

谢栋,吴建奇.循环荷载作用下红黏土累积变形研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1623-1629.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1623

XIE Li, WU Jianqi. Accumulative Deformation of Red Clay in Southern Jiangxi under Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1623-1629. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1623

循环荷载作用下红黏土累积变形研究

谢 栋¹, 吴建奇^{1,2}

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

2. 江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室, 江西 赣州 341000)

摘要: 通过 GDS 动三轴设备对赣南红黏土进行了一系列排水条件下的大次数循环试验, 研究不同循环应力比、固结应力比及围压对赣南红黏土累积变形特性的影响。结果表明: 在不同固结应力比、固结压力和循环应力比条件下, 红黏土的累积应变都呈现出先迅速累积, 后增长变缓, 最终稳定的趋势; 在一定的循环次数之后, 不同初始固结应力和不同初始应力比条件下累积应变与循环次数之间的变形规律呈现为线性关系, 且初始固结应力和初始固结应力比越小, 其线性相关性越好; 不同循环应力比下赣南红黏土的平均累积应变速率与循环次数之间也呈现出明显的线性关系。此外, 基于以上关系建立了赣南红黏土在长期循环荷载作用下的累积变形预测模型, 并通过对比验证了该模型的可行性。

关键词: 红黏土; 循环应力比; 累积变形; 累积应变速率; 变形预测模型

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1623-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1623

Accumulative Deformation of Red Clay in Southern Jiangxi under Cyclic Loading

XIE Li¹, WU Jianqi^{1,2}

(1. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

2. Environmental Ground and Disaster Control Key Laboratory of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Accumulative deformation characteristics of red clay in southern Jiangxi, China, subjected to drained cyclic triaxial loading, were investigated at different cyclic stress ratios, confining pressures, and consolidation ratios. Results indicated that the accumulative strain of red clay showed a tendency, first, toward rapid accumulation, then slow growth, and finally, stability under different cyclic stress ratios, confining pressures, and consolidation ratios. After a certain number of cycles, the cumulative strain and cycle number under different initial consolidation stress levels and initial stress ratios showed a linear relationship, with the smaller the initial consolidation stress and initial stress ratio, the better the linear correlation. There was also an obvious linear relationship between the average cumulative strain rate and

收稿日期: 2019-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768025)

第一作者简介: 谢 栋(1995-), 女, 硕士, 主要从事土动力学的工作。E-mail: 1051553700qq.com。

通信作者: 吴建奇(1980-), 男, 副教授, 主要从事土动力学的工作。E-mail: wujq1980@163.com。

the number of cycles under different cyclic stress ratios. Based on the relationship, the cumulative deformation prediction model under long-term cyclic load was established for red clay in southern Jiangxi, and feasibility of the formula was verified by comparison.

Keywords: red clay; cyclic stress ratio; accumulative deformation; accumulative strain rate; deformation prediction model

0 引言

目前,国家城市建设对交通工程的需求日益提升,高速公路、高铁、城市地铁、机场等基础设施在全国范围内实现了快速全面的发展,这种快速的发展使得红黏土地基在交通建设上得到了重视。

红黏土主要是指分布在我国长江以南碳酸盐类岩石分化出的棕红、褐黄等色的高塑性黏土。红黏土的许多不良物理性质,使其呈现出不同于其他常见黏性土的规律^[1-3]。红黏土作为路基,其在承受静荷载的同时也承受着交通工具运行时产生的振动荷载。与地震荷载不同,交通荷载作为一种特殊的动荷载,是具有一定规律性的循环荷载。这种动荷载往复作用容易造成地基产生不均匀沉降,从而使路面遭受破坏。因此,对循环荷载作用下红黏土地基的变形特性开展研究显得非常重要。

目前,国内外不少学者对交通荷载下黏土等多种土体的变形特性进行了研究。GIDEL 等^[4]利用室内动三轴试验,探讨了应力幅值和土体强度对土体的轴向变形的影响,并提出了描述永久轴向变形与最大施加应力和加载周期数的经验关系。LI 等^[5]表明土壤物理状态、土壤类型、交通吨位和车轮荷载对塑性变形积累的影响显著。ZHANG 等^[6]通过循环三轴试验研究了红土在地震响应后应力-应变行为对轴向变形和孔压的影响。杨爱武等^[7]进行三轴不固结不排水试验,探讨不同应力路径及初始累积变形对吹填土变形、强度和孔压特性。王磊等^[8]通过对饱和砂土的循环剪切三轴排水试验,分析土性及不同应力参数对累积变形影响,并提出了基于试验结果的饱和砂土累积变形计算模型。龙尧等^[9]通过室内动三轴试验,着重探讨不同循环应力比对粗粒土累积动应变的影响,构建并验证了累积动应变预测模型。陈成等^[10]考虑围压水平、动应力幅值以及静偏应力 3 个因素,研究了泥炭质土的长期累积变形特性。瞿帅等^[11]通过压缩试验和动三轴试验结果,探讨了 3 个条件(循环次数、动应力比和结构性强度)对结构性土与重塑土的累积塑性变形的影响规律。吴建奇等^[12]研究部分排水条件下原状红黏土的动孔压和动回弹特性,重点分析了累

积变形随不同应力因素的变化情况,基于试验结果提出了变形预测公式。郭林等^[13]考虑到软黏土的结构性,通过不同围压下的不排水静剪和大数目循环加载试验,研究了土体结构性对强度的影响,并着重分析结构性软黏土在长期循环荷载作用下的应变特性。孟晓宇等^[14]研究在不同含水率和固结围压条件下,红黏土破坏动应力-破坏振次关系、动应变-动弹性模量关系以及阻尼比等的变化规律。以上研究在一定程度上揭示了土体的动力特性,但是大多数的研究集中于粉土或是软黏土,对红黏土的研究很少。

本文基于 GDS 动三轴,对赣州南部的原状红黏土展开循环荷载作用下的长期动力试验,研究固结围压、循环应力比、固结应力比对累积变形的影响,提出了考虑循环应力比的红黏土累积变形模型。

1 试验土样及方案

1.1 试验土样

本文采用天然路基层红黏土制作土样。取土场地地层由上到下依次为碎石填料、红黏土、粉砂土,使用薄壁取样法在深度为 2~2.5 m 的红黏土层取样。采用标准的土力学试验测试出原状红黏土的物理力学指标为:天然孔隙比 $e=0.78$,土粒比重 $G_s=2.68$,含水率 $w=27\%$,塑限 $w_p=18.2\%$,液限 $w_L=35.2\%$ 。土样制备完,使用真空饱和和器饱和之后,装样完毕再用反压饱和直至 B 值(孔压增量与反压增量的比值)达到要求。饱和完成接着固结土样,固结完成标准,一为孔压等于反压,二为反压体积不变,达到其中一个则可以施加动载进行试验。

1.2 试验方案

本文试验采用包括轴向驱动装置、压力室、DCS 数字控制系统等组成的 GDS 动三轴仪器,加载波形为正弦波,加载频率为 1 Hz。如图 1 所示,试验方案分为 A、B、C 3 组,具体如表 2 所示。试验采用控制变量法,A 组变量为固结应力比,B 组变量为循环应力比,C 组变量为围压。试验期间,除变量变化之外,控制其他条件不变分别研究固结应力比、循环应力比、固结围压对累积变形的影响。

表 1 赣南红黏土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of red clay in southern Jiangxi

颗粒比重 G_s	天然含水量 w_n	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	初始孔隙比 e_0	饱和度 S_r	粒径分布/ $\%$	
						$<2\text{ mm}$	$<0.0075\text{ mm}$
2.67~2.70	26.5~27.8	35.2	18.2	0.78	90.1~94.5	100	91.8

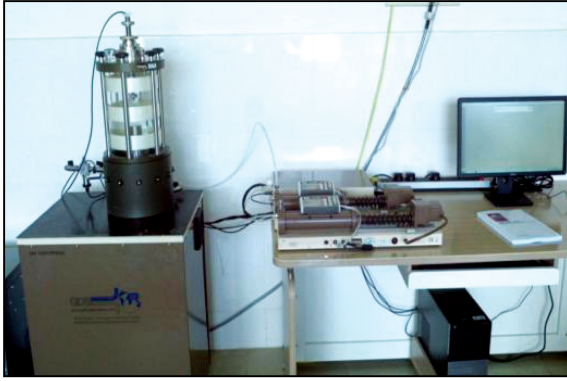


图 1 GDS 三轴仪器示意图

Fig.1 Schematic view of GDS triaxial apparatus

表 2 试验方案

Table 2 Summary of test programs

试验分组	试验编号	p'_0/kPa	CSR	η
A	A1	100	0.12	0.5
	A2	100	0.12	1.0
	A3	100	0.12	1.5
B	B1	100	0.04	0
	B2	100	0.12	0
	B3	100	0.24	0
	B4	100	0.28	0
C	C1	50	0.12	0
	C2	150	0.12	0
	C3	200	0.12	0

为了便于理解和叙述,本文定义如下参数:大主应力为 σ_1 ,小主应力为 σ_3 ,初始偏应力为 q_0 ,初始平均主应力为 p'_0 ,循环偏应力幅值为 q^{ampl} (图 2),初始固结应力比为 η 。

$$q_0 = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (1)$$

$$p'_0 = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3 \quad (2)$$

$$q^{\text{ampl}} = \sigma_1^{\text{max}} - \sigma_3^{\text{min}} \quad (3)$$

$$\eta = q_0 / p'_0 \quad (4)$$

定义循环应力比为:

$$\text{CSR} = q^{\text{ampl}} / 2p'_0 \quad (5)$$

土样受到荷载作用产生轴向总应变 ϵ_t 。在荷载逐渐变化的过程中,分为可以恢复的回弹应变 ϵ_r ,而不能恢复并逐渐累积下来的累积应变 ϵ_p ,总应变即为两者之和。图 3 为应变发展曲线示意图,图 4 为典型的滞回曲线。

$$\epsilon_t = \epsilon_r + \epsilon_p \quad (6)$$

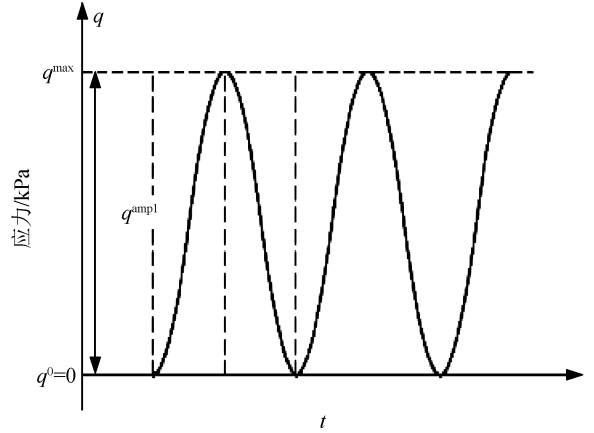


图 2 动应力加载示意图

Fig.2 Dynamic stress loading diagram

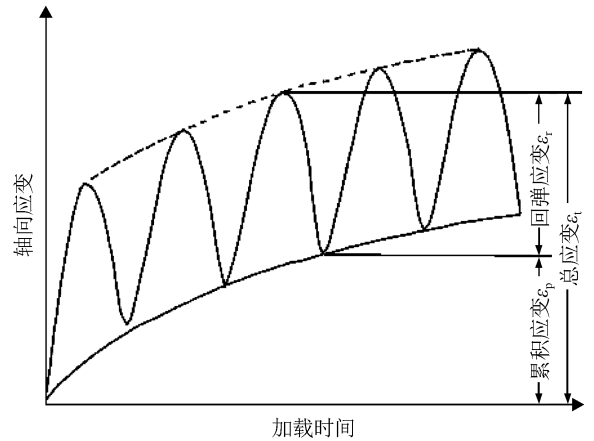


图 3 应变发展曲线

Fig.3 Strain development curve

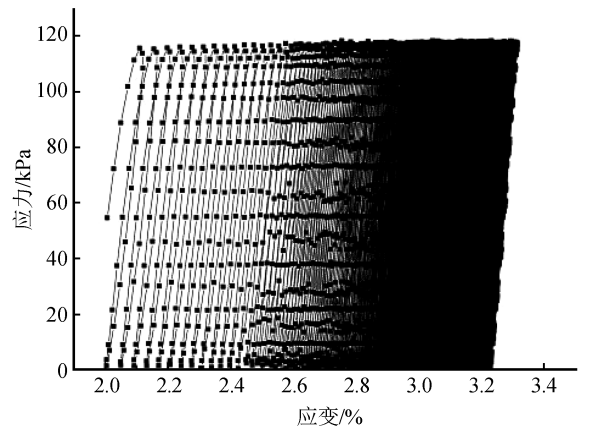


图 4 典型滞回曲线

Fig.4 Typical hysteresis curves

2 试验结果与分析

2.1 不同固结应力比

如图5所示,在相同的固结围压($p'_0=100$ kPa)和循环应力比($CSR=0.12$)下,从总体来看,无论固结应力比如何变化,应变总是随之增长。但从曲线中可以观察到,加载初期,随循环次数的增加累积应变迅速积累,过了刚开始的快速积累之后,累积应变最终处于一个缓慢增长的状态。相对应的,累积速率在循环开始阶段较大,但是在加载中后期基本保持稳定。固结应力比越大,整个试验的总累积应变越大,在相同的循环次数下,分析固结应力比(如 $\eta=0$ 和0.5与 $\eta=1.5$ 和1.0)的影响,可以看出固结应力比大的曲线之间累积变形的增量相差比较大。

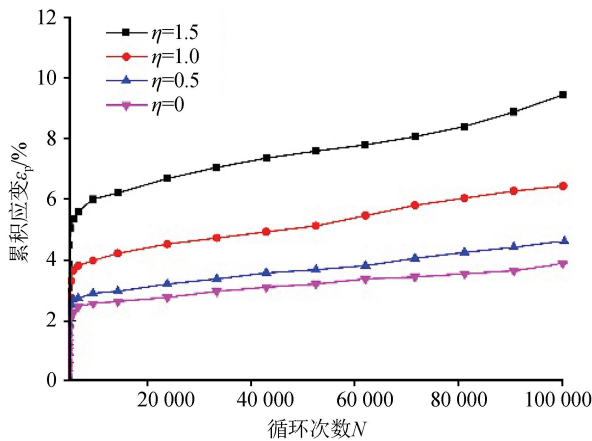


图5 不同固结应力比下累积应变随循环次数变化曲线

Fig.5 Variation curve of cumulative strain with cycle times under different consolidation stress ratios

仔细观察同围压不同固结比下循环次数5 000次之后的累积应变发展可知,在此之后累积应变与循环次数之间近似呈现出一种线性变化关系。故取循环5 000次之后的实测数据,作出拟合曲线(图6)。采用线性函数描述同围压不同固结比下累积应变和循环次数之间关系,函数形式如下:

$$\varepsilon_p = aN + b \quad (7)$$

式中: a 、 b 为试验参数,由拟合得到,参数列于表3。由表可看出,拟合度均超过了0.98,表明线性关系能很好地反映两者关系。

2.2 不同围压

由图7可知,不同的围压下累积应变都随着循环次数不断提高,加载初期累积应变迅速积累,过了迅速积累的循环次数之后,累积应变会以平稳的增速缓慢增加。固结围压大累积应变较大,不同的围压之间

应变增量比较平均。在曲线中段可以观察到,超过一定的循环次数之后,不同的围压下循环次数和累积应变都存在良好的线性关系。循环次数5 000次之后循环次数和累积应变的拟合曲线如图8所示,采用线性函数描述两者之间关系,函数形式如下:

$$\varepsilon_p = cN + d \quad (8)$$

式中: c 、 d 为试验参数,由拟合得到,参数如表4所示。表明围压越低,线性关系越能够较好地体现累积应变与循环次数之间的变化规律。

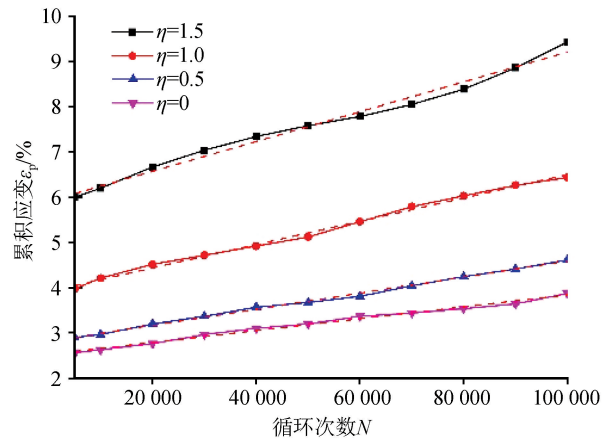


图6 不同固结应力比下累积应变随循环次数的拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of cumulative strain with cycle times under different consolidation stress ratios

表3 线性拟合参数

Table 3 Linear fitting parameters

初始固结应力比 η	a	b	拟合度 R^2
1.5	3.291	5.912	0.984
1.0	2.577	3.918	0.995
0.5	1.776	2.811	0.996
0.0	1.314	2.523	0.989

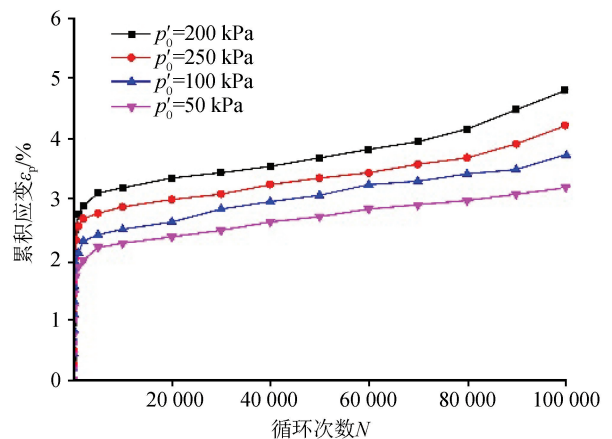


图7 不同围压下累积应变随循环次数变化曲线

Fig.7 Variation curve of cumulative strain with cycle times under different confining pressure

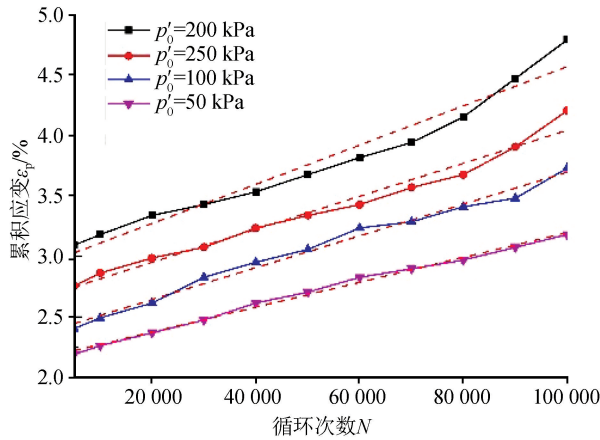


图 8 不同围压下累积应变随循环次数拟合曲线
Fig.8 Fitting curve of cumulative strain with cycle times under different confining pressure

表 4 线性拟合参数

Table 4 Linear fitting parameters

初始固结应力 p'_0 /kPa	c	d	拟合度 R^2
200	1.620	2.947	0.955
150	1.365	2.678	0.973
100	1.316	2.380	0.987
50	1.028	2.169	0.994

2.3 不同循环应力比

图 9 为在相同围压和相同固结应力比下累积应变与循环次数之间的变化关系。总趋势是循环次数越多,累积应变逐渐增大,变化速率却在不断地降低。对于不同的循环应力比,其值较小时,经过加载前期的快速积累,之后累积应变发展变缓,最终趋于稳定。循环应力比越小,动应力小,曲线越平,中后期的循环对应变的影响可以忽略不计,即很难产生累积应变。随着循环应力比逐渐变大,中后期的循环

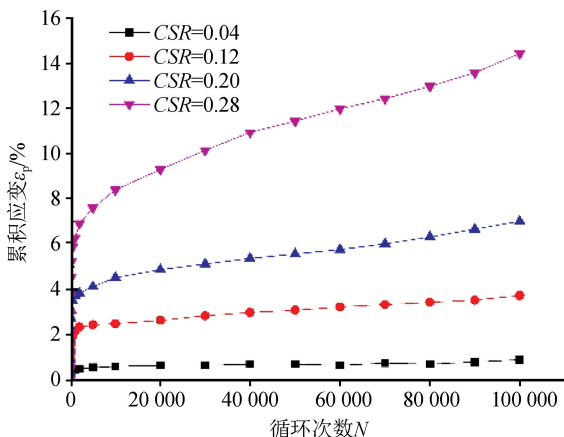


图 9 不同循环应力比下累积应变随循环次数变化曲线

Fig.9 Variation curve of cumulative strain with cycle times under different cyclic stress ratios

对累积应变的影响也逐渐增大,对比曲线可以看出,循环应力比较大时(如 $CSR = 0.28$),这种规律更加明显。

图 10 为用双对数坐标系下处理的平均累积应变速率(ϵ_p/N)变化曲线。从图中可以看出,随着循环次数的增长,平均累积应变速率在经过几百个循环之后衰减的十分快,加载过后,平均累积应变率降低到一个很低的值,平均累积应变速率与循环次数之间存在良好的线性关系。取循环次数 100 之后,不同循环应力比下 $\log(\epsilon_p/N)$ 和 $\log N$ 的拟合曲线如图 11 所示,采用线性函数来描述两者的关系,形式如下:

$$\log\left(\frac{\epsilon_p}{N}\right) = f \log N + g \quad (9)$$

式中: f 、 g 为试验参数,由拟合得到,如表 5 所示。表明线性关系能较好地体现两者之间的变化规律。

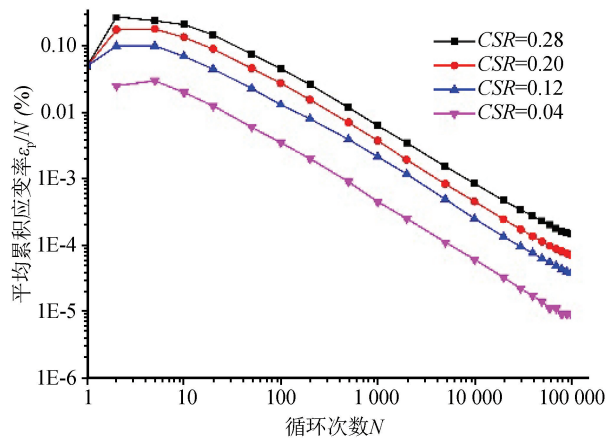


图 10 平均累积应变率随循环次数变化曲线
Fig.10 Variation curve of average cumulative strain rate with cycle times

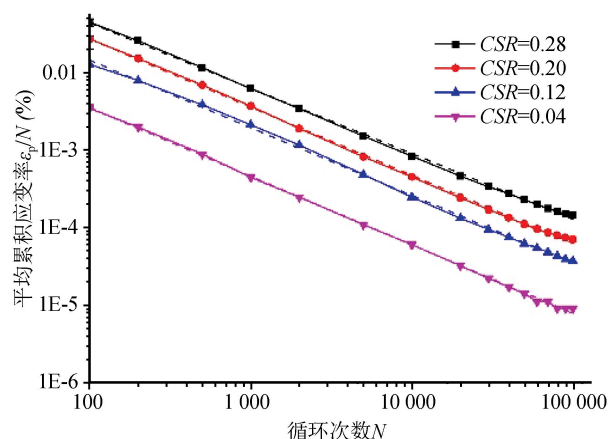


图 11 平均累积应变率随循环次数变化的拟合曲线
Fig.11 Fitting curve of average cumulative strain rate changing with cycle times

表5 线性拟合参数

Table 5 Linear fitting parameters

CSR	f	g	拟合度 R^2
0.04	-0.886	-0.677	0.999
0.12	-0.874	-0.086	0.999
0.20	-0.881	0.199	0.999
0.28	-0.845	0.335	0.999

由上述可知,这种线性关系存在于一定循环次数之后,为了方便表达,定义这一定的循环次数为参考循环次数,用 N_r 表示,本文选取 $N_r = 100$ 。

基于上述的线性关系,可以得到如下经验关系式:

$$\log\left(\frac{\epsilon_p}{N}\right) = f \log\left(\frac{N}{N_r}\right) + \log\left(\frac{\epsilon_{p,N_r}}{N_r}\right) \quad (10)$$

式中: ϵ_{p,N_r} 为参考循环次数对应的累积应变,整理上式得:

$$\log\left(\frac{\epsilon_p}{N}\right) = \log\left(\frac{\epsilon_{p,N_r}}{N_r} \cdot \left(\frac{N}{N_r}\right)^f\right) \quad (11)$$

于是有

$$\epsilon_p = \epsilon_{p,N_r} \cdot \left(\frac{N}{N_r}\right)^\lambda \quad (12)$$

式中 λ 为双对数坐标下循环 100 次后累积应变与循环次数加载直线段的斜率。

表6 公式13中参数取值

Table 6 Parameter value in formula 13

CSR	$\epsilon_{p,100}/\%$	λ
0.04	0.347 68	0.110 56
0.12	1.291 39	0.125 23
0.20	2.731 79	0.119 42
0.28	4.519 87	0.155 32

为了得到统一的计算式,分析参数 $\epsilon_{p,100}$ 和 λ 的取值,建立其随循环应力比的变化关系,如图 12 所示,两者表达式分别为:

$$\epsilon_{p,100} = a e^{bCSR} \quad (13)$$

$$\lambda = \alpha CSR^2 + \beta CSR + \gamma \quad (14)$$

式中: $a = 0.498, b = 7.954, \alpha = 0.829, \beta = -0.090, \gamma = 0.114$ 。

将式(13)和(14)代入式(12)得:

$$\epsilon_p = 0.498 e^{7.954CSR} \cdot \left(\frac{N}{N_r}\right)^{0.829CSR^2 - 0.09CSR + 0.114} \quad (15)$$

利用式(15)预测文献[12]中长期循环荷载作用下的累积应变。预测结果和试验结果对比见图 13。通过比较,上文提出的预测方程对于计算循环荷载长期作用产生的累积应变有着一定的可行性。

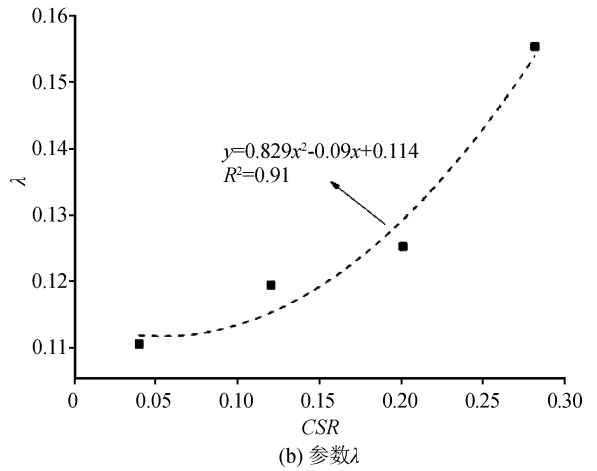
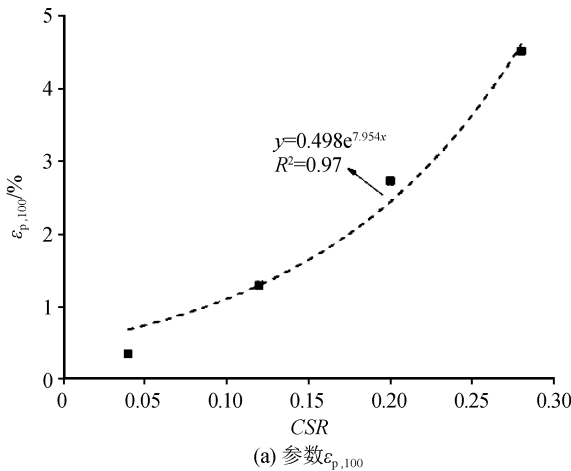


图 12 累积应变预测模型参数的确定

Fig.12 Determination of parameters of cumulative strain prediction model

3 结论

本文通过动三轴试验对赣南地区饱和红黏土进行了研究,对比分析了不同固结围压、固结应力比、循环应力比对累积变形特性的影响,主要结论如下:

(1) 在不同的固结应力比、固结围压和循环应力比下,红黏土的累积应变都随着循环次数的提高而增大,而其变化速率却随着循环次数的提高而降

低,最终呈现稳定。

(2) 在一定的循环次数之后,不同初始固结应力和初始固结应力比下累积应变与循环次数呈现明显的线性关系,固结应力比越小线性相关性越好;对于不同循环应力比来说,循环应力比越大,中后期的循环对累积应变的影响也越大,并且平均累积应变速率与循环次数之间也呈现明显的线性关系。

(3) 建立了不同循环应力比下,累积应变在长

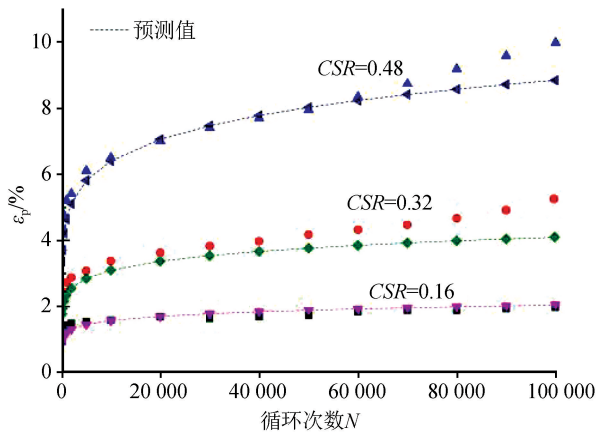


图 13 累积应变预测值和实测值对比

Fig.13 Comparison between predicted and measured values of cumulative strain

期循环荷载作用下的预测模型,并验证了该公式的可行性。

参考文献(References)

- [1] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
Editorial Board of Engineering Geology Manua Geological Engineering Handbook[M]Beijing:China Architecture & Building Press,2007.
- [2] 李剑,陈善雄,姜领发,等.应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(9):1657-1665.
LI Jian, CHEN Shanxiong, JIANG Lingfa, et al. Experimental Study on Influence of Stress History on Dynamic Properties of Remolded Red Clay[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1657-1665.
- [3] 黄质宏,朱立军,廖义玲,等.不同应力路径下红黏土的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2599-2603.
HUANG Zhihong, ZHU Lijun, LIAO Yiling, et al. Mechanical Properties of Red Clay under Different Stress Paths[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2599-2603.
- [4] GIDEL G, HORNYCH P, CHAUVIN J J, et al. A New Approach for Investigating the Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Material Using the Repeated Load Triaxial Apparatus[J].Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2001, 233: 5-21.
- [5] LI D Q, SELIG E T. Cumulative Plastic Deformation for Fine-Grained Subgrade Soils[J].Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [6] ZHANG Z L, WANG T, WU S R, et al. Dynamics Characteristic of Red Clay in a Deep-seated Landslide, Northwest China: An Experiment Study[J].Engineering Geology, 2018, 239: 254-268.

- [7] 杨爱武,赵梦生,刘琦.考虑应力路径与累积变形影响吹填土力学特性[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1284-1291.
YANG Aiwu, ZHAO Mengsheng, LIU Qi. Mechanics Characteristics of Soft Dredger Fill Considering Stress Paths and Cumulative Deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1284-1291.
- [8] 王磊,朱斌,刘向华.砂土循环累积变形规律与显式计算模型研究[J].岩土工程学报,2015,37(11):2024-2029.
WANG Lei, ZHU Bin, LAI Xianghua. Cyclic Accumulative Deformation of Sand and Its Explicit Model[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2024-2029.
- [9] 龙尧,张家生,丁建源,等.粗粒土路基循环荷载试验及累积变形模型研究[J].振动与冲击,2017,36(16):128-133,158.
LONG Yao, ZHANG Jiasheng, DING Jianyuan, et al. The Cyclic Load Experiments and an Accumulated Deformation Model for Coarse-Grained Soil Filling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 128-133, 158.
- [10] 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 Cheng, ZHOU Zhengming, ZHANG Xianwei, 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.
- [11] 瞿帅,刘维正,聂志红.长期循环荷载下人工结构性软土累积变形规律及预测模型[J].工程地质学报,2017,25(4):975-984.
QU Shuai, LIU Weizheng, NIE Zhihong. Change Law and Prediction Model for Accumulative Deformation of Artificial Structured Soft Soil under Long-Term Cyclic Loading [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 975-984.
- [12] 吴建奇,杨骁,徐旭,等.部分排水条件下饱和红黏土循环试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(7):1309-1316.
WU Jianqi, YANG Xiao, XU Xu, et al. Cyclic Triaxial Tests on Saturated Red Clay under Partially Drained Condition [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(7): 1309-1316.
- [13] 郭林,蔡袁强,王军,等.长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(12):2249-2254.
GUO Lin, CAI Yuanqiang, WANG Jun, et al. Long-Term Cyclic Strain Behavior of Wenzhou Structural Soft Clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2249-2254.
- [14] 孟晓宇,熊峰,昊望,等.循环荷载作用下江西重塑红黏土动力特性试验研究[J].科学技术与工程,2018,18(25):84-90.
MENG Xiaoyu, XIONG Feng, WU Kun, et al. Experimental Study on Dynamic Properties of Remolded Red Clay in Jiangxi under Cyclic Loading [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(25): 84-90.