

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

Efficient design of tunnel support in use of elastic wave rate of rock mass

大橋弘紀²⁾・木村正樹¹⁾・森内利臣³⁾・竹内智明³⁾

Hiroki OHASHI, Masaki KIMURA, Toshimi MORIUCHI, Tomoaki TAKEUCHI

Elastic wave exploration is very useful to evaluate the rock mass. So, the support design of the mountain tunnel is normally determined by the applicable standard support pattern to ground classification according mainly to the elastic wave exploration result. In fact, however, the rock mass come loose by constructing tunnel. So, we need to design the tunnel support in considering of that.

In this paper, we connected the loosening of the rock mass and decrease of elastic wave rate by investigating elastic wave rate around the tunnel as excavated and suggested the efficient tunnel support design method incorporated loosening of rock mass by use of decrease of elastic wave rate.

Key Words: design, tunnel support, seismic survey, rock mass loosening

1. はじめに

トンネルの設計支保パターンと実施支保パターンは乖離することが多い。近畿地方では特に美濃丹波帯と四万十帯の頁岩主体の堆積岩で、支保パターンのランクアップが大きく¹⁾²⁾、精度の高い支保設計が課題となっている。

この乖離の要因の一つとして地山区分・支保設計における弾性波速度に重点をおいた設計法が挙げられる。

NATMトンネルの支保パターンは地山区分表³⁾に基づき、地表面からの弾性波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。しかし、実際には、

- ① 限られたボーリングコアによるトンネル全体の地質評価が難しい。
- ② 弾性波探査はトンネル全線の面的な情報の取得が可能で定量的な評価が可能である。

ことから弾性波速度に重点をおいた評価が多い。

しかし、弾性波探査速度は施工前（応力解放前）の地山の評価であり、施工中及び施工後（応力解放後）の評価ではない。また、地質や岩種により応力が開放された場合の状況が異なることも推測される。つまり、トンネル設計時には、施工前の弾性波速度と地質・岩種から施工中及び施工後の地山状況を推測する必要がある。

そこで、既存資料と現地調査により、

- ① 施工前の弾性波速度と設計支保及び実績支保の関係
- ② 施工前の地山の弾性波速度と施工中・施工後の弾性波速度の関係
- ③ 施工中・施工後の弾性波速度と実績支保の関係

を地質・岩種毎に調査分析し、弾性波速度による合理的な支保パターンの設計について検討を行った。

1) 正会員 応用地質(株) 関西支社 技術部

2) 応用地質(株) 関西支社 技術部

3) 国土交通省 近畿地方整備局

2. 調査・検討方法

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、設計・実施支保パターンの乖離状況と地質毎の弾性波速度と実施支保パターンとの関係を整理した。次に、施工中の4トンネルにおいて切羽や下半盤で弾性波探査を実施し、地表面からの弾性波探査精度の確認後、①トンネル掘削による周辺地山の弾性波速度低下状況②弾性波速度とトンネル支保パターンとの関係について取りまとめを行った。資料収集及び現地試験を行ったトンネルを図1に、現地試験トンネルの諸元を表1に、調査検討の流れを図2に示す。



図1 資料整理・実証試験実施トンネル位置図

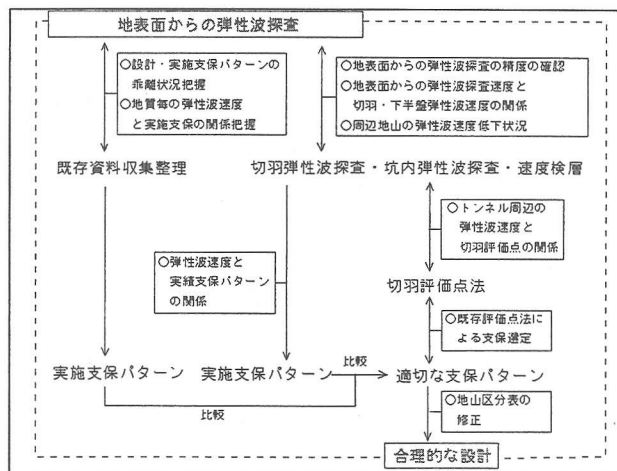


図2 調査検討の流れ

表1 現地試験トンネル諸元

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

3. 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。近畿地方の地質は、海洋プレートが沈み込む際に削り取られ日本列島側に付加した「付加体」が大部分を占めており、整理したトンネルの地質構成も付加体の頁岩を主体とした互層が最も多い(図3)。地表面からの弾性波探査速度は 4km/s 以上を示すものが 30% 以上 3km/s 以上を示すものが 60% 以上あった(図4)

一方、設計支保パターンと実施支保パターンの比較を行うと、地表面からの弾性波探査速度が 3.0km/s 以上でランクアップによる乖離が大きく、特に設計で B、C I であったものがほとんど C II で施工されている(図5)。

また、地質毎に乖離状況が異なり、砂岩・チャートは弾性波速度が 4km/s 以上で 2 ランクの乖離、頁岩・粘板岩は速度によらず 1 ランクの乖離、互層は 3km/s 以上で 2 ランクの乖離となっている(図6)。

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・丹波帯の方が重い支保パターンで施工されていた(図7)。

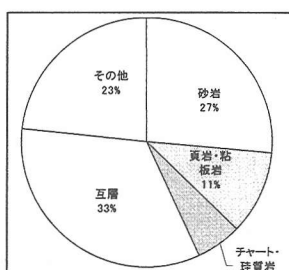


図3 資料整理トンネル地質構成

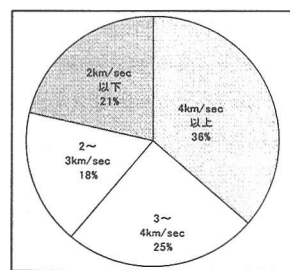


図4 資料整理トンネル弾性波速度構成

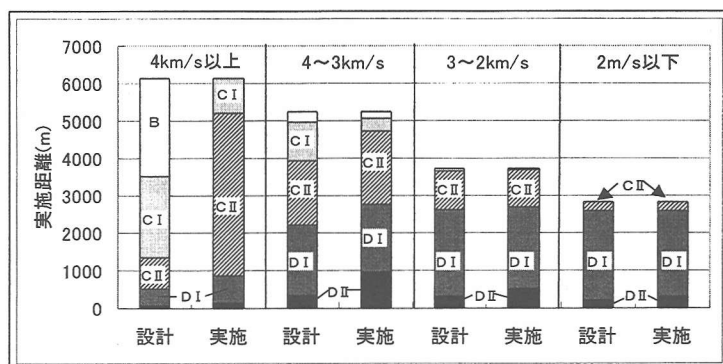


図5 弾性波速度毎の設計・実施支保パターン

岩種	2km/s以下	2~3km/s	3~4km/s	4km/s以上
チャート珪質岩	D I	D I	C II	B→C II
砂岩	D I	D I	C I→C II	B→C II
頁岩	データなし	C II→D I	C I→C II	B→C I
粘板岩	データなし	D I→D II	C II→D I	B→C I
互層	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6 岩種毎の設計・実施支保パターン

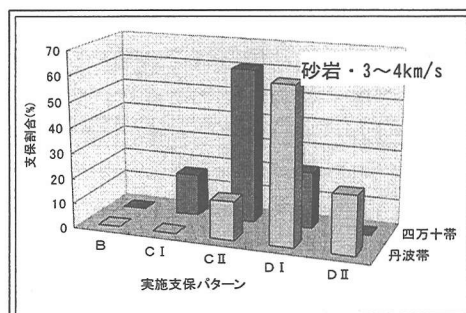


図7 地質構造帯での比較

4. 地表面からの弾性波探査精度の確認

設計支保パターンと実施支保パターンの乖離の原因として地表面からの弾性波探査の精度に限界があることが考えられる。そこで丹波帯の施工中のトンネルにおいて、地表面からの弾性波探査結果(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)と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-3m)について比較を行い、地表面からの弾性波探査精度の確認を行った。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8に各弾性波探査のイメージ図を示し、図9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%の誤差であり、このトンネルでは地表面からの弾性波探査は一定の精度を確保していることが確認された。

ただし、事前の弾性波探査がトンネル付近の地山の情報を持っていなかった例³⁾があり、想定される地質構造によっては設計時に留意が必要である。

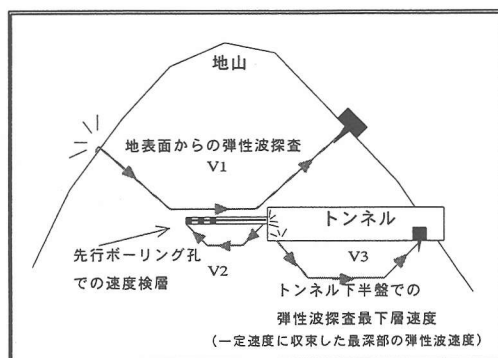


図8 弾性波速度概要図

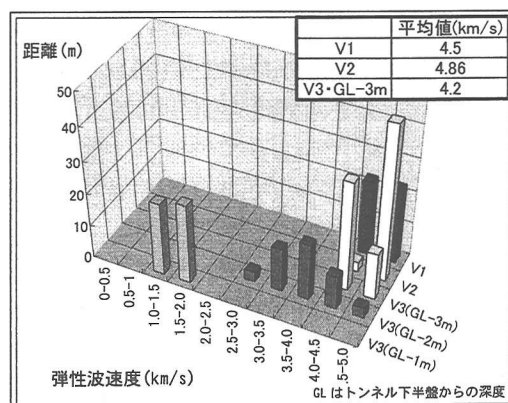


図9 弾性波速度分布図

5. トンネル掘削による周辺地山の弾性波速度低下状況

図 10 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 11 に丹波帯での最下層の速度に対する深度毎の弾性波速度を示す。トンネル下部では深くなるにつれ弾性波速度が速くなり、GL-3m で概ね最下層の速度に達していた。

また、最下層の速度が速いほど速度低下の範囲がばらついており、“元の弾性波速度が速いものほど速度が低下する”傾向が見られる。このことは既存資料整理で見られた“地山の弾性波速度が 3.0km/s 以上で乖離が大きくなる”ことと関連がある。一般に同じ岩種でも土被りが大きいほど弾性波速度が高い。これは土被り応力により、亀裂が密着しているためと考えられる。つまり、元の弾性波速度が速いほどトンネル施工時の応力開放量が大きく、これが弾性波速度の大きな低減理由と考えられる。

岩種毎の弾性波速度低減率は、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と GL-1m での弾性波速度との比率により算出した。GL-1m 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 12～図 13 に岩種毎の弾性波速度低下状況を示し、表 2 に岩種毎の弾性波速度低減率についてまとめた。丹波帯（中生古層 頁岩砂岩）で最も速度低下が大きく、第三紀泥岩で速度低下が少ない。弾性波速度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、中生古層は固結度が高いため応力解放前は速い弾性波速度を示すが、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応力開放により緩みやすいことが挙げられる。

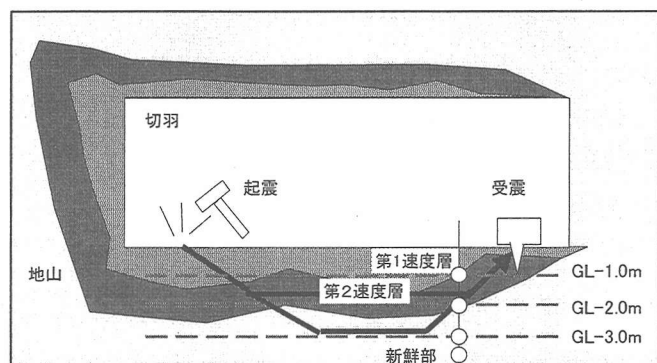


図 10 弾性波探査概要図

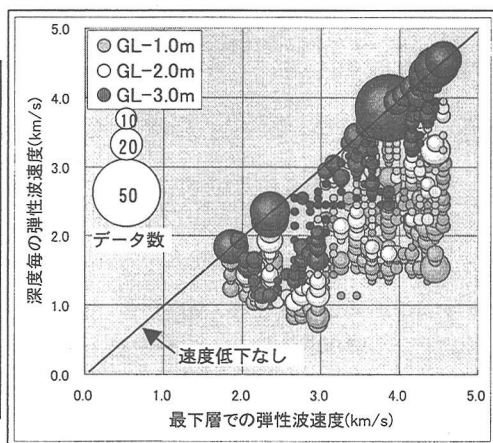


図 11 下半盤での弾性波探査結果
（全データ）

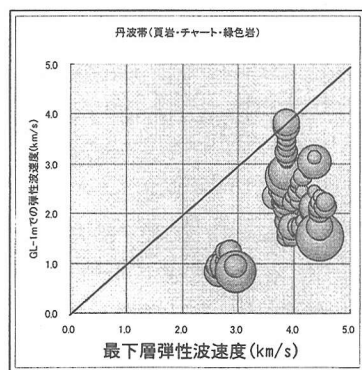


図 12 GL-1mでの弾性波速度
（丹波帯）

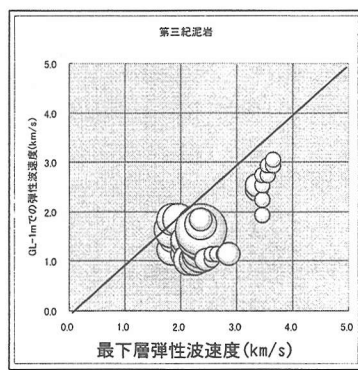


図 13 GL-1mでの弾性波速度
（第三紀泥岩）

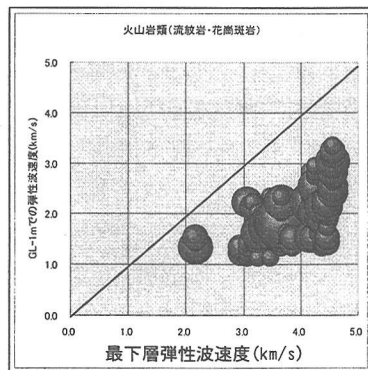


図 14 GL-1mでの弾性波速度
（火成岩）

表 2 実証試験結果

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%
中生層 (丹波帯)	40～60%	頁岩主体互層	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%

6. 弾性波速度とトンネル支保の関係

弾性波速度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 15 に GL-1m での弾性波速度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 弾性波速度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 16）、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。

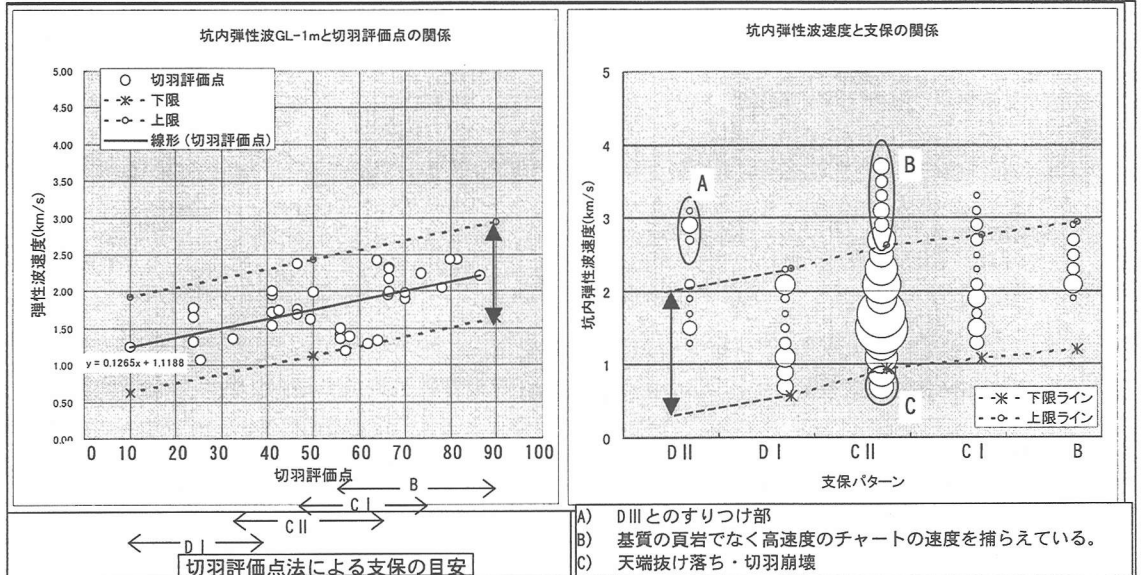


図 15 弾性波速度と切羽評価点の関係

図 16 弾性波速度と実施支保パターンの関係

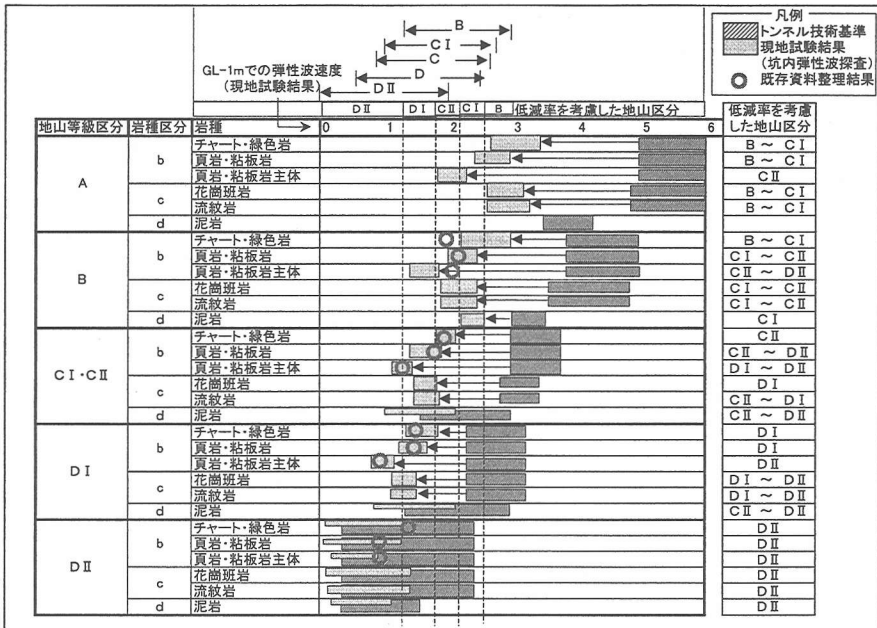
7. 地表面からの弾性波探査による合理的な設計手法の検討

以上の調査検討結果をまとめると

- ①地表面からの弾性波探査は一定の精度が確保されている。
- 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。このことは地表面からの弾性波探査速度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合理的な設計が行えることを示している。そこで、実証試験を行なった地質・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ほぼ一致している。

表3 トンネル技術基準と現地試験結果比較



8. おわりに

今回はトンネル周辺の弾性波速度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低減率を考慮した“地表面からの弾性波探査による合理的な設計手法”の検討を行った。これにより、設計の精度向上による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。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高精度・合理的な設計・支保選定方法としたい。

① 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、傾向はあるが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したい。

② 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、解析的に評価を行う。

③ 事前弾性波探査の精度確認

今回の実証試験では事前の弾性波探査の精度が確認できたが、一般的な弾性波探査結果解析法である“荻原の方法（いわゆる剥ぎ取り法）”で解析された場合、弾性波の経路がわからず、弾性波探査がトンネル施工面付近の情報を捉えていない場合がある。よって、過去の弾性波探査結果をトモグラフィ解析法で再解析し、その精度を確認するとともに、適切な事前弾性波探査の手法について提案を行いたい。

参考文献

- 1) 大橋弘紀・木村正樹・竹内智明・佐治嘉朗；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の対比；日本応用地質学会関西支部平成13年度講演会
- 2) 城間博通・赤木渉・岡部幸彦・中西昭友；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
- 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) 高橋貴子・村重直邦・木村正樹・田中崇生・小川哲司・足達康軌；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