

国土资源部、上海市人民政府合作项目“上海市三维城市地质调查”
(基[2004] 011-02)项目赞助
同济大学“十五”规划教材

Soft Soil Environment Engineering Geology

软土环境工程 地质学

唐益群 周念清
王建秀 严学新

编著



人民交通出版社

China Communications Press

国土资源部、上海市人民政府合作项目“上海市三维城市地质调查”

(基[2004] 011-02)项目赞助

同济大学“十五”规划教材

软土环境工程

地质学

唐益群 周念清
王建秀 严学新

编著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书内容主要以软土地区环境工程地质问题作为研究对象,紧扣工程性环境地质问题,从工程建设中环境工程地质灾害产生的原因着手,探讨环境工程地质问题产生的机理,提出环境工程地质问题整治措施。本书绝大部分内容是作者近些年的科学研究成果,资料翔实可靠。全书共分8章:绪论、地下水引起的环境工程地质问题、土的工程性质对地下工程环境的影响、地下工程施工引起的环境工程地质问题与保护、堤坝管涌模型试验与渗流数值模拟、软土地区密集建筑群引起的工程性地面沉降灾害与防治、软土地区浅部地层中沼气工程地质灾害与防治、冲填土的工程特性及其工程处理措施。

本书可作为大专院校的地质工程、岩土工程、土木工程防灾、水文学与水资源等专业的本科生、研究生的教材,还可供工程建设设计、施工、监理等技术人员和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

软土环境工程地质学 / 唐益群等编著. —北京: 人民交通出版社, 2007.5
ISBN 978-7-114-06528-6

I. 软… II. 唐… III. 软土地基-环境地质学 IV. X141

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第060051号

书 名: 软土环境工程地质学

编 著: 唐益群 周念清 王建秀 严学新

责任编辑: 吴有铭 (wym64298973@126.com)

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) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市吉祥印务有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.5

字 数: 430 千

版 次: 2007年6月 第1版

印 次: 2007年6月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-06528-6

印 数: 0001-3000 册

定 价: 35.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前言

地质工程地质研究所 地质工程地质研究所

随着我国经济的持续快速发展,全国各地工程建设如火如荼,呈现出欣欣向荣的景象。但与此同时,软土地区大量的工程技术活动对地质环境的影响程度越来越显著,如基坑开挖引起的基坑变形和滑坡、地下工程施工中地下水导致的流沙和管涌、工程性扰动及高层建筑群诱发的地面沉降、软土地层中浅层沼气释放引起的地质灾害、新近堆积冲填土对工程建设的影响等。在工程实践中发生的各种环境工程地质问题与不断增多的工程事故,已经引起了土木工程界和地质工程界工程技术人员的高度关注。如何更好地对工程实践中积累起来的经验教训加以总结,并在保护和提高以生态环境为中心的城市地质环境质量过程中,正确解决工程建设中所引发的各种环境工程地质问题,已成为城市实施可持续发展中一项具有重大意义的、迫切的工作。为此,作者在长期从事环境工程地质科学研究与教学的基础上,在本书中对软土地区工程建设中环境工程地质问题的理论与实践进行了概括与总结,旨在为推动环境工程地质学的发展奉献自己一份绵薄的力量。

本书稿原为研究生教学系列专题讲座材料,通过几年的科研与教学实践,不断地吸纳最新研究成果,使本书内容逐渐充实和完善,并具有自己的风格。书中内容主要以软土地区工程建设中环境工程地质问题作为研究对象,紧扣工程性环境地质问题,从工程建设中环境工程地质灾害产生的原因着手,探讨环境工程地质问题产生的机理,提出环境工程地质问题整治的措施,直接服务于国民经济与建设。

《软土环境工程地质学》共分8章:绪论、地下水引起的环境工程地质问题、土的工程性质对地下工程环境的影响、地下工程施工引起的环境工程地质问题与保护、堤坝管涌模型试验与渗流数值模拟、软土地区密集建筑群引起工程性地面沉降与防治、软土地区浅部地层中沼气工程地质灾害与防治、冲填土的工程特性及其工程处理措施。本书的特点是针对我国沿海经济发达地区工程建设中频发的环境工程地质与地质灾害问题而撰写的,书中大部分内容是作者近些年通过大量的现场试验、工程实例、室内试验以及理论探索的研究成果,资料翔实可靠,对工程实践具有重要的指导意义。

本书由同济大学唐益群教授、周念清副教授、王建秀副教授和上海市地质调查研究院总工程师严学新教授级高工共同撰写,上海市地质调查研究院王寒梅工程师、史玉金工程师参加了部分研究和撰写工作,最后由唐益群教授、周念清副教授统稿。作为教材,考虑其内容的连贯性与延伸性,书稿中引用了部分前人的研究成果,在此表示衷心的感谢。

本书中绝大部分内容是作者负责的国家自然科学基金(批准号:40372124)、国土资源部与上海市人民政府联合资助项目《上海市三维城市地质调查》子课题“软土地区密集建筑物等的工程环境效应与地面沉降机理研究”、“冲填土工程地质特性的试验、测试及理论分析研

究”的部分研究成果。另外,本书的出版还得到同济大学教材、学术著作出版基金委员会的资助。在此向国家自然科学基金委员会、项目资助单位上海市地质调查研究院和同济大学教材、学术著作出版基金委员会致以深深的谢意。

本书的所有试验都是在同济大学“岩土及地下工程教育部重点实验室”完成的。试验期间得到了该室陈宝副教授、吴晓峰工程师、杨慧芳实验师、唐国钧实验师、洪积敏工程师、徐仁龙工程师、叶志成等的大力支持,在加工和试验材料的准备方面以及在室内试验的过程中他们付出了大量的时间和精力,陈宝副教授、吴晓峰工程师、杨慧芳实验师有时还牺牲了休息时间在实验上给予了大力支持,在此一并表示感谢。

我的学生杨坪博士后、张曦博士、崔振东博士、吕少伟博士、林志博士、刘冰洋硕士、卢辰硕士、王兴汉硕士等直接参与了有关项目的研究与试验工作,特别是他们在现场取样、现场试验和室内试验方面付出了艰苦的劳动。崔振东博士、赵书凯硕士和周念清副教授的学生夏明亮硕士参加了本书图件的制作与清绘工作。

本书的读者对象主要是地质工程、岩土工程、土木工程防灾、水文学与水资源等专业的本科生、研究生及相关科研院所、设计生产单位研究员、技术人员和管理人员。由于书稿整理时间仓促,书稿中有些环境工程地质问题的研究还处于探索阶段,加之作者水平有限,书中错误和疏漏在所难免,望广大同仁不吝指正,并提出宝贵意见,以便不断完善。

作 者

2007年3月于上海

目录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 地下水引起的环境工程地质问题	4
第 1 节 地下水的工程环境影响	4
1.1 土的透水性	4
1.2 水头概念	4
1.3 层流渗透定律	5
1.4 土的渗透系数	7
1.5 流网	9
1.6 动水力与渗流破坏	13
第 2 节 潜水的环境工程地质问题	14
2.1 潜蚀对地基土强度的影响	14
2.2 孔隙水压力对基坑稳定性的影响	15
2.3 饱和软粘土基坑的瞬时稳定性和长期稳定性	17
2.4 地下水渗流对围护基坑稳定性的影响	18
2.5 考虑地下水渗流作用时的基坑稳定计算	20
第 3 节 承压水的环境工程地质问题与防治	21
3.1 基坑突涌	21
3.2 基底抗承压水层的基坑稳定性	22
3.3 沉井井底承压水引起的土体移动	23
3.4 承压水冲溃坑底的验算	24
3.5 抵抗坑底承压水的坑底地基加固	25
第 4 节 基坑施工中管涌的环境工程地质问题与防治	28
4.1 产生管涌的条件	28
4.2 管涌的防治措施	28
第 5 节 基坑施工中流沙的环境工程地质问题与防治	29
5.1 流沙的形成	30
5.2 产生流沙的条件	30
5.3 动水压力及流沙现象	31
5.4 流沙现象的判断	32
5.5 基坑开挖中流沙验算	33

5.6	沉井井底流沙引起的土体移动·····	34
5.7	流沙的防治·····	35
第6节	建筑场地地基沙土液化的环境工程地质问题与防治·····	36
6.1	概述·····	36
6.2	产生液化的因素·····	37
6.3	液化势判别·····	39
6.4	抗液化措施·····	45
第7节	建筑场地中地下水对混凝土、钢筋的侵蚀性评价·····	45
7.1	地下水对混凝土的侵蚀作用·····	46
7.2	地下水对钢筋等铁质材料的侵蚀·····	48
第3章	土的工程性质对地下工程环境的影响·····	50
第1节	地下工程的几种水土压力·····	50
1.1	基坑支护结构上的水土压力·····	50
1.2	浅埋矩形结构的水土压力·····	50
1.3	圆形隧道的水土压力·····	51
1.4	沉井上的水土压力·····	53
第2节	土的应力历史和应力路径对地下工程环境的影响·····	55
2.1	土的应力历史对地下工程的影响·····	55
2.2	土的应力路径对地下工程的影响与防治·····	57
第3节	土体流变性产生的环境工程地质问题与防治·····	58
3.1	土的蠕变对地下工程的影响与防治·····	58
3.2	土的应力松弛对地下工程的影响与防治·····	59
3.3	土的长期强度·····	59
第4章	地下工程施工引起的环境工程地质问题与保护·····	60
第1节	基坑工程引起的环境工程地质问题·····	60
1.1	基坑开挖时的地层移动机理·····	60
1.2	基坑施工引起地层移动的预测法·····	65
第2节	盾构施工引起的环境工程地质问题·····	67
2.1	盾构施工的开挖面稳定条件·····	67
2.2	盾构施工时的地层移动机理·····	71
2.3	盾构施工引起地层移动的预测法·····	75
第3节	顶管施工引起的环境工程地质问题·····	78
3.1	顶管施工时的地层移动机理·····	78
3.2	顶管施工引起地层移动的预测法·····	80
第4节	井点降水引发的环境工程地质问题·····	80
4.1	井点附近的地面变形·····	81
4.2	降水产生地面沉降的原因·····	82
4.3	地下水位的变化对土体变形的影响·····	84
4.4	荷载固结与渗透固结的差异性·····	85
4.5	地面沉降速率与地下水压力的关系·····	86

4.6	井点降水影响范围和沉降的估算	87
第5节	软粘土层中边坡变形破坏的环境工程地质问题与防治	90
5.1	软粘土层中边坡的稳定性	90
5.2	软粘土层中滑坡特征	97
5.3	影响边坡稳定因素分析	98
5.4	滑动土体善后勘探与处理	99
第5章	堤坝管涌模型试验与渗流数值模拟	100
第1节	概述	100
第2节	堤防渗流破坏的主要形式及形成机理	101
2.1	堤防渗流破坏的主要形式及其特点	101
2.2	管涌型土和流土型土的判别	103
2.3	确定土的抗渗强度的几种方法	109
第3节	管涌模型的数学解析分析	111
3.1	管涌模型数学解析分析的步骤	111
3.2	近似的解析解	114
第4节	管涌试验模拟和有限元程序模拟	117
4.1	管涌试验模拟	117
4.2	有限元程序模拟	118
第5节	试验模拟和有限元模拟对比研究	121
5.1	实验模拟数据的整理	121
5.2	有限元程序模拟	124
第6章	软土地区密集建筑群引起的工程性地面沉降与防治	134
第1节	概述	134
1.1	软土地区密集建筑群诱发地面沉降现状	134
1.2	软土地区密集建筑群诱发地面沉降研究进展	135
1.3	软土地区密集建筑群诱发地面沉降研究的意义与内容	136
第2节	上海中心城区典型密集高层建筑群现状及工程地质环境	136
2.1	上海中心城区典型密集高层建筑群现状调查	137
2.2	浦东陆家嘴地区工程地质环境分析	138
第3节	典型密集高层建筑群诱发地面沉降的监测分析	142
3.1	地面沉降	142
3.2	分层沉降	145
3.3	密集高层建筑群诱发地面沉降概念模型分析	146
第4节	典型密集高层建筑群诱发地面沉降的模型试验研究	147
4.1	模型试验的一般原理	147
4.2	模型试验 I	148
4.3	模型试验 II	157
4.4	密集高层建筑群诱发地面沉降概念模型分析	170
第5节	密集高层建筑群诱发地面沉降的数学模型	170
5.1	密集建筑群诱发地面沉降计算的解析模型	170

5.2	密集高层建筑群诱发地面沉降计算的灰色数学模型	173
5.3	密集高层建筑群诱发地面沉降计算的数学物理模型	178
第6节	密集高层建筑群诱发地面沉降机理与防治	185
6.1	软土地面沉降的机理分析	185
6.2	密集高层建筑群诱发地面沉降的工程环境效应分析	188
6.3	密集高层建筑群地面沉降防治措施	190
第7章	软土地区浅部地层中沼气工程地质灾害与防治	192
第1节	概述	192
第2节	浅层沼气产出特征	193
2.1	含沼气地层的工程地质与水文地质条件	193
2.2	沼气的成因、成分	194
2.3	上海地区浅层沼气的产出特征	195
2.4	主要含气层系	198
2.5	储气层类型	199
2.6	上海地区浅层沼气分布	200
第3节	浅层沼气的赋存分带性	202
3.1	浅层沼气的生储条件	202
3.2	砂性土层中沼气赋存的分带性	202
3.3	各带中土的结构特征	203
3.4	粘性土层中的沼气	203
第4节	上海地区浅层沼气地质灾害的分区及防治	204
4.1	浅层沼气地质灾害分区的原则	204
4.2	浅层沼气地质灾害分区	204
4.3	浅层沼气地质灾害破坏机理	205
4.4	浅层沼气地质灾害防治措施	205
第5节	浅层沼气对隧道施工的危害性	205
5.1	隧道内沼气含量控制指标	205
5.2	沼气进入隧道的途径	206
5.3	沼气在隧道施工中引燃引爆的可能性	206
5.4	沼气对隧道施工危害实例	206
第6节	浅层沼气处理与安全施工决策	207
6.1	浅层沼气处理	207
6.2	施工安全规则	209
第7节	浅层沼气释放后含气层中土的变形规律模拟试验	209
7.1	室内模拟试验设备简介	209
7.2	试验土样	209
7.3	模拟试验方法与步骤	209
7.4	试验数据整理与试验结果分析	211
第8章	冲填土的工程特性及其工程处理措施	215
第1节	概述	215

1.1	研究区概述	215
1.2	冲填土的分布	215
1.3	研究目的与内容	216
第2节	冲填土物理特性	217
2.1	冲填土的颗粒分析	217
2.2	冲填土的其他物理特性指标	219
2.3	冲填土的沉积规律	220
第3节	冲填土的力学特性	221
3.1	冲填土的压缩特性	221
3.2	冲填土的强度特性	227
3.3	冲填土地基承载力	230
3.4	冲填土的动力特性	231
第4节	冲填土场地液化特性	236
4.1	静力触探法研究冲填土的液化特性	237
4.2	标准贯入法研究冲填土的液化特性	237
4.3	波速测试研究冲填土的液化特性	239
第5节	冲填土的结构强度与自重固结沉降规律	241
5.1	冲填土沉积固化后的结构强度	241
5.2	结构强度随压力增长的规律	241
5.3	结构强度增长机理	242
5.4	冲填土的自重固结沉降规律	242
第6节	冲填土的动力响应特性与沉降规律	245
6.1	动三轴试验	245
6.2	孔隙水压力对动荷载的响应特征	245
6.3	冲填土的动力响应特征	247
6.4	静荷载作用下的沉降规律	250
第7节	冲填土流变特性与沉降规律	252
7.1	流变模型	252
7.2	冲填土的流变试验研究	252
7.3	冲填土的流变结果分析	253
7.4	冲填土流变特性与沉降分析	255
第8节	冲填土的工程处理措施	256
8.1	强夯法在新近冲填土地基加固中的应用	256
8.2	真空预压法在新近冲填土地基加固中的应用	258
8.3	堆载预压法在新近冲填土地基加固中的应用	258
参考文献		260

第1章

绪论

大量的土木工程建筑都是建在松散地层之上,由于地基问题而引发的环境工程地质问题直接关系到人民生命财产的安全,已经成为工程防灾的重要课题。而软土地区是城市人口密集居住区,在工程建设中引起的环境工程地质问题概率较大,且有些环境工程地质问题诱发的工程地质灾害破坏程度严重,已引起各级政府和单位的密切关注。

随着软土地区经济建设的发展和对外改革开放的需要,不断兴建各类工业企业、商业大厦、宾馆饭店、高层住宅、办公大楼、地铁、地下商场等工程,其中有许多建筑物都坐落在软土或沙土这类不良场地上。以上海为例,据调查统计,在上海发生的建筑工程事故中,因基坑滑动、土坡失稳、沉井歪斜、流沙、沙土液化、沉桩挤土作用时对邻近建筑物的破坏作用等地基基础失事占多数。此类事故的前兆不易被察觉,一旦失事,难以补救,甚至造成灾难性的后果。另外,近年来密集建筑群的工程环境效应诱发的区域性地面沉降已经作为一个棘手的工程地质灾害问题,引起了有关科技人员的高度重视。

软土地区的不良地基土主要为软粘土、杂填土、冲填土、饱和粉细砂(包括砂质粉土和粘质粉土)。地基问题的处理恰当与否,关系到整个工程的质量、投资、工程进度以及是否会发生工程地质灾害,因此在这些地区的环境工程地质问题的重要性已越来越为人们所认识。

沿海地区软粘土是第四纪后期形成的海相、泻湖相、三角洲相、溺谷相和湖沼相的粘性土沉积物或河流冲积物,属于新近淤积物。其中最为软弱的是淤泥和淤泥质土。这类土的特点是天然含水量高、孔隙比大、抗剪强度低、渗透系数小。在荷载的作用下,软粘土地基承载力低,地基沉降变形大,不均匀沉降也大,而且沉降稳定历时比较长。在厚度大的软粘土层上,结构物基础的沉降往往持续数年乃至数十年之久。在基坑开挖中,软粘土自立性差,易坍塌和产生土坡滑动。软粘土地基是软土地区工程实践中遇到的较棘手和产生环境工程地质问题的一大因素。

饱和粉细砂、砂质粉土及部分粘质粉土,虽然在静载条件下具有较高的强度,但在机器振动、车辆荷载、波浪或地震力及剪切力反复作用下有可能产生液化或大量振陷变形。地基会因液化而丧失承载力。在基坑开挖,特别是深基坑开挖过程中,容易产生流沙现象。因此,砂类土是软土地区产生或可能产生环境工程地质问题的又一大因素。

软土地区工程建设中,由建筑地基产生的环境工程地质问题实例很多,如书中论述开挖深大基坑、建筑地下排水隧道与地下铁道等工程中的土体稳定、变形或渗流问题对基坑或地下工程产生的破坏作用等,这些环境工程地质灾害均产生在软粘土(特别是淤泥质软粘土)或砂类土地层中,因此,对工程地质灾害必须引起高度的重视。

《软土环境工程地质学》一书讨论的主要内容有:

(1)地下水引起的环境工程地质问题与防治措施:主要介绍在地下工程勘察、设计、施工过程中,地下水始终是一个引发环境工程地质灾害中极为重要的问题。由此对地下水既作为岩土体的组成部分直接影响岩土的性质与行为,又作为地下建筑工程的环境影响地下建筑工程的稳定性和耐久性问题作了较详细地讨论。

(2)土的工程性质对地下工程的环境影响与防治措施:主要内容有地下工程中的几种水土压力,土的应力历史、应力路径的工程环境影响,土的流变性产生的环境工程地质问题与防治措施。

(3)地下工程施工引起的环境工程地质问题与保护:主要针对基坑工程、盾构隧道工程、顶管管道工程及井点降水工程,阐述地层移动的机理,分析其影响因素,找出影响的范围,介绍对环境影响进行预测的各种方法,以及一些行之有效的环境保护方法。

(4)堤坝管涌模型试验与渗流数值模拟:河道堤坝是我国防洪工程体系的重要组成部分。在长江、黄河等七大江河的中下游地区,堤坝是防御洪水的最后屏障。目前,我国建有各类堤坝 25 万 km,其中主要堤坝 6.57 万 km。我国现有的堤坝有三大特点:一是堤基条件差。堤坝傍河而建,堤线选择受到河势条件制约,基础大多为沙基。同时由于堤线过长,绝大部分堤坝未作基础处理,防灾任务过重。二是堤身建筑质量差。不少堤坝是在原民堤的基础上,经历年逐渐加高培厚而成,往往质量不佳。三是堤后坑塘多。尤其是长江干堤和洞庭湖、鄱阳湖区,多年来普遍在堤后取土筑堤,使堤后坑塘密布,覆盖层薄弱。因此,当遭遇洪水时,堤坝经常发生管涌、滑坡、崩岸和漫溢等险情,严重者导致大堤溃决。在 1998 年长江特大洪水时,仅长江中下游干堤就出现险情 6100 多处,高水位时每天出险 300 余处。这里从堤坝管涌的形成机理展开研究,提出堤坝工程抗渗稳定性分析方法和堤坝工程的设计参数及管涌的预防与治理措施,具有重要的理论和实际意义。

(5)软土地区密集建筑群引起的工程性地面沉降灾害与防治措施:从上海地区典型地质条件下高层建筑群工程环境效应对地面沉降的影响作为问题研究的切入点,探讨了在高层建筑群作用下不同土层的变形特点、相邻建筑物之间的相互影响状况、高层建筑群对中心及周边区域地面沉降的影响以及沉降影响范围、土层中应力(包括土压力、孔隙水压力)的变化规律等,指出软土地区密集高层建筑群之间地表变形存在明显的沉降叠加效应,研究结果对高层建筑群工程环境效应引起地面沉降的控制提供了有价值的参考。

(6)软土地区浅部地层中沼气工程地质灾害与防治措施:在开发利用地下空间的过程中也遇到了许多棘手的环境工程地质问题,软土地区浅部地层中的沼气工程地质灾害就是其中之一。软土层中浅层沼气对地下工程的影响主要有以下三方面:

①浅层沼气的存在会增加地下工程施工的难度,威胁施工人员的安全,影响施工的质量,严重时会造成停工、建筑物损毁、人员伤亡等事故;

②在已建成的建筑物下部若有浅层沼气存在,一旦沼气释放,会引起建筑物周围土体失稳,对建筑物造成毁灭性的破坏;

③若沼气泄漏进入地下建筑中,当达到一定浓度时将威胁建筑物中人员的生命安全。近年来,随着经济的迅猛发展,软土地区地下工程及高层建筑(深基础)逐渐增多,浅层沼气引起的工程灾害事故也相应增加,有必要从环境工程地质灾害的角度重新考虑软土地区的

浅层沼气问题,研究如何穿越含沼气软土地层的隧道施工技术难题。

(7)冲填土工程特性及其环境工程地质问题:冲填土是采用人工方法把江河和湖海底部的泥沙通过水力冲填方式而形成的沉积土。近年来,随着我国经济的快速发展,城市化进程步伐不断加快,对土地资源的需求日益迫切,在沿海及江湖地区将疏浚出来的淤泥和泥沙用来造地,已成为沿海城市缓解土地资源紧张的有效途径,但由此也带来许多环境地质问题,为了尽快开发利用冲填土地,对新近堆积冲填土地的工程地质特性亟待进行专项研究。

第2章

地下水引起的环境工程地质问题

在地下工程的勘察、设计、施工过程中,地下水问题始终是一个极为重要的问题。地下水既作为岩土体的组成部分直接影响岩土的性质与行为,又作为地下建筑工程的环境,影响地下建筑工程的稳定性和耐久性。在地下工程设计时,必须充分考虑地下水对岩土及地下建筑工程的各种作用。施工时应充分重视地下水对地下工程施工可能带来的各种环境工程地质问题而采取相应的防治措施。

第1节 地下水的工程环境影响

1.1 土的透水性

土中水除了有一部分是受分子引力作用及静电引力作用吸附在颗粒表面的结合水之外,其余都是自由水。自由水能够传递静水压力,并能在重力和表面张力作用下在土体内流动。

在地下水位以上土体中存在毛细水,这种水是靠毛细作用沿土的微细孔隙上升到一定高度。毛细水同时受表面张力和重力的影响,水中压力小于大气压力,而承受张力的作用。毛细水的存在,增加了土粒间的接触压力,这对土体的稳定是有利的,但在寒冷地区会加剧土的冻害。

地下水位以下土体中的自由水称为地下水,它连续充满所有孔隙,对土粒产生浮力作用。浮力使土的重度由饱和重度 γ_{sat} 减小到有效重度 γ' , 亦即

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

式中: γ_w ——水的重度, kN/m^3 。

可见,地下水改变了土体的自重应力。如果地下水位不是水平的情况,则地下水中存在水头差(压力差),水就会从水头高处流向水头低处,产生渗流现象。渗流对工程实践有很重要影响,主要引起两个问题:①渗流量有多大? ②渗流对土体稳定会不会构成威胁?

当基坑开挖到地下水位以下时会遇到的就是这类问题。

研究渗流问题,必须首先了解土的透水性以及影响渗流的各项因素。

1.2 水头概念

考虑地下水位以下土层中的单元体 A(图 2-1-1)。地下水位以下所有孔隙都是连通的,而且充满水,因此单元体 A 中的水具有静水压力 u_w 。如果在单元体 A 处插入一根开口管子(通常称测压管),水将在管中上升,一直到管底端的水压力与 u_w 平衡为止,亦即

$$h_w = \frac{u_w}{\gamma_w} \quad (2-1-1a)$$

或

$$u_w = \gamma_w \cdot h_w \quad (2-1-1b)$$

式中: γ_w ——水的重度, kN/m^3 ;

h_w ——A 至测压管水面的铅直距离, m, 通常称压力水头;

u_w ——静水压力, kN/m^2 , 又称为孔隙水压力。

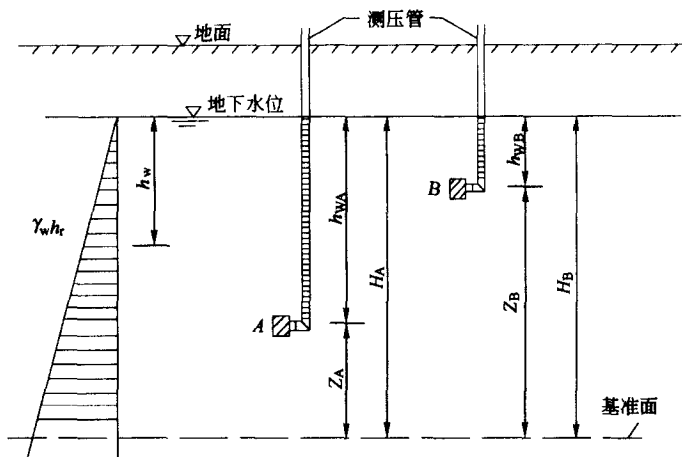


图 2-1-1 土层中地下水位以下的单元体

这里必须注意区别 3 个水头: 压力水头 h_w 、位能水头 Z 和总水头 H 。位能水头 Z 指的是所考虑的单元体至某一任意指定基准面的铅直距离(图 2-1-1); 总水头 H 指的是压力水头与位能水头之和, 亦即

$$H = h_w + Z \quad (2-1-2)$$

一般水总是从水头高处流向水头低处, 这里的水头是指总水头 H , 而不是指压力水头 h_w 或位能水头 z 。在图 2-1-1 中, $h_{wA} > h_{wB}$, $Z_B > Z_A$, 但因 $H_A = H_B$, 故水并不流动。考虑孔隙水压力 u_w 的绝对值时, 需要注意的是压力水头 h_w ; 在地下水位处, $h_w = 0$, 所以 $u_w = 0$, u_w 沿土层深度呈线性变化。考虑水的流动问题时, 需要注意的是总水头 H , 又称测压管水头(测压管中的水面至某指定基准面的铅直距离)。

1.3 层流渗透定律

地下水的运动有层流、紊流和混合流三种形式。层流是地下水在岩土孔隙或微裂隙介质中渗透, 产生连续水流; 紊流是地下水在岩土的裂隙或洞穴中流动, 具有涡流性质, 各流线有互相交错现象; 混合流是层流和紊流同时出现的流动形式。

地下水在土中的运动(渗透)属于层流(图 2-1-2), 且遵循达西(Darcy)线性渗透定律。公式如下:

$$Q = kA \frac{h}{L} \quad (2-1-3)$$

式中: Q ——单位时间内的渗透水量, m^3/d ;

k ——渗透系数, m/d ;

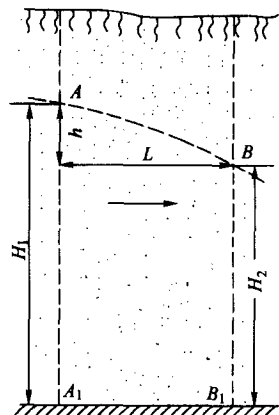


图 2-1-2 地下水层流断面图

AB—潜水面; A_1B_1 —隔水层

A ——水渗流的断面积, m^2 ;

L ——断面间的距离, m ;

h ——距离为 L 的断面间的水位差, m , $h = H_1 - H_2$;

$\frac{h}{L}$ ——水力坡度, 用符号 I 表示, 代表单位长度渗流途径上所产生的水头损失, 亦称水力梯度(无因次):

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (2-1-4)$$

达西公式两边用断面积 A 除后, 即得渗流速度(v), 渗流速度与水力坡度成正比:

$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{h}{L} \quad (2-1-5)$$

$$v = kI \quad (2-1-6)$$

当 $I=1$ 时, 得 $k=v$, 即当水力坡度等于 1 时, 渗透系数等于渗流速度, 它的单位为 cm/s 或 m/d 。

由式(2-1-4)可见, 土的渗透系数 k 也就是水力坡度等于 1 时的渗流速度。水在土中的渗流速度 v 取决于两方面的因素, 一是土的透水性(反映为 k 的大小), 二是水力条件(反映为 I 的大小), 这就是水在土中渗流的基本规律, 亦即达西定律。

这里要注意两个问题:

① v 并不是水在孔隙中真正流动的速度, 因为孔隙是弯弯曲曲的, 实际渗流途径并不等于 L ; 横截面积 A 中不全是孔隙, 实际过水面积不等于 A , 因此实际平均流速大于渗流速度 v 。但工程实践中关心的不是水质点的真正流速, 而是流经整个土体的平均流量, 所以用表观的流速 v , 同时按表观的 A 、 L 考虑是可以的, 而且更为方便。

② 达西定律 $v=kI$ 只适用于砂及其他较细颗粒中, 因为孔隙太大时(如卵石、溶洞), 流速太大, 会有紊流现象, 水质点的流线互相交错, 不是层流, v 不再与 I 的一次方成正比。

渗流速度不是孔隙中的实际流速(u), 它只是换算速度, 因为在这个公式中用的断面积不是孔隙的横断面积。

为了得到地下水在孔隙中运动的平均实际流速, 可用流量 Q 除以孔隙所占的面积 A' , 故地下水的平均实际流速为

$$u = \frac{Q}{A'} = \frac{Q}{A \cdot n} \quad (2-1-7)$$

式中: n ——土的孔隙率, %。

将式(2-1-5) $v = \frac{Q}{A}$ 代入式(3-1-7)中, 即得地下水的平均实际流速:

$$u = \frac{v}{n} \quad (2-1-8)$$

因为 n 永远小于 1, 可见平均实际流速大于渗流速度。

水在沙土中流动时, 达西公式是正确的, 如试验所得图 2-1-3 中的曲线 I 所示。但是, 在某些粘性土中, 这个公式就不正确。因为在粘性土中颗粒表面有不可忽视的结合水膜, 因而阻塞或部分阻塞了孔隙间的通道。

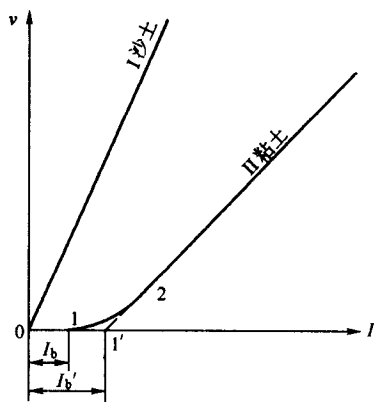


图 2-1-3 渗流速度与水力坡度的关系曲线

试验表明, I 值比较小时克服不了结合水膜的阻力, 水渗流不过去, 只有当水力坡度 I 大于某一值 I'_b 时, 粘土才具有透水性(见图 2-1-3 中的曲线 II)。如果将曲线 II 在横坐标上的截距用 I'_b 表示(称为起始水力坡度), 当 $I > I'_b$ 时, 达西公式可改写为

$$v = k(I - I'_b) \quad (2-1-9)$$

1.4 土的渗透系数

渗透系数 k 反映土的透水性大小, 其常用量纲为 cm/s 或 m/d , 一般通过做室内渗透试验或现场抽水或压水试验进行测定。

1.4.1 影响土的渗透系数的主要因素

(1) 土的粒度组成

一般土粒愈粗、大小愈均匀、形状愈圆滑, k 值也就愈大。对于洁净的(不含细粒土的)砂土, 可按下列经验公式估计 $k(\text{cm/s})$ 值:

$$k = 100 \sim 150(d_{10})^2 \quad (2-1-10)$$

式中: d_{10} ——土的有效粒径(mm), 亦即土中小于此粒径的土重占全部土重的 10%。

粗粒土中含有细粒土时, 随细粒含量的增加, k 值急剧下降。

(2) 土的密实度

土愈密实, k 值愈小。试验资料表明, 对于沙土, k 值大致上与土的孔隙比 e 的二次方成正比。对于粘性土, 孔隙比 e 对 k 的影响更大, 但由于涉及到结合水膜厚薄而难以建立二者之间的经验关系。

(3) 土的饱和度

一般情况下饱和度愈高, k 值愈大, 这是因为土的孔隙中气泡的存在会减小过水截面积, 甚至堵塞细小孔道。

(4) 土的结构

细粒土在天然状态下具有复杂结构, 结构一旦扰动, 原有的过水通道的形状、大小及其分布就会全都改变, 因而 k 值也就不同。扰动土样与击实土样的 k 值通常均比同一密度原状土样的 k 值要小。

(5) 水的温度

试验表明, 渗透系数 k 与渗流液体(水)的重度 γ_w 以及粘滞系数 $\eta(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 有关。水温不同时, γ_w 相差不多, 但 η 变化较大。水温愈高, η 愈低, k 愈大; k 与 η 基本上呈线性关系。因此, 在 $T^\circ\text{C}$ 测得的 k_T 值应加温度修正, 使其成为标准温度(10°C)下的渗透系数 k_{10} 值:

$$k_{10} = \frac{\eta_T}{\eta_{10}} k_T \quad (2-1-11)$$

式中: η_T, η_{10} —— $T^\circ\text{C}$ 、 10°C 时水的粘滞系数(可查物理手册)。

对于 T 为 5°C 的情况, $\frac{\eta_T}{\eta_{10}} = 1.161$, 对于 T 为 20°C 的情况, $\frac{\eta_T}{\eta_{10}} = 0.773$ 。由此可见, 水温因素的影响不容忽视。

地下水的温度一般在 10°C 左右, 故采用 10°C 作为标准温度, 但有的国家也有以 15°C 或 20°C 作为标准温度的。

(6) 土的构造

土的构造因素对 k 值的影响也很大。例如, 在粘性土层中有很薄的沙土夹层的层理构