

発破によるトンネルの歪測定

神戸大学工学部 正員 畑 中 元 弘

発破作業を行なう場合、その振動の既設構造物におよぼす影響が問題とされる場合が多い。本文は既設送水トンネルに近接してさらに同種のトンネルを新設する場合（A地区）¹⁾、既設軌道トンネルに近接して道路を新設する場合（B地区）²⁾、および既設トンネル上部で土取を行なう場合（C地区）³⁾、の3例に対し、離隔距離や薬量制限などについてのべたものである。

1 調査地点の概要

a) A地区 送水トンネルルート設計のための最小離隔距離の決定が主目的であつたため、施工区域と地山の性質が同一と考えられる貯水池の素掘放水トンネル内測壁底部附近で歪の測定を行なつた。トンネル断面は約 3×3 mの馬蹄形で地山は堅硬な花崗岩よりなり、縦波の伝播速度 V_p は $3,600 \text{ m/s}$ である。

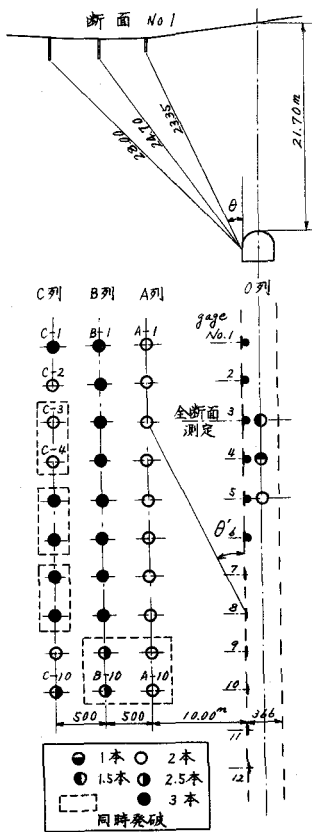
b) B地区 新設2級国道の中心線と既設トンネルとの離隔距離に対する薬量を定めるため、発破によるトンネルライニングの歪および地山の岩盤上で振源距離による歪振幅の減衰係数の測定を実施した。トンネルは約40年前に施工された複線型4板塊瓦巻ライニングで、地山は堅硬な石英粗面岩質の凝灰岩ないし角礫凝灰岩である。 V_p は $4,400 \sim 4,700 \text{ m/s}$ であるが坑外露頭部で $2,500 \text{ m/s}$ 、新設道路切取露頭部では $3,200 \sim 3,300 \text{ m/s}$ であり、表面より $18 \sim 26 \text{ m}$ は発破のためにゆるんでいるものと考えられる。実験はまず道路中心線で行なわれたボーリング孔を用いて発破によるライニングの歪を測定し、A地区での実験結果より一応の薬量を定め、この薬量で実施した道路工事の初期の段階で再度の実験を行ない発破方法や薬量を検討した。

c) C地区 この地区は海岸工業地帯造成のため大規模な採土工事が行なわれており、大量の土を運搬するため $3 \times 3.7 \text{ m}$ のコンクリートライニング馬蹄形断面のベルトコンベアトンネルがある。地山はかなり風化の進んだ花崗岩 $V_p = 2,000 \text{ m/s}$ 程度で、実験時の土被りは $21 \sim 24 \text{ m}$ であるが 10 m 程度までは掘削される計画である。図-1は振源距離による歪振幅の減衰や、ライニング各部に生じる歪分布などを調査するための発破孔の配置、歪計の設置カ所を示したものである。歪計は3地区ともカールソン歪計と動的歪測定用増幅器、電気オシログラフを使用した。なおA地区は最初であるため予備実験程度であるが、B、C地区ではかなり詳細な実験を行なつた。またA、B両地区では振幅測定をも併せて行なつており、C地区では断層の懸念もあるのでさらに機会をえて歪測定と振幅の同時測定や、詳細な弾性波調査などを実施したいと考えている。

2 振源距離による歪振幅の減衰

図-2は一例としてC地区のトンネルライニング側壁上での歪記録を示したものである。歪記録は一般に圧縮歪の初動かまたは次の第2動の引張歪が最大値を示すが、C地区ではほとんどの記録が圧縮歪より引張り歪の方が大きい、または同程度であるが全般的に両歪は差ないようである。歪波の周期は地山の地質や振源距離、薬量などによつてこととなつてはいるが、とくに地盤の堅さの影響が大きいようで、A ($L = 11 \text{ m}$)、B ($L = 30 \text{ m}$)

* 発破方法については鹿島建設佐藤博士の意見書が提出されている。



図一 発破孔および歪計の配置図 (C地区)

両地区ではいずれも 0.002~0.01 sec で 0.004~0.005 sec の周期が卓越している。C地区では地盤が比較的軟らかく測線長も $L=52\text{m}$ と前者に較べて長いから、周期も 0.016~0.018 sec とかなり長くなっている。

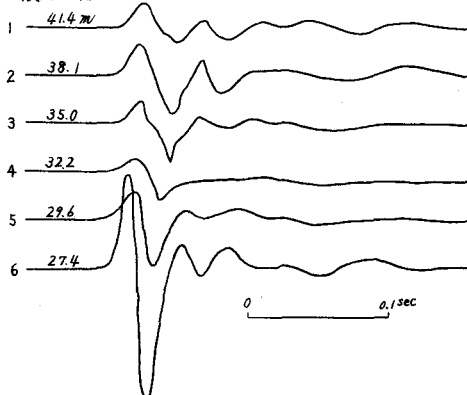
発破による地盤の振幅 y と振源距離 x 、薬量 w との間には、弾塑性領域で

$$y = cw^a x^{-b} \quad (1)$$

なる関係の成立することが知られている。ただし、 c 、 a 、 b は常数であつて $a = \frac{1}{2} \sim 1$ 、 $b = 1 \sim 2$ の場合が多いようである。また地震波については次式

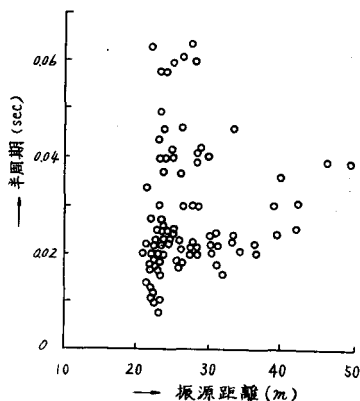
$$y = cw^a x^{-b} e^{-\alpha x} \quad (2)$$

発破点: A-10(2本), A-9(2), B-10(2.5), B-9(2.5) 計9本
振源距離



図二 地山が比較的軟かい場合、側壁ライニング上の歪記録の一例 (C地区)

見あたらないが、歪についても一応振幅におけると同様に(1)あるいは(2)式が成立するものとし、歪の最大値は歪波の初動または第2動で振動の初期の部分であるから実体波 ($b=1$) と考えて測定値の整理を行なうことにした。図-4~10は各地区における破壊を対象とした引張り歪振幅の最大値と振源距離、薬量との関係を示したもので、図-4~7に見られるように(1)、(2)の両式ともかなりよく実測値を説明でき、その適合性は両式とも大差ないように見うけられる。A、B地区は1本75gの新桐ダイナミトを使用し、いずれも一孔発破で斉発薬量は前者で38g、後者では75~375g (1~5本) である。またC地区では図-1に示すように斉発量は 0.75~6.75kg (ニューズマイト1~9本) で、1~4孔発破であり、1孔発破の場合の斉発薬量は 0.75~2.25kg である。なおC地区では、主として振源距離による歪振幅の減衰状況を調べるために、



図三 周期と振源距離との関係 (C地区)

* 伊藤博士は $y = c(\sqrt{w})^{-b}$ の形で整理されているが、同式は $y = cw^{\frac{1}{2}a} x^{-b}$ で表わされ(1)式と同形となる。

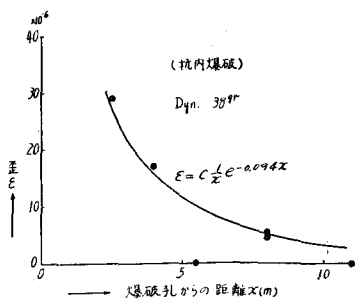


図-4 $\varepsilon - x$ 曲線 (A地区)

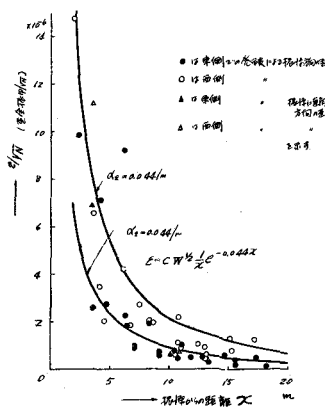


図-5 $\varepsilon/W - x$ 曲線 (B地区)

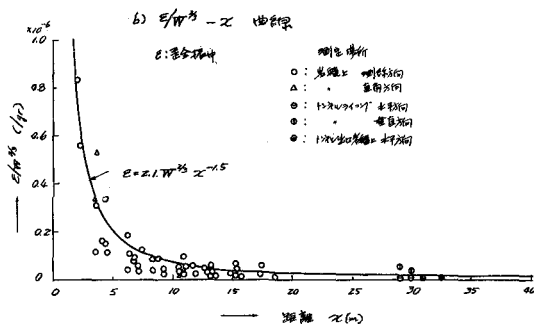
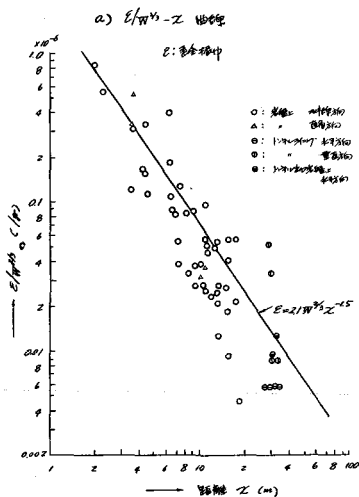


図-6 $\varepsilon/W^{3/8} - x$ 曲線 (B地区)

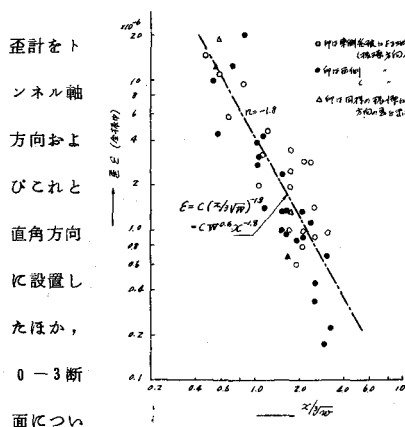


図-7 $\varepsilon - x^{1/3}/W$ 曲線 (B地区)

ネル軸方向およびこれと直角なトンネル断面の接線方向に設置した。図-8は主として側壁部トンネル軸方

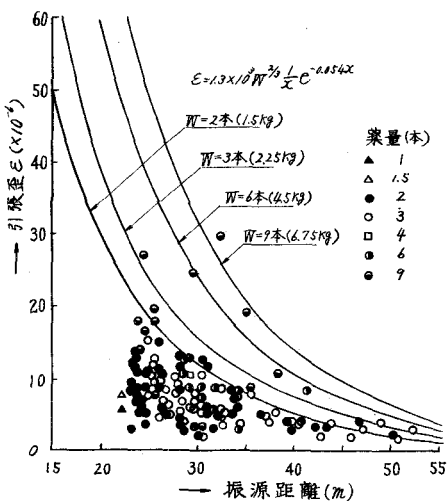


図-8 $\varepsilon - x$ 曲線 (C地区)

向の歪について振源距離、量量との関係を示したものである。なおC地区ではA、B地区にならぬ一応(1)式によ

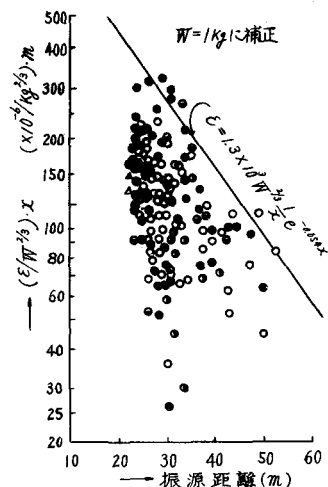


図-9 $\frac{\epsilon}{\sigma} - X$ 曲線 (C地区)

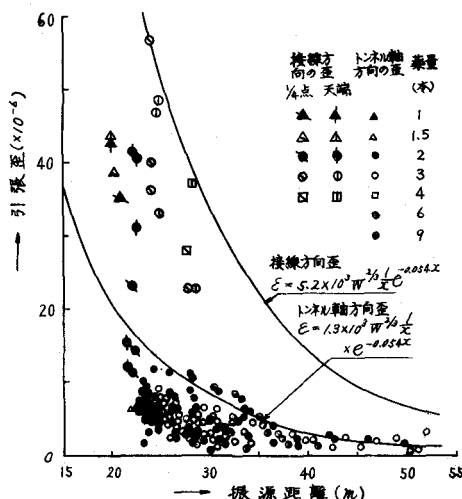


図-10 $\epsilon - X$ 曲線 (C地区)

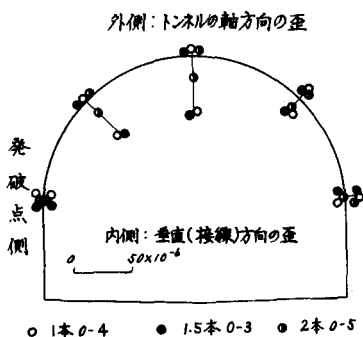


図-11 トネル断面の歪分布の一例 (C地区)

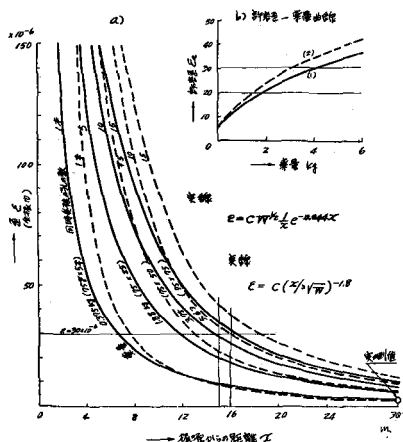


図-12 薬量制限のための図表の一例 (B地区)

つて整理してある。図-9は図-8の値に薬量の補正を施した値を示したものである。C地区の図-8~10では、振源距離が近い場合測定値のばらつきが著しいがこの点、振源距離を発破点と測点との直線距離をとり、

歪波の壁面への入射角(図-1の θ および θ')の影響を考慮してないこともその原因の一つと思われ、波動論的な考察をすべきであると考えられる。今後さらに整理方法とともにこの点について究明したい。図-11はトンネルの横断面の歪分布の一例を示したもので、発破点の位置により若干の相違があるが、アーチ天端および1/4点における接線方向の歪が各点のトンネル軸方向の歪に比べて著しく大きくなっている。なお実験トンネルの他の同様なトンネルにおいては、断層帯のほかに土被り15mの部分でアーチの1/4点附近に亀裂を生じた部分があり、この亀裂は採土発破(発破孔 ϕ 100mm, 1孔当りコーズマイト1.5kg, 斉発薬量約100kg)によるものと思われる。

3 離隔距離および薬量制限

表記の問題に対し計算による推定方法の一例としてB地区における資料を図-12に示した。同図の曲線群は、まず、(1), (2)式の係数 c を最大実測歪、薬量、振源距離より決定し、次に種々の薬量の場合の歪を算出したものであり、許容歪を定めれば振源距離に応ずる薬量を推定することができる。なお許容歪は対象材料の応力-歪曲線、弾性係数、破壊強度、安全率などより想定した。段発発破については今後の研究にゆずることにした。

- 1) 畑中：発破による隧道内岩盤の振動ならびに歪測定について、建設工学研究所報告 1, 昭. 35.3
- 2) 畑中、西村：道路工用発破がトンネルにおよぼす影響について、同上, 6, 昭. 37.3
- 3) 畑中：土木学会関西支部講演概要, 昭. 38.11, なお詳細は建設工学研究所報告, 6, 昭. 39.3に記載予定

STRAIN MEASUREMENT OF THE TUNNEL DUE TO BLASTING

by

Motohiro HATANAKA*

When blasting occurred very nearly existing buildings, it is necessary in order not to damage the structures that the quantity of powder should be restricted in case of setting the epicentral distance while the proper epicentral distance should be kept in case of setting the quantity of powders. For these problems the amplitude and the acceleration were generally considered as main factors, but writer was afraid that the allowable value of each factor was not clear. He took care of the fact that allowable strain could be estimated easily rather than amplitude or acceleration, and expressed the following equations showing the relations between strain amplitude E (in 10^{-6}), epicentral distance X (in m) and quantity of powder W (in kg) as well as for displacement amplitude:

$$E = C W^a X^{-b} \quad \dots\dots(1)$$

$$E = C W^a \frac{1}{X} e^{-dX} \quad \dots\dots(2)$$

Nextly, the results of obtained from three districts were examined and almost the same results were brought for either eq.(1) or eq.(2). Moreover, they gave at the same time such values as $a=1/2 \sim 2/3$, $b=1 \sim 1.8$, and the damping coefficient of epicentral distance $d=0.044 \sim 0.094$ /m.

Finally, the writer described the relations between epicentral distance X and quantity of powders W corresponding to $E=E_a$ in the above formula, by estimating allowable strain E_a based on the past strength tests for the bed rocks or the materials of tunnel lining.

* Kobe University