

高层建筑 施工

主 编 赵志缙
副主编 李继业
刘俊岩

GAOCENGJIANZHU
SHIGONG

- 高等专科学校
- 高等职业教育
- 函授教学用书



同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高层建筑施工/赵志缙主编.-上海:同济大学出版社,1999.7

高等专科学校 高等职业教育 函授用书

ISBN 7-5608-2079-4

I. 高… II. 赵… III. 高层建筑-工程施工 IV. TU974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 25913 号

责任编辑 方 芳

封面设计 陈益平

高层建筑施工

主编 赵志缙

副主编 李继业 刘俊岩

同济大学出版社出版

(上海市四平路 1239 号 邮编:200092)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:480 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月第 1 次印刷

印数:1—5000 定价:26.60 元

ISBN7-5608-2079-4/TU·338

前 言

我国由于实行改革开放政策,经济得到飞速发展,因而近年来我国高层和超高层建设的建设规模日益扩大,有的大城市一年施工的高层建筑达数百幢,不少中、小城市亦开始建造高层建筑。

高层建筑施工的技术要求较高,施工难度较大。在多数高等专科学校的建筑工程类系科和专业中,为帮助学生了解高层建筑的施工技术,开设了“高层建筑施工”课程,有些学校甚至将此作为施工类课程中的重要组成部分进行讲授。但到目前为止仍缺少适合高等专科学校层次使用的“高层建筑施工”教材,为适应当前的教学需要,由同济大学、济南大学、山东水利高等专科学校、山东建筑工程学院等联合编写了这本《高层建筑施工》,供有关学校试用。

近年来,我国高层建筑施工领域的理论和技术发展很快,有些方面已接近或赶上世界先进水平。我们在编写中,在极力反映国际上高层建筑施工先进技术的同时也尽可能介绍我国成熟的技术和创新发展的新技术,并力求结合高等专科教育的特点,使之更适合这一层次学生的学习。由于时间仓促,也限于作者的水平,不足之处在所难免,在此热忱欢迎读者给予批评指正,以便将来不断修订和改进。

本教材的1,2.2.1~2.2.5.2,4.4,4.5由同济大学赵志缙编写;2.1,2.2.5.3~2.2.7,2.3由济南大学刘俊岩编写;3由山东水利高等专科学校李继业编写;4.1~4.3由济南大学率兵和山东建筑工程学院王好温编写。全书最后由赵志缙进行统一修改和加工。

编者

1999年2月

目 录

1. 绪论	(1)
1.1 高层建筑的定义	(1)
1.2 高层建筑的发展	(1)
1.3 高层建筑施工技术的发展	(3)
2. 高层建筑基坑工程施工	(5)
2.1 深基坑工程的地下水控制	(5)
2.1.1 地下水的基本特性	(6)
2.1.2 动水压力和流砂	(10)
2.1.3 降低地下水位的方法	(11)
2.1.4 截水	(19)
2.1.5 回灌	(20)
2.2 深基坑工程的支护结构	(21)
2.2.1 支护结构的作用与构成	(21)
2.2.2 支护结构的选型	(22)
2.2.3 荷载与抗力计算	(29)
2.2.4 水泥土墙式支护结构	(32)
2.2.5 排桩与板墙式支护结构	(40)
2.2.6 土钉墙和喷锚的设计与施工	(101)
2.2.7 支护结构监测	(110)
2.3 深基坑工程土方开挖	(115)
2.3.1 土方开挖方案	(116)
2.3.2 土方开挖注意事项	(119)
2.3.3 安全技术	(122)
[实例] 上海金茂大厦深基坑支护技术	(124)
3. 大体积混凝土结构施工	(137)
3.1 大体积混凝土结构的特点	(137)
3.2 结构物裂缝的基本概念	(138)
3.2.1 裂缝的种类及产生原因	(138)
3.2.2 控制裂缝开展的基本方法	(141)
3.3 温度应力的计算	(142)
3.3.1 结构中的温度场	(142)
3.3.2 温度应力的计算	(144)
3.4 控制温度裂缝的技术措施	(158)
3.4.1 水泥品种选择和用量控制	(158)

3.4.2	掺加外加料	(159)
3.4.3	骨料的选择	(161)
3.4.4	控制混凝土出机温度和浇筑温度	(162)
3.4.5	加强养护,延缓混凝土降温速率	(163)
3.4.6	提高混凝土的极限拉伸值	(165)
3.4.7	改善边界约束和构造设计	(166)
3.4.8	加强施工监测工作	(168)
3.5	大体积混凝土结构施工	(169)
3.5.1	钢筋工程	(169)
3.5.2	模板工程	(170)
3.5.3	混凝土工程	(172)
3.6	大体积混凝土温度裂缝控制计算实例	(174)
3.6.1	深坑底板温度应力计算	(174)
3.6.2	深坑墙板温度应力计算	(180)
4.	高层建筑结构施工	(183)
4.1	高层建筑脚手架工程	(183)
4.1.1	悬挑式脚手架	(183)
4.1.2	附着升降式脚手架	(192)
4.1.3	悬吊式脚手架	(202)
4.2	高层建筑施工用起重运输机械	(204)
4.2.1	塔式起重机	(204)
4.2.2	混凝土泵	(209)
4.2.3	施工电梯	(211)
4.2.4	起重运输机械的选择	(212)
4.3	高层现浇混凝土结构模板工程	(214)
4.3.1	高层建筑滑升模板施工	(214)
4.3.2	高层建筑爬升模板施工	(221)
4.3.3	高层建筑大模板施工	(234)
4.3.4	高层建筑楼盖结构施工用模板	(242)
4.4	高层建筑混凝土工程施工	(256)
4.4.1	粗钢筋连接技术	(256)
4.4.2	混凝土泵送施工技术	(263)
4.5	钢结构高层建筑施工	(271)
4.5.1	钢结构材料与结构构件	(271)
4.5.2	高层钢结构安装	(274)
	参考资料	(291)

1. 绪 论

为解决城市用地有限和人口密集的矛盾,出现了高层建筑;国际交往的日益频繁和世界各国旅游事业的发展,更促进了高层建筑的蓬勃发展。同时,随着建筑科学技术的不断进步,在建筑领域内也出现了不少新结构、新材料和新工艺,这些又为现代高层建筑的发展提供了条件。

我国的高层建筑正在迅猛发展,仅上海市至 1997 年底高层建筑已达 2437 幢,其中 30 层以上者为 105 幢。还有一大批高层和超高层建筑正在建设。随着经济的高速发展,目前我国的高层建筑建设,已从北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、武汉等大城市发展到其他百余座大中城市,有些经济发达的小城市亦建有高层建筑。

1.1 高层建筑的定义

多少层或多么高的建筑物算是高层建筑?不同的国家和地区有不同的理解。而且从不同的角度,如结构、消防和运输来看待该问题,亦会得出不同的结论。1972 年召开的国际高层建筑会议确定为:

- 第一类高层建筑 9~16 层(最高到 50m);
- 第二类高层建筑 17~25 层(最高到 75m);
- 第三类高层建筑 26~40 层(最高到 100m);
- 超高层建筑 40 层以上(高度 100m 以上)。

我国建设部《民用建筑设计通则》(JGJ37-87)中规定,高层建筑是指 10 层以上的住宅及总高度超过 24m 的公共建筑及综合建筑。

1.2 高层建筑的发展

高层建筑在古代就有,我国古代建造的不少高塔就属于高层建筑。如公元 523 年(1400 多年前)建于河南登封县的嵩岳寺塔,10 层、高 40m,为砖砌单筒体结构。公元 704 年改建的西安大雁塔,7 层、高 64m。公元 1055 年建于河北定县的料敌塔,11 层、高达 82m,砖砌双筒体结构,更为罕见。此外,还有建于 1056 年,9 层、高 67m 的山西应县木塔等。这些高塔皆为砖砌或木制的筒体结构,外形为封闭的八边形或十二边形。这种形状有利于抗风和抗地震,也有较大的刚度,在结构体系上是很合理的。

同时,我国古代也出现了高层框架结构。如公元 984 年建于河北蓟县的独乐寺观音阁,即为高 22.5m 的木框架结构。其他如高 40m 的河北承德普宁寺的大乘阁等亦为木框架结构。

我国这些现存的古代高层建筑,经受了几百年、甚至上千年的风雨侵蚀和地震等的考验,至今基本完好,这充分显示了我国劳动人民的高度智慧和才能,也表明我国古代对高层

建筑就有较高的设计和施工水平。

在国外古代亦建有高层建筑,古罗马帝国的一些城市就曾用砖石承重结构建造了 10 层左右的建筑。公元 1000 年前后,意大利建造过一些高层建筑,例如,公元 1100~1109 年,意大利的 Bologna 城就建造了 41 座砖石承重的塔楼,其中有的竟高达 98m。19 世纪前后,西欧一些城市还用砖石承重结构建造了高达 10 层左右的高层建筑。

古代的高层建筑,由于受当时技术经济条件的限制,不论是承重的砖墙或筒体结构,壁都很厚,使用空间小,建筑物越高,这个问题就越突出。如 1891 年在美国芝加哥建造的 Monadnock 大楼,为 16 层的砖结构,其底部的砖墙厚度竟达 1.8m。这种小空间的高层建筑不能适应人们生活和生产活动的需要。因而,采用高强和轻质材料,发展各种大空间的抗风、抗震结构体系,就成为高层建筑结构发展的必然趋势。

近代高层建筑是从 19 世纪以后逐渐发展起来的,这与采用钢铁结构作为承重结构有关。1801 年英国曼彻斯特棉纺厂,高 7 层,首先采用铸铁框架作为建筑物内部的承重骨架。1843 年美国长岛的黑港灯塔,亦采用了熟铁框架结构。这就为将钢铁材料用于承重结构开辟了一条途径。此后一段时间内所建造的 10 层左右的高层建筑,大多采用内部铁框架与外承重砖墙相结合的结构形式。1883 年美国芝加哥的 11 层保险公司大楼,首先采用由铸铁柱和钢梁组成的金属框架来承受全部荷重,外墙只是自承重,这已是近代高层建筑结构的萌芽。

1889 年美国芝加哥的一幢 9 层大楼,首先采用钢框架结构。1903 年法国巴黎的 Franklin 公寓采用了钢筋混凝土结构。与此同时,美国辛辛纳提城一幢 16 层的大楼也采用了钢筋混凝土框架结构。开始了将钢、钢筋混凝土框架用于高层建筑的时代。此后,从 19 世纪 80 年代末至 20 世纪初,一些国家又兴建了一批高层建筑,使高层建筑出现了新的飞跃。不但建筑物的高度一跃而为 20~50 层,而且在结构中采用了剪力墙和钢支撑,建筑物的使用空间显著扩大了。

19 世纪末至 20 世纪初是近代高层建筑发展的初始阶段,这一时期的高层建筑结构虽然有了很大的进步,但因受到建筑材料和设计理论等限制,一般结构的自重较大,而且结构形式也较单调,多为框架结构。

近代高层建筑的迅速发展,是从 20 世纪 50 年代开始的。由于轻质高强材料的发展,新的设计理论和电子计算机的应用,以及新的施工机械和施工技术的涌现,都为大规模地、较经济地修建高层建筑提供了可能。同时,由于城市人口密度的猛增,地价昂贵,迫使建筑物向高空发展也成了客观上的需要,因而不少国家都大规模地建造高层建筑,到目前为止,在不少国家,高层建筑几乎占了整个城市建筑面积的 30%~40%。

目前,美国的高层建筑数量最多,160m 以上的就有 100 多幢。目前世界上最高的建筑是 450m 高的马来西亚吉隆坡城市中心大厦,第二高是 109 层高达 445m 的西尔斯大厦(美国芝加哥)。此外,1972 年建于纽约的 110 层、高 412m 的世界贸易中心双塔大厦;1931 年建于纽约的 102 层、高 381m 的帝国大厦;1995 年建于深圳的 68 层、高 384m 的地王商业大厦、1998 年建于上海的高 420m 的金茂大厦等也都是闻名于世的高层建筑。其他如英国、法国、日本、加拿大、澳大利亚、新加坡、俄罗斯、波兰、南非等国家以及我国香港特区等也修建了许多高层建筑。

我国的高层建筑始于 20 世纪初。1906 年建造了上海和平饭店南楼,1922 年建造了天

津海河饭店(12层),1929年建造了上海和平饭店北楼(11层)和锦江饭店北楼(14层),1934年建造了上海国际饭店(24层)和上海大厦(20层)以及广州爱群大厦(15层),至1937年抗日战争开始,我国约建有10层以上的高层建筑35幢,主要集中在上海等沿海大城市。高82.5m的国际饭店当时是远东最高的建筑。

50年代,我国在北京、广州、沈阳、兰州等地曾建造了一批高层建筑。60年代,在广州建造27层、高87.6m的广州宾馆。70年代,在北京、上海、天津、广州、南京、武汉、青岛、长沙等地兴建了一定数量的高层建筑,其中广州于1977年建成的33层、高115m的白云宾馆,当时除港澳地区外是国内最高的建筑。进入80年代,我国的高层建筑蓬勃发展,各大城市和一批中等城市都兴建了大量高层建筑。90年代是我国高层建筑发展最快的时期。在大、中城市建造了大量高层建筑,其中包括一些世界著名的高层建筑。

1.3 高层建筑施工技术的发展

从70年代中期以来,尤其是近年来通过大量的工程实践,我国的高层建筑施工技术得到很大的发展。

在基础工程方面,高层建筑多采用桩基础、筏式基础、箱形基础、或桩基与箱形基础的复合基础,涉及到深基坑支护、桩基施工、大体积混凝土浇筑、深层降水等施工问题。近年来,由于深基坑的增多,支护技术发展很快,多采用钢板桩、混凝土灌注桩、地下连续墙、深层搅拌水泥土桩、土钉支护等;施工工艺有很大改进,支撑方式有传统的内部钢管(或型钢)支撑,亦有在坑外用土锚拉固;内部支撑形式也有多种,有十字交叉支撑,有环状(拱状)支撑和混凝土支撑,亦有采用“中心岛”式开挖的斜撑;土锚的钻孔、灌浆、预应力张拉工艺亦有很大提高。

桩基础方面,混凝土方桩、预应力混凝土管桩、钢管桩等预制打入桩皆有应用,有的桩长已超过70m。在减少打桩对周围有害影响方面亦总结了一些经验,采用了一些有效措施。近年来混凝土灌注桩有很大发展,在钻孔机械、桩端压力注浆、成孔扩孔、动力试验、扩大桩径等方面都有很大提高,大直径钻孔灌注桩应用愈来愈多。

大体积混凝土裂缝控制的计算理论日益完善,为减少或避免产生温度裂缝,各地都采用了一些有效措施。由于商品混凝土和泵送技术的推广,万余立方米以上的大体积混凝土浇筑亦无困难,在测温技术和信息化施工方面亦积累了不少经验。在深基坑施工降低地下水位方面,已能利用轻型井点、喷射井点、真空深井泵和电渗井点技术进行深层降水,而且在预防因降水而引起附近地面沉降方面亦有一些有效措施。

在结构工程方面,已形成大模板、爬升模板和滑升模板的成套工艺,对钢结构超高层建筑的施工技术亦有了长足的进步。大模板工艺在剪力墙结构和筒体结构中已广泛应用,已形成“全现浇”、“内浇外挂”、“内浇外砌”成套工艺,且已向大开间建筑方向发展。楼板除各种预制、现浇板外,还应用了各种配筋的薄板叠合楼板。爬升模板首先用于上海,工艺已成熟,不但用于浇筑外墙,亦可内、外墙皆用爬升模板浇筑,在提升设备方面已有手动、液压和电动提升设备,有带爬架的,亦有无爬架的,尤其与升降脚手结合应用,优点更为显著。滑模工艺亦有很大提高,可施工高耸结构、剪力墙或筒体结构的高层建筑,亦可施工框架结构和一些特种结构(如沉井等),在支承杆的稳定以及施工期间墙体的强度和稳定性计算方面亦

有很大改进。

大批高层钢结构的建造,亦大大提高了我国钢结构的施工技术,在钢构件加工、钢结构安装、厚钢板焊接、高强螺栓连接,以及防腐、防火涂装方面亦大有改进。钢管混凝土和型钢混凝土结构开始应用。

此外,在粗钢筋的机械连接、商品混凝土生产、泵送混凝土施工、大跨和特种结构安装、防水技术和玻璃幕墙等高级装饰技术等方面都有长足的进步。

随着我国高层和超高层建筑的进一步发展,传统技术会进一步提高,一些新理论、新技术、新工艺也在不断涌现,将使我国的高层建筑技术登上一个新的高峰。

2. 高层建筑基坑工程施工

2.1 深基坑工程的地下水控制

高层建筑由于上部荷载大,大多采用补偿性基础,因此一般都设一层或多层地下室,这样有利于建筑物的稳定,并可充分利用地下空间。但同时由于基础埋深较大,基坑开挖较深,也给施工增大了难度。尤其是在地下水位较高的软土地区开挖深基坑时,土的含水层被切断,地下水会不断地渗入基坑,容易造成流砂、边坡失稳和使地基承载力下降,为此,在进行深基坑施工时必须做好地下水控制工作。

地下水的控制方法主要有降水、截水和回灌等几种形式,这几种形式可以单独使用,也可以组合使用。

降水的方法有集水明排和井点降水两类。

集水明排属重力降水,它是在开挖基坑时沿坑底周围开挖排水沟,并每隔一定距离设置集水井,使基坑内挖土时渗出的水经排水沟流向集水井,然后用水泵将水排出坑外。这种方法的缺点是,地下水沿边坡面或坡脚或坑底渗出,使坑底软化或泥泞;当基坑开挖深度较大时,如果土的组成较细,在地下水动水压力的作用下,还可能引起流砂、管涌、坑底隆起和边坡失稳。因此,集水明排这种地下水控制方法虽然设备简单、施工方便,但在深基坑工程中单独使用有一定的条件。

井点降水是应用最广泛的降水方法,是高地下水位地区基坑工程施工的重要措施之一。井点降水主要是将带有滤管的降水工具沉设到基坑四周的土中,利用各种抽水工具,在不扰动土的结构的情况下,将地下水抽出,使地下水位降低到坑底以下,保证基坑开挖能在较干燥的施工环境中进行。井点降水的作用是:

- (1) 通过降低地下水位消除基坑坡面及坑底的渗水,改善施工作业条件;
- (2) 增加边坡稳定性,防止坡面和基底的土粒流失,以避免流砂现象;
- (3) 降低承压水位,防止坑底隆起与破坏;
- (4) 改善基坑的砂土特性,加速土的固结。

井点降水法主要有轻型井点法、喷射井点法、电渗井点法、管井井点和深井井点法等。

在城市中心区建筑密集的地区开挖深基坑,降水时还要考虑对周围环境的影响。井点降水形成的盆式降水曲线,在使基坑内地下水位下降的同时,坑外一定区域内地下水位也有所下降,从而使基坑周围的土体固结下沉,如沉降较大则影响地上建筑物和地下管线等的安全与使用。

当因降水的原因可能会危及基坑及周边环境安全时,宜采用截水方法或回灌方法。

深基坑工程的截水方法经常采用的是截水帷幕,它是在基坑开挖前沿基坑四周设置隔水围护壁(亦称隔水帷幕),帷幕的底部宜深入坑底一定深度或到不透水层,由于围护壁是止水的,这样基坑内外的地下水就不能相互渗流。截水后,基坑内的水量或水压较大时,可以采用基坑内井点降水,这种方法既有效地保护了周边环境,同时又使坑内一定深度内的土层

疏干并排水固结,改善了施工作业条件,并有利于围护壁及基底的稳定。

回灌法就是在降水井点和要保护的原有建筑物、地下管线之间打一排井点,在降水的同时,通过回灌井点向土层内灌入一定数量的水,从而阻止或减少回灌井点外侧建(构)筑物下的地下水流失,使原地下水位基本保持不变,这样就不会因降水而使土层产生固结下沉,消除或减少了周围的地面沉降,保证原有建筑物、地下管线的安全与使用。

地下水控制的设计是基坑工程设计的重要组成部分之一。其设计应满足支护结构设计要求,控制方法的选用要根据场地及周边水文地质条件、环境条件并结合基坑支护和基础施工方案综合分析后确定。地下水控制方法适用条件参见表 2-1。

表 2-1 地下水控制方法适用条件

控制方法		土质类别	渗透系数(m/d)	降水深度(m)	水文地质特征
集水明排			< 20.0	< 5	
井 点 降 水	轻型井点	填土、砂土、粉土、粘性土	0.1 ~ 20.0	单级 < 6 多级 < 20	上层滞水或水量不大的潜水
	喷射井点		0.1 ~ 20.0	< 20	
	电渗井点	粘性土、淤泥	< 0.1	根据选用的井点确定	
	管井井点	粉土、砂土、碎石土、可溶岩、破碎带	1.0 ~ 200.0	< 5	含水丰富的潜水、承压水、裂隙水
		砂土、碎石土	10 ~ 250.0	> 10	
深井井点	粉砂、粉土、富含薄层粉砂的粉质粘土、粘土、淤泥质粘土(真空深井适用)	0.001 ~ 0.5	8 ~ 18	上层滞水、潜水承压水	
截 水		粘性土、粉土、砂土、碎石土、岩溶岩	不限	不限	
回 灌		填土、粉土、砂土、碎石土	0.1 ~ 200	不限	

2.1.1 地下水的基本特性

2.1.1.1 水在土中渗流的基本规律

为了弄清水在土中渗流的基本规律,首先看一下最简单的一维渗流情况(图 2-1)。只要土样的 A-A 与 B-B 面间存在并保持水头差 ΔH ,水就会不断地从 A-A 面流向 B-B 面,形成稳定流。实验表明,单位时间内流过土样的水量 $Q(\text{m}^3/\text{d}$ 或 $\text{cm}^3/\text{s})$ 与水头差 $\Delta H(\text{m}$ 或 $\text{cm})$ 成正比,与土样的横截面面积 $A(\text{m}^2$ 或 $\text{cm}^2)$ 成正比,而与渗径长度 $L(\text{m}$ 或 $\text{cm})$ 成反比,亦即

$$Q \propto \frac{\Delta H}{L} A$$

或
$$Q = k \frac{\Delta H}{L} A \tag{2-1}$$

式中, k 为比例系数,随土而异,反映土的透水性大小,称为土的渗透系数,单位为 m/d 或 cm/s 。

单位时间内流过单位横截面积的水量,称为渗流速度 $v(\text{m/d}$ 或 $\text{cm/s})$:

$$v = \frac{Q}{A} = k \frac{\Delta H}{L}$$

或
$$v = ki \quad (2-2)$$

式中, $i = \frac{\Delta H}{L}$, 代表单位长度渗径所消耗的水头差, 亦称水力梯度。

从式(2-2)可以看出, 水在土中的渗流速度 v 取决于两方面因素: 一是土的透水性(反映为 k), 二是水力条件(反映为 i), 这就是水在土中的渗流基本规律, 亦即达西定律。

理解达西定律时还要注意两个问题: (1) 渗流速度并不是水在土中渗流的真正速度, 因为土中孔隙是弯弯曲曲的, 实际渗径长度并不等于 L ; 横截面积 A 中不全是孔隙, 实际过水面积也不等于 A ; 因此实际平均流速小于渗流速度 v 。但工程实践中关心的是流经整个土体的流量, 所以用表观的流速 v , 同时按表观的横截面面积 A 、渗径长度 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的土中, 而孔隙太大时(如卵石、砾石), 流速太大, 会有紊流现象, 渗流速度 v 不再与水力梯度 i 的一次方成正比。另一方面, 对塑性指标 I_p 特别大的粘土, 由于结合水膜较厚, 水力梯度太小时克服不了阻力, 水渗流不过去, 只有当水力梯度 i 超过某一初始的水力梯度 i' 时才能渗流。因此, 达西定律应用于高塑性致密粘土时改写成:

$$v = k(i - i') \quad (2-3)$$

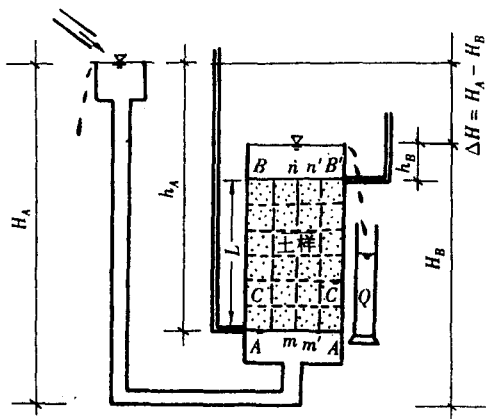


图 2-1 一维渗流实验示意图

2.1.1.2 土的渗透系数

水在土中的流动称为渗流。水质点运动的轨迹称为“流线”。水在流动时如果流线互不相交, 这种流动称为“层流”; 如果水在流动时流线相交, 水中发生局部旋涡, 这种流动称为“紊流”。水在土中的渗流一般多属于“层流”, 适用于达西定律。从达西定律中($v = ki$)可以看出渗透系数 k 的物理意义, 即土的渗透系数 k 是水力梯度 i 等于 1 时的渗流速度。渗透系数 k 反映土的透水性大小, 是计算水井涌水量的重要参数之一, 常用量纲为 m/d 或 cm/s 。渗透系数 k 一般通过室内渗透实验或现场抽水试验测定, 在地基土壤勘探时应提供各土层的 k 值。

影响土渗透系数的主要因素有土的粒度组成、密实度、饱和度、土的结构和构造等。一般土粒愈粗、大小愈均匀、形状愈圆滑, 渗透系数值也就愈大; 土愈密实, 渗透系数值愈小; 饱和度愈高, 渗透系数值愈大; 细粒土在天然状态下具有复杂结构, 一旦结构被扰动, 原有的过水通道将被改变, 因而渗透系数值也就不同; 土的构造因素对渗透系数值的影响也很大, 如在粘性土中有很薄的砂土夹层的层理构造, 会使土在水平方向的渗透系数值超过竖直方向渗透系数值几倍甚至几十倍, 因此, 在室内测定渗透系数时, 土样的代表性很重要。另外, 一个测点的渗透系数, 不一定能代表整个土层的透水性, 有条件时, 应做现场抽水试验来测定 k 值较为可靠。

2.1.1.3 流网

土体中的稳定渗流可用流网表示, 流网由一组流线和一组等势线组成。

以图 2-1 所示的一维渗流为例。如果在 $A-A$ 面上放置一些颜料, 就会出现若干条反映

水流方向的流线,如图中 $\overline{mn}$ 和 $\overline{m'n'}$,两条流线之间的空间称为流槽。等势线是总水头相等的各点的连线,如 $\overline{AA}$, $\overline{BB}$, $\overline{CC}$ 都是等势线。由等势线与流线分格出的网,就称为流网。任何流网都必须满足两个基本条件,一是流线与等势线应成正交,这是由流线和等势线的定义所决定的;二是流网中,由流线和等势线所包围的各个流区的 $\frac{b_i}{l_i}$ 值相等(b_i 为*i*流区的流线平均距离, l_i 为*i*流区等势线平均距离),这是为了计算方便,有意使各个流槽的流量 ΔQ_i 相等,使各条等势线之间的水头差 ΔH_i 相等。

绘制流网的目的是可直观地考察水在土中的渗流途径,更重要的是可以计算渗流量以及确定土体中各点的水头和水力梯度。尤其是在实际工程中多遇到二维或三维渗流情况,这时绘制流网就很有用。

下面以图 2-2 所示的基坑渗流为例,介绍用图试法绘制流网的步骤。该例基坑中段可看作是二维稳定渗流问题。

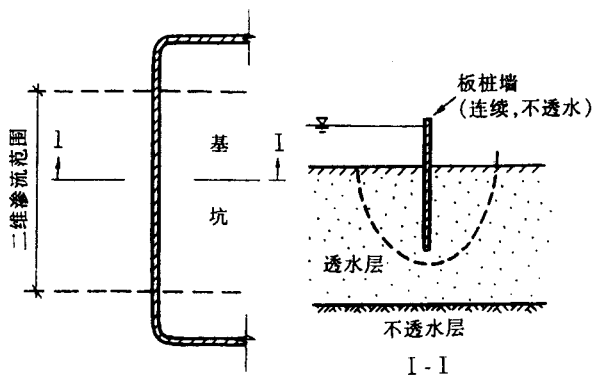


图 2-2 基坑渗流

流网绘图步骤如下:

- (1) 按一定比例绘出结构物和土层的剖面图(图 2-3);

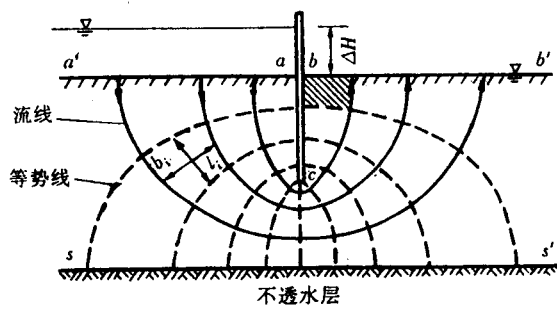


图 2-3 流网绘制

- (2) 判定边界条件,如 $a'a$ 和 bb' 为等势面(透水面); acb 和 ss' 为流线(不透水面);

- (3) 先试绘若干条流线,流线应接近相互平行、不交叉,而且是缓和曲线(因为水总是找最短的途径走,改变方向总是沿缓和曲线);流线应与进水面、出水面(等势线)成正交,并与

不透水面(流线)接近平行、不交叉。图 2-3 所示的实曲线为流线;

(4) 加上若干条等势线,等势线必须与流线正交,而且每个流区的形状必须接近“方块”(亦即 $\frac{b_i}{l_i} = 1$)。图 2-3 所示的虚曲线为等势线;

(5) 反复修改、调整所有流线和等势线,直到满足上述条件为止。

根据流网,可以计算渗流量 Q 。

设流槽数为 N_f ,各个流槽的流量为 ΔQ ,则沿基坑边长每延米的渗流量 $Q = N_f \Delta Q$;设水头落差数为 N_D ,则各条等势线之间的水头差 $\Delta H_i = \frac{\Delta H}{N_D}$;因此根据达西定律:

$$\Delta Q = k \frac{\Delta H_i}{l_i} b_i \times 1$$

因为各个流区的 $\frac{b_i}{l_i}$ 值相等且 $\frac{b_i}{l_i} = 1$,所以

$$\Delta Q = k \Delta H_i = k \frac{\Delta H}{N_D} \quad (2-4)$$

$$Q = N_f \Delta Q = N_f k \frac{\Delta H}{N_D} = k \left(\frac{N_f}{N_D} \right) \Delta H \quad (2-5)$$

例 1 某基坑如图 2-2 所示,透水层土质为粉土, $k = 0.3\text{m/d}$,基坑内外总水头差 $\Delta H = 3\text{m}$,基坑绘制的流网如图 2-3,求沿基坑边长每延米的渗流量。

解 根据流网可知,流槽数 $N_f = 4$,水头落差数 $N_D = 10$,由式(2-4),各个流槽的流量 ΔQ 为

$$\Delta Q = k \frac{\Delta H}{N_D} = 0.3 \times \frac{3}{10} = 0.09(\text{m}^3/\text{d})$$

基坑边长每延米的渗流量 Q ,由公式(2-5):

$$Q = N_f \Delta Q = 4 \times 0.09 = 0.36(\text{m}^3/\text{d})$$

2.1.1.4 潜水与层间水

土中水除了有一部分是受电分子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,能够在重力和表面张力作用下在土中流动。地下水位以下土体中的自由水称为地下水,它连续布满土中的所有孔隙,对土粒产生浮力作用。如果地下水位不是水平的,地下水就会从水头高处流向水头低处,产生渗流现象。

地下水分为潜水和层间水两种。潜水即从地表算起至第一层不透水层以上含水层中所含的水,这种水无压力,属于重力水。层间水即夹于两不透水层之间含水层中所含的水。如果水未充满此含水层,水没有压力,称无压层间水;如果水充满此含水层,水则带有压力,则称承压层间水(图 2-4)。

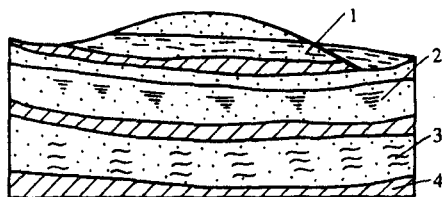


图 2-4 地下水

1—潜水; 2—无压层间水;
3—承压层间水; 4—不透水层

2.1.2 动水压力和流砂

2.1.2.1 动水压力

水在土的孔隙内流动时受到土颗粒的阻力,从作用力与反作用力大小相等、方向相反的原理可知,水流过土体时必定有压力作用于土颗粒上。单位体积土内土颗粒骨架所受到的压力总和,称为动水压力 G_D 。

从水的流动方向取一柱状土体 A_1A_2 做为脱离体(图 2-5),其横截面面积为 F ; Z_1, Z_2 为 A_1, A_2 在基准面以上的高程。

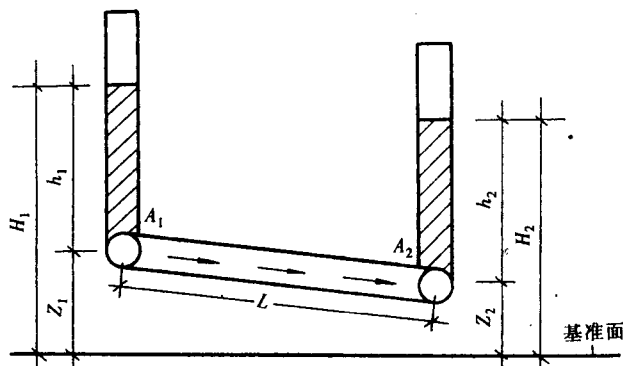


图 2-5 动水压力

由于 $H_1 > H_2$, 存在压力差, 水从 A_1 流向 A_2 。作用于脱离体 A_1A_2 上的力有:

- (1) A_1 处的总水压力, 其值为 $\gamma_w h_1 F$, 其方向与水流方向一致;
- (2) A_2 处的总水压力, 其值为 $\gamma_w h_2 F$, 其方向与水流方向相反;
- (3) 水柱重量在水流方向的分力, 其值为 $n\gamma_w L F \cos\alpha$, n 为土的孔隙率;
- (4) 土颗粒骨架重力在水流方向的分力, 其值为 $(1-n)\gamma_w L F \cos\alpha$;
- (5) 土颗粒骨架对水流的阻力, 其值为 LFT , T 为单位阻力。

由静力平衡条件得:

$$\gamma_w h_1 F - \gamma_w h_2 F + n\gamma_w L F \cos\alpha + (1-n)\gamma_w L F \cos\alpha - LFT = 0$$

由图 2-5 可知:

$$\cos\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{L}$$

代入上式后整理得:

$$T = \gamma_w \frac{H_1 - H_2}{L}$$

式中, $\frac{H_1 - H_2}{L}$ 为水头差与渗流路径长度之比, 即为水力梯度, 以 i 表示。那么, 上式可写成:

$$T = \gamma_w i$$

由作用力等于反作用力, 但方向相反的原理, 可知水在土中渗流时, 动水压力 G_D 为

$$G_D = -T = -\gamma_w i \quad (2-6)$$

从上式可知动水压力 G_D 与水力梯度成正比,即水位差愈大,动力压力 G_D 愈大;而渗流路径长度 L 愈长,则动水压力 G_D 愈小。动水压力的作用方向与水流方向相同,其量纲为 kN/m^3 。

2.1.2.2 产生流砂的条件及流砂现象

水在土中渗流,当水流在水位差作用下对土颗粒产生向上的压力时,动水压力不但使土颗粒受到水的浮力,而且还使土颗粒受到向上的压力,当动水压力等于或大于土的浸水容重 γ'_w 时,即

$$G_D \geq \gamma'_w \quad (2-7)$$

则土颗粒失去自重处于悬浮状态,土的抗剪强度等于零,土颗粒随着渗流的水一起流动,这种现象称为“流砂”。

流砂多发生在颗粒级配均匀而细的粉、细砂等砂性土中,这类土质具有相当高的渗透性。在粘土和粉质粘土中,由于不会发生渗流或渗流量很小,一般不会发生流砂现象。同样,在砾石中,由于它的高透水性而允许大量的抽汲,因而自然地形成较长的渗流流径,所以也不易发生流砂现象。

轻微的流砂现象会使一小部分细砂随着地下水一起穿过挡墙缝隙而流入基坑,增加基坑的泥泞程度;中等程度的流砂现象,在基坑底部靠近挡墙处会发现有一堆细砂缓缓涌起,形成许多小小的涌水孔,涌出的水夹带着一些细砂颗粒在慢慢地流动;严重的流砂现象涌砂速度很快,有时会像开水初沸时的翻泡,此时基坑底部成为流动状态,工人无法立足,作业条件恶化,其发展结果是基坑坍塌、基础发生滑移或不均匀下沉或悬浮,还会危及附近已有建(构)筑物的安全。因此在粉、细砂土中开挖基坑,必须采取各种有效措施以防止流砂现象的发生。

2.1.2.3 防止流砂现象的措施

目前防止流砂现象的措施主要有两类:降水和防水帷幕。

1. 降水

在基坑外将地下水位降至可能产生流砂的地层以下,然后再开挖。不同形式降水方法的选择,视工程性质、开挖深度、土质特性、经济等因素而定,浅基坑以轻型井点最为经济,深基坑则常用喷射井点或深井井点。

2. 防水帷幕

防水帷幕的作用主要是阻止或限制地下水渗流到基坑中去。此类方法有在工程四周打设封闭的钢板桩、沿基坑周边构筑水泥土墙或化学灌浆帷幕、地下连续墙等。也可以用冻结基坑周围土的方法来防止流砂,但此法造价昂贵,一般工程中不采用。

2.1.3 降低地下水位的方法

降水的方法主要有集水明排和井点降水两类。井点降水的方法有轻型井点、喷射井点、电渗井点、管井井点和深井井点。降水方法和设备的选择,应根据场地及周边水文地质条件、环境条件、结合基坑支护和基础施工方案并考虑技术经济指标综合分析后确定。各种降水方法的适应条件参见表 2-1。此处只介绍深基坑工程常用的喷射井点和深井井点。

2.1.3.1 喷射井点

一层轻型井点的降水深度不超过 6m,如果超过此限,就需采用多级轻型井点降水,这会

使基坑挖土量增大、延长工期和增加设备用量。为此,当降水深度大时,可考虑采用喷射井点降水。这种井点降水大、效果好,其一层井点可将地下水位降低 $8 \sim 20\text{m}$,适用于土层渗透系数为 $0.1 \sim 20\text{m/d}$ 的土层。

1. 工作原理

喷射井点有喷水井点和喷气井点之分,其工作原理相同,只是工作流体不同。前者以压力水作为工作流体,后者以压缩空气作为工作流体,目前多用前者。其主要设备由喷射井管、高压水泵(或空气压缩机)和管路系统组成。

喷射井点的工作原理如图 2-6、图 2-7 所示。喷射井管分内管和外管两部分,内管下端装有喷射扬水器,并与滤管相接。喷射扬水器由喷嘴、混合室、扩散室等组成,是喷射井点的主要工作部件。当喷射井点工作时,由地面高压水泵把压力为 $0.7 \sim 0.8\text{MPa}$ 的工作水经过总管分别压入井点管中,使水经过内外管之间的环行空间直达底端的喷射扬水器,在此处高压工作水由特制内管的两侧进水孔进入喷嘴喷出,在喷嘴处由于断面突然收缩变小,使工作水流具有极高的流速($30 \sim 60\text{m/s}$),在喷嘴附近造成负压(形成真空),在真空吸力作用下,地下水经过滤管被吸入混合室,与混合室里的工作水混合,然后进入扩散室中,由于扩散室的截面顺着水流方向逐渐扩大,水流速度相应减小,而水流压力相对增大,因而把地下水连同

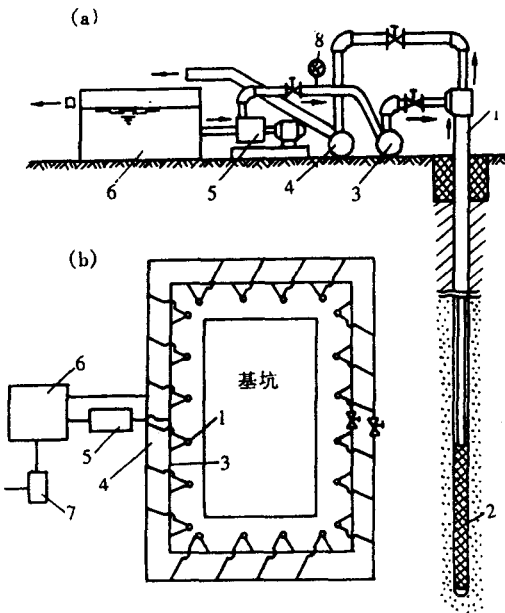


图 2-6 喷射井点布置图

(a) 喷射井点设备简图; (b) 喷射井点平面布置图

- 1—喷射井管; 2—滤管; 3—供水总管;
- 4—排水总管; 5—高压离心水泵; 6—水池;
- 7—排水泵; 8—压力表

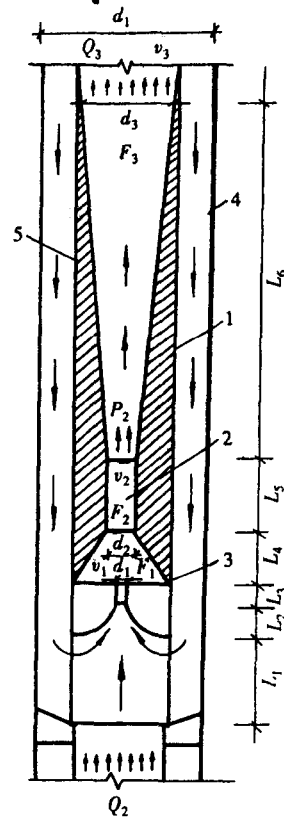


图 2-7 喷射井点扬水器构造

- 1—扩散室; 2—混合室; 3—喷嘴;
- 4—喷射井点外管; 5—喷射井点内管