

基于灰色关联理论的红层软岩尺寸效应研究*

吕龙龙^{1,2} 宋丽^{1,2} 廖红建¹ 李杭州¹ 张天宇¹

(1. 西安交通大学 土木工程系 西安 710049; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所
岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要: 为探究红层软岩岩体与小尺寸软岩试件实验强度的关系,对定西红层软岩的不同高径比试样进行单轴压缩试验,研究该类软岩的尺寸效应。考虑软岩力学性质复杂,弹性模量、泊松比、变形模量均为不确定值,引入灰色关联理论(比较了现有的4个灰色关联模型,表明相对关联模型更适用于软岩的尺寸效应研究)。计算和分析了软岩高径比、弹性模量、变形模量、泊松比与强度的相对关联度,结果表明:试样高径比 ≥ 1.2 范围,泊松比对强度影响最大,高径比其次;试样高径比 < 1.2 范围,高径比对强度影响最大,泊松比其次;变形模量对强度的影响大于弹性模量。对该类红层软岩进行尺寸效应研究,需要考虑高径比、泊松比、变形模量共同影响作用。定义了尺寸效应系数、变形模量兆帕像,采用简化维度的方法给出了尺寸效应系数的四维方程,拟合结果与试验结果具有良好的一致性。

关键词: 红层软岩; 灰色关联分析; 尺寸效应系数; 兆帕像

中图分类号: TU411.5 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2018)06-1571-06

Size Effect Study of Red Soft Rock Based on Grey Relating Analysis Theory

Lü Longlong^{1,2}, Song Li^{1,2}, Liao Hongjian¹, Li Hangzhou¹, Zhang Tianyu¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R. China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P.R. China)

Abstract: To investigate the size effect relationship between rock mass and small size sample on strength of red bed soft rock, a series of uniaxial compression tests of the red bed soft rock from Dingxi with different ratio of height to diameter were done. Elastic modulus, Poisson ratio and deformation modulus of soft rock are all uncertain values due to its complicated mechanical properties. The grey correlation analysis theory was introduced and four grey correlation analysis models were compared. Research results showed that grey correlation incidence model is more suitable for the red bed soft rock. By calculating correlation incidence degree of the sample's height diameter ratio, elastic modulus, deformation modulus, Poisson ratio on strength, the analysis results show that when the height diameter ratio is greater than or equals to 1.2, the effect of Poisson ratio on strength is largest and the height diameter ratio is second, when the height diameter ratio is less than 1.2, the effect of height diameter ratio on strength is the largest, the Poisson ratio is second and the effect of deformation modulus on strength is greater than elastic modulus. Thus, research on size effect of the red bed soft rock needs to consider the joint effect of height diameter ratio, Poisson ratio and deformation modulus. By defining the size effect coefficient and deformation modulus megapascal image, the four-dimensional equation of size effect is fitted by using the method of simplifying dimension. The simulation results show good agreement with the test results.

Keywords: red bed soft rock; grey relating analysis theory; size effect coefficient; megapascal image

* 收稿日期: 2018-06-11(修改稿)

作者简介: 吕龙龙(1991-) 男 陕西榆林人,工程师,主要从事于软岩力学特性及软岩本构关系的研究。

E-mail: leo_lvll@foxmail.com

通信作者: 宋丽(1973-) 女 宁夏西吉人,副教授,主要从事于钢筋混凝土基本理论及岩土工程材料本构关系的研究。E-mail: songli@xjtu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(xjj2013076); 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(201105047)

0 引言

红层软岩主要由中生代、新生代的土体沉积形成,在我国分布广泛,在甘肃省面积最广,可达 3 000 km²[1]。红层软岩沉积时间短,成岩效果较差,遇水强度急剧下降,极易发生崩块、崩解等现象。基于该类软岩特殊性,国内外对其进行了大量研究:彭柏兴等[2]对湘浏地洼盆地第三纪—白垩纪红层的风化带、抗压强度、承载力取值及路用性能等问题进行了探讨;徐红梅等[3]通过对试验数据进行回归分析,建立了红层的饱和重度与饱和单轴抗压强度、饱和单轴抗压强度与割性模量、三轴抗压强度与围压之间的相关方程。软岩具有尺寸效应,将室内试验获取的小尺寸试件强度直接用于工程实际是不安全的,但该类软岩尺寸效应的研究少之又少。

尺寸效应的影响在岩体工程设计中非常重要,自 20 世纪 30 年代以来,学者进行了大量的试验研究,并总结出了较好的经验公式。刘宝琛等[4]通过研究 7 种岩石不同尺寸立方体、圆柱体的单向抗压强度,提出试样强度与直径的经验公式;朱珍德等[5]等通过研究高度直径均不相同的大理岩灰岩,引入灰色系统 GM(1,1)模型,推导出任意高度的单轴抗压强度 $\sigma(h, d)$ 与标准试样(高径比为 2.0)的单轴抗压强度 σ_{02}^* 的关系。现尺寸效应的研究,由于试验用岩的岩性稳定,默认岩样的弹性模量与泊松比为定值,均仅考虑了试样高径比与单轴抗压强度的关系。软岩有着复杂的岩石力学性质,通过试验计算得各个试样的弹性模量、泊松比并非为定值。查文华等[6]研究了不同温度下砂质泥岩力学特征试验研究,共对 7 组 21 个试样进行单轴压缩试验,岩样弹性模量的范围为 0.998 ~ 4.138 GPa,泊松比的范围为 0.004 ~ 0.458。

20 世纪 80 年代初,邓聚龙等[7]和刘恩峰等[8]创立了灰色理论,适用于研究“少数据、不确定性系统”的问题。岩土学科众多学者应用了该理论:刘晓明等[9]采用灰色关联度法对湘南地区红层软岩的粒度分形特征以及矿物、化学成分试验数据与其崩解性进行了关联分析;朱连根等[10]应用灰色关联理论对洞室围岩应力、岩性条件、能量条件与岩爆进行了关联分析。红层软岩力学性质复杂且不确定,试验数据有限,不足以应用概率统计研究,灰色理论是研究红层软岩尺寸效应较为理想的方法。

依据上述分析,本文对不同高径比红层软岩试样进行单轴抗压强度对比试验,计算得出不同试样的弹性模量、变形模量、泊松比。并选用相对关联分析模型对红层软岩的高径比、泊松比、弹性模量、变形模量与单轴抗压强度进行了关联分析,探究影响红层软岩强度的因素。

1 尺寸效应试验

1.1 试验概况

本文所用岩样取自甘肃省定西市兰渝铁路(夏广段)LYS-I 标胡麻岭隧道,取样位置埋深 220 m,为上第三系沉积形成,含有近 40% 的粘土矿物成分。制取试样的高度为:20 ~ 100 mm,每 10 mm 制取一组试样,每组 3 个试样,共 9 组。对 9 组试样进行单轴压缩试验。试验设备采用中国科学院武汉岩土力学研究所多功能岩石实验系统实验室的 RMT150C 岩石力学试验系统。试样均处于天然含水状态,加荷过程中,采用位移控制方式,位移速率为 0.001 mm/s。相对于力控制式,位移控制式能很好的防止试样受压瞬间崩裂,有效地保证了试验人员、仪器的安全,在试验过程中同步显示出试样完整的应力应变关系曲线。

1.2 试验数据处理

各试件的弹性模量、变形模量和泊松比见表 1 所示。

表 1 红层软岩力学参数的主要试验结果

Table 1 Experimental results of main mechanical characteristics of red bed soft rock

$\frac{H}{D}$	编号	σ /MPa	E_{av} /GPa	E_{50} /GPa	ν
2.0	C1001	13.827	1.109	1.466 5	0.201 3
	C100 2	14.83	1.146	1.039	0.196 1
	C100 3	14.72	1.216	1.023 8	0.232 2
1.8	C901	11.192	1.204	1.23	0.389 6
	C902	10.409	1.366	1.181	0.386 2
	C903	12.45	2.364	2.277	0.197 8
1.6	C801	10.846	1.897 3	1.72	0.270 5
	C802	10.885	1.771 7	1.537	0.237 4
	C803	10.759	1.980 6	1.736	0.206 1
1.4	C701	11.176	1.2138	1.177	0.225 6
	C702	22.069	2.732	2.514	0.156 7
	C703	8.996	1.518 7	1.227	0.289 4

续表1

$\frac{H}{D}$	编号	σ/MPa	E_{av}/GPa	E_{50}/GPa	ν
1.2	C601	17.54	1.578	1.936	0.122 2
	C602	8.666	1.315 8	1.548	0.214 2
	C603	11.02	2.702 3	2.224	0.215 3
1.0	C501	16.479	2.151 9	2.026	0.224 3
	C502	10.643	1.27	1.186	0.121
	C503	17.507	2.465	2.032	0.312 3
0.6	C301	21.367	1.629	1.309	0.310 6
	C302	20.117	1.333	0.921	0.451 4
	C303	23.778	1.987	1.59	0.206
0.4	C202	24.875	1.311	0.999	0.228 5
	C203	27.08	1.535 7	1.034	0.261 3

弹性模量、变形模量计算方法参见《实验室试验标准化委员会文件》建议:弹性模量 E_{av} 由轴向应力-应变曲线中近似直线区段的平均斜率决定;变形模量 E_{50} 由零应力到极限强度的 50% 测出的割线模量^[11]。

何鹏等^[12]统计整理 300 余个沉积岩岩石的测试结果,建立了 10 个针对不同结构构造分类的沉积岩单轴抗压强度与弹性模量之间存在着模糊的正相关性。在本试验中,试样的弹性模量不是一个定值,则在研究红层软岩的尺寸效应需要考虑弹性模量的影响。

泊松比计算方法参见《实验室试验标准化委员会文件》建议^[11]:

$$\nu = - \frac{E_{av}}{\text{径向曲线的斜率}} \quad (1)$$

式中: ν 为岩体泊松比是反映岩体侧向变形的重要参数,泊松比的取值直接影响着岩体的强度和变形特征^[13]。在研究红层软岩尺寸效应则需要考虑泊松比的影响。试验中 4 个软岩试样在横向位移测点处发生破坏,泊松比计算值为错误值,剔除 4 个试验数据,试验结果见表 1。该试验很明显为“少数据,不确定”系统,灰色理论适用于该试验数据分析。

2 灰色关联分析

灰色关联分析是灰色理论一个重要组成部分,其基本思想是通过线性插值的方法将系统因素的离散行为观测值转化为分段连续的折线(即以序

列单点数值为纵坐标,单点所在序列位数为横坐标绘制折线)进而根据折线的几何特征构造关联度模型。折线几何形状越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之越小^[8]。灰色关联分析是多个比较序列与特征序列的关联度分析。关联度是一个与选定的系统特征序列相关的相对值,作为多个比较序列与特征序列关联大小的参考值。

灰色关联分析模型分为:①灰色接近关联度,即用两个序列对应点的距离测度系统因素变化趋势的相似性;②灰色绝对关联度,即用两序列相对于各自始点的变化速率确定两序列的关联度;③灰色相对关联度,需预先对序列进行算子处理,使得关联序列为数据接近的无量纲量,后续与绝对关联模型算法相同;④灰色综合关联度,为绝对关联度和接近关联度乘以加权系数之和。

2.1 分析模型的选择

本文主要分析单轴抗压强度、弹性模量、变形模量、高径比和泊松比的关联度。根据试验测得,弹性模量数量级为 10^9 ,与泊松比、高径比相差 9 个数量级。数据需预先通过算子作用,化为数量级相近的无量纲量,所以分析模型不能选择绝对关联模型和综合关联模型。则需要比较接近关联模型和相对关联模型更适合本文的关联分析。

定义区间值化算子 D_3 :

$$X^i = x_i(k) d_3 = \frac{x_i(k) - \min_k x_i(k)}{\max_k x_i(k) - \min_k x_i(k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $x_i(k)$ 为 i 序列的第 k 个试验数据, X^i 为 x_i 的区间像序列,经过 D_3 处理后序列的区间像取值范围在 $[0, 1]$ 内。

定义逆化算子 D_4 :

$$X''i = x_i(k) d_4 = 1 - x_i(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $X''i$ 为 x_i 的逆化像序列。

分析高径比在 $[1.2, 2.0]$ 范围内试样泊松比与单轴抗压强度的关联度。首先对所测试验数据通过区间化算子 D_3 经式(2)处理,得到泊松比与单轴抗压强度的区间像,区间像序列折线如图 1。泊松比的区间像与单轴抗压强度的区间像成逆关联,即泊松比区间像增加单轴抗压强度区间像减小。

对泊松比区间像按逆化算子 D_4 经式(3)处理,生成逆化像,其折线如图 1。泊松比逆化像与单轴强度区间像的关联度远大于区间像与单轴强度区间像的关联度。计算单轴抗压强度与泊松比

的正逆接近关联度和正逆相对关联度,结果见表 2。逆接近关联度与正接近关联度仅相差 13.0%,而逆相对关联度与正相对关联度相差 43.9%。相对关联模型能更明显地表示泊松比与单轴抗压强度的关联程度大小。

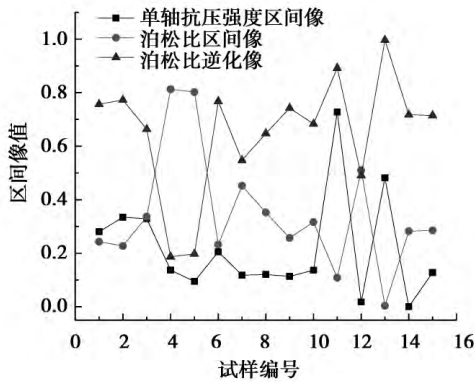


图 1 高径比在 1.2~2.0 范围内试样单轴抗压强度与泊松比的区间像、逆化像折线图

Fig. 1 Interval and reverse image line chart of UCS and Poisson ratio (height-to-diameter ratio is 1.2~2.0)

表 2 单轴抗压强度与泊松比灰色关联度计算结果

Table 2 Degree of grey incidence of UCS & Poisson ratio

关联类型	接近关联度	相对关联度
ν 正关联	0.554 7	0.584 5
ν 逆关联	0.627 2	0.841 0

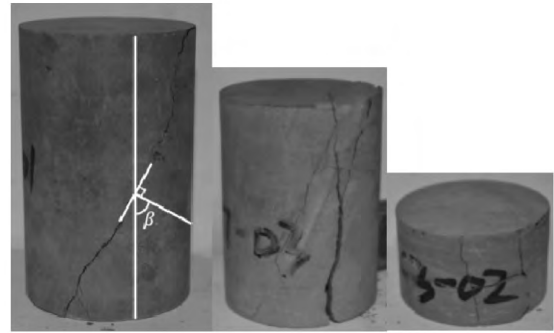
综上所述,应选择相对关联模型来分析红层软岩的尺寸效应。

2.2 尺寸效应的相对关联分析

依据上述分析,相对关联分析模型更适合用于研究红层软岩的尺寸效应。以单轴抗压强度作为特征序列,高径比、泊松比、弹性模量、变形模量作为比较序列,进行相对关联分析。首先对各序列按式(4)进行区间值算子作用,得到各序列的区间像。

基于试样破坏形态(如图 2)的分析,高径比 < 1.2 的范围内,试样由于端部效应存在三向受力状态^[14],破坏形式主要为拉伸破坏、复杂破坏;高径比 ≥ 1.2 的范围内,试样主要为剪压破坏形式,出现单轴受力状态部分,随着试样高度的增加,试样单轴受力部分也增加。需要分两部分绘制各序列区间像的折线图,如图 3~4。

基于对图 3、图 4 的分析,在高径比 ≥ 1.2 范围内,高径比、弹性模量、变形模量与单轴抗压强度成



(a) 剪压破坏 (b) 拉伸破坏 (c) 复杂破坏

图 2 试样破坏形式

Fig. 2 Rock samples' failure forms

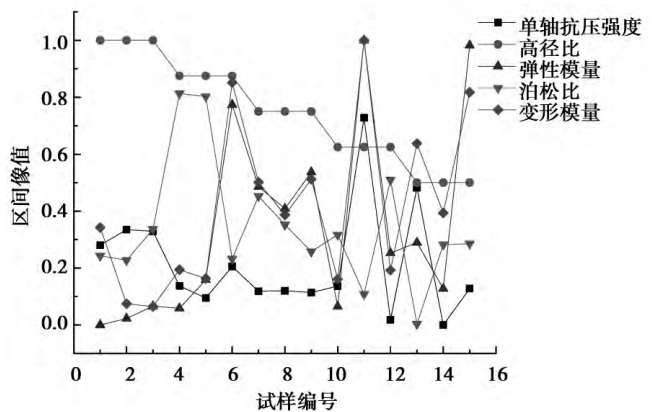


图 3 高径比在 1.2~2.0 试样各试验数据区间像

Fig. 3 Interval image line chart of mechanical indexes (height-to-diameter ratio is 1.2~2.0)

正关联,泊松比与单轴强度成逆关联;在高径比 < 1.2 范围内,泊松比、弹性模量、变形模量与单轴抗压强度成正关联,高径比与单轴强度成逆关联。求取相对关联度,见表 3。

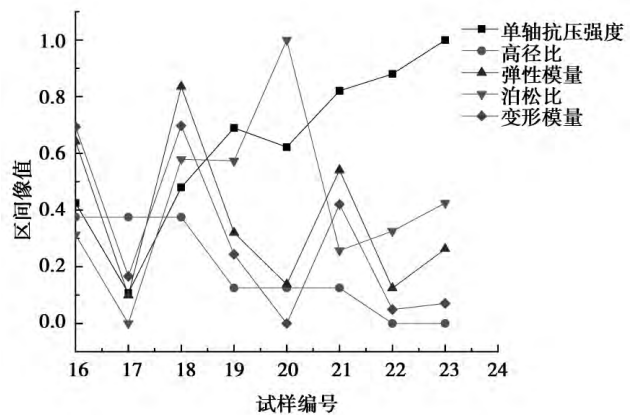


图 4 高径比在 0.4~1.0 试样各试验数据区间像

Fig. 4 Interval image line chart of mechanical indexes (height-to-diameter ratio is 0.4~1.0)

3 尺寸效应分析

在高径比 ≥ 1.2 范围内,泊松比对试样单轴抗压强度影响最大,高径比其次;在高径比 < 1.2 范围内,高径比对试样单轴抗压强度影响最大,泊松比其次。变形模量大于弹性模量对试样单轴抗压强度的影响。所以,在研究试样尺寸效应,需要同时考虑泊松比、变形模量对试样单轴抗压强度的影响。

为拟合方便,定义尺寸效应系数:

$$\eta = \frac{\sigma_{H/D}}{\sigma_c} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{H/D}$ 为非标准尺寸试样的单轴抗压强度, σ_c

为标准尺寸(高度 100 mm,直径 50 mm)试样的单轴抗压强度。

定义变形模量兆帕像 E'_{50} ,为一个数量级小的无量纲量:

$$E'_{50} = \frac{E_{50}}{1\text{GPa}} \quad (5)$$

在高径比 ≥ 1.2 和 < 1.2 的范围内,各项力学参数关联形式不同,需要分部拟合。拟合数据共有 4 组变量,为一个四维度的拟合。降低该拟合的运算量,需要先将四维度降为三维度,再升至四维度。即先将变形模量视为一定值,选取变形模量兆帕像相近(范围为 1.023 8~1.227)的数据进行三维拟合。

表 3 灰色相对关联度计算结果

Table 3 Relative degree of grey incidence

试样范围	H/D 正关联	H/D 逆关联	E_{av} 正关联	E_{50} 正关联	ν 正关联	ν 逆关联
$H/D \geq 1.2$	0.675 3	/	0.540 7	0.607 8	/	0.841 0
$H/D < 1.2$	/	0.990 9	0.538 8	0.531 0	0.868 5	/

得到三维度的尺寸效应系数 η_3 与高径比和泊松比的关系:

$$\eta_3 = f(H/D, \nu) \quad (6)$$

将所有试验数据代入式(6),得到试样的三维尺寸效应系数 η_3 ,计算试样试验得到的尺寸效应系数 η 与 η_3 的比值,拟合试样 $\frac{\eta}{\eta_3}$ 与变形模量兆帕像的关系:

$$\frac{\eta}{\eta_3} = g(E'_{50}) \quad (7)$$

则试样尺寸效应系数为:

$$\eta = f(H/D, \nu) \cdot g(E'_{50}) \quad (8)$$

经过拟合简化得到该类红层软岩在高径比 \geq

1.2 的范围内,试样尺寸效应系数与各力学指标的关系为:

$$\eta = \frac{H}{D} \cdot e^{(\alpha+\beta\nu)} \cdot (\gamma E'^2_{50} + \varepsilon E'_{50} + 1) \quad (9)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ 为与软岩性质相关的参数。

在高径比 < 1.2 的范围内,试样尺寸效应系数与各力学指标的关系为:

$$\eta = (\alpha + \beta\nu + \gamma \frac{H}{D}) \cdot (\varepsilon E'^2_{50} - E'_{50} + 1) \quad (10)$$

各参数值、两次拟合的拟合系数见表 4,拟合效果良好。

表 4 尺寸效应拟合结果

Table 4 Fitting results of size effect

H/D 范围	α	β	γ	ε	1st R^2	2nd R^2
≥ 1.2	0.302 7	-1.173	0.281 6	-0.773 8	0.936 6	0.563 8
< 1.2	6.244	-0.821 6	-4.309	0.418 1	0.944 6	0.962 2

4 结论

(1) 同一地区采集软岩样的力学性质复杂,弹性模量、泊松比为一个范围值。在理论计算、数值模拟中不能将其视为定值。

(2) 比较现有的 4 个灰色关联分析模型得知:应用相对关联模型较接近关联模型能更明显地表现出影响因子关联程度。比较序列间数量级相差过大时,相对关联模型优于绝对关联模型。

(3) 在高径比 ≥ 1.2 的范围内,泊松比与试样单轴强度成逆关联,泊松比较高径比、弹性模量、变形模量对试样强度影响最大。在高径比 < 1.2 的范围内,高径比与试样强度成逆关联,高径比对试样强度影响最大,泊松比次之。试样变形模量对强度的影响大于弹性模量。在研究软岩试样的尺寸效应,需要同时考虑试样泊松比、弹性模量、变形模量等对强度的影响。

(4) 在高径比 ≥ 1.2 的范围内,高径比与强度呈线性关系、泊松比与强度呈指数关系、变形模量与强度呈二次线性关系;在高径比 < 1.2 的范围内,泊松比与高径比的和与强度呈线性关系、变形模量与强度呈二次线性关系。

天然节理裂隙、原始地应力、尺寸效应等多个因素共同造成了岩体强度与小尺寸试件强度的差异性。本文研究的红层软岩尺寸效应为后续继续研究红层岩体强度与小尺寸试件强度关系奠定了基础。

参考文献(References)

- [1] 刘小伟, 谌文武, 刘高, 等. 引洮工程红层软岩隧洞 TBM 施工预留变形量分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1207-1214. (Liu Xiaowei, Chen Wenwu, Liu Gao, et al. Analysis of reserved deformation during the construction of rock-bed soft rock tunnel by TBM in Yintao Project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1207-1214. (in Chinese))
- [2] 彭柏兴, 王星华. 湘浏盆地红层软岩的几个岩土工程问题[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 141-144. (Peng Baixing, Wang Xinghua. Geotechnical problems for soft rock of red layer in Xiang-Liou Basin [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 141-144. (in Chinese))
- [3] 徐红梅, 侯龙清, 罗嗣海. 红层工程性质指标相关性研究[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(6): 43-47. (Xu Hongmei, Hou Longqing, Luo Sihai. Research of regression equation of red beds engineering property indexes [J]. Journal of East China Institute of Technology 2005, 28(6): 43-47. (in Chinese))
- [4] 刘宝琛, 张家生, 杜奇中, 等. 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. (Liu Baochen, Zhang Jiasheng, Du Qizhong, et al. Size effect on compression strength of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614. (in Chinese))
- [5] 朱珍德, 邢福东, 王军, 等. 基于灰色理论的脆性岩石抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1234-1238. (Zhu Zhende, Xing Fudong, Wang Jun, et al. Experimental study on size effect on compression strength of brittle rock based on grey theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1234-1238. (in Chinese))
- [6] 查文华, 宋新龙, 武腾飞. 不同温度条件下煤系砂质泥岩力学特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 809-816. (Zha Wenhua, Song Xinlong, Wu Tengfei. Experimental study of mechanical characteristics of coal-serial sandy mudstone at different temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 809-816. (in Chinese))
- [7] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. (Deng Julong. The foundation of grey theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科技出版社, 2014. (Liu Sifeng, Yang Yingjie, Wu Lifeng, et al. Grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [9] 刘晓明, 赵明华, 苏永华, 等. 红层软岩崩解性的灰色关联分析[J]. 湖南大学学报(自科版), 2006, 33(4): 16-20. (Liu Xiaoming, Zhao Minghua, Su Yonghua, et al. Grey correlation analysis of slake durability of red bed weak rock [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2006, 33(4): 16-20. (in Chinese))
- [10] 朱连根, 黄曼. 岩爆预测的灰色关联系统分析与评价[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 664-668. (Zhu Liangen Huang Man. Analysis and evaluation of grey incidence system for rock burst prediction [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 664-668. (in Chinese))

(下转第 1602 页)

- Press ,2010.(in Chinese)
- [12] Harr M E. Reliability -based design in civil engineering[Z]. Shaw Lecture , Dept. of Civil Engineering. North Carolina State University , Raleigh , N. C. ,1987: 274-281.
- [13] Kulhawy F H. On the evaluation of soil properties [J]. ASCE Geotech. Spec. Publ ,1992 ,31: 95-115.
- [14] Lacasse S ,Nadim F. Uncertainties in charactering soil properties [A]//Geotechnical Special Publication.1(NO. 58) [C].1997: 49-75.
- [15] Dai S H ,Wang M O. Reliability analysis in engineering applications [M]. Van Nostrand Reinhold , New York , 1992.
- [16] Duncan J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2000 , 126 (4) : 307-316.
- [17] Terzaghi K , Peck R B , Mesri G. Soil mechanics in engineering practice(3rd edition) [M]. Soil Mechanics in Engineering Practice , John Wiley & Sons Inc. 1996.
- [18] Folayan J I , Hoeg K , Benjamin J R. Decision theory applied to settlement predictions [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div , 1970 , 96 (4) : 1127-1141.
- [19] Harr M E. Reliability -based design in civil engineering [M]. Mcgraw-Hill , New York , 1987.
- [20] Cherubini C. Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on c' , ϕ' soils [J]. Canadian Geotechnical Journal ,2000 ,37(1) : 264-269.
- [21] Kulhawy F H. Foundation engineering handbook. [M]. Van Nostrand Reinhold , New York , 1991.
- [22] Wang Y , Au S K , Kulhawy F H. Expanded reliability based design approach for piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineer , 2001 , 137(2) : 140-149.
- [23] Orr T L L , Breyse D. Eurocode 7 and reliability-based design. In: Phoon KK , editor. Reliability-based design in geotechnical engineering: computations and applications [M]. London: Taylor & Francis; 2008.
- [24] Cherubini C. Closure to factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2001 , 126 (8) : 700-721.
- [25] Kulhawy , F H , Phoon K K , Wang Y. Reliability based design of foundations: a modern view [A] // Geo Congress 2012: Geotechnical Engineering [C]. 2012: 102-121.
- [26] Zhao Y G , Ono T. New point estimates for probability method [J]. Journal of Engineering Mechanics , 2000 , 126(41) : 433-436.
- [27] Deb K , Agrawal S , Pratap A , et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. [J] IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 2002 , 6 (2) : 182-197.
- [28] Khoshnevisan S , Gong W P , Juang C H , et al. Efficient robust geotechnical design of drilled shafts in clay using a spreadsheet [J]. Geotech. Geoenviron. Eng. , 2013 , 48: 96-106.

~~~~~

( 上接第 1576 页)

- [11]中华人民共和国国家标准编写组. 土工试验方法标准 ( GB/T 50123-1999) [S]. 北京: 中国计划出版社 , 2010. ( The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for soil test method ( GB/T 50123-1999) [S]. Beijing: China Planning Press 2010.( in Chinese )
- [12]何鹏 ,刘长武 ,王琛 等.沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究 [J]. 四川大学学报( 工程科学版) ,2011 , 43( 4) : 7-12( He Peng , Liu Changwu , Wang Chen , et al. Correlation analysis of uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary rocks [J]. Journal of Sichuan University ( Engineering Science Edition) , 2011 /3( 4) : 7-12.( in Chinese )
- [13]孙益振 ,邵龙潭 ,范志强. 非黏性土泊松比试验研究 [J]. 岩土力学 ,2009 ,30( 增 1) : 63-68.( Sun Yizhen , Shao Longtan , Fan Zhiqiang , Experimental research on Poisson's ratio of sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics , 2009 ,30( Supp.1) : 63-68.( in Chinese )
- [14]葛进生. 岩土试件端部效应影响数值分析 [D].大连: 大连理工大学 ,2012.( Ge Jinsheng. Numerical analysis on the influence of end effect of geotechnical specimen [D]. Dalian: Dalian University of Technology , 2012.( in Chinese )