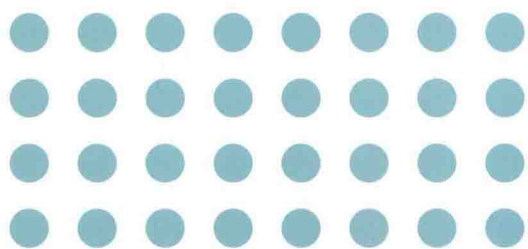


Study on marshy and lacustrine soft soil in Hengshui Lake

衡水湖

湿地湖泊相软土研究



刘春原 王向会 ©著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Study on marshy and lacustrine soft soil in Hengshui Lake

衡水湖湿地湖泊相软土研究

刘春原 王向会 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

衡水湖湿地湖泊地区分布的软土,由于特殊环境气候条件的影响和地形地质条件的复杂性,具有其独特的特点。本书对湿地湖泊相软土的工程特性以及微观力学特征进行了详细的研究。首先分析了湿地湖泊相软土与其他地区软土的差异,并研究了湿地湖泊相软土的结构特性,根据相关试验成果的分析,提出湿地湖泊相软土应力应变影响因素;其次,对湿地湖泊相软土进行了三轴流变试验研究,得出了湿地湖泊相软土在固结排水条件下的蠕变特性;同时,采用电镜扫描(SEM)测试技术,对在不同应力状态下湿地湖泊相软土的微观结构特征进行了观测,分析不同应力状态下湿地湖泊相软土的微观结构特征,揭示了不同应力状态下各微结构参数随应力的变化规律;然后,运用颗粒流程序 PFC 对标准固结试验和常规三轴试验进行了仿真模拟,建立了湿地湖泊相软土的微结构本构模型。

— 本书内容翔实具体,图文并茂,概念清晰,可供土建、水利、交通、铁道等土木建筑工程领域,特别是从事高速公路路基设计、施工、科研、管理的工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

衡水湖湿地湖泊相软土研究 / 刘春原, 王向会著

— 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.3

ISBN 978-7-114-12731-1

I. ①衡… II. ①刘… ②王… III. ①湖泊—沼泽化
地—软土—研究—衡水市 IV. ①P642.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 007484 号

书 名: 衡水湖湿地湖泊相软土研究

著 作 者: 刘春原 王向会

责任编辑: 刘永芬

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10

字 数: 230 千

版 次: 2016 年 3 月 第 1 版

印 次: 2016 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12731-1

定 价: 40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

软土具有天然含水率高、孔隙比大、压缩性高、强度低等特点,并具有结构复杂性,在软土地基上修建构筑物面临稳定及沉降控制等问题。软土特性直接决定着地基处理方法的合理选择及施工进度和质量。

与东部沿海平原地区广泛分布的软土相比,衡水湖湿地湖泊相软土具有其自身的特点。我国沿海诸省,除去山东省部分地段外,大部分为泥质海岸,土层为淤泥、淤泥质黏土及淤泥混砂层,属于饱和压密黏土,这类软土地基的处理,经过多年工程实践和经验积累,国内已取得了较为成熟的成果。由于平原湖泊湿地地区特殊环境气候的影响和地形地质条件的复杂性,修建高速公路需要在借鉴公路软基处理一般方法的基础上,开发新的软基处理技术,进行进一步研究,确保处治方法的适用性、科学性。

本研究依托河北邢衡高速公路项目,对湿地湖泊相软土的沉积环境、成因类型、物质组成以及工程特性进行了详细分析,对湿地湖泊相软土的结构特性、流变特性、微观结构参数及力学特征、分形特征进行了研究。

本书共 10 章内容,首先,从地质成因、地质分布评价、颗粒级配、矿物成分等方面分析了湿地湖泊相软土区别于其他地区软土的原因;其次,通过室内固结压缩试验、三轴剪切试验以及无侧限抗压试验,研究了湿地湖泊相软土在不同受力状态下的结构屈服应力,根据试验成果的对比分析提出湿地湖泊相软土应力应变的影响因素;然后,为模拟工程上的真空堆载联合预压技术,对湿地湖泊相软土进行三轴流变试验研究,得出了湿地湖泊相软土在固结排水条件下的蠕变特性;然后,采用电镜扫描(SEM)测试技术,对在不同应力状态下湿地湖泊相软土的水平截面和垂直截面微观结构特征进行了观测,分析不同应力状态下湿地湖泊相软土的微观结构特征,利用 Leica QWin5000 图像处理系统对湿地湖泊相软土微观结构的参量进行提取与定量分析,揭示了不同应力状态下各自微结构参数随应力的变化规律,从而提出土体发生宏观变形的微观机制;最后,运用分形理论对湿地湖泊相软土的微观结构进行了深入分析,利用 Matlab 语言编写程序,对土体微观结

构图片进行了平面分维计算,分析不同应力状态下试验土体微观结构的分形特征。

本研究中,运用颗粒流程序 PFC 对标准固结试验和常规三轴试验进行了仿真模拟,得出了应力应变曲线,通过将数值模拟结果与实测试验结果对比,发现 PFC 内置接触本构模型能够在一定程度上反映出实际土样的本构关系。

基于目前工程中常用的本构模型,本研究建立了软土的微结构本构模型。假设软土颗粒接触面上的屈服准则服从以莫尔库伦准则为基础的弹塑性准则。弹性部分通过赫兹麦德林准则求出,塑性部分通过引入一个锥状屈服面反映其特性。通过“优化假设方法”实现微观颗粒接触面上的位移到宏观应变的转化,再通过能量守恒的方法实现微观接触面上的力到宏观应力的转化。再运用标准固结试验和常规三轴试验数据对本构模型进行了验证,所得的模型可以在微观层面描述出土体的宏观本构关系,模型计算得出的结果与试验实测数据相比对以表明其一致性。

参加本书编写的单位及人员有:河北工业大学刘春原、李杰、李镶润、朱楠,河北省高速公路邢衡筹建处王向会、马文栋、岳建东、白志军,中星路桥工程有限公司张旭、王国正、单建坤等。其中第 1 章和第 10 章由刘春原、王向会编写,第 2 章由李杰、马文栋、岳建东编写,第 3 章由李镶润、白志军编写,第 4 章由王向会、朱楠编写,第 5 章由马文栋、李镶润编写,第 6 章由岳建东、李杰编写,第 7 章由白志军编写,第 8 章由张旭编写,第 9 章由王国正、单建坤编写,全书由刘春原统稿,朱楠博士对全书文稿进行校对和编辑。

本书的研究成果得到了河北省科学技术厅、河北省交通运输厅及河北省住房和城乡建设厅科技计划项目的资助,在此表示衷心的感谢。

感谢河北省高速公路邢衡筹建处、河北省建筑科学研究院、河北省交通规划设计院、衡水第三水文地质大队、中星路桥工程有限公司等单位提供的宝贵资料,特别是中星路桥工程有限公司在本课题实体实施过程中给予了积极协调、配合和支持。

由于作者水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

最后,对参考文献的作者和相关网站,致以衷心的感谢。

作者

2015 年 9 月于河北工业大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 我国湖泊相软土的分布及其特征	1
1.2 软土微观结构国内外研究现状	14
1.3 该课题的主要研究内容及研究技术路线	20
第 2 章 衡水湖湿地区域地质概况	22
2.1 区域地质背景	22
2.2 水文地质条件	36
2.3 湿地软土的分布	51
2.4 本章小结	54
第 3 章 湿地湖泊相软土的基本特性	56
3.1 岩土工程地质特征及评价	56
3.2 湿地湖泊相软土的物质组成	57
3.3 湿地湖泊相软土的基本物理力学性质	61
3.4 物理力学指标统计	61
3.5 本章小结	61
第 4 章 湿地湖泊相软土的结构特性与流变特性	63
4.1 结构屈服应力概述	63
4.2 湿地湖泊相软土的结构特性	64
4.3 湿地湖泊相软土的流变特性	69
4.4 本章小结	74
第 5 章 湿地湖泊相软土的微观结构	75
5.1 研究土体微观结构的目的	75
5.2 湿地湖泊相软土微观结构分析方法	75
5.3 湿地湖泊相软土微结构特征分析	77
5.4 本章小结	87
第 6 章 湿地湖泊相软土的微观结构参数	89
6.1 微观结构参数的选定及其确定方法	89
6.2 微观结构定量分析	96
6.3 本章小结	106

第7章 基于分形理论的土体微观结构研究	107
7.1 分形理论概述	107
7.2 分形维数	109
7.3 湿地湖泊相软土微观结构的分形研究	112
7.4 本章小结	125
第8章 PFC 接触本构模型及模型验证	126
8.1 引言	126
8.2 颗粒流程序 PFC	126
8.3 模型验证	128
8.4 本章小结	135
第9章 软土微结构本构模型	136
9.1 引言	136
9.2 微结构弹塑性本构模型的建立	136
9.3 本构方程计算程序的实现	141
9.4 模型验证	142
9.5 本章小结	144
第10章 结论与展望	145
10.1 结论	145
10.2 展望	146
参考文献	147

第1章 概 述

1.1 我国湖泊相软土的分布及其特征

湖泊沉积软土主要包括湖泊相软土和三角洲相软土。湖泊相沉积土比较复杂,其成分变化较大。在湖边沉积土颗粒较粗,在近岸带沉积多数是粗颗粒的卵石、圆砾和砂土,在远岸带沉积的是细颗粒的砂土和黏性土,在湖中心区沉积的是黏土和淤泥,常夹有细砂、粉砂薄层,湖泊如果逐渐淤塞,则可演变成沼泽,形成沼泽沉积物。沼泽沉积土主要是由半腐烂的植物残余体组成。泥炭土含水率极高,渗透性差,压缩性高,抗剪强度很低。湖泊相沉积软土主要由淡水湖盆沉积物形成,在稳定的湖水期逐渐沉积,沉积相带有季节性,表层硬质,厚0~5m,淤积厚度一般为5~25m。

内陆湖泊相沉积软土多分布于我国南部地区,在北部华北平原等地也有分布,主要分布于长江中下游地区、黄河下游、华北平原和云贵高原等地区。我国东南部地区气候湿润、雨量充沛、水系发达,容易在内陆湖泊周围地区形成湖泊相沉积软土,主要分布在洞庭湖、洪泽湖、太湖、鄱阳湖、昆明滇池、山东济宁南四湖、武汉新区的墨水湖和太子湖(武汉所在的江汉平原,多湖泊)、黄石花马湖、云南省茼蒿湖和大理洱海、苏州阳澄湖、长江以南都阳湖、合肥巢湖等地。而在我国北部华北平原地区,由于在早期有古湖泊的存在,因此在华北平原南部形成了平原湖泊相软土的分布。

不同地区的湖泊相软土,由于其周边环境和形成的地质气候条件不同,其物理力学性质也有很大的差别,造成了在不同地区的湖泊相软土其工程特性有很大的不同。根据我国内陆湖泊相软土的分布情况,按软土分布的地理位置可以将我国的内陆平原湖泊相软土按地区进行归类,包括长江下游地区、长江中游、云贵高原地区、黄河下游地区以及华北平原地区。

1.1.1 长江下游地区^[1-4]

1.1.1.1 太湖平原软土

太湖软土主要分布于长江三角洲东南缘太湖水网平原上,太湖平原主要由冲积、湖积作用形成,地势平坦开阔。软土为第四纪全新统湖积软土,自第四纪以来,地层运动以沉降为主,广泛接受堆积,形成广阔的冲湖积、湖积平原地貌。

太湖平原软土主要由淤泥、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土等组成,夹腐植物。软土分布范围广,厚度变化较大,埋深浅,近地表分布。太湖软土层呈厚层板状连续分布,形态规整,厚度无明显变化,底板平整,土质均匀,主要为淤泥质亚黏土,普遍混少量粉砂。软土及松软土厚

2~17m,主要为淤泥质黏土、粉质黏土,软黏性土,深灰色,多夹薄层粉砂,局部地段在第四系上更新统以下存在一层软黏土、粉质黏土。表层常有厚0.5~3.0m硬壳,为黏土,硬~软塑,局部地段厚达10m左右。湖相成因的软土以淤泥质亚黏土为主,深灰色,流塑,含少量腐植物,局部夹有薄层粉砂,具高压缩性、低强度的特点,且大多数灵敏度超过16,为流动黏土,具高触变性,分布范围广泛,厚3.2~16.5m。

太湖软土的天然密度在 $17.85\text{g}/\text{cm}^3$ 左右,天然含水率平均为40%左右,孔隙比平均1.10左右,泊松比0.36,土的相对密度2.74,低液限(平均35%左右),塑性指数平均15,液性指数平均1.3,低抗剪强度。由三轴不固结不排水剪切试验的结果可知:黏聚力在18~22kPa,内摩擦角 $7.9^\circ\sim 9.7^\circ$,十字板试验原状土抗剪强度10.13~12.71kPa,重塑土抗剪强度6.1~7.7kPa,灵敏度1.6左右,压缩模量3.2MPa左右。太湖平原湖相软土具有压缩性高、承载力低、高灵敏度、高触变性、流变性等特征,总体土质较均匀,工程力学性质差。软土层分布范围广,厚度大,顶板一般无硬壳层,底板时有亚砂土层分布,软土层中亦有亚砂土透镜状夹层,相比而言,其上下层透水性较好。

太湖软土的物理力学指标如表1-1~表1-4所示。

各土层主要物理力学指标

表 1-1

取样深度 (m)	天然含水率 $w(\%)$	天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	液限 $w_L(\%)$	塑性指数 I_P
2.3~2.6	37.0	1.83	1.05	36.20	17.90
4.3~4.6	53.1	1.68	1.50	41.30	18.30
6.3~20.6	42.1	1.75	1.21	31.10	12.20

软土层物理力学指标表

表 1-2

代表性路段	天然含水率 $w(\%)$	天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	液限 $w_L(\%)$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	直剪黏聚力 $c_q(\text{kPa})$
堆积阶地路段、 通济河路段	32~77.4 (55.9)	1.53~1.89 (1.69)	0.893~2.177 (1.568)	30.7~63.7 (47.9)	11.7~34.8 (23.7)	0.98~3.53 (1.35)	7~32 (14)
薛埠河路段、中 河路段	32.6~71.2 (39.7)	1.60~1.89 (1.81)	0.906~1.932 (1.109)	29.6~56.2 (36.1)	10.1~29.5 (15.2)	0.86~1.67 (1.26)	7~27 (17)
代表性路段	直剪内摩擦角 $\varphi_q(^{\circ})$	固快黏聚力 $c_{cu}(\text{kPa})$	固快内摩擦角 $\varphi_{cu}(^{\circ})$	无侧限抗压 强度 $q_u(\text{kPa})$	压缩系数 $\alpha_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$	标贯击数 $N(\text{次})$
堆积阶地路段、 通济河路段	1.1~13.2 (3.4)	8~18 (13)	2.3~7.5 (5.4)	13.1~60.8 (37.2)	0.44~2.61 (1.3)	1.17~7.09 (2.09)	2~4 (3)
薛埠河路段、中 河路段	1~16 (4.4)	10~28 (17)	1.4~21.2 (7.4)	42.5 (42.5)	0.41~2.37 (0.65)	1.41~9.3 (4.08)	1~6 (3)

软土物理力学参数

表 1-3

重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	天然含水率 $w(\%)$	相对密度 G_s	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	孔隙比 e	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$	泊松比 μ	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
17.85	46.54	2.74	21.46	1.04	1.19	3.12	0.36	10.03	8.54

太湖湖积平原沉积软土及松软土主要物理力学指标

表 1-4

地层 编号	地层 岩性	天然 含水率 $w(\%)$	天然 密度 ρ (g/cm^3)	孔隙比 e	压缩 系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	直接快剪		固结快剪		固结系数	
						黏聚力 $c_q(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_q(^{\circ})$	黏聚力 $c_{cu}(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_{cu}(^{\circ})$	$C_v(10^{-3}$ $\text{cm}^2/\text{s})$	$C_h(10^{-3}$ $\text{cm}^2/\text{s})$
1	黏土、粉 质黏土	22.1~ 28.4	19.1~ 20.8	0.61~ 0.85	0.15~ 0.20	19.0~ 26.0	8.8~ 20.9			6.759~ 9.590	8.253~ 11.02
2	淤泥质粉 质黏土、淤 泥质黏土	28.5~ 46.4	17.9~ 19.5	0.88~ 1.15	0.40~ 0.86	5.0~ 16.0	3.4~ 4.1	7.8~ 14.7	16.2~ 24.2	1.022~ 3.190	0.869~ 4.22
3	粉质黏 土	27.5~ 32.8	19.0~ 20.1	0.83~ 0.98	0.31~ 0.48	8~ 14	6.1~ 19.9	9.0~ 16.0	23.1~ 35.4	9.26	13.23
4	粉砂、黏 土	23.7~ 27.4	20.0~ 20.3	0.65~ 0.68	0.23~ 0.26	36.2~ 41.0	5.3~ 7.2	38.0~ 45.3	9.8~ 18.6		

1.1.1.2 巢湖软土^[5-6]

合肥滨湖新区位于合肥盆地东南部,巢湖之北侧,属于长江流域,区内天然河流较多,主要河流有南淝河、十五里河、派河等,支流众多,均通过巢湖流入长江。巢湖地区受晚近地质时期新构造运动和地表外力共同作用影响,第四纪全新世流水侵蚀、堆积作用形成了河湖的发育地貌。巢湖地区受河流地质作用的影响,长期的湖相地质作用形成了复杂的第四纪沉积层,厚度约为 10m,土层大多为含水丰富的淤泥或淤泥质黏土。

巢湖地区地基土均为第四纪松散沉积物,厚 50~80m,其中低及高液限黏土(淤泥层)厚度 12~46m,地面高程为 5.0~6.5m。其中,低及高液限黏土(淤泥及淤泥质土层)为近代湖相沉积层,并受河流地区地质作用的影响,颜色为灰色、灰绿及灰褐色,具滑感和臭味,富含有机质,饱和至过饱和,一般具有微层理,厚度 12~46m,呈软塑~流塑状态,局部地带夹薄砂层透镜体,为高压缩层。

巢湖地区软土具有如下特点:天然含水率高、孔隙比大;软土的黏聚力小,抗剪强度低;固结系数小;渗透性差;压缩系数大,压缩模量小,其物理力学指标同其他地区的软土相比具有较大不同;天然含水率高,平均在 40%左右,且均大于或等于其液限值,大部分土样的天然含水率超过其液限值 2%左右。天然状态下软土的液性指数在 1.02~1.06,土体长期处于流塑状态。软土饱和度大多在 90%以上,基本属于饱和土。初始孔隙比大多在 1.1~1.2,其均值大于 1.0。软土平均压缩系数为 0.85MPa^{-1} ,平均压缩模量为 3.3MPa 左右,属于高压缩土,土的工后沉降较大。土体的黏聚力一般在 6~11kPa,内摩擦角也较小,在 3° 左右,从而决定了地基承载力低、稳定性差的特性。

巢湖软土的物理力学指标如表 1-5 和表 1-6 所示。

巢湖软土基本物理性质指标

表 1-5

统计项目	天然 含水率 $w(\%)$	重度 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	饱和度 $S_r(\%)$	液限 $w_L(\%)$	塑限 $w_P(\%)$	压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
分布值	38.5~ 41.1	17.2~ 18.0	1.09~ 1.20	89.6~ 98.7	37.4~ 39.2	20.8~ 23.5	0.78~ 0.92	2.5~ 4.0	6~11	2.5~ 4.2
平均值	39.8	17.7	1.14	98.9	38.5	22.3	0.85	3.3	7.5	3.1

各层土的物理力学指标统计表

表 1-6

土 类	天然 含水率 $w(\%)$	孔隙比 e	液限 $\omega_L(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	直接快剪		固结快剪		固结系数 C_v ($10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$)	压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})
					黏聚力 $c_q(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_q(^{\circ})$	黏聚力 $c_{cu}(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_{cu}(^{\circ})$		
低及高液限 黏土	40~ 98	0.92~ 3.05	38~ 71	18~ 33	4.7~ 21	15	20.4	15	0.0003~ 0.004	0.00179
低液限粉土 质砂	18~ 35	0.6~ 1.0	30~ 50	13~ 36	30	17	10.3	24	0.0013~ 0.0034	0.00036

1.1.1.3 阳澄湖软土^[7]

阳澄湖位于苏州市东北部,该地区有全新统湖相及湖沼相沉积软土呈零星分布。此处发育的淤泥质黏土,可按所处层位和颜色详分为3种:灰黑色黏土、灰黄色黏土和灰黄夹白斑黏土,都属全新统沼积、湖积相软土,软土具有高含水率、大孔隙比、高压缩性、抗剪强度低等不良工程地质特性。

本地区黏土的含水率较高,重度偏低,孔隙比较大,液塑性含水率和塑性指数都较高。塑性指数 I_p 值均大于17,液限含水率 ω_L 都大于40%,因此各土样均属高塑性。土体的黏粒含量都大于38%,表明该黏土3个土样的亲水性矿物含量较高,具有较高的塑性且孔隙较大。

阳澄湖软土的物理力学指标如表1-7所示。

阳澄湖软土的物理力学性质指标表

表 1-7

试样编号	天然含水率 $w(\%)$	重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	相对密度 G_s	孔隙比 e	液限 $\omega_L(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	塑性指数 I_p
1—1	48.98	16.93	2.76	1.379	54.39	34.66	19.7
2—2	40.68	17.44	2.75	1.178	53.46	23.51	30
2—3	40.43	17.15	2.76	1.2	50.75	25.63	25.1

1.1.2 长江中游(江汉平原)地区^[8-10]

1.1.2.1 江汉平原地区湖相软土

武汉市地处江汉平原腹地,该区人口密布,工农业生产发达。地势平坦低洼,地形发展趋势为西北高,南低,其间稍有起伏。地面高程在24.0~32.0m之间。地表水系发育,沟渠纵横交错。气候温和多雨,地下水丰富且埋藏较浅,在低洼地带形成湖泊和沼泽。武汉周围存在发达的水系和大量的湖泊,江汉平原有大小湖泊300多个,重要的有洪湖、沔阳湖、长湖、排湖、大湖、大沙湖等,因此湖泊相沉积软土分布广泛。

江汉平原的软土十分典型,其中淤泥性质最差。软土层为第四纪全新世沉积的河湖相冲洪积物。由淤泥、淤泥质黏土或淤泥质亚黏土、泥炭薄层及黏土或亚黏土组成。沉积韵律清楚。软土层以下为粉砂或细砂,然后按亚黏土、黏土、重黏土的顺序依次沉积。一次沉积完成后,经过一段时间,生长有杂草等植物,腐烂后使重黏土表层有机质含量较大。然后可能出现第二次类似的沉积。软土地基中性质最差的是淤泥,其次是淤泥质土。淤泥层上部一般有一

薄层(0.5m左右)硬壳,其颗粒组成大都与下部土层相同。只是由于人工围垦及挖沟排水等原因,使含水率较低,密度变大而成为硬壳层,此层的存在对路堤的稳定及变形均有好处。

软土层在天然状态下性质较差,天然含水率较高,一般为40%~80%,淤泥可达60%~85%,孔隙比较大为1.5,天然密度约为 $1.52\text{g}/\text{cm}^3$,干密度低于 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$,黏聚力约为0.02MPa,抗剪强度约为0.047MPa,压缩模量约为2.99MPa,压缩系数约为 $0.7\sim 1.0\text{MPa}^{-1}$,压缩性较高。

软土的物理力学指标如表1-8~表1-10所示。

软土物理力学性质平均值指标

表 1-8

成相 或地区		深度 $H(\text{m})$	天然 密度 ρ (g/cm^3)	天然 含水率 $w(\%)$	干密度 ρ_d (g/cm^3)	孔隙比 e	液限 $\omega_L(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	液性 指数 I_L	塑性 指数 I_P	压缩 系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩 擦角 $\varphi(^{\circ})$
河湖相	汉口	7~11	1.8	40.1	1.28	1.13	42.7	25.1	0.86	17.5	0.69	—	—
	武汉	1.5~11	1.78	42.2	1.25	1.2	61	—	1.4	27	0.7	11	13

土 层 的 性 质

表 1-9

土层名称	天然含水率 $w(\%)$	重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	液限 $\omega_L(\%)$	塑性指数 I_P
淤泥	55~67	1.5~1.68	40~73	11~38
淤泥质黏土	43~52	1.67~1.80	43~60	20~40
淤泥质亚黏土	35~54	1.69~1.88	23~33	8~16
黏土	22~35	1.70~2.0	34~58	21~32
亚黏土	24~35	1.84~1.98	30~39	5~15

地基土物理力学指标表

表 1-10

地层 序号	天然 含水率 $w(\%)$	孔隙比 e	土工试验固结系数		三轴快剪		三轴固结快剪		压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	超固 结比 OCR
			竖向 $C_v(10^{-3}\text{cm}^2/\text{s})$	水平向 $C_h(10^{-3}\text{cm}^2/\text{s})$	黏聚力 $c_{cu}(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_{cu}(^{\circ})$	黏聚力 $c_{cu}(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi_{cu}(^{\circ})$		
(2)-1	72.3	2.05	0.47	4.5	6	1.3	8	2	1.56	0.92
(2)-2	41.2	1.1	1.25	3.32	14	4	16	5	0.43	
(2)-3	34.5	0.99	2.05	2.7	21.1	6.7	23	8	0.43	
(2)-4	43.4	1.22	1.2	3.73	14.2	4	16.2	5	0.68	0.93
(2)-5	48	1.38	1.71	4.64	10.3	2.5	11.3	3.5	0.79	0.82
(2)-6	35.3	1.04	3	15.53	14.5	4	17.4	5	0.43	1.1
(2)-7	32	0.93	5.6	25.39	21.3	6.7	23.2	8	0.27	
(2)-8	29.8	0.86	5.2	18.01	30	7.5	35.2	9.8	0.21	1.05

1.1.2.2 洞庭湖软土^[11-16]

洞庭湖相软土是岳阳地区广泛分布的软土类型。洞庭湖平原为洞庭湖湖相软土沉积区,地势低平,土壤软弱,为湖相沉积堆积平原地貌向坡积微丘岗地地貌过渡地段。北方地势比南方地势略高,中部丘岗隆起,东西低平开阔,微向洞庭湖倾斜。地貌分区特征较为明显:东北部

为低山丘陵区,间有溪谷平原,中南部为丘岗区,其余为平原。平原面积 1 028km² (不含江、湖、河、库等水域),按成因可分为江河平原、溪谷平原和滨湖平原。

洞庭湖地区河流、湖泊、池塘、水稻耕地等地形地貌分布广,分布有较为广泛的淤积软土,大面积的软土主要分布在洞庭湖冲积平原上。在洞庭湖沿岸地区是由长江、湘江冲积以及历史上洞庭湖沿岸人为围湖造田形成的低洼平原,地表排水不畅,地表层第四纪沉积的黏土透水性较差。表层土质普遍有明显的草根层,呈海绵状,孔隙度大,保持水分能力强。软土以淤泥质低液限黏土为主。软土沉积层属洞庭湖滨湖区及湖区第四纪河湖相沉积区。第四纪软土沉积层可分为湖泊相或沼泽相、沼泽与河漫滩交替相及河漫滩相等主要成因类型。洞庭湖湖相软土主要由淤泥、淤泥质黏性土、软塑状亚黏土、亚砂土以及松散状粉细砂组成。本地区软土厚度分布不均,以更新世地层中软土厚度较大,部分地段软土层厚达 40m 左右,全新世地层中软土仅分布于地表浅部河湖港湾中的相对静水区域或鱼塘之中,且层厚一般均小于 10m。洞庭湖地区的湖泊相及沼泽相软土一般分为上下两层,呈双层结构。上部表层为硬壳层,其厚度一般在 0.6~3.0m,下部底层为灰~灰黑色、褐色淤泥、粉砂、淤泥质黏性土、灰色黏土,厚度在 10~15m。在该区湖泊相及沼泽相软土主要分布在洞庭湖、万子湖及横岭湖北岸的草尾至黄茅洲、南大一带。

淤泥质黏土:褐色~灰黑色,软塑,部分流塑,湿~饱和;以低液限黏土为主,含有有机质,有腥臭味,主要分布于沿线水稻田、水塘中,层厚 1.2~11m,平均 6.0m。

低液限黏土:褐色~黄褐色~褐色,硬塑~可塑,部分软塑,稍湿~湿,见由高岭土组成的网状构造和斑团,分布于长江一、二阶地中,层厚 4.0~6.9m,平均厚 5.5m。

软土(Q41):灰褐色、灰黑色、灰绿色,主要为游泥、游泥质黏土、淤泥质粉质黏土,软、流塑状粉质黏土、黏土,含少量有机质,该层广泛分布于沿线沟、渠、水塘及水田段,分布厚度一般为 2.0~4.0m,其中吴家桥大桥钻孔揭露软土最大厚度 14.2m。

淤泥质黏土是最为典型的洞庭湖软土,淤泥质土呈软塑状,局部呈流塑状。承载力低、压缩性大、含水率高、孔隙比较大,具有高流变性。厚度 1.2~11.0m,土层结构疏松,含有有机质,物理力学性质差,承载力低(50~65kPa)。洞庭湖软土大部分土体的天然含水率为 35%~45%,孔隙比为 0.8~1.2,重度为 18.19kN/m³,液限为 34%~45%,塑限为 22%~30%。大部分软土中夹有薄层状粉细砂,这种结构利于土体固结排水和在施工中降水。由于湖泊处于静水环境,所受动水扰动较小,本区软土在含水率、孔隙比、液限和压缩系数,相对于两广滨海相软土和三角洲相软土较低,软土结构相对较致密,地基承载力相对较高。本区雨水期集中,暴雨经常发生,引发洪水,造成水位升降较大,容易侵蚀和浸泡路基。

洞庭湖软土的物理力学指标如表 1-11~表 1-16 所示。

洞庭湖软土的物理力学性质 表 1-11

土 类	天然 含水率 $w(\%)$	天然密度 ρ (g/cm ³)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	饱和度 $S_r(\%)$	孔隙比 e	液限 $\omega_L(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	压缩系数 a_{1-2} (MPa ⁻¹)	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	黏聚力 c (kPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
淤泥质黏土	44.6	1.76	1.22	98.9	1.227	49.4	27.8	0.86	2.26	2	5.9
亚黏土	37.2	1.85	1.42	70.3	1.03	47.6	23.5	—	6.08	5.2	40

洞庭湖软土基本参数

表 1-12

天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	天然含水率 $w(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	液限 $\omega_L(\%)$	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$
1.82	40.9	32.8	40.6	12.6	4.4	5.1

原状土物理力学指标

表 1-13

天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	天然含水率 $w(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	液限 $\omega_L(\%)$	塑性指数 I_P	孔隙比 e	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$
1.67	56.4	32.7	49.1	16.4	1.564	2.3
压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa})$	渗透系数 $k_v(\text{cm}/\text{s})$	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	桩侧摩阻力 $q_u(\text{kPa})$	有机质含量 $W_u(\%)$	相对密度 G_s
1.13	2.3×10^{-7}	[21]5(32)	[9.9]4.9(8.9)	30	1.88	2.74

注:[]表示固结快剪,()表示三轴不排水剪。

南洞庭湖区软土物理力学性质指标

表 1-14

天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	天然含水率 $w(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	液限 $\omega_L(\%)$	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$
1.82	40.9	32.8	40.6	12.6	4.4	5.1

主要物理力学指标统计表

表 1-15

统计项目	统计指标												
	天然含水率 $w(\%)$	天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	相对密度 G_s	天然孔隙比 e	液限 $\omega_L(\%)$	塑限 $\omega_P(\%)$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	压缩模量 $E_{s1-2}(\text{MPa})$	黏聚力 $c(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	标贯击数 $N(\text{次})$
统计个数	56	56	56	56	57	57	57	46	56	56	56	56	42
平均值	26.11	1.95	2.74	0.774	43.2	24.4	18.75	0.17	0.212	9.16	52.09	18.82	21.24
标准差	5.19	0.264	0.364	0.141	5.735	2.856	4.41	0.13	0.088	2.75	15.681	4.898	3.875
变异系数	0.2	0.135	0.133	0.183	0.133	0.117	0.24	0.79	0.414	0.3	0.301	0.26	0.182
修正系数	1.05	0.97	0.97	1.042	0.97	0.97	0.95	1.2	1.095	0.93	0.93	0.94	0.95
标准值	27.3	1.89	2.66	0.807	41.9	23.8	17.75	0.199	0.232	8.53	48.5	17.7	20

不同类型软土的物理性质测试分析结果

表 1-16

类型 指标	软粉砂质黏土	灰色黏土	淤泥质黏性土	淤 泥
重度 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	1.65~2.4	1.3~1.64	1.64~1.90	1.34~1.65
天然含水率 $w(\%)$	30~50	50~70	30~50	50~80
孔隙比 e	0.8~1.00	1.2~1.50	0.85~1.20	1.30~1.60
液限 $\omega_L(\%)$	35~50	45~48	30~60	35~60
塑性指数 I_P	11~15	17~35	7~20	10~22
液性指数 I_L	0.70~1.30	1.00~2.20	0.70~1.40	1.00~2.00

1.1.3 云贵高原地区^[8, 17-18]

1.1.3.1 滇池软土

滇池位于云南省昆明市,是典型的高原湖泊地区。昆明盆地阳光充足,温度适宜,又有湖泊、河流、洼地等地貌条件,利于水生、湿生植物的生长蔓延,软塑到流塑状态的泥炭质土分布较为广泛,称其为高原湖相沉积软土。

在昆明旁的滇池地区,有环滇池湖泊沉积区域,路基下部存在的深厚泥炭质软土是环滇池流域的典型地质特征,滇池流域也因此成为我国滨湖相软土地质的典型区域。

场地地层可分为4个大层:新近抛填土及耕土层、第四系全新统冲沟洼地中的湖沼沉积层、第四系更新统坡积层和第四系更新统湖相地层。

泥炭质土:深灰、黑灰色,饱和,软塑(局部流塑)状态,高压缩性,有机质含量最高达89.5%,其力学强度较低。此层土具有丝绢光泽,干强度、韧性差,摇动会析水,在冲沟低洼处沉积,厚度在0~4.0m之间。

黏土:褐灰、灰白等色,湿,软塑(局部可塑)状态,高压缩性(局部为中压缩性),局部含有机质,分布于冲沟中低洼处,干强度、韧性低,切面光滑,稍具光泽,其力学性质差,厚度在0~3.0m之间。

粉质黏土:黄、褐黄、褐黄夹灰、褐黄灰等色,湿,硬塑(局部为坚硬或可塑)状态,中压缩性,局部为高压缩性,干强度、韧性中等,切面粗糙,无光泽,无摇振反应,层间含强风化砂、泥岩角砾,力学性质一般。

黏土:黄、褐黄灰、黄夹灰等色,湿,硬塑(局部坚硬)状态,中压缩性,干强度、韧性高,切面光滑,具光泽反应,力学性质较好,局部含全风化泥岩角砾。

滇池地区分布的软土为高原湖相沉积软土,此类软土孔隙比大、含水率高、承载力低、压缩模量低,在荷载作用下侧向变形和次固结沉降较大。此外,软土的孔隙比很大,一般在2~3,部分达到8以上;天然含水率高,一般在300%左右,部分可以达到600%;重度小,重度较一般黏土、有机质土轻,多在10kN/m³左右;有机质含量高,一般在50%左右,甚至达到90%以上,液限和塑限很大,压缩性很高;承载力很低,一般承载力基本容许值在40~90kPa;土体渗透性随荷载变化明显,低荷载时渗透性很大,随着荷载加大渗透性降低。

滇池软土的物理力学指标如表1-17~表1-19所示。

土层分布及参数表 表 1-17

土 层 名 称	性 状 描 述	土层厚度 $H(m)$	土 性 指 标	
			压缩模量 $E_{s1-2}(MPa)$	承载力容许值(kPa)
黏土	褐色,可塑,高压缩性	0~3	5.1	140
淤泥	灰黑色,流塑,高压缩性	2~6	2.1	50
泥炭质土	黑色,流塑,高压缩性	4~8	1.7	70
粉土	灰色,中密,中压缩性	0.5~2.5	8.7	110
泥炭质土	黑色,流塑,高压缩性	1.5~5	1.7	70
粉土	蓝灰色,中密,中压缩性	4~10	6.7	140

中国各地区软土物理力学性质平均值指标

表 1-18

成相 或地区	深度 H (m)	天然 密度 ρ (g/cm ³)	天然 含水率 w (%)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	孔隙比 e	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	液性 指数 I_L	塑性 指数 I_P	压缩 系数 a_{1-2} (MPa) ⁻¹	内聚力 c (kPa)	内摩 擦角 φ (°)
河湖相 昆明	2~20	1.75	43	1.22	1.19	53	31	0.58	22	0.69	35.3	4.2

主要土层物理力学性质指标

表 1-19

土层名称	重度 γ (kN/m ³)	孔隙比 e	天然含水率 w (%)	液性指数 I_L	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)
泥炭质土	13.5	1.7	60.79	0.75	1.11
黏土	16.5	1.16	42.09	0.46	2.27
粉质黏土	17.3	1.35	40	0.17	4.54
黏土	17.6	1.21	45	0.39	3.14

1.1.3.2 杞麓湖软土^[19]

杞麓湖位于云南省通海县境内,处于云贵高原上。以位于杞麓山(又名秀山)畔而得名杞麓湖属断层陷落湖,湖泊长轴呈东西向,湖水位 1 796.62m,湖面积 36.73km²,湖岸线长度 45km,湖泊长度 13.5km,宽度平均 2.72,最宽 5.2km。云贵高原的软土地基多以湖相沉积软土为主,主要由灰黑色、草绿色黏土、淤泥质黏土或亚黏土构成,局部地段可能还夹有少量的粉砂土、砂土和螺壳层;地基土的含水介质粒度较细,地下水的水力坡度较小,径流条件差,地下水位一般都比较低(地表以下 0.5~1.0m)。

地质勘探表明,该区域软基土层自上而下分为 4 个层次,对路基沉降影响较大的主要为以下两个土层:

第二层为灰色、灰黑色淤泥质黏土,一般呈软塑状,土层厚度变化较大(一般厚度为 4~11m),容许承载力仅为 40kPa,属高压缩性土,具有很小的结构性。该土层的物理力学性能最差,是路基稳定和变形的控制性土层。

第三层为褐色、褐灰色、绿灰色亚黏土,层厚大于 10m,该土层上部为软塑状,容许承载力为 100~120kPa,下部为可塑状,部分呈硬塑状,容许承载力为 120~160kPa。该土层为中等压缩性土,具有一定的结构性,对路基的沉降量仍有较大影响。

淤泥质黏土:天然密度 1.43g/cm³,孔隙比 1.38,天然含水率 97.5%,液限 81.0%,塑限 48.5%,塑性指数 32.5,液性指数 1.46,压缩系数 3.20MPa⁻¹,压缩模量 1.21MPa,黏聚力 4.8kPa,内摩擦角 3.7°,允许承载力 40kPa。

亚黏土:天然密度 1.42g/cm³,孔隙比 2.91,天然含水率 106.0%,液限 104.0%,塑限 62.0%,塑性指数 42.0,液性指数 1.03,压缩系数 3.48MPa⁻¹,压缩模量 1.32MPa,黏聚力 9.9kPa,内摩擦角 6.7°,允许承载力 120kPa。

杞麓湖软土的物理力学指标如表 1-20 所示。

云南某一级公路高原湖泊软土地基土的物理力学指标

表 1-20

土层编号及名称 指标	第一层	第二层	第三层	第四层
	黏土(耕植土)	淤泥质黏土	亚黏土	硬塑状黏土
天然密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	2	1.43	1.42	1.36
孔隙比 e	0.72	1.38	2.91	2.98
天然含水率 $\omega(\%)$	26	97.5	106	102
液限 $\omega_L(\%)$	31.5	81	104	93
塑限 $\omega_P(\%)$	18.5	48.5	62	56
塑性指数 I_P	13	32.5	42	37
液性指数 I_L	0.57	1.46	1.03	1.27
压缩系数 $\alpha_{1-2}(\text{MPa}^{-1})$	0.27	3.2	3.48	4.15
压缩模量 $E_s(\text{MPa})$	6.39	1.21	1.32	0.97
黏聚力 $c(\text{kPa})$	10.2	4.8	9.9	8.5
内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	7.3	3.7	6.7	4.6
容许承载力 (kPa)	180	40	120	180

1.1.3.3 洱海软土^[20-21]

洱海位于云南省大理市,是滇西最大的断陷湖泊,长 42km,宽最大 9km,湖面海拔 1 974m,湖水面积约 249.8km²,属澜沧江水系。洱海西邻前寒武纪板岩和大理岩构成点苍山,东部为晚古生代的石灰岩低山丘陵,北侧为入口,向南为西洱河,是一个开放的湖泊水系。

洱海盆地于始新世开始断陷接受沉积。晚更新世时气候寒冷,大理冰期来临,来自西侧点苍山的山岳冰川产生强烈的刨蚀作用,造成河流堵塞。进入早全新世时,气候发生变化、温度上升,洱海水泛滥,平均水位达海拔 2 160m,形成大量河湖相或河湖—沼泽相沉积。植被发育的地段被湖水淹没后沼泽化,大量水生植物繁殖、死亡产生的腐殖物和黏土矿物沉积,形成软土的物质来源。全新世中期,全区持续上升,湖水大面积干涸或范围缩小,水位下降到海拔 2 000m 左右。全新世晚近时期,区内湖泊进一步缩小或干涸,洱海目前的水位是 1 974m。随着洱海水位不断下降,湖泊面积逐渐缩小,原湖泊近岸水面下的沉积地层出露水面,即洱海软黏土主要分布在洱海断陷湖的周缘。经孢粉分析和 14C 年龄测定,洱海边缘的软黏土主要是近一万年全新世以来的沉积。

洱海盆地分布以湖积有机质土、淤泥质土、淤泥、泥炭质土、泥炭为主,冲洪积成因软黏性土少量分布;洱海盆地至鹤庆盆地之间,软土以坡积、坡洪积淤泥质土为主,局部为湖积淤泥质黏土;鹤庆盆地线路走行于鹤庆盆地东侧边缘的坡麓地貌区。软土主要为坡洪积淤泥质土,局部为湖积淤泥质黏土,零星分布坡残积表土受水浸泡形成的淤泥质黏土、淤泥质土。

根据洱海东缘软黏土的实验结果,软黏土的工程地质特性主要表现在以下方面:

- (1)天然含水率较高。含水率一般在 40%~65%之间,但最高可达有 104%,平均值为 57.08%,接近于液限,几乎处于饱和状态。
- (2)孔隙比大。孔隙比一般在 0.64~2.63 之间,平均值为 1.49。
- (3)压缩性大。软黏土压缩系数为 0.23~2.21MPa⁻¹,平均值 0.88MPa⁻¹;压缩模量一般