

200°Cに曝露された坑井セメント硬化体の微細構造と強度に関する基礎的研究

埼玉大学大学院 正会員 ○浅本 晋吾
 埼玉大学 非会員 金富 明恵

1. はじめに

従来型石油に代わる代替資源として重質油の利用が期待されており、重質油を回収する技術の一つとしてSAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)がある。SAGDは重質油の豊富なカナダで開発され、地下数百メートルのオイルサンド層に高温の水蒸気を坑井に圧入し、重質油の粘性を下げて回収する技術である。圧入する水蒸気は約200°Cの高温であるため、坑井のセメント硬化体に組織変化やひび割れなどをもたらし、高温水蒸気や地下のH₂Sなどの有害ガスの漏洩経路を生み出す可能性がある。

本研究では、SAGD坑井に使用されるセメント硬化体が200°Cという高温に曝されたときの強熱減量、空隙構造、圧縮強度について、基礎的な検討を行った。また、石油分野の油井セメントだけでなく、土木分野で用いられている普通ポルトランドセメントとフライアッシュの坑井への適用性についても検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いるセメントは、油井セメント(OWC)、普通ポルトランドセメント(OPC)、油井セメントの全質量の20%をフライアッシュセメントに置換したもの(OWCFA)の3種類とし、配合は水粉体比44%のセメントペーストとした。打設後1日で脱型し、20°Cの封緘養生を材齢28日まで行い、高温曝露を行った。

曝露温度は、SAGD坑井の高温水蒸気の圧入を想定した200°Cとした。坑井のセメントペーストの周辺環境は、現場の地盤環境に依存し複雑な境界条件となり得るが、本研究では、「200°C乾燥」とオートクレーブ容器内を200°C水蒸気で満たした「200°C湿空封緘」という両極端な2環境に、養生後すぐに3日間曝露した。

養生直後、200°Cの各環境での曝露した試験体で、強熱減量試験、水銀圧入試験、さらには圧縮試験を行った。水銀圧入試験と強熱減量試験では、20×20×80mmの角柱供試体を200°C曝露後に5mm角程度に砕いた試料を用い、圧縮試験では、φ50×100mmの円柱供試体を用いた。

強熱減量率は、各条件で、105°Cで平衡まで乾燥させたのち、950°Cで24時間以上加熱したときの105°Cに対する質量の減量率で求めた。水銀圧入試験では、試料作製後、約3時間アセトンに浸しながら真空で引き水和を停止し、試験前まで真空デシケータ内で保管した。水銀圧入試験は24時間凍結真空乾燥を施した後、水銀圧入式ポロシメータを用いて空隙分布の測定を行った。水銀の表面張力は0.484N/m、水銀と試料の接触角は130°とし、円筒形モデルを用いて直径3nm~360μmの範囲を対象に空隙分布を算出した。圧縮試験は、上記円柱供試体を、養生後、200°C曝露後すぐに室温で冷ましたのち、JIS A1108に準拠して行った。

3. 試験結果及び考察

(1) 強熱減量

図1に強熱減量率の結果を示す。強熱減量率は、養生直後に比べ、乾燥、湿空封緘環境ともに200°C曝露によって小さくなり、200°C環境で結合水の一部が逸散したことが要因と考えられる。200°C湿空封緘では、湿潤環境にもかかわらず乾燥環境より強熱減量率が小さい。200°Cで、湿空封緘環境は乾燥環境と異なった水和物を生成することがXRD解析から示唆され、これらの水和生成物の一部が950°Cでも消失しないため強熱減量が小さくなったと考えているが、これについては今後の検討課題としたい。

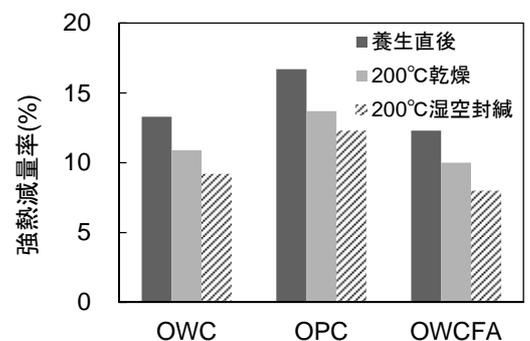


図1 105°Cに対する強熱減量率

キーワード 油井セメント, SAGD, 強熱減量, 空隙構造, 圧縮強度

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 埼玉大学工学部建設工学科 TEL 048-858-3556

各配合で比較すると、OWCはOPCに比べ、 C_3A が少ないだけで他の鉱物組成、比表面積はほぼ同等にもかかわらず、強熱減量率は小さい。XRD解析によれば、 $CaCO_3$ 量がOPCの方が若干多いことが示され、これがOPCの強熱減量率を大きくした一因と考えられる。フライアッシュを混入すると水和の進行が遅くなるため、強熱減少率は最も小さくなった。

(2) 水銀圧入試験による空隙構造

OWCにおける200°C曝露前後の水銀圧入試験の結果を図2と図3に示す。OPCとOWCFAも、OWCと同様の傾向を示した。200°C乾燥では、養生直後に比べ10nm以下の細孔が減少し100nm付近の細孔が増加し、総空隙量は増加した。これは、200°Cという厳しい乾燥条件でC-S-H相が脱水縮合し数nmの空隙は消失する一方で、空間ができ、100nm付近の空隙が増加したためと考えられる。

200°C湿空封緘では、100nm以下の細孔が減少、1000nm付近の細孔が増加し、総空隙量は200°C乾燥より増加した。本条件では、200°Cで水蒸気が飽和している状態であるため、曝露中空隙内の水分が逸散できず熱膨張し、周辺マトリックスに微細なひび割れを発生させ、空隙を粗大化させたことが考えられる。

(3) 圧縮強度

図4に、圧縮強度試験結果を示す。養生直後の強度は、各配合で強熱減量率の順に従い、水和率の違いが強度の違いをもたらしたと思われる。200°C乾燥に曝露した供試体では、曝露前よりも圧縮強度が増加した。強度増加の原因は、高温乾燥条件に曝露することで水和が促進したこと、200°Cという厳しい乾燥環境で吸着水などが逸脱し、固体の表面エネルギーが増加し、亀裂進展のための応力が大きくなることなどが考えられる。200°C乾燥曝露後の圧縮強度においてOWCとOPCでは違いは見られなかったが、フライアッシュを混入したOWCFAでは強度増加の割合が大きくなった。強度発現の遅いフライアッシュ混入セメントでは高温に曝露されることで、ポゾラン反応が促進され空隙が緻密化し、強度が増加したと考えられる。

200°C湿空封緘に曝露した供試体は、圧縮強度が大きく低下した。明確な原因は現状明らかではないが、上述のように内部の飽和水の熱膨張で、微細なひび割れが発生し、湿空封緘環境であるためひび割れは水で飽和したままで固体の表面エネルギーは増加せず、ひび割れが伸展しやすく強度が大きく低下したことが理由として推察される。フライアッシュを混入したOWCFAでは特に強度低下が大きく、曝露前の約1/10まで低下したが、フライアッシュの反応は緩慢であるため、より長期の養生のもと検討が必要だと思われる。

4. 結論

本研究では、SAGD坑井へのOPCとOWCの適用性について基礎的な検討を行ったが、明確な違いは見られなかった。100°Cを超える地熱を持つ大深度では、OWCにシリカヒュームを混和することが石油分野では一般で、SAGD坑井でもシリカヒュームを加えないと、OWCの特性が活かされないことが分かった。フライアッシュの混和の効果については、より長期の材齢での検討が必要と思われる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（挑戦的萌芽研究，課題番号：25630182，研究代表者：浅本晋吾）の補助を受けて実施した。また、X線解析は、宇部興産（株）の協力により実施した。ここに記して謝意を表す。

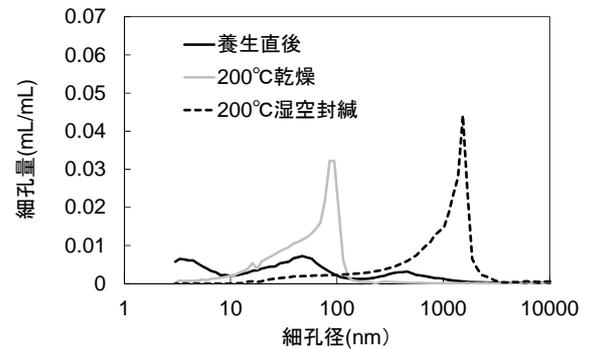


図2 OWC空隙分布

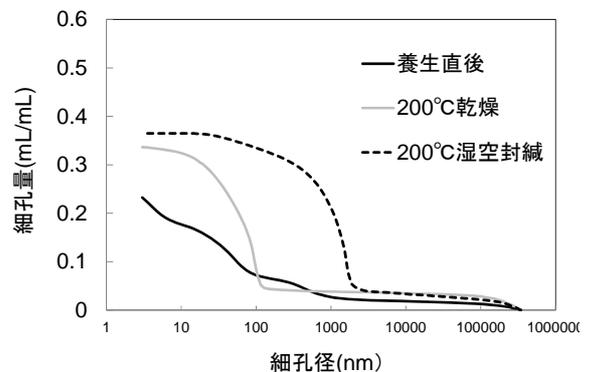


図3 OWC累積細孔量

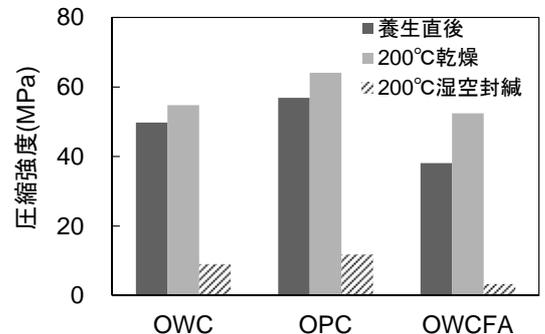


図4 圧縮強度結果