

鹿島建設技術研究所 正員 青木 謙治
同 上 正員 大野 清
同 上 正員 酒井 学

1. はじめに

大規模な地下空洞の安定性を評価するにあたり、緩み領域内の岩盤の強度や応力状態の解明は重要な技術課題である。筆者らは岩盤空洞の安定解析に際し、岩盤の破壊後の強度～変形特性を把握し、緩み領域内の強度低下とそれに伴う応力の再配分過程を取り入れた解析手法について、実測結果と対比することにより実用化を図っている。今回岩石材料の破壊後の応力～ひずみ関係を把握するため、新たに高剛性三軸試験装置を製作し、地下発電所地点の数種の岩石材料を用いて残留強度～変形特性についての実験を行った。さらにこれらの実験により得られた強度～変形特性を用い、円形空洞モデルについて緩み領域の強度低下を考慮した解析を行った。

2. 高剛性三軸試験機の概要

本試験機の剛性は2700t/cmで、コンピュータ制御により、静水圧試験、 σ_1 一定せん断試験等、任意の試験を行うことができる。負荷装置は閉ループ型のサーボコントロール機能を有し、負荷能力は軸荷重 200t、側圧 500kg/cmで、軸荷重、側圧、軸変位、径方向変位、AE発生状況、超音波伝播速度の変化等を測定することができる（写真-1）。

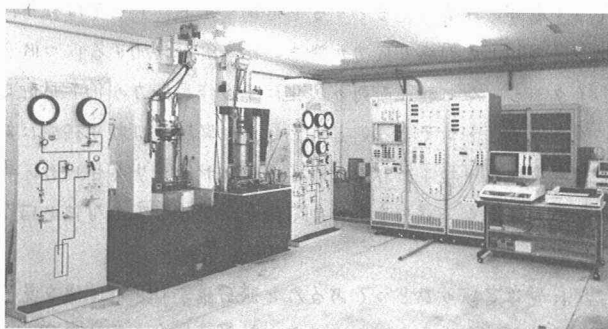


写真-1 高剛性三軸試験装置

3. 試験方法及び供試体

使用した供試体の諸元及び試験条件を表-1に示す。試験方法は静水圧状態で所定の拘束圧を載荷した後、軸ひずみ速度 0.02%/minでせん断を行ない、軸荷重、軸変位、径方向変位の測定した。軸変位の測定には加圧盤に取りつけたカンチレバー型変位計を、径方向変位の測定には供試体に直接取り付け付けたグリップ型変位計を用いた（図-1）。供試体の数は花崗閃緑岩25個、細粒砂岩25個で表-1、表-2にはそれぞれ試験結果の平均値を示した。

4. 試験結果

(1) 強度特性 表-2にピーク強度(C_p, ϕ_p)と残留強度(C_r, ϕ_r)の関係を示す。破壊後のCは1/5～1/7ほどに低下するが、 ϕ の低下はほとんど見られない。

(2) 強度低下時の変形係数 図-2,3に変形係数(D_0)と強度低下時の変形係数(D_n)の関係を示す。 D_n と D_0 の比率の傾向は岩種によって若干異なり、細粒砂岩はばらつきがやや大きい、拘束圧の増加と共にその比率は小さくなる傾向が見られる。

(3) 軸方向ひずみと径方向ひずみの増分比 軸方向ひずみ(ε_v)と径方向ひずみ(ε_h)の増分比は、ピー

表-1 供試体諸元

岩種	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)	単位体積重量(乾状) (g/cm ³)	有効間隙率 (%)	P波伝播速度(乾状) (km/sec)
花崗閃緑岩	1534	2.8	1~2	5.2
細粒砂岩	1015	2.75	2~4	4.7

試験時の拘束圧(c_p): 0.25, 5.0, 10.0 kg/cm²

表-2 ピーク強度と残留強度

岩種	ピーク強度		残留強度	
	C_p (kg/cm ²)	ϕ_p (°)	C_r (kg/cm ²)	ϕ_r (°)
花崗閃緑岩	270	54.6	38	54.0
細粒砂岩	213	53.6	45	54.3

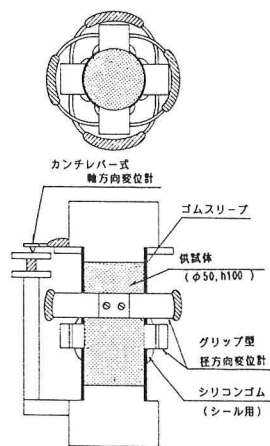


図-1 変位計取付図

ク強度発現までの領域、強度低下領域、残留強度発現領域の各領域でほぼ一様の傾向を示す（図-4）。強度低下領域、残留強度発現領域での $\Delta \varepsilon h / \Delta \varepsilon v$ と拘束圧の関係は図-5のようになり、これらが拘束圧に依存していることがわかる。

5. 解析

(1) 解析条件 上記の試験結果から花崗閃緑岩の物性を用い、 $\phi r = \phi p$ 、 $-Dn/D\sigma = 4$ を仮定して、円形空洞モデルについて C_r/C_p を変化させて解析を行い、完全弾塑性の場合 ($C_r/C_p = 1.0$) の解析結果と比較した。図-6に解析モデル、表-3に解析条件を示す。

(2) 解析結果 解析結果の一例を図-7及び図-8に示す。図-7は水平軸上の応力分布であり、図-8は壁面変位量と C_r/C_p の関係を示したものである。 C_r/C_p の値が低下すると共に緩み領域が拡大し、壁面変位量も大きくなることがわかる。

6. まとめ

剛性の高い三軸試験機を用いた硬岩についての軸ひずみ制御三軸試験の結果によると、いわゆるNegative Slopeの傾き (Dn)と、変形係数 ($D\sigma$)との間には一定の関係がみられ、 $Dn/D\sigma$ の比率は拘束圧の増大と共に小さくなる。破壊後のせん断強度は破壊前に比べ15~20%程度まで低下するが、内部摩擦角の値はほとんど変化しない。また、破壊後は供試体の内部破壊による体積変化により、みかけの径方向ひずみ (εh)が急激に増加するが、軸方向ひずみ (εv)と径方向ひずみの増分比は拘束圧の増大とともに小さくなる。

破壊後の強度低下を考慮した円形空洞の解析結果によると、強度低下を考慮しない場合に比べ壁面変位量が20%程度増加し、弾塑性境界の壁面からの距離も大きくなる。

現在、実際の空洞掘削時の周辺岩盤の緩み現象について構成岩石の破壊後の強度～変形特性を三軸試験により求め、これらを基に強度低下を考慮した解析を実施して、緩み領域の範囲、壁面変位を計算し、実測値との比較検討を実施中である。

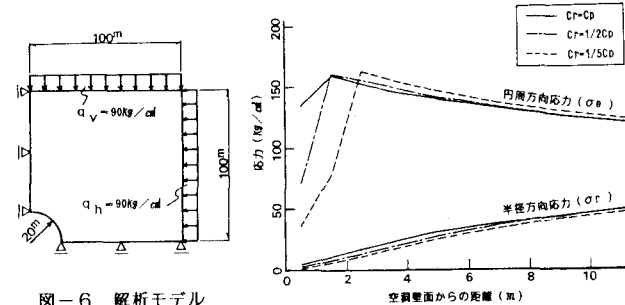


図-6 解析モデル

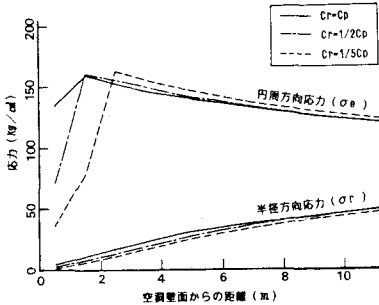


図-7 水平軸上の応力分布

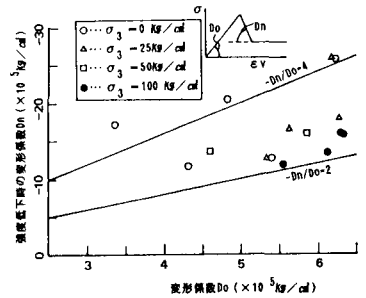


図-2 $D\sigma$ と Dn の関係（花崗閃緑岩）

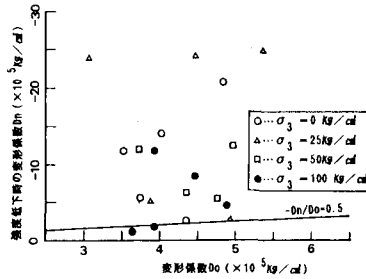


図-3 $D\sigma$ と Dn の関係（細粒砂岩）

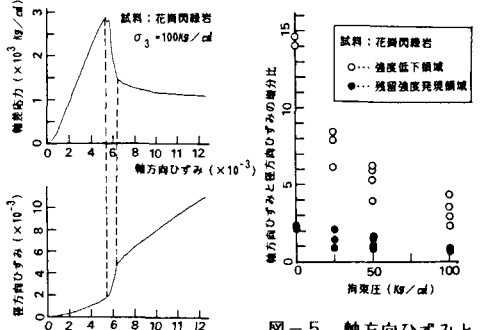


図-4 軸方向ひずみと径方向ひずみの増分比と拘束圧の関係

表-3 解析条件

CASE	通 考	ピーク強度 C_p (kg/cm^2)	残 留 強 度 C_r (kg/cm^2)	変形係数 $D\sigma$ (kg/cm^2)	ポアソン比 ν
1	完全弾塑性		C_p		$D_n = 6 \times 10^4$ (kg/cm^2)
2			$\frac{2}{3} C_p$		
3	ひずみ軟化	15	$\frac{1}{2} C_p$	55	$D_n = 2.4 \times 10^4$ (kg/cm^2)
4			$\frac{1}{3} C_p$		$\nu = 0.25$
5			$\frac{1}{5} C_p$		

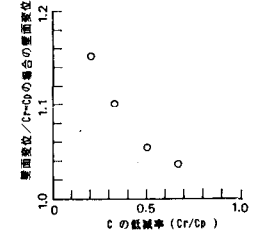


図-8 水平軸上の壁面変位