

岩盤掘削に伴う緩みの評価に向けた 地質調査データの分析事例について —先進ボーリング調査の速度検層重複区間における P波速度の岩種別低下割合—

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム ○岡崎 健治
川又 基人
倉橋 稔幸

岩盤を掘削すると、その表面付近では、応力の解放や状態の変化、亀裂の顕在化に伴う塑性領域が発生する場合があります、その領域の拡大や外因等が作用することで崩落する場合があります。

トンネルの掘削では、掘削面である切羽の観察や切羽から水平方向への先進ボーリング調査によって掘削毎に出現する岩盤の性状を評価し、崩落等による災害の未然防止に務めている。

本報告では、幾つかの国道トンネルについて、先進ボーリング孔内での速度検層によるP波速度を、同じトンネルの地山深部で測定された値と切羽周辺で測定された値を比較した。その結果、切羽周辺のP波速度は地山深部よりも2割程度低下していることがわかった。

キーワード：岩盤、P波速度、速度検層、塑性領域、緩み

1. はじめに

トンネル掘削時における切羽崩落等の未然防止に向けて「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」が改正¹⁾されるとともにトンネル工事では切羽へのコンクリートの吹き付けが標準工種に改定された²⁾。しかし、このような施工や対策が行われても災害が発生する場合があります³⁾、リアルタイムでの掘削時の切羽監視技術も開発されている⁴⁾。

切羽の崩落や肌落ちを生じやすい岩盤の特徴を予め把握することができれば、その予見や掘削後の切羽の安定性を評価するために有効な情報となる。ここで、先進ボーリング調査⁵⁾は切羽前方100m程度までの地質を確認できるとともにコアの室内試験や孔内での速度検層によるP波速度によって岩盤の状態を評価している。

剣持ら⁶⁾は膨張性を有する泥岩を地山とするトンネルにおいて、同一位置の側壁で掘削に伴う複数回の弾性波探査を行い、低速度領域を掘削による緩み領域として扱い、側壁表面からの深度と、探査区間内での地中変位計測による変位の発生深度が一致したことを示している。

また、木村・大橋⁷⁾は頁岩を地山とするトンネルにおいて、切羽から前方へ30m掘削した水平ボーリング孔内での速度検層によるP波速度を初期値として、切羽の掘削に伴い同じ孔内で測定したP波速度を比較した結果、切羽が6m近づいた際と同じ測点位置でのP波速度は3.8km/sから1.0km/sまで低下したことを示している。

そこで本報告では先進ボーリング孔内での速度検層によるP波速度の低下がトンネル掘削に伴う地山の緩みで生じると仮定し、火山岩と第三紀堆積岩類を地山とするトンネルを対象に、初回のP波速度と、トンネル掘削の進行に伴い次の切羽からの先進ボーリング孔内(図-1)で測定された同一区間(以下、重複区間)のP波速度を比較して、P波速度の変化の割合を岩種別に分析したので、その結果について述べる。

2. 調査トンネルと分析方法

(1) 調査トンネル

表-1、2に火山岩と第三紀堆積岩類における調査トンネルの延長、先進ボーリング調査の孔数、重複孔数及び重複区間における主な岩種を示す。

火山岩を地山とするトンネルのデータは総延長約12kmで65孔の先進ボーリング調査結果を用いた。そのなかで速度検層の重複孔数は20孔であった。重複区間の主な岩種は、安山岩、凝灰角礫岩、自破碎溶岩であった。

一方、第三紀堆積岩類を地山とするトンネルのデータは総延長約11kmで104孔の先進ボーリング調査結果を用いた。そのなかで、速度検層の重複孔数は8区間であった。重複区間の主な岩種は、泥岩、砂岩、凝灰質砂岩、砂岩泥岩互層であった。なお、先進ボーリング調査はト

表-1 調査トンネル（火山岩）

名称	延長(m)	孔数	重複孔数	重複区間の主な岩種
V1	2,115	9	2	安山岩・凝灰角礫岩
V2	2,455	12	5	凝灰角礫岩
V3	2,900	19	9	凝灰角礫岩
V4	1,970	15	3	安山岩・自破碎溶岩
V5	2,509	10	1	安山岩・自破碎溶岩
計	11,949	65	20	

表-2 調査トンネル（第三紀堆積岩類）

名称	延長(m)	孔数	重複孔数	重複区間の主な岩種
S1	2,310	26	3	泥岩
S2	896	6	1	凝灰質砂岩
S3	4,460	40	1	砂岩泥岩互層
S4	2,265	20	2	砂岩泥岩互層
S5	1,173	12	1	砂岩
計	11,104	104	8	

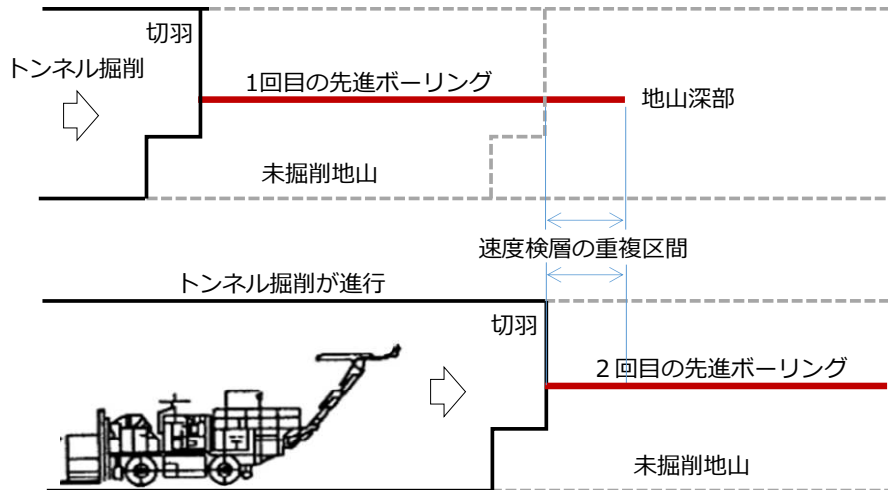


図-1 速度検層の重複区間の概要図（上：1回目の先進ボーリング、下：2回目の先進ボーリング）

ンネルや実施区間ごとに調査を担当する会社や実施する調査内容と数量で異なる場合があること、さらに、各社の報告書のまとめ方が異なり重複区間での速度検層の結果が記載されていないケースもあり使用できるデータは限られた。また、先進ボーリングの1孔当たりの平均掘削延長は96.2mで平均3.2日で掘削された⁸⁾。ただし、掘削の方向は仰角0~2°であるが孔曲がり量は調査されていない。本調査で対象とした重複区間はボーリング掘削した100m程度の先に位置することを前提としてデータを分析した。

(2) 分析方法

図-1に速度検層の重複区間の概要図を示す。1回目の先進ボーリング調査によって全区間の地質が確認され速度検層も実施される（図-1の上図）。トンネル掘削の進行に伴い切羽が地山深部に向かうが、トンネルの工程や次の先進ボーリング調査のコアの試験等に要する日数を考慮して1回目の先進ボーリング全線に対応する区間分をトンネル掘削する前に次の先進ボーリング調査が実施されることがある（図-1の下図）。そのため、1回目の先進ボーリング調査と、2回目の先進ボーリング調査の重複区間の切羽周辺では、両孔の調査結果が得られている。そこで、この重複区間の速度検層によるP波速度を

比較するとともに、その変化の割合を岩種別に分析した。

3. 分析結果

(1) P波速度の変化状況

先進ボーリング調査や各試験等の結果は、いずれのトンネルの報告書でも総括図として一覧が記載されていた。主な記載事項はボーリング区間に対応する土被りと地山の弾性波速度（P波速度）の他、ボーリング調査で得られる岩種岩質やコアの状態、RQD、速度検層によるP波速度、湧水量、孔内水平載荷試験による変形係数、コアの岩石試験結果、化学分析結果及び地山等級であった。

図-2に泥岩地山の先進ボーリング調査報告書に記載された重複区間の記載例を2つ示す。

図-2の上図は2回目の先進ボーリング調査の速度検層によるP波速度が1回目の値よりも低い例である。重複区間22mのうち1回目（B-10）の深部22mのP波速度が2.5km/sであるに対し2回目（B-11）のP波速度は切羽から深部2mまでが0.97km/s、それ以深の重複区間20mでは2.0km/sと低い値が測定された。これはトンネル掘削による緩みによってP波速度が低下したものと考えられる。

		重複区間					
測点		15,792	15,802	15,812	15,822	15,824	
土被り (m)				81.2 81.5	83.1 83.5 82.8 83.1	85	85.5 86.0
地山弾性波速度 (km/s) (地表踏査)				2.8~3.0			
速度検層 P波速度: Vp* (km/s)		上段: B-10号孔 15,794 (2.5)	15,812,45	測定不能	15,820		
		下段: B-11号孔 0.97 (2.0)	2.0		2.5 (26.0) (4.0)		
地質		古第三紀 幌内層群 幌内層					
岩種		泥岩					
ボ					15,824	15,830.4 15,	

		重複区間				
測点		15,687	15,697	15,707	15,717	15,719
土被り (m)					71	72.6
地山弾性波速度 (km/s) (地表踏査)			2.4~2.6			
速度検層 P波速度: Vp* (km/s)		上段: (B-9号孔) 15,689 (2.5)	15,707	測定不能	孔壁崩壊のため測定不能	
		下段: B-10号孔 1.2 (2.0)	2.6			
地質		古第三紀 幌内層群 幌内層				
岩種		泥岩				
ボ					15,719	15,720.65

図-2 先進ボーリング重複区間の記載事例 (上: 2回目のP波速度が1回目より低い例、下: 2回目のP波速度が1回目より高い例)

両者の変化の割合は2回目の2.0km/sを1回目の2.5km/sで割ると0.80となりP波速度は20%減少した。

一方、図-2の下図は2回目の先進ボーリング調査の速度検層によるP波速度が1回目の値よりも高い例である。

重複区間22mのうち1回目 (B-9) の深部22mまでのP波速度が2.5km/sであるに対し2回目 (B-10) のP波速度は切羽から深部2mまでが1.2km/sと低いが、それ以深の重複区間20mでは2.6km/sと高い値が測定された。両者の変化の割合は、最初の2mの区間では2回目の1.2km/sを1回目の2.5km/sで割ると0.48となりP波速度は52%減少した状態であった。また、次の20mの区間では2回目の2.6km/sを1回目の2.5km/sで割ると1.04となりP波速度は4%増加した状態であった。これは1回目のボーリング深部は記載のとおり孔壁が崩壊するような状況に対し2回目の掘削では良好な状況であったこと、または1回目の孔内の状態が局部的に悪かったことが増加の原因と考えられる。

本調査では重複区間における1回目と2回目の切羽での先進ボーリング孔の詳細な相互の位置関係を確認していないが、重複区間であっても切羽に現れる地質の硬軟や走行傾斜、亀裂や破砕の状態によってP波速度は異なると考えられる。

(2) 火山岩のP波速度の変化

表-3に火山岩を地山とする5トンネルのP波速度の変化の割合を示す。重複区間の合計は267.1mであり重複区間長は2.0~32.0mで平均13.4mであった。また、1回目のP波速度は1.05~3.90km/sで平均3.18km/sであり、2回目は0.70~3.90km/sで平均2.58km/sであった。両者の割合は0.20~1.11で平均0.83で、この割合は地山深部にトンネルの掘

表-3 P波速度の変化の割合 (火山岩)

トンネル名称	重複区間番号	重複区間長 (m)	P波速度 (Km/s)		割合 (B/A)	掘削方式
			A 1回目	B 2回目		
V1	1	8.0	3.20	2.30	0.72	発破
	2	11.0	2.80	2.93	1.05	発破
V2	1	4.0	2.97	3.31	1.11	機械
	2	3.7	3.45	2.00	0.58	機械
	3	23.3	3.45	3.00	0.87	機械
	4	12.0	2.50	2.60	1.04	機械
	5	2.8	3.29	3.17	0.96	機械
V3	1	10.6	3.15	3.15	1.00	発破
	2	15.6	3.80	3.80	1.00	発破
	3	2.0	3.50	0.70	0.20	発破
	4	7.8	3.50	3.90	1.11	発破
	5	2.0	3.90	1.40	0.36	発破
	6	16.0	3.90	3.10	0.79	発破
	7	9.7	3.90	3.50	0.90	発破
	8	2.0	3.40	1.65	0.49	発破
	9	18.8	3.40	3.30	0.97	発破
V4	1	31.3	2.40	1.70	0.71	機械
	2	25.0	3.30	2.00	0.61	機械
	3	32.0	2.70	2.90	1.07	機械
V5	1	29.5	1.05	1.17	1.11	機械
最小値	—	2.0	1.05	0.70	0.20	—
最大値	—	32.0	3.90	3.90	1.11	—
平均値	—	13.4	3.18	2.58	0.83	—
合計	20	267.1	—	—	—	—

削で切羽が重複区間に接近したことで緩みが生じた状態をP波速度が現していると考えられ、火山岩を地山とす

表4 P波速度の変化の割合（第三紀堆積岩類）

トンネル 名称	重複 区間 番号	重複 区間長 (m)	P波速度(Km/s)		割合 (B/A)	掘削 方式
			A 1回目	B 2回目		
S1	1	2.0	2.50	1.20	0.48	機械
	2	18.0	2.50	2.60	1.04	機械
	3	2.0	2.50	0.97	0.39	機械
	4	19.0	2.50	2.00	0.80	機械
	5	8.0	2.60	1.30	0.50	機械
	6	24.0	2.60	2.70	1.04	機械
S2	1	30.0	2.50	2.50	1.00	発破
S3	1	2.0	3.20	1.90	0.59	発破
	2	5.0	3.20	2.80	0.88	発破
S4	1	7.0	2.50	2.20	0.88	発破
	2	4.0	2.50	2.80	1.12	発破
S4	1	30.0	2.50	2.35	0.94	発破
	2	45.6	2.75	2.25	0.82	発破
最小値	—	2.0	2.50	0.97	0.39	—
最大値	—	45.6	3.20	2.80	1.12	—
平均値	—	15.4	2.64	2.12	0.81	—
合計	13	196.6	—	—	—	—

るトンネルではP波速度が17%減少した。なお、掘削方式別のP波速度の変化の割合は、機械掘削が0.58～1.11で平均0.90、発破掘削が0.20～1.11で平均0.78と、発破掘削でP波速度の減少が多い。また、対象とした20孔のうち、速度検層の走時曲線が残っていた5孔について、各孔の第1速度層（切羽周辺）とそれより深部の第2速度層のP波速度を比較すると、第2速度層の平均P波速度3.18km/sに対し、平均区間長3.2mの第1速度層では1.59km/sと0.53の割合で低下していた。

(3) 第三紀堆積岩類のP波速度の変化

表-4に第三紀堆積岩類を地山とする5トンネルのP波速度の変化の割合を示す。重複区間の合計は196.6mであり重複区間長は2.0～45.6mで平均15.4mであった。また、1回目のP波速度は2.50～3.20km/sで平均2.64km/sであり、2回目は0.97～2.80km/sで平均2.12km/sであった。両者の割合は0.39～1.12で平均0.81で、この割合は地山深部にトンネルの掘削で切羽が重複区間に接近したことで緩みが生じた状態がP波速度で現されていると考えられ、第三紀堆積岩類を地山とするトンネルではP波速度が19%減少した。なお、掘削方式別のP波速度の減少の割合は機械掘削が0.39～1.04で平均0.71、発破掘削が0.59～1.12で平均0.89と、機械掘削でP波速度の減少が多い。また、対象とした13孔のうち、速度検層の走時曲線が残っていた8孔について、各孔の第1速度層（切羽周辺）とそれより深部の第2速度層のP波速度を比較すると、第2速度層の平均P波速度2.62km/sに対し、平均区間長3.6mの第1速度層では1.47km/sと0.56の割合で低下していた。

以上のように重複区間におけるP波速度の減少は岩種

や掘削方式によって異なることが分かった。トンネル掘削時の緩みは、トンネル掘削に伴う内空変位量やその変化傾向、トンネル支保部材の状態変化を観察することなどで評価されて安全に施工されているが、トンネル掘削前に得られる重複区間の速度検層によるP波速度の変化の割合を加味することは、切羽や周辺地山の緩みを予め評価するために、より有効な情報になると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本調査で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 火山岩を地山とするトンネルでは、先進ボーリング孔内で実施した速度検層によるP波速度に対し、トンネル掘削が進行した次の先進ボーリング孔内で測定した重複区間のP波速度は17%減少した。一方、第三紀堆積岩類を地山とするトンネルではP波速度は19%減少した。
- 2) トンネル掘削で切羽周辺に緩みを生じた状態をP波速度の現象が現していると考えられ、P波速度がその評価のための指標として有効であることが分かった。今後は、P波速度の変化とトンネル掘削に伴う変位量、重複区間における亀裂や地質性状との関係についても分析を進めたい。

謝辞：本調査の実施にあたり、ご協力頂いた国土交通省北海道開発局の関係各位に記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 厚生労働省労働基準局：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドラインの改正について、p. 14, 2018.
- 2) 国土交通省総合政策局：国土交通省土木工事積算基準の改定について、p. 107, 2019.
- 3) 山本拓治, 吉川 正, 鈴木雅行, 辻川泰人, 上岡真也, 白鷺卓, 曾根真理, 田中統蔵, 橋立健司, 杉本翔平：AIを活用したトンネル切羽の地質評価と肌落ち予測支援による災害防止に関する研究開発⑧—肌落ち災害と対策工の実態分析及びAIによる肌落ち予測への活用について—, 土木学会, 第76回年次学術講演会講演概要集, CS14-31, 2021.
- 4) 佐藤寿延：国土交通省におけるAIの取組, 令和2年土木学会全国大会岩盤力学委員会, 岩盤力学におけるICT/AIの活用, 研究討論会(9)資料, p. 9, 2020.
- 5) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領, 第4集トンネル, 第11章, 観察・計測工, p. 12, 2021.
- 6) 剣持三平, 竹津英二, 平林孝英, 森田隆三郎：膨張性地山中のトンネル施工—(1)切羽周辺の緩み領域調査, 土木学会, 第58回年次学術講演会講演概要集, III-025, 2003.
- 7) 木村正樹, 大橋弘紀：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, 応用地質技術年報, 第22号, pp. 117-125, 2002.
- 8) 岡崎健治, 倉橋稔幸：ボーリングコアの採取後からの経過日数に応じた物理特性の変化について, 土木学会, 第76回年次学術講演会講演概要集, III-169, 2021.