

路桥过渡段桩承式加筋路堤现场试验研究

郑俊杰，张军，马强，董友扣

(华中科技大学岩土与地下工程研究所，湖北 武汉 430074)

摘要：桩承式加筋路堤与路堤填土加筋技术联合应用于黄土地区路桥过渡段，减小路桥过渡段差异沉降和桥头跳车现象。通过现场试验对桩承式加筋路堤中心轴和路肩对应位置处格栅上、下表面桩顶和桩间土土压力、桩间格栅变形以及加筋路堤各断面格栅上、下表面土压力和格栅变形进行监测分析，研究结果表明：桩承式加筋路堤通过土拱效应和张拉膜效应将路堤荷载向桩顶转移，从而可有效减小桩间土荷载；桩承式加筋路堤中心轴处路堤荷载转移主要以土拱效应为主，以张拉膜效应为辅，而路肩处格栅张拉膜效应较显著，路堤荷载传递由土拱效应和张拉膜效应共同完成，格栅在路肩处发挥作用效果大于路堤中心轴处；路堤加筋技术在桥台附近减载作用明显，随着距桥台距离的增加，减载作用逐渐减弱。

关键词：桩承式加筋路堤；路桥过渡段；现场试验；土拱效应；张拉膜效应

中图分类号：TU473.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-4548(2012)02-0355-08

作者简介：郑俊杰(1967-)，男，教授，博士生导师，主要从事岩土工程与隧道工程方面的教学、科研与咨询工作。

E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

Experimental investigation of geogrid-reinforced and pile-supported embankment at bridge approach

ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, MA Qiang, DONG You-kou

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The geogrid-reinforced and pile-supported (GRPS) embankment and the geogrid-reinforced filling technique are employed to treat the bridge approach in loess area so as to reduce the differential settlement and alleviate the bump at the end of the bridge approach. Moreover, the earth pressure on the surfaces above and below the geogrid along the central axis and shoulder of the embankment are measured as well as deformation of the geogrid. The results show that the load on the soil between piles can be reduced effectively due to the soil arching and tensioned membrane effects. In the central axis of the embankment, most of the load is transferred by the soil arching and the tensioned membrane effects, but the tensioned membrane effect is not obvious. At the road shoulders, the tensioned membrane effect increases efficiently and the load is transferred by the soil arching effect together with the tensioned membrane effect. The effect of load transfer is significant at the bridge approach and decreases gradually with the increase of distance from bridge abutment.

Key words: geogrid-reinforced and pile-supported embankment; bridge approach; field experiment; soil arching effect; tensioned membrane effect

0 引言

随着中国经济的飞速发展，对交通运输资源的需求日益增加，高速公路和高速铁路作为最为方便快捷的交通运输资源，得到了大力发展。在高速公路和高速铁路建设中，不可避免地要通过一些不适宜修建路堤的不良地基。在这些不良地基上填筑高填方路堤，常常会面临地基承载力不足、失稳、路堤沉降、不均匀沉降以及侧向变形过大等问题^[1-2]。解决这些问题的常规方法主要包括超挖换填、堆载预压、选用轻质填料、水平向加筋、设置竖向增强体等。由于地质条件

的复杂性、工期和经济方面的原因，上述方法的应用存在较大的局限性^[3]。桩承式加筋路堤由路堤填料、砂石垫层、水平加筋体、桩（帽）和地基土组成，是近年来兴起的一种新型路堤型式（图1）。具有施工工期短、路堤沉降、不均匀沉降以及侧向变形小，路堤整体稳定性高等优点，适用于不良地基上以及路桥

基金项目：国家自然科学基金项目（50978112）；教育部留学回国人员科研启动基金项目（20091341）；华中科技大学研究生科技创新基金项目（HF-08-01-2011-240）

收稿日期：2010-12-10

过渡段需要严格控制沉降的路堤。

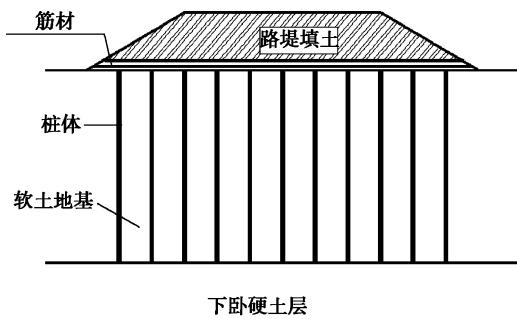


图1 桩承式加筋路堤平面示意图

Fig. 1 Geogrid-reinforced and pile-supported embankment

桩承式加筋路堤通过砂石垫层、水平加筋体、桩和地基土共同作用,作用机理复杂。Hewlett等^[4]通过模型试验分别研究了空间土拱效应和平面土拱效应,并假设路堤土拱形状为半圆形和半球形模型,基于极限平衡理论分别推导了平面与三维情况下的桩土应力比。饶为国等^[5]基于网单元的受力平衡条件,假设筋材受力变形为二次抛物线,推导出了路堤荷载下桩土应力比计算式,并分析了置换率、路堤荷载、工后沉降量、桩间土承载能力以及网的刚度对桩土应力比的影响。陈云敏等^[6]基于单桩等效处理范围路堤自身土体受力平衡,改进了传统的Hewlett极限状态空间土拱效应分析方法,求得了桩体荷载分担比计算的解析表达式,并研究了桩间距、桩帽大小和填料内摩擦角对桩体荷载分担比的影响。Abusharar等^[7]基于Low的平面半圆形土拱模型和筋材变形圆弧模型分别考虑了路堤填土的土拱效应和筋材的张拉膜作用,提出了桩土应力比的简化公式。张军等^[8]将路堤填土、水平加筋体、桩体、桩间土视为整体,基于大挠度薄板理论考虑筋材作用,充分考虑了各组成部分之间的相互作用,采用有限差分法求解路堤荷载作用下双向增强体复合地基的桩土应力比。随着计算机技术的发展,数值仿真方法被广泛应用于桩承式路堤的研究。Han等^[9]基于平面应变假设,利用有限元软件分析了路堤填土高度、筋材抗拉模量和桩体模量对桩承式加筋路堤受力体系的影响。Huang等^[10-11]分别采用二维和三维有限元流固耦合模型分析了随孔隙水压力消散路堤沉降及不均匀沉降、筋材轴力和固结度的时效性,并分别对软土模量、渗透系数、筋材抗拉模量、桩体模量和桩间距进行了参数分析。Zheng等^[12]基于平面应变假设,采用流固耦合模型,通过对无桩无筋、无桩加筋和桩承式加筋3种工况进行对比研究,考虑路堤侧向位移影响,分析了桩承式加筋路堤作用机理及作用效果。Low等^[13]通过室内模型试验验证了土拱效应的存在,分别分析了加筋与不加筋两种情况下以及不同高跨比情况

下对桩体的荷载分担比影响;Chen等^[14]通过室内模型试验分析了平面土拱效应和路堤沉降变化规律,并通过试验研究了桩土相对位移、路堤高度、桩梁净间距、桩梁宽度及水平加筋体等因素对桩土应力比及路堤沉降的影响。目前,关于桩承式加筋路堤的现场试验研究越来越多。徐林荣等^[15]通过京沪高速铁路试验段中桩-网复合地基处理段进行的路基现场试验,对桩-网复合地基中基底土压力、土工格栅应力变形、桩和土的沉降及地基侧向位移等进行观测,分析了应力分担比的变化过程、土工格栅的受力特点、沉降及侧向位移规律。费康等^[16]对一柱体面积置换率为8.7%的低置换率桩承式加筋路堤进行了现场试验,对桩-土压力、孔压、沉降及侧向水平变形等内容进行了观测分析。徐正中等^[17]以申苏浙皖高速公路为工程背景,对软土层未打穿的桩承式路堤选取二个断面进行现场试验,分别分析了在填筑过程中及填筑完成后对桩和桩间土上的土压力、路基沉降及下卧层沉降,并与软土层打穿时的实测结果作了比较。夏唐代等^[18]为了进一步明确筒桩桩承式加筋路堤的工作机制,在广州绕城高速公路九江一小塘段进行现场试验,根据试验结果,分析了筒桩复合地基的荷载传递机制及沉降变形规律。

但是,文献[15~18]的工程应用中桩承式加筋路堤都是应用于淤泥质土、泥炭土等软弱地基中修筑路堤,本次试验将桩承式加筋路堤应用于黄土地区,结合路堤填土加筋技术处治路桥过渡段,以减小路桥过渡段差异沉降和桥头跳车现象。并对桩承式加筋路堤中格栅上、下表面桩顶和桩间土土压力、桩间格栅变形,以及路堤加筋断面格栅上、下表面土压力和格栅变形进行监测分析。

1 工程概况及试验方案

1.1 工程概况

长治至安阳高速公路长平(长治—平顺)段位于山西省东南部,公路沿途地貌单元主要有黄土覆盖构造剥蚀基岩低中山区、陶清河山间凹陷区、冲积平原区。本试验段场地位于长平高速公路第十一合同段长治东枢纽工程 MCK40+826 大桥 0 号桥台台背处。桥台地貌类型主要为丘陵地貌,分布地层主要为新生界第四系全新统冲洪积粉质黏土、砂砾土、中更新统冲洪积粉质黏土等。根据地质勘察资料本试验段桥台台背地基土自上而下含以下地层:①种植土,褐黄色,稍湿,稍密,富含植物根系,见少许钙质结核,厚度0.2~0.5 m,平均0.35 m,且在施工时已全部清除;②粉质黏土,褐色,可塑,土质均匀,黏性中,虫孔

发育, 含钙化菌丝, 厚度 2.9~4.3 m, 平均 3.5 m; ③粉土, 褐黄色, 稍湿, 较为松散, 土质不均一, 见圆砾及粗砂薄层, 厚度 5.7~6.3 m, 平均 6.12 m; ④砂卵石层, 灰黄色, 稍湿, 中密, 含量约 40%, 粗砂充填, 粒径一般 1~2.5 cm, 最大 5 cm, 厚度 3.4~4.7 m, 平均 4.08 m; ⑤黏土, 褐红色, 稍湿, 硬塑, 虫孔发育, 土层较为致密, 含砾卵石少量, 厚度 10.3~14.9 m, 平均 12.5 m。该区属典型中温带半湿润大陆性季风气候, 全年冬无严寒, 夏无酷暑, 雨热同季。一般年降水量在 537.4~656.7 mm, 地质勘察范围内未发现地下水。试验段台背路堤顶面宽 B 为 34 m, 填土高度 H 为 5 m, 路堤坡率 $H:V$ 为 1:1.5。试验段土层物理力学参数见表 1。

表 1 试验段土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of subsoils

土层	压缩模量 E_s/MPa	重度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$
粉质黏土	5.2	17.2	0.33	14.2	18.3
粉土	7.6	17.8	0.33	7.6	19.7
砂卵石层	30.0	20.1	0.30	0	28.6
黏土	22.1	18.3	0.30	15.7	21.0
路堤填土	20.0	19.0	0.30	16.8	24.6

1.2 现场试验设计

路桥过渡段桥台与路堤填土、路基材料刚度的较大差异, 引起的沉降变形差异是产生桥头跳车的主要因素。桥台台身大多数为钢筋混凝土结构, 自身变形量可以忽略不计, 而高等级公路的桥梁主要以钻孔桩为主, 桥台沉降往往很小。从桥头路堤的变形机理考虑, 构成桥头路堤沉降的主要因素有桥头地基的固结变形和桥头路堤填土的压缩变形两个方面。

考虑以减小路桥搭接段差异沉降和缓解桥头跳车现象为目的, 分别对路堤台背路基进行地基处理以及对路堤填土进行加筋处理。台背路基采用桩体与土工格栅联合处理的地基处理方式, 路堤填土采用土工格栅加筋的处理方式。分别对试验段路基加固部分路堤中心轴处(I 断面)、路肩处(II 断面)和路堤填土加筋部分格栅上、下表面桩顶和桩间土土压力、桩间格栅变形, 以及路堤加筋各断面格栅上、下表面土压力和格栅变形进行监测分析, 图 2 为试验监测段的断面示意图。

根据试验段具体地质情况综合分析, 铺设一层高强度格栅于路堤顶面以下 1 m 处对路堤填土进行加筋处理。试验监测路段采用直径 500 mm 混凝土灌注桩加固路基, 混凝土强度等级为 C25, 桩顶沿深度 1 m 范围放置钢筋笼, 桩间距为 3.5 m, 正方形布桩, 桩

顶加设桩帽, 桩帽尺寸为 1000 mm×1000 mm, 桩帽中设置一层 $\phi 6@100\times100$ mm 钢筋网, 桩长为 10 m 左右, 以穿透粉土层, 进入砂卵石层 50 cm 为准。图 3 为试验监测段桩帽的大样。图 4, 5 分别为路基加固和路堤加筋现场效果图。

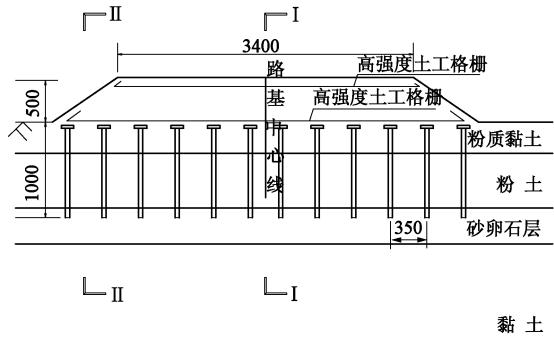


图 2 试验监测段断面示意图

Fig. 2 Sketch of measured GRPS embankment sections

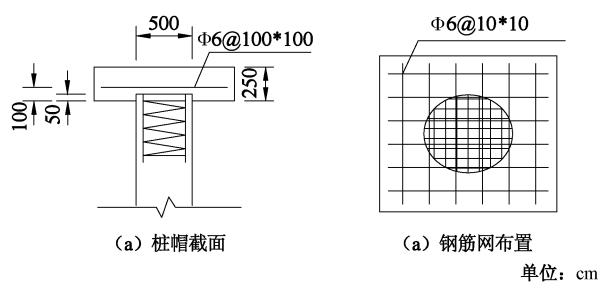


图 3 桩帽设计

Fig. 3 Design of pile caps



图 4 路基加固现场

Fig. 4 Improvement of subgrade



图 5 路堤加筋现场

Fig. 5 Embankment reinforced with geogrid

1.3 监测仪器埋设

试验段路基加固区路堤中心轴处(I断面)和路肩处(II断面)分别对桩承式加筋路堤中桩顶和桩间土格栅上、下表面各埋设一个土压力盒, 桩间格栅上表面埋设一个格栅位移计, 监测分析桩-土压力变化规律和格栅变化规律。试验段路堤填土加筋部分在路堤中心轴处沿路堤纵轴每隔3 m格栅上、下各埋设一个土压力盒, 格栅上表面埋设一个格栅位移计, 监测分析格栅有效长度以及格栅加筋减载作用。各测点具体监测仪器埋设如图6所示, 土压力盒和格栅位移计埋设现场效果图如图7所示。

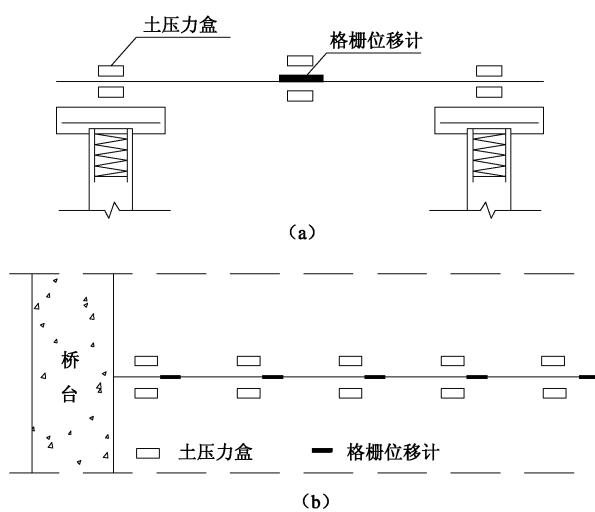


图6 监测元件埋设示意图

Fig. 6 Sketch of instrumented section

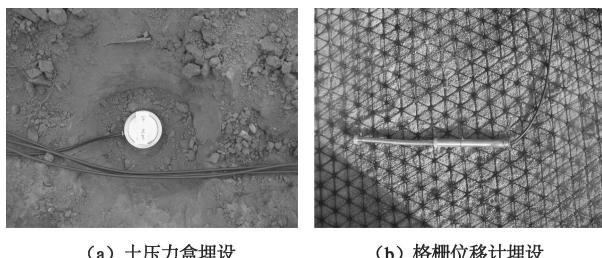


图7 监测元件埋设

Fig. 7 Layout of sensors

2 试验结果分析

2.1 桩、土压力变化规律

图8为随着路堤填土高度的增加, 桩承式加筋路堤中桩和桩间土的土压力变化曲线。图8(a)为桩承式加筋路堤桩顶格栅上、下表面土压力随着路堤填土高度增加时I, II断面各测点土压力变化曲线图。随着路堤填土高度的增加, 不同位置的土压力均有不同程度的增加。由图8(a)可见, 路堤填筑初期, I, II断面桩顶格栅上、下表面各处土压力增长速度相近,

随着路堤填土高度的增加, I断面桩顶土压力增长速率逐渐增大, 由于II断面处于路肩处, II断面桩顶格栅上、下表面各处土压力增幅与增速都明显小于I断面。加载过程中, I, II断面桩顶格栅下表面土压力大于格栅上表面土压力, 且随着路堤填土的增加, 格栅上、下表面土压力差值逐渐增大。路堤填筑完毕时, I断面桩顶格栅下表面土压力最大, 约为0.52 MPa, 是路堤填土平均土压力 γH 的5.5倍; I断面桩顶格栅上表面土压力次之; II断面桩顶格栅上表面土压力最小, 约为0.24 MPa。图8(b)为桩承式加筋路堤桩间土格栅上、下表面土压力随着路堤填土高度增加时I, II断面各测点土压力变化曲线图。与桩顶格栅上、下表面土压力变化曲线相似, 随着路堤填土高度的增加, I, II断面桩间土格栅上、下表面各测点土压力均有不同程度的增加。与桩顶土压力变化规律相反, 路堤填筑初期各测点土压力增长速率最大, 随着路堤填土的增加, 土压力增长速率逐渐减小。除路堤填筑初期外, I断面桩间土格栅上、下表面各测点土压力明显大于II断面桩间土的土压力。路堤填筑完毕时, I断面桩间土格栅上表面土压力最大, 约为0.063 MPa, 不到路堤填土平均土压力 γH 的2/3; I断面桩间土格栅下表面土压力次之, II断面桩间土格栅下表面土压力最小, 约为路堤填土平均土压力 γH 的1/5。

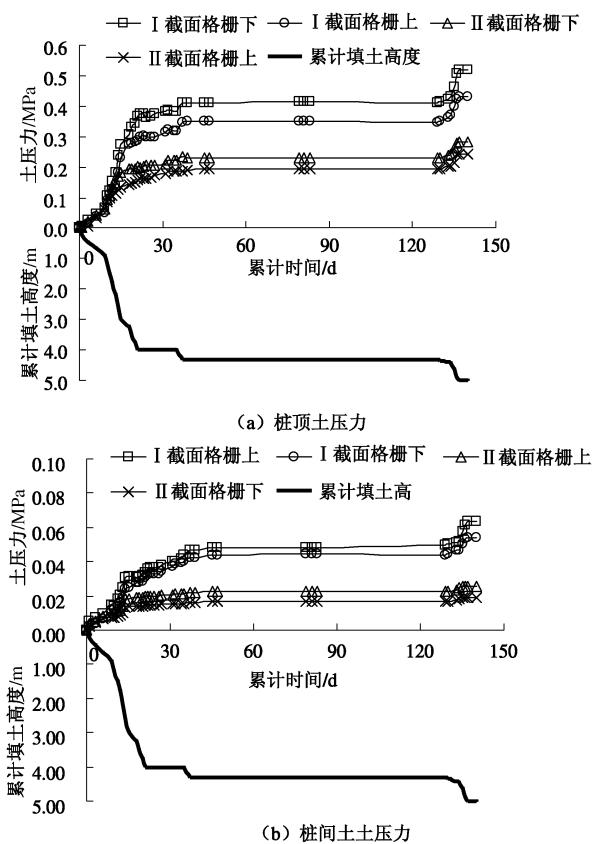


图8 桩与桩间土的土压力变化曲线

Fig. 8 Variation curves of pressure of pile and soil

桩承式加筋路堤是由桩体、土工格栅、砂石垫层和桩间土联合作用组成的一个路堤支承体系, 是通过土拱效应和张拉膜效应共同作用的一种路堤型式。由于桩和桩间土之间存在刚度差异, 在路堤荷载作用下, 使得桩间土的沉降大于相邻的桩体沉降。该差异沉降导致桩间土上部土体与桩顶土体之间产生摩擦剪切作用, 该摩阻力阻止桩间土上部土体的沉降, 从而使桩间土上部的填土荷载传递到相邻的桩顶, 减小桩间土荷载的这种现象称作土拱效应。而且桩土差异沉降引起格栅发生挠曲变形, 土颗粒与格栅的界面产生摩擦阻力和咬合力, 同时格栅内部产生张力, 并有效地将桩间土上部的填土荷载转移到桩顶, 减小地基的沉降和不均匀沉降, 这种现象称作张拉膜效应^[19]。试验段土压力监测方案设计时, 在桩顶和桩间土格栅上、下表面均埋设了土压力盒。格栅上表面土压力减去填土平均土压力为土拱效应对荷载转移的贡献, 格栅下表面土压力减去格栅上表面土压力为张拉膜效应对荷载转移的贡献。经过数据处理, 得到了土拱效应与格栅张拉膜效应所承担路堤填土土压力的发展规律。

图9为路堤填土土拱效应和土工格栅张拉膜效应所分担的土压力变化曲线图。随着路堤填土高度的增加, 土拱效应和张拉膜效应所分担的荷载逐渐增大。路堤填筑初期, 土拱效应与张拉膜效应所承担的荷载相差不大, 随着路堤填土高度的增加, 通过土拱效应承担的荷载线性增加, 土拱效应发挥的作用不断增强; 而随着路堤填土高度的增加, 格栅分担的填土荷载增幅不大, 路堤荷载通过土工格栅转移荷载的能力有限。路堤填筑完毕时, 格栅张拉膜效应分担的荷载为0.088 MPa, 不到路堤填土平均土压力 γH 的一倍。土拱效应所承担的填土压力升至0.334 MPa, 为路堤填土平均土压力 γH 的3.5倍。

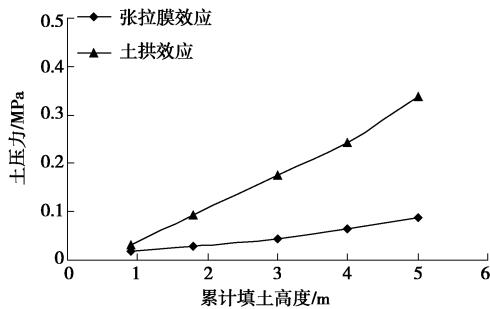


图9 土拱和张拉膜效应土压力变化曲线

Fig. 9 Variation curves of pressure of soil arching and tensioned membrane effects

分荷比表示土拱效应或张拉膜效应在路堤荷载转移过程中所分担荷载的比例。图10为随着路堤填土高

度的增加, 路堤填土土拱效应和土工格栅张拉膜效应所承担荷载的分荷比变化曲线图。

从图10可以看出, 路堤填筑初期, 土拱效应和张拉膜效应所占分荷比相差不大, 分别为63.5%和36.5%。随着路堤填土高度的增加, 格栅张拉膜效应所分担的荷载逐渐减小, 土拱效应所分担的荷载逐渐增大。填筑3 m之后, 土拱效应和张拉膜效应各自所承担的荷载趋于稳定, 分荷比变化不大。结合图9分析, 路堤填筑完毕后, 土拱效应和张拉膜效应所承担的填土压力分别为0.334 MPa和0.088 MPa, 分荷比分别为79.3%和20.7%。可以看出, 当路堤填土较低时, 格栅张拉膜效应发挥作用较大, 但是随着路堤填土高度的增加, 格栅张拉膜效应发挥作用逐渐减弱, 土拱效应在荷载转移过程中发挥主要作用。

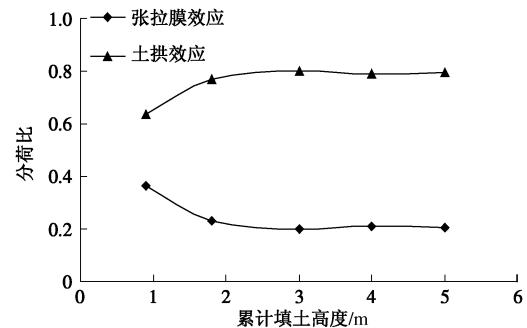


图10 土拱和张拉膜效应分荷比

Fig. 10 Load sharing ratios of soil arching and tensioned membrane effects

桩土应力比反映了复合地基桩-土荷载分担特性, 是路堤沉降计算、承载力设计和稳定性分析的重要指标^[20]。图11分别为随着路堤填土高度的增加时I, II断面各测点格栅上、下表面桩土应力比变化曲线图。可以看出, I, II断面格栅下表面桩土应力比要高于格栅上表面, 且格栅上、下表面桩土应力比变化趋势大体相近。随着路堤填土高度的增加, I断面格栅上、下表面桩土应力比呈非线性增加, 变化趋势基本相同, 且格栅上、下表面桩土应力比相差不大。与I断面变化规律不同, 除路堤填筑初期外, 格栅下表面桩土应力比远大于格栅上表面。填筑初期, 随着路堤填土高度增大, 格栅下表面桩土应力比大幅增大, 随后桩土应力比趋于稳定, 略有增大; 格栅上表面桩土应力比在整个填筑过程中略有波动, 但整体变化不大。对比分析, 在路堤中心轴附近, 格栅上、下表面桩土应力比相差不大, 路堤荷载主要依靠土拱效应传递至桩顶, 格栅张拉膜效应作用有限。II断面路肩处与路堤中心轴附近不同, 除路堤填筑初期外, 格栅上、下表面桩土应力比相差较大, 两者最大差值发生在路

堤填土高度为3 m处,格栅上表面的桩土应力比是格栅下表面的1.8倍。路堤荷载依靠土拱效应和张拉膜效应共同作用传递至桩顶,在路肩处格栅张拉膜效应发挥作用增强。

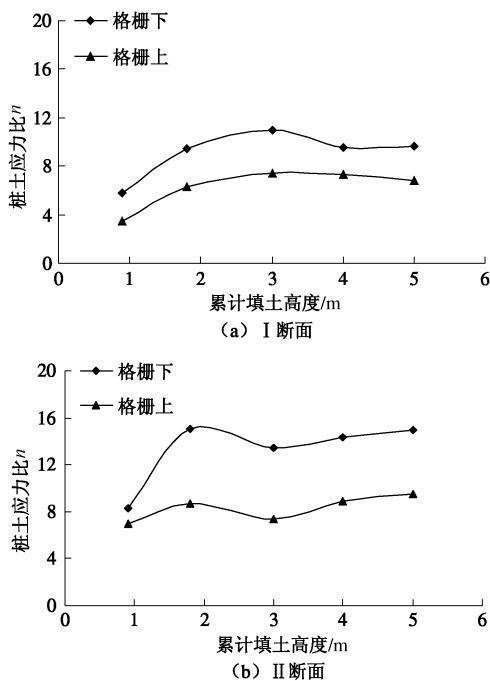


图 11 桩土应力比变化曲线

Fig. 11 Curves of pile-soil pressure ratio

2.2 格栅变形分析

格栅位移计的测杆具有一定柔性且由蛇形管保护,可随格栅变形,应用时将其两端夹具沿测量方向紧固于格栅上,使传感器与格栅产生协同变形,适用于各种土工格栅的变形测量。本试验段在I断面和II断面格栅上表面桩间中心处分别埋设一只格栅位移计,监测路堤填筑过程中初始长度为20 cm时格栅变形规律。

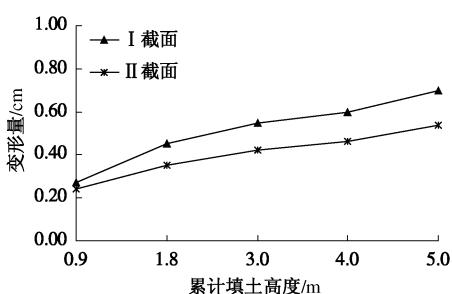


图 12 格栅变形曲线

Fig. 12 Variation curves of geogrid deformation

图 12 为随路堤填土高度增加时 I 断面和 II 断面的格栅变形曲线。路堤填筑初期,路堤中心轴处格栅变形量略大于路肩处,但两者相差不大。随着路堤填土的增加,路肩处格栅的变形增速明显要小于路堤中心轴处,但两者曲线变化规律相似。路堤填筑完毕后,

路堤中心轴处格栅总变形量为 0.70 cm,路肩处格栅总变形量为 0.54 cm。对比 I, II 断面格栅位移计埋设上方路堤填土垂直高度,两处路堤填土垂直高度分别为 2 m 和 5 m,路堤中心轴处路堤填土高度是路肩处 2.5 倍,但路堤填筑完毕后,格栅总变形量只是路肩处的 1.3 倍,格栅在路肩处发挥作用效率更高。

2.3 路堤加筋试验分析

土工格栅加筋路堤处理桥头跳车的作用机理分为两个方面:①利用锚固加筋材料一端的张拉作用,在台背局部范围,阻止路堤填土沿台背深层方向的沉降;②由于土工格栅的作用,路堤填土受到约束,土体本身颗粒间以及土颗粒与土工格栅接触面间的摩擦咬合作用增强,土体中的部分应力得到扩散和转移,从而使土体的垂直应力和水平拉应力明显降低,土体剪应力明显提高,土体的承载能力和抗变形能力因此得到明显提高。

图 13 为随路堤填土增加时试验段路堤加筋部分格栅上、下表面各测点土压力变化曲线。距桥台 1.5 m 处,格栅上表面各测点土压力明显大于格栅下表面,且随着路堤填土的增加,格栅加筋减载作用越明显。随着距桥台距离的增大,格栅加筋减载作用逐渐减小,距桥台 10.5 m 处,格栅上、下表面各测点土压力基本相等,距桥台 13.5 m 处路堤填筑 1 m 完毕后,格栅下表面土压力甚至还大于格栅上表面。可以看出,本次试验路堤填土完毕时,格栅有效加筋减载长度为 10.5 m 左右。

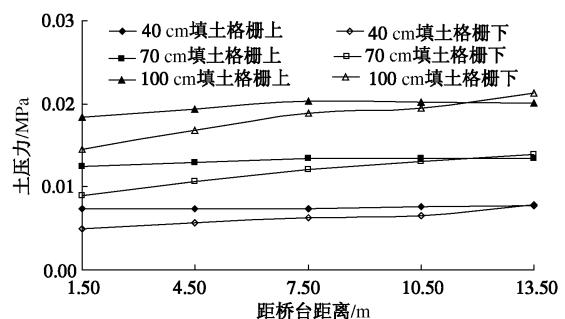


图 13 格栅上、下表面土压力变化曲线

Fig. 13 Variation of pressures below and above the geogrid

图 14 为随路堤填土增加时试验段路堤加筋部分格栅位移计变形曲线。距桥台 1.5 m 处,格栅变形量最大。随着距桥台距离的增大,格栅变形量逐渐减小,距桥台 10.5 m 处路堤填土对格栅的变形影响不大。但距桥台 13.5 m 处,随路堤填土增加,格栅变形反而增大。分析原因,可能是因为路堤填土下方路基加固区外侧沉降大于路基加固区,使格栅产生向下的拉力,从而产生距桥台 13.5 m 处格栅下表面土压力和格栅变形反

而增大的现象。

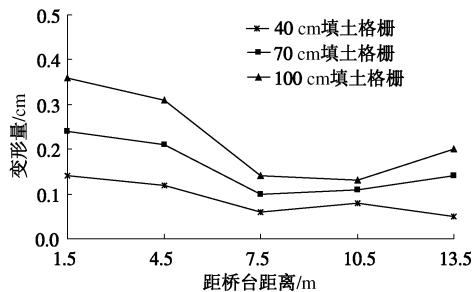


图 14 格栅变形曲线

Fig. 14 Variation curves of geogrid deformation

3 结 论

本文将桩承式加筋路堤应用于黄土地区, 结合路堤填土加筋技术处治路桥过渡段, 以减小路桥过渡段差异沉降和桥头跳车现象。对试验段桩承式加筋路堤中格栅上、下表面桩顶和桩间土土压力、桩间格栅变形, 以及路堤加筋各断面格栅上、下表面土压力和格栅变形进行现场监测。通过现场试验对比分析了桩承式加筋路堤中心轴处和路肩处桩顶和桩间土的土压力变化规律、格栅张拉膜效应和路堤填土土拱效应的发挥效率、桩土应力比变化规律以及格栅变形规律, 并对路堤加筋各断面格栅上、下表面土压力变化规律以及格栅变形规律进行了分析研究。综合以上试验研究可以得出以下结论:

(1)路堤采用桩承式加筋技术可有效减小路基桩间土所承担荷载, 路堤荷载通过土拱效应和张拉膜效应将大部分路堤荷载传递至桩顶。

(2)桩承式加筋路堤中心轴处主要通过土拱效应将路堤荷载传递至桩顶, 以张拉膜效应为辅, 路肩处格栅张拉膜效应作用明显增强, 路堤荷载传递是通过土拱效应和张拉膜效应共同作用。

(3)路堤填筑完毕后, 路堤中心轴处格栅变形量与路肩处相差不大, 格栅在路肩处效率明显大于路堤中心轴处。

(4)路堤加筋技术在桥台附近格栅下表面土压力明显小于格栅上表面土压力, 路堤加筋减载作用明显。随着距桥台距离的增加, 减载作用逐渐减小。

(5)路堤加筋部分格栅变形与加筋减载作用变化规律相同。在桥台附近变形量最大, 随着距桥台距离的增加, 格栅变形量逐渐减小。

参考文献:

[1] HAN J, GABR M A. A numerical study of load transfer mechanisms in geosynthetic reinforced and pile supported

embankments over soft soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 44 - 53.

- [2] LIU H L, CHU J, DENG A. Use of large-diameter cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 915 - 927.
- [3] CHEN B G, ZHENG J J, ABUSHARAR S W. Theoretical study and numerical analysis on geosynthetic reinforced and pile wall supported embankment[C]// Proceeding of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. Shanghai, 2008: 709 - 717.
- [4] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12 - 18.
- [5] 饶为国, 赵成刚. 桩—网复合地基应力比分析与计算[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 74 - 80. (RAO Wei-guo, ZHAO Cheng-gang. The behavior of pile-soil composite foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 74 - 80. (in Chinese))
- [6] 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(10): 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(10): 1 - 6. (in Chinese))
- [7] ABUSHARAR S W, ZHENG J J, CHEN B G. A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 39 - 52.
- [8] 张 军, 郑俊杰, 马 强. 路堤荷载下双向增强体复合地基受力机理分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1392 - 1398. (ZHANG Jun, ZHENG Jun-jie, MA Qiang. Mechanical performance of biaxial reinforcement composite foundation under embankment loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1392 - 1398. (in Chinese))
- [9] HAN J, HUANG J, PORBAHA A. 2D numerical modeling of a constructed geosynthetic-reinforced embankment over deep mixed columns[C]// Contemporary Issues in Foundation Engineering, 2005: 1 - 11.
- [10] HUANG J, HAN J. Two-dimensional parametric study of geosynthetic-reinforced column-supported embankments by coupled hydraulic and mechanical modeling[J]. Computers and Geotechnics. 2010, 37: 638 - 648.
- [11] HUANG J, HAN J. 3D coupled mechanical and hydraulic modeling of a geosynthetic-reinforced deep mixed

- column-supported embankment[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, **27**(4): 272 - 280.
- [12] ZHENG J J, CHEN B G, ABUSHARAR S W. The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls[J]. Geosynthetics International, 2009, **16**(3): 171 - 181.
- [13] LOW B K, TANG S K, CHO A V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **120**(11): 1917 - 1938.
- [14] CHEN Y M, CAO W P, CHEN R P. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, **26**(2): 164 - 174.
- [15] 徐林荣, 牛建东, 吕大伟. 软基路堤桩-网复合地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2149 - 2154. (XU Ling-rong, NIU Jian-dong, LÜ Da-wei. Experimental study on pile-net composite foundation of high-speed railway on soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2149 - 2154. (in Chinese))
- [16] 费 康, 刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(4): 1005 - 1012. (FEI Kang, LIU Han-long. Field test study and numerical analysis of a geogrid-reinforced and pile-supported embankment I[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(4): 1005 - 1012. (in Chinese))
- [17] 徐正中, 陈仁朋, 陈云敏. 软土层未打穿的桩承式路堤现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(11): 2336 - 2341. (XU Zheng-zhong, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Study of in-situ date of pile-supported embankment with pile partially penetrated in soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(11): 2336 - 2341. (in Chinese))
- [18] 夏唐代, 王 梅, 寿 旋. 简桩桩承式加筋路堤现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1929 - 1936. (XIA Tang-dai, WANG Mei, SHOU Xuan. Field test study of reinforced embankment supported by cast-in-situ thin-wall tubular piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1929 - 1936. (in Chinese))
- [19] HAN J. Design and construction of embankments on geosynthetic reinforced platforms supported by piles[C]// Proceedings of 1999 ASCE, PaDOT Geotechnical Seminar, Hershey, 1999: 14 - 16.
- [20] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M. Field tests on pile-supported embankments over soft ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2010, **136**(6): 777 - 785.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》以及本刊网站全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 2009 年起每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)