

地すべり被害を受けた道路トンネルへの On-Site Visualization 技術を活用した動態監視

野村 貢¹・禿 和英²・鈴木 季弘³・芥川 真一⁴

¹正会員 株式会社建設技術研究所 東京本社 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町 3-21-1)

E-mail: nomura@ctie.co.jp

²正会員 株式会社建設技術研究所 九州支社 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

E-mail: kamuro@ctie.co.jp

³浜松市土木部道路保全課 (〒430-8652 浜松市中区元城町 103-2)

E-mail: dourohozen3@city.hamamatsu.shizuoka.jp

⁴正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市東灘区六甲台町 1-1)

E-mail: cadax@kobe-u.ac.jp

トンネル坑口は外部空間との接点であるため、地すべりなどの自然災害の影響を受けることがある。外力により損傷したトンネルは、外力対策とともに適切な修繕を行うことにより従前の使用性能に復することが期待される。道路トンネルはトンネル空間内は道路であり、一般利用者の交通に供される空間であることから、修繕の期間が長期におよぶ場合に通行止めなどの措置がとれない場合がある。また、緊急対策を講じることが求められることがある。本事例は地すべりにより変状を来した道路トンネルにおいて、緊急修繕および暫定通行再開時の安全確保のために即応性、即時性の高い計測監視システムとして On-Site Visualization 技術を適用したものであり、本技術の適用性、効果などについて報告するものである。

Key Words: On-Site Visualization, dynamic monitoring, damaged tunnel, deformation, survice keeping

1. はじめに

道路をはじめとするトンネルは坑口部において外部空間と接点を持つことから、地すべりや崩壊、土石流などによる自然災害の影響を受けることがある。トンネルの支保工、覆工はトンネル掘削による地山の応力変化に対して地山の支保機能を補完し、内部空間を使用期間内において維持することを目的として計画、設置されることから、特殊な場合を除いて外部空間からの大きな外力には抵抗できない。そのためトンネルはせん断されたり偏圧により圧さやひび割れなどの損傷を受けることがある。

損傷を受けたトンネルは損傷原因の究明とともに、緊急点検等により使用性能を確認し、問題があるようであれば修繕を行うことになるが、道路トンネルではその間、通行止めにより措置するか、通行を維持しながら措置するかが大きな論点となることが多い。利用者のトンネル通行を停止する場合には、修繕作業の安全を確保する必要があり、通行を維持する場合にはそれに加えて利用者の安全性を確保することが必要になる。地方道や一般国道トンネルには、著しい利用者不便を生じることなく迂

回を行いトンネルを通行禁止にすることが困難な路線も多く、坑内外の動態監視を組み合わせることにより未然に覆工のはく落や路面の変状を検知し、緊急通行止めや情報提供などにより利用者に被害が及ばないようにすることが求められる。

本報告で取り上げる事例は、坑口上部の斜面が降雨により地すべり挙動を示したことによりトンネルがせん断損傷を受けたもので、容易に迂回が計画できない路線であることから、動態監視を導入したものである。さらに損傷状態が激しく、緊急点検や原因究明のための調査時に覆工コンクリートがはく落する危険性もあることから、設置の即応性と変状検知からアラートまでの即時性を考慮し、On-Site Visualization 技術を適用した。

本事例では原因究明と対策を議論するために有識者委員会が設置され、系統的な計測監視とともに分析、対策検討が実施されているが、当該部分については別な報告に譲るものとして、本報告では On-Site Visualization 技術によるトンネル動態監視について計画と実施状況を述べることとする。

2. トンネル損傷の状況と対応

(1) トンネル損傷の経緯

浜松市が管理する一般国道 152 号秋葉トンネルは、2002 年に供用を開始した NATM による道路トンネルである。本トンネルは供用開始後 18 年にわたり適切に維持管理されていたが、2020 年 7 月の豪雨により坑口上部の斜面に地すべり変状が発生し、トンネル覆工が坑口から 4~6 スパンの 3 スパン (31.5m) の区間にわたりせん断破壊され損傷を受けた (図-1, 3)。

被災程度は、地すべり挙動によるせん断により 2 スパンで覆工に大規模で連続したひび割れが発生、アーチ部コンクリートがブロック化し、残る 1 スパンは覆工側部に密集したひび割れが発生した。幸い大ブロックが落下することはなく利用者被害はなかったが、そのままではブロック落下の危険があり、一般通行を再開できる状況ではなかった。

(2) 災害対策委員会の設置

一般国道 152 号は天竜川沿いに浜松市の北部山間地と市街地を結ぶ重要路線であり、他の被災区間も併せて早期の通行再開が求められる状況であった。そのため、国道 152 号秋葉トンネル災害対策委員会 (委員長 八嶋厚) を設置し、本トンネルの緊急対策による暫定通行再開および損傷の原因究明と恒久対策を検討することとなった。

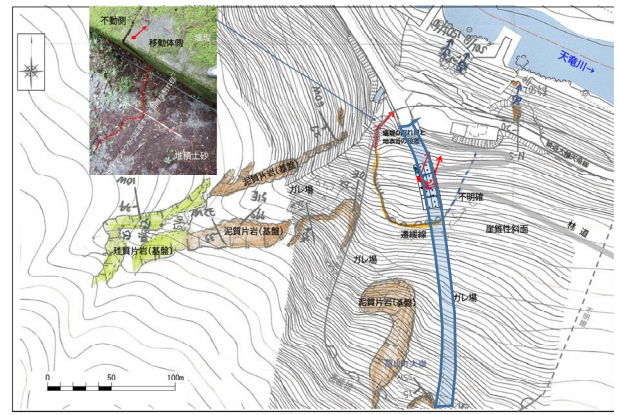


図-1 トンネル損傷区間と上部斜面の関係



図-2 被災後のトンネル坑口部状況

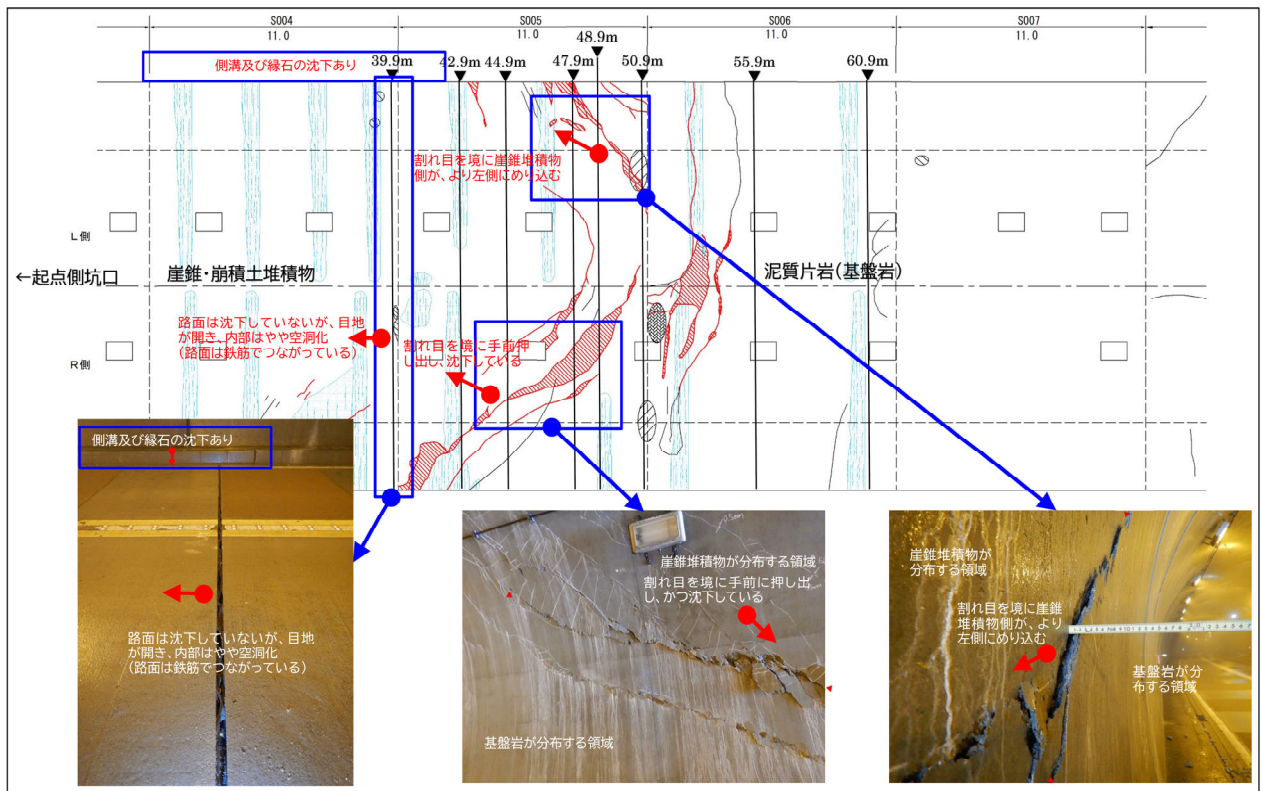


図-3 トンネル損傷の状況 (変状展開図)

(3) トンネル緊急対策

委員会の助言を得て、抜本対策までのトンネル損傷区間の対応を検討した。本路線の重要性に鑑み、坑口上部の斜面については、原因究明および対策工の検討を引き続き実施しつつ、トンネルについては道路利用者の安全性が確保できるだけの措置を速やかに実施し交通開放する方針が決定され、図-5 の手順により損傷状況の把握と緊急対策を実施することとなった。

トンネルの損傷原因が坑口上部の地すべり挙動によるものであることは想像されたが、変動が収束していることは初期には確認できず、原因も明確ではなかったため降雨や地震によりトンネルに新たな損傷が生じる危険性があった。さらに覆工、路面の損傷と同様、インバートも損傷していることが予想され、試掘により確認する必要がある。掘削による断面内荷重の変化により損傷ブロックが落下する危険性もあることから、まずFRPネットと押さえ金具により一次はく落防止を設置し（図-6）、その後、調査および計測監視を並行しつつインバートの損傷状況を確認することとした。また、トンネル坑内および坑外から水抜きボーリングを実施し、上部斜面の地下水位を低下させることとした。

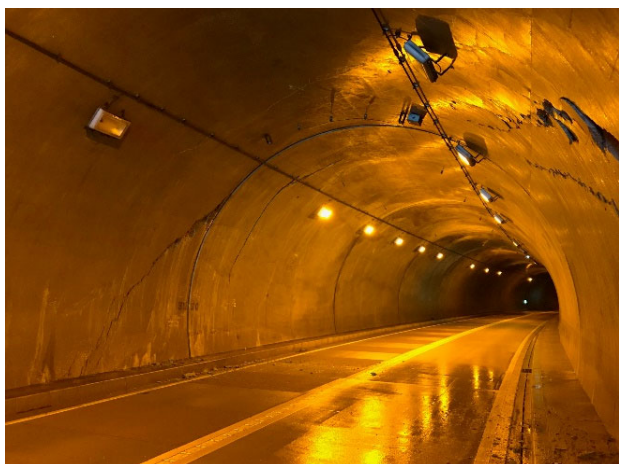


図4 トンネル損傷区間の状況（せん断破壊）

(4) 調査および計測監視

トンネルの損傷状態を確認するとともに、変状の進行および経時変化を把握するための調査、計測監視を実施した。トンネルに係る主な調査項目は、走行画像・3D点群取得、ひび割れ深さ、電磁波レーダー探査、インバート試掘である。

変位が加速度的に進行している様子はひび割れ幅等の手動計測から判断できなかったが、収束しているとは言えない。降雨や地震等により進行する危険性があるため、暫定交通開放までの作業の安全確保および暫定交通開放時の利用者安全性の確保のため、動態監視を実施

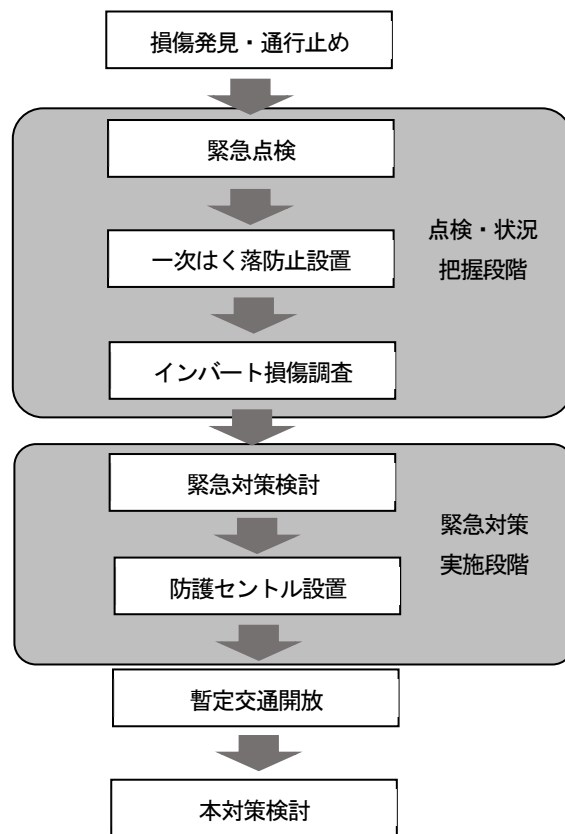


図-5 暫定交通開放までの対策フロー



図-6 一次はく落防止措置



することとした(表-1)。

これらのうち、落下の危険性ある覆工ブロックの挙動は、変位とともに一次はく落防止のFRPネットを定着させる鋼材の応力をひずみ計により観測するとした。これは、かみ合いにより落下を免れている覆工ブロックが変位の進展により脱落した際に鋼材に発生するひずみを検知しようとするもので、本計測の目的である損傷部下での作業安全性を確保する目的に沿うものとなっている。

これらの計測データは地表面の地すべり観測のデータとともに管理事務所に送信され、監視システムにより異常値が検出された場合にはアラート発信する構成とした。

また、できるだけ早くインバートの試掘により損傷状況確認を行うこと、管理事務所を介することなく即時性のあるアラートを行うことを目的に、鋼材ひずみ計の観測データをOn-Site Visualization技術による光るデータコンバータに取り込み状況を可視化することとした。

表-1 覆工損傷部における計測項目と計測方法

計測項目	計測方法
内空変位	トータルステーション、定時測定
ひび割れ幅	ひび割れ変位計
目地部開口幅	ひび割れ変位計
ひび割れ段差	ひび割れ段差計
鋼材応力	ひずみ計
温度計	補正用

3. On-Site Visualization 技術の導入

(1) On-Site Visualization の適用性

On-Site Visualization(OSV)とは、芥川ほか⁹⁾¹⁰⁾により提案される計測システム概念で、あらかじめ異常発生を判断する閾値を組み込みロジックとしてセンサーおよびアラート表示部に回路として組込むことによりシステムを簡素化するとともに、即時アラートを実現しようとするものである。芥川らは非電源型を含む簡便なセンサーの開発とともに、判断ロジックによる閾値判断とそれに基づく状態表示を一体化するシステムを提案している。さらに、近年は光ファイバーの持つセンサー機能に着目した研究開発を実施するとともに「その場で表示」だけでなく「どこからでも確認可能」を実現する適用事例が増加している⁹⁾¹⁰⁾。

本事例では、調査段階において損傷部覆工コンクリートのはく落のおそれが高いインバート試掘段階において、作業の安全性確保の観点から即時性の高い動態監視が必要とされた。さらに表-1の計測機器および上部斜面の計測システムが完成し、すべての情報が管理事務所に集約されアラートシステムが機能するまで試掘調査を待つ猶予がないことから、計測システムとして自己完結しセンシングからアラートまで現地で展開可能なOSV技術を採用したものである。

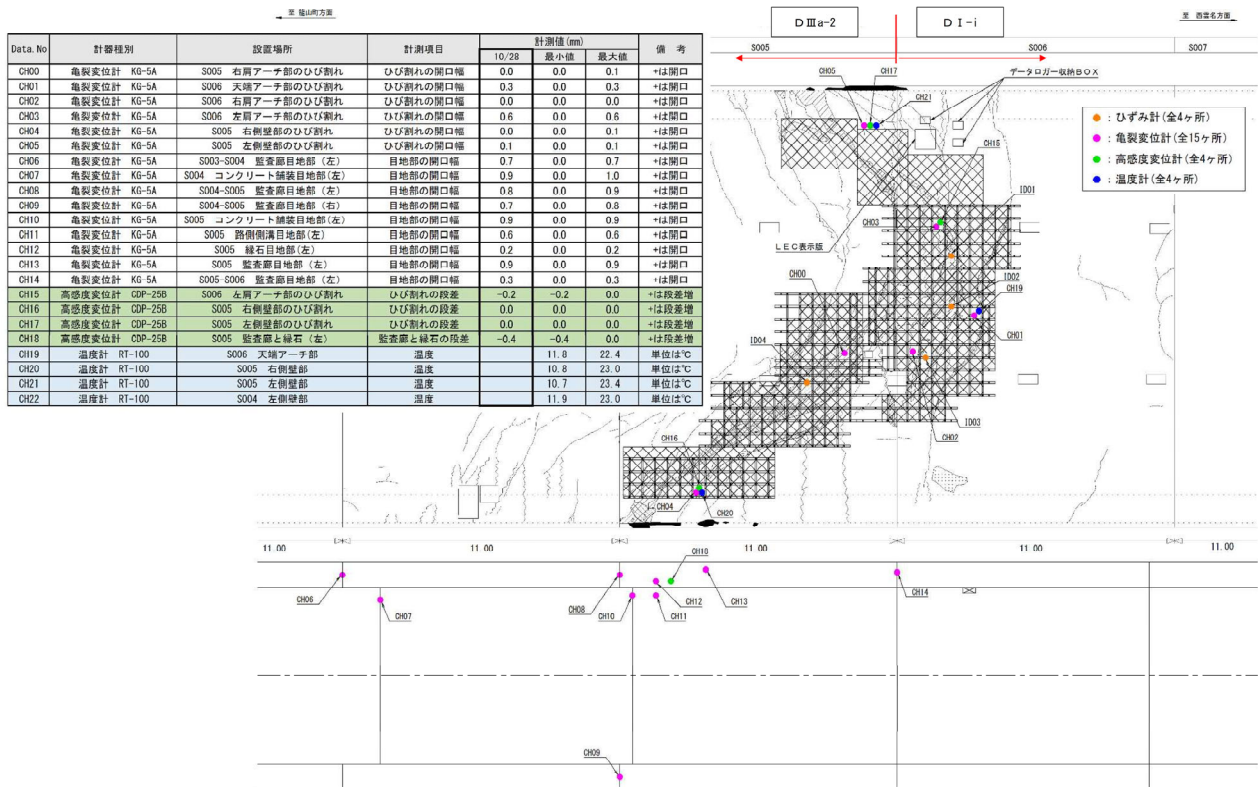


図-7 計測機器配置図

(2) 適用した On-Site Visualization 技術

本事例では、一次はく落防止の押さえ鋼材の応力変化に着目するのでセンサーは鋼材ひずみ計であり、アラート対象者はその場にいる点検員、作業員である。また作業中は、掘削機の動作音などが雑音として発生するので、目から直接的に情報を受け取れるシステムが望ましい。さらに全体計測システムが完成した後は計測データを管理事務所において受信し総合監視する計画であることから、データ出力用のアウトプットを装備していることが望ましい。これらの条件を満たす機器として、LEC (Light Emitting Converter) を採用した。本機器は、デフォルトで5色に発光するLEDを組み込んだデータロガー、データコンバーターであり、本機器にセンサー出力を取り込み閾値の設定を行えば、その場で意図した状況変化をLED発光で通報することができる。LECから動態監視データの出力も可能であるため、全体計測システムのなかでデータ処理を行うことも可能であり、一般に交通開放した後にも監視システムの一部として構成することが可能になる。

(3) 閾値の設定と運用

OSV 技術では、閾値はあらかじめ計測システムに組

み込みすることで自己完結性を高めているので、閾値の設定は計測システムの性能を規定するうえで重要である。

本事例では、覆工コンクリートに貫通したひび割れにより浮いたブロックがはく落、下部空間に落下することが最大のリスクであることから、押さえ鋼材が覆工ブロック落下を抑えている間は対処可能時間として考え、鋼材の許容応力度に着目した閾値設定とした(表-2)。

運用は常時点灯を原則とし、起動時には各色の発光をテストした上で常時点灯に移行する起動ロジックを採用した。また、OSV 技術では LED の色替えに異常発生のアラートと状態表現の意味を持たせているので、新規入場者に対して OSV 機器の発光に着目して点検、作業を行うこと、色替わりした際には速やかに退避し管理者に通報することなどを徹底した。

表-2 押さえ鋼材ひずみセンサー閾値

発光色	閾値設定
赤色	235N/mm ² 以上 短期許容応力度以上
黄色	157~235N/mm ² 長期~短期許容応力度
青色(常時点灯)	157N/mm ² 未満 長期許容応力度未満

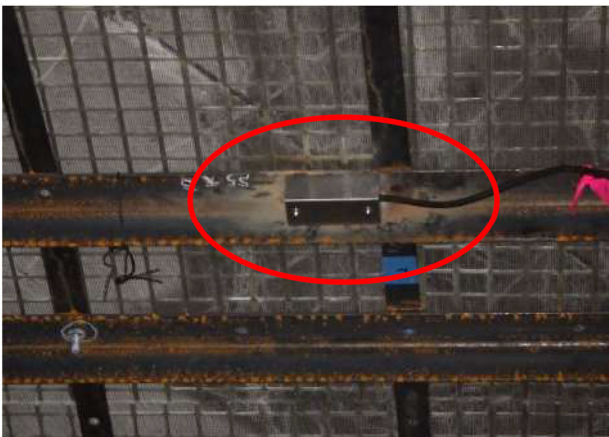


図-8 一次はく落防止に設置したひずみ計



図-10 OSV 機器作動状況(上部作業時)



図-9 OSV 機器設置状況



図-11 OSV 機器作動状況(暫定交通開放前)

(4) OSV 技術導入の効果

現地設置と計測システム運用までのリードタイムが短い OSV 技術を導入したことにより、インバート試掘などの調査にいち早く取り掛かることができたこと、点検員、作業員が安心して活動できる環境を構築できたことは OSV 技術導入の効果であると考えられる。

本技術も寄与したことにより、本路線の通行止めは約 170 日で終了させることができ、防護セトルによる仮復旧および上部斜面等の監視下であるが再度、一般の交通に供することができた。

4. On-Site Visualization 技術の性能評価

(1) 計測システムの性能評価

野村ら^{17),18)}は、斜面工事に着目し設計手法、施工管理手法が確立されているにも関わらずさまざまな形態で崩壊事故が発生していること、基準類の整備だけでなく並行して計測システムを整備していくことが重要であることを指摘している。一方でどのような計測システムを適用すれば十分であるのかを評価する標準的な方法論がないとして、計測システムを「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の3段階のプロセスとその間のコミュニ

表-3 FMEA による計測システム評価表

RPN(Risk Priority Number)を算出するための項目	評価点	性能呼称	計測ツールと測定の性能 P ₁			計測値判断の性能 P ₂	現地での結果表現の性能 P ₃		
			適切な対象が抽出されていることの性能評価値	適切な計器が選定されていることの性能評価値	適切な測定時間で計測していることの性能評価値	計測値判断の性能評価値	適切な時間内に情報発信されていることの性能評価値	情報内容が正しく伝達される性能評価値	情報内容が正しく認識されることの性能評価値
不具合モード : Failure Mode			計測ツールや測定方法が悪く、良い計測値が得られない			計測値判断が悪く状態把握ができない	結果表現が悪く、情報受領者が正しい行動を取ることができない		
計測システムの性能値 P : 影響の深刻さ Severity	1	完全	クリティカルなユニットも含め全体系が把握されている	要求に見合った精度、耐久性の計器が選択されている	要求に見合った測定時間、測定間隔が実現されている	技術基準または確かな経験則による閾値が決定されている	緊急避難の他、被害最小化などの行動に必要な時間が確保される	情報が正しく伝達される	教育や表示方法の対処により情報の意味が完全に正しく認識される
	2	合格	クリティカルなユニットは把握されているが、全体系までは困難	要求に見合った精度、耐久性の計器が選択されているが、オーバースペック	要求に見合った測定間隔より短い	現地をモデル化した解析的検討または経験則により閾値が提案されている	緊急避難に必要な最低限の時間が確保される	情報がほぼ正しく伝達される	教育や表示方法の対処により情報の意味がほぼ正しく認識される
	3	放置できない	クリティカルなユニットが把握されていない	要求に見合った精度の計器であるが、耐久性について確実でない	要求に見合った測定時間よりも長い	何らかの閾値が定められている	発災までに情報は伝わるが、緊急避難等が保証されない	異常発生などが伝わる	何かが異常であると認識される
	4	失敗	計測されていない	要求に見合った精度、耐久性が満たされない計器が選択されている	測定間隔が検討されていない	状態表示のみで判断ロジックがない	発災に情報が伝達間に合わない	情報が伝達されない	情報の意味が伝わらない
不具合の起こりやすさ : Occurance	1		計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい				計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい		
	2		計測期間中に発生する可能性は小さい				計測期間中に発生する可能性は小さい		
	3		計測期間中に発生する可能性が数回				計測期間中に発生する可能性が数回		
	4		計測期間中にしばしば発生する				計測期間中にしばしば発生する		
不具合の検出度 : Detection	1		自己検知装置等により不具合は確実に検出される			自己検知装置等により不具合は確実に検出される			
	2		不具合の検出は可能で、点検等により検出される			不具合の検出は可能で、点検等により検出される			
	3		異常値など経時変化などから検出可能である			異常発信などにより不具合の検出が可能である			
	4		検出は困難である			検出は困難である			

ケーションにより成立するものと定義し、性能評価の方法を提案している。

本方法は、機械製品等の信頼性評価において故障解析の手法として用いられる評点法である FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) を計測システムの性能評価に援用するもので、当該研究では斜面工事に着目しているがトンネル計測等にも援用できる汎用性がある。ここでは、本事例における OSV 技術による計測システムについて性能評価を試みる。

野村らが提案する評価表(表-3)において、本事例を著者らにおいて評価した結果をセルに着色する。各プロセスの評価値は以下の式で決定する。

$$P_1 = P_{1-1} \times P_{1-2} \times P_{1-3} \quad (1)$$

ここで、 P_{1-1} は適切な対象が抽出されていることの性能評価値、 P_{1-2} は適切な計器が選択されていることの性能評価値、 P_{1-3} は適切な測定時間に計測していることの性能評価値である。

$$P_2 = P_{2-1} \quad (2)$$

ここで P_{2-1} は、安全性に対する適切な判断の根拠となる閾値が、専門的アカウントビリティを満たす信頼に足る方法で決定されていることの性能評価値である。

$$P_3 = P_{3-1} \times P_{3-2} \times P_{3-3} \quad (3)$$

ここで、 P_{3-1} は情報が必要な時間内に伝達されることの性能評価値、 P_{3-2} は情報が正しく伝達されることの性能評価値、 P_{3-3} は伝達された情報が正しく認知されることの性能評価値である。

これらを算出したうえで、優先対処目標を抽出するリスクインデックスである危険優先度指数 (RPN : Risk Priority Number) を算出する。

$$RPN = P \times O \times D \quad (4)$$

計測システムの性能ランクは表-4 により定義されている。

野村らはモデル斜面を設定した専門家によるアンケート調査により、 RPN と性能ランクの関係を提案している(表-5) ので、これを用いて本事例の性能ランクを評価すると I (完全) となり、良い性能の計測システムが構築されていたと評価できる(表-6)。

表-4 総合評価値による計測システム性能ランク

性能ランク S	性能呼称	性能評価
I	完全	財産保全など含め、十分に避難の安全を保証するシステム
II	合格	共助も期待し、生命保全に必要な最小限での避難の安全を保証するシステム
III	放置できない	II が確実でなく、改善を要するシステム
IV	失敗	緊急に改善を要するまたは工事、施設保全計画の継続に対して警鐘を与えるべきシステム

表-5 専門家アンケートによる性能ランク値と性能ランクの関係

性能ランク評価値 (RPN)	性能ランク
3.25~4.00	IV
2.50~3.25	III
1.75~2.50	II
1.00~1.75	I

表-6 秋葉トンネル一次はく落防止計測の性能評価値

性能項目		秋葉トンネル	
P_1	P_{1-1}	2	2
	P_{1-2}		1
	P_{1-3}		1
P_2		2	2
P_3	P_{3-1}	3	3
	P_{3-2}		1
	P_{3-3}		1
P		12	
O			1
D			1
RPN		12	
S		1.33	I (完全)

5. まとめ

秋葉トンネルでは、2020年7月から続いていた通行止めを12月末に暫定ながら一般車交通開放し、交通不便を一部解消したところで、今後実施される斜面の対策工、トンネルの本復旧工を待っているところである。

トンネル坑口部は斜面の影響を受けやすく、地すべり規模が大きい場合には本事例のようにトンネルがせん断され構造的に支障をきたすことがある。道路管理者としては二次被害の防止とともに安全な通行の確保が第一の責務となるが、同時に地域にとって重要な幹線道路の早期復旧という責務もあり、本事例のようにいち早く計測を開始することで全体工程を短縮し早期通行再開につながる技術について開発を進めていくことが重要である。

しかし一方でどのような計測システムをどのようなタイミングで導入すべきか、導入した計測システムが必要

十分なもので、その性能に対してエビデンスを持つのかなど計測システムを性能規定する考え方の浸透は遅れており、研究の進展が期待されるところである。

謝辞：本トンネルの被災原因の究明および緊急対策、抜本対策の検討にあたり、現地調査を含め多くの助言を頂いた国道 152 号秋葉トンネル災害対策委員会の八嶋 厚委員長（岐阜大学特任教授）および委員各位に心から感謝し、本報告を捧げます。

参考文献

- 1) 芥川真一, 野村貢, 山田浩幸, 片山辰雄: On-Site Data Visualization の概念と岩盤工学における適用可能性について, 土木学会, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, Vol.39, pp.151-156, 2010.
- 2) Mitsugu NOMURA and Shinichi AKUTAGAWA : Development of a Disaster Information System Using a Light Emitting Device, Proceedings of the 3rd WFEO-JFES-JSCE Joint International Symposium, pp.63-70, September 3, Fukuoka, 2009.
- 3) Chitoshil ZUMI, Shinichi AKUTAGAWA, Mitsugu NOMURA, Reiko ABE, Haihua ZHANG; : Quality Assessment of Effectiveness of Safety Monitoring Based on On-Site Visualization Using New Devices with Various Cost Ranges, Journal of JSCE, Vol. 3, PP.311-327, 2015.
- 4) Haihua ZHANG, Shinichi AKUTAGAWA, Yasuhisa AONO, Koji TSUJIMURA : A Mechanical Method for Deformation Measurement and Visualization in Tunnel Construction, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), vol.71(2015), No.3, p.1_51-1_62, 2016.
- 5) 芥川真一: 視覚で認知するまでの事象連鎖, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 1 号, pp.61-64, 2017.1.
- 6) 芥川真一: 電気を利用したデータ可視化の基本戦略, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 3 号, pp. 77-80, 2017. 3.
- 7) 芥川真一: 閾値の設定方法とデータ可視化の方法論に関する基本的考え方, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 5 号, pp. 81-84, 2017. 5.
- 8) 芥川真一: 電気を利用したデータ可視化の実践的戦略, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 7 号, pp.92-96, 2017.7.
- 9) 芥川真一: 光源や光路に工夫をして変状を可視化する方法, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 9 号, pp.94-98, 2017.9.
- 10) 芥川真一: 光ファイバーを利用したアナログ式 Off-Site Visualization の有効利用, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 72 巻 11 号, pp.83-87, 2017.11.
- 11) 芥川真一: 光ファイバーを利用したデジタル式 Off-Site Visualization による任意変状の定性的評価, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 1 号, pp.82-87, 2018.1.
- 12) 藤井宏和, 芥川真一: 光ファイバーを利用したデジタル式 Off-Site Visualization による定量的評価, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 3 号, pp.83-87, 2018.3.
- 13) 芥川真一: 光の屈折率の違いに注目した光ファイバーセンシング, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 5 号, pp.60-64, 2018.5.
- 14) 芥川真一: 化学材料の特性を活かした電力不使用の OSV, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 7 号, pp.89-93, 2018.7.
- 15) 芥川真一: メカニカルな方式によるセンシングと可視化, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 9 号, pp.90-94, 2018.9.
- 16) 芥川真一: 次世代モニタリングで安全・安心の社会を, On-Site Visualization のすすめ, 土木技術, 第 73 巻 11 号, pp.82-86, 2018.11.
- 17) 野村貢, 戸本悟史, 西條敦志, 木村定雄, 芥川真一: トンネル内附属物モニタリングシステムの実用化についての研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), No.3 (特集号), I -47- I _62, 2016.
- 18) 野村貢, 芥川真一, 佐藤毅: 斜面工事における計測システムの性能を評価する方法の研究, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.73, No.4, I _33- I _44, 2017.

(2022. 8. 26 受付)

DINAMIC MONITOORING WITH ON-SITE VISUALIZATION TECHNOLOGY FOR THE DAMAGED ROAD TUNNEL BY LANDSLIDE

Mitsugu NOMURA, Kazuhide KAMURO, Toshihiro SUZUKI and Shinichi
AKUTAGAWA

Tunnel entrances are the points of contact with the outside space and are therefore subject to the effects of natural disasters such as landslides. Tunnels that have been damaged by external forces are expected to be restored to their previous operational performance through appropriate repairs and countermeasures against external forces. Road tunnels are used by the general public as roads, and therefore it may not be possible to close the tunnel to traffic for a long period of time for repairs. In addition, emergency measures may be required. In this case study, On-Site Visualization technology was applied to a road tunnel that had been deformed by a landslide, as a highly responsive and immediate measurement and monitoring system to ensure safety during emergency repairs and the temporary reopening of the tunnel to traffic. This paper reports on the applicability and effectiveness of this technology.