

堆積軟岩における空洞周辺の破壊現象に対する実験的および 解析的な検討

AN EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE FAILURE AROUND UNDERGROUND OPENINGS EXCAVATED IN SEDIMENTARY SOFT ROCKS

土井崇司*・大洞光央**・アイダン・オメル***・中間茂雄****

Takashi DOI, Mitsuo DAIDOU, Aydan Omeru and Sigeo NAKAMA

The failure was observed in around circular underground openings in soft sedimentary rocks. A series of laboratory and in-situ tests and numerical analyses were carried out to investigate the causes and mechanism of failure of the non-supported underground openings. Experiments were concerned with, physical, electrical and mechanical properties of sedimentary rocks and their water-content migration characteristics as well as the variations of the same parameters in the boreholes in laboratory tests, which may be indicators for the possible failure around the boreholes. Numerical studies were concerned with the conventional elasto-plastic stability analysis and also coupled analyses of water-content migration and stress field. Numerical studies indicated that yielding of rock mass was not possible if the short-term properties are used. Nevertheless, if the long-term properties are utilised, the yielding zone may develop at the crown and bottom of the boreholes. Coupled analyses indicated that rock may fail due to water-loss and the failure may resemble to onionskin-like fracturing. The failure due to this phenomenon would also be delayed. The delay depends upon the size of the boreholes

Key Words: multi-parameters, failure, underground opening, sedimentary rock, water content, diffusion

1 はじめに

現在、放射性物質の処分方法として最も有力な方法が地層処分法である。今まで地層処分に対して結晶硬岩が着目され、数多くの研究が行われてきた。しかし、結晶硬岩は不連続面を数多く含んでいるため、その透水性が問題となっている。そこで、透水性が低い堆積軟岩が注目されるようになってきている。一方、堆積軟岩の場合、強度が低いため、塑性化の可能性が高く、その難透水特性は失われることが考えられる。また、その力学特性は含水比などに大きく影響されることが知られている。東濃鉱山北延 NATM 坑道周辺の堆積軟岩に掘削した無支保状態の水平試孔において、硬岩の坑道掘削においてしばしば発生する「肌落ち」や「山はね」に似たような孔壁が崩壊する

* 学生会員 博士課程前期 東海大学大学院海洋学研究科 海洋工学専攻

** 学生会員 博士課程後期 東海大学大学院海洋学研究科 海洋工学専攻

*** 正会員 博士(工学) 東海大学海洋学部 海洋土木工学科

**** 正会員 核燃料サイクル機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

現象が観察された（写真・1）。東濃鉱山の堆積軟岩中で観察されたこの破壊現象に着目して、その破壊機構を明らかにするため、室内、現位置実験を実施し、解析を行った。本論文で、一連の実験・計測・解析について報告する。



写真-1 無支保状態の水平試錘孔における孔壁崩壊状況

2 周辺岩盤の力学特性および多重パラメータ応答

現地における堆積軟岩は大きく粗粒砂岩と細粒砂岩に分離されている。供試体の主な物理・電気特性、自然状態の単位体積重量、含水比、弾性波速度を求めた。また、力学試験より、引張強度、位置軸圧縮強度および摩擦特性を求めた。それぞれの砂岩に対する実験結果を表-1に示す。

表-1：東濃鉱山における砂岩の主な物理・力学特性

岩種	単位体積重量 (kN/m^3)	含水比 (%)	電気抵抗 ($\text{k}\Omega\text{m}$)	弾性波速度 (km/s)	引張り強度 (kPa)	圧縮強度 (MPa)	摩擦角 ($^\circ$)
細粒砂岩	17.00-22.33	6.68-15.77	0.24-4.14	1.51-2.22	644-861	4.73-5.82	43-49
粗粒砂岩	17.06-20.75	8.15-9.57	0.32-2.77	1.17-2.09	103-157	1.8-3.59	33-57

岩石の破壊時の応力・ひずみ・AE・温度・電位および電気抵抗応答特性を把握するため、開発した高精度圧縮試験機（OA-20KN）を用いて一軸圧縮試験を行った。載荷速度を 0.02mm/min として、試験中に、荷重、変位、AE、温度および電位測定を行った。一部の試験において、破壊時の加速度応答を求めるための計測も行った。また、一部の試験において、圧縮試験中の電気抵抗値を連続的に計測した。代表的な応力・ひずみ・AE・電位応答を図-1に示す。

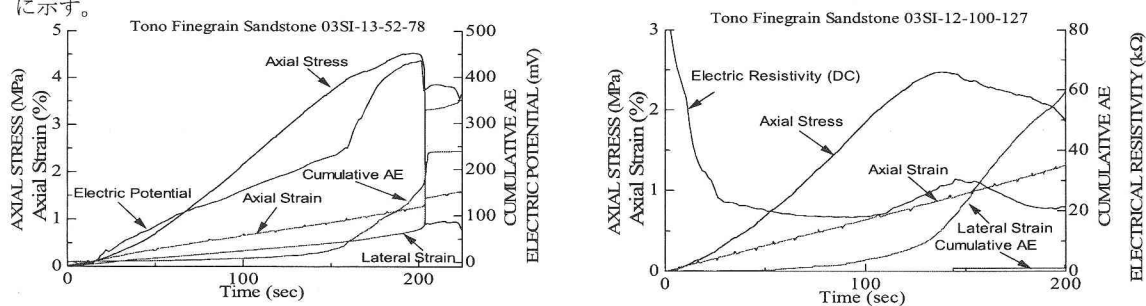


図-1 細粒砂岩の応力・ひずみ・AE・電位および電気抵抗応答

3 周辺岩盤の水分量拡散と体積ひずみに対する試験

岩石の力学特性は含水比（水分量）に大きく依存している。したがって、掘削後に現れる自由面とその周辺の温度・湿度環境によって、周辺岩盤内の水分量の移動現象が発生していると考えられる。そのため、採集された岩石試料（自然含水比が保った供試体）に関して坑内と室内環境で水分量の拡散試験を行った。試験の内容として、試

験周辺の温度・湿度を計測しながら供試体の重量と長さ変化を計測した。細粒砂岩の場合、水分量の変化と電気抵抗の関係を求めるため、連続的な電気抵抗計測も行った。坑内および室内試験に利用された供試体は同じものであり、両試験において計測は自動的に行われた。図-2は坑内および室内における実験結果を示す。実験結果よりわかるように、同温度・湿度環境で細粒砂岩は大きな体積変化を示し、一方、粗粒砂岩は大きな重量変化を示す。乾燥に伴って試験中に細粒砂岩に収縮亀裂が多数発生し、その亀裂幅は時間と共に大きく成長し、剥離現象が発生した。一方、粗粒砂岩の方は収縮亀裂がほとんど発生していなかった。

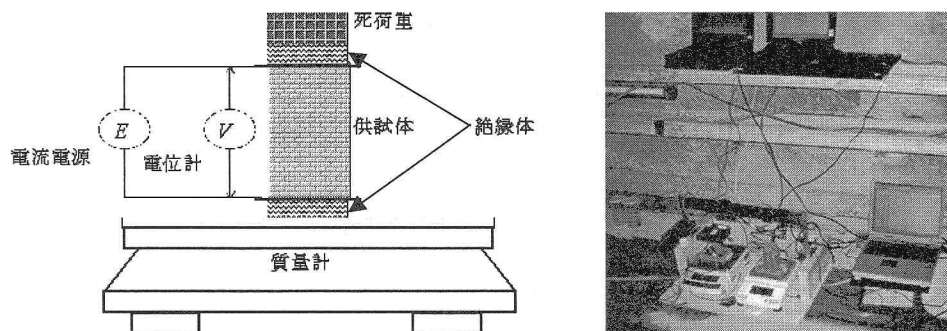


図-2 水分量拡散試験の様子

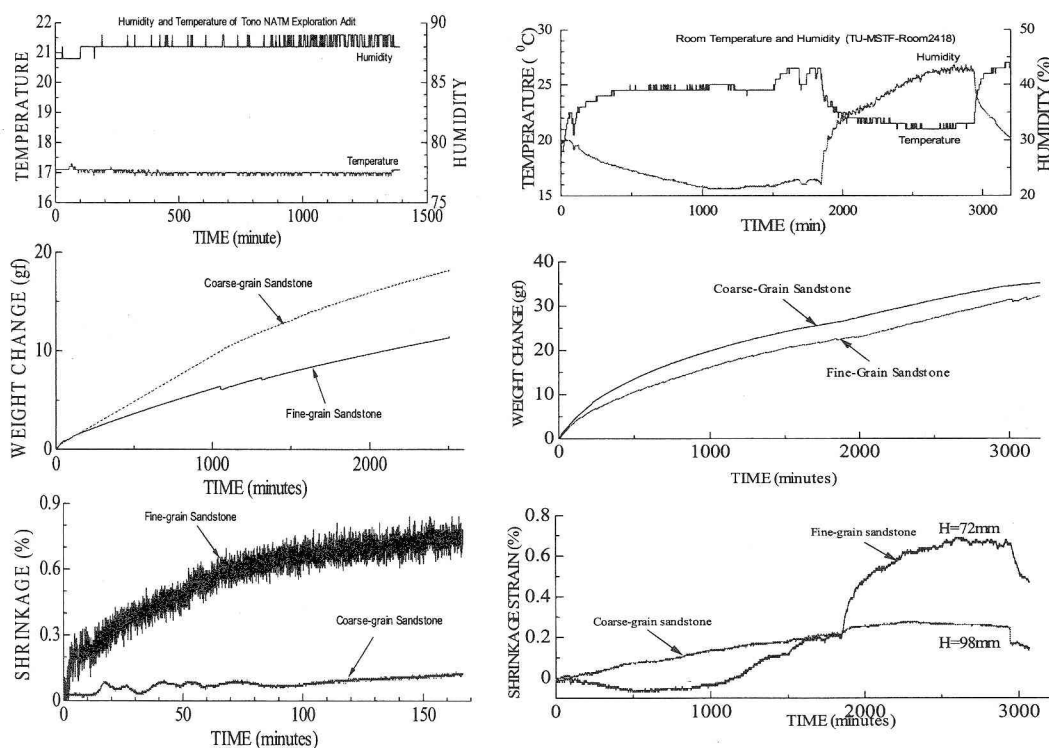


図-3 坑内水分量拡散試験における各計測パラメータの経時変化

4 空洞の室内模型試験

模型空洞には現位置から採取したボーリングコアサンプルである直径 20(cm)の円柱状の細粒砂岩を用いた。この円柱供試体に対して一軸圧縮試験で応力を一様に分布させるため、立方体の型枠に挿入し周囲をモルタルで固定し、

以下の図-4 の上に示すような形にした。使用したモルタルはセメントペーストのみと 4 号硅砂を 15%および 30% の 3 種類用意した。また、自然電位の応答を観察するため図-4 の下のように電位計電極を挿入した。さらに、破壊が進展して行く様子を明確にするため表面を薄くモルタルで覆った供試体も作成した。モルタルはいずれも水セメント比 30%のものを使用した。空洞における破壊現象をさまざまな角度から観察するため応力・ひずみ・AE・自然電位および加速度の計測を行った。供試体の両端に余分な電氣的信号を排除するため絶縁体を配置し、さらに外側に応力を一様に加えるための鉄板を配置した。応力を計測するための荷重計は破壊後の供試体の転倒を防ぐため供試体の上部に配置した。ひずみの計測には変位計を 2 つ用いてその平均を取った。破壊時の音を計測するため AE センサーを空洞真横の供試体側面に取り付けた。破壊時に供試体内部で発生するさまざまな電気信号を計測するため電位計電極を図のように配置した。予想される破壊面の上盤と下盤の加速度の違いを観察するため下の図のように加速度計も取り付けた。

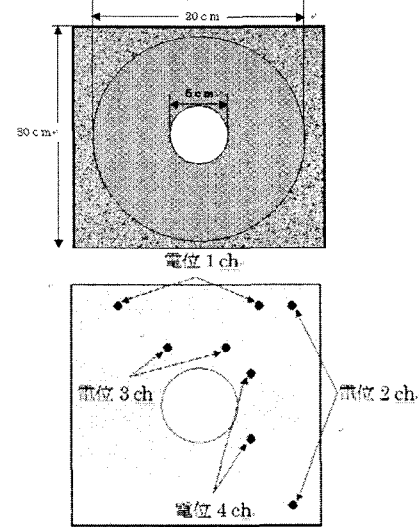


図-4 圧縮実験で用いた供試体

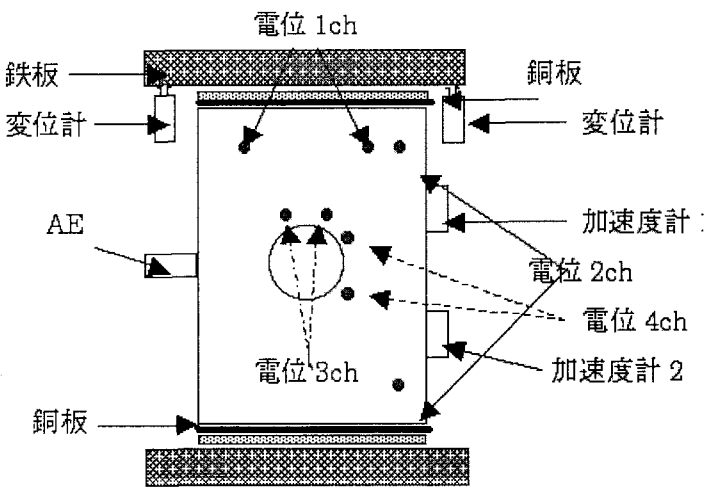
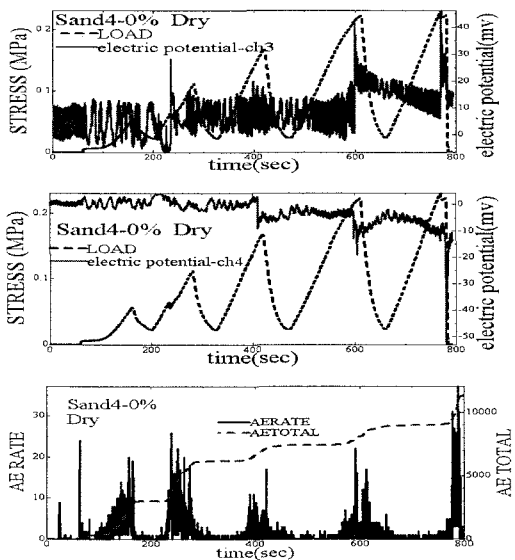
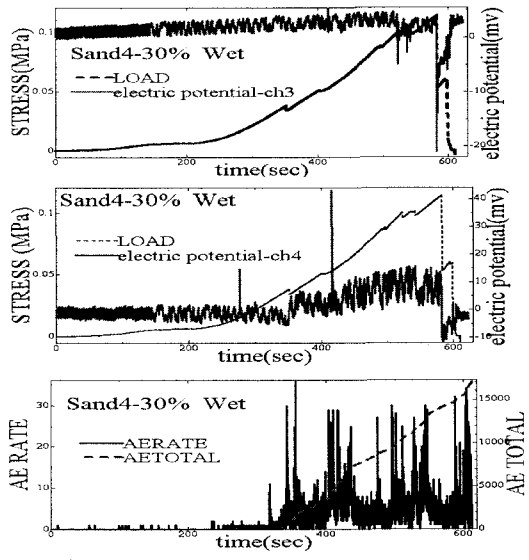


図-5 圧縮実験における計測装置の設定位置



(A) 乾燥状態



(B) 飽和状態

図-6 異なる含水比の力学実験における各計測パラメータ

図-6は一軸応力下における圧縮実験における計測結果で荷重を繰り返し载荷したものである。(A)は乾燥状態、(B)は飽和状態の供試体を圧縮実験したグラフである。図には示していないが、(A)と(B)の両方の実験で電位 1ch と 2ch での自然電位の応答が他の位置に比べて大きな応答が観察された。1ch は加圧盤によって拘束された部分であり、モルタル部分であることが最も大きな反応として現れた原因であると考えられ、同様に、2ch の反応が大きいこともモルタル部分の電氣的反応であるものと考えられる。

図-6の(A)のグラフに着目して、3ch と 4ch の自然電位の応答を比較してみる。いずれも破壊の前に自然電位の反応が出ており、4ch の方がより早い段階から応答が現れている。4ch の電極は、空洞が破壊される場合に圧縮により破壊される部分にあり、3ch の電極は引張りにより破壊される部分である。実験結果は双方の現象に対して自然電位の応答が現れることを示しており、崩壊の予測として自然電位は十分に利用可能であると考えられる。また、AE の応答は荷重曲線が不連続に変化する場合に 対応している。続いて図-6の(B)に着目すると、(A)の場合と同様に 3・4ch の両方で自然電位の応答が現れている。特に、3ch 空洞の天板付近では供試体と加圧盤付近で発生する大きな電氣的信号の影響を受けて大きな雑音が観察されるものの、破壊前に発生する自然電位の応答が観察される。東濃鉱山で発生した破壊現象が収縮亀裂の進展であることを考えると、この結果は大変興味深いものであると考えられる。

(A)と(B)を比較してもわかるように、飽和状態にある供試体の方が乾燥状態の供試体よりも強度がないことがわかる。

5 解析

5.1 応力・変形解析

はじめに東濃鉱山の解析で用いた短期および長期材料定数を表-2に示す。弾塑性解析では短期予測と長期予測の両方を解析行った。長期予測に使った表-2のデータは Aydan and Nawrocki (1998) が求めた大谷石と泥岩のクリープ試験の結果によるもので、周辺岩盤の降伏面が時間の経過とともに短期降伏面の 60%にまで収縮する実験事実に基づいている。

表-2：東濃鉱山の材料定数（短期/長期）

E (GPa)	ν	α	k (MPa)	ρ (g/cm^3)	ϕ (deg)	c (MPa)	σ_t (MPa)
2.0	0.26	0.128	1.0/0.6	18.0	22	1.0/0.6	0.8/0.48

短期および長期挙動に関して弾塑性解析手法を用いて得られた塑性域を図-7に示す。図-7(a)よりわかるように短期強度を用いた場合空洞周辺に塑性域が発生しないが、長期強度の場合(図-7(a))、弾性解析より推定される位置で塑性領域が発生し、塑性領域は対称である。

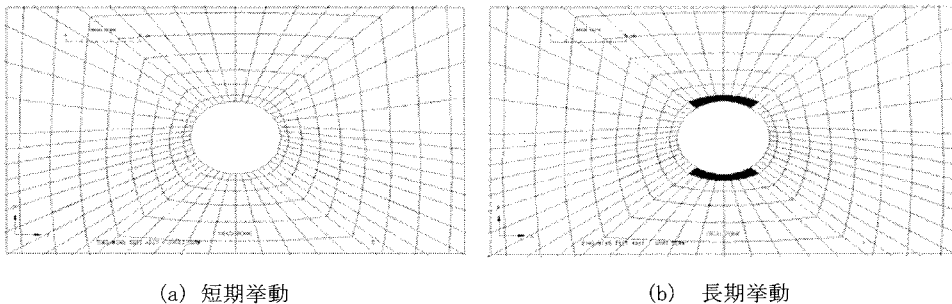


図-7：従来の弾塑性解析による塑性域

5.2 水分量拡散および応力連成解析

水分量の移動現象は基本的に拡散現象であり (Aydan 1998a, b)、ポテンシャル問題として定式化できる。水分量の変化に伴って、岩盤の物性値は変化する。その変化を水分量パラメータの関数として考え、発生する追加ひずみを膨潤圧や温度応力と同様な考え方をを用いてポテンシャルひずみとしてモデル化し、岩盤の変形挙動を求める。最終的に水分量移動の基礎方程式と運動量保存則に対する有限要素法の連立方程式は下記のように得られる。

$$[M]\{\dot{\theta}\} + [H]\{\theta\} = \{Q\} \quad (1); \quad [K]\{\dot{U}\} = \{\dot{F}\} \quad (2)$$

ここに

$$[M] = \int_V [N]^T [N] dV; [H] = k \int_V [B]^T [B] dV; \{Q\} = \int_V [\bar{N}]^T \{q_n\} d\Gamma;$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV; \{\dot{F}\} = \int_V [B]^T [D] \{\dot{e}_s\} dV + \int_S [\bar{N}]^T \{\dot{t}\} dS$$

上記の解析手法を利用して軸対称問題として空洞周辺 (空洞径 200mm) をモデル化し、他のパラメータは細粒砂岩のものと同等なものである。解析結果より水分量の拡散の変化が同様であるが、細粒砂岩における空洞の収縮変形は粗粒砂岩におけるものに比べ、大きな値を示す。その結果、細粒砂岩における空洞周辺に大きな引張り応力が発生する。図-8(a)および図-8(b)の解析結果の比較から、細粒砂岩中の空洞周辺で亀裂発生が推測される。今回の解析は軸対称であるため、空洞周辺における湿度環境の違いは検討していないが、異なる湿度境界条件を2次元解析で表現した場合、空洞周辺に見られる非対称破壊領域を解析的に再現可能であると思われる。

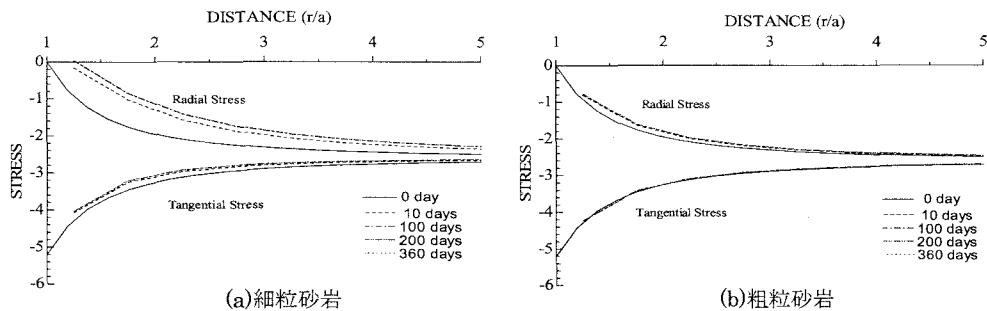


図-8 空洞周辺の応力分布の経時変化

6 まとめ

粘土を含む堆積軟岩は水分量の増加に伴って体積が増加し、逆に水分量が減少すると体積的に収縮する。また、体積変化は作用する圧力によって変化し、最も大きな体積変化は圧力が作用していない場合である。この挙動は力学的に膨潤現象に類似する。東濃鉱山にて観察された破壊現象に対する結論として、水分量の変化がおきた場合に孔壁にかかる荷重が圧縮から引張に転じる傾向があり、これが収縮ひずみと水分量の関係で、これにより孔壁崩壊が起こると考えられる。

参考文献

- Aydan Ö. & Nawrocki, P. (1998): Rate-dependent deformability and strength characteristics of rocks. *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*, Editors: A. Evangelista & L. Picarelli, 403-411.
- Aydan, Ö., Ito, T., Akagi, T. and Kawamoto, T. (1994). Theoretical and numerical modelling of swelling phenomenon of rocks in rock excavations. *Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, 3, 2215-2220.
- Aydan, Ö. (2003): The moisture migration characteristics of clay-bearing geo-materials and the variations of their physical and mechanical properties with water content. 2nd Asian Conference on Saturated Soils (UNSAT-ASIA 2003).