

# 新型路堤填筑技术

黄金荣 黄 健 徐永福 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

# 新型路堤填筑技术

*Xinxing Ludi Tianzhu Jishu*

黄金荣 黄 健 徐永福 编著

路堤填筑是公路建设的重要组成部分,几乎所有的公路建设过程中都遇到了路堤填料不符合设计要求的难题。路堤填料主要有富含有机物的土(淤泥、工业泥炭等)、高液限膨胀性土(膨胀土、红粘土)、低液限膨胀性土(黄土、粉土)、岩渣(山皮土、建筑垃圾、老路路面和原基层废弃料)。在公路建设的初期阶段,对不符合设计要求的填料常常采取弃之不用方法,造成大量弃土。随着公路建设的发展,人们发现对过去废弃的废料经过适当的改良,可以满足路堤填筑的要求。本书总结了作者多年从事路堤填筑工程实践和研究的成果,对过去废弃填料的利用进行了系统的论述。

改革开放以来,全国的公路建设取得了长足的进步。到2000年底,全国公路通车总里程达到160万公里,其中高速公路总里程达到3500 km,二级以上的普通干线公路总里程将达到8780 km,公路建设将进入新阶段。江苏省公路建设过程积累了丰富的经验,本书是在江苏省公路建设过程中,经过大量的科研、试验、推广、总结成果编写而成。

本书共分七章,第1章为绪论,为以后各章的论述提供背景知识。

第2章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

第3章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

第4章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

第5章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

第6章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

第7章为路堤填筑工程概述,主要介绍路堤填筑工程的特点、分类、填料的来源、填料的物理力学性质、填料的改良方法、在分析已有路堤填筑工程的基础上,提出路堤填筑遇到难题时,应采取的措施。

上海交通大学出版社

0416.1

11845

## 内 容 简 介

本书共分七章,阐述了常规路堤的填筑技术,提出了路堤填筑的关键难题;详细分析了土工编织袋力学特性及其填筑路堤的方法,综述了轻质路堤的特性和填筑方法;介绍了宕渣路堤的特性、宕渣的性质、碾压技术和检测方法;分析了固化淤泥的基本性质,论述了固化淤泥的路用性能、处理措施等;系统总结了膨胀土、黄土、红粘土和粉土的特殊性质、处理措施等。本书对拓宽路堤、道路改扩建中的稳定性、地基应力、加筋路堤等的模型建立、计算方法作了详细介绍。

本书可作为道路建设、路用材料研究、路堤填筑施工等科研人员及工程技术人员的实用参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型路堤填筑技术/黄金荣,黄健,徐永福编著. —上海:上海交通大学出版社,2010

ISBN 978-7-313-06276-5

I. ①新… II. ①黄…②黄…③徐… III. ①路堤—填筑 IV. ①U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 026653 号

## 新型路堤填筑技术

黄金荣 黄健 徐永福 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 16 字数: 376 千字

2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~3030

ISBN 978-7-313-06276-5/U 定价: 46.00 元

版权所有 侵权必究

路堤填筑是公路建设的重要组成部分,几乎所有的公路建设过程中都遇到了路堤填料不符合设计要求的难题。常常遇到的不符合设计要求的路堤填料主要有富含有机物的土(淤泥、工业泥浆等)、高液限胀缩性土(膨胀土、红粘土)、低液限湿陷性土(黄土、粉土)、宕渣(山皮土、建筑垃圾、老路路面和底基层废弃料)。在公路建设的初期阶段,对不符合设计要求的填料常常采取弃之不用的方法,随着对路堤填料性质的深入研究,发现对过去舍弃的废料经过适当的改良,可以满足路堤填筑要求。不可再生的土地资源弥足珍贵,对过去废弃填料的利用符合公路建设的节约、环保和可持续发展的理念。

改革开放以来,全国的公路建设取得了长足的进步。就目前笔者所了解的江苏省的高速公路,通车总里程居全国第二,密度居全国第一,到2009年高速公路通车总里程将达到3500 km,二级以上的普通干线公路总里程将达到8780 km,公路建设将迈上新的台阶。江苏省公路建设过程中一直注重科技创新和经验积累,针对所遇到的特殊填料都遵循着科研、试验、推广、总结的原则。本书正是基于已有的研究报告,总结国内外研究成果编写而成。

本书共分七章,第1章对常规路堤填筑技术进行总结,提出路堤填筑遇到难题的关键所在,为以后各章的论述提供着力点。第2章以扬溧高速公路溧阳段沟塘填筑为背景,详细分析土工编织袋的力学特性及其路堤填筑方法,从单个土工编织袋的力学特性到土工编织袋路堤的整体特性进行详细分析,介绍土工编织袋在路基沟塘填筑和膨胀土路堑边坡护坡中的应用。第3章综述了轻质路堤的特性和填筑方法,在分析已有轻质路堤的基础上,对轻质材料提出合理的分类,综述已有的研究成果,总结轻质路堤的普适性质和成熟的填筑方法。第4章详细介绍了宕渣路堤的特性和填筑方法,以宁靖盐高速公路盐城北和S231省道为工程背景,对宕渣的基本性质、宕渣填筑碾压技术和宕渣碾压质量的检测方法进行系统论述。第5章以S231省道为工程依托,分析沿线淤泥的基本性质,系统地论述了固化淤泥的路用性能、处理措施、填筑碾压技术和检测方法。第6章系统总结了膨胀土、黄土、红粘土和粉土的特殊性质,介绍特殊土性的处理措施和路堤填筑方法。第7

章介绍了拓宽路堤基本特性。道路改扩建将会在以后公路建设中经常遇到,作为一种新兴的路堤填筑形式,对拓宽路堤特性的研究显得十分必要。本书采用 FLAC 程序分析了不同处理措施对拓宽路堤差异沉降的影响。书中对以上领域内的相关难题作了深入分析,提出了合理的解决方法,对今后公路建设中路堤填筑具有重要的指导意义。本书不是泛泛的工程实例的介绍,而是对技术措施作了深入浅出的分析,学术价值十分突出。

在本书相关内容的研究过程中,得到了江苏省交通厅科技处、江苏省高速公路建设指挥部、泰州市公路管理处、江苏省交通规划设计院有限公司、常州市高速公路建设指挥部和盐城市高速公路建设指挥部的直接帮助和支持,在此深表谢意!

在本书相关内容的编写过程中,得到了邵介贤、周伯明、贾鹏、郑洲、顾小安、董毅、周忠、秦长国、周兴顺、吴新、梁农玲、周进华、姚庆军、成晟、陈宝、宋春雨、车爱兰、黄鑫、陈巨兵等所给予的帮助和支持,在此一并致以诚挚的谢意! 书中部分内容取自佟丽欣、白玉恒、张磊和潘洋的硕士学位论文,另外,陈寅奕、金鑫、李锐、王驰、许杰等参与了书中部分内容的研究,感谢他们的辛勤劳动。

上海大学孙德安教授、江苏省交通规划设计院有限公司李浩高工审阅全部书稿,在此表示衷心的感谢!

为了保持研究内容的完整性,书中引用许多学者的研究成果,对书中所引用成果的作者致以深深的敬意! 编著者尽全力将能够检索到的文献作了明确的引用注释,个别成果没有能够标注原始成果的出处,请谅解。

由于笔者才疏学浅,书中不当之处恳请读者不吝赐教!

作者

2010 年 2 月

前言

|          |                          |           |
|----------|--------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>路堤填筑</b> .....        | <b>1</b>  |
| 1.1      | 路堤设计 .....               | 1         |
| 1.1.1    | 路基结构 .....               | 1         |
| 1.1.2    | 路堤填料 .....               | 1         |
| 1.1.3    | 路堤高度 .....               | 3         |
| 1.2      | 路堤施工 .....               | 8         |
| 1.2.1    | 基底处理 .....               | 8         |
| 1.2.2    | 路堤填筑 .....               | 8         |
| 1.2.3    | 路堤碾压 .....               | 9         |
| 1.3      | 路堤质量控制指标 .....           | 14        |
| 1.3.1    | 压实度 .....                | 14        |
| 1.3.2    | 弯沉 .....                 | 16        |
| 1.3.3    | CBR 值 .....              | 16        |
| 1.4      | 路堤填筑新技术 .....            | 17        |
|          | 参考文献 .....               | 17        |
| <b>2</b> | <b>土工编织袋路堤填筑技术</b> ..... | <b>18</b> |
| 2.1      | 概述 .....                 | 18        |
| 2.1.1    | 土工编织袋的应用 .....           | 18        |
| 2.1.2    | 土工编织袋的特点 .....           | 20        |
| 2.2      | 编织袋的性能 .....             | 21        |
| 2.2.1    | 编织袋的成分 .....             | 21        |
| 2.2.2    | 编织袋的物理指标 .....           | 22        |
| 2.2.3    | 抗拉强度和伸长率 .....           | 23        |

|       |                  |    |
|-------|------------------|----|
| 2.2.4 | 土工编织袋界面摩擦系数      | 24 |
| 2.2.5 | 耐久性能             | 25 |
| 2.3   | 土工编织袋的性能(单体分析)   | 26 |
| 2.3.1 | 土工编织袋的一轴压缩试验     | 26 |
| 2.3.2 | 土工编织袋的加筋作用分析     | 27 |
| 2.3.3 | 土工编织袋的强度         | 29 |
| 2.3.4 | 土工编织袋的变形         | 34 |
| 2.3.5 | 土工编织袋的应力-应变关系    | 36 |
| 2.4   | 土工编织袋地基的性能(整体分析) | 38 |
| 2.4.1 | 土工编织袋之间的摩擦角      | 38 |
| 2.4.2 | 土工编织袋整体强度        | 42 |
| 2.4.3 | 土工编织袋边坡的稳定性      | 43 |
| 2.4.4 | 土工编织袋的地基承载力      | 46 |
| 2.4.5 | 土工编织袋地基沉降        | 51 |
| 2.5   | 土工编织袋地基沉降的数值分析   | 52 |
| 2.5.1 | 模拟工况             | 52 |
| 2.5.2 | 模拟结果             | 53 |
| 2.6   | 土工编织袋填筑沟塘        | 54 |
| 2.6.1 | 设计方法             | 54 |
| 2.6.2 | 施工工艺             | 55 |
| 2.6.3 | 检测与测试            | 58 |
| 2.7   | 膨胀土路堑边坡维护        | 59 |
| 2.8   | 经济分析             | 61 |
| 2.8.1 | 沟塘填筑             | 61 |
| 2.8.2 | 护坡绿化             | 62 |
| 2.9   | 环境评价             | 63 |
| 2.9.1 | 资源节省             | 63 |
| 2.9.2 | 生态恢复             | 63 |
| 2.9.3 | 污染控制             | 64 |
| 2.10  | 土工编织袋减振          | 64 |
|       | 参考文献             | 68 |

|          |                 |           |
|----------|-----------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>轻质路堤填筑技术</b> | <b>70</b> |
| 3.1      | 轻质材料的分类和应用      | 70        |
| 3.2      | 粉煤灰路堤           | 72        |
| 3.2.1    | 粉煤灰的基本性质        | 73        |
| 3.2.2    | 粉煤灰的路用性能        | 76        |
| 3.2.3    | 粉煤灰路堤设计         | 82        |

|       |                                              |     |
|-------|----------------------------------------------|-----|
| 3.2.4 | 粉煤灰路堤施工工艺 .....                              | 84  |
| 3.3   | EPS 路堤 .....                                 | 86  |
| 3.3.1 | EPS 的力学性质 .....                              | 87  |
| 3.3.2 | EPS 路堤设计 .....                               | 92  |
| 3.3.3 | EPS 路堤施工技术 .....                             | 94  |
| 3.3.4 | EPS 轻质路堤适用性 .....                            | 96  |
| 3.4   | 气泡混合轻质土 .....                                | 97  |
| 3.4.1 | 气泡混合轻质土制作 .....                              | 98  |
| 3.4.2 | 气泡混合轻质土的基本性质 .....                           | 99  |
| 3.4.3 | 气泡混合轻质土路堤填筑工艺 .....                          | 103 |
| 3.5   | 稳定轻质混合土(Stabilized Light Soil, 简称 SLS) ..... | 105 |
| 3.5.1 | 稳定轻质混合土的路用性能 .....                           | 105 |
| 3.5.2 | 稳定轻质混合土路堤填筑工艺 .....                          | 107 |
|       | 参考文献 .....                                   | 108 |
| 4     | 宕渣路堤填筑技术 .....                               | 110 |
| 4.1   | 概述 .....                                     | 110 |
| 4.1.1 | 宕渣的成分 .....                                  | 110 |
| 4.1.2 | 宕渣再利用 .....                                  | 112 |
| 4.1.3 | 宕渣路堤填筑 .....                                 | 113 |
| 4.1.4 | 宕渣填筑路堤的意义 .....                              | 114 |
| 4.2   | 宕渣路堤施工 .....                                 | 115 |
| 4.2.1 | 宕渣路堤填料要求 .....                               | 115 |
| 4.2.2 | 宕渣碾压机械的选择 .....                              | 116 |
| 4.2.3 | 摊铺层厚度和碾压遍数 .....                             | 118 |
| 4.2.4 | 宕渣路堤填筑过程 .....                               | 118 |
| 4.2.5 | 宕渣路堤碾压沉降 .....                               | 120 |
| 4.2.6 | 宕渣碾压破碎 .....                                 | 121 |
| 4.3   | 宕渣路堤碾压过程的数值模拟 .....                          | 122 |
| 4.3.1 | 离散单元法 .....                                  | 122 |
| 4.3.2 | 数值模型 .....                                   | 125 |
| 4.3.3 | 模拟工况 .....                                   | 125 |
| 4.3.4 | 模拟结果 .....                                   | 125 |
| 4.4   | 宕渣路堤压实质量检测 .....                             | 132 |
| 4.4.1 | 宕渣压实质量的衡量指标 .....                            | 133 |
| 4.4.2 | 宕渣压实的影响因素 .....                              | 139 |
| 4.4.3 | 宕渣最大干密度的确定 .....                             | 140 |

|       |          |     |
|-------|----------|-----|
| 4.5   | 宕渣路堤压实性状 | 145 |
| 4.5.1 | 压实度      | 145 |
| 4.5.2 | CBR 值    | 146 |
| 4.5.3 | 弯沉       | 147 |
| 4.5.4 | 碾压性状分析   | 148 |
| 4.6   | 宕渣的力学性质  | 149 |
| 4.6.1 | 宕渣的强度机理  | 149 |
| 4.6.2 | 宕渣的三轴试验  | 149 |
| 4.7   | 宕渣的湿化变形  | 152 |
| 4.7.1 | 湿化变形试验   | 152 |
| 4.7.2 | 湿化变形计算   | 153 |
|       | 参考文献     | 155 |

|       |              |     |
|-------|--------------|-----|
| 5     | 固化淤泥路堤填筑技术   | 157 |
| 5.1   | 概述           | 157 |
| 5.1.1 | 淤泥资源化措施      | 157 |
| 5.1.2 | 固化处理研究现状     | 158 |
| 5.2   | 淤泥固化机理       | 159 |
| 5.2.1 | 无机固化剂的成分     | 159 |
| 5.2.2 | 淤泥固化机理       | 160 |
| 5.3   | 水泥固化淤泥的性能    | 166 |
| 5.3.1 | 强度特性         | 166 |
| 5.3.2 | 收缩性          | 169 |
| 5.4   | 粉煤灰固化淤泥的性能   | 171 |
| 5.4.1 | 路用性能         | 171 |
| 5.4.2 | 强度和变形特性      | 176 |
| 5.5   | 固化淤泥路堤填筑施工工艺 | 184 |
| 5.5.1 | 试验路段概况       | 184 |
| 5.5.2 | 电渗降水         | 184 |
| 5.5.3 | 现场路堤填筑       | 186 |
|       | 参考文献         | 188 |

|       |              |     |
|-------|--------------|-----|
| 6     | 特殊土路堤填筑技术    | 190 |
| 6.1   | 填土的 SPC 分类体系 | 190 |
| 6.1.1 | 无粘性土         | 191 |
| 6.1.2 | 粘性土          | 191 |
| 6.2   | 膨胀土          | 193 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 6.2.1 | 膨胀土的基本特性       | 193 |
| 6.2.2 | 膨胀土的胀缩机理       | 194 |
| 6.2.3 | 膨胀土的改良         | 195 |
| 6.2.4 | 石灰改良膨胀土        | 197 |
| 6.3   | 黄土             | 203 |
| 6.3.1 | 黄土的基本性质        | 203 |
| 6.3.2 | 石灰改良黄土分析       | 205 |
| 6.3.3 | 黄土路堤填筑施工工艺     | 207 |
| 6.4   | 红粘土            | 208 |
| 6.4.1 | 红粘土的定义和分类      | 208 |
| 6.4.2 | 红粘土的路用性能       | 211 |
| 6.4.3 | 红粘土路堤填筑设计和施工工艺 | 212 |
| 6.5   | 粉土             | 214 |
| 6.5.1 | 粉土路堤的不足        | 214 |
| 6.5.2 | 粉土路堤填筑施工工艺     | 215 |
|       | 参考文献           | 217 |

|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 7     | 拓宽路堤          | 219 |
| 7.1   | 概述            | 219 |
| 7.1.1 | 路基拓宽形式        | 220 |
| 7.1.2 | 软土路基拓宽的工程措施   | 221 |
| 7.1.3 | 软土路基拓宽的关键技术   | 222 |
| 7.2   | 拓宽路堤稳定性分析     | 223 |
| 7.2.1 | 计算方法          | 223 |
| 7.2.2 | 计算模型          | 225 |
| 7.2.3 | 结果分析          | 226 |
| 7.3   | 拓宽路堤引起的地基应力   | 228 |
| 7.4   | 拓宽路堤对老路堤的影响分析 | 230 |
| 7.4.1 | 计算模型          | 230 |
| 7.4.2 | 计算结果          | 232 |
| 7.5   | 加筋路堤分析        | 235 |
| 7.5.1 | 计算模型          | 236 |
| 7.5.2 | 计算分析          | 237 |
| 7.6   | 桩承式加筋路堤分析     | 241 |
| 7.6.1 | 计算模型          | 241 |
| 7.6.2 | 计算结果          | 241 |
|       | 参考文献          | 246 |

### 1.1 路堤设计

#### 1.1.1 路基结构

公路的主要组成部分是路面和路基,路基是路面的基础,是在原地面上开挖或填筑压实而成的。根据路基横断面形式分为填筑路基、开挖路基和半填半挖路基。填筑路基结构组成的横断面图如图 1-1 所示,填筑路基的结构组成主要由原地基、路堤和路床组成,此处主要讨论填筑路基的路堤填筑技术。一般情况下,路堤填筑是采用满足一定技术要求的粘性土填筑。随着公路建设飞速发展,路堤填筑材料发生很大变化,如土工合成材料、轻质材料、宕渣和不满足路堤填筑要求的特殊土,这些特殊材料填筑路堤反映了路堤填筑技术的发展,将由不符合已有规范要求的特殊材料经改良处理后填筑路堤的技术称为新型路堤填筑技术。

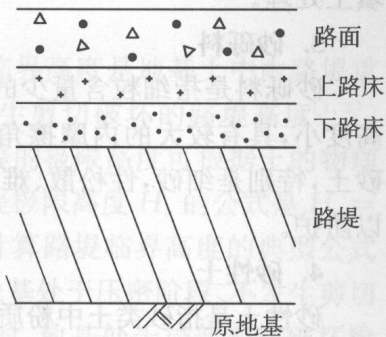


图 1-1 填筑路基结构组成横断面示意图

#### 1.1.2 路堤填料

路堤填料采用强度高、水稳性好、压缩性小、施工简便和运距短的岩石、土料。路堤填料选择主要遵循两个原则:①填料的适宜性,路堤填料要满足路堤性能要求,如能达到指定的压实度、满足水稳性和耐久性等;②填料的经济性,从填料的经济性出发,尽量利用附近路堑的挖方作为填料,在沿线荒山、高地、劣田中取土。路堤填料的强度和粒径等技术要求列于表 1-1 中。

表 1-1 路堤填料的技术要求

| 填筑位置 | 路面底以下深度/cm | CBR/%   |      |        | 最大粒径/cm |
|------|------------|---------|------|--------|---------|
|      |            | 高速、一级公路 | 二级公路 | 三、四级公路 |         |
| 上路床  | 0~30       | 8       | 6    | 5      | 10      |
| 下路床  | 30~80      | 5       | 4    | 3      | 10      |
| 上路堤  | 80~150     | 4       | 3    | 3      | 15      |
| 下路堤  | 150 以下     | 3       | 2    | 2      | 15      |

路堤填料的主要类型有:

### 1. 碎石

碎石具有强度高、稳定性和透水性好、使用场合和施工季节不受限制等优点。但填筑路堤时,石块间要嵌锁密实,以免石块松动、移位引起路面产生不均匀沉陷,导致路面破坏。填石路堤的碎石强度不应小于 15 MPa,最大粒径不宜超过层厚的  $2/3$ ,保证路堤均匀压实。在路床顶面以下一定深度范围内,应采用符合路床要求的土填筑和压实,填料最大粒径不得大于 15 cm,以提高路床顶面平整度。

### 2. 土石混合料

土石混合料的力学性质受碎石粒径、碎石和土含量的影响。碎石含量高的土石混合料的透水性强、压缩性低、内摩擦角大和水稳性好。含土(粉土、粘土)量多的土石混合料比较松散,遇水易造成边坡坍塌。土石混合料路堤填筑时,碎石块体不得过分集中,对粒径超过压实层厚的软质岩(强度小于 15 MPa)的石块要粉碎,并分层压实。土石混合填料中的碎石含量超过 70% 时,按填石处理;碎石含量低于 50% 的土石混合按填土处理。

### 3. 砂砾料

砂砾料是指细粒含量少的粗粒土,砂砾料可塑性小、透水性好、水稳性好,毛细上升高度小,具有较大的内摩擦角。级配良好的砾类土的密实度好、强度高,属优质填料。砂土,特别是细砂,性松散、难压实,抗流水冲刷和风蚀能力差,填筑路堤时要对坡面予以防护。

### 4. 砂性土

砂性土是指砂类土中粉质砂,颗粒组成级配较好,易于压实,内摩擦角大,有一定的粘结性,遇水干得快、不膨胀;干时扬尘少,属良好的路堤填料。

### 5. 粉性土

粉性土包括粉质土、粉土和低液限( $w_L < 50\%$ )粘土。粉粒含量多,毛细现象严重,干时易被风蚀,浸水后很快被湿透,在季节性冰冻地区常引起冻胀和翻浆,饱和粉质土存在振动液化问题。粉性土,特别是粉土,是稳定性差的填料,应掺加固化材料,并加强排水和采取隔离措施。

### 6. 粘性土

粘性土是指粘土(不含低液限粘土)和粘土质砂。粘性土具有较大的可塑性和粘结性,毛细现象显著,但透水性差,干湿循环因胀缩引起的体积变化大。干燥时,坚硬不易挖掘;浸水后,能长时间保持水分,强度下降明显。过干或过湿粘性土都不便施工,只有在最优含水量附近充分压实的路堤才有良好的稳定性。

高液限粘土(液限大于 50%、塑性指数大于 26)几乎不透水,粘结力强,膨胀性和塑性强,工程性质受粘土矿物成分影响大,浸水后承载力小,不宜作为路基填料。如确实需要用于路堤填筑,应适当掺加固化剂加以拌和压实。

### 7. 特殊土

特殊土包括膨胀土、黄土、有机质土(泥炭、腐殖土等)和含易溶盐的土(盐渍土、石膏土等)。路堤填筑中,特殊土应限制使用,使用时须采取适当措施进行改性处理。

## 8. 易风化的软质岩

易风化的软质岩主要是指粘土岩、泥质砂(页)岩、云母片岩等。软质岩浸水后,易崩解,强度显著降低,变形量大,一般不宜用作路堤填料。

## 9. 渣土

渣土包括粉煤灰、冶金矿渣、建筑渣土等工业废渣,可作路堤填料,但要避免有害物质含量超标污染环境。粉煤灰与砂土的工程性质相似,粘结力小,易于流失,路堤两侧 1~2 m 采用粘质土填筑包边和护坡,路床顶面采用厚 0.3~0.5 m 粗粒土封闭。

### 1.1.3 路堤高度

路基是路面的基础,承受自身重量和路面重量,以及由路面传递的行车荷载。路堤边坡、高度和宽度是路基设计三要素。路基宽度取决于公路技术等级;路基边坡坡度取决于地质、水文条件,根据边坡稳定性和横断面经济性等因素比较选定;路基高度主要取决于地形和纵坡设计。地形平坦且不受洪水影响的路段应多采用低路堤,减少工程量和占用土地,最大限度地保护自然环境。地形复杂的路段应充分结合平面设计,采用尽可能大的纵坡率,尽量减小填挖方高度。

这里重点讨论天然软土地基上的路堤临界高度。路堤临界高度是地基土中由路堤重量引起的剪应力达到土的不排水抗剪强度、地基土开始产生剪切破坏的路堤高度<sup>[1, 2]</sup>。《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)<sup>[3]</sup>指出软土地区路堤的极限高度可根据土的物理力学性质进行估算。Fenenius 给出均质厚层软土地基的路堤极限高度  $H_c$  的公式是  $H_c = 5.52c_u/\gamma$ ,  $c_u$  是软土的不排水强度,  $\gamma$  是路堤填土的容重。计算路堤临界高度的典型公式列于表 1-2 中。巴布科夫公式是在路堤达到临界高度时,地基处于压密阶段、不发生剪切破坏基础上导出的。Fenenius 公式是指路堤达到临界高度时,地基处于局部剪切破坏阶段的后期,单位面积上的路堤压力已达到天然地基的极限承载力。王宗生和张海涛公式<sup>[4]</sup>是假设在路堤中心线下  $B/2$  处剪应力达到最大值。以上临界高度的确定方法中均未考虑在路堤荷载作用下地基土固结引起强度增长的影响。

表 1-2 软基路堤的极限高度

| 临界高度公式                                 | 出处                                | 符号说明                                                         |
|----------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $H_c = 3 \frac{c_u}{\gamma}$           | 巴布科夫                              | $c_u$ 是软土的不排水强度, $\gamma$ 是路堤填土的容重                           |
| $H_c = 5.52 \frac{c_u}{\gamma}$        | Fenenius                          |                                                              |
| $H_c = \frac{p_c - p'}{\gamma I(1-B)}$ | Leroueil 和 Tavenas <sup>[2]</sup> | $p_c$ 是先期固结压力, $p'$ 是有效上覆压力, $I$ 是附加应力影响系数, $B$ 是临界高度前孔压增加系数 |
| $H_c = 3.93 \frac{c_u}{\gamma}$        | 王宗生和张海涛 <sup>[3]</sup>            |                                                              |

(续表)

| 临界高度公式                                                                                                    | 出处        | 符号说明            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|
| $H_c = 3.14 \frac{c_u}{\gamma}$                                                                           | 本章式(1-4)  | 路堤中心线下地基剪切破坏    |
| $H_c = \frac{\pi c}{\gamma} \cdot \frac{\cos \varphi'}{\cos \varphi' - (\pi/2 - \varphi') \sin \varphi'}$ | 本章式(1-10) | 最大剪应力处破坏        |
| $H_c = 3.14 \frac{c_u [1 + (2A_f - 1)] \sin \varphi'}{\gamma \Pi}$                                        | 本章式(1-14) | 不排水情况下,最大剪应力处破坏 |

软土地基上路堤临界高度是指在天然软土地基保持稳定不破坏的路堤极限高度。根据圣维南原理,梯形断面的路堤可以简化为等高度、等截面面积的矩形断面的均布荷载, Boussinesq<sup>[5]</sup>给出条形均布荷载作用下,地基任一点  $M$  处的主应力,即

$$\begin{aligned} \sigma_{10} &= \frac{p}{\pi} (\beta_0 \pm \sin \beta_0) \\ \sigma_{30} & \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中,  $p$  是路堤土的自重应力,  $p = \gamma H$ ,  $\gamma$  和  $H$  分别是路堤填土容重和高度,  $\beta_0$  是均布荷载两侧与地基下  $M$  点连线的夹角,如图 1-2 所示。路堤中心线下地基中的剪应力,

$$\tau = \frac{2\gamma H}{\pi} \sin \beta_0 \quad (1-2)$$

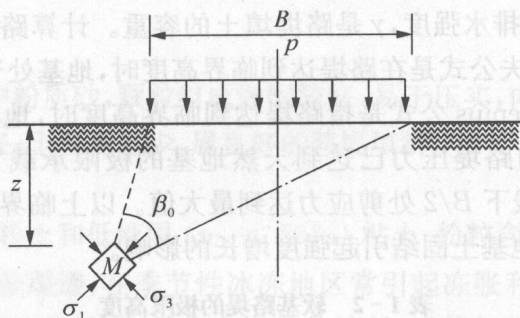


图 1-2 路堤下地基附加应力计算图

在路堤中线下,  $\sin(2\beta_0) = 2(z/B)/[(z/B)^2 + 1]$ 。令  $\alpha = 2(z/B)/\{\pi[(z/B)^2 + 1]\}$ ,  $z$  和  $B$  分别是地基深度和路堤宽度。在不排水的情况下,地基剪切破坏的条件是  $\tau = c_u$ 。天然软土地基上路堤的临界高度表示为

$$H_c = \frac{c_u}{\alpha \gamma} \quad (1-3)$$

天然软土路基上路堤中心线下剪应力随深度变化规律如图 1-3 所示。地基中的剪应力并不是简单地随深度增加而减小,在地基浅层,地基剪应力随深度增加而增加,在深度  $z = B$  处,剪应力达到最大值;在深度  $z = B$  之后,剪应力随深度增加而减小。在深度  $z = B$  处的剪应力最大,软土最容易破坏,路堤临界高度在深度  $z = B$  处最小,如图 1-4 所示。路堤中心下软土处于临界剪切破坏所对应的最大填土高度为:

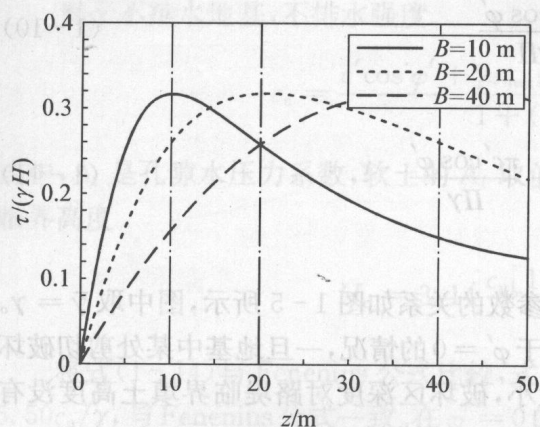


图 1-3 路堤中心线下剪应力随深度变化

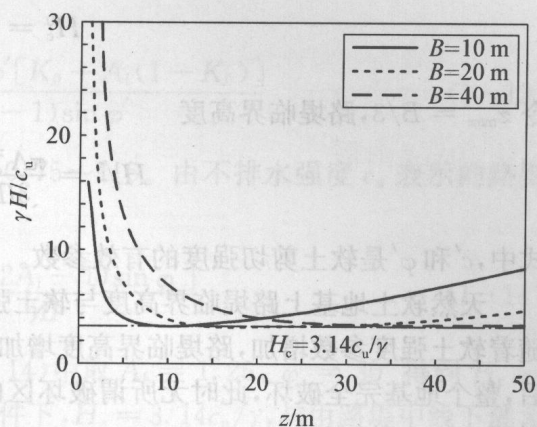


图 1-4 路堤中心下软基剪切破坏对应的路堤临界高度

$$H_c = 3.14 \frac{c_u}{\gamma} \quad (1-4)$$

式(1-4)给出的路堤临界高度与王宗生和张海涛公式<sup>[4]</sup>不同,原因是地基中最大剪应力不出现在路堤中心线下深  $B/2$  处,而是出现在地面以下  $B$  深处。

均布荷载作用下,地基中的剪应力最大值一般出现在路堤两侧坡脚处。地基中任意一点  $M$  的应力应该是路堤荷载引起的应力和土体自重应力之和,由式(1-1)得到

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{p}{\pi} (\beta_0 \pm \sin \beta_0) + \frac{z \bar{\gamma}}{K_0 z \bar{\gamma}} \quad (1-5)$$

式中,  $\bar{\gamma}$  是地基中  $M$  处土的等效容重,  $K_0$  是静止土压力系数,  $K_0 \approx 1 - \sin \varphi'$ 。Mohr-Coulomb 破坏准则为:

$$\sin \varphi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2c' \cot \varphi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3)} \quad (1-6)$$

将式(1-5)代入式(1-6)得到

$$z = \frac{p(\sin \beta_0 - \beta_0 \sin \varphi')}{\pi \bar{\gamma} \Lambda} - \frac{c' \cos \varphi'}{\bar{\gamma} \Lambda} \quad (1-7)$$

式中,  $\Lambda = (1 + K_0) \sin \varphi' - (1 - K_0)$ 。根据  $dz/d\beta_0 = 0$ , 即  $\beta_0 = \pi/2 - \varphi'$ , 剪切破坏区的最大深度

$$z_{\max} = \frac{p\Pi}{\pi \bar{\gamma} \Lambda} - \frac{c' \cos \varphi'}{\bar{\gamma} \Lambda} \quad (1-8)$$

式中,  $\Pi = \cos \varphi' - (\pi/2 - \varphi') \sin \varphi'$ 。由  $p = H_c \gamma$  得到

$$H_c = \frac{\pi \Lambda \bar{\gamma} z_{\max}}{\Pi \gamma} + \frac{\pi c' \cos \varphi'}{\Pi \gamma} \quad (1-9)$$

令  $z_{\max} = 0$ , 路基处于临塑状态时路堤临界高度

$$H_c^0 = \frac{\pi c' \cos \varphi'}{\gamma \Pi} \quad (1-10)$$

令  $z_{\max} = B/3$ , 路堤临界高度

$$H_c^{1/3} = \frac{\pi \Lambda \bar{\gamma} B}{3 \Pi \gamma} + \frac{\pi c' \cos \varphi'}{\Pi \gamma} \quad (1-11)$$

式中,  $c'$  和  $\varphi'$  是软土剪切强度的有效参数。

天然软土地基上路堤临界高度与软土强度参数的关系如图 1-5 所示, 图中取  $\bar{\gamma} = \gamma$ 。随着软土强度参数增加, 路堤临界高度增加。对于  $\varphi' = 0$  的情况, 一旦地基中某处剪切破坏后, 整个地基完全破坏, 此时无所谓破坏区的大小, 破坏区深度对路堤临界填土高度没有影响。

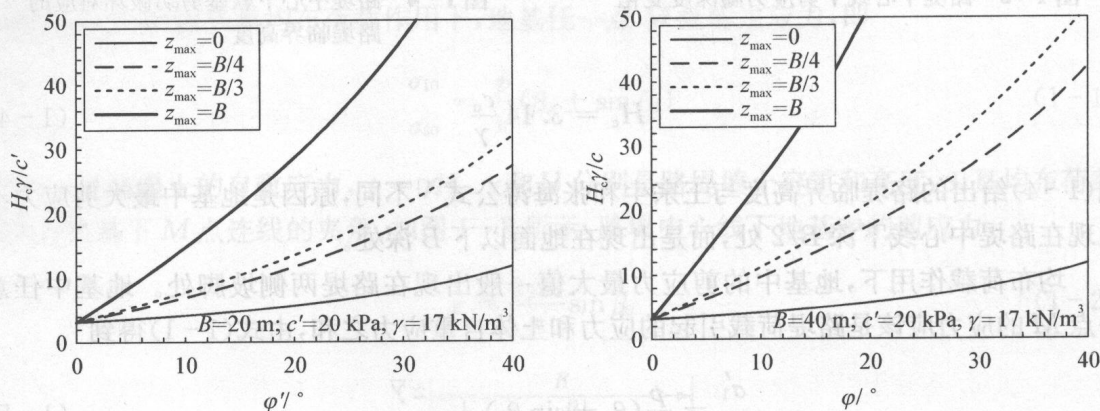


图 1-5 地基中最大剪应力对应的路堤临界高度

硬壳层对路堤临界高度的影响表现为应力扩散作用。考虑到硬壳层的应力扩散作用, 天然软土路基的路堤临界高度为:

$$H_c = \left( \frac{\pi \Lambda z_{\max}}{\Pi} + \frac{2 \pi c' \cos \varphi'}{\gamma \Pi} \right) \cdot \frac{B + 2h \tan \theta}{B} \quad (1-12)$$

式中,  $h$  是硬壳层的厚度。路堤临界高度随硬壳层厚度变化如图 1-6 所示, 随着硬壳层厚度增加, 路堤临界高度呈线性增加。

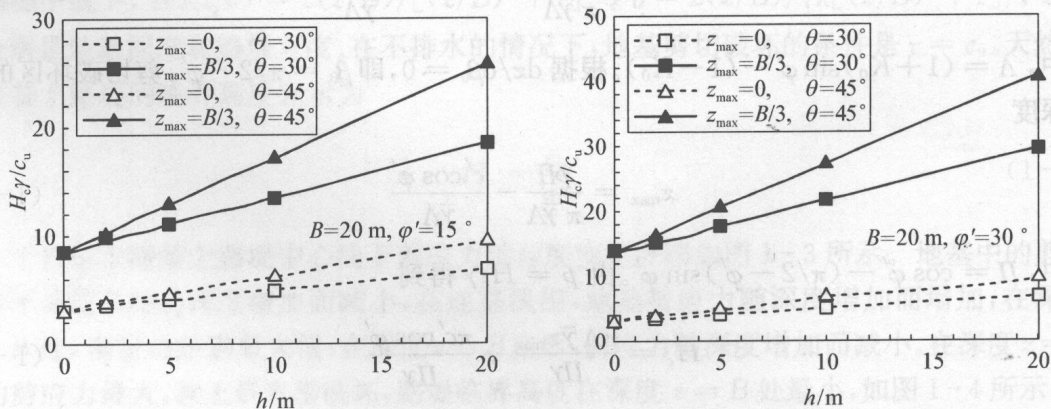


图 1-6 硬壳层厚度对路堤临界高度的影响

对于不排水地基,不排水强度

$$c_u = \frac{c' \cos \varphi' + \bar{\gamma} z_{\max} \sin \varphi' [K_0 + A_f(1 - K_0)]}{1 + (2A_f - 1) \sin \varphi'} \quad (1-13)$$

式中,  $A_f$  是孔隙水压力系数, 软土的  $A_f$  取值为 0.75~1.5。由不排水强度  $c_u$  表示的路堤临界高度

$$H_c = 3.14 \frac{c_u [1 + (2A_f - 1) \sin \varphi']}{\gamma \Pi} \quad (1-14)$$

将式(1-14)与 Fenenius 公式比较, 式(1-14)中取  $A_f = 1.25$ ,  $\varphi' = 30^\circ$  得到  $H_c = 5.50c_u/\gamma$ , 与 Fenenius 公式一致。在  $\varphi' = 0$  的条件下,  $H_c = 3.14c_u/\gamma$ , 与由路堤中线下最大剪应力确定的临界填土高度一致, 与巴布科公式和王宗生和张海涛公式接近。由此看出, 式(1-14)在特殊的条件下能回归到常用的路堤临界高度公式, 表明式(1-14)是路堤临界高度公式普适形式, 式中包含了孔隙水压力系数, 反映了软土固结特性对临界高度的影响。

以某客运专线路堤滑塌为例, 验算路堤临界高度公式。某客运专线路基填筑 13 层, 填筑高度达 3.9 m, 发生滑塌, 滑塌从路基中心开始, 右半幅向路线外整体滑移坍塌, 在路基填筑范围内形成两级沉陷, 施工便道附近稻田隆起。从左向右依次, 第一级下沉量为 0.8 m, 二级与第一级相错量为 1.64 m, 施工便道隆起高度 0.74 m, 路基右半幅出现 3 cm 左右的斜线裂缝。自上而下的地层特征为: ①人工填土: 灰黄、褐黄色, 稍密, 潮湿。②粘土、粉质粘土: 褐黄, 软塑,  $w = 30.80 \sim 39.90\%$ ,  $e = 0.91 \sim 1.15$ ,  $E_{s1-2} = 4.60$  MPa,  $\varphi_u = 4.90^\circ \sim 13.80^\circ$ ,  $c_u = 17.00 \sim 28.00$  kPa。③淤泥: 深灰色, 流塑, 含有机质,  $w = 62.40\% \sim 81.90\%$ ,  $e = 1.73 \sim 2.33$ ,  $E_{s1-2} = 1.16 \sim 1.81$  MPa,  $\varphi_u = 1.50^\circ \sim 2.20^\circ$ ,  $c_u = 4.00 \sim 9.00$  kPa,  $S_t = 1.07 \sim 5.72$ 。④粉质粘土: 灰黄色, 硬塑, 局部软塑,  $w = 25.50\% \sim 28.00\%$ ,  $e = 0.70 \sim 0.80$ ,  $E_{s1-2} = 6.51 \sim 6.76$  MPa,  $\varphi_u = 8.00^\circ \sim 20.40^\circ$ ,  $c_u = 17.40 \sim 50.00$  kPa。⑤风化凝灰岩: 褐黄色。

客运专线地基软土试样后的三轴试验结果为  $c' = 5$  kPa,  $\varphi' = 22^\circ \sim 27^\circ$ ,  $c_u = 10$  kPa。由路堤临界高度公式算出的临界高度随软土有效内摩擦角的关系如图 1-6 中线条所示, 显然, 随着软土有效内摩擦角增加, 路堤临界高度增加。图 1-7 中的空心方点是客运专线滑塌的路堤高度与有效内摩擦角的关系, 路堤临界高度对应的硬壳层厚度在 7.8~9.3 m, 实际的硬壳层厚度在 5 m 左右, 路堤临界高度公式的计算结果比实际情况偏小, 可能是因为没有考虑 CFG 桩处理效果。虽然路堤临界高度公式计算的结果略偏保守, 但与实际情况还是基本符合的。

路基滑塌处地下淤泥层与硬层交界面的倾角根据 CFG 桩的长度和路基宽度粗略地估算, 估算的前提条件假设为: CFG 桩的长度与交界面顶持平。在此假设下估算得到的界面倾角  $2^\circ \sim 7^\circ$ 。路基滑动破坏后的补充勘察资料表明, 界面最大坡度为 15%, 相当于  $8^\circ$ , 可见地下淤泥层与硬层交界面的倾角最大不超过  $8^\circ$ , 计算时取滑动界面倾角为  $5^\circ$ 。沿地下淤泥倾斜面滑动的稳定性安全系数与路堤填土高度得关系如图 1-8 所示。图中表明, 路基稳定性安全系数等于 1 时的路堤最大填土高度为 4.74 m, 安全系数等于 1.25 时的路堤最大填土高度为 2.3 m。所以, 由滑坡稳定性计算得到的填土高度与路堤临界高度公式分析的结果一致。