山岳トンネルの切羽観察・評価に向けた赤外線サーモグラフィの活用について -発破・こそく・吹付けコンクリートの各段階の切羽面や漏水等の温度測定例-

(一財) 先端建設技術センター	正会員 〇吉川	正	㈱安藤・間	フェロー	鈴木 雅行
(一財) 先端建設技術センター	正会員 橋立	健司	鹿島建設㈱	フェロー	山本 拓治
(一財) 先端建設技術センター	正会員 木山	智裕	清水建設㈱	正会員	江戸川 修一
東洋大学	正会員 曽根	真理	戸田建設㈱	フェロー	髙橋 浩

1. はじめに

山岳トンネル工事における切羽では,発破,こそく,鏡吹付けコンクリート(以後,鏡吹付けと称する)等の作 業中に,発破,鏡吹付け,湧水・漏水,換気等により各部位で温度差や経時変化が生じている.一方,支保パター ンを決める切羽観察の評価項目の一つに湧水と水による劣化があるが,例えば前者の区分は,定性的な5段階の(1. なし・滲水程度,2.滴水程度,3.集中湧水,4.全面湧水,5.その他)となっており,その評価は,個々人の判断に 委ねられている.今回,2現場において,赤外線サーモグラフィ(使用カメラ FLIR C2)による各施工段階(発破, こそく,鏡吹付け)の切羽及び施工後日数の経過した天井や側部の二次吹付けコンクリート(以後,二次吹付けと 称する)の漏水部分の温度測定を実施して,諸現象との関連付けを試みた.

2. 山岳トンネルの切羽等の各部位に対する温度測定結果

(1) 発破掘削方式による各作業段階の切羽

N現場の発破,こそく,鏡吹付け施工後の切羽の写真と温度 測定の結果から得られた知見を以下に示す.

1) 発破後

写真-1,2及び表-1より,切羽面の地山部は,デジタル写真 (RGB)と比較して赤外線画像では,孔尻(発破位置)部分の 温度が周辺より高温の橙色で円状に明確に写っている.

図-1 の発破計画図と比較することで,穿孔精度の確認が可能となる.ずりについては,紫色の温度が低い部分と切羽から離れた部分(写真手前部)に孔尻程度の温度領域(橙色)が見られ,発破ずりの飛散状況・範囲の推定にも活用可能と考える.

2) こそく後

写真-3 及び表-2 より,地山については,発破で残った部分 をブレーカで撤去することで,奥の高温部が表面に出てきて, 地山全体がほぼ均質に 18~20℃程度の橙色の部分が広がって いる.下部は,ずりの撤去で孔尻が気中に見えてきている(橙 色の円形部).発破後に 20℃前後であったずりは,坑内換気に 触れて全体的に冷えてきている.

3) 鏡吹付け施工後

写真-4, 5, 表-3 は, 鏡吹付け施工後の切羽写真と温度分布 である. 鏡吹付けの配合は, 表-4 であり, 設計厚さは, 30mm, 練り混ぜ温度は 19℃, リバウンド率は, 天端・側壁部平均: 9.0%

(2019年12月26日試験値)である. 鏡吹付けは,21℃程度の 高温域 (橙色)と18℃程度の低温域(薄紫色)が混在してい る. 吹付け厚が薄く,こそく後の切羽温度に依存している可能 性がある. 発破で生じたずり部は,19℃程度の高温域と16℃程 度の低温域が混在しており,高温域には,リバウンドした吹付 けコンクリートが混在している可能性が考えられる.





写真-2 発破後の切羽 (赤外線画像)

図-1 発破計画図

温度℃

14.5 14.3

表−2 こそく後の切羽 温度測定結果

切羽(地山:薄紫色 18.5 18.3 17.9

切羽(孔尻:橙色) 20.0 19.0 18.9 ずり(高温部:橙色) 16.0 16.0 15.9

測定対象

ずり(低温部:紫色)14.7

測定対象	温度℃			
切羽(地山)	14.1	14.0	13.9	
切羽(孔尻)	20.5	18.1	18.0	
ずり(高温部)	22.1	19.3	17.2	
ずり(低温部)	16.1	14.0	13.8	
測定日時:2020 1 17 8:29				



写真-3 こそく後の切羽 (赤外線画像)





測定日時: 2020.1.17 9:52

写真-4 鏡吹付け施工 後の切羽

写真-5 鏡吹付け施工後 の切羽(赤外線画像)

表-3	鏡吹付後の温度測定編	吉果	
10			1

測定対象	温度℃		
二次吹付け(施工済み:薄橙色)	27.5	27.1	26.2
鏡吹付け(高温部:橙色)	21.8	21.3	20.9
鏡吹付け(低温部:薄紫色)	18.1	17.8	17.3
ずり(高温部:橙色)	19.7	18.9	18.0
ずり(低温部:紫色)	16.5	16.4	16.4
,	2020 1	17 10	0:06

キーワード 赤外線,サーモグラフィ,切羽写真,切羽画像,温度分布,漏水,吹付け,発破,ずり,リバウンド 連絡先 〒112-0012 東京都文京区大塚2丁目15番6号(一財)先端建設技術センター TEL03-3942-3991

W/C

(%)

41.0

s/a

(%)

65.0

w

184

Х

日橋

スランブ

(cm)

 24 ± 2

表-4 吹付けコンクリート配合表

С

450

空気量の目標:

S

1115

単位量(kg/m)

G

581

3.0%

3.825

(2) 二次吹付け(施工済み)の漏水部

N 現場及び A 現場のトンネル坑内の施工済みの鋼 製支保工,二次吹付け及び漏水箇所の写真及び温度 分布を**写真-6**,7,表-5に示す.

N 現場の温度測定値については、施工済みの二次吹付けの乾燥部

(薄橙色)が19℃程度,同鋼製支保工が18.5℃程度,漏水(紫色)が 15℃程度,同滲み(薄紫色)が15.5℃程度となり,漏水の量が多くな るほど,温度が低下する傾向がみられる.その下方の仮排水路の流 水(暗紫色)の水温は,13℃程度と低い値である.

A 現場の施工済みの二次吹付けの漏水部(暗紫色:**写真-8,表-5**参照)の温度は,12~13.5℃程度と流下に伴って段階的に上昇している.同滲み(薄紫色)も12.5~14℃程度と上昇傾向がみられる.なお, 仮排水路の流水部(**写真-9**参照)は,13.5℃程度である.

上記から施工済みの二次吹付けでは,湧水や漏水の量が多くなれ ば,温度低下量も多くなり,地下水温に近づく傾向にあり,二次吹 付けの温度変化の傾向と漏水量と流下距離による水の温度低下量の 関係を整理できれば,二次吹付けの漏水部の測温で概ねの漏水範囲 と漏水量の把握も可能と考える.

(3) 鏡吹付け作業エリア

写真-10,11,図-2にN現場の切羽における鏡吹付け作業時の切羽 付近の状況,各部位の温度分布を示す.施工済みの二次吹付け(薄 橙色)は、30℃程度,施工中の鏡吹付け(橙色)は、21℃程度,切羽 面(鏡吹付け前:薄紫色)は18℃程度,発破ずり(鏡吹付けのリバウ ンド混じり:紫色)は、16.5℃程度,作業盤(紫色)は、16.5℃程度, コンクリート吹付け機高温部(白黄色)は36℃程度である.

以上,赤外線サーモグラフィカメラ(RGB 併用)の静止画像につい て考察したが,赤外線動画の適用で湧水の評価,切羽の鏡吹付けの 仕上がり状況や施工手順の把握と最適化への展開も可能と考える.

3. まとめ

山岳トンネル切羽における現象把握への赤外線サーモグラフィの 適用性について得られた知見と今後の適用展開について以下に示す.

- ・切羽における発破、こそく、鏡吹付けの各施工段階における温度 分布から、発破位置の特定、発破によるずりの飛散状況、鏡吹付 けの施工状況のリアルタイムでの把握が可能となる。
- ・施工済み二次吹付けの滲み・漏水の範囲及び流下距離と温度の低下傾向の可視化、更に経時の温度測定から、同場所や切羽面での 湧水・漏水・滲みの場所とそれらの量の推定が可能となる。
- ・鏡吹付けの仕上がり状況やずり上の鏡吹付けのリバウンドの範囲 た量の推定が可能となる。

今後,赤外線サーモグラフィの画像及び同動画の活用検討により, ℃ 20.0 例えば,切羽における湧水や水による劣化等種々の現象に対しての 定量的な評価手法の提案,同手法への機械学習の活用による,若手 技術者等の切羽観察の業務支援等に結び付けて行きたいと考える.

なお,本報告は,国土交通省建設技術研究開発助成並びに(一財) 先端建設技術センター自主研究開発の成果の一部である.





|減水剤 |助剤 | 急結助剤

1.35

練り混ぜ温度:19℃

4.5

『真−6 二次吹付けの 漏水・滲み

写真-7 二次吹付けの漏水 ・滲み(赤外線画像)





写真-8 二次吹付けの 写真-9 写真-8 下方仮排水 漏水(赤外線画像) 路の流水(赤外線画像)

主_5	ニカゆけけと浸水笙の泪度公布
377-31	一次成为10~雨水至0~雨冷力4

	-		
測定対象(N現場:2020.1.17)	温度℃		
二次吹付け (施工済み:薄橙色)	19.8	18.8	18.6
鋼製支保工(施工済み:薄橙色)	18.6	18.5	18.4
漏水(紫色)	15.2	15.1	15.0
滲み(薄紫色)	15.9	15.6	15.6
仮排水路の流水(暗紫色)	13.3	13.1	13.1
測定対象(A現場:2019.10.25)	温度℃		
漏水(暗紫色:上中下を測温)	11.8	12.5	13.4
滲み(紫色:上中下を測温)	12.5	13.0	14.1
下方部の流水(暗紫色)	13.2	13.5	13.6



写真-10 鏡吹付け施工状況 写真-11 鏡吹付け施工 状況 (赤外線画像)

