

氏名	うらがみ よしき 浦上良樹
学位の種類	博士(農学)
学位記番号	乙第39号
学位授与年月日	平成16年 3月12日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	下水道施設におけるコンクリートの防食対策
学位論文審査委員	(主査) 服部九二雄 (副査) 緒方英彦 作野友康 野中資博 石井将幸

## 学位論文の内容の要旨

筆者は、兵庫県が施行する揖保川流域下水道事業の建設に昭和58年度から平成2年度にかけ従事していたが、同施設が家庭排水の他に、皮革工場からの排水をも受け入れる計画であったので、建設途中でコンクリート腐食の危惧のあることに気づき、急きょ、その対策に取り組むことになった。防食のための予備調査の結果、コンクリート腐食が施設の大半に及ぶと予測されたことから、これを放置すれば事業の存立に関わりかねないと判断された。そのため当事業においては、合理的な対策が求められた。

しかし、当時は国の内外においてもコンクリート防食についての指針等がなく、不幸にも腐食に遭遇した現場では試行的な対策に終始していた。そして、ようやく我が国においてもコンクリート防食対策の必要性が認識されつつあった。そこで建設省土木研究所(当時)の全面的な支援のもとに、揖保川流域下水道を対象とした防食対策研究がスタートすることになった。そして筆者は、そのプロジェクトリーダーを担うことになった。

本論分はこれら業務として、またその後の自主的に取り組んだ「下水道施設におけるコンクリートの防食対策」研究の成果をまとめたものである。研究内容の概要をプロジェクトの進行の手順に従い以下に述べる。

### ① コンクリート腐食の実態と腐食環境の把握、

静岡県の岳南排水路、兵庫県内全公共処理場施設、兵庫県及び滋賀県の農業集落施設3箇所を調査し、コンクリート腐食の実態と管きょ及び処理場施設各槽の腐食環境の定量的把握に努めた。

### ② 腐食環境に対応する防食手法及び工法の選定

防食手法として腐食環境とコンクリートを遮断する防食工法によることにし、実施には樹脂塗工工法が適当とされた。

### ③ 実施工法の決定、

防食材は腐食環境に対して耐用年数分の防食材の腐食代を考えるのではなく、期待耐用年間にわたり、腐食の進行がみられないものとし、工法は施工時及び施工後のトラブルの発生がないと判断されるものとした。選定法は防食材及び工法同時に評価することにした。つまり、コンクリート片を防食

材で被覆した試験片を腐食性溶液に浸漬し、その前後を比較し、変化がみられないもの、または少ないものを了とした。その結果、幹線管きょと処理場施設の気相部はビニルエステル、処理場施設の液相部はエポキシ樹脂の FRP 塗工工法が選定された。

#### ④ 試験塗工

工法の選択に 7×7 cmの試験片を用いたのに対し、工事規模がケタ違いに大きくなることから、脆性材にみられる寸法効果の影響の確認、また設計図書作成のためのデータを得る目的で現地での試験塗工を実施した。これにより、寸法効果の影響がみられないことを確認するとともに、得られた各種データから施工指針及び実施設計書を作成した。

#### ⑤ 本工事の実施

防食工事の実施は、昭和 62 年度の幹線管きょから平成 6 年度末の内陸部 10 万 m<sup>3</sup>/日処理能力施設の対策工の完了まで続いた。なお、筆者は平成 2 年度まで、その任にあり、研究の傍ら講じ監督をも務めた。

#### ⑥ 対策後の効果の確認

対策工実施後、施設の供用開始を迎えたのを機に、各施設が遭遇している腐食環境の測定と同測定箇所に普通ポルトランドセメント及び高炉 B 種セメントのコンクリート片を設置し、腐食環境とコンクリート腐食の関係を調査した。その結果、予測した腐食環境は概ね適当であり、コンクリート片の腐食については、予想に反して高炉 B 種より普通ポルトランドセメントのほうが腐食の進行が少なかった。

その後、実施された十年余を経過した時点での定期検査でも、既防食対策工に損傷がみられなかった。また、用途廃止となった汚泥貯溜槽の気相部 FRP を剥がしたが、その裏面のコンクリートの中性化はみられなかった。

これらは研究というよりも行政目的が先行したことは否定できないが、いずれも高い学術的レベルのものとなった。

#### ⑦ 樹脂塗工工法の技術体系の確立に向けた研究を

本体策工で採用された脂塗工工法は完成されたものとはいえ、実施については多くの課題があった。それらは樹脂及び FRP の耐食性とコンクリートと樹脂の接着の 2 点に要約される。

前者については、主として工法選定時の腐食性液への浸漬により生じた問題点について検討した。浸漬により樹脂表面に生じた白化物については、浸漬後の試験片を KBr 錠剤法による IR 分析より組成分析し、さらに白化物除去後の試験片を再度腐食液に浸漬し、その後の経過を追跡した。これにより、これは外層表面に限られ、再浸漬では白化物が生じなかったことから樹脂の劣化とは異なることが判明した。樹脂劣化の定量的評価の試みとしては、エポキシ樹脂薄膜の IR 光の透過率変化として捉えた。弱酸性溶液への浸漬によっても FRP の力学的劣化がみられるとの報告を受け、その原因がガラス繊維の劣化によるものであることを超音波顕微鏡によりつきとめ、経時的に腐食が進行していることも観察できた。

後者については、塗工工事後に発生した FRP の水泡剥離の現象からシールド二次覆工におけるコンクリート透水係数の特異性を発見するとともに、他方、これまでの垂直引張試験が必ずしも十分な接着評価法でないことがわかった。そこで耐剥離に注目し、実験を重ねるうち、コンクリート面塗工樹脂の剥離途中の荷重-変位曲線に十分な再現性がみられ、且つ、各 FRP による特色がみられることから、新たな接着評価法の可能性があることに気づいた。そして、破壊力学的パラメーターである応力拡大係数による評価法を試みた。しかし、この方法は定量的評価は可能であるが、塗工膜の弾性係数の影響を受けることがわかった。次にエネルギー解放率による評価を試みた。これにより接着界面の耐剥離力を捉えることができ、新たな接着評価法となりえることがわかった。この評価法の適用によ

り、コンクリート下地調整としては粗骨材が浮き出る程度の状態が最適であること、また各種プライマーの性能として、エポキシ樹脂は接着力は強いがムラがあること、それに対しウレタン、ビニルエステルは強度はエポキシほどでないが、安定していることを定量的に捉えることができた。

最後に、本対策研究の付加的成果として背面水圧逸散のためのコンクリート面ドレン工法(特許取得)、二次覆工に代わるFW-L工法、接触酸化法による池水浄化システムの開発があり、それらは今も各地で採用され、技術的生命を保っている。

## 論文審査の結果の要旨

日本は昭和40年代から続いた高度成長期に豊かな国になったといわれているが、経済的に豊かな国になったが、生活基盤を支える社会生活基盤関係の施設の充実は経済成長と相俟って格段に向上したとは言い難い。その内でも下水道施設の普及は遅々として進まず、最近全国平均が70%に届こうとしているのが現状である。

このような社会生活基盤施設は、多くの場合、日本ではコンクリートで作られている。コンクリートは、セメント、水と骨材を練混ぜて作られるが、セメントは石灰石を高温で焼成し、活性化したものである。セメントは水と化学反応してセメント水和物を生成するが、これらの性質上、まだ固まらないコンクリートおよび硬化したコンクリートは、相当期間pH12~13という高いアルカリ性を示す。この高いアルカリ性はコンクリート内部の鉄筋の保護の観点から言えば好ましい条件であるが、酸性の侵食物質に対しては極めて弱い条件を与えている。

下水にはタンパク質を多く含んだ生活雑排水が流れ込んでいるが、浦上氏の研究対象とした姫路・龍野市は昔より皮革工場が多く、なめし工程で排出される動物性タンパク質が工業排水として多量に通常の下水道に流れ込んできている。このタンパク質の腐敗で発生する硫化水素が下水道内の水分および酸素と結合して硫酸を生成し、コンクリート製の下水道を容易に侵食するという問題が派生した。さらに下水処理場も殆どがコンクリートで作られているため、同じ様な問題が発生している。しかし、酸に対して抵抗性の高いコンクリート、即ち高い耐酸性のコンクリートは現在のところなく、防食性の高いライニング材でコンクリートを保護する方法が採用される。本論文では、防食性の高いライニング材の開発に主眼をおき、多くの事例から何故下水道内でコンクリート腐食が発生するかの原因を明確にし、さらにどのようなライニング工法が最適の防食機能を発揮するかを、その試験方法の新しい開発も含めて検討を加えている。特にコンクリートに塗布されたライニング材の剥離問題に関する分野は研究も十分なされておらず、新しい剥離抵抗に関する試験方法および防食性の高いライニング材の開発は、浦上氏の紆余曲折を重ねた研究成果ともいえる。

調査によるコンクリート製下水管渠および下水処理場の腐食の実態は以下のように纏められる。

- ① 一般の工業排水も流入する公共下水道および下水処理場では、溶存 $H_2S$ の果たす役割が大きく、溶存 $O_2$ および下水道管渠内の水分と反応して好気性の硫黄酸化菌の作用によって生成される硫酸が侵食劣化の原因である。
- ② 防食対策は十分なものは少なく、試行の積み重ねのものが多く、早急な対策指針が必要である。
- ③ 流入水が中性に近くても気相部では激しいコンクリート腐食が見られる。
- ④ 農業集落排水処理施設においても公共下水道施設と同様なコンクリート腐食が見られる。

一方、防食対策は、コンクリート表面に防食性の高いライニング材を塗布・塗工することが最も適

した方法であるが、問題点はライニング材とコンクリートの密着性である。特に、境界面に発生する水泡、気泡をいかに少なくするか、また剥離抵抗性をいかに測定するかが大きな課題であった。試行錯誤的な実験を重ねることで、コンクリート製の下水道には高分子材料を積層ライニングする方法を、特に激しい侵食が予測される場合には強化プラスチック管（FRP）の使用を提案している。

最後に本論文の成果をまとめれば次のようになる。

- 1) 一般の公共下水道および下水処理場で発生するコンクリート腐食の原因を明確にしている。
- 2) 下水道および下水処理施設のコンクリート防食に必要な指針を提供している。
- 3) 農業集落排水施設のコンクリート腐食を明らかにし、その防食対策を提案している。
- 4) コンクリート防食用のライニング材の剥離に関する新しい接着評価法を提案し、それにより塗工時における最適コンクリート面(下地)調整の決定と各種プライマーの性能評価を可能にしている。
- 5) 樹脂およびFRPの劣化の定量的評価方法（FT-IR または超音波顕微鏡）を提案している。
- 6) 本提案のコンクリート防食法で処理された幹線管渠および処理場施設は、供用後ほぼ15年余経過しているが、異常は認められず、適切な対策法である。

このような内容は、多くのコンクリート製社会生活基盤施設の維持管理だけでなく、現在、日本にある約25兆円といわれる農業水利施設ストックの維持管理にも大きく寄与するものと期待される。したがって、本論文が学位論文として十分な価値を有するものと判定できる。