

互層地質における長期耐久性を考慮した 新たなインバート設置判定法の適用性

小林 大助¹・中野 清人²・山崎 哲也³

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: d.kobayashi.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

NEXCO が管理する山岳トンネルにおいて、約 50 チューブのトンネルで供用後に盤ぶくれが確認されている。この多くは、トンネル建設時に大きな変位などの発生が無く比較的良好な地山で長期耐久性に問題ないとしてインバート設置不要と判断したトンネルである。盤ぶくれが発生したトンネルでは、対策として、インバートを設置する工事を実施しているが、閉鎖的空間での施工条件などから施工効率が悪く、供用中路線を長期間交通規制して施工しており社会的影響が大きい。このような背景から、建設時のインバート設置判断に苦慮している互層地質のトンネルを対象に取り上げ、インバート設置を判定するフローを検討後、トンネル建設現場でそのフローを試行し、盤ぶくれ発生リスクを低減できた事例について考察する。

Key Words: invert, heaving, alternating geology, swelling of ground, long-term durability

1. はじめに

東・中・西日本高速道路（以下「NEXCO」という）が管理するトンネルにおいて、供用後に路面が隆起する盤ぶくれ現象（以下「盤ぶくれ」という）が確認されている（写真-1）。盤ぶくれは、全国約 50 チューブのトンネルで発生しており、この多くは、トンネル建設時に大きな変位や多量湧水などの発生が無く比較的良好な地山で、長期耐久性に問題ないとしてインバート設置が不要と判断されたトンネルである。

盤ぶくれにより、路面隆起量が大きくなると走行安定性の低下や建築限界を侵すなど車両走行安全上の支障をきたす。盤ぶくれの発生が顕著なトンネルでは、その対策として、インバートを設置する工事を実施してきているが、閉鎖的空間での施工条件などから施工効率が悪く、供用中路線を長期間交通規制して施工しており、社会的影響が大きい。このような背景から、本稿は、トンネル建設段階でのインバート設置判断に苦慮している互層地質で比較的良好な地山のトンネルを対象に取り上げ、インバート設置を判定するフローを検討したうえで、トン

ネル建設現場でそのフローを試行し、盤ぶくれ発生リスクを低減できた事例について考察する。

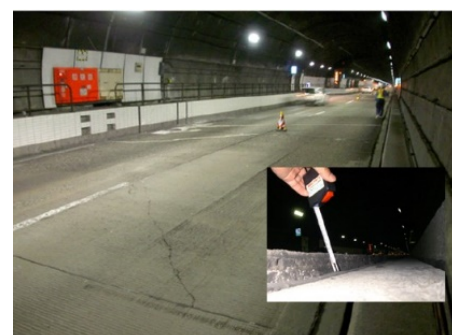


写真-1 盤ぶくれ発生状況^{① ②}

2. インバート設置基準

既往の研究³⁾より、インバートは「支保的インバート」と「覆工的インバート」に分類されるが、本稿では、長期的な安定を保持するための「覆工的インバート」について検討した。なお、「覆工的インバート」の効果と目的は、断面閉合効果や地山への内圧付与効果であり、地山劣化防止、長期的な耐久性向上、不確定要素に対する余力保持および長期的な変形性能保持を目的としている。

NEXCOにおけるインバート設置基準の変遷と現行基準を整理した結果を示す。

(1) インバート設置基準の変遷

供用後の維持管理段階で盤ぶくれに悩まされている実情から、インバートを安易に省略することは望ましいことではない。これまでの多くの実績や研究の成果を踏まえ、NEXCO設計要領ではインバート設置基準の改定を重ねており、その変遷を表-1に示す。

昭和45年に名神・東名・中央道などの施工実績から矢板工法を標準とした基準が制定され、地質区分Eは原則設置、地質区分Dは地質が悪い場合などに設置が望ましいとされた。昭和58年より、ロックボルトと吹付けコンクリートによるNATMが標準化されるとともに地質区分Dが原則設置、条件によっては省略できるとされた。昭和60年には、地山等級CI、CIIにおいても泥岩、凝灰岩等長期耐久性を損なう恐れがある場合は設置するとされた。その後、平成9年には標準支保パターンの見直しとともに泥岩、凝灰岩等は原則設置とされた。

(2) 現行のインバート設置基準

現行のインバート設置基準は次のとおりである。

1) 地山等級DI、DII、Eは原則としてインバートを設置する。

2) 地山等級CI、CIIにおいて、地質が泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土等、劣化が予測される地質（以下「懸念地質」という）では、トンネルの長期耐久性を損なう恐れがあるので、原則としてインバートを設置する。

しかし、実際のトンネル切羽では、地質は一様ではなく互層で複雑に分布していることが多く、地質によって判定する地山等級CI、CIIの場合は判断に悩まされる。また、長期耐久性に関して十分安全である場合は省略できるとされているが、その評価方法は具体的に示されたものがない。その他、水環境や土圧作用の変化等、地山の経年変化により、長期的な盤ぶくれの可能性をトンネル施工中に把握し、インバート設置要否を判断することは非常に難しく、個々の技術者の経験的判断に委ねるところが多い。そのため、大嶋らは、設計要領に加えて、

各種岩石試験により水による劣化や膨潤性の指標を考慮した設置基準を提案している（表-2（2））。⁴⁾

表-1 インバート設置基準の変遷

※下線部は改定箇所を示す

制定年度	原則設置の適用地山	インバートが必要となる地山条件
1970.1 S45.1	E	・地質区分Eは、原則設置 ・地質区分Dは、地質が悪いところや、著しい偏圧を受けるところはインバートを設けて閉塞し、安定した構造とすることが望ましい
1983.12 S58.12	坑口、D、E	・地質区分EおよびDは、原則設置 ・ <u>坑口部は、インバートを設置することとするが良好な地盤でも1打設長（10m程度）は設置</u> ・地質区分Dにあっては、 <u>支持力が長期的に十分な場合、押し出しが長期的に認められない場合、施工に伴う劣化の進行がなく、水の影響を受けても長期的に盤ぶくれが起きない場合に検討のうえ省略できる</u> ・ <u>その他の地質区分においても、部分的な悪条件で側壁の押し出しや路盤の変状が認められる場合には設置</u>
1985.1 S60.10	坑口、D、E	・地山等級DI、DII、Eの区間は原則設置 ・坑口部は、インバートを設置することとするが良好な地盤でも1打設長（10m程度）は設置 ・地山等級CI、CIIは、 <u>泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩でかつ長期耐久性を損なう恐れがある場合は設置</u> ・地山等級Dにあっては、支持力が長期的に十分な場合、押し出しが長期的に認められない場合、施工に伴う劣化の進行がなく、水の影響を受けても長期的に盤ぶくれが起きない場合に検討のうえ省略できる
1997.1 H9.10	坑口、C、D、E	・坑口部および地山等級DI、DII、Eの区間は原則設置 ・地山等級CI、CIIで第三紀泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土等は原則設置 ・ただし、トンネルの長期耐久性についての評価方法が示され、 <u>設置の要否を検討し十分安全である場合は省略してよい</u>
2009.7 H21.7 (現行基準)	坑口、C、D、E	・坑口部および地山等級DI、DII、Eの区間は原則設置 ・地山等級CI、CIIで泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土等は原則設置 ・ただし、トンネルの長期耐久性についての評価方法が示され、設置の要否を検討し十分安全である場合は省略してよい

表-2 インバート設置判定に関する内容

基準等	内容
(1) NEXCO設計要領のインバート設置基準	1) 地山等級DI、DII、Eは原則としてインバートを設置する。 2) 地山等級CI、CIIにおいて、地質が泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土など、劣化が予測される地質では、トンネルの長期耐久性を損なう恐れがあるので、原則としてインバートを設置する。
(2) 大嶋らによるインバート設置基準の提案 ⁴⁾	上記(1)の基準に加えて岩石試験により、水による劣化影響や膨潤性を判定
(3) 今回検討した新たなインバート設置判定法	上記(1)、(2)の基準に加えて岩石試験にX線回折を追加、路盤付近から試料採取、トンネル線状構造物の特性を考慮した最小施工単位の閾値を追加して判定

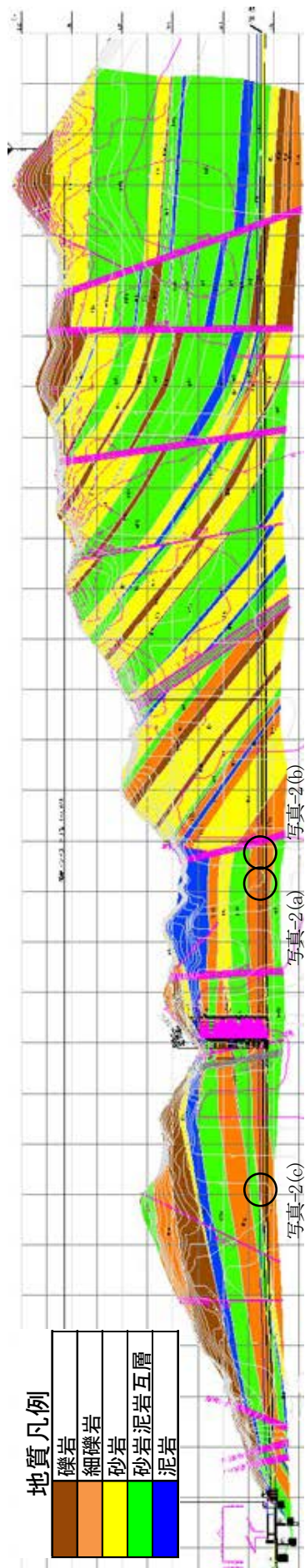


図-1 設計時の地質縦断面図 全線に渡って砂岩泥岩互層が複雑に分布

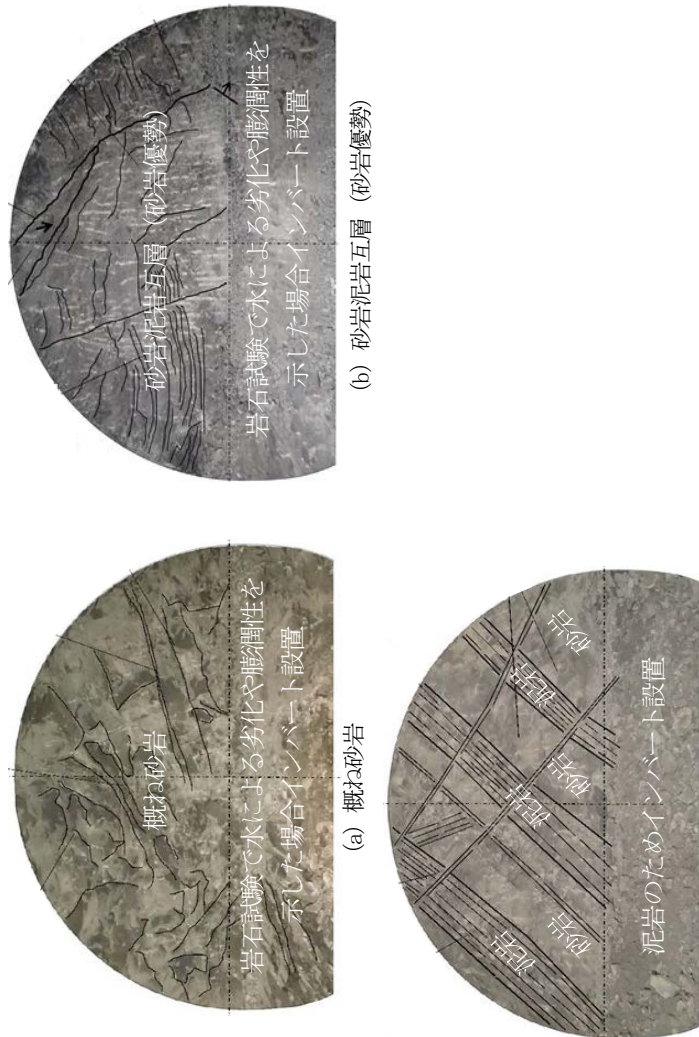


写真-2 検討対象トンネルの切羽状況

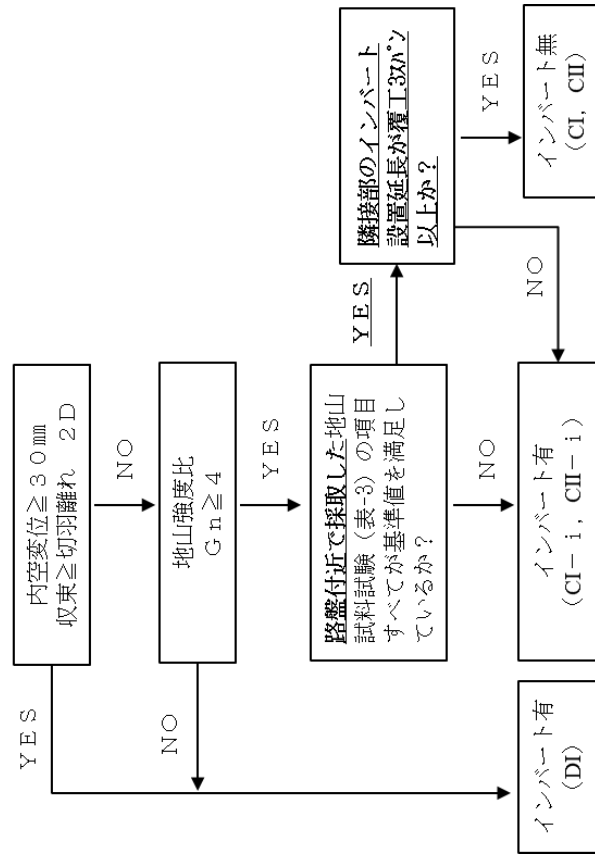


図-2 インバート設置判定フロー④に加味

3. 互層地質が分布するトンネルのインバート設置判定フローの検討

盤ぶくれ発生メカニズムは、未だ十分に解明されていないが、湧水や風化、粘土鉱物による膨潤の影響など地山強度の低下が主な要因であると考えられる。また、トンネル設計は、切羽評価や計測結果を活用し、合理的な支保設計（インバート有無を含む）を行うことが重要であるが、供用後に発生した多くの盤ぶくれ事例やその対策に要する多大な労力および社会的影響の大きさなども考慮する必要がある。

これらのことを踏まえ、図-1 に示す砂岩泥岩互層が分布する比較的良好な地山のトンネル建設時に NEXCO 設計要領を補足する手法として、インバート設置判定フローを検討した。

表-2 (1) の設置基準は、トンネル掘削時の切羽評価で判断する。切羽評価は、上半切羽で行い、写真-2 (c) のように砂岩泥岩互層（泥岩優勢）の場合はインバート設置の必要性を容易に判断できるが、写真-2 (a および b) のように上半切羽全体に砂岩または砂岩泥岩互層（砂岩優勢）が分布しかつ地山等級 CI, CII の場合、表-2 (1) の設置基準に従うとインバート設置不要と判断する可能性がある。

しかし、このような互層地質では、上半切羽の地質で判定するのではなく、盤ぶくれが生じる路盤付近の地山確認や長期耐久性の評価が必要ではないかと疑問が残る。そこで、当該トンネルでは、表-2 に示す (1) , (2) の基準を基本とし、岩石試験頻度および試料採取位置の見直しを加えた。また、膨潤性の粘土鉱物があっても CEC の値が低い値となる場合も想定し X 線回折を追加してスメクタイト含有量の確認も併せて実施することとした（表-3）。その他、盤ぶくれ発生事例を分析すると、盤ぶくれ発生箇所約 3 割がインバート設置区間に隣接するインバート無区間で変状が発生していることもわかつ

た。そのため施工範囲はトンネル線状構造物の特性、つまり、インバートの連続性も考慮し、最小施工単位をトンネル掘削幅約 11m の 3 倍相当である覆工 3 スパンとすることもフロー（図-2）に加えた。

4. インバート設置判定フローの試行

地山等級 CI, CII を対象に掘削中の支保パターンを選定する岩判定時（設計支保パターン変化点および地山変化点毎に実施）に、検討したフローを試行した。計 12 地点で岩石試験を実施したところ、基準値超過は 6 地点で、その内訳は「浸水崩壊度：1 試料」、「X 線回折：5 試料」、「CEC：1 試料」であり、X 線回折の結果からスメクタイト含有量の基準値超過が多い傾向であった（表-4）。この試験結果から、上半切羽全体に砂岩または砂岩泥岩互層（砂岩優勢）が分布している断面（写真-2 (a および b)）においても、路盤付近から採取した岩石試験より、水による劣化や膨潤性を示す結果が得られた。また、試験結果から水による劣化や膨潤性を示さなかった場合においても、トンネル線状構造物の特性として最小施工単位を考慮した判定も含め、このフローに基づき判定した結果、当初設計より約 600m の区間でインバートを追加設置した。

5. まとめと今後の課題

インバート設置判断に悩む互層地質において、NEXCO 設計要領を補足する手法として、インバート設置判定フローを検討し岩判定時に試行した。技術者によっては、インバート設置不要と判断する可能性があった区間において、上半切羽ではなく、盤ぶくれが発生する路盤付近の地山に着目し、岩石試験を用いた将来の変状発生の可能性評価およびインバートの連続性を考慮した新たなインバート設置判定法によって、将来の盤ぶくれ

表-3 岩石試験項目と試験頻度 ⁴⁾ に加筆

試験区分	項目	基準値 ^{※1)}	岩石試験の実施頻度	
			事前調査時点	設計パターン変化点および地山変化点毎 ^{※2)}
水による劣化影響を示す指標	①自然含水比 (%)	$W_n \geq 20.0$	○	
	②単位体積重量 (kN/m ³)	$\gamma \leq 21.0$	○	
	③浸水崩壊度試験	C, D	○	○
	④吸水膨張率 (%)	$E_x \geq 2.0$	○	
粘土鉱物の含有量を示す指標	⑤X線回折（スメクタイト含有量）	少量以上	○	○
	⑥CEC試験 (meq/100g)	$CEC \geq 20.0$	○	○

※1) 基準値に該当する場合にはインバートの設置が必要

※2) 岩判定時に路盤付近から試料採取し岩石試験を実施

表4 岩石試験およびインバート設置判定結果 ※下線部は基準値超過箇所を示す

試験数/項目	浸水崩壊 度試験	X線回折	CEC試験	隣接部のインバート 設置延長	岩種	湧水	インバート 設置判定	決定支保 パターン
基準値	C, D	少量以上	20.0以上	覆工3m以上				
第1回	A	少量	48.5	-	概ね砂岩	10/分未満	有	CⅡ-b-i
第2回	データなし			NO	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	無	有	CⅡ-b-i
第3回	A	微量	11.1	YES	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	10/分程度	無	CⅡ-b
第4回	A	微量	12.7	YES	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	無	無	CⅡ-b
第5回	A	少量	18	-	概ね砂岩	無	有	CⅡ-b-i
第6回	A	微量	9.7	NO	概ね砂岩	滲む程度	有	CⅡ-b-i
第7回	D	微量	8.8	-	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	無	有	CⅡ-b-i
第8回	A	微量	12.3	NO	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	無	有	CⅡ-b-i
第9回	A	少量	13.1	-	砂岩泥岩互層	50/分程度	有	CⅡ-b-i
第10回	A	少量	13.7	-	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	15~200/分 程度	有	CⅡ-b-i
第11回	A	少量	18.2	-	砂岩泥岩互層	無	有	CⅡ-b-i
第12回	A	微量	7.4	NO	砂岩泥岩互層 砂岩優勢	無	有	CⅡ-b-i

発生リスクが低減でき、長期耐久性に寄与するものと考えられる。

インバートの設置は、工費や工程に大きく影響するため、慎重な判断が必要である。供用後、盤ぶくれが発生したトンネルは、コスト削減、工程厳守および供用後の維持管理の配慮など、高速道路建設時における様々な課題を抱える中、当時の最善の判断としてインバートを設置しなかったが、結果として盤ぶくれが発生した。高速道路トンネルは今後も多くの建設計画があり、インバート設置基準について更なる研究が必要である。

(1) 盤ぶくれ発生地質

例えば、これまで盤ぶくれが発生した地質を変状延長で分析した結果（図-3）、NEXCO 設計要領で懸念地質とされている泥岩、凝灰岩が多いが、懸念地質ではない変質安山岩区間の変状も多いことがわかった。このことから、盤ぶくれが発生する恐れのある懸念地質の岩種を見直す必要性も示唆される。

(2) 今後の課題

路盤付近の地質と走向・傾斜に関して、トンネル延長方向の実績分布を把握すること、つまり、トンネル断面で評価するのではなく3次元的に地山の分布状況を捉えて評価することも重要な指標となる。また、盤ぶくれ顕在化区間と同一地質で盤ぶくれが顕在化していない区間の建設時の記録や岩石試験結果を比較することで変状要因を明らかにできる可能性もある。その他、トンネルの排水構造にも目を向けると、掘削時に顕著な湧水が確認されなかった区間においても中央排水工（有孔管）の施

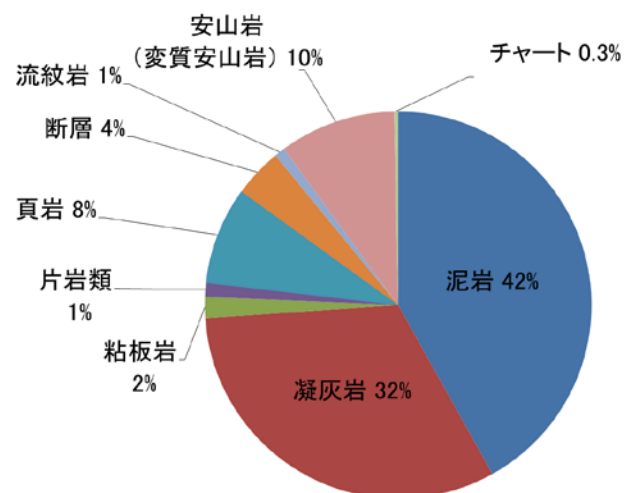


図-3 盤ぶくれ発生地質の延長比分類

工によってトンネル全線の路盤部地山に水が供給されることも盤ぶくれ発生の1つの要因とされ、排水構造の検討も必要と考える。

参考文献

- 1) 香川ら：安全性と施工性に配慮した連続車線規制によるインバート設置工事，トンネルと地下，2020.6.
- 2) 倉持ら：長野自動車道一本松トンネルにおける盤膨れ対策後の変位傾向についての一考察，第51回地盤工学研究発表会，2016.
- 3) 公益社団法人 土木学会：「山岳トンネルのインバート設計・施工から維持管理まで」，2013.11.
- 4) 大嶋健二，城間博通，伊藤哲男，村地栄次，久保田龍朗：変状トンネルの要因分析に基づいたインバート設置基準の提案について，第11回岩の力学国内シンポジウム論文集，2002.

(2021. 8. 6 受付)

APPLICABILITY OF NEW INVERT INSTALLATION JUDGMENT CONSIDERING LONG-TERM DURABILITY IN ALTERNATE GEOLOGY

Daisuke KOBAYASHI, Kiyoto NAKANO and Tetsuya YAMAZAKI

In the mountain tunnel managed by NEXCO, heaving confirmed after operation in a tunnel of about 50 tubes. Most of these tunnels are relatively good ground without large displacement during tunnel construction, and it is judged that invert installation is unnecessary because there is no problem with long-term durability. In tunnels where heaving occurred, construction work is being carried out to install inverts as a countermeasure, but construction efficiency is poor due to construction conditions in closed spaces, etc. It has a large social impact. Against this background, we took up alternating geological tunnels that are having difficulty in determining the installation of inverts at the time of construction, examined the flow for determining the installation of inverts, and then tried the flow at the tunnel construction site. Next, example of reducing the risk of heaving will be described.