

VI-5

寒冷地トンネルにおける断面内の温度変化

○(株)地崎工業 技術開発部 正会員 渋谷 卓
 (株)地崎工業 技術開発部 正会員 須藤 敦史
 北海道大学大学院教授 正会員 三上 隆
 北海道開発コンサルト(株) 正会員 岡田 正之
 (株)地崎工業 北海道本店 堀尾 時司

1. はじめに

寒冷地のトンネルは冬期に凍害を受ける可能性が高く、新設されるNATMトンネルには一次覆工と二次覆工の間に断熱材が施工されており、上北トンネル(上川側坑口)では、坑口から約315m ($t=7.0\text{cm}$: $L=126\text{m}$, $t=5.0\text{cm}$: $L=189\text{m}$)の区間で断熱材を施工している。また断熱材の設計厚や延長は、坑内の気温や一次・二次覆工、断熱材、地山の熱伝導率・熱容量に左右される¹⁾ため、設計気温は坑内の温度変化や分布を把握して設定しなければならない。しかし、坑内の温度は坑内風や換気・通過車両の排気などが複雑に影響し合う現象であるため、その正確な推定は難しい。

そこで上川側坑口では、トンネル延長方向温度と覆工断面内温度の連続観測を実施²⁾しており、今回の報告は1994年12月～1995年3月および1996年12月～1997年3月の観測値から、トンネル延長方向の温度変化と覆工断面内の温度分布を整理したものである。

2. 坑外・坑内の気象

2.1 坑口の気温

期間1994年12月～1995年3月における上川坑口の平均気温は約 -6.3°C 、また期間1996年12月～1997年3月8日で平均気温は約 -8.4°C を示している。加えて各期間の最低気温は1995年1月2日に -25.8°C 、1995年1月21日には -25.2°C 、さらに1月22日には -24.9°C を記録している。

ここで、上川側坑口の冬期(12月～3月)気温の傾向を整理したものを Table. 1に示す。ここで90日程度が日最低気温 -10.0°C 以下になり、そのうち約50日程度が最低気温が -15.0°C 以下になる。加えて、連続して日最低気温が -15.0°C 以下となる日数が最大2週間程度観測されている。

Table. 1 最低気温表

	1994年 12月	1995年 1月 2月 3月	計
-10°C 以下	21日	24日 22日 20日	87日
-15°C 以下	11日	16日 16日 13日	56日
平均気温			
-10°C 以下	13日	18日 16日 6日	53日

(1994年12月～1995年3月)

	1996年 12月	1997年 1月 2月 3月	計
-10°C 以下	24日	27日 23日 20日	90日
-15°C 以下	10日	15日 11日 4日	40日
平均気温			
-10°C 以下	9日	20日 10日 8日	47日

(1996年12月～1997年3月)

したがって、北部山岳地帯のトンネルは冬期間に厳しい寒気に曝されるため、断熱材は凍害防止に対して重要な位置を占め、加えて断熱材の効果検証および設計・施工の合理化が必要となる。

2.2 坑外の風速・風向

坑内風は、坑外(坑口)の風向・風速および坑口の気圧差に依存すると考えられる。そこで坑口周辺の風速・風向を整理したものを Fig. 1に示す。Figより、南の沢以外では季節風の影響が現れ、風向は西(W)もしくは西北西(WNW)系の風が卓越しており、風速は $2.0\text{ m/sec} \sim 6.0\text{ m/sec}$ の日が多い。また南の沢では北西(NW)もしくは南東(SE)系の風が卓越し、沢地形の影響を強く受けている。

よって、上川坑口での風は、地形効果と季節風の影響が明瞭に現れて西北西(WNW)系の風が卓越し、風速は約 $2.0\text{ m/sec} \sim 6.0\text{ m/sec}$ 程度、加えて坑口が西北西に向かっているため、寒気はトンネルに吹き込むと予想される。また、白滝側の風向は白滝アメダスの観測値および坑口地形を考慮すると西(W)系もしくは西南西(WSW)系が卓越し、風速は上川側と同程度もしくはそれ以下になると推測される。

気圧は両坑口の標高差の影響により上川坑口側が平均して $7.8 \sim 8.0\text{ hPa}$ 低く、気圧差だけを考えると坑内風は白滝側から上川側に流れると考えられる。

A Measurement of Temperatures in Tunnel and Lining

By Taku SHIBUYA, Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Masauki OKADA and Tokio HORIO



Fig. 1 坑外の風向・風速

2.3 坑内の風速・風向

坑内の風速・風向は、地形や気象条件加えて供用時の通過車輛や排気設備の稼働状況によって変化すると考えられる。今回は施工中(1994年12月～1995年2月:貫通前および1996年12月～1997年3月:二次覆工施工)の観測値であり完成後の自然風状態ではないが、得られた観測値と坑内作業の内容・位置などを照合することにより、風速・風向の概略傾向を把握することは可能と考えられる。

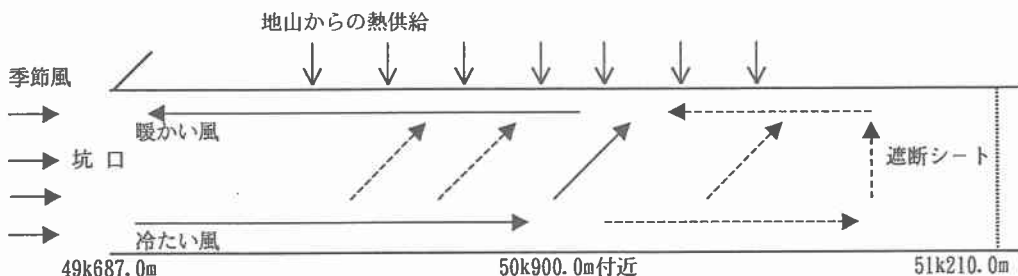
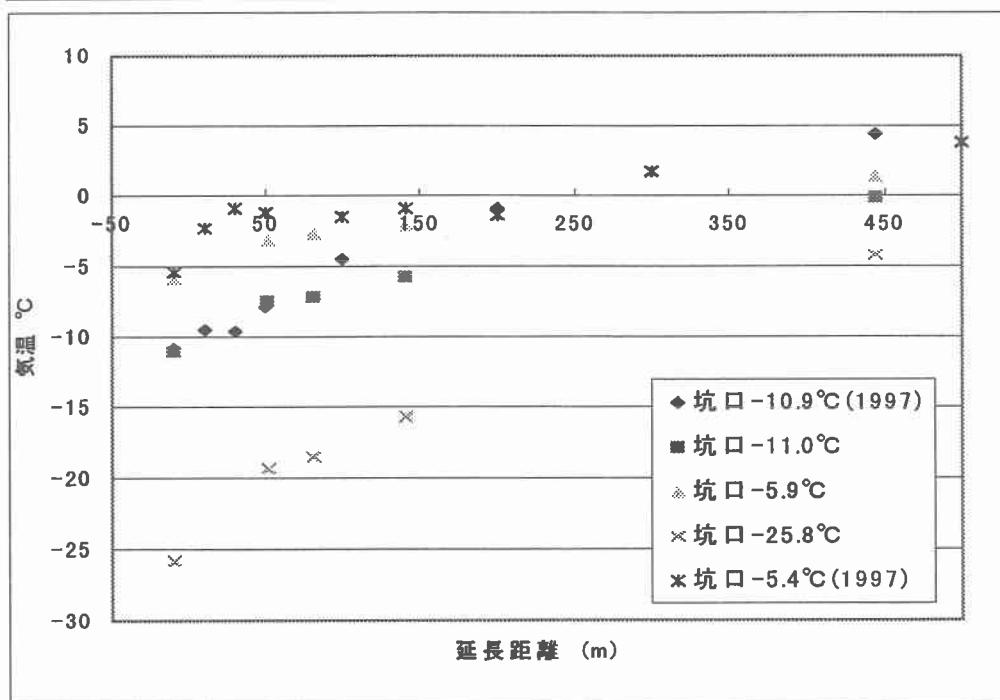
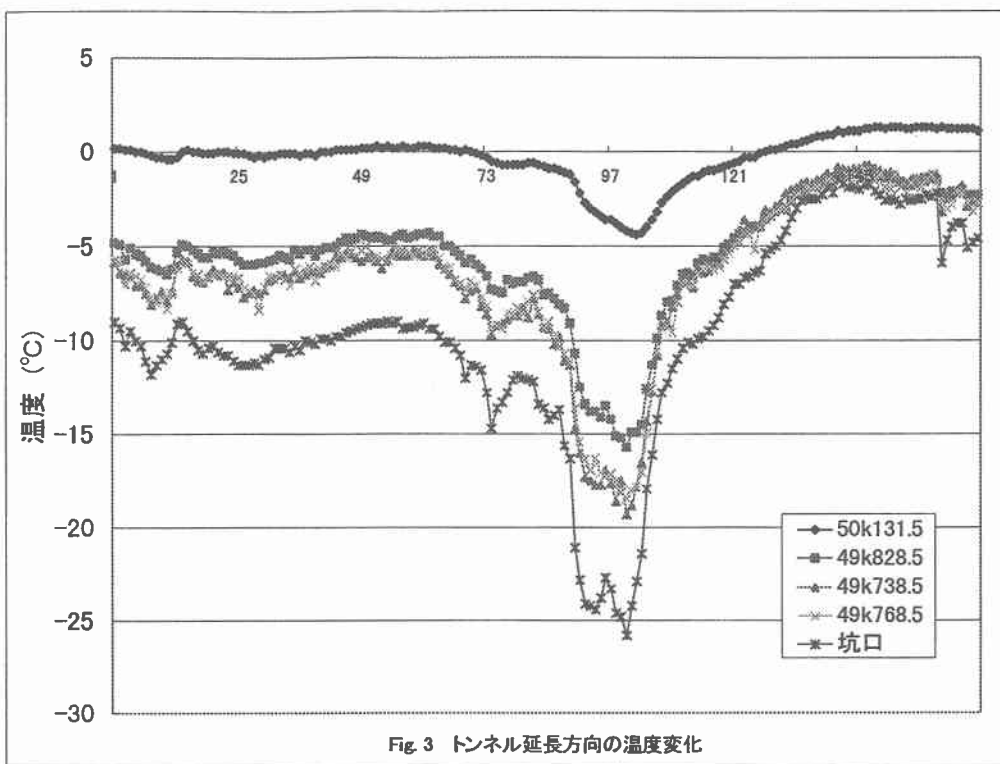


Fig. 2 坑内の風向

ここで1996年12月～1997年3月における坑内は、51k210.0mに遮断シートが設置され、50k900.0m付近で二次覆工の打設作業を行っている。よって坑内の風は Fig. 2のように寒気は上川側坑口から吹き込み、地山からの熱供給もしくは二次覆工コンクリートの硬化熱などで暖められ、トンネル上部に上昇し、逆に坑口方向へ流れるものと推測される。

ここで、遮断シートまでは約1.0km程度の距離があるため、吹き込む寒気がどこまで流入しているのかは不明であり、今後の観測および解析を待たなければならない。



3. 坑内の温度変化

3.1 坑内気温の変動

上川側坑口の期間最低気温 -25.8°C (1995年1月2日 3:00)を示した1994年12月29日0:00～1995年1月4日23:00の延長方向の温度変化を Fig. 3に示す. Figより, 延長方向の温度変化は坑口の気温変動に連動する相関を示しており, 加えて延長距離が長くなるにつれて変動幅も小さくなり, 温度は上昇する.

3.2 延長方向の温度

ここで坑口の気温が -11.0°C , -25.8°C , -5.8°C , -5.4°C における延長方向の温度変化をFig. 4に示す. Figより延長距離に伴い温度は上昇し, 坑口気温が低くなるにつれ温度上昇は大きくなる. 加えて深部において壁面温度はばらつく傾向を示すが, 坑内に吹き込む冷たい風の影響か, トンネル上部を逆に流れてくる暖かい風の影響かは, 現時点では特定できない.

ここで, 延長方向の温度変化は坑口気温と延長距離, 加えて坑内風を変数とする対数もしくは指数関数による近似が可能となると考えられる. また, 今回は風の吹き抜けは無く, かつ坑内作業を行っている状況下の観測値であるため, 今後は自然および強制換気状態における気象を詳細に検討して, 延長方向の温度推定式を誘導しなければならない.

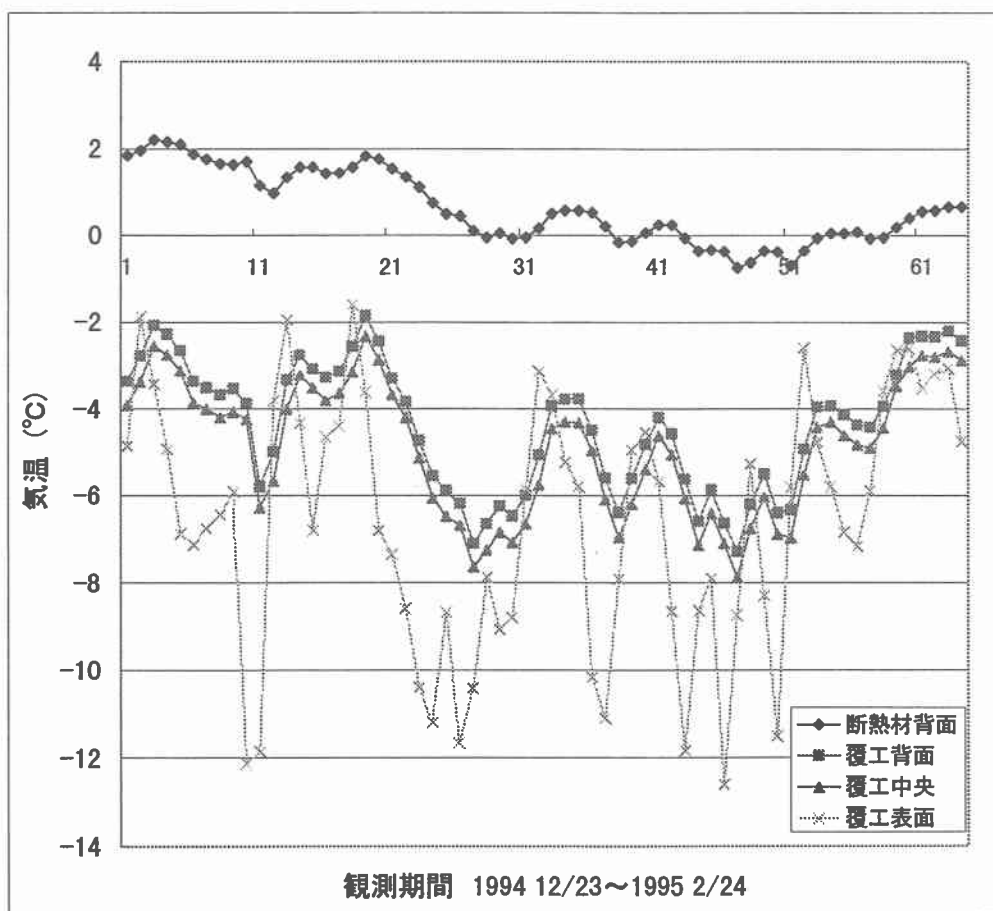


Fig. 5 支保部材の温度

4. 覆工断面内の温度分布

上川側坑口では, 断熱材を坑内気温に応じた厚さで施工しており, その断熱効果を確認する目的で, 各支保部材温度も連続観測を行っている. ここで49k768.5m (断熱材厚7.0cm) における各支保部材の

温度分布により断熱材の効果を検証する。

1995年12月23日～2月24日における各支保部材の日平均温度変化をFig. 5に示す。Figより、二次覆工中央および背面温度は表面温度の日変化の影響を受けて下降・上昇を繰り返しているが、断熱材背面の温度はあまり影響を受けていない。しかし、断熱材背面の温度は1月～2月を最低とする変化傾向を示しており、坑口気温の季節的な変動に連動した変化を示している。

したがって、断熱材背面は季節的な温度変動の影響を受けており、寒波(低温日が続く)により下降は加速している。ここで、上川坑口における月平均最低気温をTable. 2に示す。

Table. 2 月平均最低気温

観測月	平均最低気温	平均気温
1994年12月	-12.3° C	-8.4° C
1995年 1月	-15.3° C	-10.4° C
1995年 2月	-16.2° C	-10.3° C
1995年 3月	-13.7° C	-6.5° C

以上より、冬期間における断熱材背面の温度の変化は坑口平均気温の傾向と一致しているが、若干の時間遅れを示しながら、1月下旬～2月に最低温度になると推測される。

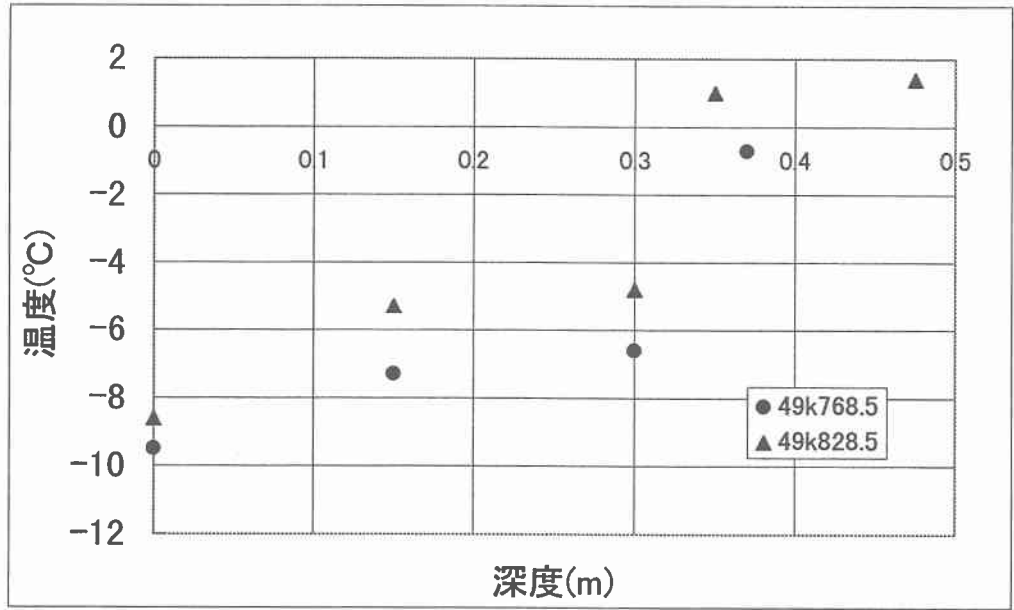


Fig. 6 覆工の温度分布

Table. 3 各部材の平均温度(1995年1月10日～2月17日)

	表(覆)	中(覆)	背(覆)	背(断)
768m	-7.6	-5.7	-5.1	0.2

*坑口平均気温 -11.27° C

次に、1995年2月11日0:00における覆工断面内の温度分布をFig. 6に示す。Fig. 6より、断面内の温度分布はほぼ平行を示していることより、2測点とも同じ程度の断熱効果を示している。

ここでFig. 6より、二次覆工コンクリートの断熱効果は3.0～4.0° C程度、断熱材の効果は約5.0～6.0° C程度となっている。加えて、一次覆工(吹付け)コンクリートの断熱効果は1.0～2.0° C程度であると推測される。

また、1995年1月10日～2月17日における支保部材の平均温度をTable. 3に示す。Tableより、二次覆工コンクリート ($t=35.0\text{cm}$) により得られる断熱効果の平均は約 2.5°C 、断熱材 ($t=7.0\text{cm}$) では約 5.3°C 程度の平均的な断熱効果を示す。

これらの結果より、地山(一次覆工コンクリート背面)温度が 0.0°C (もしくは -1.0°C)以下になる壁面温度は、断熱材が施工された断面では $-10.0\sim-12.0^{\circ}\text{C}$ 程度、断熱材が施工されていない断面では $-4.0\sim-6.0^{\circ}\text{C}$ 程度と推測される。

5. 結 論

上川側坑口部における気象観測、トンネル延長方向の温度変化および各支保部材における温度観測から、以下に示す結論が得られた。

5.1 坑外気象および延長方向の温度変化

上川側坑口における冬期間(1月～2月)の平均気温は -10.4°C 、平均最低気温は -15.8°C を示し、冬期において風は坑内に吹き込むものと推測される。加えて、坑内の気温は延長距離に伴い上昇し、坑口気温と延長距離を変数とする関係式に近似が可能と考えられる。

しかし、今回は限定された状況における観測データであるため、その変化傾向を詳細に観測して延長方向の温度推定式を誘導しなければならない。

5.2 各支保部材の温度分布

二次覆工コンクリート中央および背面の温度は気温の日変動の影響を敏感に受けるが、空気層と二次覆工の熱伝達率あるいは二次覆工の熱伝導係数により、そのピークに若干の時間遅れを示す。加えて、断熱材背面の温度変化は二次覆工コンクリート中央や背面に比べて変動は小さく、1月～2月を最低とする変動傾向を示し、寒波により下降は加速する。したがって、冬期の最低気温を基本とした設計気温を用いて断熱材を設計することが望ましい。

また、二次覆工コンクリート ($t=35.0\text{cm}$) により得られる断熱効果の平均は約 2.5°C 、断熱材 ($t=7.0\text{cm}$) では約 5.3°C 程度の平均的な断熱効果を示す。これより、地山温度が 0.0°C (もしくは -1.0°C)以下になる温度は、断熱材施工断面では $-10.0\sim-12.0^{\circ}\text{C}$ 程度、断熱材無施工断面では $-4.0\sim-6.0^{\circ}\text{C}$ 程度となる。

謝辞 今回の研究に際して坑口の気象観測データ(一部)を御提供頂いた、北海道開発局 旭川開発建設部 上川道路建設事業所の皆さまに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 芳村仁, 三上隆, 小山田欣裕: 寒冷地道路トンネルの地山温解析(非定常熱伝導解析), 土木学会北海道支部論文報告集, 昭和63年度, pp.109-112, 1988.
- 2) 須藤敦史, 三上 隆, 堀尾時司: 寒冷地トンネルにおける断熱材の効果観測, 寒地ソノボ・ジウム'97, 寒地技術論文・報告集, Vol. 13, pp. 207-212, 1997.