

高強度高緻密モルタルを用いた放射性廃棄物処分廃棄体の開発（2）

—一体成型時における温度応力ひび割れ評価の考え方と熱力学データベース—

原子力環境整備促進・資金管理センター 正会員 坂本 浩幸

日立製作所 正会員 ○川寄 透

太平洋コンサルタント 正会員 武井 明彦

太平洋セメント 正会員 片桐 誠

北海道大学 正会員 名和 豊春

東京大学 フェロー会員 魚本 健人

1. はじめに

財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターでは、止水性に非常に優れる高強度高緻密モルタルを使用して、収納する放射性物質の環境への放出を長期間防止することができる放射性廃棄物処分廃棄体（以下、廃棄体という）の検討を行っている。課題の一つに、廃棄体製作時の水和発熱による温度ひび割れ発生がある。本報告では温度ひび割れ解析を実施するためのツールの基本的な考え方を示すとともに、これに用いる高強度高緻密モルタルの水和反応に関する熱力学データを取得するための断熱温度上昇試験を実施した。

2. 一体成型法の概要

一体成型法とは、モルタルを連続的に打設して構造物と充填物を一体で製作する手法である。図1に示すように、技術的な特徴として、型枠内に廃棄物を吊り具で吊るして設置してから、モルタルの連続打設を開始し、廃棄物下部で強度が発現したところで吊り具を切り離し、上部まで打設する。1日気中養生した後、脱型し蒸気養生を行う。以上により、廃棄物の沈降の影響及び打ち継ぎのない廃棄体の実現できると考える。

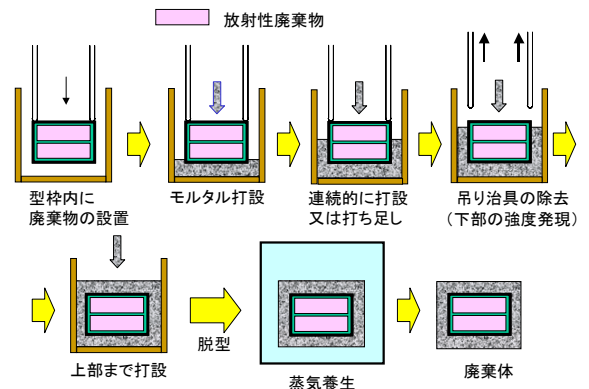


図1 一体成型法概要図

3. 温度応力ひび割れ解析の概要

廃棄体製作時の温度応力ひび割れの発生を評価するために、図2に示す連成解析ツールを開発している。本解析ツールは既存の温度ひび割れ解析[1]を参考にして、水和反応解析、伝熱解析、応力解析、ひび割れ発生判定の4つの部分で構成される。これは既存の伝熱・応力解析コードに発熱率密度、ヤング率、ポアソン比の温度、水和度に対する依存性に関するデータベースを取り入れて計算を行うものである。

しかしながら、既存の研究では単位結合材料がこれほど多いモルタルの断熱温度上昇データがない。そこで、次項に示す断熱温度上昇試験を行った。

4. 断熱温度上昇試験

水和反応解析において、任意の水和度、温度における発熱率を求めるためには、使用する材料である高強度高緻密モルタルの熱力学データベースを整備する必要がある。本モルタルの初期硬化過程では C_3S だけが寄与

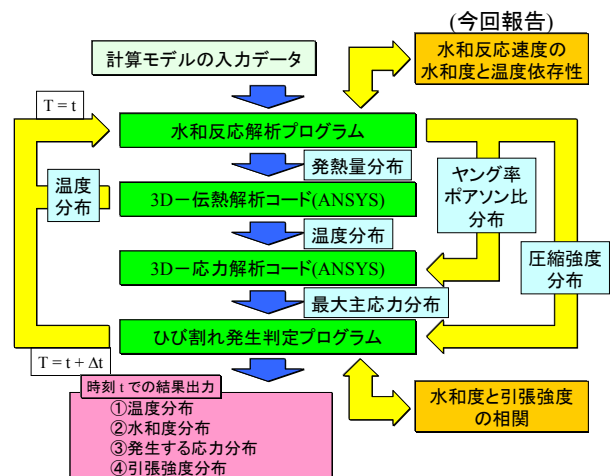


図2 温度応力ひび割れ解析フロー図

キーワード 温度応力ひび割れ、連成解析、断熱温度上昇試験、水和度、放射性廃棄物

連絡先：東京都港区虎ノ門 2-8-10、(財)原子力環境整備促進・資金管理センター TEL03-3504-1081、FAX03-3504-1297

する。そこで水和度を(その時点での発熱量)/(総発熱量)と定義し、発熱率は水和反応速度に比例すると考えた。各水和度において、水和反応速度 k と温度 T はアレニウスの関係式: $\ln(k/k_0)=-\Delta E_{\neq}/RT$ に従うとすると、整備するデータベースは k_0 及び $\Delta E_{\neq}$ の水和度依存性となる。ここで $\Delta E_{\neq}$ は見かけの活性化エネルギー、 k_0 は見かけの頻度因子をあらわす。これを求めるため、断熱温度上昇試験を実施し、 k_0 及び $\Delta E_{\neq}$ の水和度依存性を評価した。表 1 に試験で用いたモルタルの配合を示す。また、本モルタルに使用した低熱セメントの組成及び水和エンタルピーを表 2 に示す[2,3]。

表 1 モルタル配合(kg/m³)

水+混和剤	セメント	骨材
220	1000	1380

表 2 低熱セメントの組成と水和エンタルピー

鉱物名	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
組成比(wt%)	25	50	5	13
水和エンタルピー(kJ/mol)	-114	-43	-362	-205

断熱温度上昇試験は高強度高緻密モルタルの温度が過度に上昇するのを防ぐために、比熱が判っているアルミナ球を配合して行った。表 3 に試験条件を示す。

図 3 に試験結果の一例(ケース 1,2)を示す。温度上昇が始まるまでの時間は 30~40 時間であり、通常のモルタルと比較して凝結が遅いことが特徴である。

5. 活性化エネルギー、頻度因子の水和度依存性

取得した計 6 ケースの温度データに対し、各水和度における温度と水和反応速度をアレニウスプロットした。結果の一例を図 4 に示す。水和度毎の最小二乗近似直線の傾きと y 切片から、各水和度での $\Delta E_{\neq}$ 及び $\ln(k_0)$ を求めることができる。図 5 に $\Delta E_{\neq}$ 、 $\ln(k_0)$ の水和度依存性を示す。 $\Delta E_{\neq}$ 及び $\ln(k_0)$ とも分布は水和反応開始時と水和度 50%程度の 2 箇所ピークを持つプロファイルとなった。

表 3 試験条件

試験ケース	1	2	3	4	5	6
初期温度 (°C)	25	25	30	30	35	35
アルミナ球配合比(Vol%)	20	40	40	50	40	50

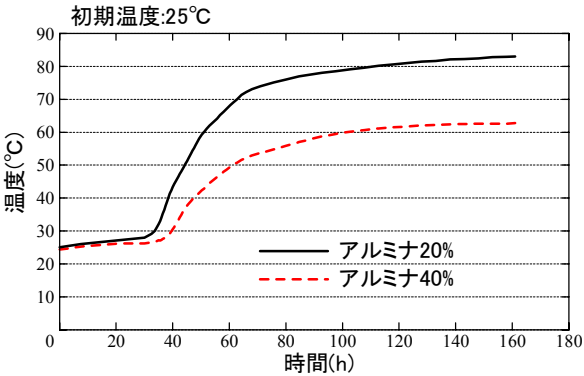


図 3 断熱温度上昇試験結果

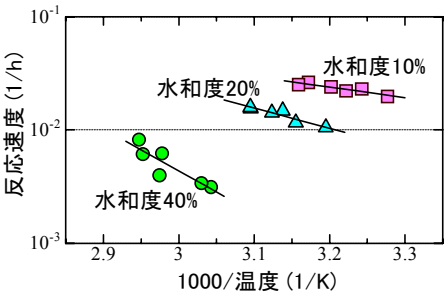


図 4 アレニウスプロットの一例

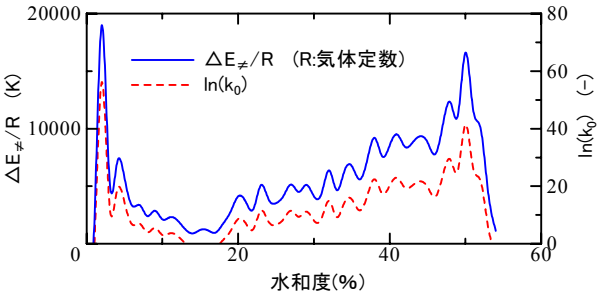


図 5 活性化エネルギー、頻度因子

6. まとめ

高強度高緻密モルタルの断熱昇温試験を行い、その結果から低熱セメント水和反応速度の水和度・温度依存性に関する熱力学データベース(図 5)を作成した。今後、本データベースを取り入れた解析ツールを使用して、廃棄体製作時の温度応力ひび割れを評価する。なお、本報告は、経済産業省からの委託による「低レベル放射性廃棄物処分基準調査」の成果の一部である。

参考文献

[1] 岸利治ほか, 複合水和発熱モデルに基づく温度ひびわれ制御設計, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No1, (1995).

[2] 大門正機, JME 材料科学 セメント科学-ポルトランドセメントの製造と硬化-, 内田老鶴圃, p48 (1989).

[3] セメント協会, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, セメント協会, p84 (1983).