岩盤内の地山応力と地学的に推定される 地殻応力との関連について*

平 松 良 雄** 岡 行 俊**
伊 藤 英 文*** 田 中 豊****

The Correlation of the Rock Stress Measured in situ and the Tectonic Stress Inferred from Geological and Geophysical Studies

by

Yoshio HIRAMATSU, Yukitoshi OKA
(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)
Hidebumi ITO
(Faculty of Home Economics, Kyoto Women's University, Kyoto)
and Yutaka TANAKA
(Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto)

On designing and performing underground excavation works it is desirable to measure the initial rock stress as one of fundamental data. Recently in the field of mining and civil engineering the rock stress is being measured by the stress relief technique. On the other hand, the tectonic movements, particularly the direction of stress and the strain rate, have been clarified by geological and geophysical investigations. The present paper first describes the method for estimating the tectonic stress. Subsequently, it mentions the fact that the initial rock stresses measured at the sites of Shintakasegawa and Okutataragi underground power stations are connected closely with the tectonic stresses in the respective districts.

From these investigations, it has been found that the axis of the maximum rock stress nearly coincides with that of the maximum tectonic stress. Though the experiences in determining rock stress have revealed that the stress obtained varies from one point to another and that the accuracy is not high, it may be concluded that the rock stress measured is reliable to some extent.

(Received Jan. 17, 1974)

1 緒 言

地下構造物の合理的な設計・施工を行なう上に、岩盤中に空洞開さく以前に存在している応力すなわち地山応力の状態を測定して、それを基礎資料の一つとして考慮に入れることが望ましい。このため最近地山応力の実測が盛んに行なわれるようになった。一方、地質学および地球物理学の分野でも、最近それぞれ独自の方法で、日本各地の地殻の応力方向とひずみ速度が、次第に明らかにされてきている。

筆者らは、長野県大町市の東京電力新高瀬川地下発電所建設工事の際、地山応力測定に協力した。また関

西電力から、兵庫県朝来町の奥多々良木発電所建設の際行なわれた地山応力測定の資料の提供を受けた。これらの地域は地質学的に古い基盤岩であり、両地域の地殻の主応力方向は地学的方法で推定がつく。従来、岩盤内の応力測定は、その信頼性を検証する手段がない点に悩みがあったが、この機会に、上記の二つの地下発電所の付近の応力測定結果と地学的方法により推定される地殻応力とを比較してみた。

2 応力解放による地山応力測定法

地山応力は、ボアホールの直径および孔軸方向のひずみの変化を測定する応力解放法によって決定される。測定操作は、Fig. 1 (上) に示すように、坑壁よりさく孔された大きいボアホールの奥に小さいボアホールを作り、その中に計器を設置し、つぎに、同図 (下) に示すように、小さいボアホールの外側をオーバコア

* 原稿受理 昭和49年 1月17日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 正 会 員 京都女子大学家政学部 京都市東山区東山七条

**** 正 会 員 京科大学理学部 京都市左京区北白川追分町

リングして、計器のまわりの応力を解放し、そのとき起こる変形を測定するのである。このとき使用される

Fig. 1. Schematic representation of measurement of in situ rock stress. Upper: Setting of borehole gauge. Lower: Overcoring for stress relief.

Fig. 2. Measuring apparatus of diametral and longitudinal deformations of borehole on the stress relief method (after Mimaki).

Fig. 3. An example of diametral deformation change with the progress of overcoring (after Mimaki).

計器の一例はFig. 2のようで、3方向の直径変化 Δd_i および孔軸方向のひずみが測定されるようになっている。Fig. 3はオーバコアリングの進行に伴う $\Delta d_i/d$ の変化の一例を示す。

3 地学的な地殻応力推定方法

この研究で、地殻応力の方向を推定するのに、次の資料や方法を用いた。

(1) 岩盤中に発達している裂かや断層などを地質構造成成時のすべり面と仮定すれば、当時の地殻応力状態が推定できる。たとえば、すべり面が活断層である場合には現在の応力状態が推定できる。Fig. 4のように、三つの圧縮主応力によって、共役的な2方向に発達するすべり面が生ずると、共役すべり面の交線の方法は中間主応力軸 p_2 の方向と一致し、 p_1 , p_3 の方向は共役すべり面のなす二つの角をそれぞれ二等分する方向と一致する。また、すべり面で分けられる四つのブロックは、相対的に p_3 の方向に伸び、 p_1 の方向に縮む。野外で見いだされた共役すべり面から、この原理に基づいて、主応力の方向をステレオ投影図上で求めるのである。

Fig. 4. Relation between conjugate slip planes and directions of tectonic principal stresses.

(2) わが国では、新旧二回の一等三角測量により、約60年間の全国三角点の水平変位が明らかにされている。その結果から、国内のほとんどの地域について平均主ひずみが計算されている。その一例をFig. 5に示す⁴⁾⁵⁾。この結果は地殻応力の状況をよく反映していると思われる。

(3) 地震波はP波(縦波)、S波(横波)および表面波の順に観測点に到達する。観測されたP波には、その初動が押しの場合と引きの場合がある。いま、一つの球面すなわち震源球を考え、多くの観測所で観測されたP波を震源球上に引きもどして、押し引き別にプロットすると、それらの点は、Fig. 6のように、震源を含み互いに直交する二つの平面(節面 Nodal

Fig. 5. Major and minor principal axes of horizontal strain in central Japan for the last 60 years, calculated from the results of the first order triangulation (after Harada and Kasai).

Fig. 6. Push-pull distribution of initial motion of seismic P wave and nodal lines on lower hemisphere of stereographic projection (left) and schematic diagram showing earthquake generating force and nodal planes (right).

plane) で分けられた四つの部分に交互に現われる。節面的一方が断層面であると考えられている。なお、このような分布を説明するためには、震源において互いに直角な方向に張力と圧縮力が働いたものと考えればよい (Fig. 6 の右図)。圧縮力の方向を起震力の方向という。この方向は、地域的に系統性がみられ、多くの場合、地域の最大主応力方向とみなされている。

4 新高瀬川発電所付近の応力

4.1 地山応力

この発電所は、Fig. 7(b)に示すように、急峻な山岳地帯の被り約 250m の岩盤中に建設されつつある。付近の地質は花崗閃緑岩、斑状細粒閃緑岩および花崗岩である (Fig. 8(a))。また、この付近の断層群として、最も近くに猪の口、少し離れて葛、さらに離れて高瀬川等の断層がある (Fig. 8(b))。また東方約 10 km に糸魚川-静岡構造線がある。

地山応力測定は地下空洞開さく在先立って行なわれた。測定箇所は、Fig. 7(a)に示す 2 本の調査坑上の No. 2~4 の三つの地点で、断面図に示すように、ほ

Fig. 7. (a) Plan of test area and exact sections of test sites and (b) N-S section through test site No. 2 in Shintakasegawa underground powerhouse.

ぼ水平および鉛直の 8 本のボアホールを掘さくし、それぞれ Fig. 2 の計器が埋設されて、合計 14 点で測定が行なわれた。測定された直径変化から適当な 3 組以上の組合せを多数 (約 300) 選び、おのこの組合せについて観測方程式を立てて、地山主応力 σ_1^* , σ_2^* , σ_3^* が計算された。これらのうち、確かと思われる主応力方向の一部を下半球のステレオ投影図上にプロットすると、Fig. 9(a)のようになる。この外、孔軸方向のひずみの測定値やディスクング現象などを考慮に入れて、同図(b)のように地山応力を決定した。最大主応力 σ_1^* は、水平に近く、ほぼ東西の圧縮力で、その大きさは 100~180 kg/cm² である。中間主応力 σ_2^* はほぼ鉛直で被り圧に近く、最小主応力 σ_3^* は零に近く谷側に向いている。

4.2 地殻応力

上述の地山応力測定結果に対して地殻応力を検討すると、次のようである。まず、断層解析について述べよう。Fig. 8(b)に示すように、猪の口断層と葛断層は共役と思われるので、これらから主応力方向を求める。同図の上位に示すステレオ投影図のような p_1 , p_2 , p_3

Fig. 8. (a) Directions of tectonic principal stresses (lower hemisphere) deduced from conjugate shear fissures developing in adits at the location I, II and III shown in the geologic map of Shintakasegawa power house area, and (b) those from the assumed set of Shishinokuchi and Kuzu faults.

Fig. 9. Directions and magnitudes of principal rock stress in Shintakasegawa power house determined by the stress relief method. (a): stereographic projection on lower hemisphere)

の方向を得る。これらは σ_1^* , σ_2^* , σ_3^* の方向とほぼ一致している²⁾。さらに、Fig. 8(a)に示す地山応力測定箇所とほぼ同一の3地点で、ずれを伴う裂か、すなわち、その表面に鏡肌や粘土シームにずれが認められるせん断裂か、の傾斜方位が調査され、共役せん断面の密度分布がとられた。これらの結果から、地殻応力の主応力軸が求められた。その結果はFig. 8(a)の上位のステレオ投影図の破線内の範囲に p_1 , p_2 , p_3 の方向がある。これらと σ_1^* , σ_2^* , σ_3^* の方向とを比較すると、最大主応力 p_1 と σ_1^* とはよく一致している。しかし、中間および最小主応力は、傾斜が約 50° 異なっている。

つぎに、Fig. 5 によって、高瀬川付近の測地学的に推定される主ひずみをみると、東西方向の圧縮ひずみである。

さらに、地震学的な検討を行なう。Fig. 10 は浅発地震の起震力の方向を、市川の研究結果から引用したものである。この付近には最近松代群発地震が発生した。この図からわかるように、ほぼ東西方向に起震力が働いたものが多いことが認められる。

5 奥多々良木発電所付近の応力

5.1 地山応力

発電所付近の地形は Fig. 11 左に示すようで、その

Fig. 10. Directions of earthquake generating forces of very shallow earthquakes in central Japan (after Ichikawa), S : Shintakasegawa, O : Okutataragi.

*1 地質は石英粗面岩質角礫岩を主体として、花崗斑岩および輝緑岩の岩脈を介在しているマッシュな岩盤である。地山応力測定箇所は同図右のようで、孔軸方向のひずみが測定された。発電所空洞の長軸方向に直交する水平軸を x 軸、鉛直に z 軸をとると、得られた結果は、同図にひずみ計位置とともに示されているように、 $\epsilon_x = 250 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon_z = 90 \times 10^{-6}$ であり、 ϵ_x が ϵ_z よりはるかに大きいことが注目される。また、採取された岩石コアについての試験から、ヤング率 $E = 5.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ およびポアソン比 $\nu = 0.25$ が得られている¹¹⁾。これらの結果から3次元的な地山応力を決定するのは、データ不足のため不可能である。いま、 x 、 y 、 z 軸

*1 関西電力奥多々々木水力発電所建設所の教示による。

Fig. 11 Topography of Okutataragi underground power house area (left), situation of test area and the values of longitudinal strain of borehole obtained by the stress relief method (right).

が主応力軸であり、 $\sigma_x^* = \sigma_y^*$ の場合と、 $\sigma_y^* = 0$ の場合とを仮定すると、前者では $\sigma_x^* = 235 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_z^* = 167 \text{ kg/cm}^2$ 、後者では $\sigma_x^* = 160 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\sigma_z^* = 90 \text{ kg/cm}^2$ となる。一方、被り圧から考えると、 σ_z^* は $65 \sim 85 \text{ kg/cm}^2$ と推定される。この点を考慮し、ヤング率を測定値よりいくぶん小さくすることにし、 $\sigma_x^* = 150 \text{ kg/cm}^2$ 程度と判断する。

Fig. 12. Trajectories and contourlines of theoretical minor principal stress in rock before and after removing the top part on arched crown excavation in Okutataragi power house.

Fig. 13. Large horizontal cracks generated on both wall sides of center heading after removing the top part on arched crown excavation in Okutataragi power house (offered by the Kansai electric power Inc.).

参考のため、アーチ部掘さくの末期に起こった現象を述べておこう。この空洞は幅 20m, 高さ 48m, 奥行 152m で、長軸方向は南北である。まず Fig. 12 に示すように 3 本の導坑が作られ、つづいてアーチ部の掘さくが二、三箇所から進められた。前後の掘さくが終わり、残された部分に取り払われた翌日、中央導坑の両側壁に水平なき裂が 20~30m にわたって発生した (Fig. 13 参照)。Fig. 12 は、アーチ部の掘さくが一部分残された時期 (上) と完全に掘さくされたとき (下) の岩盤内の σ_2 を有限要素法で計算したものである。ただし、 $\sigma_x^* = p$, $\sigma_z^* = p/2$ と仮定している。上図では中央導坑側壁に圧縮応力が現われているが、下図では約 $0.3p$ の引張応力が生じている。したがって、 $p = 150 \text{ kg/cm}^2$ とすると、導坑側壁には約 45 kg/cm^2 の引張応力が生じたことになる。ここの岩石の引張強度は 54 kg/cm^2 程度であること¹¹⁾から考えると、このようななき裂が生じたことが納得できる。いいかえれば、このような現象が起こることは、 σ_z^* より σ_x^* の方がはるかに大きく、岩盤は東西方向に強く圧縮されていたことの一つの証拠と考えられる。

Fig. 14. Conjugate sets of strike-slip faults in Quaternary in central Japan (after Huzita).

Fig. 15. Distribution of microearthquakes and active fault system in the northwestern part of Kinki district (after Kishimoto and Huzita).

5・2 地殻応力

近畿西部においては、藤田らの横ずれ活断層解析¹²⁾¹³⁾によると、Fig. 14 に示すように、山崎・三峠断層などの NW-SE 方向に延びる左ずれと、それに共役な六甲山地断層系たとえば五助橋断層など NE-SW の方向の断層が存在し、これらは部分的に右ずれを示している。また、岸本らがこの付近で観測した微小または小地震の震央分布を示すと、Fig. 15 のようで、上記の共役断層に沿う分布が認められる。以上のことから、この付近も、現在、東西圧縮の場にあると結論される。一等三角測量から得られた主ひずみは、Fig. 5 からわかるように、やはり東西方向である。さらに、Fig. 10 に示した起震力の方向も、この付近では、概して東西方向である。微小地震の発震機構についても同じ結果が得られている¹⁴⁾¹⁵⁾。

奥多々良木南方 7 km に生野鉱山があるが、ここでは、1969年から72年にかけて、山はねが数回起こり、これらが微小地震観測網にとらえられた。これらの山はねの震動の P 波初動分布から、Fig. 16 に示すよう

Fig. 16. Push-pull distribution of initial motion of ground tremors caused by rock burst in the Ikuno mine (left) and its mechanism diagram (right).

な地震機構が求められた¹⁶⁾。この結果から、これらの山はねは、東西方向の圧縮力による dip-slip 型の破壊であろうと考えられる。ただし、このことは、たまたま採掘された鍾面の走行が NS であることに關係していたとも考えられる。

6 結 言

新高瀬川および奥多々良木地下発電所の建設工事の際測定された地山応力と地学的方法によって推定された地殻応力とを比較し、兩者の主応力方向はほぼ一致することを認めた。従来経験によれば、地山応力測定値は数十 cm 程度離れてもいくぶん異なることが多く、また応力解放法そのものの信頼性は高くないことを認めなければならない。しかし、今回の検討により、地山応力測定法はある程度の信頼性が高められたものとする。

最後に、資料の提供を賜った東京電力(株)御牧陽一氏、関西電力(株)吉田 登氏・錦織達郎氏、鹿島建設(株)技術研究所岡林信行氏に深甚なる謝意を表する次第である。

(昭和48年11月24日 第4回岩の力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

1) 岡 行俊, 平松良雄, 日本鉱業会誌, **84**, 7 (1968).

- 2) 御牧陽一, 第8回岩盤力学シンポジウム講演概要, 67 (1973).
- 3) 平山次郎, 垣見俊弘, 地球科学, **78**, 23 (1965).
- 4) 原田健久, 葛西篤男, 測地学会誌, **17**, 4 (1971).
- 5) Kasahara, K., and A. Sugimura, J. Geodetic Soc. Japan, **10**, 139 (1964).
- 6) 池田 進, トンネルと地下, **3**, 10, 1 (1972).
- 7) 平松良雄, 岡 行俊, 菅原勝彦, 日本鉱業会昭和47年秋季大会分科研究会資料B-8.
- 8) 芥川真知, 岡林信行, 谷本治重, 青木謙治, 福岡 孝, 鹿島建設技術研究所年報, **21**, 123 (1973).
- 9) Ichikawa, M., Geophys. Mag., **35**, 207 (1971).
- 10) 錦織達郎, 第8回岩盤力学シンポジウム講演概要, 72 (1973).
- 11) 北原義浩, 金川 忠, 電力中央研究所技術第二研究所報告, 依頼報告 71525 (1971).
- 12) 藤田和夫, 岸本兆方, 科学, **42**, 422 (1972).
- 13) Huzita, K., Y. Kishimoto, and K. Shiono, J. Geosciences, Osaka City Univ., **16**, 93 (1973).
- 14) Nishida, R., Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., **22**, Part 3, 197 (1973).
- 15) 中村正夫, 震研速報, 10号, 第5冊, 10 (1973).
- 16) 田中 豊, 西田良平, 京大防災研年報, 14号A, 149 (1971); 15号B, 43 (1972).