

裂隙面摩擦系数变化对大理岩单轴抗压强度的影响

黄弈茗, 邓建辉, 朱俊, 余志球

(四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通过剪切试验,研究饱水岩石裂隙面摩擦系数的变化,结果表明,饱水岩石的孔隙水在裂隙表面覆盖一层水膜,当裂隙出现相对滑动趋势时,水膜造成裂隙面摩擦系数降低;基于室内试验结果,运用离散元软件 FLAC 模拟并分析裂隙面水膜对裂隙周边应力分布的影响,结果显示,由于裂隙面摩擦系数降低,饱水岩石内裂隙的拉应力集中效应更明显;运用颗粒流软件 PFC 模拟单一裂隙岩石试样的单轴压缩试验,结果表明,孔隙水膜是饱水岩石单轴压缩强度降低的重要原因之一,并使饱水岩石的破坏模式由贯通性的剪切破坏面变为非贯通性的张拉破坏面。

关键词: 公路;饱水大理岩;裂隙面摩擦系数;单轴压缩强度;水膜效应;应力分布

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)02-0073-04

20 世纪 50 年代,苏联专家提出岩石的水软化作用,并迅速在世界岩土工程界得到广泛关注。随着人类工程活动的增多和自然条件的变化,水岩相互作用成为岩土工程相关学科研究的前沿领域,是工程岩土体研究的重要内容之一。对于饱水岩石强度降低现象,Masuda K.、Atkinson B. K.、Romana M.等分别从加载速率、应力腐蚀、孔隙水压力等方面进行研究,得出岩石的水软化机制分别为黏土矿物软化、排水不畅、孔隙水压力上升、基质吸力或摩擦力下降和应力腐蚀。针对摩擦力下降,Horri H.、Steif P. S.、Ashby M. F.、Lehner F.及王元汉等从断裂力学角度分析了受压岩石内孔隙周边的应力集中现象。以上研究表明随着裂隙面摩擦系数的减小,裂隙周边的应力集中因子增大。

在室内试验方面,由于缺乏对岩石裂隙的直接观测手段,一般通过人工制造剪切面来表征岩石的天然裂隙面。李克钢等通过对重庆某边坡粉质泥岩与砂岩之间天然结构面取样进行剪切试验,发现岩体的抗剪强度与含水量成反比,其中饱水岩石内摩擦角比天然状态时下降 10.02%。刘新荣等以砂岩为代表岩体,通过对水岩循环作用下的岩石试样进行剪切试验,发现随着水岩循环作用次数的增加,岩石内摩擦角的劣化逐渐加深,干湿循环 15 次后岩石的内摩擦角损失量达到初始值的 24.09%。以上研究基本是从宏观角度研究裂隙水造成的裂隙面或节理面摩擦系数的降低,而未将这种现象与岩石饱水造成单轴抗压强度降低联系起来。为研究饱水大理岩的裂隙面摩擦系数降低对岩石抗压强度的影响,

该文通过室内剪切试验获得饱水大理岩裂隙面的摩擦系数,采用 FLAC 及 PFC 进行模拟,分析饱水岩石裂隙的应力分布及其对岩石抗压强度的影响。

1 研究方案

1.1 大理岩单轴压缩试验

在剪切试验之前,为验证大理岩的水软化现象,使用四川大学水电学院的 MTS 力学试验系统分别对 3 组干燥大理岩试样及 3 组饱水大理岩试样进行单轴压缩试验,试样为直径 38 mm、高 76 mm 的圆柱形标准试样。试样的峰值压缩强度见表 1。由表 1 可知:干燥、饱水岩样的平均峰值压缩强度分别为 189.52、182.51 MPa,软化系数为 96.30%,孔隙水对大理岩的单轴压缩强度有较明显的弱化作用。

表 1 大理岩试样单轴压缩试验结果

含水状态	试样编号	峰值压缩强度/MPa	
		试验值	平均值
干燥	M1	189.19	189.52
	M2	189.88	
	M3	189.50	
饱水	M4	186.78	182.51
	M5	186.89	
	M6	186.91	

1.2 试样制备

试验采用的大理岩取样于四川省锦屏二级水电站周边地区。采用 X 射线单晶衍射仪测定其矿物成分为白云石(87%~89%),含有少量方解石(10%~12%),岩样成分单一。

从石块中钻取直径 5 cm、高 5 cm 的圆柱体,沿横截面直径将圆柱体等分切割,并将切割面打磨生成裂隙面。试件分为上下两部分分别浇筑,制样工具为边长 50 cm、高 10 cm 的钢制制样盒,浇筑过程见图 1。

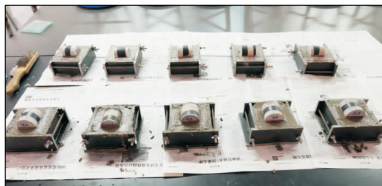


图 1 下部分浇筑完成的岩石试样

试验共使用 6 组大理岩试样,其中 JM1~JM3 为干燥试样,试验前将其置于 105 °C 烘箱中烘 48 h; JM4~JM6 为饱水试样,采用真空抽气法将岩样置于真空抽气机中强制饱水 8 h 以上,并静置 4 h 后进行试验。

1.3 试验装置与方法

试验采用成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室研制的岩土力学多功能试验仪。按照《室内岩石力学试验》的相关要求,试验的法定应力加载分为 5 级。为使剪切面保持必要的完整性,绝大部分试样采用的加载等级较低,分别为 8~20 kPa。加载顺序为先施加摩擦面的法定应力,待稳定后再施加剪应力,待剪应力平衡或切向位移超过试样剪切面直径的 10% 后停止试验。

2 岩石剪切试验结果分析

饱水条件下,岩石的裂隙表面被一层孔隙水膜覆盖,这种现象称为水膜效应。当裂隙面之间发生相对滑动时,水膜效应直接导致其剪切强度下降。图 2、图 3 分别为干燥、饱水大理岩试样剪应力与水平位移的关系。

由图 2 与图 3 可知:干燥、饱水大理岩试样的剪切强度分别为 3~13、1.5~4.5 kPa,正应力变化对饱水岩石试样抗剪强度的影响小于干燥岩石试样。

根据摩尔库伦定律,岩石的剪切强度遵循以下公式:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中: τ_f 为抗剪强度; c 为粘聚力; σ 为剪切面的法定应力; ϕ 为内摩擦角, $\tan \phi$ 为剪切面的摩擦系数。

根据式(1),利用试验测得的大理岩石剪切强度,将每组试验数据中的剪应力作为纵坐标、法定应

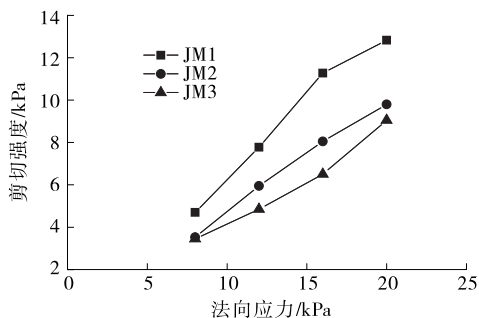


图 2 干燥大理岩正应力与剪切强度的关系

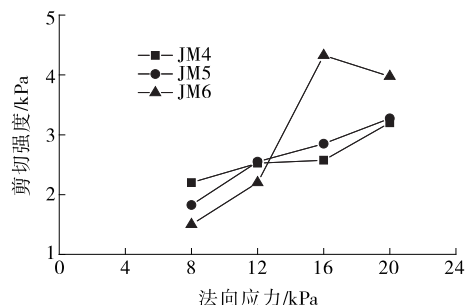


图 3 饱水大理岩正应力与剪切强度的关系

力作为横坐标,运用 MATLAB 拟合计算不同含水状态大理岩的摩擦系数,结果见表 2。

表 2 不同含水状态大理岩的摩擦系数对比

含水状态	试样编号	摩擦系数	含水状态	试样编号	摩擦系数
干燥	JM1	0.70	饱水	JM4	0.08
	JM2	0.52		JM5	0.12
	JM3	0.46		JM6	0.24

由表 2 可知:1) 干燥、饱水大理岩的摩擦系数分别为 0.46~0.70、0.08~0.24,饱水试样之间由于剪切面水膜的存在,其粗糙度降低,弱化了不同试样个体之间的差异。2) 水膜对裂隙表面具有明显的润滑作用,干燥、饱水试样的平均摩擦系数分别为 0.56、0.15,饱水试样降低 73.81%。

3 数值模拟分析

上述室内剪切试验结果证明了岩石强度的水软化现象及水膜效应对裂隙面摩擦系数的弱化。根据 Horri H. 等提出的理论公式,可推论出摩擦系数的降低将导致岩石受外部荷载作用时其孔隙周边出现张拉应力集中现象。

为讨论裂隙面水膜效应对岩石单轴抗压强度的影响,使用离散元软件 FLAC 及颗粒流软件 PFC 对试样进行数值建模,分别从孔隙周边应力分布和试样整体力学特性两个角度对水膜效应造成的强度软

化现象进行分析。

3.1 不同含水状态岩石孔隙周边应力分布特性

3.1.1 FLAC 模型基本参数的设定

FLAC 数值模型的宽度为 38 mm、高度为 76 mm,裂隙布置在试样的中心位置,其长轴长 1 mm、短轴长 0.1 mm(见图 4)。在加载过程中试样的上端面承受垂直向下的压应力,试样的下端固定。干燥、饱水试样的内摩擦角分别取 56° 、 35° 。

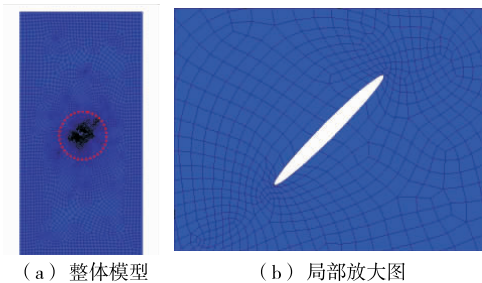


图 4 FLAC 数值模型

3.1.2 FLAC 模拟结果分析

不同含水状况下大理石孔隙周边应力见图 5。由图 5 可知:干燥、饱水大理石的拉应力分布形状差异不大,均呈 X 形分布。但大理石处于干燥状态时,其孔隙周边的最大拉应力为 810 480 Pa,而处于饱水状态时其孔隙周边的最大拉应力为 839 170 Pa。说明相对于干燥大理岩,饱水大理岩的孔隙周边拉应力更集中,更易产生张拉破坏。

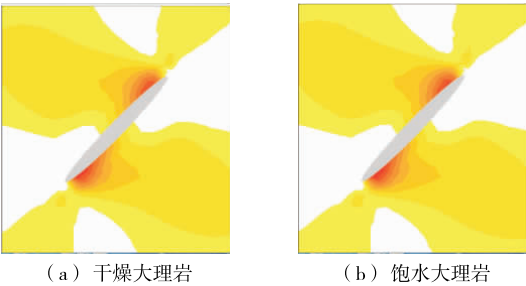


图 5 不同含水状态大理岩孔隙周边拉应力云图

3.2 不同含水状态岩石孔隙单轴压缩试验

3.2.1 PFC 模型基本参数的设定

建立与加载方向呈 60° 角的 PFC 数值模型(见图 6),裂隙长度为 1 cm,与水平方向的夹角为 30° ,裂隙的中心位置为试样的中心对称点。试样尺寸和加载方向与 FLAC 数值模拟的设置一致,细观力学取值见表 3。为了反映水膜效应对裂隙面摩擦系数的弱化作用,干燥、饱水试样的摩擦系数分别取 2×10^9 、 0.5×10^9 。

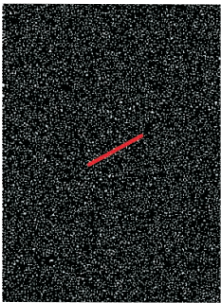


图 6 PFC 数值模型

表 3 PFC 数值模型的细观力学参数

项目	取值
最小颗粒半径/mm	0.2
最大与最小颗粒半径比	1.9
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 650
颗粒变形模量/MPa	2 860
颗粒孔隙比	0.12

3.2.2 PFC 模拟结果分析

(1) 水膜效应对岩石单轴抗压强度的影响。图 7 为不同含水状态试样在单轴压缩过程中的典型应力应变曲线。由图 7 可知:干燥试样的峰值压缩强度为 139.00 MPa,大于饱水试样的峰值压缩强度 114.55 MPa,且干燥试样的弹性模量略大于饱水岩石试样,模拟结果与实际情况较为吻合。

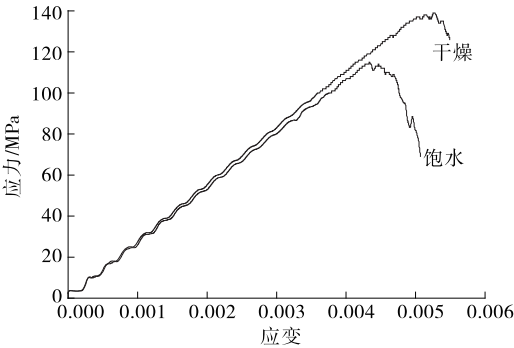


图 7 不同含水状态大理岩的典型应力应变曲线

(2) 水膜效应对岩石宏观破坏模式的影响。图 8 为不同含水状态试样的破坏形态。由图 8 可知:裂隙内是否含水对试样的最终破坏形式影响很大。裂隙面处于干燥状态时,其最终破坏时的主破坏面为一条沿裂隙面两端延展开的破坏面,破坏面贯通整个试样且其与应力加载方向的夹角约 45° ,该破坏面主要由微观剪切破坏形成,仅在原有裂隙的端点处延展出少数张拉破坏面。饱水试样达到峰值强度时没有出现明显的主破坏面,而是从原生裂隙发

育出多组破裂面,这些破裂面主要由微观张拉破坏形成,且大多数破裂面逐渐发育成与应力加载方向相同,其发育趋势与 Horri H.等预测趋势相同。

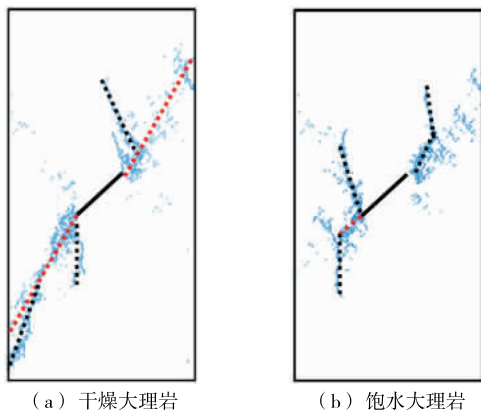


图8 不同含水状态大理岩宏观破坏模式对比

4 结论

(1) 岩石饱水后,裂隙中的水在其表面形成一层水膜,由于水膜造成裂隙表面粗糙度下降,当裂隙在荷载作用下产生相对滑动趋势时,其摩擦面之间的摩擦系数下降。

(2) 岩石受到外部荷载作用时,其裂隙周边会出现拉应力集中现象。受拉区域呈X形分布于裂隙的周边,其集中区域出现在裂隙尖端附近,且当水膜效应使裂隙的摩擦系数降低时,裂隙周边的拉应力集中更明显。

(3) 水膜效应是造成岩石水软化的重要原因之一,无论试样中的裂隙与加载方向的夹角如何变化,孔隙水造成裂隙表面摩擦系数降低后,其单轴压缩强度均会明显下降。

(4) 水膜效应会改变单轴压缩试样的破坏模式。从宏观角度,干燥试样达到峰值强度时其主破坏面为一条从原有裂隙展开并最终贯通整个试样的破坏面,且该破坏面与应力方向的夹角约为 45° ;而饱水试样没有明显的主破坏面,其裂隙衍生出的破坏面的走向与应力加载方向一致。从微观角度,干燥试样的主破坏面主要由微观剪切破坏形成,而

饱水试样的破坏面主要由微观张拉破坏形成。

参考文献:

- [1] 沈照理,王焰新.水-岩相互作用研究的回顾与展望[J].地球科学:中国地质大学学报,2002,27(2).
- [2] 刘新荣,傅晏,郑颖人,等.水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1).
- [3] 钱湘兰,冯贵堂,孙英智,等.浅析岩土工程技术概述[J].中国科技信息,2005(11).
- [4] Masuda K.Effects of water on rock strength in a brittle regime[J].Journal of Structural Geology,2001,23(11).
- [5] Atkinson B K,Meredith P G.Stress corrosion cracking of quartz:a note on the influence of chemical environment[J].Tectonophysics,1981,77(1~2).
- [6] Romana M,Vasarhelyi B.A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples[A].11th ISRM Congress[C].2007.
- [7] Horii H,Nemat-Nasser S.Brittle failure in compression:splitting,faulting and brittle-ductile transition[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London,1986,319(1549).
- [8] Steif P S.Crack extension under compressive loading[J].Engineering Fracture Mechanics,1984,20(3).
- [9] Ashby M F,Hallam S D.The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J].Acta Metallurgica,1986,34(3).
- [10] Lehner F,Kachanov M.On modelling of 'winged' cracks forming under compression[J].International Journal of Fracture,1996,77(4).
- [11] 王元汉,徐钺,谭国焕,等.改进的翼形裂纹分析计算模型[J].岩土工程学报,2000,22(5).
- [12] 李克钢,侯克鹏,张成良.饱和状态下岩体抗剪切特性试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(2).
- [13] 刘新荣,傅晏,王永新,等.(库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(9).

收稿日期:2018-08-09

(上接第61页)

- [3] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
- [4] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [5] 刘培荣.橡胶沥青性能对橡胶沥青混合料路用性能的影响[J].中外公路,2018,38(2).

影响[J].中外公路,2018,38(2).

- [6] 沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001.

收稿日期:2018-06-03