

ILC 施設の施工計画立案のための地山評価と 発破振動評価に関する調査研究

Research on Evaluation of the Ground and Evaluation of Blasting Vibration for Planning of
Construction of ILC Facility

小林 真人^{*1} 兼松 亮^{*2} 金子 伸^{*3} 森永 博^{*4} 川端 康夫^{*5}
Masahito Kobayashi Kiyoshi Kanematsu Shin Kaneko Hiroshi Morinaga Yasuo Kawabata
佐貫 智行^{*6} 京谷 孝史^{*6} 吉岡 正和^{*7}
Tomoyuki Sanuki Takashi Kyoya Masakazu Yoshioka

【要旨】

ILC は良好な岩盤（人首花崗岩体、千厩花崗岩体、折壁花崗岩体）が広く分布する北上エリアを候補地として計画されている。計画では初めに 20km のトンネルで研究を進め、その後、実験結果によってはメイントンネルを 50km まで延伸することも検討されている。この様に ILC は大規模な地下施設を構築することから、設計段階で適切なトンネル支保パターンを設定しておく必要性に加え、メイントンネル延伸時の工事振動による実験施設への影響が懸念されていた。この様な背景のもと、ILC と同種の花崗岩を掘削する「一般国道 107 号（仮称）梁川トンネル築造工事」を実験フィールドとして、地山評価や発破振動の伝搬特性に関する知見を得た。

【キーワード】 ILC 花崗岩 トンネル延伸 弾性波探査 発破振動

1. はじめに

ILC は良好な岩盤（人首花崗岩体、千厩花崗岩体、折壁花崗岩体）が広く分布する北上エリアを候補地として計画されている。計画では初めに 20km のトンネルで研究を進め、その後、実験を行いながらトンネルを 50km まで延伸することも検討されている。この様に、ILC は大規模な地下施設を構築することから、事前調査結果を基に、設計段階で適切なトンネル支保パターンを設定しておく必要性に加え、トンネル延伸時の発破振動による実験施設への影響が懸念されていた。

一方、図-1 に示す「岩手県発注；一般国道 107 号（仮称）梁川トンネル築造工事」（以下、梁川トンネル）は、メイントンネル延伸時の北端に位置して同種の人首花崗岩体を掘削するものであった。そこで、ILC 施設の施工計画立案に有益な情報を得ることを目的として、梁川トンネルにて地山評価や発破振動の伝搬特性を検討するためのデータを取得した。本報では取得したデータから示された幾つかの知見について報告する。

2. トンネル事前調査結果による地山評価について

トンネルの事前調査では全線の地山状況を詳細に把握することが困難であるため、坑口部や小土被り区間を除く一般部では、弾性波探査で得られた地山弾性波速度を利用して地山等級の判定、支保パターンの設定を行うことが多い。そのため、想定した地山と実際に顕著な差異

が生じた場合、その原因として弾性波探査の信頼性が問題視されることがある。梁川トンネルでは想定した地山と実際に差異が生じていたことから、岩盤の特徴と弾性波速度に着目して事前調査結果を再検証した。

2.1 事前調査と掘削時に確認した岩盤の特徴

梁川トンネルは延長 L=1,022m の道路トンネルで、花崗岩類を基盤として上部に凝灰岩類が分布していた。事前調査では全線で弾性波探査が実施され、坑口周辺では複数の調査ボーリングが行われた。地質縦断面図と設計及び実際の支保パターン区分を図-2 に示す。事前調査で



図-1 北上エリアの花崗岩体と梁川トンネルの位置

1. 技術研究所研究開発 G 第二研究室 2. 土木事業本部土木技術部地下空間 G 3. 九州支店赤嶺トンネル北作業所
4. 東北支店盛岡営業所 5. 土木事業本部リニューアル統括部 6. 東北大学 7. 岩手大学、東北大学

はトンネル中央部 (L=325m) は非常に良好な岩盤が期待されていたが、実際は想定していたほど良好ではなかった。掘削時に確認した岩盤は、**写真-1**に示したように亀裂に富んだ風化岩盤と硬岩レベルの新鮮な岩盤が混在し、連続性の高い平滑な割れ目が20cm-60cm間隔にあり、それが開口して岩塊が抜け落ちる現象が発生していた。このような割れ目は**写真-2**に示す調査ボーリングのコアからも確認でき、その多くには割れ目面の変色(褐色)や細粒分の付着が認められた。

2.2 弾性波探査結果の検証

事前調査の弾性波探査では、従来から使用されている「はぎとり法」の解析手法で地山弾性波速度を求めて地山等級を設定している。また、参考値の扱いとしてトモグラフィー的解析手法でも地山弾性波速度を算出している。事前調査によるトンネル位置の地山弾性波速度を

図-3に示す。トンネル中央部では、はぎとり法が5.2km/s、トモグラフィー的解析法が3.6km/sから4.5km/sの速度を示し、はぎとり法が1.0km/s程度速い結果となっている。しかし、実施工時にはそのような速い弾性波速度の地山は確認できなかった。

はぎとり法の解析では、地山が層状の速度構造を持ち、表層から下層に向かい弾性波速度が速くなる一般的な地山モデルを条件として解析する。しかし、本トンネルは、地山の中間部に弾性波速度の遅い風化層を挟む複雑な地質であったため、適切な解析ができずこのような結果になってしまった可能性が考えられる。一方、トモグラフィー的解析法は、複雑な地質構成に対応できる手法とされているが、弾性波速度の遅い風化層を検出できていないため、こちらも対応可能な地質構造に限界があると考えられる。弾性波探査は、地山の地質構造・速度構造を確認したうえで利用する必要があることがわかった。

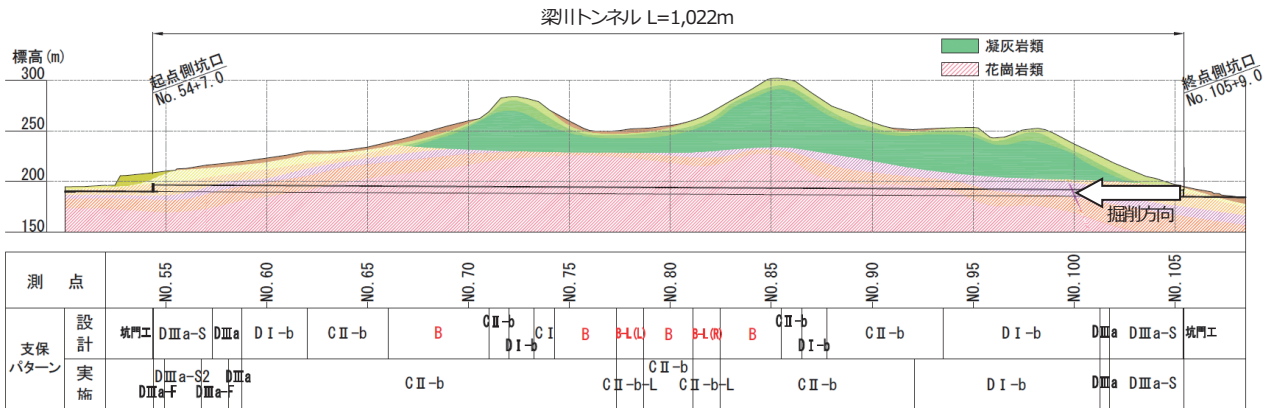


図-2 地質縦断面図と支保パターンの設計と実績

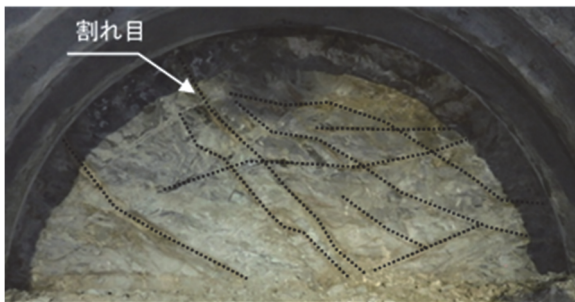


写真-1 切羽の状態 (No. 69+10)



写真-2 平滑割れ目のコア

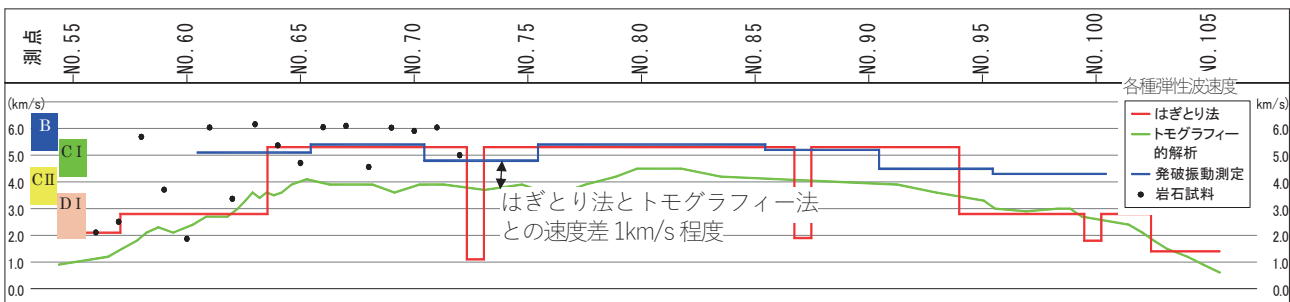


図-3 弾性波探査の結果

2.3 発破振動による弾性波速度と岩石試料による弾性波速度

梁川トンネルでは3章で示す発破振動の伝搬特性を調査することを目的に、振動速度センサーを坑内100m間隔でトンネル壁面に設置した。ここでは、各測点への振動の到達時間を利用して簡易的に測点間(100m間隔: No.60からNo.100)の弾性波速度(平均値)を算出した。速度の算出には、発破振動の初動が明瞭に読み取れた52回の測定結果を利用した。その結果を発破振動測定と表記して図-3に示す。発破による弾性波速度は4.3km/sから5.4km/sの値を示すことがわかる。また、割れ目の影響を受けない岩石固有の弾性波速度を把握するため、掘削ずりの岩塊を整形した岩石試料(5cm×5cm×10cm)を用いて超音波伝搬速度試験を実施した。その結果を岩石試料と表記して図-3に示す。No.72付近からNo.63で採取した試料の試験結果は4.6km/sから6.1km/sの速度値を示しており、発破による弾性波速度とほぼ同等であることを確認した。

発破振動測定を基に算出した弾性波速度が、当該地山の特徴である平滑な割れ目が存在していても4.3km/sから5.4km/sの値を検出したのは、地山が拘束状態で平滑割れ目が密着しているために、割れ目の影響を大きく受けずに弾性波が伝搬したためと考えることができる。この結果は割れ目が存在していてもその条件によっては、割れ目の影響を受けずに早い伝搬速度が検出されることを示唆している。

2.4 事前調査結果に基づく地山評価についての知見

事前調査結果の検証やトンネル施工時のデータや岩盤の特徴を整理した結果、事前調査結果に基づく地山評価に対して次の知見を得た。

- ・弾性波探査は解析手法によって結果が異なることがある。また、地山の地質構造・速度構造によっては、信頼性の低い探査結果しか得られない可能性がある。
- ・平滑な割れ目が卓越する硬岩地山での弾性波探査は、割れ目による速度低下の影響が小さいと考えられる

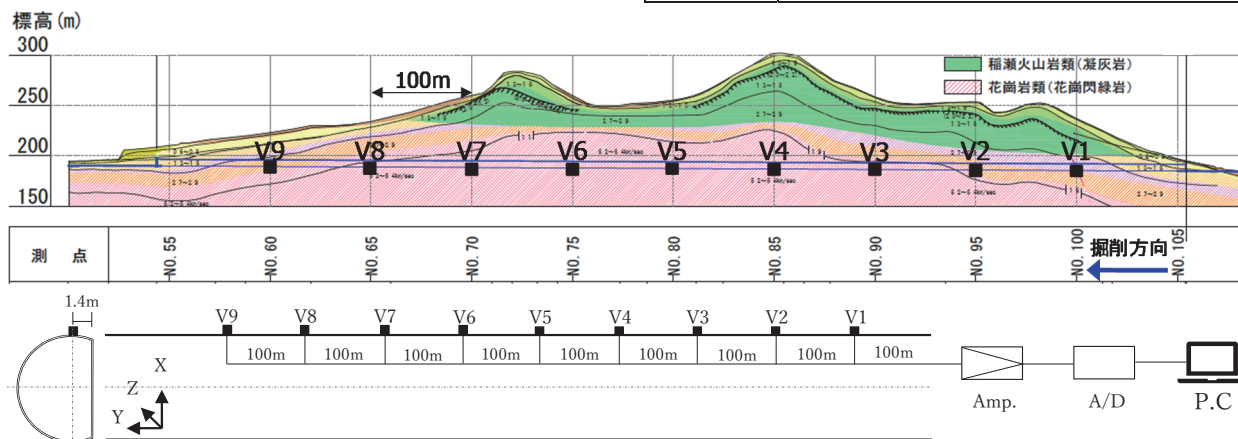


図-4 発破振動の計測点 (V1 から V9), および発破振動の計測システム

ので、このような地山において信頼性の高い評価を行うためには、ボーリングコアによる割れ目状態の確認と評価が重要である。

3. 岩盤内における発破振動の伝搬について

トンネル工事の発破作業による振動の影響予測は、地盤上の構造物や人体、および地盤中での近接構造物を対象として行われており、その伝搬特性に関して多くのデータが示されている(例えば2,3)。しかしながら、将来的にメイントンネルを延伸することになった場合の工事振動による既存実験施設等への影響評価に必要な、花崗岩体における発破振動の長距離伝搬に関するデータは十分に蓄積されていない。梁川トンネルはILC候補地にある人首花崗岩体を掘削することから、梁川トンネルの発破振動を計測することでその伝搬特性について検討した。

3.1 発破振動の調査概要

発破振動の計測は図-4に示したように、トンネル縦断方向に抗口から100m間隔で設置した測点V1からV9で行った。ただし、施工中での計測であったため、切羽の進捗に合わせて測点を追加した。ここで、切羽と最接近の測点間距離は50mから100mとした。この測点での応答を用いたプリトリガ計測により、全測点での応答を同期させてサンプリング周波数1kHzでPCへ記録した。計測は3方向の振動速度として、トンネル断面方向をX、縦断方向をY、地盤の上下方向をZとした。振動速度センサーはトンネル壁面を削孔(直径300mm, 深さ300mm)し、岩盤に打ち込んだアンカーを介して固定した。また、センサー設置後、孔にはモルタルを充填した。なお、本研究では変位での評価を行うことから、速度を積分して変位を求めた。対象とした発破の諸元を表-1に示す。

表-1 調査対象とした発破の諸元

データ数	上半, 260回 (DI : 22%, CII : 78%)
雷管	DS : 10段
段薬量	芯抜き : 0.4kg から 14.0kg
総薬量	21.6kg から 137.2kg

3.2 発破振動の伝搬性状

(1) 変位振幅の最大値と離隔距離との関係

振動の方向別に切羽からの距離と応答の関係を図-5示す。ここでは、発破振動の時間波形から応答が最大となる芯抜き値を読み取った。ただし、V1からV3はS/Nが悪いため除外した。また、図には近似式、相関係数、±95%信頼区間を併記した。

図から、発破応答と距離との関係は、累乗近似でき関係も高いことがわかる。傾きについて着目するとXとZがYに比べ若干急峻ではあるが、発破応答は距離の二乗におおむね反比例することがわかる。ここで、地盤振動の減衰に関する一般式として(1)式⁴⁾が示されている。

$$A = A_0 r^{-n} \exp(-\alpha r) \quad (1)$$

ここで、A、rは振幅、距離であり、nとαは定数である。実体波などの3次元的に伝わる球面波ではn=1、表面波などの2次元的に伝わる円筒波ではn=0.5である。また、実体波が半無限体の自由表面を伝搬する場合にはn=2となる⁴⁾。

以上のことから、本調査で得られた発破による振動は、発破点を振動源とした実体波が坑内表層岩盤を伝搬したものと考えられる。XとZの傾きが若干急峻なのは、これらがトンネル面内方向の挙動であり、Yに比べてトンネル構築が動きやすいことによる散逸が付与されていることが考えられる。

(2) 周波数別の伝搬性状

V8を基準にした振幅比と周波数、および距離との関係を図-6にYで例示する。なお、ここでは連続する10回の発破における平均値を示す。図から周波数が高くなるほど、かつ距離が離れるほど減衰が大きくなる様子がわかる。これは、周波数が高くなるほど岩盤の内部減衰に関する情報が重要であることを示すものである。

(3) 坑内を伝搬した音波による振動

前述のとおり、V1からV3の振動は切羽からの離隔が

大きく(600m以上)なったことでS/Nが悪くなった。ところが、切羽から伝搬した振動が消散した後に比較的大きな振動が発生していた。図-7はV1(切羽からの離隔766m)における応答の時刻歴(X)を示したものである。岩盤中の音速を4,000(m/s)とすれば、発破0.2秒後には振動応答が生じているはずであるが、V1では発破から約2.3秒後に大きな応答が生じている。この時の空気中の音速を340(m/s)とすれば伝搬距離は782mとなり、これは切羽と測点間の離隔にほぼ等しい。よって、図-7で示した応答は坑内を伝搬した音波によって励起された振動と考えることができる。ここでは、切羽から最も離れたV1の応答を例示したが、他の測点でも同様の現象を確認している。これらの結果は岩盤中を伝搬する振動以外に、坑内を伝搬する音波で励起された振動にも注意する必要があることを示している。

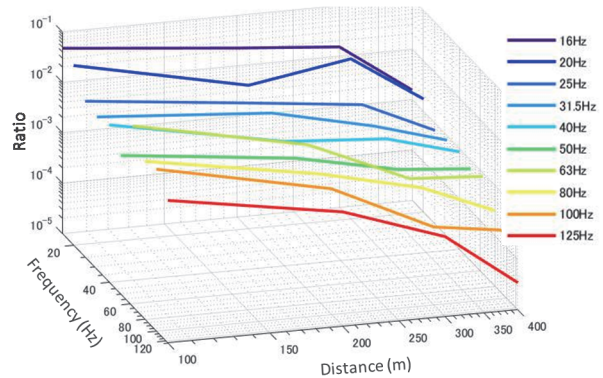


図-6 周波数別の減衰特性 (Y)

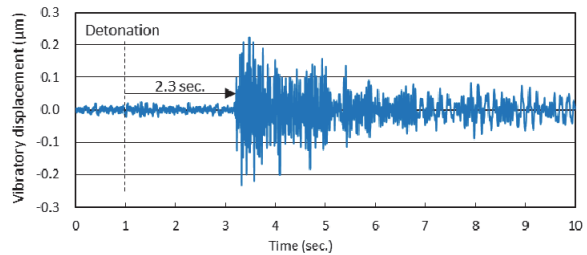


図-7 地山を伝搬した振動が消散した後に計測された振動波形 (V1,X)

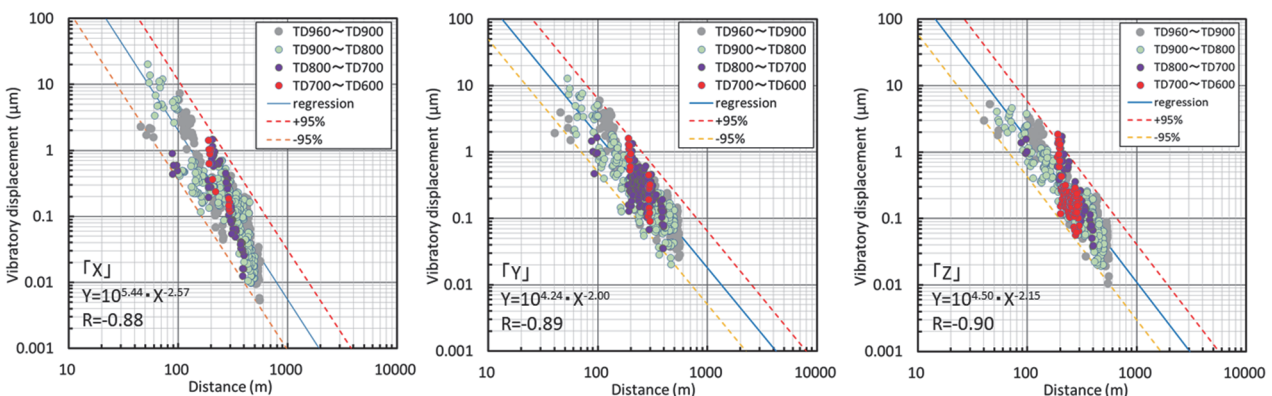


図-5 発破による振動と離隔距離との関係

3.3 岩盤内における発破振動の伝搬に関する知見

梁川トンネルにおける発破振動の調査結果から、岩盤内を伝搬する振動について次の知見を得た。

- ・発破振動の岩盤内での大きさは距離の二乗に反比例し、トンネル断面方向や上下方向の減衰はトンネル縦断方向に比べてやや大きい。梁川トンネルの実績では、切羽からの離隔が1.0kmほどで変位が0.1 μ m以下となる。
- ・岩盤内を伝搬した振動が消散したのち、坑内を伝搬した音波によって励起された振動が発生している。800mほど離れた地点でも0.2 μ mとなっていることから坑内を伝搬する音波への対策が必要である。

4. まとめ

ILC 施設の施工計画立案に有益な情報を得ることを目的に、梁川トンネルを実験フィールドとして、事前調査結果に基づく地山評価や発破振動の伝搬に関する知見を得た。地山評価に関して、弾性波探査の解析手法の選定や利用において地質構造を十分に考慮する必要があり、特に平滑な割れ目が卓越する硬岩地山では、ボーリングコアによる割れ目状態の確認と評価が重要であることを示した。発破振動に関して、その大きさは距離の二乗に反比例することが明らかになり、梁川トンネルの実績から切羽からの離隔1.0kmほどで ILC 施設における振動管理値を下回ることを示した。一方で、坑内を伝搬した音波に励起されトンネル構築に振動が発生することも示した。

謝辞：「一般国道107号（仮称）梁川トンネル築造工事」は ILC 計画の候補地と同種地質でのトンネル工事であることから、本調査研究は、ILC 計画に必要とされる各種データを取得することを目的として、東北大学と飛鳥建設との共同で実施した。また、工事発注者の岩手県南広域振興局、および岩手県科学 I L C 推進室の方々には、調査研究を進めるにあたり多大なご協力をいただきました。ここに深謝いたします。

【参考文献】

- 1) 平成25年度 一般国道107号梁川～口内地区道路及びトンネル詳細設計資料・路線測量・地質調査業務委託，平成27年3月。
- 2) 日本騒音制御工学会技術部会低周波音分科会：発破による音と振動，山海堂，1996。
- 3) 中川ほか，共訳：発破振動の測定と対策，山海堂，1995。
- 4) 江島淳，地盤振動と対策，集文社，1979。

Summary The candidate sites for the planned ILC facility are the Kitakami Area where good rock masses (Hitokabe granite, Senmaya granite, Orikabe granite) are observed over a wide area. According to the plan, the survey will be conducted initially using a 20-km tunnel, followed by a study of the possible extension of the main tunnel to 50 km depending on the results. As the ILC facility requires construction of a large-scale underground structure, it is necessary to establish an adequate tunnel support pattern in the design stage. Concern also exists that vibration during construction of the main tunnel extension may adversely affect experimental equipment. In this context, ground assessment as well as findings on blast vibration propagation characteristics were obtained from the experiment field, the “Yanagawa Tunnel (tentative name) Construction Project along National Highway No. 107,” which involved excavation of granite similar to that at possible ILC sites.

Key Words : ILC, Granite, Tunnel extension, Elastic wave survey, Blast vibration

