

深厚软土区桩梁式路堤承载及变形特性现场试验研究

黄奕彬¹, 陶红文², 费发樱², 王嘉文², 邓涛³

(1. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350003; 2. 中国水利水电第四工程局有限公司, 青海 西宁 810007;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为探究深厚软土区桩梁式路堤的荷载传递机制及深层地基变形规律, 对桩梁式路堤的桩梁顶和桩间土压力、分层沉降、地基侧向变形和连梁钢筋应力进行长期监测研究。结果表明: 路面下桩梁顶平面处实测土压力明显大于路堤中坡下实测土压力; 地基深层水平位移随深度增加且呈“鱼腹”形变化, 最大侧向变形主要集中在路堤中坡下近临坡脚区域。地基分层沉降随深度迅速衰减, 并于地表下6 m后逐渐趋于平稳, 分层沉降的稳定具有“滞后性”。连梁发生上侧受压、下侧受拉的挠曲变形, 有利于桩梁式路堤整体受力。最后, 将现场实测结果、现有理论和规范方法计算所得结果进行对比, 表明桩梁式路堤的土拱效应比桩承式路堤更明显。

关键词: 桩梁式路堤; 现场试验; 承载特性; 变形控制; 软土地基

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0160-08

Field Tests Investigation of Bearing and Deformation Behaviors on Piled-beam Supported Embankments over Deep Soft Soil Area

HUANG Yibin¹, TAO Hongwen², FEI Faying², WANG Jiawen², DENG Tao³

(1. Power China Huadong Engineering (Fujian) Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350003, China;

2. Power China Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining, Qinghai 810007, China;

3. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to explore the load transfer mechanism and deep foundation deformation patterns of pile-beam-supported embankments in areas with deep soft soil, the long-term measurements included earth pressure on pile-beam top and between piles, layered settlement, deep lateral displacements, and stress of ground beams were conducted. The monitoring results elucidated that the measured soil pressure at the pile-beam head plane below the road surface is significantly greater than the measured soil pressure below the embankment slope. The lateral deformation of the deep foundation changes in a "fish belly" shape with the increase in depths, and the maximum lateral deformation is mainly concentrated at areas of middle-slope closer to the toe of the embankment. The layered settlement of the foundation rapidly diminishes with increasing depths, gradually stabilizes after reaching depths of 6 meters underground, and the stability of layered settlement exhibits obvious "lag". The ground beams undergo flexural deflection and exhibit the behavior of upper bars in compression and lower bars in tension, which is conducive to load transfer to the piles. Finally, by comparing the field measurement results with the calculated results of the existing theoretical methods and normative methods, it indicates that the soil arching effect of the pile-beam-supported embankment is more obvious than that of the pile-supported embankment.

Keywords: pile-beam-supported embankment; field test; bearing behaviors; deformation control; soft soil foundation

在我国东南沿海地区,深厚软土广泛分布。建造路堤需要克服路堤失稳、过度差异沉降和施工工期等不良工程特性问题^[1-4]。刚性桩复合地基因其整体性好、差异沉降小及稳定性强等优点,在深厚软土区被广泛应用。

刚性桩复合地基主要由桩(帽)和地基土组成。刚性桩型众多,如水泥搅拌桩及管桩等。其中,预应力高强混凝土(PHC)管桩具有抗剪强度高、刚度大和有效控制沉降等优势,成为软土地基加固的常用方式。此外,桩顶设置的桩帽和土工格栅能进一步提高地基的稳定性。由于深厚软土的承载特性较差,带帽桩复合地基仍难以解决地基土侧向变形大和水平承载力不足等问题。在实际工程中,为提高路堤的稳定性,常在桩顶布置连梁。桩梁式路堤具有整体稳定性强等优点,在工程中得到广泛应用。然而,现有研究很少探究桩梁式路堤的整体稳定性及变形特性。

目前,桩梁式路堤承载及变形特性研究主要包括理论研究和数值研究。桩梁式路堤的承载特性主要由土拱效应中的极限平衡模型分析,极限平衡模型主要研究桩承式路堤的荷载传递机理,现已被应用于桩梁式路堤的承载特性研究。刘吉福等^[5]基于极限平衡模型推导出桩梁式黏性路堤桩土应力比计算式,该式不能揭示低填方路堤的荷载传递规律。为分析低填方路堤的荷载传递特性,Nguyen等^[6]改进Van Eekelen同心球拱(CA)模型^[7],建立了桩梁式路堤三维同心半球土拱模型,推导出荷载传递效率的解析表达式。通过数值模拟研究,可更深入地探究桩梁式路堤的承载机理。Ma等^[8]利用有限差分软件建立桩梁式路堤数值模型,研究连梁与刚性桩协同作用机理,发现桩梁式路堤的土拱效应比桩承式路堤更明显。

现场试验可以更真实地分析桩梁式路堤的承载及变形机理,但其试验研究却较少。刚性桩复合地基的现场试验主要研究桩承式路堤的特性,现场试验的监测内容主要包括土压力、沉降、侧向变形等。吴建涛等^[9]对PHC管桩加固软土地基高填方路堤开展现场原位试验,探究了PHC管桩加固高填方路堤的受力及变形特性。夏唐代等^[10]对筒桩桩承式加筋路堤开展现场试验,探究了筒桩复合地基的荷载传递机理及其变形性状,发现土拱效应的发挥程度与桩土差异沉降有关。郑俊杰等^[11]在路桥过渡段开展桩承式加筋路堤现场试验,分别监测了桩承式加筋路堤中心轴和路肩位置处桩顶和桩间土压力

变化时程曲线,研究了桩承式加筋路堤格栅上、下表面土压力变化规律以及桩土应力比变化规律。以上现场试验主要集中于桩承式路堤的分层沉降及水平变形研究,其变形规律有待深入挖掘。

为探究深厚软土区桩梁式路堤的承载力及变形特性,本文依托福建省霞浦县福宁湾滨海新城基础路网建设项目,选取断面开展现场试验研究。通过对桩梁式路堤中心及边坡处的土压力、分层沉降、水平变形及连梁钢筋应力进行长期监测,深入剖析桩梁式路堤的整体稳定性及荷载传递机理,以期为深厚软土区桩梁式路堤的工程实践提供数据支撑。

1 工程概况

1.1 工程周边环境及工程地质概况

现场试验以福建省霞浦县福宁湾滨海新城基础路网建设项目为依托,工程场地位于福建省霞浦县福宁湾滨海新城临湖低洼滩涂区域。该区域周边主要分布旱地、水塘、鱼塘、养殖区等。道路以南规划小沙溪河及天后湖,工程范围包括湖滨北路、沙洲路、洲洋路、世纪大道、塔山路、滨河路、上沙东路、空海大道等8条新建城市道路。其中,湖滨北路西起赤岸大道,东至滨海路,起点桩号HBK0,终点桩号HBK2+999.4161,道路长度3 000 m,临河侧坡度1:3,设计时速20 km/h。沿线路基下分布着深厚淤泥软土层,最大厚度约为36.5 m,呈饱和、流塑状。

工程场地位于滨海海岸沉积区,该区域分布深厚的淤泥软土(可达30 m~40 m)。试验段设在湖滨北路K1+869处,试验场地软土广泛分布,根据现场钻探结果,软土层主要为人工填积层(Q_4^m)和第四系全新海陆交互沉积层(Q_4^{mc})。场地土层自上而下主要分布为:素填土、淤泥、淤泥质土、卵石及粉质黏土。主要土层的物理力学参数如表1所示。

路基高度为5.4 m,路面宽度为40 m。路堤填料由级配良好的粗粒土组成,平均重度为20 kN/m³,内摩擦角为35°。试验断面位于路桥过渡段,该断面采用高强混凝土(PHC)预应力管桩加固地基。桩顶设置连梁,桩径0.4 m,正方形布置,桩间距2 m,桩长39.5 m。路堤填土高度达5.4 m,路堤顶面宽40 m。桩顶浇筑桩帽和连梁,桩帽宽度0.4 m,桩帽通过钢筋混凝土方形连梁连接,如图1(b)所示。钢筋直径为20 mm。连梁采用C30混凝土现浇,其标准抗压强度为30 N/mm²,符合HRB400E规范。连梁顶面铺设0.5 m厚的碎石加筋垫层。由于试验断面满足轴对称条件,因此考虑半幅路堤进行分析,选取典型断面开展现场试验,如图1所示。

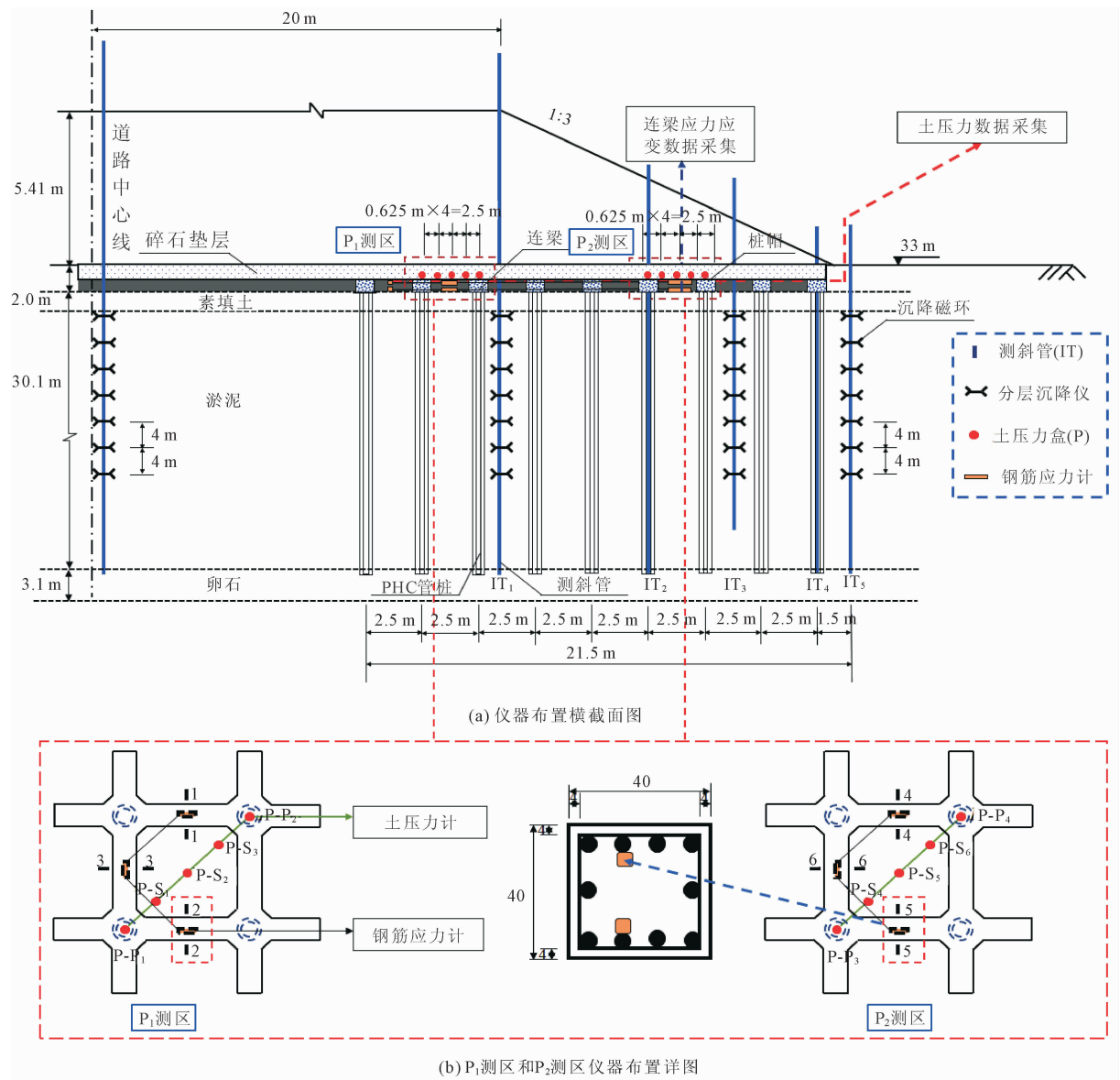


图 1 桩梁式路堤断面及监测仪器布置示意图

表 1 试验断面土层物理力学参数

层序号	土层	主要物理指标				主要力学指标			
		含水率 $w/\%$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩系数 a_v/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗剪强度 c/kPa
② ₁	素填土	39.4	2.00	0.870	0.32	0.33	6.72	35.00	0.00
② ₁	淤泥	55.8	1.55	1.554	1.42	1.28	2.03	6.14	9.72
② ₅	卵石	—	2.10	—	—	—	—	36.00	55.00
② ₅₋₁	淤泥质土	43.3	1.70	1.156	1.13	0.74	2.91	5.58	14.75
② ₆	粉质黏土	33.0	1.88	0.911	0.56	0.40	4.82	12.53	24.62

1.2 测试仪器安装与布置

为研究方形布桩下 PHC 管桩连梁加固软土地基路堤的承载及变形特性,根据桩梁式路堤断面对称性,考虑半幅路堤开展监测仪器的布置。试验断

面各仪器布置情况如图 1 所示。试验断面监测仪器布设如下:(1) 振弦式土压力盒,分别在试验断面路肩左侧(P₁ 测区)和中坡下(P₂ 测区)沿对角线布置五个土压力盒,对桩顶土压力、桩间土压力进行长期

监测。四个土压力盒(P-P₁—P-P₄)安装在桩梁上,六个土压力盒(P-S₁—P-S₆)沿对角线布置在桩间土上。(2)测斜管(IT₁—IT₅),为进一步明确路堤边坡下地基侧向变形机制,在试验断面的路肩、中坡及坡脚位置下放测斜管,以监测深层地基的侧向变形。此外,IT₂和IT₄分别埋设在路堤右侧距路基中线26 m、34 m处的内,以监测管桩的侧向变形。管桩内壁与测斜管之间的空隙采用细沙回填充实。(3)沉降磁环,为监测深层地基不同深度处的竖向沉降在道路中心处布置装有沉降磁环的测斜管,其余沉降磁环安装IT₁、IT₃、IT₅测斜管上,从地下2 m左右,每根测斜管间隔2 m布设一个沉降磁环,每根分层沉降管共装有七个沉降磁环。(4)钢筋应力计(I₁—I₆、u₁—u₆),为研究连梁的受力响应,沿着路堤横断面分别在路肩左侧(P₁测区)和中坡下(P₂测区)安置钢筋应力计,I₁—I₆钢筋应力计安装在连梁下侧,u₁—u₆钢筋应力计安装在连梁上侧。监测仪器的规格和型号和布置位置如表2所示。

所有监测仪器在路堤填筑前布设完成,从路堤填筑开始同步监测,现场监测历时233 d。

表 2 现场监测断面的传感器规格和型号				
序号	监测项目	传感器类型	测点位置	量程(精度)
1	基底压力	JM190-B 土压力计、JM1010 振弦式测试仪	路肩左侧、中坡下桩顶、桩间土	0.6 MPa (0.001 MPa)
2	连梁应力	JM193-22 钢筋应力计	路肩左侧、中坡下连梁钢筋	±200 MPa (0.1 MPa)
3	水平变形	CX-70 测斜管、CX-30A 测斜仪	路中心、路肩、中坡下、坡脚处	500 mm (0.01 mm)
4	分层沉降	沉降磁环、JM1310 钢尺沉降仪	路中心、路肩、中坡下、坡脚处	1000 mm (1 mm)

2 现场试验结果及分析

2.1 路堤底面实测土压力

图2为试验断面路肩左侧(P₁测区)、中坡下(P₂测区)土压力和填土高度随时间的变化曲线。可以看出,在填筑初期(阶段I),随着填土高度的增加,桩梁顶和桩间土土压力近似线性增加,且随着填土高度的增加而显著增大;桩梁顶土压力相较于桩间土压力增速更快。在路基间歇期(阶段II),桩顶和桩间土土压力随填土高度的增大而缓慢增加并最终基本趋于平稳。路基填筑完成后,作用在P₁测区桩梁上的土压力增加到0.146 kPa左右,而桩间土的最大压力接近0.052 kPa,其最大差值为0.094

kPa。总体而言,作用于桩梁顶土压力远大于桩间土压力,说明连梁极大地提高了桩梁式路堤填土荷载向桩的传递。比较桩间土压力的大小(P-S₁—P-S₃)。可以发现,桩间土压力近似呈倒三角形分布。

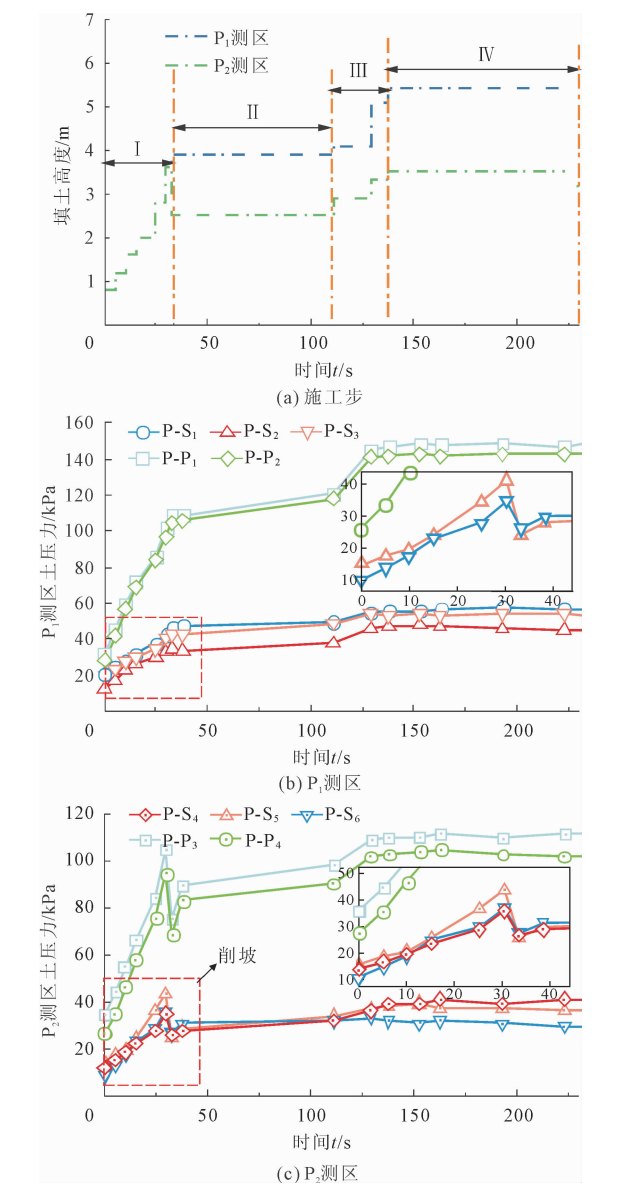


图 2 路堤底面实测土压力随时间的演变示意图

填筑完成时(阶段IV),P₁测区(P-P₁测点)和P₂测区(P-P₃测点)桩梁顶土压力最大值分别为0.146 kPa和0.108 kPa,桩间土压力最大值分别为0.052 kPa和0.041 kPa,表明P₁测区土拱效应发挥程度较P₂测区更明显。这是由于中坡下上覆土荷载较小且呈三角形分布。

2.2 深层地基水平位移

为监测不同填土高度下地基深层水平位移,分别于路肩、坡脚及中坡下布设5根测斜管(IT₁—

IT₅),如图 1 所示。其中 IT₂ 和 IT₄ 埋设于管桩内。深层地基不同深度实测水平位移与深度的关系如图 3 所示,由图 3 可以看出,地基深层水平位移随路堤填土高度呈显著的时间和空间效应:地基深层水平位移随填土高度的增加而增加;当填土高度较小时($H/(s-a)<1.25$),各深度的侧向变形增长速率较快,当填土高度较大时,地基深层水平位移增长速率明显减小。对比 IT₁—IT₅ 测点地基深层水平位移可以发现,IT₃ 测点侧向变形最大,最终收敛于 51.74 mm;而路肩下 (IT₁) 和坡脚处 (IT₅) 的侧向变形略

小,分别最终稳定于 42.88 mm 和 46.20 mm,最大侧向变形集中在地下 5 m~7 m 深度处。这是由于路基边坡下存在剪切滑动面,滑动面以上区域土体产生了显著的水平位移及推力。从深度上看,各测点水平位移随深度的增加呈增大后减小的趋势,总体呈“鱼腹”形分布,这说明连梁的约束效应能有效减小地表的水平位移。值得一提的是,坡脚处土体水平位移 (IT₅) 与管桩水平位移 (IT₄) 差异不明显,表明桩梁式路堤坡脚区域无明显的桩土“绕流”现象,边坡较稳定。

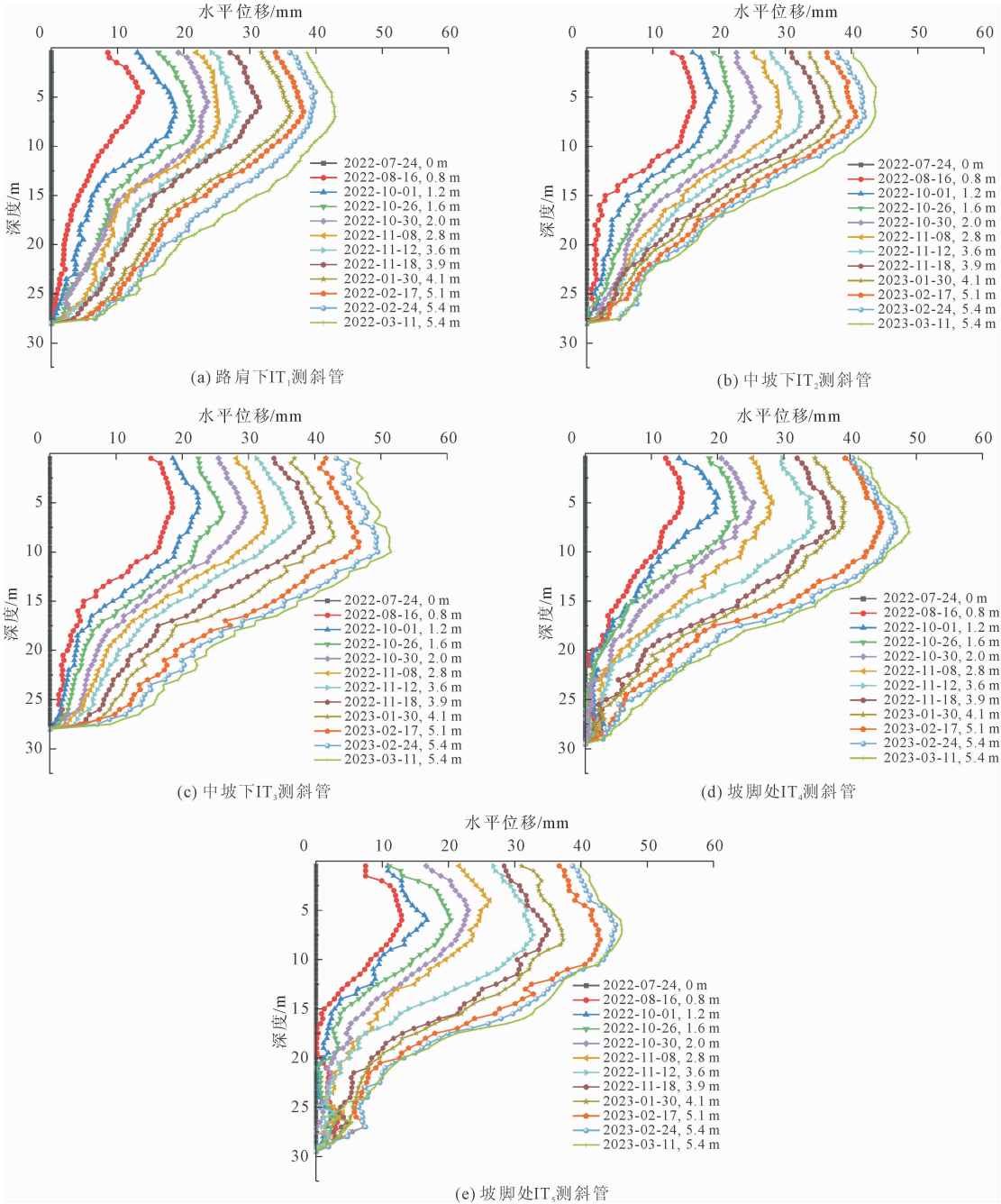


图 3 深层地基不同深度实测水平位移与深度的关系

2.3 深层地基分层沉降分析

为研究深层地基不同深度处的沉降特性,对试验断面路基中心、路肩、中坡下及坡脚位置地基的深层分层沉降进行长期监测。不同填土高度下深层地基各监测点分层沉降随时间演化如图 4 所示。

从图 4 可以看出,不同深度处的分层沉降随时间的变化趋势基本相近,在填筑初期(阶段 I),不同深度处的分层沉降随填土高度的增大而迅速增大。在路基间歇期时(阶段 II),分层沉降趋于稳定,随着时间发展地基土不断固结,沉降量略有增加。在第二次填筑时(阶段 III),分层沉降随填土高度的增大而缓慢增大,且增长速率小于填筑初期。

随着路基深度的增加,各测点分层沉降逐渐减小,最大分层沉降主要发生在地基浅层,地基土分层

沉降变化幅度较大区域主要为地表下 6 m 内。此外,当地基深度大于 10 m 左右时,沉降量缓慢减小并趋于稳定,深层沉降量约为浅层沉降的 70% 左右。表明:随着深度的增加,路堤荷载引起的附加应力沿深度迅速衰减,对地基深层区域沉降量影响较小。

通过对比图 4(a)、图 4(b)可以看出,沿着路基横断面从路基中心线至坡脚方向,最大沉降逐渐减小。填筑完成时,最大沉降发生在路基中心处,最终稳定在 135 mm。最小沉降产生在坡脚处,最终收敛于 49 mm。观测结束时,实测最大沉降和最小沉降分别为 166 mm 和 59 mm,分别增加 12.9% 和 16.3%,这是由于土体固结作用引起的。

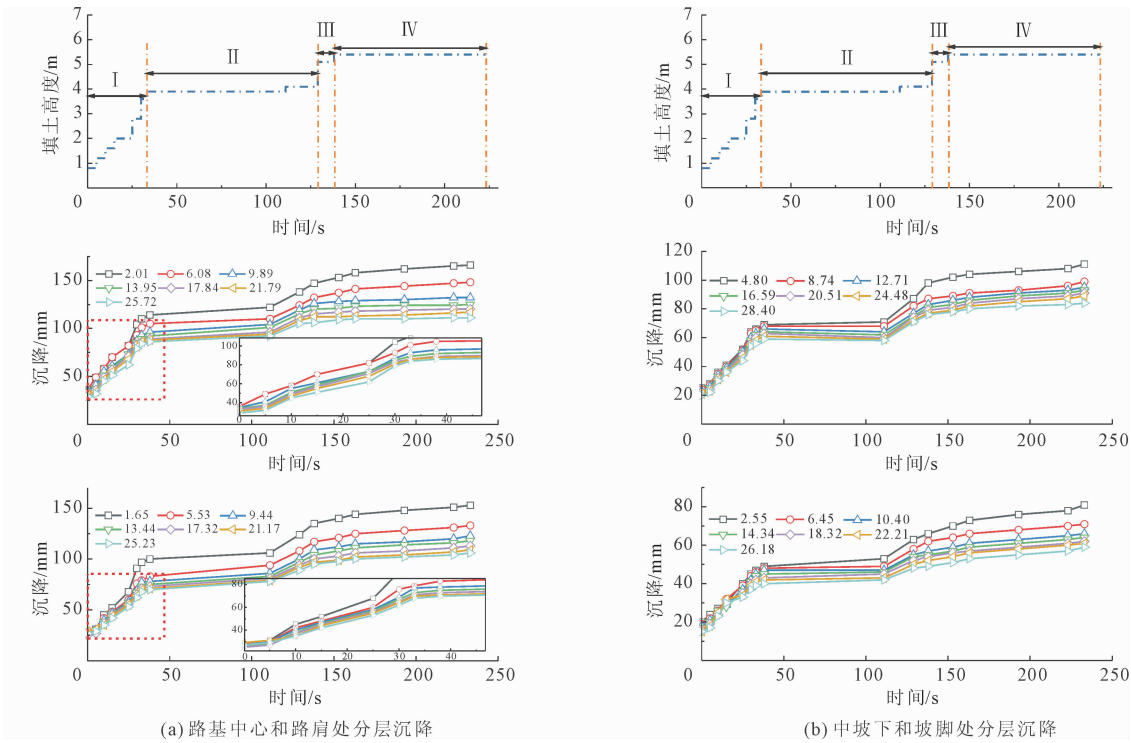


图 4 不同深度处桩间土分层沉降随时间演化示意图

2.4 整体稳定性分析

为评价桩梁式路堤整体稳定性,采用 Indraratna 等^[12]提出路堤整体稳定性系数实用计算公式:

$$\alpha = \frac{u}{w} \tag{1}$$

式中: $\alpha(\alpha_0)$ 为填土结束(监测结束)时的路堤整体稳定性系数,当 α 大于 0.5 时,可视为路堤接近破坏; $u(u_0)$ 为填土结束(监测结束)时坡脚附近地基的最大水平位移; $w(w_0)$ 为填土结束(监测结束)时为路基中心线下地基土的最大沉降。

为研究路堤横断面的整体稳定性,表 3 给出了不同测点(IT_2 — IT_5)填土结束(α)至监测结束(α_0)的整体稳定性系数变化规律。可以看出,从路肩往坡脚方向整体稳定性系数先增大后减小,其中, IT_3 测点的整体稳定性系数最大。这是由于路基边坡下存在剪切滑动带, IT_3 测点较其他测点水平位移更大,这表明路堤边坡的整体稳定性与水平位移密切相关。由表 3 还可以看出,路堤填筑完成后直至观测期结束,各测点整体稳定性系数 α 均减小 0.3 左右。这表明桩梁式路堤的整体稳定性不断增强。

表 3 填土过程中不同测点的整体稳定性系数

测点	u/mm	w/mm	α	u_0/mm	w_0/mm	α_0
IT ₂	41.93	132	0.32	43.63	148	0.29
IT ₃	49.54	132	0.38	51.54	148	0.35
IT ₄	46.87	132	0.36	48.93	148	0.33
IT ₅	44.79	132	0.34	46.20	148	0.31

2.5 连梁钢筋应力分析

为进一步研究桩梁式路堤的受力特性,在试验断面的 P₁ 测区和 P₂ 测区两个测点连梁内分别植入 6 个钢筋应力计,以监测连梁在路堤填筑阶段的力学响应。各测点钢筋应力随填土高度的变化如图 5 所示。其中, u 表示连梁上侧钢筋应力计示数, l 表示连梁下侧钢筋应力计示数。

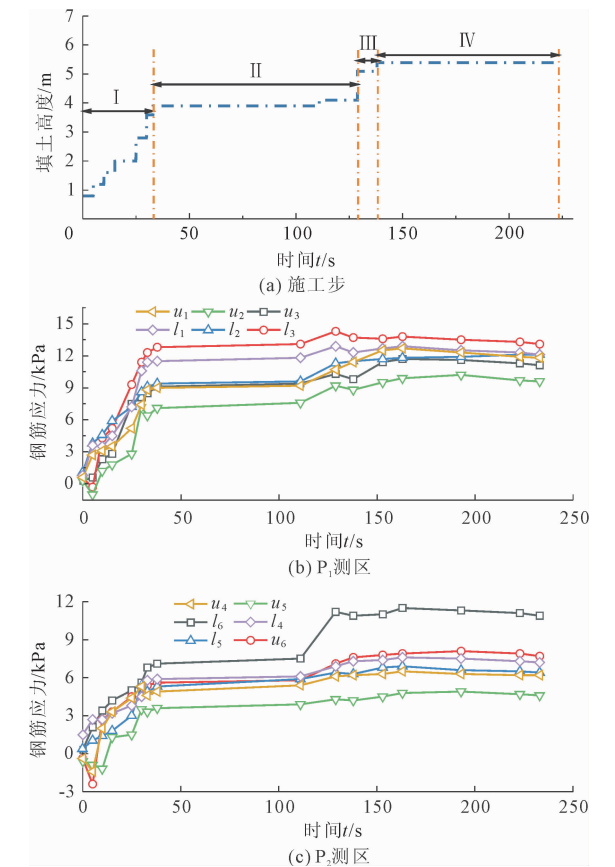


图 5 钢筋应力随时间变化示意图

图 5 表明,连梁钢筋应力随着填土高度的增大而增大,钢筋应力增长速率随填土高度的增加而逐渐减小。P₁ 测区的钢筋应力大于 P₂ 测区的钢筋应力值,这是由于 P₁ 测区承受更大的路堤荷载作用,连梁产生更大的挠曲变形。因此,沿着路基横断面从路肩往坡脚方向,连梁钢筋应力逐渐减小,在路堤中坡附近发生相对较小的挠曲变形。在填筑完成后

(阶段Ⅳ),连梁下侧的钢筋应力大于上侧的钢筋应力,下侧的钢筋应力约为上侧钢筋的 1.2 倍左右,表明在路堤填土荷载作用下,连梁发生上侧钢筋受压、下侧钢筋受拉的挠曲变形。

由图 5 可以看出,钢筋应力随着时间的发展逐渐减小,这是由于连梁与桩间土的刚度差异,造成桩间土上的路堤荷载逐渐转移到连梁上,通过连梁的挠曲变形进一步传递到桩上。总而言之,连梁起着承载和传载的双重作用。

2.6 桩梁荷载传递效率分析

桩梁荷载传递效率 η_a 用于评估桩体及连梁分担路堤填土荷载的比例,桩梁式路堤桩荷载传递效率 η_a 的表达式为:

$$\eta_a = (\sigma_p A_p) / (\sigma_p A_p + \sigma_s A_s) \tag{2}$$

式中: σ_p 为桩梁顶土压力; σ_s 为桩间土压力; A_s 为桩间土面积, $A_s = (s - a)^2$; A_p 为连梁面积, $A_p = 2as - a^2$; s 为桩间距; a 为连梁宽度。

计算实测荷载传递效率 η_a 时,桩梁顶土压力取桩梁顶土压力平均值,桩间土平均压力取桩间土区域土压力平均值。将实测数据与各理论方法计算结果进行对比,如图 6 所示。

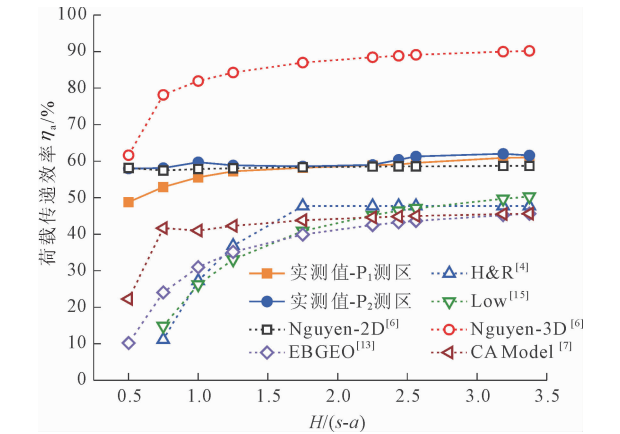


图 6 现场实测与各解析模型桩荷载传递效率对比

由图 6 可知,当 $H/(s - d) < 1.25$ 时, P₁ 测区实测桩荷载传递效率随 $H/(s - d)$ 的增加呈非线性增大,最终趋于平稳, P₂ 测区实测荷载传递效率随填土高度的增大无明显变化。实测值小于三维土拱模型 (Nguyen-3D) [6] 计算值,表明 Nguyen-3D 模型高估了传递到桩梁顶的荷载。P₁ 测区实测最大荷载传递效率为 60.98%, P₂ 测区实测最大荷载传递效率为 61.57%, 二维土拱模型 (Nguyen-2D) 计算结果为 58.69%。实测结果与 Nguyen-2D 模型的相对误差较小,实测值变化趋势与 Nguyen-2D 模型非常贴

近,表明桩梁式路堤内的力学特性近似平面应变模型。

实测结果均大于 H & R 方法^[4]、德国规范 EB-GEO^[13]和同心球拱(CA)模型^[7]及 Low 方法^[14],这些理论方法常用于分析桩承式路堤的桩荷载传递效率。可以发现,桩梁式路堤的荷载传递效率比桩承式加筋路堤更明显。这是由于桩梁式路堤的相邻桩间土区域采用连梁连接,导致桩间土的承载区域减小。连梁与桩体形成整体,增大了复合地基的整体刚度,填土荷载更多地传递到桩梁上。

3 结 论

结合桩梁式路堤现场试验,对土压力、侧向变形及分层沉降开展长期监测。通过分析监测结果,揭示桩梁式路堤变形及承载特性。主要结论如下:

- (1) 桩间土压力沿对角线呈倒三角形分布,桩梁顶土压力相较于桩间土压力增速更快。相比于桩承式加筋路堤,桩梁式路堤的荷载传递效率更明显。
- (2) 随地基深度的增大,分层沉降先不断衰减而后趋于稳定。从路堤中心往坡脚方向,最大分层沉降不断减小,最大沉降和最小沉降分别发生在路堤中心和坡脚处。分层沉降的稳定具有“滞后性”。
- (3) 深层地基水平位移随深度的增加呈“鱼腹”型变化,最大水平位移发生在中坡下近临坡脚处,主要集中在地下 5 m~7 m 深度处。桩梁式路堤整体稳定性系数较小,其可有效限制软土地基的水平位移。
- (4) 连梁钢筋应力上侧受压、下侧受拉,且随填土高度的增加而逐渐增大,这种挠曲响应有利于桩梁式路堤整体受力。

参考文献:

[1] 王长丹,王 旭,宋晓光. 湿陷性黄土地区高速铁路桩承式路堤沉降性状初探[J]. 水利与建筑工程学报, 2008,6(2):97-99.

[2] 丁国玺,王 旭. 桩承式路堤在铁路软土地基处理工程中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2006,6(1):

61-63.

[3] 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):1004-1012.

[4] Hewlett W J, Randolph M F. Analysis of piled embankment[J]. Ground Engineering, 1988,21(3):12-18.

[5] 刘吉福,余 烈. 复合地基黏性土路堤土拱效应分析[J]. 地基处理,2022,4(2):99-108.

[6] Nguyen V D, Luo Qiang, Xue Yuan, et al. Extended concentric arches model for piled beam-supported embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2023,160: 105517.

[7] Van Eekelen S J M, Bezuijen A, Van Tol A F. An analytical model for arching in piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013,39:78-102.

[8] Ma Hongfei, Luo Qiang, Wang Tengfei, et al. Numerical stability analysis of piled embankments reinforced with ground beams [J]. Transportation Geotechnics, 2021, 26:100427.

[9] 吴建涛,叶 霄,李国维,等. 高路堤下 PHC 桩加固软土地基的承载及变形特性[J]. 岩土力学,2018,39(S2):351-358.

[10] 夏唐代,王 梅,寿 旋,等. 筒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.

[11] 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.

[12] Indraratna B, Balasubramaniam A S, Sivanesarwan 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.

[13] The German Geotechnical Society (DGGT) EBGeo-Recommendation for Reinforcement with Geosynthetics [S]. Germany: The German Geotechnical Society, 2010.

[14] Low B K, Tang S K, Choa V. Arching in piled embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(11):1917-1938.