

岩土工程新技术及工程应用丛书

高填方路基后处理技术 及工程应用

郭院成 周同和 著

中国建筑工业出版社

岩土工程新技术及工程应用丛书

高填方路基后处理技术及工程应用

郭院成 周同和 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高填方路基后处理技术及工程应用/郭院成, 周同
和著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 2

(岩土工程新技术及工程应用丛书)

ISBN 978-7-112-16281-9

I. ①高… II. ①郭… ②周… III. ①路基工程-研
究 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 002716 号

高填方路基后处理技术, 是一种新型路基处理技术, 在已进行全部或部分填方路基施工的标高处, 施工无砂混凝土小桩、CFG 桩, 然后再进行后填路基或垫层施工。本书的研究主要包括三个方面: 高填方路基后处理技术作用机理研究、高填方路基变刚度后处理研究、高填方路基后处理在扩宽工程中的应用。除了理论研究成果, 作者还详细讲述了高填方路基后处理技术在黄土地区的应用, 变刚度后处理路基技术的工程实例, 以及后处理技术在扩宽改造工程、软土地基、膨胀土地基、加固处理既有构筑物地基中的应用。

本书适合从事岩土工程的技术人员、施工人员及管理人员参考学习。

* * *

责任编辑: 王 梅 李天虹

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 陈晶晶

岩土工程新技术及工程应用丛书
高填方路基后处理技术及工程应用

郭院成 周同和 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京千辰公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13¼ 字数: 319 千字

2015 年 6 月第一版 2015 年 6 月第一次印刷

定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-16281-9

(25026)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

高填方路基后处理技术,是近年来由本书著作者所在团队研究开发的一种新型路基处理技术。

与普通地基处理技术不同,后处理技术是在已进行全部或部分填方路基施工的标高处,施工无砂混凝土小桩、CFG 桩,然后再进行后填路基或垫层施工的技术。

后处理复合路基在后填方路基、路面结构、路面荷载的作用下,刚性桩会产生上刺入变形,部分桩间土体沉降大于桩体,产生负摩阻力。利用这种桩侧负摩阻力,使土中应力产生向桩体的集中,并利用加筋垫层、桩帽等作用,将后续填土荷载传至深层土体,降低了浅层地基的后期应力和总附加应力,从而可以减少地基变形和路基沉降。

对饱和软土地基,采用无砂混凝土小桩后处理技术,还可以使得地基土体获得快速固结效果,加快了路基填筑施工速度、大幅度减少工后固结沉降。该技术巧妙利用应力路径原理,独具匠心。

后处理技术,还可采用多桩型复合地基。如超软土路基工程,为了解决先期填土路基的稳定性,可预先对超软土地基进行处理,当先期填土高度达到一定要求时,再行采用后处理技术。

高填方路基后处理技术,自 1999 年湖北省京珠高速武汉东西湖某段正式应用于工程以来,已经在我国多条高速公路的填方路基处理中得到成功应用,取得了良好社会效益。主要研究成果包括:

1. 河南省重大科技攻关项目子项 II:投石压浆无砂混凝土小桩复合地基新技术的试验研究与应用(981150121)(鉴定证书编号:豫科鉴委字[1999]第 818 号),获 2000 年度河南省建设科技进步一等奖。

2. 河南省科技成果推广项目:高速公路高填方软基后处理技术(013420200)(鉴定证书编号:豫科鉴委字[2001]第 066 号),获 2002 年度河南省科技进步二等奖。

3. 河南省科技攻关计划项目:高填方路基后处理技术机理及在扩宽工程中的应用研究(0424450011)(鉴定证书编号:豫科鉴字[2009]第 220 号),获 2012 年度河南省建设科技进步一等奖。

4. 河南省高速公路发展有限责任公司科研项目:高填方路基后处理技术的变刚度设计理论及工程应用研究(鉴定证书编号:豫科鉴字[2010]第 481 号),获 2012 年度河南省建设科技进步一等奖。

5. 河南省高速公路发展有限责任公司科研项目:高填方路基后处理二元复合地基技术应用研究,获 2012 年河南省科技进步二等奖。

本书采用理论与工程实测分析等方法,对后处理复合路基若干技术问题展开研究,并取得了一系列研究成果:

1. 高填方路基后处理技术是在预填方路基上开展无砂混凝土小桩的成孔、压力注浆并形成无砂混凝土小桩复合路基,具有堆载预压、快速排水、排气固结、固化、竖向置换增强等综合作用机理;投石压浆无砂混凝土小桩复合地基由于其特殊的施工工艺,其承载力大小除与工程地质条件有关外,还与灌浆材料、灌浆压力和灌浆量、灌浆工艺及置换率有关,所以在无砂混凝土小桩复合地基承载力计算公式中引入了小桩单桩承载力发挥系数和桩间土承载力发挥系数;通过对无砂混凝土小桩复合地基桩土竖向变形协调、桩间土的应力和竖向变形的分析,解决了无砂混凝土小桩复合地基基于变形控制条件下的优化设计问题。

2. 高填方路基后处理技术中先填土高度的确定是非常关键的一个技术环节,直接关系到后处理技术的经济和工程效果。对于不同的地质条件,采用不同的分析确定方法。当浅层含有饱和软弱土层,地基承载力较低时,采用基于统一双剪强度理论的分析方法确定后处理先填土高度,可以充分发挥天然地基的承载力,达到降低造价的目的;当地基承载力较高时,基于小坡堤稳定理论的分析方法可以方便地确定后处理先填土高度,避免了后处理之前由于填土自身稳定问题给工程带来的不良影响。

3. 基于统一强度理论和柱形孔扩张弹性理论,分析了无砂混凝土小桩注浆期间注浆压力与桩周土体的应力状态,得出了桩周土体处于弹性状态和弹塑性状态时,考虑中主应力影响的注浆压力计算公式以及注浆压力与塑性开展半径的关系式;分析了桩周土体处于不同应力状态时土体注浆开裂与挤密之间的相关关系,以及中主应力权系数和初始应力取不同值时注浆压力与塑性开展半径的关系,为后处理技术注浆施工技术参数优化选择提供了理论依据。

4. 基于有限元软件,建立了模拟高填方路基后处理复合地基的数值模型,研究了路基填方及后处理复合地基施工过程和服役期间复合路基中土体沉降变形、孔隙水压力、有效应力的发展变化规律,以及无砂混凝土小桩桩侧负摩阻力、桩身轴向应力的分布及发展规律,总结了后处理复合地基中路基荷载的传递机理;在数值模型的基础上,对后处理成桩固结度、桩端持力土层刚度、桩侧软弱土层刚度、填方土体刚度、后填方高度等高填方路基后处理技术的关键设计因素进行了参数研究,分析了这些因素对于小桩桩侧摩阻力及桩身轴向应力等后处理复合地基力学性状的影响规律;采用负摩阻力弹性理论分析法,基于简化假定,建立了后处理小桩桩身轴向应力理论计算模型。结合数值模拟中相关计算参数对理论结果进行了算例分析。对比了理论模型与数值模拟结果,验证了理论模型的正确性。

5. 对比研究了高填方路基先处理、后处理技术对路堤工后沉降变形的影响机理,提出了将先处理与后处理相结合的高填方路基变刚度综合处理技术。采用有限元数值模拟方法进行了高填方路基变刚度复合地基工作性能的数值分析,就先处理、后处理结合的高填方路基处理的不同工况进行了模拟分析,对比了不同处理方式情况下的高填方路基沉降变形特点,重点分析了桩长、桩体模量、桩间距等参数对变刚度复合路基沉降变形、桩体应力、超孔隙水压力等的影响规律。探讨了高填方路基变刚度处理技术的设计计算方法。结合工程实际应用的实测数据,分析了变刚度后处理技术对高填方路基的处理效果,对变刚度处理机理的研究提供了一定的数据支持。

6. 基于高速公路双侧对称加宽的工程背景, 基于高填方路基加宽时加宽填土荷载的特殊性, 对各种荷载形式作用下地基土体的初始有效应力和超孔隙水压力进行了分析; 对后处理技术先填土、成孔施工各阶段的固结过程进行了详细分析, 得出了各阶段土体超孔隙压力和固结度的计算分析结果; 采用数值模拟方法对比分析了加宽路基采用先处理及后处理情况下, 加宽填土荷载的施工对原有地基和老路路堤的变形性状的影响; 结合路基加宽工程的实际应用, 通过对老路坡肩和新加宽路基坡肩位置水平及竖向变形监测, 验证了小桩后处理技术在增强新老路基间的结合、协调新老路基间的变形, 减小路基工后沉降变形等方面的技术效果。

7. 基于湿陷性黄土地区的高填方路基, 提出将黄土湿陷性处理与竖向增强体路基处理技术融为一体, 研究了由先期填方路基荷载提供黄土湿陷起始压力的高填方路基无砂混凝土小桩后处理技术的设计方法和施工技术要求。在已知外荷载大小及分布特征条件下, 无砂混凝土小桩成孔和注浆过程中预湿、预压湿陷性黄土, 使黄土部分湿陷变形提前完成, 剩余湿陷量减小, 湿陷起始应力增加。从而使黄土结构的湿陷性得到显著改善, 土体结构的水稳性得到保证。同时碎石桩体通过注浆施工形成竖向增强体, 与桩周土体构成复合地基, 提高了地基的承载力和压缩模量, 二者共同承担高填方路基荷载, 抵御后期沉降变形; 结合湿陷性黄土地区高速公路高填方路基的后处理工程, 通过该段高速公路投入运营1年后的检测数据证实, 采用无砂混凝土小桩后处理技术处理黄土地区高填方路基不仅可显著提高原状土体的承载力和压缩模量, 还可有效减弱或消除黄土的湿陷性。

本书由郭院成、周同和共同撰写, 其中郭院成指导毕业的博士研究生童怀峰及硕士研究生刘海涛、靳军伟、韩仲等为高填方路基后处理的机理及应用研究作出了重要贡献, 王辉、王俊立、张浩华、张杰、孙彦飞等多名硕士研究生的研究工作进一步丰富和完善了相关设计理论和应用技术。在此一并感谢!

由于时间和作者水平所限, 书中难免存在不妥之处, 敬请广大读者批评指正。

2013年7月5日 于郑州大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 高填方路基常用处理方法	2
1.2.1 复合地基法	2
1.2.2 固结密实法	3
1.2.3 国外路基处理技术现状	4
1.2.4 国内外高速公路扩建加宽研究现状	5
1.3 高填方路基后处理技术	10
1.3.1 高填方路基的后处理技术	11
1.3.2 高填方路基的变刚度后处理技术	12
1.3.3 高填方路基扩宽工程的后处理技术	13
1.4 本书主要内容	13
1.4.1 高填方路基后处理技术作用机理研究	13
1.4.2 高填方路基变刚度后处理技术	14
1.4.3 高填方路基后处理在扩宽工程中的应用	14
第 2 章 高填方路基后处理技术	16
2.1 高填方路基后处理技术开发研究	16
2.1.1 无砂混凝土小桩施工工艺	17
2.1.2 无砂混凝土小桩的压力注浆	18
2.2 后处理技术产生的固结作用与注浆压力分析	19
2.2.1 先填土荷载作用下地基应力及孔压分析	19
2.2.2 先填土荷载作用下后处理技术产生的固结作用分析	24
2.2.3 考虑桩周土体应力状态的小桩注浆压力分析	27
2.3 高填方路基后处理小桩负摩阻力研究	31
2.3.1 计算模型及假设	31
2.3.2 负摩阻力理论分析	32
2.3.3 数值模拟分析	35
2.4 无砂混凝土小桩后处理技术机理	52
2.4.1 无砂混凝土小桩后处理机理分析	52
2.4.2 无砂混凝土小桩后处理技术机理	53
2.5 本章小结	54

第3章 高填方路基后处理设计理论与方法	55
3.1 路堤临界填土高度计算方法	55
3.1.1 路堤临界填土高度计算方法	55
3.1.2 基于统一双剪强度理论的先填土高度计算方法	59
3.1.3 基于小坡堤稳定理论的填土高度计算方法	64
3.1.4 小结	66
3.2 无砂混凝土小桩复合地基的承载力分析	66
3.3 无砂混凝土小桩复合地基的竖向变形分析	68
3.3.1 小桩复合地基桩土变形协调分析	68
3.3.2 桩间土的应力和变形分析	70
3.4 无砂混凝土小桩复合地基基于变形的优化设计	71
3.5 本章小结	72
第4章 高填方路基后处理过程的数值模拟	73
4.1 引言	73
4.2 数值模型	73
4.2.1 模型简图及模拟过程	73
4.2.2 材料本构模型及相关计算参数	74
4.2.3 模型单元及边界条件	76
4.3 计算结果及分析	77
4.3.1 后处理作用机制的数值分析	77
4.3.2 后处理施工过程的数值模拟	78
4.4 本章小结	89
第5章 后处理路基工后沉降变形预测	90
5.1 高填方路基变形分析	90
5.1.1 高填方路基变形分析	90
5.1.2 数学新方法	91
5.2 高填方路基处理的技术路线	92
5.2.1 高填方路基的先处理法与后处理法	92
5.2.2 先、后处理法变形计算对比分析	95
5.2.3 先、后处理法技术经济对比分析	96
5.3 无砂混凝土小桩后处理高填方路基的变形计算	96
5.3.1 变形计算基本理论	96
5.3.2 后处理软土高填方路基变形的简便计算	101
5.4 本章小结	101
第6章 高填方路基变刚度后处理技术	102
6.1 变刚度复合地基技术	102
6.1.1 变刚度复合地基研究	102
6.1.2 变刚度后处理技术机理分析	103

6.2 变刚度高填方路基后处理过程的数值模拟	105
6.2.1 实例模型的建立	108
6.2.2 有限元模型	109
6.2.3 数值模拟计算结果分析	110
6.2.4 数值模拟结果	118
6.3 模型参数对比分析	119
6.3.1 模拟试验设计	119
6.3.2 模拟试验结果及分析	119
6.3.3 小结	131
6.4 设计理论及参数讨论	132
6.4.1 先处理承载力计算	132
6.4.2 整体稳定性验算	134
6.4.3 沉降计算	136
6.4.4 小结	138
6.5 本章小结	138
第7章 后处理加宽路基变形性状的数值模拟分析	139
7.1 基本假定和模型建立	139
7.1.1 基本假定	139
7.1.2 模型建立	139
7.2 后处理加宽路基的变形性状对比分析	141
7.2.1 加宽路基变形性状	141
7.2.2 先处理加宽路基变形性状	143
7.2.3 后处理加宽路基变形性状	144
7.2.4 小结	149
7.3 本章小结	149
第8章 高填方路基后处理技术的工程应用	151
8.1 高填方路基后处理技术在黄土地区的应用	151
8.1.1 黄土地区高填方路基处理的技术路线	151
8.1.2 基于变形控制的桥头跳车处理技术研究	153
8.1.3 无砂混凝土小桩后处理湿陷性黄土高填方路基	155
8.1.4 高填方路基后处理技术在湿陷性黄土地区的应用	157
8.1.5 小结	168
8.2 变刚度后处理路基技术的工程实例	169
8.2.1 工程概况	169
8.2.2 监测布置及结果分析	170
8.2.3 小结	174
8.3 后处理技术在扩宽改造工程中的应用	175
8.3.1 工程概况	175

8.3.2	加宽后处理方案	175
8.3.3	施工及监测结果	176
8.3.4	监测结果分析	180
8.3.5	小结	180
8.4	后处理技术在软土地基中的应用	180
8.4.1	京珠高速湖北段软土路基处理实例	180
8.4.2	湖北新滩大桥引道软土路基处理实例	182
8.4.3	小结	182
8.5	后处理技术在膨胀土地基中的应用	183
8.5.1	工程概况	183
8.5.2	膨胀土路基处理方案及施工过程	184
8.5.3	高填方膨胀土处理效果	184
8.5.4	小结	185
第9章	高填方路基后处理技术发展展望	186
9.1	后处理技术的核心思想	186
9.1.1	应力路径原理的应用	186
9.1.2	快速固结与提前固结效应	186
9.1.3	整体稳定性效果	188
9.2	后处理技术的发展展望	189
9.2.1	后处理技术手段发展的多元化	189
9.2.2	后处理技术将广泛应用于道路改造工程	190
9.2.3	后处理技术将广泛应用于高速公路、市政道路的台后修补处理	190
9.2.4	后处理技术的未来	190
参考文献		191
附录 A	FORTRAN 程序部分代码	197

第1章 绪 论

1.1 引 言

20 世纪 80 年代以来,随着我国市场经济体制的建立,国民经济持续快速发展,区域间的经济合作往来日益密切,公路运输需求增长强劲,目前,我国公路在客运量、货运量、客运周转量等方面均遥遥领先于其他运输方式的总和;公路基础设施建设开始发生了历史性的转变。

我国高速公路建设起步相对较晚,1988 年我国第一条高速公路沪嘉高速公路(18.5 公里)建成通车。此后,又相继建成全长 375 公里的沈大高速公路和 143 公里的京津塘高速公路。进入 20 世纪 90 年代,在国道主干线总体规划指导下,我国高速公路建设步伐加快,每年建成的高速公路由几十公里上升到一千多公里以上。到 1999 年底,全国高速公路通车里程已达 11605 公里;2004 年,新增公路通车里程 7 万公里,其中新增高速公路 3500 公里,到年底全国公路通车总里程达到 188 万公里,高速公路里程达到 3.3 万公里;2005 年,我国的高速公路提高到 3.5 万公里。而公路通乡率由 99.5% 提高到 99.8%,使 687 个不通公路的乡通公路;公路通行政村率由 93% 提高到 96%,使 49000 多个不通公路的村通公路。2012 年全国交通运输工作会议发布的信息显示,我国 2011 年新增公路通车总里程达 7.14 万公里,其中高速公路 1.1 万公里。截至 2011 年年底,我国高速公路通车总里程已达到 8.5 万公里,仅次于美国而居世界第二。

我国的高速公路、铁路建设近年来突飞猛进,建设投资不断增加,规模不断扩大,随着我国高速公路逐步向中西部地区的延伸,出现了越来越多的高填方路基。与一般的较低路基相比,高填方路基填筑高度大、填筑面积和土石方工程量大、自重较大;要求路堤本身具有足够的承载力和整体稳定性,并控制总沉降量和沉降速率。实际工程中,高填方路基受设计、施工、地质条件、路基填料、路基排水条件等的影响,可能造成路基局部或整体沉陷过大,不能满足使用要求,将严重影响交通安全及运输速度^[1]。由于路堤各部位(或路堤与结构物间)变形量不同而造成不均匀沉降,从而在路堤的不同部位形成拉应变区和压应变区。由于填土的抗拉强度很低,在这些部位容易产生变形裂缝^[2]。在路桥结合处使用高填方路基时,由于桥梁基础较路基基础处理深度大,处理手段好,使得桥梁段为刚性,与之结合的公路路段呈现相对柔性,从而造成两者在使用过程中产生差异沉降。车辆在通过时产生跳跃,使得车辆大幅度减速,使司机和乘客感到不适,严重时还会导致交通事故。另外,桥头跳车也加快了桥梁、路面以及车辆的损坏^[3]。

国内外消除桥头差异沉降的主要措施是设置过渡段,过渡段采用路堤桩处理桥头地基。路堤桩可以是碎石桩、木桩、灌注桩、预制桩、石灰桩、水泥土搅拌桩等。在国外,

多使用灌注桩、预制桩；在国内，一般采用碎石桩、水泥土搅拌桩、石灰桩等，以水泥土搅拌桩居多^[4]。

目前在地基处理中，主要采取的方法包括采用复合地基形式的 CFG 桩、PHC 管桩、粉喷桩、砂桩等形式^[5~7]，以及以加快土体固结的袋装砂井、堆载预压、真空预压、强夯等形式^[7~10]。从工程实践来看，以上所述形式都在其所使用的范围内取得了良好的效果，但是也存在一定的局限性。

高速公路高填方路基对沉降变形与控制要求严格，路基处理不仅要满足施工阶段的沉降和工后沉降的要求，由于施工工期的限制，通常还需要满足使土体快速固结的要求。上述处理方式由于自身方法的局限性，很难同时满足所有的要求，寻求新思路、新方法成为亟待解决的问题。

近年来，新型地基处理的思路和方法，主要体现在以下两个方面：第一个方面是两种或两种以上的地基处理方法的综合应用，如水泥土搅拌桩与排水板、桩与加筋土垫层、真空预压与堆载预压、碎石桩与 CFG 桩以及其他各种方法的联合使用，综合两种或两种以上地基处理方法，可以发挥各自的优点，达到最合理、最优的地基处理效果；第二个方面就是在技术不断发展的基础上，开发新型的施工机械、施工工艺、材料设计、监测检测技术，如夯扩桩、钉形水泥土搅拌桩、双向搅拌桩技术等。

1.2 高填方路基常用处理方法

目前高填方路基处理方法较多，按照处理位置的不同可以划分为一般地段和路桥结合处等特殊地段，按照处理原理可以划分为复合地基法和土性改善方法。

1.2.1 复合地基法

复合地基法在高填方路基中应用的主要是竖向增强体（桩）和横向增强体（加筋）两种形式，本书主要研究桩体复合地基法。按照桩体材料的特征可以将桩体复合地基分为粘结材料桩和散体材料桩。

1.2.1.1 粘结材料桩复合地基

粘结材料桩复合地基是指桩体材料之间存在相互的粘结作用，按照桩体刚度的不同分为刚性桩复合地基和柔性桩复合地基。

1) 刚性桩复合地基^[5,6,11~13]

刚性桩复合地基是指桩体材料的刚度远远大于土体材料的刚度，通过桩顶部分的桩帽和土体相互作用形成“土拱效应”，承担上部荷载的作用，其减沉效果好，侧向刚度大，可有效防止路面开裂，在工程实践中逐渐得到推广应用。常见的为由碎石、石屑、粉煤灰掺适量水泥加水拌合，用振动沉管打桩机或其他成桩机具制成的 CFG 桩和管桩复合地基形式。

CFG 桩可在全长范围内受力，能充分发挥桩侧摩阻力和端承力，并通过置换和挤密作用，提高路基承载力，减小沉降量。管桩使用起源于国外，目前我国在高速公路软基处理方面应用还较少。管桩复合地基处理质量可靠、工期短、承载力高。目前公路路基以沉

降控制为主,承载力一般都能满足实际要求,故一般采用疏桩复合地基形式。管桩按混凝土强度等级和壁厚分为^[12]:混凝土强度不得低于 C50 的预应力混凝土管桩(PC)、混凝土强度等级不得低于 C80 的预应力高强混凝土管桩(PHC)和强度等级不得低于 C60 的薄壁管桩(PTC)。预应力管桩采用先张法预应力工艺,是一种细长、空心等截面的预制构件。预应力管桩种类较多,在软基处理方面,常用的有 PTC、PHC 管桩。

王斌和徐泽中^[13]以具体工程为背景,介绍了刚性桩复合地基的设计方法,以及沉桩对原路基的影响。采用预应力疏桩复合地基方案,处理效果明显,质量可靠,造价经济。马凡^[5]根据 CFG 桩复合地基工程特性,确定高速公路高填方路基 CFG 桩复合地基的设计原则,提出地基沉降复合地基承载力的计算方法。预应力混凝土薄壁管桩是目前沿海地区公路工程中处理深厚层软土刚起步采用的桩体形式之一,张洁和王攀^[6]介绍了管桩施工及与浆喷桩的经济性比较情况。

2) 柔性桩复合地基

柔性桩(也称半刚性桩)是指无须桩周土的围箍即能自立,桩身刚度和承载力较小、压缩量较大,单桩沉降以桩身压缩为主、受桩端持力层性状影响不大的复合地基竖向增强体。常见的有石灰桩、水泥土桩、灰土桩等。

灰土桩^[14]是将石灰和土按一定的体积比例(2:8或3:7),拌合之后分层填入桩孔,夯压而成。石灰桩^[11]是指在地基中成孔后,灌入生石灰块,或在生石灰块中掺入适量的水硬性掺合料(如粉煤灰、火山灰),之后进行振密或夯压,形成桩柱体,适用于处理杂填土、素填土、一般黏性土、淤泥及透水性小的粉土。李明杰等^[15]提出了某高填方路堤的复合地基处治方案以及评价复合地基处治效果的多种检测手段。由试验段对比试验结果可以看出处治效果明显,从而证明采用复合地基对高填方路堤进行处治,并采用现场平板荷载试验评价其处治效果是可行的。

水泥土桩,分为干法和湿法两类。湿法是指水泥土搅拌桩^[14],利用水泥作为固化剂,通过深层搅拌机械,在地基深部将软土和固化剂强制拌合,使软土硬结形成加固体。干法是指旋喷桩,采用高压射流,边旋转边缓慢提升,形成的一种水泥-土网络结构^[11]。程贤志和张广明^[7]在某段一级公路路基,进行粉喷桩、砂桩和袋装砂井3种处治方案的比较。通过对比孔隙水压力和路基沉降的观测结果,认为3种处治方法均具可行性。

1.2.1.2 散体材料桩复合地基

散体材料桩是指桩体材料不具有粘结性,常见的有碎石桩、砂桩等。

砂桩是指用振动或冲击荷载在软弱地基中成孔后,将砂挤压入土中,形成大直径的密实柱体。在松散砂土中主要起挤密的作用,在软土中起到置换和排水的作用。冯伟凯等^[16]结合渝怀铁路涪陵车站软土地基施工,介绍了振冲碎石桩处理软基技术要点及质量控制措施。

1.2.2 固结密实法

强夯法又称为动力固结法或动力压密法,通过将100~400kN的重锤,以6~40m的落距下落给地基以冲击和振动,提高土体强度,降低压缩性,改善土体的振动液化条件,消除湿陷性黄土的湿陷性。其加固机理包括动力固结、动力夯实和动力置换。管殿聆和阎

万里^[10]采用南非进口的冲击式压路机对湿陷性黄土进行处理,取得良好的效果。李道生^[17]应用强夯处理湿陷性黄土,通过理论计算与试夯确定夯击参数。

注浆处理按照注浆压力的大小可以分为灌浆法和高压注浆法两类。灌浆法是将具有流动性和胶结性能的浆液,注入土体的孔隙,形成固结体。高压注浆法是采用较高的压强,进行渗透注浆或者是劈裂注浆,填充土体中的孔隙,可进行多次注浆。蔡业青,刘朝权,舒翔^[18]认为注浆处理方法的优点是能实现不破坏建筑物现有状态而达到内部加固处理的目的。钢花管注浆工艺在加固山区高填土路基、台背和处理路堤裂缝方面效果明显,有填充、固化土层和摩擦桩的效果。张劲超^[2]通过分析高填方路段路面水泥稳定层纵向裂缝产生的原因,对其注浆加固处理方法提出了一些建议。

排水固结法,是指对天然地基或已设置竖向排水体的地基进行处理,加速固结,从而提高地基土强度。排水固结法通常包括排水系统和加压系统,两者经常联合使用,适用于处理饱和软黏土、吹填土、松散粉土、新近填土、有机质土及泥炭土地基等。曹永琅等^[9]进行了某高速公路真空预压法加固高填方超软弱土路基试验,与常规堆载预压法相比,采用真空预压法节省工期。王安舜等^[19]研究了堆载预压法进行地基加固的机理,分析了土基固结后的预期强度在线性范围内的增长情况。杨卫东和朱立增^[8]对堆载预压技术进行分析,研究了预压的时间效应,总结了实际工程堆载预压的应用效果及注意事宜。

1.2.3 国外路基处理技术现状

国外的路基处理方式主要集中在三个方面:一是采用路基加筋材料,即设置横向增强体;二是采用排水板的堆载预压固结排水法;三是目前应用较多的路基加筋及桩承式的组合方式。

在路堤加筋方面:Tandjiria等^[20]研究了路堤加筋应力的分布对路堤稳定性的影响。Bergadoa等^[21]通过位于Bangkok软黏土路堤使用和不使用土工织物加强材料的全模型试验,基于现场检测和有限元分析对路堤的性能进行了对比评估。试验中,在不考虑土工织物刚度的条件下,基于基础土体破坏的土工材料主应变约为2.5%~3%。Jose和Antonio^[22]对软土加筋路堤的整体稳定性进行了研究。Sean等^[23]分析了使用加筋材料的软土路基,并研究了加筋材料的工作性状。Bakır和Akis^[24]分析了1999年日本东京地震作用下的高速公路路基破坏。Sinha等^[25]研究了使用PVD加固软土路堤的预测沉降的转折点。Allen等^[26]研究了加筋路堤中加筋材料以及路基土体的性能。Dennes和Chairat^[27]对软土加筋路堤进行了二维和三维数值分析。Tanchaisawat等^[28]采用数值方法和灵敏度分析对进行加筋的轻质材料软土路堤进行了分析。

在桩承式路堤方面:Adalier等^[29]研究了公路及铁路板桩处理路基的抗震问题。Poulos和ASCE^[30]研究了软土地基上的桩承式路堤设计方法。Murugesan和Rajagopal^[31]采用数值方法分析了土工材料包裹的碎石桩的工作性状。Sari等^[32]采用了一种简化的方法对加筋桩承式路基进行了研究。Sari等^[33]采用有限元方法,分析了路堤下长短桩的固结性状。

在固结排水法方面:Sharma和Bolton^[34]对采用排水板的软土路基进行了离心机试验和数值模拟分析。Jose^[35]采用三维有限元对采用竖向排水板的软土路基的工作性状进行了

分析。Rowe 和 Taechakumthorn^[36]研究了采用加筋材料和竖向排水板联合作用的灵敏性土路堤。Tuan 和 Toshiyuki^[37]进行了采用等效平面应变模型分析竖向排水及真空预压联合作用下的路堤研究。Abdulazim^[38]采用数值方法研究了采用竖向排水板进行加固的路堤,分析了采用 PVD 时的工作性状。

1.2.4 国内外高速公路扩建加宽研究现状

1.2.4.1 高速公路扩建加宽存在问题

自 1997 年 8 月,我国首条高速公路扩建加宽工程——广佛高速公路加宽工程动工以来,先后有海南环岛东线、沈大、沪杭甬、沪宁等高速公路相继局部或全线加宽,从长远和经济的角度讲,扩建加宽将成为我国未来高速公路建设的主流,调查表明,在旧路拓宽工程中,由于新老路基结构组成等差异及新老路基结合不良等问题,容易产生工程病害,如纵横向开裂、错台、道路横坡突变甚至新填路基整体滑塌等,从而影响道路的服务水平和行车条件。

1) 新旧路基结合的病害类型及特征^[39~45]

调查表明,新旧路基结合不良产生病害主要有:路基失稳、路面损坏、支挡结构破坏、路面整体性能下降。

① 路基失稳:主要表现为新老路基间的差异沉降、沿新老路基结合面的滑移和新填路基的整体失稳。在山区陡坡地形、软弱地基、高填方路堤、共同作用层厚度薄的拓宽路段较容易发生。与老路基相比,新填部分路基通常会产生更大的变形,当变形量较小时,新旧路基结合面会产生错台,导致新旧路基结合处路面开裂,雨水入渗,路基承载力降低,给路基稳定留下隐患,当变形量较大时,则会导致路基失稳,造成拓宽路面破坏,甚至使原有路基相继失稳和原有路面的结构损坏。

② 路面损坏:改扩建工程造成路面的损坏是拓宽道路最常见的病害,但大多数路面病害都是路基病害的反映,因路基的差异沉降要通过路面结构层反映到路面上,如沥青路面会产生沿结合面的纵向裂缝、面层网裂、破碎、结合料松散、道路横坡改变等。

③ 支挡结构破坏:支挡结构的损坏是路基损坏的一种特殊形式,挡墙一般设置在原地面边坡较陡处,以平衡新填路堤的下滑力,当墙底受水浸泡、冲刷,或墙体本身处于一潜在滑坡体上,或者挡墙所受土压力过大,将会导致挡墙稳定性不足,从而产生挡墙墙体开裂、整体滑移或倾覆等。

④ 路面整体性能下降:随着路面病害的产生和道路纵横坡的变化,道路结构承载力、平整度、路面状况指数 (PCI) 都将随之下降。当下降到一定程度时,不仅影响道路服务性能,而且将影响行车安全。

2) 路基加宽工程病害原因分析^[40,41,44]

路基加宽工程中由于新旧路基的稳定性、均匀性、材料强度和密实程度不同,新旧路基会产生不同的沉降,道路通车后会引路面出现纵横向裂缝。原因主要有以下几个方面:

① 新加宽路基的稳定性。当结合部基底存在软弱层且软基处理不彻底,腐殖土杂物清理不彻底,透水性不畅,存在薄弱的结合面,加之软弱层具有流变性,侧向变形大,软

弱地基土向路堤外侧挤出,拓宽路堤坡脚起拱,导致边坡失稳。

② 新旧路基间的不协调变形。新旧路基的不协调变形主要存在沉降的不均匀,包括道路纵向和横向不协调变形,拓宽工程中主要为横向不协调变形。新老路基拓宽处理后,由于结合部位路基材质、密实度和路面结构层厚度不一,一边为新填路基,在路基路面恒载和车辆活载作用下,地基的固结变形和新填路基的压密变形较大,另一边为老路基,其工后沉降量已相对完成,这样在新老路基结合部位存在一个沉降差,成为道路产生纵向裂缝的主要原因之一。

③ 新旧路基路面抗变形能力存在差异。由于新旧路基填料和压实度不同导致新旧路基路面整体回弹模量存在差异。新旧路基回弹模量的不同,导致新旧路基路面抗变形能力存在差异。

④ 新老路基结合部位处理不当。新老路基结合部位工艺较复杂,施工难度较大,往往在此产生人为的质量因素,如填料过厚、强度不足、填筑过快、压实不到位、密实度达不到设计标准;台阶开挖不合理、结合不良;边坡开挖过大,老边坡开挖面长时间暴露,或受雨水直接冲刷,造成新老路基亏方,新老路基叠合面减少等。

⑤ 水的作用。路基排水设施也是导致路基不协调变形的直接因素,路基土如受水浸湿,强度急剧下降,会导致路基的变形和失稳。

1.2.4.2 高速公路扩建加宽综合处治措施

高速公路加宽扩建工程通常工期紧,施工场地狭窄,同时还要维持正常的交通运输,较新建高速公路具有更高的要求。因此,需选择经济、快速、可靠的加宽处治措施以确保现有高速公路营运安全、并确保减小加宽后高速公路新旧路面的差异沉降。从我国已扩建高速公路——广佛高速公路、海南环岛东线、沈大高速公路、沪杭甬高速公路、沪宁高速公路、杭宁高速二期等工程中所使用处治措施来看,扩建加宽高速公路常用处治方法有如下几类:

1) 新填路基的处治措施

(1) 浅层处理措施

对低洼湿地及沟渠、池塘底的沉积淤泥,厚度在3.0m以下,多采用基底清淤与换填^[42,46]、抛石挤淤^[40,47]或天然地基+等载预压^[48]等方法处理。

(2) 深层处理措施

对软土较厚、填土较高的加宽路段和桥头高填方路段多采用土性改善和复合地基法,如塑料排水板+土工布+砂砾垫层^[48]、袋装砂井+土工格栅^[42]、粉湿喷桩+砂垫层^[46,48,49]、CFG桩^[50]、预应力管桩^[48]、贫混凝土灌注桩+土工格栅^[48]等。

2) 填筑材料的选择与控制

为减小新旧路基的沉降差,加宽路基的填土应当与老路基完全形成一个整体结构,保持良好的稳定性。当无法使用和老路基相同的土壤时,新填路基的填料使用山皮土、碎石土、石渣等强度较高的材料^[51,52]来提高路基的稳定性和整体承载力,或粉煤灰^[45]、EPS^[53]等轻质填料来降低路堤对地基的荷载,有利于减少地基沉降以及新路堤对老路堤的附加压力。

3) 新老路基结合部的处治措施

改扩建加宽工程设计中最主要的问题是如何处理填方段新老路基之间的衔接,即如何处理新老路堤的不均匀沉降。

(1) 土工合成材料的应用

土工合成材料的应用^[39,45,52,54,55]在一定程度上解决了差异沉降的问题,在高速公路加宽工程中常用的土工合成材料就是土工格栅,土工格栅对土的加固机理^[43,54,55,56]在于格栅与土的相互作用,其一是土工格栅表面与被加固材料间产生摩擦;其二是土工格栅肋条和结点产生被动阻抗作用;其三是由于网孔的存在,网格上层的填料与下层的填料可以相互作用对加固材料产生锁定作用,为更好改善新老路堤的横向连接,减少不均匀沉降,增加路堤的稳定性,施工中常采用两种形式处理:台阶+土工格栅、台阶+碎石垫层+土工格栅。

(2) 施工措施^[45,47,51,57,58]

为保证新老路基的连接质量,施工中常采用以下措施:

① 边坡削坡。由于削坡坡度(1:0.5)较陡,为确保老路基安全,老路基边坡可分2次开挖,第一次比第二次坡度稍大,并边开挖边做好防护工作,每次开挖完毕后,平整压实,进行地基处理施工。

② 台阶开挖。按要求开挖台阶,而且台阶的数量尽可能多,为新老路基的衔接提供更多接触面,以利于新老路基的结合,在填方较高的路段采取逐步开挖的方式施工,同时做好防水和安全防护工作。

③ 台阶根部的压实。对新老路基结合带,由于压路机无法错轮而致压实遍数不够,压实度不足,该处可用打夯机分薄层填筑压实。

④ 防水措施。开挖老路基边坡以后要截断路面水,防止雨水直接冲刷边坡和雨水渗入,迅速排除施工场地积水、断绝外来水,确保老路基安全。

⑤ 土工格栅铺设。土工格栅采用横向铺设,保证其连续性,不出现断裂、弯扭折皱、松弛,又要避免过量拉伸。

以上传统处理技术的核心是防止沿路的纵向开裂,其主要问题是:开挖土方量巨大,费用较高、工期较长,工后沉降稳定慢。

1.2.4.3 国外高速公路改扩建加宽研究现状

国外改扩建高速公路主要有日本名神(名古屋—神户)高速公路,伦敦的 Stansted 机场的铁路连接线加宽工程,美国印第安纳州(Indiana)的高速公路、田纳西州(Tennessee) 75 号和 153 号州际公路的交接段、434 号州际公路从 Ashby 到 Avenues 大学段,巴西圣保罗北部的公路拓宽工程,德国开姆尼茨—德累斯顿的 A4 号联邦高速公路,荷兰的鹿特丹(Rotterdam)—安特卫普(Antwerp)的 A16 号高速公路、鹿特丹(Rotterdam)—乌得勒支(Utrecht)的 A2 号高速公路等等。对高速公路拓宽的工程病害和新老路基的结合技术,国外曾作过一些理论分析和试验研究^[59~61]。日本和挪威主要针对的是软土地基上的新老路基拼接,美国、印度等主要涉及山区公路的路基拓宽问题。国外对于软土地基上高速公路加宽工程的理论研究尽管起步较早,但大多建立在离心模型试验和有限元模拟分析的基础之上,主要开展了以下几方面的研究:

1) 填筑工艺的研究

高速公路一般都采用普通的水平填筑工艺,在原有道路的单侧或双侧进行扩建加宽