

王晓谋 袁怀宇 编著



高等级公路 软土地基路堤 设计与施工技术

516

人民交通出版社
China Communications Press

Gaodengji Gonglu Ruantu Diji Ludi Sheji Yu Shigong Jishu

高等级公路软土地基路堤设计与施工技术

王晓谋 袁怀宇 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书根据目前我国高等级公路软土地基路堤设计与施工现状,系统阐述了软土地基路堤设计理论与施工技术,具有较强的理论性和实践性。全书共分八章,主要包括:工程地质勘察、沉降与稳定计算理论、地基处治设计与施工、桥头路堤稳定与跳车防治,并着重介绍了软土路堤试验工程设计和施工观测。

本书较全面地反映了软土地基路堤设计与施工的既有经验和最新发展,可供公路工程及相关专业设计、施工、科研、监理等单位的工程技术人员参考,也可作为高等院校有关专业本科生和研究生的选修课教材。

图书在版编目(CIP)数据

高等级公路软土地基路堤设计与施工技术 / 王晓谋, 袁怀宇编著. —北京: 人民交通出版社, 2001. 9
ISBN 7-114-04078-4

I. 高... II. ①王...②袁... III. ①公路路基-路堤-设计②公路路基-路堤-工程施工 IV. U416.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067845 号

高等级公路软土地基路堤设计与施工技术

王晓谋 袁怀宇 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:刘晓方 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×980 1/16 印张:15.5 字数:280 千

2001 年 10 月 第 1 版

2001 年 10 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—5000 册 定价:25.00 元

ISBN 7-114-04078-4

U·02979

前 言

软土具有含水量高、孔隙比大、渗透性小、压缩性高、抗剪强度低、触变性等不利工程性质,在软土地区修筑高等级公路,多年来一直是公路建设的一个重大技术课题。由于计算理论、数学模式的不同,各地软土性质的差异,以及勘察手段、施工工艺的差别,使软土地基路堤问题更为复杂和突出。多年的高等级公路建设说明,软土地基路堤是公路建设中问题集中的地段,也是影响高等级公路工期、造价和营运水平的重要因素。因此,软土地基路堤合理的设计、施工及监测技术就显得极为重要,而国内对此尚无系统论述的有关书籍。为此我们收集了大量国内外文献资料,并结合我们的科研成果和教学经验编写此书,以满足有关设计、施工、科研、监理等工程技术人员的需要。

本书编写的指导思想是针对软土地基高等级公路的特点,依据我国最新颁布的软土地基路堤设计与施工技术规范,尽可能系统阐述软土地基的勘探方法、设计计算、施工技术和现场测试等方面的理论和经验。编写中注重理论和实践相结合,具有很强的实用性和可操作性。全书共分八章。第一章主要介绍了我国软土的分布及特点,简述了目前我国高等级公路软土地基路堤设计与施工现状及存在问题;第二章主要介绍了软土地基工程地质勘察要求,详细介绍了钻探、原位测试、室内试验和定位观测的各自特点;第三章主要介绍了软土地基沉降和固结理论,就目前沉降和固结理论的局限性作了说明;第四章重点介绍了软土地基稳定计算,阐述了抗剪强度指标的选取原则和稳定计算各方法的特点;第五章主要介绍了软土地基处治的常用方法及适用范围,论述了高等级公路软土地基处治原则和设计理论;第六章主要介绍了软土地基处治施工工艺和存在的问题;第七章针对桥头路堤的特点,对桥头路堤纵向稳定性和桥头跳车的防治作了专门介绍;第八章主要介绍了软土路堤现场的观测原则和仪标选择、埋设、观测及资料整理分析等。

本书第一、三、四、五章由长安大学王晓谋编写,第二、六、七、八章由陕西省公路勘察设计院袁怀宇编写。全书由王晓谋统稿。

由于作者的水平有限,书中难免有疏漏或不当之处,望国内外专家批评指正。

作 者

2001.7

目 录

第一章 绪论	1
第一节 软土的分类和工程特性.....	1
第二节 软土地基路堤的工程问题.....	6
第三节 软土地基处理技术	11
第二章 软土地基工程地质勘察	14
第一节 概述	14
第二节 初步勘察	24
第三节 详细勘察	28
第三章 软土路堤沉降计算与固结理论	33
第一节 沉降计算	33
第二节 经验方法对一维沉降计算的修正	39
第三节 工后沉降分析	46
第四节 固结理论	49
第四章 稳定分析	56
第一节 概述	56
第二节 软土的抗剪强度	57
第三节 软土路堤稳定分析	69
第四节 公路工程软土路堤稳定分析	81
第五章 软土地基处治方法及路堤设计	84
第一节 概述	84
第二节 土工合成材料	92
第三节 预压法	100
第四节 竖向排水体	110
第五节 粒料桩加固法	114
第六节 深层搅拌法	119
第七节 高压喷射注浆法	131
第八节 灌浆法	140
第九节 强夯法	146
第十节 反压护道	150

第十一节	粉煤灰路堤	151
第六章	软土地基处治施工	156
第一节	概述	156
第二节	垫层与浅层处治	157
第三节	土工合成材料施工	161
第四节	竖向排水体施工	162
第五节	振冲碎石桩施工	169
第六节	粉喷桩施工	173
第七节	高压喷射注浆法施工	177
第八节	灌浆法施工	181
第九节	强夯法施工	184
第十节	粉煤灰路堤施工	186
第七章	软土地基桥头路堤	188
第一节	桥台与桥头路堤的纵向稳定	188
第二节	桥头跳车的防治措施	193
第三节	涵洞过量沉降的防治措施	198
第八章	软基路堤监测技术	200
第一节	概述	200
第二节	变形监测	203
第三节	应力监测	217
第四节	施工控制	224
第五节	监测成果	232
参考文献		240

第一章 绪 论

第一节 软土的分类和工程特性

一、软土的定义

国内外对软土均无统一定义,我国铁路、港口、建筑部门对软土的定义也不尽相同。有的把软土视为软粘土的简称,有的把软土视为整个软弱土质(高压缩性的有机土、可液化的砂土、软粘土等)的简称,有的则把软土视为软弱土基的简称。

1. 我国铁路部门建议下列物理力学指标作为区分软土的界限:

- ①天然含水量 w 接近或大于液限;
- ②孔隙比 $e > 1$;
- ③压缩模量 $E_s < 4000\text{kPa}$;
- ④标准贯入击数 $N_{63.5} < 2$;
- ⑤静力触探贯入阻力 $p_s < 700\text{kPa}$;
- ⑥不排水强度 $c_u < 25\text{kPa}$ 。

2. 我国建设部颁布的《软土地区工程地质勘察规范》(JGJ 83—91)规定凡符合以下三项特征即为软土:

- ①外观以灰色为主的细粘土;
- ②天然含水量大于或等于液限;
- ③天然孔隙比大于或等于 1.0。

3. 我国交通部行业标准《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—96)(以下简称《软基规范》)将软土定义为“滨海、湖沼、谷地、河滩沉积的天然含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低的细粒土”。其鉴定标准如表 1-1。

软土鉴别表(JTJ 017—96)

表 1-1

特征指标名称	天然含水量(%)	天然孔隙比	十字板剪切强度(kPa)
指标值	≥ 35 与液限	≥ 1.0	< 35

Terzaghi 和 Peck(1967)将无侧限抗压强度 q_u 小于 25kPa 的粘土称作“很软的”,而将强度在 25~50kPa 的粘土称作“软的”。而国外一些论文中将不

排水抗剪强度 S_u ($S_u = \frac{q_u}{2}$) 小于 40kPa 的粘性土称为软粘土。

日本道路公团 1987 年提出的软土地基的标准如表 1-2。

软土地基的标准(1987年日本道路公团)

表 1-2

地 层	泥炭质地基	粘土质地基	砂质地基
层 厚	< 10m	> 10m	
N(标准贯入击数)	< 4	< 6	< 10
q_u (无侧限抗压强度 kPa)	< 60	< 100	
q_c (荷兰式贯入指数 kPa)	< 800	< 1200	< 4000

《德国地基基础规范》(DIN 4084)中:软土指“很容易搓捏的土”,相当于软塑状态的土;而将液塑状的土称为“浆糊状土(拳头紧握它时,会从指缝间挤出)”。

本书中软土如无特殊说明,是指天然强度低、孔隙比大、压缩性高、透水性小的软粘土,以区别于像松砂那样的松软土层。

二、软土的主要物理力学特征

尽管国外及国内各行业对软土的描述和指标各不相同,但归纳起来,天然软土具有下列特性:

1. 含水量高

淤泥和淤泥质土的含水量多为 50% ~ 70%,液限一般为 40% ~ 60%,天然含水量随液限的增大而增加。

2. 孔隙比大

天然软土的孔隙比往往要比同一垂直压力下的重塑土的孔隙比高出 0.2 ~ 0.4,如表 1-3。

原位孔隙比

表 1-3

工程地点	原位压力(kPa)	原位孔隙比	重塑孔隙比
广深公路	40	2.15	1.79
连云港	50	2.14	1.83
上海港	70	1.32	1.10
湛江港	250	1.51	1.02

3. 渗透性小

其渗透系数一般在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 之间。而大部分淤泥和淤泥质土地区,由于该土层中夹有数量不等的薄层或极薄层粉砂、细砂、粉

土等,故在垂直方向的渗透性比水平方向要小。

4. 压缩性高

淤泥和淤泥质土的压缩系数 a_{1-2} 一般为 $0.7 \sim 1.5 \text{MPa}^{-1}$,最大达 4.5MPa^{-1} ,且随着土的液限和天然含水量的增大而增高。

5. 抗剪强度低

软土的抗剪强度与加荷速度及排水固结条件密切相关。不排水三轴快剪所得抗剪强度值很小,且与其侧压力大小无关,即其内摩擦角为零,粘聚力一般都小于 20kPa ;直剪快剪内摩擦角一般为 $2^\circ \sim 5^\circ$,粘聚力为 $10 \sim 15 \text{kPa}$;排水条件下的抗剪强度随固结度的增大而增大,固结快剪的内摩擦角可达 $8^\circ \sim 12^\circ$,粘聚力为 20kPa 左右。

6. 触变性

由于软土的结构性在其强度的形成中占据相当重要的地位,所以触变性也是软土的一个突出特点。软土的触变性是指土体强度因受扰动而降低,又因静置而增长的特性。软土中因打桩扰动引起孔隙压力增加,随后因孔隙压力消散而引起地面沉降和负摩擦的问题早就有人研究过。曾有文献报道了打设砂井后,软土的十字板强度平均降低 6kPa 。这些现象也充分说明保护天然软粘土结构性具有重要意义。

三、软土的分类和主要工程性质

软土一般都具有以上所属物理力学特性,但随着其成因类型的差异又有不同的特点。

按淤泥和淤泥质土的形成和分布,我国软土基本上可以分为两大类:

第一类是属于海洋沿岸的淤积;第二类是内陆、山区以及河、湖盆地和山前谷地的淤积。大体上说,后者常呈零星分布,沉积厚度较小,前者分布较稳定,厚度较大。

(一)沿海软土

分布于沿海的软土大致可分为四种类型,即滨海相、三角洲相、泻湖相和弱谷相。

1. 滨海相。滨海的水动力状况比较复杂,主要受到波浪和潮汐作用,使砂土沉积。粗砂在近海岸处沉积,而细颗粒物质向海方向搬运,形成不对称的波痕,并在海滩边缘形成一系列平行海岸的连续的砂脊或沙丘,从而使滨海相软土在沿岸与垂直岸方向有较大的变化。交错层理是其沉积特征。

2. 三角洲相。当河流流至海洋时,流速急剧减小,因此河水携带的沉积物质在河口沉积。以这种方式堆积在陆相和海相环境边界上的沉积物

构成了三角洲。由于河流和海洋的复杂交替作用，而使软土层与薄层砂交错沉积，形成不规则的透镜体夹层，分造程度差，结构疏松，颗粒细。表层为褐黄色的粘性土，其下则为厚层的软土或软土夹薄砂层。三角洲相沉积是一个多种沉积环境的沉积体系，包括三角洲平原、三角洲前缘和前三三角洲。

3. 泻湖相。沉积物颗粒细微，分布范围较广阔，常形成滨海平原。表层为较薄的粘性土层，其下为厚层淤泥层，在泻湖边缘常有泥炭堆积。

4. 溺谷相。分布范围略窄，结构疏松，在其边缘表层常有泥炭堆积。

(二) 内陆平原淤泥和淤泥质土

这类软土主要包括湖相及河流漫滩与古河道相两类。

1. 湖相沉积。如滇池东部及其周围地区，洞庭湖、洪泽湖盆地，太湖流域的杭嘉湖地区等属之。其组成和构造特点是组成颗粒细微、均匀，富含有机质。淤泥成层较厚，不夹或很少夹砂，且往往具有厚度和大小不等的肥淤泥与泥炭夹层或透镜体。因此，其工程性质往往比一般滨海相沉积者差。例如昆明的滇池由于受基岩地质构造影响，湖体向西偏移，湖体东部淤泥和淤泥质土夹泥炭层沉积大面积出露，淤积厚度近湖边最厚达 100m 多，靠外面逐渐变薄，一般达 10~20m。其中肥淤泥和泥炭层土质极差，厚 2m 左右，其天然含水量达 200%，压缩系数一般为 $1 \sim 2\text{MPa}^{-1}$ 。

2. 河流漫滩与废河道相沉积

1) Kural(1971)将河流沉积环境分为三类。

(1) 河床。包括邻近流线的区域、河床边缘的浅滩和砂嘴。

(2) 天然冲积堤(河岸沉积物)。由河床侧向泛滥形成的全部沉积物组成。

(3) 泛滥平原(漫滩沉积物)。包括溢出河床的泛滥期沉积物和河岸沉积物。

在河流下游靠近河口处，冲积物厚度和范围都很大，被称为冲积平原，其大部分沉积物由高洪水位期间的泛滥平原堆积物组成，并逐渐过渡到河流三角洲(海相)沉积。

河漫滩沉积典型的粒径分布为：砂粒 5%~10%，粉粒 20%~40%，粘粒 35%~60%，有机质含量为 1%~10% (主要由含粘粒的悬液沉积的碎屑带来)。其中间粒径 M_d 在 0.005mm 到 0.06mm 之间。河流漫滩相沉积的工程地质特征是具有层理和纹理特性，有时夹细砂层，不会遇到很厚的均匀沉积，有明显的二元结构。上部为粉质粘土、砂质粉土，具微层理，但比滨海相的间隔厚些，一般层厚为 3~5cm 以至十几厘米；下部为粉砂、细砂。由于

河流的复杂作用,常夹有各种成分的透镜体(淤泥、粗砂、砂卵石等),特别是局部淤泥透镜体的存在,造成地基不均一,强度小,承载力变化大(变化幅度可达 60~150kPa)。

2) 废河道牛轭河相沉积物一般由淤泥、淤泥质粘性土及泥炭层组成,处于流动或潜流状态。它是由河道淤塞沉积而成,工程性质与一般内陆湖相者相近,通常处于正常固结状态,液性指数接近 1。牛轭湖沉积物只是表面变干,硬壳层下的粘土依然很软。以后,硬壳又可被泛滥平原沉积物所覆盖,软土层仅在重力作用下固结。当现场勘测疏漏时,会造成不均匀沉降。

苏北界首一带,在数十米厚的冲积砂质粉土、粉质粘土与强度较大的砂质粉土夹粉、细砂之间,埋藏有一些废河道相淤泥层,呈较大范围的透镜体,一般厚度为 2~6cm,工程性质很差。

另外,在界首到邵伯地段为历史上旧黄河经常决口地段,土层复杂,有淤泥深塘多处,最深达 24m,其土质与前者相近。

(三) 山地型

在我国广大山区沉积有一类形成环境和性质不同于一般内陆平原和沿海地区的“山地型”淤泥和淤泥质土。其成因主要是由于当地的泥灰岩、炭质页岩、泥砂质页岩等风化产物和地表的有机物质经水流搬运,沉积于原始地形的低洼处,长期饱水软化,间有微生物作用而形成。成因类型以坡洪积、湖积和冲积三种为主。它们在分布上总的特点是,分布面积不大、厚度变化悬殊。这是因为,山区软土的分布严格地受着成土母岩的出露位置和地形地貌(沉积环境)的控制,一般分布在冲沟、谷地、河流阶地和各种洼地,广大山区,特别是属于山地型高原的西南地区,宜于沉积和形成软土的上述地貌形态数量多、面积小、起伏大,兼之山区地表径流易于消涨,沉积物质分选条件极差,这一切便决定了这些地区软土分布位置和厚度变化悬殊的特点,从而构成了软土地基的严重不均匀性。在贵州省,有的软土水平分布面积不超过 500m²,总厚度不超过 20m,但厚度变化较大,多呈透镜状或鸡窝状分布,有时相距不过 2~3m,厚度相差竟达 7~8m 之多。这种情况在平原区是少见的。

在“山地型”软土的几个主要成因类型中,常以坡洪积相分布最广。其物理力学性质差异很大:冲积相的土层很薄,土质好些;湖沼相的一般有较厚的泥炭层和肥淤泥,土质往往比平原湖相的还差;坡洪积相的性质介于两者之间。

表 1-4 为我国软土的类型和特征,表 1-5 为软土的主要物理力学特性。

我国软土的类型和特征

表 1-4

类 型		厚度(m)	特 征	分 布 概 况
滨海 沉 积	滨海相	6~200	面积广,厚度大,常夹有砂层,极疏松,透水性较强,易于压缩固结	沿海地区
	三角洲相	5~60	分选性差,结构不稳定,粉砂薄层多,有交错层理,不规则尖灭层及透镜体	
	泻湖相	5~60	颗粒极细,孔隙比大,强度低,常夹有薄层泥炭	
	溺谷相		颗粒极细,孔隙比大,结构疏松,含水量高,分布范围较窄	
内陆 平 原	湖相	5~25	粉土颗粒占主要成分,层理均匀清晰,泥炭层多是透镜体状,但分布不多,表层多有小于5m的硬壳	洞庭湖、太湖、鄱阳湖、洪泽湖周边
	河床相、河漫滩相、牛轭湖相	<20	成层情况不均匀,以淤泥及软粘土为主,含砂与泥炭夹层	长江中下游、珠江下游及河口、淮河平原、松辽平原
山地 沉 积	谷地相	<10	呈片状、带状分布,谷底有较大的横向坡,颗粒由山前到谷中心逐渐变细	西南、南方山区或丘陵地区

软土的主要物理力学特征

表 1-5

类型	天然容重 γ (kN/m ³)	含水量 w (%)	孔隙比 e	有机质 含量(%)	压缩系数 α_{1-2} (MPa ⁻¹)	渗透系数 k (cm/s)	快剪强度		标准贯入 值 $N_{63.5}$
							c_u (kPa)	φ_u	
软粘土	16~19	$w_L < w < 100$	> 1.0	< 3	> 0.3	$< 1 \times 10^{-6}$	< 20	< 10°	< 2
淤泥质土			1.0~1.5	3~10					
淤泥			> 1.5						
泥浆质土	10~16	100~300	> 3	10~50	> 2.0	$< 1 \times 10^{-3}$	< 10	< 20°	
泥炭	10	> 300	> 10	> 50	$< 1 \times 10^{-2}$				

第二节 软土地基路堤的工程问题

如上所述,软土具有含水量高、孔隙比大、渗透性小、压缩性高、抗剪强度低、触变性等不利的工程性质,在软土地区修筑高等级公路,多年来一直是公路建设的一个重大技术课题。由于计算理论、数学模式的不同,各地软土性质的差异,以及勘探手段、施工工艺等的差别,使路堤问题更为复杂和

突出,多年的高等级公路建设表明,软土路堤是公路建设中问题集中的地段,软基问题也是影响工期、造价的重要因素。

在软土地基上修筑高等级公路,需要解决的关键问题是路堤的稳定和变形。

一、软土路堤的稳定

软土路堤的稳定分析是路堤设计中最主要的工作之一,只有满足路堤的稳定条件才能进行路堤的变形计算。软土路堤的破坏主要是路堤边坡的滑动失稳,大多数是由于施工速度过快,路堤边坡太陡或地基承载力不足引起的。若边坡太陡,且路堤荷载超过地基承载力,就会产生较大的剪切变形并导致滑动破坏。遇到这种情况,就应对路堤边坡范围内的地基进行加固,提高地基的承载力和抗剪能力,以保证路堤和地基的稳定。

稳定分析一般情况下是针对路堤横向进行的,然而在某种情况下,路堤的纵向稳定起着主导作用。如软土地基上的桥台,若不注意路堤的纵向稳定,有可能由于台后填方的纵向推力,致使桥台基础发生较大的位移甚至破坏桥台基础。

多年来,我国工程部门习惯于用总应力法来分析软土地基的稳定性,即在稳定分析中不考虑孔隙水压力的影响,而采用总强度指标。根据有效应力原理,只有有效应力才能引起抗剪强度的变化。所以,从理论上讲,用有效应力法才能确切表示软土抗剪强度的实质,但是采用有效应力法必须知道土体中的总应力和孔隙水压力。总应力法的实质是依靠不同的试验方法得出适当的强度指标来代替具体情况下土体中孔隙水压力对强度的影响。目前工程界中这两种方法均有应用,但在强度指标的选配,常常因存在模糊不清的概念而引起差错。因此,正确使用总应力法或有效应力法以及选择相应的抗剪强度指标是软土地基路堤分析中的关键问题。本书第三章中着重阐述了室内试验中土样的排水条件对所测强度指标的影响,以便明确在实际工程中如何选择合适的指标。

关于稳定分析的计算方法,在极限平衡这个假定前提下已发展得比较完善,而且为了减少工作量,避免寻求最小安全系数圆弧圆心位置等麻烦,对于一般的瑞典条分法和毕肖甫法及简布法,国内已有很多单位编制了电子计算机程序。第四章中对于稳定分析方法从理论假定和原理方面作了论述,并介绍了圆弧滑动法、极限高度法和复合圆弧法。

对于安全系数,由于没有考虑到土体本身的应力—应变关系,所以只是假定滑裂面上的平均安全系数,因此无法分析稳定破坏的发生和发展过程,更无法考虑局部变形的因素。而且,对有效应力分析法的安全系数选择也需要积累更多的实际资料才能确定。为此,特别将安全系数问题提出来讨

论,以便引起重视。

二、软土路堤的变形

路堤的变形包括两类:

- (1)筑于软土地基上的路堤,其变形大部分来自软土地基;
- (2)筑于比较刚硬地基上的路堤,其变形主要发生在路堤自身内部。

本文只论述第一个问题,第二个问题超出了本书讨论范围。

随着交通事业的发展,高等级公路不仅要求路堤稳定,而且对工后沉降有较高要求,特别是需要严格控制工后不均匀沉降量。从已建软土地基上高等级公路的运行情况看,工后沉降较大,特别是存在“桥头跳车”现象,轻者影响车辆行车速度,严重的导致交通事故。因此,软土路堤的设计重点由稳定控制转为变形控制。

软土的变形性质十分复杂,它与软土的种类、状态,以及外界条件有很大关系。软土的变形理论包括沉降理论和固结理论。软基沉降理论分析方法可归纳为两种类型:一类是理论公式法,它首先确定在荷载作用下压缩土层中应力的增量,然后再采用合适的土的应力—应变关系(例如用固结试验得到)估算这些应力增量所引起的沉降量;另一类是数值分析方法,如有限元法,它可以估算荷载作用下土中任意一点的应力和应变情况。利用数值分析方法,理论上较严密,但由于该方法有一定难度,在工程中未能得到广泛应用。对于理论公式法又分为一维和多维的情况。软土路堤的沉降计算通常采用一维压缩计算法,即假定地基土在荷载作用下不发生侧向变形,这显然是不符合实际的,特别是在软粘土地基中将使计算沉降量显著偏低,偏于不安全。现有的三维沉降计算方法大致可分为三类:弹性理论方法——如 Флорин 法、黄文熙法等;模拟方法——如 Lambe 的应力路径法;以及经验方法——如前苏联规范法和我国公路软土路堤规范法等。对于弹性理论方法和模拟方法,可参阅有关土力学书籍,本书不作介绍。本书第三章着重论述了一维沉降计算方法,并从影响沉降系数的主要因素入手,结合大量工程实例对经验方法做了阐述。

事实上,工程界最关心的是工后沉降和差异沉降量,但对这部分沉降量没有统一的计算方法。本书第三章对差异沉降量对公路工程的影响作了分析,并对允许工后沉降量进行了探讨。有关软基桥台背跳车的防治在第七章做了专门的论述。

预估沉降量的大小,在一维应变情况下只需知道垂直应变就可以了,并不需要任何特殊理论。对于确定应力—应变关系的室内试验也只需评价其孔隙比的变化与所加压力的关系。而对于固结计算还要知道土中有效应力随孔隙水排出的发展情况。为了预估沉降的变化速率,就必须建立能描述

孔隙水在土体中流动的模型(如 Darcy 定律),明确渗透性和孔隙比之间的关系。从某种意义上说,将沉降分析分为分析沉降大小和沉降速率在某种程度上是人为的。

最早的固结理论是由 Terzaghi 于 1925 年首先提出的,它建立在许多简化假设的基础上,特别是只考虑孔隙水沿竖向流动所引起的竖向变形,故常被称为古典的一维理论。用一维理论计算出的固结速率与实测结果并不一致,常常低估了现场实际的沉降速率。解决二维或三维固结课题有两种基本方法。第一种是 Rendulic(1936)提出的 Terzaghi-Rendulic 准固结理论(或称为扩散理论)。这个理论假设固结期间的总应力保持常数,但固结期间孔隙水压力消散速率的变化取决于离开排水边界面的距离,同时由于杨氏模量和泊松比从不排水值变到了排水值,因而产生了差异应变,这样又需要调整总应力以满足应力—应变相容条件。准固结理论不能保持沉降大小与固结度之间的耦合性,它假设只有超孔隙水压力的消散才影响沉降量。第二个理论由 Biot(1941)直接从弹性理论导出,通常称为 Biot 理论。它可保证位移大小及其变化进程之间的耦合性,而且在固结层的任一点,都存在超孔隙水压力的消散和总应力变化之间连续的相互作用。但由于数学计算上的困难,只能对少数简单的边值问题求出解析或半解析解。直到 20 世纪 60 年代,随着计算机的发展及有限元的应用,它才得到工程界的关注。

Terzaghi 的大多数假设是不现实的或在实际应用中不能满足,但因为 Terzaghi 理论使用简单,所以最初的 Terzaghi 固结理论(有时作些改进)和一维压缩模型仍然为现场工程师们广泛使用。本书中固结理论主要讲述 Terzaghi 一维固结理论和 Barron 砂井理论(Barron, 1948)。

三、存在的问题

对软土地基变形和稳定性的研究,目前存在两大难题,即:第一,在同时考虑应力、应变及地质历史情况下,如何提出合理的沉降计算方法或计算参数;第二,如何利用有限元法,考虑土的非线性及土的初始、固结和蠕变三种变形。但是对软土地基的变形和稳定计算,下列因素直接影响其精度:

- (1)不确定的竖向和水平向排水边界条件;
- (2)填筑路堤过程中,填筑速率的不确定性;
- (3)剪应力引起的土颗粒排列改变;
- (4)次固结变形影响;
- (5)软土土样在取样、贮藏、运输过程中不可避免的扰动;
- (6)经济因素对勘探、取样和分析的限制。

为了提高软土固结沉降的计算精度,研究者们已经采取了许多措施。一类是发展众多复杂的土力学模型和计算机程序,然而计算机程序主要对

于编写者有用,而复杂的土的模型涉及到的参数很难准确的在现场被测得。另一类是不做任何分析,而采用所谓的“工程判断(engineering judgment)”。因此,解决软土路堤问题的途径只有把二者结合起来,而最有效的方式就是通过修试验路堤(试验填土),或以实体工程进行现场试验,用试验观测数据来验证理论和计算方法,进一步完善理论和计算方法。

随着研究的深入,尤其是研究重点由强度性质转向变形性质时,人们越来越认识到室内小试样不可能完全代表现场的情况。当土颗粒排列改变时,很多影响因素可能大部消失,例如土的有效强度参数就与应力路径无关。而土的变形性质受土粒结构与应力历史影响很大,这往往是室内无法模拟的。因此,由于对区域地质环境了解和分析不够,尤其对软土的生成年代、沉积环境、周边地形、地貌、古地理、气候等了解和分析不够,仅凭室内试验结果来提供设计用的各项物理力学性质参数,有时不能完全真实反映软土的自然属性和工程属性。只有通过现场试验才能测得比较可靠的参数。

同样,尽管在软土地基上修建路堤有很长历史,但是按照理论安全系数大于1来设计的路堤,常常令人失望地破坏了,而某些特意设计达到破坏的试验路堤,却偏偏不破坏。这就是为什么我们要对软土上的路堤进行观测的原因。

土的力学性质的现场测试技术已经有相当长的历史,例如瑞士从1928年就开始研究十字板剪切仪,但是其发展比较缓慢。近几年来,人们对现场测试技术的兴趣愈来愈大。在1974年,连续召开了两次专门讨论现场测试问题的国际性会议,即欧洲贯入试验讨论会和美国土木工程师学会召开的土的性质的现场测试会议。此后,现场测试问题在其它各种土工会议上也往往是一个重要议题。其中,试验路堤是一种很好的现场测试方法,它一方面与实际建筑物比较接近,试验结果又与实际不完全一样,断面形状和施工程序可以按需要设计,以便观测和分析,从而可以得到比较宝贵的资料。修筑试验路堤既是设计问题,亦是施工问题,可以从技术与经济角度寻求软基处理的最佳方法和对策。因此,尽管试验堤代价比较大,近来在世界各地做得还相当多。

试验堤或实体工程的监测工作通常包括:变形监测、应力监测和其它监测(如地下水位等)。监测的主要目的是:

(1)以工程监测的结果指导现场施工,确定和优化施工参数,进行信息化施工;

(2)根据监测结果,及时发现危险的先兆,分析原因,判断工程的安全性,采取必要的措施,防止发生工程破坏事故和环境事故;

(3)评价工程的技术状况,检验设计参数和设计理论的正确性;

(4)为设计、施工、管理和科学研究提供资料。

软土地基路堤设计与施工所需要的一些重要参数及测试方法如下:

(1)地表和土体的竖向位移。地表的竖向位移采用沉降板观测,对于成层软土应采用分层沉降标进行土体竖向变形观测。观测的主要目的是控制施工进度、预估工后沉降量和计算因沉降而增加的土方量。

(2)土的侧向位移。地表的侧向位移可用设在坡脚的边桩进行观测,土体内部的侧向位移观测应采用测斜仪。土体侧向变形是控制路堤填筑速率的重要参数。

(3)孔隙水压力。与位移资料相比,实测孔隙水压力会更好的提供关于土体破坏情况的最早迹象。对于估计固结过程和确定路堤施工速率来说,测定孔隙水压力也是一种基本手段。

随着计算机的普及和数值方法的发展,有人认为可以不再强调现场试验了,事实上恰恰相反,现场试验是验证设计、指导施工和发展理论的必由之路。

本书第八章以较大篇幅对路堤监测的目的、意义,以及仪标原理、埋设技术、资料整理做了详尽阐述,并对监测成果的运用及施工控制方法进行了探讨。

综上所述,将理论分析、室内试验、试验堤三者有机结合起来,是改进和提高软土地基路堤设计与施工质量的有效方法。

第三节 软土地基处理技术

软基上修建高等级公路,首先要进行正确的路线设计、路堤设计和选择合理的处理方法。

首先要搞清地基工程地质和水文地质条件,这是搞好设计、施工的基础。不少工程事故的发生,多是源于对天然地基条件了解不清楚或不够全面而造成的,因此一定要重视工程勘察工作。然后根据地基工程地质和水文地质条件决定地基是否需要处理,如何处理。

修筑高等级公路常采用下述方法通过软土地区:

- (1)桥梁跨越;
- (2)减轻路堤荷载;
- (3)工后修补;
- (4)地基处理,常用方法又可分为土性改善和复合地基两类;
- (5)综合处理。

当路堤较高、地价昂贵、软土地基承载力很低的情况下,采用高架桥穿