

淤泥固化土路基动力响应研究

姜磊,戴治恒,李诗琦

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 为了研究交通荷载对淤泥固化土路基动力性能的演化规律,现场淤泥固化土路基试验依托于上海市乐高乐园附属道路建设项目,对淤泥固化土路基进行不同的工程测试。测试路基在车辆不同速度、不同轴重下土压力和应变的时程变化;研究土压力峰值、应变峰值在不同速度、不同轴重作用下,沿深度分布的衰减机制。测试结果表明:在一定的速度范围内的交通荷载作用下,土体所受动应力和动应变与车辆轴重或速度呈正相关,轴重对动应力的影响相比速度更加显著。在车辆低速经过测试断面的过程中,不同的轮轴都会有一个对应的应力峰值产生,在增大车速后,相距较近的不同车轴之间产生的动应力会互相影响,并逐步演变成应力叠加现象。

关键词: 淤泥固化土;交通荷载;土压力;土应变

中图分类号: U416;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0090-06

Study on Dynamic Response of Silt-solidified Soil Subgrade

JIANG Lei, DAI Zhiheng, LI Shiqi

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: In order to study the evolution law of traffic load on the dynamic performance of silt-stabilized soil subgrade, the on-site silt-solidified soil subgrade test is based on the Shanghai Legoland Auxiliary Road Construction Project, and various engineering tests on the silt-solidified soil subgrade are conducted. The time-history variations of earth pressure and strain of the subgrade under different vehicle speeds and axle loads are tested. The attenuation mechanism of peak earth pressure and peak strain along depth distribution under the action of different speeds and different axle loads are studied. The test results show that under the action of traffic loads within a certain speed range, the dynamic stress and dynamic strain on the soil are positively correlated with the axle load or speed of the vehicle, and the influence of axle load on dynamic stress is more significant than that of speed. During the process of the vehicle passing through the test section at a low speed, a corresponding stress peak will be generated at different axles. After increasing the vehicle speed, the dynamic stresses generated between different axles that are relatively close to each other will influence each other and gradually evolve into a stress superposition phenomenon.

Keywords: silt-solidified soil; traffic loads; soil pressure; soil strain

0 引言

随着我国基础设施建设持续深化,高速公路里程呈显著增长趋势。如2018年全年新增里程突破5 000 km,反映路网建设的快速扩张^[1]。

在此背景下,道路建设对施工质量和效率提出了更高的要求。其中,固化土体有独特优势,广泛应用于道路等土木工程建设中,许多针对不同道路相

关的力学特性有很多分析研究介绍^[2-5]。梁乃兴等^[6]基于三维有限元-断裂力学联合模型,分析了水泥粉煤灰碎石基层性能参数对沥青路面在热-机荷载作用下应力分布规律。徐鹏等^[7]分析了不同基床回填材料对路基内部动力响应影响的差异。

区别于传统路基填筑材料,淤泥固化土具备一定的自密实性和强度可控等特点^[8],可用于基坑肥槽、道路路基等浇筑工程。并且其流动性是保障施工质量的重要因素^[9],进而对搅拌、运送、浇筑等施工环节提出了较高要求,需要做出合理规划并控制施工质量。在明确了淤泥固化土破碎重塑后的强度损失、力学特性及后期强度恢复特性后^[10-11],可以进一步总结新型流动性基床填筑材料的现场施工工艺流程。

收稿日期: 2025-05-28

基金项目: 上海市交通委2024年度科研计划(JT2024-KY-027)

作者简介: 姜磊(1984—),男,本科,高级工程师,从事道路桥梁施工管理工作。

通信作者: 戴治恒(1991—),男,博士,高级工程师,从事施工工程及施工技术工作。电子邮箱: zhihengdai@163.com

郎瑞卿等^[9]揭示了固化材料掺量、含水率、液限三因素对淤泥和新拌流态固化淤泥流体流变特性的影响规律,建立了流动度和黏滞剪切力计算方法。陈瑞敏等^[12]提出引入CSFG-FR协同改性技术,通过开展无侧限抗压和渗透试验,系统分析了不同固化剂掺量、纤维长度和纤维掺量对淤泥固化土力学特性的影响。王强等^[13]研究了疏浚粉土、矿渣和氯氧酸镁水泥联合固化反应机理及微观机理,探讨了养护剂掺量和养护年龄对抗压强度的影响。基于有机质含量变量控制实验,范昭平等^[14]揭示了有机组分对淤泥固化体系强度形成的抑制规律。方淑薇等^[15]提出了一种以生物炭为添加剂的水泥固化将沿海淤泥转化为路基土的新方法。在道路施工过程中,不同轴重的车辆,以不同速度通过路面,形成的各类交通荷载对淤泥固化土路基造成的动力学响应特性,也是研究的重点。然而,相关的研究缺少在实际道路工程的条件下,针对施工期间淤泥固化土路基的研究分析。

本文主要对淤泥固化土路基施工阶段进行全方位系统性分析。本文依托于上海市乐高乐园附属道路建设项目,通过对淤泥固化土路基进行不同的工程测试,得到在车辆荷载作用下,路基土压力和应变的时程变化特性,以及路基土压力峰值、应变峰值沿深度分布的衰减机制,相关研究成果可为类似的工程建设和设计提供宝贵的实测数据支持。

1 工程概况

现场试验依托上海市金山区枫泾镇的枫明路建设工程,归属于乐高乐园周边市政基础设施的配套建设。如图1所示,试验路段设计为城市次干路,全线道路规划为双向六车道,位于上海市金山区枫泾镇,西起兴豪路,东至兴北路,全长约1 591.6 m。



图1 枫明路建设规划

由于枫明路路段的浅层地质条件多以杂填土和粉质黏土为主,总体密实度较差,易发生不均匀沉

降,需进行处理后才可进行道路结构建设,具体措施为超挖至设计路面结构底以下60 cm,清除杂填土后回填砾石砂,以隔断地下水对路基的影响。在路基结构设计中,通常采用石灰土回填至路基结构底层。本次试验段采用淤泥固化土代替石灰土填筑,提高强度的同时可以避免过多的压实等工序。相关道路建设要求如图2所示,从上至下依次分为沥青混凝土面层、水泥稳定碎石基层、级配碎石、淤泥固化土层、砾石砂、天然地基。

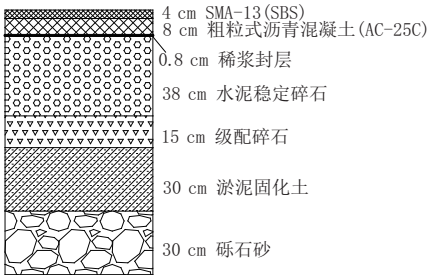


图2 淤泥固化土道路结构

现场动力荷载试验分别在碎石层、水稳层和粗粒式沥青混凝土(AC-25C)层施工完成后进行加载。考虑到在水稳层加载时,能捕捉到显著且可靠的动力监测数据,本文主要对碎石层上加载时的试验结果进行分析。

2 现场测试方案

2.1 测试内容

现场试验的研究目的是通过现场测试,分析淤泥固化土路基施工过程中,路面有卡车经过时,卡车的行车速度、轴重大小,不同因素影响下的物理力学特性变化规律。

具体内容为:

- (1)测试路基不同速度下土压力和应变的时程变化。
- (2)测试路基不同轴重下土压力和应变的时程变化。
- (3)测试土压力峰值随不同速度、不同轴重下沿路基深度方向上的衰减情况。
- (4)测试应变峰值随不同速度、不同轴重下沿路基深度方向上的衰减情况。

结合上述测试目标,通过获得车辆交通荷载作用下淤泥固化土层的动力学响应数据,对施工阶段的淤泥固化土层的土压力及变形变化规律进行深入分析。

2.2 现场布置

现场施工采用淤泥固化土代替石灰土填筑,提高

强度的同时可以避免压实等工序,在铺设的 300 mm 淤泥固化土固结后,铺设 150 mm 级配碎石,并铺设 380 mm 水泥稳定碎石。为研究淤泥固化土层中应力和应变沿不同深度的分布规律,在不同深度分别设定了相应的传感器,具体位置如图 3 所示。

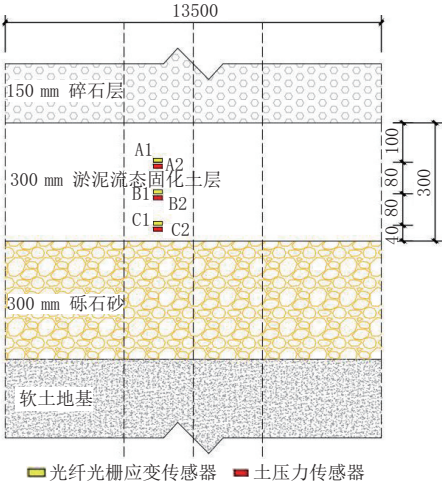


图 3 传感器布置纵断面(单位:mm)

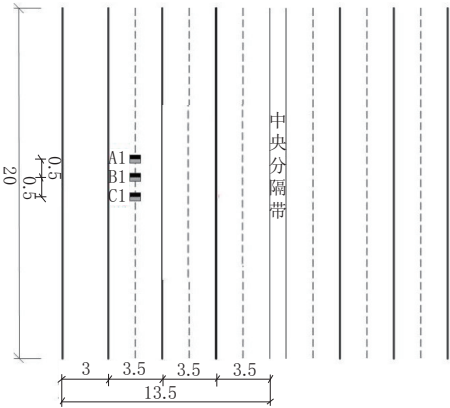
在实际布设过程中,考虑到淤泥固化土层厚度为 300 mm,而 FBG 传感器和土压力传感器因本身的尺寸在近距离间相互影响较大,在同一纵断面上不利于现场测试。因此,传感器以 500 mm 的间隔布设在不同深度位置,如图 4(a)所示。FBG 传感器和土压力传感器从上至下依次布置在淤泥固化土层 100、180、260 mm 的深度位置,分别标记为 A1、B1、C1、A2、B2、C2。

泵送施工过程中,浆液会使传感器偏离预设位置,因此本次试验采用定位支架[见图 4(b)],确保传感器布设到固定点位。淤泥固化土层施工前,试验段内道路铺设 300 mm 砾石砂,利用压路机碾压至规定压实度。然后通过卷尺及标线白灰确定测试点位并安置定位三脚架,将土压力盒受力面向上水平布置,FBG 传感器竖向绑定在支架一侧。

综合考虑运输距离、浆液方量、材料特性、施工组织等因素,最终确定现场搅拌、即时泵送的施工方案。淤泥固化土在流动状态下通过如图 5 所示泵送方式进行浇筑。

2.3 工况设计

为研究不同轴重及车速对淤泥固化土路基动力响应的影响,现场荷载试验采用了如图 6(a)所示的重型三轴自卸卡车,轴间距 4.3 m+1.4 m。荷载试验平面示意图如图 6(b)所示。由于试验设计的是车轮直接行驶在传感器正上方,因此车辆一侧三个车轮



(a)传感器布置平面图(单位:m)



(b)传感器布设
图 4 传感器布置

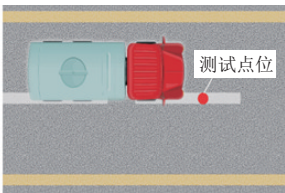


图 5 泵送浇筑

经过时,传感器监测数据中会出现明显峰值。



(a)试验所用车辆



(b)荷载试验平面示意图

图 6 车辆荷载加载

车辆测试时的荷载分为空载和满载两种负载状态。考虑到现场测试环境 and 安全性,车辆分别以较低的车速通过测试路段,分别为 10、20、30 km/h。为了确保采集数据的准确和后续分析,将行车辅助线提前在测试现场路面进行标记,以便后续试验时,车辆的车轮能准确通过传感器正上方。卡车振动作用下淤泥固化土层的动力响应特性,在数据记录和分析中定义受压为正。

3 淤泥固化土路基土压力分析

3.1 行车速度对土压力的影响

项目针对满载重型三轴自卸卡车直接行驶于铺设在 300 mm 淤泥固化土层的水泥稳定碎石上,这一实际工况展开观测和分析。

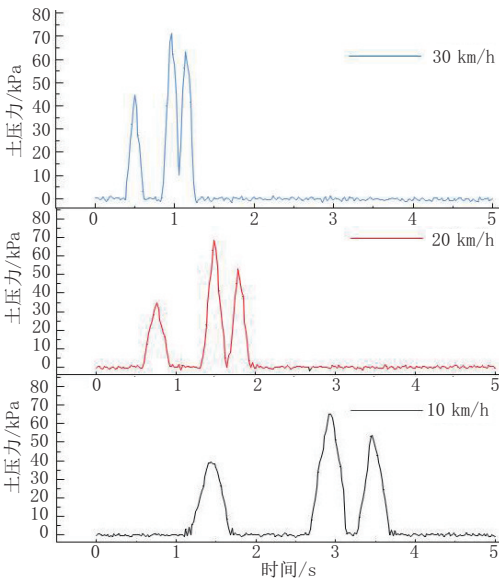


图7 不同车速下A2测点土压力动态曲线

选取轮下深度埋深 630 mm 的 A2 测试点,测试不同车速对动土压力值的影响,监测结果如图 7 所示。在 10 km/h 时速下,前后两个应力峰值间隔时间分别约为 1.5 s 和 0.5 s;20 km/h 时速下,前后两个应力峰值间隔时间分别约为 0.7 s 和 0.24 s;30 km/h 时速下,前后两个应力峰值间隔时间分别约为 0.5 s 和 0.15 s,这些在相应车速下行驶过的距离与车辆的轴距接近。另外,在车速较低时,每个峰值均由一个轮轴引起,不存在叠加现象,而车速为 30 km/h 时,车辆后轴相邻车轴所引起的动应力相互影响,且有随着车速进一步加快而合成一个峰值的趋势。

3.2 车辆轴重对土压力的影响

为了进一步研究不同车辆荷载下,动土压力的响应情况,图 8 给出了车辆分别在空载和满载状态下以 10 km/h 和 30 km/h 驶过测试路段时 A2 测点的动应力时程曲线。从中可以看出,当车辆经过测点时,不同的轮轴都对应一个应力峰值,且峰值变化幅度较大,曲线顶部较尖锐。此外,车辆在空载状态下驶过测点时,动应力峰值出现在前轴;而车辆满载时,由于车辆重要主要集中在后部,因此在后轴经过时获得动应力峰值。

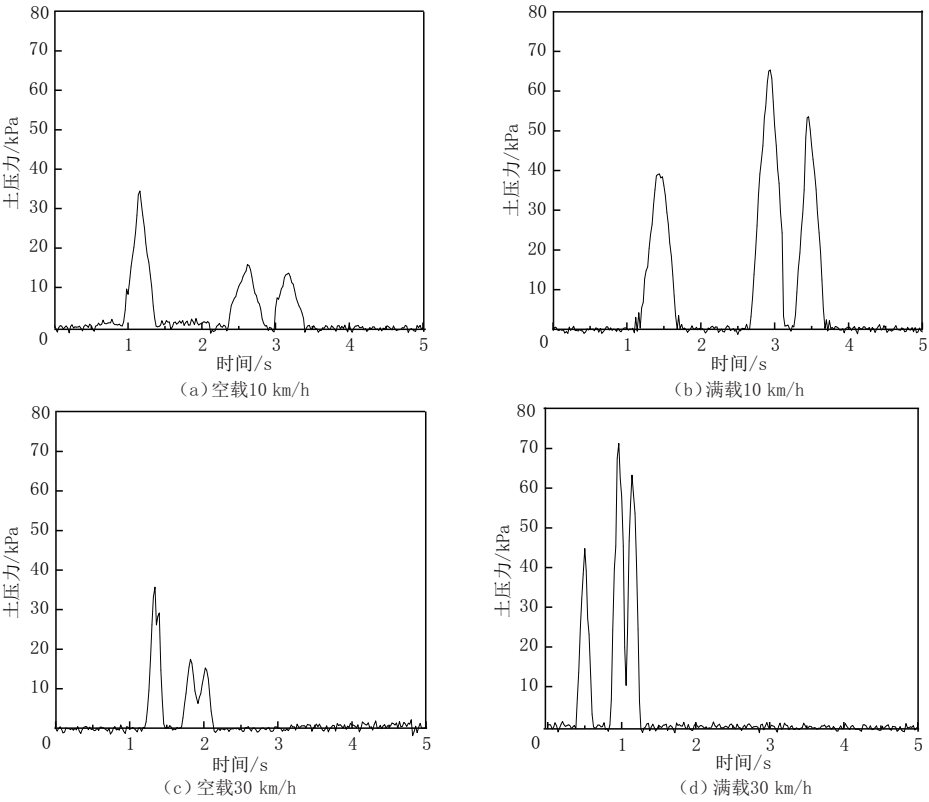


图8 不同轴重下A2测点土压力动态曲线

3.3 路基深度对土压力的影响

为分析轴重和速度的影响,选取路基不同深度处测点的土压力值作为研究。图 9 展示了不同速度

和轴重的车辆所引起的动应力沿路基深度方向上的变化规律。研究表明,在不同行车速度及轴重条件下,路基中竖向动应力响应沿深度的衰减规律呈现

一致性:其衰减速率随土层深度增加呈递减趋势。在一定的速度范围内,路基土中的动应力幅值表现出与轴重和行车速度的正相关性:二者数值的提升均导致动应力幅值增大。

从图9可以发现,轴重对竖向动应力的影响更加明显。当车辆从空载增加到满载时,最大轴重从7.51 t增加到18.32 t,不同车速(10、20、30 km/h)车辆引起的淤泥固化土轮下深度埋深630 mm的A2测点动应力峰值增长率分别为89.47%、93.11%、94.30%。而对于满载车辆,将车速由10 km/h提升到30 km/h时,A2(埋深630 mm)、B2(埋深710 mm)、C2(埋深790 mm)测点的土压力分别增长了为9.1%、8.9%和9.0%。

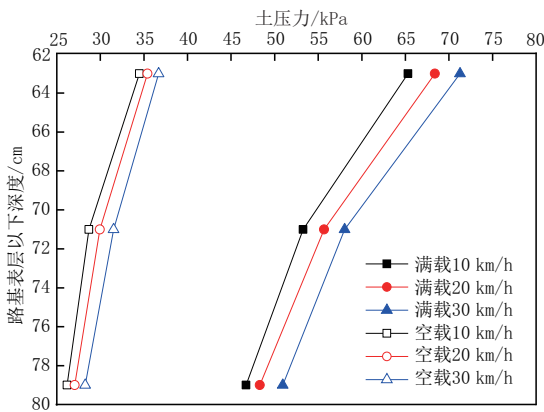


图9 土压力峰值随深度的变化曲线

表1给出了车辆在满载和空载下,以不同行车速度驶过淤泥固化土路基试验段3个测点处时,引起的3个不同最大竖向动应力。由于路面平整度较高,车辆不同速度对路基动力响应的影响较小。

表1 淤泥固化土层各测点的动态土压力峰值

车辆轴重	测点编号	不同车速下土压力峰值/kPa		
		10 km/h	20 km/h	30 km/h
满载	A2	65.31	68.38	71.27
	B2	53.27	55.67	58.02
	C2	46.73	48.31	50.94
空载	A2	34.47	35.41	36.68
	B2	28.68	29.94	31.52
	C2	26.19	27.05	28.26

4 淤泥固化土路基应变分析

4.1 车辆轴重对路基应变的影响

图10给出了车辆分别在空载和满载状态下以10 km/h和30 km/h驶过测试路段时A1测点的动应变时程曲线。从图中可以发现,相同测点的动应变时程曲线与应力时程曲线变化趋势大致相同,皆有3个波峰,且达到波峰的时间相互对应,但位移时程曲线较为平缓光滑。此外可以发现,当车速为30 km/h时,车辆后部两个车轮轴距较小,动应变相互叠加的特性及相对于动应力而言,竖向位移表现出一定的滞后性。

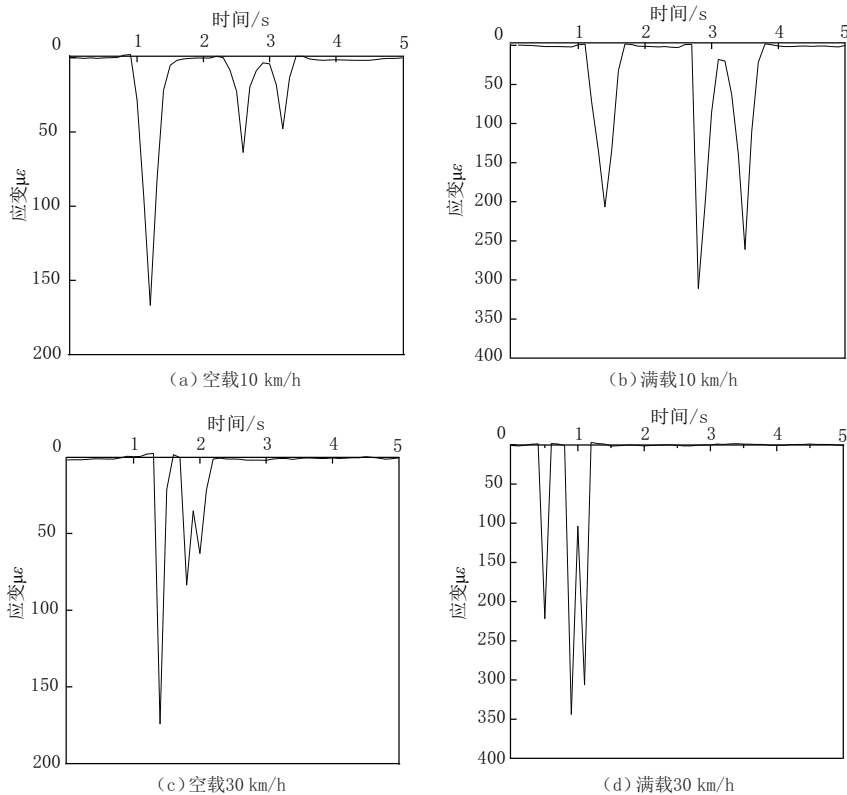


图10 不同轴重下A1测点应变动态曲线

4.2 路基深度对应变的影响

图 11 展示了不同速度和轴重的车辆所引起的竖向动应变沿路基深度方向上的衰减情况。总体上来看,应变随着车辆轴重和车速的增大而增大。当车辆从空载增加到满载时,最大轴重从 7.51 t 增加到 18.32 t,不同车速(10、20、30 km/h)车辆引起的 A1 测点动应变峰值增长率分别为 86.58%、88.81%、97.54%。而对于满载车辆,车速由 10 km/h 增加到 30 km/h 时,A1、B1、C1 测点的动应变峰值增长率分别为 10.51%、6.62%、9.98%。

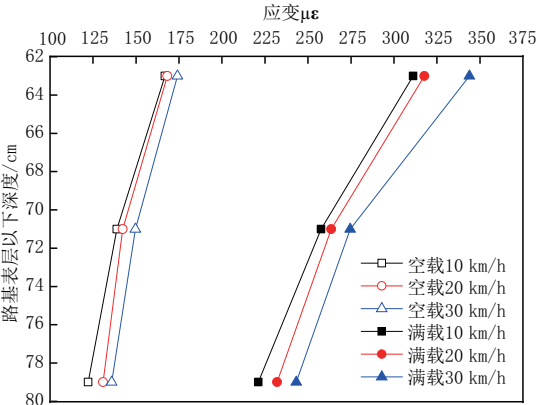


图 11 路基应变峰值随深度的变化曲线

表 2 给出了车辆在满载和空载下,以不同行车速度驶过淤泥固化土路基测试段 3 个测点处实测的动应变峰值。

装载状态		不同车速下应变峰值(μɛ)		
		10 km/h	20 km/h	30 km/h
满载	A1	311.23	317.69	343.93
	B1	257.65	263.50	274.53
	C1	221.18	231.99	243.25
空载	A1	166.81	168.26	174.11
	B1	138.90	142.31	149.62
	C1	122.26	130.80	135.94

5 结 语

本文依托上海市乐高乐园附属道路建设项目,在现场开展动载试验,对淤泥固化土路基土压力和应变进行监测,分析了施工期间淤泥固化土路基动态响应规律,得出以下结论:

(1)交通荷载测试表明,在一定的速度范围内,车辆轴重或速度与淤泥固化土路基所受动应力和动应变具有正相关性,车辆轴重或速度越大,动应力峰值和动应变峰值越大。但相较于车速而言,轴重对动应力的影响更加明显。

(2)当车辆从空载增加到满载时,不同车速(10、20、30 km/h)车辆引起的淤泥固化土 A2(埋深 610 mm)测点动应力峰值增长率分别为 89.47%、93.11%、94.30%。

(3)对于满载车辆,将车速由 10 km/h 提升至 30 km/h 时,不同深度测点 A2(埋深 630 mm)、B2(埋深 710 mm)、C2(埋深 790 mm)的动应力峰值增长率分别为 9.1%、8.9%、9.0%。

(4)在车辆经过测试断面过程中,不同的轮轴都会有一个对应的应力峰值产生,在增大车速后,相距较近的不同车轴之间的动应力会互相影响,并逐步演变成应力叠加现象。

参考文献:

[1] 耿大新,孟成,王俊,等.降雨入渗及交通荷载耦合作用下对粉土路基的影响分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(6):98-104;112.

[2] 邵吉成,李送根,张旺兴,等.淤泥初始含水率及压实度对固化土强度的影响[J].土木工程学报,2024(11):57-96.

[3] 徐立功,张睿,时正凯,等.交通荷载下低路堤高速公路路基沉降规律分析[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(1):129-132.

[4] 张幸幸,张建民,温彦锋.长期交通荷载作用下路基沉降的实用计算方法[J].岩土工程学报,2015,37(11):2067-2072.

[5] 田飞.交通荷载作用下的软土地基变形研究[D].扬州:扬州大学,2014.

[6] 梁乃兴,萧赓.水泥粉煤灰碎石基层力学性能对沥青路面结构的影响分析[J].中国公路学报,2003(3):19-23.

[7] 徐鹏,蒋关鲁,任世杰,等.红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J].岩土力学,2019,40(2):678-683;692.

[8] 林文逸,方祥位,雷运涛,等.流态固化淤泥复合胶凝材料配比优化及其固化机理[J/OL].土木与环境工程学报(中英文),1-11[2024-11-07].

[9] 郎瑞卿,裴璐熹,孙立强,等.新拌不同液限淤泥固化土流动性试验研究[J].岩土力学,2023,44(10):2789-2797.

[10] 王柳江,臧耀辉,江后根,等.淤泥固化土破碎重塑后的强度变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2025(1):197-208.

[11] 黄英豪,朱伟,张春雷,等.固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J].岩土力学,2009,30(5):1352-1356.

[12] 陈瑞敏,简文彬,张小芳,等.CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J].岩土力学,2022,43(4):1020-1030.

[13] Wang Q, Yang C, Guo J, et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of dredged silt solidification by slag-chlorine oxygen magnesium cement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 448: 138211.

[14] 范昭平,朱伟,张春雷.有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J].岩土力学,2005(8):1327-1330;1334.

[15] Fang S, Zhao L, Rong G, et al. Converting coastal silt into subgrade soil with biochar as reinforcing agent, CO2 adsorbent, and carbon sequestering material[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118394.