

スラッジケーキを内部養生材として用いたコンクリートの検証

○橋田 浩幸*1 栗田 英明*1 弓戸 淳由*1 村上 富士仁*1 河野 秀和*1

要旨：生コンクリート製造工場から「ガラス陶磁器くず」として排出されるスラッジケーキは非常に高い吸水率を有している。内部養生材として活用することで、コンクリートの自己収縮率低減、圧縮強度の向上、細孔構造の緻密化等、構造体に付加価値を付与するとともに、産業廃棄物の排出低減が可能である。検証の結果、スラッジ水の脱水処理後、所定の期間水中養生をおこない、24時間乾燥後、一定期間吸水させたものについて内部養生材¹⁾として機能することが確認できた。

キーワード：スラッジケーキ、置換率、24時間乾燥、破砕値、細孔空隙水、自己収縮

1. はじめに

内部養生材作成の際、スラッジ水中のセメントが活性状態で脱水処理をおこなう必要がある。スラッジ水を脱水し得られたスラッジケーキは脱水後もセメントの水和反応が進行しており、その状態では、内部養生材として機能しないものと考えられる。スラッジケーキを高吸水性ポリマーや多孔性セラミック等をはじめとする内部養生材の新たな選択肢とするためには、ケーキ中におけるセメントの水和反応がある程度収束した後に用いる必要がある。本実験では、スラッジケーキを骨材と置換し用いるため、コンクリートの物理特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。特に水セメント比が小さいほど骨材の強度が及ぼす影響は顕著となり、ケーキの破砕値、骨材との置換率、ケーキの粗粒率の違いが、コンクリートの物理特性にどのように影響するか検証する。

2. 研究の概要

2. 1 内部養生材の作成

スラッジ水中のセメント活性度はスラッジ水の温度により大きく異なるものと考えられ、当実験では水温が20℃程度となる時期に脱水したスラッジケーキを対象とした。セメント接水後（フレッシュコンクリート練り混ぜ後）、4時間程度迄のスラッジ水を対象とし、スラッジケーキを作成し、2日間放置後、1片/5kg程度まで破砕した。水中養生によるカルシウム溶出緩和のため、回収水（上澄水）を用い水温20℃程度で水中養生をおこなった。ケーキは試験練りに用いる3日前に破砕し、粗粒率は、粗骨材として置換し用いるものをJISA5005の砕石1005に準じるものとした。細骨材として置換し用いるものは5mmふるいを全量通過し、0.6mmふるいに留まるものを対象とした。スラッジケーキは脱水後4週間水中養生し、粗粒率が砕石1005に準じたものをケーキA（写真-1）とした。脱水後2週間水中養生した後、24時間105℃で加熱し、再度3日間吸水したもので粗粒率が砕石1005に準じたものをケーキB（写真-2）、5mmふるいを全量通過し、0.6mmふるいに留まるものをケーキC（写真-3）とし、3種類を対象とした。



写真-1 ケーキA

写真-2 ケーキB

写真-3 ケーキC

*1 広島県東部生コンクリート協同組合 技術委員会

2. 2 材料の物理特性

試し練りに用いる材料の物理特性を表-1に示す。本実験ではケーキ中の水分をゲル水と毛細管空隙水に分類した。ゲル水²⁾は105°C条件下で逸散する水と定義されており、コンクリートの内部養生に寄与しにくいと考えられる。なお、毛細管空隙に含まれる水は40°C乾燥で逸散する水と定義されており、内部養生材として有効な吸水率として、40°C乾燥(吸水①)とゲル水を含めた吸水率として、105°C乾燥(吸水②)により吸水率の評価をおこなう。

2. 3 ケーキと粗骨材の混合割合による破砕値の差

試験練りで得られる結果の推定根拠を得るべく、実験でおこなう容積割合で粗骨材とケーキを混合した試料についてBS 812part110 骨材破砕値試験方法による400kN破砕値³⁾の測定をおこなった。破砕値の試験方法は以下によるものとし、試験値を表-2に示す。試験は、破砕試験器具の計量容器に試料を3層に分けて詰め、各層を突き棒で25回突き、計量容器の上面に対する骨材の凹凸を同程度に均し、試料の質量を1gまで正確に計量する。その後、同様の手順で試験容器に試料を詰める。その際試料層の厚さは約10cmとする。鋼製プランジャを試験容器の試料上に入れ、試験容器を載荷装置に据え、毎分40kNの割合で一様にプランジャに載荷し、400kNに達した後、荷重を0に戻す。試験容器内の試料を2.5mmふるいでふるい、ふるいを通過するものの質量を1gまで計量し、次の式により試料の破砕値を算出する。

2. 3. 1 骨材破砕値の試験の考察

試験後の試料の破砕状況について、①については、碎石の角部分が欠損しており、碎石製造業者がJIS Q 17025に適合する認定機関に依頼し実施したロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験と同等の値が得られた。②~⑤については、碎石の欠損が①と比較し小さかった。2.5mmふるい通過分の試料については、目視において、ケーキの量が多い。これはケーキが緩衝材となり、碎石の欠損が小さくなったと推察される。⑥については脱水後4週間水中養生をおこなっており、人工軽量粗骨材に近い破砕値が得られ、人工軽量粗骨材の代替材料及び低品位のコンクリートの置換材料になる可能性を示した。⑦の破砕値が⑥より大きいことについては、脱水後水中養生2週間及び24時間105°Cで乾燥させた際、ケーキ内部で蒸気圧による影響を生じた可能性がある。

2. 4 配合

各配合の単位量及びケーキの混合比率、表-1のケーキA~Cにおける吸水①から算出した各配合の内部養生水量を表-3に示す。フレッシュ性状の目標値は、スランプフロー50±7.5cm、空気量2.0±1.5%とする。室内試し練りに用いるミキサの形式は強制二軸型、公称容量は60Lとし、練混ぜ量は45Lとした。練混ぜの手順は、粗骨材とセメント投入後、15秒練り混ぜ、水と混和剤を投入し30秒練り混ぜ、粗骨材と内部養生材を投入し、90秒練り混ぜ後、排出し試験を実施した。

表-1 使用材料

材料の種類	密度 g/cm ³	吸水① %	吸水② %	粗粒 率	微粒 分量 %	実積率 %
普通ポルトランドセメント	3.16	—	—	—	—	—
上水道水	—	—	—	—	—	—
硬質砂岩・砕砂	2.64	—	1.76	2.80	6.0	—
石灰岩・砕砂	2.66	—	1.26	2.86	8.3	—
硬質砂岩・碎石2005	2.72	—	0.62	6.64	0.7	59.0
ケーキA	2.00	17.8	31.5	5.92	0	56.5
ケーキB	1.99	18.4	32.2	5.86	0	55.8
ケーキC	1.92	19.3	33.3	4.32	0	58.6
高性能AE減水剤	1.05	—	—	—	—	—

表-2 破砕値試験値

組み合わせ	比率	破砕値 %
①硬質砂岩碎石2005のみ	—	11.1
②硬質砂岩碎石2005：ケーキA	7：3	19.2
③硬質砂岩碎石2005：ケーキB	7：3	21.1
④硬質砂岩碎石2005：ケーキA	8.5：1.5	15.9
⑤硬質砂岩碎石2005：ケーキB	8.5：1.5	16.7
⑥ケーキA	—	37.2
⑦ケーキB	—	44.1
⑧人工軽量骨材(参考)	—	35.9

$$C_g = (m_1 / m_0) \times 100$$

ここに、C_g：400 kN破砕値 (%)

m₁：2.5 mmふるいを通過した試料の質量 (g)

m₀：全試料の質量

表-3 コンクリートの配合 (W/C30%-50-20N)

配合	単位量 kg/m ³									
	内部養生水	セメント	水	砕砂	石灰砕砂	砕石 2010	砕石 1505	ケキ	混和剤	消泡剤
①BASE	—	567	170	566	245	441	441	—	8.50	1.42
②砕石：ケキA=7：3	34.7	567	170	566	245	309	309	195	8.50	1.42
③砕石：ケキB=7：3	35.9	567	170	566	245	309	309	195	8.50	1.42
④砕石：ケキA=8.5：1.5	17.3	567	170	566	245	375	375	97	8.50	1.42
⑤砕石：ケキB=8.5：1.5	17.8	567	170	566	245	375	375	97	8.50	1.42
⑥ケキC 細骨材置換5%	5.6	567	170	538	232	441	441	29	8.22	1.42
⑦ケキC 細骨材置換10%	11.4	567	170	510	220	441	441	59	7.94	1.42

2. 5 試験結果

2. 5. 1フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験値は**2. 4**に示す目標値の許容差を満足した。ケキ A 及び B 置換によるフレッシュ性状の違いは認められなかった。ケキ C については細骨材の置換により粘性低下が認められた。配合⑥、⑦については、混和剤の添加率低減によりスランプフロー値を規格値内に収めた。**2. 4**の配合条件により実施した試し練り試験結果を**表-4**に示す。

表-4 試験結果

配合	スランプフロー cm	空気量 %	CT °C	強度値 N/mm ² 標準		圧縮強度の増加率 標準 7日～28日	強度値 N/mm ² 気中			圧縮強度の増加率 気中 7日～28日	材齢28日における気中と標準の比
				7日	28日		3日	7日	28日		
				①	56.0×55.0	1.3	17	75.5	93.7	1.241	
②	56.0×56.0	0.7	17	69.6	85.6	1.230	41.2	58.9	70.2	1.192	0.820
③	57.0×56.0	0.9	17	66.6	80.5	1.209	43.1	61.4	73.5	1.197	0.913
④	53.0×52.0	1.1	18	70.3	87.2	1.240	44.1	65.8	76.0	1.155	0.872
⑤	54.5×54.5	1.2	18	73.8	83.2	1.127	47.3	66.6	82.5	1.239	0.992
⑥	56.0×55.0	1.3	18	80.8	97.0	1.200	50.2	72.3	83.9	1.160	0.865
⑦	55.0×55.0	1.4	18	76.9	94.4	1.228	46.9	68.9	81.4	1.181	0.862

2. 5. 2破砕値と圧縮強度の関係

表-4の配合条件①～⑤について、破砕値と28日圧縮強度の関係を**図-1**及び**図-2**に示す。**図-1**は標準水中養生によるものであり、**表-2**の破砕値の増加に伴い圧縮強度の低下が確認でき、強い相関性が認められた。**図-2**は供試体成形後28日間気中に放置したものであり、**図-1**と比較し低い相関性を示した。これはケキBの内部養生効果により、ケキAを用いた配合と比較し高い圧縮強度値を示したことが原因と考えられる。

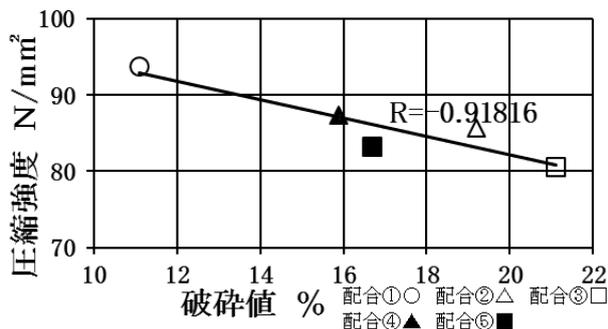


図-1 標準養生における破砕値 % と強度の関係

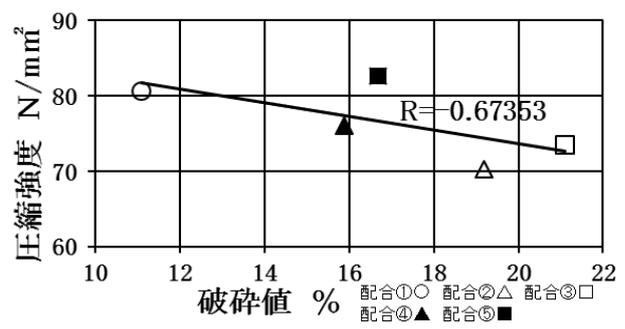


図-2 気中における破砕値 % と強度の関係

2. 5. 3 粗骨材置換による評価

配合①の標準養生、気中における圧縮強度試験値に対する配合②～⑤の強度比を図-3及び図-4に示す。標準養生では、供試体は絶えず水分供給を受けており、ケーキAを用いた配合②、④においては、ケーキ自体の水和進行による破砕値低下の影響により、ケーキBを用いた配合③、⑤に対し圧縮強度試験値が高い値を示したと推察される。各配合ともに、ケーキの置換率が増すほど圧縮強度の試験値は低下している。ケーキの置換率を増すことによる内部養生水（ケーキ中の細孔空隙水）量増加の優位性に対し、ケーキ置換により破砕値が大きくなる影響の方が勝る結果となった。気中における圧縮強度試験値は、配合②、④において、配合①に対し下回る結果となった。ケーキ中の細孔空隙水を水和によりケーキ自体が消費し、供試体への水分供給が不十分となり内部養生効果が得られなかった可能性がある。配合③、⑤においては、配合③はケーキの置換率が高いため、内部養生水が多く、気中条件下では有利となると考えられるが、⑤の配合に対し低い圧縮強度試験値を示した。これは、内部養生効果より、破砕値増加による影響の方が大きいと判断できる。配合⑤は配合①に対しわずかに高い圧縮強度試験値を示しており内部養生材として用いる場合、配合条件に応じた、破砕値と内部養生水量のバランスが求められる。

2. 5. 4 細骨材置換による評価

ケーキCを用いた配合は、細骨材に対し置換率を5%及び10%とした。コンクリート中の内部養生水は②～⑤の配合と比較し、少量であるが、標準養生、気中ともに、BASEと比較し、高い値を示した。BASE配合の強度値に対する配合⑥、⑦の強度比を図-5に示す。ケーキの置換率が小さいため、強度への影響が少ないこと、ケーキを細粒化したことによるコンクリート中の分散性改善により、内部養生材として効率よく機能したものと考えられる。配合条件⑦は⑥に対し、W/C30%、コンクリート温度20℃程度の条件下における圧縮強度試験値は小さい。ケーキCはケーキBをベースに細粒化したものであり、脆弱といえる。そのため、コンクリートが要求する内部養生水量を超えケーキ量を混入した場合、配合①からの強度増進は認められるが、ケーキの置換率による圧縮強度への影響が考えられる。

2. 6 内部養生効果による自己収縮の検証

自己収縮の検証は、表-3に示す①及び⑥、⑦の配合により実施する。自己収縮測定用供試体の寸法は100×100×400mmとし、ひずみの計測は埋め込み式のゲージを用いた。なお、供試体本数は、各配合につき1本とした。自己収縮の評価は、自由ひずみによりおこなうものとし、計測した実ひずみから測定終了までの温度ひずみを減じた値とする。自己収縮試験結果を表-5及び図-6、供試体作成から48時間までの温度推移を図-

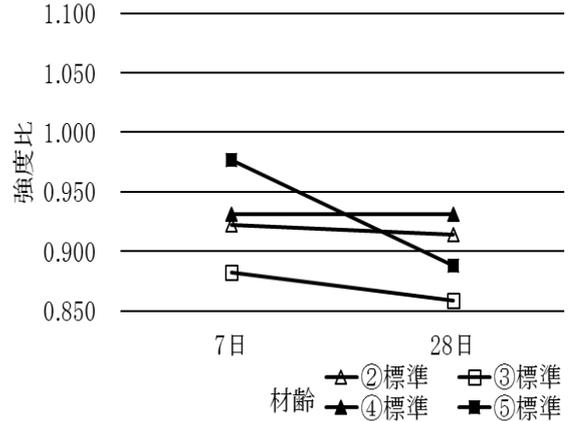


図-3 標準養生における配合①に対する配合②～⑤の強度比

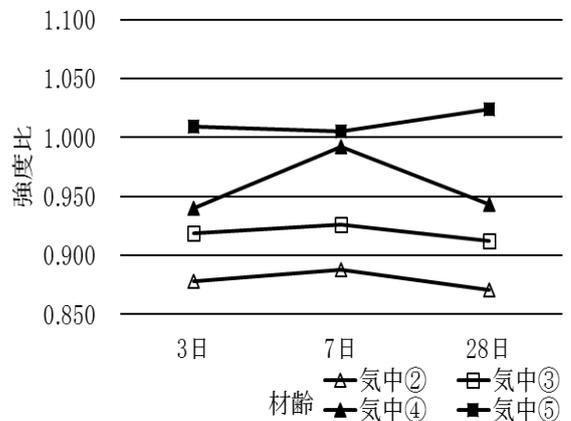


図-4 気中における配合①に対する配合②～⑤の強度比

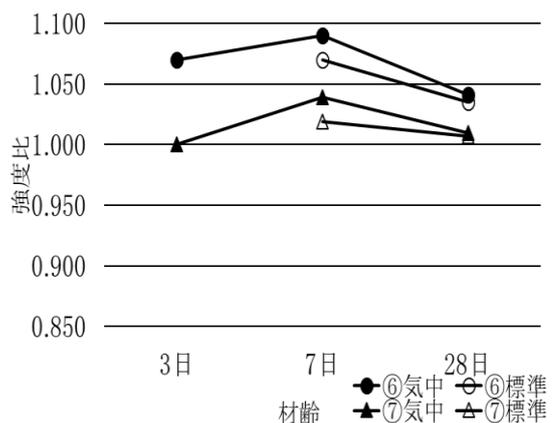


図-5 配合⑥、⑦におけるBASEに対する強度比

7に示す。

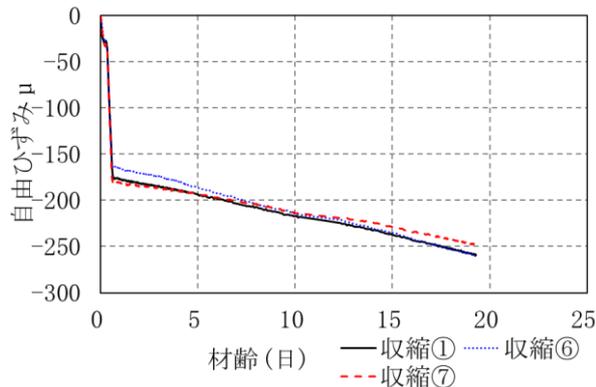


図-6 材齢間における自己収縮の推移

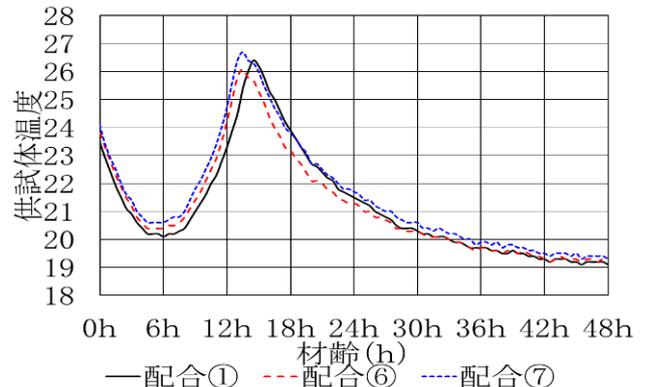


図-7 供試体作成後48時間までの供試体温度推移

表-5 自己収縮試験結果

配合 番号	上段：材齢における自由ひずみ μ					中段：材齢間におけるひずみの増加量 μ					下段：供試体温度 $^{\circ}\text{C}$	
	0h	7h	13h	14h	17h	1日	4日	7日	10日	13日	16日	19日
①	0	-30	-139	-162	-177	-177	-189	-204	-217	-228	-243	-257
	0	-30	-109	-23	-15	0	-12	-15	-13	-11	-15	-14
	23.5	20.3	24.5	26.0	24.6	21.5	18.3	18.1	18.4	18.5	18.6	18.3
⑥	0	-32	-151	-162	-164	-166	-180	-199	-215	-226	-241	-258
	0	-32	-119	-11	-2	-2	-14	-19	-16	-10	-15	-17
	23.8	20.6	25.8	25.8	23.7	21.3	18.4	18.2	18.6	18.6	18.8	18.6
⑦	0	-31	-165	-177	-181	-181	-189	-201	-213	-221	-235	-247
	0	-31	-134	-12	-4	0	-8	-12	-12	-8	-14	-12
	24.1	20.8	26.4	26.4	24.4	21.7	18.5	18.3	18.8	18.6	18.8	18.5

2. 6. 1 内部養生材置換による収縮挙動の変化について

各配合ともに、自己収縮測定用供試体作成7時間から供試体作成13時間まで供試体温度の上昇に伴い自由ひずみが急激に大きくなった。内部養生材の置換率を増すほど、配合①と比較し、供試体作成13時間までの自由ひずみと供試体温度上昇がわずかに大きい。表-5、0hにおける各供試体温度の相違による影響、スランブフローを目標許容値内とするため、混和剤量を減じ、配合修正をおこなったこと、内部養生材混入により、セメントの水和に影響を及ぼした可能性がある。又、弾性係数が小さいと考えられる内部養生材を用いることにより、自己収縮測定用供試体の収縮抵抗性が低下し、自由ひずみが増加した可能性がある。材齢4日において、配合①と配合⑦で同等、配合⑥について、わずかに自由ひずみが小さい。材齢19日においては配合①と配合⑥が同等であった。配合⑥は内部養生材の置換率が細骨材に対し5%であることから内部養生水が不足し、長期間にわたる養生効果が得られなかった可能性がある。配合⑦については配合①と比較し約4%程度、自由ひずみの低減が確認できた。

3. まとめ

スラッジケーキを混入したコンクリートの圧縮強度試験値、自己収縮率の試験により得られた事項は以下のとおりである。

- スラッジケーキは水中養生のみでは、ケーキ中のセメントが水和反応していると考えられ、内部養生効果は小さい。
- 内部養生材として用いる際は、所要の破碎値を得るべく一定期間水中養生後、24時間105°Cの条件で乾

乾燥後再度吸水することで内部養生効果が得られる。

- c) 圧縮強度試験値は標準養生において、破砕値と圧縮強度試験値に高い相関性が確認できた。気中においては相関性が低下しており内部養生効果が原因と考えられる。
- d) スラッジケーキは水中養生後、24時間105°Cの条件で乾燥後再度吸水したものを、5mmふるいを全量通過し、0.6mmふるいに留まるものとすることで内部養生効果が得られる。本実験では細骨材の容積置換5%において、最良の結果となった。
- e) 自己収縮については、細骨材を内部養生材に置換率を増すほど成型後13時間の自由ひずみが増大する。置換率を増すほどその傾向は顕著となるが、本実験では供試体作成7日後には、BASE配合に対し、各配合ともに同等の自由ひずみとなった。材齢19日では細骨材置換10%の配合条件において、BASE配合に対し、4%程度の収縮低減効果が確認できた。

4. おわりに

本実験では、ケーキ混入による内部養生効果によりコンクリート構造物に耐久的付加価値を与えることを目的とした。今回の実験では、セメント活性度の高いスラッジ水を対象に脱水処理したケーキを用い検証をおこないわざわざであるが良好な結果が得られた。現状においては、各工場におけるスラッジ水槽の設備状況において再現性が低いことが難点である。実験で用いたスラッジケーキは水中養生のみとすれば、軽量粗骨材程度の破砕値を有し、表乾密度も2.00g/cm³程度であることから、同用途の置換材となる可能性を示した。官民連携でスラッジケーキの有効活用していくことは、循環型社会を形成するうえで大きな前進となる。今後、スラッジケーキをアルカリ刺激材としフライアッシュ等を用いるなど、破砕値低減のための検証をおこなう予定である。

謝辞

この度、多大な応援を頂いた広島県東部生コンクリート協同組合 技術委員会の皆様に深甚の謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 温品達也・清木祥平・中川信矢・佐藤良一：廃瓦の内部養生によるフライアッシュ混入コンクリートの性能向上に関する実験的検討 コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No.1, 2009
- 2) 佐川孝広・石川哲也・Yao LUAN・名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性 土木学会論文集 E Vol. 66 No. 3, 311-324, 2010, 9
- 3) 鶴田浩章・松下博通・陶佳宏：粗骨材の破砕値が及ぼす高強度コンクリートの圧縮強度への影響 コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No.2, 1998