

# 高速铁路湿陷性黄土桩筏复合地基沉降控制效应

王长丹<sup>1</sup>, 王炳龙<sup>1</sup>, 王旭<sup>2</sup>, 周顺华<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为研究和分析高速铁路荷载作用下刚性桩桩筏复合地基控制湿陷性黄土地基沉降的效应, 采用离心模型试验的方法对不同桩间距设置条件下的刚性桩桩筏复合地基进行了模拟试验. 试验研究表明: 湿陷性黄土地基无法满足高速铁路轨道结构对路基工后沉降的要求, 需要加固处理. 随着桩间距由2倍增至6倍桩径, 地基总沉降量及工后沉降量显著增大且变化速率较大, 桩间土对桩体的负摩阻力增大. 桩间土与桩体相对位移中性点位置随着桩间距的增大而显著降低, 工后阶段中性点位置变化趋势为逐步上升并趋于稳定. 工后阶段筏板与桩体相对位移量呈减少并趋于稳定的趋势. 差异沉降主要发生在施工阶段, 桩筏复合地基工后阶段控制沉降及差异沉降的能力较好.

**关键词:** 路基工程; 湿陷性黄土; 刚性桩; 桩筏复合地基; 离心模型试验; 沉降

**中图分类号:** TU411.93; U213.15 **文献标识码:** A

## Settlement Controlling Effect in Pile Raft Composite Foundation on Collapsible Loess in High Speed Railway

WANG Changdan<sup>1</sup>, WANG Binglong<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>2</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the experimental study at home and abroad, the centrifuge model test is used to imitate pile raft composite foundation in different pile spacing to research and analyze the settlement controlling ability of pile raft composite foundation on collapsible loess ground in high speed railway. The research results show that collapsible loess ground which can not meet the request on settlement after construction in track structure in high speed railway need be reinforced. The settlement after construction, differential settlement, pile-

soil load share ratio and the negative skin friction of pile get larger with the extending of pile spacing from two to six times of the pile diameter. The foundation settlement, settlement after construction, and the negative skin friction of pile get larger with the extending of pile spacing from two to six times of the pile diameter. Neutral point of the relative displacement between pile and soil drop with extending of pile spacing and rise to a stable level in post-construction stage. Value of the relative displacement between pile and cushion drop to a stable level in post-construction stage with extending of pile spacing. Differential settlement occurs mainly in construction stage. The differential settlement controlling effect of pile raft composite foundation is better in post-construction stage.

**Key words:** subgrade engineering; collapsible loess; rigid pile; pile raft composite foundation; centrifuge model test; settlement

路基结构作为高速铁路轨道结构基础, 具有较好的强度、刚度、稳定性是确保列车高速、安全、舒适平顺运营的前提条件. 路基工后沉降控制是高速铁路路基设计的关键, 而控制路基的工后沉降主要是控制地基的工后沉降<sup>[1]</sup>. 高速铁路软弱地基主要采用复合地基处理措施来控制. 桩筏复合地基在建筑工程中应用, 研究, 试验的较多<sup>[2]</sup>, 在铁路湿陷性黄土地基中的应用和研究较少<sup>[3]</sup>. 尤其是在铁路路堤荷载作用下的刚性桩桩筏复合地基的作用机理、沉降控制的研究较少, 不能满足工程应用的需要. 结合铁路路基工程特点, 开展铁路路堤荷载作用下刚性桩桩筏复合地基沉降控制效应的研究工作对理论研究和实际工程应用具有重要意义.

目前对黄土湿陷变形特性的研究方法主要是原位试验和室内压缩试验<sup>[4]</sup>. 文献<sup>[5]</sup>进行了控制吸力条件下, 通过固结仪、三轴仪等设备开展了对黄土湿

收稿日期: 2011-05-15

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z116), 铁道部科技研究开发计划(2010G003-A)

第一作者: 王长丹(1982—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为高速铁路路基新结构形式和地基处理.

E-mail: 2008wangchangdan@tongji.edu.cn

陷试验的研究.文献[6]通过三轴等应力比试验和侧限压缩试验研究了黄土在压缩试验状态下结构变化特性.含水率对原状黄土结构参数的影响明显;黄土的结构参数受密度、含水率等因素对重塑黄土的影响较为明显.文献[7]通过室内侧限压缩试验,指出用重塑黄土代替原状黄土来研究非饱和黄土是可行的.文献[8]通过离心模型试验模拟原状与重塑黄土试坑浸水试验,提出以重塑黄土代替原状黄土模拟其沉降变形的可行性.土工离心模型试验能够再现重力下原型变形过程,在土体变形规律领域得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>.但尚未见到采用土工离心模型试验方法对高速铁路湿陷性黄土刚性桩桩筏复合地基的沉降变形研究的文献报道.对刚性桩桩筏复合地基中桩—桩间土—筏板结构—碎石垫层间相互作用及机理等的研究尚不充分,亟待进一步深入开展研究工作.

本文采用土工离心模型试验的方法对高速铁路湿陷性黄土地基不同桩间距参数设置条件下的刚性桩桩筏复合地基进行了模拟,在对试验结果分析的基础上探讨了此地基处理方法的可行性.同时对不同桩间距条件下刚性桩桩筏复合地基沉降控制效应及复合地基中心点变化规律进行了分析,为理论研

究及工程实践提供一种新的思路,方法和依据.

## 1 试验方案与设计

### 1.1 试验设计

试验设备:采用同济大学 20L-30 型土工离心机进行,该离心机的基本参数包括有效旋转半径 1.55 m、最大离心加速度 200  $g$  ( $g$  为重力加速度)、模型箱尺寸为:415 mm×370 mm×230 mm.试验的离心加速度为 100  $g$ .

试验模型设计:按照模型比例尺 1:100 制作试验模型,土工模型试验中为使模型材料与原型材料的物理力学特性相似,取用现场土料来模拟实际土层<sup>[9]</sup>.试验土料取自兰州黄河Ⅲ级阶地,为Ⅳ级自重湿陷性黄土.试验中对湿陷性黄土层的模拟是通过严格控制关键物理指标重塑黄土来实现的.对于以沉降观测为目的的试验研究中,用重塑黄土代替原状黄土进行离心模型试验模拟其湿陷变形的的方法是可行的<sup>[15]</sup>.稳定持力层材料采用砂土来进行模拟.试验模型主要控制指标见表 1,在此控制指标下重塑及原状湿陷性黄土具有相近的沉降变形性质<sup>[8]</sup>.

表 1 试验模型主要控制指标

Tab.1 Main controlling indexes of testing model

土层或模拟土体	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	含水量 $\omega/\%$	孔隙比 $e$	孔隙率 $n$	饱和度 $S_r/\%$	土与水的 重度之比	变形模量 $E/MPa$	粘聚力 $c/kPa$	内摩擦 角 $\phi/(^\circ)$
原状自重湿陷性黄土	1.53	7.7	0.91	0.48	23.0	2.71	25.3	26.5	36.3
重塑湿陷性黄土	1.60	19.0	1.02	0.50	50.7	2.71	16.8	16.6	24.3
路堤填土	2.08	19.0	0.55	0.35	93.5	2.71	—	35.1	60.3

刚性桩的模拟,按桩身竖向抗压刚度( $EA$ )及抗弯刚度( $EI$ )相似要求选用模型桩<sup>[10]</sup>.试验中的刚性桩在满足几何相似的条件选用铝管模拟,铝的弹性模量  $E=7.1 \times 10^4 MPa$  (钢筋混凝土预制桩的弹性模量  $E=3.8 \times 10^4 MPa$ ),模拟原型桩长 16 m,直径 40 cm,壁厚 10 cm,试验中刚性桩体自身的压缩变形量忽略不计.桩基入土方式采用打入方式,桩体打入稳定持力层 1 m.碎石垫层采用细砂(粒径 0.5~3.0 mm)模拟.钢筋混凝土板材料选用铝合金板模拟.试验时间按固结等问题  $T_M = \frac{1}{N^2} T_H$  进行换算,其中  $T_M, T_H$  分别为原型和模型时间<sup>[10]</sup>,  $N$  为实际尺寸与模型尺寸的相似比.路堤设计参数及高速铁路列车及轨道结构荷载参照相关规范的要求.

### 1.2 试验设计方案

试验分为两组,分别为高速铁路荷载作用下湿

陷性黄土地基横断面沉降观测试验和路基中心线下刚性桩桩筏复合地基中心纵断面沉降观测试验.路基设计高度 6.0 m(原型值,下同).重塑湿陷性黄土层厚度为 15 m,其下为 2 m 厚碎石稳定持力层.高速铁路列车及轨道结构荷载采用换算土柱的方法模拟.试验中采用桩间距( $s$ )组为: $s=2D$  ( $D$  为桩径), $4D, 6D$ .筏板结构厚度为 45 cm;碎石垫层厚度为 30 cm.选取每桩间距组中间(第 3 排)桩体及桩间土为观测点位,减少试验中各组观测点间相互影响.

工后沉降开始的时间,考虑到实际需要的施工工期、技术条件、模型超载预压等因素统一规定为路堤填筑完成后一个月(第 200 天)开始到路堤填筑完成后五年(第 1970 天)为止的沉降量计入工后沉降量.试验模型如图 1,图 2 所示.

### 1.3 试验数据采集与误差分析

试验中边界效应主要来自模型箱边壁对模型的

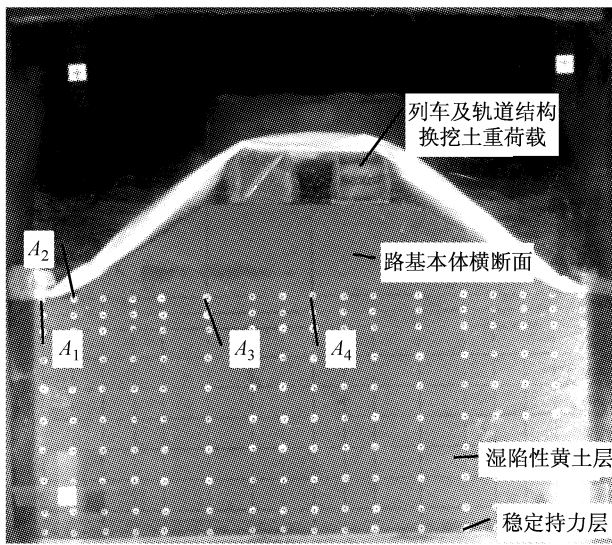


图 1 湿陷性黄土地基试验模型

Fig.1 The model of test on non-reinforced remold collapsible loess

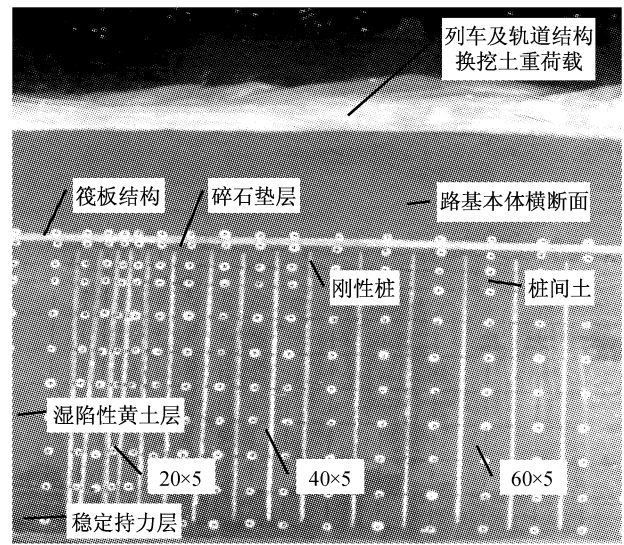


图 2 桩筏复合地基试验模型

Fig.2 The model of test on piled raft composite foundation

约束作用. 试验中在模型箱侧壁涂抹凡士林来减小摩擦, 以保证试验数据的可靠性和准确性. 模型位移观测按试验要求布置塑料粒子作为模型观测点. 塑料粒子的位移变形和该布设点土体的位移变形同步, 通过定点高速同步摄影系统在试验的不同阶段对位移标志进行成像, 通过计算机图形处理软件来定量分析土体的位移场变化情况. 模型试验中针对系统固有误差进行的分析表明试验的最大相对误差等要求满足试验的要求.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 未处理湿陷性黄土地基沉降变形分析

高速铁路荷载作用下湿陷性黄土地基表面的沉降量和沉降速率如图 3 所示. 试验分别对路基坡脚外 2 m 处 ( $A_1$ ), 路基坡脚处 ( $A_2$ ), 路肩中心线下 ( $A_3$ ) 及路基中心线下 ( $A_4$ ) 地基变形进行了观测.

施工阶段随着路堤荷载的增大,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  各观测点的地基沉降量分别达到 66.2, 96.0, 177.7, 205.5 cm. 路基中心线下地基沉降量最大, 是地基沉降控制的重点区域. 通过对试验数据的分析可知: 湿陷性黄土地基上修筑高速铁路, 施工期间地基沉降非常显著. 地基工后沉降量及年沉降速率见表 2. 路基中心线下地基工后沉降量为 13.6 cm, 最大年沉降速率  $7.0 \text{ cm} \cdot \text{年}^{-1}$ . 不能满足高速铁路轨道结构对路基工后沉降及沉降速率的要求, 必须对湿陷性黄土地基处理来满足沉降变形要求.

表 2 各观测点工后沉降统计表

Tab.2 Post-construction settlement on different observation spots

观测点位	工后总沉降量 / cm	第 2 年沉降速率 / $(\text{cm} \cdot \text{年}^{-1})$	第 3 年沉降速率 / $(\text{cm} \cdot \text{年}^{-1})$	第 4 年沉降速率 / $(\text{cm} \cdot \text{年}^{-1})$
路基坡脚外 2 m 处 ( $A_1$ )	8.4	5.1	1.9	0.8
路基坡脚处 ( $A_2$ )	9.0	5.4	2.2	0.9
路肩中心线下 ( $A_3$ )	12.5	6.5	2.9	1.8
路基中心线下 ( $A_4$ )	13.6	7.0	3.5	2.2

### 2.2 桩筏复合地基沉降控制效应分析

#### (1) 桩间距变化对地基沉降影响效应

最大总沉降量和工后沉降量均发生在路基中心线下 ( $A_4$ ) 地基, 桩筏复合地基沉降观测以此纵断面地基为观测对象. 桩间距变化对于地基沉降 (筏板结构表面沉降为参照点) 的影响如图 4 所示. 施工阶段, 2D, 4D, 6D 桩间距参数下筏板沉降量分别为: 39.6, 42.3, 65.6 cm. 工后沉降量分别为: 2.7, 5.7, 7.9 cm; 工后最大沉降速率分别为: 1.4, 3.0, 4.6  $\text{cm} \cdot \text{年}^{-1}$ . 随着桩间距增大, 4D 和 6D 相较于 2D, 工后沉降量分别增加了 111% 和 193%, 最大沉降速率分别增加了 115% 和 229%, 复合地基沉降控制能力急剧下降, 桩间土对桩体负摩阻力使得桩体承受荷载增大.

桩筏复合地基能有效发挥桩间土与桩体共同承受荷载能力, 使得桩体、筏板结构、碎石垫层、桩间土成为相互协调作用的整体. 桩筏复合地基沉降随桩间距的增加而显著增大. 随着桩间距的增大, 通过对试验结果的分析表明桩筏复合地基可有效控制湿陷性黄土地基沉降, 建议选择承载力相对较高土层为桩端持力层. 桩间距根据工程地质条件、复合地基承载力、

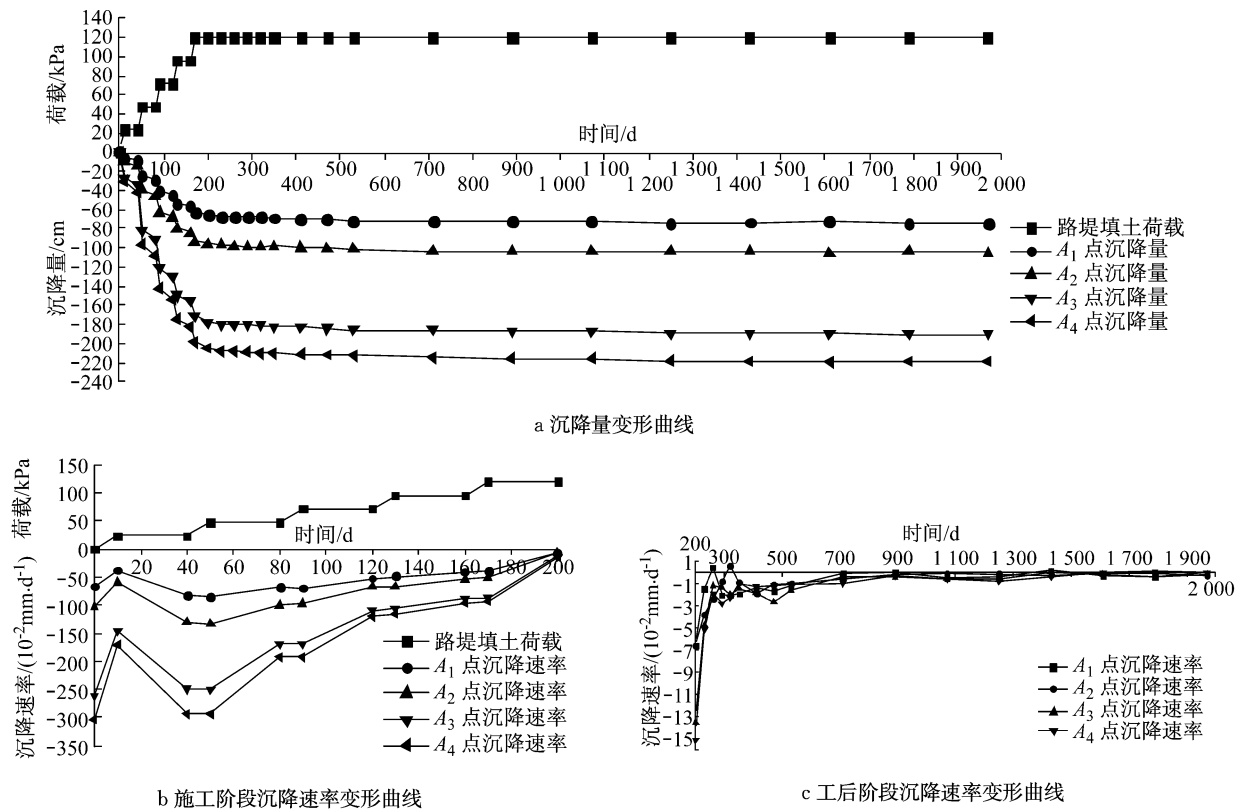


图 3 湿陷性黄土地基沉降变形曲线

Fig.3 Deformation curve of settlement on non-reinforced remold collapsible loess

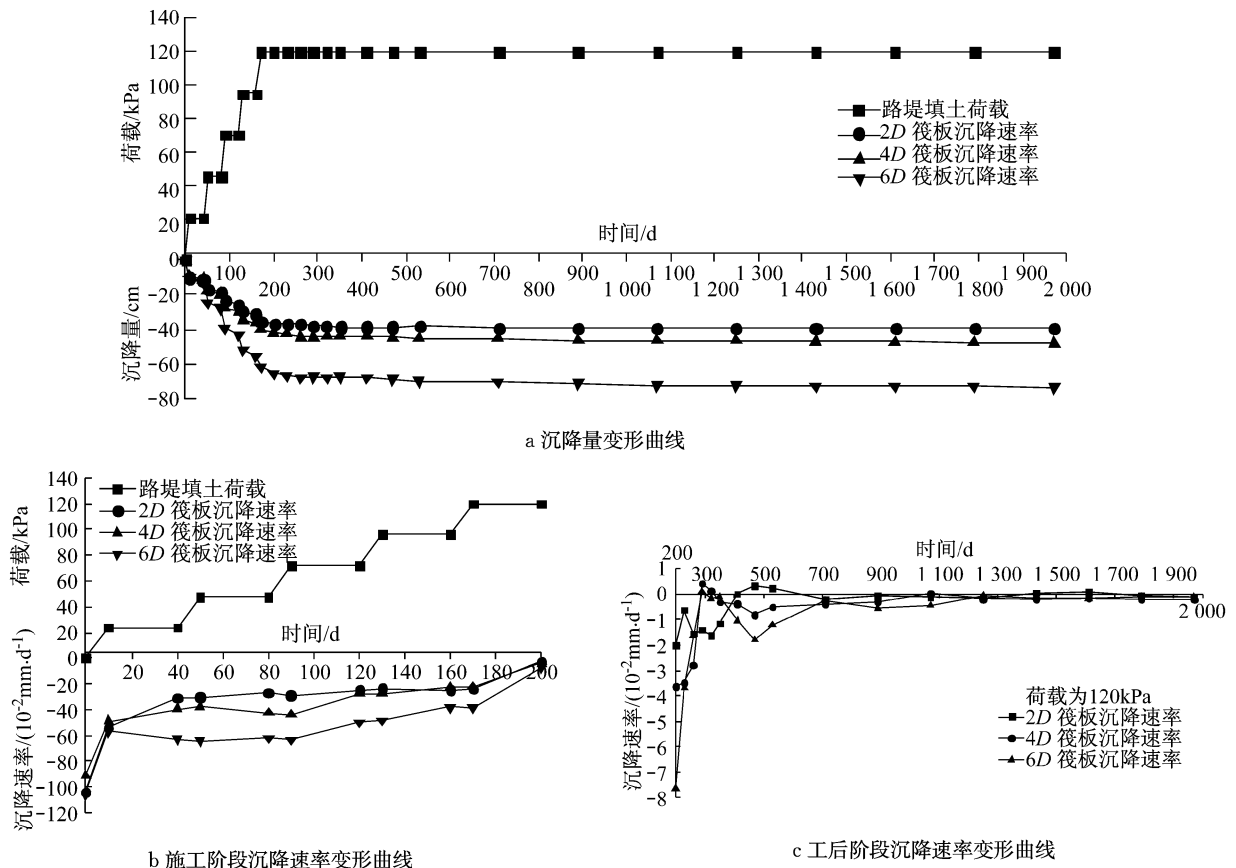


图 4 不同桩间距下筏板结构沉降变形曲线

Fig.4 Deformation curve of raft structure settlement at different pile spacing

沉降变形控制要求等因素综合确定。

(2) 桩间土与桩体相对位移及中性点变化规律

试验分析假定条件:①桩体为刚性桩,桩体自身压缩变形量忽略不计;②桩间土沉降观测点为两相邻桩体中间土体.通过对桩间土与桩体沉降量及沉降速率比较,来分析桩间土与桩体相对位移及中性点位置的变化规律.按照假定条件进行反演分析,桩间土体与桩体相对位移曲线如图 5~图 7 所示。

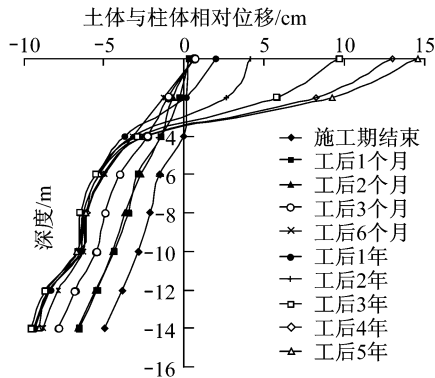


图 5 2D 桩间土与桩体的相对位移

Fig.5 The relative displacement between pile and soil in 2D

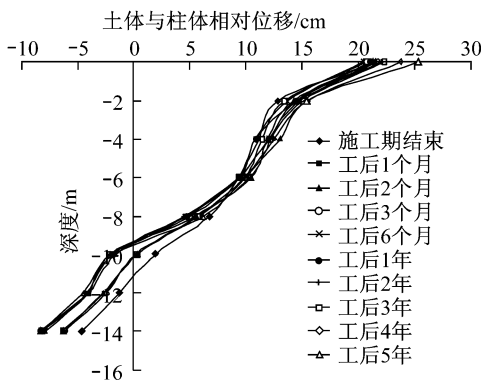


图 6 4D 桩间土与桩体相对位移

Fig.6 The relative displacement between pile and soil in 4D

2D,4D,6D 桩间距下,工后阶段中性点的稳定范围分别为与桩长比例的 0.25,0.59,0.63.中性点位置随着桩间距增大而显著降低.通过试验分析可以得出桩间土负摩阻力对桩体承载能力影响很大,建议在湿陷性黄土地基设置桩筏复合地基时尤其考虑地基排水措施,以及对地基采取减弱土层湿陷性的加固措施,以加强复合地基承载能力,提高沉降控制能力。

(3) 不同处理参数条件下地基差异沉降变形

不同处理参数下地基差异沉降如图 8 所示.随着桩间距增大,桩筏复合地基复合模量降低,施工阶段及工后阶段差异沉降显著增加.同一地基处理方式内部也存在着差异沉降情况,而在不同参数下地基差异沉降现象尤其明显.两种不同地基处理形式的交接

处,是差异沉降最为显著区域。

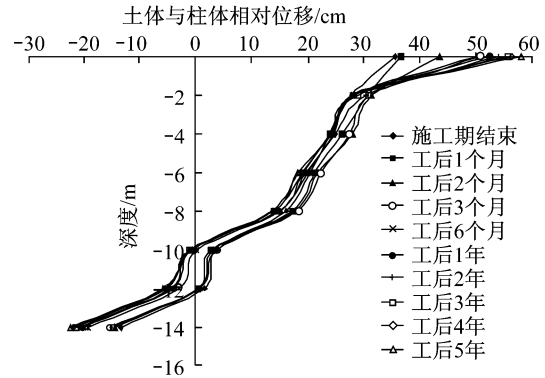


图 7 6D 桩间土与桩体相对位移

Fig.7 The relative displacement between pile and soil in 6D

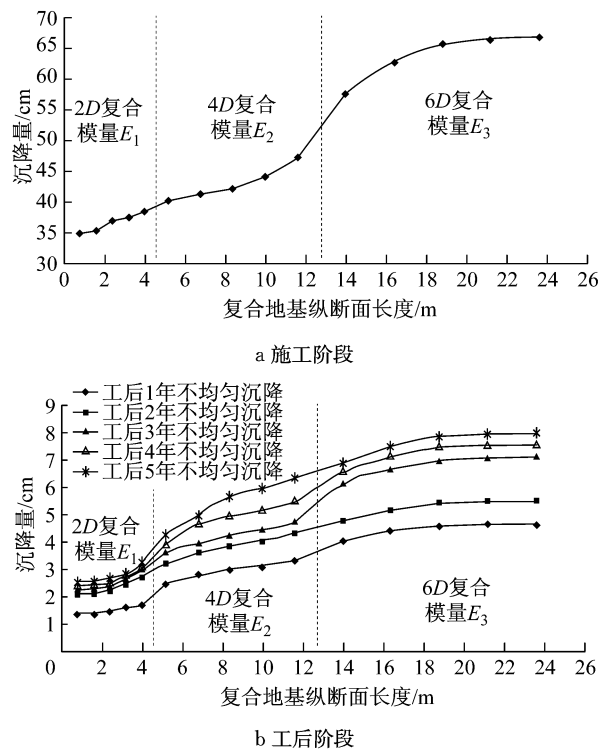


图 8 不同地基处理参数下地基差异沉降

Fig.8 Differential settlement in different parameters of ground treatment

相邻不同处理参数下地基差异沉降如图 9 所示,施工阶段,4D 与 2D 地基,6D 与 4D 地基,6D 与 2D 地基之间总差异沉降值分别为:5.34,23.31,28.65 cm.工后阶段,总差异沉降量分别为 8.35,26.71,33.86 cm.相邻差异地基(处理参数不同)交界处两侧最大差异沉降折角可达 15.0‰,42.9‰和 27.5‰.工后阶段的差异沉降量分别为 3.01,3.40,5.21 cm.相邻差异地基(处理参数不同)交界处两侧最大差异沉降折角可达 9.1‰,10.7‰和 15.6‰.差异沉降随着桩间距的增加而增大.差异沉降主要发生在施工阶段,

桩筏复合地基工后阶段控制沉降及差异沉降的能力较好。

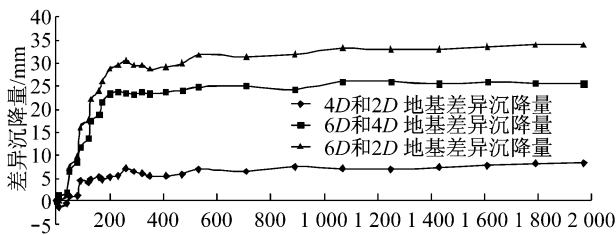


图9 相邻不同地基处理参数下地基差异沉降

Fig. 9 Differential settlement of adjacent ground of different treatment parameters

### 3 结论

(1) 桩筏复合地基能较好发挥桩间土与桩体共同承受荷载能力,使桩体、筏板结构、碎石垫层、桩间土成为相互协调整体。随着桩间距增加,地基总沉降量及工后沉降量显著增大且变化数值较大,桩间土对桩体负摩阻力增大。建议选择承载力较高土层作为桩端持力层;桩间距设计结合多因素综合考虑确定。

(2) 桩间土与桩体相对位移中性点位置随着桩间距的增大而显著降低。工后阶段中性点位置变化趋势为逐步上升并趋于稳定。建议湿陷性黄土地基设置桩筏复合地基时尤其考虑地基防排水措施,以及对地基采取减弱土层湿陷性的加固措施。

(3) 地基总差异沉降随着桩间距的增加而增大,差异沉降主要发生在施工阶段,相邻差异地基(处理参数不同)区域最为显著。桩筏复合地基工后阶段控制沉降及差异沉降能力较好。

#### 参考文献:

[1] 王炳龙. 高速铁路路基工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.  
WANG Binglong. High-speed railway subgrade engineering[M].

Beijing: China Railway Publishing House. 2007.

- [2] 龚晓南. 复合地基理论与工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2002.  
GONG Xiaonan. Theory and engineering application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press. 2002.
- [3] 王长丹,王炳龙,王旭,等. 湿陷性黄土桩网复合地基沉降控制离心模型试验[J]. 铁道学报,2011,33(4):84.  
WANG Changdan, WANG Binglong, WANG Xu, et al. Analysis on settlement controlling effect in pile-net composite foundation on collapsible loess by centrifugal model tests[J]. Journal of the China Railway Society,2011,33(4): 84.
- [4] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等. 大厚度自重湿陷性黄土地场湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(3):383.  
HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, HA Shuang, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(3):383.
- [5] Habibagahi G, Mokhberi M. A hyperbolic model for volume change behavior of collapsible soils[J]. Can Geotech J,1998,35:264.
- [6] 陈正汉,刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报[J]. 1986,8(2):1.  
CHEN Zhenghan, LIU Zudian. Mechanism of collapsible of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986,8(2):1.
- [7] 胡再强,沈珠江,谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2000.11:775.  
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Research on structure behavior of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,11:775.
- [8] 王长丹,王旭,周顺华,等. 自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报,2010(suppl 1): 775.  
WANG Changdan, WANG Xu, ZHOU Shunhui, et al. Centrifuge model tests on self-weight collapsible loess and negative skin friction of pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(suppl 1):775.
- [9] 黄志全,王思敬. 离心模型试验技术在我国的应用概况[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(2):199.  
HUANG Zhiquan, WANG Sijing. A study of application of centrifugal model testing in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(2):199.
- [10] Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology [M]. [S. l.]: Blackie Academic & Professional, 1995.