

勸電力中央研究所 〇田石田毅・田金川忠

(株)中部電力

田河合照久

1. 緒言

大規模地下空洞の開削にあたって、空洞開削前の岩盤内の応力、すなわち地山応力を測定することは、合理的な空洞設計に有用な情報を提供する。このため、種々の地山応力測定法が開発されているが、その中でも、ボーリング孔内に計器を設置し、オーバーコアリングを実施して、得られた解放ひずみから地山応力を決定する応力解放法は、頻繁に用いられる方法のひとつである。現在、国内で10年程度の測定実績のある応力解放法は、主として埋設法（電研方式）、孔底法（京大方式）、孔径法（東大方式）の3種である。従来、費用等の制約から同一地点で2種類以上の方法による測定を実施した例は乏しいが、今回、奥美濃山岳地帯（岐阜県）の調査横坑内、地表下335 m海拔460 m地点で、埋設法、孔底法の2方法を同時に実施する機会を得た。そこで、両測定結果を比較するとともに、両測定法による実測ひずみから直接ひとつの地山応力を決定する方法を開発した。また、測定結果に見られる顕著な東西圧縮傾向を地球物理学的な見地から検討した。

2. 埋設法と孔底法による測定

埋設法は、図1の埋設ゲージを用いて測定した解放ひずみ（ボーリング孔径4方向と孔軸1方向）と、室内3軸試験による埋設ゲージの感度試験結果から、地山応力を決定する方法である。一方、孔底法は、図2の8枚のストレインゲージを貼付した孔底ひずみ計による現位置解放ひずみと、室内1軸試験による岩石の弾性係数から地山応力を決定する方法である。今回、埋設法ではボーリング孔3本9測点で33個の解放ひずみを、孔底法ではボーリング孔2本5測点で40個の解放ひずみを測定した。

さて、各測定法の観測方程式はそれぞれ①②式のようにかける。

$$\{\epsilon_M\} = [B_M] \{\sigma\} \quad \text{①} \quad \{\epsilon_K\} = [B_K] \{\sigma\} \quad \text{②}$$

ここに、 $\{\epsilon\}$ 、 $[B]$ 、 $\{\sigma\}$ は、測定ひずみ、ひずみ感度マトリックス、地山応力を、添字M、Kは、埋設法、孔底法をそれぞれ示す。

①②式に最小自乗法を用いると

$\{\sigma_M\} = ([B_M]^T [B_M])^{-1} [B_M]^T \{\epsilon_M\}$ ①' $\{\sigma_K\} = ([B_K]^T [B_K])^{-1} [B_K]^T \{\epsilon_K\}$ ②' が得られ、埋設法による地山応力 $\{\sigma_M\}$ 、孔底法による地山応力 $\{\sigma_K\}$ が決定される。 $\{\sigma_M\}$ 、 $\{\sigma_K\}$ は実測結果ゆえ、 $\{\sigma_M\} \approx \{\sigma_K\}$ であることが多い。ここで、求める真の地山応力 $\{\sigma_0\}$ が $\{\sigma_M\}$ と $\{\sigma_K\}$ の間にあると仮定すれば、2つの測定法による実測ひずみからひとつの地山応力 $\{\sigma_0\}$ を決定するための観測方程式

$$\left[\frac{\sqrt{P_M} \cdot \{\epsilon_M\}}{\sqrt{P_K} \cdot \{\epsilon_K\}} \right] = \left[\frac{\sqrt{P_M} \cdot [B_M]}{\sqrt{P_K} \cdot [B_K]} \right] \{\sigma_0\} \quad \text{③}$$

が得られ、①'②'式と同様にして $\{\sigma_0\}$ が決定される。なお、③式に

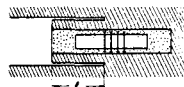
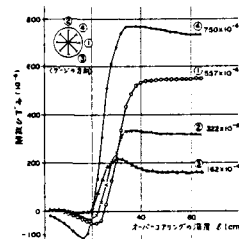
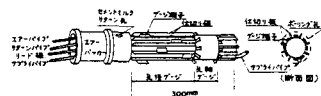


図1. 埋設ゲージの見取図と、埋設法による応力解放に伴うひずみの連続変化の1例【金川（電力士本No.163, 1979年）の図を改変】

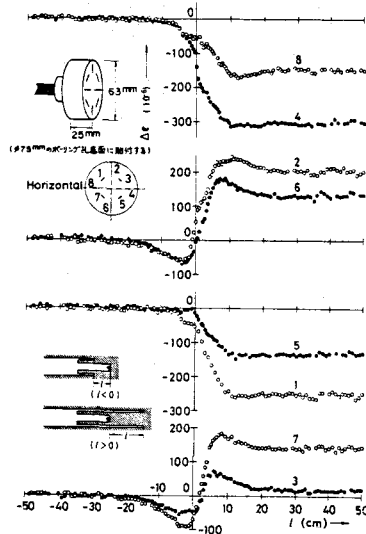


図2. 孔底ひずみ測定用8素子ゲージの見取図と、孔底法による応力解放に伴うひずみの連続変化の1例【亀岡（京大学位論文, 1978年）の図を改変】

おける P_M, P_K は、測定精度に基づいて決定されるべき測定法の重みであるが、今回は両測定法が同程度の精度を有していると仮定して次式で定めた。

$$P_M = \frac{1}{k} (\{\epsilon_K\} - [B_K] \{\sigma_K^*\})^T (\{\epsilon_K\} - [B_K] \{\sigma_K^*\}), P_K = \frac{1}{m} (\{\epsilon_M\} - [B_M] \{\sigma_M^*\})^T (\{\epsilon_M\} - [B_M] \{\sigma_M^*\})$$

ここに、 m, k はそれぞれ埋設法、孔底法によって測定された解放ひずみの個数である。

このようにして決定した $\{\sigma_o^*\}, \{\sigma_M^*\}, \{\sigma_K^*\}$ を図3に示す。同図は主応力方向をステレオ投影(下半球)した結果を示しており、応力値は引張を正としている。また σ_z^* は鉛直方向の直応力成分、 $\sigma_{Hmax}^*, \sigma_{Hmin}^*$ は水平面内の主応力値である。埋設法と孔底法の測定位置は近接しているにもかかわらず、 $\{\sigma_M^*\}$ と $\{\sigma_K^*\}$ には若干の相違が見られる。とくに $\{\sigma_M^*\}$ が $\sigma_3/\sigma_1 \approx 2.0$ であるのに対し、 $\{\sigma_K^*\}$ は $\sigma_3/\sigma_1 \approx 5.1$ と、孔底法の結果は埋設法の結果に比べてより偏圧的である。このような傾向が、偶然的なものか、測定法固有のものなのかは現在のところ不明であり、今後の検討課題である。しかし、 $\{\sigma_M^*\}, \{\sigma_K^*\}$ とも顕著な東西圧縮傾向を示しており、この点で両者はよく一致しているといえる。

3. 測定結果と造構応力の関係

測定地点は、最大傾斜が東西方向にある急峻な斜面の直下に位置するが、 $\sigma_{Hmin}^*/\sigma_z^* = 1.3 \sim 1.7, \sigma_{Hmin}^*/\sigma_{Hmax}^* = 1.5 \sim 4.2$ といった測定結果に見られる顕著な東西圧縮傾向は、このような地形の影響だけでは説明できない。図4は、主に孔底法による当地点およびその付近の $\sigma_{Hmin}^*, \sigma_{Hmax}^*$ の大きさと方向である。また、藤田和夫(1980)は、図5に示す第四紀に活動的となった構造帯の分布から、太平洋プレートによる東西方向の造構圧縮応力が北部フォッサマグナを通じて西南日本内帯に伝達されると述べている。図4と図5を比較すれば、この地域の地山応力測定結果の水平面内最大圧縮主応力 σ_{Hmin}^* の方向はほぼ造構圧縮応力の方向に向いており、奥美濃地点の大きな東西圧縮応力はこれら造構応力との関連があることも考えられる。

従来、その簡便さのために、地表の地形と岩盤の自重から地山応力を予想する場合が多いが、この測定例に見られるように必ずしも正しい結果を与えない。地下空洞が建設されるような地殻の表層においても、造構応力の影響のために、水平圧縮応力が大きい場合が少なくないと思われる。地山応力がどの程度造構応力の影響を受けているかは、地表の地形はもちろん、地域や深さあるいは地質構造によっても異なるであろうが、今後は造構応力、すなわち、プレートテクトニクスに基づく広域応力場を念頭に置いて、地下空洞の設計がなされることも必要ではないと思われる。

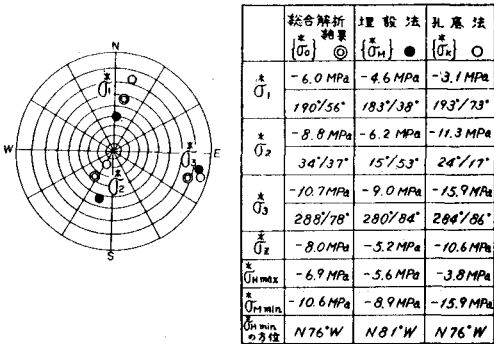


図3. 埋設法、孔底法の測定結果と総合解析結果

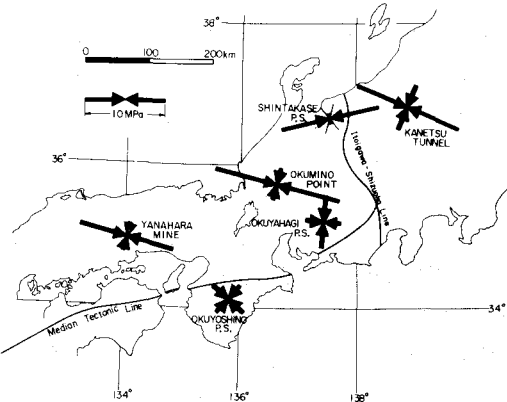


図4. 奥美濃地点およびその付近の主に孔底法による水平面内主応力の大きさと方向【石田ら(地震学会秋季大会, 1981年)】

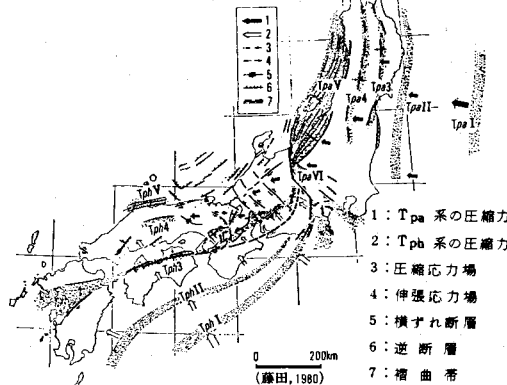


図5. 本州弧の第四紀構造帯【藤田(月刊地球, Vol.2, No.8, 1980年)】