

土丹の力学的性質と地層処分場建設の可能性に関する研究

環境システムコース・地下空間環境学

96646 木村 有仁

1. はじめに

現在懸念されている CO₂ 排出源は主に化石燃料である。CO₂ 総排出量が少ない発電方法の一つに原子力発電があり、現在日本の電力の約 35%²⁾を担っている。その際の問題点の一つが放射性廃棄物の処分である。各国で検討された結果、現状では地層処分が最も安全と考えられている。現行の計画⁴⁾では放射性廃棄物をガラス固化・埋設し、対象岩盤は硬岩から軟岩までとされている。特にわが国では、処分を許される場所は限られており、地層の選択幅はあまりないと考えられる。しかしこれまでの研究は、花崗岩をはじめとする硬岩を対象としたものが多く、上総層群土丹層（以下土丹と呼ぶ）等の軟岩に関しては、基礎的なデータさえ不十分である。

本研究では、軟岩の一つとして土丹を選んだ。土丹を選んだ理由は次の通りである。

比較的広い範囲に分布する。強度は低いが、透水係数が小さいので、地下水の移動が少ない。これまでの経験から機械化掘削に適しており施工が比較的簡単である。これらの理由から、土丹層は、放射性廃棄物の処分地として検討するに値すると考えた。また、放射性廃棄物のみならず、他の有害廃棄物の処分地としても検討に値すると考えている。

そこで、土丹に関して不足している基礎データを收拾した。その内特筆すべきは下記の二点に関するデータを実験的に求めたことである。

一軸引張試験 基礎的なデータであるが、試験の実施が極めて困難であり、調べた限りこれまでに成功例が無い。

粘弾性的性質（時間依存性） 1万年程度の長期にわたる動向を検討するには是非必要なデータであるが、これも実験が極めて困難であり、これまでに成功例が無い。

上記の他に、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、三軸圧縮試験を実施し、また試験片のX線断層写真も撮影した。これらのデータを踏まえて、時間依存性を考慮した構成方程式のパラメータを求めた。さらに、構成方程式を組み込んだ有限要素法(FEM)プログラムにより、土丹層に設けた処分場の挙動を調べた。

2. 実験結果

Table.1 に実験から得られた物性値をまとめる。

2.1 一軸引張試験

一軸引張試験の応力-歪線図を Fig.1 に示す。この引張試験は世界で初めて成功したと考えている。結果は極めて興味深く、残留強度が認められた。これは予期せぬことであった。要因として複数のクラックが入り、クラック進展が途中で止まることなどが考えられる。わずかでも残留強度が期待できれば、処分場の安定性は大いに増加し、地下構造物施工の安全性が増す。

2.2 粘弾性的性質

多くの試験片を要する通常の方法は使用できない。そこで、載荷途中に載荷速度を何回か変えた試験を行った。弾性体や塑性体では、載荷速度を変えても応力は変わらないが、

時間依存性を呈する粘弾性体では、載荷速度を上げると応力が増加し、載荷速度を減らすと応力が減少する。Fig.2 に示すような歪速度を変化させた一軸圧縮試験結果より、粘弾性（時間依存性）を調べた。また三軸圧縮試験の結果、強度破壊点以降のクラック開口が少なく延性的に振舞うことがわかった。応力-歪線図を Fig.3 に示す。

Table.1 実験より得た土丹の物性値

圧裂引張強度 (MPa)	0.65
一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	4.55
一軸引張強度 σ_t (MPa)	0.33
一軸圧縮ヤング率 (MPa) 50%強度接線	673
一軸引張ヤング率 (MPa) 20%強度接線	717
周圧 2MPa 時の破壊差応力 σ_c (MPa)	7.87
周圧 4MPa 時の破壊差応力 σ_c (MPa)	7.70
周圧 8MPa 時の破壊差応力 σ_c (MPa)	7.53
(n,m)	(30,20)
内部摩擦角 (度)	59
粘着力 σ_0 (MPa)	0.61
ポアソン比 (含む大変形)	0.35
密度 (g/cm ³)	2.01

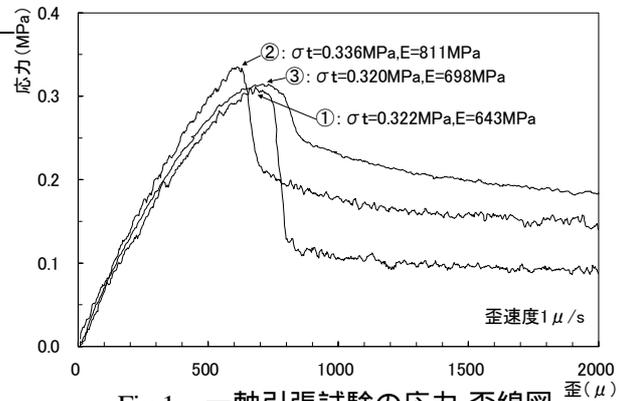


Fig.1 一軸引張試験の応力-歪線図

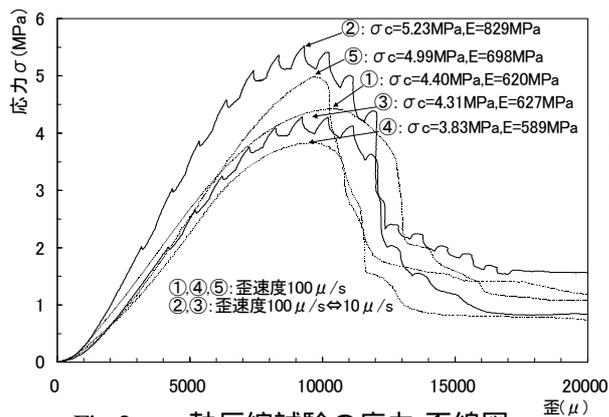


Fig.2 一軸圧縮試験の応力-歪線図

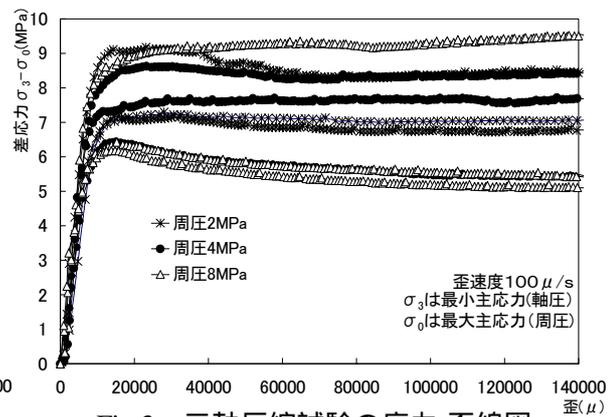


Fig.3 三軸圧縮試験の応力-歪線図

3. 計算機実験

3.1 構成方程式

一般に破壊を表現できる構成方程式（応力と歪の関係を表す式）は、極めて稀である。種々検討した結果、硬岩用に開発されたが、比較的式が簡単で扱い易いコンプライアンス可変型構成方程式¹⁾を採用した。検討結果を Fig.4 に示す。詳細は省くが、この構成方程式の特徴は次の点である。

境界（載荷）条件を選ばない。すなわち、クリープ、応力緩和、定歪速度、定応力速度のいずれにも対応できる。

基礎式は簡単であるが、項を足すことにより精密化が簡単にでき、また、その方法については定式化されている。

1次元の場合には、多くの境界条件のもとで解析解が得られている。

FEM との相性がよく、簡単に組み入れられる。

パラメータの数が少なく、比較的少ない試験より全パラメータを求めることができる。

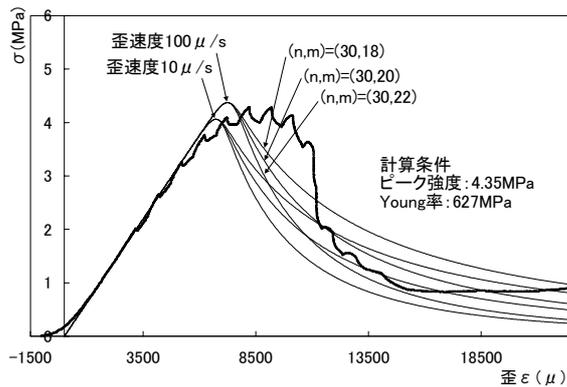


Fig.4 構成方程式による計算結果
(一軸圧縮試験片#3)

Table.2 計算条件

坑道半径 r_i (m)	: 1.5
地表からの深さ[土被り](m)	: 100
地圧(MPa)	: 2
オーバーバックの状態	: 坑内横置き
オーバーバック設置間距離 s (m)	: 4
オーバーバック半径 $d_0/2$ (m)	: 0.5
オーバーバック肉厚(m)	: 0.2
オーバーバック長さ L (m)	: 2
充填材(緩衝材)の体積弾性率 K (GPa)	: 0.1
腐食速度 C_r (μ m/year)	: 1, 2, 3, 5
オーバーバック腐食部の体積膨張係数 C_v	: 2, 3
岩盤の一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	: 4.55
岩盤の引張強度 σ_t (MPa)	: 0.65
岩盤の初期ヤング率 $E=1/\nu_0$ (MPa)	: 673
岩盤のポアソン比	: 0.25 次第に増加
岩盤の構成方程式パラメータ (n,m)	: (30,20)
時間 t (years)	: 設置後10万年まで

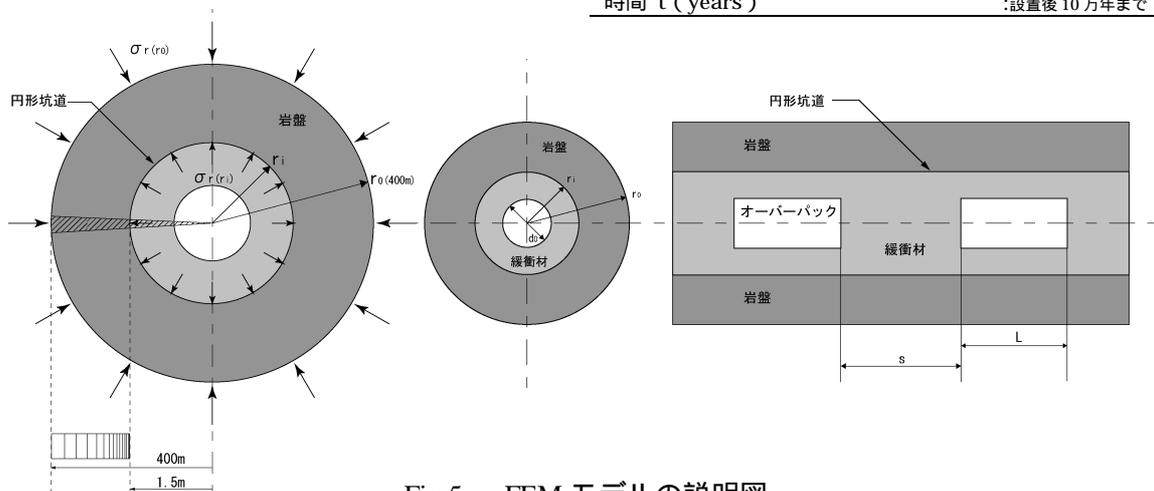


Fig.5 FEM モデルの説明図

3.2 有限要素法による計算

構成方程式を組み込んだ FEM プログラム³⁾により、10 万年までの計算機実験を行った。用いたモデルを Fig.5 に、計算条件を Table.2 に示す。坑壁の半径増分 r (Fig.6) を見ると最初若干収縮し、後に膨張に転じる。坑壁の r の経時変化 (Fig.7) を見ると、どの条件下でも両者は圧縮応力となり、1 万年後の値は一軸圧縮強度 (4.55MPa) の半分以下に収まっている。最も緩い条件の L12 と、最も厳しい条件の L53 の応力分布をそれぞれ Fig.8 と Fig.9 に示す。Fig.9 においても坑壁から 4m 程度離れると応力の変化は少なく、またその値も充分小さくなっている。以上のことから FEM の結果をまとめると下記の通りである。

少なくとも 1 万年までは、致命的な破壊は生じない。(処分場は潰れない)

処分場まわりに緩み領域が生ずるが、多くの場合その範囲は少なく、地下水の移動は限定的と考えられる。

引張破壊の発生は考え難い。

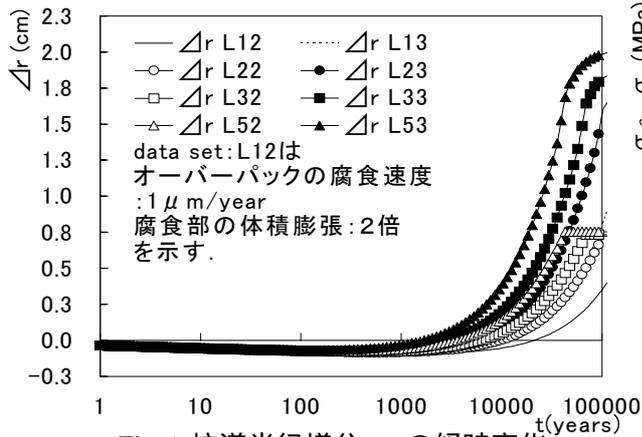


Fig.6 坑道半径増分 r の経時変化

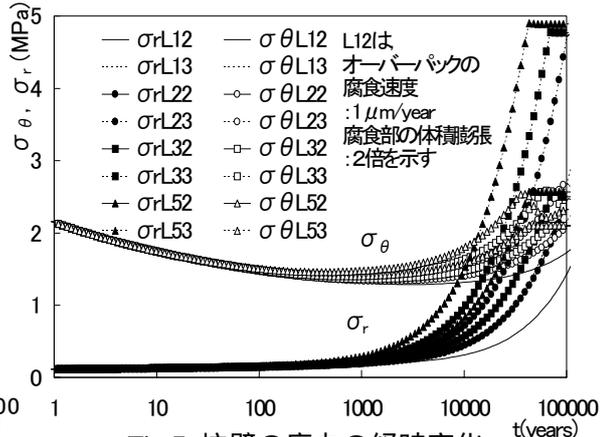


Fig.7 坑壁の応力の経時変化

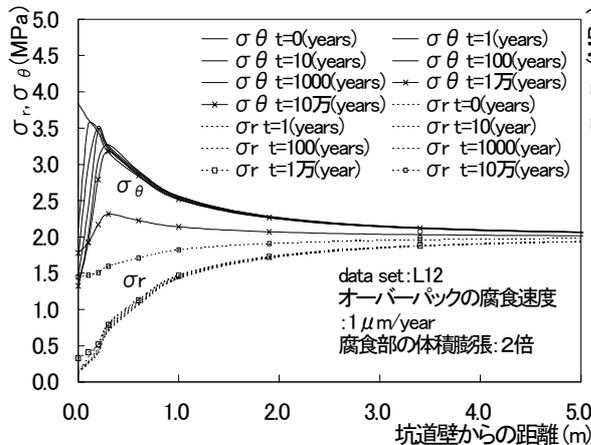


Fig.8 L12 の坑道周辺部の応力分布

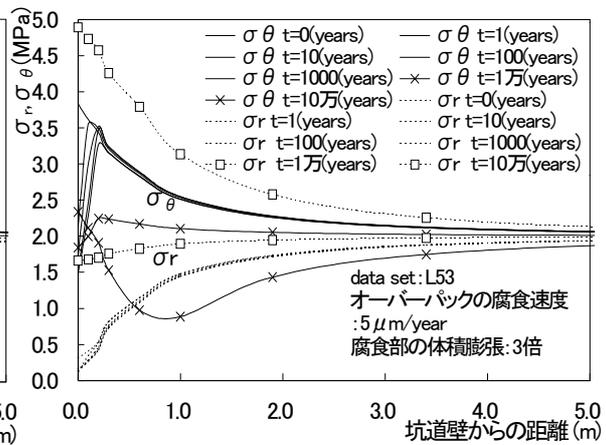


Fig.9 L53 の坑道周辺部の応力分布

4.まとめ

これらの計算機実験結果から推定する限りでは，土丹層に処分場を設置することは可能と考えられる．この結論が正しければ，地下水の流動，人間侵入の点も考慮して，比較的浅い箇所に，安価に処分場を建設できる可能性がある．また，安価なため放射性廃棄物に限定することなく他の廃棄物にも応用できる．課題として，超長期にわたる構成方程式の正しさが実証されていない事が挙げられる．この解決方法として，10年までは実験室実験，1000年までは人工物の調査，1000年以上は自然現象の爪痕の調査が考えられる．

本研究で得られた成果の内，最も独自性の高いものは，Fig.1であろう．ごく最近になって，地上の環境保全のため，地下に道路，鉄道，通信網，共同溝，倉庫，大規模空間などを建設しようとの機運が高まってきている．その際の開発候補予定地の地層は，土丹ないしそれに類するものがある．設計において，残留強度（引張における）が期待できるかどうかは重要であり，今回の実験結果はこのような観点から貴重と言える．なお，懸念される点を今一つあげておくと，土丹は鉄等を錆びさせる場合があり，長期にわたる物理化学的な挙動については，今後の検討が必要であろう．

参考文献

- 1) 大久保誠介・何昌栄・西松裕一（1987a）：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動 日鉱誌, Vol.03, p293-296
- 2) 原子力白書平成10年度版：第2章 大蔵省印刷局
- 3) 大久保誠介, 福井勝則（1999）：内圧を受ける円形坑道の長期安定性の検討 資源と素材, Vol.15; p9-15
- 4) 核燃料開発機構（1998）：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性