

岩石抗压强度与试件尺寸相关性试验研究

朱珍德 张爱军 邢福东 徐卫亚

(河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 针对江苏宜兴抽水蓄能电站提供的石英砂岩、砂岩、灰岩岩石试样进行抗压强度特性试验研究 ,依据岩石单轴压缩试验结果 ,将灰色预测改进 GM(1 ,1)模型与跳变灰过程理论耦合 ,建立了风干状态、自然状态、饱和状态下岩石的单轴抗压强度与试件高径比之间的非线性关系式 ,利用该关系式可以很方便地在相关岩土工程中为相似岩石估算其强度值提供参考、借鉴。

关键词 单轴压缩试验 抗压强度 岩石 相关性

中图分类号 :TU452 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)01-0042-04

岩石试件在单向压缩时能承受的最大压应力称为岩石单轴抗压强度(简称抗压强度)。岩石的抗压强度与试件的形状、尺寸密切相关。根据研究 ,强度随着试件横截面增大而减小的规律性可用下式表示^[1] :

$$\sigma_c = (\sigma_c)_0 \left(\frac{D_0}{D} \right)^m \tag{1}$$

式中 : σ_c ——直径(圆柱形试件)或截面边长(立方柱形试件)为 D 时试件的抗压强度 ,MPa ; $(\sigma_c)_0$ ——当所采用的标准直径或边长为 D_0 时试件的抗压强度 ,MPa ; m ——指数 ,其值一般在 0.1 ~ 0.5 之间。

岩石的抗压强度不但与试件的截面积有关 ,还与试件的高度有关。刘宝琛院士^[2]在研究岩石抗压强度的尺寸效应时 ,提出了一种指数函数形式的经验公式 :

$$\sigma_c = \sigma_m + (\sigma_0 - \sigma_m) e^{(-\beta_c D)} \tag{2}$$

式中 : σ_m ——岩体强度 ,MPa ; σ_0 ——岩石强度 ,MPa ; β_c 强度衰减系数 , cm^{-1} 。

郭中华等^[3]在研究岩石单轴抗压强度特性时 ,得到岩石抗压强度与试件高径比成线性关系 :

$$\sigma_c = \sigma_c^* \left[0.778 + 0.222 \left(\frac{H}{D} \right)^{-1} \right] \tag{3}$$

式中 : σ_c^* ——高径比为 1 的试件单轴抗压强度。对于式(3) ,高径比等于 1 的短扁试件 σ_c^* 并不易在试验中获得 ,即使做试验结果也不可靠。

基于前人研究岩石单轴抗压强度与试件尺寸相关性的科研工作 ,针对宜兴抽水蓄能电站坝址石英砂岩、砂岩、灰岩单轴压缩试验结果 ,本文首次运用灰色理论 GM(1 ,1)模型^[4,5] ,探讨试件尺寸与单轴抗压强度经验公式 ,由此可估算任何试件尺寸的单轴抗压强度 ,并能克服式(1)和式(3)的不足。

1 岩石单轴压缩试验方法

1.1 工程实例简介

针对宜兴抽水蓄能电站提供的岩石试样 ,按照该电站的要求 ,分别对 3# 西梅园(石英砂岩)、5 下库料场(长石砂岩)、玉山—南坝料场(灰岩)、芙蓉寺料场(灰岩)、五通组料场(压、软砂岩)、2# 茅山组(压、软)砂岩以及 4# 洞挖料场(砂岩) ,共 9 种岩石试件分别在 3 种状态 ,即自然状态、饱和状态和风干状态下进行单轴压缩全应力-应变过程试验。

1.2 单轴压缩试验方法及条件

试件的单轴压缩试验是在 RMT—150B 型岩石力学试验系统下进行的 ,该系统是专为岩石或混凝土类的

收稿日期 2003-07-17
基金项目 国家自然科学基金海外青年合作研究基金项目(50128908)
作者简介 朱珍德(1964—) ,男 ,河北盐山人 ,博士 ,教授 ,主要从事岩石力学教学、科研工作。

工程材料进行力学性能试验而设计的.它试验功能齐全、操作方便、自动化程度高,试验可完全在计算机控制下进行.

根据工程原址提供的岩芯及岩块,加工成直径(边长)为 50 mm 左右、高度为 100 mm 左右的试样.试件加荷过程中,采用位移控制方式,位移速率为 0.005 mm/s.

根据工程要求,笔者分别对 9 种不同岩石在不同含水状态(风干、自然、饱和)下进行单轴压缩试验.考虑到岩石力学性质离散性大的特点,在各个状态下对同一岩石分别制备了 7 个以上的试件进行试验.从试验结果来看^①,岩石的抗压强度、弹性模量、变形模量、泊松比和软化系数都是比较合理的.

2 岩石单轴强度尺寸效应经验公式

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授于 1982 年在国际上首先提出来的,该理论在短短的 20 a 左右已经渗透到农业、经济、运输、气象和土木工程等诸多领域,具有广泛的应用前景.所谓灰色系统,是指既含已知信息又含未知信息的系统.灰色预测中的 GM(1,1)模型是灰色理论的核心,其本质就是用指数曲线逼近已知信息.灰色理论将无规律的原始数据生成后,使其变成有规律的生成数据序列,随后建立微分方程模型. GM(1,1)建模过程如下:

对原始数据序列,按高径比大小建立序列:

$$\sigma^{(0)} = (\sigma_{(1)}^{(0)}, \sigma_{(2)}^{(0)}, \sigma_{(3)}^{(0)}, \dots, \sigma_{(n)}^{(0)}) \tag{4}$$

其中 $\sigma_{(n)}^{(0)}$ 是高径比为 n 的岩石试样强度.做一次累加(1-AGO)生成:

$$\sigma^{(1)} = (\sigma_{(1)}^{(1)}, \sigma_{(2)}^{(1)}, \sigma_{(3)}^{(1)}, \dots, \sigma_{(n)}^{(1)}) \tag{5}$$

其中

$$\sigma_{(k)}^{(1)} = \sum_{i=1}^{(k)} \sigma_{(i)}^{(0)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

对 $\sigma^{(1)}$ 建立线性动态微分方程:

$$\frac{d\sigma^{(1)}}{dx} + a\sigma^{(1)} = b \tag{6}$$

令

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(\sigma_{(1)}^{(1)} + \sigma_{(2)}^{(1)}) & 1 \\ -\frac{1}{2}(\sigma_{(2)}^{(1)} + \sigma_{(3)}^{(1)}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(\sigma_{(n-1)}^{(1)} + \sigma_{(n)}^{(1)}) & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

记参数列为

$$\hat{a} = [a, b]^T \tag{8}$$

$$Y_n = [\sigma_{(2)}^{(0)}, \sigma_{(3)}^{(0)}, \sigma_{(4)}^{(0)}, \dots, \sigma_{(n-1)}^{(0)}, \sigma_{(n)}^{(0)}]^T \tag{9}$$

由最小二乘(LSE)得

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \tag{10}$$

因此, GM(1,1)模型的指数响应形式为

$$\hat{\sigma}_{(x+1)}^{(1)} = ce^{-ax} + \frac{b}{a}$$

对模型值进行累减运算得到原始系列的预测值

$$\hat{\sigma}_{(x+1)}^{(0)} = \hat{\sigma}_{(x+1)}^{(1)} - \hat{\sigma}_{(x)}^{(1)} = d[e^{-ax} - e^{-a(x-1)}]$$

由定解条件,当 $x = 1$ 时, $\sigma_{02}^* = \hat{\sigma}_{(2)}^{(0)} = d(e^{-a} - 1)$ 得: $c = \frac{\sigma_{02}^*}{e^{-a} - 1}$, 推出风干状态下岩石单轴抗压强度与高径比的经验公式:

$$\sigma(h, d) = \sigma(x) = \sigma_{02}^* \frac{e^{-a(x-1)} - e^{-a(x-2)}}{e^{-a} - 1} \tag{11}$$

式(11)可化为

$$\sigma(h, d) = \sigma_{02}^* e^{-a\frac{h}{d}} e^{2a} \tag{12}$$

① 江苏宜兴抽水蓄能电站坝料试验成果报告,河海大学科研情报,2001,14—17.

式中： $\sigma(h, d)$ ——任意高、直径的试样单轴抗压强度； σ_{02}^* ——高径比为2的试样单轴抗压强度； a ——待定系数，与岩性、试验加荷速率等因素有关。

式(12)的物理意义如下：

- a. 当 $h/d \rightarrow \infty$ ，即试件为细长岩块时，由式(12)得 $\sigma(h, d) \rightarrow 0$ 。说明细长杆 $h/d \rightarrow \infty$ ，其抗压强度很小。
- b. 当 $h/d \rightarrow 2$ ，即试件为标准试件^[3]时，由式(12)得 $\sigma(h, d) \rightarrow \sigma_{02}^*$ 。
- c. 当 $h/d \rightarrow 0$ ，即试件为扁平岩块时，由式(12)得 $\sigma(h, d) = \sigma_{02}^* e^{2a} = \text{const.}$ 。说明岩石试样 h/d 小到一定数值，其抗压强度趋于一个定值，也就是说试样尺寸再减小，其强度不变。这个结论验证了有关文献^①的结论。

试验结果又表明，单轴抗压强度随试件含水状态及横截面积不同而变化的规律可表示为

$$\sigma_{cz} = \sigma_{02}^* (d/d_0)^{m_z}$$

(13)

$$\sigma_{cb} = \sigma_{02}^* (d/d_0)^{m_b}$$

(14)

式中： σ_{cz} ——直径为 d 的试件在自然状态下的单轴抗压强度； σ_{cb} ——直径为 d 的试件在饱和状态下的单轴抗压强度； d ——试件的直径， μm ； d_0 ——试件的标准直径，取为 50 mm； m_z ——待定常数，与试件天然含水率以及岩石结构有关； m_b ——待定常数，与岩石结构及加荷速率有关。

3 单向抗压强度试验结果分析

选择 5 种岩石、10 份抗压强度试验结果^[6]进行强度与尺寸效应相关性分析，岩石名称及综合试验条件列入表 1。根据试验结果^①及式(12)，用计算机拟合优化系数并计算拟合相对误差，均列入表 2。

表 1 10 种岩样尺寸及数量

Table 1 Sizes of ten rock samples and number of test groups

岩石名称	岩样形状	岩样大小/mm		试验组数	试验数量/组
		直径(或边长)	高		
3# 西梅园料场石英砂岩	长方体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	19
3# 西梅园料场石英砂岩	圆柱体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	20
4# 洞挖料场砂岩	长方体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	21
4# 洞挖料场砂岩	圆柱体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	20
2# 茅山组(压)砂岩	长方体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	18
2# 茅山组(压)砂岩	圆柱体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	19
玉山—南坝料场灰岩	长方体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	17
玉山—南坝料场灰岩	圆柱体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	20
芙蓉寺料场灰岩	长方体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	16
芙蓉寺料场灰岩	圆柱体	47 ~ 55	90 ~ 120	4	19

由试验结果可以发现，抗压强度受到很多因素的影响与制约，这些因素大体可分为两种：其一是岩石本身因素的影响，即岩石种类不同，所含矿物成分、颗粒大小、胶结物也必然存在差异，也就具有不同的强度。表现为含石英的砂岩比灰岩强度高，而石英岩状砂岩比岩屑石英砂岩强度高。其二是试验环境与物理环境的影响，例如试件尺寸、形状、试件的含水状态等。限于工程要求的客观条件制约，本次试验中矿物成分与含水量等因素影响较为明显。

4 结 语

- a. 首次引入灰色系统 GM(1,1)模型，利用岩石单轴压缩试验结果，推导了岩石单轴抗压强度与试样高径比之间的非线性关系式。
- b. 从试验结果分析(表 2)中，可以验证公式(12)是可靠的，但该公式对于扁平试样不适用。
- c. 根据工程原址提供的岩芯试件进行了 9 种不同岩样、3 个不同含水状态的单轴压缩试验，结果表明，不同岩性的岩石具有不同的强度特征，随着含水量的增加，岩石的抗压强度将明显减小，但含水状态对各种岩石影响的程度不相同。

① 江苏宜兴抽水蓄能电站坝料试验成果报告，河海大学科研情报，2001，14—17。

表 2 岩芯在风干状态、自然状态、饱和状态下的强度值

Table 2 Strength of rock core in air-dried natural and saturation states

岩石名称	σ_{02}^*/MPa	σ_{cf}			m_z	σ_{cz}			m_b	σ_{cb}		
		理论值 /MPa	实测值 /MPa	误差 /%		理论值 /MPa	实测值 /MPa	误差 /%		理论值 /MPa	实测值 /MPa	误差 /%
3# 西梅园料场 石英砂岩	240.251	213.077	211.461	0.764	1.28	185.747	173.455	7.086	2.60	146.677	136.273	7.635
		213.856	223.096	4.142		186.866	198.424	5.825		143.411	151.476	5.325
		213.947	218.058	1.885		186.691	187.958	0.674		144.231	142.160	1.456
										139.533	145.245	3.933
4# 洞挖料场 砂 岩	231.214	205.381	201.476	1.938	2.09	149.517	145.045	3.083	3.17	128.793	129.124	0.257
		205.898	216.321	4.818		153.227	150.928	1.523				
		205.229	194.279	5.636		153.149	149.112	2.707		123.446	116.830	5.663
		205.062	211.461	3.026								
		205.139	199.046	3.061		152.138	163.455	6.923		123.923	130.589	5.104
2# 茅山组(压) 砂 岩	150.365	133.977	136.145	1.592	1.50	112.459	123.015	8.581	2.92	86.052	87.710	1.890
		133.225	135.923	1.985		114.009	127.589	10.644		86.716	86.131	0.680
		133.215	130.695	1.928		113.803	102.613	10.905				
玉山—南坝料场 灰 岩	130.623				1.25	113.844	103.486	10.009	2.14	85.985	84.952	1.216
		116.188	118.996	2.360		100.205	91.584	9.413		84.852	88.716	4.355
		116.046	130.154	10.839		101.326	108.057	6.229		84.935	86.812	2.163
		116.215	101.784	14.178		101.606	112.674	9.823				
芙蓉寺料场 灰 岩	113.172				0.96	101.886	93.962	8.433	3.22	84.757	79.133	7.107
		100.496	100.295	0.200		92.715	94.429	1.815		63.574	64.460	1.374
		101.018	109.900	8.082		92.416	91.584	0.909		55.257	58.649	5.783
		100.242	93.452	7.266		93.487	92.632	0.923		59.266	51.207	15.738
										57.923	62.572	7.429

参考文献：

[1] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1981.60—63.

[2] 刘宝琛 , 张家生 , 杜奇中. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报 ,1998 ,17(6) 611—614.

[3] 郭中华 , 朱珍德 , 杨志祥 , 等. 岩石强度特性的单轴压缩试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版) ,2002 ,30(2) 93—96.

[4] DENG Ju-long. Control problem of grey systems[J]. Systems and Control Letters ,1982 ,(5) 285—294.

[5] 邓聚龙. 灰色系统理论的 GM 模型[J]. 模糊数学 ,1985 ,(2) 22—32.

Experimental study on correlation between compressive strength
of rocks and sample size

ZHU Zhen-de , ZHANG Ai-jun , XING Fu-dong , XU Wei-ya

(Geo-technical Research Institute of Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : An experimental study is performed on the compressive strength of quartz sandstone , sandstone , and limestone samples from the Yixing pumped-storage power station. According to the test results , nonlinear equations for the relationship between the uniaxial compressive strength of rocks and length-to-diameter ratio of the samples are developed for the air-dried state , natural state , and saturation state by coupling of the improved grey model GM (1 ,1) with the jumping grey theory. With the equations , some references can be conveniently provided for prediction of the compressive strength of similar rocks in related geo-technical projects.

Key words : uniaxial compression test ; compressive strength ; rock ; correlation