

発破振動データを活用した地山弾性波速度の評価手法の提案

— 県道山口宇部線道路改良工事 小郡トンネル —

Proposing a Method for Evaluating the Seismic Velocity of the Ground Using Blasting Vibration Data (Improvement Project of Ogori Tunnel on Yamaguchi Ube Prefectural Highway)

川 端 康 夫^{※1} 筒 井 隆 規^{※2} 小 林 真 人^{※3}
Yasuo Kawabata Takanori Tsutsui Masahito Kobayashi

【要旨】

発破工法でトンネル掘削を行う場合、特に坑口近傍では、発破振動が周辺住宅地での居住性に与える影響を監視しながら施工する。具体的には、対象案件の近くに振動速度計を設置し、発破毎に振動速度を計測し、規制値との比較を行う。一方、坑口近傍は、地山の変化が複雑であることから、その状態を早期にかつ的確に把握し、適切な支保、工法選定を行うことが必要とされる。通常、計画段階で弾性波探査をはじめとする物理探査やボーリング調査など、各種調査が行われるが、その精度には限界があるため、やはり施工中に得られる切羽観察や計測データが重要視される。しかしながら、これらにしても切羽前方地山を直接探索することは難しい。

ここでは、発破振動管理の中で得られる振動データを活用し、切羽前方の地山弾性波速度を簡便に算出する手法を考案し、現場でその有効性を確認した。坑口近傍の地山性状の変化を一定の頻度で探索できることから、変化の激しい坑口近傍の地山評価の手段として活用できるものと考えている。

【キーワード】 発破振動 振動速度 弾性波速度 弾性波探査

1. はじめに

トンネルを安全かつ経済的に施工するためには、掘削中の切羽前方の地山特性を早期に把握することが重要である。掘削地山の推定は、計画段階で実施される地上踏査、弾性波探査、電気・電磁波検層などの物理探査やボーリング調査で行われる他、掘削中の切羽観察や各種計測結果、必要に応じて実施される水平ボーリングなどの結果より、総合的に判断する。しかしながら、特にトンネルの坑口近傍は、地形や地質構造が複雑であり、結果的に思わぬ変状や沈下、地山崩壊に遭遇することがある。また、仮にその兆候があっても、直ちに支保の変更や補助工法の適用を検討する判断材料が得られずに対応が遅れることがある。このような状況を打開する方法の一つとして、発破振動データを活用した地山弾性波速度の評価手法を提案する。

発破工法でトンネル掘削を行う場合、特に坑口近傍では、発破振動が周辺住宅地での居住性に与える影響を監視しながら施工する。具体的には、対象案件の近くに振動速度計を設置し、発破毎に発破振動を計測し、規制値との比較を行う。この測定手法を応用し、坑口近傍の任意の計測点と切羽に別途振動速度計を設置し、これら計測装置を同期させることで、計測点間の弾性波速度を測

る手法を考案した。具体的には、心抜き発破を単独で行い、そのときの各計測点での振動の発生時間を記録し、時間差と離隔距離から弾性波速度を算出する、極めて簡便な手法である。これらの計測を切羽の進行に伴い一定頻度で行うことで、坑口までの地山性状の変化を早期に把握できるものと考えている。

ここでは、発破振動の測定結果を活用した地山弾性波速度の評価手法の概要と小郡トンネルでの実施例について報告する。

2. 弾性波探査の種類と位置づけ

トンネルの地質調査における弾性波探査は、計画段階で主に実施される屈折地震探査法とトンネル掘削中に断層等の有無を調査する反射地震探査法、直接切羽で行われる簡易弾性波測定法などが挙げられる。

屈折地震探査法¹⁾は、トンネルの地層がほぼ地上より層状に深部に至るにつれ硬質になると想定し、図-1に示すように、地層内部で振動が伝播する際の伝播時間を測定する。起振点からの振動を複数の受信装置(5~10mピッチ)で計測し、これらの結果を分析(萩原の手法やトモグラフィ的手法などによる解析)し、地層深部の弾性波速度を特定する。地表面からトンネルの路線位置

1. 土木事業本部 土木技術部 環境リニューアルG 2. 西日本土木支社 中四国土木事業部 小郡トンネル作業所
3. 技術研究所 第二研究室

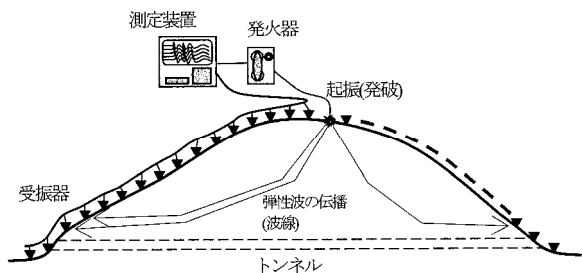


図-1 弾性波探査(屈折地震探査法)¹⁾

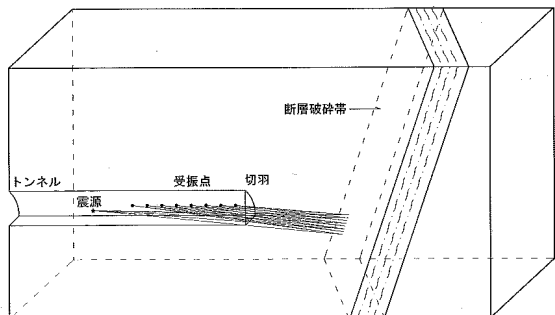


図-2 切羽前方探査(反射地震探査法)²⁾



写真-1 岩判定(簡易弾性波の測定)

の弾性波を探査するため、おのずと精度には限界がある。探査震度が150mを超えたり、弾性波の大きい層の下に低速度帯があるような逆転層での適用は困難を伴う。しかしながら、線上構造物のトンネルでは、効率よく全体を網羅する重要な調査項目として位置づけられている。

反射地震探査法²⁾は、切羽前方探査に適用されるTSP(Tunnel Seismic Prediction)やHSP(Horizontal Seismic Profiling)と呼称される手法で、起振点に対し、複数の受信点を設置する場合と逆に複数の起振点を設ける場合とに分けられるが、いずれも図-2のように断層からの反射波を分析し、その位置を特定する。これらの手法は、複数の起振点と受信点が必要とされ、その分析には専門的な知識を求められることから、日常の現場管理に適用することは困難である。

これらに対し、かつて岩判定(支保パターンを選定作業)の指標として、写真-1に示すような簡易弾性波測定(ハンマーと受信装置が結線され、切羽表面をハンマリングすることによって受信点までの振動の伝播速度を測定する手法)が適用されることがあった。しかしながら、掘削によって亀裂が開いた切羽表面の伝播速度を測定することから、実際の地山の弾性波速度より小さく、切羽の状態を過小評価することや切羽で危険を伴う計測作業となることなどから、近年適用されなくなっている。

3. 小郡トンネルの工事概要

小郡トンネルの工事概要と起点側坑口付近における地形・地質および施工実績(切羽観察結果、発破振動データ)を示す。

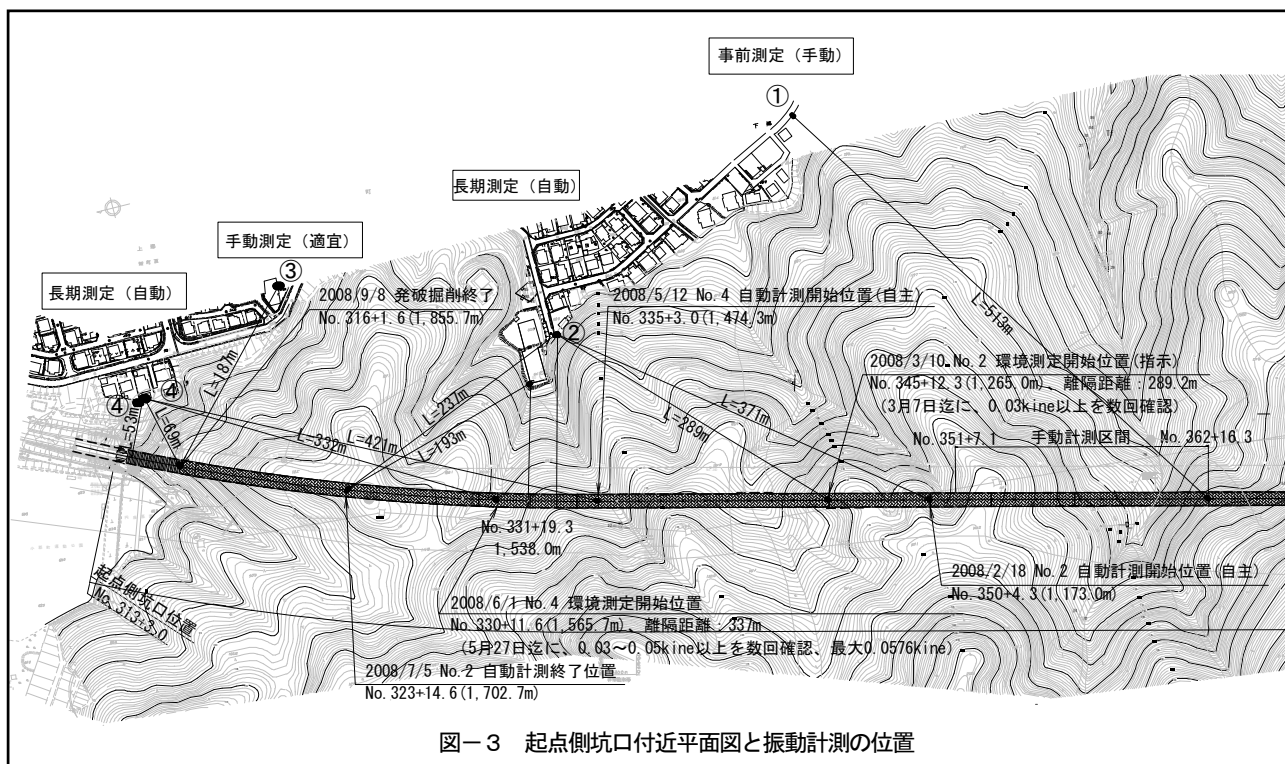


図-3 起点側坑口付近平面図と振動計測の位置

3.1 工事概要ならびに起点（出口）側坑口の地形

工事名 県道山口宇部線道路改良（小郡トンネル）工事
発注者 山口県山口土木建築事務所
施工者 飛鳥建設・フジタ・藤本工業・栗本特定建設工事共同企業体

工事場所 山口市小郡上郷円座～小郡下郷字迫田式
工期 平成18年10月11日～平成22年1月8日
諸元 延長1,915m, 掘削断面79.1m², 内空断面60.2m²
施工法 NATM 発破掘削（主要部：補助ベンチ付き全断面掘削工法, 両坑口部：上下半交互併進工法）, 機械掘削工法（起点側坑口部：上下半交互併進工法）

トンネルルートは、禪定寺山（標高392.2m）東側の山腹斜面下を標高約50mで北北東（起点側）から南南西（終点側）に向けて通過する。土被りは、ルートが山腹緩斜面を通過するため、全長に渡り50～150mで、終点側に100～150mが集中する。トンネルルートの地質は、安山岩などの火成岩や火砕流堆積物である凝灰岩を主体とした中生代白亜紀周南層群の禪定寺層からなっている。ルート全体にわたって、灰色から灰白色をした堅質で緻密な凝灰岩に覆われている。また、起点側坑口付近には、禪定寺層の堆積岩が分布している。

掘削は、終点側から着手し、起点側に向け施工した。図-3に起点側坑口付近の地形図を示す。起点側坑口近傍は、住宅地が広がっている。坑口から380m付近では、トンネルに向け入り込んだ谷地部があり、坑口同様に住宅地が連なっている。当初計画では、住宅地に対する発破振動の影響や、起点側坑口部では堆積岩が予想されていたことから、坑口から145mまでを発破工法とし、あとは機械掘削を予定した。

3.2 切羽の特徴および切羽評価点の変遷

起点側坑口近傍として、No.350+00～No.313+3.0（起点側坑口）、延長約740mにおける切羽評価点の変遷を図-4に示す。当区間の地質は、火砕流堆積物である凝灰岩が主体で、岩質は比較的に堅固だが、細かい亀裂を内包しており、鉛直方向で、かつトンネル軸方向に並行した形で顕在化していた。また、熱変質を受けた箇所が定期的に出現し、部分的に切羽の中に変質粘土が出現し、切羽の安定性に影響を与えていた。これら、亀裂の頻度・状態、変質粘土の分布の範囲・状態が切羽評価点を左右していた。写真-2に谷地部近傍のNo.335付近の切羽状況写真を示す。茶褐色の凝灰岩層では、縦亀裂が1～5cmと細かく分布しており、比較的に健全な白灰色の層と鉛直方向の互層状態で、亀裂には薄く粘土が介在していた。

切羽評価点は、No.350付近では、30～50の範囲で分布しているが、谷地部の影響を受けるNo.340からは、30前後と低くなり、谷地部周辺のNo.330～325では、10～20まで下がっている。その後、谷地部を抜けてからは、

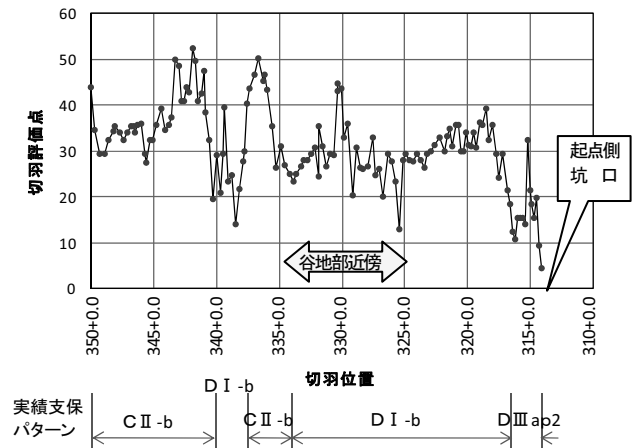


図-4 切羽評価点の変遷



写真-2 NO.335+1.8での切羽状況（切羽評価点31）

一旦30を超えて大きくなり、坑口の手前60mのNo.317から再び下がりをはじめ、坑口に至っている。

3.3 発破振動の出現状況

起点側坑口近傍では、住宅地での発破振動の居住性への影響の把握、発破制御の適用や機械掘削の開始位置の判定のため、谷地部のポイント②（以下P②）と坑口部近傍のポイント④（以下P④、図-3参照）で、発破による振動速度の測定を自動計測で行っている。発破による振動速度の計測結果と規制値との比較を行い、発破自体の妥当性の判定を行っている。図-5にP②における心抜き発破における振動速度と離隔距離との関係を、図-6にP④における関係を示す。なお、通常、発破振動管理では、自由面のない「心抜き発破」と、心抜き後自由面を有する「払い発破」に分けて管理するが、ここでは代表値として「心抜き発破」での計測結果を示す。なお、参考として図中に累乗近似曲線（ $Y = aX^b$ ）を併記する。

P②は、トンネルと法線方向で離隔距離150.9mに位置しており、最小離隔距離に近くなるにつれ、振動速度の分布は僅かながらも大きくなっている。谷地部を超えてからは、一旦急激に大きくなり、その後離隔距離の増加に伴い、小さな値となっている。P④は、離隔距離の縮小に伴い漸増し、坑口近傍では急激に増加している。

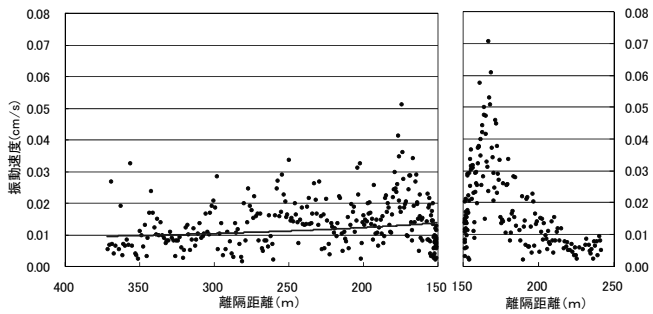


図-5 P② 心抜き発破の振動速度と離隔距離の関係

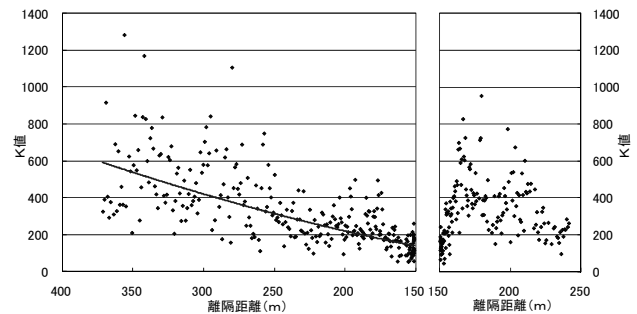


図-7 P② 心抜き発破のK値と離隔距離の関係

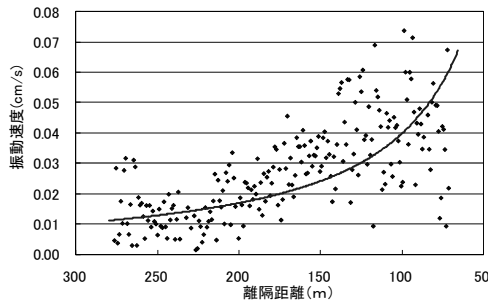


図-6 P④ 心抜き発破の振動速度と離隔距離の関係

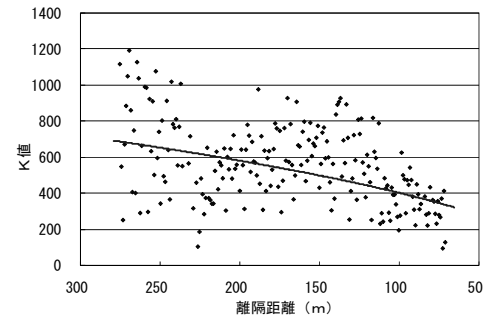


図-8 P④ 心抜き発破のK値と離隔距離の関係

発破振動の大きさは、切羽との離隔距離、使用する装薬量、および介在する地山の性質の影響を受ける。このため、それぞれの関係は、式(1)の発破振動予測式として関連づけられている³⁾。

$$V=K \times W^m \times D^n \quad (1)$$

ここで、 W は装薬量(kg)、 D は発破点と受信点との距離(m)、 K, m, n はそれぞれの係数であり、本式は、発破振動速度が装薬量、距離に支配されることを示す経験式である。特に K 値は、発破対象(明かり、トンネル)、発破位置(心抜き、払い)、発破点と受信点の中間地山の種類、状態(振動の伝わりやすさ)に支配される係数とされている。ここでは式(1)を K 値の式とし、 m, n は、経験値の $m=3/4, n=2$ を用い³⁾、図-5、図-6の測定結果を逆算した。離隔距離と K 値の関係をそれぞれ図-7、図-8に示す。

P②の K 値は、離隔距離が縮小するにつれて漸減し、最近傍の150mで100を下回っている。また、最近傍を越えてからは、急激に大きくなっている。この結果から、谷地部が近づくにつれて振動の伝わりにくい地山、つまり地山状態が悪くなり、谷地部を超えてからは、一旦地山状態が改善していることが伺える。

P④の K 値は、離隔距離が100m程度までは、ほぼ一定の値で変遷し、100m以下では漸減している。しかしながら、結果的にP②ほど小さくなることはなかった。

今回の計測は、発破点と受信点との中間地山を評価するため、切羽の状態と直接的には連動しないものと思われる。しかしながら、切羽評価点が谷地部近傍で低くなり、谷地部を超えた段階で若干大きくなっていること、坑口近傍までは、一定の値が続き、坑口近傍で急激に減

少していることなどから、その傾向は K 値の分布と一致しているものと判断できる。

これらの結果を踏まえ、発破振動データを活用した地山弾性波速度の新たな評価手法を検討した。

4. 発破振動データを用いた地山弾性波の評価

4.1 地山弾性波の測定位置

P②での振動速度の計測結果から、当該地のような複雑な地形では、切羽が計測ポイントの手前側(終点側)にある場合と奥側(起点側)にある場合で、振動速度の出場状況が異なることが確認された。中間地山での直接的な地質調査が行われていないため、その原因を特定することは難しいが、谷地部手前側の中間地山が振動の伝わりにくい不良地山で、谷地部奥側が比較的良好な地山であったことが予想された。ここでは発破の振動速度の計測で、中間地山の弾性波速度を算出し、地山特性を評価する試みを行った。

図-9に地山弾性波を測定した切羽の位置を示す。調査位置(1)は、P②最近傍の手前側に切羽があるNo.335+6.6~9.0間の3箇所、切羽とP②までの中間地山の弾性波を測定している。調査位置(2)は、P②最近傍の奥側に切羽があるNo.327+10.6~328+9.6間の3箇所、切羽とP②、P④のそれぞれの中間地山の弾性波を測定した。

4.2 弾性波速度の測定方法

以下に今回実施した地山弾性波速度の測定手順を示す。

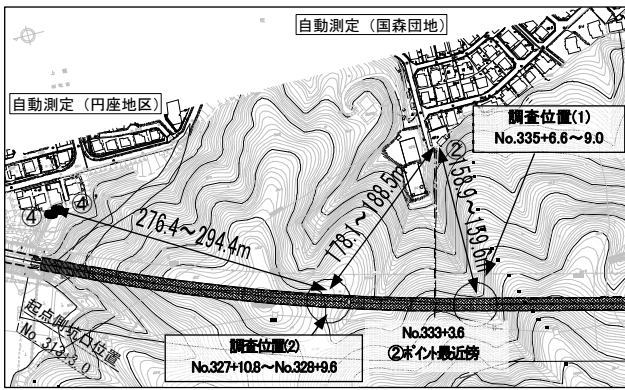
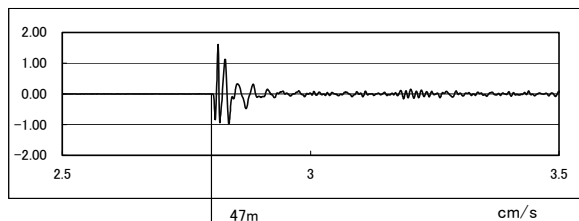


図-9 地山弾性波の測定位置

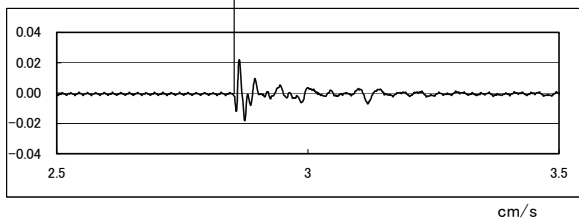
2008/6/11 10:28:00

項目	切羽Z方向	測点②Z方向
単位	cm/s	cm/s
最大値	1.5859	0.0219

切羽Z



測点②Z



離隔距離	遅延時間(ms)	弾性波速度(cm/s)
178.1	47	3789

図-10 切羽ならびに計測ポイントでの振動速度の測定と遅延時間 調査位置(2)-P②間

- STEP1 : 切羽端部と計測地点 (P②, P④) に振動速度計を設置する。
- STEP2 : 切羽位置でデジタルレコーダ 2 台にパルス信号を入力し、計測開始時間の同期を行ったのち、サンプリング 1/1000 秒で連続測定する。
- STEP3 : 1 台を切羽端部の振動計に接続、もう 1 台を各計測地点の振動計に接続する。
- STEP4 : 切羽で芯抜きをみの単発発破を行い、振動速度波形を切羽ならびに計測地点で記録する。
- STEP5 : 両地点の振動波形の立ち上がり時刻を読み取り、切羽での発破時刻と計測地点での振動到達時刻との遅延時間より伝播速度を求める。

代表的な事例として、調査位置(2), P②での測定結果を図-10に示す。発破振動波形の立ち上がり時間のずれが伝播時間を示す。

4.3 弾性波速度の計測システム

振動速度計は、ジオスペース社製の振動速度計GS-11D

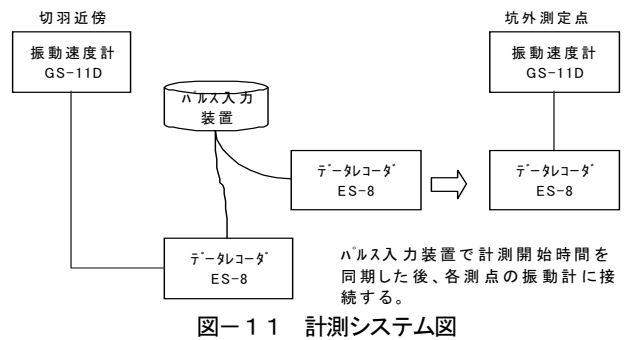


図-11 計測システム図



写真-3 切羽での振動速度計の設置状況

を使用し、これらを切羽端部および坑外計測地点に設置する。さらに記録用のデータレコーダを2台、パルス入力装置に接続し、計測開始時間を同期させた後、連続測定中の状態で切羽端部および坑外計測地点の振動計に接続し、発破振動を計測する。図-11に計測システム図を、写真-3に切羽での振動速度計の設置状況を示す。

4.4 地山弾性波の測定結果

工事着手前の事前調査で行った弾性波探査(調査範囲 No.321+15.0~334+5.0:延長 250m)では、概ね 3.0~4.0km/s と評価された地山であった。今回の調査結果では、調査位置(2)では、P②, P④ともに 3,500~3,900m/s と、事前調査とほぼ同程度の値が確認されたが、調査位置(1)とP②間では、1,600~2,100 m/s と低い値が測定されている。これは、調査位置(1)とP②間の中間地山が、当初想定したよりも脆弱であったのに対し、調査位置(2)では、P②, P④の中間地山が、当初想定したものと同様に比較的健全な地山であったことを裏付けている。また、この結果は、図-7に示すP②のK値の分布傾向(離隔距離減少過程で漸減したが、離隔距離増加過程で上昇する傾向)とも符合している。つまり、離隔距離の減少過程では、地山状態が悪くなったことで、弾性波速度も、さらに振動速度の予測式(1)より逆算した、地山の振動伝播特性に関係するK値も小さくなった。増加過程では、中間地山が健全化したことで、弾性波速度とともにK値も大きくなったものと想定される。また、調査位置(2)とP④

表-1 調査位置(1)とP②の中間地山での測定結果

番号	発破時刻	発破位置	距離距離 (m)	遅延時間 (m s)	弾性波速度 (m/s)
No.1	5/10 7:24	335+9.0	159.6	97	1,645
No.2	5/10 11:20	335+7.8	159.3	75	2,124
No.3	5/10 15:10	335+6.6	158.9	87	1,826
平均					1,865

表-2 調査位置(2)とP②の中間地山での測定結果

番号	発破時刻	発破位置	距離距離 (m)	遅延時間 (m s)	弾性波速度 (m/s)
No.1	6/11 10:28	328+9.6	178.1	47	3,789
No.2	6/16 19:54	327+13.6	186.7	51	3,661
No.3	6/17 7:23	327+10.6	188.5	50	3,770
平均					3,740

表-3 調査位置(2)とP②の中間地山での測定結果

番号	発破時刻	発破位置	距離距離 (m)	遅延時間 (m s)	弾性波速度 (m/s)
No.1	6/11 10:28	328+9.6	294.4	75	3,925
No.2	6/16 19:54	327+13.6	279.4	78	3,582
No.3	6/17 7:23	327+10.6	276.4	77	3,590
平均					3,699

の中間地山が比較的に大きな弾性波速度となったのも、この区間の地山が坑口近傍まで安定していたことが反映されたものと想定される。

5. 発破振動データによる地山弾性波速度評価手法の活用検討

5.1 活用方法の検討

今回提案する弾性波速度評価手法は、測定が簡便なことから、日常管理の中で弾性波速度の変遷を把握することができる。図-12に示すように坑口近傍の複雑な地形・地質や断層を対象とし、坑口近傍やボーリング孔などに予め振動速度計を設置し、切羽の進行に伴い、弾性波速度の変化を管理する。弾性波速度が急激に変化する場合は要注意であり、緩慢に変化する場合は、他の地質情報と併せて、地質の変化を特定する根拠となる。また、岩判定のための基礎資料としても活用できる。

5.2 今後の課題

(1) 測定方法について

小郡トンネルでは、切羽と地上部に設置した振動速度計を同期させた上で、心抜き単独で発破を掛け、振動速度の発生時刻差を測定している。このような特殊な手法では日常管理に適用できない。今後は、発破時刻の管理

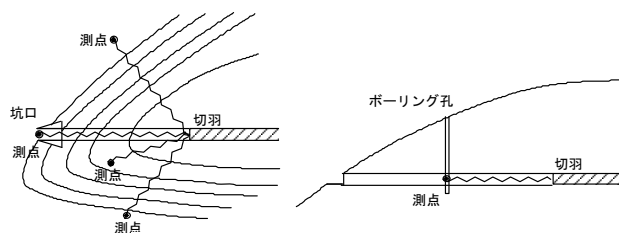


図-12 地山弾性波速度の測定方法

を発破スイッチと連動させる方法を検討し、地上部の計測位置での発破振動到達時刻の測定のみで遅延時間を算定して行きたいと考えている。

(2) 地質が複雑に変化する場合について

切羽前方で地質が複雑に変化する場合、弾性波速度がどのように変化するかは不明である。弾性波は、最短距離で伝播するのではなく、良質な地山を経由して伝播することから、切羽前方に不良地山が近づく場合は、急激に弾性波速度が小さくなるものと想定される。今後は、実績を踏まえて、これらの特性を把握して行く必要がある。

6. 結論

今回提案した地山弾性波速度の評価手法は、小郡トンネルで行った住宅地に対する発破振動管理の中で派生したものである。ここで得られた知見を以下に示す。

- 1) 発破振動管理の中で得られる振動データを活用し、切羽前方の地山弾性波速度を算出する手法を提案した。
- 2) 発破による振動速度の測定で、地山の弾性波速度を算出することができ、一定の範囲の地山状況の評価が行えることが確認できた。
- 3) 今回の弾性波速度の評価方法は、P②のような特異な地形、地質条件における振動伝播特性の解明、強いては地質状況の変化の想定に有用である。
- 4) 本手法は、未掘削の前方地山の地質状況を推定する手段としても活用できるものと考えている。

【参考文献】

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー第18号「より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて」、pp.59-60, 2007.
- 2) 物理探査学会：新版物理探査適用の手引き「土木物理探査マニュアル」、pp.413-414, 2008.
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネル爆破技術指針、pp.142-147, 1982.

Summary Effects of blasting vibration on the habitability of nearby residences should be monitored when excavating a tunnel by blasting, particularly near the tunnel entrance. Seismic velocity is measured for each blast using velocity measuring transducers installed near structures of interest, and is compared with the standard value. Because the strata of the ground change complicatedly near the mouths of a tunnel, the changes need to be correctly understood at early stages to select appropriate supports and tunneling methods. Various kinds of surveys, such as boring surveys and seismic prospecting and other kinds of geophysical exploration, are commonly conducted at the design stage, but their precisions are insufficient, and thus observation of the cutting face and measurement data obtained during execution are also carefully investigated. However, the surveys cannot make a direct search of the ground ahead of the cutting face.

The authors devised a simple method for estimating the seismic velocity of the ground ahead of the cutting face by using vibration data obtained while controlling blasting vibration. The method can prove the changes of the strata near the mouths of a tunnel at a certain frequency and is thus useful for evaluating the ground near the mouth, where the strata change intensely.

Key Words : blasting vibration, peak particle velocity, seismic velocity, seismic survey