

実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討

THE GENERAL TENDENCY OF INITIAL STRESS STATE IN JAPAN WITH THE DATA OF IN-SITU MEASUREMENTS

斎藤敏明*・石田 毅**・寺田 孚***・田中 豊****

By Toshiaki SAITO, Tsuyoshi ISHIDA, Makoto TERADA and Yutaka TANAKA

An initial stress state considerably affects the stability of an underground opening. In this paper, the authors collect and arrange the data measured at 41 points in Japan by stress relief methods, and discuss the general tendency of initial stress state in Japan. The results exhibit that the magnitude of the vertical stress is close to the overlying rock weight in the most cases, however, the horizontal stress varies with directions and the magnitude of minimum horizontal stress often exceeds that of the vertical stress. The directions of minimum horizontal stresses seem to be consistent with those implied by the geodetic strains. Therefore, the large horizontal compressive stresses in Japan can be affected greatly by crustal movements.

Keywords: initial rock stress, rock stress measurement, tectonic stress

1. 緒 言

地下水力発電所や石油地下備蓄庫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、初期地圧状態あるいは地山応力状態とよ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1つである。特に、地下浅所においても大きな水平地圧が存在することがあり、その大きさ、方向が地下空洞の設計に大きな影響を与えている。岩盤内の初期地圧の測定法は各種のものがあるが、地表からの実施が困難なものが多く、また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。したがって、初期地圧状態の一般的傾向が明らかになれば、地下空洞の開削に際して初期地圧状態を予測する手掛かりとなり、その設計にとって非常に有用であろう。さらに、初期地圧状態の発

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に大いに役立つものと考えられる。

すでに、世界各地の実測データを収集・整理して初期地圧状態の一般的傾向を明らかにしようとするいくつかの試みが、海外の研究者により報告されている^{1)~3)}が、地域によりその傾向が異なるとの指摘^{4),5)}も少なくない。特にわが国は環太平洋地震帯に属し、地学的活動が活発な地域に位置するから、初期地圧状態の傾向は他の地域と異なる可能性がある。わが国では地下空洞の設計・施工に関して初期地圧の実測は多く行われてきているが、初期地圧状態と岩質・地質との関連⁶⁾や、測定結果を収集して整理検討し初期地圧状態の一般的傾向を明らかにしようとする研究⁷⁾はまだ数少なく、これらの点で必ずしも十分な研究が行われているとはいえない。

種々の初期地圧測定法のうちで応力解放法に基づく方法が最も精度が高いといわれているが、著者らは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^{8),9)}、10数年前より種々の機会を得て初期地圧測定を実施してきた。その測定は、Table 1に示すように、日本各地14か所18地点に及び、この結果はわが国の初期地圧状態の一般的傾向を明らかにするうえで、重要な基礎データと考えられる。一方前掲の文献⁷⁾は、金川らが開発した埋設型ゲージによる日本各地の測

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部資源工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所我孫子研究所立地
部地盤研究室主査研究員
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

*** 正会員 京都大学教授 工学部資源工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

**** 理修 京都大学講師 理学部地球物理学科
(〒606 京都市左京区北白川追分町)

Table 1 Results of in-situ stress measurements in Japan by the stress relief method with the doorstopper-type δ -element gauge.

No.	SITE	DEPTH (m)	σ_1		σ_2		σ_3		DIRECTION (MPa) [*] (MPa) [*] (MPa) [*] (degree)
			(MPa) [*] (degree) [*]	(MPa) [*] (degree) [*]	(MPa) [*] (degree) [*]	(MPa) [*]	(MPa) [*]	(MPa) [*]	
1	KOSAKA MINE	312	-8.9 (204/43)	-12.1 (21/47)	-34.9 (112/89)	-10.4	-10.6	-34.9 (N76W)	
2	YANAHARA MINE	370	-0.9 (191/64)	-16.9 (27/24)	-32.4 (285/82)	-14.4	-3.3	-31.9 (N83W)	
3	OKUYAHAGI P/S	280	-3.1 (98/63)	-6.3 (189/88)	-9.4 (283/27)	-8.1	-4.4	-6.3 (N12E)	
4	OKUYOSINO P/S	175	-3.7 (72/61)	-4.9 (169/78)	-8.3 (280/32)	-7.1	-4.5	-5.4 (N56W)	
5	A P/S	335	-3.1 (193/73)	-11.3 (24/17)	-15.9 (284/86)	-10.6	-3.8	-15.9 (N76W)	
6	SEIKAN TUNNEL	265	-8.6 (217/19)	-9.2 (70/74)	-14.4 (337/80)	-8.9	-9.1	-14.2 (N32W)	
7	KANETSU TUNNEL (1)	260	-5.9 (207/58)	-6.3 (32/32)	-14.6 (299/88)	-6.2	-6.0	-14.6 (N61W)	
8	KANETSU TUNNEL (2)	960	-7.5 (3/79)	-10.7 (262/46)	-22.9 (104/47)	-16.4	-7.7	-17.1 (N79W)	
9	KANETSU TUNNEL (3)	920	-6.0 (145/86)	-22.2 (235/82)	-31.6 (32/ 9)	-31.3	-6.1	-22.4 (N55E)	
10	HIRAKI MINE	110	-1.4 (263/51)	-2.8 (160/73)	-3.4 (52/43)	-2.6	-2.0	-2.7 (N 2E)	
11	SAZARE MINE (1)	1565	-11.8 (356/72)	-25.4 (231/28)	-51.9 (93/68)	-27.9	-13.1	-48.0 (N89W)	
12	SAZARE MINE (2)	1220	-6.1 (355/75)	-21.9 (255/55)	-36.4 (104/38)	-29.9	-7.4	-27.0 (N90W)	
13	AKENOBE MINE (1)	430	-8.8 (50/75)	-11.1 (141/84)	-16.4 (254/16)	-15.9	-9.3	-11.2 (N45W)	
14	AKENOBE MINE (2)	210	-7.6 (339/64)	-10.7 (172/27)	-14.5 (71/85)	-10.1	-8.1	-14.5 (N70E)	
15	NAKATATSU MINE	590	-2.0 (346/19)	-13.0 (136/73)	-21.1 (229/81)	-3.3	-12.2	-20.7 (N38E)	
16	KAMIOKA MINE	495	-5.2 (153/67)	-6.2 (262/53)	-16.0 (30/46)	-10.7	-5.5	-11.2 (N48E)	
17	OHTANI MINE	330	-2.9 (104/15)	-9.8 (305/76)	-17.8 (213/85)	-3.5	-9.4	-17.6 (N58E)	
18	SINTAKASE P/S	250	-0.5 (355/65)	-4.7 (135/30)	-13.7 (255/70)	-5.2	-1.3	-12.4 (N 6E)	

σ_1 , σ_2 , σ_3 --- principal stress.

σ_z --- vertical normal stress component.

σ_{Hmax} , σ_{Hmin} --- maximum and minimum horizontal normal stress.

* Negative sign indicates compression.

* Stereographic representation (South=0) of principal stress plane. (Trend/Plunge)

定結果の報告であるが、これも測定原理としては著者らと同じ応力解析法を用いている。そこで、これらを参考データとして加えて、わが国の初期地圧状態の一般的傾向について検討することにする。

また、地下空洞の安定性を考えた場合、大きな水平地圧の存在が最も大きな問題になると思われる。そこで、初期地圧状態の発生機構、特に水平地圧の発生機構を明らかにすることに重点を置き、造構応力、岩盤の粘性的性質など、初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因について検討を加える。

なお、本論文では引張応力を正、圧縮応力を負とする。したがって、Table 1 に示したように、 σ_3 が最大圧縮主応力、 σ_{Hmin} が水平方向の最大圧縮直応力となる。

2. わが国の初期地圧状態の一般的傾向

測定データから初期地圧状態の一般的傾向を明らかにするためには、まず測定結果の適切な整理が必要である。初期地圧状態を示す指標としては、主応力の方向と大きさ、鉛直地圧、平均水平地圧の大きさ、最大および最小水平地圧の方向と大きさなどが挙げられる。またこれらは、測定地点の地表からの深さと密接な関係を有している。そこで前述の実測結果を整理し直し、初期地圧の主応力方向の鉛直軸からの傾き、鉛直地圧、平均水平地圧、最大および最小水平地圧のそれぞれが測定深度とどのような関係にあるかを調べるとともに、諸外国の傾向と比較することにする。なお、以下の図では、Table 1 に示した8素子ゲージを用いたポアホール底面ひずみ測定法による測定結果を○で、また文献7) で報告された電力中央研究所の埋設型ゲージによる測定結果を●で示す。

(1) 主応力方向の鉛直軸からの傾き

初期地圧がその上方にある岩盤の自重のみに依存し、かつ地表の地形が平坦である場合には、主応力方向の1つが鉛直軸と一致しているはずである。Fig. 1 は、前述のわが国における初期地圧の測定データについて、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測定深度に対して示したものである。この図からみれば、主応力方向が鉛直軸に一致することはむしろまれで、15°~50°程度の広い範囲にばらついていることがわかる。このような傾向は、オーストラリア、カナダ、アメリカ合衆国での測定結果や、南アフリカでの測定結果においても指摘されている³⁾。深くになると傾きがやや小さくなる傾向はあるが、現在までに得られているデータの範囲内ではそれは明確ではない。浅所ではこの傾く原因として地形の影響が大きいものと思われ詳細に検討

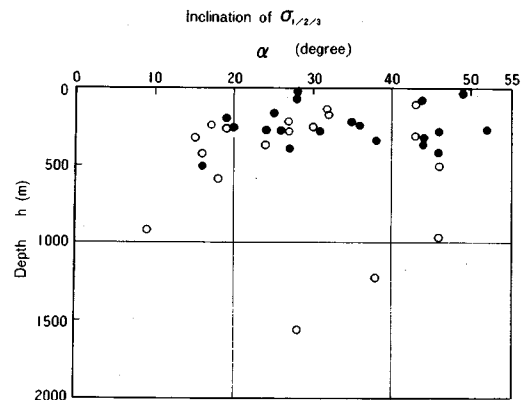


Fig. 1 Relation between inclinations of principal stresses and depths. Open and closed circles indicate the data shown in Table 1 and reported by Kanagawa et al.⁷⁾, respectively.

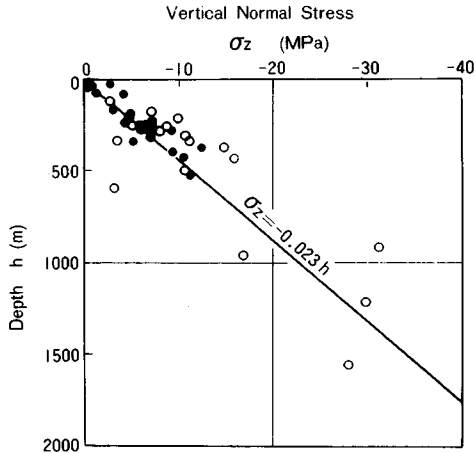


Fig. 2 Relation between vertical normal stresses and depths.

するためには個々の地点ごとの地形との関連で整理する必要があろう。また、深部では、必ずしも水平面内ない横方向からの作用力の存在が予想される。いずれにしろ、一般に主応力方向の1つが鉛直軸に一致しないのは注目に値する。

(2) 鉛直地圧と測定深度との関係

Fig. 2は、初期地圧の鉛直方向直応力成分 σ_z と測定深度 h との関係を示したものである。8素子ゲージによる測定と埋設型ゲージによる測定の両方のデータを用いて、 σ_z と h の関係を最小二乗法により直線近似すると、 $\sigma_z = -0.020h - 1.55$ (MPa) の関係が得られる。この式において、 $h=0$ を代入すると、 $\sigma_z = -1.55$ となり、地表 ($h=0$) では σ_z は0であるから、 $\sigma_z \neq 0$ としてもあまり矛盾しない。そこで、原点を通る直線で近似すると、Fig. 2に示した傾き -0.023 MPa/m の直線が得られる。多少のばらつきはあるものの、測定結果はほぼこの直線上にのっている。

一方、Brownら¹⁾とMcGarrら³⁾は、世界各地の測定結果を同様に整理し、ともに -0.027 MPa/m の傾きの直線で表わされることを報告しており、本研究の結果はこの傾きより少し小さい絶対値を示す。また、傾き -0.023 、あるいは、 -0.027 MPa/m は、 σ_z がかぶりの重量のみによって生じるとした場合、密度を 2.3 t/m^3 あるいは 2.7 t/m^3 と見積も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_z 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。

(3) 平均水平地圧と測定深度の関係

Fig. 3は、初期地圧における平均水平地圧、 $\sigma_{Hav} = (\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin})/2$ (σ_{Hmax} , σ_{Hmin} はそれぞれ水平面の最大および最小直応力)、と測定深度 h との関係を示したものである。この関係を表わす直線と、Hast¹⁰⁾とBulin¹¹⁾が行った測定結果からRanalli⁴⁾によって求めら

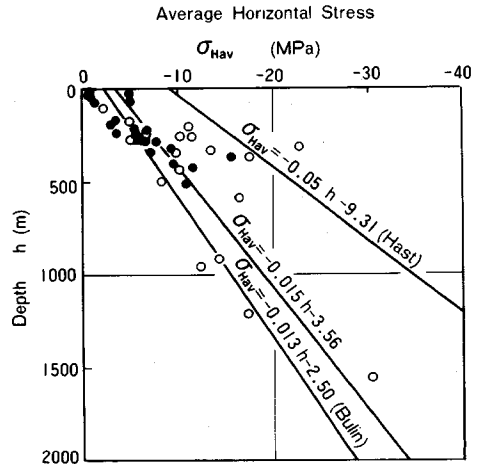


Fig. 3 Relation between average horizontal stresses and depths.

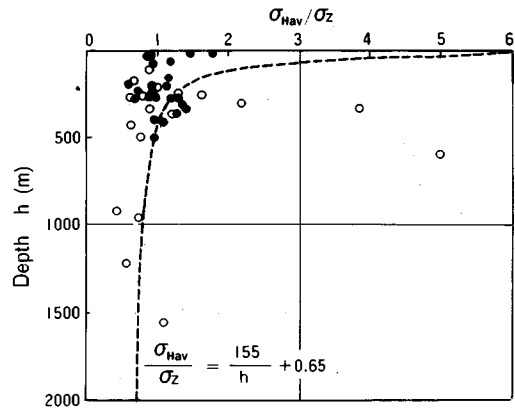


Fig. 4 Relation between the ratios of average horizontal stresses to vertical normal stresses and depths.

れた直線を比較対照して示した。Hast¹⁰⁾の結果は、スカンジナビアの古い楕状地におけるものであり、大きな水平地圧がみられる例である。一方、Bulin¹¹⁾の結果は中央アジアの卓状地の被覆堆積岩におけるもので、水平地圧が比較的小さい地域の例と考えられる。Fig. 3に示したわが国の測定値はこの2つの直線の間にほぼ入っているが、その傾向からは被覆堆積岩のそれに近いことがうかがえる。わが国は、ユーラシアプレートの東縁に位置し、太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む比較的新しい激しい変動帯に属し、大きな水平地圧が予想されるにもかかわらず、傾向としては平均水平地圧が低い部類に属する結果が得られているのは注目される。

Fig. 4は、 σ_{Hav}/σ_z の比と測定深度 h との関係を示したものである。図中の曲線 $\sigma_{Hav}/\sigma_z = 155/h + 0.65$ は、Fig. 2の $\sigma_z = -0.023h$ と、Fig. 3の $\sigma_{Hav} = -0.015h -$

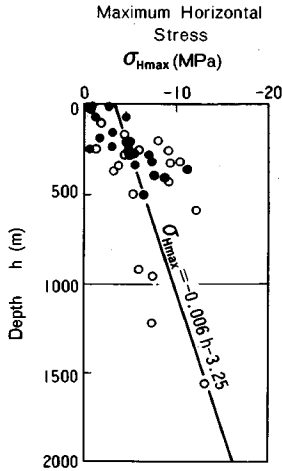


Fig.5 Relation between maximum horizontal stresses and depths.

3.56 から得られる関係で、ばらつきはあるものの測定データの傾向を示す曲線と考えられる。 σ_{Hav}/σ_z の比は、深さ500 m以浅では、1前後あるいはそれ以上のものが多くなっている。しかし、深くなるにつれてその比は1以下になる傾向がみられる。これは σ_z の深さに対する増加率が σ_{Hav} より大きいことや、 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と考えられる。

(4) 最大・最小水平地圧および最大せん断応力と測定深度の関係

Fig.5およびFig.6は、それぞれ水平面内の最大および最小直応力 σ_{Hmax} 、 σ_{Hmin} と測定深度 h との関係を示し

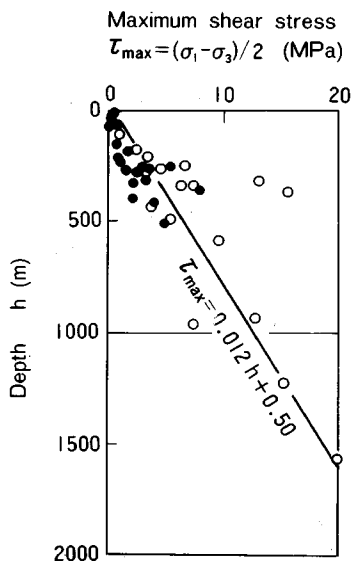


Fig.7 Relation between maximum shear stresses and depths.

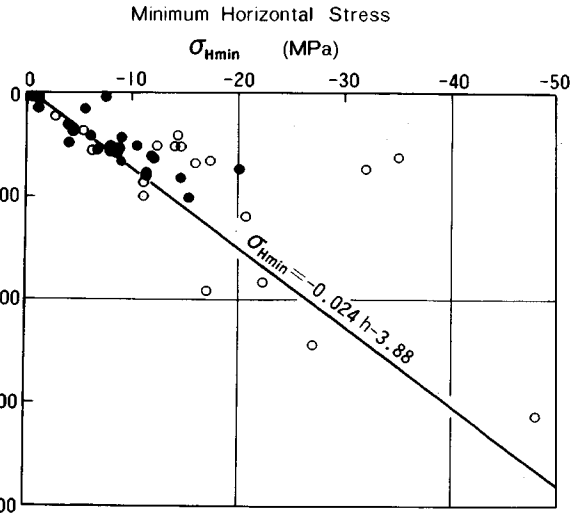


Fig.6 Relation between minimum horizontal stresses and depths.

たものである。図中の直線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_{Hmax} と σ_{Hmin} とでは傾きが大きく異なる。 σ_{Hmax} の値は、特に500 mより深いところでは深度に対する増加の割合が σ_z に比べ大きく異なり、 $\sigma_{Hmax}-h$ の直線の傾きの絶対値0.006は、Bulin¹¹⁾の示した被覆堆積岩における $\sigma_{Hav}-h$ の関係を示す直線の傾きの絶対値0.013よりもさらに小さい値となっている。McGarr³⁾によって整理された南アフリカ、アメリカ合衆国の測定結果にも、本研究で得られた $\sigma_{Hmax}-h$ と同様の傾向がみられ σ_{Hmax} は側方拘束によって生じる圧力に対応する場合は多いのではないかと推察される。一方、 σ_{Hmin} の方は、そのばらつきも大きく σ_z とほぼ同程度の増加傾向を示し、その発生には σ_{Hmax} とは明らかに異なった要因が考えられる。この要因については次章で考察する。

Fig.7は、最大せん断応力 $\tau_{max}=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ と測定深度 h の関係を示したものである。ばらつきは大きいですが、 τ_{max} は深さとともに増大する傾向があり、このデータでみる限りその最大値は20 MPaである。McGarr³⁾が整理した世界各地の測定結果においても、 τ_{max} と h の関係には同様の傾向があり、また、 τ_{max} が20 MPaを越える例は多くない。 τ_{max} の上限値は地殻の強度や地震の発生機構と関連しており興味深いですが、それを明らかにするためにはより地下深部における測定データが必要である。

3. 初期地圧状態に及ぼす造構応力と岩盤の粘弾性的性質の影響

実測結果に基づいてわが国の初期地圧状態の一般的傾

向を明らかにしたが、その結果から、主応力方向の1つが鉛直方向と一致することはまれであるが、鉛直方向の直応力成分 σ_z の大きさは、その地点の地表からの深さに対応するかぶり圧で見積もればよいように思われる。一方、水平地圧は方向により異なり、水平方向の最大直応力 σ_{Hmax} と最小直応力 σ_{Hmin} とは大きく異なる値を示すことが多い。このことは、地下空洞の安定問題などを考察する場合、 σ_{Hmin} の作用方向とその大きさの推定が重要であることを示している。

初期地圧状態に影響を及ぼす要因としては、造構応力、岩盤の粘弾性の性質、地形、地質構造、残留応力などが考えられる。これらのうち、地形と地質構造の影響は測定地点の特徴を強く反映するため、地点ごとに測定結果を詳細に検討する必要がある。また残留応力は、過去に厚い氷河におおわれたカナダやスカンジナビア半島で、しばしば地下空洞の安定に悪影響を及ぼす大きな水平地圧の原因といわれている¹²⁾。しかし、初期地圧の測定値から残留応力を区別しその影響を定量的に評価することは、種々の方法^{5), 13)}を講じても現状では困難である。そこで以下では、水平地圧の発生機構を明らかにする観点から、造構応力と岩盤の粘弾性の性質について検討することにする。

(1) 造構応力

造構応力は地殻構造形成に関する力に対応する応力で、しばしば地殻応力ともよばれる。造構応力が地下空洞の安定に影響を与えることは、地球物理学の分野で早くから予想され、イギリスではすでに1942年以前に、造構応力の作用方向を鉱山の坑道の被害状況から知ろうと、鉱山に調査票が配布されている¹⁴⁾。一方、わが国で初期地圧と造構応力との関連を実証的に指摘したのは平松ら¹⁵⁾が最初と思われる。彼らは、応力解放法により測定された2地点の初期地圧測定結果を、地学的方法によって推定されたそれら地域の造構応力と比較し、どちらの地点でも初期地圧測定結果と造構応力の最大圧縮方向がほぼ一致することを示している。しかし、地下空洞が建設されるのはせいぜい地表下数100mの深さの浅所が多く、このような地殻のきわめて浅所に、造構応力の影響が及ぶかどうかについてはなお議論の余地がある。Haimson¹⁶⁾は、ア

メリカ合衆国ウィスコンシン州の緩傾斜地の珪岩中で、水圧破碎法による初期地圧測定を行い、初期地圧状態に及ぼす地形および造構応力の影響について興味ある結果を報告している。これによれば、測定地点の σ_{Hmin} の方向は、20mより浅いところと30mより深いところでは90°近く異なっている。彼はこの結果について、20m以浅の初期地圧状態は地形の影響を受けているが、30m以深のそれは、この地域の造構応力を反映していると述べている。またわが国では、田中ら¹⁷⁾が、深度700~1000mで発生した兵庫県生野鉱山の山はね、同鉱山休止後の坑内水の浸透によって誘起されたと思われる深度2~5kmの岩盤の破壊による震動、同鉱山周辺の深度5~15kmの微小地震の発生機構、およびこの地域の深度100~400mで測定された初期地圧測定結果が、いずれも深さに関係なく一致して東西圧縮の傾向を示すことを報告している。これらのことから、前章で整理検討したわが国の初期地圧測定結果も造構応力の影響を強く受け

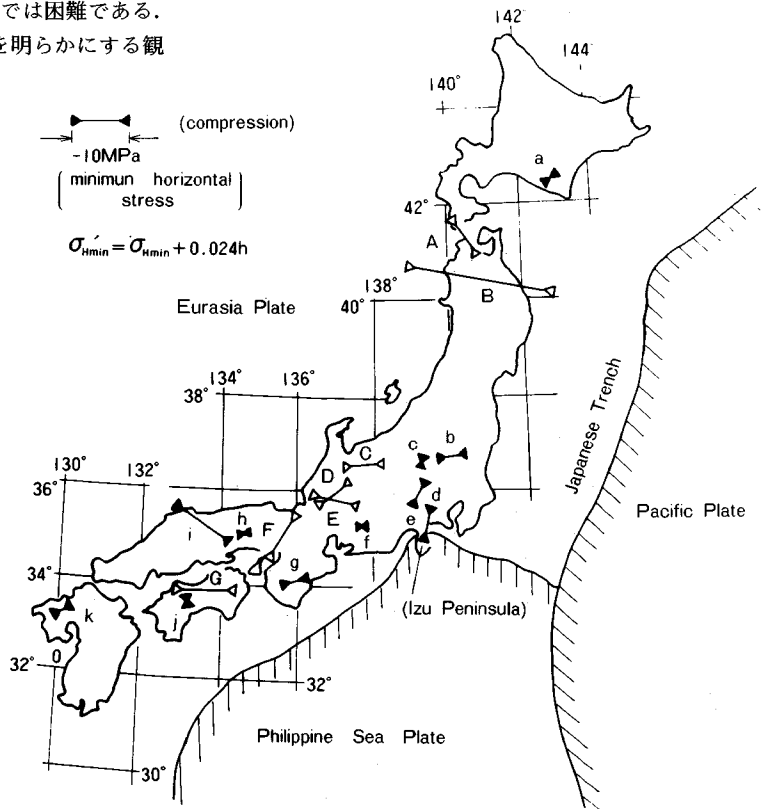


Fig. 8 Directions of minimum horizontal stresses. The effects of measuring depths are corrected in the magnitudes. The bars with open and closed triangles indicate the data shown Table 1 and reported by Kanagawa et al.⁷⁾, respectively. The plate boundaries included on the Figure are from Sugimura¹⁸⁾.

ている可能性があるといえよう。

さて、実際に測定された初期地圧状態に、造構応力はどの程度影響を及ぼしているのでしょうか。これを明らかにするためには、測定結果に測定深度の違いを補正することが望ましい。そこで、測定結果の σ_{Hmin} から、Fig. 6 に示した式に基づいて深さによる増分を除いた σ'_{Hmin} を $\sigma'_{Hmin} = \sigma_{Hmin} + 0.024 h$ の式で求める。Fig. 8 に各測定地点の σ'_{Hmin} の大きさと方向を、Table 1 に示した結果 (A, B, ...G) を \blacktriangleleft で、文献(7)による結果 (a, b, ...k) を \blacktriangleright で示した。日本列島は、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込むユーラシアプレートの東縁に位置し、地震活動をはじめとする地殻変動が活発な地域である。杉村¹⁸⁾は、新第三紀以降のプレートの境界は Fig. 8 に示したようであると、フィリピン海プレートは日本列島中央部の伊豆半島の付け根の陸上部でアジアプレートと衝突し、アジアプレートを北西に圧縮しているとしている。藤田¹⁹⁾は第四紀に活動的となった構造帯の分布から、本州に作用する造構応力系について検討を加え、本州は大きく分類して、太平洋プレートによる東西性の圧縮応力とフィリピン海プレートによる南北性の圧縮応力の2つの造構応力系に支配されているとしている。このような観点から Fig. 8 の測定結果をみると、測定地点 B, C, D, E および b, f, g, h, i, k は東西圧縮の傾向が強く、これは太平洋プレートによる圧縮力の影響を受けているものと推測される。測定点 c, d, e は、南北圧縮の傾向が強く、これは伊豆半島を経て伝達されるフィリピン海プレートの圧縮力によるものではないかと思われる。四国地方では G と j で傾向が異なるが、これらはいずれも中央構造線に近い位置での測定であり、この付近の複雑な造構応力場を反映している可能性がある。これらの全般的傾向は、藤田¹⁹⁾により推定された造構応力の作用方向や、一等三角点の測量結果に基づいて中根^{20), 21)}が算出した定常的な水平地殻ひずみの傾向ともおおむねよい一致を示している。これらのことから、初期地圧の水平成分はプレートテクトニクスに基づく地殻構造上の力の深く関連することが予想され、また、このような力は初期地圧状態の地域的な違いを特徴づける大きな要因となっているものと考えられる。

(2) 岩盤の粘弾性的性質

地震波の伝播や通常のコアの圧縮試験などの短い時間における応力変化に対して、岩石は確かに弾性的挙動を示す。しかし、岩石が破壊することなく著しいしゅう曲変形を起こし得ることも周知の事実である。初期地圧の測定結果にみられる大きな水平地圧が、このような岩盤の流動的な性質の影響を受けていることも考えられる。岩盤の粘弾性的性質が初期地圧状態に及ぼす影響につい

ては、鈴木ら²²⁾が基礎的な検討結果を報告しているが、ここでは最近の研究により明らかとなった、地殻の粘性および弾性に関する定数を用いて定量的な考察を試みることにする。

岩盤が、偏差応力成分 S_{ij} と偏差ひずみ成分 e_{ij} に対しては Maxwell 体としてふるまい、平均応力 σ_{ii} と平均ひずみ ϵ_{ii} に対しては弾性的に挙動するレオロジー体であると仮定すると、応力とひずみの関係は次式のように表わされる。

$$d(S_{ij})/dt + G \cdot S_{ij} / \eta = 2G \cdot d(e_{ij})/dt \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_{ii} = 3K\epsilon_{ii} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 G および K はそれぞれ弾性体の剛性率と体積弾性率に相当する定数で、 η は粘性定数である。

いま、粘弾性岩盤内で鉛直方向の直応力成分 σ_z が次のように与えられたとき、それによって生じる水平方向の応力成分 σ_H を計算する。

$$\sigma_z = P_0 \cdot [1 - \exp(-t/\tau)] \dots \dots \dots (3)$$

(τ : 任意の定数)

$$P_0 = -\rho gh \dots \dots \dots (4)$$

(ρ : 単位体積当たりの質量, g : 重力加速度, h : 測定深度)

これに対応する弾性解の σ_H が、自重のみの作用する弾性岩盤が水平方向に伸び縮みできない場合に生じる水平地圧 $\nu\rho gh/(1-\nu)$ で与えられるものとすれば、線形粘弾性解と弾性解の対応原理²³⁾により、 σ_H は σ_z によって次式のように表わされる。

$$\sigma_H(s) = \{\nu^*/(1-\nu^*)\} \cdot \sigma_z(s) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 $*$ は時刻 t を含む変数に施したラプラス変換を意味する。さて、式(5)の係数項は次式のようになる。

$$\nu^*/(1-\nu^*) = 1 - 6G\eta s / \{3(K+4G)\eta s + 3KG\} \dots \dots \dots (6)$$

式(6)を式(5)に代入し、その結果にラプラス逆変換を施せば、求める解 σ_H が得られる。

$$\sigma_H/P_0 = 1 + \{6G/(C-3K\tau/\tau_M)\} \cdot [\exp(-t/\tau) - \exp(-3Kt/C\tau)] \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $C=3K+4G$ 、また τ_M は Maxwell 体の緩和時間で $\tau_M = \eta/G$ である。なお、式(3)と式(7)から、 $\eta \rightarrow \infty$ のときの σ_H/σ_z を求めると、 $\eta \rightarrow \infty$ のとき

$$\sigma_H/\sigma_z = 1 - 6G/C = \nu/(1-\nu) \dots \dots \dots (8)$$

となり、弾性体の場合の解と一致する。

Maxwell 体は、応力が τ_M より十分短い時間に作用すれば弾性的に、 τ_M より十分長い時間にわたって作用すれば粘性的に挙動する。このような観点から、現実の岩盤の τ_M の値には興味がある。伊藤ら^{24), 25)}は、19年に及ぶ花崗岩のクリープ試験や西南日本の第四紀地殻変動から、岩盤や地殻を Maxwell 体で表現した場合、その粘性定数 η は約 10^{15} MPa·s であるとしている。また、彼らは剛性率 G の値を、地殻上層の地震波動や実験室で

の岩石の剛性率から 10^4 MPa 程度としているが、この値は山砂の採取に伴う付近の水準点の隆起量から求めたヤング率²⁶⁾とよい一致を示しており、オーダー的に信頼に足るものと思われる。これらの値から τ_M を求めると、

$$\tau_M = \eta/G = 10^{11} \text{ s} \approx 3000 \text{ 年} \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。応力の作用時間をどの程度と考えるかは難しい問題である。しかし、たとえば、著者らの測定点が数多く分布する西南日本内帯の地殻変動が、南北圧縮の傾向から現在の東西圧縮の傾向に変わってから、すでに100万年~200万年近く経過している²⁴⁾ことを考えれば、3000年という時間は決して長い時間ではない。したがって、岩盤の粘弾性的挙動が初期地圧状態に影響を及ぼす可能性は十分考えられる。そこで、次にその影響の程度を検討してみる。

式(3)と式(7)から、 $t \rightarrow 0$ および $t \rightarrow \infty$ における σ_H/σ_z の値を求めると、

$$t \rightarrow 0 \text{ のとき } \sigma_H/\sigma_z = \nu/(1-\nu) \dots\dots\dots (10)$$

$$t \rightarrow \infty \text{ のとき } \sigma_H/\sigma_z = 1 \dots\dots\dots (11)$$

となる。また一例として、 $G=10^4$ MPa, $K=2 \times 10^4$ MPa, $\eta=10^{15}$ MPa·s, $\tau=100$ 万年 $= 3 \times 10^{13}$ s と仮定した場合の、 σ_H/σ_z と t の関係を Fig. 9 に示す。この場合、 $K=2G$ の関係より $\nu/(1-\nu)=0.4$ である。

さて、式(10)、(11)と Fig. 9 より明らかなように、 $0 < t < \infty$ の t に対して、

$$\nu/(1-\nu) \leq \sigma_H/\sigma_z \leq 1 \dots\dots\dots (12)$$

である。このことは、岩盤の粘弾性的挙動を考慮すれば、弾性論的な考察から予想される状態より水平圧は大きくなるが、それは最大でも $\sigma_H/\sigma_z=1$ の静水圧状態までで、 $\sigma_H/\sigma_z > 1$ の状態は決して生じ得ないことを示している。しかし測定結果における水平方向の最小直応力 σ_{Hmin} の大きさが σ_z の絶対値より小さいことはむしろまれであり、初期地圧は多くの場合 $\sigma_{Hmin}/\sigma_z > 1$ の状態にある。また、岩盤の粘性的挙動で生じる水平地圧は等方的であ

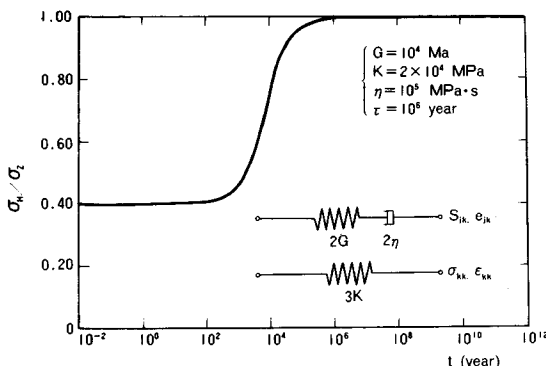


Fig. 9 Relation between the ratio of a horizontal stress to a vertical stress and time, and the model on the stress-strain relation.

るが、測定結果において $\sigma_{Hmin} \approx \sigma_{Hmax}$ であることは少ない。以上のことから、岩盤の粘性的性質は、大きな水平地圧の発生原因の1つではあるかもしれないが、その主要なものとは考えられない。

4. 結 論

8素子ゲージを用いたボアホール底面ひずみ測定法による測定結果と、文献7)で報告された電力中央研究所の埋設型ゲージによる測定結果、合計41地点の測定結果をもとに、わが国の初期地圧状態の一般的傾向について検討を行った。また、地下空洞の安定に問題となる大きな水平地圧の発生機構を明らかにするため、造構応力と岩盤の粘弾性的性質が初期地圧状態に及ぼす影響を検討した。その結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 主応力方向のうち最も鉛直軸に近いものでも 15° 以上傾くのが普通で、鉛直軸に一致することはまれである。

(2) 鉛直方向の直応力成分 σ_z は多少のばらつきはあるものの、その地点の地表からの深さ h に対応するかぶり圧 ρgh にほぼ等しい。ここに、 ρ は岩盤の単位体積当たりの質量、 g は重力加速度である。

(3) 地表からの深さの増大に伴う平均水平地圧 σ_{Hav} の増加の割合は、本研究に用いた測定データに基づけば、世界各地での測定結果の中で低い部類に属する。

(4) σ_{Hav}/σ_z の比は、深さ500mで浅では1前後あるいはそれ以上のものが多いが、深くなるにつれて1以下となる。

(5) 最大せん断応力 τ_{max} は、地表からの深さとともに増大する。

(6) 水平面内の最大直応力 σ_{Hmax} と最小直応力 σ_{Hmin} は、どちらも地表からの深さとともに増大するが、その傾向には地域によってかなり相違がみられ、これらの応力の発生には異なる要因が考えられる。

(7) σ_{Hmax} は、自重のみが作用する弾性岩盤が水平方向に拘束された場合に得られる関係 ($\sigma_{Hmax} = \nu \rho gh / (1-\nu)$) にほぼ従うものと考えられる。

(8) 水平方向の最小直応力 σ_{Hmin} の方向は、第四紀に活動的となった構造帯の分布から推定される造構応力の作用方向や一等三角点の測量結果から求められた定常的な水平地殻ひずみの方向と傾向的によい一致を示す。したがって、初期地圧の水平成分は、造構応力あるいは地殻応力とよばれる、プレートテクトニクスに基づく地殻構造上の力に深く関連していることが予想される。また、このような力の存在は、初期地圧状態の地域的な違いを特徴づける大きな要因と考えられる。

(9) 岩盤の粘弾性的性質の影響を考慮すれば、弾性論的な考察から予想される状態より、水平地圧 σ_H の大

きさは大きくなることがわかった。しかし、それは鉛直圧 σ_z と比較して、最大でも $\sigma_H/\sigma_z=1$ の静水圧状態までであり、測定結果にみられる $\sigma_H/\sigma_z>1$ の状態は生じない。また、岩盤の粘弾性的挙動で生じる水平地圧は等方的であるが、測定結果においては等方的な水平地圧の場合は少ない。これらのことから、岩盤の粘弾性的性質は大きな水平地圧の発生原因の1つではあるかもしれないが、その主要なものとは考えられない。

謝 辞：本研究を行うにあたり、(財)電力中央研究所 金川 忠主任研究員に、ご協力と有益なご助言をいただいた。ここに記して深謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Brown, E. T. and Hoek, E. : Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 211~215, 1978.
- 2) Lindner, E. N. and Halpern, J. A. : In-situ stress in North America : A compilation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 183~203, 1978.
- 3) McGarr, A. and Gay, N. C. : State of stress in the earth's crust, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, pp. 405~436, 1978.
- 4) Ranalli, G. : Geotectonic relevance of rock-stress determinations, *Tectonophysics*, Vol. 29, pp. 49 ~ 58, 1975.
- 5) Greiner, G. and Illies, J. H. : Central Europe : Active or residual tectonic stresses, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 115, pp. 11~26, 1977.
- 6) 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年.
- 7) 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.
- 8) Oka, Y., Kameoka, Y., Saito, T. and Hiramatsu, Y. : Investigations on the new method of determining rock stress by the stress relief technique and applications of this method, *Rock Mechanics in Japan*, Vol. 3, pp. 68~70, 1979.
- 9) 亀岡美友：ボアホール底面上の応力の解放による岩盤応力測定に関する研究, 京都大学工学部学位請求論文, 1978年12月.
- 10) Hast, N. : The state of stress in the upper part of the earth's crust, *Tectonophysics*, Vol. 8, pp. 169~211, 1969.
- 11) Bulin, N. K. : The present stress field in the upper parts of the crust, *Geotectonics*, Vol. 3, pp. 133~139, 1971.
- 12) 堀 正幸：カナダ・オンタリオ州における岩盤内応力測定, *土木学会誌*, 1978年6月号, pp. 66~71.
- 13) 小出 仁：地震予知のための応力測定の問題点, *月刊地球*, 第2巻, pp. 578~585, 1980年.
- 14) Anderson, E. M. : *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*, Second Edition Revised, Oliver & Boyd, Edinburgh, p. 144, 1951.
- 15) 平松良雄・岡 行俊・伊藤英文・田中 豊：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, *材料*, 第23巻, pp. 380~386, 1974年.
- 16) Haimson, B. C. : Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, No. 2, pp. 81~88, 1980.
- 17) Tanaka, Y. and Oka, Y. : Generation mechanism of rock bursts and water-induced earthquakes under the tectonic stress field, *Rock Mechanics in Japan*, Vol. 3, pp. 71~73, 1978.
- 18) 杉村 新：日本付近におけるプレートの境界, *科学*, 1972年4月号, pp. 192~202.
- 19) 藤田和夫：中部・近畿北部の第四紀テクトニクスと造構応力場, *月刊地球*, 第2巻, pp. 586~595, 1980年.
- 20) 中根勝見：日本における定常的な水平地殻歪 (I), *測地学会誌*, 第19巻, pp. 190~199, 1973年.
- 21) 中根勝見：日本における定常的な水平地殻歪 (II), *測地学会誌*, 第19巻, pp. 200~208, 1973年.
- 22) 鈴木 光・西松裕一・石島洋二：一次地圧の測定値とその粘弾性論的考察 (第1報), *日本鉱業会誌*, 第83巻, pp. 793~799, 1967年.
- 23) Lee, E. H. : Stress analysis in viscoelastic bodies, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 2, pp. 183~190, 1955.
- 24) 伊藤英文・藤田和夫：西南日本の第四紀地殻変動から導かれた地殻の流動, *材料*, 第20巻, pp. 190~196, 1971年.
- 25) 伊藤英文・岡 行俊・藤田和夫：縮みゆく日本列島, *科学*, 第46巻, pp. 745~754, 1976年.
- 26) 多田 堯：山を削ると隆起する, *地震* 2, 第35巻, pp. 427~434, 1982年.

(1987. 8. 18・受付)