

舗装内に吸蔵された凍結防止剤の滲み出し量の解析

蓑嶋 裕典, 保科 秀夫, 尾谷 賢
富田 和彦, 内山 智幸

Analysis of Exuding Mechanism of Antifreezing Agent which impregnated in Road

Hironori MINOSHIMA, Hideo HOSHINA, Masaru OTANI
Kazuhiko TOMITA, Tomoyuki UCHIYAMA

抄 録

冬道対策である凍結防止剤の使用方法として、空隙を有する舗装に液状凍結防止剤を吸蔵し、これが徐々に滲み出すことにより路面と雪の界面での効果的な凍結防止作用が期待できる「吸蔵法」を提案した。また、本法による凍結防止剤の滲み出し機構を「拡散モデル」で近似したシミュレーションを行い、実験室レベルでの滲み出し試験結果から、この「拡散モデル」が適応し得ることを確認した。さらに、「拡散モデル」から凍結防止剤の滲み出し量を調整するためには、液状凍結防止剤の粘度を調整することが有効であることを示した。これらの結果から、「吸蔵法」が凍結防止剤を効果的に使用し、かつメンテナンスフリーとなる有効な使用方法であると考えられた。

1. はじめに

北海道ではスパイクタイヤの使用禁止によるスタッドレス時代の到来に伴い、凍結防止剤に対する依存度が高まりつつある。一方、従来の塩化物系凍結防止剤の過剰な散布は環境を損なうことが報告されており、また、近年欧米で使用されつつある酢酸系凍結防止剤は環境への影響は小さいものの高価なものとなる。従って、凍結防止剤の使用にあたっては最小限の量による効果的な利用が望まれる。従来の散布法では雪面上からの作用となるため、実際に必要とされる路面と雪の界面においては過剰なものとなる。また、散水車を用いた散布となるためリアルタイムでの作用が難しくなるとともに散布頻度の増加は作業負荷を増大するものとなる。そこで、本研究では凍結防止剤の効果的な利用方法として新たな「吸蔵法」を提案し、本法による凍結防止剤の滲み出し機構を解析した。

2. 吸蔵法および滲み出し量の解析

2.1 吸蔵法

凍結防止剤を効果的に使用するためには、路面と雪の界面に凍結防止剤を直接作用させることが望ましい。このタイプ

の使用方法としては、アスファルトに粉体状凍結防止剤を練り込み、これを徐々に溶出させる方法がある。この方法では凍結防止剤の補充が困難であるため、アスファルト舗装を更新するまでの数年以上の凍結防止効果を期待することとなる。しかし、初期の表層部分による効果は期待されるものの、深層部にある凍結防止剤の溶出挙動が不確かであり数年以上の効果の持続が困難と思われること、また、冬期以外においても凍結防止剤の溶出を伴うこと等の問題点を有するものと考えられる。

そこで、本研究ではこのタイプの新たな方法として「吸蔵法」を提案する。「吸蔵法」とは、排水性舗装、インターロッキングブロック等の様に空隙を有する舗装を用い、その空隙に酢酸カリウム水溶液等の液状凍結防止剤を吸蔵させておき、徐々にこの凍結防止剤が滲み出すことにより、雪道での効果的な凍結防止機能を期待するものである。本法によれば以下の効果が期待される。

- ① 凍結防止剤が路面と雪の界面で効果的に作用する。
- ② 凍結防止剤が液状であるため深層部に吸蔵されていても十分に表面に滲み出すことが可能である。
- ③ 凍結防止剤が液状であるためシーズンおよび非シーズンにおける抜き取りおよび交換または補充が可能である。
- ④ 1シーズン分の凍結防止剤を吸蔵させておくことによ

り、期間中メンテナンスフリーとなる。

2.2 しみ出し量の解析

(1) 拡散モデル

例えば空隙を有する舗装として排水性アスファルト舗装（以下排水性舗装と称する）を用いるものとし、舗装に吸蔵した凍結防止剤のしみ出しモデルを図1の様に考える。すなわち、排水性舗装の空隙を直径dの細孔で近似し、あらかじめ空隙一杯に液状凍結防止剤を吸蔵しておく。その舗装上部にはある膜厚aで表面水が流れるものとする。この際、初期の表面は液の流動により乱れるものの、その後、凍結防止剤は細孔から表面に徐々にしみ出すものと考えられる。時間t = 0における舗装内での凍結防止剤の濃度は初期濃度C₀に等しいが、凍結防止剤の流出により、t₁後には舗装内においてC(x₁, t₁)なる濃度分布を形成する。同様にt₂, t₃においては、C(x₂, t₂), C(x₃, t₃)なる濃度分布を形成する。

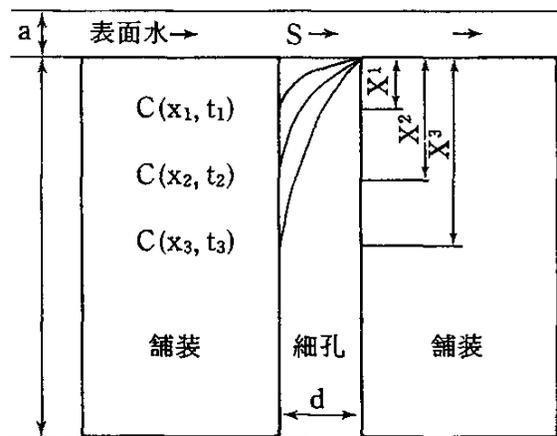


図1 凍結防止剤のしみ出しモデル

この際の凍結防止剤のしみ出し機構には、液の流動によるものと凍結防止剤の分子拡散によるものが考えられる。いま、空隙が細孔であることおよび温度が低いことから流動による影響は小さいものと考え、拡散による凍結防止剤分子の移動のみを考慮するものとする。

溶媒成分2の中を溶質成分1が拡散する場合、濃度勾配dC₁/dxにより、ある点の単位断面積を単位時間に溶質が通過する量（流束）をN₁とすると、Fickの第一法則と呼ばれる次式が、実験的に成り立つことが知られている。

$$N_1 = -D_{12} \left\{ \frac{\partial C_1}{\partial x} \right\}_t \dots\dots\dots(1)$$

ここで、D₁₂は分子拡散係数である。また、Eq.(1)と質量保存則

$$\frac{dC_1}{dt} = - \frac{dN_1}{dx}$$

とから、Fickの第二法則と呼ばれる次式が導かれる。

$$\left\{ \frac{\partial C_1}{\partial t} \right\}_x = D_{12} \left\{ \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} \right\}_t \dots\dots\dots(2)$$

浸透深さxが舗装厚さLに対して十分に小さい時、図1に示したモデルは非定常熱伝導における半無限固体の第1種（温度指定）境界条件に相当する¹⁾。従って、初期に一樣な濃度C₀であった半無限液層の他面を遮断し表面をある瞬間からC_sとした場合、Eq.(2)から以下の様な解が得られる。ただし、Dは濃度に対し一定とした。

(2) 舗装内濃度分布

t時間後の深さxと凍結防止剤の濃度Cの関係はEq.(2)から次式の様に表される（Appendix ①参照）。

$$\frac{C - C_0}{C_s - C_0} = \text{erfc}(\eta), \quad \eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、erfc(η)は余誤差関数である。

D = 10⁻⁷m²/h, C₀ = 50wt% = 635kg/m³, C_s = 0において、時間tにおける凍結防止剤濃度Cの舗装深さxによる変化をEq.(3)により試算し図2に示した。この様に、時間経過に伴う凍結防止剤のしみ出しにより形成される舗装内の濃度分布が推定できる。図2は常に表面濃度C_s = 0を仮定したしみ出しが最も激しい場合であるが、浸透深さx（初期濃度C₀である路盤深さ）はt = 80hにおいてもx = 1cm程度であることがわかる。

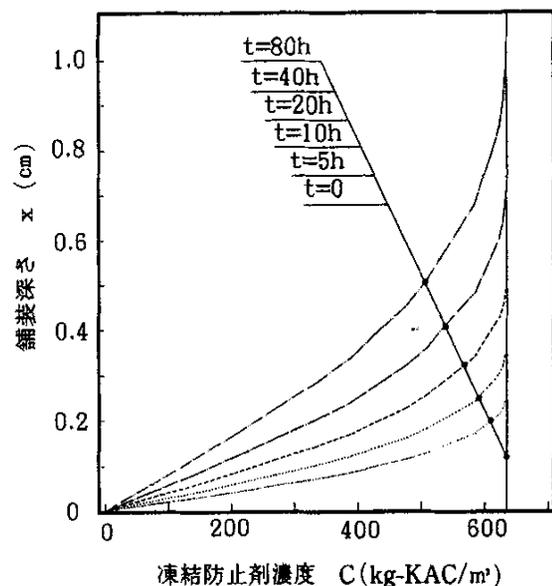


図2 舗装内濃度分布の試算結果

(3) 表面流束 N

t時間後の表面からの凍結防止剤の流出流束Nは次式で表される（Appendix ②参照）。

$$N = -D \left\{ \frac{\partial C}{\partial x} \right\}_t = -\sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C_s - C_0) \dots\dots\dots(4)$$

$D = 10^{-7} \text{m}^2/\text{h}$, $C_0 = 50\text{wt}\%$ において、表面濃度 C_s の変化に対する表面 ($x = 0$) における凍結防止剤流束 N の時間変化を Eq.(4) により試算し図 3 に示した。 N は初期に急激に減少し、その後は徐々に減少する様子がわかる。また、 C_s の上昇に伴い N は小さくなり、舗装表面への凍結防止剤の過剰な供給が避けられることが期待できる。

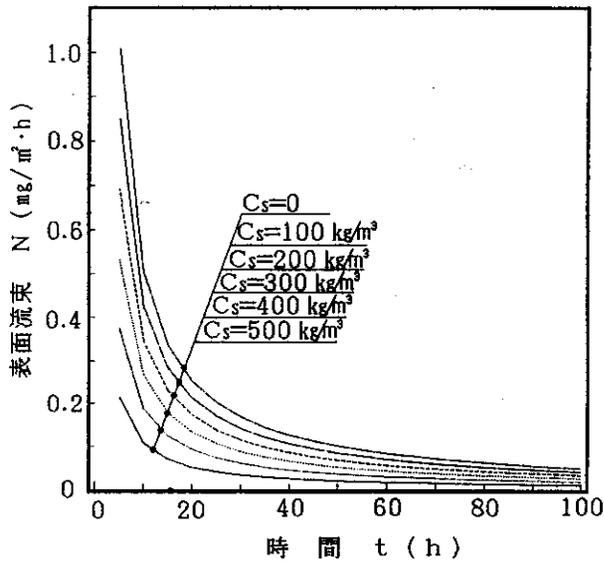


図 3 表面流束の試算結果

(4) 積算流出量 W

凍結防止剤の積算流出量 W は Eq.(4) を積分し Eq.(5) の様に得られる。

$$W = A \int_0^t N dt$$

$$= -2A \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} (C_s - C_0) \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 A は舗装表面の細孔の開孔率とする。従って、積算流出量 W と \sqrt{t} をプロットすると直線が得られ、その傾きから D が得られる。また、Eq.(5) より、 W は A および $(C_s - C_0)$ に比例する。表面水の流量 v が十分に大なる時は、 $C_s \approx 0$ とすることができるが、 v が微小な時は v により C_s が決定される。冬道において v は交通量により決定されるものと考えられる。

$D = 10^{-7} \text{m}^2/\text{h}$, $C_0 = 50\text{wt}\%$, 舗装空隙率 $\epsilon = 20\%$ において、 C_s の変化による表面からの凍結防止剤の積算流出率 W/W_0 (%) の時間変化を Eq.(5) により試算し、図 4 に示した。

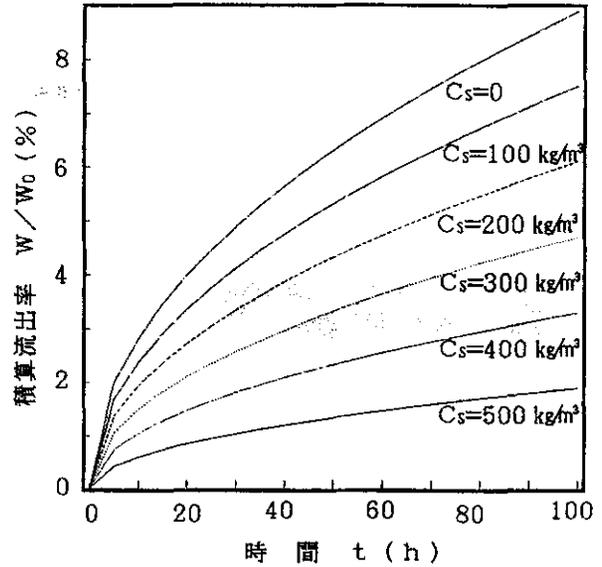


図 4 積算流出量の試算結果

以上、「拡散モデル」によるシミュレーションを行い、舗装内の凍結防止剤の濃度分布および流出量などを推定した。以下、このモデルの適合性を実験により検討した。

3. 通水試験方法

実験室スケールでの極端なモデルとして、多大な表面水量により、凍結防止剤の表面濃度 C_s が 0 と近似できるモデルを用い、上記拡散モデルの適合性について試験を行った。

試験舗装として空隙率 $\epsilon = 20\%$ の排水性アスファルト舗装モデル (200L×200W×40D) を試作し、液状凍結防止剤として市販の 50wt% 酢酸カリウム水溶液 ((株)パティネ商会, CRYOTECH 社製, E36, 以下 KAC と称する) を水で適宜希釈して使用した。

あらかじめ試作したモデルの表面一杯まで KAC 水溶液を吸蔵し、所定温度に設定した恒温器内に置く。これらが所定温度に達した後、所定温度の水をポンプによりモデル表面へ定量供給し、経過時間によるこのオーバーフロー液の KAC 濃度を測定した。KAC 濃度の測定にはイオン電極法による K^+ 測定 ((株)堀場製作所製, カスタニー LABF-23) を行い、これを換算して KAC 濃度とした。これらの試験フローを図 5 に示した。

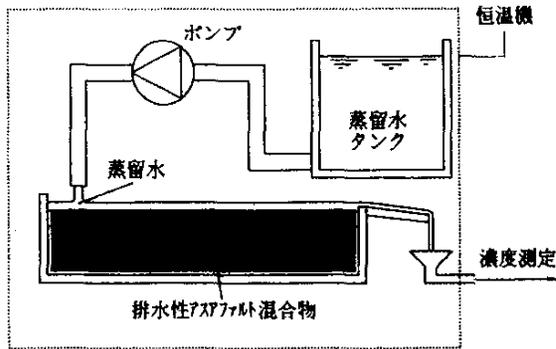


図5 実験フロー

4. 試験結果および考察

4.1 予備試験結果

一例として、試験条件 $\epsilon = 20\%$, $T = 279K$, $Co = 50wt\% \approx 635kg\text{-KAC}/m^3$ ($\rho = 1270kg/m^3$), $\mu_o = 11mPa\cdot s$, $v = 0.0012m^3/h$ における流出液の KAC 濃度と時間の関係を図6に示した。時間の経過に伴い、流出液の KAC 濃度は指数的に低下した。まれに C が高い点は、夜間に通水が途切れていたことによる影響と考えられる。さらに、Eq.(5)による W 対 \sqrt{t} のプロットを図7に示した。初期は表面の液の流動により乱れているものの、その後は、ほぼ直線関係を満足しており、「拡散モデル」が適応可能なことが確認された。

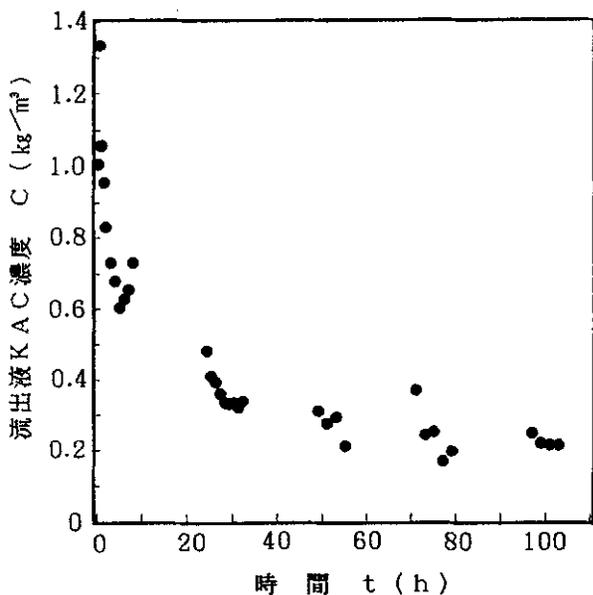


図6 流出液濃度の時間変化 (予備試験)

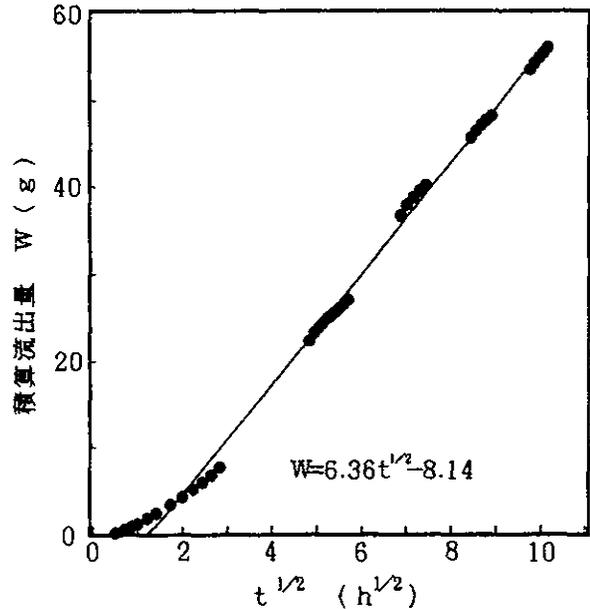


図7 W対 \sqrt{t} プロット (予備試験)

図7より、初期の変動域を除いたデータを用い、

$$W = 6.36\sqrt{t} - 8.14 \dots\dots\dots(6)$$

を得る。この直線の傾きより、

$$-2A\sqrt{\frac{D}{\pi}}(C_s - C_0) = 6.36$$

よって、 $D \approx 4.94 \times 10^{-7} m^2/h$ が得られる。ただし、 $C_s \approx 0$, $\epsilon = 20\%$ より $A = (0.2 \times 0.2 \times 0.2) = 0.008 m^2$ とした。従って、舗装中の Co の液界面が舗装の下面に到達する時間は、排水性舗装の厚さ約 40mm から、およそ

$$t = \frac{x^2}{12D} = 269h$$

となり、その際の W は Eq.(5)より $W \approx 96g$ となる。これは初期 KAC 封入量 194g の約 50% が流出した時点に相当し、その後は、半無限液体による仮定が成立しなくなる。しかし、これは雨量換算で 30mm の雨が連続的に降った場合に相当する過酷な条件のものである。実際にはこれより少ない表面液もしくは車両による運搬除去などがあつた後ある時間外乱がない、という状態が繰り返されるものと考えられる。この外乱のない期間において、舗装内に存在した KAC 濃度分布が均一化され、あらたに均一濃度 C_0 を形成し、また滲み出しを行うことが繰り返されるものと考えられる。これらは、道路の交通量等によるものであり、今後、実際の道路での確認を行いたい。

4.2 凍結防止剤の初期濃度変化による効果

あらかじめ吸蔵させる KAC 水溶液の濃度 Co を変化させ

た場合のKAC流出量に対する影響を以下の試験条件で行った。

$$\epsilon = 20\%, T = 279K, v \approx 0.0006\text{m}^3/\text{h}$$

$$C_0 = 50, 40, 30, 20\text{wt}\%$$

予備試験より、初期の変動を除いたW対 \sqrt{t} プロットが効果的であることから評価にはこれを用いた。W対 \sqrt{t} プロットを図8に示した。

図8より、それぞれほぼ直線性が認められ、拡散モデルが適応し得ることが確認された。また、それらの直線の傾きからDを求めた結果を表1に示した。

表1より、 $D \approx 2.5 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{h}$ とほぼ一定値として与えられた。また、傾きmは積算流出量Wの大きさを表しているが、Eq.(5)で示される通り、いま $C_s = 0$ としたことから、ほぼ初期濃度 C_0 に比例した結果が得られた。

本法によれば当然のことながら、積算流出量は凍結防止剤濃度の高い初期に大きく、濃度が低くなるに従い暫減する傾向を示す。この傾向を幾分か緩和する方法を以下に述べる。

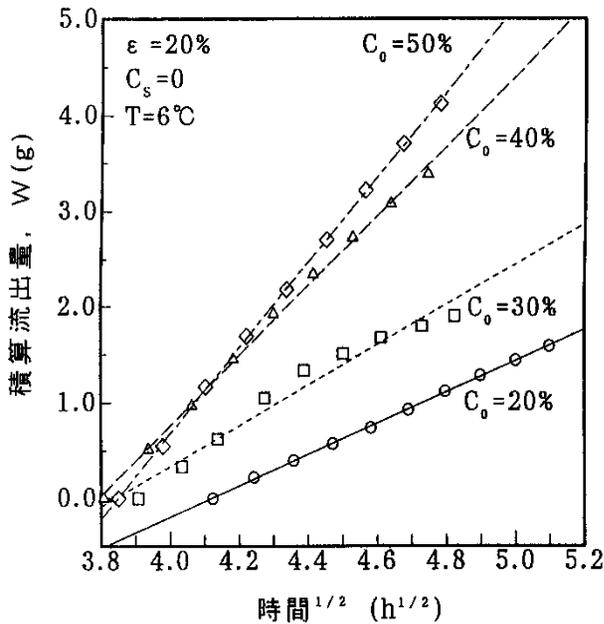


図8 W対 \sqrt{t} プロット (初期濃度変化)

表1 初期濃度変化による拡散係数

初期濃度 C_0 wt%	傾き m	拡散係数 $D \cdot 10^7$ m^2/h
20	1.62	2.75
30	2.11	1.87
40	3.66	2.87
50	4.48	2.45

4.3 滲み出し量の調整等に関する考察

以上の様に、「吸蔵法」による凍結防止剤の滲み出し機構が「拡散モデル」で近似できることが確認された。「拡散モデル」に従えば、凍結防止剤の滲み出し量を調整するためには拡散係数Dを調整する必要がある。

Dの推算式には、種々のものが提案されているが溶媒の粘度 μ 、系の温度Tとすると、多くの場合において、

$$\frac{D\mu}{T} = \text{const.} \dots\dots\dots(7)$$

と $D\mu/T$ が系に特有の定数となることが知られている²⁾。Eq.(7)より、拡散係数Dは系の温度に比例し溶媒の粘度に逆比例する。温度の低下に伴いDが減少し凍結防止剤の流出量が低下することは凍結防止にとって好ましいことではないが、温度変化、例えば+10~-30°C、によるDの変化は約15%と小さいことがEq.(7)よりわかる。従って、本システムで凍結防止機能を調整するにあたっては、溶媒の粘度を変えることにより、有効なDの変化が期待される。

$C_0 = 50\text{wt}\%$, $C_s = 0$, $\epsilon = 20\%$ において、Dの変化による表面からの凍結防止剤の積算流出率 W/W_0 (%)の時間変化をEq.(5)により試算し、図9に示した。図9よりDの変化は凍結防止剤の流出量に対する影響が顕著であることがわかる。この様に、凍結防止剤の粘度を調整しDを変化させることにより、凍結防止剤の流出量が調整可能であると考えられる。

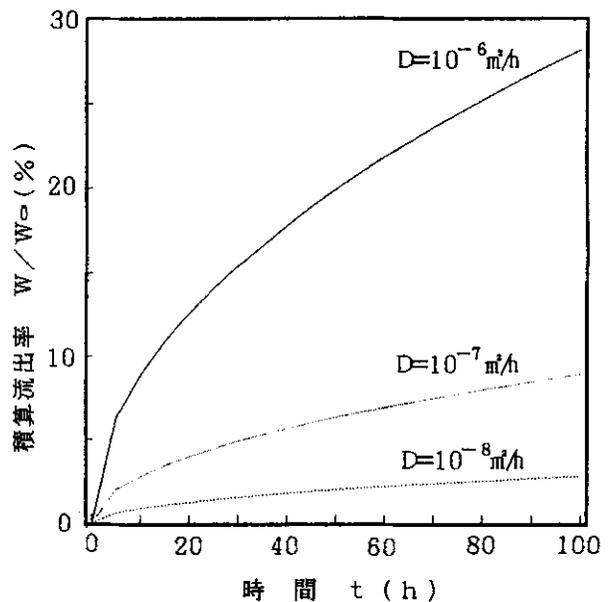


図9 凍結防止剤の粘度変化による試算

さらに、積極的に粘度調整剤を用いる場合、その選定は以下の様に行うと効果的であると考えられる。

- ① 粘度の温度依存性について

液体の粘度は温度の低下に伴い増大するため、低温下での凍結防止剤の滲み出し量が極端に減少する。凍結防止剤の作用からは温度の低下に伴い粘度が低下することが好ましいが、少なくとも粘度の温度依存性が小さい粘度調整剤を選定する必要がある。

② 粘度の濃度依存性について

凍結防止剤の流出流束 N は Eq.(4) の通り濃度 C_0 に比例する。 C_0 の低下、すなわち吸蔵されている凍結防止剤の濃度の低下により液粘度が低下し、流出量が增大することは望ましい方向にある。これをさらに効果的なものとするためには、流出量が濃度差 $(C_s - C_0)$ の低下により減少する効果に見合う粘度低下を伴えば、理想的には凍結防止剤の濃度に依存せず流出量を一定に保つことができるものと考えられる。このために必要な粘度変化は、Eq.(4) に Eq.(7) を代入して

$$N = - \frac{\sqrt{\alpha T} (C_s - C_0)}{\mu \sqrt{\pi t}}$$

従って、ある時刻 t において、 C_0 を一定に近いものとするためには、

$$\mu = \beta (C_s - C_0)^2 \dots\dots\dots (8)$$

の関係、すなわち、 μ が C の二乗に比例する様な粘度調整剤を選定すると効果的であると考えられる。ただし、粘度調整剤となる溶質が凍結防止剤と同程度の D を有し、系外に除去されることが必要となる。

一方、空隙率 $\varepsilon = 20\%$ の排水性舗装を厚さ 40mm 施工した場合の KAC の凍結防止剤の吸蔵量 M ($g - KAC/m^2$) は、KAC 水溶液 50wt% ($\rho = 1.27 \times 10^3 kg/m^3$) の場合、 $M = 0.2 \times 0.04 \times 1.27 \times 1,000 \times 0.5 \times 1,000 = 5,080g - KAC/m^2$ となる。これは、凍結防止剤を散布する場合の一回あたりの平均的な量 (数十～百 g/m^2) の百倍程度に相当する。従って、排水性舗装は液状凍結防止剤の貯槽として十分なものであり、施工面のみならず広がりによる効果が期待できる。

5. まとめ

排水性舗装を凍結防止剤の貯蔵槽として利用し、これに吸蔵させた凍結防止剤が冬季シーズン中に互って徐々に滲み出すことにより、期間中、メンテナンスフリーで舗装表面での効果的な凍結防止機能が期待される「滲み出し法」に関する基礎的な検討を行った。

多孔質構造体からの凍結防止剤の滲み出し機構に対し「拡散モデル」を提案し、実験結果が良く当モデルに適合することが確認された。これにより、吸蔵した凍結防止剤の滲み出し量の時間による変化、濃度による変化等の推定が可能である。また、吸蔵させる凍結防止剤の液粘度を調整することに

より、効果的な滲み出し量の調整が可能であることが示唆された。

今後は、さらに基礎試験により液粘度の調整による効果を確認するとともに実際の道路での現場試験を試みたいと考えている。

本研究は「平成 6 年度 地域技術おこし事業」中核技術研究開発として行われたものである。

付 録

① Eg. (3) の誘導

I.C. $t = 0, x = 0$ で $C = C_0$

B.C.1 $t > 0, x = 0$ で $C = C_s$

B.C.2 $t > 0, x = \infty$ で $C = C_0$

の条件下で Eq. (2) を積分する。

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \theta = \frac{C - C_0}{C_s - C_0}$$

なる無次元数を用い Eq. (2) の各項を表すと、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (C_s - C_0) \frac{\partial \theta}{\partial t} = (C_s - C_0) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

$$= (C_s - C_0) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \left(-\frac{x}{4t\sqrt{Dt}} \right)$$

$$= - (C_s - C_0) \frac{\eta}{2t} \frac{\partial \theta}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = (C_s - C_0) \frac{\partial \theta}{\partial x} = (C_s - C_0) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$= \frac{(C_s - C_0)}{2\sqrt{Dt}} \frac{\partial \theta}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = (C_s - C_0) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

$$= (C_s - C_0) \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$= (C_s - C_0) \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$= (C_s - C_0) \left\{ \frac{d^2 \theta}{d\eta^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\theta}{d\eta} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right\}$$

$$= \frac{(C_s - C_0)}{4Dt} \frac{d^2 \theta}{d\eta^2}$$

よって、Eq. (2) は、

$$-\frac{\eta}{2t} \frac{d\theta}{d\eta} = \frac{1}{4Dt} \frac{d^2 \theta}{d\eta^2}$$

整理すると、

$$\frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + 2\eta \frac{d\theta}{d\eta} = 0 \dots\dots\dots (D.2)$$

となる。

また, Eq. (D.1) も次の境界条件に変換される。

B.C.1' $\eta = 0$ で $\theta = 1$

B.C.2' $\eta = \infty$ で $\theta = 0$

また, 次の様に $p(\eta)$ を定義すると,

$$\frac{d\theta}{d\eta} = p(\eta)$$

Eq. (D.2) は 1 階常微分方程式となる。

$$\frac{dp(\eta)}{d\eta} + 2\eta p(\eta) = 0$$

$$\therefore \frac{dp(\eta)}{d\eta} = -2\eta p(\eta)$$

積分すると,

$$\ln p(\eta) = -\eta^2 + C_1$$

あるいは

$$p = C_1' \exp(-\eta^2), \quad C_1' = \exp(C_1)$$

である。もう一度 η で積分すると,

$$\theta(\eta) = C_1' \int_0^\eta \exp(-z^2) dz + C_2 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

Eq. (D.3) の積分定数 C_1' , C_2 は境界条件 B.C.1' B.C.2' により決定される。

$\eta = 0$ で $\theta = 1$ より, $C_2 = 1$, $\eta = \infty$ で $\theta = 0$ より,

$$\theta(\eta) = C_1' \int_0^\eta \exp(-z^2) dz + 1 = 0$$

よって,

$$C_1' = \frac{1}{\int_0^\infty \exp(-z^2) dz} = -\frac{1}{\frac{\sqrt{\pi}}{2}} = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

従って, Eq. (D.3) の C_1' , C_2 は決定し,

$$\theta(\eta) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-z^2) dz \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

となる。ここで, $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-z^2) dz$ の解はガウスの誤

差関数であり,

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-z^2) dz = \text{erf}(\eta)$$

と表す。従って, 時刻 t , 位置 x における無次元濃度 θ は

$$\eta = \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \text{ として}$$

$$\theta = \frac{(C-C_0)}{(C_s-C_0)} = 1 - \text{erf}(\eta) = \text{erfc}(\eta) \quad \dots\dots\dots (D.5)$$

となる。ここで, $\text{erfc}(\eta)$ は余誤差関数を表す。

② Eq. (4) の誘導

余誤差関数で表された, Eq. (3) の θ の微分は,

X に関する偏微分

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{t=t_1, x=x_1} = -\frac{1}{\sqrt{\pi Dt_1}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4Dt_1}\right)$$

t に関する偏微分

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{t=t_1, x=x_1} = -\frac{1}{2\sqrt{\pi Dt_1^3}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4Dt_1}\right)$$

よって, 任意の時刻 t において $X = 0$ の面を通る溶質の流束 N は,

$$N = -D \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} = -D(C_s - C_0) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0, t=t}$$

$$= -D(C_s - C_0) \frac{\exp(0)}{\sqrt{\pi Dt}}$$

$$= -\sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C_s - C_0)$$

記 号

- A : 舗装表面における空隙の面積 (m²)
- a : 表面水の膜厚 (m)
- C : 凍結防止剤の濃度 (kg/m³)
- D : 液中における凍結防止剤の拡散係数 (m²/h)
- d : 舗装の空隙を細管に近似した時の直径 (m)
- L : 舗装の厚さ (m)
- N : 凍結防止剤の流出流束 (kg/m² · h)
- T : 絶対温度 (K)
- t : 時間 (h)
- v : 表面水の流量 (m³/h)
- W : 凍結防止剤の積算流出量 (kg/h) or (kg/m² · h)
- x : 舗装表面からの深さ (m)
- ε P : 舗装の空隙率 (-)
- μ : 凍結防止剤の粘度 (mPa · s)
- ρ : 凍結防止剤の密度 (kg/m³)
- η : 無次元化時間および距離 (-)
- θ : 無次元化濃度 (-)

添 字

- S : 舗装表面における値
- 0 : 初期値

参考文献

- 1) 改訂増補・化工数学入門:(株)化学工業社, P.132-134, 1972
- 2) 佐藤一郎: 化学工学, 28, 490-494, 1964