

岩石力学试验中缺陷岩样抗压强度修正方法*

邓华锋,王哲,李建林,胡玉,张小景

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002)

摘 要:由于岩石形成过程以及所经历的地质历史作用,岩石内部微观裂纹、裂隙、孔隙等缺陷是客观存在的,而这些缺陷正是导致岩石力学试验结果离散的根本原因。在以往岩石力学试验现象统计分析基础上,详细分析了岩石内部缺陷对应力-应变曲线的影响,提出了显式缺陷和隐式缺陷岩样的概念;结合岩石的地质本质性和室内试验条件,选取岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强度预测的基本参数,建立了岩石纵波波速、密度和抗压强度预测经验公式;针对显式缺陷和隐式缺陷岩样的试验结果分别提出了抗压强度修正方法,该修正方法的核心就是采用纵波波速和密度作为衡量岩样内部缺陷的定量指标,将岩样的缺陷修正到同一水平,这样将更好地把握岩石力学试验的规律。验证结果表明,所提出的修正方法可以较好地修正由于岩样内部缺陷导致的抗压强度离散值。

关键词: 缺陷岩样;应力-应变曲线;强度预测;强度修正

中图分类号: TU 44 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)02-0307-07

Compressive Strength Correction Method of Flaw Sample in Rock Mechanics Test

Deng Huafeng, Wang Zhe, Li Jianlin, Hu Yu, Zhang Xiaojing

(China Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang Hubei 443002, P.R. China)

Abstract: Because of rock formation process and experienced geological history effects, internal micro-cracks, crevices, porosity and other flaws objectively exist in rock. These flaws are exactly the root causes resulting in discretization in rock mechanics test. On the basis of massive analysis of rock mechanics test phenomenon, effects of internal flaw on rock stress-strain curve were detailed analyzed, and conceptions of explicit flaw rock samples and implicit flaw rock samples were proposed; Combined with the geological nature of rock and laboratory test conditions, rock density and longitudinal wave velocity were selected as basis parameters to measure rock sample flaw degree and to predict rock sample strength, and rock longitudinal wave velocity, density and compressive strength prediction empirical formulas were established; Compressive strength correction methods were separately proposed for the explicit and implicit flaw rock samples, and the core of the correction method was to use a longitudinal wave velocity and density as quantitative indexes to measure internal flaws of the rock samples, to modify the rock sample flaws to the same level, which can better grasp the rules of rock mechanics test. Practice shows that the proposed correction method can better modify the compressive strength dispersion resulted by the internal flaws in the rock samples.

Keywords: flaw rock samples; stress-strain curve; strength prediction; strength correction

* 收稿日期:2016-09-07(修改稿)
作者简介:邓华锋(1979-),男,湖北宜都人,博士,教授,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。
E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51309141);国家自然科学基金重点项目(51439003);湖北省自然科学基金重点项目(2015CFA140);三峡大学科学基金(KJ2014H011)

0 引言

岩石是一种自然造物,是在漫长的地质历史中,经历了多种地球动力作用才得以形成的,岩石内部的微观裂纹、裂隙、孔隙等缺陷广泛存在,具有显著的不均一性、各向异性、不连续性和时态性^[1]。力学试验是获得岩石强度最直接的方法,这也是各类岩石规范^[2-3]中推荐的手段。在岩石力学试验过程中,一方面,岩样的高径比、截面形状、加载方法、速率和方向、饱和程度等因素会直接影响试验结果^[4],但这些因素可以通过严格控制制样精度和试验流程来减小其影响;另一方面,岩样内部的缺陷也会直接影响试验结果的离散性,在三轴试验中岩样之间的差别甚至掩盖围压对强度的影响^[5-6],而这些影响因素无法通过控制制样精度或试验流程得到消除,因此,需要寻找一种方法去衡量和修正岩样内部缺陷对试验结果的影响。

力学试验通常是破坏性试验,一个试样一般只能得到一个强度值,具有不可重复性。为了控制试验结果的离散性,各类岩石试验规范中通常建议采用重复试验的均值去消除岩样之间的差异,但文献^[5-6]的研究指出,少数几个试样的平均值不能很好消除试样之间的离散性。然而,若为了消除岩样之间的离散性而进行大量的重复试验,无疑将消耗大量的人力、财力、物力和时间。因此,如何综合应用现有的无损测试技术,提出一种能比较有效地分辨、衡量岩样之间的缺陷差异,并能对试验结果进行定量修正的方法,对提高试验结果的准确程度具有重要的现实意义和应用价值。基于此,本文在大量以往岩石力学试验现象统计分析基础上,根据岩石抗压强度试验应力-应变曲线特点,详细分析了岩石内部缺陷对应力-应变曲线的影响,并提出了相应的强度修正方法。

1 典型岩样的单轴压缩应力-应变曲线特征分析

岩体内部缺陷广泛存在,一方面,制备完成的岩样内部缺陷是客观存在的,这一点可以从岩样的纵波波速、密度、回弹值等参数的差异明显看出;另一方面,岩样的内部微观缺陷分布情况对岩样的强度影响效应是不一样的。总结大量的岩石力学试验资料可以发现,在制样精度和试验流程严格满足规范要求的情况下,岩样内部的缺陷在力学试验中有两种常见表现形式,如图1所示。一种是在加载过程中,特别是峰值强度之前出现明显的局部破坏,导致应力-应变曲线在峰值强度附近出现锯齿

状分布;另外一种是在加载过程中,应力-应变曲线没有异常现象,但峰值强度明显低于正常强度。从两类缺陷岩样应力-应变曲线的特征出发,分别称为显式缺陷和隐式缺陷。

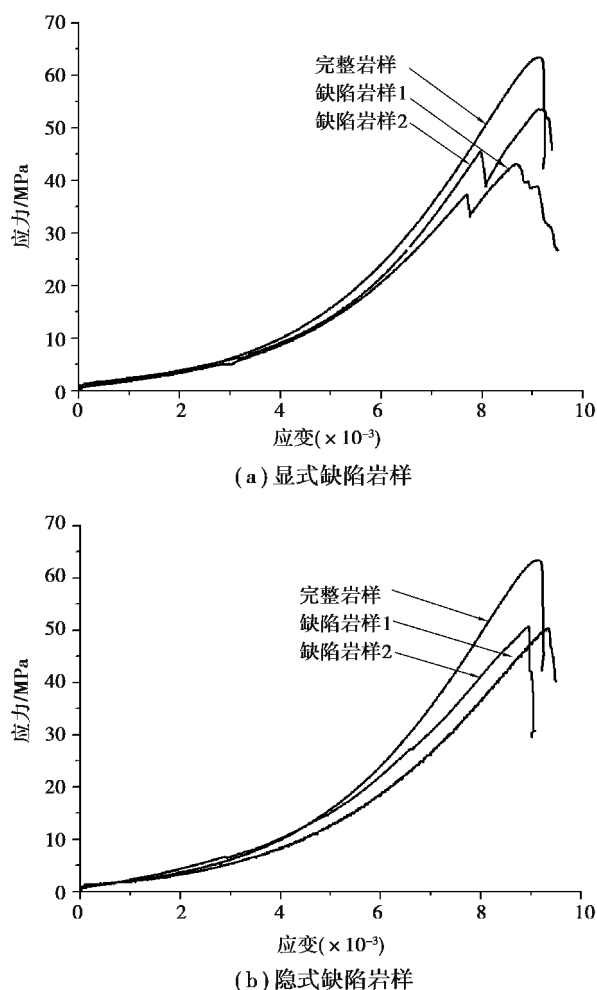


图1 典型岩石单轴压缩应力-应变曲线

Fig.1 Uniaxial compression stress-strain curve of typical rock

图1是从同一块砂岩上取下的一组岩样的单轴压缩应力-应变曲线,这里列举了1个完整岩样和4个缺陷岩样(综合前面的岩石成因和力学试验结果分析可以得出,每个岩样内部都是存在缺陷的,岩样之间的物理、力学参数的差异反映了岩石缺陷程度的不一样,所谓的“完整岩样”,只是同一组岩样中缺陷相对较少、对应强度相对较高的岩样,是一个相对的概念,为了便于分析,这里称为“完整岩样”)。

从图1可以看出:

(1)对于完整岩样,岩样内部材料和强度相对比较均匀,其屈服破坏过程是岩样内部某一断面(与加载应力条件有关)材料逐渐达到极限承载能力的过程^[5-6],达到峰值强度以后,应力迅速跌落,

在峰值强度附近形成一个连续的完整尖点。

(2)两种类型缺陷岩样和完整岩样的应力-应变曲线总体趋势一致,均包括压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段和破坏阶段,但在各阶段存在较大的差别,特别是完整岩样和缺陷岩样的峰值强度存在明显差别。因此,如果直接利用峰值强度作为其抗压强度,将不能反映岩石内部缺陷的影响,也就是说岩样内部缺陷所带来的数据离散是无法通过单纯的重复试验直接消除的。

(3)如图1(a)所示,对于显式缺陷岩样,应力-应变曲线在压密阶段、弹性阶段差别较小,但在塑性屈服阶段存在明显的分叉。分析产生这种破坏现象的根本原因在于,缺陷岩样的破坏过程是由缺陷弱面和最弱断面(与加载应力条件有关)承载能力共同控制的。在屈服阶段,由于岩样内部缺陷弱面首先达到承载极限,出现了局部破坏,应力-应变曲线出现跌落,而后应力-应变曲线逐渐回升,应力-应变曲线呈现锯齿状分布,直至岩样最弱断面材料达到极限承载能力,而这个极限强度值明显低于完整岩样的峰值强度。

(4)如图1(b)所示,对于隐式缺陷岩样,与完整岩样的应力-应变曲线基本类似,但从压密阶段后部分开始,应力-应变曲线逐渐偏离正常状态,对应弹性模量、变形模量以及峰值强度均明显低于完整岩样。分析其原因在于,岩样内部缺陷分布相对比较均匀,而且在应力条件决定的宏观破坏断面(最弱断面)上没有明显缺陷分布,加载过程中没有产生局部破坏,但加载过程中缺陷的发展影响了应力-应变曲线的宏观形式。

2 缺陷岩样的抗压强度修正方法

2.1 基于应力-应变曲线的岩石抗压强度修正方法

从图1(a)可以看出,虽然缺陷岩样和完整岩样的峰值荷载存在明显差别,但在达到峰值荷载时所对应的应变值总体一致。结合应力-应变曲线特征可以看出,完整岩样和缺陷岩样的宏观变形基本一致,不同之处在于岩样的屈服破坏过程和峰值强度,也就是说,岩样内部缺陷导致的局部破坏主要影响岩样的屈服过程和峰值强度^[5-6]。假设缺陷岩样没有“缺陷”,则其应力-应变曲线将像完整岩样一样正常屈服,即在峰值强度附近,形成一个连续的完整尖点。据此,文献^[5-6]提出了缺陷岩样强度的修正方法,根据岩样弹性变形段以及应塑性屈服早期阶段与岩样破坏阶段的曲线走势补充岩样峰值强度附近的尖点,如图2中的阴影部分所

示,阴影区域最大应力值即为该岩样消除缺陷影响的峰值强度。这种修正方法对缺陷岩样加载过程中局部破坏造成的应力跌落修正具有较好的效果。

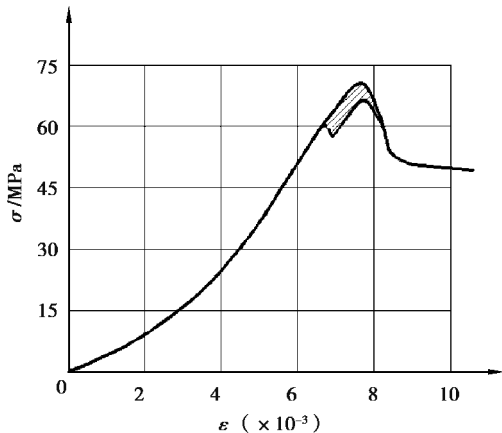


图2 缺陷岩样经修正后的轴力-轴向变形试验曲线

Fig.2 Modified stress-strain curve of flaw rock sample

2.2 基于波速、密度、回弹值等物理参数的岩石抗压强度预测方法

岩石超声波测试技术是经过60年发展起来的一门测量岩石(体)动弹性参数的新技术。它通过检测超声波在岩体等固体介质中的声学参数(超声波波速、衰减系数、波形、频率、频谱、振幅等)的变化,间接地反映岩石(体)的物理力学特性及结构特征,使岩样内部缺陷也可以通过岩样的超声波纵波波速和密度等参数得到较好的反映。自从超声波测试技术应用到岩土工程领域以来^[7],已经成功地用于岩石、岩体和土体动弹性参数测试、岩体结构分类、参数确定以及岩体质量评价等问题中,工程岩体分级的国家标准等方法^[8],都采用声速来确定岩体的完整性系数,并将其作为岩体质量分级的一个重要指标,因而得到岩土工程界的广泛重视。但基于目前的技术水平而言,我们没有办法直接建立起岩石的强度与波速、密度等物理参数之间的理论关系,因此,大多研究主要是基于统计理论建立相关统计公式。文献^[9]将工程岩体分类与岩体的超声波速联系起来,建立岩体的超声波分类方法,给出岩体强度及变形参数的超声波预测方法;杨文甫等^[10]、K. Zorlu等^[11]、Kripamoy Sarkar等^[12]、S Dehghan等^[13]分别考虑岩石密度、矿物组成、矿物粒度及形态、空隙度、纵波波速等指标,采用神经网络的方法对多类岩石的单轴抗压强度进行了预测研究;邓华锋等^[14-15]考虑回弹值和纵波波速,对砂岩抗压强度的预测和修正进行了研究。

2.3 岩石抗压强度预测基本参数的选择及分析

岩石是地质环境中生成、演化而形成的一种特

殊材料,地质学家认为岩石与其他材料相比,其特殊性可归结于其地质本质性。文献[1]指出,岩石的地质本质性包括岩石的物质性、结构性和赋存状态,其中,岩石的物质性主要取决于在成岩和演化过程中形成的某种矿物组合;岩石的结构性包括不同尺度结构体的形态和排列,以及它们之间的连接特征,岩石结构性综合体现着对岩石力学特性的影响;岩石的赋存性指岩石与周围地质环境关系的密切程度,是岩石区别于其他人工材料的重要特征,包括岩石所处地应力环境、地下水环境和地质动力环境三个方面。

岩石地质本质性是岩石物理、力学特性和工程性状的基础,因此,在岩石的力学参数分析时,必须考虑岩石的地质本质性。在以往的岩石强度预测参数选择时,往往较少系统地考虑这些因素的影响,常用的物理参数,如密度、超声波纵波波速、孔隙率等与岩石强度之间并不是单纯的对应关系,因此,预测得到的岩样强度往往存在较大的误差。基于此,在以往岩石强度预测修正方法的基础上,结合岩石的地质本质性和室内试验条件,拟选择岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强度预测及修正的基本参数,原因如下:

(1)岩石的密度可以反映其密实程度,密度越大则岩石越密实,同时意味着岩样中的孔隙越少,颗粒之间结合越紧密,矿物颗粒之间的咬合程度越好,岩样的密度也能从侧面反映矿物颗粒之间的表面摩擦阻力。因此,岩石的密度可以较好地反映岩石的物质性。另一方面,岩石内部孔隙是影响其变形强度的重要因素,文献[16]基于18种不同砂岩样品的统计分析发现,孔隙度与岩石密度相关性很好,比较而言,岩石的孔隙度测试难度较大,而岩石的密度可以方便准确测定,因此,选用岩石密度作为强度预测参数也可以较好地反映岩石内部的孔隙特征。

(2)超声波在岩石中的传播速度反映了材料的弹性性质和内部构造的有关信息^[9,14-15],而且对岩石内部的微裂纹、裂隙等缺陷具有很好的识辨能力,因此,选用超声波纵波波速作为反映岩石结构性的参数。

(3)岩石所处的应力环境和含水状态直接影响其力学特性,因此,岩石力学试验过程中,必须保证各岩样赋存状态的统一性。在本文的试验中,设计进行的是饱水岩样的单轴抗压强度试验,而且试验加载路径、速率等试验条件严格统一。

因此,在保证岩样相同的含水状态下,选取岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强

度预测的基本参数是满足岩石地质本质性的。

2.4 岩石抗压强度的超声-密度综合预测方法

试验数据分析过程中通常有两种思路,一种是通过数据回归建立相应的公式,另一种是通过神经网络的方法。为了更加直观地表达岩石强度预测修正过程,论文中以回归分析为实例进行介绍。

经过比较分析,并参照文献[14]的经验,超声-密度综合法预测强度的回归表达式如下:

$$\sigma_c = \exp(a) \times \rho^b \times (v_p)^c \quad (1)$$

式中: σ_c 为抗压强度,MPa; v_p 为纵波波速, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; ρ 为岩样的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; a 、 b 、 c 为经验公式的试验系数。

对方程左右两边同时取对数得:

$$\ln(\sigma_c) = a + b \times \ln(\rho) + c \times \ln(v_p) \quad (2)$$

式(2)为三元一次方程,通过三元线性回归的方法即可求解系数 a 、 b 、 c 。

2.5 缺陷岩样的抗压强度修正思路分析

2.5.1 综合前面的各种岩石抗压强度修正方法,综合分析可以发现:

(1)人工修正法对显式缺陷岩样的应力跌落修正具有较好的效果,但是无法反映岩石内部微空隙、微裂隙等缺陷发育程度和矿物颗粒密实程度差异对岩样强度的影响。

(2)基于超声波波速、密度、回弹值等物理参数的强度预测方法,从宏观和统计角度可以较好地反映岩样内部微观缺陷对强度的影响,但是无法考虑岩样内部局部缺陷导致的应力跌落现象的影响。

2.5.2 基于上述分析,结合缺陷岩样在力学试验中的表现形式,特提出缺陷岩样抗压强度修正思路:

(1)对于加载过程中存在局部破坏而导致应力-应变曲线在峰值强度附近出现锯齿状分布的显式缺陷岩样,首先采用人工修正法进行应力-应变曲线进行修正,然后采用前面提出的超声-密度综合法建立岩样抗压强度与纵波波速、密度的回归方程,引入修正系数,对缺陷岩样的抗压强度进行修正。

(2)对于应力-应变曲线,没有异常波动跳跃现象,只是强度偏离正常情况的隐式缺陷岩样,直接采用超声-密度综合法进行回归分析和强度修正。

(3)在超声-密度综合法数据回归分析和强度修正过程中,首先根据岩样的纵波波速、密度和实测抗压强度值,通过回归分析得到式(1)中的经验系数,然后根据得到的拟合公式,结合岩样的纵波波速和密度值,对岩样的抗压强度进行预测。纵波波速和密度值的差异显示了岩样内部缺陷程度的

差异,其对应预测抗压强度值是不一样的。

定义一组岩样中抗压强度最高的岩样为标准岩样(比较而言,这个岩样的内部缺陷是相对最少的),抗压强度为 $\sigma_{\text{标}}$,定义修正系数 c_i 为 $\sigma_{\text{标}}$ 与各岩样预测强度的比值,如式(3)所示,这样相当于建立各岩样缺陷程度差异的定量关系,则各岩样的修正强度 $\sigma_{i\text{修}}$ 为实测抗压强度 $\sigma_{i\text{实测}}$ 与修正系数 c_i 的乘积,如式(4)所示。该修正方法的核心就是采用纵波波速和密度作为衡量岩样内部缺陷的定量指标,将岩样的缺陷修正到同一水平,这样将更好地把握岩石力学试验的规律。

$$c_i = \frac{\sigma_{\text{标}}}{\sigma_{i\text{预测}}}$$

(3)

$$\sigma_{i\text{修}} = \frac{\sigma_{i\text{实测}}}{c_i}$$

(4)

3 典型试验数据验证分析

3.1 各岩样的单轴抗压强度

图3是1组饱水砂岩的单轴抗压强度试验,共成功进行了10个岩样的试验,其中单轴抗压强度60 MPa以上的岩样有2个(1#、9#);4个岩样(2#、4#、7#、8#)的应力-应变曲线出现了锯齿状的变化,峰值抗压强度在41.01~53.40 MPa之间;4个岩样(3#、5#、6#、10#)的应力-应变曲线比较完整,但是抗压强度明显较低,在44.49~55.04 MPa之间。

(1)按照上述缺陷岩样强度的修正思路,对加载过程中应力-应变曲线在峰值强度附近出现锯齿状分布的显式缺陷岩样(2#、4#、7#、8#),首先采用人工修正法对应力-应变曲线进行修正,修正抗压强度如表1所示。

表1 基于应力-应变曲线修正岩样单轴抗压强度
Table 1 Rock samples uniaxial compressive strength modified based on stress - strain curve

编号	波速/ (km · s ⁻¹)	密度/ (g · cm ⁻³)	实测单轴 抗压强度/MPa	修正抗压 强度/MPa
1	3.968	2.637	63.16	—
2	3.778	2.607	43.05	49.49
3	3.764	2.636	50.65	—
4	3.772	2.626	43.26	47.22
5	3.685	2.637	44.49	—
6	3.941	2.626	55.04	—
7	3.753	2.621	41.01	49.37
8	3.945	2.635	53.40	61.00
9	3.939	2.634	60.14	—
10	3.767	2.635	50.68	—

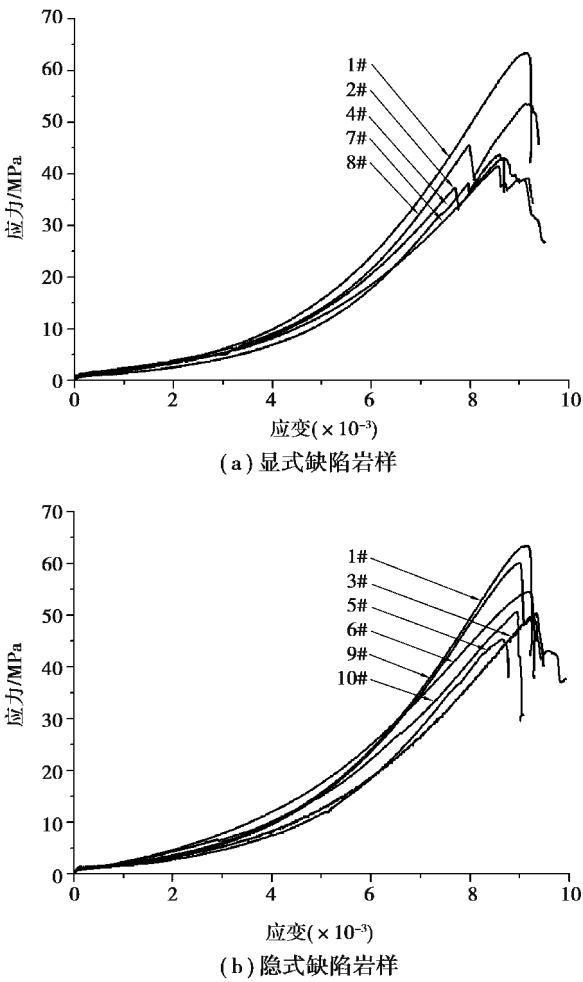


图3 典型单轴压缩应力-应变曲线
Fig.3 Typical uniaxial compression stress-strain curve

(2)根据前面建立的岩石纵波波速、密度和岩石的抗压强度经验公式,将各岩样的纵波波速、密度和抗压强度实测值进行回归分析,可以得到相关经验系数,具体如式(3)所示。

$$\sigma_{c0} = \exp(-5.442) \times \rho^{4.276} \times (v_p)^{3.948} \quad (R^2 = 0.916)$$

(3)

3.2 各岩样抗压强度修正值

采用前面提出的缺陷岩样修正方法计算修正系数,得到各岩样的抗压强度修正值如表2所示。从表2可以看出:

(1)各岩样的纵波波速、密度存在明显的差异,对应实测强度也存在明显的差异,而且具有较好的相关性。通过拟合公式预测的岩样单轴抗压强度与实测抗压强度误差在10%以内,而且大多数岩样预测强度的误差在5%以内,说明选择岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强度预测的基本参数是合理可行的。

(2)岩样修正前的抗压强度最小值、最大值、

均值、标准差分别为 44.49、63.16、53.12 和 6.363 MPa,修正后的最小值、最大值、均值、标准差分别为 57.57、63.16、61.50、2.066 MPa,修正前后各岩样的抗压强度值绘制如图 4 所示。比较而言,修正前岩样的抗压强度明显离散,而修正后岩样的抗压强度值明显集中,说明笔者提出的修正方法可以较好地修正岩样内部缺陷导致的强度的差异。

(3)笔者提出的缺陷岩样抗压强度修正方法是通过岩样纵波波速和密度定量的衡量岩样的缺陷程度,将岩样的缺陷程度修正到同一水平,然后再去比较分析岩样的力学试验结果,这样可以更好地把握力学试验规律。

表 2 岩样单轴抗压强度试验数据与修正结果

Table 2 Uniaxial compressive strength test results and correction results of rock samples

编号	实测单轴 抗压强度 /MPa	波速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	预测单轴 抗压强度 /MPa	误差 百分比	修正 系数	抗压强度修正 值/MPa
1	63.16	3.968	2.637	63.16	0.00%	1.00	63.16
2	49.49	3.778	2.607	49.55	0.12%	1.27	63.07
3	50.65	3.764	2.636	51.19	1.07%	1.23	62.48
4	47.22	3.772	2.626	50.79	7.56%	1.24	58.71
5	44.49	3.685	2.637	47.16	5.99%	1.34	59.57
6	55.04	3.941	2.626	60.38	9.71%	1.05	57.57
7	49.37	3.753	2.621	49.38	0.03%	1.28	63.14
8	61.00	3.945	2.635	61.52	0.85%	1.03	62.62
9	60.14	3.939	2.634	61.05	1.52%	1.03	62.21
10	50.68	3.767	2.635	51.27	1.16%	1.23	62.42

注:表 2 中实测单轴抗压强度是经过人工法修正后的强度。

4 结论

(1)由于岩石形成过程以及所经历地质的历史作用,自然界的岩石内部的微观裂纹、裂隙、孔隙等缺陷是客观存在的,所谓“完整岩样”只是同一组岩样中缺陷相对较少的岩样。岩石力学试验用的岩样内部总是包含不同数量、性状的缺陷,而这些缺陷正是导致岩石力学试验结果离散的根本原因。同时,岩样内部缺陷所带来的数据离散是无法通过单纯的重复试验直接消除的。

(2)在综合以往大量岩石力学试验现象统计分析基础上,详细分析了岩石内部缺陷对应力-应

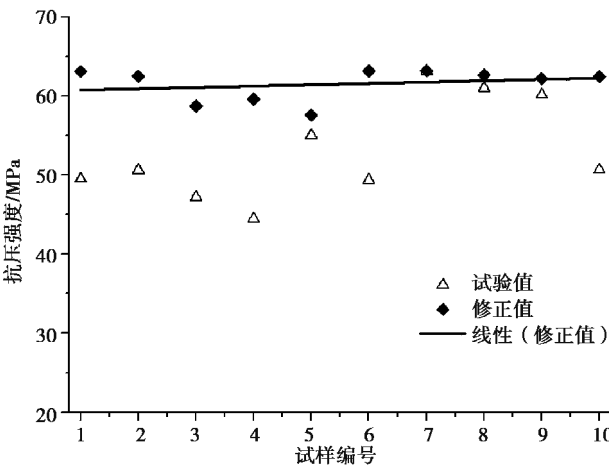


图 4 实测强度和修正强度比较

Fig. 4 Comparison of measured strength and modified strength

变曲线的影响,并基于应力-应变曲线特征,提出了显式缺陷和隐式缺陷岩样的概念。

(3)结合岩石的地质本质性和室内试验条件,选择岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强度预测的基本参数,建立了岩石纵波波速、密度和抗压强度预测经验公式。结果表明,预测强度值误差较小,说明选择岩石的密度和纵波波速作为衡量岩样缺陷程度和强度预测的基本参数是合理可行的。

(4)结合缺陷岩样在力学试验中的表现特点,针对显式缺陷和隐式缺陷岩样的试验结果分别提出了抗压强度修正方法。该修正方法的核心就是采用纵波波速和密度作为衡量岩样内部缺陷的定量指标,将岩样的缺陷修正到同一水平,这样能更好地把握岩石力学试验的规律。实例结果验证分析表明,修正后岩样的抗压强度值明显集中,说明本文中提出的修正方法可以较好地修正岩样内部缺陷导致的强度的差异。

(5)本抗压强度的修正方法可以较好地满足峰值强度的修正,修正系数可参照用于弹性模量、变形模量的修正,但是目前还不能满足应力-应变曲线的修正。

(6)笔者仅进行了单轴抗压强度试验结果实例的分析,在三轴试验中,岩样之间的差异有时候可能掩盖围压对强度的影响,也可以采用本文中提出的思路进行强度修正分析。

参考文献(References)

[1] 王思敬.论岩石的地质本质性及其岩石力学演绎[J].岩石力学与工程学报,2009,28(3):433-450.(Wang Shijing.Geological nature of rock and its deduction for rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2009, 28 (3): 433-450. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国电力工业部.工程岩体试验方法标准(GB/T50266—99)[S].北京:中国计划出版社,1999. (Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. Standard for tests method of engineering rock masses (GB/T50266-99) [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [3] 长江水利委员会长江科学院.水利水电工程岩石试验规程(SL264-2001)[S].北京:中国水利水电出版社,2001. (Changjiang River Scientific Research Institution of Changjiang Water Resources Commission. Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering (SL264-2001) [S]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 刘效云,张弛.浅谈岩石抗压强度试验中应注意的几个问题[J].煤炭科技,1999(1):18-20. (Liu Yunxiao, Zhang Chi. Several problems about rock compressive strength test should be paid attention to[J]. Coal Science & Technology Magazine, 1999(1): 18-20. (in Chinese))
- [5] 尤明庆.岩石的力学性质[M].北京:地质出版社,2007. (You Mingqing. Mechanical properties of rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [6] 尤明庆,华安增,李玉寿.缺陷岩样强度及变形特性的研究[J].岩土工程学报,1998,20(2):97-101. (You Mingqing, Hua Anzeng, Li Yushou. A study of triaxial strength and deformation of flawed specimen [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20 (2):97-101. (in Chinese))
- [7] 朱合华,周治国,邓涛.饱水对致密岩石声学参数影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,24(3):823-828. (Zhu Hehua, Zhou Zhiguo, Deng Tao. Acoustic parameters of low-porosity rock under dry and saturated conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(3): 823-828. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组.工程岩体分级标准(GB50218-94)[S].北京:中国计划出版社,1999. (The National Standard Compilation Group of People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock masses (GB50218-94) [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [9] 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. (Zhao Mingjie, Wu Delun. The ultrasonic identification of rock mass classification and rock mass strength prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 89-92. (in Chinese))
- [10] 杨文甫,仵磊,祝玉学.预测岩石单轴抗压强度的神经网络方法[J].水文地质工程地质,2003,30(6):52-54,57. (Yang Wenfu, Nai Lei, Zhu Yuxue. Method of neural network for predic tuniaxial compressive strength of rock [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, 30(6): 52-54, 57. (in Chinese))
- [11] Sarkar K, Tiwary A, Singh T N. Estimation of strength parameters of rock using artificial neural networks[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2010, 69(4): 599-606.
- [12] Dehghan S, Gh S, Chehreh C S, et al. Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural networks [J]. Mining Science and Technology. 2010, 20(1):41-46.
- [13] Zorlu K, Gokceoglu C, Ocakoglu F, et al. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models [J]. Engineering Geology, 2007, 96(3/4): 141-158.
- [14] 邓华锋,李建林,邓成进,等.岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J].岩土力学,2011,32(11):3399-3403. (Deng Huafeng, Li Jianlin, Deng Chengjin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3399-3403. (in Chinese))
- [15] 邓华锋,李建林,王孔伟,等.库岸边坡水-岩作用[M].北京:科学出版社,2016. (Deng Huafeng, Li Jianlin, Wang Kongwei, et al. Water-rock interaction in reservoir slope [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [16] 史譔,黄联捷,沈联蒂.声波时差与岩石岩性参数关系的统计分析研究[J].北京大学学报(自然科学版),1990,26(4):506-512. (Shi Ge, Huang Lianjie, Shen Liandi. Study of the relationships among travel-time differences and related parameters of a Medium using statistical analysis method [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Natural Science Edition), 1990, 26(4): 506-512. (in Chinese))