

寒冷地トンネル坑内における延長方向の気温変動

Periodic Change of Temperature overall the length at Tunnel in Cold Region

須藤 敦史¹⁾・三上 隆²⁾・岡田 正之³⁾・河村 巧⁴⁾・飯塚 哲善⁵⁾

Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Masayuki OKADA, Takumi KAWAMURA and Tetsuzen IIZUKA

In cold region, a newly constructed road tunnel lining, in which a heat insulator was sandwiched between outer lining and inner one. It was developed for prevention work against frost heave in ground. This paper deals with an identification of periodical temperature which increasing yearly mean value and narrowing amplitudes. In this study, the increasing yearly mean value and narrowing amplitudes of design temperature overall the length of tunnel, is identified at the observed temperature of actual data. Finally, numerical examples using some observational data are worked out to demonstrate the reasonableness of this estimation, which is determined the input temperature for heat insulator design at load tunnel lining.

Key words: Tunnel Insulator Design, Temperatures estimation, Observation Data

1. はじめに

寒冷地に矢板工法で施工された道路トンネルの約半数において凍害による何らかの変状が認められるため¹⁾, 新設される道路トンネルでは地山の凍結防止の目的で、坑口の一定区間において一次覆工と二次覆工の間に断熱材を施工している。しかし、その設計厚および施工延長は、計画されているトンネル坑口部の冬期気温および坑

内延長方向における気温変動により大きく異なり^{2), 3)}, 特にトンネル延長方向の気温変動の推定は坑口部の冬期気温及び坑内・坑外の風向・風速, 通過車両の排気熱や坑内換気の影響など様々な現象が複雑に影響するため, 非常に難しい問題となっている。

そこで、トンネル坑口における冬期の気温変動および坑内の気象環境とトンネル延長方向の気温変動傾向を正確に把握することを目的として、図-1に示すように北海道における延長1,000m以上を中心とした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、坑口および坑内延長方向の各点で気温変動と一部のトンネルで風向・風速の連続観測を実施している。

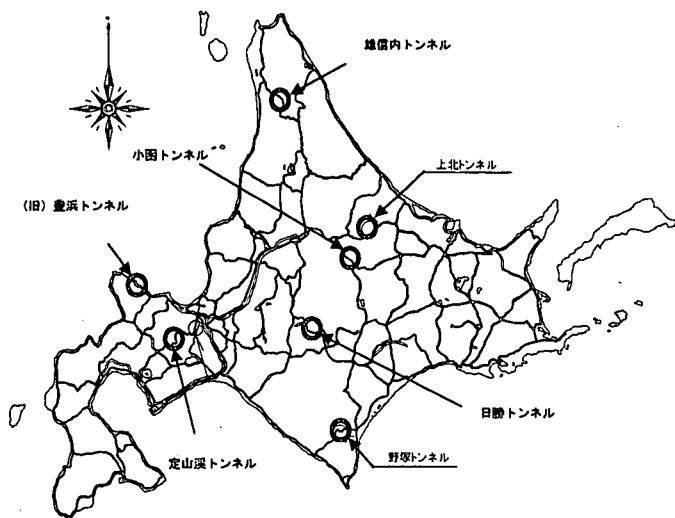


図-1 気温変動の観測トンネル位置図

1) 正会員 工博 (株)地崎工業土木部技術課, 2) フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授工学研究科社会基盤専攻
2) 正会員 (株)ドーコン, 4) 正会員 (株)地崎工業北海道本店土木部, 5) 正会員 (株)エーティック

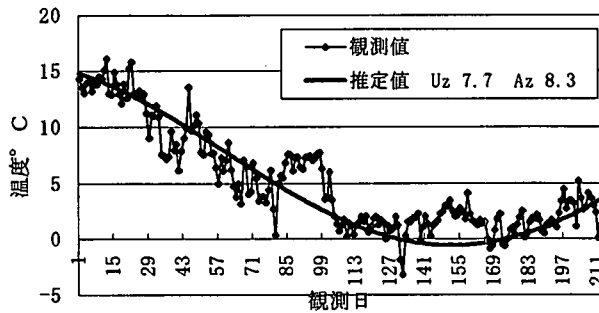


図-2(a) 上北トンネルの気温変動 (坑口からの延長距離 444.0m)

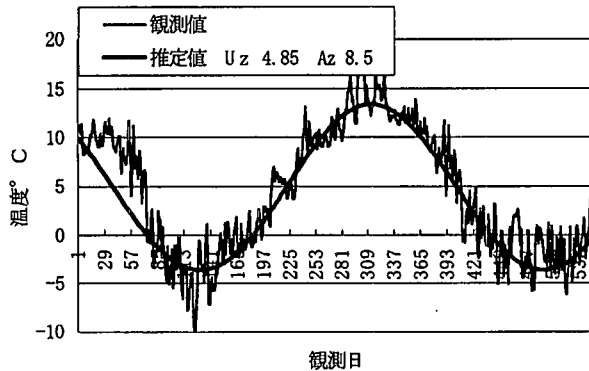


図-2(b) 野塚トンネルの気温変動 (坑口からの延長距離 900.0m)

本研究では、寒冷地トンネルにおける断熱材設計の合理化のために、各トンネルにおいて観測された延長方向の気温変動と風速・風向などの坑内環境を整理して、冬期におけるトンネル坑内の変動傾向に即した延長方向気温における推定式の提案を行ったものである。

2. 坑内延長方向の気温変動

一般的にトンネル坑内の気温変動 U_T は、正弦波で変化する坑口部周辺の外気温に起因して変動するもの⁴⁾であり、数箇所のトンネル坑内の延長方向における温度観測から坑口部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)となっている⁵⁾。

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

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 Z (m) の延長距離において坑内風速 v (m/h) で流れている風が受ける熱量と周辺地山から放出される供給熱量 Θ が等しいと仮定すると、坑内を流れる気流の温度 U は式(2)より求められる^{6), 7)}。

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

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

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 $0.240(\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

表-1 延長方向の年平均気温, 年振幅

坑内トンネル	年平均気温	年振幅
0m	6.0	13.4
20m	6.5	13.2
40m	6.7	13.0
80m	6.9	12.8
160m	7.1	12.6
400m	7.2	12.2
上北トンネル	年平均気温	年振幅
0m	2.8	14.3
51.5m	4.0	10.8
81.5m	4.5	9.9
141.5m	5.3	8.5
444m	7.7	8.3
1,000m	9.3	6.8
小国トンネル	年平均気温	年振幅
0m	3.2	14.6
20m	4.8	12.6
40m	5.2	12.2
80m	5.5	11.8
160m	5.9	11.4
300m	6.3	11.0
560m	6.7	10.6
733m	7.2	10.4
(旧)専派トンネル	年平均気温	年振幅
0m	9.2	12.2
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
定山溪トンネル	年平均気温	年振幅
0m	4.2	13.7
20m	6.7	13.3
40m	7.3	12.6
80m	7.6	12.1
160m	8.5	11.6
300m	9.1	11.2
558m	9.8	10.8
日勝トンネル	年平均気温	年振幅
0m	1.5	14.2
20m	2.6	13.8
40m	3.4	13.4
80m	3.8	13.2
160m	4.0	13.1
320m	4.1	13.0
野塚トンネル	年平均気温	年振幅
0m	3.68	13.1
100m	4.15	10.5
300m	4.45	9.5
600m	4.64	8.8
900m	4.85	8.5
1,200m	5.05	8.2
1,500m	5.25	8.0
1,800m	5.45	7.8
2,100m	5.55	7.6

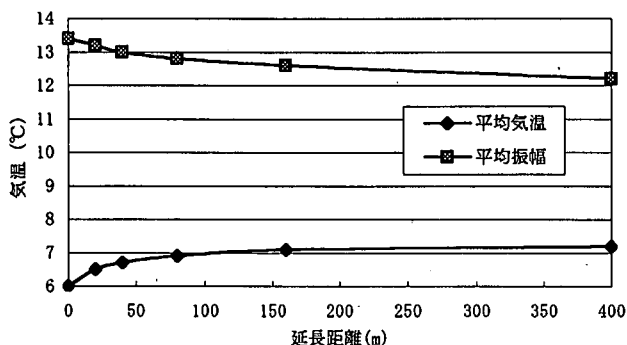


図-3(a) 雄信内トンネル平均気温, 振幅

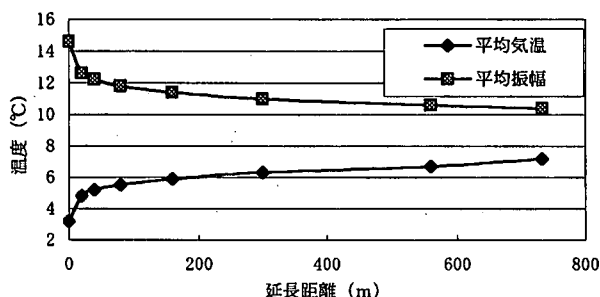


図-3(b) 小函トンネル平均気温, 振幅

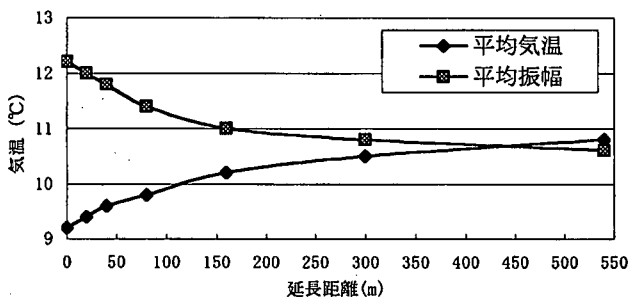


図-3(c) (旧)豊浜トンネル平均気温, 振幅

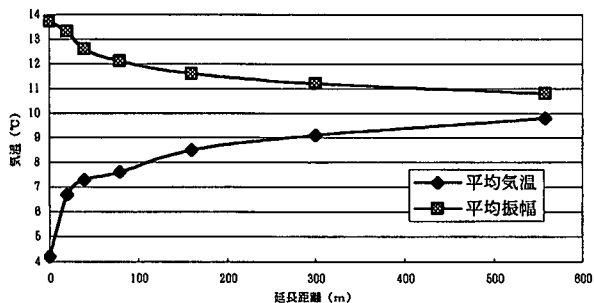


図-3(d) 定山溪トンネル平均気温, 振幅

いま, 式(2)の厳密解は式(3)となり, 年平均気温 U_m , 振幅 A_z は観測結果と同様に坑口からの延長距離に伴って変動し, その変動傾向は指数関数で表される^{6), 7)}.

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

よって, トンネル坑内における延長方向気温の観測結果および地山から放熱を受ける気流の温度誘導より, 寒冷地トンネル坑内における延長方向の気温変動は年平均気温 U_m , 年振幅 A_z が延長距離に伴って上昇・減衰する式(1)となり, 指数関数的に変動する.

ここで各トンネルにおける延長方向の観測点で得られた連続気温より, 式(1)の平均気温 U_z および振幅 A_z を求めると表-1となり, 上北トンネルにおける坑口からの延長距離444.0m地点, 同じく野塚トンネルの延長距離900.0m地点の観測された気温変動と式(1)により求めた平均気温変動の推定値を図-2(a), (b)に示す.

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.

また式(1)により求められた4箇所のトンネル坑内における延長方向の平均気温 U_z , 平均振幅 A_z を示すと図-3(a)~(e)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.

加えて, 小函・定山溪トンネルにおけるトンネル全延長における平均気温 U_z , 平均振幅 A_z を示すと図-4(a), (b)となる.

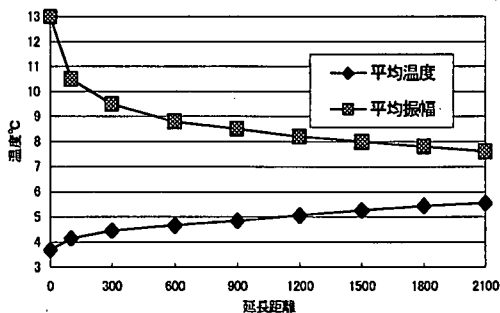


図-3(e) 野塚トンネル平均気温, 振幅

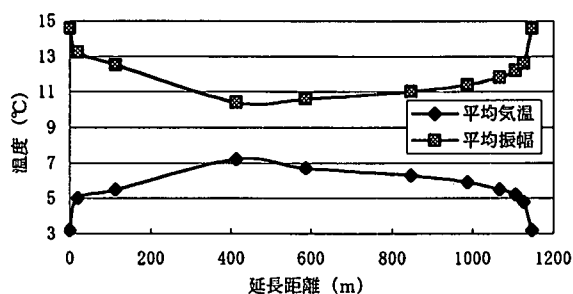


図-4(a) 小函トンネルの平均気温, 振幅 (全延長)

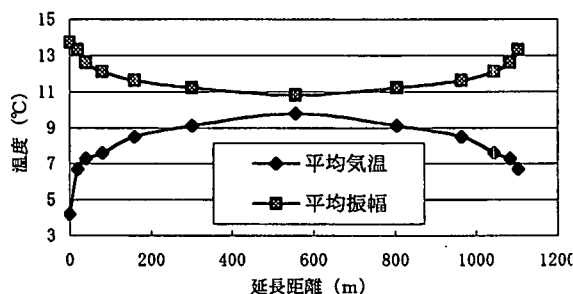


図-4(b) 定山溪トンネルの平均気温, 振幅 (全延長)

以上、図-3および図-4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。

ここで、平均気温 U_z 、平均振幅 A_z より求めた上北・野塚トンネルにおける坑内延長方向の冬期気温と観測された1, 2月の平均気温を示すと図-5(a)、

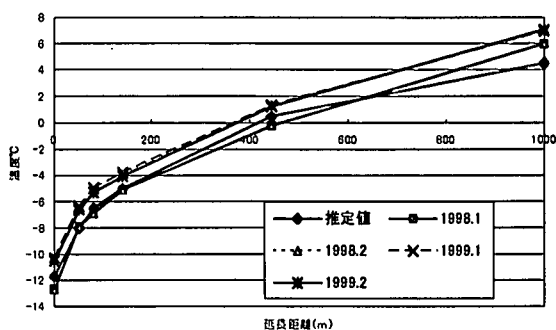


図-5(a) 上北トンネル延長方向気温

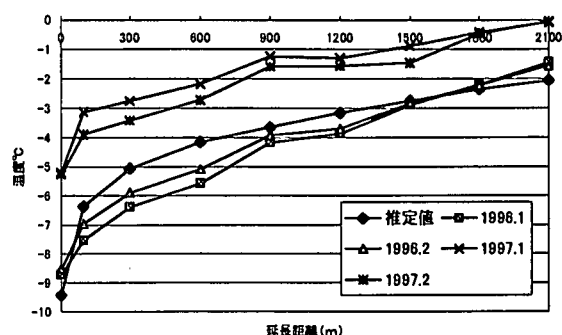


図-5(b) 野塚トンネル延長方向気温

(b)となり、観測で得られたトンネル坑内の延長方向の冬期気温とほぼ同じ傾向を示しおり、坑内の冬期気温も平均気温 U_z 、平均振幅 A_z と同様に指数関数的に上昇している。(図-5(b)における1997年の坑内温度の観測値は暖冬のため平常気温より高い値を示している。)

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

3. 坑内環境と延長方向の気温変動

延長距離に伴って指数関数的に変動する年平均気温 U_z と年振幅 A_z の変動傾向を坑内環境を考慮して、7箇所トンネルにおける観測気温から逆問題的に(観測値から)求めれば、断熱材設計を行うため

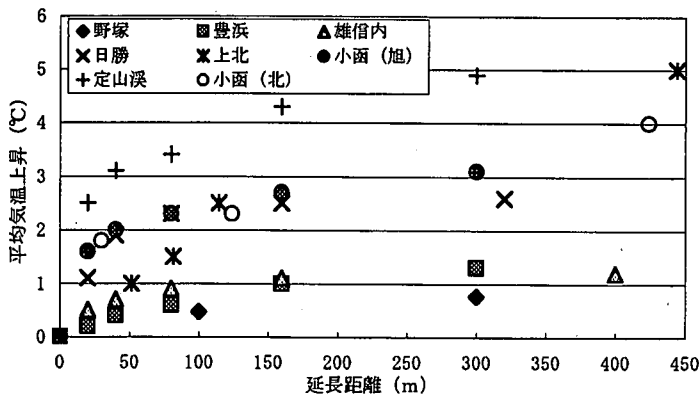


図-6(a) 延長距離における平均気温の上昇

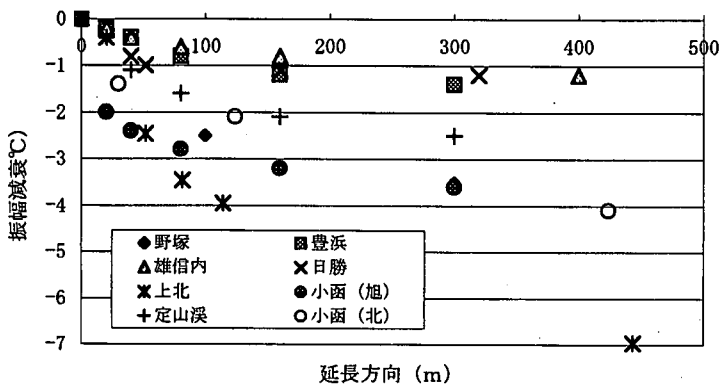


図-6(b) 延長方向における平均振幅の減衰

の実用的かつ正確な延長方向の気温変動が求められる。

そこで各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 の減衰の坑口値からの差を示すと図-6(a), (b)となる。

坑内の風向・風速と式(1)により求められる平均気温の変動傾向および図-6(a), (b)より、年平均気温 U_z ・年振幅 A_z の上昇と減衰は、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Ⅰと上北トンネルおよび小函・定山溪トンネルのグループⅡの二つに分かれている。

そこで、この二つのグループの中で代表的な野塚・上北トンネル坑の内延長方向における標準的な冬の風向・風速を示すと表-2 および表-3 となる。

表-2(a), (b)より、野塚トンネルを代表とするグループⅡでは、トンネル延長・軸の方向および坑口の地形、両坑口の標高差の状況により、トンネル坑内において一定方向の

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
坑口風(弱い場合)										
坑内風速	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
坑口風(平均風)										
坑内風速	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

風が 1.0~1.5m/s 程度の風速で吹き抜けているものと予想される。

一方、上北トンネルを代表とするグループⅠでは、表-3およびトンネル延長・軸の方向および坑口の地形、両坑口の標高差の状況により、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) その方向も定まっていないものと考えられる。そこで、トンネル坑内における風向・風速の状況が異なる二つのグループに対して、指数関数で表される年平均気温 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)で表現して、その各係数を実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。

$$U_z = a_1 e^{b_1(-z)} \quad (4) \quad , \quad A_z = a_2 e^{b_2(-z)} \quad (5)$$

ここで観測された気温から逆解析的に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 の減衰の傾向を示すと図-7(a), (b)となる。

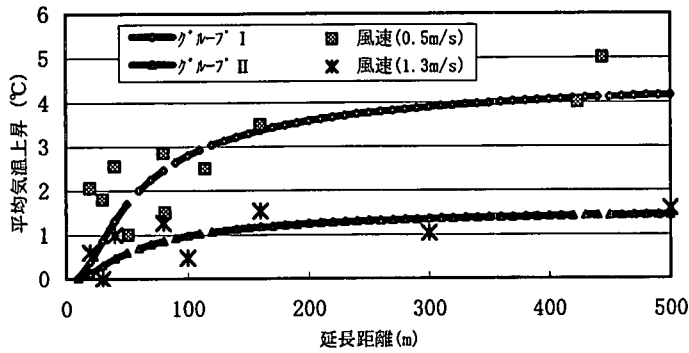


図-7(a) 延長距離における平均気温のタイプ別上昇傾向

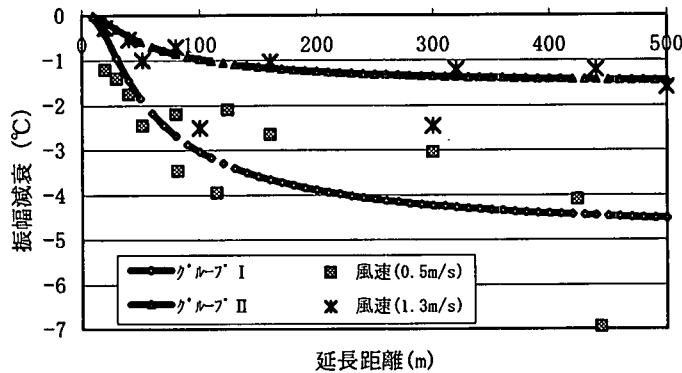


図-7(b) 延長距離における平均振幅のタイプ別減衰傾向

図-7(a), (b)より, トンネル坑内の風速が 1.0~1.5m/s (平均 1.3m/s) の場合には, 延長方向における年平均気温 U_z の上昇および年振幅 A_z の減衰はトンネル坑口から距離 100m 程度で収束 (気温上昇: 1.6°C, 振幅減衰: 1.6°C) しており, また坑内風が 0.5m/s 程度の場合では, 坑口から距離 200m~300m で収束 (気温上昇: 4.2°C 上昇, 振幅減衰: 4.6°C) している。

したがって, トンネル延長方向の気温は, 年平均気温 U_z の上昇および年振幅 A_z の減衰は坑内風速を考慮することで実用的かつ正確に求められ, 断熱材設計のより一層の合理化・簡便化が図られる。

4. 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。

(2) 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) 坂本稔, 川北稔, 五十嵐敏彦: 道路トンネルの変状実態-北海道の場合-, トンネルと地下, 第20巻5号, pp.31~35, 1989.
- 2) 岡田勝也, 福地合一: 断熱処理によるトンネルのつらら防止工の研究, 土木学会論文集, No.309, pp.129-139, 1981.
- 3) 三上 隆, 林 忠造, 榎田静也: 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.