

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.193



开放科学(资源服务)标识码OSID:



地铁隧道基底饱水风化软岩动力特性试验研究

谈亦帆¹, 石钰锋², 徐长节^{2,3}, 詹刚毅⁴

(1. 江西省建筑设计研究总院集团有限公司, 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 4. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要:为探究在列车长期循环荷载作用下地铁隧道基底风化软岩的累积塑性应变变化规律,以南昌地铁基底泥质粉砂岩为研究对象,开展不同风化程度饱水泥质粉砂岩在动应力比、静偏应力比、围压和频率等工况的室内动三轴试验,研究在不同影响因素下饱水风化泥质粉砂岩的动力变形特性规律。结果表明:在不同影响因素下,全、中风化泥质粉砂岩累积应变分别在加载1 000、100次开始趋于稳定;全风化泥质粉砂岩的临界动应力比在0.3~0.4之间;与不同动应力比和静偏应力比情况相比,改变围压和频率对两种风化泥质粉砂岩累积应变影响不大;通过分析试验结果数据,提出考虑加载次数、动应力比等因素的累积塑性应变数学模型。

关键词:地铁隧道;风化泥质粉砂岩;动三轴试验;塑性应变;非线性拟合

中图分类号:U451;TU458.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)06-0033-09

Experimental study on dynamic characteristics of saturated and weathered soft rock in metro tunnel basement

TAN Yifan¹, SHI Yufeng², XU Changjie^{2,3}, ZHAN Gangyi⁴

(1. Jiangxi Provincial Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330013, P. R. China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 4. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, P. R. China)

Abstract: In order to explore the cumulative plastic strain of weathered soft rock at the base of metro tunnels under long-term cyclic loading of trains, this paper focuses on the weathered argillaceous siltstone at the base of Nanchang Metro and develops laboratory dynamic triaxial tests of working conditions considering dynamic

收稿日期:2021-05-31

基金项目:国家地区科学基金(51768020);江西省自然科学基金(20192BAB206043)

作者简介:谈亦帆(1997-),男,主要从事隧道与地下工程研究,E-mail:452515225@qq.com。

石钰锋(通信作者),男,副教授,E-mail:827858500@qq.com。

Received:2021-05-31

Foundation items: National and Regional Science Fund Project (No. 51768020); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20192BAB206043)

Author brief: TAN Yifan (1997-), main research interests: tunnel and underground engineering, E-mail: 452515225@qq.com.

SHI Yufeng (corresponding author), associate professor, E-mail: 827858500@qq.com.

stress ratio, static deviator stress ratio, confining pressure and loading frequency, the dynamic deformation characteristics of saturated weathered argillaceous siltstone under different influential factors are studied. The results show that the cumulative plastic strain of fully weathered argillaceous siltstone and moderately weathered argillaceous siltstone become stable after 1 000 and 100 cycles, respectively, and the critical dynamic stress ratio of fully weathered argillaceous siltstone is between 0.3 and 0.4; compared with different dynamic stress ratios and static deviator stress ratios, confining pressure and frequency have marginal effect on the cumulative strain of the two weathered argillaceous siltstones; by analyzing the test result data, a mathematical model of cumulative plastic strain considering the loading times, dynamic stress ratio and other factors is proposed.

Keywords: metro tunnel; weathered argillaceous siltstone; dynamic triaxial test; plastic strain; nonlinear fitting

随着地下空间的大量开发利用,城市地铁已成为现代城市高速发展的产物。然而,地铁运营期间列车反复荷载作用产生的动力响应会对地铁的运维造成很大困难。为此,地铁隧道基底长期变形及预测越来越受到重视,众多学者对软土地基在交通荷载作用下的长期沉降研究甚多,而对风化泥质粉砂岩的研究较少。事实上,此类软岩物理力学性质较差,具有易击碎、遇水软化崩解等特点,在长期列车荷载作用下会对隧道结构产生不利影响。因此,研究循环荷载作用下风化泥质粉砂岩的累积变形具有重要工程意义。

列车循环荷载作用下岩(土)体动力变形特性已受到众多学者的密切关注。Seed等^[1]对软黏土进行循环三轴试验,研究了循环荷载作用下软黏土的动力变形规律;Yoshinaka等^[2]通过对不同软岩进行动三轴试验,研究了软岩孔隙水压力和动模量变化规律;Chen等^[3]以海洋黏土为对象进行了循环三轴试验,研究发现,加载频率越大,黏土的累积应变反而越小。刘飞禹等^[4]通过室内动三轴试验,研究了循环荷载下初始偏移应力、频率等对软土动弹性模量衰减的影响,得出频率对试样动弹性模量影响较小,初始偏移应力的增加对其动弹性模量影响较大的结论;Tang等^[5]对饱和黏土进行循环动三轴试验,根据累积塑性应变与循环次数的关系曲线特征,提出能够很好地反映动应变发展的指数型模型;陈成等^[6]以泥炭质土为研究对象,开展考虑动应力幅值、静偏应力等不同因素的不排水动三轴试验,发现动应力幅值和静偏应力不仅对其累积塑性应变影响显著,还会加剧动孔压的发展;于升才等^[7]对饱和黏性土的滞回环形态特征、塑性变形等规律进行了研究,发现随着循环次数增加,黏性土滞回环由梭形逐渐收缩变成S形,且滞回环高度、宽度逐渐变小,试样塑性变形大小随总应变的增大而增大;匡月青^[8]对地铁荷载作用下饱和软黏土进行动三轴试

验,研究了软黏土累积塑性应变和动应力-动应变关系特性,并提出了考虑频率和动应力比的累积应变数学模型;罗文俊等^[9]对饱和红黏土进行循环三轴试验,研究了动应力比、排水条件等影响因素对红黏土塑性累积应变和动孔压的影响,发现随着动应力比的增大,红黏土变形曲线由渐稳型向破坏型过渡,不排水条件下的累积应变要大于排水条件下的累积应变;冷伍明等^[10]通过大型动三轴试验,分析粗粒土在围压、动应力等影响因素下其累积塑性应变变化规律,结果表明,累积塑性应变及其稳定值随动应力的增加而增大,随围压的增加而减小;孙静等^[11]研究了多次冻融循环后粉砂土动应力、动模量等动力参数的变化规律;任华平等^[12]通过室内动三轴试验,研究了在飞机荷载作用下荷载频率和压实度对粉土道基累积塑性应变的影响,结果表明,压实度对累积塑性应变及临界循环应力比均有影响,荷载频率对加载前期的累积塑性变形发展速率影响较为显著。

从已有研究可以看出,针对交通荷载作用下岩(土)体材料最主要的研究对象是软黏土、砂土等,对软岩的研究较少,对风化软岩的研究更少且只考虑经过物理改良后作为路基填料的稳定性指标等要求,但水-岩耦合作用下风化软岩在交通荷载作用下累积变形问题日益突出。笔者以饱水全、中风化泥质粉砂岩为研究对象,分别从动应力幅值、加载频率等因素条件下开展动三轴试验,探究全、中风化泥质粉砂岩的主要影响因素和累积变形特性。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验采用的仪器设备是英国GDS试验系统,主要由轴向驱动装置、围压控制器、内压控制器、反压控制器、数据采集仪和数据采集系统等主要部分组成。加载方式有正弦波、半正弦波、余弦波等,加载

频率范围为0~2 Hz;轴向最大加载压力为10 kN;最大轴向变形为20 mm;应变测量精度为0.000 1;最大围压为2 MPa,每个循环周期最多可记录500个数据点,控制方法有应力控制和应变控制。试验采用应力控制,岩样经历加载-卸载-再加载的过程,在整个过程中,岩样所承受的塑性应变的累加即为累积塑性应变。

1.2 试验取样与制备

试验共取两种不同风化程度的软岩。其中,中风化泥质粉砂岩取自南昌地铁二号线东延项目某车站现场,采用钻孔取芯方式取样,取出来需立即用塑料膜包裹,防止其风干开裂,取样深度为25~31.5 m。中风化泥质粉砂岩呈暗红、紫红色,粉砂质结构,泥质胶结,节理裂隙发育,岩芯以柱状、长柱状为主,少量短柱状,节长一般为5~30 cm,如图1所示。 $RQD=80\%$,采取率95%,锤击声闷,属极软岩。全风化泥质粉砂岩因风化强烈,岩芯呈半岩半土状、碎块状,钻孔取芯后无法制备成试验所需的标准试样,并且考虑到在盾构施工过程中,盾构

机对围岩扰动很大,因此,全风化泥质粉砂岩采用重塑的制样方法。岩样取自地铁二号线某车站基坑。



图1 钻孔取样图

Fig.1 Drilling sampling

按照《岩石试验规范》参考引用和《土工试验规范》参考引用中的规定用磨石机和切割机加工成直径50 mm,全风化泥质粉砂岩采用分层湿捣法,并控制颗粒级配、最大干密度为 1.9 g/cm^3 和最优含水率为14.5%进行重塑,岩样的基本物理力学指标见表1,全、中风化标准试样见图2。

表1 岩样的基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indexes of rock samples

岩样名称	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	泊松比	弹性模量/MPa	承载力特征值/kPa
中风化泥质粉砂岩	2.10	450	42	0.29	1 940	2 500
全风化泥质粉砂岩	2.30	45	35	0.3	120	500

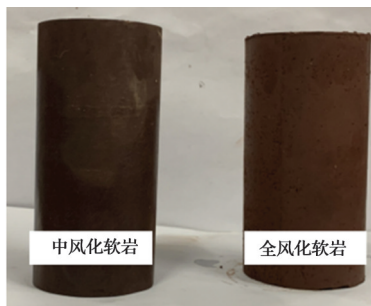


图2 标准试样

Fig.2 Standard sample

1.3 试验方案

宫全美等^[13]采用不同的正弦加载方式进行室内动三轴试验,发现用半正弦波加载方式的试验数据与实测数据更吻合。试验不考虑列车非匀速状态下动应力幅值的变化,采用单向等幅半正弦波的加载方式。南昌地铁列车运行速度为80~100 km/h,列车轴重不大于14 t,根据公式 $\sigma_d = 0.26P \times (1 \pm 0.004V)$ 和 $\eta_d = \sigma_d / \sigma_f$ (σ_d 、 P 、 V 、 η_d 和 σ_f 分别为动应

力幅值、列车轴重、运行速度、动应力比和静极限强度,根据地勘报告资料,全、中风化软岩静极限强度分别为0.3、1.5 MPa)得出全、中风化软岩动应力比,如表2所示。已有研究表明^[14],静偏应力越大,岩(土)材料达到破坏时所需时间越短,因此,选取0、75、100、150 kPa不同静偏应力进行试验($\eta_s = \sigma_s / \sigma_f$, η_s 和 σ_s 分别为静偏应力比和静偏应力)。围压一般根据土体埋深进行计算,即 $\sigma_3 = k_0 \gamma h$,全风化泥质粉砂岩埋深为25~27 m;中风化泥质粉砂岩埋深为27~31.5 m,因此,选取300、450、600 kPa进行试验。根据前人的研究,通过现场监测得出地铁列车以不同速度经过时,隧道围岩会产生低频(0.4~0.6 Hz)和低频(2.5~2.8 Hz)两种频率。因此,试验主要加载频率为1 Hz,且选取0.5、2 Hz两种工况进行对比分析。

试样放入真空饱和缸中进行预饱和,然后在GDS试验设备中进行反压饱和,当检测值 $B = \Delta u / \Delta \sigma > 95\%$ 时,则认为试样饱和,最后进行等向排水固结,

表 2 风化泥质粉砂岩试验工况表

Table 2 Test condition table of weathered argillaceous siltstone

岩样	工况	动应力比	静偏应力比	围压/kPa	加载频率/Hz
全风化泥质粉砂岩	1	0.133、0.167、0.233、0.3、0.4	0.25	300	1
	2	0.167	0、0.25、0.333、0.5	300	1
	3	0.167	0.25	300、450、600	1
	4	0.167	0.25	300	0.5、1、2
中风化泥质粉砂岩	5	0.027、0.033、0.047、0.06、0.08	0.05	450	1
	6	0.033	0、0.05、0.067、0.1	450	1
	7	0.033	0.05	300、450、600	1
	8	0.033	0.05	450	0.5、1、2

当超孔隙水压力消散到等于反压值时,则认为固结完成,试样在等压固结完成后,立即施加静偏应力和动应力,试样加载见图 3。

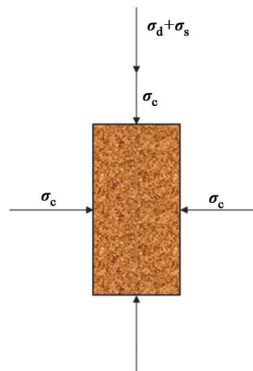


图 3 试样加载图

Fig. 3 Sample loading diagram

全、中风化软岩各进行了 15 组试验,试验采用各向等压固结,即固结应力比为 1.0。定义动应力比 $\eta_d = \sigma_d / \sigma_f$ (σ_d 为动应力幅值, σ_f 为静极限强度); 定义静偏应力比 $\eta_s = \sigma_s / \sigma_f$ (σ_s 为静偏应力, σ_f 为静极限强度), 具体工况见表 2。

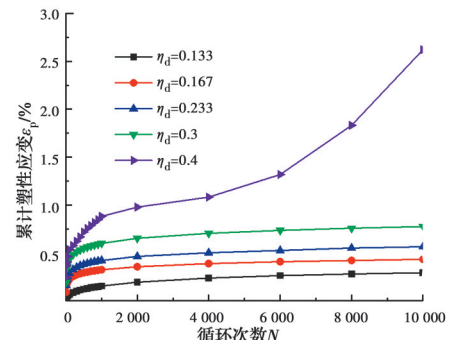
2 试验结果分析

2.1 动应力比的影响分析

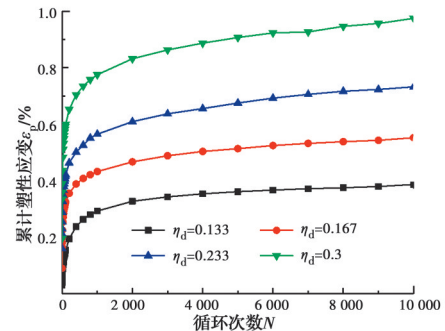
为研究不同动应力比对岩样累积塑性应变的影响,分别对试验工况 1 和工况 5 进行动三轴试验。

由图 4(a)、(b)可知,不同动应力比对岩样的累积塑性应变影响较大。当动应力比分别为 0.133、0.167、0.233、0.3 时,试样变形规律呈稳定型,变形规律大致相同;当动应力比为 0.4 时,试样变形规律呈破坏型,循环次数达到 600 次时,试样变形速率突然增大,其斜率要远大于加载初期阶段,累积塑性应变曲线发展迅猛,最终达到破坏,可知全风化泥

质粉砂岩的临界动应力比为 0.3~0.4。另外,稳定型曲线加载前 1 000 次累积应变占总应变(10 000 次)的 75%~80%,这是由于全风化软岩内部结构松散,孔隙数量较多,加载初期岩样被压实,累积变形急剧增大。由图 5 可知,5 种工况均为稳定型曲线,加载前 100 次累积应变占总应变的 85%~95%,相较于全风化软岩而言,中风化软岩达到稳定阶段所需的循环次数更少且中风化软岩加载初期应变占总应变比例更大,这是因为中风化软岩岩芯较完整,内部裂隙数量较少,颗粒之间胶结作用较强,宏



(a) 不同动应力比下动应变与加载 1 000 次的关系



(b) 不同动应力比下动应变与加载 10 000 次的关系

图 4 不同动应力比下全风化软岩与加载次数的关系

Fig. 4 Relationship between fully weathered soft rock and loading times under different dynamic stress ratios

观上表现为抵抗变形能力较强,因此,前几十次循环次数累积塑性应变曲线就已经趋于平稳。

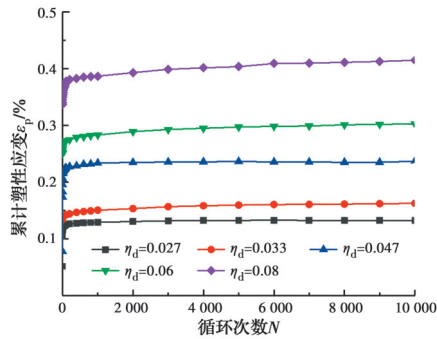
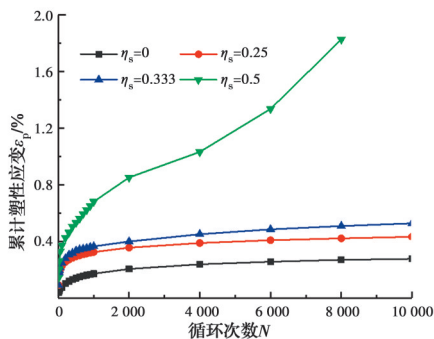


图 5 不同动应力比下中风化软岩与加载次数的关系
Fig. 5 Relationship between moderately weathered soft rock and loading times under different dynamic stress ratios

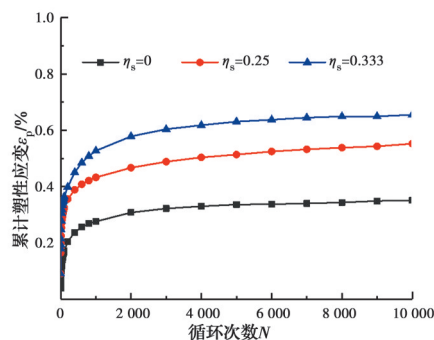
2.2 静偏应力比的影响分析

为研究不同静偏应力比对岩样累积塑性应变的影响,分别对试验工况 2 和工况 6 进行动三轴试验。

对于全风化软岩而言,如图 6 所示,当静偏应力比为 0 时,岩样总应变为 0.351%,静偏应力比增大到 0.333 时,总应变达到 0.655%,增幅为 86.6%,但累积塑性应变曲线仍为稳定型。当静偏应力比



(a) 不同静偏应力比下动应变与加载前 1 000 次的关系



(b) 不同静偏应力比下动应变与加载 1 000 次的关系

图 6 不同静偏应力比下全风化软岩与加载次数的关系
Fig. 6 Relationship between fully weathered soft rock and loading times under different static deviator stress ratios

为 0.5 时,岩样总应变高达 1.828%,是静偏应力比为 0 时的 5.2 倍,累积塑性应变曲线呈破坏型,岩样被破坏。可见,当岩样饱和时,岩样颗粒之间的结合作用被破坏,导致黏合力损坏甚至被破坏^[15],继而诱发岩样内部原生裂隙的发展和次生裂缝的萌发,引起岩样的损伤,在施加动荷载过程中会加快岩样变形速率,最终导致破坏。对于中风化软岩而言,如图 7 所示,4 种工况下岩样累积塑性应变曲线均为稳定型。当静偏应力比从 0 增大到 0.1 时,岩样所对应的总应变从 0.101% 增加到 0.312%,后者是前者的 3.1 倍。说明静偏应力对中风化岩样的影响较全风化岩样更小,这是由于中风化岩样结构完整,动强度较大,在循环荷载作用下很难产生较大的变形。

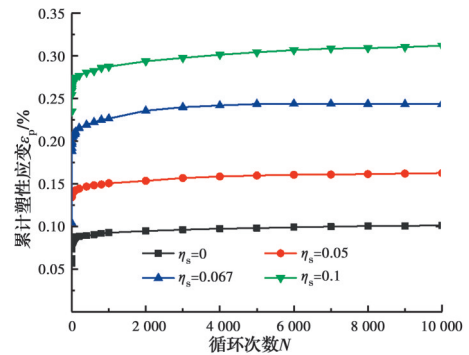
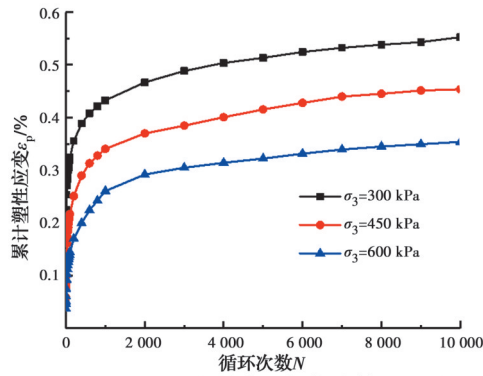


图 7 不同静偏应力比下中风化软岩与加载次数的关系
Fig. 7 Relationship between moderately weathered soft rock and loading times under different static deviator stress ratios

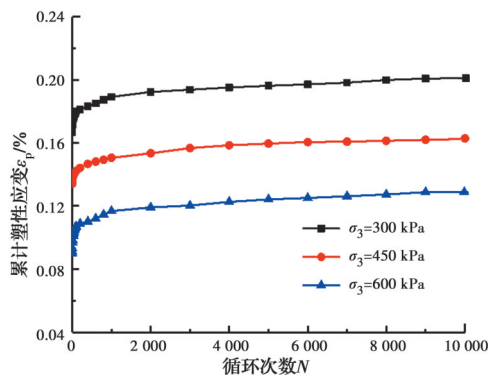
2.3 围压的影响分析

为研究不同围压对岩样累积塑性应变的影响,分别对试验工况 3 和工况 7 进行动三轴试验。

由图 8 可知,不同围压下岩样累积塑性应变曲线均为稳定型。随着围压的增大,全、中风化软岩累积应变反而越小,其原因是岩样吸水后,原有的结构特征被完全破坏,重塑过程中岩样颗粒和孔隙重新排列,导致岩样裂缝减少^[16],颗粒之间胶结作用增强,岩样更密实,物理力学指标表现为动强度越大,累积塑性应变越小。相较于不同动应力比和静偏应力比,改变围压对岩样累积塑性应变影响不大。当围压从 600 kPa 减小到 300 kPa 时,全风化软岩的总应变从 0.354% 增加到 0.552%,增幅为 56.0%;中风化软岩的总应变从 0.129% 增加到



(a) 全风化软岩与加载次数的关系



(b) 中风化软岩与加载次数的关系

图8 不同围压中风化软岩与加载次数的关系

Fig. 8 Relationship between weathered soft rock and loading times under different confining pressures

0.201%,增幅为55.7%,说明围压的改变对不同风化程度软岩的影响大致相同。

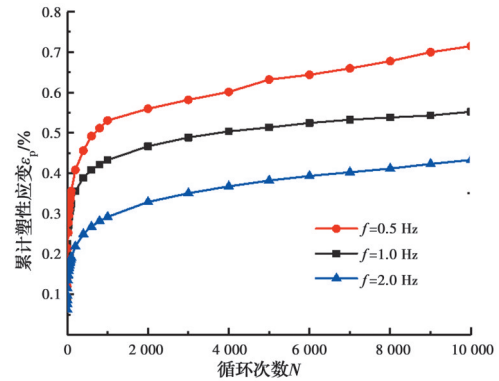
2.4 加载频率的影响分析

为研究不同频率对岩样累积塑性应变的影响,分别对试验工况4和工况8进行动三轴试验。

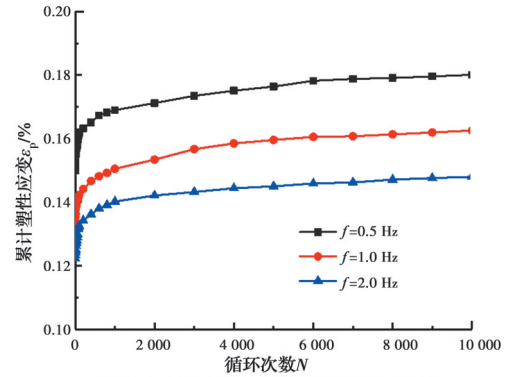
由图9可知,加载频率越低,全、中风化软岩的总应变反而越大,其原因是在加载频率较小的情况下,动荷载作用时间更长,孔压消散和裂隙发育更快,岩样累积塑性应变急剧增加。对于全风化软岩而言,当频率为0.5 Hz时,加载到10 000次岩样仍有应变继续增大的趋势,由于试验周期过长,没有考虑更多循环次数和更低频率下累积应变的变化规律,后期可考虑增加循环次数和减小频率的工况;对于中风化软岩而言,低频区段内改变频率对其影响不大,由于试验设备最大加载频率为2.0 Hz,因此,高频区段内改变频率的影响有待探究。

2.5 孔隙水压力变化分析

地铁运营初期,盾构隧道施工扰动引起隧底围岩的超孔隙水压力仍未消散,列车长期荷载作用会



(a) 全风化软岩与加载次数的关系



(b) 中风化软岩与加载次数的关系

图9 不同加载频率下风化软岩与加载次数的关系

Fig. 9 Relationship between weathered soft rock and loading times under different confining pressures

引起超孔压减小而导致固结沉降,所以,超孔隙水压力对地铁运营期的长期沉降影响需要引起重视。在设定静偏应力比0.25、围压300 kPa、频率1 Hz的条件下,分析全风化软岩动应力比分别为0.133、0.167、0.233、0.3、0.4的超孔隙水压力的变化规律;在设定静偏应力比0.05、围压450 kPa、频率1 Hz的条件下,分析动应力比分别为0.027、0.033、0.047、0.06、0.08的孔隙水压力变化的规律。定义 U^* 为孔压归一值, $U^* = \Delta\mu/\sigma_3$, $\Delta\mu$ 为超孔隙水压力, σ_3 为有效围压。

由图10可知,对于中风化软岩而言,最大动孔压为0.293;对于全风化软岩而言,最大动孔压为0.42,远大于中风化软岩,这是由于全风化软岩采用重塑制样方式,其原有内部结构已遭到破坏,颗粒之间胶结作用减弱,在循环荷载作用下,有利于空压的发展。另外,当全、中风化软岩从最小动应力比增加到最大动应力比时,动孔压增幅约为65%,因此,地铁运营期不仅要关注列车长期荷载作用下的累积变形,还需要着重关注固结沉降。

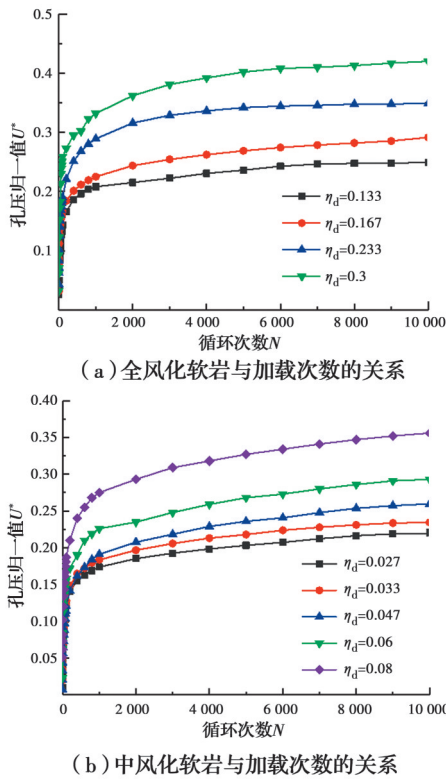


图 10 不同动应力比下动孔压比随循环次数的变化关系
Fig. 10 Relationship between dynamic pore pressure ratio and cycle times under different dynamic stress ratios

3 累积轴向塑性应变模型的建立

目前,经验公式模型主要有对数型^[17]和指数型^[18]两大类,未见风化泥质粉砂岩地层的累积塑性应变数学模型。结合风化泥质粉砂岩循环动三轴试验变化规律和影响因素,本模型采用新累积塑性应变数学模型。

$$\epsilon = a\eta_d^m(1 + \eta_s)^n + b\ln N \quad (1)$$

式中: ϵ 为风化泥质粉砂岩累积塑性应变; η_d 为动应力比; η_s 为静偏应力比; N 为循环次数; a 、 b 、 m 和 n 为拟合参数。

通过 MATLAB 软件进行编程,采用最小二乘法进行拟合,得出全风化泥质粉砂岩中 a 、 m 、 n 和 b 分别为 0.780 8、2.748 1、12.047 9 和 0.046 7, $R^2=0.92$,得出中风化泥质粉砂岩中 a 、 m 、 n 和 b 分别为 3.102 2、1.166 1、15.589 1 和 0.005 6, $R^2=0.97$,两种风化软岩拟合结果均较好。图 11、图 12 分别为不同动应力比和不同静偏应力比条件下风化泥质粉砂岩试验数据和拟合数据的对比。

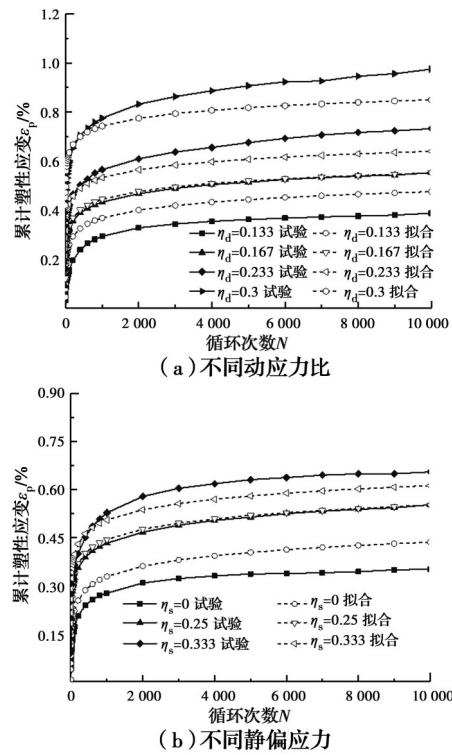


图 11 全风化泥质粉砂岩试验数据与拟合数据对比图
Fig. 11 Comparison of experimental data and fitted data of fully weathered argillaceous siltstone

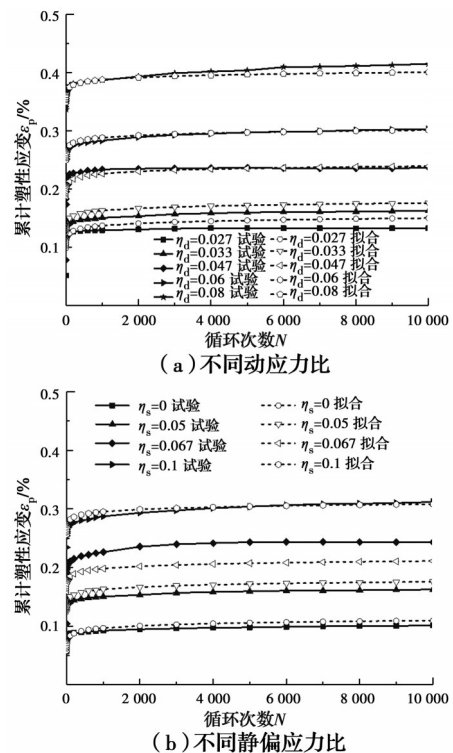


图 12 中风化泥质粉砂岩试验数据与拟合数据对比图
Fig. 12 Comparison of experimental data and fitted data of moderately weathered argillaceous siltstone

4 结论

1)不同动应力比条件下,全风化软岩在加载1 000次左右开始趋于稳定,其临界动应力比在0.3~0.4之间,中风化软岩在加载100次左右开始趋于稳定,并且相较于全风化软岩,中风化软岩加载初期的累积应变占总应变的比例更大。

2)动应力比和静偏应力比越大,两种风化程度软岩的累积塑性应变均增大;围压和频率越大,两种风化软岩累积总应变均越小,但相较于不同动应力比和静偏应力比,改变围压和频率对两种风化软岩总应变影响不大。

3)随着动应力比的增大,超孔隙水压力增大,其趋于稳定所需的时间也越长;相同动应力比情况下,中风化软岩要远小于全风化软岩的超孔隙水压力。因此,地铁运营期不仅要关注列车荷载作用下的累积变形,还需要着重关注固结沉降。

4)分析试验结果数据,提出了考虑加载次数、动应力比等因素的累积塑性应变数学模型,为预测隧道长期沉降提供理论基础。

参考文献

- [1] SEED H B, CHAN C K, MONISMITH C L. Effect of repeated load on the strength and deformation of compacted clay [R]. Highway Research Record, 1955, 34: 541-558.
- [2] YOSHINAKA R, TRAN T V, OSADA M. Non-linear, stress- and strain-dependent behavior of soft rocks under cyclic triaxial conditions [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 941-955.
- [3] CHEN Y M, JI M X, HUANG B. Effect of cyclic loading frequency on undrained behaviors of undisturbed marine clay [J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(4): 643-651.
- [4] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载下软土动弹性模量衰减规律研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(9): 1479-1483.
LIU F Y, CAI Y Q, XU C J, et al. Degradation of dynamic elastic modulus of soft clay under cyclic loading [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(9): 1479-1483. (in Chinese)
- [5] TANG Y Q, SUN K, ZHENG X Z, et al. The deformation characteristics of saturated mucky clay under subway vehicle loads in Guangzhou [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(5): 1-10.
- [6] 陈成, 周正明, 张先伟, 等. 循环荷载作用下泥炭质土动力累积特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1247-1255.
CHEN C, ZHOU Z M, ZHANG X W, et al. Experimental study on accumulative behaviour of peaty soil under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1247-1255. (in Chinese)
- [7] 于升才, 曲树盛, 杨立功, 等. 应变控制下的饱和黏性土动三轴试验研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 24-28.
YU S C, QU S S, YANG L G, et al. Research on the saturated cohesive soil with strain controlled dynamic triaxial test [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(8): 24-28. (in Chinese)
- [8] 匡月青. 地铁行车荷载作用下饱和软黏土的动力响应与长期沉降研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
KUANG Y Q. Study on dynamic response and long-term settlement of saturated soft clay under metro train vibration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [9] 罗文俊, 王海洋, 马斌, 等. 单向循环荷载作用下饱和重塑红黏土的动力特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 1-9.
LUO W J, WANG H Y, MA B, et al. Dynamic characteristics of saturated remodeling red clay under uniaxial cyclic loading [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(2): 1-9. (in Chinese)
- [10] 冷伍明, 翟斌, 徐方, 等. 基于大型动三轴试验的粗粒土累积塑性应变概率模型研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(15): 214-220, 249.
LENG W M, ZHAI B, XU F, et al. Probabilistic model of cumulative plastic strain of coarse-grained soil fill based on large-scale dynamic triaxial tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(15): 214-220, 249. (in Chinese)
- [11] 孙静, 公茂盛, 熊宏强, 等. 冻融循环对粉砂土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 747-754.
SUN J, GONG M S, XIONG H Q, et al. Experimental study of the effect of freeze-thaw cycles on dynamic characteristics of silty sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 747-754. (in Chinese)
- [12] 任华平, 刘希重, 宣明敏, 等. 循环荷载作用下击实粉土累积塑性变形研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1045-1055.
REN H P, LIU X C, XUAN M G, et al. Study of cumulative plastic deformation of compacted silt under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42

- (4): 1045-1055. (in Chinese)
- [13] 宫全美, 罗喆, 袁建议. 提速铁路基床长期累积沉降及等效循环荷载试验研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(2): 88-93.
GONG Q M, LUO Z, YUAN J Y. Experimental study on long-term cumulative settlement and equivalent cyclic load of speed-up railway subgrade soil [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(2): 88-93. (in Chinese)
- [14] 丁祖德. 高速铁路隧道基底软岩动力特性及结构安全性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
DING Z D. Dynamic properties of soft rock and the safety of base structure of high-speed railway tunnels [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [15] WANG Y, ZHANG S X, YIN S, et al. Accumulated plastic strain behavior of granite residual soil under cycle loading [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 04020205.
- [16] ZHANG X W, LIU X Y, CHEN C, et al. Engineering geology of residual soil derived from mudstone in Zimbabwe [J]. Engineering Geology, 2020, 277: 105785.
- [17] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.
HUANG M S, LI J J, LI X Z. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 891-895. (in Chinese)
- [18] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.

(编辑 胡玲)