

技 術 資 料

[熱量計算]



■ 1 所要熱量計算

ロードヒーティングは、舗装体内部の表面近くに発熱体ユニットを埋設し、電熱によって路面から雪氷障害を取り除く設備です。

ロードヒーティングの設計要素は、設置場所の気象条件、舗装構造、交通条件等ですが、所要熱量は、設備に期待する効果、その経済性等も考慮して決定します。

[表 1・標準設計発熱量]

地 域	気象条件		設計発熱量	
	外気温度	降雪量	一般歩道	車 道
道東・道北地方	-15℃	3.0cm/h	300～350w/m ²	300～400w/m ²
道央地方・東北の山間地	-10℃	2.5cm/h	250～300w/m ²	250～300w/m ²
道南地方・東北	-6℃	2.0cm/h	200～250w/m ²	200～250w/m ²
北陸・関東以南	-2℃	1.7cm/h	150～200w/m ²	180～200w/m ²

※ 橋梁や吹きさらしの多い設置場所では 50w/m²前後加算します。

※ 上記設計発熱量は弊社の実績値です。

①所要発熱量

ロードヒーティングの所要発熱量は、W. P. C h a p m a nによる次式を用います。

$$q_o = \frac{1}{\eta} \{ q_s + q_m + A_r (q_e + q_h) \} \quad (a)$$

q_o : 所要発熱量 [Kcal/m²・h]

q_s : 顕熱量 (雪を 0℃まで高める為の熱量) [Kcal/m²・h]

q_m : 融解潜熱 (積もった雪を融かす為の熱量) [Kcal/m²・h]

q_e : 気化熱 (水蒸気の蒸発潜熱) [Kcal/m²・h]

q_h : 対流および輻射による電熱量 [Kcal/m²・h]

A_r : 全面積に対する積雪のない部分の面積比

η : 熱効率

大雪が降り続けているとき、全ての雪をただちに融解し、路面の雪を無い状態に保つことは不経済なので、設計最大降雪量の降雪が発生したときは、路面全体がうすく雪でおおわれる状態まで許容出来るものとします。

このとき必要な熱量を、

$$q_1 : \text{融雪熱量 (A}_r = 0)$$

また、降雪が無いとき、湿った路面が凍結するのを防止する必要がある、この場合路面を 0℃以上の温度に保つ必要があります。

このとき必要な熱量を、

$$q_2 : \text{凍結防止熱量 (A}_r = 1)$$

一般にロードヒーティングの設計ではそれぞれ計算を行い、いずれか高い方を設計発熱量として採用します。

②融雪熱量

(a) 式において、 $A_r = 0$ とすると融雪熱量 q_1 は、

$$q_1 = \frac{q_s + q_m}{\eta} \quad (b)$$

$$q_s = \gamma \cdot c \cdot s (t_m - t_o) \quad (c)$$

$$q_m = \gamma \cdot \delta \cdot s \quad (d)$$

γ	: 雪の密度	[kg/m ³]
c	: 雪の比熱	[kcal/kg・°C]
δ	: 氷の融解熱	[kcal/kg]
s	: 降雪量 (設計最大降雪量)	[m/h]
t_m	: 路面温度 (融雪温度)	[°C]
t_o	: 外気温度 (降雪温度)	[°C]

一般的雪質の場合、

γ	: 80	[kg/m ³]
c	: 0.5	[kcal/kg・°C]
δ	: 80	[kcal/kg]
t_m	: 1	[°C]

外気温の高い地域では高めに、低い地域では低めに、又期待する効果レベルによって 0～3°C に設定します。

よって、(b) 式は、(c)・(d) 式より、

$$q_1 = \frac{\gamma \cdot c \cdot s (t_m - t_o) + \gamma \cdot \delta \cdot s}{\eta} \quad (e)$$

熱効率 η は、路面への有効な熱流と下方向への損失熱量との割合などから決まる値ですが、一般には 0.7～0.9 を用います。

③凍結防止熱量

(a) 式において、降雪は無いものと考えるので、

$$q_s = q_m = 0$$

$$A_r = 1$$

また、0°C 付近では蒸発量も無視出来る程度に少ないため

$$q_e = 0$$

(a) 式より、凍結防止熱量 q_2 は、

$$q_2 = \frac{q_h}{\eta} \quad (f)$$

$$q_h = \alpha_t (t_m - t_o) \quad (g)$$

$$\alpha_t = \alpha_c + \alpha_r \quad (h)$$

$$\alpha_c = 1.307 \sqrt[3]{(t_m - t_o)} \quad (\text{無風の時}) \quad (i)$$

$$= 5.0 + 3.4v \quad (\text{風速 } v \leq 5\text{m/sec の時}) \quad (j)$$

$$= 6.14v^{0.78} \quad (\text{風速 } v > 5\text{m/sec の時}) \quad (k)$$

$$\alpha_r = \frac{4.65}{t_m - t_o} \left\{ \left[\frac{273 + t_m}{100} \right]^4 - \left[\frac{273 + t_o}{100} \right]^4 \right\} \quad (l)$$

α_t : 対流と輻射による表面熱伝達率 [kcal/m²・h・°C]

α_c : 対流による表面熱伝達率 [kcal/m²・h・°C]

α_r : 輻射による表面熱伝達率 [kcal/m²・h・°C]

t_m : 路面温度 [°C]

t_o : 外気温度 [°C]

よって、(f) 式は、(c)・(d) 式より、

$$q_2 = \frac{(\alpha_c + \alpha_r)(t_m - t_o)}{\eta} \quad (m)$$

熱効率 η は、融雪熱量の計算と同様に、一般に 0.7~0.9 を用います。

④設計発熱量

前項の「融雪熱量」と「凍結防止熱量」をそれぞれ算出し、いずれか大きい方をロードヒーティングの設計発熱量として採用します。

熱量の単位を [w/m²] に換算すると、

$$q_o = \frac{q_1 \text{ or } q_2}{0.86} \quad [\text{w/m}^2] \quad (n)$$

⑤熱効率について

一般に、地中温度は地下 6 m 程度でほぼ一定の温度であることが知られており、厚さ 6 m の大地は非常に大きな熱抵抗を持ちますので、土工上では下方向への熱損失は無視し得ると考えられています。

また、下方向断熱材を敷設する場合は熱損失は無視し得ると考えます。

所要発熱量の計算の中で熱効率を採用することは、過渡期の下方向への熱損失に余裕を持つこと、また、通電開始時の立ち上がり時間を考慮しているためです。

なお、橋梁においては下方向への損失熱量が大きいため、コンクリート床板の場合で 0.6~0.7 程度見込みます。また、鋼床板の場合、0.5 以下とする場合もあるので注意が必要です。

■ 2 路面温度分布

ロードヒーティングの効果が継続している場合の路面温度分布を考えます。

$$t_c = q_o R_{up} + t_o \quad (o)$$

$$t_m = t_c - q_o R_{up} \quad (p)$$

$$R_{up} = \frac{1}{\alpha} + \frac{d_{up}}{\lambda_{up}} \quad (q)$$

t_c	: 発熱体埋設面の舗装体温度	[°C]
t_o	: 設計外気温度	[°C]
t_m	: 路面温度	[°C]
q_o	: 設計発熱量	[w/m ²]
R_{up}	: 発熱体埋設面から上方の熱抵抗	[(m ² ・°C) / w]
α	: 路面の表面熱伝達率	[w / (m ² ・°C)]
	凍結防止熱量の計算から引用 ($\alpha_t / 0.86$)	
d_{up}	: 発熱体埋設面から上方の舗装体厚み	[m]
λ_{up}	: 舗装体の熱伝導率	[w / (m ² ・°C)]

■ 3 発熱体の埋設間隔

発熱体の埋設間隔は発熱量、埋設深さ等の諸条件により異なり、より効率的な融雪のために路面温度が出来るだけ均一となるように設定します。

ユニカーボン発熱体は一般電熱線と比べて断面積、単位長さあたりの発熱量が大きいいため、その埋設間隔も一般電熱線より大きめに設計します。

一般電熱線 : 50~100 [mm]

ユニカーボン発熱体 : 80~125 [mm]