

断熱材の設計を目的としたトンネル延長方向の気温変動

Periodic Change of Temperature overall the length at Tunnel for Heat Insulater Design

(株)地崎工業 土木技術部 正会員 須藤 敦史(Atsushi SUTOH)
 (株)地崎工業 北海道本店土木部 ○正会員 河村 巧(Takumi KAWAMURA)
 北海道大学 大学院工学研究科 フェロー会員 三上 隆(Takashi MIKAMI)
 (株)ドーコン 交通施設部 正会員 岡田 正之(Masayuki OKADA)

1. はじめに

北海道における新設の道路トンネルでは地山の凍結防止の目的で坑口部の一定区間において一次・二次覆工の間に断熱材を施工しているが、施工延長はトンネルの延長方向気温に大きく左右される¹⁾。しかし延長方向の気温推定は、坑口の冬期気温及び坑内の風向・風速、通過車両の排気熱や坑内換気など様々な現象の影響を受けるため、非常に難しい問題となっている。

そこで、坑内環境と延長方向気温の把握を目的として図-1に示す7箇所のトンネル(雄信内トンネル:750m, 上北トンネル:4,098m, 小函トンネル:1,233.7m, (旧)豊浜トンネル:1,085m, 日勝トンネル:580m, 定山溪トンネル:1,124m, 野塚トンネル:4,232m)において坑内の延長方向気温と風向・風速の観測を実施し、冬期の坑内環境に即した延長方向気温の提案を行っている。

2. 坑内延長方向の気温

一般的にトンネル坑内の気温 U_T は、正弦波で変化する坑外

気温に起因して変動し²⁾、坑口からの延長距離に伴って年平均気温 U_m 、振幅 A_z は変動する式(1)のように表わされる³⁾。

$$U_T = U_z - A_z \sin\{2\pi(t - t_0)/365\} \quad (1)$$

U_z : 年平均気温, A_z : 振幅 (坑口からの延長距離 z m)

いまトンネル半径 r_0 (m)の坑口から延長距離 Z (m)において坑内風速 v (m/h)で流動して空気が受ける熱量と周辺地山から放出される供給熱量 Θ が等しいとすると、坑内を流れる気流の温度 U は式(2)より求められる^{4),5)}。

$$dU/dz = COF \left(\partial \Theta / \partial r \right)_{r=r_0} \quad (2)$$

$$COF = 2 \cdot \lambda / \gamma \cdot r_0 \cdot v \cdot C_p$$

ここで γ = 空気比重 $1.251(\text{kg}/\text{m}^3)$, λ = 地山熱伝導率 $(\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, C_p = 空気定圧比熱 $0.240(\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

式(2)の厳密解は式(3)となり、年平均気温 U_m 、振幅 A_z は坑口からの延長距離に伴って指数関数で変動(上昇もしくは減衰)する^{4),5)}。

$$U = U_z + A_z \sin(\beta z - \omega t) \quad (3)$$

ここで各トンネルにおける延長方向の観測気温より、式(1)の平均気温 U_z および振幅 A_z を求めると表-1となる。

ここで表-1より、坑口からの延長距離に伴って平均気温 U_z は上昇し、平均振幅 A_z は伴って減衰する傾向が見られる。

また、観測値により求めた野塚トンネルにおける坑内延長方向の気温変動式(1)の平均気温 U_z 、平均振幅 A_z を示すと図-2となり、理論式で誘導したように延長距離に伴って指数関数的に上昇もしくは減衰している。

以上、図-2より寒冷地トンネルにおける坑内の気温変動は、地山からの熱供給を受けて坑口からの延

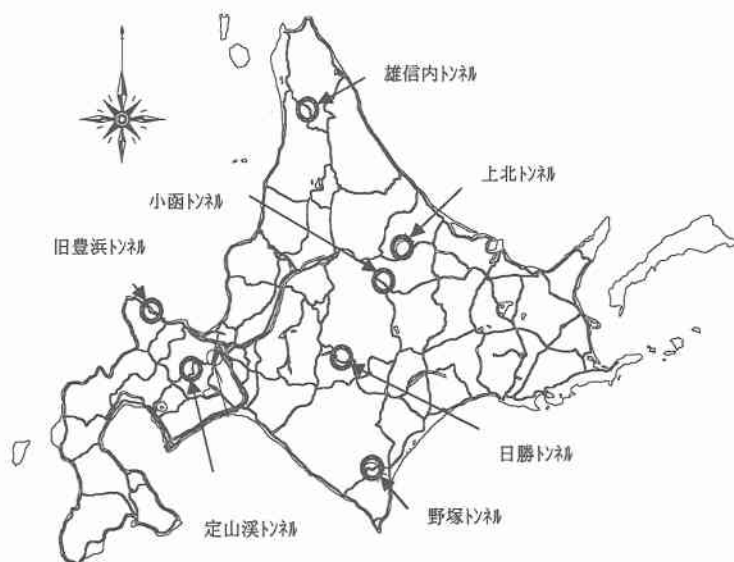


図-1 延長方向温度観測トンネル位置図

表-1 延長方向の年平均気温,年振幅

雄信内トンネル	年平均気温	年振幅	定山溪トンネル	年平均気温	年振幅
0m	6.0	13.4	0m	4.2	13.7
20m	6.5	13.2	20m	6.7	13.3
40m	6.7	13.0	40m	7.3	12.6
80m	6.9	12.8	80m	7.6	12.1
160m	7.1	12.6	160m	8.5	11.6
400m	7.2	12.2	300m	9.1	11.2
上北トンネル	年平均気温	年振幅	558m	9.8	10.8
0m	2.8	14.3	日勝トンネル	年平均気温	年振幅
51.5m	4.0	10.8	0m	1.5	14.2
81.5m	4.5	9.9	20m	2.6	13.8
141.5m	5.3	8.5	40m	3.4	13.4
444m	7.7	8.3	80m	3.8	13.2
1.000m	9.3	6.8	160m	4.0	13.1
小函トンネル	年平均気温	年振幅	320m	4.1	13.0
0m	3.2	14.6	野塚トンネル	年平均気温	年振幅
20m	4.8	12.6	0m	3.68	13.1
40m	5.2	12.2	100m	4.15	10.5
80m	5.5	11.8	300m	4.45	9.5
160m	5.9	11.4	600m	4.64	8.8
300m	6.3	11.0	900m	4.85	8.5
560m	6.7	10.6	1.200m	5.05	8.2
733m	7.2	10.4	1.500m	5.25	8.0
(旧)豊浜トンネル	年平均気温	年振幅	1.800m	5.45	7.8
0m	9.2	12.2	2.100m	5.55	7.6
20m	9.4	12.0			
40m	9.6	11.8			
80m	9.8	11.4			
160m	10.2	11.0			
300m	10.5	10.8			
540m	10.8	10.6			

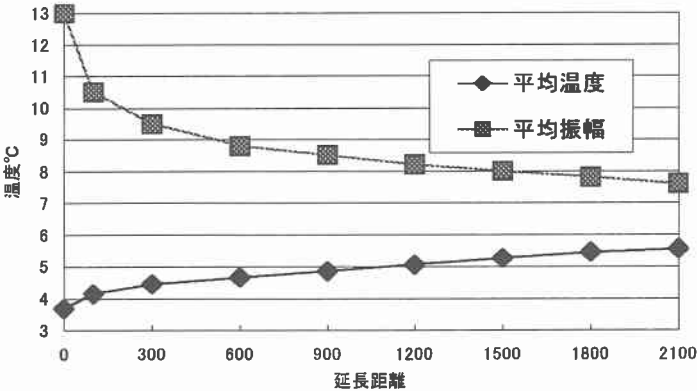


図-2 野塚トンネルにおける平均気温,振幅

長距離に伴って指数関数的に平均気温 U_z は上昇し,平均振幅 A_z は減衰している。

3. 観測値による気温変動

トンネル坑口から延長距離に伴って指数関数に変動する年平均気温 U_z と年振幅 A_z を,その気象・環境状況を考慮して7箇所(7箇所)のトンネルにおいて観測された延長方向気温から逆問題的に求められれば,断熱材の設計を行うための実用的な延長方向の気温変動が得られる。

(1) トンネル坑内の気象環境

7箇所(7箇所)のトンネルにおいて観測された延長距離に伴う年平均気温 U_z の上昇および年振幅 A_z の減衰の坑口からの差($U_{z=i} - U_{z=0}, A_{z=0} - A_{z=i}$)を示すと図-3(a),(b)のようになる。

図-3(a),(b)および風などの坑内環境より,年平均気温 U_z ・年振幅 A_z の上昇・減衰の傾向は,野塚・豊浜トンネルおよびトンネル延長が比較的短い雄信内・日勝トンネルのグループIIと上北トンネルおよび小函・定山溪トンネルのグループIの二つに分割することができる。

そこで,この二つのグループの中で代表的な野塚・上北トンネル坑内延長方向における冬期の風向・風速を示すと表-2,3となる。

表-2より,野塚トンネルを代表とするグループII(坑内風が比較的強い)では,延長距離が短い,もしくはトンネル軸が東西向き,また坑口の地形,標高差などの理由により,トンネル坑内に冬期の季節風が吹き込むため一定方向の風が1.0~1.5m/s程度の風速で吹き抜けているものと考えられる。

一方,上北トンネルを代表とするグループI(坑内風が弱い)では,表-3に示すようにトンネル延長距離や軸の方向および坑口の地形,両坑口の標高差などの諸状況により,冬期の季節風が吹き込まないためトンネル坑内ではあまり風が吹いておらず(0.5m/s程度以下)加えて,その方向も定まっていないものと考えられる。

(2) 観測値による推定

そこで,トンネル坑内(延長方向)において風向・風速の状況が異なる二つのグループの観測値を基にして,式(1)より誘導され

る指数関数的に変動する年平均気温 U_z と年振幅 A_z を係数 a_1, a_2 および b_1, b_2 で近似した式(4),(5)のように定義して,その各係数を実際の観測より得られた延長方向の気温変動から逆解析的に求める。

$$U_z = a_1 e^{b_1(-z)} \tag{4}$$

$$A_z = a_2 e^{b_2(-z)} \tag{5}$$

ここで7箇所のトンネルにおいて観測された気温変動から逆解析的に2タイプに大別したトンネル延長方向の年平均気温 U_z の上昇傾向と年振幅 A_z の減衰傾向を示すと図-4(a),(b)のようになる。

図-4(a),(b)より,トンネル坑内の風速が10~15m/s (平均13m/s) 程度の場合では,延長方向における年平均気温 U_z の上昇傾向および年振幅 A_z の減衰傾向はトンネル坑口からの延長距離が100m程度で収束 (気温上昇:1.6℃,振幅減衰:1.6℃) している。

またトンネルの坑内風が 0.5m/s 程度の場合では,坑口からの延長距離が 200 m~300m で収束(気温上昇:4.2℃上昇,振

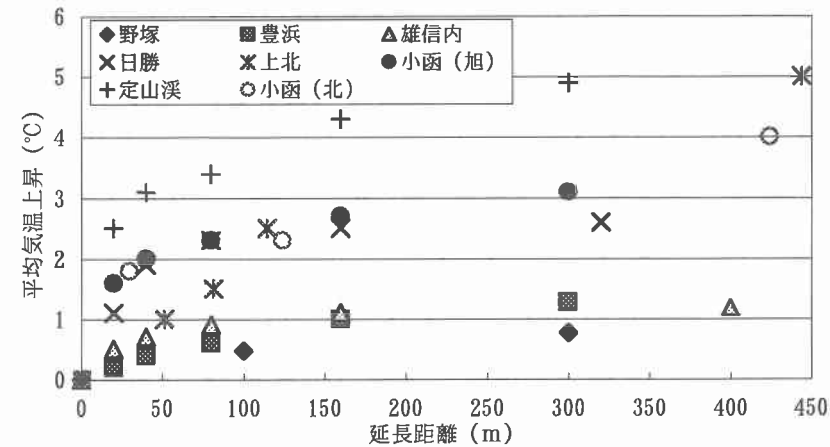


図-3(a) 延長距離における平均気温の上昇

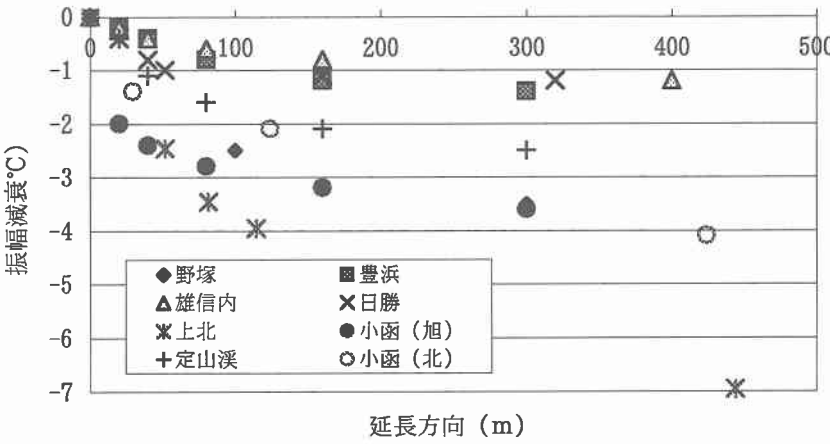


図-3(b) 延長方向における平均振幅の減衰

幅減衰:4.6℃)している。

表-2 野塚トンネル坑内の冬期風向・風速 (m/S)

	10m	100m	300m	600m	1200m
1995 年 12 月	1.1 S	0.8 S	0.9	1.0	1.0
1996 年 1 月	1.6 S	1.2 S	1.4	1.7	1.7
1996 年 2 月	1.4 S	1.1 S	1.3	1.5	1.2
1996 年 3 月	1.5 S	1.1 S	1.2	1.3	1.1
1996 年 12 月	1.7 S	1.3 S	1.6	1.8	1.5
1997 年 1 月	1.5 S	1.3 S	1.4	1.6	1.3
1997 年 2 月	1.5 S	1.1 S	1.2	1.4	1.1
1997 年 3 月	2.0 S	1.5 S	1.6	1.8	1.5
平 均	1.5	1.12	1.33	1.51	1.30

*風向S:浦河 ⇒ 広尾 , N:広尾 ⇒ 浦河

したがって,トンネル坑内延長方向の気温変動における年平均気温 U_z の上昇傾向および年振幅 A_z の減衰傾向は,トンネル坑内風の強さを考慮することで実用的に推定されることより,断熱材の施工延長に対してより一層の合理化・簡便化が図られる。

5. 結 論

本研究は寒冷地トンネルの断熱材設計における延長方向気温の合理的設定を目的として,坑内の風環境と延長方向における気温変動の傾向を整理して以下に示す結論が得られた。

- (1) トンネル坑内における年平均気温は,正弦関数の年平均気温 U_z と振

表-3 上北トンネル坑内の冬期風向・風速 (m/S)

	坑口	10m	30m	50m	100m	200m	300m	500m	700m	1,000m
坑内風速(弱)	0.45	0.25	0.08	0.08	0.10	0.04	0.02	0.03	0.03	0.06
・風向	W	W	W	W	W	W	N	W	N	W
坑内風速(平均)	0.95	0.63	0.60	0.49	0.47	0.40	0.32	0.25	0.49	0.38
・風向	W	W	W	W	W	W	W	W	W	W

*風向 W:上川⇒白滝, N:白滝⇒上川

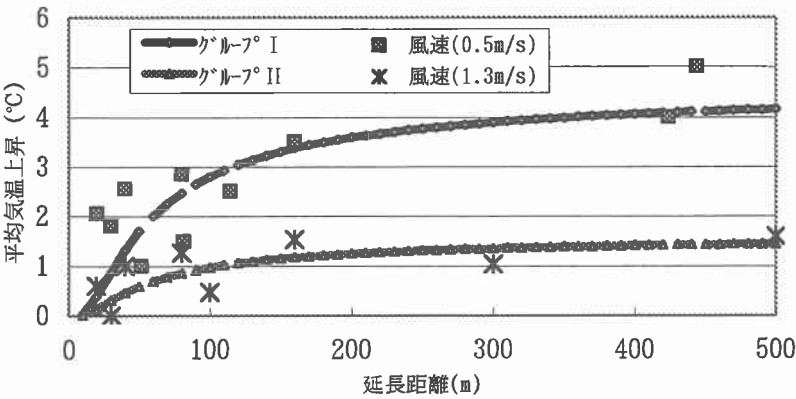


図-4(a) 延長距離における平均気温のタイプ別上昇傾向

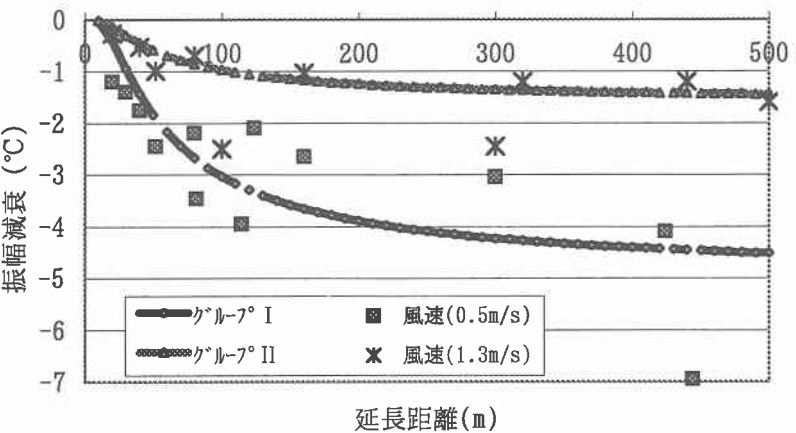


図-4(b) 延長距離における平均振幅のタイプ別減衰傾向

幅 A_z より求められ、延長距離対して指数関数的に上昇・減衰する。加えて、年平均気温および年振幅の上昇・減衰は、坑内風が1.0~1.5m/s (平均1.3m/s) では坑口より100m程度で収束 (気温上昇:1.6°C, 振幅減衰:1.6°C) し、坑内風が0.5m/s 程度では 200m~300m で収束(気温上昇:4.2°C, 振幅減衰:4.6°C)する。

- (1) トンネル延長方向の年平均気温 U_z の上昇および年振幅 A_z の減衰は、トンネル坑内の風速を考慮することで実用的かつ正確に求められ断熱材の設計における合理化・簡

便化が図れる。しかし、供用時における通行車両の排熱や強制換気を考慮したトンネル坑内の風向・風速および気温変動の推定は今後の課題となる。

参考文献

1) 三上 隆林 憲造,権田静也,寒冷地道路トンネルの断熱材設計のための実用的な温度算定式の提案,土木学会論文集, No.498/VI-24, pp.872-93,1994.

2) 岡田勝也,松本嘉司,鉄道トンネルにおける凍結深度の実態とトンネル内気温の周期的変化に対するその解析,土木学会論文集, No.424/III-14, pp.179-186,1990.

3) 須藤敦史,三上 隆,岡原貴司,岡田正之: 寒冷地トンネルの温度変動について, トンネル工学研究論文・報告集第10巻,報告-28, pp.251-256,2000.

4) 天野薫三,乾燥した岩盤坑道における気流の温度変化について,日本鉱業会誌, Vol.70, No.787, pp.23-26,1954.

5) 外尾善治郎:坑道を流れる通気の温度について,日本鉱業会誌, Vol.78, No.892,1962.