

弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル支保の選定について

木村 正樹・大橋 弘紀

Selection of rational support in consideration of reduction of elastic wave velocity

Masaki Kimura and Hiroki Ohashi

Abstract

Since elastic wave velocity is very useful to evaluate the soundness of rock mass. The tunnel support design of the mountain tunnel is usually determined by the application of standard tunnel support patterns, considering rock classification according to elastic wave velocity results. However, the ground around a tunnel loosens by excavation and consequently the elastic wave velocity is reduced.

In this paper, the loosening of rock mass and the decrease of elastic wave velocity around a tunnel are connected. Finally, the authors propose the method of rational tunnel support selection based on these results.

キーワード：トンネル支保，弾性波探査，応力解放，地山区分

1. はじめに

トンネルの支保パターンは設計時の予想と施工実績との間には乖離が生じることが多い。特に、近畿地方の付加体と呼ばれる美濃・丹波帯と四万十帯の頁岩主体の堆積岩では、施工時になると設計時に想定した支保パターンのずれ（特に支保のランクアップ）が大きくなり¹⁾²⁾、より、実際に適合した地山区分や支保選定を行なうことが課題となっている。

NATMトンネルの支保パターンは地山区分表³⁾に基づき、事前の弾性波探査速度とボーリングコアの状態及び周辺の地質状況等から区分する。

このなかで、弾性波探査はトンネル全線の面的な情報の取得と定量的な評価が可能であることから、地山評価には非常に有効とされ、弾性波探査に重点をおいて地山が評価されることが多い。

しかし、事前の弾性波探査で得られる弾性波速度値はトンネル施工前（応力解放前）の弾性波速度値を表している。

いったんトンネルが掘削されると、トンネル周辺地山が応力解放によりトンネル内側に変位し、“緩み”を発生させることが知られており、現在の施工法であるNATM工法もこれを利用した支保構造となっている。その場合、事前調査で得られた弾性波速度値が、施工中にトンネル近傍において変化している可能性は十分に考

えられ、また、その速度値の変化の大小は、地質構造区分や岩種により応力が開放された場合の状況が異なるものと考えられる。

すなわち、トンネル設計時に、事前の弾性波探査で得られた速度値をそのまま使って支保パターンを決めることはきわめて問題が多く、これが支保パターンの乖離の一要因となっている可能性がある。

そこで、事前の弾性波探査で得られる速度と施工中におけるトンネル周辺地山の弾性波速度がどの程度異なるのか、また、地質や岩種によってどの程度の違いが出るかを検証し、設計時における地山の速度値をどのように決定すれば、実際に乖離の少ない支保パターンの設計が出来るかについて考察を行った。

2. 近畿地方の地質的特徴

近畿地方の地質構造区分を図1に示す。近畿地方の地質構造区分は北から丹後・但馬帯、舞鶴帯、丹波帯、領家帯、和泉帯、三波川帯、秩父累帯、四万十累帯に大きく分類される。このうち近畿地方に広く分布する舞鶴帯、丹波帯、四万十累帯は付加体と呼ばれる地質である。これは図2に示すように海底プレートが海溝に沈み込む際に削り取られ、日本列島側に貼り付いて形成されたものである⁴⁾。このような地域では、岩種が不均一であり、高速度層になりやすい砂岩層の下に泥質岩等の低速度層があるなど、事前調査、特に弾性波探査で、トンネル施工面付近の弾性波速度を捉えにくくなっている。

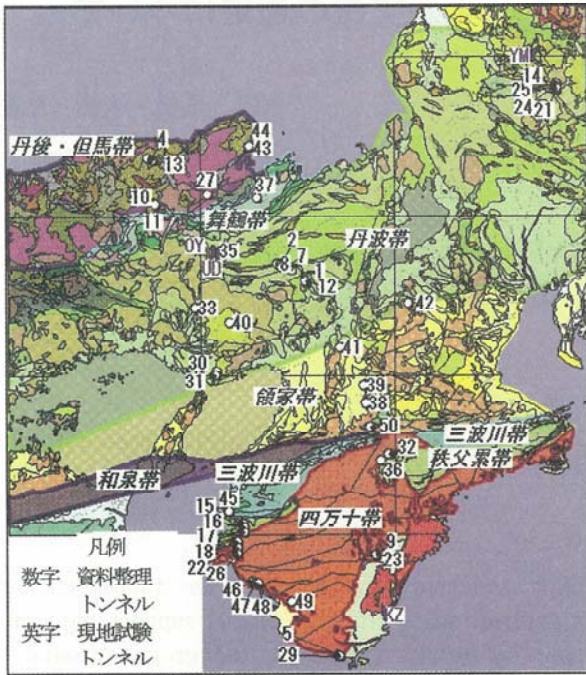


図-1 資料整理・実証試験実施 トンネル位置図
Fig.1. Location of data on tunnel collected and surveyed tunnel.

また、陸化していく間にさまざまな応力作用を受けており、潜在的弱層が多いと考えられる。

3. 調査・検討方法

調査検討の流れを図3に示す。調査検討はまず、近畿地方整備局管内のトンネルの施工実績を収録した「トンネル技術誌」を中心に既存資料の収集を行い、

- 1) 設計・実施支保パターンの乖離状況の整理分析、及び地質や弾性波速度値等の条件違いによる整理分析。

を行った。

つづいて、施工中の5トンネルにおいて切羽や下半盤で弾性波探査を実施し、

- 2) 事前の弾性波探査で得られた弾性波速度とトンネル周辺地山の弾性波速度値の比較。
- 3) トンネル前方での弾性波速度値低下状況の把握。
- 4) トンネル周辺での弾性波速度値低下状況の把握。
- 5) 岩種毎の弾性波速度値低減率の算出。

を行った。さらに施工データと比較することで

- 6) トンネル周辺弾性波速度値と切羽評価点の関係及びトンネル周辺弾性波速度値と実際に施工された支保の関係。

について取りまとめを行った。

最終的にはこれらの調査・検討結果から、

- 7) 事前の弾性波探査による合理的な支保選定方法。

について検討を行った。

資料収集及び現地試験を行ったトンネルを図1に、その諸元を表1に示す。

4. 調査結果

1) 既存資料収集・整理結果

資料収集整理を行ったトンネルはNATM工法で施工された27トンネルで、総延長は17,929mである。整理したトンネルの地質構成は付加体の頁岩を主体とした互層が最も多い(図4)。事前の弾性波探査で得られた速度値は4 km/s以上が30%以上、3 km/s以上が60%以上あった(図5)。

一方、設計時に想定された支保パターンと実際に施工された支保パターンの比較を行うと、事前の弾性波探査で得られた速度値が3.0km/s以上でランクアップによる乖離が大きく、特に設計時にB、C Iで想定されていたもののうち80%はC IIで施工されている(図6)。

また、地質毎に支保のランクアップ状況が異なり、砂岩・チャートは弾性波速度が4 km/s以上で2ラン

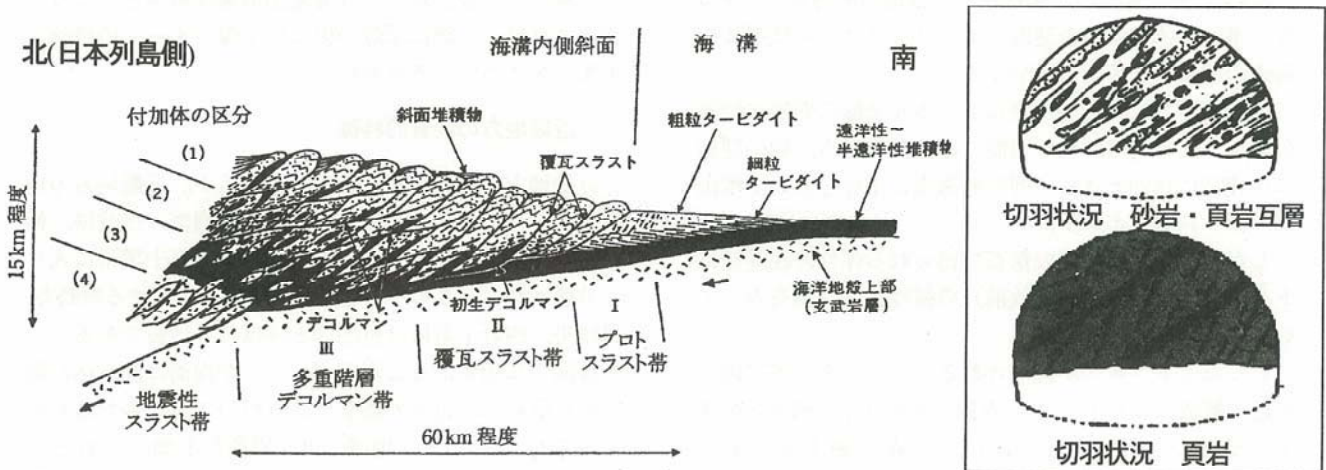


図-2 付加体の構造模式図と切羽状況⁰
Fig.2. Schematic diagram of accretionary prism and sketch of tunnel face).

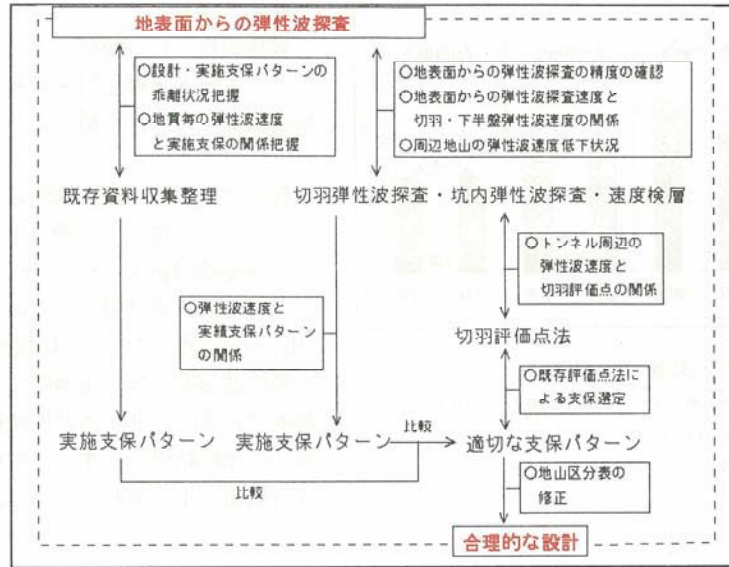


図-3 調査検討の流れ
Fig.3. Flow of this study.

表-1 現地試験実施トンネル諸元
Table 1. Dimensions of tunnels performing survey.

トンネル名	地質・岩種	延長 (m)	最大土被り (m)
OYトンネル	丹波帯 頁岩 砂岩 チャート	464	100
UDトンネル	丹波帯 頁岩 チャート 珪質岩	957	120
KZトンネル	熊野層群 泥岩 熊野酸性岩 凝灰岩 花崗斑岩	1652	190
YMトンネル	濃飛流紋岩	1537	230
TYトンネル ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	四万十帯 頁岩主体互層	1709	150

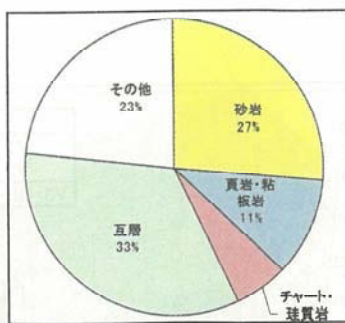


図-4 資料整理トンネル地質構成
Fig.4. Component ratio of geological for this study.

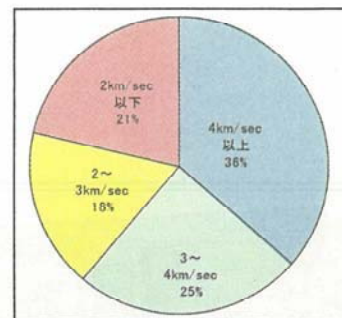


図-5 資料整理トンネル弾性波速度構成
Fig.5. Component ratio of elastic wave velocity of ground for this study.

クのアップ、頁岩・粘板岩は速度によらず1ランクのアップ、互層は3 km/s以上で2ランクのアップとなっている(図7)。

さらに、同じ岩種であっても四万十帯と美濃丹波帯ではより時代の古い美濃・丹波帯の方がランクアップされた支保パターンで施工されていた(図8)。

2) 事前弾性波探査で得られた速度値の確認

事前の弾性波探査の目的はトンネル計画地山の速度区分を面的にとらえる事である。一方で、事前の弾性波探査で得られた速度値がトンネル周辺の速度値を捉えられているかどうかについて確認した例は少ない。そこで丹波帯、四万十帯の施工中のトンネル切羽及び下半盤において、事前の弾性波探査で得られた速度値

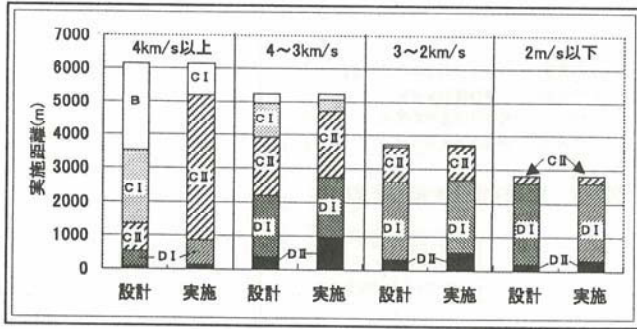


図-6 弾性波速度毎の設計・実施支保パターン
Fig.6. Comparison between designed support and constructed support against elastic wave velocity grouping.

岩種	2km/s以下	2~3km/s	3~4km/s	4km/s以上
チャート	D I	D I	C II	B→C II
珪質岩	D I	D I	C I→C II	B→C II
砂岩	データなし	C II→D I	C I→C II	B→C I
頁岩	データなし	D I→D II	C II→D I	B→C I
粘板岩	D II	D I→D II	C II→D II	B→C II

太字 2ランクの乖離
 1ランクの乖離
 設計→実施 矢印なしは変更なし

図-7 岩種毎の設計・実施支保パターン
Fig.7. Performance of tunnel support pattern showing from design to practice.

の確認を行った。

確認を行った丹波帯のトンネルは珪質頁岩を主体とし、チャート・緑色岩・砂岩がブロック状に混入する地質状況であり、岩種による速度値のばらつきは小さい。

弾性波速度の確認は事前の弾性波探査結果 (V1) と、トンネル施工の影響の少ない、先行ボーリング孔での速度検層結果 (V2) 及びトンネル下半盤で実施した弾性波探査結果のうち最下層の弾性波速度 (V3・GL-3 m) について比較を行った。なお、最下層の弾性波速度とは一定速度に収束した最深部の弾性波速度である。図9に各弾性波探査のイメージ図を示し、図10に比較結果を示す。この結果をみると、各弾性波探査結果の平均値4.52km/s に対して最大±7%の誤差であった。

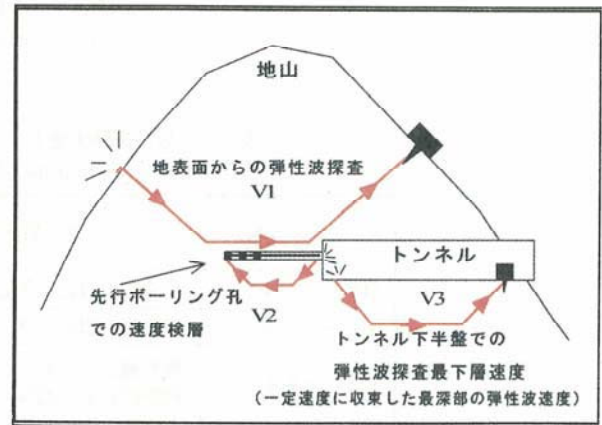


図-9 各弾性波探査波線経路概要図
Fig.9. Elastic wave path pattern running in ground and tunnel.

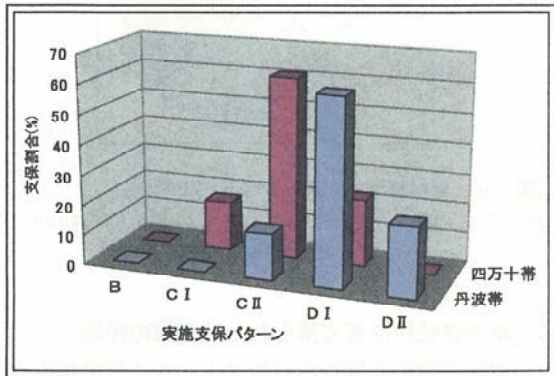


図-8 地質構造帯での比較
Fig.8. Percentage of performed support patterns for difference of geological zone.

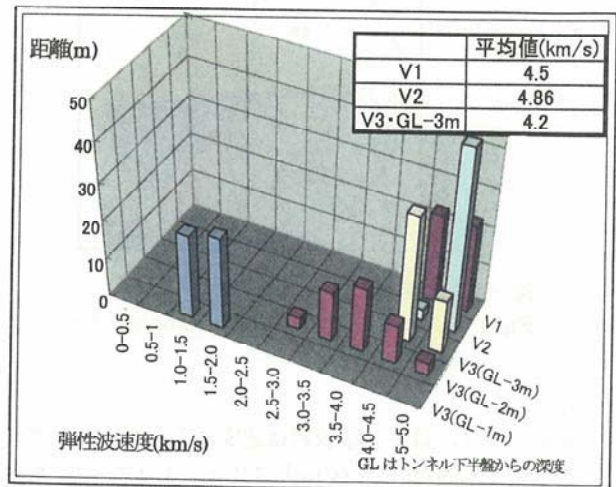


図-10 弾性波速度分布図
Fig.10. Elastic wave velocity in not-loosened zone around the tunnel.

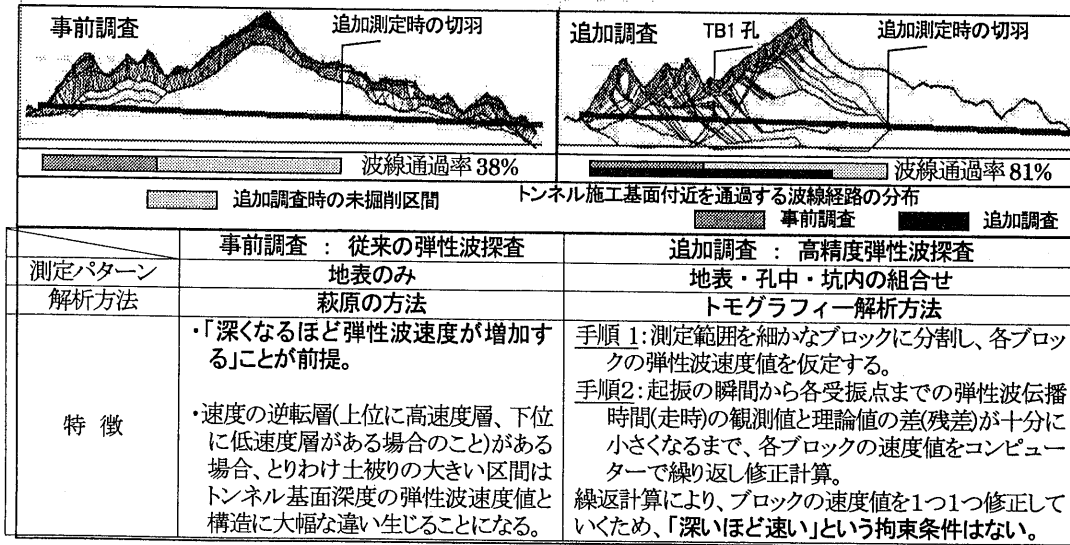


図-11 四万十帯トンネルでの調査結果

Fig 11. Comparison of elastic wave survey between conventional method and tomographical method.

一方、四万十帯のトンネルでの調査結果について図11に示す²⁾。このトンネルは設計支保パターンと実績支保パターンの乖離が大きく、施工途中で再調査(高精度弾性波探査・探査結果の再解析及び切羽からの先行ボーリング孔での速度検層)を実施したトンネルである。地質は比較的硬質な砂岩と軟質な頁岩が数mの間隔で互層を呈している。当初行われた調査結果と再調査結果を比較すると、事前の弾性波探査では、波線経路がトンネルまで到達しておらず、トンネル付近の情報がほとんど得られていない。さらに、高精度弾性波探査による再調査の結果、高速度帯の下に低速度帯が位置する付加体特有の地質構造となっており、従来の弾性波探査及び解析方法では捕らえきれないことが分かった。

一方、再調査の結果で得られた弾性波速度値と速度検層で得られた区間最高速度値はほぼ一致している。

以上のように、弾性波探査は地山の情報を概ね捉えている。しかし、地質構造によっては調査方法・解析方法の問題から必ずしもトンネル周辺地山の速度を表していないことがあることを調査・設計時に留意する必要がある。

3) トンネル切羽前方の弾性波速度値の低下状況

切羽接近による地山の弾性波速度値の変化を把握することを目的として、切羽からの先進ノコンアボーリングを利用した速度検層を行った。測定方法及び測定結果について図12に示す。地質は四万十帯の頁岩を主体とするものである。ボーリング孔の延長は30mであり、孔を塩ビパイプで保護することで、切羽進行に伴い7回(うち2回は同一切羽)速度検層を実施した。検層の結果、地山は切羽接近に伴い速度が低下しており、元々3.8km/sの弾性波速度の地山も、切羽が6m

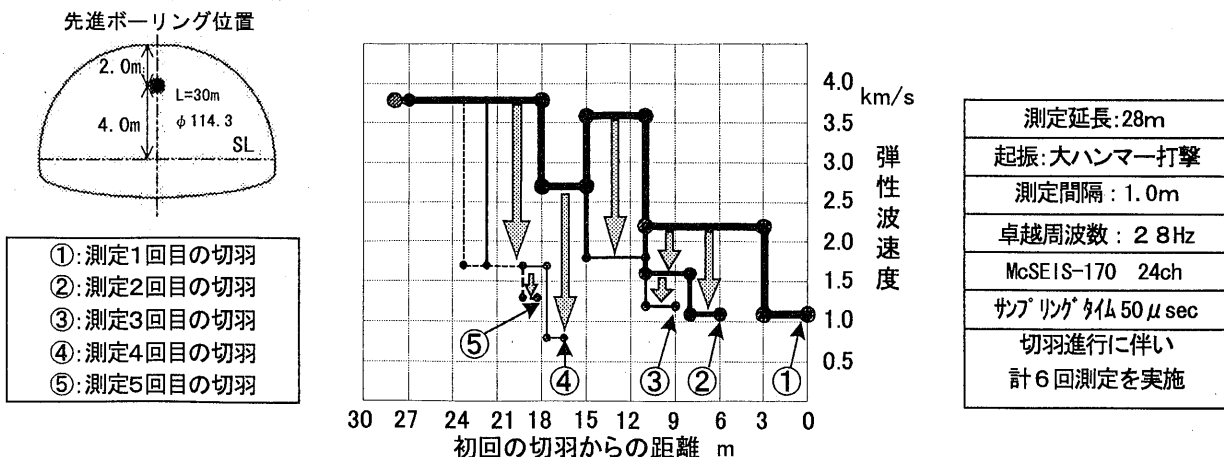


図-12 切羽進行に伴う切羽前方の弾性波速度の変化

Fig 12. Reduction of elastic wave velocity due to excavation.

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1 km/s 強まで低下していた。

4) トンネル断面方向の弾性波速度値の低下状況

トンネル断面方向の弾性波速度値分布を捕らえるため、トンネル下半盤で弾性波探査を実施した。図13にトンネル下半盤で行った弾性波探査の概要図を示し、図14に丹波帯での最下層の速度値に対する深度毎の弾性波速度値を示す。トンネルから3m深部では事前の弾性波探査で得られた速度に達しており、また、速度が変化しなくなる最下層であった。一方、3m以浅では、トンネルに近づくにつれ、弾性波速度値が低下していた。

また、最下層の速度値が速いほど速度値低下の範囲がばらついており、“元の弾性波速度値が大きいものほど速度値が低下する”傾向が見られる。このことは既存資料整理で見られた“地山の弾性波速度値が3.0km/s 以上で乖離が大きくなる”ことと関連がある。

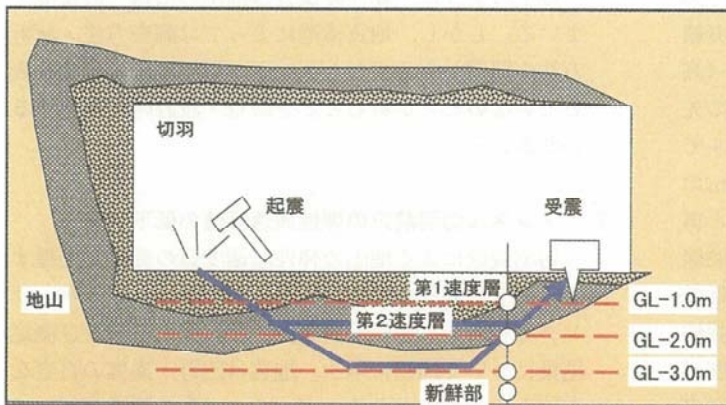


図-13 弾性波探査概要図

Fig 13. Method of elastic wave survey in tunnel.

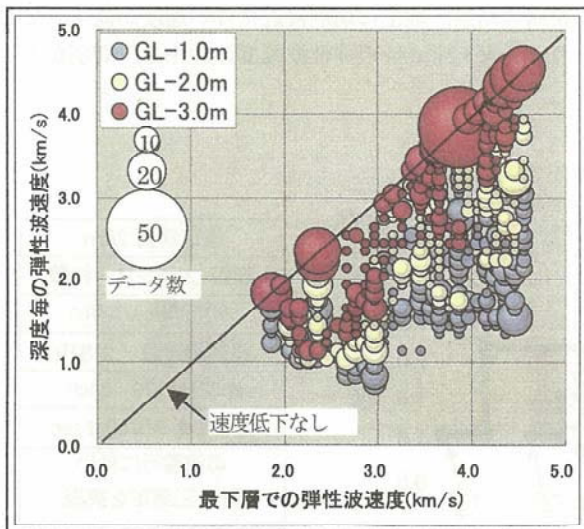


図-14 下半盤での弾性波探査結果 (全データ)

Fig 14. Comparative plots of elastic wave velocity at between each depth and lowest one (from whole data).

5) 岩種毎の弾性波速度値低減率

岩種毎の弾性波速度値低減率は、トンネル下半盤で実施した弾性波探査結果の最下層の弾性波速度値とGL-1 mでの弾性波速度値との比率により算出した。GL-1 mとしたのは掘削面の凹凸の影響、埋め戻しの影響を考慮したものである。図15~図17に岩種毎の弾性波速度値低下状況を示し、表2に岩種毎の弾性波速度値低減率についてまとめた。丹波帯(中・古生層頁岩砂岩)で最も速度低下が大きく、第三紀塊状泥岩で速度低下が少ない。弾性波速度値の低下が支保の乖離の原因とすれば、資料整理結果にもあった古い地質ほど乖離が大きくなることと一致している。この原因として、中・古生層は固結度が高いため応力解放前は速い弾性波速度値を示すが、長年の地殻変動によりダメージを受けることで潜在クラックを多く含み、トンネル掘削に伴う解放応力により弾性波速度が低下しやすいことが挙げられる。

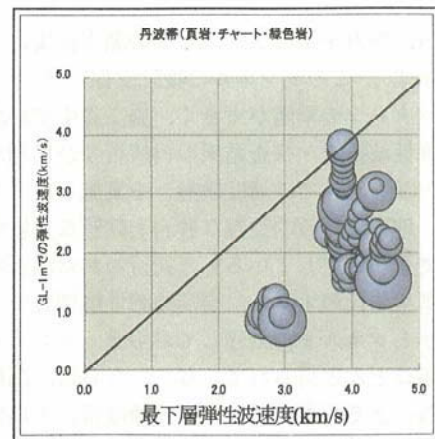


図-15 GL-1 mでの弾性波速度 (丹波帯)

Fig 15. Reduction of elastic wave velocity (alternation).

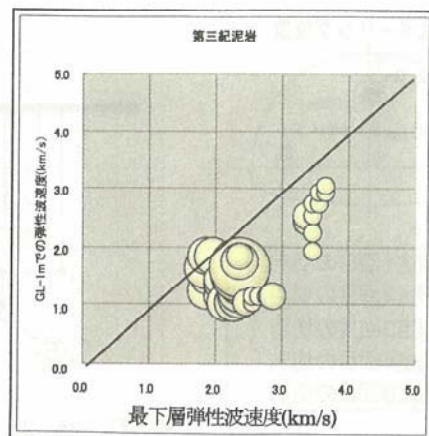


図-16 GL-1 mでの弾性波速度 (第三紀泥岩)

Fig 16. Reduction of elastic wave velocity (tertiary mad stone).

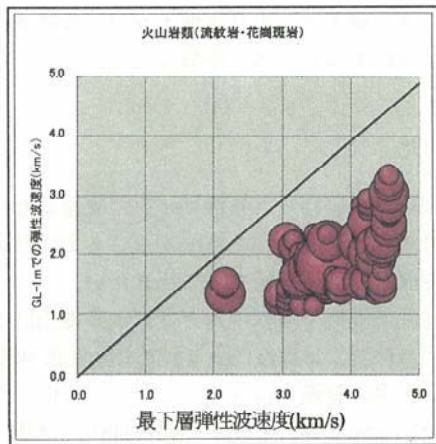


図-17 GL-1mでの弾性波速度(火成岩)
Fig 17. Reduction of elastic wave velocity (granite, rhyolite).

6) 弾性波速度値とトンネル支保の関係

弾性波速度値による適切な支保パターンの選定を目的として下半盤GL-1mでの弾性波速度値と切羽評価点及び実施支保パターンとの比較を行った。図18にGL-1mでの弾性波速度値と切羽評価点の比較について示す。これを見ると、下半盤GL-1mの弾性波速度値と切羽評価点にはある幅で相関が見られ、下半盤の弾性波速度値から切羽評価点を介して適切な支保パターンが選定できる。この下半盤の弾性波速度値から推測される適切な支保パターンと、実施支保パターンとの比較を行ったところ両者はほぼ一致しており(図19)、下半盤での弾性波探査が支保選定に非常に有効であることを示している。

表-2 現地試験による地山弾性波速度の低減率とりまとめ結果

Table 2. Summary of reduction percentage of elastic wave velocity from the survey.

地質	低減率	岩種	岩盤グループ	低減率*
第三紀層	75%	泥岩	層状・軟質	75%
中生代層 (丹波帯)	40~60%	頁岩主体瓦層	層状・中硬質	40%
		頁岩・泥岩		50%
		チャート・緑色岩	塊状・硬質	60%
火成岩類	50~55%	流紋岩	塊状・中硬岩	55%
		花崗斑岩	塊状・硬質	53%

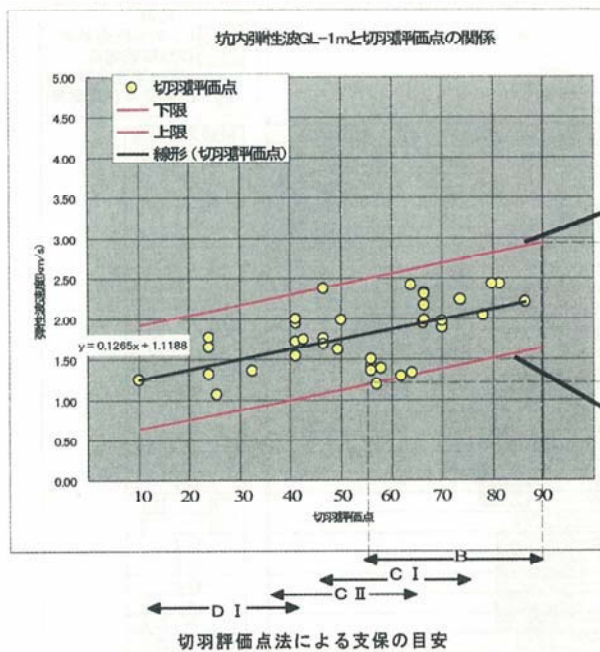


図-18 弾性波速度と切羽評価点の関係
Fig 18. Elastic wave velocity and rating of ground condition at tunnel face.

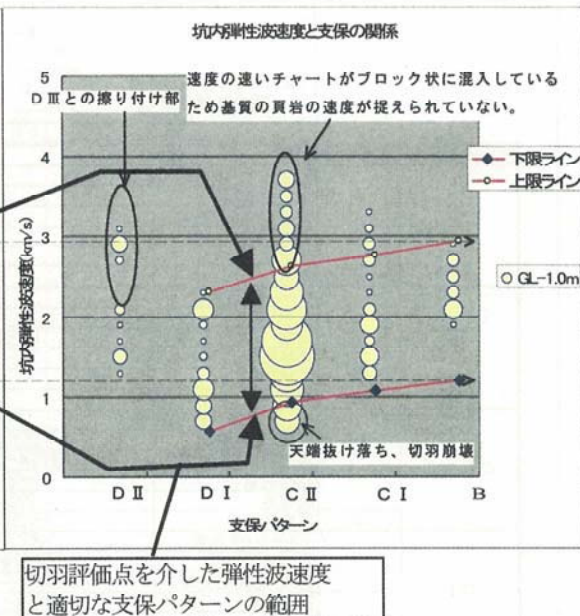


図-19 弾性波速度と実施支保パターンの関係
Fig19. Elastic wave velocity at tunnel face and adopted support.

5. 考察

以上の調査結果を考察すると以下のような結論が得られる。

- ① 地表面からの弾性波探査は、概ねトンネル施工面付近の弾性波速度を表している。
- ② トンネル周辺は掘削により弾性波速度が低下しており、岩種毎に低減率が異なる。
- ③ トンネル周辺の弾性波速度から適切な支保パターンの選定が可能。

となる。このことは事前の弾性波探査で得られた速度値に岩種毎の低減率をかけてトンネル施工時の弾性波速度を推定することでより適切な支保パターンの選定が可能であることを示している。

そこで、実証試験を行えた地質・岩種で ①現在のトンネル技術基準地山区分表 ②今回得られたデータを基にした低減率を考慮した地山区分 ③既存資料整理結果について比較を行った(表3)。既存資料に比べ、トンネル技術基準地山区分表では弾性波速度が速い部分で過小な地山区分となるが、低減率を考慮した場合の地山区分は過去の施工実績とはほぼ一致している。

今回はトンネル周辺の弾性波速度値による定量的で適切な支保選定の可能性を示し、岩種毎の弾性波速度値低減率を考慮した“事前の弾性波探査による乖離の少ない設計手法”の検討を行った。これにより、支保変更の少

ないスムーズな施工や、より迅速・妥当な設計変更が可能となり、最終的にはコスト縮減に結びつくものと考えられる。

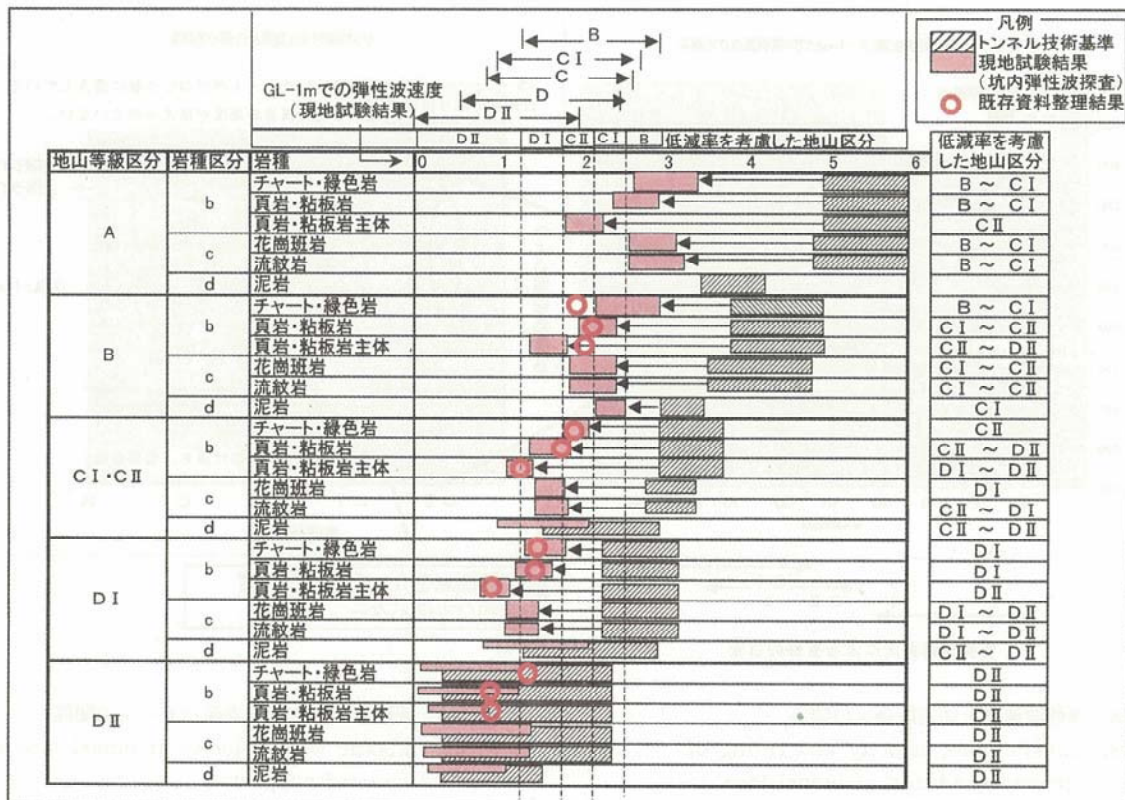
6. おわりに

今回は限られた岩種及び条件について実証したに過ぎないが、今後、以下の課題を解決することでより合理的な設計・支保選定方法を確認して行きたい。

- ① 弾性波速度低下領域の大きさによる地山評価
今回の検討では深度GL-1mでの弾性波速度値で適切な支保の評価を行った。しかし、DIIパターンより重い支保で補助工法が必要な地山では弾性波速度値での評価が難しいと考えられる。そこで評価の1つとして、弾性波速度低下領域の大きさによる地山評価も今後検討していく。
- ② 切羽での弾性波速度値による切羽の定量的客観的評価について
トンネル下半盤での弾性波探査は非常に有効であったが、切羽での弾性波探査は、切羽の不陸や部分的な影響を受けばらつきが大きかった。今後は切羽での弾性波探査方法を改善しつつ、さらに多くの岩種でデータを収集し、弾性波速度による迅速・定量的な切羽評価法を確立する。
- ③ 実施支保パターンの妥当性評価
実施支保パターンの妥当性についてA計測やB計

表-3 トンネル技術基準と現地試験結果比較

Table 3. Modification of tunnel support design based on JH standard from the proposed method.



測結果等を基に評価する。将来的にはトンネル周辺の応力解放メカニズムを明らかにし、支保部材の応力や地中変位計測結果を基に解析的に評価を行う。

謝 辞

本報告は国土交通省近畿地方整備局道路部、日本道路公団田辺工事事務所、大成建設・東急建設企業体の皆様と共著・発表した報文を再編集したものである。関係された皆様に謝意を表します。また、本報文執筆に当たっては技術本部岡部本部長、同岩盤技術部中西課長、同石澤課長補佐からは有益な助言を多数頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大橋弘紀・木村正樹・竹内智明・佐治嘉朗 (2001) : 近畿地方の丹波帯・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, 2001, pp~pp.
- 2) 城間博通・赤木渉・岡部幸彦・中西昭友 (2002) : 支保実績から分析した弾性波速度評価の一考察, トンネルと地下 vol.33 No. 9, 2002, pp49~pp57.
- 3) 社団法人 日本道路協会 : 道路トンネル技術基準 (構造編) 同解説, 1989. 6.
- 4) 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, pp429~pp438.
- 5) 高橋貴子・村重直邦・木村正樹・田中崇生・小川哲司・足達康軌 (2002) : 四万十帯におけるトンネル設計時の地山評価の留意点 : 日本応用地質学会関西支部平成14年度講演会, 2002, pp15~pp18.
- 6) 木村正樹・高橋貴子・古田尚子・田中崇生・足立康軌 (2002) : 四万十帯におけるトンネル周辺の弾性波速度と地山評価, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第12巻, 2002, pp39~pp44.
- 7) 大橋弘紀・木村正樹・森内利臣・竹内智明 (2002) : 弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル設計について, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第12巻, 2002, pp235~pp240.

