

自然災害に起因した大変状トンネルの 復旧対策工選定基準

林康啓¹・今井淳次郎²・吉塚守³・鈴木雅行⁴・重田佳幸⁵・中川浩二⁶

¹ 日本道路公団 札幌支社 室蘭管理事務所 (〒050-0055 北海道室蘭市崎守町316-3)

² 日本道路公団 札幌支社 室蘭管理事務所 (〒050-0055 北海道室蘭市崎守町316-3)

³ 正会員 財団法人高速道路技術センター 道路技術研究部 (〒100-0013 東京都千代田区霞が関3-7-2)

⁴ 正会員 博(工) 株式会社間組 土木事業本部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁵ 正会員 修(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁶ フェロー会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

火山噴火による地殻変動や地震などの自然災害が原因でトンネルに変状が発生する場合がある。このような変状が発生した場合には、既往の基準を参考として各々のトンネルにおいて対応されてきており、復旧対策工選定のための判断基準の整理が望まれている。本研究では、自然災害における復旧対策工選定基準の策定に寄与することを目的として、有珠山噴火により被害を受けた洞爺トンネルの変状事例を整理・分析した。また、既往の基準と洞爺トンネルにおける復旧対策工選定基準を比較することで自然災害における復旧対策工選定基準の特徴を整理した。

Key Words : road tunnel, tunnel deformation, restoration measures, natural disaster

1. はじめに

一般にトンネルは地震などの自然災害に強い構造物とされている。しかし、火山活動にともなう地殻変動や地震が原因となって供用中のトンネルに変状が発生する事例がいくつか見受けられる^{1),2),3)}。

供用中のトンネルにひび割れなどの変状が発生した場合に対する補強・補修の必要性を判断する基準は、道路、鉄道、水路など用途ごとに定められている。しかし、これらの判定基準は、トンネルの老朽化に伴う対策やトンネル周辺の地山挙動による変状が進行中のものに重点をおいたもので、トンネルの機能を継続的に維持していくためのものと考えられる。

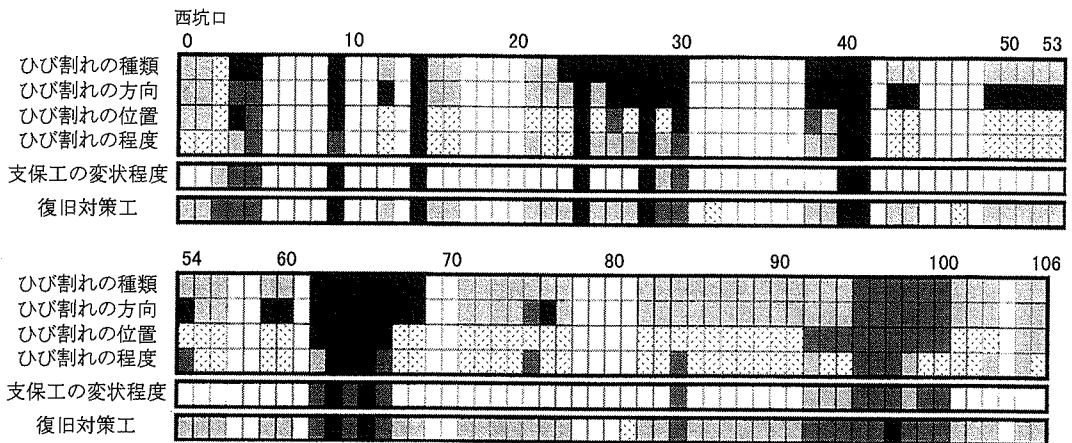
それに対し地震や火山噴火などの自然災害が原因で発生する変状は、比較的短期間のうちに覆工コンクリートの剥落などの大きな変状が発生する。また、地震や火山活動が収束した後はトンネルに発生した変状の進行も収束する可能性が高い。自然災害が原因でトンネルに変状が発生した場合には、地殻変動に対する対策を講ずるのではなく、変状が発生する前の状態にトンネルを修復することが前提となる場合が多い。そのため、一般的に用いられている判定基準を適用することが適切でない場合も考えられる。

本研究では、有珠山の噴火により被災した北海道縦貫自動車道洞爺トンネルの変状事例を整理し、トンネルに作用したと思われる要因と変状の関係および新設施工時における施工記録と変状についての関係を比較検討する。また、実施した復旧対策工の考え方をとりまとめ、自然災害に起因した大変状トンネルにおける対策工の判定基準を示す。さらに自然災害による変状トンネルの復旧対策工選定基準の特徴を明確にする目的で、交通用トンネルの維持管理に供されている主な基準と洞爺トンネルにおける復旧対策工選定基準の比較を試み、洞爺トンネルにおける自然災害対策の考え方を明らかにする。なお、筆者らは先に洞爺トンネルの被災状況と復旧対策の概要について報告している⁴⁾。本報は、これに加えてさらに詳細な検討を行ったものである。

2. 有珠山噴火による洞爺トンネルの変状概要

(1) 洞爺トンネルの概要

洞爺トンネルは、今回の有珠山噴火口の南西約1kmに位置する延長1,070mの2車線道路トンネルである。洞爺トンネルは、山岳トンネル工法により施



東坑口						
	ひび割れの種類	ひび割れの方向	ひび割れの位置	ひび割れの程度	支保工の変状程度	復旧対策工
■	せん断ひび割れ	トンネル横断方向	全周	特大 (剥落または段差を伴うもの、ひび割れ幅5mm以上)	吹付けコンクリートの複数のひび割れ (幅3mm以上) 鋼アーチ支保工の座屈または移動	覆工打ち換え 地山補強 (一部返送)
■	ねじりせん断ひび割れ	斜め方向	側壁～天端	大 (ひび割れ幅5mm以上)	吹付けコンクリートの複数のひび割れ (幅3mm以上)	覆工打ち換え
■	引張ひび割れ	トンネル縦断方向	天端	中 (ひび割れ幅3mm以上)	吹付けコンクリートの単独のひび割れまたは幅3mm未満	ひび割れ補修
■	圧壊	亀甲状	側壁	小 (ひび割れ幅3mm未満)	-	部分的な補修

図-1 各ブロックの覆工変状状況

工され、平成9年10月に供用開始となった。地質は、やや空隙の多い安山岩溶岩であり、一部に自破砕状を呈している第四紀更新世のノットコ溶岩を含む。洞爺トンネル付近のノットコ溶岩は、地表部に近いために風化しており、亀裂も多く発達している。また、熱水変質により粘土化した破砕帯も認められ、全体としては脆弱な地山である。施工時の支保パターンは、日本道路公団の基準でDI～DIIであり、脆弱部では、ウレタン注入や鏡ボルトなどの切羽安定対策がなされた。また、建設当時は湧水が多く、水抜き導坑、水抜きボーリングが多数施工された⁹⁾。

(2) 変状状況

a) トンネル覆工の変状

有珠山の噴火にともなう地殻変動により北海道縦貫自動車道長流川橋梁から洞爺トンネルまでの約10kmの区間が被災して、虻田洞爺湖IC付近では海側への水平移動と鉛直変位(隆起)が発生した。洞爺トンネルにおいても、覆工コンクリートのひび割れや剥落、鋼アーチ支保工の座屈や吹付けコンクリートの剥落などの変状が発生した。図-1にトンネルの変状状況の一覧を示す。また、同図には変状状況との比較が容易なように後に述べる復旧対策工の選定結果も併せて示した。ここで、覆工の打継目間隔である10.5mを1つのブロックとし、西坑口をブロックNo.0、東坑口をブロックNo.106で表している。覆工の変状としては、覆工のひび割れ、打ち継

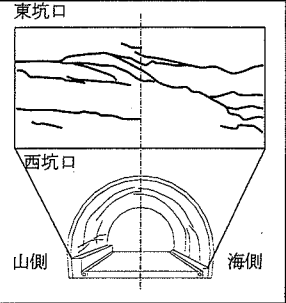
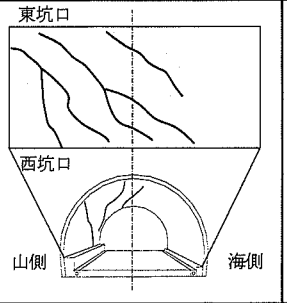
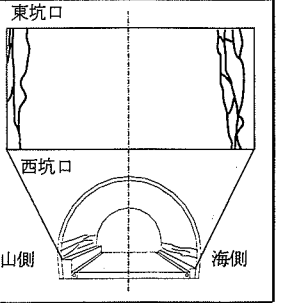
ぎ部の損傷および打ち継ぎ部における水平方向のズレなどであり、このような変状は7割程度のブロックで発生した。

ひび割れの種類は、せん断ひび割れ、ねじりせん断ひび割れ、引張ひび割れおよび圧壊に分類できる。せん断ひび割れは、全107ブロックのうち2割にあたる23ブロックで発生した。発生したブロックの分布をみるとブロックNo.0～68の区間に発生しており、ブロックNo.69～106では認められない。ねじりせん断ひび割れは、ブロックNo.95～100に発生している。引張ひび割れは、全ブロックの4割にあたる44ブロックで発生し、ブロックNo.70以降のブロックで多くみられた。圧壊は、ブロックNo.2で発生したが局所的なものであった。

ひび割れの方向は、トンネルの横断方向、縦断方向、斜め方向および亀甲状に分類して整理した。ブロックNo.0～68では、トンネル横断方向にひび割れが発生するケースが多くみられる。ブロックNo.70～106の区間では、主にトンネル縦断方向にひび割れが発生しており、ねじりせん断ひび割れが発生したブロックNo.95～100の区間で斜め方向のひび割れが発生している。亀甲状のひび割れは、圧壊が発生したブロックNo.2にみられた。

ひび割れ発生位置をみると、せん断ひび割れが多く発生したブロックNo.0～68ではトンネルの全周に発生している場合が多くみられた。ブロックNo.95～100ではねじりせん断ひび割れが山側の側壁

表-1 覆工コンクリートに発生した変状モード区分

変状モード区分	I	II	III
ひび割れの種類	せん断ひび割れ	ねじりせん断ひび割れ	引張りひび割れ
ひび割れの方向	トンネル横断方向 (トンネル全周)	斜め横断方向 (側壁～天端)	トンネル縦断方向 (トンネル側壁)
変状状況(概念図)			

から天端付近にかけて発生した。引張りひび割れは側壁に集中して発生した。

ひび割れの程度は、ひび割れの幅で分類し剥落や段差を伴う場合には、特に大きな変状として分類した。

図-1に基づき洞爺トンネルに発生した変状を表-1のように分類した。以下に各変状モードの特徴をまとめる。

変状モードIは、ブロックNo.0～68に多くみられ、せん断ひび割れがトンネル横断方向に発生したものである。ブロックNo.24, No.40, No.63では段差を有する幅10mm以上のひび割れといった大きな変状がみられた(表-4の写真参照)。このグループは、ひび割れ幅が大きいと同時に本数が多く変状の程度としては特に大きなものといえる。

変状モードIIは、ブロックNo.95～100に見られ、ねじりせん断ひび割れがトンネルに対して斜め方向に発生した。剥落や段差が発生したブロックはないが、5mm以上のひび割れが多く発生し変状の程度としては大きなものである。

変状モードIIIは、引張りひび割れのグループである。ブロックNo.70～94およびブロックNo.101～106では、ひび割れが側壁部にみられ、トンネル縦断方向に発生している。このグループの特徴としては、ひび割れの本数は多いものの、ひび割れ幅が3mm未満で変状の程度としては小さなものである。

b) 支保工の変状

洞爺トンネルの主な支保パターンはDIパターンであることから、吹付けコンクリートは厚さ $t=150\text{mm}$ 、鋼アーチ支保工はH-125(支保工間隔1.0m)、ロックボルトは4mの構成となっている。覆工コンクリートの損傷程度が大きく覆工打ち換えが必要と判断された26ブロックの覆工コンクリートの撤去に際し支保

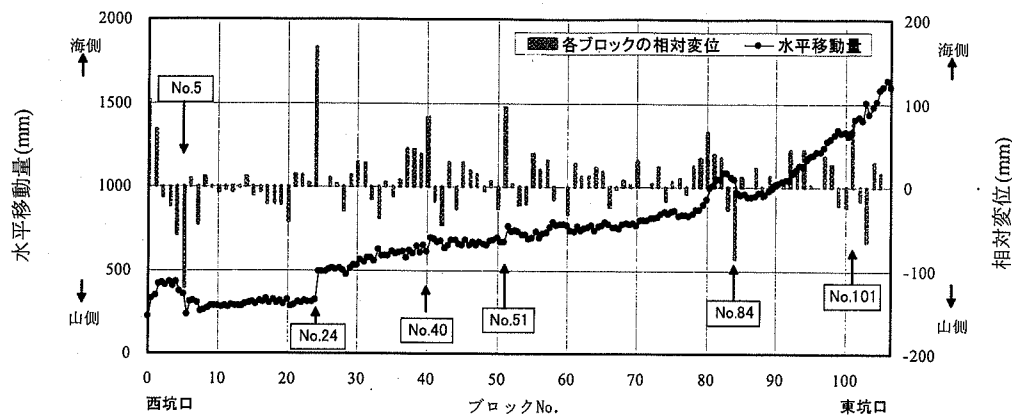
工の変状を調査した。

覆工コンクリートに剥落や段差を伴うひび割れが発生したブロックNo.24では吹付けコンクリートの剥落や、鋼アーチ支保工の座屈している状況が確認された(表-4の写真参照)。このとき行った吹付けコンクリート剥落部の地山状況の観察結果では、地山全体が粘土化しており、簡単に指が刺さる程度の箇所もあった。ブロックNo.40では、全周にわたる吹付けコンクリートの剥離、鋼アーチ支保工の変形がみられた。その他のいくつかのブロックでも吹付けコンクリートにひび割れが確認されたが、覆工コンクリートの変状で述べた変状モードII～IIIの区間における支保工変状は比較的軽微なものであった。

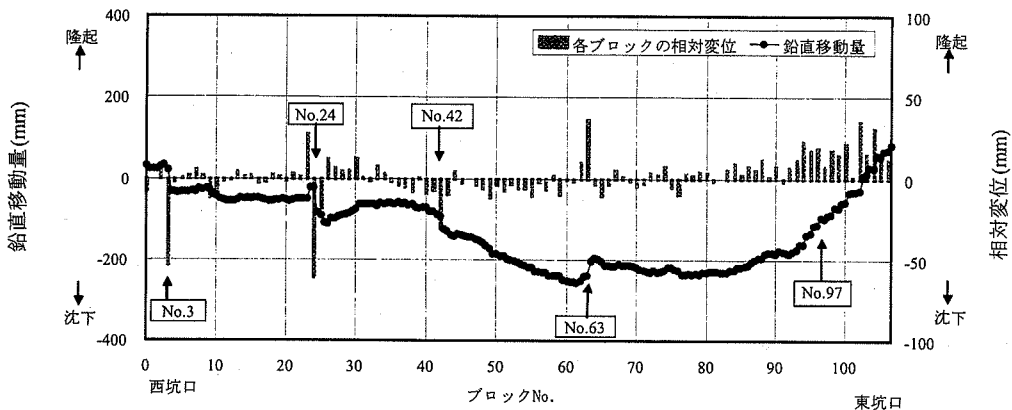
覆工コンクリートの変状と支保工の変状との関係を見ると、覆工コンクリートのひび割れ程度が特に大きなブロックNo.24, No.40, No.63では、支保工の変状程度も大きく、支保工および地山の補強が必要となった。ブロックNo.29, No.30のように覆工コンクリートのひび割れ程度が中～大の箇所では、吹付けコンクリートにひび割れが発生したものの支保工および地山の補強は必要ない程度であった。さらに、覆工コンクリートの変状が小さい場合には、吹付けコンクリートに発生したひび割れも3mm未満と小さな変状であった。以上より、覆工コンクリートの変状程度と支保工の変状程度には強い関係があるものと観察された。

c) インバートコンクリートの変状

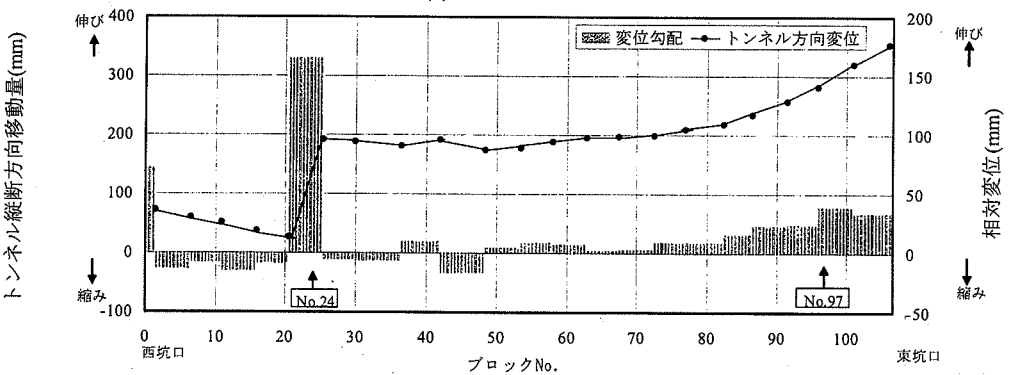
インバートコンクリートの変状については、覆工コンクリートの変状が著しく、また、変形のモード(表-1の分類)の異なる代表的なブロックに対して舗装と路盤を取り壊して調査を行った。調査は、変状モードIとして分類したブロックNo.24, No.40,



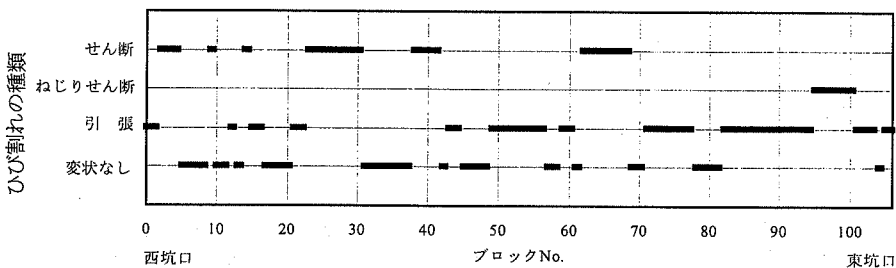
(a) 水平変位



(b) 鉛直変位



(c) トンネル縦断方向変位



(d) ひび割れの種類

図-2 洞爺トンネルの変位観測結果

No.63と変状モードIIのブロックNo.97の4ブロックを対象に実施した。その結果、ブロックNo.24では覆工コンクリートに100mm以上の段差やひび割れが発生している箇所と連続した位置でインバートコンクリートに段差を伴うひび割れが発生していた。また、一部に圧壊している箇所が認められた。ブロックNo.40, No.63, No.97では、トンネル横断方向に各ブロックで数本のひび割れが確認されたが、ひび割れの最大幅は5mm程度であり、ブロックNo.24と比較すると変状の程度は小さなものであった。

(3) トンネルの移動量および相対変位と変状の関係

洞爺トンネルの横断方向の水平移動量、鉛直移動量およびトンネル縦断方向の移動量の計測結果と各ブロック内における相対変位の分布を図-2に示す。ここで、各ブロックの相対変位とは同一ブロック内における西坑口側の変位と東坑口側の変位の差であり、東坑口側の変位から西坑口側の変位を差し引いたものである。なお、トンネル縦断方向変位については、西坑口を基準に概ね50m間隔の測定変位差を示している。

洞爺トンネルは地殻変動によりトンネル横断方向に最大1650mm（海側）、縦断方向に350mm（東坑口側）移動し、鉛直変位で最大250mm（沈下）が発生した。水平移動量は、東坑口側ほど大きく、ブロックNo.24で急激な移動が認められ、ブロックNo.84付近から移動量の増加が著しくなっている。鉛直移動量は、全体的に沈下を示している。ブロックNo.60付近で250mmの沈下が確認された。ブロックNo.24, No.63で急激な変化が認められブロックNo.90付近から沈下量が小さくなりブロックNo.102以降においては80mmの隆起が認められる。トンネル縦断方向の移動量は、ブロックNo.21～25において顕著な縦断方向への伸びが認められる。ブロックNo.25～82では200mm程度の移動が認められ、ブロックNo.82以降に移動量が大きくなり東側坑口で350mmの移動量が認められる。

水平方向の相対変位が±100mm以上のブロックは、ブロックNo.5, No.24である。また、±100mm程度のものは、ブロックNo.40, No.51, No.84, No.101が挙げられる。

鉛直変位の相対変位はブロックNo.3, No.24およびNo.42で50mm程度の沈下が認められ、ブロックNo.63では40mm程度の隆起が発生した。また、ブロックNo.97付近のブロックでは20～30mmの隆起が認められる。

トンネル縦断方向の相対変位を見るとブロックNo.24付近の相対変位が160mm程度と大きく、また、

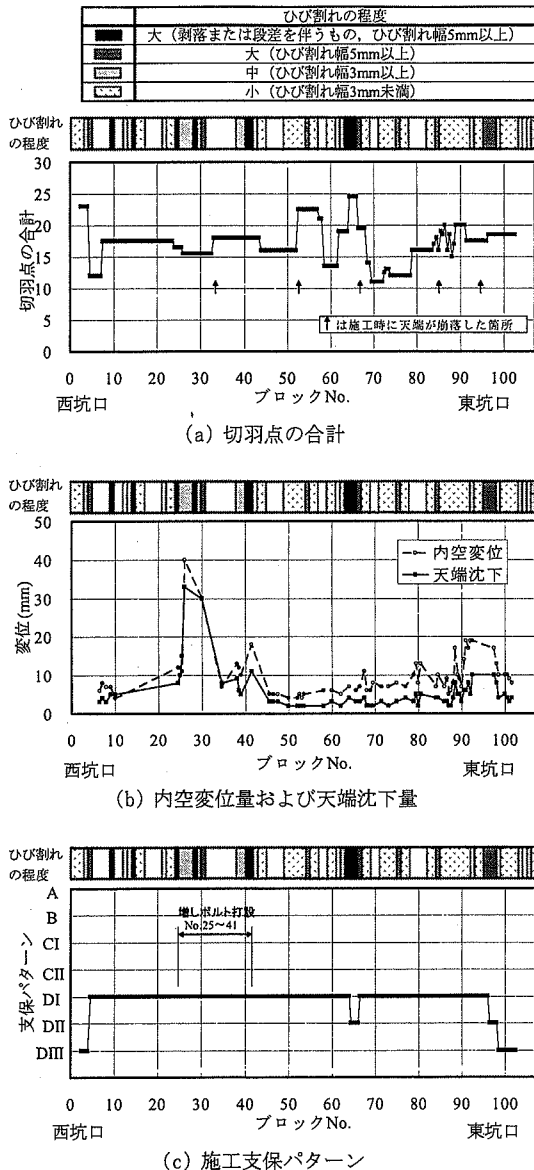


図-3 施工支保パターンとひび割れの程度

ブロックNo.97付近においても40mm程度の相対変位が発生している。

上記の各方向の相対変位が大きなブロックについて変状の種類との関係を以下に示す。

上記のブロックのうちせん断ひび割れが発生したブロックは、ブロックNo.3, No.24, No.40, No.63である。ブロックNo.24では、水平、鉛直、縦断方向の相対変位のいずれも大きい。ブロックNo.3, No.63についてみると鉛直方向の相対変位は大きいものの、水平、縦断方向の相対変位は30mm以下と小さいといえる。また、ブロックNo.40については、水平方向の相対変位が大きく、鉛直、縦断方向の相対変位

は10mm程度と小さい。相対変位とせん断ひび割れとの関係は明瞭ではないものの、水平または鉛直のいずれかの方向にズレを伴うような変位を受けた場合にせん断ひび割れが発生するものと推定される。

ねじりせん断ひび割れが発生したブロックNo.97, No.101付近においては、水平、鉛直および縦断方向の相対変位が大きい。ブロックNo.24との違いは、縦断方向の変位が40mm程度と小さいことである。このことから、トンネルに水平、鉛直および縦断方向に変位が作用した場合にはねじりせん断ひび割れがトンネル斜め方向に発生するものと推定される。

引張りひび割れが発生したブロックNo.51, No.84では水平方向の相対変位が大きく、鉛直および縦断方向の相対変位は小さい。このことから、水平方向の変位が作用し、トンネル内空変位が縮小または拡大するように変形した場合に引張りひび割れが発生するものと推定される。

このようにトンネルのおおまかな変位から予想されるひび割れの発生状況は実際の覆工のひび割れ状況とかなりよく対応しており、今後のトンネル覆工変状の評価のための有用な資料になると考えられる。

(4) 新設施工時の地山状況と変状の関係

図-3(a)に新設施工時における切羽点の合計とひび割れの程度を示す。ここで、切羽点の合計とは、洞爺トンネル施工時に実施した独自の切羽観察表における切羽観察項目である切羽の状態、地山の圧縮強度、風化変質の程度、割れ目の形態・状態、湧水状況、湧水による劣化の6項目の評価点(各1~5点)を加えた値である。大きな値ほど地山状況が悪いことを意味するものと理解できる。切羽点の合計から洞爺トンネル施工時の地山の状況を見ると、やや良好な状態~不良な状態であったものといえる。なお、ブロックNo.34, No.52, No.67, No.85, No.95付近では天端の崩落があった。

ひび割れの程度が大きいブロックNo.63~67では切羽点の合計が25程度と高いことから新設施工時における地山状況も悪かったことがわかる。しかしながら、覆工コンクリートの剥落が発生したブロックNo.24, No.40では切羽点の合計が17程度と覆工コンクリートに変状が認められないブロックと大差がない。

図-3(b)に内空変位量および天端沈下量の発生状況とひび割れ程度との関係を示す。内空変位量は、7~40mm程度であり、天端沈下量は、3~35mm程度であった。ブロックNo.25~No.30付近では、他のブロックと比較して大きな変位が発生している。ブロックNo.25~30では中~大のひび割れが確認されているが、覆工コンクリートに剥落が発生したブロック

No.24の内空変位量および天端沈下量は10mm程度であった。また、ブロックNo.63付近の内空変位量および天端沈下量は5mm程度であった。このことから、内空変位量および天端沈下量とトンネルの変状との間に明確な因果関係は認められなかった。

図-3(c)に施工支保パターンとひび割れの程度との関係を示す。洞爺トンネルでは、坑口を除いたほとんどの区間でDIパターンが採用されている。ブロックNo.63付近ではDIIパターンが採用されているが、DIパターンとDIIパターンとでは、支保工の剛性にそれほど差異がないものと考えられる。内空変位量が大きかったブロックNo.25~No.41において増しボルトが施工された。このことを踏まえて、図-3(c)をみると支保工の状態と変状の程度には、大きな関係は認められないことがわかる。

一般的にはトンネルの変状と新設施工時の地山状況とは大きな関係があると言われている。ブロックNo.63では新設施工時の地山状況と変状の程度に因果関係が認められた。しかし、ブロックNo.24のように新設施工時の地山状況と直接的に関係が認められないブロックもあった。以上より本トンネルに関する限りトンネルの変状と施工記録の地山状況、支保パターンとの間に明確な関係を捉えることはできない。このことから施工時に記録された地山要因は後のトンネル変状に対する支配的要因になるとは限らないといえる。

3. 復旧対策工判定基準と復旧対策工

(1) 復旧対策工選定のための基本方針

トンネルに作用した変位および施工時の地山要因と変状の関係を整理した結果、変位の方向や大きさに応じて覆工コンクリートの変状パターンが異なること、施工時の地山要因がトンネルの変状の支配的要因とならないことが明らかとなった。このことは、数十年後に再度噴火が起こった際、トンネルに作用する変位を抑止しないかぎり変状が発生する可能性があることを意味していると考えられる。しかし、火山噴火に伴い発生する地山の変位を抑えることは困難である。したがって、洞爺トンネルにおける復旧対策工選定の基本方針を有珠山の噴火に伴う地殻変動に耐えうる構造とするのではなく、災害前の状態に復旧することとして覆工コンクリートおよび支保工の変状の程度に応じて復旧対策工を選定することとした。

表-2 対策工判定要素

判定区分	覆工コンクリート補修の判定要素		支保工の変状状況			
	ひび割れ幅	分布状況	吹付けコンクリート	鋼アーチ支保工	インバートコンクリート	
A1	3mm以上	複数	3mm以上	有り	段差有り	
A2				無し	段差無し	
A3			0~3mm	-	-	-
B						
C1	0.2~3mm	単独	-	-	-	
C2						
(C)	0~0.2mm	-	-	-	-	
無対策						

表-3 復旧判定ランク

判定区分	対策工項目	摘要
A	覆工打ち換え 支保工補強	覆工はSFRC 支保工補強は、地山改良、縫返しを変状状況により採用
B	覆工打ち換え	覆工はSFRC
C	ひび割れ補修	ひび割れ分布状況により、炭素繊維シート貼り付けで剥落対策併用
-	無対策	覆工の構造的欠陥の有無と表面応力より健全度を判定

(2) 復旧対策工判定基準

洞爺トンネルにおける判定要素と判定区分を表-2に示す。洞爺トンネルでは、「道路トンネル維持管理便覧」⁹⁾を参考として、支保工の変状に対する判定区分などを追加した独自の判定区分を設定した。覆工コンクリート補修のための対策工判定要素の基本条件は、ひび割れ幅、ひび割れ分布状況、地質状況である。上記の各種条件に加え、洞爺トンネルの復旧対策工は全面通行止めの状況下で行われることを考慮し、経年変化により予測される将来の再補修時に全面通行止めが伴うと想定されるものについてはひび割れ状況や打音検査の結果に基づき対策工のランクアップをした。

これらの判定要素に基づき対策工の規模を区分すると、覆工コンクリートの打ち換えが適切と考えられるもの、ひび割れを補修して剥離、剥落対策を原則とするもの、無対策で現況のままとするものが考えられる。さらに、覆工の打ち換えを実施するブロックについては、支保工変状を調査し、各箇所の支保工補強の必要性を判断した。覆工コンクリートの補修および支保工補強の必要性より、各覆工ブロックを表-3に示す復旧判定ランクに区分した。図-4に洞爺トンネルの対策工選定の流れを示す。

(3) 復旧対策工

覆工を改築するほどの大規模な対策のものは全107ブロックのうち26ブロック、ひび割れの補修など中～小規模の対策を講じたものが51ブロック、無対策のものが30ブロックであった。

表-4、表-5に洞爺トンネルで実施した対策工のうち代表的なブロックにおける変状の状況と対策工についてまとめたものを示す。

a) 対策工A1～B

覆工コンクリートが著しい変状を受けている場合やひび割れ幅が大きい場合、覆工コンクリートを取

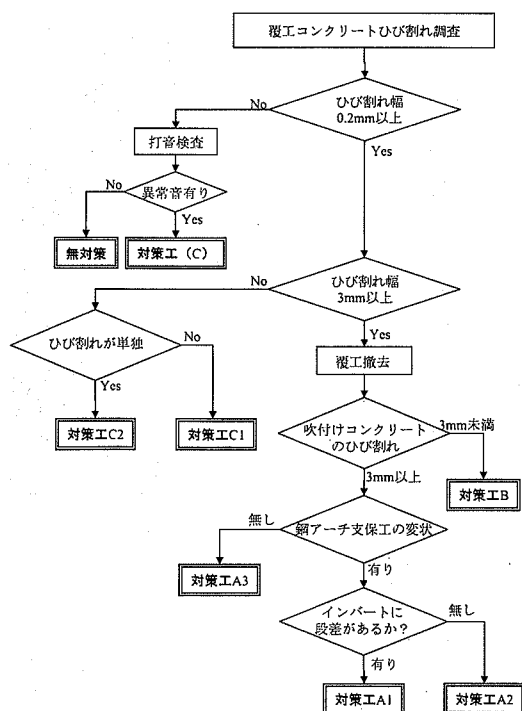
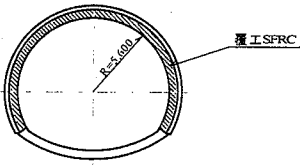
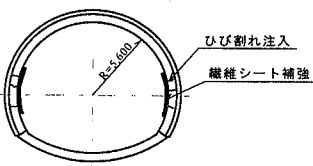
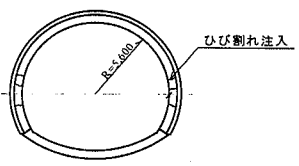
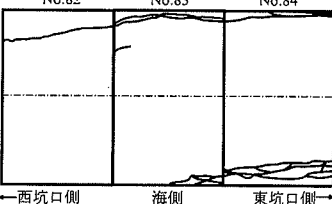
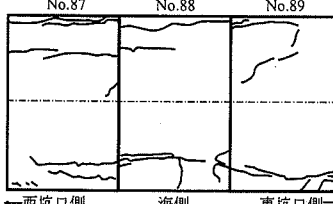
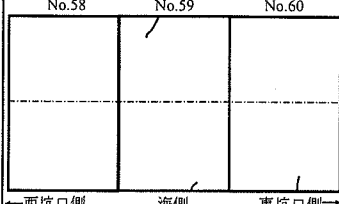
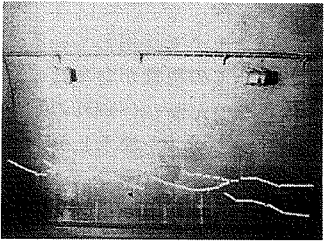
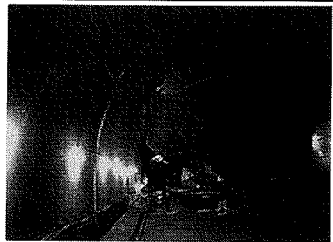
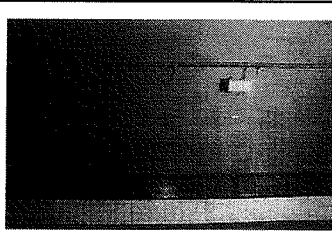
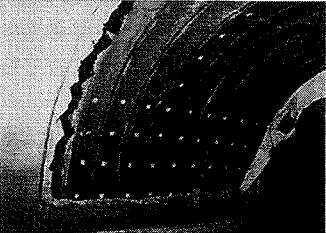


図-4 洞爺トンネルの対策工選定の流れ

表-4 変状と復旧対策工 (対策工A1, A2, A3)

	対策工A1 (ブロックNo.24)	対策工A2 (ブロックNo.40, No.63)	対策工A3 (ブロックNo.28)
判定区分と根拠	<p>【地山条件】 新設掘削時に変質帯であり, 切羽補強工実施。</p> <p>【覆工変状】 ブロック中央部に約10cmの段差をとまなうひび割れがあり, 肩部でコンクリート塊剥落。</p> <p>【支保工変状】 鋼アーチ支保工の座屈および吹付けコンクリートに剥落あり。</p> <p>【インバート変状】 覆工のひび割れとつながる段差をとまなうひび割れで一部圧壊。</p>	<p>【地山条件】 新設掘削時に変質帯であり, 上半部に増しボルト実施。</p> <p>【覆工変状】 全周にわたり複数のひび割れがあり, 最大ひび割れは14mm。</p> <p>【支保工変状】 吹付けコンクリート全周にわたるひび割れがあり, 最大ひび割れ幅は33mm。一部に剥落あり。鋼アーチ支保工は東坑口側への傾斜変状。</p> <p>【インバート変状】 トンネル横断方向に最大幅2~3mmのひび割れが数本あるが, 段差なし。</p>	<p>【地山条件】 新設掘削時に変質帯であり, 粘土化している地山。</p> <p>【覆工変状】 全周にわたり複数のひび割れがあり, 最大ひび割れ幅は15mm。</p> <p>【支保工変状】 ブロック中央部に幅の大きなひび割れ(最大幅33mm)がトンネル横断方向に分布。</p> <p>鋼アーチ支保工には変状なし。</p>
復旧対策工標準図			
ひび割れ分布図	<p>山側 No.23 No.24 No.25</p>	<p>山側 No.39 No.40 No.41</p>	<p>山側 No.28 No.29 No.30</p>
覆工の変状			
支保工の変状			
インバートの変状			<p>なし</p>

表-5 変状と復旧対策工（対策工B, C1, C2）

	対策工B（ブロックNo.84）	対策工C1（ブロックNo.88）	対策工C2（ブロックNo.59）
判定区分と根拠	<p>【地山条件】 新設掘削時に地山の固結土が低く、切羽が不安定な地山。</p> <p>【覆工変状】 側壁部にトンネル縦断方向のひび割れがあり、最大ひび割れ幅は15mm。</p> <p>【支保工変状】 海側側壁部の吹付けコンクリートにひび割れがあり、最大幅1mm。 鋼アーチ支保工には変状なし。</p>	<p>【地山条件】 新設掘削時に地山は全体的に風化を受けて軟質。</p> <p>【覆工変状】 側壁部にトンネル縦断方向のひび割れがあり、最大ひび割れ幅は0.3mm。</p>	<p>【地山条件】 新設掘削時に地山は全体的に風化を受けて軟質。</p> <p>【覆工変状】 側壁部にトンネル縦断方向のひび割れがあり、最大ひび割れ幅は0.3mm。 ひび割れは単独。</p>
復旧対策工標準図			
ひび割れ分布図	<p>山側 No.82 No.83 No.84</p>  <p>←西坑口側 海側 東坑口側→</p>	<p>山側 No.87 No.88 No.89</p>  <p>←西坑口側 海側 東坑口側→</p>	<p>山側 No.58 No.59 No.60</p>  <p>←西坑口側 海側 東坑口側→</p>
覆工の変状			
支保工の変状		なし	なし
インバートの変状	なし	なし	なし

り壊し覆工コンクリートの打ち換えと支保工の縫返し、トンネル周辺地山にシリカレジン注入材と注入ボルトによる地山改良を行った。覆工コンクリートの構造は、現在の2車線道路トンネルの地山等級Dで採用されている鋼繊維補強コンクリート（以下SFRC）で覆工の打ち換えを行い、剥離・剥落に対する耐久性の向上を図った。また、大きな損傷を受けた支保工区間を対象として孔間弾性波探査の弾性波速度値、真空透気試験の透気係数の変化から地山の緩み領域を推定し、その平均値である4mの範囲に対して地山改良を行った。なお、対策工Bの範囲については、吹付けコンクリートの変状状況から地山に大きな緩みが発生していないものと判断したため地山改良を実施しなかった。

対策工A1は、覆工コンクリートの剥落、鋼製支保工の座屈、吹付けコンクリートの剥落およびインバートの段差を伴うひび割れが発生したブロックNo.24に適用した。対策工種は、地山改良、支保工縫返し、インバート打ち替え、SFRC覆工である。

対策工A2はブロックNo.40に適用した。ブロックNo.40は覆工コンクリート、吹付けコンクリートおよび鋼アーチ支保工に変状が確認されたが、インバートに大きな変状は無かった。対策工種は、地山改良、支保工縫返し、SFRC覆工である。

対策工A3はブロックNo.28、No.63のように覆工コンクリートおよび吹付けコンクリートにひび割れなどの変状が確認されたものの、鋼アーチ支保工には変状が認められない7ブロックで実施した。対策工種は、地山改良およびSFRC覆工である。

対策工BはブロックNo.84のように覆工コンクリート側壁部付近にトンネル縦断方向のひび割れが複数発生していたが、吹付けコンクリート、鋼アーチ支保工には変状はみられなかった17ブロックについて実施した。対策工種は、SFRC覆工のみである。

b) 対策工C1, C2および無対策

覆工コンクリートにひび割れがあり、将来的に剥落の危険性があると判断された場合、あるいはトンネル天端部に断面補修箇所がある場合には、ひび割れの分布状況とひび割れの幅に応じて炭素繊維シートの貼り付け、ひび割れ補修、断面補修を行った。

対策工C1は、ブロックNo.88に代表されるように、側壁部に複数の縦断方向ひび割れがみられたブロックを対象として炭素繊維シートの貼り付けによる剥離・剥落防止対策を行った。対策は48ブロックにおいて実施した。

対策工C2は、ブロックNo.59のようにひび割れが単独である3ブロックについて、エポキシ系接着剤によるひび割れ補修を行った。また、打音検査で確

認された覆工表面の一部欠損箇所や覆工応力試験のために削孔した箇所については、無収縮モルタルによる断面補修を実施した。

覆工表面にひび割れがみられない、あるいはひび割れ幅が微小で剥離、剥落の可能性が低いと判断された場合については、レーダー探査による覆工背面空洞の確認調査、打音検査、覆工応力測定を実施し、覆工コンクリートの構造欠陥の有無を確認した。この結果により異常が認められない区間については、覆工コンクリートは健全であるものと判断して無対策とした。

c) 変状状況と対策工の関係

対策工A1, A2, A3は、せん断ひび割れが発生した8ブロックとねじりせん断ひび割れが発生したブロックNo.97において採用した。せん断ひび割れが発生したブロックにおいては、覆工コンクリートの剥落や段差を伴うひび割れなどがトンネルの全周にわたって発生している。ブロックNo.97はねじりせん断ひび割れが発生したブロックの中でひび割れの幅や本数が多い。また、支保工の変状程度も吹付けコンクリートに幅3mm以上の複数のひび割れの発生や剥落が認められ、また、鋼アーチ支保工の座屈や変形が認められるなど、変状の程度が大きなもので採用した。このことから、対策工A1, A2, A3を採用したブロックの変状状況を見ると、せん断ひび割れがトンネル全周に発生し、かつ支保工の変状程度が大きいといえる。

対策工Bは、17ブロックで採用している。ひび割れの種類は区分した全ての種類が含まれている。せん断ひび割れとねじりせん断ひび割れの発生したブロックで対策工A1, A2, A3を採用しなかった理由は、支保工の変状程度が小さいことが挙げられる。引張ひび割れが発生したブロックNo.84では、ひび割れ幅5mm以上であったため対策工Bを採用した。また、ブロックNo.2は、側壁部に圧壊が部分的に発生したブロックであり、部分的に覆工の打ち替えを施工したものである。

対策工C1, C2は、ひび割れの程度が小～中程度の箇所でも採用した。ひび割れの種類をみると引張ひび割れが発生した箇所でも多く採用されている。対策工C1, C2の主たる目的は、覆工コンクリートの剥落対策であり、覆工コンクリートに幅0.2mm以上のひび割れが無く、打音検査により異常が確認された箇所においても実施した。

表-6 対策工ランクと評価点

対策工ランク	工 種
a	改築（含む部分改築）
b	内面補強工（炭素繊維シート補強）
c	ひび割れ補修
d	対策工なし

表-7 各基準の判定区分と対策工ランク

基 準	区 分	適 用	対策工 ランク
洞爺トンネル	A	SFRC覆工，支保工繰返し， 地山改良，インパット改築	a
	A1	SFRC覆工，支保工繰返し， 地山改良	a
	A2	SFRC覆工，地山改良	a
	B	SFRC覆工	a
	C	ひび割れ補修，断面補修， 炭素繊維シート貼り	b-c
	(C)	炭素繊維シート貼り	c
	CI	ひび割れ補修	c
道路トンネル 維持管理便覧	-	対策工なし	d
	3A	剝離・剝落の恐れあり （アーチ部）	a-b
	2A	剝離・剝落の恐れあり （側壁部）	b
	A	ひび割れが進行している	c
	B	ひび割れがあるが進行していない	c
	-	健全	d
設計要領 第三集	I	剝離・剝落の恐れあり	a-b
	II	局所的な剝落の危険がある	b
	III	ひび割れがある	c
	-	健全	d
鉄道補強・補修 マニュアル	AA	剝離・剝落の恐れあり	a-b
	A1	わずかな外力で剝落する恐れあり	b
	A2	剝落の規模は小さいが，列車に支 障	b
	B	変状の進行速度が極めて緩慢	c
	C	変状の進行なし	c
	S	健全	d

4. 各基準における評価と洞爺トンネルの対策工判定区分の比較

(1) 既往のトンネル維持管理基準

トンネルの維持管理を行う上での基準は，管理を行うトンネルの用途に応じて各機関で定められている。交通用に用いられている基準では日本道路公団「設計要領第三集保全編（以下，JH第三集）」⁶⁾，日本道路協会「トンネル維持管理便覧（以下，維持管理便覧）」⁷⁾および鉄道総合技術研究所「トンネル補強・補修マニュアル（以下，補強・補修マニュアル）」⁸⁾などが主な基準といえよう。

これらの基準は，トンネルの機能として通行車両，または列車の安全面に重点を置いた基準である。調査の流れは，道路の基準と鉄道の基準で若干異なるものの，大まかな流れは同様であり，点検，調査，対策工の流れとなっている。通常の維持管理段階では，

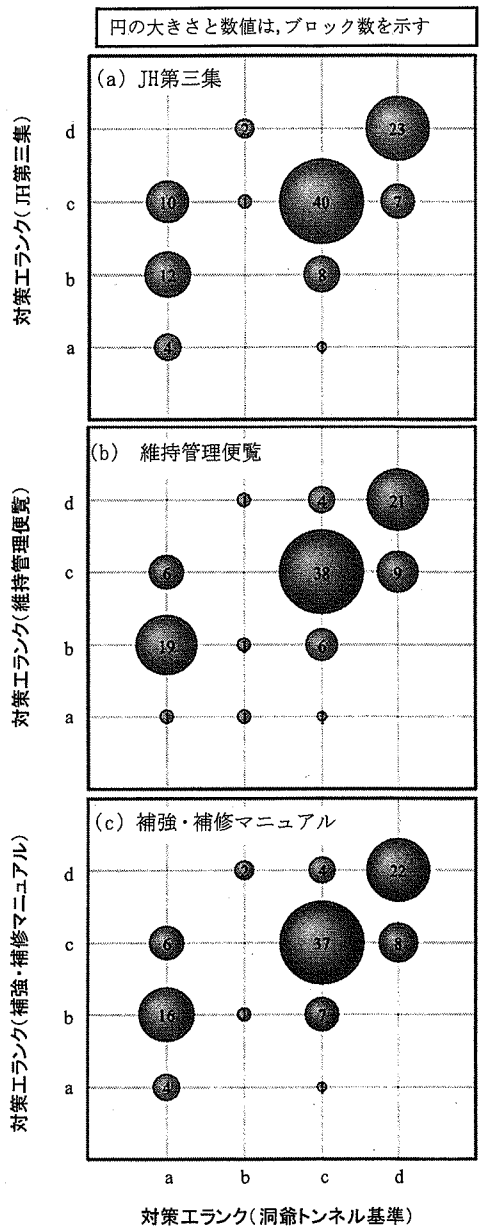


図-5 洞爺トンネルの判定基準と各基準による判定の分布

トンネルの健全度の評価は①利用者側に関するもの（安全性，供用性），②構造物に関するもの（耐荷性，耐久性），③管理の容易性，設備の維持に関するもの（維持管理），④変状の進行性，特徴（共通），などの観点に立って行われている。

トンネルの健全度の判定は，表-7の区分と適用に示すように各基準とも対策工を実施するための緊急度を判定するものであり，健全度判定の目安を外方に起因する変状，材料劣化に起因する変状，漏水な

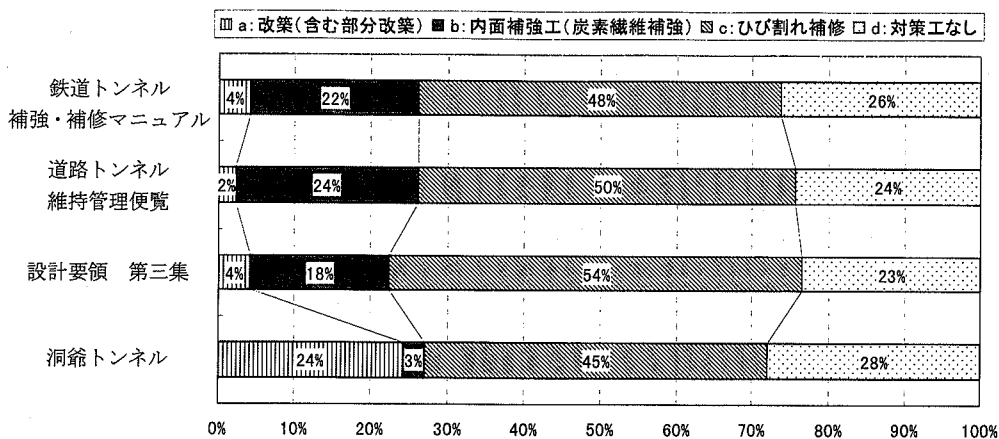


図-6 既往の基準による洞爺トンネルの対策工判定

どに分類して設定している。また、これらの基準では、外力に起因する変状の原因を塑性圧、鉛直ゆるみ圧、偏圧としており、地震や近接施工についての目次の規定はなく、供用しながらの対策を意識したものとなっている。

(2) 洞爺トンネルと従来の判定基準との比較

自然災害に起因して変状が発生したトンネルの対策工選定手法と従来の維持管理による対策工選定手法にどのような違いがあるかを明確にするため、JH第三集、維持管理便覧および補強・補修マニュアルにおける判定基準により洞爺トンネルの変状に対して判定を行った。その際、洞爺トンネル以外の基準は、対策工の必要性および緊急性を判定する基準であるため、洞爺トンネルの判定基準と直接比較できないことから、本検討においては表-6に示すような対策工ランクに置き換えて比較を行った。表-7に各基準における判定区分に対応する対策工ランクを示す。なお、既往の基準では、対策工の要否を判定した後に変状原因に応じた対策工を選定することとなるが、ここでは、剥離・剥落対策工を念頭においた検討を行った。

洞爺トンネルの判定基準と他の判定基準による判定の分布を図-5に示す。これらの図は、横軸に洞爺トンネルの判定基準に基づく対策工判定ランクを、縦軸に他の判定基準における対策工判定ランクを示したものである。

図-5を見ると概ね対角線上が大きなウェイトを有している。このことから、洞爺トンネルの判定基準と他の判定基準との判定では大きな違いはないものと判断される。しかしながら、洞爺トンネルの判定基準には、以下に示すような特徴を有している。

洞爺トンネルで対策工ランク a として判定された

26ブロックについてみると、他の基準では、対策工ランク b として判定されるケースが多く見られた。このことは、先に述べたように対策工実施の環境、すなわち、全面通行止めで実施できるか、または、供用しながらの対策工かの差によるものと考えられる。

洞爺トンネルの判定における対策工ランク c と判定された47ブロックについては、他の基準でも大半が c として判定されているものの、対策工ランク a, b として判定されるブロックがみられる。このことから、同一のブロックに対しても対策工ランクの判定に差異が生じていることがわかる。これらの差異は、ひび割れ、剥離・剥落の判定基準がひび割れ密度、ひび割れ幅、ひび割れ長さなどの要素により判定基準が異なることに起因しているものと考えられる。

図-6は、各対策工判定基準を用いた場合における対策工ランクの頻度を示したものである。対策工ランクが a (改築) と判断されたのは洞爺トンネルの判定基準では24%であり、他の判定基準においては2~4%である。洞爺トンネルの判定基準によるものが大きな割合で改築が必要という判定となった。対策工判定ランクが b (内面補強工) と判定されたものは、洞爺トンネルの判定基準では僅か3%であるのに対し、他の基準においては18~24%であった。対策工ランクが c (ひび割れ補修) と判定されたものは45~54%であり、洞爺トンネルの判定基準によるものと他の判定基準によるものとに大差がない。また、対策工ランクが d (対策工なし) と判定された割合についても、23~28%と洞爺トンネルの判定基準によるものと他の判定基準によるものとに大差がない。

洞爺トンネルによる判定では対策工ランク a が他の基準より多く適用されている傾向が見受けられる。これは、前述のように通常の維持管理においては、供用しながらの対策工を意識しており、洞爺トンネ

ルでは、全面通行止めにより対策工を施工できることに起因するものと考えられる。しかし、全体的な傾向としては、対策工の要否を判定する場合、どの基準を用いても大差無いことがわかる。また、トンネルの補修を主体とした対策工か、補強を主体とした対策工の判定においても大差ない。

洞爺トンネルの判定基準の特徴としては、対策工の必要性の判定では、他の判定基準と差異は認められないが、被災前の状態に復旧するために覆工の打ち換えなどグレードの高い対策工を選定する割合を多くしたものであるといえる。

5. おわりに

本研究では、有珠山噴火により生じた洞爺トンネルの変状事例に基づき自然災害に起因するトンネルの変状復旧対策工の選定基準についてその特徴を示した。以下に得られた知見をまとめる。

- ① 洞爺トンネルは、全107ブロックのうち、約7割のブロックに変状が発生した。洞爺トンネルの主な変状現象は、覆工コンクリートの剥離・剥落、ひび割れ、鋼アーチ支保工の座屈、インバートコンクリートの段差を伴うひび割れなどであった。
- ② ブロック両端の水平、鉛直方向の相対変位ならびにトンネル縦断方向の相対変位の大きさとその組み合わせに応じて明快な覆工のひび割れパターンが発生する。
- ③ 新設施工時の記録と変状との関係について整理した結果、本事例においては、関係が認められるブロックもあるものの、全体として明らかな因果関係を捉えるまでに至らず、施工時の地山要因が必ずしもトンネル変状の支配的要因ではないことが示された。
- ④ 上記を踏まえて復旧対策工選定の基本方針を整理し、自然災害に対する復旧対策工ではなく、災害前の状態に復旧することを基本とし、覆工コンクリートおよび支保工の変状の程度に応じた復旧対策工を講じた。

⑤ 洞爺トンネルの復旧対策工判定基準と既往の基準とを比較した結果、対策工の必要性の判定では、差異は認められないことがわかった。しかし、洞爺トンネルでは、覆工の打ち換えなどグレードの高い対策工を選定する割合が多く、他の基準と明瞭な差異が認められた。

通常のトンネル維持管理基準は、限られた予算の中で効率的にトンネルの機能を保持していくためのものである。対策工を検討する際には、当然のことながら、道路、鉄道のサービスレベルの低下を最小限に抑える必要がある。しかし、洞爺トンネルのような自然災害時の変状対策は、全面通行止めを行うことが可能であり、覆工の打ち換えなど大規模な対策を講ずることができる。ただし、自然災害時には物資の輸送などのために早期に復旧を施す必要があるため、対策工の要否とその対策を一連の流れの中で決定するシステムおよび対策工の施工順位の検討などが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 竹俣隆一, 国田正人, 大塚康範: 能登半島沖地震で被災した木の浦隧道の復旧工事について, 第20回日本道路会議論文集, pp.262-263, 1993.
- 2) 中田欽也, 斉藤伸治, 小川幸樹, 森哲夫: 兵庫県南部地震による被災送水トンネルの復旧, トンネルと地下, 第28巻, 11号, pp.39-47, 1997.11.
- 3) 小山幸則, 朝倉俊弘, 佐藤豊: 兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧, トンネルと地下, 第27巻, 3号, pp.51-61, 1996.3.
- 4) 林康啓, 今井淳次郎, 志賀正延, 鈴木雅行: 有珠山噴火に伴うトンネル災害復旧, トンネルと地下, 第32巻, 11号, pp.15-24, 2001.11.
- 5) (社)日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, pp.123-137, 1993.11.
- 6) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル トンネル本体工保全編[変状対策], pp.44-54, 1998.10.
- 7) (財)鉄道総合技術研究所: トンネル補強・補修マニュアル I. 共通編, pp.38-44, 1990.10.

(2003. 4. 15受付)

RESTORATION MEASURES OF TUNNEL EXPERIENCED LARGE
DEFORMATION DUE TO NATURAL DISASTER

Yasutaka HAYASHI, Junjiro IMAI, Mamoru YOSHIDUKA, Masayuki SUZUKI,
Yoshiyuki SHIGETA and Koji NAKAGAWA

Tunnels may deform resulting a change of tunnel shape because of natural disasters such as volcanic eruption, diastrophism, or earthquake. Those tunnels were handled by past standard measures; however there is a need to evaluate this past standard. In this research, record data of Toya tunnel which experienced damages because of the eruption of Usu Mountain is arranged and analyzed in order to obtain a proper restoration measure. Moreover, features of the proposed measure were compared with the past standard measure.