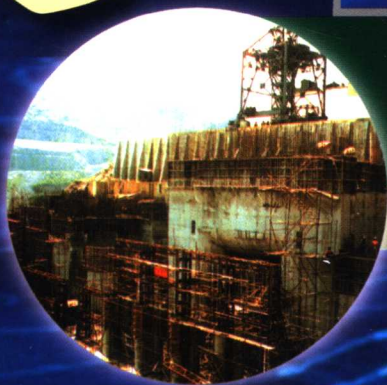


高等院校水利类教材

水利



工程地基处理

刘川顺 编著



全国优秀出版社
武汉大学出版社

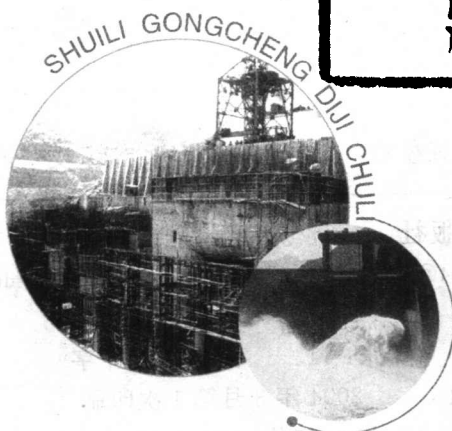
高等学校水利类教材

水利工程地基处理

■ 刘川顺 编著

武汉大学出版社

江苏工业学院图书馆
藏书章



图书在版编目(CIP)数据

水利工程地基处理/刘川顺编著. —武汉: 武汉大学出版社, 2004. 3
高等学校水利类教材
ISBN 7-307-04107-3

I. 水… II. 刘… III. 水利工程—地基处理 IV. TV223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 124887 号

责任编辑: 瞿扬清 责任校对: 王 建 版式设计: 支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 武汉理工大印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 11 字数: 262 千字

版次: 2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04107-3/TV·18 定价: 19.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 提 要

本书总结国内外近年来地基处理技术的科研成果和工程实践,系统介绍了在水利工程中广泛应用的地基处理新技术。全书共八章,包括地基处理基础知识、垫层处理、强夯法、碎石桩、深层搅拌法、高压喷射注浆法、冲积型地基堤坝工程渗流控制和土工合成材料。

本书在对几种具有代表性的地基处理新技术的方法、原理及计算方法、施工要点进行系统总结的同时,注重理论性与实用性相结合,介绍了较多的水工地基处理工程实例,可作为水利类专业研究生、本科生的教材,同时也可作为水利工程技术人员的设计、施工参考书。

前 言

水利工程中的堤防、土石坝、涵闸、泵站、渡槽等水工建筑物大都建造在各种类型的土基上,地基土的物理性状对水工建筑物的工作状态和安危有着直接的影响。实践表明,大部分水工建筑物的破坏或失事是由于地基缺陷或基础设计不妥造成的。饱和软黏土地基上的大量水闸、泵房建筑物因未采取地基处理措施而产生滑移、倾斜和裂缝。建造在砂卵(砾)石地基或粉细砂地基的堤坝、水闸、泵房等建筑物,由于缺乏有效的渗流控制措施而发生渗透变形,并引起建筑物的塌陷、滑坡或倾覆。因此在水利工程建设中,做好地基的勘察、测试工作,并在此基础上对不良地基采取针对性的加固处理措施是十分必要的。水工建筑物地基加固的目的在于提高软弱地基的强度,保证地基的稳定性;减小地基的压缩性,避免过大的地基沉降及不均匀沉降;控制地基(尤其是砂土地基)渗流,防止渗透变形。

最近二十多年来,地基处理技术有了突飞猛进的发展,突出地表现在两个方面,一是各种复合地基处理技术的诞生,二是各类土工合成材料在地基处理中的应用。这些地基处理新技术的共同特点是地基处理效果好、施工效率高、工程费用低,已经成功应用于多项实际工程的加固。为了使地基处理技术更好地服务于水利工程建设,本书对几种具有代表性的地基处理新技术进行了系统总结,同时也包括了作者本人近年来的一些研究成果,注重阐明各项地基处理技术的方法、原理及计算方法、施工要点,力求实用性与理论性相结合。全书共八章,第一章主要介绍与水工地基处理相关的土力学基础知识,并提供了不同土质的一些重要物理、力学指标,以便读者在地基加固设计时参考;第二章至第六章介绍了目前国内较成熟的地基处理方法,它们分别是:垫层处理、强夯法、碎石桩、深层搅拌法和高压喷射注浆法;第七章介绍冲积型地基的水工渗流控制方法及设计方案及相关的渗流计算方法;第八章介绍土工合成材料的类型、功能及其在水工地基处理中的应用。本书给出了较多的水工地基处理实例,以便读者加深理解并在实际应用时参考。

本书既可作为水利类专业研究生、本科生的参考教材,同时也可作为水利工程技术人员的设计、施工参考书。

由于作者学识有限,书中错误、疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书的出版,得到了武汉大学“研究生教材出版基金”的资助,作者对此表示衷心的感谢。

作者

2003年9月

目 录

前 言

第一章 地基处理基础知识	1
第一节 水工地基处理的任务、目的和方法	1
第二节 土的物理性质指标与土的工程分类	3
第三节 土的压缩性与基础沉降	6
第四节 土的抗剪强度	11
第五节 地基承载力	12
第六节 土的渗透性	17
第二章 垫层处理	23
第一节 垫层的作用及适用范围	23
第二节 垫层设计	24
第三节 垫层施工	30
第四节 垫层处理工程实例	32
第三章 强夯法	36
第一节 概述	36
第二节 强夯法加固的一般机理	36
第三节 强夯法加固设计	38
第四节 强夯的施工	44
第五节 强夯法处理地基工程实例	46
第四章 碎石桩	48
第一节 概述	48
第二节 振冲碎石桩的适用范围及优缺点	48
第三节 振冲碎石桩的加固机理	49
第四节 振冲碎石桩的设计计算	51
第五节 振冲碎石桩的施工	59
第六节 碎石桩加固地基的工程实例	64
第五章 深层搅拌法	72
第一节 概述	72

第二节	深层搅拌法的加固机理	74
第三节	深层搅拌法的桩身材料及物理力学性质	76
第四节	水泥深层搅拌桩复合地基的设计	81
第五节	水泥土深层搅拌法施工要点	88
第六节	深层搅拌法处理地基工程实例	89
第六章	高压喷射注浆法	106
第一节	旋喷法的基本工艺及浆液类型	106
第二节	高压喷射灌浆法的加固机理及适用范围	108
第三节	旋喷桩加固地基的设计计算	109
第四节	高压喷射灌浆防渗体的形状及连接形式	110
第五节	高喷灌浆工艺技术参数的选定	112
第六节	高喷灌浆施工程序和工艺	113
第七节	旋喷桩处理地基工程实例	115
第七章	冲积型地基堤坝工程渗流控制	124
第一节	堤坝工程渗流控制的主要任务	124
第二节	堤坝渗流基本理论	125
第三节	堤坝工程渗流控制的方法和途径	128
第四节	冲积地基堤坝工程垂直防渗方案研究	131
第五节	堤防减压井布置方案研究	136
第六节	冲积地基堤坝防参加固实例	140
第八章	土工合成材料	145
第一节	土工合成材料的种类	145
第二节	土工织物加固功能和加固原理	151
第三节	土工织物的加固设计	153
第四节	土工织物加固软土地基工程实例	162
参考文献		166

第一章 地基处理基础知识

第一节 水工地基处理的任务、目的和方法

一、地基处理的重要性和目的

任何水工建筑物都是建造在一定的地层上的,承受建筑物荷载的地层称为地基,建筑物向地基传递荷载的下部结构称为基础。

实践表明,大部分水工建筑物的破坏或失事是由于地基缺陷或基础设计不妥而造成的。建在软弱地基上的水闸、泵房或渡槽等建筑物,如果不采取适当的地基处理措施,可能产生较大的地基沉陷和不均匀沉陷,轻则混凝土结构产生裂缝,闸门不能正常开启、水泵不能正常运行,重则建筑物滑移、倾倒。建在砂砾石地基或粉细砂地基上的水闸、泵房、堤坝建筑物,如果不采取适当的防渗排水措施,就可能发生渗透变形,使地基淘空而引起建筑物倾覆或堤坝塌陷、滑坡。因此在水工建筑物设计中,对地基与基础的设计应给予足够的重视,要结合建筑物的上部结构情况、运用条件及地基土的特点,选择适当的基础设计方案和地基处理措施。

二、地基处理的对象

根据水工建筑物因地基缺陷而导致破坏或失事的情况来看,地基处理的对象包括:软弱地基和高压缩性地基及强透水地基。水工建筑物不良地基有以下几种常见类型:

1. 软土

软土包括淤泥及淤泥质土。软土的特点是含水量高、孔隙比大,压缩高,而且内摩擦角小,因此软土地基承载力低,在外荷载作用下地基变形大。软土的另一特点是渗透系数小,固结排水慢,在比较深厚的软土层上,建筑物基础的沉降往往持续数年甚至数十年之久。软土地基的这些特点对建筑物的正常运用和安全是十分不利的。

2. 冲填土

冲填土是指在整治和疏浚河道或湖塘时,用挖泥船通过泥浆泵将泥砂或淤泥吸取并输送到岸边而形成的沉积土,亦称吹填土。以黏性土为主的冲填土往往是欠固结的,其强度低且压缩性高,一般需经过人工处理才能作为建筑物基础;以砂性土或其他颗粒为主的冲填土,其性质与砂性土相类似,是否进行地基处理要视具体情况而定。

3. 杂填土

杂填土是指由人类活动所形成的建筑垃圾、生活垃圾和工业废料等无规则堆填物。杂填土成分复杂、结构松散、分布极不均匀,因而均匀性差、压缩性大、强度低。未经人工处理的杂填土不得作为建筑物基础的持力层。

4. 松散粉细砂及粉质砂土地基

这类地基若浸水饱和,在地震及机械震动等动力荷载作用下,容易产生液化流砂,从而使地基承载力骤然降低。另外,在渗透力作用下这类地基容易发生流土变形。

5. 砂卵石地基

对于中小型水闸、泵房等建筑物及一般的堤防、土坝工程而言,砂卵石地基的承载力通常能满足要求。但是,砂卵石地基有着极强的透水性,当挡水建筑物存在上下游水头差时,地基极易产生管涌。所谓管涌是指在渗流动水压力作用下,砂卵石地基中粉砂等微小颗粒首先被渗流带走,接着稍大的颗粒也发生流失,以致地基中的渗流通道越来越大,最后不能承受上部荷载而产生塌陷,造成严重事故。因此水利工程中的砂卵石地基包括粉细砂地基必须采取适当的防渗排水措施。

6. 特殊土地基

特殊土地基一般带有地区性特点,包括湿陷性黄土、膨胀土和冻土等。

湿陷性黄土的主要特点是受水浸润后土的结构迅速破坏,在自重应力和上部荷载产生的附加应力的共同作用下产生显著的附加沉陷,从而引起建筑物的不均匀沉降。

膨胀土是一种吸水显著膨胀而失水显著收缩的高塑性土,这种地基土的特性容易造成建筑物隆起或下沉,从而带来严重危害。

冻土是指气温在零度以下时出现固态冰的土,包括瞬时冻土、季节性冻土和多年冻土。其中,季节性冻土对水利工程的危害较大。季节性冻土因其周期性的冻结和融化,从而造成地基的不均匀沉降。

总之,不同性质土基的缺陷会给水工建筑物造成不同形式的破坏,水工地基处理的目的就是加强地基承载力,控制地基沉陷和不均匀沉陷、防止地基发生渗透变形。

三、地基处理的方法和类型

地基处理技术近年来得到飞速发展,人们可以根据具体的需要、地基特点和施工条件选择合适的地基处理方法。目前水利工程中常用的地基处理方法及适用范围见表 1-1。

表 1-1 水工地基处理方法类型、适用范围及加固原理

分类	方法	适用范围	加固原理
换土垫层法	碾压法	适用于处理浅层软土地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基、季节性冻土地基、素填土和杂填土地基	挖除浅层软弱土或不良土,回填砂、碎石、粉煤灰、干渣、灰土或素土等作为垫层,分层碾压或夯实,从而增加抗剪强度、承载力,减小压缩性,防止冻胀作用,消除湿陷性或胀缩性,防止液化
	重锤夯实法	适用于地下水位以上稍湿的黏性土、砂土、湿陷性黄土、杂填土及分层填土地基	
	平板振动法	适用于处理无黏性土和透水性强的杂填土地基	
深层密实法	挤密法	砂桩挤密法和振动水冲法一般适用于松散砂土和杂填土;土桩和灰土桩挤密法一般适用于地下水位以上深度小于 10m 的湿陷性黄土或人工填土;石灰桩适用于软弱黏土和杂填土	挤土成孔,从侧向将土挤密,回填碎石、砾石、砂、石灰、土、灰土等材料,形成碎石桩、砂桩、石灰桩、土桩、灰土桩等,与桩间土组成复合地基,提高地基承载力,减少沉降量,消除土的湿陷性或液化性

续表

分类	方法	适用范围	加固原理
	强夯法	适用于碎石土、砂土、素填土、杂填土和低饱和度的粉土、黏土、湿陷性黄土	利用夯击能,使深层土液化和动力固结,从而使土体密实
排水固结法	堆载预压法 真空预压法 降水预压法	适用于处理厚度较大的饱和软土和冲填土地基	通过布置垂直排水井,改善地基排水条件,并采取加压、抽气、抽水等措施,加速地基的固结和强度增长
加筋法	加筋土	加筋土适用于堤坝、水闸、泵房等建筑物软基加固,常配合换土回填垫层使用	在人工填土的堤坝、挡墙结构及其基础和其他建筑物地基铺设钢带、钢条、尼龙绳、玻璃纤维或土工聚合物,使这种人工复合的土体具有抗拉、抗压、抗弯、抗剪作用,提高承载力,增加稳定性,减少沉降
	土工织物	适用于砂土、黏土和软土	
化学加固法	灌浆法	适用于处理岩基、砂土、粉土、淤泥质黏土、粉质黏土、黏土和一般填土	通过注入水泥浆液或将水泥浆液进行喷射或机械搅拌,使土粒胶结,从而提高地基承载力,减少沉降,防止砂土液化,防止地基或人工填土(堤防、土坝等)渗漏
	高压喷射注浆法	适用于处理淤泥质土、黏性土、粉土、砂土、人工填土等地基及砂卵石地基	
	水泥土搅拌法	适用于处理淤泥质土、粉土和含水率较高且承载力较低的黏性土	

第二节 土的物理性质指标与土的工程分类

一、土的物理性质指标

1. 容重(γ)

具有天然结构和湿度的土重(W)与其体积(V)之比,即为土的容重(又称为天然容重或湿容重),用 γ 表示:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{单位: g/cm}^3 \text{ 或 kN/m}^3) \quad (1-1)$$

2. 含水量(w)

土中水重(W_w)与固体颗粒重(W_s)之比,即为土的含水量,用 w 表示:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100(\%) \quad (1-2)$$

3. 干容重(γ_d)

土的固体颗粒重与土体积之比,即为土的干容重,用 γ_d 表示:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W}{V} \cdot \frac{W_s}{W} = \frac{W}{V} \cdot \frac{W_s}{W_s + W_w} = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (\text{单位: g/cm}^3 \text{ 或 kN/m}^3) \quad (1-3)$$

4. 土粒比重(G_s)

土的固体颗粒重与其同体积(V_s)水重之比,即为土的比重

$$G_s = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_w} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-4)$$

式中: ρ_s 为土粒密度(单位: g/cm^3); ρ_w 为水的密度(取为 $1\text{g}/\text{cm}^3$)。

5. 孔隙比(e)

土的孔隙体积(V_v)与固体颗粒体积(V_s)之比,即为土的孔隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \quad (1-5)$$

6. 孔隙率(n)

土的孔隙体积与土体积之比,即为土的孔隙率

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s} \cdot \frac{V_s}{V} = \frac{V_v}{V_s} \cdot \frac{V_s}{V_s + V_v} = \frac{e}{1 + e} \quad (1-6)$$

7. 饱和度(S_r)

土孔隙中水的体积(V_w)与孔隙体积之比,即为土的饱和度

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_s} \cdot \frac{V_s}{V_v} = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{V_s}{W_s} \cdot \frac{V_s}{V_v} = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{W_w}{W_s} \cdot \frac{V_s}{V_v} = \frac{G_s \cdot w}{e} \quad (\%) \quad (1-7)$$

8. 饱和容重(γ_{sat})

孔隙中全部充满水(即 $S_r = 100\%$)时的土重与其体积之比,即为土的饱和容重

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + V_v \cdot \rho_w}{V} = \frac{(G_s V_s + V_v) \rho_w}{V_v + V_s} = \frac{\left(G_s + \frac{V_v}{V_s}\right) \rho_w}{\frac{V_v}{V_s} + 1} = \frac{(G_s + e) \rho_w}{e + 1}$$

(单位: g/cm^3 或 kN/m^3) (1-8)

9. 浮容重(γ')

地下水位以下的土受水的浮力作用,其单位体积土体的有效重,即为土的浮容重

$$\gamma' = \frac{W_s + V_v \cdot \rho_w - V \cdot \rho_w}{V} = \gamma_{sat} - 1 \quad (\text{单位: } \text{g}/\text{cm}^3 \text{ 或 } \text{kN}/\text{m}^3) \quad (1-9)$$

二、土的物理状态指标

1. 无黏性土的相对密度(D_r)

相对密度是反映砂石、碎石土疏松状态的物理指标,由下式确定:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{(\rho_d - \rho_{d\min}) \rho_{d\max}}{(\rho_{d\max} - \rho_{d\min}) \rho_d} \quad (1-10)$$

式中: e_0 为无黏性土的天然孔隙比或无黏性填土的填筑孔隙比; $e_{\max}$ 为无黏性土的最大孔隙比; $e_{\min}$ 为无黏性土的最小孔隙比; ρ_d 为无黏性土的天然干密度或填筑干密度; $\rho_{d\max}$ 为无黏性土的最大干密度; $\rho_{d\min}$ 为无黏性土的最小干密度。

最小干密度是把烘干土料以 25mm 的自由落高,散落在一定容积的容器内,测定其体积 V ,称其质量 m_s ,则得到 $\rho_{d\min} = m_s/V$;最大干密度 $\rho_{d\max}$ 是把一定量的烘干土料装入容器,在施加一定的压重下,放在振动台上振密,测出振密后的体积,称量其质量,然后计算求得。

工程上,按相对密度将无黏性土划分为三种状态:

$$0 < D_r \leq 0.33 \quad \text{疏松}$$

$$0.33 < D_r \leq 0.67 \quad \text{中密}$$

$$0.67 < D_r \leq 1 \quad \text{密实}$$

2. 黏性土的液性指数(I_L)

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{w - w_p}{I} \quad (1-11)$$

式中: w_p 为土的塑限含水量(%),即土由半固态转变为塑性状态时的界限含水量,也叫塑性下限含水量; w_L 为土的液限含水量(%),即土由塑性状态转为流动状态时的界限含水量,也叫塑性上限含水量; I_p 为土的塑性指数(%), $I_p = w_L - w_p$ 。

根据土的液性指数将黏性土划分为五种状态:

$$I_L \leq 0 \quad \text{坚硬}$$

$$0 < I_L \leq 0.25 \quad \text{硬塑}$$

$$0.25 < I_L \leq 0.75 \quad \text{可塑}$$

$$0.75 < I_L \leq 1.0 \quad \text{软塑}$$

$$1.0 < I_L \quad \text{流塑}$$

3. 土的不均匀系数(C_u)

土的不均匀系数是反映土颗粒成分不均匀程度的判别指标,由下式确定:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-12)$$

式中: d_{60} 称为限制粒径,mm,表示小于该粒径的颗粒重量占全部颗粒重量的60%; d_{10} 称为有效粒径,mm,表示小于该粒径的颗粒重量占全部颗粒重量的10%。

一般 $C_u \leq 5$ 时,为颗粒均匀或级配不良的土; $5 < C_u \leq 15$ 时,为颗粒中等均匀的土; $C_u > 15$ 时,为颗粒不均匀或级配良好的土。土料的 C_u 越大,填筑时越容易得到较小的孔隙比。

三、土的工程分类

土的分类指标很多,目前土的分类体系繁杂多样,不仅各国尚未统一,而且在国内各个行业部门也都制定了本专业的分类体系。我国目前倾向于以土的颗粒组成特征、塑性指标作为划分土类的依据。在区分土类时采用表 1-2 所列的粒组划分,然后按塑性指标将粗粒土和细粒土进一步细分(见表 1-3)。

表 1-2

粒 组 划 分

粒组名称	粒径 d 范围(mm)	粒组统称
漂石(块石)粒	>200	巨粒
卵石(碎石)粒	$200 \sim 60$	
砾粒 粗砾	$60 \sim 20$	粗粒
细砾	$20 \sim 2$	
砂砾	$2 \sim 0.075$	细粒
粉粒	$0.075 \sim 0.005$	
黏粒	<0.005	

表 1-3

按塑性指数分类

分类指标界限值 提出者	塑性指数分类指标界限值及土类名称									
	0	1	3	7	8	9	10	14	15	17
国家建委 TJ7-74 规范		砂土	轻亚黏土				亚黏土			黏土
水利部土工试验 规程-62		砂土	砂壤土				壤土			黏土
交通部 79 规范		砂土	亚砂土				亚黏土			黏土
冶金部冶基 规 103-77		砂土	轻亚黏土				亚黏土			黏土
地质矿产部 84 规程		砂土	亚砂土				亚黏土			黏土

第三节 土的压缩性与基础沉降

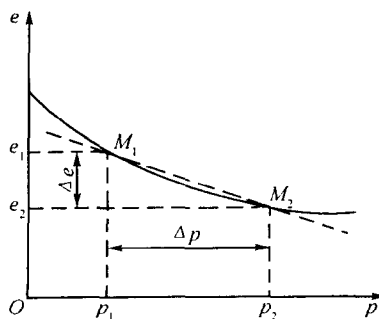
一、基本概念

土在压力作用下体积缩小的特性叫做土的压缩性。建筑物地基受上部荷载的作用而产生的垂直压缩变形,称为建筑物地基的沉降。土体受力后引起的变形可分为体积变形和形状变形。体积变形主要由正应力引起,它只会使土的体积缩小压密,不会导致土体破坏。而形状变形主要由剪应力引起,当剪应力超过一定限度时,土体将产生剪切破坏,因此,地基中是不允许发生大范围剪切破坏的。本节讨论的基础沉降主要是指由正应力作用引起的体积变形。

土体在压力作用下产生的体积压缩的原因有三个方面:(1)土粒本身的压缩变形;(2)孔隙水的压缩变形;(3)孔隙的压缩变形(由于部分孔隙水和气体的排出)。由于水和土粒本身的压缩性很小,故孔隙水及土粒的压缩变形通常可以忽略不计。

二、土的压缩性指标

通过土的压缩试验,可以得到一条外加压力强度(p)和土孔隙比(e)的变化关系曲线(如图 1-1)。压缩曲线的割线斜率反映了土的压缩线的高低,即



$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = - \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (1-13)$$

式中： a_v 称为压缩系数，以 kPa^{-1} 或 MPa^{-1} 计。 e_1 、 e_2 为压缩曲线上与 p_1 、 p_2 相对应的孔隙比。应当注意，压缩系数不是常量，它随压力的增加以及压力增量取值的增大而减小。在工程中，为了便于统一比较，习惯上采用 100kPa^{-1} 和 200kPa^{-1} 范围的压缩系数来衡量土的压缩性的高低。

图 1-1 土的压缩曲线

土的压缩试验结果,也可绘制在半对数坐标上,如图 1-2 所示,该压缩曲线通常称为 $e-\lg p$ 曲线。从图中可以看出,在较高的压力范围内, $e-\lg p$ 曲线近似地为一直线。于是,可用直线的斜率—压缩指数 C_c 来反映其陡缓,即

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1} = - \frac{\Delta e}{\lg \left(\frac{p_1 + \Delta p}{p_1} \right)} \quad (1-14)$$

式中: e_1 、 e_2 分别为 p_1 、 p_2 对应的孔隙比。

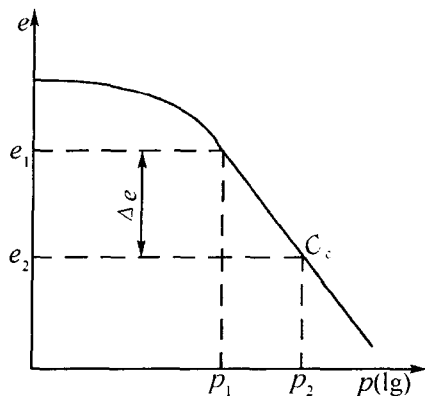


图 1-2 压缩试验的 $e-\lg p$ 曲线

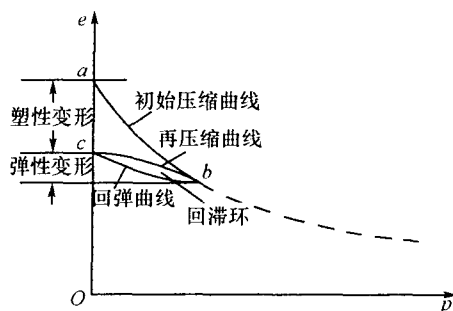


图 1-3 图的回弹、再压缩曲线

压缩指数 C_c 也是反映土的压缩性高低的一个指标。 C_c 值越大,土的压缩性就越高;反之, C_c 值越小,则土的压缩性就越低。虽然压缩系数 a_v 和压缩指数 C_c 都是反映土的压缩性的指标,但是两者又有所不同。 a_v 随取的初始压力以及压力增量的大小而异,而 C_c 在较高的压力范围内却是常数。

压缩试验是地基沉降量计算的基本依据,因此各土层的压缩试验的加荷过程必须尽量符合实际,每一试样的压缩试验均应从小荷重开始,逐渐分级加荷,当荷载增加到土样在天然埋藏条件下所受的自重应力后,逐级卸荷(模拟基坑开挖),这样就获得土样的回弹曲线,然后再逐级加荷,直至最终荷载达到基底的设计荷载强度加上 1.5~2.0 倍基底宽度的土柱重量为止,这样就获得土样的二次压缩曲线(如图 1-3)。从图中可以看到二次压缩曲线的一些特征:(1)卸荷时,试样不是沿初始压缩曲线,而是沿曲线 bc 回弹,可见土体的变形是由可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形两部分组成;(2)回弹曲线和再压缩曲线构成一回滞环,这是土体不是完全弹性体的又一特征;(3)回弹曲线和再压缩曲线比压缩曲线平缓得多;(4)当再加荷时的压力超过 b 点对应的压力,再压缩曲线就趋于初始压缩曲线的延长线。

三、无侧向变形条件下的压缩量公式

目前工程中广泛采用的计算基础沉降的分层总和法都是建立在下面的无侧向变形条件下土的压缩量(或单向压缩)公式的基础之上的:

$$S = \frac{a_v}{1 + e_1} \Delta p H \quad (1-15)$$

或

$$S = m_v \Delta p H \quad (1-16)$$

式中: Δp 为压力增量, $\Delta p = p_2 - p_1$, p_1 为基础在原始自然状态下的压力强度; e_1 为在 p_1 作用下压缩已经稳定时的孔隙比; H 为此时的土层厚度, a_v 为土的压缩系数; m_v 为体积压缩系数, 即土体在单位压力增量作用下单位体积的体积变化, 也即单位厚度的压缩量, $m_v = a_v / (1 + e_1)$; S 为厚度为 H 的土层在 Δp 作用下的压缩量。

若令 $E_s = 1/m_v$, 则式(1-16)可以改写成

$$S = \frac{\Delta p H}{E_s} \quad (1-17)$$

式中: E_s 称为压缩模量, 以 kPa 计。它是在无侧向变形条件下, 竖向应力与应变之比值, 故又称为土的侧限弹性模量。

根据广义胡克定律, 土体应变 ϵ 与应力 σ 之间存在以下关系

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_y + \sigma_z) \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_z) \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式中: E 为土的变形模量, 以 kPa 计, 它表示在无侧限条件下应力与应变的比值, 即无侧限时的弹性模量(各类土的变形模量参考值见表 1-4); μ 为土的泊松比, 一般在 0.3~0.4 之间, 饱和黏土在不排水条件下的 μ 值可能接近 0.5。

有侧限变形条件下, $\sigma_x = \sigma_y, \epsilon_x = \epsilon_y = 0$, 于是从式(1-18)中的前两式可得到

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (1-19)$$

又因为无侧限条件下, 侧向有效应力与竖向有效应力的比值为静止侧压力系数 K_0 , 于是有

$$K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu} = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} \quad (1-20)$$

由式(1-17), 可将无侧限时的竖向应变表示为

$$\epsilon_z = \frac{S}{H} = \frac{\sigma_z}{E_s} \quad (1-21)$$

由式(1-18)、(1-20)、(1-21)可得到

$$E = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right) \quad (1-22)$$

表 1-4

各类土的变形模量 E 的经验取值范围

土类	泥炭	塑性黏土	硬塑黏土	较硬黏土	松砂	密实砂	密实砂砾
E (kPa)	100~500	500~4000	4000~8000	8000~15000	10000~20000	50000~80000	100000~200000

四、基础沉降量的计算

基础沉降按照其发生的原因和次序, 可分为初始沉降(即基础荷载加上后立即发生的沉

降)、固结沉降(即由于土孔隙中的水和气体在压力作用下逐渐排出,因土体体积缩小而引起的沉淀)、次固结沉降(即在土体固结后期,当超孔隙压力基本已消散为零,土料表面上的吸着水层受压变形,其中一部分吸着水逐渐转变为自由水,从而引起的地基土的压缩沉降)。

由于采用常规法计算初始沉降和次固结沉降有一定难度,因此目前工程中通常是对地基各土层按式(1-15)计算无侧限条件下的固结沉降,然后将土层的沉降总和,并乘以一个与地基条件有关的修正系数,最终得到地基沉降量计算结果,即

$$S = m \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} h_i \quad (1-23)$$

式中: S 为地基最终沉降量, m ; n 为计算范围内的土层数; e_{1i} 为基础底面以下第 i 层土在平均自重应力作用下,由压缩曲线查得的相应孔隙比; e_{2i} 为基础底面以下第 i 层土在平均自重应力加平均附加应力作用下,由压缩曲线查得的相应孔隙比; h_i 为基础底面以下第 i 层土的厚度, m ; m 为地基沉降量修正系数,可采用 1.0~1.6(坚实地基取较小值,软土地基取较大值)。

在利用式(1-23)计算地基沉降量时,要注意两点:一是压缩曲线的选用。对于软土地基,宜采用 $e-p$ 压缩曲线;对于一般土质地基,当基底压力小于或接近于基坑开挖前作用于该基底面上的自重压力时,宜采用 $e-p$ 回弹再压缩曲线;对于重要的、大型建筑物的地基沉降量计算,宜采用 $e-\lg p$ 压缩曲线。二是地基压缩层计算深度的确定。目前水利工程中通常按竖向附加应力 σ_z 与竖向自重应力 σ_s 之比来确定压缩层计算深度。对于一般黏性土,压缩层深度取至 $\sigma_z = 0.2\sigma_s$;对于软黏土,压缩层深度取至 $\sigma_z = 0.1\sigma_s$ 。

下面介绍分层总和法计算地基沉降的步骤:

(1) 选择沉降计算剖面,在每一个剖面上选择若干有代表性的计算点

在计算基底压力和地基中附加应力时,要根据建筑物基础的尺寸,判别是属于空间问题还是平面问题;再按作用在基础上的荷载性质(中心、偏心或倾斜等情况),求出基底压力的大小和分布;然后结合地基中土层性状,选择沉降计算点的位置。

地基计算剖面的选择应包括荷载变化较大与地基压缩性变化较大的地段在内。例如,水闸两侧岸墙与闸身之间往往荷载相差较大,有可能产生较大的不均匀沉降。

图 1-4 为水闸平面示意图。沉降计算的部位可考虑取在 0、1、2、3 和 4 各点,以便了解闸身上下游沉降量和沉降差,以及岸墙与闸身的沉降差。

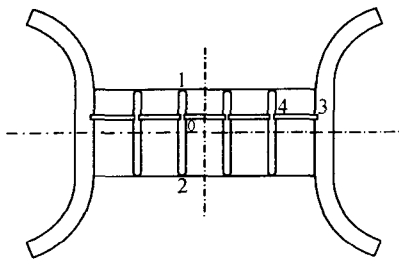


图 1-4 水闸沉降计算点

对于堤防、土坝等建筑物,一般应以基础的两侧点、中间点及较宽马路下的对应点作为沉降计算点(如图 1-5)。

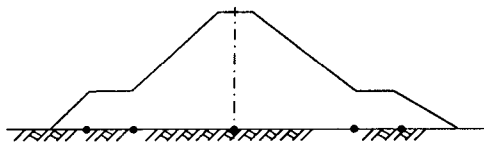


图 1-5 堤坝沉降计算点

(2) 将地基分层

天然土层中不同土质层的交界面和地下水位应分为层面,同时在一类土层中分层的厚度不宜过大。一般水工建筑物地基,分层的厚度 h_i 的取值为 $2 \sim 4\text{m}$, 或 $h_i \leq 0.4B$, B 为基础的宽度。对每一分层,可近似认为地基压力是均匀分布的。

(3) 计算各土层的平均应力

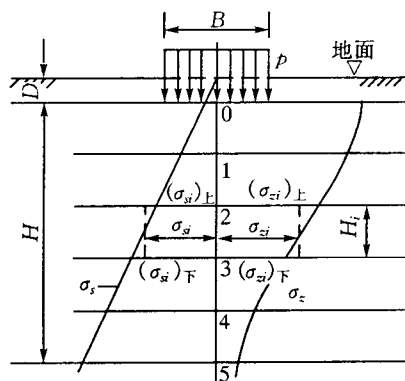


图 1-6 分层综合法沉降计算图

首先求出计算点垂线上各个分层层面处的竖向自重应力 σ_s (应从地面算起), 并绘出它的分布曲线。然后求出计算点垂线上各个分层层面处的竖向附加应力 σ_z 并绘出它的分布曲线, 并以 $\sigma_z = 0.2\sigma_s$ 或 $0.1\sigma_s$ 的标准确定压缩层的总厚度。需注意的是, 当基础为埋置式时, 附加应力应从基底算起 (即应为基底静压力)。最后, 按算术平均算出各分层上下层面的平均自重应力 σ_{si} 和平均附加应力 σ_{zi} (如图 1-6)。

(4) 计算基底各代表点的沉降

取第 i 层的平均初始应力 p_{1i} 等于 σ_{si} , 平均初始应力与平均附加应力之和等于 p_{2i} , 由 p_{1i} 及 p_{2i} 查压缩曲线得到相应的初始孔隙比 e_{1i} 和压缩稳定后孔隙比 e_{2i} , 然后按式 (1-23) 算出各代表点的沉降量。

为保证建筑物的安全和正常使用, 建筑物基础可能产生的最大沉降量和沉降差控制在该建筑物所容许的沉降量 $[S]$ 和沉降差 $[\Delta S]$ 之内。例如, 《水闸设计规范》规定: 天然土质地基上的水闸地基最大允许沉降量 $[S] = 15\text{cm}$, 最大允许沉降差 $[\Delta S] = 5\text{cm}$ 。一旦不满足这一要求, 应采取适当措施。

以上讨论的地基沉降是指地基在自重荷载应力和基础荷载附加应力作用下, 地基所产生的最终沉降量。对于饱和黏性土地基, 由于压缩性大而透水性小, 排水固结慢, 沉降过程要持续很长时间。这种情况的沉降问题, 不但要求得最终沉降量, 还要了解沉降随时间的增长过程 $S_t = f(t)$ 。较简单可靠的办法是通过原型沉降观测建立经验关系式。前苏联尼奇波罗维奇 (А. А. Ничипорович) 给出了如下经验公式

$$S_t = S(1 - e^{-dt}) \quad (1-24)$$

式中: S_t 为 t 时的沉降量; S 为最终稳定沉降量; t 为沉陷历时, 年; d 为系数, $1/\text{年}$, 它与压缩土层厚度、初始孔隙比、压缩系数、渗透系数等多种因素有关; e 为自然对数的底。

式 (1-24) 反映出沉降量增长率随时间衰减的大致规律, 但实用仍不便。经验表明, 如将 S_t 曲线的起点改置于施工期过半的 t_1 处, 则 $S_t = f(t)$ 接近双曲线, 即