

温、湿度对粉砂质泥岩边坡岩体抗剪强度的影响

付宏渊, 陈小薇, 陈镜丞, 曾 铃, 邱 祥

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为研究粉砂质泥岩边坡受温、湿度影响后的岩体抗剪强度参数变化规律,总结了基于 Hoek-Brown 准则的岩体抗剪强度参数的计算方法,并开展一系列单轴力学试验,得到粉砂质泥岩试样在不同温、湿度条件下的单轴抗压强度 σ_c 、劈裂强度 σ_t 及纵波波速 V_{pi} ,根据试验结果及 Hoek-Brown 准则计算粉砂质泥岩边坡岩体抗剪强度参数并分析其变化规律。结果表明:温、湿度变化后 σ_c 、 σ_t 、 V_{pi} 均降低,且降幅与变温温差 ΔT 、变温循环次数 n 及含水率 w 相关;温度单独变化时,岩体抗剪强度参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 均衰减,且其衰减幅度均随温差幅度 $|\Delta T|$ 、变温过程平均温度、变温循环次数 n 增大而增大;岩体在恒温浸水时仅湿度变化,其含水率增速在前期较快而在后期趋缓,岩体抗剪强度参数 c 、 φ 与含水率 w 呈指数函数的递减关系;当温、湿度同时变化时,岩体抗剪强度参数 c 、 φ 均比天然状态时大幅衰减,且因温度变化影响了湿度变化,使得 c 、 φ 在降温循环时随温差幅度 $|\Delta T|$ 增大而增大,在升温循环时随温差幅度 $|\Delta T|$ 增大而减小;在相同变化时间下,湿度变化对岩体抗剪强度参数的影响大于温度变化,温、湿度同时变化对岩体抗剪强度参数的影响大于温度、湿度单独变化时的影响之和,表明温度与湿度之间存在协同增效作用;岩体抗剪强度参数中黏聚力 c 的衰减幅度大于内摩擦角 φ 。

关键词:道路工程;边坡工程;粉砂质泥岩;岩体抗剪强度参数;Hoek-Brown 准则

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

Impact of temperature and humidity on rock mass shear strength of silty-mudstone slope

FU Hong-yuan, CHEN Xiao-wei, CHEN Jing-cheng, ZENG Ling, QIU Xiang

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to study the change law of the rock mass shear strength parameters of silty-mudstone slope impacted by temperature and humidity, a method for calculating the rock mass shear strength based on the Hoek-Brown criterion was summarized. According to this method, a series of uniaxial mechanical tests were implemented, and the uniaxial compressive strength σ_c , splitting strength σ_t , and ultrasonic velocity V_{pi} of silty-mudstone specimens under different temperature and humidity conditions were obtained. Based on these test results, the rock mass shear strength parameters of silty-mudstone slope were calculated and analyzed. The results show that σ_c , σ_t , and V_{pi} of silty-mudstone decreases under the effect of temperature and humidity, and

收稿日期:2018-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51508040,51678073,51678074,51578079);湖南省自然科学基金项目(2016JJ3010);

湖南省社会发展领域重点研发项目(2016SK2023);长沙理工大学土木工程重点学科创新项目(15ZDXK08)

作者简介:付宏渊(1965-),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,E-mail:fhy001@126.com。

the decreasing range associated with temperature difference ΔT , temperature cyclic times n and water content w . When temperature changes individually, the rock mass cohesion c and internal friction angle φ are reduced, while the decrease rate of c and φ increases with the increase in absolute temperature difference $|\Delta T|$, average temperature in the temperature changing process, and n . Humidity changes only when the rock mass soaks water at a constant temperature, and w increases rapidly in the early stage and slowly in the later stage; the shear strength parameters c and φ pertaining to the rock mass exponentially decrease with the increase in w . When temperature and humidity change simultaneously, c and φ are significantly lower than those in the natural state because the humidity is affected by the change in temperature; c and φ increase with an increase in $|\Delta T|$ in the heating cycle, and decrease with an increase in $|\Delta T|$ in the cooling cycle. Under the equal duration, the impact of humidity on the shear strength parameters of rock mass is greater than that of temperature; the decreasing rate of the rock mass shear strength parameters impacted by simultaneous changes in temperature and humidity is greater than the sum of that of temperature and humidity changes individually, shows a synergistic effect between temperature and humidity; the decrease rate of c is always larger than that of φ . 3 tabs, 15 figs, 22 refs.

Key words: road engineering; slope engineering; silty-mudstone; shear strength parameters of rock mass; Hoek-Brown criterion

0 引言

中国南方地区主要为亚热带季风气候,气温的昼夜、季节变化显著,在春夏季时有雨热同期的特点。该地区粉砂质泥岩分布较广,公路、铁路工程建设中常形成粉砂质泥岩边坡。由于粉砂质泥岩干缩湿胀、易于风化的特性,在频繁的降雨及气温显著变化时,粉砂质泥岩边坡的岩体力学性能易受影响而产生较大变化,影响边坡稳定与安全。因此,粉砂质泥岩边坡稳定性问题研究必须对不同温、湿度下的粉砂质泥岩体抗剪强度变化规律准确认识。然而直接获取岩体力学参数的现场原位试验操作复杂、测试周期长、测试成本高,且试验结果具有一定的离散性^[1],有必要寻求一种通过间接手段精确获取岩体抗剪强度的方法。Eberhardt 总结了 Hoek-Brown (H-B) 准则的研究进展,认为 H-B 准则提供了一种有效估算岩体强度参数的方法^[2]。H-B 准则的运用关键在于准确获取材料参数,Hoek 结合地质强度指标 G_{SI} 提出了岩体 H-B 准则参数的取值方法,但未考虑开挖扰动对岩体的影响^[3]。Hoek 等在 2002 版 H-B 准则中引入了岩体扰动因子 D ,同时基于 Mohr-Coulomb (M-C) 准则和 H-B 准则强度参数等效,给出了岩体抗剪强度计算方法,但材料参数取值的主观性和随意性仍制约着计算精度^[4]。Gercek 基于大量单轴拉、压试验提出了材料参数 m_i

的室内试验取值法^[5]。夏开宗等提出了由岩体纵波波速量化计算 G_{SI} 、 D 的方法,并证明了其适用于低波速岩体,提高了材料参数取值的准确性^[6-8]。Merifield 等讨论了关于 H-B 准则与 M-C 准则等效时的参数估计问题^[9-11]。卓莉等改进了 Hoek 的岩体强度参数估算方法,使之不再受限于小主应力区间的取值,但未能证明其对低围压软岩的适用性^[12]。上述研究都没有将岩体强度参数计算方法与室内试验相结合,进行具体岩体抗剪强度的变化规律分析。

目前,国内外众多学者已开展了一些针对岩石在温度或湿度作用下力学性能变化的研究。李克钢等分析了干湿循环对砂岩力学性能的影响规律^[13-14],黄宏伟等分析了单一的温度或湿度对岩石物理力学性能的影响^[15-16],但其研究均缺少对岩石同时受温、湿度影响的分析,且未考虑粉砂质泥岩的独有特性。于怀昌等对粉砂质泥岩的三轴力学特性进行了研究^[17-18],但没有涉及温、湿度影响。刘镇等研究了粉砂质泥岩饱水过程中微观结构的演化及遇水崩解的机理^[19-20],但未能同时考虑温度变化的影响。上述研究都停留在对岩石力学性能层面进行分析,而未能进一步分析岩体抗剪强度的变化规律。

鉴于此,本文开展粉砂质泥岩在温、湿度变化下的单轴力学试验,并测试岩石纵波波速变化,基于试验结果和 H-B 强度准则计算并分析粉砂质泥岩体

抗剪强度参数在不同温、湿度条件下的变化规律。研究成果有助于深入了解其岩体在不同温、湿度条件下的力学性能变化,为粉砂质泥岩边坡稳定性分析提供参数依据。

1 Hoek-Brown 强度理论

1.1 广义 H-B 准则

Hoke 和 Brown 提出的广义 H-B 强度准则反映了岩体固有的非线性破坏特点及结构面、应力状态对岩体的影响,并且能解释低应力区、拉应力区和最小主应力对岩体强度的影响^[21],其经验表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为岩体破坏时的最大、最小有效主应力(MPa); σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度; m_b 、 s 、 a 均为与岩体特征有关的材料参数。

岩体材料参数 m_b 、 s 、 a 的取值是运用 H-B 准则的关键,Hoek 等提出基于地质强度指标 G_{SI} 、岩体扰动因子 D 的材料参数取值计算方法^[4],即

$$m_b = e^{\frac{G_{SI}-100}{28-14D}m_i} \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{G_{SI}-100}{9-3D}} \quad (3)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-G_{SI}/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

式中: G_{SI} 为地质强度指标值,与岩体结构特征、结构面特征有关; m_i 为完整岩石材料参数。

m_i 可由岩石单轴压缩试验、劈裂试验结果计算得到^[5],计算公式为

$$m_i = \frac{16\sigma_{ti}}{\sigma_{ci}} - \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{ti}} \quad (5)$$

式中: σ_{ti} 为完整岩石的劈裂强度(MPa)。

岩体纵波波速能够反映岩体完整性,表征岩体结构面性状和岩体性质。相比传统方法,由岩体纵波波速量化计算 G_{SI} 、 D 能有效降低取值的主观性和随意性,提高精度^[6-7],其计算如下

$$G_{SI} = 15V_{pme} - 7.5 \quad (6)$$

$$D = 1 - \left(\frac{V_{pme}}{V_{pm0}} \right) \quad (7)$$

式中: V_{pm0} 、 V_{pme} 分别为扰动前、后岩体的纵波波速(km/s)。

在岩体受温、湿作用时,由于试验条件制约,难以对岩体的纵波波速实时测量,根据少量已有试验数据,假定在相同温、湿度条件下岩体纵波波速与岩石纵波波速等比例变化,即

$$\frac{V_{pme}}{V_{pm0}} = \frac{V_{pie}}{V_{pi0}} \quad (8)$$

式中: V_{pi0} 、 V_{pie} 分别为完整岩石扰动前、后的纵波波速(km/s)。

根据式(8)可由岩体初始纵波波速及完整岩石扰动前、后的纵波波速估算岩体扰动后的纵波波速 V_{pme} 。

1.2 岩体抗剪强度参数计算方法

M-C 准则广泛应用于现行岩石工程计算中,如何准确便捷地取得岩体的抗剪强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ),一直是工程及科研人员的研究热点。Hoek 等基于 $(\sigma_t, \sigma_{3max})$ 范围内 M-C 准则和 H-B 准则强度参数等效进行最佳拟合,得到岩体抗剪强度参数 c 、 φ 计算如下^[4]

$$c = \frac{1}{(1+a)(2+a)} \{ \sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1} \} \{ 1 + [6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}] / [(1+a)(2+a)] \}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \arcsin [6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}] / [2(1+a) \cdot (2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}] \quad (10)$$

$$\sigma'_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci} \quad (11)$$

式中: σ_t 为劈裂强度; σ_{3max} 为最大围压上限。

在边坡工程中,温、湿度变化对完整岩体的影响深度较浅,只取埋深 1 m 以内岩体进行研究,则最大围压上限 σ_{3max} 与岩体强度 σ_{cm} 有如下关系^[22]

$$\frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma} \right)^{0.91} \quad (12)$$

式中: γ 为岩体重度(kN/m³)。

当满足应力范围 $\sigma_{ti} < \sigma_3 < 0.25\sigma_{ci}$ 时,岩体强度 σ_{cm} 可用下式计算^[4]

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (13)$$

2 温、湿度变化的单轴力学试验

2.1 温、湿度变化试验方案

根据式(2)~式(13),可由完整岩石的纵波波速及单轴拉、压强度估算边坡岩体强度。故为了分析温、湿度对粉砂质泥岩体强度的影响,本文设计了 3 种试验方案来获取其纵波波速及单轴拉、压强度。

(1)方案 1(温度变化):取 10 组天然试样在室温下用吸湿硅胶干燥以消除湿度的影响,然后放入干燥的恒温试验箱中,其中方案 1-A 以变温方式 1~5 对 5 组试样进行 10 次变温循环;方案 1-B 以变

温方式 5 分别对 5 组试样进行 0、3、6、10、15 次变温循环;最终测量各组试样的纵波波速及单轴拉、压强度,见图 1。

(2)方案 2(湿度变化):将 8 组天然试样放入水浴箱中 25 ℃ 恒温浸水,在浸水 0、0.5、1、2、10、20、60、120 d 时依次测量其含水率、纵波波速及单轴拉、压强度。

(3)方案 3(温、湿度同时变化):将 5 组天然试样放入水浴箱中浸水,同时分别以变温方式 1~5(图 1)对 5 组试样进行 10 次(即 10 d)变水温循环,最后测量试样含水率、纵波波速及单轴拉、压强度。

上述方案中,各试样组均包含 3 个 $\Phi 50 \times 100$ mm 和 3 个 $\Phi 50 \times 25$ mm 试样,分别用于单轴抗压试验和劈裂试验,各变温方式如图 1 所示。由图 1 可知:1 次变温循环的周期时长为 24 h,共包含 2 个变温段(时长 0.5 h)和 2 个温度稳定段(时长 11.5 h);以周期内最高温与最低温的差值为温差幅度 $|\Delta T|$,则有 $|\Delta T_1| = |\Delta T_5| = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $|\Delta T_2| = |\Delta T_4| = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $|\Delta T_3| = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$;以周期内先升温的升温循环为正向变温,以周期内先降温的降温循环为负向变温,变温方式 1~5 可由变温温差 $\Delta T_1 \sim \Delta T_5$ 表示,分别为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

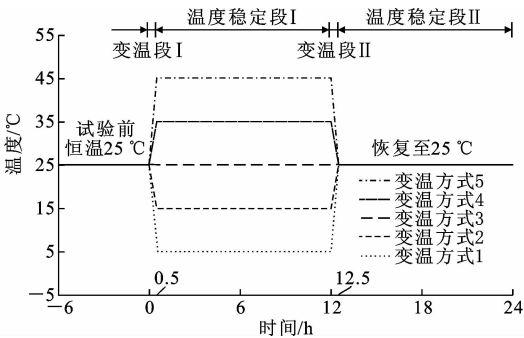


图 1 周期内的不同变温方式

Fig. 1 Temperature changing modes in a cycle

2.2 粉砂质泥岩试样制备

本文所用粉砂质泥岩采自湖南长沙市岳麓山中泥盆统棋梓桥组强风化粉砂质泥岩边坡,其物理参数如表 1 所示。

表 1 粉砂质泥岩的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of silty mudstone	
参数	参数值
密度/(g·cm ⁻³)	2.4
孔隙率/%	19.0
天然含水率/%	4.3
岩体扰动前纵波波速 $V_{pm0}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	1.56

根据国际岩石力学学会(IRSM)推荐的试验规

程^[21],将采集的粉砂质泥岩块制成 $\Phi 50 \times 100$ mm 和 $\Phi 50 \times 25$ mm 的圆柱体试样。对制成的试样开展超声波检测,最终选用纵波波速在 2.2~2.3 km/s 的试样进行试验,以降低岩石性能的离散性。部分试样如图 2 所示。

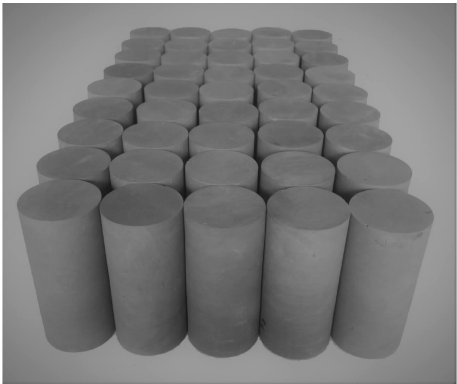


图 2 粉砂质泥岩部分试样

Fig. 2 Parts of test samples of silty-mudstone

2.3 试验结果与分析

2.3.1 方案 1

方案 1 对干燥试样循环变温以模拟粉砂质泥岩受温度变化影响。由方案 1-A 可得干燥粉砂质泥岩纵波波速 V_{pi} 、单轴抗压强度 σ_c 、劈裂强度 σ_t 与变温温差 ΔT 的关系,见图 3、图 4。由图可知: V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 三者具有类似的变化规律;在升温循环时($\Delta T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 均随 $|\Delta T|$ 的增大而减小;在降温循环时($\Delta T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 均随 $|\Delta T|$ 的增大而减小。

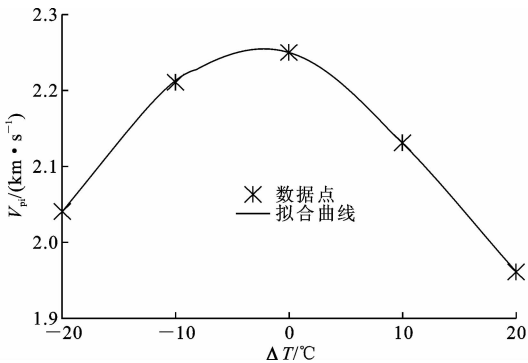


图 3 不同变温方式下干燥粉砂质泥岩的纵波波速(变温循环 10 次)

Fig. 3 Ultrasonic velocity of dry silty-mudstone under different temperature changing modes (10 times of temperature cycle)

根据方案 1-B 的结果,干燥粉砂质泥岩 V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 随变温循环次数 n 变化的关系见图 5、图 6。由图可知: V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 随变温循环次数 n 的增加而减小,且其近似呈线性下降,经历 15 次变温循环后, V_{pi} 、 σ_c 、

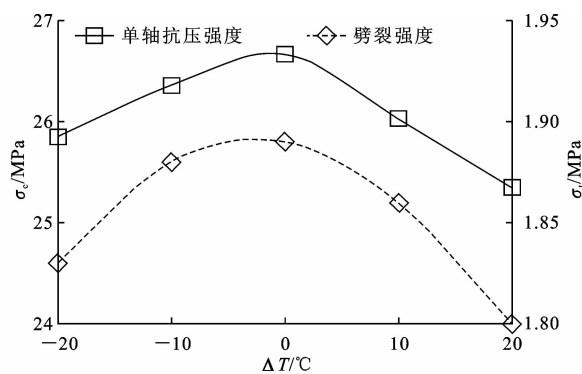


图 4 不同变温方式下干燥粉砂质泥岩的单轴抗压强度和劈裂强度(变温循环 10 次)

Fig. 4 Uniaxial compressive strength, splitting strength of dry silty-mudstone under different temperature changing modes (10 times of temperature cycle)

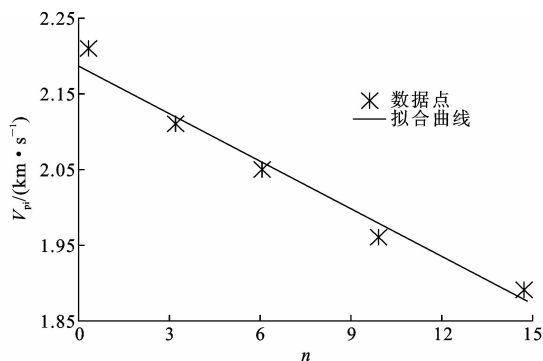


图 5 干燥粉砂质泥岩纵波波速与变温循环次数的关系(变温方式 5)

Fig. 5 Relationship between ultrasonic velocity of dry silty-mudstone and temperature cyclic times (temperature changing mode 5)

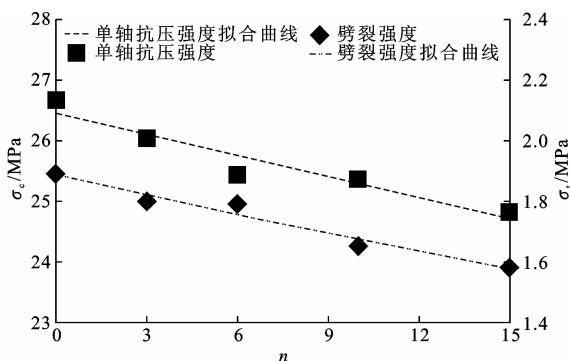


图 6 干燥粉砂质泥岩单轴抗压强度、劈裂强度与变温循环次数的关系(变温方式 5)

Fig. 6 Relationships between uniaxial compressive strength, splitting strength of dry silty-mudstone and temperature cyclic times (temperature changing mode 5)

σ_t 分别降低至初始值的 83.7%、83.2%、83.6%。

2.3.2 方案 2

方案 2 将试样恒温浸水以模拟粉砂质泥岩受湿度

变化影响。图 7 为恒温浸水时粉砂质泥岩的含水率 w (质量分数,下同)随浸水时间 t 变化的曲线。由图 7 可知:天然粉砂质泥岩恒温浸水后含水率持续增大,浸水 120 d 后含水率由 4.3%增至 15.5%;浸水最初 2 d 内含水率快速增大,浸水 2 d 后含水率增速逐渐趋缓。

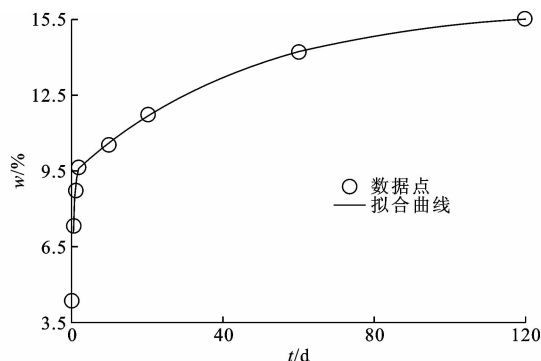


图 7 粉砂质泥岩的含水率与浸水时间的关系(恒温 25 °C)

Fig. 7 Relationship between water contents of silty-mudstone and soaking times (constant temperature of 25 °C)

图 8、图 9 为恒温 25 °C 浸水时粉砂质泥岩纵波波速 V_{pi} 、单轴抗压强度 σ_c 、劈裂强度 σ_t 与含水率 w 的关系。由图可知:粉砂质泥岩的 V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 均随 w 增加呈递减关系;当含水率 w 由 4.3%增至 15.5%时, V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 分别降低至初始值的 68.4%、54.5%、64.5%,可见浸水时粉砂质泥岩抗压强度的衰减程度比抗拉强度的大。

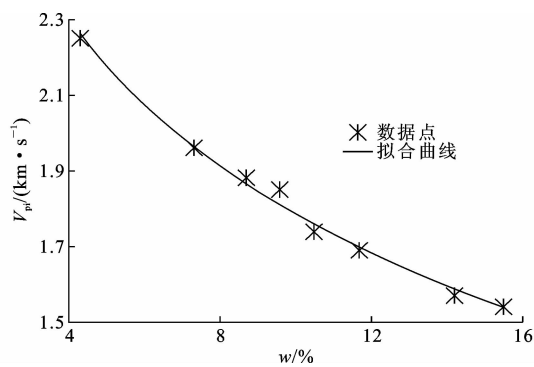


图 8 粉砂质泥岩不同含水率时的纵波波速(恒温 25 °C)

Fig. 8 Ultrasonic velocities of silty-mudstone under different water contents (constant temperature of 25 °C)

2.3.3 方案 3

方案 3 在粉砂质泥岩试样浸水同时循环变化水温,模拟温、湿度同时变化的影响。相同浸水时间下粉砂质泥岩的纵波波速 V_{pi} 、含水率 w 、单轴抗压强度 σ_c 、劈裂强度 σ_t 与变水温温差 ΔT 的关系如图 10、图 11 所示。由图可知:不论经历何种变水温循环,粉砂质泥岩的 V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 总小于天然状态时,而其含水率总大于天然状态时; w 随 ΔT 增大而增大,

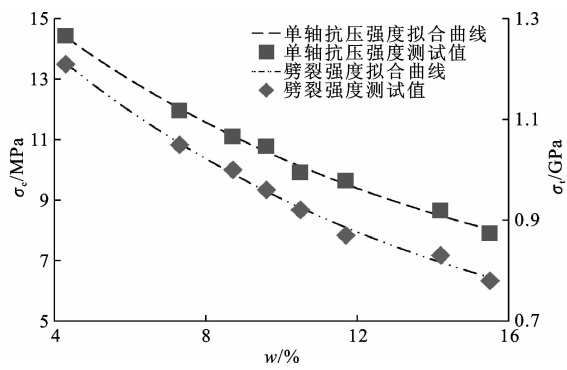


图 9 粉砂质泥岩不同含水率时的单轴抗压强度、劈裂强度(恒温 25 °C)

Fig. 9 Uniaxial compressive strength, splitting strength of silty-mudstone under different water contents (constant temperature of 25 °C)

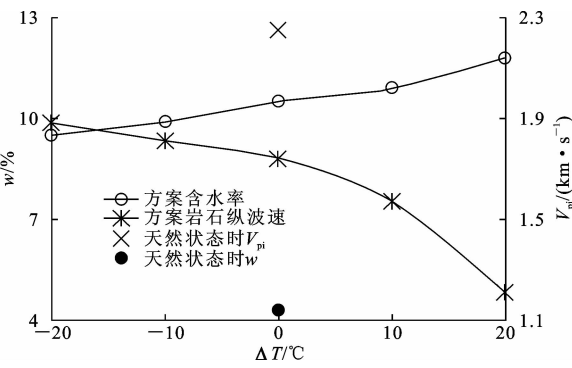


图 10 不同变水温方式下粉砂质泥岩的含水率及纵波波速(浸水 10 d)

Fig. 10 Water contents, Ultrasonic velocities of silty-mudstone after different water temperatures changing modes (soaked for 10 d)

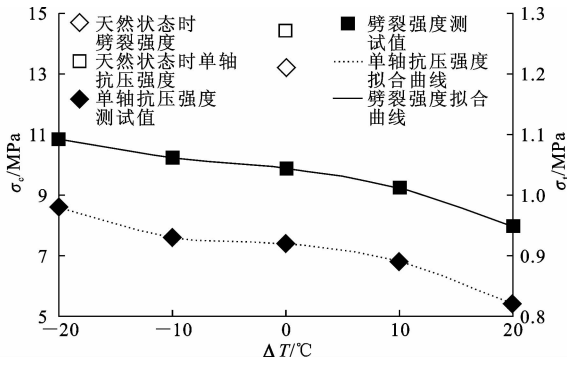


图 11 不同变水温方式下粉砂质泥岩单轴抗压、劈裂强度(浸水 10 d)

Fig. 11 Uniaxial compressive strength, splitting strength of silty-mudstone after different water temperatures changing modes (soaked for 10 d)

说明粉砂质泥岩的含水率除受浸水时长影响外,还受到浸水温度变化的影响; V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 具有相似的变化规律,均随 ΔT 的增大而减小。

3 基于 Hoek-Brown 准则温、湿度变化对粉砂质泥岩体抗剪强度的影响

3.1 温度变化

粉砂质泥岩体受温度变化影响时,岩体抗剪强度参数与变温温差 ΔT 的关系如图 12 所示。由图 12 可知:降温循环($\Delta T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,岩体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 随温差幅度 $|\Delta T|$ 的增大而减小, $\Delta T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, c 、 φ 分别比未变温时(即 $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)降低 17.6%、14.9%;升温循环($\Delta T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, c 、 φ 也随 $|\Delta T|$ 的增大而减小, $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 c 、 φ 分别比未变温时降低 24.4%、21.0%。

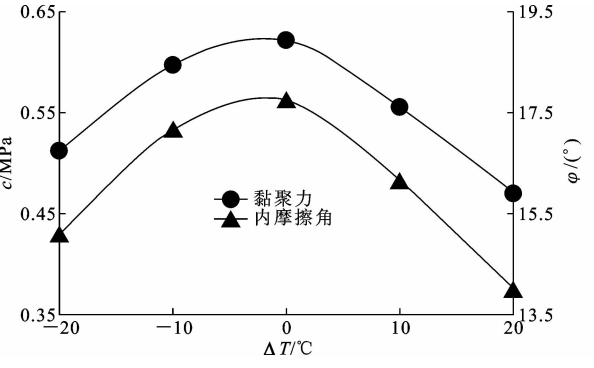


图 12 不同变温方式下的干燥粉砂质泥岩体抗剪强度参数(10 次变温循环)

Fig. 12 Shear strength parameters of dry silty-mudstone mass after different temperatures changing modes (10 times of temperature cycle)

粉砂质泥岩体抗剪强度参数与变温循环次数 n 的关系如图 13 所示。由图可知: c 、 φ 随 n 的增加而减小,平均每次循环衰减幅度分别约为 2.73% 和 2.31%,经 15 次变温循环后 c 、 φ 分别比初始值降低 40.9%、34.6%。这是因为温度变化引起的岩体裂隙发生和发育是不可逆的,岩体的损伤因变温次数增加而不断累积增长,导致岩体强度持续衰减。

3.2 湿度变化

粉砂质泥岩体在恒温浸水时仅受湿度变化影响时,其抗剪强度参数随含水率 w 变化如图 14 所示。由图 14 和图 8 可知:岩体浸水后, w 随浸水时间增加而增大, c 、 φ 均随 w 的增大而减小;长期浸水后, w 由 4.3% 增加到 15.5% 时, c 、 φ 分别比初始值降低 66.3%、63.3%。

3.3 温、湿度同时变化

温、湿度同时变化 10 d 后,粉砂质泥岩体在不同变水温方式下的抗剪强度参数如图 15 所示。由

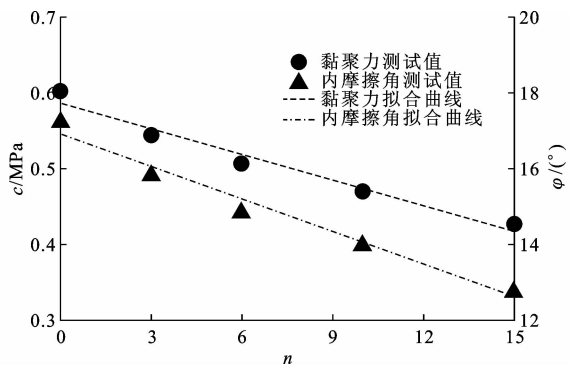


图 13 干燥粉砂质泥岩体抗剪强度参数与变温循环次数的关系(变温方式 5)

Fig. 13 Relationships between shear strength parameters of dry silty-mudstone mass and cycle times (temperature changing mode 5)

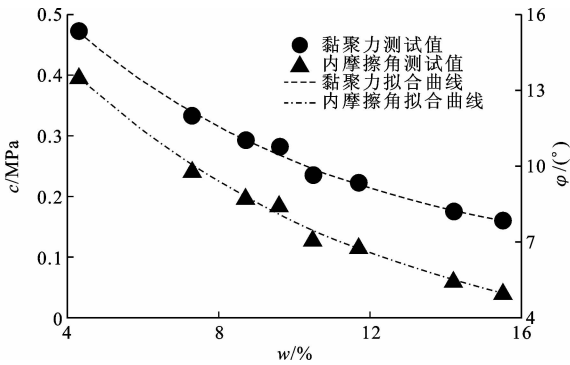


图 14 不同含水率下的粉砂质泥岩体抗剪强度参数(恒温 25 °C)

Fig. 14 Shear strength parameters of silty-mudstone mass under different water contents (constant temperature of 25 °C)

图 15 可知:不论经历何种变水温方式,粉砂质泥岩体 c 、 φ 均较天然状态时大幅衰减;降水温循环时 ($\Delta T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), c 、 φ 均较恒温 25 °C 浸水时增大,且增幅随 $|\Delta T|$ 增大而增大, $\Delta T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 c 、 φ 分别比恒温 25 °C 浸水时增大 23.7%、21.7%,其变化趋势与温度变化时相反;升水温循环时 ($\Delta T > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), c 、 φ 均较恒温 25 °C 浸水时减小,且降幅随 $|\Delta T|$ 增大而增大, $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 c 、 φ 分别较恒温 25 °C 浸水时 ($\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 减小 61.8%、55.8%,此时 c 、 φ 变化趋势与温度变化时相似。

针对上述分析,结合图 1、图 10 可知其原因为: ΔT 越大,循环过程的平均温度越高,岩体含水率也越大,表明浸水温度降低减缓了水分入渗及水-岩作用,从而减小了岩体抗剪强度参数的衰减;反之浸水温度升高则加快了水分入渗及水-岩作用,从而增大了岩体抗剪强度参数的衰减;在降水温循环时,虽然 $|\Delta T|$ 越大,温度变化引起岩体抗剪强度参数的衰减幅度增大,但其不足以抵消含水率降低引起的岩体

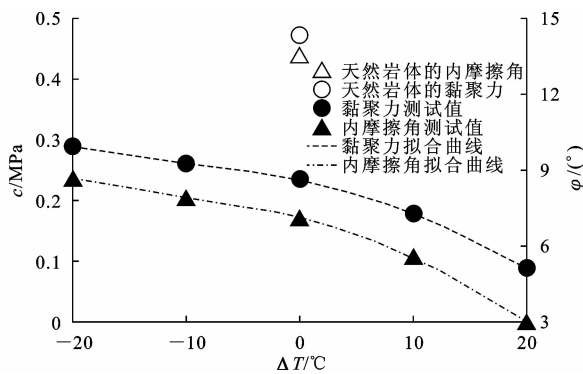


图 15 不同变水温下的粉砂质泥岩体抗剪强度参数(浸水 10 d)

Fig. 15 Shear strength parameters of silty-mudstone mass after different cycle of water temperatures (soaked for 10 d)

抗剪强度参数变化量,二者相加使得降温循环时岩体抗剪强度参数随 $|\Delta T|$ 增大而增大;而当升水温循环时,随着 $|\Delta T|$ 增大,温度变化与湿度变化均使得岩体抗剪强度参数衰减,二者相加使得岩体抗剪强度参数随温差幅度增大而减小。

3.4 不同温、湿度变化方案对岩体抗剪强度的影响

选取方案 1(变温方式 5、每天循环变温 10 次)、方案 2(仅浸水 10 d)、方案 3(变温方式 5、每天浸水同时变温循环 10 次)作为代表工况,比较不同温、湿度条件对粉砂质泥岩体强度参数的影响,结果见表 2、表 3。由表 2、表 3 可知:在持续变化 10 d 后,湿度单独变化引起岩体 c 、 φ 衰减幅度分别为 50.4%、47.4%,大于温度单独变化时的 28.0%、18.9%,相同条件下湿度对岩体抗剪强度的影响大于温度;温、湿度同时变化时 c 、 φ 的衰减幅度分别为 81.1%、77.8%,均大于其在温度、湿度单独变化时的衰减幅度之和,说明湿热季节时温度与湿度间具有协同增效的作用,会导致粉砂质泥岩体抗剪强度产生极大衰减;温、湿度同时变化时, c 的衰减幅度始终大于 φ 。

表 2 不同温、湿度条件下 c 的衰减

Tab. 2 Decrease of cohesion under different conditions of temperature and humidity

岩体黏聚力 c	温度变化	湿度变化	温、湿度同时变化
初始值/MPa	0.60	0.47	0.47
变化后值/MPa	0.47	0.23	0.09
衰减幅度/%	28.0	50.4	81.1

4 结 语

(1)粉砂质泥岩干燥试样经变温循环时,岩石纵波波速 V_{pi} 、单轴抗压强度 σ_c 及劈裂强度 σ_t 随变温循环次数 n 、变温温差 ΔT 的变化而降低;天然试样

表 3 不同温、湿度条件下 φ 的衰减

Tab. 3 Decrease of internal friction angle under different conditions of temperature and humidity

岩体内摩擦角 φ	温度变化	湿度变化	温、湿度同时变化
初始值/(°)	17.3	13.6	13.6
变化后值/(°)	14.0	7.1	3.0
衰减幅度/%	18.9	47.4	77.8

恒温浸水后 V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 随 w 递减;天然试样浸水且变水温时, V_{pi} 、 σ_c 、 σ_t 均降低,其降幅随变温温差 ΔT 递增。

(2)温度变化会导致粉砂质泥岩体 c 、 φ 衰减,其衰减幅度均随温差幅度 $|\Delta T|$ 、变温过程的平均温度、变温循环次数 n 递增。

(3)恒温浸水时,粉砂质泥岩体含水率 w 随浸水时间增加而增大,且浸水前期增速较快而后期趋缓; c 、 φ 均随含水率 w 变化呈递减趋势,且 c 、 φ 与 w 的关系符合指数函数分布。

(4)温、湿度同时变化时,粉砂质泥岩体 c 、 φ 均较天然状态时大幅衰减,降水温循环时 c 、 φ 随温差幅度 $|\Delta T|$ 增大而增大;升水温循环时 c 、 φ 随温差幅度 $|\Delta T|$ 增大而减小。

(5)在相同变化时间下,湿度对粉砂质泥岩体抗剪强度参数的影响幅度大于温度;温、湿度同时变化对岩体抗剪强度参数的影响幅度大于二者单独变化之和,表明温、湿度具有协同增效作用; c 的衰减幅度总大于 φ 。

(6)本文采用的岩石材料参数 m_i 取值参照 Gereck 根据脆性岩石的室内试验^[5]给出,其针对非脆性岩石取值时精度有所降低。粉砂质泥岩在低含水率表现为脆性,在高含水率时其塑性较明显,不属于典型脆性岩石,后续拟针对 m_i 的取值精度进行研究。

参考文献:

References:

[1] HOEK E,DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43:203-215.

[2] EBERHARDT E. The Hoek-Brown failure criterion [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45 (6):981-988.

[3] HOEK E. Strength of rock and rock masses[J]. Inter-national Society for Rock Mechanics News Journal, 1994,2(2):4-16.

[4] HOEK E,TORRES C C,CORKUM B. Hoek-Brown

failure criterion; 2002 edition [C]//HAMMAH R, BAWDEN W F,CURRAN J,et al. Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS-TAC 2002. Toronto; University of Toronto Press, 2002:267-273.

[5] GERCEK H. Properties of failure envelopes and sur-faces defined by the Hoek-Brown failure criterion [C]//CRRMS. Proceedings of the 6th Canadian Re-gional Rock Mechanics Symposium. Ottawa; Mines Branch Department of Energy, Mines and Resources, 2002:3-11.

[6] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7):1458-1466.

XIA Kai-zong,CHEN Cong-xin,LIU Xiu-min,et al. Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mas and Hoek-Brown criterion and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engieering,2013,32 (7):1458-1466.

[7] 巫德斌,徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2005,33(1):89-93.

WU De-bin,XU Wei-ya. Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters of excavated slope rock mass[J]. Journal of Hohai University; Natural Sciences,2005,33(1):89-93.

[8] 周元辅,邓建辉. 基于纵波波速的块状岩体 GSI 系统 [J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(5):948-956.

ZHOU Yuan-fu,DENG Jian-hui. GSI system for rock blocks based on longitudinal wave velocity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(5):948-956.

[9] MERIFIELD R S,LYAMIN A V,SLOAN S W. Lim-it analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalised Hoek-Brown criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2006,43(6):920-937.

[10] PRIEST S D. Determination of shear strength and three-dimensional yield strength for the Hoek-Brown criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005,38(4):299-327.

[11] YANG X L,YIN J H. Linear Mohr-Coulomb strength parameters from the non-linear Hoek-Brown rock masses[J]. International Journal of Non-Linear Me-chanics,2006,41(8):1000-1005.

[12] 卓 莉,何江达,谢红强,等. 基于 Hoek-Brown 准则确定岩石材料强度参数的新方法[J]. 岩石力学与工

- 程学报,2015,34(1):2773-2782.
- ZHUO Li, HE Jiang-da, XIE Hong-qiang, et al. Study of new method to determine strength parameters of rock material based on Hoek-Brown criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 2773-2782.
- [13] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(增2): 168-173.
- LI Ke-gang, ZHENG Dong-pu, HUANG Wei-hui. Mechanical behavior of sandstone and its neural network simulation of constitutive model considering cyclic drying-wetting effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 168-173.
- [14] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3704-3708.
- YAO Hua-yan, ZHANG Zhen-hua, ZHU Chao-hui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704-3708.
- [15] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 867-870.
- HUANG Hong-wei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University: Natural Sciences, 2007, 35(7): 867-870.
- [16] 杨永明, 鞠杨, 陈佳亮, 等. 温度作用对孔隙岩石介质力学性能的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 856-864.
- YANG Yong-ming, JU Yang, CHEN Jia-liang, et al. Mechanical propertie of porus rock media subjected to temperature effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 856-864.
- [17] 于怀昌, 李亚丽, 刘汉东. 粉砂质泥岩常规力学、蠕变以及应力松弛特性的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 60-70.
- YU Huai-chang, LI Ya-li, LIU Han-dong. Comparative study of conventional mechanical, creep and stress relaxation properties of silty mudstone under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 60-70.
- [18] 李良权, 王伟. 粉砂质泥岩流变力学参数的试验研究[J]. 三峡大学学报: 自然科学版, 2009, 31(6): 45-49.
- LI Liang-quan, WANG Wei. Experimental study of rheological-mechanical properties of silty mudstone [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2009, 31(6): 45-49.
- [19] 刘镇, 周翠英, 朱凤贤. 软岩饱水软化过程微观结构演化的临界判据[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 661-666.
- LIU Zhen, ZHOU Cui-ying, ZHU Feng-xian. Critical criterion for microstructure evolution of soft rocks in softening process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 661-666.
- [20] 杨建林, 王来贵, 李喜林, 等. 粉砂质泥岩遇水损伤规律及化学改性研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1883-1890.
- YANG Jian-lin, WANG Lai-gui, LI Xi-lin, et al. Damage-law of silty-mudstone in water and chemical modification [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(6): 1883-1890.
- [21] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses [C]// HUDSON J A. Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: Thomas Telford Publishing, 1992: 209-214.
- [22] LI A J, MERIFIELD R S, LYAMIN A V. Stability charts for rock slopes based on the Hoek-Brown failure criterion [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 689-700.