

P_5 含量对路基粗粒土动力特性影响 规律试验研究

毛永强¹, 陈世豪¹, 袁青², 王琳², 熊齐欢²

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室)

摘要:为了研究 P_5 含量对粗粒土动力特性的影响,开展不同 P_5 含量粗粒土的大型振动三轴试验。试验结果表明:当 $P_5=10\%\sim 70\%$ 时,增加 P_5 含量能显著增大试样最大动弹性模量, P_5 含量从 50%增至 70%时,最大动弹性模量增长 26.2%。当 $P_5=70\%\sim 90\%$ 时,最大动弹性模量呈下降趋势。试样最终轴向累积应变,最大阻尼比随 P_5 含量增加先减小后增大,在 $P_5=70\%$ 时达到最小值。在振次 $N=1\,000$ 次以前试样完成大部分变形累积,且轴向累积应变增长速率不断减小;在振次 $N>1\,000$ 次以后,轴向累积应变增长速率保持在一个较低水平,试样只有很小的累积变形,曲线趋于稳定,表明试样在该级荷载下处于稳定状态,其动力响应也趋于弹性。

关键词: P_5 含量; 动力特性; 动弹性模量; 阻尼比; 轴向累积应变

1 前言

粗粒土因其良好的力学性能及透水性能被广泛应用于路基填筑工程。路基作为承受交通荷载的关键结构,其在服役过程中经历包括多个(静动)加载—(临界)破坏—再(静动)加载—(临界破坏)的过程,此外由于降雨入渗水力坡降作用和地震等都会导致路基填料粗粒含量产生渐进变化和演化历史。级配的变化又加剧路基填料层的刚度劣化与变形累积,最终表现为道路病害。级配变化直观反映为粗粒含量的变化,而粗粒含量对路基粗粒土填料有着巨大影响,准确掌握不同粗粒含量的粗粒土填料在大次数交通循环荷载下的强度及变形特性是进行道路设计及道路沉降控制的前提。近年来不断有学者研究路基粗粒土的动力特性及其影响因素。何忠明,刘森峙等基于不同荷载条件下粗粒土大型动三轴试验结果,指出试样的初始动弹性模量随围压的增大而增大,动应力幅值越大,累计轴向变形越大,荷载频率越大,滞回圈越陡峭;B. Indraratna 选取围压为 60 kPa,荷载频率为 10~40 Hz (列车所对应的荷载频率)在循环应力比(动应力幅值与围压的比值)为 6~9 的条件下开展粗粒土饱和排水

试验,得出试样的累计变形随荷载频率增大而增大;胡焕校运用工业 CT 对动三轴试验前后两个阶段的试样进行扫描,认为试样颗粒在试验过程中存在挤密、错动、融合的现象;孔祥勋利用 GDS 动三轴仪开展了不同围压、不同细粒($<0.075\text{ mm}$)含量的粗粒土动三轴试验研究,研究表明粗粒土的强度、动弹性模量、抗剪强度指标随细粒($<0.075\text{ mm}$)含量的增加而增加,阻尼比随细粒($<0.075\text{ mm}$)含量的增加而减小;De Zhang 等为了研究冻土混合物的动态特性,采用粉质土壤制备土样,并掺加不同含量的粗颗粒(砾石直径为 2.0~4.0 mm),试样尺寸为 $\phi 61.8\text{ mm}\times 125.0\text{ mm}$,粗粒(直径为 2.0~4.0 mm)含量分别为 10%、20%、40%、60%、80%。试验结果表明:随着粗粒含量的增加,动弹性模量增加;同等围压条件下随粗粒含量增加,阻尼比减小;傅华等研究级配对粗粒土动力特性的影响,指出低围压状态下,级配对粗粒土动力特性影响不大,随着围压提高,级配优的粗粒料最大动弹性模量增加明显;Tennakoon, N. 等指出轴向应变和体变随细粒含量增加而增加,此外由于粗粒料之间的细料提供了“缓冲作用”保护粗料免受剧烈磨损,因此随细粒含量增加颗粒的破碎率逐渐降低。

可见,前人的研究多集中于围压、荷载的幅值、频

收稿日期:2020-10-15(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技创新示范项目(编号:云交科教 201915 号)

作者简介:毛永强,男,硕士,高级工程师。

率对粗粒土动力特性的影响, P_5 (粒径大于 5 mm 的颗粒)含量对粗粒土动力特性的影响鲜有报道,且前人由于试验仪器限制且粗粒土大型试验极为耗时费力,故研究多采用直径 39 mm 的小样,最大粒径只有 5 mm,该文针对以上不足,基于路基真实动应力水平,开展不同 P_5 含量的粗粒土大型动三轴试验,讨论 P_5 含量对粗粒土动力特性及轴向累积应变的影响。

2 大型动三轴试验设计

2.1 试验仪器

试验在成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 GDS-DYNTTS 粗粒土大型动三轴试验系统进行。试验仪器如图 1 所示。试验仪器可施加的最大轴向荷载为 60 kN,最大频率为 5 Hz,最大围压为 1 MPa,位移量程为 100 mm,位移精度为 0.07%,轴向力的精度小于等于荷重传感器量程的 1%,轴向力分辨率为 16 位,每个周期可控制的数据点数为 10 000 点/s,最大可以存储的数据点数为 1 000 点/周期,加载波形可选择正弦波、方波、三角波以及自定义波形。



图 1 GDS-DYNTTS 粗粒土大型动、静三轴试验系统

2.2 试验方案

试验所用土样为强风化灰岩土石混合体,试样取回后测其天然含水率为 9.5%,风干含水率为 3.1%。试样风干后依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对土料进行筛分,筛分时分出粒径大于 5 mm 的颗粒

和粒径小于 5 mm 的颗粒,并将两者按一定比例混合,控制粒径大于 5 mm 的颗粒含量分别为 10%、30%、50%、70% 和 90%,即 P_5 含量分别为 10%、30%、50%、70% 和 90%,级配曲线如图 2 所示。先对不同 P_5 含量的土料在不同含水率条件下进行粗粒土大型击实试验,得到每种土料的最大干密度和最优含水率。

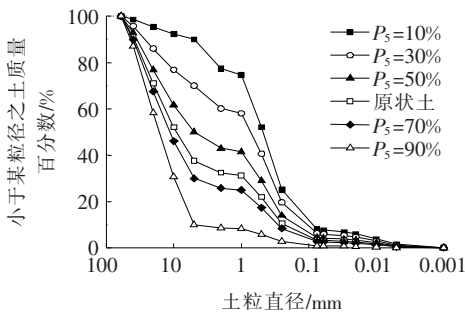


图 2 不同 P_5 含量土样的级配曲线

在击实试验的基础上,动三轴试样在最优含水率条件下,控制压实度为 95% 进行试备,试样尺寸 $\phi 300$ mm \times 600 mm,试样分 5 层填装,层与层之间进行刮毛处理。试样的制备条件如表 1 所示,试样的加载方案如表 2 所示。根据已有研究文献,公路路基荷载的频率为 0.1~10 Hz,1 Hz 最为常见,故试验频率多采用 1 Hz。动三轴试验围压确定为 50 kPa 用以模拟路面下 1.0~3.0 m 深度路基粗粒土侧压环境。加载波形采用正弦波,循环偏应力示意图如图 3 所示。由图 3 可知,实测路基动应力为 31~185 kPa。为了消除由

表 1 试样制备信息

试样 编号	P_5 含 量/%	含水率/ %	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	压实度/ %	湿密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)
1-1	10	7.60	1.98	95	2.02
2-1	30	6.23	2.06	95	2.08
3-1	50	5.27	2.14	95	2.14
4-1	70	6.02	2.17	95	2.18
5-1	90	5.20	2.14	95	2.13

表 2 试样加载方案

试样 编号	P_5 含量/%	围压 σ_3/kPa	循环偏应力 q/kPa	循环应力比 $\eta(q/\sigma_3)$	每级荷载循 环次数/次	频率 $f/$ Hz
1-1	10	50			5 000	1
2-1	30	50			5 000	1
3-1	50	50	20,60,100,	0.4,1.2,2.0,	5 000	1
4-1	70	50	140,180	2.8,3.6	5 000	1
5-1	90	50			5 000	1

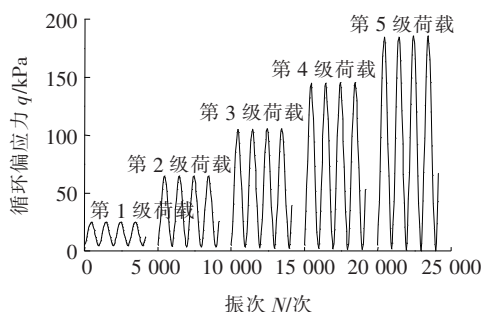


图3 加载波形示意图

于试样两端轻微的不规则性造成初始阶段变形以及孔压的产生,参考 Wichtmann 进行加载时,第一圈循环荷载的频率控制为 $f=0.01 \text{ Hz}$ 。

2.3 试验数据处理方法

由于土的应力应变关系具有明显的非线性特征,在周期荷载作用下土的应力与应变的关系为滞回环,如图4所示。

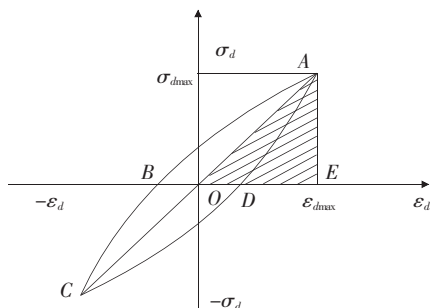


图4 动应力—动应变滞回环

依据式(1)、(2)计算动弹性模量 E_d 、阻尼比 λ_d ：

$$E_d = (\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}) / (\epsilon_{d\max} - \epsilon_{d\min}) \quad (1)$$

$$\lambda_d = A / (4\pi A_s) \quad (2)$$

式中: A 为滞回环 $ABCD$ 的面积; A_s 为三角形 OAE 的面积; $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$ 分别为滞回环轴向最大、最小动应力; $\epsilon_{d\max}$ 、 $\epsilon_{d\min}$ 为滞回环轴向最大、最小动应变。

对于此次试验中的土样,无论是动力模型还是静力模型(例如 Duncan—Chang 模型),都定义初始动弹性模量 $E_{d\max}$ 是 $\epsilon_d \rightarrow 0$ 的模量。最大动弹性模量 $E_{d\max}$ 求取方法是在普通直角坐标系统中,绘制 $\epsilon_d / \sigma_d \sim \epsilon_d$ 关系曲线,在图中 $\epsilon_d = 0$ 处截取纵标 $a = 1/E_{d\max}$, a 的倒数就是 $E_{d\max}$ 。

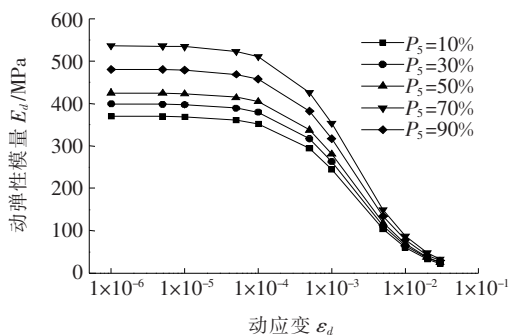
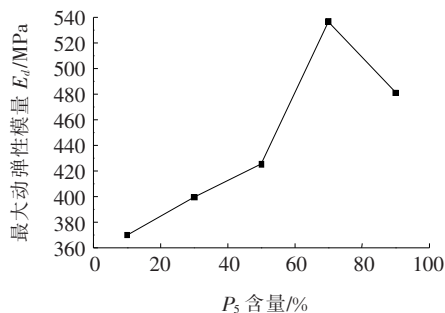
最大阻尼比的确定有通过经验公式和试验确定两种方式,该文采用试验确定。当动应变水平较低时,动应力—动应变滞回环面积较小,求得的阻尼比点较离散,误差较大;当动应力动应变水平较高时,动应力动应变曲线围成的滞回环面积较大,求得的阻尼比也较

为准确,当阻尼比随动应变上升较平缓时,将其渐进常数作为最大阻尼比 $\lambda_{d\max}$ 。

3 P_5 含量对动弹性模量的影响

动弹性模量是材料在动荷载作用下所表现出来的弹性力学性能参数,其数值越大说明材料的弹性承载性能越好。

通过对试验数据进行整理,对同一 P_5 含量的试样,选择每级荷载下的第 10 个滞回环来计算动弹性模量。图5为不同 P_5 含量的试样动弹性模量与动应变的关系曲线。图6为试样的最大动弹性模量随 P_5 含量变化曲线。

图5 不同 P_5 含量试样动弹性模量随动应变变化曲线图6 最大动弹性模量随 P_5 含量变化曲线

由图5可知:不同 P_5 含量的试样,其动弹性模量随动应变变化趋势基本相同,即动弹性模量随动应变的增加而减小,具有明显的非线性特征。在图中所示应变范围内,动弹性模量变化呈现缓慢降低~快速降低~趋于平缓的过程,即在动应变较小时,动弹性模量随动应变的增大而缓慢减小,在 $\epsilon_d = 1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 时曲线趋于水平,表明土体处于近似弹性状态,随动应变继续增大,试样内部裂隙扩展,动弹性模量出现断崖式下跌,以 P_5 为 10% 的试样为例,动应变由 1×10^{-4} 增大至 1×10^{-2} ,动弹性模量降低 83.1%,表明土体处于弹塑性状态;当动应变由 1×10^{-2} 继续增

大,动弹性模量继续减小,但减小幅度明显降低,动应变从 1×10^{-2} 增大至 2×10^{-2} 动弹性模量减小 9.8 MPa。

由图 6 可知: P_5 含量对试样最大动弹性模量有重大影响。当 P_5 含量小于 70% 时,增加 P_5 含量,最大动弹性模量显著增大,当 P_5 含量从 50% 增至 70% 时,最大动弹性模量增长 26.2%。当 P_5 含量大于 70% 时,曲线呈下降趋势,当 P_5 含量从 70% 增至 90% 时,最大动弹性模量降低 10.3%。这是因为试样的弹性模量取决于试样内部结构的致密程度与裂隙的发育情况,结构越致密、裂隙越少则弹性模量越大。当 P_5 含量小于 70% 时,随着 P_5 含量增多,粗颗粒逐渐形成骨架,细颗粒填充粗颗粒间的孔隙,粗粒、细粒的相互作用在 $P_5=70\%$ 时达到最强,此时试样的致密性最强,刚度最大,最大动弹性模量达到最大 541 MPa。当 P_5 含量超过 70%,随着 P_5 含量继续增大,细料填满粗料间的孔隙,试样的致密性减弱,此外外荷载也主要由粗颗粒骨架承担,粗粒之间的细粒不能承担相应的作用力,试样的刚度降低,动弹性模量减小。

4 P_5 含量对阻尼比的影响

土的阻尼比表示土体在动荷载作用下一个周期内消耗的能量与作用在土体上总弹性能量的比值。岩土体的阻尼参数是工程抗震设计中的重要指标,也是地震反分析和场地安全性评价的重要参数。阻尼比表征振幅衰减快慢,阻尼比越大,说明振幅衰减得越快,土体能量损耗越大。

对同一 P_5 含量的试样取每级荷载下第 10 个滞回环进行阻尼比的计算。不同 P_5 含量试样阻尼比随动应变变化曲线如图 7 所示。最大阻尼比随 P_5 含量变化曲线如图 8 所示。

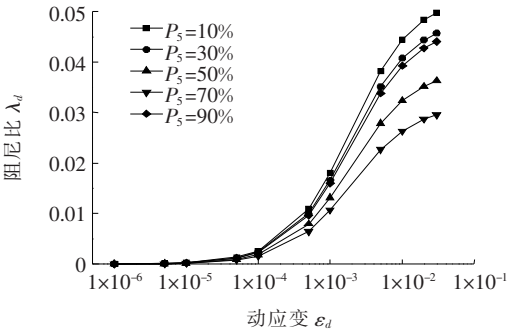


图 7 不同 P_5 含量试样阻尼比随动应变变化曲线

由图 7 可知:不同 P_5 含量的试样,其阻尼比随动

应变变化趋势基本相同,即阻尼比随动应变的增加而增加,具有明显的非线性特征,呈现出缓慢增长~快速增长~趋于平缓的过程,在动应变较小时,阻尼比随动应变的增大缓慢增大,以 P_5 含量为 70% 的试样为例,动应变从 1×10^{-6} 增大至 1×10^{-5} 阻尼比增大 0.002 7;随动应变继续增大阻尼比快速增长,最后有趋于平缓的趋势,例如对于 P_5 含量为 10% 的试样,动应变从 1×10^{-5} 增大至 5×10^{-3} 阻尼比增加 0.059 8,动应变从 1×10^{-2} 增大至 2×10^{-2} 阻尼比增大 0.002 1。

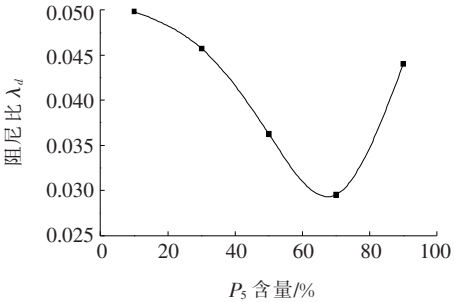


图 8 最大阻尼比随 P_5 含量变化曲线

由图 8 可知:当 P_5 含量小于 70% 时,增加 P_5 含量,最大阻尼比显著减小,例如 P_5 含量从 50% 增至 70% 时,最大阻尼比减小 12.1%。当 P_5 含量大于 70% 时,曲线呈上升趋势,例如 P_5 含量从 70% 增至 90% 时,最大阻尼比增长 6.2%。这主要是因为 P_5 含量为 70% 时,土料内部致密性最强,在动荷载作用下一个周期内消耗的能量最小,振幅衰减得最慢,动力特性表现最佳。

5 P_5 含量对滞回曲线的影响

将不同 P_5 含量试样在循环偏应力 $q=20$ kPa,振次 $N=10$ 次的滞回曲线单独绘制进行对比分析,如图 9 所示。

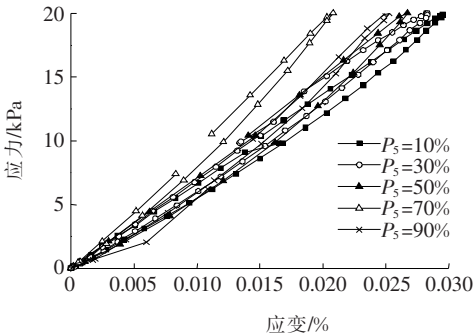


图 9 不同 P_5 含量试样的滞回曲线

由图9可知:其他条件相同的情况下,在 P_5 含量为10%~70%时,随 P_5 含量的增加,滞回环的斜率增大,面积减小。表现为动弹性模量增大,阻尼比减小,土样刚度增加。当 P_5 含量为70%~90%时,随 P_5 含量增加,滞回环往横坐标轴倾斜,斜率减小,动弹性模量减小;滞回环面积增大,阻尼比增大,内部孔隙率增大,土样刚度下降。

6 P_5 含量对轴向累积应变的影响

通过对试验数据进行整理,绘制不同 P_5 含量试样轴向累积应变随振次发展曲线如图10所示。循环应力比 $\eta=2.8$ 时,不同 P_5 含量试样的轴向累积应变随振次发展曲线如图11所示。

由图10可知:不同 P_5 含量试样的轴向累积应变发展曲线形态基本相似,表现为前期轴向累积应变迅速发展,后期增长速率减小,曲线变缓并趋于稳定。在振次 $N=1\,000$ 次以前试样完成大部分变形累积,例如 $P_5=30\%$, $\eta=3.6$,在振次 $N=1\,000$ 次以前试验完成轴向累积应变的89%。在振次 N 大于1 000次以后,轴向累积应变增长速率保持在一个较低水平,试样只有很小的累积变形,曲线趋于稳定,表明试样在该级荷载下处于稳定状态,其动力响应也趋于弹性。出现这种现象主要是因为,在循环振动荷载下颗粒间沿接触面产生剪应力,并在剪应力的作用下颗粒发生重新排列并伴随破碎和滑移,颗粒间较大的孔隙首先被填充,而后颗粒运动空间减小,颗粒间阻力增加,土体滑移速率减小,经过一定时间后达到新的平衡。

由图11知:当荷载幅度相同时,试样最终轴向累积应变随 P_5 含量增加先减小后增大,在 $P_5=70\%$ 时,轴向累积应变达到最小值。以第4级荷载循环应力比 $\eta=2.8$ 为例,当 P_5 含量从10%增至70%时,轴向累积应变减小67.8%,当 P_5 含量从70%增至90%时,轴向累积应变增大111.5%。这是因为当 $P_5=10\%\sim 70\%$ 时,随土体粗粒含量增加,因粗粒料颗粒大相应颗粒个数少,代替同重量的个数多、比表面积大的细粒料,形成单位体积土重增加,孔隙比减小;当 P_5 含量为70%左右时,粗料形成完整骨架,细料能填满孔隙,孔隙比最小,相同荷载下变形量最小;当 P_5 含量超过70%以后,由于粗粒料含量增多,细粒料含量减小,细料填不满粗料的孔隙,试样孔隙比增大,相同荷载下变形量增加。

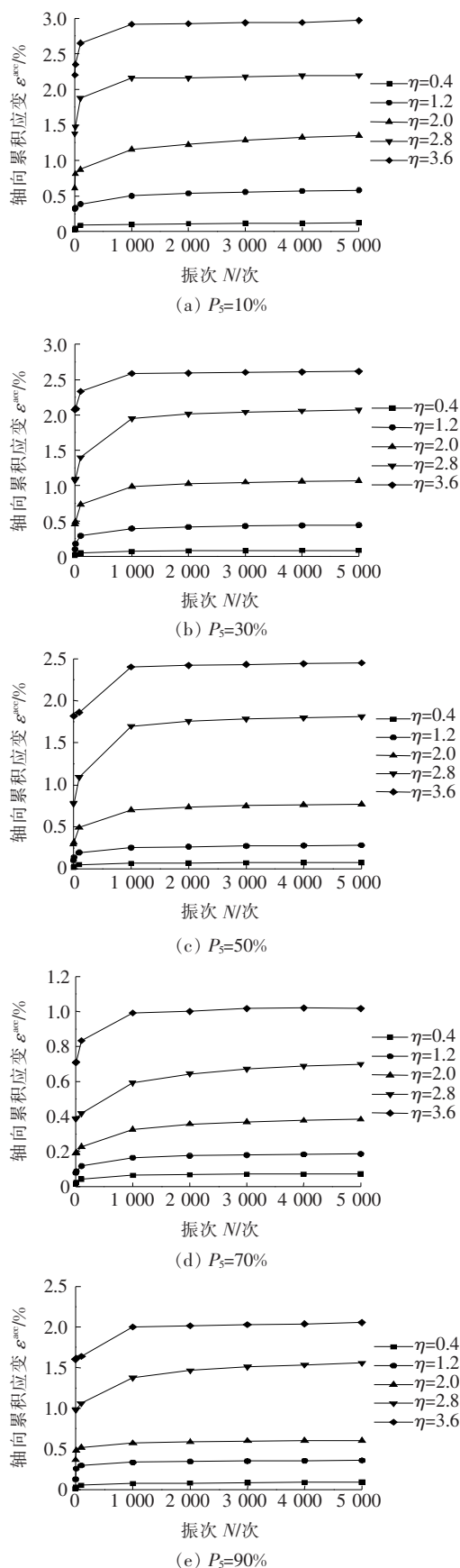


图10 轴向累积应变随振次发展曲线

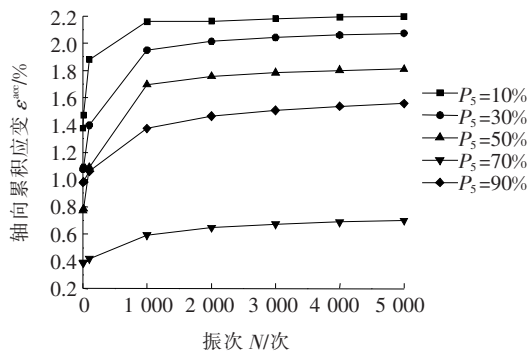


图 11 $\eta=2.8$ 时不同 P_5 含量试样的轴向累积应变发展曲线

7 结论

基于路基真实动应力水平,开展路基粗粒土填料大型动态三轴剪切试验,研究 P_5 含量对粗粒土动力特性的影响规律,得到以下结论:

- (1) 当 $P_5=10\% \sim 70\%$ 时,增加 P_5 含量,最大动弹性模量快速增长,当 $P_5=70\% \sim 90\%$ 时,增加 P_5 含量最大动弹性模量降低。
- (2) 最大阻尼比随 P_5 含量增加先减小后增大,在 P_5 含量为 70% 时达到最小值 0.031。
- (3) 当 $P_5=10\% \sim 70\%$ 时,增加 P_5 含量,滞回环的面积减小,斜率增大,当 $P_5=70\% \sim 90\%$ 时,随 P_5 含量增加滞回环面积增大,斜率减小。
- (4) 相同荷载下, $P_5=70\%$ 时试样的轴向累积应变最小。

参考文献:

- [1] 蔡袁强,赵莉,曹志刚,等. 不同频率循环荷载下公路路基粗粒填料长期动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017(5).
- [2] 傅华,赵大海,韩华强,等. 不同级配粗颗粒材料动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016(8).
- [3] 何忠明,杨煜,段旭龙. 粗粒土路堤填料路用性能及其

循环动应力试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019(2).

- [4] 胡焕校,段旭龙,何忠明,等. 动三轴 CT 条件下粗粒土填料的力学特性与细观力学性能分析[J]. 中国公路学报, 2018(11).
- [5] 孔祥勋. 冻融环境下高速铁路基粗粒土填料动力特性研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2018.
- [6] 刘萌成,孟锋,王洋洋. 粗粒料颗粒破碎变化规律大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020(3).
- [7] 刘森峙,何忠明,杨煜,等. 干湿循环和荷载作用下粗粒土动力特性试验研究[J]. 公路与汽运, 2018(6).
- [8] 李子春. 轨道结构垂向荷载传递与路基附加动应力特性的研究[D]. 铁道部科学研究院硕士学位论文, 2000.
- [9] 马少坤,王博,刘莹,等. 南宁地铁区域饱和圆砾土大型动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019(1).
- [10] 彭敬. 透明砂室内动三轴试验及离散元模拟[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2019.
- [11] 周文权,冷伍明,蔡德钧,等. 循环荷载作用下路基粗粒土填料临界动应力和累积变形特性分析[J]. 铁道学报, 2014(12).
- [12] 王常晶,陈云敏. 交通荷载引起的静偏应力对饱和软黏土不排水循环性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007(11).
- [13] Indraratna B., Yhakur P K, Vinod J S. Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading[J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10(4).
- [14] De Zhang, Quanming Li, Enlong Liu, et al. Dynamic Properties of Frozen Silty Soils with Different Coarse-Grained Contents Subjected to Cyclic Triaxial Loading[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 8(4).
- [15] Tennakoon N., Indraratna B. Behaviour of Clay-Fouled Ballast under Cyclic Loading[J]. Geotechnique: International Journal of Soil Mechanics, 2014, 64(6).
- [16] Wichtmann T., Rondon H A, Niemunis A., et al. Prediction of Permanent Deformations in Pavements Using a High-Cycle Accumulation Model[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(5).