

硫黄酸化細菌を想定した酸によるコンクリート腐食現象の解析

日大生産工（院）○杉浦 広人 日大生産工 大木 宜章
日大生産工（院） 木科 大介 ソフトハウス㈱ 藤本 憲司

1. はじめに

近年、初期に整備された下水道管が耐用年数に達し、都市部では管路の再構築という新たな課題に取り組んでいる。

その一方で、耐用年数である50年に満たない時期において、コンクリート下水道管の早期老朽化が原因で道路の陥没事故などが起きている。この老朽化は

- ①コンクリートの中性化による劣化
- ②下水中に含まれる有機酸による腐食
- ③下水道管内に生息する硫黄酸化細菌が硫化水素を酸化することによって生成する硫酸による腐食

などによるものと考えられ、さらにこれらの条件の相乗効果によって引き起こされる。

本研究では、老朽化の原因の中でも最も深刻な『硫黄酸化細菌が生成する硫酸によるコンクリートの腐食』に着目し、レーザー変位計を用い、初期段階における硫黄酸化細菌の硫酸を想定した硫酸単体での腐食の進行を数値的に解析した。

2. 実験概要

施工時のコンクリートは高アルカリであるため、硫黄酸化細菌の生育には適さない。しかし、中性化が進行し表面が至適pHになると、硫黄酸化細菌の増殖により腐食が進行する。これと同様の条件にするため、コンクリート供試体（形状40mm×40mm×40mm）はCO₂にて一年間中性化（供試体表面pH8.8）させたものを用い、pH2.0に調整した硫酸水溶液に浸漬し、パラフィルムにて密閉した状態で25℃の恒温装置内で実験を行った。なお、

硫酸水溶液のpHについては、腐食されたコンクリートがpH1.0～3.0であることから、pH2.0に調整したもので実験を行った。

測定項目は硫酸水溶液のpH、供試体重量、レーザー変位計による供試体の形状変化の測定および光学顕微鏡による視的観察を2日間毎に行った。レーザー変位計は広域の測定に適したLK-Gと細部の測定に適したLTを用いて測定を行い、今回はLTのデータを中心に解析を行った。

3. 実験結果

図-1に硫酸水溶液のpHの変化を示す。

初期の段階においてコンクリート中のアルカリ分の溶出に伴うpHの急激な上昇が見られ、6日目以降も6日毎に急激なpHの上昇がみられるが、連続してpHが上昇することはなくなり、コンクリート表面のアルカリ分の溶出は減少し、pHも低下していると考えられる。

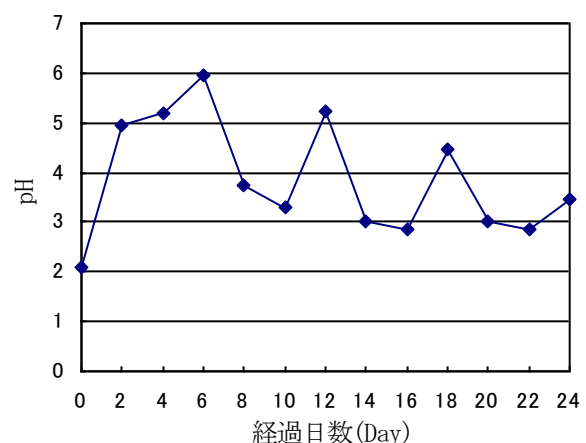


図-1 pHの推移

The Analysis of the Concrete Corrosion Phenomenon by the Acid that Assumed Sulfur Oxidation Bacteria

Hiroto SUGIURA, Takaaki OHKI, Daisuke KISHINA, and Kenji FUJIMOTO

図-2に重量減少率の推移を示す。
 実験開始2日目に重量の微量増加が見られた。これはコンクリートの主成分である水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 等と硫酸 (H_2SO_4) の反応によって生成された、二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) および膨張性物質の、エトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) 等の影響であると考えられる。また、エトリンガイトは非常に脆く、容易に崩壊する物質であるため、重量の増加後に大幅な減少がみられるのはこのためと考えられる。2日目以降は微量の増加と大幅な減少を繰り返しながら、徐々に減少する結果となった。

写真-1に顕微鏡写真($\times 40$)を示す。
 供試体表面の0日目、12日目、24日目のもので、すべて同じ箇所を撮影したものである。0日目はクラックが見られないが、12日目では多くのクラックが見られ、左下の部分には表面が剥がれ落ちている様子が見られる。実際には、この時点で表面の変色も起こっている。図-1の結果より12日目ではpHの上昇が見られ、供試体表面から大量のアルカリ分が溶出した。このことにより供試体表面が硫酸の影響を受けやすい状態となり、表層部分の脱落につながったと言える。24日目には細骨材もみられ、表面がより多く剥がれ落ちていることがわかる。

図-3に供試体の表面画像の経日変化を示す。
 画像はレーザー変位計により測定した供試体上面の一部で、測定範囲は $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ で、写真-1と同じ場所を測定したものである。
 0日目は顕微鏡写真と同じく表面は滑らかな状態で、12日目ではクラックと表層が脱落した箇所が現れている。LTの画像では深い場所になるほど色が暗くなるため、顕微鏡写真では判断しにくかったクラックの深さも確認できる。24日目では硫酸の影響によるクラックが多く発生した状態となり、表面の腐食が進行していることがわかる。LT画像において0日目から存在するクラックを【クラックA】とする。日数の経過と共に徐々に拡大し、その右下には新たなクラックが見られる。写真-1と比較して見ると、24日目は全体的に表面が剥がれ始めていることがわかる。

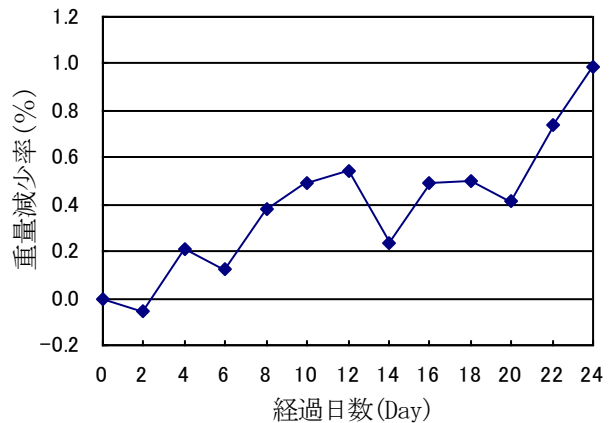


図-2 重量減少率

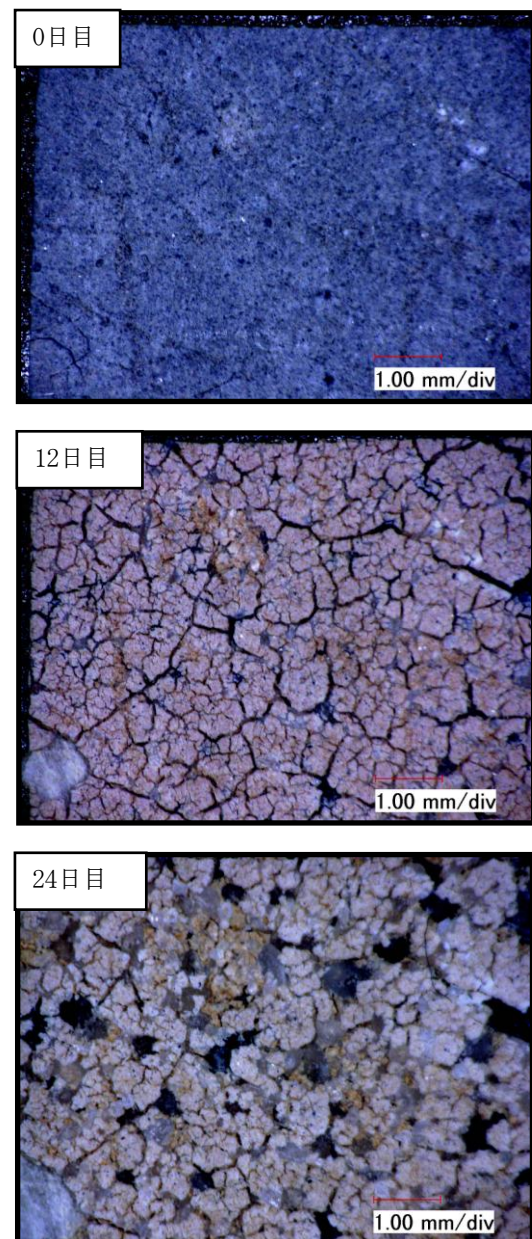


写真-1 供試体上面の経日変化

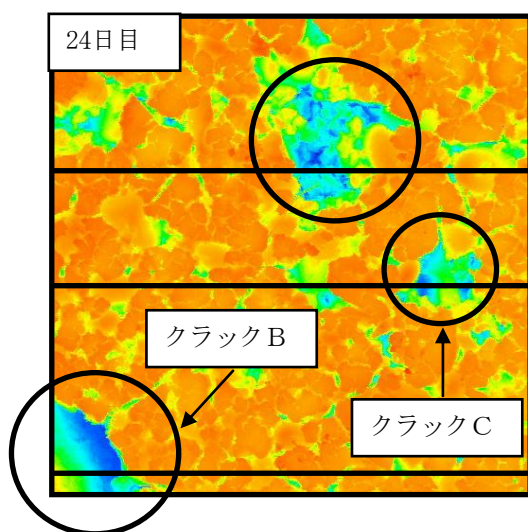
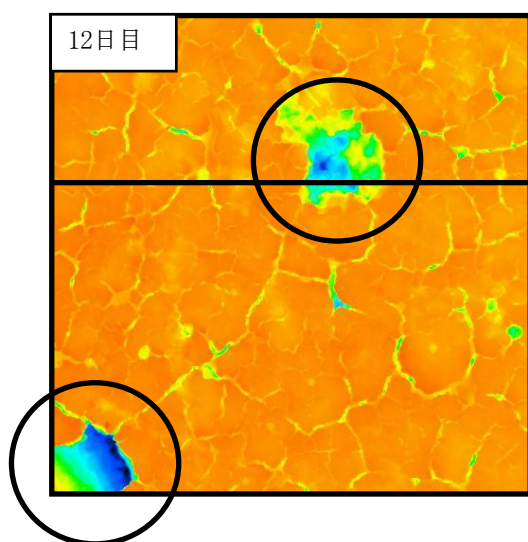
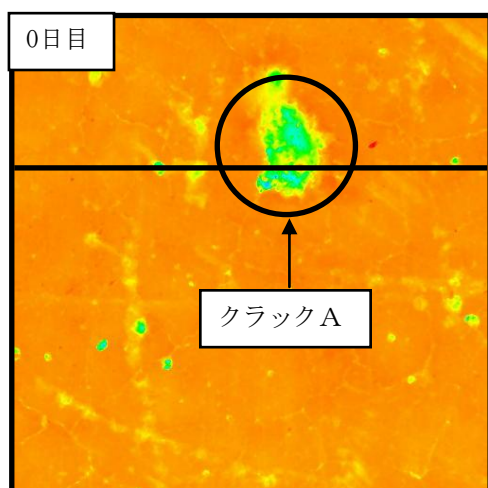


図-3 LT画像

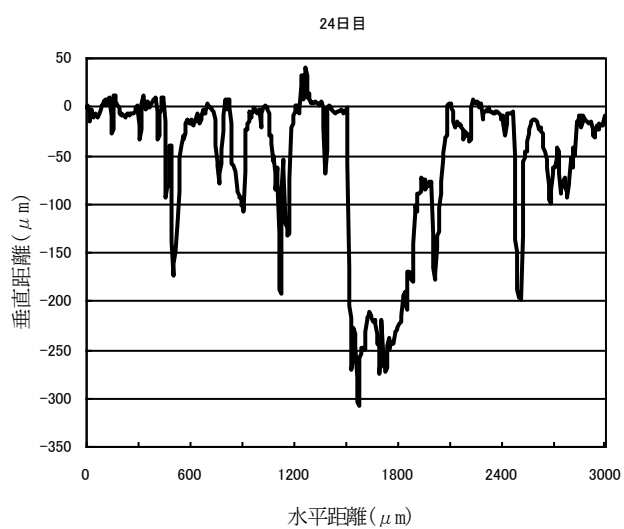
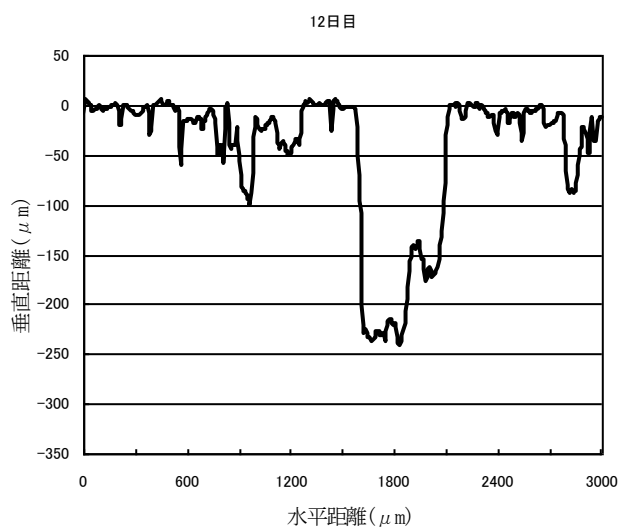
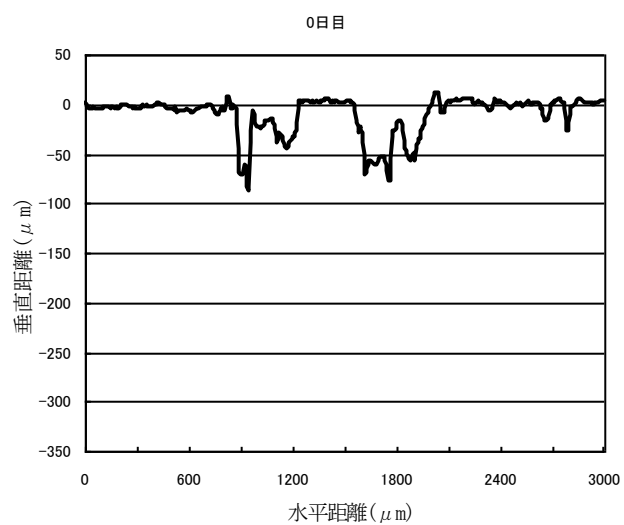


図-4 クラック A断面図

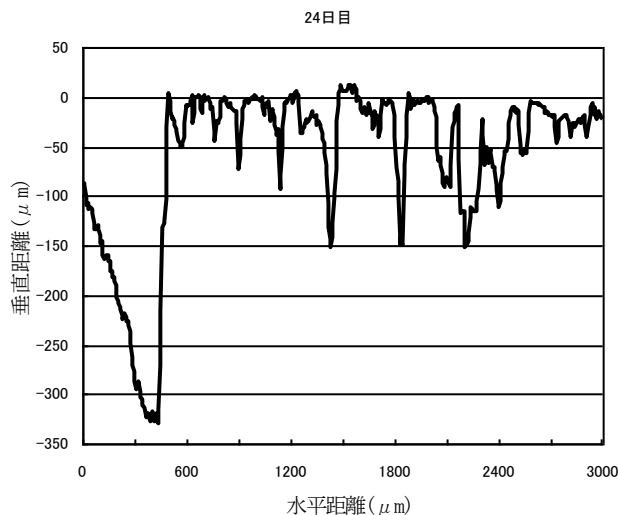


図-5 クラック B 断面図

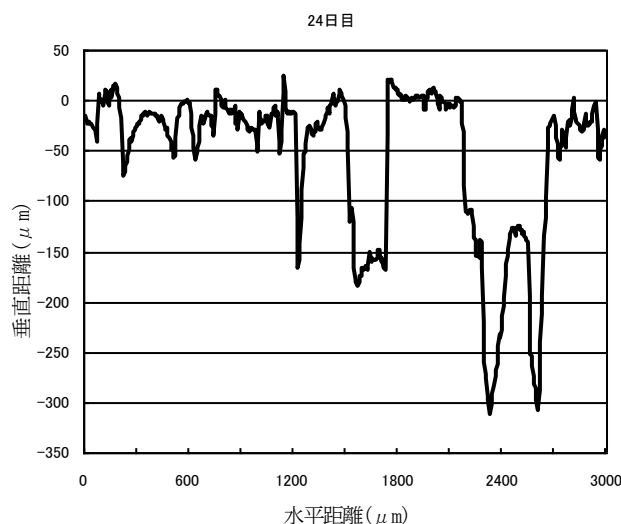


図-6 クラック C 断面図

図-4にLTでの数値解析による供試体表面の形状を示す。

このグラフは図-3におけるライン部の形状を示したもので、特徴的であるクラックAの部分を中心に、断面形状をグラフ化したものである。0日目では深さ100 μm に満たないものが、12日目で250 μm 近くに達し、24日目においては300 μm を超える深さとなっている。クラックA以外の箇所においても、硫酸の影響によって生じた微細なクラックを中心として腐食が拡大しているといえる。

最後に12日目、20日目に表層の脱落によって発生した巨大なクラックの断面図を示す。12日目のものを【クラックB】、20日目のものを【クラックC】とし、それぞれ図-5、図-6に示す。

24日目のクラックAと比較するため、B、Cどちらも24日目のものをグラフ化した。

B、CどちらもA以上の深さまで腐食が進行している。表層部分の脱落により深いクラックが一瞬で発生したが、発生時から24日目まではクラックの拡大がみられない。これは、実験開始時からクラック内部に硫酸が浸透しているクラックAとは異なり、B、Cは脱落が起こる直前までは内部にアルカリ分が残留していたと考えられる。そのため、腐食の進行が他の箇所比べて遅くなったのではないかと考えられる。

しかし、26日目以降は表層の脱落が一挙に進み、LTでは測定不可となってしまったことから、この期間に硫酸がクラックから内部に浸透し、腐食が内部から進行したものと考えられる。

4. まとめ

重量減少率の結果より、硫酸によるコンクリート腐食は初期段階において、エトリンガイト、二水石膏などの影響による膨張現象により、重量の増加、その後は崩壊による減少が起き、この増加と減少を繰り返しながら、全体として徐々に減少することが確認された。pHの変化からもコンクリート中のアルカリ分の消失が腐食に関係しているといえる。断面形状の推移からは、クラックは横方向にはあまり拡大せず、主に縦方向に拡大していることが分かる。この縦方向に拡大したクラックから浸透した硫酸が内部からコンクリートと反応し、生成されたエトリンガイト等の結晶物の膨張と崩壊により、コンクリートの内部がポーラスな状態となり、その部分に硫酸がさらに浸透し、内部からの腐食により表層部分の脱落が起こる。

以上のことから、硫酸によるコンクリート腐食は、表面の腐食によって発生したクラックから、硫酸が浸透し、内部からも同時に進行するものであり、その結果、表層部分の脱落が起こり、徐々にコンクリートの表面が減少し、腐食が進行して行くものと考えられる。

謝辞 本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業による私学助成を得て行われた。ここに記して誠意を表す。