

足利工業大学 正員 ○石橋 孝治
 東京大学大学院 学生員 田辺 俊郎

1. まえがき

岩質材料の破壊現象や亀裂の進展を追跡するために種々の計算モデルと解析方法が提案されている。電子計算機の進歩に伴う数値解析法の進歩には目覚ましいものがあり、中でも有限要素法は多方面で応用され独自の体系が形成されている。破壊現象を取扱う分野においても同様であるが、本来有限要素法は連続体の力学に基づいて確立された計算手法であり、亀裂の発生に伴う不連続性を考慮しようとする場合には新たな要素を導入するなどの工夫を必要とする。したがって、応力あるいはひずみの状態に応じて発生する局所的な破壊面や逐次進展する破壊面を追跡するためには、生じた不連続面での荷重条件や要素特性を逐次変化させることが必要となり、一連の計算は極めて複雑になる。この様な背景から川井により提案された剛体バネモデル(RBSM: Rigid Body Spring Model)を応用した極限解析を行なうことにより岩質材料の逐次破壊現象の追跡を試みた。

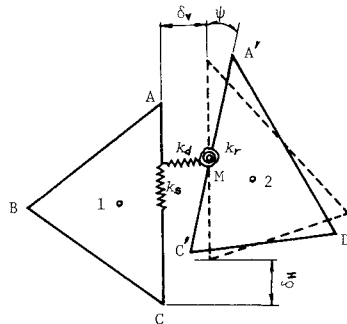
2. 計算モデル

RBSMは解析領域を有限個の微小要素に分割し、それ自身は剛体であると考え隣接要素とはその境界面上に連続的に分布するバネ系で連結され、これらのバネの変形によって固体の変形や内力の伝達が行なわれると仮定するモデルである。連結するバネ系は平面問題の場合図-1に示すように境界面への垂直相対変位、切線相対変位、相対回転変位に抵抗する k_n , k_s , k_r の3種類であるが、 k_r のバネ特性は k_n のそれを用いて表わされ、結局2種類のバネで構成される。各々のバネ定数は弾性域においては境界面におけるひずみの法線方向微分のみを考え差分近似することにより求められる。亀裂発生後(塑性域)においては採用する破壊規準を塑性ポテンシャル関数に等しくとり、塑性流れの法則に従って導出される。

3. 構成関係と解析仮定

材料の応力とひずみの関係は図-2に示すような折線で近似した関係を用いる。破壊規準としてはMohr-Coulombの条件を採用し、図-3に示すように亀裂の発生前後で異なる応力円包絡線を用いる。亀裂のパターンは境界面上の直応力が圧縮の領域で生ずるものと引張の領域で生ずるものとに2分し、前者をせん断亀裂、後者を引張亀裂とする。せん断亀裂を生じた場合には破壊規準の移行に伴うせん断応力($\tau_u - \tau_r$)のみを、引張亀裂を生じた場合には境界面上の全応力を配分する。塑性流れの法則は図-3におけるAB間には適用せずBD間に適用する。亀裂発生後の亀裂は発生時のパターンの性格を有し続けるものとし、開閉は起らないものとする。

4. 岩質材料の圧縮載荷実験



δ_v : RELATIVE NORMAL DISPLACEMENT
 δ_u : RELATIVE TANGENTIAL DISPLACEMENT
 ψ : RELATIVE ROTATIONAL ANGLE
 k_s : SPRING CONSTANT OF TANGENTIAL DIRECTION
 k_n : SPRING CONSTANT OF NORMAL DIRECTION
 k_r : SPRING CONSTANT OF ROTATIONAL DIRECTION

Fig. 1 RIGID BODY SPRING MODEL

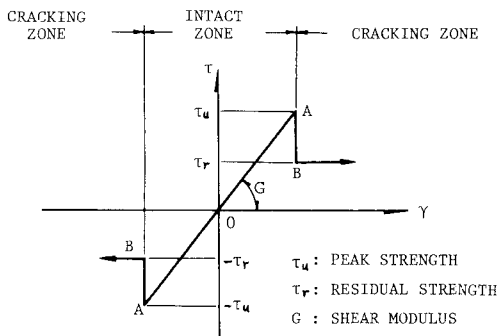


Fig. 2 RELATIONSHIP BETWEEN STRESS & STRAIN

岩質材料としてセメントモルタルを用いた $15 \times 15 \times 4$ の矩形供試体を製作し、中央に $\phi 18$ と $\phi 48$ の円孔を設けこれに一軸圧縮荷重を加え破壊に至るまでの亀裂の発生と伸長状況を観測計測した。図-4に各供試体の亀裂発生状況を示す。亀裂は円孔頂部および底部の引張応力集中部に最初に生ずるが、この亀裂はある長さまで伸長した後停留する。その後円孔の側壁の圧縮応力集中部に亀裂が発生し、荷重の増加に伴ない載荷面方向に伸長し、供試体の破壊に至る。亀裂発生荷重および破壊荷重を表-1に示す。

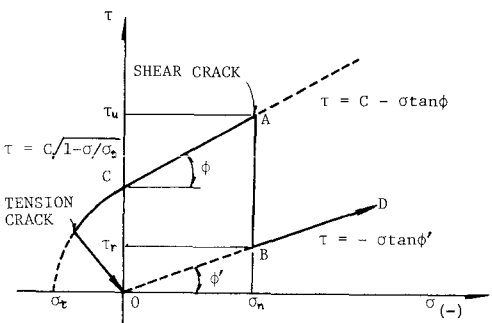


Fig. 3 FRACTURE CRITERION

5. 極限解析結果と考察

解析は供試体および載荷方向の対称性を考慮して供試体の $\frac{1}{4}$ 部分について行なう。表-2に計算に用いたセメントモルタルの力学的性質を示す。これらは材料試験により得られた値であるが、粘着力(C)については一軸圧縮強度と割裂引張強度を用いて算出した値である。解析においては載荷面の摩擦係数を0.53、亀裂発生前後における内部摩擦角と弾性係数の比をそれぞれ0.8、0.001としている。表-1に計算による亀裂発生荷重と破壊荷重を示す。計算による破壊はすべり線が供試体端部まで伸長し、マクロの破壊のメカニズムを形成した時点で定義している。同表の実験値と比べ約25%程度小さく評価されているが、実験における破壊荷重が最大耐力の性格であることを考慮すればほぼ一致しているものと考えられる。図-5に計算による破壊時の亀裂発生状況を示す。両供試体とも破壊を決定するすべり線は図-4に示した実験による亀裂発生状況とよく一致している。また、円孔頂部に生じる引張亀裂は破壊を決定するまでには伸長せず停留している。円孔側部に生じるせん断亀裂は供試体内部に最初に発生した後、載荷面と孔壁に向けて伸長してゆく。

6. まとめ

亀裂の閉合等改善すべき解析手法上の問題が残されているが、RBSMは岩質材料の破壊現象を追跡する計算モデルとして充分有効なものと考えられる。

<参考文献>

川井忠彦, 都井裕: 平面歪問題の離散化解析に対する新しい要素, 生産研究, Vol. 27, No. 4, 1977

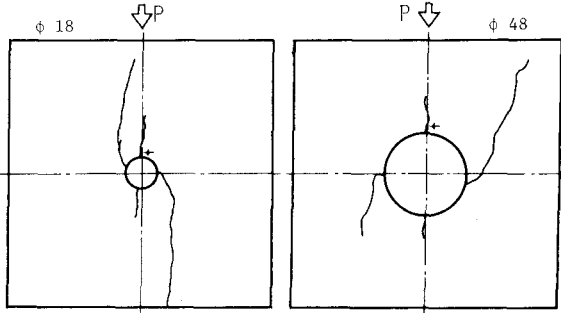


Fig. 4 CRACK PROPAGATION

Table-1 CRACKING LOAD & FRACURE LOAD

	CRACKING LOAD (ton)		FRACTURE LOAD (ton)	
	$\phi 18$	$\phi 48$	$\phi 18$	$\phi 48$
EXPERIMENT	5.0	3.5	20.1	14.5
CALCULATION	7.9	2.6	14.8	10.4

Table-2 MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIAL

σ_c (Kg/cm ²)	σ_t (Kg/cm ²)	C (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)	ν	ϕ (deg.)
420	30	82	2.85×10^5	0.26	54

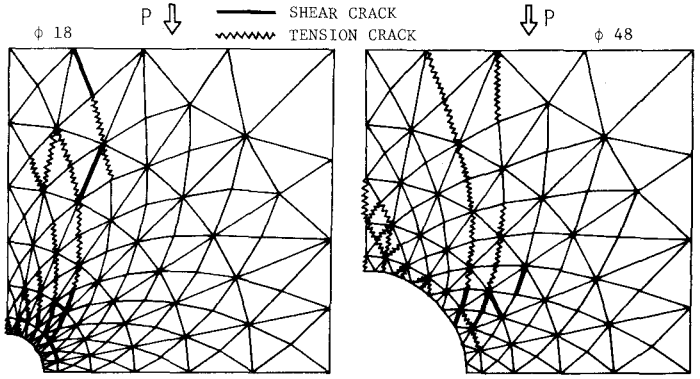


Fig. 5 SLIP LINE