

# マイクロ波加熱方式を用いた密粒度アスファルト舗装の 自己治癒に関する基礎的研究

The fundamental study of the self-healing of asphalt pavements using microwave heating method

北見工業大学 工学部 社会環境工学科 ○学生員 土井駿弥 (Shunya Doi)  
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)

## 1. はじめに

現在、道路舗装にはアスファルト舗装が最も多く普及している。その理由として工期が短い、費用も安価などの利点があるが、一般的にアスファルト舗装は車両の通行、雨水・融雪水の浸透、特に北海道のような著しく凍上を受ける地域では凍結・融解の繰り返しによる経年変化が起こり、ひび割れやわだち掘れなど致命的な損傷に至ることが懸念されるため、アスファルト舗装の適切な維持・修繕が非常に重要である。

アスファルト舗装の損傷を補修する既存の維持修繕工法には主に平坦性の低下の際に用いる切削オーバーレイ、ひび割れ・たわみの劣化が著しい場合に用いる打ち換え工法などが実施されているが、この方法らは局部的な補修による既存のアスファルト舗装との品質差の発生や維持管理の難しさなどとともに多くの費用がかかる問題点がある<sup>1)2)</sup>。また、機能低下した舗装の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高いのが現状である。したがって、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。

そこで、低エネルギーで効果的なアスファルト舗装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」<sup>3)</sup>の導入が挙げられる。これは、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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) を混合することにより、骨材間の界面にある酸化鉄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<sup>4)</sup>”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、維持管理費の削減や長寿命化につながるものと考えられる。

本研究では、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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) を混入した密粒度アスファルト混合物の適切な配合について検討を行った。その後、マイクロ波加熱した場合において酸化鉄混入量の変化による各ケースの回復率の検討を行った。図-2 に本研究における研究フローを示す。

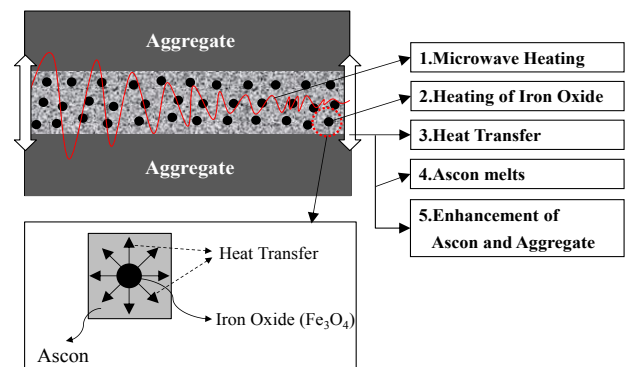


図-1 マイクロ波加熱方式による自己治癒メカニズム

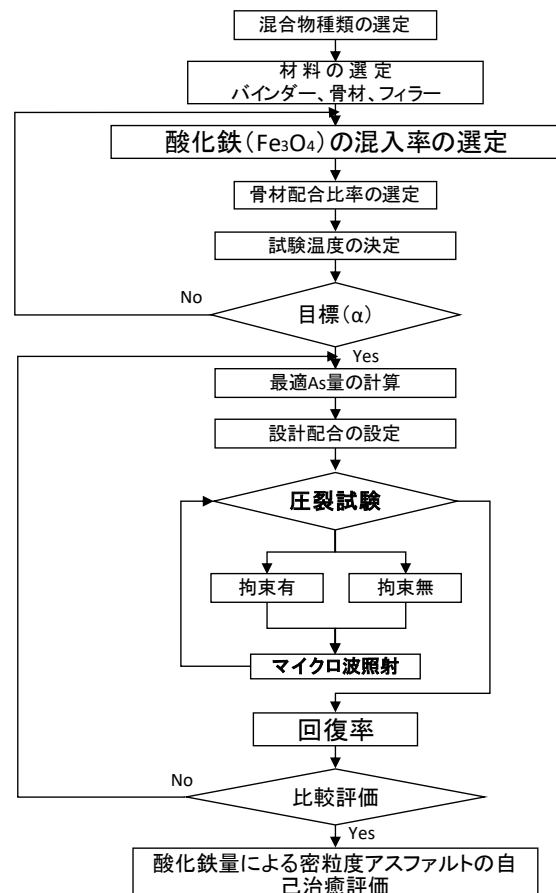


図-2 研究フロー

## 2. 実験項目および測定方法

酸化鉄を混入した各ケースの配合設計のため、まずアスファルト量を 5.2～6.0%の範囲で密度試験を行い、最適アスファルト量を求めた。なお、試験方法については、舗装調査・試験法便覧 B008 密粒度アスファルト混合物の密度試験方法に準拠した。

次に、最適アスファルト量で密粒度アスファルト混合物のマーシャル試験体を作製し、本実験の試験温度を決定するため、-20℃、-10℃、0℃、10℃、20℃、30℃の6水準でそれぞれ圧裂試験を行った。試験温度は、骨材間のアスファルト部分のひび割れを誘導するため、圧裂強度と温度履歴から密粒度アスファルト混合物の脆性破壊領域と流動破壊領域の境目となる脆化点を探し出し、それよりも高温域側である流動破壊領域の温度から決定した<sup>5,6)</sup>。なお、試験方法については、舗装調査・試験法便覧 B006 圧裂試験方法に準拠した。

最後に、本実験の主目的である酸化鉄 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) を混入した密粒度アスファルト混合物の「マイクロ波加熱方式」による回復率の評価を行った。実験条件は、周波数 2.45GHz、高周波出力 750W でマイクロ波を照射し、加熱時間を 60 秒と 120 秒の2水準とした。骨材間のアスファルト部分に発生するひび割れ程度に応じた回復率を比較評価するため、マーシャル試験体を用いてその破壊率 100%を貫通ひび割れ、60%をミクロひび割れ、30%をマイクロひび割れの3段階のひび割れ状態を模擬して実験を行った。また、マイクロ波照射による酸化鉄混入密粒度アスファルト混合物の加熱特性を把握するため、塩化ビニル管に試験体を固定させた場合（拘束有）と固定しない試験体の場合（拘束無）の拘束条件を加えて実験を行った。マイクロ波の照射による各ケースの回復率は、マイクロ波加熱前後の圧裂試験結果から算出した（図-3 参照）。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 密粒度アスファルト混合物の配合比算定

表-1 に密粒度アスファルト混合物の配合比を示す。本実験では、最大骨材粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物の密度、飽和度、空隙率の関係から求めた最適アスファルト量 5.6%を基に、酸化鉄を内割として 0、3.5、7.0%の3水準で配合設計を行った。まず最適アスファルト量の結果を表-2 に示す。酸化鉄を混入した  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ \_3.5%は 5.5%、

$\text{Fe}_3\text{O}_4$ \_7.0%は 5.3%であり、Plain の最適アスファルト量（5.6%）と比較して若干低減する傾向を示した。これは、酸化鉄を内割で置換することで、平均粒径が約 40 $\mu\text{m}$  の非常に微細な酸化鉄が混入するためと推測される。しかし、図-4～図-6 に示すように各ケースの合成粒度が標準粒度分布曲線に満足していることから、マーシャル試験体の製作は可能であると考えられる。酸化鉄 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) の成分比を表-3 に示す。

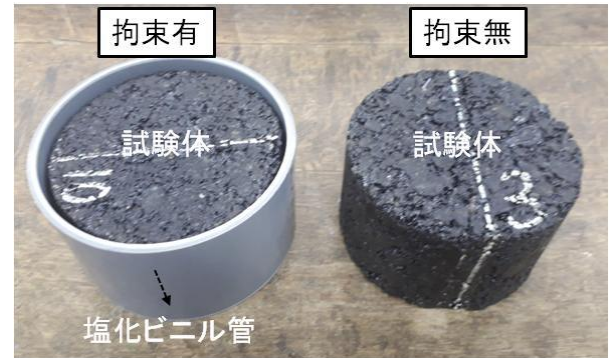


図-3 マーシャル試験体

表-1 密粒度アスファルト混合物の配合比

| 種類 (%)                  | Plain | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ _3.5 | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ _7.0 |
|-------------------------|-------|------------------------------|------------------------------|
| 6号砕石                    | 36.0  |                              |                              |
| 7号砕石                    | 22.0  |                              |                              |
| 粗目砂                     | 30.0  |                              |                              |
| 細目砂                     | 6.0   | 5.0                          | 3.0                          |
| 石粉                      | 6.0   | 3.5                          | 2.0                          |
| $\text{Fe}_3\text{O}_4$ | 0.0   | 3.5                          | 7.0                          |
| 計                       | 100   |                              |                              |

表-2 最適アスファルト量

| 密度試験結果       | Plain | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ _3.5 | $\text{Fe}_3\text{O}_4$ _7.0 |
|--------------|-------|------------------------------|------------------------------|
| 最適アスファルト量(%) | 5.6   | 5.5                          | 5.3                          |

表-3 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 |

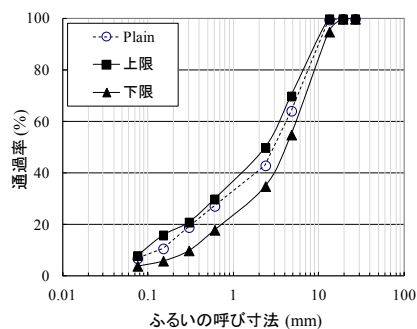


図-4 Plain

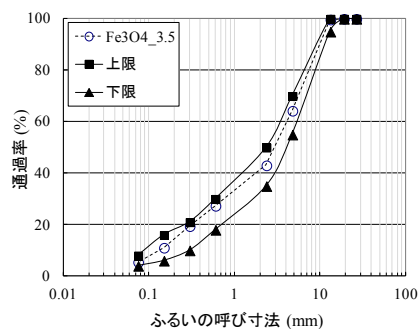


図-5  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ \_3.5

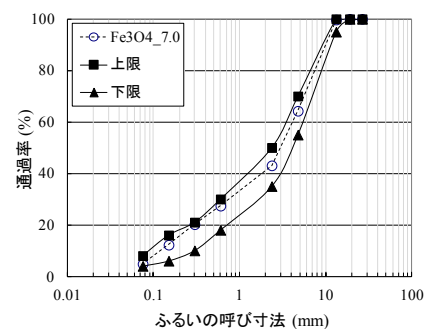


図-6  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ \_7.0

### 3.2 試験温度の決定

図-7 に本実験の試験温度を決定するため、Plain を用いた密粒度アスファルト混合物の圧裂強度と温度の関係を示す。ここで、縦軸に圧裂強度を対数目盛りで、横軸に試験温度を普通目盛りで表す。また、圧裂強度 $\sigma_t$  (MPa) は以下の式 (1) により求めた。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

ここで、P：破壊時の最大荷重[N]，d：厚さ[mm]，l：直径[mm]である。

図-7 より+30℃から脆化点（約-13℃）まで、温度の低下にともない圧裂強度は増加する傾向がみられた。この結果から本実験の試験温度は、流動破壊領域とみられる10℃に決定した。

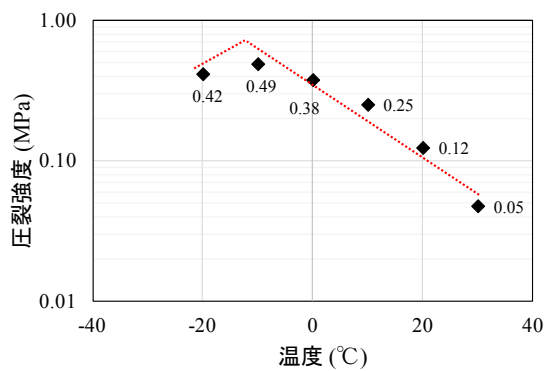


図-7 圧裂強度と温度の関係

### 3.3 回復率

マイクロ波加熱（周波数2.45GHz、高周波出力750Wで照射）による各ケースの密粒度アスファルト混合物の回復率を把握するため、3.2節で求めた試験温度10℃で保管した試験体を用いて、マイクロ波加熱の前後に対する圧裂強度から求めた回復率で比較評価した。各マイクロ波加熱時間（60s、120s）において酸化鉄の混入量の変化や拘束有無による回復率の結果を図-8～図-11に示す。

まず図-8と図-9の「拘束有」の場合、マイクロ波の照射時間60sと120sによる回復率は、破壊率に関わらず0% > 3.5% ≥ 7.0%のような傾向を示した。ただし、マイクロ波の照射時間60sの場合、破壊率100%では0% > 3.5% ≥ 7.0%の順で、破壊率60%と30%ではほぼ同等な回復率を示しており、酸化鉄の混入量による明確な傾向は見られなかった。これにより、塩化ビニル管に試験体を固定させた「拘束有」の場合においては、マイクロ波を酸化鉄や密粒度アスファルト混合物の両方が吸収することでマイクロ波の吸収エネルギーが分散されたと推定される。図-9のPlainの回復率が酸化鉄混入のケースより高くなったのは、Plainの最適アスファルト量が比較的多く密粒度アスファルト混合物が溶けやすい状況にある一方で、混合物の流動が拘束されるためひび割れ界面が再付着し回復率の増加につながったと考えられる。そのため、拘束有の場合では酸化鉄を混入せずに密粒度アスファルト混合物のみを対象にしてマイクロ波照射方法を適用するのが望ましいと考えられる。

一方、図-10と図-11の「拘束無」の場合、マイクロ波の照射時間60sにおける回復率は、破壊率100%ではほぼ同等であったが、破壊率60%と30%では0% < 3.5%

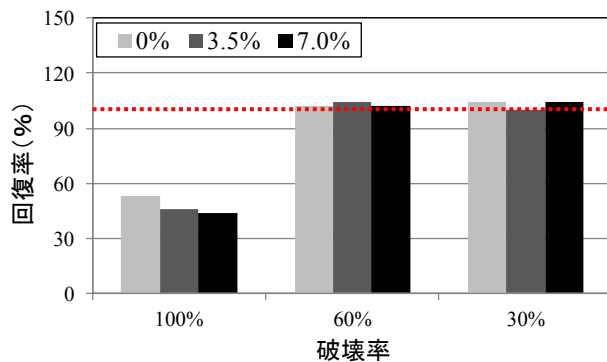


図-8 加熱時間 60s（拘束有）

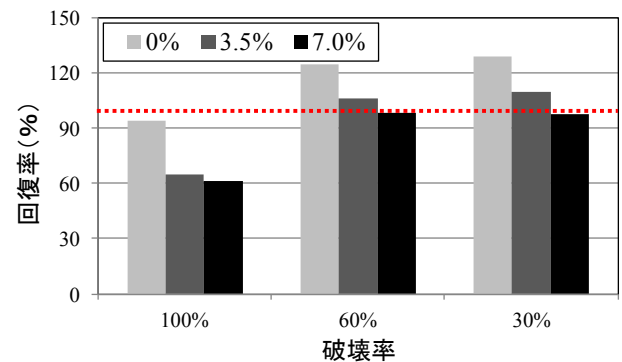


図-9 加熱時間 120s（拘束有）

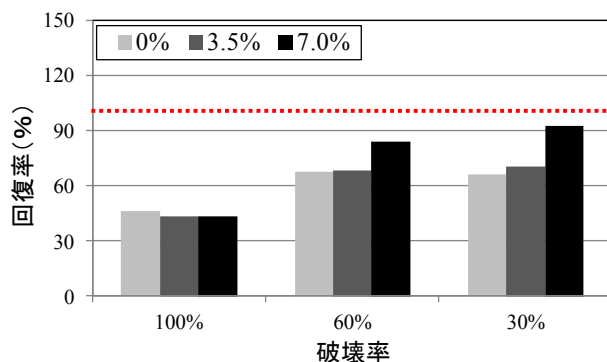


図-10 加熱時間 60s（拘束無）

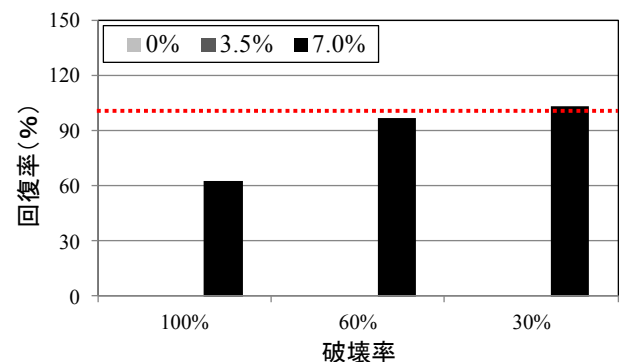


図-11 加熱時間 120s（拘束無）



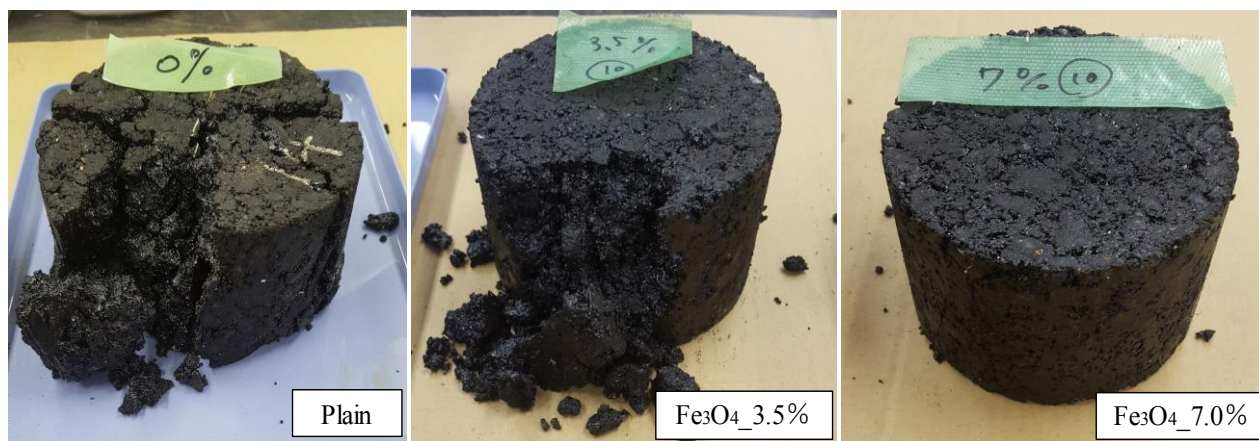


写真-1 試験体の様子 (加熱時間 120s、拘束無)

≤7.0%のような傾向を示した。特に、酸化鉄の混入量 7.0%の場合は酸化鉄の選択的加熱により回復率が高くなることを確認した。マイクロ波の照射時間 120s においては、酸化鉄の混入量 0%と 3.5%の試験体はマイクロ波加熱によって試験体に変形し、部分的に崩れることが確認できた(写真-1 参照)。しかし、酸化鉄の混入量 7.0%の場合、「拘束有」の場合とほぼ等しい回復率を示しており、試験体の変形も発生しないことを確認した(写真-1 参照)。塩化ビニル管で試験体を固定しない「拘束無」の場合においては、試験体側面を覆う塩化ビニル管がないことで「拘束有」の場合よりマイクロ波を吸収する面積が増大するためマイクロ波の吸収エネルギーも増大したと考えられる。同時にマイクロ波によってアスファルト混合物中の酸化鉄が選択的に加熱されることにより、アスファルト混合物自体の過度な加熱が抑制され、結果として試験体の形状が維持されたことが回復率の上昇に繋がったものと推測される。

#### 4. まとめ

本研究では、酸化鉄( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )を混入した密粒度アスファルト混合物の配合比の検討とともに、破壊率や拘束有無の条件下で酸化鉄混入量を変化させた試験体を対象としてマイクロ波加熱による回復率の検討を行った。以下に本研究における知見を示す。

1) 酸化鉄を混入した密粒度アスファルト混合物の配合比を検討した結果、平均粒径が約 $40\mu\text{m}$ の非常に微細な酸化鉄を内割置換することで、最適アスファルト量が小さくなるものの、標準粒度分布曲線を満足することを確認した。したがって、酸化鉄を 7%まで内割置換した密粒度アスファルト混合物の製作は可能であると考えられる。

2) 拘束有の場合、酸化鉄を混入しない密粒度アスファルト混合物の方が回復率は高くなった。これは、最適アスファルト量が比較的多く密粒度アスファルト混合物が溶けやすい状況にある一方で、混合物の流動が拘束されるためひび割れ界面が再付着し回復率の増加につながったと考えられる。

3) 拘束無の場合、マイクロ波を吸収する面積が増大することでマイクロ波の吸収エネルギーが増大することとともに、酸化鉄の混入量 7.0%ではマイクロ波によってアスファルト混合物中の酸化鉄が選択的に加熱されることで試験体の形状が維持され、回復率が上昇したものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 石川俊哉：アスファルト舗装クラック補修方法の工夫, JCM マンスリーレポート, Vol.25 No.4, 2016.7
- 2) (公社) 日本道路協会：アスファルト舗装の損傷事例, 5 章, pp.57~114
- 3) Choi, H., et al.: Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete, Journal of Environmental Protection, No.5, pp.583-596, 2014.
- 4) Álvaro Garcia, 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) 吉田隆輝：アスファルト混合物の圧裂特性, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008.09
- 6) 森吉他：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 210 号, pp.57~64, 1973.2

#### 謝辞

マイクロ波加熱による密粒度アスファルト舗装の自己治癒にあたっては、ニチレキ株式会社技術研究所にお世話になりました。ここに記して、感謝の意を表します。