

神戸大学工学部	正 員	桜井 春輔
神戸大学工学部	正 員	北村 泰寿
神戸大学大学院	学生員	○宮川 清

Ⅱ. まえがき

近年、鉄道・道路等が新設される場合、用地公害等種々の問題からトンネルを多く掘削する傾向にある。また、上下水道にも多くトンネルが用いられるなど、その需要はますます増加すると考えられる。このような状況下では、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がたびたび生ずる。トンネルの掘削は発破によるのが普通であるが、既設トンネルに対して爆破の影響・安全性などを充分考慮した上で工事を行なわなければならない。しかし、トンネルのような地中構造物の耐震性状についてはまだまだ不明な点が多く、発破の装薬量・パターン等の管理、トンネルに対する振動許容値の決定はかなり経験的であるのが現状である。このような状況における施工例はこれまでにいくつか報告されている。しかし既設トンネル内に受振器を設置し、トンネル掘削時における爆破振動を直接測定・監視しながら施工できる場合は問題ないが、既設トンネル内に受振器を設置することが困難な場合には、掘削中のトンネル内で監視する必要性が生じる。本文では既設トンネル、新設トンネル内で行った種々の実測結果から、トンネル交差点における爆破振動について述べ、今後の施工への参考に供したいと思う。

2. 測定現場の概要

測定現場は図-1に示されるように上水道の送水と貯水を目的とするトンネル（以後既設トンネルと称す）に対し、その下方を鉄道の複線トンネル（以後新設トンネルと称す）が交角78°で立体交差して掘削されている所である。ただし、ここで言う既設トンネルも実験時には施工中であり、交差点の掘削は完了しているが覆工は施されていない。一方新設トンネルは底設導坑先進上部半断面工法で施工され、既設トンネルとの離隔距離は導坑掘削時29.7m、上部半断面掘削時24.5mである。地質はこの付近一帯が六甲型花崗岩（黒雲母花崗岩）からなっており、実測による縦波速度は約3000m/s～3700m/s程度となっている。

3. 測定方法および測定機器

測定はトンネル壁面の岩盤における振動速度について行い、受振器から直流増幅器を通じ、電磁オシログラフにて記録した。機種については下記に示すとおりである。受振器はモルタルにて直接岩盤に固定し、その位置は既設トンネル内においては底盤の中央とし、新設トンネルにおいては現場の状況から、坑口から切羽に向かって右側の側壁の下、底盤の端部に取り付けた。

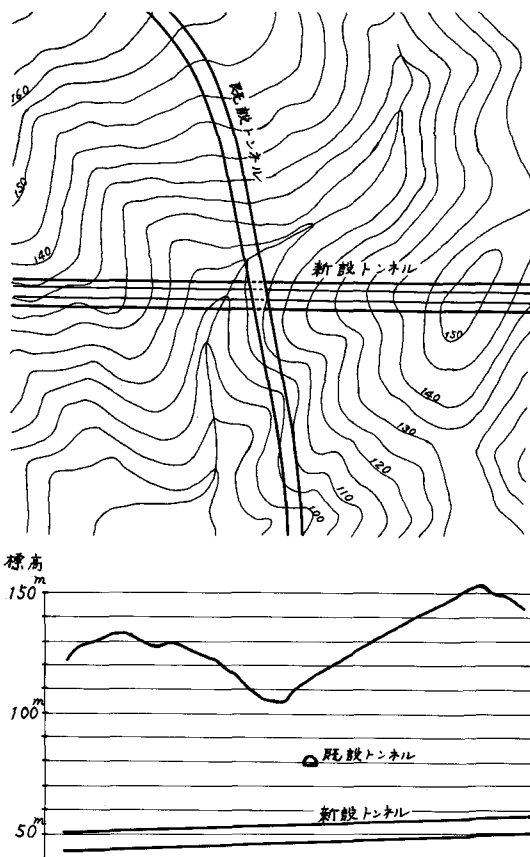


図-1 地形概略図

○受振器 動電型速度計

上下動・水平動 固有周波数 4.5Hz, 8Hz

Geo-Space 社製

上下動・ 固有周波数 18 Hz

日本電気(株)製

○増幅器 6L5型直流増幅器 三栄測器(株)製

○記録器 FR301型ビジュアル 三栄測器(株)製

ガルバノメータ G-500

固有周波数 500Hz 三栄測器(株)製

4. 測定結果および考察

i) 既設トンネル・新設トンネル内振動速度値の比較

新設トンネルの掘削爆破による既設トンネルの安全性を検討する際、どの程度の振動が生じているかということが問題となる。ここでは新設トンネル内(善坑)の測定結果から既設トンネルにおける振動値を推定する場合を想定し、両トンネル内の爆源から等距離にある点の振動速度値を同時記録し、これを比較した。図-2は(既設トンネル内の測定値/新設トンネル内の測定値)を示したものである。(a)図は既設トンネル内上下成分を新設トンネル内の卓越成分である振源方向水平成分で除したものである。また(b)図に新設トンネル内上下成分で除したものを示した。

図-1(b)から明らかなように上下成分で比較すると10倍を越える場合があり、新設トンネル内の卓越成分である振源方向水平成分と比較しても交差地奥の手前30mに爆破点がある場合に対して4~7倍、交差地奥直下にある場合には3~5倍、通過30mで2~3倍となり、新設トンネルに対して既設トンネルでは大きな振動が記録されることが示される。また、爆破点を手前30mから交差地奥直下、通過30mと進行するにともないこの倍率が減少する傾向が現われている。

図-3は図-2, Bの場合における両トンネル内で測定した Particle motion を示したものである。これによると既設トンネル底盤は上下方向に振動するが新設トンネルの底盤の端部はトンネル断面の中心に向かって振動する傾向を示している。このため上下成分は測定する位置が異なると値が大きく変化する。つまり、底盤の中央では上下成分は大きく測定されるが側壁ではかなり小さくなると考えられるので注意を要する。

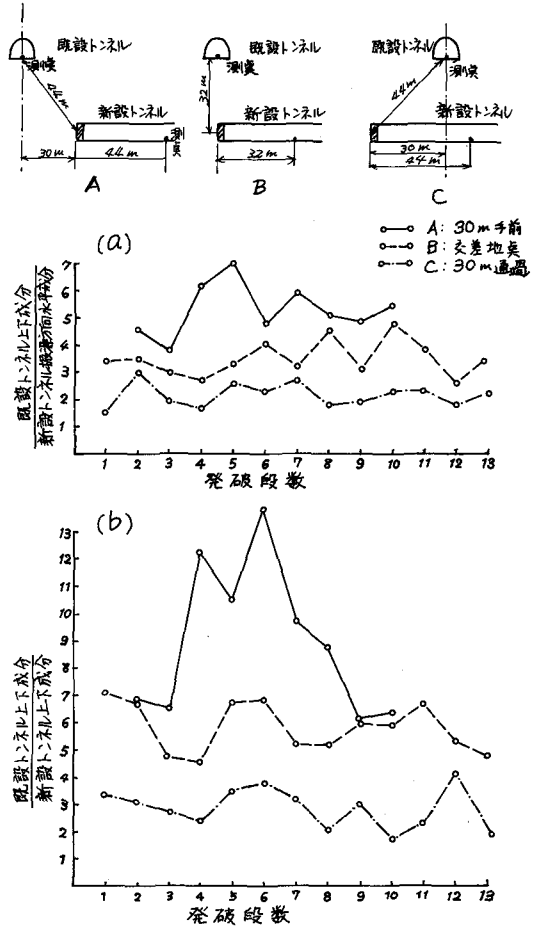


図-2 振動速度値の比

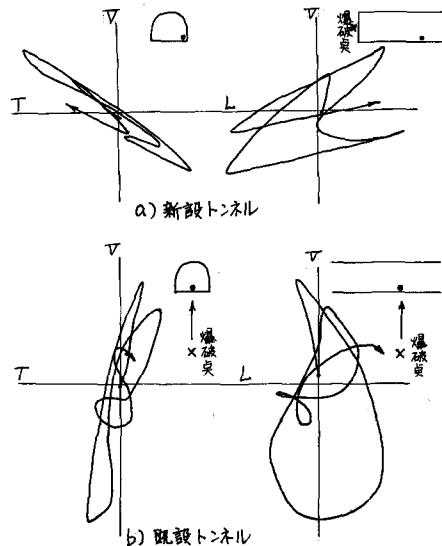


図-3 Particle motion

ii) トンネル掘削爆破による波動伝播の指向性

図-2で新設トンネル(導坑)掘削のための爆破臭が接近してくる時には、遡る時より既設トンネルに大きな影響を与えることが示された。このことに注目して、上部半断面掘削のための爆破が両トンネルの交差部を通過する際の振動を継続的に測定した。実際の振動速度は装薬量の $2/3$ 乗に比例するものと仮定して遅延爆破の段ごとに補正した結果を図-4に示す。これによると各段においてかなりの変動はあるが、既設トンネルに最も大きな振動速度値を与えるのは距離が最小となる交差部直下付近ではなく、交差部に接近しつつある時の爆破であることが示される。このことからトンネル掘削のための爆破には、岩盤内に投射される波動に指向性を持つという仮定が成り立つ。つまり掘削の進行方向に対して前方には投射される波動のエネルギーが大きく、後方には小さくなるというものである。これは後方へは掘削による自由面があり、爆破によって岩が破砕されエネルギーが後方へは波動として伝播されにくいと考えられる。

図-5(a)(b)は両トンネル内に測線をとって距離減衰を測定したものである。これを比較すると減衰は大きく異っており、既設トンネル内で交差地点からとった測線上では急速に振動速度値が小さくなることを示している。これは添図に示すような位置的条件の違いから生じるものであらうと考えられる。いま、既設トンネル内に測線をとった場合と、図-4の添図に示されるように新設トンネルの掘削爆破が接近してくる場合の位置的条件が類似していると考えられる。すなわち既設トンネルに爆破臭が接近してくる場合に対して、図-5(b)に示される減衰の係数を用いて振動速度・装薬量・距離の関係を $v = C W^{2/3} r^{-2.7}$ ($v: \text{kin/s}, W: \text{g}, r: \text{m}$) で表現できると仮定する。ここで C は破砕効果・岩質・火薬の種別などに影響され、伝播される波動の速度振幅の大きさを示す係数と考えられるが、図-4の記録から上式によって各々の爆破の各段について C 値を求めると爆破臭が接近するにしたがって減少する傾向がみられる。これを測定位置と新設トンネルの軸とのなす角度で整理を行うと図-6に示されるようになり、トンネル掘削爆破による振動の速度振幅には図中に実線で示されるような指向性があるものと考えられることができる。なお、ここで示された C の値、減衰の係数の値は、両トンネルの離隔距離・岩質など本実験の条件においてのみ適用されるものであるが、図-6に示される指向性の傾向については、これらの要素が除去されているものと考えてよい。

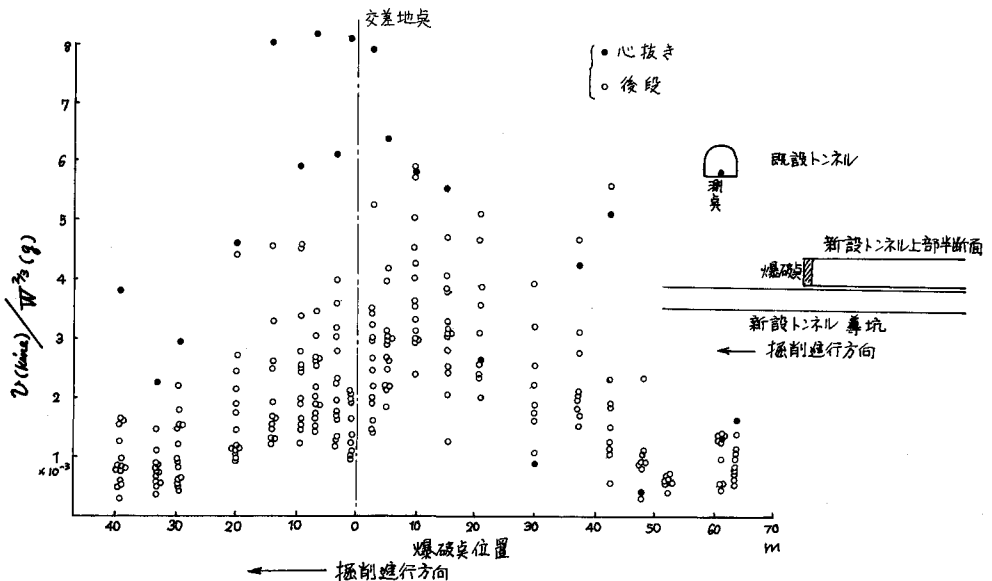


図-4 新設トンネル掘削爆破による既設トンネル内の振動速度値

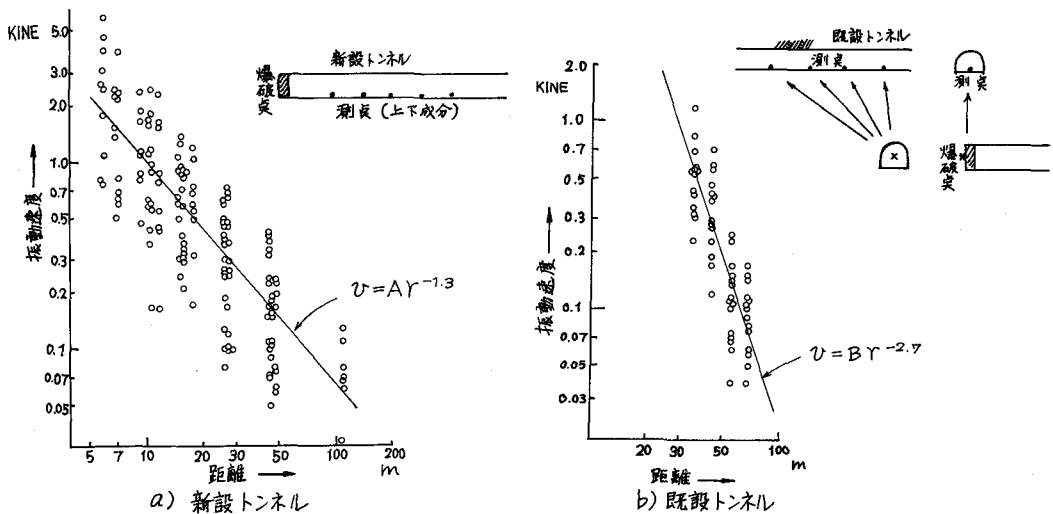


図-5 距離減衰曲線

5. 結語

本実験から得られた結果をまとめると次のようになる。

α) 既設トンネル内では新設トンネル内に比較してかなり大きな振動が測定されるため、新設トンネルで振動を監視・規制するにはこれを充分考慮すべきである。特に新設トンネル内上下成分は小さく測定される場合があるため注意を要する。なお本実験では既設トンネルにはライニングが施されていないので、ライニングがある場合には振動がこれよりも小さくなることも考えられる。

β) 新設トンネル掘削のための発破の装薬量・パターンなどを規制するには、既設トンネルとの交差地点に到達するまでが最も重要であり、通過後は規制をゆるめることができる。

本文においてはトンネルに対する振動許容値についてはふれていないが、これについて統一した標準がないのが現状であり、筆者らも目下検討中である。

なお、本実験の実施にあたり御協力を賜った神戸市交通局・神戸市水道局および清水建設(株)の関係各位に感謝の意を表します。

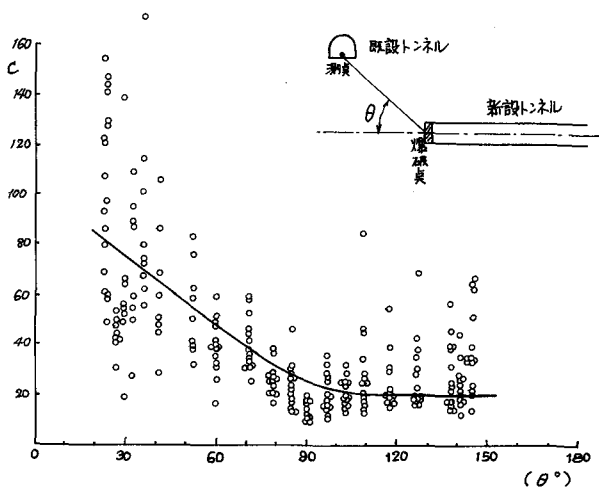


図-6 トンネル掘削爆破による波動伝播の指向性

Blast Vibration at Tunnel Crossing

By Shunsuke Sakurai*
Yasutoshi Kitamura*
Kiyoshi Miyagawa*

In this paper are presented the field measurements of vibration of tunnel due to adjacent blasting operations.

When a tunnel is excavated in the vicinity of an existing tunnel, controlled blasting is necessary to avoid damage to the existing structure. In order to establish controlled blasting techniques, dynamic behaviors of tunnel under blast vibration have to first be understood.

It is concluded by this experimental study that directional effects of penetration of stress wave are of significance. That is, a great amount of energy is propagated in the forward direction from the tunnel face rather than in the backward. Therefore, potential damage to the existing tunnel due to blasting operations must be seriously considered only when the newly constructed tunnel is approaching to the existing tunnel.

* Dept. of Civil Engineering
Kobe University, Kobe, Japan