

低熱ポルトランドセメントの水和反応と圧縮強度発現機構

京大原子炉、^AJAEA、^B東大物性研、^C清水建設(株)、^D高エネ研

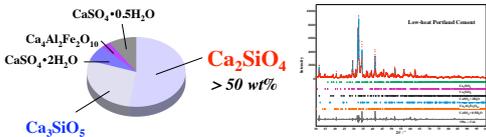
森一広、福永俊晴、稲村泰弘^A、山室修^B、大石晃嗣^C、川合将義^D

1. 緒言

家の垣根から高層ビルに至るまで、コンクリートは私たちの生活基盤を支える重要な建築材料の一つである。コンクリートの性能(圧縮強度、耐久性など)は、水/セメント比や使用する骨材の種類、養生条件など、様々な要因に敏感であるが、その中でも、セメントの水和反応特性はコンクリートの性能を特徴づける上で大変重要である。



本研究では、巨大建造物の建設で使用される低熱ポルトランドセメント(Low Heat Portland Cement: LHPC)の水和反応の様子を中性子準弾性散乱装置を利用して観測した。また、この系の水和反応特性について評価し、圧縮強度とセメント水和物量の関係について調べた。



低熱ポルトランドセメントに含まれている主な成分

2. 圧縮強度試験

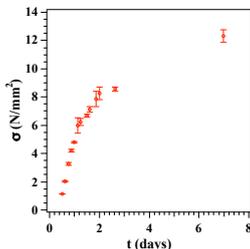
- 試料名 : モルタル
- 試料直径 : ϕ 50 mm
- 試料高さ : 100 mm
- H₂O/LHPC : 50 mass%
- H₂O/LHPC/骨材 : 1 : 2 : ~6
- 養生温度 : 24°C



圧縮強度測定器



供試体作製の様子



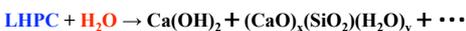
モルタル圧縮強度の時間変化

3. セメント水和反応の評価方法

X線・中性子回折

LHPCの消費量

Too Complicated ...



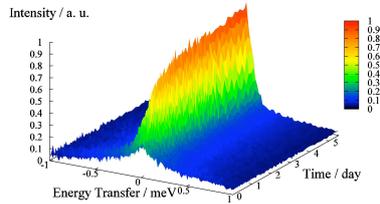
水の消費量

中性子準弾性散乱

Wow..., so Easy !!!



4. 中性子準弾性散乱実験の結果



準弾性散乱スペクトルの時間変化

Incoherent scattering cross-section
 $\sigma_{\text{inc}}[\text{H}] = 80.26 \text{ barn}$
 $\sigma_{\text{inc}}[\text{Ca}] = 0.05 \text{ barn}$
 $\sigma_{\text{inc}}[\text{Si}] = 0.004 \text{ barn}$
 $\sigma_{\text{inc}}[\text{O}] = 0.000 \text{ barn}$
 $\sigma_{\text{inc}}[\text{H}] \rightarrow I(Q, E)$
 ほぼ水からの散乱と見なす事ができる

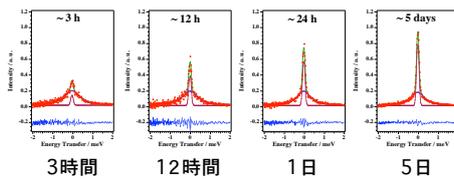
セメントペースト中の水の拡散モデル

$$I_{\text{inc}}(Q, E) = \left\{ BW\delta(Q, 0) + FW \frac{\Gamma_B}{\pi(\Gamma_B^2 + E^2)} \right\} \otimes \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{E}{\sigma}\right)^2} \right) + B.G.$$

結合水 自由水 装置関数



水の拡散係数が異なる

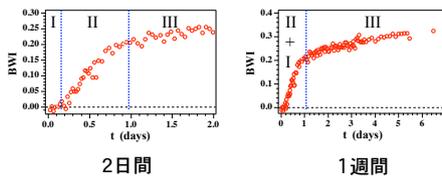


Fittingの様子

BWIの定義

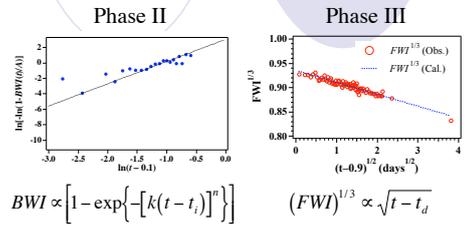
$$\text{Bound Water Index (BWI)} = \frac{BW_1 - BW_0}{(BW_1 - BW_0) + FW}$$

LHPCに含まれている水素



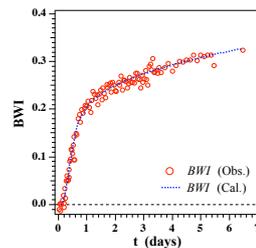
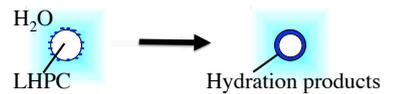
セメント水和物量の時間変化

5. 圧縮強度と水和物量の関係



$$BWI \propto \left[1 - \exp\left\{-[k(t-t_i)]^n\right\} \right]$$

$$(FWI)^{1/3} \propto \sqrt{t-t_d}$$

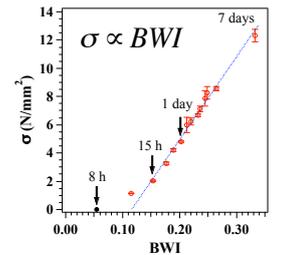


BWI(t)で記述可能!

低熱ポルトランドセメントの水和反応をBWIで記述

(15時間まで)
セメント水和物の生成によって徐々に圧縮強度が増加

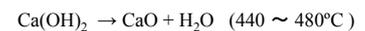
(15時間以降)
圧縮強度はセメント水和物量に比例して増加



モルタル圧縮強度と水和物量の関係

6. 水酸化カルシウムの生成

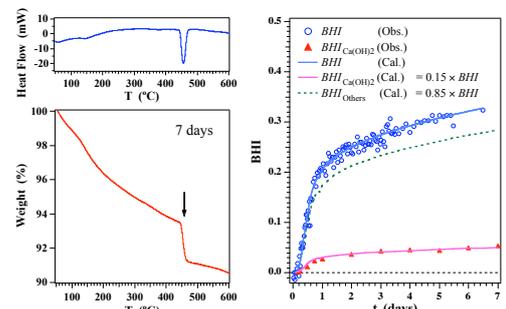
水酸化カルシウムの分解



... 水酸化カルシウム量の評価に利用

BHIの定義

$$\text{Bound Hydrogen Index (BHI)} = \frac{BH_1 - BH_0}{(BH_1 - BH_0) + FH}$$



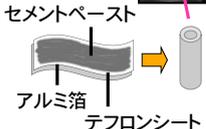
示差熱重量分析(TG)の結果

水酸化カルシウムの生成の様子

全セメント水和物量と水酸化カルシウム量の比は一定値を示す

分光器名 : AGNES (ISSP, Tokyo Univ.)
 波長 λ : 4.22 Å
 Q-領域 : 0.2 ≤ Q ≤ 2.7 Å⁻¹

試料名 : LHPCペースト
 H₂O/LHPC : 50 mass%
 試料厚さ : ~0.5 mm
 試料高さ : 50 mm
 測定温度 : 28°C



中性子準弾性散乱実験の条件