

V-30

多層構造アスファルト混合物の内部温度分布と熱伝導解析

北海道電力(株) ○正会員 神藤 謙一
 北海道電力(株) 中井 雅司
 (財)電力中央研究所 正会員 西内 達雄

1. まえがき

北海道電力(以下北電)は、長期的な電力の安定供給と供給コストの低減に向け、原子力の中核とし火力、水力等によるバランスのとれた電源の多様化を推進しており、その一環として虻田郡京極町に純揚水発電所の建設を計画している。本計画は、京極町の北部に位置する台地に掘り込み式の上部調整池、京極町近傍を流下し日本海に注ぐ尻別川水系の支流ペーペナイ川上流部に下部ダム(下部調整池)を構築し、この間の落差約370mを利用して、最大出力60万kWの北電初の純揚水発電所を建設するものであり、上部調整池は、内側全面をアスファルト混合物で覆う遮水壁(以下、アスファルト全面遮水壁という)を計画している。

今回の報告は冬季の気象条件を考慮してアスファルト全面遮水壁の多層構造の設計温度を設定することを目的として、多層構造の供試体を作成しその温度分布測定と熱伝導解析により、各層の熱物性値を算定するとともに、実際の気象条件を模擬した熱伝導解析によるシミュレーションを実施し、各層の設計温度を検討したものである。

2. 検討の概要

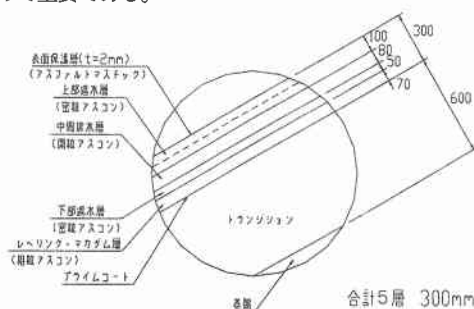
土工用としてアスファルト混合物を使用するために、アスファルト混合物がもっている特徴¹⁾を以下に示す。

- ・アスファルトバインダー、アスファルト混合物は温度とひずみ速度に依存する粘弾性材料である。
- ・高温環境下では粘性的要素が卓越し、変形係数が小さくなるため、斜面に施工する遮水層表面のダレ(塑性流動)が問題となる。
- ・低温環境下では粘性的低下で弾性的要素が卓越し、変形係数が大きくなり脆性破壊を起こすため、アスファルト混合物の構造設計には十分な配慮が必要である。
- ・低温環境下では、設計条件として最低温度の設定が極めて重要である。

上記の特徴を踏まえ、アスファルト全面遮水壁を採用する場合、低温時のアスファルト混合物の物性値の把握が必要であり、設計最低温度をどのように設定するかが重要な課題である。既往の文献などでは、多層構造であるアスファルト遮水層の内部温度分布の計測事例はあるが、現場の実測値が中心であり、実測値と熱伝導解析の比較検討などが行われた事例は少ない。

今回は、①室内試験で内部温度の分布を測定し、②熱伝導解析により、多層構造アスファルト混合物の各層の温度変化シミュレーションを実施することで、上部調整池アスファルト全面遮水壁の設計最低温度を設定することとした。

想定したアスファルト遮水壁の構造を図-1に示す。



アスファルト量 密粒度層: 8.2%
 開粒度層: 3.7%
 粗粒度層: 5.0%

図-1 想定したアスファルト遮水壁の構造

Thermal Analysis of Multi-Layered System of Asphalt Mixture

by Kenichi KANDO, Masashi NAKAI, Tatuo, NISHIUTI

3. 上部調整池計画地点の最低外気温の算定

上部調整池計画地点の外気温の測定データは、至近3ヶ年しか実測データがないため、計画地点の設計最低外気温は以下の手順で算定した。

- ① 上部調整池地点 3 ヶ年 (1996. 7. 10～1999. 3. 31) データと同時刻の近傍気象観測所の喜茂別測候所の外気温測定データから、0℃以下のデータを抽出し、回帰直線式 ($Y=0.6247X-4.0545$) を導いた。なお、データ数が500で相関係数は0.8204であった。
- ② 上部調整池の測定開始以前の12年間については、喜茂別測候所の実測データから上記回帰式を用いることで、外気温データを補完した。
- ③ 上部調整池の最低外気温は、上記の方法で得られた15年分データから確率計算により算定した。算定結果は表一1に示すとおり20年・50年および100年確率で、大きな差異はなく-2.5℃程度となった。

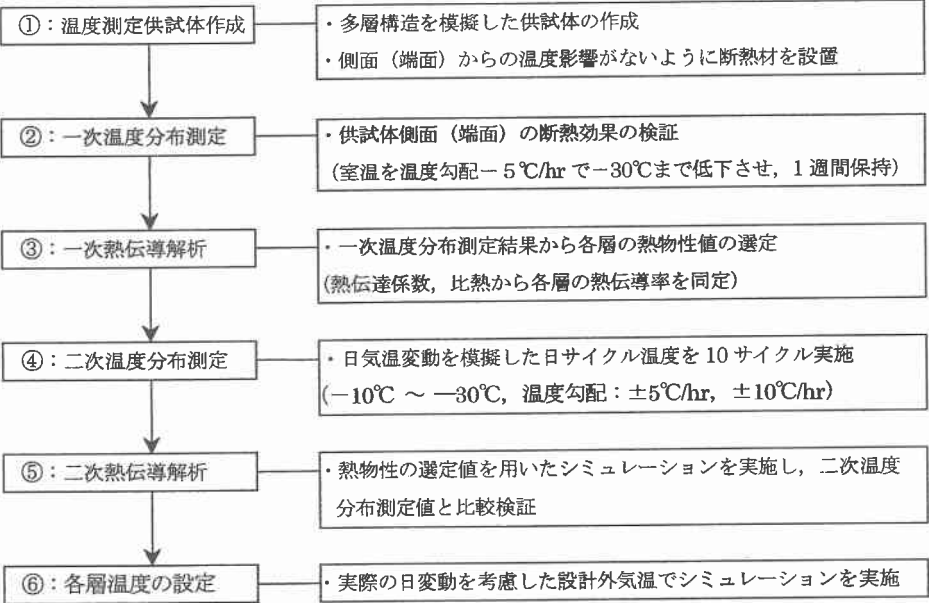
表一1 最低外気温算定結果

確率年	最低外気温
20年	-23.7℃
50年	-24.7℃
100年	-25.3℃

4. 多層構造アスファルト混合物の内部温度の検討

(1) 検討手順

アスファルト遮水壁を構成する各層の温度条件を設定するために、多層構造アスファルト混合物の温度分布測定と熱伝導解析を実施した。多層構造の内部温度の検討は、図一2に示すとおりであり以下にその内容を記載する。



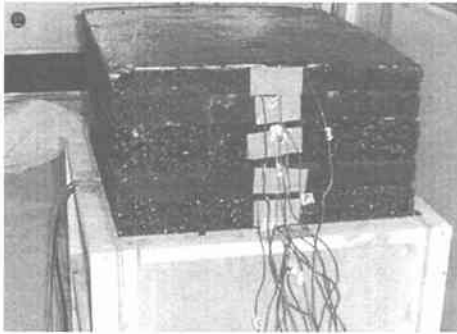
図一2 検討フロー

(2) 温度測定試験の概要

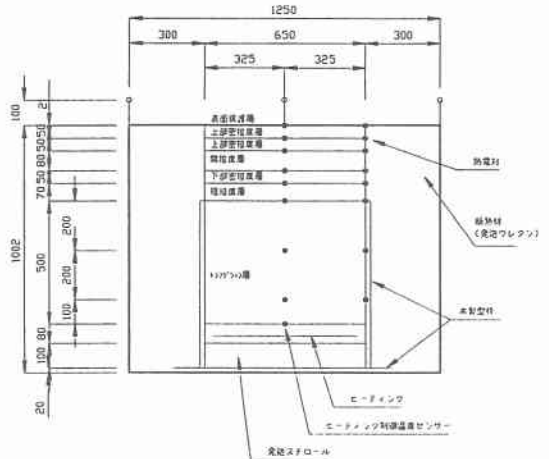
温度測定試験は、図一3および写真一1，2に示すとおり図一1想定したアスファルト遮水壁の構造を忠実に再現して実施した。また、供試体のトランジションの下端には、基盤の地熱の保温効果を考慮し、ヒーターを用いて境界面を0℃に保持するとともに、熱伝導が各層深さ方向に1次的に作用させる必要があることから、供試体周辺を発泡ウレタンで断熱し、外部との熱交換がない構造とした。

また、温度分布測定を実施した恒温恒湿室は、写真一3に示すとおりであり、室内寸法は、幅(W)=4.07m、

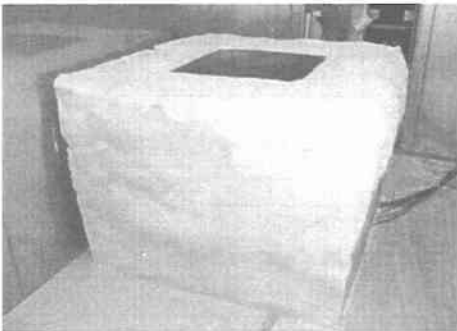
温度制御に対しては、温度測定供試体表面から 10cm の高さで発泡ウレタンの外枠 4 辺で室内温度を測定したが、温度差は $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 以内であった。



写真—1 温度測定用ゲージ貼付状況
(アスファルト混合物の端面)



図一3 供試体の構造



写真—2 発泡ウレタンで断熱した供試体



写真-3 恒温恒湿室の全景

(3) 解析概要

解析は、非定常熱伝導解析手法を用いて、温度分布測定結果の数値シミュレーションを行い、前記のとおりアスファルト混合物の熱伝導率を算定した。数値シミュレーションの解析コードは、(財)電力中央研究所が開発し、他地点での使用実績がある三次元有限要素解析コード[DKN-TMP]を用い、室内温度と各層供試体との熱収支バランスを評価し、熱伝導率を求めた。

解析条件は一次元モデルと仮定し、4 節点アイソパラメトリック平面ひずみ要素を用い、要素の側面および最深部の底面は断熱境界とした。また、アスファルト混合物の熱伝達係数、比熱については、既往の文献などを参考に以下のとおり仮定し、熱伝導率を同定した。なお、各層の空隙率は、密粒層で約 2%、粗粒層で約 7%、開粒層で約 15%程度である。

- ① 熱伝達係数は、コンクリートと比重が類似しているため、コンクリートの熱伝達係数を参考とした。コンクリートの熱伝達率は、無風状態で $8 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 、弱風状態で $10 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 、強風状態（層流）で $15 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 、強風状態（乱流） $25 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}^{2)}$ 、静止している空気の状態 で $1 \sim 20 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 、流れている空気の状態 で $10 \sim 250 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}^{3)}$ とされている。

② 熱伝導率は、舗装道路での熱伝導率の現場測定値³⁾やアスファルト単体の熱伝導率の値（コンクリートの 1/10 程度）^{4),5)}から、コンクリートの熱伝導率の 0.5～1.0 倍とし、各層の値は、空隙率の大きい層ほど熱伝導率を小さく設定した。

③ 比熱は、下記の計算式⁶⁾により設定した。

$$C = (0.388 + 0.00081 t) / d^{0.5}$$

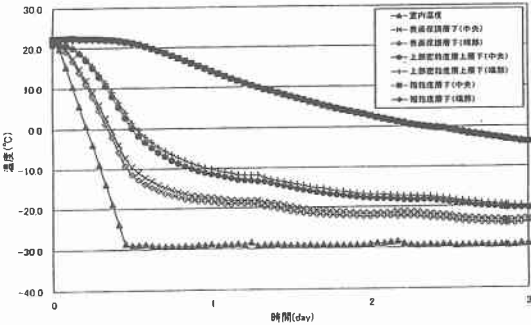
ここに、C：比熱 (cal/g℃)

d：15℃における比重

t：温度 (℃)

（４）一次温度分布測定および一次熱伝導解析結果

一次温度分布測定では、供試体中心部分と端部について、深部方向の温度分布を比較することで、発泡ウレタンによる断熱効果の検証を実施した。測定結果は、図－４に示すとおり多層構造の中心部と端部の温度差が1～2℃程度であったため、発泡ウレタンによる断熱効果は十分であると判断される。また、上記測定条件での一次熱伝導解析による熱物性値の算定結果を表－２に示す。



図－４ 中心部と端部の温度比較

表－２ 一次解析による熱物性値の算定

各層の名称	仮 定 値		算 定 値
	熱伝達係数 (kcal/m ² hr℃)	比 熱 (cal/g℃)	熱伝導率 (kcal/mhr℃)
表面保護層	48	0.35	0.07
密粒度層	—	0.40	2.00
開粒度層	—	0.45	1.50
粗粒度層	—	0.40	1.75
トランジション層	—	0.45	1.50

（５）二次温度分布測定および二次熱伝導解析結果

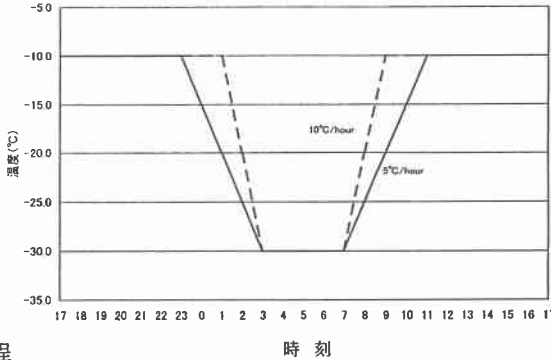
　　a. 二次温度分布測定方法

設定した外気温の日変動パターンは、上部調整池地点の実測結果をもとに、図－５に示すとおり日最高温度を-10℃、日最低温度を-30℃、温度勾配を±5℃/hr および±10℃/hr とした。また、図－５の日変動パターンを連続 10 日間（10 サイクル）実施したが、測定結果から 5 サイクル以降では各層の温度はほとんど変動しなかった。

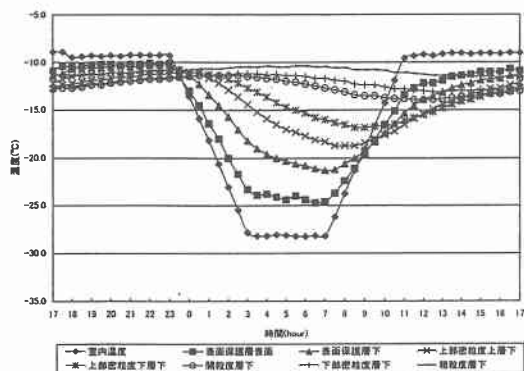
　　b. 測定結果と解析結果

温度勾配を変えた 2 ケースの測定結果は、温度勾配の差は顕著に現れなかったことから、熱伝導解析のシミュレーションについては、日最高温度を-10℃、日最低温度を-30℃、温度勾配を-5℃/hr で実施した。測定値とシミュレーションによる解析値の検証は、累積温度低下がない 5 サイクル目で検証した。図－６および図－７に測定結果と解析結果を示す。

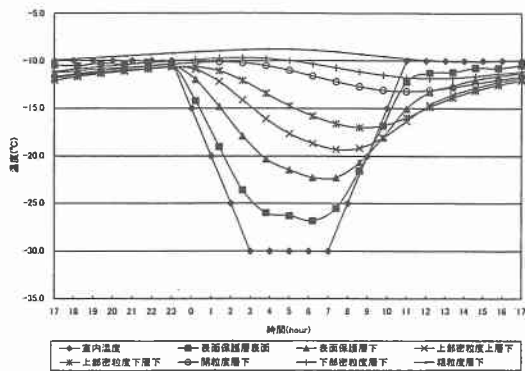
図－６、 7 から多層構造の温度変化については、測定値と解析値でほぼ等しい傾向を示した。また、両方の値とも、規則的に各層温度の時間遅れが生じ、深部にいく程温度低下が小さくなっていることが確認された。



図－５ 日変動パターン



図一六 各層温度の測定結果
(5サイクル目)

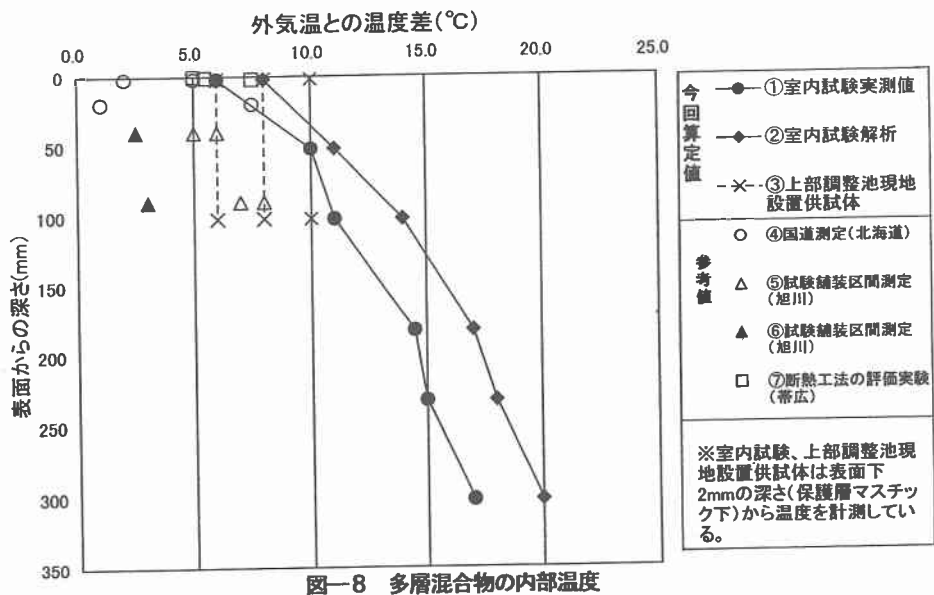


図一七 各層温度のシミュレーション結果
(5サイクル目)

5. 多層混合物の内部温度の推定

図一八に多層混合物の内部温度測定および熱伝導解析結果を示す。図中のデータは①室内試験実測値、②室内試験解析値、③上部調整池現地設置供試体の3ケースと参考値として土木学会年次学術講演会講演概要集 7) , 8) , 9) , 10) から4データ抽出し合計7ケースとした。図一八から、保護層マスチック下面(上部遮水層上面)において気温との温度差は5℃程度であった。なお、③の上部調整池地点のデータの一部については、積雪に覆われていたため、表面からの深さに関係なくほぼ一定値を示していた。

従って上部調整池地点の最低温度を-25℃とした場合には、上部遮水層の設計最低温度は、-20℃程度が妥当であると思われる。



図一八 多層混合物の内部温度

6. まとめ

本試験および解析結果により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ① 多層構造である遮水壁の内部温度測定結果と熱伝導解析結果から、アスファルト混合物の熱伝達係数、比熱を仮定することで熱伝導率が算定され、熱伝導解析の数値シミュレーションで、各層毎の設計温度を推定することが可能となった。
- ② アスファルト混合物の熱伝導率については、薄層であるマスチック層を除き、各層の空隙率に依存し、空隙率が小さい程熱伝導率が大きい結果となった。
- ③ アスファルト混合物の伝熱特性については、アスファルトマスチックに保温効果があり、外気温よりも密粒度混合物の表面温度は実測結果と解析結果から、5℃程度高くなっていることが分かった。さらに、積雪深によって外気温とアスファルトマスチック表面で保温効果が期待出来るものと考えられる。
- ④ 保護層マスチックの効果は、表面保護の他に断熱効果も期待できるため、寒冷地にあつては有効に作用すると思われる。

7. あとがき

本稿は、アスファルト混合物の内部温度分布測定と熱伝導解析についてまとめたものである。これまでに多層混合物の温度分布を測定した事例は少ないが、熱伝導解析との比較により、アスファルト多層混合物層の熱特性（熱伝導率）を把握することが出来た。

また、設計最低温度は、供用後の上部調整池運用を勘案すると、以下に示すとおり①調整池の水位変動に関係なく温度変化が小さいブロックと、②調整池の水位変動と積雪状況により温度変化が大きいブロックに分類できることから、各ブロックごとに設計温度を設定する予定である。

①温度変化が小さい部分

- ・常時アスファルトが露出しているブロック（H.W.L以上）
- ・常時アスファルトが水中にあるブロック（L.W.L以下）

②水位変動と積雪状況で温度変化が大きい部分（H.W.L～L.W.L）

今後は、層構造や層厚を変化させた場合についてシミュレーションを実施して、より合理的なアスファルト混合物各層の設計温度を推定し、別途報告している『間接引張試験による水工用アスファルト混合物の低温時力学性状』、『アスファルトマスチックの力学的性状』などの研究成果と合わせアスファルト全面遮水壁の設計を進める計画である。

最後に本研究を取り纏めるのに際し、ご指導、ご協力を頂いた北海道大学菅原照雄名誉教授、北海道工業大学笠原篤教授、北電興業（株）をはじめ、アスファルト試験および設計に携わっている関係各位に深く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 水工アスファルト研究会 (1976) 水工アスファルト
- 2) 原田：高温度におけるセメントモルタルおよびコンクリートの温度伝達率の変化，建築学会研究報告No24，1953. 10
- 3) 矢川，宮崎：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1953. 10
- 4) 斎藤：大学講座建築学環境論第1巻建築気候，共立出版，1974
- 5) 横堀，久我訳：ギート基礎伝熱工学，丸善，1960
- 6) 西林：土木工学基礎講座土木材料，朝倉書店，1973
- 7) 久保，熊谷，小栗（北海道開発局）：アスファルト舗装の温度応力クラック，1981
- 8) 武市（北海学園大学）：積雪寒冷地における舗装体の温度分布に関する研究，1988
- 9) 武市（北海学園大学）：積雪寒冷地における舗装体の温度分布に関する研究，1989
- 10) 武市（北海学園大学），久保（北海道開発局）：開削調査による道路の断熱工法の評価，1990