

空洞掘削時の応力再配分に着目した ゆるみ域測定法の提案

石田 毅*・金川 忠**・矢田 篤***・
田仲正弘****

地下空洞周辺の岩盤ゆるみ域の測定法として、応力再配分に伴う岩盤内の微小ひずみの変化の測定に着目し、その適用性をAEや弾性波伝播特性の測定の適用性ととも、室内実験で検討した。さらに、岩盤内の微小ひずみの測定については新たにゲージを作製し、これを用いた原位置測定を行って検討を進めた。その結果、これらの測定手法が、岩盤ゆるみ域の測定手法として妥当であることを確認した。

Keywords: underground chamber, stress redistribution, loosened region, in-situ measurement, rock mechanics

1. 緒 言

地下発電所空洞や山岳トンネルなどの深部地下空洞の掘削に際しては、周辺岩盤挙動を把握し、空洞の安定性を評価しながら施工を進めることが重要である。また、近い将来実現が予想される高レベル放射性廃棄物の地層処分や圧縮空気貯蔵では、空洞に漏水や漏気に対する高い密閉性が要求されるため、空洞掘削が周辺地山に与える影響を従来以上に厳密に把握し、設計や施工に反映することが重要である。しかし現状では、ゆるみ域とよばれる空洞周辺の要補強領域の挙動をはじめ、多くの岩盤挙動の実態が、必ずしも実測によって十分に明らかにされているとはいえず、この点で新たな測定手法の開発が必要とされている。

さて、空洞掘削に伴う応力再配分を、円形断面空洞の側壁部分を例にとって単純化すると、次の2種類に分類できる。ひとつは、Fig.1の左側に示す半径方向の圧縮応力(σ_r)の解放であり、もうひとつは、円周方向の圧縮応力(σ_θ)の増大である。 σ_r の解放に伴う現象は、既存の亀裂の開口幅の増大、潜在亀裂の新たな開口及び岩石実質部の伸びによる空洞方向へのはらみ出し現象である。これらの現象は、内空変位計、岩盤変位計、スライディングマイクロメータ¹⁾、ボアホールテレビ²⁾などを用いた観測で、その挙動を把握することが可能であり、すでに多くの測定実績がある。一方、 σ_θ の増大に伴う現象は、空洞接線方向の圧縮ひずみの増大、岩盤内亀裂の新たな発生や既存亀裂の進展、またその結果として生じ

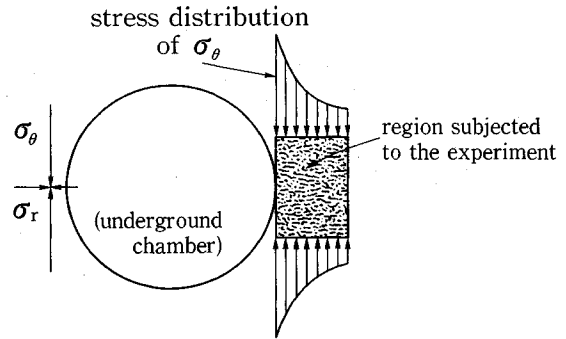


Fig.1 Underground chamber and the region subjected to the experiment.

る耐荷力の低減などの現象であり、これらに対しては、岩盤内の微小ひずみやAE (Acoustic Emission) の測定³⁾⁻⁵⁾、弾性波の利用⁶⁾が有望であるが、必ずしも十分な測定実績があるとはいえず、研究の余地が残されている。

そこで筆者らは、供試体を用いた室内実験を行い、供試体表面のひずみの測定とともにAEや弾性波速度の測定を行い、これらの測定手法の検討を行った。さらに、ひずみ測定については、地圧測定技術⁷⁾⁻⁹⁾を応用して、原位置の1本のボアホール中に多数連結して埋設できるゲージを作製し、空洞掘削に伴う岩盤内のひずみ変化を原位置で実際に測定した。これらの結果、岩盤内のひずみの測定が、AEや弾性波速度の測定と同様、ゆるみ域をはじめとする空洞掘削に伴う岩盤挙動の測定法として有効であるとの結論を得たので以下に報告する。

2. 室内実験の方法

(1) 供試体と載荷方法

地下空洞側壁部分の円周方向直応力の分布は、Fig.1の右側に示すように、空洞近傍で大きく空洞から離れる

* 正会員 工博 山口大学講師 工学部社会建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所立地部地盤研究室 主任研究員

*** 工修 関西電力(株)大河内水力発電所建設所 第二工区長代理 (現在、関西電力(株)和歌山支店 土木建築課長)

**** (株)日本パブリック 技術開発室技術開発課 主任

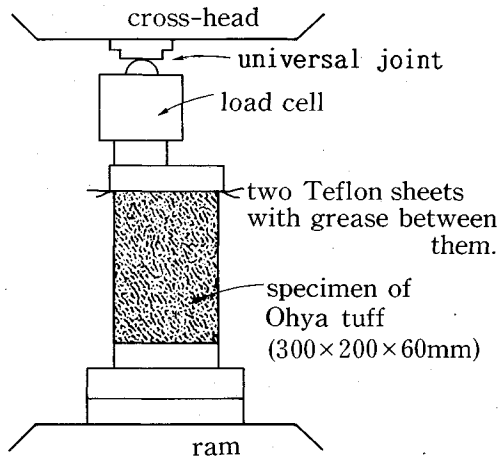


Fig.2 Specimen and loading manner.

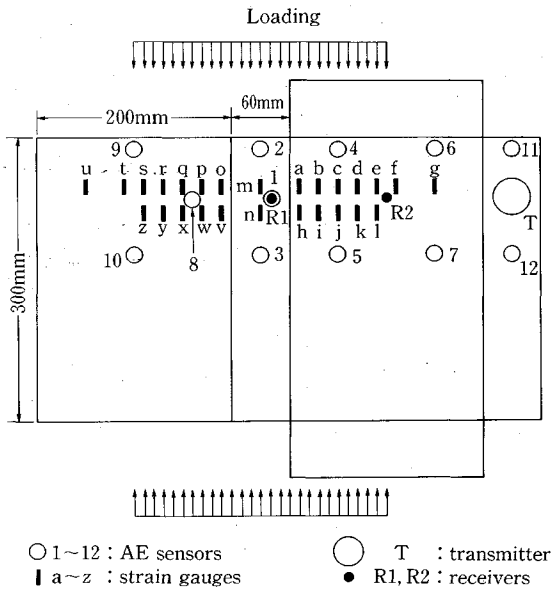


Fig.3 Locations of AE sensors, strain gauges, a transmitter and receivers for V_p measurement.

につれて小さくなる傾向にある。この応力分布を定性的に模擬するため、供試体に Fig.2 に示すような上部左半分の偏心載荷を行った。

供試体には、高さ 300 mm、幅 200 mm、厚さ 60 mm の大谷石を用いた。供試体の上端面には、載荷板による端面の拘束を避けるため、グリースを間に塗った 2 枚のテフロンシートを置き、その上方に供試体よりやや大きな載荷板を設置した。供試体より大きな載荷板を用いたのは、実験時に載荷板端部が供試体に食い込んで供試体を破壊するのを避けるためである。この載荷板の上に、高さと同様がこの載荷板に等しく幅が供試体の半分の幅の載荷板を置き、ロードセルと球座を介して、偏心載荷を行った。供試体の載荷には、サーボ制御が可能な 200

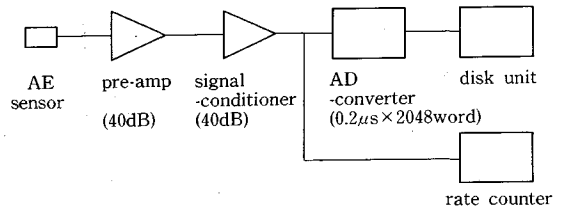


Fig.4 Block diagram of the AE measuring system.

tonf 容量の載荷試験機を用い、ラムとクロスヘッド間の変位が一定の速度で生じるよう制御した。

(2) 供試体の破壊挙動の観測方法

供試体の破壊挙動の観測は、ひずみ、荷重、AE 及び弾性波伝播特性の測定により行った。ひずみゲージ、ロードセル、AE センサー及び弾性波測定用の発振子・受振子の配置を Fig.3 に示す。

ひずみは、偏心荷重の作用する供試体左上部の載荷方向のひずみを中心に測定することとし、ゲージ長 10 mm の単軸ゲージ (共和電業 (株) 製 KFC-10-C1-11) を、供試体上端から 5 cm の高さの供試体表裏面に各 7 枚、左側面に 1 枚、また上端から 8 cm の高さの表裏面に各 5 枚、左側面に 1 枚、計 26 枚貼付した。ひずみの測定は、パーソナルコンピューターで制御したデジタルストレインメーター (共和電業 (株) 製 UCAM) を用い、破壊発生前は 30 秒毎、破壊の進展時は 15 秒毎にデータを収録した。

荷重は、容量 50 tonf のロードセル (共和電業 (株) 製 LC-50 TE) を用い、ひずみと同様の方法で測定し、データの収録を行った。

AE は、発生頻度の計数とともに、3 次元の震源決定が行えるよう多チャンネルで波形の観測を行った。AE センサーには、共振周波数 150 kHz、直径 17.4 mm、厚さ 16.3 mm の円柱型センサー (Physical Acoustics Corporation 製、R 15 型) を使用し、加熱して溶融させたワックス (商品名エレクトロンワックス) を用いて、合計 12 個のセンサーを供試体上半分の 4 側面に接着した。AE 波形の収録には、Fig.4 に示すにシグナルコンディショナー、AD 変換機、ディスクユニットとレートカウンター (いずれも応用地質 (株) 製) から成る、筆者らが開発した 12 チャンネル用の測定システムを用いた。このシステムは、すでに報告した原位置測定用システム⁵⁾と基本的に同じであるが、シグナルコンディショナーと AD 変換機に室内実験用の高周波仕様機器を用いている点異なる。今回の実験では、各チャンネルともセンサーで受振した AE 信号をプリアンプで 40 dB、シグナルコンディショナーで 40 dB、合計 80 dB 増幅した。AD 変換機は、各チャンネル毎に、分解能 8 ビット、記録長 2048 ワードの性能を有し、最小サンプリングタ

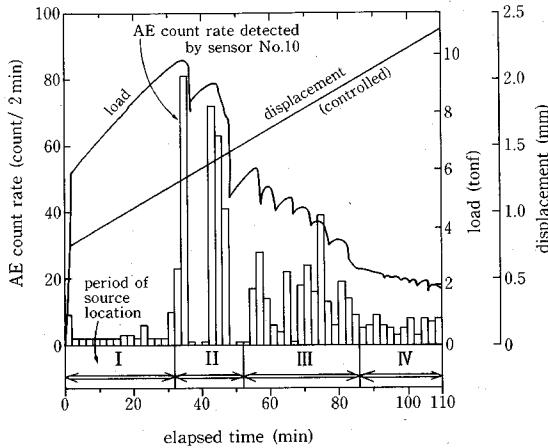


Fig.5 Load, displacement and AE count rate as a function of time.

イムは 50 ns である。今回の測定では、サンプリングタイムを 0.2 μs に、また、プレトリガーはできるだけ多くのチャンネルで初動が読み取れるよう、記録長の 1/2 に設定して使用した。AD 変換器へのトリガーには、最初供試体左上端に近いセンサー No.4 の信号を用いていたが、このセンサーの設置位置近傍に破壊が及んだ実験開始 42 分後以降は供試体中央部のセンサー No.5 の信号を用いた。AE 波形の収録は、トリガーがかかる毎に AD 変換器のディスプレイ上で 12 チャンネルの全波形を肉眼で観察し、5 チャンネル以上で初動の立ち上がりを読み取れる良好な波形を含む AE イベントデータのみを、GP-IB でディスクユニットに転送しフロッピーディスクに収録した。ディスプレイ上への波形表示と肉眼による判別に約 6 秒、フロッピーディスクへのデータ転送と収録に約 18 秒を要するため、ディスプレイ上で不良データと判断して破棄する場合には約 6 秒、良好と判断してデータを収録する場合には約 24 秒が AE 測定の欠測時間となる。ディスクユニットには、容量 710 キロバイトの 3.5 インチフロッピーディスク 4 枚を搭載でき、1 枚のフロッピーディスクには 14 個の AE イベントの波形データ (12 チャンネル分) が収録できるため、フロッピーを順次交換して連続的にデータの収録を行った。なお、プリアンプとシグナルコンディショナーの測定周波数帯域は 20 kHz~2 MHz であるが、AE センサーの帯域が狭いため、これが全体を規定し、今回の実験の測定対象周波数帯域は 100 kHz~500 kHz 程度の範囲である。一方、上述の AE 波形の収録とは別に、センサー No.1, 4, 5, 9, 10, 11 で計測した AE 波形をシグナルコンディショナーを介してレートカウンターに導き、AE 発生頻度をイベント計数法により計数して実験中モニターした。

弾性波の測定は、供試体右側面に接着した発振子 T

に 1 分間に 1 回、パルス幅 10 μs、電圧 5 V の単発の方形波を入力し、発生した振動を発振子 T と対向する供試体左側面に貼付した受信子 R 1 及び図の手前側面に貼付した受信子 R 2 で受振することにより測定した。発振子には、厚み方向に分極した直径 30 mm、厚さ 10 mm、共振周波数 67 kHz の PZT 素子を直径 40 mm、高さ 35 mm の真ちゅう製容器の底面に貼りつけたものを使用した。受振子は AE 測定に用いたのと同じ仕様の AE センサーである。受振波形は 4 チャンネルの AD 変換器 ((株) NF 回路設計ブロック社製 AE-9620) を主体とする、AE 測定とは別系統のシステムで収録した。

3. 室内実験の結果

(1) 荷重・変位及び AE 発生頻度の経時変化

Fig.5 は、荷重、変位及び AE 発生頻度の経時変化を示す。供試体の載荷は、試験機のラムとクロスヘッド間の変位を図に示すように制御して載荷した。すなわち、試験時間短縮のため、0.75 mm の変位を最初の 90 s 間で生じさせ、その後、変位速度を 1 mm の変位を 4000 s で生じさせる小さな速度に低下させ、供試体に穏やかな破壊を発生させて破壊挙動を観測した。ラムとクロスヘッドの間の変位量を供試体の長さ 300 mm で除した値を供試体のひずみ速度と考えれば、最初の 90 s 間のひずみ速度は 27.7 μ/s、その後の破壊時のひずみ速度は 0.83 μ/s である。

このような変位制御のもとで、荷重は実験開始 34 分後に最大値 9.85 tonf を記録した後低下した。その後、破壊の進展に伴い、荷重は数回にわたって段階的な低下を示した。

Fig.5 に示した AE 発生頻度は、破壊の進展領域から少し離れた供試体中央部の No.10 センサーで検出した 2 分間毎の AE 発生頻度である。頻度の計数は、検出した波動を合計 80 dB 増幅して包絡線検波し、しきい値 7.6 V を越えるものを対象とした。弾性波測定のための受振信号も計数されたが、この計数値は実験時に確認しておき、図にはその値を差し引いて示した。

(2) AE の震源分布と供試体表面亀裂の経時変化

Fig.6 は、AE の震源分布と実験中に発生が観察された供試体表面亀裂を、Fig.5 に示した破壊過程の時間区分 I~IV 毎に示したものである。

AE の震源は、各センサーへの P 波初動の到達時刻から求めることとし、P 波速度はこの供試体で測定した 2.11 km/s の値を用いた。震源の決定には、非線形最小二乗法を繰り返し適用し、走時残差 (i 番目のセンサーへの初動到達時刻 t_i と試行的に決めた震源要素から計算される初動到達時刻 T_i との差) の 2 乗和 $\sum (t_i - T_i)^2$ が最小となる震源要素を求めた¹⁰⁾。また、震源決定精度向上のため、以下の 5 条件をすべて満たして決定

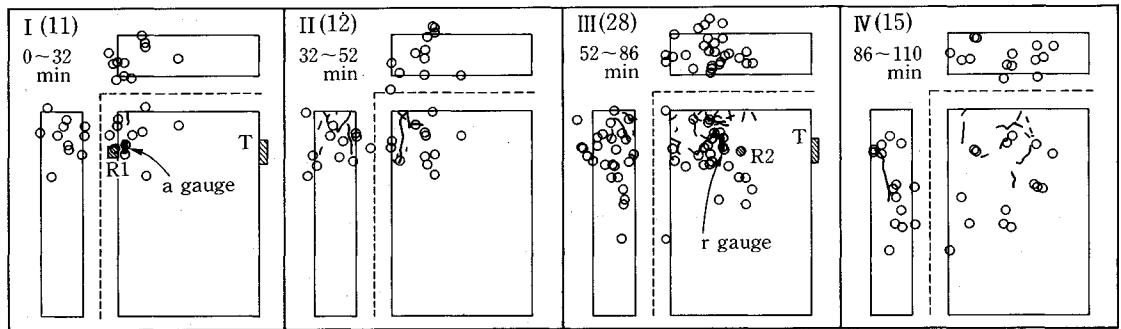


Fig.6 Distribution of AE hypocenters (○) and cracks appearing on the surfaces of the specimen (solid lines) for each period. In the upper left of each figure, the number of located AE hypocenters and the elapsed time are shown.

された震源のみを Fig.6 に示した。

- (i) センサー数 (データ数) は 6 以上である。
- (ii) 決定された震源は、その震源決定にデータを用いたセンサーによって 3 次的に取り囲まれた位置にある。
- (iii) 走時残差の標準偏差は $5 \mu\text{s}$ 以下である。
- (iv) 走時残差の絶対値 ($|t_i - T_i|$) の最大値は $10 \mu\text{s}$ 以下である。
- (v) 各センサーで観測された波動 (到達の順番や振幅の相対的な大きさ) は決定された震源位置と矛盾しない。

この結果、震源決定精度は、上記 (iii) の基準より平均的には弾性波が供試体中を $5 \mu\text{s}$ の間に伝播する距離すなわち 10 mm 程度であり、最大でも $20 \sim 30 \text{ mm}$ 程度であろうと推定される。またこの精度が確保されていることは、弾性波測定のための発振波形に対する震源決定で実験的に確認している。

さて、Fig.6 に示した経時変化から、AE の震源は、実験開始後 32 分間の I 期には供試体左上部に集中し、その後 II 期、III 期と、時間が経過するに従い供試体右下部に広がっていったことがわかる。また、各期毎に新たに発生が観察された供試体表面の亀裂を図中に実線で示したが、この亀裂の経時変化も供試体の破壊が左上部から右下部へ広がっていったことを示している。一方、震源分布と表面亀裂を比較すると、いずれの期でも震源分布は表面亀裂よりも右下部まで広く分布し、経時的には表面亀裂が震源分布の後ろを追うように広がっていく傾向がうかがえる。このことは、目に見える大きな表面亀裂の発生に先立って AE が発生したためか、あるいは供試体内部に亀裂が発生してから表面に現れたためと思われる。しかし、いずれにしても、供試体の破壊の進展に関して、AE の震源決定が供試体表面の目視観察よりも時間的に先行して有用な情報を提供したことを示しており、AE の震源決定が岩盤の破壊の予測に有効であることを示していると思われる。

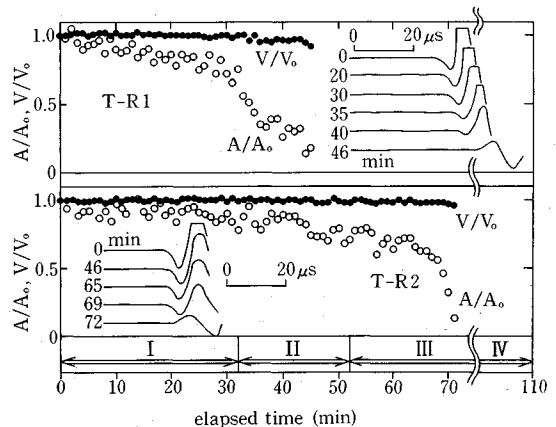


Fig.7 Change of P wave velocity ratio (V/V_0) and P wave first motion amplitude ratio (A/A_0) with the elapsed time, along the two paths T-R1 and T-R2.

(3) 弾性波速度と初動振幅の経時変化

Fig.7 は、発振子 T と受振子 R1 及び R2 の間で 1 分毎に測定した、P 波速度 (V) 及び P 波初動振幅 (A) の経時変化を、実験開始直後の測定値 (V_0, A_0) で正規化して示したものである。図に示した測定波形の例からわかるように、T-R1 のパスでは実験開始後 46 分に、T-R2 のパスでは 72 分に、それまでの初動が消滅し、見掛け上初動の極性が逆転した。そこで Fig.7 では、これらの時刻以降の測定結果は表示していない。P 波速度については、見掛けの初動位置を P 波の到達時刻として読み取れば、これらの時刻以降の経時変化を示すことが可能であり、その場合には P 波速度は顕著な低下を示すことになる。P 波速度と P 波初動振幅を比較すると、振幅はいずれのパスにおいても比較的大きなばらつきを示すものの、速度よりかなり早い時点で低下傾向を示していることが特徴的である。

T-R1 のパスで、振幅が顕著な低下を示し始めた実験開始後 30 分は、震源決定の時間区分では I 期の最後にあたる。Fig.6 を見ると、I 期には受振子 R1 の位置

する供試体の左端に AE 震源の集中がみられ、実験開始後 30 分のこの時期に、このパスでの測定が岩盤の微小破壊の影響を受け始めたのではないと思われる。一方、速度が低下し始めた実験開始後 44 分は II 期の半ばであり、II 期には明確な亀裂が受振子 R1 のすぐ右側の供試体表面に表れている。速度が低下し始めた 2 分後の 46 分には P 波初動が消滅したことから、この時期に規模の大きな破壊が、測定パスを横断する位置に生じたのではないと思われる。

T-R2 のパスの測定結果で、振幅が顕著な低下を示し始めたのは実験開始後 65 分頃と見ることができる。III 期の半ばに対応するこの時期には、Fig.6 より明らかなように、受振子 R2 の近傍まで AE の震源が広がってきている。また次節で述べるように、この約 10 分前の実験開始後 57 分には受振子 R2 の裏面側近傍の r ゲージで顕著なひずみ量の低下を生じており、この時期は受振子 R2 の近傍に微小な破壊が進展してきた時期と見ることができる。一方、速度については、低下し始めるとすぐに P 波初動が消滅する点が、T-R1 のパスの測定結果と共通している。

P 波速度よりも P 波初動振幅の方が、岩盤の破壊に対して敏感な変化を示すことは、すでに室内実験で報告されており¹³⁾、原位置の岩盤監視にも適用が試みられている⁹⁾。今回の測定結果は、これらの従来の研究結果と調和的であり、振幅の低下は AE の発生で特徴づけられる微小な破壊の開始時期に、一方速度の低下は供試体表面で観察できる開口亀裂で特徴づけられる巨視的な破壊の発生時期に対応しているように思われる。このように、弾性波伝播特性の測定は、岩盤の破壊の進展に関して有用な情報を提供するから、有力な原位置測定手法のひとつとして、今後の発展が期待される。

(4) 測定ひずみの経時変化

Fig.8 は、供試体上部左端の a, b, c ゲージと a, b, c ゲージの裏面の位置にある o, p, q ゲージで測定したひずみの経時変化を示す (ゲージ位置は Fig.3 参照)。いずれの図においても、枠で囲った部分を拡大して右側に示した。

まず、上の図で a, b, c ゲージの挙動を比較すると、供試体の左端に位置する a ゲージは、試験開始 25 分後に圧縮ひずみの最大値を示した後、他のゲージに比べて最も早く 32 分頃からひずみ量の急激な減少を示す。この時期は、AE の震源分布の時間区分では I 期の末期に対応するから、Fig.6 より a ゲージの貼付位置上部に亀裂が発生した時期であることがわかる。従って、亀裂の発生により a ゲージ貼付箇所の応力が緩和され、ひずみ量の減少を示したものと思われる。しかし、Fig.5 より明らかなように、この時期には供試体全体に作用する荷重は未だ増大しており、a ゲージ周辺で負担されなく

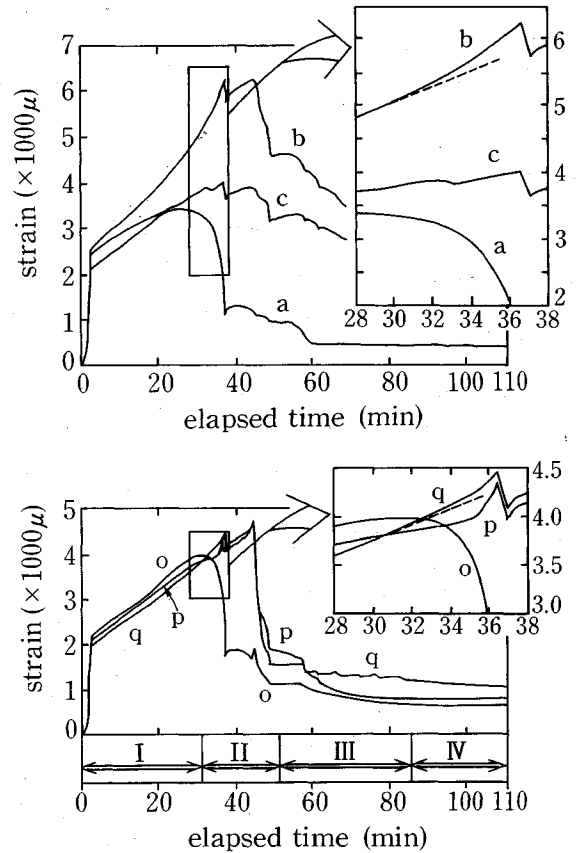


Fig.8 Change of strains as a function of time.

なった荷重は、a ゲージより右側の亀裂の生じていない堅硬な部分で負担されたはずである。そこで、a ゲージのすぐ右側に貼付した b, c ゲージの挙動をみると、c ゲージには顕著な変化はみられないものの、a ゲージに隣接する b ゲージには、a ゲージのひずみ量の減少に伴ってひずみ量の増大がみられる。右側の拡大図の b ゲージの経時変化の曲線には 28 分における接線を破線で示したが、これをみると、a ゲージのひずみ量の減少に伴って b ゲージのひずみ量が非線形的に増大していることがわかる。

一方、a, b, c ゲージの裏面の位置にある o, p, q ゲージの挙動を下図でみると、やはり供試体の左端に位置する o ゲージが、a ゲージと同じく他のゲージより早く 32 分頃からひずみ量の急激な減少を示している。右側の拡大図の q ゲージの経時変化には、28-32 分間の直線部分の延長を破線で示した。これをみると、o ゲージのひずみ量の減少に伴って、o ゲージに隣接する p ゲージには顕著な変化がみられないものの、その隣の q ゲージのひずみ量には、上の図の b ゲージにみられたのと同様の、非線形的な増大が生じていることがわかる。

このように、表裏の位置関係にある a, b, c ゲージ

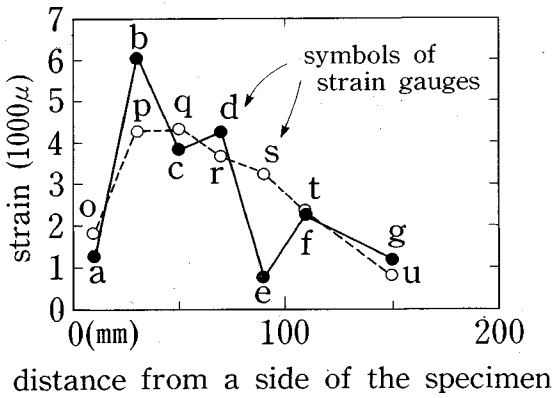


Fig.9 Distribution of measured strains at 40 minutes after the start of loading.

と o, p, q ゲージの測定結果では, a 及び o ゲージのひずみ量の低下にともなって, 隣接する b ゲージまたはひとつ置いて隣の q ゲージに非線形的なひずみの増大がみられた. o ゲージの場合, 隣接する p ゲージに対応する非線形的なひずみの増大がみられなかったのは, この箇所にも破壊の影響がおよびつつあり, やや微妙な応力状態にあったためではないかと推測される. いずれにしても, これらの測定ひずみの経時変化は, a 及び o ゲージの貼付位置が耐荷力の低減領域に入り, これらの部分で負担されなくなった荷重が, b ゲージあるいは q ゲージの貼付位置の堅硬な部分で負担されたことを示していると考えられる.

(5) 測定ひずみの分布形状から見たゆるみ域の範囲

Fig.9 は, 载荷開始後 40 分 (a 及び o ゲージによるひずみ測定値が急激に低下した約 8 分後) におけるひずみの分布を示したものである. 横軸は供試体側面からの距離であり, ●印は a~g ゲージの, ○印はその裏面の位置に貼付した o~u ゲージの測定値を示す. 载荷直後には, 圧縮ひずみは供試体の左端に近いほど大きな値を示し, 左端から離れるにつれてその値が単調に減少する傾向が見られた. しかしこの時点では, 表裏いずれの分布も, 左から 2 番目の b ゲージあるいは左から 2 及び 3 番目の p, q ゲージにピークをもつ, 左に偏った上に凸の形状を示し, 左端の a 及び o ゲージは他のゲージに比べて小さい値を示す共通した傾向が見られる. このひずみ測定値の分布を, 地下空洞周辺岩盤に対応させて考えるならば, a 及び o ゲージの貼付位置は耐荷力の低減領域に入り, b ゲージあるいは p, q ゲージの貼付位置はその荷重をも負担している堅硬な岩盤中にあると考えられる. また, 空洞掘削面 (供試体左側面) からロックボルトや PS 工などによる補強を行うなら, b ゲージあるいは p, q ゲージの貼付位置より深いところにアンカーを行うことが望ましいといえる. 従って, このような現

象が現実の地下空洞周辺岩盤で測定できるならば, 補強を必要とする領域について有用な情報が得られることになる. また, ひずみ量の低下を示しつつある a 及び o ゲージの値は, 不安定な破壊の進展途上にあるため必ずしも十分信頼できるとはいえないものの, ゲージ貼付箇所周辺に残留する耐荷力を示しているともみることができる. 従って, このような測定を行えば, 耐荷力の低減程度に関する情報をも得ることができると考えられる.

4. 原位置測定への適用

以上の室内実験の結果, 岩盤内の微小ひずみを測定すれば耐荷力の低減領域の範囲とその低減程度に関する有用な情報が得られることがわかった. そこで, ボーリング孔に埋設できる微小ひずみ計を作製し, 原位置測定を行った.

(1) 作製した埋設型微小ひずみ計

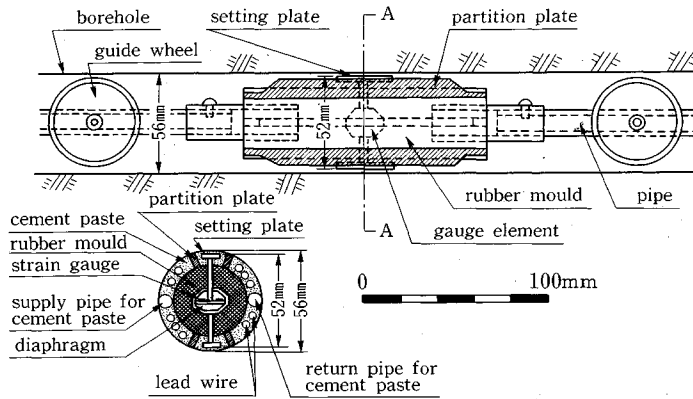
作製した埋設型微小ひずみ計は, 電中研式地圧測定ゲージのゲージ素子として実績のある (株) 共和電業製 BS-5B 型小標点距離ひずみ計を, 1 本のボアホール中に連結して多数埋設できるように加工したものである. すなわち, Fig.10 に示したように, 測定成分を鉛直に向けた 1 つのゲージに治具をつけて塩ビパイプに固定し前後にガイド用の車輪を取り付けたものを, 多数連結してセメントペーストでボアホール中に埋設するわけである.

ゲージの標点間距離は 52 mm であり, この間の平均ひずみを, 内蔵したダイアフラムの変形としてひずみゲージで検出する. ゲージ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. しかし, 埋設に用いるセメントペーストが固化した後円筒を形成するとゲージ挙動に影響を及ぼす恐れがあるため, これを防ぐために, 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るとともに, ゲージの標点間距離 52 mm に対し埋設するボアホールの直径を 56 mm とし, ゲージの周囲のセメントペーストがあまり厚くならないよう配慮した.

(2) 原位置測定の概要

原位置測定を行った場所は, 兵庫県東部の山岳地帯の地表下面下約 285 m に位置する, Fig.11 の幅 8 m, 高さ 7 m, 長さ 32 m 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, 25 m 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 56 mm のボーリング孔を削孔し, この中にひ



(A-A section view)

Fig.10 View of the strain gauge buried in a borehole.

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 0.8 m 離れた位置に、ゲージ No.2~No.9 は約 0.5 m の間隔で掘削予定線から 1.3 m~4.6 m の間に、ゲージ No.10~No.12 は約 1.0 m の間隔で 4.6 m~9.0 m 間にそれぞれ埋設設置した。ひずみ計の埋設に際しては、地圧測定ゲージの埋設経験^{7)~9)}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 10 m 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。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 Fig.11 のステップ 1 から始め、24 m (掘削ステップ 24) までは 1 m ずつ掘削し、その奥の 8 m (掘削ステップ 25~28) は 2 m 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 の手前の切り抜げ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) 測定ひずみの経時変化

Fig.12 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 Fig.12 に示すように、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、Fig.11 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

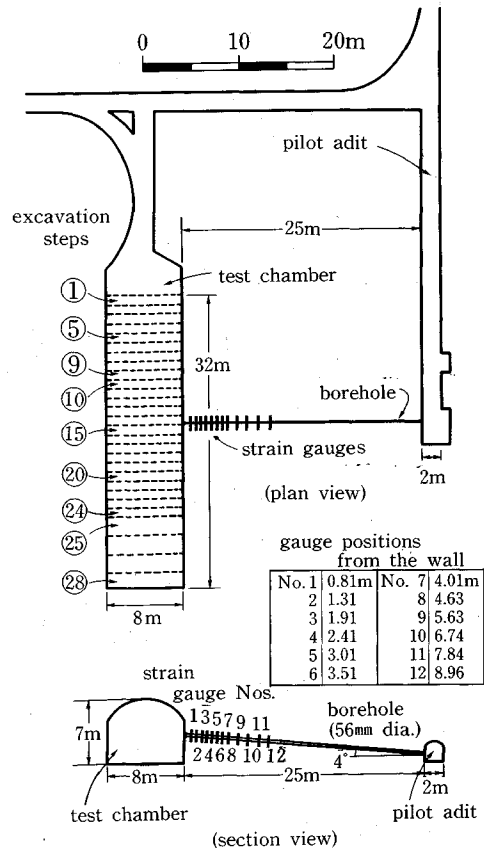


Fig.11 Positions of the strain gauges and excavation steps of the test chamber.

93 日である。

Fig.12 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 0.8~2.4 m 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。

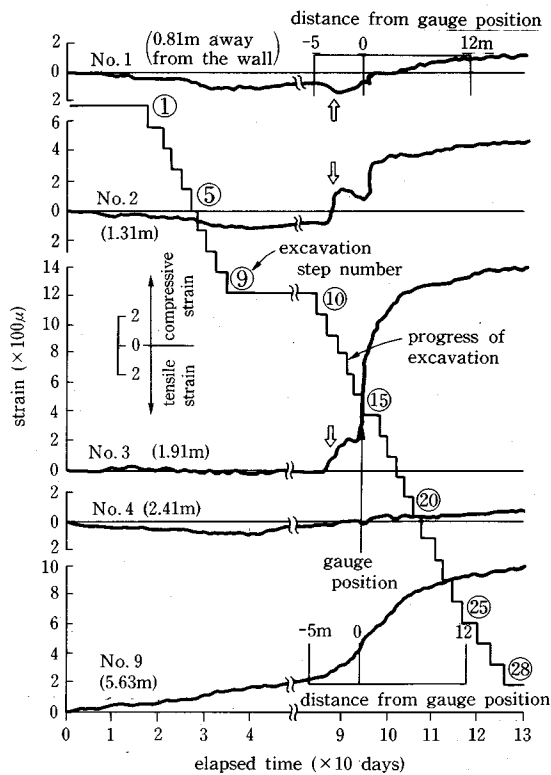


Fig.12 Change of measured strains and progress of excavation with time.

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 4 m 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 3 m 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推測される。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 52 mm 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分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分が、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分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 の埋設箇所は耐荷力の低減領域内にあると考えられる。

なお、室内実験の供試体は概ね均質であり、ゲージ貼付位置はいずれも一定の耐荷能力を有していた。このため、耐荷力の低減領域の発生は、いずれも応力が増大して破壊点に到達して耐荷力を失うという経過を経た。一方、上述の原位置測定用のゲージ No.1, No.2 及び No.4 などは初期状態から応力の増大を経ないまま、逆にそのことを根拠に耐荷力の低減領域にあると判断した。これは、原位置岩盤の場合、過去の地殻変動などにより空洞掘削以前にすでに破壊点に到達した岩盤領域がある、つまり原位置岩盤は室内実験の供試体のように均質ではなく、既存の亀裂や岩盤の不均質性により、耐荷力の低減した領域がすでに空洞掘削以前に存在していると考えたからである。

(4) 測定ひずみの分布形状から見たゆるみ域の範囲

ゲージ埋設断面の手前 5 m (ステップ 10 の掘削直前) からその奥 12 m (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、試験空洞側壁からの距離を横軸にとって Fig.13 に示した。この測定ひずみの分布形状を、室内実験で得られた Fig.9 の分布形状と比較すると、ゲージ No.1 及び No.2 の埋設箇所が耐荷力の低減領域、すなわち、通常ゆるみ域と呼ばれる領域にあることが推測される。従って、測定箇所の

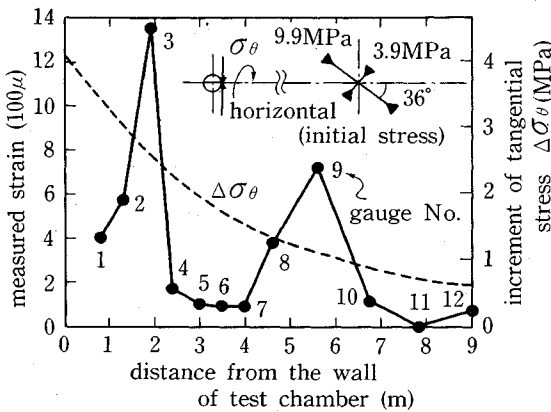


Fig.13 Distribution of measured strain increments due to excavation of the test chamber.

ゆるみ域は、空洞側壁から1.5 m程度の範囲と推定される。

(5) 測定ひずみの分布形状の特徴についての考察

測定ひずみの分布は、室内実験では、Fig.9に示したように空洞側壁に対応する供試体の左側面から少し離れた1箇所だけにピークを持つ分布形状を示したのに対し、原位置測定では、Fig.13に示したように空洞側壁から2 m付近(ゲージ No.3)と5.5 m付近(ゲージ No.9)の2箇所にピークを持つ分布形状を示した。原位置で測定したのは接線方向ひずみの増大量であるから、これは空洞掘削に伴う接線方向応力の増大量 $\Delta\sigma_\theta$ と概ね対応するはずである。初期地圧状態については、この空洞から少し離れた箇所で応力解放法による測定が行われており¹²⁾、その結果をこの空洞断面について表示すると、Fig.13の右上に示したようである。図中の破線は、この測定値を用い、空洞が均質等方な一様弾性体中にある直径8 m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求めた接線方向応力の増大量 $\Delta\sigma_\theta$ の分布である。 $\Delta\sigma_\theta$ の分布は、空洞から離れるにつれて単調な減少を示しており、測定ひずみの分布と大きく異なる。空洞周辺の2箇所にピークを有する測定ひずみの分布は、応力の再配分に伴う荷重の増大が、節理などの不連続面の噛み合いや岩盤剛性の不均質性により、ひずみ計を設置した空洞側壁から約9 mの範囲では、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ことを示しているように思われる。

筆者らは、空洞掘削以前の初期地圧状態においても岩盤内の応力分布が不均質であり、硬質な剛性の高い岩盤部分に相対的に大きな地圧が作用している傾向のあることを報告したが、その違いはせいぜい2倍程度であった¹³⁾。Fig.13の測定値は、最大値と最小値で10倍以上の違いがあり、岩盤の不均質性の影響は初期地圧状態におけるよりも、応力再配分に際してさらに顕著に表れる

ことを示しているように思われる。このような応力再配分が行われれば、荷重を支える柱に相当する部分には局部的に大きな応力が作用するため、施工上注意を要する。2箇所にピークを有するひずみの分布は、著者らが他地点で行った最近の測定でも現れており、今後さらにデータを積み重ねて研究を進めていきたいと考えている。

5. 結論と今後の課題

空洞掘削時の岩盤挙動、特に空洞接線方向の圧縮応力の増大に起因する岩盤挙動を把握する手法を開発するため、供試体を用いた室内実験を行い、測定手法の検討を行った。また、新たに着目した岩盤内の微小ひずみの測定については、原位置測定用のゲージを作製し、空洞掘削に伴う岩盤内のひずみ変化を原位置で実際に測定して、さらに検討を進めた。これらの結果を整理すると、以下の通りである。

(1) 供試体表面で観察された亀裂は、AE (Acoustic Emission) の震源分布の後を追うように広がっていく傾向がうかがえ、AEの震源決定が圧縮応力の増大に起因する岩盤の破壊の予測に有効であることがわかった。

(2) 実験中に供試体を通る2つのパスで測定したP波速度とP波初動振幅を比較したところ、従来の研究と同様、P波速度よりもP波初動振幅の方が、岩盤の破壊に対して敏感な変化を示すことがわかった。また、P波初動振幅の低下はAEの発生で特徴づけられる微小な破壊の開始時期に、一方P波速度の低下は供試体表面の開口亀裂で特徴づけられる巨視的な破壊の発生時期に対応している傾向がみられ、このような弾性波伝播特性の測定は、圧縮応力の増大に起因する岩盤中の破壊の進展の把握に有効であることがわかった。

(3) 供試体に貼付したひずみゲージは、荷重に伴っていずれも圧縮ひずみの増大を示したが、供試体に破壊が生じると破壊発生部分周辺に貼付したゲージのひずみ量は減少を示した。また、このひずみ量の低下に伴い、隣接する未だ破壊の生じていない部分に貼付したゲージのひずみ量は非線形的な増大を示す傾向が見られた。この挙動は、破壊の生じた部分で負担されていた荷重が、破壊の生じていない堅硬な部分に移動したことに対応しており、このようなひずみの測定が、空洞掘削時の応力再配分に伴って生じるゆるみ域の範囲や性状に関して、有用な情報を提供する可能性のあることがわかった。また、供試体にある程度破壊が進展した時期のひずみ分布の形状を検討したところ、この分布形状から、耐荷力を失った要補強領域が比較的容易に推測できることがわかった。

(4) 室内実験のひずみの測定に対応する原位置岩盤の微小ひずみの変化を測定するため、新たに孔内埋設ひずみ計を作製し、この計器を用いて、幅8 m、高さ7 m、

長さ 32 m の空洞の掘削に伴う周辺岩盤内のひずみ変化を測定した。これを室内実験の結果と比較検討したところ、作製した計器が原位置の測定に十分適用できること、また、測定箇所ゆるみ域は、空洞側壁から 1.5 m 程度の範囲であることがわかった。

(5) 原位置で測定したひずみは、空洞から離れた 2 箇所にピークを有する特徴的な分布形状を示した。このような分布は、応力の再配分に伴う荷重の増大が、節理などの不連続面の噛み合いや岩盤剛性の不均質性により、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ことを示しているように思われた。筆者らは、空洞掘削以前の初期地圧状態においても岩盤内の応力分布が不均質であり、硬質な剛性の高い岩盤部分に相対的に大きな地圧が作用している傾向のあることを報告したが、この傾向は応力再配分に際してさらに顕著に表れることを示しているように思われる。2 箇所にピークを有する測定ひずみの分布は、著者らが他地点で行った最近の測定にも現れており、今後さらにデータを積み重ねて研究を進めていきたいと考えている。

著者らは、本研究で妥当性を確認した埋設ひずみ計によるひずみ測定や、AE、弾性波伝播特性の測定を、現実のいくつかの大規模な地下発電所空洞に適用し、すでに有用なデータを得ている。現在、これらのデータの整理・検討を進めており、次の機会にはこれらデータに基づく岩盤挙動、特に空洞掘削に伴う空洞接線方向の圧縮応力の増大に伴う岩盤挙動を報告したいと考えている。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費(一般研究(C) 04805064, 研究代表者:石田毅)と(財)中国電力技術研究財団の助成を得て行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Kovari, K. and Petter, G. : Continuous strain monitoring in rock foundation of a large gravity dam, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, pp.157-171, 1983.

- 2) Kanaori, Y. : The observation of crack development around an underground rock chamber by borehole television system, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, pp.133-142, 1983.
- 3) 石田毅・金川忠・佐々木俊二・浦沢義彦: AE による岩盤空洞安定性監視に関する基礎実験, *土木学会論文集*, 第 376 号/Ⅲ-6, pp.141-149, 1986.
- 4) 石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹: AE と弾性波速度測定による花崗岩ブロックの熱破壊挙動の観測, *土木学会論文集*, 第 418 号/Ⅲ-13, pp.153-161, 1990.
- 5) 石田毅・北野晃一・木下直人・若林成樹: AE 測定による原位置花崗岩加熱時挙動の観測, *土木学会論文集*, 第 424 号/Ⅲ-14, pp.187-196, 1990.
- 6) 佐々宏一・南光宣和・渡江隆雄: 弾性波を利用する岩盤監視, *日本鉱業会誌*, Vol.98, No.1135, pp.927-931, 1982.
- 7) 金川忠・林正夫・北原義浩: 地圧の計測法と応用, *電力土木*, No.163, pp.31-42, 1979.
- 8) 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.
- 9) 金川忠・日比野敏・石田毅: オーバーコアリング法による 3 次元地圧計測法——埋設型 8 成分ゲージの開発——, *電力中央研究所・研究報告*, No.385033, 1986.
- 10) 佐々木俊二・石田毅・金川忠: 高温岩体発電のための岩盤破碎評価技術の開発——水圧破碎で発生する AE の特性と破壊メカニズム——, *電力中央研究所・研究報告*, No.U86032, 1987.
- 11) 井上博之・金子勝比古・佐々宏一・伊藤一郎: 岩石の破壊の進展に伴う弾性波の振幅の減衰, *日本鉱業会誌*, Vol.94, No.1083, pp.323-328, 1978.
- 12) 金川忠・山本清彦・田中達吉・横山幸也: AE 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.
- 13) 石田毅・金川忠: 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, *地震 2*, 第 40 巻, pp.329-339, 1987. (1991.7.29 受付)

PROPOSING OF A NEW METHOD TO DETECT LOOSENED REGIONS AROUND A ROCK CHAMBER, TAKING NOTE OF STRESS REDISTRIBUTION DUE TO EXCAVATION

Tsuyoshi ISHIDA, Tadashi KANAGAWA, Atsushi YADA and Masahiro TANAKA

As a method to investigate loosened regions around a rock chamber, the authors took note of the measurement of small strain changes in rock due to stress redistribution resulting from the excavation of a chamber. Then, they examined the applicability of it through a laboratory experiment, with examining the applicability of the monitoring of acoustic emission and P wave velocity. Moreover, on the measurement of small strain changes, they made a new gauge and measured real strain changes in rock with excavation of a small chamber. Through these laboratory and in-situ investigations, it was elucidated that the measurement of small strain changes is applicable to investigate loosened regions around a rock chamber.