

2. 岩石の標準的な材料試験方法

2.1 緒言

岩盤の強度・変形特性は、岩盤構造物の合理的な設計・施工をする上で、また岩盤に関わる諸現象を理解する上で、最も基本的な情報である。ここでは、岩石・岩盤の変形・強度特性を得るために標準的な試験方法と、これらの試験によって供試体に生じる応力・変位について述べる。なお、実測される岩石の応力ーひずみの関係については第3章で説明する。

2.2 岩石の変形・強度特性を得るために標準的な試験方法

2.2.1 岩石供試体

岩石供試体は通常、岩石ブロックまたは地山状態にある岩盤からコアビットを用いた作孔により採取する。その結果、コア（円柱形試料）が得られるので、ダイヤモンドカッターを用いてコアから長さが径の2倍強の円柱形を切りだし、端面間の平行度、平滑度、側面と端面の直角度が所定の誤差内に収まっているように平面研削盤などを用いて仕上げ、供試体とする。標準的な円柱形岩石供試体は長さが径の2倍になっている。

岩石は多少とも不均質であり、しばしば異方性があるので、ある岩盤の性質を知ろうとする場合には、同一の母集団に属すと考えられるような供試体を3個以上作り（このためには全ての供試体を同一の岩石ブロックを用いて同一方向にボーリングする）、また、供試体の軸方向を記載し、強度試験に先立って弾性波速度を調べることが望ましい。弾性波速度によりヤング率や強度のばらつきの程度を推定でき、同一母集団に属するか否かの判断材料になる。

2.2.2 載荷試験方法

円柱形供試体を軸方向に圧縮する（1軸）圧縮試験や周囲から圧力（封圧）を加えつつ圧縮する3軸試験が岩盤の最も標準的な試験方法である（金属の場合は引張試験が標準的である）。

3軸試験では図2.1aに示すように、円柱形供試体に対し側壁に沿って圧力 p 、軸方向から軸圧 σ を加える（ $\sigma > p$ ）。圧力 p は封圧と呼ばれる。1軸圧縮試験は封圧0という特別の条件下の3軸試験といえる。3軸試験をするには、図2.1bに示すように供試体を圧力容器の中に入れ、油などの圧力媒体を介して圧力を負荷した後、ピストンで軸圧を負荷する。供試体に圧力媒体が直接接すると媒体の供試体への圧入など問題が生じるので、供試体はあらかじめブ

ラスチックの薄肉円筒などで覆っておく。

上記の2つが岩石の標準的な試験になっている理由は以下のようである。

①岩石は地山状態の下では、地圧（つまり圧縮応力）を受けている。したがって、圧縮の雰囲気下の力学的な挙動を知ることが重要である。

②後述するように、1軸圧縮試験や3軸圧縮試験の下では供試体に一様な応力状態が作り出される。性質に不明な部分があり、不均質な材料である岩石では一様な応力下で変形・強度特性を捉えることが重要である。

③円柱形供試体は一様に引張るのが難しい（供試体中央で破壊せずに掴み部で破壊する）。

2.3 1軸・3軸試験で供試体内部に生じる応力・ひずみ状態

2.3.1 応力解析

或る境界条件の下で構造物に生じる応力・ひずみ状態を明らかにする作業を応力解析という。ここでは、1軸・3軸試験時における供試体の応力解析について述べる。この場合の構造物と境界条件は次のようである。

構造物：円柱形供試体。

境界条件：円柱形の両端面および側壁で所与の荷重や圧力が与えられる。

2.3.2 円柱座標の導入と変位の状態

円柱の応力解析には、図2.2 aに示す円柱座標を導入すると便利である。円柱座標（ r, z, θ ）の下では、3つの変位成分（ u_r, u_θ, u_z ）は図2.2 bに示すようになっている。

円柱が均一な材料から構成されている場合、軸方向に軸圧 σ 、周囲から封圧 p を受けるときに供試体に生じる変形は、図2.2 bに示すように、どの θ 断面（ $\theta = \theta^* : \theta^*$ 任意の値）でも同じになっているであろう。これは次のことを意味する。

(1) 2つの変位成分 u_r, u_z は θ に関係しない。

$$u_r = u_r(r, z), \quad u_z = u_z(r, z) \quad (2.1)$$

(2) θ 方向の変位成分 u_θ は0である。

$$u_\theta = 0 \quad (2.2)$$

(1)、(2)の条件は軸対称条件と呼ばれる。

変位成分 u_r は、 $r=0$ では明らかに $u_r=0$ である。また変位成分 u_z は $z=0$ では $u_z=0$ としてかまわない。そこで、これと(2.1)式を満たす変位の関数として次式を仮定する。

$$u_r = a r \quad (2.3)$$

$$u_z = b z \quad (2.4)$$

a, b : 未定定数

この変位は境界条件を満たすことがわかれば、正解を与える。なぜならば、正解はただ1つしか存在しないことがわかっているからである。

2.3.3 ひずみ状態

円柱座標系で定義されたひずみ ($\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z, \gamma_{r\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{zr}$) は(2.2)式を満たす場合、明らかに θ に関する角の変化は生じないので、次式が成立する。

$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = 0 \quad (2.5)$$

(2.2)式が成り立つ場合、ひずみ成分($\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$)と変位成分 u_r の間に成立する関係を導くことにする (図2.3参照)。いま、円柱内に任意の1点 $P(r, \theta)$ と、この点の近傍の2点 : $Q(r+dr, \theta)$, $R(r, \theta+d\theta)$ を考える ($dr, d\theta$: 微小量)。変形後、 P, Q, R は P', Q', R' に移動するものとすれば、これらの座標は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} P'(r + u_r(r, \theta), \theta) \\ Q'(r + dr + u_r(r + dr, \theta), \theta) \\ R'(r + u_r(r, \theta + d\theta), \theta + d\theta) \end{aligned} \quad (2.6)$$

変形前の線素 PQ, PR は、変形に伴い、 $P'Q', P'R'$ になるので、直ひずみ $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ は、定義から次のように評価される。

$$\varepsilon_r = (P'Q' - PQ) / PQ = [\{dr + (\partial u_r / \partial r)dr\} - dr] / dr = \partial u_r / \partial r \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta = (P'R' - PR) / PR \\ = [\{r + u_r(r, \theta + d\theta)\}d\theta - rd\theta] / (rd\theta) \\ = [r + u_r(r, \theta)]d\theta / (rd\theta) = u_r / r \end{aligned} \quad (2.8)$$

同様に、ひずみ $\varepsilon_z, \gamma_{zr}$ も評価できる。結果のみを示すと次のようになる。

$$\varepsilon_z = \partial u_z / \partial z, \gamma_{zr} = \partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r \quad (2.9)$$

変位成分が(2.3)、(2.4)式で表されるとき、これを(2.7)(2.8)(2.9)式に代入し、次のような評価が得られる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = a, \varepsilon_z = b, \gamma_{zr} = 0 \quad (2.10)$$

2.3.4 円柱座標形で表した弾性体の応力-ひずみの関係と応力状態

円柱座標系(r, z, θ)で定義された応力成分 (図2.3参照) は、均質・等方な線形弾性体の場合、一般化されたHookeの法則により、ひずみの関数として次のように表される。

$$\sigma_r = A \{ (1-\nu) \varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z \}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_\theta &= A \{ \nu \varepsilon_r + (1-\nu) \varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z \} \\
\sigma_z &= A \{ \nu \varepsilon_r + \nu \varepsilon_\theta + (1-\nu) + \varepsilon_z \} \\
\tau_{r\theta} &= B \gamma_{r\theta} \\
\tau_{\theta z} &= B \gamma_{\theta z} \\
\tau_{zr} &= B \gamma_{zr} \\
A &= E / \{(1-2\nu)(1+\nu)\}, \quad B = E / (2+2\nu)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

これに(2.5),(2.10)式を代入することにより応力は次のように表される。

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= A(a + \nu b) \\
\sigma_\theta &= A(a + \nu b) \\
\sigma_z &= A(2\nu a + b(1-\nu)) \\
\tau_{r\theta} &= \tau_{\theta z} = \tau_{zr} = 0
\end{aligned} \tag{2.12}$$

2.3.5 境界条件

3軸試験において半径d/2、長さ1の円柱形供試体が図2.1に示すように封圧p、軸圧σを受け場合の境界条件は次のようになる。

$$\begin{aligned}
r=d/2 \text{において } \sigma_r &= p, \\
z=0 \text{および} z=1 \text{において } \sigma_z &= \sigma
\end{aligned} \tag{2.13}$$

(2.12)式より、未定定数a, bを次のように決めるとき、境界条件(2.13)式を満たす。

$$a = -\{\nu \sigma - (1-\nu)p\}/E, \quad b = -\{2\nu p - \sigma\}/E \tag{2.14}$$

2.3.6 3軸試験において円柱形供試体中に生じる応力・ひずみ

ひずみは(2.14)式を(2.5),(2.10)式に代入することにより次のようになる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \{(1-\nu)p - \nu\sigma\}/E, \quad \varepsilon_z = \{\sigma - 2\nu p\}/E \tag{2.15}$$

$$\gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = \gamma_{zr} = 0$$

なお、体積ひずみ ε_v は次式のようになる。

$$\varepsilon_v = (dV' - dV)/dV = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = (1-2\nu)(2p + \sigma)/E \tag{2.16}$$

また、応力は(2.14)式を(2.12)式に代入することにより次のようになる。

$$\sigma_r = \sigma_\theta = p, \quad \sigma_z = \sigma, \quad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{zr} = 0 \tag{2.17}$$

応力とひずみの両者は、供試体中のどの場所でも同じになっている、つまり一様状態になっていることがわかる。

変位は(2.14)式を(2.2)(2.3)(2.4)式に代入することにより次のようになる。

$$\begin{aligned} u_r &= -r\{\nu \sigma - (1-\nu)p\}/E \\ u_z &= -z\{2\nu p - \sigma\}/E \\ u_\theta &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

一軸圧縮（引張）試験では、封圧が $p=0$ なので、ひずみと応力は次のようになる。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -\nu \sigma/E, \quad \varepsilon_z = \sigma/E, \quad \gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = \gamma_{zr} = 0 \quad (2.19)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta = 0, \quad \sigma_z = \sigma, \quad \tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \tau_{zr} = 0 \quad (2.20)$$

2.4 1軸、3軸圧縮試験の載荷経路と供試体に生じる主応力・主ひずみ

1軸、3軸圧縮試験においては、通常、図2.4 aに示すような載荷経路が採用される。測定結果は、軸差応力($\sigma - p$)—軸ひずみ(ε_z)、軸差応力($\sigma - p$)—周ひずみ(ε_θ)、軸差応力($\sigma - p$)—体積ひずみ(ε_v)線図として整理する。図2.4 bは、軸差応力($\sigma - p$)—軸ひずみ(ε_z)、軸差応力($\sigma - p$)—周ひずみ(ε_θ)線図を同時に示したものである。

一軸圧縮および3軸圧縮試験における載荷によって供試体に生じる最大主応力、最小主応力は次になる。

(1) 1軸圧縮試験

最大主応力 $\sigma_1 = \sigma_z = \sigma$ 、中間・最小主応力 $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta = 0$

最大主ひずみ $\varepsilon_1 = \varepsilon_z$ 、中間・最小主ひずみ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta$ (2.18)

(2) 3軸圧縮試験

最大主応力 $\sigma_1 = \sigma_z = \sigma$ 、中間・最小主応力 $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta = p$

(σ : 軸圧、 p : 封圧、試験は、 $\sigma \geq p$ の条件でなされる)

最大主ひずみ $\varepsilon_1 = \varepsilon_z$ 、中間・最小主ひずみ $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_r = \varepsilon_\theta$ (2.19)

問題 1軸、3軸圧縮試験で、載荷経路に沿う応力の変化を $\sigma - \tau$ 線図のモール円で表しなさい。

2.5 1軸・3軸試験におけるひずみの計測方法

載荷に伴う供試体のひずみを測定すれば、応力—ひずみ線が求まり、後述するように、岩石の変形特性に関して多くの重要な情報が得られる。ひずみは、最大主ひずみ ε_1 、最小主ひずみ ε_3 の両方を測定することが望まれる。両ひずみの測定法には大別して2種類ある。

(1) 供試体側面に貼付したクロス型抵抗線ひずみゲージにより、軸方向ひずみ ε_z と周方向の

ひずみ ϵ_θ を測定する方法 (図 2.5 a)

本方法は、簡便で、3軸試験でも使用可能である（ゲージにコーディングすれば圧力媒体の影響をさけることができる）。しかし、ゲージの貼付された部分の局部的なひずみ値が得られる危険がある（多くの岩石は不均質である）。また、ゲージは使い捨てになる。さらに、ゲージとそれを貼付する接着剤によりゲージ貼付近傍の岩石が実際よりも強くなる危険がある（特に、軟岩の場合には、この影響が強い）。この観点からゲージベースは和紙製がよい。

(2) 変位計を用いる方法 (図 2.5 b、c)

供試体側壁の軸に平行な線上の2点間にアンカを設け、その間の相対的な変位 U を測定する。これによって軸ひずみが $\epsilon_z = U/L$ (L :アンカ間の距離) として得られる。アンカは輪ゴムで簡易に固定する構造のものがある。供試体端面に接するエンドピース間の相対的变化を測る場合もある。前者は端面付近の応力の不均一な領域を避けて、均一な応力状態になっている領域の変位を測定できるという利点がある。

周方向のひずみ ϵ_θ は、両端に変位計のついたチエーンを供試体の周に巻き測定する方法（このときの変位を U とすれば ϵ_θ は、 D を直径として $\epsilon_\theta = U/(\pi D)$ と評価される）。径方向の相対する側壁間の伸縮 U からは、半径方向のひずみ ϵ_r が $\epsilon_r = U/D$ として求まる ($\epsilon_r = \epsilon_\theta$ に注意)。

変位を測る方法は、ひずみゲージを用いた測定に付随する欠点がないだけ優れている。

問題：断面が正方形をした直方体状供試体を用いた場合、側壁に貼付したクロスゲージから軸ひずみ ϵ_z 、横ひずみ ϵ_h が測定される。横ひずみは周ひずみと力学的に同じ内容であることを確認しなさい。

解：横ひずみ ϵ_h は ϵ_2 に等しいが、周ひずみも ϵ_2 に等しい。

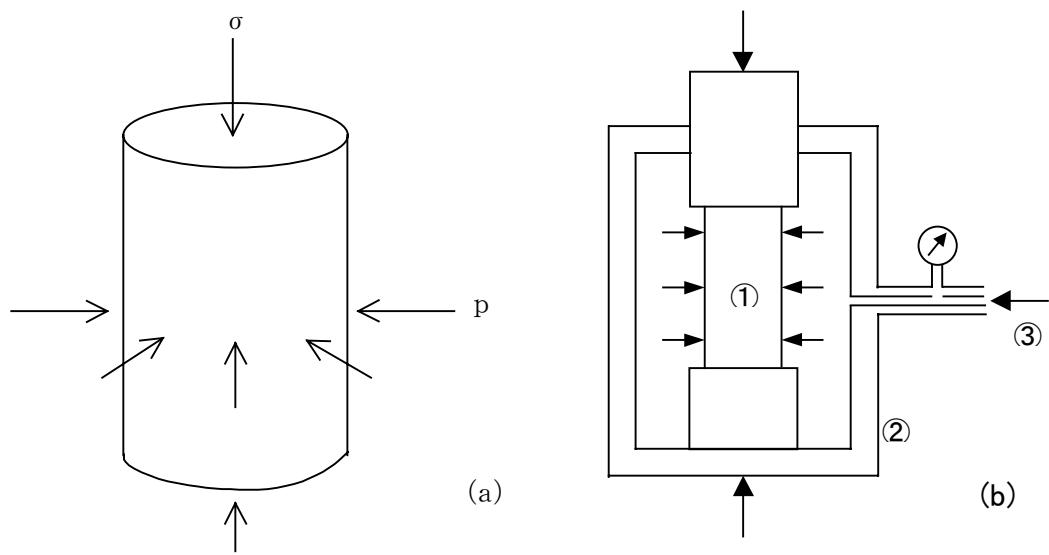


図 2.1 軸圧 σ と封圧 p が負荷された円柱 (a) と、この応力状態を作り出すための載荷装置 (b) ①供試体 ②圧力容器 ③圧力媒体

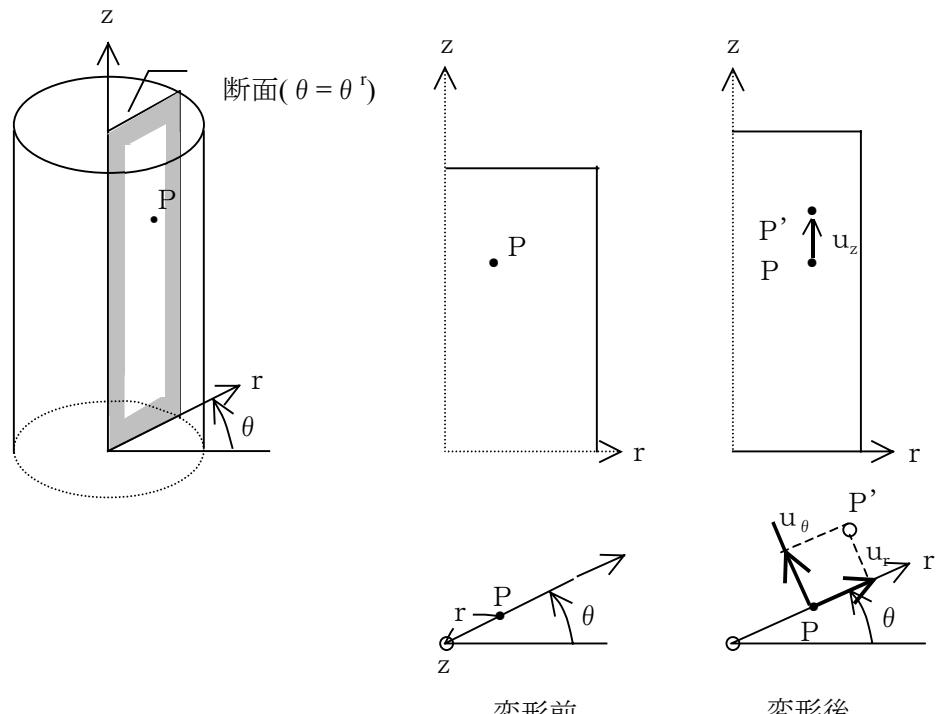


図 2.2 円柱座標 (a) とこの座標で定義される変位成分 (b)。構造物中の任意の一点 P が変形により点 P' に移動するとき変位成分 (u_r, u_θ, u_z) は図のように定義される。

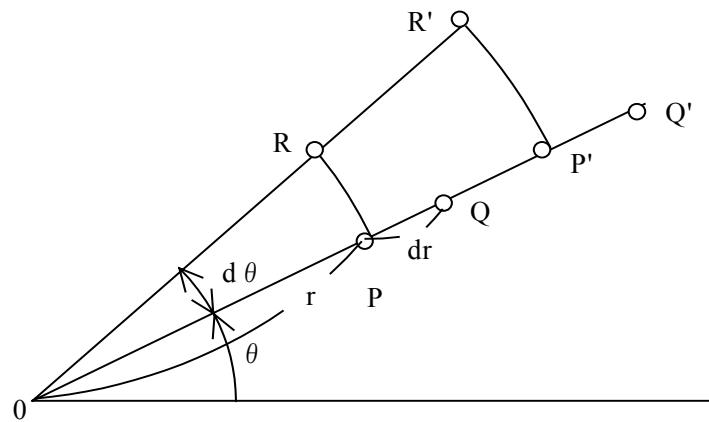


図 2.3 点 $P(r, \theta)$, $Q(r + dr, \theta)$, $R(r, \theta + d\theta)$ が変位後、 P' , Q' , R' に移ったときの状態。

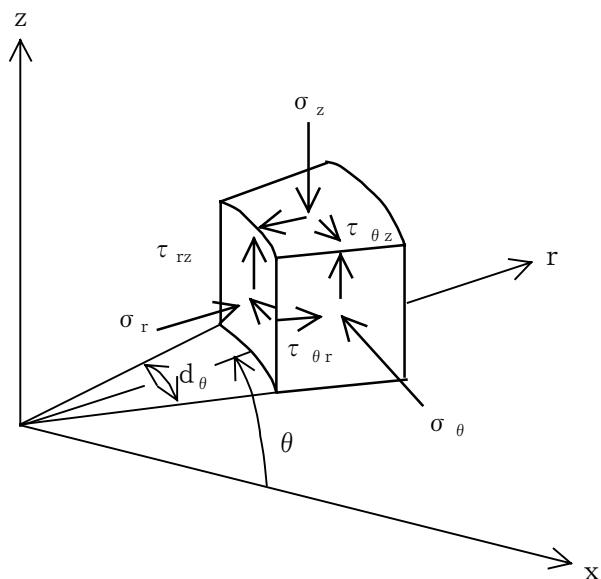


図 2.4 円柱座標系で定義される応力成分

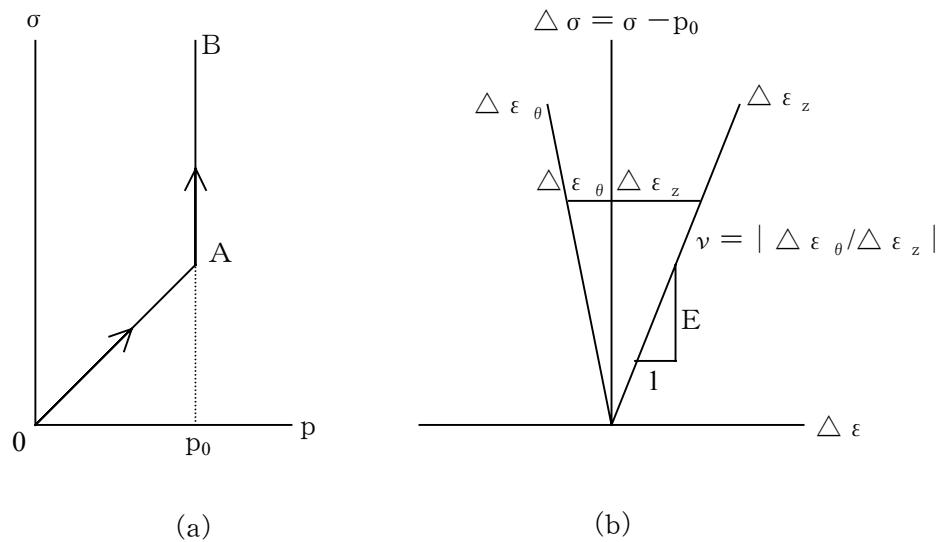


図 2.5 3 軸試験における載荷経路 (a) と本試験で得られる応力ーひずみ線図 (b)

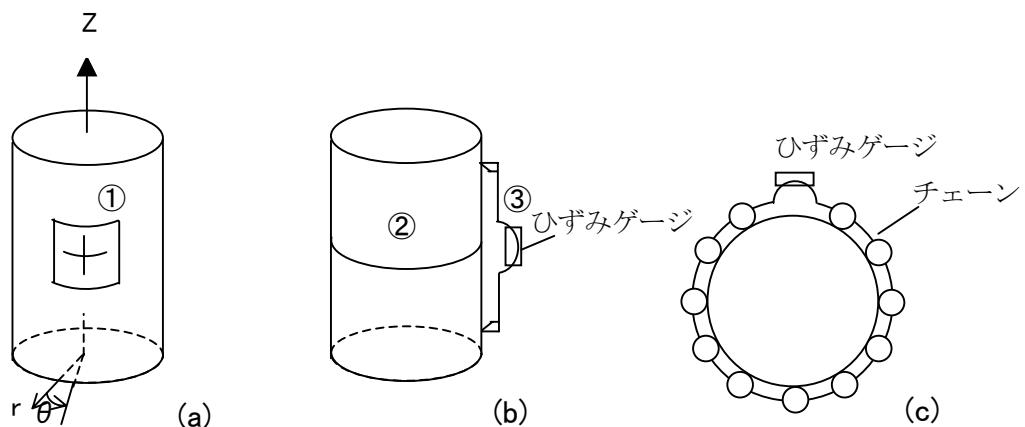


図 2.6 1 軸・3 軸試験で円柱形供試体に生じるひずみの計測方法。a は抵抗線ひずみゲージを貼付する方法、b は変位計を用いて軸方向、周方向の相対的変位を計る方法。c は b ②の周方向の相対的変位を計るためのチェーン式変位計の模式図である。