

ひび割れ中の酸素濃度を対象とした非接触式酸素計測に関する検討

愛媛大学 正会員 谷川 魁 西日本高速道路 非会員 高升 那々子
愛媛大学大学院 正会員 河合 慶有 愛媛大学大学院 正会員 氏家 勲

1. はじめに

近年、ひび割れ補修を対象としたバイオ補修材の研究が進められている。既往の研究¹⁾では、納豆菌とアルギン酸ナトリウム及び栄養源であるグルコースを用いて、モルタルのひび割れ中に注入し、炭酸カルシウムが析出することでひび割れを閉塞する効果が確認されている。バイオ補修材をひび割れに注入するとアルギン酸ナトリウムとひび割れ表面のカルシウムイオンが反応し、イオン架橋によりゲル被膜が形成され微生物と栄養源をひび割れ中に封じ込めることができる。また、納豆菌の代謝に伴いひび割れ中の溶存酸素量は減少し、pHも低下することとなるが、アルカリ環境下では代謝生成物と水酸化カルシウムが反応し、ひび割れ中に炭酸カルシウムが析出する。しかしながら、このようなひび割れ中の自律治癒性状を把握する方法は確立されていない。以上のような背景から、本研究では、アルギン酸ナトリウムを用いて作製された自己治癒カプセル及びバイオ補修材を注入したモルタル供試体のひび割れを対象として、非接触式の酸素計測技術を用いて溶存酸素濃度を計測し、自律治癒性状を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 光学式カメラと酸素センサー

本研究では光学式カメラを用いて非接触で酸素濃度を計測する技術を用いた。酸素が蛍光体に衝突すると蛍光エネルギーを吸収し、蛍光が持つエネルギーが消失するクエンチングという現象を利用し、蛍光染料が塗布されたセンサシートを測定対象物に密着させ、蛍光エネルギーの強度と消失時間を計測することで酸素濃度に換算可能な空気飽和度 (a.s.%) を計測することができる。なお、計測精度は $\pm 1.5 \sim 3.0\%$ である。計測の様子を図1に示す。

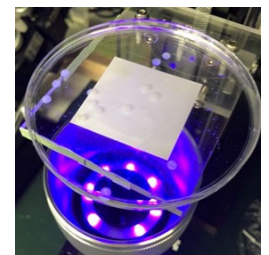


図1 計測の様子

2.2 カプセルの作製

次に、納豆菌を用いたカプセルの作製方法を示す。まず、納豆菌培養液を溶媒として質量パーセント濃度 1.5% のアルギン酸ナトリウム水溶液を作製する。なお、栄養源のグルコースは 0.40mol/L として予め溶解させている。シャーレ内に Tris 緩衝溶液 (0.1mol/L) を用いて pH8.0 に調整した酢酸カルシウム水溶液 0.2mol/L を作製し、スポイトを用いてアルギン酸ナトリウム水溶液を滴下する。このように作製されるアルギン酸カルシウムのカプセルはゲル状で内部に微生物及び有機栄養源を封じ込めることができる。また、ゲル被膜は半透性を有しておりイオンの移動は可能となっている。

2.3 モルタル供試体およびバイオ補修材の作製

本研究では、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のモールド管を使用し、水セメント比 60% のモルタル供試体を作製した。モルタル配合を表1に示す。混和材には、JISA 6201II種に適合しているフライアッシュ (密度 2.30g/cm^3 , $4090\text{cm}^2/\text{g}$) を使用した。供試体は打設後 24 時間で脱型し、材齢 28 日まで封緘養生を行った。また、コンクリート部材に生じたひび割れを模擬するため、載荷試験機を用いて $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ の割裂ひび割れを導入した。割裂ひび割れを導入後に、エポキシ樹脂系接着剤で供試体側面を被覆し、中性化試験槽 (二酸化炭素濃度 5%) に静置した。中性化期間は、材齢 28 日から 12 週間とした。中性化後には、供試体高さが約 20mm になるように湿式カッターを用いて供試体を切断した。次に、2.2 で述べたバイオ補修材 (酢酸カルシウムを含まない) を作製した。その後、供試体 1 体につき、バイオ補修材を 5mL 注入後、蒸留水を用いて乾湿繰り返し実験 (乾燥 12 時間 + 湿潤 12 時間) を実施した。なお、各サイクルの湿潤直後に酸素濃度を計測した。

表1 モルタル供試体の配合

供試体	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)				(g/m^3)
		水	セメント	混和材	細骨材	AE減水剤
FA	60	277	324	139	1357	1458

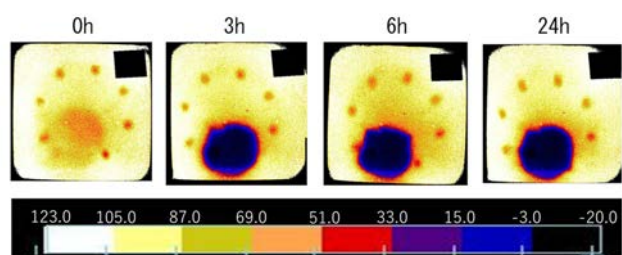


図2 カプセル中の空気飽和度の経時変化

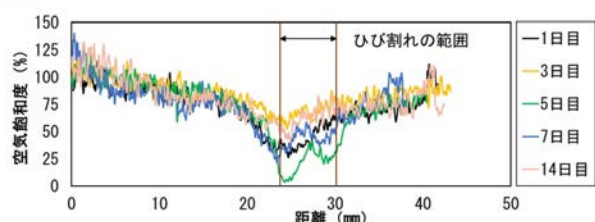
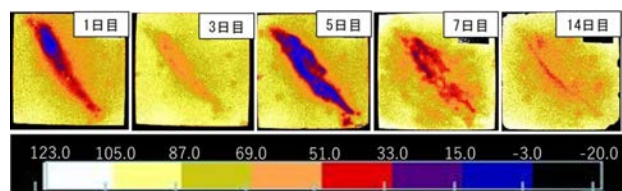


図4 モルタルひび割れ中の空気飽和度の分布

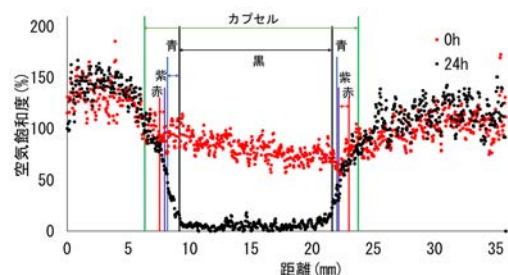


図3 カプセル内外の空気飽和度

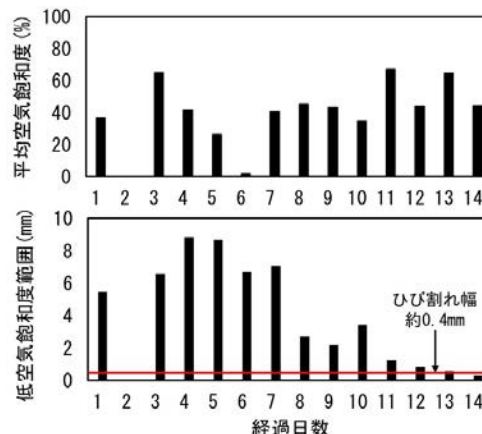


図5 ひび割れ範囲の平均空気飽和度及び低空気飽和度の範囲

3. 実験結果および考察

2.2 で述べた方法で酸素センサシートを接着したシャーレ上にカプセルを作製し、カプセル作製直後から 24 時間後までを計測対象とした。計測した空気飽和度の分布を図 2 に示す。なお、計測結果の円状に並ぶドットは、光源が映り込んだノイズであり、空気飽和度の低下を示すものではない。図より、カプセル内部の空気飽和度が低下していることがわかる。また、カプセル近傍を含めカプセル内部の空気飽和度を対象として任意で指定した 900pixel (約 40mm) 分のデータを抽出したグラフを図 3 に示す。なお、カプセルの位置をグラフ上に表示している。カプセルの直径は約 18mm であり、24 時間後に空気飽和度が低下しているのはカプセルの内側であることがわかる。また納豆菌の代謝により、カプセルの外周においてはカプセル外（大気）から内側の方向に酸素濃度の勾配が生じていることがわかる。以上の結果に基づき、納豆菌はカプセル外に流出することなく、カプセル内部において継続的に代謝していると推察される。

次に、バイオ補修材を注入した FA-12w における 14 日後までの計測結果を図 4 に示す。図より、14 日目の計測においても空気飽和度の低下を確認することができたため、14 日間の乾湿繰り返し実験ではひび割れ中に形成されたゲル被膜内に納豆菌は存在していると推察され、継続的な代謝に伴いひび割れ中の酸素濃度は低下し続けていることがわかった。また、ひび割れ近傍においても空気飽和度の低下が確認でき、本検討では空気飽和度が低下する範囲を特定することを試みた。ひび割れに直交する任意の線上の空気飽和度が低下した範囲を抽出したグラフを図 5 に示す。なおグラフ上にはひび割れ幅約 0.4mm を示している。図より、実験の初期にはひび割れ幅よりも広い範囲で空気飽和度が低下しているものの、乾湿繰り返しに伴い空気飽和度の低い範囲が徐々に小さくなっていることがわかる。しかし、14 日後においてもひび割れ位置における空気飽和度の低下は明確に検知できており、非接触式酸素センサーを用いて 0.4mm 程度のひび割れ中における納豆菌の代謝活性を評価できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（19H02216）及び JST（JPMJTM19YW）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) K. Kawaai, T. Nishida and A. Saito, Effect of Crack Repair by Bio-Based Materials Using Alginate and Bacillus Subtilis under Wet and Dry Environment Part-I, in: Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components, 2020