

資源循環型社会に則したインフラ施設における 有機・無機的要因の現象解明と改善に関する研究

日大生産工 大木 宜章 日大生産工 河合 糺茲
日大生産工 岩下 圭之 日大生産工 保坂 成司
日大生産工 高橋 岩仁 日大生産工(P.D.) 木科 大介

1. はじめに

これまでの土木分野では土やコンクリートなど無機体からなる構造の解明を主体として研究されてきたが、これらの解明には無機的要素だけでなく、有機的要素を加味した現象の解明が不可欠となっている。このことから、環境（環境科学を含めた自然現象やサイクル）・衛生（生を衛る）分野は、広義の生命工学の一部分と位置づけされる。

本研究グループでは、狭義の生命工学分野として社会基盤におけるライフライン、下水道に着目し、下水道管の腐食メカニズムの解明、測定技術の開発および防食技術の確立、さらに腐食の基である水環境の把握について、有機・無機的要因の現象解明と改善を行った。なお、この解明過程において生物・生命や生活向上を目標とした他グループとの調和は不可欠であり広義での生命工学分野といえる。これらの解明・開発から得られた知見・技術は広く社会に還元するものである。

本研究グループは、現状の水質汚濁の把握－現象の解明－腐食診断の開発－腐食対策の流れから、研究分担者毎に大きく

- ①生命工学的見地からの下水道施設腐食メカニズムの解明と測定法の確立
 - ②コンクリート下水道施設の延命効果に関する研究
 - ③空間情報による水環境浄化評価
- の3つに分けて行った。以下に、本研究グループの研究成果を記載する。

2. 生命工学的見地からの下水道施設腐食メカニズムの解明と測定法の確立

現在、わが国における下水道普及率は平成20年度で全国平均71.7%、東京都内においてはほぼ100%と、高度成長期を機に下水道のインフラ整備は急速に進められた。しかし、初期に整備された下水道管は耐用年数に達し、下水道の維持改修や再構築が必要とされている。さらに近年、耐用年数に満たないコンクリート下水道管の早期老朽化により、道路の陥没事故などが頻繁に発生しており、深刻な社会問題となっている。

本研究は、これまで下水道施設における早期老朽化の原因解明について、無機的手法だけでなく有機・無機の複合作用として現象の解明を行っている。これに腐食度合の測定方法を確立することにより、腐食の診断とその結果に対する生命工学的な対策が可能となり、構造物のライフサイクル延命を図ることができる。

2. 1 高精度レーザー変位計によるコンクリート腐食現象の長期変位解析

下水道施設における早期老朽化の原因として、コンクリートの中性化に加え、下水中に含まれる有機酸による腐食現象、さらに、硫黄酸化細菌による下水道管内の硫化水素（ H_2S ）の酸化反応から生成される硫酸による腐食が考えられる。

これまでの研究では H_2S 、 CO_2 および人工下水を用いて腐食を行ったが、本年度は実験条件を更に下水道管内の環境に近づけると共に、菌がコンクリートに与える影響を解明することを目的として、硫化水素、人工下水および硫黄酸化

Research on the Methodologies for Solving and Improving the Phenomenon of the Effects of Organic/Inorganic Factors on Public Facilities -Based upon the “Resources Recycle Concept”

Takaaki OHOKI, Kawai TADASHI, Iwashita KEISHI, Seiji HOSAKA, Iwahito TAKAHASHI
and Daisuke KSHINA

細菌による腐食現象について、高精度レーザー変位計と解析ソフトを用いて、供試体表面の形状変化を数値化し腐食現象の解析を行った。

図-1に実験概略図を示す。実験は、密閉容器内にコンクリート供試体（形状40×40×80mm）を静置し、供試体が半分まで人工下水に浸した状態で行った。また、下水道管の内部環境を再現するため、供試体上部に菌体を増殖させたスポンジを乗せ、上部に接続したテドラーバッグにより容器内部にH₂Sを注入した。なお、本実験は恒温槽により気温を25℃に保ち行った。測定項目は供試体重量、レーザー変位計による供試体気中部、喫水部、水中部の形状変化および光学顕微鏡による視的観察、さらに人工下水のpHとした。

図-2に供試体の重量減少率の経時変化を示す。実験初期段階、供試体重量は増加傾向を示した。これは、コンクリート内部の水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と硫化水素(H₂S)の酸化により生成された硫酸(H₂SO₄)の反応により二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が生成され、これがモノサルフェート(3CaO・Al₂O₃・CaSO₄・12H₂O)および未反応のアルミン酸カルシウム(3CaO・Al₂O₃)と反応し、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)などを生成したといえる。なお、7週目以降は結晶の生成に伴う重量増加と生成物の崩落が繰り返行われ、徐々に減少傾向を示した。

図-3に、LK-Gによる断面形状の推移（喫水部）を示す。LK-Gによる測定は気中部(上面)、喫水部(側面)、水中部(下面)で行なった。その結果、腐食は気中部より水中部の方に目立ってみられた。したがって、今回の実験条件による腐食は、人工下水の酸化により生成された有機酸および気中のH₂Sに由来する硫酸が主な要因であるといえる。また、上面には腐食がみられなかったことから、硫黄酸化細菌によるH₂Sからの硫酸生成はなかったといえる。このことから、今回の条件は、硫黄酸化細菌の活動に不適な条件であったと推測される。グラフより、0週目、23週目および35週目を比較すると、水中部でも特に喫水部分の腐食が目立っており、35週目において

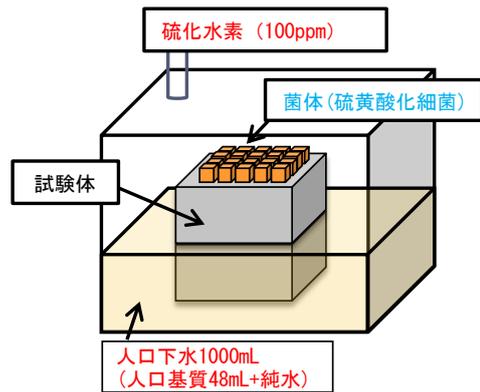


図-1 実験概略図

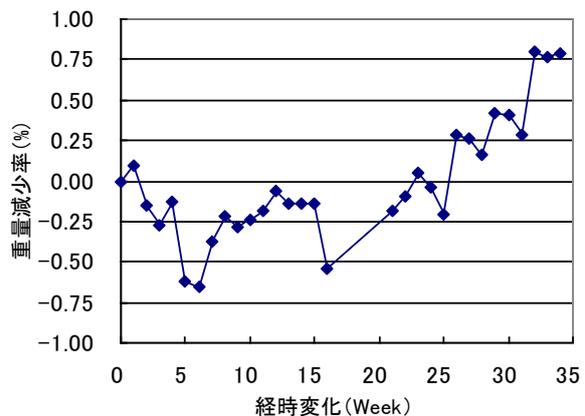


図-2 供試体の重量減少率の経時変化

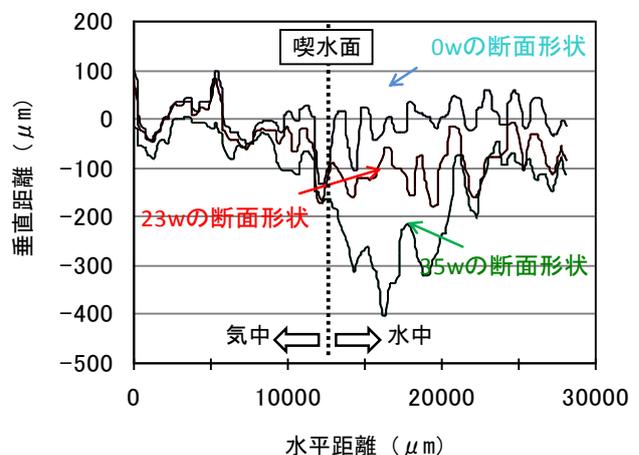


図-3 LK-Gによる断面形状の推移（喫水部）

最も減少の激しかった部分では約400μmの減少がみられた。また、この腐食現象についてはLK-Gによる画像においても明確に表すことができている。以上のことから、下水管内における腐食現象において、高精度レーザー変位計(LK-G, L-T)において視覚的および数値的に表すことができたのと同時に、腐食メカニズムの解明に寄与したものといえる。

2. 2 下水道施設におけるコンクリートの劣化層推定に関する研究

早期老朽化の対策として補修，再構築の箇所を抽出すべく，下水道管の腐食調査は頻繁に行われている。この調査において管径 800mm 以下では，管内調査カメラの映像による目視調査であるため，内部評価など構造物の健全性に関わる調査を行えないのが実状である。

本研究では供用中である構造物に損傷を与えることなく内部調査が行える非破壊検査として超音波法を用い，腐食による劣化層の推定が可能であるか検討を行った。

図-4 に超音波実験装置を示す。実験装置は「パルサーレシーバー」「トランスデューサー」「オシロスコープ」で構成されている。

図-5 に供試体平面図および断面図を示す。微生物による腐食を受けたコンクリートの主成分は二水石膏であることから，本研究では，内部反射の影響が少ない 300mm×300mm×50mm のコンクリート平板の表面に劣化層に見立てた石膏層を作成したものを供試体とし実験を行った。

今回使用する試験体はコンクリートと石膏の複合体であり，コンクリートと石膏では超音波の伝播速度に違いが生ずる。よって今回の伝播時間の計算は次の式を用いた。なお，コンクリートと石膏の伝播速度は測定の結果，4100m/s，および1900m/sであった。

$$T = \frac{L_G}{V_G} + \frac{L_C}{V_C} \dots \textcircled{1}$$

L_G ...石膏における伝播距離 (m)

L_C ...コンクリートにおける伝播距離 (m)

V_G ...石膏における伝播速度 (m/s)

V_C ...コンクリートにおける伝播速度 (m/s)

T ...伝播時間 (s)

図-6 に伝播経路の模式図を示す。これまでの研究では過去の実験で，超音波が供試体を伝播する経路として石膏を透過したのち，コンクリート表面を伝播する経路が有力であることがわかった。したがって，実測伝播時間より式①を用いてコンクリート伝播距離の計算を行った。図-7 にトランスデューサー間隔に対するコンクリート伝播距離の関係を示す。グラフより，ト

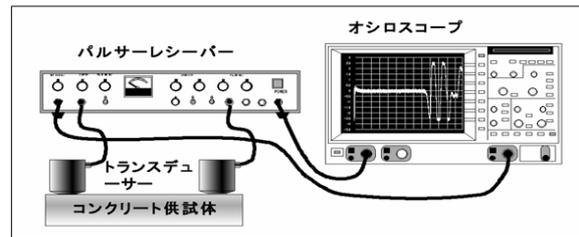


図-4 超音波実験装置

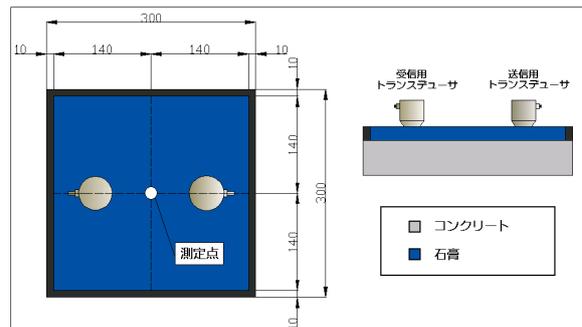


図-5 供試体平面図および断面図

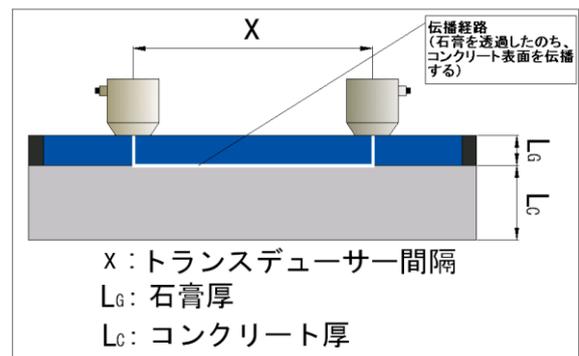


図-6 伝播経路模式図

ランスデューサーの中心間隔と伝播距離の関係は一次式で示された。

$$L' = 1.0067x - 16.103 \dots \textcircled{2}$$

この式の傾きはほぼ1でありトランスデューサー間隔と推定コンクリート伝播距離の変化量とほぼ一致する。切片はトランスデューサー間隔と推定コンクリート伝播距離との誤差であり，この誤差がトランスデューサーにおける超音波の送信・受信の位置の違いであると考えられる。次にここで求めた式②を式①の L_C に代入すると石膏厚予測式は次式となる。

$$L_G = \frac{(T \times V_C) V_G}{V_G} \dots \textcircled{3}$$

ここで表面走査法による測定値を推定式に代入し実証試験を行った。表-1 に実証試験結果を示す。③式を用いた推定石膏厚は表-1 に示すよ

うに誤差は僅かであった。以上のことから、超音波法による腐食層の推定は可能であるといえる。

3. シャモットを活用した下水道管の強度性状

下水道コンクリート構造物は、長寿命化、高耐久化および環境負荷軽減の観点から、耐久性を向上させ長寿命化を図ることは、新設・既設構造物に関わらず重要な課題である。このような背景から、本研究は鉄筋コンクリート下水道施設の延命効果を主体に細粗骨材にシャモットを用いた防食コンクリートの開発に取り組んだ。

これまでの研究では、シャモットの物理性状、シャモットモルタル供試体の強度性状および腐食性状の試験を行い、シャモットはコンクリートの細・粗骨材として活用できると判断した。したがって、今回はシャモットをコンクリートの細粗骨材として利用し、コンクリートの強度特性を確認すると共に、下水道コンクリート構造物としての防食効果について報告する。

表-2にシャモットコンクリートの配合表を示す。コンクリートの配合は（社）日本下水道協会、JSWAS A-1⁵⁾ およびJSWAS A-6⁶⁾ の強度性状を参考にして、シャモットコンクリートの試し練りを繰り返し行い決定した。

表-3に外圧圧縮強度試験結果を示す。結果より、シャモット鉄筋コンクリート管のひび割れ荷重および破壊荷重は約50～65%、JSWAS A-1およびJSWAS A-6に規定されている外圧圧縮荷重より大きな荷重となった。また、普通コンクリート鉄筋コンクリート管に対してひび割れ荷重および破壊荷重共に約11～28%大きな外圧圧縮荷重が認められた。

表-4に曲げ試験結果を示す。結果より、シャモットコンクリート下水道管および普通コンクリート下水道管の曲げ強度は、72.3kNと同等の値であった。コンクリートの強度性状は、一般的に圧縮強度に対して約10～7%程度と言われている。これは、コンクリートが破壊近傍の応力状態が塑性的を示すことと、その性状が極小間で示され、曲げ強度差異が認められなかったものと推察される。

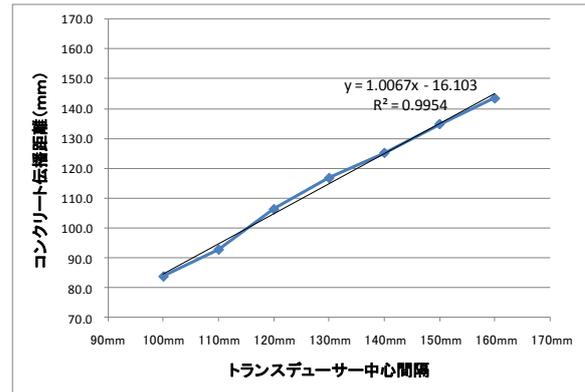


図-7 トランスデューサー間隔に対するコンクリート伝播距離の関係

表-1 石膏厚の推定結果

実石膏厚 (mm)	伝播時間 (μs)	推定石膏厚 (mm)	誤差 (mm)
5	39.0	4	-1
10	48.0	12	2
15	51.0	15	±0
20	54.6	19	-1

表-2 シャモットコンクリートの配合表

水セメント比 W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤
	水	セメント	シャモット		
	W	C	細骨材	粗骨材	
68.3	329	482	1590		0
51.9	250	482	955	635	0

表-3 外圧圧縮強度試験結果

コンクリート種別	ひび割れ荷重 規格荷重	破壊荷重 規格荷重
	A-1=11.67kN/m	A-1=25.50kN/m
A-6=32.40kN/m	A-6=49.10kN/m	
普通 コンクリート	A-1=19.07kN/m	A-1=27.86kN/m
	A-6=48.20kN/m	A-6=78.00kN/m
シャモット コンクリート	A-1=23.48kN/m	A-1=38.97kN/m
	A-6=59.30kN/m	A-6=88.90kN/m

軸方向圧縮強度試験結果を表-5に示す。結果より、軸方向圧縮強度の平均値は59.4N/mm²であった。これはJSWAS A-6 規格で規定している50N/mm²を約19%上回る結果となったことから、シャモットコンクリートは下水道推進管として十分に対応可能である。

下水道コンクリート構造物は、耐久性を向上させ長寿命化を図ることは、新設・既設構造物

に関わらず重要な課題である。このような背景から、下水道コンクリート構造物としての腐食防止効果を掘り下げ、さらに実物大シャモット鉄筋コンクリート下水道管の暴露試験を行った。

試験はO町の協力を得て、下水道敷設事業の一部に暴露試験区間を設置した。試験区間のマンホールには、シャモット鉄筋コンクリート管製作時に作成した品質管理用供試体を写真-9に示すように暴露した。なお、本暴露試験においては、硫化水素濃度と品質管理用供試体の質量によって腐食状態を評価した。

暴露試験期間1年6ヶ月の中性化深さの影響は、写真-10に示すように供試体の一部分が水面下と水面上にある状態で差異が認められた。中性化の進行は、供試体の一部分が水面上にある部分から進行している。すなわち普通コンクリートの場合、コンクリート上部から約3~10mmであるのに対してシャモットコンクリートは供試体上部から2~3mmであった。中性化および腐食が供試体上部から進行していることから、前述のように結露水によって発生する硫化水素に起因していると推察される。以上のことから、シャモットコンクリートの中性化、腐食防止効果があったと考えられる。

4. 空間情報による水環境浄化評価

本研究は、地域的に水域の汚濁環境評価に対して、衛星リモートセンシングデータの周期観測性ならびに広域観測性を有効利用した評価システムの構築を行い、この空間特性を駆使しマクロ的に水環境を生命工学およびグリーンバイオの観点から地域水環境評価を行うものである。

これまでの主成果として、UCSB Jeffrey C. Dozier教授などと共に『複合ラジオメトリック補正法』構築した。これは、既往の補正アルゴリズムでは対処していない極地的な大気中エアロゾルデータの処理が特徴であり、ラジオメトリックの基本である「正規化海水射出輝度および海面入射光」の補正、ガウシアンフィルタリング法によるスムージング処理およびデストライピング法によるラインノイズ除去処理を同時に処理できる補正法である。処理後の画像では

表-4 折れ曲げ試験結果

普通コンクリート		シャモットコンクリート	
実測値	平均値	実測値	平均値
72.4	72.3	73.1	72.3
72.2		72.2	
72.2		71.6	

注)表中の数値は、ひび割れ発生時の強度。単位はKNである。

表-5 軸方向圧縮強度試験結果

供試体N.o	軸方向圧縮強度N/mm ²	
1	58.7	59.7
2	59.2	
3	59.4	
4	59.5	
5	60.1	
6	61.4	



写真-1 暴露試験状況



写真-2 暴露試験供試体

ほとんどノイズも見られず、汚濁水塊のコントラストもかなり強調されている。

同手法により適切に補正された衛星データを基にChl.a濃度を推定するアルゴリズムの構築を行った。また、従来モデルで困難であった浮遊懸濁物質(SS)や溶在有機物が多数混在する高濃度域においても利用可能なChl.a数量化モデルの構築/アレンジについても試みた。

本研究では、「閉鎖性水域」を対象とした精度の良いChl.a濃度推定モデルを作成するための波長として、水面反射光の影響がない水中から水面に出てくる光の分光放射輝度 I_w を選択した。このアルゴリズムの検証は、クベルカームンク理論検証法にて行い、適切に構築されたことを確認した。また、水域の解析においても一つ考慮すべきディスタートである水面の鏡面反射の影響については、鏡面反射光除去理論で代表的なコックスムンクモデルを基本とし、『風力』『拡散係数』などパラメータが少ない分モデルも簡素化し、良好に水面の鏡面反射を除去することができた。

これにより精密に補正されたTerra衛星データを利用した水域の表層クロロフィルa(Chl.a)の数量化モデルを構築し、Terra Scan解析システムに組み込むことに成功した。写真-3は、2007年12月27日に観測されたTerra/ASTER VNIRデータを利用して、本プロジェクトで構築したChl.a数量化アルゴリズムにより視覚化された集中豪雨翌日の東京湾内湾部のChl.a濃度分布を示したものである。さらに「複合ラジオメトリック補正」および「クロロフィルa数量化モデル」を、生命工学・リサーチ・センターにおいて毎日7〜8パス受信している衛星データ

(Terra/MODIS, Aqua/MODIS) からChl.a濃度画像を準リアルタイムでTerra Scan解析システムに組み込んだ。

この結果として、生命工学・リサーチ・センターのホームページ(<http://www.cit.nihon-u.ac.jp/~modis/modis/>)の「衛星画像WEB閲覧システム」において北緯50度〜25度、東経125度〜155度の範囲を対象に、トゥルーカラー画像(L1B)、Chl.a濃度画像(L2)および10日間合

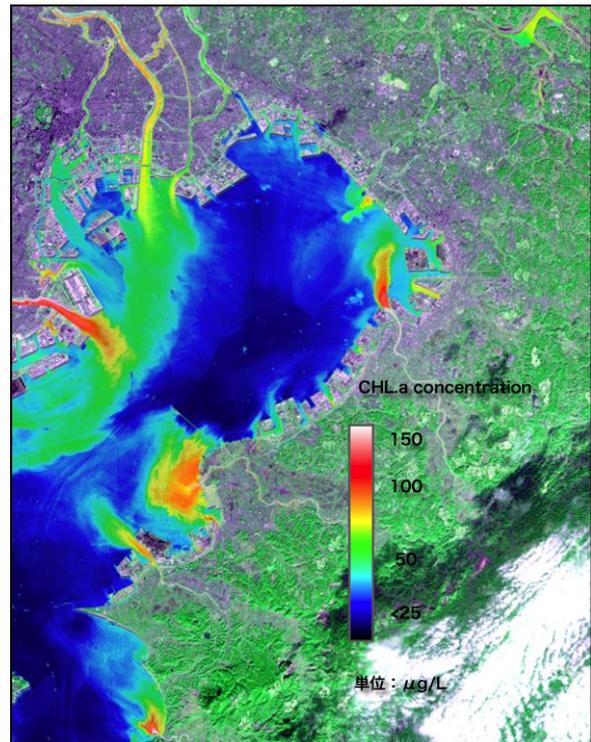


写真-3 Chl.a数量化アルゴリズムによる東京湾内湾部のChl.a濃度分布(2007年12月27日観測 Terra/ASTER VNIRデータ)



写真-4 衛星画像WEB閲覧システムのトップページ

成Chl.a濃度画像(L3)を公開している。さらに、現在は上記のL2およびL3を時系列データとして活用し、対象とする外洋や内湾における水質環境ハザードマップを作成している。

5. おわりに

本グループで得られた成果は、土木学会、日本下水道協会、廃棄物資源循環学会、日本リモートセンシング学会など国内外の学協会において論文投稿および研究発表が行われた。