

斜桩加固下覆倾斜基底软土桩-网复合地基 离心模型试验

毕俊伟^{1,2}, 高广运^{1,2}, 张建经³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 通过 2 组相似比为 1:100 的土工离心模型试验, 研究斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果。试验结果表明, 采用斜桩加固既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基, 可有效减小路堤顶面的工后位移(竖向、水平), 控制路堤顶面两侧沉降差的发展; 同时, 斜桩加固能有效抑制既有复合地基中斜坡桩、摩擦桩的桩顶水平和竖向位移, 防止土工格栅的破坏及复合地基非对称“盆状”沉降的产生和发展; 此外, 斜桩加固可显著减小既有复合地基中的水平向推力, 提高地基刚度及稳定性。研究表明, 斜桩是加固既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的有效措施。

关键词: 斜桩; 下覆倾斜基底; 软土; 桩-网复合地基; 土工离心模型试验

中图分类号: TU441

文献标志码: A

Centrifuge Model Test of Soft Soil for Pile-Net Composite Foundation with Overlying Sloping Base Reinforced by Inclined Piles

BI Junwei^{1,2}, GAO Guangyun^{1,2}, ZHANG Jianjing³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Two geotechnical centrifuge model tests with a similar ratio of 1:100 were performed to investigate the reinforcement effect of inclined piles for the existing pile-net composite foundation on soft soil overlying sloping

base. The test results show that due to the reinforcement of inclined piles, the post construction displacement (vertical and horizontal) on the top of the embankment is reduced effectively and the development of the settlement difference on both sides of the embankment top can also be controlled. Meanwhile, reinforced by the inclined piles, the horizontal and vertical displacement of the pile top of the slope pile and friction pile in the existing composite foundation can be restrained effectively, and the damage of the geogrid and the generation and development of the asymmetrical “basin” settlement of the composite foundation can be prevented. In addition, the horizontal thrust in the existing composite foundation can be reduced and the stiffness and stability of the foundation can be improved significantly by inclined pile reinforcement. The research shows that the inclined pile is an effective measure to reinforce the existing pile-net composite foundation on soft soil overlying sloping base.

Key words: inclined piles; overlying sloping base; soft soil; pile-net composite foundation; geotechnical centrifuge model test

我国东部沿海地区已基本建成以高铁为主的铁路运输网络。这一地区普遍分布着厚度大、工程特性差的饱和软土。桩-网复合结构以其承载力高、工后变形小等特点成为该地区高铁建设广泛采用的地基处理形式。

由于地质构造等原因, 东部沿海地区地表软土

收稿日期: 2019-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51978510, 41772288)

第一作者: 毕俊伟(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为土动力学、环境振动及防治、桩土复合路基。

E-mail: bijw@tongji.edu.cn

通信作者: 高广运(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土动力学、环境土工、桩基与深基础。

E-mail: gaogy@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

层下分布着不同倾角的倾斜基底。采用桩-网复合结构对该类下覆倾斜基底软土地基进行处理时,受设计、施工等因素的影响,在满足承载力前提下通常采用等长桩设计。既有研究表明^[1-5],在上部荷载(路堤及列车荷载,下同)作用下,复合地基中不同位置处桩体的受力和变形特性有较大差异。笔者通过试验研究指出^[6],采用等长桩设计的桩-网复合结构对下覆倾斜基底软土地基进行处理,会导致路堤顶面两侧差异沉降,并伴随明显的水平位移,严重威胁高铁列车的运营安全。

目前,常用于加固既有铁路地基的方法有注浆法、基床封闭法、换填法、挤密桩法等,然而上述方法存在妨碍既有铁路运营、加固效果不理想等问题^[7]。斜桩加固法是一种在保障铁路正常运营的前提下从线路两侧对既有铁路地基进行加固的方法。Paulsson等^[8]基于现场试验研究了斜桩对既有铁路软土地基的加固效果,研究表明斜桩可有效控制既有铁路的路堤变形,并指出斜桩加固施工时既有铁路应限制车速及轴重。陈学喜等^[9]以宝中铁路为背景,通过理论计算、数值分析、现场载荷试验等方法,研究并指出斜桩加固的最优倾角是其与水平面成 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 夹角。于贵等^[10]以大准铁路病害路段为研究对象,利用数值分析研究了倾角、桩径、桩间距等对斜桩加固既有铁路效果的影响。上述研究都是围绕斜桩加固既有铁路水平成层地基展开的,而对于斜桩加固既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的相关研究则鲜有报道。

鉴于此,本文以浙江沿海某高速铁路为背景,选取典型断面,设计并开展2组相似比为1:100的土工离心模型试验,研究斜桩对下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果。本文研究成果为斜桩加固该类既有铁路复合地基提供了重要的试验依据。

1 试验原型高铁工段概况

本试验原型高速铁路工段软土地基下分布着倾角为 $11^{\circ}\sim 27^{\circ}$ 不等的倾斜基底,采用等长桩设计的桩-网复合结构进行处理。该工段高速铁路运营后,路堤出现水平位移不断增大、竖向沉降超限等问题,且变形随下覆基底倾角的增大愈加明显。为保证行车安全,宁波工务段多次采用注浆法对该高铁工段下覆倾斜基底软土复合地基进行加固,但无法取得长期有效的加固效果。基于此,本文选取下覆基底倾角为 27° 的断面作为典型断面,如图1所示,研究斜

桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果。

如图1所示,典型断面的地基土层条件如下:①为素填土、人工填土,呈灰黄或黄褐色;②为淤泥质黏土,呈灰色,流塑状;③为粗角砾土,稍一中密,饱和,呈灰、浅灰黄色;④为粉质黏土,呈灰黄色,软塑状;⑤为凝灰岩,中一强风化,呈灰黄色。各土层物理力学参数如表1所示。该工段地下水以第四纪孔隙潜水为主,埋深 $0.5\sim 2.0$ m,较为发育。

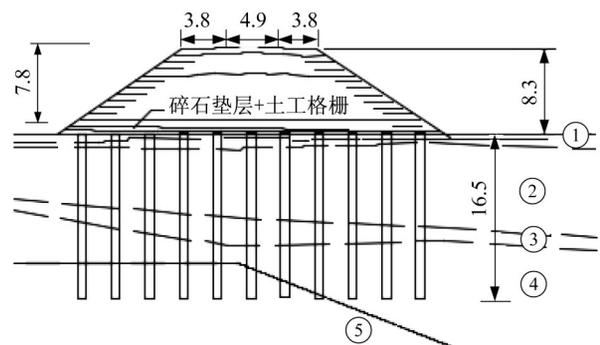


图1 典型断面示意图(单位:m)

Fig. 1 Sketch of typical section (unit: m)

原型高铁工段采用正方形布桩的等长桩-网复合结构对下覆倾斜基底软土地基进行加固。桩体采用外径0.80 m,内径0.60 m,长度16.50 m的预应力管桩(PHC),桩间距为4倍桩径。垫层由两层厚度为0.25 m的级配碎石夹一层土工格栅组成。

表1 各土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层 编号	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa
①	17.50	2.06	7.90	10.35
②	15.31	4.60	2.61	3.78
③	18.19	11.56	13.89	10.26
④	19.23	6.51	9.81	11.20
⑤	20.00	12.14	34.53	33.34

2 离心模型试验

2.1 土工离心机试验设备

采用西南交通大学TLJ-2型土工离心机进行试验。该离心机最大容量为 $100.0\text{g}\cdot\text{t}$,有效半径2.7 m,最大加速度 200.0g 。试验模型箱内部尺寸为 $0.6\text{m}\times 0.4\text{m}\times 0.4\text{m}$ (长×宽×高)。

2.2 土工离心模型设计

2.2.1 试验相似设计

土工离心模型试验是通过将比尺为1:n的离心模型置于加速度为 ng 的离心惯性力场中,使模型的应力状态与原型相同^[11]。综合考虑模型箱尺寸、边界效应等因素,本试验选取 $n=100$ 作为相似常数,再根据量纲分析法得出其他物理量的相似常数,如表2所示。

表2 土工离心模型试验相似常数

Tab. 2 Similarity constant of geotechnical centrifugal model test

物理量	单位	相似常数	物理量	单位	相似常数
离心加速度	$m \cdot s^{-2}$	100^{-1}	位移	m	100
长度	m	100	应变		1
面积	m^2	100^2	应力	$N \cdot m^{-2}$	1
体积	m^3	100^3	变形模量	$N \cdot m^{-2}$	1
质量	kg	100^3	渗透系数	$m \cdot s^{-1}$	100^{-1}
密度	$kg \cdot m^{-3}$	1	时间	s	100^2
重度	$N \cdot m^{-3}$	100^{-1}	集中力	N	100^2

2.2.2 离心模型材料设计

(1)模型土体。由图1可知,土层①和③厚度较小,故将土层①、②合并为②淤泥质黏土,土层③、④合并为④粉质黏土。本试验从原型铁路工段附近的相应地层取土,重塑后用于模型地基的制作^[12]。本文假定下覆倾斜基底不发生变形,故采用水泥、河砂、黏土和石膏的混合材料(质量比为0.5:7.0:1.0:5.0)进行倾斜基底的模型制作。采用煤屑、石英砂和黏土的混合材料制作边坡为1.0:1.5的模型路堤,模型路堤的填料与原型路堤之间满足级配相似关系^[6]。

(2)土工格栅模拟材料。杜延龄^[12]研究指出,离心模型试验中采用的土工织物,其单位宽度的强度需为原型的1/100。基于材料抗拉试验结果^[6],本试验选取窗纱作为土工格栅的模拟材料^[13]。

(3)模型桩体。基于相似原理,本试验采用外径8.0 mm,壁厚0.5 mm,长度16.5 cm的铝管作为模型桩。由表3可知,铝管与原型桩之间满足刚度相似关系。此外,选取截面相同、长度为26.0 cm的铝管作为斜桩加固试验中的斜桩。模型桩两端使用少量玻璃胶进行封堵,并在模型桩外侧黏附细砂来模拟桩侧摩阻力。

2.3 模型设计及试验方案

2.3.1 离心模型制作

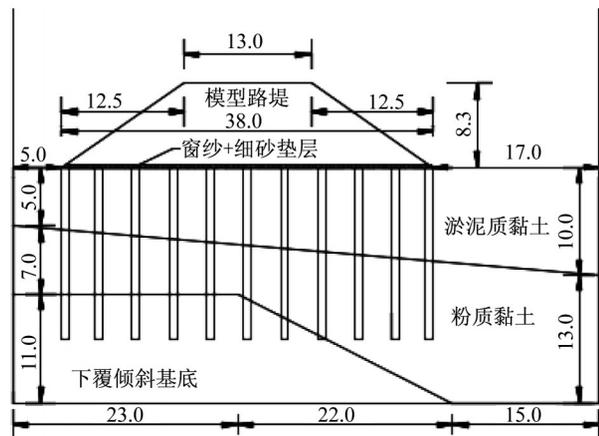
土工离心模型如图2所示。首先在模型箱内壁上标注出模型轮廓,并进行防水处理。为减小边界

表3 桩体刚度相似换算关系

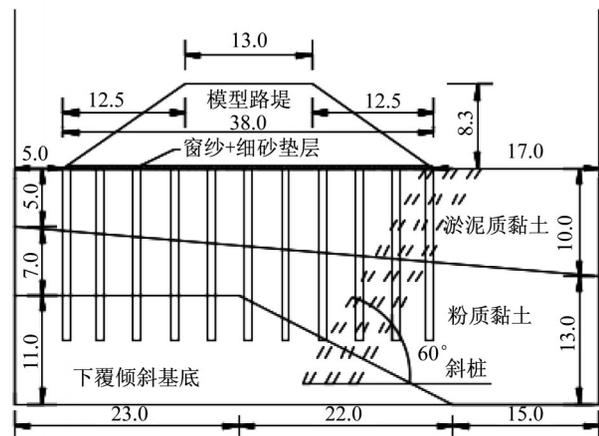
Tab. 3 Similarity conversion relationship of pile stiffness

桩体	弹性模量 E/kPa	面积 A/m^2	刚度 E_A/kN
PHC原型桩	3×10^7	0.2198	6.594×10^6
模型桩	3×10^7	0.2198×10^{-4}	659.400
铝管	7×10^7	0.1178×10^{-4}	824.250

效应的影响,将凡士林均匀涂抹于模型箱内壁^[14]。然后,按标记的轮廓对下覆倾斜基底进行填筑、夯实。待倾斜基底具有足够强度后,再依次分层填筑重塑后的粉质黏土和淤泥质黏土。为保证模型地基与原型铁路地基之间满足相似关系,本试验以不排水抗剪强度作为控制指标对模型地基进行预固结处理。测试结果表明,2组试验模型地基不同深度处的土体不排水抗剪强度与原型铁路工点基本一致,满足试验相似关系。



a 既有复合地基试验



b 斜桩加固试验

图2 土工离心模型(单位:cm)

Fig. 2 The geotechnical centrifuge test model (unit: cm)

利用钢尺在模型地基表面标记出模型桩位置,并借助水准尺将模型桩垂直置入模型地基内。然后在模型地基表面铺设两层细砂(厚度1 mm)及1层窗纱。最后,再以压实系数作为控制指标填筑模型路堤,既有复合地基试验离心模型如图2a所示。

对于斜桩加固试验,斜桩采用矩形布桩,沿轨道方向的桩间距为4倍桩径,垂直轨道方向的桩间距为2倍桩径。斜桩加固试验中斜桩与水平面的夹角为 60° ,从既有路堤坡脚向外依次布设3排斜桩,如图2b所示。受模型箱尺寸等因素的制约,本文仅对上述一种斜桩加固方案进行研究。

2.3.2 加载方案

本试验通过分级加载对路堤分层填筑的施工过程进行模拟,并基于换算土柱法模拟列车荷载^[15],然后根据等效荷载法^[6,16]计算出各工况荷载对应的离心加速度,如表4所示。为控制试验变量,更好地对比分析斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果,本文斜桩加固试验与既有复合地基试验采用相同的加载工况。

表4 离心模型试验加载工况

Tab. 4 Loading cases of centrifuge test

工况	加速度/ g	持时/min	备注
填土至2.1 m	35.41	36.27	工期1个月
填土至4.2 m	62.78	10.96	工期1个月
填土至6.3 m	84.82	6.00	工期1个月
填土至8.3 m	100.00	4.32	工期1个月
工后静置	100.00	25.92	工后静置6个月
运营第1年	120.00	36.00	
运营第2年	120.00	36.00	
运营第3年	120.00	36.00	

2.3.3 传感器及测点布置

如图3所示,本试验利用差动式位移计(W1~W3)测量模型路堤顶面的竖向和水平位移。同时,通过孔隙水压力计(K1、K2)对淤泥质黏土和粉质黏土中的孔压变化进行监测。随下覆倾斜基底埋深的增加,本试验将模型桩分为嵌岩桩、斜坡桩和摩擦桩3类,并对模型桩进行编号。分别在3类桩区域内的桩间软土分界面处选取合适位置,采用竖向布置的土压力计(T1~T6)对地基软土分界面处淤泥质黏土和粉质黏土的侧向土压力进行监测。

如图4所示,为避免边界效应对试验结果的影响,选取离心模型中部的两列模型桩,测量加载前后模型桩顶竖向和水平向的相对位移,研究斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果。

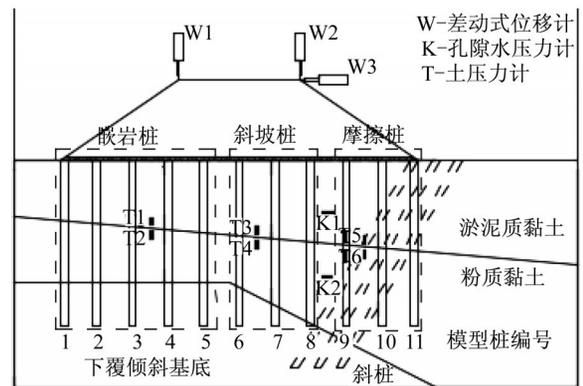


图3 传感器布置图

Fig. 3 Layout of sensors

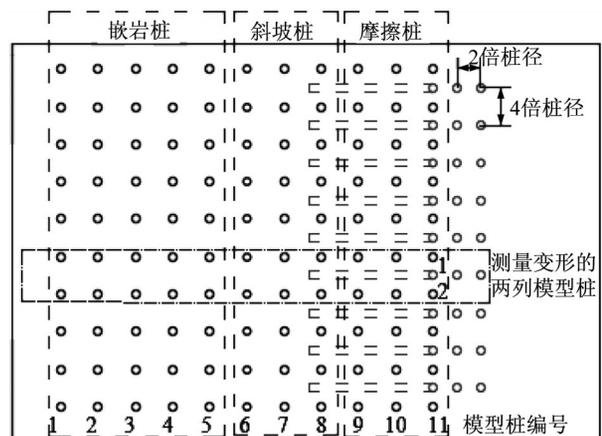


图4 模型桩测点布置平面图

Fig. 4 Layout of monitoring points of model piles

3 试验结果及分析

试验后对模型进行开挖、测量,并分析数据。本文主要从路堤顶面和桩-网复合地基的变形,超静孔隙水压力,以及桩间土侧向土压力等方面研究斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的加固效果。文中路堤顶面和桩顶位移均已按几何比换算为原型路堤及桩体的位移。

3.1 路堤变形

模型路堤顶面竖向和水平位移随加载过程的变化曲线如图5、6所示(规定向下、向右的位移为正)。对于既有复合地基试验,路堤顶面的位移随荷载增加不断增长,最大竖向及水平位移分别为31.8 cm(W1)、35.7 cm(W2)和26.2 cm(W3)。路堤顶面位移主要发生在施工和工后静置阶段,分别占位移总量的67.3%(W1)、62.0%(W2)和57.3%(W3)。进入运营阶段后,路堤顶面的竖向及水平位移随时间推移持续增长,竖向沉降差不断发展,

且截至试验结束(运营期满3年),变形仍然有继续增大的趋势。这与原型铁路工段的变形趋势相契合。

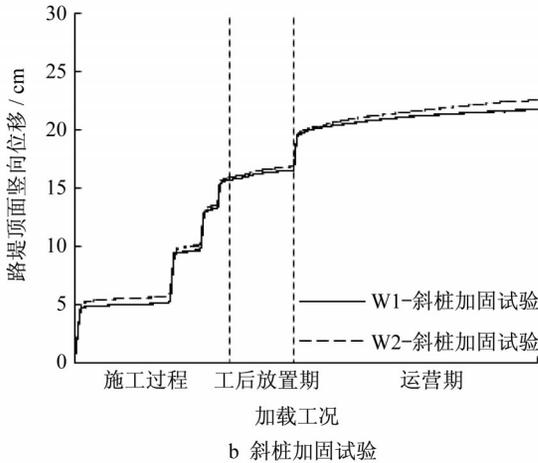
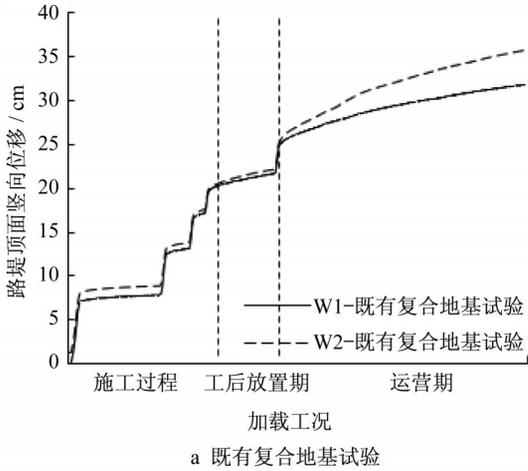


图 5 模型路堤顶面竖向位移

Fig. 5 The vertical displacement of model embankment top surface

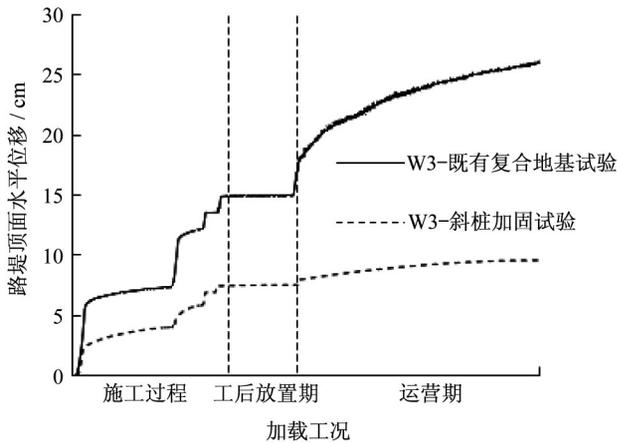


图 6 模型路堤顶面水平位移

Fig. 6 The horizontal displacement of model embankment top surface

地基及路堤在运营前产生的变形称为施工变形,可通过填补加高进行处理,不作为控制部分。进入运营阶段后的变形称为工后变形,这部分变形直接关系到铁路的运输能力、维护模式及成本等^[17]。对比分析图 5 和图 6,截至试验结束,既有复合地基试验中模型路堤顶面两侧的工后竖向沉降分别为 10.4 cm(W1)、13.6 cm(W2),沉降差为 3.2 cm,工后水平位移为 11.9 cm(W3),已超过《高速铁路设计规范》(TB 10621—2014)^[18]中规定的相关限值,严重威胁高铁行车安全。对于斜桩加固试验,模型路堤顶面两侧的工后竖向沉降分别为 5.1 cm(W1)、5.9 cm(W2),沉降差为 0.8 cm,工后水平位移为 2.1 cm(W3)。试验结果表明,采用斜桩加固可使路堤顶面两侧的工后竖向沉降、水平位移分别减小 51.0%(W1)、56.6%(W2)及 82.3%(W3),工后竖向沉降差减小 75.0%。

综合模型开挖结果分析可知,利用斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基进行加固,可防止斜坡桩和摩擦桩发生向上、向下的刺入破坏以及倾覆破坏,有效减小路堤顶面的竖向、水平位移和竖向沉降差。

3.2 超静孔隙水压力

图 7a、7b 分别为既有复合地基试验和斜桩加固试验中模型地基各层软土超静孔隙水压力随荷载和时间的变化曲线。由图 7 可知,各级荷载的施加都伴随着模型地基软土超孔压峰值的出现,粉质黏土层中的超孔压大于上部淤泥质黏土层。进入运营阶段,模型地基各软土层中的超孔压均随时间推移逐渐消散,且淤泥质黏土层中超孔压的消散速度大于下层粉质黏土。这是因为相较于上层淤泥质黏土,粉质黏土层的排水路径更长,使粉质黏土层中的超静孔隙水压力难以消散。

截至试验结束,既有复合地基试验中软土层的超静孔隙水压力仍保持较高水平,表明在列车荷载作用下,地基软土中超孔压的消散将持续较长时间,这将对路堤顶面的竖向沉降、沉降差及水平位移等造成不利影响。对比分析图 7a 和 7b 可知,采用斜桩加固可有效降低地基各层软土中的超静孔隙水压力,改善既有复合地基的承载性能。此外,斜桩能显著提高地基软土的排水固结速率,在有效抑制上部路堤变形的同时可逐步提高地基土体强度,进一步增强既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的稳定性。

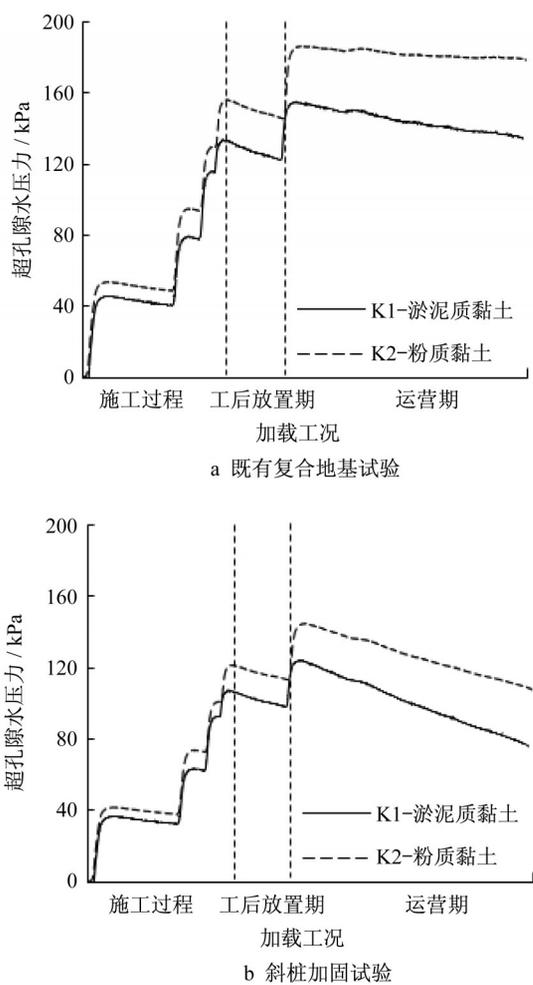


图7 超孔隙水压力
Fig. 7 The excess pore water pressure

3.3 桩-网复合地基变形

为研究下覆倾斜基底软土桩-网复合地基中桩体的变形及斜桩加固效果,本文对模型桩顶试验前后的相对位移(竖向、水平)进行测量,如图8所示。由图8可知,桩顶的竖向位移沿下覆基底斜坡向下先增大后减小,其中8#桩桩顶的竖向位移最大。由于下覆基底倾斜,地基在上部荷载作用下会产生水平向的推力,复合地基中桩顶的水平位移沿下覆基底斜坡向下逐渐增大。

综合试验后模型的开挖结果分析可知,既有复合地基试验中复合地基沉降在横断面上呈中间大、两端小的非对称“盆状”分布,路堤顶面以下基底斜坡一侧(8#桩位置)的复合地基沉降最为严重,斜坡桩和摩擦桩出现不同程度的向下刺入破坏,桩顶竖向位移沿下覆基底斜坡向下呈非对称“V”字型分布,导致路堤顶面的竖向沉降差不断增大。随下覆倾斜基底埋深的增加,桩端嵌固长度不断减小,锚固作用逐渐降低,直至无锚固作用。在地基水平

推力作用下,既有复合地基试验中斜坡桩出现了不同程度的倾斜,摩擦桩也有不同程度的倾斜或横移,这会进一步加剧路堤顶面的水平位移和竖向沉降差。

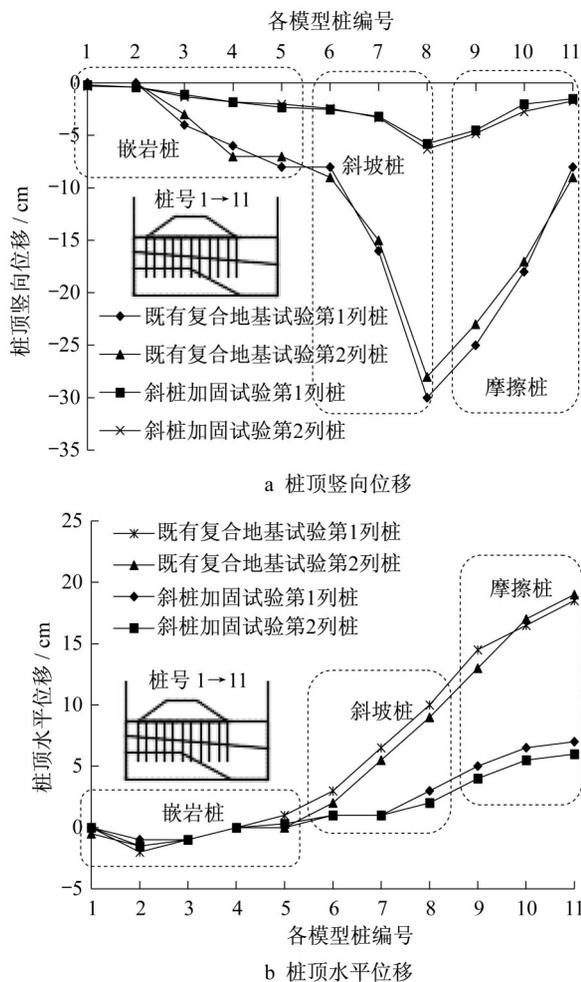


图8 模型桩桩顶位移

Fig. 8 The displacement of model pile top

对比分析斜桩加固试验可知,采用斜桩加固既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基,可有效减小复合地基中桩顶的竖向、水平位移,对斜坡桩和摩擦桩的加固效果尤为显著,这与模型路堤顶面位移变化所反映的加固效果相符。开挖结果显示采用斜桩加固能有效抑制既有复合地基非对称“盆状”沉降的产生和发展,表明斜桩具有良好的加固效果。

如图9a所示,既有复合地基试验中斜坡桩顶部出现多处土工格栅的失效破坏,这将加剧路堤顶面的竖向位移和沉降差。对比分析图9b可知,采用斜桩加固能有效避免土工格栅的穿刺失效破坏,提高既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基的刚度和

稳定性,进而有效控制上部路堤的变形。

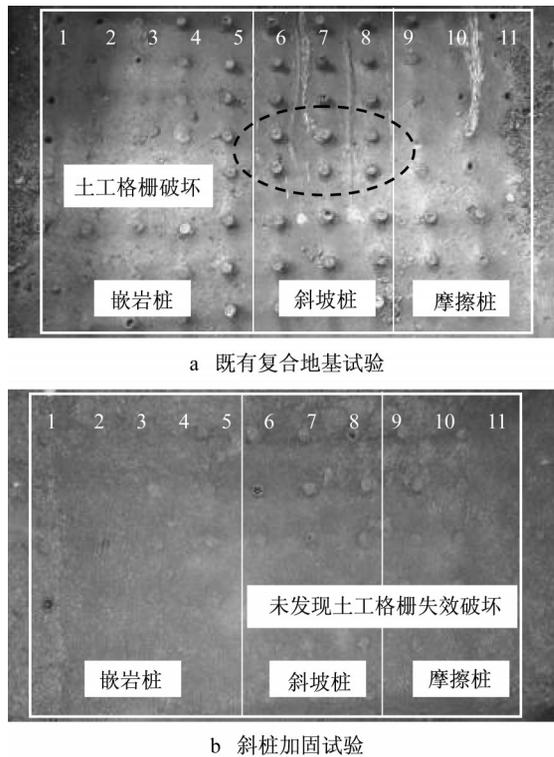


图9 试验后土工格栅破坏情况

Fig. 9 The damage condition of geogrid after tests

3.4 桩间土侧向土压力

图10和图11分别为既有复合地基试验和斜桩加固试验中模型地基淤泥质黏土与粉质黏土分界面不同位置处侧向土压力随荷载和时间的变化曲线。由图10可知,既有复合地基试验中复合地基软土分界面处淤泥质黏土和粉质黏土中的侧向土压力随荷载增加不断上升。进入运营阶段,嵌岩桩和摩擦桩区域的桩间软土侧向土压力以及软土分界面处侧向土压力差值均随运营时间增加逐渐减小并趋于稳定。然而,斜坡桩区域的桩间软土侧向土压力随运营时间推移不断增大,且软土分界面处侧向土压力差值由37.4 kPa增大至50.0 kPa,严重威胁既有复合地基中斜坡桩的安全。

由图11可知,斜桩加固试验中嵌岩桩和摩擦桩区域桩间软土分界面处侧向土压力随时间的变化趋势与既有复合地基试验类似,且斜桩加固能进一步减小摩擦桩区域桩间软土侧向土压力及软土分界面处的侧向土压力差值。如图11b所示,斜桩加固试验中斜坡桩区域桩间软土分界面处侧向土压力差值从运营初期的21.6 kPa逐渐减小到试验结束时的15.4 kPa,并趋于稳定。这表明斜桩加固能显著减小既有下覆倾斜基底复合地基中软土的侧向土压

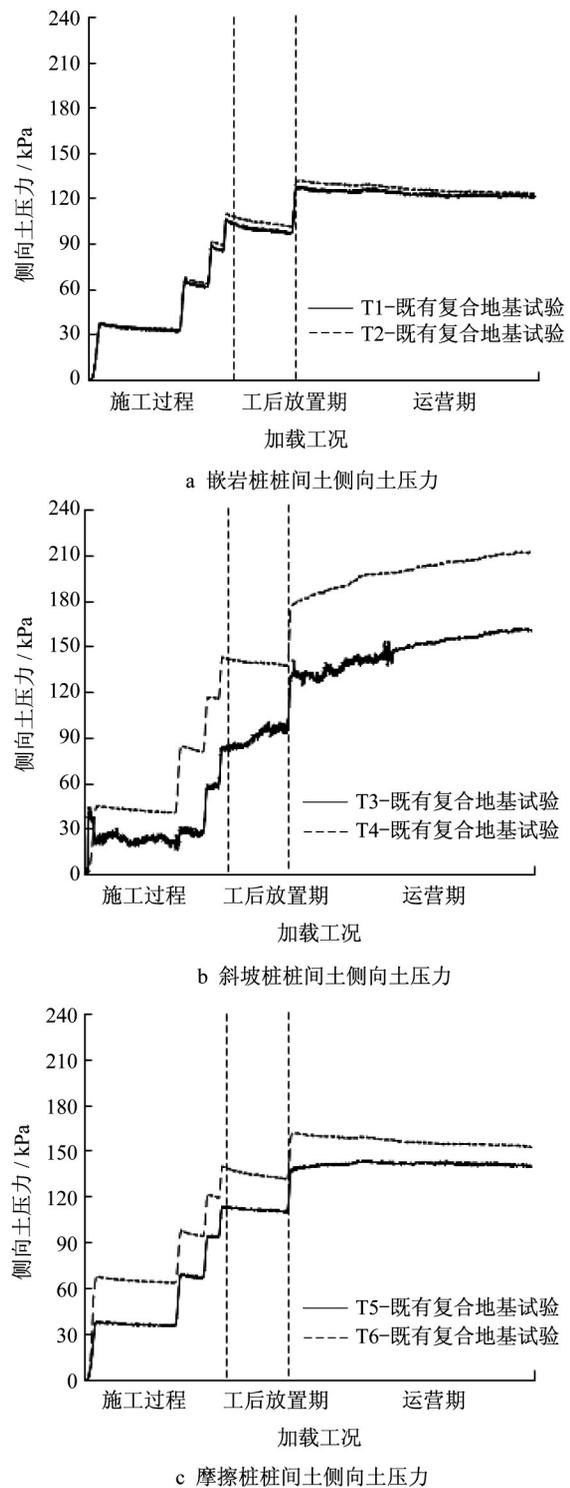


图10 既有复合地基试验软黏土分界面侧向土压力

Fig. 10 Lateral soil pressure on the interface of soft soil at existing composite foundation test

力,并能有效抑制复合地基软土分界面处侧向土压力差值的发展。

综合文献[2,6]的研究成果,下覆倾斜基底软土桩-网复合地基中,随倾斜基底埋深的增加,斜坡桩

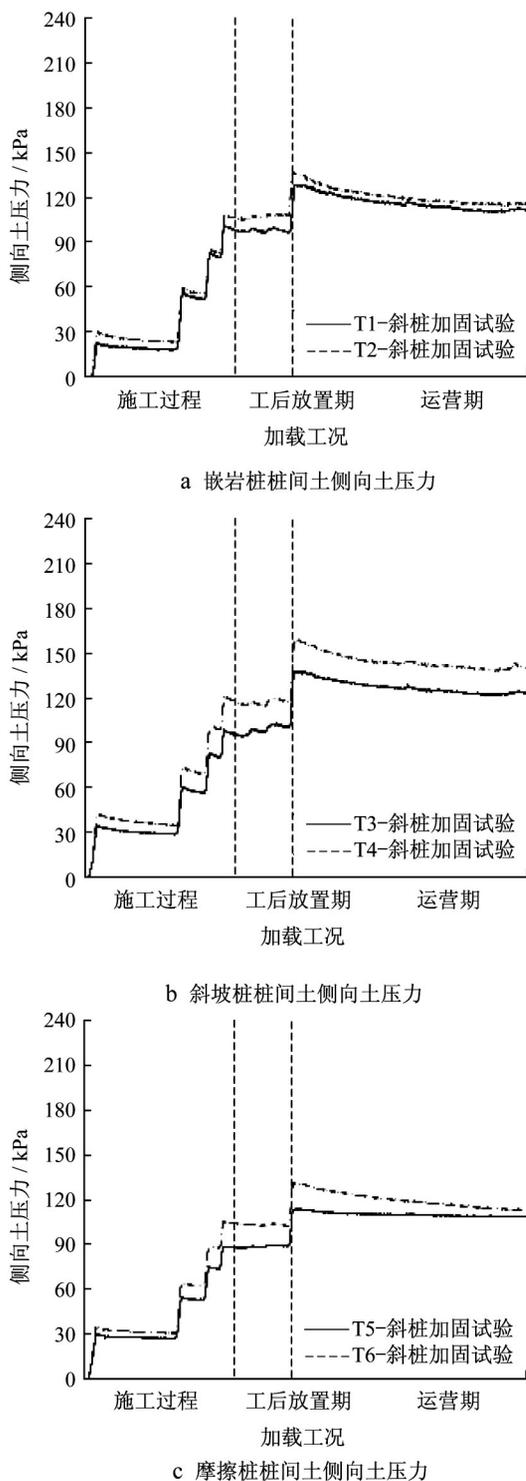


图 11 斜桩加固试验软黏土分界面侧向土压力

Fig. 11 Lateral soil pressure on the interface of soft soil for the reinforcement model test

的潜在破坏模式为弯剪破坏或倾倒破坏,而摩擦桩的潜在破坏模式为横移及倾倒破坏。对比分析 2 组试验结果表明,斜桩加固可有效减小既有下覆倾斜基底桩-网复合地基中软土侧向土压力及软土分界面处的侧向土压力差值,避免斜坡桩发生弯剪破坏,

并能防止斜坡桩和摩擦桩出现倾倒及横移,从而显著提高下覆倾斜基底软土复合地基的稳定性,有效控制上部路堤变形的发展。

4 结论

本文基于土工离心模型试验研究斜桩加固既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基,主要结论如下:

(1)路堤顶面位移主要发生在施工及工后静置阶段。既有复合地基试验中路堤顶面两侧的工后竖向沉降分别为 10.4 cm 和 13.6 cm,并伴随 11.9 cm 的工后水平位移,严重影响高铁行车安全。采用斜桩加固可显著降低既有路堤顶面的工后竖向、水平位移,并能有效抑制路堤顶面两侧的竖向沉降差。

(2)采用斜桩对既有下覆倾斜基底软土桩-网复合地基进行加固,能显著提高既有复合地基软土的排水固结速率,改善其承载性能,在有效抑制上部路堤变形同时逐步提高地基土体的强度。

(3)随下覆倾斜基底埋深的增加,既有复合地基中桩体可分为嵌岩桩、斜坡桩和摩擦桩。利用斜桩加固可显著减小既有复合地基中桩顶的水平位移和竖向位移,防止斜坡桩和摩擦桩发生倾倒、横移或向下刺入破坏,并能有效抑制既有复合地基的变形,避免非对称“盆状”沉降的产生和发展。

(4)通过斜桩加固,能明显减小下覆倾斜基底软土桩-网复合地基中桩间软土的侧向土压力及软土分界面处的侧向土压力差值,防止斜坡桩的弯剪破坏,并能显著提高既有复合地基的刚度和稳定性,有效避免土工格栅的穿刺破坏。

参考文献:

- [1] KITAZUME M, MARUYAMA K. Internal stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(3): 437.
- [2] 郑刚,李帅,刁珏. 刚性桩复合地基支承路堤稳定破坏机理的离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1977.
ZHENG Gang, LI Shuai, DIAO Jue. Centrifugal model tests on failure mechanisms of embankments on soft ground reinforced by rigid piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 1977.
- [3] ANJANA B, RAJAGOPAL K. Numerical study of basal reinforced embankments supported on floating/end bearing piles considering pole-soil interaction [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2015, 43(6): 524.
- [4] 刘晋南,蒋鑫,邱延峻. 路堤荷载作用下斜坡软弱地基变形耦

- 合特性研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(4): 94.
- LIU Jinnan, JIANG Xin, QIU Yanjun. Deformation coupling characteristics of sloped weak ground under embankment load [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(4): 94.
- [5] 顾行文, 黄炜旺, 谭祥韶, 等. 基底倾斜的管桩复合地基路堤破坏模式研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 204.
- GU Xingwen, HUANG Weiwang, TAN Xiangshao, *et al.* Failure mechanisms of embankment on inclined soft foundation reinforced by pipe piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 204.
- [6] 毕俊伟, 高广运, 张建经. 下覆倾斜地层软土桩-网复合地基破坏机理试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 1.
- BI Junwei, GAO Guangyun, ZHANG Jianjing. Model test study on the failure mechanisms of the geogrid-reinforced and pile-supported foundation on soft soil with overlying sloping base [J]. Journal of Haerbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 1.
- [7] ARULRAJAH A, ABDULLAH A, BO M W, *et al.* Ground improvement techniques for railway embankments [J]. Ground Improvement, 2009, 162(1): 3.
- [8] PAULSSON B, EKBERG A. Results to exemplify the joint EU project INNOTRACK: innovative track systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2010, 224(1): 1.
- [9] 陈学喜, 吴玉哲, 杨昊天, 等. 斜向高压旋喷桩加固既有铁路路基设计参数的取值[J]. 铁道建筑, 2016(12): 60.
- CHEN Xuexi, WU Yuzhe, YANG Haotian, *et al.* Values of design parameters of existing railway subgrade reinforced by oblique jet high pressure grouting piles [J]. Railway Engineering, 2016(12): 60.
- [10] 于贵, 李星, 舒中文, 等. 灰土桩加固既有铁路路基关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 1.
- YU Gui, LI Xing, SHU Zhongwen, *et al.* Research on the key control techniques on reinforcement of lime-soil pile used in existing railway subgrade section [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 1.
- [11] 吴邦颖, 张师德, 陈绪禄, 等. 软土地基处理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- WU Bangying, ZHANG Shide, CHEN Xulu, *et al.* Soft soil foundation treatment [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1995.
- [12] 杜延龄. 土工离心模型试验基本原理及其若干基本模拟技术研究[J]. 水利学报, 1993, 8: 19.
- DU Yanling. Fundamental principle and some modelling techniques of geotechnical centrifugal model test [J]. Shuili Xuebao, 1993, 8: 19.
- [13] 向科, 罗凤. 土工离心模型试验中的加筋材料[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 889.
- XIANG Ke, LUO Feng. Reinforcing material in centrifuge model test [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 889.
- [14] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80.
- XU Guangming, ZHANG Weimin. Scale effects and boundary effects on centrifugal modeling test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80.
- [15] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路路基设计规范: TB10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design on subgrade of railway: TB10001—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [16] BUI PHU DOANH, 罗强, 张良, 等. 基于离心模型试验的高强度桩复合地基桩间距效应分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 69.
- BUI PHU DOANH, LUO Qiang, ZHANG Liang, *et al.* Analysis on pile spacing effect of composite foundation with high strength piles by centrifugal model test [J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(6): 69.
- [17] 王炳龙, 宫全美, 周顺华, 等. 砂井联合超载预压控制软土地基路基工后沉降的优化设计[J]. 铁道学报, 2004, 26(6): 75.
- WANG Binglong, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, *et al.* Optimizaton design for surcharge precompression on ground with sand drains to control the post-construction of subgrade over soft soils [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(6): 75.
- [18] 中华人民共和国国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621-2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.