

文章编号: 1000-7598-(2014) 06-1664-07

循环荷载下桩网结构路基和垫层动力响应研究

张崇磊^{1,2}, 蒋关鲁^{1,2}, 袁胜洋^{1,2}, 王 伟^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 西南交通大学 道路工程四川省重点实验室, 成都 610031)

摘 要: 基于相似理论, 开展了 4 组桩网结构路基大比例动态模型试验, 测试了循环荷载下桩网结构路基的动力响应指标, 研究了降雨前、后加载力、加载频率以及循环加载次数对路基的动力响应、桩土荷载分担以及垫层格栅应变的影响。结果表明, 降雨后路基动应力和动加速度均会增大, 并且在基床内部增速较快, 而路堤下部其增长基本趋于稳定; 循环加载期间桩土应力比缓慢增大, 其受降雨影响敏感, 雨后降幅可达 56.4%~79.5%; 循环加载完成后垫层格栅应变增大, 其横向分布特征基本保持不变; 土拱形成后路基填高继续增加, 路基宽度范围内 4 桩中心格栅应变增幅较大, 峰值出现在边坡中心和路基中心附近, 横向分布呈“W”型; 两桩中心的格栅应变由路基中心向坡脚处呈“台阶”型递增, 而路基宽度与边坡范围的格栅应变差距不断缩小。

关 键 词: 桩网结构路基; 动力响应; 格栅应变; 循环荷载; 大比例模型试验

中图分类号: TU 413.6+2

文献标识码: A

Dynamic response analysis of column-net structure subgrade and reinforced cushion under cyclic loading

ZHANG Chong-lei^{1,2}, JIANG Guan-lu^{1,2}, YUAN Sheng-yang^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Four large-scale model tests are made to monitor the dynamic response of column-net structure subgrade. The influence of loading level, loading frequency and loading times on the dynamic parameters, the pile-soil load sharing and the strains of geogrid are studied. The results show that the dynamic stress and the dynamic acceleration increase fast in the bed of subgrade and underneath trend towards stability with depth after rainfall. During the stage of cyclic loading, the stress concentration ratio increases slowly. After rainfall, the stress concentration ratio can decrease about 56.4 % to 79.5 %. Compared with the construction stage, the strains of geogrid increase and the transverse distributions remain the same form after cyclic loading. The strains of geogrid among four piles within the width of subgrade increase fast after the formation of soil arching. The peak value points of strains of geogrid appear in the centre of the slope and subgrade, which emerges as W-shape in the cross-section. The strains of geogrid between two piles increase from the centre to the slope toe of subgrade, which emerges as stair-shape. The differences of strains of geogrid between the slope and the width of subgrade decrease gradually after the formation of soil arching.

Key words: column-net structure subgrade; dynamic response; geogrid strain; cyclic loading; large-scale model test

1 引 言

桩网结构路基作为一种新型地基处理方法, 主要由 4 部分组成, 自上向下分别为上部路堤、柔性拱区、桩土复合加固区和下卧层^[1]。桩网结构路基不仅要承担上部结构的静荷载, 还要受到列车动循环荷载的作用, 而动荷载又会随着列车轴重、车辆

型号、行车速度以及线路条件等改变, 因此, 路基、垫层、桩以及桩间土之间相互作用复杂, 仅依靠理论计算难以定量分析。目前, 国内外学者已从理论分析^[2-6]、现场测试^[7-8]、室内模型试验^[9-11]及数值模拟^[12]等方面开展了大量研究。路基荷载传递、桩土荷载分担以及加筋垫层受力和变形等研究多是围绕静态开展, 而列车动循环荷载作用下桩网结构路基

收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目 (No. 2010G003-F); 国家博士点基金资助项目 (No. 20070613044)。

第一作者简介: 张崇磊, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事路基工程、铁路地基处理方面的研究工作。E-mail: chongleizhang2010@163.com

通讯作者: 蒋关鲁, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事道路与铁道工程方向的研究工作。E-mail: wgljiang@swjtu.edu.cn

动力响应的相关研究却刚刚起步^[13-15]。

基于相似理论，设计并建立了几何相似比 1:13 的桩网结构路基室内大比例动态模型试验系统，模拟了循环荷载下路基-加筋垫层-桩土之间的相互作用，测试了加载频率、加载力以及加载次数对桩网结构路基动力响应指标、桩土荷载分担以及加筋垫层格栅应变等动力响应的影响，分析了降雨前、后路基动力响应指标以及桩土荷载分担的变化，研究了填筑及循环加载阶段格栅应变的横向分布规律等。

2 试验方法

2.1 试验设计

选取遂渝铁路 DK134+820 典型路基工点进行模型试验，工点路基断面形式为双块式无砟轨道结构，路堤高度为 15.2 m，上部高为 7.2 m，边坡坡度为 1:1.5，基床表层为 0.7 m 厚级配碎石，之下为 6.5 m 厚 AB 组填料；路堤下部为已填 8 m 红层泥岩人工填土，边坡坡度 1:1.75；地基采用钢筋混凝土桩加固，正方形布桩，桩径为 0.6 m，桩间距为 2 m，加筋垫层厚为 0.6 m，铺设双层土工格栅，地基土物理力学参数如表 1 所示。为使模型试验能够真实地反映原型的动力特性，采用量纲分析方法，根据相似条件和研究内容，对模型与原型间的相似关系进行了推导，模型相似常数^[14]见表 1。

表 1 模型相似常数

Table 1 Similarity constants of model

物理量	相似常数	相似比	物理量	相似常数	相似比
几何比 L	C_L	13	动响应应变 ε	$C_\varepsilon=1.0$	1.0
密度 ρ	$C_\rho=1.0$	1.0	加速度 a	$C_a=1.0$	1.0
弹性模量 E	$C_E=C_L$	13	动位移 S_d	$C_{S_d}=C_L$	13
振动频率 ω	$C_\omega=C_L^{-0.5}$	0.277	动应力 σ_d	$C_{\sigma_d}=C_L$	13
重力加速度 g	$C_g=1.0$	1.0	加载力 F	$C_F=C_L^3$	13 ³
累积沉降 S	$C_S=C_L$	13	摩擦系数 f	$C_f=1.0$	1.0
内摩擦角 φ	$C_\varphi=1.0$	13	泊松比 μ	$C_\mu=1.0$	1.0
黏聚力 c	$C_c=C_L$	13	阻尼系数 R	$C_R=C_L^{2.5}$	13 ^{2.5}
应力 σ	$C_\sigma=C_L$	13	含水率 w	$C_w=1.0$	1.0

2.2 模型制作

模型中桩体为混凝土钻孔灌注桩，满足了尺寸、桩土相对刚度、表面粗糙度以及施工工艺等方面与原型相似；桩径为 4.6 cm，桩长 114.6 cm，正方形布桩，桩间距为 23.1 cm，入持力层深度为 15.4 cm，共布置 60 根；加筋垫层厚为 6 cm，粗砂填筑，垫层中间 3 cm 粗砂上下铺设 2 层磷青铜带网模拟土工格栅；模型分层填筑，1~12 层为地基填土，13~

23 层为红层泥岩下部路堤填土，24 层为土工格栅粗砂层，25~35 层为上部路堤 AB 组填料，36 层为板下级配碎石；水硬性混凝土支承层(HGT)、混凝土基础及轨道板采用混凝土整体浇筑而成，长、宽和高分别为 110.0、38.0、7.5 cm；轨道采用间距为 11.15 cm、长 110 cm 两根 8[#]小钢轨模拟，图 1 为模型制作过程。

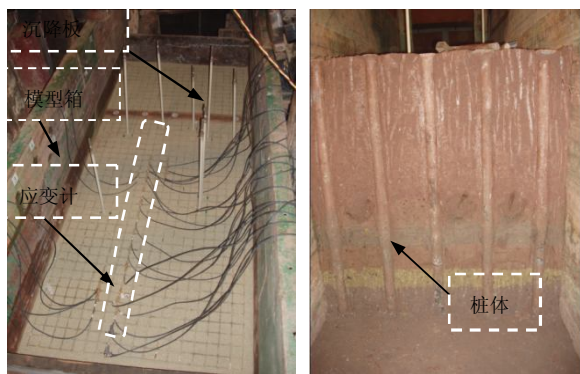


图 1 模型制作过程

Fig.1 Models making process

2.3 测点布置和监测内容

模型中布置了动土压力计、加速度计、格栅应变计以及沉降板等仪器，图 2 为模型仪器布置示意图。A~E、1~12 为桩体定位编号，DT 为 BY2 型动土压力计，测试基床表层、基床底层、路堤下部以及垫层上下桩间土对应位置处动土压力；XT 为

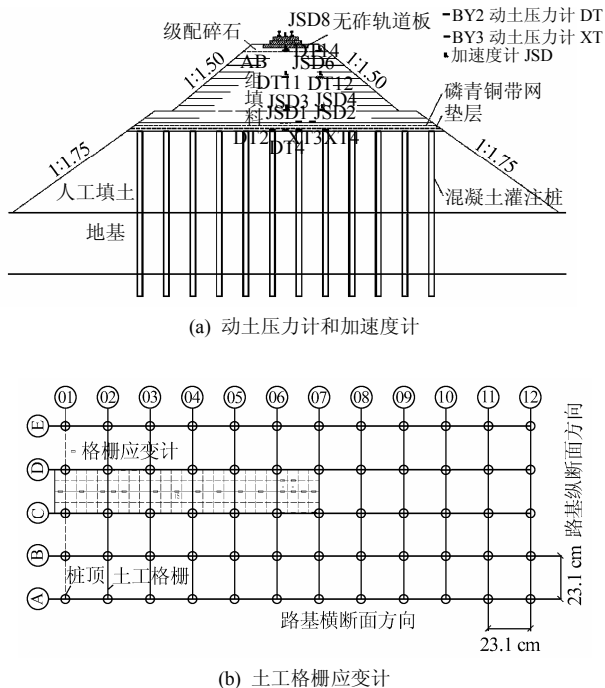


图 2 模型仪器布置示意图

Fig.2 Layouts of model sensors

BY3 型动土压力计, 监测桩顶动土压力; 加速度计 JSD 测试轨道板、基床表层、基床底层以及路堤下部加速度; 桩顶、桩间土累积沉降采用沉降板监测 (见图 1); 沿路基横向、纵向分别在下层磷青铜带网上安装了 25 组应变计, 应变计布置见图 2(b)。

2.4 加载试验方案

模型试验采用 26.640、13.336 kN 两种加载力, 5、10 Hz 两种加载频率, 共 4 种工况, 激振项目见表 2。工况 1 循环加载 30×10^4 次, 其余工况加载 5×10^4 次, 输入波形为正弦波; 为了分析降雨对路基动力响应指标的影响, 加载完成后对路基边坡进行了降雨-再循环加载模拟。模拟降雨过程发现, 路堤部分的级配碎石以及 AB 组填料基本不会阻滞雨水渗透, 降雨直接从路堤上部填料中渗流至红层泥岩交界面处, 并从交界面陆续流出。

表 2 激振项目		
Table 2 Exciting force and frequency		
工况	加载 / kN	加载频率 / Hz
1	26.640	5
2	26.640	10
3	13.336	5
4	13.336	10

3 试验结果及分析

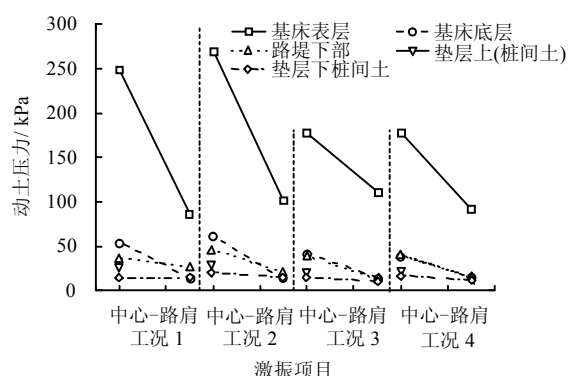
3.1 路基动力响应

定义动土压力(加速度)横向分布系数为路肩处动土压力与路基中心处动土压力(加速度)的比值; 定义加速度扩散系数为路基不同深度处加速度与混凝土板上加速度的比值。图 3 为路基不同深度处动土压力沿路基横向分布曲线, 图 4、5 分别为加速度沿路基横向、深度方向分布曲线。

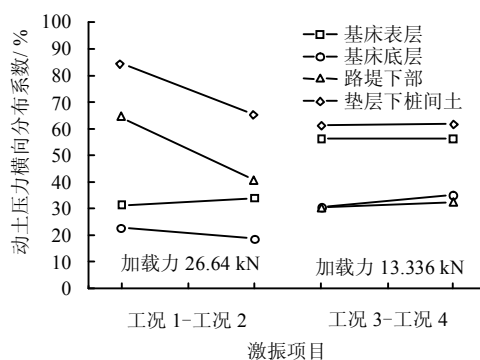
由图 3(a)、图 5 可知, 基床表层、基床底层以及路堤下部最大动土压力、加速度分别为 268.89 kPa、 1.172 m/s^2 , 61.83 kPa、 0.356 m/s^2 , 45.90 kPa、 0.209 m/s^2 , 地表桩间土处最大动土压力为 31.69 kPa。由于路基填料的阻尼作用以及动应力扩散作用^[16], 造成动土压力、加速度沿路基深度方向衰减, 基床表层衰减幅度较大, 基床底层减慢, 路堤下部基本趋于稳定; 动土压力和加速度沿路基横向分布表现为路基中心大, 路肩处较小。

对比分析加载力、加载频率对动土压力和动土压力横向分布系数的影响发现 (见图 3 (b)), 加载力大小对动土压力影响较为明显, 路基中心处工况

1 动土压力较工况 3、工况 2 较工况 4 均增加, 基床表层增幅可达 50.9%。加载力越大, 加载频率对动土压力的影响越大, 路基中心处工况 2 动土压力较工况 1 增加 14.6%, 工况 4 较工况 3 增加 4.4%。当加载力较大 (26.64 kN) 时, 动土压力横向分布系数随着路基深度的增大而增大, 动土压力横向差值不断缩小, 其中加载频率为 10 Hz 时, 基床表层动土压力横向分布系数大于 5 Hz 工况, 随着路基深度增大, 10 Hz 工况的动土压力横向分布系数逐渐小于 5 Hz 工况, 其差距越来越明显; 当加载力较小时, 加载频率对动土压力横向分布系数影响不显著。



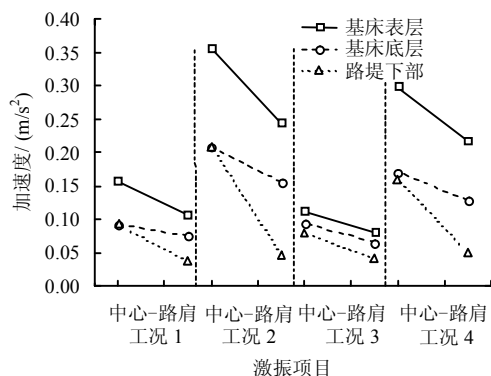
(a) 动土压力横向分布



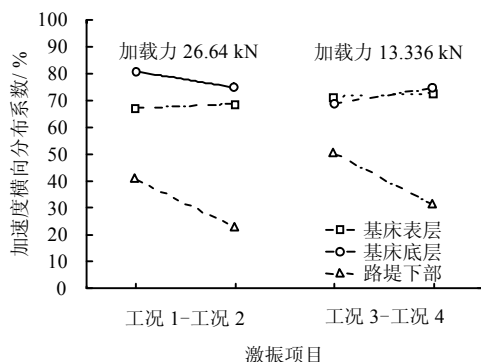
(b) 动土压力横向分布系数

图 3 动土压力沿路基横向分布曲线
Fig.3 Transverse distributions of subgrade dynamic stresses

对比分析加载力、加载频率对加速度、加速度横向分布系数以及加速度扩散系数的影响发现 (见图 4、5), 加载频率对加速度响应影响显著, 而加载力的影响相比有限。加载力相同时, 加载频率越大, 加速度越大, 10 Hz 工况路基中心的加速度最大可增至 5 Hz 工况的 2.67 倍; 加载频率相同、加载力增大时其加速度存在增大趋势。



(a) 加速度横向分布



(b) 加速度横向分布系数

图4 加速度沿路基横向分布曲线

Fig.4 Transverse distributions of accelerations along subgrade

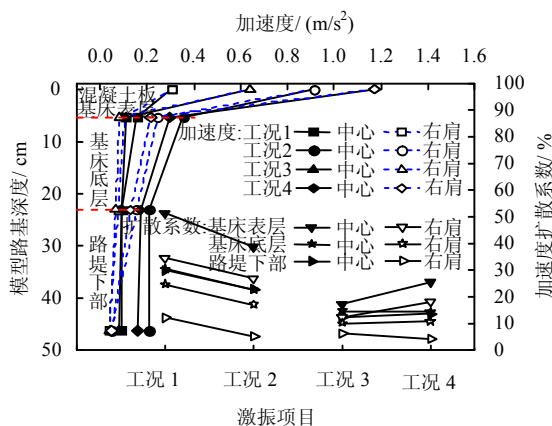


图5 加速度沿路基深度方向分布曲线

Fig.5 Distributions of accelerations along subgrade depth

基床内部加速度横向分布系数较路堤下部大, 加载频率对加速度横向分布系数的影响具有一定规律性, 10 Hz 工况基床表层的加速度横向分布系数大于 5 Hz 工况, 随着路基深度增大, 10 Hz 工况加速度横向分布系数逐渐小于 5 Hz 工况, 二者差距较明显。加速度扩散系数随着路基深度增大而不断减

小, 路基中心处扩散系数比路肩处大; 加载力较大时, 10 Hz 工况加速度扩散系数小于 5 Hz 工况; 加载力较小时, 10 Hz 工况基床表层加速度扩散系数大于 5 Hz 工况, 之后 10 Hz 工况扩散系数随着路基深度增大而逐渐小于 5 Hz 工况, 说明加载力、加载频率对加速度扩散系数的影响相互耦合。

图 6 为降雨后动应力、加速度增幅曲线。由图可知, 与降雨前相比, 降雨后动土压力、加速度增大, 动力响应增强, 基床内部增长较快, 路堤下部增幅趋于稳定, 这是由于降雨后路基填料的应力扩散角减小, 承担荷载的土体体积减小造成的。

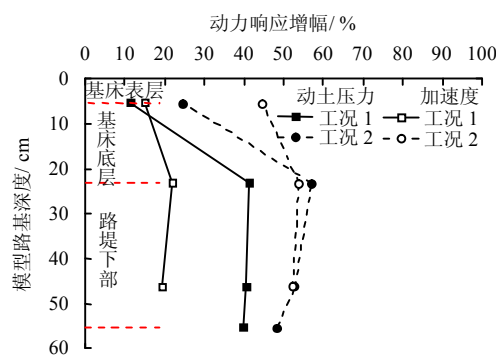


图6 降雨后动土压力、加速度增幅曲线

Fig.6 Increases of dynamic stress and acceleration after rainfall

3.2 桩土荷载分担

定义加筋垫层上、下动土压力的比值为垫层应力扩散系数, 作为评价垫层应力扩散能力的指标。图 7 为不同工况下桩间土对应位置的垫层应力扩散系数。由图可知, 加筋垫层对上部荷载进行调整, 垫层上动土压力大于垫层下, 垫层应力扩散系数为 46.7%~54.6%, 激振项目对垫层下动土压力的影响较垫层上减弱, 表明垫层应力扩散作用良好。

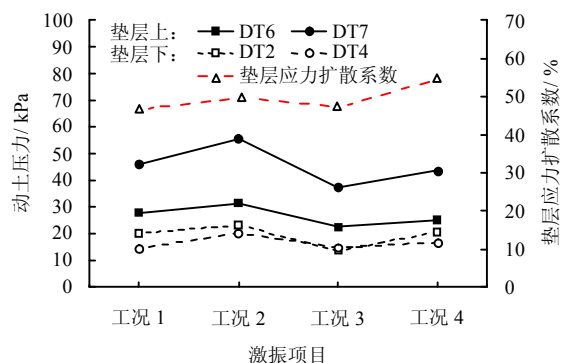


图7 加筋垫层应力扩散系数

Fig.7 Stress diffusion coefficients of reinforced cushion

图8为桩土应力比、桩土沉降与循环加载次数的关系曲线。由图可知,初期加载 2×10^4 次期间,桩土累积沉降、桩土沉降差增大,后期增长缓慢,逐渐趋于稳定,表明桩土应力和应变调整主要发生在循环加载初期;桩土应力比随加载次数缓慢增大,由2.1增至2.6,这是由于循环荷载作用下路基内土拱拱身填料受挤压而不断密实,土拱效应逐步发挥造成的。

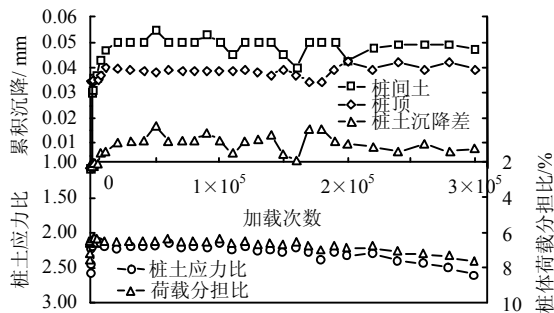


图8 桩土应力比、桩土沉降与加载次数关系

Fig.8 Relationships among pile-soil stress ratio, settlement and number of cyclic load

图9为降雨前后桩土应力比变化曲线。由图可知,桩土应力比受降雨影响敏感,由降雨前2.44降至1.71,降幅为20.5%~43.6%,表明降雨后路基荷载由桩顶向桩间土转移,桩顶处荷载集中效应被削弱。降雨引起的桩与桩间土间荷载转移应引起重视,雨后桩间土抗剪强度减弱以及分担荷载增加,可能会造成地基剪切破坏。

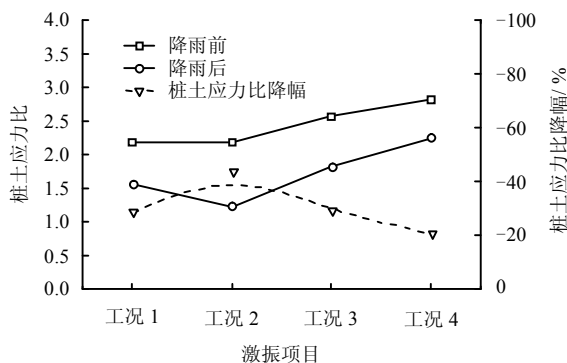


图9 降雨前后桩土应力比变化

Fig.9 Pile-soil stress ratios before and after rainfall

3.3 垫层格栅的变形响应

图10、12分别为循环加载前后工况1路基中心四桩桩间格栅应变及其增幅的横向分布曲线,图11为循环加载前四桩之间格栅应变的等值线,格栅应

变增幅为循环加载后比加载前格栅应变的增长率。如图10、11所示,格栅应变横向分布不均匀,桩间中心线处格栅应变(6-5-4-3)沿横向分布呈“抛物线”型,即两端小、中心大,桩间轴线处格栅应变(10-9-8-7)分布呈“马鞍”型,即两端大、中心小;桩顶边缘附近格栅应变(10、7、2)最大,桩间中心线中心(5、4)、桩间轴线中心处(9、8)应变次之,桩间中心线两端处(6、3)最小;循环加载后较填筑完成时格栅应变的横向分布特征基本保持不变,只是应变增幅不同。

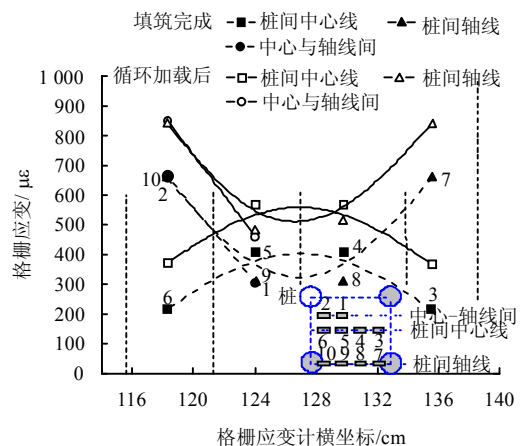


图10 路基中心处格栅应变横向分布曲线

Fig.10 Transverse distributions of geogrid strains in the middle of subgrade

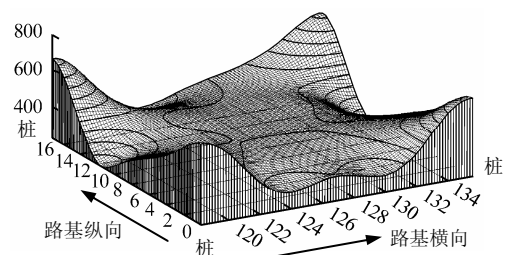


图11 四桩之间格栅应变等值线图

Fig.11 Contour map of geogrid strains among four piles

由图12可知,格栅应变增幅的横向分布特征与图10格栅应变的横向分布相反。循环加载期间,格栅应变横向分布发生调整,当填筑期格栅应变较小时,循环加载后格栅应变增幅较大,而当填筑期格栅应变较大时,格栅应变增幅较小,表明循环加载期间路基中心四桩桩间的格栅应变被匀化。

图13为路基填筑期格栅应变的横向分布,其中图13(a)为四桩中心处,图13(b)为两桩中心处。由图13可知,格栅应变随路基填高的增大而增大,路基填至31层时格栅应变的横向分布特征发生改变,边坡中心格栅应变最大,而此阶段土拱已形成;土

拱形成后路基宽度范围四桩中心格栅应变增幅加快, 峰值出现在路基中心附近, 根据对称性可知, 格栅应变横向分布近似成“W”型, 随着填高继续增大其分布特征愈加明显; 两桩中心格栅应变横向分布表现为由路基中心向坡脚处递增的“台阶”型, 土拱形成后路基宽度范围内格栅应变与边坡范围差距不断缩小; 循环加载后四桩、两桩中心格栅应变增幅的横向分布特征基本一致, 路基宽度范围格栅

应变增幅较边坡范围大, 两桩中心格栅应变增幅略大于四桩中心, 路基中心差值可达 33.1%。

4 结 论

(1) 加载力对动土压力影响明显, 加载力越大, 加载频率对动土压力的影响越大, 动土压力横向分布系数沿路基深度的增大而增大; 加载频率对加速度影响显著, 基床内部加速度横向分布系数较路堤下部大; 加速度扩散系数沿路基深度增大而不断减小, 路基中心处比路肩大; 降雨后动土压力和加速度增大, 动力响应增强, 基床内部增长较快, 路堤下部增幅趋于稳定。

(2) 加筋垫层对上部荷载进行调整, 垫层应力扩散系数为 46.7%~54.6%; 循环加载 2×10^4 次期间, 桩土累积沉降、差异沉降增大, 后期增长缓慢, 逐渐趋于稳定; 桩土应力比随加载次数保持缓慢增大, 受降雨影响敏感, 降雨后降幅达 20.5%~43.6%, 说明降雨引起的桩土间荷载转移应引起重视, 避免地基剪切破坏的产生。

(3) 路基中心四桩桩间中心线处格栅应变横向分布呈“抛物线”型, 桩间轴线处呈“马鞍”型, 循环加载后格栅应变增大, 而分布特征保持不变; 土拱形成后, 路基宽度范围四桩中心格栅应变增长较快, 峰值出现在路基和边坡中心处, “W”型分布特征明显; 两桩中心格栅应变由路基中心向坡脚递增, 分布呈“台阶”型, 土拱形成后路基宽度范围格栅应变与边坡下差距不断缩小。

参 考 文 献

- [1] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 遂渝线无碴轨道桩网结构地基处理技术[J]. 铁道工程学报, 2006, 94(4): 22-25.
XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing, et al. Discussion of Sui-Yu railway line ballastless track column-net structure[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2006, 94(4): 22-25.
- [2] 周镜, 叶阳升, 蔡德钧. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 1-6.
ZHOU Jing, YE Yang-sheng, CAI De-gou. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. *China Railway Science*, 2007, 28(2): 1-6
- [3] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. *Ground Engineering*, 1988, 21(3): 12-18.
- [4] LOW B K, TANG S K, CHO A. Arching in piled

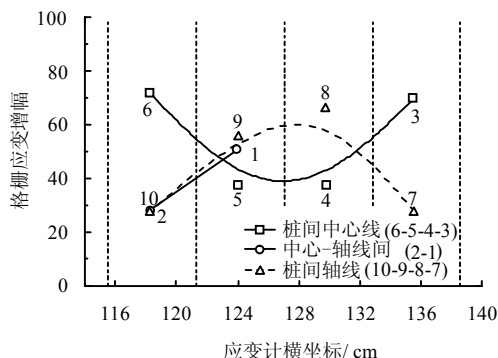


图 12 循环加载前后格栅应变增幅
Fig.12 Increments of geogrid strains before and after cyclic loading

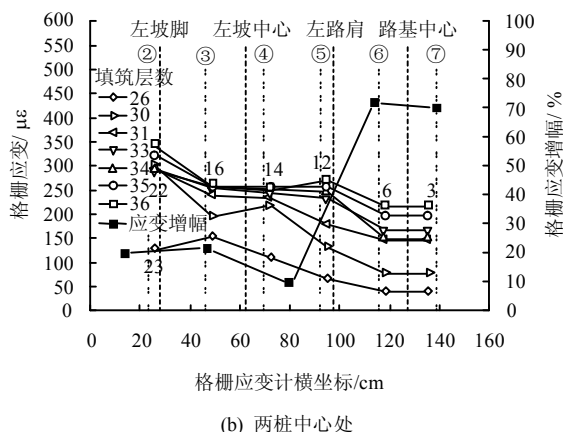
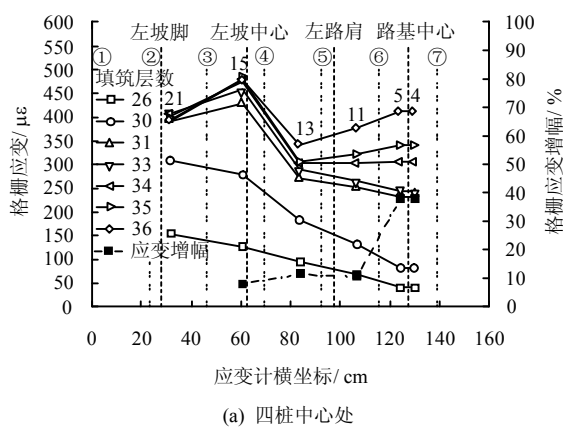


图 13 路基填筑期格栅应变横向分布

Fig.13 Transverse distributions of geogrid strains during subgrade construction period

- embankments[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(11): 1917—1938.
- [5] 陈云敏, 贾宁, 陈仁朋. 桩承式路堤土拱效应分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 1—6.
CHEN Yun-min, JIA Ning, CHEN Ren-peng. Soil arch analysis of pile-supported embankments[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2004, 17(4): 1—6.
- [6] 陈福全, 李阿池. 桩承式加筋路堤的改进设计方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1804—1808.
CHEN Fu-quan, LI A-chi. Improved design method of geosynthetic reinforced pile supported embankments on soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1804—1808.
- [7] 曹新文, 卿三惠, 周立新. 桩网复合地基土工格栅加筋效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3162—3167.
CAO Xin-wen, QING San-hui, ZHOU Li-xin. Experimental study on reinforcement effect of geogrid on composite foundation with dry jet mixing piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 3162—3167.
- [8] 张良, 罗强, 陈亚美, 等. 桩网结构路基承载特性的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3793—3800.
ZHANG Liang, LUO Qiang, CHEN Ya-mei, et al. Research on bearing behavior of pile-net structure subgrade based on field test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(12): 3793—3800.
- [9] PHU-DOANH Bui, 罗强, 张良, 等. 基于大比例静力模型试验的高强度桩复合地基加筋垫层分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2345—2349.
PHU-DOANH Bui, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis of reinforced cushions in high-strength concrete pile composite foundation based on large-scale static model tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2345—2349.
- [10] 蔡德钧, 闫宏业, 叶阳升, 等. 桩网支承路基结构中土拱效应及网垫受力的模型试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 85—92.
CAI De-gou, YAN Hong-ye, YE Yang-sheng, et al. Model study on arch effect and bedding force of geosynthetics reinforced and pile supported embankment[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2011, 33(11): 85—92.
- [11] 于进江, 程谦恭, 贺宏武, 等. 超大面积深厚软土桩—网复合地基承载性状模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3323—3330.
YU Jin-jiang, CHENG Qian-gong, HE Hong-wu, et al. Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation on oversized deep soft soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3323—3330.
- [12] 陈仁朋, 徐正中, 陈云敏. 桩承式加筋路堤关键问题研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 7—12.
CHEN Ren-peng, XU Zheng-zhong, CHEN Yun-min. Research on key problems of pile supported reinforced embankment[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2007, 20(2): 7—12.
- [13] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 客运专线无砟轨道桩网结构模型试验研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 126—131.
XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing, et al. Model test of column-net structure for express passenger line unballasted track[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2007, 29(2): 126—131.
- [14] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 桩网结构模型试验柔性拱研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3032—3036.
XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Study of flexible arch of model test in column-net structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3032—3036.
- [15] 肖宏, 蒋关鲁, 魏永幸. 遂渝线无砟轨道桩网结构路基现场动车试验测试分析[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 79—84.
XIAO Hong, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing. Dynamic test analysis on ballastless-track column-net structure subgrade of the Suining-Chongqing railway line[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2010, 32(1): 79—84.
- [16] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 达成线红层泥岩路基循环加载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1888—1893.
WANG Zhi-meng, JIANG Guan-lu, WEI Yong-xing, et al. Experimental study on dynamic performance of red-mudstone subgrade under cyclic loading in Dazhou-Chengdu line[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1888—1893.