

耐酸性コンクリート（アシッドガード） による補修事例

辻正邦¹・大崎雄作²・江渡正満³・浦野真次⁴・新田智博⁵・杉山武⁶

¹正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部 先端技術部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

²正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部 技術開発部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

³正会員 工博 清水建設株式会社 土木技術本部 先端技術部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3）

⁴正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター

（〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17）

⁵正会員 ティビュー株式会社（〒246-0007 神奈川県横浜市瀬谷区目黒町33-5）

⁶帝国ヒューム管東日本株式会社（〒246-0007 神奈川県横浜市瀬谷区目黒町33-5）

下水道施設や温泉地帯から流れる酸性水により、排水路等のコンクリート構造物が腐食を受け、その補修対策が必要となっている。このような状況の中、著者らは現場の打込みが可能な経済性と施工性を兼ね備えた耐酸性材料を開発した。この耐酸性材料は下水処理施設から発生する溶融スラグとアルカリ珪酸塩を主原料とし、従来のコンクリートと比較して耐酸性があり、強酸性の水中でも硬化する。本報告は、酸性水の流れる休廃止鉱山の水路の底版補修工事において、初めてこの耐酸性材料を適用した工事における、施工性および耐酸性に関する確認試験の結果について取りまとめたものである。

キーワード：耐酸性、下水汚泥溶融スラグ微粉末、補修、酸性水、経済性、施工性

1. はじめに

近年、下水道施設において発生する硫酸を含む廃水や下水によるコンクリート構造物の腐食および、温泉・火山地帯において酸性土壌に起因する酸性水によるコンクリート構造物の腐食が、各地で報告されている。このため、劣化したコンクリートの補修対策が重要な問題となっているが、これまでの腐食対策は耐酸性の材料で製造されたプレキャスト部材を使用する方法か、耐酸性の合成樹脂や樹脂プレートでコンクリート構造物を保護する方法がとられている。これらの方法は構造物の設置条件により使い分けているが、現場で打込みができないため施工方法が限定されている。一方、現場で打込みが可能な耐酸性材料として用いられる樹脂モルタルは一般に材料コストが高い。このような状況の中、著者らは構造物の高耐久化と廃棄物のリサイクルを目的とし、下水処理場から排出される下水汚泥溶融スラグ微粉末（以下、下水スラグとする）を主原料とする耐酸性材料を開発した。

本稿では、まず本材料の耐酸性のメカニズムについて紹介する。さらに、この材料を初めて適用したPH2～3の酸性水が流れる休廃止鉱山の排水路補修工事を通じ、その施工性および耐酸性に関する確認試

験結果について報告をする。

2. 耐酸性材料の反応メカニズム

耐酸性材料は、下水スラグとアルカリ珪酸塩を基調とする結合材に特殊ポリマーを用いた材料である。以下に一般的な普通コンクリート（普通ポルトランドセメント、水、骨材からなるコンクリート）と比較しながらその反応機構及び酸に対する挙動について記述する。

(1) 普通コンクリートの反応機構と酸に対する挙動

普通コンクリートは、式(1)のように、普通ポルトランドセメントと水の水和反応によって硬化し、C-S-H（カルシウム・シリケート水和物 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ）や水酸化カルシウムを生成して硬化する。

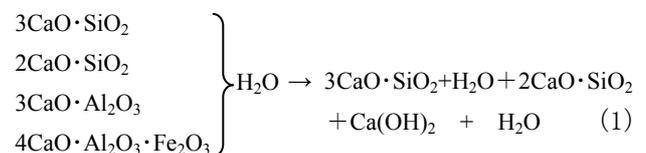
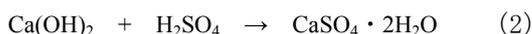


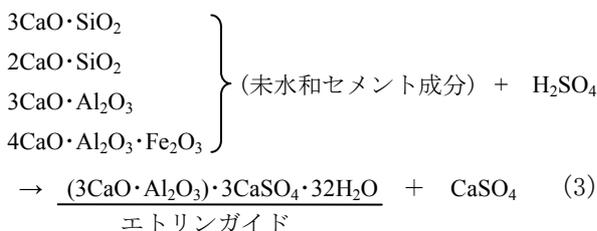
表-1 各材料の化学成分表

種別	CaO/SiO ₂ モル比	化学成分 (%)					
		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅
下水スラグ	0.30	10.2	36.2	19.7	7.1	2.7	14.1
高炉スラグ	1.3~1.5	42	32	14	0.3	6	—
ポルトランドセメント	1.6~3.0	65	22	5	3	1	0

これら生成されたC-S-H等は式(2)のように、酸(例えば硫酸H₂SO₄)との反応によって二水石膏(CaSO₄・2H₂O)に変化し、脆い組織に変化する。



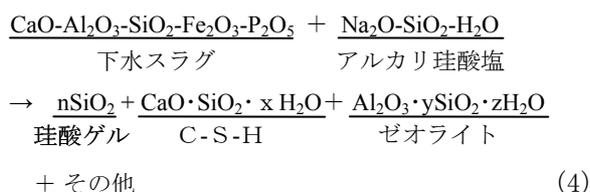
また、式(3)のように、その一部や未水和のセメントは更にモノサルフェート((3CaO・Al₂O₃)・CaSO₄・12H₂O)等と反応しながらエトリンガイド((3CaO・Al₂O₃)・3CaSO₄・32H₂O)に変化する。



エトリンガイドは反応中に膨張する性質を有しており、前述の脆弱な組織を膨張圧によってさらに崩壊させる。

(2) 耐酸性材料の反応機構と酸に対する挙動

一方、耐酸性材料は、表-1に示すように主原料である下水スラグが同じガラス網目構造を持つ高炉スラグに比べ塩基度(CaO/SiO₂)が小さいものの、P₂O₅やAl₂O₃等のガラス網目構造を不安定化する物質が含まれていることにより「活性化された状態」にあると考えられている。そこへアルカリ珪酸塩を混入することで式(4)に示されるように、潜在水硬性等が発揮され硬化する。



これらの反応生成物には、珪酸ゲル、ゼオライト及び水酸化カルシウムがあるが、珪酸ゲルが酸に対する抵抗性が非常に高く、また、式(5)のように

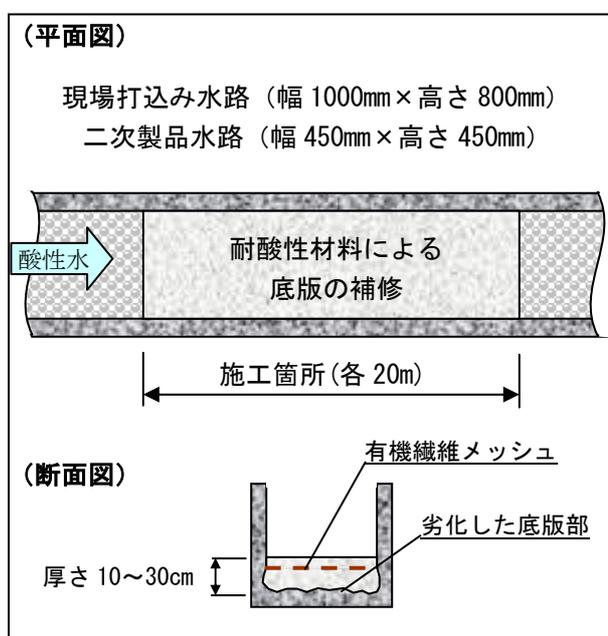
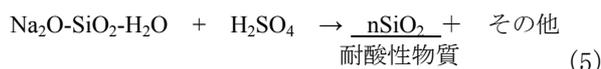


図-1 補修箇所概要図(平面図および断面図)

未反応アルカリ珪酸塩は硫酸との反応により更に珪酸ゲルが生成される。



このように耐酸性の高い珪酸ゲルを多く含み、保護層を形成している上に、表-1に示されるように、CaOの成分が少ないことから普通コンクリートに多く含まれる、酸に弱い水酸化カルシウムの生成量が非常に少ないため、耐酸性を有すると推察される。

3. 施工性および耐酸性確認試験

(1) 試験概要

2006年6月8日、図-1に示すように、酸性水の流れる休廃止鉱山の山腹水路の排水路(コンクリートによる現場打込み水路1000mm×800mmおよびコンクリート二次製品水路450mm×450mm、勾配数%)において、酸性排水によって劣化した底版部分を、耐酸性材料を現地で練り混ぜ、10~30cmの厚さで各20m打ち込む補修工事により施工性の確認を行った。



写真-1 排水路底版部の劣化状態
(上：現場打ち込み水路の底版
下：二次製品水路の底版)



写真-2 アンカーボルトおよび有機繊維メッシュ設置状況（現場打ち込み水路底版）

また、耐酸性材料の実際の酸性水に対する劣化を確認するために、底版には劣化度合いの計測用の定規を設置し、一方排水路の上流にある沈砂地内（PH2～3）には、普通コンクリートおよび耐酸性材料で作製した供試体を沈設し、浸漬試験を実施した。

(2) 施工状況

a) 準備工

最初に施工を容易にするため水中ポンプにより、施工箇所の水を切り廻した。既設排水路の底版部を清掃した後の、補修前の状況を写真-1に示す。長期に亘る酸性の排水による腐食・劣化により、底版コンクリートのセメントペースト分が流出し、骨材がむき出しになり、二次製品水路の底版は鉄筋が露出している。耐酸性材料と既設水路との付着を高め、硬化後の乾燥収縮によるひび割れを低減することを目的とし、写真-2のように水路の側

表-2 使用材料

材料	記号	仕様
下水スラグ	SS	CaO/SiO ₂ モル比：0.30 密度：2.75g/cm ³
アルカリ珪酸塩	Wg	主成分：酸化ナトリウム、無水珪酸 密度：1.56g/cm ³
細骨材	S	埼玉県皆野町産細砂 密度：2.63g/cm ³ 粗粒率：3.20
粗骨材	G	埼玉県皆野町産 2005 密度：2.67g/cm ³ 粗粒率：6.46
吸水性ポリマー	Po	変性アクリル系架橋重合体 密度：1.00g/cm ³
水	W	水道水 密度：1.00g/cm ³

表-3 耐酸性材料配合表

単位量 (kg/m ³)					
SS	Wg	S	G	Po	W
430	226	814	895	0.44	33



写真-3 移動式プラントおよびホッパー

壁に50cm間隔にアンカーボルトを打ち込み、ボルト間を9mmの鉄筋でつなぎ、100×100の有機繊維のメッシュを設置した。また、収縮ひび割れ対策として、5m間隔に目地を設置した。

b) 練混ぜ

本試験で用いた使用材料を表-2に示す。本材料は、下水スラグとアルカリ珪酸塩を主原料とし、粗骨材、細骨材に加え、施工性の改善を目的として、吸水性ポリマーを使用している。現場で練混ぜを実施するため、写真-3に示す移動式プラント（0.5m³強制練りミキサー搭載）を使用した。練混ぜの手順は、下水スラグ、細骨材、粗骨材および吸水性ポリマーを1分間空練りをし、アルカリ珪酸塩および水を加えて4分間練り混ぜて排出する。

練上がり時のフレッシュ性状の一例を写真-4に示す。練上がり温度は27℃前後、スランプは24cm



写真-4 スランプ試験



写真-6 排水（酸性水）による水中養生状況
（現場打ち込み水路）



写真-5 打ち込み状況



写真-7 排水路底版部の補修完了
（上：現場打ち込み水路の全景
下：二次製品水路の表面）

前後、スランプフロー値が43cm前後であった。

c) 打ち込み・養生

写真-5のように、ホッパーにより水路の底版部に耐酸性材料を10～30cmの厚さで打ち込み、表面の左官仕上げを行った。

強酸性水中でも硬化する特性を生かし、表面硬化が始まり初期硬化が発現するまでの養生は、写真-6のように、土嚢袋で施工箇所を2～3m間隔に仮堰を設置し、酸性排水を流下させながら、仕上げ面を水没させる方法とした。

d) 施工完了

写真-7に示すように、酸性状況下においても硬化し、底版の補修が完了した。

(3) 耐酸性確認試験

a) 底版の劣化調査による耐酸性確認

写真-8に示すように、劣化および磨耗度合いを測るための定規を、現場打ち込み水路および、二次製品水路の、それぞれ上流と下流に2箇所ずつ（計4箇所）埋め込み、耐酸性材料により補修した面が劣化する度合いを調査し、耐酸性を確認することとした。

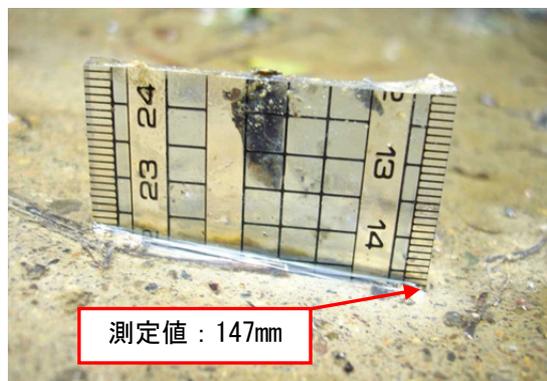


写真-8 劣化計測用定規の設置状況

表-4 底版劣化調査結果 (単位: mm)

劣化計測用定規 設置位置 (※ 表面摩耗方向が正)		2006.6.9	2006.6.16		2006.9.8		2006.12.8	
		設置前	設置1週間		設置3ヶ月		設置6ヶ月	
		初期値	測定値	変化量	測定値	変化量	測定値	変化量
現場打込み水路	①上流	29	27	-2	27	-2	27	-2
	②下流	148	147	-1	147	-1	147	-1
二次製品水路	③上流	23	25	2	未測定	-	未測定	-
	④下流	55	56	1	54	-1	54	-1



写真-9 浸漬試験用沈砂池

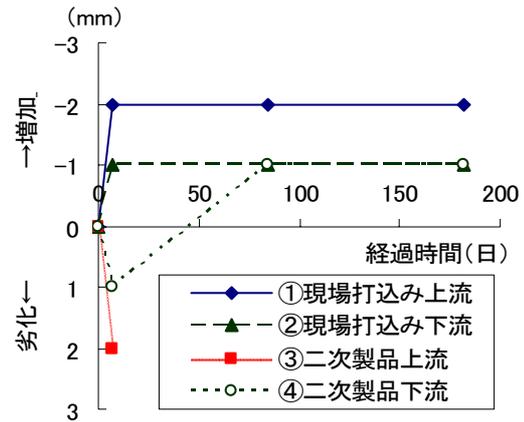


図-2 底版劣化調査結果 (経時変化図)



写真-10 排水路補修6ヶ月後
(二次製品水路の表面)

b) 浸漬試験による耐酸性確認

写真-9に示すような排水路の上流部にある沈砂池 (PH2.5~2.7) に、耐酸性材料および普通コンクリートで作製したΦ100×100の円柱供試体を各6本水中浸漬した。供試体設置後の長期に亘る質量変化を計測および、外観について比較する事により、耐酸性を確認することとした。尚、各供試体は同配合で作製し、浸漬までの28日間気中養生(常温)を行い、試験開始後に沈砂池の水を吸水することが試験結果に影響を及ぼすため、事前に十分な上水の吸水を実施した。

4. 試験結果

(1) 施工性確認試験結果

3.(2)で示したように、スランプ(スランプフロー)から判断されるワーカビリティも良好で、現場における打込みが可能であり、今回の施工条件では良好な施工性が確認できた。ただし、気温が高い条件では硬化が早い状況が認められ、今回の施工では練混ぜ後数十分程度で硬化が始まった。施工が夏場の場合、練混ぜから打込みまでの時間については、今後検討する必要があると考えられる。

(2) 底版の劣化調査結果

表-4に、設置6ヶ月後の各測点における劣化調査の結果を示す。底版の表面の位置変動は2mm以内である。図-2に経時変化を示すように、現時点では劣化の程度を判断するまでには至っていない。6ヶ月後の表面の様子を写真-10に示すが、劣化の形跡は全く見当たらない。今後更なる長期的な計測が必要と考える。

表-5 浸漬実験結果（浸漬水PH=2.5~2.7）

供試体名称	供試体No.	2006.6.9	2006.9.8		2006.12.8	
		初期値	設置 3ヶ月		設置 6ヶ月	
		質量 (g)	質量 (g)	変化率 (%)	質量 (g)	変化率 (%)
耐酸性材料 供試体	①	1713.8	1714.7	0.05	1715.4	0.09
	②	1775.5	1775.0	-0.03	1776.2	0.04
	③	1726.7	1727.9	0.07	1729.0	0.13
	④	1718.6	1712.5	-0.35	1714.9	-0.22
	⑤	1853.5	1850.3	-0.17	1852.3	-0.06
	⑥	1671.9	1666.7	-0.31	1672.1	0.01
	平均				-0.12	
普通 コンクリート 供試体	①	1862.7	1871.3	0.46	1868.2	0.30
	②	1825.7	1821.8	-0.21	1815.2	-0.58
	③	1879.4	1883.0	0.19	1877.8	-0.09
	④	1832.5	1836.9	0.24	1842.5	0.55
	⑤	1913.0	1884.5	-1.49	1876.5	-1.91
	⑥	1852.2	1831.0	-1.14	1834.9	-0.93
	平均				-0.33	

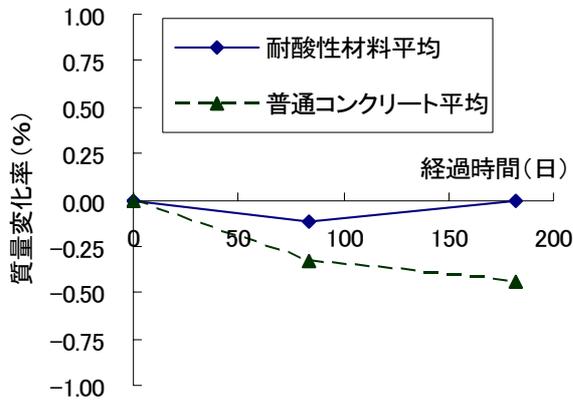


図-3 浸漬実験経時変化図



写真-11 浸漬6ヵ月後の供試体
(左：耐酸性材料，右：普通コンクリート)

(3) 浸漬試験結果

浸漬実験による耐酸性材料および普通コンクリートの6本の供試体の質量変化率を表-5に示す。普通コンクリートは6ヶ月の間に1%以上質量が減少している供試体があるのに対し、耐酸性材料はほとんど質量が変化していない。図-3に、各供試体の質量変化率の平均値の経時を示す。普通コンクリートが確実に質量が減少、劣化・腐食が進行しているのに対し、耐酸性材料はほとんど変化が認められない。写真-11に浸漬6ヶ月の供試体を示すように、普通コンクリートにはペースト部分の流出（骨材の露出）が確認されることから、今後両材料の耐久性について差が大きくなっていくものと推察される。

5. まとめ

耐酸性材料の施工性試験および耐酸性試験を行い、

以下の結論が得られた。

- 1) ワーカビリティも良好であり、今回の条件では現場の打込みが可能であった。ただし、施工条件によっては硬化時間に対する検討が必要である。
- 2) 耐酸性材料の劣化調査および浸漬試験の結果により、現地における耐酸性が確認できた。引き続き長期に亘り継続調査をする予定である。

参考文献

- 1) 新田ら：下水汚泥溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの諸物性，コンクリート工学年次論文集，Vo 1. 22，No. 2，2000，
- 2) 山田ら：場所打ち向け高耐酸性自硬性材料の基礎性状に関する検討，土木学会第60回年次学術講演概要集，No. V-355，pp. 699-700，2005。