

マイクロ波加熱方式を用いたポーラスアスファルトの 自己治癒に関する基礎的研究

The fundamental study of the self-healing of porous asphalt using microwave

北見工業大学	工学部	社会環境工学科	○学生員	吉田雅哉	(Masaya Yoshida)
北見工業大学	工学部	地域未来デザイン工学科	正員	崔希燮	(Heesup Choi)
北見工業大学	工学部	地域未来デザイン工学科	正員	井上真澄	(Masumi Inoue)
北見工業大学	工学部	地域未来デザイン工学科	正員	岡田包儀	(Kaneyoshi Okada)

1. はじめに

一般的なアスファルト舗装は、雨天時に路面に水がたまり、車両の走行安定性や歩行者の歩きやすさを低下させるだけでなく、交通騒音など沿道環境に対する課題も取りあげられてきた。その対策として、ポーラスアスファルト舗装が開発・適用され、今後、一層の普及が図られていくと予想される¹⁾。

ポーラスアスファルト舗装は、高い空隙率を有することから、雨水を路面下へ速やかに浸透させることにより路面への滞水を抑制し、視認性の向上やハイドロブレーニング現象の抑制などによる車両の走行安全性の向上および騒音低減などに寄与している。しかし、雨水や融雪水のアスファルト路面下への浸透は、ひび割れの発生および進展を誘発させるなど、ポーラスアスファルト舗装の機能を低下させる主要原因になる。さらに、このような現象が繰返し作用することによりひび割れ幅の拡大につながり、わだち掘れやポットホールなど致命的な損傷に至ることが懸念される。

特に、積雪寒冷地である北海道では早期の機能低下が課題となっており、透水機能は約2年程度で効果が無くなると報告されている^{2,3)}。また、機能低下した舗装を機能回復などによる維持管理することは困難であり、定期的な補修補強作業による維持管理費は通常のアスファルト舗装よりも高いのが現状である。したがって、ポーラスアスファルト舗装において微細なひび割れ発生時点で予防することは非常に重要である。

一方、低エネルギーで効果的なポーラスアスファルトの維持管理を実現させる方策として、「マイクロ波加熱方式」⁴⁾の導入が挙げられる。これは、ポーラスアスファルト混合物の製造時に、高誘電率を有する酸化鉄(Fe_3O_4)を混合することにより、骨材間の界面にある

酸化鉄(Fe_3O_4)をマイクロ波によって選択的に加熱させ、周囲のアスファルトを溶かすことで、ひび割れを修復させる、すなわち“アスファルトの自己治癒⁵⁾”を実現するものである(図-1 参照)。これにより、低エネルギーでポーラスアスファルト舗装のひび割れ修復が可能となり、維持管理費の削減につながるものと考えられる。また、骨材表面のコーティング層に存在するアスファルトに酸化鉄(Fe_3O_4)を混合することで、骨材とアスファルト間の機械的摩擦力の向上が期待できる。これはポーラスアスファルトの弱点部であるアスファルトと骨材界面の付着強度を改善し、その力学特性の向上にも寄与すると考えられる。

本研究では、ポーラスアスファルト舗装の延命に寄与する予防的維持方法として「マイクロ波加熱方式」に着目し、酸化鉄(Fe_3O_4)を混入したポーラスアスファルト混合物の基本的な力学性能を把握するとともに、マイクロ波加熱した場合の温度上昇特性について基礎的な検討を行った。図-2に本研究における研究フローを示す。

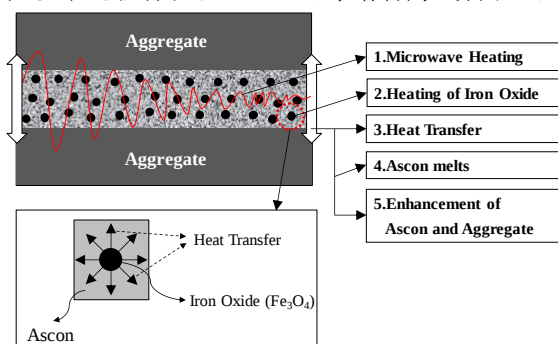


図-1 マイクロ波加熱方式による自己治癒メカニズム

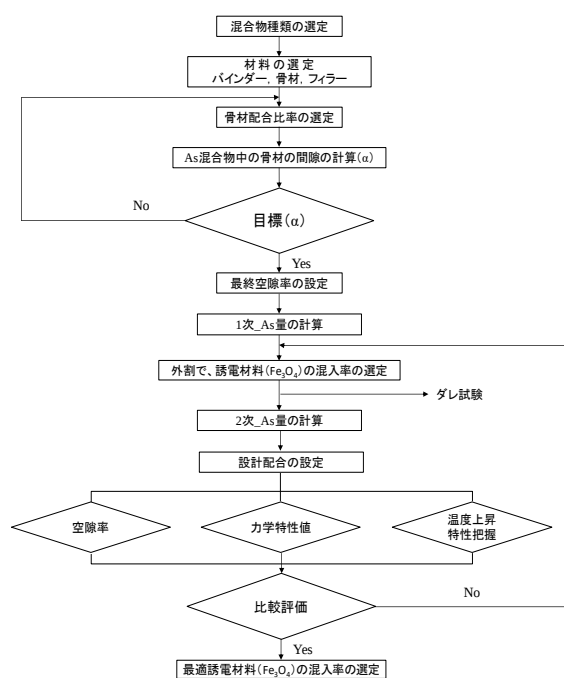


図-2 研究フロー

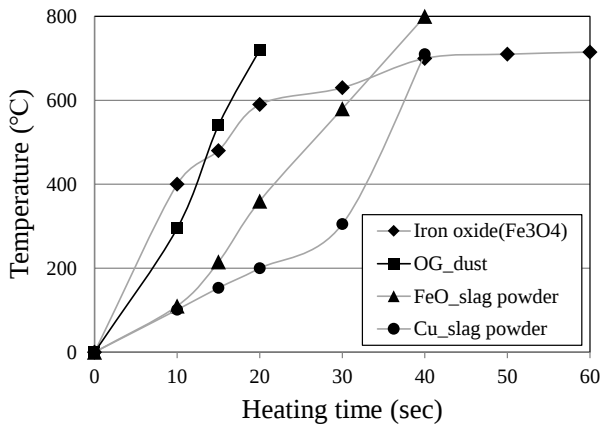


図-3 サーマグラフィーによる
マイクロ波加熱の誘電材料の温度上昇評価

表-1 ポーラスアスファルト混合物の配合比

種類 (%)	Plain	Fe ₃ O ₄ _5	Fe ₃ O ₄ _10	Fe ₃ O ₄ _15
6号砕石	85.5			
粗目砂	9.5			
石粉	5.0			
Fe ₃ O ₄	0	5.0	10.0	15.0

表-2 酸化鉄の成分表 (%)

Fe	O	Si	P	Mn	Cu	Zn
75.79	20.86	0.47	1.15	0.66	0.66	0.40

2. マイクロ波による適切な誘電材料の選定

図-3 にマイクロ波加熱（周波数 2.45GHz、高周波出力 1800W で照射）による昇温状況を誘電加熱材料の種類毎に示す。酸化鉄（Fe₃O₄）は、初期の温度上昇が最も高く、その後も比較的安定的に温度上昇していることから、温度制御が比較的容易である。また、転炉 OG 細粒ダストは、酸化鉄（Fe₃O₄）と比較して、初期の加熱勾配にそれほど大きな差はなく、600℃以上においても昇温効果を維持している。鉄精粉は、酸化鉄と比較すると昇温勾配は緩やかであるが、昇温特性の制御を考慮した場合には有効といえる。最後に銅スラグは、初期の温度上昇率が他の材料に比べて小さく、300℃を超えるとランナウェイ現象が見られることから、他の材料に比べると性能の低下は顕著である。

以上の昇温特性の結果から、本技術への適用材料には、酸化鉄あるいは OG 転炉ダストが挙げられ、安定的な

昇温特性を持つ酸化鉄がより適切と考えられる。

3. 実験概要

3.1 使用材料

表-1 にポーラスアスファルト混合物の配合比を示す。本実験では、ポーラスアスファルト混合物に対する最適な酸化鉄（Fe₃O₄）混入量を探求するため、最大骨材粒径 13mm、目標空隙率 20%のポーラスアスファルト混合物（最適アスファルト量 4.9%）を基に、酸化鉄を外割置換として 5、10、15%の 3 水準で実験を行った。また、使用アスファルトはポリマー改質アスファルト H 型とした。酸化鉄（Fe₃O₄）の成分比を表-2 に示す。

3.2 実験項目および測定方法

まず 2 章の結果より選定した酸化鉄を混入した各ケースの最適アスファルト量を求めるため、アスファルト量 3.5～5.5%の範囲でダレ試験を行った。なお、試験方法については、舗装調査・試験法便覧の第 3 分冊 B009 に準拠した。

次に最適アスファルト量でマーシャル供試体を作製し、空隙率を求めるとともに、養生および試験温度を 5℃でカンタブロ試験を行い、カンタブロ損失率を測定した。なお、その他のカンタブロ試験条件は、舗装調査・試験法便覧の第 3 分冊 B010 に準拠した。

最後に、本実験の主目的である酸化鉄（Fe₃O₄）を混入したポーラスアスファルト混合物の温度上昇特性に関する実験を行った。実験条件は、周波数 2.45GHz のマイクロウェーブを用い、高周波出力は 500W と 750W の 2 水準、加熱時間を 0、60、80、100、120 秒としてマーシャル供試体を加熱した。試験体温度は、マイクロ波加熱直後に電子レンジの扉を開放した直後、5 分および 10 分経過時点で測定した（写真-3 参照）。

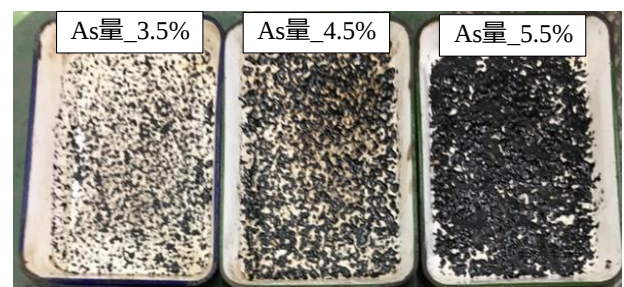


写真-1 ダレ試験結果（Fe₃O₄_10%）

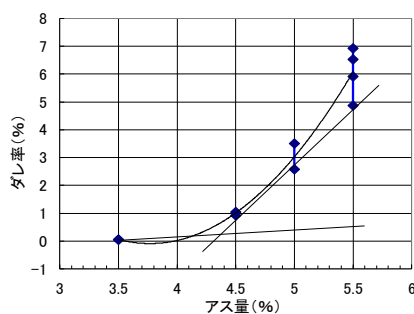


図-4 Fe₃O₄_5%

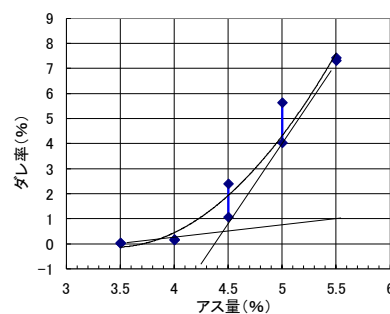


図-5 Fe₃O₄_10%

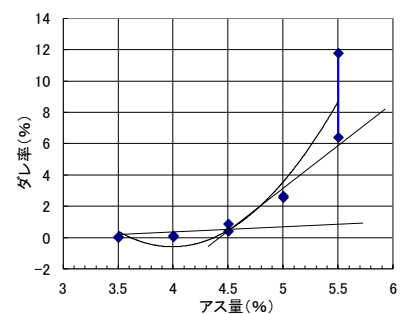


図-6 Fe₃O₄_15%

4. 実験結果および考察

4.1 最適アスファルト量の決定

図-4～図-6 に酸化鉄 (Fe_3O_4) を外割として 5、10、15%混入した各ケースのアスファルト量とダレ率の関係を示す。酸化鉄を混入した場合の最適アスファルト量は、 $\text{Fe}_3\text{O}_4_5\%$ は 4.4%、 $\text{Fe}_3\text{O}_4_10\%$ は 4.4%、 $\text{Fe}_3\text{O}_4_15\%$ は 4.5%であり、Plain の最適アスファルト量より 0.5%程度減少した。これは、表-1 の Plain 配合比を基準として酸化鉄 (平均粒径: $10\mu\text{m}$ 程度) を外割置換したことにより、細骨材およびフィラー分の占める割合が少なくなったこと、および酸化鉄へのアスファルトの被覆性による影響と考えられる。写真-1 に酸化鉄を 10%混入した場合のダレ試験後のバットの様子 (一例) を示す。

4.2 空隙率およびカンタブロ損失率

表-3 に最適アスファルト量におけるマーシャル供試体の空隙率およびカンタブロ損失率の測定結果を示す。また、空隙率とカンタブロ損失率 (5°C) の関係を図-7 に示す。Plain (最適アスファルト量: 4.9%) では、空隙率 22.4%、カンタブロ損失率 19.1%であったが、酸化鉄を外割置換(5、10、15%)した場合には、置換率の増加にともない、空隙率とカンタブロ損失率はともに減少する傾向を示した。これは Plain と比較して、酸化鉄を外割置換することにより、混合物中に含まれる 6 号碎石の割合が小さくなったことにより空隙率が小さくなったものと考えられる。また、空隙率が小さくなったことにより、カンタブロ損失率も小さくなったと推測できる。さらに、骨材間を埋めるアスファルトに酸化鉄を置換したことで機械的摩擦力が向上したことも要因と考えられる。

表-3 カンタブロ損失率および空隙率

区分	最適アスファルト量 (%)	カンタブロ損失率 (%)	空隙率 (%)
Plain	4.9	19.1	22.4
Fe_3O_4_5	4.4	16.4	21.0
Fe_3O_4_10	4.4	12.5	18.9
Fe_3O_4_15	4.5	10.7	15.5

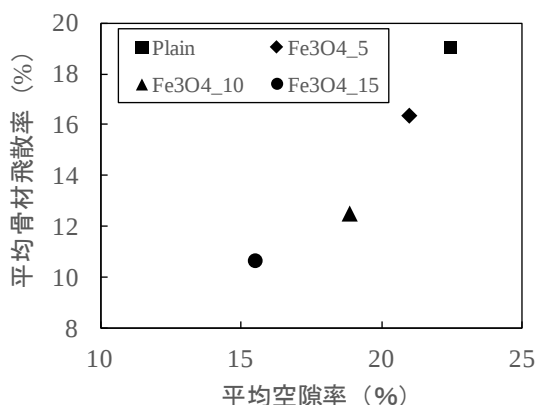


図-7 骨材飛散率および空隙率の比較

4.3 マイクロ波による温度上昇特性

マイクロ波加熱によるポーラスアスファルト混合物の温度上昇特性を把握するため、周波数 2.45GHz の同一条件で、高周波出力 500W の場合の加熱時間を 0、60、120 秒、高周波出力 750W の場合の加熱時間を 0、80、100 秒として試験体の加熱を行った。マイクロ波加熱直後、5 分、10 分におけるマーシャル供試体の表面部 (サーモグラフィー) および内部 (熱電対) の温度上昇特性を比較した結果を図-8～図-11 に示す。写真-3 にマイクロ波加熱実験の状況を示す。

図-8 および図-9 の高周波出力 500W の場合、加熱時間に関わらずほぼ全てのケースの表面部(S)で温度変化に明確な傾向は見られなかった。しかし、内部(I)では、Plain に比べ酸化鉄を混入したいずれのケースでも約 $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の温度差が発生した。

図-10 および図-11 の高周波出力 750W の場合、 500W の場合と同様、加熱時間に関わらず表面部(S)の温度変化に明確な傾向は見られなかった。しかし、内部(I)では、加熱時間 80 秒の場合に約 $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ 程度温度差が、加熱時間 100 秒では約 $20^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 程度温度が高くなることが確認できた。

写真-4 に高周波出力 750W で 100 秒加熱したマーシャル供試体の外観を示す。Plain と Fe_3O_4_5 のケースでは供試体の形が崩れたが、 Fe_3O_4_10 と Fe_3O_4_15 のケースでは健全な供試体の形状を維持していた。その状況から、酸化鉄を混入させることによって、マイクロ波加熱による酸化鉄を選択的に加熱されたものと考えられる。

以上より、誘電材料として酸化鉄を混入したポーラスアスファルト混合物にマイクロ波加熱した場合、酸化鉄を混入しない場合と比較して、マイクロ波による加熱効果が高いことが確認できた。ただし、酸化鉄を 15%混入した Fe_3O_4_15 より、酸化鉄を 10%混入した Fe_3O_4_10 の加熱温度の方が若干高くなった、これは本実験で作製した試験体の空隙率が Fe_3O_4_15 より Fe_3O_4_10 の方が高いため、 Fe_3O_4_10 の方がマイクロ波の吸収エネルギーが増大したことが影響したものと考えられる。

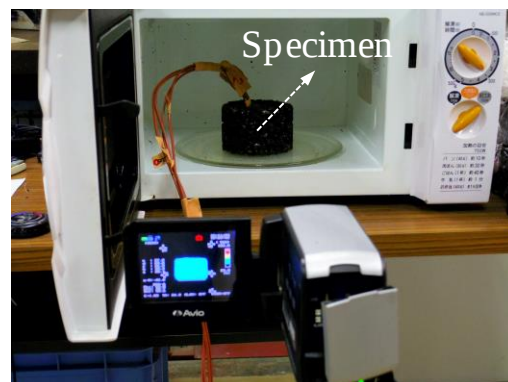


写真-3 マイクロ波加熱実験の様子

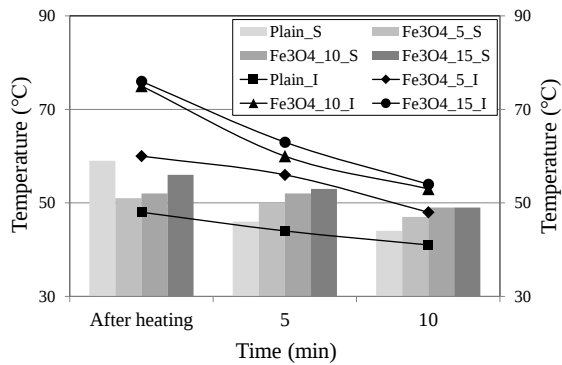


図-8 加熱時間 60 秒 (500W)

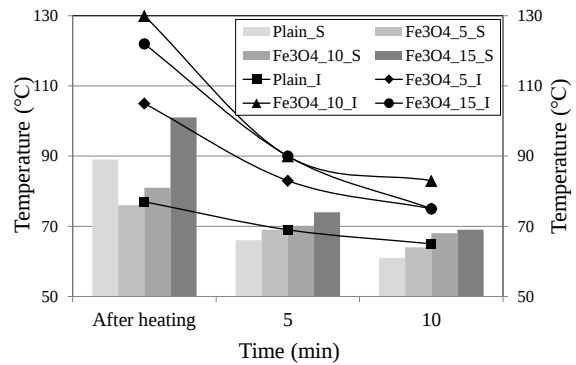


図-9 加熱時間 120 秒 (500W)

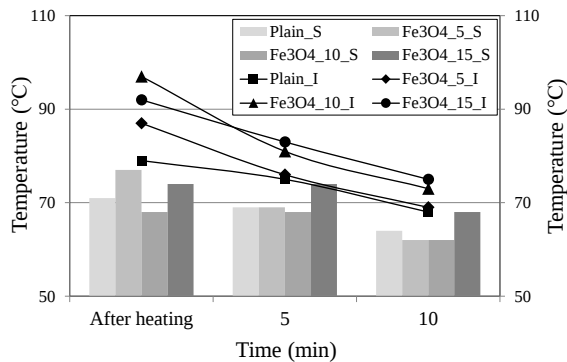


図-10 加熱時間 80 秒 (750W)

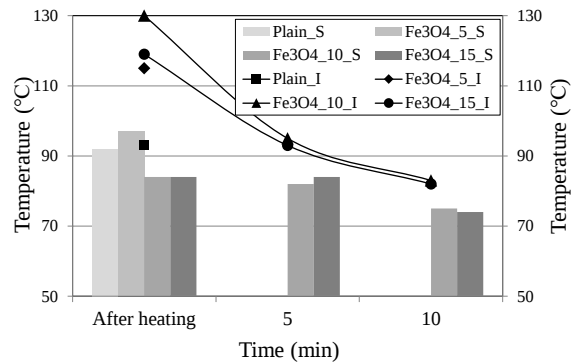


図-11 加熱時間 100 秒 (750W)

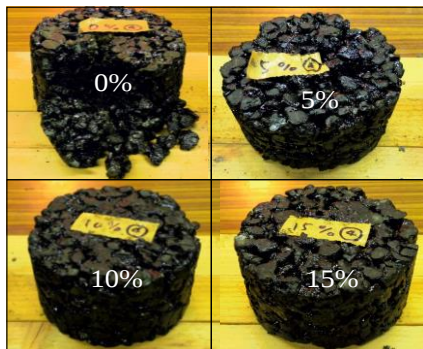


写真-4 マイクロ波加熱後の試験体の様子

これは本実験で作製したマーシャル供試体の空隙率の違いにより、マイクロ波の吸収エネルギーが増大したことが影響したものと考えられる。

今後は本技術の現場への適用に向けて、一般的なポーラスアスファルト混合物の空隙率に合わせて、酸化鉄を混入した場合の検討が必要と考えている。

謝辞

本研究の実験の遂行にあたり、ニチレキ株式会社技術研究所にご協力いただいた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考資料

- 1) 加納孝志：ポーラスアスファルト舗装の現状と課題，日本アスファルト協会論文集，Vol.51，No.224，pp.1-4，2008.
- 2) 早坂保則：北海道における排水性舗装の課題と対策，開発土木研究所月報，No.568，pp.56-60，2000.09
- 3) 帆苅浩三：積雪寒冷地域における排水性舗装の供用性に関する一検討，道路建設，No.562，pp.47-53，1994.11
- 4) Choi, H., et al.: Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete, Journal of Environmental Protection, No.5, pp.583-596, 2014.
- 5) Álvaro García, et al.: Optimization of composition and mixing process of a self-healing porous asphalt, Journal of Construction and Building Materials, No.30, pp.59-65, 2012

5. まとめ

本研究では、酸化鉄 (Fe_3O_4) を混入したポーラスアスファルト混合物の基本的な力学性能を把握するとともに、マイクロ波加熱した場合の温度上昇特性について基礎的な検討を行った。以下に本研究における知見を示す。

- 1) 酸化鉄を外割で混入する場合には、ポーラスアスファルト混合物の透水機能を確保する点から 10%以下が望ましい。また、その場合の骨材飛散抵抗性については、カンタブロ損失率が Plain 以下であったことから、ポーラスアスファルトの弱点である骨材間の界面を酸化鉄を混入したアスファルトでコーティングすることで機械的摩擦力の向上が期待される。
- 2) 酸化鉄を 10～15%混入させることにより、マイクロ波の選択的加熱が可能と考えられる。また、本実験では、酸化鉄の混入率が 15%より 10%混入した場合の方がマイクロ波加熱による温度上昇効果は大きくなったが、