納豆菌の微生物代謝が鉄筋腐食抑制効果に与える影響

愛媛大学大学院　非会員　○藤岡宗一郎
愛媛大学大学院　正会員　河合慶有　正会員　氏家勲

１．はじめに

近年，コンクリート中の鉄筋腐食に伴う RC 構造物の早期劣化が社会問題となっている．鉄筋腐食が発生すると，鉄筋表面では鉄がイオン化するアノード反応と酸素が還元するカソード反応が進行し，セルという腐食電池が形成される．カソード反応においては，鉄筋表面で酸素が消費されるため，酸素透過量はコンクリート中の鉄筋腐食に大きな影響を及ぼす要因の一つであることが報告されている．また，コンクリート中の鉄筋腐食はマクロセル腐食とミクロセル腐食に大別される [1)]．既往の研究 [2)]において，好気性微生物である納豆菌をモルタル中に混入させることで，納豆菌がセメント硬化体中の溶存酸素を消費し，鉄筋腐食反応のうちカソード反応を抑制できる可能性が示唆されている．しかし，本実験は室内の乾燥環境で実施されたため，鉄筋腐食抑制効果について電気化学的計測を通じた検証が十分になされているとはいえない．そこで，本研究では納豆菌を混入した曲げひび割れを有するモルタル供試体を対象として，塩水を用いた乾湿作用下における鉄筋腐食抑制効果について酸素透過性と腐食形態を考慮して検討を行った．

２．実験概要

（1）供試体概要及び養生方法

供試体は，**図 1** に示すように断面 60×70 mm，長さ 140mm の角柱供試体とし，分割鉄筋を 1 本埋設した．丸鋼の両端にリード線をはんだで固定し，エポキシ樹脂を用いてはんだ付け部分を被覆し，分割鉄筋（ϕ9mm，長さ 20mm）を作製した．かぶりはいずれの供試体においても 30mm とし，各検討ケースについて 2 体ずつ作製した．モルタルの配合を**表 1** に示す．打設から 1 日後に脱型し，材齢 28 日まで水中養生を行った．水中養生終了後，ケース 1，3，5，7 の供試体には 4 点曲げ試験により曲げひび割れ（0.15mm 程度）を導入した．

（2）試験方法

本検討では，20℃の恒温室で塩水（10%）を用いて湿潤 3 日，乾燥 4 日を 1 サイクルとした乾湿繰り返し試験を行った．なお，湿潤期間後に各測定を行った．自然電位及びミクロセル電流密度は，AC インピーダンス法を用いて測定し，腐食の判定を行った．また，マクロセル電流密度は無抵抗電流計を用いて測定した．なお，材齢 56 日においてカソード分極試験（掃引速度 1mV/s）を行い，限界電流密度を測定することにより，酸素透過速度を算出した．

３．実験結果及び考察

（1）自然電位の測定結果

図 2 に材齢 28 日以降に測定された自然電位の測定結果を示す．ケース 1，3，5，7 は曲げひび割れを導入した供試体である．埋設した分割鉄筋の要素 B において，特に納豆菌を混入していないケース 1，3 の自然電位が -600 mV vs. CSE よりも卑下し，明確な腐食傾向が確認された．一方，曲げひび割れを有する供試体であっても，

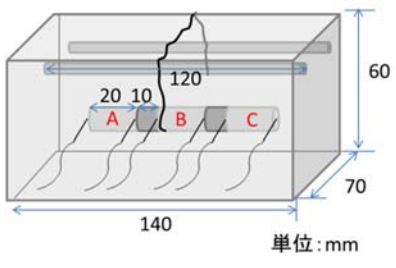

図 1　供試体概要

表 1　配合表

ケース	塩分	納豆菌適用方法	曲げひび割れ	W/C (%)	単位量(kg/m³)					
					W	C	S	納豆菌	AE減水剤	NaCl
1	無	無	有	50	316	632	1264	－	3.16	－
2			無							
3	有		有							10
4			無							
5	無	練り混ぜ水	有		158			158		－
6			無							
7	有		有							10
8			無							

納豆菌を混入したケース 5 及び 7 では，ケース 1 及び 3 と比較して貴な電位を示している．これらの結果から，納豆菌を混入することで，曲げひび割れ部における腐食傾向に明確な違いが認められる．

（2）ミクロセル電流密度の測定結果

図 3 にミクロセル電流密度の測定結果を示す．ケース 3 の要素 B では曝露試験の早い段階でミクロセル電流密度は 1μA/cm^2 よりも大きい値を示し，明確な腐食傾向が確認された．また，材齢 56 日以降において塩分，納豆菌ともに混入していないケース 1 の鉄筋要素 B においてもミクロセル電流密度は徐々に増加し，明確な腐食傾向が確認された．一方，納豆菌を混入したケース 5 及び 7 の供試体では特に材齢 56 日以降においてミクロセル電流密度は 1μA/cm^2 を超えていない．さらに，材齢 91 日においては最大で 0.2μA/cm^2 程度となっている．これらの結果から納豆菌を混入することでミクロセル腐食を抑制する効果が得られる可能性が示唆される．

（3）マクロセル電流密度の測定結果

図 4 にマクロセル電流密度の測定結果を示す．マクロセル電流密度は．鉄筋要素 AB 間及び BC 間で測定し，定常状態に達した際の絶対値をそれぞれ足し合わせた結果となっている．なお，いずれのケースも鉄筋要素 B がアノードとなっていることを確認している．納豆菌を混入していないケース 1 では 0.160μA/cm^2，納豆菌を混入したケース 5 では 0.013μA/cm^2 となっており，0.150μA/cm^2 程度低減されていることがわかる．また，塩分を混入したケース 3 及び 7 を比較すると，納豆菌を混入していないケース 3 では 0.204μA/cm^2，納豆菌を混入したケース 7 では 0.015μA/cm^2 となっており，0.190μA/cm^2 程度低減されていることがわかる．これらの結果より，納豆菌を混入することによるマクロセル電流密度の低減が明確に確認された．以上の結果から，曲げひび割れ部では，マクロセル腐食による局所的な腐食が進行している可能性が考えられたが，納豆菌を混入したケース 5 及び 7 の供試体においては，マクロセル電流密度は極めて小さい値を示した．次に，上述した鉄筋腐食抑制効果について鉄筋要素 A 及び C で消費される酸素透過速度の結果を踏まえて考察を加えた．

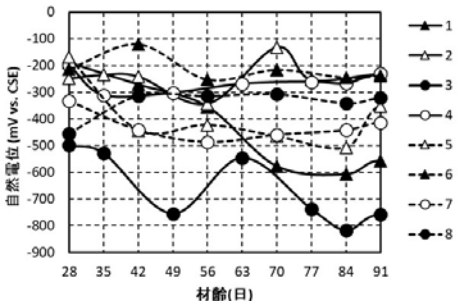

図 2　自然電位の結果

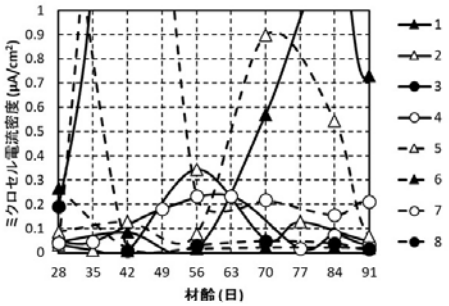

図 3　ミクロセル電流密度の結果

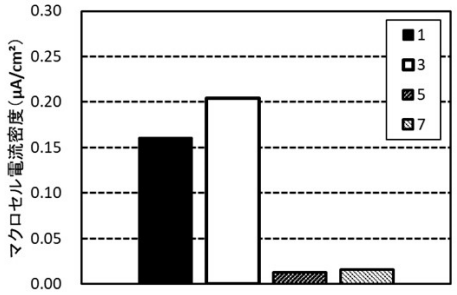

図 4　マクロセル電流密度の結果

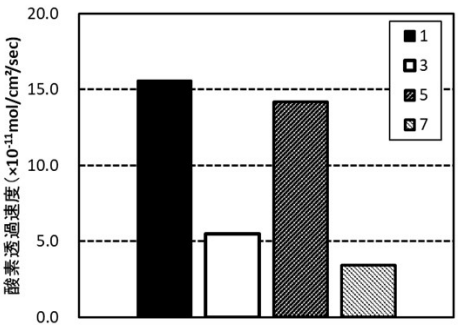

図 5　酸素透過速度の結果

（4）酸素透過速度の測定結果

図 4 に材齢 56 日における酸素透過速度の測定結果を示す．曲げひび割れを有する供試体について塩分を混入していないケース 1，5 と混入したケース 3，7 をそれぞれ比較すると，納豆菌を混入したケース 5，7 の方が酸素透過速度は小さい値となっている．したがって，マクロセル電流密度の結果を踏まえると納豆菌を混入した供試体では溶存酸素濃度が低減されたことにより鉄筋要素 A 及び C におけるカソード反応が抑制され，マクロセル腐食の進行が抑制された可能性が示唆される．

参考文献

1） 宮里ら：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・論理的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，2001.

2） K. Kawaai et al.: Enhancement of corrosion resistance in mortar using aerobic bacillus subtilis, HealCon, 2016.