

# 埋設ひずみ計の感度に及ぼす排水条件の影響

## Influence of Drainage Condition on Sensitivity of Embedded Gauges

船戸明雄\*・細田光一\*

Akio FUNATO and Kouichi HOSODA

In the cases of monitorings of rock behavior or initial stress measurements, strain gauges are installed in a pilot borehole, and measured strain changes by excavations or drillings will be converted into stress changes. In this analysis based on the elastic theory, elastic moduli are required. Then, biaxial test or triaxial test are conducted in laboratory in order to evaluate elastic moduli. But it is well known that stress-strain behaviors should be influenced by drainage conditions especially in soft rocks. Therefore the authors conducted sensitivity testes in order to examine the influence of drainage conditions on the sensitivities of strain gauges embedded in various rocks.

Following results are obtained,

- As to Ohya Tuff, apparent sensitivities ( $\sigma/\varepsilon$ ) in un-drained condition appear larger than those in drained condition.
- As to Mortar, there is no difference between the sensitivities in both conditions.
- As to Inada Granite and Mud stone, there exists only small difference.

From these results, the authors propose the stress analysis considering drainage conditions.

**Key Words:** embedded gauge, sensitivity, drainage condition, stress monitoring

### 1. はじめに

岩盤の挙動モニタリングや初期地圧測定においては、あらかじめ削孔したパイロット孔内にひずみ計を設置し、掘削などによるひずみの変化に弾性係数を乗じて応力変化を求めている。この時パイロット孔内に設置されるひずみ計や埋設材の弾性係数は一般に周辺岩盤と等しくないため、それらを含む複合体としての等価の弾性係数を求めるために感度試験を実施することがある。ところが軟岩においては、弾性係数は排水条件によって異なることが知られており、ひずみ計を含む軟岩複合体の変形挙動も排水条件によって変わる可能性がある。そこで筆者らはひずみ感度に及ぼす排水条件の影響を検討するため、各種の岩石にひずみ計を埋設して感度実験を行なった。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試体の作成

実験には、大谷石、泥岩、花崗岩およびモルタルを用いた。前3者については、ブロック試料から内径46mm、外径100mm、高さ200mmの円筒供試体を繰り抜き、3成分のモールドゲージを供試体の中心に設

\*応用地質株式会社 コアラボ

置いてモルタルで充填した。

モルタル供試体については、内径 100mm、高さ 200 mm の容器の中心に 3 成分モールドゲージを設置し、モルタルを充填して供試体を作成した。モルタルの配合は、水：早強セメント：無収縮材：減水剤=4.4:9.5:0.5:0.1（重量比）とした。モルタル打設後水中で 1 週間養生し、感度実験に供した。

実験に用いた大谷石、泥岩、花崗岩およびモルタルの物性を表-1 に、試験装置の概要を図-1 に示す。

表-1 実験材料の物性

(弾性係数,ポアソン比は  $\sigma_c=1\text{MPa}$  の三軸試験による)

実験材料	排水条件	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
大谷石	CU	1.50	2,100	0.43
	CD		2,600	0.29
泥岩	CU	1.61	720	0.47
	CD		580	0.16
花崗岩	CU	2.64	—	—
	CD		37,000	0.12
モルタル	CU	1.96	17,000	0.23
	CD		15,000	0.23

## 2.2 実験条件

実験は以下の条件で行った。

- ①水圧荷重 : メンブレンなしで側圧を荷重
- ②非排水荷重 : メンブレンを装着し排水コックを閉じて側圧を等方荷重
- ③背圧荷重 : 側圧一定で背圧を変化
- ④排水荷重 : 排水コックを開いて側圧を等方的に荷重

なお実験に用いる供試体は脱気水中で 2 昼夜以上真空吸引し飽和化を図った。また上記の各ステップの実験を行った後は側圧と背圧を開放し、ひずみ変化が落ち着くのを待って次のステップの実験を行った。実験の最大圧力は側圧、背圧とも、大谷石では 1MPa、花崗岩とモルタルでは 5MPa とした。

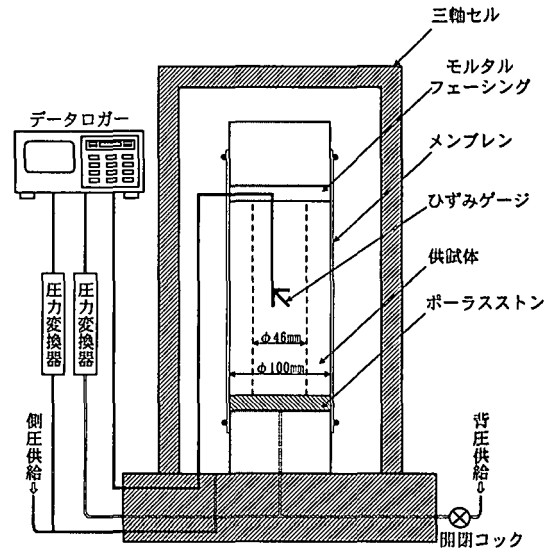


図-1 感度試験装置の概要図

## 3. 実験結果

### 3.1 大谷石

大谷石の水圧荷重条件における側圧とひずみの関係を図-2 に示す。ひずみゲージの方向による直線の勾配やヒステリシスの挙動がわずかに異なるのは供試体の不均質性によるものと考えられる。

ここには示していないが、非排水荷重時の側圧とひずみの関係も図-2 とほぼ同様である。これは非排水荷重時には側圧とはほぼ等しい間隙水圧が発生していることから理解できる。

図-3 には水圧荷重、非排水荷重、排水荷重条件における側圧と半径ひずみの関係を比較して示す。水圧荷重と非排水荷重のひずみはほぼ同じであるが、排水荷重の場合にはそれらよりやや大きなひずみが発生している。

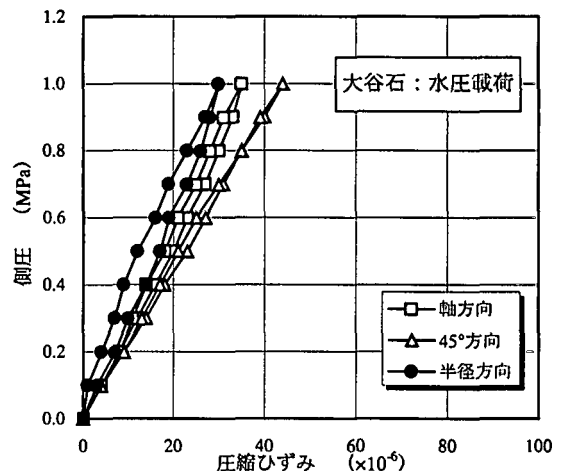


図-2 側圧とひずみの関係

### 3.2 泥岩

図-4には3条件における泥岩の側圧と半径ひずみの関係を示す。水圧载荷と非排水载荷とも直線関係を示しほとんど差はない。これに対し排水载荷の場合にはヒステリシスが著しく、特に低圧レベルで非直線的な挙動を示している。ただし直線部分の勾配は前2者とほぼ等しくなっている。このような挙動を示す原因として、供試体作成時にモルタルの膨張によって円筒状の泥岩に内圧が作用し、部分的に降伏して不均質化したことが考えられる。

### 3.3 モルタル

図-5にはモルタルの側圧と半径ひずみの関係を示す。3条件による差はほとんどなく、いずれの場合も直線関係を示している。側圧 $\sigma$ とひずみ $\epsilon$ の勾配から次式で弾性係数Eを求めることができる。

$$E = (1 - 2\nu) \frac{\sigma}{\epsilon} \quad 1) \text{式}$$

ここで表-1に示したポアソン比0.23を用いると $E=16\text{GPa}$ となり、三軸圧縮試験による値と一致している。

### 3.4 花崗岩

花崗岩の側圧と半径ひずみの関係を図-6に示す。水圧载荷に比べて非排水载荷と排水载荷の場合にはややヒステリシスが大きい。また排水载荷の場合には他よりもやや大きなひずみが発生している。

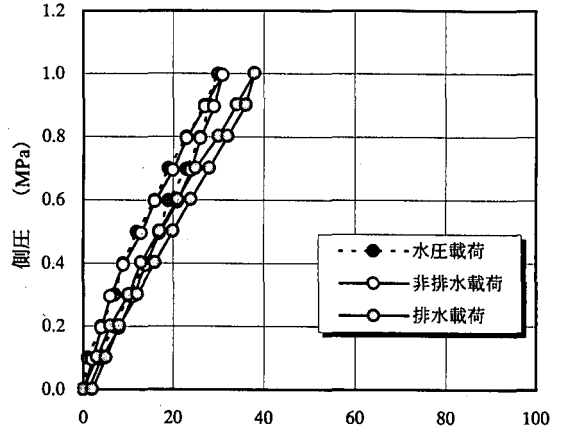


図-3 側圧と半径ひずみの関係 (大谷石)

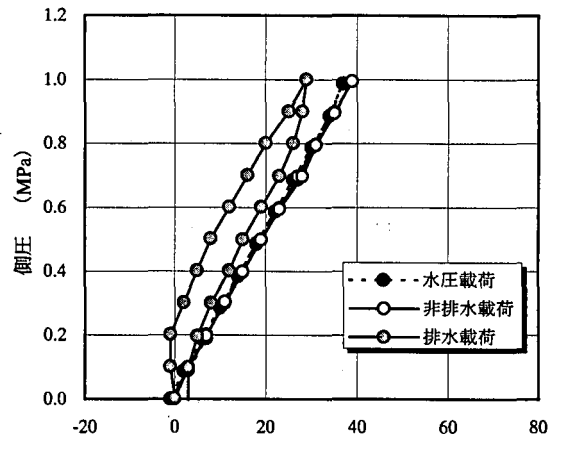


図-4 側圧と半径ひずみの関係 (泥岩)

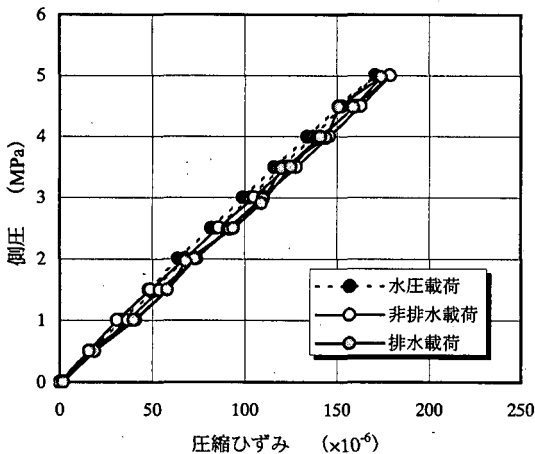


図-5 側圧と半径ひずみの関係 (モルタル)

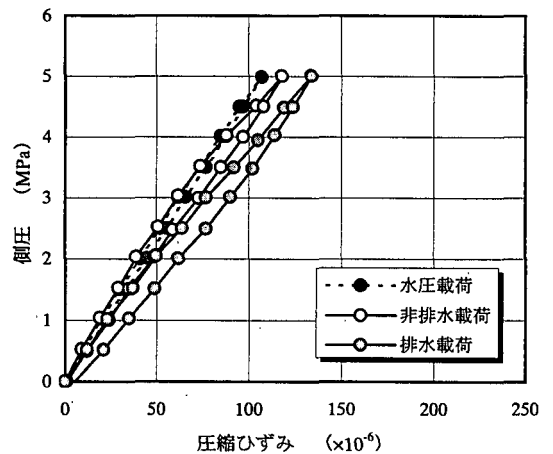


図-6 側圧と半径ひずみの関係 (花崗岩)

表-2 見かけ感度  $\sigma/\varepsilon$

試験条件 供試体	$\sigma/\varepsilon$ (GPa)		
	水圧載荷	非排水 載荷	排水載荷
大谷石	31	31	26
泥岩	26	25	24
花崗岩	46	42	37
モルタル	29	28	29

4. 考察

実験によって得られた側圧と半径ひずみを直線回帰して見かけ感度  $\sigma/\varepsilon$  を求めると表-2 のようになる。この結果から以下のように考察される。

- ① いずれの岩石においても水圧載荷と非排水載荷の  $\sigma/\varepsilon$  はほぼ等しい。これは非排水載荷の場合には側圧にほぼ等しい間隙水圧が発生していることから、メンブレンの有無にかかわらず水圧載荷と非排水載荷では供試体に加えられる応力条件に差はないことがうかがえる。
- ② 泥岩の排水載荷（排水コックを開いて 0.1MPa/min の速度で載荷）の場合には、透水係数が小さいので間隙水圧がほとんど消散せず、その結果非排水載荷とほぼ同じ  $\sigma/\varepsilon$  になったと考えられる。
- ③ 排水載荷時の  $\sigma/\varepsilon$  は、花崗岩はモルタルより大きく、大谷石や泥岩はモルタルより小さい。これは岩石の弾性係数の大小関係と同じであり、以下に厚肉円筒理論を用いて考察する。

4.1 厚肉円筒理論による考察

内圧と外圧を受ける厚肉円筒の変位は次式で表される。  
ここに、

$$d = \frac{p_1 r_1^2 [(1-\nu)r^2 + (1+\nu)r_2^2] - p_2 r_2^2 [(1-\nu)r + (1+\nu)r_1^2]}{E (r_2^2 - r_1^2) r} \quad \text{2) 式}$$

- d : 半径方向の変位
- $p_1, p_2$  : 内圧と外圧
- $r_1, r_2$  : 内半径と外半径
- $E, \nu$  : 厚肉部の弾性係数とポアソン比

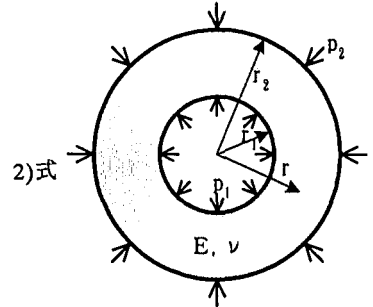


図-7 内外圧を受ける厚肉円筒

2) 式において  $r=r_1$  とすれば円筒内側の変位  $d_{in}$  が求められる。また、 $r=r_2, r_2=r_1, p_2=p_1, r_1=p_1=0$  とすれば、外圧  $p_1$  を受ける半径  $r_1$  の中実円筒外側の変位  $d_{out}$  を得ることができる。そこで外側円筒部の弾性係数、ポアソン比を  $E_2, \nu_2$ 、内側中実部のそれを  $E_1, \nu_1$  として  $d_{in}=d_{out}$  とおくことで次式が導かれる。

$$p_1 = \frac{2 r_2^2 p_2}{[(1-\nu_2)r_1^2 + (1+\nu_2)r_2^2] + E_2/E_1 (1-\nu_1) (r_2^2 - r_1^2)} \quad \text{3) 式}$$

ここで  $\nu_1=0.23$  (表-1 のモルタルの値) とし、 $\nu_2=0.12$  (花崗岩; 排水),  $0.29$  (大谷石; 排水),  $0.47$  (泥岩; 非排水) の場合について  $E_2/E_1$  を変化させてこの関係を図化すると図-8 のような曲線になる。緻密にはポアソン比によって若干異なるが、 $E_2 > E_1$  の時には  $p_1 < p_2$  となり中心部のひずみは  $p_1/p_2$  倍 ( $< 1$ ) に小さくなる。従ってこれを側圧とひずみの見かけ感度  $\sigma/\varepsilon$  でみれば  $p_1/p_2$  倍に大きくなる。そこで表-1 に示した三軸試験による  $E_2/E_1$  と、表-2 に示した感度試験による  $\sigma/\varepsilon$  の比の逆数 (岩石供試体の  $\sigma/\varepsilon$  に対するモルタル供試体の  $\sigma/\varepsilon$  の比) を同図にプロットした。それによれば花崗岩と泥岩 (非排水条件) は理論値にほぼ一致していることがうかがえる。大谷石の場合には図に示した排水条件では理論値とやや差がみられ、非排水条件の場合にはさらに理論値との乖離が大きくなる。この原因としては供試体のばらつきや、ひずみ計を埋設した際に空隙にモルタルが浸透して剛性を高めたことなどが考えられる。

## 4.2 排水条件の影響

非排水载荷と排水载荷で見かけ感度  $\sigma/\varepsilon$  の差が比較的大きかった大谷石について、背圧载荷の結果を含めて有効応力的な考え方で考察する。

図-9に大谷石の背圧载荷の結果を非排水载荷、排水载荷と比較して示す。背圧载荷では最初に側圧と背圧を同時に1.0MPaまで加え、その後側圧は一定のまま背圧だけを0.2MPaづつ減少させた。したがって図-9における経路は原点から始まって  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  に至っている。例えば点  $b_1$  は背圧0.8MPa、有効拘束圧0.2MPaである。これらの点と、排水载荷の対応する点  $a_1 \sim a_5$  を結んだ直線の勾配は、原点から  $b_0$  に至る非排水载荷の勾配に概ね等しくなっている。すなわちある拘束圧によって発生するひずみは、原点から  $a_i$  までの有効拘束圧によるひずみと、 $a_i$  から  $b_i$  までの背圧によるひずみの和となっている。これを式で表すと以下ようになる。ただしここではある特定方向の応力とひずみだけを考えている。

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon_u$$

$$\sigma/S_a = \sigma'/S' + u/S_u \quad 4) \text{ 式}$$

ここに、

$\sigma, \varepsilon, S_a$  : 側圧, ひずみ, 見かけ感度 ( $=\sigma/\varepsilon$ )

$\sigma', \varepsilon', S'$  : 有効拘束圧, 排水载荷時のひずみ, 排水载荷時の見かけ感度 ( $=\sigma'/\varepsilon'$ )

$u, \varepsilon_u, S_u$  : 水圧, 非排水载荷時のひずみ, 非排水载荷時の見かけ感度 ( $=u/\varepsilon_u$ )

また、

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma' + u \\ &= S'(\varepsilon - \varepsilon_u) + u \\ &= S'(\varepsilon - u/S_u) + u \end{aligned} \quad 5) \text{ 式}$$

となるので、5)式を用いて埋設ひずみ計による原位置の応力変化を評価する際には、 $S', S_u$  および  $u$  (原位置においては間隙水圧の変化)を知る必要がある。もちろん  $S'=S_u=S_a$  の場合には  $\sigma = S_a \varepsilon$  である。

## 5. あとがき

岩石中に埋設したひずみ計の感度は、排水条件により異なる場合がある。その場合には排水条件と非排水条件で感度試験を行い、さらに原位置の水圧変化を考慮することでより適切な応力評価ができる可能性を示した。しかし、三次元応力を求めるためにはポアソン比が不可欠であり、このような複合材料のポアソン比をどのように評価していくかは今後の課題である。

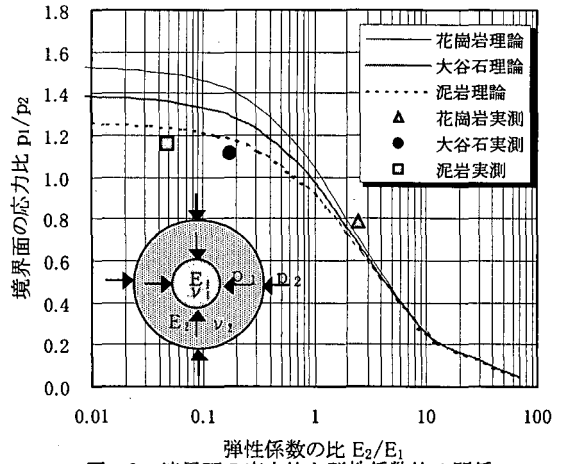


図-8 境界面の応力比と弾性係数比の関係

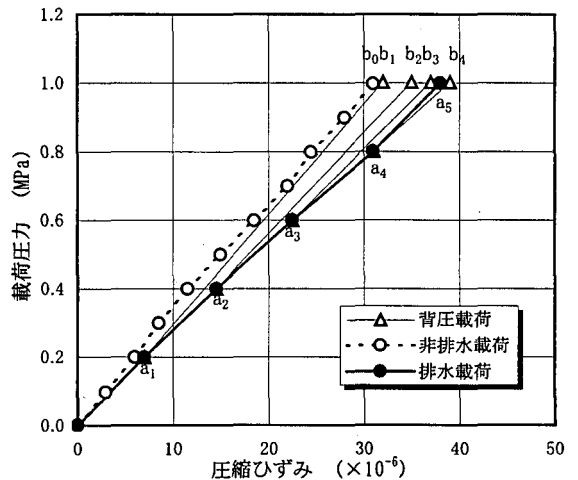


図-9 背圧载荷による半径ひずみ(大谷石)