

## 論文 下水溶融スラグを用いたエココンクリートの諸物性

小松崎 正人<sup>\*1</sup>・新田 智博<sup>\*2</sup>・杉山 武<sup>\*2</sup>・柳内 睦人<sup>\*3</sup>

要旨：本研究は，下水溶融スラグをコンクリート用材料として有効利用することを目的として各種強度試験ならびに耐酸性試験を行った。その結果，強度試験では普通コンクリートと同等の強度発現が得られ，耐酸性試験では硫酸浸漬 365 日後の質量変化が約 2.5% 減少に留まり高い耐酸性が認められた。

キーワード：下水溶融スラグ，耐酸性，エココンクリート

### 1.はじめに

近年，下水道普及率の増加に伴い下水汚泥発生量は年々増加しており，その処理方法は一般に焼却灰にして埋立処分を行っている。しかし，環境被害を招く恐れがあるため埋立処分地の確保は年々困難になってきておりその残余年数は，今後 6 年未満となる公共団体が約 5 割にもなると予測されている<sup>1)</sup>。処分地の確保が困難な都市部では，処分地減容化を目的として，下水汚泥を色々な方法で再利用する研究が行われている。その内訳には，下水汚泥を建設資材や肥料として再利用し，汚泥から発生する消化ガスによる発電やヒートポンプによる下水の熱利用などエネルギー資源としても有効利用されている。しかし，その利用率は 10% 程度と低迷しているため今後は今まで以上に汚泥の減量化，資源化を図り，有効利用を進めていくことが急務となっている(図-1 参照)<sup>2)</sup>。一方，下水道関連施設または温泉地などでは硫黄酸化細菌の作用による硫酸の生成によって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，下水道施設のライフサイクルコスト低減の観点からも耐腐食性に優れ耐用年数の長

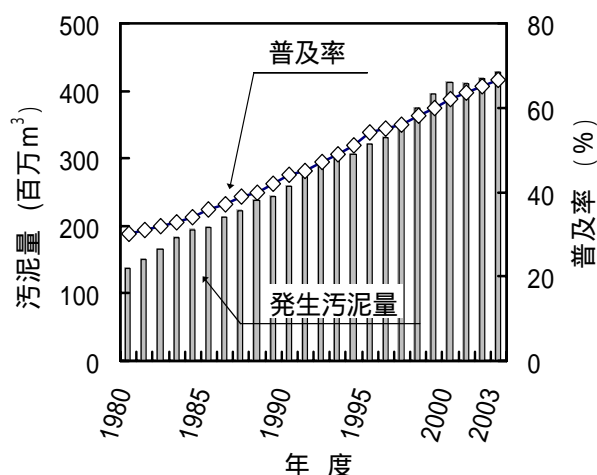


図-1 下水汚泥発生量

い下水道管渠が望まれている。

本研究は，リサイクルによる有効利用率が高く，さらに広範囲に活用が求められている下水溶融スラグを使用して耐酸性に優れ，かつ普通コンクリートと同等な強度性能を発揮するエココンクリートを提案し，その諸物性について明らかにすることを目的としている。なお，本研究では学内において基礎耐酸性試験を行い，実用化に向けた実験は酸性成分が多く含まれている温泉地において温泉中での浸漬試験を行い，エココンクリートの耐酸効果について検討したものである。

\*1 日本大学大学院 生産工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

\*2 帝国ヒューム管東日本(株) 営業部開発営業課 (正会員)

\*3 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-1 下水溶融スラグの化学組成

(%)

スラグ産地	塩基度	CaO	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	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	42	32	-	1	6	-	-	-	-	-	-	-
ポルトランドセメント	2	65	22	-	5	3	1	-	-	-	-	-	-

2. 実験概要

2.1 下水溶融スラグの製造

下水溶融スラグとは、焼却灰をさらに焼却熱や電気から得られるエネルギーによって、1,200～1,500 の高温で加熱燃焼させ、無機物を溶融した後に冷却したガラス質の固化物である。表-1に、廃棄地の異なる下水溶融スラグ(SS1, SS2, SS3と記す)の化学組成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 SiO<sub>2</sub>分が多い低塩基度の材料である。また、下水溶融スラグは汚泥脱水助剤の違いにより、高分子系と石灰系がある。なお、本研究のエココンクリート用材料は、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。

2.2 使用材料

表-2 に使用材料の仕様を、表-3 にエココンクリート(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。このエココンクリートは、下水溶融スラ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。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(式-1 参照)、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<sup>3)</sup>。また、比較のための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。骨材は、両コンクリートともに 同一の石灰成分の少ないコンクリート用砕石及び砕砂を使用した。特に、両コンクリートの配合は蒸気養生後材齢 28 日における圧縮強度( $f_{28} = 60 \text{ N/mm}^2$ )が同程度となるよう定めている。

2.3 供試体の製造方法

エココンクリートの製造方法は、100 リットルのパン型ミキサーに粗骨材、下水溶融スラグ、細骨材の順に入れ、1 分間空練りを行い、次に水と

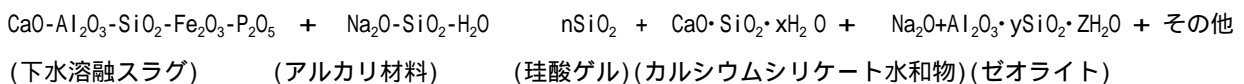
表-2 使用材料

材 料	記号	仕 様
下水溶融スラグ	SS1	密度 : 2.75g/cm <sup>3</sup> ブレーン : 5,200cm <sup>2</sup> /g
	SS2	密度 : 2.94g/cm <sup>3</sup> ブレーン : 5,400cm <sup>2</sup> /g
	SS3	密度 : 2.57g/cm <sup>3</sup> ブレーン : 5,500cm <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup> F.M. : 3.19 吸水率 : 1.96%
粗骨材	G	密度 : 2.67g/cm <sup>3</sup> 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 <sup>3</sup>
混和剤	Ad	ナフタレン系高性能減水剤 密度 : 1.20g/cm <sup>3</sup>

表-3 エココンクリートの配合表

種別	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	SS	Wg	S	G	Ad
EC	155	-	350	226	830	934	-
PL	167	553	-	-	666	1018	3.87

アルカリスラグ反応式・・・・・・・・・・(1)



アルカリ材料を投入して4分間本練りを行った。練り混ぜた材料は、型枠をテーブルバイブレータに載せて振動を与えながら流し込んで成形し、蒸気養生を行った。なお、蒸気養生条件は2時間の前養生、温度上昇速度が20 /h 3時間、最高温度(80±5 )保持が8時間、冷却速度20 /h 3時間の1サイクル14時間の工程である。さらに、供試体は蒸気養生後、脱型して所定の材齢まで温度20±2 ,湿度70±5%の恒温恒湿養生槽内にて所定の材齢まで養生を行った。

### 2.4 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、圧縮強度、曲げ及び引張強度は表-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。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、質量変化率試験及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。なお、硫酸水溶液の交換は、浸漬開始2週間までは3回/月、1ヶ月までは5回/月、それ以降は1回/月の間隔で実施した。

## 3. 実験結果

### 3.1 強度試験

図-2に、圧縮強度試験結果を示す。SS1及び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反応が促進して、設計基準強度の90%にも達している。しかし、材齢180日及び材齢365日の長期強度では、エココンクリートは普通コンクリートの約90%程度の強度発現に留まった。また、SS2供試体は、他の下水溶融スラグほどの強度発現がみられなかった。これは、下水溶融スラグは高炉スラグに比べC/Sが小さく、活性が低いと考えられるが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>やP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>などのガラス網目

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
	曲げ強度試験	JIS A 1106 28,91,180,365日
	引張強度試験	JIS A 1113 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

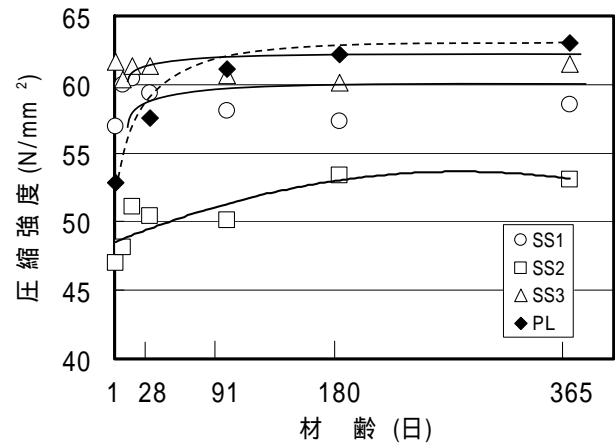


図-2 圧縮強度試験結果

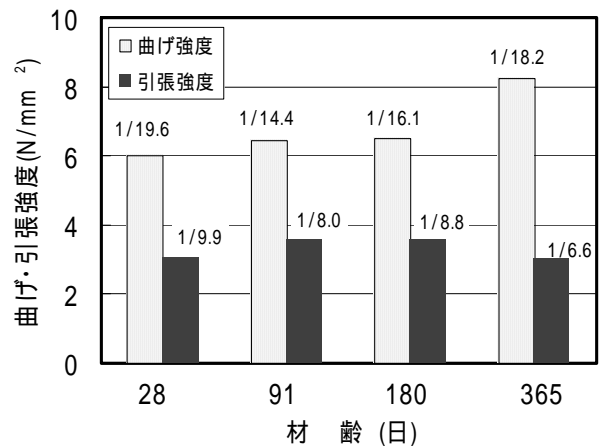


図-3 曲げ及び引張強度試験結果 (SS1 供試体)

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加えることで反応し、強度発現すると考えられるが、その骨格を形成するSiO<sub>2</sub>量が少ないため、SS2供試体の強度発現が小さくなったものと考えられる<sup>4)</sup>。

図-3に、SS1 供試体の曲げ及び引張強度試験結果を示す。なお、図中の数値は同材齢における圧縮強度との比率を示したもので、曲げ強度が約 1/7 ~ 1/10、引張強度が約 1/14 ~ 1/19 となり、その割合は普通コンクリートより若干小さい値であった。

図-4に材齢とポアソン比の関係を、図-5に材齢と静弾性係数の関係を示す。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、縦及び横ひずみを測定した。その値は普通コンクリートで一般的に 0.11 ~ 0.21 程度であり、各スラグを混入したエココンクリートもこの範囲内の留まり普通コンクリートと同等であった。また、SS1、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伸び、その後は同程度に推移している。

### 3.2 耐酸性試験

図-6に、硫酸浸漬期間での質量変化率試験結果を示す。なお、質量変化率とは、硫酸水溶液へ浸漬した後の質量を除いた値である。普通コンクリートが浸漬 365 日で約 95% 減少したのに対して、エココンクリートは約 2.5% 減少にと留まり高い耐酸性を示した（写真-1、写真-2 参照）。これは、エコ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、エココンクリートは、含まれるCaO分が硫酸と反応してCaSO<sub>4</sub>を生成し、硫酸に対してのバリア層として機能しているものと思われる<sup>5)</sup>。

図-7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吹きかけ、赤褐色に反応した健全域の横方向を計測し、浸漬前の直径とを減算した。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。エココンクリートは、浸漬期間が経過するに連れて緩やかになり、浸漬 365 日において約 12mm の進行に留まった。

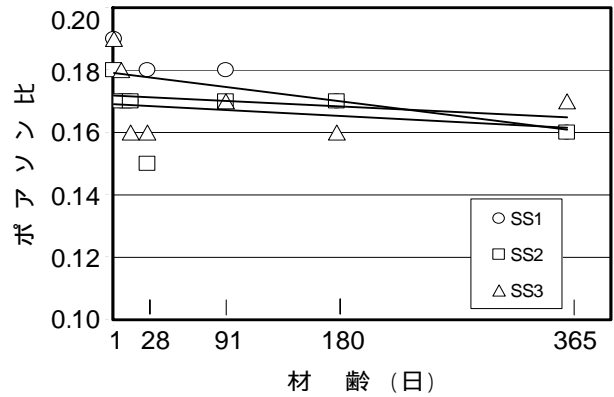


図-4 材齢とポアソン比の関係

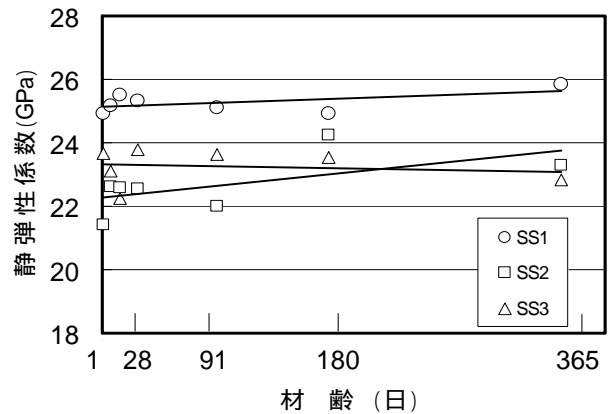


図-5 材齢と静弾性係数の関係

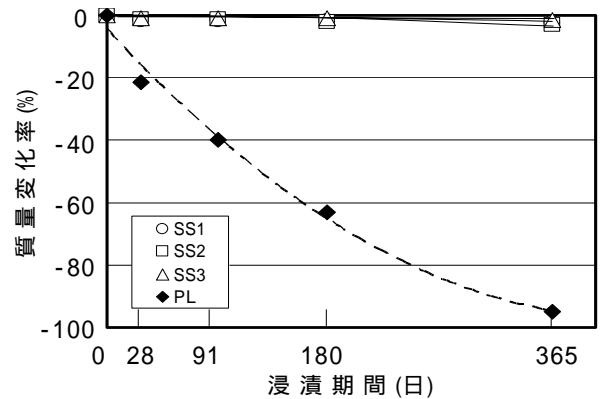


図-6 硫酸浸漬後の質量変化率試験結果

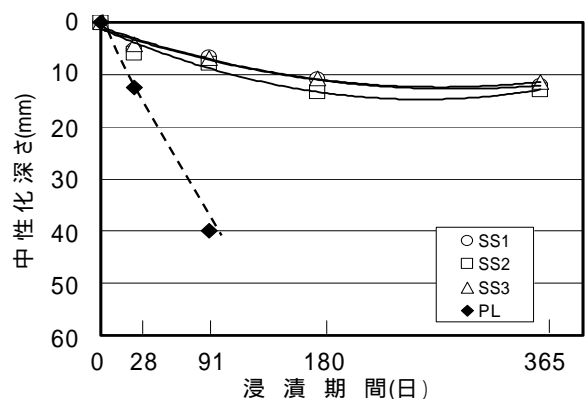


図-7 硫酸浸漬後の中性化試験結果



(a)SS1 供試体 (b)SS2 供試体 (c)SS3 供試体

写真-1 硫酸浸漬後の状況変化  
(EC : 浸漬 365 日)



写真-2 硫酸浸漬後の状況変化  
(PL : 浸漬 365 日)

#### 4. 実地試験

##### 4.1 試験場所

エココンクリートは、基礎試験結果より高い耐酸性を有することが明らかとなったので、実用化に向けて温泉地での耐酸性試験を行い、厳環境下での耐酸性試験を実施した。実施場所は、上信越地区の某温泉の源泉を選定し、平成 14 年 4 月より供試体を 1,095 日間浸漬させた。表-5 に温泉の化学成分を、表-6 に温泉ならびに測定環境条件を示す。なお、対象とした温泉は pH が 2.2、水温が約 51 の酸性温泉であった。

##### 4.2 試験方法

実地試験は、10×20cm 円柱供試体と 10×10×40cm 角柱供試体を温泉水に浸漬させて定期的に質量変化率試験及び中性化試験を実施した。円柱供試体は、外観及び質量変化率試験を行い、角柱

供試体は切断し、表面にフェノールフタレイン溶液を填霧して中性深さを測定した。なお、測定対象は SS1 スラッグのみを用いて、表-3 に示す配合条件で製作した供試体である。

表-5 温泉の化学成分 (mg/kg)

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

表-6 環境調査結果

調査項目	浸漬期間(日)			
	0	180	365	1095
pH	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

#### 4.3 試験結果

図-8 に、温泉浸漬後の質量変化率試験結果を示す。浸漬 1,095 日で、普通コンクリートは約 23.0%減少したのに対して、エココンクリートは約 9.0%の減少に留まった。

図-9 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、エココンクリートは約 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。

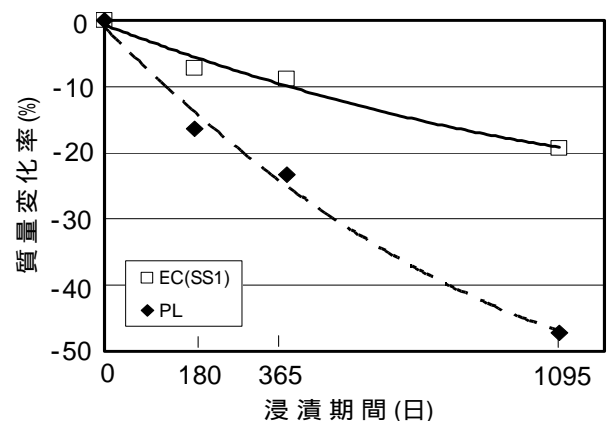


図-8 温泉浸漬後の質量変化率試験結果

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がコンクリート中に浸透するの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<sup>6)</sup>。

## 5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) エココンクリートに蒸気養生を施すことで、材齢1日で最終強度の約9割に達した。
- (2) 普通コンクリートのポアソン比は、一般に0.11~0.21であるが、エココンクリートのポアソン比もこの範囲内に入っており、普通コンクリートと同等の結果が得られた。
- (3) エココンクリートの静弾性係数は、圧縮強度と同様に初期に伸び、その後は同程度に推移した。
- (4) SS1 供試体の曲げ及び引張強度の同材齢における圧縮強度との比率は、普通コンクリートより若干小さい値であった。
- (5) 20 - 5%硫酸水溶液に365日浸漬させた時の質量変化率は、普通コンクリートは約95%減少したのに対し、エココンクリートは約2.5%に留まり、高い耐酸性を示した。
- (6) 20 - 5%硫酸水溶液に365日浸漬させた時の中性化深さは、普通コンクリートは浸漬91日までしか測定できなかったのに対し、エココンクリートは約12mmの進行に留まった。
- (7) 耐酸性温泉水中に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25%減少したのに対し、エココンクリートは約9%の減少に留まった。
- (8) 耐酸性温泉水中に1,095日間浸漬させた時の中性化深さは、普通コンクリートが約10.75mmまで進行したのに対し、エココンクリートは約9.55mmの進行となり、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。

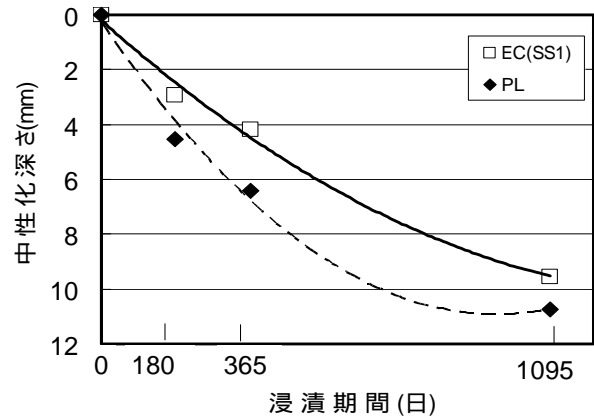


図-9 温泉浸漬後の中性化試験結果

以上の結果、下水溶融スラグを用いたエココンクリートは、普通コンクリートに比べて高い耐酸性を有し、環境条件が厳しい管渠や、温泉地の構造物に使用されることが期待できる。

## 参考文献

- 1) (社)日本下水道協会下水汚泥資源利用協議会パンフレット「下水道処理の普及とともに増え続ける汚泥」,平成15年度版,2003
- 2) 丸山能生:下水溶融スラグと溶融パウダーを骨材に利用したコンクリートの特性,ハザマ技術研究所,土木学会第58回年次学術講演会,pp.899-900,平成15年9月
- 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,vol.23,No.86,pp.84-89,2000.1
- 4) 新田智博,杉山武,石田泰之,石森正樹:下水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,vol.22, No.2,pp.1249-1254,2000.7
- 5) 新田智博:下水溶融スラグを用いた耐酸性コンクリート,土木技術,第57巻,3号,pp.100-103,2002.3
- 6) 水上国男:コンクリート構造物の耐久性シリーズ「化学的浸食」,技報堂出版(株),p.22,1986.12