

高聚物胶凝戈壁土的动残余变形特性试验研究

宋优建^{1,2}, 杨海华^{1,2}, 杨武^{1,2}, 高鹏展^{1,2}, 沈静东^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:高聚物胶凝戈壁土是将高聚物与戈壁土按一定比例拌合而成的,可有效提高戈壁土的力学性能。为研究高聚物胶凝戈壁土的动残余变形特性,采用中型动三轴试验研究了高聚物质量比、围压、固结比和动应力比等对高聚物胶凝戈壁土残余剪应变和残余体应变的影响。结果表明:高聚物胶凝材料能有效降低戈壁土的动残余变形,高聚物胶凝戈壁土在经受30次循环荷载后产生的残余剪应变为天然戈壁土的15.0%~18.8%,残余体应变为天然戈壁土的12.1%~22.2%;掺入高聚物质量比为3%和12%时,残余剪应变的减小幅度为85.0%、95.2%,残余体应变的减小幅度为87.9%、95.5%,且高聚物质量比越大,减小幅度越大。采用投影寻踪回归(projection pursuit regression, PPR)分析了各影响因数对残余变形的影响权重,得出高聚物胶凝戈壁土动残余剪应变和残余体应变的影响权重依次为高聚物质量比、围压、动应力比和固结比。采用指数函数对高聚物胶凝戈壁土的残余变形与振次的关系进行拟合,建立了能反映高聚物质量比影响的高聚物胶凝戈壁土的修正残余变形模型。**关键词:**高聚物胶凝戈壁土;动三轴试验;残余剪应变;残余体应变;投影寻踪回归分析;残余变形模型
中图分类号:TU43 **文献标识码:**A

Tests study for dynamic residual deformation characteristics of high polymer cementitious Gobi soil

SONG Youjian^{1,2}, YANG Haihua^{1,2}, YANG Wu^{1,2}, GAO Pengzhan^{1,2}, SHEN Jingdong^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: High polymer cementitious Gobi soil is made by mixing high polymer with Gobi soil in a certain ratio, which can effectively improve the mechanical properties of Gobi soil. In order to study the dynamic residual deformation characteristics of high polymer cementitious Gobi soils, the effects of high polymer mass ratio, surrounding pressure, consolidation ratio and dynamic stress ratio on the residual shear strain and residual body strain of high polymer cementitious Gobi soils were investigated in this paper using medium-sized dynamic triaxial tests. The results show that the high polymer cementitious materials can effectively reduce the dynamic residual deformation of Gobi soil, and the residual shear strain of polymer cementitious Gobi soil after 30 cycles of loading is 15.0%~18.8% of that of natural Gobi soil, and the residual body strain is 12.1%~22.2% of that of natural Gobi soil. The reduction of residual shear strain was 85.0% and 95.2%, and the reduction of residual body strain was 87.9% and 95.5% for 3% and 12% of high polymer mass ratio. The larger the high polymer mass ratio, the larger the reduction. Projection pursuit regression (PPR) was used to analyze the influence weights of each influence factor on the residual deformation, and the influence weights of the dynamic residual shear strain and residual body strain of the polymer cementitious Gobi soil were obtained as high polymer mass ratio to peritectic dynamic stress

收稿日期:2023-05-11; 修回日期:2023-05-31

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01A100)

作者简介:宋优建(1999—),男,硕士研究生,主要从事砂土及粗粒土静动特性研究。E-mail:1640685958@qq.com

通讯作者:杨海华(1986—),男,高级实验师,博士,主要从事岩土工程材料静、动力特性研究。E-mail:yanghaihua@xjau.edu.cn

ratio to consolidation ratio. An exponential function was used to fit the relationship between residual deformation and vibration times of polymer cementitious Gobi soil, and a modified residual deformation model of high polymer cementitious Gobi soil was established, which can respond to the effect of high polymer mass ratio.

Key words: high polymer cementitious Gobi soil; dynamic triaxial test; residual shear strain; residual body strain; projection pursuit regression; residual deformation model

0 引言

地震是一种破坏力较强的自然灾害,我国地震带发生过多地地震灾难,造成巨大的财产损失,对土石坝不仅能够造成坝体裂缝、土体滑坡、地基失稳和液化等灾害,还会引起永久变形对建筑物造成破坏。自20世纪60年代以来,学者们对土石坝等在地震后的永久变形开展了研究,并认为土石坝、建筑地基等建筑物在经历地震后常出现沉降、局部开裂等情况,其变形特征具有明显的非线性、滞后性和变形累计效应^[1]。2008年的汶川大地震后,紫坪铺面板堆石坝出现坝顶沉陷100 cm,坝体上游、下游边坡均向内收缩,水平位移达到60 cm^[2];碧口黏土心墙坝在震后坝顶的最大永久变形达到了242.2 mm,向上游的水平位移为157.5 mm^[3]。已有的研究资料显示,许多震害都与地震永久变形有关,地震作用下的这种永久变形对建筑地基或建筑物体系的整体结构有着严重的损害,出现土石坝坝顶区域土体产生松动、滑移甚至坍塌等现象^[4]。

在土石坝等的动力分析中,永久变形的准确预估和计算可为坝体的抗震安全评价提供理论依据,因此开展筑坝材料的动残余变形试验和模型研究就显得尤为重要。王昆耀等^[4]、STEWART^[5]、CHANG等^[6]、曹培等^[7]和凌华等^[8]进行了粗粒土的动三轴试验,研究了粗粒土在不同影响因素下的残余变形特性,得出残余变形与土的孔隙比、细料含量和试验围压等均有关。赵凯等^[9]通过残余变形试验,得出土的动残余变形与排水条件和粗料含量有关。何冰^[10]、刘汉龙等^[11]进行了加筋的试验,研究表明,加筋可以有效地降低土的残余变形。刘平等^[12]通过开展不同先期动应力作用下的动三轴试验,表明了先期振动对残余变形有显著的影响。许多学者对土的残余变形模型进行了研究,如TANIGUCHI^[13]等进行了黄土、砂土的动三轴试验研究,采用等效地震惯性力分析方法,建立了剪应力和残余应变间的关系Eiichi模型(谷口荣一模型)。孔宪京^[14]在谷口荣一模型的基础上,采用静动耦合试验方法对不同固结比下的残余变形进行归一化处理,并考虑孔隙比的影响,提出了改进的残余变形模型。中国水科院进行紫坪铺堆石料的残余变形试验时研究了动剪应力作用时的动剪应变和体应变规律,提出了同时考虑残余剪应变和体应变的残余变形模型^[15]。沈珠江等^[16]在新疆吉林台堆石料的动三轴试验基础上,给出了残余剪应变和残余体应变随振次的增量关系,提出了能反映残余变形发展过程的沈珠江模型。邹德高等^[17]、吕小龙等^[18]和杨青坡等^[19]进行了堆石料的动残余变形试验,认为在固结比较大时,动残余变形与振次在半对数坐标上的拟合关系不好,采用幂函数形式拟合具有更好的适用性。

高聚物胶凝戈壁土是将高聚物掺入戈壁土中,可有效提高天然戈壁土的基本性质。在地震作用下土石坝工程常表现出坝顶区的“鞭梢效应”,并伴随上下游坝坡表面的震陷、坍塌等问题^[1],采用高聚物胶凝戈壁土对土石坝坝顶和边坡进行加固,可有效提高土石坝的抗震能力。研究高聚物胶凝戈壁土的动残余变形特性,为计算高聚物胶凝戈壁土加固的建筑物地震永久变形提供参数,可为其工程应用提供理论依据。本文对高聚物胶凝戈壁土开展了动三轴残余变形试验,研究高聚物质量比、固结比、试验围压和动应力比等影响因素对动残余变形特性的影响。在沈珠江残余变形模型的基础上,建立考虑高聚物质量比的修正动残余变形模型。

1 动三轴试验

1.1 试验设备和材料

试验所使用的设备是采用新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室的多功能大型动静三轴试验机。该试验机可进行直径为 $\phi 300$ mm和 $\phi 150$ mm这2种尺寸的静、动力三轴试验。轴力、围压加载系统采用液压伺服作动器,可实现轴向、径向(围压)不同动应力、不同相位差的单和双向循环加载试验。

试验用土料取自新疆和田某水利枢纽工程现场。本次试验采用直径为 $\phi 150$ mm、高度为 300 mm 的中型三轴仪进行,按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[20] 中粗粒土的试样制备要求,选定试料的最大粒径为 40 mm。对直径大于 40 mm 的戈壁土颗粒进行处理,处理后的试验级配曲线见图 1。试料不均匀系数 $C_u = 32.7$,曲率系数 $C_c = 1.2$,小于 0.075 mm 颗粒含量为 0.7%,属于级配良好砾。经试验测得其颗粒比重 $G_s = 2.71$,最大干密度为 $\rho_{dmax} = 2.28$ g/cm³,最小干密度为 $\rho_{dmin} = 1.85$ g/cm³。

试验用的高聚物材料选用新疆某防水材料企业生产的非水反应类双组份弹性聚氨酯。这种材料具备较好的黏结性能和适应变形的能力,拉伸强度为 0.7 MPa,拉伸伸长率为 528%,低温弯折性能可达到 -40 °C,高温在 120 °C 时未出现软化现象,基本性能检测情况见表 1。

表 1 双组份弹性聚氨酯基本性能

Table 1 Basic properties of two component elastic polyurethane

密度/(g/cm ³)	固含量/%	表干时间/h	实干时间/h	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	黏结强度/MPa
1.403	95.5	1.0	4.5	0.71	528	1.21

1.2 试样制备

试样成型前,对高聚物(双组份弹性聚氨酯)2种原料进行混合(黑白比为 4:1),拌合均匀后呈黑亮色、稠度均匀、流动性好的膏状物;然后按所需质量比称取高聚物和戈壁土进行拌和,为使混合物搅拌均匀,把 2 种试料按质量要求加入搅拌机中搅拌 4 min,形成高聚物戈壁土混合物,搅拌前、后的高聚物戈壁土混合物如图 2 所示。

考虑到戈壁土与试验采用的双组份弹性聚氨酯的密度有较大差异,为减小在制作不同高聚物质量比 R_p 试样时对高聚物胶凝戈壁土的密度影响,以戈壁土相对密度 $D_r = 0.70$ ($\rho_d = 2.133$ g/cm³) 作为试验密度。采用击实方法成型试验,将搅拌均匀的高聚物戈壁土混合物按试样密度要求称取质量,装入标准试模($\phi 150 \times 330$ mm)中,分 2 层进行击实,采用重型击实锤手动击实,最终以击实后试样高度 $h = 300$ mm 作为标准来控制试样的密度,击实后试样在试模中静置 24 h(大于高聚物的实干时间),待试样形成整体后进行拆模,击实成型后的高聚物胶凝戈壁土试样如图 3 所示。对于高聚物质量比 $R_p = 0\%$ 的试样(天然戈壁土)成型,按照土工试验规程三轴试验的试样成型方法,在中型三轴仪试样成型试模中按试验密度要求击实成型后直接进行试验。

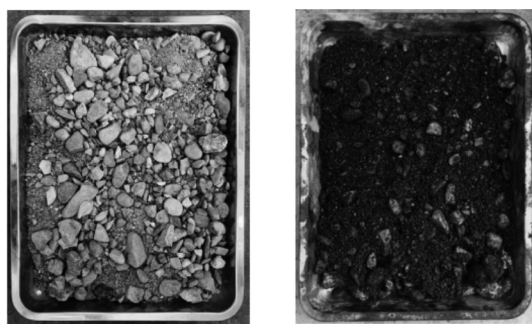


图 2 高聚物掺入戈壁土对比 ($R_p = 3\%$)

Fig. 2 Comparison of high polymer mixed with Gobi soil ($R_p = 3\%$)



图 3 成型后的高聚物胶凝戈壁土试样

Fig. 3 High polymer cementitious Gobi soil sample after molding

1.3 试验方法

高聚物胶凝戈壁土的动残余变形试验中,将试样装入动三轴仪中,安装压力室后进行抽气饱和,当试样饱和度达到 $S_r \geq 95\%$ 后进行试验,如图 3(b) 所示。根据试验要求施加不同围压和轴向固结应力进行试样固结,待试样在给定围压固结完成后,对试样施加循环动应力进行动残余变形试验。动应力采用两级施加,动

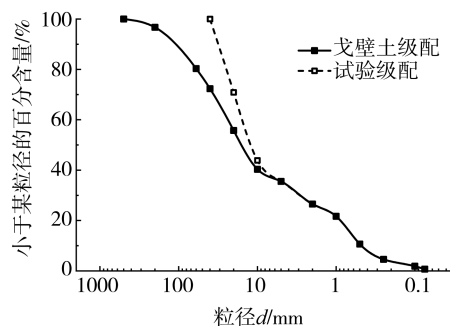


图 1 戈壁土料颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain distribution curves of Gobi soil

应力比(cyclic stress ratio, CSR)(动应力幅值 σ_d 与试验围压 σ_3 之比)为0.4和0.8。按照地震动标准反应谱计算方法^[1],在8级地震时的地震加速度过程相当于循环振动30次,因此本次残余变形动三轴试验选取正弦波模拟加载,振动次数为30次,振动频率为0.1 Hz。

高聚物胶凝戈壁土的动残余变形特性与戈壁土和高聚物本身的性质有关,同时还与高聚物质量比 R_p 、试验围压 σ_3 、固结比 K_c 、动应力比CSR和振动次数 N 等有关。为研究高聚物胶凝戈壁土的动残余变形在不同影响因素下的变化规律,进行了5种高聚物质量比 R_p 、3个试验围压 σ_3 、3个固结比 K_c 和2个动应力比CSR下的动三轴试验,试验方案见表2。

表2 高聚物胶凝戈壁土残余变形试验方案

Table 2 Residual deformation test scheme of high polymer cementitious Gobi soil

高聚物质量比 R_p /%	固结比 K_c	围压 σ_3 /MPa	动应力比 CSR
0	1.0,1.5,2.0	0.3,0.6,0.9	0.4,0.8
3	1.0,1.5,2.0	0.3,0.6,0.9	0.4,0.8
6	1.5	0.3,0.6,0.9	0.4,0.8
9	1.5	0.3,0.6	0.4,0.8
12	1.5	0.3,0.6	0.4,0.8

2 试验结果及分析

土体在动应力作用或发生结构性弹性变形条件下会产生残余变形,并随动荷载作用稳定增长。为研究高聚物胶凝戈壁土在动荷载作用下的残余变形特性,进行了不同高聚物质量比、围压和固结比等因素影响下的动三轴试验,下面分别分析不同因素对高聚物胶凝戈壁土的动残余变形的影响。

2.1 高聚物质量比对残余变形的影响

不同高聚物质量比 R_p 在固结比 K_c 为1.5、围压 σ_3 为0.3 MPa、动应力比CSR为0.4条件下的残余剪应变 γ_r 和振动循环次数 N 的变化曲线如图4所示。由图4(a)可知, $R_p=0$ 的残余剪应变 γ_r 随振动循环次数 N 的增大呈非线性增长,在前几次振动产生较大的残余剪应变 γ_r ,随着 N 的增大其增长速率逐渐降低,曲线呈现出先变陡后逐渐变缓过程; R_p 为3%、6%、9%和12%时,残余剪应变 γ_r 随振动循环次数 N 增大而增大,增长幅度较小;由图4(b)可知,残余体应变 ε_{vr} 随振动循环次数 N 的增大而增大, $R_p=0$ 的残余体应变 ε_{vr} 随振动循环次数 N 的增长速率较大;其他高聚物质量比 R_p 随振动循环次数 N 的增长速率较小,且 R_p 越大,增长速率越小。在相同的初始应力条件和动应力比CSR下,高聚物胶凝戈壁土的残余剪应力 γ_r 和残余体应变 ε_{vr} 均随高聚物质量比 R_p 的增大而减小。 R_p 为3%的高聚物胶凝戈壁土在经受30次循环振动荷载后产生的残余剪应变为 R_p 为0%(天然戈壁土)的15%~18.8%,产生的残余体应变 ε_{vr} 为天然戈壁土的12.1%~22.2%; R_p 为12%的高聚物胶凝戈壁土所产生的残余剪应变 γ_r 和残余体应变 ε_{vr} 为天然戈壁土的4.7%~8.1%和4.5%~6.3%。说明高聚物的掺入能有效提高戈壁土的完整性,减小戈壁土在动荷载作用下的颗粒移动,显著降低动残余变形。

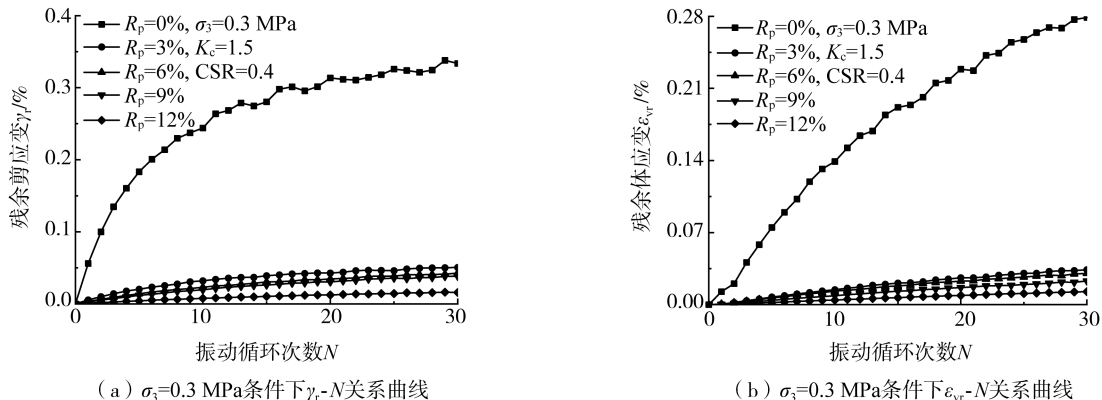


图4 CSR=0.4时 R_p 对高聚物胶凝戈壁土动残余变形的影响

Fig. 4 Effect of R_p on dynamic residual deformation of high polymer cementitious Gobi soil when CSR=0.4

以荷载循环振动次数 N 为 30 次时的残余剪应变 γ_r^{30} 和残余体应变 ε_{vr}^{30} 为最终塑形变形, 将高聚物胶凝戈壁土在不同 R_p 时的残余剪应变 γ_r^{30} 和残余体应变 ε_{vr}^{30} 汇总于表 3 和表 4。表中 γ_r^{30} 减小幅度和 ε_{vr}^{30} 减小幅度表示高聚物胶凝戈壁土相对 R_p 为 0% 时的天然戈壁土残余变形的减小程度, 其表达式为

$$\gamma_r^{30}(\varepsilon_{vr}^{30}) = 1 - \frac{R_p''}{R_p'} \quad (1)$$

式中: R_p'' 为 $X\%$ 时的 $\gamma_r^{30}(\varepsilon_{vr}^{30})$; R_p' 为 0% 时的 $\gamma_r^{30}(\varepsilon_{vr}^{30})$ 。

表 3 高聚物质量比对高聚物胶凝戈壁土残余剪应变的影响

Table 3 Effect of polymer mass ratio on residual shear strain of high polymer cementitious Gobi soil

CSR	σ_3/MPa	残余剪应变 $\gamma_r^{30}/\%$					残余剪应变 γ_r^{30} 减小幅度/ $\%$			
		$R_p=0\%$	$R_p=3\%$	$R_p=6\%$	$R_p=9\%$	$R_p=12\%$	$R_p=3\%$	$R_p=6\%$	$R_p=9\%$	$R_p=12\%$
0.4	0.3	0.338	0.051	0.043	0.038	0.016	85.0	87.4	88.7	95.2
	0.6	0.576	0.094	0.069	0.067	0.038	83.6	88.0	88.3	93.4
	0.9	0.739	0.129	0.103	—	—	82.5	86.0	—	—
0.8	0.3	0.555	0.091	0.075	0.060	0.040	83.7	86.5	89.2	92.8
	0.6	0.922	0.169	0.118	0.112	0.075	81.6	87.2	87.9	91.9
	0.9	1.349	0.254	0.213	—	—	81.2	84.2	—	—

表 4 高聚物质量比对高聚物胶凝戈壁土残余体应变的影响

Table 4 Effect of polymer mass ratio on residual body strain of polymer cementitious Gobi soil

CSR	σ_3/MPa	残余体应变 $\varepsilon_{vr}^{30}/\%$					残余体应变 ε_{vr}^{30} 减小幅度/ $\%$			
		$R_p=0\%$	$R_p=3\%$	$R_p=6\%$	$R_p=9\%$	$R_p=12\%$	$R_p=3\%$	$R_p=6\%$	$R_p=9\%$	$R_p=12\%$
0.4	0.3	0.279	0.034	0.030	0.023	0.013	87.9	89.1	91.8	95.5
	0.6	0.387	0.063	0.050	0.037	0.019	83.6	87.0	90.4	95.1
	0.9	0.515	0.115	0.091	—	—	77.7	82.3	—	—
0.8	0.3	0.311	0.065	0.053	0.038	0.019	79.1	82.8	87.8	93.8
	0.6	0.615	0.111	0.075	0.068	0.039	82.0	87.8	89.4	93.7
	0.9	0.900	0.182	0.136	—	—	79.8	84.8	—	—

由表 3 可知, 动应力比 CSR、固结比 K_c 和围压 σ_3 为定量时, 高聚物胶凝戈壁土的动残余剪应变 γ_r^{30} 会随着高聚物质量比 R_p 的增大而减小, 在高聚物质量比 $R_p=3\%$ 的 γ_r^{30} , 减小幅度高达 85%, 而且还会随着 R_p 的增大而增大, $R_p=12\%$ 的 γ_r^{30} , 减小幅度为 95.2%, 增长速率较小, 为 10.2%。戈壁土在加入高聚物后, 高聚物的胶结作用能有效地将戈壁土颗粒黏结在一起, 使土颗粒之间形成一定的黏结力, 这种黏结力可以让颗粒在受到循环荷载时防止发生相对位移, 从而保持土体不发生较大塑性变形。 R_p 增大后(12%)和较小时(3%)颗粒间的黏结作用是相近的, 残余剪应变减小幅度的增长较小, R_p 的增大会对戈壁土内部颗粒间的孔隙进行填充, 使高聚物胶凝混凝土的密实度和整体性增大, 所以 R_p 较大时其残余剪应变 γ_r^{30} 减小幅度的增长量并不明显。

由表 4 可知, 高聚物胶凝戈壁土在动应力比 CSR、固结比 K_c 和围压 σ_3 相同时, 动残余体应变 ε_{vr}^{30} 减小幅度随高聚物质量比 R_p 的增大而增大, 且增长的规律与残余剪应变 γ_r^{30} 减小幅度的增长规律是类似的。 $R_p=3\%$ 时, ε_{vr}^{30} 减小幅度为 87.9%; $R_p=12\%$ 时, ε_{vr}^{30} 减小幅度为 95.5%; 随着 R_p 的增大, ε_{vr}^{30} 减小幅度的增长速率减缓。

高聚物胶凝材料掺入戈壁土能够降低在循环作用下戈壁土的残余变形, 其原因: 一方面主要是由于高聚物具有较好的胶结性能, 可让戈壁土颗粒黏结在一起, 形成比天然戈壁土整体性更好, 结构性更稳定的胶凝复合材料, 增大荷载作用时颗粒重新排列的阻力减小颗粒发生相对位移的能力; 另一方面, 本次试验的高聚物材料为弹性聚氨酯, 具有较高的强度和弹性恢复能力, 加入高聚物后的戈壁土弹性恢复能力提高, 增大了高聚物胶凝戈壁土的弹性, 荷载作用时其适应变形的能力更强, 从而显著减小了戈壁土在循环振动荷载作用时的残余剪切变形和残余体积变形。结合表 3、表 4, 高聚物胶凝戈壁土的残余变形在 $R_p=3\%$ 时减小了约 80%, 然后随 R_p 的增大其减小速率降低。所以, 对高聚物加固戈壁土改善其在振动荷载作用下的残余变形

而言,可采用高聚物质量比 $R_p = 3\%$ 左右即可大幅降低戈壁土的残余变形。

2.2 围压对残余变形的影响

不同围压 σ_3 在固结比 $K_c = 1.5$ 、高聚物质量比 R_p 为 0% 和 3%、动应力比 CSR 为 0.4 条件下的残余剪应变 γ_r 和振动循环次数 N 、残余体应变 ε_{vr} 和振动循环次数 N 的关系曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,不同的高聚物质量比 R_p ,在其他条件相同的情况下,残余剪应变 γ_r 和残余体应变 ε_{vr} 都会随着围压 σ_3 的增大而增大,高聚物胶凝戈壁土的残余变形受围压 σ_3 的影响较大。

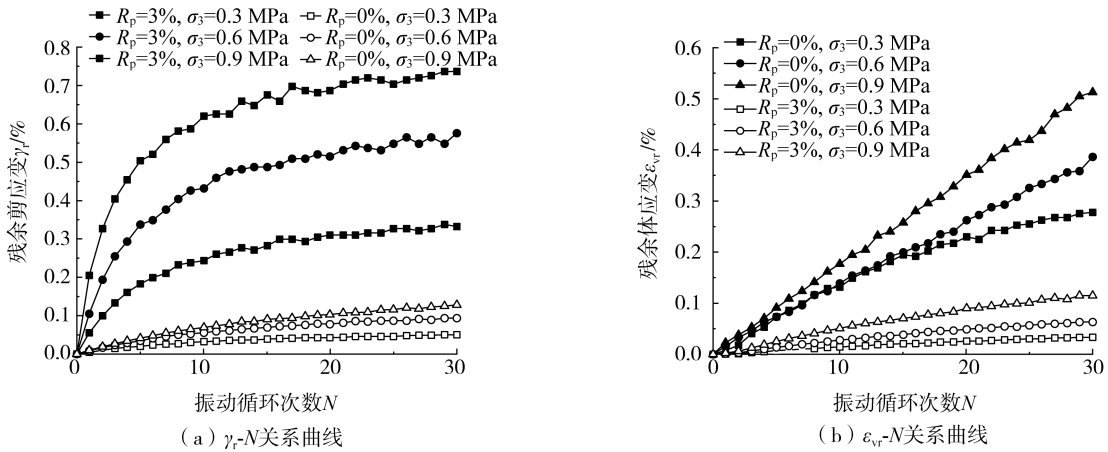


图 5 围压 σ_3 对高聚物胶凝戈壁土动残余变形的影响

Fig. 5 Effect of confining pressure σ_3 on dynamic residual deformation of high polymer cementitious Gobi soil

2.3 固结比对残余变形的影响

不同固结比 K_c 在高聚物质量比 R_p 为 0% 和 3%、动应力比为 0.4、围压 σ_3 为 0.3 MPa 条件下的残余剪应变 γ_r 和振动循环次数 N 、残余体应变 ε_{vr} 和振动循环次数 N 的变化曲线,如图 6 所示。由图可知,在相同的试验条件下不同的高聚物质量比 R_p 的高聚物胶凝戈壁土的动残余变形均随固结比 K_c 的增大而减小。高聚物质量比 R_p 不同时,残余剪应变 γ_r 在循环振动初期受固结比 K_c 的影响较大,关系曲线随 K_c 的增大而减小,曲线斜率明显变缓,随着振动 N 的增大,不同 K_c 条件下的残余剪应变 γ_r 差值逐渐减小,如图 6(a) 所示。

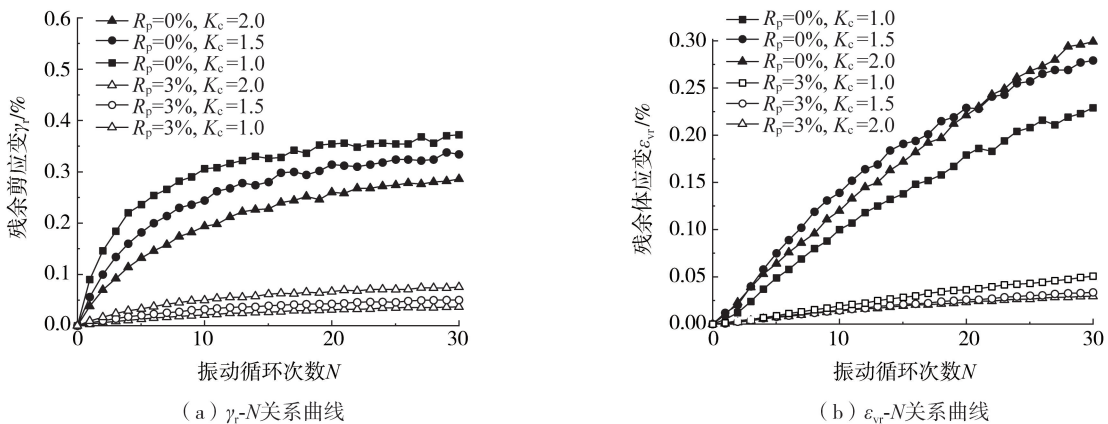


图 6 K_c 对高聚物胶凝戈壁土动残余变形的影响

Fig. 6 Effect of K_c on dynamic residual deformation of high polymer cementitious Gobi soil

2.4 动应力比对残余变形的影响

不同的动应力比 CSR 在围压 σ_3 为 0.3 MPa、固结比 K_c 为 1.5、高聚物质量比 R_p 为 0% 和 3% 的条件下,残余剪应变 γ_r 、残余体应变 ε_{vr} 和振动循环次数 N 的关系变化曲线,如图 7 所示。由图可知,在不同高聚物质量比 R_p 下,高聚物胶凝戈壁土的残余变形均受动应力比 CSR 的影响较大,相同条件下,高聚物胶凝戈壁土的残余剪应变 γ_r 和残余体应变 ε_{vr} 均随动应力比 CSR 的增长而增大。

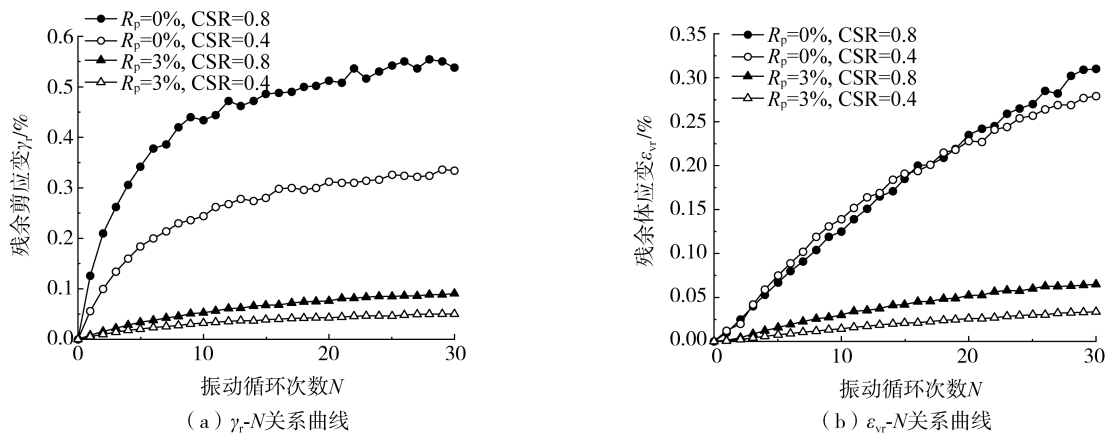


图7 CSR对高聚合物胶凝戈壁土动残余变形的影响

Fig. 7 Effect of CSR on dynamic residual deformation of high polymer cementitious Gobi soil

3 动残余变形的影响因素分析

为分析各因素对高聚合物胶凝戈壁土的残余变形的影响规律,确定因素对残余变形的影响权重,采用投影寻踪回归(projection pursuit regression, PPR)分析^[21-22]对试验结果进行无假定建模,以高聚物质量比 R_p 、动应力比CSR、围压 σ_3 、固结比 K_c 等因素作为影响因素,分析其对动残余剪应变和残余体应变的影响规律。

PPR的模型可用式(2)表示为

$$f(x) = E(Y_i | X_1, X_2, X_3, \dots, X_p) = \bar{y}_i + \sum_{m=1}^M \beta_m f_m \left(\sum_{j=1}^p \alpha_{jm} x_j \right) \quad (2)$$

式中: f_m 为第 m 个岭函数; M 为岭函数个数上限; β_m 为岭函数贡献权重系数; α_{jm} 为 j 方向的第 m 个投影值($j=1, 2, \dots, M$), $\sum_{j=1}^p \alpha_{jm}^2 = 1$ 。

极小化准则:

$$L_2 = \sum_{i=1}^Q W_i E \left[Y_i - EY_i - \sum_{m=1}^{M_u} \beta_{im} f_m \left(\sum_{j=1}^p \alpha_{jm} X_j \right) \right]^2 = \min \quad (3)$$

式中: M_u 为岭函数最优个数; W_i 为第 i 个因素的权重系数。

通过PPR建模计算高聚物质量比 R_p 、动应力比CSR、围压 σ_3 和固结比 K_c 对高聚合物胶凝戈壁土的动残余剪应变 γ_r^{30} 和残余体应变 ε_{vr}^{30} 的影响权重系数见表5。由表可知,各影响因素对高聚合物胶凝戈壁土的动残余变形的相对影响权重排序为高聚物质量比 $R_p >$ 围压 $\sigma_3 >$ 动应力比CSR $>$ 固结比 K_c 。说明高聚合物胶凝戈壁土的动残余剪应变 γ_r^{30} 和残余体应变 ε_{vr}^{30} 受高聚物质量比 R_p 的影响最大,围压 σ_3 和动应力比CSR的影响次之,固结比 K_c 最小。

表5 影响因子对残余变形的相对影响权重系数

Table 5 Relative weight coefficient of influence factors on residual deformation

残余变形类别	高聚物质量比 R_p	动应力比CSR	围压 σ_3	固结比 K_c
残余剪应变 γ_r^{30}	1.000	0.142	0.205	0.040
残余体应变 ε_{vr}^{30}	1.000	0.148	0.235	0.024

4 残余变形模型修正

针对残余变形,已有学者进行了大量的研究,得出了常用的两类模型,一种是考虑动应力与残余变形关系的模型;另一种是考虑振动周次与残余变形关系的模型。周次-残余变形模型相较于动应力-残余变形模型能够更好地描述土石坝在地震作用下的永久变形。因此,本文选用沈珠江模型研究高聚合物胶凝戈壁土的残余变形。

4.1 沈珠江残余变形模型

沈珠江残余变形模型^[16]是基于吉林台面板堆石坝坝料动三轴试验结果而提出的,认为残余变形随振次的发展在半对数坐标上服从线性衰减,其基本表达式为

$$\varepsilon_{vr} = c_{vr} \log(1 + N) \tag{4}$$

$$\gamma_r = c_{dr} \log(1 + N) \tag{5}$$

$$c_{vr} = c_1 \gamma_d^2 \exp(-c_3 S_1^2) \tag{6}$$

$$c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_1^2 \tag{7}$$

式中: ε_{vr} 、 γ_r 分别为残余体应变和残余剪应变; c_{vr} 、 c_{dr} 分别为残余体应变参数和残余剪应变参数; γ_d 为动剪应变幅值,随着动应力幅值的增大而明显增大,一般开始几周较大,后期略有减小,整理资料时以第 10 次循环幅值为准; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 为模型参数,由试验结果确定。

4.2 残余变形模型的修正

本文采用沈珠江残余变形模型对高聚物胶凝戈壁土的残余变形试验结果进行整理,绘制本次试验不同高聚物质量比 R_p 下的高聚物胶凝戈壁土动残余变形与振动次数的关系曲线,采用式(4)、式(5)对试验结果进行拟合,如图 8 所示。

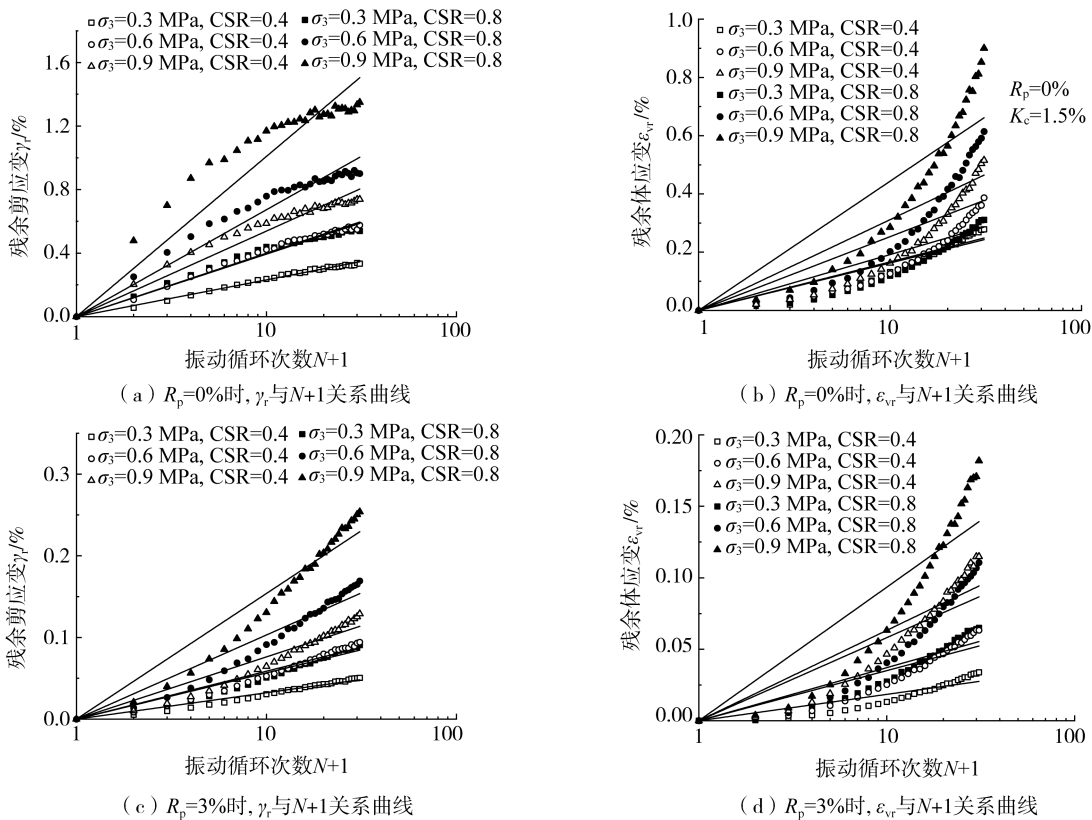


图 8 沈珠江模型拟合 $K_c = 1.5$ 时高聚物胶凝戈壁土动残余变形与振动次数关系

Fig. 8 Relationship between dynamic residual deformation and vibration frequency of high polymer cementitious Gobi soil when K_c is 1.5 fitted by Shen Zhujiang model

由图 8 可知,不同高聚物质量比 R_p 下的动残余变形试验结果在振动次数 N 的半对数坐标上均表现出不同程度的非线性,与沈珠江模型假设的线性拟合差异较大。所以,残余变形模型建立时应考虑高聚物质量比 R_p 对高聚物胶凝戈壁土动残余变形的影响,用 $\lg^m(N+1)$ 代替式(4)、式(5)中 $\lg(N+1)$ 对试验结果进行拟合,得到不同条件下的指数 m 值见表 6、表 7。

由表 6、表 7 可知,指数 m 随高聚物质量比 R_p 的增大而呈非线性增加,为反映高聚物胶凝戈壁土在不同高聚物质量比 R_p 条件下的动残余变形与振动次数的关系,对沈珠江动残余模型进行修正,如式(8)、式(9)所示:

$$\varepsilon_{vr} = c_{vr} [\lg(N+1)]^{2+2\sqrt{R_p}} \tag{8}$$

$$\gamma_r = c_{dr} [\lg(N+1)]^{0.75+3\sqrt{R_p}} \tag{9}$$

表6 残余剪应变 γ_r 采用指数函数拟合时指数 m 汇总表

Table 6 Summary table of index m when the residual shear strain γ_r is fitted with an exponential function

高聚物质量比 $R_p/\%$	固结比 K_c	$\sigma_3=0.3$ MPa		$\sigma_3=0.6$ MPa		$\sigma_3=0.9$ MPa		均值
		CSR=0.4	CSR=0.8	CSR=0.4	CSR=0.8	CSR=0.4	CSR=0.8	
0	1.0	0.74	0.66	0.58	0.52	0.42	0.32	0.54
	1.5	0.97	0.78	0.88	0.66	0.67	0.51	0.75
	2.0	1.20	0.94	1.05	0.88	1.06	0.78	0.98
3	1.0	1.23	0.98	0.77	1.13	0.88	1.03	1.00
	1.5	1.36	1.12	1.28	1.19	1.38	1.23	1.26
	2.0	1.59	1.35	1.56	1.24	1.45	1.06	1.38
6	1.5	1.69	1.49	1.60	1.39	1.52	1.25	1.49
9	1.5	1.83	1.58	1.67	1.43	—	—	1.63
12	1.5	1.96	1.91	1.86	1.79	—	—	1.88

表7 残余体应变 ε_{vr} 采用指数函数拟合时指数 m 汇总表

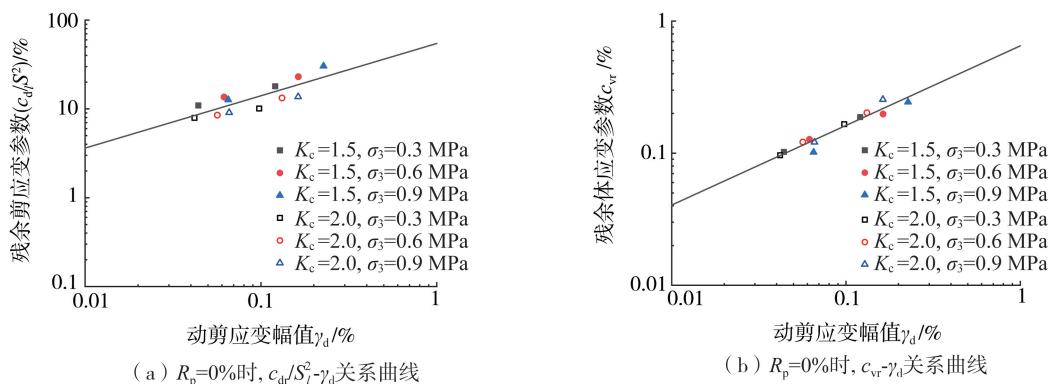
Table 7 Summary table of index m when the residual body strain ε_{vr} is fitted with exponential function

高聚物质量比 $R_p/\%$	固结比 K_c	$\sigma_3=0.3$ MPa		$\sigma_3=0.6$ MPa		$\sigma_3=0.9$ MPa		均值
		CSR=0.4	CSR=0.8	CSR=0.4	CSR=0.8	CSR=0.4	CSR=0.8	
0	1.0	2.29	2.13	2.24	2.08	2.13	1.92	2.13
	1.5	1.99	2.03	2.08	2.06	2.09	1.90	2.02
	2.0	1.92	1.81	2.02	2.00	2.08	2.12	1.99
3	1.0	2.66	2.12	2.45	1.53	2.55	1.96	2.21
	1.5	2.37	2.18	2.35	2.54	2.32	2.62	2.39
	2.0	2.17	2.32	2.25	2.48	2.43	2.54	2.36
6	1.5	2.38	2.53	2.50	2.61	2.52	2.68	2.54
9	1.5	2.78	2.73	2.77	2.68	—	—	2.74
12	1.5	2.94	2.81	2.93	2.82	—	—	2.87

在不考虑应力水平 S_l 对 c_{vr} 的影响 (即 $c_3=0$) 和 K_c 为 1.5、2.0 条件下,在双对数坐标下绘制 $c_{vr}-\gamma_d$ 和 $c_{dr}/S_l^2-\gamma_d$ 的关系曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,在不同高聚物质量比 R_p 下的 $c_{dr}/S_l^2-\gamma_r$ 和 $c_{vr}-\gamma_d$ 关系基本符合线性曲线, c_{dr}/S_l^2 与动应变增幅值 γ_d 在双对数坐标内的数据点离散性较大,说明沈珠江残余变形模型不能合理的估计固结比 K_c 对残余剪应变的影响。应综合考虑高聚物质量比 R_p 和固结比 K_c 对高聚物胶凝戈壁土的残余剪应变的影响,对残余剪应变参数 c_{dr} 进行修正,如式 (10) 所示:

$$c_{dr} = c_4 \gamma_d^{c_5} S_l^{1+1.4R_p^0.2} \tag{10}$$

采用式 (10) 在高聚物质量比 R_p 为 0%、3% 条件下对试验结果 $c_{dr}/S_l^{1+1.4R_p^0.2}$ 与动剪应变幅值 γ_d 关系绘制于双对数坐标中,如图 10 所示。由图可知,采用修正后的残余变形模型式 (10) 对试验结果的线性拟合效果相较于原沈珠江模型要好,数据点的离散性减小,表明修正后的残余变形模型能更好地描述高聚物胶凝戈壁土的残余剪应变。



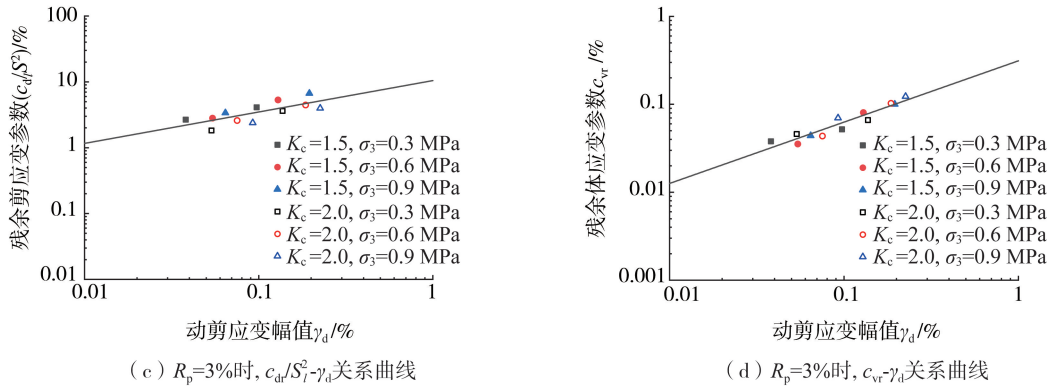


图 9 不同 R_p 条件下沈珠江残余变形模型拟合高聚物胶凝戈壁土 $(c_{dr}/S_t^2)-\gamma_r$ 、 $c_{vr}-\gamma_d$ 关系曲线
 Fig. 9 The $c_{dr}/S_t^2-\gamma_r$ and $c_{vr}-\gamma_d$ relationship curves of high polymer cementitious Gobi soil fitted by Shen Zhujiang residual deformation model under different R_p conditions

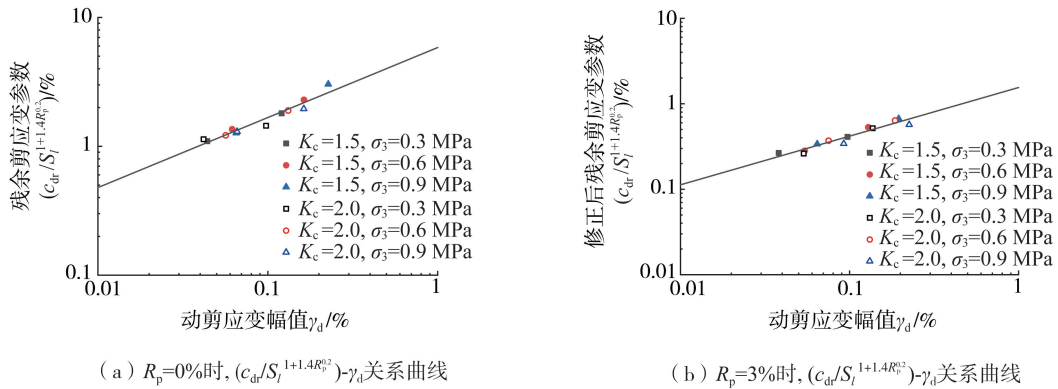


图 10 修正后模型拟合高聚物胶凝戈壁土 $(c_{dr}/S_t^{1+1.4R_p^{0.2}})-\gamma_d$ 关系曲线

Fig. 10 Relationship curves of modified model used to fit the $(c_{dr}/S_t^{1+1.4R_p^{0.2}})-\gamma_d$ high polymer cementitious Gobi soil

4.3 模型验证

为验证高聚物胶凝戈壁土的修正残余变形模型的适用性,进行固结比 K_c 为 1.5 和 2.0、围压 σ_3 为 0.4 MPa 和 0.8 MPa、动应力比 CSR 为 0.4 和 0.8、高聚物质量比 R_p 为 3% 条件下的高聚物胶凝戈壁土动残余变形试验。考虑戈壁土在工程中一般采用较大的干密度填筑,验证试验密度以戈壁土相对密度 $D_r = 0.85$ ($\rho_d = 2.205 \text{ g/cm}^3$) 控制。

整理得到的不同试验条件下的残余剪应变 γ_r 、残余体应变 ε_{vr} 与振动次数 N 的关系曲线,并采用式(8)、式(9)进行非线性拟合,结果见图 11。由图 11 可知,高聚物胶凝戈壁土在较大密度时的残余剪应变 γ_r 与残余体应变 ε_{vr} 随振动次数 N 增长也呈非线性增大,采用指数函数形式拟合时试验点与拟合曲线吻合度较高。

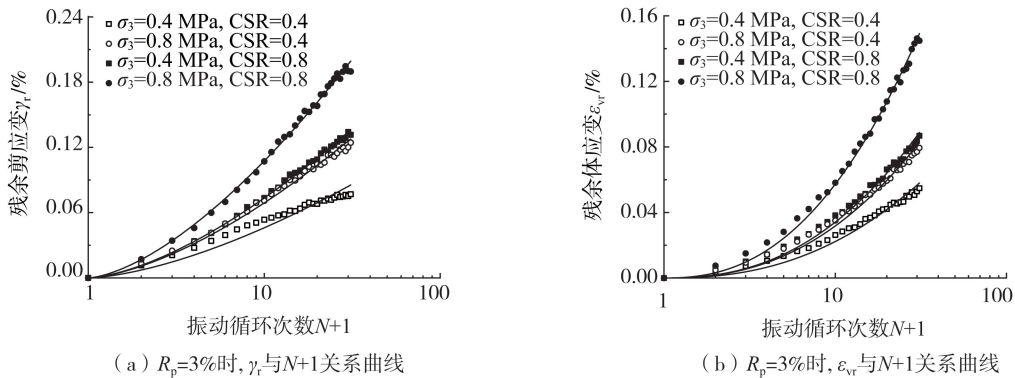


图 11 采用修正模型拟合 $k_c = 1.5$ 时高聚物胶凝戈壁土动残余变形与振动次数关系

Fig. 11 Relationship between dynamic residual deformation and vibration frequency of high polymer cementitious Gobi soil fitted by modified model

根据图 12 计算得残余体应变参数 c_{vr} 和残余剪应变参数 c_{dr} , 在双对数坐标内分别绘制 $(c_{dr}/S_t^{1+1.4R_p^{0.2}})-\gamma_d$ 关系曲线和 $c_{vr}-\gamma_d$ 关系曲线。由图可知, $(c_{dr}/S_t^{1+1.4R_p^{0.2}})-\gamma_d$ 、 $c_{vr}-\gamma_d$ 在双对数坐标内具有良好的线性关系,说明

修正残余变形模型能较好描述高聚物胶凝戈壁土的动残余变形规律。由拟合直线的截距和斜率分别推求出高聚物胶凝戈壁土的残余变形模型参数,见表8。

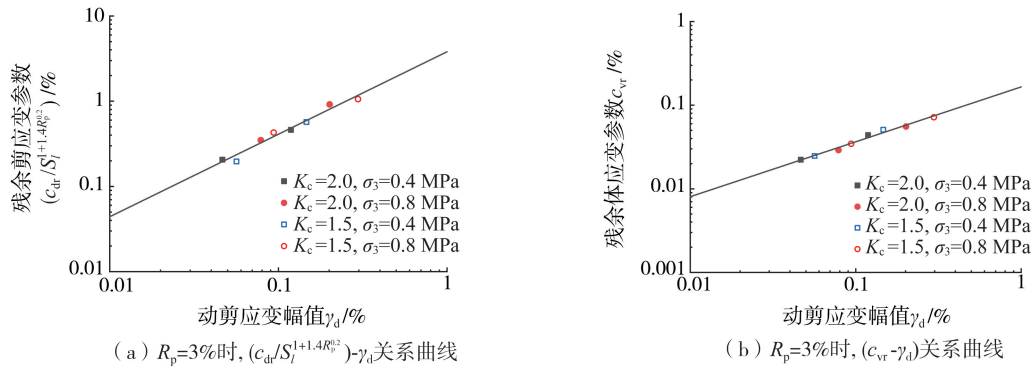


图12 采用修正模型拟合高聚物胶凝戈壁土动残余变形试验结果

Fig. 12 Test results of modified model used to fit the dynamic residual deformation of high polymer cementitious Gobi soil

表8 高聚物胶凝戈壁土动残余变形模型参数

Table 8 Parameters of dynamic residual deformation model of high polymer cementitious Gobi soil

高聚物质量比 $R_p/\%$	$c_1/\%$	c_2	c_3	$c_4/\%$	c_5
3	0.17	0.66	0	3.80	0.97

综上,修正后的残余变形模型可以较好地描述高聚物胶凝戈壁土在密度较大时的动残余变形试验结果。

5 结论

本文进行了高聚物胶凝戈壁土的中型动三轴试验,研究高聚物质量比、围压、固结比和动应力比对高聚物胶凝戈壁土动残余变形的影响,并采用投影寻踪回归(PPR)对各影响因素进行了分析;在沈珠江动残余变形模型的基础上,考虑高聚物质量比对动残余变形的影响,采用指数函数对动残余剪应变和残余体应变随振动次数的关系进行拟合,建立了适用于高聚物胶凝戈壁土的修正残余变形模型。主要得出以下结论:

1) 高聚物胶凝戈壁土的残余变形随高聚物质量比的增大而减小。高聚物质量比为3%的高聚物胶凝戈壁土在经受30次循环振动荷载后产生的残余剪应变为天然戈壁土的15.0%~18.8%,残余体应变为天然戈壁土的12.1%~22.2%,并且高聚物质量比越大,减小幅度越大。说明高聚物的掺入能有效提高戈壁土的整体性,减小戈壁土在动荷载作用下的颗粒移动,显著降低动残余变形。

2) 围压、固结比和动应力比对高聚物胶凝戈壁土的动残余变形均有影响。高聚物胶凝戈壁土的残余剪应变和残余体应变均随围压的增长而增大,服从线性增长规律;动残余变形随固结比的增大而减小,随动应力比的增大而增大。

3) 通过投影寻踪回归分析,得出高聚物质量比、动应力比、围压和固结比对高聚物胶凝戈壁土的动残余剪应变和残余体应变的影响权重排序依次为高聚物质量比、围压、动应力比、固结比,表明高聚物胶凝戈壁土的动残余变形受高聚物质量比的影响最大。

4) 在沈珠江动残余变形模型的基础上,采用指数函数对残余变形与振动次数的关系进行拟合,具有较好的拟合度;考虑高聚物质量比对动残余变形的影响,建立了高聚物胶凝戈壁土的动残余变形修正模型;通过验证试验,得出修正后的残余变形模型可以较好地描述密度较大时的高聚物胶凝戈壁土的动残余变形试验结果。

本文仅对各影响因素对高聚物戈壁土的动残余变形特性的影响进行了试验研究,未涉及到对建筑物的结构优化方面的分析,这一部分工作尚需作更深一步研究。

参考文献:

[1] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[2] 陈生水, 霍家平, 章为民. “5.12”汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 795-801.

- CHEN Shengshui, HUO Jiaping, ZHANG Weimin. Analysis of effects of "5.12" Wenchuan earthquake on Zippingpu concrete face rock-fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 795-801. (in Chinese)
- [3] 陈容, 赵明. 汶川地震对碧口等三座大坝的震损及修复工作综述[J]. 大坝与安全, 2012(3): 6-10.
CHEN Rong, ZHAO Ming. Influence of Wenchuan earthquake on three dams and rehabilitation[J]. Dam & Safety, 2012(3): 6-10. (in Chinese)
- [4] 王昆耀, 常亚屏, 陈宁. 往返荷载下粗粒土的残余变形特性[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 48-53.
WANG Kunyao, CHANG Yaping, CHEN Ning. Residual deformation characteristics of coarse-grained soils under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 48-53. (in Chinese)
- [5] STEWART H E. Permanent strains from cyclic variable-amplitude loadings[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(6): 646-660.
- [6] CHANG C S, WHITMAN R V. Drained permanent deformation of sand due to cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(10): 1164-1180.
- [7] 曹培, 王芳, 严丽雪, 等. 砂砾料动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 211-215.
CAO Pei, WANG Fang, YAN Lixue, et al. Experimental study of residual deformation behavior of sandy gravel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 211-215. (in Chinese)
- [8] 凌华, 傅华, 蔡正银, 等. 坝料动残余变形特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 532-537.
LING Hua, FU Hua, CAI Zhengyin, et al. Experimental study on dynamic residual deformation characteristics of dam materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 532-537. (in Chinese)
- [9] 赵凯, 蓝天, 周建军, 等. 饱和砂砾土动残余变形的新模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 1102-1114.
ZHAO Kai, LAN Tian, ZHOU Jianjun, et al. A new residual deformation model of saturated sandy gravel under cyclic loadings[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 1102-1114. (in Chinese)
- [10] 何冰. 加筋土地震残余变形试验模型研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
HE Bing. Study on seismic residual deformation of reinforced soil in experimental model[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020. (in Chinese)
- [11] 刘汉龙, 林永亮, 凌华, 等. 加筋堆石料的动残余变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1418-1421.
LIU Hanlong, LIN Yongliang, LING Hua, et al. Residual deformation behaviors of reinforced rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1418-1421. (in Chinese)
- [12] 刘平, 刘汉龙, 孟敏强, 等. 先期振动对高聚物胶凝堆石料动变形特性的影响[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 230-239.
LIU Ping, LIU Hanlong, MENG Minqiang, et al. Effect of previous cyclic loading on dynamic deformation behaviors of PFA-reinforced rockfill materials[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(6): 230-239. (in Chinese)
- [13] TANIGUCHI E, WHITMAN R V, MARR W A. Prediction of earthquake-induced deformation of earthdams[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 126-132.
- [14] 贾革续, 孔宪京. 粗粒土动残余变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 26-30.
JIA Gexu, KONG Xianjing. Study on residual deformation characteristics of coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 26-30. (in Chinese)
- [15] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J]. 水利学报, 1987, 18(12): 1-16.
WANG Wenshao, JIN Chongpan, WANG Kecheng. Aseismatic calculation, model and prototype experiments and field monitoring of earth-rock dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987, 18(12): 1-16. (in Chinese)
- [16] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 143-150.
SHEN Zhujiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143-150. (in Chinese)
- [17] 邹德高, 孟凡伟, 孔宪京, 等. 堆石料残余变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 807-812.
ZOU Degao, MENG Fanwei, KONG Xianjing, et al. Residual deformation behavior of rock-fill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 807-812. (in Chinese)
- [18] 吕小龙, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9): 1729-1735.
LV Xiaolong, CHI Shichun, JIA Yufeng. Experimental study on dynamic deformation behavior of rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1729-1735. (in Chinese)
- [19] 杨青坡, 邹德高, 李云清, 等. 两种残余变形模型计算结果对比分析[J]. 人民长江, 2015, 46(4): 74-77.
YANG Qingpo, ZOU Degao, LI Yunqing, et al. Comparative analysis of calculated results by using two residual deformation models[J]. Yangtze River, 2015, 46(4): 74-77. (in Chinese)
- [20] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [21] 郑祖国, 何建新, 宫经伟, 等. 复杂系统的投影寻踪回归无假定建模技术及应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
DENG Zuguo, HE Jianxin, GONG Jingwei, et al. Projection pursuit regression for complex systems without assumed modeling techniques and application examples[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese)
- [22] 姜春萌, 宫经伟, 唐新军, 等. 基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 333-340.
JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese)