特集≫≫ トンネル

先行天端沈下計測システムの開発と適用

切羽前方地山の不安定化を常時監視

木 梨 秀 雄・木野村 有 亮・辻 村 幸 治

山岳トンネルの前方地山は,地質の不確定性のためしばしば複雑な変化が設計に反映されないことがある。このため,掘削時に予測できない脆弱部に遭遇し,切羽が崩壊することが時々発生している。

著者らは掘削時に切羽崩落が発生する場合,その予兆として前方地山に先行沈下が発生することに着目 し,これを常時監視できる計測手法を開発した。この報文では,崩落監視の方法と管理基準値の設定につ いて述べる。

キーワード:先行沈下、切羽崩落、切羽安定、限界せん断ひずみ、加速度センサ

1. はじめに

土砂地山や破砕帯など不良地山のトンネル工事で は、切羽が不安定化し崩落する事例が過去に発生して いる。このようなケースでは、切羽付近にいる作業員 が危険にさらされるだけでなく、崩壊が地表にまで及 び第三者への影響も懸念される。切羽の不安定化は、 掘削時のゆるみ荷重の作用に対する地山の強度不足に よる破壊が原因と考えられる。本報では、切羽前方地 山の不安定化を常時監視する目的で開発した計測シス テムについて述べる。

2. 計測システムの概要

本システムで切羽前方に設置する計器は、 φ 27 mm の小口径であり長尺先受け工の鋼管(φ 114.3 mm) 内にも設置可能で、本設の注入工の妨げにもならな い。先受け工打設時に鋼管内にインサート管(φ 38 mm)を設置しておき、端末の鋼管撤去後に計測器 を挿入して計測を開始する。計測終了後には計測器を 引き抜いて回収し、後続の計測に転用できる。なお、 室内実験においてφ 76 mm の GFRP 管内にも設置で きることを確認している。

挿入する計測器は、加速度センサにより 50 cm 区 間ごとに水平傾斜角θを測定するものである。切羽前 方からの地山不安定化の概念を描いたものが図—1で ある。この図に示したように切羽前方地山は崩落時に 円弧上のすべりを呈することが過去の事例から知られ ている。上部からのゆるみ荷重に地山が耐え切れなく



図-1 切羽前方地山の不安定化の概念

なってすべる形であり,先受け工などが折れ曲がる事 例もある。

本システムは50 cm ごとに先行沈下を求めるとと もに、両隣の差分から区間せん断ひずみを求める。計 測データは坑内に設置したタブレット PC に直接取り 込み、崩落の予兆となる地山のせん断ひずみの増大を 常時監視する。計測値が管理基準値を超過した場合に は、切羽近くにて警報音と光の信号で作業員に知らせ るとともに、自動的に工事事務所や担当職員に通報す る。

地山の不安定化の判定指標としては,図-2の櫻 井らの「限界せん断ひずみ」¹⁾²⁾が著名であり,これ を一つの重要な指標として崩落の監視に適用できると 考えた。限界せん断ひずみは,山岳トンネルの内空変 位の管理基準値の設定に一般的に利用されている「限



界ひずみ」と同様に,地山の一軸圧縮強度から比較的 簡易に求めることができる。限界ひずみは,櫻井らが 実施した非常に多数の岩石の一軸圧縮強度に基づいて データベース化されたものであり,破壊の目安として は最も信頼性の高いものといえる。また,切羽が崩壊 する場合には,地山がせん断破壊するものと考えられ るため,後述の事例ではこの限界せん断ひずみを計測 管理の指標に用いた。

3. 室内検定

本計測システムは、管内にセンサを設置して定着材 充填後に計測するため、地山の沈下の計測はやや間接 的なものになる。そこで、地山の沈下に対する測定精 度に関し、室内にて検定試験を行った。写真—1の ように、長さ6mのGFRP管(ϕ 76mm)内にインサー ト管を設置してモルタルを充填し、24時間養生した。 模擬の変位は、図—3および写真—1のようにパイ プジャッキを用いて強制的に与えた。ジャッキベース として H 形鋼を地面に置き、パイプジャッキを伸ば



写真—1 室内検定試験状況



すことで GFRP 管を情報に押し上げ強制的に撓ませた。変位は管内のセンサ位置に一致するよう 50 cm ごとに鉛直に設置した高感度接触式変位計(CDP) により計測し,同時に GFRP 管内に設置した加速度 式傾斜計による変位を計測した。図-4 には,ジャッ キで与えた強制変位と管内で計測した変位の関係を示 す。両者はほぼ一致しており,管内の加速度式傾斜計 で実際の沈下量を計測できることを確認した。

4. 現場への適用と考察

写真―2のような未固結堆積岩のトンネル現場に おいて,実際に本システムを注入式長尺先受け工 (AGF)の鋼管に設置し,掘削に伴う挙動を計測した。 注入式長尺先受け工は,当該の地山が軟弱でありゆる



写真-2 適用したトンネルの切羽(未固結堆積岩)



写真-3 設置状況



写真―4 センサを設置するインサート管

み荷重を支持して崩落等を防止する目的で採用されて いたものである。本計測システムの天端部 AGF 鋼管 内への設置状況を**写真**—3に示す。鋼管内に**写真**—4 の ϕ 38 mm のインサート管をあらかじめ設置し,本 設のシリカレジンを注入した。当現場の長尺先受け工 は無拡幅タイプであり,端末の3mを撤去後に計測 システムを設置した。**写真**—3のような塩ビ製のベ ント管を取り付け,フレキシブルに曲げることが可能 な計測器(加速度センサ)をインサート管内に挿入し た。計測終了後は回収して再度転用できる。

常時監視中に計測値が閾値を超えると**写真**—5の ような警報システムで切羽周辺の作業員に知らせる。 切羽近傍に設置した**写真**—5左側のPCに数秒ごとに 取り込んだ計測値を随時判定し,閾値を超えた場合に はLED ランプが黄色や赤色に切り替わり,現場職員 や作業員らへ警報として知らせる。このため,施工の 一時停止や応急処置などを迅速に処置することがで き,切羽の崩落を未然に防止することが可能となる。

計測結果として,切羽進行ごとの先行天端沈下および,センサ間隔の0.5 m ごとの区間せん断ひずみ y' (以下では y')を図-5 に示す。天端沈下は,切羽 通過後,最大で11 mm 発生した。区間せん断ひずみ



写真-5 LED による警報システム



表―1 各パラメータ値

弾性係数	ポアソン比	限界	限界せん	
		ひずみ	断ひずみ	供业
Е	ν	ε ,	γ _c	加ち
MN/m ²				
165	0.35	0.95%	1.28%	$\gamma_c = \varepsilon_o (1 + v)$

は、図—1中の式に基づいて算定した。式中の δy は センサ間隔の 0.5m で、 δx は隣り合うセンサで計測 された沈下の差分である。また、地山の一軸圧縮強度 は約2 MPa であり、図—2から求めた限界せん断ひ ずみ γc は以下の式(1) と(2)から 1.28% と算定さ れた。限界せん断ひずみの算定に使用した物性値を表 —1に示す。弾性係数E は現地で実施した孔内水平 載荷試験から得られたものである。式(1)の限界ひ ずみ ε_0 は、山岳トンネルで日常の計測管理で管理基 準値として利用されている限界ひずみである。

 $log \varepsilon_0 = -0.25 \ log E - 1.47 \cdots (1)$ $\gamma_C = \varepsilon_0 \ (1 + \gamma) \ \cdots \ (2)$

本現場では、この限界せん断ひずみを管理基準値と

し,掘削中常時自動監視した。図—5においてy'は 切羽通過前においては0.2%以下と非常に小さく,前 方地山が安定している状態であることを示している。 切羽通過後に天端の沈下をしている状態においても最 大でy' = 0.5%程度であった。

なお、事前に区間せん断ひずみと真のせん断ひずみ の関係を解析により求めた。計測で得られる区間せん 断ひずみと真のせん断ひずみは本質的に異なるためで ある。切羽の崩壊は有限差分解析プログラム(FLAC-3D)でシミュレーションした。地山は線形弾性体と し切羽を含む領域を三次元でモデル化した。図—6に 示すように応力解放反力 pr を徐々に解放することで 地山の破壊が進行し、100%解放すると切羽が崩壊す るように設定した。



図-6 解析モデル(せん断ひずみ)

図-7は解析における応力解放率の増大ごとの測 点と y'の関係を表している。 y'は応力解放率の上昇 とともに緩やかに増加するが、解放率 87%以降は急 激に y'が大きくなり、破壊に至ることがわかる。



図-8は解析上で求めた区間せん断ひずみy'およ び要素の真のせん断ひずみyと(以下ではy)応力解 放率の関係を表している。y'とyはほぼ一致してお り、今回のケースではy'により地山の安定性を評価 できる。

このように、区間せん断ひずみは計測器の間隔によ り異なるものであり、かつ真のせん断ひずみとの関係 は地山の物性により一致しないことが一般的で、あら かじめ解析により両者の関係を求めておく必要があ



る。

今回,管理基準値として用いた限界せん断ひずみ γ_c^{120} と,解析で求めた破壊時のせん断ひずみ γ を比較して みると, $\gamma_{max} = 1.25\%$, $\gamma_c = 1.28\%$ となり,両者は ほぼ一致していることがわかった。櫻井らの限界せん 断ひずみは,実験結果に基づいて求められたものであ り,解析上考慮しているものではないが,両者が一致 していることは限界せん断ひずみの重要性を示唆して いるものと考えられる。今回は崩壊の限界値を γ_c と して測定から得られる区間せん断ひずみによって管理 し,不安定化を監視できることが確認できた。本格的 に用いる際には,管理限界値を限界ひずみよりやや割 り引いて安全側で管理する必要がある。

5. おわりに

加速度式傾斜計による先行天端沈下計を新たに開発 し,施工中の山岳トンネルの現場に適用した。軟弱な 未固結堆積層の区間において,注入式長尺鋼管先受け 工の鋼管内に本計測システムを設置し,掘削時に計測 した結果より,以下のことがわかった。

- 室内試験で実施したとおりに、本システムが現場 においても容易に設置でき、現場作業に支障のな いことを確認した。
- 2) 切羽前方地山に設置したセンサによる自動計測で 常時監視し、区間せん断ひずみにより切羽前方地 山の安定性をリアルタイムで評価できた。
- 3)区間せん断ひずみはセンサ間隔に影響されるため、 真のせん断ひずみとの関係を現場に導入する前に あらかじめ実施する解析により求め、補完して計 測管理する必要がある。
- 4)本計測システムは切羽が崩落する前に予兆を常時

計測でとらえ,警報により即時坑内の現場職員と 作業員に知らせるため,施工の一時停止や迅速な 応急対策を処置することが可能となり,脆弱地山 の不安定化を未然に防ぐことが可能である。

今後は,種々の地山に適用し,データを蓄積・分析 して行く予定である。

JCMA

《参 考 文 献》

- 2) 櫻井春輔,川島幾夫,大谷達彦,松村真一郎:トンネルの安定性評価 のための限界せん断ひずみ、土木学会論文集 No.493/Ⅲ-27, pp.185-188, 1994.6
- 2) 櫻井春輔・足立紀尚「都市トンネルにおける NATM」(鹿島出版会, 1988 年)



[筆者紹介]
木梨 秀雄(きなし ひでお)
(株)大林組
生産技術本部 トンネル技術部
副部長



(株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部

木野村 有亮 (きのむら ゆうすけ)



辻村 幸治 (つじむら こうじ) (㈱エス・ケー・ラボ 代表取締役

