III-189　破壊力学による岩石材料の応力拡大係数決定について

徳島大学工学部　正員　○藤井清司
徳島大学大学院　学生員　藤井重造

まえがき　岩石材料の内部にはき裂等大小様々の欠陥が存在しているが，その挙動は強度評価におけるばらつきと深い関連があると考えられている。そこで，こうしたき裂を取扱う手法として金属材料における破壊力学に着目し，特に線形破壊力学において強度定数として用いられている応力拡大係数（Stress Intensity Factor；K）の決定方法について検討を行ったものである。1つはASTM[1]で指定された平面ひずみ破壊靭性試験法に準じて開口形き裂変形に対するK値であるKIを決定する際，その結果に最も影響を与えると考えられる試験片の板厚効果を確めるものである。もう1つは，岩石材料において き裂変形として開口形とともに重要な，内面せん断形に対するK値であるKIIを決定するための試験法に関する試みである。これらの結果と，村上の簡便決定法[2]を用いたF.E.M.による結果を合わせて報告する。

試験片　KIを求めるための試験片の形状を図1に示す。これは片側に先を鋭くした線状の切欠きを入れた矩形単純梁で，ASTMの標準試験片に沿ったものである。寸法はW＝10cmで，a/Wの変化が与える影響についてはすでに確認しているので[3]，a＝5cmとし，厚さBを寸法比B/Wで0.25, 0.50, 0.75, 1.00の4種類とした。ここでB/W＝0.5が標準試験片寸法比である。KIIを求めるために著者らが開発した試験片の形状を図2に示す。これは片側切欠き梁試験片と同形状の切欠きを位置せん断面内で向かい合わせて入れたものであり，各寸法は図中に示すとうりで，寸法比のa/Wを0.6, 0.7, 0.8, 0.85の4種類とした。使用した材料は普通ポルトランドセメントで，細骨材の最大寸法が2.5mm，配合がC:S:W＝1:2:0.6のセメントモルタルである。これを各々の型枠に打設して24時間後に脱型し，10日間の水中養生の後3日間室温で乾燥して試験片を作製する。切欠きは所要の形状に加工した厚さ1mmの鋼板を打設前に型枠に設置することにより作製した。材料の力学特性については表1に示す。

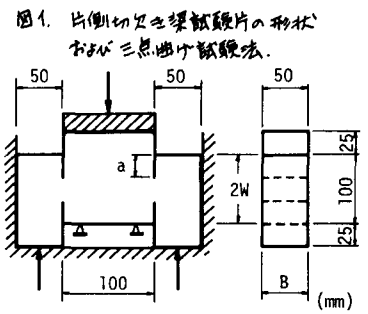

図1. 片側切欠き梁試験片の形状および三点曲げ試験法.

図2. KII用試験片の形状，寸法および試験法.

表1. 使用セメントモルタルの力学的特性.

	圧縮強度 σ_c (kg/cm²)	引張強度 σ_t (kg/cm²)	弾性係数 x10⁵ (kg/cm²)	ポアソン比 ν
C:S:W=1:2:0.6 材令2週間	317	30.3	1.88	0.20

試験方法　片側切欠き梁の試験は図1のような三点曲げ試験で，スパン長さS＝4W＝40cmとし，中央載荷点にはφ28mmの鋼棒を用いる。載荷にはスクリュージャッキを用い，荷重速度をほぼ一定（150kg/min）に保ち，その変化はロードセルで測定する。き裂開口端には，き裂開口変位量を測定するためにクリップ型変位計を設置する。また，梁中央部のたわみ量を同時に測定するためにカンチレバー型の変位計を用いる。両変位計とロードセルの出力は，X－Yレコーダーに記録させる。図2のKII用試験片については二面せん断試験とし，載荷には油圧ジャッキを用いるが，載荷時に横方向と支点の移動を防ぐために試験片を拘束する。今回の試験では図中に示すように，試験片下端の凹部に2個のカンチレバー型変位計を取りはけて，下側のき裂の載荷方向への変位量を取り出し，ロードセルの出力とともにX－Yレコーダーに記録させ，その2本の曲線の平均値を計算して荷重～変位曲線図を求めた。

KI, KIIの計算　K値の計算には本来き裂進展開始時の荷重値を用いるべきであるが，セメントモルタルのように不均質な材料ではその荷重値を明確に求める方法がないので，今回は各々の荷重～変位曲線より得られる最大荷重Pmを用いて計算する。図3と図4が各々の荷重～変位曲線の一例である。KI値の計算にはASTMの破壊靭性試験に使われている次式のような基礎方程式を用いる。

$$K_I=(P_F S/BW^{3/2})[2.9(a/W)^{1/2}-4.6(a/W)^{3/2}+21.8(a/W)^{5/2}-37.6(a/W)^{7/2}+38.7(a/W)^{9/2}]$$

一方，K_{II}値の計算には次のような式を用いた。

$$K_{II}=2[P_F/4B(W-a)]\sqrt{(W-a)/\pi c}$$

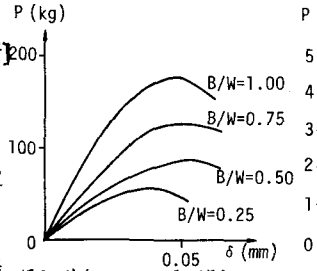

図3. 片側切欠き梁の荷重～き裂開口変位曲線

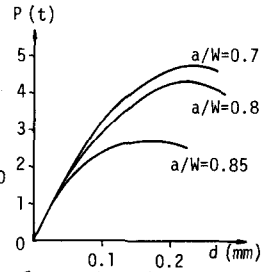

図4. 二面せん断試験の荷重～変位曲線

FEMによるK値の簡便決定法　応力拡大係数の簡便決定法が村上によって提案されている。この方法では，まず計算対象形状について境界条件を同じにして，き裂が存在しないと仮定したときの計算を行い，き裂先端に予定されている要素の応力σ_gを求める。次に，き裂先端近傍の要素分割を同じにして，き裂先端における要素の応力σ_{tip}を求める。これらの計算結果から得られる応力差$(\sigma_{tip}-\sigma_g)$がK値と関係すると考える。$(\sigma_{tip}-\sigma_g)$とK値との関係は，厳密解が求まっている問題を有限要素法で解くことにより求められる。すなわち，2つの問題A，Bを考えるとき，き裂先端の分割をそろえることにより二つのK値の比は$(\sigma_{tip}-\sigma_g)_B/(\sigma_{tip}-\sigma_g)_A$で与えられると考え，問題Aの厳密解が求まっていれば，この値を基準として種々のK値が求められる。

試験結果　片側切欠き梁の三点曲げ試験の結果を，板厚比B/Wで整理したのが図5である。これをみると，板厚比が大きくなるに従ってKIの値が全ての板厚に対する一定の仮想値 $K_I=57.5\ kg\cdot cm^{-3/2}$ に収束する傾向がわかる。しかも，K_I自体のばらつきもかなり減少していることより，き裂材の破壊という現象が事実上一定のK値で起こると考えられる。これについては，B/W＝4.0というかなり板厚比の大きい中央き裂入り四柱試験片で圧裂引張試験をした場合にも，この傾向に一致する結果が得られている(3)。また，試験片の破断面を観察すると，板厚比の小さい薄い試験片では破面が引張方向に対して傾斜しており，応力状態が実質的にK平面応力状態であると考えられる。他方，板厚比の大きい厚い試験片では破面が引張方向に対して直角な分離形をしており，中央部では平面ひずみの条件で変形したものと考えられる。二面せん断試験の結果をa/Wで整理したのが図6である。もろい性材料では純粋なせん断破壊を再現することはかなり難しいものであり，今回の試験でもばらつきを生じたが，FEM解析によれば，切欠き間において最大せん断応力はほぼ仮想せん断面に沿って分布しており，今回用いた試験片で形状的には問題はないものと思われる。そして平均して$K_{II}=100\ kg\cdot cm^{-3/2}$，$\tau_F=73\ kg/cm^2$前後の結果が得られ，この$\tau_F$の値を$\tau=\sqrt{\sigma_t\cdot\sigma_c/2}=70\ kg/cm^2$と比較すると，試験の結果がかなりよかったものであると考えられる。簡便法による計算結果を図7に示す。これはB/W＝0.5として求めたもので，K_I値の場合その平均値57.5 $kg\cdot cm^{-3/2}$は，同様の寸法比の片側切欠き梁の三点曲げ試験より得られた$K_I=57.1\ kg\cdot cm^{-3/2}$と比較して良い値と思われる。$K_{II}$の場合は試験結果より大きめの値が得られた。

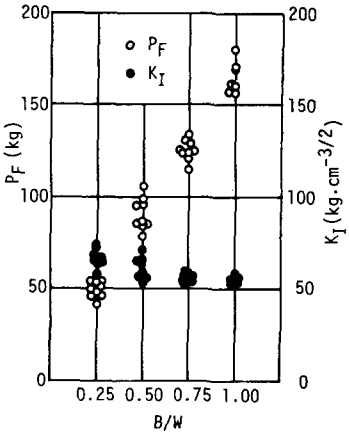

図5. 片側切欠き梁の板厚比の変化に対するP_FとK_Iの比較

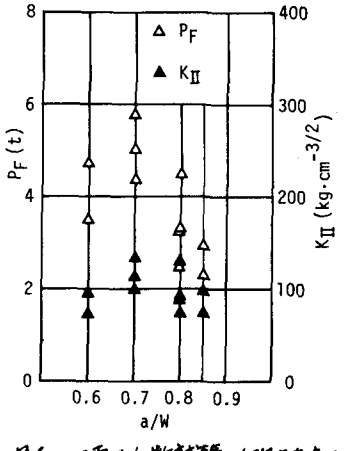

図6. 二面せん断試験の切欠き寸法比に対するP_FとK_{II}の比較

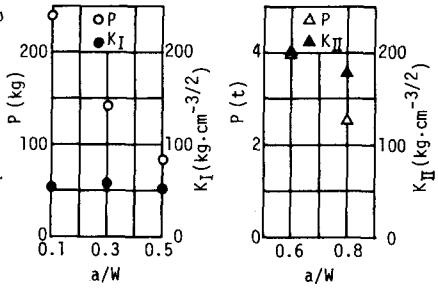

図7. 簡便決定法より求めたK_IおよびK_{II}の値

*参考文献 (1) ASTM, E399-70T, 1970.
(2) 村上；機論，42-360(昭51-8)，2305.
(3) 藤井ら；岩石材料への破壊力学の適用に関する考察，第29回中国学術講演，1977.