

# 山岳トンネルの盤ぶくれ対策における地山評価手法

## 1. はじめに

### 1-1 山岳トンネルにおける盤ぶくれ

建設中や供用後の山岳トンネルで問題となる変状の1つにトンネル底盤部の隆起（盤ぶくれ）がある。整備新幹線では、軌道の高さ変位をミリ単位で調整する必要があるため、可能な限り盤ぶくれの発生を抑制しなければならない。

この盤ぶくれが発生する原因としては、地山の耐力不足により塑性化が進行することで生じる地山の押出しに起因する場合（スクイーミング）と、地山中に含まれる膨潤性粘土鉱物の吸水膨張に伴う地山の押出しに起因する場合（スウェリング）が想定される。これらは地山が持つ特性により変化するため、地山の性状を把握しておく必要がある。

また、盤ぶくれへの対策としては、インバートを設置するなどの予防対策と、発生後に棒状補強材を打設するなどの事後対策がある。この対策については、予防対策を選択した方が事業に与える影響は小さいことから、鉄道・運輸機構（以下、機構）では予防対策（インバートの設置）を基本としている。この対策においては、各々の地山性状に適したインバートの構造を選定する必要があるため、インバートの設置前に地山の性状を評価する必要がある。

### 1-2 現況の機構の対応状況

機構では、平成20年に制定した「山岳トンネル設計施工標準・同解説」において、原則、インバートを設置することとし、更に平成26年にはインバートの構造を選定するためのフロー（以下、選定フロー）を策定した（図-1）。

この選定フローでは、地山評価指標のうち次の4つの指標（以下、4指標）を判断指標としている。

- ・地山強度比
- ・上下半施工時の内空変位量  
（以下、内空変位量）
- ・浸水崩壊度
- ・スメクタイト含有量

この選定フローを用いてインバート構造を選定することで、大部分のトンネルで盤ぶくれの

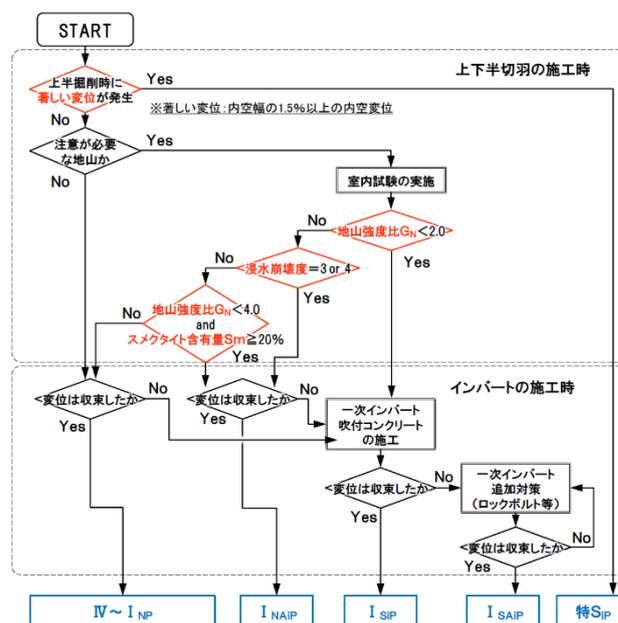


図-1 インバートの選定フロー

発生を防げたが、一部のトンネルでは発生し事後対策を行った。このことは、現行の選定フローは完全なものではなく、その改良の必要性を示唆している。

### 1-3 地山評価指標の測定方法の現状

選定フローにて用いられる4指標には、地山強度比と内空変位量のような現場で測定（現場試験）可能な指標と、浸水崩壊度やスメクタイト含有量のような現場で測定できない（試験機関で試験を行う）指標がある。現場で測定可能であれば設計や施工に即時的に活用できるが、試験機関で行うものについては、結果を得るまでに時間がかかり設計や施工に反映できない可能性がある。

このうち浸水崩壊度については、岩石試料を清水に浸して、その状態を記録するシンプルな試験であるものの、浸水前に試料を電気炉にて乾燥させる前処理が必要であり、この操作は現場での実施が困難である。そこで、電気炉を用いた方法に代わる簡易かつ実用的な前処理方法を導入できれば、現場でより安価かつ高頻度で試験が実施できるようになり、盤ぶくれ発生の抑制に資することが期待できる。

### 1-4 本稿における研究課題

以上を踏まえ、選定フローの改良と浸水崩壊度に係る現場試験の導入という課題に対し、①4指標と実績の地山性状との相関性の確認、②浸水崩壊度試験の前処理方法の簡易化について検討した。

## 2.4 指標と実績の地山性状との相関性の確認

### 2-1 数量化Ⅱ類分析

相関性の確認においては、数量化Ⅱ類分析を用いて、4指標で実績の地山性状を分類する場合の各指標の寄与度を推定し、その値で評価することとした。

数量化Ⅱ類分析とは、定性的なデータの相関性を確認する分析手法であり、目的変数に区分を設けて、説明変数をいくつかのカテゴリーに分割し、各カテゴリーが目的変数の区分にどの程度寄与しているか推定するものである。

具体的には、「5教科のテストの点数から理系・文系を分類する」というような場合であれば、目的変数を「理系」と「文系」に区分し、説明変数を各教科のテストの点数とし、点数でカテゴリーを構成する（例えば、0～60点（不可）：カテゴリー1、60～70点（可）：カテゴリー2、70～80点（良）：カテゴリー3、80～90点（優）：カテゴリー4、90～100点（秀）：カテゴリー5など）。そして、5教科のテストの点数と理系・文系のデータ組を用意し、データを分析することで各教科の各カテゴリーが、理系・文系の区分けにどの程度寄与しているか推定するという流れになる。

### 2-2 分析条件及び使用データ

選定フローでは、4指標から地山性状を判断し、それに応じた5パターン（「IV～I<sub>NP</sub>」「I<sub>NAiP</sub>」「I<sub>SiP</sub>」「I<sub>SAiP</sub>」「特<sub>SiP</sub>」）のインポートを設定している。そこで本稿では「盤ぶくれの生じやすさ」を目的変数とした上で、これを「インポートパターン」と「盤ぶくれへの事後対策の有無」の組合せにより表現することとし、以下の区分を設定した（表-1）。

- 区分1：盤ぶくれが生じやすい地山
- ・「I<sub>SiP</sub>」「I<sub>SAiP</sub>」「特<sub>SiP</sub>」のいずれかである、または事後対策を実施した場合。
- 区分2：盤ぶくれが生じにくい地山
- ・「IV～I<sub>NP</sub>」または「I<sub>NAiP</sub>」であり、かつ、

事後対策を実施していない場合。

表-1 盤ぶくれの生じやすさの区分

インポートパターン	事後対策	あり	なし
IV～I <sub>NP</sub> 、I <sub>NAiP</sub>		生じやすい (区分1)	生じにくい (区分2)
I <sub>SiP</sub> 、I <sub>SAiP</sub> 、特 <sub>SiP</sub>		生じやすい (区分1)	生じやすい (区分1)

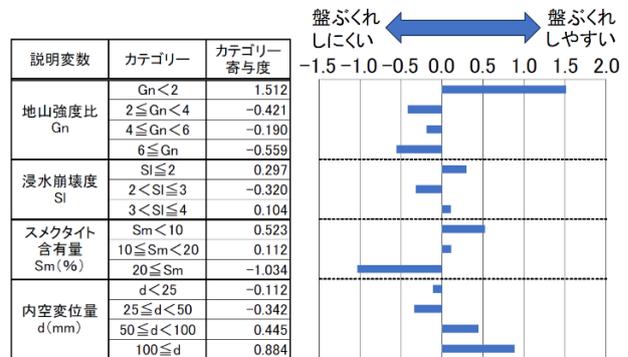


図-2 4指標のカテゴリーとその寄与度

表-2 各選定手法での一致率

4指標 寄与度			
試行・実績	個数	割合	
○：一致	61	72.6%	
×：不一致	安全側※1	11	13.1%
	危険側※1	12	14.3%
計	84	100.0%	

※1 安全側：実績は区分2（生じにくい）、試行は区分1（生じやすい）  
危険側：実績は区分1（生じやすい）、試行は区分2（生じにくい）

選定フロー※2			
試行・実績	個数	割合	
○：一致	49	58.3%	
×：不一致	安全側※1	0	0.0%
	危険側※1	35	41.7%
計	84	100.0%	

※2 事後対策を講じなくともよいパターンが選ばれているとし、単純に選定されたインポートパターンのみで集計した的中率

また、4指標を説明変数とし図-2左表のようにカテゴリーを設定した。このとき、選定フローで設定されている分岐条件を参考にした。

なお、使用したデータは、整備新幹線8トンネル10工区の施工実績データ（計84組）であり、盤ぶくれが発生した、または発生が疑われたトンネルのものである。

### 2-3 分析結果

推定結果を図-2に示す。この寄与度は値が大きいほど、盤ぶくれしやすい地山である（区分1）と分類されることを表す。

ここで、各カテゴリーの寄与度に注目する。地山強度比は、その値が小さいほど、内空変位

量は、その値が大きいほど、盤ぶくれしやすい地山に分類される結果となった。

浸水崩壊度は、現行の選定フローのもとでは、盤ぶくれの生じやすさの分類に対する寄与は小さいと推定された。

スメクタイト含有量は、その値が小さいほど盤ぶくれしやすい地山に分類される結果となり、既往の知見と矛盾する結果であった。これは、今回用いたデータには「スメクタイト含有量は少ないが事後対策を講じた箇所」の情報が多く含まれていることに起因し、既往の研究結果を否定するものではないと考える。

### 2-4 結果の応用事例

先述の結果より、各指標のカテゴリー寄与度を用いた盤ぶくれの生じやすさの区分を試みた。その手法は、①あるデータ組に対して、各指標の値と、先述の分析で設定したカテゴリーを照合し、各指標の値に応じたカテゴリー寄与度を取得する。②4指標で取得したカテゴリー寄与度を合計する。③合計したカテゴリー寄与度に対して閾値を設定しておき、その閾値未満の場合は「盤ぶくれが生じにくい(区分2)」、そうでない場合は「盤ぶくれが生じやすい(区分1)」と判定する、という方法である(以下、新手法)。

新手法の実効性を検討するために、盤ぶくれの生じやすさの区分に係る試行結果と実際の区分を比較し、一致率を算定した。また、選定フローを用いた場合の一致率も算定し、その数値を比較した。

その結果、選定フローを用いた場合よりも新手法の方が一致率は高かった(表-2)。よって、新手法の方が適切に地山を判定することができていると考えられる結果となり、したがって、新手法を用いることでインパットパターンの選定方法を改良できることが示された。

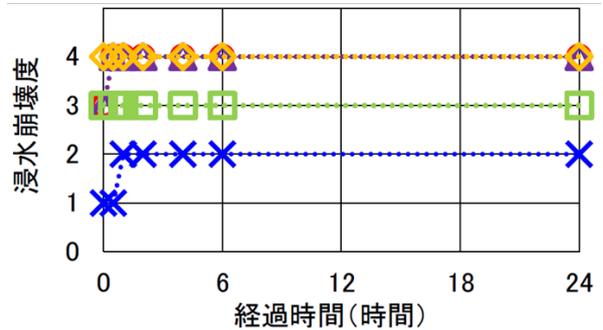
## 3. 浸水崩壊度試験の簡易化の検証

### 3-1 標準法と代替前処理法

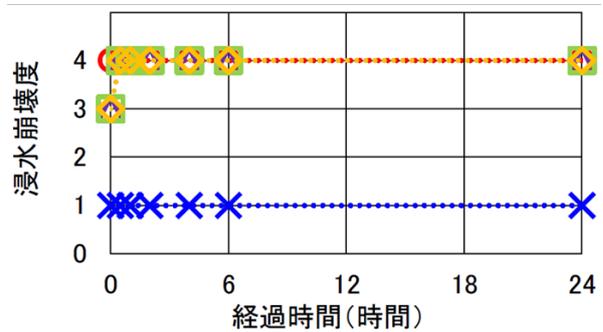
浸水崩壊度試験は、前処理した試料を清水に24時間浸水させ、その状態を観察する。この前処理にて「試料を電気炉により24時間60℃乾燥させる」(以下、標準法)ため、試験に際し電気炉が必要となる。しかし、工事現場には一般的に電気炉がないことから、代替となる前処理方法を確立する必要がある。そこで、以下の3種類の簡易的な前処理方法を考案した。

電子レンジ法：電子レンジにて試料の質量が一定となるまで加熱乾燥。

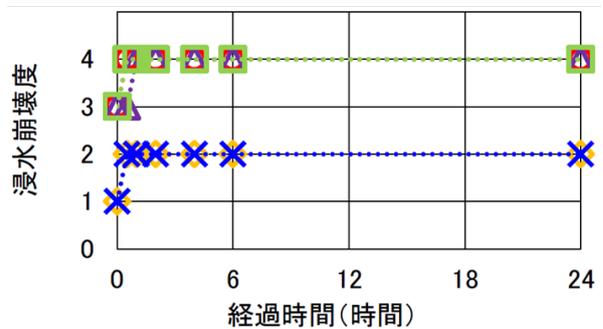
### 比較対象：標準法(電気炉)



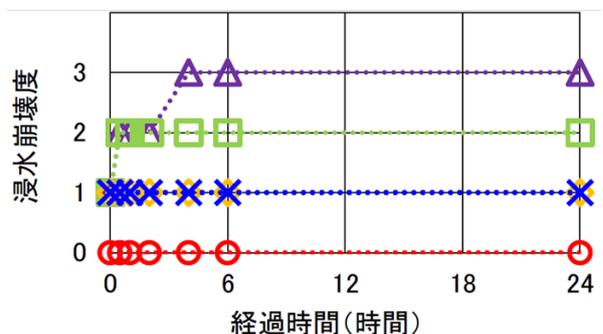
### 簡易法：電子レンジ法



### 簡易法：風乾法



### 簡易法：非乾燥法



○ 試料1(軟質) ▲ 試料2(軟質) □ 試料3(軟質)  
◇ 試料4(軟質) × 試料5(比較的硬質)

図-3 各前処理法の浸水崩壊度の動向

風乾法：試料の質量が一定となるまで自然乾燥。

非乾燥法：試料を乾燥させずに浸水。

各方法の特徴としては、電子レンジ法は標準法よりも短時間で試料を乾燥させること、風乾法は機器を用いずに乾燥させること、非乾燥法は機器を必要とせずすぐに試験を実施できることが挙げられる。

### 3-2 対照実験と使用した試料

先述の3つの代替前処理法と標準法で、浸水崩壊度に差異が生じるかを確認するために、実際に岩石試料を用いて浸水崩壊度に係る対照実験を行った。使用した試料は、新第三系中新統の泥岩で事前にスレーキング試験を行い、スレーキングすることが確認された岩塊より採取した試料（軟質な試料（4試料）と、比較的硬質な試料（1試料））を使用した。

また、試験方法は各前処理を実施したのちに標準法と同様の手順で試料を浸水させ、一定時間経過後（浸水直後、0.5、1、2、4、6、24時間後）に崩壊度を記録した。さらに、前処理前、前処理直後、浸水後24時間経過時点での試料の含水比も計測した。

### 3-3 試験結果

各前処理法の試験結果を図-3に示す。標準法、電子レンジ法、風乾法では、軟質な試料の浸水崩壊度が3~4に収まり大きな差異はなかった。一方、非乾燥法は他の方法との乖離が大きかった。また、各前処理法における含水比（5試料平均）の測定結果を図-4に示す。標準法、電子レンジ法、風乾法では、前処理後にほぼ絶乾状態（含水比3%以下）となり、浸水後に含水比が大幅に増加した。一方、非乾燥法では、含水比は試験中にほぼ変化がなかった。

### 3-4 前処理の必要性に関する考察

各前処理法で得られた浸水崩壊度と含水比の傾向を比較すると、標準法、電子レンジ法、風乾法では、得られた浸水崩壊度は概ね同値であり、共通点としては、試料を絶乾状態させた後、浸水させていることであった。

よって、標準法と同等の試験結果を得るためには、浸水前に試料を乾燥させる必要があると考えられ、この操作により、浸水による試料の状態変化（細粒化、岩片化）を誘発しているものと考えられる。また、この操作をインバート構

築の過程に照らし合わせると、地山が掘削された後、外気に曝露し乾燥状態となる過程に該当すると考えられる。なお、その後の浸水させる過程は、インバートコンクリート構築後、地山が地下水で飽和状態となる過程に該当すると考えられる。

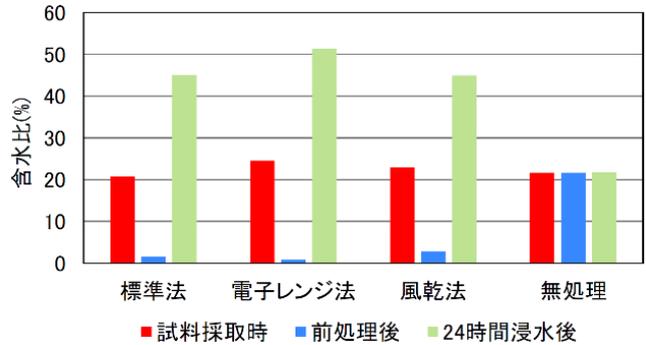


図-4 各試験法における含水比の変化

説明変数	カテゴリー	配点	合計点	インバートパターン	概要図
地山強度比 Gn	Gn < 2	○○点	4指標の合計点を算定	IV~I <sub>NP</sub>	
	2 ≤ Gn < 4	××点			
	4 ≤ Gn < 6	▲▲点			
	6 ≤ Gn	□□点			
浸水崩壊度 SI	SI ≤ 2	▽▽点	I <sub>NAP</sub>		
	2 < SI ≤ 3	■●点			
	3 < SI ≤ 4	◇◇点			
スメクタイト含有量 Sm (%)	Sm < 10	◎◎点	I <sub>SP</sub>		
	10 ≤ Sm < 20	☆☆点			
	20 ≤ Sm	◆◆点			
	d < 25	△△点			
内空変位量 d (mm)	25 ≤ d < 50	★★点	I <sub>SAP</sub>		
	50 ≤ d < 100	▼▼点			
	100 ≤ d	※※点			
			□□点以上	特S <sub>p</sub>	

図-5 点数制による選定イメージ

## 4. 今後の検討事項

インバート構造選定フローの再検討にあたり、数量化Ⅱ類分析を行った結果、「盤ぶくれの生じやすさ」の分類に対する4指標の寄与度が推定された。この結果から現行の選定フローの改良案として、4指標の各カテゴリーに対し、数量化Ⅱ類分析の結果を基に点数を割付け、その合計点数でインバートパターンを選定する「点数制」への変更を提案する(図-5)。これにより、盤ぶくれの生じやすさの分類に対して浸水崩壊度の寄与が大きくなるが、導入にはスメクタイト含有量の取扱いに係る検討の深度化が必要である。

また、浸水崩壊度試験については、新たに考案した前処理法により、泥岩においては現場試験の適用可能性が示唆されたが、砂岩（粗粒堆積岩類）や火山砕屑岩類に対しては検証がなされていないため、導入に向けてはこれらの試料に対する検証を行う必要がある。