

平成28年(2016年)熊本地震における南阿蘇鉄道 犀角山トンネルの被害について

川越健^{1*}・岡野法之²・嶋本敬介²・津留恒誉³・石坂岳士⁴・飯島康夫⁵

¹(公財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地質 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²(公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³南阿蘇鉄道(株) (〒869-1602 熊本県阿蘇郡高森町大字高森1537-2)

⁴八千代エンジニアリング(株) 九州支店 (現, (公財)鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地質)

⁵八千代エンジニアリング(株) 総合事業本部 地質・地盤部 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8)

*E-mail: kawagoe.takeshi.43@rtri.or.jp

平成28年4月に発生した熊本地震では構造物の損傷、斜面崩壊などの被害が多数発生した。南阿蘇鉄道高森線においても立野駅から中松駅間で施設の被害が多く発生し、特に白川右岸では斜面崩壊、トンネルや橋りょうの損傷の程度が大きかった。この内、白川右岸の犀角山トンネルが位置する犀角山は安山岩質の溶岩からなり、岩塊としては比較的堅硬だが、開口した割れ目が非常に多く、弾性波速度はトンネル底盤下まで1km/s程度であった。犀角山トンネルでは出口方約40m地点で最大490mmの右横ずれの変位が生じ、その付近で覆工の損傷が著しかった。この損傷は断層運動によるものと考えられ、今回の地震によるトンネルの損傷は地山強度が全体に著しく低いものの局所的であったといえる。

Key Words : The 2016 Kumamoto Earthquake, tunnel, seismic damage, geological survey

1. はじめに

熊本県、大分県を中心として2016年4月14日から発生した一連の地震(平成28年(2016年)熊本地震、以下「熊本地震」と呼ぶ)では、道路構造物、ダム(ため池)など多くの構造物に甚大な被害が発生した¹⁾。同年6月20日の降雨の影響と合わせ、鉄道においても大きな被害が生じた区間がある。南阿蘇鉄道でも全線で被害が発生しており、特に立野駅から長陽駅間ではトンネルや橋りょうの変形、斜面崩壊が多発した。これを受け、(公財)鉄道総合技術研究所は、国土交通省鉄道局より被害の詳細と損傷程度の評価ならびに概略の復旧計画を作成するための調査の委託を受けた²⁾⁴⁾。本報文ではその調査結果を踏まえ、まず南阿蘇鉄道全線における被害の概要と被害が集中した白川右岸にある犀角山(さいかくやま)トンネルの被害および地山の地質調査結果を示し、熊本地震によるトンネルの被害に関して若干の考察を行う。

2. 南阿蘇鉄道の地震被害の概要

(1) 平成28年(2016年)熊本地震の概要

2016年4月14日21時26分に発生した熊本地震の前震(マグニチュード(Mj)6.5)では、南阿蘇鉄道では後述するように被害が大きかった白川を通過する付近で、震度5弱~4、4月16日1時25分に発生した本震(マグニチュード(Mj)7.3)では、震度6強~6弱を記録している³⁾。また、終点の高森駅付近では、前震時に震度5弱、本震時に震度5強が記録されている。

また、熊本地震発生後の2016年6月20日~21日の降雨(最大の1時間ごとの雨量値: 68.5mm, アメダス「南阿蘇」)によっても斜面崩壊などの被害が拡大した。

(2) 南阿蘇鉄道の概要

南阿蘇鉄道は立野駅(熊本県阿蘇郡南阿蘇村)を起点として高森駅(同高森町)に至る営業キロ17.7kmの路線である(図-1参照)。南阿蘇鉄道は大正12年4月に旧鉄道省により高森線として工事着手され、昭和2年6月に竣工、昭和3年2月に全線開通した⁵⁾。昭和61年4月に当時の国鉄から南阿蘇鉄道(株)に継承され、現在に至る。路線は、立野駅方から順に白川右岸の溶岩台地上を白川沿いに遡上し、犀角山をトンネル(犀角山トンネル、L=125m)で、白川を橋りょう(第一白川橋りょう、L=166m)にて通過した後、北向山をトンネル(戸下ト

ネル、L=904m)で通過する。その後、阿蘇カルデラ内を白川沿いに長陽駅を経て高森駅に至る。長陽駅から高森駅間は、盛土路盤が主体となる。



図-1 南阿蘇鉄道全線の被害概要

※地理院地図（電子国土Web）を編集・加筆

(3) 南阿蘇鉄道の被災状況

南阿蘇鉄道の全線で土木構造物、沿線斜面に被害が生じた。特に白川を渡る前後の区間の施設、斜面に被害が集中した。なお、調査時期の関係により本報文中では、本震後の6月20日～21日の降雨による被害を含んでいる。以下、土木構造物の種別ごとに被害の概要を記す。被害が比較的軽微であった中松駅から高森駅間は2016年7月31日に運転が再開された。

○石積み擁壁の変状

立野駅構内、犀角山トンネル両坑口、戸下トンネル入口などで石積み擁壁の変形、一部崩壊が生じた。

○斜面崩壊

立野橋りょう終点方アバット、犀角山トンネル両坑口付近で斜面崩壊が生じた。また、戸下トンネル入口では上部の沢からの落石や土砂の流入があり、斜面对策工の損傷が認められた。同トンネル出口でも上部の沢からの土砂流入が生じた（写真-1）。また、戸下トンネル入口上方の沢筋では露岩と崖錐堆積物との間に隙間が生じている。

○橋りょう

犀角山トンネル手前の旧桜谷橋りょう（現、ボックスカルバート）の箇所ではボックスが左周り回転の上、沈下したため、大きな軌道変位が生じた。

第一白川橋りょう（バランスドアーチ橋⁹⁾）の起点方の橋脚、橋台(1P, 1A)が沈下するとともに下流方に変位した。また、中央部で隆起が生じた。起点方では部材の破断、変形が、また一部の橋脚基礎の損傷、シユーの逸脱が生じた。

○トンネル

犀角山トンネル起点方90m付近で最大490mmの右横ずれの変位が確認された。この付近の前後では覆工の変状

（ひび割れ、剥落、径間材の座屈）、軌道面の沈下などが確認された。

○盛土・軌道の変位

長陽駅～高森駅間の20カ所で対策が必要と判断される盛土（橋台背面を含む）の変状などが発生し、それらに伴い軌道変位が生じた。



写真-1 戸下トンネル入口の被災状況

3. 犀角山周辺の地形・地質概要

(1) 地形

犀角山は阿蘇カルデラの外輪山の西側を削った谷である立野火口瀬に位置している（図-1参照）。ここでは、カルデラ内北縁を流れる黒川と合流したカルデラ内南縁を流れる白川が西向きに熊本平野へ流下する。白川の右岸側は河床からの比高が100～150m程度の溶岩台地が分布している。犀角山はこの溶岩台地上に位置し、周辺の台地面から約50mの高さの北東-南西方向に延びるやせ尾根状を呈する山地である。白川左岸は傾斜40～60°の北向き傾斜の外輪山斜面からなる。

(2) 地質

立野火口瀬周辺には更新世中期～後期の先阿蘇火山岩類、阿蘇火砕流堆積物、阿蘇火山岩類が分布する^{7) 9)}。白川右岸の犀角山周辺には、下位から外輪山を形成する先阿蘇火山岩類、それを覆い立野火口瀬の溶岩台地を形成する立野溶岩と赤瀬溶岩が分布する。犀角山では周辺露頭の観察から立野溶岩が主に分布すると考えられる。一方、犀角山の対岸、白川左岸の北向山には主に先阿蘇火山岩類の安山岩溶岩、凝灰角礫岩が分布する。

(3) 断層

犀角山付近には布田川断層帯の一部である右横ずれ断層の北向山断層が分布しており⁹⁾、その方向は概ね付近の白川と調和する方向である。また、犀角山周辺には図-2に示すように北北東-南南西に伸長する断層が各研究

機関などによって推定，確認されている^{7) 9) 12)}。今回の地震においては，国土地理院の航空写真の判読¹³⁾により，布田川断層帯の周辺では地表に亀裂が多く発生していることが分かっている。今回の調査でも犀角山周辺の道路において，5章で後述するように右横ずれ成分の変位が大きいクラックが多数，確認された（図-6参照）。

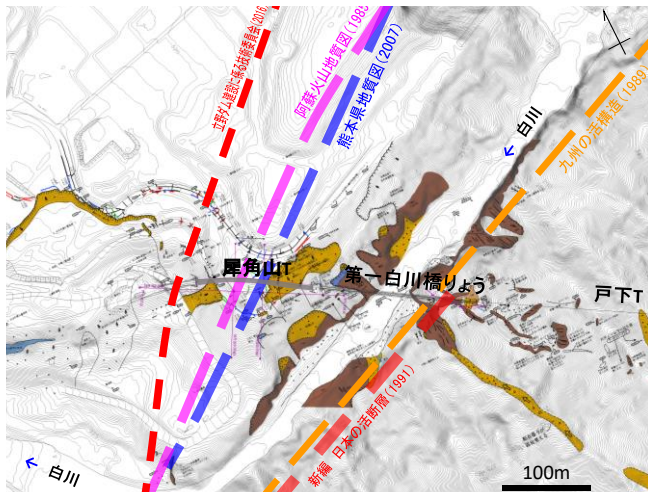


図-2 犀角山周辺における断層の分布³⁾
*文献^{7), 9)~12)}より作成

4. 犀角山トンネルの被災状況と計測結果

(1) 犀角山トンネルの概要

犀角山トンネルは，延長124.74mの単線トンネル（馬蹄形断面，最大水平内空幅4.27m）である。工事誌⁹⁾によれば，掘削は全線で人力により行われている。インバートは坑口部の5mのみ設置されている。覆工はコンクリートブロック2層積み（ $t=47\text{cm}$ ）で構築されている。また，トンネル上部の地山を掘削し，道路を建設する計画があったため，コンクリートブロック積みの既存覆工の内側に，H型支保工（アーチ・側壁・ストラット，H-100~125）およびモルタル吹付け（ $t=13\text{cm}$ ）を施工する補強工事が行われている。支保工間隔は道路が近接する区間（起点方）で密に配置されている。

(2) 被災状況

図-3に地震後の変状展開図を示す。図には地震後に光波測距儀による内空断面計測（6断面，S1~S6）の位置を併せて示す。S4（支保工番号105番）およびS6（支保工番号121番）付近ではずれを伴う開口ひび割れ，剥落，径間材の座屈など大きな変状が発生している。特に終点方に被害が集中している。写真-2に105番支保工付近の天端部の変状を示す。非常に幅の大きなひび割れ（幅150mm程度）が多数，同じ方向に発生していることがわかる。ひび割れの方向は支保工に沿った輪切り開口ひび

割れとともに，白川の方に平行な（トンネルを斜めに切る）ひび割れが多く発生しており，トンネルが全体的に軸方向に伸びたことが想定される。なお，S1~S6の全ての断面で地震後の変位の進行は見られなかった。

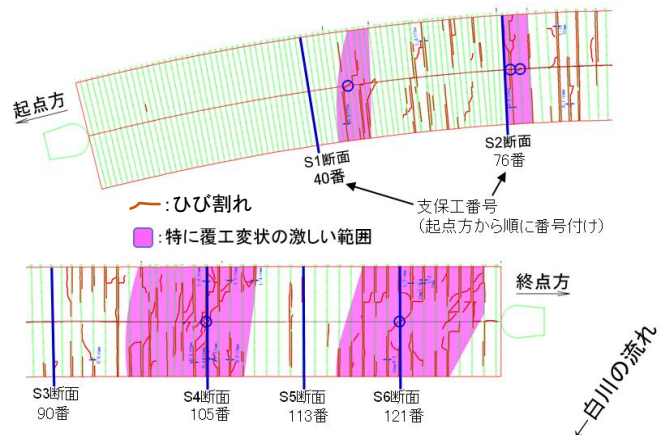


図-3 変状展開図（見下げ）と内空断面計測位置^{2)~4)}

写真-3に出口方から第一白川橋りょうを望む写真を示す。橋りょうに対して橋台背面地盤およびトンネル坑口部が白川側（写真右斜め前側）に変位しているため，レールが曲がっている。また，橋台背面地盤が沈下しているため，枕木がトンネル橋りょう間で浮いている。図-4に3Dスキャナにより得られたトンネル内面の3D座標点群データとS3，S4，S6の断面変形図を示す。赤色の線は，仮設定した中心線に対して設計の支保工を示している。青色のそれは，3Dスキャナにより得られた地震後のトンネル内空断面形状である。ここでの中心線は概ね地震前の線形と近いので，図中に側方変位の値がおおよそその地震による変位となる。ただし，鉛直方向変位については，路盤を整地してから3Dスキャンを実施しているため，地震により発生した変位を抽出することはできていない。側方変位をみるとS3では小さいがS4付近の10m程度の範囲で徐々に本線右側にトンネル全体が変位し，かつ天端部が本線右側に傾くように変形していることがわかる。この付近のトンネルの変形モードは，全体として右側に移動するとともに，トンネルが川側に引張られて内空が拡大するような変位が発生したことがわかる。地震によるトンネルの鉛直方向の変位を評価するために，S1~S6断面の天端の反射板のz座標の初期値を整理した。犀角山トンネルの当初縦断勾配はレベルである。図-5に横軸をトンネル出口からの距離，縦軸をS6を基準とした天端の高さを相対値として整理したグラフを示す。同図から入口付近のS1断面，出口付近のS6断面の天端はトンネル中央部であるS3断面の天端よりも相対的に鉛直座標値が200mm程度低く，トンネル中央部のS3付近から両坑口に向かって沈下する傾向が見られる。S3~S6にかけての天端の座標値の変化を勾配に換算すると，4.8‰

程度となる。ただし、犀角山トンネルに関しては吹付けモルタルの不陸が大きいことから、反射板の鉛直座標が必ずしもトンネルとしての鉛直変位を表していない可能性があるため、変位量や勾配自体はあくまでも傾向としての評価である。



写真-2 105番支保工付近の天端部の変状³⁾



写真-3 犀角山トンネル出口方坑口部の変位状況

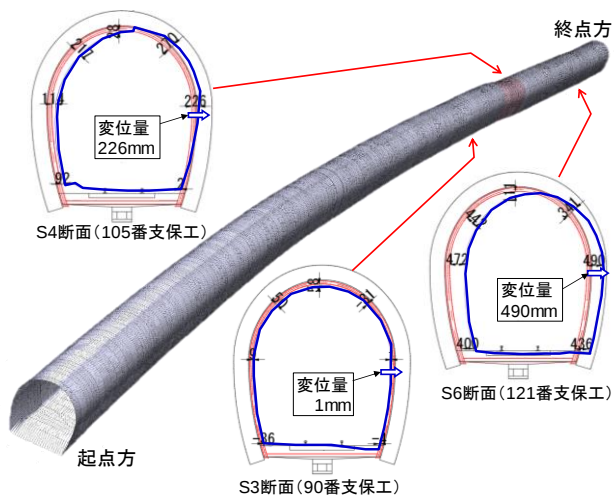


図-4 3Dスキャナーによるトンネル変形形状^{2)・4)}

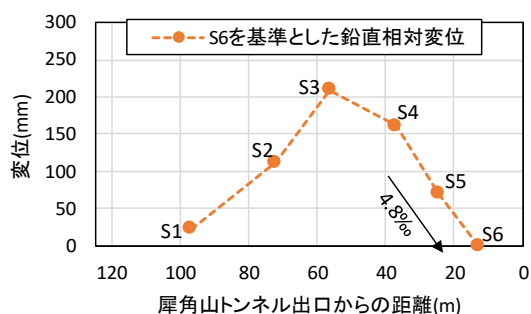


図-5 S6を基準としたS1～S6の天端の相対鉛直変位

5. 犀角山における地質調査の結果

(1) 地表踏査結果

犀角山周辺の地表踏査結果の概要を図-6に示す。トンネルのレベルより高標高部には立野溶岩（デイサイト質）が、低標高部には先阿蘇火山岩類の凝灰角礫岩が分布する。坑口付近の斜面崩壊では、崩落した岩塊が方形のブロックを呈している。犀角山トンネルのほぼ直上に位置する道路には右横ずれ、相対的に東側が下がる開口したクラックが多く認められた（写真-5）。

(2) ボーリング調査結果

犀角山トンネル直上では、いずれもトンネル底盤より5m程度深い深度までのボーリングを2本実施し（図-6参照）、コア観察、岩石試験、PS検層を実施した。いずれでも全層で立野溶岩が分布している。割れ目が発達し、細片を呈する区間があり、RQDは総じて50を下回っている。一部区間ではビットの落ち込みがあったこと、削孔

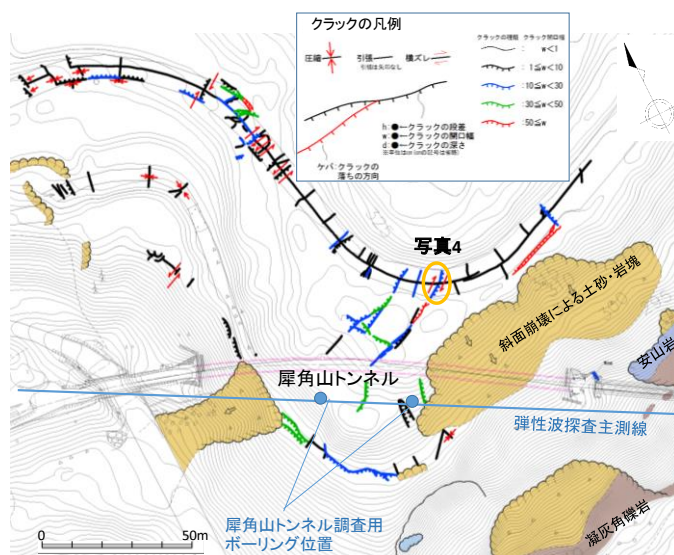


図-6 犀角山トンネル周辺の地表踏査結果

*弾性波探査測線、ボーリング位置を含む。参考文献³⁾を編集。

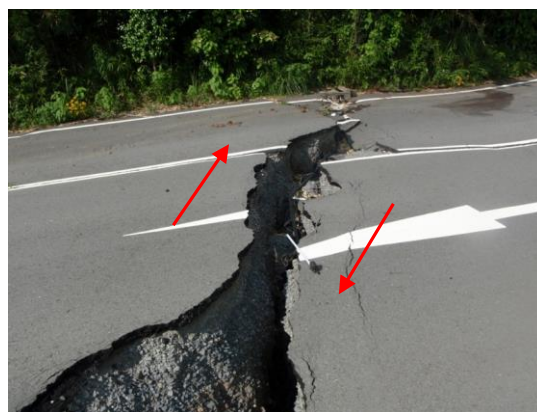


写真-5 地表のクラック（右横ずれ）の状況

水の戻りがほとんど無いことから割れ目の多くは開口し、それらは連続していると考えられる。PS検層では深度依存性は認められず、P波速度でおおむね1～3km/secであった。コアを用いた岩石試験の結果、密度は2.45～2.51g/cm³、一軸圧縮強さはばらつきが大きく、最小で20N/mm²、最大で75N/mm²（各試験深度での平均的な値）であった。超音波伝播速度はP波ではいずれの試験区間でも3km/sec以上の値であり、PS検層の結果よりも速い値を得た。

(3) トンネル底盤の岩盤状況

犀角山トンネルでは終点方で延長約 50m 区間にわたり路盤を掘削してトレンチ調査を行った。最も変位が大きい起点方坑口から約 90m 付近（105 番支保工付近）の底盤スケッチを図-7 に示す。すべての調査箇所で見野溶岩が分布しており、下位の先阿蘇火山岩類との境界は確認できなかった。大きく 3 つの方向に大別できる高角度の傾斜を呈する割れ目が多い。最も多いのは、概ね白川の流下方向と同様な走向を示す割れ目（N78°E）で、次いで概ね白川の流下方向と直行する方向の割れ目（N22°W）、そしてトンネル軸とほぼ直行する割れ目（N15°E）となっている。この内、開口幅が 1cm 以上を示すものは北北東-南南西方向で高角度に南傾斜を示すものが多い。細片化されたゾーンも同様の傾向が認められた。この方向はトンネル坑壁の割れ目と概ね同じ方向である。なお、今回の底盤調査では断層運動に伴うと考えられる明瞭な変位や鏡肌を呈する割れ目は確認できなかった。

岩盤の開口部にバラストと考えられる円礫が散在しているのが認められた。これらは長い期間の間に落ち込んだ可能性があり、路盤の空洞化が進行していたことが考えられる。このような場所で地震動によって軌道面が部分的に沈下したと思われる。

(4) 弾性波探査結果

図-8に弾性波トモグラフィ法の結果を示す。地表からトンネルが位置する深度までは総じて1km/sec以下の速度層が分布している。

(5) 地山状況に関するまとめ

ボーリングコアを用いた岩石試験の結果からは、立野溶岩は岩塊としては比較的堅硬であるといえるが、地山としての弾性波速度はコアを用いた岩石試験の結果と比べて著しく低い値となっている。また、PS検層結果と弾性波探査結果から得られた速度層構造はおおむね同様の傾向を示すが、弾性波探査から得られた速度が総じて低い。岩石や岩盤の観察から、犀角山トンネルが位置する箇所、特に立野溶岩は割れ目や空隙が非常に多いため

に、地山としての弾性波速度が全体的に低くなっていると考えられる。犀角山トンネルが位置する地山は全体に、工学的には非常に脆弱な地山と考えられる。割れ目や空洞が多い理由として、立野溶岩の冷却時の割れ目や、犀角山周辺に分布が推定される北北東-南南西に伸長する断層の影響が考えられる。地表での変位を伴う割れ目があること、トンネルが特定箇所で急激に右横ずれの変位を示していることから、右横ずれの断層の影響が考えられたが、トンネル底盤の観察では断層（せん断構造）を特定することはできなかった。

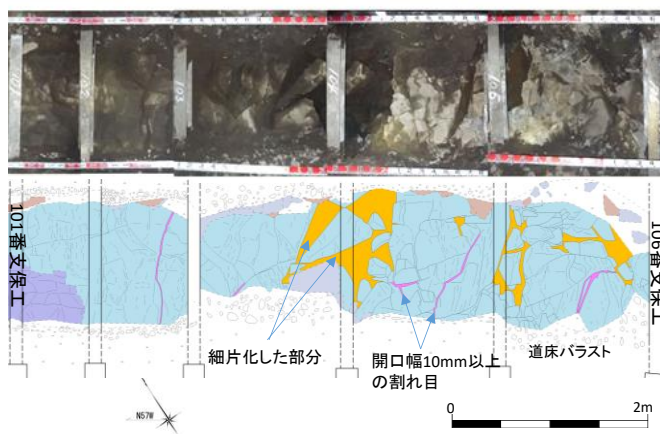


図-7 犀角山トンネル底盤の岩盤状況
(101番～106番支保工)

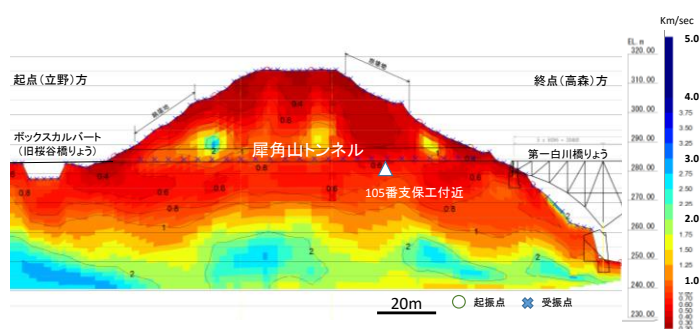


図-8 弾性波探査の結果
参考文献3)を編集

6. トンネル被害についての考察

今回の熊本地震による南阿蘇鉄道高森線の被害が桜谷橋～犀角山トンネル～戸下トンネル入口付近で大きかったのは断層運動による変位とその直近であったための強い地震動によるものと考えられる。

特に、犀角山トンネル坑内の被害は終点側に集中しており、覆工のひび割れの方法は支保工に沿った輪切り開口ひび割れとともに、白川の方に平行なひび割れが目立っている。また、トンネル底盤の割れ目の方向についても白川の方と同様な走向を示す割れ目が目立つ。こ

のことから、犀角山トンネルの出口から40m程度の箇所を境として、出口側が斜面傾斜方向である右斜め下方に引張られるように変位したと考えられる。犀角山トンネル終点側に被害が集中したのは、断層変位によるものと考えられるが、今回の調査では明瞭な断層面は確認できなかった。犀角山トンネルでは両坑口で石積み擁壁の変状、斜面崩壊が発生しているが、被害は終点側に集中している。このような被害状況を考え合わせると、犀角山トンネルの変状は、地震断層もしくはその直近で顕著であり、それ以外の箇所では損傷は比較的小さかったと考えられる。

7. まとめ

平成 28 年(2016 年)熊本地震では構造物の損傷、斜面崩壊などの被害が多数発生した。南阿蘇鉄道においても構造物の損傷、斜面崩壊などの被害が発生した。特に白川右岸側で構造物に大きな被害があった。白川右岸の犀角山では斜面崩壊、地表クラックが発生している。地山は更新世の溶岩からなり、開口した割れ目などにより、工学的には脆弱な地山と考えられる。犀角山トンネルでは終点方で変状が激しく、復旧に困難を伴うような最大 490mm の右横ずれの変位が確認された。断層と変状の関係は明確にできなかったが、今回の地震によるトンネルの損傷は地山強度が全体に著しく低いものの、断層もしくはその直近で顕著であり、それ以外の箇所では比較的小さかったと考えられる。

謝辞：国土交通省鉄道局施設課には本委託において終始ご指導をいただきました。国土交通省九州地方整備局立野ダム工事事務所ならびに関係する工事施工会社の皆様には用地内の通行などで大変お世話になりました。熊本県企画振興部交通政策・情報局交通政策課には諸手続を進める上で助言をいただき円滑な調査着手にご協力をい

たきました。また、南阿蘇鉄道の関係市町村には様々な場面でご協力をいただきました。この場をお借りして調査にご協力いただいた関係各所に改めてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、2016 年熊本・大分地震災害調査団報告書～熊本の大地・新たな伝承の始まり～：(一社)日本応用地質学会・九州応用地質学会、(一社)日本応用地質学会、2017.
- 2) 国土交通省鉄道局：南阿蘇鉄道の鉄道施設災害復旧調査報告概要，<http://www.mlit.go.jp/common/001181697.pdf>（閲覧：2017 年 8 月 31 日），2017.
- 3) 国土交通省鉄道局：南阿蘇鉄道の鉄道施設災害復旧調査参考資料，<http://www.mlit.go.jp/common/001181852.pdf>（閲覧：2017 年 8 月 31 日），2017.
- 4) 国土交通省鉄道局：南阿蘇鉄道の災害復旧調査結果について，<http://www.mlit.go.jp/common/001181698.pdf>（閲覧：2017 年 8 月 31 日），2017.
- 5) 気象庁：災害時地震報告 平成 28 年(2016 年)熊本地震，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2016/saigaiji_201601.pdf（閲覧：2017 年 8 月 31 日），2016.
- 6) 鉄道省熊本建設事務所：高森線建設概要，1928.
- 7) 小野晃司，渡辺一徳：火山地質図 4 阿蘇火山地質図，地質調査所，1985.
- 8) 星住英夫，尾崎正紀，宮崎一博，松浦浩久，利光誠一，宇都浩三，内海茂，駒澤正夫，広島俊男，須藤定久：20 万分の 1 地質図幅「熊本」，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2004.
- 9) 活断層研究会：新編 日本の活断層一分布と資料一，東京大学出版会，1991.
- 10) 九州活構造研究会：九州の活構造，東京大学出版会，1989.
- 11) 熊本県地質図編集委員会：熊本県地質図，熊本県地質調査業協会，2007.
- 12) 「九州地方整備局：立野ダム建設に係る技術委員会報告書，2016.
- 13) 国土交通省国土地理院，平成 28 年熊本地震に関する情報（平成 28 年 10 月 3 日 17 時 00 分更新版），<http://www.gsi.go.jp/common/000145493.pdf>（閲覧：2017 年 2 月 13 日）。

SEISMIC DAMAGE OF SAIKAKUYAMA TUNNEL, MINAMI-ASO RAILWAY IN THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takeshi Kawagoe, Noriyuki Okano, Keisuke Shimamoto, Tunetaka Turu,
Takeshi Ishisaka and Yasuo Iijima

Lots of Rail facilities and slopes along the Mianami-Aso railway suffered *seismic damage in The 2016 Kumamoto Earthquake*. Especially, area of the right bank of Shirakaw-river, include the Saikakuyama, seismic damage was serious. In the exit-side of Saikakuyama-tunnel, the right displacement of 490mm occurred. We could not clear the relation between the active fault in *The 2016 Kumamoto Earthquake* and the displacement of Saikakuyama tunnel damage. However we supposed that the tunnel damage near the fault was more serious than far it.