

An Estimation Method for Mode I Fracture Toughness K_{Ic} of Rocks

Jun Liu¹, Hui Sun²

¹Key of Laboratory for RC and PRC Structure of Education Ministry, Southeast University, Nanjing Jiangsu

²School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: 653867489@qq.com

Received: Jan. 7th, 2018; accepted: Jan. 21st, 2018; published: Jan. 29th, 2018

Abstract

The mode I fracture toughness K_{Ic} of rocks is a mechanical properties index which characterizes the resistance of instability expansion of inner cracks, namely brittle fracture damages of materials, but it is usually difficult to obtain this parameter in laboratory test. Therefore, based on the equivalent principle of uniaxial tensile strength of rocks, combining the relationship between mode I fracture toughness K_{Ic} and tensile strength of rocks with the relationship between experience parameter m_i of Hoek-Brown (H-B) strength criterion and uniaxial compressive, tensile strength of rocks, a new estimation method of mode I fracture toughness K_{Ic} of rocks based on uniaxial compressive strength and experience parameter m_i of rocks is proposed. Lastly, the reliability of the correlation is validated by some related testing results. When the basic testing data are unavailable, the proposed correlation can provide a preliminary estimation value of mode I fracture toughness K_{Ic} by the uniaxial compressive strength of rocks.

Keywords

Rocks, Mode I Fracture Toughness, Uniaxial Compressive and Tensile Strength, Experience Parameter m_i , Correlations

一种岩石I型断裂韧度 K_{Ic} 估算方法

刘 军¹, 孙 辉²

¹东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 江苏 南京

²东南大学土木工程学院, 江苏 南京

Email: 653867489@qq.com

收稿日期: 2018年1月7日; 录用日期: 2018年1月21日; 发布日期: 2018年1月29日

文章引用: 刘军, 孙辉. 一种岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 估算方法[J]. 土木工程, 2018, 7(1): 74-81.

DOI: 10.12677/hjce.2018.71010

摘要

岩石的I型断裂韧度 K_{Ic} 是表征岩石材料抵抗裂纹失稳扩展即脆断破坏的力学性能指标,而在实验室开展该参数的测试工作往往比较困难。为此,本文基于岩石单轴抗拉强度等效的原则,结合岩石I型断裂韧度与单轴抗拉强度、岩石Hoek-Brown (H-B)强度准则的经验参数 m_i 与单轴抗压和抗拉强度之间的相关关系,提出以岩石单轴抗压强度和参数 m_i 估算岩石I型断裂韧度 K_{Ic} 的经验公式。最后,通过相关试验成果验证了经验公式的可靠性。在缺乏必要的试验数据时,所建议的经验关系式可用于通过岩石单轴抗压强度对I型断裂韧度的初步估算。

关键词

岩石, I型断裂韧度, 单轴抗压、抗拉强度, 经验参数 m_i , 相关关系

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

断裂韧度是表征材料,如:岩石、混凝土等抵抗裂纹失稳扩展即脆断破坏的力学性能指标。脆性和半脆性岩体断裂是地壳表层广泛存在的地质构造,也是工程地质、探矿工程等研究的重要对象。长期以来,在岩体地下工程、页岩气开采、CO₂地质封存等过程中广泛采用的工程爆破和水压劈裂等技术,关于岩石断裂韧度的评价显得愈加重要。朱传云[1]指出预裂爆破装药密度与断裂韧度之间存在必然联系,并由岩石I型(张开型)断裂韧度估算预裂爆破的线装药密度;陈建国等[2]指出岩石断裂韧度对于定量评价页岩储层可压裂性具有重要的意义并进行了室内断裂韧度测试,从而建立断裂韧度与地球物理测井数据之间的直接联系;陈治喜等[3]为对水力压裂设计中裂缝的几何形态进行有效预测,提出利用液体压力对空心厚壁圆柱形岩样进行压裂而测定岩石断裂韧性的简单方法;水工大坝“无坝不裂”的铁律,对拟建混凝土大坝的材料抗裂、防裂提出一定的要求,并开展这方面的研究工作[4]。研究表明:岩石类脆性材料的破坏,其根本原因之一在于岩石内部的微裂隙向前延伸扩展,而引起微裂隙向前延伸扩展的根本原因在于其受到了拉应力的作用[2]。Erdogan和Sih关于脆性材料的复合型裂纹失稳扩展问题,提出了最大周向拉应力理论,指出当周向拉应力达到临界值 K_{Ic} 时断裂失稳扩展[5];Whittaker等[6]从已有试验数据得出,最大主应力理论最能解释岩石的断裂特性。对于地下工程中的许多结构来说,常常处于压剪复合应力状态下[7],并且复合型裂纹扩展中的压剪断裂可以等效转化为张开型裂纹扩展问题,如李世愚、潘别桐等关于I-II型复合断裂判据的推导[8][9],而滑移型(II型)和撕开型(III型)裂纹扩展实质是裂纹I型起裂后在扩展过程中产生的次生现象[10]。因此,反映材料抵抗张开型裂纹扩展的I型断裂韧度 K_{Ic} 的测试越来越受到广大科研工作者的研究与关注。

岩石材料断裂韧度参数的测试和断裂力学试验技术的研究是工程断裂力学的重要组成部分[11]。目前,ISRM对岩石断裂韧度 K_{Ic} 的测试推荐三点弯曲、短圆棒、巴西圆盘3种测试方法。但这些试验的开展需要专用试验设备,并且已有经验表明试件制备时间较长,难以获得与规定的公差相一致的切口尺寸,采用不同测试方法和试样类型获得的I型断裂韧度值往往存在较大差异,使这一参数的准确获得与合理评价带来诸多不便。此外,Colak等[12]建立了目前运用最为广泛的岩石通用屈服准则——Hoek-Brown

(H-B)岩体强度准则中的参数 m_i 与岩石间接拉伸强度 σ_{IB} 、单轴抗压强度 σ_c 之间的经验关系式,并且E. Hoek等结合大量工程地质人员来自实验室和工程实践的经验积累,提出了比较全面且可以覆盖多种岩石类型(包括岩石质地和矿物成分)的参数 m_i 取值方法,详见文献[13]。故相对而言,岩石经验参数 m_i 和抗压强度 σ_c 的获取比较容易,并且对于岩石单轴抗压强度的测试已形成国际统一标准。

因此,探讨岩石的I型断裂韧度与其强度参数的相关性具有十分重要的理论和工程意义。本文开展岩石I型断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度、经验参数 m_i 与抗拉及抗压强度的关系分析,提出结合H-B强度准则中的参数 m_i ,由岩石单轴抗压强度估算取值较为困难的I型断裂韧度 K_{Ic} 的简单实用方法。相较以往类似研究成果,本文因结合了岩石的经验参数 m_i ,考虑了岩石类型对其断裂韧度的影响,使拟合得到的经验公式更具有一般性。最后通过与相关其他试验成果的比较,验证了公式的可靠性。在缺乏必要的试验数据时,所建议的经验关系式可用于通过岩石的单轴抗压强度对I型断裂韧度的初步估算。

2. 岩石I型断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度的关系分析

邓华锋等[10]对于岩石纯I型断裂问题运用断裂力学中的最大周向拉应力理论,从理论上分析了岩石I型断裂韧度与抗拉强度的相关性,其表达式如下:

$$K_{Ic} = \sigma_t \sqrt{2\pi r} \quad (1)$$

式中, K_{Ic} 为岩石的I型断裂韧度,MPa·m^{1/2}; σ_t 为岩石的单轴抗拉强度,MPa; r 为裂纹扩展半径,m。

因此,从理论上讲,对于某种岩石的纯I型断裂破坏,其裂纹扩展半径 r 值应该是一个常数。试验研究表明,岩石类脆性材料的抗拉强度与I型断裂韧度之间存在良好的线性关系,基于不同类型的岩石试验结果,研究者们已建立多种反映岩石I型断裂韧度与抗拉强度之间的经验关系,表1列出用数据统计方法给出的一些经验公式。

以上统计结果表明,对于各种不同类型的岩石,其I型断裂韧度与抗拉强度之间都可以建立相应的经验关系。鉴于Zhang Z X提出的经验公式是基于各种不同类型的岩石,并且相关系数很高,故以岩石抗拉强度为联结,由岩石单轴抗压强度 σ_c 和参数 m_i 估算岩石I型断裂韧度 K_{Ic} 的修正经验公式时,岩石断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度经验公式采用 $\sigma_t = 6.88K_{Ic}$ 。

3. 岩石参数 m_i 与抗拉、抗压强度的关系分析

H-B强度准则中反映不同类型岩石软硬程度的经验参数 m_i 提供的只是一个范围值,而更加精确的 m_i 取值尚需通过一系列的室内岩石力学试验获得,如根据岩石三轴压缩试验数据进行拟合。因此,研究者从理论或数据拟合角度已进行了大量的参数 m_i 的试验取值研究,并建立参数 m_i 与岩石间接拉伸强度 σ_{IB} 或直接拉伸强度 σ_t 、单轴抗压强度 σ_c 等的经验关系式,表2列出用数据统计方法给出的一些经验公式。

考虑到岩石抗拉强度会因试验方法的不同而各异,并且在目前的工程实践中,巴西试验已被广泛应用于确定岩石的间接抗拉强度,统计资料中将以劈裂抗拉强度为主,故在接下来的分析计算中,文献中基于不同测试方法得到的拉伸强度不再细分而统称为抗拉强度。

从以上统计结果可知,不同研究者都试图构建参数 m_i 与比值 σ_c/σ_t 或者 σ_t/σ_t 和 σ_t/σ_c 等之间的关系,但具体形式差别较大。同样,鉴于不同研究者在数据拟合时样本数量及岩石类型有限,这些关系式对各种类型的岩石不一定都具有适用性。下面将通过本文统计的近100组包含岩石单轴抗压强度和抗拉强度值(部分数据如表3所示),对表2中的经验关系式一一进行分析检验,然后探索岩石经验参数 m_i 与抗拉、抗压强度值之间的一般关系。

Cai由Griffith强度理论推得脆性材料的抗拉强度为抗压强度的1/8[17],岩石单轴抗拉强度与抗压强度的比值大致分布在区间1/10~1/20,该结论已为较多研究者提出[22],由本文统计的岩石强度参数计算

Table 1. Empirical formulas of mode I fracture toughness and tensile strength of rocks
表 1. 岩石断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度经验公式统计表

| 资料来源 | 公式 | 说明 |
|----------------|---|--------------|
| 邓华锋等[10] | $\sigma_t = 8.23K_{Ic}$ | 干燥和饱和砂岩 |
| Whittaker 等[6] | $\sigma_t = 9.35K_{Ic} - 2.53 (R^2 = 0.62)$ | 各种类型的岩石, 包括煤 |
| Zhang Z X [14] | $\sigma_t = 6.88K_{Ic} (R^2 = 0.94)$ | 各种不同类型的岩石 |

Table 2. The experience relations between m_i and strength parameters of rocks
表 2. 岩石参数 m_i 与强度参数的经验关系

| 资料来源 | 公式 | 备注 |
|----------------|---|---|
| Richards 等[15] | $m_i \approx R = \sigma_c / \sigma_t $ | m_i 与比值 R 具有一致性 |
| Colak 等[12] | $m_i = \sigma_t / \sigma_c - \sigma_c / \sigma_t$ | σ_t 以压为正, 下同 |
| Gercek [16] | $m_i = 16\sigma_{tB} / \sigma_c - \sigma_c / \sigma_{tB}$ | σ_{tB} 由巴西劈裂试验获得 |
| Cai [17] | $m_i \approx 8 \text{ or } 12\sigma_c / \sigma_{ci}$ | 8 和 12 分别适用于低围压至拉伸状态和高围压状态; σ_{ci} 为岩石单轴压缩试验中的初裂强度 |

Table 3. Part of statistical results of uniaxial compressive strength and tensile strength of rocks
表 3. 部分岩石单轴抗压强度和抗拉强度统计结果*

| 文献 | 岩石名称 | σ_c (MPa) | σ_t (MPa) | m_i 经验范围 |
|----------|-------|------------------|------------------|------------|
| Cai [17] | 钾肥岩石 | 25 | 2 | / |
| | 石灰岩 | 52 | 4 | 12 ± 3 |
| | 花岗岩 | 226 | 13 | 32 ± 3 |
| | 硫化混合岩 | 70 | 4.45 | (19 ± 3) |
| | 硫化混合岩 | 83 | 5.7 | (19 ± 3) |
| | 硫化混合岩 | 91 | 6.8 | (19 ± 3) |
| | 硫化混合岩 | 115 | 5.15 | (19 ± 3) |
| | 片岩 | 65 | 8.75 | 12 ± 3 |
| | 片岩 | 69 | 9.9 | 12 ± 3 |
| | 片岩 | 73 | 8.7 | 12 ± 3 |
| | 石英岩 | 152 | 11.4 | 20 ± 3 |
| | 橄榄岩 | 67 | 6.2 | 25 ± 5 |
| | 橄榄岩 | 155 | 8.35 | 25 ± 5 |
| | 结晶花岗岩 | 169 | 11.85 | 32 ± 3 |
| | 块状硫化物 | 124 | 11.85 | (19 ± 3) |
| 闪岩 | 110 | 8.9 | 26 ± 6 | |
| 陈招军等[18] | 砂板岩 | 102.596 | 13.793 | 7 ± 4 |
| | 砂岩 | 86.075 | 5.813 | 17 ± 4 |
| | 泥岩 | 17.992 | 2.147 | (7 ± 2) |
| 蒋伟[19] | 曲阳花岗岩 | 99.25 | 11.8 | 32 ± 3 |
| | 大理岩 | 49.78 | 3.22 | 9 ± 3 |
| | 北山花岗岩 | 80.57 | 3.70 | 32 ± 3 |
| | 灰岩 | 63.16 | 4.39 | 10 ± 2 |
| 王羽等[20] | 花岗岩 | 238 | 7.6 | 32 ± 3 |
| | 大理岩 | 151 | 18.2 | 9 ± 3 |
| | 花岗岩 | 181 | 7.5 | 32 ± 3 |
| | 玄武岩 | 203 | 8.3 | (25 ± 5) |
| | 大理岩 | 152 | 8.2 | 9 ± 3 |

注: *未列数据详见文献[21]中岩石的自然含水状态下的测试结果。

得到的抗拉与抗压强度的比值, 绝大多数也分布在此区间。因各种岩石的经验参数 m_i 分布在 2~35 之间, 故 Richards 等提出的经验公式对于 m_i 值较大及较小时将无法有效预测; Cai 提出的经验公式含有岩石单轴压缩试验中的初始起裂强度 σ_{ci} , 虽然该值可由岩石单轴压缩试验中的声发射过程得到, 但其与抗拉强度的关系尚不明确; 经初步试算, 由 Gercek 提出的经验公式得到的 m_i 值普遍偏小。故 Colak 等提出的经验公式成为唯一的选择, 但通过比较 Richards 等与 Colak 等提出的经验公式可以发现, 后者的计算结果要稍小于前者, 该差值即为岩石单轴抗拉强度与抗压强度的比值, 故尚需根据统计结果对 Colak 等提出的经验公式进行重新拟合, 在比值 σ_t/σ_c 与 σ_c/σ_t 前分别确定一个系数 a 和 b (形如式(2)所示), 使修正后的经验关系式能够较好地反应大多数岩石的经验参数 m_i 与其抗拉、抗压强度之间的关系。

$$m_i = a \frac{\sigma_c}{\sigma_t} - b \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \tag{2}$$

根据表 3 及文献[21]的岩石单轴抗压强度和抗拉强度共计近 100 组统计结果, 以比值 σ_t/σ_c 与 σ_c/σ_t 为自变量, 经验参数 m_i 为因变量, 采用 1stOpt 4.0 数理统计软件进行非线性曲线拟合(图 1), 拟合的结果为 $a = 1.318$, $b = 4.586$, 即:

$$m_i = 1.318 \frac{\sigma_c}{\sigma_t} - 4.586 \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = 1.318 \frac{\sigma_c}{\sigma_t} - 4.586 \frac{1}{\sigma_c/\sigma_t}, R^2 = 0.731 \tag{3}$$

利用表达式(3)并结合岩石的经验参数 m_i 即可通过岩石单轴抗压强度间接获得单轴抗拉强度。但表达式(3)的相关系数并不高, 可能的原因有:

- 1) 岩石参数 m_i 是基于三轴试验并且围压通常很大而获得的一经验值, 部分岩石的取值区间较大, 最大差值可达 10, 对于单轴拉伸或压缩应力状态下可能不太适用, 针对某一特定岩石合理而准确地确定其 m_i 值存在较大的困难。
- 2) 鉴于岩石强度测试为破坏性试验以及试件数量的多寡等原因, 故在部分统计结果中, 岩石的单轴抗压强度与其抗拉强度可能不具有代表性。

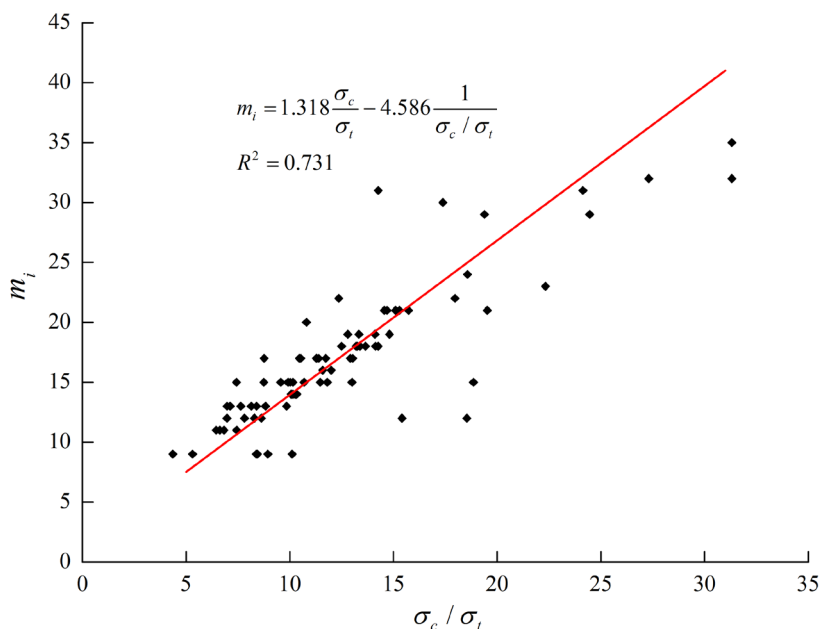


Figure 1. The relationship between parameter m_i and ratio of σ_c/σ_t
 图 1. 参数 m_i 与比值 σ_c/σ_t 关系曲线

4. 岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 确定新方法及验算

4.1. 岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 确定新方法

李江腾等[23]曾基于 4 种不同类型的岩石试验结果建立岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗压强度之间的相关关系。比较 Zhang Z X 建立的岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与抗拉强度、参数 m_i 与单轴抗压和抗拉强度之间的经验关系即式(3), 结合参数 m_i 并以单轴抗拉强度为联结, 提出以岩石单轴抗压强度和参数 m_i 共同确定 I 型断裂韧度 K_{Ic} 的新方法, 如式(4)所示。

$$K_{Ic} = -\frac{\sigma_c \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 24.177} \right)}{63.103} \quad (4)$$

则在通过岩石单轴压缩试验获得其单轴抗压强度并结合参数 m_i , 即可根据式(4)方便地获得岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 的估测值。

Table 4. Calculation results by the modified probational correlation

表 4. 采用修正试用关系式的计算结果

| 文献 | 岩石名称 | m_i 范围 | σ_c (MPa) | σ_t (MPa) | 实测 K_{Ic} (MPa·m ^{1/2}) | m_i 值 | 计算 σ_t (MPa) | 计算 K_{Ic} (MPa·m ^{1/2}) | K_{Ic} 误差 (%) |
|----------|---|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--|---------|------------------------|--|--------------------|
| 邓华锋等[10] | 砂岩(干燥) | 17 ± 4 | 56.31 | 3.17 | 0.37 | 21 | 3.487 | 0.507 | 37.0 |
| | 砂岩(饱和) | 17 ± 4 | 46.17 | 2.61 | 0.3 | 20 | 2.998 | 0.436 | 45.2 |
| 李江腾等[23] | 矿石 | / | 53.1 | / | 1.56 | 7 | 8.999 | 1.308 | -16.2 |
| | 下盘橄榄岩 | 25 ± 5 | 25.61 | / | 0.71 | 20 | 1.663 | 0.242 | -65.92 |
| | 上盘橄榄岩 | 25 ± 5 | 42.96 | / | 1.1 | 22 | 2.541 | 0.37 | -66.0 |
| | 混合岩 | (29 ± 3) | 37.92 | / | 0.93 | 26 | 1.908 | 0.277 | -70.2 |
| | 大理岩 | 9 ± 3 | 62.7 | / | 1.59 | 8 | 9.504 | 1.381 | -13.1 |
| 朱传云[1] | 花岗岩 | 32 ± 3 | 150 | / | 0.734 | 35 | 5.621 | 0.817 | 11.3 |
| | 砂岩 | 17 ± 4 | 50 | / | 0.395 | 21 | 3.096 | 0.45 | 13.9 |
| | 混合岩 | (29 ± 3) | 60 | / | 0.320 | 32 | 2.457 | 0.357 | 11.6 |
| | 白云岩 | (9 ± 3) | 70 | / | 0.492 | 12 | 7.390 | 1.074 | 118.3 |
| 黄有爱等[24] | 闪云斜长 花岗岩 | 32 ± 3 | 177 | / | 0.88 | 34 | 6.826 | 0.992 | 12.7 |
| | | | 195 | / | 0.85 | 35 | 7.307 | 1.062 | 25.0 |
| | | | 220 | / | 0.80 | 35 | 8.244 | 1.198 | 49.8 |
| 王志[25] | 20℃红砂岩 60℃红砂岩 100℃红砂岩 150℃红砂岩 200℃红砂岩 250℃红砂岩 300℃红砂岩 | 17 ± 4 | 173 | / | 0.95 | 34 | 6.672 | 0.970 | 2.1 |
| | | | 67.24 | 2.90 | 0.80 | 19 | 4.589 | 0.667 | -16.6 |
| | | | 84.98 | 3.93 | 0.95 | 20 | 5.518 | 0.802 | -15.6 |
| | | | 98.88 | 4.11 | 1.11 | 21 | 6.123 | 0.89 | -19.8 |
| | | | 99.49 | 4.29 | 1.15 | 21 | 6.161 | 0.895 | -22.1 |
| | | | 103.79 | 4.95 | 1.09 | 21 | 6.427 | 0.934 | -14.3 |
| | | | 90.29 | 2.63 | 1.08 | 19 | 6.162 | 0.896 | -17.1 |
| 66.36 | 2.24 | 0.60 | 18 | 4.772 | 0.694 | 15.6 | | | |
| 尹祥础等[26] | 红砂岩 花岗岩 大理岩 辉长岩 | 17 ± 4 32 ± 3 9 ± 3 27 ± 3 | 45.0 | 2.4 | 1.47 | 14 | 4.113 | 0.598 | -59.3 |
| | | | 191.0 | 7.0 | 1.19 | 31 | 8.070 | 1.173 | -1.4 |
| | | | 151.5 | 6.5 | 1.70 | 12 | 15.994 | 2.325 | 36.7 |
| | | | 203.7 | 12.8 | 0.40 | 30 | 8.890 | 1.292 | 223.0 |
| 李祥龙等[27] | 砂岩 | 17 ± 4 | 70 | 5 | 0.68 | 21 | 4.335 | 0.63 | -7.35 |

4.2. 岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 确定新方法的验算

以下通过本文统计的试验数据(包括 13 组包含岩石 I 型断裂韧度和单轴抗压强度值, 14 组包含岩石 I 型断裂韧度与抗拉强度、单轴抗压强度值的室内试验数据)对 Zhang Z X 推荐试用的岩石 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与其抗拉强度之间的关系式和岩石参数 m_i 与其抗拉、抗压强度之间的经验关系式(3)进行可靠性检验。根据统计结果由岩石经验参数 m_i 与单轴抗压强度 σ_c 通过式(3)计算得到单轴抗拉强度 σ_t , 将 σ_t 代入 Zhang Z X 的直线关系式来估算 K_{Ic} 的值或直接由岩石经验参数 m_i 与单轴抗压强度 σ_c 通过式(4)来估算 K_{Ic} 的值, 同时评价 K_{Ic} 的计算误差, 采用修正试用关系式的计算结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 由式(4)估算得到的断裂韧度 K_{Ic} 的预测值大多具有较好的精度, 除去两个最大误差, 最大相对误差约为 65%, 在缺乏必要的试验数据时, 该经验关系式可用于通过岩石单轴抗压强度对其 I 型断裂韧度进行初步估算。当岩石的经验参数 m_i 较大而单轴抗压强度与抗拉强度较小时相对误差也相应地增大。

5. 结论与建议

1) 岩石参数 m_i 与抗拉、抗压强度之间的经验关系式可表示为 $m_i = 1.318\sigma_c/\sigma_t - 4.856\sigma_t/\sigma_c$, $R^2 = 0.731$ 。由此关系式, 即可由岩石参数 m_i 和单轴抗压强度得到抗拉强度预测值。

2) 利用关系式 $K_{Ic} = -\frac{\sigma_c \left(m_i - \sqrt{m_i^2 + 24.177} \right)}{63.103}$, 即可通过岩石单轴抗压强度并结合 H-B 强度准则中的

的经验参数 m_i , 估算取值较为困难的 I 型断裂韧度值 K_{Ic} 。

3) 岩石经验参数 m_i 与其抗拉、抗压强度之间的相关关系可能因岩石类型不同而相差较大。以上建议的三者之间的经验关系式, 其相关系数 R^2 并不高, 通过岩石单轴抗压强度估算的部分 I 型断裂韧度 K_{Ic} 与实测值相差较大。针对不同岩石类型建立参数 m_i 以及断裂韧度 K_{Ic} 与其强度参数之间的经验关系有待于进一步的理论和试验研究。

参考文献 (References)

- [1] 朱传云. 岩石抗压强度与断裂韧度规律的探讨[J]. 水利水电技术, 1989(4): 5-6.
- [2] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 等. 页岩储层 I、II 型断裂韧性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 3.
- [3] 陈治喜, 陈勉, 金衍, 等. 水压致裂法测定岩石的断裂韧性[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 59-64.
- [4] 侍克斌, 李新, 詹新武, 等. 运用断裂力学分析碾压混凝土坝表面裂缝[J]. 人民长江, 2008, 39(8): 48-51.
- [5] 姜傅之. 断裂力学与裂纹扩展[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1984.
- [6] Whittaker, B.N., Singh, R.N. and Sun, G. (1992) Rock Fracture Mechanics Principles, Design and Applications. Elsevier, Amsterdam.
- [7] 傅钢, 李贺, 鲜学福, 等. 压剪应力状态下脆性岩石复合断裂准则的研究[J]. 重庆大学学报自然科学版, 1990(2): 73-78.
- [8] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [9] 潘别桐, 唐辉明. 岩石压剪性断裂特性及 I-II 型复合断裂判据[J]. 地球科学, 1988(4): 59-67.
- [10] 邓华锋, 朱敏, 李建林, 等. 砂岩 I 型断裂韧度及其与强度参数的相关性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3585-3591.
- [11] 臧启山, 姚弋. 工程断裂力学简明教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2014.
- [12] Colak, K. and Unlu, T. (2004) Effect of Transverse Anisotropy on the Hoek-Brown Strength Parameter ' m_i ' for Intact Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **41**, 1045-1052. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.04.004>
- [13] 朱合华, 张琦, 张连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩土力学与工程学报, 2013, 32(10):

1945-1963.

- [14] Zhang, Z.X. (2002) An Empirical Relation between Mode I Fracture Toughness and the Tensile Strength of Rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **39**, 401-406. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00032-1)
- [15] Richards, L.R. and Read, S.A.L. (2011) A Comparison of Methods for Determining m_i , the Hoek-Brown Parameter for Intact Rock Material. *45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, San Francisco, 26-29 June 2011, ARMA-11-246.
- [16] Gercek, H. (2002) Properties of Failure Envelopes and Surfaces Defined by the Hoek-Brown Failure Criterion. *Proceedings of the 6th Regional Rock Mechanics Symposium*, Konya, 10-11 October 2002, 3-11.
- [17] Cai, M. (2010) Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek-Brown Strength Parameter m_i of Brittle Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **43**, 167-184. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0053-1>
- [18] 陈招军, 王乐华, 金晶, 等. 三种岩石巴西劈裂及单轴压缩试验对比研究[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 34-38.
- [19] 蒋伟. 不同岩石抗拉与抗压实验对比研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2014.
- [20] 王羽, 许强, 柴贺军, 等. 工程岩爆灾害判别的 RBF-AR 耦合模型[J]. 吉林大学学报(地), 2013, 43(6): 1943-1949.
- [21] 孙丽. 论述岩石抗拉强度与单轴抗压强度两者之间的联系[J]. 农业科技与信息, 2012(14): 48-49.
- [22] Zhang, L. (2005) *Engineering Properties of Rocks*. Elsevier, New York.
- [23] 李江腾, 古德生, 曹平, 等. 岩石断裂韧度与抗压强度的相关规律[J]. 中南大学学报自然科学版, 2009, 40(6): 1695-1699.
- [24] 黄有爱, 夏熙伦. 岩石断裂韧度的物理性状效应[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(4): 91-96.
- [25] 王志. 岩石高温剪切(含 II 型和 III 型)断裂特征的理论实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [26] 尹祥础, 颜玉定. 不同方法测定岩石断裂韧度 K_{IIc} 的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(4): 328-333.
- [27] 李祥龙, 唐辉明. 逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 687-694.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org