

熱／土／水／空気連成解析によるベントナイト緩衝材の再冠水挙動解析

福島工業高等専門学校	学生会員	○小林	千莉
福島工業高等専門学校	正会員	金澤	伸一
福島工業高等専門学校	学生会員	市川	希
福島工業高等専門学校	学生会員	武藤	尚樹
福島工業高等専門学校	学生会員	柳井	正樹
西松建設(株)技術研究所	正会員	石山	宏二

1. 研究背景

高レベル放射性物質の地層処分に用いられるベントナイト緩衝材は、施工初期の廃棄体周辺の間隙の充填、放射性物質の移動抑制などの性能が期待されている。しかしながら、地層処分の処分期間は数万年から数十万年とされ、廃棄体の崩壊熱により緩衝材は高温環境に曝されることから、この長期間に緩衝材としての要求性能を維持できる仕様設計を決定することは困難である。そのため、近年は解析による性能把握が重要視されている。そこで本研究では、熱/土/水/空気連成解析コード(DACSAR-MP)を用いた供用過程における処分坑道の再冠水シミュレーションを行うことにより、再冠水後のベントナイト緩衝材の力学挙動の把握を行った。

2. 膨潤圧試験の要素解析

2-1. 解析条件

構築した解析コードの再現性を検討するため、温度を変化させた膨潤圧試験の要素解析を行った。図1に、解析モデル、図2に水分特性曲線、表1に材料パラメータを示す。解析モデルは、上端を非排水・排気境界、下端を排水・非排気境界とした。また乾燥密度を 1.6Mg/m^3 、初期飽和度を 20%、温度を 30°C 、 60°C 、 90°C とし、要素下端から吸水させた。透水係数と透気係数は表1の値を使用した。なお、透水係数、透気係数の異方性は考慮していない。ここで、 λ : 圧縮指数、 κ_0 : $\text{Se}=0$ における膨潤指数、 $M(=q/p')$: 応力比、 ν' : ポアソン比、 l : 粒状性消失を制御するパラメータ、 k_w : 飽和透気係数(m/day)、 n_E : ECモデルのフィッティングパラメータ、 a , n : 不飽和化による圧密降伏応力の倍率を決定するパラメータ、 S_{r0} : 吸水水が占める飽和度、 k_a : 透気係数(m/day)、 G_s : 土粒子比重、 c_s , c_w , c_a : 土粒子、水、空気の比熱(kJ/kg K)、 λ_s , λ_w , λ_a : 土粒子、水、空気の熱伝導率(kJ/m day K)である。

2-2. 解析結果

図3に初期飽和度 20%の膨潤圧の経時変化を示す。解析の結果、温度が高い方が初期の立ち上がりが大きくなる傾向が確認された。この傾向は、市川らが行った膨潤圧試験(図4)でも同様の傾向が確認されている。しかしながら、実験では 60°C と 90°C の平衡膨潤圧の差が小さいことから、ベントナイトの膨潤特性には温度により閾値が存在する可能性が考えら

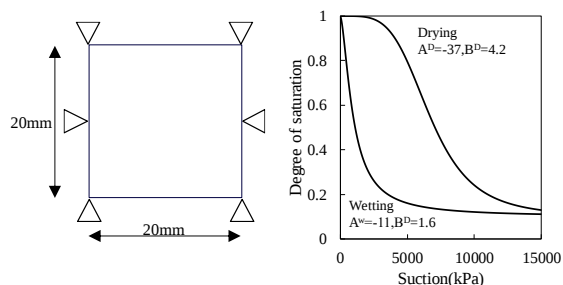


図1 解析モデル

図2 水分特性曲線

表1 材料パラメータ

λ	0.14	k_a	1.39
κ_0	0.01	G_s	2.79
M	0.5	c_s	0.631
ν'	0.45	c_w	4.182
l	10	c_a	1.006
k_w	5.5×10^{-9}	λ_s	56.96
n_E	1.8	λ_w	52.01
a	20	λ_a	2.22
n	1	ρ_w	998.2
S_{r0}	0.1	ρ_a	1.166

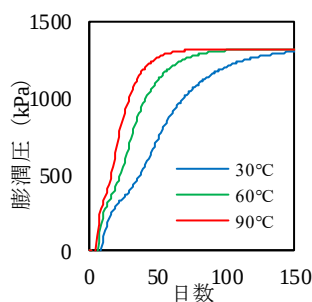


図3 解析による膨潤圧の経時変化

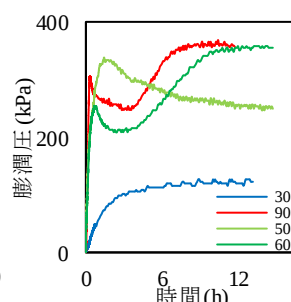


図4 実験による膨潤圧の経時変化

キーワード ベントナイト, 温度, 地層処分

連絡先 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 福島工業高等専門学校 TEL 0246-46-0827

れる。今回は、この閾値について試験数が少ないため、力学・化学的根拠が明確になったうえで今後表現を試みる。

3. 処分坑道断面における再冠水シミュレーション

3-1. 解析条件

図5に廃棄体を縦置きに定置する場合の処分坑道断面の解析モデルを示す。解析モデルは第二次取りまとめで示されていた断面形状を参考にし、緩衝材はベントナイトと珪砂を7:3の割合で混合したものを仮定し、土粒子の比熱を0.673(kJ/kg K)、熱伝導率を69.56(kJ/m day K)とした。その他の材料パラメータは表1のものを用いた。また、初期飽和度は50%とし、坑道周囲前面から冠水させ、10、100年間の時間をかけて水位を300mまで上昇させた。なお、熱は廃棄体周囲に境界条件として100°Cを与えた。

3-2. 解析結果

図6に縦置き断面内における廃棄体上部（以下、要素38）と埋め戻し材中央部（以下、要素250）の空気圧の経時変化、図7に飽和度の経時変化、図8に温度の経時変化をそれぞれ示す。図6より、要素38と要素250では再冠水期間10年の方が0.1MPaほど大きい値を示す結果となった。図7より、要素250では再冠水期間100年において飽和していることが確認できるが、要素250の再冠水期間10年と要素38では完全に飽和しないことが確認された。これは熱の影響に加え、再冠水後に一部不飽和領域が存在し、坑道内部は高い空気圧環境下におかれることが推測される。したがって、不飽和領域が存在することで熱伝導率が低下し、熱の影響を受ける期間が長くなることで、緩衝材や埋め戻し材の性能を低下させる可能性があると考えられる。また、ガラス固化体の周囲を覆う金属製のオーバーパックは、地下水との酸化還元反応により水素ガスを放出することが報告されている。実際には再冠水後の坑道内部の空気圧はさらに上昇し、緩衝材にクラックが生じる可能性もあると考えられる。

図8によると、要素38では約0.5日、要素250では約10日後に温度が100°Cに達することが確認された。しかしながら、実際には廃棄体の崩壊熱は徐々に減衰するため、今後はガラス固化体からの発熱量の減少を考慮した解析を行う。

4. まとめ

今回はシンプルな境界条件の下で、再冠水シミュレーションを行った結果、廃棄体付近で不飽和領域が存在することが確認された。今後は、坑道下端からの水位上昇や、廃棄体の温度変化を考慮するなど、想定しうるシナリオを複数設定し予測を行っていく。

参考文献

- 1) 市川希, 金澤伸一, 林久資, 武藤尚樹, 石山宏二: 温度変化を考慮したベントナイト緩衝材の膨潤特性, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集 CS7-017(2018)

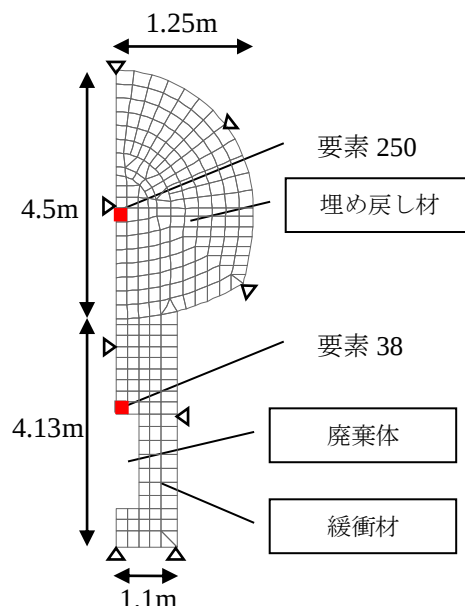


図5 縦置き断面の解析モデル

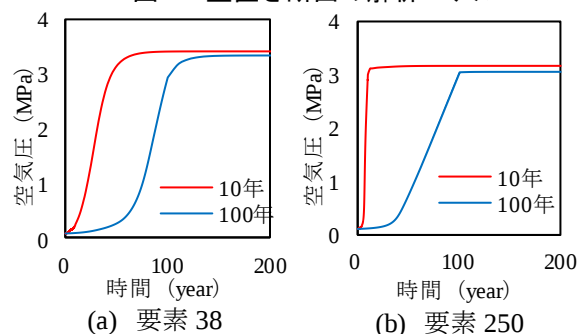


図6 空気圧の経時変化

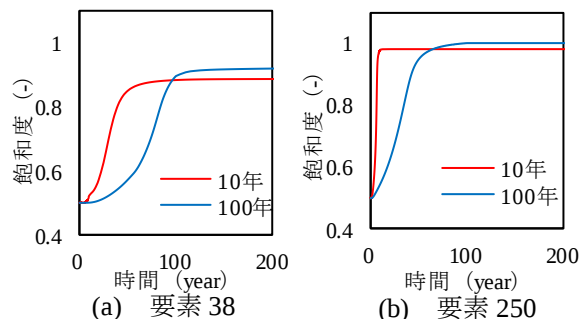


図7 飽和度の経時変化

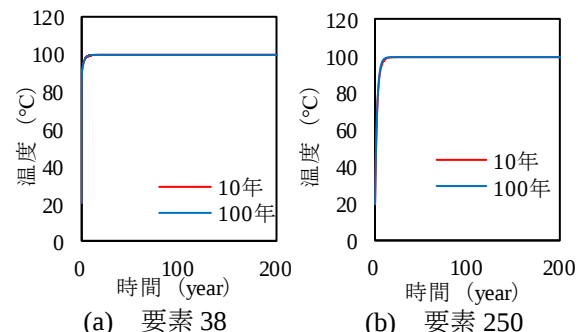


図8 温度の経時変化