

論文 下水汚泥スラグ細骨材を用いたコンクリートの力学的特性

武田 字浦^{*1}・久保田 純司^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*4}

要旨：下水汚泥スラグ細骨材をコンクリート用骨材として使用するために、下水汚泥スラグ細骨材の物理的性質，モルタルの強度特性，コンクリートのフレッシュ特性，硬化コンクリートの力学的特性について実験検討を行った。その結果，普通骨材を用いたコンクリートと同等の強度特性が得られた。

キーワード：下水汚泥スラグ細骨材，モルタル，コンクリート

1. はじめに

近年，下水道の普及に伴い，発生汚泥量が増加する傾向にある。そのほとんどは埋め立て処分されているが，最終処分地の残存容量は減少しており，埋め立て処分の継続は限界に近い状況にある。また，天然資源の枯渇等に起因して，循環型社会に適応した経済社会の変革の必要性が問われている。下水汚泥の利用方法の1つに，下水汚泥スラグのコンクリート用骨材としての利用があげられる。

滋賀県では，琵琶湖の総合保全を目的とした「マザーレイク 21 計画」の第 1 期末の平成 22 年までに，湖中砂利採取の段階的縮小・廃止が決められた。そのため，天然骨材に代わる，良質なコンクリート用骨材の確保が急務となっている。天然骨材に代わるコンクリート用骨材として，上述した下水汚泥スラグがあげられる。高炉スラグやごみ熔融スラグをコンクリート用骨材として用いる研究は多くなされているが，下水汚泥スラグに関する研究はまだ少ない。

下水汚泥スラグをコンクリート用細骨材として使用するためには，スラグのもつ特性がコンクリートに及ぼす影響を把握することが必要である。本研究では，下水汚泥スラグの基礎物性，ならびに下水汚泥スラグをコンクリート用細骨

材として用いたモルタルの強度特性，コンクリートの基礎物性について実験を行った。

2. 実験概要

2.1 下水汚泥スラグ細骨材の物性試験

表 1 に下水汚泥スラグ細骨材の物理試験項目を示す。下水汚泥スラグをコンクリート用細骨材として使用するための基本物性として，細骨材の密度，吸水率，粒度分布，単位容積質量，実積率および微粒分量を JIS に従い測定した。

本実験では，滋賀県湖南中部浄化センター汚泥熔融設備から製造された空冷スラグを用いた。空冷スラグは，汚泥ケーキ（高分子系汚泥）を循環流動層熱分解炉および立体型旋回式熔融炉により約 1400~1500℃で加熱熔融し，自然に冷却したもので，本実験では粒径 5mm 以下に破

表 1 下水汚泥スラグ細骨材の物理試験項目

試験項目	試験方法
ふるい分け	JIS A 1102
密度	JIS A 1110
吸水率	JIS A 1110
単位容積質量	JIS A 1104
実積率	JIS A 1104
微粒分量	JIS A 1103
外観観察	----

*1 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修（正会員）

*2 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 工修（未会員）

*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科教授 工博（正会員）

*4 立命館大学 理工学部建築都市デザイン工学科教授 工博（正会員）

砕・調整したものを使用した。

2.2 下水汚泥スラグ細骨材を用いたモルタルの強度試験

(1) 試験項目

下水汚泥スラグを、細骨材として置換したときの圧縮強度および曲げ強度を、JIS R 5201 付属書 2 (セメントの試験方法—強さの測定) に従い測定した。

(2) 使用材料

モルタルの使用材料を表-2に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材に川砂および下水汚泥スラグを使用した。下水汚泥スラグは細骨材試験で用いたものと同じである。

(3) 示方配合

モルタルの示方配合を表-3に示す。モルタルの配合は、水セメント比を 30 および 50%、細骨材セメント比を 2 および 3 とした。また、下水汚泥スラグ置換率 $[S_s / (S + S_s)]$ は細骨材質量に対して内割で 0, 25, 50, 75 および 100% の 5 水準とし目標フローを 180±20mm (W/C=50%) および 200±20mm (W/C=30%) とし、W/C=30%

のときは高性能 AE 減水剤使用量により調整した。各水セメント比とも、目標空気量は 2±1% とした。供試体は打設翌日脱型し、所定の材齢 (7, 28, 91 日) まで標準水中養生 (20±1°C) を行った。

2.3 フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリート試験

(1) 試験項目

表-4にコンクリートの試験項目および試験方法の概要を示す。下水汚泥スラグをコンクリート用細骨材として置換することによって、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートに与える影響を把握するために、以下に示す項目について、実験・検討を行った。

圧縮強度、曲げ強度、引張強度試験、超音波パルス伝播速度試験、静弾性係数試験、動弾性係数試験および超音波パルス伝播速度試験¹⁾を材齢 7, 28, 91 日に行った。

(2) 使用材料

コンクリートの使用材料を表-5に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、

表-2 モルタルの使用材料

材料 (略記)	主な性質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	(S) 川砂, 表乾密度: 2.60g/cm ³ , 吸水率: 1.56%, F.M.=2.73
	(S _s) 下水汚泥スラグ (空冷スラグ), 表乾密度: 2.76g/cm ³ 吸水率: 0.86%, F.M.=3.06
高性能AE減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系特殊高分子界面活性剤* 密度: 1.03~1.07g/cm ³

* W/C=30%の時のみ使用

表-3 下水汚泥スラグ細骨材を用いたモルタルの示方配合

配合名	W/C (%)	(S+S _s)/C	S _s /(S+S _s) (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)	フロー (mm)	Air (%)
				W	C	S	S _s			
30-0	30	2	0	213	709	1417	0	1.5	200	3.0
30-25			25	214	714	1071	357	1.5	213	2.3
30-50			50	216	720	720	720	1.5	220	1.7
30-75			75	218	725	363	1088	1.3	202	1.7
30-100			100	219	731	0	1461	1.3	215	1.6
50-0	50	3	0	249	499	1507	0	/	176	1.6
50-25			25	251	502	1131	377		176	1.4
50-50			50	253	507	760	760		180	1.6
50-75			75	255	511	383	1149		179	1.1
50-100			100	257	515	0	1545		173	1.5

細骨材は川砂および下水汚泥スラグを、粗骨材は砕石を使用した。下水汚泥スラグは細骨材試験で用いたものと同じである。

(3) 示方配合

コンクリートの示方配合を表-6に示す。水セメント比を50%とし、下水汚泥スラグの置換率 $[S_s/(S+S_s)]$ は細骨材容積に対して内割で0, 25, 50, 75 および 100%の5水準とした。目標スランブを $7.5\pm 1\text{cm}$ 、目標空気量を $4.5\pm 1\%$ とし化学混和剤使用量により調節した。

コンクリートの練混ぜには、二軸強制練りミキサ（容量100L）を使用した。ミキサに骨材およびセメントを投入して30秒間空練りし、さらに練混ぜ水（水+混和剤）を投入し、90秒間練混ぜた。供試体は、2層詰めとし、棒状振動機により各層の締固めを行った。打設翌日脱型後、所定材齢まで標準水中養生（ $20\pm 1^\circ\text{C}$ ）を行った。

3. 実験結果

3.1 下水汚泥スラグ細骨材の物性試験結果

下水汚泥スラグ細骨材の物性値と規格値の比較を表-7に示す。本研究では、天然骨材である川砂に代わる材料として用いることを目的としているため、JIS規格値との比較を行った。

下水汚泥スラグ細骨材の表乾密度は $2.76\text{g}/\text{cm}^3$ 、絶乾密度 $2.73\text{g}/\text{cm}^3$ と川砂に比べ、幾分大きな値を示した。しかし、細骨材における絶乾密度のJIS規格値は $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上であり、今回使用した下水汚泥スラグの絶乾密度は、十分に規格値を満足するものであった。

下水汚泥スラグ細骨材の吸水率は0.86%で、川砂1.56%に比べ非常に小さい値を示しており、規格値3.0%以下および3.5%以下を満たしているが、一般に使用される細骨材に比べると吸水率が小さくなる傾向を示した。

下水汚泥スラグ細骨材の単位容積質量は $1.80\text{kg}/\text{l}$ であり、川砂の $1.61\text{kg}/\text{l}$ に比べ、大きな値を示した。実積率は下水汚泥スラグ細骨材で66.0%、川砂では62.9%となり、幾分大きな値

表-4 コンクリートの試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング	JIS A 1123
凝結	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108
曲げ強度	JIS A 1106
引張強度	JIS A 1113
静弾性係数	JIS A 1149
動弾性係数	JIS A 1127
超音波パルス伝播速度	JCIの方法 ¹⁾

表-5 コンクリートの使用材料

材料（略記）	主な性質
セメント（C）	普通ポルトランドセメント，密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	（S）川砂，表乾密度： $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率：1.80%，F.M.=2.67
	（Ss）下水汚泥スラグ（空冷スラグ），表乾密度： $2.76\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率：0.86%，F.M.=3.06
粗骨材（G）	硬質砂岩砕石，表乾密度： $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ ，吸水率：0.63% F.M.=6.80，骨材最大寸法：20mm，5mm以下：2.3%
混和剤	AE減水剤リグニンスルホン酸化合物，密度： $1.10\text{g}/\text{cm}^3$
	AE助剤アルキルアリルスルホン酸化合物，密度： $1.19\text{g}/\text{cm}^3$

表-6 下水汚泥スラグ細骨材を用いたコンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	Ss/(S+Ss) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (cc)	AE助剤	スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	Ss	G				
50-0-C	50	0	43.6	173	346	764	0	1024	3464	2.5A	8.0	5.0
50-25-C		25	44.9	168	336	595	211	1013	3364	2A	6.8	4.0
50-50-C		50	45.3	169	338	400	425	1003	3378	2A	8.4	3.5
50-75-C		75	46.5	173	346	213	638	972	3464	2A	6.5	3.9
50-100-C		100	47.1	173	346	0	873	961	3464	2A	7.0	5.4

表-7 下水汚泥スラグ細骨材の物性値と規格値の比較

	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/l)	実績率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
下水汚泥スラグ	2.76	2.73	0.86	1.80	66.0	3.09	4.07
川砂	2.60	2.56	1.56	1.61	62.9	2.73	2.08
規格1	---	2.5以上	3.0以下	---	53.0以上	---	7.00以下
規格2	---	2.5以上	3.5以下	---	---	---	3.00以下

規格1：JIS A 5005（コンクリート用砕石および砕砂）

規格2：JIS A 5308付属書1（レディーミクストコンクリート用骨材）

を示したが規格値を満足するものであった。下水汚泥スラグ細骨材の粗粒率は3.09であり、川砂の2.73に比べ、大きな値を示した。

下水汚泥スラグ細骨材の微粒分量は4.07%であり、川砂の2.08%に比べ、大きな値を示した。規格1の7.00%以下は満たしたが、規格2の3.00%以下は満たさなかったため、今後使用に際し、微粒分量の調整などの検討が必要である。

下水汚泥スラグ細骨材の粒度分布を図-1に示す。下水汚泥スラグ細骨材の粒度は、0.6~2.5mmの粒子が幾分多いが、土木学会の標準粒度の範囲内にあった。下水汚泥スラグ細骨材はガラス質で、角がとがった骨材も観察された。

3.2 下水汚泥スラグ細骨材を用いたモルタルの強度試験結果

材齢7日、28日および91日における圧縮強度および曲げ強度とスラグ置換率の関係を図-2に示す。材齢28日、91日において、置換率0と100%での圧縮強度は水セメント比、材齢に関わらずほぼ同程度の強度発現であったといえるが、25、50、75%においてはスラグ置換率の増加に伴う一定の傾向を読み取ることが困難であった。材齢7-28日および材齢28-91日の強度増加率は、置換率に関わらず同程度であったが、初期材齢での強度増加率の方が大きい傾向にあった。

曲げ強度は、W/C=30%の材齢7日の場合を除き、スラグ置換率の増加に伴い大きくなる傾向が観察できた。材齢7日に対する材齢28日の強度増加率は、スラグを置換することにより増加し、材齢28日に対する材齢91日の強度増加率

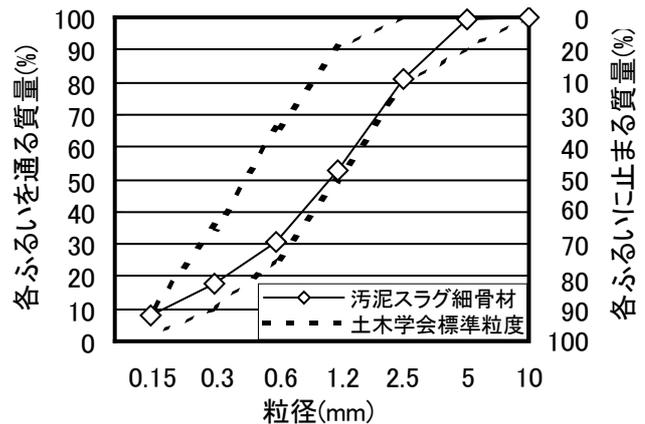


図-1 下水汚泥スラグ細骨材の粒度分布

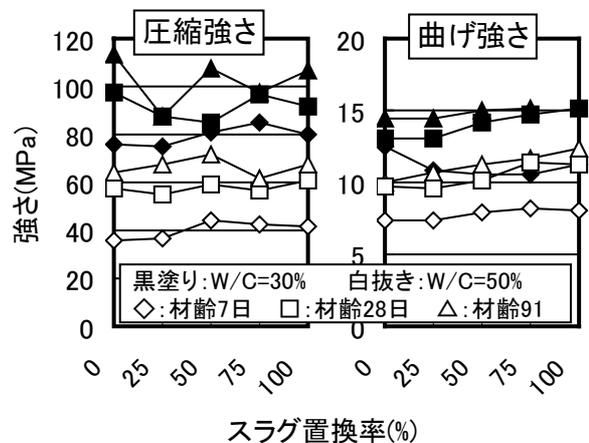


図-2 モルタルの強さとスラグ置換率の関係

は、スラグ置換に関わらずほぼ同程度であった。ただし、材齢91日のスラグ置換率100%の供試体（配合30-100）は、本実験で用いた試験機では破壊できなかった。

3.3 下水汚泥スラグを細骨材として用いたフレッシュコンクリートの基礎的性質

凝結時間とスラグ置換率の関係を図-3、強度発現から終結までの貫入抵抗の経時変化を図-4に示す。スラグ置換率が増加するに伴って、

始発時間および終結時間が若干早くなった。ただし、スラグ置換率 100%ではともに遅くなった。また、スラグ置換率が増加するに伴って、始発から終結までの時間が 15~25 分程度短くなったが、置換率 100%では 1 時間以上長くなった。凝結は塩素やリンといったスラグの化学成分の影響を受けるが、本研究においてもその影響を受けたと考えられる。今後、スラグの化学成分を調べ検討する。

ブリーディング率の経時変化を図-5に示す。ブリーディング率は、スラグ置換率が増加するに伴い増加する傾向が観察された。これは、スラグ骨材表面が平滑なガラス質で骨材の形状が鋭利であったことと²⁾、スラグの吸水率が川砂に比べ小さいため³⁾ブリーディング率に影響を及ぼしたと考えられる。

3.4 下水汚泥スラグを細骨材として用いた硬化コンクリートの基礎的性質

材齢 7 日、28 日および 91 日における各種強度とスラグ置換率の関係を図-6に示す。コンクリートの各種強度は、置換率に関わらず置換率 0%のときとほぼ同程度であった。

圧縮強度において、材齢 7-28 日および材齢 28-91 日の強度増加率は、スラグ置換に関わらずほぼ同程度であった。置換率に関わらず、材齢 28 日までの初期材齢での強度増加率の方が大きい傾向にあった。曲げ強度は、材齢 7 日の場合を除き置換率の増加に伴い、若干増加する傾向にあった。また、圧縮強度に対する曲げ強度の比は、約 1/5~1/9 であった。引張強度の材齢の進行に伴う増加率は、スラグ置換率に関わらず、ほぼ同程度であった。また、圧縮強度に対する引張強度の比は、約 1/9~1/14 であった。

弾性係数および超音波パルス伝播速度とスラグ置換率の関係を図-7に示す。静弾性係数は 1/3 割線弾性係数、動弾性係数は縦振動時の 1 次共鳴振動数により求めた。

静弾性係数は、動弾性係数より幾分小さい値を示しスラグ置換率により増加する傾向が観察された。また、静弾性係数、動弾性係数ともに

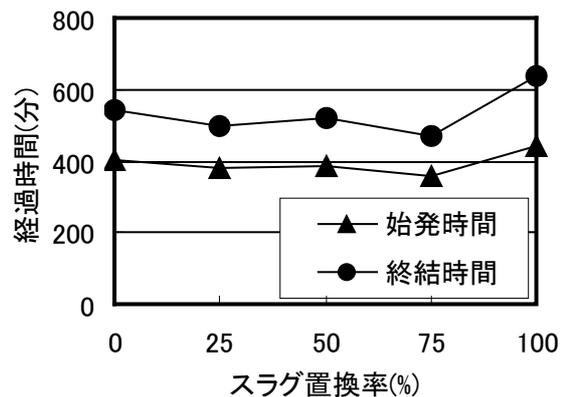


図-3 凝結時間とスラグ置換率の関係

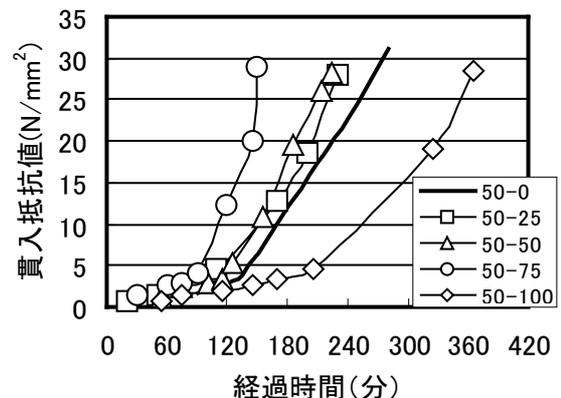


図-4 強度発現から終結までの貫入抵抗の経時変化

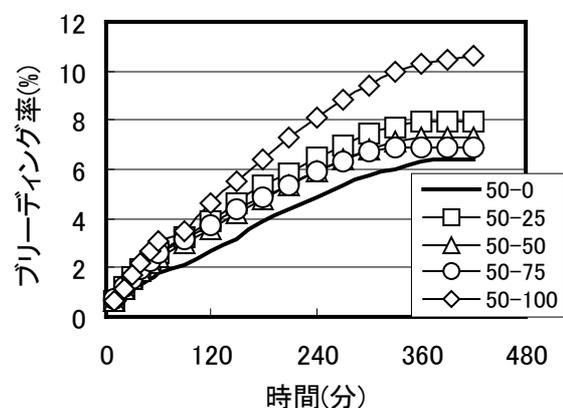


図-5 ブリーディング率の経時変化

材齢の進行に伴い増加し、その増加の割合はスラグ置換率に関わらずほぼ同程度であった。動弾性係数 (E_d) と静弾性係数 (E_s) の比は、強度が大きいほど、長期材齢になるほどこの値は小さくなる⁴⁾。下水汚泥スラグ細骨材を用いたコンクリートは、この範囲内にあり、長期材齢になるほど E_d/E_s の値が小さくなった。また、スラグ置換率が増加するに伴って、 E_d/E_s の値が小さくなった。

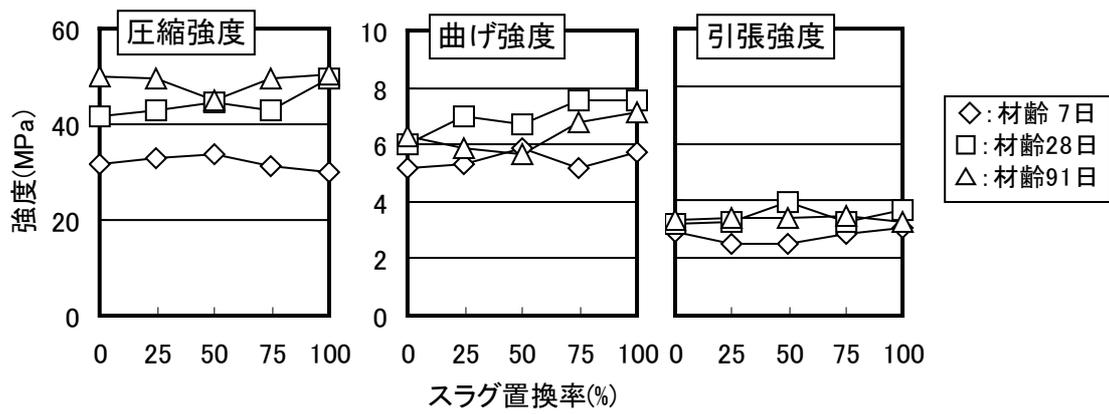


図-6 コンクリート強度とスラグ置換率の関係

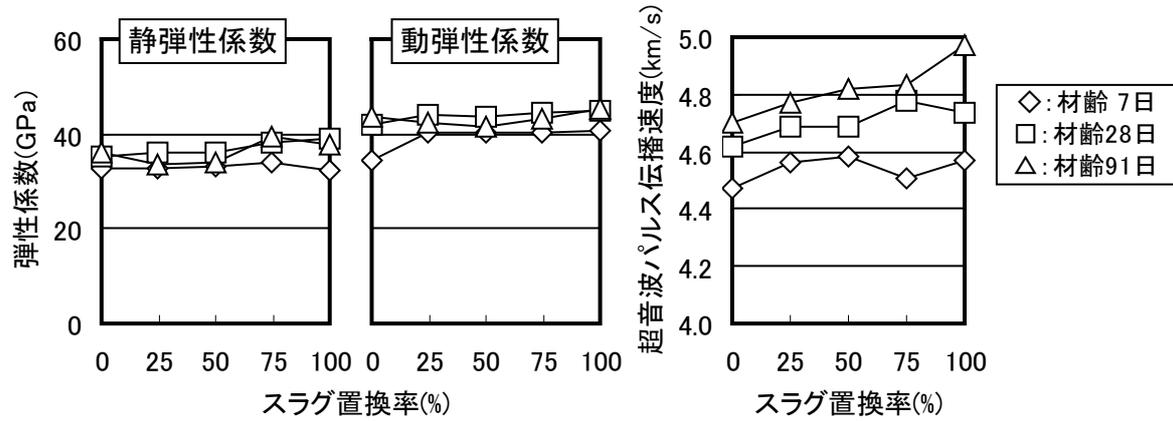


図-7 弾性係数および超音波パルス伝播速度とスラグ置換率の関係

超音波パルス伝播速度は、スラグ置換率が増加するに伴って伝播速度が幾分増加した。また、材齢の進行に伴い伝播速度は増加し、その割合はスラグ置換率に関わらずほぼ同程度であった。

4. まとめ

- 以下に、本研究より得られた結果を述べる。
- (1) 本実験で用いた下水汚泥スラグ細骨材は、絶乾密度、吸水率および実績率に関する JIS 規格値を満足した。
- (2) モルタルの圧縮強さは明確な下水汚泥スラグ細骨材置換率の増加に伴う影響を読み取れなかったが、曲げ強さは下水汚泥スラグ細骨材置換率の増加に伴い若干増加した。
- (3) 凝結の始発および終結時間は、下水汚泥スラグ細骨材置換率の増加に伴って早くなり、ブリーディング量は増加する傾向にあった。
- (4) 下水汚泥スラグ細骨材を用いたコンクリートの各種強度は、置換率に関わらず置換率 0% のときと同程度であったが、置換率 0% のとき

より 100% のときの方が、若干強度が大きくなる傾向にあった。

今後、長期材齢や凍結融解抵抗性などの耐久性に関する項目、下水汚泥スラグの含有成分がコンクリートに及ぼす影響について検討を行ってきたい。

参考文献

- 1) 超音波パルス伝播速度の測定方法 (試案), 日本コンクリート工学協会・コンクリート非破壊試験方法研究委員会報告書, 1992
- 2) 斉藤 丈士ほか: ごみ熔融スラグの細骨材としての利用がコンクリートの調合および品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 3) 戸田勝哉ほか: 熔融スラグを骨材として用いたコンクリートの耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 4) 丸岡隆安ら: コンクリート工学, コロナ社, 1959