有限要素法による地下鉄トンネル温熱環境シミュレーション

THERMAL SIMULATION OF SUBWAY TUNNEL
BY FINITE ELEMENT METHOD武田 仁*
Hitoshi TAKEDA

After thermal environments of a subway were surveyed for a year, the author developed a thermal environmental simulation program by the two- and three-dimensional finite element methods.

Affluent data obtained through the survey showed theoretical values were nearly coincident with actual figures.

The simulation found the outlet temperature of the tunnel rose 0.6 degree centigrade when ventilation facilities were stopped throughout the year, while it went up 1.0 degree centigrade when the heating value doubled.

Keywords : unused energy, finite element method, thermal property value, constant earth-temperature layer, simulation, parameter

未利用エネルギー、有限要素法、熱物性値、不易層、シミュレーション、パラメータ

1. はじめに

最近、化石燃料の大量消費による地球温暖化、また、都市の排熱によるヒートアイランド化が著しい。これら環境上の問題を解決する手段として都市排熱などの未利用エネルギーの活用がクローズアップされている。筆者は未利用エネルギーの一つである地下鉄排熱に着目し、東京の代表的なビジネスセンターの地下鉄駅舎、トンネルおよび換気塔における一年間(1992年1月～12月)の長期実測測定結果を文献1)に報告した。それらの結果を踏まえ、今後、地下鉄の新設、あるいは既存の地下鉄で増加するであろう列車運行に伴う発熱量の増加に対してトンネルの温熱環境を精度良く予測することは重要なことである。これまでの地下鉄の実測またはシミュレーションは水野らによる文献2)～9)、文献14)、15)、黒本、前川、高木らによる文献10)～13)、吉田らによる文献16)、19)等が見られる。

今回筆者は熱伝導解析手法として有限要素法(FEM)を適用し、熱物性値を実測値より導き出し、実測値と理論値の検証を行い、換気量および発熱量条件変化による長期間の地下鉄トンネル部の温熱環境シミュレーションを試みた。

2. 対象地下鉄の概要

シミュレーションの対象として望ましい施設は、

- ①測定データがあり、検証可能なこと。
 - ②施設が新しく、今後経年変化の測定が可能であること。
- などがあげられる。筆者の調査施設は東京の地下鉄半蔵門線大手町駅を挟む大手壕換気塔から常盤橋換気塔間(約1km)で行い、実測データは温度、湿度、風速などを15秒間隔で計測し、10分間隔の平

均値データを採取している(計測点は文献1図3参照)。調査当時、稼動して4年程度しか経過しておらず比較的新しい施設である。この路線の換気方式は機械換気による駅部給気、トンネル部排気で、大手町駅舎で外気を取り入れ、駅構内、トンネル内を通過して、駅舎と駅舎の中間部の大手壕換気塔と常盤橋換気塔から強制的に排気している。駅舎、車両冷房期間は4月～11月までの8ヶ月間で、営業時間は午前4:30から翌日午前0:30までである。これらを考慮して、今回解析対象とした部分は、図1に示す渋谷方面行き(B線)トンネルで大手町駅から大手壕換気塔までの区間(単線シールド、476m)である。図2にトンネル断面図を示す。

3. 解析方法

トンネルの熱伝導解析法として、有限要素法(FEM)による数値解析を行う。有限要素法を用いる理由の一つに、差分法では原則として直交格子点を採用せざるを得ないのに対し、トンネル内表面のような曲面にも三角形または四辺形などの任意形状を要素として精度良く適用できることである。ここでは四辺形要素を適用し、2次元モデルには高精度の解が得られる8節点アイソパラメトリック要素を使用し、3次元六面体モデルには2次元モデルを3次元に拡張した20節点アイソパラメトリック要素を使用した。

図3に示すように、トンネル断面に有限要素法を適用し、トンネルを n 個のセルに分割する。入り口空気温度 T_0 は最初のセル C_1 でトンネル壁体表面の熱伝達、トンネル地中内の熱伝導により空気温度 T_1 が算出される。 C_1 の空気温度 T_1 は次のセル C_2 の入り口空気温度として流入し、再び壁体表面の熱伝達、地中内の熱伝導が生じる。

本論文は文献17)～18)を加筆、修正したものである。

* 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science & Technology, Science University of Tokyo, Dr. Eng.

図1 半蔵門線大手町駅周辺断面図

図3 シミュレーション概念図

この過程を n 回繰り返して、 C_n における地中温度および空気温度 T_n を求める。 T_n がトンネル出口温度となる。このように、トンネル空気の流れと直交するトンネルの地中温度分布とトンネル空気温度を算出し、これを流れ方向に繰り返すことで、トンネルの非定常伝熱を解析する。なお、実測調査結果^{文献1)}よりトンネル壁体表面における吸放湿は無視できるほど小さいことが判明しているため、ここでは顕熱挙動のみを取り扱う。

トンネル壁体表面の熱流は、各セルの壁体表面温度は均一とみなし、壁面は対流熱伝達が支配するものとする。

セル番号 i のトンネルの熱収支式より、次の式が得られる。

$$T(i) = T(i-1) - \frac{Q(i)}{C_v \cdot V \cdot S} + \frac{H}{C_v \cdot V \cdot S \cdot N} \quad \text{式(1)}$$

i : 空気の流れに沿ったセル番号

$T(i)$: i 番目セルの空気温度変化 [K]

$Q(i)$: i 番目セルのトンネル壁面への流出熱量 [W]

H : トンネル内全発熱量 [W]

N : トンネル分割数, A : 1セルのトンネル壁面積 [m^2]

C_v : 空気の容積比熱 [$\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$], V : トンネル内風速 [m/s]

S : トンネル断面積 [m^2]

トンネル壁面への流出熱量 ($Q(i)$) は、

$$Q(i) = \alpha_{cv} \sum_j A_j (T(i) - T_s(i)_j) \quad \text{式(2)}$$

である。

$T(i)$: Δt 時間前の空気温度 [K]

$T_s(i)_j$: Δt 時間前のトンネル壁面節点 j の温度 [K]

A_j : 節点 j のトンネル壁要素面積 [m^2] ($A = \sum_j A_j$)

図2 トンネル断面図

図4 熱物性値検証の概念図

表1 土壌の熱物性値

タイプ	土の種類	熱伝導率 W/mK	容積比熱 kJ/m ³ K
1	ローム	1.050	1033.1
2	火山灰	0.721	974.5
3	粘土質(1)	1.850	1504.9
4	粘土質(2)	0.651	896.6
5	粘土質(3)	1.850	896.6

文献21)参照

なお、列車往来により壁面近傍の風速は激しく変化することが文献1で判明しており、ここではそれらを含んだ平均風速をユルゲスの実験式に適用し、対流熱伝達率を算出する。

$$\alpha_{cv} = 1.163(5.3 + 3.6v) \quad (\text{粗面}) \quad (v \leq 5\text{m}) \quad \text{式(3)}$$

α_{cv} : 強制対流熱伝達率 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$], 1.163: 換算係数, v : 平均風速 [m/s]

実測値との比較の場合、換気塔ファン運転時のトンネル内風速 (v) は終電通過後、トンネル内に入り JIS B 8615 の円形管路の測定点に準拠して熱線風速計で測定した平均風速 1.68 m/s (一定値) を用いた。また、対流熱伝達率に適用する風速は列車往来の影響を受けるトンネル壁面近傍で連続測定した風速の平均値を用いた。なお、具体的数値シミュレーションは東京理科大学情報処理センターのワークステーションを利用した。

4. シミュレーションパラメータの検討

シミュレーションプログラムの精度の検討を行う場合、各々のパラメータは相互に関係しあうので、1つのパラメータのみを取り出して決定するのは困難な場合があるが、全体のシミュレーションへの影響を考慮しながら決定したパラメータをフィードバックして逐次決定した。

(1) 熱物性値

トンネル壁面はコンクリートのシールド厚 350mm であり、その周囲はすべて土壌で覆われている。トンネルの解析を行う場合、蓄熱

図5 熱物性値評価指標(年平均値)

が大きな問題となり、それに関係する周囲の土壌の熱物性値(熱伝導率、容積比熱)は大切である。実測調査でトンネルをボーリングし熱電対を埋設した際の土壌の感触では、比較的含水率の高いものと思われた。そこで、可能性のありそうな熱伝導率、容積比熱の組み合わせ5タイプを表1のごとく想定した。1月から12月までの1年分の実測データを図4のように測定空気温度、計算時間間隔ともに10分として入力し計算を行った。壁面～壁体内(1500mm)の5点の理論計算温度と実測値の比較の評価指標として、

理論値と実測値の評価指標

$$= \frac{\text{各深さにおける理論値} - \text{各深さにおける実測値}}{\text{計算回数}}$$

を定義した。その結果を図5に示す。評価指標の最も良かったタイプ5の熱物性値を採用することとした。

(2)トンネル断面のメッシュ

トンネルは図2に示すごとく単線シールドで左右対称とみなせる。トンネル断面の半分の形状を四辺形要素を適用して不易層に至るまで、図6に示す要素数135、節点数470とした。トンネル空気と接する面近傍は可能な限り微細に要素数を分割し、温度変動の少ない不易層に近づくに従い、粗いメッシュとし、地表面の熱授受は考慮に入れなかった。まず、熱挙動を把握するため不易層までの距離を70mとし、2年間の予備計算(実測データ1年分を繰り返し使用)を行った後の3年目の計算結果を検討した。なお、不易層の温度は文献1)の調査を参考に22.1℃とした。図7に奇数月の月末の断面温度分布を示す。これを見ると1年周期では大きな温度変動は表面から10m以内で、20mのところではほとんど変動がない。不易層は20m程度と思われる。今回のシミュレーションでは、不易層までの距離を念のため30mとした。

(3)計算時間間隔

一般に計算時間間隔を短くすれば、精度が上がるが、計算に要する時間は増す。目的に応じて時間間隔を検討する必要がある。実測測定間隔は10分であるが、計算時間間隔を10分および1時間を検討した。計算条件は、先に述べた条件を用い、トンネル長さ方向の分割は10分割とした。1年間の予備計算をおこなった後の2年目の代表的な9月の断面温度分布を図8に示す。トンネル空気温度変化が激しい時期で差が大きくなっているが、最大でも0.15℃以下であり、長期計算の場合は計算時間間隔が1時間でも問題はないと言える。今回のシミュレーションでは10分間隔とした。

(4)トンネル方向の分割数

トンネル内の空気の流れの方向の分割数は、計算時間間隔と同様

図6 トンネル断面のメッシュ

図7 奇数月の月末のトンネル断面温度分布

図8 9月末の断面温度分布(時間間隔10分と1時間)

図9 分割数の違いによるトンネル出口空気温度

に分割数と目的の精度を考慮しなければならない。ここでは、100分割を基準にして5, 10, 20, 30, 50分割を検討した。評価指標として温度誤差評価指標

=対象とする分割数の温度-100分割の温度

を定義し、各時刻における差の平均値を図9に示す。これによると差の大きさが、評価指標で0.04℃以上になるのは、5分割のときの

みで、長期計算では10分割で十分と思われ、この分割数を採用した。

(5) トンネル内発熱量の推定

トンネルの入り口空気温度(プラットホーム端空気温度)には駅舎およびプラットホーム発熱量が含まれていると考えられ、ここではトンネル部のみの発熱量を算出する。発熱量の算出根拠は全て営団地下鉄所有の資料に基づいた(注1)。発熱量は列車走行に伴う発生熱、車両冷房機発生熱および人体発生熱である。冷房は全車両の冷房であり、車両冷房期間は4/15～11/15、車内設定温度は26℃である。プラットホーム部の気温を考慮して、非冷房期(12～3月)、冷房期1(4～6月)稼働率60%、冷房期2(7～9月)稼働率100%、冷房期3(10～11月)稼働率50%に分けた。各時刻における列車運行本数は、平日、休日の列車運行ダイヤ、乗車人員は乗車人員調査資料に基づいた。上記の諸条件をもとに発熱量を算出した。その結果を図10、11に示す。なお、この推定発熱量は、実測とシミュレーションとの比較検討が必要である。

このように(1)は実測値との検証、(2)～(4)は数値計算上の精度の検定、(5)は事業者の資料に基づいて検討を行った。

5. 2次元と3次元シミュレーションモデルの比較

ここまで述べてきた計算結果は2次元 FEM モデルのアルゴリズムを利用した。しかし、現実のトンネルは幾何学的に3次元構造であるので、熱的に2次元、3次元の比較検討が必要である。図3のごとく、2次元モデルではトンネルの長さ方向のセル間は断熱境界であるが、3次元モデルではセル間で熱流が生じることになる。3次元モデルは図12のごとく断熱面の影響を少なくするためトンネルの両端面に最端部断熱の1分割面(1セル分)各々47.6m追加し、トンネル長さを571.2mとした。その結果、要素数1620、節点数8126と大メモリが必要となった。1例として、図13に7月31日24時の2次元と3次元の出口断面地中温度分布の計算結果の比較を示す。2次元と3次元の温度が1年を通じて差が大きな時間帯である。地中温度は表面近傍で2次元の方が高く、1.5m以上の深さでは、逆に3次元の方が高くなる。これは3次元では土壌の軸方向に熱流が生じ、温度が均一化されたためと思われる。しかし、重要な出口空気温度は0.06℃差程度である。同じ程度の結果を得るため、2次元モデルから3次元モデルに移行すると入力データが複雑になり計算時間も非常に長くなる。

6. 実測値とシミュレーション値の比較

実測値とシミュレーション結果の比較検討を行った。なお、トンネル内発熱量は4. (5)のトンネル内発熱量の推定を用い、推定値が妥当か否かの検討も行った。

(1) 2次元、3次元モデルと実測値の比較

実測値のデータ取り込み間隔10分に合わせ、計算時間間隔を10分とした。実測値および2次元、3次元シミュレーション結果の比較検討を行ない、その結果を図14に示す。

1) 出口空気温度

2次元、3次元とも挙動は実測値と良く合致している。トンネル内空気温度の算出は正確に行っていると思われる。詳細に見ると2次元の方が3次元に比べ営業時間で0.3～0.4℃高く、非営業時間ではほぼ同じ値になっている。営業時間帯の実測値との比較では3次元

図10 各季節の時刻別トンネル内発熱量(平日)

図11 各季節の時刻別トンネル内発熱量(休日)

図12 3次元のメッシュ

図13 2次元と3次元断面地中温度分布

は約0.5℃程度低い値を取っているのに対し、2次元の方が実測値に非常に近い値となっている。非営業時間帯においては実測値に対し、2次元、3次元とも0.7℃程度低い。これはシミュレーションモデルが強制対流を対象とした壁面近傍平均風速に基づき熱伝達率を計算しているのに対し、実態は列車が運行していない時壁面では自然対流が支配的になるためと考えられる。

2) トンネル表面温度

2次元、3次元とも温度挙動は実測値とよく合っている。営業時間帯においては、2次元の方は0.2℃程度実測値より低いが、発熱量が多い平日ではほとんど誤差がない。3次元の方は実測値に比べ約1℃低くなった。表面温度に関しては、2次元モデルの方が実測値と良く合う結果となった。

(°C)

図 14 実測値と2次元、3次元モデル計算値の比較(8月、換気塔ファン連続運転時)

(°C)

図 15 実測値と2次元モデル計算値の比較(9月、換気塔ファン停止-運転時)

図 16 大手環換気塔運転、停止時のトンネル壁面近傍平均風速
(測定点は文献 1 図 3 参照)

表2 各タイプの設定条件

タイプ	トンネル内風速	トンネル内 発熱量	ホーム部の条件
1	標準 (換気塔運転時 1.68m/s, 換気塔停止時 壁面近傍平均風速)	標準 (図 10, 11)	実測値
2	換気塔運転時の風速 (1.68m/s)	標準	実測値
3	換気塔停止時の風速 (壁面近傍風速)	標準	実測値
4	標準	標準×1.1	実測値
5	標準	標準×2.0	実測値
6	標準	標準	実測値 +1.6℃ (ラッシュ時 上昇温度×2.0)

3) 地中温度

トンネル表面から 50mm の深さにおいて、非営業時間において実測値とやや温度差が大きくなる傾向があるが、営業時間では 2 次元の方がよくあっており、3 次元の方は 0.3℃程度低くなる。ただ、発熱量の多い平日においては、2 次元は実測値より温度が高く、3 次元は実測値に近づく傾向があり、実測値が 2 次元と 3 次元の間になる。500mm の深さでは、1 日のトンネル空気温度変化に対して大きな変化が見られなくなる。2 次元の方がやや高く 3 次元の方がやや低く実測値を挟み込む形となっている。1000mm の深さにおいては、2 次元と 3 次元の計算結果はほぼ同じである。実測値と比較すると計算値が約 0.2℃程度高くなっている。1200mm の深さでは実測値と計算値がよく合うが、3 次元の方がやや温度が高くなる傾向がある。

結論として、3 次元モデルは 2 次元モデルに比べ、インプットデータの作成、計算時間等費やす労力に比べ、精度などの成果がそれほどあがらないことが判明した。物性値を 2 次元モデルに合うように決定したせいもあり、実測値との比較ではむしろ 2 次元モデルの方がよく合う場合もある。シミュレーションでは 2 次元モデルで十分と思われる。また、トンネル内発熱量の推定値も、シミュレーションに利用できることが判明した。

(2) 換気塔ファン停止時の 2 次元モデルと実測値との比較

実測値とシミュレーション結果の換気塔ファン停止時の出口空気温度比較を図 15 に示す。

一時換気塔を停止した場合、実測空気温度が上昇し、シミュレーションでは追従できない。換気塔の運転を開始すると、実測値と計算値は比較的一致する。換気塔停止時のシミュレーションは困難であるが、風速が微風速なので、熱量的な誤差は小さいと思われる。

全体的に換気塔を運転しているときの空気温度、表面温度などのシミュレーション結果の精度は高い。換気塔を停止している非営業

図 17 換気量の違いによる年平均出口空気温度

図 18 換気量の違いによる月平均出口地中温度 (2 月)

図 19 発熱量の違いによる年平均出口空気温度

図 20 発熱量の違いによる月平均出口地中温度 (2 月)

時にやや誤差を生じるものの、このモデルを長期シミュレーションモデルとして問題ないと言える。

7. 長期予測シミュレーション

換気量および発熱条件を表 2 に示す 6 タイプを設定し、各タイプとも 10 年間のシミュレーションを行った。トンネル壁面近傍の平均風速を図 16 に示す。この実測風速を基に対流熱伝達率を算出した。

図 21 各設定による月平均出口空気温度

(1) 換気量が変化した場合

タイプ 1-----標準。対流熱伝達率は、実測期間中の運転時および停止時の平均風速に基づく。

タイプ 2-----常時運転。対流熱伝達率は、終日換気塔が稼動している日の平均風速に基づく。

タイプ 3-----運転停止。対流熱伝達率は、終日換気塔が停止している日の平均風速に基づく。

シミュレーション結果を図 17、18 に示す。出口空気温度に関してはタイプ 1(標準)に比べ、タイプ 2 は、0.1℃下がる程度である。タイプ 1 に比べ、タイプ 3 は 0.5℃程度上昇する。換気の必要性が認められる。出口地中温度分布は、トンネル表面ではタイプ 2 はタイプ 1 に比べ 0.1℃低く、タイプ 3 は 0.5℃高い。この差は土中深くなるに従い小さくなる。

(2) トンネル内発熱量が増加した場合

トンネル内発熱量を 2 種類想定した。

タイプ 4-----現在の発熱量の若干増加(現在の発熱量を各時刻 1.1 倍する。トンネル内風速、対流熱伝達率はタイプ 1 と同様とする。)

タイプ 5-----現在の発熱量の極端増加(現在の発熱量を各時刻 2.0 倍する。トンネル内風速、対流熱伝達率はタイプ 1 と同様とする。)

シミュレーション結果を図 19、20 に示す。出口空気温度は、タイプ 1 に比べタイプ 4 は 0.1℃高く、タイプ 5 は 1.0℃程度極端に高くなる。出口地中温度分布はタイプ 1 と比較して、タイプ 4 はほとんど変わらなく、タイプ 5 は表面付近で約 1.0℃高い。深くなるに従い、その差は小さくなる。

(3) トンネル入口空気温度が上昇した場合

トンネル入口空気温度を 1 種類想定した。

タイプ 6-----入口空気温度上昇(平日の AM7:00~10:00、PM5:00~9:00 にトンネル入口温度をラッシュ時に上昇する温度の 2 倍を想定し実測値+1.6℃とする。トンネル内風速、対流熱伝達率はタイプ 1 と同様とする。)

タイプ 6 の想定した 1.6℃上昇を熱量換算すると約 81kW で、トンネル内発熱量の平日ピークの 8 時と同等となり、その発熱量を上乘せしていることになり、トンネル温度に与える影響は大きく出た。計算結果を図 19、20 に示す。年平均出口空気温度はタイプ 5 近くまで上昇する。出口地中温度は、タイプ 1 に比べ表面付近で 2℃近く高くなるが、徐々に差が小さくなり、7m 以上の深さでは、タイプ 5 と同様の温度分布になる。

まとめとして各月平均出口空気温度の比較を図 21 に示す。タイプ 5 はタイプ 1 と比べると 1 年を通して平均 1℃高くなる。タイプ 2、3、

4 についてはタイプ 1 と同じような変動をする。タイプ 6 は発熱量の多い時期(7、8、9 月)はタイプ 1 と変わらないが、非冷房期では空気温度を相当上昇させる。

8. 結論

結論として以下の事が言える。

- ①地下鉄トンネルの非定常解析に有限要素法を用いた。今回採用した 2 次元四辺形 8 節点および 3 次元六面体 20 節点アイソパラメトリック要素は辺の中間にある節点を通る二次曲線で近似するのでトンネルのように曲線を含む問題には最適である。
- ②トンネル断面の有限要素数は 135、計算時間間隔 10 分、トンネル方向分割数 10 分割で十分計算精度が確保できる。
- ③実測地点のトンネル周囲の土壌の熱物性値は熱伝導率 1.85 W/mK、容積比熱 897 kJ/m³K 程度と思われる。
- ④2 次元と 3 次元モデルの比較を行った。空気温度は最大で 0.1℃差が生じる程度であった。地中温度に関しては、表面付近で 2 次元の方がやや高く、深いところで 3 次元の方がやや高くなった。今回のシミュレーションは、出口空気温度を重点的に取り扱っているので、2 次元モデルで十分精度が出ることが確認できた。今後の課題として、3 次元モデルの計算時間の短縮である。計算機能力向上は言うまでもないが、今回高精度の 20 節点アイソパラメトリック要素を用いたが、精度にあわせた要素の使い分けの工夫が必要であろう。
- ⑤シミュレーションモデルによる空気温度およびトンネル表面付近の地中温度の計算結果は実測値とよく一致した。地中温度では、計算結果の方がやや高くなり 500mm で 0.5℃、1000mm では 1℃近く差が生じた。空気温度に関しては強制対流を前提として解析を行ったため換気塔が停止している非営業時間に差が生じた。
- ⑥長期シミュレーションより現状に比べ以下の結果を得た。
 - ・換気塔が 1 年中停止すると、年平均出口空気温度は 0.6℃程度上昇する。
 - ・トンネル内発熱量が 1 年を通して 2 倍になると、年平均出口空気温度は 1.0℃程度上昇する。
 - ・ラッシュ時のみプラットホーム部(入口)空気温度が上昇し、他の時間帯は現状維持とすると、出口温度は非冷房期には上昇するが、夏期には現状と比較してほとんど変わらない。

9. おわりに

1 年間の実測結果を踏まえ、有限要素法を用いたシミュレーションプログラムを作成、検証を行った。また、そのプログラムを用いて、精度の高い予測シミュレーションも行った。今後はさらにいくつかのパラメータを設定することにより、多くの事象を想定したシミュレーションが可能になると思われる。

謝辞

地下鉄実測を計画立案した丸の内熱供給(株)、実測を許可した帝都高速度交通営団の各位に感謝致します。さらに、有限要素法に関して東京理科大学菊池正紀教授にご指導を賜った。またコンピュータシミュレーションの計算では村田知毅君、柳澤克宏君(当時東京理科大学大学院生)にご無理をかけました。記して謝意を表します。

注1 列車走行発生熱及び冷房機発生熱の推定(営団地下鉄所有資料)
車両条件は1編成10両、大手町駅と換気塔間の滞在時間は59秒とした。

(1) 列車走行発生熱

a) 制動発生熱計算式

$$q_A = 1.163 \times \left\{ \frac{W + w \cdot \eta_T}{427} \times \frac{V_A^2}{2 \cdot g} + \frac{W}{427} \times \Delta H \right\} \times (1 - \alpha) \times N$$

q_A : 制動区間での発生熱[W]

W : 列車重量(1編成当たり) = $w + n \times 55 \text{ kg}$ / 人 [kg]

w : 車両自重(1編成当たり) = 285 400 [kg]

V_A : 最終制動地点での列車速度 = 9.7 [m/s] (運転曲線による)

n : 乗車人員(1編成当たり) [人] (乗車人員調査資料による)

g : 重力加速度 = 9.8 [m/s²], ΔH : 標高差 = $H_A - H_S$ = 0.65 [m]

H_A : 最終制動地点での標高[m], H_S : 停車点の標高[m]

α : 実回生電力比 ラッシュ時(0.4), 閑散時(0.3)

N : 到着列車本数[本/h] (列車運行ダイヤによる)

η_T : 回転慣性係数 = 0.08

b) 加速発生熱計算式

$$q_B = q_A \times 0.25, \quad q_B : \text{加速発熱量[W]}$$

c) 補機発生熱計算式

$$q_C = (q_A + q_B) \times 0.05, \quad q_C : \text{補機発熱量[W]}$$

(2) 車両冷房機発生熱(1編成あたり)

$$q_D = M \times \beta$$

q_D : 冷房機発生熱[W], M : 冷房機モータ入力 = 200 000 [W],

β : 稼働率[-]

集 PP. 733~736, 1991. 10

13) 小野弘臣、岩井清、他4名: 地下鉄トンネルの排熱利用に関する研究(その4: 排熱利用効果の検討)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 1185~1188, 1992. 10

14) 下田吉之、水野稔: 地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究 第1報-夏期の室温を制約条件とする限界発熱量の基本的特性-, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 43, PP. 49~58, 1990. 6

15) 下田吉之、花井裕、水野稔: 地下空間における地盤の吸熱効果に関する研究 第2報-地下鉄構内の気温形成に及ぼす機械換気と地盤吸放熱の影響に関する検討-, 空気調和・衛生工学会論文集 No. 53, PP. 1~12, 1993. 10

16) 吉田治典: 地下鉄内の温度、熱負荷予測のためのシミュレーション、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 317~320, 1980. 10

17) 武田仁、矢崎淳史: 地下鉄の排熱に関する基礎的調査 その3

有限要素法によるトンネル内熱収支シミュレーション、日本建築学会学術講演梗概集 PP. 479~480, 1993. 9

18) 武田仁、矢崎淳史: 地下鉄の排熱に関する調査研究(その3) -トンネル部の温熱環境シミュレーション-, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 337~340, 1994. 10

19) 吉田治典、伊丹清、寺井俊夫、他3名: 地下鉄道における冬期熱回収と夏期温度予測、空気調和・衛生工学会論文集、No. 61, PP. 13~23, 1996. 4

20) O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor: The Finite Element Method Forth Edition, McGraw-Hill Book Co. 1989

21) 日本熱物性学会編: 熱物性ハンドブック PP. 488~489, 養賢堂, 1990

(1996年12月10日原稿受理, 1997年5月26日採用決定)

参考文献

- 1) 武田仁: 地下鉄の排熱利用のための温熱環境実測調査、日本建築学会計画系論文集 No. 474, PP. 7~15, 1995. 8
- 2) 水野稔、下田吉之、花井裕、内藤和夫: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(1) -換気量、ホーム部気温の実測-, 日本建築学会学術講演梗概集 PP. 221~222, 1988. 10
- 3) 下田吉之、花井裕、水野稔、内藤和夫: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(2) -シミュレーション結果と実測結果の比較-, 日本建築学会学術講演梗概集 PP. 223~224, 1988. 10
- 4) 花井裕、下田吉之、水野稔、内藤和夫: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(3) -パラメータ・スタディー-, 日本建築学会学術講演梗概集 PP. 225~226, 1988. 10
- 5) 田中誠二、花井裕、下田吉之、水野稔、内藤和夫: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(4) -交通量の多い線区への適用-, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会講演論文集 PP. 151~154, 1989. 3
- 6) 花井裕、下田吉之、水野稔: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(5) -列車風の予測と実測結果の比較-, 日本建築学会近畿支部研究報告集 PP. 133~136, 1989. 3
- 7) 花井裕、下田吉之、水野稔: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(6) -列車風の予測と実測結果の比較(続報)-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 PP. 525~526, 1989. 10
- 8) 下田吉之、花井裕、水野稔: 地下鉄を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(7) -機械換気運転の影響に関する実測値とシミュレーション-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 PP. 1403~1404, 1990. 10
- 9) 花井裕、下田吉之、水野稔: 地下鉄構内の高温化対策に関する研究 -プラットフォームスクリーンの熱的有効性-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 PP. 1401~1402, 1990. 10
- 10) 黒本英智、前川哲也、他3名: 地下鉄トンネルの排熱利用に関する研究(その1: 実測)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 137~140, 1990. 10
- 11) 高木賢二、太田勝也、他3名: 地下鉄トンネルの排熱利用に関する研究(その2: 予測手法及び排熱回収量)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 141~144, 1990. 10
- 12) 高木賢二、太田勝也、他3名: 地下鉄トンネルの排熱利用に関する研究(その3: 駅部を含めた予測手法)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 PP. 733~736, 1991. 10