

ZHUSANJIAO  
**珠三角**

# 软基处理试验工程报告集

RUANJICHULI SHIYAN GONGCHENG BAOGAOJI

中铁建港航局集团岩土工程有限公司 著



人民交通出版社  
China Communications Press

# 珠三角软基处理试验 工程报告集

中铁建港航局集团岩土工程有限公司 编

人民交通出版社

## 内 容 提 要

中铁建港航局集团岩土工程有限公司(原广东省航盛建设集团有限公司岩土分公司)自1992年成立以来,承接并完成了十余项地基处理试验工程,获得多项省部级科学技术奖,积累了丰富的试验资料。在公司成立20周年之际,特将珠江三角洲十项试验工程的试验报告汇编出版,以飨同行。试验报告集涉及十余种地基处理方法,试验资料真实可靠、试验成果丰富,可供地基处理科研人员与施工技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

珠三角软基处理试验工程报告集 / 中铁建港航局集团岩土工程有限公司著. — 北京:人民交通出版社, 2012.9

ISBN 978-7-114-10062-8

I. ①珠… II. ①中… III. ①高速公路—软土地基—道路工程—试验报告—珠江三角洲 IV. ①U416.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第207327号

书 名: 珠三角软基处理试验工程报告集

著 作 者: 中铁建港航局集团岩土工程有限公司

责任编辑: 刘永芬

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.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 43.25

字 数: 1044 千

版 次: 2012年9月 第1版

印 次: 2012年9月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10062-8

定 价: 100.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 《珠三角软基处理试验工程报告集》

## 编 委 会

主 编：刘吉福 黄 腾

副 主 编：谭祥韶 张迎春

编写委员会：王盛源 关锦荷 薛 威 姜海青 许发明

叶袁坤 陈 杰 熊燕文 郭 灿 蒙庆辉

蒋雪琴 马国栋 周春儿 周龙翔 肖 峰

余 烈 杨春林 李根存 魏金霞 颜治平

# 第二届全国复合地基理论及工程应用学术研讨会

(2012 · 广州)

## 主办单位：

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会地基处理学术委员会

广东省公路学会

中国铁建股份有限公司

## 承办单位：

中国铁建港航局集团有限公司

中铁建港航局集团岩土工程有限公司

广东省公路学会岩土工程专业委员会

中科院广州化灌工程有限公司

# 前 言

珠江三角洲高速公路自 20 世纪 90 年代以来迅猛发展。珠江三角洲广泛分布高含水率、高孔隙比、高压缩性、低渗透性、低强度的深厚软黏土,同时由于水网密布、路基填土高度大,高速公路路基稳定与工后沉降问题比较突出。为验证各种地基处理方法的适用性,为地基处理设计与施工提供参考依据,珠江三角洲多条高速公路在建设前期都在线路上选择具有代表性的路段开展了软基试验工程。在广东省交通运输厅的大力支持下,广东省航盛建设集团有限公司于 1992 年成立了岩土分公司,并承接了几乎省内所有高速公路软基处理工程,为广东省高速公路的发展做出了重大贡献。

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会地基处理学术委员会、广东省公路学会和中国铁建股份有限公司将于 2012 年 9 月在广州联合主办“第二届全国复合地基理论及工程应用学术研讨会”,为了配合此次会议的召开,将珠江三角洲高速公路建设中软基处理的技术发展历程与全国学者、同行交流和分享,决定编写《珠三角软基处理试验工程报告集》。本书由具有代表性的 10 篇试验工程总结报告汇编而成,涉及表层处理法、常规排水固结法、真空联合堆载预压法、水载预压法、动力固结法、电渗法、碎石桩复合地基法、水泥搅拌桩复合地基法、管桩复合地基法等十余种地基处理方法,试验资料详实、丰富,是不可多得的现场试验数据。本书由人民交通出版社出版,在这里对出版社的大力支持表示衷心感谢。

为了尽量体现珠江三角洲高速公路发展各个阶段软基处理技术的水平,本书仅对不同时间段内完成的软基试验工程总结报告做了非实质性修改,尽管这些总结报告中个别结论与观点现在看来不甚妥当。

本书内容较多,时间仓促,如有不妥、错误之处,敬请读者批评指正。

王盛源

2012 年 9 月

# 目 录

|     |                                            |     |
|-----|--------------------------------------------|-----|
| 第一篇 | 深汕汽车专用公路(龙岗—潭西)第四合同段软基<br>试验工程总结报告 .....   | 1   |
| 第二篇 | 京珠高速公路广珠段灵山软基试验工程总结报告 .....                | 35  |
| 第三篇 | 西部沿海高速公路台山段第三合同段真空联合堆<br>载预压试验工程总结报告 ..... | 115 |
| 第四篇 | 西江下游航道整治工程 C7 合同段碎石桩现场大<br>型综合试验总结报告 ..... | 149 |
| 第五篇 | 西部沿海高速公路台山段软基试验工程总结报告 .....                | 187 |
| 第六篇 | 广东省中江高速公路港口至四村段软基试验工程<br>总结报告 .....        | 223 |
| 第七篇 | 广州至珠海(西线)高速公路软基试验工程总结报告 .....              | 301 |
| 第八篇 | 佛山市北滘至乐从公路主干线软基处理试验工程总结报告 .....            | 413 |
| 第九篇 | 佛山市中心组团新城区启动区首期道路软基试验工程<br>总结报告 .....      | 541 |
| 第十篇 | 广(州)贺(州)高速公路三水至四会段软基试验工程<br>总结报告 .....     | 611 |

# **第一篇**

## **深汕汽车专用公路(龙岗—潭西) 第四合同段软基试验工程总结报告**

一九九四年八月





# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 概述.....                     | 5  |
| 1.1 概况 .....                      | 5  |
| 1.2 试验成果 .....                    | 6  |
| 1.3 几项新技术问题的探讨.....               | 12 |
| 1.4 结语.....                       | 16 |
| 第 2 章 现场试验施工监测报告 .....            | 17 |
| 2.1 施工过程简介.....                   | 17 |
| 2.2 监测.....                       | 21 |
| 2.3 结语.....                       | 22 |
| 第 3 章 在软土路基上填筑路堤的新方法——薄层轮加法 ..... | 23 |
| 3.1 分级加载计算方法.....                 | 23 |
| 3.2 实例计算与分析 .....                 | 25 |
| 3.3 结语.....                       | 28 |
| 第 4 章 计算沉降量与实测值对比分析 .....         | 29 |
| 4.1 用实测沉降过程线推算最终沉降量.....          | 29 |
| 4.2 计算值与实测值的对比分析.....             | 31 |
| 4.3 结语.....                       | 33 |



# 第1章 概 述

## 1.1 概况

深汕汽车专用公路(龙岗—潭西)第四合同路段约9km的软弱地基路段,是全线软基集中的路段,淤泥厚达16~20m,含水率高达73%,孔隙比1.96,塑性指数最大21.7,固结系数为 $10^{-4}\text{cm}^2/\text{s}$ ,十字板剪切强度最小为8.6kPa。这样的软土属于超软弱地基。设计预估最终沉降量超过150cm。最大预压期长达720天。在如此软弱的地基上建造高等级公路,将会带来一系列难于处理的工程问题。例如施工期的稳定控制问题、路堤预压固结问题、建筑物与路堤之间差异沉降的控制问题、软弱地基加固处理方法的合理选用等问题。这些问题都是控制整个工程安全、质量、工期、造价等直接关系到工程成效的根本性的问题。为了合理、正确地解决这些工程建设中的重大技术性问题,广东省交通厅、世界银行和广东省高速公路公司特安排在此路段设置软基加固试验段。

建设单位委托广东省航务工程总公司,在主线K120+920~K121+010和K128+200~K128+475两处共长365m,用各种地基加固方法在现场开展工程性试验。本试验从1992年9月进场开始,至1993年9月,为期一年的施工加载、停歇观测,共获得了地基的应力应变系统资料数万项,并于1993年10月5日、6日在海丰县现场组织阶段成果评审会议。会议结论有四个方面:

(1)一年多来该工程按批准的设计文件填筑路堤、埋置仪器,进行了多种项目的观测,并做了两种原位测试及土工试验,搜集了大量原始资料并进行了汇总分析工作。提出了四个专题小结,是广东省一个较好、较完整的公路软基试验工程,已完成合同第一阶段的工作任务。

(2)试验达到了预期的目标,这些目标是通过试验取得的各种参数,提出适合本路段的最优地基处理方案,这就是以袋装砂井加土工布来替代原设计的挤密砂桩;提出了施工工艺和控制施工填土速率的沉降和位移速率标准,用于指导本路段的具体施工;本试验的成果用于指导和改进四标段软土地基施工,进而推广到深汕全线软基施工中。

(3)高速公路软基加固方法应以排水固结法为主体,竖向排水以 $\phi 7\text{cm}$ 袋装砂井或排水塑料板为佳,施工控制以沉降速率和边桩位移速率互相配合使用为好,提出了在一般施工条件下采用砂井排水最大沉降速率和最大位移速率的控制指标。以上结论符合软基固结规律,切合现实的技术经济条件,有较高的可信度和实用性,对深汕高速公路乃至省内同类软基处理具有普遍的指导意义。

(4)下阶段应继续按预定超载量加载并进行观测;对后期地基强度随时间变化进行观测并总结其规律;对土工布影响沉降规律、瞬时沉降和次固结沉降的比例等进行深入地研究,并进一步分析确定达到工后沉降标准控制相应的固结度、控制沉降值及超载量等。

试验的阶段成果于1993年开始应用于深汕高速公路:

(1) 深汕西线第四标段约 9km 软基中原设计的  $\phi 42\text{cm}$  和  $\phi 50\text{cm}$  的挤密砂桩已全部改成  $\phi 7\text{cm}$  的袋装砂井加土工编织布;

(2) 深汕东线的第六标段、第七标段、第八标段和第十七标段均部分地将原有  $\phi 42\text{cm}$  砂桩改为  $\phi 7\text{cm}$  袋装砂井。这些加固方法的改进,在经济上节省了可观的费用。例如以 15m 加固深度为例:如采用  $\phi 42\text{cm}$  砂桩按 18 元/m 计,加固费约 120 元/m<sup>2</sup>,袋装砂井 3.5 元/m,土工布 10 元/m<sup>2</sup>(以两层计),加固费为 72.5 元/m<sup>2</sup>,每公里可节省 240 万元左右。此外,还能为加快施工进度,确保施工质量创造良好条件。除深汕高速公路外,其他一些正在施工或正在设计的高速公路中软基处理方法大都将  $\phi 42\text{cm}$  的砂桩改为袋装砂井或其他更合理的加固方法。

在填土超过设计高程后,停载观测。观测的目的是要分析地基土的固结变化过程,以便确定工后沉降量,为深汕高速公路西线软基段浇筑路面准备条件。其次,在合理安排填土期的同时,加快施工进度,缩短工期应采取的相应措施。上述两个问题是深汕高速公路西线软基段的现实问题,需尽快得到结论。此外,尚需探讨软基上建造高速公路的稳定控制和沉降分析两个基本问题,以及如何选择经济有效合理的软基处理方法。

## 1.2 试验成果

经过两年的长期现场观测,采集到数万个地基应力-应变的实测数据,并建立了淤泥地基上建造高速公路的一个大型试验工程和数据库。经过对这些实测资料的分析和提炼,获得的主要成果介绍如下。

### 1.2.1 淤泥地基稳定分析

淤泥地基上筑路遇到的首要问题是稳定分析,若在修筑施工期不能牢固地控制地基稳定状态,那就会出现失稳事故,它将给工程的经济、工期、计划带来极大的危害。例如 1993 年某国道连续发生两次大滑动,每段长约 100m,下坍 2m 多,经数次技术会议讨论,修复每段需花费工程款 100 多万元,而且还衍生出许多其他问题:如征地问题、土源问题、工期协调安排问题等。由此可见,地基稳定的控制是淤泥地基上修筑高速公路的几个问题中的首要问题。

地基稳定分析由两大部分组成:其一是稳定分析计算方法;第二是淤泥地基上土质强度指标。计算方法目前已经成熟,规范规定的方法是比较合理的,只要土质强度指标选取准确,则计算所得结果也能反映实际工程的稳定程度。为适应地基加固的发展和需要,在稳定计算方法上,可采用既简单实用又能反映实际工程情况的总应力法,在此基础上可以进一步考虑由加固材料和淤泥土组成的复合材料的稳定计算方法。关于淤泥土的强度指标测定和选用是稳定分析成败的核心问题。依据广东地区的淤泥土含水率高、土质软弱的工程特性,考虑到现场取土进行室内常规试验的方法测得的土体指标失真严重,本试验工程采用现场原位测定淤泥土的十字板剪切强度为稳定分析强度指标。工程实践表明该方法切实可行,能很好地反映工程实际情况。由土体和化纤织物组合而成的复合材料地基,例如试验路段地基内设置许多用化纤编织物做成的竖向排水体(袋装砂井、塑料排水板),其地基稳定性分析方法有刚性法和柔性法。刚性法是将化纤织物在抗滑作用时以刚性筋带出现在计算式内,而柔性法是视作柔性筋带在地基中起抗拉作用。显然化纤织物以柔性模式计算比较合理。以上稳定分析的具体内容均在阶段性报告“稳定分析与极限填土高度确定”一文中。文中计算时,天然地基取用现场十字板剪切强度的小值平均值,计算所得的第一试验场五个断面的极限填土高度为 2.5 ~

3.0m。实测情况如下:1993年1月20日,填土高度3.36m,路堤中心线(Ⅱ断面)一号孔隙水压力传感器测得 $\Delta\mu_1=28\text{kPa}$ ,二号测得 $\Delta\mu_2=18\text{kPa}$ ,三号测得 $\Delta\mu_3=16\text{kPa}$ ,四号测得 $\Delta\mu_4=14\text{kPa}$ ,4个传感器埋深分别为2.2m、4.0m、9.2m和14.5m,同时其他监测仪器也反映出警戒状态,如测斜仪测出最大位移速率为4.1mm/d,地面沉降测得速率为8mm/d(三日平均量)。依据这些实测资料,可判定地基已处于危险状态,由此决定停载观测。第一试验场停歇约50d,地基强度有所恢复后继续填土,至1993年8月27日,五个断面填土的总高度已达4.32~4.93m,已超过设计填土高度(表1-1)。

填土过程统计表 表 1-1

| 试验场   | 断面号 | 加载至第63d的加载量(m) | 停歇时间(d) | 第一阶段总加载量(m) | 第一阶段总加载时间(d) | 设计填土高度(m) | 备 注          |
|-------|-----|----------------|---------|-------------|--------------|-----------|--------------|
| 第一试验场 | I   | 2.898          | 50      | 4.316       | 300          | 3.2       |              |
|       | Ⅱ   | 2.961          | 50      | 4.368       | 295          | 3.2       |              |
|       | Ⅲ   | 2.961          | 50      | 4.931       | 290          | 3.2       |              |
|       | Ⅳ   | 2.961          | 50      | 4.746       | 285          | 3.2       |              |
|       | V   | 2.961          | 50      | 4.591       | 280          | 3.2       |              |
| 第二试验场 | I   | 2.364          | 234     | 2.772       | 309          | 1.95      | 1994年5月已填至4m |
|       | Ⅱ   | 2.364          | 234     | 2.255       | 309          | 1.95      | 同上           |

此后决定停载进入预压期,进行长期沉降监测,以便进一步分析工后沉降。从以上分析可以看出,在稳定分析中采用原位十字板剪切所得的土质指标是比较合理的,计算方法可以使用简便的规范规定的总应力法,至于十字板剪切资料中如何取值,一般取用小值平均值比较稳妥。如果地基采用加固措施,例如排水加固法,则在稳定计算方法中需考虑加固材料的抗滑筋体作用,计算模式以柔性模式为好,以上所讨论的各种因素均适用于规范规定的总应力分析方法。经现场试验证实,这套计算方法是合理的,比较切合工程实际情况。它的特点是方法简便实用,概念清晰,易于理解,遵守规范主题内容,又适当增加了新技术、新概念,各种主要因素均已考虑,并且合理发挥了各种因素的潜在能量,已达到经济、合理、稳妥的目标。

1.2.2 淤泥地基的固结状态分析

淤泥地基固结状态的测定与分析是软基上修建高速公路的另一个大课题。饱和淤泥的压缩变形通常用K·Terzaghi的固结理论为依据,这个理论可以归纳为如下两个方面:其一就是饱和的淤泥受压后,在孔隙水压力作用下被排出而发生体积压缩;其二从应力概念上可以表征为体积压缩过程的同一时刻引起孔隙水压力转化为土骨架上的有效应力的过程。由此人们将利用它直接控制地基的稳定,由于施工加载,地基内产生孔隙水压力,使淤泥土强度降低,当淤泥中孔隙水受压后从土体中排出,孔隙水压力降低,土的强度就增长,这就是淤泥的固结过程。由此可见,淤泥的排水快慢,也就是淤泥的固结快慢,直接控制着施工期地基的稳定状态和停歇期沉降的稳定。本试验第二试验场因路堤本身不高,淤泥又不厚,因此它的固结问题在工程中不起重大影响,而第一试验场淤泥厚达16~20m,设计路堤高度4m,加上超载路堤填土高达6m,因此地基的固结状态起着关键作用。试验段的袋装砂井和塑料排水板没有打穿淤泥层,仅为10.2m和14.5m两种,间距有2m和1.3m两种,此外,还有反压护道、土工布等,共计5种组合情况。在试验开始前进行了详细勘探,发现在地面以下5m左右有50cm的细砂贝壳组成

的透水层,这就大大缩短了排水距离,加快了固结速度,在试验观测中,充分证实了这个水平透水薄层起了良好的排水作用。

第一试验场和第二试验场的 7 个断面的填土过程列入表 1-2 中。由表中可知,事先通过计算分析,包括超载,第二试验场两个断面总的填土高度均为 4m 高,地基可以不做任何处理。从 1993 年 3 月 7 日开始,至 3 月 13 日共 7d,填筑高度为 2.364m,停歇至 1994 年 5 月又填至 4m 高,地基一直处于稳定状态。表 1-3 为第二试验场的孔隙水压力消散情况:埋深 4.5m 和 6.5m 的两个测点,从 3 月 12 日至 8 月 14 日经 154d 时间,孔隙水压力的增量已经基本消散,固结度达到 100%。埋深 3m 的  $\mu_{28}$  号测点,最大孔隙水压力增量为 23.42kPa,经 154d 至 8 月 14 日,尚有剩余孔压 20.67kPa,此时的固结度仅完成 30%。埋深 1.5m 的  $\mu_{27}$  号测点,经 154d 尚留有孔隙水压力 11.12kPa,固结度仅完成 12%。由此可见,这个试验场淤泥较薄,填土不高,但地基未作任何加固处理,固结速度很慢,从另一个角度证实一般情况下淤泥地基需要采取加快固结的措施。(以上分析均包含静水压力,详见表 1-3)。

两个试验场填土统计表 表 1-2

| 试验场 | 断面号 | 清淤后垫层土及砂垫层总厚度(m) | 第一次填土(m) | 第二次填土(m) | 第三次填土(m) | 第四次填土(m) | 第五次填土(m) | 第六次填土(m) | 第七次填土(m) | 第八次填土(m) | 第九次填土(m) | 第十次填土(m) | 第十一次填土(m) | 累计填土(m) |
|-----|-----|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------|
| I   | 1   | 1.199            | 0.431    | 0.236    | 0.282    | 0.337    | 0.332    | 0.081    | 0.328    | 0.412    | 0.339    | 0.333    | 2.023     | 6.0     |
|     | 2   | 1.153            | 0.243    | 0.298    | 0.256    | 0.366    | 0.302    | 0.343    | 0.166    | 0.493    | 0.296    |          | 2.084     | 6.0     |
|     | 3   | 1.032            | 0.479    | 0.228    | 0.242    | 0.217    | 0.372    | 0.13     | 0.264    | 0.386    | 0.28     | 0.453    | 1.917     | 6.0     |
|     | 4   | 1.329            | 0.414    | 0.288    | 0.208    | 0.352    | 0.139    | 0.185    | 0.409    | 0.325    |          |          | 2.351     | 6.0     |
|     | 5   | 1.364            | 0.304    | 0.388    | 0.305    | 0.422    | 0.396    | 0.288    |          |          |          |          | 2.533     | 6.0     |
| II  | 1   | 0.566            | 0.577    | 0.589    | 0.638    | 1.636    |          |          |          |          |          |          |           | 4.0     |
|     | 2   | 0.560            | 0.577    | 0.589    | 0.638    | 1.636    |          |          |          |          |          |          |           | 4.0     |

第二试验场孔压消散统计表 表 1-3

| 孔压编号      |                   | $\mu_{27}$ | $\mu_{28}$ | $\mu_{29}$ | $\mu_{30}$ |
|-----------|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| 埋深(m)     |                   | 1.5        | 3.0        | 4.5        | 6.5        |
| 1993.3.12 | $\mu$ (kPa)       | 9.15       | 20.03      | 37.69      | 55.82      |
|           |                   |            |            |            |            |
| 1993.4.12 | $\Delta\mu$ (kPa) | 21.39      | 43.45      | 59.53      | 70.68      |
|           | $\Delta\mu$ (kPa) | 12.24      | 23.42      | 21.84      | 14.68      |
| 1993.5.11 | $\Delta\mu$ (kPa) | 21.12      | 42.9       | 46.85      | 69.91      |
|           | $\Delta\mu$ (kPa) | 11.97      | 22.87      | 9.16       | 14.09      |
| 1993.8.14 | $\Delta\mu$ (kPa) | 20.27      | 40.7       | 32.26      | 69.13      |
|           | $\Delta\mu$ (kPa) | 11.12      | 20.670     | 0          | 13.31      |

第一试验场以第Ⅳ断面为例,分析如下:从表四的孔压消散统计中可以看出,第一阶段从 1992 年 12 月 13 日加载,至 1993 年 3 月 5 日,共计 82 天加载期,加载量为 4.638m 堤高,共分 9 级加完,加载后孔隙水压力消散情况是:共 6 只孔隙水压力传感器,埋深分别为 2.1m、4m、6m、9m、12.4m 和 14.6m。按加载后开始消散的第 13d、34d、59d、92d 和 120d 的 5 次资料分

析。从表 1-4 中资料可知停载后第 13d,整个土层加权平均固结度为 15.7%,34d 时土体固结度为 32.7%,59d 测定固结度 50.1%,92d 已达到固结度 68.7%,120d 时已超出 80%,达到 81.4%。众所周知,淤泥的固结度达到 80% 时已基本满足工程要求,如果按设计预估,路堤总沉降量为 150cm 分析,则 120d 后的工后沉降小于 30cm,这样的固结速度,足以说明深汕四标在处理 17m 深的淤泥,用 10.2m 的袋装砂井,间距为 1.3m 时,在设计荷载下,用 120d 的预压,固结度已能达到 80%,比起理论计算的预压时间快 3 倍多,这个问题值得工程学术界引起重视。其实,在以往的工程中也多次出现过,理论计算的土体固结度比实际工程的固结度要慢 2~3 倍,原因是两个方面:其一是固结方程存在一些无法弥补的根本缺陷;其次是土质指标测定时被扰动,影响指标的真实性。由此可见,对于深汕西线 4 标段的软基路段,如果砂井、砂垫层排水加固措施的施工质量可靠,再将施工填筑期的地基稳定性控制稳妥,则预压期是可以保证的,而且缩短的可能性较大,这个结论是本次试验的成果之一(表 1-4)。

第一试验场 IV 断面 120d 的固结度分析表 表 1-4

| 孔压编号                     |                   | $\mu_{17}$ | $\mu_{18}$ | $\mu_{19}$ | $\mu_{20}$ | $\mu_{21}$ | $\mu_{22}$ | 备注 |
|--------------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|
| 孔深(m)                    |                   | 2.1        | 4          | 6          | 9          | 12.4       | 14.6       |    |
| 起始压孔(kPa)                |                   | 42         | 42         | 57.3       | 123.5      | 138.8      | 171.2      |    |
| 最大压孔增量 $\Delta\mu$ (kPa) |                   | 33.9       | 41.1       | 31.8       | 41.7       | 34.1       | 17.8       |    |
| 经 13 天                   | $\Delta\mu$ (kPa) | 27.7       | 34         | 25.4       | 35.6       | 30         | 15         |    |
|                          | $\mu$ (%)         | 18.3       | 17.3       | 20.1       | 14.6       | 12.6       | 15.7       |    |
| 经 34 天                   | $\Delta\mu$ (kPa) | 26.2       | 24.8       | 18.9       | 25.9       | 25.1       | 13.1       |    |
|                          | $\mu$ (%)         | 22.7       | 39.7       | 40.6       | 37.9       | 26.4       | 26.4       |    |
| 经 92 天                   | $\Delta\mu$ (kPa) | 11.5       | 8.1        | 7.9        | 9          | 10.9       | 11.2       |    |
|                          | $\mu$ (%)         | 66.1       | 80.3       | 75.2       | 78.4       | 68         | 37.1       |    |
| 经 120 天                  | $\Delta\mu$ (kPa) | 7.6        | 4.5        | 2.6        | 4.5        | 5.1        | 9.4        |    |
|                          | $\mu$ (%)         | 77.6       | 89.1       | 91.8       | 89.2       | 85         | 47.2       |    |

1.2.3 高速公路软基中采用袋装砂井排水固结法的合理性与优越性

淤泥地基的加固方法,从原理上分析可分为 5 个大类 70 种方法。5 大类指置换法类、排水固结类、振动挤密类、胶结法类和加筋法类。从加固时间上分,又可分为快速加固法和慢速加固法,快速加固完毕立即可以投产使用。鉴于有 70 种方法,因此在选择加固方法时需慎重,稍有疏忽就会造成大量经济损失或工程失误。正确选择合理的加固方法需遵守几条原则:①正确掌握淤泥的工程性质。有的淤泥结构灵敏,这类土不宜采用振动扰动;有的淤泥有机质含量大,黏粒含量重,就不适宜用排水固结法;②正确了解所建工程特点。例如本工程施工期长,路堤本身又可借用为堆载荷重,因此具备了排水固结的条件;③了解和分析当地环境。有些工程砂石料多,价格便宜,运输方便,就可以选用振动置换法加固。总之,依据这些原则来选用合理的加固方法能起到事半功倍的效果,反之则不然。

深汕高速公路西线第四标段软基的淤泥含量高,强度低,淤泥土层厚。但是这种淤泥粉性重,相对于上海地区、内地一些地区,它的排水固结速度较快。通过试验已知情况如下:首次加载期约 60~70d,接近极限填土高度,停歇 60d 左右,再用 170d 加至设计填土高度,总加载期约为 300d,然后进入预压期,通过 180d 至 200d 的预压,已完成整个路堤的预压过程,此时各试验段的总沉降量已超过设计预估沉降量,沉降速率已小于 0.5mm/d。由上述分析可知,从清淤开始至预压完成总工期约需 18 个月,比原设计预估 36 个月有较大提前。由此可知类



似于这样的淤泥地基,建造高速公路,采用排水固结已能解决工程问题。

必须指出,排水固结法须具备两个前提:①有足够的预压堆载荷重,只有在荷重堆压下才能将淤泥中的孔隙水挤出来,再通过淤泥中设置的一系列排水通道将孔隙水迅速排出,完成加固目标;②有足够的排水时间。淤泥的孔隙水排出需要有一个时间过程,这个时间过程必须得到工程建设许可,否则就会延误工期。以上两个前提条件,对高速公路建设是完全具备的,一般的高等级公路建设周期大于24个月,有的36个月,甚至48个月,这样的建设周期可以充分利用。其次路堤本身就是个良好的预压荷重。以上两个条件如能综合利用,将对公路建设发挥巨大影响。

此外,目前高速公路设计中出现了一些 $\phi 42 \sim 50\text{cm}$ 挤密砂桩,此砂桩能否在高含水率的超软弱淤泥中起到挤密作用,国内工程界和学术界已有一致看法,认为这种强度很低的高含水率淤泥是无法被挤密的,相反淤泥被扰动后强度反而降低了,在施工期会得不偿失。在试验过程中做了少量砂桩效果检验,结果远远达不到设计要求,只能作为一种直径较大的排水砂井。从排水砂井固结理论计算结果看, $\phi 42\text{cm}$ 的砂井达到80%固结度时需要30d, $\phi 7\text{cm}$ 砂井在同样土质条件下,达到80%固结度需100d,两者相差70d, $\phi 7\text{cm}$ 砂井造价一般在3元/m左右, $\phi 42\text{cm}$ 砂井18元/m以上,两者差价达6倍以上,而70d工期在长达720~1440d中完全可以通过合理安排和调整满足工程工期要求。其次是挤密砂桩的施工质量保证,尤其在保证达到设计要求的灌砂率方面,施工难度很大,而且施工速度又慢。由此可见挤密砂桩用来挤密高含水率淤泥不太可能,而用来作为排水砂井则有造价昂贵、施工期长和质量难于控制等缺陷,因此一般情况下不宜使用。深汕西线四标段经试验论证,已用袋装砂井替代了挤密砂桩,深汕东线也有部分地段中途将砂桩改成砂井,至目前这些施工地段情况比较正常。

#### 1.2.4 最终沉降和工后沉降量分析

目前行业内普遍采用计算采用分层总和法计算。该方法简单,但计算结果与实测往往有较大出入,为此笔者建议在计算中乘以一个系数 $m_s$ 。分层总和法的主要缺点是假定土体在侧向受限制的条件下发生垂直压缩,这个条件与室内压缩试验相似,但与实际工程条件相差太大,为弥补这一缺陷,对软土地基在公式中乘以一个大于1的系数 $m_s$ 。由此可以推断,土质越软,侧向变形越大, $m_s$ 值也越大,规范规定 $m_s = 1.1 \sim 1.3$ ,深汕高速公路至少用到1.3。

试验段观测结果如下:第一试验场第一阶段加载,停歇观测,总时间为280~300d,总填土高度为4.316~4.931m,均超过设计高度(表1-1)。加载后又预压210d,测得的总沉降量为1003~1654mm,其中第一断面为两层土工布,它可以改善侧向受力条件,因此它的沉降仅1003mm,特别小。第三至第五断面分别为1654mm、1585mm和1606mm,都大于设计计算的1550mm,此时,第三断面沉降速率已下降至0.49mm/d。估计按此速度下降,尚会发生15~20cm的沉降量。从上述资料可以看出计算沉降量小于实测沉降量,这说明深汕四标段的土质比较软弱。此外,第二试验场两个断面,分别测得最大沉降量为455mm和496mm,这远比设计计算的187mm为大,这里除土质软弱外,尚存在着淤泥土质指标的测定是否正确的问题。

上述实测沉降量大于计算值,原因如下:

(1)淤泥土的沉降由3个主要部分组成:第一部分为侧向挤出量,这部分至今尚无法用理论公式计算,它是由于地基土体出现局部溯流而产生的,这属于弹性或塑性体问题,正确的理