

CFG 桩复合地基加固桥头深厚软基

何 宁, 娄 炎, 娄 斌
(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 深厚软基经过 CFG 桩复合地基处理后, 能够满足高路堤桥头控制工后沉降的要求. 路堤预压期间桩间土压力总体呈上升趋势, 预压期间桩间土与桩顶承受的荷载在不断地调整, 桩土应力比呈下降趋势, 直到预压后期基本稳定在 18.7. 路堤下刚性桩复合地基在桩土应力比、桩土荷载分担上与刚性基础下刚性桩复合地基有较明显的差异. 本工程实测资料表明桩、土承载能力仅仅发挥 20%, 尚有较大潜力. 对于刚性桩复合地基, 扩大桩间距的同时在桩顶设置足够面积和刚度的桩帽, 增大桩的置换率, 以保证刚性桩复合地基刚度是发挥桩、土承载能力的有效途径.

关 键 词: CFG 桩; 复合地基; 高速公路; 桥头; 深厚软基; 工后沉降

中图分类号: U416.1:TU471.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)04-0089-06

CFG 桩复合地基法广泛应用于工业和民用建筑领域的地基加固, 取得了丰富的成果和经验^[1], 已形成相应的规程、规范^[2], 但直至近几年才在高速公路建设中开始运用. 由于高速公路对工后沉降量的要求较高, 位于东部沿海地区的高速公路高填方桥头深厚软基, 过去大都采用预压方法进行处理, 由于工期、技术、施工安全等方面原因, 处理结果往往不够理想, 工后沉降量较大, 形成桥头跳车, 难以达到交通部相关标准^[3]的要求. 因此 CFG 桩复合地基法渐渐被引入到高速公路高填方桥头深厚软基的处理中^[1,4].

本文在杭州湾跨海大桥南岸接线试验区内现场试验研究的基础上, 着重总结了加固效果以及与此有关的一些问题, 希望对软土地区高速公路的设计及施工等各方面有借鉴作用.

1 地质概况与加固方案

1.1 地 质 概 况

CFG 桩试验段工程位于浙江慈北冲积平原, 主要由冲积海积黏土、亚黏土和亚砂土组成. 加固区有 4 层土, 其中 3 层为软土, 软土厚度达 31 m. 自地表向下分别为: ②₁ 亚黏土层, 浅层为耕植土, 大部分为软塑状, 少数为可塑状, 厚约 2.5 m; ②₂ 淤泥质亚砂土层, 呈流塑状, 饱和, 厚约 6.4 m; ③₁ 淤泥质亚黏土层, 呈流塑状, 饱和, 厚约 22 m; ⑤₂ 细砂、粉砂层, 厚度大于 4.2 m. 土层主要物理力学指标见表 1.

表 1 土层主要物理力学指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indices of the soil layers

土层 代号	土层厚度/ m	含水率/ %	湿密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙比	液限/ %	塑性指数	液性指数	压缩系数/ MPa ⁻¹	固结系数/ (10 ⁻³ cm ² ·s ⁻¹)
② ₁	2.5	31.0	1.91	0.872	34.5	14.0	0.76	0.32	7.64
② ₂	6.4	34.1	1.86	0.951	29.0	8.3	1.77	0.39	8.72
③ ₁	22.1	42.1	1.79	1.160	34.3	13.2	1.59	0.70	5.73
⑤ ₂	4.2	29.5	1.91	0.834	/	/	/	/	/

收稿日期: 2010-02-25

作者简介: 何 宁 (1969-), 男, 江西高安人, 高级工程师, 主要从事岩土工程安全监测与地基处理研究.

E-mail: nhe@nhri.cn

1.2 加固方案

CFG 桩的设计直径 50 cm, 采用 425 号普通硅酸盐水泥, 粗骨料碎石粒径 3 ~ 5 cm, 桩体强度要求达到 C12; 桩顶铺设 50 cm 厚的碎石垫层, 垫层采用粒径 2 ~ 5 cm 的洁净碎石, 内铺一层钢塑土工格栅, 铺于地面以上 30 cm 处的碎石垫层内, 钢塑土工格栅要求延伸率不大于 3.0%, 其纵向抗拉强度大于 80 kN/m, 横向抗拉强度大于 60 kN/m. 桩的打设深度超过软土厚度 1.0 m 以上, 间距有 2.5 m 和 2.0 m 两种, 对应于桥头过渡段和桥头路段, 都为正三角形布置. 路堤设计高度 5 m 左右.

2 方案实施

2.1 施工机械与施打顺序

CFG 板施工工艺一般常用长螺旋钻施工^[1,5]或振动沉管施工^[1]. 本工程施工区域地下水位接近地表, 被加固地基为饱和软黏土, 难以用长螺旋钻孔灌注成桩, 故采用振动沉管机进行施工, 打桩时用钢筋混凝土预制桩尖作为桩靴.

CFG 桩施工中, 施打顺序有连续施打, 也有隔桩隔排跳打 (见图 1). 当采用隔桩隔排跳打施工时, 第 1 次序为单排双号桩, 第 2 次序为双排单号桩, 第 3 次序为单排单号桩, 第 4 次序为双排双号桩; 第 1 次序全部施打完成后再进行第 2 次序桩的施打, 依此类推. 根据试桩情况, 跳打方式桩身质量并不比连打的好, 因此采用中间向两边连续退打的方式, 以防止桩身被设备压断, 也能防止因跳打造成地基不平而引起安全问题, 同时桩机往返移动的减少, 能加快施工进度, 缩短施工周期.

2.2 实施概况

CFG 桩施工结束后按比例对 160 根桩进行了低应变检测, 其中 I 类桩 103 根, 占 64.4%; II 类桩 57 根, 占 35.6%; II 类桩出现的桩身质量问题大都在桩体浅部的桩头部位, 钻孔检测显示桩身质量良好, 在碎石褥垫层施工前对所有 CFG 桩桩头都进行了补强处理.

3 试验结果与加固效果分析

3.1 软土强度

加固后在每层土中 3 个不同位置、不同时间测定了土层的十字板强度, 详细结果可见文献[6]. 加固后经过 3 个月, 各层软土的强度变化如表 2 所示, 表中土层平均十字板强度的统计采用加固前 2 个检测孔和加固后 5 个检测孔的试验资料, 每个检测孔 3 层软土的试验点位分别为: ②₁ 亚黏土层 3 个试验检测点, ②₂ 淤泥质亚黏土层 6 个试验检测点, ③₁ 淤泥质亚黏土层 15 个试验检测点. 地基中、上两层软土的十字板强度提高 9% ~ 26%, 而第 3 层软土仍未恢复到原状土水平, 仅为原状土的 87%. 研究表明沉桩挤土桩的挤土效应休止期是很长的, 有些甚至长达几十年^[7-8].

表 2 加固前后软土层十字板强度的变化

Tab. 2 The Vane strength of soft soil before and after reinforcement

时 间	土层平均十字板强度 C_u / kPa		
	② ₁ 亚黏土	② ₂ 淤泥质亚黏土	③ ₁ 淤泥质亚黏土
原状土	30	65.2	72.6
加固后 3 个月平均值	37.7	71.1	63.4
强度增加 (%)	26	9	-13

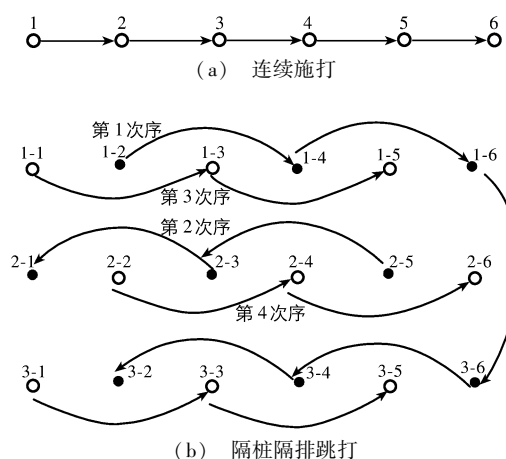


图 1 CFG 桩施打顺序

Fig. 1 Construction sequence of CFG piles

3.2 超静孔隙水压力增、消情况

图2是CFG桩复合地基在填土荷载作用下地基中形成的超静孔隙水压力增、消过程。观测资料表明,在填土达到4.2 m后,CFG桩复合地基中形成的最大正超静孔隙水压力仅为22.4 kPa,此时相应的超静孔隙水压力平均值和施加的预压荷载的比值 $u_{\text{平均}}/P$ 约为0.28,远小于本工程中类似地质条件下的堆载排水预压处理路基中形成的超静孔隙水压力平均值与施加的预压荷载的比值0.79^[6],这说明填土荷载大部分由桩体承担;而且消散速率也比天然地基快,在填土达到标高后的40~50 d超静孔隙水压力消散几乎为0。

3.3 地基的水平位移

路堤填筑加荷过程中地基软土深层水平位移累计最大值不到7 mm,没有出现地基失稳。而成桩施工过程中地基软土累计发生54 mm的水平位移^[6,9],说明土体的侧向变形主要发生在成桩施工过程中,这与采用的施工机械及工艺有关。

3.4 关于桩、土压力

3.4.1 桩顶与桩间土压力 填土过程中,埋于桩顶和土中的土压力计所测桩顶、桩间土压力发展过程如图3所示。可见,在路堤填筑过程中,桩间土压力与桩顶压力随荷载增大而增大,桩间土压力在填土完成时最大土压力达到30 kPa;在路堤预压期间,桩间土压力总体呈上升趋势,达到的最大值为39 kPa,到预压后期桩间土压力上升势头基本停止,稳定在36 kPa上下。桩顶土压力最大值为673 kPa,桩顶自填土开始就承受着较高的土压力,随着预压的进行,桩顶应力有所降低,表明预压期间桩间土与桩顶承受的荷载在不断地调整。

3.4.2 桩、土压力的调整 在路堤填筑期间,桩土应力比随填土荷载的增加不断增大(见图4),至填土结束后半个月达到最大值29.3。在进入预压阶段后桩土应力比不断下降,直到预压后期(14个月)才基本稳定在18.7左右(见图5)。这说明桩间土和桩所承受的荷载在不断地变化调整,以进行应力重分配^[10]。这种应力的调整与土体和桩的变形有关。桩间土在填土荷载下被压缩,现场地基土的深层沉降资料见图6。

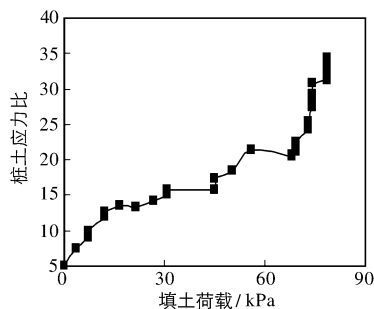


图4 桩土应力比随填土荷载变化

Fig. 4 The relationship between load and pile-soil stress ratio

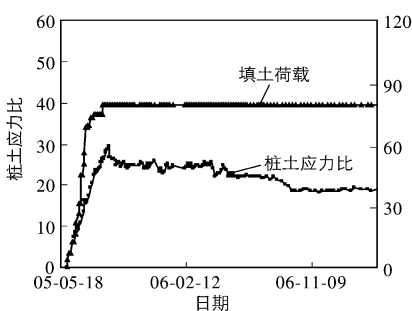


图5 预压期间桩土应力比变化

Fig. 5 The pile-soil stress ratio in the preloading period

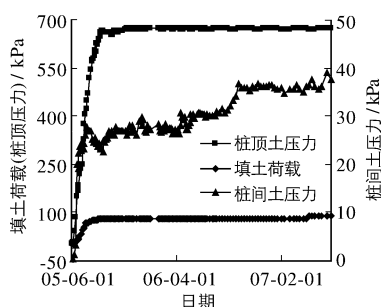


图3 桩顶、桩间土应力随荷载变化

Fig. 3 The relationship between load and stress on top of piles and in soil-area between piles

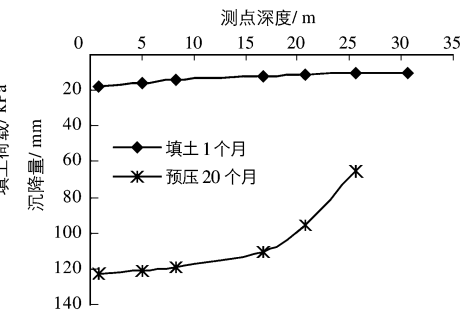


图6 预压后期不同深度桩间土的沉降

Fig. 6 The settlement of different depths soil between piles in the late preloading period

上述结果表明:不同深度的桩间土相对原地表有不同程度的下沉,预压后期自地表向下20 m深的软土

有 10 cm 以上的下沉量. 这说明桩间软土中的碎石垫层部分被压入桩顶之下, 桩间土密实度有所提高, 承担荷载的能力逐渐增加(见图 3), 故桩土应力比不断降低.

3.5 复合地基承载力与桩、土荷载的分担

文献[2]中推求 CFG 桩复合地基承载力特征值 f_{spk} 的公式是:

$$f_{\text{spk}} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1 - m)f_{\text{sk}} \quad (1)$$

式中: m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向承载力特征值(kN); A_p 为单桩截面面积(m^2); β 为桩间土承载力折减系数, 取 0.75~0.95; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值(kPa).

式(1)是由刚性基础下按面积加权推得的桩体复合地基承载力计算式, 是在桩与桩间土受荷时发生等沉降变形的前提下得出的. 大量实践(较多的是柔性桩复合地基)表明, 复合地基破坏时, 桩的承载能力得到发挥, 而桩间土往往还没有达到极限状态, 所以式(1)中乘以桩间土承载力折减系数 β . 复合地基中影响桩或土先达到极限状态的因素较多且关系复杂, 包括路堤的强(刚)度、桩体的强(刚)度、土体的强度及其相对比值, 垫层厚度、刚度, 桩间距, 置换率与加筋材料属性等; 目前这些都处于研究阶段, 较难定量确定, 具体问题多依靠现场试验加以解决.

本文中, 现场载荷试验测得单桩竖向承载力特征值为 325 kN, 桩间土承载力特征值为 170 kPa, 复合地基承载力特征值为 250 kPa. 桩间土承载力特征值按《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)计算, 即对 CFG 桩复合地基来说, 以黏性土为主的地基, 取 $s/b=0.01$ 所对应的压力.

以现场实测桩、土的承载力按式(1)计算复合地基承载力特征值, 当 β 取 0.95(置换率为 5.67%)时, CFG 桩复合地基承载力特征值为 246.2 kPa, 当 $\beta=1.0$ 时复合地基承载力特征值为 254.3 kPa, 与现场实测复合地基承载力特征值很吻合. 这表明在计算刚性基础下刚性桩复合地基承载力特征值时, 桩间土承载力折减系数 β 取大值比较合适. 因现场试验结果是在刚性基础下得到的, 它满足式(1)的条件, 所以式(1)的计算结果与现场测试结果(250 kPa)比较一致.

现场复合地基载荷试验得出: 单桩极限荷载 500 kN, 桩上荷载 320 kN, 桩间土荷载 180 kN, 桩土荷载承担比为 1.78; 桩顶平均压力 1 630 kPa, 桩间土压力 224 kPa, 桩土应力比 7.28. 可见在达到极限状态时, 桩承担的荷重占总荷载的 64%, 而土仅占 36%, 桩成为承担荷载的主力. 桩、土承担的荷重分别是它们极限承载力的 49.2% 和 65.9%(桩、土的极限承载力分别为 650 和 340 kN), 说明土可能先进入极限状态. 这与文献[11]说的“一般桩先到达极限状态”的结论有所不同, 可能因本载荷试验是刚性基础下的刚性桩复合地基, 文献[11]中的例子是刚性基础下的柔性桩复合地基, 但真正原因还需进一步验证.

预压期内路堤下复合地基中桩土荷载承担情况为一个间距内理论土柱总重 138 kN, 桩顶土压力均值 672 kPa, 桩上承担的荷载 66 kN, 桩间土压力均值 35.9 kPa, 桩间土承担的荷载 59 kN, 预压期内平均桩土应力比 18.7, 桩土荷载承担比 1.12. 一个间距内桩与桩间土二者荷载实测值相加为 125 kN, 与路堤土柱理论总重 138 kN 较为接近. 路堤预压期内平均桩土应力比达到 18.7, 远高于现场复合地基载荷试验(刚性基础)的 7.28, 桩土应力比大说明路堤荷载向桩转移得多, 土拱效应强. 路堤下桩土荷载承担比为 1.12, 桩承担了总荷载的 53%, 桩间土承担了 47%, 二者比较接近. 桩承担的荷载占其承载力特征值的 $66/325=20.3\%$, 桩间土的占 $36/170=21.1\%$, 二者承载力发挥度都较低, 可见桩、土承载能力尚有较大潜力可挖. 在路堤高度不变的情况下, 扩大桩间距即增大间距内土柱总重量、增大桩土上的荷载是提高它们承载力发挥度的途径, 但研究表明柔性基础下桩、土应力比随荷载水平增大而降低, 使桩承担荷载的比例下降, 因此要使刚性桩的高承载特性得到充分发挥, 必须在扩大桩间距的同时提高桩的置换率, 以保证桩土应力比没有太多的降低. 这可通过在桩顶上增加受荷平台即桩帽予以解决.

3.6 从沉降资料看加固效果

图7为软基经过CFG桩加固后,在路基填土过程中地表发生的沉降随时间的变化过程.资料表明经过加固处理后,地基沉降得到有效控制,地基发生的最大总沉降仅为123 mm,远小于本工程中类似地质条件下堆载排水预压处理路段的地基压缩变形(其压缩量在1.1 m以上),说明CFG桩复合地基控制沉降效果显著,CFG桩复合地基大大减少了地基的总压缩量,减少幅度接近90%.

现场试验中,4 m的填土在2个月的时间填筑完成,一般2~3 d填筑1层,几乎是连续加荷,施工速度大大提高,但这期间沉降速率却发展不快.加荷强度最大的是3 d填筑0.74 m,其沉降仅9 mm,其余沉降速率都未超过3.0 mm/d,说明CFG桩复合地基能适应快速填筑路堤的施工,而不会出现地基失稳.填筑完成后地基固结变形量为78 mm,占总沉降量的63.4%,此后20个月预压沉降量仅为45 mm,占36.6%,这说明CFG桩复合地基的压缩变形主要发生在填土加荷期间.在预压结束前的8个月当中,地基沉降速率由1.67 mm/月逐渐降到接近于0,见表3.从图7中也可以看出沉降速率日渐减小,CFG桩复合地基沉降变形稳定较快,沉降曲线在预压期间很快变得平缓,沉降已趋于稳定.

根据高速公路控制工后沉降规范的要求^[3],桥头路段工后沉降应小于100 mm.经过CFG桩复合地基处理后,综合考虑路基土体的次固结沉降和预压残余沉降,认为工后沉降可满足规范要求.

表3 CFG桩段基层施工前路堤断面中心沉降速率

Tab.3 The settlement ratio in the middle of CFG pile composite foundation before construction of pavement

时 段	沉降速率/(mm/月)	时 段	沉降速率/(mm/月)
06-08-14-06-09-20	1.67	06-11-24-06-12-27	0.91
06-09-20-06-10-30	1.50	06-12-27-07-02-15	0.61
06-10-30-06-11-24	1.25	07-02-15-07-04-15	≈0

4 结 语

(1)路堤填筑期间,CFG桩复合地基中桩土应力比随荷载增大而增大.预压期间,桩间土压力总体呈上升趋势,桩间土与桩顶承受的荷载不断调整,以进行应力重分配,桩土应力比略有下降.

(2)路堤下CFG桩复合地基在预压期内平均桩土应力比达到18.7,大大高于载荷板试验(刚性基础)中的7.3;桩承担了路堤总荷载的53%,桩间土承担了47%,二者比较接近,而载荷板试验中桩承担了总荷载的64%,桩间土承担了36%.这些体现出柔性桩与刚性基础对刚性桩复合地基的影响.

(3)路堤下CFG桩复合地基桩、土承载能力仅发挥20%,在路堤高度不变的情况下,扩大桩间距、增大间距内路堤总重量可提高其承载力,但必须在扩大桩间距的同时增大桩的置换率,以保证桩土应力比没有太多的降低,解决的办法是在桩顶上设置桩帽、增大受荷面积.

(4)CFG桩复合地基的总压缩变形仅仅是预压路段的10%左右,填土加荷期间发生的压缩量占总变形量的60%以上.桥头路段深厚软基经过CFG桩复合地基处理后,能够满足高速公路高路堤控制工后沉降的要求.

参 考 文 献:

- [1] 阎明礼, 张东刚. CFG桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (YAN Ming-li, ZHANG Dong-gang. CFG pile composite foundation technology and engineering practice[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2001. (in Chinese))
- [2] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S]. (JGJ 79-2002, Technical code for ground treatment of building[S]. (in Chinese))

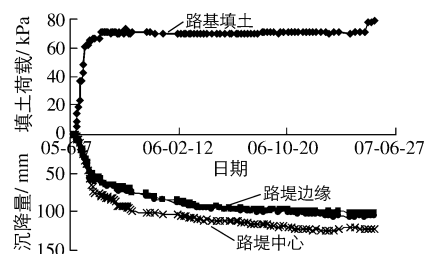


图7 CFG桩段地表沉降曲线

Fig.7 The curve of surface settlement in the section of CFG pile Composite foundation

- [3] JTJ 017-96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S]. (JTJ 017-96, Technical specifications for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. (in Chinese))
- [4] 王军, 孙红亮, 肖昭然. CFG 桩在处理高速公路软基中的应用[J]. 建筑技术, 2009, 40(7): 624-625. (WANG Jun, SUN Hong-liang, XIAO Zhao-ran. Application of CFG pile in soft foundation treatment[J]. Architecture Technology, 2009, 40(7): 624-625. (in Chinese))
- [5] 卢亮. 高速公路软基 CFG 桩施工技术[J]. 山西建筑, 2009, 35(21): 291-293. (LU Liang. The CFG pile construction technique in highway soft foundation[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(21): 291-293. (in Chinese))
- [6] 娄炎, 何宁. 深厚软土地基处理技术试验研究技术报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (LOU Yan, HE Ning. Experiment and study of the technique to improve deep soft soils[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [7] 龚晓南, 李向红. 静力压桩挤土效应中的若干力学问题[J]. 工程力学, 2000, 30(7): 11-14. (GONG Xiao-nan, LI Xiang-hong. Several mechanical problems in compacting effects of static piling in soft clay ground[J]. Engineering Mechanics, 2000, 30(7): 11-14. (in Chinese))
- [8] 鲁绪文, 何宁, 关秉洪, 等. 混凝土芯砂石桩的沉桩挤土效应及超孔隙水压变化[J]. 水利水运工程学报, 2006(4): 41-45. (LU Xu-wen, HE Ning, GUAN Bing-hong, et al. Soil squeezing effect of concrete-cored sand-gravel pile and excess pore water pressure dissipation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(4): 41-45. (in Chinese))
- [9] 陈有华, 何宁, 娄炎. CFG 桩成桩过程对桩间软土的影响[J]. 施工技术, 2008, 37(增刊): 168-172. (CHEN You-hua, HE Ning, LOU Yan. The influence to the soft soil by the construction of CFG pile[J]. Construction Technology, 2008, 37(Suppl): 168-172. (in Chinese))
- [10] 丁桂伶, 王连俊, 刘升传. 柔性基础下褥垫层厚度对带帽 CFG 桩复合地基特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 997-1001. (DING Gui-ling, WANG Lian-jun, LIU Sheng-chuan. Effect of cushion thickness on deformation characteristics of CFG pile composite foundation with caps under flexible load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(7): 997-1001. (in Chinese))
- [11] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GONG Xiao-nan. The theory and engineering application of composite foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese))

Improvement of deep and thick soft foundation at the end of a bridge by using CFG pile composite foundation

HE Ning, LOU Yan, LOU Bin

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: By using CFG pile composite foundation to improve the deep and thick soft foundation at the end of a bridge, the post-construction settlement can be controlled and meet the requirements of the relevant criterion. During the preloading period, the load acting on the soil of the composite foundation increases, and the load acting on the pile and the soil of the composite foundation continuously adjusts. The ratio of the load acting on the pile and the soil decreases. Finally, it reaches a steady value of 18.7. It is the basic characteristic of the rigid pile composite foundation. The experimental data from a case of CFG pile composite foundation show that only 20% carrying capacity of piles and soil is used, and their potential carrying capacity is great. For the rigid pile composite foundation, it is important to expand the spacing between piles and construct a sufficient size and stiffness pile cap to increase the rate of replacement of piles. It is an effective measure to utilize the high carrying capacity of rigid piles and soil by increasing the rigidity of the embankment and foundation.

Key words: CFG pile; composite foundation; expressway; end of bridge; deep and thick soft foundation; post-construction settlement