

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（4）

－セメント水和による温度応力ひび割れ評価解析と検証試験－

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
	正会員	渋谷 和俊
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

著者らは、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パッケージ（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。ここでは、セメントの水和発熱過程、熱伝導および温度応力の連成を考慮した解析により温度応力によるひび割れ指数を評価する手法、および円筒状模擬試験体による妥当性検証結果について報告する。

2. 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1に示す連成解析ツールを開発した。本解析ツールは水和反応解析、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。本ツールではまず、断熱温度上昇試験から取得した熱力学データ[1]を用いて水和反応解析を行い、水和度 $a(t)$ と反応速度 $k(=da/dt)$ の空間分布を求める。水和度 $a(t)$ は温度依存性を示すため、見かけの活性化エネルギー ΔE_{\neq} 、頻度因子 k_0 を用いて $da/dt = k_0 \cdot \exp(-\Delta E_{\neq}/RT)$ のアレニウス則が成立すると仮定する。また、初期のセメント水和熱及び強度発現は主にエーライトに起因し、圧縮強度 f が a に、ヤング率と引張強度が $f^{0.5}$ に比例すること等を仮定する[2]。このようにして得たデータを汎用の伝熱解析および、応力解析コードに取り込み、最大主応力の空間分布を求め、これと引張強度空間分布を比較することでひび割れ指数の計算を行った。ひび割れの判定はひび割れ指数による確率分布によって行った。

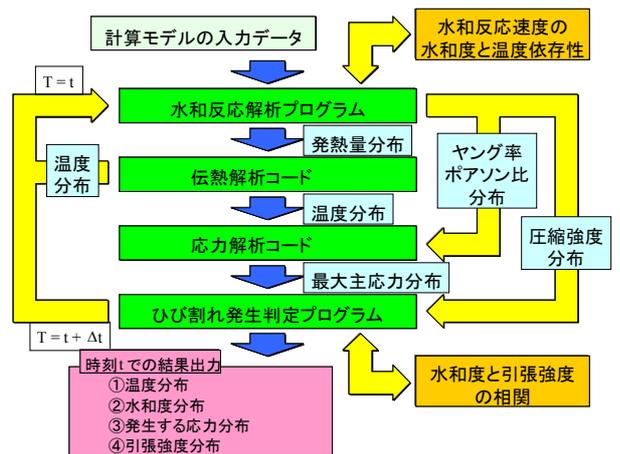


図1 温度応力ひび割れ解析フロー図

このようにして得たデータを汎用の伝熱解析および、応力解析コードに取り込み、最大主応力の空間分布を求め、これと引張強度空間分布を比較することでひび割れ指数の計算を行った。ひび割れの判定はひび割れ指数による確率分布によって行った。

3. 円筒状模擬試験体による解析ツールの検証

3.1 模擬試験体の概要

上記解析ツールを検証するため、円筒状模擬試験体を用いて、温度応力ひび割れに及ぼすモルタル厚さの影響について検討した。本試験体はφ15×30cmの円筒容器内の同軸上にヒータを設置し、容器とヒータの間にモルタルを打設したものである。ヒータの径を変化させることにより、モルタルの厚さを2.5cm、5.0cm、6.5cmの3水準とした。ヒータ温度は各場合ともモルタル打設後40時間まで20℃とし、それ以降は60℃まで急速に上昇させた後60℃を維持し、容器外面は自然空冷とした。表1に解析条件を示す。試験ではモルタル中に歪ゲージを埋め込んで歪量を測定し、解析と実験の結果を比較した。

キーワード 温度応力ひび割れ、連成解析、水和度、ひび割れ指数、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

表1 簡易円筒モデル解析条件

雰囲気温度	高強度高緻密モルタル 熱伝導率	高強度高緻密モルタル 熱膨張率	熱伝達率
20°C	1 W/m ² ・°C	1×10 ⁻⁴ /°C	5 W/m ² ・°C

3.2 解析結果

図2に水和反応が平衡に達したときの径方向の応力分布を示す。モルタルの肉厚が2.5cmの場合では円筒外面での応力が高くなっており、6.5cmでは内面が高くなっている。また、5.0cmの場合は、ピークを持たず平坦な応力分布となっている。

次に応力が最大となる地点における引張応力、引張強度及びひび割れ指数の経時変化を図2に示す。どの場合でもヒータの加熱開始とともに強度、応力ともに急激に上昇している。ひび割れ指数はモルタルの肉厚が2.5cmのとき約0.3であり、ひび割れが入る可能性が非常に高いことを示す。一方、5.0cmのとき指数は約2.4であり、ひび割れは入らないものと予測された。モルタル6.5cmのときには指数は約1.1であり、ひび割れ発生確率は約70%と予測された。

3.3 実験結果

解析と同一条件にて実験を実施し、ひび割れの有無を観察した。モルタルの肉厚が2.5cmの場合では円筒外面にひび割れが見られ、5.0cm及び6.5cmでは見られなかった。

なお、計測した歪み量から、肉厚が2.5cm及び6.5cmの場合は歪み量が200 μ m/mを超えても増加し続けているのが認められ、ひび割れの発生したと考えられる。しかし、6.5cmの時にひび割れが観察されなかったのは、図2に示したように内面にひび割れが発生したためと推論される。また、肉厚5.0cmの時の歪み量は、100 μ m/m以下であった。

以上の結果より、実験と解析の傾向が一致しており本解析ツールによるひび割れ評価の妥当性が確認された。

4. まとめ

水和発熱過程、熱伝導および温度応力の連成を考慮した解析により、温度応力によるひび割れ発生確率を評価する手法を開発し、円筒状模擬試験体において妥当性を検証した。なお本報告は、経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等」の成果の一部である。

参考文献

- [1] 坂本浩幸他、本学会第57回年次学術講演会予稿集 CS10-054.
- [2] 荒井康夫、セメントの材料化学、大日本図書(1984).

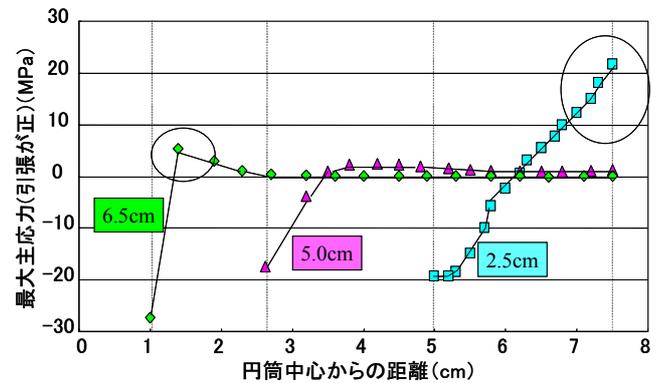


図2 応力の径方向分布

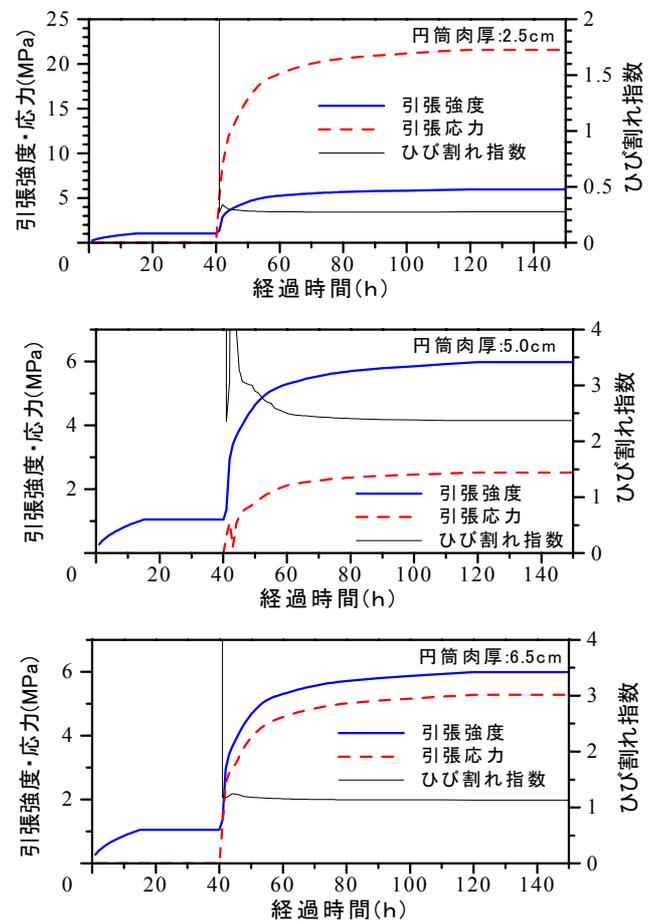


図3 強度、応力、ひび割れ指数の経時変化