

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.064

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



考虑加卸载时长的路基土动态回弹模量 测试方法及试验研究

彭俊辉, 张军辉, 郑健龙

(长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室, 长沙 410114)

摘要:路基土动态回弹模量是沥青路面结构设计中的重要参数,准确获取路基土动态回弹模量一直是道路工程领域的重要研究课题之一。在调研路基土动态回弹模量测试方法相关成果的基础上,通过有限元数值计算、试探性试验,建立考虑行车荷载加卸载时长影响的路基土动态回弹模量测试方法;选取两种典型的路基土,开展考虑行车荷载加卸载时长的动态回弹模量试验。试验结果表明:两种土质动态回弹模量随围压增大而增大,随循环偏应力、加载时长的增大而减小;随着加载时长的增加,路基土动态回弹模量减小可达34.6%,加载时长的影响不容忽视;不同加载时长下,路基土动态回弹模量随围压、循环偏应力的影响规律基本一致。

关键词:路基;动态回弹模量;加卸载时长;测试方法;试验研究

中图分类号:U416.1;TU411.8 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)06-0017-10

Test method and experimental study on the resilient modulus of subgrade soil considering the loading and unloading duration

PENG Junhui, ZHANG Junhui, ZHENG Jianlong

(National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: The dynamic resilient modulus of subgrade soil is an important parameter in design of asphalt pavement structure. Accurate acquisition of the dynamic resilient modulus of subgrade soil is always one of the important research subjects in the field of road engineering. In this paper, based on the investigation of the relevant results of domestic and foreign subgrade soil dynamic resilient modulus testing methods, a dynamic resilient modulus testing method for subgrade soil considering influence of the loading and unloading duration has been established through finite element numerical and exploratory tests. Two kinds of typical subgrade soils were selected to carry out dynamic resilient modulus tests considering the loading and unloading duration of the vehicle load. The experimental results show that the dynamic resilient

收稿日期:2021-03-05

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(51927814);国家自然科学基金(52025085、51878078)

作者简介:彭俊辉(1992-),男,博士生,主要从事道路工程研究,E-mail:pjh@stu.csust.edu.cn。

张军辉(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:zjhseu@csust.edu.cn。

Received:2021-03-05

Foundation items:National Major Scientific Instruments and Equipments Development Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51927814); National Natural Science Foundation of China (No. 52025085, 51878078)

Author brief:PENG Junhui (1992-), PhD candidate, main research interest: road engineering, E-mail: pjh@stu.csust.edu.cn.

ZHANG Junhui(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zjhseu@csust.edu.cn.

modulus of the two kinds of soil increases with the increase of confining pressure, and decreases with the increase of cyclic deviatoric stress and loading time. With the increase of loading time, the dynamic resilient modulus of subgrade soil can be reduced by 34.6%, and the influence of loading time cannot be ignored. Under different loading time, the influence law of the dynamic resilient modulus of subgrade soil with confining pressure and cyclic deviatoric stress is basically same.

Keywords: subgrade; dynamic resilient modulus; loading and unloading duration; test method; experimental study

路基土动态回弹模量是沥青路面结构设计中的重要参数^[1],被定义为瞬时动态脉冲荷载下循环偏应力与回弹或可恢复应变的比值^[2]。公路在运营期受到交通荷载、自然环境等因素的综合作用,同时路基土动态回弹模量在交通荷载、湿度、密实状态、路基土自身物理属性等因素的影响下呈现出不同的动力学特性^[3],准确获取路基土动态回弹模量一直是道路工程领域的重要研究课题之一。

Seed 等^[4]首次指出了加载时长对路基材料的动态回弹模量有影响,发现当加载时长从 20 min 降低至 0.3 s 时,砂土的动态回弹模量从 160 MPa 增加至 190 MPa。在 20 世纪中后期,鲜有加卸载时长对路基土动态回弹模量影响的研究^[5],即使有少数研究,也因为当时设备采集精度低的问题,认为加载时长或加载频率对路基土动态回弹模量影响不显著^[6]。随着试验设备的发展,越来越多的学者发现加卸载时长或加载频率对路基土动态回弹模量有显著影响^[7-9]。Liu 等^[10]对 6 类路基土的动、静态回弹模量进行研究,研究了加载频率、应力水平、压实度和含水率对动、静态回弹模量的影响,建立了动态回弹模量非线性参数的预测模型和动、静态回弹模量之间的关系,研究表明,车速度为 18~144 km/h 时,路基受到的加载频率分布为 0.5~3 Hz,加载频率对不同土体的动态回弹模量有显著影响,当加载频率每上升 1 Hz,回弹模量会增加 9%~14%。Li 等^[11]研究了在循环荷载作用下冻融循环及加载频率对饱和黏土的动力特性的影响,研究表明,动态回弹模量随加载频率的增大而增大,荷载低频率下会导致更大的瞬时应变。郑刚等^[12]针对天津临港工业区典型黏土做了一系列原状土与重塑土的动力试验,结果表明,低振动频率循环荷载作用下,原状土与重塑土均有可能发生脆性破坏,当振动频率大于 3.0 Hz 时,频率对于土样变形的影响较小。当频率处于 0.2~3.0 Hz 之间时,饱和软黏土动强度随频率的增加而增大,频率在 3.0~5.0 Hz 之间时,动强度

增长的幅度放缓。

虽然有学者针对加卸载时长或加载频率对路基土的动力特性开展了一些十分有价值的研究,但其测试方案各不相同,且其加载形式没有考虑实际的行车荷载情况,缺乏考虑加卸载时长对路基土动态回弹模量方面的研究。笔者通过文献调研、数值计算、试验研究等手段,在借鉴相关研究成果的基础上,结合实际行车荷载情况,提出了考虑加卸载时长的路基土动态回弹模量测试方法,并开展了相关的试验研究。

1 测试方法

1.1 加载应力组合

路基土承受静态的周围约束作用和动态的交通荷载作用,在进行三轴动态回弹模量试验时,一般通过设置围压来模拟土体所受周围约束作用,通过设置循环偏应力来模拟交通荷载作用。在确定动三轴加载序列时,要求其应力组合能够覆盖测试层内的典型应力范围。典型的动三轴试验加载序列有 NCHRP 1-28A、AASHTO T307-99、周宇^[13]提出的、罗志刚^[14]提出的,其加载序列如图 1 所示^[15]。

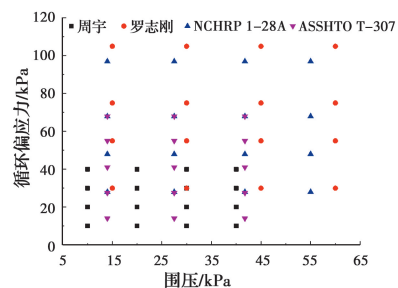


图 1 4 个主要路基土动态回弹模量加载序列^[15]

Fig. 1 Four main loading sequences of resilient modulus of subgrade soil

罗志刚调研了中国典型的高速公路路面结构,所提出的加载序列的循环偏应力和围压取值相对大一些。周宇调研了中国南方湿热地区 10 条典型高速公路,提出的加载序列的偏应力和围压取值相对

小一些。而 NCHRP 1-28A 和 AASHTO T307-99 加载序列更适合其他国家的路面结构受力情况。因此,考虑到更广的适用性,动三轴加载序列的应力组合参考罗志刚提出的测试方案。

对于路基细粒土而言,应力加载序列从最小的循环偏应力开始,避免材料过早的破坏。但在一个常循环偏应力条件下降低围压会导致主应力比增加。虽然主应力对于纯黏性材料比不重要,然而对于带有部分摩擦力的黏性材料,随着循环偏应力或主应力比的增加,其破坏的潜在可能性也在增加。所以,对黏性材料的应力组合序列,可按不同循环偏应力水平由低到高分为 4~5 组,每组又将围压由高到低分列 3~5 级应力水平。

1.2 加卸载时长及波形

1.2.1 移动荷载有限元建模 加卸载时长的选择主要取决于车辆的行驶速度和车辆间距。对于不同等级公路,其设计车速如表 1 所示。根据《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》和文献调研,不同车速下的安全车距如表 2 所示。对于加载时长,Liu 等^[10]研究表明,车速在 18~144 km/h 时,路基顶所受加载时长为 0.33~2 s。郑刚等^[12]研究了不同加载时长下重塑土的动力特性,加载时长为 0.1~2 s,并发现加载时长在 0.1~0.33 s 时,动强度变化不明显。由于路基中应力加载时长会随路基深度方向递增,且对于卸载时长鲜有研究成果,因此,采用有限元方法计算荷载加卸载时长的大致范围。

表 1 各公路等级设计车速

Table 1 Design speed of different classes of highway

公路等级	设计车速/(km·h ⁻¹)
高速公路	80~120
一级公路	60~100
二级公路	40~80
三级公路	30~40
四级公路	20

表 2 不同车速下的安全车距

Table 2 Safe distance at different speeds

行车速度	60 km/h	50 km/h	40 km/h	20 km/h
	以上	左右	以下	以下
安全距离	安全车距在数字上等于车速;例如,车速 80 km/h,安全车距为 80 m	不低于 50 m	不低于 30 m	不低于 10 m

采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件,对中国典型的路面结构进行二维有限元数值建模,面层采用 0.20 m 沥青混凝土,基层采用 0.40 m 水泥稳定碎石,底基层采用 0.20 m 水泥稳定碎石,路基采用 7.0 m 路基土,地基为 2.0 m,各层均视为纯弹性体,路面结构参数如表 3 所示。采用标准轴重的移动荷载加载,车轴距为 2.7 m,每个轮胎压强为 0.7 MPa,轮胎作用直径为 0.213 m,移动速度为 20~120 km/h。有限元模型如图 2 所示,网格尺寸为 0.2 m×0.2 m,为消除边界效应,x 方向长度设为 80 m,x=0 m 和 x=80 m 处仅约束 x 方向位移,y=0 m 处约束 x 和 y 方向位移。

表 3 路面结构参数

Table 3 Pavement structural parameter

层位	结构层材料类型	厚度/m	动态回弹模量/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比
面层	沥青混凝土	0.20	11 000	2.35	0.3
基层	水泥稳定碎石	0.40	9 000	2.10	0.25
底基层	水泥稳定碎石	0.20	7 000	2.10	0.25
路基	路基土	7.0	100	1.85	0.35
地基	地基土	2.0	40	1.80	0.35

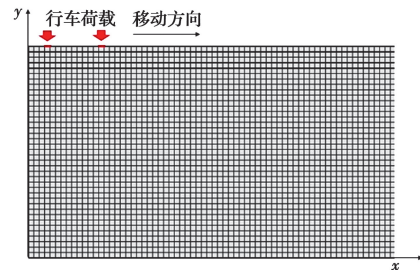


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.2.2 建模结果分析 图 3 为不同行车速度下距路基顶面不同深度下的应力时程曲线,由图 3 可知,速度越快荷载作用时间越短,当行车速度从 20 km/h 增加到 120 km/h,不同路基深度下的荷载作用时长减少 83.4%~83.9%。同时,同一行车速度下,随距路基顶面深度增加,荷载作用时间变长,从距路基顶面深度 0 m 增加到 7 m,荷载作用时间增加 89.4%~95.6%。另外,当荷载波形结束后,仍会有小范围的波动,为保证所选取加载时长在合理的范围,参考误差的取值方式,取荷载峰值的 5% 作为荷载谷值。为了方便查看,将不同车速下距路基顶面不同深度的加载时长以表格形式统计,如表

4 所示。由表 4 可以看到,行车速度 20 km/h 时,加载时长为 2.07~4.05 s;行车速度 40 km/h 时,加载时长为 1.20~2.34 s;行车速度 60 km/h 时,加载时长为 0.81~1.55 s;行车速度 80 km/h 时,加载时长为 0.60~1.17 s;行车速度 100 km/h 时,加载时长为 0.48~0.93 s;行车速度 120 km/h 时,加载时长为 0.40~0.76 s。加载时长范围为 0.40~4.01 s,因此,在进行动三轴试验时,应包括该加载时长范围。考虑到路基土动态回弹模量在高频加载时受加载时长影响变化显著,加载时长采取向后差值递增的设置方式,分别为 0.2、0.6、1.4、2.6、4.2 s。同时,由图 3 可以发现,在距路基顶面 0 m 深度处,应力波形呈现双峰值,这是由于车辆前后轴距造成的,但在距路基顶面 1 m 及以上深度处,其应力波形均为半正弦波。因此,在进行路基土动三轴试验时,对于加载波形选择,与其他学者处理方式一致,将行车荷载简化为半正弦波。

按照表 2 不同行车速度所对应的安全距离设置连续的行车荷载,图 4 为不同车速连续行车荷载下距路基顶面不同深度处的应力时程曲线。由图 4 可以看到,在行车速度为 20 km/h 时,存在不同程度的应力叠加,即卸载时长可以看成为 0 s,在行车速度大于 40 km/h 时,前后车辆所产生的路基内动应力

相互不叠加,存在不同的卸载时长。为了探究不同卸载时长对路基动力响应的影响程度,设置了卸载时长分别为 0、0.4、0.8、1.2 s 的试探性试验来研究卸载时长对路基土动三轴试验结果的影响,试验结果如图 5 所示。由图 5 可以看到,在 0.2、0.6 s 加载时长下,0 s 卸载时长下的动态回弹模量会比其他卸载时长下的略高,同时,在 0.2 s 加载时长、0 s 卸载时长下,第 12 序列后出现了模量的衰减,通过观察原始数据,发现是其塑性应变快速累积,试件出现了鼓包及损伤,因此,在高频加载情况下,试件易产生塑性变形。在 1.4、2.6 s 加载时长下,卸载时长对动态回弹模量值基本没有影响。因此,仅在加载时长小于 0.6 s,且卸载时长小于 0.4 s 时,卸载时长对路基土动态回弹模量值有影响;加载时长小于 0.6 s,对应于行车速度大于 60 km/h,由图 4(c)~(f) 可以看到,此时路基中实际的卸载时远远大于 0.4 s。因此,在实际道路中,不会出现因加载卸载时长不同导致路基土动态回弹模量值不同情况。对于路基土,学者们通常取 0.8 s 的时间间歇来进行动三轴试验。因此,结合实际的道路受力情况,保证三轴试验中试件的最小损坏原则,并结合国内外学者的三轴试验方案,统一取 0.8 s 的卸载时长进行研究。

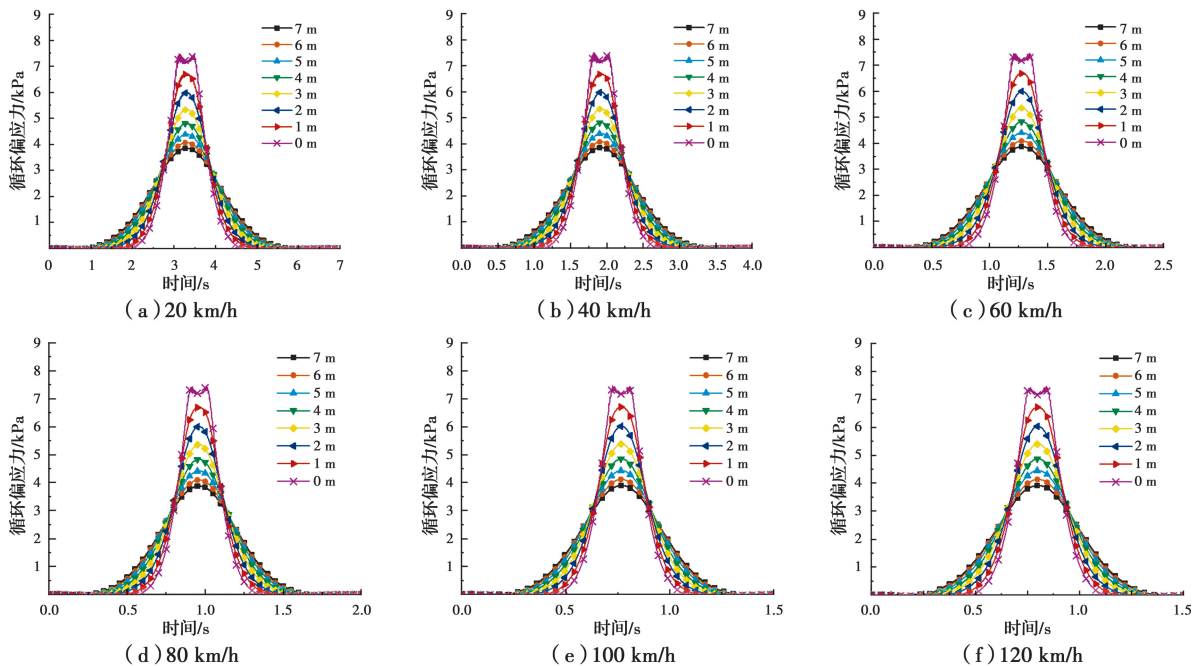


图 3 不同车速下距路基顶面不同深度下的应力时程曲线

Fig. 3 Stress-time curve of different speeds at different depths from the top surface of subgrade

表 4 不同车速下距路基顶面不同深度的加载时长

Table 4 Loading time of different speeds at different depths from the top surface of subgrade

行车速度/ (km · h ⁻¹)	距路基 顶面的 深度/m	加载时 长/s	行车速度/ (km · h ⁻¹)	距路基 顶面的 深度/m	加载时 长/s
20	0	2.07	80	0	0.60
	1	2.38		1	0.69
	2	2.76		2	0.80
	3	3.13		3	0.90
	4	3.44		4	0.99
	5	3.69		5	1.06
	6	3.89		6	1.12
40	0	1.20	100	0	0.48
	1	1.38		1	0.55
	2	1.60		2	0.64
	3	1.81		3	0.72
	4	2.00		4	0.79
	5	2.14		5	0.85
	6	2.25		6	0.89
60	0	0.81	120	0	0.40
	1	0.93		1	0.46
	2	1.07		2	0.53
	3	1.20		3	0.60
	4	1.33		4	0.66
	5	1.42		5	0.70
	6	1.50		6	0.74
7	1.55	7	0.76		

1.3 加载序列

张宗涛等^[16]研究发现,随着车速的增加,车辆动载对路面结构永久变形损伤指数也在增加。Romanov^[17]研究了 4 Hz 和 2 Hz 加载频率下,铁路路基的累积塑性变形,结果表明,随着加载频率的增加,路基土的累积塑性应变增加,Peng 等^[18]也发现了同样的规律。因此,在进行考虑加载时长的动三轴试验时,应先高频后低频加载,尽早地消除路基土试件的塑性变形和减少试样破坏的可能性。确定的加载序列如表 5 所示。

表 5 考虑加卸载时长的动三轴加载序列

Table 5 Dynamic triaxial loading sequence considering loading and unloading duration

加载 序列	围压/ kPa	接触应力 0.2σ ₃ /kPa	循环应 力/kPa	加载 次数	主应力 之比	备注
0-预载	30	6	55	2 000	2.83	—
1	60	12	30	100	1.50	加卸载时长组合: ①0.2 s~0.8 s ②0.6 s~0.8 s ③1.4 s~0.8 s ④2.6 s~0.8 s ⑤4.2 s~0.8 s
2	40	9	30	100	1.75	
3	30	6	30	100	2.00	
4	15	3	30	100	3.00	
5	60	12	55	100	1.92	
6	40	9	55	100	2.38	
7	30	6	55	100	2.83	
8	15	3	55	100	4.67	
9	60	12	75	100	2.25	
10	40	9	75	100	2.88	
11	30	6	75	100	3.50	
12	15	3	75	100	6.00	
13	60	12	105	100	2.75	
14	40	9	105	100	3.63	
15	30	6	105	100	4.50	
16	15	3	105	100	8.00	

注:预加载结束后,依次进行①~⑤加卸载时长组合 1~16 个加载序列。

1.4 动态回弹模量取值

根据最新研究成果,一般取最后 5 周期计算动态回弹模量。吴宏伟等^[19]通过动三轴试验分析表明,当路基土样进行正式加载 20 个周期后,试件的动态回弹模量值基本上处于稳定状态,同时,《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)也规定取最后 5 个周期的路基土动态回弹模量的平均值作为实测模量值。因此,在进行动三轴回弹模量试验时,取最后 5 次循环的平均动态回弹模量作为实测动态回弹模量值。

2 动态回弹模量试验过程

2.1 土样及试件制作

选取长沙、上海两地的典型路基土,采用本文制定的考虑加卸载时长的路基土动态回弹模量测试方法进行试验,用于研究不同加载时长下的路基土动态回弹模量变化规律。通过比重试验、颗粒筛分试验、界限含水率试验、击实试验分别得到了两种土样的基本物理力学性能参数,如表 6 所示,其中,长沙土样为高液限粉土,上海土样为低液限黏土。

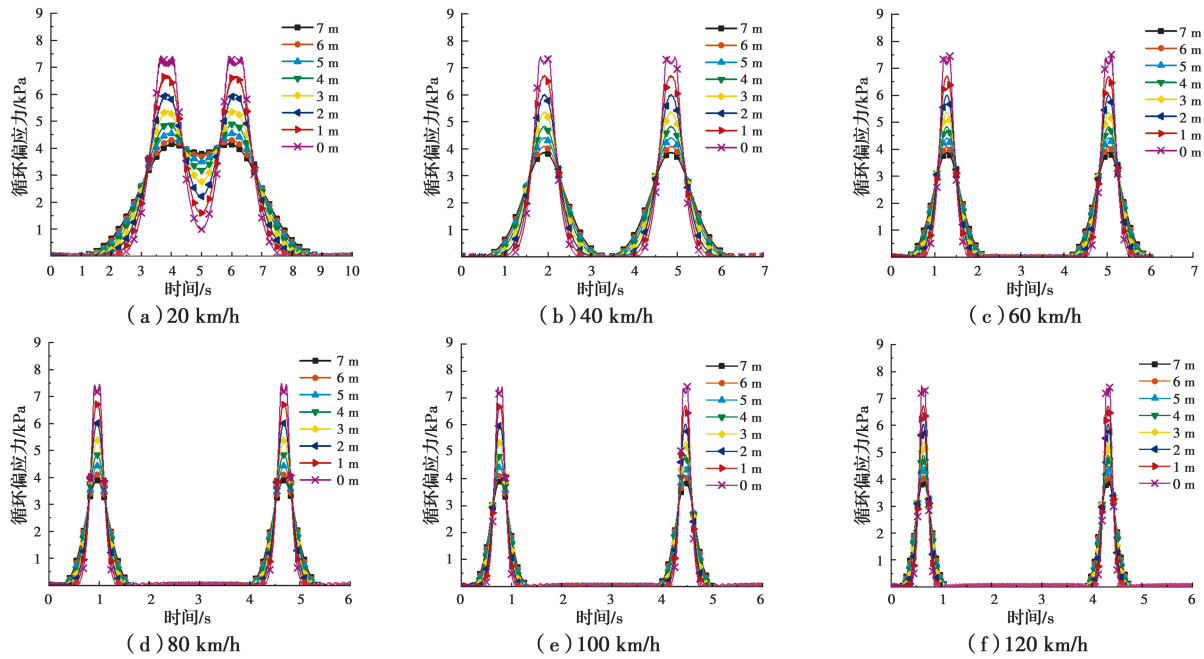


图 4 连续行车荷载下距路基顶面不同深度处的应力时程曲线

Fig. 4 Stress-time curve at different depths from the top surface of subgrade under continuous running load

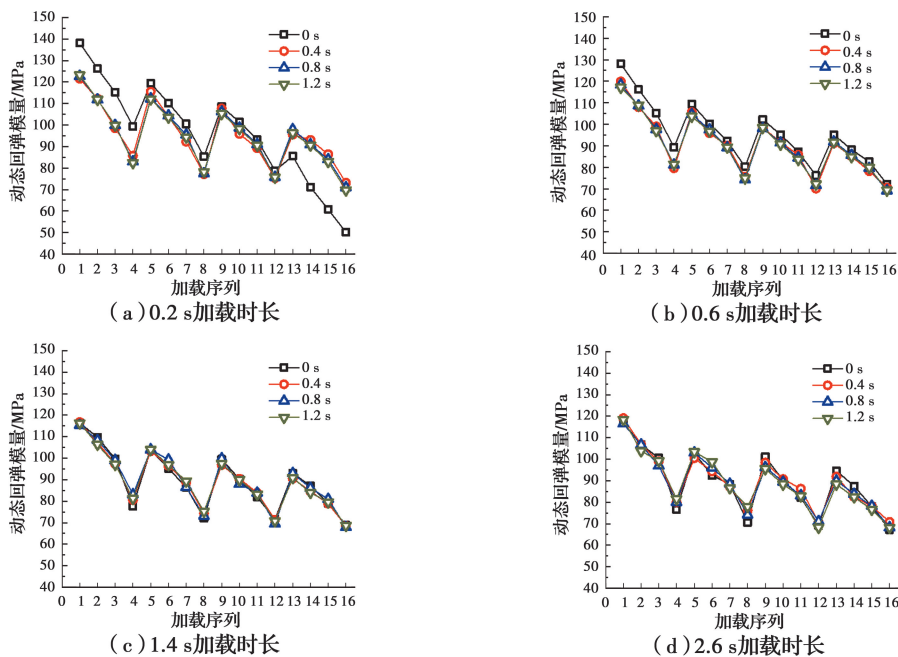


图 5 不同卸载时长下动态回弹模量值

Fig. 5 Resilient modulus under different unloading duration

表 6 路基土基本物理力学性能参数

Fig. 6 Physical and mechanical properties of subgrade soil

土样来源	比重	液限 / %	塑性	最佳	最大干	0.075 mm 通过率 / %	分类
			指数 / %	含水率 / %	密度 / (g · cm ⁻³)		
长沙	2.71	51.9	14.8	23.0	1.62	95.6	高液限粉土
上海	2.59	48.2	26.8	13.6	2.02	93.1	低液限黏土

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)对路基压实度的要求,压实度工况设置为 96%,满足路床的压实度要求,含水率设置为最佳含水率。

依据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中对动三轴试验的规定,两种土样的最大粒径不超过 19 mm,因此,试件尺寸为直径 100 mm、高 200 mm。AASHTO T307-99 试验规程中提到土颗粒的直径

不应超过试件直径的 $1/10$, 因此, 在进行试件成型前对土样充分碾压, 并过 9.5 mm 筛。粒径达到要求后, 烘干土样, 配置到设定的含水率状态, 土样进行密封保存 24 h , 使其含水率分布均匀。含水率配置完成后, 应再次测定土样含水率, 控制误差在 0.5% 以内。采用万能试验机, 对土样分 5 层静压成型, 每一层的质量一致, 压实厚度一致, 保证试件压实度均匀。试件成型后密封保存 2 d , 保证试件内部含水率均匀分布。

2.2 试验设备

试验采用长沙理工大学公路工程养护技术国家工程实验室的动三轴试验设备, 该设备由意大利 Controls 公司提供, 型号为 Dynatriax100/14 动三轴试验系统, 如图 6 所示^[20]。



图 6 动三轴试验系统^[20]

Fig. 6 Dynamic triaxial test system

3 动态回弹模量影响因素分析

3.1 循环偏应力及围压

在试验过程中, 循环偏应力和围压分别模拟交通荷载和土体周围的约束, 体现为剪切和侧限两种不同的作用效果。对长沙、上海两种土样不同加载时长的动态回弹模量试验结果进行分析, 如图 7、图 8 所示。从图中可以看到, 在不同加载时长和围压下, 路基土动态回弹模量值均随循环偏应力的增大而减少。对于长沙土样, 当循环偏应力从 30 kPa 增加到 105 kPa 时, 0.2 s 、 0.6 s 、 1.4 s 、 2.6 s 、 4.2 s 加载时长下的动态回弹模量分别减少了 $28.1\% \sim 33.8\%$ 、 $26.1\% \sim 34.0\%$ 、 $26.0\% \sim 33.1\%$ 、 $25.9\% \sim 33.8\%$ 、 $25.8\% \sim 32.2\%$ 。对于上海土样, 循环偏应力从 30 kPa 增加到 105 kPa 时, 0.2 s 、 0.6 s 、 1.4 s 、 2.6 s 、

4.2 s 加载时长下的动态回弹模量分别减少了 $25.8\% \sim 28.8\%$ 、 $25.7\% \sim 29.2\%$ 、 $25.8\% \sim 29.4\%$ 、 $25.7\% \sim 29.3\%$ 、 $25.6\% \sim 29.5\%$ 。

由图 7、图 8 还可以看到, 在不同循环偏应力和加载时长下, 路基土动态回弹模量值均随围压的增大而增大。对于长沙土样, 围压从 15 kPa 增加到 60 kPa 时, 0.2 s 、 0.6 s 、 1.4 s 、 2.6 s 、 4.2 s 加载时长下的动态回弹模量分别增加了 $38.9\% \sim 50.9\%$ 、 $35.3\% \sim 51.4\%$ 、 $35.0\% \sim 51.5\%$ 、 $34.9\% \sim 51.6\%$ 、 $34.8\% \sim 51.4\%$ 。对于上海土样, 围压从 15 kPa 增加到 60 kPa 时, 0.2 s 、 0.6 s 、 1.4 s 、 2.6 s 、 4.2 s 加载时长下的动态回弹模量分别增加了 $34.8\% \sim 39.6\%$ 、 $34.5\% \sim 41.3\%$ 、 $34.4\% \sim 41.4\%$ 、 $34.5\% \sim 41.6\%$ 、 $34.8\% \sim 41.7\%$ 。因此, 在不同加载时长下, 路基土动态回弹模量随循环偏应力和围压的变化规律基本一致, 但由于土质的不同, 其变化幅度不同。

3.2 加载时长

选取长沙、上海土样在围压 30 kPa 、循环偏应力 30 kPa 下不同加载时长的动态回弹模量试验结果例进行分析, 如图 9 所示。由图 9 可以看到, 随加载时长增加, 路基土动态回弹模量逐渐减小, 并到达稳定值。对于长沙和上海土样, 加载时长从 0.2 s 增加到 4.2 s , 路基土动态回弹模量分别减小了 32.0% 和 27.6% , 尽管土质不同, 但路基土动态回弹模量随加载时长变化的幅度差异不大。同时, 还计算了不同围压和循环偏应力下的动态回弹模量试验结果, 对于长沙土样, 加载时长从 0.2 s 增加到 4.2 s , 路基土动态回弹模量减小了 $25.4\% \sim 34.6\%$; 对于上海土样, 加载时长从 0.2 s 增加到 4.2 s , 路基土动态回弹模量减小了 $18.7\% \sim 30.9\%$ 。可见, 加载时长的影响不容忽视。

值得一提的是, 由于路基为黏弹塑性体, 通过有限元数值计算得到的加载时长范围较实际情况偏小。由图 9 可以发现, 当加载时长大于 2.6 s 时, 路基土动态回弹模量基本不受加载时长的影响。因此, 数值计算结果能够为考虑加载时长的动态回弹模量试验服务。

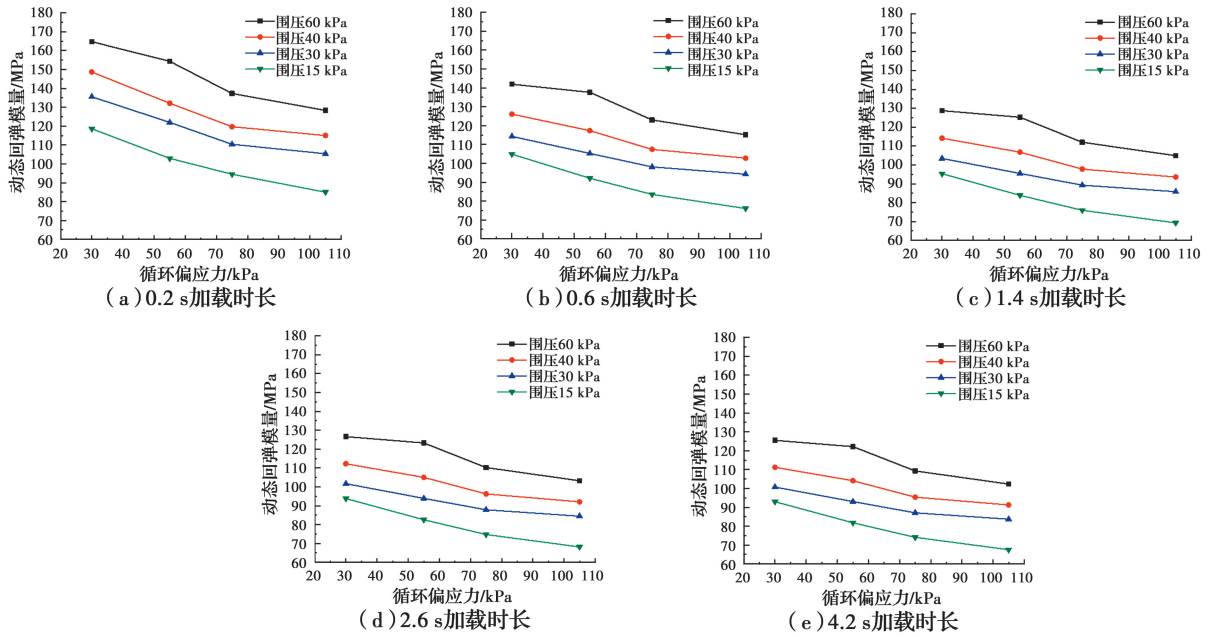


图 7 长沙土样不同加载时长下的动态回弹模量试验结果

Fig. 7 Resilient modulus test results of Changsha soil samples under different loading duration

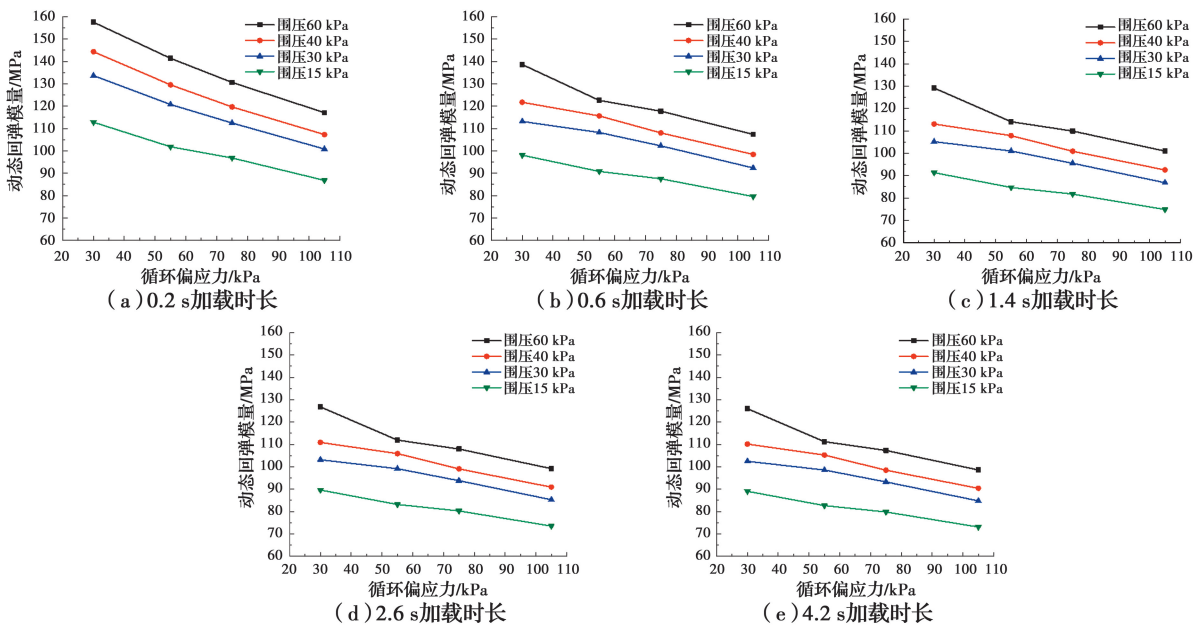
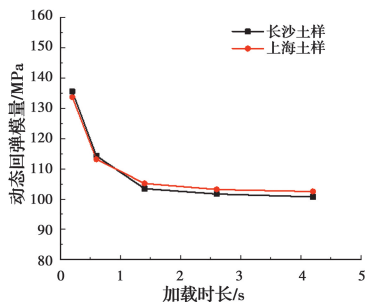


图 8 上海土样在不同加载时长下的动态回弹模量试验结果

Fig. 8 Resilient modulus test results of Shanghai soil samples under different loading duration

图 9 长沙和上海土样不同加载时长的动态回弹模量
Fig. 9 Resilient modulus of soil samples from Changsha and Shanghai under different loading duration

4 结论

提出了新的动态回弹模量测试方法,对两种典型路基土开展了动态回弹模量试验,并对试验数据进行了分析,主要结论如下:

1)分析了已有的动态回弹模量加载序列,分析了不同行车速度对路基应力传播特性的影响,提出了考虑加卸载时长影响的路基土动态回弹模量测试方法;加载时应先高频加载后低频加载,尽早消除路

基土试件的塑性变形和减少试样破坏的可能性。

2)选取了两种典型路基土,制备了96%压实度、最佳含水率下的试件来进行动态回弹模量试验研究。

3)动三轴试验结果表明,两种土样动态回弹模量随围压增大而增大,随循环偏应力、加载时长的增大而减小;随着加载时长的增加,路基土动态回弹模量减小可达34.6%,加载时长的影响不容忽视;不同加载时长下,路基土动态回弹模量随围压、循环偏应力的影响规律基本一致。

参考文献:

- [1] 张军辉, 彭俊辉, 郑健龙. 路基土动态回弹模量预估进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 1-13.
ZHANG J H, PENG J H, ZHENG J L. Progress and prospect of the prediction model of the resilient modulus of subgrade soils [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] PENG J H, ZHANG J H, LI J, et al. Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 120: 103413.
- [3] ZHANG J H, PENG J H, ZHENG J L, et al. Characterisation of stress and moisture-dependent resilient behaviour for compacted clays in South China [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(1): 262-275.
- [4] SEED H B, CHAN C K, LEE C E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements [C]// International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1962: 611-636.
- [5] 段丹军. 运煤重载黄土路基动态回弹模量加载序列确定[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 688-693.
DUAN D J. Determination of loading sequence for dynamic resilient modulus of subgrade in coal overloading loess areas [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(6): 688-693. (in Chinese)
- [6] LI J, WHITE D J, STEPHENSON W R, et al. Considerations for laboratory resilient modulus testing of unbound pavement base materials [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 515-523.
- [7] 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, 36(5): 1238-1246.
CAI Y Q, ZHAO L, CAO Z G, et al. Experimental study on dynamic characteristics of unbound granular materials under cyclic loading with different frequencies [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1238-1246. (in Chinese)
- [8] ZHANG J, RAO Q H, YI W. Viscoelastic parameter prediction of multi-layered coarse-grained soil with consideration of interface-layer effect [J]. Applied Sciences, 2020, 10(24): 8879.
- [9] WALKER R T R, INDRARATNA B. Moving loads on a viscoelastic foundation with special reference to railway transition zones [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(11): 04018145.
- [10] LIU X L, ZHANG X M, WANG H, et al. Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various influencing factors [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 178-186.
- [11] LI J, TANG Y Q, YANG P, et al. Dynamic properties of freezing-thawing muddy clay surrounding subway tunnel in Shanghai [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(6): 5341-5349.
- [12] 郑刚, 霍海峰, 雷华阳, 等. 振动频率对饱和黏土动力特性的影响[J]. 天津大学学报, 2013, 46(1): 38-43.
ZHENG G, HUO H F, LEI H Y, et al. Contrastive study on the dynamic characteristics of saturated clay in different vibration frequencies [J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46(1): 38-43. (in Chinese)
- [13] 周宇. 湿热地区路基湿度分布及刚度的湿度依赖性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
ZHOU Y. Research on subgrade moisture distribution and stiffness of humidity dependence in hot and humid areas [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
LUO Z G. Study on dynamic modulus parameters of subgrade and granular layer [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [15] ZHANG J H, PENG J H, ZHENG J L, et al. Prediction of resilient modulus of compacted cohesive soils in South China [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7): 04019068.

- [16] 张宗涛, 朱月风, 张洪亮. 车辆动载对路面的永久变形损伤评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(7): 978-983.
ZHANG Z T, ZHU Y F, ZHANG H L. Evaluation of road permanent deformation damage due to vehicle dynamic load [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(7): 978-983. (in Chinese)
- [17] ROMANOV V. 循环列车荷载下道砟碎石-粗粒土永久变形研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ROMANOV V. Experimental investigation on permanent deformation of ballast coarse grained soil induced by cyclic train load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] PENG K, ZHOU J Q, ZOU Q L, et al. Effect of loading frequency on the deformation behaviours of sandstones subjected to cyclic loads and its underlying mechanism [J]. International Journal of Fatigue, 2020, 131: 105349.
- [19] 吴宏伟, 陈锐. 非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 123-128.
WU H W, CHEN R. Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 123-128. (in Chinese)
- [20] ZHANG J H, PENG J H, ZHANG A S, et al. Prediction of permanent deformation for subgrade soils under traffic loading in Southern China [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020: 1-10.

(编辑 胡玲)