

文章编号:1671-8879(2019)02-0027-08

粗粒土路堤填料路用性能及其循环动应力试验

何忠明^{1,2}, 杨 煜², 段旭龙³

(1. 长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要:为了研究粗粒土路堤在动力荷载及雨水湿化作用下的路用性能,以粗粒土为研究对象,开展室内常规物理力学试验,分析压实度、干密度以及含水率对粗粒土填料回弹模量的影响;利用大型动三轴试验仪研究不同压实度和围压条件下轴载作用次数与动态回弹模量之间的关系,以压实度和含水率为条件变量对粗粒土试件进行永久变形试验,探讨循环动应力作用下粗粒土试件轴向累计轴向应变的发展规律。试验结果表明:压实度和含水率对粗粒土的物理力学特性影响较大,但对干密度影响较小;试件累计轴向应变随着压实度增大而减小,当压实度为 90% 时,试验前期累计轴向应变增加幅度较小,当累计轴载次数达到 1 000 时,累计轴向应变急剧增加;累计轴向应变随着含水率的增加而增大,并随着压实度的增大而减小;粗粒土随着轴载次数的增加经历了稳定、临界和破坏 3 种状态,其中压实度为 90% 的试件表现较为明显;粗粒土路堤填料的动弹性模量随着轴载次数的增加而减小,衰减速率逐渐减小,最终趋于平稳。

关键词:道路工程;粗粒土;动三轴试验;路用性能;动弹性模量

中图分类号:U416.12 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.02.004

Experimental on road performance and cyclic dynamic stress of coarse-grained soil subgrade

HE Zhong-ming^{1,2}, YANG Yu², DUAN Xu-long³

(1. Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: To determine the road performance of coarse-grained soil subgrade under a dynamic load and wet rain, coarse-grained soil was took as the research object, and the influence of the compaction degree, dry density, and moisture content on the modulus of resilience of coarse-grained soil was analyzed. This was based on conventional physical and mechanical laboratory experiments. At the same time, the relationship between the number of axial loads and the dynamic elastic modulus under different compaction degrees and confining pressures was studied using large dynamic triaxial apparatuses. Further, a permanent deformation test of coarse-grained soil specimens was carried out under the varying compaction degrees and moisture contents. In addition, the development rule for the axial cumulative strain of coarse-grained soil under cyclic

收稿日期:2018-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51678073,51508042)

作者简介:何忠明(1980-),男,湖南永兴人,教授,工学博士,博士后,E-mail:hezongming45@126.com。

dynamic stress was discussed. The results show that the degree of compaction and the moisture content have a significant influence on the physical and mechanical properties of coarse-grained soil, and the dry density has little influence. The cumulative axial strain decreases with an increase in the compaction degree. When the compaction degree is 90%, the cumulative axial strain increases slightly during the early stage of the test. Further, when the number of loads reaches 1 000, the cumulative axial strain increases sharply. The cumulative axial strain increases with the increase in moisture content and decreases with an increase in the degree of compaction. With an increase in load times, coarse-grained soil experiences three states, stability, criticality and destruction, of which 90% of the samples showed obvious compaction. The dynamic elastic modulus of the coarse grained subgrade filler increases with the number of axial loads, and the attenuation rate decreases gradually, finally tending toward stability. 4 tabs, 14 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; coarse-grained soil; dynamic three axle test; road performance; dynamic elastic modulu

0 引言

粗粒土是岩体未完全风化的颗粒堆积物,被广泛应用于高速公路路堤填筑过程中^[1]。粗粒土路堤在长时间的服役过程中,受降雨及动力荷载等的影响会出现不同程度的滑坡、崩塌等病害。针对上述问题,国内外学者已经开展了一些初步研究,并取得一定的成果。Seed 等指出粗粒土在动力荷载作用下会产生附加变形,并指出这种附加变形会对路基稳定性产生威胁^[2]。Barksdale 提出了在一定的动应力水平范围内,应变率随轴向加载次数增加而逐渐减小^[3]。Sweere 则提出了动三轴作用下,试件轴向应变增长与轴向加载次数成反比^[4]。田兆阳等通过室内静力学和动三轴试验分析了软土动、静力学参数对其力学性能的影响,并研究了软土应力-应变下的动力特性^[5]。张向东等通过大量室内动三轴试验,分析了粗粒土路基的振陷变形,并指出粗粒土在动应力加载过程中将产生可恢复的弹性变形以及不可恢复的塑性变形^[6]。李校兵等指出了动弹性模量是土力学中最为重要的参数之一,并在动三轴试验下通过循环偏应力和循环围压分析了软黏土的动弹性模量衰减规律^[7]。程展林等通过三轴试验分析了不同围压条件下粗粒土试件的体积变化规律,并分析了围压对粗粒土试件的力学性能的影响^[8]。曾铃等通过静三轴试验分析了不同围压和压实度对炭质泥岩的力学特性的影响^[9]。王协群等通过试验研究指出不同深度下路基土承受的扩散力也不同,压实度和含水率对路基土的基质吸力也会产生影响^[10]。综上所述,以往的研究主要侧重于不

同压实度和围压对土体的力学特性的影响,鲜有将动力荷载和降雨入渗结合起来分析粗粒土路基的路用性能。

此外,部分学者认为路基的沉降变形是日积月累的过程,很少考虑动力荷载对土基的影响,而多采用静三轴试验模拟路基土的受力状态。实际上在动力荷载作用,路面首先会出现不平整、坑槽等现象,此现象将加剧动力荷载对路基的破坏,使路基土在动力荷载作用下发生挤压、破裂等现象;同时在降雨条件下,雨水渗入会进一步弱化土体的抗剪强度,加剧边坡的失稳。

因此,本文首先通过室内试验分析压实度、干密度以及含水率等对粗粒土路用性能中回弹模量的影响;然后基于大型动三轴试验着重分析动力荷载和降雨入渗条件下粗粒土试件的累计轴向应变和动、弹性模量随循环荷载次数的变化关系,为粗粒土路基设计提供参考。

1 动三轴试验设计与原理

1.1 试验土样及制备

为了保证试验土样与高速公路路基填料一致,本文按照《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[11]和《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[12]的要求进行试样的制作。试验中采用的粗粒土填料来源于桂林—三江高速公路第3标段粗粒土路基边坡,见图1。郭庆国等在进行粗粒土土工试验时,均采用最大粒径剔除法制作试验土样^[13-14],因此,本文也剔除大于20 mm的粗粒土颗粒,以便基础试验和三轴试验能顺利进行。通过室内土样筛分试验,得到试验用粗粒土的级配曲线,见

图 2、图 3。



图 1 土样选取的施工路段

Fig. 1 Road construction section selected of soil samples



图 2 土样筛分试验

Fig. 2 Soil samples screening test

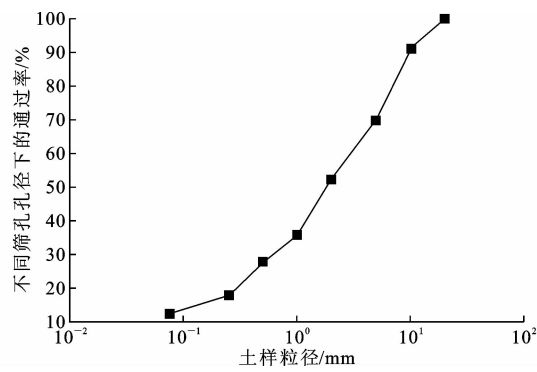


图 3 粗粒土的级配曲线

Fig. 3 Gradation curve of coarse-grained soil

根据试验土样级配曲线和土样粒径级配表,计算得到不均匀系数 $C_u=51.5$, 曲率系数 $C_c=1.8$, 可知试验土样级配良好。

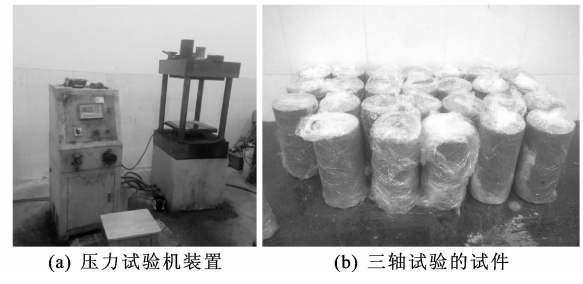
试验用的三轴试件为圆柱体, 直径 $d=100\text{ mm}$, 高度 $h=200\text{ mm}$, 高宽比 $h/d=2$, 其中最大土颗粒粒径 $d_{\max}=20\text{ mm}$, 试件的直径与最大土颗粒粒径的比值为 5, 可消除尺寸效应的影响^[15-16]。试件制作采用分层压实方法, 具体实施步骤如下所述。

(1)将筛分后的粗粒土放入烘箱中烘干, 根据式 (1)在烘干后的粗粒土中加入一定质量的水, 随后将粗粒土填料进行密封保存, 密封时间为 24 h, 以保证粗粒土填料的湿度均匀性。试件分 5 层进行压实。首先, 通过测量每层粗粒土的质量和压实高度对粗粒土的压实度进行控制; 然后, 通过击实试验测得粗粒土的最佳干密度, 其计算如下

$$m_1 = [\rho_{d\max} D_c V (1 + \omega)] / 5 \quad (1)$$

式中: m_1 为每层粗粒土质量; $\rho_{d\max}$ 为最佳干密度; D_c 为目标压实度; V 为试样的体积; ω 为试样的含水率。

(2)对密封保存后的土样进行试件配制。首先, 在制作试件的模具内侧涂刷一层凡士林, 将称量后的每层质量为 m_1 的粗粒土倒入模具中, 在使用压力试验机时, 开始阶段可调节速度快些, 当压力板接近 40 mm 时, 必须调小油压, 控制机械慢速运行, 当压力板达到 40 mm 时, 保持试件压缩时间在 2 min 以上; 其次, 再进行卸载, 卸载后对压缩的试样表面进行刨毛; 然后, 进行下一层粗粒土的压缩和刨毛, 在完成 5 次压缩后, 运用脱模仪完成对试件的脱模; 最后, 使用保鲜膜对试件进行包裹保存。试件的制作和存放如图 4 所示。



(a) 压力试验机装置 (b) 三轴试验的试件

图 4 三轴试样的制作

Fig. 4 Triaxial samples preparation

1.2 试验原理

动三轴试验是目前最常见的获得循环动应力荷载作用下土基变形、强度特征的室内试验手段之一^[17]。三轴试验的本质是把规范规定的圆柱体试件在一定应力状态下进行固结, 然后在大主应力方向上施加动荷载, 同时设定接触应力, 达到循环加载的目的。

动弹性模量作为土动力学中的重要参数之一, 现阶段土动力学中使用较为广泛的等效线性本构模型即是对动弹性模量随动应变衰减规律进行定量的描述^[18-19]。因此, 本文研究了动弹性模量在动力荷载作用下的变化规律, 在试验过程中, 由于施加的动

荷载具有周期性等特点,使得动应力 δ 和动应变 ϵ 之间表现出一系列的滞回曲线,其结构示意图如图 5 所示。根据一系列的滞回曲线可采用式(2)计算出动弹性模量 $E_d^{[20]}$

$$E_d=\frac{\sigma_{\max}-\sigma_{\min}}{\epsilon_{\max}-\epsilon_{\min}}\tag{2}$$

式中: σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为最大和最小应力; ϵ_{\max} 、 ϵ_{\min} 分别为最大和最小应变。

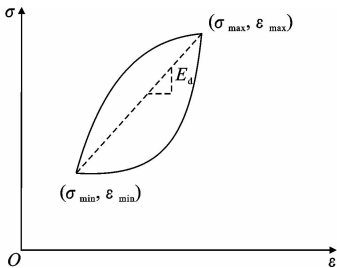


图 5 滞回曲线示意
Fig.5 Schematic of hysteresis curve

表 2 粗粒土的基本物理指标

Tab.2 Basic physical indexes of coarse-grained soil

参数	塑限/%	液限/%	塑性指数	最佳含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	土粒相对密度	饱和渗透系数/(10 ⁻⁶ m·s ⁻¹)
参数值	27.90	28.40	7.50	5.10	2.24	2.51	1.38

注:含水率为质量分数,下同。



图 6 HM-1 型回弹模量仪
Fig.6 HM-1 Type rebound modulus meter

由于粗粒土高路堤填筑完成后,经常受到动力荷载和降雨入渗的共同作用,导致路基土的含水率急剧增加,抗剪强度降低,对其回弹模量产生不同程度的影响,因此除了考虑以上因素外还应考虑含水率对粗粒土的回弹模量的影响。本文以压实度 94%、干密度 2.15 g/cm³ 情况下试样的室内试验结果分析不同含水率对回弹模量的影响,含水率取值及试验结果如表 3 所示^[21]。

2.2 动三轴试验方案

以上基础试验仅对粗粒土路堤填料的敏感影响因素进行了分析,而在循环动应力作用下各敏感因

2 试验方案

2.1 基础试验方案

为了研究粗粒土的路用性能,本文首先通过室内试验分析了不同压实度和干密度对粗粒土回弹模量的影响。本次试验选用 90%、92%、94%、96% 四组压实度,见表 1。将其分别与不同干密度进行正交试验设计,据此来考虑 2 种因素对粗粒土回弹模量的影响。其他相关参数试验结果见表 2。基于《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[12],采用 HM-1 型回弹模量仪,进行 16 组不同参数的常规室内试验,如图 6 所示。

表 1 不同压实度与干密度参数的正交方案

Tab.1 Orthogonal schemes for parameters of different degrees of compaction and dry densities

压实度/%	90	92	94	96
干密度/(g·cm ⁻³)	2.05	2.10	2.15	2.20

表 3 含水率与回弹模量的关系

Tab.3 Relationship between moisture contents and rebound moduls

含水率/%	9.14	10.53	11.48	13.65	14.86	16.03
回弹模量/MPa	87	69	53	35	31	26

素对粗其路用性能影响还需进一步试验研究。因此,本次试验采用 R-8001T 动三轴试验系统,见图 7。该设备能够单独控制偏应力和围压,加载方式采用正弦函数轴向加载,最大荷载为 120 kPa,由伺服电机控制,接触应力取值为 20 kN^[22-23],荷载频率设为 2 Hz;试件为圆柱体,直径为 100 mm,高度为 200 mm,见图 8;围压分别采用 60、90、120 kPa,用来抑制可能产生裂缝的发展^[24]。试验采用固结不排水的试验方法,通过油压进行施加轴压,模拟不同深度粗粒土土基的受力特性,对不同压实度及含水率试件进行动三轴加载试验,其中动三轴试验中各参数选取如表 4 所示^[23];以此来模拟研究不同含水率的粗粒土路堤填料在循环动应力作用下的力学性能变化。

3 试验结果与分析

3.1 粗粒土回弹模量的影响因素分析

图 9、图 10 是在压实度、干密度相互正交作用下进行室内回弹模量试验得到的变化规律及三维关



图 7 动三轴试验系统
Fig. 7 Dynamic and triaxial test system



图 8 动三轴试件的安装过程
Fig. 8 Installation process of dynamic triaxial test samples

表 4 动三轴试验中各参数的选取方案

Tab. 4 Dynamic triaxial test of selection of parameters

参数	取值		
围压/kPa	60	90	120
压实度/%	90	94	96
含水率/%	4.95	9.14	13.65

系。分析图 9 可知:当干密度与压实度最大时,粗粒土回弹模量最大,其值为 67 MPa;当干密度与压实度最小时,粗粒土回弹模量最小,其值为 39 MPa,其他试验方案测得回弹模量数值均呈非线性曲面分布。由图 9 和图 10 可知,相同干密度条件下压实度在 94%~96%之间时,回弹模量上升较快,由此可见提高路基的压实度对路基土的稳定性起着重要作用。由表 3 可知:含水率对回弹模量影响较大,随着含水率的增加,回弹模量急剧减小,随后其下降趋势逐渐变缓;含水率由 9.14% 上升到 16.03%,对应的回弹模量下降了 61 MPa。综合分析可知:压实度、干密度和含水率均对回弹模量有影响,其中压实度和含水率对回弹模量的影响幅度明显大于干密度的影响,特别是较大的压实度和较小的含水率可以大幅度提高路基土的回弹模量。产生以上现象的主

要原因是:压实度越低,单位体积内固体颗粒的数量就越少,孔隙率也就越大,在相同的循环动应力作用下,固体颗粒之间更容易挤密,土体产生明显的压缩变形;而水在三相体中具有不可压缩性,当含水率较高时,动应力作用下,一部分含水量较高的团聚体结构强度减弱,被其他颗粒挤扁,可能形成定向的镶嵌结构和紊流状结构,从而影响粗粒土路堤填料的路用性能。

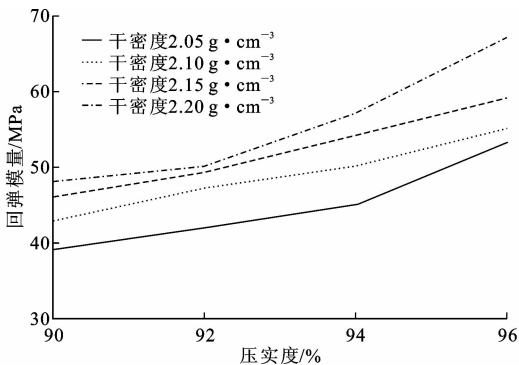


图 9 不同干密度时回弹模量随压实度的变化规律
Fig. 9 Change laws of degree of compaction with rebound modulus at different dry densities

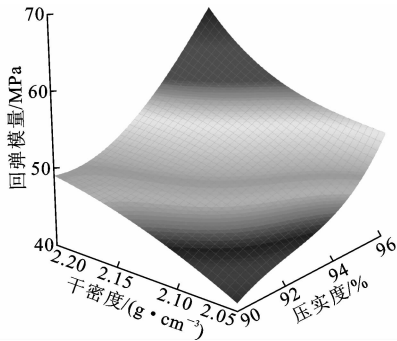


图 10 回弹模量与干密度及压实度之间的关系
Fig. 10 Relationships between rebound modulus and dry densities and degrees of compaction

在同一压实度和干密度条件下,随着含水率的增加,回弹模量明显减小;含水率、压实度及干密度都是粗粒土回弹模量的影响因素,其中压实度和含水率是主要影响因素,干密度为次要影响因素。

3.2 不同压实度和围压对粗粒土试件动弹性模量的影响

循环动应力对不同深度的粗粒土路堤填料产生的挤压破坏也不尽相同,根据扩散理论,为了进一步分析不同深度路基土的路用性能在动荷载作用下的变化规律^[25],选用压实度为 94% 的试件,围压为 60、90、120 kPa 条件来模拟不同深度下粗粒土路堤填料的受力状态,研究该条件下试件的动弹性模量

随轴载次数的变化规律。分析时采用朱思哲等提出的动弹性模量的分析方法进行计算^[20],得到的试验计算结果如图 11 所示。由图 11 可知:围压 60、90、120 kPa 条件下,动弹性模量随着轴载次数的增加表现出规律性下降趋势,其下降幅度由大逐渐变小,最终趋于平稳状态;3 种围压条件下试件的动弹性模量相差不大。

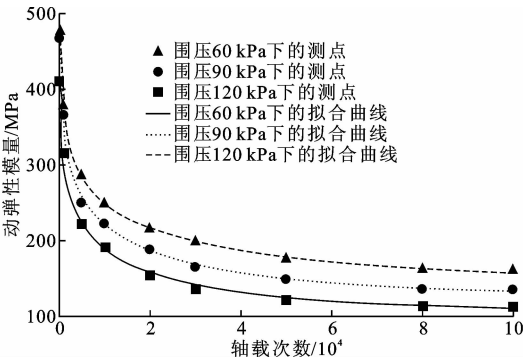


图 11 不同围压时动弹性模量变化规律

Fig. 11 Change laws of dynamic elastic modulus under different confining pressure

图 12 为动三轴试验中围压为 60 kPa 时,不同压实度的粗粒土试件动弹性模量随轴载次数的变化规律。从图 12 中可以看出,压实度为 96% 时,初始动弹性模量为 528 MPa,随着轴载次数的增加,其值逐渐衰减,衰减速率由大逐渐减小,最终趋于平稳状态。压实度为 90%、94% 的粗粒土试件,动弹性模量变化趋势较为接近。其主要原因可能为,试件在循环荷载初期处于弹性阶段,随着循环荷载次数的增加,这种弹性性质逐渐减弱,逐渐过渡为塑性阶段。

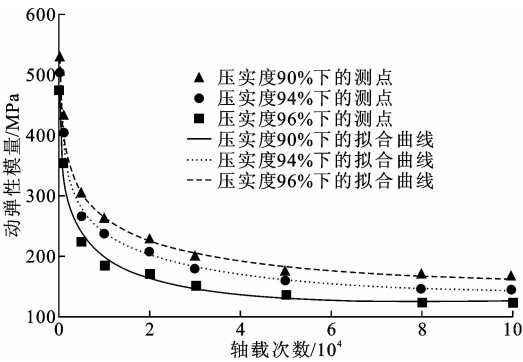


图 12 不同压实度时动弹性模量的变化规律

Fig. 12 Change laws of dynamic elastic modulus under different degrees of compaction

3.3 不同压实度和含水率对粗粒土试件累计轴向应变的影响

图 13、图 14 分别为不同压实度和含水率时累

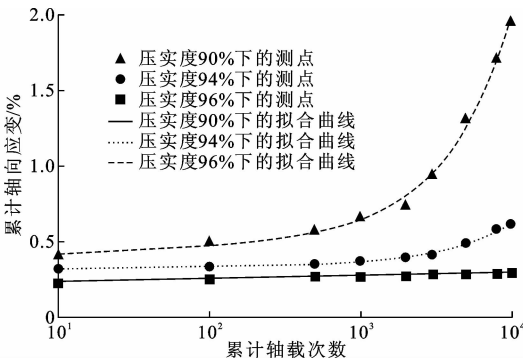


图 13 不同压实度时轴载次数与累计轴向应变的变化规律

Fig. 13 Change laws of axle load times and accumulative axial strain under different compaction degrees

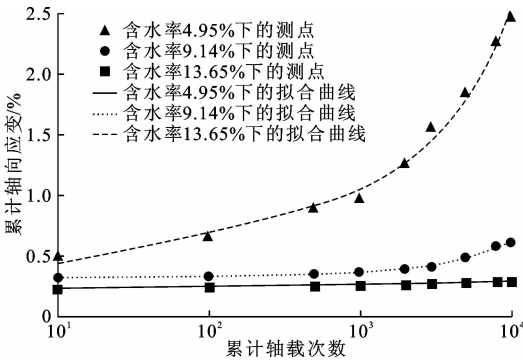


图 14 不同含水率时轴载次数与累计轴向应变的变化规律

Fig. 14 Change laws of axial load times and accumulative axial strain under different water contents

计轴载次数与累计轴向应变的变化规律。由图 13 可知:在围压一定条件下,累计轴向应变随着累计轴载次数的增加而增加,累计轴向应变的增量由小逐渐增大;压实度为 90% 的试件,当累计轴载次数达到约 100 时,累计轴向应变达到 0.5%,而压实度为 94% 的试件,累计轴载次数约为 8 000 时累计轴向应变才达到 0.5%;压实度为 90% 时,其累计轴向应变随着累计轴载次数的增加变化幅度比较明显,而压实度为 96% 的试件在轴载作用下始终变化不大。因此,可推论出:路基土的压实度不同,累计轴向应变也不相同;压实度越大,累计轴向应变越小;累计轴向应变的增量由小逐渐增大,累计轴载次数约在 1 000 时累计轴向应变增量急剧增加。因此,可推算出路基土在循环动应力作用下可能经历了 3 个状态,即稳定状态、临界状态和破坏状态,试件由弹性阶段向塑性阶段过渡。

由图 14 可知,含水率越小,累计轴向应变变量就越低,随着含水率的增加,累计轴向应变变量随之增加,其增加幅度逐渐上升。综上可知,随着含水率的增加,路基土的变形就越大,压实度与含水率均对路

基稳定性产生重要影响,压实度为首要影响因素。

4 结 语

(1)粗粒土路堤填料的回弹模量受压实度、含水率的影响较大,受干密度的影响较小。压实度与含水率均对路基稳定性产生重要影响,相比之下,压实度为首要影响因素。

(2)动弹性模量随着轴载次数增加的下降趋势较为接近,下降的幅度由大逐渐变小,最终趋于平稳状态。

(3)试件的压实度越大,累计轴向应变就越小;当粗粒土压实度较小时,随着累计荷载作用次数增加,轴向变形曲线经历了稳定、临界和破坏3种状态,最终呈现出指数增长趋势。

(4)围压和试件的压实度越小,初始动弹性模量越小;随着轴载次数的增加,其动弹性模量的衰减速率逐渐减小,最终趋于平稳状态。

(5)本文仅选取了几组具有代表性的压实度、含水率及干密度等参数进行了相应的试验研究,并没有考虑大数据和多重参数共同影响的情况,下阶段将从这几个方面入手开展相应的研究工作。

参考文献:

References:

- [1] 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,2018,31(11):42-50.
HU Huan-xiao, DUAN Xu-long, HE Zhong-ming, et al. Mechanical properties and meso mechanical performance evaluation of coarse-grained soil fillers based on dynamic triaxial CT test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 42-50.
- [2] SEED H B, CHAN C K. Clay strength under earthquake loading condition[J]. Journal of the Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, 92, 53-78.
- [3] BARKSDALE R D. Laboratory evaluation of rutting in basecourse materials[C]//ICSDAP. Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. London: ICSDAP, 1972: 161-174.
- [4] SWEERE G T H. Unbound granular bases for roads [D]. Delft: University of Delft, 1990.
- [5] 田兆阳,李平,郑志华,等. 软土动力特性动三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 95-99, 118.
TIAN Zhao-yang, LI Ping, ZHENG Zhi-hua, et al. Dynamic three axis experimental study on dynamic

characteristics of soft soil[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 39(1): 95-99, 118.

- [6] 张向东,李旭,刘家顺,等. 动荷载作用下风积土路基振陷变形[J]. 公路交通科技, 2011, 28(12): 39-43.
ZHANG Xiang-dong, LI Xu, LIU Jia-shun, et al. Dynamic settlement of aeolian soil subgrade under dynamic loading[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12): 39-43.
- [7] 李校兵,谷川,蔡袁强. 循环偏应力和循环围压耦合应力路径下饱和软黏土动模量衰减规律研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1218-1226.
LI Xiao-bing, GU Chuan, CAI Yuan-qiang. Study on attenuation law of dynamic modulus of saturated soft clay under coupled cyclic stress and cyclic confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1218-1226.
- [8] 程展林,姜景山,丁红顺,等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 460-467.
CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Study on nonlinear dilatancy model of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 460-467.
- [9] 曾铃,付宏渊,贺炜,等. 三轴CT条件下预崩解炭质泥岩路堤填料的细观试验[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(3): 925-931.
ZENG Ling, FU Hong-yuan, HE Wei, et al. Meso test of filling material of pre disintegrated carbonaceous mudstone embankment under three axis CT[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2014, 45(3): 925-931.
- [10] 王协群,邹维列,骆以道,等. 考虑压实度时的土水特征曲线和温度对吸力的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 368-372.
WANG Xie-qun, ZHOU Wei-lie, LUO Yi-dao, et al. Soil water characteristic curve and influence of temperature on suction when compaction degree is taken into account[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 368-372.
- [11] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
JTG D30—2015, Specifications for design of highway subgrades[S].
- [12] JTG E40—2007, 公路土工试验规程[S].
JTG E40—2007, Test methods of soils for highway engineering[S].
- [13] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 北京: 黄河水利出版社, 1999.
GUO Qing-guo. Engineering properties of coarse soil

- and its application[M]. Beijing: Yellow River Water Conservancy Press, 1999.
- [14] 刘大鹏. 车辆荷载作用下风积沙和砾类土低路堤工程特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
LIU Da-peng. Study on engineering characteristics of aeolian sand and gravelly soil embankment under vehicle load[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [15] 李 翀, 何昌荣, 王 琛, 等. 粗粒料大型三轴试验的尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增 1): 563-566.
LI Chong, HE Chang-rong, WANG Chen, et al. Study of scale effect of large-scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 563-566.
- [16] 黄 博, 丁 浩, 陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 195-202.
HUANG Bo, DING Hao, CHEN Yun-min. Dynamic three axle test simulation of high speed train loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 195-202.
- [17] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(2): 353-369.
- [18] HARDIN B O, DMEVIEH V P. Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, 98(6): 603-624.
- [19] HARDIN B O, DMERVICH V P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 1972, 98(7): 667-692.
- [20] 朱思哲, 刘 虔, 包承刚, 等. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
ZHU Si-zhe, LIU Qian, BAO Cheng-gang, et al. Principle and application technology of three axis test [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [21] 张 磊, 苗强强, 陈正汉, 等. 含水率变化对路基回弹模量的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(3): 13-16, 54.
ZHANG Lei, MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, et al. Influence of water content change on resilient modulus of subgrade[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(3): 13-16, 54.
- [22] 郭婷婷, 秦梅梅. 土动三轴试验参数选取的理论分析与计算[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(2): 144-149.
GUO Ting-ting, QIN Mei-mei. Theoretical analysis of parameters selection of dynamic triaxial tests[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(2): 144-149.
- [23] 周文权, 冷伍明, 刘文劼, 等. 低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 415-423.
ZHOU Wen-quan, LENG Wu-ming, LIU Wen-jie, et al. Dynamic characteristic curve model saturated backbone coarse soils under cyclic loading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 415-423.
- [24] 程明书, 汪时机, 毛 新, 等. 结构性损伤膨胀土三轴加载下的裂隙形态及力学表征[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增 2): 73-78.
CHENG Ming-shu, WANG Shi-ji, MAO Xin, et al. Fracture morphology and mechanical characterization of structural damage expansive soil under three axial loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 73-78.
- [25] 郭 莹, 栾茂田, 董秀竹, 等. 不同应力条件下砂土动模量特性的试验对比研究[J]. 水利学报, 2003, 34(5): 41-45.
GUO Ying, LUAN Mao-tian, DONG Xiu-zhu, et al. Experimental study on dynamic modulus characteristics of sand under different stress conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(5): 41-45.