

論文 産業廃棄物溶融スラグのレディーミクストコンクリートへの適用性

草薙 悟志^{*1}・三浦 正純^{*2}・堺 孝司^{*3}・中村 俊之^{*4}

要旨：産業廃棄物溶融スラグを有効利用することを目的に、スラグをレディーミクストコンクリートに用いた場合の品質・製造、無筋および鉄筋コンクリートに用いた場合の施工性・耐荷性に関する検討を行った。影響因子として、室内基礎試験により溶融スラグおよびスラグ混入コンクリートの基本的な性質を、実機評価試験および重力式擁壁のフィールド試験によりスラグ混入レディーミクストコンクリートの製造・品質・施工性を、RC床版橋の載荷試験により耐荷性を評価した。その結果、適切な配合と置換率を用いたスラグコンクリートは、スラグを用いないコンクリートとほぼ同等の品質・耐荷性を有すること、スラグをレディーミクストコンクリートに適用できること、等が明らかになった。

キーワード：産業廃棄物溶融スラグ、レディーミクストコンクリート、製造、施工、品質、耐荷力

1. はじめに

香川県では、豊島産業廃棄物等の焼却・溶融処理により発生した溶融スラグ（以下豊島スラグと記す）を有効利用することを目的に、豊島スラグの利用に関する評価試験や利用マニュアル・利用計画の策定を行い、平成16年度から無筋コンクリート構造物や小型プレキャスト製品への利用が実施に移されている。

本文では、直島中間処理施設で生成された豊島スラグを用いたコンクリートに関する評価試験の概要とレディーミクストコンクリートへの適用性に関する検討結果について述べる。

2. 評価試験の経緯と豊島スラグの利用状況

評価試験の概要と豊島スラグの利用状況を図-1に示す。

現在、豊島スラグは、スラグの基本特性試験を終え、直島中間処理施設における安全性検査および品質検査をクリアしたスラグのみが県内3箇所のスラグヤードに出荷されている。

無筋コンクリートへの利用は、評価試験（室内基礎試験、実機評価試験、フィールド試験）を終え、製品試験やパイロット工事を経て、砂防ダムや重力式擁壁などの無筋構造物、インターロッキングブロックや舗装用平板などの小型プレキャスト製品に用いられている。

鉄筋コンクリート構造物や大型のプレキャスト製品への利用は、評価試験（RC梁の耐荷試験、RC床版橋のフィールド試験および耐荷試験、RCプレキャスト製品試験）を終え、橋梁や逆T型擁壁などのRC構造物、ボックスカルバートやL型擁壁などのRCプレキャスト製品への利用を予定している。

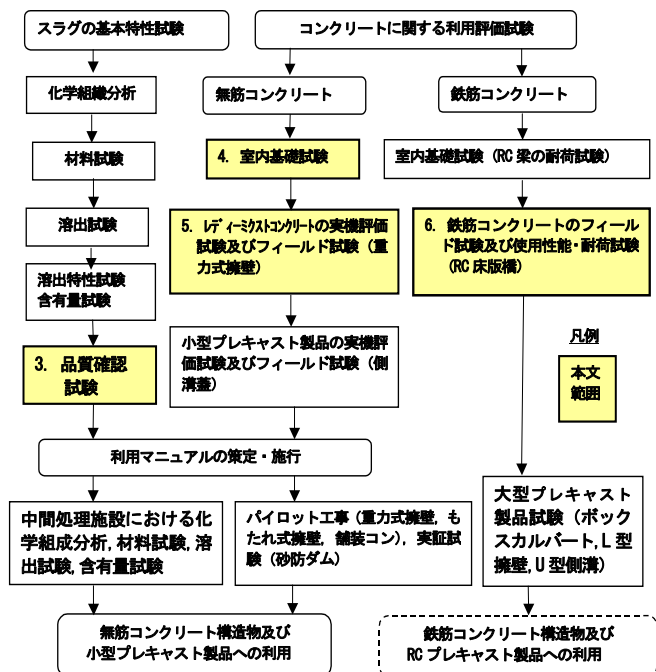


図-1 コンクリートに関する評価試験と利用の流れ

3. 豊島スラグの細骨材としての品質

(1) 化学成分、物理的性質、アルカリシリカ反応性

豊島スラグの化学成分および物理的性質を一般廃棄物溶融スラグ¹⁾と比較して表-1に示す。

豊島スラグの化学成分は、一般廃棄物溶融スラグと同様にSiO₂、CaO、Al₂O₃を主成分としているが、SiO₂が約50%を占めているのが特徴である。また、豊島スラグの物理的性質は、絶対密度が一般廃棄物溶融スラグよりもやや大きいものの、他の値は一般廃棄物溶融スラグよりも小さい。

*1 ㈱四電技術コンサルタント 土木技術部部长 (正会員)

*2 ㈱四電技術コンサルタント 土木技術部土木設備グループGL 工博 (正会員)

*3 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

*4 香川県 小豆総合事務所河川港湾課副主幹

このように、豊島スラグの化学成分・物理的性質は一般廃棄物溶融スラグとほぼ同等であり、溶融スラグ骨材のJIS規格値を満たしていること、アルカリシリカ反応性は無害であることなど、溶融スラグ骨材としての品質を満足している。

(2) 有害物質の溶出量、含有量

豊島スラグの溶出試験および含有量試験結果を表-2に示す。鉛の含有量がやや多いものの、有害物質の溶出量基準および含有量基準を全て満足し、環境に対する安全性に問題はない。

(3) 膨脹性

溶融スラグに含まれる金属アルミニウムは、コンクリート中のアルカリ水溶液と反応して水素ガスを発生し、コンクリートを膨脹させる。アルカリ溶液中の豊島スラグの発泡状況（水素をガス検知管で確認）を写真-1に、スラグ100%モルタルの練り混ぜ時に採取した発生ガスの成分分析結果を表-3に示す。回収ガス中の2/3は空気（酸素、窒素）、残りの1/3は水素であった。

また、スラグヤードの3区画から定期的に採取した豊島スラグの膨脹率測定結果の1例を図-2に示す。全区画のスラグは1~3ヶ月後に0.3%以下の膨脹率となり、これは金属アルミニウム表面の不活性化（降雨や酸素の作用によりアルミニウム表面に酸化被膜が形成される）によるものと考えられる。

これらの試験結果から、練混ぜ時の水素発生とそれに伴うコンクリートの膨脹・品質低下対策として、直島中間処理施設で製造した豊島スラグをスラグヤードで3ヶ月程度エージングし、膨脹率が0.5%未満のスラグ骨材を出荷することとした。

表-1 溶融スラグの化学成分、物理的性質の比較

試験項目	単位	豊島溶融スラグ	一般廃棄物溶融スラグ ¹⁾	JIS規定値	
化学成分	SiO ₂	%	51.0	34.6	—
	CaO	%	18.8	25.4	—
	Al ₂ O ₃	%	10.9	16.4	—
	Fe ₂ O ₃	%	8.8	5.8	—
	Na ₂ O	%	3.8	3.0	—
	K ₂ O	%	3.2	1.0	—
	CuO	%	2.0	—	—
	MgO	%	1.3	2.5	—
化学規定成分	酸化カルシウム CaO	%	19.1~23.0	25.4	45.0以下
	全硫黄 S	%	0.07~0.18	—	2.0以下
	三酸化硫黄 SO ₃	%	<0.01~0.17	—	0.5以下
	金属鉄 Fe	%	0.06~0.54	—	1.0以下
物理的性質	ふるい分け(F.M)	—	2.67~2.89	—	—
	吸水率	%	0.08~0.15	0.68	3以下
	絶乾密度	g/cm ³	2.77~2.85	2.77	2.5以上
	微粒分量	%	0.52~1.20	2.34	7.0以下
	粒形判定実積率	%	53.8~54.3	55.4	53以上
	安定性	%	0.5~1.6	2.15	10以下
	試験方法	規格	試験時のJIS他分析・測定方法	JIS A 5031	
アルカリシリカ反応	—	無害	—		
試験方法	規格	JIS A 5308附属書8(モルタルバー法)			

表-2 豊島スラグの有害物質の溶出量および含有量

項目	単位	溶出量	溶出量基準	単位	含有量	含有量基準
カドミウム(Cd)	mg/L	<0.001	0.01以下	mg/kg	<0.1	150以下
鉛(Pb)	mg/L	<0.005	0.01以下	mg/kg	83	150以下
六価クロム(Cr ⁶⁺)	mg/L	<0.005	0.05以下	mg/kg	<0.2	250以下
ヒ素(As)	mg/L	<0.001	0.01以下	mg/kg	0.6	150以下
総水銀(T-Hg)	mg/L	<0.0005	0.0005以下	mg/kg	<0.01	15以下
セレン(Se)	mg/L	<0.001	0.01以下	mg/kg	<0.1	150以下
ふっ素(F)	mg/L	<0.1	0.8以下	mg/kg	13	4000以下
ぼう素(B)	mg/L	<0.1	1.0以下	mg/kg	169	4000以下
試験方法	規格	環境庁告示第46号	規格	環境庁告示第19号		

表-3 スラグ混入モルタル練混ぜ時の発生ガス分析結果

成分	濃度
水素	35.20%
酸素	13.30%
窒素	50.20%

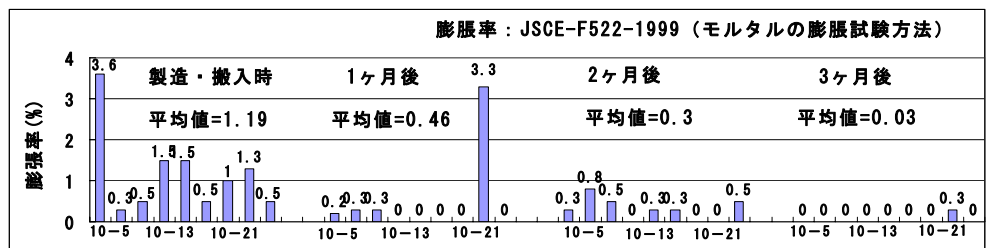


図-2 豊島スラグの膨脹率とエージング試験結果

4. スラグ混入コンクリートの基本的性質

中間処理施設と同等の処理方式で生成された試験スラグ、直島中間処理施設（表面溶融炉）の試運転期間において生成された試運転スラグおよび供用後のスラグを用いた室内基礎試験を行い、スラグ混入コンクリートのフレッシュ性状、硬化コンクリートの性状など基本的な性質を把握した。室内基礎試験の配合とフレッシュ性状を表-4に示す。

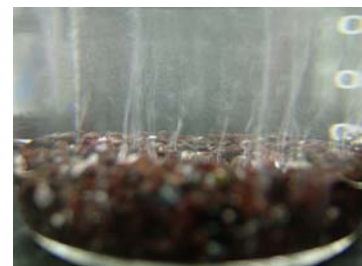


写真-1 アルカリ溶液中の豊島スラグの発泡状況

表-4 室内基礎試験の配合とフレッシュ性状

分類	配合条件	スラグ置換率 (%)	粗骨材の最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリージング量 (cm ³ /cm ²)	備考	
						セメント	水	細骨材		混和剤						
								砕砂・海砂	豊島スラグ	高性能減水剤	AE剤					
試験スラグ	45-00	0	20	45	44.1	378	170	757	0	960	3.02	1.70	10.0	3.8	0.06	普通ポルトランドセメント
	45-80	80						167	666		1.51	0.94	12.0	5.9	0.13	
	50-00	0	20	50	45.1	340	170	788	0	960	2.38	1.53	12.0	5.2	0.07	
	50-70	70						257	599		1.02	0.85	11.5	4.5	0.20	
試験転スラグ	45-00	0	20	45	44.1	378	170	754	0	971	3.21	1.32	11.0	4.4	0.07	普通ポルトランドセメント
	45-40	40						461	307		2.46	1.13	12.0	4.5	0.09	
	50-00	0	20	50	45.1	340	170	785	0	971	3.57	1.19	9.5	5.1	0.08	
	50-40	40						480	320		2.38	1.02	11.0	4.5	0.13	
	55-00	0	20	55	45.9	309	170	810	0	971	2.78	1.08	10.5	4.1	0.16	
	55-20	20						654	163		2.63	0.93	11.0	4.3	0.17	
55-40	40	495						330	2.47		0.77	9.5	4.2	0.20		
供用スラグ	室内A	0	40	58	39.0	241~262	140~152	713~738	0	1141~1173	-	2.41~2.62	5.0~6.0	4.0~5.8	-	高炉セメントB種
	室内B	30				241~257	140~149	500~516	238~243	1149~1173	-	2.41~2.57	4.5~6.0	3.9~5.6	-	
	室内C	30				40.5	262	152	524	241	1169	-	0.52	-	-	

(1) 土木建築材料の品質

土木・建築用材料としてのコンクリートの品質目標と試験スラグおよび試験転スラグを用いた試験値の関係を表-5に、乾燥収縮率の試験結果と品質目標値を図-3に、耐久性指標の試験結果と品質目標値を図-4に、中性化の試験結果と品質目標値を図-5に示す。図表中の配合条件の左記は水セメント比を、右記はスラグ置換率を表している。なお、土木の品質目標値はコンクリート標準示方書〔施工編〕2002から、建築の品質目標は標準仕様書（JASS5）に品質目標が明記されていないため、高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）1991から引用した。

これらの図表より、適切なスラグ置換率を用いたコンクリートの長さ変化はスラグ非混入コンクリートよりも小さくなる傾向にあり、耐凍害性および中性化にも特別な問題は発生しないことがわかった。なお、スラグ未混入コンクリート（55-0）の相対動弾性係数の低下原因はわからないが、これは砕砂の吸水率（2.22%）とスラグの吸水率（1.34%）の違いによるものかもしれない。

表-5 コンクリートの品質目標と試験値

品質項目	品質目標		試験結果	
	土木学会	建築学会	水セメント比-スラグ置換率	
ブリージング (cm ³ /cm ²)	-	0.3以下	45~55-0	45~55-20, 40
乾燥収縮率	-	7×10 ⁻⁴ 以下(6ヶ月)	9.9×10 ⁻⁴	(8.2~8.6)×10 ⁻⁴
耐久性指標	60~85以上	85以上(300サイクル)	61	87~89
中性化(mm)	-	25以下(6ヶ月)	7.9	5.4~15.9

(2) 圧縮強度, 引張強度

供用スラグを用いたスラグ混入（置換率 30%）および非混入コンクリートの圧縮強度, 引張強度と材齢の関係を一般的なコンクリート（コンクリート標準示方書〔施工編〕）と比較して図-6, 7に示す。

スラグ混入コンクリートの材齢 3日・7日の圧縮強度および引張強度は、スラグ非混入コンクリートとほぼ同等の強度であるが、材例 28日ではスラグ非混入コンクリートよりも 10%程度小さくなった。また、

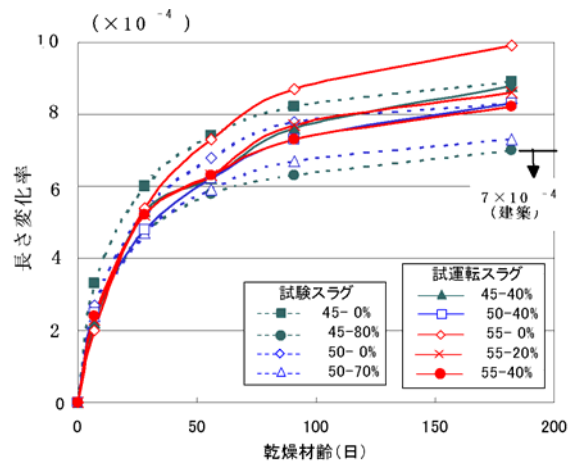


図-3 材齢と長さ変化の関係

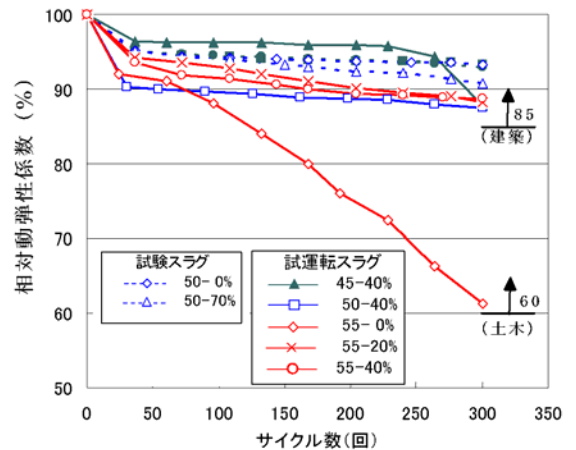


図-4 サイクル数と相対動弾性係数の関係

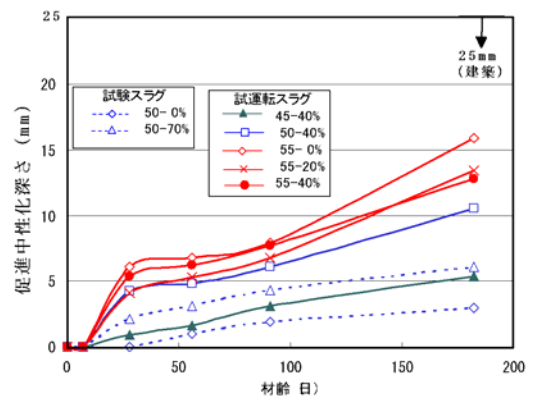


図-5 材齢と促進中性化深さの関係

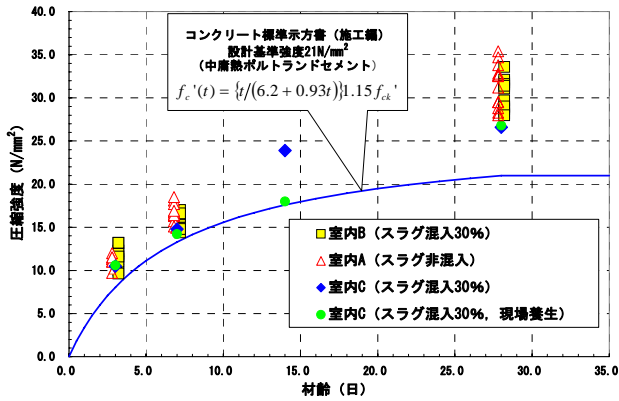


図-6 スラグ混入・非混入コンクリートの圧縮強度と材齢

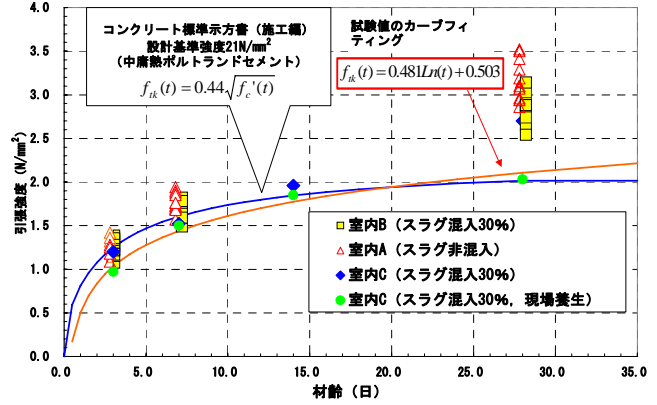


図-7 スラグ混入・非混入コンクリートの引張強度と材齢

弱材齢（3日・7日）の引張強度には、スラグ混入・非混入コンクリートともに一般的なコンクリートよりも小さい値が見られた。なお、引張/圧縮強度比は、スラグ混入・非混入コンクリートともに1/9~1/12であった。

(3) 静弾性係数

供用スラグを用いたスラグ混入コンクリート（置換率30%）の静弾性係数と材齢の関係を図-8に示す。試験値は一般的なコンクリートよりもかなり大きい値となったが、フィティング式の形状は類似している。

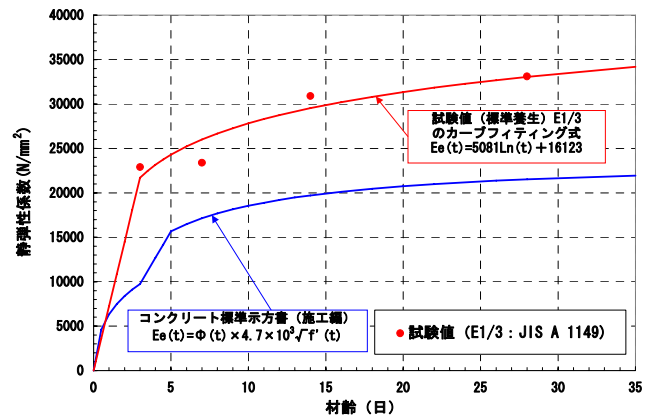


図-8 スラグ混入コンクリートの静弾性係数と材齢

5. 無筋コンクリートの実機評価試験、フィールド試験

室内基礎試験に基づいて、生コンプラント2社における実機練りと重力式擁壁を用いたフィールド試験を実施した。レディーミクストコンクリートの配合とフレッシュ性状を表-6に、フィールド試験の状況を写真-2に示す。

(1) フレッシュ性状

豊島スラグを20~40%混入したレディーミクストコンクリートは、ワーカビリティも良好であり、30分経過後の空気量・スランプロスも小さいこと、ブリージング量・凝結時間ともに大きな差はないことなど、プレーンコンクリート（JISコンクリート）とほぼ同等の性状であった。

(2) 硬化コンクリートの強度

レディーミクストコンクリートのプラント出荷時、現場打設時のテストピースおよび擁壁から採取したコアの圧縮



写真-2 フィールド試験の施工および脱型後の状況

表-6 無筋用レディーミクストコンクリートの配合とフレッシュ性状

分類	ケースNo.	細骨材組合せ		粗骨材最大寸法Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率s/a (%)	単位量(kg/m³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)	ブリージング量 (cm³/cm²)	凝結時間	備考				
		種類	スラグ置換率				セメント	水	細骨材			粗骨材							混和剤			
									粗砂	細砂	豊島スラグ	4020							2015	1505	AE減水剤	AE剤
試験その1	1	海砂(粗砂60%, 細砂40%)	0%	40	57	40.1	272	155	436	291	0	506	339	281	C×1.0 2.72	8.0A 21.76	9.5 (8.0)	4.1 (3.6)	19.5 (20.0)	0.191	3:50	高炉セメントB種 フレッシュコンクリート結果の()内数値は30分経過後の値
	2		20%						349	232	159						11.0 (10.0)	5.1 (4.3)	20.0 (20.1)	0.200	3:50	
	3		30%						306	201	240						11.0 (9.0)	5.6 (5.6)	19.9 (20.0)	0.210	3:55	
	4		40%						263	173	318						12.0 (9.0)	5.9 (3.6)	20.5 (23.2)	0.203	3:40	
試験その2	1	花崗岩砕砂	0%	20	50	42.0	348	174	739	0	-	514	511	C×0.2 0.696	3.5A 12.18	12.0 (9.0)	4.4 (3.7)	22.4 (23.5)	0.218	2:20	設計基準強度=18N/mm²	
	2		20%						591	156						12.0 (9.0)	5.9 (3.7)	20.0 (20.5)	0.206	2:15		
	3		30%						517	234						12.0 (9.0)	5.9 (3.7)	20.0 (20.5)	0.184	2:20		
	4		40%						444	312						12.0 (9.0)	4.5 (3.7)	22.3 (23.5)	0.212	2:40		

強度を図-9に示す。置換率40%の圧縮強度がプレーンコンクリートよりも数%低下しているものの、実用上問題はなく、強度発現もプレーンコンクリートと同等である。

(3) 硬化コンクリートの安全性

実機評価試験時の暴露試験体から採取したコアの溶出試験では、豊島スラグの混入・非混入に係らず六価クロム以外の溶出は認められなかった。六価クロムについてもその値は溶出量基準を下回っており、また1年後の値にも変動はなく、環境への溶出はないものと考えられる(表-7)。

(4) 作業性、コンクリート表面の仕上り

レディーミクストコンクリートの生コンプラントおよび打設現場での作業性や脱型後のコンクリートの表面状況(写真-2)からは、スラグの混入による違いは認められなかった。

表-7 暴露試験体コアの溶出試験結果

分析項目	単位	コア						溶出量基準
		材齢3ヶ月		材齢6ヶ月		材齢12ヶ月		
		50-0	50-40	50-0	50-40	50-0	50-40	
pH	-	12.6	12.7	12.1	12.0	11.8	11.8	-
六価クロム(Cr ⁶⁺)	mg/L	0.038	0.021	0.028	<0.005	0.031	0.014	0.05以下
試験方法	規格	環境庁告示第46号						

6. 鉄筋コンクリートのフィールド試験、使用性能試験、耐荷試験

室内基礎試験(RC梁の耐荷試験)による豊島スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断耐荷挙動²⁾や鉄筋の付着特性³⁾に関する研究成果を踏まえて、豊島スラグの鉄筋コンクリートへの利用に向けたRC床版橋のフィールド試験、使用性能試験、耐荷試験を実施した。

(1) フィールド試験

RC床版橋のフィールド試験に用いたレディーミクストコンクリートの配合とフレッシュ性状および圧縮強度を表-8に示す。

豊島スラグを40%混入したコンクリートは、プレーンコンクリート(JISコンクリート)よりもブリージング量が多く、28日強度も18%の強度低下となっているが、336日強度は5%の強度低下であり、実用上問題ない程度と考えられる。また、打設現場での作業性やコンクリートの仕上り状況にもスラグの混入による違いは認められなかった(写真-3)。

表-8 鉄筋用レディーミクストコンクリートの配合とフレッシュ性状および圧縮強度

種類	スラグ置換率(%)	粗骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ性状				圧縮強度(N/mm ²)				備考	
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	スランプ(cm)	空気量(%)	CT(°C)	ブリージング量(cm ³ /cm ²)	材齢					
														材齢					
														7日	28日	168日	336日		
スラグ有	40	20	51.0	42.5	169	331	450	319	1031	3.31	9.0	5.1	7.0	0.56	16.8	35.2	45.6	47.2	*高炉セメントB種・設計基準強度=21N/mm ²
スラグ無	0	20	51.0	42.5	169	331	749	0	1031	3.31	9.5	5.0	8.0	0.41	20.6	43.1	48.7	49.6	

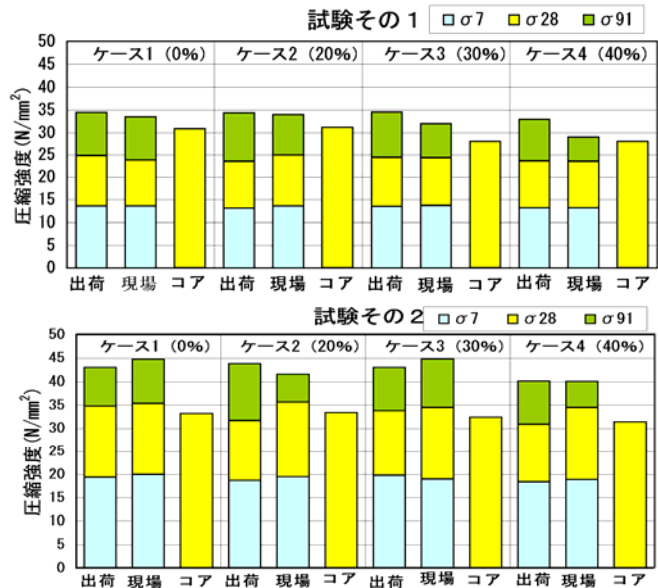


図-9 コンクリートの圧縮強度とスラグ置換率



写真-3 コンクリートの打設および仕上り状況

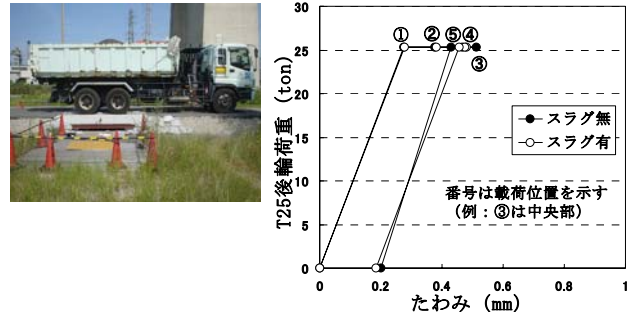


図-10 T25 載荷試験の状況および荷重-たわみ曲線

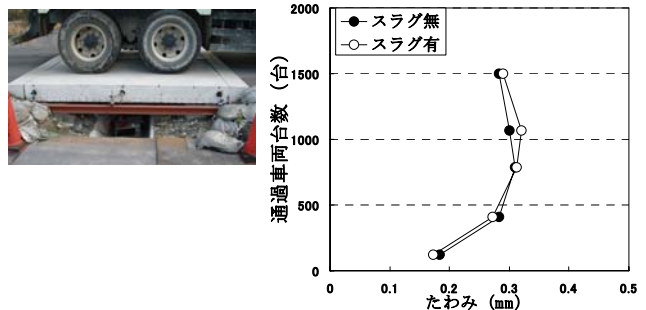


図-11 車両通行時の測定状況および通過車両台数と測定時のたわみ量の関係

(2) RC 床版橋の使用性能

スラグ混入および非混入 RC 床版橋の使用性能を比較するため、T25 載荷試験とスラグ積載車両（11 t ダンプトラック）通行時の 1 年間の挙動測定を実施した。T25 荷重の載荷状況および載荷・除荷時の輪荷重-たわみの関係を図-10 に、車両通行時の測定状況および通過車両台数と測定時のたわみ量の関係を図-11 に示す。

スラグの有・無による T25 荷重載荷時の最大たわみ量の差は 0.03mm、供用 1 年後の車両通過（累計 1500 台）時のたわみ量の差は 0.02mm であり、RC 床版橋の使用性能にスラグ混入の影響はなかったものといえる。

(3) 切取 RC 梁の耐荷性能

スラグ混入および非混入 RC 床版橋の終局時の耐荷性能を比較するため、床版橋から切取った RC 梁の載荷試験を実施した。梁の切取りおよび載荷試験の状況を写真-4 に、試験体の形状寸法・諸元および曲げ耐力を表-9 に、ひび割れ状況を図-12 に、荷重-たわみ曲線を図-13 に示す。

RC 梁の降伏曲げ耐力やひび割れ挙動、たわみ量などに有意な差はなく、スラグ混入の影響は認められなかった。

7. まとめ

産業廃棄物溶融スラグ（豊島スラグ）を用いたレディーミクストコンクリートの製造、無筋および鉄筋コンクリートの品質・施工性、RC 床版橋の使用性能・耐荷性能について、次のことが明らかになった。

- (1) 豊島スラグは、一般廃棄物溶融スラグ骨材の JIS 規格値、有害物質の溶出量・含有量基準を満足し、3 ヶ月程度のエージングにより膨張率は 0.5% 未満となる。
- (2) 豊島スラグを 20%~40% 混入したコンクリートは、非混入コンクリートよりもブリージング量が多く、強度が 10% 程度低下するものの、スラグ非混入コンクリートと同等の性質を有し、土木用コンクリート材料としての品質を満足する。
- (3) 豊島スラグを混入した無筋用レディーミクストコンクリートは、JIS コンクリートの品質とほぼ同じであり、その製造や作業性、無筋コンクリート（重力式擁壁）の施工性や安全性も JIS コンクリートと同等である。
- (4) 豊島スラグを混入した RC 用レディーミクストコンクリートは、JIS コンクリートの品質よりもやや劣るものの、実用上問題のない程度である。また、鉄筋コンクリート（RC 床版橋）の施工性や使用性能、耐荷性能も JIS コンクリートとほぼ同等である。
- (5) 以上より、豊島スラグをレディーミクストコンクリートに適用できる。



写真-4 RC 梁の切取りおよび載荷試験状況

表-9 試験体（切取梁）の形状寸法・諸元および耐力

試験体名 (W/C-スラグ 置換率)	全長 L (mm)	幅 B (mm)	有効 高さ d (mm)	かぶり c (mm)	鉄筋 径 D (mm)	鉄筋 比 Pc (%)	等曲げ モーメント 区間 (mm)	せん断 スパン a (mm)	せん断 スパン 比 a/d	梁の 降伏 曲げ 耐力 実験値 /計算値 (kN)
スラグ無 (51-00)	3000	475	190	49	D22	1.72	1000	750	3.95	196/207 (0.95)
スラグ有 (51-40)						1.63				170/163 (1.04)

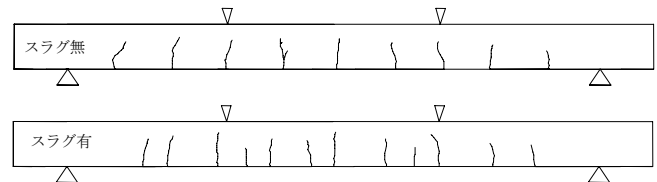


図-12 RC 梁のひび割れ状況

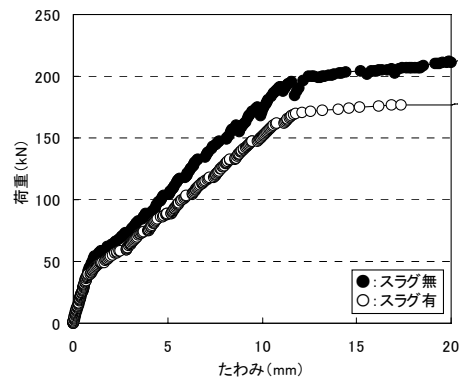


図-13 RC 梁の荷重-たわみ曲線

参考文献

- 1) 辻幸和他：溶融スラグ骨材の利用と JIS 化，コンクリート工学，Vol.45，No.4，pp.3-9，2007.4.
- 2) 松家武樹他：産業廃棄物溶融スラグを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げおよびせん断耐荷挙動，土木学会論文集，Vol.62，No.1，pp.159-173，2006.
- 3) 松家武樹他：鉄筋コンクリート梁に対する産業廃棄物溶融スラグの適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.63，No.2，pp.235-249，2007