

公路工程中的地基处理与加固技术

郝振东

中交(青岛)城市建设有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16894

[摘要] 文章围绕公路工程中的地基处理与加固技术展开研究,采用案例研究法,选取沁阳至伊川高速公路QYTJ-3合同段工程为实例加以分析,在明确工程概况后,对该公路工程中的不良地质情况进行梳理,并以此为导向,针对性制定了地基处理与加固技术方案,其中包括人为坑洞地基加固、黄土陷穴充填夯实、湿陷性地基强夯挤密、高填深挖路基处理、边坡防护与防排水五项主要技术措施,最终通过该技术体系,顺利完成地基处理与加固,有效提升了地基稳定性。

[关键词] 公路工程; 地基处理; 地基加固

中图分类号: TE834 文献标识码: A

Ground Treatment and Reinforcement Technologies in Highway Engineering

Zhendong Xi

China Communications Construction (Qingdao) Urban Construction Co., Ltd

[Abstract] This article focuses on the research of foundation treatment and reinforcement technology in highway engineering. Using the case study method, the QYTJ-3 contract section of Qinyang Yichuan Expressway is selected as an example for analysis. After clarifying the project overview, the adverse geological conditions in the highway project are sorted out, and based on this, a targeted foundation treatment and reinforcement technology plan is formulated, including five main technical measures: artificial pit foundation reinforcement, loess sinkhole filling and compaction, dynamic compaction and compaction of collapsible foundation, high filling and deep excavation of roadbed treatment, slope protection and drainage. Finally, through this technology system, the foundation treatment and reinforcement are successfully completed, effectively improving the stability of the foundation.

[Key words] Highway Engineering; Foundation Treatment; Foundation Reinforcement

引言

我国高速公路网络在建设期间逐渐向复杂地质条件区域延伸,这就导致公路工程施工期间可能会面临诸多不良地质,直接影响公路路基稳定性,若处理不当,则可能引发边坡失稳、路基不均匀沉降等问题。因此,对于公路工程而言,在施工期间应立足实际,根据地质条件处理并加固地基,使地基结构可满足公路工程建设要求,为后续高质量通行奠定良好基础。

1 工程概况

为增强该次研究的现实意义,选取沁阳至伊川高速公路QYTJ-3合同段工程(以下简称“案例公路工程”)为实例展开分析。案例公路工程全长19.75km,起讫桩号为K49+900~K69+650,设计速度120km/h,公路等级-I级,其中K49+900~K52+265.822段为双向六车道,路基宽度34.5m,K52+265.822~K69+650段为双向四车道,路基宽度27m。该工程主要位于黄土丘陵区,分为巩义段、偃师段。其中巩义段黄河南岸邙岭地形起伏不平,属典型

的黄土丘陵区,土层以黄土状粉土和黄土状粉质黏土为主,局部为粉细砂,黄土状土具有湿陷性,垂直节理发育;偃师路段南部大部分地段呈缓坡状分布,地形变化缓慢,线路范围内地层开挖面极窄,区域内黄土状土发育,见有钙质结核^[1]。

2 公路工程实例中的不良地质

对公路工程沿线地质全面勘察后发现,主要的不良地质现象包括人为坑洞、黄土陷穴。

(1)人为坑洞。公路工程沿线经过居民区或半山坡,而当地建筑以地坑院、窑洞为主,属于人工开挖形成的洞穴。经调查后发现,局部路段从人为坑洞上部通过,对路基稳定性有所影响。(2)黄土陷穴。沿线区域存在大面积分布的黄土状土层,疏松多孔,在地表水流的冲刷下形成了冲沟及黄土陷穴,陷穴主要分布于黄土冲沟边缘和部分沟床。由于地表径流沿沟头汇集,加之黄土较为松散,垂直节理发育,水流沿节理下渗、潜蚀,在新黄土中形成竖井状、漏斗状或串珠状陷穴。

除上述两类主要的不良地质现象外,还存在黄土滑坡(滑塌)现象,但距离线路较远,对路线无影响,故不赘述。但公路工程所在地区多年平均降水量330~1012mm,时空变化较大,多集中在6~9四个月,集中降雨将会对边坡产生冲刷,且项目存在高填路段与深挖路段,需做好处理与防护工作。

3 基于公路工程实例的地基处理与加固技术

3.1 人为坑洞地基加固

经上述分析可知,案例公路工程路基范围内存在以窑洞、地坑院为主的人工坑洞,为保障路基整体稳定,提高工后沉降的可控程度,在公路工程路基施工期间,需依据坑洞形态、埋深及路基填筑高度采取差异化处治措施。在案例公路工程项目中,运用高密度电法与探地雷达展开精细探测,用于确定人为坑洞的分布范围、埋深、洞体跨度、顶板残余厚度。经勘测后发现,埋深多为3~8m,洞体跨度处于4~6m范围内,进一步根据该结果,将坑洞划分为浅埋型($H \leq 5m$)、深埋型($H > 5m$)两种,分别采用开挖回填与压力注浆相结合的综合处治方案。

对于浅埋型坑洞,在机械设备的帮助下开挖至洞底,清除松散土体与杂物后,分层回填水泥土,其中水泥掺量为6%。浅埋型坑洞加固填充期间,按照0.3m的标准控制每层虚铺厚度,夯实6~8遍,要求压实度至少为96%。回填至路基基底标高后,于坑洞边界外扩5m范围内布设水泥土挤密桩,桩径、桩间距分别为0.40m、1.00m,且要求桩长贯穿坑洞影响区并进入稳定土层不少于2m,继而形成复合地基^[2]。对于深埋型或顶板稳定性较好的坑洞,则采用压力注浆加固工艺。注浆材料选用P.042.5水泥浆,水灰比处于0.5~0.6区间内,并掺入2%速凝剂。注浆孔按梅花形布置,孔距1.50m,注浆压力初压0.5MPa,终压1.0~1.5MPa,稳压时间不少于15min。注浆体28d无侧限抗压强度不低于15MPa,旨在填充空洞并强化周边土体结构。为增强路基整体刚度,在注浆区域上部铺设厚度为0.60m的水泥土垫层,水泥掺量8%,压实度不低于95%。

加固完成后,采用动力触探与静载试验进行质量验证,要求处理加固后的复合地基承载力特征值至少达到180kPa,地基系数 $\geq 110MPa/m$ 。

3.2 黄土陷穴充填夯实

案例公路工程沿线存在竖井状、漏斗状及串珠状黄土陷穴,为保障公路路基稳定性,在施工期间借助无人机航测、地面渗透雷达进行初步定位,以结果数据为导向,通过钻孔取芯精确测定陷穴的空间形态特征,其中钻孔取芯的孔径为110mm,取芯率要求至少达到85%。以陷穴发育程度为依据,将路基黄土陷穴区域划分为三个等级。I级黄土陷穴区域直径 $< 2m$ 、深度 $< 3m$; II级区域直径处于2~5m内,深度为3~8m; III级区域直径超过5m,深度大于8m。处理加固之前,需清除穴壁松散土体,并对穴壁进行修整,使其坡度不大于1:0.75。

对于案例公路工程中的I级陷穴区域,采用直接分层回填方案。回填材料选用水泥掺量为7%的水泥土,层铺筑厚度0.25m,采用18t压路机碾压6遍,使压实度至少达到95%。回填至原地面

标高后,于陷穴周边2m范围内实施重锤夯实处理,夯锤重量为15t,落距与夯击能分别为10m、150kN·m,夯点间距为2m。II级陷穴区域采用压力注浆与回填相结合的综合处治方案,其中注浆材料采用P.042.5水泥浆,水灰比为0.55,并掺入3%的膨胀剂与1%的早强剂。注浆压力精细化控制在0.3~0.8MPa范围内,注浆速率按照30~50L/min的标准控制。注浆完成后,采用粒径低于5cm的碎石进行回填,每层厚度为0.3m,采用20t压路机碾压8遍。III级陷穴区域采用综合处治措施,在陷穴底部设置厚度为0.5m的混凝土封底层,随后于穴内回填水泥掺量为8%的水泥土,每层厚度为0.2m,采用25t压路机碾压10遍。于陷穴顶部铺设双向土工格栅,格栅抗拉强度 $\geq 80kN/m$,并在其上设置厚度0.4m的水泥土垫层。

黄土陷穴充填夯实处理加固完毕后,按照标准进行质量控制,经实际检测后发现,处理加固后的黄土陷穴区域地基承载力特征值均达到150kPa以上,有效消除了黄土陷穴对路基稳定性的潜在威胁。与此同时,施工期间尤为注重防排水措施,于陷穴处治区域周边设置截水沟,沟底坡度不小于0.5%,确保地表径流及时排离,防止二次侵蚀。

3.3 湿陷性地基强夯挤密

对现场勘察获得的湿陷类型、等级及土层厚度数据进行整理,以这些数据为依据选取适宜方法对湿陷性地基进行处理加固。在案例工程项目中,主要运用强夯法与水泥土挤密桩工艺处理公路沿线的湿陷性地基^[3]。

湿陷土层厚度低于10m的一般路基段,采用强夯法进行处理。强夯施工分三遍实施。首遍主夯点按正方形布置,间距为5.0m,夯击能控制为1500kN·m;第二遍为插夯,夯点位于首遍夯点中间,夯击能调整为1200kN·m;最后一遍采用1000kN·m能量满夯,锤印彼此搭接1/3。在整个强夯处理期间,夯锤重量为15t,直径2.5m,落距为10m,单点夯击为8~12次,同时要求两遍间隔时间不少于72h,以超孔隙水压力消散至80%以上为控制标准。湿陷土层厚度超过10m或位于高填方路段的地基,则采用水泥土挤密桩进行加固。桩体直径为0.4m,按照等边三角形进行布设,桩间距为1.0m,桩长要求穿透湿陷性土层并进入下伏稳定层深度不小于1.0m。成孔采用振动沉管法,桩孔内回填水泥土,分层回填厚度为0.3m,采用1.5t夯锤进行孔内夯实,落距为2.0m,夯击6至8次,确保桩体压实度不低于95%,且28d无侧限抗压强度超过4.0MPa。

对湿陷性地基强夯挤密过程中,为确保地基处理加固效果,对施工过程中的关键指标进行监测。按照标准指标完成湿陷性地基的强夯挤密处理加固后,对其性能进行检测,发现处理后地基的平均干密度提升至1.68g/cm³,孔隙比降至0.65~0.72,湿陷系数控制在0.002~0.008之间,湿陷性完全消除,复合地基承载力特征值均达到200kPa以上,满足公路工程施工要求。

3.4 高填深挖路基处理

高填方与深挖方路基段在公路工程施工期间存在沉降控制难题,对地基结构进行处理加固时,根据路基高度、边坡坡

度及地质条件的差异,采取分阶处治与综合防护相结合的技术方案。

对于填方高度超过12m的高填路基,采用分层碾压与强夯补强的组合工艺。路基填筑每层松铺厚度低于0.3m,采用20t振动压路机进行碾压,与此同时,将行驶速度控制在2.5km/h以内,振动碾压不低于6遍,静压收面2遍,确保压实度达到96%以上。此外,每填筑4m高度后实施一遍强夯补强,夯击能采用1200kN·m,夯点间距、夯锤重量分别为4m、12t,落距为10m,单点夯击8~10次,以消除填土层的差异沉降。在填挖交界处设置过渡段,过渡段长度按填方高度的3倍控制,且不小于15m。过渡段采用粒径不大于10cm的碎石土填筑,每层厚度0.25m,采用18t压路机碾压8遍,并在基底铺设双向经编土工格栅,其纵横向抗拉强度不低于100kN/m,延伸率≤8%,格栅铺设时保持张紧状态,用“U”型钢筋锚固,锚固间距按照1.5m的标准进行控制。

对于挖方深度大于16m的深挖路堑,采用分级开挖与预支护相结合的控制性施工方法。边坡按1:0.75的坡率进行分级开挖,以8m为间隔设置一道2m宽的平台,平台设置4%的外向横坡以利排水。开挖前采用超前锚杆进行预支护,锚杆采用Φ28mm螺纹钢,长度6m,按2.0m×2.0m间距布置,注浆压力0.6~0.8MPa,浆液水灰比0.45。为最大限度确保高填深挖路基的处理加固效果,在施工期间采取动态监测,运用测斜仪、沉降观测点、应力计了解挖方参数,监测频率在开挖期间为每天1次,开挖完成后每周2次。通过实时数据反馈指导施工参数调整,确保路堑边坡稳定和基底安全,依托于精细化施工控制,使路堑基底沉降量控制在规范允许范围内。

3.5 边坡防护与防排水

案例公路工程采取上述措施对地基进行处理加固的同时,还同步开展边坡防护与防排水作业。

在边坡防护方面,以边坡高度、岩土性质、稳定性差异为依据进行分级防护。

对于填方路基边坡防护:

①当路基填土高度小于等于5m时,在坡面铺25cm种植土(清表土),其次采用机械喷播草籽(四种草籽混种,草籽中混入30%左右的灌木)。

②路基填高大于5.0米路段,采用拱形骨架植草防护,拱形骨架采用C25预制混凝土块拼装,预制块底部采用M7.5水泥砂浆座浆,拱圈内回填种植土,植草灌。

③在路基稳定安全的基础上优先考虑放坡,尽量减少挡墙的设置。地形受限、不宜全部放坡的填方路段设置仰斜式路肩墙、衡重式路堤墙、坡脚护脚墙。地面横坡较陡,不宜放坡的路段挡墙和护脚均采用C25片石混凝土。

④易受水流冲刷路段,常水位以上0.5m的以下部分采用满铺式现浇混凝土防护或挡土墙防护,安全高度以上部分采用植草灌防护或骨架防护。

对于填方路基边坡防护:

挖方路基边坡防护设计根据边坡地质、边坡高度、坡率及

环境条件,采取植物防护与工程防护,并采用分层开挖、分层稳定和坡脚预加固措施,保证路基稳定。

①一般路段土质(或全风化岩石)挖方边坡高度小于4m时,采用植草、草灌防护。一般路段当边坡高度大于4m时,且坡率不陡于1:0.75,采用拱形骨架+植草防护。

②黄土路段第一级边坡陡于1:0.75时,在坡脚增设2m高、30cm厚C25现浇砼护脚,护脚以上坡面及上部1:0.5坡率边坡坡面穴种紫穗槐,要求紫穗槐株距50cm,株高大于等于0.6m,冠幅大于等于30cm,挖方平台采用15cm厚C25现浇混凝土硬化。在穴种紫穗槐前,根据所定的栽植点为中心,沿四周向下挖种植穴,种植穴的大小根据土球规格及根系情况来定,种植穴应比根系球大出30cm以上,以便操作。树穴深度是穴径的2/3。树穴的上下口径应统一,以免植树时根系不能舒展或填土不实影响成活率。

③对于风化严重的软质岩石或较破碎岩石路堑边坡采用窗孔式护面墙防护。对于岩体破碎易产生崩塌滑落路段,清除破碎体后,采用窗孔式护面墙防护,窗孔内采用码砌植生袋绿化。

④中风化膨胀岩坡面按1:0.75~1:1放坡,坡面开挖后,铺设两布一膜防水土工布,采用窗孔式护面墙或锚杆框架梁防护,全风化膨胀岩、膨胀土坡面按1:1.5~1:2.0放坡,坡面开挖后,铺设两布一膜防水土工布,采用拱形骨架喷播植草护坡。

⑤对于风化严重的软质岩石或较破碎岩石路堑边坡采用护面墙或窗孔式护面墙防护。

⑥对于岩体裂隙节理较发育及存在局部楔型破坏边坡,采用锚杆框架梁护坡。硬质岩石挖方边坡岩面不进行人工防护,只在碎落台和边坡平台设置花坛,种植藤蔓植物以节约土地为原则,在满足排水需要的前提下,根据现场实际能排则排、不能排则蓄的原则,做好黄土地区路基排水系统总体设计,使路表排水、坡面排水、路侧排水等衔接合理,排水畅通,防止积水下渗,避免发生湿陷性导致路基破坏。

本项目结合水文水力计算结果,分别设置不同尺寸的矩形边沟、矩形盖板边沟,集中将路面水、坡面水收集,在挖方段或填挖交界处将水排离,综合确定填方排水沟尺寸及蓄水型排水沟段落,主要方案如下:

填方排水:

排水沟(A1):适用于连续排水长度小于等于200m有出水口的路段。主线及互通一般路段采用底宽80cm、净深60cm(斜面1:0.25)梯形排水沟,沟身采用10cm厚C25混凝土预制块,沟身铺砌5cm厚M10水泥砂浆,所有预制块外露线条均设置5mm倒角,预制块外露面均为模板成型面。勾缝采用M10水泥砂浆,勾缝为凹缝,缝宽1cm,深度0.3cm。

排水沟(A2):适用于大于200m小于等于500m范围内有出水口的填方路段,梯形排水沟净深h为80cm、排水沟底宽80cm、顶宽240cm。沟身采用8cmC25混凝土预制块、沟身底部设置2cm厚M10水泥砂浆垫层。

排水沟(A3):适用于大于500m没有排水出口的填方路段,

形成蓄水排水沟,排水沟净深 h 为120cm。A2、A3型排水沟采用C25砼预制块铺筑,底部设置M10水泥砂浆垫层。A3蓄水排水沟应每隔100m设置120cm高、20cm厚的C20现浇砼挡板,A3蓄水排水沟与急流槽出口相接位置,急流槽两侧各1m范围内沟底采用实心混凝土预制块硬化处理。

排水沟(A4):适用于主线与匝道交界处,A4型排水沟沟型采用三角形,沟身采用C25预制块铺筑,底部设置M10水泥砂浆垫层。

挖方排水:

主线及互通区所有挖方路段均设置矩形盖板边沟。沟身采用C25混凝土现浇,盖板采用钢筋混凝土预制。

黄土路段按照“远接远送”、“加强边沟、排水沟、急流槽防渗、防漏、出水口消力、防冲刷、防溢水”设计:

坡面汇水面积较大或开挖路段较长(≥ 200 m)路段采用底宽0.8m,深0.8m和宽0.6m、深0.8m矩形边沟,边沟侧壁及沟底设置防渗土工膜;

对于挖方连续长度大于1.0km路段,边沟尺寸采用1.2m深、宽0.8mC25现浇砼;对于连续长度介于1~1.5km路段,边沟尺寸采用1.2~2.5m深、宽0.8mC25现浇砼。

并且挖方坡面坡顶外至少5m的位置设置截水沟,截水沟结合地形和地质条件沿等高线布置,将拦截的水顺畅的排向自然沟谷或水道。一般路段,坡顶截水沟采用C25现浇混凝土矩形沟,厚度20cm,净宽60cm,净深60cm,并在墙身中间布置C12、C16钢筋,

具体实施时可根据汇水量大小采用变化界面截水沟。局部路段,根据汇水量局部路段采用顶宽4m、底宽2m截水沟,采用25cm厚C25混凝土现浇,同时加密急流槽间距,截水沟起终点采用C25水泥混凝土封闭。通过上述方案最大限度保障防排水施工效果,确保路基稳定性。

4 结束语

综上所述,公路工程路基施工期间,需对不良地质进行处理与加固,减少其对公路路基结构稳定性的影响,增强路基承载力与稳定性。结合案例公路工程项目来看,则因地制宜,根据工程所在区域地质实际情况编制了一套可行的地基处理与加固技术方案,混合运用技术方法后,尽可能削弱了不良地质对公路地基结构的影响,可为类似工程项目提供参考借鉴。

[参考文献]

[1]廖坤.高速公路工程施工中软土地基的处理要点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(23):59-61.

[2]白翔.公路工程中软土地基处理技术及其对道路稳定性的影响分析[J].运输经理世界,2025,(22):31-33.

[3]孔德政.挤密桩法在公路湿陷性黄土地基处理中的应用[J].福建建材,2025,(05):67-71.

作者简介:

郝振东(1991--),男,汉族,黑龙江嫩江人,本科,中级工程师,从事公路工程技术研究。