

CO₂注入坑井の力学的安定性に対するセメント硬化体の影響に関する研究

埼玉大学 学生会員 ○平井 遼介

埼玉大学 正会員 浅本 晋吾

1. 序論

近年、二酸化炭素排出削減を見据え、地下数 1000m 以下の大深度領域において、二酸化炭素を閉じ込める CCS（二酸化炭素地中貯留技術）という最先端技術が欧米を中心に着目されている。本技術においては、地下深くまで通じる坑井に高濃度の CO₂ を注入するため、坑井は、高圧、高温といった地下の厳しい環境、高濃度 CO₂ に長期間曝され、力学的、化学的な劣化を伴うことが予測される。従って、こうした劣化のメカニズムを明確にすることが、有害ガスの地上漏洩防止に必要不可欠である。本研究においては、坑井に用いられるセメントペーストに着目し、CO₂ 注入坑井の安定性の検討を行うこととした。様々な配合のもと、強度、熱特性といったセメントペーストの基礎的な特性を計測し、得られた実験データを CCS における熱-構造 FEM 解析に反映させ、CO₂ を注入した際の坑井の力学的な安定性を確保できる最適な配合について検討した。

2. セメントペーストの材料特性の検討

(1) 実験概要

実験に用いるセメントは、普通ポルトランドセメント(OPC)、石油分野で一般的に用いられるオイルセメント(OC)、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを 20%置換したフライアッシュセメント(FA)の3種類とし、水粉体比(W/B)は 0.44%とした。実験は、圧縮・直接引張試験、熱伝導率・比熱測定を行った。養生温度は、地下 600m 付近の坑井を想定した温度 20℃と、地下 2000m 付近の坑井を想定した温度 50℃とし、いずれも水中養生とした。圧縮・引張試験に関しては、5*10cm の円柱供試体で計測した。また、熱伝導率・比熱測定については、4*4*16cm の角柱供試体を用い、市販の熱特性計で計測した。

(2) 実験結果および考察

圧縮・直接引張試験の結果をまとめたものを表-1、

表-1 強度試験結果 (20℃環境)

供試体名	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	引張強度 (MPa)
OPC	41.28	15.88	1.51
OC	48.08	16.48	2.02
FA	47.43	15.52	0.48

表-2 強度試験結果 (50℃環境)

供試体名	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	引張強度 (MPa)
OPC	36.64	15.05	1.32
OC	52.08	14.73	3.04
FA	52.19	16.85	2.01

表-3 熱伝導率、比熱試験結果

	熱伝導率(W/m・K)		比熱(MJ/kg・K)	
	20℃	50℃	20℃	50℃
OPC	0.851	0.710	1.745	2.059
OC	0.892	0.896	1.806	2.103
FA	0.857	0.955	1.869	2.549

表-2 に示す。また、表-3 は熱伝導率・比熱測定の結果である。なお、計測データはすべて材齢 28 日のものである。

圧縮・引張強度において、OC と FA は、20℃の場合よりも 50℃の場合の方が大きい結果となった。これは、高温により水和反応が促進したためと考えられる。一方、OPC においては、20℃の場合よりも小さい結果となった。コンクリートは一般的には高温環境では、長期強度が小さくなるため、本実験における OPC では、その傾向が観察されたと考えられる。FA の場合は、フライアッシュのポゾラン反応により長期強度が継続したものと考えられる。熱伝導率については、50℃の場合の OPC は低下、OC はほぼ変化なし、FA は上昇という結果となり、比熱は 3 種類とも上昇する結果となった。コンクリートは一般的に、0~60℃の環境において温度が高く、含水率が高いほど熱伝導率は高くなる傾向がある。OPC については、強度から推察されるように、高温で養生すると空隙率が粗くなり、内部構造の連結性が低かったため伝導率が低下したことなどが考えられる。

キーワード：大深度地下、CCS、オイルセメント、熱-構造 FEM 解析

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 TEL 048-858-3556

3. 実験結果に基づいた熱-構造 FEM 解析

CCS の熱-構造 FEM 解析には、フランス原子力庁 CEA が開発した FEM ソフト「Cast3M」を使用して行った。本研究では、地下 600m 付近の坑井を想定した 2 重構造のタイプの坑井と、地下 2000m 付近の坑井を想定した 1 重構造のタイプの坑井で二次元解析を行った。本稿では、紙面の都合上、1 重構造タイプの坑井の解析のみを示す。

解析メッシュは、鋼材であるケーシングとセメントペーストからなる坑井と、その周辺に十分に長い地盤要素を配置した(図-1)。各材料間には、引張強さを持たないジョイント要素を配置した。セメントペーストの材料特性は、表-1~3 に示す結果を入力した。ケーシングには一般的な鋼材の材料特性、地盤要素には、透水性の高い砂岩の材料特性を用いた。また、本解析では、熱移動によるセメントペースト内の応力変化に着目するため、弾性解析とした。地下 2000m 付近の坑井において、地熱による周辺の温度は 50℃ と設定し、注入する二酸化炭素の温度は 30℃ と仮定し(図-2)、注入圧は最大 7.5MPa である。

図-3(a)~(c)は、3 種類のセメントを用いた場合の、地下 2000m 付近の坑井を想定した解析結果であり、坑井の接線方向に作用する応力を示している。また、図-3(d)は、OC を用いた場合の、各材料界面の開きの経時変化である。

坑井の接線方向に作用する応力において、引張応力が観察された。これは、初期の CO₂ の注入圧のためであると推察される。また、全てのセメントの場合において、セメントペーストと地盤の界面に 6μm 程度の開きが見られた。これは、熱伝導率の高いケーシングとセメントペーストが地盤より先に熱収縮するためであると考えられる。しかし、界面の開きは 10μm 以下であれば許容範囲であることが報告されており¹⁾、CO₂ 漏洩の可能性は低いと考えられる。

FA を使用した場合、坑井に作用する引張応力が他のセメントの場合より大きくなった。一方で、界面の開きについてはさほど違いは見られなかった。また、本実験で得られた各セメントの引張強度と、坑井の接線方向に作用する引張応力を比較した場合(図-3(a)~(c)横線)、50℃環境において、OPC、FA を使用した場合ではセメントペーストにひび割れが生じる結果となった。また、OC においても、坑井に偏心

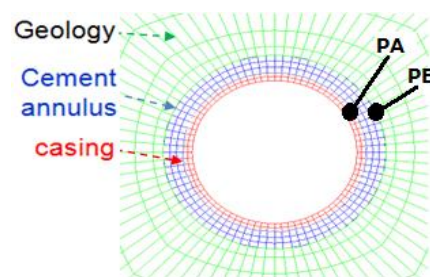


図-1 1重構造の坑井のFEMメッシュ

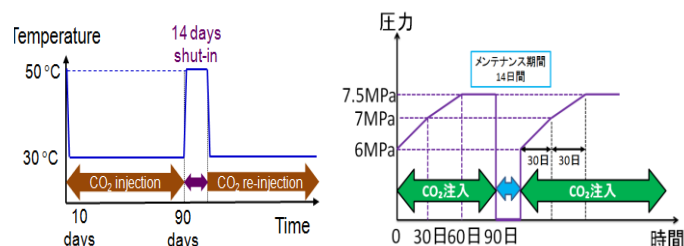


図-2 CO₂ 注入によるケーシング内側の境界条件

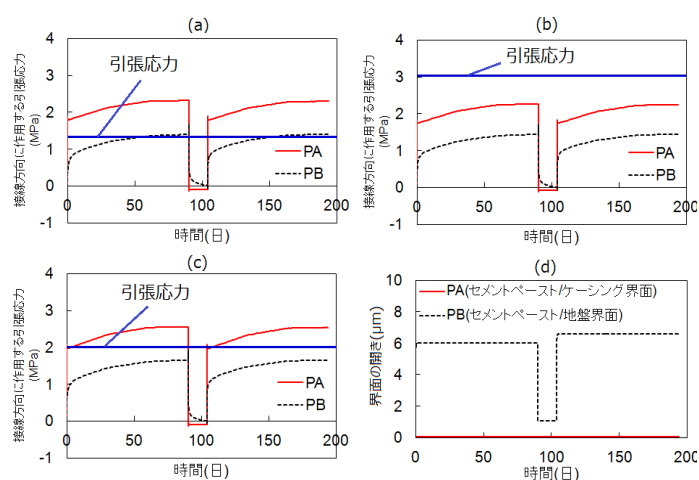


図-3 (a)~(c) : 接線方向に作用する応力変化と (d) : 界面の開き ((a)OPC, (b)OC, (c)FA, (d)OC)

などが生ずれば、容易にひび割れが発生する可能性があることが示唆された。

4. 結論

オイルセメントは、50℃環境において、20℃環境よりも圧縮強度が増加し、高い引張強度を保持したことから、坑井に適したセメントであることが確認された。また、解析結果より、界面の開きは 6μm 程度であり、坑井に大きな影響を与えないことがわかった。今後 CO₂ による化学的劣化も含め、セメントの適合性について総合的に検討を行いたい。

参考文献

- 1) V. Barlet-Gouedard et. al: A solution against well cement degradation under CO₂ geological storage environment, international journal of greenhouse gas control, 3, 206-216, (2009).