

論文 自己充てん性を有する耐硫酸コンクリートの施工性

宮原 茂禎^{*1}・大脇 英司^{*2}・佐々木 彰^{*3}・遠山 晃二^{*4}

要旨: 通常のコンクリートと比較して10倍の耐硫酸性を有する自己充てん型のコンクリートを開発した。本研究ではこの耐硫酸コンクリートを用いて、壁部材の新設と補修および天井面の断面修復を模擬した大型部材の施工試験を実施し、耐硫酸コンクリートの施工性と硬化後の物性を確認した。また、天井面を断面修復した部材を用いた載荷実験により、既設のコンクリートと強固に一体化することを確認した。

キーワード: 下水道, 硫酸, 劣化, 耐久性, 補修, 自己充てん, 載荷実験

1. はじめに

下水道施設のコンクリートは、**図-1**に示すように微生物が生成する硫酸により早期に劣化することが知られている。主な対策として、コンクリート表面を樹脂等で被覆して硫酸との接触を遮断する防食被覆工法が用いられている。しかし、防食被覆工法に要求される耐用年数は10年間であるため¹⁾、施設の供用期間中に定期的なメンテナンスが必要である。さらに、被覆材の僅かなキズやピンホールが起点となって膨れや剥がれが生じ、10年に至る前に追加のメンテナンスが必要となる場合もある。ここで、コンクリートの耐硫酸性を飛躍的に向上させることができれば、防食被覆が不要になり、メンテナンスの頻度を大幅に低減することができる。これにより、施設の維持管理費が低減でき、ライフサイクルコストの観点からも効果が期待できる²⁾。

著者らはこれまでに通常のコンクリートと比較して10倍以上の耐硫酸性を有するコンクリートを開発した³⁾。このコンクリートは「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」¹⁾のI類またはII類に相当する腐食環境でも、標準的な供用期間である50年間は防食被覆などの対策を必要としない耐硫酸性を有するものと期待される。

本研究では、この耐硫酸コンクリートの実用化を進めるために、通常のレディーミクスト工場で製造して、壁部材の新設および壁面の補修を模擬した施工試験を行い、施工性や硬化後の物性について検討した。さらに、下水道施設において著しい劣化が生じる天井面の断面修復工への適用を図るため、劣化した天井の断面修復工を模擬した施工試験を行い、施工性と既設コンクリートとの一体性を確認した。

2. 耐硫酸コンクリートの性能

表-1および**表-2**に耐硫酸コンクリートの使用材料および配合を示す。このコンクリートは、特殊化学混和剤、石灰石微粉末および石灰石骨材の使用により耐硫酸性を大きく向上させたものである。特殊化学混和剤はコンクリートに減水性と耐硫酸性を付与するものである。混和剤の添加によりコンクリートの表面に緻密なセッコウ層が生成され、内部への硫酸の浸透が抑制されるため耐硫酸性が向上すると考えられている⁴⁾。また、コンクリートは自己充てん性を有するため、高密度に配筋された狭窄箇所の補修・補強工事へも適用できる。**図-2**に耐硫酸コンクリートと、水セメント比55%、圧縮強度35N/mm²程度の通常のコンクリートを5%の硫酸に浸せきしたときの侵食深さを示す。また、**図-3**に5%の硫酸に26週間浸せきしたときの供試体の切断面を示す。侵食深さは、浸せき前の寸法(x)と切断面のフェノールフタレイン溶液呈色域の長さ(y)の差とした。26週間まで浸せきしたときの侵食速度(浸せき期間と侵食深さ

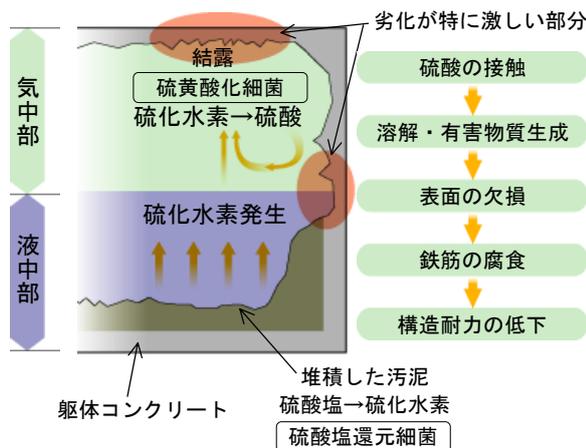


図-1 下水道施設での硫酸によるコンクリートの劣化

*1 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任研究員 工博 (正会員)

*3 (株)宇部三菱セメント研究所 宇部センター コンクリートグループ 工修 (正会員)

*4 日本下水道事業団 技術開発研修本部 技術開発部 総括主任研究員 (非会員)

表-1 使用材料

記号	材料	品種・品質
W	練混ぜ水	水道水
C	セメント	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm ³ ，ブレン比表面積 3290cm ² /g
S	細骨材	石灰石砕砂：表乾密度 2.63g/cm ³ ，粗粒率 3.09
G	粗骨材	石灰石碎石：Gmax25mm，表乾密度 2.70g/cm ³ ，粗粒率 6.67
LSP	混和材	石灰石微粉末：密度 2.67g/cm ³ ，ブレン比表面積 4190cm ² /g
SAd	混和剤	特殊化学混和剤

表-2 配合 (kg/m³)

W	C	LSP	S	G	SAd
170	310	231	822	770	24

W/C=55%，空気量 4.5%

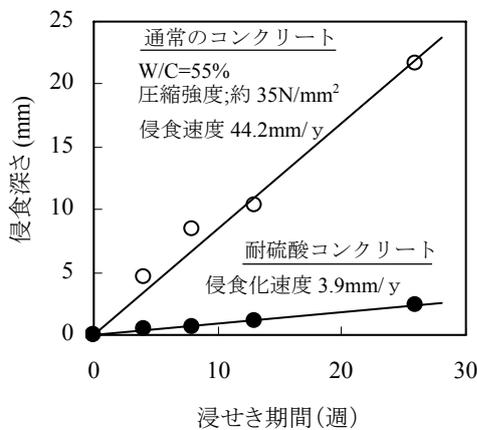
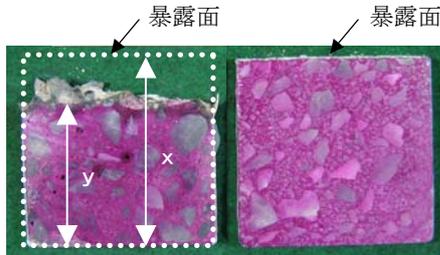


図-2 5%硫酸への浸せき試験の結果



通常のコンクリート 耐硫酸コンクリート
(浸せき期間 26 週間，硫酸濃度 5%)

図-3 試験後の供試体の一例

の関係直線で回帰したときの傾き)で比較すると、耐硫酸コンクリートは 3.9mm/y であり、通常のコンクリート (44.2mm/y) の 1/10 以下となっている。すなわち、10 倍以上の耐硫酸性を有していることが確認できる。耐硫酸性の向上は、前述の特殊化学混和剤の効果と、弱酸-強塩基の塩である炭酸カルシウムを主成分とする石灰石骨材および石灰石微粉末によりコンクリート表面近傍の浸漬液が中和された効果により得られたものと考えられる。さらに、石灰石骨材を用いると、通常の山砂などの場合と異なり、骨材が剥落して侵食深さが急激に増大することがないことを確認しており、これも耐硫酸

性の向上に貢献しているものと思われる。

また、強度の目標値は、圧縮強度は同一水セメント比の通常のコンクリートと同等以上 (水セメント比 55% の場合 35N/mm² 程度)、断面修復したときの既設コンクリートとの付着強度は 1.5N/mm² 以上と設定した。

3. 壁部材の施工試験

3.1 試験方法

(1) 耐硫酸コンクリートの製造試験

耐硫酸コンクリートは表-2 を示方配合として、通常のレディーミクストコンクリート工場で製造した。自己充てん性は「高流動コンクリートの施工指針」⁵⁾ (以降、高流動指針) におけるランク 2 の性能を満足するものとし、JIS A 1150 : 2001 「コンクリートのスランブフロー試験」および JSCE-F511-1999 「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過試験方法 (案)」(U 型容器：障害 R2) によるスランブフローと充てん高さを、それぞれ 70±5cm，350mm 以上とした。

二軸強制練りミキサ (容量 6m³) を用いて、1 バッチ当りの練混ぜ量を 2.5m³ としてミキサ負荷値 (消費電流量) が一定になるまで練り混ぜた。総練混ぜ時間は 180 秒であった。コンクリートはアジテータトラックに積載し、練上り直後と 30 分後にフレッシュ性状を性状の確

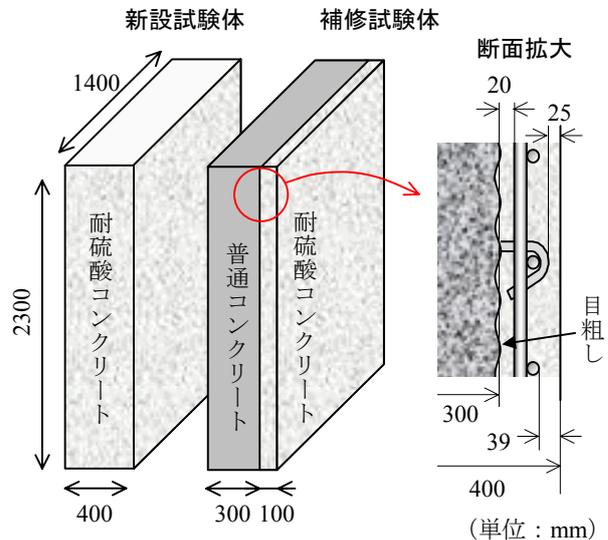


図-4 壁部材の施工試験の概要

認後、現場に運搬した。

(2) 壁部材の施工

図-4 に壁部材の概要を示す。大きさは幅 1.4m、高さ 2.3m、厚さ 0.4m とし、新設構造物を想定して全断面を耐硫酸コンクリートで施工する新設試験体と、断面修復工を想定して一部分に適用する補修試験体を施工した。

新設試験体では高密度配筋での充てん性を確認するため、既往の下水道施設を参考に、主筋(D19)と配力筋(D16)をそれぞれ10cm間隔で配置した2層の格子状の鉄筋をD13のせん断補強筋で締結した(図-5)。

補修試験体は普通コンクリートで作製した厚さ 0.3m のコンクリート版の表面を目粗し処理して、下水道施設において劣化したコンクリートの表面をはつき取った状況を模擬した。コンクリートの打設時に表面に遅延材を散布したのちに高圧水で洗い流して目粗しを行った。断面修復の厚さを 10cm とし、鉄筋と型枠を設置した。主筋と配力筋をそれぞれ 10cm 間隔で配置した格子状の鉄筋を1層設置し、せん断補強筋を模擬したフック状の鉄筋を配置した(図-4、図-5)。充てんする最小間隙は約 2cm とした。

なお、両部材ともに硬化後にコンクリートコアを採取して物性試験を行ったため、高さ 30, 90, 150, 210cm 付近では主筋の一部および配力筋を配置していない。

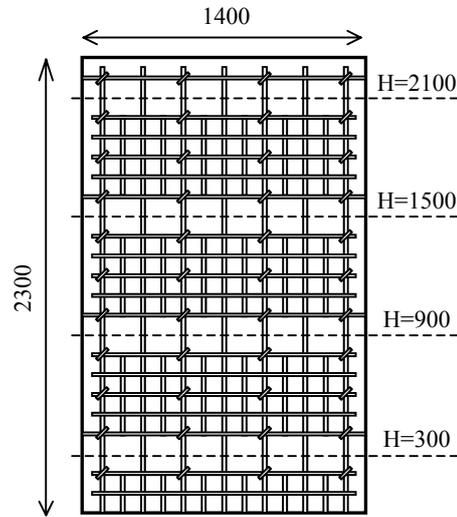
現場に搬入した耐硫酸コンクリートはフレッシュ性状の確認後、バイブレータなどによる締固めを行わずに、バケットを用いて打設した。型枠の1面はアクリル板とし、充てん状況を目視観察した。一連の施工は耐硫酸コンクリートの練上りから 160 分後までに終了した。この間、現場においてフレッシュ性状の変化を測定した。

材齢 28 日において、新設試験体から $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、補修試験体から $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のコアを採取して密度、圧縮強度を測定した。また、補修試験体を用いて耐硫酸コンクリートの付着力を測定した。耐硫酸コンクリート側から普通コンクリートに達するまで $\phi 100\text{mm}$ の円形の切込みを入れ、建研式引張り試験機により求めた。これらの結果から充てん性や均一性について検討した。

3.2 試験結果

耐硫酸コンクリートの打設は冬期に実施し、気温は 6°C であった。また、練上り直後のコンクリート温度は 10°C 、空気量は 4.6% であった。図-6 に耐硫酸コンクリートのスランプフローの経時変化を示す。練上りから施工の終了した 160 分後まで、スランプフローは目標値である $70 \pm 5\text{cm}$ を満足した。U型充てん高さについても 160 分後に 358mm であり目標値を満足した。耐硫酸コンクリートは通常のレディーミクストコンクリート工場での製造が可能であり、練上りから 2 時間 30 分以上の間、フレッシュ性状を保持できることを確認した。

充てん状況を目視観察により狭隘な隙間にもコンクリートが充てんされる様子が確認できた。また、打設後 2 週間で脱型した部材の表面には充てん不良、ひび割れ



主筋(縦筋); D19@100
配力筋(横筋); D16@100
せん断補強筋; D13(90° -135° フック)×44本
(単位: mm)

図-5 壁部材の配筋

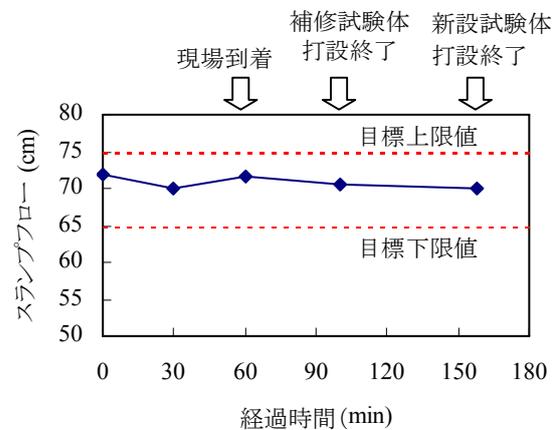


図-6 スランプフローの経時変化

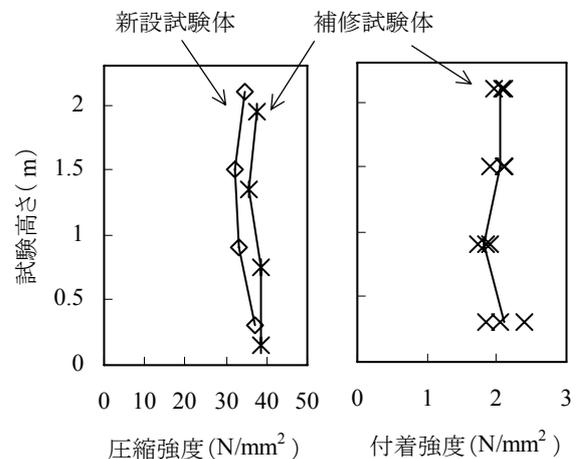


図-7 圧縮強度および付着強度

などの欠陥は認められず、密実に充てんされていた。

新設および補修試験体から採取したコアの圧縮強度と補修試験体で行った付着強度の測定結果を図-7 および表-3 に示す。耐硫酸コンクリートの圧縮強度は、新設と補修試験体でコアの寸法が異なるため補修試験体のほうが若干大きくなったが、コアの採取位置によらず 35N/mm² 程度であった。付着強度についても試験位置によらず 2N/mm² 程度であった。付着試験では普通コンクリートと耐硫酸コンクリートの界面ではなく、普通コンクリートが破壊し、界面の付着力が十分であることが確認された。また、密度、圧縮強度の変動係数はいずれも小さく、部材全体にわたって材料分離を生じることなく均一に充てんされていることが確認できた。

4. 天井面の断面修復工の施工試験と載荷実験

4.1 耐硫酸コンクリートの配合調整

天井面の断面修復においては、既存のコンクリートの下側から耐硫酸コンクリートを打設する「逆打ち」となるため、付着界面での充てん不良を排除して一体性を確保することが重要である。これを考慮して耐硫酸コンクリートの材料や配合に調整を加えた。配合を表-4 に示す。高密度に配筋された狭窄部や凹凸のある既設コンクリートの付着面へも確実に充てんするために粗骨材の最大寸法は 13mm とし、既設躯体との一体性の向上のために石灰系膨張材を 15kg/m³ 添加した。また、粗骨材の絶対容積は高流動指針を参考にして 0.285 m³/m³ とした。鉄筋が高密度に配置されて充てん間隔も狭いことから、自己充てん性のレベルはランク 1 を目標とし、さらなる高性能化を図った。フレッシュ性状の目標値は高流動指針に示される併用系高流動コンクリートの場合を参考に、スランプフローを 70±5cm、50cm フロー到達時間を 5~10 秒、U 型充てん高さを 350mm 以上とした。

4.2 試験方法

(1) 天井面の断面修復工

天井面の断面修復工に関する施工試験の概要を図-8 に示す。普通コンクリート(24-8-20H / JIS A 5308:2003) で作製した 2.0m×1.0m、厚さ 0.2m のコンクリート版を既設躯体の代替として、その下面端部から耐硫酸コンクリートをポンプ圧送、充てんした。コンクリート版の下面は壁の補修試験体と同様に目粗し処理を行った。圧送には吐出口径 4 インチ、理論吐出量 4m³/h のスクイズ式コンクリートポンプを用いた。ポンプの吐出口でテーパ管を介して 3 インチの耐圧ホースに接続し、地上から 1.5m の高さに設置した部材の充てん口と接続した。充てん部の厚さは 10cm とした。

図-9 に部材の配筋図を示す。密な配筋条件での充てん性を確認するために、充てん部には主筋と配力筋(と

もに SD295 : D13) をそれぞれ 10cm 間隔で、純かぶり 35mm の位置に配置した。これは一般的な下水道施設のおよそ 2 倍の鉄筋量に相当する。なお、硬化後に物性試

表-3 物性値と変動係数

種類	物性	平均値	変動係数	試験点数
新設試験体	密度	2.35 g/cm ³	4.2%	12
	圧縮強度	34.2 N/mm ²	6.3%	12
補修試験体	密度	2.41 g/cm ³	1.8%	12
	圧縮強度	37.7 N/mm ²	5.2%	12
	付着強度*	2.00 N/mm ²	8.8%	12

※界面ではなく普通コンクリート部で破壊

表-4 天井面の断面修復工に用いた耐硫酸コンクリートの配合 (kg/m³)

W	C	Lsp	Exp	S	G	SAd
170	295	290	15	766	772	27

W/C=55%, 空気量 4.5%, Gmax : 13mm

※Exp : 石灰系膨張材, 他の記号は表-1 と同様

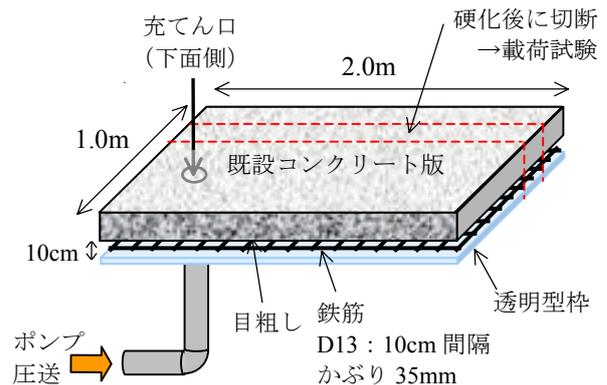


図-8 天井面の断面修復工の概要

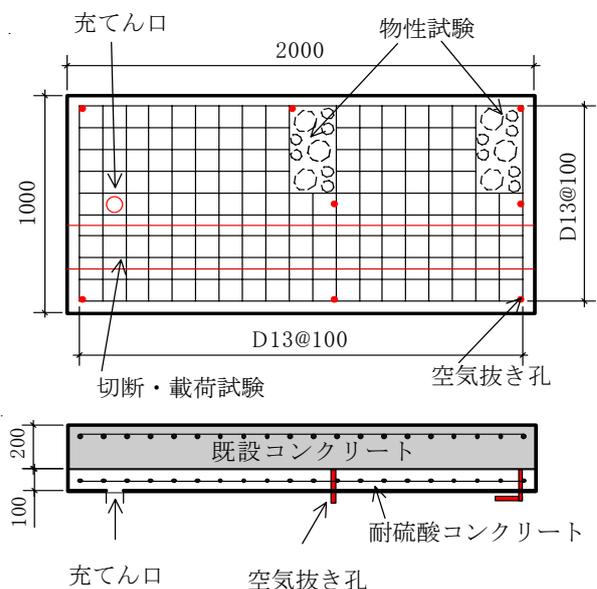


図-9 部材配筋図

験を行うため、一部の鉄筋を省略した。充てん部の側面および底面の型枠はアクリル板とし、充てん状況を確認しながらおよそ $0.4\text{m}^3/\text{h}$ の速度で耐硫酸コンクリートを圧送、充てんした。このとき、 $0.5\sim 1.0\text{m}$ 間隔で 8 箇所に設置した空気抜き孔を介して型枠内の空気を排出した。また、耐硫酸コンクリートの練上りから 90 分後までのフレッシュ性状の変化を測定した。

打設後 28 日において、充てん口から 1m と 2m の部位で $\phi 50\text{mm}\times 100\text{mm}$ のコアを採取して圧縮強度と 3.1.(2) に示す方法で付着強度を測定した。

(2) 載荷試験方法

既設コンクリートと耐硫酸コンクリートの一体性を確認するために、硬化後の部材から図-8 に示すように、長さ 2.0m 、幅 0.2m 、高さ 0.3m の梁状の試験体を切り出し（以降、修復部材）、耐硫酸コンクリートの材齢 28 日において曲げ載荷試験を実施した。劣化前の健全なコンクリート部材として、同一形状、同一配筋で普通コンクリート（24-8-20H）のみを用いて試験体（以降、既設部材）を作製し、修復部材と比較した。

4.3 試験結果

(1) 耐硫酸コンクリートの施工性

耐硫酸コンクリートの打設は冬場を実施し、気温は 13°C 、練上り後のコンクリート温度は 15.4°C であった。表-5 に練上りから 90 分後までの耐硫酸コンクリートのスランプフロー測定および U 型充てん試験（障害 R1）の結果を示す。スランプフロー値は 90 分後まで目標値の $70\pm 5\text{cm}$ を満足した。U 型充てん試験による充てん高さは 90 分後においても 358mm であった。ポンプ圧送には 3 インチの小径の耐圧ホースを用いたが、閉塞することなく円滑に圧送することができた。また、ポンプ圧送後に筒先から採取したコンクリートについてもフレッシュ性状の低下は認められなかった。これらのことから、耐硫酸コンクリートは、所定の期間、必要な流動性と充てん性を保持し、良好にポンプ圧送が可能であることを確認した。

型枠内の流動状況の観察から、型枠内部での材料分離は認められず、かぶりが 35mm と小さい場合でも耐硫酸コンクリートが鉄筋の周囲や型枠の端部まで確実に充てんされる様子が確認できた（図-10）。打設後 2 週間で脱型したときの耐硫酸コンクリートの表面は平滑で、ジャンカや粗大な空隙は確認されず、 10cm の厚さを充てんしてもひび割れは発生しなかった。

修復部材から曲げ載荷試験のための試験体を切り出した際の切断面を観察した。界面の付着状況は概ね良好であった。観察した長さ 2m の界面うち、界面での気泡だまりにより延長 22cm 、間隙幅 $0.5\text{mm}\sim 5\text{mm}$ の付着切れが生じていた。付着切れを生じていた長さは観察した

長さの 10%程度であったが、この付着切れは耐荷性能に影響を及ぼさないことを 4.3(3) に示す載荷試験により確認した。

以上より、天井面の断面修復に用いた耐硫酸コンクリートは、所定の時間フレッシュ性状を保持することができ、良好なポンプ圧送性と充てん性を有する施工性に優れたコンクリートであることが確認できた。

(2) 耐硫酸コンクリートの物性

材齢 28 日に測定した耐硫酸コンクリートの圧縮強度と付着強度を表-6 に示す。

採取した $\phi 50\times 100\text{mm}$ コアの圧縮強度は、充てん口からの流動距離によらず $47\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であり、同一寸法で標準養生した供試体の $41\text{N}/\text{mm}^2$ よりも高く良好な強度特性を有していた。これは、膨張材を添加した耐硫酸コンクリートが、部材では型枠や既設コンクリートにより膨張を拘束されたためと推察している。

充てん口から 1m および 2m 地点で測定した付着強度は、それぞれ $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $1.3\text{N}/\text{mm}^2$ であり、いずれも界面で破壊した。逆打ちの影響を検討するために $\phi 100\times 200\text{mm}$ の型枠の半分高さまで普通コンクリートを打設して、修復部材と同様に目粗し処理したのちに耐硫酸コンクリートを上方から打設した通常の打継ぎによる供試体（比較用供試体）を用いて付着強度を測定した。こ

表-5 フローおよび U 型充てん試験の結果

経過時間 (分)	スランプフロー		U 型充てん (ランク 1)		空気量 (%)
	50cm 通過(s)	スランプ フロー(cm)	30cm 通過(s)	充てん 高さ(mm)	
目標値	5~20	70±5	—	350 以上	4.5±1.5
0	11.8	74.3	7.2	357	5.9
30	13.3	75.2	9.1	358	4.7
60	13.7	74.9	11.0	356	3.9
90	17.3	72.2	14.1	358	3.1
圧送筒先	11.8	73.3	6.5	358	3.7



図-10 型枠内部での耐硫酸コンクリートの流動状況

表-6 付着強度および圧縮強度の試験結果

	圧縮強度 (N/mm^2)	付着強度 (N/mm^2)
1m 地点	47	1.5
2m 地点	48	1.3
比較用供試体	—	2.2
標準養生	41	—

の供試体の付着強度は 2.2N/mm^2 であり、打継ぎの界面ではなく普通コンクリートが破壊した。通常の打ち継ぎを行った場合の付着強度は十分であったが、逆打ちした修復部材では、前項で示したような付着切れが生じていない場合でも付着強度が低下する場合があることが明らかになった。しかしながら、付着切れの場合と同様に、耐荷性能に影響を及ぼさないことを 4.3(3)にて確認した。

(3) 曲げ載荷試験

載荷試験の概要を図-11に示す。載荷試験のせん断スパン比は 3.1 とし、曲げが先行する破壊形態となる条件とした。載荷速度は 0.1kN/sec とし、曲げひび割れの発生時、設計上の鉄筋の降伏荷重到達時 (43kN)、に一旦徐荷した。修復部材に関しては既設/耐硫酸コンクリートの界面（以降、界面）に沿ったひび割れの発生時にも徐荷した。曲げ載荷試験による部材中央の荷重-変位曲線を図-12に、ひび割れ発生荷重と鉄筋の降伏荷重を表-7に示す。耐硫酸コンクリートの圧縮強度 (47N/mm^2) が既設部材の普通コンクリート (33N/mm^2) よりも高いこともあり、曲げひび割れの発生荷重は既設部材よりも修復部材のほうが大きくなった。修復部材においては、荷重 44kN で界面に沿ったひび割れが発生したが、その後も荷重および剛性の低下はみられず、既設部材と同様に部材の降伏は主鉄筋の降伏により決定した(図-12)。また、鉄筋降伏後、変位制御により最終変位 15mm 、変形角 $1/53$ まで載荷したが、両部材とも荷重の低下はみられなかった。このように、界面の一部における付着切れや、通常の打ち継ぎとの比較による付着力の低下が観察されたが、耐硫酸コンクリートと既設コンクリートの部材としての一体性は良好であり、断面修復工により劣化前と同等の耐荷性能を回復できることが確認できた。

5. まとめ

通常のコンクリートと比較して 10 倍の耐硫酸性をもつコンクリートを用いて、壁部材の新設と補修および、天井面の断面修復工を模擬した施工試験を実施した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 自己充填型の耐硫酸コンクリートは通常のレディミクストコンクリート工場での製造が可能であり、練上りから 2.5 時間以上の間フレッシュ性状を保持していた。
- (2) 壁部材の新設および補修を模擬した施工試験と物性試験から、耐硫酸コンクリートは良好な施工性を有し、部材全体にわたり均一な物性を示すことを確認した。
- (3) 天井面の断面修復工の施工試験により、天井面の断面修復工に適した配合に調整した耐硫酸コンクリートは優れたポンプ圧送性と充填性を示し、施工性は良好であった。
- (4) 天井面の断面修復部材を用いた載荷試験により耐硫

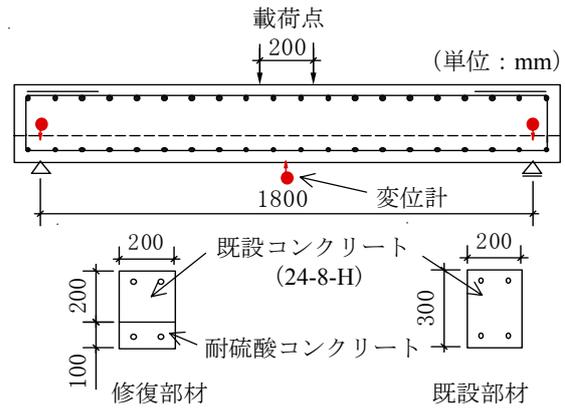


図-11 載荷試験の概要

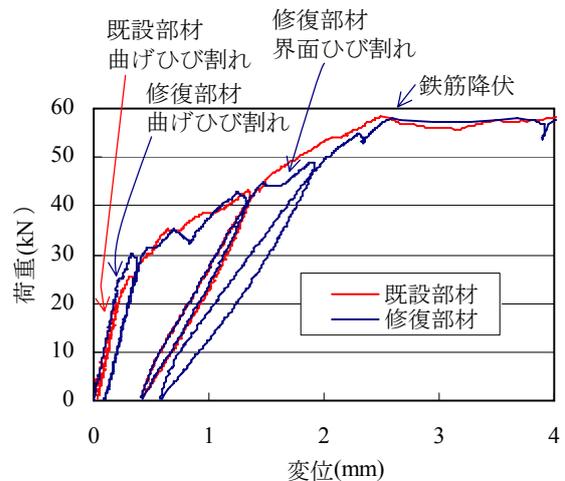


図-12 部材中央の荷重-変位曲線

表-7 ひび割れ発生および降伏荷重 (kN)

	曲げ ひび割れ	界面 ひび割れ	鉄筋 降伏
既設部材	18	—	58
修復部材	25	44	58

酸コンクリートは既設コンクリートと強固に一体化し、劣化前の構造物と同等まで耐荷性能を回復できることが確認された。

参考文献

- 1) 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及び防食技術マニュアル，2007.7
- 2) 中沢均，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
- 3) 佐々木彰ほか：骨材岩種と水セメント比がコンクリートの耐硫酸性に与える影響，第 61 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp.599-600，2006
- 4) 小西和夫，黒澤功ほか：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
- 5) 土木学会：高流動コンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー93号，1998.7