

DOI: 10.11779/CJGE201803020

不同车速下高速公路 X 形桩网复合地基动力特性研究

尹 锋^{1,2}, 刘汉龙^{1,2,3}, 陈育民³, 李建斌^{1,2}, 周 航^{1,2}, 楚 剑⁴

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡)

摘 要: 基于大比例模型试验系统, 开展高速公路车辆荷载作用下 X 形桩网复合地基动力模型试验研究; 测试了不同车速作用下桩网复合路基的动力响应, 包括路基内部动应力分布、动应力扩散、格栅动应变、格栅累积应变、桩土差异沉降等的变化规律。结果表明, 高速和低速状态下, 动应力均会在格栅处产生波动, 并且高频车速对车辆附加荷载贡献较小; 当车速达到高速状态时, 格栅的动应变变化较小, 路肩处的垫层应力传递系数要小于路基中心处; 格栅动应变比与格栅应变增量比存在线性关系, 并且格栅的累积变形主要是在低速状态下产生的; 车速越快, X 形桩身动应力幅值越大, 其桩身轴力小于圆形桩。

关键词: 桩网结构路基; X 形桩; 交通荷载; 动力响应; 模型试验

中图分类号: TU470; U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)03-0546-08

作者简介: 尹 锋(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事高速公路地基处理以及可视化方面的研究工作。E-mail: yinf1988@163.com。

Dynamic response of XCC pile-geogrid composite foundation of expressways influenced by vehicles with different speeds

YIN Feng^{1,2}, LIU Han-long^{1,2,3}, CHEN Yu-min³, LI Jian-bin^{1,2}, ZHOU Hang^{1,2}, CHU Jian⁴

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering,

Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technology University, Singapore)

Abstract: Based on the large-scale model test system, dynamic model tests on geogrid-reinforced XCC piles-supported embankment of expressways under traffic loads are carried out. The dynamic parameters under the vehicles different speeds are monitored. The variations of dynamic stress distribution, dynamic stress diffusion, geogrid dynamic strain, geogrid cumulative strain and differential settlement are studied. The results show that the amplitude of dynamic stress above soils fluctuates near the geogrid in the case of high and low speeds. There is a little difference in the additional load of the vehicle with high speed. The dynamic strain of geogrid remains stable in the case of high speed. The stress transfer coefficient of the cushion located in the center of subgrade is larger than that near the shoulder. The relationship between the dynamic strain and the cumulative strain of geogrid can be described by the linear function, and the cumulative deformation of geogrid is mainly produced under low speed. The amplitude of dynamic stress of a XCC pile increases with the increasing speed, and its axial force is smaller than that of the circular pile.

Key words: column-net structure subgrade; XCC pile; traffic load; dynamic response; model test

0 引 言

现今中国高速公路总里程已突破 12 万 km, 比 2012 年末增长了 24.7%。高速公路对地基要求甚高, 路面不均匀沉降会使车辆通过时产生跳动和冲击, 从而对路面造成附加冲击荷载, 会使路面不平整进一步加剧。桩网结构路基作为一种新型的地基处理技术, 具有施工工期短、工后不均匀沉降小等特点, 已被广泛应用于铁路路基和高速公路、低路堤改造、道路加

宽以及建筑结构等方面^[1]。目前, 桩网结构路基的性能已从理论分析^[2]、数值模拟^[3]、室内模型试验^[4-5]等角度进行了研究。

以上对桩网结构路基的研究, 大多是围绕静态条件下开展的, 目前针对高速公路车辆动荷载下的研究

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51420105013); 国家自然科学基金青年基金项目(51708063)

收稿日期: 2016-09-05

较少。韩高孝等^[6]通过模型试验研究了列车动荷载作用下的土拱效应,但是使用锯末代替地基土,与实际工况有差异。张崇磊等^[7]研究了桩网结构路基和垫层的动力响应,但其只分析了两种加载力和两种加载频率,高速公路车辆荷载的形式较列车荷载更为复杂,影响因素也更多,有必要进行定性分析。陈仁朋等^[8]对桩网加筋路堤进行了大振次的模型试验研究,但是高速公路车辆荷载的形式与铁路列车动荷载的形式不同,而且高速公路与铁路施工标准、路面结构、路基材料均有差异。目前中国公路总里程已突破12万km,现阶段中国高速公路的重点已经从建设期转入养护期。但是高速公路的营运养护单位没有充分认识桩网复合地基动力特性,只是简单进行加铺和修补工作,新的加铺层又导致新的沉降,形成一种恶性循环。关于现役高速公路在车辆荷载作用下,桩网结构路基的性能鲜有研究^[9]。因此,有必要开展现役高速公路的动力特性研究。

近年来,一种新型的混凝土桩技术——现浇X形混凝土桩,以其较高的承载力和性价比受到了很多学者^[10-12]的关注,并开始用于实际工程中。但关于现役高速公路X形桩网复合地基动力特性的研究尚未展开。

本文针对现役高速公路,研究了X形桩网复合地基的动力特性,并且基于相似理论,设计并建立了几何相似比1:7的高速公路桩网结构路基大比尺动态模型试验系统,模拟了在不同车速作用下高速公路的路基、格栅、桩土之间的相互作用,测试了车速对格栅动力响应的影响,分析了在动力作用下格栅拉膜效应在路基内不同位置的作用,研究了格栅动应变与桩土差异沉降的关系以及X桩的动力响应,并与传统圆桩进行了对比,从而给养护单位提供参考依据。

1 试验方案设计

1.1 试验设备

本文试验主要基于河海大学大型桩基模型试验系统开展。模型槽系统由试验场地、加载系统和监测系统组成。加载系统包括加压设备和加压控制系统,监测系统包括监测元件和数据采集系统。该模型槽为5m×4m×7m的钢筋混凝土结构,其上反力架为钢结构,具有模拟静动荷载的加载设备,图1为模型槽全景示意图。

1.2 室内模型试验填筑

本模型试验采用缩尺试验,模型与原型的几何相似比取1:7,应力相似比取1:1。原型高速公路半幅路面宽14m,路堤高3.5m;道路面层采用沥青混凝土,厚度为18cm;路面基层和底基层均为水泥稳定

碎石,厚度均为35cm;土工格栅加筋垫层厚度为70cm。地基粉土、路堤填土以及碎石采用现场材料制作,以及浇注模型桩的水泥标号和沥青混凝土的规格与原型相同,因此密度相似比为1:1。进而采用量纲矩阵分析方法根据相似第二定理,求得p因子建立各物理量的关系,得荷载相似比为1:49,频率相似比为1:√7。



图1 模型槽实物图

Fig. 1 Photo of large-scale model test system

试验地基填筑采用粉土,取自地铁一号线南京百家湖站附近;垫层碎石采购自南京的砂石厂,含水率为5.4%,堆积密度为2.6g/cm³,内摩擦角为34°;路基填土采用黏土,取自南京河西地区某基坑开挖工程。各材料物理力学指标见表1,其级配曲线见图2。

表1 土料的基本物理力学指标

| Table 1 Properties of soil | | | | | |
|----------------------------|-----------|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| 土料 | 含水率 /% | 天然密度 /(g·cm ⁻³) | 黏聚力 /kPa | 内摩擦角 /(°) | 压缩模量 /MPa |
| 粉土 | 27.8 | 1.86 | 13.0 | 26.4 | 8.48 |
| 黏土 | 29.3 | 1.92 | 24.7 | 28.2 | 4.69 |

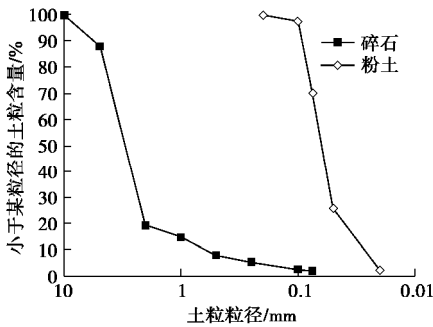


图2 碎石和粉土的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of gravel and silt

试验模型桩为X形混凝土桩,混凝土强度等级为C25。桩长为4260mm,开弧间距(2a)为39mm,外包圆直径(2R)为160mm,开弧角度(q)为90°,如图3。X形桩按照梅花形布置,桩体间距为3.75倍桩径(桩径600mm)。在模型槽底部填筑1m厚砂垫层,作为复合地基桩基持力层。

地基土采用粉土，粉土总高度为 4300 mm，分 9 层填筑，控制压实标准。桩帽选用的尺寸为 300 mm × 300 mm × 40 mm，桩帽内部布置 6 根直径为 10 mm 的 HRB335 级钢筋，其中横向和纵向分别布置 3 根，钢筋间距均为 80 mm。桩帽顶面铺设一层碎石垫层，其厚度为 100 mm，土工格栅置于垫层中间，距离桩帽顶面 50 mm。路基土采用黏土，路堤高 500 mm，路基顶面宽 2000 mm，边坡坡度为 1：1.5。路基土分层填筑，压实度达到 90% 以上。本次试验主要研究对象是路基，因此将路面结构层进行了简化。路面基层按两层施工，即基层和底基层，其厚度均为 50 mm，材料均为水泥稳定碎石。底基层的水泥含量为 4%，基层的水泥含量为 6%。面层材料为厂拌 AC-16 沥青混凝土，厚度为 25 mm，详细尺寸见图 4，施工流程见图 5。另外，为了减小模型槽四壁摩擦力和反射波对试验结果的影响，填土前预先在墙体四周和底部布置“两布三膜”；由于本次试验采用的是半幅路面形式，在路堤对称面采用相同的黏土堆填，减小反射波的影响。

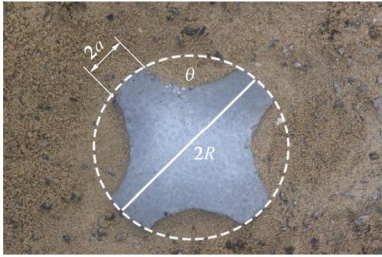


图 3 X 桩示意图

Fig. 3 Sketch of X pile

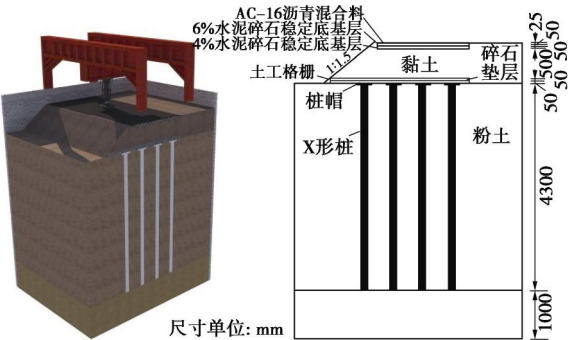


图 4 模型试验图

Fig. 4 Details of model tests

1.3 加载方式

国内外学者针对公路车辆荷载的模拟进行了研究^[13]，根据这些结论，可以看出采用半正弦波形式模拟移动车辆荷载是合理的。所以，本模拟试验采用半正弦波（如图 6（a）所示）简化模拟对道路作用的车辆动荷载，并通过控制作动器的加载频率来模拟不同车速，其荷载形式为

$$q(t) = P + A \sin^2 \left(\frac{\pi t}{T} \right) \quad (1)$$

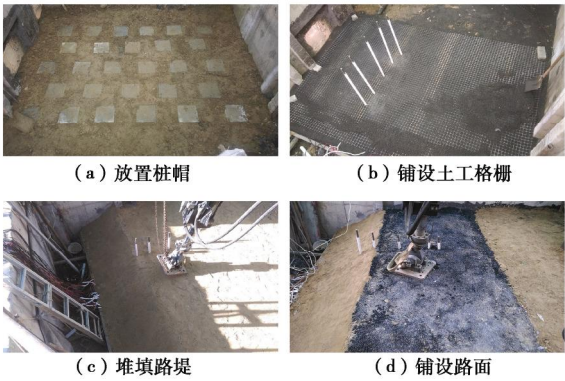
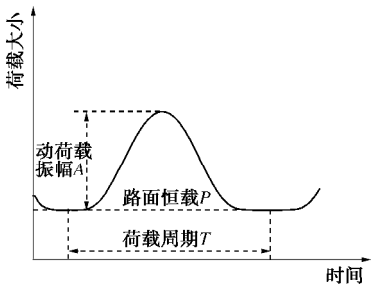


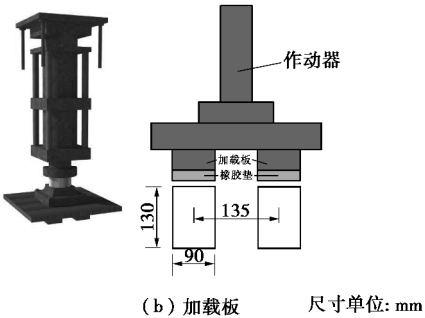
图 5 施工流程图

Fig. 5 Construction process

式中 $q(t)$ 为作用在路面上的车辆荷载 (kN)； P 为作用在路面的恒载 (kN)，用来模拟车辆载重； $A \sin^2(\pi t/T)$ 为附加动荷载， A 为车辆动荷载的振幅 (kN)； T 为荷载作用周期 (s)， $T = -0.4746 \ln v + 2.452$ ^[14]， v 为行车速度 ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。《公路沥青路面设计规范》^[15]中采用 0.7 MPa 作为轮胎标准接地压强，本模型试验使用 0.7 MPa 作为车辆的接地压强 p ， $p = P/S$ ， S 为加载板与路面的接触面积。相关文献表明^[16]，用矩形描述轮胎接地形状比圆形更接近实际情况。本模型试验采用双矩形加载板模拟轮胎与路面接触形式，加载板为钢板与橡胶垫的复合结构，加载面积为 130 mm × 90 mm，加载板间距为 135 mm，加载位置中心与路肩边缘距离为 800 mm，如图 6（b）所示。卢正^[13]认为车辆附加动荷载等于静压强乘以冲击系数，并采用单自由度和两自由度振动模型来分析路面不平整引起的车辆动荷载，计算所得的冲击系数介于 0~0.4 之间。本模型试验冲击系数取值 0.2，即 $A=0.2P$ 。



(a) 荷载



(b) 加载板

尺寸单位: mm

图 6 轮载示意图

Fig. 6 Schematic diagram of wheel loads

1.4 传感器布设

为了测量路基内的动力响应, 模型试验布置了动土压力盒和应变片, 如图 7。土工格栅上共布置 14 个应变片, 同一个位置布置两个应变片, 保证其正常工作。在 X 形桩浇注前, 在其中心的钢筋上每隔 500 mm 共布置 8 个应变片。路基内纵向每隔 200 mm 布置一个动土压力盒, 具体分布情况见图 7 (a)。土压力盒的型号为 BMW 型土压力传感器, 选用 0.04~0.1 MPa 不等的量程, 其准确度误差 $\leq 0.3\%F\cdot S$, 可在饱和水介质中工作, 具有温度修正功能。

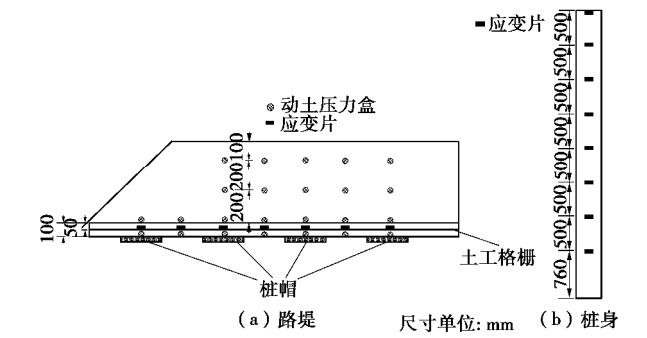


图 7 仪器布置示意图
Fig. 7 Layout of instruments

1.5 试验工况

本文模型试验针对 X 形桩复合地基开展了 4 组试验, 具体见表 2。

表 2 试验加载工况
Table 2 Cases of loading tests

| 编号 | 模拟车速 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$ | 接地压强 p/MPa | 动荷载振幅 A | 振次 $N/\text{次}$ |
|----|---|------------------------|--------------|--------------------|
| 1 | 60 | 0.7 | $0.2P$ | 13000 |
| 2 | 80 | 0.7 | $0.2P$ | 13000 |
| 3 | 100 | 0.7 | $0.2P$ | 13000 |
| 4 | 120 | 0.7 | $0.2P$ | 13000 |

2 试验结果与分析

2.1 静力结果分析

为了验证系统在路堤静荷载条件下是否形成完整的土拱, 在路堤土堆载并压实完成后量测了桩顶和桩间土上方的土压力。靠近桩帽处, 桩顶上方的土压力迅速增加, 路堤静荷载向桩顶转移。由图 8 可知, 在距离桩帽顶面 500 mm 的位置桩顶上方土压力与桩间土上方的土压力较为接近。因此, 土拱高度约为 500 mm。桩帽净间距为 300 mm, 路堤高度为 600 mm (含垫层), 土拱高度约为 1.7 倍桩帽净间距, 路堤内能够形成完整的土拱。

2.2 路基动应力分析

(1) 桩帽顶部土体动应力分析

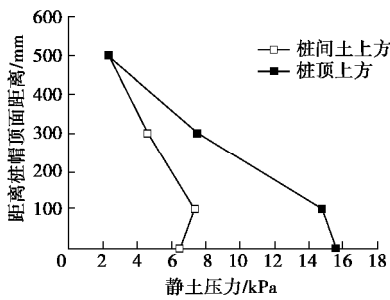


图 8 竖向静土压力分布

Fig. 8 Distribution of vertical static stress

图 9 为施加动荷载后路堤内部桩帽上方不同位置的动应力随振动次数的变化曲线。由图 9 可知, 桩帽以上 500 mm 范围内 (即土拱高度范围内) 动应力幅值由上至下呈递增趋势。越靠近桩帽, 土体振动响应越剧烈。

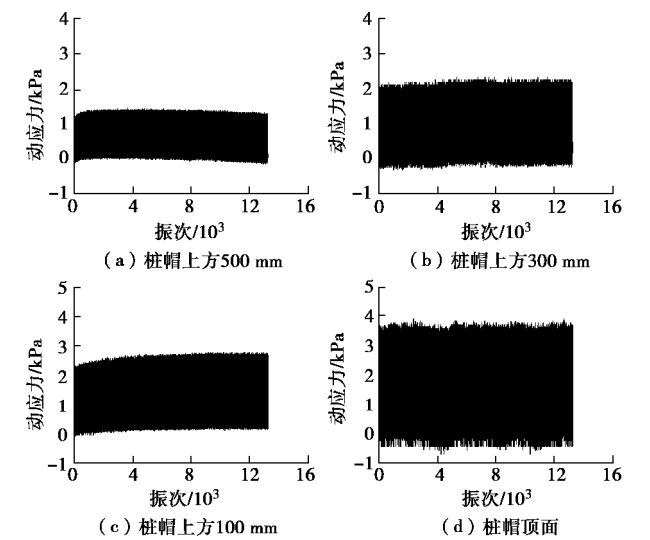


图 9 桩帽顶面上方的动应力

Fig. 9 Dynamic stresses above pile cap

(2) 桩间土体动应力分析

图 10 为相同条件下桩间土上方各处的动应力随振动次数的变化曲线。由图可知, 同一高度时, 桩间土的动应力幅值远远小于桩帽上方的动应力幅值, 越接近桩帽的位置, 两者的差值越大。由此可知, 桩顶上部土体的振动响应明显大于桩间土上部土体。桩间土上方土体的动应力幅值由上至下呈递减趋势, 但在土工格栅处出现波动。格栅上方的动应力幅值迅速增大, 甚至会大于路堤顶部, 是格栅下方 (即桩间土顶面) 的动应力幅值的 3 倍, 这是因为土工格栅存在拉膜效应。桩土差异沉降引起格栅变形, 路堤填土与格栅表面产生摩擦力, 并在格栅内部产生张力, 有效地将上部静土压力以及动荷载转移到桩顶, 使得格栅下部土体的动力响应较弱。由此可知, 土工格栅的存在能有效增加动荷载作用下地基土的稳定性。在靠近桩

间土顶面的位置,如图 10 (d),桩间土的动应力逐渐增大。这主要是因为施加动荷载后土拱效应遭到削弱,原本由桩承担的一部分荷载转移到桩间土所致。

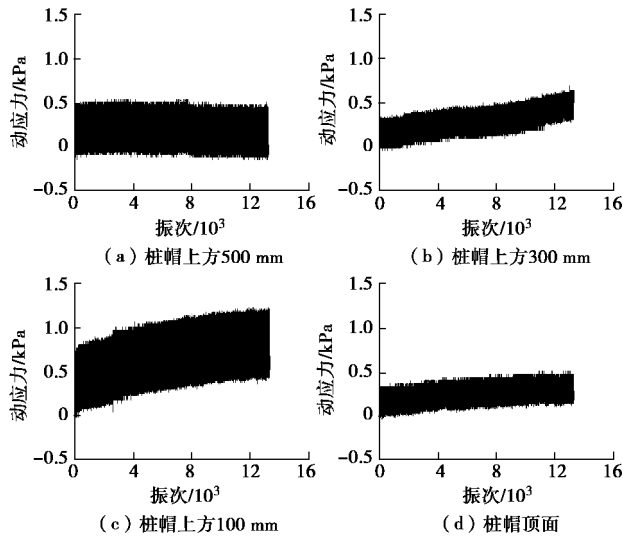


图 10 桩间土上方的动应力

Fig. 10 Dynamic stresses above soils between piles

(3) 路堤内部动应力分析

图 11 为不同车速作用下路堤内部不同位置处的动应力。由图可知,在格栅上部的桩间土体动应力在深度方向上均呈现逐渐衰减的趋势,但是在土工格栅附近动应力会产生波动,造成格栅上方的动应力大于格栅下方的动应力,甚至会高于路堤顶部的动应力。这表明土工格栅的拉膜效应充分发挥作用,增加了下部土体的稳定性。桩间土上方的动应力对车速的变化并不敏感,车速为 120 km/h 时桩间土顶面的动应力为 0.38 kPa, 60 km/h 时为 0.23 kPa,相差不大;桩顶上方的动应力对速度的变化较为敏感,车速从 60 km/h 提升到 120 km/h,桩帽顶面的动应力从 2.89 kPa 增加到 4.64 kPa。这是因为桩帽上方的土体在荷载作用下被压密,一部分应力波在桩帽附近反射并累积,而在桩间土顶部,应力波能很好的传递到下层结构。在施加动荷载后,桩土动应力比在 10.4~12.9 范围内变化,桩帽承担了约 91 %的动荷载,桩间土承担的动荷载较小。

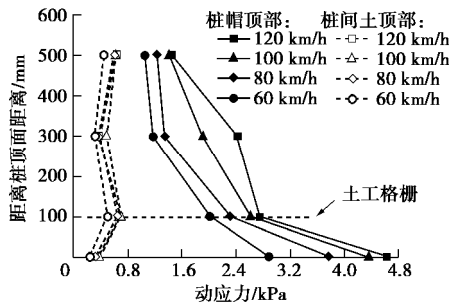


图 11 路堤内部动应力

Fig. 11 Dynamic stresses in embankment

本文以车速 $v=60$ km/h 作为基准,对数据进行归一化处理。图 12 为不同车速条件下格栅下方的桩间土动应力。由图 12 可知,桩间土动应力在低速状态下呈现线性增长趋势。当速度达到 100 km/h 时,桩间土动应力变化较小。这是因为车辆振动的主要能量集中在波长介于 30~60 m 的区间内,附加动荷载主要由低频部分产生,高频部分对车辆附加动荷载的贡献很小。

2.3 格栅动力响应

(1) 垫层应力传递系数

定义桩间土顶面的动应力与垫层表面的动应力比值为垫层应力传递系数,作为评价垫层动力响应的指标,其值越小表明传递到下层的动应力越小,格栅发挥的作用越大。图 13 为路基中心处和路肩处的垫层应力传递系数。路基中心的垫层应力传递系数在高速状态下 (100 km/h 和 120 km/h) 变化不大,这主要是车辆附加荷载主要有低频部分产生。路基中心的垫层应力传递系数明显大于路肩处,这表明在动荷载作用下路基中心的土工格栅的作用小于路肩处。车辆荷载往往集中在路基中心,导致该处的格栅变形较大。当格栅的拉膜效应发挥到极限时,其垫层应力传递的能力受到限制。路肩处的格栅变形相对较小,格栅的拉膜效应还未完全发挥作用,导致其垫层应力传递能力优于路基中心处。

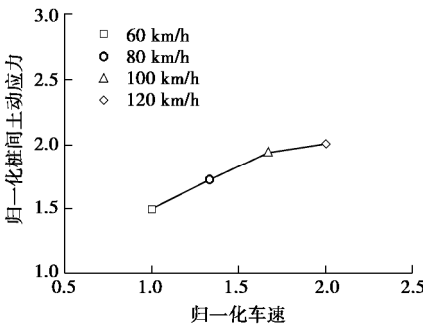


图 12 格栅下方桩间土动应力

Fig. 12 Dynamic stresses of soils between piles beneath geogrid

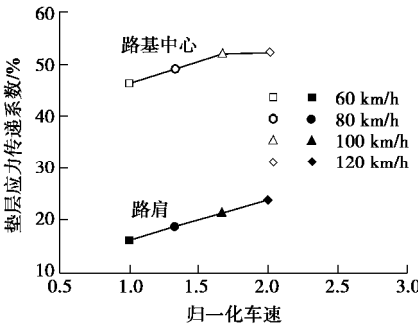


图 13 垫层应力传递系数

Fig. 13 Stress transfer coefficients of reinforced cushion

本次试验采用的土工格栅在路基中心处动应力扩

散程度在 50% 左右,在路肩处动应力扩散程度在 80% 左右,由此可见,在动荷载作用下土工格栅对于路基稳定性的重要意义。

(2) 格栅动应变

图 14 为不同车速条件下的格栅动应变。在低速状态下,车速的增加会明显提高格栅动应变的峰值;达到高速状态时,格栅动应变峰值几乎保持不变。造成这种现象的原因有两点:①高频的车辆振动对附加动荷载的贡献较小;②当车速达到一定值的时候,格栅的拉膜效应已经充分发挥作用。

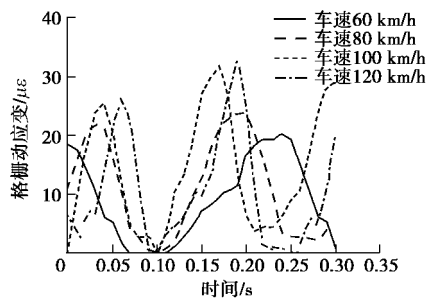


图 14 格栅动应变

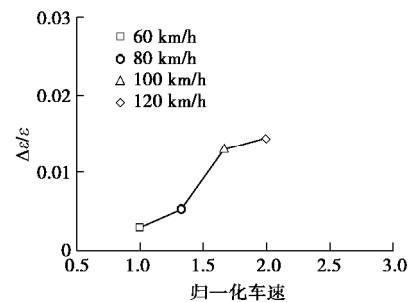
Fig. 14 Dynamic strains of geogrid

图 15 (a) 为停止施加动荷载后桩间土格栅应变增加量 Δe 与施加动荷载前在路堤填料自重下格栅发生的应变 e 的比值 $\Delta e/e$ 。应变增量比 $\Delta e/e$ 反映了施加动荷载后格栅的累积变形程度,其值越大,格栅变形的程度就越厉害,桩间土的变形也就越大。由图可知,在低速阶段,应变增量比增加较为明显。当车速超过 100 km/h 时,应变增量比变化较小。较低的车速会导致车辆轴重作用在路面上的时间增长,传递到下层结构的应力增多,格栅最终发生的变形偏大。

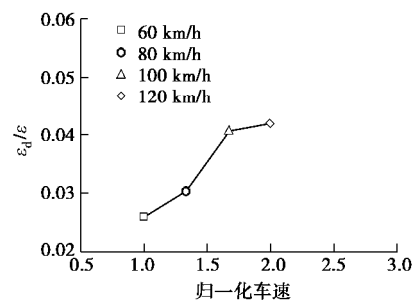
图 15 (b) 为施加动荷载过程中桩间土格栅产生的动应变 e_d 与施加动荷载前在路堤填料自重下格栅发生的应变 e 的比值 e_d/e 。动应变比 e_d/e 反映了施加动荷载后格栅的振动响应,其值越大,振动就越厉害。由图可知,在高速状态下 (100 km/h 和 120 km/h),动应变比变化不大,分别为 0.041 和 0.042,这主要是因为格栅的拉膜效应在路基中心已经充分发挥作用,其振动幅值也较为稳定。

图 15 (c) 为动应变比值 e_d/e 与应变增量比值 $\Delta e/e$ 的关系。有图可知,两者存在线性关系。这也表明,导致格栅的动应变增加的因素也会导致格栅累积变形增加,最终有可能造成桩土差异沉降过大。格栅的动应变增加 1 倍,最终将导致格栅的累积应变增加 3 倍,而且大部分累积应变是车速低于 100 km/h 的情况下产生的。这主要是因为车辆在低速状态下与路面接触的时间更长,车辆的轴重以及车辆附加动荷载

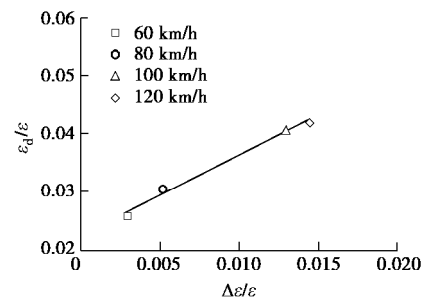
能充分传递到下层结构。



(a) 应变增量比



(b) 动应变变化



(c) 动应变比与应变增量比的关系

图 15 动应变比与应变增量比的关系

Fig. 15 Relationship between dynamic strain ratio and strain increment ratio

2.4 桩身动力响应

桩身动应力幅值为循环周期里桩身应力的最大值和最小值之差。本试验对作动器正下方的 X 桩身应力进行了测量,图 16 (a) 为桩身动应力幅值沿深度的分布。由图可知, X 桩的振动均随着深度的增加而减弱。车速的增加会引起桩顶处的应力累积加快,最终导致桩体振动加剧。卢一为等^[17]对圆形桩进行了模型试验,其模型桩的混凝土等级、荷载加载方式、填筑方式与本试验一致。图 16 (b) 为桩身轴力沿深度的关系,结果进行了归一化处理,即桩身轴力/(桩顶应力×桩截面积)、深度/桩长,并与传统圆桩进行了对比。桩身轴力分布曲线基本反应了桩侧摩阻力的大小。在相同荷载、相同深度条件下 X 形桩的轴力要小于圆形桩。因为相同横截面积的情况下, X 形桩体表面与土体的接触面积更大,这也充分体现了 X 形桩为摩擦桩的特性。

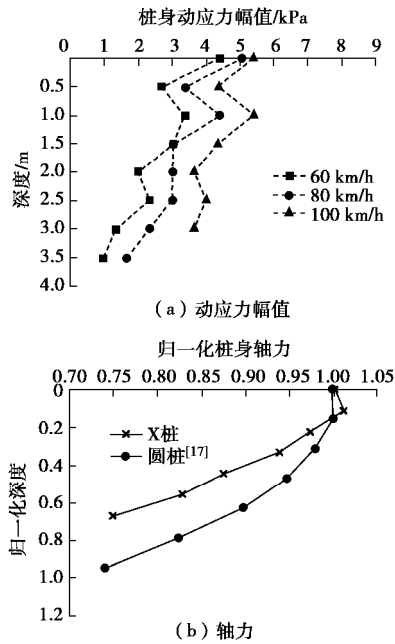


图 16 桩身动力响应

Fig. 16 Dynamic responses of piles

3 结 论

本文通过开展大比例模型试验研究了不同车速作用下高速公路 X 形桩网结构路基的特性, 得到以下 4 点结论。

(1) 桩帽承担了约 91% 的动荷载, 在高速和低速状态下动应力在格栅附近均会产生波动。

(2) 高频车速对车辆附加荷载的贡献较小。路肩处的垫层应力传递系数小于路基中心, 格栅在路基中心处的作用要小于路肩处。

(3) 格栅的应变增量比和动应变比存在线性关系。在高速状态下两者的变化很小, 并且大部分格栅累积变形是在低速状态下产生的。

(4) 车速的增加会导致 X 形桩振动加剧, 其桩身轴力比同深度的圆形桩更小。

参考文献:

[1] 张崇磊. 中等压缩性土地区短桩桩网复合地基路基荷载传递规律及沉降机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (ZHANG Chong-lei. Study on load transfer and settlement mechanisms in geosynthetics-reinforced floating-pile supported embankments over medium compressibility foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

[2] LOW B K, TANG S K, CHOA V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE,

1994, **120**(11): 1917 - 1938.

[3] 费康, 王军军, 陈毅. 桩承式路堤土拱效应的试验和数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 1975 - 1983. (FEI Kang, WANG Jun-jun, CHEN Yi. Experimental and numerical studies of soil arching in piled embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 1975 - 1983. (in Chinese))

[4] 郑俊杰, 张军, 马强, 等. 路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(2): 355 - 362. (ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, MA Qiang, et al. Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment at bridge approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(2): 355 - 362. (in Chinese))

[5] 吕伟华, 缪林昌, 王非, 等. 桩-网加固拓宽路堤土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(8): 2316 - 2322. (LÜ Wei-hua, MIAO Lin-chang, WANG Fei, et al. Experimental study of soil arching of geogrid-reinforced and pile-supported widening embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(8): 2316 - 2322. (in Chinese))

[6] 韩高孝, 宫全美, 周顺华. 列车动荷载下桩网结构路基土拱效应试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1600 - 1606. (HAN Gao-xiao, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua. Experimental study of soil arching effect in geogrid reinforced pile supported embankment under train dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1600 - 1606. (in Chinese))

[7] 张崇磊, 蒋关鲁, 袁胜洋, 等. 循环荷载下桩网结构路基和垫层动力响应研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1664 - 1670. (ZHANG Chong-lei, JIANG Guan-lu, YUAN Sheng-yang, et al. Dynamic response analysis of column-net structure subgrade and reinforced cushion under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1664 - 1670. (in Chinese))

[8] 陈仁朋, 汪焱卫, 陈金苗, 等. 大振次列车动荷载作用下桩网加筋路堤土拱效应模型试验研究[J]. 铁道学报, 2015, **37**(9): 107 - 113. (CHEN Ren-peng, WANG Yan-wei, CHEN Jin-miao, et al. Experimental study on soil arching effect in pile-supported reinforced embankment under dynamic train loads with large number of vibration cycles[J]. Journal of The China Railway Society, 2015, **37**(9): 107 - 113. (in Chinese))

[9] 许朝阳, 周锋, 吕惠, 等. 动荷载下桩承式路堤的承载特性及机制研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(11): 3232 -

3239. (XU Zhao-yang, ZHOU Feng, LÜ Hui, et al. Bearing behavior and mechanism of pile-supported embankment under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3232 - 3239. (in Chinese))
- [10] LIU H L, ZHOU H, KONG G Q. XCC pile installation effect in soft soil ground: a simplified analytical model[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 62(7): 268 - 282.
- [11] 周 航, 孔纲强. 水平荷载作用下现浇 X 形桩桩周土体响应理论分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3377 - 3383. (ZHOU Hang, KONG Gang-qiang. Theoretical analysis of the reaction mechanism of the surrounding soil of X-section cast-in-place pile under lateral load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3377 - 3383. (in Chinese))
- [12] LV Y R, LIU H L, NG C W W, et al. Three-dimensional numerical analysis of the stress transfer mechanism of XCC piled raft foundation[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 365 - 377.
- [13] 卢 正. 交通荷载作用下公路结构动力响应及路基强度设计方法研究[D]. 武汉: 中国科学院, 2009. (LU Zheng. Study on the dynamic responses of highway structure layers under traffic loads and the design method of dynamic strength[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese))
- [14] 凌建明, 王 伟, 郭洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报, 2002, 30(11): 1315 - 1320. (LING Jian-ming, WANG Wei, GUO Hong-bo. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(11): 1315 - 1320. (in Chinese))
- [15] JTGD50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006. (JTGD50—2006 Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [16] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. (ZHUANG Ji-de. Technical of automobile tires[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese))
- [17] 卢一为, 丁选明, 刘汉龙, 等. 循环加载下 X 形桩竖向承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 281 - 288. (LU Yi-wei, DING Xuan-ming, LIU Han-long, et al. Model test of vertical bearing characteristics of X-section pile under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 281 - 288. (in Chinese))

2018 年全国工程地质学术年会

(第 1 号通知 征集论文)

会议简介: 2018 年全国工程地质学术年会将于 2018 年 10 月 12 日~16 日在陕西西安市召开。全国各地及国际特邀工程地质专家学者将欢聚一堂, 围绕国家“一带一路”与生态环境协调发展理念, 对我国重大工程建设涉及的城市、交通、能源、水利、海洋等重大工程地质问题, 新时代工程地质新理论、新技术以及重大工程案例进行研讨, 为我国“一带一路”国家战略和生态文明美丽中国献计献策。我们热忱邀请各位代表莅临魅力古城西安参加本次学术盛会。

主办单位: 中国地质学会。

承办单位: 长安大学; 中国地质学会工程地质专业委员会。

会议主题及议题: “一带一路”与生态环境——新时代工程地质理论与实践。①新时代工程地质理论; ②一带一路重大工程地质问题; ③一带一路沿线地质灾害防控; ④黄土高原生态环境; ⑤交通建设与工程地质; ⑥城市地质与地下空间开发利用; ⑦工程地质新技术新方法。

会议时间安排: 2018 年 10 月 12~16 日。

会议论文征集: 论文题目请根据大会主题和议题自由选定。会议论文应为未正式发表过的最新成果, 篇幅尽量控制在 6 页以内。部分论文择优在《工程地质学报》、《地球科学与环

境学报》和《长安大学学报》(自然科学版)正刊发表, 其余论文经评审后在《工程地质学报》增刊发表。论文格式请严格按《工程地质学报》编排格式编排, 具体见网站: <http://www.gcdz.cn>。论文请通过电子邮件发送到: gcdz@mail.iccas.ac.cn, 邮件主题请注明“2018 年全国工程地质学术年会投稿”。论文摘要截止时间: 2018 年 4 月 15 日; 论文全文截止时间: 2018 年 5 月 31 日; 联系地址: 100029 北京朝阳区北土城西路十九号《工程地质学报》郭静芸收; 联系电话 / 传真: 010-82998124。

会议费用: ①会议代表注册费 1200 元 / 人, 在校学生及陪同代表 600 元 / 人; ②会议期间交通及食宿费用自理。

大会秘书处: 吕艳 15829299867, 杨友健 13636808212, 邓龙胜 13571857487, 祝艳波 18291971798, 朱兴华 15891391126, 黄伟亮 13379258205, 地址: 西安市雁塔路 126 号长安大学地质工程与测绘学院(工程地质学术年会会务组)。

展板招租联系人: 邓龙胜, 13571857487, 邮编: 710054, 联系电话: 029-82339021, 电子邮箱: xian2018gcdzh@163.com, 传真: 029-82339021。

(大会组委会 供稿)