

付加体におけるトンネル周辺の弾性波速度と地山評価

A SEISMIC WAVE SPEED AROUND THE TUNNEL IN THE ACCRETIONARY ZONE AND ROCKMASS CLASSIFICATIONS

木村正樹¹⁾・高橋貴子²⁾・古田尚子²⁾・田中崇生³⁾・足達康軌⁴⁾

Masaki KIMURA, Takako TAKAHASHI, Naoko FURUTA, Takao TANAKA, Yasuki ADACHI

In accretionary zone tunnel, heterogeneous rocks or variable geological conditions at the face produce serious problems and additional costs to the estimated cost. The seismic refraction method has been widely used in many tunnel projects in mountainous areas. But, it is usually difficult to do accurate rock-mass classification in the way of investigating.

In the present paper, high resolution seismic refraction method was used in accretionary zone tunnel. Consequently, the precision of the classification was improved. But, we must pay attention to the evaluation result that an elasticity wave speed around face decreases too much according to a tunnel cutting.

Key Words: tunnel, accretionary zone, high resolution seismic refraction method,

1. まえがき

山岳トンネルの建設では、当初設計と実績支保パターンが乖離することが多く、度重なる設計変更により工事費が増大するという問題が生じている。特に「付加体」としてよく知られる四万十帯は、地質構造が複雑で地山評価の困難な地質の一つであり、乖離しやすいことが報告されている(※1)。

和歌山県紀伊半島の四万十帯に建設中の高田山トンネル(高規格2車線道路トンネル)においても、弾性波速度および地質の観察結果から決定されたCⅠ・CⅡ主体の当初設計が、DⅡ主体の施工への大幅な変更となった。そのため施工中のトンネル坑内探査を含めた追加調査を実施し、地山区分の見直しを行うことになった。追加調査では2種類の物理探査を選定して、実施した。ここでは『弾性波探査の解析方法と測定パターン』、『トンネル基面付近の弾性波速度』および『切羽接近に伴う弾性波速度の変化』に着目し、事前調査段階におけるトンネル設計時の地山評価の留意点について報告する。

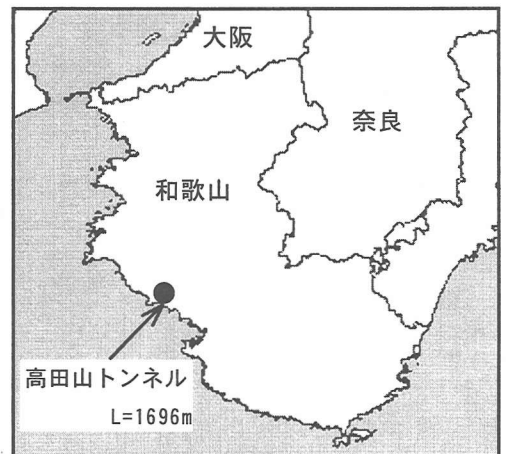


図-1 トンネル案内図

- 1) 正会員 応用地質株式会社 関西支社
- 2) 応用地質株式会社 関西支社
- 3) JH関西支社 田辺工事事務所
- 4) 近畿自動車道南部工事共同企業体(大成建設㈱)

2. 付加体の地質的特徴

付加体は図-2 に示すように海底の土砂が海溝の日本列島側に張り付いて形成されたもので、高田山付近と同時代の地質は静岡県西部～紀伊半島南部～四国南部～九州南部などに分布している。高田山トンネルの周辺の地質は、四万十帯の音無川帯に区分される付加体でトンネル域には瓜谷累層頁岩および羽六累層頁岩・砂岩互層が、北落ちの構造で分布することが判明した。これは弾性波速度から見ると速度が速い地質と遅い地質が交互に重なり傾斜していることを示しており、高速度層の下に低速度層が現れるような速度の逆転層が存在することが予想される。

露頭における瓜谷累層の頁岩は、ハンマーの打撃により容易に数 mm 程度の細片に分解しやすい。また、羽六累層の砂岩頁岩互層は、硬質な砂岩と破碎された頁岩からなり、露頭には砂岩部分が残しやすい。切羽では図-2 に示すように羽六累層の硬質な砂岩優勢層と瓜谷累層の破碎した頁岩の部分と比較的塊状硬質な頁岩の部分が交互に出現しており、未施工区間では、ボーリングで確認されたようなレンズ状～層状砂岩を挟む羽六累層の頁岩・砂岩互層が出現するものと予想されている。

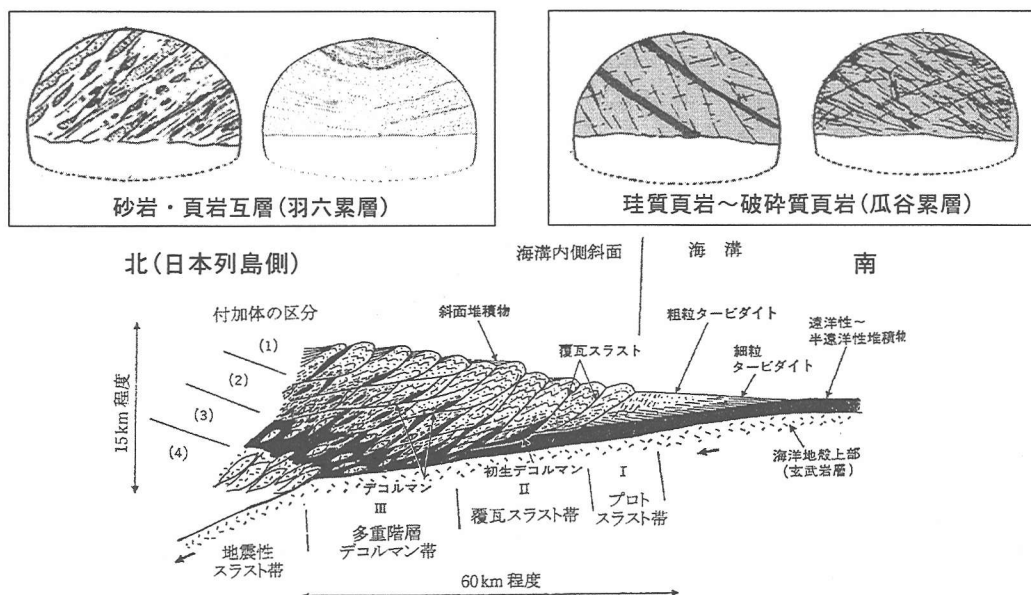


図-2 付加体の構造模式図と切羽状況 (文献 2 に加筆)

3. 高精度弾性波探査

事前調査では従来の屈折法弾性波探査により萩原の方法による解析が行われた。追加調査では、切羽および反対側の坑口で事前調査時より大量の火薬による起振が実施できたこと、中間部で新たなボーリングを追加したことから、地表面とボーリング孔内に受振点を配置し、トモグラフィ的高精度弾性波探査を実施した。両手法の概要を表-1 にまとめ、解析結果図を図-3 に示す。

事前調査における弾性波探査の測定パターンは起振、受振ともに地表である。この場合、トンネル位置の波線通過率が図-5 に示すように 40%程度であり、土被りの大きい部分では波線が通過していない。

これに対し、地表・孔中・坑内の起振と受振を組合せた測定を実施した追加調査の高精度弾性波探査では、トンネル位置の波線通過率が約 40%増加した。また、波線経路が一様だった北坑口寄りの区間では、上下方向の波線経路が加わったことで、速度値の決定精度が上がることを期待できる。

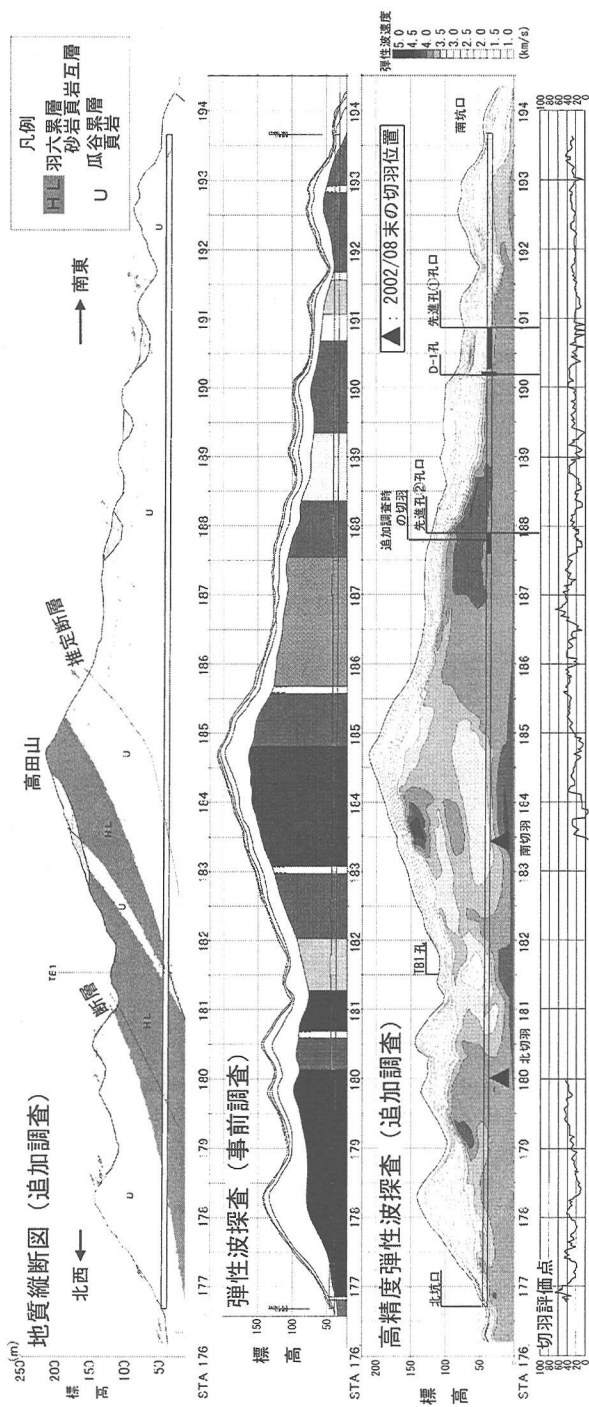


図-3 調査結果総合図

表-1 事前調査と追加調査の違い

測定パターン	事前調査	追加調査
解析方法	地表のみ 統原の方法	追加調査：高精度弾性波速度 地表・孔中・坑内の組合せ トモグラフィ解析方法
特徴	「深くなるほど弾性波速度が増加する」ことが前提。 - 速度の逆転層・上・位・高速度層、下位・低速度層がある場合のこのとがある場合、とがけ土俵りの大きい区間はトンネル基面深部の弾性波速度値と構造に大幅な違いを生じることになる。	- 手順1:測定範囲を細かなブロックに分割し、各ブロックの弾性波速度値を仮定する。 - 手順2:起振の時刻から各受振点までの弾性波伝播時間(走時)の観測値と理論値の差(残差)が十分に小さくなるまで、各ブロックの速度値をコンピュータで繰り返し修正計算。 - 繰返計算により、ブロックの速度値を1つ1つ修正していくため、「深いほど速い」という拘束条件はない。

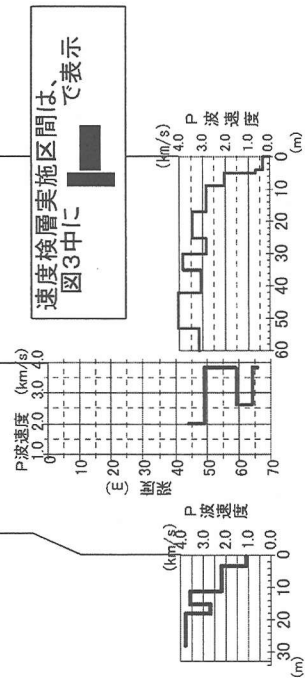


図-4 トンネル基面付近の弾性波速度 (速度検層結果)

表-2 度弾性波探査 追加測定

追加測定	位置	STA	深度	起振回数	受振点間隔
起振点	切羽踏前	187+82.9	80m	1 回	—
	北坑口	176+85.0	5m	1 回	—
受振点	地表	177+80~184+80	0m	—	20m
	TB1 孔	181+52.33	38~60m	—	2m
解析要素	1815 要素	深度方向 3~20 m		水平方向 5m	
解析ソフト		SeisImager2D			

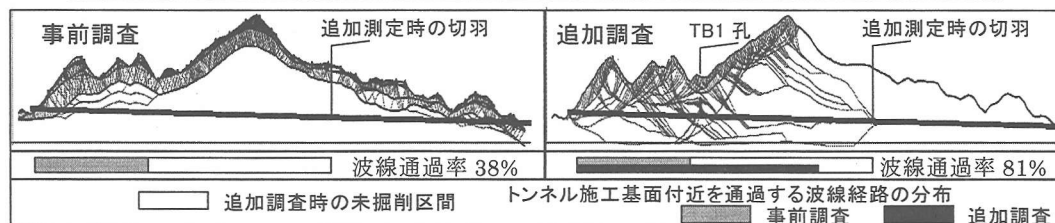


図-5 事前調査における弾性波の波線経路(左)と追加測定における弾性波の波線経路(右) 縦:横=2:1

また、調査地のような地質の場合、表-1 に示すように、従来の弾性波探査解析方法である萩原の方法では深部の速度値を把握できない場合が多いため、表-2 の仕様で調査し、トモグラフィ解析方法を採用した。

事前調査結果では、トンネル基面のほとんどの区間が最下層内に位置している。最下層の速度は、低速度帯を除くと 3.6~4.8km/s である。これに対し、高精度弾性波探査の結果から得られた速度構造は、音無川帯の特徴である北落ちの構造を反映し、速度の逆転層があることが確認でき、最大土被り部や STA179 付近、STA188 付近など、事前調査で高速度と見られた区間におけるトンネル基面は、速度の逆転層の低速度層内に位置することがわかった。実際、鏡ボルトが必要なほど切羽の自立性が悪い区間も存在した。

4. 孔内・坑内弾性波探査

図-4 にはトンネル基面付近の実際の弾性波速度を把握するため、地表および切羽から掘進したボーリング孔において実施した速度検層結果を示した。検層を実施した各孔の位置は、図-3 中に示した。D-1 孔および先進孔①の位置は、探査結果では深部または奥へ進むにつれて徐々に速度が増加する区間、先進孔②は弾性波速度 3.75~4.0km/s の速度一様な区間である。各孔とも最高速度層の速度は、同位置の高精度弾性波探査結果と同程度であるが、いずれの孔においても弾性波速度は数m単位で 4.0km/s~2.5km/s 程度の間で上下しており、岩盤の硬さは一様ではなく、数m単位で硬軟変化していることが判明し、付加体の形成時の弱層(スラスト)等が繰り返し出現することが予想された。

高精度弾性波探査の結果、当初地山等級の見直しを実施し、設計支保ランクのアップを行った。高精度弾性波探査のトモグラフィ法による弾性波速度値とボーリングコアの評価点(切羽評価点と同様な指標で点数化)・A計測天端沈下・切羽評価点を整理した結果を、図-6 に示した。速度検層を実施し、トモグラフィ解析の際の入力値にもなっているボーリング地点では弾性波速度と評価点の相関が高く、天端沈下とも一定の関係が見られる。ただし、切羽評価点そのものとは相関は低い。これは、解析要素の大きさやデータ数・弾性波探査の波線経路と精度の問題もあるが、付加体の複雑な地質の特徴で、切羽サイズでも良好な地質が連続しないこと(切羽評価点では 30%以上弱層があると弱層の評価となる)を反映しているものと考えられる。

さらに、図-7 に示すように低速度帯の傾斜により見かけの弾性波速度が実際より早めに検出されることがある。このため、特に付加体の地質のように低角の弱層が存在すると予想される場合には、ボアホールカメラ等で不連続面の傾斜を計測するか、複数の速度測定孔で方向を確認し、弾性波速度を補正して評価する必要がある。

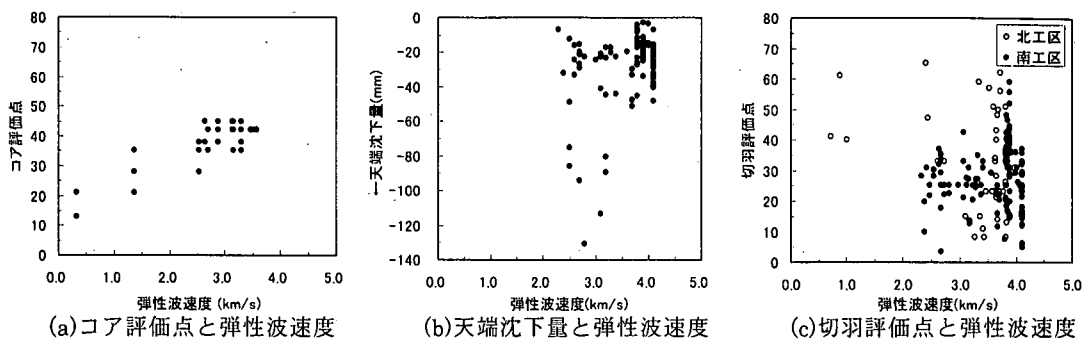
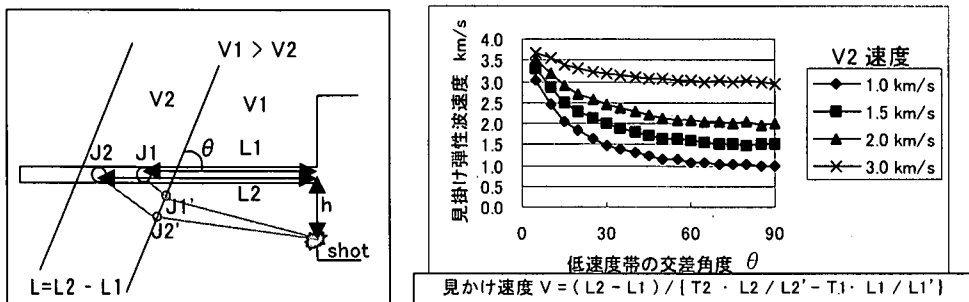


図-6 高精度弾性波探査解析結果による弾性波速度とコア評価点・天端沈下・切羽評価点の関係

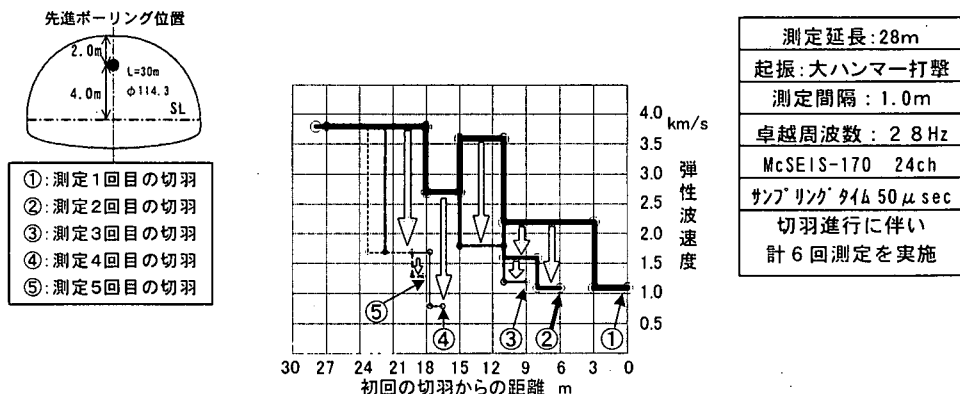


5. 切羽接近に伴う弾性波速度の低下

四万十帯におけるトンネルの設計と施工の乖離が大きい理由には、弾性波探査の測定上および解析上の精度問題のほか、付加体形成時の潜在的弱層が多い岩盤が切羽接近による応力解放で、強度低下しやすい性質があることが考えられる。つまり、三軸状態で土被り応力を受けているときの弾性波速度と切羽が近づき応力が解放されたときの弾性波速度が極端に異なる可能性がある。

そこで、応力が解放されたときの弾性波速度低下率を把握することを目的として、掘進長 30m の先進ノンコアボーリング(塩ビ管で保孔：瓜谷累層-頁岩)を利用して、切羽進行に伴い 7 回(うち 2 回は同一切羽、⑤で鏡ボルトの施工前後に実施)速度検層を実施した。

速度検層結果を図-8 に示した。元々 3.8km/s の弾性波速度の地山も、切羽が 6m 程度手前に近づいた時点で弾性波速度が低下しはじめ、最終的には、50～70% 減の 1km/s 強まで低下している。



なお、鏡ボルト施工前後の切羽前方速度分布⑤には変化が無く、切羽掘削休止中(3日)のクリープ変位や削孔中の振動や使用水による地山の攪乱の影響は少ないと確認できた。切羽周辺の弾性波速度の低下は図-9に示すようにジュラ紀付加体の丹波帯でも報告されており、健全部の弾性波速度を低減させて地山評価を行う必要がある。

6. まとめ

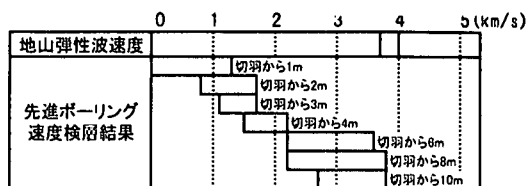
付加体である四万十帯の頁岩が優勢なトンネルにおいて、各種の弾性波探査を実施し、地山評価の留意点を確認した。地質の成り立ちを考慮した当初設計と施工実績の乖離の要因および類似トンネルでの留意点は、以下のことが考えられる。

- ① 地層が傾斜していることから、高速度層の下に低速度層がある構造となっているが、「深いほど速い」ことが前提の従来の萩原の方法による解析方法では、深部の低速度域が把握できない。弾性波探査では、図-10に示すようにボーリング孔や坑内の起振・受振データを用いたトモグラフィ解析を行い、付加体の特徴である低角度のスラスト（低速度帯）を解析できるようにする。
- ② 地質の成り立ちを反映して数m毎に弾性波速度が4.0km/s～2.5km/s程度の範囲で変化している。
- ③ 潜在的な弱層が多くトンネル施工に伴う応力解放に対して緩みやすい地山であるため、切羽接近に伴う速度の低下を考慮し、弾性波速度の最大値に低減率を掛けて地山弾性波速度を評価する。

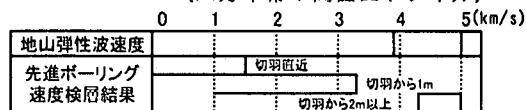
本トンネルは平成14年9月現在も施工中であり、以上のような付加体の複雑な地質構造・速度構成に留意し、安全かつ合理的に施工を継続していきたい。

<参考文献>

- 1) 竹内・佐治・大橋・木村：近畿地方の美濃・丹波帯、四万十帯トンネルにおける地山評価と実施工の対比，日本応用地質学会関西支部平成13年度講演会概要集 2001.6
- 2) 加賀山・塩野・平：南海トラフと四万十帯の調査に基づく海溝付加帯形成モデル，科学 53, 1983, p429-438
- 3) 中川浩二：弾性波速度分布によるトンネル岩盤の事前予測と施工時の岩盤評価との関係，日本応用地質学会平成13年度講演会概要集，2001.6
- 4) 益田稔：紀伊半島四万十帯、音無川層群に見出されたパイルナップ構造とその変形，地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集 2002.5
- 5) 木村・杉田・大塚：評価点法を用いた事前調査による地山評価と施工，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集，第11巻，2001.11, p87-92
- 6) 古田・大橋・木村・片山・松岡：ボーリング孔壁画像のトンネル切羽前方探査への適用事例，日本応用地質学会関西支部平成14年度講演会概要集，2002.6
- 7) 足達・小川：軟弱地山における先行緩み測定結果と長尺鏡ボルトの効果について，第57回土木学会年次報告，2002.9
- 8) 城間・赤木・岡部・中西：支保実績から分析した弾性波速度評価の一考察，日本トンネル技術協会誌 トンネルと地下，第33巻 2002.9



(a) 天端-3mの先行ボーリング内速度分
(四万十帯：高田山トンネル)



(b) 上半盤+約1mの切羽簡易弾性波速度探査
(丹波帯：0Yトンネル(※1))

図-9 切羽接近に伴う弾性波速度の低減状況

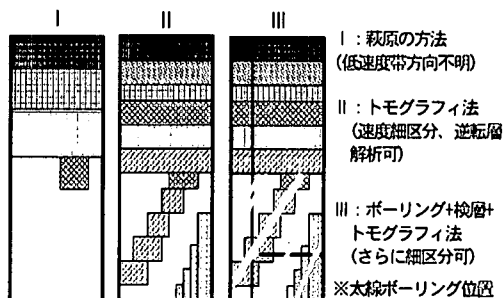


図-10 解析手法によるトンネル周辺地山の
弾性波評価イメージ