

トンネル建設実績と地山のひずみ比に基づく

坑道の安定性評価に関する検討

STUDY ON THE EVALUATION OF THE STABILITY OF TUNNELS BASED ON CONSTRUCTION RECORDS AND THE STRAIN RATIO OF GROUND

熊坂博夫¹⁾・桜井英行²⁾・石井卓²⁾・小野文彦³⁾

Hiroo KUMASAKA, Hideyuki SAKURAI, Takashi ISHII and Fumihiko ONO

This paper first outlines the survey on tunnel construction records and the evaluation of the stability of tunnels, and concludes that the stability should be evaluated using strains. In addition, using the measurement data obtained from tunnel construction projects, the authors studied the applicability of a design method, which evaluates the stability based on the strain ratio, to geological disposal facilities in soft rock.

As a result, it was found that the stability of such structures can be assured, even if the allowable strain is set to larger than the limit strain which is used in the current design methods as the allowable value.

Key Words: stability evaluation method, tunnel construction records, limit strain, geological disposal

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物は、使用済燃料のリサイクル過程で発生する放射能の高い廃液をガラスで固めたもので、長期間にわたり放射能のレベルが高いことから、人間の生活環境から隔離して安全に処分することが求められている。この処分方法として、地下深くにトンネル群を建設しその中に埋設する「地層処分」が検討されている。昨年6月には、高レベル放射性廃棄物の処分の枠組みとなる法律が公布され、今後処分場の立地に向けた調査などが進められる。

この地層処分施設は、上記の法律では地下300mより深い位置に建設することが定められている。従来の地層処分施設の安定設計に関する研究では、硬岩は1,000m、軟岩は500mを対象とした設計・検討がなされている。この中で、硬岩では無支保、軟岩では厚さ50cmのコンクリート支保あるいは厚さ15cmの高強度コンクリートセグメントを使用した設計例が示されている^{(1),(2),(3)}。一方、軟岩中のトンネルの建設実績によれば、支保は上記の場合に比べ軽微なことが示されている⁽⁴⁾。

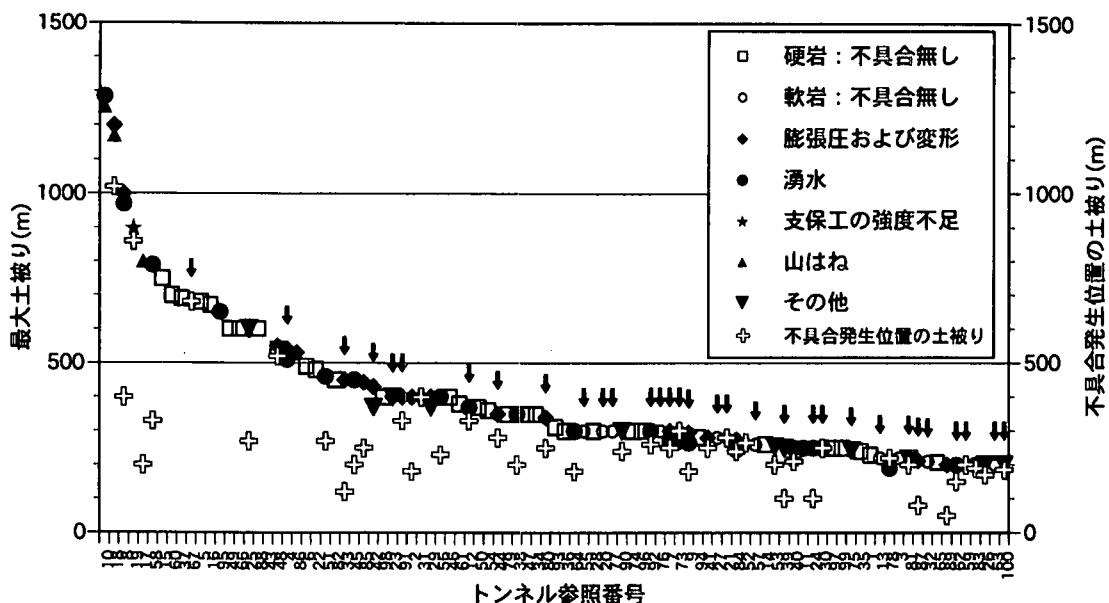
地下施設の構造安定設計を高度化することにより過度の保守性を軽減できるならば、地質条件の制約を小さくすることやより深い位置における立地が可能となることにより候補地の拡大につながり、また、同一深度での支保の軽減による経済性向上の効果も期待できると考えられる。したがって、硬岩に比べ強度が低い軟岩においては特に重要な研究課題である。

軟岩における安定設計を合理化する上で、トンネルや坑道の安定性の判定基準の設定方法が重要である。ここでは、既往のトンネルの建設実績を踏まえて、従来の安定設計で用いられている判定基準および適用性について考察したので報告する。

1) 正会員 清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ

2) 正会員 清水建設株式会社 技術研究所 原子力グループ

3) 正会員 東京電力株式会社 原子力技術部 サイクル技術センター 処分技術グループ



図－１ 調査トンネルにおける最大土被りと施工時の不具合及びその発生位置（↓：軟岩）

2. トンネル建設実績調査の概要

過去10年間を基本とする道路、鉄道および水路などのトンネルの公開文献から建設深度が200m以上の95事例について調査した。検討にあたっては、サイクル機構⁽¹⁾が地質条件を硬岩と軟岩に大別していることを参考にして、硬岩64件と軟岩36件に分類し（この内、5事例は同じトンネルで硬岩・軟岩地質が存在）、最も深い深度の実績やその近傍において実施された計測結果について整理を行った。各トンネルの最大深度と施工時の課題（不具合の有無）とその発生深度について整理した例を図－1に示す。図より以下のことが示される。

- ・硬岩、軟岩ともに、施工時の不具合があっても建設がなされ、法律で定められた処分深度300m以深における建設実績がある。

加えて、施工時の不具合の発生位置は、最大深度到達以前に発生しているものの、何らかの対策を行うことにより、最大深度地点では不具合無く施工されている事例が多い。また、定量的な検討を行うために、事例中で比較的データの揃っていた3つのトンネル（A,B,C）に対して、土被り200m以上の複数の計測断面におけるデータを読み取り分析・検討を行った。

3. 安定性の評価基準と実績について

3.1 応力による評価基準の適用性について

応力による評価基準の適用性については既に報告している⁽⁵⁾。ここでは、その概要について示す。文献(6),(7)および前述のA,B,Cの3トンネルにおける深度200m以上の地山強度比とトンネル壁面の変形率（≡接線方向ひずみ）の関係を図－2に示す。図より以下のことがわかる。

- ・地山強度比の実績は、岩石強度で0.03～18、岩盤強度で1～20程度である。一方、地層処分における軟岩の検討事例は0.3～0.7程度であり、既に建設実績を有している荷重条件である^{(1),(2)}。

(3)。

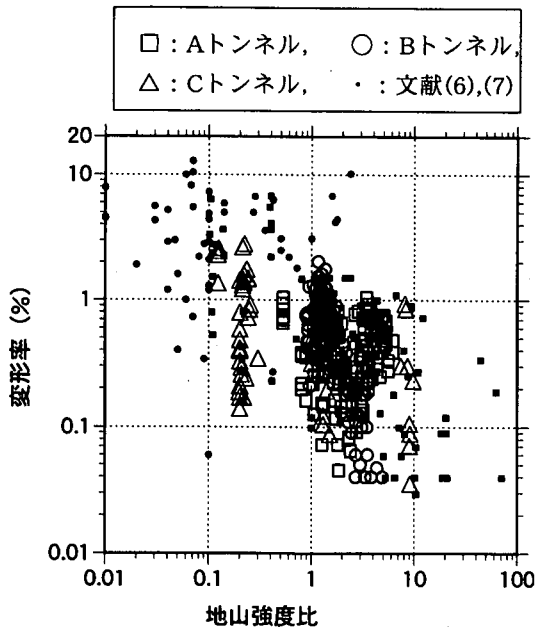


図-2 地山強度比の文献・実績調査の結果

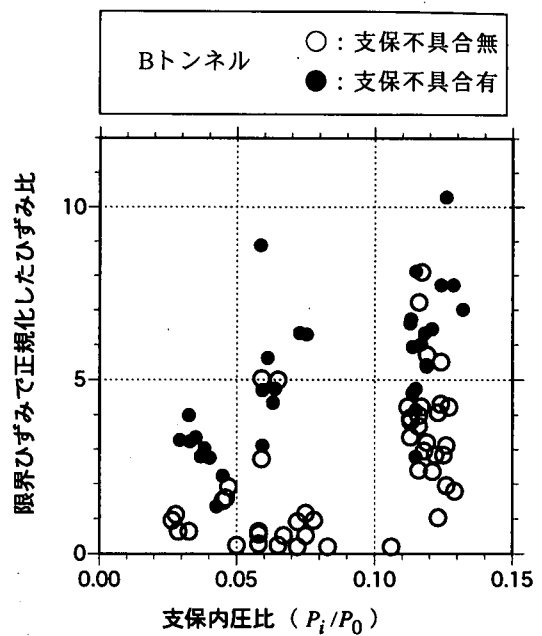


図-3 支保内圧比と限界ひずみによるひずみ比の関係

ただし、支保効果を考慮した評価を試みたが、地山強度比を用いた場合、同程度の安定性に対して計測から得られたひずみの実測値は広くバラツキのある分布する結果となった。そこで、Bトンネルの計測データを用い、支保内圧比 P_i/P_0 と桜井らの限界ひずみ ε_0 (平均値：レベルⅡ) で正規化したひずみ比の関係を整理して、図-3を求めた。図より以下のことがわかる。

- ・トンネル建設実績は支保の変状の有無に関わらず、支保内圧比が大きいと大きなひずみ（変形）を許容している。

3.2 ひずみによる安定性評価について

前節より、ひずみによる安定性評価が必要と考えらる。A,B,Cトンネル各計測断面の壁面ひずみの関係を図-4に示す。図中の直線は一軸圧縮強度と限界ひずみの関係である。図より、建設実績では、限界ひずみ（レベルⅡ）よりも大きなひずみを許容して施工されていることがわかる。ただし、この図では、図-3に示されるような支保効果（内圧＝拘束圧）を考慮していない。本報告では、この支保（拘束圧）効果によりひずみがどの程度許容されるかを求めるために、このトンネルで計測された壁面ひずみと室内試験のひずみとの対応関係を次式とおいた。

$$\varepsilon_\theta = \left(\eta_a - \frac{1-\nu}{2} \right) \left[(\kappa - 1) \frac{P_i}{q_u} + 1 \right] \varepsilon_0, \quad \text{for } F \leq 0 \quad (1)$$

ここに、 q_u ：一軸圧縮強度、 ν ：ポアソン比、 κ ：ダイレイタンス係数（ $= (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ ） P_i ：支保内圧、 η_a ：室内試験の軸ひずみの ε_1 と限界ひずみ ε_0 の比である。また、 F は坑道壁面の応力による安定性評価指標であり次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$F = (\kappa + 1) \frac{P_i}{P_0} + \left(\frac{q_u}{P_0} - 2 \right). \quad (2)$$

ここに、 P_0 ：初期地圧である。

A,B,Cの3トンネルにおける一軸圧縮強度とひずみ比 η_a の関係を図-5に示す。図において、Bトンネルについては、支保に不具合が無い場合についてプロットした。図よりひずみ比 η_a の最大値は3～4の値と

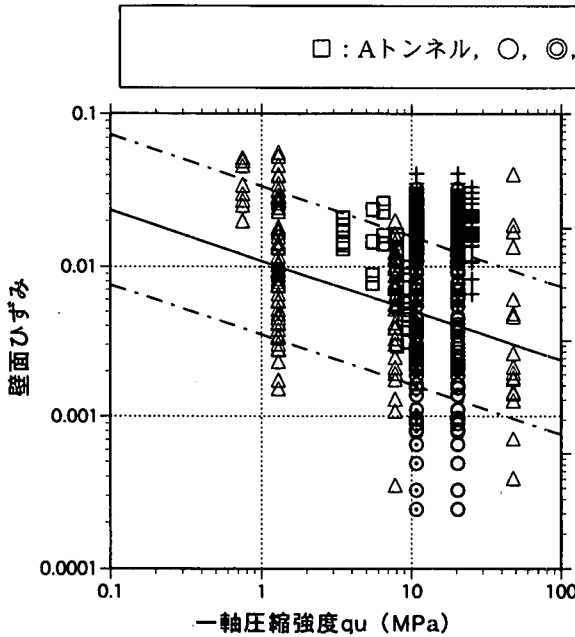


図-4 一軸圧縮強度と壁面ひずみの関係

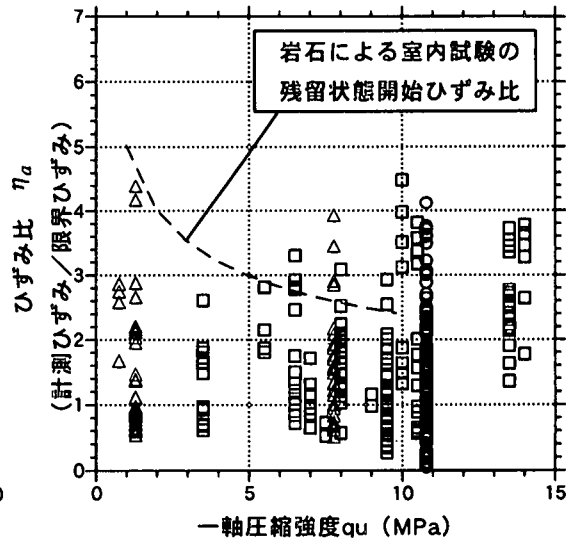


図-5 一軸圧縮強度とひずみ比の関係

なった。一方、図中のAydanらによるの一軸圧縮強度と残留状態開始のひずみ比の関係⁽⁸⁾は図中の右下がりの関係として得らる。図より、一軸圧縮強度が小さい場合には、建設実績のひずみの最大値はほぼ整合性を示す。すなわち、以下のようにまとめられる。

- ・トンネルの壁面ひずみは室内試験で得られる残留状態開始のひずみに相当するまで、トンネル建設における実績があることから、このひずみを許容ひずみとしてもトンネルは安定性を確保できる可能性がある。

4. まとめ

軟岩を対象とした地層処分施設の安定設計における地山のひずみ比に基づく安定性評価の適用性について、トンネルの建設実績から得られた計測データの検討を行った。その結果、既往の設計検討で用いられている許容ひずみ（限界ひずみ）よりも大きなひずみを許しても安定性を確保できる可能性があることが示された。ただし、検討に用いた計測データは3トンネルであり、また、地質情報、計測データも十分ではない。したがって、信頼性の高い設計方法・安定性の評価基準の確立を図るために、より多く、かつ、質の高いデータによる検討がさらに必要と考えられる。

本研究は電力10社による電力共通研究において実施した研究成果の一部である。また、本研究を実施するにあたり有益なご助言をいただいた電力中央研究所・野崎隆司氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 核燃料サイクル機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ，1999。(2) 黒木，他：土木学会第55回年講，CS-177，2000。(3) 金川，他：原子力バックエンド研究，vol.5，No.2 1999。(4) 郷家，他：土木学会第55回年講，CS-170，2000。(5) 熊坂，他：土木学会第56回年講，CS1-030，2001。(6) 竹林，他：第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，1989。(7) 北川，他：土木学会論文集，No.463/III-22，1992。(8) Aydan，他：土木学会論文集，No.448/III-19，1992。