35 卷 第 6 期	中国岩溶
2016 年 12 月	CARSOLOGICA SINICA

Vol. 35 No. 6 Dec. 2016

郑小战,郭 宇,戴建玲,等.岩溶区线性工程影响下的地下水监测及数值模拟研究——以广州市金沙洲为例[J].中国岩溶,2016, 35(6):657-666.

DOI:10.11932/karst20160607

第

岩溶区线性工程影响下的地下水监测及数值模拟研究 ——以广州市金沙洲为例

郑小战^{1,2},郭 宇^{1,2},戴建玲¹,陈小月²,黄健民²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质科学院岩溶塌陷防治重点实验室,广西桂林 541004;

2. 广州市地质调查院,广州 510440)

摘 要:以广州市金沙洲地区的水文地质条件及地下水位监测结果为基础,应用地下水数值模拟 FEFLOW 软件建立了金沙洲地区的地下水系统的数值计算模拟模型。模拟结果表明:(1) 高铁金沙洲隧道施工降水是 引起金沙洲地下水流场变化的主要原因,高铁隧道施工大量抽排地下水时,地下水位变化形成以抽水点为中 心的降落漏斗;(2) 随着抽水量的加大,形成水位下降漏斗及地下水强径流排泄带,加速地下水对泥沙的搬运 动力,增大对岩土体结构的冲刷作用,使与岩溶管道连通的土洞及覆盖层稳定性受到破坏,从而导致地面塌陷 的发生;(3) 随着地下水水位的下降,金沙洲一带的软弱淤泥土容易出现排水固结沉降和失托沉降,从而产生 地面沉降灾害。

关键词:岩溶塌陷;地下水;金沙洲;数值模拟 中图分类号:P642.2;X141 文献标识码:A

0 引 言

近年来,我国经济社会高速发展,人类活动对地 下空间的开发达到了前所未有的深度和广度,由此引 发了大量城市岩溶地面塌陷和地面沉降等地质灾害。 自 2007 年 7 月 14 日以来,广州市金沙洲地区陆续发 生了较为严重的地面塌陷、地面沉降地质灾害^[1-4], 导致周边十余幢居民楼相继发生倾斜、变形开裂,涉 及居民上千人,初步估算直接经济损失约 0.5 亿元, 地质灾害严重威胁当地人民群众的生命财产安全。

据有关研究表明^[5-7],岩溶区地面塌陷的发生与 地下水位的波动密切相关,尤其是地下水位发生剧烈 波动时,本研究区内有武广高铁从地下隧道穿过,因 此,根据广州市金沙洲地区的水文地质条件及地下水 位监测结果,建立金沙洲地区的地下水系统的数值计 算模拟模型,可以深入探讨隧道抽水与地质灾害发生 的相关联系,亦可为其他岩溶区的线性工程开发与地 质灾害防治提供参考实例。

文章编号:1001-4810(2016)06-0657-10

本次研究采用 FEFLOW 模拟软件,将整个金沙 洲研究区作为地下水系统的模拟计算范围。FE-FLOW 是由德国柏林水资源规划与系统研究所 (WASY)开发的一种对地下水水量及水质进行模拟 的软件系统,利用它不仅可以计算出水位、溶液浓度 和温度等标量数据,而且还可以模拟降水、地表水、地 下水的流动与转换,计算出流速、流线及流径线等向 量数据,很适合分析模拟区地质灾害与地下水流场的 关系^[8-9]。

1 研究区地质环境概况

金沙洲位于广州市西部,东临珠江白沙河,与罗 冲围隔水相望,北部、西部及南部与南海里水、洲村、

基金项目:中国地质科学院岩溶塌陷防治重点实验室开放研究基金项目

第一作者简介:郑小战(1968一), 用, 高级工程师, 主要研究方向为水工环地质。E-mail: 13503031611@163. com。

通信作者:郭宇(1984-),男,博士,主要研究方向为水工环地质。E-mail:174563241@qq.com。

收稿日期:2016-03-26

白沙村等接壤,总面积为 8.26 km²。研究区地形为 低丘陵和平原地貌,地面高程 5.2~125.0 m,地表无 基岩出露,皆为第四系所覆盖,东部与珠江相临界,西 部丘陵地带分布有三个山塘,总水面面积 37.7 万 m^2 , 蓄水量 100.7 m^3 。区内的主要河涌有横沙涌、 平乐南涌和泌冲涌等,总体流向自北西向南东方向汇 人珠江,三条主要河涌的径流、排泄条件相对独立,河 涌水体成为模拟区内地下水的补给来源,河涌水位直 接受珠江出海口潮汐影响,变化幅度 0.8~1.6 m。 据地质钻探揭露,区内的第四系厚度为13.5~57.1 m,一般为15.8~26.3 m,第四系内的砂层分布于局 部地段,部分钻孔揭露有砂层,含水介质为粉细砂、中 粗砂及砾砂等,为孔隙潜水、局部弱承压。第四系覆 盖层之下的地层有早古生代石炭纪的下统大赛坝组 $(C_1 d_s)$ 、下统石磴子组 (C_1) 、下统测水组 $(C_1 c)$ 、中上 统壶天群(C2+3ht)和白垩纪大塱山组(K1dl)及正长 斑岩,其中石磴子组(C₁)灰岩及中上统壶天群(C₂₊₃ ht)底部的灰岩质砾岩的岩溶裂隙、溶洞发育,较少充 填或半充填,但受岩性及构造的影响,岩溶较发育且 连通性较好,为研究区的地下水赋存提供了有利条 件。金沙洲一带是由河海相冲积形成的冲积平原,其 下部多有厚度不等的砂层、砂砾层及黏土层等,这些 松散层构成主要地下水含水层,即孔隙水含水层,其 次为灰岩分布区内岩溶裂隙形成的岩溶裂隙水。

2 地下水系统结构模型

2.1 地下水边界条件概化

金沙洲模拟区范围内的地下含水层系统是一个 相对完整的地下水含水层系统,主要有第四系砂层含 水层和基岩岩溶裂隙含水层。因此,模拟区的边界条 件可概化为三类边界条件:定水头边界、径流边界和 隔水边界(图1)。东部边界:金沙洲东面环水,与模 拟区内地下水有水量交换,枯水期的珠江水位低于模 拟区内的第四系水位,起排泄地下水的作用;丰水期 的珠江水位升高,可以补给模拟区的孔隙水含水层, 可视为径流边界。由于灰岩顶板覆盖有孔隙含水层, 故灰岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 故灰岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 齿灰岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 如天岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 如天岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 如天岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 动灰岩可视为隔水边界,但其上部覆盖的孔隙含水层, 面部边界,第二层含水层为隔水边界。南部边界:第 量交换,主要为地下径流侧向补给,可作为径流边界。 西部边界;西侧山丘地区为金沙洲地下水含水系统的 分水岭,其山脊线可视为零流量边界,即为隔水边界。 垂向边界:潜水含水层自由水面为系统的上边界,通 过该边界的潜水与系统外发生垂向水量交换,如大气 降水入渗补给等:下部以基岩中风化层底板为底部边 界,按零通量边界处理,这是因为底部未风化的基岩 几乎不透水。金沙洲武广客运专线金沙洲隧道1# 竖井降水中心概化成抽水井,作为模型的第四类边界 (图1)。地下水系统符合质量守恒定律和能量守恒 定律:含水层分布广、厚度大,常温常压下地下水运动 符合达西定律;考虑浅、深层之间的流量交换以及计 算软件的特点,地下水运动可概化成空间三维流;地 下水系统的垂向运动主要是层间的越流,三维立体结 构模型可以很好地解决越流问题;地下水系统的输 人、输出随时间、空间变化,故地下水为非稳定流;计 算参数随空间变化,体现了系统的非均质性,特别是 水平与垂向上有明显的方向性,所以参数概化成各向 异性。

2.2 含水层系统结构概化

金沙洲模拟区涉及的地层从地表第四系到中风 化基岩(中风化以下为隔水层),中风化和强风化的基 岩属于裂隙含水层。通过分析所收集的钻孔资料,同 时根据模拟区地下水系统含水介质的物质组成及水 文地质特性,对金沙洲模拟区的含水层进行适当的归 并和概化,可将其内部结构概化为四层,目的是方便 进行含水层的三维可视化与水流数值模拟。金沙洲 含水层的第一层为人工填土层、淤泥土和弱透水层, 第二层为砂层(第四系含水层),第三层为基岩风化残 积土弱透水层,第四层为基岩岩溶裂隙含水层,如典 型水文地质剖面示意图(图 2)所示。

3 地下水系统数值模拟模型

3.1 数学模型及网格剖分

为了建立地下水数值模拟模型,首先对前述建立 的水文地质概念模型进行数学描述,然后选取合适的 求解方法进行建模计算。根据金沙洲模拟区的水文 地质条件、钻孔、地下水水位动态及抽水试验成果等 资料,建立地下水系统数值模拟模型,拟选用确定性 分布参数三维裂隙岩溶承压~潜水数学模型来模拟 其内部结构、水流运动方式及水量的时空转化过程。 对于非均质、各向异性、空间三维结构、非稳定地下水 流系统,可用地下水流连续性方程及其定解条件式来 描述。



图 1 金沙洲地下水系统模拟区边界类型划分图 Fig. 1 Boundary types of groundwater systems in Jinshazhou

模拟区范围以金沙洲界线为模拟边界,模拟面积 8.26 km²。重点模拟目的层为第四系含水层和基岩

裂隙含水层,模型底界控制埋深约 70 m。将模拟区 范围内平面(即每一个模拟层)剖分为 9 350 个结点,



图 2 金沙洲典型含水层剖面概化示意图



14 092 个三角单元。模型垂向上共分 4 个模拟层,4 层模拟层的总结点数为 9 350×4=37 400 个,总单元 数为 14 092×4=56 368 个。金沙洲模拟区的三维网 格剖分图见图 3。



图 3 金沙洲地下水数值模拟区网格剖分图

Fig. 3 Mesh generation of groundwater numerical simulation area in Jinshazhou

3.2 水文地质参数划分及源汇项处理

金沙洲地下水数值模拟模型主要的水文地质参数为渗透系数、给水度、储水系数及弹性释水系数等。 各种参数的大小的初始值按照前人的工作成果,利用 金沙洲地质灾害综合勘察资料、1:5万佛山市及广 州市幅综合水文地质图等数据资料,并结合模型识别 和验证时期进行适当调整确定。为保证对计算精度 不产生影响,并使水文地质参数分区简化,将每一个 渗透系数分区同时视为给水度、储水系数分区。渗透 系数的初始分区按地形地貌、沉积类型和地层岩性等 进行划分。各区的参数初始值根据抽水试验、沉积类 型和地层岩性、地层时代等特征进行估值,垂向渗透 系数根据类似地区的计算经验估计给值。基岩裂隙 含水层考虑到断层对含水层导水性的影响,沿断层的 方向生成缓冲区,加大缓冲区的渗透系数。

源汇项主要考虑地下水开采量、垂向入渗补给量 和蒸发量。现状条件下,计算区地下水开采有人工开 采,武广客运专线施工人工开采概化为井单元处理。 垂向入渗主要考虑两方面:一是接受大气降水的入渗 补给,取多年加权平均降雨量;二是接受地表水的入 渗补给,计算区内分布多条河涌,补给量主要与河道 的过水量、河道下部地层岩性有关,采用河流补给系 数法确定补给量,在数值模拟中概化为沿河道分布的 单元补给强度。模拟过程中不考虑蒸发量。

3.3 模型验算与校正

为了判断最终模型是否能全面、客观地表征模拟 区的具体水文地质条件和特征,需要进行模型识别验 证。模型识别的基本方法有试估一校正法和自动调 整参数法等两种。金沙洲地下水数值模拟模型的识 别与检验过程采用试估一校正法,数值模拟结果的可 靠性是通过比较计算的地下水水位与实测地下水水 位的拟合程度来检验。取 K36、K37 和 K723 三个钻 孔观测水位数据与模拟水位数据进行对比,对数值模 拟模型进行检验,取模型识别的时段为 2009 年 7 月 13 日至 2009 年 12 月 31 日,取时间步长为 1 天,共 计 1 171 个时间步长,以实际水位和计算水位的拟合 情况作为调整参数的依据。对水位变化值较小(小于 5 m)的情况,水位拟合误差结果一般应小于 0.5 m (图 4)。从图中可以看出,经过识别的参数计算的水 位线与实测水位线趋势相同,误差都在容许范围 15%之内。通过对地下水计算水位与实测水位拟合 误差进行统计,模型的识别与检验阶段观测孔的水位 拟合情况较好,并具有相同的变化趋势,能够较好反 映出该点水位动态趋势。这些充分说明了含水层结 构、边界条件概化、水文地质参数的选取及源汇项的 确定都是基本合理的,建立的数学模型能较真实地刻 画金沙洲模拟区的地下水系统特征,仿真性强,可以 利用建立的数值模型进行地下水流场的分析。



图 4 实测水位与模拟水位检验图



4 数值模拟计算与结果

根据广州市地质调查院的监测资料,金沙洲武广 客运专线金沙洲隧道施工对金沙洲地下水动态变化造 成的影响大致可分为五个阶段。第一阶段为 2007 年 4 月 23 日至 2007 年 7 月 14 日,武广客运专线金沙洲隧 道开展 1 # 竖井施工,抽排地下水量约 750~3 000 m³/ d,平均约为 1 200 m³/d;第二阶段为 2007 年 7 月 14 日至 2007 年 10 月 16 日,隧道停工,地下水位迅速恢 复至初始状态,并保持相对稳定;第三阶段为 2007 年 10 月 16 日至 2008 年 8 月 15 日,隧道边注浆止水边施 工,这一阶段隧道抽排地下水量约为2 300 m³/d;第四 阶段为 2008 年 8 月 15 日至 2009 年 5 月 8 日,隧道全 面施工,抽排地下水量 2 000~3 500 m³/d;第五阶段为 2009 年 5 月 8 日至今,隧道完工,但隧道仍在抽排地下 水,抽排排水量约 1 000 m³/d 左右。

根据武广客运专线金沙洲隧道施工抽排地下水的动态演变过程,武广客运专线金沙洲隧道1#竖井施工抽水可分为1200 m³/d、2300 m³/d、3200 m³/



图 5 工况一金沙洲第四系砂层含水层模拟区流场分布图 Fig. 5 Flow field distribution in aquifer simulation area of Jinshazhou Quaternary sand layer for condition one

4.2 工况二数值模拟结果

武广客运专线金沙洲隧道施工降水抽排地下水 量增加到2300m³/d时,金沙洲地下水位稳定时的 地下水流场见图7和图8。随着抽排地下水量的增 加,武广客运专线金沙洲隧道抽排地下水中心部位的 地下水位降深明显增大。同时,图8表明抽排地下水 量达到2300m³/d时,武广客运专线金沙洲隧道一 带的基岩岩溶裂隙水位下降至低于-5m高程,其中 隧道1#竖井施工降水中心周围的基岩岩溶裂隙水 位下降至低于-7m高程,且抽水中心点周围的地下 水位等值线加密,地下水位坡降加大,流速加快。 d 等三种典型工况。因此,选取抽排地下水量 1 200 m³/d(工况一)、2 300 m³/d(工况二)及 3 200 m³/d (工况三)等三种代表性降水工况进行金沙洲地下水 流场数值模拟计算。

4.1 工况一数值模拟结果

图 5 和图 6 是武广客运专线金沙洲隧道施工降 水抽排地下水量为 1 200 m³/d 时的地下水位稳定时 的地下水流场分布图。从地下水流场分布图中可以 看出,金沙洲地下水向武广客运专线金沙洲隧道施工 抽水的中心流动,形成以武广客运专线金沙洲隧道 1 #竖井工程施工降水点为中心的降落漏斗地段。



图 6 工况一金沙洲基岩岩溶裂隙含水层模拟区流场分布图 Fig. 6 Flow field distribution in the simulated area of the karst fissure aquifer in Jinshazhou for condition one

4.3 工况三数值模拟结果

武广客运专线金沙洲隧道施工抽排地下水量增加到3200m³/d时,金沙洲地下水位稳定时的地下 水流场分布图见图9和图10。当抽排地下水量增加 到3200m³/d时,抽排地下水中心部位的地下水位 降深显著增大;特别是金沙洲隧道1#竖井施工抽排 地下水中心周围的基岩岩溶水位下降到-20m高 程,地面塌陷发生地段的地下水位坡降进一步增大, 地下水流速更快,形成地面塌陷与地面沉降的危险性 进一步上升。



图 7 工况二金沙洲第四系砂层含水层模拟区流场分布图 Fig. 7 Flow field distribution in aquifer simulation area of Jinshazhou Quaternary sand layer for condition two



 图 9 工况三金沙洲第四系砂层含水层模拟区流场分布图
Fig. 9 Flow field distribution in aquifer simulation area of Jinshazhou Quaternary sand layer for condition three



图 8 工况二金沙洲基岩岩溶裂隙含水层模拟区流场分布图 Fig. 8 Flow field distribution in the simulated area of the karst fissure aquifer in Jinshazhou for condition two



图 10 工况三金沙洲基岩岩溶裂隙含水层模拟区流场分布图 Fig. 10 Flow field distribution in the simulated area of the karst fissure aquifer in Jinshazhou for condition three

4.4 地下含水层剖面模拟结果

为进一步认识抽排地下水活动对金沙洲各地下 含水层之间地下水位波动过程的影响,选择图1所示 的典型剖面 A-A'和剖面 B-B'分析不同工况时金 沙洲第四系砂层和基岩岩溶裂隙含水层的地下水位 演变特征,同时设置 ZK2004、ZK2003、ZK2002 及 ZK2001 和 ZK3015、ZK9008 及 ZK9018 分别作为 A -A'剖面和 B-B'剖面的模拟地下水位观测孔。不 同工况时地下水系统数值模拟计算得出的 A-A'剖 面和 B-B'剖面的第四系砂层含水层和基岩岩溶裂 隙含水层的水头分别如图 11 及图 12 所示,模拟观测 孔的稳定地下水位见表 1。



图 11 金沙洲 A-A'剖面不同工况含水层模拟水位

Fig. 11 Aquifer water level simulation on Jinshazhou A-A'profile in different conditions 1-工況-稳定水位 2-工況二稳定水位 3-工況三稳定水位 4-填土 5-淤泥 6-黏土 7-灰岩 8-砂岩 9-溶洞 10-断层



图 12 金沙洲 B一B′剖面不同工况含水层模拟水位

Fig. 12 Aquifer water level simulation on Jinshazhou B-B profile in different conditions 1-工況一稳定地下水位 2-工況二稳定地下水位 3-工況三稳定地下水位 4-人工填土 5-淤泥 6-泥质砂岩 7-灰岩 8-黏土 9-溶洞 10-断层

		0			•	
模拟地下水 位观测孔号	工况一稳定水位高程/m		 工况二稳定水位高程/m		工况三稳定水位高程/m	
	第四系砂 层含水层	岩溶裂隙 水含水层	第四系砂 层含水层	岩溶裂隙 水含水层	第四系砂 层含水层	岩溶裂隙 水含水层
ZK2004	4.13	4.12	4.10	4.01	4.05	3.95
ZK2003	1.25	1.18	1.15	1.10	0.98	0.72
ZK2002	3.93	3.90	3.90	3.85	3.80	3.65
ZK2001	5.33	5.33	5.31	5.30	5,28	5.25
ZK 3015	-0.92	-1.36	-4.34	-4.02	-14.94	-17.05
ZK9008	0.38	0.48	-0.98	-1.01	-1.08	-2.06
ZK9019	2.56	2.55	2.55	2.54	2.50	2.48

表1 含水层模拟观测孔稳定地下水位统计

Table 1 Statistics of groundwater level in observational wells from aquifer simulation

图 11 和表 1 表明,随着武广客运专线金沙洲隧 道施工抽排地下水量的增加,地下含水层的地下水位 下降明显。例如,广州市金沙中学地面塌陷(沉降)点 附近的地下水位变化更加剧烈,附近形成地下水强径 流带,造成地下水侵蚀强烈部位地下淤泥层内的局部 淤泥颗粒迁移、流动,易形成土洞,从而引发地面沉降 及地面塌陷。图 12 和表 1 表明,武广客运专线金沙 洲隧道施工抽排地下水形成降落漏斗的中心位置位 于 1 # 竖井及周边一带地下水位快速下降的同时,对 周边含水层的地下水疏干作用强烈,致使淤泥层内的 淤泥产生排水固结和失托沉降,引起地面沉降变形。

5 讨 论

综上所述,金沙洲地区地质灾害的发生主要由三 个方面的因素构成,第一是金沙洲区内断裂构造发 育,断层及不同规模的节理裂隙密集,造成可溶岩发 育多层裂隙和溶洞,洞隙之间连通性好,构成区域地 下水的主要径流场,例如,金沙洲隧道1#竖井位于 浔峰断裂(F3)的两条分支断层 F3-1 和 F3-2 之 间,且F3-1和F3-2断层带构成局部地下水强径 流带,地下水流速加快,易将溶洞和土洞内的填充物 带走,致使断裂带附近的地下淤泥层内形成土洞,随 着地面沉降量的累积,土洞进一步扩展,进而导致地 面塌陷。国内有学者对山东、徐州、唐山等地的塌陷 研究均显示出受断裂构造控制这一特点[10-13]。第二 是比较第四系砂层含水层与基岩岩溶裂隙含水层的 地下水位变化幅度,前者小于后者;第四系砂层含水 层与基岩裂隙含水层之间存在厚度变化不均的风化 残积土隔水层或弱透水层,当二者之间的风化残积黏 土层在施工过程中被贯穿时,砂层内的砂粒在水头差 的作用下可穿过黏土层向基岩中的溶洞流动,导致砂 层内形成空洞,从而形成地面塌陷和地面沉降地质灾

害。Meng^[14]等学者对其机理有较为详细的研究。 第三是金沙洲地区灰岩覆盖层内的第四系松散土体 中普遍分布厚度较大的淤泥层,淤泥具有含水量高、 孔隙比大、高压缩性、高灵敏度及抗剪强度低等特点, 其工程地质性质极差,是地面沉降的敏感地层;随着 工程施工降水造成地下水位降低,软弱淤泥容易出现 排水固结沉降和失托沉降,尤其是覆盖于灰岩顶面之 上的淤泥更容易沿岩溶管道流失,这些地段可形成更 为严重的地面沉降。蒋小珍等^[15]对湖南宁乡大成桥 充水矿山疏干区岩溶系统水气压力的研究与此原理 类似。

隧道施工抽排地下水的强度直接影响着金沙洲 岩溶塌陷和地面沉降的强度及范围,对比不同工况时 金沙洲地下水流场的数值模拟计算结果,有如下几点 讨论及认识:

(1)从金沙洲地下水流场数值模拟的结果上看, 武广客运专线金沙洲隧道施工降水是引起金沙洲地 下水流场变化的主要原因;武广客运专线金沙洲隧道 施工期间,地下水的流动方向由四周向武广客运专线 金沙洲隧道施工降水中心流动,形成以施工抽水点为 中心的降落漏斗,地下水位变化明显。

(2)随着武广客运专线金沙洲隧道施工抽水量的 加大,地下水位降深加大,地下水流速加快,改变了地 下水的天然流场状态,形成水位下降漏斗及地下水强 径流排泄带。由于地下水的水动力条件突变,水位降 落过快,地下水流速将大大增加,水动能增加,加速地 下水对泥沙的搬运动力,增大对岩土体结构的冲刷作 用,使原来充填或半充填与岩溶裂隙、管道中的软土 随水被带走,岩溶通道得到疏通,使与岩溶管道连通 的土洞及覆盖层稳定性受到破坏,容易形成中空土 洞,从而导致发生地面塌陷。

(3)金沙洲地面沉降的形成一方面是抽水引起地 下水位持续下降,造成孔隙水压力减小,然而土体承 受的总压力不变,因而有效应力增大,有效应力增量 的持续作用导致土层表现出被压缩的状态;另一方 面,含水层顶板软土内的结合水可形成向含水层的渗 流,导致软土固结,出现程度不同的塑性变形或永久 变形。因此,随着地下水水位的下降,金沙洲一带的 软弱淤泥土容易出现排水固结沉降和失托沉降,从而 产生地面沉降灾害。

6 结 论

(1)高铁金沙洲隧道施工降水是引起金沙洲地下水流场变化的主要原因,高铁隧道施工大量抽排地下水时,地下水位变化形成以抽水点为中心的降落漏斗;

(2)随着抽水量的加大,形成水位下降漏斗及地下水强径流排泄带,加速地下水对泥沙的搬运动力, 增大对岩土体结构的冲刷作用,使与岩溶管道连通的 土洞及覆盖层稳定性受到破坏,从而导致地面塌陷的 发生;

(3)随着地下水水位的下降,金沙洲一带的软弱 淤泥土容易出现排水固结沉降和失托沉降,从而产生 地面沉降灾害。

参考文献

[1] 黄健民,吕镁娜,郭宇,等. 广州金沙洲岩溶地面塌陷地质灾害 成因分析[J]. 中国岩溶,2013,32 (2): 167-174.

- [2] 郭宇,黄健民,陈建新,等. 广州市白云区金沙洲地区地质灾害 风险区划[J].热带地理,2013,33(6):659-665.
- [3] 郭字,黄健民,周志远,等.广州市白云区金沙洲地区地质灾害现 状及防治对策[J].中国地质灾害防治学报,2013,24(3):100-104.
- [4] 郑小战,黄健民,李德洲.广花盆地南部金沙洲岩溶演变及环境 特征[J].水文地质工程地质,2014,41(1):138-143.
- [5] 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.
- [6] 康春景,张绪教,吴中海,等. 滇西怒江河谷潞江段岩溶发育特征 及其对工程的影响[J].地质通报,2012,31(2/3):374-381.
- [7] 郑小战,郭宇,戴建玲,等.广州市典型岩溶塌陷区岩溶发育及影响因素[J].热带地理,2014,34(6):794-803.
- [8] 郭晓东,田辉,张梅桂,等.我国地下水数值模拟软件应用进展 [J].地下水,2010,32(4):5-7.
- [9] 张立志. 基于 FEFLOW 的大兴区地下水动态模拟研究[D]. 北 京:中国地质大学,2009:1-66.
- [10] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等.山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特 征及形成机理[J].中国岩溶,2015,34(5):495-506.
- [11] 邢雪,周丹,罗跃.江苏徐州岩溶塌陷及其防治对策[J].中国地 质灾害与防治学报,2014,25(4):51-58.
- [12] 李颜贵,刘子龙,于孝民,等. 唐山黄庄岩溶塌陷形成条件和机 理分析[J].中国岩溶,2014,33(3):299-307.
- [13] 石树静,张勤军,康志强,南宁市坛洛镇岩溶塌陷群成因机制分析[J].中国岩溶,2015,34(5):507-514.
- [14] Meng Y, Lei M T, Lin Y S, et al. Models and mechanisms of drilling-induced sinkhole in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7); 1961-1969.
- [15] 蒋小珍,雷明堂,管振德.湖南宁乡大成桥充水矿山疏干区岩溶 系统水气压力监测及突变特征[J].中国岩溶,2016,35(2): 179-189.

Groundwater monitoring and numerical simulation under the influence of linear engineering in karst areas: A case study of the Jinshazhou area, Guangzhou City

ZHENG Xiaozhan^{1,2}, GUO Yu^{1,2}, DAI Jianling¹, CHEN Xiaoyue², HUANG Jianmin²

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, CAGS & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;
2. Guangzhou Indtitute of Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510440, China)

Abstract This paper establishes a conceptual model of the groundwater system by generalizing the hydrogeological conditions, and then builds a numerical simulation model of groundwater flow in the study area based on FEFLOW. The simulation shows that groundwater flows to the center from the surroundings during the construction of pumping, and forms a depression cone. The simulation results areconsistent with the geological disasters both in time and space. According to the study results, the pumping intensity should be strictly controlled in the Jinshazhou to prevent ground collapse and ground subsidence.

Key words karst collapse, groundwater, Jinshazhou, numerical simulation

(编辑 吴华英)