

隧道内外の温度差による坑内自然気流並に温度分布に就て

準員 大 平 拓 也*

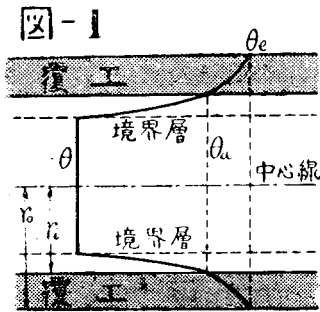
1. 緒 言

本文は鐵道隧道内諸施設並に排煙に關聯のある隧道内外の温度差による坑内氣流並に温度分布に就き考察し、2, 3 の應用例を示したものである。

2. 隧道内外の温度差による坑内自然氣流並に温度分布

各斷面上の各點の壓力 (p)、單位體積の重量 (γ)、亂流部の温度 (θ) はその流速 (v) は同一であるとす。但し壁附近は層流薄層を生じ、この層では隧道斷面中心部の如き流れの混合がない爲、温度の勾配は極めて急で、隧道覆工壁體內面温度 (θ_a)、亂流部と層流部との境界部の温度 (θ) との差は層流薄層の厚さにより變化すべきもので、従つて熱傳達率 (α) は平均流速 (v_m) の函數¹⁾ となる。(圖—1 参照)

隧道覆工内熱傳達率を K 、温度を 圖—1 に示す通りとし熱流が定常であれば覆工壁單位延長を通し單位時間に、 $Q = \beta(\theta_a - \theta)$ の熱の移動がある。但し β の値は次の如くして求められる。



今隧道を中空圓筒とし、熱が横斷方向に流れるとす

* 運輸省岐阜地方施設部

昭. 22. 9 京都大學工學部卒業

1) 石原藤次郎: 管内亂流に於ける熱の移動とエネルギー輸送の類似に就て (土木學會誌, 第 29 卷第 5 號, 昭. 18. 3)

れば圓筒中心より r なる半徑の點の覆工内温度を θ_r とすると、

$$\frac{d^2\theta_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta_r}{dr} = 0$$

$r = r_i$ にて $\theta_r = \theta_a$ $r = r_o$ にて $\theta_r = \theta$ なる故

$$Q = -2\pi r K d\theta_r/dr = 2\pi K(\theta_a - \theta) / \log(r_o/r_i) \dots \dots \dots (1)$$

又隧道内亂流部と覆工壁内面との間の熱量の移動は單位延長につき

$$1/(2\pi r_i \alpha) Q = -(\theta_a - \theta) \dots \dots \dots (2)$$

$$(1)(2) \text{より } \beta = 2\pi / \{ (1/K) \log(r_o/r_i) + 1/(\alpha r_i) \} \dots \dots \dots (3)$$

今隧道内氣流及び熱の移動が定常であるとし單位時間の氣流々量(重量)を G 、隧道斷面積を F (全長に互り一樣とする) とし入口に於ける値には添字の 0 を記せば

$$G = \gamma v_0 F = \gamma v F \dots \dots \dots (4)$$

今仕事の熱當量を A とし、 $x = x$ 、 $x = x + \Delta x$ の 2 斷面に於て氣流 G の有する各種エネルギーの増加を熱單位で表はすと

(i) 速度エネルギー増加は(4)式を用ひ、高次の微係數を無視すれば

$$(\gamma v F A / 2g) (dv^2/dx) \Delta x$$

(ii) 内部エネルギー増加は單位重量の氣體の有する内部エネルギーを U とすれば

$$\gamma v F (du/dx) \Delta x$$

(iii) 仕事のエネルギー増加は

$$\gamma v F A \left(\frac{1}{\gamma} \frac{dp}{dx} + p \frac{d(1/\gamma)}{dx} \right) \Delta x$$

(iv) 壁面との摩擦のために費す仕事量を、 Δx 間流れる G なる流量につき W とすれば AW

(v) 位置のエネルギーの増加は隧道勾配 $dz/dx = i$ を一定とすると $\Delta z = ix$ であるから $\gamma v F A i \Delta x$

以上 5 種のエネルギー増加及仕事量はエネルギー不

減則により Δx の間に於て単位時間に壁體を通して大地より流入する熱量 $\beta(\theta_e - \theta)\Delta x$ と摩擦により生ずる熱量 AW_r との和に等しいはずであるから、

$$\frac{A}{2g} \frac{dv^2}{dx} + \frac{dv}{dx} + A \frac{d(1/\gamma)}{dx} + A_i = \frac{\beta}{\gamma_0 v_0 F} (\theta_e - \theta)$$

一方理想氣體に於ては、

$dv + Ad(p/\gamma) = cp \cdot d\theta$ (cp は氣體の定壓比熱) 然るに空氣は乾燥状態にては常溫常壓附近で理想氣體と考へられ、隧道内空氣を理想氣體と假定すれば上記 2 式より、

$$\left. \begin{aligned} \frac{A}{2g} \frac{dv^2}{dx} + cp \frac{d\theta}{dx} + Ai = B(\theta_e - \theta) \\ \text{但し } B = \beta/(\gamma_0 v_0 F) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式は氣流及び熱の移動の状態共に定常になつた時の關係式である。

更に理想氣體では Boyle-Gaylussac の法則が成立し隧道内に於ては、壓力の變化は大氣壓 (約 760mm Hg) に比し僅少で $p_0/p \approx 1$ と見られ、 v, v_0, γ, γ_0 は主として溫度のみによつて變化し壓力の影響が無視出来るから(4)式により

$$v/v_0 = \gamma_0/\gamma = (273 + \theta)/(273 + \theta_0) \dots\dots (6)$$

(5)(6)兩式により

$$\left. \begin{aligned} \{(a\theta + b)/(c - \theta)\} d\theta = B \cdot dx \\ \text{但し } a = \frac{A}{g} \left(\frac{v_0}{273 + \theta_0} \right)^2 \\ b = 273 \frac{A}{g} \left(\frac{v_0}{273 + \theta_0} \right)^2 + cp \\ c = \theta_e - Ai/B \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$x=0$ に於て $\theta = \theta_0$ として積分すれば

$$\left. \begin{aligned} \theta = \theta_e - \frac{Aiv_0}{B_1} - \left(\theta_e - \theta_0 - \frac{Aiv_0}{B_1} \right) \exp \left[- \frac{Av_0^3(\theta - \theta_0) + gB_1(273 + \theta_0)^2 x}{Av_0^3 \left(\theta_e + 273 - \frac{Aiv_0}{B_1} \right) + v_0 c p g (\theta_0 + 273)^2} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

但し $B_1 = Bv_0 = \beta/(F\gamma_0)$

(8) 式は隧道内延長上の溫度分布を表はす。

次に単位長當りの隧道の摩擦係数を f とすれば、Bernoulli 式より

$$\frac{1}{2g} \left\{ \gamma \frac{dv^2}{dx} + f\gamma v^2 \right\} + \frac{dp}{dx} + i\gamma = 0$$

$$\dots\dots\dots (9)$$

(6), (7)式により變形し $x=0 \sim l$ で積分すると

$$\begin{aligned} A_1(\theta_{x=l} - \theta_0) + A_2(\theta_{x=l}^2 - \theta_0^2) + A_3 \log \frac{273 + \theta_{x=l}}{273 + \theta_0} + A_4 \log \frac{c - \theta_{x=l}}{c - \theta_0} = p_0 - p_l \\ \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{但し } A_1 &= \frac{\gamma_0 v_0^2}{2g(273 + \theta_0)} \left\{ 2 - \frac{f}{B} a(c + 2 + 273cp) \right\} \\ A_2 &= -\gamma_0 v_0^2 f a / \{4gB(273 + \theta_0)\} \\ A_3 &= i\gamma_0 c p (273 + \theta_0) / \{B(273 + c)\} \\ A_4 &= -\frac{\gamma_0(ac + b)}{B} \left\{ \frac{v_0^2 f (273 + c)}{2g(273 + \theta_0)} + \frac{i(273 + \theta_0)}{273 + c} \right\} \end{aligned}$$

l は氣流出口の氣流入口よりの水平距離即隧道の全長である。氣流出口の氣壓 $p_{x=l} \approx p_l$ の値は入口の氣壓 p_0 より z だけ高い所の外氣の氣壓に等しいはずであるから、(10) 式の右邊は高度 z の遠いある兩地點の外氣の氣壓差に等しい。(10)式に $(p_0 - p_l)$ 及(8)式より求めた $\theta_{x=l}$ の値を代入すれば、その時の v_0 の値を得る。

3. 數値計算例

計算に用いる諸値を欽明路隧道にとり、

$$l = 3117\text{m}, i = 10/1000, r_1 = 2.74\text{m}, r_0 = 3.09\text{m}, f = 0.006115$$

管内亂流に對する管壁との熱傳達率 α は次式で表はされている²⁾。

$$K_H^{-1} = 13.38R^{1/4} + 37.70P_r, R^{1/8} - 28.12$$

但し $K_H^{-1} = \alpha/(\rho cv), P_r = \mu c/K_a, R = dv/s$

μ = 流體の粘性係數, d = 管の直径

ρ = 流體の密度, c = 流體の比熱

s = 流體の動粘性係數, v = 断面平均流速

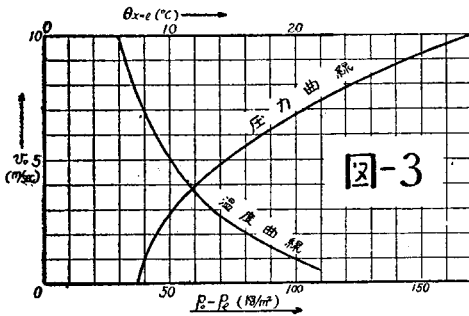
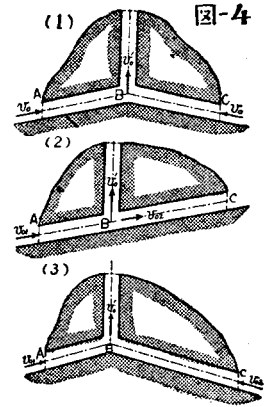
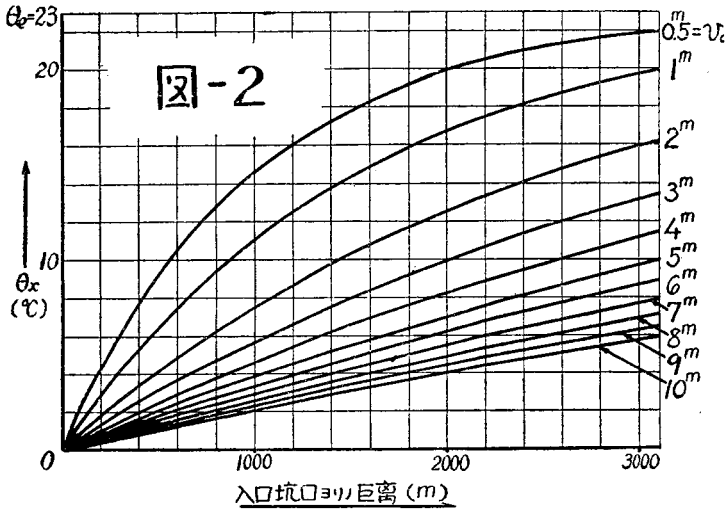
K_a = 流體の熱傳導率

今假に 0°C と 15°C の2つの溫度に對する α の値を算出して比較すると、溫度の變化に對する α の變化は非常に小さいから、0°C - 30°C に對して 15°C に對する次式を用いれれば充分である。

$$\frac{1}{\alpha} = 1121v^{-3/4} + 451.7v^{-7/8} - 95.23v^{-1}$$

$\theta_0 = 23^\circ\text{C}$ とし且上式を用いて坑内各位置に於ける氣溫 θ を(8)式により計算すると、各流速に對する溫度分布は 圖-2 の如くなる。次に(10)式によつて各 v_0 と $(p_0 - p_{x=l})$ との關係を計算すると 圖-3 の如くな

2) 石原藤次郎: 前掲 1)



る。 p_0 と $p_{x=l}$ との間の空気を静止齋一空気と見なして $p_0 - p_l = \gamma_0 h = 1.293 \times 31.17 = 40.30 (\text{kg/m}^2)$ とし之を 圖-3 より測り出せば、それに應ずる v_0 は、 $v_0 = 1.10 \text{m/sec}$, $\theta_{x=3117} = 20.1^\circ\text{C}$ が求められる。

以上により $p_0 - p_2$ に相當した坑内自然氣流を求めることができ、又逆に通風に必要な流速 v_0 を得る爲の壓力差を知ることが出来る。

4. 豎坑を有する隧道換氣に對する考察

豎坑の位置形狀を簡單に次の3つの場合に大別し、(圖-4 參照)、本文理論を豎坑に應用した結論をのべれば

(1) 豎坑が左右對稱なる兩勾配隧道の中央にあれば AB, BC 間の換氣は同様に生じ形式として理想的である。(2) の場合の如く片勾配隧道で $AB < BC$ の時

は BC 部分の換氣は AB 部分に比して不良で豎坑を設けたためかえつて隧道内の汚染を増加する。(3) の如く兩勾配の頂點に豎坑のある時は AB, BC 間の換氣は A, C の標高, AB, BC の長さで變化するが A, C が同一高さであれば勾配緩く長さ大なる方の部分が勾配急で長さ小なる部分に較べて著しく換氣能率が悪く、豎坑の換氣力が一方に偏して働く缺陷がある。

5. 極寒地隧道内防水工に對する考察

防水工を施して湧水を止めねばならぬ時、凍結區間を決定するには (9)式に於て坑内氣流 v_0 を最も常時吹く値に定め、 θ_0 を外氣最低氣溫とし、 $\theta \geq 0^\circ\text{C}$ とし x を求めればよい。

6. 長大隧道内無接目軌條に對する考察

碎石道床區間で軌條敷設時の氣溫と一年を通じての氣溫差が、50kg 軌條で 22°C , 37kg, 30kg 軌條で 19°C 以下であれば、軌條は無制限に無接目として敷設し得ることが證明されてゐる³⁾から、此の理論値に適當なる安全率を見込み、一年間を通じての坑内の最高最低氣溫差が軌條控屈の安全限度になる x を、(9)式より求めればこれ以奥を無接目としてよいこととなる。

(昭 23. 2. 18 受付)

3) 星野陽一氏 "無接目軌條の可能性に就て", (鐵道業務研究資料, 第 26 卷, 4 號)

學 會 記 事

學 會 行 事 記 録

昭和 23 年度通常總會 5 月 29 日丸の内交通協會會議室にて施行, 下記の如く報告協議及び講演があつた。

1. 昭和 22 年度事業報告 (別項参照)
2. 昭和 22 年度會計報告
3. 定款及び規則の一部改正 即ち定款第 27 條「通常常議員會は毎年二月に開かれる」を「通常常議員會は毎年五月に開かれる」と改正, 規則第 15 條第 2 項「定款第 19 條による常議員の選挙は 毎年一月三十一日迄に行ふ」を「定款第 19 條による常議員の選挙は 毎年四月三十日迄に行ふ」と改正。

4. 昭和 23 年度會長、副會長及び理事當選報告 (別項参照)

5. 會長講演
6. 新任會長挨拶 以上である。

中部支部講演見學會

昭和 23 年 6 月 4 日 (講演) 5 日 (見學) に行つた。見學は名古屋港を, 又講演内容は次のとおり。

1. 不完全弾性柱の挫屈について 正員 結城朝恭
2. 科學技術の理念 正員 田中 豊

關西支部研究發表會

昭和 23 年 6 月 29 日大阪大學工學部にて。

1. 圓形隧道の應力分布に就て 正員 伊藤富雄
2. 堰堤コンクリートの人工冷却について 准員 丹羽義雄
3. 鋼の歪硬化による影響について 正員 奥村敏惠
4. 格子構造の計算法について 正員 小西一郎
5. 等分布横抵抗を受ける壓縮材の挫屈 正員 安宅 勝
6. 自動車の走行に適する道路の構造について 正員 星 埜 和
7. 施工機械について 正員 齋藤義治
8. 急斜面土壌浸蝕の實驗的研究 正員 田中 茂
9. 都市社會學による都市計畫の考察 准員 井上 孝
10. 西大阪地盤の沈下に就て 正員 近藤市三郎
11. 岸壁背面の地震時土壓に就て 正員 片岡 謙
正員 永井莊七郎 正員 石原藤次郎 正員 松尾春雄
12. コンクリート鋪裝版に於るコンクリート壓縮強度試験 正員 吉田徳次郎

昭和 22 年度事業概要

本年度に於ても戦災者、復員、引揚者の連絡不十分であつたことは遺憾にたえない。諸物價騰貴の爲所期の事業を遂行し得なかつたが、會誌、論文集の發行の外に、土木ニュースの月刊が實施され久しく中絶されていた會員名簿も昭和 22 年度として刊行することが出来た。この外 35 卷に亘る土木工學叢書及び夏期講習會講演録も刊行準備中である又八月には夏期講習會を又九月より隔月の研究發表會を開設し座談會も數次催した。規則改正、諸會合、會員數など下記のとあり。

1 規則の改正 昭和 23 年 3 月 27 日開催の常議員會で規則の一部を改正し會費は次のとおり増額した。年額正員 300 圓, 准員 270 圓, 學生員 240 圓, 特別員 1 級 3,000 圓以上, 2 級 2,000 圓 又 3 級 1,000 圓とした。

2 諸會合 夏期講習會, 研究發表會 3 回, 通常總會, 理事會 18 回, 常議員會, 支部長會議, 會誌編輯委員會 4 回, 新聞編輯委員會 14 回, 水理委員會 3 回, 土木工學叢書刊行委員會 3 回, 抄録委員會 3 回, 災害調査常置委員會, 土木技術史編輯委員會。

3 會員數 昭和 23 年 3 月 31 日現在で, 名譽員 8 名, 正員 4,761 名, 准員 9,769 名, 學生員 1,926 名, 特別員 139 名, 贊助員 22 名, 計 16,625 名

昭和 23 年度役員

會長 岩澤忠恭 副會長 廣瀬孝六郎及び田中茂美
理事 熊本正晴, 高坂紫朗, 扇田彦一, 種谷實, 友永和夫, 星埜和, 最上武雄, 山内一郎, 末尾秀三及び渡部時也 常議員 有坂誠喜, 石田武雄, 稻積豊二, 猪瀬寧雄, 上野省二, 岡本舜三, 奥村敏惠, 小野木次郎, 小野竹之助, 尾之内由紀夫, 河北正治, 高原芳夫, 國分正胤, 小西則良, 坂本貞雄, 鹽澤弘, 鈴木信孝, 西松三好及び野瀬正儀

設置委員會

(昭和 23 年 5 月現在)

會誌編輯委員會	委員長 星 埜 和
ニュース編輯委員會	委員長 奥田 敏 朝
抄録委員會	委員長 廣瀬孝六郎
水理公式委員會	委員長 安 齋 皎 一
用語委員會	委員長 福 田 武 雄
土木技術史編纂委員會	委員長 河 上 房 義