

H-5

乾湿繰り返し作用がシリカフェームを混和したセメント水和物の C-S-H に及ぼす影響 Effects of Repeated Wet-Dry Action on the C-S-H in Cement Hydration Products mixed with Silica Fume

○杉山颯斗¹, 佐藤正己², 小泉公志郎³, 梅村靖弘²*Hayato Sugiyama¹, Masaki Sato², Koshiro Koizumi³, Yasuhiro Umemura²

It is important to investigate the effects of environmental conditions on the deterioration and alteration of hydration products in concrete using blended cement. On the other hand, Japan's precipitation levels are higher than the global average, creating a rainy environment. Consequently, it is assumed that many structures frequently experience repeated cycles of wetting due to rainfall and drying due to solar radiation (wet-dry cycles). This study investigated the effects of carbonation and leaching on cement hydration products under repeated wet-dry cycles, using powdered samples of cement paste mixed with silica fume as an admixture. The results showed that SF exhibited lower CaO leaching compared to HC, and the reduction in C-S-H content was smaller due to the formation of C-S-H through pozzolanic reactions.

1. はじめに

カーボンニュートラル社会実現のため、コンクリート構造物には混合セメントの使用が増加すると考えられており、それらを用いたコンクリート中の水和物の環境条件による劣化・変質影響に関する検討が重要である。一方で日本の降水量は世界平均と比較して多雨環境であることから構造物の多くが雨掛かりによる湿潤状態と日射による乾燥状態の繰り返し(乾湿繰り返し)が頻繁に発生していると想定される。

本研究では、乾湿繰り返し環境下における炭酸化と溶脱がセメント水和物に及ぼす影響について、混和材としてシリカフェームを混和させたセメントペースト(CP)の粉末試料を用いて検討した。混和材は SiO₂ を多く含み C-S-H の組成変化が期待できることからシリカフェームを選択した。

2. 実験概要

使用材料は早強ポルトランドセメント(密度: 3.13g/cm³, プレーン値: 4720cm²/g)とシリカフェーム(密度: 2.2g/cm³, BET比表面積: 15.4m²/g), 蒸留水とした。配合は CP 試料の水結合材比を 60%とし、混和材無混和の試料(HC)と混和材を 20%混和した試料(SF)を作製した。CP 試料は、練混ぜ後、250mL ポリ瓶に打込み、20°C室内で材齢 56 日まで封かん養生を行った。CP 試料は、空隙の影響を少なくし、反応を促進させるため粉末状に加工した。粉末試料は、水やイオンを透過するが粉末は透過しない透析用セルロースチューブ(以後半透膜, 分画分子重量: 孔径 5nm 約 12000~14000)に入れることとした。試料は約 20g ずつ半透膜で包みサイクルごとに小分けにした。

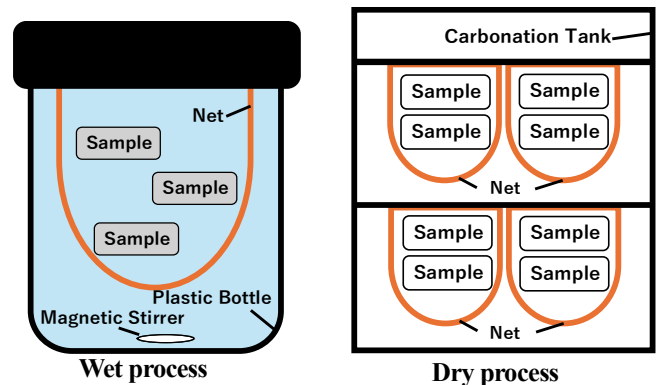


Figure1. Repeated Wet-Dry Test

乾湿繰り返し試験の配置を **Figure1** に示す。湿潤工程は、半透膜で包んだ試料をネットに入れてイオン交換水で満たし密封した 2L 広口ポリ瓶内で、マグネティックスターラーで攪拌して管理した。乾燥工程は、温度 20°C, 湿度 60%RH, CO₂ ガス濃度 0.1%に調整された炭酸化槽内で行い、半透膜に包まれた試料はネットに吊して管理した。WD の試験サイクルは湿潤 3 日, 乾燥 4 日の計 1 週間を 1 サイクル(以降 1C)とした。試験材齢は試験開始時(0C), 4 サイクル(4C), 8 サイクル(8C), 12 サイクル(12C), 16 サイクル(16C)とした。試験材齢時はアセトン浸漬による水和停止を行った。

各材齢試料の分析項目は、①蛍光 X 線分析(XRF)(内部標準法: ZnO 10%)による含有物質の測定, ②熱重量示差熱分析(TG-DTA)による Ca(OH)₂ と CaCO₃ の定量, ③トリメチルシリル誘導体化法(TMS 法)による C-S-H 量の変化率および C-S-H のケイ酸鎖長分布の測定とした。また、以上の①より化学組成の作成を行った。

3. 実験結果及び考察

Figure2 に化学組成の経時変化を示す。0C での SF

1: 日大理工・院(前)・土木 2: 日大理工・教員・土木 3: 日大理工・教員・一般

の化学組成をみてみると HC と比較して CaO 量が少なく、SiO₂が多くなった。つまり、C/S 比は HC が 1.87、SF が 0.98 となった。総化学組成量は 0C から 8C までは減少し、8C 以降で増加がみられた。これは、0C から 8C までは溶脱、8C 以降では炭酸化によるものであり、初期で溶脱、後期で炭酸化が優位に起こったと考えられる。主成分である CaO についてみてみると、4C 以降では HC、SF とともに CaO 量が 0C から 8C までに緩やかな減少し、8C 以降に変化が見られなかった。これは、8C までは CP 中の C-S-H や Ca(OH)₂ の CaO 成分が湿潤工程でイオン交換水中に溶出したと考えられる。

Figure3 に Ca(OH)₂ 量と CaCO₃ 量の経時変化を示す。HC では Ca(OH)₂ 量は徐々に減少し、12C から 16C にかけて停滞した。CaCO₃ 量は 8C から 16C にかけて増加した。SF では Ca(OH)₂ 量は徐々に減少し、8C で 0mass% となった。CaCO₃ 量は 8C から生成された。

Figure4 に C-S-H 量の変化率を示す。C-S-H 量は、HC で 0C から 12C までに減少し、12C 以降で増加した。一方 SF では 0C から 4C で増加し、4C から 12C までに減少し、12C 以降で増加した。4C での SF の C-S-H 量の増加は、SF の反応が進行したためと考えられる。

Figure5 に C-S-H のケイ酸鎖長分布の経時変化を示す。HC は 0C から 8C まで単量体が減少し、2 量体、3 量体以上が増加した。その後 8C から 12C で単量体が増加し、2 量体が減少した。さらに、12C から 16C で単量が減少し、2 量体が増加した。SF は 0C から HC と比較して 2 量体以上のケイ酸鎖が多く長鎖長となっていた。SF は 0C から 4C まで単量体が減少し、2 量体が増加した。さらに 4C 以降は、変化がみられなかった。

以上の結果からまとめると、HC では 0C から 8C で CaO 成分の溶脱が優位に起こり、C-S-H 量が減少し、C-S-H のケイ酸鎖長は縮合反応が起き長鎖長化したと考えられる。また、8C から 16C では炭酸化が優位に起こり、C-S-H の分解により CaCO₃ が生成された。これにより、試料中の pH が低下していると考えられ、切断反応が進行したと考えられる。一方、SF では 4C までにポズラン反応が進行し、新たに C-S-H が生成されたため C-S-H 量の変化が小さかった。また、8C 以降は C-S-H の分解により CaCO₃ が生成されゲルが生成したと推察され、長鎖長化が進んでいると考えられる。

4. まとめ

SF は HC と比較して CaO 成分の溶脱量が小さく、ポズラン反応による C-S-H の生成により、C-S-H 量の低下が小さくなった。

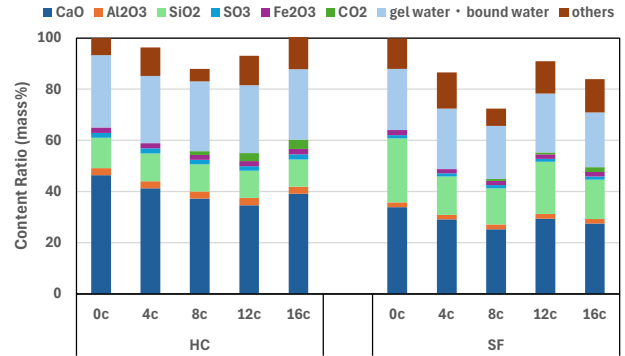


Figure2. Changes in Chemical Composition

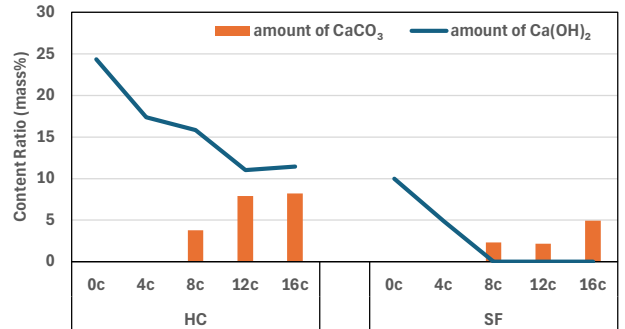


Figure3. Changes in amount of Ca(OH)₂ and CaCO₃

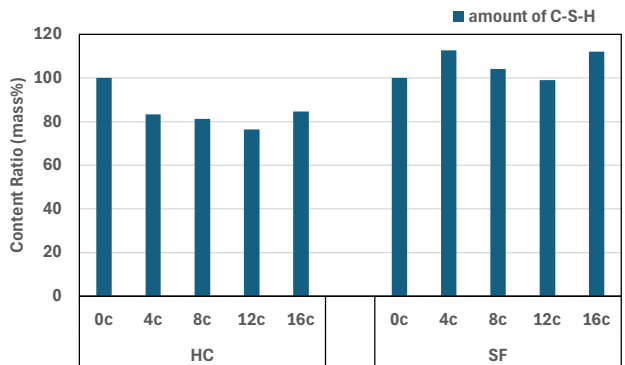


Figure4. Ratio of Change in amount of C-S-H

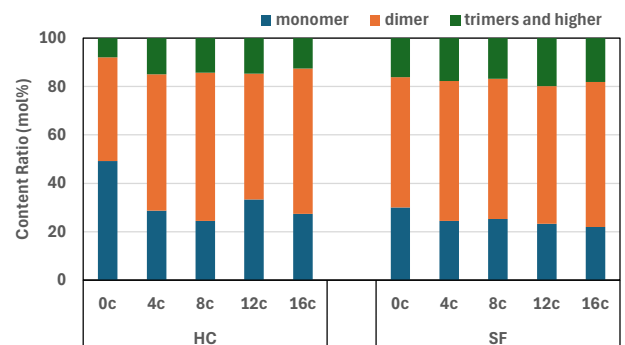


Figure5. Silicate Chain Length Distribution for C-S-H

5. 参考文献

[1] 須田裕哉：「C-S-H の組成と物理的性質の関係に基づいたセメント硬化体の性能評価に関する研究」, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, 528-544, 2010
 [2] 菅野杏子ほか：「乾湿繰返し作用がセメント硬化体中のケイ酸カルシウム水和物に及ぼす影響」, 土木学会第 79 回年次学術講演会, V-817, 2024