

广州市地面塌陷特征与防治对策的初步研究

程鉴基

(广东省建筑科学研究院, 广州 510500)

[摘要] 广州市地面塌陷频繁发生,近20年来呈波浪式上升趋势,主要分为岩溶地面塌陷和工程地面塌陷两种。具有点多面广、灾害点个体规模小、稳定性差、活动频繁、危害严重、地质灾害发育呈明显的地域性以及季节性发育与分布特点。岩溶地面塌陷主要分布在广花盆地的花都区、白云区,工程地面塌陷主要分布在主城区。地面塌陷形成条件复杂,是多种因素相互作用的结果。地层岩性是其形成的内在要素,在一定程度上决定着地质灾害的发育程度与类型。人为因素和强降雨是地面塌陷的主要诱发因素。岩溶地面塌陷主要是由于过量抽取地下水或矿山疏干排水、地下采空、暴雨激发所引起;工程地面塌陷主要是人类经济工程行为所致,主要包括排水疏干与突水(突泥)作用、人工加载、人工振捣、人工振动、人工开挖、基坑、桩基、地表渗水、坑道、过街隧道、地铁等地下工程结构掘进等。对地面塌陷的防治应采用点面结合综合治理的方法。

[关键词] 地面塌陷;时空分布;诱发因素;防治对策

中图分类号: TU421 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2011) S2-0443-06

Preliminary study on characteristics of ground collapse and countermeasures in Guangzhou

Cheng Jianji

(Guangdong Provincial Academy of Building Research, Guangzhou 510500, China)

Abstract: Ground collapse frequently occurs in Guangzhou in the last 20 years, and it is divided into two main types, which are karst collapse and engineering surface collapse. The collapse has characteristics of widely distribution, small-scale, poor stability, activity frequency, serious harm and development of regional and seasonal. Karst ground collapse is mainly distributed in the Huadu and Baiyun District of Guanghua Basin. Engineering surface collapse is mainly distributed in the main urban areas. Ground collapse forms complex conditions, which is the result of the interaction of several factors. Lithology is the internal of ground collapse, which determines the degree of geological disasters and type of development to some extent. Human factors and heavy rainfall are the main predisposing factor of ground collapse. Karst land collapse is mainly due to excessive pumping of groundwater or mine water drainage, underground mined, and heavy rains. Engineering ground collapse is mainly caused by human economic behavior works, including dewatering and drainage, manual loading, manual vibrator, artificial vibration, artificial excavation, foundation, pile foundation, surface water seepage, tunnel, subway and underground excavation engineering structures, and so on. In order to prevent and control ground collapse, comprehensive approach should be adopted, combining main points with all aspects.

Keywords: ground collapse; spatial and temporal distribution; predisposing factors; control measures

0 前言

广州市位于广东省中部偏南、珠江三角洲的东北缘,地处海陆结合部,地质环境复杂,淤泥质软土分布广泛。由于城市化进程加快,人类经济活动剧烈,特别是地下工程施工。在各种自然因素及人为因素的影响下,地面塌陷尤其是工程塌陷频繁发生,而导致地面塌陷发生的原因是多方面的,主要是降雨在时间和地域上过于集中造成的,也与人类违背自然规律而进行经济工程活动时,对地质环境的破坏密切相关。据不完全统计,1990年以来,广州发生地面塌陷56次,直接经济损失达8000万元以上,每年因人类工程经济活动形成或诱发的地质灾害约占全市地质灾害总数50%左右。

试图在对近年来开展广州市地质灾害调查与区划成果分析研究的基础上,进一步分析和探讨地面塌陷形成类型、分布特征、诱发原因,并提出预防地面塌陷的措施与对策。以便积极主动有效地开展地面塌陷预防,采取切实可行的防治措施,避免和减轻致灾地质作用给人民生命财产造成的损失,维护社会稳定,保障生态环境安全,促进国民经济可持续发展。

1 自然地理环境

广州处于亚热带,属亚热带典型的海洋性季风气候,气候温暖、雨量充沛、夏长冬短、是一个四季长春的“花城”。广州市北依白云山,南临珠江,

作者简介:程鉴基,工程师,Email: CJJ2019@163.com。

常发育河流二级阶地和三级阶地,并具有独特的地质环境特征。广州地区新构造活动起于晚第三纪~第四纪,地质构造复杂,对地层的构成、发育影响较大,岩相多变、沉积类型复杂,是内外动力地质作用的结果。

1.1 多雨的气候背景

广州市纬度低,北靠大陆,南临南海,受南方海洋性暖湿气候和季风的影响,形成了典型的亚热带海洋性季风气候,冬夏季风交替,雨热同期,雨量充沛。区内温和湿润,四季的特点是:春季阴雨连绵,雨日特多;夏季高温湿热,暴雨集中,洪水持续出现;秋季台风入侵频繁;冬季很少严冬,雨量稀少。广州年平均气温 21.5°C ,气温年内变化为单峰型,最高温在 7~8 月,最低温在 1 月,年平均降雨量 $1689.3 \sim 1876.5\text{mm}$,4~9 月为雨季,占年降雨量的 80% 以上,降雨量时空分布不均匀,差异性特别显著。受厄尔尼诺的影响,连续性的强降雨天气或暴雨成为地面塌陷的最常见最主要的诱发因素之一^[1]。

1.2 复杂的地质条件

广州市地质结构相当复杂,有中低山、丘陵、岗台地、冲积平原、滩涂和水域等六种地貌类型,分布着不同类型的地层,包括海陆交互相沉积土层。广从断裂、广三断裂、瘦狗岭断裂、沙湾断裂、石碣断裂和西江断裂将本区分割成不同的构造块体,并以块断差异升降为主要活动方式,形成不同的地貌单元。广州地区东北部丘陵普遍存在 4 级夷平面和 2 级剥蚀台地。河流阶地保留不佳,但仍可分 3 级,地貌面和微地形的形成反映了新构造间歇性抬升。广州东郊车陂河同级阶地的高度,在断裂附近的要比断裂两侧的高数米;流经广从断裂两盘的白土河河流阶地也发生变形。断裂对河道发育有着控制作用。断裂带岩层较为破碎,河流容易沿破碎带发育,特别是一些河道较直的河流,多沿构造线发育。同时,构造活动的继承性也导致了河流发育的继承性,广州地区主要河流多是沿断裂带发育。

1.3 活动的断裂构造

广州受加里东构造运动、海西运动、燕山运动和喜马拉雅山运动等多期构造运动作用,构造格局非常复杂,而且断裂构造发育均为活动性断裂。它们不仅控制着区域地壳的升降活动、地貌景观差异和大地构造单元,还诱发地震。本市位于华南褶皱系粤中凹陷的中部,断层 40 余条,褶皱 30 多个。NNE 走向的广从断裂,近 EW 走向的瘦狗岭、广三断裂为区内两大主要活动断裂,是市内构造的基本骨架,自加里东构造阶段便开始活动,经历了海西-

印支构造阶段、燕山构造阶段和喜马拉雅构造阶段。主要表现为强烈的继承性断裂活动,并引起差异断块升降,即地洼学说的地洼余动期块状断。

(1) 广三-瘦狗岭断层带

据热释光测年资料,断层距今 10~20 万年有过活动。对地震资料分析,于 1372 年、1915 年先后发生过 4.75 级地震,1983 年又发生过 0.6~2.6 级地震 5 次。在瘦狗岭断层所做的断层气测量,汞气含量已超过异常下限值,反映断裂近期仍在活动,属典型的活动性断裂。

(2) 广从断裂带的活动性

据热释光测年资料,断层距今 8.11 万年有过活动,即晚第三纪更新世以来,曾有过强烈活动,沿着断裂曾发生过 4 次 4.0~4.9 级历史地震。自 1971 年建地震台以来,沿着断裂记录到 2.0~2.9 级地震 17 次,3.0~3.9 级 3 次。该断裂近百年来都有过活动,属活动性断裂。

1.4 广布的淤泥质软土

广州新构造运动的活动性断裂对广州地区第四纪沉积类型和沉积厚度有很大的控制作用。如广从断裂北东段,上升盆为萝岗-帽峰山,第四纪沉积类型主要为残、坡积物及冲、洪积物,厚度较薄;下降盘则主要为冲积物,部分地区为冲积海积物,沉积物厚度较大,一般为 3.0~30m,局部地区达 60 余 m。瘦狗岭断裂北盘为萝岗-帽峰山;南盘为海冲积平原,沉积厚度约为 20~30m。第四纪沉积物往往沿断裂带成条状分布,并形成一系列沉积中心。如西江断裂沿北西向呈带状延伸,并在大沙形成沉积中心,沙湾断裂所控制的白坭河谷,第四纪沉积也呈带状展布。

广州软土主要分布于海积平原,沿珠江水系两侧往北至花都毕村、清潭;顺流溪河上至李溪、太平场;由和顺往西自官窑经三水区与北江水系软土沟通。此外,在山前洼地、丘间谷地也有零星分布,如龙眼洞、狮岭等地。软土的埋藏条件受第四纪沉积的古地理环境控制,平原区广泛分布裸露型软土(埋藏 < 3m),埋藏型(> 3m)软土则多分布在珠江水道、佛山水道和北江两侧,有时埋藏软土与上层软土共同组成双层淤泥。这种广布的淤泥层厚度大,地下水埋藏浅,天然含水量为 66.7%~82.6%,液性指数 1.44~2.49,压缩系数 0.11~0.186 cm^2/kg ,具有强烈的触变性、流塑性、高压缩性、不均匀性。在城市基础设施施工的动静载荷变化的影响或施工振动,砂土液化、淤泥排水压密,土体快速突变,从而导致工程塌陷^[2]。

1.5 剧烈的人类活动

广州市现辖10个区,2个县级市,总面积7434.4km²。2004年末户籍总人口为737.67万人,外来常住人口300多万,总数超过1000万。市区拥有众多大型工业企业,地表水污染又日益严重,工厂和村民对地下水淡水的需求很大,长期超量开采浅层地下水潜水和承压水是地面塌陷的主要原因。广州市城市建设以高层建筑基础工程、市政工程、隧道地铁等为代表的建设施工过程,如基坑开挖、排水、沉桩、盾构掘进、坑道等地下工程都可能造成地面塌陷;若工程穿过易液化砂层,或饱和淤泥质软土及花斑易膨胀性黏土时,可能造成支护结构失稳,导致基坑和隧道附近塌陷。

2 地面塌陷的形成条件及诱发因素

地面塌陷的形成条件主要有地形地貌、地质构造、地层岩性、岩土类型、活动断裂等,其诱发因素又分为自然因素和人为因素,主要为大气降雨和人类工程活动。

2.1 岩溶塌陷因素分析

广州地区不同时期的古老地层,分布广泛的石灰岩及其堆积层,以及珠江三角洲软土沉积层,复杂的各类地质构造,类型多样的地貌形态,较为活跃的新构造运动,高温、降雨量时空分布不均匀的气候特征,不合理的较大规模经济工程活动等构成了广州市地面塌陷的孕灾环境。除了开采地下水引起地面塌陷外,浅层岩溶也会引起地面塌陷。如广州大坦沙污水处理厂地质钻探时,当揭穿第四系土层后,地面发生塌陷,钻机下沉达8m。又如在竹料钻探时,当揭穿基岩风化土后,地面发生塌陷,钻机下沉约3m,塌陷面积4m×6m。

(1) 过量抽取地下水或矿山疏干排水。岩溶含水层是广花盆地最主要的开采水层。由于广花盆地工矿企业分散,边缘地区自来水管未有铺设,自来水难以供应,因此分散性供水的开采地下水有增无减,开采量一直呈上升趋势。

(2) 广州市煤炭资源主要集中在白云区和花都区一带,煤油大致分为3个矿区:广州加禾、花都狮岭-中东岭、象山-西岭等矿区。白云区的同德围既是隐伏岩溶区,又是历史上旧煤窖采空区,地下不均匀地分布着大大小小的岩溶洞或挖空洞,为岩溶塌陷多发区。

(3) 断裂构造的影响。区内北东向构造发育,尤其是广从断裂在晚近时期仍由一定的活动,表现为沿断裂带有微震动和弱震,尚有温泉分布。断裂两侧的相对位移导致了松散沉积物的微弱变形,进

一步发展便引起地面塌陷。

(4) 矿山开采等地下工程对地面塌陷的影响。广州市的地下工程1980年以前以煤矿开采为主,80~90年代以采石场开采为主,2000年以后以地铁隧道为主。长期以来,开采布局不合理,选址不科学,破坏环境地质的平衡状态,易造成地面塌陷。

2.2 工程塌陷致灾因素

在广州市主城区内,不合理或强度过大的人类工程活动是地面塌陷最主要的诱发因素。当然,每次塌陷的出现可能是几种因素共同作用的结果。

(1) 排水疏干与突水(突泥)作用。矿坑、隧道、人防及其他地下工程,由于排疏地下水或突水(突泥)作用,使地下水位快速降低,上方的地表岩、土体平衡失调,在有地下空洞存在时,便产生塌陷。如1999年8月7日,中山八路33号地段,由于工地施工大量抽取地下水导致20m多的地表塌陷,直接经济损失20多万元。

(2) 人工加载。在有隐伏洞穴发育部位上方的人工加载也会导致地面塌陷的产生。1999年4月6日,起义路115号附近马路由于排水渠长期受到挤压而发生塌陷。2005年7月21日中午12时,海珠区江南大道中某建筑工地地面塌陷主要原因是桩基实际开挖深度超过设计深度4.1m,造成原支护桩成为吊脚桩,而且该处又存在软弱透水夹层,南边坑顶严重超载达140t,是塌陷的直接导火线。

(3) 人工振动。施工导致的振动使饱和砂土液化,液化后的砂土呈流塑状态,砂土随着液体流走,从而引起地面塌陷。1996年10月6日,天河区天河路万新大夏南侧附近慢车道及人行道地面塌陷的致灾原因,是由于万新大夏工地有厚达4m的呈流塑状淤泥质黏土,在基建施工持续振动下液化,又加上地下供水管多次断裂,水流冲刷及潜蚀作用等原因最终导致地面塌陷。

(4) 地表渗水。疏水管路渗漏或场地排水不畅造成地表水下渗或污水下渗,也能引起地面塌陷。2001年6月14日天河区黄埔大道洗村路段,由于施工道路箱渠漏水造成长4m、宽2m的地面塌陷,经济损失10多万元。

(5) 人工开挖桩基。1994年7月15日,天河区沙河镇林和村北街二横巷发生长20m、宽17~20m地面塌陷,直接经济损失130万元。其发生原因是由于该处西侧开挖排桩19m深的帷幕桩孔。该处地势低平,集水较多,上部紫红色粉土变软,大规模的开挖桩基孔和排水疏干,改变了原来的相对稳定状态而导致地面塌陷。

(6) 地铁等地下隧道盾构掘进。盾构掘进过程中,由于不良地质、机械故障等原因引起掌子面的不稳定而坍塌,进而引起地面塌陷。1996年11月9日,华贵路122~138号约50m地面塌陷,经济损失约400万。致灾原因是:由于该处土体为流塑状、饱和状淤泥,砂层极其松软,地铁施工掘进,表层土体失稳导致地陷。2001年2月11日黄埔大道西洗村路段由于修建地下通道,引起砂土流失导致地面塌陷,直接经济损失达100万元。

3 地面塌陷分布特征

广州地区碳酸盐岩类主要分布在广花盆地和珠江三角洲北部局部地区,多呈北东~南西向条带状展布,除小面积零星露出地表外,其余均为第四系或下第三系、白垩系红层所覆盖。地下溶洞的分布大致可分为三个层次:顶层溶洞埋深20~30m,第二层溶洞埋深40~50m,底层溶洞埋深60~70m。这些溶洞层次的形成也反映了地壳的间歇性沉降,新构造运动控制了溶洞发育的强弱、方向和深度。

3.1 时间分布特征

本区地面塌陷的高发期与强降雨的高峰期基本吻合,即每年4~9月份为雨季的暴雨多发期,地面塌陷尤为严重。这一时期的降水丰沛,地面水位变幅大,成为隐伏岩溶塌陷的主要动力。自1999年厄尔尼诺多发期以来,气候异常,多暴雨和洪水易于诱发地面塌陷。同时,由于市政工程和城市地铁等地下工程建设的全面展开,地下施工振动大,过量抽取地下水,对岩土层破坏显著,地表因此失稳,工程地面塌陷频繁发生。各种地面塌陷有明显的波浪式上升趋势。

3.2 空间分布特征

3.2.1 岩溶地面塌陷空间分布特征

地面塌陷主要分布于广花盆地的花都区,白云区的江高镇、石井镇,从化市良口、石岭和面塘等,增城市的吕田、灌村、派潭一带等隐伏岩溶区。覆盖型岩溶地面塌陷主要发生于石炭、泥盆、白垩和二叠系灰岩分布的岩溶盆地内,特别是栖霞组、壶天组、石磴子组、天子岭组灰岩最为发育,一般发生在地形平坦的岩溶盆地,多为人工抽排地下水人为因素和地下水水位季节变动的自然因素综合作用下引发地面塌陷。广花盆地的江村、萧岗、新华三个水源地,由于多年来过量开采岩溶地下水而引起的地面塌陷点共150处,有75幢平房和楼房出现了宽窄不同的裂隙。其中江村水源地中部的双岗,有25幢民房出现了裂缝,范围约500m;向南庄18

幢民房出现裂缝,范围约22500m²;雅瑶和三向村有40幢民房出现裂缝,范围约400m²;大涵庄8幢民房出现裂缝,范围约400m²;萧岗水源地南部的三元里矿泉别墅有2幢楼房已出现裂缝,面积约2000m²;新华水源地在历史抽水过程中出现地面塌陷18处,范围约500m²。

3.2.2 工程塌陷空间分布特征

工程塌陷主要分布在广州市主城区,包括白云区、越秀区、荔湾区、天河区、萝岗区、番禺区。其范围大致为外环高度公路环绕地区,面积约300km²。比较集中分布的有几个典型的塌陷群。如康王路塌陷群、同德围塌陷群、大坦沙塌陷群、金沙洲塌陷群、黄埔大道塌陷群、鹅掌坦塌陷群、工业大道塌陷群等。如2001年1月9日江南大道北由于地铁施工抽水引起附近周边地面塌陷;2007年7月至2009年5月,由于武广客运专线地下隧道施工抽水引起的附近周边地面塌陷19起(处),地面沉降13起(处),涉及的区域面积约12m²,影响家庭263房1002人,潜在直接经济损失5000万元以上。

4 地面塌陷防治对策

在隐伏岩溶地面塌陷危险区,应坚持以防为主、防治结合的方针。岩溶塌陷具有特定的地质环境。因古生代石灰岩在地质构造和地下水的作用下,产生溶蚀并形成溶洞,易引发塌陷灾害。首先在规划上尽量避开在岩溶地面塌陷危险区搞城镇建设;其次对现有的村庄、城市建设进行全面的地面塌陷评估,对可能出现塌陷的建筑物停止使用和搬迁。

4.1 地面塌陷地区地基基础选型预防措施

目前广州地面塌陷地区常用的基础形式有预应力混凝土管桩、钻(冲)孔灌注桩和复合地基,每项工程采用何种基础形式应根据场地工程地质条件,结合结构荷载和工期等因素确定。

4.1.1 预应力混凝土管桩

预应力混凝土管桩强度高、耐打性好、工期短、造价低,适用于灰岩面埋深较大,且其上有较厚硬塑~坚硬黏性域中密~密实砂层、全风化岩、强风化岩的场地。如广州白云国际会议中心工程,下伏基岩主要为石炭系大塘阶石磴子段和测水段的灰岩、炭质泥页岩、含砾砂岩,局部为古老变质的混合岩,主要采用预应力混凝土管桩基础,重要部位采用钻(冲)孔桩,利用完整和较完整的灰岩作为桩端持力层。岩溶区常见的桩基质量问题有桩端持力层中溶洞和桩底沉渣等质量问题。

4.1.2 钻(冲)孔灌注桩

该桩型适用于灰岩面埋深较浅的地段、软弱土

层直接覆盖在灰岩面上或灰岩面上硬土层较薄的地段、重要工程或重要部位等。如广州新白云国际机场一期航站楼、广州白云国际会议中心工程等,其基础设计主要采用预应力管桩,重要部位则采用钻(冲)灌注桩基础。在地面塌陷的发育区采用钻(冲)孔灌注桩基础方案时,宜按桩位布置超前钻,施工时应考虑土洞、溶洞的影响,可能会突然大量漏浆、地面塌陷、桩机下沉等工程事故,必须采取预防措施及应急方案。如内环路广佛放射线工程,采用冲孔灌注桩基础,其中 A6-2, A6-3 标段受构造、地下水等作用影响,岩溶非常发育,要满足桩端持力层连续完整厚度 3~5m(或 >3D)的条件较困难,造成桩长偏大,成桩也困难,施工过程中部分出现斜孔漏浆、孔壁坍塌等现象,少数桩还出现卡钻、埋钻等问题,甚至出现地面塌陷。

4.1.3 复合地基

对于多层或小高层建筑地基,若上部土层较软弱,工期要求紧,则可采用复合地基。由于复合地基不需处理溶洞,地基承载力相对于原状土大幅度提高,且沉降较小,因此对于多层和小高层建筑是一种较好的基础形式。如同德花园采用深层搅拌桩复合地基,置换率 $m=0.2$, $\phi 500@1000$, 长度 $L=10\sim 15\text{m}$ 。桩端持力层为中粗砂层或粉质黏土层,水泥掺入量 15%~18%,单桩竖向承载力 100~150kN,复合地基承载力 120~180kPa。又如机场路汇侨新城二期的 8 栋 18 层建筑,采用长螺旋 CFG 桩进行软基处理。该桩型具有承载力高、沉降变形小等优点,在灰岩地区有良好的适应性和应用远景^[3]。

4.2 地面塌陷的预防管理措施

(1) 严格控制区域地下水的下降,避免地基土的干缩和湿胀,控制地面变形的发生。

(2) 减少人类工程活动的影响。减少地下工程施工时对岩土体扰动的影响;减少压水井的数量,建立集中供水设施;减少渗流通道。特别控制好矿山采石场,建筑工地基坑,生产井抽排地下水以及市政坑道、隧道、地铁等地下工程,避免过量抽排地下水引起地面塌陷的发生。

(3) 对于矿山开采引起的地面塌陷,应填埋塌陷区,用废矿石、矿渣对废弃坑道进行回填充实等处理。在隐伏岩溶区,尽量避免大降深抽排地下水,以保持地下水位正常,避免地面塌陷的发生。

5 广州市白云区金沙洲地面塌陷与地面沉降成因分析案例

5.1 工程概况

金沙洲社区位于广州市沙贝村,场地工程地质

条件复杂,既是典型的岩溶地区,又是软土地区。自 2007 年 7 月至 2009 年 5 月,金沙洲地区共发生 19 起小型地面塌陷、13 起地面沉降。灾害点集中分布于金沙洲南部,武广客运专线东西两侧的隐伏石灰岩地区,并受到断裂构造的控制和影响。地质灾害已造成西环高速、源林花园、向南街 2~38 号、沙凤新村复建房、凤岗村西侧民房、金沙洲中学教学楼与操场及新社区内道路发生地面塌陷与地面沉降,最大沉降量约 50cm,部分建筑物变形开裂,涉及的区域面积约 12 万 m^2 ,受影响家庭 263 户,1002 人。

5.2 场地工程地质条件

5.2.1 岩土条件

本工程场地处于珠江三角洲冲积平原地带,原为种植地,地面高程 5.0~10.0m 左右。主要地层自上而下分别为:人工填土层、冲积层淤泥砂、残积层粘土、基岩灰岩、局部砂岩。灰岩中溶洞较发育。

5.2.2 水文地质条件

本场地地下水位埋深 0.2~2.0m,地下水主要为孔隙水和岩溶水,分别赋存于粉砂岩和灰岩中,由大气降雨和珠江侧向补给,地下水丰富。

5.2.3 典型的特殊地质岩体特征

1) 岩溶发育,见洞率 13.8%~26.60%,洞高 0.3~10.8m,多呈串珠状分布,充填物为软塑~流塑状粘土,有少量土洞,洞高 0.3~3.9m; 2) 岩面起伏变化大,灰岩顶面埋深 6.9~58.8m; 3) 软土发育,部分直接覆盖在灰岩面上; 4) 地下水丰富,部分为承压水。

5.3 地质灾害成因调查结论

金沙洲地区脆弱的地质环境是地面塌陷、沉降易发的基本条件。该区总面积 826 万 m^2 ,其中石灰岩分布区达到 447 万 m^2 ,占总面积的 54%,岩溶率为 33.3%~95.4%。钻孔单井涌水量 522~1218 m^3/d ,地下水资源丰富且连通性好;广州年平均气温约 22℃,较高的平均气温促使溶蚀作用不断进行。该区共有 3 条北东-南西向的断层,其中两条通过灰岩分布区,受其影响,这一带的基岩比较破碎,节理、裂隙发育,为地表水和地下水的运移创造了良好的条件,促进了岩溶进一步发育。当区域地下水位持续下降时,岩溶区第四系土层在失去水的浮托力的同时,水力坡度也急剧增大,使孔隙水对土体的潜蚀作用加强。在孔隙间真空负压及地下水潜蚀作用下,土体不断流失,被搬运到下伏灰岩的溶洞中,在灰岩与上覆残坡积土层之间形成土洞。随着地下水的频繁升降作用,土洞向上发展

扩大。当潜蚀作用穿越残坡积土层顶部时,第四系土层就快速塌落,导致地面塌陷。另外,该区第四系覆盖层以淤泥、淤泥质土及砂砾层为主,饱和软土分布面积达 610 万 m^2 ,占总面积的 74%,软土厚度 1.6 ~ 16.3m,多处区域厚度超过 8m,含水量达 92.7%,压缩模量标准值只有 2.05MPa,承载力很低。当地下水位下降时,软土会因失水而固结收缩,引发不均匀的地面沉降,并导致基础结构条件不足的房屋发生变形开裂。

武广客运专线金沙洲隧道工程施工大量抽排地下水,是引发或加剧地面塌陷和地面沉降的直接因素。武广客运专线金沙洲隧道里程 DK2192+831 ~ DK2197+265,全长 4354m,其中 1140m 穿越灰岩区。隧道分为进口工区、斜井工区、1#竖井工区、2#竖井工区和出口工区,其中 1#竖井深 40.44m,2#竖井深 32.75m,两个竖井均处于灰岩区。隧道按竖井双向掘进组成施工,采用光面爆破,风动凿岩机钻孔,辅以人工机械开挖,初期支护喷射混凝土,初砌采用复合式衬砌。金沙洲地区已发生的 32 起地面塌陷和地面沉降。从空间上看,分布在武广客运专线铁路地下隧道东西两侧;从时间上看,灾害发生于 2007 年 7 月至 2009 年 6 月,正好是隧道抽排地下水施工阶段。据调查,天然条件下,金沙洲地区地下水水位标高为 0.30 ~ 2.40m。自 2007 年 7 月 14 日隧道施工引发第一起地面塌陷起(位于隧道 1#竖井西北侧约 130m 处,当时 1#竖井抽排水量约为 3500 m^3/d) 8 月至 10 月,工地停工进行止水帷幕施工,区内地下水位逐步恢复,多处在标高 2m 以上;2007 年 10 月恢复施工后,隧道抽排水量很快从 1000 m^3/d 上升到 2000 m^3/d ;从 11 月下旬至 2009 年 5 月,区内部分区域地下水位下降至 -19m 以下,最深 -24.05m,降深 21 ~ 26m;2009 年 5 月由于隧道穿越了灰岩区并贯通,抽排水量减少,约 400 ~ 600 m^3/d ,地下水位在缓慢上升。通过绘制金沙洲地下水位等值线图,较清晰地反映了区内地下水向武广客运专线隧道汇流,地下水降落漏斗中心位于隧道主井附近。区域性地下水位大幅下降是引发或加剧金沙洲地区地面塌陷和地面沉降的直接因素,而地下水位大幅下降主要是由武广客运专线金沙洲隧道工程大量持续抽排地下水引起的。

6 结 论

广州市地面塌陷都因生产井抽水、矿山(包括石场)开采、基坑、坑道、隧道、地铁等地下工程挖土抽水,建设基础疏干排水、大型建筑场地过于集中,大量抽排地下水等都易诱发地面塌陷。近年来经

济高速发展和人口不断增长,对自然环境的干扰破坏也愈来愈强烈,不合理工程活动也使地面塌陷日益加剧。主要表现为城内市政工程、建设基坑、坑道、隧道、地铁等地下工程的挖土和抽排地下水;城外主要是道路交通建设、矿山开采、开采地下水和采石场疏干排水等都直接引起地面塌陷。

(1) 广州市地质环境复杂,多雨的气候背景、活动的断裂构造、广布的淤泥质地层岩性、剧烈的人类工程活动都孕育着地面塌陷的出现,塌陷类型主要包括岩溶塌陷(含采空塌陷)和工程塌陷等。

(2) 广州地面塌陷有较明显的时空分布规律性。近 30 年来呈波浪式上升态势。每年分布集中发生在汛期 4 ~ 10 月份;在空间上,岩溶塌陷主要分布在广花盆地内的花都区、白云区和从化市等隐伏岩溶区;工程地面塌陷主要分布在广州市主城区,一般与工程量和工程强度成正比。

(3) 岩溶塌陷主要是由于过量抽取地下水或矿山疏干排水、采石场开发、地下采空、暴雨触发等所致;工程地面塌陷主要致灾因素有排水疏干与突水(突泥)作用、人工加载、人工振动、人工开挖桩基、地下隧道、坑道、地表渗水、地铁等地下工程盾构掘进施工。

(4) 针对灰岩地区不同的工程地质条件,尤其是典型的复杂岩溶和软土地层,结构荷载和工期等要求,采用预应力混凝土管桩、钻(冲)孔灌注桩和深层搅拌桩复合地基的基础形式。以灰岩为桩端持力层且桩端持力层厚度小于 0.5m 的预应力混凝土管桩位置布置超前钻,且进行灌浆加固桩端持力层。对钻(冲)孔灌注桩位置超前钻,确保桩端持力层厚度大于 3m(或 $\geq 3D$),要求穿过溶洞、灰岩破碎层,以厚度大于 3m 的完整和较完整的灰岩作为钻(冲)孔灌注桩桩端持力层。

(5) 对各类工程建设、新建矿山、坑道、隧道、地铁等地下工程,要做到统筹规划,合理布局,科学选址,并执行地质灾害易发区工程建设地质灾害危险性评估制度。

参 考 文 献

- 1] 刘江龙,吴湘滨,等.广州市地面塌陷分布特征与人为致灾因子分析[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(3):64-68.
- 2] 李平日,郑建生,方国祥.广州地区第四纪地质[M].广州:华南理工大学出版社,1989.
- 3] 程鉴基.覆盖型岩溶地基化学灌浆补强加固处理[J].铁道工程学报,1996,14(4):73-79.