

岩石损伤特性与强度的超声波速研究^{*}

The rock damage and strength study based on ultrasonic velocity

赵明阶, 徐 蓉

(重庆交通学院 河海建筑工程系, 重庆 400074)

摘 要: 借助于损伤力学的观点, 用岩石在未受荷载条件下的超声波速定义岩石的初始损伤变量; 然后基于岩石在受荷载条件下的声学特性模型, 建立岩石的损伤演化方程, 从而给出运用岩石超声波速估计岩石强度的方法。

关键词: 岩石; 损伤; 超声波

中图分类号: TU 452; P 631. 5; O 346. 5

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0720- 03

作者简介: 赵明阶, 男, 1967年生, 1998年获重庆建筑大学岩土工程专业博士学位, 现为重庆交通学院河海建筑工程系副教授, 从事岩土动力学及地震工程方面的教学与研究工作。

ZHAO Ming-jie, XU Rong

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on damage mechanics, the initial damage variable of rock is defined as its ultrasonic velocity, when there is no loading on it. The damage evolution equation was set up by the ultrasonic properties model for rock under loading. The rock strength was predicted by the ultrasonic velocity of rock.

Key words: rock; damage; ultrasonic

1 引 言^{*}

岩石损伤特性的研究是解决岩石破坏强度与岩石稳定性问题的理论基础, 在静力学研究方面已获得了大量的岩石损伤本构模型^[1]。随着超声波测试技术在岩石工程中的广泛应用, 运用超声波研究岩石的损伤特性对岩石超声波测试技术进入定量化具有重要的意义。实践表明, 不同损伤程度的岩石具有不同的声学特性和不同的超声波传播参数, 但要研究岩石声学特性随损伤演化的规律, 必须有岩石在受载过程中的声学特性理论模型作为基础, 由于建立这种理论模型的难度较大, 因而目前在岩石工程中运用超声波测试技术预测岩石强度的实例并不多见^[2, 3]。本文借助于损伤力学的观点, 用岩石在未受荷载条件下的超声波速定义岩石的初始损伤变量; 然后基于笔者提出的岩石在受荷载条件下的声学特性模型^[4], 建立岩石损伤演化模型; 从而给出运用岩石超声波速估计岩石强度的近似方法。数值计算结果表明, 运用超声波速定义的初始损伤变量与岩石的强度之间存在明显的规律性。

2 岩石的损伤变量

用来反映岩石内部损伤的变量, 称为岩石的损伤变量。在岩石损伤力学研究中大都采用连续损伤力学的方法, 连续损伤力学分析必须首先定义适当的损伤变量, 损伤变量的定义有多种, 如利用弹性常数、屈服

应力、拉伸强度、延伸率、密度、电阻、超声波速及声发射等等; 目前在岩石力学中较为常用的损伤变量主要有三种, 即按空隙面积定义的损伤标量、按空隙配置定义的损伤张量以及按弹性模量变化定义的损伤张量。如果假设岩石是由岩石母体和微裂纹所组成的各向同性体, 则可采用超声波速定义损伤变量^[1]:

$$D = 1 - \left(\frac{V_p}{V_{pf}} \right)^2 \quad (1)$$

式中 V_p 为各向同性微裂隙岩石的声波速度(m/s); V_{pf} 为岩石母体(无损伤)的声波波速(m/s); D 为岩石的损伤变量。

如果将式(1)中的 V_p 以岩石未受荷载时的声速 V_{p0} (m/s) 替代, 则得到岩石的初始损伤变量

$$D_0 = 1 - \left(\frac{V_{p0}}{V_{pf}} \right)^2 \quad (2)$$

岩石的损伤变量反应了岩石内部的损伤程度。已有研究表明, 随着应力的变化, 岩石的声速随之改变, 它反应了岩石内部微裂隙(损伤)的变化^[5]。由于超声波速与岩石弹性常数、密度及内部微裂隙紧密相关, 因此给出的损伤变量能综合反应岩石各参数的劣化程度。

3 岩石损伤的演化

假设岩石是包含有随机分布椭圆形微裂纹的各向

同性体, 岩石母质是线弹性体; 岩石在受荷条件下的声学特性研究结果^[4]表明, 岩石声速随单轴应力呈非线性变化关系, 这种关系可简略地表示为

$$V_p = g(m, \sigma_1) \quad (3)$$

式中 $m = (E_0, \nu, K_{IC}, \varphi, a_0, \alpha, \epsilon)$, 其中, E_0, ν 分别为岩石母体的弹性模量和泊松比, K_{IC}, φ 分别为岩石的断裂韧度和内摩擦角, a_0, α, ϵ 分别为椭球形微裂纹半长度、形状比和裂纹密度; σ_1 为单轴应力。

由式(1)和式(3)可得关系式:

$$H(D, m, \sigma_1) = 0 \quad (4)$$

该式实际上就给出了岩石的损伤变量 D 随应力演化的物性方程, 即损伤演化方程式。

在式(4)中, 参数 a_0, α, ϵ 反应了岩石的初始损伤, 唯一地确定出 D_0 ; 而参数 $E_0, \nu, K_{IC}, \varphi$ 在受荷过程中为不变量。将式(2)代入式(4)可得

$$F(D_0, D, m_1, \sigma_1) = 0 \quad (5)$$

其中 $m_1 = (E_0, \nu, K_{IC}, \varphi)$, 表示不随应力变化的岩石细观参数。式(5)给出了岩石的损伤变量 D 随初始损伤变量 D_0 和应力变化的隐含关系式。

对于同一种岩石的不同损伤而言, 由文献[6]的研究结果, 岩石的变形特性完全由 D_0 确定。这说明对于具有不同初始损伤的同一种岩石, 其损伤演化规律完全由初始损伤变量 D_0 确定。

4 岩石的强度及其超声波速的关系

研究岩石的强度, 首先要研究其破坏准则或破坏判据, 因这里是采用声波预测强度, 因而岩石的破坏判据也就必须与声波波速相关, 根据笔者的研究结果^[6], 当岩石受到 80%~90% 的破坏强度的荷载时, 单轴受压岩石的轴向超声波速-应力关系具有明显的特征点, 声速由增加变为下降, 也即是说当 $\sigma_1 = (80\% \sim 90\%) \sigma_c$ 时, 对应的声速-应力曲线在该处具有明显的极值点, 由式(1)知此时岩石的损伤变量亦存在一特征极值点, 由该点可建立岩石的破坏判据。由式(5)对 σ_1 求偏导数并令

$$\partial D / \partial \sigma_1 = 0 \quad (6)$$

求解得到 $\sigma_1^* = \sigma_1^*(D_0, m_1)$, 于是有强度预估值:

$$\sigma_c = \sigma_1^*(D_0, m_1) / 0.9 \quad (7)$$

由于该式是在单轴压缩条件下获得的隐式函数关系, 因此只适用于单轴压应力状态, 式(6) (7) 的计算也仅能

采用数值计算^[6], 在计算过程中对荷载进行逐级判断。表 1 为几种岩石的实测强度与理论预测强度的对比。

表 1 岩石单轴强度的实测值与理论预估值

Table 1 The experimental results and theoretical predictions of the strength of rocks					MPa
岩石	砂岩	大理岩	花岗岩	灰岩	石膏
实测强度	86.6	67.9	140.2	253.0	6.90
预估强度	88.9	62.2	142.2	281.1	6.33

由表 1 可以看出, 预估强度与实测强度非常接近。但是, 由于这种预估强度值与岩石的参数紧密相关, 因而参数的选取至关重要。表中预估强度值的计算参数均来自实测数据的反分析。然而在实际应用中较难获取岩石参数 $E_0, \nu, K_{IC}, \varphi$ 及 a_0, α, ϵ , 从而给应用带来不便, 必须对式(7)进行简化。首先应用声学特性模型在理论上对式(7)进行数值求解, 任意取同一种岩石(参数 $E_0, \nu, K_{IC}, \varphi$ 不变)不同初始损伤变量 D_0 (参数 a_0, α, ϵ 改变)的多种参数组合, 运用式(2)和式(5)分别计算初始损伤变量 D_0 和损伤变量 D 随应力的变化关系, 再由式(7)计算不同初始损伤变量 D_0 时的强度 σ_c , 得到如图 1 所示的曲线。

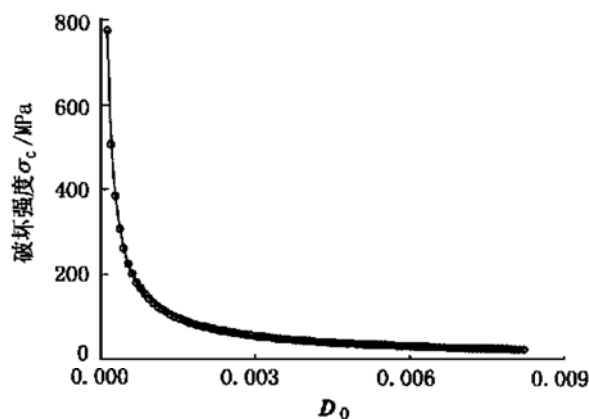


图 1 初始损伤变量与破坏强度的关系

Fig. 1 The curve of initial damage variable vs strength

图 1 表明 $\sigma_c - D_0$ 曲线是一个典型的幂函数曲线, 可表示为:

$$\sigma_c = AD_0^{-B} \quad (8)$$

式中 A, B 为参数 $E_0, \nu, K_{IC}, \varphi$ 的函数, 因而对于同一种岩石, A, B 是常数。将式(2)代入式(8), 有

$$\sigma_c = A(1 - CV_{p0}^2)^{-B} \quad (9)$$

式中 $C = 1/V_{p0}^2$, 由 E_0, ν 及岩石母体的密度确定。显然, 对于同一种岩石, C 也是一个常数。如果要在实验室对式(9)进行标定, 在回归分析时很不方便。为此对式(9)直接改用 $\sigma_c - V_{p0}$ 的关系, 图 2 是对于任意的参数 $E_0, \nu, K_{IC}, \varphi$ 及 a_0, α, ϵ 而计算的 $\sigma_c - V_{p0}$ 关系曲线。由图 2 可以看出 $\sigma_c - V_{p0}$ 关系可用一个指数函数曲线来描述其关系式:

$$\sigma_c = A \exp(BV_{p0}) \quad (10)$$

式中的系数 A , B 与参数 E_0 , V , K_{IC} , φ 相关。式(10)给出了 $\sigma_c - V_{p0}$ 的关系, 首先在实验室对不同声速的同种岩石进行标定, 获取参数 A , B ; 然后便可在现场声波测试时预测微裂隙岩石的强度值。图3是对混凝土单轴抗压强度的标定曲线, 标定结果有如下关系:

$$\sigma_c = 0.283 \exp(1.40061 V_{p0}) \quad (11)$$

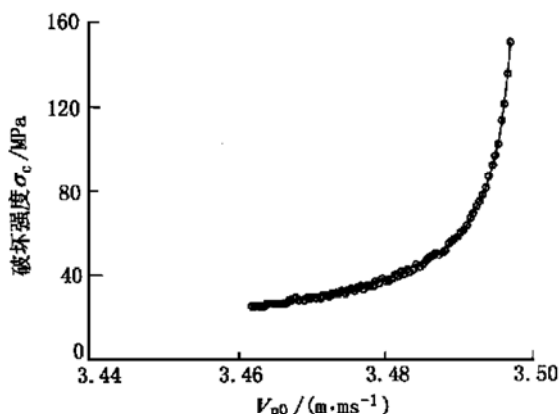


图2 声速与破坏强度的关系

Fig. 2 The curve of ultrasonic velocities vs strength

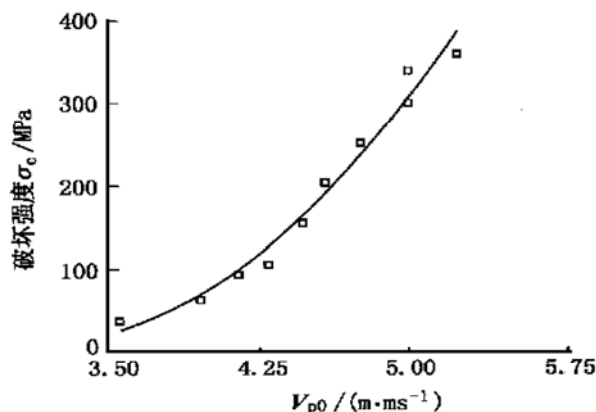


图3 混凝土超声波速与强度的关系

Fig. 3 The relationship between ultrasonic velocities and the strength of concrete

图4是重庆砂岩进行单轴实验后得出的标定曲线, 标定要求岩石试样必须是同一种岩石, 即所有试样的矿物成分要基本相同。图4中的13个实验数据分别由13个具有不同孔隙率和不同风化程度的粗细砂岩试样获得, 标定结果有如下关系:

$$\sigma_c = 9.3867 \exp(0.7427 V_{p0}) \quad (12)$$

由于系数 A , B 是参数 E_0 , V , K_{IC} , φ 的函数, 因而式(11)将受到混凝土的骨料、含水率及养护条件等因素的影响。同理, 对于岩石, 不同地区的同类岩石其 $\sigma_c - V_{p0}$ 的关系也可能有较大的差异, 因此原则上在某一区域的某种岩石的超声测强公式应当用该区域的同类岩石进行标定, 以保证其精度及可靠性。

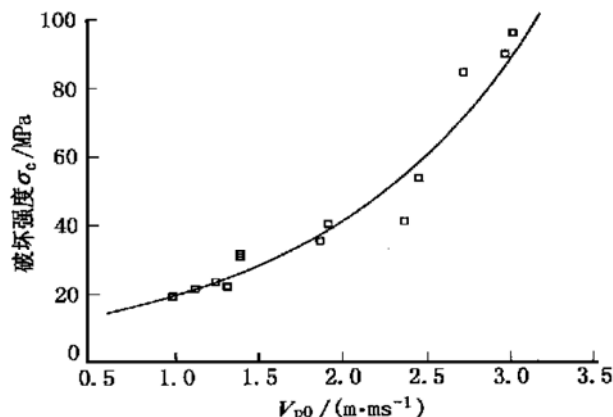


图4 重庆砂岩超声波速与强度的关系

Fig. 4 The relationship between ultrasonic velocities and strength of Chongqing sandstone

5 结 语

(1) 由于岩石的超声波速能综合反映岩石内部损伤程度, 运用岩石的超声波速定义的损伤变量完全可以表述岩石微裂纹的宏观力学效果。

(2) 基于岩石在受荷条件下的声学特性理论模型而给出的损伤演化方程, 虽然难以运用显式函数表达, 但经数值计算仍能揭示出岩石初始损伤变量与岩石的单轴抗压强度之间存在幂函数关系, 而岩石初始声速与岩石的强度之间存在指数关系。重庆砂岩与混凝土的实验结果证实了这种关系的存在。

(3) 笔者给出的岩石在受荷条件下的声学特性理论模型较为复杂, 涉及的参数获得较困难, 因此本文获得结果在实际应用中只能采用标定的方法。但随着超声波测试技术在岩石工程中的应用不断深入, 运用超声波研究岩石的损伤特性, 并进一步提出简单实用的岩石损伤演化的超声波理论模型已显得愈来愈重要。

参考文献:

- [1] Kawamoto T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass damage mechanics theory [J]. Int J Num Anal Meth in Geomech, 1988, 12(1): 1~30.
- [2] 赵明阶, 吴德伦. 工程岩体的超声波分类及强度预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 89~92.
- [3] 赵明阶, 徐 蓉. 坝基灌浆效果评价中波速成像法 [J]. 桂林工学院学报, 1996, 16(2): 136~142.
- [4] 赵明阶, 吴德伦. 单轴受荷条件下岩石的声学特性模型与实验研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 540~545.
- [5] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 50~54.
- [6] 赵明阶. 裂隙岩体在受荷条件下的声学特性研究 [D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1998.