

3-2-1 「粒度調整灰を添加した耐硫酸性に優れるコンクリート」

を使用した人孔改良工事について

西部第二下水道事務所 施設課 氏名 大寺 諒
武元 貴裕
連名者 大成建設(株) 氏名 長嶋 洸佑

1. はじめに

1.1. 新河岸水再生センターの施設概要

新河岸処理区（10,474ha）は、練馬・板橋・杉並区の大部分と新宿、豊島、北、中野区の一部を抱える処理区であり、区部全体の面積の約18%を占めている。新河岸水再生センター（以下、「当センター」という。）の処理区域を図1に示す。新河岸処理区より発生する下水を浮間水再生センターと共同で処理した後、新河岸川に放流しているが、処理水の一部を砂ろ過し、当センター内の機械の洗浄・冷却、トイレ用水及び緑地への散水に使用するなど有効利用を図っている。

水処理の過程で発生した汚泥は、浮間水再生センターから圧送された汚泥とともに、全量を当センター内で焼却処理している施設である。

1.2. 工事までの経緯

「粒度調整灰を添加した耐硫酸性に優れるコンクリート（以下、「耐硫酸コンクリート」という。）を使用した人孔改良工事」（以下、「本工事」という。）は、当センター内の一部人孔が長年の使用により劣化していたため、改良を行ったものである。既設 SNo.3 特殊人孔（以下、「既設 SNo.3 人孔」という。）は、当センターの汚泥処理過程で生じる下水が流入する排水系統の最下流に位置し、恒常的に高濃度の硫化水素ガスが発生することから、著しい腐食環境下にある。このため、これを起因とした大規模な陥没事故が過去に2回発生している。

1.2.1 過去の陥没事故

既設 SNo.3 人孔付近では、平成29年度、令和元年度の2回にわたり大規模な陥没事故が発生している。図2に管渠の破損箇所を示す。

平成29年5月22日に幅3m×高さ3m×深さ2mの陥没事故が発生した。調査の結果、既設 No.4 円形人孔（以下、「既設 No.4 人孔」という。）と既設 SNo.3 人孔に接続する管渠φ900(HP)が腐食により破損し、管渠内に土砂が流入したことが原因であることが判明した。



図1 新河岸処理区

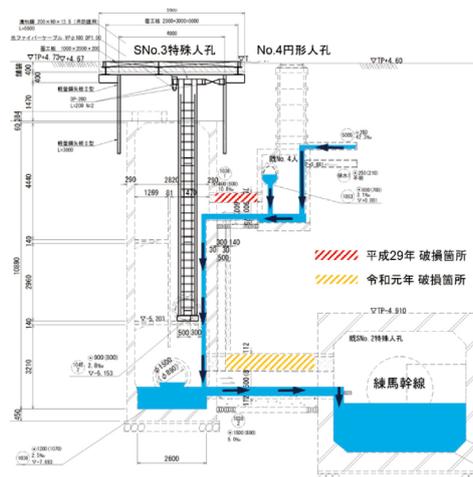


図2 管渠破損箇所図

このため、管渠内部に管渠φ600（FRPM管）を挿入・固定する緊急工事を実施した。

約2年後の令和元年9月25日に同様の箇所にて幅5m×高さ5m×深さ5mの空洞が確認された。調査の結果、既設SNo.3人孔と練馬幹線に接続する管渠φ1500（HP）が腐食により破損し、管渠内に土砂が流入したことが原因であることが判明した。このため、SPR-SE工法によりφ890の更生管を設置する緊急工事を実施した。

両陥没事故とも管渠の腐食によって破損し、管渠内に土砂が流入したことが原因であった。管渠の腐食は、以下の現場環境が主な要因と考えられた。

1点目は、流入する下水である。本工事現場に流入する下水は、濃縮槽や混合汚泥貯留槽などの脱水過程で生じる、硫化水素ガスが発生しやすい脱水分離液に加え、焼却炉より生じる50℃超の洗煙排水が既設No.4人孔及び既設No.3人孔内で合流するため、嫌気性環境下において一般に30～35℃で最も盛んに増殖する硫酸塩還元細菌（嫌気性従属栄養細菌）によって、下水中の硫黄化合物が硫化水素に変化しやすい環境¹⁾にあるとした。

2点目は、人孔内の高落差である。既設No.4人孔から既設SNo.3人孔（以下、「既設当該人孔」という。）に流入する際、約7.5mの高落差（副管なし）となるため、下水の流動が激しく乱れ、攪拌されることにより下水中（液相部）で生成した硫化水素が空气中（気相部）に拡散され、高濃度の硫化水素ガスが発生し、コンクリートの劣化が進行しやすい環境であるとした。

これらの現場環境より、当該箇所は著しい腐食環境であることから、破損した管渠に加え、将来的に既設当該人孔の破損も懸念された。写真1に既設No.4人孔、写真2に既設SNo.3人孔内部の写真を示す。このようなことから、令和2年度から抜本的な人孔改良の検討に入った。

1.2.2 焼却炉排水の予備系統の整備

前述1.2の通り、既設SNo.3人孔は汚泥処理過程で生じる下水が流入する排水系統の最下流に位置する。当センター汚泥処理系統管網図を図3に示す。既設人孔の北、西及び南側より、各系統からの下水が集水された後、練馬幹線に流入している。

特に西側より流入する焼却炉（全炉）からの排水は、平常時で約0.4m³/sと流量が多く、硫化水素濃度も高いため、既設当該人孔施工時は、焼却炉（全炉）の全停止が必要とされたが、施設の運用上、長期間の施設停止は不可能であった。また、前述の1.2.1より既設当該人



写真1 既設No.4人孔



写真2 既設SNo.3人孔



図3 汚泥処理系統管網図

孔を含めた、コンクリート構造物の腐食が著しい要因に、脱水分離液と洗煙排水が合流することとした。

以上の点を踏まえ、本工事に先立ち、令和2、3年度に、焼却炉排水の予備系統の整備（2系統化）を実施した。予備系統は、焼却炉排水が流入する経路で既設No.4人孔の1つ手前にある既設人孔と練馬幹線の既設人孔間を結ぶ管渠φ700を鋼製さや管推進工法（ベビーモール工法）にて布設した。なお、両既設人孔間を結ぶ管渠布設のため、鋼製ケーシング立坑を2箇所構築の上、人孔を新設した。

1.2.3 本工事の設計委託

本工事の設計委託により、既設当該人孔内の硫化水素ガス濃度を測定した結果、年間平均硫化水素ガス濃度が50ppm以上、腐食速度で概ね7mm/年以上の腐食環境I類に該当すると判明した。図4に既設当該人孔内の温度及び硫化水素濃度を示す。本工事において新たに設ける2つの人孔（以下、「新人孔」という。）躯体の設計に際し、防食D種に適用可能な塗布型ライニング工法及びシートライニング工法等の採用を検討した。

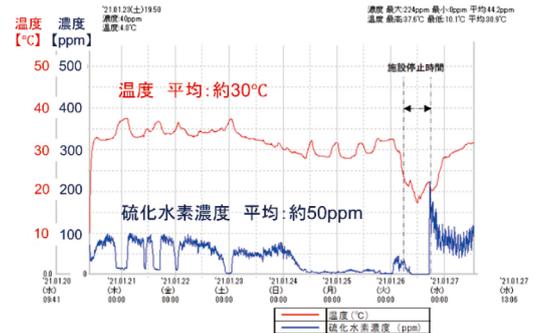


図4 人孔内の温度と硫化水素濃度

しかし、防食被覆工法は標準耐用年数（10年）経過後に状況に応じて防食の更新工事を行う必要があるが、本工事現場は流入水を止めるための設備停止を長時間及び連続しての停止が困難な場所に位置することから、防食被覆更新時にコンクリート示方書に規定されている養生時間を確保できないといった施工管理基準を満たせず、維持管理に問題が生じる。

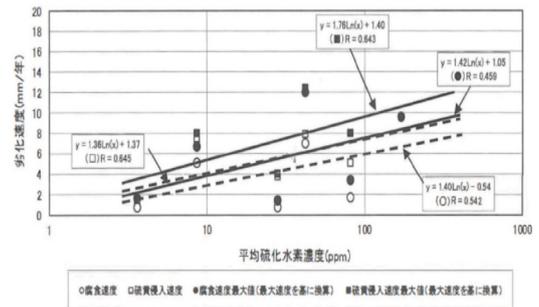


図5 平均硫化水素濃度と劣化速度

このため、防食被覆工法以外に人孔躯体の材料が耐硫酸性に優れ、長期的な腐食対策効果が期待

できる材料を検討した結果、当局の技術管理委員会にて承認されている、「耐硫酸コンクリート」を候補とした。なお、この検討にあたっては、本工事現場の供用条件、腐食環境及びD種防食材としての品質規格より、妥当性を検証（出典：JS防食マニュアル²⁾）した。

$$y_d = 0.0145 \times r_{cd} \times \alpha_{sd} \times \alpha_{md} \times t \quad (1)$$

$$\alpha_{sd} = 1.42 \ln(X) + 1.05 \quad (2)$$

y_d : 防食被膜層の設計厚さ (mm)

r_{cd} : 安全係数 (1.265)

α_{sd} : 設計対象物の劣化速度 (mm/年、(2)式、図5 平均硫化水素濃度と劣化速度)

$\ln(X)$: 平均硫化水素濃度 (50ppm)

α_{md} : 耐硫酸コンクリートの劣化速度 (mm/日、耐硫酸コンクリートを5%硫酸水溶液に112日浸せきした場合の硫酸浸透深さ(3.5mm)を112日で除した値)

t : 供用日数 (日)

既設当該人孔の年平均硫化水素濃度は、50ppm、設計対象物の劣化速度 (α_{sd}) は式(2)より 6.6051mm/年、耐硫酸コンクリートの劣化速度 (α_{md}) は前述より 0.03125mm/年、供用日数は 18250 日 (50 年) とし、試算を行った。

試算結果から、通常のコングリートの場合、式(2)より 330mm の腐食深さが予測されるが、耐硫酸コンクリートを使用した場合は、式(1)より 69mm となるため、約 1/5 にまで腐食深さを低減できることがわかった。また、新人孔の鉄筋最小被り (主筋) は 100mm としたため、供用年数 50 年経過後も鉄筋まで腐食が進行しないと期待でき、設計上は既往の防食技術の標準耐用年数である 10 年を大幅に延長し、50 年間の長期の間、メンテナンスフリーが可能であるという評価に至った。

以上の結果より、新人孔躯体の材料は、現場の腐食環境や現行の腐食対策技術を考慮し、耐硫酸コンクリートを採用する方針とした。

2. 耐硫酸コンクリートについて

耐硫酸コンクリートは、当局、東京都下水道サービス株式会社、宇部興産株式会社及び大成建設株式会社にて共同開発し、令和 3 年 2 月に当局の技術管理委員会にて承認を得ている現場打ちコンクリートである。図 6 に本技術で期待する性能を示す。

配合には、資源の有効利用の観点からセメント重量比 5% (開発での研究結果から採用) の粒度調整灰を添加し、腐食環境 I 類・II 類に実施・適用可能かつ、一般的な防食技術の標準耐用年数 10 年をさらに延長する方法 (I 類環境下で腐食速度 Max1mm/年 (硫酸浸透深さ試験結果より) →被り厚さ ≤ 耐用年数となる →メンテナンスフリー) を明示した上、D 種防食材としての品質規格及び品質評価試験法を明示した実用化技術である。

2.1 材料の特徴

本工事で使用した耐硫酸コンクリートの使用材料を表 1 に、配合を表 2 に示す。石灰石骨材を使用の上、特殊混和材として耐硫酸性付与材を使用することにより耐硫酸性を高めたことに特徴がある。耐硫酸性付与材を添加すると流動性が高くなり、減水効果が発生することから、混和材として石灰石微粉末及び特殊混和材の流動調整材を添加し、材料分離抵抗性及び流動性を制御している。これに加え、ひび割れ防止の観点から膨張材を使用しかつ、資源化の観点よりセメント重量比

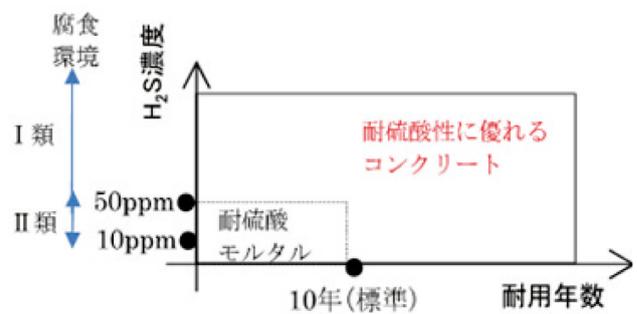


図 6 本技術で期待する性能

表 1 使用材料

材料	記号	種類
練混ぜ水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	石灰石砕砂
粗骨材	G	石灰石砕石
混和材	LP	石灰石微粉末
	EX	膨張材
	SA	粒度調整灰
特殊混和材	A	耐硫酸性付与材
	B	専用流動調整材
混和剤	AE	AE 剤

表 2 耐硫酸コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)								添加量 (kg)
	W	C	LP	S	G	A	EX	SA	B
51.7	160	295	350	861	632	9.6	15	16	調整

5%の粒度調整灰を添加したのが耐硫酸コンクリートの材料である。

呼び強度は、土木工事では一般的なレベルである24を標準とし、また施工においては、締固めを行わずに型枠の隅々まで充填可能な自己充填性を有する高流動コンクリートである。

2.2 耐硫酸性のメカニズム³⁾

2.2.1 耐硫酸性付与材の効果について

本材料で使用した耐硫酸性付与材の効果の概略図を図7に示す。通常のコンクリートは硫酸と接触するとペーストが溶解し、腐食生成物として表面にパテ状の脆弱なせっこう層が生成される。その後、ペーストの溶解と脆弱化により骨材が脱落し、表面が後退する。耐硫酸コンクリートにおいても硫酸が接触した際にせっこう層が生成されるが、耐硫酸性付与材の効果により、生成したせっこう層が曝露面と平行に成長して隙間なく表面を覆い、緻密なバリア層を形成するため、劣化速度を大幅に低減することができる。また、一度形成したせっこう層は、天災等の事由により剥落しても、新たなコンクリート面に硫酸が接触すると再びせっこうのバリア層を形成する。この繰り返しにより腐食の速度を低く抑えながら耐硫酸性を発揮し続けることが可能となっている。

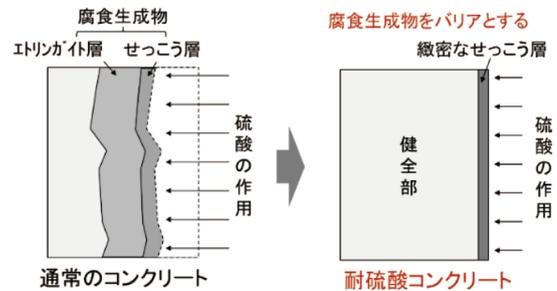


図7 耐硫酸性のメカニズム

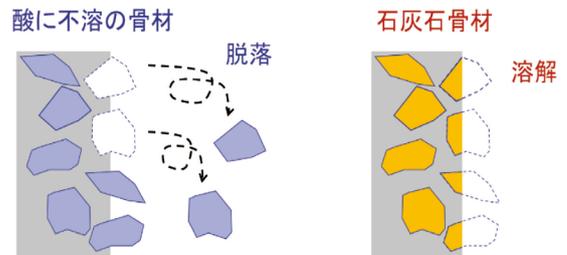


図8 石灰石骨材の効果

2.2.2 石灰石骨材 (CaCO₃) の効果について

石灰石骨材を使用するとより高い耐硫酸性を発揮する。石灰石骨材の効果の概略図を図8に示す。酸に不溶な石灰石以外を骨材として通常使用した場合、骨材周囲のペーストが劣化すると骨材が脱落し、骨材の粒径分だけ急激に劣化深さが大きくなるのに対し、石灰石骨材の場合には、周囲のペーストと同じ速度で緩やかに溶解するため、脱落による急激な欠損が生じない。また、石灰石と硫酸との反応による局所的な酸の中和効果も耐硫酸性の向上に寄与していると考えられている。

3. 工事概要

本工事の概略図を図9に示す。本工事は、立坑構築前に、側圧軽減及び地下水の流入を防止することを目的とし、高圧噴射攪拌工法 (CJG 工法及び V-JET 工法) にて地盤改良工を実施した。その後、既設 No.4 人孔を撤去し、練馬幹線に接続する管渠 1036-2 路線に SNo.10 特殊人孔、既設 SNo.3 人孔に接続する管渠 1045-2 路線に SNo.11 特殊人孔を新設し、この人孔間を結ぶ管渠φ800 を鋼製さや管推進工法 (ベビーモール工法) にて布設した。また、腐食が著しい既設 SNo.3 人孔は、北側より流入する管渠 1036 路線の流路を確保するため、SNo.3 人孔内に FRPM 管を布設した後、流動化処理土を充填し、人孔としての機能を廃止した。

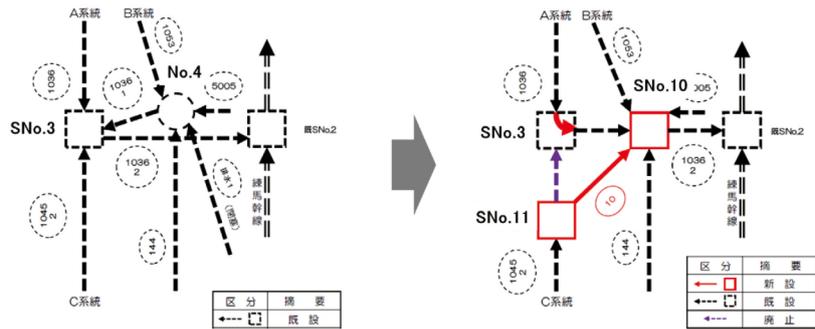


図 9 工事の概略図

4. 施工上の留意点及び対策

耐硫酸コンクリートは、公共工事における新設構造物での実績がなく、施工に際し様々な課題が見受けられた。このため、コンクリートの品質及び防食材としての要求性能を満たすため、後述の通り、対策を講じた。

4.1 施工管理

特殊コンクリートである耐硫酸コンクリートは、開発から携わっていたプラント 1 社（関東宇部コンクリート工業株式会社 大井工場）でしか製造ができない状況であった。プラントから本工事現場まで距離があったため、プラントからの運搬ルートについて、首都高速道路の時間帯・曜日別の混雑状況調査、車両を走行させての運搬時間の実測及び交通事故等により首都高が通行止めになった場合を想定し、一般道での運搬時間の実測を事前に行った。実測の結果を元に、耐硫酸コンクリートの可使用時間である「練り混ぜ開始から 3 時間以内⁴⁾」に打込みが完了するよう計画した。

耐硫酸コンクリートの施工に際し、プラントの予約は 2 ヶ月前に確定させる必要があると、打設スケジュールを容易に変更することができないことから、打設当日は、少雨でも施工を可能にするため、雨養生や立坑内の導水設備を計画した。雨養生の様子を写真 3 に示す。

耐硫酸コンクリートはその特性上、高流動コンクリートとしての扱いが必要であった。高流動コンクリートは自己充填性があるため、打設時のバイブレータ等による締固めは原則不要である一方、材料の粘性が高いため、打設中に巻き込んだエントラップドエアはコンクリート中から抜けにくく、そのまま気泡として残りやすいという性質がある。このため、耐久性に影響する鉄筋かぶり部のコンクリートにおいては、突き棒や木槌を用い、エントラップドエアの除去を行った。突き棒を使用したコンクリートの打設状況を写真 4 に示す。

支保工計画・打設計画においても、打設中にこのような作業が必要となる場面を想定し、作業時の作業員の体勢などを考慮して計画した。



写真 3 雨養生の様子



写真 4 コンクリート打設状況

型枠については、高流動コンクリートであるため、打設中は常に液体として側圧がかかるという条件で計算を行った。SNo. 10 特殊人孔の打設割を図 10 に示す。SNo. 10 特殊人孔は躯体内径 1800mm、高さ 4440mm であるため、壁と頂版部のコンクリートを一度に打設しようとする支保工が複雑になり、内側からの作業が困難となる。そのため、壁の打設を 2 回に分ける計画とし、打設中の作業員が支保工内を動けるようスペースを確保した。また、打設計画では、型枠面の表面気泡除去を全面で行うために、気泡除去作業のペースに合わせてコンクリート打上げ速度の調整を行う計画とした。打設割については、既設管周りの開口補強筋、壁鉄筋の継手長、推進部の位置を考慮し、これらに干渉しない位置に打継面を設定した。

打継面となる部分には、打継目処理剤としてコンクリート打設後に凝結遅延剤を散布し、コンクリート硬化後には脆弱層であるレイタンスの除去作業を行うことで、打継面の品質を確保した。凝結遅延剤を写真 5 に、散布状況を写真 6 に示す。

高流動コンクリートの特性として、バケットなどによる運搬等の微振動を与えると材料分離が生じやすいという特性があったため、打設にはコンクリートポンプ車による圧送を計画した。図 11 にコンクリートの打設計画を示す。高流動コンクリートの圧送時には、通常コンクリートの 2~4 倍程度の管内圧力損失が発生することから、スクイズ式に比べ最大吐出圧力の大きなピストン式のコンクリートポンプ車を選定し、打設中の管内閉塞を防止した。

自由落下高さについて、通常コンクリートは 1.5m 以内となっているが、高流動コンクリートの自由落下高さは 5m まで⁵⁾とされている。しかし、落下高さが大きくなると、型枠に想定以上の衝撃荷重がかかり、飛散したコンクリートがせき板に付着し、色むらや剥離の原因となる。また、高流動コンクリートの充填性は、コンクリートの自重による流動を前提としているため、落下による広がりや空気巻き込みの可能性が高い。前述のとおり、材料粘性の高い高流動コンクリートは、打設中に巻き込んだエントラップドエアがコンクリート

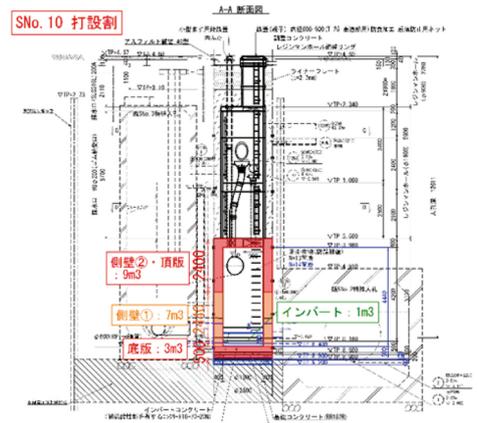


図 10 SNo. 10 人孔の打設割



写真 5 凝結遅延剤



写真 6 凝結遅延剤散布状況

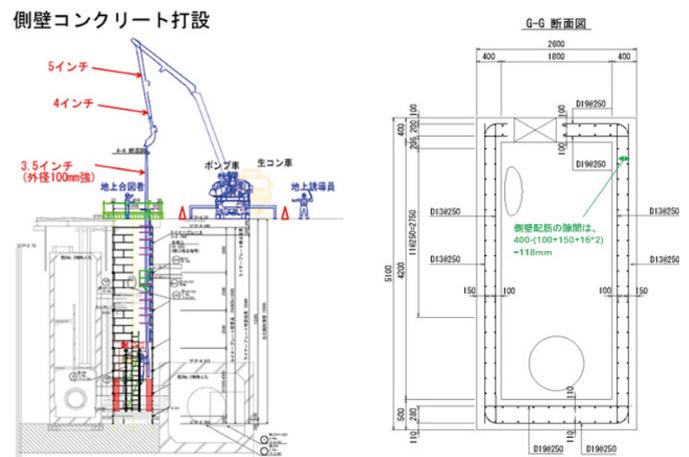


図 11 コンクリート打設計画

中から抜けにくく、そのまま気泡として残りやすい性質があるため、自重による流動によって型枠内を充填するよう、コンクリートの自由落下高さを小さくする計画とした。具体的には、特殊人孔の側壁配筋の隙間は118mmであったため、コンクリートポンプ車のフレキシブルホースの先端を最小径である3.5インチとし、側壁鉄筋の間にフレキシブルホース筒先を入れ込むことで自由落下高さを1.5m以内とすることを可能とした。

4.2 品質管理

高流動コンクリートの大きな特徴として、ブリーディング水が少ないという点がある。この特徴により、仕上げがしにくいことに加え、表面が乾燥しやすく、初期の収縮ひび割れが生じやすいことから、コンクリート表面からの水分蒸発を防ぎ、散水養生ができるようになるまでの繋ぎの養生を行う目的で、被膜養生剤を使用した。被膜養生剤を写真7に、散布状況を写真8に示す。これにより、コンクリート表面の乾燥に起因する打設直後のプラスチック収縮ひび割れを防止することができ、作業員の仕上げのしやすさも向上し、施工性を高めることにも繋がった。

コンクリートの仕上げについては、耐硫酸コンクリートを現場打ちした実績が無いため、模型を作製し、データを取りながら施工計画に反映した。模型の作製状況を写真9に示す。試験練り時に測定した経時変化より、耐硫酸コンクリートは粒度調整灰を配合しているため、通常のコンクリートと比較し、凝結開始後の硬化速度は同等であるが凝結開始は遅い傾向があるため、現場打ち躯体では仕上げのタイミングを逸することがないように、現場と同条件にて試験施工をし、凝結開始のタイミングを把握した。特に、インバートコンクリートは5%の勾配を確保する必要があったため、同サイズの模型を2回作製し、試験施工を行った。

特殊人孔内の耐硫酸性を均一に確保するため、耐硫酸コンクリート現場打ち部の弱点部となる、Pコン処理材やスペーサーなどを補強する必要があった。Pコン処理材は、耐硫酸性に優れた樹脂系目地材、スペーサーは、躯体と同じ耐硫酸コンクリートを使用し、全て現場作製した上、施工した。

以上の施工管理及び品質管理を実施した結果、所定の寸法及び外観等の検査基準を満足する躯体を構築することができた。

5. まとめ

耐硫酸コンクリートは、公共工事における新設構造物での使用実績は本工事が初めてであったため、施工に際し、様々な課題が見受けられたが、その都度、受注者とともに対策



写真7 被膜養生材



写真8 被膜養生材散布状況



写真9 現場模型作製状況

を講じ、無事に本工事現場の新人孔の完成を迎えることができた。

重要なインフラである下水道施設の老朽化が進行している現状において、施設のメンテナンスフリーと長寿命化を可能とする耐硫酸コンクリートは、下水道事業の課題である人手不足や財源不足といった負担を軽減できると考えられる。今後、本工事現場での経過データや同様な施設での施工実績を蓄積し、性能や施工性等の知見を多く得ることにより、施設のメンテナンスフリーを実現できるコンクリート技術として普及が期待される。

・参考文献

- 1) コンクリート改修技術マニュアル（センター・ポンプ所編）
- 2) 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, 令和5年3月
- 3) 下水道施設のメンテナンスフリーを目指した耐硫酸コンクリートの開発と展開, 2022
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceim/1/1/1_180/_pdf
- 4) 下水道施設に用いる耐硫酸コンクリートの開発, 大成建設技術センター報, 2006
https://www.taisei.co.jp/giken/report/01_2006_39/paper/A039_023.pdf
- 5) 高流動コンクリート配合設計・施工指針, 土木学会, 2012