

高速铁路 CFG 桩的终孔电流值与路基沉降相关性研究

李 成 彦, 王 会 超, 陈 学 军

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘 要:针对高速铁路(350 km/h)路基,行业内一般采用 CFG 桩复合地基进行处理。阐述了依托某站场路基 CFG 桩复合地基处理工程,通过对成桩电流值和沉降变形监测数据与钻进不同深度土层的电流值(持力层电流值)等参数,以及工后单桩承载力和路基沉降变形观测数据进行分析研究后,发现终孔电流值的取值对于桩底质量的影响较大,进而影响到复合地基的承载力。研究结果表明:CFG 桩施工电流值的大小可以在一定程度上反映出地基处理的最终效果,对成桩质量具有重要影响,可以较大程度地提高成桩质量,有效提高桩基的单桩承载力,增强复合地基的承载能力,降低工后沉降。所取得的科研成果为高速铁路 CFG 桩的施工控制提供了理论依据和实践指导,为解决高速铁路建设中的地基沉降控制问题提供了有益的参考和借鉴。

关键词:高速铁路;CFG 桩基;终孔电流值;路基沉降

中图分类号:U215;U215.1;U215.7

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2024)增 2-0017-07

Research on Correlation between the Final Hole Current Value of CFG Piles and Subgrade Settlement in High-Speed Railway

LI Chengyan, WANG Huichao, CHEN Xuejun

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: In the industry of high-speed railway (350Km/h) subgrade foundation, CFG pile composite foundation treatment is generally adopted. Based on the CFG pile composite foundation treatment project for a railway station, this article investigates the impact of the final hole current value on the pile bottom quality through analyzing the pile-forming current value records, settlement deformation monitoring data, current values of different soil layers (current value of the bearing stratum) during drilling, as well as the post-construction bearing capacity of single piles and subgrade settlement deformation observation data. The research finds that the value of the final hole current affects the quality of the pile bottom, thereby influencing the bearing capacity of the composite foundation. The results show that the magnitude of the CFG pile construction current value can reflect the final effect of foundation treatment to a certain extent, which has a significant impact on the pile quality. It can greatly improve the pile quality, effectively enhance the bearing capacity of the single pile foundation, strengthen the bearing capacity of the composite foundation, and reduce post-construction settlement. The research results provide theoretical basis and practical guidance for the construction control of CFG piles in high-speed railways, and serve as a useful reference for solving the problem of foundation settlement control in high-speed railway construction.

Key words: High-speed railway; CFG pile foundation; Final hole current value; Foundation settlement

1 概 述

高速铁路路基的地基处理是保证其运行安全、稳定、舒适运营的重要基础。某站场路基所处地层以粉土、黏土、粉砂及粉质黏土为主,具有压

缩性较高、承载力较低、区域沉降较严重的特点。对于该地基的处理,设计单位全部采用 CFG 桩。典型横断面设计见图 1。CFG 桩复合地基处理技术因其具有独特的优势在高速铁路软弱地基处理中得到了广泛的应用。然而,CFG 桩的成桩质量

收稿日期:2024-06-26

及其与地基的相互作用机制,对铁路路基的整体稳定性和沉降控制具有直接影响,而成桩过程中的电流值作为衡量施工过程中的重要质量参数与沉降控制问题之间的联系已逐渐成为业界研究的焦点。

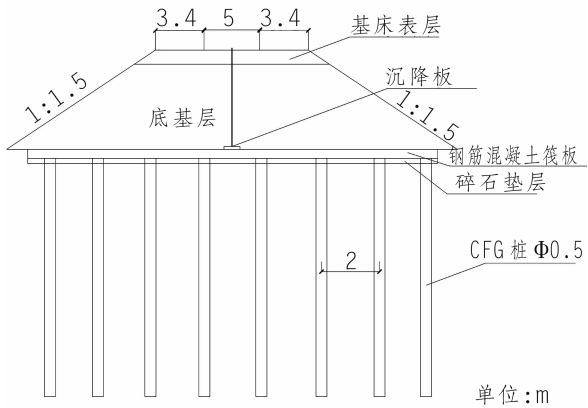


图 1 某站场路基典型横断面设计图

1.1 CFG 桩复合地基处理技术的研究现状

CFG 桩复合地基系通过水泥、粉煤灰、碎石等材料混合搅拌成混凝土后泵送至桩头形成的桩体,其与桩间土共同作用,在其桩顶施作钢筋混凝土筏板形成复合地基,能够有效提高地基的承载力和稳定性;CFG 桩在钻孔施工过程中由信息化监测系统记录钻机钻进时的电流值,其终孔电流值在一定程度上具有代表桩底地层承载力的重要作用。CFG 桩的成桩过程能够通过电流值进行监测和控制,其电流值的变化可以有效反映桩体的单桩承载力、有效桩长以及桩身与周围土体的相互作用情况。因此,研究 CFG 桩成桩电流值与提高单桩承载力、进一步提高复合地基处理的质量、控制路基基底的沉降问题,对于确保高速铁路建设的质量、提高其运营效率、保障铁路运营安全具有重要意义。

按照高速铁路的建设要求,其路基工后的差异沉降值不大于 5 mm。CFG 桩复合地基作为一种新型的地基处理方法,主要由 CFG 桩(素混凝土桩)和桩间土以及桩顶筏板(桩帽)与褥垫层共同组合而成。其特点为:通过 CFG 桩结合土体致使土体挤密、灌注混凝土及桩顶浇筑钢筋混凝土筏板(桩帽)等工艺对地基进行加固,以提高地基的承载能力和稳定性。因其具有高承载力、高可靠性和显著的经济效益,在高速铁路路基处理中

得到了广泛应用。当前,关于 CFG 桩复合地基处理的研究主要集中在以下几个方面:

(1)应用领域。CFG 桩复合地基处理技术广泛应用于高速铁路路基、大型建筑物的地基处理、土石方工程的边坡加固、公路和铁路路基的加固、河道和水库治理等领域。

(2)研究的重点。力学性能分析:CFG 桩复合地基的受力性能稳定,具有承载能力高、变形小、耐久性好等特点。

(3)设计优化。CFG 桩复合地基的设计方式多样,可以根据工程的具体情况进行设计优化。CFG 桩复合地基对于不同地质条件工程的应用效果各异,但总体效果显著。

(4)施工方法。通常使用的施工方法包括螺旋钻孔成桩、管内泵压混合料成桩、长螺旋钻孔、钻孔灌注成桩以及振动沉管成桩等。

(5)发展趋势。随着国家基础设施建设的发展,CFG 桩复合地基将会得到更广泛的应用,且其应用技术将会得到进一步的完善和发展。

1.2 沉降控制研究^[1]

(1)沉降问题。在高速铁路建设中,地基沉降是一个需要特别重点关注的问题。地基沉降导致轨道的几何条件发生变化,进而限制了列车的运营速度。对于基础沉降问题,还需要有针对性的及时进行维护,从而导致维护成本的增加,同时降低了线路运输能力。沉降不仅会影响到铁路线路的平稳性和安全性,还会使运维成本高昂。

(2)沉降监测技术。目前,对于高速铁路地基沉降的监测主要采用电子水准仪监测技术、GPRS 通讯网络和计算机技术的远程自动化沉降及水位监测技术。这些技术能够及时、准确地监测地面的沉降情况,为沉降控制提供数据支持。

(3)路基沉降的控制^[2]。使用 CFG 桩能够增加地基的承载力,有效分散地基的荷载、减小沉降,通过建立数学模型可以分析路基变形和沉降的规律,预测出可能出现的沉降问题,并据此采取相应的措施,制定出严格的施工工艺标准以确保路基的填料和压实度达到设计要求,减少工后沉降。施工过程中一定要做好边坡加固的措施,完善路基综合排水系统以降低水对地基的影响。在路堤填筑过程中需要加强沉降观测,特别是对于桥涵、路堑的过渡段,记录沉降量的数值,分析沉

降速率。根据监测结果及时调整施工方法,采取补救措施以确保将沉降控制在设计允许范围内。加大对地面沉降相关科学研究的投入,深入研究地面沉降的成因、机理和预测方法。随着科学技术的进步,为地面沉降防治提供更加科学的方案。

总体来说,高速铁路 CFG 桩复合地基处理技术及其沉降控制研究已经取得了显著进展。随着科学技术的不断完善和发展,CFG 桩复合地基必将在高速铁路建设中发挥更加重要的作用。同时,沉降控制的研究亦将为高速铁路的安全稳定运行提供有力保障。

2 CFG 桩基的施工工艺^[3]及质量控制

2.1 施工工艺流程

(1)施工工艺流程:放线定位→桩机就位→成孔→混凝土搅拌→泵送混合料→拔管→弃土清运→切割桩头。

(2)设备的准备:CFG 桩的施工过程通过安装在桩机顶部的北斗测量放样系统实现,以确保桩基轴线位置的准确性。其桩基数量不少于设计数量。

(3)桩机就位:将 CFG 桩机移动到指定的桩位,采用北斗测量放样系统以保证桩机稳定且垂直度符合设计要求。

(4)成孔:利用安装桩机的设备调整钻杆垂直度的偏差不大于 1%。开始钻孔时关闭钻头阀门、向下移动钻杆至钻头触及地面时启动旋转马达钻进,先慢后快,钻进速率按 2~3 m/min 控制。使用 CFG 桩机进行成孔作业,其孔深应达到设计要求并严格控制孔径和垂直度。钻孔过程中钻杆持续旋转,同时加入水泥浆或泥浆用于冲洗土层以保持钻孔的稳定。

(5)混凝土搅拌:在拌和站进行混凝土的集中拌和,并确保混凝土的质量符合设计要求。

(6)混合料灌注:向钻孔中泵入拌制好的混凝土,通过 CFG 桩机螺旋钻杆的旋转和提升,将混凝土持续注入孔中。当钻杆芯管充满混凝土后留振 5~10 s 后开始拔管;严禁先提管、后泵料以确保混凝土充实钻孔。混凝土连续灌注使其与周围土壤形成一体。

(7)拔管:灌注混凝土后,操作设备将导管(或称为注浆管)拔出。这一过程需要控制拔管的速

度,确保混凝土不会因拔管过快出现质量问题。

(8)弃土清运:将钻孔过程中产生的废土、废泥浆等及时清运出施工现场,以确保施工环境的整洁。

(9)切割桩头:待混凝土凝固、达到一定强度后,使用专门的设备对桩头进行切割,使其达到设计要求的标高。

2.2 桩基施工的过程控制^[4]

(1)严格控制桩基偏位:利用安装在桩机顶端的北斗卫星定位系统,经过现场核对后自动控制并调整桩机姿态以保证桩机的水平度和钻杆垂直度。开钻前和钻进过程中必须注意对其平面位置和高程进行检查复核,确保桩基位置准确、垂直度满足要求、数据全程记录以备核查。

(2)控制钻进速度:在成孔过程中,桩长及桩径均不小于设计值,其垂直度偏差不大于 1%。钻孔时先慢后快,钻进速率按 2~3 m/min 进行控制,在使用“CFG 桩信息化终端”控制的同时,在长螺旋钻机动力头底面停留位置相应的钻机塔身处用红反光漆作醒目的标记,将其作为施工时控制桩长的依据。

(3)混凝土灌注量:混凝土的灌注速度和钻头的提升速度一定要匹配,其灌注总量采用在泵管出口安装的混凝土流量计进行计量并记录。

(4)严格控制拔管速度,避免断桩、夹层:保持混凝土灌注的连续性;严格控制提速,如灌注过程中因意外原因造成灌注停滞,其中断时间不得大于混凝土的初凝时间;不能使用大型机械清理桩间土,应使用小型挖机配合人工清理桩间土;待清理出桩头后用切割机截去桩头,不能用大锤蛮力敲打桩头。

(5)桩身混凝土收缩:对于桩顶,至少超灌 0.3~0.5 m,并防止孔口处的地表土混入桩体混凝土中;选择减水效果好的减水剂。

(6)桩端不饱满:主要是因为施工中为方便阀门的打开而采用先提钻、后泵料所致。这种情况可能会造成钻头上的土掉入桩孔或地下水侵入桩孔,进而影响到 CFG 桩的桩端承载力。为杜绝这种情况的发生,施工时前、后台的工人应密切配合以保证提钻和泵料的一致性。

(7)桩长的控制:终孔桩长的控制主要采用钻进桩长和终孔电流值双控,在保证桩长不小于设

计值的同时,一般要求电流值不小于79.9 A。终孔电流值过小,说明桩底未到达持力层,不能保证地基处理的最终效果,对成桩质量有重要影响。

2.3 终孔电流值的控制

由于地勘工作的局限性,CFG桩的设计桩长一般会在一个区域内长度相等,但地层在该范围内会有一定的变化。施工时仅依据设计桩长其桩底不一定能够恰好到达持力层。而终孔电流值是钻头到达设计桩长的瞬间所记录到的电流值。该电流值通过连接设备的终端电流计进行测量和记录,当钻头达到设计桩长时,终端电流计会实时监测并记录电流值。如果该电流值不满足设定的要求,说明桩底土体软弱、未达到持力层的需要,此时应继续钻进;一旦达到设计桩长且电流值达到终孔电流的要求值,则判定电流值满足要求。

电流值的监测:通过监测钻进到不同深度土层的电流值(持力层电流值),可以反映出施工过程中地层特力层的强弱,对成桩质量具有重要影响。

3 终孔电流值对单桩承载力的影响

(1)试验桩的选取。选取某站场路基DK377+531、DK377+647、DK377+729桩底电流值不同的三个断面,分别选取这些断面中的典型电流值进行对比分析、验证不同终孔电流值施工后的

单桩承载力,现场揭示这三个不同终孔电流值桩底土质的变化,再分别统计并对比了三根桩现场混凝土的灌注量。

三根桩的设计桩长均为20 m,桩径为0.5 m,桩间距为2 m×2 m,CFG桩设计的单桩承载力不小于975 kN,三个断面各选取1根(782号、719号、778号)分别作为试验桩。

(2)对试验桩的电流值进行分析。某站场路基段所处位置为黄河冲积平原,地层岩性以粉土、黏土粉砂及粉质黏土为主,由上至下依次分布粉土(Q_4^{1al})→黏土(Q_4^{1al})→粉砂(Q_4^{1al})→粉质黏土(Q_4^{1al})→粉土(Q_4^{1al})→黏土(Q_4^{1al})→粉砂(Q_4^{1al})→粉土(Q_4^{1al})→粉质黏土(Q_4^{1al})→细砂(Q_4^{1al})。

①782号CFG桩钻孔深度及电流值监测情况见图2。钻进前期,电流值上升较快,进尺至16 m以前能够满足80 A的电流值;进入富水粉砂层后,电机扭矩减小、电流值开始下降,在打穿了持力层后其电流值下降较快;进尺到达设计桩长20 m时的电流值为78 A,已不能满足电流值要求;继续钻进至20.86 m终孔时其电流值为81 A。随着提钻其电流值下降至0 A。钻进过程揭示的地质情况与地勘报告基本吻合,孔底以灰褐色、黄褐色饱和粉土、粉砂为主,其基本承载力 $\sigma_0=60$ kPa。

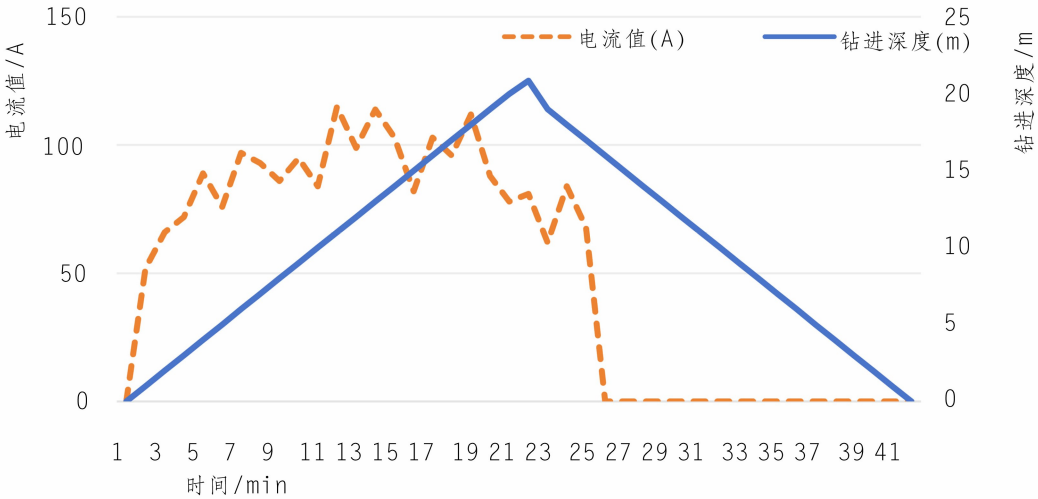


图2 782号CFG桩钻孔深度及电流值监测图

②719号CFG桩钻孔深度及电流值监测情况见图3。开钻后,电流值上升较快,大于80 A;随着进尺的增加电流值逐渐升高,电流变化起伏较小,

待到达桩基设计深度20 m时电流值为93 A;至终孔深度20.37 m时其电流值为95.31 A;随着提钻电流值下降至0 A。钻进过程揭示的孔底地质情

况与地勘报告基本吻合,孔底以黄褐色、褐黄色黏土、粉砂为主,其基本承载力 $\sigma_0=90\text{ kPa}$ 。

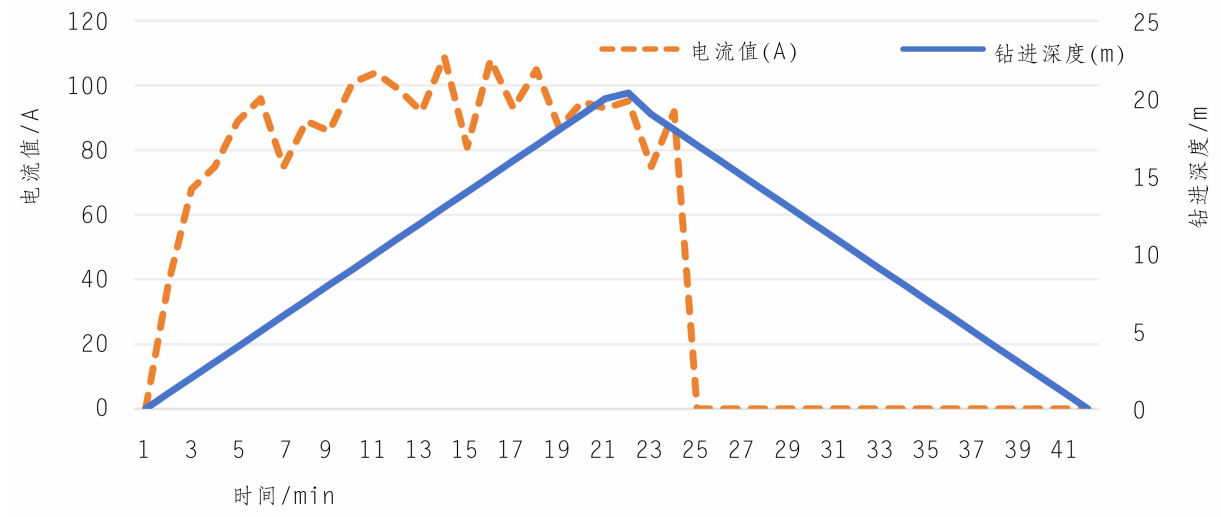


图 3 719 号 CFG 桩钻孔深度及电流值监测图

③778 号 CFG 桩钻孔深度及电流值监测情况见图 4。开钻后电流值上升较快,随着进尺增加,电流值逐渐升高,电流变化起伏较小;钻进过程维持大电流,到达桩基设计深度 20 m 时电流值为 131.1 A,至终孔深度 20.16 m 其终孔电流值为 132.6 A;随着提钻电流值下降至 0 A。钻进过程揭示的孔底地质情况为灰褐色、黄褐色粉砂,密实,饱和,其基本承载力 $\sigma_0=200\text{ kPa}$ 。

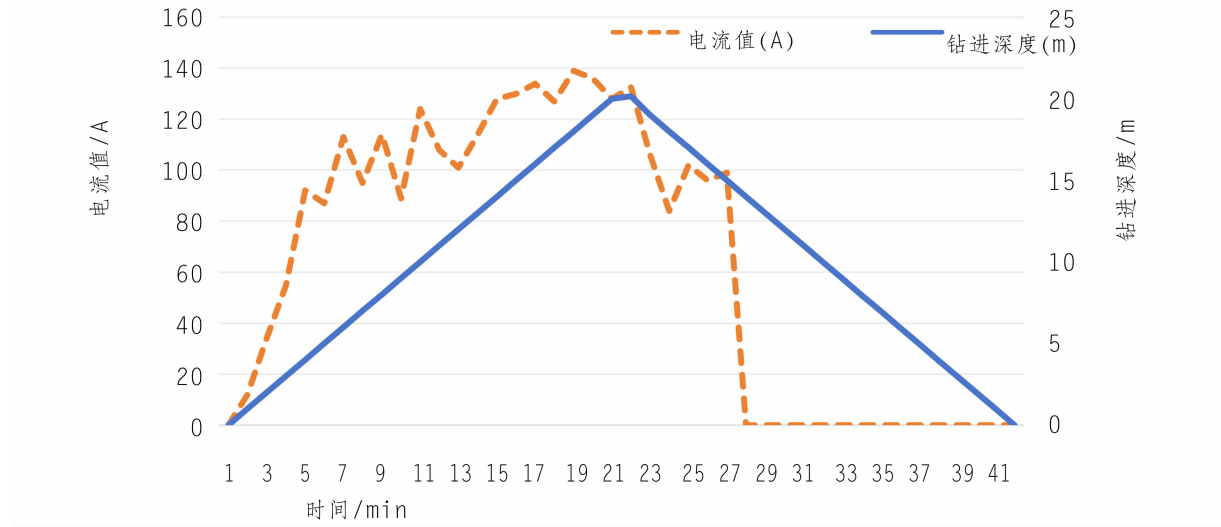


图 4 778 号 CFG 桩钻孔深度及电流值监测图

(3)不同电流值所对应的单桩承载力。桩基灌注完成并达到 28 d 强度后,分别对上述不同电流值的三根 CFG 桩进行了单桩竖向静载荷试验,目的是检验单桩竖向容许承载力是否满足设计要求;同时,根据单桩竖向静载荷试验检测结果分别对比了三根桩的混凝土灌注量和单桩沉降值。

单桩竖向静载荷试验检测结果汇总情况见表 1。从表 1 可以看出:终孔电流值越小、地层越软

弱,单桩沉降越大,混凝土灌注量越大;终孔电流值越大,地层越坚硬,单桩沉降越小,混凝土灌注量越小。

4 CFG 桩成桩电流值与路基基底沉降关系^[5]

研究

笔者在路基填筑期间和路基填筑完成后对路基基底进行了沉降观测,分别在上述三个里程断面进行了观测与记录,形成了累计沉降记

录曲线图。路基 CFG 桩不同电流值累计沉降曲线见图 5。通过沉降值和变化过程曲线并结合路基沉降对电流值与单桩静荷载检测结果进行了相关性研究,验证了单桩和复合地基承载力,同时采用拟合函数对沉降变化过程曲线进行了回归分析,预测了工程完工后的变化趋势及沉降值。

(1)桩长对路基沉降的影响

桩长是影响 CFG 桩复合地基沉降性能的重要因素之一,桩体能够嵌入坚硬土层提供更大

的承载面积和更好的承载性能。通过控制 CFG 桩的成桩电流值用以确保桩长满足设计要求,对于减小路基工后的沉降具有重要意义。

总体来说:CFG 桩的成桩电流值与路基沉降之间存在间接的相关性。通过合理控制 CFG 桩的终孔电流值,可以确保桩体与土体充分结合、满足设计承载力要求,从而能够有效地控制路基的沉降。在实际工程中,应根据具体的地质条件和工程要求达到最佳的沉降控制效果。

表 1 单桩竖向静载荷试验检测结果汇总表

序号	里程	检测点号	终孔电流值 /A	桩长 /m	混凝土量 /m³	允许承载力 /kN	最大试验荷载 /kN	检测龄期 /d	最大沉降量 /mm	最大回弹量 /mm	沉降 /mm
1	DK37+531	782	81.00	20.86	4.17	≥725	1 450	28	12.75	4.08	8.67
2	DK37+647	719	95.31	20.37	4.05	≥725	1 450	28	8.24	2.94	5.30
3	DK37+729	778	132.56	20.16	3.96	≥725	1 450	28	6.74	2.96	3.78

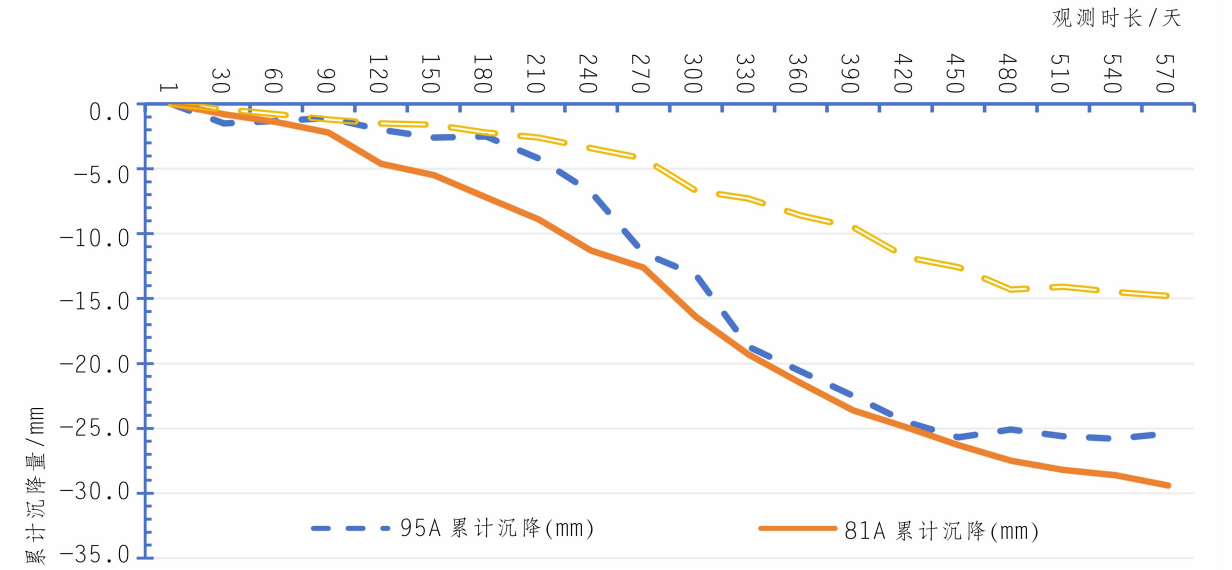


图 5 路基 CFG 桩不同电流值累计沉降曲线图

(2)处理效果分析

- ①复合地基承载力的提升。地基承载力得到了显著提升,能够满足高速铁路的运营要求。
- ②沉降控制。经过长期沉降观测发现:终孔电流值小,其基底沉降值大,沉降收敛缓慢且沉降速率逐渐减缓,说明 CFG 桩地基处理在减小路基沉降方面具有显著效果,回归分析拟合工后沉降值符合设计要求。
- ③经济效益。能够合理减少混凝土的使用

量,具有显著的经济效益。

5 所取得的研究成果

此次研究系依托雄商高速铁路某站场路基 CFG 桩复合地基的处理,对终孔电流值在 CFG 桩施工中的影响进行探究。通过现场试验、数据分析和系统研究取得了以下主要成果:

- (1)施工过程中,当终孔电流值偏小时,可能意味着桩底地质条件较为松软,可以排除工艺、设备或人为操作等因素。工程技术人员应及时

将电流值偏小的情况反馈给设计单位的地质人员,以便其进行进一步的地勘复核。根据地勘复核结果,适当调整 CFG 桩的设计参数,如桩长、桩径、桩间距等,以确保桩基的施工质量和地基处理效果。

(2)当终孔电流值偏大时,表明桩周地质条件较为复杂,如存在孤石、夹层等硬质地层而导致成桩难度增加;亦可能是地勘资料与实际地质条件存在较大的差异,这也是导致电流值偏大的原因之一;此时应将电流值偏大的情况反馈给设计单位的地质人员,以便其对地勘资料进行复核。根据地勘复核结果适当调整 CFG 桩的设计参数或采用其他的地基处理方法,以提高施工的经济性和效率。

(3)对于电流值的异常变化,可以通过铁路建设平台等信息化手段实时分发、反馈给现场技术人员,并应及时排查施工控制指标是否正常(钻进速度过快导致电流大,钻进速度过慢导致电流小),揭示了电流值变化与土层性质、承载力之间的内在联系,为 CFG 桩施工过程中通过电流值预测土层承载力提供依据。

(4)施工参考电流值:根据上述对比 81 A、95 A、132 A 三组电流值对应的混凝土灌注量、累计沉降变化趋势分析得知:对于黄河冲积平原之粉土、黏土、粉砂等地层条件下,当终孔电流值达到 90 A 时,在堆载预压后其沉降量满足要求,且距离沉降控制上限有一定的余量,既经济、又能满足质量要求,因此,笔者推荐 90 A 的电流值作为类似地区施工时参考。

(上接第 8 页)

6 结 语

通过对信息化系统在 CFG 桩施工中的应用进行研究,总结出 CFG 桩采取的新型质量控制方式,改变了传统的结果检测方式,实现了对成桩全过程的监测,以最全面、真实的数据为桩基施工质量控制提供支撑,有效地保证了桩基的施工质量,确保了雄商高铁临清东基地基处理的高效施工,有效节约了人员和机械设备的投入,取得了良好的经济效益,所取得的经验可为后续同类工程施工借鉴。

参考文献:

6 结 语

笔者基于研究成果提出了通过严格控制施工参数(特别是电流值),来提高 CFG 桩成桩质量的方法,其实质是更为精确地控制桩底嵌入土体的强度,从而有效提升复合地基的承载力和稳定性。通过对终孔电流值的监测可以减小工后沉降,从而大大降低了工后的维护成本,能够为高速铁路建设带来显著的经济效益,为高速铁路的安全运营提供有力的保障,能够在满足桩基施工质量的同时减少混凝土的灌注量,进而节约施工成本。该方法不仅适用于高速铁路路基工程,还可广泛应用于其他需要进行地基处理的工程项目。

参考文献:

[1] 陈洪运,马建林,胡中波,等. 高速铁路载体桩复合地基沉降计算方法探讨[J]. 建筑结构,2013,43(24):76-79.
[2] 张晓波,阎保家,张光宗,等. 济南西站宽站场路基复合地基沉降特性研究分析[J]. 高速铁路技术,2015,6(6):9-16,38.
[3] 张毅. 浅谈高速铁路 CFG 桩施工工艺[J]. 科技情报开发与经济,2012,22(10):147-149.
[4] 周末春. 高速铁路地基处理 CFG 桩施工质量通病和应对措施[J]. 安徽建筑,2011,18(2):98-99.
[5] 李鑫. 高速铁路深厚软土地基物理力学特性分析及沉降控制[J]. 铁道勘察,2021,47(2):72-75,86.

作者简介:

李成彦(1983-),男,甘肃临洮人,工程师,从事铁路工程建设施工技术与管理工
王会超(1990-),男,河北邯郸人,工程师,学士,从事铁路工程施工技术与项目管理工作;
陈学军(1988-),男,宁夏固原人,副高级工程师,从事铁路工程建设施工技术与管理工

(编辑:李燕辉)

[1] 蒙核量,张淑芳. 基于 CFG 桩复合地基的软基处理应用研究[J]. 建筑技术开发,2023,50(2):154-156.
[2] 张永春. CFG 桩长螺旋钻机施工方法[J]. 四川水力发电,2010,29(增刊 2):129-131.
[3] 张新. CFG 桩在软弱地基处理中的实际应用探讨[J]. 资源信息与工程,2016,31(6):143-144.
[4] 刘磊. CFG 桩在高铁软土路基建设中的应用[J]. 科技创新与应用,2024,14(4):185-188.
[5] 甘兴旺. 津保铁路软基处理中的 CFG 桩施工与质量控制[J]. 四川建筑,2013,33(3):130-132.

作者简介:

王会超(1990-),男,河北邯郸人,工程师,学士,从事铁路工程施工技术与项目管理工作。

(编辑:李燕辉)