

V-283 初期高温養生したセメントの水和物と細孔構造に及ぼす昇温速度の影響

電気化学工業特殊混和材部 正会員 森本丈太郎
 東京大学 生産技術研究所 正会員 魚本 健人

1. はじめに

高温養生したセメントは水和反応速度が上昇するため初期強度は高くなるが、長期強度は標準養生より低下することが知られている。この原因としては養生温度が高くなると、微細構造内部の水和ゲルの分布が不均一になることや、セメントの内部水和物が著しく緻密化し、水和反応速度を低下させることなどがあげられているがいまだに定説はない。そこで、本研究ではセメントの高温養生下の水和について研究を行い、昇温速度がセメントの水和率、圧縮強度、細孔構造および水和物に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

セメントペーストを温度20℃、水セメント比40%でモルタルミキサを用いて練り混ぜた。前養生3時間後、昇温速度2℃/時および20℃/時で養生温度を上昇させ、温度60℃で24時間保持する高温養生を行った。高温養生中は封緘養生とし、高温養生以降は3時間自然放冷後、20℃の封緘養生を実施した。所定時間養生後、セメントペースト硬化体の圧縮強度、結合水量、細孔径分布、比重および比表面積の測定を行った。昇温速度については2℃/時は一般のコンクリート構造物、20℃/時は促進養生したコンクリートを想定している。

3. 実験結果および考察

図-1に昇温速度別の圧縮強度と見かけの水和率の関係を示す。図-1より昇温速度の差に関係なく60℃養生の場合は見かけの水和率と圧縮強度はほぼ同一の曲線となり、見かけの水和率が増加すると圧縮強度は増加する。見かけの水和率を一定にすると、60℃養生は20℃養生に比べ圧縮強度が10～20N/mm²程度低くなる。

次に、空隙の影響を取り除いたセメント硬化体中のセメントの水和量と圧縮強度の関係を調べるために、見かけの水和率からセメントペースト体積当たりのセメントの水和量¹⁾を求めた。また、表-1よりセメント硬化体の比重は養生温度によって差があり、同一の見かけの水和率では60℃養生の硬化体の比重は20℃養生よりも約0.1大きくなる。そこで、この硬化体の比重から生成した水和物の比重¹⁾を算出した。この結果から高温養生で生成する水和物の比重は20℃養生よりも0.13程度大きくなっていると考えられる。さらに計算した水和物の比重から、水和セメント体積の補正を行った¹⁾場合のセメントの水和量と圧縮強度の関係を図-2に示す。図-2より各曲線がほぼ一致するので、図-1の同一の見かけの水和率で60℃養生が20℃養生に比べ圧縮強度が低下する原因は、60℃養生は20℃養生と比較して水和物の比重が大きくなり、水による体積膨張が小さくなり、その結果として空隙量が多くなるためであると考えられる。

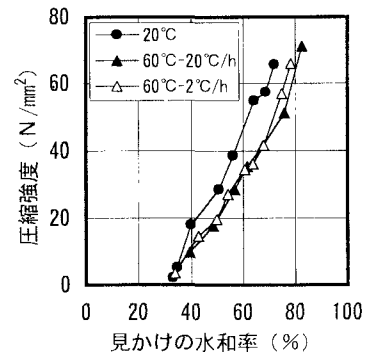


図-1 昇温速度別の圧縮強度と見かけの水和率の関係

表-1 硬化体の比重、比表面積および水和物の粒径

養生温度 (℃)	昇温速度 (℃/h)	水和率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	硬化体の比重 (測定値)	水和物の比重 (計算値)	比表面積 (m ² /g)	水和物の粒径 (nm)
20	—	68.7	57.4	2.40	2.05	26.6	65
60	2	67.8	41.7	2.50	2.18	19.2	86
60	20	67.5	41.6	2.50	2.18	17.1	97

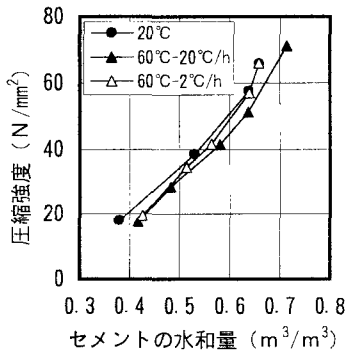


図-2 水和物の比重の補正後の昇温速度別の圧縮強度とセメントの水和量の関係

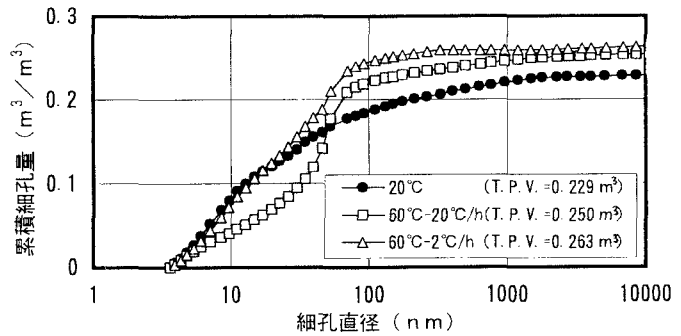


図-3 見かけの水和率が約70%における昇温速度別の細孔径分布

図-3に表-1の各試料の細孔径分布を示す。図-3より高温養生は20°C養生と比較して全空隙量が増加するが、これは主に毛細管空隙中の20～70nm細孔量の増加によると考えられる。昇温速度の影響は主にゲル空隙と考えられる5～20nm細孔に現れ、昇温速度が遅い場合には5～20nmの細孔量が多く、20°C養生とほぼ同様な空隙の組織を持つと考えられる。従って、ゲル空隙の組織は昇温速度、即ちセメントの水和反応速度と密接な関係にあり、水和反応速度が速くなると微細な細孔が少ない組織構造になると考えられる。

次に、表-1の硬化体の比表面積の測定結果から式(1)(2)(3)を用いて水和物を球と仮定した場合の水和物の平均粒径を算出した。その結果を同じく表-1に示す。

$$a_p = a_c + a_h \quad (1)$$

$$A_h = a_p(\rho_p/\rho_h \cdot \alpha) - A_c\{\rho_c(1-\alpha)/\rho_h \cdot \alpha\} \quad (2)$$

$$r_h = 3/A_h \cdot \rho_h \quad (3)$$

ここに、 a_p ：硬化体の比表面積、 a_c ：セメントの比表面積、 a_h ：水和物の比表面積、

ρ_p ：硬化体の比重、 ρ_c ：セメントの比重、 ρ_h ：水和物の比重

A_c ：セメントの単位重量当たりの比表面積、 A_h ：水和物の単位重量当たりの比表面積

α ：見かけの水和率、 r_h ：水和物の粒径

この計算結果から高温養生した場合には20°C養生と比較して、水和物の粒径が昇温速度が2°C/時の場合は約1.3倍、20°C/時の場合は約1.5倍になるので、高温養生によって水和物の粒径は大きくなると考えられる。このことが毛細管空隙中の20～70nm細孔量を増加させる一因になっていると考えられる。また、高温養生では20°C養生と比べて同一の見かけの水和率で水和により生成する Ca(OH)_2 の量が減少するため、 Ca(OH)_2 の比重が一定と考えると、生成するC-S-HはCa/Siのモル比が高く、比重の大きい水和物になると考えられる。

4. まとめ

(1) 高温養生すると20°C養生と比較して強度が低下する原因は昇温速度2～20°C/時では、水和物の比重が大きくなり、水和による体積膨張が小さくなり、その結果として空隙量が多くなるためであると考えられる。

(2) 昇温速度はゲル空隙に影響を及ぼし、昇温速度が遅い場合には20°C養生とほぼ同様なゲル空隙の組織を持つと考えられる。

(3) 水和物の粒径は高温養生すると20°C養生と比較して大きくなると考えられる。

【参考文献】

1) 森本丈太郎、魚本健人：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.7, No.1, pp.153～159, 1996.1