

DOI:10.11918/201809061

下覆倾斜地层软土桩-网复合地基破坏机理试验

毕俊伟^{1,2}, 高广运^{1,2}, 张建经³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092;
3. 西南交通大学 岩土工程系, 成都 610031)

摘要: 为研究嵌岩桩和摩擦桩同时存在下桩-网复合地基的破坏机理, 以浙江沿海某高速铁路工段为背景, 基于典型断面开展相似比尺为 1:100 的土工离心机模型试验, 分析下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的变形特征及破坏模式。结果表明: 路堤顶面的竖向、水平位移主要发生在施工阶段及工后静置阶段, 且进入运营阶段后亦有明显发展, 路堤顶面竖向沉降差随运营时间的推移逐渐增长; 复合地基的沉降呈非对称分布, 形成一个偏向下覆倾斜地层斜坡向下一侧的不对称沉降盆; 在上部荷载作用下, 复合地基的沉降主要由下卧层的压缩、桩体的向上向下刺入及桩体倾斜或横移 3 部分组成; 桩顶水平位移沿下覆地层斜坡向下方向逐渐增大并伴随不同程度的淤泥质黏土绕流破坏, 桩顶竖向位移呈现偏向下覆地层斜坡向下一侧的不对称“V”字型分布; 嵌岩桩的潜在破坏模式为弯拉或弯剪破坏, 斜坡桩的潜在破坏模式为弯剪或倾斜破坏, 摩擦桩的潜在破坏模式为倾斜及横移破坏。通过试验可知, 采用等长桩的桩网复合结构对下覆倾斜地层软土地基进行处理是不合理的, 将威胁高铁的安全运营。此外, 对此类既有铁路地基的维护及有效加固措施亟待进一步研究。

关键词: 高速铁路; 下覆倾斜地层; 软土; 桩-网复合地基; 土工离心机模型试验

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)02-0001-09

Model test study on the failure mechanisms of the geogrid-reinforced and pile-supported foundation on soft soil with overlying sloping base

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

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

Abstract: To investigate the failure mechanisms of the geogrid-reinforced and pile-supported foundation in which the embedded piles and floating piles exist at the same time, the centrifuge model test with the similar constant of 1:100 was performed based on a typical project of a high speed railway located in the coastal areas of Zhejiang Province. The deformation characteristics and failure modes of such foundation on soft soil with overlying sloping base were analyzed in detail. According to the centrifuge model test, the conclusions are drawn as follows: most vertical and horizontal displacement occurred during the construction phase and the standing time, and increased continuously in operating phase. Meanwhile, the differential settlement increased gradually with the operation time. The distribution of the composite foundation settlement was asymmetric, and a settlement basin appeared after the test. Under the upper load, the settlement of the composite foundation was mainly caused by the underlayer compaction, the upward and downward pricking destruction of the pile, and tilting or transversal displacement of the pile. The horizontal displacement of the pile head increased gradually along the downward direction of the overlying sloping base, and the soil flowed around the piles in varying degrees. The pile head vertical displacement distributed unevenly and presented an asymmetric shape of "V". The embedded piles suffered bending tensile failure or bending-shear failure; piles on the overlying sloping base suffered bending-shear failure or tilting failure; and floating piles suffered tilting failure and transversal displacement failure. Test results indicate that it is unreasonable that this kind of foundation is reinforced by equilong piles, and the effective reinforcement measures for this kind of high speed railway foundations still need further research.

Keywords: high speed railway; overlying sloping base; soft soil; geogrid-reinforced and pile-supported foundation; centrifuge model test

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(41772288)

作者简介: 毕俊伟(1990—), 男, 博士研究生;

高广运(1961—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 高广运, gaogy@tongji.edu.cn

在中国经济较为发达的东部沿海地区, 以高铁为主的铁路网络已基本建成, 该地区广泛分布深厚的饱和软土, 具有强度低、渗透性小、压缩性高、流变

性显著等不良工程特性. 由于地质构造等原因,在饱和软土层下通常分布有一定倾斜角度的下覆地层, 本文称为下覆倾斜地层. 对于下覆倾斜地层软土地基, 桩土复合地基因其承载力高、沉降小等特点为高铁广泛采用的基础形式, 且以桩-网复合地基为主^[1].

对于上述下覆倾斜地层软土地区较早修建的高速铁路, 考虑到设计、施工成本等因素, 在满足承载力前提下, 其桩-网复合地基通常采用等长桩设计. 这就使下覆倾斜地层软土桩-网复合地基设计中同时存在嵌固长度不同的嵌岩桩和摩擦桩. 在上部荷载(桩-网复合地基上路堤、列车荷载, 下同)作用下, 下覆倾斜地层软土地基中会产生较大的水平向推力, 可能造成桩-网复合地基和路堤的失稳破坏. 所以, 下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的受力、变形特征和破坏模式与水平成层地基相比存在较大差异.

为保障列车高速行驶的安全性和舒适性, 中国对高铁变形控制提出了严格要求. 《TB10621—2014 高速铁路设计规范》^[2] 中规定, 高速铁路工后沉降不得大于 10 cm(时速 250 km/h)和 5 cm(时速 300, 350 km/h), 沉降速率不得大于 3 cm/a(时速 250 km/h)和 2 cm/a(时速 300, 350 km/h). 然而, 对于下覆倾斜地层软土地基上的高速铁路, 路堤的不均匀沉降及侧向变形同样对高速铁路的安全运行具有重要影响^[3].

对于桩-网复合地基破坏模式, 学者们进行了相关研究. Broms 等^[4] 研究表明除剪切破坏之外, 桩体的破坏模式还有弯曲破坏和受拉破坏. Hashizume^[5]、Kitazume^[6-7] 和郑刚等^[8-9] 借助模型试验探讨了复合地基中桩体的破坏模式, 发现桩体的潜在破坏模式包括剪切破坏、弯剪破坏、弯拉破坏、倾倒、横移以及桩间土的绕流破坏, 且桩体的破坏模式与地基、外部荷载和桩体所在位置有关. Anjana 和 Won 等^[10-11] 指出嵌岩桩和摩擦桩的工作及破坏机理有明显的区别. 上述研究均是针对水平成层土, 而对于下覆倾斜地层桩-网复合地基的研究相对较少. 刘晋南和蒋鑫等^[12-14] 对斜坡地基路堤的变形及加固措施展开研究, 揭示了斜坡地基侧向变形与竖向沉降的关系及桩基对斜坡地基的加固机理. 顾行文等^[15] 通过土工离心机模型试验对山区倾斜基底桩-网复合地基的破坏模式进行研究, 指出桩体倾倒和桩间土绕流破坏与桩端嵌固长度、桩体所在位置、桩顶联接条件等因素有关.

本文基于浙江沿海某高速铁路工段典型断面, 开展土工离心机模型试验研究, 分析了下覆倾斜地

层软土中桩-网复合地基的变形特征、破坏模式. 有关下覆倾斜地层软土桩-网复合地基同时存在不同嵌固长度的嵌岩桩和摩擦桩的研究鲜有报道, 故本文成果可为相关问题的研究及工程设计提供借鉴.

1 工程原型概述

本试验高速铁路原型工段软土场地下分布倾角为 11°~27°不等的倾斜地层. 该工段采用等长桩设计的桩-网复合结构对下覆倾斜地层软土地基进行处理, 采用间距为 4 倍桩径的预应力管桩(详见下文), 正方形布桩; 网结构由两层碎石垫层(厚度为 0.25 m)夹一层土工格栅组成.

该工段高速铁路在运营期间出现竖向沉降差超限、水平位移不断增大等问题, 严重影响列车的运营安全. 并且, 对于下覆地层倾角越大的铁路断面, 变形趋势越明显. 因此, 为研究最不利状态, 选取倾角为 27°的下覆倾斜地层软土地基作为研究对象, 如图 1 所示. 该工段土层条件分述如下: (1) Q_4^{ml} 素填土、人工填土, 呈灰黄或黄褐色; (2) Q_4^{al} 淤泥质黏土, 呈灰色, 流塑状; (3) $Q_3^{\text{al+pl}}$ 粗角砾土, 稍-中密, 饱和, 呈灰、浅灰黄色; (4) 粉质黏土, 呈灰黄色, 软塑状; (5) I_3^{m} 中风化凝灰岩, 呈灰黄色. 地下水以第四纪孔隙潜水为主, 较为发育, 埋深为 0.5~2.0 m. 各土层物理力学参数如表 1 所示.

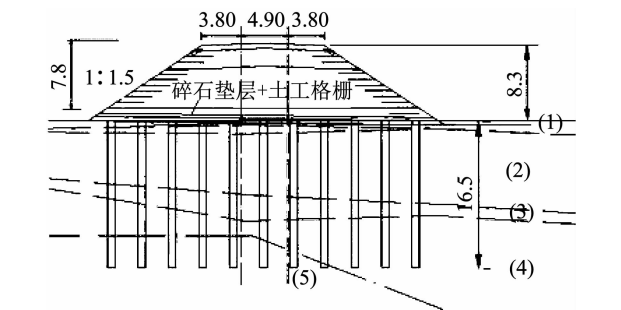


图 1 典型断面示意(m)
Fig. 1 Sketch of typical section(m)

表 1 土体物理力学参数
Tab. 1 Soil parameters for the centrifuge test

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 土工离心机模型试验

2.1 试验设备

土工离心机模型试验通过在模型上施加离心力,使模型达到与原型相同的应力状态^[16]. 本试验利用西南交通大学 TLJ-2 型土工离心机进行,其参数如表 2 示.

表 2 TLJ-2 型土工离心机参数

Tab.2 Parameters of the centrifuge type TLJ-2						
有效荷载/ (g·t)	旋转 半径/m	有效 半径/m	最大加 速度/g	主电机 功率/kW	数据采 集通道数	模型箱 尺寸/m
100	3.0	2.7	200	185	70	0.6× 0.4×0.4

2.2 土工离心模型设计

2.2.1 相似设计

综合考虑模型箱尺寸、边界效应及试验结果精度等因素,本试验的相似比尺 n 取 1/100. 再通过量纲分析法确定其他物理量的相似常数,如表 3.

表 3 试验相似常数

Tab.3 Similar constant of test					
物理量	量纲	相似常数	物理量	量纲	相似常数
离心加速度	LT^{-2}	$1/n$	位移	L	n
长度	L	n	应变	-	1
面积	L^2	n^2	应力、压强	$ML^{-1}T^{-2}$	1
体积	L^3	n^3	变形模量	$ML^{-1}T^{-2}$	1
质量	M	n^3	渗透系数	LT^{-1}	$1/n$
密度	ML^{-3}	1	时间	T	n^2
容重	$ML^{-2}T^{-2}$	$1/n$	集中力	MLT^{-2}	n^2

2.2.2 模型材料设计

1)模型土体. 本试验主要对下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的变形特征、破坏模式进行分析研究,所以,假定模型下覆地层不发生变形,仅考虑其几何相似关系. 试验中,采用水泥、河砂、黏土和石膏的混合材料(质量比为 0.5:7:1:5)对模型下覆地层进行制作. 由图 1 可知,软土层(1)、(3)的厚度较小,且本次试验主要考虑下覆倾斜地层及软土对桩-网复合地基和路堤的影响,故将土层(1)、(2)合并为(2) Q_4^m 淤泥质黏土,土层(3)、(4)合并为(4)粉质黏土. 杜延龄^[17]研究表明,当分析对象为黏性土时可采用原型土制作模型. 故本试验所用软黏土均取原型铁路工段,对其重塑后用于模型软土地基. 模型路堤的填筑材料采用煤屑、石英砂及黏土按一定比例混合而成,如图 2 所示,所配置的模型路堤填筑材料与原型路堤之间满足级配相似关系.

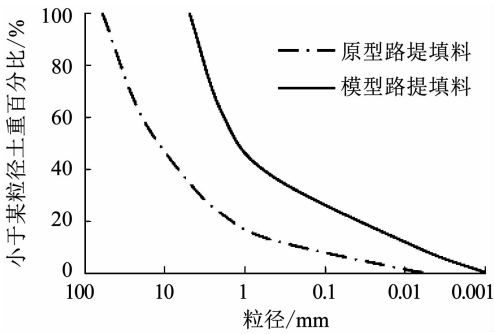


图 2 路堤填料级配曲线

Fig.2 Gradation curves for the embankment

2)土工格栅模拟材料. 既有研究成果表明,在土工离心机试验中可采用窗纱对土工格栅进行模拟^[18]. 本试验选取 I、II 两类窗纱材料作为原型土工格栅的备选模拟材料. 原型土工格栅的极限抗拉强度为 80 kN/m,最大延伸率约为 10.9%. 通过对这两类窗纱进行抗拉试验,得到 I 类窗纱的极限抗拉强度为 6.5 kN/m,最大延伸率 19.0%; II 类窗纱的极限抗拉强度为 23.6 kN/m,最大延伸率为 24.3%. 根据抗拉试验结果,两类窗纱均无法完全满足相似关系,但制作更低强度的模拟材料存在较大困难,目前,这仍是离心机试验研究中尚未解决的问题. 综合考虑各方面因素,选取 I 类窗纱作为土工格栅的模拟材料.

3)模型桩体. 原型桩体为外径 0.8 m、壁厚 0.1 m 的预应力管桩(PHC),长度 16.5 m. 根据相似原理,本试验在选择模型桩体材料时主要考虑刚度相似. 因此,选取外径 8.0 mm、壁厚 0.5 mm 的铝管对原型预应力管桩进行模拟,其刚度换算关系如表 4 所示. 可以看出,选用长度 16.5 cm 的铝管作为模型桩可以满足相似关系. 在制作模型时为防止软黏土灌入模型桩内,采用玻璃胶对模型桩两端进行封堵,并通过在模型桩外侧黏附细砂实现对桩侧摩阻力的模拟.

表 4 桩体刚度相似换算关系

Tab.4 Conversion relationships of pile stiffness			
桩体	弹性模量 $E/10^7$ kPa	面积 A/m^2	刚度 EA/kN
PHC 原型桩	3	0.219 8	6.594×10^6
PHC 模型桩	3	$0.219 8 \times 10^{-4}$	659.4
铝管	7	$0.117 8 \times 10^{-4}$	824.25

2.3 模型设计及试验方案

2.3.1 模型制作

基于所选取的典型断面,按照几何比尺($n = 1/100$)制作离心模型. 首先在模型箱的内壁上标记

出模型轮廓,对模型箱进行防水处理,并在内壁上涂抹凡士林以减小边界效应对试验结果的影响^[19]. 然后进行下覆倾斜地层的填筑、夯实,待模型下覆地层达到强度之后再进行模型地基软土的分层填筑. 先填筑重塑粉质黏土,达到标记高度后将其表面进行刮毛处理,再进行重塑淤泥质黏土的填筑.

为使模型地基软土与原场地保持一致,在模型土填筑完毕之后,以软土不排水抗剪强度作为控制指标,利用土工离心机对模型进行预固结处理. 处理结果表明,模型土不排水抗剪强度满足试验要求,如图 3 所示. 在模型地基表面标记出模型桩的位置,并利用水准尺将模型桩置入土体内,之后在桩基上铺设两层厚度为 1.0 mm 的细砂并将裁剪好的 I 类窗纱置于两层细砂之间. 最后,以压实系数为控制指标进行模型路堤的填筑,制作完成后的模型如图 4(a) 所示.

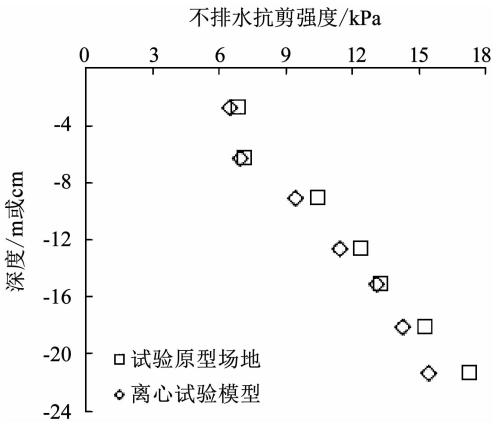


图 3 不排水抗剪强度

Fig. 3 Undrained shear strength

2.3.2 传感器及测点布置

为研究下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的变形特征与破坏模式,选取多种传感器监测模型的变形、受力等,传感器布置如图 4(b) 所示. 利用差动式位移计(W1 ~ W4)测量模型路堤顶面的竖向和水平位移. 将模型桩进行编号并根据其所在位置的不同划分为嵌岩桩、斜坡桩和摩擦桩,分别选取 4#、7#和 10# 3 类桩分析其桩身弯矩. 在淤泥质黏土与粉质黏土分界面处,通过竖向布置的土压力计(T1 ~ T6)在分界面不同位置监测软黏土水平向土压力. 此外,通过淤泥质黏土和粉质黏土中的孔隙水压力计(K1 ~ K2)可得超静孔隙水压力的变化.

选取其中一列模型桩,在其朝向下覆地层平台的一侧用绿色彩砂标记(如图 5),可分析桩间土的绕流. 如图 6 所示,选取两列模型桩测量加载前后的桩顶竖向、水平相对位移,以研究桩体在下覆倾斜地

层软土地基中的变形特征及破坏模式.

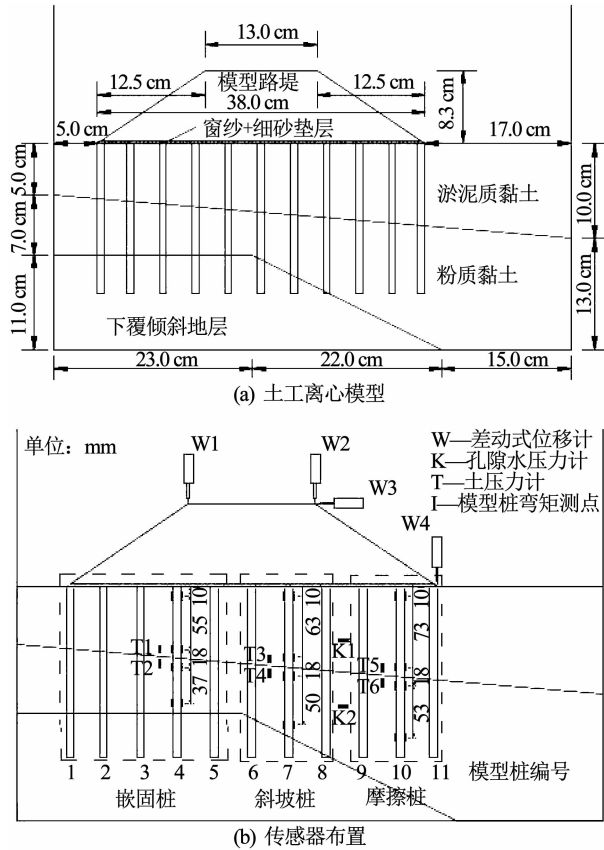


图 4 土工离心模型与传感器布置

Fig. 4 Layout of sensors and the model



图 5 彩砂桩示意

Fig. 5 Model pile with color sand

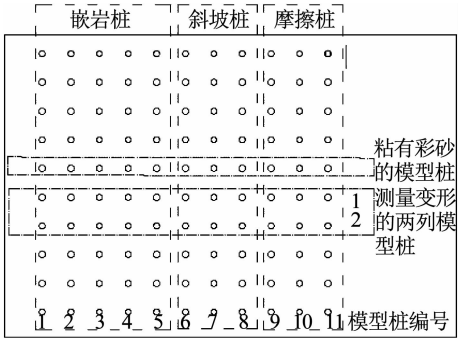


图 6 模型桩测点布置平面

Fig. 6 Layout of monitoring points on the piles

2.3.3 加载方案

采用分级加载方式对路堤分级填筑施工及列车运行进行模拟,模型路堤高 83 mm,路堤填筑过程分为 4 级进行加载,列车运行荷载由换算土柱法^[20]等效为静荷载进行施加. 本试验各级荷载对应的离心加速度均按照等效荷载法^[21-22]进行计算. 如图 7 所示,路堤填筑各级荷载和列车运行等效荷载在复合地基表面产生的应力等于该级离心加速度下模型地基表面产生的应力,具体计算公式为

$$P = N\gamma S_m / L_m = \gamma S_{p,h} / L_p. \tag{1}$$

式中: γ 为路堤土体重度; S_m 为模型路堤侧面积; L_m 为模型路堤底面长度; $S_{p,h}$ 为各施工阶段对应的原型路堤侧面积; L_p 为原型路堤底面长度.

通过式(1)得到各级荷载作用下对应的 N , 则该级荷载对应的离心加速度 a 为 Ng , 且此时超孔隙水压的消散时间为原型地基的 $1/N^2$. 具体加载工况如表 5 所示.

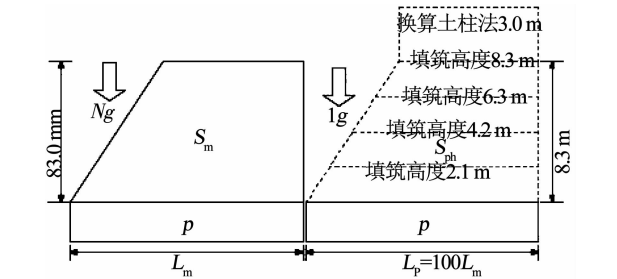


图 7 等效荷载法计算示意

Fig. 7 Schematic diagram of the equivalent load method

表 5 离心机加载工况

Tab. 5 Loading cases

分级荷载	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
工后静置期	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	

3 试验结果及分析

试验后对模型进行开挖、测量,主要从模型路堤、桩-网复合地基的变形以及模型桩弯矩、位移等方面分析下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的变形及破坏特性. 文中所提路堤顶面及桩体顶部的位移均已按几何比尺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、水平)位移随荷载的发展

规律如图 8 所示(以向下、向右的位移为正). 随荷载的不断增加,路堤顶面的竖向及水平位移均不断增长. 截至试验结束,路堤顶面最大竖向和水平位移分别为 31.8 cm(W1)、35.7 cm(W2)和 26.2 cm(W3). 竖向和水平位移均主要发生在施工及工后静置阶段,分别占位移总量的 67.3%(W1)、62.0%(W2)和 57.3%(W3). 进入运营阶段之后,路堤顶面的竖向和水平位移随运营时间均有明显增长,但增长速率逐渐减小. 截至运营满 3 年,路堤顶面的工后沉降为 10.4 cm(W1)和 13.6 cm(W2),均已超过规范规定限值^[2]. 此外,由图 8 可知,路堤顶面的竖向沉降差在施工阶段随上部荷载的增大逐渐减小;在工后静置阶段,竖向沉降差和水平位移基本保持稳定;而进入运营阶段后,竖向沉降差随运营时间的推移不断发展,且试验结束时模型路堤顶面的竖向沉降差有继续增大的趋势. 这与实际工程反应的位移变化趋势相契合.

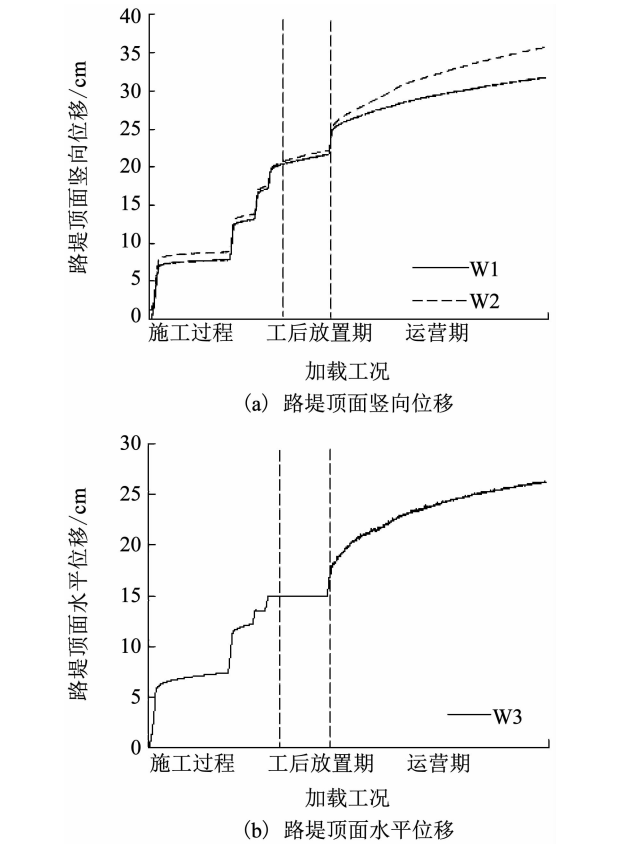


图 8 模型路堤顶面位移

Fig. 8 Displacement of the embankment top surface

综合模型开挖结果分析可知,在运营阶段开始前,上部荷载较小,沉降主要由复合地基下卧层的压缩引起,此时模型路堤顶面产生的竖向沉降差较小. 投入运营后,上部荷载增大,复合地基中斜坡桩和摩擦桩出现不同程度的向上、向下刺入及倾倒破坏,造成路堤顶面的水平位移及竖向沉降差进一步增大,

这将严重影响高速铁路的运营安全。

3.2 超静孔隙水压力

淤泥质黏土层与粉质黏土层中超孔隙水压力随荷载和时间的变化如图9所示。在施工阶段,随着每一级荷载的施加,软土层中均出现超孔压峰值,且粉质黏土层中的超孔压大于淤泥质黏土层,说明地基软土中的超孔压呈现沿深度方向逐渐增大的趋势。运营阶段超孔压随时间逐渐消散,淤泥质黏土层中超孔压的消散速度大于粉质黏土层,这表明在运营初期地基软土的沉降主要是上层淤泥质黏土层的固结引起。运营期满3年,地基软土中的超孔压仍保持较高水平,说明运营车载的连续作用使得地基土的超孔压将持续较长时间。这将对路基的沉降、沉降差及水平位移等造成不利影响。

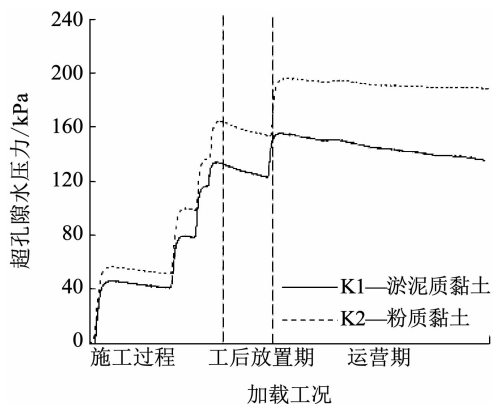


图9 超孔隙水压力

Fig. 9 Excess pore pressure

3.3 桩-土复合地基变形

由试验后模型开挖的结果可知,桩-网复合地基形成一个偏向倾斜地层斜坡向下一侧的不对称沉降盆,模型桩在荷载作用下出现不同程度的向下刺入破坏。为研究桩-网复合地基中的桩体变形,对模型桩桩顶的位移(竖向、水平)进行测量,如图10所示。在荷载作用下,模型桩竖向位移的分布呈现先增长然后逐渐减小的趋势,其中最大竖向位移出现在8#桩。由图10(a)可以看出,模型桩顶部的竖向位移沿下覆地层斜坡向下方呈不对称“V”字型分布。

由于下覆倾斜地层的存在,在上部荷载作用下地基中会产生水平向推力。由图10(b)可以看出,桩顶的水平位移沿下覆地层斜坡向下方逐渐增大。由于斜坡桩的嵌固长度沿倾斜地层斜坡向下逐渐减小,锚固作用越来越弱,直至无任何锚固,在水平推力作用下斜坡桩出现了不同程度的倾倒。此外,由于桩端未嵌固,摩擦桩在水平推力作用下发生不同程度的整体横移及倾倒。桩体的倾倒或横移会加剧路堤的水平位移及竖向沉降差。

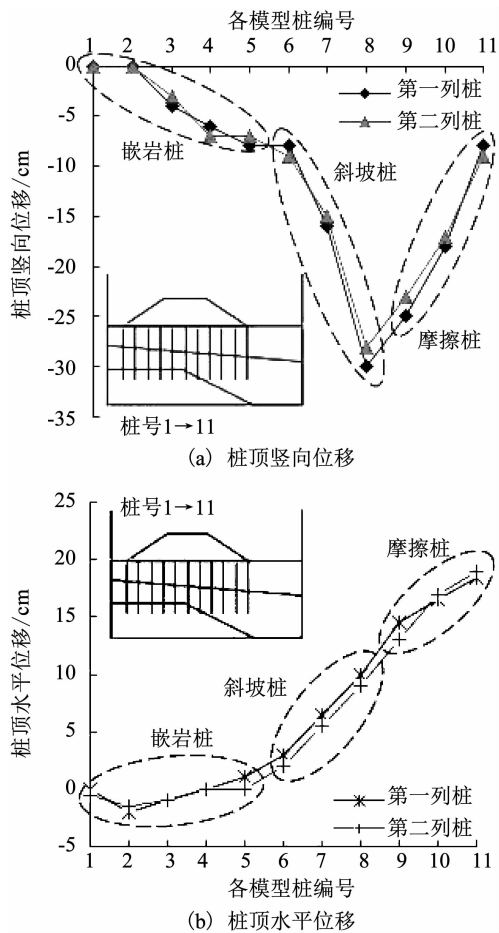


图10 模型桩桩顶位移

Fig. 10 Displacement of the pile head

如图11所示,在斜坡桩(6#、7#、8#)区域的淤泥质黏土中可以清晰发现桩体一侧的彩砂颗粒移动到另一侧。这说明由于下覆倾斜地层的存在,斜坡桩周围的淤泥质黏土发生了桩间土绕流破坏,而在嵌岩桩和摩擦桩区域并未发现明显的淤泥质黏土绕桩流动现象。随着斜坡桩嵌固长度的逐渐减小,淤泥质黏土绕桩流动的范围也逐渐缩小。相较淤泥质黏土,粉质黏土具有较高的强度和黏聚力,故在试验中并未发现粉质黏土绕桩流动现象。由此可知,桩间土的绕桩流动破坏与下覆地层倾斜程度、桩端嵌固条件及土体强度有关。

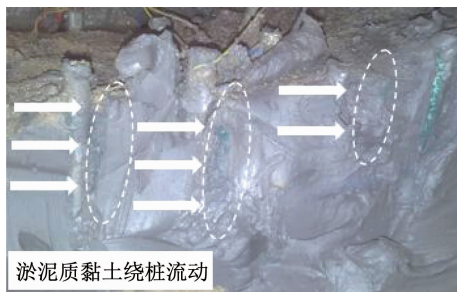


图11 桩间土绕流示意

Fig. 11 Overall failure of the soft soil

如图 12 所示,由模型开挖观察可知,路堤中心偏下覆地层斜坡向下一侧模型桩桩顶处的土工格栅出现多处刺入破坏,且大多数破坏出现在斜坡桩桩顶处。土工格栅破坏及模型桩向上刺入会进一步加剧路堤顶面的竖向沉降差。

综合分析可知,下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的竖向沉降主要由 3 部分组成:上部荷载作用下桩-网复合地基下卧层的压缩;桩体在上部荷载作用下出现向下、向上的刺入破坏;在地基土体水平推力的作用下,桩体倾倒或整体横移引起的桩-网复合地基竖向沉降。

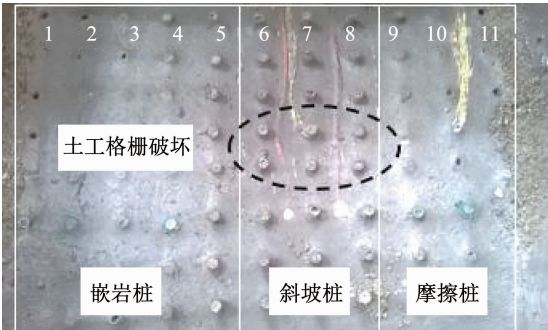


图 12 试验后土工格栅破坏情况
Fig. 12 Destruction of the geogrid

3.4 桩身弯矩

4#嵌岩桩、7#斜坡桩和 10#摩擦桩桩身弯矩 M 随荷载的变化如图 13 所示, M_u 表示桩体的极限弯矩,定义桩身右侧受拉为正,左侧受拉为负,并采用 M/M_u 对桩体弯矩进行描述。随着上部荷载的不断增大,模型桩所受弯矩逐渐增大,位于路堤中心以下的 7#斜坡桩桩身弯矩最大,10#摩擦桩最小。4#嵌岩桩桩身最大弯矩 (M/M_u) 约为 0.60,位于粉质黏土与下覆倾斜地层交界处附近;7#斜坡桩和 10#摩擦桩的最大弯矩 (M/M_u) 位于淤泥质黏土和粉质黏土交界处,分别为 0.91 和 0.54。

从模型开挖结果分析可知,模型路堤及桩-网复合地基沿下覆地层斜坡向下方向发生明显滑动。从斜坡桩到摩擦桩,桩体的倾倒程度随桩端嵌固长度的减小逐渐增大,这与桩身弯矩的分布情况相契合。因此,在下覆倾斜地层软土桩-网复合地基中,桩身弯矩与桩端嵌固条件、下覆地层倾斜程度及上部荷载有关。

3.5 桩侧土压力

复合地基软土分界面的不同位置处,淤泥质黏土与粉质黏土侧向土压力随荷载的变化如图 14 所示。由图 14(a) 和 (c) 分析可知,对于嵌岩桩和摩擦桩区域,软土分界面处淤泥质黏土与粉质黏土的水平推力随上部荷载的增加不断上升,且水平推力的

差值随时间增加逐渐减小并趋于稳定。其中,嵌岩桩区地基土分界面处水平推力的差值由运营初期的 4.5 kPa 减小到运营 3 年时的 1.8 kPa;摩擦桩区,水平推力的差值由 21.7 kPa 减小至 13.4 kPa。

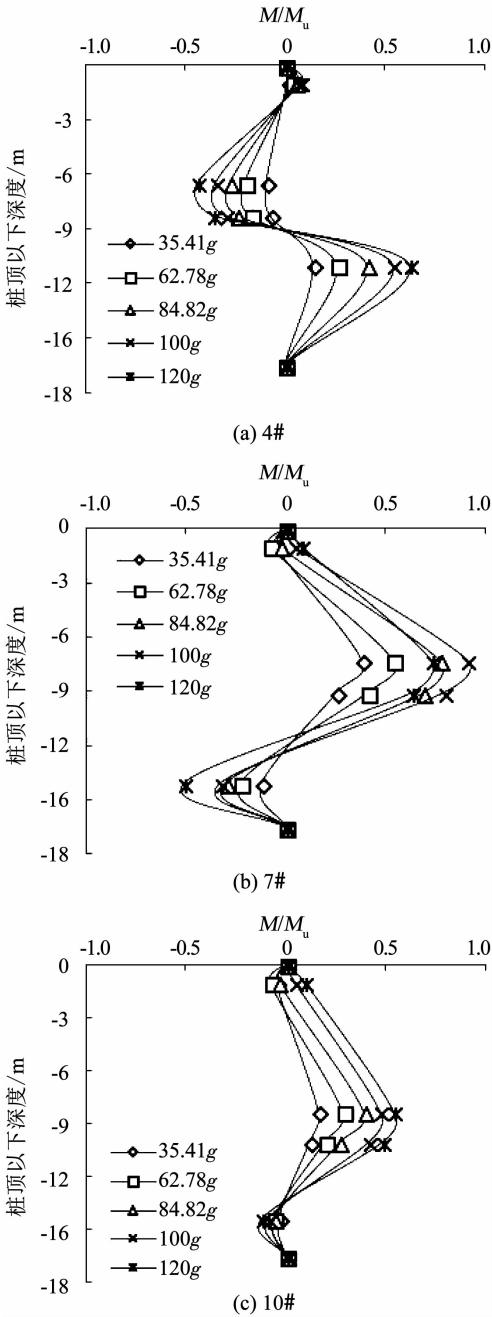
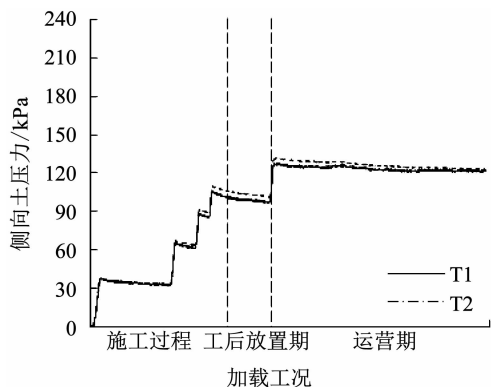


图 13 模型桩弯矩

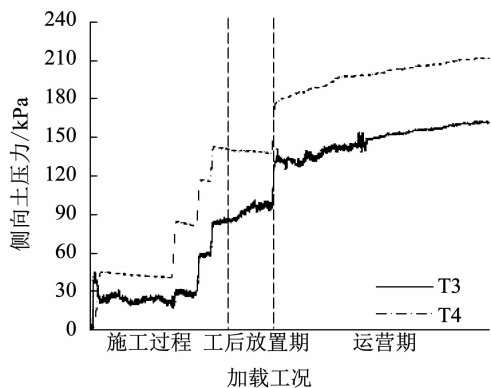
Fig. 13 Bending moment of model piles

由图 14(b) 可知,对于斜坡桩区,施工阶段淤泥质黏土与粉质黏土分界面处水平推力的差值随上部荷载的增加不断增大。运营阶段,地基土分界面处水平推力的差值随运营时间推移由 37.4 kPa 增长到 50.0 kPa。由于淤泥质黏土与粉质黏土土性的不同以及下覆倾斜地层的存在,斜坡桩区域软土分界面处淤泥质黏土中的水平推力远小于粉质黏土,这与地基中软土绕桩流动的情况相符合。综合开挖结果

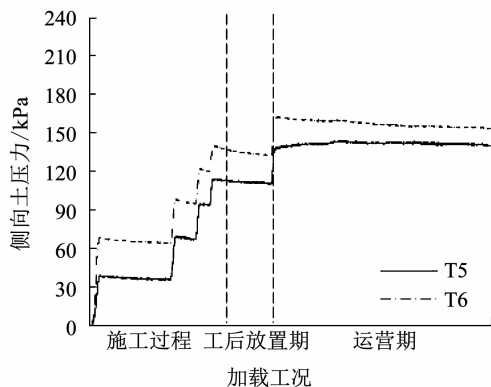
分析可知,路堤中心处的斜坡桩同时承担弯矩和剪力,可能发生弯剪破坏.斜坡桩的嵌固长度沿下覆地层斜坡向下逐渐减小,此处桩体可能发生倾倒破坏.



(a) 嵌岩桩桩间土侧向土压力



(b) 斜坡桩桩间土侧向土压力



(c) 摩擦桩桩间土侧向土压力

图 14 软黏土分界面的侧向土压力

Fig. 14 Lateral soil pressure on the interface of soft soil

在下覆倾斜地层软土桩-网复合地基中,由于嵌岩桩、斜坡桩及摩擦桩所处的位置不同,其变形、受力特征及破坏模式也不同.基于本文试验结果及文献[8-9]的研究成果可知,对于不同位置的嵌岩桩,越远离路堤中心桩身弯矩越大,其潜在的破坏模式为弯拉破坏;越靠近路堤中心,由于下覆倾斜地层的存在,软黏土分界面处水平推力差值逐渐增大,此处的少数嵌岩桩可能发生弯剪破坏.摩擦桩由于发生了刚性位移,桩身弯矩明显减小,其潜在的破坏模式为倾倒及横移破坏.对于斜坡桩,桩端的嵌固长度

沿下覆地层斜坡向下不断减小,其潜在的破坏模式为弯剪破坏或倾倒破坏.此外,由于东部沿海地区地下水位较高,对混凝土造成的中等溶出型侵蚀^[23]会进一步削弱桩体的承载能力,从而可能导致复合地基和路堤的失稳破坏.

4 结 论

1)路堤顶面的竖向、水平位移主要发生在施工及工后静置阶段.进入运营阶段后,路堤顶面水平位移及竖向沉降差随运营时间仍有明显发展,严重影响列车的安全运行.

2)随倾斜地层埋深由小到大,依次为嵌岩桩、斜坡桩和摩擦桩,从嵌岩桩到摩擦桩,桩顶的水平位移逐渐增大,且斜坡桩出现了不同程度的淤泥质黏土绕流破坏;桩顶的竖向位移呈偏向下覆地层斜坡向下一侧的不对称“V”字型分布.路堤中心下斜坡桩桩顶处的土工格栅为刺入破坏,复合地基形成偏向下覆地层斜坡向下一侧的不对称沉降盆.

3)下覆倾斜地层软土桩-网复合地基的竖向沉降主要包括复合地基下卧层的压缩、桩体向上及向下的刺入破坏和桩体倾倒、横移及地基土体水平位移所造成的复合地基沉降.

4)嵌岩桩的潜在破坏模式主要为弯拉破坏;随着桩端嵌固长度的逐渐减小,斜坡桩的潜在破坏模式为弯剪破坏或倾倒破坏;摩擦桩的潜在破坏模式为倾倒及横移破坏.

通过本文的试验研究发现,下覆倾斜地层软土桩-网复合地基采用等长桩设计是不合理的,并对高铁的安全运营造成威胁.并且,针对下覆倾斜地层桩-网复合地基的设计方法,以及这类既有铁路地基的维护方案及有效加固措施亟待展开进一步深入研究.

参考文献

- [1]王其昌.高速铁路土木工程[M].成都:西南交通大学出版社,1999
WANG Qichang. Civil engineering for high speed railway [M]. Chengdu: Press of Southwest Jiaotong University, 1999
- [2]高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S].北京:中国铁道出版社,2015
Code for design of high speed railway: TB 10621 - 2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015
- [3]姚裕春,魏永幸,袁碧玉.高速铁路斜坡路堤变形控制探讨[J].铁道工程学报,2014,5:16
YAO Yuchun, WEI Yongxing, YUAN Biyu. Exploration on the deformation and control of embankment constructed on slope foundation for high-speed railways [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 5: 16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2014.05.004

[4] BROMS B B. Can lime/cement columns be used in Singapore and Southeast Asia [R]. 3rd GRC Lecture, Nanyang Technological University and NTU-PWD Geotechnical Research Centre, 1999: 214

[5] HASHIZUME H, OKOCHI Y, DONG J, et al. Study on the behavior of soft ground improved using deep mixing method [C] // Proceedings of the International Conference on Centrifuge 98. 1998: 851

[6] KITAZUME M, MARUYAMA K. External stability of group column type deep mixing improved ground under embankment loading [J]. Soils and Foundations, 2006, 46 (3) : 323. DOI: 10.3208/sandf.46.323

[7] 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. DOI: 10.3208/sandf.47.437

[8] 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

[9] 郑刚, 刘力, 韩杰. 刚性桩加固软弱地基上路堤稳定性问题 (II) — 群桩条件下的分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (12) : 1811
ZHENG Gang, LIU Li, HAN Jie. Stability of embankment on soft subgrade reinforced by rigid inclusions (II) : Group piles analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (12) : 1811

[10] 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. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2015.05.003

[11] WON P H, JAEHO L, SEONGWON H. Full-scale tests on embankments founded on piled beams [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 14 (12) : 1. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001145

[12] 刘晋南, 蒋鑫, 邱延峻. 软弱层特性对斜坡软弱地基路堤变形的影响 [J]. 西南交通大学学报, 2013, 48 (2) : 303
LIU Jinnan, JIANG Xin, QIU Yanjun. Influence of weak layer properties on deformation of embankment over sloped weak ground [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (2) : 303. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.02.018

[13] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.04.014

[14] 蒋鑫, 梁多伟, 刘晋南, 等. 碎石桩与抗滑桩联合加固斜坡软弱地基路堤的工作机理分析 [J]. 铁道学报, 2015, 37 (12) : 81
JIANG Xin, LIANG Duowei, LIU Jinnan, et al. Working mechanism of embankment over sloped weak ground reinforced by combination of gravel piles and slide-resistant piles [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (12) : 81. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2015.12.013

[15] 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 (增刊 1) : 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. DOI: 10.11779/CJGE2017S1040

[16] 朱维新. 土工离心模型试验研究状况 [J]. 岩土工程学报, 1986, 8 (2) : 82
ZHU Weixin. Centrifuge modelling for geotechnical engineering in the world [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8 (2) : 82. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1986.02.009

[17] 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]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 8 : 19. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.1993.08.003

[18] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2007.05.021

[19] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.1996.03.012

[20] 铁路路基设计规范: TB 10001—2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005
Code for design on subgrade of railway: TB 10001-2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005

[21] BUI P D, 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 P D, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2009.06.012

[22] 杜延龄. 土工离心模型试验技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010
DU Yanling. Experimental technology of centrifuge modeling tests [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010

[23] 侯敬会. 土壤与地下水环境下混凝土结构耐久性若干问题的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005
HOU Jinghui. Studies on the durability of reinforced concrete structure exposed to soil and groundwater environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005

(编辑 刘 彤)