

梁立刚,陈梁,刘建芳.砂漏型岩溶地面塌陷防治原则和方法[J].中国岩溶,2019,38(6):910-915.
DOI:10.11932/karst20190608

砂漏型岩溶地面塌陷防治原则和方法

梁立刚¹,陈梁¹,刘建芳²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037;

2. 武汉地铁集团有限公司, 武汉 430030)

摘要:武汉地区在近东西向的多个褶皱构造中分布有6条石灰岩条带是岩溶地面塌陷多发区。其岩溶地面塌陷可分为砂漏型、土洞型、真空吸蚀型等三种基本类型,每种类型有其特定的地质条件及对应的塌陷机理。文章重点对灾害后果最严重、防治难度最大的砂漏型塌陷的地质条件及塌陷机理进行了分析,认为地下水(岩溶水和孔隙水)渗流是导致砂漏发生的关键因素,其中岩溶水渗流是原始动力。基于此,认为设置帷幕截断岩溶水渗流是防治砂漏型塌陷的根治措施,并提出地铁车站和区间盾构防治砂漏型塌陷的原则和方法,取得了良好效果。

关键词:地铁工程;岩溶地面塌陷;砂漏型;防治原则;武汉地区

中图分类号:P642.26 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)06-0910-06 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶地面塌陷是一种难以预测、破坏后果严重的地质灾害。近年在武汉、广州、深圳、杭州、徐州等城市都不同程度地发生过岩溶地面塌陷,给工程建设和人民生命财产带来了严重影响和威胁。

自20世纪80年代以来,我国许多学者和工程技术人员对这类地质灾害进行研究,取得了一定成果。在塌陷机理研究方面,具代表性的是徐卫国等^[1],他们从研究矿山岩溶地面塌陷出发,提出了岩溶地面塌陷的“真空吸蚀”机理。但是,纵观各种研究成果,无一不是将诱发因素和(或)其力学效应作为塌陷机理来研究,忽略了对土颗粒的运动学响应特性的研究^[2]。在岩溶地面塌陷防治方面,由于塌陷机理尚未取得一致性认识,导致面对如何防治的难题,往往莫衷一是,或采取过度治理或治理不当留下后患。

武汉地区在近东西向的多个褶皱构造中分布有6条石灰岩条带^[3],是岩溶地面塌陷多发区。自1931

年有记录至今,自然塌陷有13次,人为诱发的塌陷有40余次,造成不同程度的环境破坏、工程事故和人员伤亡。面对如此严重的地质灾害,相关单位的技术人员做了大量的勘察、研究工作。罗小杰^[4]根据可溶岩上覆盖层物质成分、地质结构及其物理力学性能的差异,划分出5种不同的地质结构类型,并以碳酸盐岩“六带五型”为基础,将碳酸盐岩展布区划分为高、中、低3个危险性区。各危险区应以地质结构为基础,在防治原则指导下,制定相应的防治措施。

范士凯自20世纪80年代就开始关注、研究“岩溶地面塌陷”地质灾害。在参与湖北、武汉、深圳等地的岩溶地面塌陷事故处理过程中,做了大量的调查研究。他从岩溶地面塌陷的宏观地质条件入手,针对地质条件所决定的塌陷类型及其对应的微观机理,抓住地下水(岩溶水及覆盖层中的孔隙水)渗流这一主要动力,将岩溶地面塌陷归纳为“渗流破坏、流土漏失型塌陷”(简称“砂漏型”)、“潜蚀土洞冒落型塌陷”(简称“土洞型”)和“真空吸蚀型塌陷”三种

第一作者简介:梁立刚(1973—),男,高级工程师,主要从事岩土工程勘察工作。E-mail:lianglg@bjucd.com。

收稿日期:2019-02-04

基本类型,同时针对不同的类型及其对应的机理制定具体的防治措施^[5-6]。这些理论和原则已在武汉地铁工程中全面应用,并且收到了良好效果。十余年的工程实践也证明了这些理论和原则的正确性和适用性。

武汉市自 2006 年开始大规模建设地铁工程,并对各条线路通过石灰岩区段做了“岩溶专项勘察”,

对岩溶发育规律和岩溶地面塌陷进行了深入研究。在上述岩溶地面塌陷的三种基本类型中,砂漏型塌陷既是发生概率最高,又是规模最大、灾害后果最严重的一种类型,也是治理难度最大、工程最复杂的类型(图 1),是武汉地铁工程通过可溶性岩区所面临的主要安全隐患。因此,本文主要针对地铁工程通过“砂漏型塌陷区”的防治原则和方法进行研究。



图 1 武汉江夏法泗街 12 号砂漏型陷坑(85 m×37.5 m×7.0 m)
Fig. 1 Hourglass-type pit No. 12 at Fasi Street, Jiangxia, Wuhan (85 m x 37.5 m x 7.0 m)

2 “砂漏型”岩溶地面塌陷机理

不同类型的岩溶地面塌陷是由其特定的地质条件-覆盖层性质、岩溶发育特征和地下水(孔隙水、岩溶水)的活动特点所决定的,而这些地质条件是有分布规律的。

砂漏型塌陷主要发生在近代(Q_4)河流冲、洪积阶地或冲积湖积平原上,其地质条件是可溶岩之上的覆盖层为饱和砂性土层,其下可溶岩岩溶发育且岩溶水与砂土层中的孔隙水有直接水力联系。

当岩溶承压水头低于砂层孔隙水位时,孔隙水则向下渗流(图 2c)^[6]。

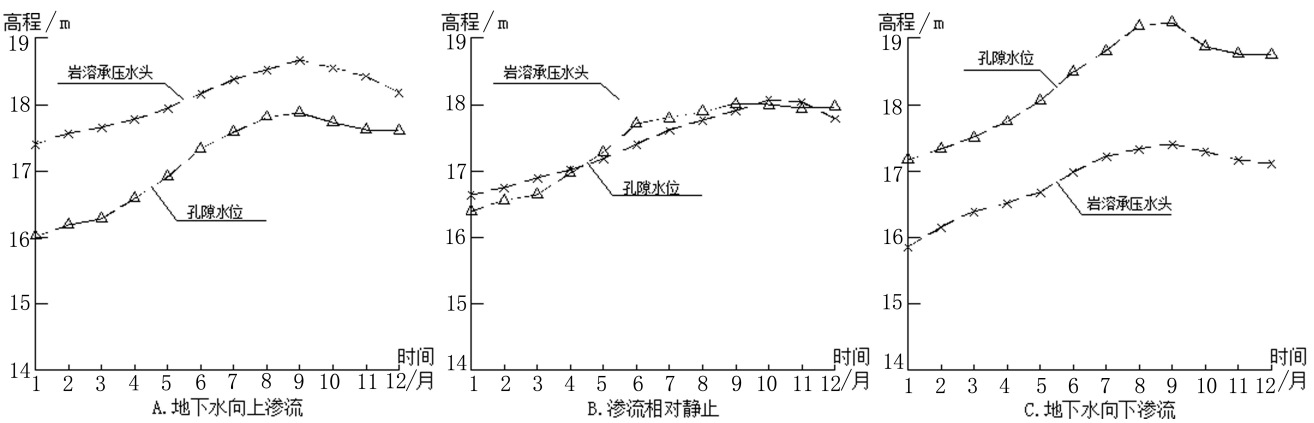


图 2 渗流与地下水位的关系
Fig. 2 Relationship between seepage and groundwater level

当孔隙水位与岩溶水头之间的水力梯度(j)超过砂层的临界水力梯度(j_c)时,饱和砂土产生流土(液化)。流土漏失到基岩溶洞中并随岩溶水的运动被带走,便发生地面塌陷(图3)。这种机理概括为“渗流破坏、流土漏失型塌陷”,简称“砂漏型塌陷”。

从砂漏型塌陷的塌陷机理可知,地下水(孔隙水和岩溶水)渗流、流动是造成塌陷的重要因素,尤其是岩溶水的流动是致塌的关键动力。因此,塌陷防治要以防止、截断地下水渗流、流动,尤其是岩溶水的流动为主导措施^[6]。

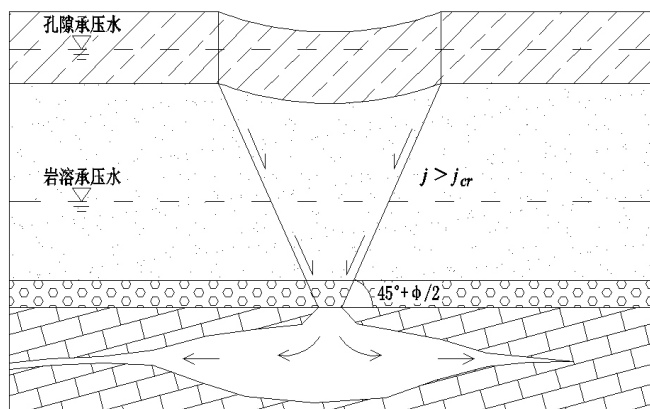


图3 渗流破坏—流土漏失

Fig. 3 Seepage failure-leakage of flowing soil

3 “砂漏型”岩溶地面塌陷的防治原则和方法

3.1 防治原则

3.1.1 防治措施必须符合塌陷机理

前已述及,“砂漏型”塌陷机理是当岩溶承压水头低于覆盖砂层中孔隙水位一定高度时,产生向下渗流。当两者水头差超过“临界水力梯度”时,砂土产生流土而向溶洞中漏失,并随着岩溶水渗流被带走,导致覆盖层发生塌陷。地下水(孔隙水、岩溶水)向下渗流是“砂漏”的主要原因,而地下水向下渗流的基本动力是岩溶水的渗流运动。显然,阻止地下水渗流是防止“砂漏”发生的根本措施^[6]。

3.1.2 阻止地下水向下渗流的两类措施

其一是在饱和砂层与可溶岩之间做水平隔渗帷幕,形成“阻隔层”;其二是在可溶岩中做注浆帷幕(竖向为主),截断岩溶水渗流。前者,由于地表施工条件严苛,也很难保证水平帷幕严密无缝,且造价昂贵、工期长等不利因素,故不宜采用。后者(即在可

溶岩中做注浆帷幕、截断岩溶水渗流)则是切实可行的。

3.1.3 防止砂漏型塌陷的基本原则^[5]

(1)截断可溶岩中岩溶水流动通道,阻止岩溶水渗流,或阻断覆盖层中孔隙水与岩溶水之间的水力联系是防止砂漏型塌陷的根本性措施。

(2)岩溶水渗流的主要通道是岩溶强发育和中等发育带,因此,在中等以上发育带中设置隔渗帷幕能有效阻断岩溶水渗流。

(3)为确定隔渗帷幕设置范围和深度,需通过综合勘探、测试、试验查明岩溶的空间发育规律,尤其是土岩接合面以下的岩溶发育的垂直分带。

(4)若盾构隧道在可溶岩之上的饱和砂土层中通过,防治措施不仅要考虑隧道限界内对应的岩溶层,还应防止隧道界限外相邻地段发生塌陷对隧道产生的影响。

3.1.4 平原区岩溶地面塌陷特征

平原区岩溶地面塌陷基本上发生在岩溶水动力垂直分带的“表层岩溶带”之上的覆盖层中。因为此带的岩溶类型及其形态特征是垂向发育,且与覆盖层联系密切,而深部的水平循环带虽有大型水平溶洞,但与覆盖层联系很弱。因此,研究平原区岩溶地面塌陷时应该在研究岩溶水动力垂直分带、尤其是“表层岩溶带”特征的基础上进行。

3.1.5 治理工艺

选择可靠的施工工艺,防止施工过程中诱发塌陷。

3.2 防治方法

为防止位于潜在砂漏型塌陷区的盾构隧道在施工或运营中发生塌陷,防治方案应针对“可溶岩中”和“覆盖层中”两部分采取可靠又可行的处理措施。盾构隧道和车站的防治措施见表1。

基岩和覆盖层中各种处理措施的具体布置方式见图4和图5^[6]。防治方案实施要点如下:

(1)施工顺序按照先施工基岩中竖向帷幕(措施1)及两帷幕之间溶洞充填注浆(图5之措施3),后施工覆盖层中防邻近塌陷隔墙(图5之措施2)顺序进行;

(2)为防止帷幕注浆施工过程中诱发砂漏、塌陷,注浆成孔采用“套管跟进工艺”,将砂层与基岩隔离;

表 1 盾构隧道、车站砂漏型塌陷防治措施^[7]

Table 1 Prevention and control measures for hourglass-type collapse in shield tunnel and station

工程类型	防治方法、功能	位置深(高)度/m	施工工艺	质量控制	备注
盾构隧道	可溶岩中 自岩面向下做竖向注浆帷幕,截断岩溶水渗流通道;对帷幕间岩体中的溶洞充填注浆	对应隧道两边限各一道深至岩溶弱发育带中	砂层中跟管钻进,岩体中袖阀管注浆	注浆孔返浆为止,采用自动监控、记录系统	
	覆盖层中 在砂土层中做竖向隔墙(水泥土、砂),防邻近塌陷扩散	自两隧道外沿向下至岩面内 0.5~1.0 m	高喷、深搅或砂墙	通用检测方法	塌陷影响范围在砂层中按塌陷角(35°~40°)确定
车站	可溶岩中 自岩面向下做竖向注浆帷幕(与车站围护结构衔接)截断岩溶水渗流通道;车站底板下溶洞进行充填注浆	车站两侧围护结构下各一道,深至岩溶弱发育带中	在车站围护结构施工之前进行,工艺同前	与盾构隧道相同	
	覆盖层中 车站围护结构入岩,与岩体中竖向帷幕衔接,兼做防邻近塌陷隔墙	车站围护结构	车站围护结构	车站围护结构	不考虑相邻塌陷影响

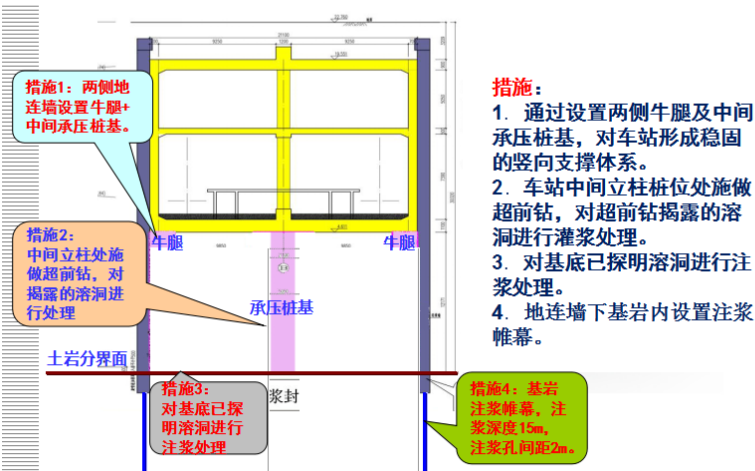


图 4 地铁车站防治措施示意图

Fig. 4 Schematic diagram of prevention and control measures in metro stations

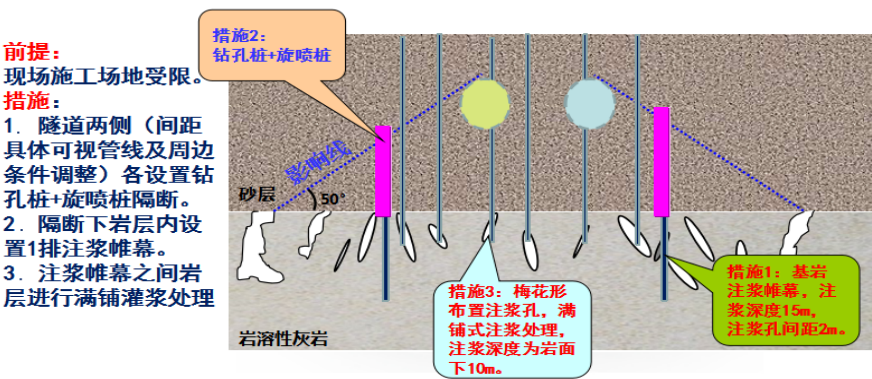


图 5 盾构隧道防治措施示意图

Fig. 5 Schematic diagramme of prevention and control measures for collapse in shield tunnel

(3)岩体中注浆质量控制的主要标准是孔口返浆,为此需在注浆施工中根据实际情况灵活采用单液浆、双液浆或化学浆,适时调整注浆压力、连续注浆或间歇注浆或跳孔注浆等工艺方法;

(4)注浆监控采用自动测量(压力、流量)、自动记录系统,既可掌控注浆过程,又能准确计量工程量;

(5)做好工后质量检测(抽芯、原位测试)。

3.3 防治效果及验证

武汉地铁某区间位于长江 I 级阶地,车站及盾构隧道在可溶性石灰岩之上覆盖层——饱和砂层中通过。线路通过地段及邻近场地是岩溶地面塌陷灾害频发区,如邻近某厂钢材库曾于 1977 年 9 月发生地面塌陷,某小区曾于 2013 年 12 月发生桩基成孔施工诱发的岩溶地面塌陷事故,属于塌陷危险区。

为确保施工和长期运营期间不发生任何塌陷,也不受相邻塌陷影响,2014 年至 2015 年期间,对该地铁区间 1.1 km 内的车站和区间盾构隧道均按照 3.2 节防治方案内容、要求进行了防塌陷处理设计和施工。以下事实充分表明防治效果:

(1)2015 年 8 月,岩溶注浆处理施工期间,距离地铁隧道边线仅仅 40 余米的某小区工棚附近发生塌陷,造成 2 名民工遇难;一陷坑距隧道边线仅 10 余米,12 m 高的电线杆陷入坑中。当时岩溶处理施工只完成了与小区相邻的右线基岩帷幕,隧道边线以内场地安然无恙,这表明一条帷幕就已截断隧道区与塌陷区岩溶的水力联系。

(2)由于采取合理的施工顺序(首先施工基岩注浆帷幕)和可靠的施工工艺(套管跟进成孔),施工期间未发生任何诱发塌陷。车站地连墙在基岩注浆帷幕完成后施工并入岩,3 000 多个基岩注浆孔通过饱和砂层,均未诱发塌陷。

(3)当所有的岩溶处理工程全部完成后,车站围护结构和主体结构施工中未发生任何问题,盾构隧道也顺利通过饱和砂层。该地铁线路已于 2016 年底全线通车,近 3 年未发生岩溶地面塌陷事故,处理效果良好并经历了邻近场地塌陷的考验。

4 结 论

(1)一种类型地质灾害的防治,应当符合其发生

机理。“砂漏型岩溶地面塌陷”属于“渗流破坏、流土漏失”机理。其关键因素是岩溶水渗流、运动引起覆盖层砂层中孔隙水向下渗流,导致流土(液化)漏失,造成覆盖层及地面塌陷。因此,截断岩溶水渗流、流动通道是防治的根本措施;

(2)在可溶岩中设置竖向注浆帷幕、帷幕间岩体中的溶洞充填注浆是截断岩溶水渗流、流动的最可行、最有效的根本措施;

(3)“砂漏型”塌陷防治措施主要包括三个方面:可溶岩中竖向注浆帷幕、两帷幕之间浅表溶洞充填注浆和砂层中防止邻近塌陷扩散影响的阻隔墙;竖向注浆帷幕必须穿过岩溶强发育带和中等发育带,进入弱发育带,为此要充分掌握岩溶垂向发育规律;

(4)采取合理的工序(首先施工可溶岩中竖向帷幕)和可靠的注浆孔成孔工艺(跟管钻进)是防止施工诱发塌陷的必要措施;

(5)为确保注浆施工质量,应采用自动监控(压力、流量)和自动记录系统。同样应做好各部分(帷幕、阻隔墙、充填注浆)的质量检测,以确保总体质量。

这些原则和方法在武汉市已建成通车的 10 条线路和在建的 10 余条线路中(累计穿越石灰岩区总长超过 70 km)得以成功实施,都未发生过岩溶塌陷引起的安全事故,并已在杭州市得到推广应用。相信这些防治原则和方法会在武汉及各地应用中逐渐成熟和完善。

参考文献

- [1] 徐卫国,赵桂荣. 试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J]. 地质论评,1981,27(2):174-180,183.
- [2] 罗小杰,沈建. 我国岩溶地面塌陷研究进展与展望[J]. 中国岩溶,2018,37(2):101-111.
- [3] 罗小杰. 武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J]. 中国岩溶,2013,32(4):419-432.
- [4] 罗小杰. 武汉地区碳酸盐岩“六带五型”划分与岩溶地质灾害防治[J]. 水利学报,2014,45(2):171-179.
- [5] 范士凯. 略谈岩溶与工程(《土体工程地质宏观控制论的理论与实践》)[M]. 北京:中国地质大学出版社,2017.
- [6] 范士凯. 岩溶地面塌陷机理、类型、分布规律和防治对策(《土体工程地质宏观控制论的理论与实践》)[M]. 北京:中国地质大学出版社,2017.
- [7] 刘建芳. 武汉轨道交通 6 号线工程岩溶发育特征及处理措施[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(7):134-137,152.

Principles and methods for preventing and controlling the hourglass-type karst ground collapse

LIANG Ligang¹, CHEN Liang¹, LIU Jianfang²

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China; 2. Wuhan Metro Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430030, China)

Abstract There are 6 limestone belts trending in nearly EW trending fold structures in the Wuhan area, where karst ground collapse occurs frequently. Such failure can be divided into three basic types, i.e. hourglass type, soil cavity type and vacuum erosion type, each has its special geological conditions and corresponding collapse mechanism. As the disaster caused by hourglass-type collapse is the most serious and most difficult to control, this paper focuses on its geological conditions, collapse mechanism, prevention principles and methods. Analysis shows that the key factor to cause the hourglass is the groundwater (karst water and pore water) seepage, of which original power is the karst water seepage. Consequently, the fundamental measure to prevent hourglass collapse is to set up curtains to cut off karst water seepage. At last, the principles and methods of preventing and controlling the hourglass collapse of subway stations and section shield are proposed, which have attained good effects in practice.

Key words subway engineering, karst ground collapse, hourglass type, prevention principles, Wuhan area

(编辑 张玲)

(上接 888 页)

Remote sensing investigation to the distribution and change of karst rocky desertification from 2003 to 2015 in the Nayong area of Guizhou based on Landsat-X GEVI

KUANG Zhong, BAO Ping, WU Kaibin, JIANG Kaiyuan

(Guizhou Institute of Geological Survey, Guiyang, Guizhou 550018, China)

Abstract Karst rocky desertification is a fragile ecological environment that puzzles the development of karst areas in southwest China. In order to understand the improvement of karst rocky desertification in the Nayong area of Guizhou, the authors extracted the scale information of karst rocky desertification in 2003 and 2015 by using the improved enhanced vegetation index model (GEVI) method based on Landsat data, which is 540.06 km² and 390.99 km², respectively. Comparison of data over these two periods shows that the area of karst rocky desertification in this area has been reduced by 149.07 km², and the improvement rate has reached 12.88%, especially in the areas of severe rocky desertification (such as Chaoyanggu, Lanba and Maochang), which have been distributed in vast swaths previously. It is also found that the karst rocky desertification in this area is migrating from southwest to northeast, with an area of 289.47 km², dominated by a moderate degree. It indicates that the control and destruction are synchronized, and the control task remains a great challenge. Nevertheless, the total area of karst rocky desertification is reduced and ecological conditions show a benign development trend, reflecting the effectiveness of comprehensive efforts in recent years.

Key words Landsat-X GEVI, Nayong area, karst rocky desertification, distribution changes, remote sensing survey

(编辑 张玲)