

### 急激な高温加熱を受けたコンクリートの細孔構造について

福島工業高等専門学校      フェロー 緑川猛彦  
 福島工業高等専門学校      正会員 林久資  
 福島工業高等専門学校      車田研一

#### 1. はじめに

福島第一原子力発電所では、東日本大震災によって生じた津波の影響で原子力発電所電源が喪失し、原子炉燃料が溶融した。溶融した原子炉燃料は压力容器を通過し格納容器の下部領域、さらには建屋下部領域に到達している可能性がある。この原子炉燃料が到達したと想定される領域はコンクリートを主とする建設材料で構成されているが、予想以上の高温に曝されたコンクリートの物性についての研究例は少ない(例えば<sup>1), 2)</sup>。また、燃料デブリが压力容器を溶かし格納容器下部のコンクリートに達した場合、コンクリートは超高温の燃料デブリの接触により急激に温度上昇したと考えられ、このような状況下でのコンクリートの物性を把握することは重要であると考えられる。以上の観点から本研究は、テルミット反応を用いて急激に高温加熱をしたコンクリートの細孔構造について実験的に検討することとした。

#### 2. 実験概要

図-1 に供試体の概要を示す。一辺 30cm の立方体の上面に直径 20cm の半球状の窪みを設けたモルタル供試体を作製し、窪みに酸化鉄とアルミニウム粉末の混合物をセットした。その後粉末混合物に着火してテルミット反応を生じさせ、急激に発熱した後の約 90 分間コンクリート内部の温度をモニタリングした。コンクリート温度は供試体内部に深さ方向に 2cm 毎に設置した熱電対で 1 秒毎に測定した。モルタルに用いた材料は、フライアッシュセメント B 種 ( $\rho_c=2.96\text{g/cm}^3$ )、細骨材(山砂,  $\rho_s=2.56\text{g/cm}^3$ , F.M.=2.88) とし、モルタルの配合は細骨材容積比  $s/m=45\%$  および  $W/C=38\%$  とした。

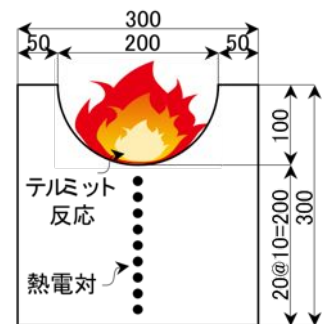


図-1 供試体概要

供試体が冷却した後窪みに固化した金属を剥がし取り、圧縮試験機を用いて供試体を軸方向に 4 分割した。その分割供試体より、着火点直下部にあたる部分から深さ方向に 1cm 毎にモルタル片を採取し、窒素吸着法による細孔分布測定を行った。また、着目したモルタル片について SEM 観察を行った。

#### 3. 実験結果および考察

図-2 に加熱中における供試体中の温度を示す。着火後約 8 分で、発熱部より 2cm 下方のモルタルの温度が約 600°C の最大値を示した。その後さらに 6 分後(実験開始 14 分後)に発熱部より 4cm 下方のモルタルが 255°C を示した。着火部におけるテルミット反応自体の温度は測定していないが、モルタル厚さ 2cm で熱の伝達が急激に低下することが分かる。

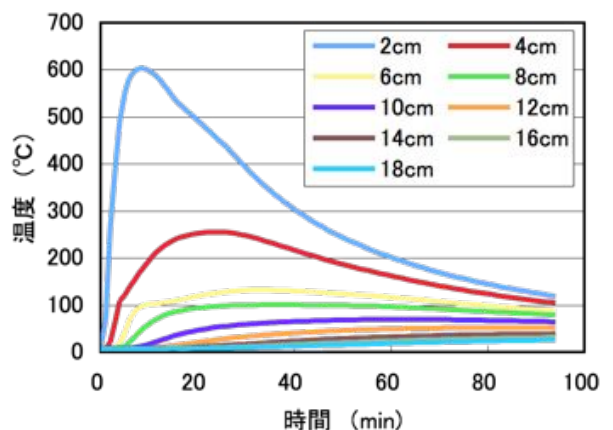


図-2 供試体内部の温度

図-2 のグラフを用いて各深さ位置での最大温度をプロットしたものを図-3 に示す。コンクリートの強度は加熱温度 200°C を超えるにつれて徐々に強度が低下してゆくことが明らかになっている<sup>1)</sup> ので、本実験では深さ 5cm 以深では何ら影響を受けていないように見える。

図-4 に窒素吸着法により求めた相対圧とガス吸着量との関係を示す。測定は深さ 1cm から 9cm まで行ったが、大きく 3 種類の傾向が見られた。①深さ 1cm から 2cm の範囲、②深さ 3cm から 6cm の範囲、③深さ 7cm から 9cm の範囲である。図-4 には代表的なものとして①では 1cm、②では 4cm、③では 9cm の測定値をプロットしてある。

まず、深さ 9cm のサンプルは図-3 の結果より最大加熱温度は 90°C 程度である。この状態ではモルタルは加熱の影響を受けていないと考えられ、モルタル中の細孔径分布はノーマルなものである。すなわち、モルタル中の細孔径は大小さまざまなものが連結しており、相対圧に対するガス吸着量は吸着側と脱着側とで等温線にヒステリシス

キーワード：テルミット反応, 高温加熱, 細孔構造, sintering, 吸着等温線

連絡先 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 Tel:0246-46-0835, Fax:0246-46-0843

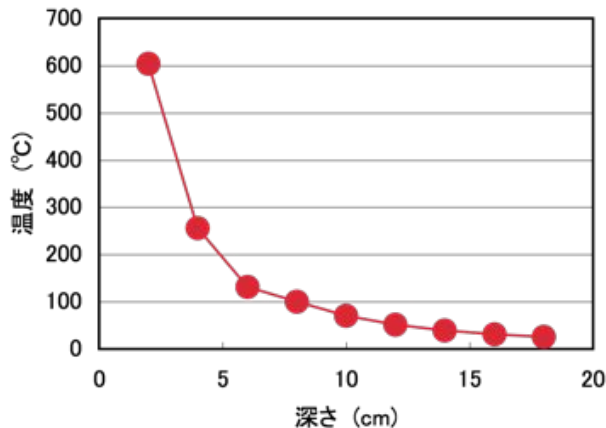


図-3 深さと最大温度の関係

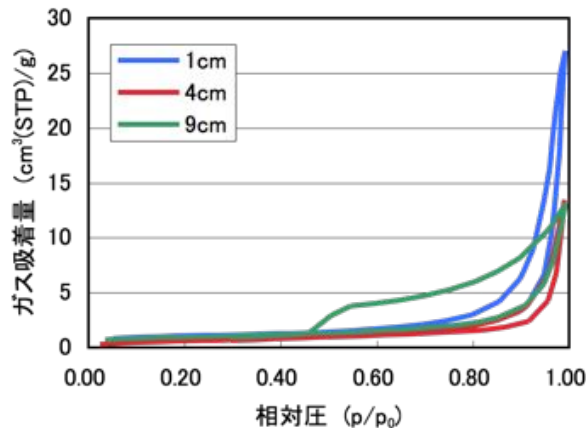


図-4 各深さにおける吸着等温線

を示すことになる。しかし、深さ 4cm のサンプルでは図-3 より最大加熱温度が 200°C 程度であるにもかかわらず、図-4 におけるヒステリシスが小さい方向へ変化することになった。これは、ガス吸着側と脱着側が同じ脱着機構になることを示しており、言い換えれば細孔径が大きい方にシフトしていることを示している。これは sintering (焼結) とよばれる現象であると考えられる。一般的には 200°C 程度の加熱であればコンクリートには何ら影響がないと考えられているが、組織内部では sintering により細孔構造が変化しているものと予想される。さらに、深さ 10mm のサンプルでは図-3 より最大加熱温度が 1000°C 以上であると考えられるが、図-4 においてはヒステリシスが小さいままでガス吸着量が増加することとなり、別な変化が生じていると予想された。

図-5 に各サンプルの SEM 写真を示す。(a)は深さ 9cm のサンプル写真であるが、各粒子が独立していると共に粒子の形状を確認することができる。(b)は深さ 4cm のサンプル写真である。(a)に比較して粒子一つ一つの形状を捉えにくく各粒子が独立していないと共に比較的大きな孔の出現が見える。これは加熱によりコンクリート中に元々あったナノ孔が消失し、sintering もしくは新相生成により生成した粒状構造間の間隙に相当するマクロ孔のみを有するより粗大な構造へ転化したものと推察される。さらに、(c)は深さ 1cm のサンプル写真であるが、倍率が低いにも関わらず大きなひび割れが発生している。図-4 においてヒステリシスが小さいままでガス吸着量が増加した原因は、高温加熱によるひび割れにより比較的大きな空隙が発生したためと考えられる。

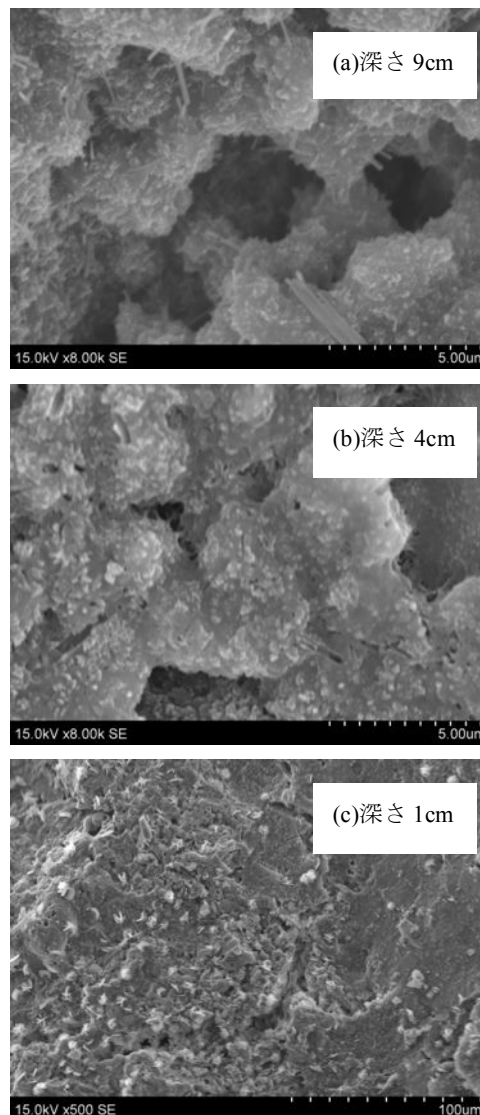


図-5 各深さの SEM 写真

4. 結論

テルミット反応を用いて急激に高温加熱を行ったモルタルの細孔構造について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) モルタル中における熱の伝達は緩慢であり、2cm の厚さで伝わる温度が急激に低下する。
- (2) コンクリート中の細孔構造は加熱温度により変化する。200°C 程度の加熱であっても sintering が生じ細孔構造は大きい方にシフトする傾向を示した。また、600°C 以上に加熱した場合、モルタル自体に微細なひび割れが生じる。

【参考文献】

- 1) 林久資, 緑川猛彦: 高温加熱を受けたコンクリートの再養生による強度回復, 土木学会第 71 回年次学術講演会 V-369, pp.737-738, 2016.9
- 2) 加藤優志, 五十嵐豪, 西脇智哉: 1150°C までの高温履歴を受けたセメント硬化体の力学的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.687-692, 2016.7