

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.05.008



高铁不同刚度桩-网复合地基工作性状差异

周洛汉^{1,2}, 许燕群¹, 徐林荣¹, 商拥辉¹, 李义杰¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410000; 2. 贵州路桥集团有限公司, 贵阳 550000)

摘要:结合沪宁城际铁路 CFG 桩-网复合地基试验段和京沪高铁砂桩-网复合地基昆山试验段, 在现场试验断面埋置土压力盒、沉降计和孔隙水压力计等监测仪器, 获取地基沉降、桩和桩间土压力、孔隙水压等监测数据, 对比分析 CFG 桩与砂桩-网在高速铁路地基工作性状及工后沉降控制效果中的差异。分析结果表明: CFG 桩-网和砂桩-网联合堆载预压均可满足高速铁路无砟轨道工后沉降控制要求, CFG 桩-网复合地基沉降总量与沉降速率均小于砂桩-网复合地基, 且收敛速度快; 受桩刚度差异的影响, CFG 桩-网复合地基与砂桩-网复合地基桩土应力规律存在较大差异, 前者桩土应力比随着路堤填筑加载而增大, 最终趋于稳定, 后者桩土应力比随荷载增加先增大后减小, 再增大, 呈波浪形变化; CFG 桩-网地基超孔压消散速率远小于砂桩-网地基的超孔压消散速率; 在施工工期较短的情况下, 与砂桩-网复合地基相比, CFG 桩-网复合地基处理技术的工后沉降控制效果更优。

关键词:复合地基; 桩土应力比; 沉降控制; 高速铁路

中图分类号: TU447; U213.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)05-0056-07

Difference analysis on the performance of the pile-net composite foundations with different pile types of high speed railway

Zhou Minghan^{1,2}, Xu Yanqun¹, Xu Linrong¹, Shang Yonghui¹, Li Yijie¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410000, P. R. China;

2. Guizhou Road & Bridge Group Co., Ltd., Guiyang 550000, P. R. China)

Abstract: The monitoring components were put into the Shanghai-Nanjing intercity railway CFG pile-net composite foundation and Beijing-Shanghai high speed railway sand pile-net composite foundation of Kunshan test section, such as the soil pressure boxes, the settlement gauges and the pore water pressure gauges, etc., to monitor and obtain a large number of ground settlements (post construction), pile tops pressure and soil pressures, pore water pressures and other field test data in order to get variation law of properties of composite foundations. Working behavior of foundation during construction period and post construction settlement control effect were comparatively analyzed between the two different pile types (CFG pile-net and sand pile-net). The results showed that both CFG pile-net and sand pile-net preloading can meet the ballastless track of high-speed railway post construction settlement (less than 15 mm) control

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金 (U1134207)

作者简介: 周洛汉 (1990-), 男, 主要从事道桥工程研究, (E-mail) 1020138026@qq.com。

徐林荣 (通信作者), 男, 教授, (E-mail) csuxlr@126.com

Received: 2017-02-20

Foundation item: China Scholarship Council and National Natural Science and High Speed Rail Joint Foundation (No. U1134207)

Author brief: Zhou Minghan (1990-), main research interests: road and bridge engineering, (E-mail) 1020138026@qq.com.

Xu Linrong (corresponding author), professor, (E-mail) csuxlr@126.com.

requirement according to the field tests. The total settlements and the velocity of settlement of CFG pile-net foundation were smaller than that of sand pile-net foundation, and its convergence speed was faster, which meant the latter requires a longer period of time to load. Affected by the pile stiffness, there was a big difference on the law of stress of pile and soil. The stress ratio of pile and soil in CFG pile-net foundation was increased with the increase of the filling of the embankment, and eventually stabilized, while that of sand pile-net foundation decreases with the increasing of load first, and then increase, presenting the wave shape change. And the CFG pile-net foundation excess pore water pressure dissipation rate was far less than the latter. In the case of short construction period, compared with the composite foundation of sand pile-net, the settlement control effect of CFG pile-net composite foundation treatment technology was more excellent.

Keywords: composite foundation; pile-soil stress ratio; settlement control; high speed railway

桩-网复合地基作为联合型复合地基,有水平与竖直两个方向的增强体,水平方向主要以网为主,竖直方向则以桩为主,目前在高速公路和高速铁路的软基处理、路桥过渡段差异沉降处理等方面已得到广泛应用。在调动桩、网、土三者的潜力,使其协同工作方面,桩网复合地基发挥了重要作用,使得桩和土能够共同承担荷载^[1]。

目前,对桩-网复合地基的研究已有不少,但主要集中在桩-网复合地基桩、土各自承载力特性^[2-4]及其荷载分布情况^[5-6]、桩-网复合地基加固作用机理^[7-11]、土工合成材料作用效应^[12-13]等方面,然而,对类似工程环境下不同型式桩-网复合地基的工作性状及工后效果对比分析的研究相对较少。因此,笔者基于沪宁城际铁路 CFG 桩-网复合地基(镇江试验段)和京沪高速铁路砂桩-网复合地基(昆山试验段)现场试验,测试得到路基沉降变形、地基桩土应力比、孔隙水压力等数据,总结分析其各自变化规

律,并对比分析 CFG 桩-网和砂桩-网复合地基工作性状和处理效果的差异。

1 试验概况

1.1 沪宁城际铁路镇江试验段

试验工点位于沪宁城际高速铁路镇江试验段,试验段内地形略有起伏,岗地与坳谷相间分布其间,试验段部分线路与京沪既有线有交叠,沿线存在水田、鱼塘。试验段地基表层为粉质粘土,褐灰色,软塑~硬塑,厚度在 0~9.8 m 范围内,其下分布淤泥质粉质粘土和粉质粘土,各土层物理力学性质如表 1 所示。由表 1 可知,该试验段地基土属于中压缩性土。选取试验段内经 CFG 桩-网复合地基处理的路段进行研究分析,CFG 桩采用正方形布置,桩径为 0.5 m,桩间距为 1.8 m,桩长 8 m;双向土工格栅铺设于厚 0.5 m 的碎石垫层内,土工格栅参数详见表 2。

表 1 沪宁路基试验段土层物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of Huning subgrade test section soil

土层名称	土层厚度/m	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	液性指数	塑性指数	压缩模量/MPa	固结快剪	
								c/kPa	Φ/(°)
粉质黏土	1.7	23.7	1.63	0.63	0.26	16.30	7.34		
粉质黏土	9.3	33.9	1.49	0.87	0.70	19.40	5.63	14.21	11.33
淤泥质黏土	4.2	25.3	1.60	0.68	0.44	15.60	7.85	21.70	9.67
粉质黏土	6.4	23.6	1.62	0.66	0.39	14.60	7.76	42.55	8.00
黏土	3.6	22.9	1.63	0.63	0.04	23.00	6.80	31.54	11.50

表 2 沪宁试验段土工格栅参数表

Table 2

横向网格尺寸/mm	纵向网格尺寸/mm	单位质量/(g·m ⁻²)	延长率/%	最大抗拉强度/(kN·m ⁻¹)	2%延伸率的抗拉强度/(kN·m ⁻¹)	5%延伸率的抗拉强度/(kN·m ⁻¹)
25.4	25.4	480	10	30	8.55	17.58

1.2 京沪高铁昆山试验段

试验工点位于京沪高速铁路昆山试验段,试验

段地基表层主要为黏土,灰黄色,软~硬塑,层厚 0.76~3.60 m;其下为淤泥质粉质黏土,并夹带少量

粉砂,呈深灰色,厚 3.2~16.5 m;下卧层由粘土、粉土及粉质粘土组成,各土层物理力学性质如表 3 所示。由表 3 可见,试验段地基土基本属于中低压缩性土。

该试验段共进行了两次堆载预压,第 1 次堆载预压完成后达到了有砟轨道路基工后沉降标准,历时 4 a 的固结沉降后,再进行第 2 次堆载预压,以求

达到无砟轨道路基工后沉降控制标准。经过第 1 次长时间的堆载预压,认为该试验段土层固结已基本完成。

选用砂桩-网复合地基对昆山试验段进行加固,砂桩桩径为 0.4 m,桩间距为 2.0 m,桩长 15.0 m,呈梅花形布置,土工格栅铺设于 0.6 m 厚的砂垫层内,土工格栅参数见表 4。

表 3 京沪昆山试验段土层物理力学性质

Table 3 Physical and mechanical properties of test section soil of the Beijing-Shanghai Kunshan test section

土层名称	土层厚度/m	天然含水量/%	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然孔隙比	液限	塑限	塑性指数	压缩指数	固结快剪	
									c/kPa	$\phi/(\text{°})$
黏土	2.86	31.9	19.2	0.89	40.9	19.7	21.1	0.25	24.5	8.7
淤泥质粉质黏土	3.24	44.4	17.8	1.23	35.8	19.9	16	0.30	8.4	6.3
粉质黏土	4.51	35	18.8	0.97	33.2	19.8	15.5	0.14	29.0	10.6
粉质黏土夹薄层粉砂	2.63	26	19.9	0.70	35.2	16.4	17.0	0.25	30.5	7.9
黏土	5.63	24.5	20.3	0.69	36.2	17.1	19.1	0.14	57.3	16.7
黏土	4.37	35.5	18.7	0.98	33.9	21.9	12.7	0.20	15.6	15.0
粉质黏土	6.68	36.4	18.7	0.99	34.8	20.4	14.4	0.33	14.7	15.3

表 4 京沪试验段土工格栅参数表

Table 2 Parameter list of soil engineering grid

横向网格尺寸/mm	纵向网格尺寸/mm	单位质量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	延长率/%	最大抗拉强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	2%延伸率的抗拉强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	5%延伸率的抗拉强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
25	25	400	9.11	24.4	7	16.85

2 现场试验方案

2.1 沪宁 CFG 桩-网复合地基

沪宁试验段的沉降量测试采用单点沉降计,以此获得地表总沉降、加固区沉降量及下卧层沉降量,并获得沉降量随时间、荷载变化的规律。将土压力盒分别埋设于测试断面的桩顶、两桩间形心和四桩间形心等不同位置处,并由现场实测结果进一步获得 CFG 桩-网复合地基的桩土应力比、荷载分担比的变化规律。测试元件具体埋设位置如图 1 所示。

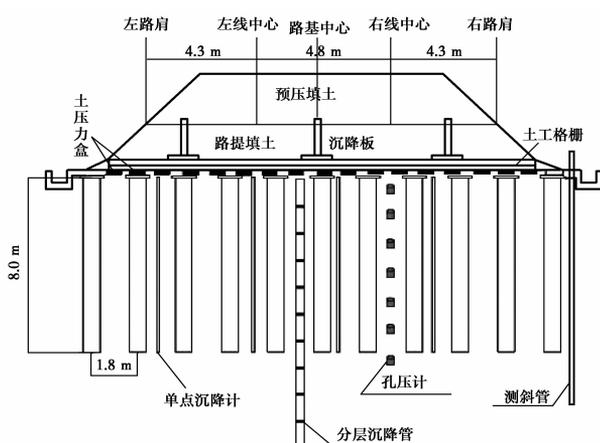


图 1 沪宁试验段观测元件埋设示意图

Fig. 1 observation element buried diagram of Huning test section

2.2 京沪砂桩-网复合地基

在线路中心、线路左侧、线路右侧的路基基底分别埋设沉降板,用于观测砂桩-网复合地基的总沉降量;在砂桩桩顶、两桩间土中心及三桩之间的形心处分别埋设土压计,根据测得的土压力数据获得桩土应力比及荷载分担比的变化规律。测试元件布设位置如图 2 所示。

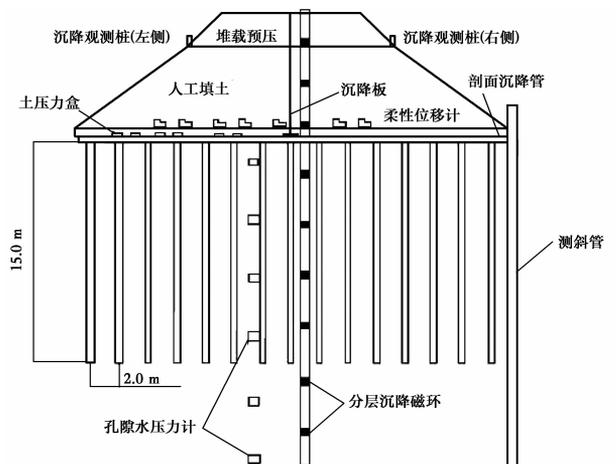


图 2 京沪昆山试验段观测元件埋设示意图

Fig. 2 Observation elements buried diagram of Beijing-Shanghai Kunshan test section

大部分测试元件均应在地基加固完成后路基填

筑施工前时间内进行埋设,路基面观测桩埋设应在路基填筑施工完成后进行。试验段共进行了两次地基处理,第 1 次采用砂桩联合等载预压措施,填筑高度达 6.29 m,经地基处理后达到有砟轨道路基工后沉降标准(≤ 10 cm);第 2 次为达到无砟轨道路基工后沉降标准(≤ 15 mm),在原有砂桩地基基础上进行堆载预压,填筑高度为 2.0 m。桩土应力比和孔压分析采用第 1 次预压时获得的数据,沉降变化规律则采用第 2 次预压所得结果。

3 试验测试结果及对比分析

3.1 沉降变形规律分析

经过建设期的长期沉降监测,得到如图 3 所示的沪宁城际铁路 CFG 桩-网复合地基沉降时间-荷载图。从图中可以看出,沉降量随荷载和时间的增加而增大,加载期沉降速率和沉降量迅速增大,恒载期沉降速率减小,沉降量趋于稳定,卸载后沉降量没有发生明显回弹现象;同一埋深下,路肩桩底的沉降量远大于路基中部桩底沉降量,埋深较浅部位由于受外界干扰较大,其沉降量波动亦较大。

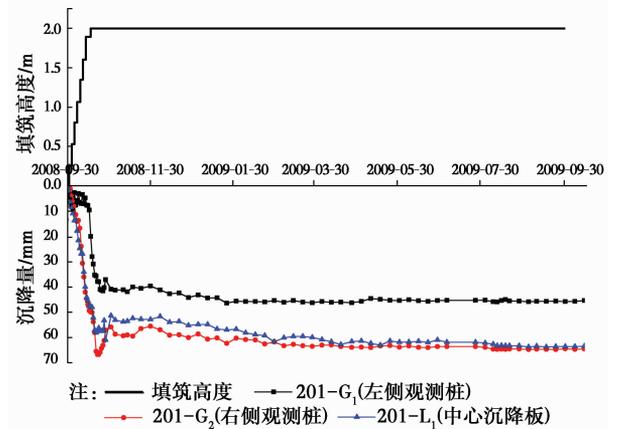


图 4 砂桩-网地基沉降-时间-荷载曲线

Fig. 4 Sand pile-net foundation settlement-time-load curve

渐趋于稳定状态,且地基不同位置处的沉降规律均呈现一致。

根据建设期实测得到的沉降数据,运用多种沉降预测方法预测其工后沉降值,得到表 5 和表 6 所示复合地基工后沉降预测值。

表 5 沪宁 CFG 桩-网复合地基工后沉降预测值

Table 5 Settlement prediction of Huning CFG

pile-net composite foundation				mm
预测方法	2010-03-08	最终沉降	工后沉降	
三点法	28.68	32.54	3.86	
双曲线法	28.68	33.99	5.31	
星野法	28.68	34.71	6.03	
抛物线法	28.68	31.21	2.53	
Asaoka 法	28.68	31.84	3.16	
GM(1,1)法	28.68	31.50	2.82	
Verhulst 法	28.68	31.66	2.98	

注:根据路肩处复合地基的总沉降实测数据预测的最终沉降和工后沉降。

表 6 砂桩-网复合地基第 2 次预压后的工后沉降预测值

Table 6 Settlement prediction of sand pile-net

预测方法	路基中心		左侧观测桩		右侧观测桩	
	总沉降	工后沉降	总沉降	工后沉降	总沉降	工后沉降
	双曲线法	65.62	0.09	46.01	0.58	65.6
三点法	64.18	0.65	45.72	0.29	65.19	0.55
星野法	68.60	5.07	45.45	0.02	66.78	2.14
Asaoka 法	63.00	0	45.95	0.52	64.42	0

从表 5 和表 6 中可以看出,CFG 桩-网和砂桩-网联合堆载预压后其预测工后沉降值均可满足高速

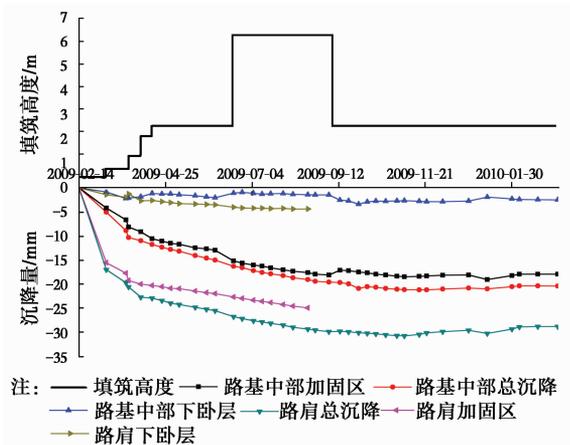


图 3 CFG 桩-网复合地基沉降时间-荷载曲线

Fig. 3 CFG pile-net composite foundation settlement-time-load curve

图 4 为昆山试验段第 2 次堆载预压时地基土的沉降时间-荷载图。由图 4 可见,桩顶左侧沉降量最小,中心次之,右侧沉降量最大,三者沉降量在填筑期均随荷载增加而急剧增大,恒载期随时间的推移缓慢增加,三者大体呈现一致规律。

比较分析两种桩型桩-网复合地基沉降变形规律可以发现:在中低压缩性地基土中,CFG 桩在堆载过程中沉降量随荷载逐步增加,沉降速率明显较砂桩慢;砂桩在加载过程中沉降量迅速增加,沉降速率较快;两者在预压恒载期沉降曲线都比较平稳,逐

铁路无砟轨道工后沉降控制要求,其中,预测出的最大工后沉降值分别为 6.03 mm 和 5.07 mm(其中砂桩-网复合地基共经过二次预压,笔者取其第 2 次预压后的工后沉降预测值)。CFG 桩-网地基根据实测数据预测出的工后沉降量稍稍大于砂桩-网地基,但差别不大,且其沉降总量及沉降速率则均小于砂桩-网地基。前者沉降总量预测值为 34.71 mm,后者为 68.60 mm,这主要与后者含有部分高压压缩性土层有关。

3.2 桩土应力比分析

为了解复合地基受力工作状态,以及桩、土的受力特性,现对复合地基的桩、土应力比 n 值和荷载分担比 N 值随时间荷载变化的规律进行分析。两种桩型桩网复合地基的桩土应力比随荷载变化规律如图 5 所示。

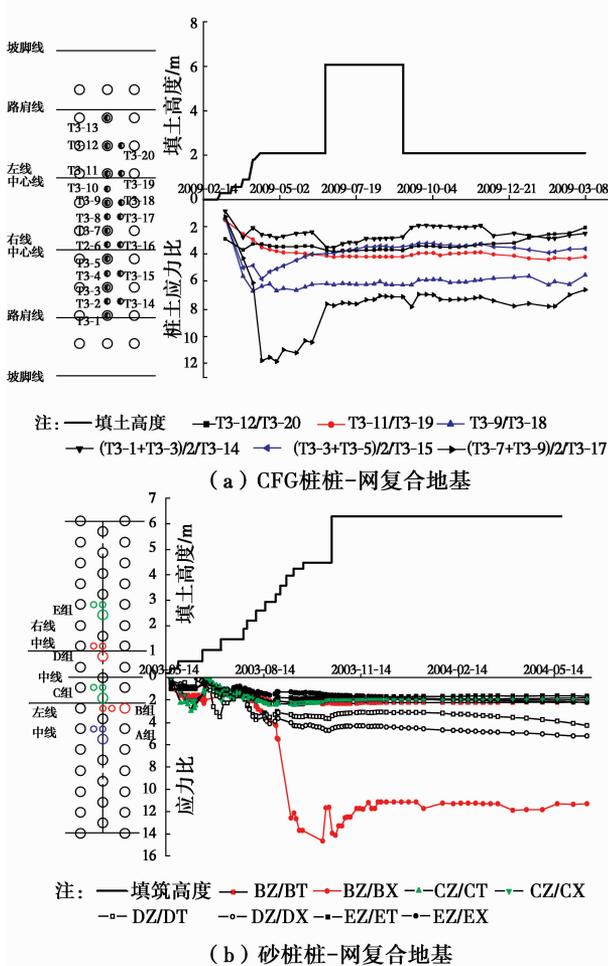


图 5 桩土应力比随荷载变化图
 Fig. 5 Stress ratio of pile and soil

从图 5(a)中可以看出,CFG 桩-网复合地基桩土应力比在填筑初期增长速率较慢,随着荷载的增加,桩土应力比逐渐增大,这是因为在土工格栅和褥

垫层内形成了土拱和拉膜效应,荷载逐渐集中至桩顶。在超载预压填土高度达到 6.25 m 时,桩土应力比稳定在 2~8 之间,说明土工格栅发挥了其调整桩土间相对位移、调动桩间土承载能力的作用,使得各处桩土应力比差异性较小。卸载至设计标高 2.1 m 后,桩土应力比有所降低,最后稳定在 4.2 左右,这是由于桩顶应力在卸载后回弹量较桩间土应力回弹量大造成的。

砂桩桩-网复合地基桩土应力比总体上呈现先增大后稳定的趋势。图 5(b)中显示大多数组的桩土应力比在填筑 4 个月后即趋于稳定,仅有一组的桩土应力比是在填筑结束后才稳定,而 4 个月时路基填筑的高度仅为 4.5 m,这说明中低压缩性地基土经砂桩处理后其桩土应力比能在较短时间内稳定。

砂桩作为散体桩,其承载作用远小于 CFG 桩这类半刚性桩,砂桩-网地基桩土应力比随时间与荷载稳定后约为 3.5,其荷载分担比约 17.9%;而 CFG 桩-网复合地基桩土应力比最终稳定在 4.2 左右,其荷载分担比达到 50%左右。上述二者随时间荷载变化规律呈现一定差异:CFG 桩-网复合地基桩土应力比随着加载过程的进行呈非线性增长,最终趋于某一稳定值;砂桩-网复合地基桩土应力比则呈现一定的波浪形变化,比值先随荷载增加而增大,而后又逐渐减小,最后又有所增加并逐渐稳定。这主要是因为荷载刚作用时地基内应力迅速向桩体集中,随荷载的增加砂桩逐渐发挥出复合地基的作用,桩间土承载力得到发挥,到了加载后期由于桩间土承载力有限,大部分荷载仍由砂桩承担,但桩顶应力增长速率减缓,与桩间土应力增长速率逐渐同步,桩土应力比趋于稳定,这也说明当砂桩-网地基开始发挥复合地基作用后,桩体和桩间土的应力增长开始协调发展;与 CFG 桩相比,砂桩处理过的中低压缩性地基土,其桩土应力比及荷载分担比能够在较短时间内趋于稳定。

3.3 孔隙水压力分布规律

图 6 为不同深度处 CFG 桩-网复合地基超静孔隙水压力随时间荷载的变化规律,从总体上看,埋设深度对超静孔压变化影响不大,但上部荷载对超静孔压变化有一定影响,超静孔压随荷载增加而略微增大,到恒载期超静孔压逐渐消散。且在恒载期较深测点处的超静孔压值有所降低,说明孔隙水自上而下渗流,土体逐渐固结,卸载至设计标高后超静孔压继续减小。桩底 16 m 处测点的孔压最大,下卧层次之,桩间土的孔压相对较小。

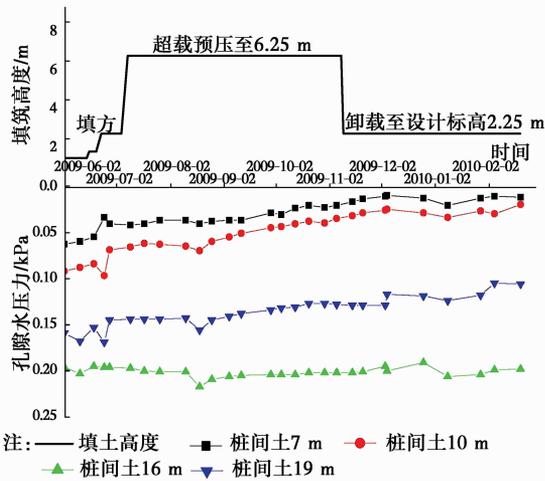


图 6 CFG 桩-网复合地基孔压变化曲线

Fig. 6 The change curve of hole pressure in CFG pile-net composite foundation

图 7 为砂桩-网复合地基超静孔压荷载-时间过程图。从总体上看,不同深度处超静孔压变化呈现出的规律大致相同,即呈现出有规律的台阶状增加消散趋势。埋设深度越深,荷载变化对超静孔压规律的影响越小,这是因为荷载对超静孔压的影响是通过附加应力产生的,而地基附加应力随埋深逐渐减小。加载初期,荷载较小,加荷速率较慢,超静孔压随荷载增加而缓慢增大,在间歇期缓慢消散;加载后期,加载速率增至 1.3 kPa/d,超静孔压随加载速率的增加而迅速变化,曲线台阶密集;恒载期,超静孔压随着时间发展逐步消散。

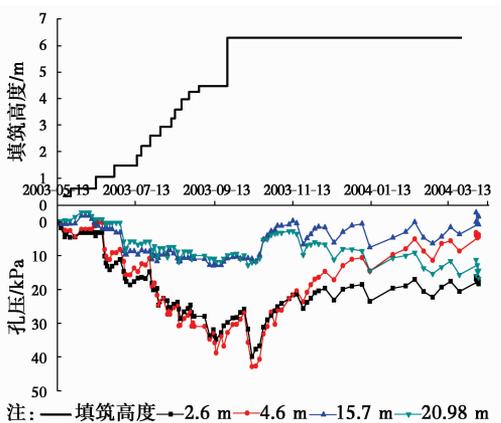


图 7 砂桩-网复合地基孔压变化曲线

Fig. 7 The change curve of pore pressure in the sand pile-net composite foundation

二者超静孔压虽然都受到埋深的影响,但在相同深度处的超静孔压值相差甚远(不在同一数量级),砂桩的超孔压值远远大于 CFG 桩的超孔压值;CFG 桩的超孔压对上部荷载的变化不敏感而砂桩

的超孔压增加消散受上部荷载影响较明显,这是因为 CFG 桩作为半刚性桩,被认为具有完全不透水性,而砂桩属于散体桩,其透水性很强,也因此 CFG 桩-网地基超孔压消散速率(0.000 2 kPa/d)远小于砂桩-网地基的超孔压消散速率(0.270 0 kPa/d)。通过分析超静孔压变化规律也可知道,砂桩在加载初期主要以排水固结为主,在此过程中泥土细颗粒不断被带入砂桩内,砂桩本身的强度和密实度逐渐增加,随着时间及荷载的增加,排水固结过程逐渐完成。

4 结论

通过对沪宁 CFG 桩-网复合地基和京沪砂桩-网复合地基两种不同刚度桩-网复合地基的现场试验对比分析,得出以下结论:

1)在中低压缩性土中,经 CFG 桩-网复合地基或砂桩-网复合地基处理后的工后沉降均能满足无砟轨道路基的要求,说明中低压缩性土的工后沉降与地基处理类型的关系并没有软土明显。但 CFG 桩-网复合地基沉降总量与沉降速率均小于砂桩-网复合地基,收敛速度亦较快。

2)受桩刚度差异的影响,桩土应力比变化规律存在较大差异,CFG 桩-网桩土应力比随着路堤填筑加载而增大,最终稳定在 4.2 左右,其荷载分担比达到 50%左右;而砂桩-网桩土应力比随荷载增加先增大后减小再增大,呈波浪形变化,最终稳定后约为 3.5,其荷载分担比约 17.9%。在中低压缩性地基土中,砂桩较 CFG 桩更能在较短时间内使桩土应力比稳定。

3)两种不同桩型桩-网地基超静孔压都受到埋深影响,荷载变化对 CFG 桩-网地基孔压影响有限,而砂桩-网地基超静孔压对荷载变化较敏感,且其超静孔压消散速率远远大于 CFG 桩。

参考文献:

[1] 连峰,龚晓南,赵有明,等. 桩-网复合地基加固机理现场试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 7-12.
LIAN F, GONG X N, ZHAO Y M, et al. Field test study on strengthening mechanism of pile net composite foundation [J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 7-12. (in Chinese)

[2] 张良,罗强,刘潇潇,等. 基于现场试验的桩网复合地基垫层效应分析[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(5): 787-793
ZHANG L, LUO Q, LIU X X, et al. Cushion effect analysis of pile-net composite foundation based on field

- tests [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(5): 787-793. (in Chinese)
- [3] 马建林,刘俊飞,朱明,等. 高速铁路 CFG 桩网复合地基桩土承载特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(7): 56-58.
MA J L, LIU J F, ZHU M, et al. Experimental study on bearing capacity of composite foundation of CFG pile engineering [J]. 2009(7): 56-58. (in Chinese)
- [4] JIANG A L, WANG M X. Composite foundation on bearing characteristics and simulation analysis CFG pile for the high speed railway [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78; 3827-3831.
- [5] 张继文,李殿龙,曾俊铖,等. CFG 桩网复合地基桩土应力荷载比试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(7): 59-61.
ZHANG J W, LI D L, ZENG J J, et al. Experimental study on stress load ratio of CFG pile composite foundation [J]. Railway Engineering, 2009(7): 59-61. (in Chinese)
- [6] WANG C D, SU H, ZOU C H. Comparative analysis on neutral point distribution in rigid pile composite foundation on collapsible loess in high speed railway [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 90-93; 471-476.
- [7] 贾佳. 桩-网复合地基工作机理的数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 87.
JIA J. Numerical modeling study of mechanism of geosynthetic-reinforced and pile-supported composite foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 87. (in Chinese)
- [8] 左坤,王敏,徐林荣,等. 高速铁路中低压缩性土桩-筏(网)地基加固效果研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 1590-1597.
ZUO S, WANG M, XU L R, et al. Research on reinforce effect of high-speed railway low and medium compressible soil pile-raft (net) foundation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(5): 1590-1597. (in Chinese)
- [9] YU J J, CHENG Q G, LI C H, et al. Numerical simulation research on the settlement regularity in pile-net composite foundation [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263; 1251-1256.
- [10] CHEN J J, NIU J D. Behavior of pile-net composite foundation [C]// Geotechnics of Soft Soils-Focus on Ground Improvement-Proceedings of the 2nd International Workshop on Geotechnics of Soft Soils, 2009: 393-398.
- [11] JIANG D P, WANG B L. An analysis on failure pattern of CFG pile-net composite foundation of high-speed railway [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597; 1357-1262.
- [12] YU J J, CHENG Q G, LI C H, et al. Model test research on bearing behavior of pile-net composite foundation in super large area and deep soft soil [J]. Advanced Materials Research, 2012, 378-379; 470-476.
- [13] 王宏贵,徐林荣,赫晓光,等. 加筋间距对高填方路堤稳定性影响分析[C]// 第二届全国环境岩土工程及土工合成材料技术研讨会, 2008: 5.
WANG H G, XU L R, HE X G, et al. Analysis on the stability of high embankment influenced by vertical reinforcement interval [C] // The Second National Environmental Geotechnical and Geotechnical Composite Technology Symposium, 2008: 5. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)