

論文 下水汚泥溶融スラグを用いたコンクリートの強度特性

武田 宇浦*1・三浦 弘明*2・岡本 享久*3・児島 孝之*4

要旨：下水汚泥溶融スラグの利用拡大を目的に、下水汚泥溶融スラグを粗骨材として用いたコンクリートの圧縮強度、曲げ強度および引張強度試験結果より、砕石を用いた場合と同程度の特性の得られる置換率を推定した。特に、骨材界面の付着性状が物理的な物性に大きく影響することから引張軟化特性について考察を行い、強度に及ぼすメカニズムにも考察を加えた。その結果、下水汚泥溶融スラグ粗骨材置換率を5～15%とすることで、普通コンクリートとほぼ同等の強度特性を得ることができると明らかとなった。

キーワード：下水汚泥溶融スラグ、粗骨材、置換率、引張軟化曲線

1. はじめに

1.1 社会的背景

下水道普及率の増加に伴い、下水処理の最終過程で発生する下水汚泥の発生量が増加している。この下水汚泥は、一般的に埋立処理がなされているが、埋立処分場の残存容量は限界に近く、新規処分場の確保も困難な状況となっている。持続可能な循環型社会形成に向け、様々な政策が取られているなか、下水汚泥のリサイクル率は7割にまで増えている。下水汚泥の有効利用方法の1つに、下水汚泥を溶融しスラグ化したものを建設資材として用いる方法がある。

天然資源の枯渇に伴い、骨材採取を取巻く状況が年々厳しくなり、骨材供給の先行きが懸念されている。このため、滋賀県では、2001年11月に「滋賀県骨材需給基本計画」を策定し、住宅・社会資本整備を着実かつ計画的に推進するために、良質な骨材を安定的に確保していくための基本方向と取組みの方針を示した。本計画の具体的取組みとして、湖中砂利採取廃止の具体的計画、採石場の立地計画、堆積土砂・発生土砂などの利用計画、再生骨材等の利用計画を挙げている。さらに、滋賀県湖南中部浄化センターで製造されている下水汚泥溶融スラグ（以下、汚泥スラグ）を、骨材として使用したコンクリート二次製品を優先的に使用することとしている。当初、同センターで製造された汚泥スラグは、細骨材としての利用が図られていたが、製造コストの問題から、粗骨材としての利用に転向した。このため、汚泥スラグの安定供給の確立が重要となっている。

1.2 既往の研究

図-1に過去に本学において行った汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度試験結果より圧縮強度と汚

泥スラグ置換率の関係を示す¹⁾。汚泥スラグ置換率25%のコンクリートは、置換率0%の普通コンクリートと比較して強度低下率が10%未満となったのに対し、置換率50%以上では置換率の増加に伴い10～20%の強度低下が観察された。このため、汚泥スラグ置換率を25%以下としたコンクリートの強度特性を確認することで、より広い範囲において汚泥スラグの利用が期待できる。

1.3 研究目的

本研究では、汚泥スラグをコンクリート用粗骨材として用いるために、砕石に置換して使用したコンクリートの物性について実験的検討を行った。特に、汚泥スラグ粗骨材の使用量（置換率）を低く設定したコンクリートに関する研究を行い、その後、切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験を実施することで、砕石を用いた普通コンクリートと比較し、汚泥スラグ粗骨材

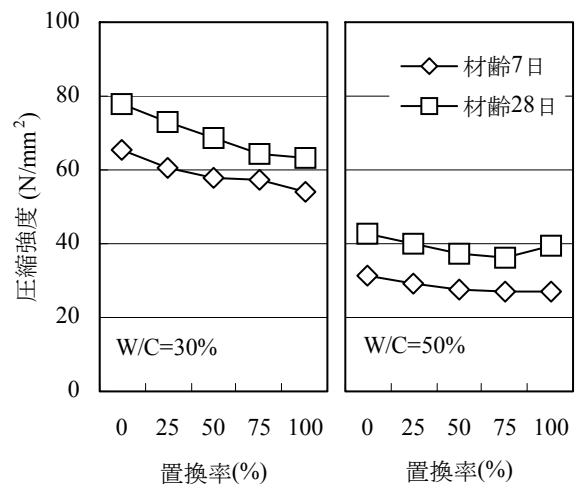


図-1 圧縮強度とスラグ置換率の関係¹⁾

*1 立命館大学 理工学部 助手 博士(工学) (正会員)

*2 立命館大学 理工学部 土木工学科

*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)

の利用可能性について言及する。

2. 汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度試験

2.1 概要

前述の、過去に行った、汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの力学的特性に関する研究成果より、汚泥スラグ置換率を25%以下としたコンクリートについて強度試験を行い、実用可能なスラグ置換率について明らかにする。

2.2 コンクリートの使用材料

表-1 に汚泥スラグ粗骨材を用いた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、細骨材に川砂、粗骨材に砕石および汚泥スラグを用いた。また、混和剤として、水セメント比 (W/C=) 30%のコンクリートにはポリエーテル系の高性能 AE 減水剤、W/C=50%のコンクリートにはリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を使用した。

本実験で使用した汚泥スラグは、滋賀県湖南中部浄化センター汚泥溶融設備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（石灰系汚泥）を循環流動層熱分解炉および立体型巡回式溶融炉により約 1400～1500℃で加熱溶融し自然に冷却したもので、粒径 5～20mm のものを使用した。空冷スラグはガラス質の塊状である¹⁾が、冷却速度が遅いと一部結晶化が進むため、

一般的に、急冷スラグに比べ骨材強度が大きいという特長をもっている。

表-2 に汚泥スラグ粗骨材の物性値と JIS 規格値の比較を示す²⁾。汚泥スラグの表乾密度・絶乾密度、吸水率は、砕石と比較して小さく JIS 規格値を満足していた。しかし、すりへり減量は 43.6%、破砕値は 41.1%となり、砕石に比べ強度が低い骨材である。骨材強度の低い原因の1つに、汚泥スラグは非常に脆く、とがった形状を有するものが多いことが影響していると考えられる。

2.3 コンクリートの示方配合

表-3 に汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの示方配合を示す。W/C は 30、50%の2水準とし、W/C=30%のとき目標スランブを 18±2cm、W/C=50%のとき目標スランブを 7.5±1cm、目標空気量は 4.5±1%とし混和剤使用量によって調整した。

スラグ置換率は、両水セメント比とも、0、5、15、25%（容積比）の4水準とした。

2.4 硬化コンクリートの試験方法

表-4 に硬化コンクリートの試験方法を示す。各配合で作製したコンクリートについて、圧縮強度、曲げ強度、引張強度を JIS 規格に準拠し測定した。供試体は、試験材齢まで標準水中養生を行った。

2.5 硬化コンクリートの強度試験結果および考察

(1) 圧縮強度試験結果

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 ³ ，比表面積：3260cm ² /g
細骨材(S)		川砂；表乾密度：2.61g/cm ³ ，吸水率：1.34%，F.M.=2.88
粗骨材	(G)	砕石；表乾密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：0.67%，F.M.=6.81，最大寸法：20mm
	(MG)	下水汚泥スラグ；表乾密度：2.75g/cm ³ ，吸水率：0.25%，F.M.=6.52 最大寸法：20mm
混和剤	W/C=30%	・高性能 AE 減水剤；カルボキシル基含有ポリエーテル系ポリカルボン酸 密度：1.03~1.10g/cm ³ ・AE 助剤(2%溶液)；密度：1.01~1.05g/cm ³
	W/C=50%	・AE 減水剤(25%溶液で使用)；リグニンスルホン酸化合物 密度：1.10g/cm ³ ・AE 助剤(1%溶液)；アルキルアシルスルホン酸化合物 密度：1.19g/cm ³

表-2 汚泥スラグ粗骨材の物性と規格値の比較²⁾

	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)	実積率 (%)	すりへり減量 (%)	破砕値 (%)
MG	2.65	2.60	0.25	1.52	58.5	43.6	41.1
G	2.70	2.68	0.70	1.61	60.1	11.4	15.1
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	---
規格 3	---	2.50 以上	3.00 以下	---	---	---	---

規格 1：JIS A 5301 (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及び砕砂) *：粒形判定実積率

規格 3：JIS A 5308 附属書 1(レディミクストコンクリート用骨材)

表-3 コンクリートの示方配合

配合名	スランプ (cm)	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					(高性能) AE 減水剤 (cc)	AE 助剤 (cc)
						W	C	S	G	MG		
30-0	18±2	30	0	4.5±1	41.2	170	566	651	963	0	3341	8494
30-5			5						915	49	3114	8154
30-15			15						818	147	3114	16988
30-25			25						722	245	3228	9060
50-0	7.5±1	50	0	4.5±1	45.2	170	340	798	1003	0	850	1699
50-5			5						953	51	510	1699
50-15			15						853	153	544	1699
50-25			25						753	255	204	1156

図-2 に圧縮強度と汚泥スラグ置換率の関係を示す。W/C=30%のコンクリートでは、材齢に拘らずスラグ置換率 0%と 5%の圧縮強度が同等となった。スラグ置換率 15%および 25%では、置換率 0%の普通コンクリートと比較して、材齢 28 日でそれぞれ約 4.5%および 8%の強度低下が観察された。

W/C=50%では、スラグ置換率 0%の普通コンクリートより圧縮強度が 10%程度低下したが、スラグ置換率 5~25%では、置換率の増加に拘らずほぼ同程度の圧縮強度となり、置換率の影響は観察されなかった。

汚泥スラグを用いたコンクリートの場合、W/C=30%ではスラグ置換率 25%、W/C=50%ではスラグ置換率 15%を上限とすることで、普通コンクリートの 90%以上の圧縮強度を確保できると推察できる。

(2) 曲げ強度試験結果

図-3 に曲げ強度と汚泥スラグ置換率の関係を示す。W/C=30%のコンクリートでは、材齢 7 日におけるスラグ置換率 15%の場合を除き、置換率に拘らず置換率 0%の普通コンクリートと同程度もしくは強度低下率 10%以内の曲げ強度が得られた。

一方、W/C=50%では、材齢 28 日における置換率 15%の供試体をのぞき、置換率に拘らず、材齢 7 日で 20~30%、材齢 28 日で約 15%の強度低下が確認された。

(3) 引張強度試験結果

図-4 に引張強度と汚泥スラグ置換率の関係を示す。水セメント比に拘らず、汚泥スラグ置換率の増加に伴い引張強度が低下した。材齢 28 日では、両水セメント比ともにスラグ置換率 15%までのコンクリートでは、置換率 0%の普通コンクリートの 90%の引張強度が確保できた。

(4) まとめ

水セメント比に拘らず、汚泥スラグ置換率を 25%としたコンクリートでは、最大で約 30%の強度低下が確認された。しかし、汚泥スラグ置換率 15%程度までであれば、若干の傾向の違いはみられるものの、普通コンクリートの 90%以上の強度が確保できたことから、本実験で使用している汚泥スラグ骨材は、汚泥スラグ置換率 15%程度

表-4 硬化コンクリートの試験方法

項目	試験方法	供試体(cm)
圧縮強度	JIS A 1108	φ 10x20
曲げ強度	JIS A 1106	10x10x40
引張強度	JIS A 1113	φ 15x15

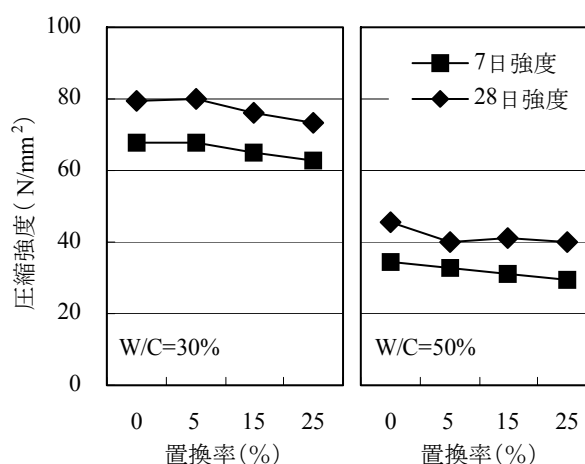


図-2 圧縮強度と汚泥スラグ置換率の関係

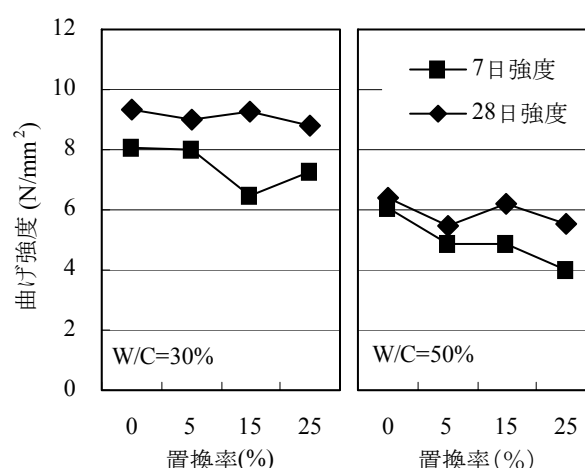


図-3 曲げ強度と汚泥スラグ置換率の関係

までが妥当であると言える。

3. 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験

3.1 概要

2章の汚泥スラグ粗骨材を用いた硬化コンクリートの強度試験結果において、汚泥スラグ置換率の影響が明確に確認しづらいのは、骨材界面の付着性状が、汚泥スラグ骨材強度や表面形状、破断面に存在する汚泥スラグ粗骨材の分布が異なることなどが影響していると推察される。そこで、各種強度試験結果より、普通コンクリートの90%の強度を確保できた、汚泥スラグ置換率15%までのコンクリート供試体について、切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験を行う。本実験結果より、コンクリート中での骨材界面および汚泥スラグ骨材自体のひび割れ抵抗性について確認する。

3.2 破壊エネルギー試験用コンクリートの使用材料

表-5 に破壊エネルギー試験用コンクリートの使用材料を示す。川砂の産地、混和剤として両水セメント比とも同一の高性能 AE 減水剤および AE 助剤を用いた点以外は、2章で用いた材料と同じである。

3.3 破壊エネルギー試験用コンクリートの示方配合

表-6 に破壊エネルギー試験用コンクリートの示方配合を示す。2.5 節の強度試験結果より、汚泥スラグ置換率は、普通コンクリートの強度の90%以上を確保できた、0, 5, 15%の3水準とした。供試体は、打設翌日脱型後試験2日前まで標準水中養生を行い、コンクリートカッターで切欠きを設けた後、気中養生を行った。

3.4 切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法

(1) 载荷方法

図-5 に、破壊エネルギー試験の载荷方法を示す。載

荷方法は3等分点载荷(せん断スパン10cm, 曲げスパン10cm)とした。供試体下面中央部には、コンクリートカ

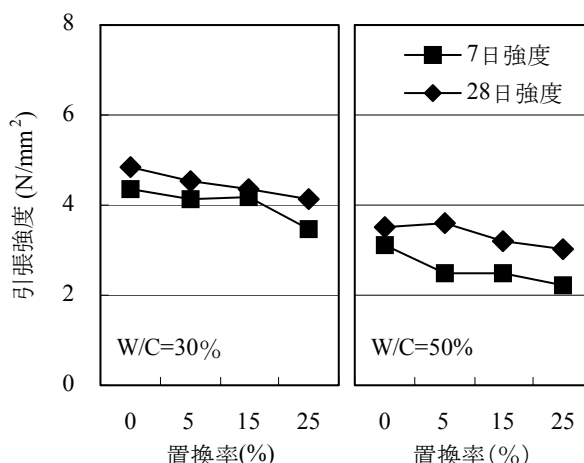


図-4 引張強度と汚泥スラグ置換率の関係

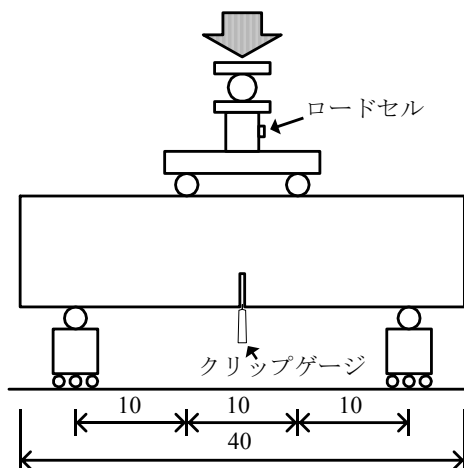


図-5 载荷方法

表-5 破壊エネルギー試験用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 ³ , 比表面積: 3260cm ² /g
細骨材(S)	川砂; 表乾密度: 2.62g/cm ³ , 吸水率: 1.0%, F.M.=2.84
粗骨材	(G) 碎石; 表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率: 0.67%, F.M.=6.81, 最大寸法: 20mm
	(MG) 下水汚泥スラグ; 表乾密度: 2.75g/cm ³ , 吸水率: 0.25%, F.M.=6.52 最大寸法: 20mm
混和剤	・高性能 AE 減水剤; カルボキシル基含有ポリエーテル系ポリカルボン酸 密度: 1.03~1.10g/cm ³ ・AE 助剤(2%溶液); 密度: 1.01~1.05g/cm ³

表-6 破壊エネルギー試験用コンクリートの示方配合

配合名	スランプ(cm)	W/C (%)	スラグ置換率 (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 (cc)	AE 助剤 (cc)
						W	C	S	G	MG		
30-0	18±2	30	0	4.5±1	41.0	170	566	650	966	0	5096	8494
30-5			5						918	49	3964	6795
30-15			15						821	148	4530	5096
50-0	7.5±1	50	0	4.5±1	45.0	170	340	798	1007	0	1665	1292
50-5			5						957	51	2039	1088
50-15			15						856	154	1869	0

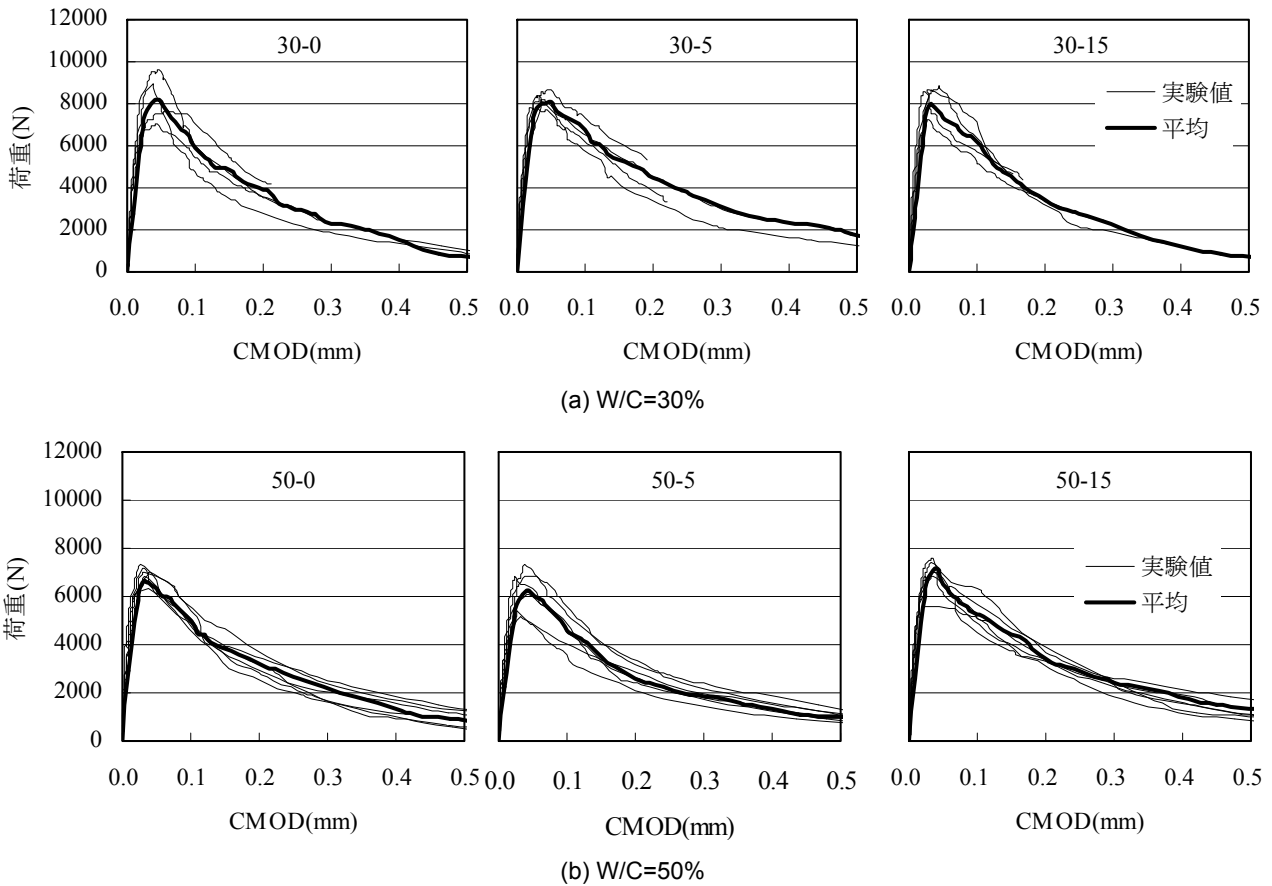


図-6 荷重-CMOD 曲線

ッターにより深さ 3cm の切欠きを設けた。荷重は、スクリージャッキを用いて行い、荷重、供試体下面の切欠き開口変位 (CMOD) を、ロードセルおよびクリップゲージを用いて測定した。

(2) 算定方法

破壊エネルギーは (G_f)、荷重-CMOD 曲線の測定結果から、曲線で囲まれる面積 (W_0) を数値積分により求め、式(1)より算出した。

$$G_f = W_0 / A_{lig} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 A_{lig} はリガメント部の面積とした。また、今回は供試体の自重、治具の質量は考慮しないこととした。

引張軟化曲線は、JCI-S-001-2003 付属書 (参考)「コンクリートの引張軟化曲線の推定方法」および橋高らの多直線近似解析手法³⁾を参考に推定した。

3.5 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結果および考察

(1) 荷重-CMOD 曲線

図-6 に実験より得られた荷重-CMOD 曲線を示す。実験値を細い実線、その平均値を太い実線で示した。平均化の処理の際、破断に至る途中までしか実験値が計測できていないものについては、実験値が得られた箇所までを平均化し、それ以降は除外した。

計測結果に大きなばらつきは観察されず、スラグ置換率の増加に拘らず同様の荷重-CMOD 曲線を示した。

表-7 汚泥スラグを用いたコンクリートの破壊特性

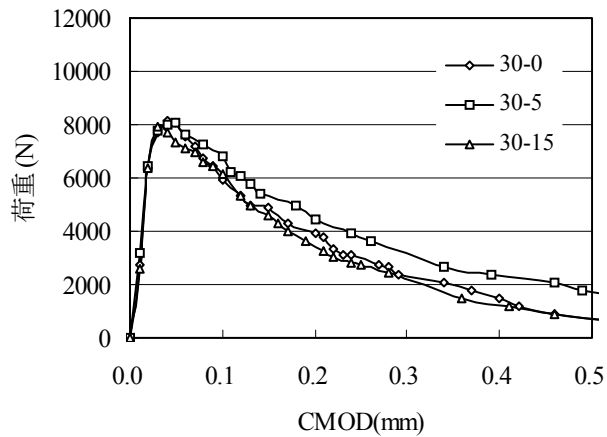
配合名	曲げ強度 1 ^{*1} (N/mm ²)	曲げ強度 2 ^{*2} (N/mm ²)	破壊エネルギー (N/m)
30-0	8.56(1.00) ^{*3}	5.13(1.00)	0.28(1.00)
30-5	9.33(1.09)	4.81(0.94)	0.34(1.20)
30-15	9.21(1.08)	5.01(0.98)	0.24(0.84)
50-0	6.09(1.00)	4.12(1.00)	0.28(1.00)
50-5	6.11(1.00)	3.10(0.75)	0.25(0.92)
50-15	5.58(0.92)	4.12(1.00)	0.30(1.09)

*1 : JIS A 1106 に準拠した曲げ強度試験結果
 *2 : 平均曲線の最大値から算出した曲げ強度
 *3 : ()内は置換率 0%に対する各値の比

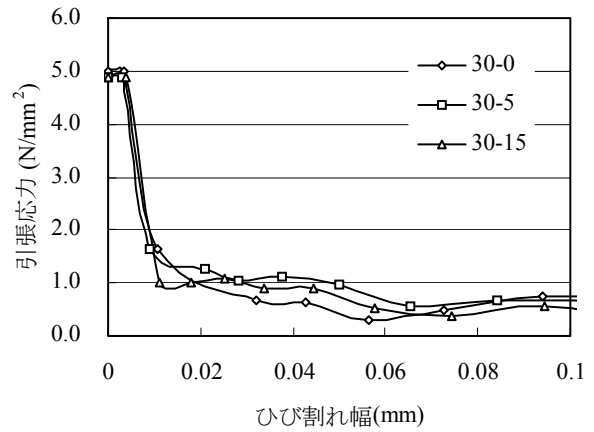
荷重試験終了後、破断面を観察すると、荷重-CMOD 曲線が平均値より上回っていた供試体断面では、汚泥スラグ骨材内部をひび割れが通り、骨材がほぼ半分に分れていた。一方、平均値より下回った供試体では、ひび割れが汚泥スラグ骨材端部を通り破断していた。このため、汚泥スラグ置換率だけでなく、コンクリート中の汚泥スラグ骨材の分布も、コンクリートの強度に影響していると推察できる。

(2) 破壊エネルギー

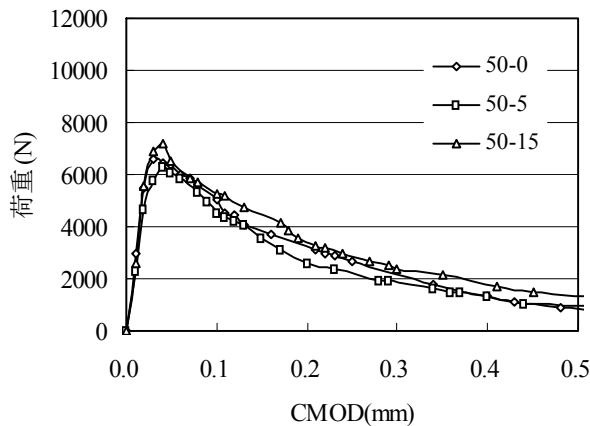
表-7 に汚泥スラグを用いたコンクリートの破壊特性



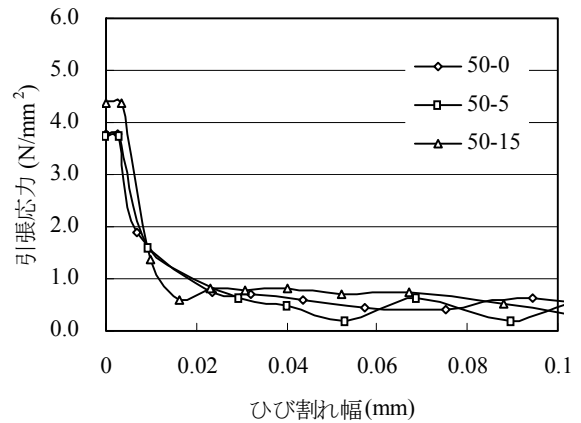
(a) 荷重-CMOD 曲線 (平均値) ; W/C=30%



(b) 引張軟化曲線 ; W/C=30%



(c) 荷重-CMOD 曲線 (平均値) ; W/C=50%



(d) 引張軟化曲線 ; W/C=50%

図-7 荷重-CMOD 曲線および引張軟化曲線

を示す。水セメント比の違いによる、曲げ強度および破壊エネルギーの差が観察された。しかし、汚泥スラグ置換率に拘らず、スラグ置換率 0%の普通コンクリートと同様の曲げ強度および破壊エネルギーを示し、置換率の増加に伴う影響は観察されなかった。

(3) 引張軟化曲線

図-7に荷重-CMOD 曲線および引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線は、各配合の荷重-CMOD 曲線の平均値を用いて解析を行った。引張軟化曲線は、スラグ置換率に拘らずほぼ同様の概形を示した。

(4) まとめ

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結果より、汚泥スラグ置換率 15%までであれば、普通コンクリートと同様の引張軟化曲線を示し、同等に扱える可能性が示唆された。

4. 結論

以上の、汚泥スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度試験結果、および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結果より、汚泥スラグ置換率を 15%以下とすることで、普通コンクリートと同様の強度特性を得ることができることが明らかとなった。

平成 20 年度の滋賀県内における骨材需給量は、530～580 万 t と予測されている⁴⁾。現在、湖南中部浄化センターから製造される汚泥スラグは年間約 6000t であり、骨材需給量に対して 5%～15%の置換率であれば、十分に使用し切れる量である。このため、本研究結果より、汚泥スラグ骨材を 100%再利用できると期待できる。

謝辞

きり欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験実施に当たり、名古屋大学 国枝稔准教授の御指導をいただいた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 滋賀県、(財)滋賀県下水道公社：下水汚泥溶解スラグ有効利用マニュアル、p.4
- 2) 武田字浦，高木宣章，児島孝之他：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
- 3) 橋高義典，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報告集，No.453，pp.15-25，1993.11
- 4) 滋賀県土木交通部：滋賀県骨材需給基本計画，2005.5