

実測結果に基づく地下岩盤内の初期応力状態の検討

京都大学工学部 ○齋 藤 敏 明
電力中央研究所 石 田 毅
京都大学大学院 玉 井 昭 雄
京都大学理学部 田 中 豊

1. 緒 言

地下発電所や地下貯油槽などの大規模な地下空洞、あるいは山岳トンネルなどの地下深部の空洞の合理的な設計や施工にあたって、初期応力状態あるいは地山応力状態と呼ばれる空洞開削以前の岩盤内の応力状態は考慮すべき最も重要な条件の一つであろう。とくに、地下浅所においても水平に近い大きな圧縮応力が存在することがあり、その大きさ、方向が地下空洞設計に大きな影響を与えている。

岩盤内の初期応力の測定法は各種のものがあるが、いずれも地表からの実施が困難なことや比較的特殊な技術と多額の費用を要するため、なかなか容易に実施できないのが現状である。たのため、地下空洞建設に際して、ある程度初期応力が予想できれば、その設計にとって非常に有用であろう。さらに、初期応力状態の発生機構や他地点との違いを知ることは空洞安定を計るうえに大いに役立つものと考えられる。

筆者らは8素子ゲージを用いたボアホール底面ひずみ測定による応力解放法を開発し、約10年前より日本各地で種々の機会を得て地山応力の測定を実施している。本報告では、これらのデータより地山応力状態の一般的傾向を示すとともに、その発生がどのような原因に基づいているのかについても検討を加えた。

なお、ここでは圧縮応力を正としている。

2. 8素子ゲージを用いた応力解放法

岩盤内の応力測定法には、応力解放法、応力補償法、水圧破碎法、AE法などが現在行なわれているが、筆者らの方法は応力解放法の一つで8素子を持つモールドゲージをボアホール孔底面に貼付し、応力解放のためのオーバーコアリングを行なうものである。解放ひずみ $\{\epsilon\}$ はその途中のひずみ変化を測定することによって得られる。第1図は8素子ゲージのゲージ配置と応力解放に伴うひずみ変化の一例を示したものである。測定された解放ひずみと地山応力 $\{\sigma^*\}$ の関係は次式のように表わされる。

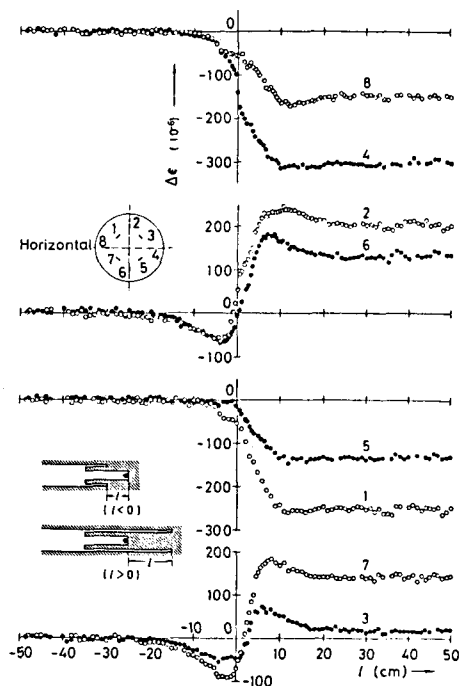
$$\{\epsilon\} = \frac{1}{E} [M] \{\sigma^*\}$$

上式を正規化して、次のように応力状態を決めることができる。

$$\{\sigma^*\} = E ([M]^T [M])^{-1} [M]^T \{\epsilon\}$$

ここで、 E は岩盤のヤング率、 $[M]$ は岩盤を弾性体としてボアホール底面上の応力集中から求められる係数マトリックスでゲージ位置とボアソン比によって決まる。

本方法では、1本のボアホールの1回の測定で三次元的な応力状態を決定することができる。しかし、その決定精度が方向によって異なるため、直交あるいはそれに



第1図 8素子ゲージを用いた応力解放法の測定例

近い2本のボアホールで各2～3回の測定を総合して決定するのを原則としている。

3. 初期応力状態の一般的傾向

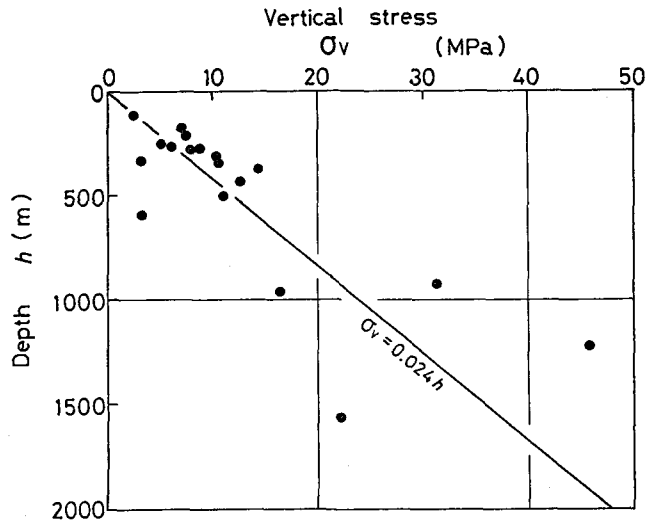
日本各地で測定した岩盤内応力状態のうち採掘の影響をうけていないと思われる14地点18箇所のデータを対象として以下の検討を行なった。(測定地点の概略の位置は第7図参照)

地山応力の主応力は一般に鉛直軸や水平軸から傾いているのが普通であるが、比較検討のため、鉛直方向の応力成分 σ_v と水平面内での最大応力成分 σ_{H1} と最小応力成分 σ_{H2} の大きさを整理するのが便利である。まず、これらと地表からの深さの関係を示しその一般的傾向を述べる。

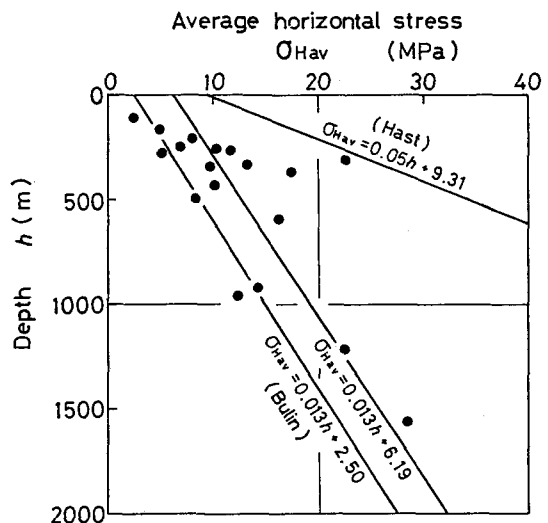
第2図は σ_v と測定深度 h との関係を示したものである。これらのデータからその関係を直線近似すればその傾きは0.024MPa/mとなり、多少ばらつきはあるもののほぼこの傾向を示すことがわかる。一方、Brown¹⁾らが世界各地の測定結果から同様に整理した場合の傾きは0.027MPa/mと報告されており、今回の結果はこの値より少し小さくなった。また、この値は σ_v がかぶりの重量のみによって生じるとした場合、密度を2.4t/m³あるいは2.7t/m³と見積ればよいことになり、実際の岩盤の密度とほぼ一致することから、 σ_v はその大部分がかぶりの重量によって生じるものと考えられる。

第3図は平均水平応力 $\sigma_{Hav}=(\sigma_{H1}+\sigma_{H2})/2$ と深度 h の関係をプロットしたものである。また、これらの値から直線近似したものと、外国の例としてHastとBulinの測定結果からそれぞれ同様に求めて求められた直線²⁾も同時に示した。 σ_{Hav} と深度 h の関係の一般的傾向は世界各地でかなり異なることが報告されており、Hastの結果はスカンジナビヤの古い楕状地に対するものであり、大きな水平応力が見られる例である。一方、Bulinの結果は中央アジアの卓状地の被覆堆積岩に対する結果で、水平応力は比較的小さい地域の例と考えられる。今回の日本の測定値はこの二つの直線の間にほぼ入るがその一般的傾向は被覆堆積岩のそれに近いことがわかる。日本は、比較的新しい造山活動地帯に属し、高い水平応力が予想されるにもかかわらず一般的傾向としては低い部類に属するのは注目される。

第4図は σ_{H1} と σ_{H2} に分けて深度 h との関係をプロットしたものである。直線



第2図 鉛直応力成分と深さの関係



第3図 平均水平応力成分と深さの関係

はそれぞれのデータに最小二乗法をあてはめたものであるが、 σ_{H1} と σ_{H2} では傾きが大きく異なる。 σ_{H2} の大きさおよび傾きは被覆堆積岩の例よりさらに小さくなり、これは側方拘束によって生じる圧力にほぼ対応するのではないかと想像される。一方、 σ_{H1} の方は、そのばらつきも大きく σ_V とほぼ同程度の増加傾向を示し、その発生には σ_{H2} とは明らかに異なった要因の関連が考えられる。

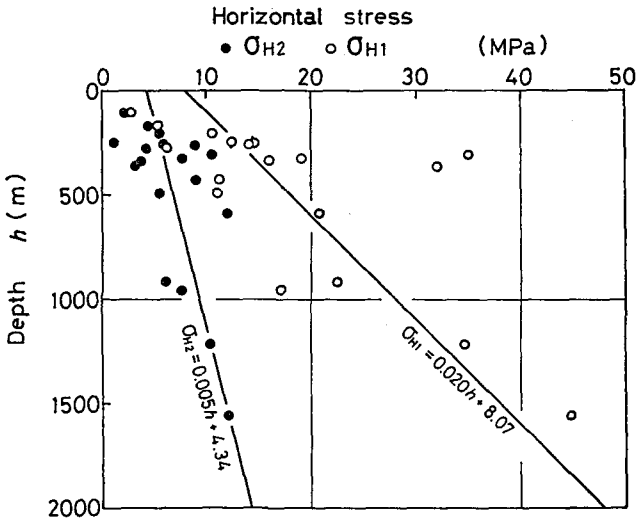
第5図は σ_{Hav}/σ_V の比を示したものである。深さ 500 m 以浅ではその比が 1 前後あるいはそれ以上のものが増えてきている。しかし、深くなるにつれその比は 1 以下になる傾向となる。これは σ_V の深度に対する増加率が σ_{Hav} より多少大きいことや σ_{Hav} は浅所でも大きな値を示す箇所が多いことによるものである。

第6図は鉛直軸に最も近い主応力方向が鉛直軸からどの程度傾いているかを示したもので $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 傾くのは普通のようなものである。深くなると小さくなる傾向はあるが現在までのデータでは明確ではない。傾く原因としては浅所では地形の影響が大きいものと思われ、また横方向から作用する力も必ずしも水平面内にないことなどが考えられる。

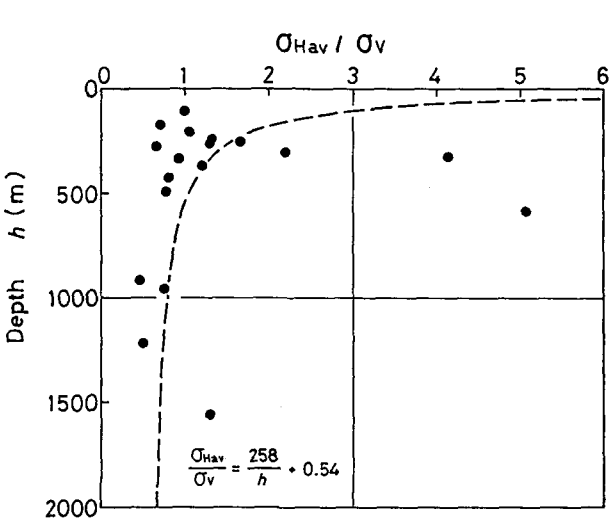
4. 初期応力状態の地域的な特徴

岩盤の初期応力状態は先に述べたようにその深度に影響を受ける他、その地点の地形、岩盤の物性、地質構造および地殻構造上の力に影響をうけるものと思われる。これらは地域毎に異なった特徴を持ち、先に示した図のデータのばらつきの大きな原因となっているものと思われる。この中でも大きいのは地形と地殻構造上の力の影響と思われるが、地形についてはある程度理論的に検討できるのでここでは触れないこととする。

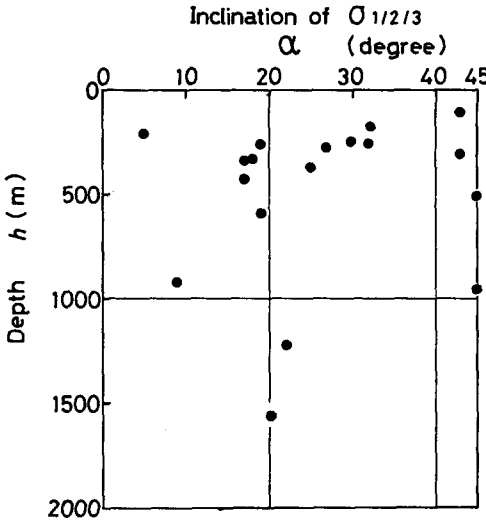
地殻構造上の力は地殻応力あるいは造構応力と呼ばれるものに対応すると考えられ、³⁾ σ_{H1} の発生と深く関連しているも



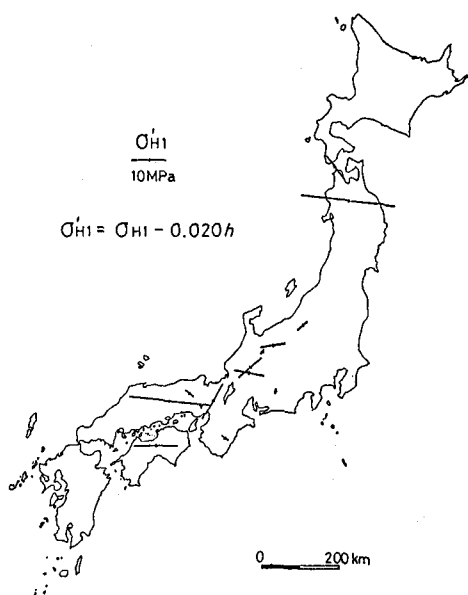
第4図 最大水平応力成分および最小水平応力成分と深さの関係



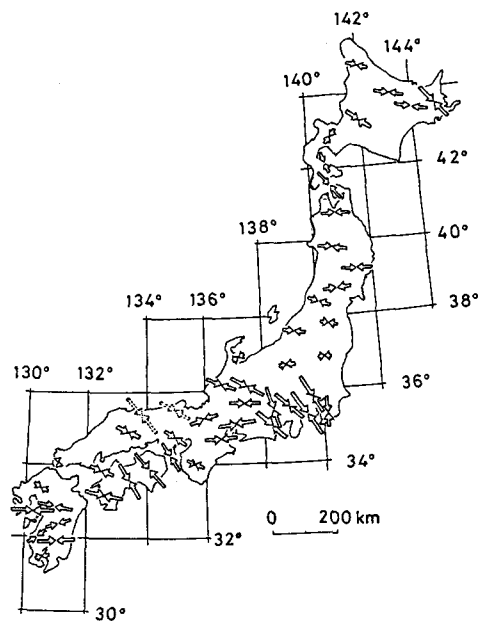
第5図 平均水平応力成分と鉛直応力成分との比と深さの関係



第6図 主応力方向の鉛直軸からの傾きと深さの関係



第7図 深さの影響を除いた最大水平応力成分の大きさと方向分布



第8図 三角点の測量から求められた地殻ひずみ (中根による)

と思われる。第7図は、各測定地点の水平最大応力を示すが深さによる影響をできるだけ除くため第4図に示した式によって σ_{H1} から深さによる増分を除いた σ_{H1}' とその方向を示したものである。また、第8図は三角測量の結果から計算された地殻ひずみの方向と大きさである。両図を比較すれば四国の結果を除いてその方向はほぼ一致しているのがわかる。また、その地域の地震の起震力の方向を発震機構から調べ比較すると四国地方の結果もこれとは一致することがわかった。さらに、これらの結果は、プレートテクトニクスや、断層解析などによって推定される造構応力⁴⁾の方向ともほぼ一致している。これらのことから σ_{H1} が地殻構造上の力に深く関連することは予想でき、地域的な違いを特徴づける大きなものと考えられる。この力の一般的な傾向はその方向が東西圧縮の傾向が強いこと、今回の測定結果のなかでは、東北、中国、四国地方に大きな力が測定されたことなどである。

5. 結 言

ある程度のかぶり深さを持つ地下空洞で掘削に先立ってその設計施工のため岩盤の初期応力状態を推定する場合、極く大雑把には、日本における一般的傾向として、第2図、第4図に示した一般的傾向を示す式から深さに応じて σ_V , σ_{H1} , σ_{H2} を予想することができよう。さらに、 σ_{H1} については地域的な特徴を加え、その方向と大きさを決めるべきであろう。また、主応力は鉛直軸より傾くのが普通であるのでこの影響についても考慮すべきであろう。

しかしながら、現状の測定値からだけでは、これらの値を確定することが難しいことや日本のような複雑な地殻構造を持つ地帯では地域的な変動は大きいものと考えられるので、実際の掘削にあたっては実測によりその値を確定するのが望ましい。

参考文献

- 1) Brown et al., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 15, 211-215, 1978
- 2) Ranalli, Tectonophysics, 29, 49-58, 1975
- 3) 平松 他, 材料 Vol. 23, No. 248, 87-93, 1974
- 4) 藤田, 月刊地球 Vol. 2, No. 8, 586-595, 1980

STUDY ON ROCK STRESS STATES IN JAPAN BASED ON MEASUREMENTS

By Toshiaki SAITO*, Tsuyoshi ISHIDA**,
Akio TAMAI* and Yutaka TANAKA*

* Kyoto University

** Central Research Institute of Electric
Power Industry

SUMMARY

The authors have been carrying out in-situ rock stress measurements in the Japanese Islands at various opportunity. In this paper, a general view of the results at 18 points are shown, and the factors affecting these results are discussed.

The method of in-situ stress measurement is one of the stress relief method by using improved 'doorstopper' with 8 element gages which are developed by the authors and others. One of the advantage of this method is that three dimensional stress state can be determined with single bore hole.

Rock stress states are discussed with vertical stress component σ_v , maximum and minimum horizontal stress components, σ_{H1} , σ_{H2} respectively. At first, the variation of these stress components according to the depth are investigated. It is indicated that σ_v approximately corresponds to the overburden pressure and average value of horizontal stress σ_{Hav} in Japan tends to belong to the lower value group in comparison to that tendency of the world, in spite of the tectonically active region. The main factor which is concerned with the cause of σ_{H1} , is assumed to be different from that of σ_{H2} , because of the larger deviation and the different rate of increase with depth for σ_{H1} .

It is supposed that the initial rock stress have local characteristics in addition to that of depth. Trajectories of the maximum horizontal tectonic stress inferred from present-day crustal movements obtained by geodetic surveys are approximately agree with that of σ_{H1} . Therefore, σ_{H1} supposed to be related deeply with the tectonic stress.

Rock stress state in Japan can be roughly estimated according to the general tendency obtained. However, with respect to σ_{H1} , local characteristics should be taken into account.