

爆破振動がトンネル掘削に与える影響

神戸大学工学部 正会員 桜井 春輔
 神戸大学工学部 正会員 〇北村 泰寿
 神戸大学大学院 学生員 吉田 耕造

1. まえがき 既設トンネルに近接して行われる発破作業によって生ずる爆破振動が、既設トンネルにどのような影響を与えるかを調べる目的で試験発破による現場試験を行った。本報告は、これらの測定結果のうち特に掘削断面内の振動速度分布、掘削内壁の振動速度とひずみの対応、および掘削内部の半径方向のひずみ分布について述べるものである。

2. 実験概要 実験は2箇所現場において行われ、トンネル内掘削断面の振動速度とひずみ、同時期にも実施した。なお、第1の現場(実験①)は宅地造成地であり、土砂埋藏用のベルトコンベアが施設されているトンネルである。第2の現場(実験②)はダム工事現場の水路使用トンネルである。

発破位置、せん断長、装薬量は、それぞれ図-1に示すとおりである。装薬は3号桐およびAN-FOを使用し、発破は支那の伝播行路にある岩盤が先に爆破で乱れることのないよう遠方より順次行なった。

なお、岩質については実験①の現場は花崗岩、実験②の現場は凝灰岩であり、両現場とも表土層はほとんど存在していない。走時曲線より求めた伝播速度は、実験①では2~3 km/s、実験②では2.5~4.4 km/s程度である。

測定機器は、振動速度換振器(Geo Space製、 $f_0=4.5$ Hz)、超小型加速度計(共和製、 $f_0=750$ Hz、max 50 G)、およびひずみゲージ(φL=67 mm)であり、掘削断面内の4~6点それぞれ図-2に示すように取り付けた。つまり、振動速度、加速度については各点の上下成分、および掘削断面内水平成分(トンネル軸と垂直する方向)を、ひずみについてはトンネル断面の揺動方向を測定した。実験②では、埋込型ひずみゲージ(φL=20 mm)を用いて掘削内部の半径方向のひずみ分布も測定した。

3. 測定結果および考察 (1) 速度波形と距離減衰 爆発からほぼ等しい距離にあるトンネル掘削および地表面と測定される速度波形(上下成分)の代表的ものを図-3に、振動速度の距離減衰を図-4にそれぞれ実験①、②について示す。特に地表面の距離減衰は、初動のピーク値とその後最大値についてプロットした。図-3の地表面における波形は、実験①、②とも地表面の影響を大きくうけている様子が見られる。爆発から非常に近い地点を除いて、振動速度は一般に次式で示されるが、

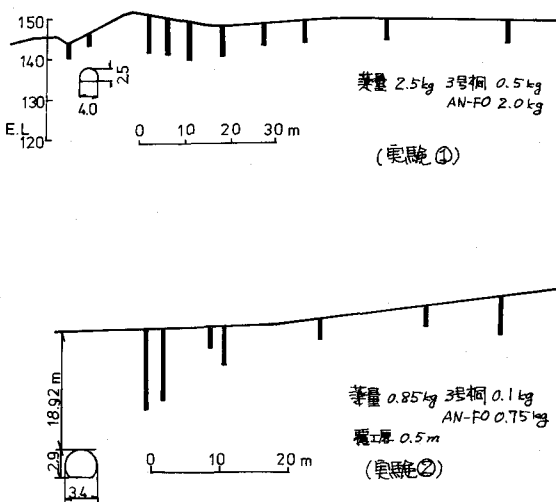


図-1 発破位置、せん断長説明図

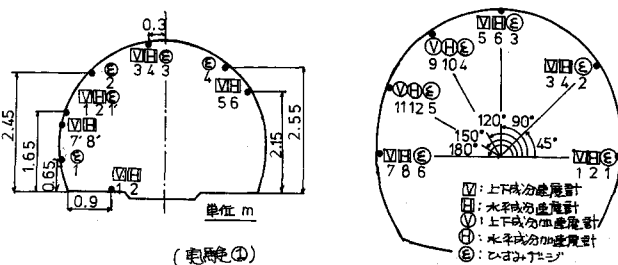


図-2 測定機器取り付け位置

$$v = C \cdot W^{\alpha} \cdot r^{\beta} \quad (1)$$

v : 振動速度(kine), W : 装薬量(kg)
 r : 爆発距離(m), C, α, β : 係数

図-4より最大振動速度の距離減衰配は、実験①、②いずれもトンネル内、地表面ともほぼ同じ($\alpha \approx -2$)である。従って、距離減衰は近似的に距離の2乗に反比例すると言っておさしつかえはないと考えられる。

(2) トンネル震工の横断面内の振動速度分布；発破による主動が震工に入射するときの振動速度分布は実験①、②についてそれぞれ図-5、図-6を示す。図-5は爆発距離24m、図-6は15mのものである。これらは、震工内壁の各点における振動速度の記録から時間と追って振動速度値を読み取り、主動入射前の中丘線からプロットして描いた図である。つまり、中丘線の内側は内側の速度の大きさを意味する。これらの図によると、トンネル震工に主動が入射するとき、爆発側の壁面は主動入射直後にトンネル中心方向に強く押されるような挙動を、一方天端付近では上方に押し上げられるような挙動を示す。結局、振動速度の最大値は爆発側壁面、もしくは天端付近の壁面の自由面と垂直な方向の成分において記録される。

(3) 振動速度と壁面ひずみとの対応；ひずみは震工の変形のみによって生じるものであるが、振動速度は剛体的な振動の成分をも含んでおり、振動速度とひずみは本質的に異なるものと考えられる。また、トンネル断面においてこれらの最大値が生じる位置も異なることから考えられる。

まず、トンネル震工内壁面接線方向の最大ひずみと断面内半径方向・接線方向の最大振動速度の分布は実験②の結果より絶対値で図-7を示す。なおここで参考までで理論解¹⁾を図-8に示す。両図よりこれらの分布形は定性的に似かよっている。図-7によると半径方向の振動速度が最大となるのは、 $\theta = 70^\circ$ の点である。これは、天端付近の振動速度に他はない。一方、接線方向の最大ひずみは、 $\theta = 45^\circ, 150^\circ$ 付近である。この図から、トンネル震工の振動速度が最大となる点で必ずしも接線方向のひずみが最大とはならないことがわかる。このことは図-8に示す理論解からも明らかである。また図-7から、爆発側面、震工壁面の振動は半径方向の成分が卓越し、その他の部分では接線方向の成分が卓越する。しかし、その絶対値は爆発側面、震工壁面

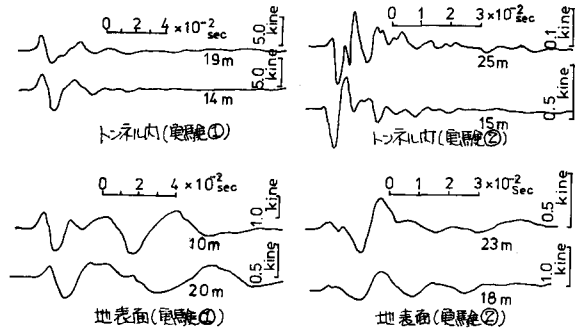


図-3 振動速度波形

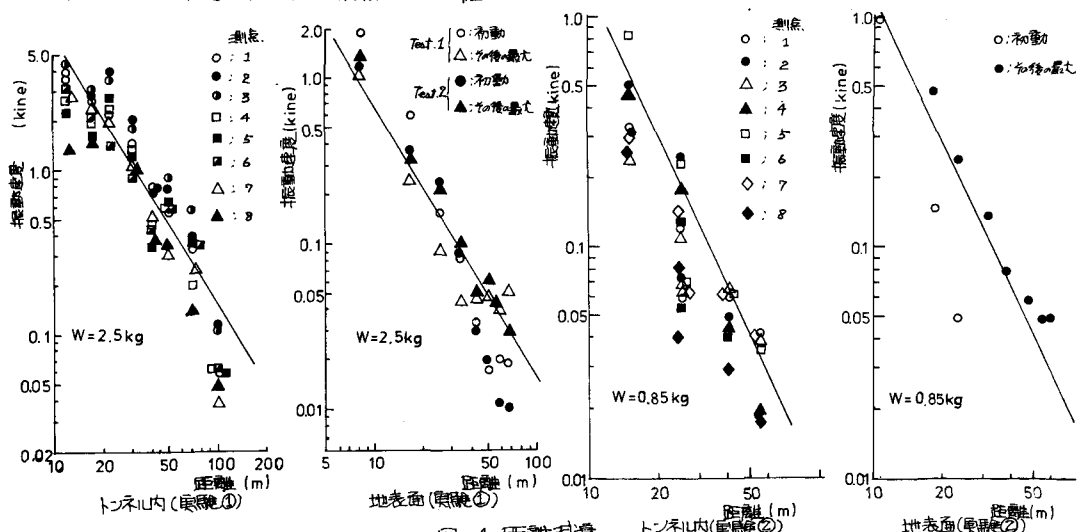


図-4 距離減衰

工壁面に生ずる半径方向成分はそれより大きくはない。及び半径方向の振動速度の分布形において、実測値は天端付近で最大となり理論解における最大値の生ずる位置と異なるが、これは次のような理由によると考えられる。a) トンネル天端付近には施工上の問題から地山との間に空隙が存在する可能性がある。b) 掘削による地山のゆるみが天端付近で著しい。

次に、電線①、②で得られた振動速度とひずみとの関係を図-9に示す。同図は同一地点の振動速度とひずみとを対応させて描いたものである。両者の関係は図-7、図-8で得られた結果を考慮してはいないため、当然ではあるが非常にばらばらしている。そこで両者の分布形が違ふことを考慮して最大振動速度と最大ひずみの関係をあらためて図-10に示す。同図より両者の間には一定の関係があるようである。

これらの結果より、トンネル断面内における振動速度とひずみの対応関係は、それらを規定した断面内の位置の重要性を持つこととなる。なお、この両者の関係は理論解より振動入射角と関係していることがわっている。図-9の集束を示す場合、ひずみと振動速度の関係として一般に(2)式を用いる場合が多い。そこで、(2)式の係数Cは文献(2)によればトンネルの幾何学的関係より

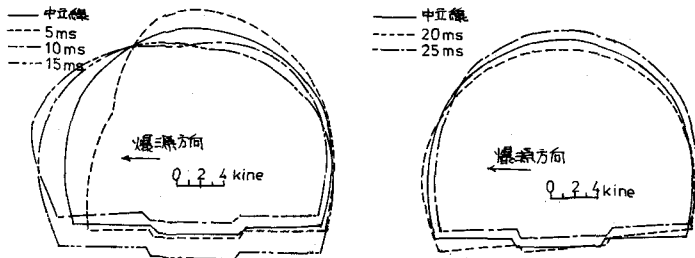


図-5 振動速度分布(電線①)

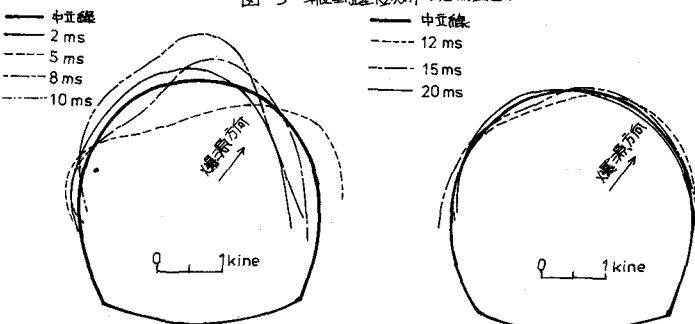


図-6 振動速度分布(電線②)

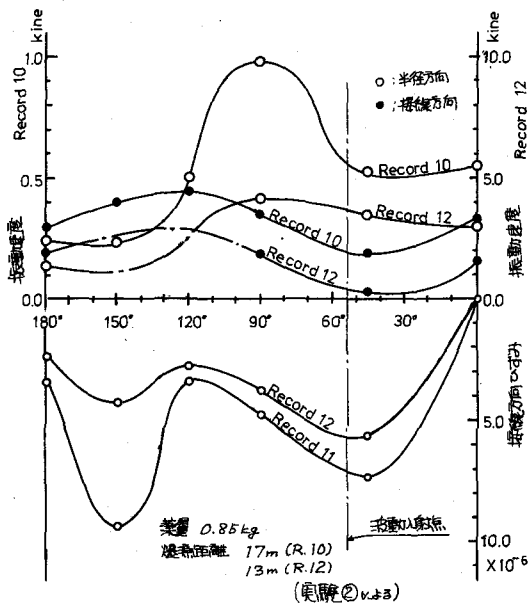


図-7 最大振動速度・最大ひずみの分布

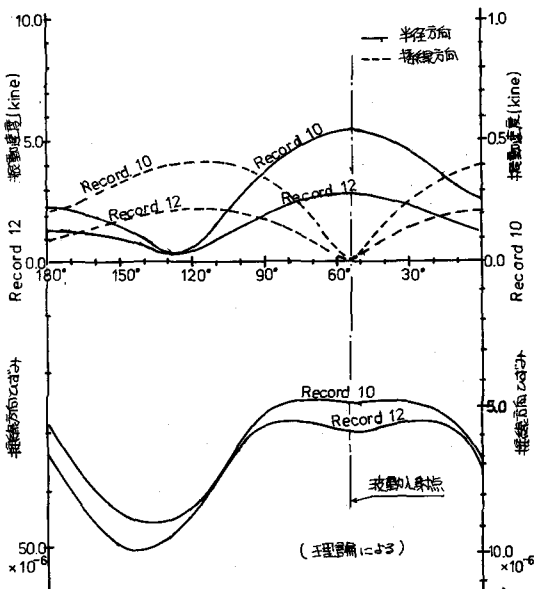


図-8 最大振動速度・最大ひずみの分布

$$\varepsilon = V/C \quad \varepsilon: \text{ひずみ}, V: \text{振動速度}, C: \text{係数}$$

(2)

よび地山およびトンネル覆工の剛性はばり、てまる定数であり、次のように表わされるものである。

$$\frac{1}{C} = \frac{G_i k_i^2 |S(r)|}{2\pi f k_i |H_n^{(2)}(k_i r)| E_2 V^*} \quad (3)$$

ここで $S(r) = H_2^{(2)}(k_i r)/K^2 + H_0^{(2)}(k_i r) \cdot (1/K^2 - 1)$,
 $K = \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$, ν : 地山のポアソン比,
 $k_i = 2\pi f/V_p$, f : 振動数, V_p : 縦波の伝播速度,
 $k_i' = K k_i$, G_i : 地山のせん断弾性係数,
 E_2 : 覆工のヤング率, σ^* , V^* : 応力, 速度の集中係数,
 $H_n^{(2)}$: 第2種 n -次 Hankel 関数, r : 爆発距離.

(4) トンネル覆工内部の半径方向のひずみ分布: (1)~(3)は覆工表面のひずみについて述べてあり、覆工内部のひずみについては不明である。このため1例ではあるが、爆発に近い覆工断面内のひずみ分布について測定した結果を表-1に示す。これによるとトンネル覆工内部の半径方向に生ずるひずみは圧縮ひずみであり、その絶対値は自由面近くにくつて大きくなる。一方、覆工表面ではかなり大きな引張ひずみが発生する。このことから、最大引張ひずみは覆工表面において生ずるのであると考えられる。

4. おおひこ ここに得られた結果を要約すれば次のようである。

- 1) トンネル壁面で測定される距離成長勾配は、地表面で得られる距離成長勾配にほぼ等しい。
- 2) 覆工は施工上の問題もあって天端付近の上下方向の振動速度が最も大きく、その他の部分では爆発に面した覆工内壁面の自由面に垂直な方向の振動成分が卓越する。
- 3) 振動速度の最大値が生ずる点と断面内揺動方向ひずみの最大値が生ずる点は必ずしも一致しない。
- 4) 最大ひずみと最大速度はほぼ比例関係にあり、その係数 C は(3)式に示すような意味をもっている。
- 5) 覆工内部の半径方向ひずみは圧縮ひずみであり、その絶対値は表面の引張ひずみの絶対値より小さい。

最後に、種々の便宜をはかっていただいた神戸市開発局ならびに、神戸市水道局の関係者各位に感謝の意を表する。また、住友建設(株)川清氏(当時大学院生)、ならびに学部生 北田郁夫君には実験およびデータ整理の御協力いただいた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献: 1) 梶井 葛西, "近接爆破によるトンネル覆工の動的挙動に関する理論的考察" 第29回土木学会年次学術講演会, 昭和49年 III-210

2) 葛西, "我動に受けるトンネルの動的挙動に関する理論的研究" 神戸大学修士論文, 昭和49年3月

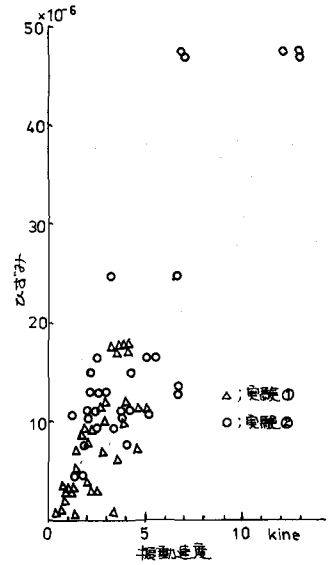


図-9 振動速度ひずみの対応

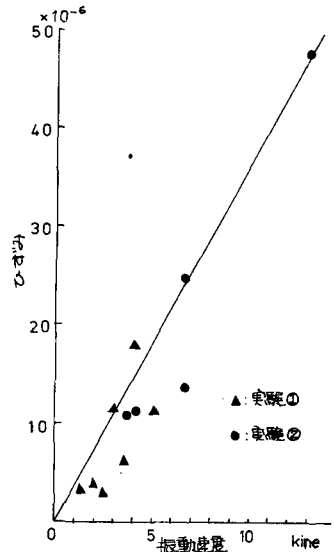


図-10 最大振動速度・最大ひずみの対応

表-1 覆工半径方向および壁面のひずみ

表面から距離(cm)	0.0*	0.0**	2.5	17.5	32.5	45.5
ひずみ(x10 ⁻⁶)	38.2	32.8	-17.0	-9.4	-1.9	0.0

* トンネル軸方向
 ** 断面内揺動方向

(-は圧縮, +は引張を示す)

Tunnel Vibration from Adjacent Blasting

Shunsuke Sakurai*

Yasutoshi Kitamura*

Kohzo Yoshida*

The blasting operations in the vicinity of an existing tunnel have recently increased with progress of urban development. A controlled blasting technique must be established so as to avoid any serious damages on the existing tunnel. The dynamic behaviors of tunnel under blasting operation must be clarified. For this purpose some field works have been conducted. In this paper have been studied the dynamic distribution of particle velocity on the internal surface of tunnel lining, correlation between particle velocity and strain, and strain distribution in the lining. The results obtained in this study are as follows.

- 1) The wave propagation law obtained at tunnel cross-section is approximately similar to one obtained at the ground surface.
- 2) The particle velocity has the maximum value at the crown of the lining.
- 3) The maximum value of the particle velocity and the maximum strain do not appear at the same point on the surface of tunnel lining.
- 4) Approximately linear relation between the maximum value of the particle velocity and the maximum strain at the lining surface is revealed.
- 5) The radial strain in the lining is in compression and its absolute value is smaller than one on the surface of the lining.

*Department of Civil Engineering,
Kobe University, Kobe