

# 岩盤 A E を計測するために

長 秋雄<sup>1)</sup>・楠瀬勤一郎<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

日本では現在, 串木野・菊間・久慈の3地点で地下に石油を備蓄するための岩盤内貯蔵タンクの建設が進められている。石油以外にも LPG・天然ガス・圧縮空気の岩盤内貯蔵が検討されており, 今後いっそう岩盤地下空洞の利用が進むものと思われる。

地下に空洞を掘削した場合, 空洞周辺の岩盤には初期の地山応力に加えて空洞の掘削によって生じる二次的な応力が働く。これらの応力を支えるべき岩石が空洞の掘削によって取り除かれたため, 空洞周辺の岩盤では変形が進み, 節理の開口や発生などが生じ, ゆるんだ状態になる。この領域は「緩み域」と呼ばれている。

緩み域では, 時間とともに変形量が增大する塑性変形が空洞中心に向かって起こる。また地山応力が大きい地下の深い場所や構造的な応力が働いている場所の空洞では, 空洞壁面が爆発的に飛び出す「山はね」という破壊現象が起きることがある(写真1)。緩み域は応力的に不安定な領域であり, 放置すれば空洞中心に向かった変形が進むとともに, 緩み域はさらに外側へと拡大する。空洞が埋め尽くされるまで, この変形は続く。従って, 空洞を長期にわたって保持するには, 緩み域での変形の進行を抑えるための適切な支保や覆工を施すことが必要になる。空洞の建設中の安定性及び完成後の長期安定性を考える上で, 緩み域の大きさ・性状を評価することも重要なことである。



写真1 南アフリカの鉱山(深度3150m)で生じた「山はね」  
(Gay and Wainwright, 1984)

用する方法がある。青木ほか(1990)は岩盤 A E の m 値(振幅頻度分布を示す値)の低下量と緩み域の発生機構の違いとの関連を報告している。鉱山等ではこれまでも, 空洞の崩壊事故を事前に予知するために岩盤 A E のモニタリングが行われてきている。空洞の崩壊に先だって前兆的な A E 現象が観測され, 予知に成功した例も報告されている(Brady and Leighton, 1977)。

岩盤 A E については, これまでは発生頻度・規模別頻度分布・震源位置の評定がなされている。これらは, 岩盤 A E 波動の中に含まれている情報のごく一部でしかない。地震学の分野では, 複数の地点で観測された地震波

## 2. 緩み域の評価法

緩み域の位置・大きさを評価するには, 有限要素法等によって空洞開削後の空洞周辺の応力分布を求め, 応力値が岩盤の降伏強度より大きくなる領域を緩み域とみなす方法がある。また, 現場計測では弾性波速度の低下域を緩み域の推定に用いている。これら以外に, 緩み域の変形の過程で起きる岩盤の破壊にともなう岩盤 A E を利

1) 地質調査所 環境地質部

形から、地殻の大きな破壊である地震断層について、その位置・大きさ・破壊の伝播速度と方向・破壊のすべり量・応力降下量・主応力軸の方向など多くのことを知ることができるようになってきている。地下空洞周辺の緩み域で発生する岩盤A Eにおいても、地震学と同様の手法を用いれば、より詳しく緩み域での破壊現象や緩み域の性状をすることができる。Brady and Leighton (1977)のインクルージョンモデルでは、岩盤の崩壊に先だって主応力軸の変化・波動エネルギーの低下・周波数成分の低下が起きるとされている。これら前兆現象の有無も岩盤A E波形が正確に計測でき、その中に含まれている情報を取り出すことができれば検証できる。

### 3. 岩盤A Eの計測上の問題

地震計で計測される岩盤A E波形には、下式のように震源の情報と観測点までの伝播経路の特性と地震計の特性が重合した形で含まれている。

$$\text{Obs. Wave}(t) = \text{Source}(t) * \text{Path}(t) * \text{Seismometer}(t)$$

ここで、Obs. Wave (t) は観測波形

Source (t) は震源過程

Path (t) は途中の伝播経路の応答関数

Seismometer (t) は地震計の応答関数

\* はコンボリューションを示す。

この式を解析的に解くことはできないので、伝播経路の応答関数を適当に仮定した上で、震源過程に適当な初期モデルを与えて上の式で計算波形を求め、計算波形と観測波形と比較しながら逐次モデルの修正を繰り返して、最も観測波形に似た波形を与える震源過程モデルが導きだされる。この式を用いるとき、応答関数が簡単な地震計を用いて波動を忠実に計測することが望まれるが、岩盤A EのようなkHzのオーダーの高周波を対象とする場合、いろいろと解決すべき問題がでてくる。

一つは地震計の設置場所についての問題である。地下空洞の周囲には発破による直接損傷領域と緩み域が存在する。緩んだ岩盤上に地震計を設置したのでは、波動を正確に計測することができない。Rowell and Yoder (1984)は地下空洞表面及び掘削孔内の3m・6m・12mの近接した4地点に地震計を設置して、それぞれの地震計で計測された岩盤A E波形の比較を行った。彼らの結果では、孔内の6mと12m地点に設置した地震計では個々の岩盤A Eに対して個別の波形が得られ、かつ類似性も良かった。一方、空洞表面と孔内の3m地点に設置した地震計では、いずれの岩盤A Eでも、それぞれ約3kHzと約7.5kHzの共振がつねに計測された。この共振は空洞周辺の緩んだ岩に地震計を設置したために起きた

ものと考えられる。また、周波数kHzオーダーの弾性波の波長はこれらの領域と同程度の長さなので、波動がこれらの領域を通過する際にその波形がみだされてしまうことが考えられる。従って、岩盤A E波動を正確に計測するには、空洞周辺の緩み域の影響を避けるために、緩んでいない岩盤にまで掘削した孔の中に地震計を設置することが必要となる。

二つは、孔内設置装置自体の固有振動の問題がある。これは計測する弾性波の周波数が低い時は問題にならなかったことだが、周波数が高くなると地震計を組み込んだ装置の固有振動が問題になってくる。孔内に地震計を設置する場合、円筒状の装置に地震計を組み込むことになる。この円筒状装置の撓み振動やねじれ振動の固有振動域が計測する周波数領域に存在すると、岩盤A E波動の入射によって装置が共振し、岩盤A E波動を正確に記録することができなくなる。装置の固有振動を高めるには、装置を小型・軽量化するとともに、装置と孔壁との接触面積を大きくすればよいと考えられている (Hardage, 1983)。

### 4. 孔内設置型高周波地震計

以下では、岩盤A E計測のためにこれまで試験改良を進めてきている孔内設置型の高周波地震計について述べる。この装置は地上部のコントローラと孔内に入れる各ユニットからなっている(第1図)。

#### (1) 地上部のコントローラ

地上部のコントローラでは、孔内に設置される各ユニットの操作(アームの開閉・ハンマーの駆動)と、波形の収録条件(サンプリング周波数・フィルタ・ゲイン・トリガチャネル・トリガレベル・プレトリガ数)の設定と、波形データの記録・印刷等が行われる。

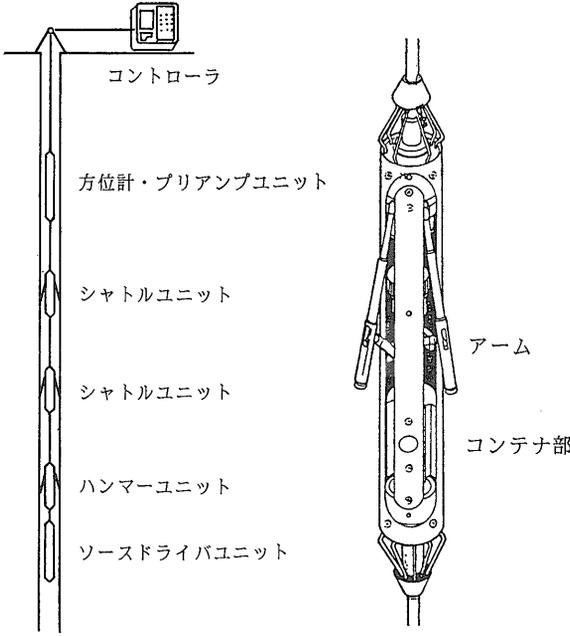
#### (2) 方位計・プリアンプユニット

フラックスゲート型の方位計とプリアンプが内蔵されている。方位計は地震計の設置方位を測定するためのものである。

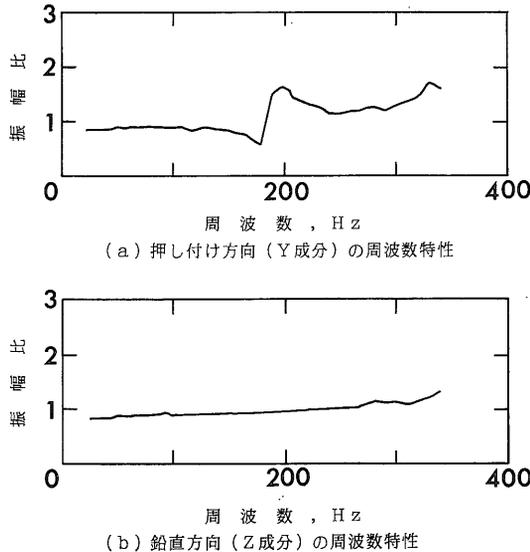
#### (3) シャトルユニット(第2図)

直径51mm, 長さ400mm, 重量3kgで、できるかぎり小型化をはかった。地震計コンテナとモータ駆動により開閉するアームが取り付けられている。ユニットを孔内に入れるときはアームをユニット内に閉じておき、所定の深度にユニットが達したら地上部のコントローラでモータを駆動させてアームを開き、シャトルユニットを孔壁に押し付けて固着させる。孔径56mm~100mmの孔に設置可能である。

ユニットのコンテナ部には、3成分(1上下動と2水平



第1図 孔内設置型高周波地震計の構成. 第2図 シャトルユニット



第3図 シャトルユニットの周波数特性

動)の地震計がとりつけられる。速度型地震計(感度0.137 V/cm/sec)を内蔵したコンテナと、加速度計(感度100mV/G)を内蔵したコンテナが用意されている。これらは対象となる振動の周波数領域によって一方を選択して使う。コンテナの寸法は直径48mm・長さ80mmであり、この寸法の中に入るものであれば他のセンサーを組み込むことが可能である。

#### (4) ハンマーユニット

シャトルユニットと同じ物だが、地震計コンテナの代わりに孔壁を打撃するハンマーコンテナが取り付けられている。このハンマーで孔壁を打撃し、その振動を上部の地震計で計測してユニットと孔壁との固着状態を調べたり、ユニット間の弾性波速度を調べたりするのに用いる。

#### (5) ソースドライバユニット

ハンマーユニットを駆動するための電気回路が内蔵されている。

### 5. シャトルユニットの周波数特性

このシャトルユニットの周波数特性を計るために、シャトルユニットをアルミ製パイプ(内径76mm・肉厚15mm・長さ550mm)にとりつけて、振動台で振動試験を行った。

その結果が第3図に示されている。縦軸の振幅比はシャトルユニット内の加速度計コンテナからの出力とコンテナと同位置のパイプ外壁に取り付けた加速度形の出力との比である。振幅比の値が1であれば、シャトルはパイプの振動と同じ振幅で振動しており、望ましい状態と言える。X成分(シャトルの押し付け方向と直交する方向)の振動については、今回の取付法ではパイプ全体を様に振動させることができなかったため周波数特性は測定できていない。Y成分(シャトルの押し付け方向)とZ成分(上下動成分)の振動については、いずれも周波数340Hzまでパイプを様に振動させることができたので、この範囲での周波数特性が示されている。Y成分の周波数特性では、190Hz周辺に弱い共振が存在していて、シャトルユニットでは振幅が約±60%変動して計測されている。共振域以外の周波数帯では、振幅比は1に近い値になっている。Z方向の周波数特性は、300Hzまでは振幅比はほぼ1であり平坦な特性となっている。300Hz以上では、Y成分とZ成分とも振幅比に増加の傾向が見られる。現在、周波数1kHzまでの周波数特性が測定できるようにパイプの取り付け法など加振方法の検討が行われている。

### 6. シャトルユニットでの震源方位の評定

シャトルユニットには3成分の地震計が組み込まれているので、P波初動の振動方位(=岩盤AEの到来方位)を求めることができる。岩盤の弾性波速度が別の方法で求められていれば、P波到達時刻とS波到達時刻との差から震源までの距離が求められる。両者を組み合わせることで、点対象の任意性は残るものの1点の観測でも震源

位置を評定することが可能である。この方法をホドグラム法と言う。ホドグラム法では弾性波速度構造が一様であることを仮定している。

シャトルユニットを孔内に設置して、計測された初動の振動方位と震源方位を比較する試験を行ってみた。シャトルユニットは深度6.8mに設置され、孔口から半径11mの位置で中心角10°毎に重りを落下させて震源とした。震源位置は南側の中心角120°の範囲であった(第4図)。

この試験結果が第5図に示されている。横軸はシャトルと震源間の幾何学的方位であり、縦軸は初動の振動方位である。南から東側の範囲では、初動の振動方位は幾何学的方位とほぼ一致する結果が得られた。一方、西側の範囲では初動の振動方位は幾何学的方位とはかなりずれた値となった。このずれは、西側の地中になんらかの速度構造の異常があって、弾性波の伝播経路が直線ではなく、北側からの回りこみがあったためと考えられる。その理由を以下にのべる。この試験ではシャトルは、方位計の値よりほぼ西向き(S79°W)に押し付けられていた。Y成分(シャトルの押し付け方向)の初動の押し・引きの変化が震源位置S0°とS10°Eの間でおきていたことも、シャトルがほぼ西向きに押し付けられていたことを示している。この方位にシャトルが押し付けられていたとき、X成分の初動の押し・引きの変化は震源位置S80°WとS90°Wの間でおきるはずであるが、結果はS50°WとS60°Wの間でおきていた。このことは伝播経路が北側から回り込んでいたことを示している。

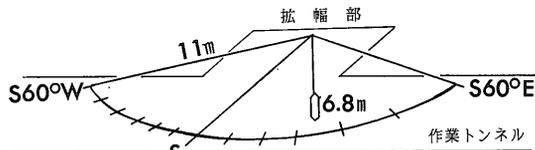
## 7. おわりに

本特集号の他の記事で紹介されているように、都市域でも大深度地下空間の利用が考えられている。その際、事前の詳しい地下構造調査が必要となる。孔井間の弾性波トモグラフィ法はそのための有力な手法の一つであり、分解能をあげるために高周波の弾性波の利用が研究されてきている。今回紹介したような孔内設置型の高周波地震計はこの方面でも必要とされてきている。

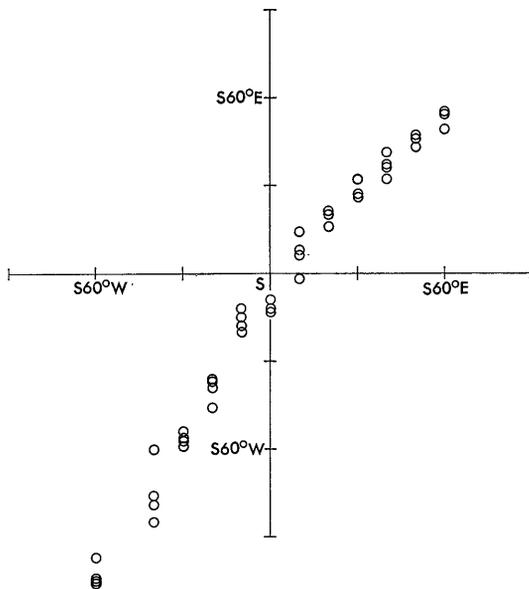
なお、孔内設置型高周波地震計の作製・改良は応用地質株式会社の協力を得て行われた。震源方位評定試験の実施にあたっては日本地下石油備蓄株式会社久慈事業所と鹿島建設株式会社他5社JVに便宜をはかっていただいた。ここに感謝の意を表す。

## 文 献

青木謙治・戸井田克・腰塚憲一(1990): AE計測による岩盤空洞掘削時の安定性監視技術について。第8回岩の力学国内



第4図 シャトルユニットと震源の配置



第5図 幾何学的方位(横軸)と初動の振動方位(縦軸)の比較

シンポジウム講演論文集, 133-138.

Brady, B. T. and Leighton, F. W. (1977): Seismic anomaly prior to a moderate rock burst: A case study. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **14**, 127-132.

Gay, N. C. and Wainwright, B. H. ed. (1984): Rockburst and seismicity in mines, *The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 363p.

Hardage, B. A. (1983): Vertical seismic profiling, part A, principles. *Handbook of geophysical exploration*, **14 A**: Geophysical Press, 509p.

Rowell, G. A. and Yoder, L. P. (1984): The effect of geophone emplacement on the observed frequency content of microseismic signals. in Hardy, H. R. and Leighton, F. W., ed., *Acoustic emission/microseismic in geologic structures and materials*, *Proceeding of the third conference*: Trans Tech Publications, 707-727.

CHO Akio and KUSUNOSE Kinichiro (1991): Downhole seismic tool for field AE observation.

<受付: 1991年8月1日>