



岩土工程丛书

SERIES BOOK

—13—

吴林高 朱雁飞 等著
娄荣祥 王建秀

Comprehensive Treatment of Damages Caused by
Confined Water in Deep Excavation Engineering

深基坑工程 承压水危害综合治理技术



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Comprehensive Treatment of Damages Caused by
Confined Water in Deep Excavation Engineering

深基坑工程承压水危害 综合治理技术

吴林高 朱雁飞 娄荣祥 王建秀 等 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书为《工程降水设计施工与基坑渗流理论》(2003年)、《基坑工程降水案例》(2009年)的后续书。全书分为7章,前5章是承压水危害综合治理技术(降水、隔水、回灌)的理论基础,第一章介绍承压水对基坑工程的危害机理与表现形式、危害评估方法及危害综合治理方案设计,第二、四两章介绍承压水降水技术的设计理论与方法,第三章介绍基坑降水引发地面沉降机制与计算方法,第五章介绍基坑工程承压水回灌技术,第六、七章详细介绍了上海、杭州、南京、昆山和天津等地大型深基坑工程承压水危害的综合治理(水位控制型与沉降控制型)工程案例,附录介绍了制作深层隔水帷幕的超深地下连续墙、超深三轴搅拌桩、深层高压旋喷、TRD工法和CSM工法等新型施工技术与大型设备的应用。

本书主要供岩土工程勘察、设计及施工人员使用,也可供大专院校地质工程、岩土工程及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深基坑工程承压水危害综合治理技术 / 吴林高等著

· 一北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.12

ISBN 978-7-114-12655-0

I. ①深… II. ①吴… III. ①深基坑—基坑工程—承压水—综合治理—研究 IV. ①TU46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 287703 号

岩土工程丛书

-13-

书 名:深基坑工程承压水危害综合治理技术

著 作 者:吴林高 朱雁飞 娄荣祥 王建秀 等

责任编辑:曲 乐 韩 帅

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

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)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:19.25

字 数:448千

版 次:2016年1月第1版

印 次:2016年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12655-0

定 价:39.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

《岩土工程丛书》编审出版委员会

名誉主任委员 许溶烈 孙 钧 刘建航 沈珠江 郑颖人

主任委员 史佩栋

副主任委员 高大钊(常务) 朱合华 张建民 陈云敏

韩 敏 岳中琦(中国香港)

委 员 (按姓氏汉语拼音排列)

白 云

包承纲

陈云敏

陈正汉

崔玉军

冯夏庭

傅德明

高大钊

龚晓南

顾宝和

桂业琨

郭蔚东(澳大利亚)

韩 杰(美国)

韩 敏

何满潮

何毅良(中国香港)

李焯芬(中国香港)

李广信

李建中(中国台湾)

李永盛

廖红建

凌天清

刘建航

刘金砺

刘松玉

莫若楫(中国台湾)

秦中天(中国台湾)

沈珠江

施建勇

史佩栋

孙 钧

王钟琦

吴世明

谢永利

许溶烈

杨林德

杨志法

殷建华(中国香港)

岳中琦(中国香港)

宰金珉

张建民

张苏民

赵锡宏

郑 刚

郑颖人

周申一

朱合华

秘 书 曲 乐

艾智勇

丁源萍

总 序

2002年3月23日,对于《岩土工程丛书》(以下简称《丛书》)而言,是一个值得纪念的日子,因为在那一天,我们萌生了组织出版这套《丛书》的构想。

经过海峡两岸暨香港地区部分专家学者数度聚首商讨,又以函电形式广泛征求各方意见,反响热烈,令人鼓舞。大家的观点几近一致,都认为面对我国岩土工程的空前大发展,认真总结半个多世纪,特别是近20余年以来弥足珍贵的工程经验、科研成果和事故教训,实属当务之急。这不仅对于指导当前持续高速发展的工程建设,以确保设计施工质量和工程安全大有裨益,而且对于培养专业人才、提升行业素质、促进学科进步,乃至加强对外交流,都极具重大意义。这也是出版此《丛书》的宗旨和指导思想。

根据各方推举,本《丛书》的编委会承蒙深孚众望的国内20余所高等院校、科研院所和10余家有关企事业单位(含出版社)的41位专家组成,其中含内地36位,香港3位,台湾2位,其名单列于卷首*。在各位编委和同行专家的热情关怀和出版社领导的大力支持下,《丛书》即将陆续问世,我们的内心怎能不激动?

由于岩土工程源远流长,而又与时俱进,日新月异,本《丛书》的素材将取之不尽,因此它将是开放性、系列性的,成熟一本,出版一本。其稿源将包括编委本人报送的,编委推荐的,以及编委会特约或组织撰写的各类作品。同时,我们热忱欢迎海内外各地同仁多赐佳作,共襄此举。

本《丛书》将分为**专题著述**、**工程案例**和**手册指南**三大类,其选题将围绕岩土工程发展中的热点难点技术问题、理论问题和重大工程的进展研究确定。著述内容力求精炼浓缩、深入浅出,实用性与学术性相结合,文字可读性强;工程案例将侧重于有影响和代表性的项目,可一例一书,也可同类工程数例并写于一书;要使之从实践中来,提到理论的高度进行分析与总结,以期能为日后的工程所用;手册指南将不重复已有的出版物而推陈出新。

本《丛书》稿件的审查,一般可由作者在征求编委会的意见后,自行约请专家审查并提出评语,必要时也可商请编委会指定专家负责。书稿经审定后,将由作者与

* 现已增至47位。



出版社直接签订合同,履行各自的权利与义务。文责由作者自负。

本《丛书》的读者对象主要是从事岩土工程勘察、设计、施工、检测、监理等方面的专业人士,也可供高等院校、科研院所相关专业的教师、研究人员、研究生和大学高年级学生等参考。

衷心希望本《丛书》能成为岩土工程界广大同仁的良师益友!

史佩栋 高大钊 朱合华

2003年7月

序

十二年前,在史佩栋教授的倡导和组织下,人民交通出版社开始编辑出版“岩土工程丛书”。当年,吴林高教授等编著的《工程降水设计施工与基坑渗流理论》作为这套丛书的第一本专著出版与读者见面,这是很有意义的一件事。

最近,吴教授又将一本新著《深基坑工程承压水危害综合治理技术》的书稿给了我,按照这套丛书的编号序列,这本著作应该是“岩土工程丛书”的第13本书了。期间,吴教授还有一本《基坑工程降水案例》出版。在这前后不过十年左右的时间里,就有3本关于基坑工程降水问题的系统专著问世。这既反映了当代我国深基坑工程技术的蓬勃发展,也显示出吴教授老骥伏枥,壮志不已,虽然年事已高,但仍笔耕不止的精神境界,为岩土工程界先后贡献了这3本很有意义的系统著作,丰富了岩土工程技术的知识宝库。

深基坑工程是岩土工程中比较复杂的一个领域,而地下水的治理又是基坑工程中难度比较大而又影响全局的技术关键问题,处理不当常会引发影响社会安宁的环境工程问题甚至会造成基坑工程事故。基坑工程中的地下水治理涉及很多领域的技术协作,特别是超深基坑工程的开挖深度很深,无法回避承压水所引起的各类复杂工程问题,而已有的理论和现行的一些技术规范又缺少这方面的知识积淀和经验总结。吴教授的这本书重点讨论了承压水危害的评估方法和承压水危害的治理方案设计,总结了承压水对深基坑工程危害的综合治理经验,包括降水、隔水、回灌等技术的设计方法和工程应用的经验,介绍了制作深层隔水帷幕的超深地下连续墙、超深三轴搅拌桩、深层高压旋喷、TRD工法(Trench-Cutting and Remixing Deep Wall Method)和CSM工法(双轮铣深搅工法)等新型施工技术与大型设备的应用,并详细报道了上海、杭州、南京、昆山和天津等地的许多大型深基坑工程承压水危害综合治理的工程案例。内容丰富翔实,有许多宝贵的工程监测资料、对深基坑工作状态的分析和工程处理的经验总结,对工程技术人员无疑是一本不可多得的教材与参考书。

基坑工程的地下水治理不仅是一个工程技术的实践问题,而更需要水文地质理论的支撑。吴林高教授是水文地质学领域的专家,具有极其深厚的理论素养,他常年关注并参与了深基坑工程的地下水治理工程实践。他和他的学生们在解决深



基坑降水的工程实践中,不断发展与丰富了工程降水的设计理论和工程处理的经验都集中反映在这 3 本著作中。这套书的出版,对于提升“岩土工程丛书”的工程实践意义和理论水平具有非常重要的作用。

高大钊

2015 年 4 月于同济园

高大钊,同济大学教授、博士生导师

前 言

在我国方兴未艾的城市化浪潮中,基坑工程的规模和数量以原先难以想象的数量增长,以往较少遇到的承压水问题,目前已经成为一个经常性的挑战。每年都有大量的基坑工程由于认识不全面、措施不充分、应对不及时产生由承压水诱发的险情,不仅危及工程自身安全,也威胁到周围建(构)筑物的安全。大量的事故案例告诉我们,不能再以简单的“降水”措施应对承压水对深基坑工程的危害。

在诸多类型的地下工程之中,基坑是比较简单的,工序无非是围护、开挖支护与回筑;而人类认识承压水已有两千多年历史了,每一本地质学教科书都能够明确的定义。与之对应,工程中的承压水问题,一度被认为是已经解决的问题,只要通过降水措施,将水头控制在安全高度以下,就可以保证基坑不产生突涌。

但正如当年“经典物理学晴空中的两朵乌云”,所有理论上的完善都是近似的。对于基坑与承压水这两个“简单”的组合问题,越是严肃地看待它,越会意识到它的复杂性;越是从土木工程的全局眼光来观察,越会意识到它不是一个孤立的课题,而是一个土力学中应力与应变关系、渗流固结、极限平衡三大基本问题交织的综合性课题。由于目前这三大基本问题的理论存在不兼容性,势必导致这个课题在目前的理论框架下找不到一个现成的答案。

好在对于地下工程而言,实践始终走在理论的前面。即使没有完善理论的指导,二十余年来,我们靠着“摸着石头过河”的方法,也“摸”出了一套针对基坑工程承压水各类危害的“综合治理”方法,经在全国广大富水软土地区初步应用,收到了较好的社会效益,同时,在理论方面也做了一些探索。希望本书能够为深基坑工程的设计和施工从业者提供帮助,提高对承压水问题的认识,丰富应对手段,尤其重要的是,认识到承压水危害是需要“全方位、全过程”的治理,而不仅仅是降水的问题。

全书共分为7章。前5章是《深基坑工程承压水危害综合治理技术》的理论基础。第一章承压水对基坑工程的危害,介绍承压水对基坑工程的危害机理与表现形式,承压水危害的防治思路以及承压水危害评估与危害综合治理方案设计,包括承压水危害评估方法,制订治理方案时要考虑的因素、治理方案设计流程及治理技术措施,提出城市敏感环境下承压水危害治理时“以水位控制为前提、以沉降控制



为核心”的降水最小化原则及“分层降压、适度隔断与必要时回灌”的总体措施与适用范围；第二章基坑渗流规律与基坑渗流计算方法，重点介绍两种不同类型基坑地下水流态规律及考虑井损的层流沿程水头损失（水头降深）计算方法，还介绍了基坑地下水渗流类型；第三章基坑降水引发地面沉降机制与计算方法，重点介绍多层含水层组合地层沉降机制及逆回弹系数修正解析法计算降水诱发的地面沉降，还介绍了其他解析法、经验解析法及数值法等计算降水诱发地面沉降的方法；第四章深基坑工程降水设计，介绍深基坑工程降水设计要求与内容、减压降水井位置、井数量、井间距、单井抽水流量、井结构与运行管理设计；第五章深基坑工程承压水回灌技术，重点介绍深基坑工程回灌特点、承压水降水-回灌一体化设计、回灌水源（富含铁、锰质地下水）水质处理技术，还介绍了深基坑工程回灌结构及施工质量控制、降水-回灌运行控制；第六、七章为深基坑工程承压水危害综合治理案例，第六章为3个水位控制型案例，第一节介绍杭州庆春路隧道江南工作井“全隔断帷幕加降水”承压水危害治理技术，第二、三节分别介绍两个“部分隔断帷幕加降水”承压水危害治理技术；第七章介绍沉降控制型承压水危害综合治理技术的6个案例；附录深基坑工程隔水帷幕技术，主要介绍几种超深隔水帷幕（超深地下连续墙、超深三轴搅拌桩、TRD工法、CSM工法、RJP高压旋喷桩、MJS高压旋喷桩等）的施工工艺。

本书前言由朱雁飞、吴林高执笔；第一章由朱雁飞、沈尉执笔；第二章由吴林高、张英英执笔；第三章由王建秀、刘笑天执笔；第四章由吴林高执笔；第五章由陆建生、娄荣祥执笔；第六章由侯永茂、陆建生、赵浩执笔；第七章由娄荣祥、王建秀、刘笑天、张英英、陆建生、侯永茂、潘伟强、史小锐、李侠执笔；附录由侯永茂、娄荣祥、童峰执笔；全书由张英英、刘笑天汇总、统编。

本书在编写过程中，得到同济大学高大钊教授的关注与大力支持，在此谨向他致以衷心感谢。书中引用了一些单位及个人的研究成果与工作总结，作者在此表示深切谢意。

作者

2015年6月

目 录

第一章 承压水对基坑工程的危害	1
第一节 承压水对基坑工程的危害机理与表现形式	1
第二节 承压水危害的防治思路	10
第三节 承压水危害的评估方法	11
第四节 承压水危害综合治理方案设计	13
本章参考文献	17
第二章 基坑渗流规律与基坑渗流计算方法	19
第一节 基坑地下水流态规律	19
第二节 基坑地下水渗流类型	27
第三节 基坑地下水渗流计算方法	29
本章参考文献	44
第三章 基坑降水引发地面沉降机制与计算方法	45
第一节 基坑降水引发地面沉降的规律	45
第二节 基坑降水引发地面沉降的机制	49
第三节 基坑降水引发地面沉降计算方法	54
本章参考文献	66
第四章 深基坑工程降水设计	67
第一节 深基坑工程降水设计要求	67
第二节 深基坑工程减压降水井位置设计	69
第三节 降水井数量、井的间距及单井抽水流量设计	72
第四节 降水井的结构设计	73
第五节 降水井运行管理设计概述	79
本章参考文献	80
第五章 深基坑工程承压水回灌技术	81
第一节 深基坑工程承压水回灌目的、机理及特点	81
第二节 深基坑工程承压水降水-回灌一体化设计	87
第三节 深基坑回灌水(地下水)水质处理技术	101



第四节 深基坑工程回灌井施工质量控制	105
第五节 深基坑工程降水-回灌运行控制管理	111
本章参考文献	112
第六章 水位控制型承压水危害综合治理案例	115
第一节 杭州庆春路隧道江南工作井	115
第二节 杭州地铁 6 号线钱江世纪城站	128
第三节 南京宁和城际轨道交通天河路站	144
本章参考文献	157
第七章 沉降控制型承压水危害综合治理案例	159
第一节 上海轨道交通 9 号线宜山路站	160
第二节 上海轨道交通 11/12 号线龙华站	176
第三节 上海长江路隧道浦西工作井	194
第四节 上海轨道交通 12/13 号线汉中路站	215
第五节 天津机场交通枢纽中心	239
第六节 昆山人民南路交通枢纽城市综合体	259
本章参考文献	279
附录 深基坑工程隔水帷幕技术	282
附录参考文献	294

第一章 承压水对基坑工程的危害

第一节 承压水对基坑工程的危害机理与表现形式

一、以渗流观点重新审视基坑与承压水问题

对于承压水对基坑的危害,目前规范明确规定的仅有坑底抗突涌一种。其控制机理为防止承压水水头顶破覆盖层,对应计算方法为:抗突涌安全系数是覆盖层质量与承压水作用于覆盖层底面的静水压之比。这一算法已经沿用多年,实践证明它是安全的。然而,不断有工程技术人员质疑它过于保守,因为有不少安全系数不足 1.0,甚至仅 0.8 左右的基坑并未如计算所预测的那样发生突涌^[1],很多工程师试图用地基土的“结构强度”来解释,结果都是勉为其难的^[2]。

1998 年长江流域大洪水后,众多学者针对长江堤防的渗流破坏做了的大量研究。长江荆江大堤的堤基地质条件一般,表层为弱透水黏性土层,下卧透水性强的砂层和砂卵石层。弱透水层在堤内延伸宽广,堤外则被水流冲刷掉,使砂层或砂卵石层与江水直接相通,形成一种袋形地基^[3]。在基坑工程中,这就是典型的承压水工况。

李广信等^[4]针对强/弱渗透性双层堤基进行了渗透变形的室内模型试验,如图 1-1 所示。试验表明:此类渗流破坏首先在弱透水层中发生流土,然后在两层土之间发生接触冲刷,称为“接触冲刷”或“潜蚀”;同时也证明悬挂式防渗墙对于管涌出砂量有控制作用,并且在试验中管涌口环形出砂面积与防渗墙深度线性相关,陈建生等也通过模型试验得出了类似的结论^[5]。

事实上,富水软土地区开挖深度大于潜水水位埋深的基坑,一般都设兼具挡土、止水作用的围护结构,这使得基坑渗流与水坝渗流之间存在一定的对应关系,如表 1-1 所示。基坑围护可视为设抗渗芯墙的坝体,基坑开挖过程中的渗流作用



与水坝是类似的,坑外相当于上游方向,坑内相当于下游方向,如图 1-2 所示。其中,围护结构可视作抗渗心墙,坑内疏干井和减压降水井可视作优质反滤层严密保护下的渗流出口,潜水的渗流可视作水坝蓄水的自然渗流。

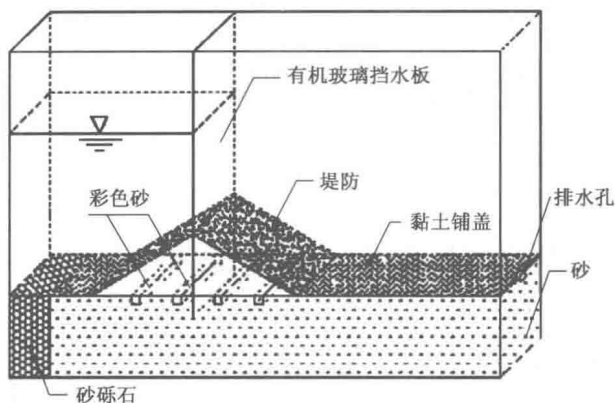


图 1-1 双层坝基渗流破坏试验^[4]

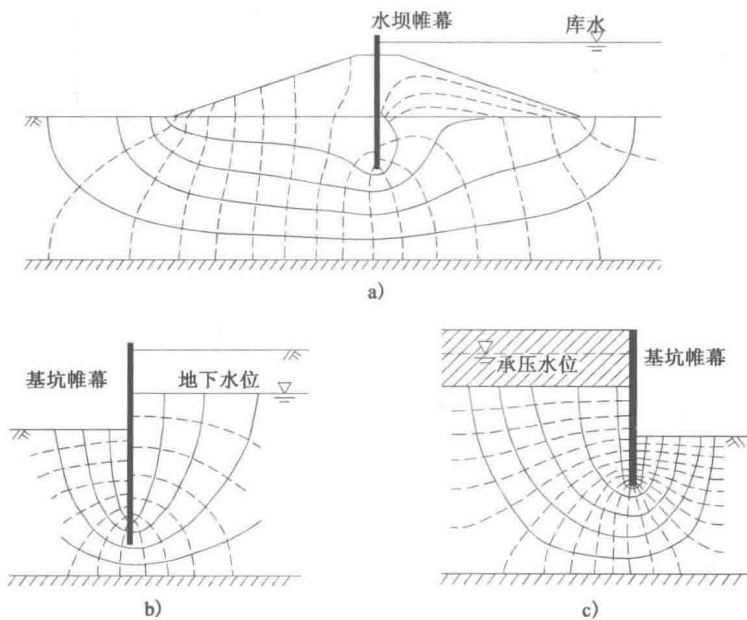


图 1-2 水坝渗流与基坑渗流



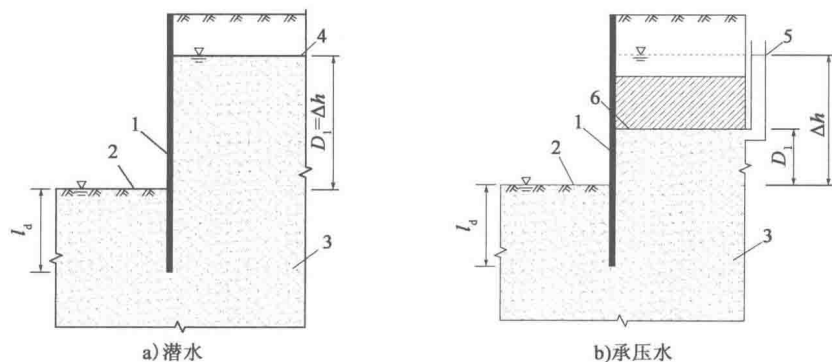
渗流分析角度基坑与水坝的对应关系

表 1-1

序 号	基 坑	水 坝
1	止水帷幕(地下连续墙)	抗渗心墙
2	坑外	上游
3	坑内	下游
4	减压降水井/疏干井	反滤层保护下的渗流出口
5	潜水渗流问题	蓄水自然渗流问题
6	承压水抗突涌问题	强/弱渗透性二元结构坝基稳定问题

如果我们借鉴水利工程渗流分析的方法来看基坑承压水问题,就会发现目前惯用计算方法——将覆盖层质量与承压水作用于覆盖层底面的静水压之比作为安全系数的算法,其实包含两个假定:①覆盖层绝对不透水;②自然渗流发生即产生破坏。实际上,绝对不透水的覆盖层是几乎不存在的,而坑内的减压降水井、疏干井客观上起着渗流保护作用,只有当坑底的地基土最薄弱部位水力梯度超过其临界水力梯度时才会渗流破坏。

新颁布的行业标准《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[6]首次将渗流分析的概念引入承压水突涌安全系数计算,对悬挂式止水帷幕的流土型破坏分析专门做了规定,如图 1-3 所示,并要求必要时进行管涌型破坏分析,这是一个良好开端,但所采用的简化方法尚未经过长期的工程实践检验,尚不能完全取代惯用计算方法;同时由于实用计算工具的匮乏和观念的滞后,一般基坑设计中完整地计算、分析渗流场,并以此优化方案还有待时日。

图 1-3 规范要求的渗流稳定算法^[6]

1-截水帷幕;2-基坑底面;3-含水层;4-潜水水位;5-承压水测管水位;6-承压水含水层顶面



$$\frac{(2l_d + 0.8D_1)\gamma'}{\Delta h\gamma_w} \geq K_f \quad (1-1)$$

式中: K_f ——流土稳定性安全系数,安全等级为一、二、三级的支护结构, K_f 分别应不小于 1.6、1.5、1.4, cm/s;

l_d ——截水帷幕在坑底以下的插入深度, m;

D_1 ——潜水面或承压水含水层顶面至基坑底面的土层厚度, m;

γ' ——土的浮重度, kN/m³;

Δh ——基坑内外的水头差, m;

γ_w ——水的重度, kN/m³。

即便如此,一旦我们用渗流分析的眼光来看待基坑工程中的承压水问题,就会发现承压水对基坑工程的危害远不止坑底突涌这一种,而是至少包括下列 3 种类型。

二、危害之一:基坑渗流破坏

基坑工程施工过程中,周围或坑内土体发生渗流破坏是承压水危害的最常见形式,根据成因和发生的部位又可分为 3 种类型:坑底突涌、坑侧渗漏、底侧突涌,其表现形式和成因如下。

(1)坑底突涌:这是工程界最早认识到的承压水危害形式,李广信等^[4]指出突涌包括坑底顶裂、坑底流砂、坑底“沸腾”等多种形式。由于上海地区覆盖层通常相对软弱,加上基坑内一般都有立柱桩、地质探孔等薄弱环节,表现形式多为坑底薄弱处涌水、涌砂,坑底大面积开裂、突涌情况倒不多见。这一情况有可能是由于抗突涌安全系数不足,也有可能是地质探孔未封闭等原因。前者案例包括上海 1985 年发生的煤气管过江工作井突涌^[7]、2003 年漳州中银大厦坑底突涌^[8],后者包括 1995 年上海金茂大厦坑底涌水事件^[9]。值得指出的是,结构底板完成后其下方的减压降水井、疏干井或泄水孔封闭不良,也可能发生突涌事故。

(2)坑侧渗漏:即由于围护结构缺陷造成开挖面以上渗漏如图 1-4a)所示。这种渗漏往往被认作和潜水作用下的渗漏没有本质区别,但从渗流角度看,承压水作用下的渗漏属于有压渗流,而潜水渗漏属于无压渗流。前者随渗漏发生,水位也随之降低,往往能形成相对稳定的边界,而后者属于有压渗流,并不随着渗漏持续降低,一旦发生险情如不能快速处置,坍方区可能会持续扩大。图 1-5 为上海地铁 1 号线北延伸段某深基坑潜水渗漏形成的盆状土坡,图 1-6 为上海地铁 4 号线某区间隧道旁通道冻结失败后连续涌水 7d 形成的大范围坍陷,坍陷长度达 230m。此



事故虽然不是基坑事故,但同样是封闭式止水帷幕缺陷导致侧向渗漏。可见承压水作用下渗漏的危害程度要严重得多。

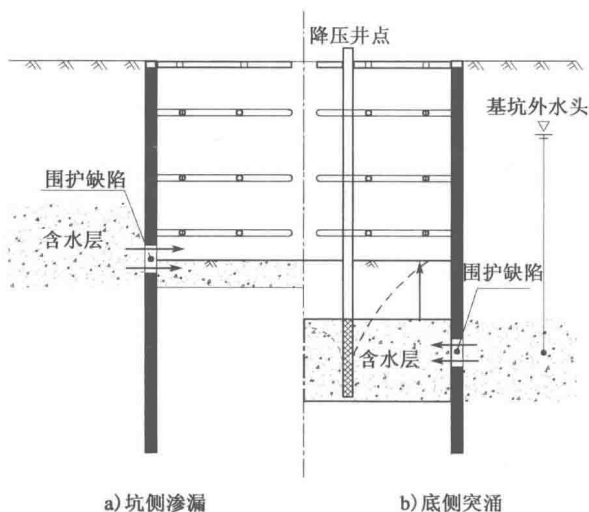


图 1-4 坑侧渗漏与底侧突涌

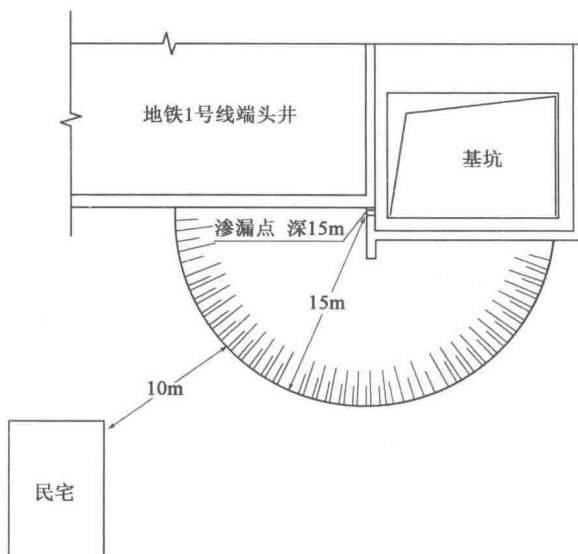


图 1-5 潜水渗漏案例