

# 論文 下水汚泥溶融スラグ粗骨材を用いたコンクリートの諸物性と破壊力学特性

井上 真澄\*1・宮崎 正雄\*2・岡本 享久\*3・児島 孝之\*4

**要旨:** 本研究は、下水汚泥溶融スラグ(以下、溶融スラグ)のコンクリート用粗骨材への適用性と溶融スラグの物性がコンクリートの諸物性に及ぼす影響を把握することを目的として、硬化コンクリートの各種強度および耐久性について検討を行った。また、溶融スラグ界面の付着性状と強度との関係にも着目し、破壊エネルギーと引張軟化特性についても検討を行った。その結果、本実験で対象とした溶融スラグはすりへり減量や破砕値が小さく、これを粗骨材として用いたコンクリートは普通骨材コンクリートと同等以上の性能を発揮すること、また溶融スラグの置換により破壊エネルギーが増加することが確認できた。

**キーワード:** 下水汚泥溶融スラグ, 粗骨材, 強度, すりへり減量, 破壊エネルギー

## 1. はじめに

下水道普及率の向上に伴い、発生汚泥量は全国規模で年々増加傾向にある。滋賀県は琵琶湖の水質を保全するため、昭和 46 年に「琵琶湖周辺流域下水道基本計画」を策定し、下水道の普及に努めている。滋賀県下における下水道普及率は平成 19 年度末で約 82%であり、今後の下水道普及率向上に伴って発生汚泥量は、益々増加することが予想されている<sup>1)</sup>。発生汚泥は、脱水処理されたケーキ状のものであり、産業廃棄物として最終処分場でそのほとんどが埋立て処理されているのが現状である。しかし、最終処分場の逼迫、新規処分場の確保が困難となってきており、汚泥の減量化あるいは資源化が急務の社会問題となっている。

一方、河川産骨材をはじめとする天然骨材の枯渇、海砂あるいは砕石・砕砂採取の環境問題からの規制により、コンクリート用骨材の不足が現在大きな問題となっている。滋賀県では、琵琶湖の水質保全のために、「マザーレイク 21 計画」(琵琶湖総合保全計画)の第 1 期末の平成 22 年度(2010 年)には、琵琶湖湖中の砂と砂利の採取廃止が計画されている<sup>2)</sup>。そのため、産業廃棄物あるいは生活廃棄物のコンクリート用骨材としての有効利用は、社会的要請となっている。

既往の研究<sup>3),4)</sup>では、滋賀県湖南中部浄化センター汚泥溶融設備にて製造された溶融スラグを対象として、それを粗骨材として用いたコンクリートの様々な性質を検討してきた。その結果、置換率 15%までは普通骨材コンクリートと同程度の強度特性を得ることができるが、それ以上置換すると強度や耐久性が大きく低下することを明らかにしている。

本研究では、滋賀県において新規に稼動を開始した東北部浄化センター汚泥溶融設備において製造された溶融スラグ粗骨材を対象として、コンクリート用粗骨材としての適用性を明らかにすることを目的としている。前述の既往データ<sup>3),4)</sup>から各溶融設備で製造された溶融スラグの物理的性質の比較、溶融スラグの物性がコンクリートの諸特性に及ぼす影響について検討を行った。また、溶融スラグの粒子とモルタルとの付着性状が強度特性に大きな影響を及ぼすと考えられることから、破壊エネルギー、引張軟化曲線といった引張軟化特性に及ぼす影響についても検討を行った。

## 2. 力学的特性に関する実験

### 2.1 実験概要

本実験で対象とした溶融スラグ粗骨材をコンクリートに置換した場合の諸特性を明らかにするため、骨材物性試験、各種強度、乾燥収縮、凍結融解抵抗性について実験検討を行った。また、既往データとの比較検討を行い、溶融スラグの物性がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響についても検討を行った。

### 2.2 使用材料

表-1 にコンクリートの使用材料を示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には砕砂、溶融スラグの置換対象となる粗骨材には砕石を使用した。

本実験で使用した溶融スラグは、滋賀県東北部浄化センターで製造された空冷スラグである。空冷スラグは、汚泥ケーキ(高分子系汚泥)を流動床式焼却炉および旋回流式溶融炉により 1400~1450℃で加熱溶融し自然冷却した。その後、粉碎により 5~20mm に粒径調整したも

\*1 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科助教 博(工) (正会員)

\*2 滋賀県土木コンクリートブロック協同組合 技術委員長 (非会員)

\*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学科教授 工博 (正会員)

表-1 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: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3260cm <sup>2</sup> /g
細骨材 (S)	高槻産硬質砂岩砕砂, 表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.10%, F.M.=2.78
粗骨材	(G) 高槻産硬質砂岩砕石, 表乾密度: 2.67g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.62%, F.M.=6.74, M.S.=20mm
	(MG) 下水汚泥溶融スラグ, 表乾密度: 2.48g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.69%, F.M.=6.57, M.S.=20mm
混和剤	(Ad1) AE 減水剤, 密度: 1.10g/cm <sup>3</sup> , 主成分: リグニンスルホン酸化合物
	(Ad2) AE 助剤, 密度: 1.19g/cm <sup>3</sup> , 主成分: アルキルアリルスルホン酸化合物

表-2 下水汚泥溶融スラグ粗骨材の物性と JIS 規格値

	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)	すりへり減量 (%)	破碎値 (%)
MG	2.48	2.44	0.69	1.41	57.4	28.2	22.7
MG*	2.65	2.60	2.16	1.52	58.5	43.6	41.1
G	2.67	2.65	0.62	1.58	59.1	9.76	8.96
規格 1	—	2.50 以上	3.00 以下	—	—	—	—
規格 2	—	2.50 以上	3.00 以下	—	55.0 以上	40.0 以下	—

\*: 既往研究データ<sup>3)</sup>

規格 1: JIS A 5031(一般廃棄物, 下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材)

規格 2: JIS A 5005(コンクリート用砕石および砕砂)

表-3 コンクリートの示方配合

配合名	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (cc/m <sup>3</sup> )	AE 助剤 (cc/m <sup>3</sup> )
				W	C	S	G	MG		
50-0	50	0	44.7	176	352	782	986	0	1126	2253
50-15		15					838	137	1126	2112
50-30		30					690	275	1126	1760
50-50		50					492	458	1056	1408
50-100		100					0	916	1760	0
65-0	65	0	47.7	180	277	859	960	0	554	1108
65-50		50					480	461	831	831
65-100		100					0	892	1108	0

表-4 試験項目

項目	規格	供試体
スランブ	JIS A 1101	—
空気量	JIS A 1128	—
圧縮強度	JIS A 1108	φ10×20
曲げ強度	JIS A 1106	10×10×40
割裂引張強度	JIS A 1113	φ15×15
静弾性係数	JIS A 1149	φ10×20
乾燥収縮	JIS A 1129-2	10×10×40
凍結融解	JIS A 1148	10×10×40

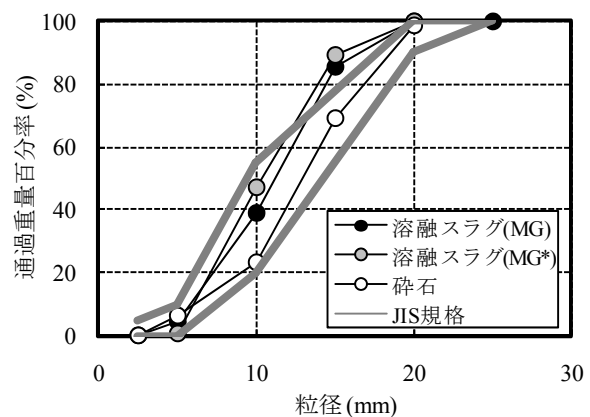


図-1 粒度分布

のを使用した。既報告のスラグと溶融形式は同じであるが、凝集剤に高分子系のものを使用している点異なる(既報告のスラグは石灰系凝集剤を使用<sup>3),4)</sup>。

表-2に溶融スラグ粗骨材の物理的性質と JIS 規格値を示す。表中には、本実験で比較対象とする既往の骨材データも記載した。本実験で使用した溶融スラグは、表乾密度・絶乾密度が砕石に比べて小さく、JIS の規格値を若干下回る結果となった。すりへり減量は 28.2%、破碎

値は 22.7%であり、砕石に比べると骨材強度は低い骨材であるといえる。

図-1に本実験で用いた溶融スラグの粒度分布を、写真-1に各種粗骨材の写真を示す。既往のスラグと比較すると、粒子形状や粒度に差はないが、粒子表面は複雑な凹

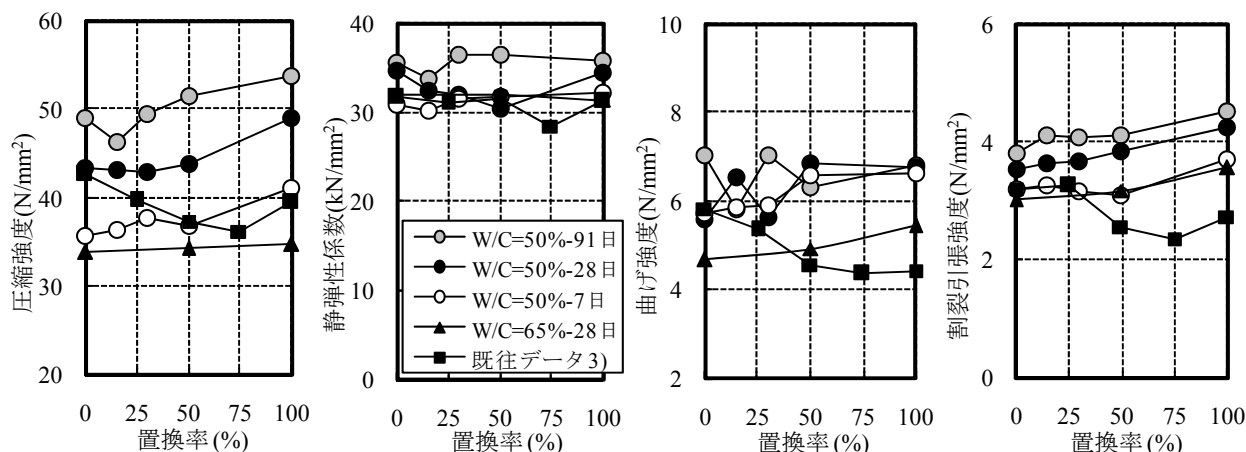


図-2 各種強度および静弾性係数とスラグ置換率の関係

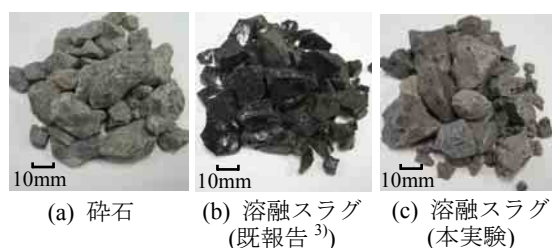


写真-1 各種粗骨材の一例

凸の表面形状を有しており、表面に気泡が多く存在した。また、密度は小さいものの、すりへり減量や破砕値は既報告の熔融スラグに比べれば小さい値を示しており、熔融スラグの組織がより結晶化していると推察される。

使用した熔融スラグは、環境庁告示第46号「土壌の汚染に係る環境基準について」に準拠して溶出量および含有量を試験した結果、全項目ともJIS A 5031に示されている基準値を満足していることが確認されたものである。また、化学法によるアルカリシリカ反応性は無害、モルタル膨張率試験においても基準値を満足している。

## 2.2 コンクリートの示方配合

表-3に熔融スラグ粗骨材を用いたコンクリートの示方配合を示す。水セメント比は50%、65%の2水準とした。熔融スラグの置換率は、0、15、30、50、100%(容積比)の5水準とした。目標スランプは $7.5 \pm 1\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1\%$ とし、混和剤により調整した。

## 2.3 試験項目

表-4に試験項目を示す。フレッシュコンクリートのスランプ、空気量はJISに準拠して行った。コンクリート供試体は、打設後、材齢1日で脱型し、所定の試験材齢(7、28、91日)まで水中養生( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ )を行った。硬化コンクリートの各種試験は、JIS規格に準拠して行った。乾燥収縮試験は、供試体を材齢7日まで標準水中養生した後、 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、RH60 $\pm$ 5%の環境下で実施した。乾燥収縮ひずみの測定は、コンタクトゲージ法で行った。凍結融解試験は、供試体を材齢28日まで水中養生( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ )

を行った後、300サイクルまで外観観察、質量減少率、動弾性係数の測定を行った。

## 2.4 実験結果および考察

### (1) 強度特性

図-2に各種強度と静弾性係数試験結果を示す。熔融スラグを置換したコンクリートの圧縮強度は、水セメント比や材齢に関わらず、無置換の普通骨材コンクリートと同等の強度を発現している。置換率50%以上では、無置換よりも強度が増加しており、最大で15%程度の強度増加を示している。曲げ強度、引張強度および静弾性係数も同様の傾向であった。

図中には、既往の研究データ<sup>3)</sup>よりW/C=50%の材齢28日における強度試験結果も示す。既報告では、熔融スラグの置換率の増加に伴い、強度が低下する傾向を示している。既報告で使用した熔融スラグ(MG\*:表-2参照)は、密度や吸水率についてはJIS規格を十分に満足するものであったが、すりへり減量は40%以上の数値を示しており、非常に脆弱な骨材であった。また、熔融スラグ粗骨材の表面に光沢があり粒子表面が平滑であったことから、モルタルとの付着が悪いことが強度低下の原因として考えられる(写真-1参照)。一方、本実験で使用した熔融スラグは、コンクリートに置換した場合の強度が全く逆の傾向を示した。既往のスラグと比較して粒子表面に光沢はなく複雑な凹凸の表面形状を有し、密度は小さいものの、すりへり減量や破砕値は小さい。したがって、熔融スラグの強度とモルタルとの付着性状がコンクリートの強度発現に影響を及ぼしたものと考えられる。

### (2) 乾燥収縮

図-3に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。熔融スラグ粗骨材を用いたコンクリートは、既報告<sup>3)</sup>と同様、無置換のコンクリートに比べて乾燥収縮が小さくなる傾向にある。スラグ置換率の変化に伴う差異はほとんどないが、乾燥日数100日の時点では無置換供試体に比較すると乾燥収縮ひずみが50 $\mu$ 程度小さくなっている。現時点

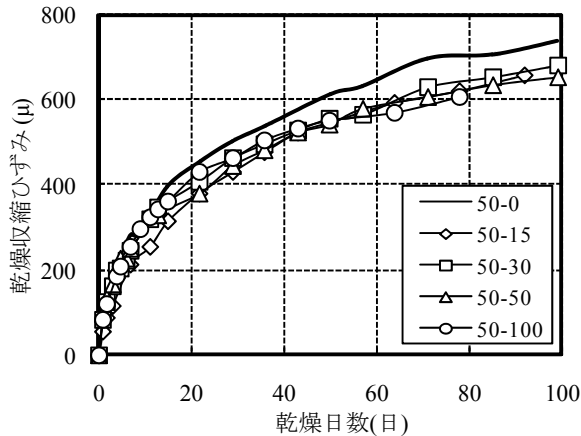


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

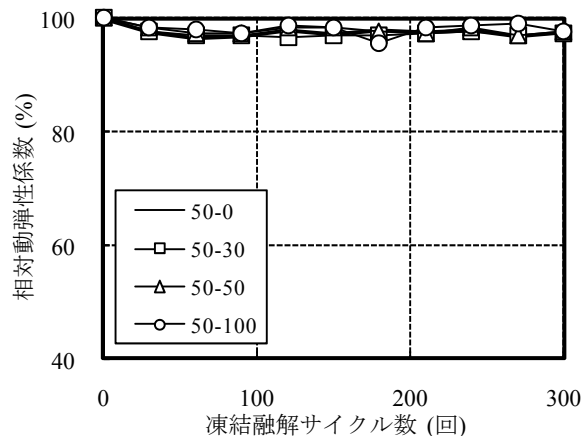


図-4 相対動弾性係数の経時変化

では、溶融スラグ粗骨材を用いたコンクリートは寸法安定性に優れていると推察される。

### (3) 凍結融解抵抗性

図-4に相対動弾性係数の経時変化を示す。相対動弾性係数の経時変化をみると、スラグ置換率を増加させても変化はほとんどなく、無置換の普通骨材コンクリートとほぼ同程度の値を示している。耐久性指数は、300 サイクル終了時点でスラグ置換の有無に関わらず、95%以上であり高い耐久性を示した。質量減少率についても、外観観察において供試体表面層の剥離が若干生じていたため、質量減少はしていたが、無置換供試体よりも減少率は小さい値を示した。したがって、本実験で使用した溶融スラグ粗骨材は、コンクリートの耐凍害性に悪影響はなく、粗骨材に全置換した場合であっても十分な耐凍害性を有するものと考えられる。

## 3. 破壊エネルギー試験

### 3.1 実験概要

前章の各種試験結果より、本実験で使用した溶融スラグは、置換率が増加しても普通骨材コンクリートと同等以上の強度と耐久性を有することが明らかとなった。これは、前述のように溶融スラグ自体のすりへり減量や破碎値が従来のものに比較して小さく、骨材強度に優れていることが要因の一つとして考えられる。しかし、碎石に比べれば骨材強度が小さいにも関わらず、スラグ置換率 50%以上の範囲では普通骨材コンクリートよりも強度が増加する傾向を示していることから、溶融スラグ粗骨材とモルタル界面の付着の影響も推察される。そこで、ここでは切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験を実施し、溶融スラグ粗骨材の置換がコンクリートの破壊エネルギーや引張軟化特性に及ぼす影響について検討を行った。

### 3.2 使用材料とコンクリートの示方配合

使用材料は、表-1 および表-2 に示すものと同様の材料を使用した。コンクリートの配合要因は、水セメント比は 50%, 65%の 2 水準とし、溶融スラグの置換率は 0, 50, 100%(容積比)の 3 水準とした。

### 3.3 供試体概要と試験方法

供試体には、100×100×400mm のはり供試体を用いた。1 条件につき 5 体の供試体を作製し、載荷試験の前日に供試体中央部に深さ 30mm の切欠きをコンクリートカッターにより設けた。養生は、試験材齢まで水中養生(20 ±1°C)した。

破壊エネルギー試験は、JCI 規準「切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001-2003)」に準じて行った。図-5に載荷試験の概略図を示す。載荷は、3 点曲げ載荷とし、載荷スパンははり高さの 3 倍(300mm)とした。また、水平方向の拘束を取り除くため両支点ともローラー支持とした。計測項目は、荷重および切欠きの開口変位(CMOD)とし、ロードセルおよびクリップゲージを用いて計測した。

破壊エネルギーは、試験で得られた荷重-CMOD 曲線から、JCI 規準 (JCI-S-001-2003)に準じて算定した。また、引張軟化曲線は、荷重-CMOD 曲線から多直線近似解析法<sup>5)</sup>により推定した。

### 3.4 実験結果および考察

#### (1) 荷重-CMOD 曲線

図-6に切欠きはりの 3 点曲げ載荷試験で得られた荷重-CMOD 曲線を示す。図には、供試体 5 体の平均曲線を示した。溶融スラグ粗骨材を使用したコンクリートの荷重-CMOD 曲線の方が、普通骨材コンクリートよりも最大荷重以降の荷重低下が緩やかになる傾向を示している。特に、いずれの水セメント比においても置換率 100%のコンクリートでその傾向が顕著に認められた。

#### (2) 破壊エネルギーと引張軟化曲線

図-7に荷重-CMOD 関係から求めた破壊エネルギーと

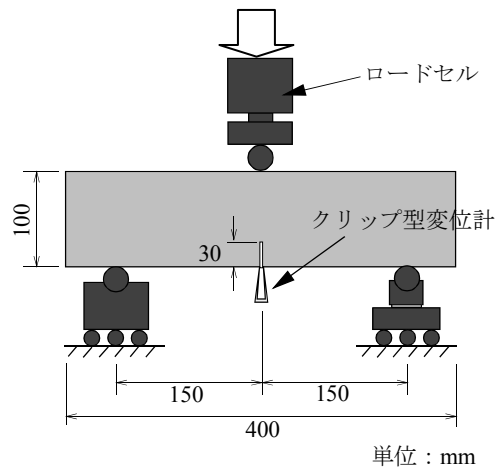


図-5 荷重試験の概要図

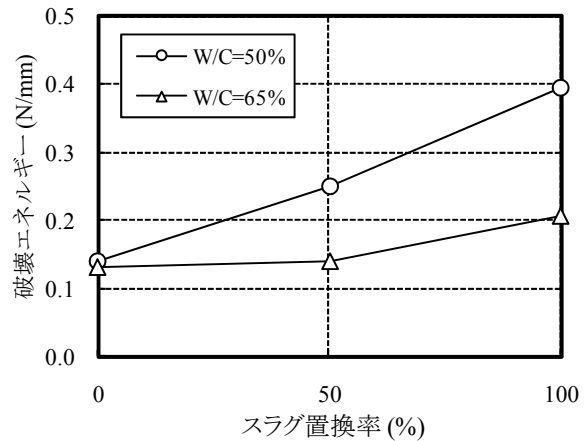
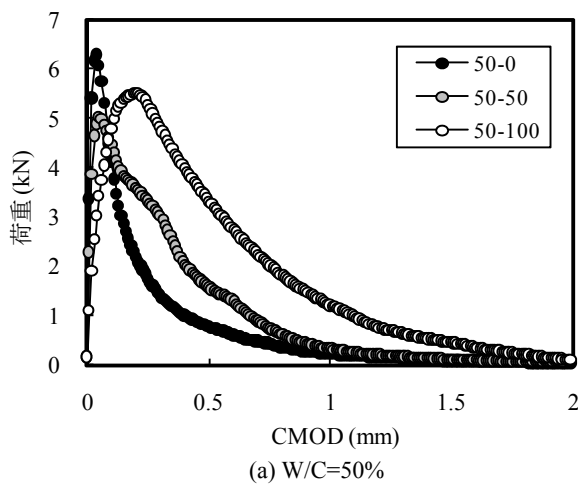
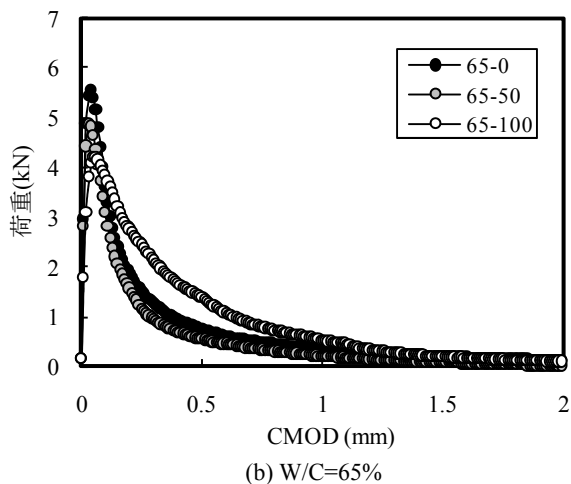


図-7 破壊エネルギーとスラグ置換率の関係



(a) W/C=50%



(b) W/C=65%

図-6 荷重-CMOD 曲線

スラグ置換率の関係を、図-8には荷重-CMOD 曲線から多直線近似解析法により推定された引張軟化曲線を示す。各水セメント比において、熔融スラグの置換により、破壊エネルギーは明確に増加している。また、引張軟化曲線についても、軟化開始後からスラグ置換率の大きいほど応力低下が緩やかになる傾向が確認された。

写真-2 に破壊エネルギー試験後の供試体破断面の一

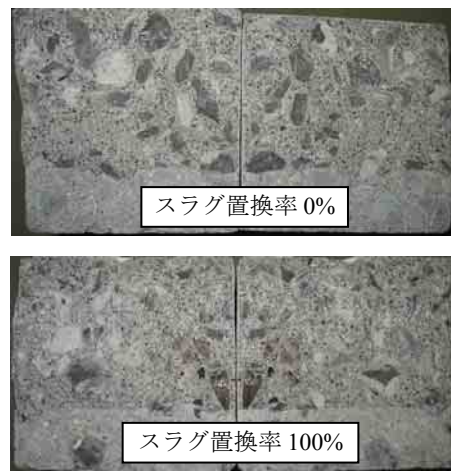
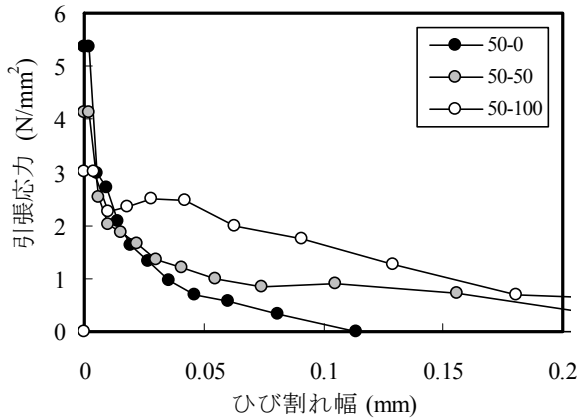


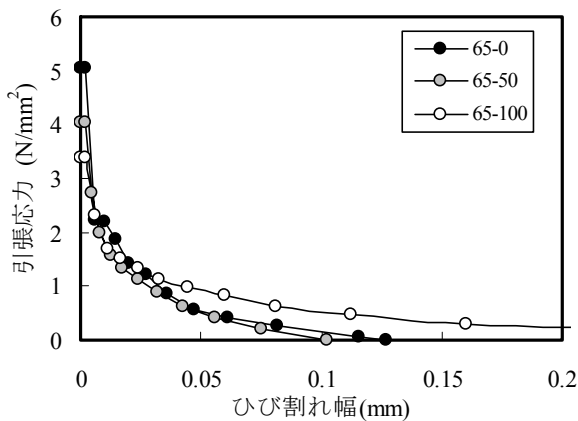
写真-2 供試体破断面 (破壊エネルギー試験後)

例を示す。ここでは、置換率 0%と 100%の供試体断面を示す。既往のスラグでは骨材強度が小さいため、曲げ強度あるいは割裂引張強度試験後の供試体破断面を観察すると、骨材とモルタルの界面ではなく、熔融スラグ骨材自体が割れを生じていた。これに対して、本実験では、熔融スラグを 100%置換したコンクリートの破断面は、写真に示すように骨材とモルタル界面で破断している部分が多く、碎石のみを用いた 0%置換のコンクリート破断面と差異は観察されなかった。

コンクリートにおける破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学特性は、粗骨材の種類や物性、粒形などに影響を受けることが知られている。骨材の種類に着目した既報告<sup>6),7),8)</sup>から、骨材自体の品質に優れる碎石の方が、熔融スラグより破壊エネルギーが大きくなると予想された。しかし、本実験で使用した熔融スラグ粗骨材では、碎石を用いた場合よりも破壊エネルギーが大きくなり、置換率が大きい場合にその影響が顕著である。本実験で対象とした熔融スラグは、既往の熔融スラグ<sup>3)</sup>と比較して粒子形状や粒度に差はないが、粒子表面に光沢はなく複雑な凹凸の表面形状を有しており、写真-3に示



(a) W/C=50%



(b) W/C=65%

図-8 引張軟化曲線



写真-3 溶融スラグ表面拡大写真

すように表面に 1~2mm 程度の気泡を多く含んでいた。その結果、溶融スラグとモルタルとの付着面積が確保され界面付着が良好となり、破壊エネルギーや引張軟化曲線、さらには強度発現に寄与したものと推察される。

本実験の溶融スラグが既往のものと比較して骨材強度、表面形状や気泡などの外観が大きく異なる原因としては、溶融設備や冷却方式の違いなど様々な要因が考えられ、さらに今後の検討を要する。

#### 4. まとめ

本実験で対象とした溶融スラグは、密度が小さく JIS 規格を満足していない。しかし、すりへり減量や破砕値

は既往のスラグに比べ小さく、粗骨材として使用したコンクリートは、強度や耐久性に優れ、砕石を使用した場合と同等以上の性能を発揮することが確認された。また、砕石を用いたコンクリートに比べて破壊エネルギーが大きくなることも確認した。

下水汚泥溶融スラグについては、2006年に「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材(JIS A 5031)」として標準化された。スラグの置換率は30%以下を標準として推奨されており、その物理的性質としては、絶乾密度や吸水率、実積率などが規定されている。今後、溶融スラグの密度や吸水率といった性質だけでなく、強度や付着性状に関係する指標も含めて溶融スラグを分類し、適用範囲を定めることが用途拡大に向け必要であると考えられる。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、滋賀県土木コンクリートブロック協同組合および滋賀県東北部浄化センターのご協力を得た。ここに記して、厚く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 滋賀県・(財)滋賀県下水道公社：下水汚泥スラグ有効利用マニュアル，2003.3
- 2) 滋賀県：滋賀県骨材需給基本計画に関する行動計画，2003.4
- 3) 武田字浦，久保田純司，高木宣章，児島孝之：下水汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.101-106，2006.7
- 4) 武田字浦，三浦弘明，岡本享久，児島孝之：下水汚泥溶融スラグを用いたコンクリートの強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.451-456，2008.7
- 5) 橘高義典，上村克郎，中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文集，No.453，pp.15-25，1993.11
- 6) 小野博宣，大岸佐吉：コンクリートの破壊靱性( $K_{IC}$ ， $G_{IC}$ ， $J_{IC}$ )に及ぼす骨材種別の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.403-408，1988.6
- 7) 橘高義典，上村克郎，高瀬憲克：高強度コンクリートのボルト引抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.245-250，1991.6
- 8) 石黒覚：各種骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.139-144，1998.6