

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2022.03.011

基于 MDE 方法的岩石耐久性研究

韩 意, 张 伟, 叶 焕

(安徽科技学院 建筑学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘要: 岩石的耐久性不仅与自身性质有关, 还与岩石所处的服役环境有关。首先, 介绍岩石耐久性的量化方法——MDE 方法。然后, 通过实际工程案例, 在充分考虑岩石自身性质和所处的服役环境情况下, 计算在一定设计年限下岩石剩余质量分数, 量化岩石在当前服役环境下的使用寿命, 判断此类岩石性质。最后, 得出经过设计使用年限, 基于 MDE 方法计算的此类岩石剩余质量分数满足使用要求, 为其他工程中岩石耐久性评价提供借鉴与参考。

关键词: 岩石; 耐久性; MDE 方法

中图分类号: TU 521

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2022)03-0081-05

Study on the Durability of Rock Based on MDE Method

HAN Yi, ZHANG Wei, YE Huan

(College of Architecture, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233030, China)

Abstract: The durability of rock is not only related to its own properties, but also to the service environment in which it is located. This paper briefly introduces MDE method. Through a specific project, the residual mass percentage of rock in a certain design life is calculated, the service life of rock in the current service environment is quantified, and the properties of such rock are judged by taking into full consideration the nature of rock itself and the service environment. It is concluded that the residual mass percentage of such rocks calculated based on MDE method meets the use requirements after the designed service life, which can provide reference for the evaluation of rock durability in other projects.

Key words: rock; durability; MDE method

岩石在市政工程、房建工程、水利工程、水运工程中的应用都比较广泛, 其耐久性与环境有很大关

收稿日期: 2022-01-13。

基金项目: 2021 年安徽科技学院校级优秀中青年骨干教师资助项目(210036); 2022 年高校优秀青年骨干人才国内访学研修资助项目(220030); 矿物尾矿在建筑材料中的无害化资源化利用项目(880602)。

作者简介: 韩意(1985—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士, 讲师。E-mail: hdhanyi@163.com

引用本文: 韩意, 张伟, 叶焕. 基于 MDE 方法的岩石耐久性研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 81-85.

系。因此,在不了解现场环境条件和设计应用情况下,仅凭岩石强度试验结果并不能较好地确定岩石材料是否适合当前工程。而国内外对于岩石自身耐久性的研究较多,但忽略了服役环境对岩石耐久性的影响。因此很多设计者是通过保守尺寸设计、较高频次的维护等方法解决岩石耐久性不足等问题,这不可避免的增加了工程成本,造成一定程度的资源浪费。李博文等^[1]提出一种适用于玄武岩的冻融耐久性模型,认为岩石冻融耐久性评价指标可以选取玄武岩的冻融系数、强度等参数。吴琦等^[2]指出不同热循环作用下,大理岩会随着热循环次数的增加,物理力学性能不断劣化。侯志强等^[3]提出大理岩三轴疲劳-卸围压模型,为大理岩的地下工程疲劳活动规律模型提供借鉴。ANTOLIK 等^[4]介绍了作为混凝土填充骨料的花岗岩的硅碱反应性对路面耐久性的影响。GRATCHEV 等^[5]在实验室干湿循环作用下和数年自然风化条件下,对岩石物理力学性能的变化进行对比,为实验室类似岩石试验提供实际参考。幸雪松等^[6]介绍了岩石压缩过程中的软化行为。

文中提到的岩石是指直接运用于工程中的单体材料,其耐久性的影响因素一般包括材料本身性质及其服役环境^[7]。岩石的耐久性是通过在工程使用过程中岩石性能变化所导致的岩石材料质量损失率(如平均质量的减少)来间接量化的。这也意味着,即使是劣质岩石材料,在温和的外界环境中,由于退化力较小,也可以认为岩石的耐久性较好。岩石强度损耗过程大致可分为磨损、断裂和普遍崩解。ESCAMEIA^[8]认为对于海岸工程来说,水位变动区是最容易受到物理化学影响的区域,岩石主要受到冻融、盐结晶、干湿、温度循环等风化作用;对于永久淹没的水下区岩石,上述环境侵蚀可以忽略不计;对于远离水域的市政工程,岩石主要受温度变化、干湿交替等风化作用影响。

1 MDE 方法介绍

文章提供了岩石耐久性的系统预测方法,主要是通过特定环境下,岩石质量损失率来衡量岩石性质的变化。实际工程中,岩石的质量损失可能在经过长时间的休眠潜伏期后,偶然发生局部或大部分结构质量损失,岩石质量损失相对快速,如冻融、氧化引起的爆炸等。为了便于研究,文中涉及的岩石耐久性预测模型基于以下假设:岩石使用寿命期内质量变化遵循渐进形式,也就是质量损失发生相对连续,呈现持续减速的退化趋势。

最初的岩石耐久性模型是基于实验室岩石磨损试验的测试结果得到的,是在恒定的研磨环境下,用分数图表示剩余质量占初始质量的比例与实验室研磨时间的关系,图线的梯度称为耐磨指数,表示单位时间变化导致岩石的质量损失率。熊锐等^[9]采用洛杉矶磨耗试验研究了几类岩石的磨耗损失率及形态特征变化规律,并提出提高路面抗滑性能的方法。成全喜^[10]、翟鹏程^[11]对比介绍了评价石料耐磨性能的几种磨损试验方法,并对结果进行了比较。UMAR 等^[12]将洛杉矶磨损试验运用于混凝土的耐磨实验中。后期经过不断修订,ESCAMEIA 设计出基于 Micro-Deval(又称微型狄法尔磨耗试验)的岩石耐久性模型被称为 MDE 模型,此模型类似于标准磨损试验,与耐磨指数高度相关^[8]。MDE 模型中使用的 Micro-Deval 方法最初仅适用于判断研磨前后岩石性质的变化,即研磨前后岩石抗滑性能的变化。为了将该模型应用于其他性能的检测中,根据研究人员的经验,对所有影响岩石耐久性的因素进行了半定量评价,得出 MDE 模型^[12]。

首先,根据 Micro-Deval 测试方法,得到 M_{DE} 值。然后,使用式(1)将 M_{DE} 值转换为岩石耐久性指数 k_s 值,为

$$k_s = 4.12 \times 10^{-5} M_{DE}^{1.485} \quad (1)$$

式中: M_{DE} 值由 Micro-Deval 试验测得,是一个无量纲的量,主要和岩石初始研磨质量以及研磨后筛余质量有关; k_s 为岩石耐久性指数。

使用式(2)可绘制剩余质量比(m/m_0)与时间(t)的关系曲线,此线称为岩石耐磨曲线。并将岩石耐磨曲线与耐磨分类图(图 1)进行比较,根据岩石耐磨曲线位于的区域,确定岩石性质。

$$m/m_0=0.05\exp(-30k_s t)+0.95\exp(-k_s t)$$

(2)

式中: m_0 为岩石初始质量; m 为研磨后过 1.6 mm 筛孔的剩余质量; t 为研磨时间,是一个无量纲的量,每研磨 1 000 转为单位 1。

使用式(3)计算等效磨损时间因子 X

$$X=X_1\cdot X_2\cdot X_3\cdot X_4\cdot X_5\cdot X_6\cdot X_7\cdot X_8\cdot X_9$$

(3)

式中 X_1, X_2, \cdots, X_9 为岩石性质参数。

岩石性质参数 X_1, X_2, \cdots, X_9 是根据岩石性质所确定的数值,参数 X_1 称为尺寸效应,按照式(4)进行求解,其余参数按照表 1~表 5 量化求得,具有一定的经验性。

$$X_1=0.5\times(m_{50})^{1/3}$$

(4)

式中 m_{50} 为中值质量。

根据研究,使用气象气候风化强度(M_{CW1})因子替换岩石性质参数 X_7 ,更加强调工程服役环境对岩石耐久性能的影响^[8], M_{CW1} 具体计算方法见式(5)。表 1~表 5 中其他参数含义: m_{85} 为石料级配曲线上小于此质量的石料质量占比为 85%; m_{15} 为石料级配曲线上小于此质量的石料质量占比为 15%; H_s 为有效波高; $I_{m_{50}}$ 为 m_{50} 的下降比例; W_A 为吸水率; $D_{n_{50}}$ 为中值粒径。

$$M_{CW1}=(a/b)\times(d/365)\times(e/c)\times((g/f)\times h)$$

(5)

式中: a 为多年平均(最高波高)与多年平均(最低波高)的差值; b 为年平均气温; c 为最高温度高于结冰温度的平均天数; d 为最高温度低于结冰温度的平均天数; e 为多年极高温度和极低温度的差值; f 为降水量大于 0.25 mm 的平均天数; g 为年降水量,cm; h 为正常气温天数,基准温度为 18 ℃。

表 2 参数 X_6 取值

Table 2 Table for parameter X_6

H_s	$I_{m_{50}}/\%$			
	<2.0	2.0~5.0	5.0~15.0	>15.0
<4.0	3.0	2.6	2.3	2.0
4.0~8.0	2.0	1.6	1.3	1.0
>8.0	1.0	0.7	0.5	0.3

表 3 参数 X_7 取值

Table 3 Table for parameter X_7

M_{CW1} 指数	$W_A/\%$	
	0.5~2.0	>2.0
<100	1.0	0.8
100~300	0.8	0.6
300~600	0.6	0.4
>600	0.4	0.2

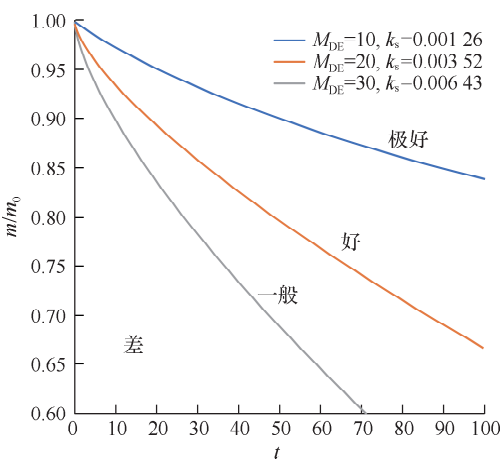


图 1 岩石耐久性分类图

Fig.1 The figure of rock durability classification

表 1 参数 X_2, X_3, X_4, X_5 取值

Table 1 Table for parameter X_2, X_3, X_4, X_5

参数	影响因素	取值
X_2	$(m_{85}/m_{15})^{1/3}$ 范围	1.1~1.4
		1.2
		1.0
X_3	初始形状	2.4~2.5
		0.5
		角度/不规则
		1.0
X_4	结构所处位置	块状/相等
		1.1
		半圆形
X_5	耐水磨性	圆形
		2.0
		水位变动区
		1.0
		大气区/热带
		2.5
X_6	初始形状	大气区/温带
		8
		水下区
		10
		鹅卵石
X_7	耐水磨性	0.2
		沙砾
		0.5
		沙子
		1.0
X_8	初始形状	淤泥
		1.2
X_9	初始形状	更小颗粒
		1.5

表 4 参数 X_8 取值

Table 4 Table for parameter X_8

坡度	潮差/m		
	<2.0	2.0~6.0	>6.0
1:2.5	1.0	1.2	1.5
1:3.0 或更陡	1.5	1.8	2.0

表 5 参数 X_9 取值

Table 5 Table for parameter X_9

$I_{m_{50}}/\%$	$H_s/\Delta D_{n_{50}}$			
	1~2.4	2.5~3.9	4~6.9	7~20
<2.0	2.0	1.8	1.6	1.4
2.0~5.0	2.0	1.5	1.0	0.5
5.0~15.0	2.0	1.0	0.5	0.2
>15.0	1.5	0.6	0.3	0.1

表 1~表 5 中岩石性质参数的定量确定与工程经验有关,其准确性可由历史数据及敏感性分析判断。 m_{50} 的下降比例 $I_{m_{50}}$ 可用于量化岩石块体的完整性,同时其值影响波能参数 X_6 和移动度参数 X_9 的量化。

最后量化预测岩石的使用寿命,使用寿命可以根据式(6)结合等效磨损时间因子计算求得

$$m/m_0=0.05\exp[-30(k_s/X)T]+0.95\exp[(-k_s/X)T] \quad (6)$$

式中: m/m_0 为剩余质量比例; k_s 为岩石耐久性指数; X 为等效磨损时间因子; T 为设计年限,a。

2 工程应用

法赫德国王大桥护坡工程项目根据拟选岩石中值粒径求得岩石的尺寸效应为 1.08,工程设计波高为 6.0 m,根据当地气象水文资料,代入式(5),求得气候风化强度为 648。根据工程勘测结果,对预选岩石性能进行 Micro-Deval 试验,得 $M_{DE}=11\%$ 。基于以上的计算结果,结合工程服役环境测量得 $W_A=2.2\%$, $I_{m_{50}}=4.0\%$,再根据表 1~表 5 确定各参数估计值,具体见表 6。根据表 6 计算得到的等效磨损时间因子为 0.829,再拟合 m/m_0 与 T 的关系曲线,具体结果如图 2 所示。再结合图 1 可知本项目所选岩石的耐久性拟合曲线位于第二区域,即此类岩石耐久性较好。当 $T=150$ a 时,求得 m/m_0 为 0.730 8,即按照设计年限为 150 a,计算此类岩石的质量分数为 0.730 8,大于 0.7。此计算结果表明,经过 150 a 的设计使用年限,拟选岩石的剩余质量仍大于初始质量的 70%,在受到相关作用时,仍能保持自身稳定。

具体计算流程如图 3 所示。首先根据 Micro-Deval 试验确定 M_{DE} 和 k_s 值,根据岩石性质和服役环境,确定各参数估计值,并求得 X ,根据 k_s 和 X 确定岩石的使用寿命,绘制岩石耐磨曲线,判定岩石性质,当同时满足工程使用寿命和岩石性质要求时,工作结束,否则重新选择岩石,进行计算。计算结果从材料本身和服役环境,综合说明防波堤的使用年限计算方式,为防波堤使用年限的确定提供理论支撑。

表 6 岩石参数的估计值

Table 6 The estimates of rock parameters

参数	相关信息	结果
k_s	$4.12 \times 10^{-5} \times M_{DE}^{1.485}$	0.001 45
X_1	$0.5(m_{50})^{1/3}$	1.08
X_2	$(m_{85}/m_{15})^{1/3}$	1.0
X_3	棱角不规则形状	1.0
X_4	水位变动区	1.0
X_5	沉积物为沙子	1.0
X_6	$H_s=6.0$ m, $I_{m_{50}}=4.0\%$	1.6
X_7	$M_{CW1}=648$, $W_A=2.2\%$	0.2
X_8	坡度为 1:2.5,潮差 4 m	1.2
X_9	$H_s/\Delta D_{n_{50}}=2.0$, $I_{m_{50}}=4.0\%$	2.0
X	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot X_6 \cdot X_7 \cdot X_8 \cdot X_9$	0.829

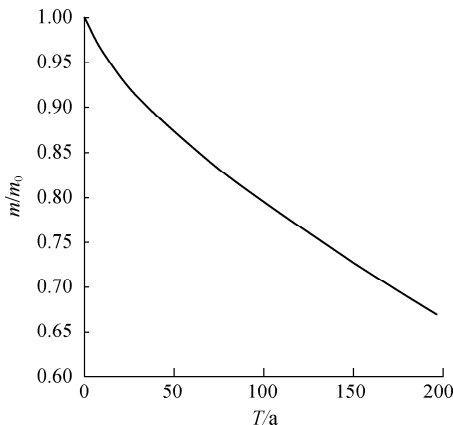


图 2 m/m_0 与设计年限关系图

Fig.2 Relation diagram of m/m_0 and design year

3 结 论

MDE方法综合考虑了岩石的各种性质和服役环境,可以定量评价岩石的耐久性。进行岩石耐久性参数的量化过程中,成果的准确性主要依赖经验,为了将此方法推广运用,后期需要应用实际工程数据对MDE模型进行校准,尤其是对磨损测试结果和现场降解结果进行对比。① 建议在实际的工程中,对岩石耐久性参数的量化进行敏感性分析,尽量全面分析参数取值对耐久性计算结果的影响程度。② MDE耐久性预测方法假定岩石质量损失的长期模式是渐进的,也就是假设岩石耐久性的恶化是连续的,这与实验室磨损试验形式相同。③ 质量损失在达10%~50%任何值时,岩石性质可能加速恶化,这比连续性假设更加符合工程实际。对于较小的质量剩余比,如低于0.7时,MDE模型对岩石耐久性的预测精确性较差,后期需要根据工程实际,总结经验,不断完善此模型。

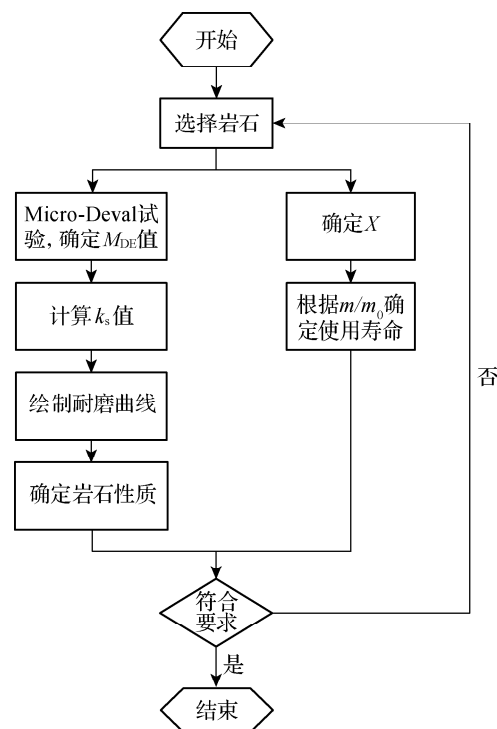


图3 计算流程图

Fig.3 Calculation flow chart

参考文献:

- [1]李博文, 荣冠, 蒙世仟, 等. 冻融循环条件下玄武岩耐久性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 116-121.
- [2]吴琦, 蒙世仟, 蒋买勇, 等. 热循环作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 148-153.
- [3]侯志强, 王宇, 刘冬桥, 等. 三轴疲劳-卸围压条件下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1510-1520.
- [4]ANTOLIK A, JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA D. Assessment of the alkali-silica reactivity potential in granitic rocks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 295: 123690.
- [5]GRATCHEV I, PATHIRANAGEI S V, KIM D H. Strength properties of fresh and weathered rocks subjected to wetting-drying cycles[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2019, 5(3): 211-221.
- [6]幸雪松, 周长所, 曹文科. 考虑岩石应变软化特征的井筒稳定性分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 58-61.
- [7]BELLOPEDE R, ZICHELLA L, MARINI P. Stone roofing in the Aosta Valley, Italy: technical properties and durability of traditional lithotypes[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 35: 102068.
- [8]ESCARAMEIA M. The use of rock in hydraulic engineering[M]. London: CIRIA, 2007.
- [9]熊锐, 杨发, 关博文, 等. 路用高抗滑集料耐磨性能评价与机理分析[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3436-3440.
- [10]成全喜. 粗集料磨耗试验方法讨论[J]. 科技资讯, 2011, 9(7): 116.
- [11]翟鹏程. 粗集料洛杉矶磨耗虚拟试验方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [12]UMAR T, EGBU C, SAIDANI M. A modified method for los angeles abrasion test[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020, 44(3): 941-947.

(责任编辑:谭晓荷)