# 膨張性地山を通過する供用トンネルに発生した 大規模変状(インバート隆起:最大950mm)を復旧する 山形自動車道盃山トンネル(上り線) LARGE DEFORMATION OCCURRED THROUGH THE NATURAL GROUND-SERVICE TUNNEL (INVERT SWELLED BY 950MM) TO RECOVER YAMAGATA EXPRESSWAY SAKAZUKIYAMA TUNNEL (UP LINE)

佐久間 智<sup>1</sup>・菅原 徳夫<sup>2</sup>・多田 誠<sup>3</sup> Satoru SAKUMA・Norio SUGAWARA・Makoto TADA

On the afternoon of August 13, 2008 Yamagata Expressway Sakazukiyama Tunnel(up line) surface def-ormation (upheaual) and the crack occurred. As measures to remove the existing damaged invert, the invert with the power recovered from the load-carrying capacity. In addition, various measurements and deformation from the event, the behavior of existing natural ground displacement in the empty tunnel lining, invert the stress and recovery were observed.

*Keywords: tunnel, deformation, recovery, measurement, deformation mechanism, calculating load bearing ability* 

平成 20 年 8 月 13 日の午後、山形自動車道の盃山トンネル(上り線)において、路面変状(隆起)とク ラックが発生した。路面変状は日々拡大し、10 日間で約 380mm の隆起を確認した。この路面変状は、膨張 性を有する地山(膨張性粘土鉱物(スメクタイト)を平均 52%(最大 94%)を含有)が地下水の供給によ り劣化・膨張することで、既設インバート(最大隆起量:950mm)を押し上げ、破壊に至ったものであった。 供用中トンネルとして、これだけ急激な変位速度で変状を起こし、インバートが破壊した事例は極めて少 ない。

対策として、損傷した既設インバートを撤去し、より耐荷力のある鋼製支保工・吹付コンクリートと一体をなったインバートを復旧した。また、変状発生時から各種の計測を行い、内空変位・既設のトンネル 覆工・地山の挙動等を観察し、更に変状メカニズムの分析、対策工の評価を行った。

キーワード:トンネル、変状、復旧、計測、変状メカニズム,耐荷力算定 <sup>1</sup>正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 山形管理事務所 副所長 <sup>2</sup>非会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 仙台管理事務所 工務担当課長 <sup>3</sup>非会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 山形管理事務所 改良担当課長



図-1 盃山トンネル位置図

## 1. はじめに

山形自動車道は、東北自動車道の村田JCTより 分岐し、奥羽山脈を越えて山形県に入り、月山道 路(自動車専用道路)を経由して酒田市に至る総 延長137kmの高速道路である。盃山トンネル(上 り線)は、図-1に示すように山形蔵王IC~山形 北IC間にある1,234mのトンネルである。トンネル 内に膨張性地山区間が存在し、建設時に非常に大 きな変位が発生し、工事が難航<sup>1)</sup>したが、平成2 年10月に貫通し、平成3年7月20日に暫定2車線で 供用した。その後、平成14年10月30日には、下 り線が供用して四車線化が完成し、現在に至っ ている。

供用後概ね17年経過した 平成20年8月13日の午後、盃 山トンネル(上り線)の走 行車線に路面変状(隆起・ クラック)が突然発生し、 急激な変状の進行と範囲の 拡大に至った。

本稿は、膨張性地山に建 設された供用中のトンネル において急激に発生したト ンネルの変状状況、調査、 対策工事、計測、変状メカ ニズムの弾塑性解析、耐荷 力評価について報告する。



図-2 インバート損傷のメカニズム



**図-3** 路面隆起状況(縦断方向)

## 2. トンネル変状と地質概要

今回の変状メカニズム(推 定)を図-2 に示す。この路面 変状は、周辺地山が地下水等 により劣化し、膨張圧(塑性 圧)が発生したことにより、 インバートコンクリート(以 下、「インバート」という) を下方より押し上げ、破壊に 至ったと思われる。更にイン バートの破損が進行し、セン タードレーンも破壊され、地 山への水の供給量が増加し、 塑性領域が拡大していき、イ ンバートの損傷範囲が縦断方 向に進展していった。路面の 隆起状況を図-3 に示す。路面変状は 日々拡大し、10日間で約380mm という 急激な隆起を確認した。

今回変状を起こした区間の地質は、 図-4に示すように膨張性粘土鉱物(ス メクタイト)が平均52%(最大94%) も含む熱水変質した流紋岩質凝灰岩が 分布し、著しい膨張性の基準30%を大 きく越えている。地山強度比は0.1以下 であり、著しい膨張性の基準0.5をかな り下回っている。



**図-4** 膨張性地山指標



### 3. インバートの損傷状況

既設インバートの損傷は、おおよそインバート中央付近で破壊し、縦断方向に約128mの区間で確認された。 写真-1にインバート損傷状況(36.6KP付近)を示す。インバートの断面測量を実施したところ、設計断面に 対し、最大で950mmの隆起(写真-1、 にて)が確認された。供用中トンネルにおいて変状が確認されてか ら、約1ヶ月半でこれほど大規模に、しかも急速にインバートが隆起して破壊した事例は皆無といえる。

支保部材		上り線 (損傷インバート)	上り線 (建設時補強 インバート)	上り線 (復旧インバート)	(参考) 下り線インパート
吹付コンクリート	f'ck			36 N/mm <sup>2</sup>	18 N/mm <sup>2</sup>
	t			25 cm	25 cm
鋼製支保工			200H @4.Om	200H @1.Om	200H @1.Om
本インバート	f'ck	18 N/mm <sup>2</sup>	18 N/mm <sup>2</sup>	24 N/mm <sup>2</sup>	18 N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	t	50 cm	50 cm	50 cm	50 cm

表-1 インバートの諸元

平成 14 年度に供用 した下り線トンネルの インバート(厚さ 0.5m、鋼製支保工 (H200@1m)、吹付けコ ンクリート(厚さ 0.25m)、半径 13.1m) は、現在も変状を起こ していない。

今回の対策工の断面 を図-5 に示す。下り 線トンネルのインバー ト構造を参考にして、 更にインバートの半径 を13.1mから10.0mに 変更して、よりトンネ ル断面を円形に近づけ た。また、諸元を表-

1に示す。また、インバート下面に 設置した鋼製支保工と既設のアーチ 支保工との継手は、下方からの塑性 圧を考慮して図-5のa部の詳細図に 示す構造とした。

# 5. 施工状況

損傷が発生した上り線は全面通行 止めとし、隣接する下り線を対面通 行することでお客様の交通を確保し、 周辺道路への影響を極力回避した。 災害発生後も日々路面は隆起し、ト ンネル内空は縮小する状況のもと早 期に変位を抑える対策工を実施する 必要があった。写真-2 に示すように、





写真-2 インバート対策状況

インバート施工は、昼夜連続作業で約8mを1日のサイクルで実施し、早期に損傷したインバートを復旧し、 順次断面閉合を行った。

## 6. 計測について

対策工の施工時には、通常のトンネルで実施される内空変位、天端沈下などの計測Aと地中変位計の測定 や新設のインバートコンクリート応力測定などの計測Bに加え、既設覆工コンクリートのクラウン部の応力 測定を実施した。ここでは、代表的な計測断面として、変状区間の中で最も内空変位や盤ぶくれが大きい 36.601kp付近の計測結果について示す。



図-7 地中变位測定結果 (36.601KP)

施工過程を整理すると、全変位で約 111mm、そのうちインバート部の掘削から新設のインバートによる 閉合までに約 36mm の変位が発生した。

b) 破壊を受けたインバートの掘削直前のクラウン部には、最大 - 12.2 N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力が発生していた が、対策工の施工により引張側へ、約3.0N/mm<sup>2</sup>変化した。 (2) 地中变位測定結果

観測結果を図-7に示す。

- a) 水平変位より鉛直変位が大きく 9/1~9/16 の増分は水平が約
  10mm 程度に対して鉛直が約 70mm
  と7倍の変位が発生した。
- b) 鉛直は工事に伴い撤去された が、水平は下り線側(左)が大 きい、また、変位が発生した深 度も深い。

# 変状メカニズムを考慮した弾塑性 解析

数値解析のモデルとして、図-8 に 示す 3 種類の変状メカニズムを考え、 地山の破壊基準は、モール・クーロン を採用した。

初期応力は、変状区間の土被りが最大 100m 程度であることから、yH= - 2.00MPa で静水圧 状態と仮定した。また、case3 の膨張圧は、既 設インバートの破壊条件を満たすように試行錯 誤により求めた。既設インバートが破壊する条 件は、インバートの一部に設計基準強度 -18.0MPa 以上の応力が発生した時点とした。

結果として膨張圧は、0.30MPa であり図-9 に 示す岩石(地山)の吸水膨張圧試験で得られた 最大の値0.35MPa に極めて近い値となった。

なお、図-8に示すステップ1~ステップ4の変 状現象の解析の前段階では、トンネル建設時の



(a) 水平内空変位(SL位置)



図-8 変状メカニズムの概念と解析ステップ







(b) 天端内壁面の応力

図-10 解析結果と実測値の比較

内空変位を再現する掘削解析を行った。また、覆工の弾性係数は一般値の22.0MPaとし、地山および支保の 物性値などは、トンネル建設時の変位より逆算して設定した。

解析結果を図-10に示す。また、変状メカニズムの検証のために実測値も合わせて示した。図-10より、変 位や応力の大きさや対策施工時に天端付近の圧縮応力が減少した傾向を最も良く表しているcase3が、盃山 トンネルの変状メカニズムであると判断した。



図-11 インバート断面性能曲線

#### 8. 耐荷力評価

損傷したインバートを復旧するに当り、上り線トンネル周辺地山の塑性流動が急速に進行していること が明らかであること、併設する下り線トンネルの内空変位を僅かであるが生じていることを踏まえ、検討 会の討議において、より構造的にしっかりしたインバートを早く施工することが重要であると指導を頂い た。これを踏まえ、下記の対応を行った。

既設のインバートと復旧インバートがそれぞれどの程度の耐荷力を有しているか考察した。 上り線の 損傷したインバート、 建設時にインバートが損傷して再施工したインバート、及び 今回の復旧インバ ート、並びに参考として 隣接する下り線のインバートの諸元を表-1に示す。

今回変状した上り線のインバートの復旧は、下り線のインバートよりも耐荷力を向上させる構造を基本 とし、更にインバート半径R3は従前の13.1mから10mとしてより円形に近い断面を採用した。

図-11 は、 上り線の損傷したインバート、 建設時にインバートが損傷して再施工したインバート、及び 今回の復旧インバート、並びに参考として 隣接する下り線のインバートそれぞれの耐荷力を断面性 能曲線として示したものである。

図-11 から曲げが極めて卓越する場合を除き、復旧インバートは、損傷したインバートと比較して約 2.5 ~3.0 倍の耐荷力を有している。また、下り線インバートに対して約 1.2~1.5 倍の耐荷力を有している。 今回、損傷したインバートは、並列する下り線のインバートに比べ熱水変質作用を受けた流紋岩質凝灰岩 の劣化が進行し、塑性圧は増加していることが推察できること、及び建設時点から覆工にはある程度の応 力が作用していることなどから、上記に示す程度の耐荷力は必要と考える。

### 9. 考察

盃山トンネルの変状発生から損傷状況、対策工、計測、変状メカニズムの弾塑性解析、耐荷力評価について記述した。得られた知見を下記の通り記述する。

- (1) インバート隆起への対策工事は、変状状況にもよるが確実な計測・監視体制下の早期にインバート復旧 するのが最も有効な手段である。
- (2) 損傷したインバートを撤去してから、復旧インバート打設までが内空変位の速度が最も速く、細心の注意が必要である。
- (3) 地中変位は、水平変位よりも鉛直変位が大きく、9月1日~16日の増加は水平の約10mm程度に対して 鉛直が約70mmの7倍の変位が発生している。下り線施工の影響で追越車線側の値が大きい。変位が発生し た深度も深い。
- (4) インバートを最終的に破壊させた外力は、数値解析と吸水膨張試験の結果から地山自体の吸水膨張圧に よる可能性が高い。
- (5) その後のクリープ的な変形は、トンネル周辺の地山が、トンネル近傍から深部へ徐々に塑性化し、同時 に強度が低下した結果、地山の応力の再配分が発生したためと考えられる。
- (6) インバートの破壊により急激な盤ぶくれと側壁の押出しが発生し、トンネル覆工クラウン部の内側では、 圧縮応力が増加するが、インバート閉合により、圧縮応力は減少した。
- (7) 変状および対策工の施工により発生した応力は、時間依存的な挙動は厳密には考慮できていないが、各 段階の挙動は弾塑性解析により、概ね再現することができた。
- (8) 耐荷力算定した結果、今回の損傷したインバートに比べて、復旧したインバートは約2.5~3.0倍の耐荷 力を有している。

謝辞:今回のトンネル変状に対して、「盃山トンネル変状対策技術検討会」を設置し、9月に2回の現地検 討会を開催しました。座長を務めていただきました東京都立大学今田名誉教授を始めとする各委員の皆様 には、極めて特殊な変状事象に対しまして、ご指導・ご鞭撻を頂き、迅速かつ適切な対策を決めて対応す ることができました。本件につきまして、深甚の謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 二唐時雄、佐藤秀行、芹沢尚一、高須賀俊行:流紋岩質凝灰岩熱水変質部の膨張地山を掘る 山形自動車道盃山ト ンネル、トンネルと地下、1991.2、Vol22 No2、pp25~31
- 2) 佐久間、菅原、多田:供用トンネルのインバート隆起(最大 950mm)を復旧する 山形自動車道盃山トンネル(上 り線)、土木施工、2009.5、Vol50 No5、2009.5