

耐硫酸コンクリートの開発と適用事例

伊藤隆絢・藤野由隆・玉滝浩司

当社と大成建設株式会社は、下水道施設の長寿命化やメンテナンスフリーの実現を目的に、硫酸に対して高い抵抗性を有する耐硫酸コンクリートを共同開発した。耐硫酸性付与材と石灰石微粉末をコンクリートに添加することで、一般的なコンクリートの5倍以上の耐硫酸性を発揮することが可能となる。本コンクリートの耐硫酸性は、硫酸浸せき試験および実環境での暴露試験で確認し、いずれも高い耐硫酸性を発揮した。また、稼働中の下水道施設での補修工事に適用した結果、耐硫酸性に加え、生コン工場での製造・運搬、現場での施工性も良好であることが確認された。

キーワード：下水道、耐硫酸性、耐硫酸コンクリート、メンテナンスフリー、補修、長寿命化

1 緒 言

我が国の下水道整備は明治から始まり、令和5年度末までに約2200箇所の処理場、総延長約50万kmの管路が構築されている⁽¹⁾。そのうち標準耐用年数50年を経過した管路施設が令和15年度末には約10万km（約20%）、令和25年度末には約21万km（約42%）になるなど、老朽化した下水道施設が急速に増大することが見込まれている⁽¹⁾。

下水道施設のコンクリートは、微生物が生成する硫酸によって早期に劣化する⁽²⁾ことが知られている（図1）。その劣化は気中部で特に激しく、コンクリートの断面欠損により構造耐力が低下し、道路等の陥没などの問題を引き起こす可能性がある。この対策として、コンクリート表面を樹脂等で被覆して硫酸との接触を防止する防食被覆工法が広く用いられているが、防食被覆の標準的な耐用年数は10年であり、50年を超える供用期間中に数回の更新が必要となる。また、施工時のピンホール・気泡などから硫酸が浸透し、被覆の背面から劣化が進行して早期に補修が必要となる場合⁽³⁾もあり、定期的なメンテナンスが不可欠である。

本稿で紹介する耐硫酸コンクリートは、下水道施設の長寿命化やメンテナンスフリーの実現に向けて開発された耐硫酸コンクリート^{(4),(5)}で、一般的なコンクリートの約5～10倍の耐硫酸性を持ち、さらに、高い自己充填性を有するコンクリートである。耐硫酸コンクリートは、その高い耐硫酸性、自己充填性、施工性および硬化後の品質について、建設技術審査

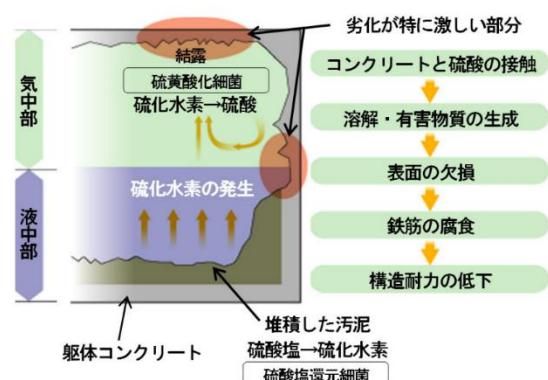


図1 下水道施設のコンクリートの硫酸劣化⁽²⁾

証明（公益財団法人下水道新技術機構）や建設材料技術性能証明（一般財団法人日本建築総合試験所）を受けている（図2、証明取得は標準仕様のみ）。

本稿では、耐硫酸コンクリートの基本物性を報告するとともに、市中のレディーミックスコンクリート工場（以下、生コン工場）において製造した耐硫酸コンクリートの適用事例について紹介する。

2 耐硫酸コンクリートの基本物性

2.1 配合およびフレッシュ性状

耐硫酸コンクリートは、水、セメント、細骨材および粗骨材の一般的な材料に加え、特殊混和材として耐硫酸性付与材（サルファテクト本剤）、専用流動調整材（サルファテクト助剤）および石灰石微粉末を使用したスランプフロー70cm程度の併用系高流動コンクリートである（表1、表2および写真1）。そ

の自己充填性は、JSCE-F 511 「高流動コンクリートの充填試験方法 (U型容器, 障害条件R2) 」⁽⁶⁾によつて確認しており、自己充填性ランク2の性能を有している。スランプフローは一般的なコンクリートと異なり、専用流動調整材 (外割添加) によって調整する。空気量は、一般的なコンクリートと同様にAE剤によって調整する。

2.2 硬化物性

耐硫酸コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さおよび塩化物イオンの拡散係数は、使用する骨材の種類によらず、同一水セメント比の一般的なコンクリートと同等の性能を有していることを確認している。

3 耐硫酸性

3.1 耐硫酸性発揮のメカニズム

耐硫酸コンクリートは、サルファテクト本剤と石灰石微粉末を使用することによって高い耐硫酸性を発揮する。一般にコンクリートは、硫酸と接触するとセメントペーストが溶解し、脆弱な石こうが生成する。その石こうは、膨張圧や流水などの影響によって剥落するため、コンクリート表面から著しく劣化が進行する。一方、耐硫酸コンクリートは、硫酸との接触により、接触面に対して垂直に石こうが発達し、結晶が隙間なく集合した緻密な組織 (石こう層) が形成される (写真2)⁽⁷⁾。その石こう層が硫酸の侵入に対してバリア層として機能し、劣化速度を大幅に低減している。また、一度形成された石こう層は、何らかの理由により剥離しても、新たなコンクリート面に硫酸が接触すると再び石こうのバリア層を形成する。この繰り返しにより、腐食速度を抑制しながら耐硫酸性を発揮し続ける。

3.2 硫酸浸せき試験

耐硫酸コンクリートの耐硫酸性は、5%硫酸水溶液に112日間浸せきした場合の硫酸浸透深さ (硫酸により欠損した深さと残存コンクリートのアルカリ性を失った深さの和) で評価している。硫酸浸透深さは、「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」⁽⁸⁾ (以下、JSマニュアル) に示される普通モルタルを基準としており、JSマニュアルでは、5%硫酸水溶液による普通モルタルの腐食速度を0.19mm/日として防食設計に用いている。これと比較すると、耐硫酸コンクリートの腐食速度は、骨材



図2 建設技術審査証明書および
建築材料技術性能証明書

表1 耐硫酸コンクリートの標準使用材料

| 種類 | 記号 | 材料 |
|-----------|----|--------------------------|
| 水 | W | 上水道水 |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント |
| 細骨材 | S | 石灰石碎砂など |
| 粗骨材 | G | 石灰石碎石など |
| | LP | 石灰石微粉末 |
| 特殊 混和材 | A | サルファテクト本剤 (MUマテックス社製) |
| | B | サルファテクト助剤 (MUマテックス社製) |

表2 耐硫酸コンクリートの標準配合

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | 添加量 (kg) |
|------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------------|
| | W | C | LP | S | G | A | |
| 51.7 | 160 | 310 | 290 | 780 | 767 | 9.6 | 6.0 |



写真1 スランプフローの状況

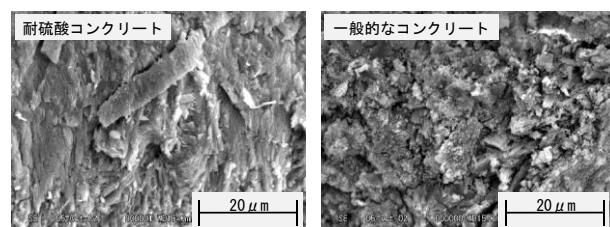


写真2 供試体表面のSEM写真
(5%硫酸水溶液に28日間浸せき後)

に石灰石骨材以外を使用した場合は1/7、全量石灰石骨材を使用した場合は1/35であり、いずれの場合も、高い耐硫酸性を示した（図3）⁽⁹⁾。

3.3 実環境での曝露試験

下水道施設で実施した曝露試験（曝露期間4.4年）における試験体の腐食状況を写真3に、硫酸浸透深さを図4に示す。試験体は70mmの立方体としたが、厳しい腐食環境（H₂S濃度：0～335ppm、腐食環境II類⁽⁸⁾）のため、比較用の一般的なコンクリートはほとんどが消失した。これに対し、耐硫酸コンクリートは表面の一部が腐食したのみであった。一般的なコンクリートは曝露開始から1年を経過したのちに腐食速度が急激に増加したが、耐硫酸コンクリートの硫酸浸透深さは4.4年間で1.6mmとわずかであった。1年以降の硫酸浸透深さから腐食速度を求めるとき、耐硫酸コンクリートは一般的なコンクリートの1/25であり、実際の下水環境においても10倍以上の耐硫酸性を示した。

4 適用事例

4.1 薄型断面の補修工事

4.1.1 施工概要

下水道施設の沈殿池において、気中部の劣化した壁面および天井面の一部に耐硫酸コンクリートを用いて補修した。硫化水素濃度計により通年で測定した現地のH₂S濃度は、季節による変動が大きいが0～442ppmであり、年平均値は44ppm（腐食環境II類⁽⁸⁾）であった⁽¹⁰⁾。

耐硫酸コンクリートの配合を表3に示す。35mmの隙に充填するため、粗骨材最大寸法は10mmとした。収縮ひび割れ防止のために膨張材を添加し、剥落防止を目的に有機纖維を0.15vol%混合した。また、資源の有効利用を目的に、下水汚泥焼却灰を分級・粉

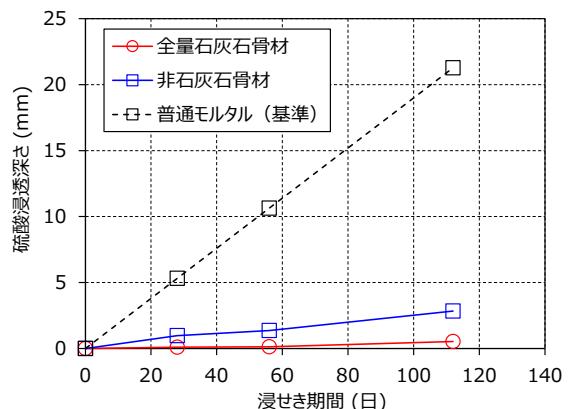


図3 硫酸浸せき試験結果

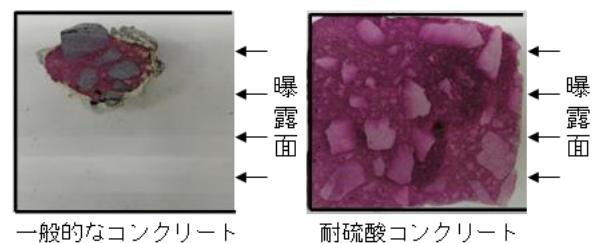


写真3 曝露4.4年後の試験体の状況

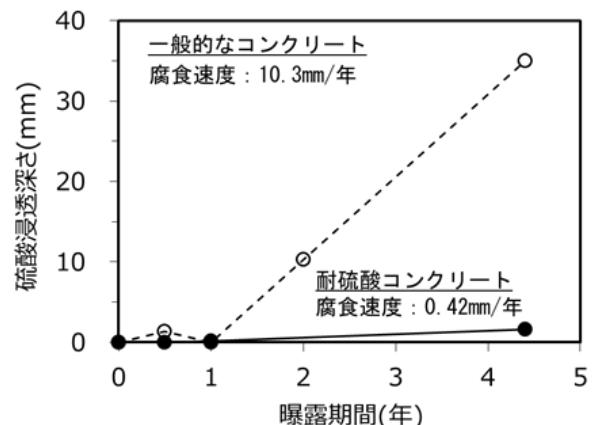


図4 曝露試験における硫酸浸透深さ

表3 防食工に用いた耐硫酸コンクリートの配合

| 配合種別 | 配合名 ^{※1} | 繊維 (vol%) | W/C (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | |
|-------|-------------------|--------------|------------|-------------------------|------|-----|------------|-----------|------------|--------------------------|-------------------------|
| | | | | 水 | セメント | 膨張材 | 石灰石 微粉末 | 粒度 調整灰 | 石灰石 細骨材 | 石灰石 粗骨材 ^{※2} | サルファテクト本剤 ^{※3} |
| 充填工法 | 充填-0 | 0.15 | 55 | 175 | 320 | 30 | 352 | — | 873 | 581 | 13.1 |
| | 充填-5 | | | | | | 307 | 16 | 917 | | |
| | 充填-10 | | | | | | 262 | 32 | 961 | | |
| パネル工法 | パネル | 1.5 | 59 | 276 | 464 | — | 386 | — | 1063 | — | 20.3 |
| | グラウト | — | 60 | 230 | 384 | 30 | 366 | — | 557 | — | 23.0 |

※1 充填工法の配合名の後の数字（0、5、10）は粒度調整灰の添加率

※2 粗骨材最大寸法：10 mm

※3 サルファテクト助剤含む

碎して製造した粒度調整灰をセメント質量の5%および10%添加した。

施工は、図5に示す充填工法およびパネル工法により行った。施工時は、写真4に示すように配合毎に施工範囲を区切り、各区画に充填口を設けて耐硫酸コンクリートを充填した。パネル工法では、工場で製作した耐硫酸コンクリートのパネルを躯体表面から「約10mm離して設置し」、その間隙に耐硫酸性を付与したグラウトを充填することで躯体とパネルを一体化した。なお、パネルの材料は粗骨材を除いたモルタルとし、輸送や施工の過程で欠けが生じないように有機纖維を1.5vol.%添加した（表3）。

4.1.2 施工後の評価

施工完了から7年間供用された施設について、耐硫酸コンクリートの健全度を調査した。供用した耐硫酸コンクリートの表面の状況を写真5に示す。表面には薄茶色の脆弱な石こうが厚く析出しており、脆弱部を除去した表面には白い析出物が固着していた。粉末X線回折によって白色析出物を分析した結果、析出物は石こうであり、その石こうの層が硫酸に対するバリア層として機能していた。腐食深さの実測値は施工厚さ35mmに対して3mmとわずかであり、目地材のエポキシ樹脂にも全く変状が認められなかった。また、施工部位から採取したコンクリートコアをEPMAで観察した結果、硫黄は表面付近でのみ観察され、内部への浸透はほぼみられなかった（写真6）。

以上の結果から、供用7年の時点では目地部も含めた補修部は健全な状態を維持しており、今後も耐用が可能であると判断した。

4.2 流量調整槽の補修工事

4.2.1 工事概要

民間施設の排水処理施設である流量調整槽の補修工事に耐硫酸コンクリートを適用した。流量調整槽は、変動する汚水の水質・水量を安定させるため、一時的に汚水を貯留する水槽であり、供用開始から約40年が経過しているため、槽内で生成された硫酸によってコンクリートが劣化していた。特に気中部やスラブ下面および壁面の劣化が著しく、表面から約30mm劣化している箇所もあり、部分的に骨材や鉄筋の露出も認められた。そのため、将来のメンテナンスを含むライフサイクルコストを考慮して、耐硫酸コンクリートによる増し打ち工法を選定した。

4.2.2 使用材料および配合

現場に適用した耐硫酸コンクリートの配合を表4に示す。本工事では、硫酸浸透深さの設計値を2.1mmとするため、細骨材および粗骨材には全量石灰石骨材を使用した。また、充填性を向上させるため、標

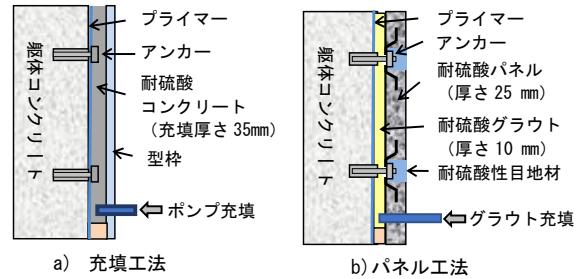


図5 防食工法の概要

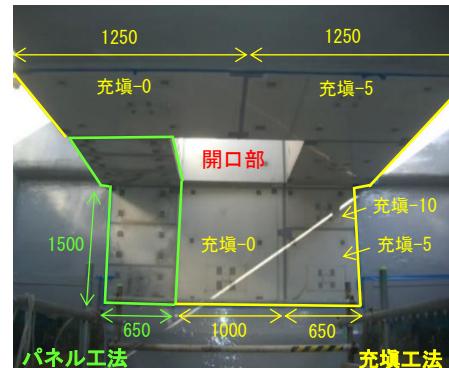


写真4 防食施工完了時の状況

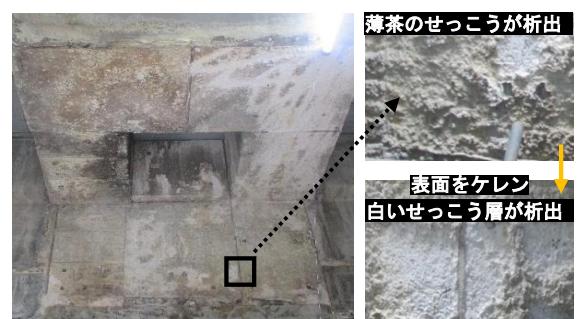
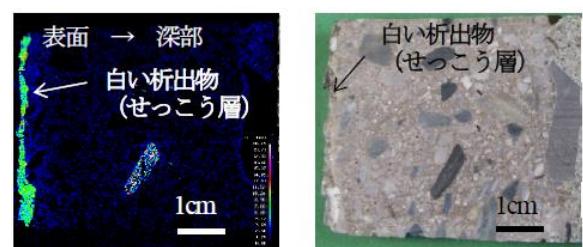


写真5 7年間供用後の施設の状況



a) 硫黄の分布
b) 試験体写真
写真6 EPMAによる硫黄（硫酸）の浸透状況

表4 耐硫酸コンクリートの適用配合

| 種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-----|------------|------------|--------------------------|------|------------|-----|-------------|-----|---------------|
| | | | 水 | セメント | 石灰石 微粉末 | 細骨材 | 粗骨材 1505 | 膨張材 | サルファ テクト本剤 |
| 配合1 | 51.7 | 58.0 | 160 | 295 | 350 | 873 | 635 | 15 | 9.6 |
| 配合2 | | 52.8 | 165 | 305 | 380 | 767 | 689 | | |

※ 適宜調整

準配合よりも粗骨材を減じて石灰石微粉末を増やし、粗骨材の最大寸法を20mmから15mmに変更した（配合1）。さらに、スラブ下面および梁下部では、溶接金網の配置によって充填厚さが十分確保できない可能性があったため、配合1よりも単位水量を増加させてペースト量を増やし、s/aを58.0%から52.8%に調整した配合（配合2）を適用した。フレッシュ性状の目標値は、いずれの配合においても、スランプフローを70±5cm、-10cm (60~75cm)、空気量を4.5±1.5%とした。

4.2.3 コンクリートの製造

耐硫酸コンクリートを製造する生コン工場は、施工現場までの運搬距離および石灰石骨材を常用していることを考慮して選定した。練混ぜ手順および練混ぜ時間は、水平2軸形強制練りミキサ（3.3m³）を用いて事前に試験練りを行って決定した。練混ぜ水を除いたすべての材料を投入後、30秒間空練りをおこない、次に練混ぜ水を投入してから3分間練り混ぜる方法を採用した。耐硫酸コンクリートは、単位粉体量が多く、さらに、専用流動調整材で材料分離抵抗性を高めていることから、通常の高流動コンクリートと同様に粘性が高く、ミキサ負荷値が安定するまでに3分間の練混ぜ時間を要した。

4.2.4 耐硫酸コンクリートの品質

耐硫酸コンクリートの受入検査結果を図6および図7に示す。スランプフローは、いずれの期間においても目標値の範囲内であり、良好な流動性を示した。空気量は出荷時に4~5%であったが、受入検査時に3~4%に低下しており、トラックアジテータでの運搬によって、約1%減少したと認められた。流量調整槽では、凍結融解作用が生じないため、空気量が低くても凍害は生じないが、凍結融解作用を受ける部材へ適用する際には、空気量の管理に注意が必要と考えられる。

標準水中養生による材齢28日の圧縮強度を図8に示す。圧縮強度は平均47.9N/mm²、標準偏差1.6N/mm²

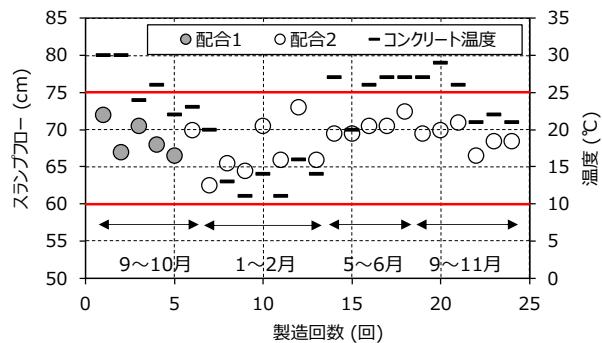


図6 スランプフローおよびコンクリート温度の測定結果

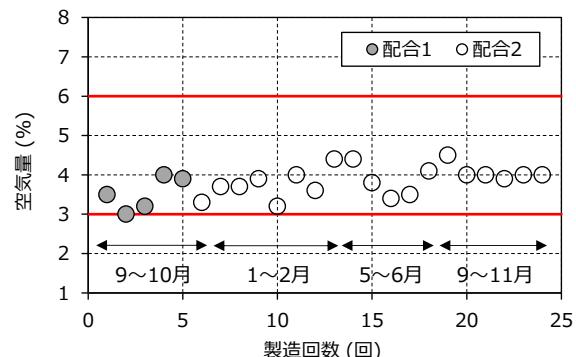


図7 空気量の測定結果

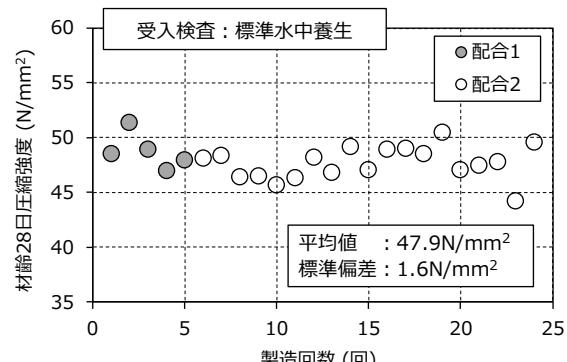


図8 圧縮強度の測定結果

であり、ばらつきも小さかった。

受入検査時に成形した供試体を用いて、硫酸浸せき試験を実施した。測定結果を図9および写真8に示す。写真8に示す通り、硫酸と供試体との接触面に石

こう層が形成されており、5%硫酸水溶液に112日間浸せきした場合の硫酸浸透深さは1.1mmであった。この結果より、出荷した耐硫酸コンクリートにおいても、耐硫酸性10倍の目標値（本工事の設計値）である2.1mm以下を十分に満足することを確認した。

5 結 言

下水道施設の老朽化が急速に進む中、限られた財源、人員で下水道事業を持続させるためには、高機能な材料を使用した施設の長寿命化やメンテナンスフリーを実現できる技術が不可欠である。耐硫酸コンクリートは、今後の下水道施設の構築と補修に貢献できる材料である。これまでに、基本的な技術データの収集と、生コン工場での製造・運搬、ポンプ圧送による施工性および実物大の試験体を用いた構造一体性、実環境における耐腐食性について検証している。また、実際の補修工事への適用においても、高い充填性と耐硫酸性を確認できた。

今後は、下水道施設の新設・補修工事の適用実績が増加し、下水道施設の長寿命化に貢献できるものと期待している。

参考文献

- (1) 国土交通省：国土交通省HP、下水道の維持管理、
(1) 施設の現状
- (2) 宮原茂禎、大脇英司、藤野由隆、伊藤智章：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、土木学会インフラメンテナンス実践研究論文集、Vol.1、No.1、pp.180-188、2022
- (3) 中沢均：下水道施設の保守に関する日本下水道事業団の取組み 総合的な腐食対策が求められる、コンクリートテクノ、Vol.21、No.2、pp.49-55、2002
- (4) 大脇英司、宮原茂禎、佐々木彰、遠山晃二：下水道施設の50年間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、セメント・コンクリート、No.734、pp.31-36、2008
- (5) 宮原茂禎、大脇英司、佐々木彰、武元貴裕、林悦朗：通常の10倍の耐硫酸性を有するコンクリートの下水道施設への展開、セメント・コンクリート、No.869、pp.18-23、2019
- (6) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書〔基準編〕 土木学会基準および関連基準、pp.284-286、2023

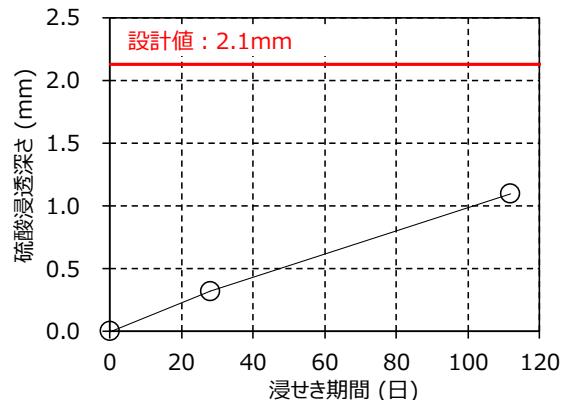


図9 出荷品における硫酸浸せき試験の結果

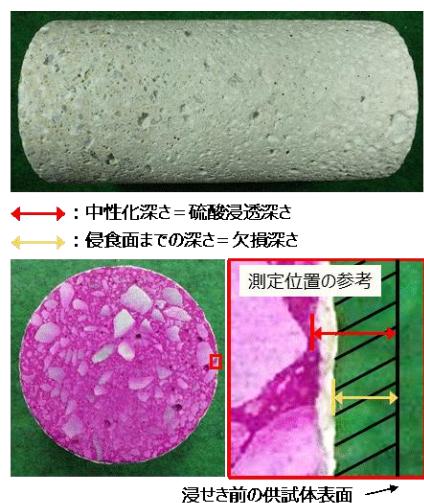


写真8 硫酸浸せき試験後の供試体状況

(5%硫酸水溶液、112日間浸せき後)

- (7) 小西和夫、黒沢功、五十嵐秀明、須賀雄一：下水道施設用コンクリートの耐硫酸性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.57、pp.315-320、2003
- (8) 一般財団法人日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術マニュアル及び防食技術マニュアル、p.80、2017
- (9) 藤野由隆、伊藤智章、宮原茂禎、木村竜太：耐硫酸コンクリート「T-Sulfatec®」の開発、セメント・コンクリート、No.911、pp.40-45、2023
- (10) 上野恭宏、藤野由隆、新藤竹文、武元貴裕、荻野正貴、林悦朗、宮原茂禎：下水処理施設における耐硫酸コンクリートの2年間の実環境暴露試験、土木学会第71回年次学術講演会、V-224、2016

伊藤 隆紘・いとう たかひろ
研究所 コンクリート研究室
生コン・特殊コンクリート 研究員

藤野 由隆・ふじの ゆたか
研究所 コンクリート研究室
生コン・特殊コンクリート 研究員

玉滝 浩司・たまたき こうじ
研究所 コンクリート研究室
生コン・特殊コンクリート グループリーダー