

下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの諸性状に関する研究

日大生産工(院) ○小松崎 正人 帝国ヒューム管東日本(株) 新田 智博
日大生産工 柳内 睦人 帝国ヒューム管東日本(株) 杉山 武

1. はじめに

近年、下水道の普及に伴い大量発生する下水汚泥は大部分が埋立処分されているが、その処分地の確保が難しいのが現状である。また、各自治体では「ゼロエミッション」のスローガンを掲げて、下水汚泥の減容化や有効利用の技術開発を推進している。

一方、下水道関連施設や温泉地などでは、発生する硫化水素が硫黄酸化細菌の働きによって硫酸に変化し、コンクリート管渠が腐食劣化する事例が数多く報告され、耐腐食性に優れ、耐用年数の長い下水道管渠が望まれている。

そこで、本研究は下水溶融スラグを使用し耐酸性に優れ、かつ普通コンクリートと同等の強度発現する耐酸性コンクリートを提案し、その諸性状について明らかにする。なお、本研究では学内において基礎耐酸性試験を、実用化に向けた実験は酸性温泉において温泉水中での浸漬試験を行った。

2. 実験概要

2.1 下水溶融スラグの化学的特性

下水溶融スラグとは、焼却灰をさらに約1,500 の高温で加熱燃焼させ、無機物を溶融後、冷却したガラス質の固化物である。

スラグ化は、重金属の溶質防止およびダイオキシン類の分解削減に極めて有効である。表-1 に、廃棄地の異なる下水溶融スラグの化学組成（以後、SS1, SS2, SS3 と記す）を高炉スラグやポルトランドセメントと対比して示す。

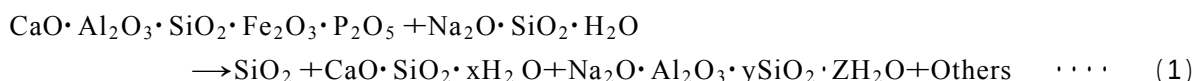
下水溶融スラグは、CaO分が少なく SiO₂ 分が多い低塩基度の材料であり、汚泥脱水助剤の違いにより、高分子系と石灰系がある。両者ともに、SiO₂、Al₂O₃、CaO、P₂O₅ およびFe₂O₃が主要化学成分である。なお、本研究で用いた溶融スラグは、石灰分の少ない高分子系のもので溶融後急冷して製造されたものを使用している。下水汚泥溶融スラグは、アルカリ材料とのアルカリスラグ反応により硬化し、カルシウムシリケート水和物や珪酸ゲルおよびゼオライト系水和物を生成し水和硬化するものと想定される。式-1に、下水溶融スラグとアルカリ材料との化学反応式を示す。

2.2 使用材料および配合

表-2に使用材料の仕様を、表-3に耐酸性コンクリート(以後、ECと記す)と普通コンクリート(以後、PLと記す)の配合表を示す。この耐酸性コンクリートは、下水溶融スラ

表-1 下水溶融スラグの化学組成

種 別	塩基度	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Cl
SS1	0.29	10.0	36.7	13.8	19.5	7.3	2.6	0.02	1.16	1.69	0.81	0.30	-
SS2	0.61	9.7	16.9	22.5	12.9	21.8	4.5	0.03	1.10	1.63	0.91	1.01	0.010
SS3	0.49	15.9	34.7	10.3	15.7	11.6	2.9	0.08	1.43	1.36	1.02	0.15	0.015
高炉スラグ	1.4	41.7	33.8	-	13.4	6.0	-	-	-	-	-	0.3	-
ポルトランドセメント	2	64.2	22.0	-	5.5	3.0	1.5	2.0	-	-	-	-	-



Study on Many Properties of Acid-Resistant Concrete
Using Sewage Molten Slag

Masato KOMATSUZAKI, Tomohiro NITTA, Takeshi SUGIYAMA and Mutsuhito YANAI

グ微粉末とアルカリ珪酸塩を主材料とし、通常のセメントを全く用いないところに特徴がある。本実験では、アルカリ材料にアルカリ珪酸塩を用いた。また、比較のために製作した普通コンクリートは、セメントに普通ポルトランドセメントを、混和剤にナフタレン系高性能減水剤を使用した。なお、耐酸性コンクリートは粘性度が高いために普通コンクリートの配合とは異なっている。両コンクリートの配合は、材齢 28 日における設計基準強度 ($\sigma_{28} = 60\text{N/mm}^2$) が同程度となるよう定めている。

表-2 使用材料

材 料	記号	仕 様
下水溶融スラグ	SS1	密度 : 2.75g/cm^3 ブレーン : $5,200\text{cm}^2/\text{g}$
	SS2	密度 : 2.94g/cm^3 ブレーン : $5,400\text{cm}^2/\text{g}$
	SS3	密度 : 2.57g/cm^3 ブレーン : $5,500\text{cm}^2/\text{g}$
アルカリ材料	Wg	アルカリ珪酸塩 主成分：酸化ナトリウム 17.48% 無水珪酸 37.03%
細骨材	S	密度 : 2.57g/cm^3 F.M. : 3.19 吸水率 : 1.96%
粗骨材	G	密度 : 2.67g/cm^3 F.M. : 6.46 吸水率 : 1.17%
水	W	水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16g/cm^3
混和剤	Ad	ナフタレン系高性能減水剤 密度 : 1.20g/cm^3

表-3 配合表

種 別	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)						
			W	C	SS	Wg	S	G	Ad
E C	34	48	155	-	350	226	830	934	-
P L	30	40	167	553	-	-	666	1018	3.87

2.3 試験項目

表-4 に、本実験で実施した各試験項目を示す。なお、強度試験は表-4 に示す各材齢時において JIS 規格に準じて行った。

耐酸性試験は、強度試験と同条件の蒸気養生を行った後、28 日間恒温恒湿養生槽内にて養生を行い、さらに 14 日間の水中養生を行った後、硫酸水溶液中に浸漬させた。なお、硫酸水溶液の濃度は 5% とし、定期的に pH 計にて管理を行った。供試体は、所定の浸漬期間に達した時点で高圧水を使用してコンクリート表面を洗浄し、質量変化率試験および中性化試験を行った後、さら

に供試体表面の変状を目視観察した。

実地試験は、上越地区の某温泉の源泉にて平成 14 年 4 月より 1,095 日間供試体を浸漬させた。供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体と $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体を使用し、円柱供試体で外観および質量変化率試験を行い、角柱供試体切断し表面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。なお、測定対象は SS 1 供試体のみを用いて、表-3 に示す配合条件で製作した供試体である。

表-4 試験項目

試 験 項 目		規 格	試 験 材 齢
強度試験	圧縮強度試験	JIS A 1108	1,7,14,28,91,180,365日
	静弾性係数試験	JIS A 1149	1,7,14,28,91,180,365日
耐酸性試験	質量変化率試験	-	28,91,180,365日
	中性化試験	JIS A 1152	28,91,180,365日
実地試験	質量変化率試験	-	180,365,1095日
	中性化試験	JIS A 1152	180,365,1095日

3 . 試験結果

3.1 強度試験結果

図-1 に、圧縮強度試験結果を示す。SS1 および SS3 供試体の初期強度は、普通コンクリートより 5~20% 増の高い強度発現があった。これは蒸気養生の効果で、下水溶融スラグ微粉末がアルカリ珪酸塩の主成分である NaOH のアルカリ刺激を受けて水和作用が促進して、設計基準強度の 90% にも達しているものと推察される。

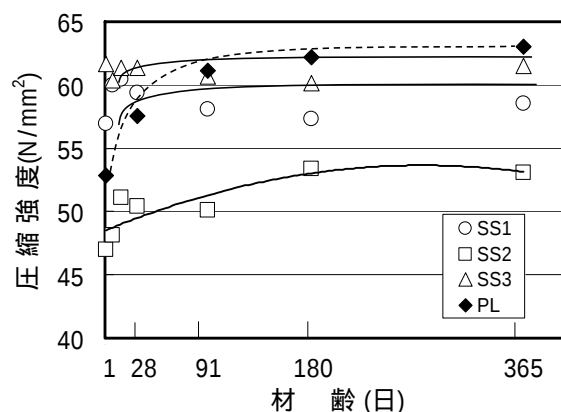


図-1 圧縮強度と材齢との関係

図-2 に材齢とポアソン比の関係を、図-3 に材齢と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数の測定方法はコンプレッソメーターを用いて、円柱供試体に圧縮軸方向に荷重を加え、縦および横ひずみを測定した。普通コンクリートのポアソン比は、一般的に0.11～0.21程度であるが、耐酸性コンクリートもこの範囲内にあり、普通コンクリートと同等の結果であった。また、SS1 および SS2 供試体の静弾性係数は、圧縮強度と同様に材齢を追うごと増伸し、その後は同程度に推移している。

3.2 耐酸性試験結果

図-4 に、硫酸浸漬期間での質量変化率試験結果を示す。質量変化率とは、硫酸水溶液へ浸漬した後の質量を浸漬前の質量で除した値である。浸漬 365 日で普通コンクリートが約 95% 減少したのに対して、耐酸性コンクリートは約 2.5% 減少に留まった。これは、耐酸性コンクリートが普通コンクリートよりカルシウム量が少ないことや、下水溶融スラグとアルカリ材料を反応させることで、前述のとおり耐酸性のある珪酸ゲルが生成されたことが起因しているものと推測される。また、上述の要因のほかに、硫酸に対しては、硬化体中に適量のCaOが含まれていた方が良好な耐酸性を示す場合もある。これは、耐酸性コンクリートに含まれるCaO分が硫酸と反応して CaSO_4 を生成し、硫酸に対してのバリア層が形成されることで酸のコンクリート内部への浸透が抑えられるものと考えられる。

図-5 に、中性化試験結果を示す。中性化深さは、浸漬後の供試体を縦方向に割裂し、1% フェノールフタレイン溶液を噴霧して、赤褐色に反応した健全域の横方向を計測し、浸漬前の直径から減算した。普通コンクリートは、浸漬 180 日には石膏化し、浸漬 91 日までしか測定できなかったのに対して耐酸性コンクリートは、浸漬期間が経過するにつれて緩やかとなり、浸漬 365 日では約 12mm の進行に留まった。

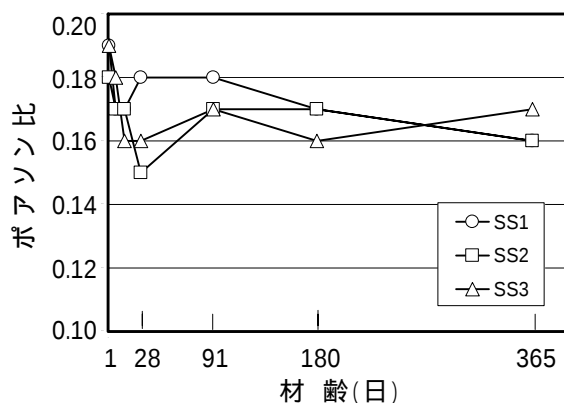


図-2 ポアソン比と材齢との関係

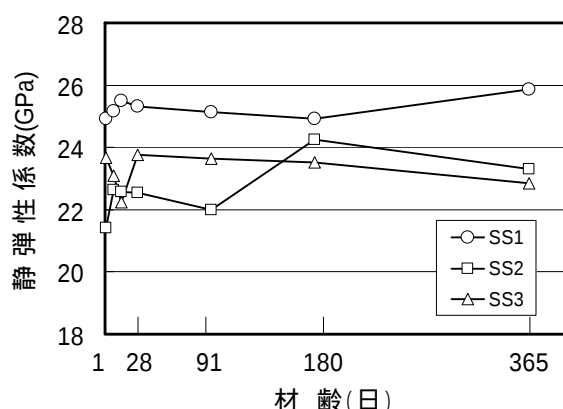


図-3 静弾性係数と材齢との関係

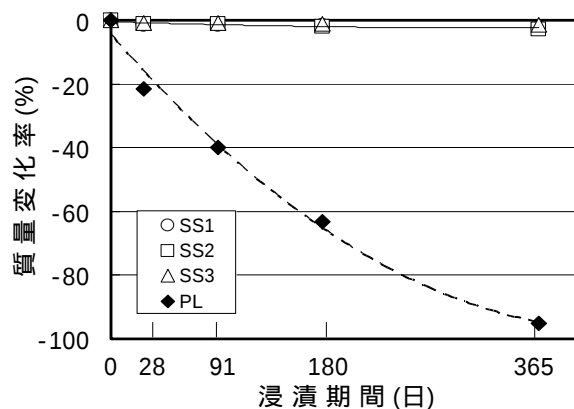


図-4 硫酸浸漬後の質量変化率試験結果

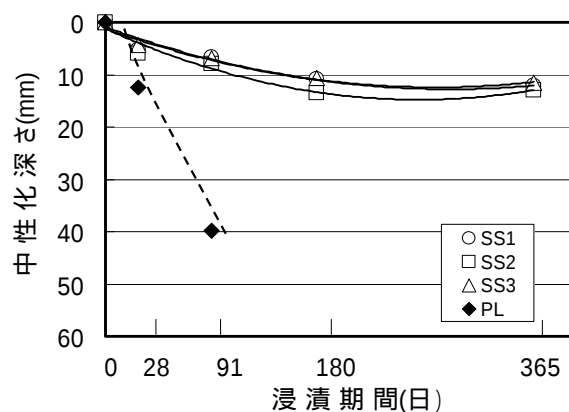


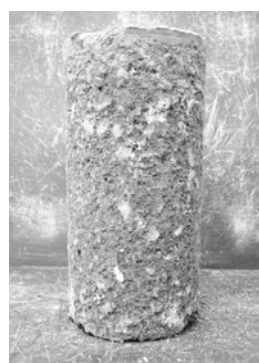
図-5 硫酸浸漬後の中性化試験結果

3.3 実地試験結果

表-5 に環境測定結果を、表-6 に温泉の化学成分を示す。環境調査の結果、対象とした温泉は pH が約 2.2、水温が約 51 の酸性温泉であった。

図-6 に、温泉浸漬後の質量変化率試験結果を示す(写真-1 参照)。浸漬 1,095 日で、普通コンクリートは約 23 %減少したのに対して、耐酸性コンクリートは約 9%の減少に留まった。

図-7 に、温泉浸漬後の中性化試験結果を示す。普通コンクリートが浸漬 1,095 日で約 10.75mm まで進行したのに対し、耐酸性コンクリートは約 9.55mm の進行に留まった。耐酸性試験と比較すると、実地試験での中性化の進行が小さな差異に留まった。この要因としては、硫酸水溶液と温泉成分の pH 値の違いによるものと考えられる。普通コンクリートは、酸の濃度が薄い場合には石膏がある程度コンクリートの空孔を塞ぐ作用があり、初期段階では分解生成物の溶出や酸液のコンクリート中への浸透を抑える作用を示し、見かけ上浸食が遅れるからであると推察される。



耐酸性コンクリート



普通コンクリート

写真-1 実地試験結果

(温泉浸漬:1,095 日)

4 . まとめ

- (1)耐酸性コンクリートの強度発現は、普通コンクリートと同等であった。特に蒸気養生を施すことで、初期強度において設計基準強度の約 90%の強度発現が認められた。
- (2)耐酸性コンクリートは、硫酸浸漬 365 日後の質量変化が約 2.5%の減少に留まった。
- (3)酸性温泉水中に 1,095 日間浸漬させた時の質量変化率は、普通コンクリートは約 23%減少したのに対し、耐酸性コンクリートは約 9%の減少に留まった。

表-5 環境測定結果

調査項目	浸漬期間(日)			
	0	180	365	1095
p H	2.2	2.2	2.1	2.2
水 温 ()	51.5	50.9	51.0	50.6
酸化還元電位 (mv)	159	211	209	276
外 気 温 ()	7.0	15.7	22.0	21.0

表-6 温泉水の化学組成

Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺ +Fe ³⁺	Al ³⁺
57.3	24.2	75	35.8	17.8	57.1
MnO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂	H ₂ S	-
2.9	355	857	188	5.8	-

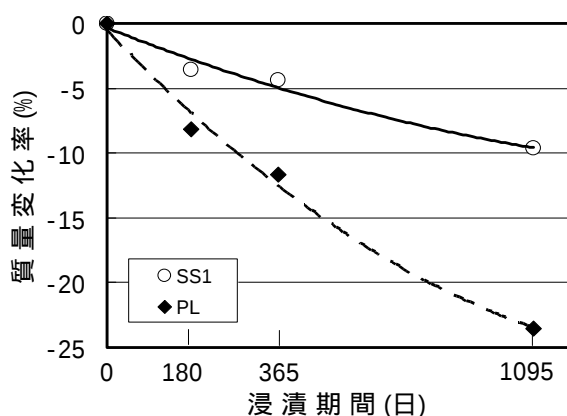


図-6 温泉浸漬後の質量変化率試験結果

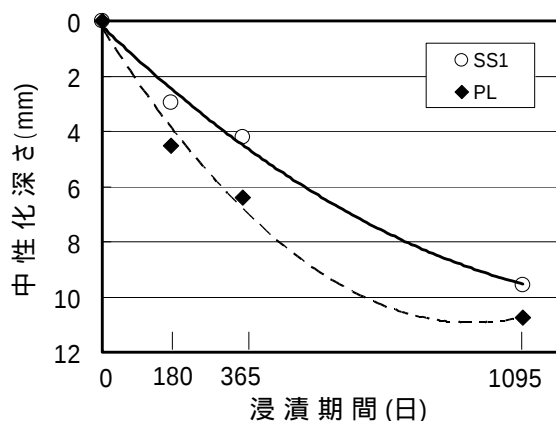


図-7 温泉浸漬後の中性化試験結果