

DOI: 10.11779/CJGE202209006

# 循环交通荷载作用下饱和重塑黄土变形特性研究

翁效林<sup>1</sup>, 胡继波<sup>\*1</sup>, 贾 阳<sup>2</sup>, 周尚琪<sup>1</sup>

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 河南省郑州市住房和城乡建设局, 河南 荥阳 450100)

**摘 要:** 为研究主应力轴旋转作用下饱和重塑黄土的变形规律, 借助空心圆柱扭剪仪开展了排水状态下饱和重塑黄土的循环三轴试验和循环交通荷载试验, 主要研究了主应力轴旋转对饱和重塑黄土的竖向塑性累积应变、径向塑性累积应变以及八面体塑性累积剪应变的影响。试验结果表明: ①主应力轴旋转会使土体产生塑性累积变形; 土样的竖向塑性累积应变和八面体塑性累积剪应变随循环次数增加呈对数型增长趋势, 且循环竖向应力比和循环扭剪应力比与其呈正相关; 径向塑性累积应变初期主要表现为拉应变形式, 随荷载作用次数的增加, 其值逐渐减小并向相反方向累积。②主应力轴旋转会加速相应的竖向塑性累积应变, 在其他条件一定时, 循环交通荷载作用下试样的变形量是循环三轴试验的数倍。③重塑黄土在交通荷载作用下竖向变形远远小于原状软黏土, 作为路基填筑材料具有一定的优越性。④对现有的竖向塑性累积应变计算模型进行了修正, 得到了饱和重塑黄土沉降变形的显式预测模型, 并对该模型的有效性进行了分析验证。

**关键词:** 主应力轴旋转; 循环交通荷载试验; 饱和重塑黄土; 累积应变; 沉降预测模型

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)09-1617-09

**作者简介:** 翁效林(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土性状及地下工程研究。E-mail: 49768532@qq.com。

## Deformation characteristics of saturated remolded loess under cyclic traffic loads

WENG Xiao-lin<sup>1</sup>, HU Ji-bo<sup>1</sup>, JIA Yang<sup>2</sup>, ZHOU Shang-qi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Highway Engineering for Special Regions, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Xingyang City, Henan Province, Xingyang 450100, China)

**Abstract:** To study the deformation laws of saturated remolded loess under the rotation of principal stress axis, the cyclic triaxial tests and cyclic traffic load tests on the saturated remolded loess under drainage are carried out by using the hollow cylinder torsional shear apparatus, and the effects of the rotation of the principal stress axis on the vertical plastic cumulative strain, radial plastic cumulative strain and octahedral plastic cumulative shear strain of the saturated remolded loess are mainly studied. The experimental results show that: (1) The rotation of the principal stress axis will cause the plastic cumulative deformation of soil. The vertical plastic cumulative deformation and octahedral plastic cumulative shear strain of soil exhibit a logarithmic growth trend with the increase of the cyclic times, and the cyclic vertical stress ratio and cyclic torsional shear stress ratio are positively correlated with them. At the initial stage of the plastic cumulative strain, it is mainly in the form of tensile strain. With the increase of load times, its value gradually decreases and accumulates in the opposite direction. (2) The rotation of the principal stress axis will accelerate the corresponding vertical plastic accumulated strain. When other conditions are certain, the deformation of the samples under cyclic traffic loads is several times that of cyclic triaxial tests. (3) The vertical deformation of the remolded loess under traffic loads is far less than that of undisturbed soft clay, which has certain advantages as the subgrade filling materials. (4) The existing vertical plastic cumulative strain model is modified, and an explicit prediction model for the settlement deformation of saturated remolded loess is obtained, and the validity of the model is analyzed and verified.

**Key words:** principal stress rotation; cyclic traffic load test; saturated remolded loess; accumulated plastic strain; settlement prediction model

## 0 引 言

黄土作为风成土具有较强的结构性, 结构性土具有较高的抗压和抗剪能力。但这种结构性在浸水或者

扰动作用下会发生破坏, 进而导致土的力学性质发生显

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51378004)

收稿日期: 2021-09-08

\*通信作者 (E-mail: hujibo@chd.edu.cn)

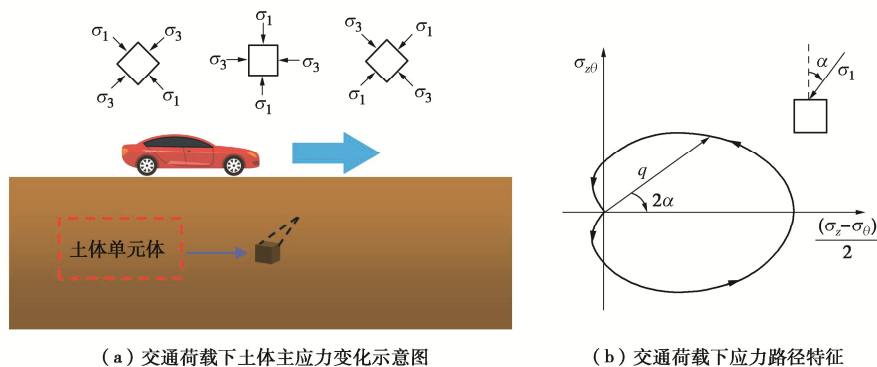


图1 交通荷载作用下土体应力变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of change of soil stress under traffic loads

著变化,如湿陷性、承载力降低和强度弱化等现象<sup>[1-2]</sup>。原状黄土经过开挖、击实等扰动后,其粒间架空孔隙结构发生破坏,孔隙被压缩,变为重塑黄土,此时原状黄土的湿陷性丧失,进而成为路用性能较好的填筑材料。随着一带一路倡议的推进,一大批交通基础设施工程建于黄土地区,交通荷载引起了黄土地基严重的永久变形,如兰新高铁黄土地基产生了较大工后不均匀沉降(最大沉降 62 mm)<sup>[3]</sup>,西宝高速公路、通黄高速公路、连云港—兰州铁路等黄土地基也出现了较大的工后不均匀沉降<sup>[4]</sup>。因此,研究循环交通荷载作用下的重塑黄土的力学性质具有重要的现实意义。

岩土工程领域内的实际工程建设经常会发生主应力轴旋转现象,尤其是在边坡、土方开挖及路基填筑等工程问题中<sup>[5]</sup>。此外,在地震、波浪、尤其是车辆交通荷载等循环荷载作用下,地基土中的应力路径发生变化。以交通荷载为例,其应力特征为主应力方向连续旋转与剪应力幅值耦合变化的心形线应力路径,车轮正下方的土体单元的主应力在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 间做连续变化,如图1所示。其中主应力轴旋转不仅产生弹性变形,也会产生部分塑性变形,这已成为业内共识<sup>[6-7]</sup>。

目前,国内外针对于主应力轴旋转的研究主要集中在砂土和软黏土方面<sup>[8-10]</sup>。沈扬等<sup>[11]</sup>依托浙江大学HCA较早地针对原状软黏土进行了一系列的主应力轴旋转试验,发现主应力轴旋转对土体孔压的积累带来显著的影响。王钰轲等<sup>[12]</sup>对饱和软黏土开展了主应力轴连续旋转试验,指出随着孔压的增加,竖向模量和剪切模量均随着循环应力比和围压的增加逐渐降低。刘家顺等<sup>[13]</sup>通过对软黏土的孔压和塑性应变的累积进行分析,得到累积塑性应变随循环剪应力比和循环动应力比的增大而增大的变化规律。扈萍等<sup>[14]</sup>对粉细砂的非共轴变形进行了细致研究,发现主应力系数和循环起始角度对粉细砂竖向应变、剪切应变及体

应变等有明显影响。Prasanna等<sup>[15]</sup>通过空心圆柱扭剪试验对砂土液化的敏感性进行了分析,结果表明液化敏感性增加可能是由于最大剪应力平面与层面的倾角等因素造成的。

黄土作为良好的路基填筑材料,在西北地区道路工程建设中起到重要作用。而目前针对于黄土路基在交通荷载作用下的研究较少。为此,本文以重塑黄土作为研究对象,借助空心圆柱扭剪仪对饱和重塑黄土在主应力轴旋转下的变形特性展开研究,以期为实际工程中黄土路基的变形控制提供科学依据。

## 1 试验基本情况

试验仪器为长安大学 GDS 空心圆柱扭剪仪(图2),该仪器主要包括围压控制系统和外力控制系统。仪器可以对试样施加独立控制的外压( $P_o$ )、内压( $P_i$ )、轴力 $W$ 和扭矩 $M_T$ ,从而实现主应力轴连续旋转等复杂条件下的试验应力路径。关于仪器的具体描述参见 Yang等<sup>[16]</sup>的研究。



图2 GDS 空心圆柱扭剪仪

Fig. 2 GDS hollow cylinder torsional shear instrument

试验所用土样为重塑黄土,土样的基本物理性质指标见表1。将原状黄土烘干、粉碎后按照一定的含水率拌合,密封至保鲜袋中18~24 h,确保含水率均匀,后将土料分层放入安装好的模具内,每装入100 g

击实一次, 最终制备完成试样<sup>[17]</sup>。试样尺寸为高度×外径×内径=200 mm×100 mm×60 mm。采用空心圆柱扭剪仪对制备好的土样进行反压饱和 (反压分别为 50, 100 和 150 kPa; 围压分别为 70, 120 和 170 kPa), 采用三级饱和法, 直至孔压系数  $B \geq 0.96$ <sup>[18]</sup>, 即可认为土样达到饱和状态, 随后进行等压固结, 保持反压不变, 同时将内压和外压增大至 250 kPa, 最终完成土样的固结。

表 1 土样物理指标					
Table 1 Physical parameters of soil samples					
含水率	密度	干密度	相对质	液限	塑限
/%	/(g·cm <sup>-3</sup> )	/(g·cm <sup>-3</sup> )	量密度	/%	/%
14.2	2.07	1.83	2.71	13.8	18.9

交通荷载作用引起地基土单元体主应力轴发生连续循环旋转, 其应力路径可简化为心形, 因此, 本试验采用动态加载模块, 对土样施加不同循环荷载从而模拟路基上方交通荷载作用。具体地, 开展了不同条件下饱和和重塑黄土的循环三轴试验和循环交通荷载试验。在循环三轴试验中忽略埋深对路基土体单元的影响, 引入了竖向循环应力比 CVSR:

$$CVSR = \sigma_z^{ampl} / 2p'_0, \tag{1}$$

式中,  $\sigma_z^{ampl}$  为循环动应力幅值,  $p'_0$  为初始有效平均应力。在循环交通荷载试验中, 忽略轴载的影响, 引入了循环扭剪应力比  $\eta$ :

$$\eta = \tau_{z\theta}^{ampl} / \sigma_z^{ampl}, \tag{2}$$

式中,  $\tau_{z\theta}^{ampl}$  为循环剪应力幅值。循环三轴试验仅从竖向循环动应力  $\sigma_z^{ampl}$  的角度出发, 反映了其对路基沉降的影响, 而循环交通荷载试验则反映了竖向循环动应力  $\sigma_z^{ampl}$  及循环剪应力  $\tau_{z\theta}^{ampl}$  两方面对路基沉降的影响。为了实现心形加载路径, 引用心形线的参数方程:

$$\left\{ \begin{aligned} X &= a[2\cos(t) - \cos(2t)] \\ Y &= a[2\sin(t) - \sin(2t)] \end{aligned} \right. \tag{3}$$

根据试验方案对其进行适当的平移变化, 就可得到本文所需的加载波形, 如图 3 所示, 其中  $\omega$  为加载频率,  $T$  为加载时间。

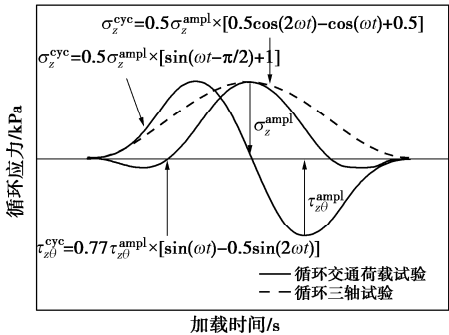


图 3 加载波形图

Fig. 3 Diagram of loading waveform

试验划分为 12 组, 根据试验影响因素的不同, 试验方案可分为 2 个系列, 分别为循环三轴试验 ( $\eta=0$ ) 和循环交通荷载试验 ( $\eta \neq 0$ )。所有试样的有效固结压力  $\sigma_3$  均为 150 kPa, 根据 ASTM 规范<sup>[19]</sup>选取试验加载频率为 2 Hz (车辆速度约 70 km/h), 循环次数达 10000 次后停止试验。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案  
Table 2 Test programs

系列 编号	试样 编号	$\sigma_z^{ampl}$ /kPa	CVSR	$\tau_{z\theta}^{ampl}$ /kPa	$\eta$
I	A1	20	0.10	0	0
	A2	30	0.15	0	0
	A3	40	0.20	0	0
II	B1	20	0.10	4	0.2
	B2	20	0.10	6	0.3
	B3	20	0.10	8	0.4
	C1	30	0.15	6	0.2
	C2	30	0.15	9	0.3
	C3	30	0.15	12	0.4
	D1	40	0.20	8	0.2
	D2	40	0.20	12	0.3
	D3	40	0.20	16	0.4

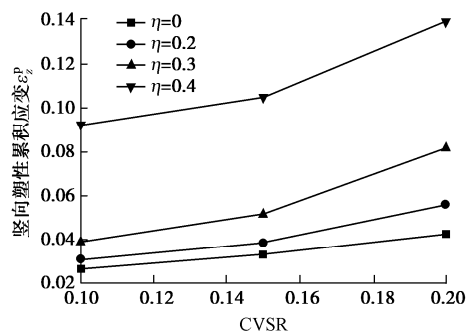
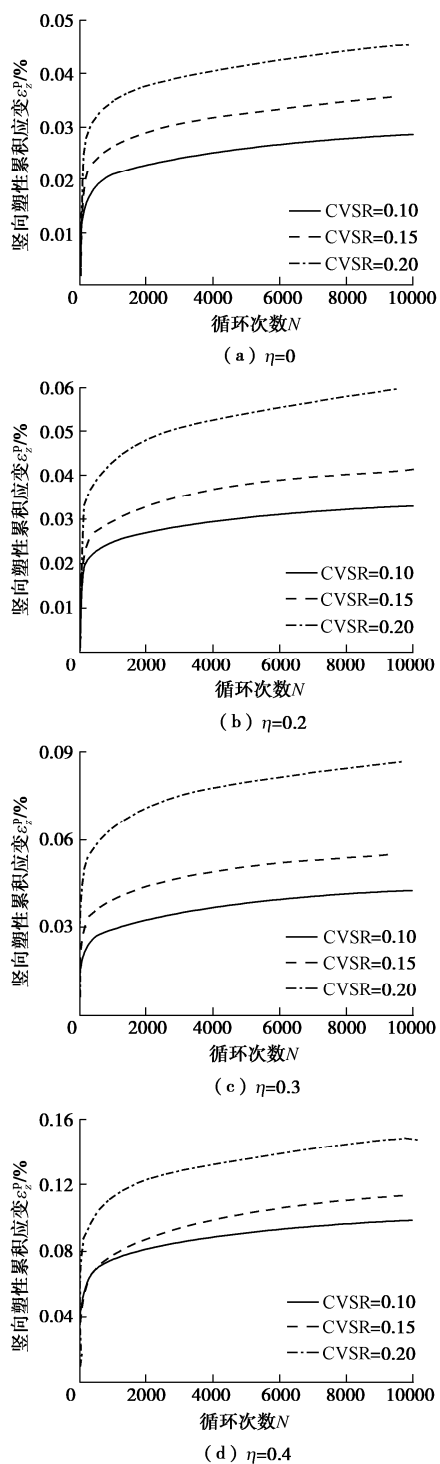
值得注意的是, 对于渗透性较低的土类, 绝大部分学者开展的循环加载试验均是在不排水条件下进行的, 原因是一般加载频率范围内排水条件下的循环加载试验无法保证试样中孔压的完全消散, 这样会造成试样内部孔压和有效应力分布不均匀, 因而一般来说排水条件下的循环加载试验不能看作为标准的单元体试验。这样的单元体试验结果是不能直接用于本构模型验证的。实际工程的排水条件可以结合有效应力模型通过边值问题进行求解, 而排水条件下的循环加载单元体试验结果可以作为边值问题的一种验证。因此, 从工程实用角度来说, 排水条件下的循环加载试验具有一定参考价值。基于上述原因本文开展的试验均在排水条件下进行。

2 试验结果与分析

2.1 竖向塑性累积应变分析

图 4 为竖向塑性累积应变  $\epsilon_z^p$  随竖向循环应力比 CVSR 变化图。从图 4 中可以看出, 两类试验中  $\epsilon_z^p$  均呈现出随循环次数的增大而增大的变化规律。在循环次数较低时,  $\epsilon_z^p$  增长速率很快, 在  $N$  达到 1000 次后,  $\epsilon_z^p$  增长逐渐变缓, 之后随循环次数的增长表现出缓慢增长的趋势, 并最终逐渐趋于平稳。这主要是由于试验初始阶段试样孔隙结构逐渐被压密, 当孔隙结构被压实至一定程度, 累积应变也逐渐趋于稳定。当循环扭剪应力比  $\eta$  一定时,  $\epsilon_z^p$  随竖向循环应力比 CVSR 的

增加而增加。而对比不同 $\eta$ 下,同一循环次数下(图4(e),以 $N=6000$ 为例)的累积应变增长速率可发现,循环三轴试验中 $\varepsilon_z^p$ 随CVSR的增大速率接近于线性,而循环交通荷载试验呈现出非线性增长的趋势,这表明循环交通荷载对土体的竖向变形有着显著的影响。其原因在于即使仅有主应力轴方向的循环变化,土体也会产生相应的累积应变。此外, $\varepsilon_z^p$ 随循环次数 $N$ 的变化趋势与应力主轴是否发生旋转无关,其主要原因可能是土样压实度的影响。



(e) 竖向塑性累积应变( $N=6000$ )与循环竖向应力比CVSR关系

图4 竖向塑性累积应变随竖向循环应力比变化

Fig. 4 Variation of vertical plastic accumulated strain with cyclic vertical stress ratio

图5为竖向塑性累积应变 $\varepsilon_z^p$ 随循环扭剪应力比 $\eta$ 的变化图。对比不同循环扭剪应力比 $\eta$ 试验结果,可发现应力主轴的旋转会加速产生相应的竖向塑性累积应变。例如当 $N=10000$ , CVSR=0.2时,循环三轴试

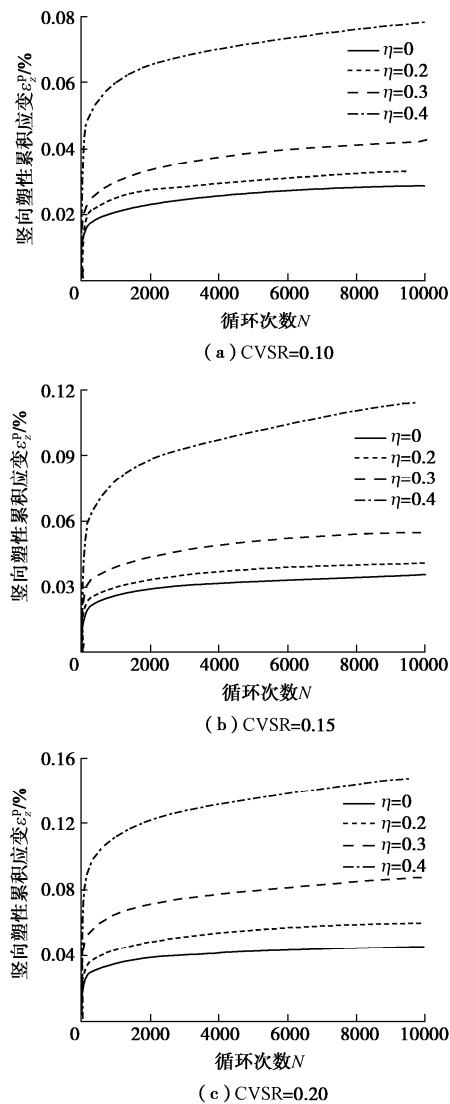


图5 竖向塑性累积应变随循环扭剪应力比变化

Fig. 5 Variation of vertical accumulated strain with cyclic torsional shear ratio

验的  $\varepsilon_z^p$  为 0.0442, 循环交通荷载试验下,  $\eta=0.2, 0.3$  和 0.4 时,  $\varepsilon_z^p$  分别为 0.0593, 0.0813 和 0.1437, 为循环三轴试验的 1.34 倍, 1.84 倍和 3.25 倍。此外, 结合图 4 和图 5, 可发现循环竖向应力比和循环扭剪应力比的增加均会引起竖向塑性累积应变的增加, 且当循环次数达到一定时 ( $N \geq 1000$ ),  $\varepsilon_z^p$  逐渐趋于稳定。

## 2.2 径向与环向塑性累积应变分析

为反映不同循环应力比下, 径向塑性累积应变随循环加载次数的变化规律, 本文以  $\eta=0.3$  和  $\text{CVSR}=0.15$  为例进行分析。图 6 为径向塑性累积应变  $\varepsilon_r^p$  随不同循环应力比的变化规律。由于等压固结时可能已产生部分径向应变, 在此均取起始径向应变为参考点进行分析。从图 6 中可以看出, 径向塑性累积应变方向为负, 说明起始径向受力状态为拉应力作用, 在拉应力作用下试样短时间内产生很大的  $\varepsilon_r^p$ , 随着循环次数的增加, 在达到某一值后,  $\varepsilon_r^p$  开始反向不断累积。在  $\eta$  一定时, 随着  $\text{CVSR}$  的增大,  $\varepsilon_r^p$  产生的径向拉应变逐渐增大, 同时, 在  $\text{CVSR}$  一定时, 不同  $\eta$  下, 径向累积应变随循环次数的变化规律总体呈现出类似于不同  $\text{CVSR}$  下径向累积应变随循环次数的变化规律, 即呈现出先快速降低后缓慢上升趋势。由此可推断出, 加载初期试样受径向拉应力影响, 快速发生变形, 随循环次数的增加,  $\varepsilon_r^p$  的增加速率逐渐减小, 当达到一定循环次数时, 径向应变达到了最大值, 此时竖向循环应力产生的拉应力与循环扭剪应力产生的压应力相等, 随后继续加载时, 径向拉应力小于径向压应力, 从而试样径向累积应变趋于减小。

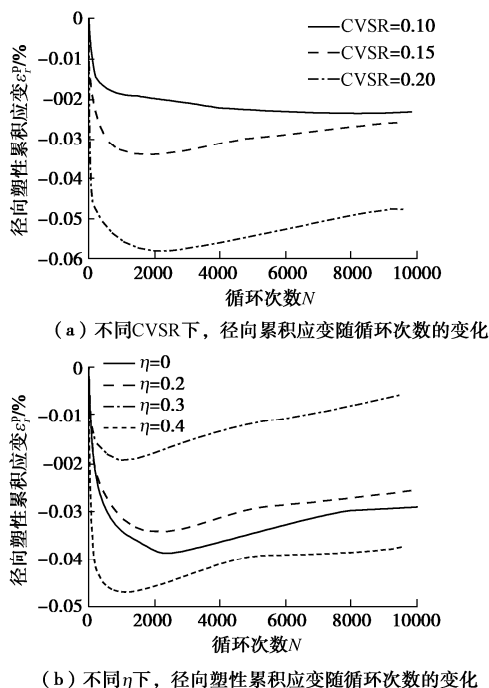


图 6 径向累积应变随 CVSR 和  $\eta$  的变化

Fig. 6 Variation of radial accumulated strain with CVSR and  $\eta$

在本文的试验过程中, 内外围压在数值上始终相等, 此时根据 Hight 等<sup>[20]</sup>提出的薄壁试样计算公式可知, 环向应力和径向应力数值相等 ( $\sigma_r = \sigma_\theta$ ), 因此径向塑性累积应变  $\sigma_r^p$  和环向塑性累积应变  $\sigma_\theta^p$  也近似相等。为验证上述猜测, 以  $\eta=0.3$  时环向塑性累积应变随不同竖向循环应力比的变化规律(如图 7 所示)为例进行试验验证。对比图 7 与图 6 (a) 可知, 在相同应力比条件下,  $\sigma_r^p$  和  $\sigma_\theta^p$  在数值上近似相等。这与 Cai 等<sup>[21]</sup>对砂土进行的围压恒定的定向剪切试验得到的结论相似。

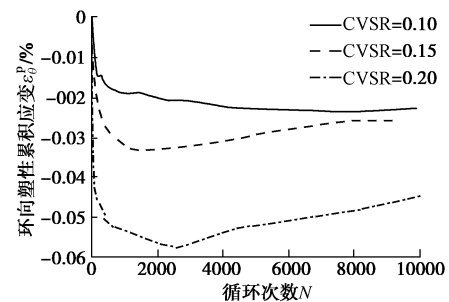


图 7 环向塑性累积应变随 CVSR 的变化

Fig. 7 Variation of radial accumulated strain with CVSR

## 2.3 累积塑性体应变分析

图 8 为累积塑性体应变  $\varepsilon_v^p$  随循环扭剪应力比  $\eta$  的变化图。由图 8 可知, 在循环次数较低时,  $\varepsilon_v^p$  为负值, 在循环次数达到某一值后,  $\varepsilon_v^p$  开始逐渐由负转正, 呈现出随循环次数的增大而增大的变化规律。在试验过程中, 试样在扭矩  $M_T$  作用下径向和环向上发生剪缩现象, 而在轴力  $W$  作用下径向和环向上会发生剪胀现象, 竖向呈现剪缩现象。试样的体应变计算公式如下所示:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta, \quad (4)$$

在循环次数较低时, 扭剪次数较低, 试样在径向和环向上的变形主要受轴力作用影响, 试样在径向和环向上所受的拉应力大于竖向所受的压应力, 试样整体受拉, 体应变为负值。随着循环次数的增加, 试样在循环扭剪应力的作用下, 试样在径向和环向上出现径缩, 试样整体受压, 体应变为正值。同时由 2.1 节可知, 主应力轴连续旋转会加速竖向应变的累积, 因此随着循环次数的增加, 试样体应变逐渐增大, 出现由负转正的变化规律。

## 2.4 八面体塑性累积剪应变分析

图 9 反映了八面体应变空间下, 剪应变随循环扭剪比  $\eta$  变化规律。由图 9 可知,  $\gamma_{oct}^p$  随循环次数的增大而增大, 且表现为对数型的增长态势。从图 9 中可以看出, 循环三轴试验和循环扭剪试验均呈现出随循

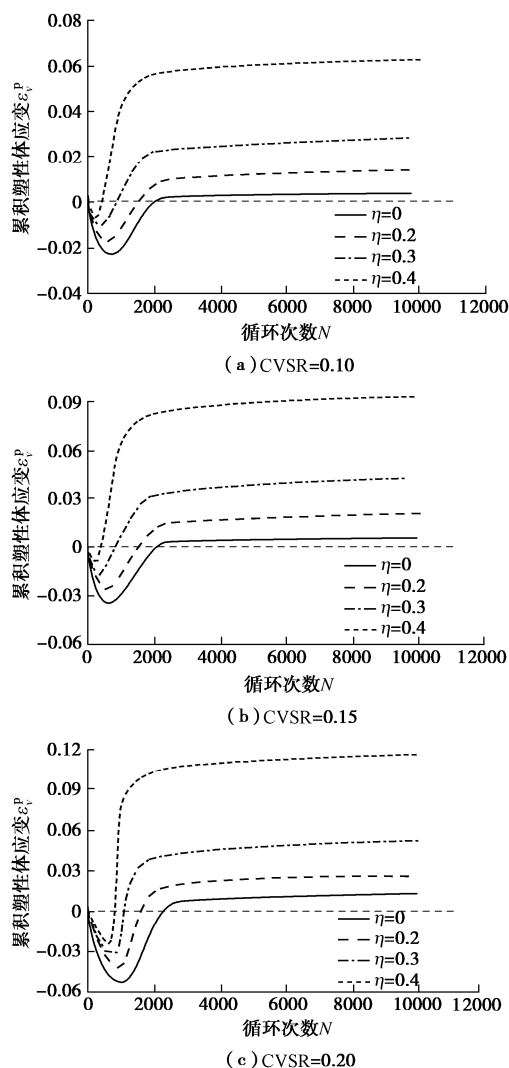


图8 累积塑性体应变随循环扭剪应力比变化

Fig. 8 Variation of cumulative plastic volumetric strain with cyclic torsional shear ratio

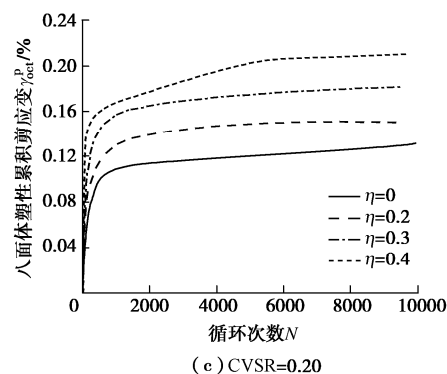
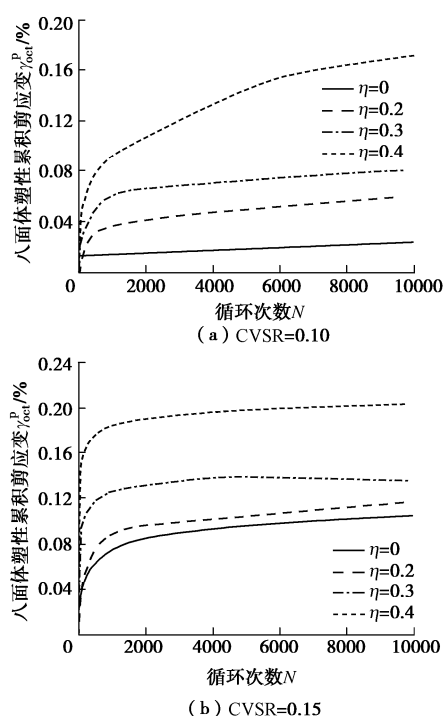


图9 八面体塑性累积剪应变随循环扭剪应力比变化

Fig. 9 Variation of vertical accumulated strain with cyclic torsional shear ratio

环次数的增大而增大的变化规律。同时,随着 $\eta$ 的增大, $\gamma_{oct}^p$ 也相应增大。例如当 CVSR=0.2 时,试验结束时,循环三轴试验 $\gamma_{oct}^p$ 为 0.128%, $\eta=0.2, 0.3$  和 0.4 时, $\gamma_{oct}^p$  分别为 0.137%, 0.174% 和 0.208%, 分别是同条件下循环三轴试验的 1.07 倍, 1.36 倍, 1.63 倍。这说明应力主轴的旋转会加速八面体剪应变的累积,随着 $\eta$ 的增大,土样的 $\gamma_{oct}^p$ 也增大。对比分析图 9,可发现在 $\eta$ 不变时, $\gamma_{oct}^p$ 随 CVSR 增大也出现相应的增大,但当 $\eta$ 达到某一值(文中为 $\eta=0.4$ )且循环次数较大时,试样 CVSR 的增加不会引起 $\gamma_{oct}^p$ 发生明显变化。这表明 $\eta$ 较大时, $\gamma_{oct}^p$ 的收敛主要是由于循环扭剪应力所产生的,而不依赖于竖向循环应力比 CVSR。

## 2.5 塑性累积应变对比分析

由于环向塑性累积应变与径向塑性累积应变数值近似相等,竖向塑性累积应变与累积塑性体应变变化规律也大体相似,在相同应力条件下,本文仅对竖向塑性累积应变、径向塑性累积应变和八面体塑性累积剪应变的发展规律进行对比,以加载结束时( $N=10000$ 次)的累积应变作为数据来源,对 CVSR=0.15 和 $\eta=0.3$  时 3 种应变形式进行了分析对比,如图 10 所示。从结果看,对竖向累积应变和八面体累积应变而言,应变终值与循环扭剪应力比 $\eta$ 和循环竖向应力比 CVSR 均呈正相关。且随不同应力比的增长趋势基本一致。但当 CVSR 一定时,径向累积应变终值随 $\eta$ 增大在 0.3 处波动,可认为其和扭剪应力比的相关性不显著;当 $\eta$ 一定时,径向累积应变终值随 CVSR 增大而逐渐减小,因此,可认为其和竖向循环应力比呈负相关。此外,循环交通荷载试验( $\eta \neq 0$ )中累积变形大于循环三轴试验( $\eta=0$ )累积变形,其中竖向塑性累积应变>八面体塑性累积应变>径向塑性累积应变,试验结果进一步表明了主应力轴旋转对路基稳定性有着显著的影响。

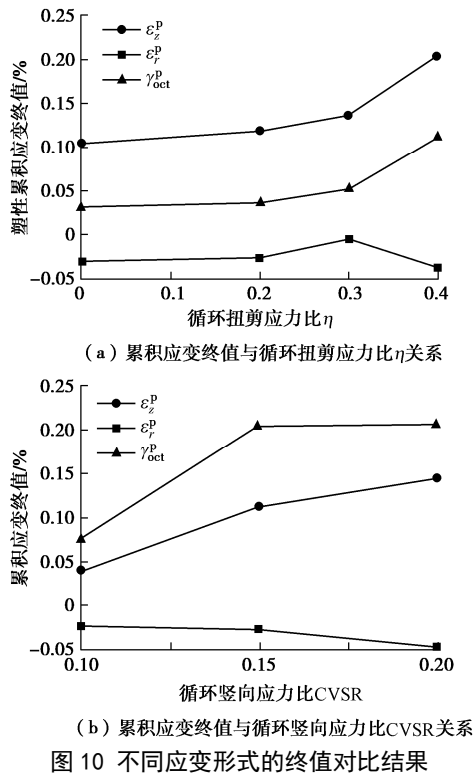


图 10 不同应变形式的终值对比结果

Fig. 10 Comparative results of final values in different strain forms

## 2.6 土类对比分析

前文已对循环交通荷载作用下饱和重塑黄土的变形特性进行了详细的分析, 为更好地反映重塑黄土在实际工程中的应用价值, 将本文试验结果与郭林<sup>[22]</sup>的饱和原状软黏土试验结果进行比较。图 11 为相同 CVSR 和  $\eta$  情况下, 重塑黄土与原状软黏土竖向塑性累积应变对比图。

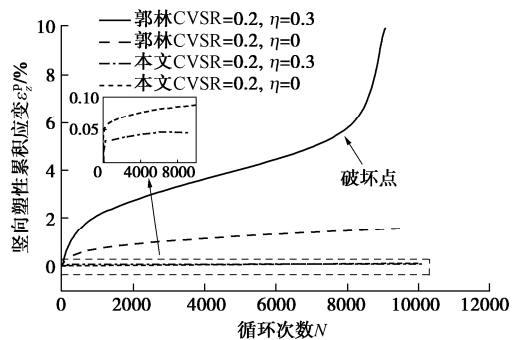


图 11 重塑黄土与原状软黏土变形对比

Fig. 11 Comparison of deformation between remolded loess and undisturbed soft clay

由图 11 可知, 原状软黏土在未发生破坏时, 其竖向塑性累积应变约为重塑黄土的 10 倍, 在发生破坏时, 其竖向塑性累积应变约为重塑黄土的 100 倍, 这是因为相较于原状软黏土, 重塑黄土由于击实作用, 其压缩模量远远大于原状软黏土, 因此原状软黏土在外力扰动作用下, 更易发生较大变形。此外, 值得注意的是当 CVSR=0.2,  $\eta=0.3$ , 循环次数约为 8000 时,

原状软黏土的竖向塑性累积应变发生突变, 土体发生了破坏, 而重塑黄土在本次试验中未发生破坏。这进一步表明重塑黄土相较于原状软黏土作为路基填筑材料的优越性。

## 3 竖向塑性累积变形计算模型

### 3.1 竖向塑性累积变形计算模型的建立

基于上述所获得的空心扭剪试验结果, 本文在 Monismith 模型<sup>[23]</sup>的基础上提出了适用于重塑饱和黄土路基竖向应变累积的显式模型, Monismith 模型如下式:

$$\varepsilon_z^p = \alpha N^\beta, \quad (5)$$

式中,  $N$  为循环次数,  $\alpha$  和  $\beta$  为拟合参数。

本文在此基础上, 引入循环扭剪应力比  $\eta$  和循环竖向应力比 CVSR, 从而建立较为完善的黄土路基沉降预测模型。通过对试验数据的进一步处理, 发现试样在经过 200 次循环后, 竖向塑性累积应变  $\lg(\varepsilon_z^p)$  与循环次数  $\lg(N)$  基本呈线性变化关系, 如图 12 所示。所以根据式 (4) 提出如下假设:

$$\lg(\varepsilon_z^p) = k[\lg(N) - \lg(200)] + \lg(\varepsilon_{z,200}^p), \quad (6)$$

式中,  $k$  为拟合曲线斜率,  $\varepsilon_{z,200}^p$  为第 200 次循环后试样的竖向塑性累积应变。

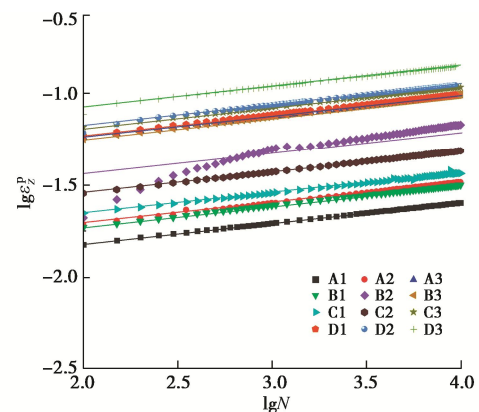


图 12 试样竖向塑性累积应变与循环次数曲线

Fig. 12 Curves of vertical plastic cumulative strain and cycle times of samples

对比图 12 中的拟合曲线可发现, 线性拟合后, 拟合线斜率基本保持不变, 由此可说明  $k$  与循环应力比和循环竖向应力比均无相关性。因此,  $k$  值取 12 组数据的加权平均值, 即  $k=0.112$ 。而截距  $\lg(\varepsilon_{z,200}^p)$  随 CVSR 和  $\eta$  具有显著的相关性。为此, 本文提出以 CVSR 和  $\eta$  为自变量,  $\lg(\varepsilon_{z,200}^p)$  为因变量, 采用 Origin 软件进行二元非线性拟合, 拟合函数采用 Poly 2D 函数, 具体数学模型表达式为

$$\varepsilon_{z,200}^p = m + a \times \text{CVSR} + b \times \eta + c \times (\text{CVSR})^2 + d \times \eta^2 + n \times \text{CVSR} \times \eta. \quad (7)$$

基于循环次数为 200 时的竖向塑性累积应变的试

验数据以及 Poly 2D 函数开展二元非线性拟合。求解得出其中的参数  $m$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $n$  分别为 0.049, -0.650, -0.051, 3.050, 0.367 和 0.036。将式 (7) 带入式 (6) 中, 进而得到完整的饱和重塑黄土路基沉降的显式预测模型, 即

$$\varepsilon_z^p = \left( \frac{N}{200} \right)^{0.112} \times (0.049 - 0.65\text{CVSR} - 0.051\eta + 3.05 \times \text{CVSR}^2 + 0.367 \times \eta^2 + 0.036\eta \times \text{CVSR}) \quad (8)$$

### 3.2 竖向塑性累积变形计算模型的验证

为验证上述预测模型的准确性, 本文设置了一组与试验方案相同的平行试验, 并将预测值与其试验结果进行了对比验证, 结果如图 13 所示。

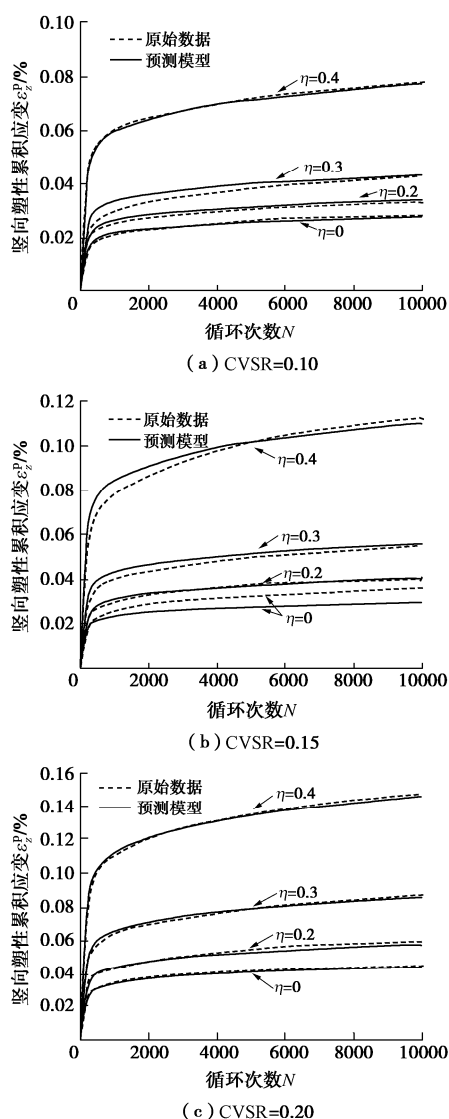


图 13 计算模型与试验数据对比图

Fig. 13 Comparison between calculated results and experimental data

从图 13 可以看出, 通过式 (8) 得到的竖向塑性累积应变与通过扭剪试验得到的累积应变基本吻合。计算模型对不同循环扭剪应力比  $\eta$  和循环竖向应力比

CVSR 均有一定的预测效果。因此, 该计算模型能较好地适用于重塑饱和黄土的循环三轴试验累积应变的预测, 同时通过引入 CVSR 和  $\eta$  两个系数也能较好地反映主应力轴旋转对竖向塑性累积应变产生的影响。

## 4 结 论

通过开展不同循环应力比下重塑黄土的空心圆柱扭剪试验, 主要针对循环扭剪应力比和循环竖向应力比对试样竖向应变、径向应变以及八面体剪应变的影响展开分析, 并与饱和软黏土的变形特性进行了比较, 且基于试验结果建立了黄土路基沉降变形的显式预测模型, 最终通过已有结果与试验结果对比验证了模型的有效性。主要结论如下:

(1) 土样的竖向塑性累积应变和八面体剪应变随循环次数呈对数型增长趋势, 在循环次数达到 1000 次时, 应变增长速率趋于平缓。

(2) 试样竖向塑性累积变形增长速率随循环次数变化的变化规律与主应力轴是否发生旋转无关, 但应力主轴的旋转会加速累积沉降变形的产生, 循环交通荷载对路基的沉降变形有着显著的影响。

(3) 对竖向累积应变和八面体累积应变而言, 累积应变终值与循环扭剪应力比  $\eta$  和循环竖向应力比 CVSR 均呈正相关。对径向累积应变而言, 累积应变终值主要受 CVSR 影响, 与  $\eta$  相关性并不显著。

(4) 经试验数据验证, 建立的同时考虑 CVSR 和  $\eta$  影响的竖向塑性累积应变的计算模型适用性良好。

### 参考文献:

- [1] LI J, SHAO S J, SHAO S. Collapsible characteristics of loess tunnel site and their effects on tunnel structure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **83**: 509 - 519.
- [2] WENG X L, SUN Y F, ZHANG Y W, et al. Physical modeling of wetting-induced collapse of shield tunneling in loess strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **90**: 208 - 219.
- [3] 王星博, 于洪钦, 王财平, 等. 西部寒区高速铁路路基沉降整治措施研究[J]. 路基工程, 2017(5): 53 - 58. (WANG Xing-bo, YU Hong-qin, WANG Cai-ping, et al. Study on control measures for subgrade settlement of high-speed railway in cold regions of Western China[J]. Subgrade Engineering, 2017(5): 53 - 58. (in Chinese))
- [4] 谷天峰. 郑西客运专线黄土地基振(震)陷研究[D]. 西安: 西北大学, 2007. (GU Tian-feng. Study on Loess Seismic Subsidence and Dynamic Settlement of Roadbed of Zhengzhou-Xi'an Passenger Express Railway[D]. Xi'an:

- Northwest University, 2007. (in Chinese))
- [5] ZDRAVKOVIĆ L, POTTS D M, HIGHT D W. The effect of strength anisotropy on the behaviour of embankments on soft ground[J]. *Géotechnique*, 2002, **52**(6): 447 – 457.
- [6] SIVATHAYALAN S, VAID Y P. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**(1): 63 – 76.
- [7] TOWHATA I, ISHIHARA K. Undrained strength of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes[J]. *Soils and Foundations*, 1985, **25**(2): 135 – 147.
- [8] VAID Y P, A S Y, HOU E H, et al. Generalized stress-path-dependent soil behaviour with a new hollow cylinder torsional apparatus[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, **27**(5): 601 – 616.
- [9] 熊 焕, 郭 林, 蔡袁强. 交通荷载应力路径下砂土地基变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(4): 662 – 669. (XIONG Huan, GUO Lin, CAI Yuan-qiang. Deformation behaviors of sandy subgrade soil under traffic load-induced stress path[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(4): 662 – 669. (in Chinese))
- [10] 钱建固, 杜子博. 纯主应力轴旋转下饱和软黏土的循环弱化及非共轴性[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(8): 1381 – 1390. (QIAN Jian-gu, DU Zi-bo. Cyclic degradation and non-coaxiality of saturated soft clay subjected to pure rotation of principal stress axis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(8): 1381 – 1390. (in Chinese))
- [11] 沈 扬, 周 建, 张金良, 等. 考虑主应力方向变化的原状黏土强度及超静孔压特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(6): 843 – 847. (SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Research on strength and pore pressure of intact clay considering variation of principal stress direction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(6): 843 – 847. (in Chinese))
- [12] 王钰轲, 万永帅, 方宏远, 等. 圆形应力路径下软黏土的动力特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(5): 1643 – 1652. (WANG Yu-ke, WAN Yong-shuai, FANG Hong-yuan, et al. Experimental study of cyclic behavior of soft clay under circle stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(5): 1643 – 1652. (in Chinese))
- [13] 刘家顺, 张向东, 孙嘉宝, 等. 主应力轴旋转下  $K_0$  固结饱和粉质黏土孔压及变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(8): 2787 – 2794, 2804. (LIU Jia-shun, ZHANG Xiang-dong, SUN Jia-bao, et al. Experimental study on the pore pressure and deformation of saturated silty clay under  $K_0$  consolidation and principal stress axis rotation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(8): 2787 – 2794, 2804. (in Chinese))
- [14] 扈 萍, 魏 超, 杨令强, 等. 主应力轴往复循环旋转下砂土的变形特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, **14**(4): 955 – 961. (HU Ping, WEI Chao, YANG Ling-qiang, et al. Deformation behavior of sands under reciprocating cyclic principal stress rotation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, **14**(4): 955 – 961. (in Chinese))
- [15] PRASANNA R, SINTHUJAN N, SIVATHAYALAN S. Effects of initial direction and subsequent rotation of principal stresses on liquefaction potential of loose sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2020, **146**(3): 04019130.
- [16] YANG Z X, LI X S, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. *Géotechnique*, 2007, **57**(4): 371 – 384.
- [17] 贾 阳. 循环交通荷载下饱和重塑黄土应变及动力特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019. (JIA Yang. Study on Strain and Dynamic Characteristics of Saturated Remoulded Loess under Cyclic Traffic Load[D]. Xi'an: Changan University, 2019. (in Chinese))
- [18] 谌文武, 刘 伟, 王 娟, 等. 黄土饱和度与  $B$  值关系试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(3): 834 – 842. (CHEN Wen-wu, LIU Wei, WANG Juan, et al. Relationship between saturation degree and  $B$  value for loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(3): 834 – 842. (in Chinese))
- [19] ASTM. Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil[S]. 2013.
- [20] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. *Géotechnique*, 1983, **33**(4): 355 – 383.
- [21] CAI Y Q, GU C, WANG J, et al. One-way cyclic triaxial behavior of saturated clay: comparison between constant and variable confining pressure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(5): 797 – 809.
- [22] 郭 林. 复杂应力路径下饱和软黏土静动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (GUO Lin. Experimental Study on the Static and Cyclic Behavior of Saturated Soft Clay under Complex Stress Path[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [23] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. *Transportation Research Record*, 1975(537): 1 – 17.