

Principle of Deep Mixing Method For the
Improvement of the Soft Marine
Clay in Highway Engineering

高速公路海相软土地基 水泥土搅拌桩加固技术

● 钱国超 赵 隼 陈 功 邓永锋 陈加富 刘松玉 等 编著



人民交通出版社

China Communications Press

Principle of Deep Mixing Method for the Improvement
of the Soft Marine Clay in Highway Engineering

高速公路海相软土地基 水泥土搅拌桩加固技术

钱国超 赵 僊 陈 功 等 编著
邓永锋 陈加富 刘松玉

人民交通出版社

内 容 提 要

本书总结了我国主要海相软土的基本工程性质,分析了海相软土地基处理常用方法的优缺点,提出了海相软土地基处理设计流程和原则,针对江苏省海相软土地基处理成熟的预压法和水泥土搅拌桩法,尤其是对水泥土搅拌桩法进行了深入系统的研究,总结了沉降特性,提出了相应的工程实用设计和施工控制方法。

本书可供沿海地区从事公路地基处理的工程技术人员参考使用,也可供大专院校相关专业师生学习借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路海相软土地基水泥土搅拌桩加固技术/钱国

超等编著. —北京:人民交通出版社,2008.5

ISBN 978 - 7 - 114 - 06987 - 1

I .高… II .钱… III .高速公路—海相—软土地基—水
泥土—桩加固 IV .U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 016029 号

书 名: 高速公路海相软土地基水泥土搅拌桩加固技术

著 译 者: 钱国超 赵 侃 陈 功 邓永锋 陈加富 刘松玉

责任编辑: 岑 瑜

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)85285838,85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.25

字 数: 364 千

版 次: 2008 年 5 月第 1 版

印 次: 2008 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 06987 - 1

定 价: 38.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

随着我国经济的快速发展,高速公路等基础设施建设兴起了新的高潮,建设规模和质量迈上了一个新的台阶。根据国家高速公路网规划,到2020年我国将建成由中心城市向外放射以及横连东西、纵贯南北的大通道,由7条首都放射线、9条南北纵向线和18条东西横向线组成的“7918网”,总规模约8.5万公里的高速公路,其中东部沿海地区将建成多条高速公路。

我国东部沿海地区软土分布广泛,特别是分布大量海相软土。海相软土一般具有高含水率、高压缩性、高孔隙比、低强度、低渗透性、高灵敏度、高有机质含量、流变性能显著等特点。因此,海相软土的加固处理是否成功,是保证该区域高速公路建设质量和正常运营的关键技术问题之一。江苏省沿海已经修建了多条高速公路,如连徐高速公路、汾灌高速公路、沿海高速公路等。在这些高速公路建设过程中,江苏省高速公路建设指挥部、连云港市高速公路建设指挥部和东南大学岩土工程研究所,进行了大量的工程实践和科学研究工作,在高速公路海相软土地基加固技术方面取得了可喜的成果,积累了丰富的经验。

沿海高速公路连盐段位于江苏省东部沿海地区,是交通部规划的国家重点干线公路网的一部分,也是江苏省规划的“四纵四横四联”高速公路网中“纵一”的重要组成部分。路线全长约151.5km,其中连云港市境约43km,盐城市境108.5km。设计车速120km/h,双向6车道,路基宽度35m。沿海高速公路连盐段沿线总体属于苏北滨海平原地区,其表层全部为第四系所覆盖。工程地质勘察资料表明,沿线可划分为:灌云—响水海积平原区、滨海废黄河冲海积平原区和盐城—东台冲海积平原区三个工程地质区。线路所经区域绝大部分地势平坦,自西南向东北微向黄海倾斜,地面高程2~5m,线路区域内河流纵横成网,工程地质条件复杂,软土分布广泛且工程性质差,软土地基处理成功与否是该高速公路成败的关键技术之一。本书即以江苏省沿海高速公路连盐段海相软土的地基处理实践为基础,总结已有研究成果编著而成。

书中总结了我国主要海相软土的基本工程性质,分析了海相软土地基处理常用方法的优缺点,提出了海相软土地基处理设计流程和原则,针对江苏省海相软土地基处理成熟的预压法和水泥土搅拌桩法,尤其是水泥土搅拌桩法进行了深入系统的研究,总结了沉降特性,提出了相应的工程实用设计和施工控制方法。

全书由江苏省高速公路建设指挥部、东南大学岩土工程研究所、连云港市高速公路建设指挥部共同编著。具体分工为:第一章由钱国超、赵倂和刘松玉执笔;第二章由陈功和邵光辉执笔;第三章由钱国超、赵倂、陈加富和刘松玉执笔;第四章由邓永锋、岳红宇和洪振舜执笔;第五

章由邓永锋、刘松玉和经绯执笔；第六章由陈加富、岳红宇、朱向阳和邓永锋执笔；第七章由陈加富、邓永锋和蔺宁君执笔。全书由钱国超和刘松玉统稿。

本书编著过程中，江苏省高速公路建设指挥部、连云港市高速公路建设指挥部和东南大学交通学院等相关单位人员提出了宝贵的修改意见，作者深表感谢。作者在编著过程中参考了大量的文献资料和研究报告，在此特向提供资料的单位和个人表示由衷的感谢！

限于作者水平，本书难免有欠妥之处，恳望读者和同行予以指正。

编著者

2007 年金秋于南京

目录

第一章 绪论	1
第一节 高速公路发展现状	1
第二节 软土地基高速公路建设基本要求	4
第三节 高速公路软土地基常用处理技术	5
一、堆载预压法	5
二、刚性桩技术	6
三、柔性桩技术	6
四、半刚性桩技术	7
五、土工加筋技术	7
第四节 复合地基理论及其进展	8
一、复合地基分类	8
二、复合地基的设计方法	9
第二章 海相软土的工程性质	13
第一节 我国海相软土分布	13
一、区域分布	13
二、基本特性	14
第二节 典型海相软土工程特性	15
一、天津软土	15
二、上海软土	16
三、温州软土	17
四、湛江软土	18
第三节 连云港海相软土工程特性	20
一、连云港软土沉积历史	20
二、连云港软土物理性质	27
三、连云港软土力学特性	32
第三章 海相软土地基处理原则	42
第一节 天然地基沉降规律研究	42
一、沉降量与填筑高度的关系	42
二、土层厚度对沉降变形的影响	43
三、侧向变形规律	44

第二节 水泥土搅拌桩复合地基沉降规律	45
一、填筑高度的影响	45
二、硬壳层厚度的影响	46
三、软土层厚度对沉降的影响	47
四、水泥土搅拌桩设计参数影响	49
五、施工因素对沉降的影响	53
六、粉湿喷桩对沉降的影响	55
七、水泥土搅拌桩地基水平向变形与竖向变形之间的关系	56
第三节 海相软土地区高速公路地基处理设计原则	58
一、调查研究	58
二、地基处理方案的确定	59
三、地基处理设计程序	60
四、地基处理工程的施工管理	60
第四章 水泥土搅拌桩施工扰动分析	61
第一节 水泥土搅拌桩施工扰动理论分析	61
一、水泥土搅拌桩施工过程桩周土应力分析	61
二、桩周土应力分析	65
三、土体扰动程度的评价方法	67
四、水泥土搅拌桩施工扰动评价	69
五、扰动对参数的影响	71
第二节 水泥土搅拌桩施工对桩周土扰动的室内模型试验研究	77
一、粉喷桩模型机设计及研制	77
二、孔压测试设备	78
三、模型实施过程	79
四、模拟试验结果分析	81
五、桩周土扰动度变化以及扰动度与强度关系验证	86
第三节 水泥土搅拌桩施工扰动的数值模拟	87
一、室内模拟试验的有限元分析	88
二、影响扰动度分布因素分析	90
三、现场扰动度的模拟	94
第四节 水泥土搅拌桩施工对桩周土强度影响的现场试验研究	99
一、连云港天然沉积土物理力学性状	100
二、试验场地及方案介绍	106
三、现场单桩试验和分析	109
四、现场群桩试验和分析	113
第五章 水泥土搅拌桩复合地基变形规律研究	120
第一节 有限元分析理论	121
一、考虑流固耦合有限元理论	121

二、平面简化计算方法	123
第二节 数值计算模式以及参数验证	125
第三节 路堤荷载作用下搅拌桩地基变形特性	129
一、桩间距(置换率)对路堤沉降的影响分析	129
二、桩身模量变化对路堤沉降的影响	139
第四节 水泥土搅拌桩桩身模量与变形关系确定	148
第六章 水泥土搅拌桩粉湿喷法加固海相软土比较	150
第一节 粉湿喷桩施工效应对比研究	150
一、现场单桩试验和分析	151
二、现场群桩试验和分析	153
第二节 粉湿喷桩桩体强度的对比	155
第三节 粉湿喷桩复合地基变形特性	157
一、现场荷载试验	157
二、路堤填筑过程观测	165
第四节 粉湿喷桩的选择方法	168
一、室内试验研究	168
二、现场试验研究	169
第七章 水泥土搅拌桩加固海相软土实用设计方法	171
第一节 水泥土搅拌桩设计要点	171
第二节 水泥土搅拌桩强度取值	174
一、基于似水灰比的室内强度确定	175
二、基于似水灰比的现场强度预测公式	179
三、水泥用量的确定	183
第三节 水泥土搅拌桩桩间距确定	185
一、工后沉降分析	186
二、复合地基沉降计算	188
三、工后沉降与等效似水灰比的关系	189
四、交通荷载的确定	200
五、桩间距确定方法	201
六、实例验证	202
第四节 水泥土搅拌桩质量控制方法	203
一、水泥土搅拌桩的质量要求	203
二、质量检测方法	204
参考文献	213

第一章 绪 论

第一节 高速公路发展现状

自改革开放以来,我国实施扩大内需的积极财政政策,对基础设施投资的力度日益增大,使我国公路建设步入前所未有的高速发展时期。区域间的经济合作交往日益密切,交通量增大,一般的低等级公路已经不能满足要求,作为快捷、便利和具有“门对门”运输功能的高速公路建设已经成为经济发展的迫切需要。高速公路建成通车后,使投资环境发生了巨大变化,原地区的经济得到迅速发展。从 20 世纪 80 年代至今,我国的公路基础设施实现了跨越式的发展,取得了举世瞩目的成就,缓解了对经济发展的瓶颈制约。截至 2006 年底,全国等级公路里程达 159.18 万 km,占公路里程的 82.5%,其中二级及二级以上的高等级公路里程 32.58 万 km,占公路总里程的 16.9%。按公路等级分组,各等级公路里程分别为:高速公路 4.54 万 km,一级公路 3.8 万 km,二级公路 25 万 km,三级公路 34 万 km,四级公路 92 万 km,等外公路 34 万 km。

我国高速公路建设实现历史性的突破,“十五”期间建成高速公路 2.47 万 km,是“七五”、“八五”和“九五”建成高速公路总和的 1.5 倍。2005 年,全国新增高速公路通车里程 6 717 km,2006 年新增高速公路通车里程 4 000 km 左右,全国高速公路通车里程达到 45 339 km。2006 年,河南、江苏、浙江、山西等省区全年新增高速公路通车里程均超过 500 km。截至 2006 年底,全国有 29 个省(市、区)的高速公路通车里程均超过 500 km。高速公路突破千公里的省(市、区)上升到 20 个,分别是:河南(3 439 km)、江苏(3 355 km)、广东(3 328 km)、山东(3 163 km)、浙江(2 382 km)、河北(2 322 km)、辽宁(1 849 km)、山西(1 820 km)、四川(1 788 km)、陕西(1 755 km)、湖北(1 748 km)、江西(1 700 km)、云南(1 690 km)、安徽(1 546 km)、广西(1 544 km)、湖南(1 405 km)、内蒙古(1 224 km)、福建(1 160 km)、甘肃(1 006 km)和黑龙江(1 000 km)。

公路客货运量已稳列各种运输方式的首位。京哈、京沪和京珠高速公路实现了全线贯通,在我国华北、东北、华东和华南之间形成了多条相互贯通的公路运输大通道。尤其是交通部制订的公路交通发展的三个阶段的目标,为我国今后高速公路建设勾画出宏伟蓝图,届时我国高速公路总里程将达到 8.5 万 km,公路总里程达到 300 万 km,高速公路将覆盖全国 20 万以上人口的中等城市,将会彻底改变省际间交通运输的宏观格局,有力地促进我国经济腾飞,为社会发展作出贡献。我国沿海地区几个省市的土地面积占全国的 13.8%,但人口占全国的 41%,工农业总产值占全国的 60% 以上。其中珠江三角洲、长江三角洲、京津地区、山东半岛、辽东半岛是我国经济繁荣,资金、技术与智力高度密集的地区。该地区对高速公路的需要更迫切,建成后的经济效益和社会效益更大,因此,初期绝大部分的高速公路建于此地区。

图 1-1 为我国高速公路网的布局方案,从图可以进一步看出我国目前已建和在建的高速

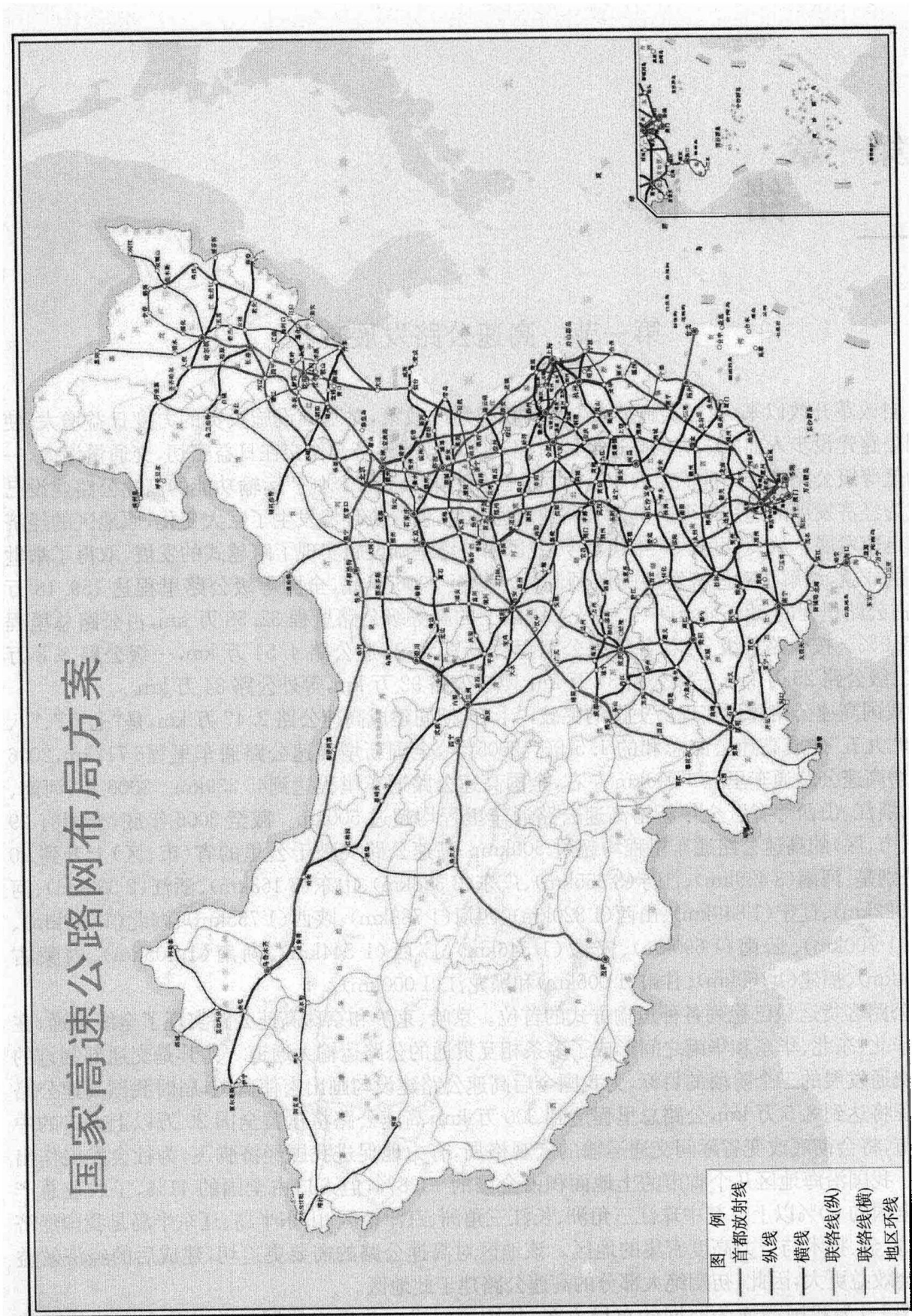


图 1-1 我国高速公路网布局方案

公路大部分在我国的东部和南部地区。图 1-2 为江苏省高速公路建设示意图,江苏是我国东部沿海的一个有代表性的省份,从图上可以看出,江苏省已建有多条高速公路,包括沪宁高速、连徐高速、沿海高速、京沪高速等。其中许多高速公路分布在海相沉积软土区域。



图 1-2 江苏省高速公路建设示意图

我国沿海,除山区外,大部分的海岸线为淤泥质海岸。特别是大江、大河河口附近多为河海相沉积层,在地质上属于第四系全新统 Q_4 土层,土的类别多为淤泥、淤泥质黏土和淤泥质亚黏土,在南方少数地区还有淤泥混砂层。我国最早建成通车的高速公路,如沪嘉、京津唐、广佛、杭甬、沪宁等高速公路均建于沿海或沿江地区,20%以上甚至 100% 路段通过软土段。在软土地区修建高速公路的实践,促进了公路岩土工程的发展,以适应兴建高速公路的科学技术发展的需求。软土的成因、结构和性态不同,但都具有含水率大、压缩性高、强度低和透水性差的特点,将直接影响这些地区的高速公路工程的稳定性和耐久性。另外,通过软土地基的路堤高程受立交桥、跨河桥、通道等影响,新建的高速公路往往以比较高的路堤和较重的荷载穿过软基,若软基处理不当,将会严重影响工程的质量和使用寿命,甚至造成工程事故。另一方面,由于联网建设的需要,在两条路的结合点——匝道处,也会要求按不影响老路正常运行的技术要求,进行基础和路基的安全拼接施工。

为此,系统总结我国高速公路软土地基处理技术对推动我国公路建设水平有重要意义和价值。

第二节 软土地基高速公路建设基本要求

根据现行交通部《公路工程技术标准》(JTJ B01—2003)的规定,公路根据功能和适应的交通量分为高速公路、一级公路、二级公路、三级公路、四级公路五个技术等级。其具体的定义和要求如下所述。

(1)高速公路:为专供汽车分向、分车道行驶,并全部控制出入的干线公路。它具有4个或4个以上车道,设有中央分隔带,全部立体交叉,并具有完善的交通安全设施与管理设施、服务设施。4车道高速公路一般能适应按各种汽车折合成小客车的远景设计年限年平均昼夜交通量为25 000~55 000辆;6车道高速公路一般能适应按各种汽车折合成小客车的远景设计年限年平均昼夜交通量为45 000~80 000辆;8车道高速公路一般能适应按各种汽车折合成小客车的远景设计年限年平均昼夜交通量为60 000~100 000辆。

(2)一级公路:为供汽车分向、分车道行驶的公路,其设施与高速公路基本相同,只是部分控制出入。一般应设置分隔带,当受到特殊条件限制时,必须设置分隔设施。一般4车道能适应按各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为15 000~30 000辆,6车道能适应按各种汽车折合成小客车的年平均日交通量为25 000~55 000辆。它是连接高速公路或是某些大城市的城乡结合部、开发经济带及人烟稀少地区的干线公路。

(3)二级公路:为连接中等以上城市的干线公路,或者是通往大工矿区、港口的公路。双车道二级公路一般能适应按各种车辆折合成小客车的年平均日交通量为5 000~15 000辆。

(4)三级公路:为沟通县、城镇之间的集散公路。双车道三级公路一般能适应按各种车辆折合成小客车的年平均日交通量为2 000~6 000辆。

(5)四级公路:为沟通乡、村等地的地方公路。双车道四级公路一般能适应按各种车辆折合成小客车的年平均日交通量为:双车道2 000辆以下;单车道400辆以下。

针对上述各种等级的公路,交通部制定了公路的技术标准。公路的技术标准是国家交通主管部门颁布的法定技术准则,它是指公路路线和构造物的设计、施工,在技术性能、几何尺寸、结构组成方面的具体规定和要求。它是根据一定数量的车辆在道路上以一定的计算行车速度行驶时,对路线和构造物的设计要求,是根据理论和总结设计、施工、使用经验的基础上,经过调查研究和分析列成指标制定出来的。

高等级公路(包括高速公路、一级公路以及部分二级公路)目前采用按变形控制进行设计,为此《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》对高等级公路的工后沉降进行了规定(表1-1),以保证公路通车运营后不会产生过大的跳车、隆起等现象,从而影响行车性能。

容许工后 15 年沉降 表 1-1

容许工后沉降 道路等级	工程位置		
	桥台与路堤相邻处	涵洞或箱涵型通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤0.1m	≤0.20m	≤0.30m
二级公路(采用高级路面)	≤0.20m	≤0.30m	≤0.50m

为了保证高等级公路的工后沉降能满足规范规定的要求,根据江苏省高速公路建设的经验,在路堤施工期、预压期和路面填筑期间需要对公路的沉降进行监测,并根据逐月沉降来指导施工,具体如下。

路堤施工期每月沉降不超过 30cm,预压期在每月沉降小于 5mm 时方可卸土进行后续施工,而在路面施工期需确保每月沉降小于 3mm。

对公路工程而言,路堤的稳定性是工程关注的一个重点,《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》对路堤的稳定性安全系数给出了具体的要求,具体要求如表 1-2 所示。

稳定性控制标准 表 1-2

采用的计算方法		稳定安全系数容许值
总应力法	快剪指标	1.1
	十字板剪切强度	1.2
有效固结应力法	快剪与固结快剪指标	1.2
	十字板剪切强度	1.3
准毕肖普法	有效剪切指标	1.4

第三节 高速公路软土地基常用处理技术

地基处理的方法分类多种多样,如按时间可分为临时处理和永久处理;按处理深度可分为浅层处理和深层处理;按处理土性对象可分为砂性土处理和黏性土处理,饱和土处理和非饱和土处理;也可按照地基处理的作用机理进行分类。对江苏省已建和在建高速公路地基处理方法进行统计,发现目前江苏省软土地基,尤其是海相软土地基处理的方法主要采取预压法、刚性桩、柔性桩、半刚性桩和加筋等技术。下面具体介绍各种地基处理方法的原理和优缺点。

一、堆载预压法

堆载预压法是排水固结原理的应用,是公路修筑最古老和最经济的方法。其基本原理是利用饱和软黏土地基在荷载作用下,孔隙中的水被慢慢排出,孔隙体积慢慢减小,地基发生固结变形;同时随着超静孔隙水压力逐渐消散,有效应力逐渐提高,地基土的强度逐渐增长,从而使路堤的工后沉降达到规范的要求。

堆载预压法的排水固结效果与它的排水边界密切相关。如图 1-3 所示的排水边界条件,即土层厚度相对路堤宽度来说比较小,这时土层中的孔隙水向上下面透水层排出而使土层发生固结,这时称为竖向排水固结。根据太沙基固结理论,黏性土固结所需要的时间和排水距离的平方成正比,土层越厚固结

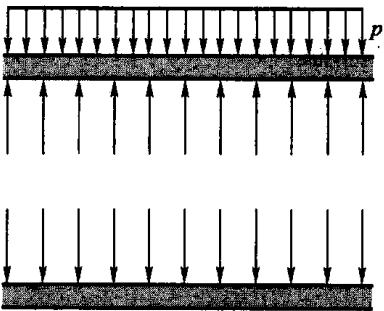


图 1-3 竖向排水

延续的时间越长,为了加速土层的固结,最有效的方法是增加土层的排水路径,缩短排水距离。砂井、塑料排水板等竖向排水体的设置就是为了减小排水路径,如图 1-4 所示,这时土中的孔隙水主要从水平向通过竖向排水体和部分从竖向排出。竖向排水体缩短了排水距离,因而大大加速了地基的固结速率,从而加快施工进度和减小工后沉降。

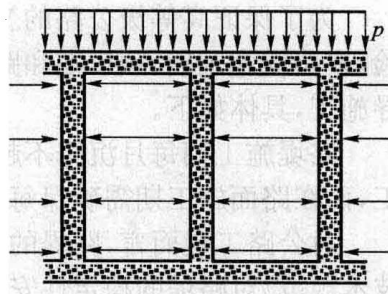


图 1-4 砂井地基排水

目前,国内外很多公路的软土地基采用了堆载预压法进行处理以减小工后沉降,堆载预压法有其优点和不足,优点为经济节约,施工简单;不足为需要足够的预压时间和大量堆载土方以及土石方的搬运机械。

二、刚性桩技术

刚性桩是近年发展起来的一种地基处理技术。目前在高速公路上应用的刚性桩主要有 CFG 桩(水泥、粉煤灰和碎石施工而成)、管桩(预应力管桩、薄壁管桩等)、素混凝土桩及树根桩等。该类桩的刚度(或模量)比周围地基土的大了许多,以预应力管桩为例,桩体的模量一般比桩周土模量大 300~500 倍。由于桩体的刚度(或者模量)远大于地基土体的刚度(或模量),桩体表现出很高的承载力以及抗变形能力。路堤荷载是一种柔性荷载,目前在公路工程的地基处理中为了发挥刚性桩的高承载力和大抗变形能力,在刚性桩上增加方形或者圆形的桩帽,有时还在桩帽上加铺土工格栅或者格室,使路堤荷载更大比例地转移到刚性桩上,进而可以增大桩间距,如图 1-5 所示。

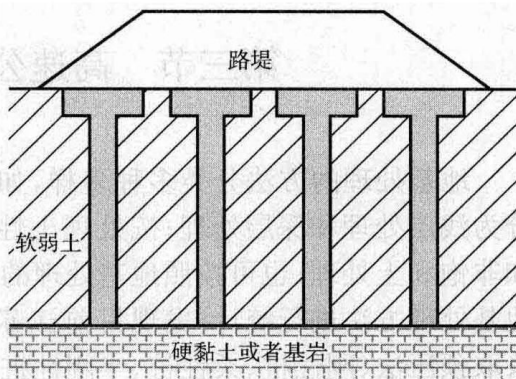


图 1-5 路堤工程中刚性桩地基示意图

由于刚性桩的地基模量或刚度远远大于桩间土的模量或刚度,在路堤荷载作用下桩土之间存在一定的差异变形,但目前刚性桩复合地基的设计仍然借用复合地基的理论。因此,对于路堤荷载作用下

刚性桩地基的设计以及荷载传递机理,目前在进一步的研究。

对于刚性桩地基而言,其优点主要表现在以下几点:

- (1) 刚性桩具有很高的承载力和很大的抗变形能力。
- (2) 刚性桩和预应力管桩施工后,桩身质量容易得到控制。
- (3) 在高灵敏度的海相软土地区,由于刚性桩的桩间距较大,能够减小桩的施工对桩周土的扰动。

但是对刚性桩地基而言其主要缺点表现为:

- (1) 刚性桩处理软土地基造价较高,并且对三材用量较大。
- (2) 目前刚性桩地基的设计理论和荷载传递规律尚未明晰,实践先于理论。

三、柔性桩技术

柔性桩(如碎石桩和砂桩)又称粗颗粒土桩,是指用振动、冲击或水冲法等方式在软弱地基

中成孔后,再将碎石桩或砂挤入已成孔中,形成大直径的碎(砂)石所构成的密实桩体。

碎石桩最早在 1835 年由法国在 Bayonne 建造兵工厂车间时使用,这个兵工厂坐落在海湾沉积的软土上,当时设计桩径 0.2m,桩长 2m,每根桩承担荷载 10kN。加固后的沉降只有未加固前的四分之一。20 世纪 50 年代末,振冲法开始用来加固黏性土地基,并形成碎石桩。我国应用振冲法始于 1977 年。

碎(砂)石桩应用于软黏土地基处理其主要机理为置换,即以性能良好的碎(砂)石置换不良的软弱的地基土。由于碎(砂)石桩是由散粒体组成,承受荷载后产生径向变形,并引起周围的黏性土产生被动抗力,如果黏性土的强度过低,不能使碎石桩和砂桩得到所需要的径向支持力,桩体会产生鼓胀破坏,从而导致加固效果不佳。目前柔性桩(碎石桩/砂桩)的主要设计理论采用复合地基理论。

对于碎石(砂)桩而言,目前施工工艺比较成熟,其桩体除了强度较原地基大以外,还是良好的排水通道。但对于碎(砂)石桩而言,需要大量的砂石料,造价比较高,同时如施工工艺处理不当,容易使已施工的桩体挤断,从而在海相软土地基处理中使用较少。

四、半刚性桩技术

半刚性桩是目前地基处理常用的一种处理方法,主要指水泥土搅拌桩。该类桩体的刚度比碎石桩和砂桩大,强度高;但与灌注桩和管桩相比刚度小,该类桩体的模量一般比桩周土模量大 30~100 倍。由于该类桩施工容易控制,同时能够较好地满足复合地基理论的假设,因此在海相软土地基上高速公路工程软土处理中得到推广。

水泥土搅拌桩是美国在第二次世界大战后最早研制成功的,称为就地搅拌桩(MIP)。1953 年日本清水建设株式会社从美国引进此方法,1967 年日本港湾技术研究所研制石灰系搅拌桩。20 世纪 60 年代末期,瑞典工程师改进了已有的搅拌桩施工工艺,提出了水泥系粉喷桩。20 世纪 70 年代日本进一步研发水泥系浆喷桩。我国于 1978 年底制造出国内第一台双轴搅拌机。

截至 2002 年底,日本水泥系搅拌桩的工程量达到 5 千万立方米,欧洲达到了 1 千万立方米。我国使用水泥土搅拌桩目前没有具体详细的统计,单就江苏省已建和在建的高速公路使用水泥土搅拌桩的用量已超过了 1.5 亿延米。

五、土工加筋技术

土工加筋是指在人工填土的路堤或者挡土墙内铺设土工合成材料(或者钢带、钢条、钢筋混凝土带、尼龙带等)。这种人工复合的土体,可承受抗拉、抗压和抗剪作用,借以提高地基承载力、减小沉降和增加地基稳定性。这种起加筋作用的人工材料称为加筋材料。

土中加筋在我国古代早有所见,我国劳动人民早已用草秸等材料加入胶泥盖屋或用材枝褥垫修路。现代加筋土技术的发展始于 20 世纪 60 年代初期,法国工程师 Henri Vidal 首先在试验中发现当掺入纤维材料时,其强度较原有天然土提高了好几倍,并由此提出了加筋概念和理论。

采用路堤加筋的办法来改良路堤的性能在工程中比较经济,施工快捷,并不会对环境造成污染,但目前主要应用于路堤边坡稳定性的改良上。对于采用加筋的办法来减小工后沉降和地基的变形,目前的研究比较少,已有的研究表明采用路基加筋不能有效地减小地基的总体沉降变形,其改良机理尚需进一步的研究。

第四节 复合地基理论及其进展

一、复合地基分类

复合地基一词始用于 1962 年,其理论是许多地基处理方法分析和设计的基础,如水泥土搅拌桩地基、碎石桩地基、石灰桩地基和 CFG 桩地基(由水泥、粉煤灰和碎石施工而成桩构成的地基)等。

所谓复合地基是指由两种刚度(或模量)不同的材料(桩体和桩间土体)所组成,在相对刚性的桩基础上共同分担上部荷载并协同变形(包括剪切变形)的地基,其中桩体为增强体,而桩间土体为基体。

增强体与基体保持共同承担荷载作用是形成复合地基的条件,根据增强体的方向,复合地基可以分为水平向增强体复合地基和竖向增强体复合地基。

复合地基与天然地基同属地基范畴,为此两者之间有内在联系,但又有本质区别。复合地基与桩基都是采用以桩的形式处理的地基,故两者之间有相似之处。但复合地基属地基范畴,而桩基为基础范畴,所以两者又有本质区别。复合地基中桩体与基础往往不是直接相连的,它们之间通过垫层(碎石或砂垫层)来过渡,而桩基中桩体与基础直接相连,两者形成一个整体。因此它们的受力特性存在明显差异。如图 1-6 所示,复合地基的主要受力层在加固区内,而桩基的主要受力层在桩间的一定范围以内。由于复合地基理论的最基本假设为桩与桩间土协同变形,为此,从理论上而言,复合地基中也不存在类似桩基中的群桩效应。

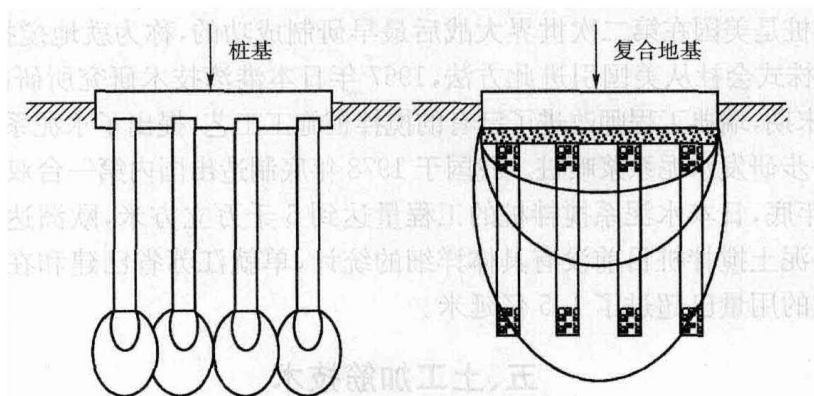


图 1-6 复合地基与桩基受力特性对比

在复合地基的桩和桩间土中,桩的作用是主要的,而地基处理中桩的类型比较多,性能变化较大。为此复合地基的类型按桩的类型进行划分较妥。

然而,桩又可以根据桩所采用的材料以及成桩后桩体的强度(或刚度)进行划分。

1. 桩体按成桩所采用的材料分

散粒体桩:如碎石桩、砂桩等。

水泥土类桩:如水泥土搅拌桩、旋喷桩等。

混凝土类桩:树根桩、CFG 桩。

2. 桩体按成桩后桩体的强度(或者刚度)分

柔性桩:散粒体桩属于此类桩。

半刚性桩:如水泥土类桩。

刚性桩:如混凝土类桩。

半刚性桩中水泥掺入量的大小将直接影响桩体的强度和刚度。当掺入量较小时,桩体的特性类似柔性桩;当掺入量较大时,又类似于刚性桩,为此具有双重性。

由柔性桩和桩间土所组成的复合地基可称为柔性桩复合地基,其他依次为半刚性桩复合地基、刚性桩复合地基。

二、复合地基的设计方法

1. 复合地基承载力

从已有的计算公式看,复合地基承载力的计算公式基本一致,仅视桩的类型略有不同。

对柔性桩(如碎石桩),其复合地基承载力标准值为:

$$f_{sp} = f_p m + (1 - m) f_s \quad (1-1)$$

$$f_{sp} = [1 + m(n - 1)] f_s \quad (1-2)$$

式中: f_{sp} 、 f_p 、 f_s ——分别为复合地基、单桩和桩间土的承载力标准值;

m ——桩土面积置换率;

n ——桩土应力比。

对半刚性桩(如水泥土搅拌桩),其复合地基承载力标准值为:

$$f_{sp} = f_p m + \eta(1 - m) f_s \quad (1-3)$$

式中: η ——桩间土承载力折减系数,对摩擦桩取 $\eta = 0.5 \sim 1.0$;对摩擦支承桩取 $\eta < 0.5$,其质是部分考虑桩间土的作用。

对刚性桩(如 CFG 桩),其复合地基承载力标准值的计算目前尚未取得统一。

2. 复合地基剪切强度

若碎石桩、砂桩、水泥土桩、石灰桩等,用于改善天然地基整体稳定性时,可利用复合地基的抗剪特性,再使用圆弧滑动进行计算。如考虑桩体和桩间土两者都发挥抗剪强度,并按面积置换率进行计算,则可以得出复合地基的抗剪强度 τ_{ps} 的表达式为:

$$\tau_{ps} = m\tau_p + (1 - m)\tau_s \quad (1-4)$$

式中: τ_{ps} 、 τ_p 、 τ_s ——分别为复合地基、桩体和桩间土的抗剪强度。

然而对不同类型的复合地基,因各自情况不同,其简化形式也不同。

对于散粒体桩复合地基,其计算表达式为:

$$\tau_{ps} = (1 - m)c_u + (pm\mu_s + \gamma_p z) \tan \varphi_p \cos^2 \theta \quad (1-5)$$

式中: c_u ——桩间土的黏聚力;

φ_p ——桩体的有效内摩擦角;

p ——作用荷载;

μ_s 、 n ——分别为应力降低系数和桩土应力比, $\mu_s = \frac{1}{1 + m(n - 1)^2}$;

m ——桩土面积置换率;

γ_p ——桩体材料的重度;