

治山構造材料の実用的な強度評価について

林業試験場九州支場 陶山正憲

1 はじめに

コンクリート、岩石、木材などのような治山・砂防構造材料は、材質的にはき裂または力学的なき裂と等価と見なされる各種の欠陥を含み、その破壊は“割れ”の形態をとるといって、ぜい性不均質材料である。しかしながら、従来このような材料の強度評価にも、便宜上、公称応力基準が一般に採用されている。その結果、得られた強度値はかなりばらつくのが普通であり、これを材料定数として実用化するには若干の矛盾点が指摘される。すなわち、き裂材の強度は一般に、き裂の寸法、形状、方向、位置、分布などによって変わるものと考えられるが、公称応力基準では、このような材料中の欠陥を正確には評価できない。このようなき裂材強度の評価には、現在、破壊力学的パラメータの使用が最も有効であると考えられる。

本報では、破壊力学における破壊靱性と、材料力学における降伏点強度との比較、破壊靱性試験の実用的な方法の提案、各種材料の破壊靱性試験の結果の要約などを行い、これらに対して破壊力学的検討を加える。

2 材料強度のパラメータとしての破壊靱性

破壊力学は、欠陥の存在あるいは発生が危惧される材料・構造物を強度上安全に使用するための工学的な方法論であり、その適用範囲は広く、特にぜい性材料の破壊強度の解析には、線形破壊力学が極めて有効なアプローチである。破壊力学では、き裂の進展にともなう弾性エネルギーの解放率を考慮することと、き裂先端近傍の応力場の強さの限界値をとることとは等価であることを示し、この両条件を支配する単一のパラメータとして、応力拡大係数 (K) またはエネルギー解放率 ($G \approx K^2/E$) を導入している。この K や G は、材料力学における応力 (σ) やひずみ (ϵ) に相当し、いずれも力学的環境を表わすパラメータとなるので、 K や G を媒介として材料強度と構造物強度を対応づけることができる。

さて、応力拡大係数には、き裂および対象物体の形状、寸法、位置、方向、分布などのすべての力学的境界条件を含ませることができるので、この K ひとつを

決めれば、任意物体の任意き裂の力学的条件を一義的に決定することができる。つまり、き裂の先端から発生する破壊は、き裂のごく周辺の応力だけに支配され、その破壊の発生、進行は K の関数になると考えるのである。したがって、連続体とみなされる物体であれば、いかなる材料にも破壊力学の適用が基本的には可能となるので、コンクリート、岩石、木材などへの適用性が十分考えられるわけである。

応力拡大係数の等しい二つのクラックが、その先端周辺において小規模降伏状態であれば、両者の弾性応力分布は合同になる。したがって、一方である現象が起きれば、他方でも同じ現象が起きるはずである。この考え方に基づいたぜい性破壊発生条件式は $K \geq K_c$ となり、エネルギー・バランスの条件式は $G \geq G_c$ となる。ここで K_c および G_c は、ともに破壊靱性である。なお、上記の両条件式は G と K が一対一対応しているのと同様である。この破壊靱性値は、破壊発生時の荷重とそのときのき裂寸法から算出する。したがって、破壊力学を治山構造材料に適用する場合には、まず破壊靱性試験を行う必要がある。

3 破壊靱性試験の方法

コンクリート、岩石、木材のようなぜい性不均質材料に対する破壊靱性試験法はまだ確立されていないので、既に筆者が採用し、その適用性が認められた試験法について、以下にその要点を示す。

1) 曲げによる破壊靱性試験の方法

これは ASTM 規準の平面ひずみ破壊靱性試験法¹⁾ に準拠した方法で、図-1 に示す 3 点曲げ片側切欠き梁による曲げ試験²⁾ である。試験片の形状は高さ W 、板厚 B 、切欠き長さ a 、スパン長 S の矩形で、標準試験片の寸法は $a = B = 0.45 W \sim 0.55 W$ 、 $S = 4 W$ である。

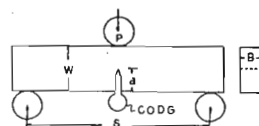


図-1 3点曲げ破壊靱性試験

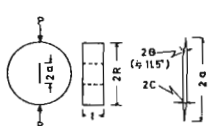


図-2 集中圧縮破壊靱性試験

この破壊靱性試験では、破壊開始荷重 Pq を荷重～き裂開口変位量($P\sim S$)曲線から求めることになっている。しかしながら、この Pq の判定は一般に煩雑であり、実用的には破壊時の荷重 P_f を用いて、これに対する破壊靱性値 K_{If} を次の式で計算する。

$$K_{I1} = 6 Y M \sqrt{a} / B W^2 \quad (1)$$

$$M = P S / W \quad (2)$$

$$Y = 1.93 - 3.07 (a/W) + 14.53 (a/W)^2 - 2.511 (a/W)^3 + 2.580 (a/W)^4 \quad (3)$$

2) 圧縮による破壊靱性試験の方法

これは著者らの開発した試験法³⁾で、図-2に示す中央スリット入り円板を用いた圧縮による破壊試験である。試験片の形状は、直径 $2R$ 、板厚 t の円板中心に長さ $2a$ のスリットを有する円板で、その寸法は、 $a=R/5\sim 3R/10$ 、 $t=2R/5\sim 2R/3$ である。

中央スリット入り円板が、スリット線に沿って集中圧縮荷重を受ける場合、破壊時の荷重 P_f に対する破壊靱性値 K_{If} は次の式で計算する。

$$K_{I1} = F P \sqrt{a/\pi} / R t \quad (4)$$

$$F = 1.0 + 1.5 (a/R)^2 \quad (5)$$

4 試験結果の要約と考察

欠陥や試験片の寸法を変えると、荷重(P)基準の材料の強度は当然変わるが、応力拡大係数(K)基準強度ではいかになるかを確認するため、筆者はすでに各種の治山構造材料について、幾多の破壊靱性試験を行い、このような材料の破壊靱性の K 依存性について種々の検討を行った^{2)~4)}。その結果、材料定数としての強度値としては、 P 基準強度より K 基準強度の方が格段に優れていることが証明されたので、以下にセメント硬化体、岩石および木材の試験結果を要約する。

まず、セメント硬化体は、表-1に示すモルタル、

コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートである。

次に、岩石は比較的等方均質な中粒の秋芳大理石(粒径 $0.01\sim 0.10mm$)で、ヤング率 $E=7.5\times 10^5$ (kg/cm^2)、ポアソン比 $\nu=0.33$ である。

また、木材は実生アカマツ(樹齢推定50年、胸高直径42cm)を伐倒・玉切りした丸太から木取りした心去角材で、試験時の含水率は12.2%、比重0.44である。

これらの材料の破壊靱性値 K_{If} を、従来の JIS 試験による圧縮強度 σ_c 、引張強度 σ_t 、曲げ強度 σ_b とともに表-2に要約した。結果として K_{If} 値は、明らかにセメント硬化体<大理石<アカマツとなり、セメント硬化体では、モルタル<コンクリート<鋼繊維補強コンクリートの傾向がうかがわれる。なお、 K_{If} 値のばらつきが σ に比して相当小さいので、実用的な材料定数としての破壊靱性値の有効性が十分認められる。

引用文献

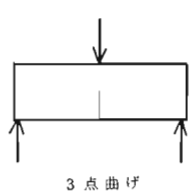

- 1) ASTM Committee: E 399-74, 1974
- 2) 陶山正徳: 新砂防, 101, 9~16, 1976
- 3) 北川英夫ら: 19回材研連講, 157~158, 1975
- 4) 陶山正徳: 日林九支研論, 33, 301~302, 1980

表-1 セメント硬化体の配合

	重量配合化				使用骨材種	
	水%	細骨材	粗骨材	鋼繊維	細骨材	粗骨材
モルタル	60	2.0	---	---	標準砂	---
	52	2.5	---	---	川砂	---
コンクリート	60	2.1	2.1	---	標準砂	川砂利
鋼繊維補強コンクリート	60	3.0	3.0	0.26	川砂	川砂利

(注) 鋼繊維の種類は ISF-25

表-2 材料の破壊靱性値と各種強度

破壊じん性試験		モルタル	コンクリート	鋼繊維補強コンクリート	岩石(秋芳大理石)	木材(アカマツ)
 <p>3点曲げ</p>	K_{IF} ($kg/cm^{3/2}$)	48.8	56.0	-----	115.0	354.0
	σ_c (kg/cm^2)	455.0	-----	-----	1100.0	-----
	σ_t (kg/cm^2)	-----	-----	-----	89.0	-----
	σ_b (kg/cm^2)	39.7	40.3	-----	153.3	309.0
	試験片寸法	W(cm)	8.0	8.0	-----	4.0
	B(cm)	4.0	4.0	-----	2.0	4.0
	a(cm)	4.0	4.0	-----	2.0	4.0
 <p>集中圧縮</p>	K_{IF} ($kg/cm^{3/2}$)	52.7	54.8	57.6	95.0	-----
	σ_c (kg/cm^2)	396.4	309.8	271.5	1100.0	-----
	σ_t (kg/cm^2)	32.6	31.3	31.6	89.0	-----
	σ_b (kg/cm^2)	-----	32.2	44.9	153.3	-----
	試験片寸法	D(cm)	20.0	20.0	20.0	10.0
	t(cm)	6.7	6.7	6.7	2.0	-----
	a(cm)	4.0	4.0	4.0	3.0	-----