

(47) 空洞掘削時の応力再配置に着目した 岩盤ゆるみ域測定法の提案

(財)電力中央研究所 正会員 ○石田 毅
(財)電力中央研究所 正会員 金川 忠
関西電力(株) 矢田 篤
(株)日本パブリック 田仲 正弘

Proposing of a New Method to Detect Loosened Regions Around a Rock Chamber,
Taking Note of Stress Redistribution due to Excavation

Tsuyoshi ISHIDA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Tadashi KANAGAWA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Astushi YADA, The Kansai Electric Power Co. Inc.
Masahiro TANAKA, Nihon Public Co. Inc.

Abstract

To develop a new method to make clear rock behavior by excavation, the authors tried to measure vertical strain change in rock around an underground chamber using small strain gauges. Twelve small strain gauges were buried in a 52 mm diameter borehole with 0.5~1.0 m intervals, from 0.8 m (No.1 gauge) to 9.0 m (No.12 gauge) distant from the wall of an 8 m diameter circular chamber.

An elastic theory indicates that the magnitudes of strain changes become larger with proximity to the chamber. However, the magnitudes distribution of measured strain change showed two peaks at No.3 and No.9 gauges. This result indicates that the load increment due to stress redistribution was supported by the two portions showing the peaks of strain changes, like two pillars. This result also indicates that the rock region near the chamber where No.1 and No.2 gauges were buried did not support the load increment, therefore, the region was loosened by excavation.

Consequently, it was elucidated that this new measuring method can give us important information on stress redistribution and loosened regions.

1. はじめに

地下発電所空洞やトンネルなどの種々の深部地下空洞の掘削において、空洞周辺岩盤のゆるみ域の把握は、空洞の安定性を評価し、補強対策を講じるうえで重要である。筆者らは、空洞掘削に伴う岩盤内の微小ひずみの変化を測定して応力再配置の状態を調べることで、ゆるみ域の発生範囲や岩盤挙動に関する有用な情報が得られるのではないかと考えた。そこで、トンネル型の空洞の掘削に先立ち、隣接する先進導坑からボーリング孔を削孔し、その中にいくつかのひずみ計を埋設し、切り羽の通過に伴う鉛直方向の微小ひずみの変化を測定した。その結果、ゆるみ域の発生範囲や岩盤挙動について興味ある結果を得たので、以下に報告する。

2. 測定現場の概要

測定の対象は、兵庫県の山岳地帯の地表下約285mに位置する、図1の幅8m、高さ7m、長さ32mのトンネル型の空洞である。この空洞は、この地点に建設が予定されている大規模な地下発電所空洞の挙動予測のために試験的に掘削されたものである。空洞周辺岩盤は、電中研式岩盤分類でC_H級の堅硬なひん岩である。

空洞の掘削に伴って発生する周辺岩盤内の鉛直方向の微小ひずみの変化を測定するため、25m離れて平行に先行掘削した先進導坑から、掘削予定軸に直角に仰角4度で直径56mmのボーリング孔を削孔し、この中にひずみ計を埋設した。ひずみ計は可能な限り多数埋設することとし、ゲージNo. 1は空洞の掘削予定線から0.8m離れた位置に、ゲージNo. 2～No. 9は約0.5mの間隔で掘削予定線から1.3m～4.6mの間に、ゲージNo. 10～No. 12は約1.0mの間隔で4.6m～9.0m間にそれぞれ埋設設置した。ひずみの測定にはデジタルストレインメータを用い、ひずみ計埋設箇所近傍の掘削時には発破直後に、それ以外の場合には1日1回程度測定を行った。

空洞の掘削は、全断面の発破掘削で図1のステップ1から始め、24m（掘削ステップ24）までは1mずつ掘削し、その奥の8m（掘削ステップ25～28）は2mずつ掘削した。ひずみ計の埋設断面は掘削ステップ14と15の間に位置する。補強工は、掘削ステップ1の手前の切り抜け部分にロックボルトが施工されたが、ステップ1～28の空洞部分は吹き付けコンクリートのみでロックボルトは施工されていない。

3. 測定に用いた埋設型微小ひずみ計

測定に用いた埋設型微小ひずみ計を図2に示す。測定成分は1成分のみであり、ゲージ素子は、電中研式地圧測定ゲージ¹⁾の素子として使用実績のある鋼共和電業製BS-5B型小標点距離ひずみ計である。ゲージの標点間距離は52mmであり、この間の平均ひずみを内蔵したダイヤフラムの変形としてひずみゲージで検出する。

このひずみ計は、ゴムモールドされた剛性の低い、いわゆる「やわらかい」ゲージであるが、埋設に用いるセメントペーストの剛性が円筒を形成してゲージ挙動に影響を及ぼす恐れがある。そこで、固化したセメントペーストが円筒を形成しないよう、ゲージの側面に図中にハッチングで示した仕切り板を設けている。埋設するボアホールの直径は、ゲージの標点間距離52mmに対し56mmとした。また、測定成分を鉛直方向に正しく向けかつ1本のボアホール中に所定の間隔をあけて多数設置できるよう、ゲージを塩ビパイプに固定し、前後に孔内挿入用の車輪をつけた。

埋設を確実にを行うため、地圧測定ゲージの埋設経験に基づいてセメントペーストの配合や粘度・流動性などの調整を行い、かつ事前に長さ10m程度の透明の亚克力管中に実際に埋設する個数と同じ12個の模擬ゲージを置いた埋設の予備実験を実施して、埋設が十分確実に行えることを確認した後、原位置での埋設を行った。

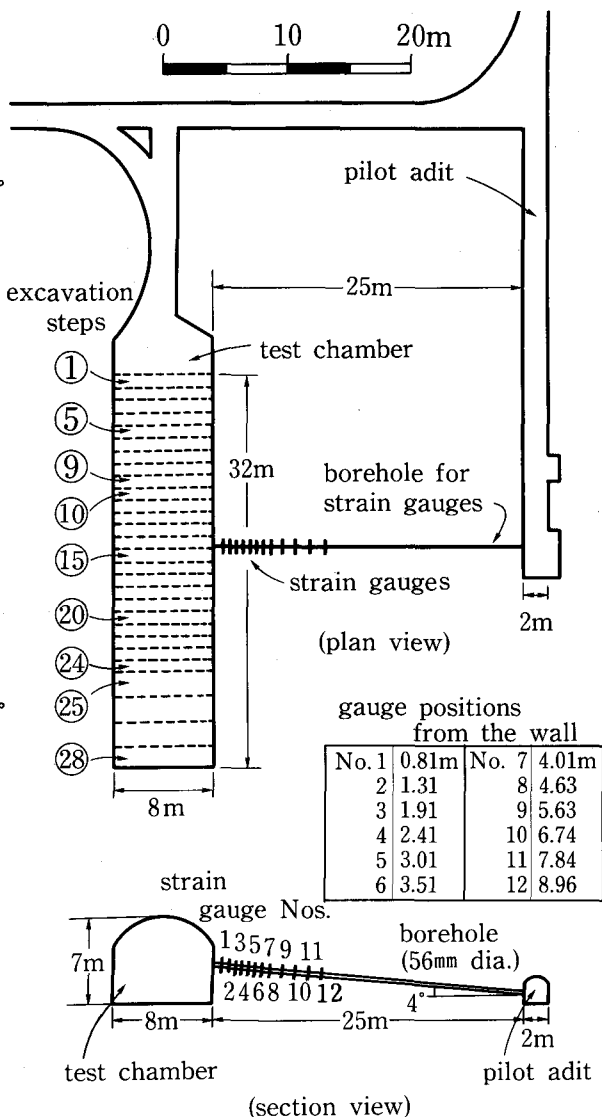
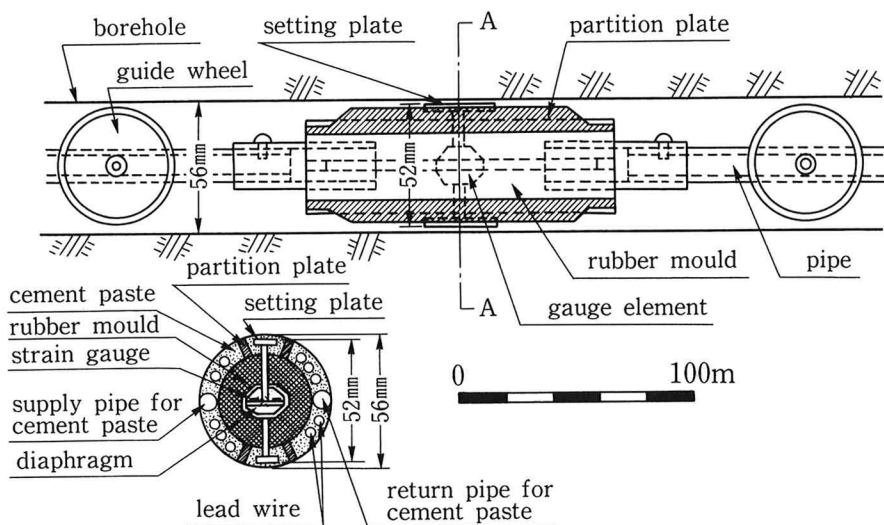


図1. 試験空洞の掘削ステップとひずみ計埋設位置



(A-A section view)

図2. 測定に用いた埋設型微小ひずみ計

4. 測定ひずみの経時変化

図3は、掘削ステップと測定ひずみの経時変化を示す。横軸は経過日数で、ゲージの初期値を計測したゲージ埋設後7日目を0としている。掘削は全断面の発破掘削で行われ、その進捗は図3より明らかなように、掘削ステップ9が完了した時点で種々の計測のため約50日間掘削が停止した以外は、ほぼ2日間で1ステップを掘削する速度で進められた。ひずみ計の埋設箇所は、図1に示したように、掘削ステップ14と15の間に位置し、掘削ステップ15の掘削が行われたのは、初期値計測後93日である。

図3に示した測定ひずみは、ゲージNo. 1～4及びNo. 9の測定結果である。すなわち、No. 1, 2, 3及び4は、空洞の側壁から0.81～2.41mの距離に設置した空洞近傍のゲージであり、No. 9は、No. 5～12のうちで最も大きなひずみ変化を示したゲージである。

測定ひずみの典型的な例として、最も顕著な変化を示したゲージNo. 3の測定結果を見ると、掘削切り羽がゲージ埋設位置の手前4m付近に到達した87日目頃から圧縮ひずみの増大が始まり、切り羽がゲージ埋設位置を通過するに伴いさらに急激な増大を示し、切り羽が遠ざかるにつれて一定値に収束する傾向が見られる。

一方、ゲージNo. 1には、図中に白矢印で示したように、切り羽がゲージ埋設位置の手前3m付近に到達した88日目頃に、若干伸び方向へのひずみの増大が見られる。初期値は、初期地圧のために岩盤に圧縮ひずみが生じた状態であるから、この伸びひずみの増大は圧縮ひずみの解放を意味する。ゲージNo. 1にこの圧縮ひずみの解放が現れた時期に、ゲージNo. 2及びNo. 3では、白矢印で示したように対照的な圧縮ひずみの増大が見られる。このことは、ゲージNo. 1の埋設位置周辺の岩盤が、既存亀裂のすべりや発破などによる新たな亀裂の発生により荷重を負担できず、隣接するゲージNo. 2及びNo. 3の埋設位置周辺の岩盤がその荷重を負担したのではないかとと思われる。測定ひずみに対するこのような解釈は、ゲージの測定値に影響を与える岩盤の亀裂がゲージの測定長52mmに比べて十分大きい間隔で存在し、測定値の変化がゲージを埋設した岩塊に作用する荷重もしくは応力の変化に対応すると考えられるからである。

ゲージNo. 2では、白矢印で示した時期に前述の圧縮ひずみの増大が見られた後、切り羽通過直後に再び圧縮ひずみの増大が生じる。しかし、この切り羽の通過に伴う圧縮ひずみの増大量は、ゲージNo. 3に比べ明らかに小さい。従って、ゲージNo. 1やNo. 2埋設箇所周辺の岩盤では、切り羽通過に伴う荷重の増大に十

分耐え切れず、その荷重がゲージNo. 3埋設箇所周辺の岩盤に集中したのではないかと推測される。

ゲージNo. 4には、圧縮ひずみの大きな増大は見られない。これは、ゲージNo. 3埋設箇所周辺の岩盤が突っ張るような形で十分な荷重の負担を行い、そのすぐ近くにあるゲージNo. 4の位置は、いわば影になった形で応力再配置の影響があまり及ばなかったものと思われる。

ゲージNo. 9は、ゲージNo. 3の1400 μ に次いで大きな1000 μ 近いひずみ変化を示したゲージである。このような空洞から離れた位置のゲージで大きな圧縮ひずみの増大が見られるのは、空洞掘削に伴う応力再配置が、空洞近傍の1箇所だけではなく、やや離れた箇所にも大きな影響を及ぼすことを示しているように思われる。

以上のことから、測定箇所周辺の岩盤の応力再配置に伴う荷重の増大は、ゲージNo. 3及びゲージNo. 9埋設箇所周辺の岩盤で、支えられたように思われる。また、この場合、本来大きな荷重の増大を負担すべき位置にありながら、荷重を負担しなかったと見られるゲージNo. 1及びNo. 2の埋設箇所はゆるみ域内にあるのではないかと考えられる。

従って、測定箇所のゆるみ域は空洞側壁から1.5m程度、すなわち、空洞幅8mの2割程度と推定される。

5. 測定ひずみの分布形状

図4は、ひずみ計埋設箇所の手前5m（ステップ10の掘削直前）からその奥12m（ステップ25の掘削直後）までの間の掘削によって生じた圧縮ひずみの増大量を、空洞側壁からの距離を横軸にとって示したものである。この空洞から少し離れた箇所で、応力解放法による初期地圧の測定が行われており²⁾、その結果をこの空洞断面について表示すると、図の右上に示したようである。この測定値を用い、空洞が直径8mの円形断面であると仮定し、円孔の応力集中の理論式から接線方向応力の増大量 $\Delta \sigma_{\theta}$ の分布を求め、図に破線で示した。測定値は接線方向ひずみであるから、空洞形状が円形とやや異なる点や半径方向応力の変化によるポアソン比のひずみ量などの違いはあるにしても、岩盤が均質等方な線形弾性体であれば、理論的に求めた

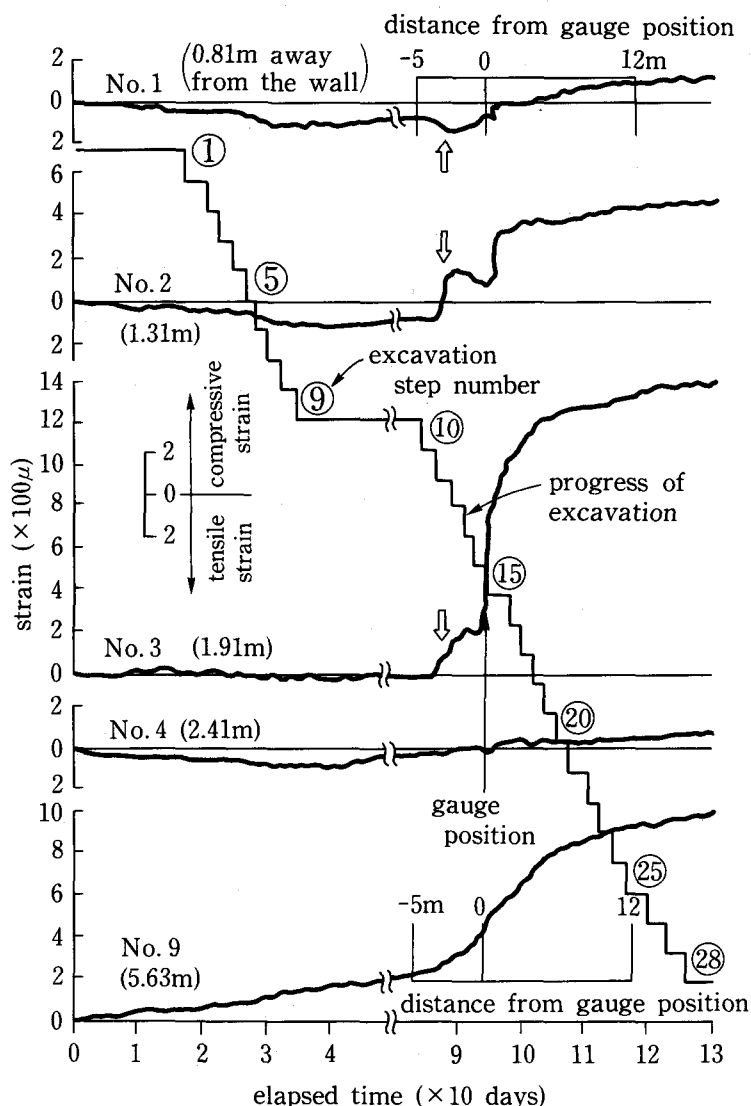


図3. ひずみの経時変化と掘削の進展状況

$\Delta\sigma_\theta$ と似た分布を示すはずである。しかし、測定ひずみの分布は $\Delta\sigma_\theta$ の分布と異なり、空洞側壁から2 m付近(ゲージNo. 3)と5.5 m付近(ゲージNo. 9)に大きなピークを示している。このことは、応力再配置に伴う荷重の増大が、いわば岩盤中に2本の柱を形成するような形で支えられたと考えることができる。このような応力再配置が行われれば、柱に相当する部分には局所的に予想を大きく上回る応力が作用するため、場合によっては山はね的な激しい破壊が生じる可能性があり、岩盤が連続体であることを前提とした従来の設計の考え方を新たな観点から見直す必要が生じる。

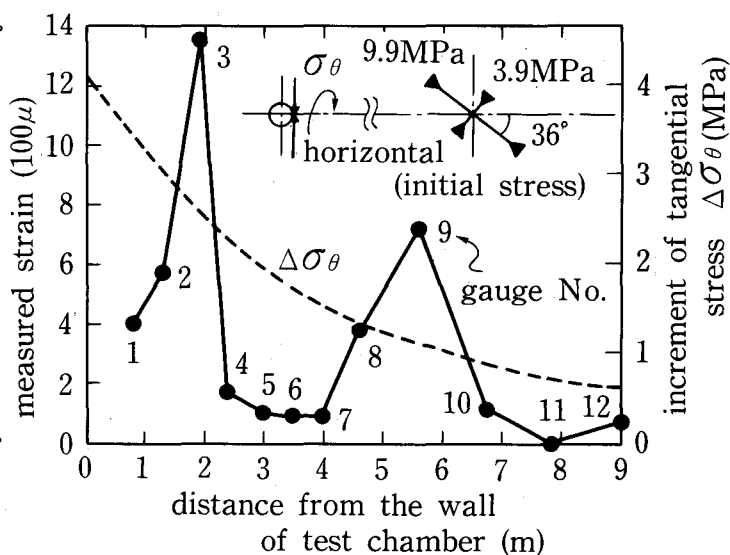


図4. 掘削に伴う圧縮ひずみ増大量の分布

筆者らは、本論文で述べた手法を用いて、現在数箇所の地下発電所空洞の側壁部で掘削に伴う岩盤挙動の測定を行っているが、これらの測定結果においても、図4に似た「2本の柱に支えられる」傾向がしばしば見られる。このような応力再配置は、空洞規模と節理間隔の関係など、岩盤の不連続性を支配する要因と密接な関係を有しているのではないかと推測される。今後データを積み重ね、このような岩盤挙動がどのような条件のもとで生じるのかを明らかにしていきたいと考えている。

6. まとめ

空洞掘削に伴って生じる周辺岩盤の鉛直方向の微小ひずみの変化を、ボーリング孔内に埋設した測定長52 mmひずみ計で測定し、岩盤内の応力再配置挙動を検討した。その結果、ゆるみ域を「応力再配置に伴う荷重の増大を負担できない岩盤部分」と定義することにより、この測定手法で空洞側壁部のゆるみ域の範囲を推定できることがわかった。また、応力再配置に伴う岩盤挙動は、荷重の増大を「2本の柱で支える」という興味ある傾向を示した。

従来、ゆるみ域の概念は頻繁に用いられるものの、その力学的な実態は必ずしも明らかではない。筆者らは、電力各社に協力して、本論文で述べた埋設型微小ひずみ計による測定に、A E (Acoustic Emission)や弾性波速度の測定、スライディング・マイクロメータやボアホール・テレビジョンによる測定を加え、現在掘削中の数箇所の地下発電所空洞の側壁部で集中的な岩盤挙動測定を行っている。これらの種々の手法を組合せた集中測定により、空洞掘削に伴う岩盤挙動やゆるみ域に関する有用な知見が得られつつある。これらの結果については、今後適当な機会に報告していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 23, pp. 29-39, 1986.
- 2) 金川忠, 山本清彦, 田中達吉, 横山幸也: A E法と変形率変化法を併用した室内試験による地圧測定, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 193~198, 1987.