

(57) 掘削に伴って変動する地山応力の新しい測定法について

東北大学工学部 ○松木浩二・奥村清彦・奈良坂 孝

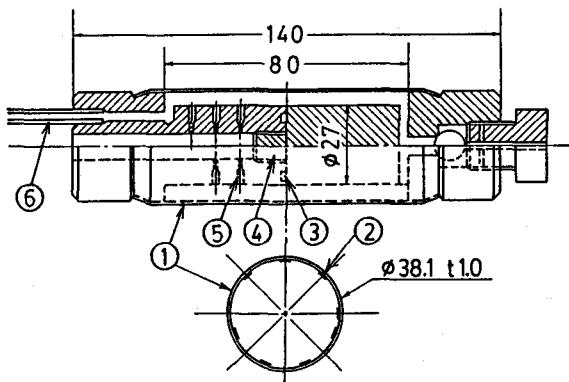
1. 緒言

大規模な地下構造物の建設や鉱山における採掘などの安全管理にとっては、掘削や採掘に伴って生ずる周辺地山の応力変化を知ることが極めて重要なことであるが、比較的手軽にできてかつ信頼性の高い地圧変化測定法が見あたらないために、専ら、変位測定がモニタリングの主体になっていると思われる。しかし、変位やひずみから応力を求めるためには岩盤の変形係数を知る必要があり、周知のように、岩盤の変形係数はその正確な評価がむずかしく、また、コア片のヤング率よりもかなり小さい。特に、軟岩中の地下構造物の建設や黒鉱鉱山などでは、軟弱な岩盤内の地圧変化も計測する必要があり、一方、硬岩といえども節理等の弱面の分布状態によって多様であることから、幅広い変形係数の岩盤に適用できてかつ局所的な弱面の影響を受けにくいもので対象岩盤の変形係数を正確に考慮できる地圧変化測定法の開発が望まれる。

そこで、本研究では、軟岩を含めた幅広い岩盤を対象とすることができる圧力セルに注目し、円筒型圧力セルの内壁に8枚のひずみゲージを貼付した新しいポアホール埋設型の地圧変化測定法を試みた。本方法では、充填材の固化後、測定に先立って、まず、測定装置そのものを用いて内圧試験を行い、圧力に対する岩盤を含めた測定系の応答を知ることの特徴があり、次に、この情報をセル内壁のひずみと地圧変化の関係に利用するものである。以下、本報では、測定方法の原理とモルタルブロックを用いた一軸および二軸圧縮応力下の室内実験結果について述べる。

2. 円筒型圧力セルと測定原理

第1図は、室内実験用の円筒型圧力セルを示したものである。図中、①は外径38.1mm、厚さ1mm、有効長80mmの銅パイプで、両側の銅製円柱に接着されている。②は銅パイプ中央内壁の円周方向に貼付した8枚のひずみゲージ、③はOリング、④は接続ネジ部、⑤はリード線取出口、⑥は圧力パイプで、ブルドン管式圧力計と油圧カップラーに接続されている。なお、圧力セルの材質としてはステンレス等の他の材料も考えられ、有効長についても節理の程度などの岩盤条件に応じて変えるべきであろう。

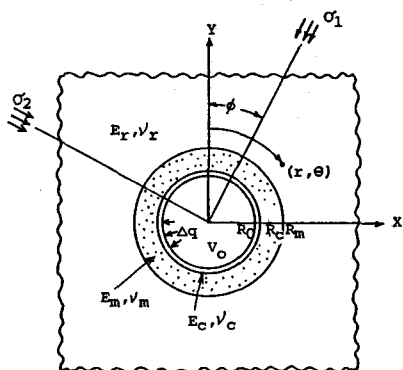


第1図 内壁にひずみゲージを貼付した円筒型圧力セル

さて、充填材を用いてボアホールに埋設された円筒型圧力セルを模式的に示すと第2図のようである。即ち、岩盤（ r ）、充填材（ m ）および円筒型圧力セル（ c ）からなる系が、二次元的な地圧変化 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ を ϕ の方向から受けてセル内に Δq の内圧増加が生じた場合を考える。なお、岩盤、充填材とも等方弾性体で、平面ひずみ状態を仮定している。この場合、セル内壁円周方向のひずみ ε_θ の増加は、問題の幾何学的対称性から、圧縮を正として次のように表される。

$$\varepsilon_{\theta} = f \cdot \{ \Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 - 2 (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2) \times \\ \cos 2 (\theta - \phi) \} - g \cdot \Delta q. \quad (1)$$

ただし、(1)式右辺の第1項は $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ によるひずみでfは測定系の全てのヤング率E、ポアッソン比 ν および寸法(半径R)



第2図 岩盤中の円筒型圧力セル

に依存する値であり、第2項は、内圧 Δq によるひずみで g は内圧試験から求められる。一方、 $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta p$ の場合のセル内壁の円周ひずみ ε_θ は、軸対称問題を解くことによって次のように与えられる。

$$\varepsilon_\theta = (1 + \nu_c) / E_c \cdot (\Delta p / K_p) - (1 + \nu_c) / E_c \cdot (\Delta q / K_q) \quad (2)$$

ただし、 $K_p = \beta / (1 - \nu_r) (1 - \nu_m) (1 - \nu_c)$ (3), $K_q = \beta / \gamma$ (4),

$$\begin{aligned} \beta = \{m_2 (1 - 2\nu_m) + 1\} \{m_3 (1 - 2\nu_c) + 1\} + (R_o / R_c)^2 \{m_2 (1 - 2\nu_m) + 1\} \\ \times (m_3 - 1) + (R_c / R_m)^2 \{m_3 (1 - 2\nu_c) - (1 - 2\nu_m)\} (m_2 - 1) + (R_o / R_m)^2 \times \\ (m_3 + 1 - 2\nu_m) (m_2 - 1) \quad (5), \quad \gamma = \{m_2 (1 - 2\nu_m) + 1\} \{m_3 (1 - 2\nu_c) + 1\} \\ - (R_o / R_c)^2 \{m_2 (1 - 2\nu_m) + 1\} (m_3 - 1) (1 - 2\nu_c) + (R_c / R_m)^2 \{m_3 (1 - 2 \\ \times \nu_c) - (1 - 2\nu_m)\} (m_2 - 1) - (R_o / R_m)^2 (m_3 + 1 - 2\nu_m) (m_2 - 1) (1 - 2\nu_c) \\ (6), \quad m_2 = (E_r / E_m) \cdot \{(1 + \nu_m) / (1 + \nu_r)\} \quad (7), \quad m_3 = (E_m / E_c) \\ \times \{(1 + \nu_c) / (1 + \nu_m)\} \quad (8) \end{aligned}$$

従って、(1)、(2)式から、次の関係が求められる。

$$f = (1 + \nu_c) / 2 E_c / K_p, \quad g = (1 + \nu_c) / E_c / K_q \quad (9)$$

g に関する(9)式からわかるように、岩盤のヤング率を除く測定系の他の弾性定数が既知であれば、内圧試験からの g の値から岩盤のヤング率 E_r が求められることになる。即ち、内圧試験から得られる g の値は岩盤のヤング率に関する情報を含んでいるので、ここで、(1)式の右辺の地圧変化に関する係数 f を g を用いて次のように書き換える。即ち、(9)式から、外圧 Δp と内圧 Δq によるセルの変形比率である K_p / K_q を用いて、

$$f = g / (2 K_p / K_q) \quad (10)$$

第3図は、第1図に示した円筒型圧力セルを直径が4.69 cmのボアホールに埋設した場合の岩盤のヤング率 E_r と K_p / K_q の関係を充填材のヤング率 E_m をパラメータとして表したものである。同図から、充填材としてヤング率の大きなものを用いれば、(10)式中の K_p / K_q は幅広いヤング率の岩盤に対してあまり変わらない値となることがわかる。従って、内圧試験から得られる g の値を用いて f を(10)式のように表すことによって、岩盤の変形係数の評価誤差による地圧変化の測定誤差を小さくすることができる。なお、既に述べたように、内圧試験によって岩盤のヤング率を求めることができるので、この値から、(10)式の K_p / K_q が求められる。このようにして、円筒型圧力セル内壁のひずみ分布は、結局、次式で与えられる。

$$\varepsilon_\theta = g / (2 K_p / K_q) \cdot \{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 - 2 (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2) \cos 2(\theta - \phi)\} - g \cdot \Delta q \quad (11)$$

従って、 ε_θ の分布を測定すれば最小二乗法を用いて地圧変化 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ とその方向 ϕ が求められる。

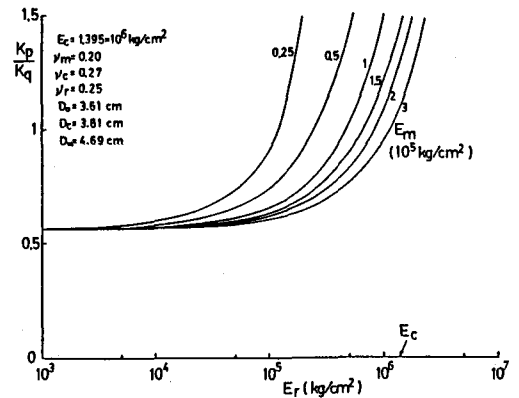
一方、油圧系を閉じて初期圧設定後の内圧変化を測定する場合には、地圧変化と内圧変化によって生ずるセルの体積変化と油の体積弾性率 K_o から、セルの有効体積を V_c 、油圧系の全体積を V_o として、地圧変化の和 $\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2$ が、次式で求められる。

$$\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 = (K_p / K_q) (V_o + 2 g V_c K_o) / (g V_c K_o) \cdot \Delta q \quad (12)$$

3. 室内実験

3.1 試料および充填材

試料としては、30 cm立方のモルタルブロックを用いた。4週間養生後のヤング率、ポアッソン比、一軸圧縮強度、圧裂引張強度は、それぞれ、 $0.969 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、0.17、 2.29 kg/cm^2 、23.5



第3図 岩盤(E_r)と充填材(E_m)のヤング率と K_p / K_q の関係

kg/cm^2 である。4週間養生後、メタルピットを用いてモルタルブロックに直径46.9mmのボアホールを穿孔し、無収縮グラウト材を用いてブロック中心に円筒型圧力セルを埋設した。用いた充填材の養生日数と一軸圧縮強度 σ_c および50%強度の接線ヤング率 E_m の関係を第4図に示す。

3.2 試験方法および試験装置

室内試験は一軸圧縮試験と二軸圧縮試験のそれぞれについて行われたが、一軸試験では、アムスラー型材料試験機(容量100t)を用いて、埋設後、1、2、3日および1、2、3、4週間経過した時点で加えた応力と測定値の比較を行った。なお、加えた応力は、モルタルブロックの引張強度の関係で最大22

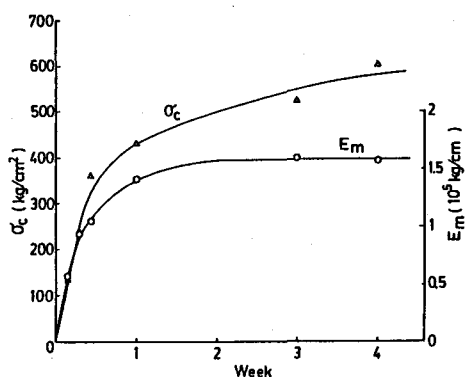
kg/cm^2 である。一方、二軸試験では、第5図に示す試験装置を用いた。図中、①は垂直方向載荷用のサーボコントロール型圧縮試験機(容量100t)の載荷盤であり、水平方向について

は、4個の架台⑧上にクッションを介して設置した左右の反力盤⑥を4本の連結棒⑦で連結し、その間に耐圧盤②、球座③、ロードセル④をセットして左右の70t油圧ラム⑤で供試体⑨に荷重を加えた。二軸試験では、一軸試験で用いた同じブロックに対して最大垂直応力を20 kg/cm^2 として、数通りの垂直応力と水平応力の組合せについて試験を行った。なお、初期設定内圧は3~5 kg/cm^2 である。

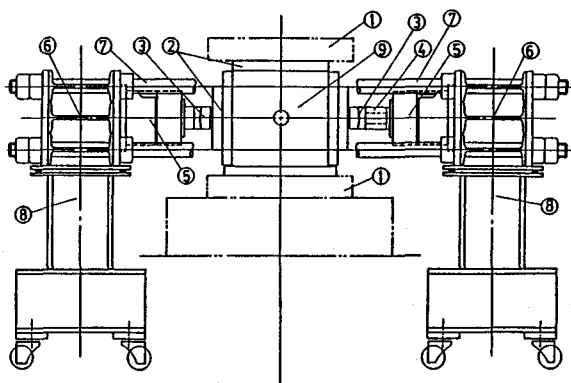
3.3 実験結果および考察

(1) 一軸圧縮試験

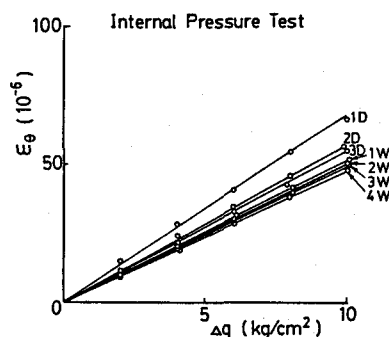
第6図は、円筒型圧力セル埋設後の各経過日数における内圧試験結果を示したものであるが、充填材の固化に伴ってセル内壁の平均ひずみが小さくなっていることがわかる。なお、内圧試験では載荷と除荷の両方の特性を測定し、ここでは、除荷時の結果を用いている。圧力セル埋設後、2、3、4週間目の応力が11、22 kg/cm^2 の場合のひずみ分布を第7図に示す。なお、図中の曲線は最小二乗法によるあてはめ曲線であり、貼付位置が 180° 以上のひずみゲージについては点対称位置にプロットしてある。これから、引張ひずみを除けば、良好なひずみ分布であることがわかる。一方、第8図に埋設後4週間目のひずみと応力の関係を示したが、圧縮ひずみが初期に若干の非線形性を示し、また、応力レベルがある値以上になると引張ひずみが増加しにくくなる傾向が認められる。これは、充填材の圧密やセルと充填材の接着性に起因していると考えられる。第1表は一軸試験結果をまとめたものである。なお、同表には、信頼係数が95%の場合の区間も示した。これから、埋設後十分な養生期間を取れば、特に低応力レベルでは満足できる精度の測定が可能であることがわかる。しかし、応力レベルが高くなると、既に述べたように、引張ひずみが正しい値を示さないために、見かけ上、 $\Delta\sigma_2$ が作用したかのように評価されて $\Delta\sigma_1$ も大きな値にな



第4図 充填材の力学的性質の養生日数による変化



第5図 二軸圧縮試験機



第6図 内圧試験結果

っている。ただし、これは、原位置試験の場合のように、初期設定圧を大きく取ることができれば、改善することができると考えられる。また、応力変化の方向は、いずれの場合でも $\pm 6^\circ$ 以内の精度である。

第1表 一軸試験結果（埋設後の経過日数と計測値）

		σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)	ϕ ($^\circ$)	σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)	ϕ ($^\circ$)
ACTUAL		11	0	0	22	0	0
EXPERIMENTAL	1-D	8.39 $\pm$ 0.51	0.60 $\pm$ 0.51	-2.3 $\pm$ 3.0	17.8 $\pm$ 1.3	3.3 $\pm$ 1.3	-3.6 $\pm$ 4.2
	2-D	9.14 $\pm$ 0.66	0.55 $\pm$ 0.66	0.0 $\pm$ 3.3	21.6 $\pm$ 2.1	4.4 $\pm$ 2.1	-2.1 $\pm$ 5.4
	3-D	9.29 $\pm$ 0.85	0.65 $\pm$ 0.85	-0.7 $\pm$ 4.4	21.3 $\pm$ 2.1	5.4 $\pm$ 2.1	-4.4 $\pm$ 6.1
	1-W	8.99 $\pm$ 0.66	0.65 $\pm$ 0.66	-1.9 $\pm$ 3.3	21.2 $\pm$ 1.8	4.8 $\pm$ 1.8	-4.7 $\pm$ 4.6
	2-W	9.39 $\pm$ 0.56	-0.19 $\pm$ 0.56	-4.1 $\pm$ 2.5	21.6 $\pm$ 1.7	2.8 $\pm$ 1.7	-5.2 $\pm$ 3.9
	3-W	11.6 $\pm$ 0.71	-0.04 $\pm$ 0.71	-4.2 $\pm$ 2.6	24.6 $\pm$ 1.8	3.0 $\pm$ 1.8	-5.1 $\pm$ 3.5
	4-W	11.5 $\pm$ 0.47	-0.51 $\pm$ 0.47	-4.6 $\pm$ 1.7	25.7 $\pm$ 1.8	1.2 $\pm$ 1.8	-5.2 $\pm$ 3.1

(2) 二軸圧縮試験

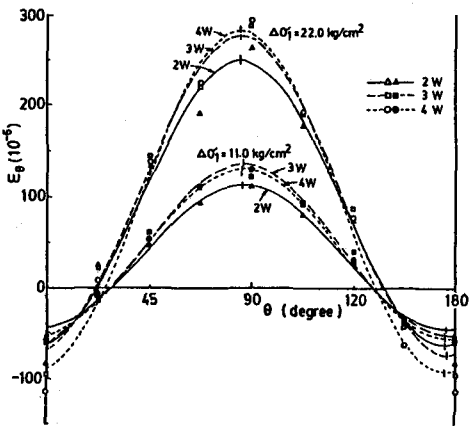
二軸試験におけるひずみ分布を第9図に、また、測定結果をまとめて第2表に示す。なお、垂直応力 σ_v の方向は 0° である。これから、水平応力 σ_H が 20 kg/cm^2 になると二軸試験前の度重なる一軸試験によってボアホール周囲のモルタルブロックと充填材が局部的に弱化したために測定精度がやや落ちていたが、 σ_H が低いレベルでは精度のよい地圧変化の大きさと方向を測定することができることがわかる。

第2表 二軸試験結果

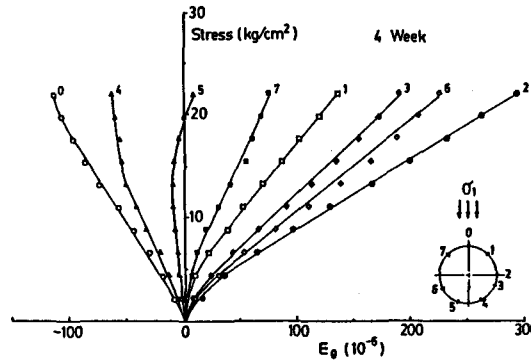
actual stresses		predicted stresses and azimuth		
σ_v	σ_H	σ_1	σ_2	(degree)
		(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
20	0	18.0 $\pm$ 3.9	1.2 $\pm$ 3.9	-1.3 $\pm$ 5.5
20	5	20.1 $\pm$ 4.0	4.1 $\pm$ 4.0	-2.1 $\pm$ 5.9
20	10	20.9 $\pm$ 4.1	9.2 $\pm$ 4.1	-2.1 $\pm$ 8.4
10	10	11.4 $\pm$ 2.5	9.9 $\pm$ 2.5	6.0 $\pm$ 3.7
20	20	22.6 $\pm$ 3.6	29.6 $\pm$ 3.6	-6.0 $\pm$ 12

4. 結 言

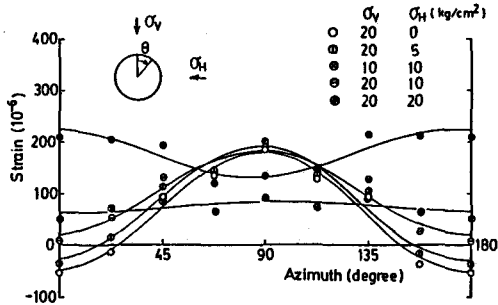
掘削や採掘に伴って変動する地山応力の精度良い測定法の開発のために円筒型圧力セルの内壁に8枚のひずみゲージを貼付した新しい地圧変化測定装置を試作し、一軸および二軸圧縮応力下の室内試験を行って測定精度を検討した。その結果、ほぼ満足できる結果が得られたが、今後、原位置試験用の測定装置を試作して原位置試験に適した充填方法や測定装置の長期安定性等について検討を行う予定である。



第7図 一軸試験におけるひずみ分布の例



第8図 载荷応力とひずみの関係（一軸、4週間）



第9図 二軸試験におけるひずみ分布の例

(57) A New Method for Measuring Two-dimensional Change of
In-situ Stresses During Mining Excavations

Koji MATSUKI, Kiyohiko OKUMURA and Takashi NARASAKA
(Faculty of Engineering, Tohoku University)

Determination of in-situ stress change in rock mass during excavations is most important for security of underground constructions or mining operations. However, monitoring of displacements or strains is mainly conducted for the purpose because there is not a simple and reliable method to measure the change of in-situ stresses especially for the wide range of rock masses.

In this paper, a new method is proposed for measuring two-dimensional change of in-situ stresses, and the results of laboratory tests under both uniaxial compression and biaxial compression are described.

In this method, a cylindrical pressure cell with eight strain gauges glued to the inner wall of the cell is inserted in the bore-hole with grouting material. A special merit of this method lies in the internal pressure test, which is carried out prior to the measurement of in-situ stress change, using the measuring instrument itself in order to measure the mechanical interaction between the measuring system and the rock mass. Utilizing the information on the deformation modulus of the rock mass obtained in the internal pressure test, two-dimensional change of in-situ stresses in the rock mass can be measured accurately with least squares method on the strain distribution around the inner wall of the pressure cell.