



冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩力学性质及破坏特征

张 立

On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles

ZHANG Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202102035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究

Effect of freezing-thawing cycles on mechanical properties and microscopic mechanisms of loess

刘乐青, 张吾渝, 张丙印, 谷遇溪, 解邦龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 109–115

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones

张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167–174

从核心期刊评价指标分析如何提升期刊影响力——以《水文地质工程地质》为例

An analysis on the evaluation indexes of core journal and its improving effect on journal influence: a case study of Hydrogeology & Engineering Geology

汪美华, 范宏喜, 张若琳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 169–169

固化轻质土在干湿循环及大变形条件下力学特性研究

A study of the mechanical properties of curing light soil under the condition of drying-wetting circles and large deformation

杨爱武, 姜帅, 封安坤, 陈立杰, 赵梦生 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 93–100

干湿循环作用下污泥固化土三维力学特性研究

Research on 3D mechanical properties of sludge solidified soil under the action of drying and wetting cycles

徐健, 赵绪, 马锐敏, 杨爱武, 杨少坤 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 110–118

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108–115



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202102035](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202102035)

冻融循环条件下含软弱夹层隧道围岩 力学性质及破坏特征

张 立

(中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089)

摘要: 川藏铁路沿线隧道围岩中常存在大量软弱夹层, 且岩体受严寒气候影响较大。为研究夹层倾角和冻融循环对隧道围岩力学性质的影响, 室内制备了不同软弱夹层倾角、不同冻融循环次数条件下的互层岩体, 并对含软弱夹层岩体展开了单轴压缩试验。研究发现: (1) 含软弱夹层岩体的硬岩部分变形较小, 而软岩夹层部分的破坏更加剧烈。夹层倾角较小时($\beta=0^\circ$ 、 30°)岩体破坏后裂纹与夹层倾角接近平行, 当夹层倾角较大时岩体破裂面与夹层呈X型交叉状; 冻融循环次数越多, 岩体的破坏程度越强烈。(2) 随着夹层倾角的增大, 岩体的单轴抗压强度和弹性模量先减小后增大; 当夹层倾角 $\beta=45^\circ$ 时, 抗压强度和弹性模量最小, 抗压强度较含水平软弱夹层岩体降低35.27%, 弹性模量降低34.84%。(3) 冻融循环劣化了夹层岩体的力学性质, 岩体承载能力随着冻融循环次数的增加而减弱, 但塑性变形能力有所增强。在冻融循环作用的影响下, 岩体抗压强度、弹性模量呈负指数量递减, 峰值点应变则呈线性增大。

关键词: 川藏铁路; 工程地质; 冻融循环; 软弱夹层; 力学试验

中图分类号: TU458⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0074-07

On mechanical properties and failure characteristics of surrounding rock of tunnel with weak interlayer under freezing-thawing cycles

ZHANG Li

(China Highway Engineering Consulting Group Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: There are a lot of weak intercalations in the surrounding rock of tunnels along Sichuan Tibet railway, and they are greatly affected by the cold climate. To understand the influence of dip angle of interlayer and freezing thawing cycles on the mechanical properties of tunnel surrounding rock, the interlayered rock mass with different dip angle of weak interlayer and different freezing thawing cycles was prepared in laboratory, and the uniaxial compression test of rock mass with weak interlayer was carried out. The results show that: (1) the deformation of hard rock part with weak interlayer is smaller, while the failure of soft rock interlayer is more severe. When the dip angle of the interlayer is small ($\beta=0^\circ$ and 30°), the fracture crack is nearly parallel to the dip angle of the interlayer after rock failure. When the dip angle of the interlayer is large, the fracture surface of the rock mass and the interlayer present an X-shaped intersection. The more freezing thawing cycles, the stronger the damage degree of rock mass (2) Uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock mass decrease first and then increase with the increase of dip angle of interlayer, and the compressive strength and elastic modulus are the minimum when the dip angle of interlayer $\beta=45^\circ$. Compared with the rock mass with horizontal weak interlayer,

收稿日期: 2021-02-27; 修订日期: 2021-04-20

基金项目: 2019年中咨集团资助项目(KY201903)

第一作者: 张立(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事隧道与边坡研究设计工作。E-mail: changshan0606992@163.com

the compressive strength is reduced by 35.27%, and the elastic modulus is reduced by 34.84%. (3) Freezing thawing cycles have a significant deterioration effect on the mechanical properties of rock mass. The bearing capacity of rock mass decreases with the increase of freezing thawing cycles, but the plastic deformation capacity increases. There is a negative exponential correlation between uniaxial compressive strength, elastic modulus and freezing thawing cycles, and a positive linear correlation between peak strain and freezing thawing cycles.

Keywords: Sichuan-Tibet Railway; engineering geology; freezing thawing cycle; weak interlayer; mechanical test

川藏铁路起自四川成都,终至西藏拉萨,线路全长近1750 km,其中隧道总长占比超过20%,对我国社会经济发展具有重要意义^[1-3]。然而,由于我国西部地区地形起伏大,地质条件复杂,岩体多具有大范围裂隙或软弱夹层,不良工程地质问题突出,给川藏铁路隧道工程建设带来了很大的难题^[4-5]。因此,研究软弱夹层对隧道围岩工程力学性质的影响在川藏线隧道工程建设围岩支护工作中至关重要。

受地质构造运动的影响,川藏铁路沿线工程地质条件较差,岩体中存在大量充填型节理,导致岩石力学性质发生劣化,强度大幅降低^[6-7]。此外,围岩的力学性质也受节理的倾角控制^[8-10]。因此,研究夹层倾角对岩体力学性质的影响十分重要。张泽林等^[11]研究发现含泥岩软弱夹层的岩体的剪切破坏均发生在软弱层内部,且随软弱层厚度和倾角的增加,倾角在0°~60°范围内,试样的剪切强度逐渐降低。丁恩理等^[12]对某水电站泥岩-白云岩互层情况进行研究,室内采用相似材料制备了不同层厚比和夹层倾角条件下的互层岩体并开展了力学试验,发现互层岩体的强度随夹层倾角的增大而逐渐减小,且岩体中软层厚度越大,岩体整体强度越低。汤友生等^[13]指出弱夹层对煤系砂岩的单轴抗压强度具有明显的弱化作用,岩体的抗压强度随夹层倾角的增加呈现出先减小再增大的变化规律,且在倾角为30°时夹层对强度的弱化效应最显著。

由于研究区气温波动较大,且隧道的建设、运行周期较长,冻融循环影响下隧道围岩发生物理风化,岩石内部产生大量微裂隙,其力学性质均产生较大的损伤^[14-16]。张君岳等^[17]开展了冻融循环下红砂岩物理力学性质研究,并指出红砂岩在冻融损伤过程中出现了裂纹、颗粒脱落和片落三种劣化模式,且其孔隙率随冻融次数增大而增大,纵波波速和抗压强度随冻融次数增大而逐渐减小。宋彦琦等^[18]研究发现随着冻融循环次数的增加,灰岩的抗压强度、弹性模量、

泊松比等力学参数逐渐减小,弹性波速也逐渐减小,但岩石的塑性变形能力有所增强。刘新喜等^[19]深入研究了冻融循环对炭质页岩力学性质的影响,并指出随冻融循环次数、应力水平和时间增加,炭质页岩轴向应变逐渐增大。综上所述,严寒气候会显著劣化川藏铁路隧道围岩的安全性和稳定性,研究冻融循环对含软弱夹层岩体力学性质的影响具有十分重要的意义。

本文以川藏铁路某隧道围岩为研究对象,室内制备了不同夹层倾角、不同冻融循环次数条件下的含软弱夹层岩体,研究夹层倾角和冻融循环对隧道围岩力学性质及破坏特征的影响。本研究旨在为严寒气候与不良地质条件下川藏铁路隧道围岩支护工作提供一定的借鉴作用。

1 试样制备与试验设计

1.1 试样制备

根据现场调查结果,川藏铁路成都—林芝段某隧道围岩为白垩纪红砂岩,且发育有薄层泥岩软弱夹层,泥岩夹层厚度在2~3 cm之间,强度较低。对取自工程现场的红砂岩岩块钻孔取芯并进行切割,作为夹层岩体中的硬岩部分;利用石膏模拟夹层岩体中的软弱夹层部分,设计石膏层厚20 mm。按照《工程岩体试验方法标准》^[20]将软、硬部分组合制备为φ50 mm×100 mm的标准岩体,制备完成的含夹层岩体如图1所示,其物理参数如表1所示。



图 1 岩体试样

Fig. 1 Rock mass specimens

表 1 含软弱夹层岩体物理参数

Table 1 Physical parameters of rock mass containing weak interlayer

分组	直径/mm	高度/mm	平均密度/(g·cm ⁻³)	夹层厚度/mm	夹层倾角/(°)
A	50.12	99.75	2.37	19.95	0
B	50.08	100.54	2.36	20.70	30
C	49.86	100.13	2.34	19.80	45
D	50.32	100.33	2.32	20.03	60

1.2 试验设计

为进一步研究冻融循环对含软弱夹层岩体力学性质的影响, 室内设计了 4 种不同循环次数(n 为 0, 10, 20, 30 次)下的含软弱夹层岩体单轴压缩试验。冻融循环试验操作流程如下:

(1) 将含软弱夹层岩体试样全部放入真空饱和设备中进压饱和 48 h。

(2) 取出试样并擦干后, 利用 TDS 冻融试验机对含不同夹层倾角的岩体试样进行冻融。其中, 上下限温度分别为 20, -20 °C。每次冻融循环为 12 h 的冷冻后, 将岩体试样放入 20 °C 水中浸泡 12 h 进行常温融化。

利用 RMTS-150 型岩石力学测试系统开展含软弱夹层岩体的单轴压缩试验, 该设备可实现最大轴压为 1 000 kN。利用 LVDT 位移计进行轴向位移监测, 其量程为 -2.50 ~ 2.50 mm, 上述试验设备精度均在 0.5% 以内。

2 试验结果分析

2.1 破坏特征分析

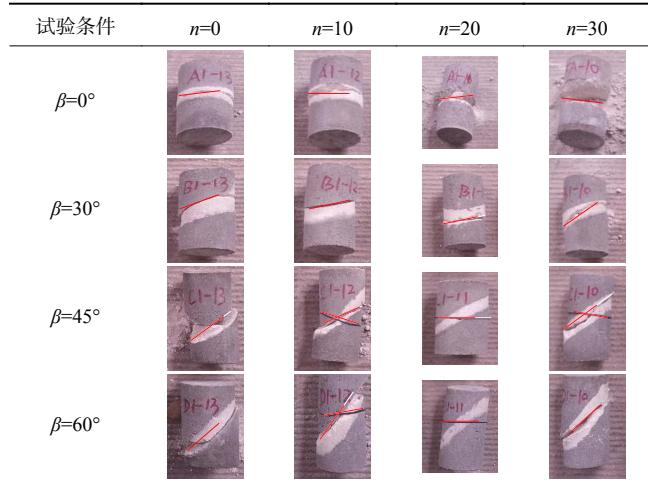
表 2 展示了不同试验条件下含软弱夹层岩体单轴压缩破坏形态特征。在单轴压缩试验条件下, 含软弱夹层岩体均发生了破坏, 岩体的硬岩部分变形较小, 而软岩夹层部分的破坏比较强烈。软岩夹层的横向变形较硬岩部分大, 岩体不同部分间表现出明显的非协调变形。当夹层倾角较小时($\beta=0^\circ, 30^\circ$), 岩体破坏后断裂裂纹出现在软弱夹层部位, 且其与夹层倾角接近平行, 而硬岩部分仅出现细小微裂纹; 当夹层倾角较大时($\beta=45^\circ, 60^\circ$), 岩体破裂面与夹层呈 X 型交叉状, 穿夹层滑移在硬岩部分与软弱夹层均产生了明显的大裂纹。冻融循环对岩体的破坏形态也有一定的影响。

由表 2 可知, 随着干湿循环次数的增加, 相同夹层倾角条件下岩体的破坏模式基本一致, 但其破坏程度

越来越强烈。分析认为, 在冻融循环试验条件下的影响下, 岩体内部矿物颗粒产生了不协调膨胀, 进而产生了微裂纹。此外, 冷冻条件下岩体内部水分结晶膨胀, 并在融化过程中流失, 也导致了岩体内部出现大量微裂纹。因此, 冻融循环后含软弱夹层岩体的破坏更加强烈。

表 2 不同试验条件下岩体破坏形态特征

Table 2 Failure characteristics of rock mass specimen under different testing conditions



2.2 应力应变曲线

图 2 为典型含软弱夹层岩体单轴加载应力-应变曲线及变形破坏过程。由图 2 中(a)可知, 在低应力作用下, 含软弱夹层岩体应力应变曲线呈下凹型, 岩体内部孔隙被逐渐压密, 此时岩体整体并未出现明显裂纹或破坏。随着轴向荷载的逐渐增大, 岩体进入弹性变形阶段。由图 2 中(b)可知, 夹层岩体的破坏从软弱夹层的变形开始, 当进入屈服变形阶段时, 硬岩部

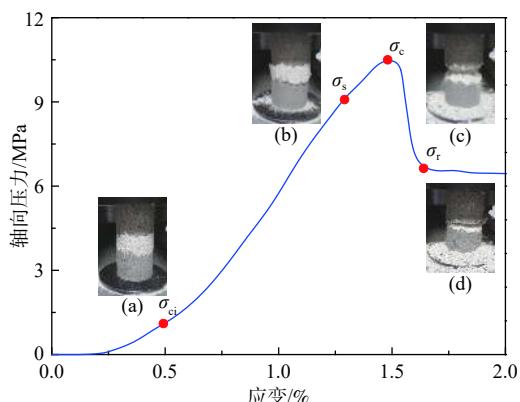


图 2 典型夹层岩体单轴应力-应变曲线及变形破坏过程

Fig. 2 Typical stress-strain curves of rock mass with weak interlayer and deformation diagrams

分未出现明显裂纹而软弱夹层部分开始破碎并脱落。此外,由图2中(c)可知,当达到峰值强度后,软岩夹层大范围破碎脱落而硬岩部分仅出现局部微小裂纹。破坏后的含软弱夹层岩体仍具有一定的承载能力,此时软弱夹层已经完全破碎脱落,试验停止。

图3为不同夹层倾角、冻融循环次数条件下含软弱夹层岩体应力-应变曲线,不同夹层倾角和冻融循环下岩体的应力-应变曲线特征存在显著差异。当夹层倾角 $\beta=0^\circ$ 时,岩体的应力-应变曲线具有明显的孔隙压缩阶段,而随着夹层倾角的逐渐增大,这种孔隙压缩特征变得不明显。结合夹层岩体的变形破坏特征

图分析认为,在夹层倾角 $\beta=0^\circ$ 时,轴向荷载通过硬岩能够均匀有效地传导到孔隙率较大的软弱夹层,因此软弱夹层能够大幅压密且在后期完全破碎脱落。随着夹层倾角的逐渐增大,岩体的破坏逐渐转化为沿夹层角度的剪切破坏,软弱夹层未能得到有效压密。此外,随着冻融循环次数的增加,含软弱夹层岩体的塑性变形能力逐渐增强,但承载能力降低。分析认为,这是由于冻融循环导致岩体内部矿物颗粒产生了不协调膨胀,岩体内部出现大量微裂纹、损伤程度增大,因此岩体的塑性变形能力增强而承载能力变差。

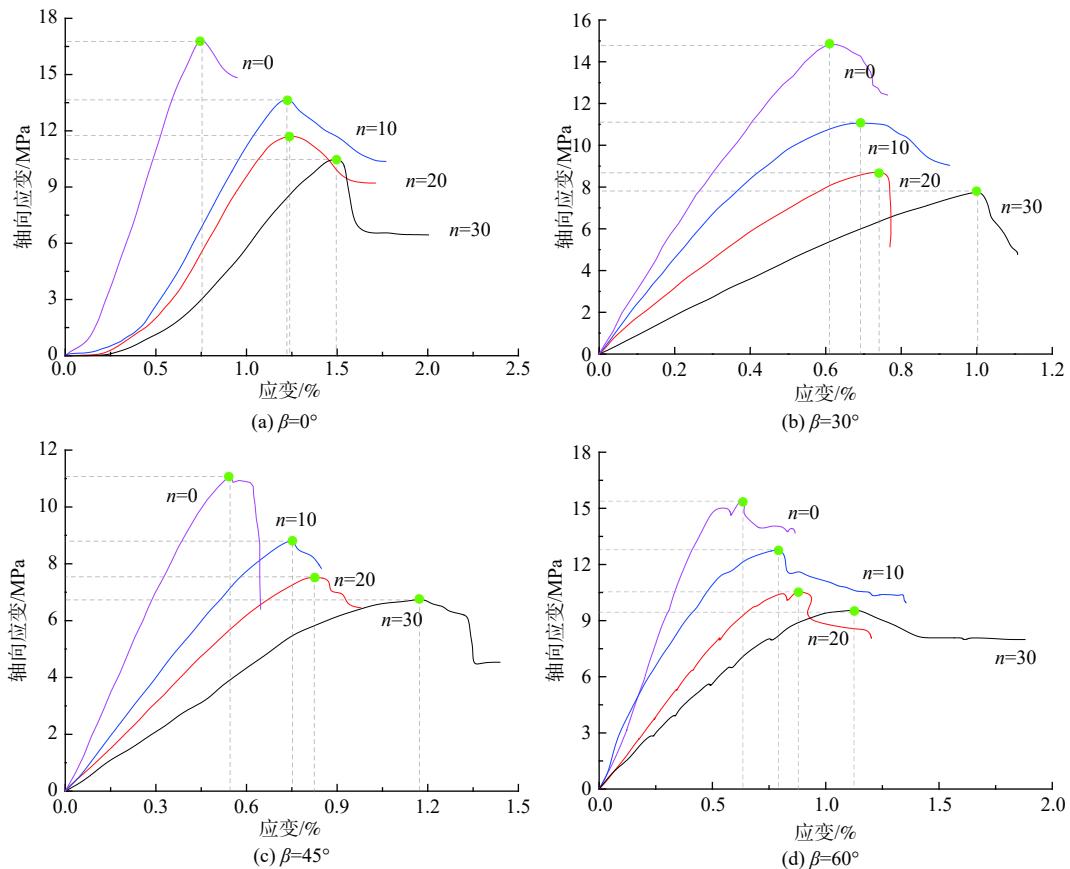


图3 不同状态下含软弱夹层岩体应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of muddy limestone under different water-bearing conditions

随着冻融循环次数的增长,岩石的单轴抗压强度不断降低,塑性变形能力逐渐增强。以含水平夹层岩体为例,未经历冻融循环岩体的抗压强度为16.91 MPa,对应峰值点轴向应变为0.76%。随着冻融循环次数的增加,岩体的单轴抗压强度分别相对降低18.98%、30.63%和37.84%,峰值点轴向应变相对增大59.21%、61.84%和97.36%。此外,岩体的弹性模量也呈逐渐降低的变化趋势。当夹层倾角 $\beta=0^\circ$ 时,0, 10, 20, 30次冻

融循环下岩体的弹性模量分别为3.86, 2.70, 2.03, 1.55 GPa。随着夹层倾角的逐渐增大,岩体的抗压强度和弹性模量呈先增大后减小的变化趋势。当冻融循环次数 $n=0$ 时,夹层倾角分别为 0° 、 30° 、 45° 和 60° 下岩体的抗压强度分别为16.91, 14.82, 11.07, 15.55 MPa,弹性模量分别为3.86, 3.53, 3.03, 3.63 GPa。

2.3 夹层倾角影响

基于应力-应变曲线得到不同冻融循环次数下含

表 3 不同条件下含软弱夹层岩体力学参数

Table 3 Mechanical parameters of rock mass with weak interlayer under different conditions

分组	倾角/(°)	循环次数	抗压强度/MPa	峰值点应变/%	弹性模量/GPa
A	0	0	16.91	0.76	3.86
		10	13.70	1.21	2.70
		20	11.73	1.23	2.03
		30	10.51	1.50	1.55
B	30	0	14.82	0.63	3.53
		10	11.06	0.71	2.34
		20	8.71	0.76	1.71
		30	7.79	1.01	1.16
C	45	0	11.07	0.55	3.03
		10	8.85	0.75	1.78
		20	7.53	0.80	1.11
		30	6.80	1.19	0.86
D	60	0	15.55	0.64	3.63
		10	12.82	0.79	2.44
		20	10.60	0.88	1.81
		30	9.58	1.14	1.27

软弱夹层岩体力学参数随夹层倾角变化,如表 3 所示。由表 3 可知,在相同的冻融循环次数条件下,随着夹层倾角的增大,岩体的单轴抗压强度和弹性模量均先减小后增大,当软弱夹层倾角 $\beta=0^\circ$ 时,岩体的单

轴抗压强度和弹性模量最大;随着夹层倾角的增大,岩体的抗压强度和弹性模量产生了明显降低,软弱夹层倾角 $\beta=30^\circ$ 时岩体的抗压强度相对下降 12.38%~25.87%,弹性模量相对下降 6.50%~25.24%。当夹层倾角 $\beta=45^\circ$ 时,抗压强度和弹性模量均取得最小值,此时岩体的承载能力最差,软弱夹层对岩体力学性质的弱化效应最明显。而随着夹层倾角的进一步增大,岩体的抗压强度和弹性模量出现一定程度的增大。以未经历冻融循环试验组为例,相较于 $\beta=45^\circ$ 条件下,当 $\beta=60^\circ$ 时,岩体的抗压强度相对提高 40.47%,弹性模量相对提高 19.80%。

2.4 冻融循环影响

图 4 为不同夹层倾角下含软弱夹层岩体力学参数随冻融循环次数变化关系。由图可知,在相同的软弱夹层倾角条件下,随着冻融循环次数的增加,岩体的单轴抗压强度和弹性模量均逐渐减小。未经历冻融循环的岩体承载能力最强,此时岩体的单轴抗压强度和弹性模量最大;而随着冻融循环次数的增多,岩体的承载能力逐渐劣化,岩体的抗压强度和弹性模量产生了明显降低;岩体的变形能力增强,峰值点应变逐渐增大。相较于未经历冻融循环的岩体,当冻融循环

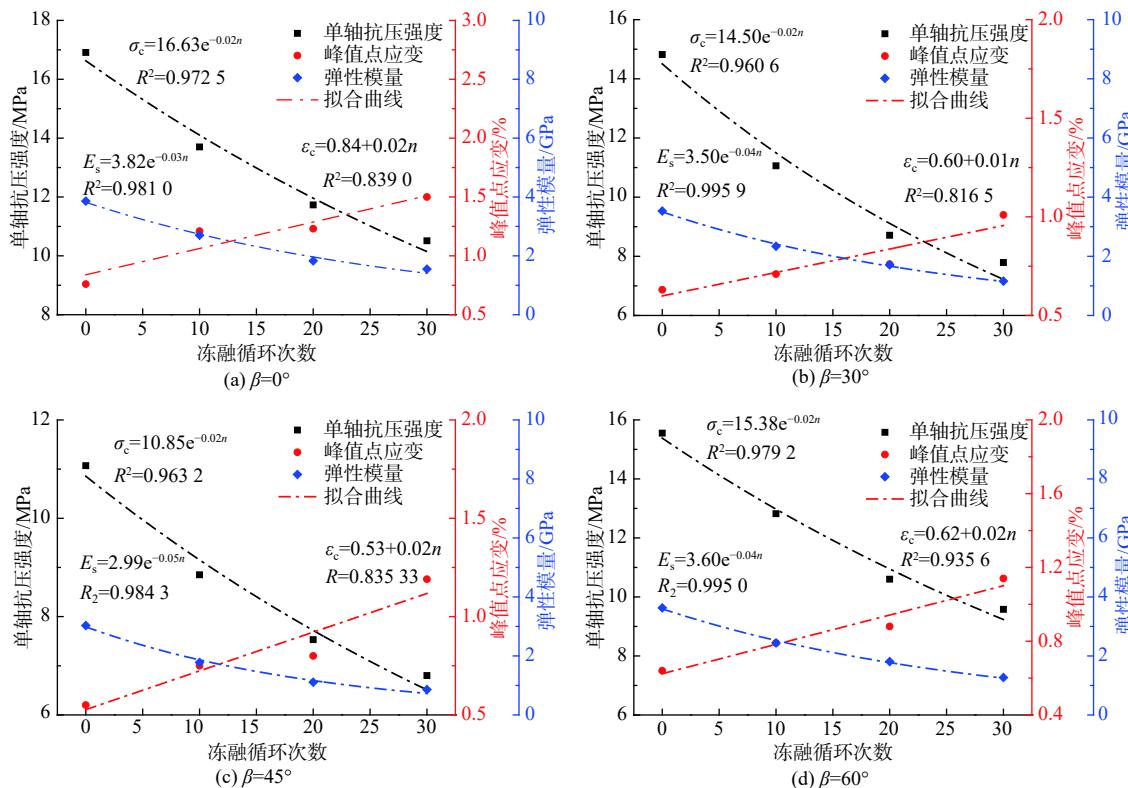


图 4 岩体力学参数随冻融循环次数变化关系

Fig. 4 Mechanical parameters of rock mass evolves with freezing thawing cycles

次数达到30次时岩体的抗压强度相对下降37.84%~47.43%，弹性模量相对降低59.85%~71.62%，而峰值点轴向应变则相对增大87.84%。由此可见，冻融循环过程能够大幅降低工程岩体的力学性质，且随着冻融循环次数的增加，岩体的力学参数不断劣化，这为川藏铁路工程的长期稳定性带来一定的威胁。

进一步分析岩体的力学参数与冻融循环次数之间的关系，拟合结果如图4所示。由图可知，单轴抗压强度、弹性模量和冻融循环次数之间呈负指数相关，即在冻融循环的影响下，岩体的抗压强度和弹模逐渐减小但减小速率越来越慢。峰值点应变与冻融循环次数之间呈线性正相关，随着冻融循环次数的增大，岩体的峰值点应变呈线性增大趋势。

由于试验条件限制，本次研究仅针对不同夹层倾角($\beta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)和冻融循环次数条件下($n=0, 10, 20, 30$)的含夹层岩体展开了单轴压缩试验，而川藏铁路沿线穿越地区的地质条件更加复杂，隧道工程所面临的还有地应力和地下水影响，因此，后续开展不同围压、孔隙水压和干湿循环等条件下的试验研究具有深刻意义。

3 结论

(1)含软弱夹层岩体破坏后其硬岩部分变形较小，而软岩夹层部分的破坏较为强烈。软岩夹层的横向变形较硬岩部分大，岩体软、硬夹层表现出明显的非协调变形。当夹层倾角较小时，岩体破坏后断裂裂纹出现在软弱夹层部位，而硬岩部分仅出现细小微裂纹；当夹层倾角较大时，岩体破裂面与夹层呈X型交叉状，岩体硬岩部分与软弱夹层均产生了明显的大裂纹。

(2)夹层倾角对岩体力学性质影响显著。随着软弱夹层倾角的增大，岩体的抗压强度和弹性模量先减小后增大，且当夹层倾角为45°时，抗压强度和弹性模量最小，抗压强度较含水平软弱夹层岩体降低35.27%，弹性模量降低34.84%。

(3)在冻融循环作用的影响下，岩体的承载能力减弱而塑性变形能力增强。当冻融循环次数达到30次时岩体的抗压强度相对下降37.84%~47.43%，弹性模量相对降低59.85%~71.62%，而峰值点轴向应变则相对增大87.84%。岩体的抗压强度、弹性模量呈负指数型递减，峰值点应变则呈线性增加。

参考文献 (References) :

- [1] 田四明, 巩江峰. 截至2019年底中国铁路隧道情况统计 [J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 292~297.
- [2] TIAN Siming, GONG Jiangfeng. Statistics of railway tunnels in China as of the end of 2019[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 292~297. (in Chinese)
- [3] 郑宗溪, 孙其清. 川藏铁路隧道工程 [J]. 隧道建设, 2017, 37(8): 1049~1054. [ZHENG Zongxi, SUN Qiqing. Sichuan-Tibet Railway tunnel engineering[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8): 1049~1054. (in Chinese)]
- [4] 宋章, 张广泽, 蒋良文, 等. 川藏铁路主要地质灾害特征及地质选线探析 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60(1): 14~19. [SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Analysis of the characteristics of major geological disasters and geological alignment of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(1): 14~19. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445~468. [XUE Yiguo, KONG Fanmeng, YANG Weimin, et al. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 445~468. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论 [J]. 现代地质, 2017, 31(5): 877~889. [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet Railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 877~889. (in Chinese with English abstract)]
- [7] ZUO J P, WANG Z F, ZHOU H W, et al. Failure behavior of a rock-coal-rock combined body with a weak coal interlayer [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6): 907~912.
- [8] HUANG F, ZHU H H, XU Q W, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel-Scaled model tests and numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 207~218.
- [9] 郭朋瑜, 吉锋, 何双, 等. 节理分布位置对岩体剪切破裂特征影响试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(3): 81~87. [GUO Pengyu, JI Feng, HE Shuang, et al. An experimental study of the influence of discontinuous structural planes at different locations on the shear fracture characteristics of rock mass[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 81~87. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 宋洋,任萌,张维东,等.非贯通非共面凝灰岩节理岩体各向异性及其能量特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):126–132. [SONG Yang, REN Meng, ZHANG Weidong, et al. Analysis of anisotropy and energy characteristics of tuffs with non-penetrating joints[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 126 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郑文棠,汪华安,葛军辉.基于地质强度指标法的柱状节理玄武岩体力学强度估计[J].[地质力学学报](#),2009,15(4):330–335. [ZHENG Wentang, WANG Huaan, GE Junhui. Strength estimation of columnar jointed basaltic mass based on geological strength index[J]. [Journal of Geomechanics](#), 2009, 15(4): 330 – 335. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张泽林,王涛,吴树仁,等.泥岩中软弱夹层的剪切力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):713–724. [ZHANG Zelin, WANG Tao, WU Shuren, et al. Study on shear mechanical properties of mudstone with weak intercalation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 713 – 724. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 丁恩理,刘越,吴继敏,等.软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊1):39–46. [DING Enli, LIU Yue, WU Jimin, et al. Triaxial test study on the mechanical properties of soft-hard interbedded rocklike specimens[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Sup 1): 39 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 汤友生,姚海林,廖阳,等.软弱夹层倾角对煤系砂岩物理力学特性的影响研究[J].矿业研究与开发,2018,38(8):51–55. [TANG Yousheng, YAO Hailin, LIAO Yang, et al. Study on the influences of weak interlayer inclination on physical mechanics properties of coal bearing sandstone[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(8): 51 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ZHANG H M, MENG X Z, YANG G S. A study on mechanical properties and damage model of rock subjected to freezing thawing cycles and confining pressure[J]. [Cold Regions Science and Technology](#), 2020, 174: 103056.
- [15] 沈世伟,吴飞,甘霖,等.不同初始饱和度红砂岩冻融后物理力学性质研究[J].钻探工程,2021,48(1):120–128. [SHEN Shiwei, WU Fei, GAN Lin, et al. Study on physical and mechanical properties of red sandstone with different initial saturation after freezing thawing[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 120 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 蒋钰峰,吴光,刘芳.冻融循环条件下碳质千枚岩物理力学性质研究[J].水文地质工程地质,2018,45(6):114–121. [JIANG Yufeng, WU Guang, LIU Fang. Research on the physical and mechanic properties of carbonaceous phyllite subjected to freezing thawing cycles[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 114 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张君岳,田镇,刘桓兑,等.冻融红砂岩物理力学性质损伤演化试验研究[J].矿业研究与开发,2020,40(10):79–84. [ZHANG Junyue, TIAN Zhen, LIU Huandui, et al. Experimental research of physical and mechanical damage evolution of freezing thawing red sandstone[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(10): 79 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 宋彦琦,刘济琛,邵志鑫,等.冻融循环条件下灰岩物理力学性能试验[J].[科学技术与工程](#),2020,20(2):741–746. [SONG Yanqi, LIU Jichen, SHAO Zhixin, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of limestone under freezing thawing cycles[J]. [Science Technology and Engineering](#), 2020, 20(2): 741 – 746. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘新喜,李盛南,徐泽沛,等.冻融循环作用下炭质页岩蠕变模型研究[J].中国公路学报,2019,32(11):137–145. [LIU Xinxi, LI Shengnan, XU Zepei, et al. Research on creep model of carbonaceous shale under freezing thawing cycle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 137 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266—2013[S]. [Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. (in Chinese)]

编辑: 汪美华