

(30) 亀裂及び節理系材料の三軸圧縮強度

埼玉大学 浜島良吉 ○(株)間組技術研究所 葦深守人 法政大学 山下清明

1. まえがき

岩盤には通常多くの亀裂及び節理が含まれ、多軸応力状態にある。本研究では亀裂及び節理を多数含む岩質材料について二軸、三軸試験をおこなひ、その強度変形特性についての考察をおこなった。こうした不連続性を有する岩質材料においては特に載荷方法、すなわち剛板載荷であるか等分布載荷であるかが強度、変形特性に大きく影響することが予想される。そこで本研究では剛板載荷と等分布載荷(フレッシャーバック使用)による影響をも考察した。

2. 実験結果

図-1は多亀裂性岩質材料(亀裂本数10本)に対する各種応力経路の比較である。本実験で用いた供試体は全て高土、幅、厚さがそれぞれ20 cm, 10 cm, 5 cmの石膏供試体である(石膏と水の重量比1.6)。亀裂のない場合の一軸圧縮強さ $\sigma_c = 130 \text{ kgf/cm}^2$ である。静水圧載荷において拘束圧 20 kgf/cm^2 では拘束圧のない場合に比し約3.2倍の軸圧縮(σ_y)強度である。亀裂のない場合の1.4倍に比し著しく拘束圧の影響が大であるが、拘束圧が σ_x のみの場合、拘束圧の影響は亀裂を有する場合と無い場合、ほぼ同程度となる。これは線形破壊力学からの予測と一致する。本研究では2次元的な節理を有する岩質材料の力学的特性と対照としているので以後、厚さ方向(σ_z)の拘束を零とした実験について考察する。

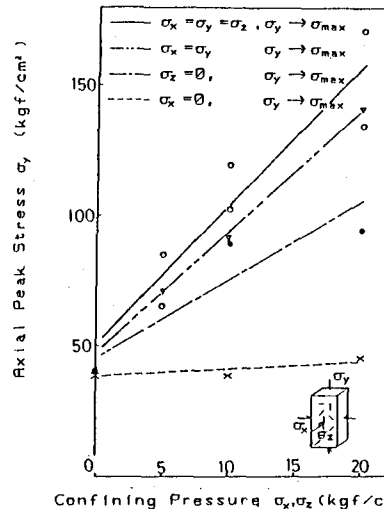


Fig.1
Influence of
Stress Path

図-2は節理本数による強度、及び初期弾性定数の変化である。本数が1本、2本の場合には強度のばらつきが著しく大きい。図-8(a)に示される応力-ひずみ曲線を見ると、節理面でのすべりが生じ、横方向の変位が顕著なものと、すべりが生ぜず、母材で破壊しているものとが存在する。これは図-3(a)で明らかにように節理角度 $\beta = 45^\circ$ 近傍は節理面でのすべりが生ずる臨界角度であり、強度が急変する(図-7の一面せん断試験結果から節理面のピーク摩擦角 $\phi_p = 37^\circ$ 、そして初期降伏応力に対する摩擦角 $\phi_0 = 28^\circ$ である)。

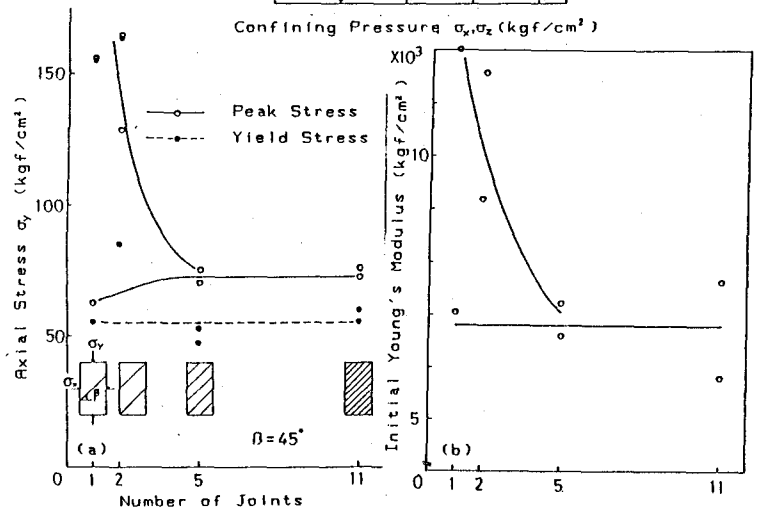


Fig.2 Variation of Number of Joints

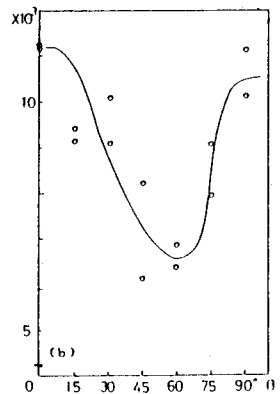
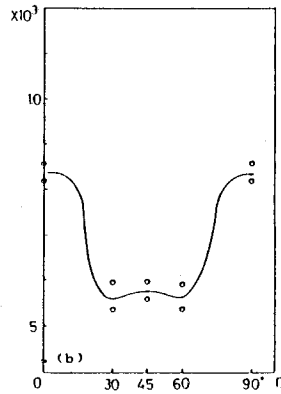
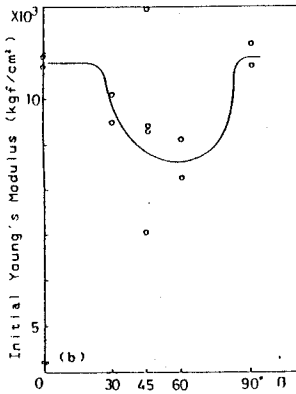
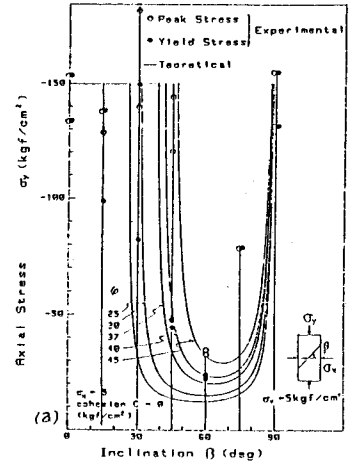
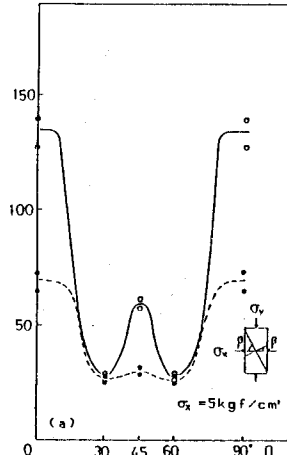
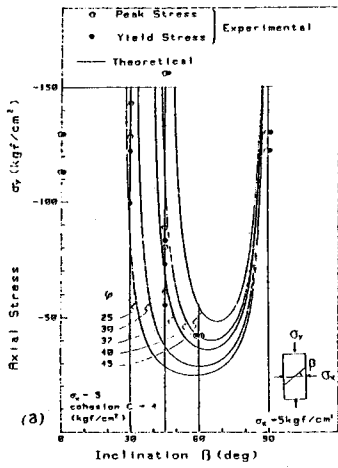


Fig. 3 One Joint Set with Cohesion

Fig. 4 Cross Joint Set with Cohesion

Fig. 5 Cohesionless One Joint Set

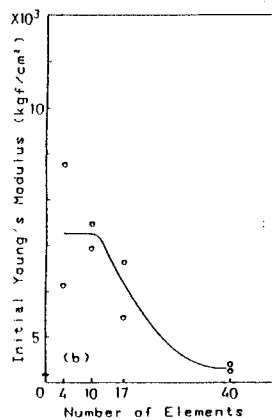
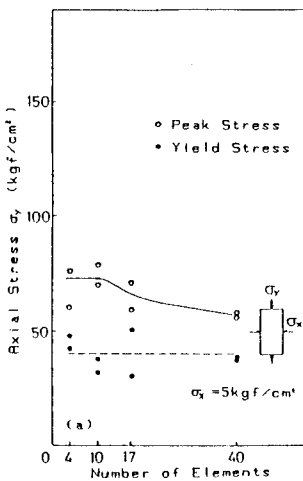


Fig. 6 Random Joint Set with Cohesion

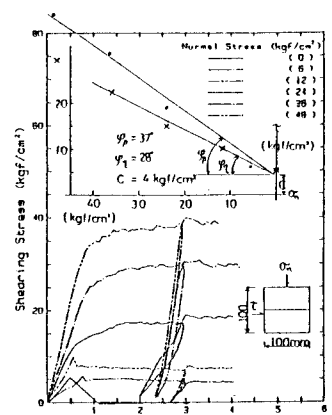


Fig. 7 Direct Shear Test with Weak Plane

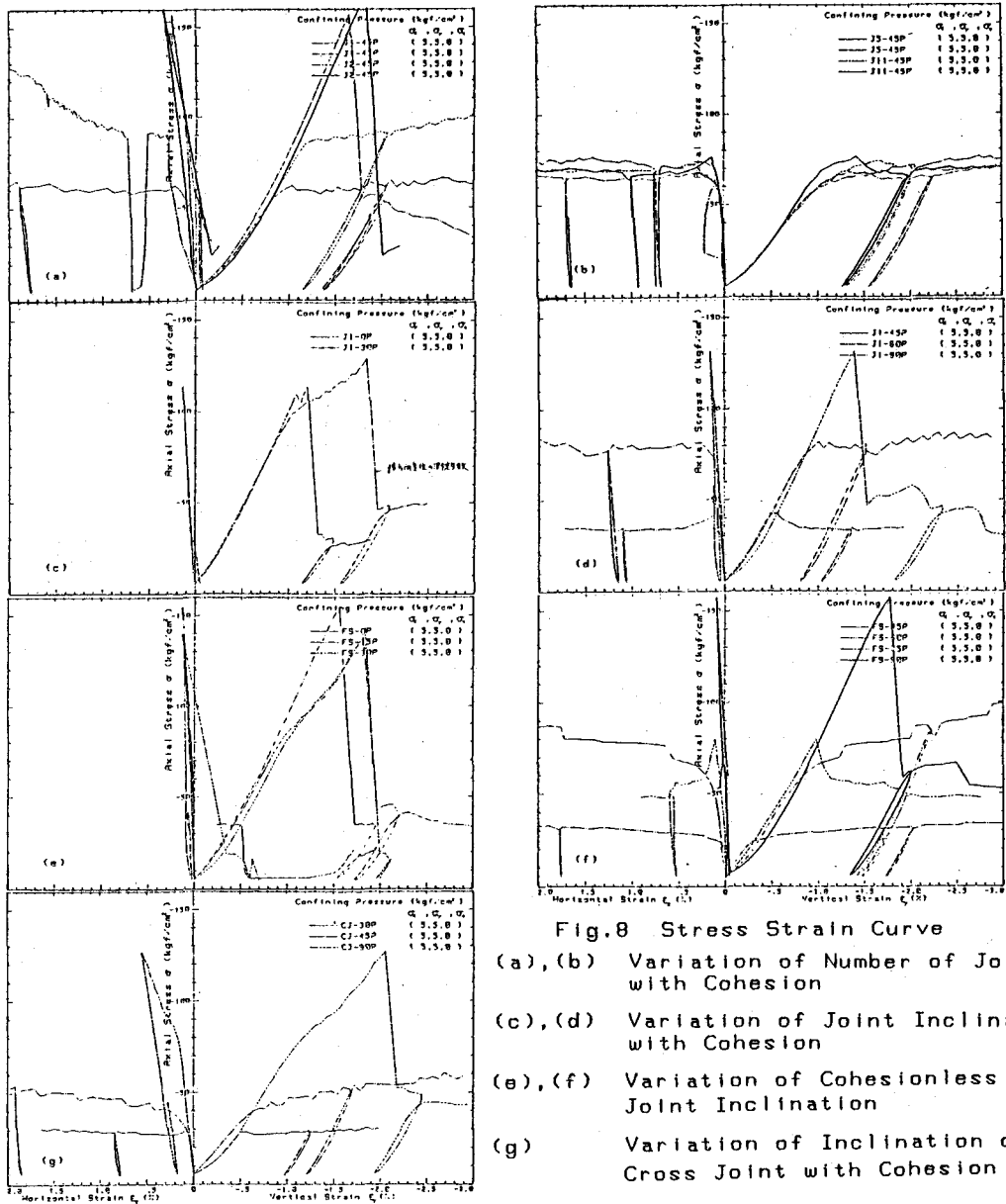


Fig.8 Stress Strain Curve

- (a),(b) Variation of Number of Joints with Cohesion
 (c),(d) Variation of Joint Inclination with Cohesion
 (e),(f) Variation of Cohesionless Joint Inclination
 (g) Variation of Inclination of Cross Joint with Cohesion

図-3(a)における理論値は弱面を有する場合の強度をクーロンの摩擦則から導き $\varphi = 25 \sim 45^\circ$ (粘着力 $C = 4 \text{ kgf/cm}^2$) について示したものである。図-5(a)は粘着力 $C = 0$ の場合、すなわち cut したものの切断面を有するものであり、切断面の摩擦角は一面せん断試験の結果から $\varphi_p = 39^\circ$ 、 $\varphi_n = 32^\circ$ である (図-5に示される供試体以外の節理を有する供試体は石膏供試体を切断し、母材より弱い強度の石膏 (石膏と水の重量比 1) で接着したものである)。

図で示されるように粘着力、及び摩擦角の変化により、強度の急変する節理角度が大きく変化することから実際の節理系岩盤における各種強度実験のばらつきの原因となる。ただし図-2に示されるように節理本数が少くなるに依りむしろ強度のばらつきは減少する。図-4は cross joint に対するものであり、節理角度 45° を軸に対称となる。図-3(b)、図-4(b)、図-5(b)は節理角度による初期弾性係数の変化でありピーク応力の変化よりも初期

降伏応力の变化に対応している。

図-8(a)~(g)は 図-2~5 の場合に対応する応力-ひずみ曲線であるが、すべりが生じない場合には節理の無い場合の強度変形特性とはほぼ同じになり、横方向へのひくらは母材のポアソン比 0.25 に対応した値となっている。これに対し、すべりによる強度低下を生じるものは横方向の変形が著しく大となる。こうした節理面のすべりによる横方向へのひくらは空洞掘削時のはらみ出し等に見られ、不連続性岩盤の解析はこうした等動を正確に把握しうるものでなくてはならない。又、図-8(c)の J1-30P (節理一本で節理角度 30° Pressure Bag による載荷) に見られるようにピーク強度以前に変形係数が変化するものがある。これは図-7 の節理を有する一面せん断試験結果に見られるようにピーク強度に達する以前に降伏を生じており $\phi_m = 28^\circ$ となっている。そのため図-3(a)の理論値からみてすべりにすべり領域に入っているといえよう。しかし、一面せん断試験結果に見られるように、初期降伏応力点からひずみ硬化を生じピーク応力値に対するため、ピーク応力に達する前に母材で破壊することになる。こうした力学現象を正確に解析するためには図-7 で示される節理面の有するせん断強度変形特性を正確に定量化する必要がある。ただし、拘束圧度の場合のピーク以後の softening の現象は節理面での引張破壊に基づくものであろう。

次に図-6、図-9 はランダムジョイント (要素数 4, 10, 17, 40) の場合の強度変形特性および剛板と Pressure Bag による拘束圧載荷の比較である。(RJ10P: ランダムジョイント 10 要素, Pressure Bag 載荷, RJ10R: 剛板載荷を意味する)。

要素数が少ない場合、節理面でのすべりのみならず要素の破壊が生じ、応力-ひずみ曲線はピーク応力後 softening 現象を示している。要素数が多くなり、節理面の数が増えるにつれ、節理面のみのすべりにより変形が進み、砂の場合の応力-ひずみ曲線の性状に似てくる。

図-9(b)は剛板載荷と Pressure Bag による拘束圧 ($\sigma_x = 5 \text{ kgf/cm}^2$) 載荷の比較であり、剛板載荷ではすべりによる変形を拘束することから強度が高めに出る傾向がある。

3. まとめ

節理を有する岩質材料の実験における強度変形の基本的特性を調べた。節理面の角度により強度が変化するところがあり、そのため強度に大きなばらつきを生じる。こうしたことは解析をする際にも注意が必要であり、解の不安定性を示すことがある。又、現場での実験結果を整理する場合、こうした節理系岩盤の基本的特性を充分認識しておくことが必要である。

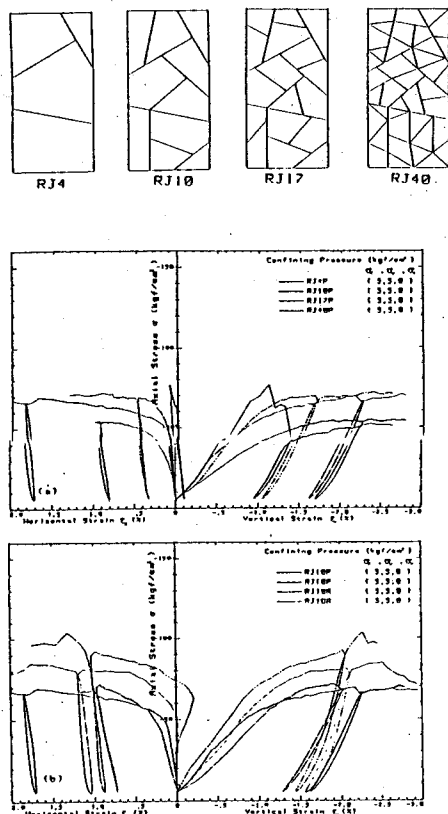


Fig.9 Stress Strain Curve

(a) Random Joints

(b) Comparison between Pressure Bag and Rigid Plate

(30) COMPRESSSIONAL STRENGTH OF CRACKED AND JOINTED ROCK MASS

by Ryokichi HAMAJIMA*
Morito KUSABUKA**
Kiyooki YAMASHITA***

*Saitama University
**Hazamagumi, Ltd.
***Hosei University

SUMMARY

Usually rock mass contains many cracks and joints, and is at a three-dimensional stress state. When the constitutive equation necessary for their analysis is determined based on experiments, the strength deformation characteristics differ according to size and shape of the specimen, and the loading method, i.e., rigid plate loading or uniform pressure loading. Particularly when the behaviors after the peak load are put in question, these factors have a large effect. Thus the constitutive equation determined based on experiments generally contains the material characteristics as well as the structural characteristics, and so it can not be said that this constitutive equation represents true material characteristics. Especially in case of rock mass, the constitutive equation is more complicated due to discontinuity such as cracks and joints the rock mass contains. But it is very difficult to obtain the constitutive equation which contains all such discontinuities. Especially in rock mass, the analysis which considers such discontinuities is necessary because sliding between joints and the progress of cracks have a large effect on the material and deformation characteristics. The authors have made clear the following by using a discontinuous analysis method.

- (1) Stress distribution on jointed anisotropic rock mass: There is a joint inclination where the stress distribution changes suddenly by sliding between joints.
- (2) Strength and deformation characteristics of cracked rock mass having several basic crack patterns: Stable and unstable fractures occur according to the progress of cracks.
- (3) Simulation to the direct shearing test on rock: In the analysis on a low confined stress state, cracks occur and show strain softening characteristics. Therefore the strain softening characteristics seen in rock mass are also attributed to the structural characteristics.

The constitutive equation used in the above analysis is based on the Coulomb's failure criterion, and the discontinuity of rock mass can be expressed comparatively well by such a simple constitutive equation. In this study, the following experiments were further made in order to make clear the fundamental characteristics of discontinuous rock mass.

- (1) Strength and deformation characteristics by various stress paths of cracked rock mass having basic crack patterns.
- (2) Changes of number and angle of joints, and further the strength and deformation characteristics of the rock mass having random joints.
- (3) Changes of the strength and deformation characteristics of discontinuous rock mass by rigid plate or uniform pressure loading.