

CFG 桩复合地基桩土应力和沉降现场试验

徐 毅¹ 洪宝宁¹ 符新军¹ 徐 杰²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 南通市路桥工程有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要 基于对佛山市“一环”城际快速干线季华路互通立交桥过渡路段 CFG 桩复合地基桩、土应力和表面沉降的现场试验, 研究了路堤荷载下 CFG 桩顶、桩间土的应力和沉降变化规律, 对加载过程中桩土应力传递的性状、桩土荷载分配比例, 以及 CFG 桩复合地基桩、土变形和承载作用发挥的过程等进行了分析. 结果表明: ①在路堤荷载作用下, CFG 桩、桩间土最终可达到变形协调, 共同发挥承载作用; ②桩、土沉降差使桩体顶部填土出现土拱效应, 导致桩顶应力集中, 桩、土应力比及应力差增大; ③桩间不同位置土压力分布不同, 两桩中间土压力大于四桩中心的; ④土工格栅对调整桩、土应力比及荷载分配具有明显的作用; ⑤在 CFG 桩设计桩间距较大的疏桩形式下, 桩间土承担着大部分荷载; ⑥作为路堤荷载的地基时, 可设计为疏桩形成, 此时褥垫层厚度应适当取大, 桩体设计强度可取得低一些.

关键词 CFG 桩; 复合地基; 沉降; 应力传递; 荷载分配

中图分类号: TV223 文献标识码: B 文章编号: 1006-7647(2005)S1-0116-03

随着高等级公路建设事业的不断发展, 软基处理方法日益丰富. 目前在处理深厚软基方面特别是桥头过渡路段和含结构物路段, 已大量采用 CFG 桩复合地基^[1]. CFG 桩复合地基克服了粉喷桩复合地基在处理深度、成桩质量和承载能力等方面的不足^[2], 已得到广泛认可. CFG 桩和桩间土、褥垫层一起形成复合地基^[1,3]; “桩-网-土”协同作用共同承载. 桩土应力比是反映桩、土共同工作性状的重要参数, 也是确定地基承载力的重要依据^[4]. 对复合地基桩、土应力比的研究途径主要是进行载荷板试验和埋设土压力盒进行桩、土应力测试, 国内已有不少学者开展了这方面的试验研究^[5-7]. 载荷板荷载作为一种刚性荷载, 与实际施工中柔性路堤荷载的作用效果显然不同, 其作用下的桩、土荷载比并不能充分反映施工中的实际情况. 与之比较, 在现场埋设土压力盒进行路堤荷载下桩、土应力的实测是一种更为合理、可行的研究手段.

本文通过佛山“一环”某桥头过渡路段 CFG 桩复合地基桩、土应力及表面沉降的现场试验, 将桩、土应力与表面沉降的变化结合起来考虑, 对路堤荷载下桩、土变形及承载作用的变化过程进行了研究. 通过研究, 了解了该桥头过渡路段 CFG 桩复合地基

桩、土的实际工作状况, 并据此对褥垫层厚度、桩间距及桩体强度等设计参数的合理性进行了反分析.

1 工程概况

佛山市“一环”城际快速干线季华路互通立交(XK10+200)~(XK10+300)桥头过渡路段, 所处地段原为鱼塘. 地质勘察报告显示, 浅层地基发育了厚度约 20.7 m 的软弱黏性土层, 其软土具有天然含水量高、压缩性高、强度低的特点, 工程性能较差. 在桥头高填土荷载作用下, 易于产生侧向位移、不均匀沉降和蠕变变形. 各分层地基土的物理力学指标见表 1.

表 1 地基土物理力学性质指标

土层	土性	层厚 h/m	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水量 w/%	孔隙 比 e	塑性 指数 I_p	压缩系数 $a_{0.1-0.2}$ /MPa ⁻¹	压缩 模量 E_s /MPa
①	灰黑色 淤泥	15.8	1.50	64.4	1.981	21.0	0.59	1.42
②	灰色淤泥 质亚黏土	4.9	1.64	45.7	1.368	11.2	0.92	2.45
③	灰色粉质 砂土	3.6	1.99	18.0	0.595	9.2	0.21	7.24

鉴于该桥头过渡路段软基深厚且施工工期紧、填土速度快, 地基处理方案选择了变形小、沉降稳定快、承载力高的 CFG 桩复合地基, 设计参数为: CFG

作者简介: 徐毅(1980—)男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 从事软土地基处理研究.

桩直径 40 cm, 间距 2 m, 正方形布置, 桩长 22.3 m, 桩体强度等级 C15, 桩顶铺设 30 cm 砂垫层, 砂垫层上铺一层 TGDC35 单向土工格栅。

2 现场试验方案

现场试验结合软基监控进行, 即将该桥头过渡路段的 K10+300 断面作为重点监控断面, 同时作为现场试验研究断面。在该断面路堤中心线位置的 CFG 桩顶、桩间设置土压力盒, 以研究桩顶、桩间土的应力变化情况及相互关系; 在土压力盒埋设区附近的桩顶及桩间各埋设 2 块表面沉降板, 以研究桩顶、桩间土的沉降变化及相互关系。

现场测试选用精度较高的 TYJ-25 型振弦式土压力盒。作为对比, 在褥垫层下桩顶、桩间土设置一组土压力盒, 在褥垫层上 30 cm 处设置另一组土压力盒。褥垫层下桩顶的土压力盒布置在桩体中心上 10 cm 处, 桩间的土压力盒布置在两桩连线的中点。为避免试验过程中桩顶出现应力集中现象对试验结果的影响, 桩顶土压力盒平板下铺设了 10 cm 厚的砂垫层。土压力盒的具体布置如图 1 所示。

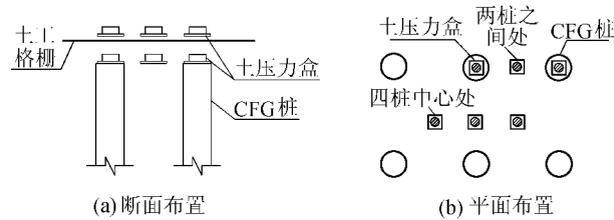


图 1 土压力盒布置示意图

3 试验结果和分析

从砂垫层施工开始计, 该桥头过渡路段路堤填土历时 25 d, K10+300 断面填筑高度 3.3 m。填土加载过程中, 对每级荷载下桩顶、桩间土的土压力和表面沉降进行了观测, 相同位置的土压力和表面沉降取其平均值。

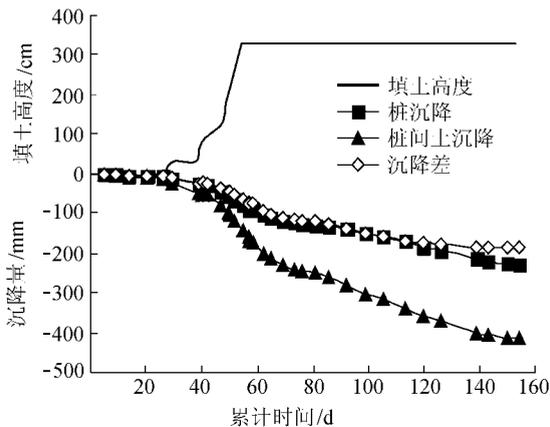


图 2 桩顶、桩间土表面沉降曲线

3.1 桩、土表面沉降

图 2 是桩顶、桩间土在施工过程及结束后的表面沉降观测曲线。由图可见, 桩顶沉降始终小于桩间土的沉降; 至超载预压的后期, 从沉降曲线趋势可以判断, 桩间土沉降与桩顶的沉降都还未完全稳定, 这不仅说明超载预压还需继续, 而且反映了填土荷载仍在桩和桩间土之间调整转移。但是, 这种变化已渐趋平缓, 这点从桩顶、桩间土的沉降差曲线可以看出。整个加载过程, 沉降差随着荷载的增大而增大, 但增长速率由小变大再变小, 最后沉降差趋于稳定值, 表明桩体和桩间土将最终可以达到变形协调, 桩体和桩间土承载作用同步发挥(后文图 4 中格栅下桩土应力比曲线的变化趋势也印证了这一点)。

3.2 桩顶、桩间土应力

图 3 是施工过程和结束后桩顶和桩间土的土压力观测曲线。由图可见, 桩顶和桩间土的土压力均随着填土荷载的增大而增大, 但格栅下部的桩顶土压力增幅大, 桩间土压力增幅小, 表现出明显的桩顶应力集中现象, 桩、土应力出现差值; 与图 2 沉降曲线比较可以看出, 桩、土沉降差稳定时, 桩、土应力差也较稳定; 快速填土、沉降差迅速增加时, 桩土应力差增加也很快。这说明了桩、土沉降差是应力集中的重要成因。据分析, 在每级加载刚结束时, 填土荷载在地基表面基本上是均匀分布的, 桩顶和桩间土所受的压力基本相同, 但由于桩间土的压缩模量远小于桩的压缩模量, 导致桩间土的沉降大于桩顶的沉降, 桩体向上部褥垫层刺入, 桩间土产生弯沉, 而路堤填土经压实已具有一定的强度, 不能完全同桩间土的弯沉变形保持协调, 从而在桩之间的顶部填土中引起土拱效应, 导致荷载向桩顶集中, 使得桩顶、桩间土压力增幅不一。

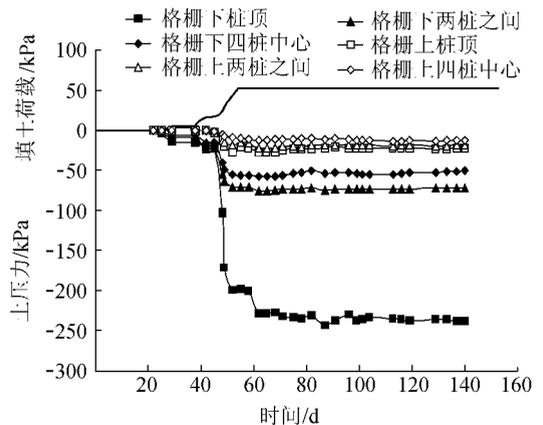


图 3 不同位置处桩顶、桩间土压力时程曲线

比较而言, 格栅上部 30 cm 处相同位置土压力的增幅则小得多, 并且桩顶、桩间土压力增幅差别不大, 没有褥垫层下那种明显的桩身应力集中现象。分

析认为,除了两处深度位置相差 60 cm 的填土荷载外,土工格栅随桩间土的弯沉而被拉紧,其拉膜作用对应力的扩散是主要原因。

从图 3 还可见,不同桩间位置测得的桩间土压力不同.两桩之间的土压力大于四桩中心的土压力,而且随着路堤荷载的增加,前者增量要比后者大一些.分析认为,由于排水固结作用,桩间土受桩体挤密后表现为应变硬化.由于间距更小、径向排水路径更短,两桩之间桩间土受到桩的挤密作用后,固结及应变硬化的程度要大于四桩中心桩间土,变形模量也因之大于后者.在填土荷载下,两桩之间土体的沉降量以及与桩顶的沉降差均小于四桩中心土体的.因此,在相同的加载下,两桩之间桩间土向桩顶转移的荷载要小于四桩中心的,从而使两桩之间的桩间土压力大于四桩中心的,并且其增量也要比后者大一些.比较而言,格栅上部两桩之间与四桩中心的土压力较格栅下部接近得多,这正是土工格栅发挥的应力扩散作用所致。

3.3 桩土应力比

桩土应力比的变化规律更直接地反映了在加载过程中桩土应力传递的性状.图 4 是桩土应力比变化的时程曲线.由图可见,格栅下桩土应力比在填土初期随填砂高度增加陡升至 1 附近,达到一个小的峰值,这主要是在加载初期,砂垫层刚铺填时,桩顶、桩间土高程基本齐平,两者共同承载,桩、土应力接近,应力比在 1 左右;随后略有下降,直到填土高度在 1.2 m 时,才逐渐增加,并于一段时间后达到另外一个峰值.这是因为当填土高度达 1.2 m 以后,填土速度加快,沉降量及桩、土沉降差快速增加,桩体顶部填土拱效应的增强,荷载向桩顶集中,使得桩顶应力增加很快,桩土应力比迅速增大.填土后期及结束后,由于土工格栅作用的增强,以及桩间土的应变硬化,桩、土应力有所调整,桩土应力比的增加变得平缓。

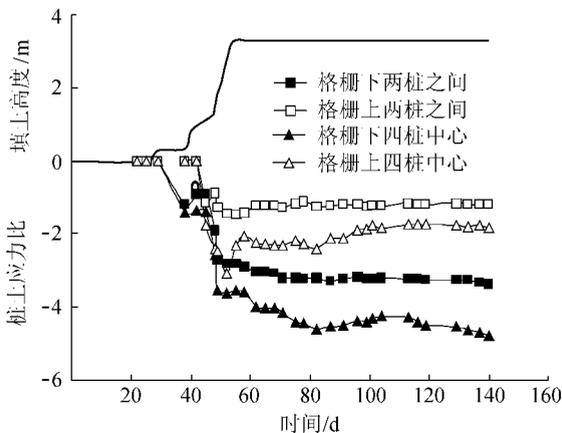


图 4 不同位置处桩、土应力比时程曲线

从图 4 还可看出,格栅上桩土应力比的变化过

程比较简单,而且其值较小,仅为 1.0~2.0 左右.这主要是土工格栅拉膜作用对应力扩散的结果.在加载前期,格栅上桩土应力比随荷载的增加有较小幅度的增加;在填土高度 1.2~3.3 m 快速加载时,桩土应力才表现出明显的上升;之后在超载预压阶段随着应力扩散及桩间土强度的不断增加,格栅上桩土应力比又表现为缓慢地下降。

3.4 桩、土荷载分配

按照规范^[8]中复合地基承载力计算公式的思路,假定桩顶应力均匀分布,根据超载预压后期实测数据进行桩土荷载分配的初步计算.填土高度 $h = 3.3$ m,平均填土密度 $\rho = 1.8$ g/cm³,单桩处理区面积 $A = 4$ m²,单桩面积 $A_p = 0.126$ m²,桩顶平均应力值 $\sigma_p = 239.5$ kPa,则:单桩处理区总填土荷载 $P = \rho gh = 232.8$ kN;单桩承担荷载 $P_p = \sigma_p A_p = 30.2$ kN;单桩荷载分担比 $\delta_p = P_p/P = 13\%$;桩间土荷载分担比 $\delta_s = 1 - \delta_p = 87\%$ 。

根据桩间土压力的实测情况,两桩中间土压力实测值约 70 kPa、四桩中心土压力实测值约 50 kPa,与计算出的 87% 的桩间土荷载分担比是吻合的.因此,可以认为桩间土承担了大部分荷载.尽管预压后期荷载仍在桩间土、桩顶之间缓慢地调整,但从桩土应力比曲线后期的平缓趋势可以看出,这种变化不会很大.可见,该桥头过渡路段 CFG 桩复合地基在设计桩间距为 2 m 的疏桩形式下,桩间土发挥了主要的承载作用。

3.5 相关设计参数分析

上述桩顶和桩间土应力、沉降及荷载分配的试验研究对合理选择相关的设计参数,如褥垫层厚度、桩间距、桩体强度等有一定作用。

a. 从桩、桩间土表面沉降观测来看,预压后期桩、土之间沉降差偏大.褥垫层的一个重要作用是在桩体向上刺入时,褥垫层材料的流动补偿使得桩间土与基础底面始终保持接触,从而使两者间的接触应力得到均化和调整,桩间土的承载力得到充分发挥^[3].而该 CFG 桩处理区在设计桩间距为 2 m、褥垫层的设计厚度为 30 cm 的情况下,桩土沉降差达到了 18 cm 左右.这样可能导致因褥垫层材料的流动补偿不足而使得路基底面与桩间土接触不好甚至局部脱空,使桩间土的承载力不能充分发挥.因此,在设计桩间距较大的情况下,褥垫层厚度应再适当增加,以更好地形成柔性承台,充分发挥桩间土的承载作用。

b. 从桩、土应力比和荷载分配来看,桩土应力比最大值也未超过 6.0,桩间土则承担了总填土荷载的 87%,可见采用 CFG 桩复合地基(下转第 123 页)

5 结 语

桩基工程高应变动力检测实践表明该方法具有速度快、耗资低等优点,从而得到广泛的应用。但要提高高应变动力测桩技术的可靠性,仍有许多问题有待研究。

a. 高应变动力测试时,锤击能量大,对桩头的处理要求也更高,一定要高度重视认真对待。

b. 在高应变动力测桩过程中要特别重视不同场地、不同桩型的动静对比试验,对一个工程或一个地区,把高应变检测同静载试验结合起来,在高应变动力测桩的同时做好静载试验。

c. 确定一种检测方法的可靠性,必须立足于大量、可靠、全面的对比材料,然后做科学的统计分析,得出定量的总体评定指标。大量工程实践表明,高应变测承载力和静载试验有一定的相关性^[5],在掌

(上接第 118 页)作为路堤柔性荷载的地基时,可将桩间距适当取大,设计为疏桩形式,以充分发挥桩间土的承载作用。

c. 根据路堤填土施工前静载荷试验的结果,该桥头过渡路段的 CFG 桩单桩极限承载力为 600 kN,折算后的单桩承载力标准值为 300 kN。而 CFG 桩顶应力的测试表明,在超载预压的后期,桩顶平均应力也只有 239.5 kPa,据此计算的单桩实际承载为 30.2 kN 左右,大大小于 300 kN 的单桩承载力标准值。尽管可能存在仪器精度及测试误差的因素,但从技术经济的角度考虑,CFG 桩复合地基作为路堤荷载的地基时,桩体设计强度还可以取得低一些。

4 结 语

本文以佛山市某高等级公路桥头过渡路段 CFG 桩复合地基处理为试验研究背景,通过填土施工期的桩、土应力和表面沉降现场试验,对路堤柔性荷载下桩、土承载作用的变化和成因进行了研究,并据此对一些设计参数的合理性进行了反分析。主要结论如下:

a. 桩、土变形及承载作用方面。①在路堤荷载作用下,CFG 桩、桩间土最终可达到变形协调,共同发挥承载作用;②桩、土应力比及应力差与桩、土沉降差有着密切的关系,桩、土沉降差使桩体顶部填土中出现土拱效应,导致桩顶应力集中,桩、土应力比及应力差增大;③桩间不同位置土压力分布不同,两桩中间土压力大于四桩中心的;④土工格栅对调整桩、土应力比及荷载分配具有非常明显的作用;⑤在 CFG 桩设计桩间距较大的疏桩形式下,桩间土承担

握了高应变动力测试的基本理论、相关知识,掌握丰富的动静对比、参数的取值经验的情况下,高应变动力测试结果和静载结果将有较好的一致性。

参考文献:

- [1]汪凤泉.基础结构动态诊断[M].南京:江苏科技出版社,1992.
- [2]中国建筑科学研究院.JGJ106—97,基桩高应变动力检测规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3]刘超英,陈夷,苏全.高应变动力测试技术在桩基工程检测中的应用[J].中国农村水利水电,2004(5):48-49.
- [4]陈桂科.锤击管桩静载与高应变检测结果的对比分析[J].广东土木与建筑,2001(6):77-79.
- [5]徐攸在.动力测定桩承载力的若干问题[J].工业建筑,1996,26(2):3-7.

(收稿日期 2004-12-16 编辑 骆超)

着大部分荷载。

b. CFG 桩复合地基设计参数方面:①设计桩间距较大的疏桩形式下,褥垫层厚度应适当取大;②作为路堤荷载的地基时,可设计为桩间距较大的疏桩形式;③作为路堤荷载的地基时,桩体设计强度可以取得低一些。

参考文献:

- [1]陈冠雄,黄国宣,洪宝宁.广东省高速公路软基处理实用技术[M].北京:人民交通出版社,2005:143-145.
- [2]叶书麟,韩杰,叶观宝.地基处理与托换技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1994:96-98.
- [3]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,2001:9-11.
- [4]龚晓南.复合地基[M].杭州:浙江大学出版社,1992:81-82.
- [5]李海芳,温晓贵,龚晓南.低强度桩复合地基处理桥头跳车现场试验研究[J].中南公路工程,2003(3):27-30.
- [6]秦建庆,叶观宝,费涵昌.水泥土桩复合地基桩土分担荷载的试验研究[J].工程勘察,2000(1):35-37.
- [7]马时冬.水泥搅拌桩复合地基桩土应力比测试研究[J].土木工程学报,2000(2):48-51.
- [8]中国建筑科学研究院.JGJ79-91,建筑地基处理技术规范[S].北京:中国计划出版社,1992.

(收稿日期 2005-11-24 编辑:马敏峰)

