



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	伸びひずみに伴い減少する変形係数に基づいた構成方程式のせん断場や厚肉円筒への応用
Author(s)	藤井, 義明; 石島, 洋二
Description	資源・素材学会平成11年度(1999年)春季大会, 1999年3月29日~1999年3月31日, 早稲田大学理工学部, 東京都.
Citation	春季大会講演集. I, 資源編, 11
Issue Date	1999-03
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/47409">https://hdl.handle.net/2115/47409</a>
Type	conference paper
File Information	MMIJ, 1999. pdf



# 伸びひずみに伴い減少する変形係数に基づいた構成方程式のせん断場 や厚肉円筒への応用

北大・工 藤井義明・石島洋二

## 1. はじめに

筆者らは岩石の圧縮試験において、軸ひずみ・周ひずみ・軸応力の軌跡が、これらを座標軸とする空間内のある平面上にはほぼ位置することを見出し、この知見から、伸びひずみに伴い減少する変形係数に基づいたゼィ性岩石の構成方程式を開発した(藤井・石島、1998)。この構成方程式は、主応力のうちの2つが等しい、すなわち、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ 、あるいは、 $\sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$  の応力状態に対応しており、定数を 4 つしか必要としないものの、ひずみ軟化を含む応力-ひずみの非線形挙動、圧縮強度が引張強度より大きい現象、封圧による圧縮強度の増加等を再現することができる。

ここでは、本構成方程式を修正し平面ひずみ状態に対応させる。導いた構成方程式によりせん断試験、外圧や内圧を受ける厚肉円筒等の問題を解き解を示す。

## 2. 平面ひずみ状態に対応した構成方程式

藤井・石島(1998)の(3)、(4)式を修正して、

$$\sigma_1 = A(\epsilon_1) \epsilon_1 + B \epsilon_2 \quad (1)$$

$$\sigma_2 = A(\epsilon_2) \epsilon_2 + B \epsilon_1 \quad (2)$$

とする。ここで、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  は最大・最小主応力、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  は最大・最小主ひずみ、 $B$  は後述の  $A$  より小さい値の定数、 $A(\epsilon)$  は伸びひずみに伴い減少する変形係数であり、以下の式で評価する。

$$A(\epsilon) = D [ \tan^{-1} \{ C(\epsilon / \epsilon_s + 1) \} + \pi / 2 ] + F \quad (3)$$

$$D = (A^2 - B^2) / (A \pi) \quad (4)$$

$$F = B^2 / A \quad (5)$$

ここで  $C$  は定数、 $A$  はヤング率と同程度の値の定数、 $\epsilon_s$  は限界伸びひずみ(最大荷重点における伸びひずみ)の-0.5 倍程度の値を持つ正の定数である。

## 3. せん断試験のシミュレーション

当初、ある等方圧状態からせん断ひずみだけを増加させてみたが、この条件では、ひずみ軟化が生じないことがわかった。そこで、実際のせん断試験と同じく、垂直圧を一定とし、垂直ひずみを許すこととした。計算の流れは以下のようである(座標系については図 1 を参照されたし)。

- (1) 初期垂直ひずみ  $\epsilon_{y0}$  を与える。 $\gamma_{xy}$  の初期値は 0 とする。
- (2)  $\sigma_x = 0$  と仮定して  $\epsilon_x$ 、ならびに、試験中一定に保つ  $\sigma_y$  を求める。
- (3)  $\gamma_{xy}$  に増分を与える。
- (4)  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $\gamma_{xy}$  から主ひずみ  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  とその角度  $\alpha$  を求める。

(5) 主ひずみから主応力を求める。

(6) 主応力とその角度から  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  を求める。

(7)  $\sigma_y$  が設定値になるように  $\epsilon_y$  を調節する。

(8)  $\sigma_y$  が所定の誤差範囲内に収まるまで手順(4)~(7)を繰り返す。

(9)  $\gamma_{xy}$  が所定の値になるまで手順(3)~(8)を繰り返す。

計算の結果得られたせん断ひずみ-せん断応力線図とせん断ひずみ-垂直ひずみ線図を図 1 に示す。せん断強度は垂直圧とともに増加している(a)。応力低下挙動は、垂直圧が大きくなるにつれ穏やかになっている。垂直ひずみには、せん断ずれに伴う浮き上がり挙動がみられる(b)。これらの特徴は、岩石のせん断試験でみられるものと一致している。

## 4. 外圧や内圧を受ける厚肉円筒

平面ひずみ状態において軸対称荷重を受ける厚肉円筒問題を、線要素を用いた有限要素法で解いた。外圧を 60 MPa とした場合(ケース 1)の応力分布の例を図 2 に示す。この岩盤の単軸圧縮強度は約 70 MPa であり、通常の弾塑性解と同様に孔壁周辺に圧縮破壊による塑性域が認められる。塑性域では半径方向の伸びひずみが発現している。

一方、内圧 90 MPa、外圧 20 MPa とした場合(ケース 2、図 3)には、孔壁近傍の接線応力が引張となっている領域で降伏が生じた。ひずみには特に大きな値は生じていない。

## 5. まとめ

ひずみに依存した変形係数に基づく構成方程式を修正し、平面ひずみ状態に対応させた。導いた構成方程式を応用してせん断試験をシミュレートした結果、垂直圧によるせん断強度の増加、せん断ずれに伴う浮き上がり挙動等を再現できることがわかった。

外圧のみを受ける厚肉円筒では、圧縮による塑性域の発現をシミュレートできること、また、外圧と内圧を受ける厚肉円筒では、引張による降伏域の発現をシミュレートできることを確認した。

## 参考文献

藤井義明・石島洋二(1998) : 半径方向の剛性の変化に注目した岩石の構成方程式、資源と素材、Vol. 114、No. 3, p. 169-174

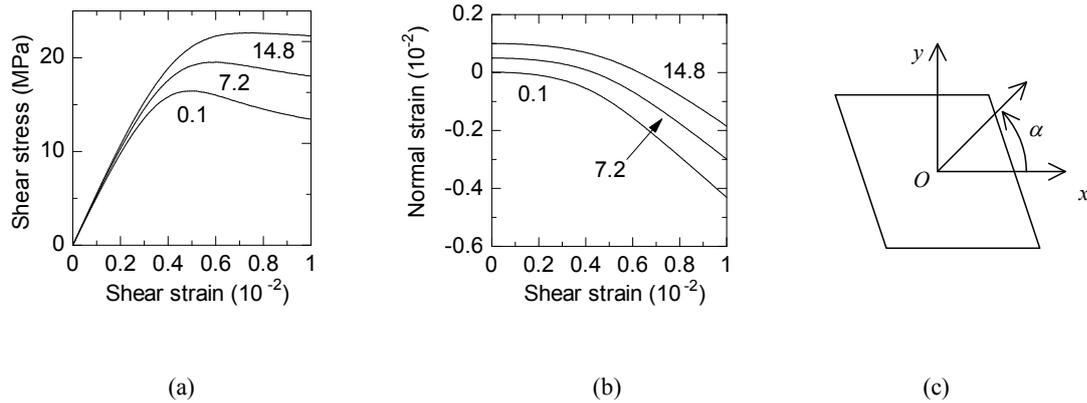


図 1 垂直応力 0.1 MPa、7.2 MPa、14.8 MPa を仮定したせん断試験のシミュレーション結果 ( $A = 20$  (GPa),  $B = 5$  (GPa),  $C = 1$ ,  $\varepsilon_s = 0.002$ )。 (a): せん断ひずみ-せん断応力線図、 (b): せん断ひずみ-垂直ひずみ線図、 (c): 座標系。

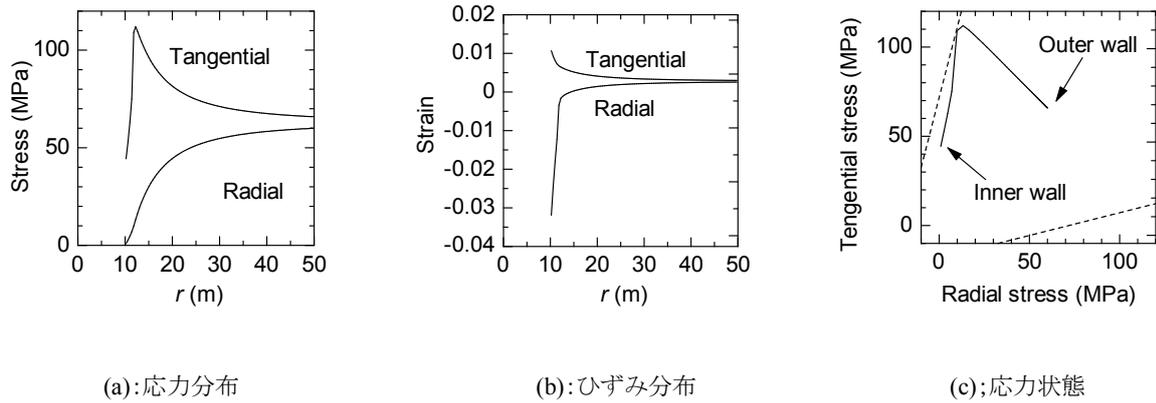


図 2 外圧 60 MPa を受ける内半径 10 m、外半径 50 m の厚肉円筒の応力解析結果 (ケース 1)。  $A = 20$  (GPa),  $B = 5$  (GPa),  $C = 1$ ,  $\varepsilon_s = 0.002$ 。 点線は破壊包絡線を示す。

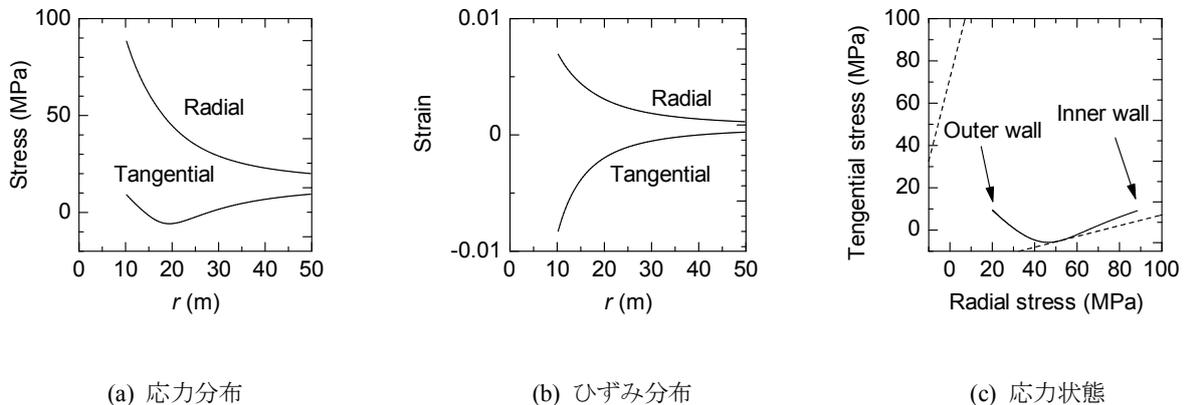


図 3 内圧 90 MPa、外圧 20 MPa を受ける内半径 10 m、外半径 50 m の厚肉円筒の応力解析結果 (ケース 2)。  $A = 20$  (GPa),  $B = 5$  (GPa),  $C = 1$ ,  $\varepsilon_s = 0.002$ 。 点線は破壊包絡線を示す。