

单轴压缩试验条件下含水饱和度对应力应变曲线的影响*

Effect of water content on stress-strain curve under uniaxial compression test

朱 飞¹, 关天定², 苏 倩³, 周建伟⁴

- (1. 陕西海嵘工程试验检测股份有限公司, 陕西 西安 710000;
2. 广东建设职业技术学院, 广东 广州 510000;
3. 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000;
4. 川藏铁路有限公司, 四川 成都 610094)

摘 要: 为了研究水对岩石力学行为影响的机理, 除力学性质外, 还需要关注应力应变曲线随不同水条件的变化情况, 这是表示力学行为的最基本特征之一。在本研究中, 研究了含水饱和度对岩石单轴抗压强度和应力应变曲线的影响。使用安山岩、凝灰岩、砂岩、花岗岩和大理岩进行了6种含水条件下的单轴压缩试验。试验结果表明, 安山岩、凝灰岩、砂岩和花岗岩的应力应变曲线随含水饱和度的变化而变化。另一方面, 却未观察到含水饱和度对大理岩应力应变曲线的影响。根据试验结果, 讨论了由于含水饱和度降低而导致的强度增加机理, 研究了峰值强度随水分条件变化的变化规律, 并在此基础上考虑了不同水分条件下应力应变曲线之间的关系。

关键词: 岩石; 含水饱和度; 单轴抗压强度; 应力应变曲线

中图分类号: TU454

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0008-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.008

ZHU Fei¹, GUAN Tianding², SU Qian³, ZHOU Jianwei⁴

(1. Shaanxi Hairong Engineering Test and Testing Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. Guangdong Construction Polytechnic, Guangdong 510000, China;

3. The Engineering Design Academy of Chang'an University Co., Ltd, Xi'an 710000, China;

4. Sichuan-Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610094, China;)

Abstract: In order to study the mechanism of the influence of water on the mechanical behavior of rock, in addition to mechanical properties, it is necessary to pay attention to the change of stress-strain curve with different water conditions, which is one of the most basic characteristics of mechanical behavior. In this study, the influence of water content on uniaxial compressive strength and stress-strain curve of rock is studied. Uniaxial compression tests under six water-bearing conditions were carried out using andesite, tuff, sandstone, granite and marble. The experimental results show that the stress-strain curves of andesite, tuff, sandstone and granite

* 基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目, 复杂动载下受损长大隧道的灾变智慧感知方法研究(52020105002); 垃圾填埋场防渗衬垫材料性能研究(ZD2020-03)。

作者简介: 朱飞(1984-)男, 硕士, 高级工程师, 从事公路水运工程试验检测工作。

通信作者: 周建伟(1983-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为隧道桥梁。

收稿日期: 2023-05-24

change with the change of water content. On the other hand, the influence of water content on the stress-strain curve of marble has not been observed. According to the experimental results, the mechanism of strength increase due to the decrease of water content is discussed, and the variation law of peak strength with the change of water condition is studied. On this basis, the relationship between stress-strain curves under different water conditions is considered.

Keywords: rock, water saturation, uniaxial compressive strength, stress-strain curve

0 引言

众所周知,水会影响岩石的强度和变形特性。在地下工程基岩中开挖洞室时,垂直于空洞壁面的基岩应力随开挖而减小,约束压力减小,含水状态对岩石地下围岩的力学性质和损伤特征具有显著影响^[1]。因此,在地下洞室的施工和稳定性评价中,了解岩石在受力状态下在各种含水状态条件对地下围岩的稳定性影响具有重要意义^[2]。部分学者从不同加载方式下的岩石力学进行研究^[3-6]。M. S. A. Perera 等^[7]研究了干燥和饱和状态下煤岩的变形特征和力学特性。刘忠锋等^[8]分析了注水后煤样的含水率对单轴抗压强度和弹性模量的影响。郑文红等^[9]通过对干燥和饱和状态下的岩石进行单轴压缩试验,研究了硬岩的软化系数和脆性系数与含水状态之间的关系。孟召平等^[10]通过试验发现受力过程中岩石储存的弹性应变能随着含水率的增加而降低。

为了更详细地了解含水状态对岩石力学行为的影响,需要研究各种含水条件下岩石力学行为及其特征。因此,本研究对多种类型的岩石在 6 种含水状态下进行了单轴压缩试验。研究了含水饱和度对强度和应力应变曲线的影响规律。

1 试验方法

岩石试样分别使用了安山岩、凝灰岩、砂岩、大理岩和花岗岩。安山岩主要由斜长石、辉石、斜长石和磁铁矿斑块组成。凝灰岩主要由含长石、石英和含有少量黑云母和辉石组成。砂岩主要由长石和少量石英、钾长石组成。大理岩主要由方解石颗粒组成。花岗岩主要由石英、斜长石、碱性长石和黑云母组成。试样为直径 25 mm、高 50 mm 的圆柱体。对于每个岩石种类在各种含水量

条件下制备 24 个试样。试样的含水饱和度 S_w (%) 通过下式计算。

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \times 100\% = \frac{m_i - m_d}{m_w - m_d} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_p 是孔隙的体积, V_w 是水的体积。 m_w 为饱和状态试样的重量, m_d 为完全干燥状态的试样重量, m_i 为试样单轴压缩试验前的重量。

制样完成后,将试样在设定为 105 °C 的烘干箱中干燥 7 天。将试样从烘干箱中取出,在干燥过程中每隔 1 天定时称重,直至确认重量为恒定值,将其设为 m_d 。在烘干箱中干燥后,在干燥器中缓慢恢复至室温 1 天后,将试样用真空饱水法进行饱水,将所测试样的重量定义为 m_w 。然后通过以下方法调整试样的含水饱和度,在试验前立即可测定重量 m_i ,通过式 (1) 计算出 S_w 。

将试样的含水饱和度调整为各种预定值,在 6 种不同含水量下进行试验(表 1)。首先将所有试样放入烘干箱中烘干 48 小时,此时可以测得 m_d ,将一组试样放入纯净水中自然饱水 24 小时(自然饱水状态),然后将所有试样进行真空饱水,测得 m_w 。将其中 3 个样直接进行测试(真空饱水状态);将其中 3 个试样在恒定的室温下晾干 24 小时进行测试(风干 1 天);将一组 3 个试样风干 15 天后进行测试(完全风干);再将一组饱水完的试样烘干 48 小时进行测试(烘干状态);将一组试样烘干 48 小时后,再在抽真空状态下冷却 24 小时至室温后就行测试(真空干燥状态)。试验中发现大理岩的烘干状态和真空干燥状态的含水饱和度基本一致,因此只进行烘干状态的试验。表 1 为试样在各含水量下的含水饱和度 S_w 的平均值。表中: φ_e 是岩石的有效孔隙率, S_w 是岩石含水饱和度, σ_r 为岩石的峰值强度, $\Delta\sigma$ 为岩石的峰值强度与饱和状态下峰值强度的差值。

岩土力学

表 1 试验方案及结果统计
Table 1 Test scheme and result statistics

岩性	φ_e (%)	状态	S_w	σ_f (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
安山岩	19.7	烘干	0.1	89.8	23.4
		真空干燥	1.38	83.1	16.8
		完全风干	3.16	79.3	13.0
		风干 1 天	20.4	68.9	2.5
		自然饱水	29.2	69.9	3.6
		真空饱水	100	66.3	0.0
凝灰岩	31.3	烘干	0.11	33.9	25.5
		真空干燥	4.98	29.4	21.0
		风干	9.30	23.5	15.0
		风干 1 天	21.6	16.2	7.8
		自然饱水	32.8	12.4	4.0
		真空饱水	100	8.4	0.0
砂岩	23.9	烘干	0.76	54.5	37.0
		真空干燥	17.4	39.7	22.2
		风干	25.9	36.4	18.9
		风干 1 天	41.3	29.6	12.1
		自然饱水	47.0	24.9	7.4
		真空饱水	100	17.5	0.0
大理岩	0.45	烘干	3.13	98.1	8.7
		风干	1.89	94.8	5.4
		风干 1 天	8.33	97.2	7.8
		自然饱水	14.6	99.6	10.2
		真空饱水	100	89.4	0.0
		烘干	1.26	244.4	52.8
花岗岩	0.88	真空干燥	4.87	230.0	38.5
		风干	6.95	211.8	38.5
		风干 1 天	23.7	201.1	9.5
		自然饱水	32.0	199.7	8.1
		真空饱水	100	191.6	0.0

2 试验结果

图 1 为各试样在各含水条件下的应力应变曲线。图 1 (a) 为安山岩的应力应变曲线。峰值强度随着含水饱和度 S_w 的降低而增加变大, 从风干状态 1 天后强度的增加变得显著。随着 S_w 的减小, 峰值强度处的应变趋于逐渐增加的趋势。在任何含水量下, 应力达到峰值后急剧下降, 当应力降低到 5~10MPa 左右时, 应力应变曲线的斜率变缓, 观察到的残留强度约为 2~5MPa。虽然残余强度也有变化, 但越接近饱和湿态, 往往越小。

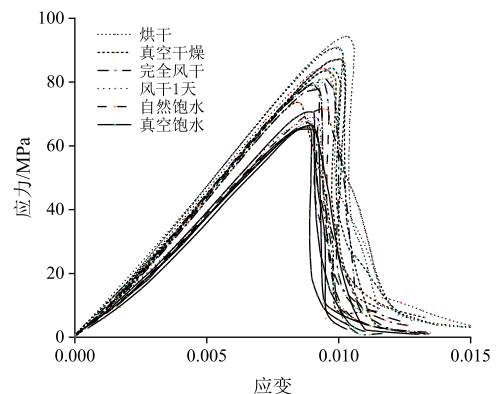
图 1 (b) 为凝灰岩应力应变曲线, 在 S_w 的影响下变化明显大于安山岩。峰值强度和峰值强度之前的曲线斜率随着 S_w 降低而增加。尤其是峰值强度从饱和状态到风干状态显著增加。应力在峰

值强度后降低, 但随着 S_w 的降低趋于变脆。虽然残余强度也因试样而异, 但与峰值强度类似, 它会随着 S_w 的减小而增加。与安山岩类似, 当 S_w 较小时, 应力应变曲线往往包含于在 S_w 较大时的应变曲线。

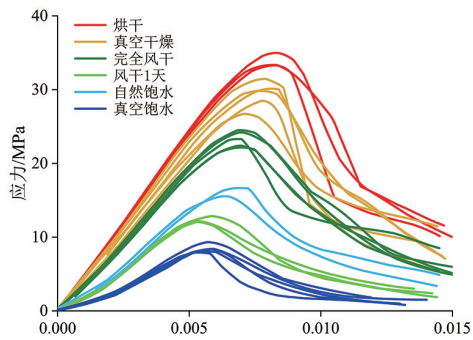
图 1 (c) 是砂岩的应力应变曲线, 也受 S_w 的影响很大, 与凝灰岩一样。峰值强度前曲线的斜率在饱和状态附近最小, 但变化小于凝灰岩。峰值强度随 S_w 变化很大, 从饱和状态到风干状态的强度增加也很显著, 但其在五种岩石中, 从真空饱水到烘干状态的强度增加幅度最大。峰值强度处的应变也随 S_w 变化。强度达到峰值后, 与凝灰岩一样, S_w 越小, 它往往越脆。 S_w 越小, 残余强度越高。

图 1 (d) 是大理岩的应力应变曲线, 在试样中表现出较大的差异性, 但峰值强度和峰值强度前曲线的斜率随着 S_w 的减小而增加, 但与上述 3 种岩种相比, 其变化小。峰值强度以后的应力缓慢下降至约为强度的 80%, 之后呈急剧下降的趋势。含水饱和度与峰值强度处的应变和残余强度的关系无明显规律。

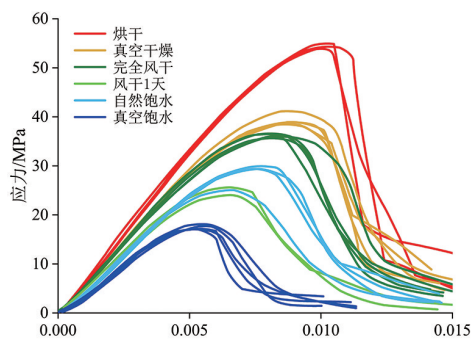
图 1 (e) 是花岗岩的应力应变曲线, 在任何含水状态下, 峰值强度以前曲线几乎是重合的。曲线的斜率在达到峰值强度之前略有变小, 达到峰值强度后应力急剧下降, 无法读取有效残余强度。峰值强度和峰值强度点处的应变与安山岩、与凝灰岩和砂岩类似, 随着含水量的变化而变化, 越接近饱和状态的越小。



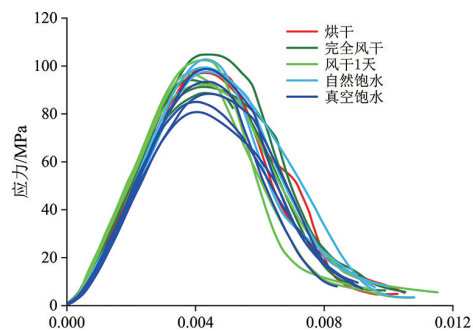
(a) 安山岩



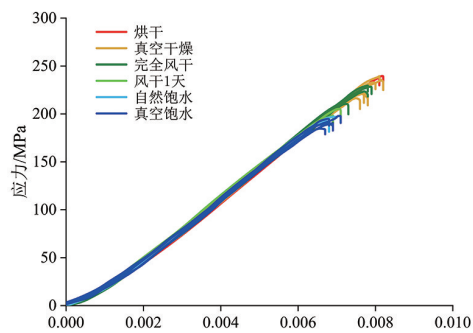
(b) 凝灰岩



(c) 砂岩



(d) 大理岩



(e) 大理岩

图 1 不同含水饱和度条件下的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves under different water content

3 结果分析

3.1 试样特性

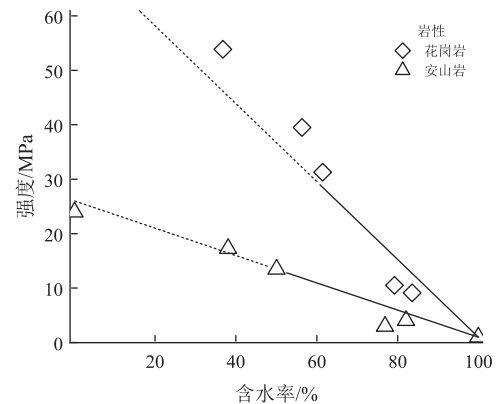
表 1 为通过的应力应变曲线得到的峰值强度 σ_f 的平均值、各含水状态下强度平均值与饱和状态下强度平均值的差值 $\Delta\sigma$ 的汇总表。前人研究多集中于极端含水条件下的强度分析。本研究着眼于由于含水饱和度的增加而引起强度的减少量和减少速度。因此，在本研究中，主要关注干燥状态到饱和状态条件下强度的增加量 $\Delta\sigma$ 。

此外，在过去的许多研究中，强度和含水饱和度之间的关系常用指数相关的公式来表示，在本研究中，使用对数函数类型相关的公式，除大理石以外的强度增加量 $\Delta\sigma$ 与含水饱和度 S_w 之间的关系近用以下公式表示：

$$\Delta\sigma = \sigma_f - \sigma_{f,w} = a \ln(100/S_w) \quad (0 < S_w \leq 100) \quad (2)$$

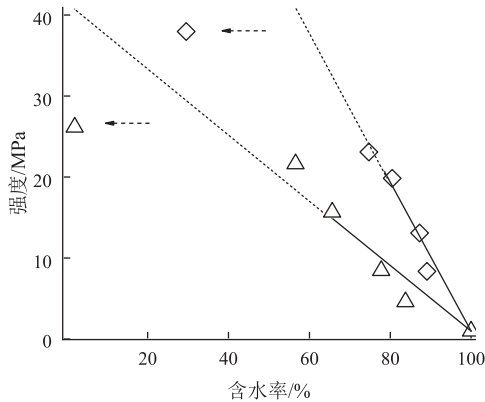
其中 a 是常数。

图 2 显示了 $\Delta\sigma$ 和 S_w 之间的关系。横轴上的 S_w 是对数轴，根据含水量不同对图进行颜色编码。从图 2 中描述的应力应变曲线的变化可以清楚地看出，安山岩、凝灰岩、砂岩和花岗岩的强度随着 S_w 的减小而增加， $\Delta\sigma$ 有增加的趋势（图 2 (a), (b)）。另一方面，大理石的 $\Delta\sigma$ 变化很大，无法确认 S_w 的依赖性（图 2 (c)）。式 (2) 中 a 的值为纵轴为强度、横轴为含水饱和度的对数时的直线斜率，如图 2 所示。它表明了强度对含水饱和度的依赖程度。

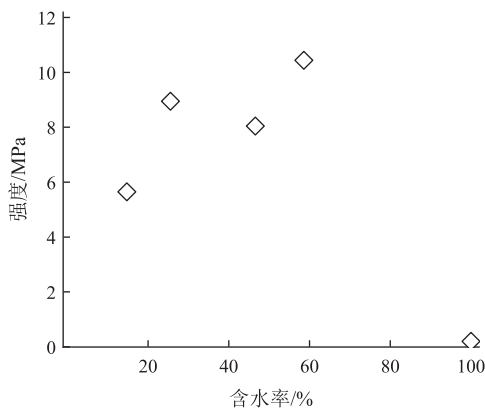


(a) 安山岩与花岗岩

岩土力学



(b) 凝灰岩和砂岩



(c) 大理石

图 2 $\Delta\sigma$ 和含水饱和度之间的关系

Fig. 2 Relationship between $\Delta\sigma$ and water content

需要说明的是，在式 (2) 中，含水饱和度 S_w 不能为零。为考虑式 (2) 的适用范围，暂时绘制的 S_w 范围为从饱和状态到风干状态，正常地下空洞周围基岩含水量不会出现真空干燥状态和烘干状态。表 2 表示了 a 和通过最小二乘法获得的相关系数。 a 值从大到小依次为砂岩、花岗岩、凝灰岩、安山岩。此外，将这些近似线延伸到烘干状态，并在图 2 (a) 和图 2 (b) 中用虚线表示。在安山岩和花岗岩中，真空干燥状态和烘干状态的 $\Delta\sigma$ 位于该延长线上。而凝灰岩和砂岩的 $\Delta\sigma$ 在真空干燥状态下位于延长线上，但在烘干状态下比近似线上预测的 $\Delta\sigma$ 小。

由于存在真空干燥状态和烘干状态的 $\Delta\sigma$ 值位于近似线的延长线上，也存在烘干状态的岩石的 $\Delta\sigma$ 小于近似线所预测的 $\Delta\sigma$ ，因此可以说明公式 (2) 存在适用范围。式 (2) 是表示由于应力

软化和粘土矿物的强度降低等机制而使岩石强度发生变化的线，可以认为近似线的倾斜度 a 是岩石固有的材料常数。在凝灰岩和砂岩的试验结果中，本研究使用的含水饱和度 S_w 的范围内，可以看到该近似线的适用界限。当 S_w 减小到一定程度时，可以认为强度不因 S_w 而变化，显示出该岩石固有的强度。

假设式 (2) 中的 a 为不依赖于 S_w 的材料常数，如果对岩石在两种含水状态下的 S_w 进行强度测试，例如饱和状态和风干状态下，如果求出岩石的 S_w 并进行强度试验，就可以评价该岩石对 a ，即 $\Delta\sigma$ 对 S_w 的依赖程度，并可以预测不同 S_w 下的岩石强度。在本研究的试验结果中，式 (2) 适用于安山岩和花岗岩的烘干状态，以及凝灰岩和砂岩的真空干燥状态。后续研究还需要确认该预测方法适用于哪种岩石，适用于何种程度的含水状态等。

如图 2 (c) 所示，大理石的 $\Delta\sigma$ 无法确认对 S_w 的依赖性。众所周知，像大理石和石灰岩这样的碳酸盐岩石也会因为水的存在而加速破坏。另外，也存在多孔质的石灰岩在饱和状态下的强度比干燥状态下的强度低的情况。由此可以认为，如果向岩石内微裂缝末端供水，碳酸盐岩石也会加速破坏，使其强度降低。本研究使用的大理石的有效空隙率为 0.45%，由于大理石结构的致密性，水没有流入微裂缝末端，所以对强度特性没有产生影响。

表 2 a 值与相关系数
Table 2 a value and correlation coefficient

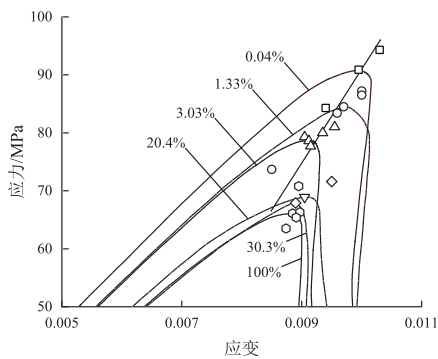
岩性	a 值	相关系数 R^2
安山岩	3.62	0.88
凝灰岩	5.88	0.95
砂岩	13.4	0.97
花岗岩	10.3	0.81

3.2 含水量变化引起的应力应变曲线变化

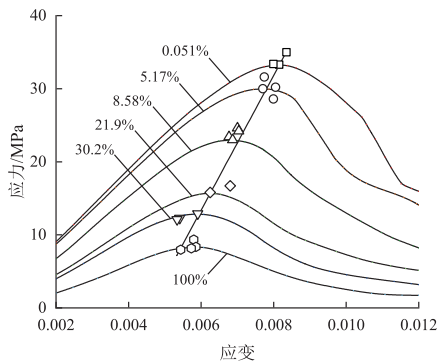
前文研究了应力应变曲线随含水状态的变化。然而，本研究中未详细分析大理石 (图 1 (d))，因为应力应变曲线对含水量的依赖程度很小。

首先，为了研究含水量对应力应变曲线的影响，重点关注各含水量中应力应变曲线对应点的特征和峰值强度。图 3 为每种含水状态下的典型

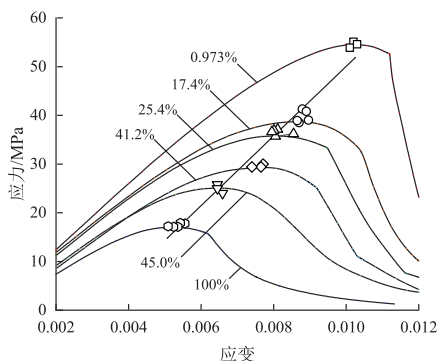
峰值区域的应力应变曲线，绘制了从图 1 中获得的峰值强度的点。该图还显示了每个含水量下的代表性应力应变曲线和当时的含水饱和度 S_w 。从图 3 可以清楚地看出，所有四种类型的岩石，在 S_w 较小的含水量状态下，峰值强度和对应的应变较小。由于测试中获得的所有峰值强度点几乎呈线性排列，因此采用最小二乘法，如图 3 所示，画了一条近似的直线。从图中可以求出：安山岩弹性模量为 16.4GPa，凝灰岩为 9.16 GPa，砂岩为 7.17 GPa，花岗岩为 33.5 GPa。



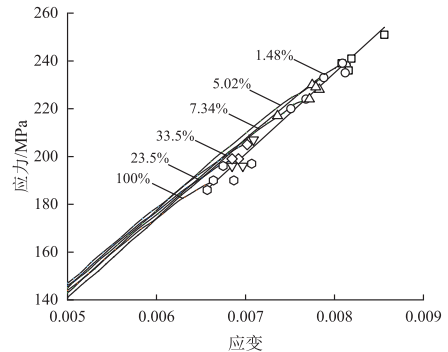
(a) 安山岩



(b) 凝灰岩



(c) 砂岩



(d) 花岗岩

图 3 峰值强度点分析 (大理岩除外)
Fig. 3 Peak strength point analysis (except marble)

由于峰值强度的点排列成直线状，该斜率与加载曲线的斜率大致相等，因此可以理解为各含水状态的峰值强度的点的非弹性应变相等。如果应变大于连接本研究中获得的峰值强度点的直线，则可以说破坏会加速进行。

其次，根据峰值强度的点呈直线状排列，本文研究了一种从一个含水状态下的应力应变曲线估算不同含水状态下的应力应变曲线的方法。沿着连接图 3 所示的峰值强度点的直线适当缩小图 1 所示的应变曲线。首先，应力曲线沿应 X 轴方向平行移动，使得峰值强度的点在图 3 的直线上。但是，在花岗岩中，峰值强度的点几乎呈直线状排列，因此不进行该操作。然后，通过连接峰值强度的点的直线的斜率 E_f ，将应变 ε 分为弹性应变 ($\varepsilon_e = \sigma/E_f$) 和非弹性应变 ($\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$)，变换后的应力和应变分别转换为 σ' 和 ε' ，由下式转换：

$$\sigma' = \sigma \times k$$

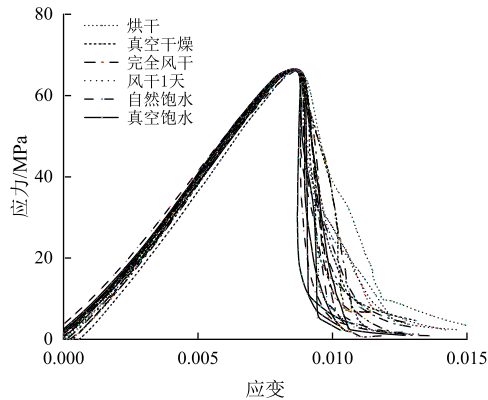
$$\varepsilon' = \varepsilon_e \times k + \varepsilon_p$$

式中，系数 k 为各强度与饱和状态下的强度的平均值之比 ($\sigma_{f,w}/\sigma_f$)。

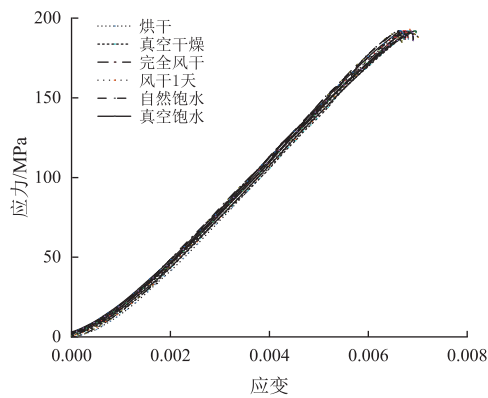
安山岩转换后的应力应变曲线如图 4 (a) 所示。从峰值强度到峰值强度之前的低应力状态下，各含水状态下的应力应变曲线很好地重叠。峰值强度以后，随着应力的降低，偏差变大，越接近饱和状态，越倾向于在曲线的内侧。花岗岩的转换结果如图 4 (b) 所示。与安山岩一样，峰值强度以前的应力应变曲线几乎重叠。即使在峰值强度之后，虽然存在偏差，但大致一致。另一方面，

岩土力学

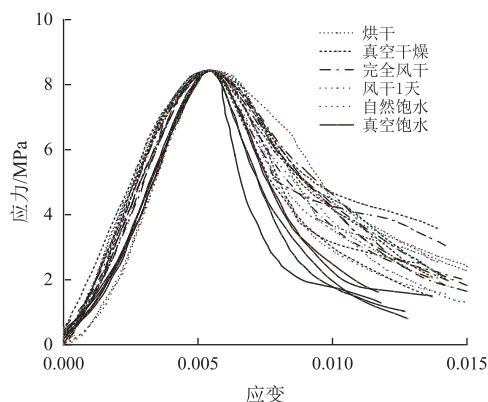
图 4 (c) 所示的凝灰岩转换后的应力应变曲线除了峰值强度以外没有重叠。虽然图中没有显示,但这种趋势也在砂岩的转换结果中看到。



(a) 安山岩



(b) 花岗岩



(c) 凝灰岩

图 4 转换后的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve after transformation

在安山岩和花岗岩中,在峰值强度之前,在一定含水状态下的应力应变曲线可以转换为饱和状态下的应力应变曲线。从这个结果可以看出,

从一个含水状态的应力-应变曲线可以估计出另一个含水状态的应变曲线。如在节 3.1 中所述,通过两个含水状态下的强度测试结果来预测某个含水饱和度下的强度,并且基于预测的强度,例如从饱和状态下的应力应变曲线推测某个含水饱和度下的应力应变曲线。另外,根据图 4 (a)、(b) 的结果,可以说峰强度之前的曲线的斜率变化小,与连接在任何含水状态下峰强度的点的直线的斜率大致相等。在这些岩石中,由于含水状态引起的应力应变曲线的斜率等变形特性的变化可以解释为非弹性应变发生了变化。

另一方面,在凝灰岩和砂岩中,在某含水状态下的应力应变曲线不能转换为饱和状态下的应力应变曲线。这可以认为是因为在这些岩石中,曲线的斜率即使在峰值强度之前也会发生很大的变化。在这些岩石中,如何估计不同含水状态下的应力应变曲线,以及是否可以将含水状态引起的变形特性的变化解释为非弹性应变的变化需要进一步的研究。

转换后的应力应变曲线的峰值强度以后,根据岩种的不同有一定程度的差异,没有很好地重叠。这可以认为是因为峰值强度以后的曲线的斜率与连接峰值强度的点的直线的斜率不同。关于峰值强度以后的研究将作为今后的关注研究的课题。

4 结论

(1) 本研究对五种岩石在不同含水量条件下进行了单轴压缩试验,研究了含水饱和度对强度和应力应变曲线的影响。在安山岩、凝灰岩、砂岩和花岗岩中,强度和应力应变曲线随含水量而变化。另一方面,在大理岩中,强度和应力应变曲线变化很大,几乎没有观察到含水饱和度对这些的影响。

(2) 本文讨论了各含水状态下的强度与饱和湿状态下的强度 $\Delta\sigma$ 与含水饱和度的关系。通过研究成为峰值强度的点如何随着含水量的变化而移动,研究了根据含水状态的变化和根据某一应变曲线估计不同含水状态下的应变曲线的方法。

(3) 今后,对各种含水状态下岩石的峰值强

度以后的应力应变曲线的研究, 以及不仅在单轴压缩应力下, 在三轴压缩应力和拉伸应力下的研究, 都需要研究水饱和度对岩石力学行为的影响。

参 考 文 献

- [1] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水饱和度煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (6): 1115-1120.
- [2] TATONE B S A, ABDELAZIZ A, GRASSELLI G. Novel mechanical classification method of rock base on the uniaxial compressive strength and brazilian disc strength [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55 (4): 2503-2507.
- [3] 苏承东, 李怀珍, 张盛等. 应变速率对大理岩力学特性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (5): 943-950.
- [4] 宋义敏, 邢同振, 邓琳琳等. 不同加载速率下岩石变形场演化试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (10): 2773-2779+2788.
- [5] 李杰林, 洪流, 周科平等. 不同加卸载方式下饱和岩石力学特征的试验研究 [J]. 矿冶工程, 2021, 41 (2): 15-19+32.
- [6] 甘德清, 田晓曦, 高峰等. 循环冲击条件下磁铁矿石损伤特征研究 [J]. 金属矿山, 2020, No. 525 (3): 79-84.
- [7] PERERA M S A, RANJITH P G, PETER M. Effects of saturation medium and pressure on strength parameters valley brown coal: carbon dioxide, water and nitrogen saturations [J]. Energy, 2011, 36 (12): 6 941 - 6 947.
- [8] 刘忠锋, 康天合, 鲁伟等. 煤层注水对煤体力学特性影响的试验 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (1): 17-19.
- [9] 郑文红, 施天威, 潘一山等. 含水饱和度对岩石电荷感应信号影响规律研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (3): 659-668.
- [10] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (S1): 2637-2643.
- (上接第 41 页)
- [6] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固材料试验研究与应用 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (7): 1937-1946.
- [7] 李召峰, 李术才, 张庆松, 等. 富水破碎岩体注浆加固模拟试验及应用研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (12): 2246-2253.
- [8] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 富水破碎岩体帷幕注浆模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (9): 1627-1634.
- [9] 邓尤东, 周凯. 深孔注浆技术在岩溶富水隧道施工中的应用 [J]. 建筑施工, 2012, 34 (1): 36-37.
- [10] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 李永林, 牟力. 隧道超前地质预报综合分析方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (12): 2429-2436.
- [11] 毛筱霏, 张艳艳, 胡富利, 等. 糯米浆改性烧料礞石灌浆材料力学性能试验研究 [J]. 应用力学学报, 2022, 39 (5): 965-973.
- [12] 朱永建, 任恒, 王平, 等. 含单一贯通破裂面岩石注浆试验及加固机理分析. 岩土力学, 2022 (12): 1-10.
- [13] 周梅, 白金婷, 郭凌志, 等. 基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化 [J]. 材料导报, 2023 (20): 1-14.
- [14] 胡瑶瑶, 王凯, 马川义, 等. 海底隧道注浆水泥-水玻璃浆液黏度时变特性 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4 (2): 90-97.
- [15] 迟凤霞, 韩博, 孙艺涵, 等. 矿物掺合料对水泥-水玻璃注浆材料性能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (2): 773-780.
- [16] 夏冲, 李传贵, 冯啸, 等. 水泥粉煤灰-改性水玻璃注浆材料试验研究与应用 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2022, 52 (1): 66-73+84.