

红层软岩路基填料强度特性研究

何能方¹ 张宗红¹ 胡 仁² 马 杰² 何晓芸²

(1. 中交路桥华南工程有限公司, 广东中山 528405; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

【摘要】 为研究填料粒径和含水率对红层软岩路基填料抗剪强度特性的影响, 针对广西地区典型红层软岩填料, 开展了不同含水率、不同粒径的红层软岩填料直剪试验, 明确了粒径与含水率对红层软岩填料抗剪强度、脆性及剪胀特性影响规律。研究表明: 红层软岩填料粒径、含水率和竖向荷载的增大均会使应力-位移曲线由软化向硬化过渡, 也会使得峰值剪切位移增大; 红层软岩抗剪强度随含水率增大呈先增后减的趋势, 呈现出典型的“山峰效应”, 而随填料粒径增大呈减小的趋势; 随着竖向荷载及含水率增大, 剪切体变也由剪胀向剪缩过渡; 增大红层软岩填料的粒径、含水率及竖向荷载均会抑制剪胀, 且随着红层软岩填料粒径的增大, 试样在剪切前期的剪缩行为也更加显著; 随着红层软岩填料粒径及含水率增大, 剪切时的脆性指数随剪胀角的变化先后经历 3 个阶段: 软化-剪胀、硬化-剪胀、硬化-剪缩。

【关键词】 红层软岩; 路基填料; 强度特性; 直剪试验

【中图分类号】 TU452; U416.1

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0158

Strength characteristics of fill material for red clay soft rock roadbed

HE Nengfang¹ ZHANG Zonghong¹ HU Ren² MA Jie² HE Xiaoyun²

(1. China Communications Road and Bridge South China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528405, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

【Abstract】 To investigate the influence of particle size and moisture content on shear strength characteristics of red-bed soft rock fillers in roadbed engineering, direct shear tests were conducted on typical red-bed soft rock fillers from Guangxi region under varying particle sizes and moisture conditions, clarifying the influence of particle size and moisture content on the shear strength, brittleness, and dilatancy characteristics of red-bed soft rock fillers. The results revealed that: increasing particle size, moisture content, and vertical load promoted the transition of stress-displacement curves from softening to hardening, accompanied by increased peak shear displacement; shear strength demonstrated a characteristic peak-shape response to moisture variation, while showing monotonic decay with particle size growth; elevated vertical loads and moisture contents facilitated the shear volumetric behavior also transitioned from dilatancy to contraction; particle coarsening, moisture saturation, and load intensification collectively suppressed dilation, with coarser particles exhibiting pronounced pre-shear contraction; brittleness evolution progressed through three-phase coupling with dilation angle: softening-dilatancy, hardening-dilatancy, and hardening-contraction, governed by the increasing particle size and moisture content of red-bed soft rock fillers.

【Key words】 red-mudstone; roadbed fill material; strength characteristics; direct shear test

0 引言

红层软岩广泛分布于我国南方地区, 具有颗粒易破碎、强度低、遇水易软化等物理力学性质。随着高速公路建设快速发展, 不可避免地要穿过红层软岩地区, 路堑及隧道开挖产生大量红层软岩弃渣, 弃渣堆放会占用土地资源, 造成环境污染, 破坏当地植被^[1-6]。将红层软岩弃渣采用合理的技术手段处理

后, 用作路基填料, 可以合理消纳利用红层软岩弃渣, 达到节省工程投资的目的。

将红层软岩用作路基填料, 填料的粒径及含水率对路基服役性能有显著的影响。现有研究表明: 在较低饱和度状态下, 红层软岩填料经过压实处理后, 路用指标特性和填料强度表现良好, 满足路基填料要求^[7-10], 但在实际工程中, 红层软岩组成复杂, 尤其在

基金项目: 中交路桥华南工程有限公司资助项目(R110124H01094)

作者简介: 何能方, 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作。E-mail: 59847091@qq.com

通信作者: 张宗红, 男, 1995 年生, 工程师, 主要从事公路工程的建设管理工作。E-mail: 1139014038@qq.com

完全饱和状态下极易发生崩解,压缩变形显著,强度急剧下降,严重影响路基的安全性和使用寿命^[11-16]。长时间雨水浸泡会使路基填料完全饱和,强度和刚度显著降低,导致路基产生显著的沉降变形,严重时甚至发生路基垮塌,直接影响路基的服役性能^[17-23]。除此之外,渗入路基的水分会使红层软岩填料吸水膨胀,导致路基出现持续上拱等变形行为。红层软岩填料的变形特性是红层软岩路基建设的关键因素,过大的形变会给路基结构本体以及路面结构造成危害。目前有关红层软岩填料强度特性研究内容主要集中在最优含水率状态,未能有效揭示红层软岩填料粒径和含水率对于红层软岩路基抗剪强度和剪胀性的影响规律,而红层软岩填料粒径和含水率是路基填筑和运营中不可忽视的重要影响因素,因此有必要研究红层软岩填料粒径和含水率对红层软岩路基填料抗剪特性的影响。

鉴于此,本文以广西桂林北部地区红层软岩为研究对象,通过击实试验确定其最优含水率,然后在相同干密度条件下对不同填料粒径、不同含水率的红层软岩试样进行直剪试验,明确红层软岩填料粒径和含水率对红层软岩填料强度特性的影响规律。研究成果可为广西地区红层软岩路基设计及工程建设提供技术指导。

1 试验方案

1.1 试验土样

试验所用红层软岩填料来自广西全州—容县高速公路,该区域为剥蚀—侵蚀构造丘陵谷地地貌。根据《公路土工试验规范》(JTG 3430—2020)对红层软岩进行基本物理力学试验。由于红层软岩具有崩解性,故需经一定时间的自然崩解,将崩解后的红层软岩填料过筛,测定基本物理力学特性。采用击实试验确定红层软岩填料的击实特性,得到红层软岩填料的最大干密度为 1.89 g/cm³,最优含水率为 10.7%。

采用筛析法测量红层软岩填料颗粒组成,结果表明,该红层软岩填料以圆砾为主,填料不均匀系数 $C_u=5$,曲率系数 $C_c=1.1$,填料粒径级配良好。采用 XRD 试验测定红层软岩填料的矿物组成,红层软岩填料矿物成分主要为石英,占比 50%~60%,未发现膨胀性矿物(蒙脱石),其余均为非膨胀矿物如伊利石、斜长石、赤铁矿等。为深入了解红层泥岩填料性质,开展一系列基本物理试验,包括界限含水率试验和自由膨胀率试验。其中界限含水率试验采用圆锥仪—液塑限联合测定法,结果如表 1 所示。

表 1 红层软岩基本物理指标
Tab. 1 The basic properties of red-bed soft rock filler

最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	自由膨胀率/%
1.89	10.7	30.3	21.2	0

1.2 试样制备

- (1)将完全烘干试样置于盘中,使用喷雾器喷洒适量水,调整至目标含水率;
- (2)将试样密封保存于袋中 24 h,确保水分均匀分布并达到平衡状态;
- (3)利用千斤顶和模具对试样进行静压成型,制成直径 61.8 mm、高度 20 mm 的圆饼样;
- (4)为避免水分流失,将成型试样密封保存于袋中,留待后续试验使用;
- (5)针对饱和试样,采用抽气饱和法完成饱和处理,为直剪试验提供标准试样。

1.3 试验方案

为了研究含水率对红层软岩的影响,分别在最优含水率选取具有代表性的含水率,由于广西地区降雨充沛、连续集中,路基填料经过长时间浸泡而达到饱和,有必要对饱和试样进行直剪试验。小粒径范围内的红层泥岩填料具有较强的水稳性,但实际工程中难以将红层泥岩填料全部控制在小粒径范围内,故依据《公路土工试验规范》(JTG 3430—2020),在标准试验圆孔筛孔径范围内选取 20 mm 及以下、10 mm 及以下、2 mm 及以下三种粒径范围进行直剪试验,试验方案见表 2。

表 2 直剪试验方案
Tab. 2 direct shear test programs

干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	粒径/mm
1.80($K=95\%$)	6, 9, 10.7, 12, 15, 18(sat)	2
1.80($K=95\%$)	10.7, 18(sat)	2, 10, 20

依据已有研究^[24]进行快剪试验,统一采用 1 mm/min 剪切速率进行力学性能测试。针对饱和试样,结合区域性降雨入渗动力学特征,考虑水分迁移深度制约下浅层土体饱和效应^[23],竖向荷载设置为 5, 12.12, 20, 30, 40 kPa,模拟路基表层填料实际状态。对于非饱和试样,根据《公路土工试验规范》(JTG 3430—2020)结合高填方路基填筑现场,采用 12.5, 50, 100, 200, 300 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 应力—位移曲线演变规律

红层软岩填料粒径对应力—位移曲线的影响如图 1 所示,由图 1 可知:在含水率和竖向荷载保持不

变时,随着红层软岩填料粒径的增大,剪应力峰值减小,峰值剪切位移逐渐增大,当红层软岩填料粒径为2 mm时,应力-位移曲线表现为软化型,当红层软岩填料粒径超过10 mm时,应力-位移曲线表现为硬化型,表明红层软岩填料粒径增大使得应力-位移曲线由软化向硬化过渡。

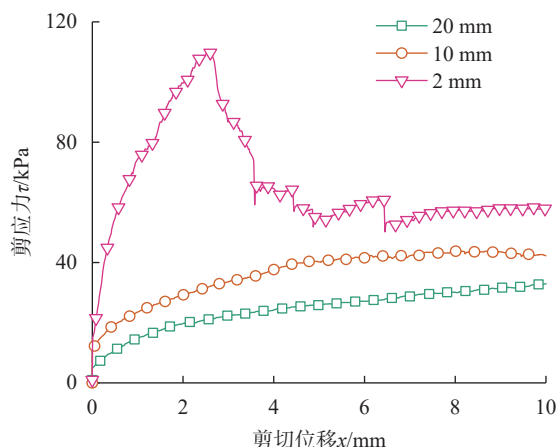


图1 粒径对应力-位移曲线的影响

Fig. 1 Effect of particle size on stress-displacement curves

含水率对应力-位移曲线的影响如图2所示。由图2可知:在红层软岩填料粒径和竖向荷载保持不变时,随着含水率的增大,峰值剪应力呈先增大后减小趋势,对应的剪切位移也逐渐增大,应力-位移曲线逐渐由软化型向硬化型过渡。

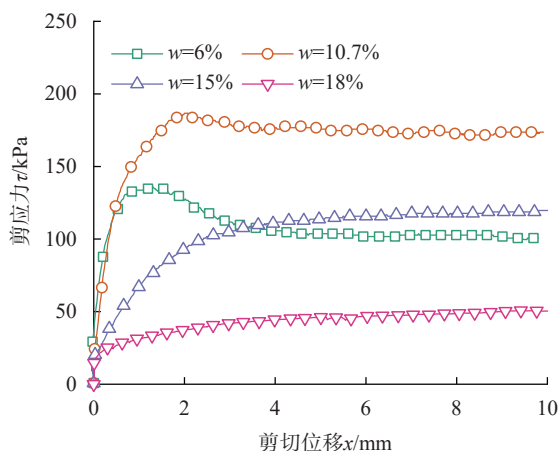


图2 含水率对应力-位移曲线的影响

Fig. 2 Effect of moisture condition on stress-displacement curves

竖向荷载对应力-位移的影响见图3。由图3可知:在红层软岩填料粒径和含水率保持不变时,随着竖向荷载的增大,抗剪强度逐渐增大,对应的剪切位移呈增大的趋势,随着竖向荷载增大,应力位移曲线逐渐由软化型向硬化型过渡。

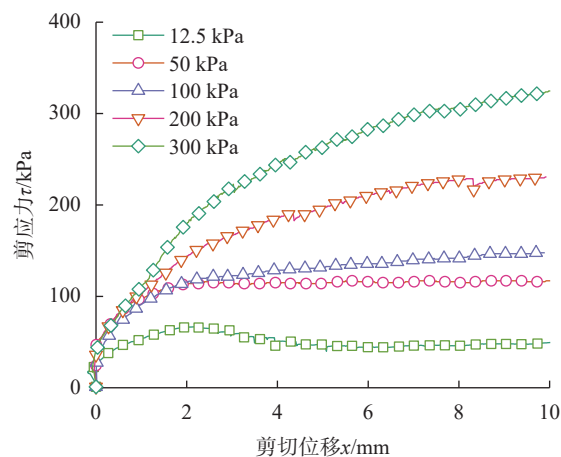


图3 竖向荷载对应力-位移曲线的影响

Fig. 3 Effect of vertical load on stress-displacement curves

2.2 抗剪强度演变规律

红层软岩填料粒径对抗剪强度的影响如图4所示。由图4可知:不同红层软岩填料粒径试样抗剪强度随着竖向荷载增大呈现增大的趋势。相同竖向荷载下,抗剪强度随着红层软岩填料粒径增加而减小,红层软岩填料在粒径较小($D \leq 2$ mm)时,表现出更高的抗剪强度。因此,在采用红层软岩进行路基填筑时,选择较小粒径($D \leq 2$ mm)的红层软岩填料,能够充分发挥填料的强度。

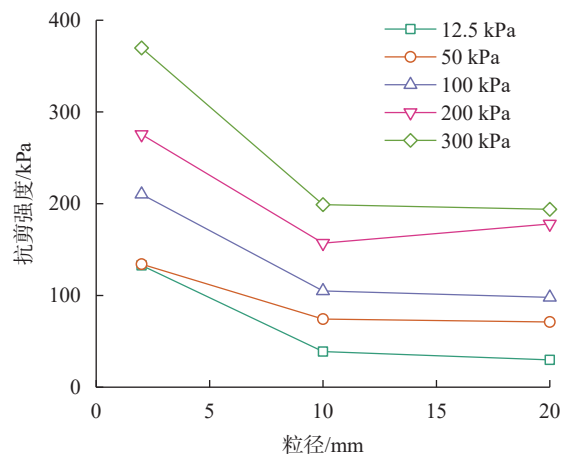


图4 粒径对抗剪强度的影响

Fig. 4 Effect of particle size on shear strength

含水率对抗剪强度的影响见图5。由图5可知:不同含水率试样抗剪强度随着竖向荷载增大呈现增大的趋势。相同竖向荷载下,随着含水率增加,抗剪强度先增大后减小,在最优含水率(10.7%)附近时,峰值抗剪强度最大,呈现出明显的“山峰效应”。

红层软岩填料粒径和含水率对抗剪强度影响见图6。由图6可知:在相同含水率和干密度下,峰值抗剪强度随红层软岩填料粒径的增大呈现出减小的趋势,这是由于红层软岩填料大粒径颗粒的接触面积

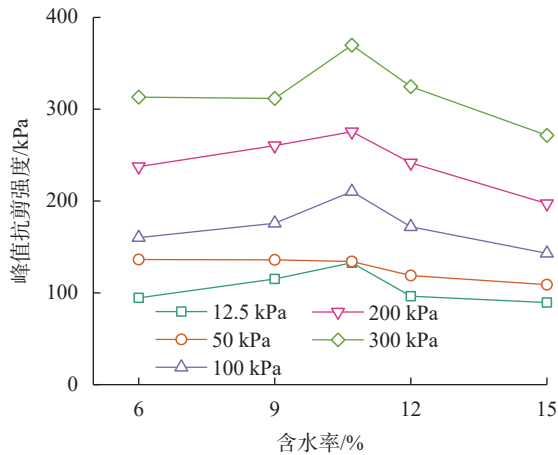


图5 含水率对抗剪强度的影响

Fig. 5 Effect of moisture condition on shear strength

相对较小,使得颗粒相互之间咬合力减小;在相同填料粒径和干密度下,峰值抗剪强度随含水率的增大而减小,这是由于水分在颗粒之间形成润滑层,减少了颗粒间的直接接触面积和摩擦力,颗粒的运动更容易发生,相互之间的相对位移增加,使得剪切强度显著下降。将红层软岩填料含水率控制在 10.7% 左右,填料粒径控制在较小范围内可有效发挥红层软岩填料抗剪强度。

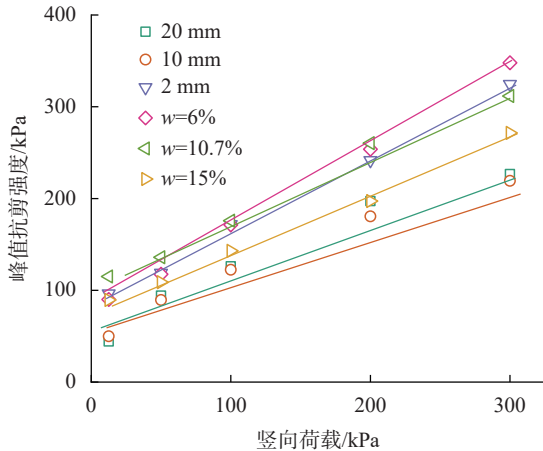


图6 粒径和含水率对峰值抗剪强度的影响

Fig. 6 Effect of particle size and moisture condition on shear strength

2.3 脆性演变规律

将峰值抗剪强度与残余抗剪强度的比值定义为脆性指数。含水率和粒径对脆性指数的影响见图 7。由图 7 可知:在不同含水率下,随着竖向荷载的增加,脆性指数相应降低,相同竖向荷载状态下,脆性指数随着含水率的增加而减小;特别地,饱和状态下脆性指数恒为 1。其主要成因可解释为:随着竖向荷载和含水率增大,导致软化特征减弱,残余抗剪强度与峰值抗剪强度的差值逐渐减小,而饱和状态下,峰值抗

剪强度恒等于残余抗剪强度。

在不同红层软岩填料粒径下,随着竖向荷载的增加,脆性指数相应降低,相同竖向荷载状态下,脆性指数随着红层软岩填料粒径的增加而减小。主要原因是:竖向荷载增大,导致软化特征减弱,残余应力与峰值应力的差值逐渐减小;红层软岩填料粒径越大的试样,残余抗剪强度与峰值抗剪强度差值越大,软化特征明显。

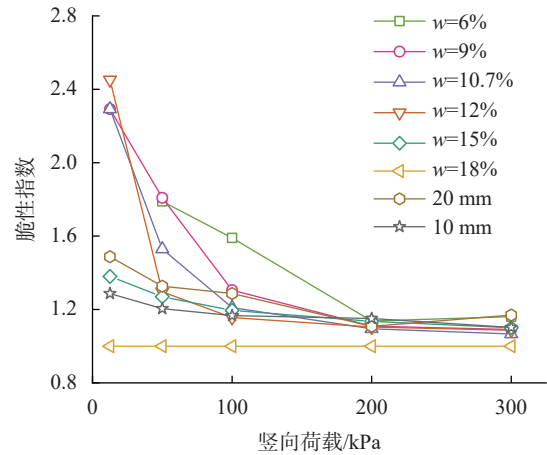


图7 含水率和粒径对脆性指数的影响

Fig. 7 Effect of particle size and moisture condition on brittleness index

2.4 剪胀性演变规律

试样在剪胀过程中通常会在前期发生剪缩,后发生一定程度的剪胀,最终不随水平位移变化趋于平缓。以剪切过程中发生压缩为正方向,即试样在正方向发生竖向位移表现为剪缩特性,在负方向发生竖向位移表现为剪胀特性。竖向荷载对竖向位移的影响见图 8。由图 8 可知:竖向荷载较低时,试样表现出剪胀特性,而随着竖向荷载的增加,剪胀特性可能减弱甚至转变为剪缩特性。

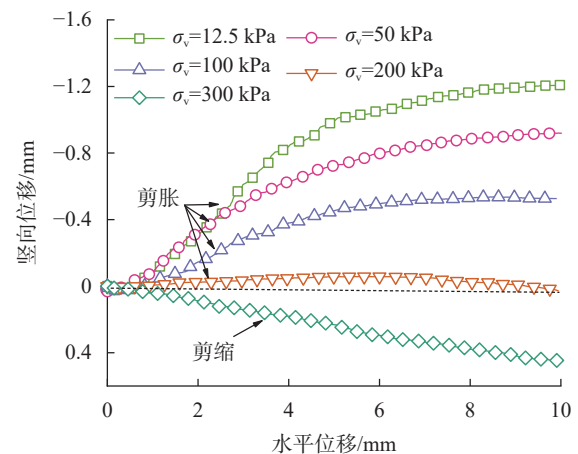


图8 竖向荷载对竖向位移的影响

Fig. 8 Effect of vertical load on vertical displacement

填料粒径对竖向位移的影响见图9。由图9可知: 红层软岩填料粒径增大会不同程度地加剧前期发生的剪缩行为, 剪胀特性可能减弱甚至转变为剪缩特性。其主要原因是红层软岩填料粒径颗粒更容易形成稳定的骨架结构, 限制了颗粒间的相对位移, 抑制剪胀行为的发生。

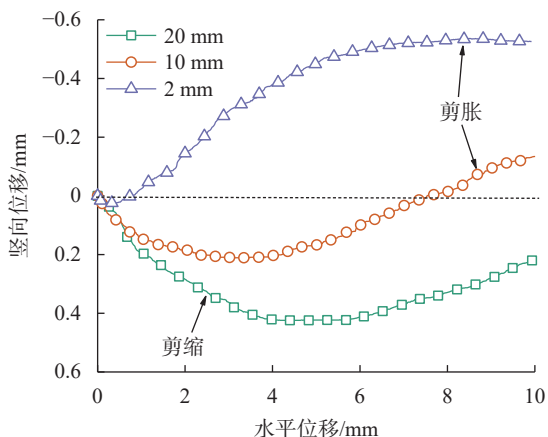


图9 填料粒径对竖向位移的影响

Fig. 9 Effect of particle size on vertical displacement

含水率对竖向位移的影响见图10。由图10可知: 在较低的含水率下, 试样表现出剪胀特性; 而在较高的含水率下, 由于水分的润滑作用, 试样表现出剪缩特性, 表明含水率增加使红层软岩填料由剪胀向剪缩过渡。随着含水率的增加, 材料的剪胀程度减小, 而剪缩程度会增加。其主要原因是水分可以填充材料内部的孔隙, 减少颗粒间的摩擦, 从而抑制剪胀并促进剪缩。

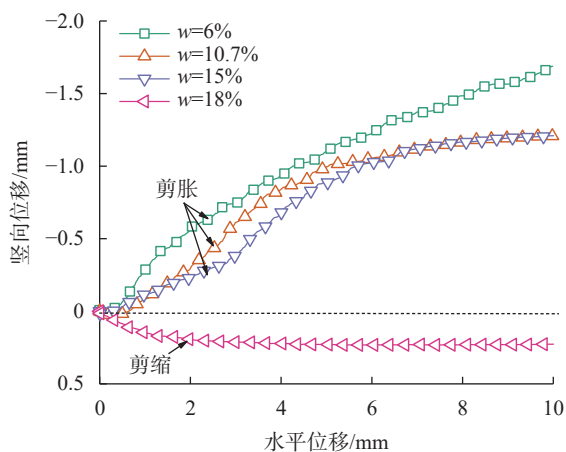


图10 含水率对竖向位移的影响

Fig. 10 Effect of moisture condition on vertical displacement

将竖向位移增量与剪切位移增量比值的反正切值的相反数定义为剪胀角^[24]。红层软岩填料粒径对剪胀角的影响见图11。由图可知: 剪胀角随竖向荷

载增加呈下降的趋势, 随着红层软岩填料粒径的增大, 试样剪胀特性减弱。饱和状态下剪胀角均为负值, 表明在该状态下表现为剪缩特性, 与非饱和试样相比, 剪胀特性全部转变为剪缩特性, 剪缩程度显著增大。

含水率对剪胀角的影响见图11。由图11可知: 随着竖向荷载增大, 剪胀角呈现减小的趋势。含水率的增加会导致剪胀角减小, 甚至转变为负值。主要由于水分填充了颗粒间的空隙, 减少了颗粒间的相对运动空间。

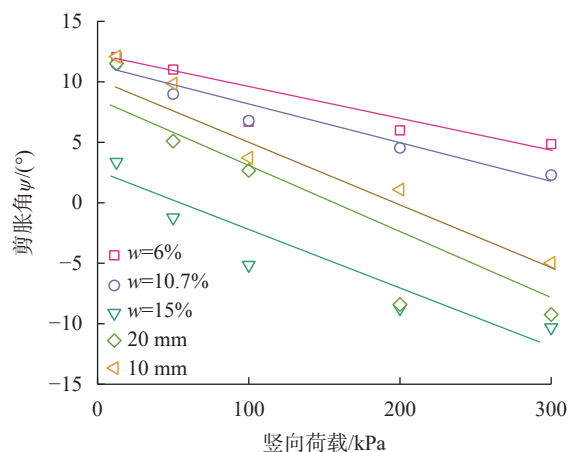


图11 含水率和粒径对剪胀角的影响

Fig. 11 Effect of particle size and moisture condition on dilatancy angle

2.5 剪胀性和脆性指数相互影响规律

脆性指数反映强度特性, 剪胀角反映剪胀性。通过两者可以研究红层软岩剪切中强度与剪胀性的相互影响。

脆性指数随剪胀角变化见图12。由图12可知: 试样脆性指数随剪胀角变化分为三个阶段, 第一阶段为脆性指数随剪胀角减小呈现出减小的趋势, 此时试样软化特征明显, 表现为剪胀; 第二阶段为脆性指数

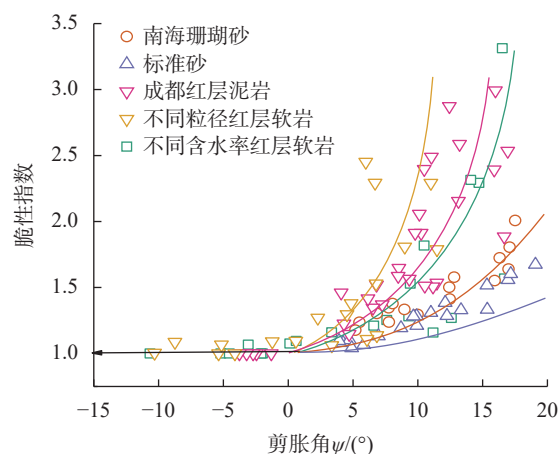


图12 脆性指数随剪胀角变化图

Fig. 12 Change of brittleness index with dilatancy angle

随剪胀角减小保持不变,此时试样由软化转化为硬化,仍然表现为剪胀;第三阶段为脆性指数随剪胀角减小保持不变,此时试样应力-应变曲线为硬化型,表现为剪缩。

与成都红层泥岩相比,两者的变化趋势相同,性质接近。在对比关于标准砂与珊瑚砂的强度与剪胀特性研究中,当剪胀角在某一区间内减小时,这两种材料的脆性指数均呈现出明显的下降趋势,这一变化模式与红层泥岩在其第一阶段所展现的特性相吻合。

3 结论

本文采用直剪试验,明确了红层软岩填料粒径和含水率对红层软岩填料强度特性、脆性及剪胀性的影响规律,主要得到了以下结论:

(1)红层软岩应变-位移曲线受红层软岩填料粒径、含水率和竖向荷载变化的影响,过大的红层软岩填料粒径、含水率、竖向荷载使应力-位移曲线由软化型向硬化型过渡,峰值所需剪切位移逐步增大。

(2)抗剪强度、黏聚力、内摩擦角均随红层软岩填料粒径的增大逐渐减小;含水率的增大会导致黏聚力呈现出典型的“山峰效应”,对内摩擦角影响有限,饱和状态下红层软岩抗剪强度明显低于最优含水率状态下抗剪强度。

(3)随着竖向荷载增大,红层软岩软化特征减弱,残余抗剪强度和峰值抗剪强度差值减小,脆性指数趋近于1。饱和状态下,残余抗剪强度恒等于峰值抗剪强度,脆性指数为1。

(4)红层软岩填料粒径、含水率、竖向荷载增大均会抑制剪胀并促进剪缩发生,红层软岩填料在大粒径状态下会使前期的剪缩行为更为显著。特别地,饱和状态下红层软岩均表现为剪缩。

(5)剪切初期脆性指数随剪胀角下降而减小,试样软化特征显著伴随剪胀行为;中间阶段脆性指数稳定,红层软岩由软化特征转为硬化特征,仍伴随剪胀行为;最终脆性指数稳定为1,红层软岩表现为硬化特征,并且转为剪缩。

参 考 文 献

- [1] 王智猛. 红层泥岩及其改良土填筑高速铁路路基适应性及工程技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (WANG Z M. Study on applicability and technology for filling subgrade using red-mudstone and improved soil in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [2] 陈 康, 刘先峰, 蒋关鲁, 等. 饱和红层泥岩填料动力及耗散能特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 571-579. (CHEN K, LIU X F, JIANG G L, et al. Experimental study on dynamic and dissipated energy behaviors of saturated red mudstone fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 571-579. (in Chinese))
- [3] 马 杰, 刘先峰, 续嘉航, 等. 压实全风化红层泥岩填料力学特性及其影响因素 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44(5): 1-10. (MA J, LIU X F, XU J H, et al. Mechanical properties and influencing factors of compacted completely-weathered red mudstone filling material[J]. China Railway Science, 2023, 44(5): 1-10. (in Chinese))
- [4] 陈晓斌, 喻昭晟, 李志勇, 等. 红层泥岩路基填料分类与高效利用技术 [J]. 公路工程, 2024, 49(4): 51-56, 94. (CHEN X B, YU Z S, LI Z Y, et al. Classification and efficient utilization technology of red-bed mudstone roadbed filler[J]. Highway Engineering, 2024, 49(4): 51-56, 94. (in Chinese))
- [5] 何隆云, 聂文峰, 李光慧, 等. 高液限红层填料填筑铁路路基可行性研究 [J]. 路基工程, 2023(3): 1-5. (HE L Y, NIE W F, LI G H, et al. Feasibility study on the filling railway subgrade with high liquid limit red bed stuffing[J]. Subgrade Engineering, 2023(3): 1-5. (in Chinese))
- [6] 蒋关鲁, 房立凤, 王智猛, 等. 红层泥岩路基填料动强度和累积变形特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 124-129. (JIANG G L, FANG L F, WANG Z M, et al. Experimental study on dynamic strength and accumulated deformation characteristics of red-mudstone filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 124-129. (in Chinese))
- [7] 甘季中, 张 轩, 陈 敦, 等. 红层水理力学特性研究进展 [J]. 岩土工程技术, 2025, 39(4): 475-486. (GAN J Z, ZHANG X, CHEN D, et al. Research progress on hydraulic and mechanical properties of red beds[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025, 39(4): 475-486. (in Chinese))
- [8] 蔺鹏杰, 赵丽娜, 范文晓. 含水率对红层泥岩填料剪切强度与小应变刚度影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(12): 5071-5079. (LIN P J, ZHAO L N, FAN W X. Effect of water content on shear strength and small strain stiffness of red mudstone as subgrade fill material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(12): 5071-5079. (in Chinese))
- [9] 胡安华, 蒋关鲁, 王智猛, 等. 高速铁路路基红层泥岩填料力学特性试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2008, 25(2): 21-25. (HU A H, JIANG G L, WANG Z M, et al. Experimental research on mechanical characteristics of

- red rock filling for subgrade of high-speed railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008, 25(2): 21-25. (in Chinese))
- [10] 刘俊新, 刘育田, 邱恩喜. 非饱和红层路堤沉降理论与应用研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 217-222. (LIU J X, LIU Y T, QIU E X. A preliminary research on theory and application of unsaturated red layers embankment settlement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 217-222. (in Chinese))
- [11] 孙 怡, 邓荣贵, 文琪鑫, 等. 红层泥质岩循环干湿风化下变形特性试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(1): 57-65. (SUN Y, DENG R G, WEN Q X, et al. Experimental study on deformation characteristics of red-bed mudstone under cyclic dry-wet weathering[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(1): 57-65. (in Chinese))
- [12] NAHAZANAN H, ROSLEY I S, YUSOFF Z M. Shear behavior of crushed mudstone and claystone under macrostructural and microstructural approaches[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2021, 49(3): 2017-2027.
- [13] WANG J J, GUO J J, BAI J P, et al. Shear strength of sandstone-mudstone particle mixture from direct shear test[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(12): 1442.
- [14] WEN B P, HE L. Influence of lixiviation by irrigation water on residual shear strength of weathered red mudstone in Northwest China: implication for its role in landslides' reactivation[J]. *Engineering Geology*, 2012, 151: 56-63.
- [15] KONG, ZENG Z X, BAI W, et al. Engineering geological properties of weathered swelling mudstones and their effects on the landslides occurrence in the Yanji section of the Jilin-Hunchun high-speed railway[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2018, 77(4): 1491-1503.
- [16] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4173-4179. (WU D X, LIU H J, WANG G Q. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S2): 4173-4179. (in Chinese))
- [17] 刘晓明, 颜 圣, 刘 凯, 等. 干湿循环作用下红层软岩填料强度特性试验研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(3): 24-30. (LIU X M, YAN S, LIU K, et al. Experimental study on strength properties of red bed weak rock filler under dry-wet cycles[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(3): 24-30. (in Chinese))
- [18] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 667-671. (ZHAO M H, LIU X M, SU Y H. Experimental studies on engineering properties of red bed material containing slaking rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(6): 667-671. (in Chinese))
- [19] 王晓强, 姚华彦, 代 领, 等. 皖南红层软岩崩解特性试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 683-691. (WANG X Q, YAO H Y, DAI L, et al. Experimental study on slaking characteristics of red-bed soft rock in southern Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(3): 683-691. (in Chinese))
- [20] SHARMA K, KIYOTA T, KYOKAWA H. Effect of slaking on direct shear behaviour of crushed mudstones[J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(2): 288-300.
- [21] 赵明华, 陈炳初, 苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 351-356. (ZHAO M H, CHEN B C, SU Y H. Fractal analysis and numerical modeling disintegrate process of red-bed soft rock[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2007, 38(2): 351-356. (in Chinese))
- [22] LUO T Y, ZHANG Q S, GUI C, et al. Experimental study on the disintegration behavior and mechanism of red-bed mudstone in Guangxi, China[J]. *Frontiers in Materials*, 2024, 11: 1357116.
- [23] 陈晓斌, 徐望国, 刘小平. 降雨入渗对粗粒土路堤变形与稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(3): 765-771. (CHEN X B, XU W G, LIU X P. Effect of rainfall infiltration on additional settlement and stability debasement of granular soil fillings embankment[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(3): 765-771. (in Chinese))
- [24] 刘先峰, 马 杰, 袁胜洋, 等. 干密度和含水率对压实红层泥岩路基填料强度特性的影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(10): 2910-2918. (LIU X F, MA J, YUAN S Y, et al. Experimental research on the influence of dry density and water content on the strength characteristics of compacted red mudstone fill material[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(10): 2910-2918. (in Chinese))