

下水道施設の防食被覆工法「スラスラ工法」

(株)間組
前田 照信

技術資料

下水道施設の防食被覆工法「スラスラ工法」

(株)間組 前田 照信
Terunobu Maeda

1. 開発の背景

コンクリートは、安価で、加工しやすく、耐久性に優れた材料として多量に使用されてきた。下水構造物では50年の耐久性を考慮して設計されていることが一般的であり、コンクリートの耐久性は永久との考え方もあった。しかし、1970年代後半から相次いで下水構造物のコンクリートが早期劣化した事例が国内で報告され始めた。

劣化の例を写真1（硫化水素濃度約80ppm、供用後10年）に示す。この劣化はイオウ酸化細菌が下水から発生する硫化水素を食べて硫酸を作りだし、この硫酸とセメント水和物が反応し硫酸カルシウムすなわち石膏を生成するもので、石膏化部は容易に指を差し込めるほど脆弱化する。石膏化による劣化自体は20世紀初頭に見出され、1945年にはパーカー⁽¹⁾によってイオウ酸化細菌が単離され報告されている。イオウ酸化細菌による劣化速度は硫化水素の濃度に比例する。下水が落ち込んだり、ポンプ圧送直後の下水が激しく攪拌される部分では硫化水素濃度が100ppmを越える部分があり、このような部分では10年で数cm程度の石膏化が進行する。劣化した部分の補修は劣化した部分を除去し、モルタル等を打設後、防食塗装する方法が一般的であった。

従来のこのような工法では、

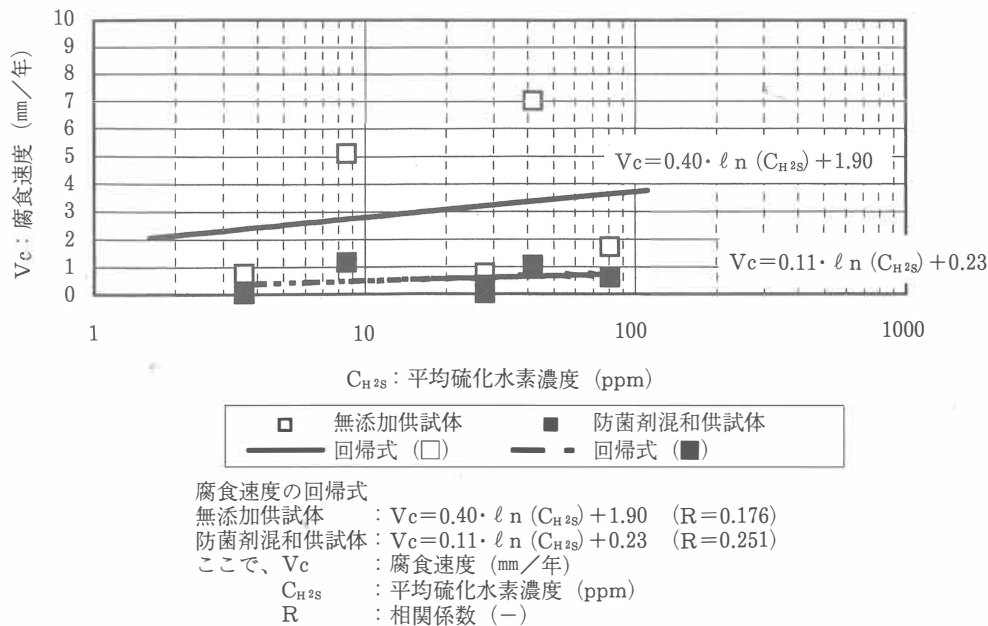
- 劣化部の除去が完全でないとコンクリート打設面から剥離する。除去しすぎると不経済である。
- モルタル等の打設は母材との付着が充分取れず、構造物と一体化せず強度の回復が充分でない恐れがある。
- 塗装とはコンクリートとヤング率、熱膨張係数、透水透気係数を面で付着させることであり、長期



写真1 セッコウ化した汚泥受槽の梁
(硫化水素濃度約80ppm、供用後10年)

間健全な付着を確保することは困難である。この結果10年間隔での再塗装が必要とされていた。現場からは、塗装に変わる50年以上の耐久性を有する防食工法の出現が待望されていた。

- 気体は高分子化合物を透過する。このためレトルト食品やお茶の包装シートにはアルミ箔等をラミネートして酸素や水蒸気を遮断している。硫化水素も塗装やシート等の高分子材を透過する（硫酸のような液体に対しては高分子材を選べば透過は阻止可能である）。防食材を透過した硫化水素は内部でイオウ酸化細菌に酸化され硫酸となり、接着面を石膏化する。このため塗装では短期間で剥離することがあった。ユーザーからはイオウ酸化細菌の活動を制御する方法の出現が望まれていた。
- 硫酸がコンクリートに浸透した初期には、セメント鉱物と硫酸カルシウムとが反応、エトリンガイトと言う膨張性の化合物が生成する。このため石



第1図 腐食速度

膏化直前のコンクリートはケミカルプレストレスを持ち強度が倍近く上がるため、除去には多大の労力が必要とされる。この点についても効率的かつ経済的な除去方法の開発が望まれていた。

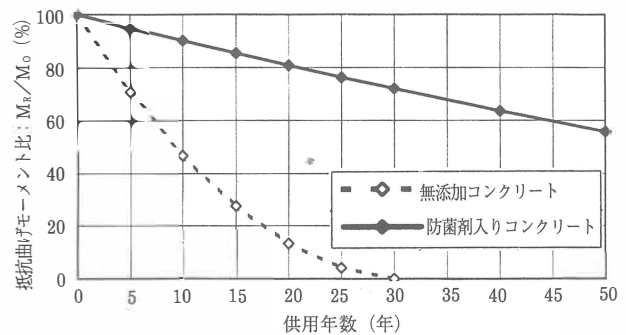
など、多くの問題、要望があった。

以下にこれらの問題点の解決方法について述べる。

2. イオウ酸化細菌の制御

イオウ酸化細菌が原始的な細菌で、コンクリートの腐食に関与する多くのイオウ酸化細菌は絶対独立栄養細菌とよばれ、イオウや無機イオウを含む化合物、一部の細菌では2価鉄を酸化して栄養とし、必要な炭素は大気中の炭酸等から採取し、酸素と水があれば生息する細菌である。重金属に対しても一部のイオウ酸化細菌は耐性を持ち、硫化カドミウムを硫酸カドミウムにして溶出し、農作物を汚染した結果発症したイタイイタイ病、あるいは硫化銅や硫化砒素を同様に溶出した足尾鉍毒事件の原因菌でもある。工業的にはイオウ酸化細菌の一種であるチオバチルス・フェロオキシダンスが有用金属含有量の少ない硫化銅や硫化銀から硫酸銅あるいは硫酸銀の形で回収するバクテリオリーチングに使用されている。このことは、現在流行している銀や銅系の抗菌剤が一部のイオウ酸化細菌には効果がなく、銀や銅を溶出させる可能性を示している。このためにはイオウ酸化細菌用の生育阻害剤を開発する必要があった。

ハザマでは1987年の調査工事実施時にコンクリート



第2図 平均硫化水素濃度5ppmにおける供用年数と強度(抵抗曲げモーメント)の関係(ヒューム管呼び径φ1000の場合)

や鉄筋が激しい腐食を受けているにも拘わらずステンレス攪拌翼が損傷を受けていないことに着目し、ステンレスを構成する金属を中心にスクリーニングし、ニッケルが有効なこと、またイオウ酸化細菌の酸化酵素に結合し酵素の働きを阻害することを見出した。さらに、タングステンも同様の作用を持ち、特に酸性領域では際だった阻害効果を示すことを見出した。効果は単離された数十の細菌あるいは実曝露によって確認している。また、販売してから現在で7年になり実績も日々積み重ねられている。この生育阻害剤を当社では防菌剤と呼称し、毎年コンクリート換算5万tを出荷している。また、国内外で特許を取得すると共に1998年度下水道新技術推進機構の技術評価を取得している。硫化水素濃度と腐食速度の関係を第1図に示す⁽²⁾。また、第2図に硫化水素濃度5ppmでの標準的なヒュームの耐用年数の関係を示す⁽²⁾。図から硫化水素濃度

5 ppm以下ではコンクリートに十分な耐久性を与えることが明らかである。また、硫化水素濃度50ppm以下の雰囲気では腐食速度を1/4にすることができる。

防菌剤は5 ppm以下の硫化水素濃度ではコンクリートに添加するだけで、それ以上の濃度では腐食代を大きくとるか被覆工法と併用することにより十分な耐久性を賦与することができる。

3. 劣化部分の診断

打設直後のコンクリートはpH13程度の高アルカリを示す。その後表面から大気中の炭酸と反応しpH 9を下回る領域が出現する。これをコンクリートの中性化と呼ぶ。鉄筋はpH 9以上では不動態を形成し安定であるが、pH 9を下回ると発錆し、その膨張圧により直近のコンクリートを破壊する。中性化はコンクリートの劣化と捉えられ、従来の補修は石膏化した事例でも中性化部まで除去することが一般的であった。しかし、硫酸の侵入は中性化部よりさらに1～2 cm内部にあることが多く、中性化部までの除去では、補修後に成長したエトリングタイトの結晶によって剥離が生じることがあった。実際の構造物からコアを採取し硫酸の侵入の程度が異なる部分でモルタルを打ち継ぎ、強度変化を調べ許容される硫酸濃度を求め、許容値を境界に発色する指示薬を開発した⁽³⁾。この指示薬はポゾリス物産からRCF-27の名称で市販されている。この指示薬の出現により現場で指示薬をスプレーするだけで劣化部を診断することが可能となった。

4. 劣化部の除去

劣化部の除去深さは5～8 cmになることが多く、また先に述べた如く強度が増加しているために人力によるハツリでは効率が低い。ウォータージェットによるハツリでは強度の高い石膏化部分直下に時間を取られ高強度部が除去された直後に、下部の通常強度の部分に余分なハツリを行う可能性があり制御に工夫が必要となる。当社では空気圧により複数のタガネを作動させる「商品名：スパイキーハンマー（栗田鑿岩機）」を使用してハツリを実施している。

5. 断面欠損部の補修

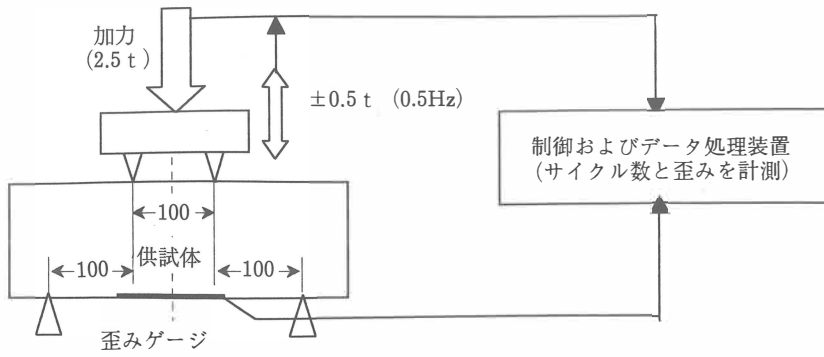
劣化部を除去したあとは、防菌剤を混入したモルタルで補修する。従来の型枠を使用した打設では母材との付着を安定して確保することは困難でとくに天井面、すなわち上向きの注入では凹凸の激しいハツリ面に充

填モルタルを充分行き渡らすことは至難の技であり、再度エポキシ樹脂注入をするなどして対応してきた。

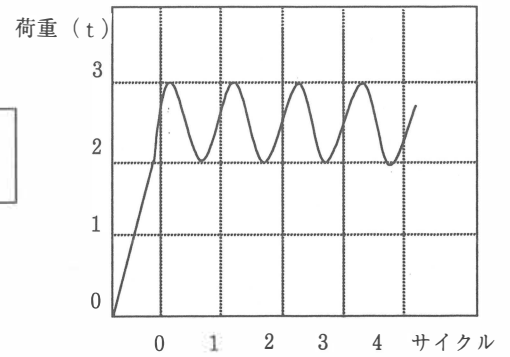
付着を確実に確保するには吹き付けによる方法がある。しかし、通常の吹き付けでは最大厚さ1 cm程度しか一度に施工できず5～8 cmもの断面欠損を補修するには工期上の問題があった。スラスラ工法ではモルタルに高分子の短繊維を混入することにより天井面で2 cm、壁面で4 cmの厚吹きを可能とした。また、付着も引き抜き試験で母材から破壊するほど強固である。第3図に健全な材料、吹き付け補修した材料、さらに次に述べる突起付きシートを差し込んだ材料の疲労試験結果を示す。補修により健全な供試体より強度が上がったことがわかる。

6. シートの差込

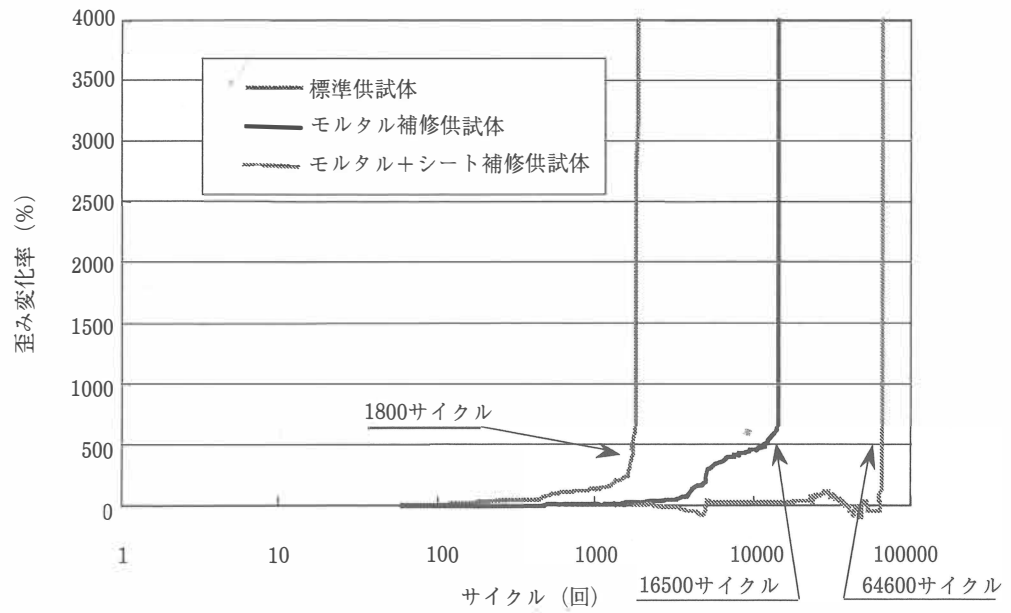
防菌剤単独ではすでに生成した酸には無力である。酸の流入など高度の防食が要求される時はモルタルを吹き付け左官仕上げした未硬化のモルタル面に突起付きのシートを差込防食する。スラスラ工法で使用する突起付きシートを写真2に示す。シートの材質は高密度ポリエチレン、ポリプロピレン、フッ素樹脂等があるが下水用には高密度ポリエチレンが一般的に使用される。差し込みは壁面では手で押し込んで、天井面では簡単な型枠で支保しながら行い、その後軽くバイブレーターをかける。シートとシートの接合はシートと同質のワイヤーを溶融して盛り立てる溶接によって行う（写真3）。溶接後は15,000Vの電圧を印加した金属ブラシで溶接面を走査し、放電する欠陥部を探索補修する。最終の仕上がり状況を写真4に示す。シート差込による補修は型枠にシートを張り付けてモルタルやコンクリートを打ち込む従来工法に比べて、部材が大きく取れる、セパレータ等の型枠用貫通部がない、シワ（型枠に張り付けた後の温度で起こる）がない等の特徴を持つ。高密度ポリエチレンは濃硫酸の容器にも使用されるほど良好な耐食性を示す。しかし、高密度ポリエチレンも高分子材料であるから硫化水素の透過を防ぐことは不可能である。このため、下地の吹き付けモルタルにも防菌剤を混入していることは言うまでもない。吹き付けによる工法は前項で述べたように強度を完全に回復するだけでなく、第3図に示したように疲労試験では修復以前より良好な結果が得られる。



(1) 試験装置概要



(2) 加力方法



(3) 疲労試験結果

第3図

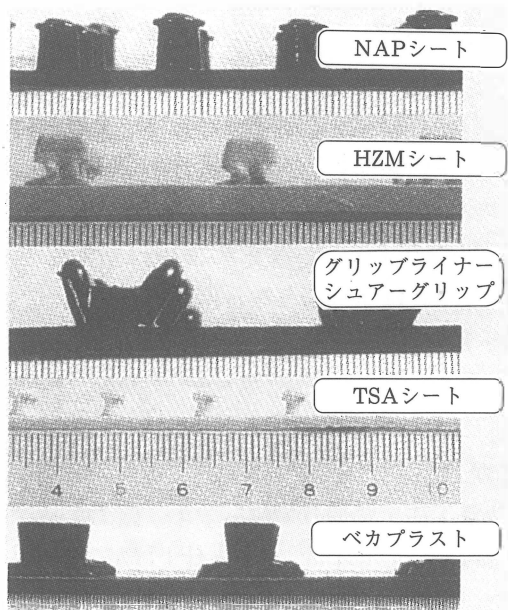


写真2 スラスラ工法用各種突起付きシート

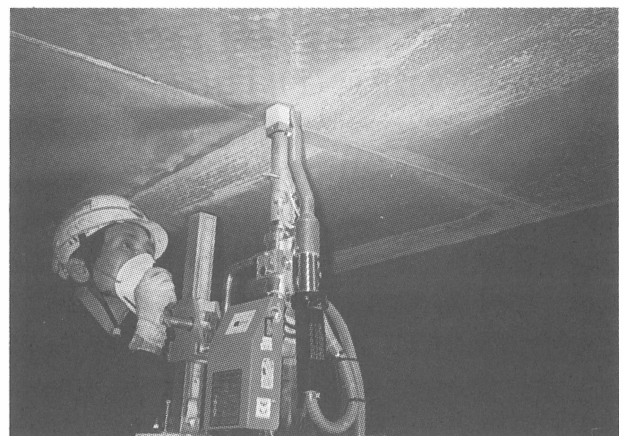


写真3 シート溶接状況

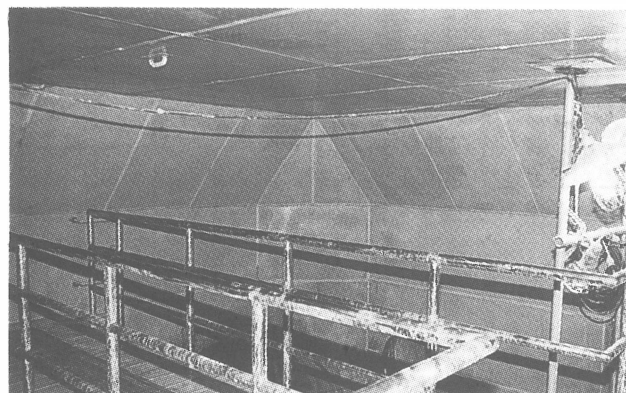


写真4 スラスラ工法で補修した下水道施設



第4図 工事の概要

第1表 主要工事数量

工種		仕様	数量	備考
防食塗装工	劣化部除去工（機械）	エアー打撃式ハツリ厚2cm	7,680.0m ²	トンネル周長6.4m×延長1,200m
	劣化部除去工（人力）	ハツリ厚2cm	190.6m ²	立坑部、流入路部
	溶接金網設置工	SUS304 φ2mm100×100	7,870.6m ²	劣化部除去工の（機械）+（人力）
	アンカー工	SUS304 T6×40	7,870.6m ²	3本/m ² 以上
	モルタル吹付け工	防菌剤入りモルタル厚さ2cm	7,870.6m ²	3本/m ² 以上
	コンクリートガラ処分工	ハツリガラの処分	160.6m ³	劣化部除去工面積×2cm
漏水処理工		Vカット深5cm	2,152.0m	漏水クラック延長
坑内清掃工			1,250.0m	施工延長1200m+50m

7. スラスラ工法の施工例

2項～6項の工法をスラスラ工法と呼び、(財)下水道新技術推進機構の下水道技術・技術審査証明を2000年3月に取得した⁽⁴⁾。なお、スラスラ工法はSheet Lining with Anchor, Shotcrete Lining with Antibacterial agentの略である。実際に供用している下水構造物を補修するには工期が渇水期に限定されることが多い。さらに、1999～2000年にまたがる工事では2000年問題のため12月31～1月1日にかけて供用可能な工程を組む必要性のある現場があり、短工期での施工が望まれる。ここに示す神戸の高松污水幹線の防食工事ではイオウ酸化細菌による劣化は軽微であったものの震災によるクラックおよび漏水が著しく、その対策と今後50年間の防食を兼ねて20mmの防菌剤を配合したモルタル吹き付け工を行った。防食の観点からは劣化部（数～20mm程度）を除去して防菌剤配合モルタルを吹き付けだけでも施工は可能であるが50年の耐久性を確保するためには20mmの厚さが計算上必要であり、

断面積を変更しないためにハツリ工も20mmとした。工事の概要を第4図および第1表に、手順を第5図（写真5、写真6）に、補修の断面を第6図に示す。工程はハツリ工程が最大のネックである。このため、専用のレール上を移動する台車に円周方向とトンネルの前後方向に移動可能なスパイクハンマーを取り付けたハツリ機を2台製作し、作業に供した（第7図、写真7）。このハツリ機2台を以て24時間体制で運用1日当たり300m²を施工した。これらの機械は空気圧で作動し、ハツリ厚さは空気圧と送り速度で調整した。ハツリは1.5ヶ月で終了し、工区内に無事施工を終了することができた。

あとがき

スラスラ工法を開発してから5年、施工実績はモルタル仕上げが2万5千m²、シート仕上げが7千m²となった。また、1997年に研究会を設立、昨年度はハザマ、エヌエムビー、カーボフォル・ジャパンの3社連名で

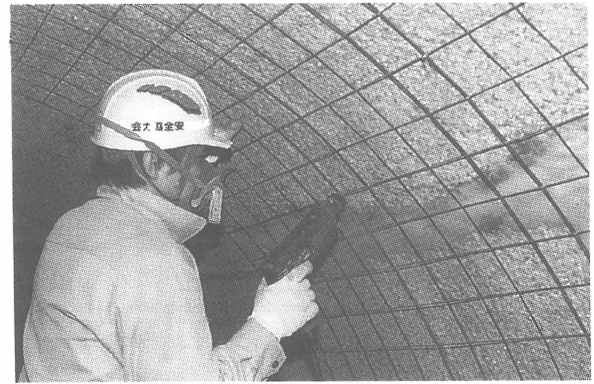
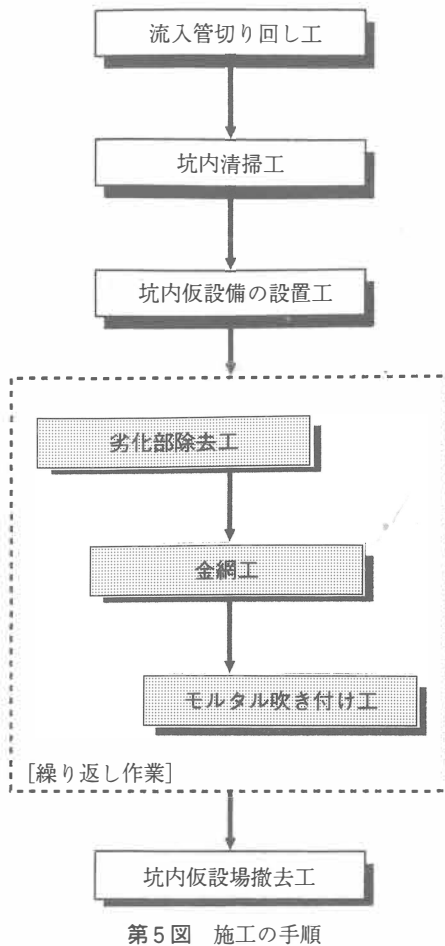
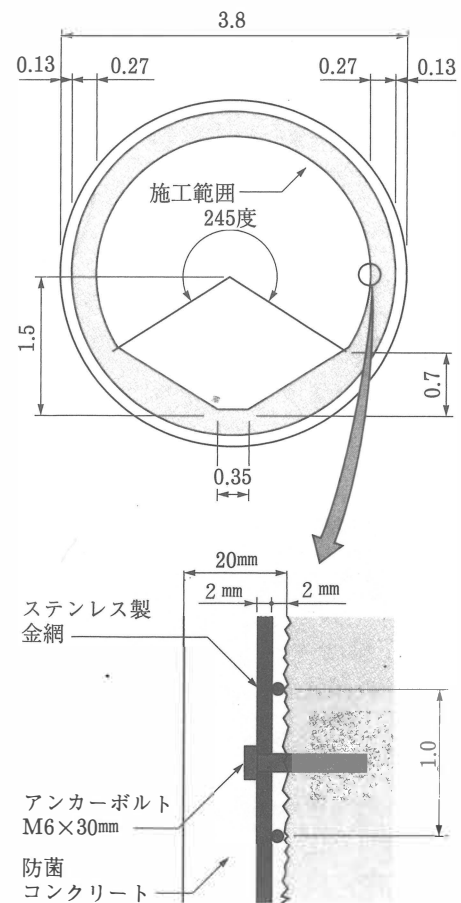


写真6 金網工



第6図 補修する下水道の断面図

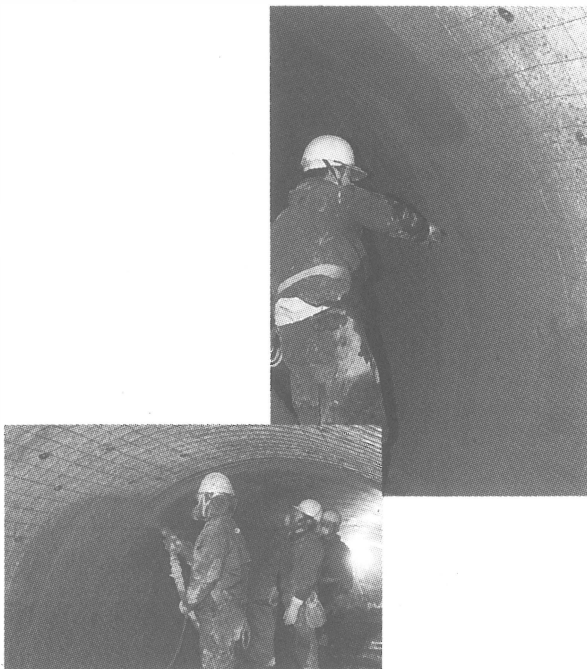
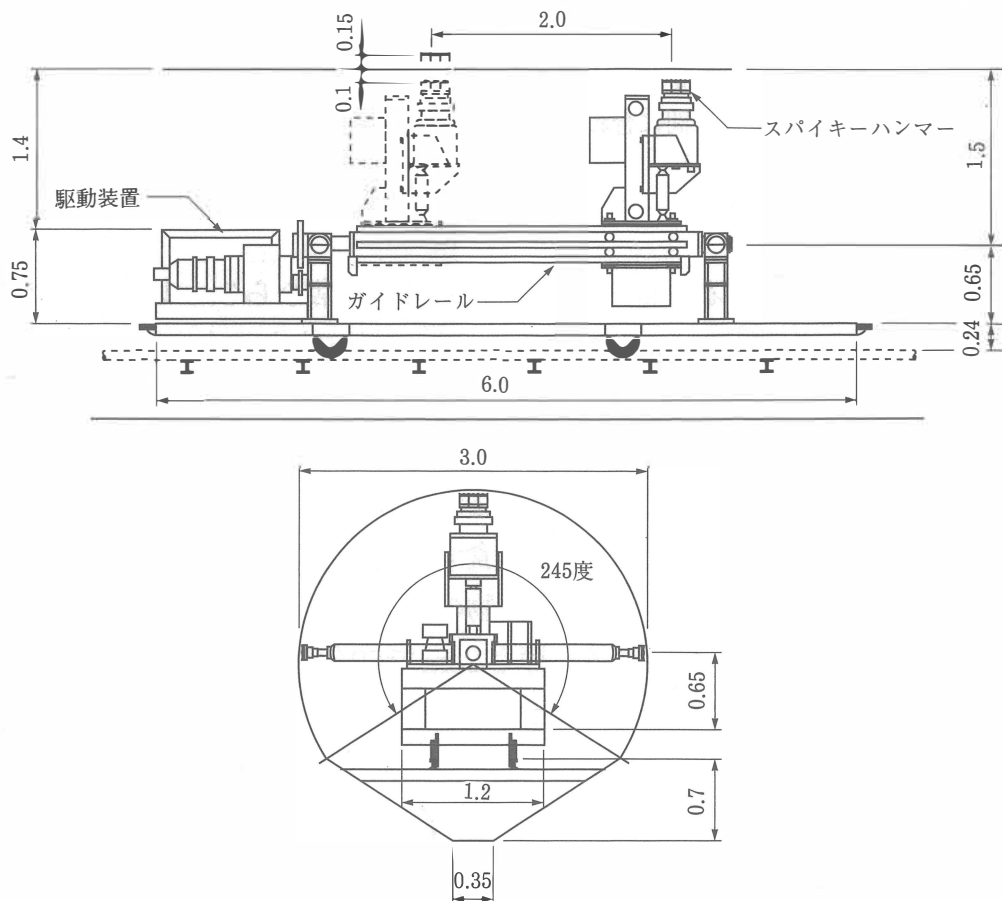


写真5 モルタル吹き付け工

(財)下水道新技術推進機構の技術評価を取得した。現在協会とすべく準備中である。協会設立後は技術の普及と溶接等特殊技術を必要とする部分について資格制度を確立する予定である。現在研究会には12社が参加している。今後は下水構造物の防食のみならず温泉水の流入するダムや発電施設、化学プラントの防食等広く社会資本の整備に寄与すべく研究中である。



第7図 スパイクハンマー付専用コンクリートはつり機

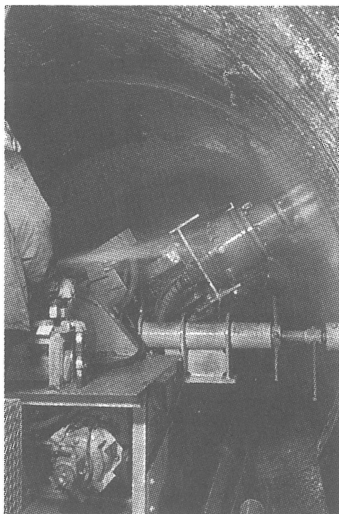


写真7 劣化部除去工

<参考文献>

- (1) C.D.Parker, Aust.J.EXP.Biol.Med.Sci., 23. 81 (1945).
- (2) 下水道技術・技術審査証明報告書「ビククリート（防菌コンクリート）」日本ヒューム管(株)、(株)間組（1999年3月）。
日本下水道事業団・(株)間組・日本ヒューム管(株)、共同研究「硫黄酸化細菌による劣化に対するコンクリートの補修、防食工法に関する技術開発報告書」（1998）。
- (3) 建設省土木研究所・(株)間組、「下水道施設における経済的な硫化水素対策技術の開発に関する共同研究報告書」（1998）。
- (4) 下水道技術・技術審査証明報告「スラスラ工法」(株)間組、(株)エヌエムビー、カーボフォルジャパン(株)（2000年3月）

【筆者紹介】

前田照信

（昭和25年1月26日生・兵庫県出身）
 (株)間組 技術・環境本部 環境修復事業部
 〒305-0822 茨城県つくば市荻間515-1
 TEL：(0298)58-8825
 FAX：(0298)58-8829
 E-mail:m3477@hazama.co.jp

<主なる業務歴および資格>

博士（農学）、技術士（応用理学部門、衛生工学部門、建設部門）。

水中コンクリート用薬剤の開発、コンクリート防食工法の開発、水中PCB除去方法の開発、六価クロム還元剤の開発、トリクロロエチレン等汚染土壌修復工法に関する開発。