

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.010

# 高速铁路 CFG 桩-筏复合地基现场测试研究

陈宏伟,徐林荣

(中南大学 土木工程学院,长沙 410075)

**摘要:**基于沉降控制设计理念,沪宁城际铁路路基试验段采用 CFG 桩-筏复合地基。为探索其沉降控制机理和承载特性,对路基沉降变形、桩土应力分布、超孔隙水压力消散等进行了长期观测,获取了一些客观的数据。分析了路堤荷载作用下复合地基沉降、土体侧向变形、桩土应力沿路基横向分布以及孔隙水压力随时间变化规律,探讨了桩土应力比与荷载分担比变化规律。为 CFG 桩-筏结构在高速铁路软基处理中应用进一步理论研究与设计优化提供试验依据。

**关键词:**高速铁路;现场测试;桩土应力比;沉降特性

**中图分类号:**TU413.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0060-07

## Analysis of Field Test High-Speed Railway CFG Pile-Raft Composite Foundation

Chen Hongwei, Xu Linrong

(School of Civil engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

**Abstract:** Based on settlement control design, CFG pile-raft composite foundation was used in the Shanghai-Nanjing intercity railway embankment test. To explore the settlement control mechanism and bearing characteristics of the CFG pile-raft composite foundation, embankment settlement, pile-soil stress distribution and the dissipation of excess pore water pressure were observed to obtain data through field testing. Composite foundation settlement, lateral deformation of subgrade soil, pile-soil stress distribution along the lateral base and excess pore water pressure changes with time under embankment were analyzed. The change pattern of pile-soil stress ratio and load sharing ratio were studied. Field test results provide the experimental basis for the further theoretical studies and optimized practical design of the soft foundation treatment in the CFG pile - raft structure in the high-speed railway project.

**Key words:** high-speed railway; field test; pile-soil stress ratio; settlement characteristics

CFG 桩-筏复合地基以 CFG 桩作为竖向增强体与桩间土、褥垫层和钢筋混凝土筏板共同组成承载体系<sup>[1]</sup>,是一种有效的软土地基加固方法,能提高地基土体的承载力,施工工期短,并有效减少不均匀沉降和工后沉降,近年来在高速铁路软基加固、路桥(涵)过渡段地基处理等工程中被逐渐推广使用<sup>[2-3]</sup>。

各国学者对桩-筏复合地基的研究较多,Davis

等<sup>[4]</sup>对桩-筏复合地基进行了理论与应用研究,陈龙珠等<sup>[5]</sup>以及龚晓南<sup>[6]</sup>对刚性桩复合地基承载特性、沉降控制进行了研究。桩-筏复合地基在高层建筑地基处理中已广泛应用<sup>[7-8]</sup>,但在高速铁路路基处理中的应用近几年才开始,CFG 桩-筏复合地基在高速铁路路堤荷载作用下和房建工程存在较大差别。在深厚软土地区修建高速铁路,路基在满足强度要求的

收稿日期:2014-03-11

基金项目:国家自然科学基金(51078358);铁道部科技研究开发计划课题(2012G009-C);高铁联合基金重点项目(U1134207)

作者简介:陈宏伟(1979-),男,博士生,主要从事岩土工程研究,(E-mail)cai7698@126.com。

同时还需满足变形(尤其是工后沉降)要求,高速铁路无砟轨道路基工后沉降要求极为严格( $\leq 15$  mm),且施工工期较短<sup>[9]</sup>。目前,对 CFG 桩-筏复合地基的研究主要集中在理论分析<sup>[10-11]</sup>、数值模拟<sup>[12-13]</sup>,在高速铁路软基处理中现场测试研究尚不多<sup>[14-15]</sup>,路堤荷载作用下高速铁路 CFG 桩-筏复合地基沉降控制机理、承载特性还有待进一步深入研究。

工后沉降控制问题已成为深厚软土地区高速铁路建设亟需解决的难题之一,对 CFG 桩-筏复合地基开展深入试验研究与探索十分必要。笔者依托沪宁城际铁路 CFG 桩-筏复合地基试验段,对其沉降变形、桩土应力分布、孔隙水压力等进行了长期观

测,探讨了复合地基沉降、土体侧向变形、垫层内应力以及桩间土竖向应力的发展变化规律,研究分析了桩土应力比与荷载分担比变化规律。

## 1 工程概况与场地工程地质条件

沪宁城际铁路客运专线,是为实现南京至上海之间交通公交化而建,设计时速 300 km/h,采用无砟轨道。CFG 桩-筏复合地基试验段里程为 DK70+020,地貌为海相冲积平原,地势平坦,形成历史久远,沿线鱼塘、沼泽、沟渠较多,路基下伏 2~6 m 不等淤泥质黏土,地质情况复杂。地基物理力学指标如表 1 所示。

表 1 地基土物理力学指标

层序号	含水率 $\omega/\%$	重力密度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	快剪		标贯试验/ $(\text{N}\cdot\text{击}^{-1})$	锥尖阻力 $q_c/\text{MPa}$	变形模量 $E_0/\text{MPa}$
					$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$			
(1)	24.40	19.3	0.612	4.54	29.24	6.64	3.2	1.66	6.84
(2)	26.00	18.6	0.673	9.12	69.65	27.45	3.5	1.08	20.51
(3)	24.70	17.3	0.621	4.63	20.70	3.82	4.5	0.51	21.76
(4)	22.60	19.4	0.575	10.86	4.72	22.34	4.4	1.68	25.77
(5)	21.00	21.0	0.607	14.46	43.82	16.47	6.5	4.02	36.39

试验段加固区主要为硬塑状态粉质黏土,下卧区主要为软弱土层和流塑、软塑状态粉质黏土,土层自上而下描述为:1)  $Q_4^m$  人工填土,灰褐色,硬塑状态,表层为耕植土,含少量植物根系,厚约 2.8 m,极限承载力  $P_u=440.35$  kPa; 2)  $Q_4^{pl+pl}$  粉质黏土,灰色,软塑,厚约 2.4 m,极限承载力  $P_u=601.32$  kPa; 3)  $Q_4^l$  粉质黏土夹淤泥,灰色,软塑~流塑,主要成份为黏粒,厚约 3.4 m,极限承载力  $P_u=473.57$  kPa; 4)  $Q_4^l$  粉质黏土,灰褐色,黏性较强,主要为黏粒和粉粒,厚约 4.3 m,极限承载力  $P_u=784.54$  kPa; 5)  $Q_3^l$  粘土,灰色,厚约 12.6 m,极限承载力  $P_u=440.35$  kPa。

## 2 现场测试

### 2.1 CFG 桩-筏复合地基方案

试验段 CFG 桩径 0.5 m,筏板下方桩间距 1.8 m,筏板外侧桩间距 1.6 m,正方形布置,桩长 16.5 m。桩顶铺设 0.6 m 碎石垫层,其上设宽 14.4 m,厚 0.5 m 的 C30 钢筋混凝土筏板,单元长 16.78 m。在筏板上填筑路堤,路堤上铺设无砟轨道。复合地基平面布置如图 1 所示。

### 2.2 测试项目与内容

试验段采用超载预压,第 1 级填土高度为 2.25 m,60 d 后加载至第 2 级 6.25 m,预压 90 d 后卸除超载至设计标高 2.25 m。CFG 桩-筏复合地基测试剖面如图 2 所示。

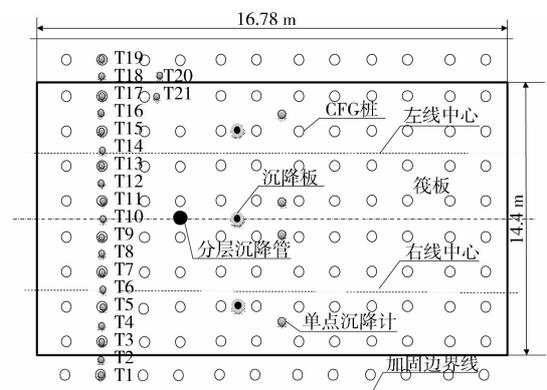


图 1 CFG 桩-筏复合地基平面布置图

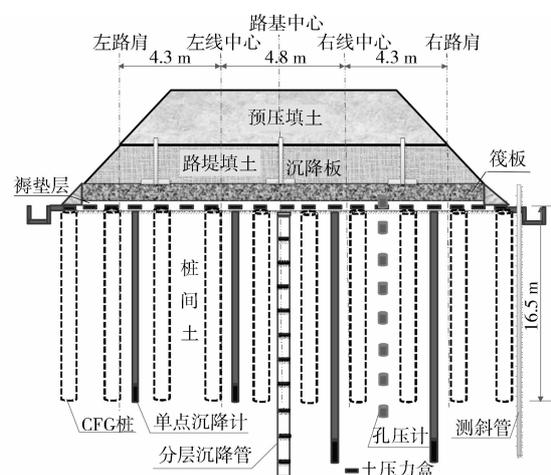


图 2 CFG 桩-筏复合地基测试剖面图

为研究桩土承载特性,在分级填筑过程中对桩土应力进行了测试。现场土压力测试分别在 CFG 桩顶、褥垫层(竖向中间)、桩间土(1/2 桩距和 1/4 桩距之间)以及土侧向采用钻孔法埋设量程为 1.0 MPa 的钢弦式土压力盒,土压力盒布置见图 3 所示。现场仪器埋设如图 4 所示。

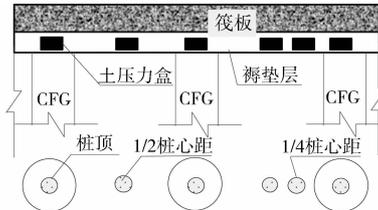


图 3 土压力盒布置图

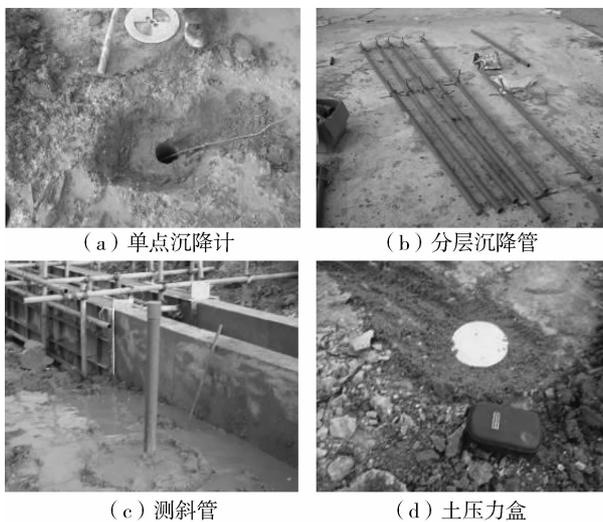


图 4 现场埋设测试仪器

综合采用了沉降板、分层沉降管、单点沉降计 3 种测试方法。沉降板测试地表总沉降,在左路肩、右路肩和路基中央的筏板顶面分别埋设 1 个沉降板;分层沉降管埋设于路基中央,磁环分层间距为 2 m,埋设至深入持力层 8 m,其沉降量为所在土层的地基土压缩量;桩长位置的单点沉降计测试数据为加固区桩间土的压缩量,持力层的测试数据为桩间土的总压缩量,在桩长位置和深入持力层分别埋设了 2 个单点沉降计。

采用测斜管测量土体的侧向水平位移。测斜管管顶与筏板顶部平齐,埋设在路肩边缘处,深入持力层 8 m,距离坡脚线 1.0 m。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 荷载-时间-沉降规律分析

CFG 桩-筏复合地基沉降曲线如图 5~7 所示。

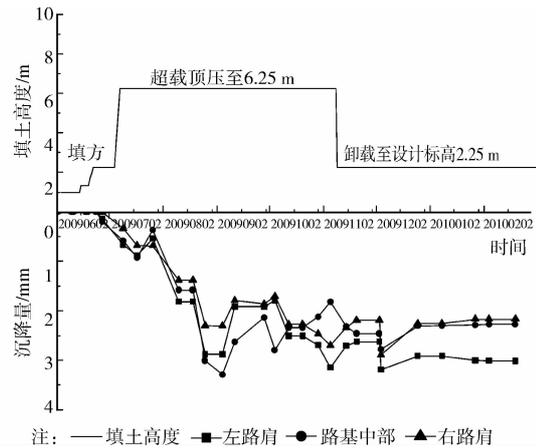


图 5 沉降板现场测试数据

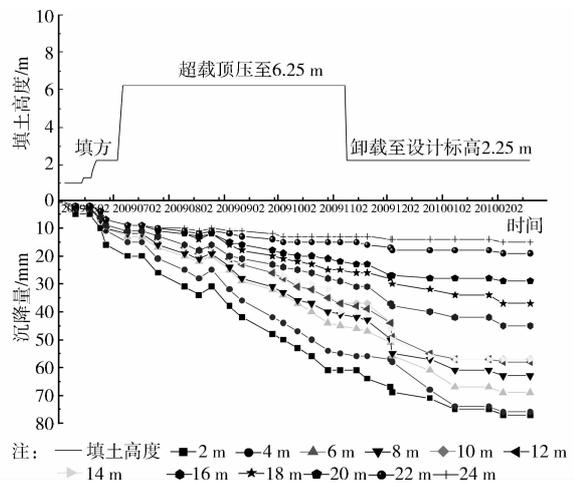


图 6 分层沉降管现场测试数据

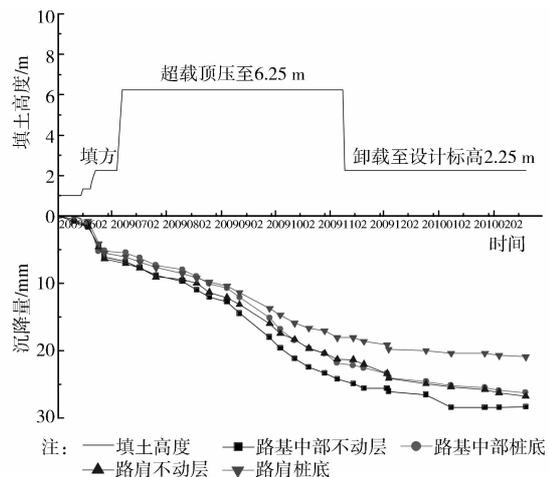


图 7 单点沉降计现场测试数据

图 5~图 7 测试数据表明:沉降与荷载为非线性关系,在填筑和超载预压初期沉降发展较快,卸载后,曲线稍有回弹,并继续发展,逐渐趋于稳定。

沉降板沉降速率相对较慢,超载预压后沉降速率变得更为缓慢,路基中心沉降大于路基边缘,且左

右路肩沉降不一致,说明筏板发生了翘曲。随着土体沉降固结程度的提高,分层沉降速率变缓,沿深度方向逐渐减小,分层沉降主要发生在加固区(占地基土总沉降的83.4%左右)。单点沉降计最大沉降为28.41 mm,发生在超载预压后期的路肩不动层,沉降速率随荷载变化明显,超载卸除后曲线略有回弹,随后趋于稳定。

### 3.2 土体侧向变形分析

水平位移随深度变化关系如图8所示。

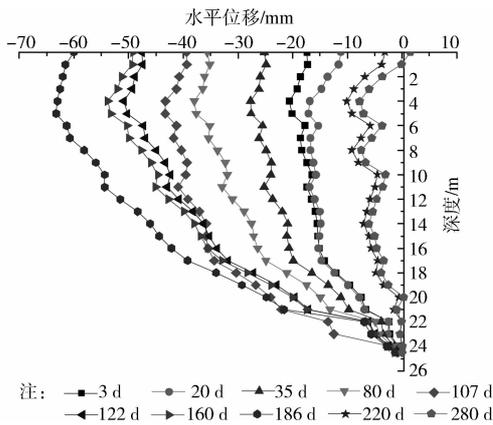


图8 水平位移随深度变化曲线图

由图8可见,路基超载预压初期水平位移发展较快,随后变缓,当卸载后,水平位移有所减小。最大水平位移为63.5 mm,最大水平位移速率发生填筑初期,为4.5 mm/d。由于土体侧向产生了塑性变形,最终存在不可恢复的残余变形。

### 3.3 桩土应力分布规律

3.3.1 桩土应力横向分布规律 桩土应力沿路基横向分布规律如图9所示。

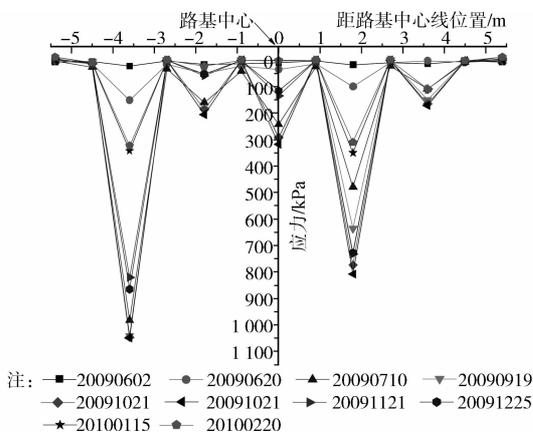


图9 桩土应力横向分布

桩顶和桩间土应力在筏板下方沿路基横向分布呈锯齿形,波峰为桩顶应力,波谷为桩间土应力,表明桩顶应力集中现象明显。

随着路堤填筑和预压荷载的施加,桩顶应力和桩间土应力都呈现出增加趋势,但CFG桩顶应力增加速率明显大于桩间土。在最大荷载作用下筏板下方桩顶最大应力为1 050 kPa,且没有发生在中心桩(距路基中心4.5 m的CFG桩顶)。桩间土最大应力为348 kPa,在离路基中心1.8 m处。筏板外侧CFG桩顶最大应力为32 kPa,明显比筏板下方小。超载预压后期至卸除超载后,CFG桩顶应力和桩间土应力继续增加,但CFG桩顶应力增加速率小于桩间土。这表明在筏板作用下CFG桩的承载性能得到更充分的发挥,褥垫层通过变形协调保证桩和桩间土共同承担荷载。

3.3.2 桩间土应力-时间-荷载变化规律 桩间土应力变化曲线如图10所示。

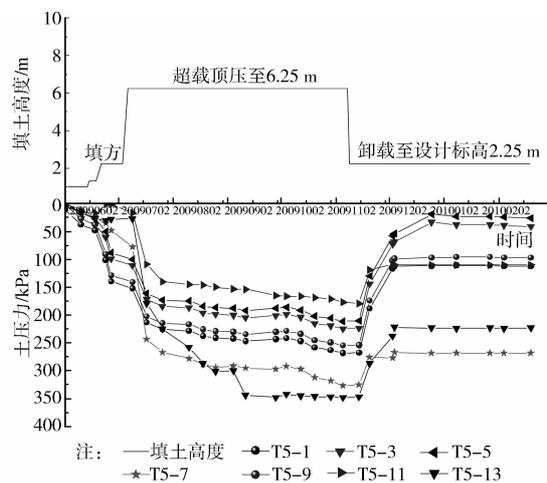


图10 桩间土应力变化曲线图

实测结果表明:桩间土压力随着填土荷载的变化而相应发生变化,在筏板浇筑后土方填筑与超载预压初期变化明显,在超载预压阶段桩间土压力基本保持稳定,卸载后桩间土压力明显减小,随后逐渐稳定。

路基中间位置桩间土压力相对较大,在超载预压期间桩间土应力范围值为149~348 kPa,平均值约为243 kPa。土压力随着填筑荷载的增加而增加,但并非线性关系,土压力增幅明显小于填土荷载增幅。当上部荷载从填筑初期2.25 m超载预压至6.25 m时,桩间土压力平均增加2.1倍,但是在超载预压期间却保持相对稳定,这表明随着上部荷载的增加和预压时间的延长,桩体分担的荷载比重在增大,上部荷载一部分通过筏板和褥垫层直接传递到CFG桩上,另一部分荷载通过褥垫层传递到桩间土,进而通过桩土之间的相互摩擦作用传递到CFG桩上。

### 3.4 桩土应力比与荷载分担比分析

CFG 桩-筏复合地基桩土应力比测试结果如图 11~图 12 所示。

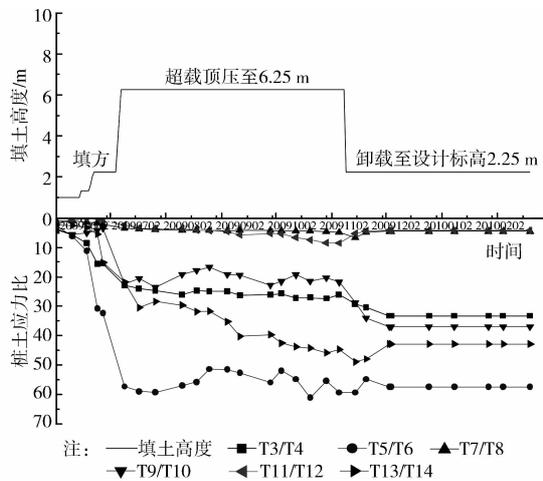


图 11 CFG 桩-筏复合地基桩土应力比

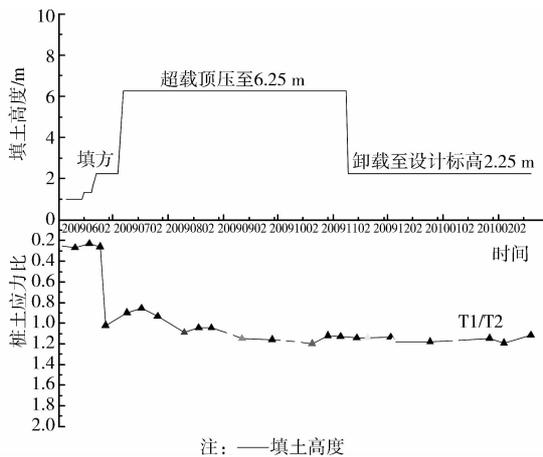


图 12 CFG 桩复合地基桩土应力比

由图 11 和图 12 可以看出,CFG 桩-筏复合地基(筏板下方)桩土应力比从加载初期的 10.23 增加到稳定后的 37.62,最大值达到 61.32。CFG 桩复合地基(筏板外侧),桩土应力比最大值为 1.17,卸载后桩土应力比几乎稳定在 1.10。CFG 桩-筏复合地基的桩土应力比远大于 CFG 桩复合地基,且桩土应力比与填筑荷载呈非线性关系,在填筑初期,由于桩顶出现应力集中现象,桩土应力比增加较快;进入间歇期后,由于褥垫层发挥变形协调作用,桩间土逐渐发挥其承载作用,但桩土应力比仍缓慢增大;卸除超载预压使桩和桩间土都发生少许回弹,桩土应力比继续增加,之后逐渐保持稳定。这是由于试验段表层地基土为中低压缩性土层,使得筏板仅能提供有限的承载力,CFG 桩-筏复合地基桩间土性能没有得到充分的发挥<sup>[16]</sup>。在 CFG 桩顶设置刚度较大的褥

垫层,可有效增加桩体承担荷载的比例,并改善桩体上端的受力状态<sup>[6]</sup>,对减小复合地基的沉降起到一定的作用。

试验段桩土荷载分担比随路基填筑变化曲线如图 13~14 所示。

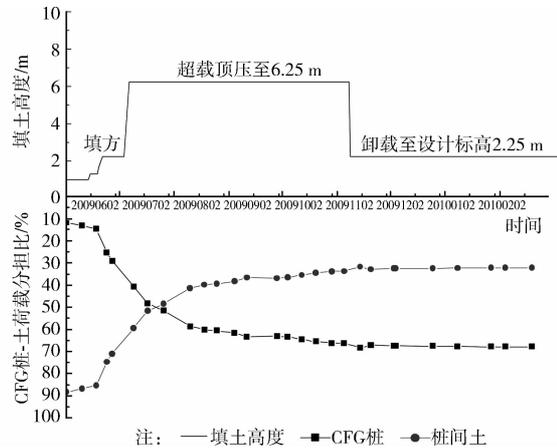


图 13 CFG 桩-筏复合地基桩土荷载分担比

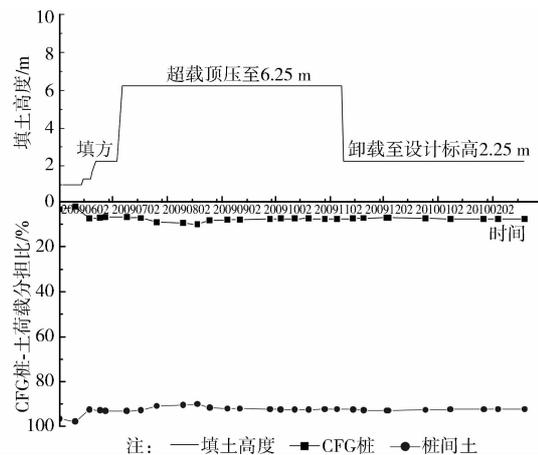


图 14 CFG 桩复合地基桩土荷载分担比

CFG 桩-筏复合地基在填筑开始阶段,桩和桩间土荷载分担比分别为 11.7% 和 88.3%;在超载预压初期阶段,桩和桩间土荷载分担比分别为 48.4% 和 51.6%,之后 CFG 桩荷载分担比逐渐减小,桩间土荷载分担比逐渐增加,并逐渐趋于稳定,桩和桩间土荷载分担比分别为 67.8% 和 32.2%。由此可见,当荷载较小时桩间土承担大部分荷载,桩的承载能力未得到体现,随着荷载增加,桩体承担的荷载比例迅速增加。CFG 桩复合地基桩土荷载分担比在填筑期间基本维持稳定,卸除超载预压后,CFG 桩和桩间土荷载分担比分别为 92.3% 和 7.7%。

### 3.5 孔隙水压力消散规律分析

为研究 CFG 桩-筏复合地基桩间土的固结规

律,埋设了孔隙水压力计。超孔隙水压力随时间变化规律如图15所示。

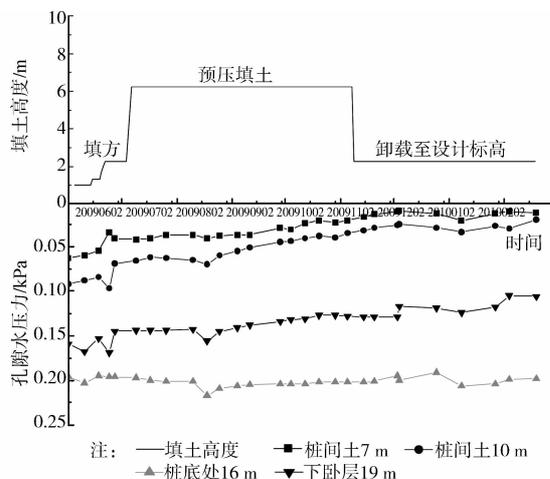


图15 孔隙水压力随时间变化规律

超孔隙水压力随路堤荷载增加逐渐增大,间歇期间,超孔隙水压力逐渐消散,最深的测点反映孔压有所回升,表明孔隙水自上而下渗流,土体逐渐固结。在超孔隙水压力消散过程中,桩间土沉降也逐渐稳定,孔压消散曲线与单点沉降计和分层沉降管所测桩间土沉降变化规律一致。

## 4 结论

1) 针对沪宁城际铁路短时间内实现高标准沉降控制的难题,开展沉降测试研究。综合采用单点沉降计、分层沉降磁环以及沉降板监测技术,揭示了CFG桩-筏复合地基沉降变形规律。

2) CFG桩-筏复合地基桩间土沉降大于桩顶沉降,桩顶和桩间土应力横向分布呈锯齿形,桩顶应力集中现象明显,在筏板作用下CFG桩的承载性能得到更充分的发挥。

3) CFG桩-筏复合地基褥垫层发挥变形协调作用,保证了桩和桩间土共同承担荷载,但由于试验段表层地基土为中低压缩性土层,使得筏板仅提供有限的承载力,桩间土承载能力没有得到充分发挥。桩土应力比与荷载分担比,最后分别稳定在31.8%与67.8%。

4) 超孔隙水压力随时间增加逐渐消散,孔隙水自上而下渗流,土体逐渐固结。超孔隙水压力随时间变化规律与桩间土沉降变化规律一致。

### 参考文献:

[1] 张继文,曾俊铖,涂永明,等.京沪高速铁路CFG桩-筏复合地基现场试验研究[J].铁道学报,2011,33(1):83-88.

Zhang J W, Zeng J C, Tu Y M, et al. Experimental study on CFG pile-raft composite foundation of Beijing-Shanghai High-Speed Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1):83-88.

[2] Abusharar S W, Zheng J J, Chen B G. Finite element modeling of the consolidation behavior of multi-column supported road embankment [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(4):676-685.

[3] 沈宇鹏,杜嘉俊,汪梨园,等.松软土地区高速铁路路涵过渡段动静态试验研究[J].土木工程学报,2012,45(8):158-165.

Shen Y P, Du J J, Wang L Y, et al. Test for static or dynamic response of subgrade-culvert transition section for high-speed railways in soft soil ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8):158-165.

[4] Davis E H, Poulos H G. The analysis of pile raft systems [J]. Australian Geomechanics Journal, 1972, G2(1):21-27.

[5] 宰金珉,蒋刚,王旭东,等.极限荷载下桩筏基础共同作用性状的室内模型试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(11):1597-1603.

Zhai J M, Jiang G, Wang X D, et al. Model test on pile-raft foundation interaction under ultimate load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11):1597-1603.

[6] 陈龙珠,梁发云,严平,等.带褥垫层刚-柔性桩复合地基工程性状的试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(3):125-129.

Chen L Z, Liang F Y, Yan P, et al. Experimental study on behavior of rigid-flexible pile raft foundation with cushion [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(3):125-129.

[7] 龚晓南.广义复合地基理论及工程应用[J].岩土工程学报,2007,29(1):1-13.

Gong X N. Generalized composite foundation theory and engineering application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1):1-13.

[8] Basuony E G, Ahmed A G, Abdel F Y, et al. Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5(5):389-399.

[9] 曾俊铖,张继文,童小东.高速铁路CFG桩-筏复合地基沉降试验研究[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(3):570-575.

Zeng J C, Zhang J W, Tong X D. In-situ test on settlement of CFG pile-raft composite foundation in high-speed railway [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(3):570-575.

- [10] Dang C N, Dong S K, Seong B J. Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55(1):14-26.
- [11] 田建勃, 韩晓雷, 史庆轩, 等. 深埋暗道 CFG 桩及碎石垫层复合地基变形特性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(1):74-80.  
Tian J B, Han X L, Shi Q X, et al. Analysis on deformation characteristics of CFG piles-gravel cushion composite foundation of the deep embedded secret passage [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(1):74-80.
- [12] Zheng J J, Abusharar S W, Wang X Z. Three-dimensional nonlinear finite element modeling of composite foundation formed by CFG-lime piles [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(4):637-643.
- [13] 周爱军, 栗冰. CFG 桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6):1803-1808.  
Zhou A J, Li B. Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6):1803-1808.
- [14] 徐林荣, 王宏贵, 左坤, 等. 高速铁路沉降控制复合桩基的性状试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9):2605-2612.  
Xu L R, Wang H G, Zuo S, et al. Test study of performance of composite pile foundation of high-speed railway controlling settlement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9):2605-2612.
- [15] Bourgeois E, de Buhan P D, Hassen G. Settlement analysis of piled-raft foundations by means of a multiphase model accounting for soil-pile interactions [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 46(11):26-38.
- [16] Poulos H G. *Pile raft foundations: Design and applications* [J]. *Geotechnique*, 2001, 51(2):95-113.

(编辑 胡英奎)