



建筑工程施工知识丛书

地基基础



吴迈 李雨润 骆中钊 编著



化学工业出版社



建筑工程施工知识丛书

地基基础

● 吴迈 李雨润 骆中钊 编著



化学工业出版社

·北京·

本书是《建筑工程施工知识丛书》中的一册,内容包括地基土的工程性质及其承载力、土方工程、地基处理与加固、基坑工程、浅基础施工、桩基础施工。本书按照现行国家和行业工程建设标准编写,适用性强、工艺先进、理论联系实际,文字通俗易懂,表达深入浅出。

本书适合于从事建筑业施工的广大农村知识青年、技术工人和管理人员阅读,可作为建筑施工技术的培训教材,还可供大专院校相关专业师生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基基础/吴迈,李雨润,骆中钊编著. —北京:化学工业出版社,2008.7
(建筑工程施工知识丛书)
ISBN 978-7-122-03132-7

I. 地… II. ①吴…②李…③骆… III. 地基-基础(工程) IV. TU47

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第087931号

责任编辑:刘兴春 徐娟
责任校对:周梦华

文字编辑:谢蓉蓉
装帧设计:周 遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张11¼ 字数220千字 2008年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00元

版权所有 违者必究

出版者的话

改革开放的春风给我们的祖国带来了无限的生机和活力，举国上下建设热潮汹涌澎湃，令人鼓舞，催人奋进。广大农村的大批知识青年和剩余劳动力进入建筑行业，经过专业的培训和锻炼，已成为建筑业的生力军，为我国建筑业的发展立下了汗马功劳。

“百年大计，质量第一”。建筑必须有可靠的质量保证，才能确保人们的安居乐业。建筑工程的施工危险性大，必须有可靠的技术保证和安全措施，才能确保广大施工人员的生命安全和施工质量。建筑业的迅猛发展，急需大量懂技术、懂安全的熟练工人和善管理、会经营的技术人员。现在进入建筑业的大批来自农村的知识青年都具有一定的文化水平，只要能为他们提供一些通俗易懂的建筑工程施工知识，通过自学、辅导和培训，让他们尽快掌握建筑工程施工知识有着重要的现实意义和可行性。为了适应发展的需要，我们已组织出版了可供从事建筑工程施工的广大农村知识青年通过自学，从读懂施工图入手，进而学习一般建筑工程施工的基本知识、质量检查常识和施工安全常识的《建筑工程施工知识 自学丛书》（共六册，2006年该丛书荣获全国服务“三农”优秀图书），深受广大农村知识青年的欢迎和社会各界的好评。

党和我国政府极为关心农民问题。十七大报告中再次强调指出，解决好农业、农村、农民问题，事关全面建设小康社会大局，必须始终作为全党工作的重中之重；同时还指出，坚持农村基本经营制度，培育有文化、懂技术、会经营的新型农民，发挥亿万农民建设新农村的主体作用。

改革开放三十年来，很多在建筑业中刻苦学习、勤奋工作的农村知识青年已成为建筑业中的领军人物，并已走上了管理岗位。为了响应党中央和我国政府的号召，值此纪念改革开放三十周年之际，化学工业出版社邀请国内该领域多位专家、学者，组织编写包括《地基基础》、《砌体结构》、《混凝土结构》、《钢结构》和《施工组织》共五册的《建筑工程施工知识丛书》，为多年从事建筑业施工，并掌握了一定技术和经验的广大农村知识青年提供较为全面、系统的建筑工程施工知识，以期能为他们提高技术水平和走上管理岗位提供一些帮助。

在《建筑工程施工知识丛书》出版之际，感谢很多领导、专家的关心和指导，感谢全体编写人员的辛勤工作。

限于组织编写时间仓促，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者批评、指正，以便进一步修改、完善。

前 言

在建筑工程中,地基与基础的施工占有十分重要的地位,是其他各项工程施工的基础。地基与基础工程的工期一般占整个工程的 $1/3 \sim 1/2$,投资约占到 $30\% \sim 50\%$,而其施工质量的优劣直接影响着建(构)筑物的安全稳定和使用寿命。由于我国幅员辽阔,地质、水文情况千差万别,使得地基与基础工程施工技术十分复杂,涉及专业领域广泛,包括土力学、结构力学、流体力学、工程地质、建筑材料、建筑机械、施工组织与管理等各个学科。作为施工技术人员,必须全面掌握相关知识,才能在工程中合理应用,保证施工质量,确保工程顺利进行。

本书是《建筑工程施工知识丛书》中的一册,主要内容包括:地基土的工程性质及其承载力;土方工程施工;地基处理与加固;浅基础工程施工;桩基工程施工;基坑工程施工。反映了国内外近年来在地基基础施工技术方面的新进展,总结了编著者在地基基础施工技术方面的研究成果和工程实践经验。本书按照现行国家和行业工程建设标准编写,力求做到适用性强、工艺先进、理论联系实际,并以通俗易懂的语言,深入浅出地进行表达。旨在为从事建筑业施工的广大农村知识青年、技术工人和管理人员提供一本有关地基与基础施工方面的简明、实用、系统、全面的参考用书,以便于他们尽快掌握理论知识,提高实践水平,与时俱进,适应日益激烈的市场竞争需要。

本书由吴迈、李雨润、骆中钊编著。河北工业大学吴迈编著第3章,河北工业大学李雨润编著第1、2、5章,岳阳市规划勘测设计院赖广平编著第4章,河北工业大学田敬贤编著第6章。全书由骆中钊统稿和校审。

在编著过程中,我们得到了很多专家、学者、同行的支持和指导,参考了有关专家、学者的论著,借此致以衷心的感谢。

限于水平,不足之处在所难免,敬请读者指正。

编著者

2008年5月

目 录

1 地基土的工程性质及地基承载力	1
1.1 地基土的工程性质	1
1.1.1 土的渗透性	1
1.1.2 土的流变性	3
1.1.3 土的变形特性	4
1.1.4 土的强度特性	9
1.2 地基承载力及其确定	10
1.2.1 破坏类型	10
1.2.2 临塑荷载与临界荷载	12
1.2.3 地基极限承载力	15
1.2.4 地基承载力的确定	17
1.2.5 影响地基承载力的因素	21
2 土方工程	22
2.1 土的分类与性质	22
2.1.1 土的工程性质	22
2.1.2 土的工程分类	24
2.2 工程场地平整	25
2.2.1 场地平整设计标高的计算	25
2.2.2 场地平整土方量计算	27
2.2.3 土方的平衡调配	31
2.3 土方开挖、回填与压实	32
2.3.1 基坑(槽)土方量计算	32
2.3.2 土方边坡	33
2.3.3 土方回填	35
2.4 质量检验	41
2.4.1 密实度检验	41
2.4.2 检验标准	41
3 地基处理与加固	43
3.1 地基处理概述	43
3.2 换填垫层法施工	44
3.2.1 换填垫层法概述	44
3.2.2 换填垫层法施工步骤	45
3.2.3 施工检验及工程验收	49
3.3 夯实法施工	51
3.3.1 重锤夯实法	51
3.3.2 强夯法	52
3.4 复合地基加固法施工	57
3.4.1 复合地基加固法概述	57
3.4.2 砂石桩法	58
3.4.3 柱锤冲扩桩法	64
3.4.4 石灰桩法	69
3.4.5 灰土(土)挤密桩法	75
3.4.6 水泥土搅拌法	80
3.4.7 高压喷射注浆法(旋喷桩法)	88
3.4.8 夯实水泥土桩法	95
3.4.9 水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩法)	98
4 基坑工程	109
4.1 基坑工程概述	109
4.1.1 基坑工程的内容	109
4.1.2 基坑支护结构的安全等级	109
4.1.3 基坑支护结构形式及适用范围	110
4.1.4 基坑工程施工的一般规定	112
4.1.5 基坑工程的施工组织与	

管理	112	5.2.3 砖基础施工	135
4.2 支护结构施工	113	5.2.4 混凝土和毛石混凝土基 础施工	139
4.2.1 水泥土墙的施工	113	5.3 钢筋混凝土基础施工	140
4.2.2 钢板桩的施工	114	5.3.1 独立基础施工	141
4.2.3 锚杆的施工	116	5.3.2 条形基础施工	144
4.2.4 内支撑体系的施工	117	5.3.3 片筏式基础施工	146
4.3 基坑土方开挖	119	5.3.4 箱形基础施工	148
4.3.1 基坑土方开挖施工 要点	119	6 桩基础施工	151
4.3.2 挖土方法	119	6.1 桩基础概述	151
4.3.3 基坑土方开挖质量检验 标准	120	6.2 预制桩施工	151
4.4 基坑地下水控制	121	6.2.1 预制桩制作、运输和 堆放	151
4.4.1 地下水控制方法 选择	121	6.2.2 沉桩方法	153
4.4.2 集水明排法	121	6.3 混凝土灌注桩施工	159
4.4.3 降水	122	6.3.1 混凝土灌注桩施工一般 规定	160
5 浅基础施工	127	6.3.2 干作业钻孔灌注桩	161
5.1 浅基础概述	127	6.3.3 泥浆护壁成孔灌 注桩	163
5.1.1 基础材料选择	127	6.3.4 沉管灌注桩	166
5.1.2 浅基础类型	128	6.3.5 人工挖孔灌注桩	168
5.2 无筋扩展基础施工	129	参考文献	170
5.2.1 灰土和三合土基础 施工	129		
5.2.2 毛石基础施工	130		

1 地基土的工程性质及地基承载力

1.1 地基土的工程性质

1.1.1 土的渗透性

土的渗透性是指水流通过土中孔隙的能力。水在土中的渗流运动有层流和紊流两种形式。渗流速度远较地表水慢,除在宽大裂隙或空洞中具有较大速度外,一般均以层流为主要运动形式。

土的渗流是促使土的物理、力学性质发生变化的影响因素,它影响了岩土工程设计与施工的安全稳定,如地下工程深基坑开挖施工排水、隔水或降水的考虑及其措施,建(构)筑物地基的渗流稳定和防护措施等。

1.1.1.1 土的渗透规律

土中水的渗流规律可以认为是符合层流渗透定律,也称达西定律,它的基本表达式为:

$$Q = Fki \quad (1-1)$$

或

$$v = ki \quad (1-2)$$

式中, Q 为渗透流量即单位时间内流过土截面积 F 的流量, m^3/d 或 cm^3/s ; v 为渗流速度, m/d 或 cm/s ; F 为水流过土的横截面面积, m^2 或 cm^2 ; k 为渗透系数,由试验测定, m/d 或 cm/s ; i 为水力梯度,代表渗透流程中单位长度的水头差值,即

$$i = \Delta H / L \quad (1-3)$$

式中, ΔH 为距离为 L 的断面间的水头差值, cm ; L 为渗透长度, cm 。

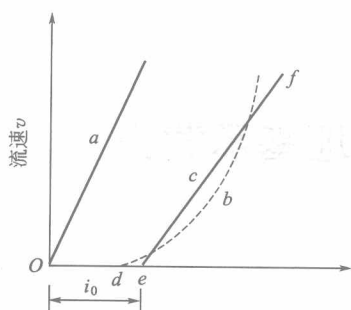
达西定律表明,水在土中的渗透速度与水力梯度成正比。应该指出,由于孔隙水的渗流不是通过土的整个截面,而仅是通过该截面内土颗粒间的孔隙,因此,土中孔隙水的实际渗流速度 v_0 要比公式 (1-2) 的计算平均流速 v 要大。

由于达西定律只适用于层流的情况,故一般只适用于中砂、细砂、粉砂等,对粗砂、砾石、卵石等粗颗粒土不适用,因为这时土的孔隙大,水的渗流速度也大,已不是层流而是紊流,这时则服从于紊流运动的定律,即水的渗透速度与水力梯度的平方根成正比。

此即谢才定律,其表达式如下:

$$v = ki^{1/2} \quad (1-4)$$

在黏土中,土颗粒周围存在着结合水,结合水因受到分子引力作用而呈现黏



滞性，因此，黏土中自由水的渗流受到结合水的黏滞作用产生很大阻力，只有克服结合水的抗剪强度后才能开始渗流。这个水头梯度称为黏土的起始水力梯度 (i_0)，在黏土中，应按修正后的达西定律来计算水的渗流速度：

$$v = k(i - i_0) \quad (1-5)$$

砂土与黏土的渗透规律如图 1-1，直线 a 表示砂土的 $v-i$ 关系，它是通过原点 O 的一条直线。

图 1-1 砂土和黏土的渗透规律 黏土的 $v-i$ 关系是曲线 b (图中虚线所示)， d 点是黏土的起始水力梯度，当土中水头梯度超过此值后水才开始渗流，一般常用折线 Oef 代替曲线 b ，即认为 e 点是黏土的起始水头梯度 i_0 。

1.1.1.2 土的渗透系数

(1) 根据粒度分析资料计算渗透系数

① 哈赞经验公式

$$k = Cd_{10}^2 (0.7 + 0.03t) \quad (1-6)$$

式中， k 为渗透系数， m/d 或 cm/s ； d_{10} 为颗粒的有效粒径； t 为渗透水的温度， $^{\circ}C$ ； C 为经验系数，视砂的均匀性与孔隙度而定，黏土质砂为 500~700，纯砂 700~1000。

该式适用于粒径为 0.1~3mm，且不均匀系数不超过 5 的砂。

② 斯利哈吉尔经验公式

$$k = Ad_{10}^2 m \frac{1}{\mu} \quad (1-7)$$

式中， A 为与渗透系数单位有关的系数，当 k 的单位为 m/d 时， $A=88.3$ ； m 为与孔隙度有关的系数； μ 为与水的温度有关的黏滞性系数。

该公式适用于较为等粒的砂。

③ 克留盖尔公式 对不等粒的和细粒的砂、无结构的黏土，可按克留盖尔公式计算：

$$k = 1.44 \times 10^6 \frac{n}{W^2} \quad (1-8)$$

式中， k 为渗透系数， m/d ； n 为孔隙度； W 为 $1cm^3$ 土中全部颗粒的表面积， cm^2 。

(2) 软土渗透系数的计算 对于透水性很低的软土，可通过固结试验测定固结系数 C_v 和体积压缩系数 m_v (或 a 与 e) 计算：

$$k = \frac{C_v \rho w^a}{1+e} = \frac{C_v \rho w}{m_v} \quad (1-9)$$

式中, C_v 为固结系数; m_v 为压缩系数; ρ 为水的密度; w 为土的含水量。

(3) 在野外用实验方法测定渗透系数 在野外天然条件下测定土的渗透系数是最准的方法, 在非饱和土层内, 可以采用渗水试验的方法进行, 而在饱和水层内, 则多采用抽水试验的方法进行。

① 渗水试验 在需要进行试验的土层掘一平底方形或圆形小坑, 边长 35~40cm, 坑深 10cm。小坑底铺以 2cm 厚的小砾石, 以防坑底在注水时受到冲刷。注水入小坑, 保持水位固定, 水层厚 3~4cm。通过测定时间和水量的消耗, 可以确定单位时间渗入的水量 Q , 小坑的面积 F 可以量出, 这样可以计算出渗透速度。

当试验时间较长, 水渗入地下相当深时, 小坑中水层厚度 z 与渗透深度 h 之和与渗透深度 h 很接近, 即水头梯度 i 接近于 1, 此时渗透系数 k 约等于渗透速度。

② 抽水试验 在试验现场沉入 1 根抽水井管, 若井管穿过饱和水土层, 达到其下的隔水层, 开始抽水。按照裘布依公式求得渗透系数 k 值为:

$$k = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{\pi (H^2 - h^2)} \tag{1-10a}$$

或

$$k = \frac{0.733 Q \lg \frac{R}{r}}{H^2 - h^2} \tag{1-10b}$$

式中, Q 为渗透流量, m^3/d 或 cm^3/s ; R 为抽水影响半径, m ; r 为抽水井的半径, m ; H 为含水层厚度, m ; h 为井孔中水的厚度或井中的动水位, m 。

各类土的渗透系数 k 值, 可参考表 1-1。

表 1-1 土的渗透系数

土的名称	渗透系数 k		土的名称	渗透系数 k	
	/(m/d)	/(cm/s)		/(m/d)	/(cm/s)
黏土	<0.055	< 6×10^{-6}	粗砂	20~50	$2 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
粉质黏土	0.005~0.1	$6 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$	均质粗砂	60~75	$7 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-2}$
粉土	0.1~0.5	$1 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	圆砾	50~100	$6 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-1}$
黄土	0.25~0.5	$3 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	卵石	100~500	$1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-1}$
粉砂	0.5~1.0	$6 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	无充填物卵石	500~1000	$6 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10$
细砂	1.0~5	$1 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$	稍有裂隙岩石	20~60	$2 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2}$
中砂	5~20	$6 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-2}$	裂隙多的岩石	>60	> 7×10^{-2}
均质中砂	35~50	$4 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$			

1.1.2 土的流变性

流变性是黏性土和淤泥质黏性土的重要工程性质, 它对于估算地基的长期稳定、土坡的深层稳定、挡墙和地下结构土压力变化以及次时间效应引起地基过量的沉降有着重要意义。

土的流变性一般包括以下几个方面。

(1) 蠕变特性 所谓蠕变特性是指黏性土在某种大小不变的荷载作用下, 应变 ϵ 随时间 t 而逐渐增长的特性。

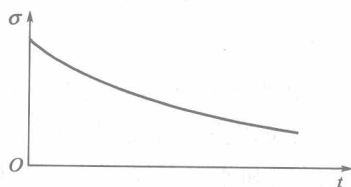


图 1-2 恒定应变下的应力松弛

(2) 松弛特性 土的应力松弛是指在一定的变形 ϵ_0 下, 土中抵抗变形的阻力将随着时间而被减弱 (图 1-2) 的特性。

应力松弛的结果常常使隧洞顶上的压力或挡土墙背后的主动压力增加。

土的蠕变及应力松弛与时间因素有关, 也受土的种类、土的结构、排水条件、温度等因素的影响。一般黏粒含量愈高, 黏土活性愈大, 蠕变及应力松弛愈大。高含水量土的蠕变比低含水量土的蠕变重要, 当应力大于前期固结压力时, 灵敏性亚稳结构的蠕变比重塑的非灵敏性结构的蠕变大, 干土及砂土的蠕变及应变速率是不大的, 但有着相似的规律性。

(3) 长期强度 土的长期强度是指土体在静载作用下, 其强度随时间的延长而降低的特性。图 1-3 绘出抗剪强度 τ 与剪切历时 t 的关系曲线。可以看出, 土的抗剪强度随着剪切历时而逐渐降低, 最后 (当 $t \rightarrow \infty$ 时) 趋于稳定值 τ_∞ , τ_∞ 称为长期强度极限; 而当 $t \approx 0$ 时, 抗剪强度最大, 称作瞬时强度, 记为 τ_0 相应于任一较长的剪切历时的强度, 称作长期强度, 记为 τ_t 。按现行规程的一般方法测定抗剪强度时的剪切历时较短, 相应于图中之 τ_s 值, 通常称为标准强度。

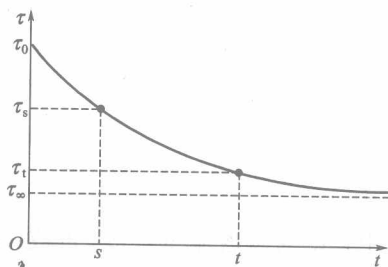


图 1-3 抗剪强度和剪切历时的关系

黏性土的蠕变性和应力松弛及由此而产生的强度衰减特性, 对于建造在软土地基上的建筑物、水工构筑物、码头、桥台及土质边坡的稳定性常具有重要的意义, 不少这类工程常因土的这种特性而产生过大的有害变形, 甚至遭到破坏。

1.1.3 土的变形特性

(1) 土的压缩性与变形指标 地基土体在上部结构荷载作用下发生变形, 地基的竖直方向变形即为沉降。土体的变形或沉降是与土的压缩性能密切相关的。地基土受力后的变形, 实际上包括了土颗粒压缩, 土孔隙中的水和气体的排出, 土体积减小的过程, 也即孔隙水压力消散, 有效应力增大, 土体产生压缩的过程。

在描述土的应力与应变关系时, 常用的是孔隙比 e 和压力 p 的变化关系, 其几何图形即压缩曲线。根据其描述坐标系统的不同而有直角坐标的 $e-p$ 曲线和半对数坐标的 $e-\log p$ 曲线, 见图 1-4 在压缩曲线上可以得到土的压缩性参数, 这些参数都是进行地基变形 (沉降) 计算时常用的, 有的甚至是不可缺少的。

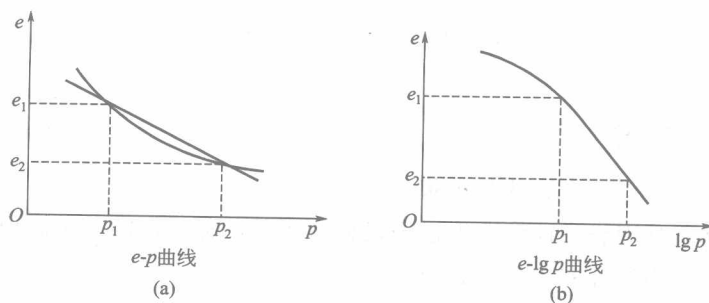


图 1-4 土的压缩曲线

从 $e-p$ 曲线中可看出：当压力变化不大时，孔隙比 e 的变化与压力 p 的变化成正比，即可得到曲线中某一压力范围的割线的斜率，称为土的压缩系数 α (MPa^{-1})，其表达式为：

$$\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \quad (1-11)$$

式中， p_1 、 p_2 分别为固结压力，kPa； e_1 、 e_2 分别为对应于 p_1 、 p_2 时的孔隙比。

工程上常以 $p = 100 \sim 200 \text{ kPa}$ 时的压缩系数 α_{1-2} 作为评价土层压缩性高低的标准：

当 $\alpha_{1-2} < 0.1$ 时，为低压缩性；当 $0.1 \leq \alpha_{1-2} < 0.5$ 时，为中压缩性；当 $\alpha_{1-2} \geq 0.5$ 时，为高压缩性。

$e-\lg p$ 曲线可以形象地反映土的应力历史的影响，其直线斜率称为压缩指数 C_c ，表达式为：

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg p} = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1} \quad (1-12)$$

根据弹性力学的虎克定律原理可求出另一个压缩性指标即压缩模量 E_s (MPa)：

$$E_s = \frac{1 + e_0}{\alpha} \quad (1-13)$$

式中， e_0 为土的天然孔隙比；其他符号意义同前。

压缩模量 E_s 是土体在无侧向膨胀的条件下，一维竖向应力与竖向应变的比值，适用于相应的变形计算方法量（分层总和法）。

变形模量 E_0 是与压缩模量相当的另一个常用的变形计算参数，它是土在单轴受力且无侧限情况下，应力与应变之比，也叫总变形模量。它是在现场用载荷试验方法求出的， E_0 值适用于三维（空间）应力状态的变形计算（三维条件时还有土的侧膨胀系数即泊松比 μ ）。

应用广义虎克定律可以在理论上导得变形模量与压缩模量之间的理论关系为：

$$E_0 = E_s \left(1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \right) = \beta E_s \quad (1-14)$$

$$\text{其中 } \beta = 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}$$

式中, μ 为土的泊松比; E_s 为压缩模量。

由于土体不是理想弹性体, 上述公式显然还是一种近似的关系。但是, 有了这些相互关系式可为工程实用提供方便。

(2) 土的固结与固结特性

① 有效应力原理 在外荷载作用下土中孔隙水排出, 土体因发生体积变化而压密的时间过程称为土的固结。

通常论及土体固结均是针对饱和的二相土 (即孔隙中完全充满水的软土) 而言, 太沙基提出了著名的有效应力原理及其数学表达式:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (1-15)$$

式中, σ 为总应力; σ' 为有效应力; μ 为孔隙水压力。

该式揭示了固结过程中土体孔隙水压力和有效应力分担外荷总应力即彼此相互转换土体固结机理。固结实际上是土中孔隙水压力 μ 不断消散, 有效应力 σ' 不断增长的过程。

对饱和黏性土地基来说, 固结过程往往要经历较长的时间 (几年到几十年, 甚至更长), 沉降才能达到稳定。经验表明, 建筑物由于恒载引起的沉降量, 对低压缩性黏性土可认为在施工期间已完成约 50%~80%, 中等压缩性黏性土为 30%~50%; 高压压缩性黏性土为 10%~30%。

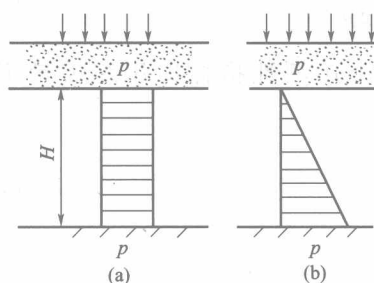


图 1-5 不同的起始孔隙压力分布

② 单向固结微分方程的求解 根据如下假定: 土中水的渗流为稳定流, 符合达西定律公式 (1-1); 土体为线弹性体, 土的压缩服从压缩定律; 土是饱和的, 土的孔隙体积的压缩与土孔隙中水的排出量相等。

其他相应的一维应力条件, 太沙基建立了土体一维 (竖向) 固结微分方程:

$$C_v = \frac{\partial \mu}{\partial z^2} = \frac{\partial \mu}{\partial t} \quad (1-16)$$

$$C_v = \frac{k_v (1+e)}{a \gamma_w} \quad (1-17)$$

式中, C_v 为土的固结系数 (竖向渗流), 主要由室内固结试验确定, cm^2/s ; t 、 z 分别是固结时间和竖向坐标值; γ_w 为孔隙中水的重度, kN/m^3 ; k_v 、 a 、 e 分别是竖向渗透系数、压缩系数和孔隙比。

根据土层合适的初始条件和实际边界条件可求得土中孔隙压力的分布式解。

a. 土层为单面排水，起始孔隙压力为线性分布，如图 1-5 所示。

当起始孔隙压力分布为矩形时 [图 1-5(a)] 求得解为：

$$\mu = \frac{4p}{\pi} \left(\sin \frac{\pi z}{2H} \right) e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \quad (1-18)$$

式中， μ 为孔隙压力； p 为起始孔隙压力； z 为土层深度； H 为土层厚度，亦是孔隙水的最大渗径； e 为自然对数的底， $e=2.7182$ ； T_v 为时间因数。

当起始孔隙压力分布为三角形时 [图 1-5(b)]，求得解为：

$$\mu = \frac{8}{\pi^2} p \sin \left(\frac{\pi z}{2H} \right) e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \quad (1-19)$$

b. 土层为双面排水时，如图 1-6 所示。求得解为：

$$\mu = \frac{2p}{\pi^2} (1+\alpha) \sin \left[\frac{\pi (2H-z)}{2H} \right] e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \quad (1-20)$$

式中， α 为黏性土层顶面与底面的孔隙压力的比值； H 为孔隙水的最大渗径，双面排水时，最大渗径取为土层厚度的一半；其他符号意义同前。

③ 固结度计算 地基土层在某一压力作用下，经历时间 t 所产生的变形量 s_t 与土层的最终变形量 s (严格说应是主固结变形量) 之比，称为土层的固结度 U_t ，即

$$U_t = \frac{s_t}{s} \quad (1-21)$$

基于太沙基一维固结理论，解得最常用的一维条件的固结度表达式为：

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \quad (1-22)$$

式中，时间因数 $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$ 。

式(1-21)也就是通常所说的单向固结问题的固结度计算式。它适用于模拟的工程实际情况相当于饱和压缩土层表面作用面积无穷大的超载或者基础荷载宽度远大于可压缩土层的厚度 H (如 $B > 4H$)，相应的附加应力沿土层深度不变，亦即初始孔压图形是矩形的情况。

从上列公式不难看出，当其他条件已定且相同时，达到某一固结度的时间，只取决于时间因数 T_v 。因此，若有两个性质相同的土层，其渗径分别为 H_1 及 H_2 ，则它们达到同一固结度所需要的时间为 t_1 及 t_2 ，与其渗径之间存在着如下关系：

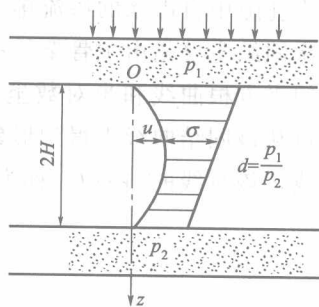


图 1-6 双面排水时

$$\frac{t_1}{H_1^2} = \frac{t_2}{H_2^2} \quad (1-23)$$

应用上式能迅速简便地根据室内试验测定的结果进行实际土层固结度的粗略判断和估算。

④ 主固结与次固结 按照太沙基固结理论，在恒定外加压力下，当孔隙水压力消散完了、固结终了时（ $u=0$ ， $U_t=100\%$ ），变形就应当终止，理论曲线在 $U_t=100\%$ 时应为一条水平线（图 1-7 中的虚线所示）。但实际中，在 $U_t=90\%$ 前后，试验曲线与理论曲线即已产生偏离，而且在 $U_t=100\%$ 之后变形仍在发展（图 1-7 中的 a 点和 b 点之后），试验曲线并未转向水平，表明土的变形并未终止，所以 a 点、 b 点把土的固结区分为质的不同的两部分：在恒定外压力下 $U_t=100\%$ 之后土体仍继续随时间发生体积的变形部分称之为次固结（次压缩），而把在这之前的变形部分称为主固结（如 a 、 b 点以前的变形部分）。一般认为主固结主要是由于土孔隙中自由水的渗流排出、孔隙压力 u 消散所致，当 $u=0$ 时，主固结也终止，而次固结主要是由主骨架的蠕变速度所决定的。从室内试验可得到直角坐标系统的时间平方根曲线和半对数坐标系统的时间对数曲线（图 1-7），土体主、次固结性状可从该固结曲线中得到形象的描述。在时间对数曲线上次固结阶段表现为一条斜直线，该直线的斜率 C_a 称为次固结系数。即：

$$C_a = \frac{\Delta e}{\lg \frac{t_2}{t_1}} \quad (1-24)$$

式中， C_a 为次固结系数，无因次，可在 $d \sim \lg t$ 试验曲线上求得（ d 是试验时的测微表的读数值）； Δe 为次固结阶段土的孔隙比变化量； t_1 为主固结所需时间； t_2 为计算次固结变形所要求的总时间。

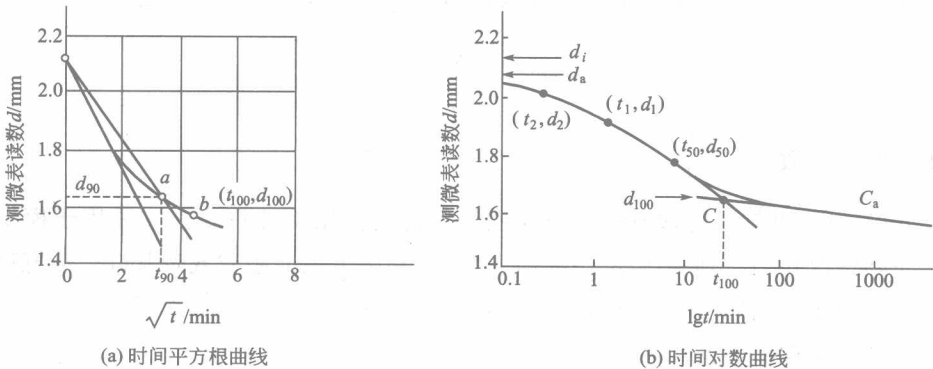


图 1-7 土的固结曲线

次固结系数 C_a 可以根据试验确定，有时也可以按天然含水量 w 估算：

$$C_a = 0.018w \quad (1-25)$$

次固结变形 s_s 可按下式进行计算：

$$s_s = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{1+e_i} C_{ai} \lg \frac{t}{t_{100i}} \quad (1-26)$$

式中， n 为土层层数； t 为需要计算次固结的时间； H_i 为 i 层厚度； e_i 为 i 层天然孔隙比； t_{100i} 为主固结所需时间。

次固结变形对于大多数坚硬或较坚硬的地基土而言，相对于主固结是次要的，可以不考虑。但对于可塑性大的软弱土，以及淤泥质黏性土、淤泥及有机质土，或者对深厚的可压流土层承受较小的压力增量作用时，次固结将在总沉降量中占有很可观的比例。

1.1.4 土的强度特性

土的抗剪强度是指土体抵抗非荷载剪切破坏的极限能力。抗剪强度参数在边坡稳定分析、挡土墙土压力的估算、建筑地基承载力的计算以及稳定性的评价中都是不可缺少的指标。

土体抗剪强度最基本的表达式是莫尔-库仑准则的数学方程：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1-27)$$

式中， τ 为抗剪强度，kPa； c 为黏聚力，kPa； φ 为内摩擦角，(°)； $\tan \varphi$ 为直线的斜率，亦称摩擦系数； σ 为法向应力（可为总应力或有效应力），kPa。

抗剪强度的几何意义可见图 1-8，它是由室内直剪试验获得的。由图可见，强度指标 c 和 φ 只是强度包线（库仑破坏线）在 τ - σ 直角坐标系中的纵轴截距和倾角。

c 、 φ 反映土的抗剪强度变化的规律性，它们是随着具体试验条件变化的。对于洁净的干砂，因其内聚力 $c=0$ ，故式 (1-27) 成为

$$\tau = \sigma \tan \varphi \quad (1-28)$$

软土在最一般的工程条件下也是二相饱和介质。土中存在的孔隙水的多少会对其性质产生多种影响。由于有效应力原理，土的强度指标又可区分为总应力指标和有效应力指标。

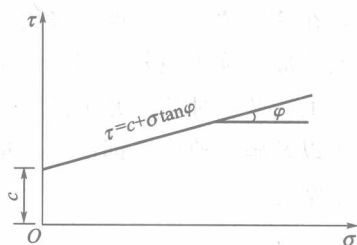


图 1-8 抗剪强度与法向应力关系

试验时并没有测量孔隙水压力的变化，用总应力大小整理表达出来的强度指标称为总应力指标。只考虑总应力大小而不考虑孔隙压力影响的方法称为总应力法。对于总应力法的强度而言，不同的排水控制条件会产生相应不同的强度和指标，它是随试验条件（如排水控制条件）的不同会有不同的结果。一般来说，有 6 种不同的试验方法及其相应的指标。这就是直剪、慢剪和固结快剪及三轴试验中的不固结不排水剪、排水剪和固结不排水剪。

在强度指标量值的选用上, 由于土体排水固结将会不同程度增强土的强度, 如内摩擦角 φ , 一般的正常固结土, 排水剪得到的 φ_{cd} 最大, 固结不排水剪的 φ_{cu} 次之, 不固结不排水剪的 φ_u 值最小, 如图 1-9 所示。内聚力 c 值亦不同, 快剪所得的 c 值较大。

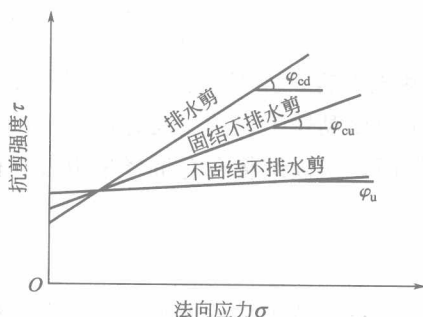


图 1-9 不同试验方法内摩擦角比较

试验时测量土样破坏时的孔隙压力 u , 算出此时的有效应力 $\bar{\sigma}$, 可以用有效应力与抗剪强度的关系表达试验结果, 即可以写成下列表达式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi' \quad (1-29a)$$

$$\tau_f = c' + \bar{\sigma} \tan \varphi' \quad (1-29b)$$

式中, c' 为有效黏力; φ' 为有效内摩擦角。

在实际工程的强度和稳定性计算中, 应根据土质条件和工程的特点来选用恰当的试验方法, 以进行地基或建筑物的稳定和安全的

估计及控制不同的试验条件可得到不同的强度指标。例如, 当考虑土体固结使强度增长的计算或稳定性分析时, 即测定土体在任何固结度时的抗剪强度应使用有效强度指标; 当地基为厚度较大的渗透性低的高塑性饱和软土, 而建筑物的施工速度又较快, 预计土层在施工期间的排水固结程度很小, 这时就应当采用快剪试验的强度指标来校核建筑物的地基强度及稳定性; 若黏土层很薄, 建筑物施工期很长, 预计黏土层在施工期间能够充分排水固结, 这时就可采用慢剪指标; 若预计在建筑物施工期间能够充分排水固结, 但是在竣工后大量活荷载将迅速施工 (如料仓), 或可能有突然施加的活荷载 (如风力) 或地基应力可能发生变化 (如地下水位变化) 等, 在这些情况下, 就应采用固结快剪指标; 对于可能发生快速破坏的正常固结土天然边坡、软土地基或路堤土体等均应用快剪和不排水剪指标进行验算控制。当然, 上述的各种情况并不是具有很准确的概念。例如, 速度快慢、土层厚薄、荷载大小以及施工速度等都没有定量的数值, 都得根据实际情况配以实际经验或地区特点来掌握。

1.2 地基承载力及其确定

1.2.1 破坏类型

建筑地基的破坏, 通常都是由于地基土承载力不足引起的剪切破坏。地基剪切破坏分为整体剪切破坏、局部剪切破坏和冲剪破坏 3 种类型, 如图 1-10 所示。

(1) 整体剪切破坏

① 破坏过程