

Nai Jiu Xing Gao Su Gong Lu Xiu Zhu Xin Ji Shu

耐久型高速公路

修筑新技术

刘中林 高民欢 齐彦锁 田文 杨广庆◎编著



人民交通出版社

Nai Jiu Xing Gao Su Gong Lu Xiu Zhu Xin Ji Shu

耐久型高速公路 修筑新技术

刘中林 高民欢 齐彦锁 田文 杨广庆◎编著



人民交通出版社

内 容 提 要

为实现修筑长寿命、耐久型平原区高速公路的目标,作者结合多年来的实践经验,对河北省青银高速公路路基路面修筑过程中采用的新技术、新材料、新工艺等科研成果进行总结和提炼编著此书。本书内容丰富新颖、系统全面、理论联系实际,具有较强的实用性和可操作性。

全书共分十一章,主要内容包括高速公路软土地基处理技术、高速公路路基填料承载比特性及应用技术、高速公路路基边坡冲刷机理及防护技术、高速公路路基沉降变形控制技术、水泥稳定碎石基层振动成型法在高速公路中的应用、柔性基层沥青路面设计参数及路用性能、大粒径碎石沥青混合料设计参数及路用性能、沥青混合料级配优化及应用技术、沥青路面抗滑表层设计优化及应用技术和沥青路面工程施工质量控制技术等。

本书可作为从事公路工程设计、施工、管理、监理及养护的技术人员和管理人员的参考用书与培训教材,也可作为高等院校相关专业师生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

耐久型高速公路修筑新技术 / 刘中林等编著. — 北京:人民交通出版社, 2011.8
ISBN 978-7-114-09283-1

I. ①耐… II. ①刘… III. ①高速公路—工程施工—新技术 IV. ①U412.36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 142321 号

书 名:耐久型高速公路修筑新技术

著 作 者:刘中林 高民欢 齐彦锁 田 文 杨广庆

责任编辑:刘彩云

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) 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:22.5

字 数:538 千

版 次:2011 年 8 月 第 1 版

印 次:2011 年 8 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09283-1

定 价:68.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

河北省青银高速公路是交通运输部规划的“五纵七横”国道主干线之一,也是河北省“十五”公路网建设发展规划确定的“四纵四横十条线”主骨架中的组成部分。本项目的建设对完善国家路网,促进国民经济发展具有重要意义。线路起自冀鲁界的油坊以南1km处,途经清河、威县、南宫、新河、宁晋、赵县、栾城、元氏、鹿泉,止于石太高速公路K333+500处,路线全长182.004km,总体呈西北—东南走向,基本与G308国道并行。沿线地势西高东低,为山前洪积扇、冲积平原地貌。

线路设计为平原微丘区双向4车道高速公路,设计速度120km/h,路基宽度28m;经河北省交通厅批准,每千米增加1对停车港湾。连接线采用二级公路标准建设,设计速度80km/h,路基宽度12m;桥涵设计车辆荷载采用公路I级;设计洪水频率,特大桥为1/300,大中小桥、涵洞及路基工程为1/100;抗震设防烈度为VII度。

本工程于2003年5月16日开工建设,2005年12月11日交工验收,同年12月28日试运营。2010年3月进行了竣工验收。竣工验收委员会认为:青银至银川国道主干线清河(冀鲁界)至石家庄公路平、纵线形顺适;路基稳定,排水系统完善;桥型结构合理,外观质量良好;路面平整密实,交通工程及机电设施完善,房建工程布局合理。该项目注重管理创新和技术创新,设计理念先进,项目中推行低路基、节约土地、基层振动试验成型法、GTM等措施,保证了工程质量和安全,项目管理水平较高。经过通车试运营,整体状况良好。竣工验收工程质量评分值为96.58分,工程质量评定等级为优良。本工程获国家银质奖1项,省部级优质工程奖2项。

青银高速公路作为河北省“十五”期间建设里程最长、投资规模最大的高速公路项目,为了适应高速公路建设快速发展的要求,实现青银高速公路科学规范管理,确保优质工程的总体目标,青银高速公路筹建处在项目管理创新和技术创新上实现了十项突破。

(1)河北省第一条将土建工程、机电工程、监控、绿化、联网收费等统筹建设、同时交付使用的高速公路工程。

(2)河北省第一条建设单位工程建设质量管理体系通过ISO 9000认证的高速公路。

(3)国内第一条实行纪检、监察、审计联席制度建设的高速公路,为在公路建设领域推行十大公开,打造阳光工程积累了经验,奠定了基础。

(4)以项目建设为依托进行了14项研究课题,其中6个课题获得河北省科技进步奖。

(5)河北省第一条全面实行精细化管理和路面施工动态技术质量管理的高速公路。

(6)河北省第一条采用低路基方案、节约土地做法的高速公路,实现了当年取土,当年

复耕,当年种庄稼。节约耕地 336 亩,节约取土用地 2798 亩。

(7)为解决桥头跳车这一质量通病,率先采用冲击压实和水泥搅拌桩处理原地面,采取液态粉煤灰水泥混合料等新工艺、新材料浇筑基坑和台背,效果良好,行车舒适。

(8)河北省第一条全面推广振动击实成型法进行基层材料组成设计和施工控制的高速公路,提高了路面基层压实度,大大降低了路面开裂隐患。

(9)率先在河北省推广大粒径 ISAM 沥青混凝土新型路面结构和长路段柔性基层研究的高速公路,同时也是大规模在全线沥青面层施工中推行 GTM 设计方法的高速公路。

(10)通过专家论证,率先在沥青路面上、中、下三层之间设置改性沥青黏结防水层的高速公路。

本书对河北省青银高速公路路基路面修筑过程中采用的新技术、新材料、新工艺等科研成果进行了总结和提炼,内容丰富新颖、系统全面、理论联系实际,具有较强的实用性和可操作性。在本书的编写过程中得到了河北省青银高速公路管理处、石家庄铁道大学、长安大学、河北工业大学、吉林大学、解放军理工大学工程兵工程学院以及全体参建单位和监理单位的大力支持,在此表示衷心的感谢。

本书主要由刘中林、高民欢、齐彦锁、田文、杨广庆编著,参加编写工作的还有张文裕、封晓黎、张新宇、史建方、何敬晨、张景堂和左劫。全书共分十一章,主要内容包括高速公路软土地基处理技术,高速公路路基填料承载比特性及应用技术,高速公路路基边坡冲刷机理及防护技术,高速公路路基沉降变形控制技术,水泥稳定碎石基层振动成型法在高速公路中的应用,柔性基层沥青路面设计参数及路用性能,大粒径碎石沥青混合料设计参数及路用性能,沥青混合料级配优化及应用技术,沥青路面抗滑表层设计优化及应用技术,沥青路面工程施工质量控制技术等。

限于作者水平,书中遗漏、不足之处在所难免,敬请各位专家和读者批评、指正。

编著者

2011 年 5 月

目 录

第 1 章 高速公路软土地基处理技术	1
1.1 软土地基沉降机理与计算分析	1
1.2 软土地基处理测试布置技术	8
1.3 高速公路软土路基地基处理效果分析与评价	13
1.4 结论	27
第 2 章 高速公路路基填料承载比特性及应用技术	28
2.1 承载比(CBR 值)试验的意义及内在机理	28
2.2 高速公路路堤填料 CBR 值影响因素研究	29
2.3 高速公路填料承载比 CBR 值、回弹模量 E_0 及压实度 K 相关关系	36
2.4 含水率对土基 CBR 值影响试验	43
2.5 提高路堤填料 CBR 值的措施及试验研究	44
2.6 提高路基填料 CBR 值对路面结构形式的影响	47
2.7 结论	47
第 3 章 高速公路路基边坡冲刷机理及防护技术	48
3.1 路基边坡冲刷机理分析	48
3.2 路基边坡冲刷防护试验研究	52
3.3 边坡防护临界高度及应用场合分析研究	60
3.4 路基边坡冲刷综合防护与生态环境保护技术研究	69
3.5 结论	78
第 4 章 高速公路路基沉降变形控制技术	80
4.1 高速公路路堤竖向沉降变形研究	80
4.2 行车荷载作用下路基累积塑性变形研究	97
4.3 土工格室楔形搭板处理桥头跳车技术研究	102
4.4 结论	106
第 5 章 水泥稳定碎石基层振动成型法在高速公路中的应用	107
5.1 半刚性基层存在的主要问题	107
5.2 振动成型原理	108
5.3 河北省青银高速公路基层结构设计	108
5.4 水泥稳定碎石基层振动成型法配合比设计	109
5.5 结论	114

第 6 章 基于抗裂性能的半刚性基层设计优化技术	115
6.1 半刚性基层材料防裂配合比设计方法	115
6.2 半刚性材料综合路用性能研究	123
6.3 半刚性材料收缩机理分析及抗裂评价指标研究	137
6.4 半刚性基层沥青路面温度应力分析	140
6.5 试验路工程	148
6.6 结论	152
第 7 章 柔性基层沥青路面设计参数及路用性能	154
7.1 柔性基层沥青路面结构设计指标、模型与参数研究	154
7.2 基于 GTM 的沥青稳定碎石级配设计及路用性能研究	169
7.3 沥青稳定碎石级配设计方法及性能研究	181
7.4 沥青稳定碎石基层竖向离析分析	188
7.5 柔性基层沥青路面结构组合及试验路铺装与观测分析	191
7.6 结论	219
第 8 章 大粒径碎石沥青混合料设计参数及路用性能	221
8.1 基于弹性体系的大粒径沥青路面结构分析	221
8.2 大粒径碎石沥青混合料设计参数研究	227
8.3 大粒径碎石沥青混合料路用性能试验研究	233
8.4 大粒径碎石沥青混合料的 GTM 设计及路用性能分析	236
8.5 大粒径碎石沥青混合料施工技术特征研究	242
8.6 结论	258
第 9 章 沥青混合料级配优化及应用技术	259
9.1 沥青混合料级配特征及稳定性评价方法	259
9.2 嵌挤密实型混合料级配优化设计技术	271
9.3 沥青混合料路用性能试验研究	278
9.4 沥青混合料级配变异及施工控制技术	282
9.5 结论	285
第 10 章 沥青路面抗滑表层设计优化及应用技术	286
10.1 骨架密实结构 SAC13 设计方法研究	286
10.2 SAC13 沥青混合料路用性能研究	296
10.3 沥青混合料压实特性分析	310
10.4 SAC13 沥青混合料试验路的施工技术研究	315
10.5 结论	328
第 11 章 沥青路面工程施工质量控制技术	330
11.1 热沥青混合料的生产管理技术	330
11.2 热沥青混合料生产质量的过程控制技术	334
11.3 热沥青混合料的运送与摊铺作业质量控制	337
11.4 沥青路面碾压施工技术	350

第1章 高速公路软土地基处理技术

我国大陆最早建成通车的沪嘉高速公路全长 15.9km,均为软土地基,于 1988 年 10 月通车;继沪嘉高速公路之后,又有京津塘高速公路(全长 143km,软土段 48km)、广佛高速公路(全长 15.7km,软土路段 4.43km)、杭甬高速公路(全长 145km,软土路段 91.65km)、广深高速公路(全长 122km,软土路段 34km)等位于软土地地区的高速公路建成通车。一次建成通车里程最长的软土路基上的高速公路是始建于 1992 年 6 月,1996 年 9 月通车的沪宁高速公路,该路全长 274.08km,软土路段 92.29km。可以说,我国的高速公路是在软土地地区发展起来的。

软土在我国沿海地区和内陆平原或山间盆地都有比较广泛的分布,它们的成因、结构和形态虽然不同,但都具有含水率大、压缩性高、强度低和透水性差的特点。我国沿海各地主要是海岸沉积形成的软土,长江、黄河、珠江、淮河等各大河流下游为陆相的河滩沉积和海相的三角洲沉积软土,洞庭湖、洪泽湖、太湖等各大湖泊周围广泛分布有湖泊沉积的软土。在软土地基上修建高速公路,首先要进行加固处理。因此,加强对软基处理效果的研究,科学地选择经济、有效的软基处理方案,对于确保工程质量具有很重要的意义。

本章就高速公路软土地基处理效果评价及选型策略技术进行了系统研究与分析,主要包括:

(1)结合河北省青银高速软土地基处理试验段的长期沉降观测资料来预测工后沉降,对软基处理的效果进行评价。

(2)针对软土地基不同地质条件、填土高度和地基处理方式,选择典型的断面,埋设了土压力盒、测斜仪、沉降观测标,进行沉降和应力观测。对观测结果进行分析,给出不同性质软土的沉降修正系数。

研究内容为揭示软土路基填筑高度—沉降量、填筑速率—沉降速率、填筑高度—侧向位移量、填筑速率—侧向位移速率、填筑高度—孔压以及在施工期、预压期和运营期路堤荷载—土压力的变化规律。通过以上实测资料来分析和评价各种地基处治方法的作用机理、适用性和处治效果,对于在建和未建的高速公路软基处理具有十分重要的意义。

1.1 软土地基沉降机理与计算分析

1.1.1 软土地基沉降变形机理

高速公路地基沉降按照其发生的机理可以分为瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降三部分。高速公路软土地基设计中通常只计算固结沉降,然后乘上一个综合影响系数 m_s 作为总沉降量。对于主要由黏性土组成的高速公路路基而言,其中固结沉降是路基沉降中的主要部分。因此,在设计计算中也主要是针对固结沉降而言的。

1) 沉降变形机理

沉降经历的三个不同阶段:瞬时沉降 S_d 、固结沉降 $S_c(t)$ 、次固结沉降 $S_s(t)$,如图 1-1 所示。总沉降为

$$S(t) = S_d + S_c(t) + S_s(t) \quad (1-1)$$

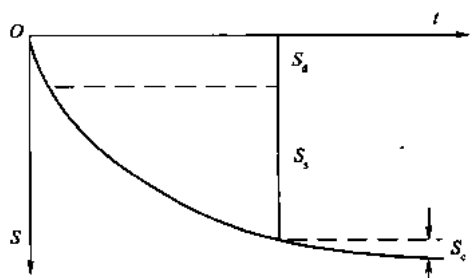


图 1-1 地基沉降的三个组成部分

(1) 瞬时沉降

瞬时沉降是在外荷加上的瞬间,饱和软土中孔隙水尚来不及排出时所发生的沉降。此时土体只发生变形而没有体变。瞬时沉降与加载方式和加载速率有很大的关系,这是由于不同增量加载时刻,土中有效应力随着土体的固结而增大,土体的变形模量相应增大的缘故。

(2) 固结沉降

荷载加于地基土上后,随着时间的延续,荷载不变而地基土中的孔隙水逐渐排出过程中所发生的沉降,称为固结沉降。它是由于外荷载引起超孔隙水压力的水力梯度促使水从土体内排出,而应力增量转移到土体骨架上而发生沉降。它与时间有关,且主要发生体积的变化。

(3) 次固结沉降

当地基土中的超静孔隙水压力,在不变的外荷载作用下已完全消散,主固结变形已完成后,土体仍会继续出现沉降变形。这一阶段的变形是在超孔隙水压力完全消散以后,有效应力不变时发生的沉降,是地基土中土粒骨架在持续荷载下蠕变所引起的,故也可称之为排水蠕变。

瞬时固结不导致孔隙水的排出,但不等于可以将软土看成弹性体而认为其导致的变形是瞬时完成的。瞬时沉降与加载方式和加载速率有很大的关系,如采用瞬时一次加载方式时,地基的瞬时沉降量比均匀加载的情况要大得多。这主要是由于增量加载的时刻,土中有效应力随土体的固结而增大,土体的变形模量也相应增大。因此,瞬时沉降实质并非“瞬时”,而是不排水的侧向挤出而产生的位移变形沉降。而且,侧向挤出产生的沉降也并非瞬时能完成,也能延续相当长的时间。

这种人为地将固结沉降从时间上划分为三个阶段,认为次固结沉降只是从主固结基本完成后才开始发生,实际上,次固结沉降从受到荷载就开始了。次固结导致的变形较缓慢也会导致孔隙水的排出,而且次固结导致的孔隙水的排出与主固结的同步,只是各自的机理及延续的时间不同。事实上,瞬时固结、主固结和次固结都是在受力后同时开始发生的,只是在某个阶段以一种沉降变形为主而已,且不同性状的土三个组成部分的相对大小及时间是不同的。通常在地基设计中只计算固结沉降。在上述的三部分变形分析中,只是考虑了在法向力作用下的变形,特别是固结和次固结变形的分析,实际上都忽略了剪应力引起的变形。

2) 工后沉降的组成分析

软土路基的工后沉降由因孔隙水压力消散而产生的主固结沉降与因土骨架蠕变产生的次固结沉降组成。如果工后沉降主要由主固结沉降组成,可以采用加长预压时间或超载预压的方法进行解决;而如果工后沉降主要由次固结沉降组成,由于目前没有可行的方法消除或加快完成次固结,无法采取主动的措施,但需要准确预测其沉降值。因而,区分主固结和次固结沉

降并分析二者在工后沉降中所占的比例,对于软基处理技术方法选取、方案设计具有重要的意义。工后沉降量的预测,对工程措施的决策及工程质量的保证具有重要的意义。

1.1.2 高速公路软土地基沉降计算

地基沉降的计算方法可以分为四类:①弹性理论法,也称直接法;②工程方法,也称间接法;③经验公式法;④数值分析法。

弹性理论方法立论严谨,对于弹性的、均质的、各向同性的半空间体,其数学解精确,但对软黏土地基而言,其本构方程有时与实际不符,因而其计算结果与实测结果有较大差异,主要用于瞬时沉降量的计算。

工程方法包括压缩仪法(Terzaghi, 1925)、Skempton-Bjerrum法(1957)、应力路径法(Lambe, 1967)、状态边界法(Burland, 1971)等。这些方法仍利用弹性理论来计算地基中的附加应力,而土的应力—应变关系则取自试验(间接法)。该类方法应用最广,其计算结果为瞬时沉降和固结沉降之和。

第三类方法包括经验和半经验公式,利用原位测试结果来推算地基的沉降。数值分析方法主要有有限元法、有限差分法和集总参数法等。

1) 瞬时沉降量的计算方法

在剪应力作用下,地基内会产生剪切变形及侧向挤出引起附加沉降。实际上,此项沉降量也是随着路堤的填高而增大,越接近极限高度,增长的数值越大。如地基受到显著扰动时,此项沉降增加得更多。通常,根据固结沉降量的计算结果进行修正来确定最终沉降量,而没有专门合适的方法来计算这项沉降量。一般采用弹性理论公式进行计算。

弹性理论公式法是用弹性理论公式来计算建(构)筑物的沉降,然后再考虑地基中塑性开展区的校正方法。

(1) 瞬时沉降量计算

当黏性土地基的厚度很大,作用于土面的圆形或矩形面积上压力为均布荷载时,初始沉降可用下述弹性理论公式计算,即

$$S_d = C_d q B \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) \quad (1-2)$$

式中: q ——均布荷载;

B ——圆形或矩形荷载面积的直径或宽度;

C_d ——考虑荷载面积形状和沉降计算点位置的系数,可查表;

E ——土的弹性模量;

μ ——土的泊松比。

(2) 弹性参数的估计

对于饱和软黏土,在刚加荷的瞬间,它是在体积不变的情况下产生变形的,即可以认为它是不可压缩的,通常可假设 $\mu = 0.5$ 。尽管许多黏土层是各向异性的,这个假定不一定正确,但它对瞬时沉降的结果并无明显的影响。

沉降计算中比较关键的问题在于如何确定弹性模量 E 的值。一般从三轴不排水试验或单轴压缩试验得到的应力—应变关系曲线的初始切线模量求得。实践证明,这样得到的 E 值

往往偏低,仅为现场实测值的一小部分,可以逐渐增加轴向压力,达到现场荷载条件下的压力,然后减小到零,这样重复加荷和卸荷多次,确定每一循环在最大轴向压力一半时的切线模量。这种切线模量随着循环次数的增多而增大,最后趋近于一渐进线,称为再加荷模量 E ,一般 5~6 个循环即可确定。用该数值来取代式(1-2)中的弹性模量 E ,得到的瞬时沉降与实测沉降值比较一致。

(3) 塑性区开展的校正

如果地基分层很多,软硬变化显著,或者荷载 q 接近于极限荷载 q_u ,使得地基中有较大的塑性区存在时,公式(1-2)所得的结果则难以正确。如何考虑塑性区存在时校正地基瞬时沉降量的问题,已由 D'Appolonia(德阿普乐尼亚)用有限元法予以解决。

首先确定土的现场剪应力(加荷之前)与不排水抗剪强度 τ_u 之比为:

$$f = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} / \tau_u = \frac{(1 - K_0)\sigma_v}{2\tau_u} \quad (1-3)$$

式中: σ_v 、 σ_h ——初始有效竖向应力与水平应力;

K_0 ——土的静止侧压力系数。

一般来说,黏性土的 τ_u 与 σ_v 成正比,所以对均质地基 f 为一常数。

按不排水抗剪强度推求地基的极限荷载为 q_u ,并设目前所加荷载为 q ,因此应力水平比为 q/q_u 。根据 q/q_u 和 f ,可以查阅图表得出校正系数 S_R 。

考虑有塑性区存在时,地基的初始沉降为

$$S'_d = \frac{S_d}{S_R} \quad (1-4)$$

2) 主固结沉降量的计算

(1) 传统分层总和法(单向压缩法)

分层总和法有如下假定:

- ①压缩时地基不能有侧向变形;
- ②根据基础中心点下的土的附加压力进行计算;
- ③基础最终固结沉降量等于基础底面下压缩层范围内各土层压缩量的总和。

分层总和法将压缩层范围内的土层分成 n 层,应用弹性理论计算在荷载作用下各土层中的附加应力,采用侧限条件下,即单向压缩条件下的压缩性指标,分层计算各土层上的压缩量,然后求和得到压缩层范围内的总沉降。

分层总和法沉降计算公式如下:

$$S_c = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i H_i \quad (1-5)$$

式中: ΔS_i ——第 i 层土的压缩量;

ε_i ——第 i 层土的侧限压缩应变;

H_i ——第 i 层土的厚度。

单向压缩法中,附加压力一般取基础轴线处的附加应力值,以弥补采用该法计算得到的沉降偏小的缺点。由于附加应力 σ_z 沿深度方向的分布是非线性的,为避免产生较大的误差,计算中土层的分层不宜过大,建议一般分层的厚度不超过基础宽度的 2/5。

(2) 规范推荐法(修正的分层总和法)

用单向压缩法计算地基最终沉降量时,由于理论上作了一些与实际情况不完全符合的假设以及其他因素的影响,计算值往往与实测值不尽相符,甚至相差很大。为此,可以根据传统的分层总和法原理,将计算方法加以简化。分析沉降观测资料表明,可以采用修正系数 ψ_s 来反映沉降量计算值与实测值的差别,对计算结果进行修正。修正系数 ψ_s 综合考虑了沉降计算中所不能反映的一些影响因素,诸如土的类型不同、选用的压缩模量与实际有出入、土层的非均质性对应力分布的影响、荷载性质的不同与上部结构对荷载分布的调整作用等。

沉降计算公式如下:

$$S_c = \psi_s S'_c = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{P}{E_{si}} (z_i a_i - z_{i-1} a_{i-1}) \quad (1-6)$$

式中: S'_c —— n 层土竖向压缩量之和;

ψ_s ——沉降计算经验系数,根据地区沉降观测资料及经验确定,也可查表确定;

E_{si} ——第 i 层土的压缩模量,按实际应力范围取值;

P ——对应荷载标准值的基础底面附加压力;

z_i, z_{i-1} ——分别为第 i 层土底面和顶面距基础底面的距离;

a_i, a_{i-1} ——分别为第 i 层土底面和顶面的平均附加应力系数,可查规范。

(3) 考虑先期固结压力计算固结沉降量方法

现场的软黏土在其地质历史上一般受过前期固结压力 P_c 作用,由于土层的变动、河流的冲刷等原因,这一压力不一定等于现场的有效应力 P_0 。为此,可将黏土分为三类:

① $P_0 = P_c$,称为正常固结土;

② $P_0 > P_c$,称为超固结土;

③ $P_0 < P_c$,称为欠固结土。

在沉降计算中应考虑先期固结压力 P_c 的影响,当土体处于不同状态时,要求采用不同的压缩性指标计算沉降量。

这三类土的沉降计算的基本公式为

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{1 + e_{0i}} H_i \quad (1-7)$$

式中: Δe_i ——第 i 层土孔隙比的改变量,利用现场原状压缩曲线得到;

e_{0i} ——第 i 层土的初始孔隙比;

H_i ——第 i 层土厚度。

由于三类土的 e - $\lg P$ 曲线的性状不同,故在实际沉降计算中需对 Δe_i 加以修正。

Δe_i 的修正直接关系到计算的精确性,对于不同类型的土体应根据相应的 e - $\lg P$ 曲线作出相应的修正,然后代入式(1-7)求得沉降量,这里不再赘述。

(4) 考虑侧向变形的固结沉降计算(Skempton-Bjerrum法)

利用 e - $\lg P$ 曲线来计算沉降,对正常固结、超固结和欠固结黏性土,可分别对待,这似乎比利用 e - p 曲线计算沉降前进了一步。实际上,地基中的土受到附加应力后,变形并不是如前所述的那样简单,也不是像在固结仪中简单地沿一个垂直方向压缩。侧向变形对固结沉降的影响很大,特别是当地基中黏性土层的厚度超过基础面积的尺寸时,这种影响更大。对此,司开

普顿和贝伦(Skempton & Bjerrum)利用半径法来解决。

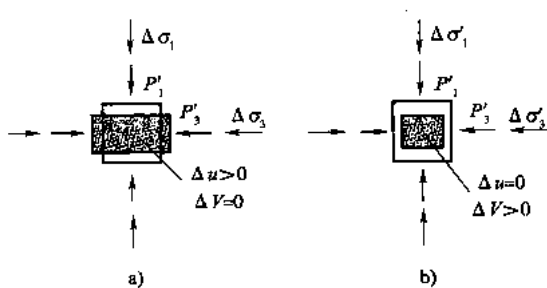


图 1-2 土体侧向变形

图 1-2 表示一块存在于地基内部土样。如图 1-2a) 所示,原来作用于土样上的垂直和水平方向的压力是 P'_1 和 P'_3 。开始加荷时,增加了附加应力 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$,这时,对饱和土来说,孔隙压力 $\Delta u > 0$,体积改变 $\Delta V = 0$,但土块已经产生变形,这是瞬时弹性变形。随后,上部土体固结,孔隙水随着时间而逐渐排出, Δu 逐渐减小,直至土块完全固结, $\Delta u = 0$,如图 1-2b) 所示。

对于固结变形而言,由于附加主应力 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ 引起孔隙压力 Δu ,它们之间的关系可写成如下表达式:

$$\Delta u = B\Delta\sigma_3 + BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (1-8)$$

式中: $B\Delta\sigma_3$ ——由附加应力 $\Delta\sigma_3$ 引起的孔隙压力;

$BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ ——由偏应力 $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ 引起的孔隙压力;

A 、 B ——孔隙压力系数,可用三轴仪测定。

对于饱和土来讲,系数 $B = 1$,孔隙压力的增长与四周附加应力 $\Delta\sigma_3$ 相等,系数 A 视土在地质历史上受压的情况而定。超固结土 $A = 0 \sim 0.5$,甚至会产生负值,正常固结土 $A = 0.5 \sim 1.0$,特别灵敏黏土 A 超过 1.0。

当 $B = 1$ 时,式(1-8)也可写成如下形式:

$$\Delta u = \Delta\sigma_1 \left[A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} (1 - A) \right] \quad (1-9)$$

设 m_v 是土的体积压缩系数,即单位体积土体在单位压力作用下的竖向压缩量。则对厚度为 H 的土层,固结变形的压缩量可近似地按下式计算:

$$S'_c = \int_0^H m_v \Delta u dz = \int_0^H m_v \Delta\sigma_1 \left[A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} (1 - A) \right] dz \quad (1-10)$$

根据前述,固结仪中单向压缩的固结变形为

$$S_c = \int_0^H m_v \Delta\sigma_1 dz \quad (1-11)$$

假设一个比例系数 C_p ,代表这两个固结变形之比,则有

$$C_p = \frac{S'_c}{S_c} = \frac{\int_0^H m_v \Delta\sigma_1 \left[A + \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} (1 - A) \right] dz}{\int_0^H m_v \Delta\sigma_1 dz} \quad (1-12)$$

对于某一指定土层而言, m_v 和 A 都是常数,所以,

$$C_p = A + \frac{\int_0^H \Delta\sigma_3 dz}{\int_0^H \Delta\sigma_1 dz} \cdot (1 - A) = A + a(1 - A) \quad (1-13)$$

式中, $a = \int_0^H \Delta\sigma_3 dz / \int_0^H \Delta\sigma_1 dz$, a 值大小视荷载面的形状及土层厚度 z 而定。

图 1-3a) 为按弹性理论算得的关系曲线。故式 (1-13) 中 C_p 与 a 以及 A 的关系可绘成图 1-3b) 的关系曲线。从图中可以看出, 只有 A 值接近于 1, 或为浅层压缩土 (z/B 较小时), 利用单向压缩公式计算固结变形才是比较正确的。否则, 比例系数 C_p 就是一个修正系数, 很容易从图 1-3b) 中求得, 乘以单向压缩固结变形 S_c , 就得到考虑侧向变形的固结沉降, 即

$$S'_c = C_p \cdot S_c = C_p \int_0^H m_v \Delta \sigma_1 dz \quad (1-14)$$

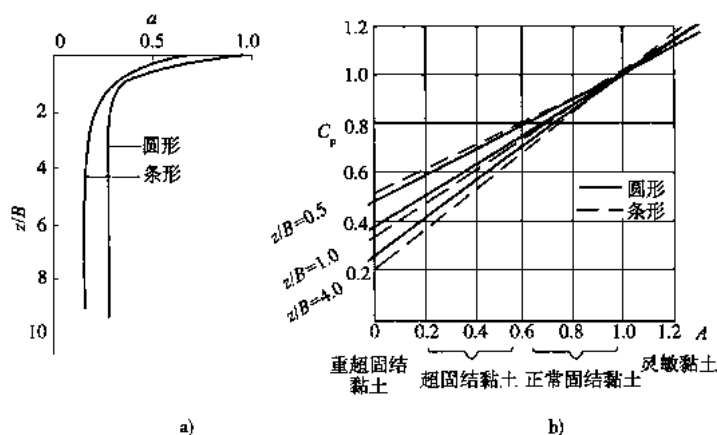


图 1-3 a 和 C_p 变化图

(5) 应力路径法计算沉降

为了更好地考虑侧向变形对垂直沉降的影响, Lambe 和 Marr 提出了一个更为方便的方法: 根据地基土体所经过的应力路径计算土体的压缩量。在这种方法中, 估计和模拟所选单元的应力路径要与室内试验尽可能接近。如地基中一单元土体原始状态为图 1-4 中的 A 点, 不排水条件下加荷的有效应力路径如 AB 所示。 A 点和 B 点之间的轴向变形相当于土体剪切变形引起的竖向压缩量。土体固结过程的有效应力路径如 BC 所示, B 点和 C 点之间的轴向变形相当于固结变形引起的竖向压缩量。从 A 点到 C 点土体竖向压缩量等于从 A 点到 B 点和从 B 点到 C 点的压缩量之和。

常用的应力路径法有两种:

- ① 采用室内试验模拟现场有效应力路径法;
- ② 应变等值线法。

第一种方法是 Lambe (1964 年) 首先提出来的, 其基本思路是:

- ① 根据弹性理论计算出各典型单元应力路径;
- ② 按照计算所得的应力路径进行三轴试验, 并视现场条件确定排水条件, 测量竖向应变;
- ③ 将实测竖向应变乘以相应土层厚度, 计算沉降量。

该方法的优点是能较好地模拟实际应力路径的影响; 缺点是采用弹性理论计算得到的应力路径同地基中的实际应力路径有一定的误差, 按照规定的应力路径试验比较复杂, 且有一定难度。

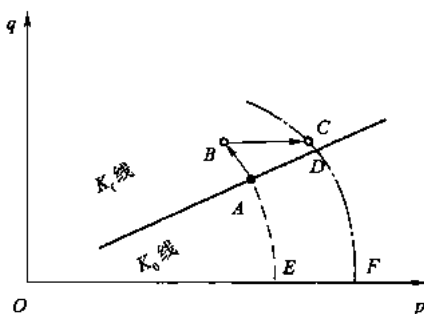


图 1-4 应力路径法示意图

第二种应变等值线法的基本思想是:

①通过一系列的三轴固结不排水剪切试验,得到等轴向应变图。对正常固结黏土,等轴向应变线同等强度发挥应变线重合,均为过原点的直线。

②将由弹性理论计算得到的总应力路径转化成有效应力路径画在等轴应变图上。

③不排水加载阶段的竖向应变和孔隙水压力消散固结过程部分的竖向应变可由等轴向应变图求得。

④土体总的竖向应变即为上述两部分竖向应变之和,然后将应变乘以土层厚度即可得到土体的竖向固结变形量。

1.2 软土地基处理测试布置技术

1.2.1 观测控制点布置原则

在路堤填筑期埋设监测仪器,其布置应遵循如下原则:

①监测点应设在观测数据容易反馈的地方。地基条件差、地变形化大、设计问题多的部位和土质调查点附近等特殊路段均应酌情增设观测点。

②对于成层软土地基需进行土体内部竖向和水平向位移观测。

③在桥梁两端、通道一侧设置观测断面。其中桥头设置左、中、右三个观测点。如桥头路基段分为桥头段和过渡段,一般在桥头搭板的尾部(一般搭板长5~8m),设一观测断面。

④软土路段观测断面的间距为50m,填高大于5m的高路堤设置左、中、右三个观测点。

1.2.2 路基观测项目和目的

软土路基的观测项目主要有沉降、水平位移、孔隙水压力、土压力等。其中沉降观测有以下四种:地面沉降板、深层沉降标、深层分层沉降标以及沿横断面的沉降分布。水平位移的观测仪表采用测斜管,在路堤的边坡坡中及边沟外侧处埋设至地基下卧硬层,测定地基在路堤荷载作用下不同深度的水平位移。一般在路堤的中心和路肩部位,在不同深度的软土层中埋设钢弦式孔隙水压力计,观测路堤在施工及预压期地基中孔隙水压力的变化情况。土压力盒一般埋设在砂砾垫层底部,观测路堤荷载作用下土中应力变化情况。为了进一步清楚了解各观测项目的具体情况,现将其总结归纳如表1-1所示。

1.2.3 典型断面的观测示意图

原位观测所需的全部仪器的布置以不同的视角展现,如图1-5和图1-6所示。

1.2.4 施工观测

1) 地表沉降观测

(1) 观测点的布设

软土路段地表沉降观测一般每100m布设一观测断面,预压施工高度达到极限高度的路段,纵向每50m设一观测断面。此外,在与跨度超过30m的桩基结构物相邻两端各设一观测

断面,跨度小于30m时仅在一端设置。一般路段沉降板埋置于路中心,桥头引道可增设路肩及坡脚位置的沉降板。

路基观测项目和仪器

表 1-1

观测项目	仪器名称	观测目的
地表沉降量	沉降板	用于沉降管理。根据测定数据调整填土速率;预测沉降趋势,确定预压卸载时间和结构物及路面施工时间;提供施工期间沉降土方量的计算依据
地表水平位移量及隆起量	边桩	用于稳定管理。监测地表水平位移及隆起情况,以确保路基施工的安全与稳定
地下土体分层水平位移量	测斜管	用于稳定管理与研究。用作掌握分层位移量,推定土体剪切破坏的位置
地下土体分层压缩量	分层沉降标	地基不同深度在不同时期土体的分层压缩量,用以分析不同土层在施工过程中的变形情况;根据测定数据调整填土速率
孔隙水压力	孔隙水压力计	路基在施工期及预压期孔隙水压力的变化情况;通过分析施工期间孔隙水的消散过程,确定地基的固结程度
土体应力	土压力盒	测定填土工程中路基底面及土体内部的应力分布及变化情况,在复合地基中监测桩及桩间土的应力比

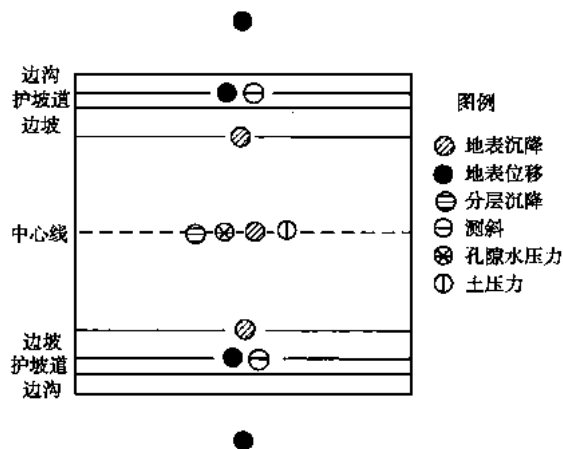


图 1-5 观测断面仪器平面布置图

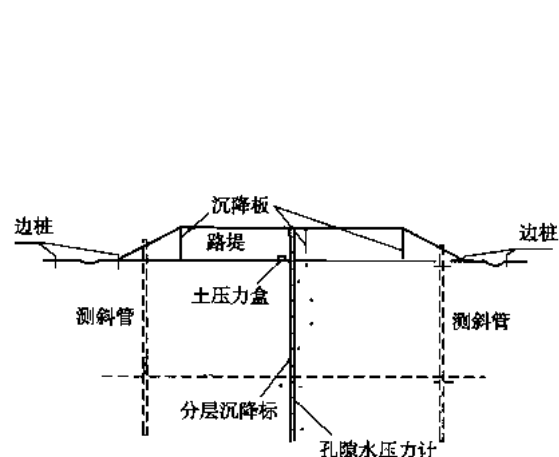


图 1-6 观测断面仪器纵断面布置图

(2) 观测设施的构造

观测设施由沉降板、测杆、套管、套管接箍、套管盖板、测杆头组成,沉降底板采用 $400\text{mm} \times 400\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的钢板,测杆采用 $\phi 38\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的无缝钢管制成,一般每根长为 50cm ,套管采用 $\phi 89\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的无缝钢管。

(3) 观测设施埋设

沉降板埋设示意图如图 1-7 所示,其特点如下:

①在埋设点地面挖一 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的土坑,坑内铺 5cm 左右的黄砂,整平压实;

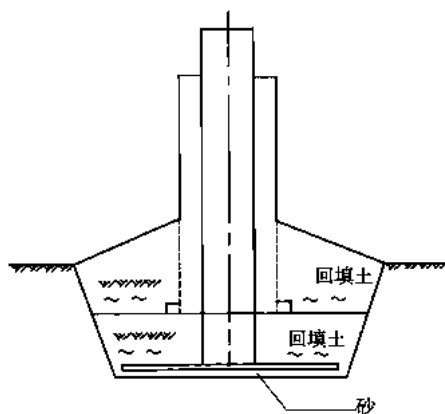


图 1-7 沉降板埋设示意图

②将沉降板平放在坑内,四周用黄砂填实并用水准尺校正使板面水平,再回填土整平压实;

③用套管垂直套进测杆标于土面上,使其与测杆底板保持 10cm 以上,在套管四周用土堆压实使其稳定;

④用水准仪连续数日观测杆的高程,确定初始高程;

⑤路堤开始填筑时,应保护沉降板,在沉降板周围 1m 范围内采用人工填筑压实。

(4) 水准点的设置

水准点应设在不受垂直方向和水平方向变形影响的坚固的地基上或永久建筑物上,其位置应尽量满足观测时不转点的要求,每 3 个月用路线测设中设置的水准点作为基准点,对临时设置的水准点校核一次。

(5) 水准仪和水准尺的选择

沉降观测采用的 S_1 和 S_3 水准仪用在二等水准测量中,用于观测基桩和校核基桩高程; S_3 水准仪用于三等水准测量,在填筑过程中观测沉降用。使用前应进行校正,水准尺应固定专用,木质水准尺或铝合金水准尺均可。

(6) 观测频率

①路堤填筑期:在施工程期间位移观测应每填筑一层土观测一次;如果两次填筑时间间隔较长,每三天至少观测一次。如果发现异常沉降,则每两天观测一次或每天观测一次,以密切注意沉降异常动态。在日沉降速率不大于 10mm/d 时方可填筑下一层。

②路堤预压期:路堤预压期间观测应视地基稳定情况而定,一般半月或每月观测一次。条件允许时,预压期第一个月每 5~10d 观察一次,第二个月每半月观察一次。

③底基层和面层施工期:底基层和面层厚度大于或等于 30cm 时,一般分两次碾压,每碾压半层或一层观察一次。若一个层次两次碾压时间间隔较短,可合并一次进行观测。

(7) 观测控制标准

按三、四等水准测量精度实测的月沉降速率,对路堤施工全过程实施有效动态控制。

①路堤填筑期:一般路堤每昼夜沉降速率应小于 10mm/d ,桥头路堤每昼夜沉降速率应小于 5mm/d 。

②结束预压期:等载处理段连续两个月的沉降速率应小于 $3\sim5\text{mm/m}$,超载处理段连续两个月的沉降速率应小于 8mm/m 。

③填筑基层和沥青混凝土面层连续两个月的沉降速率应小于 3mm/m 。

④对软基路堤而言,该段重点应限制路堤填筑最高速率,防止施工期内路基失稳。经有限元分析并参考国内已建工程经验,为便于施工操作,一般路堤填筑速率按沿路堤中线原地面每昼夜沉降速率应小于 10mm/d ,坡脚水平位移每昼夜沉降速率应小于 5mm/d ,每填筑一层观测一次,进行动态控制。

⑤桥头:为避免填土对桥桩的影响,要求原地面每昼夜沉降速率应小于 5mm/d 。当沉降速率大于 10mm/d 时,应判断其严重程度,决定是否采取应急措施。每加一级荷载后,路堤在没有施加第二级荷载前,当其断面中心地表测得的沉降量随时间的变化收敛于某一数值时,即