

インバートの設置基準に関する研究
JUDGEMENT ON NECESSITY OF INVERT CONCRETE

中田雅博*・三谷浩二**・吉塚守**

Masahiro NAKATA, Koji MITANI and Mamoru YOSHIZUKA

More than ten cases of upheaving pavement in tunnels managed by JH have been observed. It seems rational to suppose that the reason for upheaving pavement is the omission of invert concrete. In those cases, there seemed to be no problem on long-term stabilization of tunnels therefore invert concrete was not required since the displacements were very small and faces were stable during tunnel construction period.

In order to clarify which kind of physical values of ground are needed for judgment on the necessity of invert concrete and what amount of them should be adopted as the guideline, we performed a case study on the deformed tunnels as well as researching related literature and questionnaires submitted by those who had been involved in the cases.

As the relation between the physical values of ground and upheaving pavement has been studied, we report the results on this paper.

Keywords: Invert concrete, necessary condition, physical values, ratio of ground strength

1. はじめに

現在、JHの管理するトンネルで、インバートを設置しなかったことに起因すると考えられる舗装版の隆起現象が10数例発生している。これらのトンネルでは掘削時に変位量が小さくて切羽も安定していることから、トンネルの長期安定性に問題がないとしてインバートの設置を見合わせたものである。

現行の設計要領においては、泥岩・凝灰岩等で長期耐久性を損なう恐れのある地山等にはインバートを設置するものとあるが、その具体的な判断方法にまで言及されていないのが実状である。このため、トンネル施工時にインバートの設置が必要かどうかの判断ができる指標として、どのような地山の物性値を採用するか、またそれらの物性値の具体的な値をどのように設定するかを検討しておく必要がある。ここでは、完成後に舗装版等の変状が発生したトンネルについて、建設および管理段階での資料を収集し、変状が有った区間と無かった区間の物性値を比較することによって変状原因の整理・分析を行った。

変状発生のジャストポイントでの地山物性のデータが前もって得られているケースは少ないが、変状が発生させる可能性があると考えられる種々の地山物性値について変状との関連を分析した結果、地山強度比(事前弾性波速度より算定した概略値)と変状との関係が比較的明瞭であることが確認できたことから、その結果を報告するものである。

* 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

** 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室

2. 研究の方法

今回の研究においては、変状が確認されたトンネルの地山物性値に関するデータを収集、整理、分析し、また既往の基準・研究等から得られた知見を参考として、トンネルの長期的安定性確保の観点からインバート設置の要不要を判断するための地山物性値の種別とその概略値の検討を行った。

今回の分析において対象としたトンネルは、完成後の変状が確認されたトンネルの内、インバートを設置しなかったことが変状の原因であると考えられる9本を抽出した。

表-1に対象トンネルの概要を示す。

表-1 調査対象トンネル一覧表

トンネル番号	掘削工法	地質年代	変状地質	トンネル延長(m)	変状延長(m)	変状部土被り(m)
1	NATM 機械掘削一部発破	新第三紀～ 第四紀	安山岩 凝灰角礫岩	683	249	43～118
2	NATM 機械掘削一部発破	古第三紀 漸新世	頁岩	2,610	380	185～288
3	NATM 発破	新第三紀 中新世	泥岩	1,578	220	55～84
4	矢板工法 発破	中生代白亜紀	ひん岩	1,165	115	35～70
5	NATM 発破	新第三紀 中新世	泥岩 凝灰岩	684	110	61～126
6	NATM 機械掘削	新第三紀 中新世	泥岩	570	24	50
7	NATM 機械掘削	新第三紀 中新世	泥岩	2,989	2,228	23～155
8	矢板工法 発破	中生代	粘板岩	1,572	184	50～130
9	NATM 発破	新第三紀 中新世	凝灰岩 安山岩	4,007	—	2～121

3. 分析結果

3.1 各機関におけるインバートの設置基準

各機関におけるインバートの設置基準は表-2に示すように定められているが、いずれの基準においても施工時にインバート設置の判断に最も苦慮する、Cクラスの地山に対しては「長期耐久性、将来土圧の変化が生ずるもの」等と、定性的な表現となっておりインバート設置のための明確な指標が示されていないといえる。

表-2 インバート設置基準に係る参考文献記述一覧表

組織名	設置基準の記述内容		文献名	制定年月
	インバートを必ず設置する条件	インバート設置を考慮する条件		
J R	(1)地山等級Ⅰ _N に該当する場合には、原則としてインバートを設置すること。 (2)特殊地山については、インバートの打設時期についても検討しなければならない。 (3)地形上偏圧が予想される場合、あるいは二次掘工に力学的機能を必要とする場合は、原則としてインバートを設置すること。	また、地山等級Ⅱ _N の場合でも泥岩質のものについてはインバートを設置することが望ましい。	NATM設計施工指針(案) ¹⁾	昭和58年3月
J H	1)地山等級DⅠ・DⅡ・Eは、原則としてインバートを設ける。	2)地山等級CⅠ・CⅡは、地質が泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩で、かつ、トンネルの長期耐久性を損なう恐れのある場合には、インバートを設置するものとする。	設計要領第三集 ²⁾	昭和60年10月 (平成5年1月改訂)
北海道開発局	(1)地山等級DⅠ以下については、原則としてインバートを設置することとする。	また、地山等級がCⅡ以上にあっても、泥岩質のもの、将来土圧の変化が生ずるもの、偏圧が予想されるもの等についてもインバートの設置を検討する。	道路トンネル設計・施工要領 ³⁾	平成6年4月

また、いずれの基準においても、泥岩質の地山においては長期安定性に注意を喚起する記述があるが、トンネル施工時に長期的安定性を評価するための具体的指標が示されていない。

3. 2 変状部の物性値に関する整理結果

変状トンネルごとに、変状部の物性値を整理したものを表-3に示す。

表一 3 變狀部物性值等一覽表

トンネル 番 号	岩 種	平均土被り m	地山弾性波 速度 km/s	超音波伝播 速度 km/s	一軸圧縮 強度 kgf/cm ²	スレーキ ング性の有無	内空変位量 mm	1ヶ月以上の 有無	CEC meq/100g	液性限界 %	塑性指数 %	2 μ以下 粒度 %	比重
1	安山岩 凝灰角礫岩	90	2.2~3.5	—	90	—	3	有	—	95~136	64~94	14~50	1.9~2.2
2	頁岩 泥岩	230	1.9	3.2	100	有	20~50	無	—	—	—	—	2.5
3	泥岩	70	2.1	1.9	49	有	10	—	32	—	—	—	—
4	ひん岩	55	3.0	—	126~293	有	—	有	20~30	—	—	—	—
5	泥岩 凝灰岩	90	4.5	—	28	有	28~44	—	23	—	—	—	—
6	泥岩	50	2.0	2.4~2.7	4.4~48	有	6~14	有	22~29	—	—	—	—
7	泥岩	90	1.5~2.0	2.0~2.7	39	有	70	有	27~29	100	76	29	—
8	粘板岩	75	3.0~3.5	—	測定不能	—	—	—	—	—	—	—	2.4~2.5
9	凝灰岩 安山岩	120	3.0~5.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
〈参考〉泥質地山において膨脹性を示す指標として提唱されている値					40 以下	浸水前境度 C~D	—	20~30% 以上	20~35% 以上	100% 以上	70% 以上	15~30% 以上	—

注) 部分は収状後に確認された値である

表－３より変状が発生した９トンネルのうち、６トンネルについてスレーキングの有ることが確認された。また、この表より次のような地山の場合にインバートを省略することによってトンネルの変状が発生する可能性があると考えられる。

- ①泥質岩で膨張性鉱物を含む地山。
- ②泥質岩でスレーキング性がある地山。
- ③泥質岩で一軸圧縮強度が 100kgf/cm^2 以下で土被りが 50m 以上の地山。

3. 3 変状と施工時変位の関連

変状の発生したトンネルが泥岩に多いこと、北陸自動車道において泥岩での地山物性値の整理が比較的なされていることから、変状と施工時変位（上半最終時内空変位）の関係の分析は泥岩に限定して実施した。

泥岩における地山強度比と施工時変位の関係について、JH所有のNATMデータベースから図-1の様な関係が得られている。これより、泥岩においては地山強度比がある一定値を下回ると変位が大きくなるケースが多くなることがわかる。したがって、地山強度比と施工時変位を指標に変状の有無を整理してみることにした。ここで、地山強度比の値を求めるに必要な一軸圧縮強度の値は、コアによる強度試験値を使用するとデータ数が少ないこと、強度の値として過大評価されることから図-1においてはハンマーの打撃によって強度を推定した切羽観察表の地山強度の項目から推定した値を使用した。

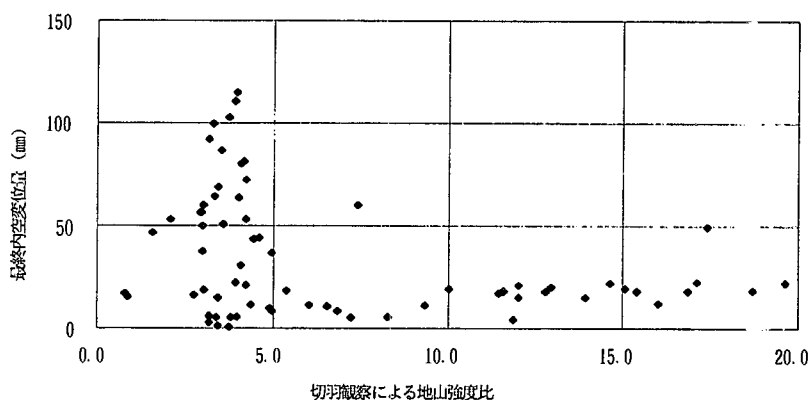


図-1 地山強度比と内空変位量 (NATMデータベース)

次に、変状箇所での一軸圧縮強度が必要である今回の分析では、変状箇所でのデータが揃っている事前調査時の弾性波速度によって、式-1に示す「北陸自動車道 上越～朝日間 Ⅰ期線」の施工結果から得られた弾性波速度と一軸圧縮強度の関係式を用いて一軸圧縮強度を推定することとした。

$$q_{vp} = (V_p / 0.9523)^{1/0.1999} \quad (\text{式-1})$$

ここに、 q_{vp} ：地山弾性波速度換算の一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

V_p ：地山弾性波速度 (km/s)

以上により得られた地山強度比と施工時壁面ひずみの関係を図-2に示す。

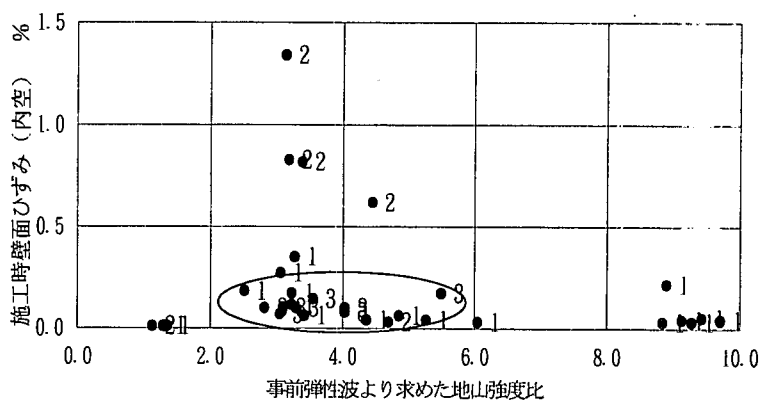


図-2 地山強度比と変状種別

プロットパラメータは、

1：変状無し、インバート無し、 2：変状無し、インバート有り、 3：変状有り、インバート無しとした。この図より事前弾性波速度から得られる地山強度比2～6で比較的小さな(0.2%程度以下)領域に、インバートを設置せずに変状が発生したケースが集中していることがわかる。

4. 考 察

4. 1 変状発生要因

JHの設計要領の地山判定基準では、地山強度比＝2がDⅠパターンとDⅡパターンの境界とされており、それ以下の場合には変形余裕を見込むものとしている。これは、地山強度比が2より小さい場合は掘削時（地山解放時）には、すでにトンネル周辺地山が塑性領域に入っているものと考えられているためである。

また、図-1に示す泥岩地山での切羽観察表より求めた地山強度比と施工時の内空変位量については、地山強度比5程度（地山強度比が小さくとも、変位量が小さいものに留まっているトンネルも有るが）を境として地山強度比が小さくなるにつれて変位が急激に増加していることが読みとれる。このことは、切羽観察による地山強度比がある程度概略値であるにしても、地山の挙動を表現しうる指標であることを示している。

上越～朝日間のⅠ期線データの地山物性値の内、一軸圧縮強度と自然含水比の関係を整理すると、図-3に示す傾向となる。これによれば、自然含水比が大きくなれば、強度が低下する傾向にある。

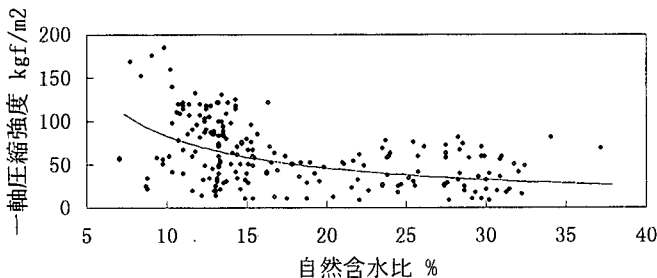


図-3 自然含水比と一軸圧縮強度

したがって、インバートを設置せずに変状が発生した泥質地山のトンネルにおいては、

- ① 施工時の変位量が少なかったため、トンネルの長期安定性には問題が無いとしてインバートを省略した。
- ② 弾性波速度から推定した地山強度比は2から6の範囲である。

つまり、インバートを設置せずに変状が発生したトンネルにおいては、施工時には比較的安定していた地山が何らかの要因（スレーキング、膨潤性鉱物、湧水等の影響が考えられるが、ここでは図-3の関係の様な含水比の増大に伴う強度の低下によることも一因と考えられる。）で岩自体の強度低下により、変状に至ったものと推察される。

4. 2 地山強度比算定に関する考察

地山強度比を算定するに必要な一軸圧縮強度の「値」は、図-1においては切羽観察表の地山の強度より推定したもの、図-2においては事前弾性波速度より導いたものであり、コア試験による一軸圧縮強度の値を使うよりトンネル変位との相関が良いといえる。

通常、コアの一軸圧縮強度は同一岩塊から採取したいくつかの試料で行っても試験値が一定になることはない。これについて三木⁴⁾らは、岩石の不均質性と、岩石中の潜在的な亀裂分布がランダムであること、さらには異方性のためと位置づけている。したがって、コアの採取位置、保存状態等で試験値が大きく変化する一軸圧縮強度の統一的な試験方法・評価方法及び、地山の亀裂の存在により、地山自体の強度が低下するこ

とが知られており、亀裂の取り扱いを含めた地山強度比の評価に課題があると考ええる。また、地山強度比は地山挙動を概ね表現できる指標であるといえるが、地山強度比が小さくても大きな変位を生じていないトンネルもあり、泥質地山における地山一軸圧縮強度の値の評価が今回の重要な課題である。

5. まとめ

以上の検討の結果をまとめると次のようになる。

- ① トンネル施工時にインバート設置の可否を判断する指標として地山強度比に着目する必要がある。
- ② 現地でコアの物性値と地山の物性値を把握することが重要である。特に、コアの強度は現場で簡易に把握できる方法の確立と導入が重要となる。
- ③ 地山の強度は、含水比の状態等や層理等の方向と載荷方向に影響を受けるので、その評価方法について統一的に試験を行うことが必要である。

6. 今後の課題

- ① 現場での地山強度の簡易な測定方法として、ポイントロード試験、針貫入試験、シュミットハンマーによる簡易な試験による統一的な方法を確立する。
- ② その際、トンネル完成後の状態を想定した試験方法の試行と確認が必要となる。たとえば、十分浸水飽和し浸水崩壊度を確認した後、ポイントロード試験等の簡易な方法で、飽和状態での一軸圧縮強度を測定するなどの方法が考えられる。
- ③ インバートの無い構造で盤ぶくれが生じる場合、側壁脚部にその現象が顕著に生じることから、工事中側壁脚部の盤ぶくれを測量するなどの方法等、地山強度、地山物性値推定の方法を含めて、インバートの必要性を現場で容易に判断できる方法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) J R. NATM設計施工指針（案），1983
- 2) 日本道路公団．設計要領，第三集，第9編トンネル，（1）トンネル本体工，1985（1993改訂）．
P. 80-81
- 3) 北海道開発局．道路トンネル設計・施工要領，1994
- 4) 三木幸蔵．岩盤力学入門．鹿島出版会，1993． P. 188-207