

富水杂填软弱地质深基坑综合加固研究

刘富强

(中交一航局华南工程有限公司)

摘 要:为解决地下水位埋深较浅的杂填区软弱地质下基坑安全稳定的问题,以国道 G355 线怀集县城高凤至大岭段改建工程明挖下穿通道施工为依托,在原设计及施工方案的基础上,采用支护桩“护筒跟进成孔法”、高压旋喷桩止水帷幕“二次复喷”等施工工艺优化调整,经比选增加了基坑内被动土压区水泥搅拌桩加固的措施,基坑开挖期间基坑变形位移数值可控、基坑监测数据未超过预警值,取得了预期的效果,为类似富水杂填软弱地质深基坑综合加固提供了重要的理论和实践指导。

关键词: 软弱地质; 综合加固; 止水帷幕; 基坑监测

0 引言

基坑支护的设计参数需根据地勘资料、周边环境要求及不同支护形式的特点与造价等因素综合确定^[1]。遇到地勘未探明的地质环境时,应及时对原方案设计调整,合理采取基坑加固措施。位于基坑坑底内侧的被动区土体对基坑变形及支护结构的稳定具有重要作用,采取措施对被动区土体加固后,可显著提高基坑被动区土体强度和抗变形能力^[2]。软弱地质对支护结构、止水帷幕施工也存在扩径、难以成桩等影响,在支护基坑施工时应考虑解决软弱土层造成支护结构侵陷主体结构的问题^[3]。

本文以确保深基坑开挖期间安全稳定为原则,研究了国道 G355 线怀集县城高凤至大岭段改建工程明挖下穿通道深基坑施工中遭遇富水软弱地层后综合加固和施工工艺优化的措施。

1 工程概况

国道 G355 线怀集县城高凤至大岭段改建工程站前广场下穿通道全长 540 m,基坑宽度为 31.9 m,基坑最深处为 14.6 m,基坑支护采用灌注桩支护与高压旋喷桩止水帷幕组成,基坑内部采用混凝土支撑+钢支撑形式设计,基坑中间设置

2 排临时立柱,灌注桩设计为摩擦桩,桩长根据设计图纸埋入基坑底 3~7 m,桩径为 1 000 mm、桩间距 1 200 m;高压旋喷桩止水帷幕桩径 600 mm,位于支护桩间隙处,桩长为基坑开挖面以下 2~3 m。根据地勘资料结合地面地质调查,项目区域上覆第四系人工填土、冲积层;下伏白垩系全、强、中风化泥质粉砂岩和砂岩,项目区属剥蚀丘陵及山间低洼地貌,地形起伏较大。怀集县年降水量平均约 1 782 mm,降水充沛属亚热带海洋季风气候,地下水常水位为地表以下 1.2 m,属富水地层。

2 地质参数变化

项目暗埋段 B3 结构段支护桩施工时,出现桩孔及地面塌陷、地表开裂异常状况,最大塌陷量达 195 mm,地面裂缝宽度最大 32 mm。在原设计勘察成果上加密勘察钻孔,补勘结果素填土层厚度参数由 3.5 m 变为 11.8 m,增加 8.3 m。基坑开挖地层参数由素填土、强风化泥质砂岩变为素填土、粉质黏土土层,基坑开挖期间土压力将发生变化。采用理正深基坑 7.0 版本计算软件对基坑支护稳定性进行验算,参数取值如表 1 所示。距离基坑支护结构 1 m 以外,超载计算取值为 20

表 1 土层物理学参数

层号	土层名称	岩土稠度状态	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然直快黏聚力 C/kPa	天然直快内摩擦角 $\phi/(\circ)$	压缩模量 E_s 及变形模量 E_0	基底摩擦系数 μ
1-2	素填土	松散-稍密(或可塑)	19.6	14.4	12.8	5.0	—
2-2-2	粉质黏土	软塑	19.0	5.3	5.4	3.0	0.25
5-2-1	强风化泥质粉砂岩	土状	19.7	18.8	16.4	5.5	0.28

kPa，按荷载满布考虑，根据施工方案对开挖工况进行模拟计算，按最下层支点为转动轴心，验算坑底隆起的圆弧条分法计算安全系数 $K_s=2.01$ ，小于安全值 2.2，即坑底抗隆起稳定性不满足要求，需对原基坑支护设计采取加固措施。

3 基坑综合加固

3.1 支护桩护筒跟进成孔

对该软弱地质区域采取支护桩桩长增长的设计调整，摩擦桩在不小于设计桩长的前提下终桩的原则为：嵌入土层、全风化层深度不小于 5.5 m、嵌入强风化层不小于 4.0 m 或嵌入中风化层不小于 3.0 m。由于回填土层孔隙率较大，施工时存在塌孔问题，混凝土超灌后将侵入现浇通道主体结构，对结构尺寸造成影响。综合比选后采取了“护筒跟进成孔法”施工，用 EC460B 型高频液压振动打桩机将 12 m 长钢护筒穿透杂填区，再用 SM415R 型旋挖钻钻进成孔，待灌注混凝土后拔出护筒。

为防止灌注桩超灌、塌孔、垂直度偏差等因素造成灌注桩混凝土侵入主体结构，在桩位测量放样时整体向基坑外侧偏移 100 mm，确保桩身充盈后不侵入主体。钢护筒打设期间，采用全站仪跟踪控制垂直度，保证垂直度偏差在小于 1% 桩长，防止桩身倾斜进入主体，同时避免垂直度控制较差则旋挖钻无法钻进。混凝土灌注完成后，30 min 内需完成钢护筒拔出，在拔出时由于激振力扰动周围土层会导致灌注桩扩径，混凝土液面下降，故需在拔出时进行混凝土补灌，保证桩顶标高高出设计值不少于 50 cm。桩基施工采用“跳桩法”，相邻施工桩位距离不小于 6 m，避免扰动影响成桩质量。

3.2 止水帷幕二次复喷

项目位于高铁站站前广场，车流量较大，且地下水水位较高，止水帷幕施工质量必须严格控制，避免渗漏水造成基坑侧壁水土流失而出现行車道路面塌陷等后果。但由于回填地层土体空隙较大，在采用二重管法高压旋喷桩施工时，在软弱地质内水泥浆体流失严重，现场出现周围土体地表水中大量气体冒出状况，单个桩位孔底坐喷约 40 min，仍未见孔口返浆。

因杂填区地下空隙较大，最初施工时不能有效返浆，导致浆液大量流失。为解决该项问题，在水泥浆液中掺入水泥用量 2% 的硅酸钠(水玻璃)

速凝剂，进行第 1 遍旋喷桩成桩，将旋喷桩泵浆压力调整为 1 MPa，在桩位周围形成一层临时水泥土保护壳，防止浆液大量流失。第 1 次成桩 1 h 后按照正式试桩参数进行第 2 次旋喷桩施工，浆液损失显著减少，孔口正常返浆，达到预期效果。成功试桩后控制措施为选用 XL-50C 型旋喷钻机、ZJB/BP 型高压注浆泵作为二重管法高压旋喷桩施工设备，施工参数如表 2 所示。为保证旋喷桩桩体与灌注桩紧密相切，在桩位放样时由原设计桩心位置向支护桩内侧偏移 100 mm。

表 2 高压旋喷桩施工参数

水灰比	旋喷速度/ (r·min ⁻¹)	提升速度/ (cm·min ⁻¹)	水泥用量/ (kg·m ⁻¹)	浆压/MPa	气压/MPa
1.0	18	16	285	28	0.7

3.3 被动土压区土体加固

由于存在较厚回填土层，力学性质较差，易形成滑裂面，此外主体结构对基底基础要求承载力不小于 180 kPa，而补勘资料显示回填土层承载力仅为 80 kPa，不满足要求。需要保证基坑开挖期间变形控制的同时提升地基承载力。选用 CFG 桩、高压旋喷桩、水泥搅拌桩等多种被动区土体加固的措施，按照施工效率、加固效果、对基底承载力提升效果及经济性等多因素进行比选，如表 3 所示。最终选定水泥搅拌桩加固，既可以有效对被动土压区加固，又可形成复合地基，提升整体承载力，有效减少主体结构工后沉降。

表 3 被动土压区及坑底承载力方案对比

加固方案	施工效率	被动土压区 加固效果	基底承载力 提升效果	经济性
CFG 桩加固	快	一般	一般	费用低
高压旋喷桩加固	一般	好	好	费用高
水泥搅拌桩加固	较快	较好	较好	经济性好

针对深厚软土地层的变形不稳定问题，应用水泥搅拌桩进行加固，并采用 PLAXIS 有限元建立桩土数值模型，对被动区加固的有效深度宽度进行探究。计算范围按照基坑深度的 3~4 倍，计算模型断面大小为 100 m×30 m。所有土体均采用硬化土模型，支护桩采用板单元等效代替，支护桩和土层的接触效应采用界面单元模拟，界面强度折减因子均取为 0.7。

在满足基坑支护桩位移变形稳定的前提下，对水泥搅拌桩裙边加固深度和宽度进行优化，分别按照 1~9 m 逐一取值，如图 1 所示。

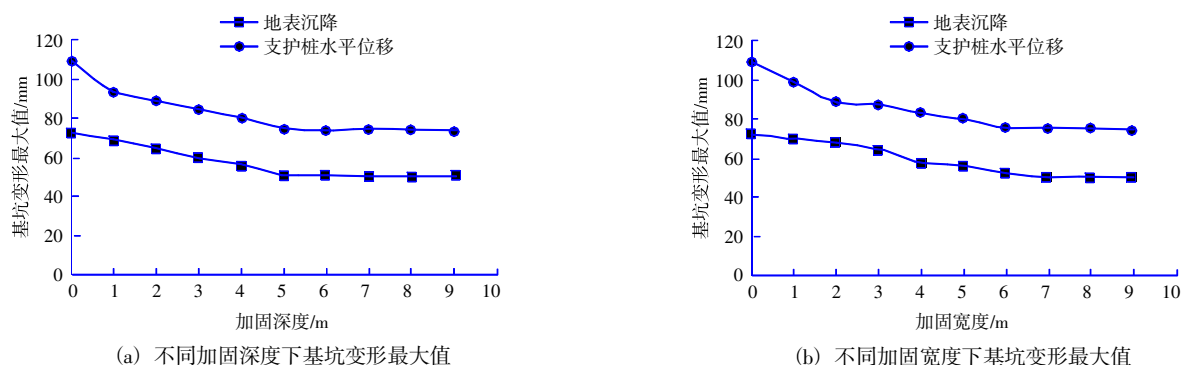


图 1 不同加固深度、宽度对基坑变形值的影响图

由图 1 可知,随着加固体深度、宽度的增加,支护桩水平位移和地表沉降均呈现线性递减趋势,当加固体深度、宽度在 5 m 以内时,变形减小幅度显著,当加固体深度、宽度超过 5 m 范围时,对基坑变形的控制作用不够明显,最终按照加固宽度、深度均为 5 m 进行被动区加固,同时为提高基坑复合地基承载力,在坑底中间按照 2.4 m 间距设置抽条加固。

被动土压区水泥搅拌桩加固施工机械选用 PH-5D 型单轴水泥搅拌桩机,试桩后确定施工参数如表 4 所示。搅拌桩以四搅四喷工艺,从裙边开始,按两侧向中间对称加固的方式进行,控制提升速度不得大于 0.8 m/min;桩位之间需采取有效搭接,相邻桩搭接范围不小于 100 mm;水泥搅拌桩施工完成 14 d 后经检验无侧限抗压强度满足 1 MPa 以上时方可进行基坑开挖施工。

表 4 水泥搅拌桩施工参数表

水泥用量/(kg·m ⁻¹)	水灰比	水用量/(kg·m ⁻¹)	桩长/m	下沉速度/(m·min ⁻¹)	提升速度/(m·min ⁻¹)	喷浆压力/MPa
80	0.45	36	5	0.8	0.8	0.8

4 实施效果

支护灌注桩施工完成后,采用低应变反射波法与钻芯法进行检测,Ⅰ类桩率为 98.5%,灌注桩混凝土超灌系数结果为 1.08,钻芯芯样未发现孔洞、夹渣等质量缺陷,抗压强度满足设计要求。基坑开挖时灌注桩无明显侵入主体,整体控制效果较好。

高压旋喷桩止水帷幕施工后,采用开挖法与钻芯法 2 种方法检查桩身尺寸、芯样长度、强度、

完整性均满足要求,基坑开挖期间未出现明显渗漏情况,止水帷幕达到预期施工效果。

基坑安全等级为一级,对支护结构顶部水平位移、立柱顶沉降测量、地下水位变化、地面沉降、支护桩测斜、支撑轴力等主要基坑监测指标进行监测。根据施工方案,基坑开挖分为第 1 道混凝土支撑底、第 2 道钢支撑底、基坑底共 3 层开挖,对开挖期间支护桩顶部水平位移数据进行监测,如图 2 所示。

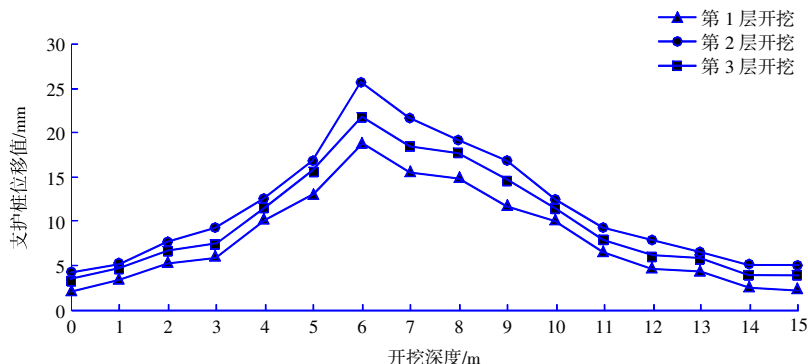


图 2 开挖期间支护桩水平位移值监测

由图 2 可以看出随基坑开挖深度增加，支护桩位移逐渐增大，基坑开挖至第 2 道支撑位置时变形量达到最大，最大值小于一级基坑监测要求预警值 30 mm，当基坑进行最后一层开挖时，由被动土压区水泥搅拌桩抵抗基坑变形，且施作完成第 2 道支撑，根据监测数据显示，此时支护位移与地面沉降均为下降趋势，证明坑底被动土压区加固满足要求。基坑开挖完毕后对基坑底部进行复核地基承载力检测，结果为 320 kPa 满足实际值不小于 180 kPa 的要求，有效解决了富水杂填软弱地质深基坑综合加固问题。

5 结语

通过对国道 G355 线怀集县城高风至大岭段

改建工程明挖下穿通道深基坑综合加固的研究，顺利解决了富水杂填软弱地质深基坑施工的难题。总结了基坑地质参数变化、基坑安全稳定性验算、支护桩护筒跟进成孔、止水帷幕二次复喷、基坑底部被动土压区土体加固等措施，在实际施工中取得了较好效果，积累了深基坑综合加固的施工经验，可为后续类似工程施工提供借鉴和参考。

参考文献：

- [1] 郭伟强,杨旭,杨世忠,等.深厚软土基坑不同加固形式效果研究[J].路基工程,2024(5):188-193.
- [2] 陈海强,贾鹏飞,张婷,等.软弱地质条件下污水厂浅基坑施工技术研究与应用[J].中国水运,2024,24(8):56-58.
- [3] 房江锋,严树,刘国栋,等.深基坑工程支护桩侵限切除及加固处理研究[J].钻探工程,2024,51(1):147-153.