

トンネル掘削における超近接発破に関する研究

中野研一郎*・岡田 滋**・古川浩平***・
中川浩二****

近接トンネルの掘進発破において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とは言えない。本研究は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の発破掘削において後行トンネルの掘削時の発破が先行トンネルのライニングコンクリートに及ぼす影響について実測結果を基に検討したものである。

Keywords : closed blasting, vibration, cracking

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、道路トンネルでは一般的に中心間隔をトンネル直径の3倍程度の距離にしている。これは1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実用上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。

最近道路建設における用地取得の困難さの問題などにより、トンネル中心間の距離を十分にとれないことが多くなりつつある。このような場合に、発破振動が先行トンネルの覆工にどのような影響を及ぼすのか、超近接発破における発破振動の予測はどのように考えればよいか、などの点についてはいまだ明らかになっていない。

本研究はこのような観点から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、実測結果を基に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。当トンネル付近の地盤は古生代の三郡変成岩類に属する黒色片岩が大部分を占め、緑色片岩や砂質片岩の薄層を狭在する。黒色片岩は剝離性に富む片理構造が非常に顕著であり、特に破碎帯部は熱変成による泥質化が著しい。

当トンネルの土被りは最大42mであり岩質はC～Dに区分される。坑口部に破碎帯が見られ、弾性波速度は坑口部では低いが中央部では5km/sec程度である。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400kg/cm²であったため、当初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の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。支保パターンは、発破による影響が問題となる下り線トンネルの標準はD_{IV}とされ内容は表-1に示すとおりである。

また発破振動によるクラックの発生が考えられる下り線トンネルの吹き付けコンクリートの配合は表-2のとおりであり、上り線トンネル上半掘削時での材令はおよそ4ヶ月である。

* 正会員 日本道路公団広島建設局 建設第1部
(〒730 広島市中区土橋町7-1)

** 正会員 清水建設(株) 東電蛇尾川発電所1区鹿島・清水・三井共同企業体

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

表一 本トンネルの標準支保パターン

項目	下り線	上り線
吹付コンクリート	t=25cm	t=20cm
金網	2層	1層
鋼アーチ支保工	H=200 (t°×φ1m)	H=200 (t°×φ1m)
ロックボルト	L=4m V:1m H:1.2m	L=4m V:1m H:1.2m
覆工コンクリート	t=35cm	t=30cm

表二 下り線トンネルの吹付コンクリートの配合

W/C (%)	単位セメント量 (kg)	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量 (kg)	急結剤 (kg)	摘要
56	360	1086	675	セメント量の5.5% 19.8	粗骨材最大寸法 Gmax 15mm

表三 発破が近接トンネルに及ぼす影響の検討例
(発破振動推定式 $PPV = K \cdot W^a \cdot D^{-b}$)

番号	トンネル名称	地層 (弾性波速度)	心抜き	K	a	b	管理値 cm/sec	使用火薬 (調査時)	調査対象
1	山陽新幹線 己斐トンネル	花崗岩 (5km/s)	心	500	3/4	2	2.5	2号覆	送水トンネルと立体交差 (下方11.4m 交角84°)
			払	300	3/4	2			
2	中央自動車道 笹子トンネル	黒色片岩主体	心	1542	2/3	2	8.53	2号覆	国道笹子トンネルと立体交差 (下方17.0m 交角30°)
			払	580	2/3	2			
3	上越新幹線 六日町トンネル	新第三紀泥岩	心	521	2/3	2	1.0	2号覆	北陸北線赤倉トンネルと立体交差 (上方1.8m 交角73°)
			払	431	2/3	2			
4	早瀬野ダム 仮排水路トンネル	凝灰岩 (3km/s程度)	心	642 ±122	2/3	2	5.0	7-A°付	排水トンネルと立体交差 (上方4.5m 交角33°)
			払	196 ±60	2/3	2			
5	宮城県 国見トンネル	凝灰岩 (4.5km/s程度)	心	962	2/3	2	3.0	7-A°付	仙台市送水トンネルと立体交差 (下方4.85m 交角30°)
			払	707	2/3	2			
6	北陸電力 庵谷発電所 導水路トンネル	礫岩 (5km/s)	心	1514	0.87	1.33	3.0		神通川第1発電所水路トンネルと近接施工
			払						
7	山陽新幹線 瓜生野トンネル	花崗岩 (3.2-4.8km/s)	心	300	3/4	2	2.5	2号覆	工業用水路トンネルと立体交差 (上方10.0m 交角26°)
			払						
8	神戸市地下鉄 第2横尾トンネル	花崗岩 (3.3km/s)	心	470	3/4	2	1.0	2号覆	水道トンネル(2ヶ所)と立体交差
			払						
9	中央道富士吉田線 花咲トンネル	凝灰角レキ岩	心	298 ±156	2/3	1.6	5.0	2号覆	4車線化に伴う双設トンネル (中心間隔30~40m)
			払	131 ±156	2/3	1.6			
10	神戸市 新神戸トンネル	花崗岩 (5km/s)	心	980	2/3	1.77	2.5	2号覆	神戸市水道トンネル(2ヶ所)と立体交差 (下方24.0m 交角45°) (下方17.7m 交角75°)
			払	520	2/3	1.77			

3. 過去の検討例

若山トンネルのようなめがねトンネルでの計測や検討例はほとんどないが、過去において発破が近接トンネルに及ぼす影響に関してはかなり数多くの検討がなされている。表一三にそれらの代表例を示す¹⁾。これらのトンネルにおける発破振動の予測に関しては従来からよく用いられてきた次式を用いている。

$$PPV = K \cdot W^a \cdot D^{-b} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、PPVは最大速度振幅 (kine)、K, a, bは定数、Wは薬量 (kg)、Dは距離 (m) である。表一三に示すように定数aとして2/3~3/4、bとして1.5~2.0程度の値を用いることが多い。また、K値は岩質や心抜きまたは払いといった発破の方法、さらには使用爆薬によっても異なるが、200-1500程度の値を用いることが多い。表一三を見ても分かるように、用いられたK値

はトンネルにより大きく異なり、発破振動の管理がいかに難しいものであるかが分かる。

発破振動が既設の構造物に及ぼす影響の評価に関しては、実際に用いられた管理値を見ることによりその大体の傾向を知ることができる。表-3によると、管理値として1.0~6.5 kine 程度を用いている。これらのトンネルの覆工に被害が生じたということは報告されておらず、既設のトンネルの覆工に及ぼす影響はこの管理値程度であれば全く問題はないものと考えられる。しかし換言すれば、これらの管理値は過度に安全側の値を与えている可能性のあることを否定できない。

これらのトンネル間の距離はNo. 3の上越新幹線六日町トンネルを除けば近いものでも4.5 mあり、大部分は10 m以上離れている。また、No. 3の六日町トンネルでは近接区間を発破ではなく手掘りしている。これに対し、若山トンネルでは後述するように覆工面と計画発破位置の最短距離は1.5 m~2.0 mであり、若山トンネルの方がはるかに近い。この距離では表-3に示す管理値を満足する発破を行うことは実際上不可能である。一方、これらのトンネルは供用中のトンネルに近接して新しいトンネルを掘削するものであり、供用中のトンネル覆工に損傷を与えないということが前提条件とされている。しかるに若山トンネルの場合には既設のトンネルもやはり施工中であることから、たとえ若干の損傷を覆工等に生じても、トンネルの安定に支障のない補修が行いければ特に大きな問題はないものと考えられる。以上のことを考え合わせると若山トンネルでこれらの結果を直接利用することは難しいものと言える。

若山トンネルとよく似た条件下で計測された例として常磐自動車道小木津トンネルの例が挙げられる²⁾。この小木津トンネルは若山トンネルと同じく、上下線の距離が1.5~1.8 mと近接したためがねトンネルであり、発破工法により施工された。この発破に関し先行して掘削された中央導坑を用いて各種の計測が行われた。その結果、

- ① 振動速度の最大値は計器取付位置に最も近い孔の発破の際に生じ、その成分は壁面垂直方向の計器の振動値が最大である。
- ② 同段での数孔の発破における波形の重なりは少ない。そのため孔当り薬量を用いて振動速度値を推定すればよい。
- ③ 近接発破では距離による減衰が大きく、式(1)の定数 b として3程度になった。
- ④ 覆工に生じるクラックは振動速度が30~40 kine より大きいときに生じる。
- ⑤ $PPV = (500 \sim 700) W^{2/3} D^{-2}$ で振動速度の管理が可能である。

ということが明らかになったことが報告されている。しかし、③に関しては、壁面垂直成分の振動速度のみから

この結論が導かれており、入射角との関係が明確でなく、距離による減衰を過大評価している可能性があること、④に関しては、クラックの発生のチェックが厳密になされていず、本当にこの値以上でクラックが発生したか明らかでなく、30~40 kine という値が過度に安全側の数値である可能性があることなどが疑問点として残されている。しかしこの小木津トンネル以外では超近接発破の詳細な計測についての報告は行われておらず、大いに参考になるものと考えられる。なお、本研究で用いる入射角あるいは入射角度というのは、爆源と測点を結ぶ線が壁面法線となす角度を意味する。

若山トンネルの計測に際しては、これらの疑問点を明らかにし、さらに今後の超近接発破の参考になるようにと考え、後述のような計測を行い孔尻の厳密な特定とクラックの発生を正確に把握できるように試みた。

4. 発破計画および各種の計測計画

(1) 発破計画

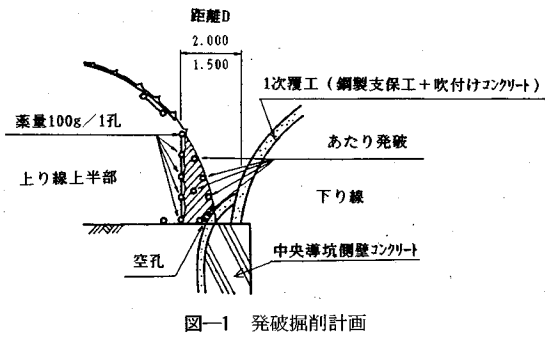
若山トンネルの掘削は地質条件の悪い下り線の掘削をまず行い、その後上り線を掘削することとした。トンネルの安定性の問題をはじめ、種々の検討を行った結果、上り線掘削時の下り線の覆工は1次覆工までとし、上り線の掘削に伴う下り線覆工の変状を観測調査するとともに、もし変状が生じた場合それに応じて適当な対処を行うこととした。これは、本トンネルのように爆源と覆工面までの距離が非常に近いケースは上述のようにこれまでほとんど施工例がなく、予測に用いた仮定が妥当でない可能性もあったためである。

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極力小さくするという前提に立ち、以下のような方針に基づくこととした。

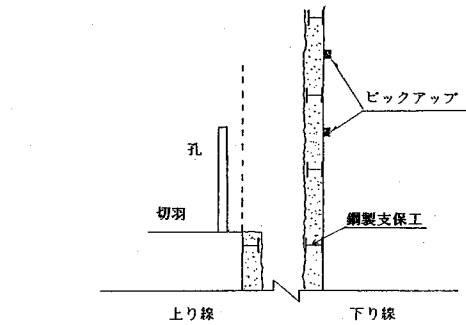
- ① 図-1に示す発破掘削計画で明らかのように、下り線側の覆工に大きな変状を与えないため、覆工面からの通常発破最短距離は2.0 m、SB孔からは1.5 mとすることを一応の目標とする。それより近い部分はブレーカーによる掘削および注意深いあたり発破とする。
- ② 実際の掘削に際しては十分な試験施工を行い観察された覆工面のクラックおよび振動速度値から薬量や発破最短距離を最終決定する。

(2) 振動計測計画

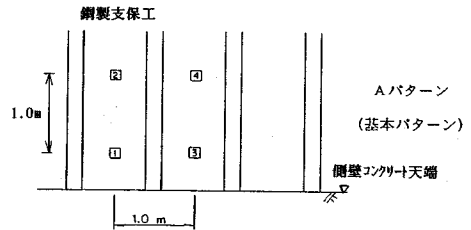
一般に発破振動による被害損傷の度合は振動速度に密接に関連するものであり、ほとんどの場合振動速度で管理を行うのが良いとされている。従って直接振動速度を計測するのが望ましいが、本トンネルのように計測位置が非常に発破域に近接した場合、大きな、しかも高周波の振動速度が発生する。そのため現在市販されている一般的な速度計では振動に対する追従性が悪く計測に問題



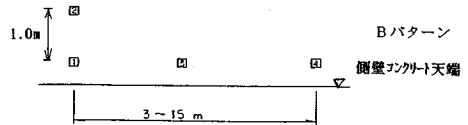
図一 発破掘削計画



(a) 平面図



(b) 縦断面 (Aパターン)



(c) 縦断面 (Bパターン)

図二 ピックアップ設置位置図

がある。そこで圧電型の大容量加速度計 (R社製測定最大加速度 1000 G) により加速度を検出し、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、さらには最大の振動速度が予測される孔尻に近い壁面では壁面に垂直な方向の振動が卓越することが報告されていることから³⁾、壁面に垂直な方向のみとしている。

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ることを基本とした。孔深さは切羽に最も近い鋼支保工からほぼ 1.5 m 程度であるため、図-2 (b) の A 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 1 m の奥側に上下に 2ヶ所の 4 点を基本とした。なお、大きな距離における振動速度を計測するため、奥行き 3~15 m の位置にピックアップを設置した例もある (B パターン、図-2 (c) 参照)。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。
- ② 100 kine 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。

(3) 爆源距離計測

本研究では、振動速度と距離との関係を正確に把握することが何より必要であり、その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。この距離計測は非常に煩雑な作業であるが、切羽面内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。これは爆源をより正確に把握するためである。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や鋼製支保工からの距

離をスケールにより測定した。

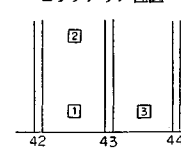
削孔位置は、当初下り線の吹付けコンクリート面からの最短距離が 2.0 m となるように設定して振動速度のデータの収集を行ったが、吹付けコンクリートに変状の発生が見られなかったためこの距離を 1.5 m にした。また上下線とも支保設計は D_{IV} となっているため、下り線の隣接鋼支保の中間に上り線掘削の孔尻が常にくるように配慮した。

(4) クラックの計測

爆薬には 2 号複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 1.8 m の位置までセメント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、水などをモルタル面に吹き付けるとい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

表—4 振動計測結果例

発破段数	薬量 (kg)	位置 1		位置 2		位置 3		位置 4		備 考
		距離 (m)	速度 (kine)	距離 (m)	速度 (kine)	距離 (m)	速度 (kine)	距離 (m)	速度 (kine)	
#18	0.2	1.66	25	2.42	17	1.84	22			クラック発生 ピックアップ位置 
#17	0.2	1.69	90	2.38	55	1.82	69			
#16	0.1	1.61	19	1.99	20	1.90	14			
#15	0.1	2.28	8	2.34	7	2.50	7			
#14	0.2	2.54	28	2.26	19	2.75	20			
MAX		1.69 m		90 kine						

へアクラックであったため測定は行わなかった。

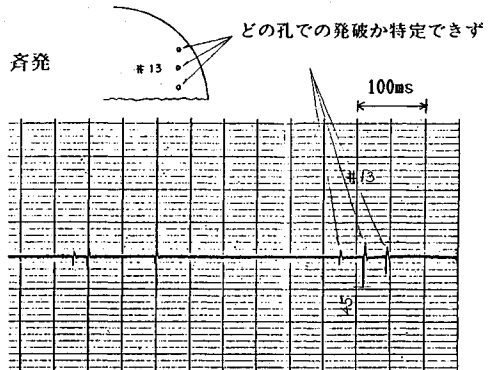
5. 計測結果および考察

(1) 装薬量、距離と振動速度との関係

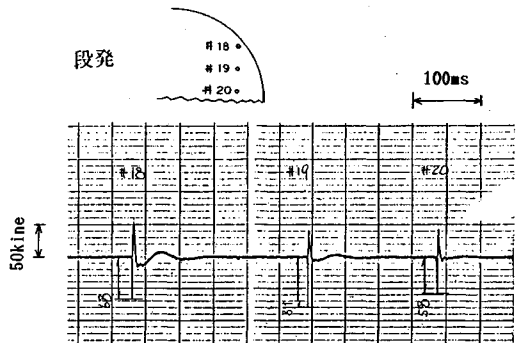
計測結果の一例を表—4に示す。表中距離は孔尻とピックアップの直線距離、振動速度は最大値を示す。

本計測において払いに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。データレコーダの記録を段発、斉発の場合についてフォトコーダーに出力したものが図—3である。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²⁾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。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の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以下の図である。図—4は計測された全データをピックアップ位置別に示したものである。ピックアップ位置の1~4は図—2にすでに示した。なお、斉発データに関しては上述のようにどの孔の発破で最大振動速度が得られたか不明なため、数孔中でピックアップに最も近い孔の距離とその薬量をデータとして用いた。図から分かるように計測結果のばらつきはかなり大きい、明らかにピックアップ位置1および2の振動速度値が大きいのが分かる。図中黒く塗りつぶしたのが斉発時のデータである。図を見て明らかなように、段発データの分布とほとんど差がない。斉発データに関しては上述のように距離・薬量と振動速度との対応が明確でないため、以後は距離・薬量と振動速度との対応が明確な段発データのみを用いて解析を行う。



図—3(a) 斉発発破における計測された発破振動例



図—3(b) 段発発破における計測された発破振動例

図—5は段発の結果を薬量別に示したものである。最も振動速度が大きいのは距離が1.08mで薬量 $W=0.3$ kgの発破である。これは観測No.3の発破で記録した値である。この発破は上述の仕様とかなり異なっているが、その理由は以下のとおりである。前々回の発破(観測No.1)で距離 D を2m以上離して行った結果、かなり当りが出た、当り発破を必要とした。そこで、距離を1mとして削孔、発破を行い、振動を計測した。この際初めてクラックが発生したため、以後は最小距離を1.5mとした。この1例を除けば、距離1.5m程度まで

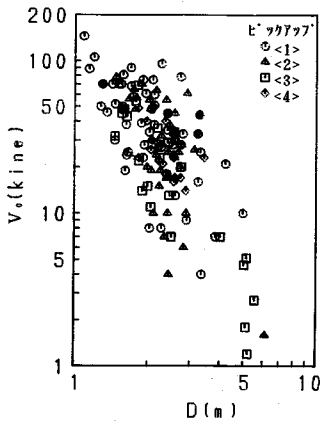


図-4 距離と振動速度の関係 (ピックアップ別) (V_0 : 観測最大速度値)

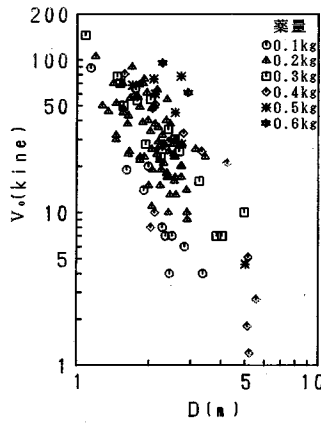


図-5 距離と振動速度の関係 (薬量別) (V_0 : 観測最大速度値)

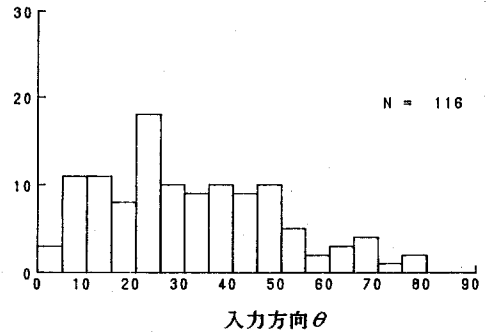


図-6 発破振動の入力方向

は $W=0.1 \text{ kg}$ または 0.2 kg を用いている。

これらのデータはいずれも計測された壁面垂直方向の振動速度であった。しかし実際の振動が入射する方向は壁面垂直方向だけとは限らない。ピックアップ位置 1, 2 の壁面垂直方向に対して振動が入力する方向をヒストグラムで表したものを図-6 に示す。5°から 50°位まではほぼ同程度に分布し、中には 80°近い角度のあるものも存在する。そのため、この入射角をどのように考えるかで結果がかなり変わるものと予想される。

これらの入射角度が振動速度に及ぼす影響を調べるため、測定した壁面垂直方向のデータより入射方向の振動速度をベクトル合成により求めた。すなわち図-7 に示すように入射角 θ で自由面に爆破衝撃波が入射する場合、ピックアップの軌道は複雑なオービットを描き、ピックアップに検出されるものはその自由面に垂直な方向の加速度成分となる。壁面に垂直に取り付けたピックアップで計測した結果と入射角の関係は必ずしもベクトル的な関係にあるとは決められないが、他に有効な方法が考えられなかったため、ここでは波動入射方向の最大速度値 V をもって評価することとし、観測最大速度 V_0 に対し、 $V = V_0 / \cos\theta$ でこの値を近似した。以降この手法により求めた速度値をベクトル合成による振動速度と称する。なお、図-7 は紙面上で描く都合上 2 次元で描いてあるが、実際の θ は当然 3 次元的に求めたものである。図-8 はこのベクトル合成により求めた段発データをピックアップ位置別に示したものである。図-5 と比べると分かるように、元のデータで振動速度が小さかった部分が上方へ (振動速度が大きくなる方へ) 移行しており、距離減衰が小さくなっていることが分かる。

ここでピックアップ位置 1, 2 で得られた元のデータおよびこれをベクトル合成したデータを用いて式 (1) の定数を求める。これはピックアップ 1, 2 に対しては比

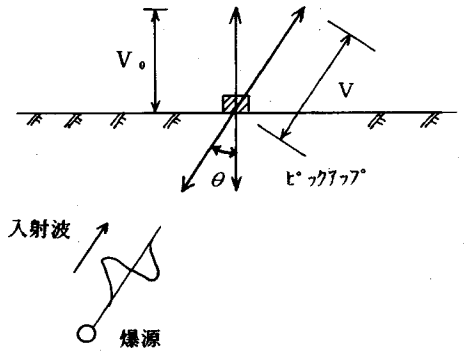


図-7 衝撃波入射方向と観測最大速度 V_0 およびベクトル合成による振動速度 V

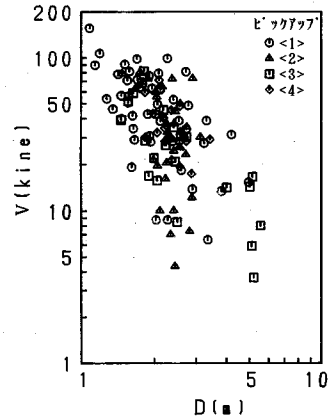


図-8 距離とベクトル合成による振動速度の関係 (ピックアップ別)

較的振動計測面への入射角 θ が小さく、かつ全発破に対して計測が行われたためこれらのデータによる定数の決定が実際的であると考えたためである。これらの段発データを用いて最小自乗法で直線回帰させると、回帰直線として元のデータ、ベクトル合成した結果についてそれぞれ次式のようなになる。

元のデータ

$$PPV_0 = 522.8W^{0.936}D^{-1.891} \dots \dots \dots (2)$$

ベクトル合成したデータ

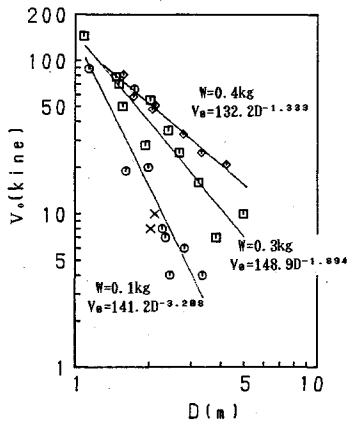


図-9 薬量ごとに見た距離と最大振動速度の関係

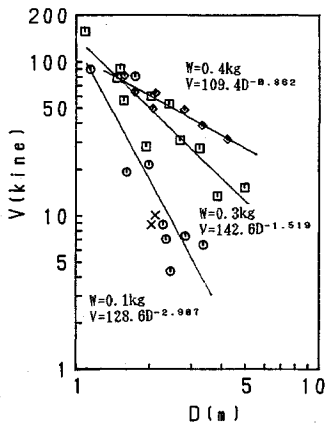


図-10 薬量ごとに見た距離とベクトル合成による最大振動速度の関係

$$PPV = 476.2W^{0.914}D^{-1.585} \dots\dots\dots (3)$$

これからも明らかなように、距離減衰を示す b の値はベクトル合成により 1.891 から 1.585 へ小さくなっており、ベクトル合成的な考え方を取ることにより、距離減衰の評価が小さくなる。先に述べた小木津トンネルにおける計測で、 b の値が 3 近くなったのは、ベクトル的な考えを取り入れなかったためであると考えられる。

すなわち、超近接発破においては、爆源や受振点の位置が少し異なっただけで、波動の入射角度が大きく異なる。そのために壁面垂直方向だけを測定したデータを用いた場合、入射角により振動が小さく測定されるという現象も、距離減衰効果の中に取り込まれてしまい、結果的に距離減衰が大きくなると考えられる。

ピックアップ位置 1, 2 で得られたデータ全ての中には各種の薬量が用いられている。そこで薬量が発破振動に及ぼす影響を明らかにするため、元のデータ、ベクトル合成したデータについて薬量毎に回帰直線を求めた。その結果は次のようになった。

元のデータ

表-5 クラック観察結果の一覧

観測No.	最短距離 D (m)	最大振動速度 V_0 (kine)	薬量 W (kg)	クラック		備考
				有 無	長さ(cm)	
1	2.28	32	0.2	無		
2	2.72	78	0.5	無		
3	1.08	145	0.3	有	100	
4	2.28	95	0.6	有	110	
5	2.07	48	0.4	無		
6		45		無		斉発
7		44		無		斉発
8		33		無		斉発
9	1.57	81	0.4	有	220	
10	1.78	54	0.3	無		
11	1.91	75	0.2	有	150	
12		70		無		斉発
13	1.55	70	0.2	有	55	
14	1.19	105	0.2	有	65	
15	1.69	90	0.2	有	115	
16	1.14	88	0.1	有	60	

$$W=0.1\text{kg } PPV_0 = 141.2D^{-3.208} \dots\dots\dots (4)$$

$$W=0.2\text{kg } PPV_0 = 104.2D^{-1.652} \dots\dots\dots (5)$$

$$W=0.3\text{kg } PPV_0 = 148.9D^{-1.894} \dots\dots\dots (6)$$

$$W=0.4\text{kg } PPV_0 = 132.2D^{-1.333} \dots\dots\dots (7)$$

ベクトル合成したデータ

$$W=0.1\text{kg } PPV = 128.6D^{-2.987} \dots\dots\dots (8)$$

$$W=0.2\text{kg } PPV = 105.1D^{-1.431} \dots\dots\dots (9)$$

$$W=0.3\text{kg } PPV = 142.6D^{-1.519} \dots\dots\dots (10)$$

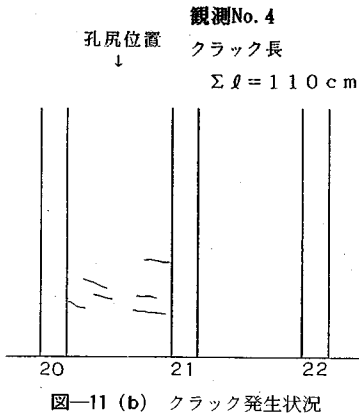
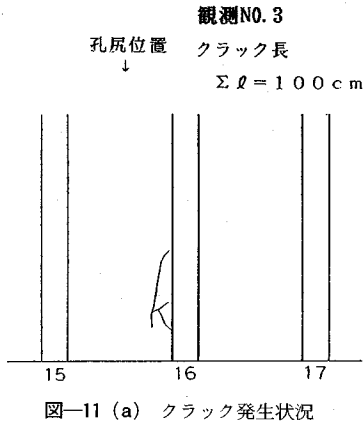
$$W=0.4\text{kg } PPV = 109.4D^{-0.862} \dots\dots\dots (11)$$

これらの結果から明らかなように、 $W=0.2\text{kg}$ と $W=0.3\text{kg}$ の直線の傾きはほぼ等しいので、元のデータ、ベクトル合成したデータ共に分かりやすいように $W=0.2\text{kg}$ を除いてまとめて図示したものを図-9, 図-10 に示す。

これらの図から薬量毎に回帰直線の勾配に明らかな差がみられ、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、薬量が大きくなると発破の爆源が順次移動する効果ならびに薬長が長くなるため、点振源から線振源へと変化することなどが考えられる。一般的に超近接発破では本研究で用いた程度の薬量しか用いることができないが、このような場合距離減衰の効果が大きく、発破による振動を正しく予測し制御する観点からは考慮すべきことと言えよう。

(2) クラック

クラック観察を行った 16 ケースの結果のまとめを表



—5に示す。表中振動速度 V_0 はそれぞれのケースでの観測最大振動速度、距離 D はその振動に対応する発破の孔尻とピックアップとの直線距離、薬量はその孔の薬量である。なお、表—5中の振動速度として観測最大値 V_0 を用い、ベクトル合成した速度を用いていないのは、斉発の場合どの孔の発破で最大速度値を記録したかが不明なためである。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のスケッチの一部を図—11 (a), (b) に示す。クラックはすべてへ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上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。このクラックの確認においては、発破前に孔尻真横の数支保工区間について目視による観察を行い、クラックの有無を調べ、発破後新たに発生したクラックを調査してクラック発生を確認を行っている。

図にも示したように、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いる。しかし、中には一区間先の支保工間やあるいは一つ遅れの支保工間にもクラックが発生する場合も認められた。これらも主として発破によるものと考えられるが、一部には発破前の調査

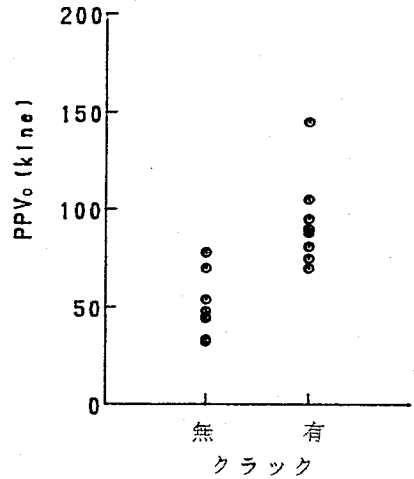


図-12 クラックの発生有無に対応する観測最大振動速度

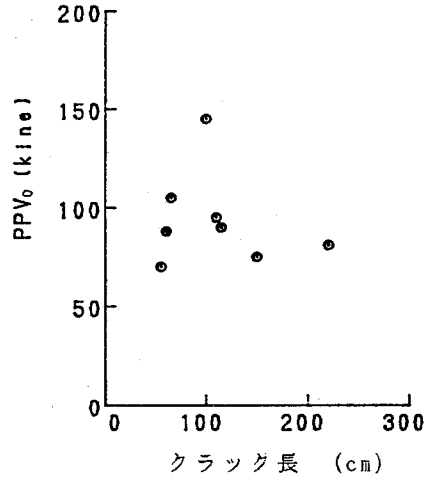


図-13 発生したクラックの延長に対応する観測最大振動速度

において調査漏れがあったものや上り線トンネルの掘削に起因する岩盤のゆるみ等の影響によるものと解釈すべきものも含まれているであろう。また、クラックの方向は水平方向が多かったが、図—11 (a) に示すように鉛直方向のクラックも見受けられた。クラックの方向と振動速度等との関連は見い出せなかった。

いま各発破シリーズにおける壁面垂直方向の最大振動速度とクラックの発生有無を示したものが図—12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70 kine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80 kine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70 kineを限界として良いものと思われる。

またここで発破により生じる壁面の最大振動速度は必

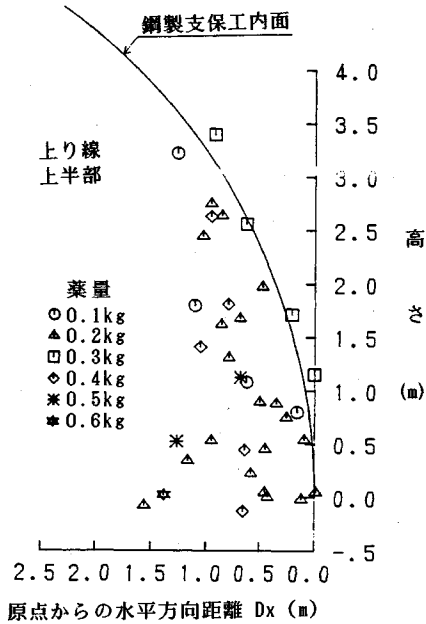


図-14 薬量ごとに見た孔尻位置の分布 (クラックの発生した場合)

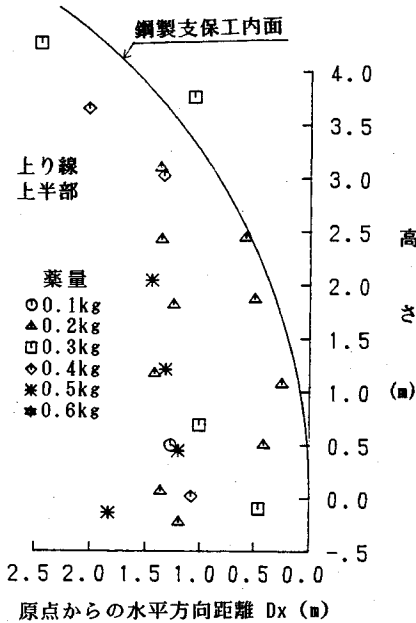


図-15 薬量ごとに見た孔尻位置の分布 (クラックの発生しなかった場合)

ずしも孔尻の真横の支保工間に生じるとは限らない。しかし、クラックの発生の認められた8ケース中、7ケースにおいて孔尻の真横の支保工間にクラックが認められたこと、および観察された最大振動速度とクラックの発生が非常によい関連を持つことから、発破振動管理のための振動観測は孔尻の真横の支保工間で行えば十分であ

ると考えられる。

図-13には発生した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、クラックの成長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。

クラックの発生について更に詳しく検討を試みる。図-14、図-15にクラックが発生した場合、発生しなかった場合に分けて発破孔の孔尻位置を示している。図の横軸、縦軸は上り線の鋼製支保工の前面踏前を座標原点としたときの原点からの距離を示す。また図中の曲線は鋼製支保工の内側の曲線を示す。

図-14にはクラックが発生した8グループの発破が含まれているが、それぞれのグループにおいてどの孔の発破によりクラックが発生したかは明らかでない。また図-15の8グループの発破ではどの孔の発破によってもクラックは生じなかったことが認められる。ここで図-14と図-15のデータの分布は原点からの水平方向距離 (D_x) が1m程度で分かれるようである。これらの図よりクラック発生の可能性を小さくするには D_x が1m以上(下り線の覆工から1.5m以上)、またクラックを発生させないようにするには D_x が1.5m以上(下り線の覆工から2.0m以上) 離すことが必要と考えられる。

また図-14では D_x が1m以内では薬量が0.1kg, 0.2kgであってもクラックの生じた可能性があることが示されている。これに対し、図-15では D_x が1m以内で薬量0.2kgが4例、0.3kgが1例見られ、 D_x が1mより大きくなると薬量が0.3kg以上のものが多くなるがクラックは発生していない。以上を総合すると、クラックを生じさせないためには D_x が1m以内では火薬を使用すべきでないといえる。

6. 結 論

若山トンネルの上り線上半掘削時における下り線吹付けコンクリートに発生する発破振動の計測解析を行い、検討した結果次のことが明らかになった。

1) 振動速度 (PPV) と距離 (D) および孔当り装薬量 (W) との関係は壁面垂直方向で計測された振動速度値を用いると下式となった。

$$PPV_0 = 522.8W^{0.936}D^{-1.891}$$

また、波動の入力方向を考慮し、ベクトル合成の考えを取り入れて、振動入力方向の振動速度を考えた場合、次式となる。

$$PPV = 476.2W^{0.914}D^{-1.585}$$

ベクトル的な合成を考慮すると、上述の2式を比較して分かるように距離減衰評価が小さくなる。近接発破では爆源と受振点の位置関係が少し異なるだけで、入力角

度に大きな違いが生じ、そのために壁面垂直方向だけを測定したデータを用いた解析では入射角により振動が小さくなる現象も距離減衰効果の中に取り込まれ、結果として距離減衰を大きく評価する可能性がある。

2) 吹付けコンクリートのクラック発生はほとんどの場合、発破孔横の支保工間で生じた。このことから発破振動管理のための振動計測は孔尻の真横の壁面で行うのが实际的であると考えられる。

3) 吹付けコンクリートにクラックを発生させる壁面に垂直な方向の最大振動速度は70 kine程度が下限であり、それ以上ではクラックが生じる可能性がある。なお、振動速度と変位の程度（クラックの長さ）との関係は明確には認められなかった。

4) 今回多かった装薬量0.2～0.3 kgについていえば、発破孔と下り線吹付けコンクリートとの最短距離が2.0 m以上の場合にはクラックはほとんど発生しなかった。また、1.0 m～1.5 mの場合にはクラックの発生したケースが多かったが、このクラックはいずれもヘアークラックであった。発破により掘削予定面まで掘削できなかった場合には、油圧ブレイカーによる施工に多大な時間を要するため当り発破を行わざるを得ない。従って、掘削後に二次覆工を打設することから、吹付けコンクリートには多少のクラックの発生を許容するとすれば、1.5 m前後で施工し、必要に応じて当り発破を行うのが良いと考えられる。

5) 従来発破振動では同段の総薬量を用いて振動予測を行っていたが、近接発破では同段であっても雷管の秒時に誤差があり同時起爆していない。そのため、振動予測において段当り薬量を用いることには問題がある。

6) 近接発破では爆源と受振点との関係でその距離や波動の入射角が異なる。そのため、爆源が少し移動しただけで最大振動速度はかなり異なり、発破設計ではその

点に対する配慮が必要である。

7. あとがき

以上のように超近接発破を行った若山トンネルの計測結果をまとめた。この解析から得られた主要な結論は、先行トンネルのライニングに及ぼす発破の影響は70 kine程度までは大丈夫であること、注意して発破を行えば1.5 m近くまで先行トンネルのライニングにクラックを発生させず発破が可能なこと、孔当り薬量を用いて振動予測が可能なこと、超近接発破では距離減衰の効果の予測が非常に難しいということが挙げられる。

これらを総合すると、従来上下線のトンネル間隔として壁面間20 m程度を用いていたが、発破の影響という観点からすると、かなり小さい値（最小1.5 m程度まで）でも掘削は可能と考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、日本道路公団広島建設局徳山工事事務所長青木秀郎氏および徳山工事事務所の皆様方に多大な支援をいただいた。また発破振動の計測にあたり、福川工事共同企業体の近藤所長および所員の皆様の多くの協力を得た。本論文をまとめるにあたり山口大学工学部社会建設工学科中尾絵理子教員の助力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本道路公団徳山工事事務所：山陽自動車道若山トンネル計測結果解析業務報告書，1990。
- 2) 東急建設株式会社：小木津トンネル発破試験報告書，1983。
- 3) 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。

(1991.12.6受付)

VIBRATION AND CRACKING OF TUNNEL LINING DUE TO ADJACENT BLASTING

Ken-ichiro NAKANO, Shigeru OKADA, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

On the construction of very closely located twin tunnels, the blasting vibration from the second tunnel may damage the lining of the first tunnel. However, vibration data related to actual damage are very few and the relation between the magnitude of the vibration and the cracking of the concrete lining has not been discussed enough.

In this study, the blasting vibration and the crack formation on the shotcrete lining of the first tunnel were carefully recorded. The closest distance between the blasting point and the shotcrete lining surface was approximately 1.0 m and the maximum vibration velocity reached to 145 cm/sec. Cracking on the shotcrete lining was observed when the maximum vibration velocity exceeded 70 cm/sec.