

长期循环荷载下粗粒土应变累积与 塑性安定准则研究

胡永利^{1,2}, 邬智峰³, 张东杰³, 李琼林³, 王利平⁴, 田光明⁴, 王晓鹏²

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031; 2. 济南交通发展投资有限公司, 山东 济南 250101;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 中铁二十二局集团第四工程有限公司, 天津 301700)

摘要:压实粗粒土作为铁路路基基床表层的填筑材料,其在长期列车循环荷载作用下的动力响应对于整个路基结构的服役性能至关重要。文中研究进行了一系列循环三轴试验,以探究细颗粒含量、围压和循环应力幅值对粗粒土累积行为的影响。研究表明,在相同的循环荷载作用下,细颗粒含量较高的试样产生更少的累积轴向应变。此外,粗粒土试样在较高的围压或较低的循环应力幅值作用下产生的累积轴向应变也较少。随后,根据一个通用的安定准则确定了不同细颗粒含量粗粒土的塑性安定极限。结果表明,随着细颗粒含量的增加,粗粒土试样的塑性安定极限逐渐增大。在较高的围压作用下,粗粒土对应的塑性安定极限也更高。此外,通过在 $p-q$ 平面上绘制与粗粒土塑性安定极限相对应的应力状态,建立细颗粒含量系数(fine content, FC)与现有安定准则中模型参数之间的关系式,进而提出了适用于不同细颗粒含量的粗粒土的统一塑性安定准则。研究成果可为铁路路基的设计和稳定性评估提供理论基础。

关键词:粗粒土;细颗粒含量;累积应变;塑性安定极限

中图分类号:TU435

文献标志码:A

Strain accumulation and plastic shakedown criterion of coarse-grained soil under long-term cyclic loading

HU Yongli^{1,2}, WU Zhifeng³, ZHANG Dongjie³, LI Qionglin³, WANG Liping⁴,
TIAN Guangming⁴, WANG Xiaopeng²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Jinan Communications Development & Investment Co., Ltd., Jinan 250101, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
4. China Railway 22nd Bureau Group 4th Corporation Limited, Tianjin 301700, China)

Abstract: The dynamic response of compacted coarse-grained soil as a filling material for the surface layer of railway subgrade bedding is crucial for the overall performance of the subgrade structure under long-term cyclic train loads. This study conducted a series of cyclic triaxial tests to investigate the effects of fine content, confining pressure, and cyclic stress amplitude on the accumulated behavior of coarse-grained soils. The test results indicate that under the same cyclic loading conditions, specimens with higher fine content exhibit less accumulated axial strain. Furthermore, coarse-grained soil specimens exhibit less accumulated axial strain under higher confining pressure or lower cyclic stress amplitudes. Subsequently, the plastic shakedown limit of coarse-grained soils with different fine contents was determined based on a universal shakedown criterion. The results demonstrate that the plastic shakedown limit of coarse-grained soil specimens gradually increases with an increase in fine content. Under

收稿日期:2023-12-06; 修回日期:2024-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52178356)

作者简介:胡永利(1986—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事轨道交通工程振动控制研究。E-mail:hy119860113@163.com

通信作者:李琼林(1986—),男,教授,博士,主要从事土动力学与寒区岩土工程研究。E-mail:qionglin_li@swjtu.edu.cn

higher confining pressure, the corresponding plastic shakedown limit of coarse-grained soil is also higher. Additionally, by plotting the stress state corresponding to the plastic shakedown limit of coarse-grained soil on the plane of p - q , a relationship was established between the coefficient of fine content (FC) and the model parameters in the existing shakedown criterion. A united plastic shakedown criterion is then proposed for coarse-grained soils with different fine contents. The conclusions can provide a theoretical foundation for the design and stability assessment of railway subgrades.

Key words: coarse-grained soil; fine content; accumulated strain; plastic shakedown limit

0 引言

目前,我国铁路建设面向高速化与重载化发展,车辆行驶速度与载重量的提高显著加剧了路基结构的动态响应^[1-2]。压实的粗粒土被广泛用作路基表层的填筑材料,直接承受由铁路轨道传递而来的长期循环荷载。大量的工程实践表明,在气候环境和长期交通荷载的联合作用下,路基结构层会发生不均匀沉降、开裂和翻浆冒泥等工程病害^[3-4],而前述病害的发生与路基粗粒土填料服役性能的劣化有关,粗粒土路基填料的强度、刚度和长期稳定性将直接影响铁路的安全运营与长期服役性能。因此,深入研究长期循环荷载作用下压实粗粒土的应变累积行为,评估长期循环荷载下路基的动力稳定性显得尤为迫切,国内外学者针对该问题也开展了大量的试验与理论研究。

模拟长期交通荷载的循环三轴试验常用于研究粗粒土的应变累积行为,大量的试验结果表明^[5-7],在长期循环荷载作用下,粗粒土会产生不可忽略的塑性应变,随着加载循环次数的增加,塑性应变逐渐累积变化,其发展受到各种因素的影响,包括细颗粒含量、湿度、循环应力幅值、围压、初始偏压应力、频率和压实度等。不同循环应力水平下粗粒土的累积塑性应变与加载循环次数之间的累积曲线,可分为3种发展模式,WERKMEISTER^[8]首次将其定义为塑性安定、塑性蠕变和增量型破坏,并得到了后继研究者的认可与发展^[9]。此外,已有学者也提出了不同的判定准则来确定3种发展模式之间的区域界限,并将其用于评估路基材料的长期服役状态^[10]。塑性安定和塑性蠕变之间的界限对应的循环应力幅值被定义为塑性安定极限值,常被用作评估路基长期动力稳定性的指标。当由车辆交通荷载引起的路基内的循环应力幅值低于塑性安定极限时,粗粒土处于安定状态,在长期循环荷载作用下路基的动力沉降变形趋于稳定,且在可控范围内。目前针对影响塑性安定极限因素的研究也已开始展开,包括围压、偏压应力和土体的湿度等,并希望提出关于应力状态的塑性安定极限准则,但这些研究尚不充分^[9-10]。

同时值得注意的是,粗颗粒路基结构层在长期干湿、冻融和交通荷载的联合作用下,黏土细颗粒会侵入粗颗粒土骨架,形成受污染的路基层,其不仅影响路基填料的持水性能,同时也影响了其在长期交通荷载下的承载性能,因此需要研究不同细颗粒含量的粗粒土填料的应变累积和承载性能的变化,服务于路基工程长期服役性能的准确评估。目前,国内外学者们针对不同细颗粒含量的粗粒土开展了大量的试验研究,探究其对粗粒土强度和变形的影响^[11-13]。陈靖宇^[14]对不同细颗粒含量条件下的粗粒土开展了循环三轴试验。试验结果表明,在较低的循环应力作用下,粗粒土的累积轴向应变随着细颗粒含量的增加呈现出先增后减的趋势。随着循环应力幅值的增大,在低频率下粗粒土的累积轴向应变也随细颗粒含量的增加呈现类似的趋势。在高频率下,随着细颗粒含量的增加,粗粒土的累积轴向应变则呈现出先增大后减小再继续增大的趋势。在较高循环应力的作用下,粗粒土的累积轴向应变随细颗粒含量的增加也呈现先增后减小再继续增大的趋势。元帅^[15]也开展了不同细颗粒含量的粗粒土三轴试验。试验结果表明,随着细颗粒含量的增大,粗粒土试样的静强度和累积轴向应变均减小。凌华等^[16]对粗粒土开展了大型三轴排水试验。试验结果表明,随着细颗粒含量增大,粗粒土的强度逐渐减小,其中强度指标黏聚力呈现降低的趋势,而内摩擦角呈现递增的趋势。上述研究表明,不同学者研究得到的细颗粒含量变化对粗粒土力学特性的影响规律并不完全一致。目前的研究中关于细颗粒含量对粗粒土的安定行为的报道尚不多见,部分研究仅通过现有的安定准则初步判定了不同细颗粒含量粗粒土累积曲线的发展模式,无法满足路基长期动力承载性能评估的技术需求^[17]。

鉴于前述,本文首先对不同细颗粒含量的粗粒土进行了系列的模拟交通荷载的循环三轴试验,研究了细颗粒含量、围压和循环应力幅值对粗粒土累积轴向应变的影响规律。随后,基于安定理论研究粗粒土的应变累积行为,并详细探究了细颗粒含量对粗粒土塑性安定极限的影响。最后,结合既有的研究成果,提出了考虑细颗粒含量影响的粗粒土塑性安定准则。研究成果可为铁路路基的长期动力稳定性设计和评估提供理论支持。

1 试验过程

1.1 试验材料和试样制备

本研究中的试验材料是一种由粉质黏土、砂土和级配碎石组成的人工混合物,常用于铁路工程中的路基填充材料。为了研究细颗粒含量对混合物的长期动力特性的影响,参考文献[13]并定义了细颗粒含量参数(fine content, FC),它表示粒径小于0.075 mm以下的土颗粒与粒径大于0.075 mm以上的土颗粒的干质量的比值。本研究制备了4种不同细颗粒含量(FC)的粗粒土试样,分别为3%、6%、9%、12%。通过对细颗粒含量为3%的粗粒土进行标准击实试验,确定其最大干密度为 2.2 g/cm^3 ,最优含水量为6.8%。然后,以0.95的压实度作为基准,进一步确定试样中粉质黏土、砂土和级配碎石的质量。在本研究中,为了对比细颗粒含量的影响,保持细颗粒含量为6%、9%、12%的试样中粗颗粒土(粒径 $>0.075 \text{ mm}$)的干质量均与细颗粒含量为3%的试样一致。不同细颗粒含量下试样的级配曲线见图1。通过开展细粒土的液塑限试验,确定细粒土的液限为24.16%,塑限为14.19%。

试样的制备过程遵循我国TB 10102—2010《铁路工程土工试验规程》^[18],不同细颗粒含量试样的含水率均控制在6.8%。首先对各个粒径的土壤颗粒进行单独称重,并与适量的水充分混合。然后,将得到的混合物放入一个封闭的容器中,并在压实之前静置12 h,以确保整个土壤颗粒中的水分均匀分布。随后,将一定数量的混合物放入标准模具,其高度为200 mm,直径为100 mm。使用落锤对混合物进行5层压实,制作好后的试样如图2所示。

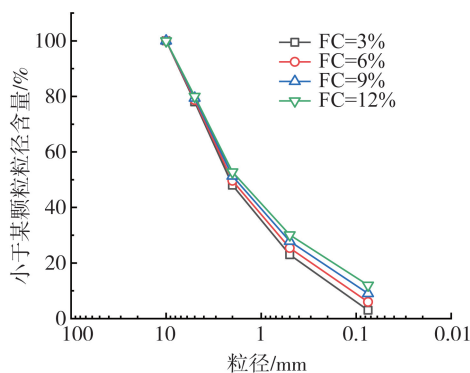


图1 不同细颗粒含量粗粒土试样的级配曲线

Fig. 1 Gradating curves of coarse-grained soil specimens with different fine contents

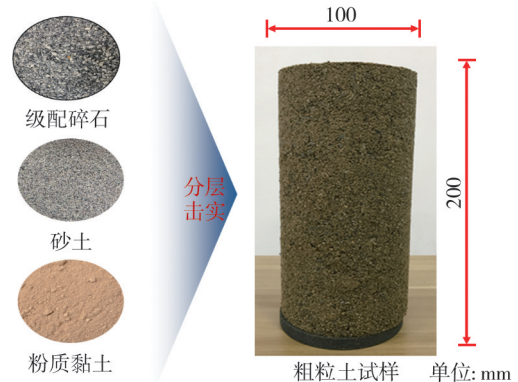


图2 测试粗粒土样

Fig. 2 Tested coarse-grained soil

1.2 试验设备和加载方案

本研究的所有试验工作均使用循环三轴试验系统开展,该测试系统配备了围压和反压控制器、轴向加载器和数据采集装置。测试系统的压力控制器能够在 $0 \sim 2 \text{ MPa}$ 的范围内对试样施加围压和反压。轴向加载系统能够通过应用内部生成的波形来控制应力,例如正弦、三角形或其他由外部输入定义的波形,最大频率为5 Hz。峰值轴向承载力为10 kN,最大轴向位移为100 mm。

在试验开始前,将试样放置在压力室底座上,然后根据试验条件施加相应水平的围压,并在达到设定的围压后保持一段时间。随后,在垂直方向上对试样施加15 kPa的轴向力,并保持一段时间。上述步骤为后续施加循环荷载提供了所需的初始静应力状态。接着,以指定频率2.0 Hz施加正弦波形的循环应力。试件的整个加载过程如图3所示,图中 σ_3 为围压, σ_s 为初始静轴向应力, $\bar{\sigma}_{\text{cyc}}$ 为循环应力幅值。加载过程在轴向

应变达到 15% 或加载循环次数达到 10 000 次时结束。试验方案考虑了循环应力幅值、围压和细颗粒含量。测试条件的详细概述见表 1。

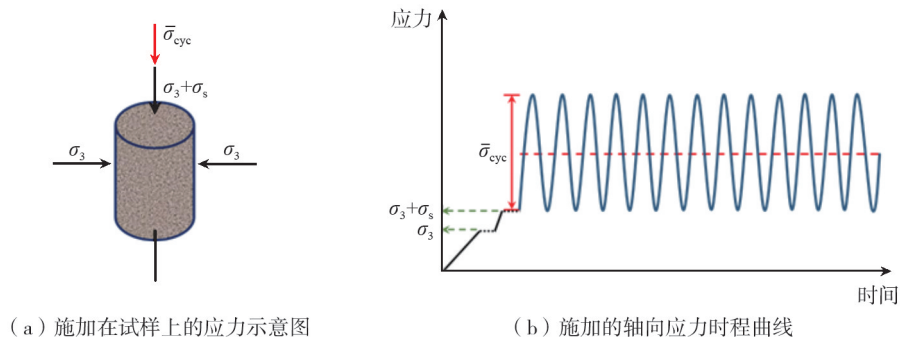


图 3 试样的应力加载过程示意图

Fig. 3 Schematic illustration of stress loading process of the specimen

表 1 粗粒土循环三轴试验条件表

Table 1 Cyclic triaxial tests of coarse-grained soil

试验分组	试验编号	细颗粒含量/%	围压/kPa	动应力幅值/kPa	试验分组	试验编号	细颗粒含量/%	围压/kPa	动应力幅值/kPa
A 组	A1	3	30	120	C 组	C1	9	30	120
	A2		30	180		C2		30	180
	A3		30	240		C3		30	240
	A4	60	60	180		C4	60	180	
	A5		60	240		C5	60	240	
	A6		60	300		C6	60	300	
	A7	90	90	240		C7	90	240	
	A8		90	300		C8	90	300	
	A9		90	360		C9	90	360	
B 组	B1	6	30	120	D 组	D1	12	30	120
	B2		30	180		D2		30	180
	B3		30	240		D3		30	240
	B4	60	60	180		D4	60	180	
	B5		60	240		D5	60	240	
	B6		60	300		D6	60	300	
	B7	90	90	240		D7	90	240	
	B8		90	300		D8	90	300	
	B9		90	360		D9	90	360	

2 试验结果与分析

2.1 细颗粒含量的影响

图 4 展示了不同细颗粒含量试样的累积轴向应变随循环次数增加的变化情况。从试验结果中可以观察到,细颗粒含量对累积轴向应变的影响,具有较高细颗粒含量的粗粒土试样在给定的加载循环次数下产生较少的累积轴向应变。这是因为随着细颗粒含量的逐渐增加,粗颗粒之间的孔隙被逐渐填充,粗细颗粒之间的嵌挤作用增强,试样密实度增加,此时粗粒土试样的强度由粗颗粒与细颗粒共同承担,土体强度得到提升。由图可知,由 WERKMEISTER^[8]定义的 3 种积累曲线类型。试样 A1 的累积曲线属于塑性安定型,试样 A2 的累积曲线可以被视为塑性蠕变型,试样 A3 的累积曲线属于增量型破坏。

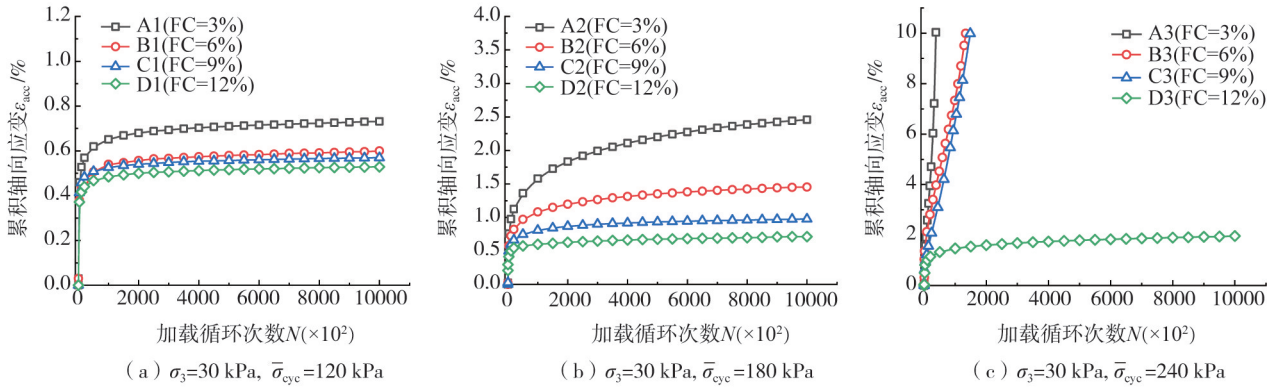


图 4 不同细颗粒含量试样累积轴向应变与加载循环次数的关系

Fig.4 Relationship between cumulative axial strain and numbers of loading cycles for specimens with different fine contents

2.2 围压的影响

粗粒土的累积曲线如图 5 所示,研究了围压对累积轴向应变的影响。图中所有试验均在 240 kPa 的循环应力幅值下进行。由图可知,无论细颗粒含量如何,在相同的加载循环下,试样产生的累积轴向应变都会随着围压的增加而减小。这可以归因于围压导致土颗粒间相互更加靠近并限制土颗粒的横向移动,从而显著提高了粗粒土在循环加载下的变形抵抗能力。此外,围压对轴向应变累积的抑制作用在细颗粒含量较低的试样中更为显著。以细颗粒含量为 3%和 12%的试样的试验结果为例,对于细颗粒含量为 3%的试样,当围压从 60 kPa 增加到 90 kPa 时,试样的最终累积轴向应变减小了 45.5%,而对于细颗粒含量为 12%的试样,最终累积轴向应变减小了 13.2%。

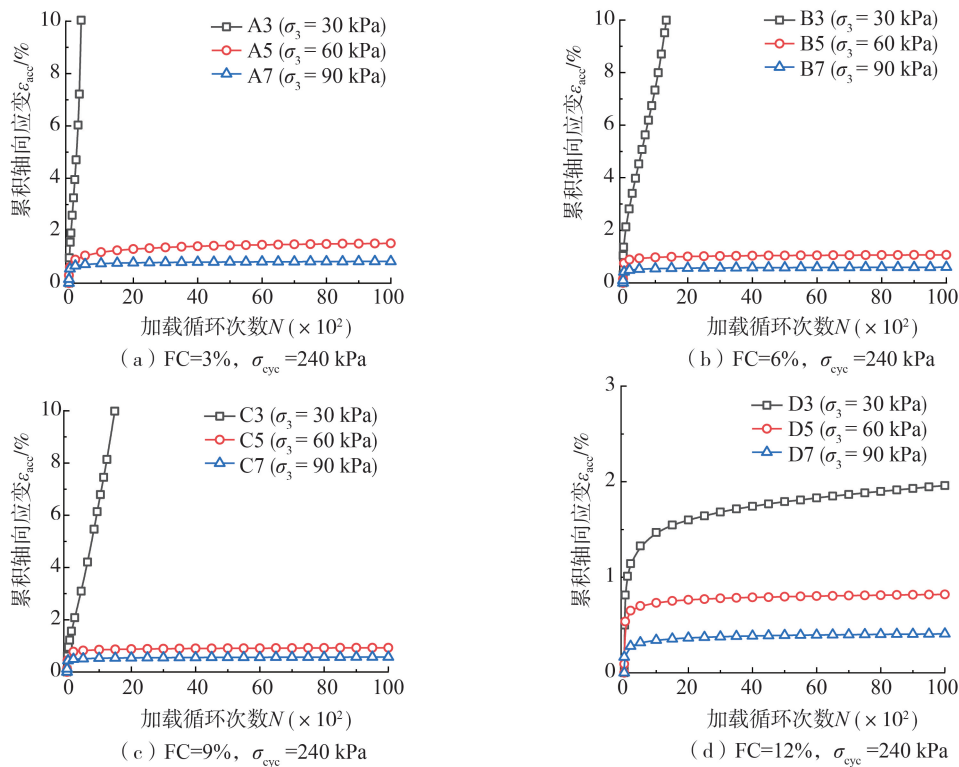


图 5 不同围压下粗粒土累积轴向应变与加载循环次数的关系

Fig.5 Relationship between cumulative axial strain and the numbers of loading cycles for coarse-grained soils under different confining pressures

2.3 循环应力幅值的影响

粗粒土累积轴向应变在不同循环应力幅值下随加载循环次数的变化如图 6 所示。由图可知,循环应力幅值对试样轴向应变的累积影响显著,在相同的加载循环次数下,具有更高的循环应力幅值将产生更多的累积轴向应变。对于细颗粒含量为 3%的试样,随着循环应力幅值的增加,累积曲线的模式发生了变化,如

图6(a)所示。由图可知,由 WERKMEISTER^[8]定义的3种累积曲线类型,当循环应力幅值为120 kPa时,试样A1的累积曲线属于塑性安定状态。在循环应力幅值为180 kPa时,试样A2的累积曲线中可以观察到塑性蠕变现象。在循环应力幅值为240 kPa时,试样A3的累积曲线可以被视为增量型破坏。此外,对于细颗粒含量较低的试样,循环应力对累积轴向应变的影响更为显著。选取细颗粒含量为3%和12%的试样结果验证了这一结论。细颗粒含量为3%时,当循环载荷从120 kPa增加到180 kPa时,试样的累积轴向应变增加了365%。而细颗粒含量为12%时,当循环载荷从120 kPa增加到180 kPa时,试样的累积轴向应变增加了146%。

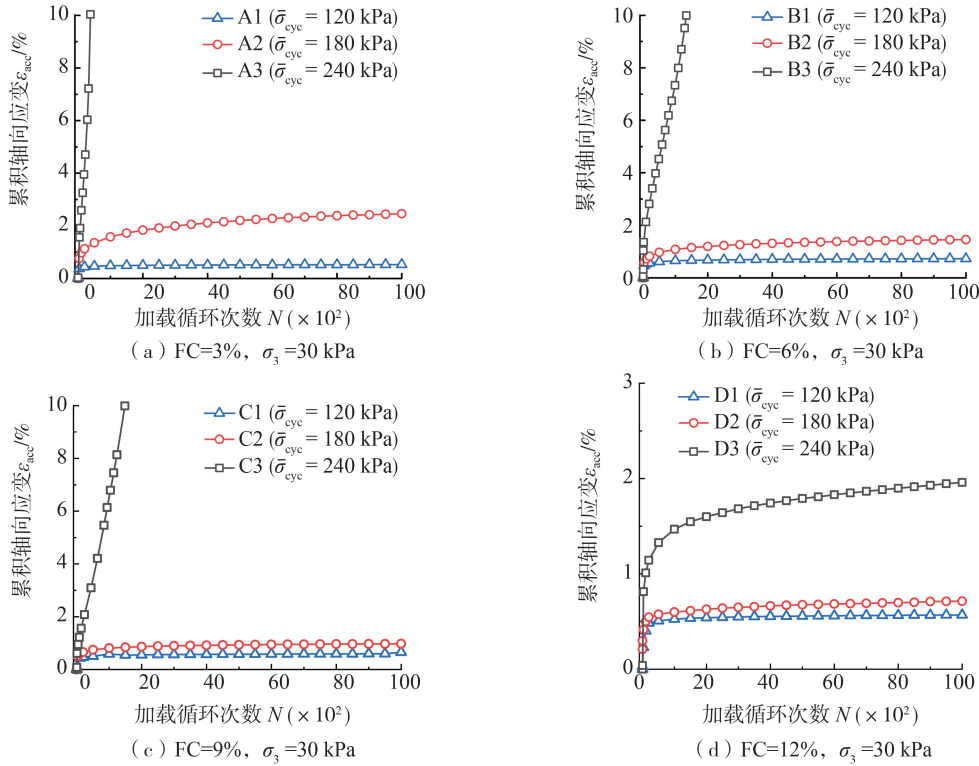


图6 不同循环应力幅值下累计应变和加载循环次数的关系

Fig. 6 Relationship between cumulative strain and the numbers of loading cycles for different cyclic stress amplitudes

3 基于安定理论的粗粒土应变累积行为分析

3.1 塑性安定极限的确定

目前,安定理论被广泛用于分析颗粒材料的累积行为并评估铁路路基的长期稳定性^[19]。基于该理论所确定的塑性安定极限常被用作评估安定状态的定量指标。目前,不同学者提出了不同的由累积曲线形态判定安定行为的方法,例如:2个加载周期之间累积轴向应变的增量或累积轴向应变的速率^[19]。本研究采用了CHEN等^[20]提出的塑性安定判定准则来确定粗粒土的塑性安定极限。图7展示了累积轴向应变随循环振动次数的演变,分为2个不同的阶段:后压密阶段和二次循环压缩阶段。与这2个阶段的边界相对应的加载循环次数被称为“特征循环次数 N_0 ”。由图7可知,二次循环压缩阶段产生的累积轴向应变的表达式为

$$\Delta \varepsilon_{2,acc} = \frac{1}{a_s} / \log[(N_0 + N_s) / N_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_s = N - N_0$;模型参数 $1/a_s$ 为判别累积曲线类型的指标。基于大量的粗粒土试验数据,CHEN等^[20]提出了对应于塑性安定极限和塑性蠕变极限的 $1/a_s$ 值。这些准则描述如式(2)~式(4)所示:

1) 塑性安定(范围A)

$$\frac{1}{a_s} \leq 0.1 \quad (2)$$

2) 塑性蠕变(范围B)

$$0.1 < \frac{1}{a_s} \leq 0.434 \quad (3)$$

3) 增量型破坏(范围 C):

$$\frac{1}{a_s} > 0.434 \quad (4)$$

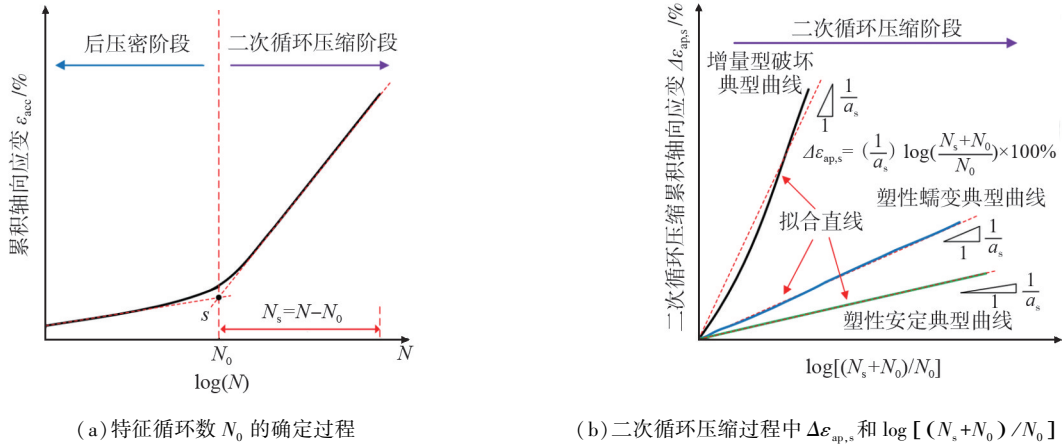


图 7 步骤图

Fig. 7 Step diagram

3.2 粗粒土的塑性安定极限

在本研究中,根据 CHEN 等^[20]提出的方法,绘制了粗粒土的二次累积轴向应变与 $\log[(N_s+N_0)/N_0]$ 之间的关系如图 8 所示,图中虚线均为拟合直线。在这个过程中,特征循环次数 $N_0=2000$ 。由图可知,所有二次累积轴向应变与 $\log[(N_s+N_0)/N_0]$ 的曲线都近似线性关系,这说明在本研究中选择的特征循环次数是合适的。

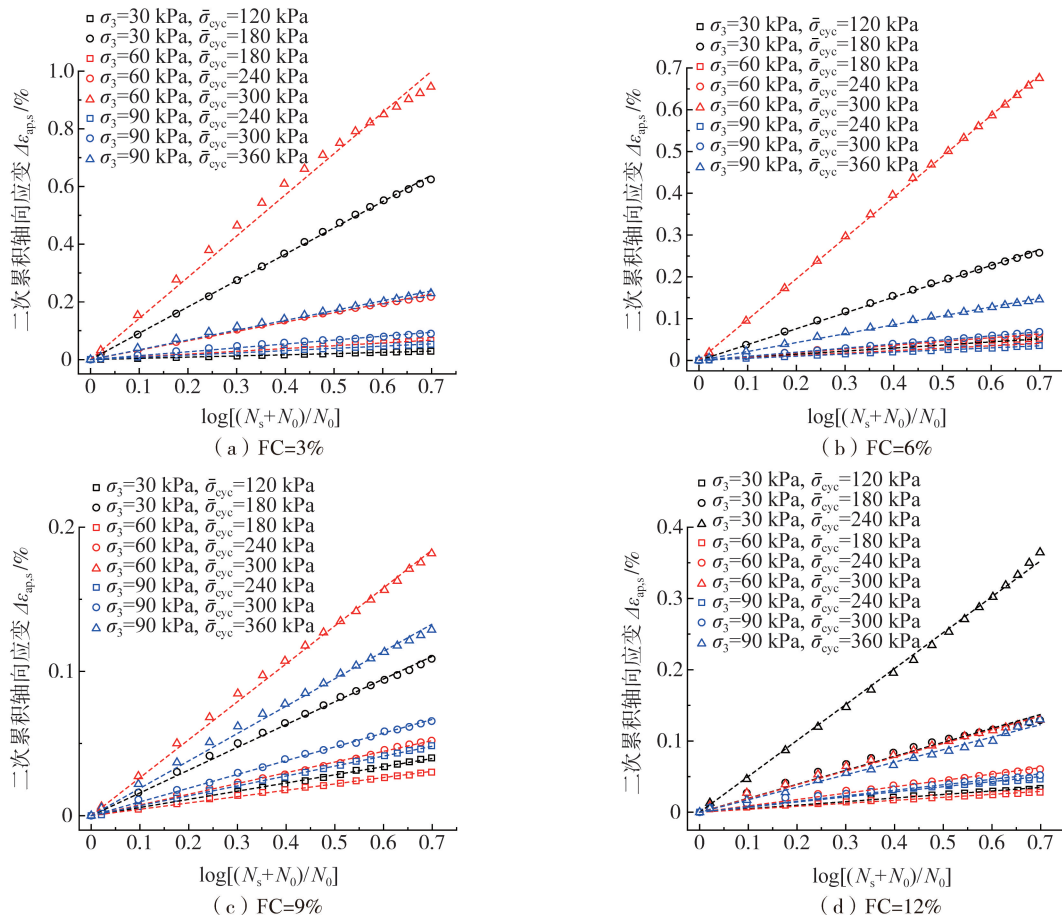


图 8 $\Delta\varepsilon_{ap,s}$ 与 $\log[(N_s+N_0)/N_0]$ 之间的线性关系

Fig. 8 Linear relationship between $\Delta\varepsilon_{ap,s}$ and $\log[(N_s+N_0)/N_0]$

由式(1)可以确定各个试验条件下对应的参数 $1/a_s$ 的数值,随后绘制施加的循环应力幅值与参数 $1/a_s$ 之间的关系如图9所示。由图可知,由式(2)~式(4)定义的塑性安定极限和塑性蠕变极限也用2条虚线表示,然后通过线性插值方法获得与这2个极限相对应的循环应力幅值。

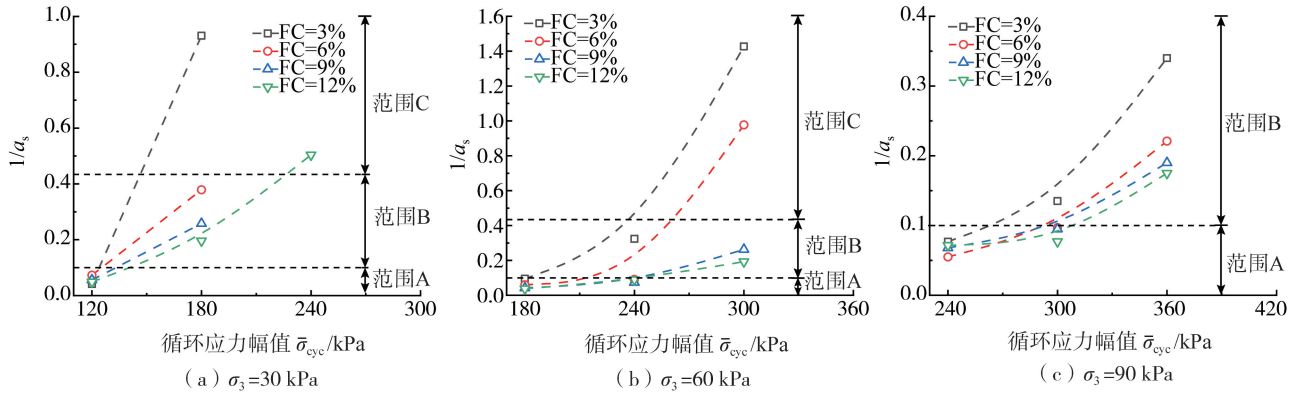


图9 不同围压下循环应力幅值 $\bar{\sigma}_{cyc}$ 与 $1/a_s$ 的关系

Fig. 9 Relationship between $\bar{\sigma}_{cyc}$ and $1/a_s$ under different confining pressures

图10以柱状图的形式显示了粗粒土试样的塑性安定极限,在较高的围压下,具有相同细颗粒含量的试样具有更高的塑性安定极限。这可以归因于围压本身使粗粒土颗粒更加靠近,限制了轴向循环加载下土颗粒的横向移动,从而显著提高了循环加载下土壤的承载能力。另一方面,在相同围压下,细颗粒含量更高的试样也具有更高的塑性安定极限。以60 kPa围压的试验条件为例,细颗粒含量分别为3%、6%、9%、12%的试样对应的塑性安定极限分别为180、214、237、240 kPa。然而,随着细颗粒含量的进一步增加,粗粒土塑性安定极限的增长速率趋于减小,塑性安定极限的增量分别为19%、11%、1%。

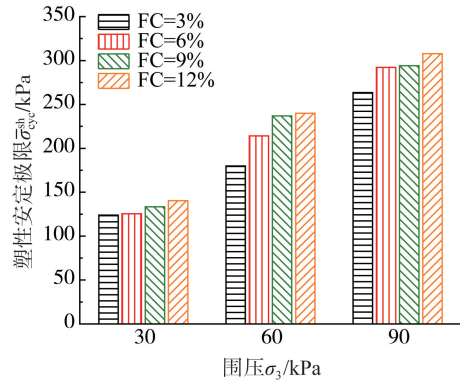


图10 不同细颗粒含量和围压下粗粒土试样的塑性安定极限
Fig. 10 Plastic shakedown limits of coarse-grained soil specimens with different fine-grained contents and confining pressures

3.3 p - q 平面中的塑性安定准则

在先前的研究中,当处于不同初始应力状态的粗粒土达到塑性安定极限时,试样的所有应力状态点均表现出趋向于在 p - q 平面上汇聚成一条直线^[21]。这条直线被用作粗粒土的塑性安定准则表达式为

$$q_{sh} = Ap_{sh} + B \quad (5)$$

式中: $q_{sh} = \sigma_{1,0} + \bar{\sigma}_{cyc}^{sh} - \sigma_3$; $p_{sh} = (\sigma_{1,0} + \bar{\sigma}_{cyc}^{sh} + 2\sigma_3)/3$; $\bar{\sigma}_{cyc}^{sh}$ 为粗粒土的塑性安定极限; $\sigma_{1,0}$ 为初始静轴向力; σ_3 为围压; 参数 A 和 B 分别为该安定准则的斜率和截距,这些参数可以通过使用不同试验条件下粗粒土的试验数据进行最佳拟合方法来确定。

绘制不同细颗粒含量条件下粗粒土的塑性安定准则线如图11所示。由图可知,不同细颗粒含量的塑性安定准则线对应的斜率 A 几乎相同,而随着细颗粒含量的增加,塑性安定准则线的截距 B 逐渐增大。根据式(5)对不同细颗粒含量粗粒土塑性安定准则线进行线性拟合,获得各试验条件下的斜率和截距如表2所示。

在本研究中,安定准则式(5)为确定不同细颗粒含量条件下的粗粒土塑性安定极限提供了一个简便的方法,具体的推导过程是:如图12所示, A 点表示试样在 p - q 平面上的初始静应力状态。在三轴条件下,塑性安定准则线上的应力状态可以表示为 $q_{sh} = \sigma_{1,0} + \bar{\sigma}_{cyc}^{sh} - \sigma_3$ 和 $p_{sh} = (\sigma_{1,0} + \bar{\sigma}_{cyc}^{sh} + 2\sigma_3)/3$,如图12中 B 点所示。将 B 点的应力状态代入式(5),即可得安定应力表达式为

$$\bar{\sigma}_{cyc}^{sh} = -\sigma_{1,0} - \frac{3+2A}{A-3}\sigma_3 - \frac{3B}{A-3} \quad (6)$$

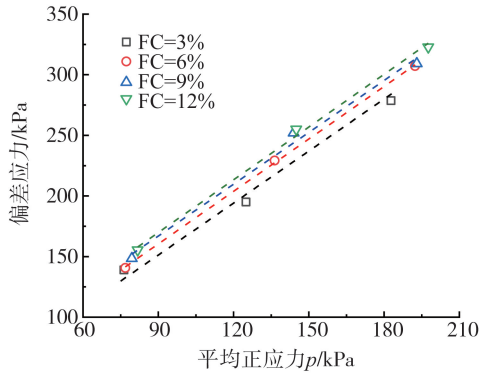


图 11 p - q 平面内粗粒土塑性安定准则线的确定

Fig. 11 Determination of the plastic shakedown criterion line of coarse-grained soil in the p - q plane

表 2 不同细颗粒含量粗粒土塑性安定准则线的斜率和截距

Table 2 Slopes and intercepts of plastic shakedown criterion lines for coarse-grained soils with different fine-grained contents

细颗粒含量 FC/%	斜率 A	截距 B
3	1.43	22.5
6	1.44	30.7
9	1.42	38.7
12	1.45	39.2

由图 11 和表 2 可知,不同细颗粒含量条件下斜率 A 的值几乎相同,因此在式(6)中 A 的取值均为 1.43。而参数 B 随细颗粒含量的增大而增大,因此绘制截距 B 与细颗粒含量 FC 的关系如图 13 所示。将图 13 中截距 B 与细颗粒含量 FC 的关系式代入式(6)中,可以确定不同细颗粒含量粗粒土的塑性安定极限如式(7)所示:

$$\bar{\sigma}_{\text{cyc}}^{\text{sh}} = -\sigma_{1,0} - \frac{3+2A}{A-3}\sigma_3 - \frac{-0.6(\text{FC})^2+15(\text{FC})+27}{A-3} \quad (7)$$

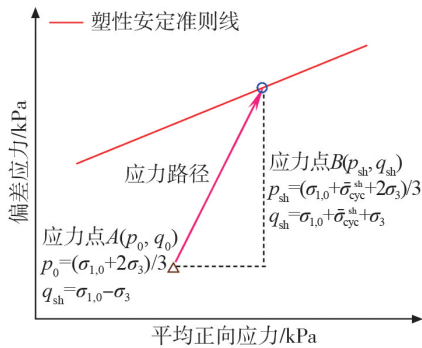


图 12 确定塑性安定极限示意图

Fig. 12 Schematic illustration of the determination of plastic shakedown limits

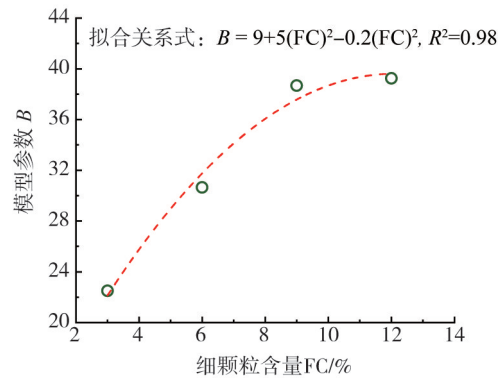


图 13 模型参数 B 与细颗粒含量系数 FC 的关系

Fig. 13 Relationship between model parameter B and fine content factor FC

4 结论

本研究对粗粒土进行了一系列的循环三轴试验,以探究不同细颗粒含量、围压和循环应力幅值条件下粗粒土的累积行为。基于安定理论确定了粗粒土的塑性安定极限,并在此基础上建立了考虑细颗粒含量和围压影响的粗粒土塑性安定极限统一预测准则。主要得到以下结论:

1) 长期循环应力引起的累积轴向应变的变化受试样细颗粒含量的显著影响。对于具有更高细颗粒含量的试样,在相同数量的加载循环下观察到了更低的累积轴向应变。随着细颗粒含量的逐渐增加,粗颗粒之间的孔隙被逐渐填充,粗细颗粒之间的嵌挤作用增强,试样密度增加,此时粗粒土试样的强度由粗颗粒与细颗粒共同承担,因此土体抵抗累积变形的能力得到提升。

2) 在相同数量的加载循环下,具有相同细颗粒含量的试样的累积轴向应变随着围压的增加而减小,围压导致土颗粒间相互更加靠近并限制土颗粒的横向移动,从而显著提高了粗粒土在循环加载下的变形抵抗能力。此外,对于细颗粒含量较低的试样,可以观察到围压对累积轴向应变的抑制作用更为显著。

3) 对于细颗粒含量相同的试样,在同一围压条件下,较高的循环应力幅值会导致粗粒土试样在相同数量的加载循环下产生更多的累积轴向应变。此外,对于具有更低细颗粒含量的试样,可以观察到循环应力幅值对累积轴向应变的影响更为显著。

4) 由通用的塑性安定准则确定了不同细颗粒含量粗粒土的塑性安定极限。细颗粒和围压对塑性安定

极限的影响显著,对于具有相同细颗粒含量的试样,施加更高的围压会导致更高的塑性安定极限。此外,在相同围压条件下,高细颗粒含量的试样会产生较高的塑性安定极限。

5)通过在 $p-q$ 平面上绘制与粗粒土塑性安定极限相对应的应力状态,建立细颗粒含量系数 FC 与现有安定准则中模型参数之间的关系式,从而提出一种能够预测不同细颗粒含量粗粒土塑性安定极限的统一准则。这些结论对于铁路路基的设计和稳定性评估具有重要意义。

参考文献:

- [1] YE Y S, CAI D G, YAO J K, et al. Review on dynamic modulus of coarse-grained soil filling for high-speed railway subgrade[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 27: 100421.
- [2] LI Q L, CUI K, JING X, et al. Influence of stress history on the cyclic behavior of compacted soils in the frozen state: Deviator stress history[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 153: 107074.
- [3] CUI X H, LING X. Effects of differential subgrade settlement on damage distribution and mechanical properties of CRTS II slab track[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121821.
- [4] LIU W Q, ZHOU H M, WANG B S, et al. A subgrade cracking monitoring sensor based on optical fiber sensing technique[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(9): e2213.
- [5] CAO Z G, CHEN J Y, CAI Y Q, et al. Effects of moisture content on the cyclic behavior of crushed tuff aggregates by large-scale tri-axial test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 95: 1-8.
- [6] SUN Q D, INDRARATNA B, NIMBALKAR S. Effect of cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(9): 746-751.
- [7] SU Y, CUI Y J, DUPLA J C, et al. Effect of water content on permanent deformation of fine/coarse soil mixtures with varying coarse grain contents and subjected to multi-stage cyclic loading[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(8): 3259-3268.
- [8] WERKMEISTER S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions[D]. Dresden: University of Technology, 2003.
- [9] CERNI G, CARDONE F, VIRGILI A, et al. Characterisation of permanent deformation behaviour of unbound granular materials under repeated triaxial loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 79-87.
- [10] ZHAI B, LENG W M, XU F, et al. Critical dynamic stress and shakedown limit criterion of coarse-grained subgrade soil[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 23: 100354.
- [11] 杨志浩, 岳祖润, 叶朝良, 等. 重载铁路基床污染级配碎石临界动应力及动强度特性研究[J]. *铁道学报*, 2022, 44(7): 145-153.
YANG Zhihao, YUE Zurun, YE Chaoliang, et al. Study on critical dynamic stress and dynamic strength properties of fouled graded macadam in heavy haul railway subgrade bed[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(7): 145-153. (in Chinese)
- [12] 赵明志, 邓龙翔, 刘钢, 等. 不同细粒含量高压密级配碎石力学特性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(5): 1121-1130.
ZHAO Mingzhi, DENG Longxiang, LIU Gang, et al. Research on mechanical properties of high pressure densely graded gravel with different fine particle content[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(5): 1121-1130. (in Chinese)
- [13] 赵莉. 不同荷载频率与细粒含量下路基粗粒填料动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHAO Li. Experimental study on dynamic behavior of unbound granular materials with different fines contents under different-frequency cyclic loadings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [14] 陈靖宇. 公路路基填料长期动力特性试验研究与累积应变模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
CHEN Jingyu. Experimental study and accumulated strain model on long-term cyclic behavior of road base fillings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [15] 元帅. 循环荷载下高速铁路基粗—细粒混合料力学特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
QI Shuai. Mechanical behaviors of coarse grain-fines mixture of high-speed railway embankment under cyclic loadings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [16] 凌华, 傅华, 韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊1): 12-16.
LING Hua, FU Hua, HAN Huaqiang. Experimental study on effects of gradation on strength and deformation of coarse-grained soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(Sup. 1): 12-16. (in Chinese)
- [17] 聂如松, 李亚峰, 冷伍明, 等. 列车间歇荷载作用下路基细粒土填料的塑性变形行为及临界动应力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4): 828-841.
NIE Rusong, LI Yafeng, LENG Wuming, et al. Plastic deformation and critical dynamic stress of fine-grained soils under intermittent loading of trains[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4): 828-841. (in Chinese)
- [18] TB 10102—2010 铁路工程土工试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
TB 10102—2010 Code for soil test of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Press, 2010. (in Chinese)
- [19] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behaviour of granular materials[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2005, 6(1): 31-51.
- [20] CHEN W B, FENG W Q, YIN J H, et al. Characterization of permanent axial strain of granular materials subjected to cyclic loading based on shakedown theory[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 751-761.
- [21] CUI K, ZHANG D J, LI P J, et al. Influence of the initial static stress state on the accumulation behaviour of a coarse-grained soil under long-term cyclic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 172: 108042.