

岩盤応力連続測定のための制御破砕载荷によるボーリング孔壁任意方位一面破砕の形成

岩崎好規 (財:地域 地盤 環境 研究所), 生山法裕 (同)

世良田章正 (Serata Geomechanics, Inc.)

まえがき: 地殻応力の連続測定を行うには、水圧あるいはスリーブ破砕法がある。両方法も、一度形成された破砕面上の応力の変化は測定できるが、主応力の方向の変化を含む地殻応力テンサーの変動は測定できない。このためには、異なった方向を有する少なくとも3つ以上の破砕面で測定する必要がある。田中豊は、1978年から1993年までの兵庫県南部地震前の六甲断層から約40kmの距離の定点における継続的な応力観測から、せん断応力比が増加傾向にあることを報告し(1994)、地震後、せん断応力比が減少したことを報告した(1998, 地震 II, Vol.50, pp201-208)。田中は3つの異なった方向を有するボーリング孔を用いて、応力の経時変化を測定した。1孔での応力変化を連続計測しようとするれば、1孔内で異なった3つの破砕面を造成する必要がある。今回発表する制御破砕法は、ボーリング孔壁に任意の方位角を有する破砕面を形成できる。

制御破砕法: 水圧やスリーブ破砕法による破砕面方向は孔周縁応力によって規制され、最大主応力の方向に一致しており、任意方向に破砕面を形成することはできない。これに対して新破砕法では、2個1組の半円筒摩擦シェルによる孔周縁応力の制御によって必要数の任意方向破砕面を造成できる。摩擦により孔壁に作用する力は壁面への法線応力と壁面への摩擦力との二つとなるが、制御破砕法は、シェルの継目ラインに引張り応力を集中作用せしめるのである。

摩擦シェルによる引張応力: 岩盤より剛性の大きなシェルを孔壁に固着させて内圧を载荷すると、シェルと岩盤孔壁間に摩擦力が発生し、岩盤周縁の膨張を阻止するように作用する。この作用は、载荷部周縁の引張応力を減少させると同時に、開口部継目ラインに著しい引張り応力の増大集中を起こさせる。この集中引張応力が岩盤の引張強度を越えるときに、その継目ラインに破砕面の発生が起こる。シェルと孔壁は固着され、摩擦力は常に孔壁に伝達される。両者の力学挙動の関係は、その剛性比によって影響される。FEM数値シミュレーションの結果を、応力と载荷圧の応力比(σ_θ/p)の関係で図-1と2に示した。図-1は、開口部を20度としたときの場合のシェルと岩盤の剛性比を変化させた場合である。シェルの剛性比($R_E=E_s/E_r$)を、 $R_E=0.001$, 1.0 , および 10.0 の3ケースに変化させた。 R_E が大きくなるにつれて開口端部に引張応力が集中することが分かる。図-2においては $R_E=1.0$ で開口部の幅を10度から4度に狭めた場合であり、開口幅を小さくすることで応力集中が起こることが理解できる。

任意破砕面の形成: 地殻主応力は水平面内にあるとして、その大きさを $P, Q(P>Q)$ とする。ボーリング孔周縁の初期接線応力は、 P 軸から時計廻りの角を α として

$$\sigma_{\theta(\alpha)} = P + Q - 2(P - Q)\cos(2\alpha)$$

と表される。任意角 α に破砕面を形成することを考えよう。破砕面形成のためには継目の方位を α に合わせ、継目における引張り応力 σ_t が、岩体の引張強度 T と $\sigma_{\theta(\alpha)}$ との和を越える必要がある。即ち

$$\sigma_{t=r=a} > \sigma_{\theta(\alpha)} + T = P + Q - 2(P - Q)\cos(2\alpha) + T$$

さらに、室内実験の破砕結果から、次のことが判明した。

実証実験: 半径 $a=30\text{mm}$ の円孔を有する石灰岩試料(引張り強度 3MPa)(60×60 , 厚さ 20cm)の外側から 2.07MPa の等方载荷 ($P=Q$) 状態として、摩擦シェルによる孔壁载荷により破砕面の形成実験を行った。このときの $\sigma_{\theta(\alpha)}=4.14\text{MPa}$ だから、 $\sigma_{t=r=a} > \sigma_{\theta(\alpha)} + T = 4.14 + 3 = 7.14(\text{MPa})$ である。内圧 $p=10\text{MPa}$ でシェルの継目に割目が見られた。継目部分に推定される引張り応力は、 20MPa であるので、これは、予想される必要引張り力の3倍程度大きな値である。これは、破砕面が形成されると、破砕面に作用していた引張り応力が再配分されるため、破砕面の連続的な形成が阻害されるからであると考えられる。応力計測のための必要な亀裂長さは、半径($=a$)の3-4倍程度だが、この亀裂先端位置($r=3a$)における引張り応力が、 $\sigma_{t=r=3a, \alpha} \geq \sigma_{\theta, \alpha} + T$ 以上である事が充分条件である。多数の室内テストを行った結果による実測によればこの条件を満たす内圧は、必要条件を与える内圧の3-6倍程度の载荷圧を要することが判明した。写-1に破砕事例を示した。現場実証実験は、カナ

ダのマニトバ州にある核廃棄物地下研究所の Underground Research Laboratory の深度 500m の花崗岩体で行われた。岩盤は花崗岩で、密度 $\rho=2.65$, ヤング率は $E=80\text{GPa}$, 引張強度 $=8\text{--}12\text{MPa}$ で、初期地圧は, $P_v=11\text{MPa}$ ということが分かっている。孔は水平ボーリングで坑口から約 20m の距離位置で実験が実施された。シェル載荷圧がほぼ $p=37.5\text{MPa}$ で、破砕面が形成された。このときの載荷圧は、初期地圧の約 3.4 倍であった。

結論; 半円筒型摩擦シェルの孔壁載荷による孔周縁応力はシェル継目部分で引張応力の集中により, 岩盤の孔壁に任意の方位角を有する破砕面の形成される。この技術の確立により, 単孔において地殻応力テンサーの変化のモニターが可能となった。

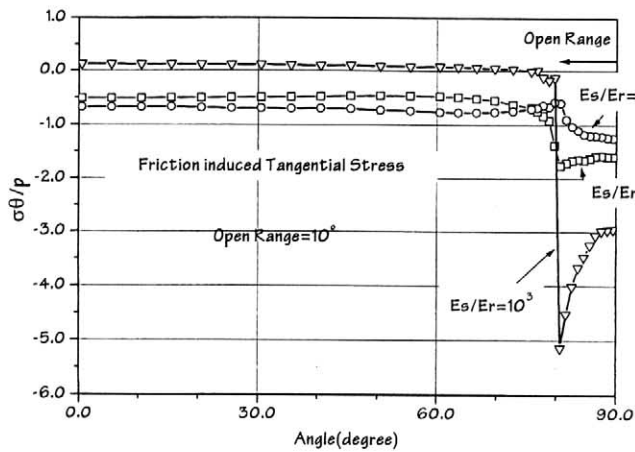


図-1 剛性比の違いによる接線応力分布図

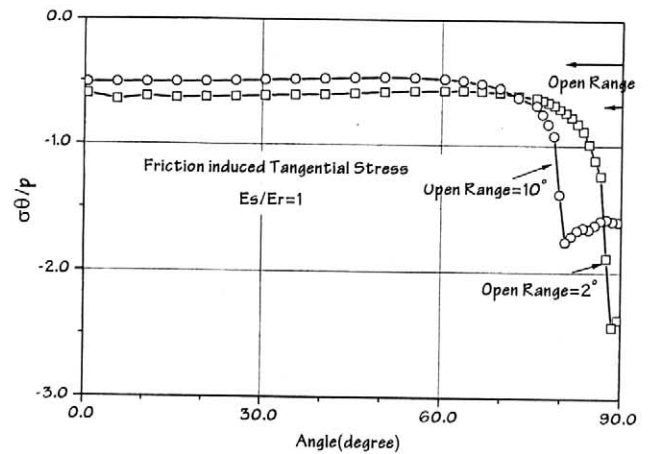
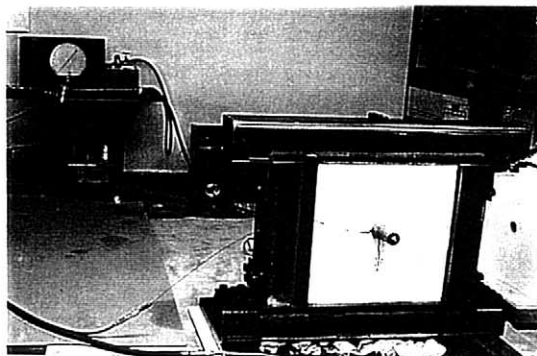
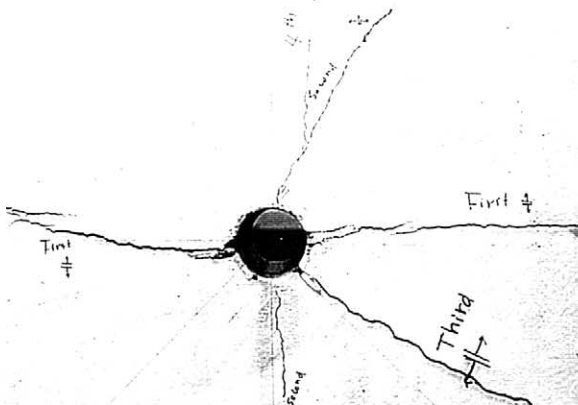


図-2 解放自由端面の違いによる接線応力分布図



Biaxial test stand for thin specimen.



Three single fracture planes created consecutively by single fracture probe.

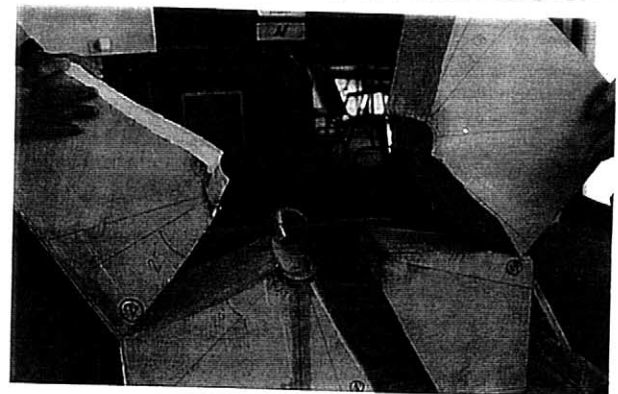


写真 -1 制御破砕によって形成された破砕面