石炭灰硬化体の練混ぜ時間延長による品質改善効果とその機構に関する検討

鹿児島大学　学生会員　○小池　賢太郎
（株）間組　正会員　坂本　守
鹿児島大学大学院　正会員　武若　耕司
鹿児島大学大学院　正会員　山口　明伸

1. はじめに

石炭灰硬化体とは，石炭灰とセメントを最適含水比に近い低水粉体比で練混ぜ，振動作用で流体化させ締固める製造方法で作製する硬化体である。特に余剰水を極めて少ない状態で締固めることが可能なため，少ないセメント量で石炭灰を多量に有効利用できる点で効果的である。また，この石炭灰硬化体には硬化体製造時の練混ぜ時間と圧縮強度との間に相関関係があることが既往の研究[1)]によって明らかになっており，硬化体の品質改善が期待されている。その機構として，著者らは練混ぜによって石炭灰粒子が分散し，反応性が向上することで強度が増加すると仮定した。そこで，本研究では練混ぜ時間の延長による石炭灰硬化体の圧縮強度増加とその機構について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 圧縮強度試験

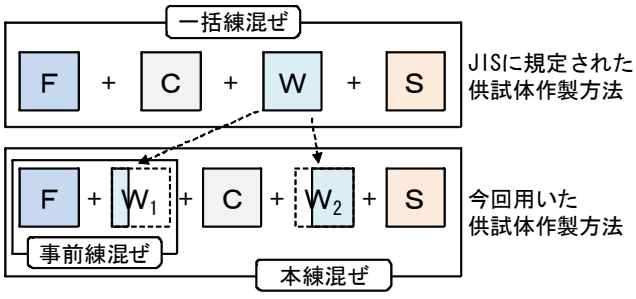
硬化体製造時の低速での一次混練時間を 1 分で固定し，中速での二次混練時間（以下「練混ぜ時間」と呼ぶ）を 2，5，10 分と変化させたφ5×10cm の円柱供試体を 4 種類の石炭灰でそれぞれ作製し，硬化体の練混ぜ時間と圧縮強度の関係を検討した。示方配合を**表－１**に示す。配合決定に際しては，全硬化体においてセメント置換率を 15%で固定し，練混ぜ時間 2 分において流体化時間（練混ぜ後の振動締固め時間）が約 120 秒となるような水粉体比を選定し配合決定を行った。強度試験は材齢 7，28，91 日にて行い，養生方法は硬化体作製後φ5×10cm の型枠をフィルムで密封し，材齢 7 日目に脱型し以降は水中養生を開始した。

表－１　灰種ごとの示方配合

灰種	W/P (%)	単位量(kg/m^3)			
		W	NaCl	C	F
①	26.3	372	12.3	213	1204
②	26.6	375	12.4	212	1199
③	21.1	328	10.8	233	1322
④	21.6	327	10.8	227	1287

2.2 活性度指数試験

硬化体作製時の二次混錬が強度発現性に与える効果を定量的に把握するために，4 種類の灰を用いて活性度指数試験を実施した。なお，試験は JIS A 6201 付属書 2「フライアッシュのモルタルによるフロー値比及び活性度指数の試験方法」に基づいて行ったが，その際，**図－1** に示すように練混ぜ水の一部を石炭灰と事前に所定の時間（2，5，10 分）練混ぜることで，二次混錬の効果を模擬することとした。



※W_1：一次練混ぜ水，W_2：二次練混ぜ水，$W= W_1 + W_2$

図－１　本試験の供試体作製プロセス

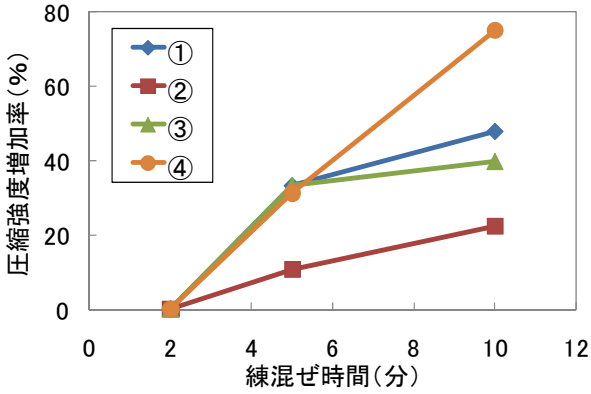
2.3 示差熱分析

2.1 にて圧縮強度試験を行った供試体を用いて，示差熱分析による反応生成物の定量測定を実施し，練混ぜ時間と反応生成物量の関係を評価した。測定に際しては TG/DTA 同時測定装置（島津製作所社製 DTG-60H）を使用して材齢 7，28，91 日における C-S-H ゲルの生成量を測定対象とした。しかし，C-S-H ゲルは，AFt（$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ エトリンガイト），AFm（$C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ モノサルフェート）等の他の水和物の脱水時のピークと重なり，C-S-H ゲル単体での定量が非常に困難であるため，C-S-H ゲル，AFt，AFm，これらの水和物の合計の生成量を練混ぜ時間との関係で評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験

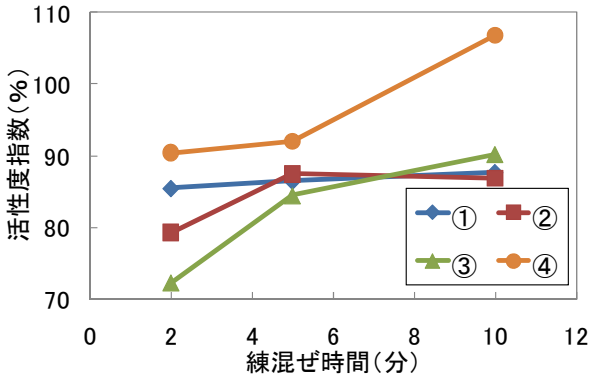
図－２は材齢28日での練混ぜ時間2分の圧縮強度に対する圧縮強度増加率と練混ぜ時間との関係を示した図である。練混ぜ時間を2分より延長することで圧縮強度が増加する傾向にあり，また練混ぜ時間10分での強度増加率が20%～80%と配合によって大きく異なっていた。これは強度増加の主な要因が，練混ぜ時間の延長による石炭灰やセメントの粒子の分散にあり，その際の粒子の凝集状態が配合ごとに異なるため，分散効果による強度増加の程度に差が出たと推測される。



図－２　圧縮強度増加率と練混ぜ時間の関係

3.2 活性度指数試験

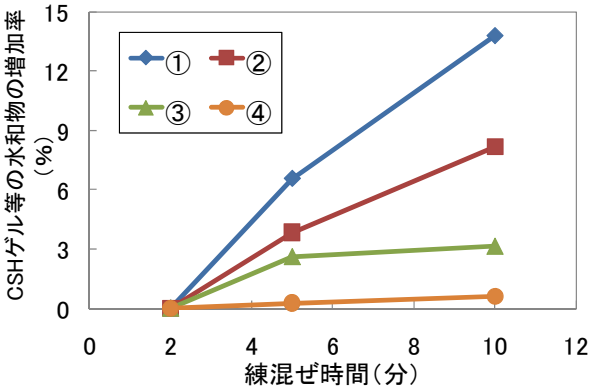
図－３は材齢28日での活性度指数と事前練混ぜ時間との関係を示した図である。石炭灰の種類によって増加傾向は異なるが，事前練混ぜ時間を延長することにより活性度指数が増加する傾向にあった。このことからも，練混ぜ時間を延長することで石炭灰の反応性を向上させる効果があると推測することができ，圧縮強度増加の一因であると考えることができる。



図－３　活性度指数と事前練混ぜ時間の関係

3.3 示差熱分析

図－４は材齢28日での練混ぜ時間ごとのC-S-Hゲル等の水和物の増加率を示した図である。C-S-Hゲル等の水和物は練混ぜ時間に比例して増加する傾向を示している。また**図－５**はC-S-Hゲル等の水和物の生成量と2.1の圧縮強度試験によって得られた圧縮強度との関係を表した図である。C-S-Hゲル等の水和物の生成量と圧縮強度との間には相関関係が認められ，C-S-Hゲル等の水和物生成量の増加に伴って圧縮強度も大きく増加していることが分かる。

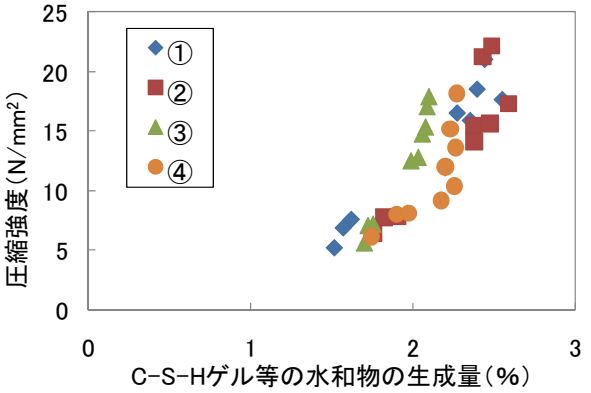


図－４　CSHゲル等の水和物と練混ぜ時間の関係

4. まとめ

本研究により，練混ぜ時間を延長することで石炭灰硬化体の強度が増加し品質改善が期待できることが示唆された。また，その機構としては，圧縮強度はC-S-Hゲル等の水和物の生成量と強い相関性があり，練混ぜ時間の延長により石炭灰の反応性が向上して，これらの水和物の生成量が増加するためと考えられる。

今後はさらなる多種の石炭灰種類によって体系的に検討を行い，練混ぜ時間延長による品質改善機構を明確にしていく必要がある。



図－５　CSHゲル等の水和物と圧縮強度の関係

【参考文献】

1）坂本守，武若耕司，山口明伸：最適含水比に近い低水粉体比の石炭灰硬化体の性状に及ぼす混練時間の影響，V-371，pp739-740，土木学会第64回年次学術講演会，2009.9