

# 岩盤の長期挙動と地下構造物の長期利用

## Long-term Behavior of Rock and Long-term Usage of Underground Structure

羽柴公博<sup>1</sup> 雷鳴<sup>1</sup> 大久保誠介<sup>1</sup> 福井勝則<sup>1</sup>

Kimihiko HASHIBA<sup>1</sup>, Ming LEI<sup>1</sup>, Seisuke OKUBO<sup>1</sup> and Katsunori FUKUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東京大学工学系研究科システム創成学専攻

<sup>1</sup>Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

**Abstract:** Underground structures are difficult to change plans under construction and to rebuild in use, and unacceptable to leave as is after use. So it is necessary to plan and build underground structures carefully and to use them for as long as possible. For example, tunnels and high-level radioactive waste repository should be used for a few hundred years and about ten thousand years, respectively. To estimate such a long-term behavior of rock and to assess such a long-term stability of underground structures, technical methods and knowledge in not only mining and civil engineering but also geology and geophysics are required. And it is also necessary to require consideration of economy and impact on the environment. In this paper, our recent studies concerning these issues were introduced.

### はじめに

地下構造物は地上の構造物に比べて、建設中の計画の変更や使用中での作り直しなどが難しく、また使用後に寿命がきたからといって放置することも認められにくい。そのため、地下構造物は事前に十分慎重に計画して建設する必要があり、建設後はできるだけ長期間にわたって使用することが前提となる。例えば、トンネルなどでは数百年、放射性廃棄物の地層処分施設では数千年から数万年の使用が前提となるであろう。このような長期間の岩盤の挙動を予測・評価するためには、鉱山学や土木工学だけではなく地質学や地球物理学などの手法や知見も必要となる。また、経済性や環境への負荷なども考慮する必要がある。本稿では、著者らが取り組んでいるこれらの問題に関する、最近の研究成果について紹介する。

### 岩盤の長期挙動の調査・研究方法

図1は、著者らが考える岩盤の長期挙動を対象とした調査・研究手法の概念図である。1 m 程度までの寸法領域、数年程度までの時間領域における岩盤の挙動は、主に室内試験により従来から研究されてきた。このような小規模な岩盤（岩石）の短時間の挙動に関しては、比較的精度の高い多くの試験結果が蓄積されているのが現状である。

その次の 100 m 程度までの寸法領域を対象とした研究としては、坑道やトンネル、各種地下空間における原位置計測や原位置試験が行われてきた。1000 年程度までの時間領域における岩盤の挙動を把握する際にも、このような人工物の観察、調査、計測、試験などが有効と考えられる。ただし、これまでに行われた原位置計測は、せいぜい 10 年程度までであり、それよりも長期間にわたる観察や計測、過去に建設された地下構造物の調査などは、今後の課題といえる。

100 m 以上の寸法領域、1000 年以上の時間領域における岩盤の挙動を理解するためには、自然物の調査や地質現象を利用するしかないであろう。鉱山学や土木工学の分野では、前提とされている構造物の使用期間はせいぜい 100 年程度である。そのため、1000 年やそれ以上の時間領域は超長期と解釈されることが多い。一方、地質学の分野では 1 万年程度は比較的短期間であり、地質の変化や安定性は、さらに長い十万年や百万年のオーダーで評価されることが多い。当然ながら、扱う寸法領域に関しても、鉱山学や土木工学に比べると地質学や地球物理学の方が格段に大きい。工学の主な対象は人工の構造物、地質学の主な対象は自然の地質という違いはあるが、両者の知見が必要な領域といえる。例えば、今後建設が予定されている、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設などは、この時間・寸法領域まで含めて検討すべき構造物であろう。

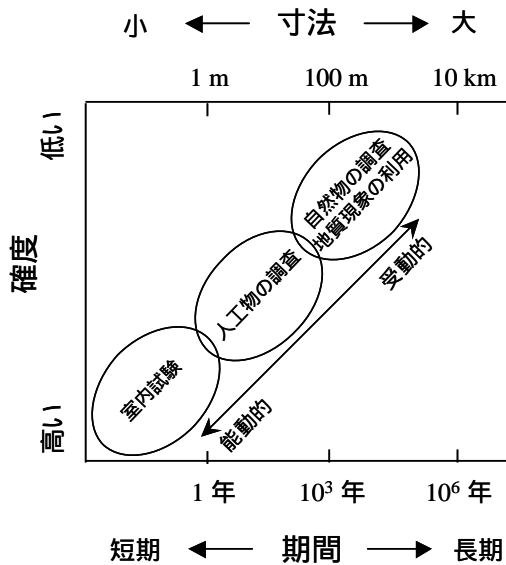


図1 岩盤の長期挙動の調査・研究方法の概念図。  
(文献[1][2]を一部修正)

### 最近の研究成果

岩盤の長期挙動を把握し、地下構造物の長期的な安定性を評価するためには、鉱山学や土木工学のような工学的な観点だけでなく、地質学や地球物理学などの理学的な観点、さらには経済性や環境への負荷なども考慮する必要がある。以下では、著者らの最近の研究成果を紹介する。

#### 岩盤の時間依存性と長期室内試験

岩盤は粘弾性の性質を有するので、変形から破壊に至る挙動には、時間依存性が観察されることが多い。例えば、強度や応力 - 歪曲線が載荷速度によって変化する(載荷速度依存性)。また、加える応力を一定に保ったとしても歪が増加したり(クリープ)、歪を一定に保っても応力が減少したり(応力緩和)する。しかし、このような岩盤の粘弾性の性質/時間依存性を、比較的短時間で簡単に調べる方法は一般に困難であるとされてきた。そこで著者らは、強度試験中に2種類の載荷速度を交互に切り換える新しい試験法を提案した[3]。図2が一軸圧縮応力下での試験結果の一例であるが、載荷速度を交互に切り換えることによって応力が増減する様子が見られる。図中の細線のように、得られた応力 - 歪曲線の内側と外側をそれぞれ滑らかにつなぎ、1本の試験結果から2種類の載荷速度に対応する応力 - 歪曲線を取得した。これらの結果より、載荷速度が遅いと強度が

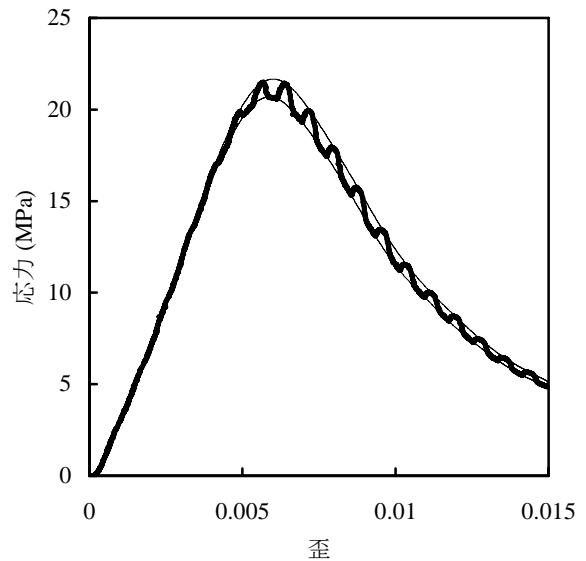


図2 載荷速度を交互に切り換える試験結果の一例。  
田下凝灰岩を用いた一軸圧縮応力下、気乾状態での結果で、歪が  $4 \times 10^{-4}$  増加することに歪速度を  $10^{-5} / s$  と  $10^{-4} / s$  で交互に切り換えた。太線が試験結果で、応力 - 歪曲線の内側と外側をそれぞれ細線で滑らかにつないだ。  
(文献[3]を一部修正)

減少し、岩盤の種類によって強度の低下率が異なることがわかった。

載荷速度が遅ければ遅いほど、すなわち試験時間が長くなればなるほど、強度はいくらでも小さくなるのであろうか。載荷速度が十分小さいときの強度は長期強度と呼ばれることがある。すなわち、ある応力条件下では、いつまでも岩石が破壊に至らないという考えがあり、それが長期強度に相当する。長期強度が存在するかどうか、また存在するとすればその値はどの程度かを知ることは、地下構造物の長期安定性を評価するために重要である。しかし、この問題は古くから議論されてきたものの、明瞭な結論が出ていないのが現状である。

著者らは、できる限り長期間の試験に耐えうる試験装置と、長期間にわたって精度の良い計測が行える計測システムについて検討し、載荷速度が十分小さい試験、すなわちクリープ試験を1997年に開始した。試験は一軸圧縮応力下で行い、加えた応力(クリープ応力)は対象とする岩石試験片の一軸圧縮強度の約30%である。2007年には試験開始から10年が経過し、過去にほとんど例のない、長期間の高精度なデータが取得された[4]。図3に試験結果を示したが、試験開始から10年が経過しても歪の増加が続

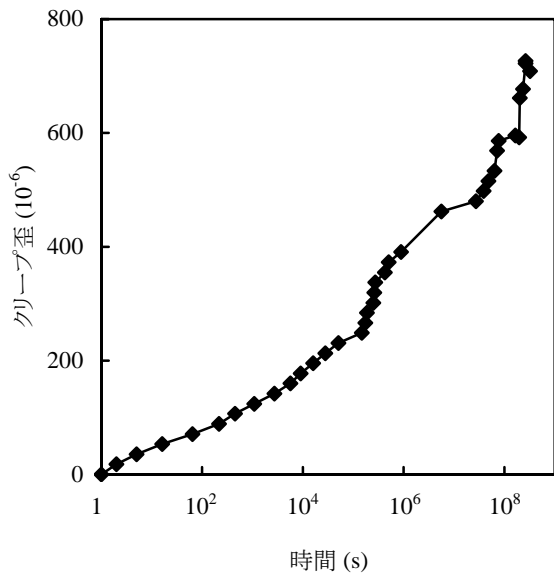


図3 約10年間のクリープ試験結果。田下凝灰岩を用いた一軸圧縮応力下、湿潤状態での結果。クリープ応力は一軸圧縮強度の約30% (文献[4]を一部修正)

いている。すなわち、この試験により、強度の約30%というかなり低い応力下でも変形が徐々に進行するという重要な知見が得られた。試験開始から10年が経過した現在でも変形は続いており、このまま試験を継続したらどうなるかについては、現今の知見では判断できない。可能な限り、淡々と試験を続けるのが賢明と考えている。

このような長期間の試験は試験装置の維持・管理が容易ではなく、数多くのデータを得ることも困難である。図1にも示したように、より長期的な岩盤の挙動を把握するためには、人工物や地質現象を利用する必要がある。

### 岩盤の長期強度と地質現象による検証

地下の岩盤は三軸圧縮応力状態であり、このような条件下での強度は、次式のクーロンの破壊基準で近似できることが多い。

$$f = c + a \cdot \sigma_3 \quad (1)$$

ここで、 $f$ は三軸圧縮応力下での強度、 $c$ は一軸圧縮応力下での強度、 $\sigma_3$ は最小主応力である。 $a$ は岩石によって2~6程度の範囲内で変化する定数である。

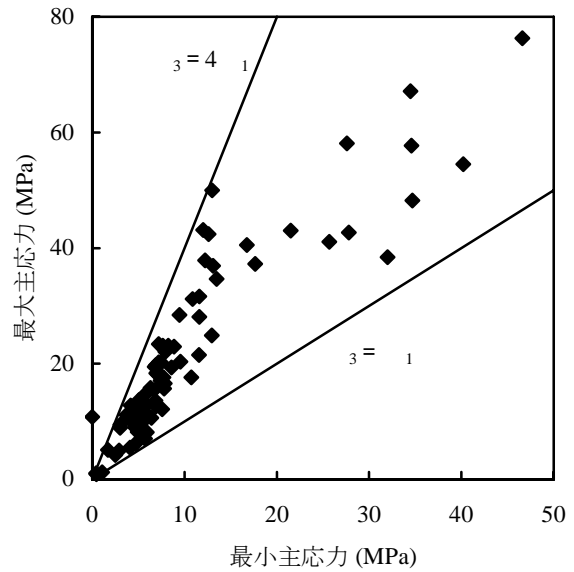


図4 過去に得られた地圧測定結果。(文献[1]を一部修正)

ここで、より安全側を考えて、 $c=0$ と仮定して議論を進めることにすると、(1)式は次式のようになる。

$$f = a \cdot \sigma_3 \quad (2)$$

$a$ は2~6程度なので、いつまでも破壊に至らない安定領域は次式で表される。

$$\sigma_3 < \sigma_1 < 2 \sim 6 \sigma_3 \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_1$ は最大主応力である。

著者らは、(3)式を検証するために、最近になって測定精度が向上し、さらにかんりのデータの蓄積がみられる地圧(rock stress)を利用することにした[1]。過去に得られている地圧の測定結果を整理し、図4に最大主応力 $\sigma_1$ と最小主応力 $\sigma_3$ の関係を示した。地圧とは地下の岩盤が受けている応力であり、ここに示した結果は、比較的信頼性が高いもの、比較的安定な岩盤におけるものである。図には $\sigma_1 = \sigma_3$ と $\sigma_1 = 4 \sigma_3$ を実線で示したが、測定結果はこの2本の実線の間にはほぼ収まった。すなわち、地圧測定結果は次式の関係をはほぼ満たしていることがわかった。

$$\sigma_3 < \sigma_1 < 4 \sigma_3 \quad (4)$$

地殻の変動が比較的少ない場所では、地下の岩盤

の最大主応力と最小主応力の関係は安定領域付近にプロットされると考えられる。逆に、安定領域に入っていない場合は、ある程度の時間が経過した後に破壊が生じ、安定領域に入るのではないかと考えられる。(3)式と(4)式はほぼ一致したが、この結果は、短期間の室内試験結果の外挿が、実際の長期間にわたる地質現象と矛盾していないことを示唆している。ただし、地質現象は複雑であり、過去の応力履歴の影響などについては不明な点が多く、今後も検討が必要である。

### 岩盤の長期安定性と回復機能

通常の工業製品では、部材は強度破壊点以前の領域で使用されることが前提とされていることが多い。しかし、地下の岩盤に関しては、加わる応力(地圧)が正確にはわからないし、正確にわかったとしても、部材をより強度の高い材料に変更することは通常はできない。そのため例えば、地下を掘削すると、掘削による応力状態の変化や受ける衝撃などにより、周辺の岩盤は何らかの損傷を受ける。その結果、この領域は強度破壊点(ピーク強度をとる点)を超えてしまうことがしばしばある。従来は、時間の経過にともなってこのような領域(緩み領域)は拡大していき、図5に示すように、地下構造物の安定性は徐々に低下すると考えられることが多かった。これは、他の多くの工業製品の設計に際して採用される考え方とほぼ同じである。

過去に掘削された坑道周辺の岩盤が、数十年が経過した後、掘削直後よりも硬化していることが報告されている[5][6]。また、切削や圧砕などの過程で、粉砕された岩片が、ビット(切削刃物)に硬く固着する現象なども確認されている[5][7]。すなわち、岩盤は一旦破壊しても、ある条件下では強度などの力学特性が回復する可能性があると考えられる。その結果、条件さえ整えば、図5に示すように、地下構造物の安定性はある時点から時間の経過にともなって回復する可能性がある。もしそうであれば、地下構造物の長期安定性の向上が見込まれる。鉱物粒子の集合体は、圧力と温度を受けて長時間経過した後に固まり堆積岩となる。しかし、これは地質学的な長期的な時間で生じる現象であり、工学的に重要な数十年から数千年の間に岩盤の力学特性が回復するかどうかについては、これまで系統的には検討されてこなかった。また、岩盤の回復機能に関係する現象は、経験的には知られていたかもしれないが、これも系統的な研究は行われてこなかった。

著者らは、室内試験により岩石試験片の強度回復特性について検討した[5]。試験では、図6に示すよ

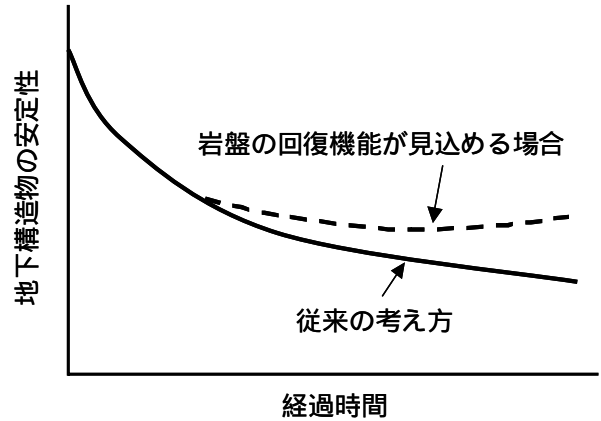


図5 地下構造物の長期安定性に関する概念図。(文献[5]を一部修正)

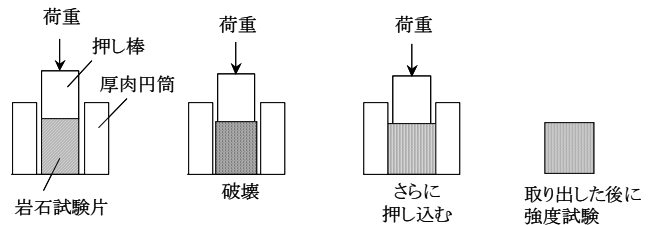


図6 岩盤の強度回復特性を調べる試験の手順。(文献[5]を一部修正)

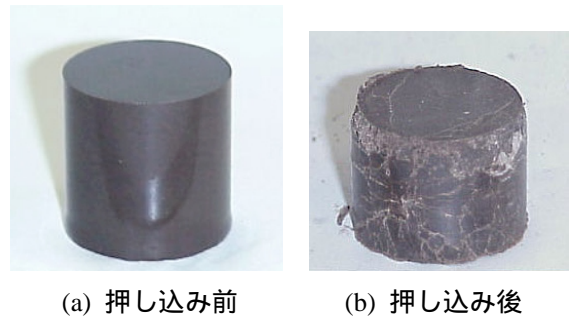


図7 押し込み前と押し込み後の幌延珪質泥岩の写真。湿潤状態で押し込み最大荷重が 58.8 kN での結果。

うに、円筒形の試験片を鋼製の厚肉円筒の中に入れて、いったん破壊させた。この段階では、岩石はまさにばらばらの状態である。引き続き、押し棒によってばらばらの岩石を押し込んだ。押し棒に加える荷重を、あらかじめ定めた値まで増加させた後に、

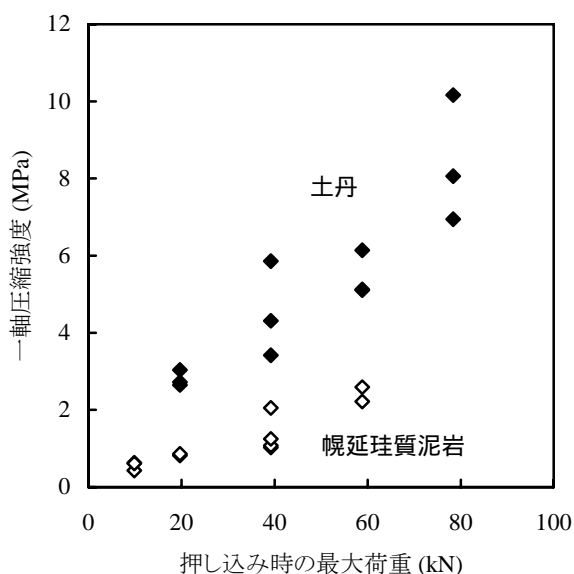


図 8 厚肉円筒から取り出した試験片の一軸圧縮試験結果。いずれの岩石とも湿潤状態での結果。(文献[5][8]を一部修正)

岩石を厚肉円筒から取り出した。図 7 には、厚肉円筒に入れる前の健全な試験片と、押し込み後に厚肉円筒から取り出した試験片の写真を示した。押し込み後の試験片の側面には細かいひび割れが見られたが、比較的滑らかであった。この取り出した岩石を用いて強度試験を行った。図 8 には、厚肉円筒内での押し込み時の最大荷重と、取り出した試験片の一軸圧縮強度との関係を示した。土丹の強度の回復は著しく、最大荷重 80 kN を加えた後の一軸圧縮強度は、健全な試料の一軸圧縮強度（平均値で 5.2 MPa）を上まわった。幌延珪質泥岩でも、押し込み時の最大荷重が大きいほど、一軸圧縮強度も大きくなった。今回の室内試験では、荷重を加えた時間はわずかであり、これが数年とか数十年続けば、さらに岩石は固化していくのではないかと考えられる。

### まとめと今後の課題

数千年前に建設された構造物のうち、現在でも残っているものは、岩石や岩盤で造られていることが多い。このように、岩盤構造物や地下構造物は高い耐久性を持っていると考えられるが、岩盤の長期的な挙動を予測したり、地下構造物の長期安定性を評価したりすることは容易ではない。そこで著者らは、図 1 に示したように、室内試験、人工物の調査、地質現象の利用などにより、このような問題に取り組

んできた。本稿で述べたように、室内試験に関しては、これまでに多くの知見が蓄積されてきた。しかし、これらの知見を、そのまま実際の寸法の構造物に適用したり、長期間の安定性評価に応用したりするには、多くの解決すべき問題が残されているのが現状である。

本稿では、最近の研究成果のうち、長期室内試験結果、地質現象を利用した研究結果、岩盤の回復機能に関する試験結果を紹介した。岩盤を対象とした研究では、対象とする時間が長くなれば、地質学的手法や知見が必要となる。また、対象とする寸法が大きくなれば、地球物理学的な手法や知見も要求されるようになる。本稿ではその一端を紹介したつもりである。このようなアプローチからの研究は少なく、今後も検討していく必要があると考えている。

### 参考文献

- [1] 大久保誠介, 福井勝則, 新孝一: 岩盤の破壊基準と長期強度に関する一考察, 資源と素材, Vol. 115, pp. 213-218, (1999)
- [2] 羽柴公博: 岩石の時間依存性挙動と周圧の影響に関する最近の研究, Journal of MMIJ, Vol. 123, pp. 10-16, (2007)
- [3] K. Hashiba, S. Okubo and K. Fukui: A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 43, pp. 894-904, (2006)
- [4] 羽柴公博, 大久保誠介, 福井勝則: 田下凝灰岩の 10 年クリープ試験, Journal of MMIJ, Vol. 124, (2008) (掲載予定)
- [5] 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博: 緩み領域の強度回復に関する基礎研究, 資源と素材, Vol. 117, pp. 631-638 (2001)
- [6] 石島洋二, 藤井義明, 市原義久, 木山保, 高田迪彦, 菅原隆之, 熊倉聡: 原位置計測と坑内観察に基づく釧路コールマインにおける閉塞した空洞内の諸状態, Journal of MMIJ, Vol. 124, pp. 445-451 (2008)
- [7] P. A. Lindqvist and H. H. Lai: Behaviour of the crushed zone in rock indentation, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 16, pp. 199-207 (1983)
- [8] 羽柴公博, 雷鳴, 大久保誠介, 福井勝則: 破碎した堆積軟岩の強度回復特性, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (2009) (掲載予定)