

(57) トンネル掘削における超近接発破に関する一考察

日本道路公団	正会員	中野研一郎
清水建設	正会員	岡田 滋
山口大学工学部	正会員	古川 浩平
山口大学工学部	正会員	中川 浩二

VIBRATION AND CRACKING OF TUNNEL LINING DUE TO ADJACENT BLASTING

Ken-ichiro NAKANO, J.H.P.C.
Shigeru OKADA, Shimizu Construction Co., Ltd.
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

Concerning the construction of very closely located twin tunnels, the blasting vibration by the excavation of the second tunnel may seriously damages the lining of the first tunnel. The tunnels, in this study, were excavated by NATM. The vibration history of the shotcrete surface of the first tunnel was recorded during the blasting of the second tunnel. The minimum distance between the shotcrete surface and the blasting point was about 50 cm. Cracking on the shotcrete surface was observed when the surface velocity exceeded 70 cm/sec.

1. はじめに

山岳トンネルの建設において上下線2本のトンネルを掘削する場合、道路トンネルとしては一般的に中心間隔を30m程度と十分な間隔としている。これは一つには両トンネルの間隔を十分にとることによりトンネルの力学的安定性を確実なものとする配慮があったと同時に、トンネル掘進が発破により行われる場合、後続して掘削されるトンネルの発破振動が先行トンネルに与える影響をできるだけ小さくする目的があったと考えられる。

道路建設上のこれらの問題について前者はFEM等を用いた数値解析法と実計測をもとに多くの検討がなされてきている。しかし、後者についてはどの程度の発破振動が実構造物に有害であるのかどうかの議論は必ずしも十分でなく、また実際の発破に伴う振動の計測例も十分にあるとは言えない。本研究は上下線の間隔が掘削最短距離50cm前後と非常に近接した状態で計画されたいわゆるめがねトンネルを発破で掘削するに際して、後行トンネルの掘削時の発破が先行トンネルライニングに及ぼす影響について検討したものである。

2. トンネルの概要

若山トンネルは山陽自動車道徳山東IC～徳山西IC間の若山山麓に位置する延長約150mのトンネルである。当トンネルは当初切土として計画していたものを、その後の地質調査で断層の存在が確認されたことおよび近隣の道路の切土のり面において岩すべりを起こし、再々の切直しを行っていたなどの事例により、道路構造を再検討しめがねトンネルに変更したものである。周辺のボーリングコアによる一軸圧縮強度が約400 kg/cm²であったためトンネルの掘削工法は機械による掘削が可能であると判断し、ゆるみを極力小さくするため中央・側壁導坑先進上部半断面工法による機械掘削とした。掘削は中央導坑及び側壁導坑から開始したが当初推定値に比し一軸圧縮強度が高く（最高値約1200kg/cm²、平均値約600kg/cm²）、機械による掘削が困難であると判断し発破掘削に変更した。

3. 発破および振動計測計画

3-1 発破計画

めがねトンネルの掘削は地質条件の悪い下り線の掘削後上り線を掘削することとした。トンネルの安定性の問題をはじめ、種々の検討を行った結果、上り線掘削時の下り線の覆工は1次覆工までとし、上り線の掘削に伴う下り線覆工の変状を観測調査するとともに、もし変状が生じた場合それに適当な対処を行うこととした。

上り線の発破に際して下り線覆工、特に隣接上半のピラー部に与える影響を大きくしないという前提に立ち、以下のような方針に基づくこととした。

① 下り線側の覆工に大きな変状を与えないため、覆工面からの通常発破最短距離は2.0mとすることを一応の目標とし、それ以上はブレーカーによる掘削および段発によるあたり発破とする。(図-1)

② 実際の掘削に際しては十分な試験施工を行い観察された覆工面のクラックおよび振動速度から最終決定する。

3-2 振動計測計画

一般に発破振動による被害損傷の度合は振動速度に密接に関連するものであり、ほとんどの場合振動速度で管理を行うのが良いとされている。従って直接振動速度を計測するのが良いが、本トンネルのように計測位置が非常に発破域に近接した場合、大きな、しかも高周波の振動速度が発生する。そのため現在市販されている一般的な速度計では振動に対する追従性が悪く計測に問題がある。そのため圧電型の大容量加速度計により計測し、積分器を通して振動速度に変換、検討することとした。また計測成分は次に述べる設置技術の問題もあり、壁面に垂直な方向のみを計測している。

加速度ピックアップの設置は計測位置が爆源になるべく近くなるようにした。すなわち図-2(a)に示すように孔尻位置の真横にピックアップを取り付けた。孔深さは切羽に最も近い鋼支保工からほぼ1.5m程度であるため、図-2(b)を基本パターンとし、孔尻位置に上下2ヶ所、孔尻位置から1mの奥側に上下に2ヶ所の4点を基本とした。またピックアップの設置に関しては次の2点が必要となった。

① 常に爆源近くで振動計測を行うため、切羽の進行に伴いピックアップを移動させる。

② 100kine程度の大振動を計測するため吹付けコンクリートにしっかりと固定する。

以上のことを考慮し種々試行の上、ピックアップはホールインアンカーにて固定することとした。

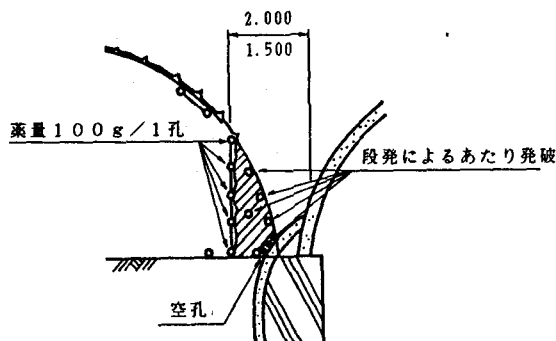


図-1 発破掘削計画

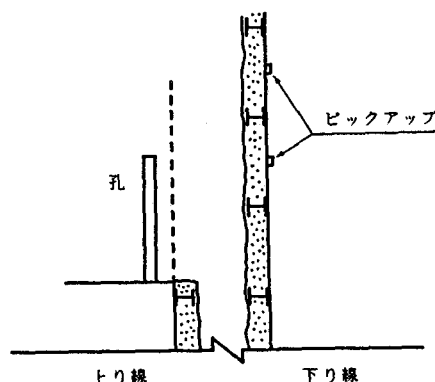


図-2 (a)ピックアップの取付位置

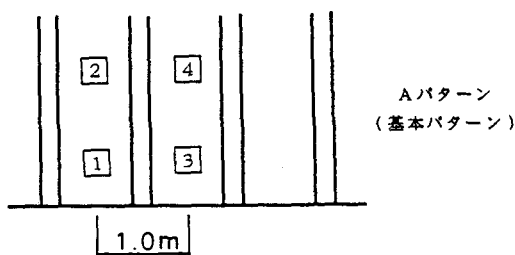


図-2 (b)先行トンネルライニング上のピックアップ取付位置

4. 計測

4-1 爆源距離計測

振動速度と距離との関係を正確に把握するため爆源と計測位置との間の距離の測定を正確に行った。また距離計測は非常に煩雑な作業であることから、下り線側に最も近い部分の一系列については、孔入口の座標のみならず、孔の深さ、角度までも測定した。他の孔については孔口の座標と孔の深さを測定した。それを用いて孔尻の位置とピックアップの座標を出し、2点間の距離を計算により求めた。実際の計測は距離計測用に作製した定規とクリノメーターを用いて行った。ピックアップの取付位置は中央導坑の側壁コンクリート天端からの高さと同製支保工からの距離をスケールにより測定した。

4-2 クラックの計測

爆薬には2号梗ダイナマイトを用いておりDS電気雷管で起爆している。

凹凸の激しい吹き付けコンクリート面ではクラック発生の有無の確認が困難であると考えられたため、計測区間については事前に側壁コンクリート天端から高さ1.8mの位置までモルタルを塗布した。クラックの確認は肉眼で行い、ルーペを使用したり、水をモルタル面に吹き付けると言った特別な方法は用いなかった。ピックアップ設置時に発破前のクラックの有無を確認し、発破後にクラック発生の有無および長さを計測した。長さの計測はチョークでマーキングし、スケールで行った。なおクラック幅についてはすべてのクラックがヘアクラックであったため測定は行わなかった。

5. 計測結果および考察

5-1 計測結果

(1) 装薬量、距離および振動速度

本計測において払いを同じ段数の雷管を使用して発破する場合を「斉発」、各孔毎に段数を変えて発破する場合を「段発」と称した。「斉発」の場合、図-3(a)に示すように同段の雷管内における起爆秒時のずれにより各孔の波形は分離して記録された。このことは他トンネルの計測においても報告されている¹⁾が本計測においても明確に確認された。しかし、起爆秒時のずれの順序が各雷管について不明なため、どの発破孔での発破がどの振動波形に対応するのかの判断はできなかった。「段発」の場合の波形例を図-3(b)に示す。また振動波形は図に示すように、初動が最大となった。これにより中心線から最も大きい振れを読んで計測値とした。

計測された振動速度を距離に対して示したものが図-4である。計測結果のばらつきはかなり大きく現れているが、いまこれを

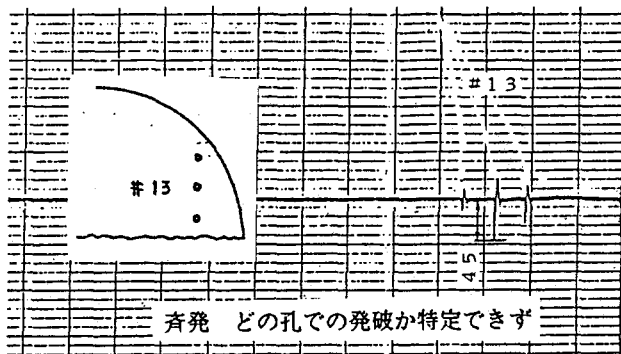


図-3 (a) 斉発発破における計測発破振動

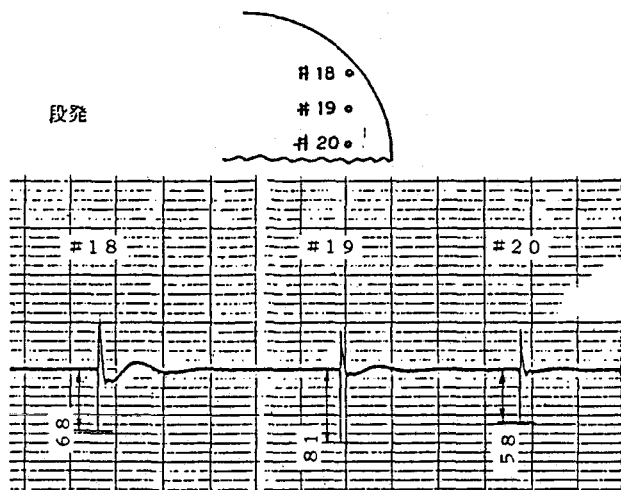


図-3 (b) 段発発破における計測発破振動

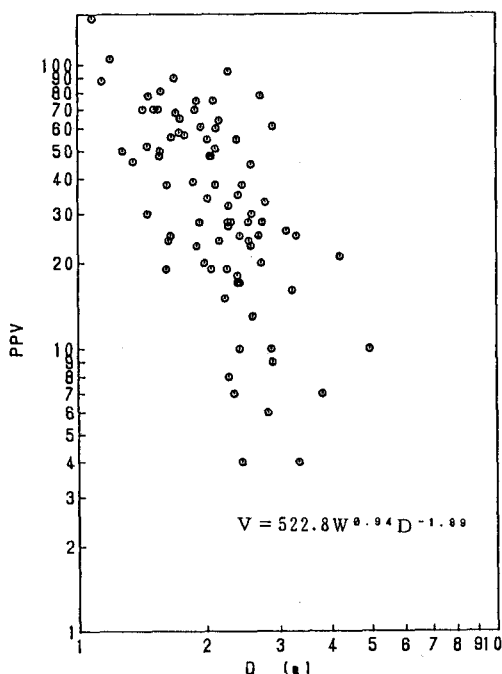


図-4 最大振動速度と距離との関係

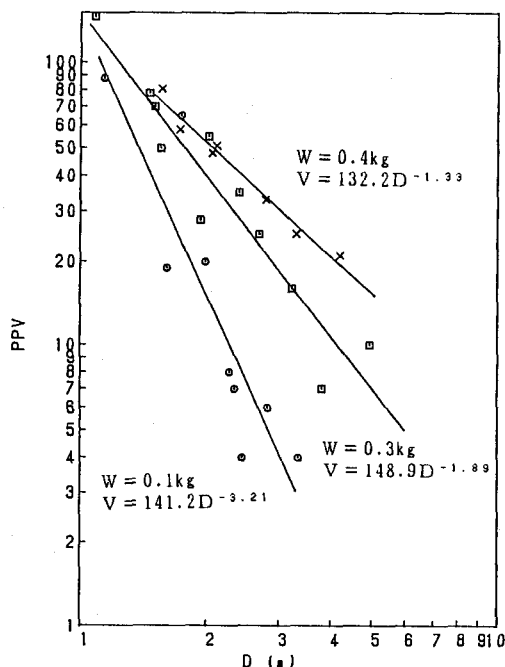


図-5 薬量ごとにみた最大振動速度と距離との関係

最小2乗法により直線回帰させると回帰直線として

$$V = 522.8W^{0.94}D^{-1.89}$$

が得られる。ここで得られた計測結果を薬量毎に分類し、例えば孔当り薬量100g, 300g, 400gのものについてそれぞれ示したものが図-5である。なお薬量200gの結果は300gの場合とほとんど同じである。これによると薬量毎に回帰直線の勾配に明かな差がみられ、薬量が大きくなるにしたがって直線の勾配が小さくなるのが認められる。この理由については明確ではないが、非常に興味のあるところである。

超近接発破による先行トンネルのラ

イニングに与える影響を管理するに当たって孔尻位置に対してどの位置に最大の振動が発生するかを確認するため、図-2(b)に示すNo.1およびNo.3のピックアップの同一の発破に対する振動値の比を示したものが図-6である。これによって明らかに孔尻と平行な位置にあるピックアップに最大の振動が計測されることが示されており、発破管理のための計測は孔尻の平行位置で行えば良いことが認められる。

(2) クラック

発破振動によりクラックが発生したと確認できるケースは8ケースあった。このクラックの発生状況例の

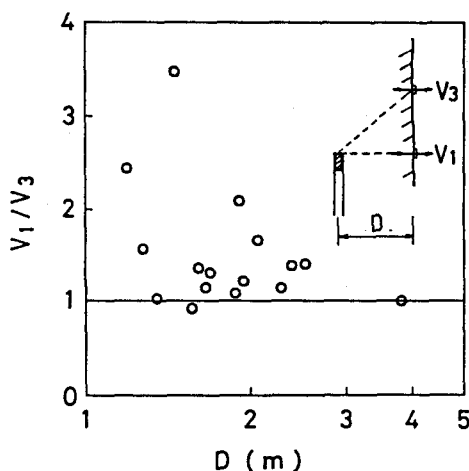


図-6 孔尻横とその1m先のピックアップで計測される最大振動速度の比

スケッチを図-7に示す。クラックはすべてヘアクラックであったが肉眼で調査したものである。今回吹き付けコンクリート面にモルタルを塗ってあったため確認が可能であったものであり、通常の吹き付けコンクリート面では確認は困難なものと思われた。

クラックの発生は多くの場合、孔尻の真横の支保工間に生じており、先の最大の振動速度が孔尻横のピックアップで計測されることに対応している。しかし、中には一區間先の支保工間やあるいは一つ遅れの支保工間にクラックが発生する場合も認められ、

これらは岩盤の節理や先行トンネルの掘削にともなう岩盤のゆるみ等に起因するものと思われる。

いま各発破シリーズにおける最大振動速度とクラックの発生有無を示したものが図-8である。この図においても必ずしもその最大振動速度を生じた孔の発破でクラックが発生したとする根拠はないが、クラックの発生は最大振動速度が70kine以上になった場合に限られており、またクラックの発生が認められなかったのは最大振動速度が80kineに達しなかった場合のみである。このことからライニングのクラックの発生は70kineを限界として良いものと思われる。

図-9には発生するクラックの延長と振動速度との関係を示しているが、特に明確な関係は認められないようであり、クラックの発生は振動速度のみならず岩盤の状況等多くの要因の影響を受けるものと思われる。

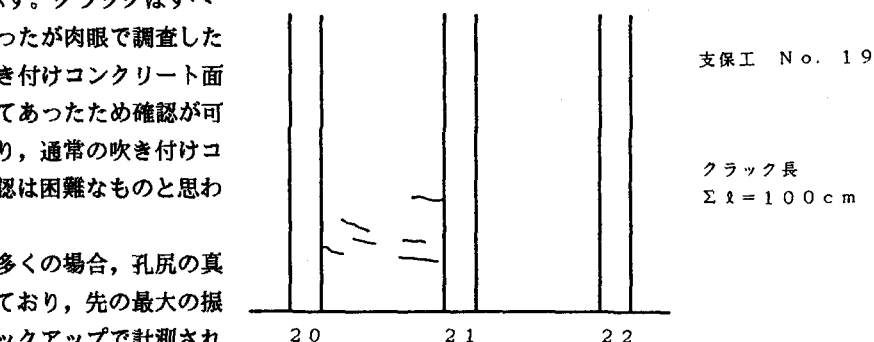


図-7 吹き付けコンクリート上に観察されたクラックのスケッチ例

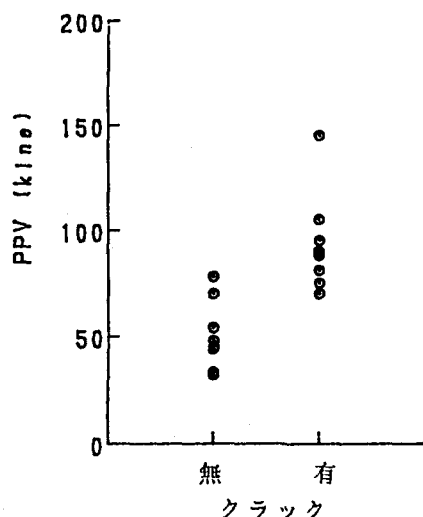


図-8 クラックの発生有無に対応する最大振動速度

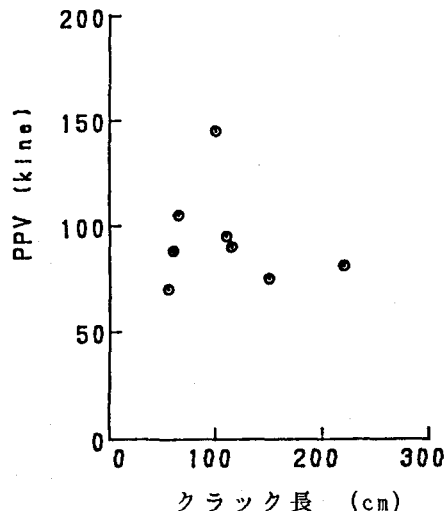


図-9 発生したクラックの延長に対応する最大振動速度

6. 結論

以上の結果次のことがいえる。

- 1 近接発破によるライニングの破損のモニタリングは発破孔の孔尻に最も近接したライニングで振動計測を行えばよい。
- 2 クラックの発生は最大振動速度70kineを限界にしておりそれ以上では生じる可能性がある。

参考文献 1) 高速道路技術センター；小木津トンネル計測解析技術検討報告書，1985。