Tomio ITO

## 1. 結 言

既設トンネルの近傍における発破作業は、既設トンネルの安全を考慮して慎重に行う必要があり、従来は、既設トンネルの覆工内壁で振動速度を測定し、この値が許容値以下となるように、発破方法、火薬量を制限している<sup>1),2)</sup>。しかし、この場合には、無限弾性体内を伝播する平面波の振動速度と応力との関係が利用されるので、トンネルそのものおよびその覆工の存在が無視されるという欠点がある。また、上記の方法は、現場の測定結果を用いるため、設計の段階で万全の施工計画を立てることができず<sup>3),4)</sup>、さらに、水路トンネルのようにトンネル内に測定機器を設置できない場合には、上記の方法は使用できない。

近年、波動伝播によるトンネルの動的挙動を解析する試みが行われるようになった<sup>5)~13)</sup>。たとえば、Jakub・Mow<sup>10)</sup>は、等方性弾性地山内の円形トンネルに、それと平行な線状振動源から調和疎密波が入射する場合の素掘トンネルの挙動を解析し、桜井・葛西<sup>11)</sup>は、上記の場合のトンネル覆工の挙動を、弾性波動論により解析している。また、伊藤・佐々<sup>12)</sup>は、発破に起因する波動は衝撃的であることから、パルスの縦波によって生じる弾性地山内の素掘トンネルの応力を、Tensor Code<sup>14),15)</sup>により解析し、丹羽・小林・松本<sup>13)</sup>は、階段進行波によって生じる弾性および弾塑性地山内のトンネルと覆工の挙動を、Tensor Code と有限要素法により解析している。

しかし、発破は、通常、有限長の装薬により立体的に行われ、また、地盤が減衰特性を有する<sup>16)</sup>ことや、発破で用いられる火薬の種類や重量により、トンネルの振動

挙動が異なる<sup>1)</sup>ことは、よく知られているにもかかわらず、上記の解析では、これらの条件が考慮されていない。したがって、上記の解析結果をそのまま現場に適用することはできない。

そこで、本論文では、上記諸条件を考慮し、近接発破に起因する既設トンネル覆工の動的挙動を、解析的に算定する手法を提案する。その場合、まず、三次元的な広がりをもつ地山および発破圧力の分布を、二次元モデルに置換して解析する手法を示し、ついで、本手法による解析結果と現場実測結果とを比較し、本手法の妥当性を検証する。次に、従来使用されている覆工応力推定式による結果と本解析結果との比較を行い、既設トンネル覆工の動的特性について考察を加える。

## 2. 動的解析手法

## (1) 有限要素法による解析

本解析では、発破に起因するトンネル覆工の動的挙動を、平面ひずみ状態の仮定のもとに、有限要素法 (FEM) により解析するが、この場合、質量マトリックスは Consistent mass matrix とし、減衰マトリックスは Variable damping<sup>17)</sup> とする。また、次式で示される運動方程式は、直接数値積分法である Wilson の  $\theta$  法<sup>18)</sup> により解析する。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $M$ : 質量マトリックス、 $C$ : 減衰マトリックス、 $K$ : 剛性マトリックス、 $u$ : 変位ベクトル、 $f$ : 外力ベクトル、 $\cdot$ : 時間に関する微分。

なお、3 角形および 4 辺形要素を使用する。

## (2) 解析結果の検証

本解析結果を検証するために、二次元無限弾性体内にある半径  $a_0=3\text{ m}$  の円孔面に、調和的に変動する直応

\* 正会員 工博 大阪大学助手 工学部

\*\* 正会員 工博, Ph.D. 神戸大学教授 工学部

\*\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部

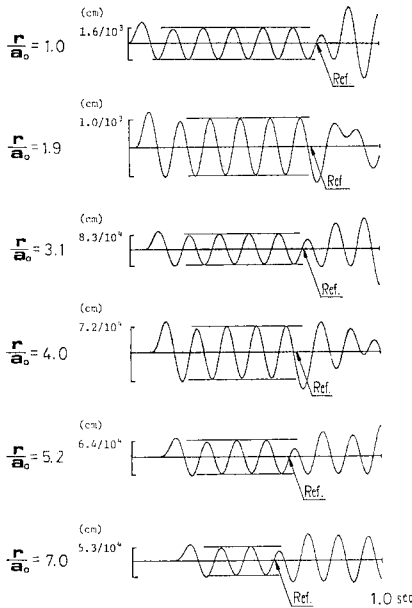


図-1 円孔の中心からの距離  $r$  における半径方向の変位応答

力  $\sigma_r(t) = -\sigma_0 \cdot \sin(2\pi ft)$  ( $f$ : 振動数) が一様に作用する場合の変位応答について、前節の FEM による手法で求めた解析結果といわゆる理論解析結果<sup>19)</sup>との比較を行うことにする。この場合、弾性体の縦波速度、ポアソン比、単位重量、および上式の  $f$ ,  $\sigma_0$  は、それぞれ、100 m/s, 0.25, 1 gf/cm<sup>3</sup>, 8.33 Hz,  $3.821 \times 10^{-4}$  kgf/cm<sup>2</sup> とする。また、本解析で用いる解析領域の半径  $\bar{r}$  は 40.8 m とし、対称性を考慮して、全領域の 1/4 (252 要素) について解析を行った。

図-1 は、円孔中心からの距離  $r$  における半径方向の変位応答を、本解析により求めて示したものである。この場合、波動伝播方向の要素の最大長と波長の比  $\Delta l/\lambda$  が次の条件

$$\Delta l/\lambda \leq 1/12 \dots\dots\dots (2)$$

を満足しておれば、Consistent mass matrix を用いる際の一次元問題の解析誤差は 1% 程度である<sup>20), 21)</sup>ことから、上記解析ではこの条件を満足させており、また、数値積分における時間ステップ  $\Delta t$  は、入力周期の 1/16 としている。図-1 の結果から、応答波形は直接波が到達するとともに振動を開始し、短時間のうちに入力周波数に一致する定常振動状態に入るが、 $r = \bar{r}$  における固定境界からの理論的な反射波到達時刻 (図中に Ref. で示す。) 以後、波形の乱れることがわかる。図-2 は、反射波が到達する以前の定常振動時の変位全振幅  $A$  と距離  $r$  との関係について、また、図-3 は、応答波形の立上がり時刻と加振位置からの距離 ( $r - a_0$ ) について、本解析結果と理論解析結果とを対比して示したものであ

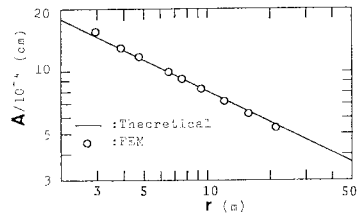


図-2 変位全振幅  $A$  と距離  $r$  の関係

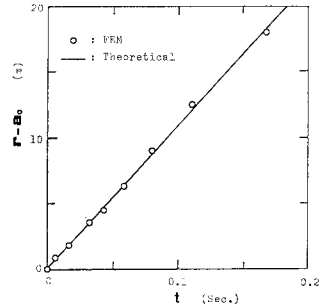


図-3 応答波形の立上がり時刻  $t$  と加振位置からの距離 ( $r - a_0$ ) との関係

る。

以上の結果から、反射波到達時刻までは、本解析結果は理論解析結果にほぼ一致するので、本解析結果は妥当であると思われる。

### 3. 入力データの決定

#### (1) 地山と覆工の力学特性

供試体試験から求められる岩石の力学的性質は、岩盤の性質を評価するうえで重要ではあるが、岩盤の力学特性をそのまま代表するとは考えられない。これは、岩石の力学特性が、岩石を構成する粒子の配列や粒子間の空隙など微視的な材料特性に左右されるのに対し、岩盤の力学特性は、節理や断層など巨視的な構造特性の影響を顕著に受ける<sup>22)</sup>ためと考えられるからである。したがって、岩盤の力学特性は、原位置において把握することが必要となる。また、岩盤の弾性係数は、静的に求めた値よりも動的に求めた値の方が一般に大である<sup>23)</sup>。そこで、動的問題を取り扱う本解析では、原位置で求められる岩盤の縦波速度  $c_p$  を用い、次式<sup>23)</sup>により動的弾性係数  $E$  を決定し、これを使用する。

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \rho c_p^2$$

ここに、 $\rho$  と  $\nu$  は岩盤の密度とポアソン比である。

一方、岩盤の減衰特性については、以下のように考える。図-4 は、調和的に変化する動的応力を種々の岩盤

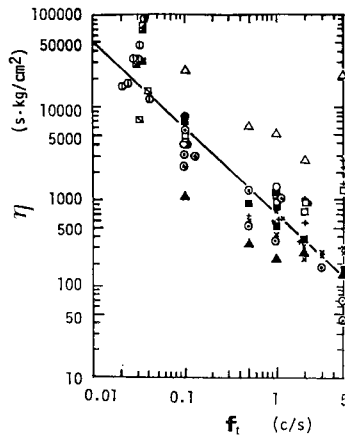


図4 荷重周波数  $f_t$  と粘性係数  $\eta$  の関係 (林ら<sup>16)</sup>による)

に与えた場合について、岩盤をフォークト型粘弾性体と仮定し、その粘性係数  $\eta$  と載荷した動的応力の周波数  $f_t$  との関係を示した実測結果<sup>16)</sup>であるが、これをみると、 $f_t$  が減少すると  $\eta$  が指数関数的に増大することがわかる。 $f_t$  と  $\eta$  の関係は、同じ岩質の岩盤でも風化の程度や節理の多少により異なるが、本解析では、図4の結果を次式で示される図中の直線で近似して使用する。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= a_0 f_t^{-b_0} \\ a_0 &= 6.75 \times 10^2 (\text{s} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^2), \quad b_0 = 0.93 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

この場合、減衰定数  $h$  は次式で求められ<sup>16)</sup>、

$$h = \frac{\pi f_t \eta}{E}$$

有限要素法における各要素  $q$  の減衰マトリックス  $[c]_q$  は、円振動数を  $\omega$  として、次式により算定される。

$$[c]_q = \alpha_q [m]_q + \beta_q [k]_q,$$

$$\alpha_q = h\omega, \quad \beta_q = h/\omega$$

$[m]_q$ : 要素質量マトリックス

$[k]_q$ : 要素剛性マトリックス

ところで、発破による地盤の振動は定常的でなく、また、岩盤表面で測定される振動周波数は一般に数 10 Hz から数 100 Hz の広範囲に分布する<sup>1)</sup>。しかし、ダイナマイトが爆ごうする場合の岩盤の振動スペクトルは 200 Hz 近傍で最大値を示すという報告<sup>24)</sup>のあることから、式 (3) の  $f_t$  を 200 Hz として  $\eta$  を決定する。また、発破に起因する振動は、地震のように地盤全体が振動する場合と異なり、非常に局所的な振動であることから、この場合に、 $\omega$  として系の最低固有円振動数を採用<sup>17)</sup>すれば、発破点から十分離れ、発破の影響を受けない地盤も  $\omega$  の決定に寄与することになり、現実的でない。したがって、本解析では、 $\omega$  の決定に際しても岩盤の振動数を 200 Hz とする。また、コンクリート覆工については、コンクリートと岩石の力学特性が類似している<sup>25)</sup>こ

とから、以上の条件をコンクリートにも適用する。

### (2) 発破圧力

水中衝撃波法を用いて実測された爆ごう圧の研究<sup>26)</sup>によれば、爆速が 4000 m/s 以上の場合、爆薬が爆ごうする際の最大圧力  $P_d$  は、Jones によって提案された次式により概算し得るといわれている。

$$\left. \begin{aligned} P_d &= 0.000424 v^2 \rho_0 (1 - 0.543 \rho_0 + 0.193 \rho_0^2), \\ &\text{(C.G.S. 単位)} \\ v &: \text{爆速}, \quad \rho_0: \text{装てん密度} \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

しかし、爆薬中を伝播してきた爆ごう波が、爆薬と岩盤との境界面で岩盤に作用する最高圧力  $P_{\max}$  は、岩盤の特性に応じて  $P_d$  と異なる値をとり、次式で近似される。

$$P_{\max} = \frac{2 \rho_c c_p}{\rho_c c_p + v \rho_0} P_d \dots (5)$$

一方、爆薬の爆ごうに伴う衝撃作用の時間長さは、 $10^{-6}$  秒からせいぜい  $10^{-4}$  秒程度であり、ガス圧力の作用時間は  $10^{-3}$  秒から  $10^{-1}$  秒程度である<sup>27)</sup>といわれている。Starfield ら<sup>28)</sup>は、数 10  $\mu$  秒において発破圧力が最大値に達すると仮定して爆破に対する数値解析を行い、これによる解析結果は実測結果とよい一致を示している。

そこで、本論文では、岩盤に与えられる最高圧力は式 (4)、(5) で算定し、発破圧力の経時変化は、60  $\mu$  秒において最大値を示す次式<sup>29)</sup>を使用することにする。

$$\begin{aligned} P(t) &= P_{\max} (e^{-Bt/\sqrt{2}} - e^{-\sqrt{2}Bt}) N, \\ B &= 16338, \quad N = 4, \quad t: \text{秒} \end{aligned}$$

上式の与える発破圧力の経時変化を図5に示す。また、本解析での時間ステップ  $\Delta t$  は、発破圧力が最大値を示すまでの時間を入力周期の

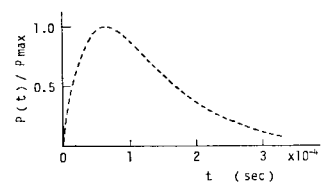


図5 発破圧力の経時変化

1/4 と考え、これを 4 等分した  $\Delta t = 15 \mu$  秒を使用する。

### (3) 発破孔半径の決定

既設トンネルに及ぼす近接発破の影響は、発破点に近い所ほど大であるから、本解析では、発破点を通り既設トンネルの軸に直交する断面を解析対象断面と考え、また、既設トンネルと発破孔は互いに平行で、平面ひずみ状態にあると仮定する。しかし、実際の発破は、有限長の装薬により行われるため、実際の発破孔半径と同一の発破孔半径を本二次元解析に用いれば、実際に比べて多大のエネルギーを岩盤に与えることになる。

そこで、本論文では、解析で用いる発破孔半径 (以下、これを仮想発破孔半径という。) を以下のようにし

で決定する。すなわち、まず、トンネルから十分離れ、かつトンネル周辺地盤とほぼ同一の地盤において、発破に起因する地盤の振動特性をあらかじめ現場実測しておく、ついで、その現場について、有限要素法により動的解析を行う。そして、この解析結果が上記現場実測結果に一致するよう、仮想発破孔半径  $r_0$  と使用火薬重量  $W_0$  との関係求めておく。そうすれば、トンネルの近傍で発破を行う場合においても、上記の結果から、使用火薬重量に対応して仮想発破孔半径を決定することができ、また、トンネル周辺の幾何学的条件は、有限要素解析により考慮できるので、実際に近いトンネルの動的挙動の把握が可能になると思われる。しかし、この場合、発破パターンなど、発破の施工方法によって岩盤の振動挙動が異なる<sup>31)</sup>ので、 $r_0 \sim W_0$  関係を求める場合の発破の施工方法と、トンネルに近接して行う場合のそれとは、同一であることが必要である。また、 $r_0 \sim W_0$  関係を決定する際の測点と発破点との間の距離は、近接発破時のトンネルと発破点との間の距離と大きく異ならないものとする。

4. 本解析手法の現場への適用

以上に述べた本解析手法により、トンネル覆工の振動挙動を解析し、その結果と現場実測結果<sup>30)</sup>とを比較することにより、本解析手法の妥当性を検証する。

(1) 現場の概要

対象としたトンネルは、比較的平坦な地表面を有する風化花こう岩内にあり、土かぶり約 26 m、トンネル直

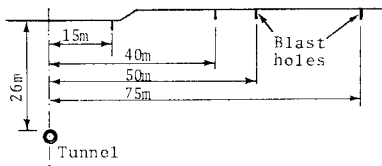


図-6 測定現場

径 2.3 m、コンクリート覆工厚は 25 cm である。当現場の概況は図-6 に示すとおりで、表層土は削り取られており、走時曲線から求めた縦波速度  $c_p$  は約 1.7 km/s である。発破は、地表面下約 2.7 m の深さに 3 号桐ダイナマイト ( $v=6000$  m/s,  $\rho_0=1.43$  g/cm<sup>3</sup>) を一定重量  $W_0=400$  g 装薬し、先の発破によって波動伝播経路に

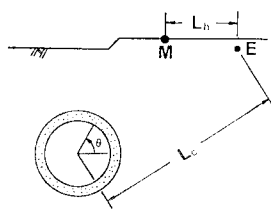


図-7 発破点 E、地表測点 M およびトンネルの幾何学的関係

表-1 地盤と覆工の定数

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	$c_p$ (km/s)
Lining	2.30	0.16	4.5
Ground	2.67	0.21	1.7

あたる岩盤が乱されぬよう、順次遠方から実施する。振動の測定は、地表面とトンネル覆工内壁で行い、発破点 E、トンネルおよび地表測点 M の幾何学的関係は、図-7 に示すとおりである。

また、表-1 に地盤と覆工の定数をまとめて示す。

(2) 使用火薬量と仮想発破孔半径の関係

図-8 は、仮想発破孔半径  $r_0$  を変化させた場合について、発破点から 15 m および 28 m 離れた地表面での最大振動速度  $V_{max}$  を解析的に求めた結果である。これらを図のように直線で近似すると、次のような指数関数で表わすことができる。

$$V_{max} = c_1 r_0^{c_2} \dots\dots\dots (6)$$

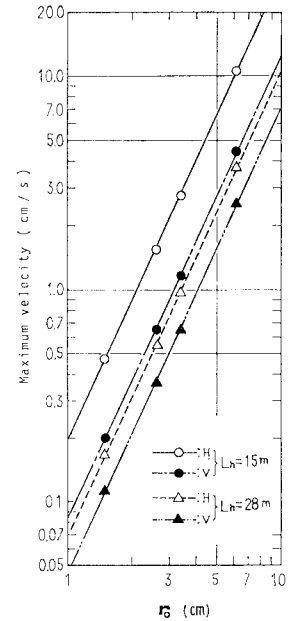


図-8 仮想発破孔半径  $r_0$  と地表面での最大振動速度の解析結果の関係

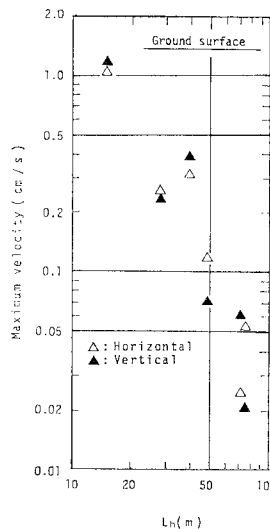


図-9 地表面で実測された最大振動速度と距離  $L_h$  の関係

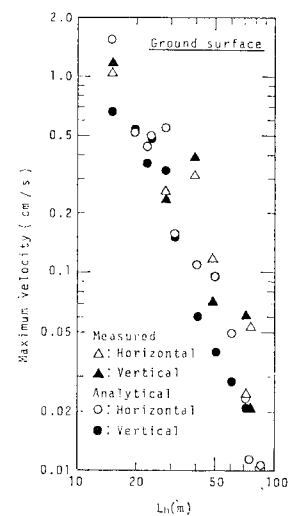


図-10 地表面における最大振動速度の実測結果と解析結果の比較

ここで、 $c_1$ 、 $c_2$  は 図-8 から求められる定数である。一方、図-9 は、地表面で実測された  $V_{max}$  と距離  $L_h$  との関係であり、発破点から 15 m および 28 m 離れた位置での  $V_{max}$  の実測結果を式 (6) の左辺に代入することにより、 $W_0=400$  g に相当する  $r_0$  の平均値を 2.2 cm と決定することができる。

上記  $r_0$  の値は、発破点から 15 m と 28 m 離れた位置で実測した  $V_{max}$  の値に基づいて決定されているが、

この  $r_0$  の値を使用した地盤の振動解析結果が、他の地表測点での  $V_{max}$  の実測結果と適合するか、あらかじめ調べておく必要がある。そこで、発破点からの距離が  $L_h$  である地表面での  $V_{max}$  について、解析と実測の結果を対比すると、図-10 のようになる。これを見ると、両者の結果はほぼ対応しており、したがって、当現場の使用火薬量に対して求めた仮想発破孔半径は妥当であると考えられる。

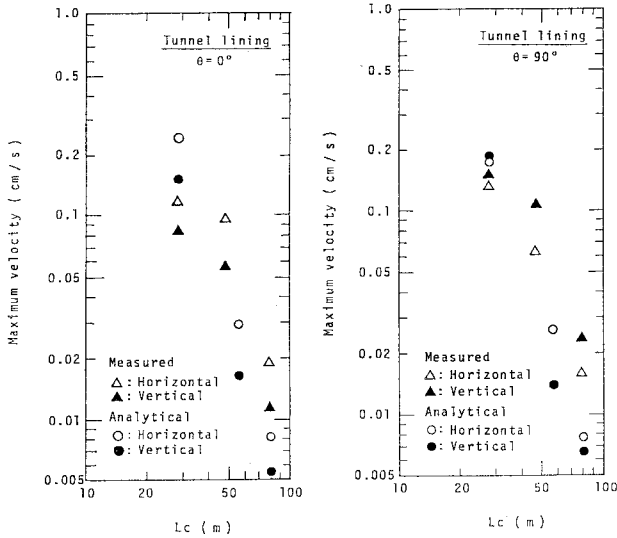


図-11 覆工内壁の最大振動速度の実測結果と解析結果の比較

(3) トンネル覆工の振動挙動の比較

図-11 は、トンネル中心と発破点との間の距離  $L_c$  が変化した場合について、上記で決定した  $r_0$  の値を用いて解析的に求めたトンネル覆工内壁の  $\theta=0^\circ$  および  $\theta=90^\circ$  における最大振動速度の値と、それと同じ場所における実測値とを比較して示したものであるが、両者はほぼ対応しているといえよう。また、図-12 は、上記と同一場所における振動速度の経時変化について、実測と解析の結果を対比したものである。解析波形に比べて実測波形の方が早期に振動が終了しているが、解析における反射波到達時刻 (Ref. で示す.) 以前については、両者の周期はよく対応しているといえる。また、他の 2 つのトンネル現場に本解析手法を適用したところ、上記と同様の結果が得られた。

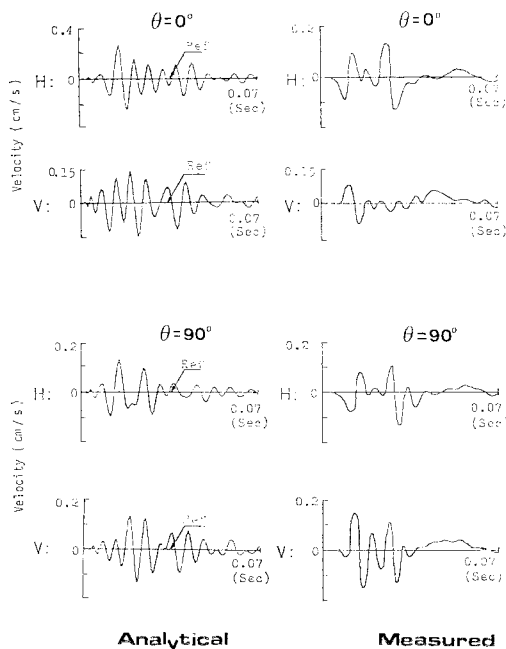


図-12 覆工内壁における振動速度の経時変化の解析結果と実測結果の比較 ( $L_c=28$  m, H: 水平方向, V: 鉛直方向)

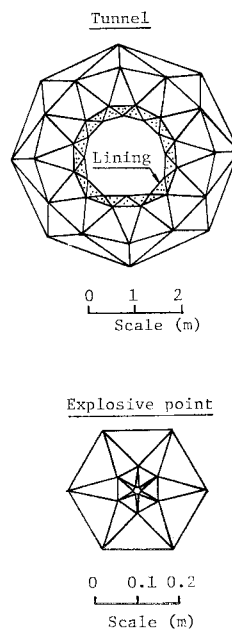


図-13 トンネルおよび発破点付近の要素図

以上の結果から、解析で使用する仮想発破孔半径と実際に使用する火薬量との関係をあらかじめ決定しておけば、その関係を用いることにより、トンネル覆工の振動挙動を解析によりある程度定量的に推定できると思われる。

なお、本現場に対する解析領域は、深さ方向に 80 m、水平方向に 180 m とり、トンネル、発破点および波動伝播経路にあたる部分の要素は密に、そうでない部分は疎に配し、要素数は 241 である。トンネルおよび発破点付近の要素図を 図-13 に示しておく。

5. 解析結果と考察

近接発破における各種の因子が、既設トンネル覆工の動的挙動に与える影響を、解析により明らかにし、また、従来現場で使用さ

れている波動論的手法による結果と本解析結果とを比較して、種々考察を加えることにする。なお、トンネルと発破点との幾何学的関係は図-14のごとくであり、トンネル半

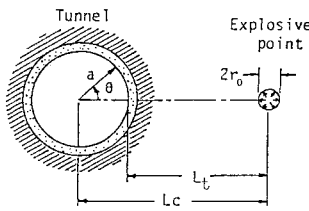


図-14 トンネルと発破点の幾何学的関係

径  $a$  は 3 m, 覆工厚は 50 cm, 火薬の爆速は 5 000 m/s, 装てん密度は 1.1 g/cm<sup>3</sup> とし, その他のパラメーターは表-2 と 表-3 に示すとおりである。

(1) 振動特性

図-15 は, トンネルと発破点との中心距離  $L_c$  を変化させ, 覆工内壁各点の最大振動速度  $V(\theta)_{max}$  を,  $\theta=0^\circ$  における最大振動速度  $V(\theta=0^\circ)_{max}$  で無次元化し, それらの分布を示したものである。この図から, 当然のことながら, 発破点の遠近にかかわらず,  $\theta=0^\circ$  にお

表-2 地盤と覆工の定数

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	$c_p$ (km/s)
Lining	2.4	0.20	3.4
Ground	2.6	0.21	Table 3

表-3 各 Case におけるパラメーターの値

	$r_0$ (cm)	$V_p$ (km/s)	$L_c$ (m)
Case 1	2.6	5.3	8
Case 2	2.6	5.3	15
Case 3	2.6	5.3	35
Case 4	2.6	5.3	70
Case 5	2.6	6.2	8
Case 6	2.6	6.2	35
Case 7	2.6	6.2	70
Case 8	2.6	4.1	8
Case 9	2.6	4.1	15
Case 10	2.6	4.1	35
Case 11	0.9	5.3	8
Case 12	0.9	5.3	35
Case 13	8.0	5.3	15
Case 14	8.0	5.3	35

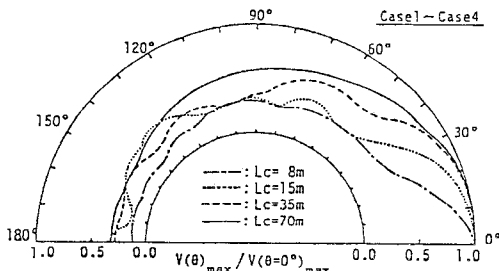


図-15 距離  $L_c$  が変化した場合の覆工内壁の最大振動速度分布

る振動速度が常に最大となることがわかる。そこで,  $V(\theta)_{max}$  のうちの最大値  $\bar{V}_{max} (=V(\theta=0^\circ)_{max})$  と距離  $L_t$  との関係を示せば 図-16 が得られ, この図からわかるように,  $\bar{V}_{max}$  の値は  $L_t$  のほぼ 2 乗に逆比例する。なお, この結果は, 現場実測による最大振動速度の距離減衰の結果<sup>1), 32)</sup>と一致している。

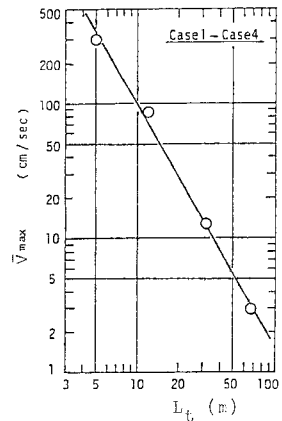


図-16 覆工内壁の最大振動速度  $\bar{V}_{max}$  と距離  $L_t$  の関係

(2) 応力分布

図-17 は, 覆工に生じる最大引張応力  $\bar{\sigma}_t, max$  および最大圧縮応力  $\bar{\sigma}_c, max$  と,  $L_c$  との関係を示したものである。これから, 同一の  $L_c$  に対するこれらの値はほぼ同程度であるから, 通常のコングリート覆工の安全性に対しては, 最大引張応力についてのみ検討すればよいことがわかる。

図-18 は, 覆工内に生じる最大引張応力  $\sigma_t(\theta)_{max}$  が, 距離  $L_c$  によってどのように変化するかを示したものである。この図から, 発破点が遠ざかるに従って,

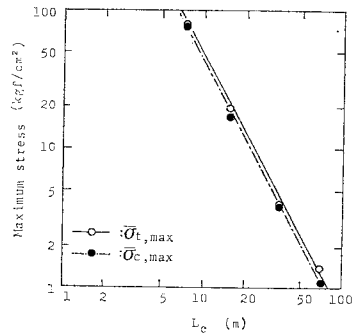


図-17 覆工に生じる最大引張応力  $\bar{\sigma}_t, max$  および最大圧縮応力  $\bar{\sigma}_c, max$  と距離  $L_c$  の関係 ( $V_p=5.3$  km/s,  $r_0=2.6$  cm)

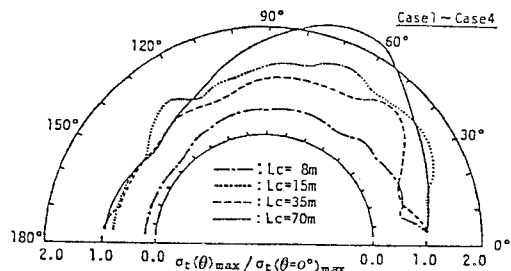
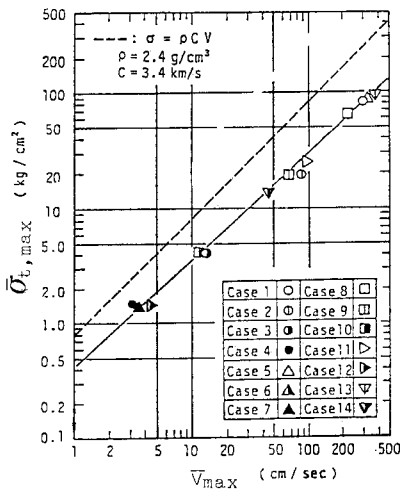


図-18 最大引張応力  $\sigma_t(\theta)_{max}$  の分布に及ぼす距離  $L_c$  の影響



図一19 覆工に生じる最大引張応力  $\bar{\sigma}_{t,max}$  と、覆工内壁の最大振動速度  $\bar{V}_{max}$  の関係

$\sigma_t(\theta)_{max}$  の最大値  $\bar{\sigma}_{t,max}$  の発生位置が、 $\theta=0^\circ$  から  $\theta=90^\circ$  の方に移行することがわかる。したがって、図一15の結果と考え合わせれば、 $\bar{V}_{max}$  と  $\bar{\sigma}_{t,max}$  の生じる位置が距離  $L_c$  の値によって異なる場合がある<sup>12)</sup>ことが、本解析結果からも指摘される。

(3) 最大引張応力  $\bar{\sigma}_{t,max}$  と最大振動速度  $\bar{V}_{max}$  の関係

岩盤の縦波速度  $c_p$ 、距離  $L_c$  および使用火薬量に直接関係する仮想発破孔半径  $r_0$  を、表一3のように種々変化させ、 $\bar{\sigma}_{t,max}$  と  $\bar{V}_{max}$  を求めてそれらの関係を示すと、図一19の実線のようになる。これを見ると、図示の範囲内では、上記パラメーターの値にかかわらず、 $\bar{\sigma}_{t,max}$  と  $\bar{V}_{max}$  の間には両対数紙上でほぼ直線関係が認められる。また、同図中の破線は、従来使用されている次の覆工応力推定式<sup>1)</sup>から求めた結果である。

$$\sigma = \rho CV$$

ただし、 $\sigma$ 、 $\rho$ 、 $C$  および  $V$  は、覆工の応力、密度、縦波速度および振動速度である。上式によれば、覆工内壁で測定される振動速度からその覆工に生じる応力が推定されるが、同推定式では、トンネルそのものおよび覆工と地山の材料特性の違いは無視されている。図一19から、同一の振動速度に対する推定式での応力は、本解析結果よりも大であることがわかる。

## 6. 結 論

本論文では、近接発破に起因する既設トンネル覆工の動的挙動を明らかにするために、まず発破の施工条件、地質特性および幾何学的条件を考慮した解析手法を示し

た。ついで、現場実測結果と本解析結果とを比較して本手法の妥当性を検証し、さらに、種々の検討を行った。その結果得られた成果の概要は、下記のごとくである。

(1) 実際に使用する火薬量と、それに対応して解析で使用する仮想発破孔半径との関係を、現場実測と解析の結果によりあらかじめ決定しておけば、本解析手法により、近接発破を行う場合の既設トンネル覆工の動的挙動、ひいてはその安全性を解明することができる。

(2) トンネル覆工内壁の最大振動速度は、常に発破点に最近の位置において生じる。

(3) 覆工に生じる最大引張応力と最大圧縮応力の値はほぼ同程度であり、したがって、コンクリート覆工の安全性は、通常、最大引張応力のみについて検討すればよい。

(4) 上記の最大引張応力の生じる位置は、発破点とトンネル中心との間の距離によって変化する。したがって、その距離により、最大振動速度と最大引張応力の生じる位置が異なる場合がある。

(5) 最大振動速度と最大引張応力の関係は、火薬量、地盤の縦波速度および発破点とトンネル中心との間の距離にかかわらず、両対数紙上でほぼ直線関係が認められる。また、覆工内壁での最大振動速度の値を従来の推定式に適用し、その結果から推定される覆工応力の値は、本解析で求めた値より大である。

謝 辞：本研究は、神戸大学工学部 北村泰寿助教授、元大阪大学の大学院学生 小林洋一君（現在、住友金属工業勤務）、学部学生 山脇正啓君（熊谷組勤務）の助力を得て行われたことを記し、心から謝意を表す。

### 参 考 文 献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネル工事の発破振動および騒音対策に関する調査研究報告書，1977。
- 2) 柳場 武，ほか4名：トンネル掘削が既設トンネルに及ぼす影響とその対策，第4回岩の力学国内シンポジウム，pp. 169~174, 1973。
- 3) 伊藤富雄・久武勝保・小林洋一：近接発破によって生じる既設トンネルの覆工応力，土木学会関西支部年次学術講演会講演要旨，III-25, 1980。
- 4) 伊藤富雄・久武勝保・小林洋一：既設トンネルの振動挙動に及ぼす近接発破の影響，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第3部，pp. 501~502, 1979。
- 5) Pao, Y.H.: Dynamic Stress Concentration in an Elastic Plate, J. Appl. Mech., Vol. 29, No. 2, pp. 299~305, 1962。
- 6) Cheng, S.L. and A. Jahanshahi: On Dynamic Stress Concentration Around a Discontinuity, J. Appl. Mech., Vol. 34, pp. 385~391, June, 1967。
- 7) Cheng, S.L.: Dynamic Stress in a Plate with Circular Holes, J. Appl. Mech., Vol. 39, pp. 129~132, March, 1972。
- 8) 丹羽義次・小林昭一・福井卓雄・東 憲昭：積分方程式法による埋設物周辺の過渡応力の解析，土木学会論文報

- 告集, 第 248 号, pp. 41~53, 1976.
- 9) Garnet, H. and J. Crouzet-Pascal : Transient Response of a Circular Cylinder of Arbitrary Thickness, in an Elastic Medium, to a Plane Dilatational Wave, *J. Appl. Mech.*, Vol. 33, pp. 521~531, Sept., 1966.
  - 10) Jakub, M. and C.C. Mow : On the Effects of Source Proximity on the Dynamic Stresses Around a Cylindrical Cavity, *J. Appl. Mech.*, Vol. 34, pp. 359~364, June, 1967.
  - 11) 桜井春輔・葛西俊一郎 : 近接発破によるトンネル覆工の動的挙動に関する理論的考察, 土木学会第 29 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp. 410~411, 1974.
  - 12) 伊藤一郎・佐々宏一 : 近接爆破に対する空洞の安全性の検討と設計・施工への応用, 第 2 回 岩の力学講演会, 現場における岩盤計測と設計・施工への応用, pp. 45~62, 1973.
  - 13) 丹羽義次・小林昭一・松本忠章 : 進行波に伴って発生するトンネル周辺の過渡応力状態, *材料*, 第 23 巻, 第 248 号, pp. 43~49, 1974.
  - 14) Maenchen, G. and S. Sack : *Methods in Computational Physics*, Academic Press, Vol. 3, pp. 181~210, 1964.
  - 15) 勝山邦久・佐々宏一・伊藤一郎 : 空孔の存在による動的応力のじょう乱に関する数値解析, *材料*, 第 21 巻, 第 228 号, pp. 23~29, 1972.
  - 16) 林 正夫・北原義浩・藤原義一・駒田広也 : 動的粘性係数を考慮した三次元地盤と地山構造物の連成震動解析, 土木学会論文報告集, 第 217 号, pp. 11~23, 1973.
  - 17) Idriss, I.M. and H.B. Seed : *Seismic Response by Variable Damping Finite Elements*, ASCE, GT 1, pp. 1~13, 1974.
  - 18) たとえば, 戸川隼人 : 有限要素法による振動解析, サイエンス社, 1975.
  - 19) 田村重四郎・中村 豊・加藤勝行 : 地中坑道に発振源がある場合の周辺地盤の震動の解析, 土木学会論文報告集, 第 281 号, pp. 41~53, 1979.
  - 20) Segol, G., J.F. Abel and P.C.Y. Lee : *Finite Element Mesh Gradation for Surface Waves*, ASCE, GT 11, pp. 1177~1181, 1975.
  - 21) Kuhlemeyer, R.L. and J. Lysmer : *Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems*, ASCE, SM 5, pp. 421~427, 1973.
  - 22) 川本眺万 : 岩盤力学, 朝倉書店, pp. 8~9, 1975.
  - 23) 土木学会 : 土木技術者のための岩盤力学, pp. 88~89, 1970.
  - 24) 伊藤一郎・佐々宏一・谷本親伯 : 爆破振動の軽減法に関する検討, 土木学会第 26 回年次学術講演会講演概要集, 第 3 部, pp. 117~120, 1971.
  - 25) 桜井春輔 : 静荷重下における岩石の破壊条件, *材料*, 第 17 巻, 第 181 号, pp. 30~35, 1968.
  - 26) 伊藤一郎・佐々宏一 : 爆ごう圧に関する研究, *工業火薬協会誌*, Vol. 32, No. 6, 1971.
  - 27) 日本材料学会編 : 岩石力学とその応用, 丸善株式会社, pp. 364, 1966.
  - 28) Starfield, A.M. and J.M. Pugliese : *Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charge : A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 5, pp. 65~77, 1968.
  - 29) 伊藤一郎・佐々宏一 : 爆破に伴う岩盤内応力に及ぼすポアソン比の影響, *水曜会誌*, Vol. 16, No. 2, 1964.
  - 30) 桜井春輔・北村泰寿・吉田耕造 : 既設トンネルに対する近接発破の発破管理法に関する一考察, 建設工学研究所報告, No. 19, pp. 1~12, 1977.
  - 31) 工業火薬協会編 : 発破ハンドブック, pp. 35~38, 山海堂, 1976.
  - 32) 文献 31), pp. 335~337.

(1982.3.15・受付)