

## 分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

张 振, 陈 勇, 杨天亮, 叶观宝, 郑文强

### An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

ZHANG Zhen, CHEN Yong, YANG Tianliang, YE Guanbao, and ZHENG Wenqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007042>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 尺寸和加载速率对冻结水泥土单轴压缩影响

Effect of size and loading rate on the uniaxial compression characteristics of frozen cement soil

陈鑫, 张泽, 李东庆 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 74-82

#### 单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141

#### 非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

#### 循环动荷载下下伏空洞路面塌陷的模型试验研究

Model tests of road subsidence progress with underground cavities caused by cyclic dynamic load

高程鹏 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 70-77

#### 水泥改良黄土路基动力稳定性评价参数试验研究

An experimental study of the evaluation parameters of dynamic stability of the cement-improved loess subgrade

张沛云, 马学宁 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 141-141

#### 高含盐水泥土的力学特性及微观结构研究

Mechanical characteristics and microstructure of salt-rich cement-soil

邢皓枫, 张好, 李浩铭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 102-109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007042

# 分级循环动荷载下水泥土动力特性试验研究

张 振<sup>1,2</sup>, 陈 勇<sup>1,2</sup>, 杨天亮<sup>3,4</sup>, 叶观宝<sup>1,2</sup>, 郑文强<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海市地质调查研究院, 上海 200072; 4. 自然资源部地面沉降监测与防治重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 随着车辆载重的变化, 其荷载幅值也会随之变化。然而, 已有的研究大多关注恒定动荷载下水泥土动力特性, 对分级循环荷载作用下水泥土的动态特性研究较少。利用 GDS 动三轴仪, 开展一系列水泥土动三轴试验, 探讨分级荷载条件下静偏应力和围压等因素对水泥土动力特性的影响。试验结果表明: 水泥土的轴向塑性应变随着围压和静偏应力比的增加而增加。水泥土轴向应变在 0.1% ~ 0.5% 范围, 其应变发展属于稳定型, 分级加卸载对应变发展过程影响较大, 对最终应变影响较小。建立了考虑水泥土加卸载条件、围压和静偏应力比的塑性应变的经验模型, 分级卸载的相关系数大于 0.95, 而分级加载的相关系数在 0.8 ~ 0.9 之间。分级卸载时, 第一级荷载对应变发展起主导作用, 而分级加载时, 最大动应力比无法主导前几级荷载较小时的应变发展。在分级加卸载条件下, 水泥土的骨干曲线表现为 2 种模式: 上升型和下降型, 可将其简化为多段直线, 利用建立的累积塑性应变计算方法, 提出了确定多段直线分界点的方法, 并验证了其可行性。

**关键词:** 分级循环荷载; 动三轴; 水泥土; 塑性应变; 骨干曲线; 经验模型

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0089-08

## An experimental study of the dynamic characteristics of cement soils subjected to staged cyclic loading

ZHANG Zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Yong<sup>1,2</sup>, YANG Tianliang<sup>3,4</sup>, YE Guanbao<sup>1,2</sup>, ZHENG Wenqiang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China; 4. Key Laboratory of Land Subsidence Monitoring and Prevention, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** With the change in vehicle loading, the load amplitude will also change. However, most of the existing studies focused on the dynamic characteristics of cement soil under the constant dynamic loading, and the dynamic characteristics of cement soil under staged cyclic loading were seldom examined. Using the GDS dynamic triaxial apparatus, a series of dynamic triaxial tests of cement soil are carried out to investigate the influence of static deviator stress and confining stress on the dynamic characteristics of cement soil. The results show that the axial plastic strain of cement soil increases with the increasing confining stress and static deviator stress ratio. The axial strain of cement soil is in the range of 0.1% ~ 0.5%, and its strain development belongs to a stable type. The staged loading and unloading have a great influence on the development process of the plastic strain of the cement soil,

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772281; 41972272)

第一作者: 张振(1984-), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事软基处理与教学科研工作。E-mail: zhenzhang@tongji.edu.cn

通讯作者: 叶观宝(1964-), 男, 工学博士, 教授, 主要从事软土地基处理技术及理论研究。E-mail: ygb1030@126.com

but have little influence on the ultimate strains. The empirical model of plastic strain considering loading and unloading conditions, confining stress and static deviator stress ratio is established. The correlation coefficient of staged unloading is greater than 0.95, while that of staged loading is between 0.8 and 0.9. The results show that the first stage load plays a leading role in the strain development, while the maximum dynamic stress ratio cannot dominate the strain development when the first stage load is small. Under the condition of staged loading and unloading, the backbone curve of the cement soil shows two modes: ascending type and descending type, which can be simplified as a multi-segment straight line. Based on the established cumulative plastic strain calculation method, a method to determine the dividing point of the multi segment straight line is proposed, and its feasibility is also verified. The research results lay a foundation for systematic analyses of the dynamic mechanical properties of cement soil under traffic loading.

**Keywords:** staged cyclic loading; dynamic triaxial tests; cement soil; plastic strain; backbone curve; empirical model

随着我国工业化和城市化的快速发展,一些基础设施建设(如公路、铁路)不得不穿越地质条件较差的软土地基,特别是在沿江、沿海及沿湖地区。水泥搅拌桩由于其施工高效、加固效果好和经济性等特点,广泛应用于软土地基加固工程中<sup>[1]</sup>。由于路基要承受长期往复交通荷载,因此,水泥土的动力特性也备受关注。Tika 等<sup>[2]</sup>、Pantazopoulos 等<sup>[3]</sup>采用共振柱试验研究了在小应变范围内水泥土动态模量变化规律。张敏霞等<sup>[4]</sup>基于水泥土疲劳荷载试验,提出了水泥土应力空间的疲劳破坏准则,建立了关于振动次数的幂函数形式疲劳寿命模型。Ma 等<sup>[5]</sup>、唐朝生等<sup>[6]</sup>、鹿群等<sup>[7]</sup>及王闵闵等<sup>[8]</sup>研究了掺入纤维对水泥土静动力特性的改善作用。王军等<sup>[9]</sup>基于应变控制下水泥土的动静力三轴试验,发现掺入比决定水泥土应力应变关系曲线的软化或硬化模式。宁宝宽等<sup>[10]</sup>采用模拟试验的方法探讨了水泥土在各种腐蚀环境中的力学特性。然而,目前的研究大多关注在恒定动荷载下的水泥土动力特性。交通荷载随着车辆载重的变化,其荷载幅值也会随之变化<sup>[11-12]</sup>。目前对分级循环荷载作用下水泥土的动态特性研究较少。

本文开展一系列水泥土动三轴试验,探讨分级荷载条件下静偏应力和围压等因素对水泥土动力特性的影响,建立水泥土累积塑性应变分析模型和分级加卸载条件下水泥土的动力特性骨干曲线模型。

## 1 试样制备与试验方案

### 1.1 试验材料

本文试验用土取自上海第④层淤泥质土,土体的基本物理力学参数如下:密度为  $1.66 \text{ g/cm}^3$ ,比重为

2.74,含水量为 50%,液限为 43.5%,塑限为 23.2%,渗透系数为  $2.97 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ,压缩模量为 2.04 MPa。水泥采用 325#普通硅酸盐水泥,水采用自来水。

### 1.2 试样的制作与养护

试验前将土碾碎并风干,过 2 mm 筛,作为试验用土。按水泥掺入比 10%,将水泥和试验用土粉均匀拌和。按照水灰比 1.0 以及恢复土体天然含水量,计算加入水的质量。将混合料和水用搅拌机拌合 10 min。将拌合后的浆液灌入模具中,模具内直径为 39.1 mm、高 80.0 mm。为保证试样的密实性,将浆液分批灌入模具,并在震动台上振动到表面有些许浆液溢出,然后将表面抹平并编号,24 h 脱模后放入标准养护室中养护 60 d。水泥土立方体 60 d 无侧限抗压强度约为 1 MPa。

### 1.3 试验方案

三轴试验采用英国 GDS 动三轴仪。加载形式分为分级加载和分级卸载:分级加载的动应力比共分 5 级,每级循环 2 500 次,依次动应力比为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45;分级卸载动应力比次序与之相反。根据交通荷载的特点<sup>[13]</sup>,试验的加载频率取为 1 Hz。加载示意图如图 1 所示。围压采用 40, 60, 80 kPa。试验方案见表 1 所示。施加的动应力采用半正弦波形:

$$F(t) = 2\sigma_3(SDR + CSR|\sin(\omega t)|) \quad (1a)$$

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma_3}, SDR = \frac{\sigma_s}{2\sigma_3} \quad (1b)$$

式中:  $\sigma_3$ ——固结围压;

$\sigma_d$ ——轴向动应力;

$\sigma_s$ ——静偏应力;

$\omega$ ——振动角频率;

$t$ ——加载时间;  
 $CSR$ ——动应力比;  
 $SDR$ ——静偏应力比。

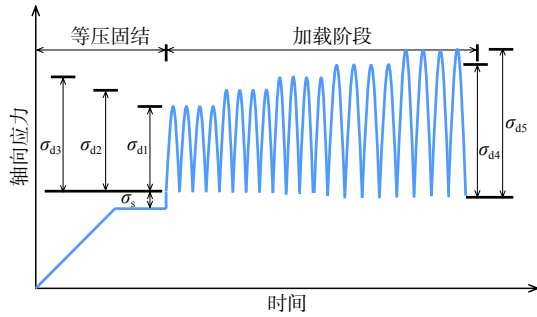


图 1 分级循环加载示意图

Fig. 1 Schematic diagram of staged cyclic loading

表 1 水泥土动三轴试验方案

Table 1 Dynamic triaxial test scheme of cement soil

试验编号	围压/kPa	加载方式	静偏应力比
D1	40	分级加载	0.00
D2	60	分级加载	0.00
D3	80	分级加载	0.00
D4	40	分级卸载	0.00
D5	60	分级卸载	0.00
D6	80	分级卸载	0.00
D7	80	分级加载	0.15
D8	80	分级加载	0.20
D9	80	分级加载	0.25
D10	80	分级卸载	0.15
D11	80	分级卸载	0.20
D12	80	分级卸载	0.25

## 2 水泥土塑性应变结果与分析

### 2.1 围压对水泥土塑性应变的影响

图 2 为分级加卸载条件下, 不同围压下水泥土的塑性应变随循环振次变化曲线。由图 2 可知, 无论是分级加载还是分级卸载, 塑性应变均随着围压的增加而显著增加。围压从 40 kPa 增至 80 kPa: 分级加载时, 水泥土试样的最终塑性应变从 0.228% 增加至 0.336%; 分级卸载时, 最终塑性应变从 0.232% 增加至 0.340%。

表 2 为分级加卸载时, 各级荷载加载结束时的累积塑性应变。由表 2 可知, 在不同围压下, 动应力的加载方式影响轴向塑性应变的发展过程, 而对最终应变影响较小。分级卸载中, 初始动应力比即最大的一级动应力比对水泥土的最终应变起主导作用。例如, 分级卸载时, 围压 40, 60, 80 kPa 时, 动应力比为 0.45 时的塑性应变分别占到了最终塑性应变的 87.5%、91.1%、91.2%。

由于水泥土在不同的应变范围下会表现出不同的静动力特性<sup>[14-16]</sup>。在本次试验中, 水泥土均发生了明显的塑性变形, 水泥土的应变在 0.1% ~ 0.5% 之间, 且水泥土试样均未破坏。在此应变范围内, 可忽略分级加载和分级卸载这 2 种应力路径对于水泥土最终应变的影响。

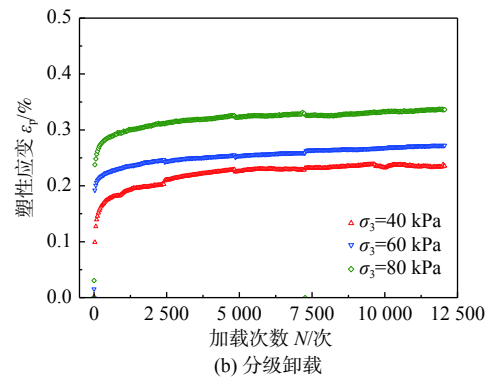
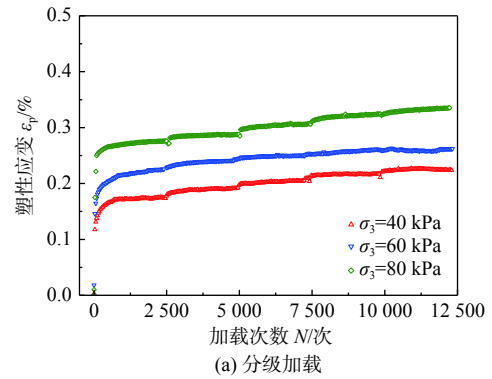


图 2 不同围压下塑性应变与加载次数关系曲线

Fig. 2 Relationship between the plastic strain and cyclic times under different confining stresses: ( a ) staged loading; ( b ) staged unloading

表 2 不同围压下累积应变  
 Table 2 Cumulative strain under different confining stresses

加载方式	围压/kPa	动应力比					/%
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	
		0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	
加载	40	0.174	0.192	0.207	0.216	0.228	
卸载	40	0.203	0.218	0.225	0.229	0.232	
加载	60	0.224	0.241	0.253	0.261	0.267	
卸载	60	0.246	0.255	0.260	0.266	0.270	
加载	80	0.275	0.289	0.307	0.326	0.336	
卸载	80	0.306	0.326	0.332	0.336	0.340	

### 2.2 静偏应力对水泥土轴向应变的影响

在静偏应力比  $SDR$  为 0.00, 0.15, 0.20, 0.25 时, 分级加载和分级卸载的轴向应变-循环振次关系曲线如



图 3 所示。可知,无论是分级加载还是分级卸载,轴向应变均随着静偏应力比的增加而增加。静偏应力比从 0.00 增至 0.25 时:分级加载时,水泥土试样的最终塑性应变从 0.336% 增加至 0.445%;分级卸载时,最终塑性应变从 0.340% 增加至 0.443%。

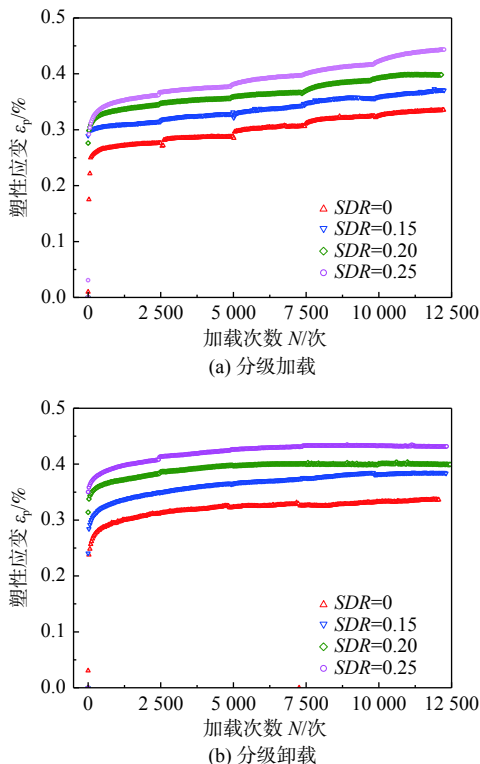


图 3 不同静偏应力下塑性应变与加载次数的关系

Fig. 3 Relationship between the plastic strain and cyclic loading times under different static deviator stresses: ( a ) staged loading; ( b ) staged unloading

表 3 为不同静偏应力比下的累积应变汇总表。由表 3 可知,当静偏应力比相同时,分级加载和分级卸载的最终轴向塑性应变基本相同。由表 2 和表 3 可知,当静偏应力和围压相同时,水泥土的最终塑性应变受加载方式的影响较小。

### 2.3 水泥土轴向应变模型

目前,关于累积塑性变形最常用的经验模型是 Monismith 等<sup>[17]</sup>提出的一种简单的指数模型:

$$\varepsilon_p = A \times N^b \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_p$ ——累积塑性应变/%;

$N$ ——循环加载次数;

$A$ 、 $b$ ——模型参数。

水泥土的塑性应变与加卸载条件、围压和静偏应力比有关。由试验可知,对于应变发展为稳定型的水

泥土,分级加卸载对水泥土的最终应变影响较小;分级卸载中,初始动应力,即最大的一级动应力,对水泥土的最终应变起主导作用。因此,基于试验数据,将 Monismith 模型改进为:

$$\varepsilon_p = (CSR_{max})^{a_1} (1+SDR)^{a_2} \left(\frac{\sigma_3}{Pa}\right)^{a_3} N^{a_4} \quad (3)$$

式(3)中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $a_4$  分别反映了加卸载条件、静偏应力比、围压和加载次数对水泥土塑性应变的影响;  $Pa$  为标准大气压,即 101.3 kPa;  $CSR_{max}$  为分级荷载中的最大一级动应力比。表 4 为基于试验结果拟合的式(3)待定系数。可以看出,分级加载时参数  $a_1$  小于分级卸载时的参数  $a_1$ ,当加载方式和静偏应力一定时,不同围压下的  $a_4$  数值基本相同。需要注意的是,本文所建立的水泥土轴向应变经验模型主要针对水泥土处于应变范围 0.1% ~ 0.5% 的情况时,即水泥土的应变发展模型为稳定型。

表 3 不同静偏应力下累积应变  
Table 3 Cumulative strains under different static deviator stresses

加载方式	静偏应力比	动应力比				
		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
		0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
加载	0.00	0.275	0.289	0.307	0.326	0.336
卸载	0.00	0.310	0.326	0.332	0.336	0.340
加载	0.15	0.315	0.329	0.345	0.357	0.379
卸载	0.15	0.348	0.364	0.374	0.379	0.383
加载	0.20	0.347	0.356	0.367	0.391	0.400
卸载	0.20	0.385	0.397	0.402	0.403	0.404
加载	0.25	0.361	0.378	0.399	0.419	0.444
卸载	0.25	0.409	0.427	0.432	0.434	0.443

表 4 水泥土累积塑性应变拟合参数

Table 4 Fitting parameters of the cumulative plastic strain modes of cement soil

编号	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
D1	2.49	N/A	0.41	0.093
D2	2.49	N/A	0.64	0.089
D3	2.49	N/A	0	0.091
D4	2.21	N/A	0.35	0.070
D5	2.21	N/A	0.27	0.068
D6	2.21	N/A	0	0.074
D7	2.49	3.16	0	0.055
D8	2.49	2.70	0	0.057
D9	2.49	1.67	0	0.080
D10	2.21	1.57	0	0.057
D11	2.21	1.48	0	0.032
D12	2.21	0.68	0	0.038

图4、图5为采用式(3)的试验数据拟合曲线,可以看出采用式(3)计算得到的累积塑性应变规律在描述分级卸载的试验数据时,相关系数 $R^2$ 均大于0.95。而在描述分级加载的试验数据时, $R^2$ 在0.8~0.9之间。分级卸载的数据吻合度要大于分级加载。分析原因主要是分级卸载时,第一级荷载对应变发展过程起主导作用,而在分级加载时,最大动应力比无法主导前几级荷载较小时的应变发展。式(3)考虑了最大动应力对应变发展的主导作用,因此分级卸载情况吻合较好。

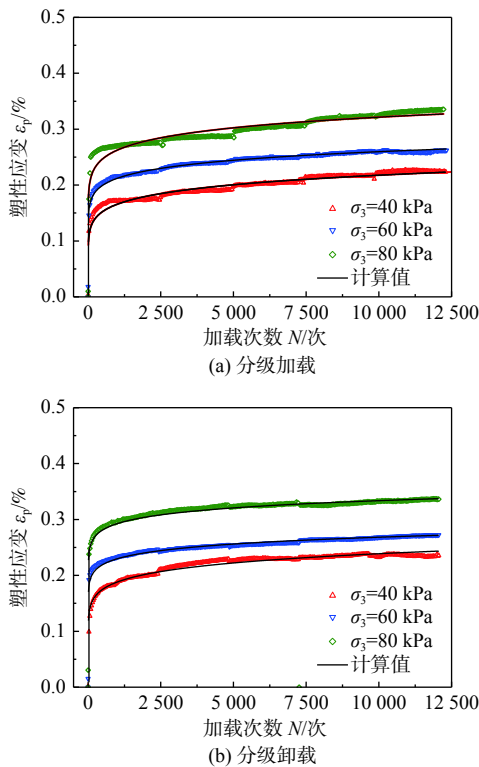


图4 不同围压下水泥土塑性应变拟合曲线  
Fig. 4 Fitting curves of the plastic strains of cement soils under different confining stresses: (a) staged loading; (b) staged unloading

### 3 水泥土骨干曲线结果与分析

#### 3.1 围压对水泥土骨干曲线的影响

在围压40, 60, 80 kPa时,分级加载和分级卸载的骨干曲线如图6所示。可知,分级加载和分级卸载的骨干曲线存在2种模式。当分级加载时,不同围压下骨干曲线的第一段上升速率比较接近。例如,围压为40 kPa时,当动应力从0增加到40 kPa,水泥土的轴向塑性应变达到0.15%;当动应力维持在40 kPa时,水泥土在此荷载下轴向塑性应变从0.150%增加到0.176%;

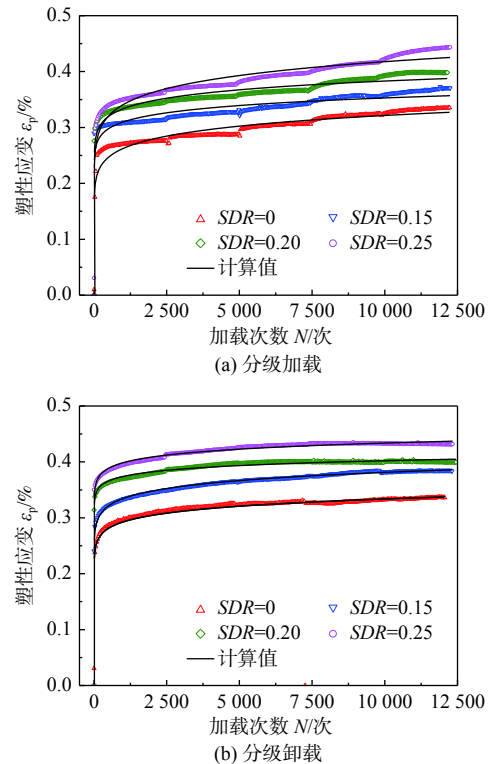


图5 不同静偏应力下水泥土塑性应变拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of the plastic strains of cement soils under static deviator stress: (a) staged loading; (b) staged unloading

当动应力继续增加到第五级荷载72 kPa时,水泥土的轴向应变从0.176%增加到0.220%。在分级卸载时,以围压为40 kPa为例,当动应力从0增加到72 kPa,水泥土的轴向塑性应变达到0.168%,当动应力维持在72 kPa不变时,水泥土的轴向塑性应变从0.168%增加到0.205%。当动应力从72 kPa减小到40 kPa时,水泥土的轴向塑性应变从0.205%增加到0.230%,骨干曲线呈下降型。

#### 3.2 静偏应力比对水泥土骨干曲线的影响

在静偏应力比为0.00, 0.15, 0.20, 0.25时,分级加载和分级卸载的骨干曲线如图7所示。由图7可知分级加载和分级卸载的骨干曲线和图6一样存在2种型式。在分级加载时,水泥土的骨干曲线呈上升型。在第一级加载初期,由于动应力的增长,骨干曲线逐步上升。当第一级荷载稳定后,动应力不变,水泥土的轴向应变不断增加。当第一级荷载结束后,水泥土在很小的应变范围内动应力迅速增加。在分级卸载时,水泥土的骨干曲线呈下降型。由图7还可知,水泥土骨干曲线第一段上升速率随着静偏应力比的增加而增加。

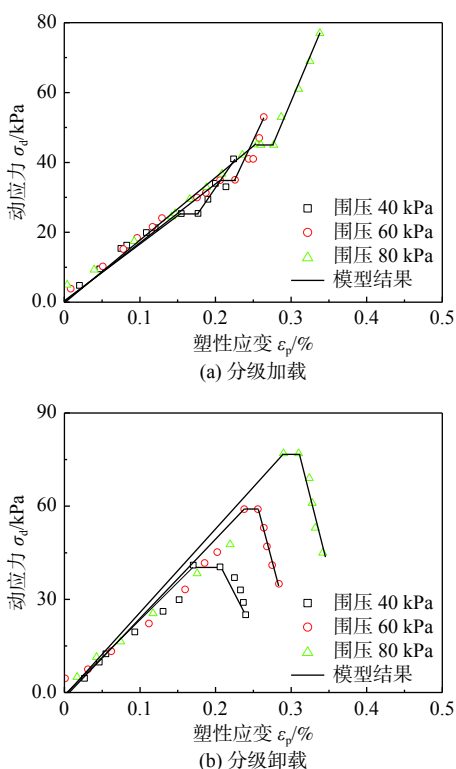


图 6 不同围压下水泥土骨干曲线

Fig. 6 Backbone curves of the cement soil under different confining stresses: ( a ) staged loading; ( b ) staged unloading

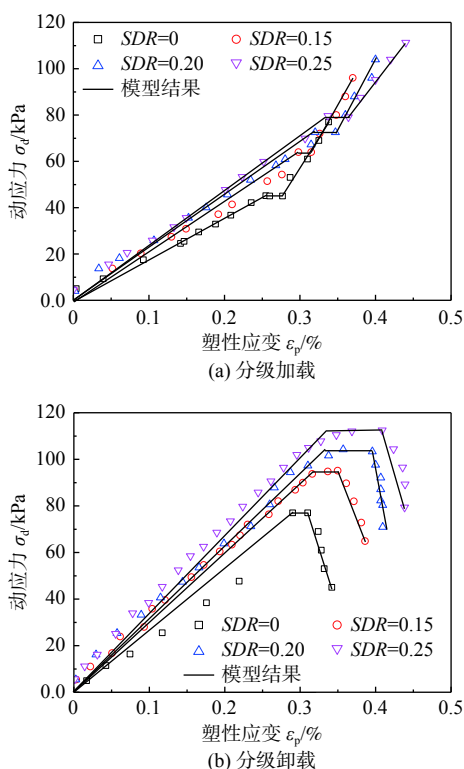


图 7 不同静偏应力比下水泥土骨干曲线

Fig. 7 Backbone curves of the cement soils under different static deviator stresses: ( a ) staged loading; ( b ) staged unloading

### 3.3 水泥土骨干曲线模型

由图 6 和图 7 可知,水泥土的骨干曲线可根据分级加卸载,简化为多段直线,如图 8 所示。

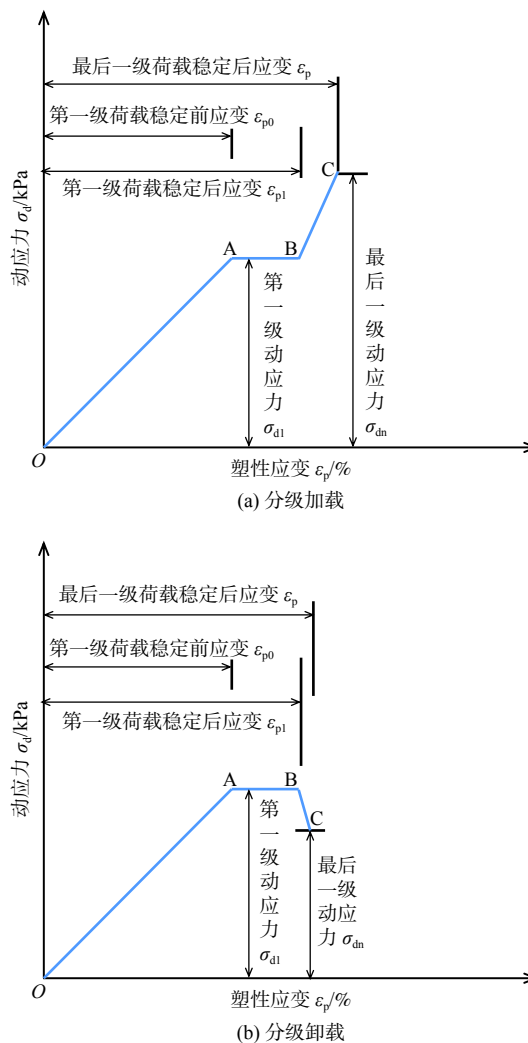


图 8 水泥土骨干曲线简化模型

Fig. 8 Simplified model of the cement soil backbone curve: ( a ) staged loading; ( b ) staged unloading

图 8 中 OA 段可以理解为水泥土在第一级荷载下的瞬时变形。根据本文试验,此时加载次数通常在 100 次以内基本完成。因此,拐点 A 可取  $N=100$ ,代入式(3)求得 A 点  $\epsilon_{p0}$ ; AB 段可以理解为水泥土在第一级荷载稳定后的残余变形,将  $N=2\ 500$  代入式(3)即可得到  $\epsilon_{p1}$ ; BC 段可以理解为水泥土在第一级荷载到最后一级稳定后的残余变形,将  $N=12\ 500$  代入式(3)即可得到  $\epsilon_p$ 。

## 4 结论

(1)水泥土的轴向塑性应变随着围压和静偏应力

比的增加而增加。水泥土轴向应变在 0.1% ~ 0.5%, 应变发展为稳定型, 分级加卸载对应变发展过程影响较大, 对最终应变影响较小。

(2) 基于试验结果建立了考虑加卸载条件、围压和静偏应力的水泥土塑性累积应变指数模型。由相关待定参数变化可知, 当加载方式和静偏应力一定时, 围压对加载次数的指数项影响较小。

(3) 水泥土的骨干曲线在分级加卸载时呈现 2 种不同模式, 可将其简化为多段直线。利用建立的累积塑性应变计算方法, 提出了确定多段直线分界点的方法, 并验证了其可行性。

### 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 黄春霞, 韩爱民, 隋志龙, 等. 水泥土搅拌桩复合地基承载力的确定 [J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(3): 99 - 102. [ HUANG Chunxia, HAN Aimin, SUI Zhilong, et al. Determination of bearing capacity for composite foundation of cement-soil mixing piles[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(3): 99 - 102. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] TIKKA T, KALLIOGLOU P, KONINIS G, et al. Dynamic properties of cemented soils from Cyprus[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, 69(2): 295 - 307.
- [ 3 ] PANTAZOPOULOS I A, ATMATZIDIS D K. Dynamic properties of microfine cement grouted sands[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 42: 17 - 31.
- [ 4 ] 张敏霞, 徐平, 简文彬. 动荷载作用下水泥土的疲劳寿命分析 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1264 - 1268. [ ZHANG Minxia, XU Ping, JIAN Wenbin. Analysis of cemented soil fatigue life under dynamic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1264 - 1268. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] MA Q Y, GAO C H. Effect of basalt fiber on the dynamic mechanical properties of cement-soil in SHPB test[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(8): 04018185.
- [ 6 ] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1796 - 1800. [ TANG Chaosheng, SHI Bin, CAI Yi, et al. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1796 - 1800. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 鹿群, 郭少龙, 王闵闵, 等. 纤维水泥土力学性能的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(增刊 2): 421 - 426. [ LU Qun, GUO Shaolong, WANG Minmin, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 2): 421 - 426. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 王闵闵, 鹿群, 郭少龙, 等. 循环荷载作用下纤维水泥土动力特性 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(5): 1753 - 1760. [ WANG Minmin, LU Qun, GUO Shaolong, et al. Dynamic behavior of soil with fiber and cement under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(5): 1753 - 1760. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 王军, 郑晓, 蔡袁强, 等. 应变控制下水泥土动静力特性试验 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2010, 44(10): 1857 - 1862. [ WANG Jun, ZHENG Xiao, CAI Yuanqiang, et al. Experimental research on static and dynamic characteristics of cement soil under strain control[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(10): 1857 - 1862. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 环境侵蚀下水泥土力学特性的时间效应分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2005, 32(2): 82 - 86. [ NING Baokuan, CHEN Sili, LIU Bin. The timing effects of mechanical properties of cemented soil under environmental erosion[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2005, 32(2): 82 - 86. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析 [J]. *土木工程学报*, 1990, 23(2): 21 - 28. [ PAN Changshi, XIE Zhengguang. Measurement and analysis of vibrations caused by passing trains in subway running tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1990, 23(2): 21 - 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 屈畅姿, 王永和, 魏丽敏, 等. 武广高速铁路路基振动现场测试与分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1451 - 1456. [ QU Changzi, WANG Yonghe, WEI Limin, et al. In-situ test and analysis of vibration of subgrade for Wuhan-Guangzhou high-speed railway[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1451 - 1456. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 温日琨, 王常晶, 陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软粘土变形影响 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊 2): 119 - 122. [ WEN Rikun, WANG Changjing, CHEN Yunmin. Effect of traffic loading induced static deviator stress on deformation of saturated soft clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup 2): 119 - 122. (in Chinese



- with English abstract) ]
- [14] 陈善民, 王立忠, 李挺, 等. 水泥土动力特性室内试验及复合地基抗震特性分析[J]. [浙江大学学报\(工学版\)](#), 2000, 34(4): 398 – 403. [ CHEN Shanmin, WANG Lizhong, LI Ting, et al. Experimental determination of dynamic properties of cement-treated soil and earthquake behavior of composite foundation[J]. [Journal of Zhejiang University \(Engineering Science\)](#), 2000, 34(4): 398 – 403. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 郑晓, 郭玺. 动荷载作用下水泥土小应变剪切模量试验研究[J]. [路基工程](#), 2008(4): 84 – 85. [ ZHENG Xiao, GUO Xi. Experimental study on small shear modulus of cement soil under dynamic load[J]. [Subgrade Engineering](#), 2008(4): 84 – 85. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 董城, 冷伍明, 李志勇, 等. 水泥改良高液限黏土动态回弹模量试验研究[J]. [岩土力学](#), 2013, 34(1): 133 – 138. [ DONG Cheng, LENG Wuming, LI Zhiyong, et al. Experimental study of dynamic resilient modulus of cement-improved high liquid limit clay[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2013, 34(1): 133 – 138. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 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.

编辑: 张明霞