

塑料套管混凝土桩加固公路软土地基现场试验研究

左殿军^{1,2}, 齐昌广², 张宇亭^{1,2}, 刘晓强¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 岩土工程研究中心, 天津 300456; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据某一高速公路塑料套管混凝土桩加固软土地基工程实例, 对桩土应力、地表沉降、横向位移、不同深度孔隙水压力进行观测, 讨论了塑料套管混凝土桩桩承式路堤的工作机理。结果表明: 塑料套管桩加筋路堤的临界高度约为1.26倍桩净距, 观测期末, 荷载分担比接近89%; 桩帽和桩间土最大差异沉降为30 mm左右, 且应力集中比随着差异沉降的增大而线性增大; 路堤堤脚附近不同深处横向位移随着路堤填筑高度的增加而增加, 施工结束时, 地表以下2.5 m处横向位移最大, 为12.86 mm; 横向位移-沉降比和横向位移增加率随着路堤填筑高度的增加逐步减小并趋于稳定, 塑料套管混凝土桩加筋路堤系统能够有效防止路堤横向位移的发展和改善路堤的整体稳定性。

关键词: 塑料套管混凝土桩; 小直径刚性桩; 桩承式路堤; 荷载分担比; 差异沉降; 横向位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)09-1746-07

作者简介: 左殿军(1983-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 工程师, 主要从事软土地基加固处理技术、重金属污染土治理与控制技术方面的研究。E-mail: zdj647@163.com。

Field tests on plastic tube cast-in-place concrete piles for reinforcing soft ground of highways

ZUO Dian-jun^{1,2}, QI Chang-guang², ZHANG Yu-ting^{1,2}, LIU Xiao-qiang¹

(1. Geotechnical Engineering Research Center, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on a case of plastic tube cast-in-place concrete piles for reinforcing soft ground of a highway, the characteristics of the plastic tube cast-in-place concrete pile supported embankment system are studied by measuring the pile-soil stress, surface settlement, horizontal displacement, and pore water pressure at different depths. The test results show that the critical height of the plastic tube cast-in-place pile-supported embankment is about 1.26 times the net pile space. The load-sharing ratio approaches 89% at the end of monitoring. The settlements of piles and soils and the differential settlements between piles and soils mainly occur during the period of embankment construction. The measured maximum differential settlement between piles and soils is about 30 mm; and the stress concentration ratio linearly increases with the differential settlement between piles and soil. The lateral displacements at different depths near the embankment toe increase with the increasing embankment height. The maximum lateral displacement is 12.86 mm and located 2.5 m in depth under the surface at the end of embankment construction. The lateral displacement-settlement ratio and the increment ratio of lateral displacement are reduced and stabilized with the increase of the embankment height, which indicates that the plastic tube cast-in-place concrete pile-supported embankment system can prevent the development of lateral displacement and improve the whole stability of embankment effectively.

Key words: plastic tube cast-in-place concrete pile; small-diameter rigid pile; pile-supported embankment; load-sharing ratio; differential settlement; lateral displacement

0 引言

桩承式路堤作为一种软基处理方式,以其造价低、施工工期短、对相邻建筑影响小而广泛应用在高速公路、堤坝、机场等工程中^[1]。

针对大直径刚性桩桩承式路堤工作性状国内外学者研究较多^[2-18],并总结了工程中桩承式路堤设计步

骤^[19-20]。上述研究表明,桩承式路堤充分利用路堤填土的土拱效应和加筋材料的拉膜效应以使桩、土、水平加筋体在路堤填土荷载下协同作用。刚性桩桩身刚度、桩间距、桩间土刚度、路堤填土高度、水平加筋

材料类型、加筋方式等多方面因素都会影响桩承式路堤的工作性状。Wachman 等^[9]对桩承式路堤从结构特性上进行了分析, 认为在荷载传递平台下与桩间土之间存在着无应力区, 路堤中土拱效应的形成主要是由于桩体与桩间土体刚度间巨大差异造成的。曹卫平等^[10]通过模型试验研究了路堤高度、桩净距和水平加筋体抗拉强度对应力集中比和路堤沉降的影响。费康等^[12]根据室内三维模型试验研究了无加筋和采用不同加筋材料、加筋层数下桩承式路堤桩土应力比、应力折减系数、填土中竖向应力分布、地基沉降等内容。Han 等^[13]采用数值模拟研究了路堤填筑高度、水平加筋体抗拉强度和桩体弹性模量 3 个因素对桩 - 土 - 水平加筋体间相互作用的影响。Poulos^[19]提出了桩承式路堤的设计步骤, 其设计可概括为: ①控制地表沉降的设计措施; ②合理的布桩形式控制过渡段的差异沉降; ③桩体的处理宽度应超出路基边缘 3 倍桩间距以上以避免过大的横向位移; ④路基垫层应远超出最后一排桩体 3 倍桩间距以上。

近年来, 以塑料套管混凝土桩^[21]为代表小直径刚性桩以其单桩承载力高(与柔性桩相比)、地基处理效果更加显著(与排水固结法相比)、施工速度快(与堆载预压及真空预压相比)、经济性(与传统预制管桩相比)等特点在公路软基加固中得到广泛应用, 然而, 关于小直径刚性桩桩承式路堤的工作机理尚未展开系统研究。因此, 本文结合某一高速公路工程实例, 根据现场试验数据, 分析了塑料套管桩桩承式路堤的工作机理, 讨论了路堤填筑高度对桩土应力比、桩土差异沉降、地基土层孔隙水压力变化和横向位移影响, 为小直径刚性桩桩承式路堤的设计提供一定参考。

1 工程概况

某一高速公路工程位于浙江省北部, 并延伸至上海市浦东机场, 全长 80 余公里, 路堤填筑高度 1.2~4.5 m, 塑料套管混凝土桩加固软基路段里程桩号 K3+259~K32+847, 应用概况如表 1 所示。该路段桩身直径 160 mm, 桩尖直径 0.3 m, 具体施工方法见文表 2 K32+840 断面土层基本性质

献[21]。为研究这种小直径刚性桩加筋路堤中工作机理, 选择在 K32+822~K32+847 段落进行了现场试验, 该段路堤填筑信息如图 1 所示。

表 1 塑料套管桩应用概况

Table 1 Application situation of PTCC

起讫桩号	桩长/m	桩间距/m	路堤高度/m
K3+259~K3+289	18	1.35	3.5~4.2
K3+289~K3+314	16	1.70	3.1~3.8
K6+406~K6+440	16	1.35	3.0~3.7
K6+440~K6+465	15	1.70	2.3~3.2
K6+510~K6+520	15	1.70	2.7~3.3
K6+520~K6+560	15	1.35	3.0~3.8
K6+560~K6+570	15	1.70	2.7~3.3
K7+404~K7+414	15	1.70	2.4~3.0
K7+414~K7+454	15	1.35	2.8~3.4
K7+454~K7+464	15	1.70	2.6~3.0
K32+790~K32+822	19	1.70	3.7~4.0
K32+822~K32+847	19	1.35	3.8~4.3

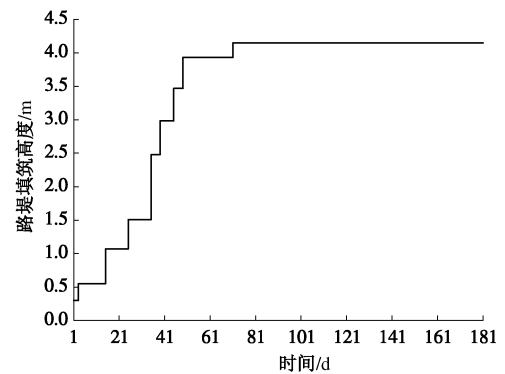


图 1 路堤填筑高度随时间的变化

Fig. 1 Variation of embankment height with time

试验段主要地层分述如下: ①0~1.2 m: 黏土, 灰褐色, 灰色, 软塑—可塑, 饱和, 含少量铁锰质斑。②1.2~11.5 m: 淤泥质黏土, 灰色, 流塑, 饱和, 含少量有机质及云母碎屑。③11.5~18.5 m: 粉砂夹黏土, 灰色, 湿, 稍密状, 具层理, 以粉砂为主。④18.5~32.5 m: 黏土, 黄褐色, 可塑, 局部硬可塑, 饱和。试验段地基土体多为正常固结或轻微超固结土, 其超固结比 OCR 介于 1.0~1.6 之间, 地下水位约在 1.6~3.8 m 深度处。试验段地层物理力学性质如表 2 所示。

Table 2 Soil properties of K32+840 section

土层编号	层名	含水率 w/%	密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比 e ₀	塑性指数 I _p /%	压缩模量 E _{50.1-0.2} /MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
①	黏土	33.0	1.83	0.949	16.1	3.48	8	5.7
②	淤泥质黏土	45.3	1.76	1.250	20.6	2.35	5	2.3
③	粉砂夹黏土	24.3	1.91	0.867	—	7.81	9	30.0
④	黏土	31.6	1.87	0.875	20.0	5.04	50	8.8

2 现场试验及结果分析

2.1 试验方法

在试验段内选取现场试验观测断面，里程桩号 K32+840，该断面距离距桥头约 7 m 左右，路堤高度为 4.148 m，路面宽度为 28 m，两侧边坡斜率为 1:1.5，路堤填筑材料主要是碎石和黏土的混合物，其重度约为 20 kN/m³。该断面塑料套管混凝土桩打设长度为 19 m，打设至黏土层，方形布设，桩间距为 1.35 m，桩帽为方形，边长为 0.5 m，桩净距为 0.85 m。在该断面分别进行了桩承式路堤桩土荷载分担、桩土总体和差异沉降、不同深度下孔压的变化和路堤荷载引起的横向位移观测。

图 2 为观测断面仪器布置断面图，图 3 为桩体及周围仪器埋设平面布置图。如图 2, 3 所示：①在路堤中心附近的桩 A 处，埋设了 6 个土压力盒，编号为 E1-E6，E1, E3 和 E5 放置在桩帽上，E2, E4 和 E6 放置在桩间土中，测试桩土荷载分担。②在路堤中心和路肩附近埋设了 4 个沉降，编号为 S1~S4，S2 放置在桩 A 的桩帽上，S1 在桩 A 附近的桩间土表面上，S4 和 S3 分别设置在路肩附近的桩帽和桩间土上，进行地表沉降和差异沉降观测。③在桩 A 左侧埋设 6 个孔压计，孔位呈正六角形状，对应的外接圆的半径为 0.425 m，编号为 P1~P6，打设深度分别为 2, 6, 12, 18, 24 和 30 m，以研究路堤填筑时土体中孔压消散规律。④在距离堤趾 1.8 m 处埋设了测斜管，地面以下的长度为 24 m，每隔 0.5 m 深测试一下该深度处的横向位移，进行土体水平位移监测。

在桩帽浇注完成后，进行了上述仪器的埋设工作，在路堤填筑前对各仪器进行了检测，无破损的情况。监测工作从路堤开始填筑的 2007 年 10 月 26 日起，共持续了 6 个月。

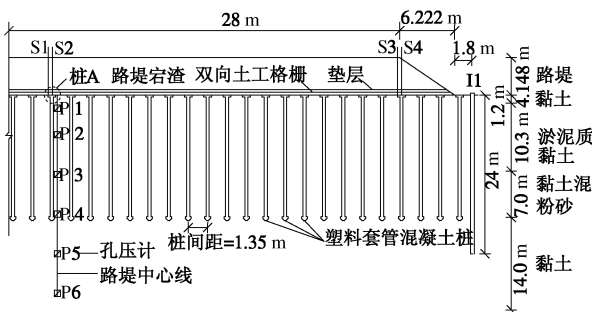


图 2 K32+840 试验断面仪器布置断面图

Fig. 2 Sectional drawing for layout of K28+840 test profile

2.2 试验结果及分析

(1) 桩帽和桩间土压力分析

图 4 为桩 A 附近的桩帽和桩间土上 6 个土压力盒

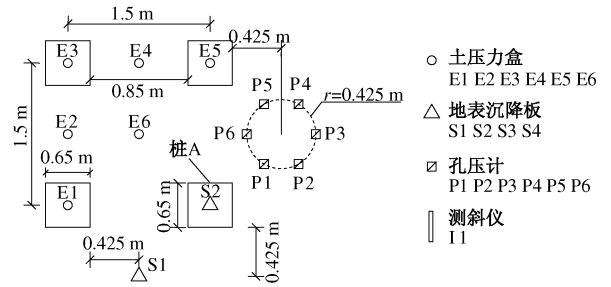


图 3 K32+840 试验断面仪器布置平面图

Fig. 3 Plane drawing for layout of K28+840 test profile

的测试值。路堤填筑至 0.55 m 时，桩帽应力和桩间土应力随路堤荷载同步增长，压力值相近；当填筑至 1.070 m 时（约为桩净距的 1.26 倍），桩间土应力开始小于路堤荷载，桩帽应力开始大于路堤荷载；在路堤高度填筑值 1.070 m 后，与路堤荷载相比，桩帽应力大幅增加，在路堤荷载为 21.40, 30.16, 49.56, 59.66, 69.34, 78.66 和 82.96 kN 时，桩帽应力的增加率分别为 182.66%, 262.24%, 322.56%, 331.34%, 346.81%, 361.69%和 364.05%。在观测期前 41 d，桩间土应力随路堤荷载先增加后减小，峰值在发生在 17~25 d 之间，之后减小，41 d 之后保持稳定状态，这与 Chen 等^[11]在桩承式路堤的现场试验中发现的规律具有一致性。

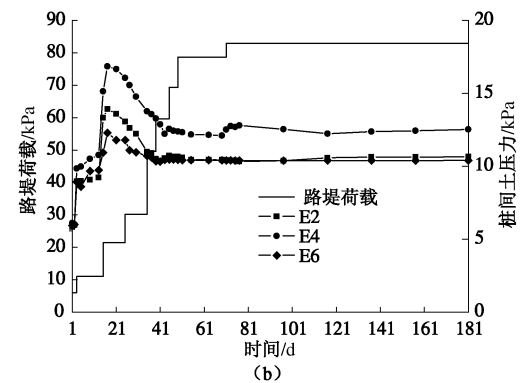
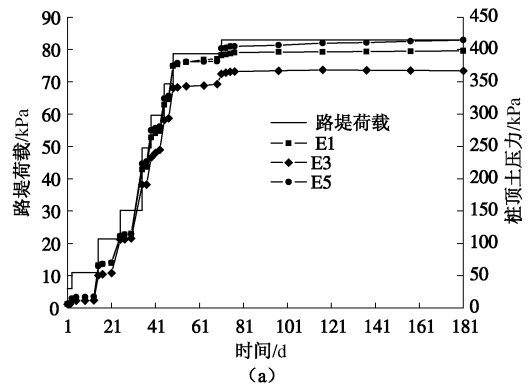


图 4 路堤路肩和中心线处土压力随时间和路堤荷载的变化
Fig. 4 Variation of earth pressures of shoulder and embankment centerline with time and embankment load

由此可以看出，当路堤高度大于 1.070 m 后，桩

间土体的承受荷载逐步向桩体传递, 导致了桩体承担了大部分路堤荷载, 这表明路堤内部已存在 Terzaghi^[22]所述的土拱效应。根据文献[1], 桩体荷载分担率可由下式计算:

$$n = \frac{P_p \cdot A_c}{\gamma_1 \cdot H \cdot S_a^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中 P_p 为桩帽上的土压力; A_c 为桩帽面积; γ_1 为路堤填料的重度; H 为路堤填高; S_a 为桩间距。桩体荷载分担比介于 0 至 1 之间。根据 E2, E4 和 E6 三个土压力盒测试的平均值计算得到了如图 5 所示的桩体荷载分担比随路堤荷载的变化规律, 路堤填筑监测末期荷载分担率达到 89%。

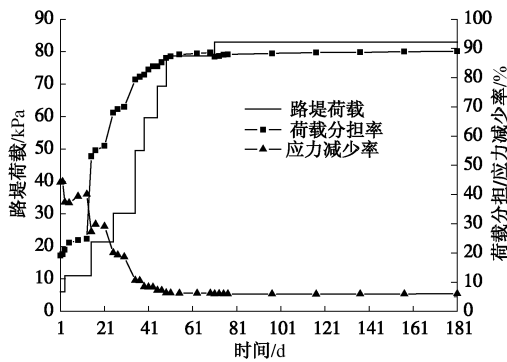


图 5 荷载分担率和应力减小率随路堤荷载的变化

Fig. 5 Variation of load-sharing ratio and stress reduction ratio with embankment load

另外, 当路堤高度大于一定高度后, 路堤荷载开始由土体传递至桩体, 这一高度称为临界高度^[1]。从本试验的土压力数据中可以发现, 当路堤高度为 1.070 m 时 (1.26 倍桩净距), 荷载传递已经发生, 与 Rogbech 等^[23]建议的 1.20 倍净距相接近。

Low 等^[16]定义了应力减小比 S_{3d} , Han 等^[13]提出了应力集中比 r , 用以量化土拱效应的程度, S_{3d} 和 r 的计算公式分别如下:

$$S_{3d} = \frac{P_s}{\gamma_1 H} \times 100\% \quad (2)$$

$$r = \frac{P_p}{P_s} \quad (3)$$

式中, P_s 为桩间土应力, S_{3d} 介于 0 到 1 之间, 其值越大表明桩间土承担的荷载越大, 土拱效应弱, 当 $r=1$ 时, 表明无土拱效应, r 越大, 土拱效应越明显。

根据 E1、E3 和 E5 三个土压力盒测试的平均值得到了如图 5 所示的应力减小比随路堤荷载的变化规律, 监测末期所得应力减小比为 0.06。

理论上, 路堤荷载与桩体承担荷载、桩间土承担荷载有如下关系式:

$$\gamma_1 \cdot H \cdot S_a^2 = P_p \cdot A_c + P_s \cdot A_s \quad (4)$$

$$S_a^2 = A_c + A_s \quad (5)$$

式中, A_c 为桩帽面积, A_s 为桩间土面积。

联立式 (1)、(2)、(4) 和 (5), 可得荷载分担率 n 与应力减小比 S_{3d} 的关系式为

$$n + S_{3d} \cdot A_{sr} = 1 \quad (6)$$

其中, $A_{sr} = A_s / S_a^2$ 。

图 6 为 $n+0.812S_{3d}$ 与路堤荷载的变化图, 其中 0.812 是本试验中 A_{sr} 取值。可以看出, $n+0.812S_{3d}$ 并不总是等于 1, 当路堤荷载较小时, $n+0.812S_{3d}$ 值在 0.55 左右, 只有当路堤高度大于 2.983 m (约 3.5 倍桩净距) 时, $n+0.812S_{3d}$ 值达到 0.9 以上, 证明本试验所得的桩帽和桩间土应力值是较准确的。图 7 为应力集中比和桩土差异沉降随路堤填筑时间的变化图。Chen 等^[11]认为桩土的沉降差是引起 r 增大的一个重要原因, 实测结果计算所得应力集中比 r 始终大于 1, 监测结束时, $r=35.13$ 。当路堤高度为 0.550 m 时, r 值在 1.48 左右, 这是由于在路堤高度较低时, 桩土间已存在了沉降差异, 路堤高度为 0.550 m 时, 沉降差在 3 mm 左右。

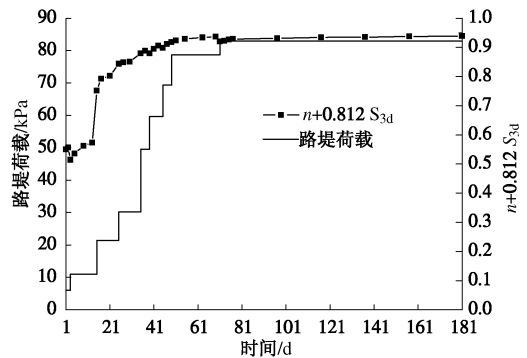


图 6 $n+0.812S_{3d}$ 随路堤荷载的变化

Fig. 6 Variation of $n+0.812S_{3d}$ with embankment load

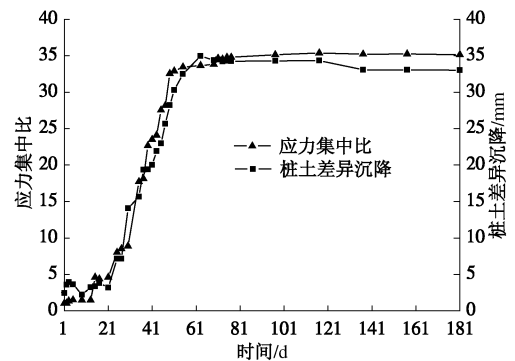


图 7 应力集中比和桩土差异沉降随时间的变化

Fig. 7 Relationship between stress concentration ratio and differential settlement

(2) 路堤中心线和路肩处地表沉降分析

图 8 显示了路中附近的桩间土沉降和桩帽沉降及其二者的差异沉降和路肩附近的桩间土沉降和桩帽沉降及其二者的差异沉降。随着路堤高度的增加, 沉降量逐渐增加, 在路堤施工期间, 完成了大多数的沉降, 施工后的次固结沉降量很小, 最大沉降量发生在路中处, 在监测结束时, S1、S2、S3、S4、S1-S2 和 S3-S4 的分别为 96.05, 63.04, 77.81, 46.18, 33.01 和 31.63 mm。差异沉降量大于 Chen 等^[1]所得的结果, 这主要由于地基土中含有 9.8~10.3 m 厚的淤泥质黏土有关。

从图 8 可以看出, 差异沉降随着路堤高度的增加而增加, 当路堤高度小于临界高度时, 差异沉降很小, 随着路堤高度的不断增加, 差异沉降在 20~60 d 内呈线性增加, 路堤填筑结束后, 差异沉降的增量很小, 路中和路肩附近从 60 d 至监测结束时的差异沉降的增量分别为 -1.94 mm 和 1.58 mm, 这是因为路中附近的应力集中比更大, 桩体承担了更大的荷载, 因此路中附近的差异沉降的增量出现了负值。

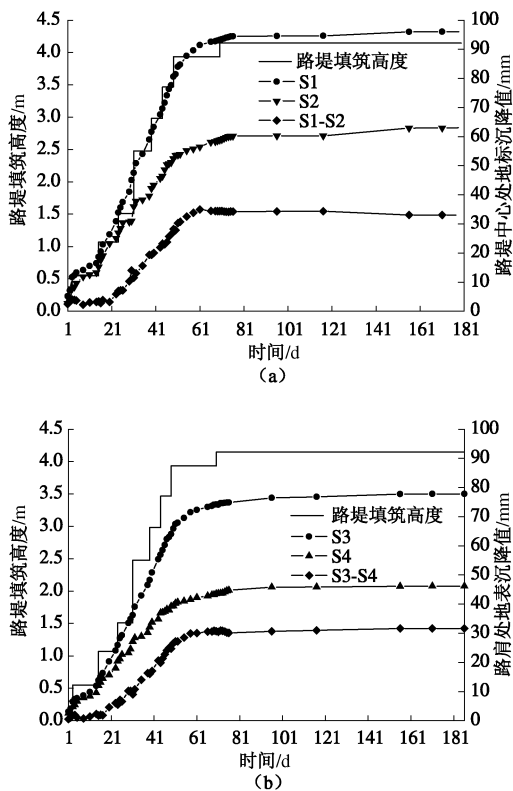


图 8 路堤中心线和路肩处地表沉降随时间的变化

Fig. 8 Variations of measured surface settlements of embankment centerline and shoulder with time

(3) 不同深度处孔压分析

图 9 为反映了在路中线 2, 6, 12, 18, 24 和 30 m 深度的孔压随路堤荷载的变化规律, 在路堤施工初期, 2, 6 和 12 m 处的孔压逐渐增大, 路堤高度达到 1.508 m 时, 孔压达到峰值, 分别为 30.8, 64.7 和 122.8 kPa, 孔压最大增量发生在 2 m 处, 为 12 kPa, 6 和 12 m 最

大增量分别为 8.4 和 7.5 kPa, 随后 3 处的孔压逐步减小, 50 d 后维持处在稳定状态。孔压的变化与桩间土的变化相一致, 这是由于存在土拱效应, 当路堤高度大于临界高度时, 桩体承担了大部分路堤荷载, 桩间土荷载存在向桩体转移的现象, 导致桩间土和下部的孔压存在先增大后减小的变化规律; 而 18, 24 和 30 m 孔压在整个监测期间无明显变化; 总体来讲, 在整个路堤的施工期间, 孔压的变化较小, 这与 Han 等^[13]通过数值模拟结果一致。

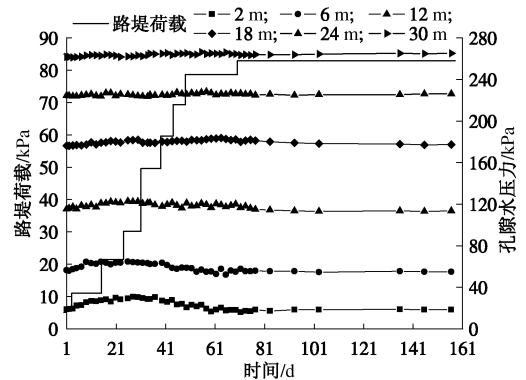


图 9 不同深度处孔隙水压力随路堤加载的变化

Fig. 9 Variation of pore water pressures at different depths with embankment load

(4) 堤趾处横向位移分析

图 10 显示了不同路堤高度下测斜管 I1 测得的不同深度下的横向位移。随着路堤的增高, 横向位移逐渐变大, 在路堤填筑过程中, 最大横向位移发生在地面深度以下 2~4 m 范围内, 大部分横向位移发生在路堤施工期间, 路堤施工结束时的最大横向位移为 12.86 mm, 发生在地面以下 2.5 m 处, 检测结束时的最大横向位移为 14.37 mm, 发生在地表。

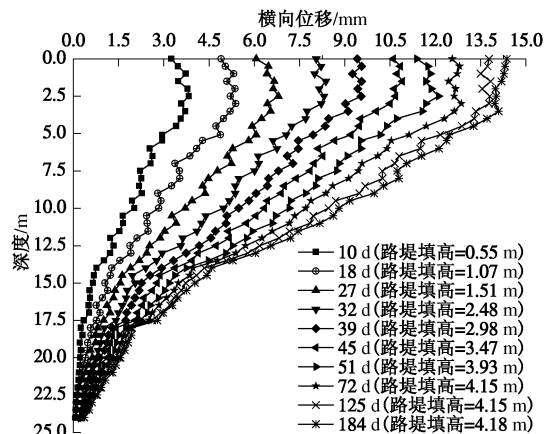


图 10 堤趾处横向位移随深度和路堤填高的变化

Fig. 10 Variation of lateral displacements of embankment toe with depth and embankment height

横向位移-沉降比是衡量路堤稳定性的一个重要指标^[7, 24-25], 同时 Yang 等^[24]通过现场试验指出, 在路堤失稳前的横向位移的差异很小, 当路堤高度达到破坏高度时, 横向位移会突然增大, 为此引入了横向位移增加率, 它是指相邻的两次横向位移相对增加的百分比, 图 11 为横向位移-沉降比和横向位移增加率的变化曲线, 随着时间的增长, 横向位移-沉降比和横向位移增加率逐步减小, 当达到最大路堤高度后保持持稳定, 表明塑料套管混凝土桩桩承式路堤能够有效防止横向位移的发展, 改善路堤的整体稳定性。

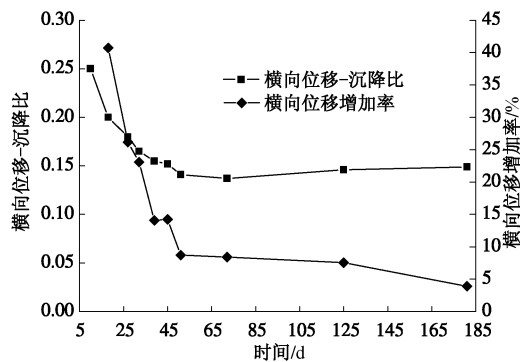


图 11 横向位移-沉降比和横向位移增加率随时间的变化

Fig. 11 Variation of lateral displacement-settlement ratio and increment ratio of lateral displacement with time

3 结 论

根据某一高速公路塑料套管混凝土桩加固公路软土地基工程实例, 对桩体及桩间土应力、地表沉降、水平位移、不同深度孔隙水压力进行观测, 讨论了塑料套管混凝土桩桩承式路堤的工作机理。得出以下 4 点结论:

(1) 当路堤高度为 1.26 倍桩净距时, 监测数据表明塑料套管混凝土桩路堤填土的土拱效应已经形成, 路堤填筑完毕后, 荷载分担比在 85%~89%之间。根据实测数据建立了荷载分担比与应力减小比的关系式: $n+0.812S_{3d}=1$, 结果表明, $n+0.812S_{3d}$ 并不总是等于 1, 当路堤荷载较小时, $n+0.812S_{3d}$ 值在 0.55 左右, 只有当路堤高度大于 2.983 m (约 3.5 倍桩净距) 时, $n+0.812S_{3d}$ 值达到 0.9 以上。

(2) 桩帽和桩间土的总沉降和差异沉降主要发生在路堤施工期, 最大差异沉降为 30 mm 左右, 应力集中比随着差异沉降的增大而线性增大。

(3) 路堤荷载引起孔压的变化主要发上在路堤的施工期内, 随着深度的增加变化逐渐减小且消散较快, 在监测末期, 孔压几乎消散完毕。

(4) 横向位移随着路堤填筑高度的增加而增加, 且主要发生在路堤施工期内, 路堤施工结束时的最大

横向位移为 12.86 mm, 发生在地面以下 2.5 m 处, 检测结束时的最大横向位移为 14.37 mm, 发生在地表; 横向位移-沉降比和横向位移增加率随着路堤填筑高度的增加逐步减小并趋于稳定, 表明塑料套管混凝土桩桩承式路堤能够有效防止横向位移的发展, 改善路堤的整体稳定性。

参考文献:

- [1] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, LING D S, ZHU B. Field tests on pile-supported embankments over soft ground[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2010, **136**(6): 777 - 785.
- [2] 陈小庭, 夏元友, 芮 瑞, 等. 管桩加固软土路堤桩土应力比现场试验[J]. *中国公路学报*, 2006, **19**(3): 12 - 18. (CHEN Xiao-ting, XIA Yuan-you, RUI Rui, et al. Field experiment on pile-soil stress of soft subgrade reinforced by pre-stress concrete piles [J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2006, **19**(3): 12 - 18. (in Chinese))
- [3] 夏唐代, 王 梅, 寿 旋, 等. 筒桩桩承式路堤现场试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(9): 1929 - 1936. (XIA Tang-dai, WANG Mei, SHOU Xuan, et al. 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))
- [4] 刘汉龙, 王新泉, 陈永辉, 等. Y 型沉管灌注桩加固路堤力学性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(2): 297 - 304. (LIU Han-long, WANG Xin-quan, CHEN Yong-hui, et al. Field experimental study of mechanical performance of Y-shaped vibro-pile reinforced embankments [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(2): 297 - 304. (in Chinese))
- [5] 叶俊能, 朱向荣, 谢庆道. 沉管灌注筒桩在处理高速公路桥头软基的应用[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(1): 100 - 104. (YE Jun-neng, ZHU Xiang-rong, XIE Qing-dao. Application of the driven cast-in-place tubular piles to treating soft foundation of bridge head of express highway[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(1): 100 - 104. (in Chinese))
- [6] 詹金林, 梁永辉, 水伟厚. 大直径刚性桩桩网复合地基在储罐基础中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 1): 122 - 124. (ZHAN Jin-lin, LIANG Yong-hui, SHUI Wei-hou. Application of large-diameter rigid pile-net composite foundation in tank base[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S1): 122 - 124. (in Chinese))
- [7] LIU H L, CHARLES W W NG, FEI K. Performance of a

- geo-grid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(12): 1483 - 1493.
- [8] 曹卫平, 赵敏. 刚性桩加固高速公路软基性状分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(增刊 2): 217 - 223. (CAO Wei-ping, ZHAO Min. Behaviors of rigid piles for reinforcing highway embankments in soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(S2): 217 - 223. (in Chinese))
- [9] WACHMAN G S, BIOLZI L, LABUZ J F. Structural behavior of a pile-supported embankment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, **136**(1): 26 - 34.
- [10] 曹卫平, 陈仁朋, 陈云敏. 桩承式路堤土拱效应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(3): 436 - 441. (CAO Wei-ping, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min. Experimental investigation on soil arching in piled reinforced embankments[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(3): 436 - 441. (in Chinese))
- [11] CHEN Yun-min, CAO Wei-ping, CHEN Ren-peng. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, **26**(2): 164 - 174.
- [12] 费康, 陈毅, 王军军. 加筋形式对桩承式路堤工作性状影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(12): 2312 - 2317. (FEI Kang, CHEN Yi, WANG Jun-jun. Experimental study on influence of reinforcing modes on behavior piled embankment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(12): 2312 - 2317. (in Chinese))
- [13] HAN J, GABR M A. Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported earth platforms over soft soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, **128**(1): 44 - 53.
- [14] 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.
- [15] 芮瑞, 夏元友. 桩-网复合地基与桩承式路堤的对比数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(5): 769 - 772. (RUI Rui, XIA Yuan-you. Numerical simulation and comparison of pile-net composite foundation with pile-supported embankment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(5): 769 - 772. (in Chinese))
- [16] LOW K Q, WONG I H. Arching in piled embankments[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, **120**(11): 1917 - 1937.
- [17] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of pile embankments[J]. *Ground Engineering*, 1988, **21**: 12 - 18.
- [18] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A theoretical solution for pile-supported embankments on soft soils under one-dimensional compression [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, **45**(5): 611 - 623.
- [19] POULOS H G. Design charts for piles supporting embankments on soft clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(5): 493 - 501.
- [20] 徐立新. 桩承式路堤的设计计算方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (XU Li-xin. Study on design and computation method of geosynthetic reinforced pile-supported embankments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [21] 陈永辉, 齐昌广, 王新泉, 等. 塑料套管混凝土桩单桩承载特性研究[J]. *中国公路学报*, 2012, **25**(3): 51 - 59. (CHEN Yong-hui, QI Chang-guang, WANG Xin-quan, et al. Research on bearing performance of plastic tube cast-in-place single pile[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, **25**(3): 51 - 59. (in Chinese))
- [22] TERZAGHI K. *Theoretical soil mechanics*[M]. New York: Wiley, 1943.
- [23] Y VONNE ROGBECH, CHAES ALEN, GUNILLA FRANZEN, et al. Nordic guidelines for reinforced soils and fills[M]. Nordic Geosynthetic Group of the Nordic Geotechnical Societies: Nordic Industrial Fund, 2003.
- [24] YANG C W, CHAI J C, MIURA N, et al. Effect of base reinforcement on the behavior of embankment over soft subsoil [J]. *Lowland Technology International*, 1999, **1**(2): 15 - 26.
- [25] INDRARATNA B, BALASUBRAMANIAM A S, SIVANE-SWARAN N. Analysis of settlement and lateral deformation of soft clay foundation beneath two full-scale embankments[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1997, **21**(9): 599 - 618.