

論文 下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリートの諸物性

新田 智博*¹・杉山 武*²・石田 泰之*³・石森 正樹*⁴

要旨：下水処理場から発生する溶融スラグとアルカリ材料を主原料とした耐酸性コンクリートについて、基本物性を調べた。耐酸性試験として20℃-5%の硫酸水溶液中に普通コンクリートと耐酸性コンクリートを180日間浸漬したところ、普通コンクリートの質量が約20%まで減少したのに対し耐酸性コンクリートは1%以内に留まった。圧縮強度は蒸気養生直後で最終強度の約9割に達する。また、その他物性についても普通コンクリートと同等もしくはそれ以上の結果が得られた。

キーワード：下水溶融スラグ, 耐酸性コンクリート, リサイクル, アルカリ材料

1. はじめに

現在、下水汚泥の処理は、焼却灰にして埋め立て処分しているのが一般的である。しかし、処分地の確保が難しい都市部では、処分地の延命のため減容化を目的としてその一部をスラグ化している。このような状況の中、各自治体では「ゼロエミッション」を掲げ、下水汚泥や焼却灰をセメント材料の一部として用いたり、溶融スラグを舗装用骨材としてリサイクルするなど、これらの有効利用に向けて取り組んでいる。

一方、下水道施設の内部に発生する硫化水素がチオバチルス族等の酸化還元菌によって硫酸に変化し、コンクリートで造られた構造物を腐食させるという事例が上げられている。また、一部の温泉排水や酸性土壌においても同様に、コンクリートが酸によって腐食する現象が報告されている。

本論文は、下水溶融スラグを有効利用しつつ下水道施設等におけるコンクリート構造物の耐久性を向上させるため開発された耐酸性コンクリートの諸物性についてまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

耐酸性コンクリートは、下水処理場から発生する下水溶融スラグの微粉末とアルカリ材料を主原料とする材料で、通常のセメントを全く用いないものである。本論文ではアルカリ材料にアルカリ珪酸塩を用い、その成分は酸化ナトリウム 17.48%、無水珪酸 37.03%と水からなる。

また、比較用の普通コンクリートのセメントには普通ポルトランドセメント、混和剤にはナフタレン系高性能減水剤を用いた。骨材には両者とも同一のものを使用し、石灰成分の少ないコンクリート用碎石および砕砂を用いた。溶融スラグの成分を表-1に、使用骨材の物理的性質を表-2に示す。

配合については、ヒューム管用コンクリートを対象としており、耐酸性コンクリートと普通コンクリートの蒸気養生後材齢 28 日における圧縮強度が同程度となるよう、表-3のごとく定めた。

2.2 供試体の製造方法

*1 テイヒュー (株) 技術研究所研究員 (正会員)

*2 テイヒュー (株) 技術研究所研究員

*3 太平洋セメント (株) 研究本部佐倉研究所研究員

*4 太平洋セメント (株) 研究本部佐倉研究所主任研究員

表-1 下水溶融スラグ成分

(%)

発生先	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
A自治体	44.4	18.1	8.2	11.4	3.1	1.34	1.39	1.07	9.13

表-2 骨材の物理試験結果

骨材の種類	各ふるいを通過する質量百分率(%)								表 乾 密 度 (g/cm ³)	粗粒率 (F.M.)	吸水率 (%)
	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15			
細骨材	100	100	91.0	61.0	37.0	21.0	9.0	0	2.62	2.81	0.49
粗骨材	95.0	35.0	4.0	1.0	0	0	0	0	2.68	6.62	0.95

表-3 耐酸性コンクリートと普通コンクリートの配合

コンクリート種類	W/C (%)	s/a (%)	Sl. (cm)	単 位 量 (kg/m ³)						
				W	C	溶融スラグ*	アルカリ材料	S	G	AD
耐酸性コンクリート	—	48.0	5.0	149	—	350	116	867	958	—
普通コンクリート	40.0	46.0		166	415	—	—	804	962	3.2

(1) 耐酸性コンクリート

100 リットルのパン型ミキサーに液体以外の材料を入れ 30 秒間空練りをする。その後、水とアルカリ材料を投入して 90 秒間本練りする。

つぎに、型枠へ振動を加えながら材料を流し込み、蒸気養生を施して硬化後脱型する。脱型後は 20°C、70% RH の恒温恒湿養生槽に所定の材齢まで放置した。ここに、蒸気養生方法は、前置き養生 3 時間を確保した後、毎時 20°C の速度で昇温させ、最高温度 70°C で 5 時間保持する。降温はこれらを経過したところで蒸気を止め自然放冷とした。

(2) 普通コンクリート

100 リットルのパン型ミキサーにセメントおよび骨材を入れ 30 秒間空練りする。その後、水と減水剤を予め混ぜておき、それを投入して 60 秒間本練りする。

その後、耐酸性コンクリートと同様の工程で型枠へ打設し養生を行う。ただし、蒸気養生方法は、前置き養生 3 時間を確保した後、毎時 20°C の速度で昇温させ、最高温度 70°C で 3 時間

保持する。降温過程は耐酸性コンクリートと同一とする。

2. 3 試験項目およびその方法

(1) 強度試験および静弾性係数の測定

圧縮強度は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。曲げ強度試験および引張強度試験は、JIS A 1106 「コンクリートの曲げ強度試験方法」、JIS A 1113 「コンクリートの引張強度試験方法」に準じて行った。圧縮強度試験の材齢は 1 日、14 日、28 日、曲げ強度試験および引張強度試験は 28 日とした。

また、静弾性係数およびポアソン比の測定は材齢 28 日で行い、ポリエステルゲージおよびデジタル式静ひずみ測定器を用いて計測した。

(2) 耐薬品性試験

週 2 回の滴定試験によって管理された 20°C - 10% 硫酸水溶液、20°C - 5% 硫酸水溶液、20°C - 5% 水酸化ナトリウム水溶液および各種薬品水溶液の中に、予め十分吸水させた φ10×20cm の供試体を浸漬する。所定の浸漬期間に達した

時点で高圧水等によって脆弱なコンクリートを除去した後質量を測定した。浸漬期間は7日、14日、28日、91日、180日とした。

(3) 長さ変化試験

JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準じて行った。供試体には脱型後7日間吸水させた10×10×40cm角柱供試体を用い、20℃、60%RHの恒温恒湿室の中に放置したものをマイクロメータによって無拘束状態のコンクリートの長さ変化率を測定した。

(4) 中性化試験

供試体には脱型後13日間恒温恒湿養生した10×10×40cm角柱供試体を用いた。CO₂濃度5%(20℃、60%RH)の槽内に放置し、所定の期間で中性化深さを測定した。測定箇所は1断面の1辺につき5箇所とし、試薬にはフェノールフタレインを使用した。中性化期間は、7日、28日、56日、91日、180日とした。

(5) 透水試験

供試体は、φ15×10cmの円盤状のものであり、インプット法により透水係数を求めた。ここに、透水係数は、直径方向断面積と水の浸透部面積をプランメータによって計測し、平均浸透深さを計算する。その後所定の式を用いて算出した。

(6) 線膨張係数の測定

10×10×40cmの角柱供試体型枠中央部に埋め込みゲージをセットし、コンクリートを打設後、材齢28日まで養生する。その後、水分の出し入れがないようビニールで被い、恒温恒湿養生槽で毎時2℃の速度で最高温度80℃まで昇温させ、供試体中心温度および長さ変化をデジタル式静ひずみ測定器によって計測し算出した。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度、曲げ強度および引張強度

材齢と圧縮強度の関係を図-1に示す。縦軸

に圧縮強度、横軸に材齢を示す。図中の数値は、材齢28日の強度に対する各材齢の強度比率を表したものである。

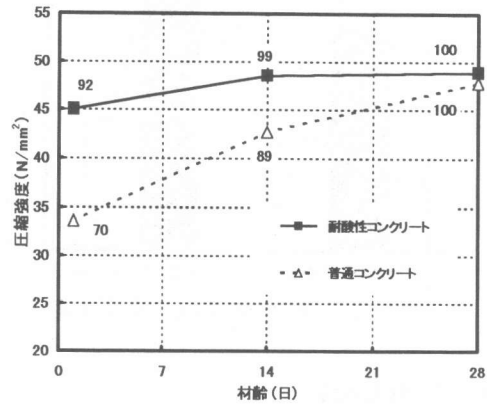


図-1 材齢と圧縮強度の関係

普通コンクリートは、蒸気養生後でも材齢に伴って強度が徐々に増大していくのに対して、耐酸性コンクリートは、材齢1日で最終強度の約9割に達することが分かる。

ここで、硬化のメカニズムについて述べる。下水溶融スラグは、高炉スラグに比べCaO/SiO₂が小さく活性が低いと考えられるが、P₂O₅やFe₂O₃等のガラス網目構造を不安定にする物質が含まれていることにより「活性化された状態」にあると考えられる。そこへアルカリ材料を混入することで、いわゆる「潜在水硬性」が発揮され水和硬化する。^{1) 2)} 加えて本試験では蒸気養生を行ったために反応が助長され、短期材齢で強度が発現したものと推測される。

図-2は、材齢28日における曲げ強度と引張強度を示したグラフで、図中の数値は同材齢の圧縮強度に対する比率を示したものである。

普通コンクリートの曲げ強度および引張強度の圧縮強度に対する比率が一般的にいわれている範囲であったのに対し、耐酸性コンクリートの圧縮強度に対する比率は、曲げ強度が1/7.6、引張強度が1/15.6と若干低い値を示した。

また、普通コンクリートの静弾性係数が30.4GPaであったのに対し、本材料は17.1GPaと低い。ポアソン比は、普通コンクリートと同程度の0.22であった。

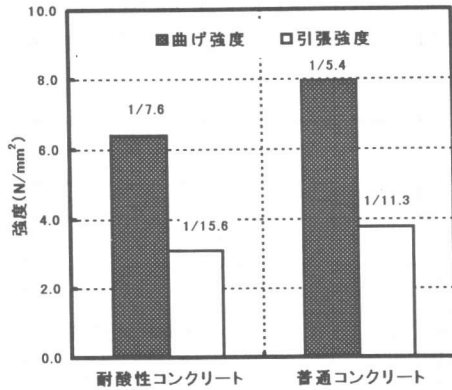


図-2 曲げ強度および引張強度

3.2 耐薬品性

図-3、図-4に硫酸水溶液へ浸漬した場合の質量変化を示す。縦軸には質量変化率、横軸には浸漬期間を示した。ここに、質量変化率とは水溶液へ浸漬する前後の質量差を浸漬前の質量で除した値のことをいう。

5%硫酸水溶液において、普通コンクリート質量が浸漬期間180日で約20%減少したのに対し、耐酸性コンクリートの質量変化はほとんど見られなかった。また、10%硫酸水溶液においても普通コンクリートの質量が半減したのに対し、耐酸性コンクリートは1%以内の質量変化に留まり、高い耐酸性を示した。これは、耐酸性コンクリートが普通コンクリートに比べ、材料に含まれるカルシウム量が少ないことや、アルカリ材料と下水溶融スラグを反応させることで耐酸性の珪酸ゲルが生成されたことによるものと考えられる。³⁾

また、試験後の耐酸性コンクリートの外観は、表面が若干白く変質するものの内部への進行は見られなかった。これは上述の原因の他に、硫酸中で耐酸性コンクリートに含まれるCaO分が反応してCaSO₄を生成し、これがバリア的なはたらきをしたためと考えられる。

図-5に水酸化ナトリウム水溶液に浸漬した場合の結果を示す。水酸化ナトリウム水溶液中では、耐酸性コンクリート、普通コンクリートとも変化は見られなかった。

また、塩酸、硫酸塩、脂肪酸、鉱物油、植物油についても同様の試験を試みたが耐酸性コンクリートには変化が見られず、総じて、耐薬品性を有していると判断出来るようである。

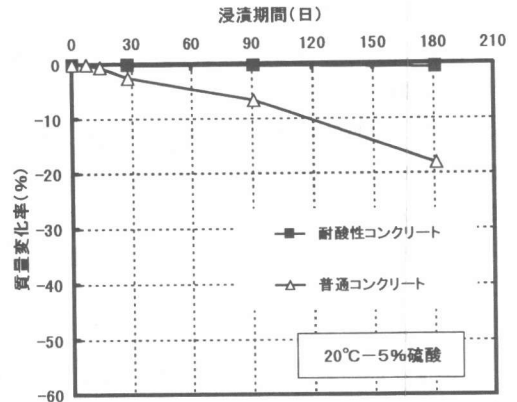


図-3 耐酸性試験結果(20°C-5%硫酸)

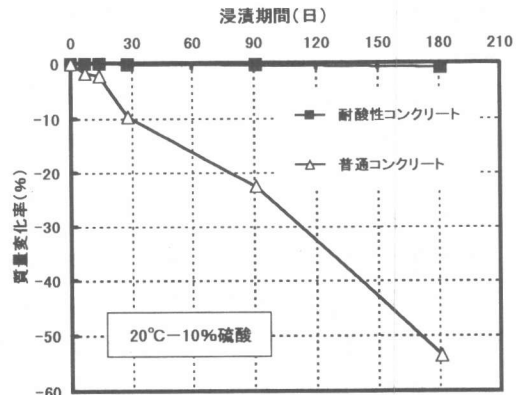


図-4 耐酸性試験結果(20°C-10%硫酸)

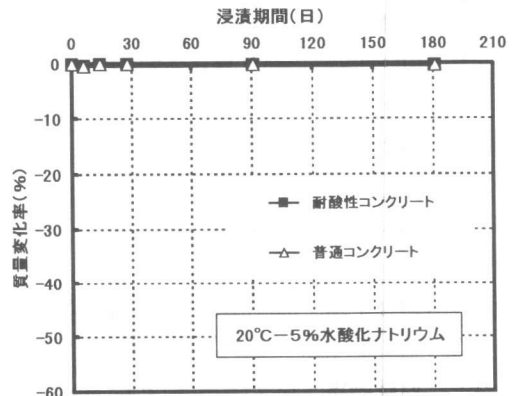


図-5 耐酸性試験結果
(20°C-5%水酸化ナトリウム)

3. 3 長さ変化

図-6に材齢に伴う耐酸性コンクリートおよび普通コンクリートの長さ変化を示す。縦軸には長さ変化率、横軸には乾燥期間を示した。

最終的な長さ変化率は同程度になるものの、普通コンクリートが徐々に収縮していくのに対し、耐酸性コンクリートは初期で大きく変化する傾向がうかがえる。この現象に関してはまだ詳しく言及は出来ないが、供試体の質量変化も長さ変化に追従していることから、耐酸性コンクリートと普通コンクリートの硬化生成物が異なり、硬化組織からの水分逸脱速度に差があったためと考えられる。

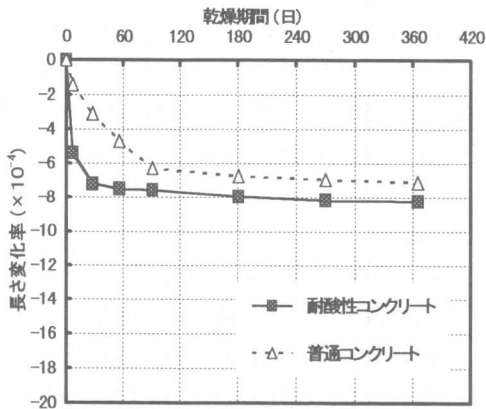


図-6 長さ変化試験結果

3. 4 中性化

図-7に中性化試験結果を示す。縦軸には平均中性化深さ、横軸には中性化期間を示した。

普通コンクリートの中性化深さが中性化期間180日で8mm程度まで進行したのに対し、耐酸性コンクリートは1mm以下であった。これは、耐酸性コンクリートも基本的に炭酸ガスを取り込むが、普通コンクリートとは異なり下水溶融スラグとアルカリ材料よりなる生成物中にはCaではなくNaが多く含まれるため、 Na_2CO_3 (炭酸ナトリウム)が生成されるものと考えられる。これ自体がアルカリ性物質であり、硬化体はアルカリ性を保つためフェノールフタレイン溶液による変色域が小さかったと考えられる。

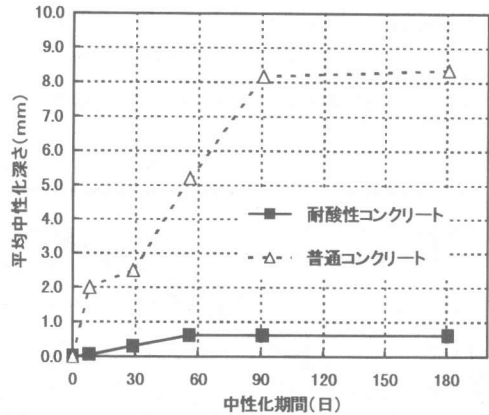


図-7 中性化試験結果

3. 5 透水係数

耐酸性コンクリートの透水試験結果を表-4に示す。

耐酸性コンクリートの透水係数は普通コンクリートに比べやや大きい値となっている。しかし、下水道施設やその他耐酸性コンクリート製品として使用する場合、実用上遜色ない値と推測される。

表-4 透水試験結果

コンクリート種類	透水係数 (cm/sec)
耐酸性コンクリート	0.32×10^{-9}
普通コンクリート	0.27×10^{-9}

3. 5 線膨張係数

図-8に耐酸性コンクリート、図-9に普通コンクリートの線膨張係数測定結果を示す。縦軸には供試体内部温度、横軸には供試体中央部に生じたひずみを記載する。図中の式はプロットされた値から最小2乗法によって求めたものである。

耐酸性コンクリートおよび普通コンクリートの線膨張係数は、次式によって求められ、それぞれ $12.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、 $11.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であった。これから耐酸性コンクリートの線膨張係数は普通コンクリートと同等と判断され、鉄筋コンクリート構造物としても十分適応することが可能と推測される。

$$\text{線膨張係数} = \frac{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|}{|T_1 - T_2|}$$

ε_1 : 供試体温度の T_1 時のひずみ量

ε_2 : 供試体温度の T_2 時のひずみ量

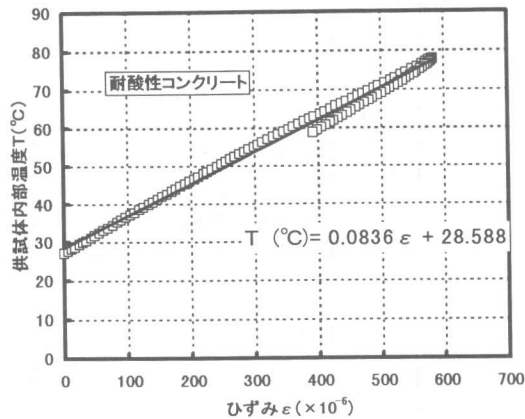


図-8 線膨張係数測定結果
(耐酸性コンクリート)

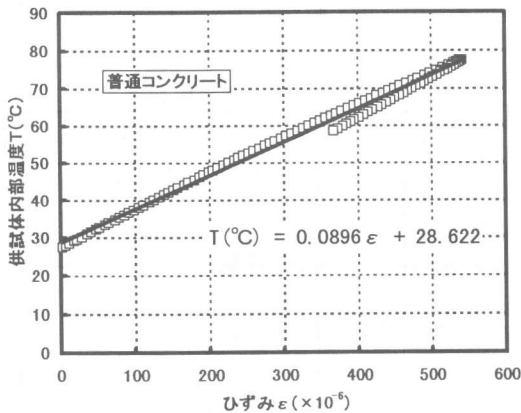


図-9 線膨張係数測定結果
(普通コンクリート)

4. まとめ

一連の試験から耐酸性コンクリートの諸物性について、得られた結果または推測される事項を以下に示す。

- ① 蒸気養生を施した場合、材齢1日で最終強度の約9割の強度発現が認められた。
- ② 同材齢における曲げ強度、引張強度の圧

縮強度に対する比率は、普通コンクリートよりよりも若干小さい。

- ③ 静弾性係数は、普通コンクリートよりも小さい。
- ④ 20℃-10%硫酸水溶液中に180日間浸漬した場合の質量変化は、普通コンクリートが半減したのに対し、耐酸性コンクリートは1%以内に留まった。
- ⑤ その他薬品についても大きな変化はなく、耐薬品性は普通コンクリートよりも優れると判断される。
- ⑥ 長さ変化は初期の乾燥期間において大きいものの、最終的には普通コンクリートと同程度になる。
- ⑦ 中性化は普通コンクリートに比べ小さくほとんど進行しない。
- ⑧ 透水係数および線膨張係数は普通コンクリートとほぼ同等であった。

参考文献

- 1) 岡元豊重、石田泰之、内田潤：各種化合物を添加混合した低CaO/SiO₂モル比の熔融スラグの水和硬化特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 51、pp. 108-113 (1997)
- 2) 岡元豊重、石田泰之：各種熔融スラグを用いた混合ポルトランドセメントの水和硬化特性に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No. 52、pp. 28-35 (1998)
- 3) 岡元豊重、杉山章：下水スラグを用いたヒューム管等の耐酸性コンクリート製品について、再生と利用、No. 86、pp. 84-89 (2000)