

软土工程 若干理论与应用

白 冰 肖宏彬 编著

71.8

2



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

软土工程 若干理论与应用

白 冰 肖宏彬 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

前 言

近年来,随着软土地基加固及开挖技术等相关领域的迅速发展,软粘土的物理力学特性及其加固理论和实践的研究受到极大的重视。编著者近十多年来一直从事软粘土工程的基本理论研究工作,也参加了多项软土工程的实践工作,并发表了多篇相关学术论文。本书不拟对软土工程理论及其应用的方方面面进行阐述,重点结合编著者的研究成果和实践进行论述,同时也参阅了大量的国内外有关文献。因此,本书反映了软土工程若干领域的最新研究成果和发展动态,同时也是对编著者这一期间在该领域研究工作的总结。

本书内容丰富,除涉及了相关领域的最新理论研究成果外,还特别强调其实用性,给出了较多的工程实例。

全书共分8章,具体内容如下:第1章介绍软粘土的基本物理力学特性,主要对目前软土力学中的一些新的研究成果进行概括和总结,包括软粘土物理力学指标之间的相互关系、饱和软粘土的塑性指数对其变形参数的影响、土的结构性及其取样扰动的影响等。第2章介绍周期荷载作用下软粘土的一些性状,对若干基本特性和理论进行了概括和评述,拓宽了土动力学研究和应用的范围。第3章主要介绍编著者博士论文的工作,包括冲击荷载作用下软粘土的变形和孔压变化规律、饱和软粘土的再固结性状、超固结土及其在冲击荷载作用下的性状。第4章介绍冲击荷载作用下的软粘土变形和强度计算理论,该章为前一章工作的继续,为动静结合排水固结法加固软基后变形和强度的预测计算提供了可能的途径。第5章介绍软土地基加固的若干新技术及其应用,包括公路软基及其结构物的设计与施工中的一些新的技术,并就三向应力状态下土工织物的变形特点及加筋软基承载力的计算等相关问题进行了讨论,结合编著者的研究和实践给出了软土地基加固中的一些新的思路。第6章介绍强夯法加固饱和软粘土地基的最新发展,重点结合编著者近年来的研究成果,就“动静结合排水固结法”加固软基的基本思想及其相关问题进行讨论。第7章介绍聚苯乙烯泡沫塑料在岩土工程中的应用,包括聚苯乙烯泡沫塑料的基本特性、测试方法、适用范围及其在公路软基中的应用情况,考虑到这一新材料在土工中

应用的全面性，特别就其作为减荷材料来减轻上埋式地下结构物土压的基本原理和应用进行了较为深入的研究。第8章介绍软土工程中的环境土工问题，主要包括桩基础施工对环境的影响、基坑开挖对环境的影响和隧道施工对环境的影响等内容，这些方面的论述对于研究其它施工活动对周边环境的影响也有较大的参考价值。

本书由白冰博士和肖宏彬博士合著，白冰负责统一全稿。

本书部分内容承蒙武汉大学刘祖德教授、陆士强教授，同济大学周健教授等指导和审阅，并提出了不少宝贵意见和建议，作者在此表示衷心的感谢。此外，本书引用了国内外许多学者的研究成果和资料，在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者才疏学浅，不妥之处在所难免，恳请各位专家和广大读者批评指正。

编著者

2002年1月

白冰简介

白冰，男，汉族，1966年生。
1988年毕业于合肥工业大学土木工程系；1991年及1998年在武汉水利电力大学分别获得岩土工程专业硕士及博士学位，1999年7月至2001年7月在同济大学土木学科博士后流动站工作。现在中国科学院武汉岩土力学研究所工作，株洲工学院兼职教授，主要从事土工测试技术、软土地基加固及相关理论的研究。自1992年以来已在《岩土工程学报》、《水利学报》、《工程力学》、《岩石力学与工程学报》等国内外公开出版刊物上发表50余篇学术论文，出版《土动力学理论与计算》等学术专著两部。主持湖北省教委科学研究计划项目“动静结合排水固结法处理软基研究”等多项课题。

肖宏彬简介

肖宏彬，男，1957年生，博士。1982年毕业于湖南大学土木系路桥专业，获工学学士学位，1991年至1992年在同济大学地下建筑与工程系作国内访问学者。现为株洲工学院土木系主任、副教授，中南大学博士，主要从事岩土力学与基础工程的教学与研究工作。先后完成了“深基坑开挖的围护结构理论和应用”、“大直径空心桩理论与试验研究”等课题的研究。近年来，在国内外学术刊物上发表论文10多篇。

目 录

前言

第 1 章 软粘土的基本物理力学特性	1
1.1 概述	1
1.2 饱和软粘土的基本特点	1
1.2.1 基本特点描述	1
1.2.2 湖北省宜昌至黄石一级公路仙桃至江陵段的工程地质特征	3
1.3 软土物理力学指标之间的相互关系	6
1.3.1 压缩指数与土物理指标的一些关系	6
1.3.2 湖北省宜黄公路仙江段的土性指标关系统计分析	7
1.4 饱和软粘土的塑性指数对其变形及力学参数的影响	8
1.4.1 塑性指数的物理意义及其对粘性土性状的影响	8
1.4.2 饱和软粘土的孔隙比与塑性指数的关系	9
1.4.3 塑性对若干变形及力学参数的影响	9
1.4.4 软粘土的天然强度与塑性指数的关系	13
1.5 土的结构性及其取样扰动的影响	14
1.5.1 土体的取样扰动	15
1.5.2 取样扰动对土样残余应力和饱和度的影响	15
1.5.3 取样扰动对土样强度和固结特性的影响	16
1.5.4 土体取样扰动特性的评价指标	17
1.5.5 人工扰动条件下原状土的性状	19
参考文献	19
第 2 章 周期荷载作用下的软粘土性状	21
2.1 引言	21
2.2 周期荷载作用下的粘性土变形和孔压的影响因素	21
2.3 周期荷载作用历史对粘性土性状的影响	23
2.4 周期荷载作用下的粘性土孔压和变形计算模式	25
2.5 饱和粘性土动力本构模型参数的研究	28
2.6 软粘土永久变形的计算方法	34
2.7 饱和软粘土弹塑性本构模型的发展	36
参考文献	39
第 3 章 冲击荷载作用下的饱和软粘土性状	45
3.1 引言	45
3.2 冲击荷载作用下的软粘土变形和孔压	45

3.2.1	冲击荷载作用下的软粘土变形和孔压变化规律	45
3.2.2	残余变形的计算模式	50
3.2.3	孔隙水压力的计算模式	53
3.3	饱和软粘土的再固结性状	58
3.3.1	试验装置和试验方法及方案说明	58
3.3.2	饱和软粘土的再固结变形	60
3.3.3	影响再固结变形量因素的分析	64
3.3.4	孔压升高与再固结体应变之间的惟一性关系	66
3.3.5	再固结体压缩系数的确定	68
3.3.6	有关问题的进一步讨论	70
3.3.7	冲击荷载作用历史对软土变形和强度的影响	71
3.4	超固结土及其在冲击荷载作用下的性状	73
3.4.1	研究的方法和内容	74
3.4.2	超固结土的变形性状	74
3.4.3	超固结土冲击后的再固结行为	76
3.4.4	强度与超固结比的关系	77
3.4.5	不同超固结比土样残余变形的计算模式	77
	参考文献	80
第4章	冲击荷载作用下的软粘土变形和强度计算理论	82
4.1	引言	82
4.2	再固结指标及沉降计算的方法	82
4.2.1	再固结压缩系数	82
4.2.2	再固结压缩指数	83
4.2.3	再固结压缩指数与回弹再压缩指数的比较	85
4.2.4	多遍冲击荷载作用下的土体沉降计算	85
4.3	冲击荷载作用下的软土强度计算	87
4.3.1	形成历史对似超固结土强度的影响	87
4.3.2	似超固结比的定义	88
4.3.3	不排水冲击荷载作用条件下的强度计算	88
4.3.4	冲击再固结后的强度计算	89
4.3.5	多遍冲击情况下的强度计算	90
4.3.6	强度预测模型的验证	93
4.4	动静荷载耦合作用下的渗透固结理论	95
4.4.1	动静荷载耦合的孔隙水压力	95
4.4.2	动静荷载耦合的固结计算	96
4.4.3	固结微分方程式解析解的进一步讨论	99
4.4.4	算例分析	100
4.5	饱和软粘土及其在冲击荷载作用后的次固结变形计算	102
4.5.1	饱和软粘土的固结及次固结变形分析	102

4.5.2 冲击荷载作用后的次固结变形分析	104
4.5.3 使用荷载(静荷载)下的变形计算	106
参考文献	107
第5章 软土地基加固的若干理论及其应用	109
5.1 概述	109
5.2 公路软基设计与施工中的一些问题	109
5.2.1 低路堤情况下的问题和对策	109
5.2.2 特殊地形条件下的处理方法	110
5.2.3 建筑物下软土地基的设计和施工	112
5.2.4 日本高速公路软基处理的一些做法	116
5.3 软土地基的加固监测	119
5.3.1 观测手段	119
5.3.2 沉降和稳定控制及其对策	120
5.4 三向应力状态下土工织物加固软基的计算	121
5.4.1 三向应力状态下土工织物的变形特点	122
5.4.2 土工织物三向受力状态加筋软基承载力的计算	126
5.4.3 土工织物的抗顶破设计方法	130
5.5 土工格栅加固软基的一些应用	131
参考文献	133
第6章 强夯法加固软粘土地基的原理及应用	135
6.1 强夯法加固地基的概况	135
6.2 强夯法加固饱和软粘土地基的若干问题	136
6.2.1 动静结合法处理软基的基本思想	137
6.2.2 设计与施工原理	137
6.2.3 现场监控方法	139
6.2.4 强夯施工的扰动区域	139
6.2.5 强夯法处理软基机理的进一步研究	140
6.3 关于夯锤冲击力大小的研究	143
6.3.1 夯锤与地表接触动应力的特点	144
6.3.2 室内试验研究	145
6.3.3 理论计算	146
6.4 强夯荷载作用瞬间饱和土层内的孔压和固结变形	154
6.4.1 强夯荷载作用下动应力的分布特点	154
6.4.2 强夯荷载作用期间孔隙水压力分布的求解	155
6.4.3 强夯荷载作用期间饱和土层的固结变形计算	158
6.5 工程实例及分析	161
6.5.1 强夯法加固上海浦东国际机场	161
6.5.2 其它一些工程简介	164

参考文献	167
第7章 聚苯乙烯泡沫塑料在岩土工程中的应用	169
7.1 概述	169
7.2 岩土工程中应用 EPS 的基本思想和适用范围	169
7.3 EPS 的物理力学性质及其测试	171
7.3.1 基本特性	171
7.3.2 EPS 的测试	173
7.4 EPS 的减压作用试验研究及计算分析	178
7.4.1 基本原理	178
7.4.2 模型试验	179
7.4.3 减荷条件下的土压力理论计算公式	182
7.4.4 高填土下矩形刚性结构物竖向土压力的数值计算	184
7.4.5 上埋式圆形结构物周边土压力的数值计算	187
7.5 EPS 在岩土工程中的应用实例研究	190
7.5.1 道路工程中的应用	190
7.5.2 EPS 的减荷作用应用实例	195
7.5.3 耐久性与经济性	196
参考文献	197
第8章 软土工程施工中的环境土工问题	199
8.1 概述	199
8.2 软粘土中桩基础施工对环境的影响	200
8.2.1 打桩对环境的影响及研究概况	200
8.2.2 沉桩过程中的桩土挤压应力及超孔压的计算	201
8.2.3 打桩作用对桩承载力的影响	204
8.2.4 打桩对桩周土体及临近结构物的影响	206
8.2.5 打桩振动对环境的影响	212
8.2.6 减少打桩对周围环境影响的措施	215
8.3 软粘土地基基坑开挖对环境的影响	217
8.3.1 基坑开挖的环境影响	217
8.3.2 基坑开挖条件下典型的应力路径	218
8.3.3 深基坑支护事故的原因分析	219
8.3.4 基坑工程的环境效应及防治对策	221
8.4 软粘土中隧道施工对环境的影响	223
8.4.1 研究概况	223
8.4.2 隧道施工对周围土体力学性状的影响	225
8.4.3 隧道施工引起的地表位移和沉降	230
8.4.4 隧道施工对周围环境的影响	234
参考文献	237

第 1 章

软粘土的基本物理力学特性

1.1 概 述

近年来,随着软土地基加固及开挖技术等相关问题的迅速发展,饱和软粘土的物理力学特性的研究也受到极大的重视。本章结合作者近些年来的研究成果,在对饱和软粘土的基本特点进行描述的基础上,主要对下列一些问题进行研究和讨论:①介绍土的物理力学指标之间的一些关系,其基本思想是,利用一些易于得到的物理指标来估算粘性土的力学指标,这些关系不但有一定的物理意义,而且可以很好地用于工程计算;②除了上述一般的物理力学指标之间的相互关系外,还特别介绍了粘性土的塑性指数与其力学及变形参数之间的相互关系,并对它的物理意义进行了深入的分析;③粘性土的结构性及其取样和施工扰动的影响对其力学参数的影响是目前值得重视的一个研究课题,它的研究对于正确合理地评价和选用土的力学和变形参数有十分重要的指导意义。本章对扰动情况下一些重要参数的影响进行了概括和总结,为工程应用进行了必要的准备。

1.2 饱和软粘土的基本特点

1.2.1 基本特点描述

软粘土的特性和一般粘性土不同,根据我国某些地区软土的物理力学性质指标的统计值并根据大量的工程实践,可对沿海地区软土的主要物理力学性质分析如下:

天然含水量高。天然软粘土的含水量一般在 34%~72% 之间,其值一般大于液限,属于流动状态,天然孔隙比在 1.0~1.9 之间,故而一般属于淤泥或淤泥质土,其中淤泥质土占多数。液限变化在 34%~58% 之间,大多在 34%~43% 的范围内,塑性指数变化在 13~30 之间,大多在 15~20 的范围内,属于中等塑性的无机土。

压缩性大。压缩系数一般在 $0.005 \sim 0.02 \text{ cm}^2/\text{N}$ 之间,属于高压缩性土,其压缩性往往随液限的增大而增大。由于软粘土大多为第四纪后期的沉积物,通常属正常固结土。但一些近期沉积的软土,则为未完全固结土,即为欠固结土,例如新近围垦的海滩(俗称海涂),在自重作用下还会继续下沉。

渗透性小。渗透系数大部分为 $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm/s}$ 之间,所以在荷载作用下固结很慢,强度不易提高。当土中有机质含量较大时,甚至会产生气泡,堵塞排水通道,降低其渗透性。

对于夹有薄砂层的粘土,其水平向渗透性可能会显著增大,渗透系数可达 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。所以,该类土层的固结速率也比均质粘性土要快得多。

抗剪强度低。一般在快剪情况下,粘聚力在 10kPa 左右,内摩擦角 $0^\circ \sim 5^\circ$ 之间。固结

快剪粘聚力与快剪相比差别不大，内摩擦角一般在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间。

软土的强度大小与排水条件有密切关系。在荷载作用下，如果土层有良好的排水条件，那么经过固结后，它的强度随有效应力的增大而增加；反之，如果土层没有排水固结，则随荷载的增大，它的强度可能随剪切变形的增大而衰减。因此，在工程实践中必须根据地基的排水条件和加荷的时间长短采用不同排水条件进行试验（如不排水剪、固结不排水剪和固结排水剪等），取得相应的抗剪强度指标。由于位于不同深度的土层，是在大小不同的自重压力作用下固结的，所以软土的强度一般随深度的增加而增加。根据统计分析，软土层在深度 10m 以内的平均十字板剪切试验强度一般为 $5\sim 20\text{kPa}$ ，深度每增加 1m，其强度平均增加 $1\sim 2\text{kPa}$ 。

软土的另一特点是它的流变性十分显著。在剪应力作用下，土体产生缓慢的剪切变形，剪应力愈大，剪切变形愈明显，当剪应力达到一定值后，长期作用下土体可能会剪坏，此时的剪应力值一般小于常规试验方法得到的抗剪强度值，该值称之为长期抗剪强度，它一般为常规试验方法抗剪强度的 $40\%\sim 80\%$ ，而且土的塑性指数愈大，其值愈小。考虑到土的流变性，一般可将常规试验得到的抗剪强度值适当降低。但实际工程中，地基在荷载作用下的固结作用可能会抵消其降低值，因而具体设计中常常不考虑土的流变性质。工程实测资料表明，软土在固结沉降完成之后，即孔隙水压力完全消散后，还可能继续产生一定的次固结沉降。

软土具有显著的结构性，特别是海相沉积的软土，一旦受到扰动（振动、搅拌或搓动等），其絮凝状结构受到破坏，土的强度将明显下降，甚至产生流动状态。软土受到扰动后强度降低的特性过去一般常用灵敏度来表示。我国东南沿海（如上海和宁波等地）滨海相沉积的软土的灵敏度约在 $4\sim 10$ 之间。因此，在高灵敏度粘土地基上进行地基加固或开挖基坑时，应力求避免土的过分扰动。另一方面，软土扰动后，随着静置时间的增长，其强度又会逐渐有所恢复，但一般不能恢复到原来结构的强度。关于结构性软土扰动的一些定量评价方法将在后面加以讨论。

由于软粘土成因的复杂性，因而它的构造也较为复杂。例如，滨海相沉积的软土层，由于受潮汐水流等因素的影响，其上部往往形成厚度达 3m 以上的所谓“硬壳层”，下部则为夹粉细砂透镜体的淤泥质土或夹粉砂的层状淤泥质土，有时局部有薄的泥炭层。而三角洲沉积的软土层则往往为淤泥质土与薄砂层的交错层。对于湖泊沉积的软土层而言，由于沉积过程受季节性的影响较大，因此下部软土层的淤泥质土与粉砂的层状构造更为明显，有时还存在较厚的泥炭层，从而造成软土层在构造上具有各向异性和成层性的特点。

软粘土主要由粘土粒及粉粒组成，常含有有机质。其粘粒含量较高，有的可达 $60\%\sim 70\%$ 。粘土粒的矿物成分一般为高岭土、蒙脱石和水云母等，而以水云母最为常见。由于粘土矿物颗粒很小，一般呈薄片状，且表面带有负电荷，在粘土颗粒四周吸附着大量的偶极化分子。所以，在沉积过程中，软土层常形成絮凝状结构，是造成软粘土天然含水量大的原因之一。

此外，软土层一般具有较大的吸力或吸附力。所以，安放在软土上的活动建筑，如活动式钻井平台等，在升高时必须克服这种吸力。研究表明，软土对建筑物的吸力由三部分组成，即软土与建筑物底面的粘结力、真空负压（即负的孔隙水压力）和软土对建筑物侧

面的摩阻力。其中，真空负压是最主要的因素。工程中为了减少软土对建筑物的吸力，可向建筑物底面通水或通气以消除真空负压的影响。

1.2.2 湖北省宜昌至黄石一级公路仙桃至江陵段的工程地质特征

现以湖北省宜黄（宜昌至黄石）一级公路仙江（仙桃至江陵）段的工程地质特征说明河湖相沉积软粘土地基的一些特点及其土性指标。

宜黄一级公路仙江段横跨江汉平原腹地（图 1.1）。由于特殊的地理环境和地质成因，该段地基土具有一些典型的工程性质。应宜黄公路建设的需要，在该地段曾进行了大量的钻探取样和静力触探等地质勘察工作，同时还进行了软基路段堤稳定变形的试验研究。下面根据所掌握的资料对其工程地质特征进行描述。

一、地理环境和工程地质特征

江汉平原自白垩纪以来连续接受沉积，地表覆盖有松厚饱和的第四系河湖相全新统沉积物，厚度 20~40m 不等。地面高程一般在 27~29m 之间，个别地段达 31m，地下水位离地表 1~2m，地势坦荡，无明显起伏，河渠纵横交织。地基土主要为粘土、亚粘土、淤泥、淤泥质土，并夹有少量的粉细砂透境体。部分地带分布有厚 5~10m 的软土，个别地区大于 20m。图 1.2 和图 1.3 为该地区典型的地质柱状图及其土性特征。钻探取样提示，各土层中常含有少量贝壳、植物根叶等有机物质，局部土层含有大量铁锰质结核、钙质结核、云母、石英、姜石等原生矿物成分。总体而言，在离地表 1m 左右的范围内，由于受地下水位影响较大，地表土呈不完全饱和状态，饱和度在 90% 左右，而 1m 之下，则基本呈完全饱和状态，饱和度一般在 95% 以上。

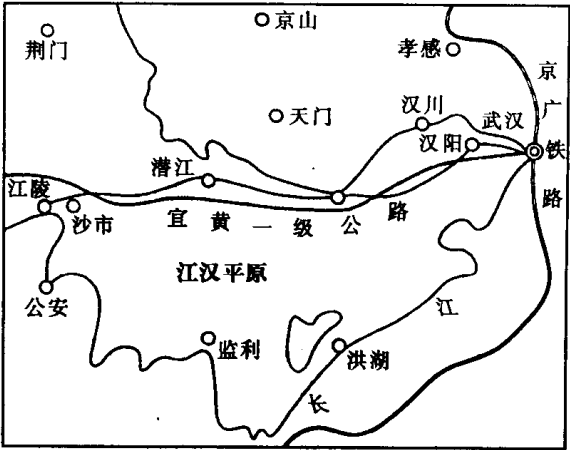


图 1.1 宜黄公路仙江段地理位置示意图

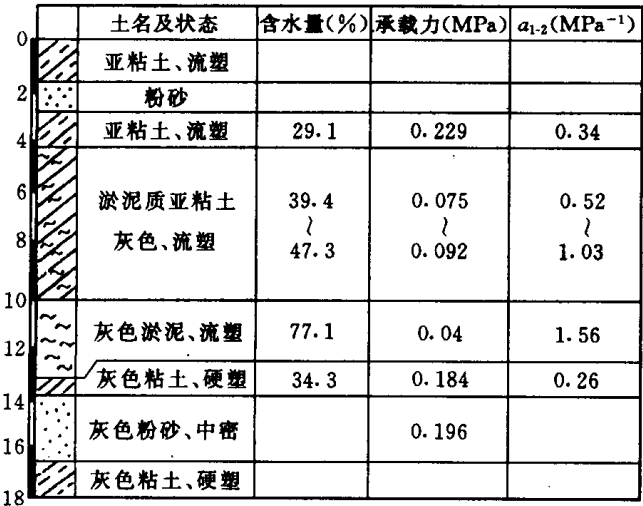


图 1.2 典型钻孔柱状图及土性

江汉平原系多次交替沉积而成，且在平面上分布极不均匀。每次沉积的粒度组成、矿物成分和沉积环境均有所不同，土类呈软塑、硬塑、流塑等各种状态，因而其物理力学性质有较大差异，有明显的不均匀性。

大量资料表明，地基在逐渐沉积过程中曾经历过几次相对稳定的阶段。如潜江市某断面钻孔资料揭露，在 15m 深的范围内，细砂之后经历了三次大的沉积。高程 15.4~19.6m 为第一次沉积，高程 19.6~24.7m 为第二次沉积，

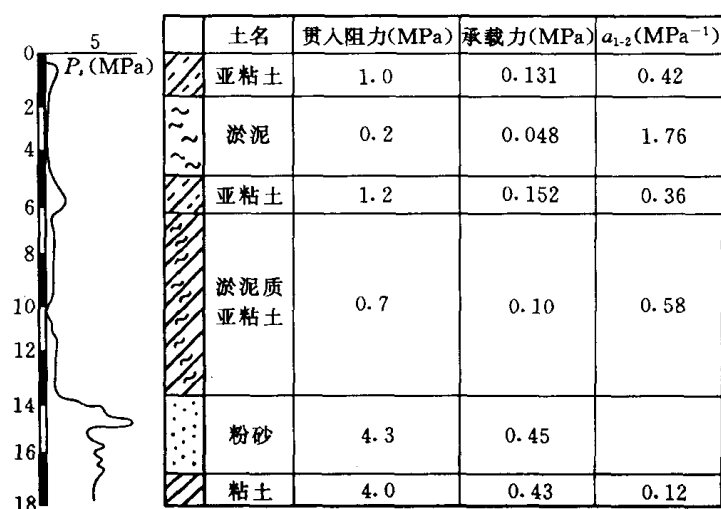


图 1.3 静力触探曲线及柱状图
 a_{1-2} —按表 1.5 中相关关系 5 推算

高程 24.7~27.5m 为第三次沉积。每次沉积完成后生长有大量植物，故在层与层之间形成一薄层富含有机质的泥炭腐植物。地基的成层性还表现在每一个小的分层中。如有的地带基坑开挖时有明显的成层感，肉眼观察在竖直方向其颜色和土性亦有细微差别。由于地基土有明显的层理构造，间或有粉细砂夹层存在，故场地水平和竖直两方向的渗透系数 k 值应有较大差别。但从室内小试样试验结果来看， k_h 和 k_v 之间并无一般的规律。有的试样 k_v 值反而大于 k_h 。渗透系数的无规律性可能与取样方法和土样的扰动重塑、原有结构被破坏等因素有关。为合理选用计算参数，建议进行现场渗透试验，有资料表明，现场渗透试验值可能比室内小试样试验值大 10 倍以上，需引起注意。表 1.1 给出室内试验所得地基土物理力学指标范围。

表 1.1 地基土物理力学性质指标

性质指标	含水量 ω (%)	容重 γ (g/m ³)	饱和度 S_r (%)	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩系数 (MPa ⁻¹)	渗透系数 k (10 ⁻⁶ cm/s)
范围	29.1~77.1	1.60~1.93	90~100	0.81~2.03	0.54~1.66	0.26~1.56	0.223~6.59

宜黄公路仙江段内有 26km 长的软基，一般上覆 2m 左右的黄色或灰褐色硬壳层，具超固结性状。少数地段无硬壳层，主要为一些滩湖地带，呈流塑状态，承载力仅 0.05MPa。表 1.2 为某工地软土的土性指标统计值。

表 1.2 软土的物理力学性质指标

土名	含水量 ω (%)	容重 γ (g/m ³)	孔隙比 e	液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2} (MPa ⁻¹)	固结系数 C_v (cm ² /s)
淤泥	59.1~69.8	1.56~1.62	1.64~1.95	50.7~62.0	29.1~32.1	20.4~32.6	0.83~2.0	1.49~2.55	6.38×10^{-4}
淤泥质	52.2~58.7	1.65~1.70	1.42~1.55	58.5~89.5	33.3~38.5	25.1~51.0	0.27~1.01	0.81~1.45	5.38×10^{-4}

二、地基土成层性对固结变形的影响

仙江段地基土具有十分明显的成层性，层与层间常有富含有机质的泥炭腐植物。这部

分土层孔隙比大、含水量高、压缩性大、渗透性小，直接影响到地基土垂直向的排水畅通。对该类地基打设垂直向塑料排水板来增强该方向的排水能力是适宜的。塑料排水板呈梅花型布置，间距 1.5m，影响范围等效圆直径为 1.575m。插入深度一般以穿过软土层为准。地表排水采用两种方法。一是铺设砂垫层，先将中粗砂灌入塑料插板的井中并密实，再铺 20cm 厚中粗砂及 10cm 厚粉细砂；二是采用横向塑料排水板，先开挖断面尺寸 30cm×30cm 排水沟，内铺断面尺寸为 23cm×0.6cm 的横向塑料排水板，将竖向排水板与横向排水板搭接固定。现场观测资料表明，路堤完成后，经 400d 的间歇期，固结度可达 93%，效果理想。

为反映场地地质结构对固结变形的影响，避免小试样试验结果计算带来的误差，长江科学院曾取得现场原状土样进行室内离心模型试验。由专门加工的取样器分两层取样，并在室内切割成规定尺寸，大小为 50 cm（长）×19 cm（宽）×12cm（高）。所取试样中夹有黄色粘土、粉砂和贝壳化石，且有不规则的裂隙存在，能较好反映现场实际情况。模型试验包括各种处理方案。试验结果表明，如采用塑料排水板加水平砂垫层处理路基（相当于 12m 厚软基），半个月将路堤填高 3m，再过半个月可完成 50% 的沉降，路堤将下沉近 90cm，再经过两个月，可填 3m 以上路堤。利用小十字板测定固结后地基强度随深度的变化，表明强度大大增加。原地基表面不排水强度 $c_u=18\text{kPa}$ ，6m 填土固结后增至 29 kPa。而深度 10m 处 c_u 则由原来的 40 kPa 增至 60 kPa。可见强度增长是明显的。

地基的成层性还反映在淤泥或淤泥质土（呈流塑或软塑状态）与一般粘性土（呈硬塑状态）的互层分布上。这种构造特点与单一深厚软土层相比，对地基的稳定是十分有利的。它使地基内的连续滑动面不易形成，具有较高的极限填土高度。同时地基内多层硬粘土的存在也限制了软土层的侧向变形，故在地基的沉降变形计算中应予考虑。

三、土的结构性

软粘土的结构性早已引起人们的关注。结构性的主要作用是增大了土骨架的刚度。结构性愈强，土骨架刚度愈大。土体受外荷后，荷载首先由土骨架承担，荷载不断增加，结构破坏，外荷才逐渐由孔隙水来承担。本路段几个观测断面在填土初期孔隙水压力观测值增长均十分缓慢，后期填土增高，孔隙水压力才有所上升，说明土的结构性的影响。另一方面，随土体结构破坏，剪切变形增大，沉降相应增大甚至引起滑动破坏。需要说明，地表硬壳层及软基中硬塑粘土层的存在对土结构性有一定保护作用，故软基处理原则上应避免硬壳层有较大破坏，同时应控制施工速度。

四、施工控制与沉降分析

为合理选择施工方案，长江科学院曾对一典型断面进行数值计算。采用敛桥模型加以分析。该断面下卧 9m 厚软土层（淤泥或淤泥质土， $a_{1-2}=0.84\sim1.5\text{MPa}^{-1}$ ），其余是亚粘土（ $a_{1-2}=0.5\text{MPa}^{-1}$ ）及灰色细砂。地基采用塑料排水板处理，截面尺寸为 100 mm×4mm，梅花型布置，间距 1.5m，打设深度 12m，其上为 30cm 的砂垫层。路堤填筑高度为 5.2m，路基顶宽 24m，坡宽比 1:1.75。

数值分析结果表明，该断面在天然地基情况下极限填土高度仅为 3m，显然不能满足设计要求。采用塑料排水板处理后（图 1.4 和图 1.5），第一级荷载填土 3m，填土时间 50d，停歇 40d，地基固结度达 $U=72\%$ ，相应地基强度增长值 $\Delta\tau_f$ 见表 1.3。然后施加第二级荷

载, 填土高度为 2m, 地基的安全系数为 $F_s=1.2$, 再停歇 60d 后, 地基固结度可达 84.5%, 地基的稳定性能得到保证。由计算知, 最终沉降量为 145cm, 待地基再稳定一段时间后, 即可进行路面施工。

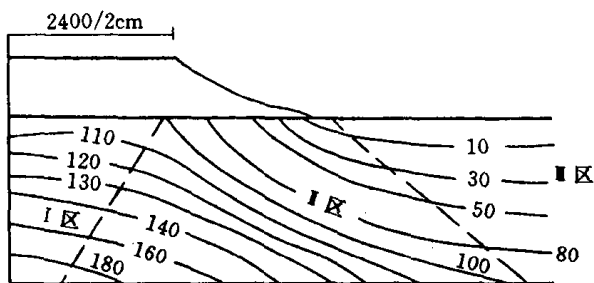


图 1.4 填土高度 5m 时 σ_1 等值线 (单位: kPa)

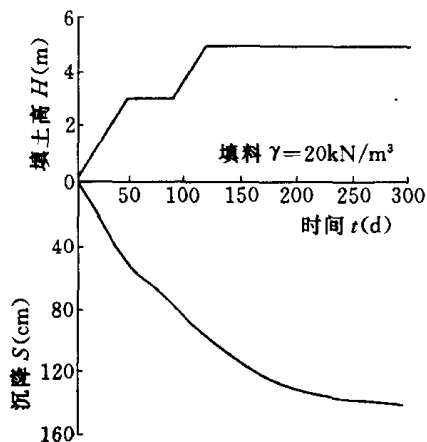


图 1.5 道路中央填土与沉降曲线

表 1.3 地基抗剪强度增长预计 (单位: MPa)

土 层	厚 度 (m)	$t=90d, U=72\%$			$t=180d, U=84.5\%$		
		I 区	II 区	III 区	I 区	II 区	III 区
1	1	12	6	0	23.4	14.1	0
2	3.7	11.4	5.7	0	22.3	13.4	0
3	3.5	12	6	0	23.4	14.1	0
4	7.2	12.7	6.3	0	24.8	14.9	0

实践表明, 这样的加载方案是合理的。施工以此作为控制标准, 填土得以顺利进行。经实测, 工后沉降基本控制在允许范围之内。

1.3 软土物理力学指标之间的相互关系

1.3.1 压缩指数与土物理指标的一些关系

一些研究者已建立了许多关于土的压缩指数与土物理指标的相关关系。这些物理指标包括液限、天然含水量、初始孔隙比、塑性指数和液限时的孔隙比等, 其中, 较早给出类似关系的是 Skempton (1944) 建立的压缩指数与液限之间的关系式, 如表 1.4 所列。表 1.4 还列出了其它一些学者给出的关系式^[16], 可供工程应用中参考。

Sridharan 等^[16] (2000) 研究了压缩指数与一些物理参数的关系, 指出压缩指数与土的塑性指数、液限以及缩性指数均有较密切的相关关系。其中, 与缩性指数的关系最好, 而与塑性指数的关系次之。由于土的缩性指数的资料较为有限, 故工程应用中常常可利用与塑性指数的相关关系来确定土的压缩指标。

表 1.4

压缩指数与土物理指标的一些关系

相 关 关 系	适 用 范 围	研究者, 年份
$C_c=0.007 (w_L-10)$	重塑粘土	Skempton, 1944
$C_c=0.0046 (w_L-9)$	巴西粘土	Cozzoline, 1961
$C_c=0.009 (w_L-10)$	正常固结粘土	Terzaghi 和 Peck, 1967
$C_c=0.006 (w_L-9)$	$w_L < 100\%$ 的粘土	Azzouz et al, 1976
$C_{c10}=0.009 (w_L-8)$	大阪海湾粘土	Tsuchida, 1991
$C_{c10}=0.009w_L$	东京海湾粘土	Tsuchida, 1991
$C_c=0.01 (w_n-5)$	一般粘土	Azzouz et al, 1976
$C_c=0.01w_n$	一般粘土	Koppula, 1981
$C_c=0.01 (w_n-7.549)$	一般粘土	Herrero, 1983
$C_c=0.0115w_n$	有机质粉土和粘土	Bowles, 1989
$C_c=1.15 (e-e_0)$	一般粘土	Nishida, 1956
$C_c=0.29 (e_0-0.27)$	无机粘土	Hough, 1957
$C_c=0.35 (e_0-0.5)$	有机质粘土	Hough, 1957
$C_c=0.246+0.43 (e_0-0.25)$	巴西 Motley 粘土	Cozzolino, 1961
$C_c=1.21+1.055 (e_0-1.87)$	巴西 Lowlands 粘土	Cozzolino, 1961
$C_c=0.75 (e_0-0.5)$	低塑性粘土	Sowers, 1970
$C_c=0.208e_0+0.0083$	芝加哥粘土	Bowles, 1989
$C_c=0.156e_0+0.0107$	一般粘土	Bowles, 1989
$C_c=0.2e^{1.6}$	天然新近沉积粘土	Shorten, 1995
$C_c=0.5 (\gamma_w/\gamma_d)^{2.4}$	所有土类	Herrero, 1980
$C_c=0.185 [G_s (\gamma_w/\gamma_d)^2-0.144]$	所有土类	Herrero, 1983
$C_c=0.5I_P G_s$	重塑正常固结粘土	Wroth 和 Wood, 1978
$C_c=0.329 [0.027 (w-w_P) + 0.0133I_P (1.192+ACT^{-1})]$	重塑正常固结粘土	Carrier, 1985
$C_c=0.2237e_L$	重塑正常固结粘土	Nagaraj et al., 1983
$C_c=0.2343e_L$	重塑正常固结粘土	Nagaraj et al., 1986
$C_c=0.274e_L$	砂粘混合土	Nagaraj et al., 1995

注 ACT 为土的活动度; C_c 为土的压缩指数; C_{c10} 为固结应力为 $p=10\text{kg/cm}^2$ 时的压缩指数; e 为孔隙比; e_L 为液限时的孔隙比; e_0 为初始孔隙比或现场孔隙比; G_s 为比重; I_P 为塑性指数; w_L 为液限; w_n 为天然含水量; w 为重塑土的含水量; w_P 为塑限; γ_d 为土的干重度; γ_w 为水的重度。

1.3.2 湖北省宜黄公路仙江段的土性指标关系统计分析

以下对湖北省宜黄公路仙江段土性指标进行相关分析, 见表 1.5。

表 1.5

宜黄公路仙江段地基土土性指标相关关系

编号	样本容量	统计范围	回归方程	相关系数	统计量 F	$F_{1-\alpha}$
1	50	$e_0=0.68\sim 1.86$	$a_{1-2}=-0.69+1.21e_0$	0.94	355.8	7.22
2	50	$w=24\%\sim 77\%$	$a_{1-2}=-0.7+336w$	0.94	378.9	7.22
3	50	$\gamma=1.55\sim 1.95\text{g/cm}^3$	$a_{1-2}=6.08-37\gamma$	-0.88	171.9	7.22
4	50	$w_L=25.1\sim 61.9$	$I_P=0.74 (w_L-18.4)$	0.91	241.1	7.22
5	21	$P_s=0.25\sim 1.7\text{MPa}$	$a_{1-2}=0.42P_s^{-0.89}$	-0.86	54.2	8.18
6	50	$e_0=0.68\sim 1.86$	$E_{1-2}=3.87e_0^{-1.44}$	-0.85	20.1	7.22
7	50	$w=24\%\sim 77\%$	$E_{1-2}=0.79w^{-1.65}$	-0.90	21.5	7.22

注 a_{1-2} 单位为 MPa^{-1} ; E_{1-2} 单位为 MPa ; $F\sim F(1, n-2)$; $\alpha=0.01$ 。