

罗小杰, 罗程. 岩溶地面塌陷三机理论及其应用[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 171-188.
DOI: 10. 11932/karst2021y001

岩溶地面塌陷三机理论及其应用

罗小杰¹, 罗程²

(1. 长江岩土工程总公司(武汉), 湖北 武汉 430010;
2. 中机三勘岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要:为了给岩溶地面塌陷预测、监测、防治和应急措施提供理论依据, 全面总结了岩溶地面塌陷的发育规律, 认为岩溶、土体和诱发因素是岩溶地面塌陷的三要素。岩溶为土体丧失提供通道和储藏空间。土的工程地质性质决定了土体塌陷方式: “黏土块”坍塌、砂颗粒漏失、软弱土流失; 土体塌陷方式决定了土体塌陷机理; 据土体塌陷方式提出了由“土洞型塌陷”“沙漏型塌陷”和“泥流型塌陷”构成的岩溶地面塌陷三机理论: 黏性土和密实砂性土层中, 在外力作用下, 土洞顶板拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷; 由于诱发因素的触发导致可溶岩上方松散砂层中砂颗粒漏失而产生的地面塌陷现象称为沙漏型塌陷; 可溶岩上方软弱土体在外力作用下向可溶岩中流失而产生的地面塌陷现象称为泥流型塌陷。三机理论关注土体塌陷方式, 既解释了岩溶地面塌陷现象, 更回答了土体“如何塌”的问题。诱发因素是塌陷的外部影响因素, 不是塌陷机理的构成要素; 诱发因素产生作用力; 作用力改变土颗粒运动状态, 使土颗粒由“静止→运动”, 土体由“稳定→塌陷”。依据三机理论, 提出了岩溶地面塌陷综合地质预测方法, 建立了基于三个塌陷机理的土体塌陷确定性预测模型, 系统总结了岩溶地面塌陷监测、防治和应急措施方法, 形成了从理论到实践的、完整的岩溶地面塌陷思想体系。

关键词: 土洞型塌陷; 沙漏型塌陷; 泥流型塌陷; 塌陷预测; 塌陷监测; 塌陷防治; 塌陷应急处置措施

中图分类号: P642. 25 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2021)02-0171-18 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶地面塌陷是指覆盖型岩溶地区, 岩溶孔隙与溶洞等提供土颗粒运移通道和储藏空间, 外部诱发因素直接或间接地产生的作用力导致土体“黏土块”坍塌、砂颗粒漏失或软弱土流失而引起的地面沉降变形现象。岩溶地面塌陷常常造成重大经济损失, 严重威胁人民的生命和财产安全, 长期以来被引起广泛的关注, 国内外研究者做出了许多积极而有益的探索。

在成因机理方面, 原苏联著名地质学家A. П. 巴普洛夫(1898)提出了地面塌陷成因的“潜蚀论”, 认为地下水的活动是造成岩溶地面塌陷的重要因素。

上世纪70年代后期, 徐卫国等研究了矿山岩溶突水导致的地面塌陷后, 提出了岩溶塌陷的“真空吸蚀”机理^[1-3]。尽管“潜蚀论”和“真空吸蚀论”仍存在一些疑义^[4-5], 但是仍然较好的解释了一些地面塌陷现象, 目前已被多数研究者所接受。

上世纪80年代中期, 康彦仁、项式均等^[6-8]以大量的塌陷调查资料为依据, 按塌陷产生的主导因素和受力状态, 将岩溶地面塌陷划分为自然塌陷和人为塌陷两个大类和八种基本类型, 即: 重力塌陷、潜蚀塌陷、冲爆塌陷、真空吸蚀塌陷、振动塌陷、荷载塌陷、溶蚀塌陷和根蚀塌陷, 并提出了相应的8种致塌模式^[5-8]。

1994年, 陈国亮在前人塌陷机理的基础上, 进一

第一作者简介: 罗小杰(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事岩土工程地质勘察与城市岩溶研究工作。E-mail: lxj420601@sina.com。

收稿日期: 2020-10-02

步研究了包括垂直渗压、压强差、浮力、土体强度等四个效应在内的 11 个塌陷效应^[9]。

此外,还有研究者提出了一些新的机理,如共振论^[10-11]、机械贯穿致塌机理^[12-14]、胀缩—崩解效应^[15-17]、溯源侵蚀与软土流变机理^[18]等。

据不完全统计,目前文献记载的成因机理多达 19 个,且数量还有增加的趋势。大多数研究者认为岩溶地面塌陷现象是多机理叠加的结果^[5,12-13-14]。

尽管有研究者从力学角度讨论了不同类型盖层的塌陷机理^[7,11,19-24],但尚未取得共识。

从本质上讲,诸多塌陷机理或效应多将诱发因素作为塌陷机理的内容,并且只是解释了“塌陷现象”,没有回答“如何塌”的问题,因而多属诱发因素范畴或岩溶塌陷形成过程的某一作用或环节,还算不得系统的塌陷机理理论^[18,25]。

由于没有成熟的塌陷机理理论指导,岩溶地面塌陷的预测、监测、防治和应急处置等还存在较大的缺陷。

在塌陷预测方面,普遍采用所谓的半定量方法,如模糊预测模型、灰色预测模型、统计预测模型等。它们关注了各种诱发因素对岩溶地面塌陷贡献的不确定性,忽略了一定条件下岩溶地面塌陷与地质体间的必然性。尽管有研究者提出了土洞型塌陷的确定性预测模型^[26],但这些模型与诱发因素紧密关联,系基于特定诱发因素条件下的“量身定做”,没有普适性。另外,目前未见有沙漏型塌陷和泥流型塌陷的预测模型;对塌陷时间预报更只是尝试性探索。

在塌陷监测方面,尚未形成完整的、有塌陷理论依据的监测体系,检测方法和手段尚不健全。

在塌陷防治方面,防治方法缺乏系统性,有“头痛医头、脚痛医脚”和“无病呻吟”之嫌。前者主要表现在“一事一例”的防治,缺乏理论上的指导;后者表现在把岩溶塌陷灾害扩大化,无论是否会发生塌陷灾害都进行治理,造成较大的浪费。

鉴于此,本文基于十余年的研究成果,深化与完善岩溶地面塌陷三机理理论,并系统总结其在塌陷预测、监测、防治和应急处置工作中的宏观指导作用。

1 岩溶地面塌陷三机理理论

岩溶地面塌陷三机理理论由土洞型塌陷、沙漏型塌陷和泥流型塌陷等三个塌陷机理组成,是关于

可溶岩上覆土层塌陷破坏的基本理论。它关注土体塌陷方式,既解释了岩溶地面塌陷现象,更回答了土体“如何塌”的问题。

1.1 三机理理论及其核心思想

岩溶地面塌陷三机理理论的核心思想是:

(1) 土体、岩溶和诱发因素是岩溶地面塌陷的三要素。

(2) 土的工程地质性质决定了土体塌陷方式。以老黏土为代表的黏性土具较大的凝聚力,黏土颗粒组成“黏土块”。在外力作用下,“黏土块”呈块体脱离母体发生坍塌。以粉细砂为代表的砂性土具散体结构,有较大的内摩擦角,无(或极小的)凝聚力;在外力作用下砂颗粒一颗颗地漏失。以淤泥为代表的软弱土呈软塑—流塑状态,具较小的内摩擦角和凝聚力,受外力作用时软弱土体发生塑性流动而流失。

(3) 土体塌陷方式决定土体塌陷机理。黏土块坍塌决定了土洞型塌陷机理,砂颗粒漏失决定了沙漏型塌陷机理,软弱土流失决定了泥流型塌陷机理。

(4) 岩溶为土体丧失提供通道和储藏空间。岩溶发育程度影响地面塌陷发生的概率。岩溶越发育,发生地面塌陷的概率越大。

(5) 诱发因素是外因,不是塌陷机理的组成要素;诱发因素产生作用力;作用力改变土颗粒运动状态,使土颗粒由静止→运动,土体由稳定→塌陷。

1.2 土洞型塌陷机理

1.2.1 地质概化模型

根据黏性土、砂性土和软弱土在可溶岩上方不同的组合方式,土洞型塌陷具有如下三种地质概化模型(表 1):

(1) 黏性土层直接覆盖在可溶岩之上,岩溶地下水在土/岩界面处频繁活动可形成冲刷型土洞;

(2) 在黏性土层和下伏可溶岩之间发育有砂性土;当砂颗粒向可溶岩的溶蚀通道和溶洞中漏失时可形成沙漏型土洞;

(3) 在黏性土层和下伏可溶岩之间发育有软弱土,当软弱土向可溶岩中的溶蚀通道和溶洞流失时可形成泥流型土洞。

三种类型的土洞在演化后期,当拱效应失效时发生土洞型岩溶地面塌陷。

表 1 土洞型岩溶地面塌陷地质概化模型及其特征
Table 1 Geological generalization model of soil-cave type karst ground collapse

类型	模型图	结构特征及塌陷机理
I ₁		上部为黏性土,下部为可溶岩,可发生土洞型塌陷
I ₂		上部为黏性土,中部为砂性土(厚度大于 3 m),下部为可溶岩;可发生土洞型塌陷
I ₃		上部为黏性土,中部为软弱土(厚度大于 3 m),下部为可溶岩;可发生土洞型塌陷

1.2.2 塌陷机理

黏性土和密实砂性土层中,随着土洞的形成与演化和向上迁移,在外力作用下,由于土洞顶板拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷(图 1)。

土洞型塌陷是基于土洞型顶板坍塌而产生的岩溶地面塌陷,其前提是要存在土洞。大量塌陷案例表明,黏性土和密实砂性土层中都可以孕育土洞。

黏性土层中微小的黏土颗粒彼此间互相吸附,形成“黏土块”。土洞的形成和演化过程中,“黏土块”呈块状脱落而离开母体而使土洞扩大和向上迁移,而不是单个黏土颗粒独立运动。到土洞演化到后期,拱效应失效,土洞顶板整体垮塌才发生地面塌陷。

土洞型塌陷可以划分为土洞形成与演化阶段和土体塌陷阶段两个阶段。土洞形成与演化阶段是一个漫长的演化过程;在这个过程中,土洞规模从小到大。土体塌陷阶段即是土洞演化到后期,土洞顶板失去平衡而发生地面塌陷,时间短暂,常常瞬间发生。

1.2.3 土洞类型及其形成与演化

在自然条件下,天然土洞主要有地下水冲刷潜蚀、砂土漏失和软弱土体流失等三种成因。

(1)冲刷潜蚀土洞:在上部为黏性土、下部为可溶岩地区(表 1 中 I₁模型),地下水沿土中裂隙和土/岩结合面渗流、地下水位在基岩面附近频繁上下波动时,土体将会发生软化、崩解、溶蚀、溶解、冲刷等作用(统称为冲刷潜蚀作用),致使土颗粒脱离母体而形成土洞雏形(图 1a)。

初始土洞规模较小,洞顶土体容易形成拱效应而稳定。随着冲刷潜蚀作用的持续发生,土洞不断扩大(图 1b),洞周黏土块坍塌并堆积在洞底;地下水不断地将堆积物搬运带走,始终在其上方存在坍塌堆积物的储存空间,同时土洞向上方迁移(图 1c)。土洞不断向地表发展,最终在诱发因素触发下导致地面塌陷(图 1d)。如果土洞坍塌物在洞底不断堆积、留存,土洞将会被后续的坍塌堆积物堵塞并消亡(图 1e)。由此可见,土层厚度越大,塌陷规模越大、发生频率越低。

(2)沙漏土洞:在黏性土和岩溶地层之间发育有松散的砂性土层时(图 2a,表 1 中 I₂模型),在诱发因素触发下,砂颗粒沿裂隙、溶隙、落水洞等漏失,将在砂性土层和黏性土层之间形成空洞(图 2b)。初始阶段空洞较小,上部黏性土层中存在拱效应,土体保持稳定。随着砂性土的不断漏失,土洞不断增大,最终拱效应失效,上部黏性土发生塌陷,在地表形成塌陷坑(图 2c)。

(3)泥流土洞:在黏性土和岩溶地层之间发育有软弱土体时(图 3a,表 1 中 I₃模型),在诱发因素触发下,软弱土体沿裂隙、溶隙等通道流失,将在软弱土层和黏性土层之间形成土洞(图 3b)。初始阶段土洞较小,上部黏性土体存在拱效应,土体稳定。随着软弱土不断流失,土洞不断增大,拱效应失效,上部黏性土塌陷在地表形成塌陷坑(图 3c)。

1.2.4 土洞顶板弱化

土洞顶板弱化降低了顶板抗塌能力,对土洞顶板稳定不利。土洞顶板弱化可分为土洞顶板强度降低、厚度变薄及结构破坏等三种方式。

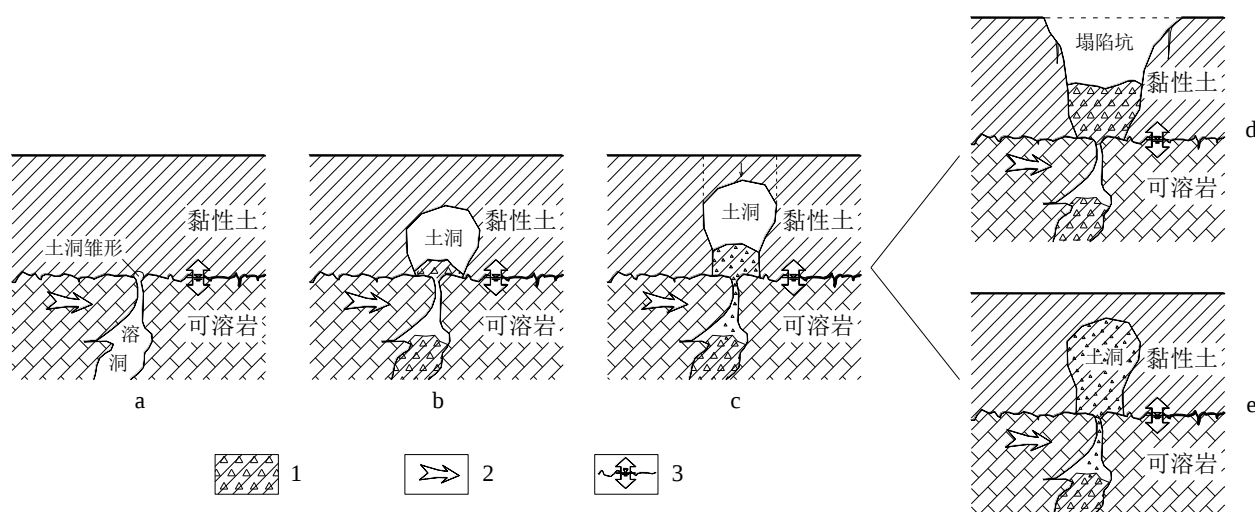


图1 土洞的形成与演化及土洞型地面塌陷机理

Fig. 1 Formation and evolution of soil-cave and the mechanism of soil-cave type ground collapse

1—坍塌的黏土块与溶洞堆积物 2—地下水在土/岩界面处顺层渗流方向 3—地下水位在土/岩界面处频繁上下波动 a. 形成土洞锥形 b. 土洞扩大 c. 土洞向上迁移 d. 土洞顶板塌陷 e. 土洞消亡

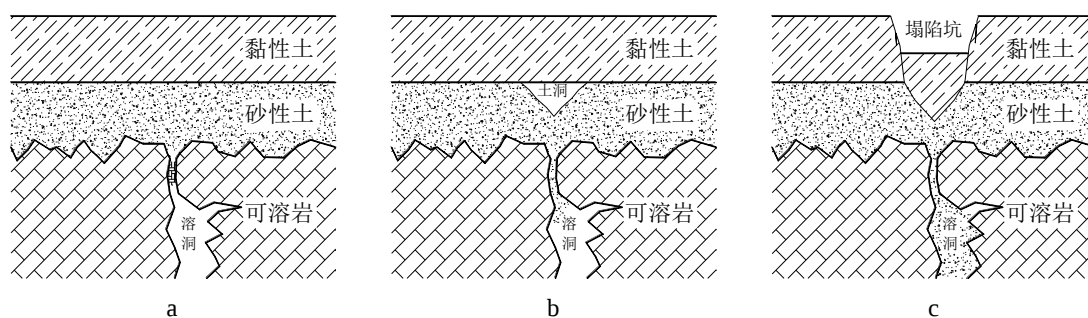


图2 砂性土漏失导致的土洞型地面塌陷机理

Fig. 2 Soil-cave type ground collapse caused by sand leakage

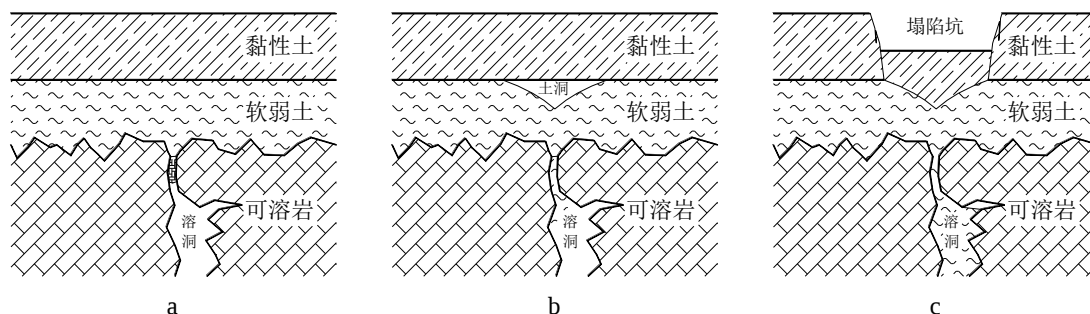


图3 软弱土体流失导致的土洞型地面塌陷机理

Fig. 3 Soil-cave type ground collapse caused by soft soil loss

土洞顶板中有地表水入渗时,土体含水量增大,土的抗剪强度将大幅降低;土洞上方土体中基坑开挖和土洞顶板内部坍塌都会使土洞顶板变薄;地表水下渗过程中对土洞顶板的侵蚀、对可溶矿物的溶解等改变了土洞顶板结构;生物活动可破坏了土体的既有完整性。

1.2.5 基本特点

土洞型塌陷的土洞形成与演化时间一般较长,且当土层厚度较大时土洞自我消亡而不发生地面塌陷的可能性增大。土洞顶板陷落往往瞬间发生,时间短暂。

土洞型塌陷具有随机性、隐蔽性和突发性的特

点。在宏观上,土洞的发育部位是可以知道的,但具体位置是则是随机的,具有随机性;天然土洞的形成与演化过程中地面一般是稳定的,往往不为人们所发现,具有很大的隐蔽性;土洞拱效应失效时地面塌陷突然发生,具有突发性。

土洞型塌陷发生于以老黏性土为代表的黏性土层中,其凝聚力 C 值较大,一般坑壁较陡,在剖面上呈柱状或井状、桶状等;由于坑壁的二次坍塌,亦见口部大、下部小的喇叭状;另外,由于土洞顶板整体向下塌落,也见有“口小身粗”的坛状或瓮状。塌陷坑平面形态多呈浑圆状或椭圆状,亦见不规则形状;当黏性土呈软可塑性状态时,则多呈碗状塌陷坑,甚至向碟状塌陷坑过渡。

土洞型塌陷坑周围土体中常伴生有弧形张裂缝,并错列成环状;远离塌陷坑方向,裂缝宽度逐渐变小,直至消失,反映出土体变形由强变弱;塌陷坑周边,一般可明显观察到张裂缝导致的原始地面朝塌陷坑方向呈阶梯状错落的现象。

1.3 沙漏型塌陷机理

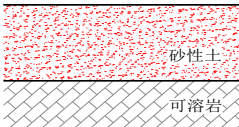
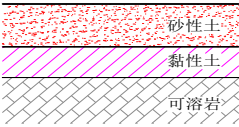
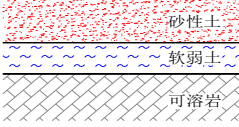
1.3.1 实体模型与地质概化模型

“沙钟”为一计时装置,是非常好的松散砂土塌陷的实体模型,由两个玻璃球和一个狭小的管道组成,通过上面玻璃球中的沙子穿过管道漏入下部玻璃球来计量时间,具有如下特点:① 沙颗粒受重力作用下漏,没有水的参与,且上表面无静荷载。说明水和静荷载不是砂颗粒漏失的必要条件;② 沙钟存在沙颗粒漏失的通道和储存空间,且下半球需足够的空间以储存漏沙;③ 整个计时过程中未发现天然拱现象,即未形成土洞。

以上实体模型的概化地质模型为以粉细砂为代表的砂性土直接覆盖于可溶岩之上(表 2 中的 II₁ 类型),砂颗粒可以独立地、自由地向下方可溶岩中漏失。

另外,当砂性土与可溶岩之间发育有厚度大于 3 m 的黏性土或软弱土层时,则分别构成两种新的地质概化模型(表 2 中的 II₂ 和 II₃ 类)。

表 2 沙漏型岩溶地面塌陷地质概化模型及其特征
Table2 Geological generalization model of hourglass type karst ground collapse

类型	模型图	结构特征及塌陷机理
II ₁		上部为砂性土,下部为可溶岩,发生沙漏型塌陷
II ₂		上部为砂性土,中部为黏性土(厚度大于 3 m),下部为可溶岩;黏性土破坏时可发生沙漏型塌陷
II ₃		上部为砂性土,中部为软弱土(厚度大于 3 m),下部为可溶岩,可发生泥流—沙漏型复合式塌陷

1.3.2 塌陷机理

在覆盖型岩溶地区,当覆盖层为松散的砂性土时,溶蚀裂隙、落水洞等为砂性土颗粒的漏失提供通道,各种规模的溶洞及地下暗河系统等则提供了砂颗粒的储存空间。这就像一个巨大的天然沙钟(图 4a)。

在诱发因素触发下,砂颗粒连同地下水一起向下漏失,同时在地表产生地面变形反应(图 4b)。随着时间推移,在地表逐渐形成规模较大的塌陷坑,即发生沙漏型岩溶地面塌陷(图 4c)。这种由于诱发因

素触发,导致可溶岩上方松散沙颗粒漏失而产生的地面塌陷现象称为沙漏型塌陷。

1.3.3 基本特点

高自由度的砂颗粒、岩溶通道和溶洞、诱发因素是沙漏型塌陷的必要条件。沙漏型塌陷具有如下基本特点:

(1) 砂颗粒是塌陷主体,重力是沙漏的必要条件,没有地下水的作用沙漏型塌陷照样会发生;地下水的作

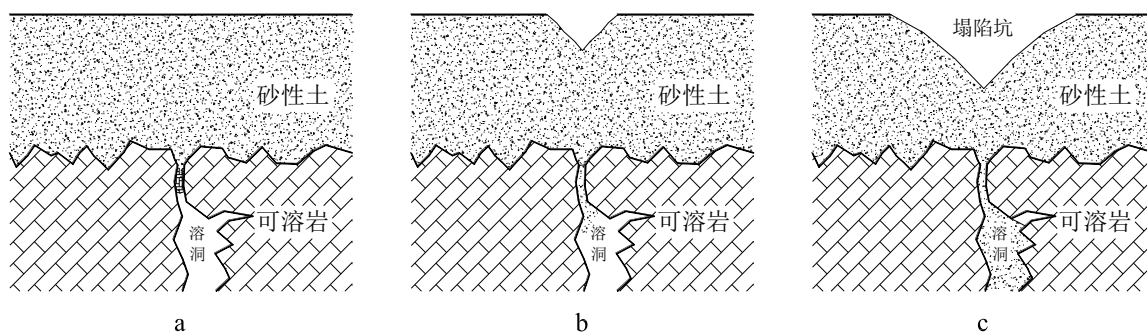


图4 沙漏型地面塌陷机理

Fig. 4 Mechanism of hourglass type ground collapse

(2) 沙漏型塌陷需要有砂颗粒漏失通道和储存空间,这是发生塌陷的另一必要条件,否则塌陷不会发生;

(3) 发生沙漏型地面塌陷需要有诱发因素触发,如渗流液化、振动液化等事件,启动塌陷行为的发生;

(4) 沙漏型塌陷是砂颗粒漏失造成的,塌陷过程中不会形成土洞,因而沙漏型塌陷不是由于拱效应失效造成的;

(5) 一次塌陷是一个连续、渐进的过程,一般没有明显的阶段性,与土洞型塌陷的塌陷阶段相比,沙漏型塌陷坑的形成速度相对较缓慢,而不是瞬间陷落。

(6) 当上部砂性土和下部可溶岩间夹有黏性土等隔离层时,人类活动,如钻探、桩基施工等,贯穿中部隔离层并连通砂性土和可溶岩中的通道时,也可发生类似的岩溶地面塌陷现象。

(7) 沙漏型塌陷型塌陷坑平面形态多呈圆形或椭圆形,坑壁倾角多为中等角度,剖面上一般呈漏斗状,塌陷坑深度与其直径相差不大,深径比多接近于1。

1.4 泥流型地面塌陷机理

1.4.1 地质概化模型

可溶岩上方软弱土与黏性土和砂性土的不同组合,具有如表3所示的三种地质概化模型:

表3 泥流型岩溶地面塌陷地质概化模型及其特征

Table 3 Geological generalization model of mudflow type karst ground collapse

类型	模型图	结构特征及塌陷机理
Ⅲ ₁		上部为软弱土,下部为可溶岩,可发生泥流型塌陷
Ⅲ ₂		上部为软弱土,中部为黏性土(厚度大于3 m),下部为可溶岩,黏性土破坏时可发生泥流型塌陷
Ⅲ ₃		上部为软弱土,中部为砂性土(厚度大于3 m),下部为可溶岩,可发生沙漏—泥流复合型塌陷

(1) 以淤泥为代表的软弱土层直接覆盖在可溶岩之上,软弱土流失可发生泥流型塌陷。

(2) 在软弱土层和下伏可溶岩之间发育有厚度大于3 m的黏性土。

(3) 在软弱土和下伏可溶岩之间发育有厚度大于3 m的砂性土时,砂颗粒漏失后,软弱土变形,可在

地表形成塌陷坑。

1.4.2 塌陷机理

软弱土体含水率高、孔隙比大、干密度小,呈软塑—流塑状,具有低的抗剪强度,因而具有较高的触变性及流变性。

在上部为软弱土体、下部为可溶岩地区(图 5a, 表 3 中的 III₁ 类型), 受诱发因素触发后, 下方可溶岩中的溶蚀裂隙、岩溶漏斗等通畅时, 软弱土体可顺通

道发生流动变形, 并逐渐在地面产生变形效应(图 5b)。随着软弱土体不断流失, 最终在地面形成塌陷坑(图 5c)。

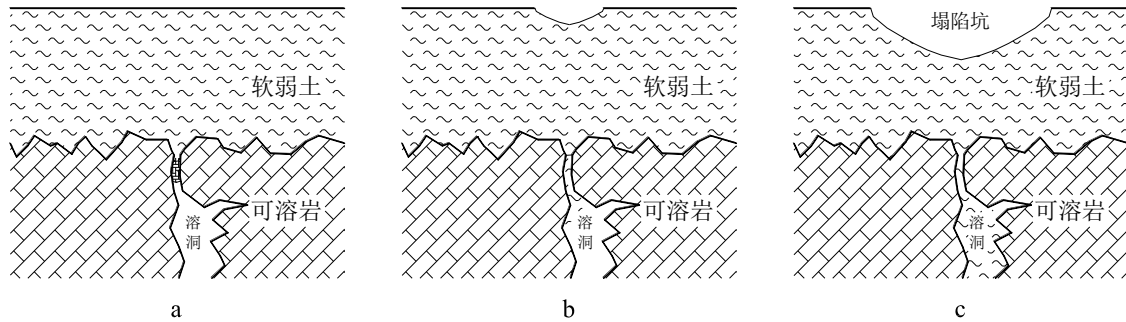


图 5 泥流型地面塌陷机理

Fig. 5 Mechanism of mudflow type ground collapse

在软弱土体与可溶岩之间发育有黏性土等隔离层, 人类活动(如钻探、桩基施工等)导致上部软弱土体和下部可溶岩中的通道连通, 也可发生类似的岩溶地面塌陷现象。

1.4.3 基本特点

泥流型塌陷坑平面上多呈圆形、椭圆形和不规则形态; 由于软弱土抗剪强度较低, 土体流动后受影

响的范围较大, 塌陷坑壁一般相对较缓, 坑深较小, 塌陷坑“深径比”一般小于 1, 剖面形态形态多呈碟状, 亦见井状、坛状、漏斗状^[27]。

1.5 诱发因素及其产生的作用力

岩溶地面塌陷诱发因素可分为自然因素和人类活动两大类, 其中自然因素中最重要是水的作用(图 6), 其次是生物活动。人类活动的影响日益增大。

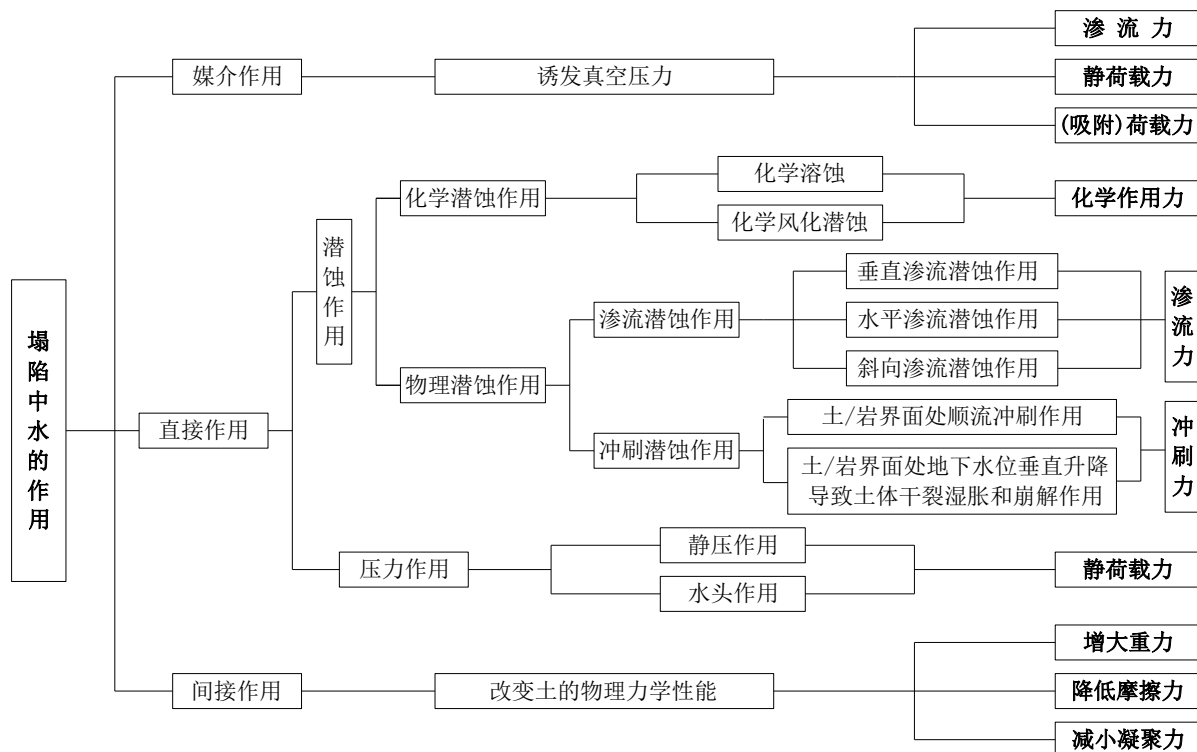


图 6 地面塌陷中水的作用

Fig. 6 Function of water in ground collapse

诱发因素的种类很多,但他们的作用是产生作用力。研究表明,地面塌陷中的作用力主要有以下 8 种类型。

(1)土体重力。土体重力是所有塌陷都具有的作用力,在整个塌陷过程中都起着重要的作用,其大小为:

$$G=\gamma V$$

式中: G -重力; γ -土的重度; V -土的体积。

(2)渗透压力。地下水在土体中渗流时对土颗粒产生的拖拽力,作用方向与渗流方向相同,大小与水头成正比:

$$D=\gamma_w i$$

式中: D -渗透压力; γ_w -水的重度; i -水力坡度。

(3)冲刷力。冲刷力是地下水与地表水流动过程中,由重力势能转化而来的动能作用在土体之上的作用力,通过冲击、掏挖、拖拽等方式破坏和离散土体,并将离散的土颗粒搬运它处,对土洞的形成与演化起着重要作用。冲刷力的大小可以用下式表示^[20,26]:

$$F=\frac{1}{2g}\gamma_w U^2$$

式中: F -冲刷力; g -重力加速度; γ_w -水的重度; U -水流速度。

(4)外加静荷载力。可区分为方向向下的正向静荷载力和方向向上的逆向静荷载力。

正向静荷载力是指附加于土洞顶板上表面、自上而下的作用力,包括真空负压荷载、地表水体荷载、堆载荷载等,其合力用 $P_{\downarrow}$ 表示。

逆向静荷载力是指附加于土洞顶板的下表面、自下向上的作用力,其合力用 $P_{\uparrow}$ 表示。

荷载合力(即静荷载增量)可表示为:

$$\Delta P=P_{\downarrow}-P_{\uparrow}$$

(5)外加动荷载。震(振)动荷载是由物体震(振)动所产生。地震为天然震动荷载;机械、车辆、施工、爆破等振动均为人工动荷载。

震(振)动荷载既可对土洞顶板产生水平和垂直方向的作用,也可对饱和砂土产生液化作用,从而导致地面塌陷。地震荷载可用下式计算:

$$F=\alpha G$$

式中: F -地震荷载; α -地震影响系数; G -质点重量。

(6)表面摩擦力。土体中的静止侧压力在土洞顶板的侧壁上产生静摩擦力。

(7)内摩擦力。软弱土体呈层流状态流动时,其角变形速度和剪切力之间的关系服从牛顿内摩擦定律,即:

$$\tau=\eta \frac{du}{dr}$$

式中: η -软弱土的黏滞系数(单位: $Pa \cdot s$), $\frac{du}{dr}$ -速度梯度。

(8)化学作用力。化学作用力是地表水和地下水对土体中盐分溶解和对矿物的溶蚀等作用力。

1.6 岩溶的作用

岩溶包括岩溶现象和岩溶作用两个方面。岩溶现象中的溶隙、溶洞为土颗粒丧失提供通道和储存空间;溶隙、溶洞发育的位置、规模和岩溶强度等岩溶地面塌陷都有一定的影响。

对于碳酸盐岩,据袁道先院士(1997)研究成果,自然界中碳酸盐岩的百年溶蚀厚度小于 7 mm。因此,工程寿命期(按百年计)内,可以不考虑碳酸盐岩中岩溶作用对地面塌陷的不利影响。但是,对于岩盐等溶解度较大的可溶岩,则岩溶作用影响较大,工程实践中要引起重视。

2 三机理理论在地面塌陷预测应用

作为三机理理论的塌陷预测应用,这里提出了岩溶地面塌陷综合地质预测方法,建立三个塌陷机理的确定性预测模型。其中土洞型塌陷预测模型只考虑了作用力,没有与具体的塌陷诱发因素相联系,相比既有预测模型,更具普适性;沙漏型和泥流型塌陷系首次建立的预测模型。三个确定性预测模型仅仅是理论上的探索,目的是探求一种思路,起到抛砖引玉的作用。

2.1 综合地质预测模型中的应用

综合地质预测模型以三机理理论为依据,采用地质科学的方法和手段,充分考虑诱发因素的不良影响,得出的结论比较客观、可靠,是岩溶地面塌陷预测的正途。具体预测方法步骤如下。

(1)查明岩溶地质结构、确定塌陷机理。采用工程地质调查与测绘、钻探等方法,查明研究区的岩溶地质结构和岩、土体的工程地质性能,将土体划分为黏性土、砂性土和软弱土三大类,然后以三类土与下伏可溶岩的叠置关系,将覆盖型岩溶划分为9类地质概化模型(分别参见表1,表2和表3)。根据地质概化模型即可确定场地内可能存在的塌陷机理。

(2)判断岩溶发育程度。根据相关规程、规范判断标准,确定场地内的岩溶发育程度。如《建筑地基基础设计规范》(GB50007-20011)和《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB50307-20012)分别给出了岩溶发育程度的判别依据。

(3)确定诱发因素。在进行综合预测前,应了解本场地的主要诱发因素,确定可能存在的诱发因素及其影响程度,分析其产生的作用力。

根据这些诱发因素对三种塌陷机理的影响程度,结合本地岩溶地面塌陷的实际情况,判断塌陷发生的可能性大小以及不同诱发因素的出现部位。

(4)综合地质预测。根据塌陷机理、岩溶发育程度和主要诱发因素等,进行岩溶地面塌陷易发性分区。

进行易发性分区前,首先要确定易发性等级。一般有2级、3级、4级甚至5级等不同级别的设置。如可参照《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB50307-20012),将岩溶地面塌陷易发性划分为高、中、低3个易发区。各易发区可据表4确定。

表4 岩溶地面塌陷易发性分区

Table 4 Susceptibility zoning of karst ground collapse

分区依据	高易发区	中易发区	低易发区
塌陷机理	沙漏型塌陷		泥流型塌陷
岩溶发育程度	强发育	其他组合	微弱发育
诱发因素	强影响		弱影响

(5)塌陷危险性评估。在易发性分区的基础上,结合塌陷对工程设施及周边环境和人类活动影响的程度,划分岩溶地面塌陷危险性等级并进行分区,为塌陷灾害预防和治理提供依据。

塌陷危险性可划分为高、中、低3个等级。主城

区居民和建筑物密集、塌陷造成的破坏后果很严重的高易发区可划分为高危险区;远城区且对周边环境威胁很小的低易发区可划分为低危险区;其他易发区划分为可划分为中等危险区(表5)。

表5 岩溶地面塌陷危险性分区

Table 5 Hazard zoning of karst ground collapse

影响程度	高易发分区	中易发分区	低易发分区
高	高危险区	高危险区	中等危险区
中等	高危险区	中等危险区	低危险区
低	中等危险区	低危险区	低危险区

2.2 确定性预测模型中的应用

确定性模型预测就是在地质概化模型的基础上建立地面塌陷的物理模型,然后运用物理等相关学科的方法和手段,推演各个参数和变量之间的数学关系表达式,从而进行塌陷预测。

本节将基于三机理论,分别建立三个确定性预测模型,给出塌陷土体和岩溶参数间的关系。

2.2.1 土洞型塌陷确定性预测模型

土洞不仅大小各异,而且形态千差万别。为了建模简便,将土洞形态概化为直径为 D 的空腔球体。当土洞位于土/岩界面处时,视为半空腔球体(图7)。

土洞顶板指土洞正上方直立柱状黏性土体,具弱一极微透水性,一般难以形成稳定的渗流场,存在渗透压力的可能性很小;冲刷潜蚀作用主要在土洞形成与演化期内起作用,不考虑其影响。故土洞顶板受重力 $G_{\downarrow}$ 、侧摩擦力 $f_{\downarrow}$ 、外加静荷载力 $F_{\downarrow}$ 的作用。各作用力的数学表达式见第1.5节。

定义稳定系数 K 为向上的作用力的合力($P_{\uparrow}$)与向下的作用力的合力($P_{\downarrow}$)之比,则有:

$$K = \frac{F_{\uparrow} + f_{\uparrow}}{F_{\downarrow} + G_{\downarrow}} = \frac{\gamma D P_{\uparrow} + 2k_0 \gamma^2 H^2 \tan \phi + 4A\gamma HC + 8BC^2}{\gamma D (P_{\downarrow} + \gamma H)}$$

上式即为土洞型岩溶地面塌陷的数学预测模型。当 $K=1$ 时,土洞顶板处于极限平衡状态;当 $K>1$ 时,

土洞顶板稳定;当 $K < 1$ 时,土洞顶板塌陷。

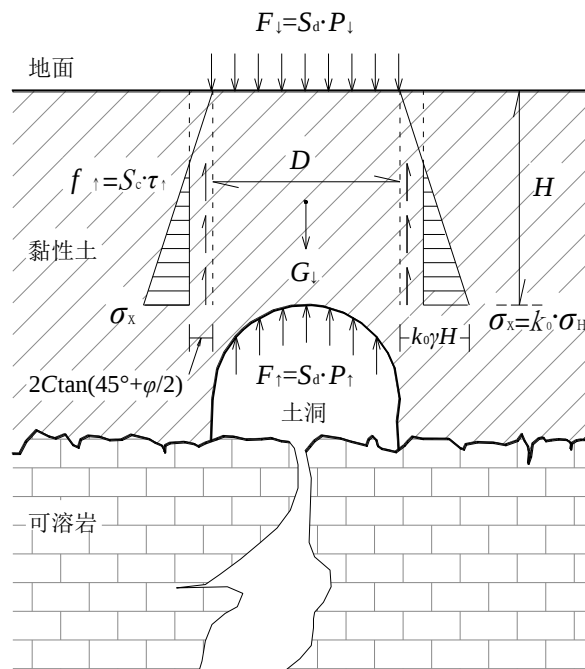


图7 土洞型岩溶地面塌陷物理模型

Fig. 7 Physical model of soil cave type karst ground collapse

2.2.1.1 稳定系数与土洞规模的关系

将土洞型塌陷数学预测模型变形为:

$$K = \frac{2(\gamma H - 2bC) \cdot (ak_0\gamma H + 2abk_0C + 2C)}{\gamma(P_d + \gamma H)} \cdot \frac{1}{D} + \frac{P_u}{P_d + \gamma H}$$

上式为一反比例函数, K 随着 D 的增大而减小,表明:土洞水平跨度 D 越大,覆盖层越不稳定。

2.2.1.2 与土洞顶板厚度的关系

预测模型中,假定 K 为土洞顶板 H 的函数,其余为常量,将预测模型变形为:

$$K = \frac{2ak_0\gamma^2 \cdot H^2 + 4\gamma C \cdot H - (8ab^2k_0C^2 + 8bC^2 - \gamma DP_u)}{\gamma D(P_d + \gamma H)}$$

K 对 H 求导数得:

$$\frac{dK_T}{dH} = \frac{2ak_0\gamma^2 \cdot H^2 + 4ak_0\gamma P_d \cdot H + 8b(abk_0 + 1)C^2 + (4CP_d - \gamma DP_u)}{D(P_d + \gamma H)^2}$$

当逆向静荷载 P_u 满足下列表达式时,上式为增函数,此时土洞顶板厚度越大,其稳定性越好:

$$P_u < \frac{2ak_0\gamma^2 \cdot H^2 + 4ak_0\gamma P_d \cdot H + 8b(abk_0 + 1)C^2 + 4CP_d}{\gamma D}$$

2.2.1.3 与抗剪强度的关系

分别将 C 和 φ 作为自变量,将预测模型变形为:

$$K = -\frac{8b(abk_0 + 1)}{\gamma D(P_d + \gamma H)} \cdot C^2 + \frac{4H}{D(P_d + \gamma H)} \cdot C + \frac{2ak_0\gamma H^2 + DP_u}{D(P_d + \gamma H)}$$

$$K = \frac{2k_0\gamma^2 H^2 \tan\varphi - 8C^2 \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) \left[k_0 \tan\varphi \tan(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) + 1 \right]}{\gamma D(P_d + \gamma H)} + \frac{4CH + DP_u}{D(P_d + \gamma H)}$$

以上两式表明,土洞顶板稳定性与抗剪强度呈正相关性,即抗剪强度越大,土洞顶板稳定性越好。

图 8(a)为取表 6 所示参数的条件下,不同内摩擦角时,稳定系数 K 与凝聚力 C 的一元二次函数关系曲线,每条内摩擦角曲线均取得最大值 $K_{\max}$,且 $K_{\max}$ 值随 φ 的增大而增大。

图 8(b)为取表 6 所示参数的条件下,不同凝聚力

C 时,稳定系数 K 与内摩擦角 φ 在第一象限的三角函数关系曲线,每条凝聚力曲线取得极大值。

以上各曲线出现最大值和极大值体现了临界高度 z_0 的影响。

表 6 土洞相关参数及土洞顶板所受静荷载

Table 6 Related parameters of soil cave and static load on its roof

项目	重度 γ kN/m ³	凝聚力 C kPa	内摩擦角 φ 度	静止侧压力系数 k_0	顶板厚度 H m	土洞跨度 D m	正向荷载 $P_{\downarrow}$ kN/m ²	逆向荷载 $P_{\uparrow}$ kN/m ²	荷载增量 ΔP kN/m ²
指标	19.5	30	16	0.42	15	5	100	30	70

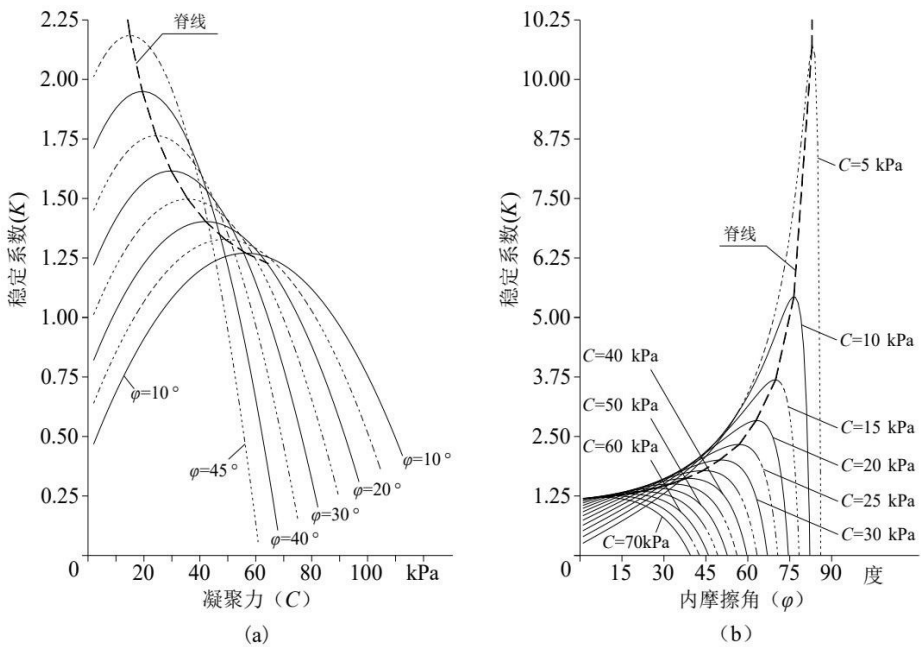


图 8 地面塌陷稳定系数与抗剪强度关系

Fig. 8 Relation between stability coefficient and shear strength associated with ground collapse

a. $K-C$ 曲线; b. $K-\varphi$ 曲线; 脊线为各相邻曲线上稳定系数 K 的最大值(a)和极大值(b)的连线

2.2.1.4 与逆向荷载的关系

在预测模型中,假定 $P_{\uparrow}$ 为自变量, K 为逆向荷载 $P_{\uparrow}$ 的函数,其余为常量,则预测模型变形为:

$$K = \frac{1}{P_{\downarrow} + \gamma H} \cdot P_{\uparrow} + \frac{2(\gamma H - 2bC) \cdot [ak_0\gamma H + 2(abk_0 + 1)C]}{\gamma D(P_{\downarrow} + \gamma H)}$$

上式是斜率为大于 0 的直线,反映出逆向荷载越大,覆盖层越稳定。这与实际情况相符。

2.2.1.5 与正向荷载的关系

在预测模型中,假定 $P_{\downarrow}$ 为自变量, K 为 $P_{\downarrow}$ 的函数,其余为常量,则预测模型变形为:

$$K = \frac{\gamma DP_{\uparrow} + 2(\gamma H - 2bC) \cdot (ak_0\gamma H + 2abk_0C + 2C)}{\gamma D} \cdot \frac{1}{P_{\downarrow} + \gamma H}$$

上式为一反比例函数。正向荷载 $P_{\downarrow}$ 增大时,稳定系数 K 减小,土洞顶板稳定性变差。

2.2.1.6 对土洞顶板临界厚度的讨论

(1)与土洞水平跨度的关系。将预测模型变形为厚度 H 与土洞跨度 D 的表达式如下:

$$H = \frac{(\gamma D - 4C) + \sqrt{(\gamma D - 4C)^2 + 8ak_0\gamma D\Delta P_T + 64abk_0(abk_0 + 1)C^2}}{4ak_0\gamma}$$

由上式可见,土洞顶板临界厚度 H 与水平跨度 D 成正相关性,即 D 越大,所要求的临界厚度 H 越大;也就是说,土洞顶板厚度越大越稳定。

图9为取表6相关参数条件下,据上式得到的土洞顶板临界厚度 H 与水平跨度 D 的关系曲线。

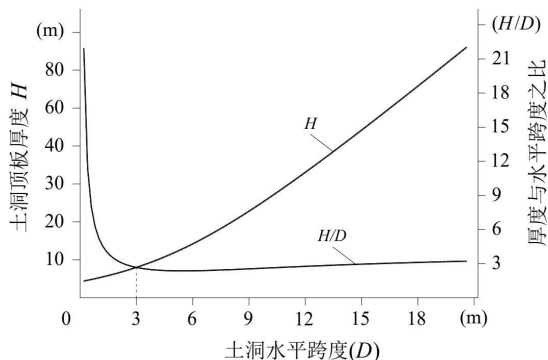


图9 土洞顶板厚度 H 与水平跨度 D 的关系

Fig. 9 Relation between roof-thickness (H) and the horizontal span (D) of soil-cave

该图可见,当土洞水平跨度 D 增大时,顶板临界厚度 H 也相应增大。据 H/D 曲线,在土洞水平跨度大于3 m时,处于极限平衡状态下, H/D 的比值变化很小,曲线平缓,土洞顶板厚度 H 约为土洞水平跨度 D 的3倍。

(2)与外加荷载的关系。外加荷载中,向下的正向荷载是常见的、导致地面塌陷的荷载。向上的逆向荷载少见,有利于土体稳定。所以这里主要讨论 $\Delta P = P_{\downarrow} - P_{\uparrow} > 0$ 的情况下 ΔP 与 H 的关系。

图10为取表6相关参数的条件下,据上式得到的 ΔP 与土洞顶板临界厚度 H 的关系曲线。

由该图可见, H 与 ΔP 呈正相关性,即外荷载合力越大,所需的土洞顶板临界厚度越大。即土层厚度越大,抵抗外加荷载的能力越强,土洞顶板越稳定,塌陷越不易发生。这与实际情况相符。

(3)与抗剪强度的关系。同样厚度条件下,土洞顶板的抗剪强度(C, φ)越大,土洞顶板周围提供的摩擦力就越大,因而越有利于土洞稳定。此时顶板临界厚度 H 则可以减小。但是,黏性土的抗剪强度越大,则其自立高度 z_0 越大,相应地,在土洞侧面产生摩擦力的面积将减小,导致摩擦力减小,使得土洞顶板变得不稳定,即土洞顶板厚度要相应增大。在上述两方面诱发因素的共同作用下,存在与抗剪强度相

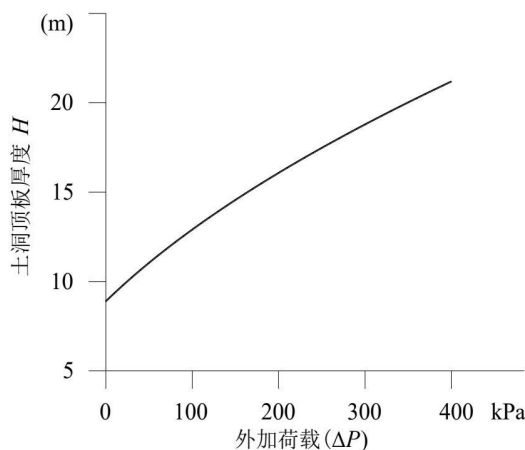


图10 土洞顶板厚度 H 与荷载增量 ΔP 的关系

Fig. 10 Relation between thickness (H) of soil-cave roof and external load increment (ΔP)

关的极小临界厚度 $H_{\min}$ 。

2.2.2 沙漏型塌陷确定性预测模型

将岩溶通道概化为直径为 D 的圆形通道,则其横截面积为 $s = \frac{\pi}{4} D^2$;可溶岩上方砂性土土层厚度为 H (图11)。

在沙漏型塌陷机理中,重力是基本作用力,它导致砂颗粒向岩溶通道中漏失。

地下水渗流产生的渗透压力加速了砂颗粒的漏失,由达西定律通过渗流速度来反映。

地下水的密封作用诱发的真空压力可折算成水头通过渗透比降由渗流速度来反映。

砂性土层所受动荷载作用是使饱和砂土中有效应力丧失导致砂土液化。故动荷载主要起着砂土漏失的启动作用,在恒受力分析中不予考虑。

其它作用于砂性土表面的非真空荷载对塌陷基本不起作用,可不予考虑。

塌陷时,土颗粒混合地下水一起形成“流沙”,在重力和水头作用下,同时向岩溶孔洞中漏失,采用水力学中的曼宁公式,计算这种水砂流体通过直径为 D 的岩溶通道的平均流速:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}$$

式中, v -管道断面的平均流速,水力半径 $R = \frac{A}{X} =$

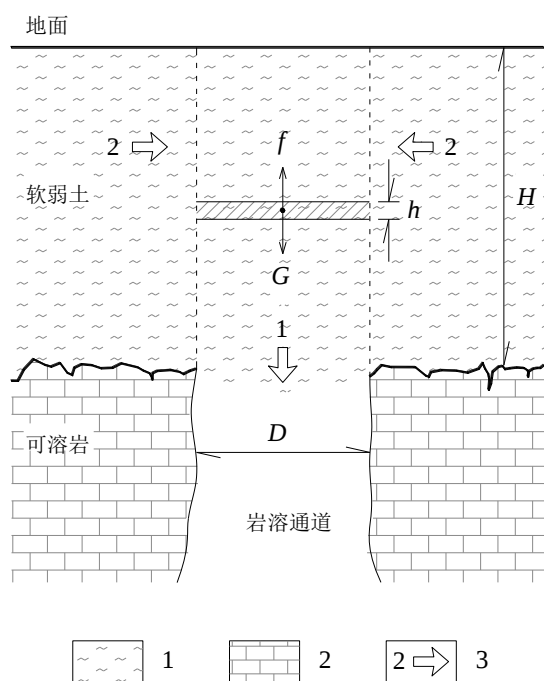


图 12 泥流型岩溶地面塌陷物理模型与受力分析

Fig. 12 Physical model and force analysis of mudflow type karst ground collapse

1—软弱土 2—可溶岩 3—软弱土流动次序及方向

$$G = \gamma V = \frac{\pi}{4} \gamma D^2 h$$

如果将软弱土体概化为流体,在塌陷过程中呈层流状态流动,其角变形速度和剪切力之间的关系服从牛顿内摩擦定律,则软弱土体在直径为 D 岩溶通道中流动过程中,所受的内摩擦力为:

$$f = \eta \cdot \frac{U}{D/2} \cdot \Delta s = 2\pi\eta h U$$

其中, U 为软弱土体塌陷时向下的流动速度。

塌陷开始时软弱土体流动速度 U 较小;随着软弱土体加速流动,流动速度 U 将不断增大,内摩擦力 f 随着增大。当内摩擦力 f 增大到与重力 G 相等时,根据流体力学原理,流动速度 U 将保持恒定^[28]。此时有:

$$f = G$$

从而得到:

$$U = \frac{\gamma}{8\eta} D^2$$

上式即是软弱土体塌陷的数学预测模型。该模型反映出:软弱土流失速度 U 与岩溶通道 D 直径的平方及软弱土的重度成正比,与软弱土粘滞系数 η 成反比。

3 三机理理论的地面塌陷监测应用

3.1 地面塌陷监测的对象和内容

根据三机理理论,岩溶地面塌陷三要素为土体、岩溶和诱发因素。研究表明,岩溶发展速度缓慢,其对塌陷的影响可以忽略不计,故而岩溶本身不作为地面塌陷监测的对象。塌陷监测对象为土体和诱发因素。

3.1.1 土体监测

土体监测主要包括土体变形及其伴生的地面沉降和建筑物变形三个方面的监测。

土体变形将产生两个方面的变化:一是土颗粒发生相对位移,二是土压力发生变化。因此,需对土颗粒相对位移和土压力监测。土颗粒相对位移可以采用地质雷达监测技术、电磁波时域反射技术和光导纤维监测技术进行监测;对于土压力监测,由于土体的空腔压力与岩溶地面塌陷存在着较好关联性,通过确定覆盖层的土压力变化情况与岩溶地面塌陷的关系,对覆盖层土压力临界值进行研究,进而深化研究岩溶地面塌陷的形成机理。

地面沉降和建筑物变形监测已有成熟的监测方法,这里不再赘述。

3.1.2 诱发因素监测

诱发因素监测主要包括水的活动监测和人类活动监测。

地表、地下水活动是岩溶地面塌陷形成过程中最活跃的诱发因素之一。对地下水的监测主要对地下水水位(水、气压力)、水温、水质,地下水流速、流向、水力坡度等进行监测,目前已有较为完备的监测方法,此处略去。

人类活动的监测,比如桩基施工、堆载、降水等,则主要通过有效的管理和恰当的设计、施工方案来实现。

3.2 监测工作布置原则

3.2.1 土洞型塌陷监测工作布置

土洞型塌陷过程可以区分为土洞形成与演化和土洞顶板塌陷两个阶段。

在土洞的形成与演化阶段,土体变形发生在土体内部,土洞顶板尚处于稳定状态。故其监测的重点是土体的内部变形。对于冲刷潜蚀土洞,土/岩结

合面附近可溶岩中的地下水位和地下水流速流向监测非常重要。

土洞顶板塌陷阶段时间短暂,地表变形现象显著,重点监测地面变形和建筑物变形。另外,土洞中的地下水位和土洞空间的真空度(即水、气压力)直接影响着土洞顶板的稳定性及塌陷破坏方式,对土洞中的真空度地下水位监测是必要的。

3.2.2 沙漏型塌陷监测工作布置

沙漏型地面塌陷是可溶岩上方的砂性土和地下水一起向下方岩溶孔隙或溶洞中漏失,对地下水反应敏感。因此,在沙漏型塌陷地区,首选的监测对象是监测地下水活动,尤其是要加强地下水位变化的监测。

沙漏型地面塌陷历时一般比较短,很快就会反映到土体本身的变形和地面变形,故亦需对土体变形、地面变形及建筑物变形进行监测。

对于地下水位的监测,建立地下水监测网是必要的;同时也有必要对降雨量进行监测,这可以收集到气象部门的测量数据。

3.2.3 泥流型塌陷监测工作布置

泥流型地面塌陷是由软弱土的塑性流动造成,软弱土的流动可以直接反映到地表变形。因此,泥流型塌陷的监测的重点对象是土体变形、地面变形和建筑物变形。

4 三机理理论在地面塌陷防治应用

4.1 基本原则

根据三机理理论,提出岩溶地面塌陷防治工作的基本原则为:“规避为主,防治结合;修正内因,控制诱因”。防治的通用措施有工程绕避、工程回避和消除岩溶影响三个方面。

“规避为主,防治结合”原则中的规避包括工程绕避和工程回避两方面。“工程绕避”就是在工程选线、选址阶段绕避可溶岩分布范围较大、治理工程规模大而治理费用畸高的高危险区和兴建后的工程运行维护费用高而使用价值较低的高危险区。“工程回避”是针对一些不可采用绕避措施的重要与重大工程,在高危险区和中等危险区,应避免选用土层作为持力层,采取不同的基础型式或工程结构措施,将上部荷载传于下伏完整、稳定的岩体上,规避土体塌陷风险。

“修正内因”就是根据三机理理论改善岩溶地质结构。“控制诱因”要求有效控制诱发因素。

“消除岩溶影响”就是堵塞土颗粒丧失通道和消除土颗粒储藏空间。

4.2 土洞型塌陷防治原则

根据土洞型塌陷机理,土洞型塌陷可以区分为土洞的形成与演化和地面塌陷两个阶段。各阶段有不同的地质特征。进行土洞型塌陷防治时,在不同的阶段应采用不同的防治方法。

4.2.1 土洞的形成与演化阶段

根据土洞型塌陷机理,在本阶段内,主要的问题是土洞的形成和土洞的演化(即土洞不断向上迁移)。因此,阻止土洞的形成和促使土洞消亡是本阶段非常必要的手段。

在土/岩界面注浆形成水平帷幕,可以阻断土颗粒漏失途径,隔断地下水的不利影响,消除冲刷潜蚀土洞的形成条件,同时可充填既有土洞。

可采用沙漏型塌陷的治理方法(详见后文)阻止沙漏土洞的形成与演化。对软土进行加固处理,使其不具备流动性而不能形成泥流土洞。

对可溶岩中岩溶孔隙进行注浆处理,堵塞软弱土流失通道,避免砂颗粒漏失和/或软弱土流失而形成泥流土洞。

对既有土洞进行注浆,消除地面塌陷风险。

4.2.2 土洞顶板塌陷阶段

在土洞演化的后期,如果土洞没有自然消亡是,防止土洞顶板弱化则是本阶段的主要方法,其主要措施包括:①阻止土洞顶板强度降低(如控制地下水入渗而浸泡土洞顶板);②防止土洞顶板厚度减薄(如控制基坑开挖深度等);③避免土洞顶板结构破坏(如控制土洞顶板上的钻孔、桩孔、酸液、树根等);④维持土洞顶板稳定现状(如果土洞顶板现状稳定条件很好,就尽量不要破坏现状)等。

4.2.3 控制诱发因素

控制土洞型塌陷的诱发因素,首先是防止地表、地下水的不良作用,主要措施有:①防止地表水入渗(如封闭地表等)、②有效导水(如将地表、地下水主动引导排走)、③控制排水(如避免矿洞突水、控制矿洞、隧道排水速度和流量等)、④控制开采岩溶水(如合理布置取水井孔、控制开采强度等)、⑤控制降岩

溶水(如避免基坑降岩溶水等)、⑥ 控制渗流(如设置隔渗墙、防渗帷幕等隔断渗流)、⑦ 降低水头(如有控制地排水降低水位等)、⑧ 消除负压(如设置排气孔)等。

消除人类活动的不利影响也是重要的措施。尽量避免一切可以避免塌陷发生的人类活动以及控制外加动荷载(如设置隔振沟)和外加静荷载(洞上方防止积水,禁止堆土、避免存放材料、货物、机械设备等)。

4.3 沙漏型塌陷防治原则

4.3.1 改良砂性土体

根据沙漏型塌陷机理,发生沙漏型塌陷的根本原因是砂颗粒自由度太大,可以自由漏失。因此可以考虑往砂层中注入泥浆或水泥浆,增大土层的凝聚力,降低砂颗粒的自由度,从而达到防止沙漏型塌陷发生的目的。

4.3.2 改善岩溶地质结构

改良岩溶地质结构就是砂性土层和可溶岩之间设置可靠的水平隔断体,从而改变其岩溶地质结构,防止沙漏型岩溶地面塌陷发生。一是可在基岩面上方5~10 m范围的砂性土层内采取高压注浆,形成水平隔层,阻止砂颗粒向下漏失;二是在基岩面以下5~10 m范围内注浆形成水平帷幕,隔断砂颗粒与岩溶孔隙的联系。

4.3.3 控制诱发因素

控制沙漏型塌陷的诱发因素可以从防止向下的渗流潜蚀作用(如禁止基坑施工时降岩溶水等)、控制振动荷载(如避免采用振动过大的施工方案或采取有效措施防止饱和砂土振动液化)和施工临时阻隔(如勘探时进行跟管钻进、桩孔带护筒施工等)三个方面着手。

4.4 泥流型塌陷防治原则

4.4.1 改良软弱土体

发生泥流型塌陷的根本原因是软弱土的粘滞系数太小,具流动性。因此,增大软弱土的粘滞系数是治本之举。这些工作可以与地基处理同时进行。

4.4.2 控制诱发因素

泥流型塌陷主要控制真空荷载、振动荷载和进行施工临时阻隔。

岩溶水急剧下降等引起的真空负压所衍生的岩溶空腔内对软弱土的吸附力有重大影响,这种吸附力将和重力一起,加剧该类型塌陷的发生和发展。因此需从消除真空荷载。

震动荷载将会使得软土震陷,因此,控制震动荷载也是必要的。

进行桩基施工时最好采用钢筒护壁,以避免泥浆护壁施工过程中护壁泥浆遇岩溶孔隙突然漏失时而导致泥流型地面塌陷灾害。

5 基于三机理理论的塌陷应急措施

岩溶地面塌陷具有随机性、隐蔽性和突发性的特点。塌陷发生后采取恰当的应急措施非常重要。

5.1 塌陷过程与阶段区分

一次岩溶地面塌陷一般都经历“突变→缓变→暂时稳定”的过程。相应地,可将塌陷变形区分为突变、缓变和暂时稳定三个阶段。

在突变阶段,地面塌陷突然发生,迅速形成塌陷坑。由于事发突然,时间短暂,大多是毫无征兆就发生,很少会及时为人们所发现,即使发后也往往没有较充分的反应时间。灾难性后果大多发生在这一阶段内。

塌陷坑形成后,周围土体中应力开始调整,逐步进入缓变阶段,塌陷坑外围裂缝规模增加、影响范围扩大。这一阶段内,地面变形速率相对变小,延续时间相对较长。

土体中应力经过一段时间调整后,土体变形逐渐减弱,塌陷土体将达到新的平衡状态而进入暂时稳定阶段。

5.2 应急处置

不同的塌陷阶段应采取不同的应急处置措施。

5.2.1 突变阶段

由于塌陷突然发生,且时间短暂,救援人员往往没有时间采取外部救援措施,灾害发生时以现场人员逃生、自救为主,最大程度地减小人员伤亡。

有鉴于此,在可能发生岩溶地面塌陷的危险区域开展各项活动前,根据三机理理论制定预防措施并进行演练,使全员了解岩溶地面塌陷的基本特征与危害,知晓地面塌陷后自救方法与逃生路线。发现有塌陷迹象时,应迅速逃离变形区域,不能顾及任

何的财产和器物。

5.2.2 缓变阶段

塌陷事故发生后,①应立即启动应急预案,按照应急预案,及时、有序、安全地将受险人员紧急疏散到安全区,有能力的人员尚应积极应急自救及协助救援;②迅速收集塌陷现场相关信息,紧急了解塌陷的位置、规模、大致范围与危害程度等;③收集塌陷区及其周边的相关地质资料,包括区域地质资料、已有的工程勘察资料、水文地质资料等,确定塌陷机理、岩溶条件和诱发因素;④安排专业技术人员进行宏观调查,布置塌陷监测网;⑤研究与制定抢险救援方案,开展科学救援。

5.2.3 暂时稳定阶段

在暂时稳定阶段,主要开展应急抢险勘察、塌陷灾害处置和受损工程处置等三方面的工作。

应急抢险勘察:①查明岩溶地质结构,确定塌陷机理;②进行全面调查,查明诱发因素;③进行必要的原位测试和土工试验,查明土工程地质性质;④调查土体变形特征,综合确定塌陷影响范围。

塌陷灾害处置:①回填塌陷坑;②依据塌陷机理,开展塌陷灾害的治理防止塌陷再次发生,特别是沙漏型塌陷要重点处理。

受损工程处置:①对塌陷及其影响范围内的建(构)筑进行全面排查和登记。②已经损坏而不能使用的建筑物应予以拆除;③其余建筑物应逐一进行安全鉴定,据鉴定结果分别予以拆除和实施加固措施;④对结构影响不大且修复后可以使用的建筑物,应对地基采取加固等措施;⑤有特殊要求的建筑物,加固后满足其相应要求;如堤防工程等应对堤基采取防渗措施。

6 结 论

土体、岩溶和诱发因素是岩溶地面塌陷的三要素。诱发因素是外因,不是塌陷机理的构成要素;诱发因素产生作用力;作用力改变土颗粒运动状态:使土颗粒由“静止→运动”,土体由“稳定→塌陷”。土的工程地质性质决定土体塌陷方式:黏土块坍塌、砂颗粒漏失、软弱土流失;土体塌陷方式决定土体塌陷机理。根据土体塌陷方式,提出了由“土洞型塌陷”“沙漏型塌陷”和“泥石流型塌陷”构成的三机理理论。岩溶为土颗粒的丧失提供通道或储藏空间,仅此

而已。

三机理理论既解释了岩溶地面塌陷现象,更回答了“如何塌”的问题;可以很好地指导岩溶地面塌陷的预测、监测、防治和应急处置工作,形成了从理论到实践完整的思想体系,可以广泛应用与工程实践。

当然,作为一种新提出的机理理论,还存在着一些不足。如三个确定性预测模型还需工程实践和试验的检验和验证,对塌陷监测、防治和应急措施的指导工作还要进行深入的研究和完善等。

参考文献

- [1] 徐卫国,赵桂荣. 试论岩溶矿区地面塌陷的成因及防治设想[J]. 化工矿山技术,1978,4:19-27,18.
- [2] 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.
- [3] 徐卫国,赵桂荣. 论岩溶塌陷形成机理[J]. 煤炭学报,1986,2:1-11.
- [4] 左平怡,赵济群,钱再华. 对真空吸蚀作用解释地面塌陷的疑义[J]. 地质论评,1981,3:243-248.
- [5] 康彦仁. 论岩溶塌陷形成的致塌模式[J]. 水文地质工程地质,1992,19(4):31-34.
- [6] 康彦仁. 试论岩溶地面塌陷的类型划分[J]. 中国岩溶,1984,3(2):146-155.
- [7] 康彦仁. 岩溶塌陷的形成机制[J]. 广西地质,1989(2):83-90.
- [8] 项式钧,康彦仁,刘志云,等. 长江流域的岩溶塌陷[J]. 中国岩溶,1986,5(4):256-282.
- [9] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994,76-94.
- [10] 代群力. 岩溶矿区地面塌陷成因新说—共振论[J]. 中国煤田地质,1991(3):66-68.
- [11] 代群力. 论岩溶地面塌陷的形式机制与防治[J]. 中国煤田地质,1994,6(2):59-63.
- [12] 吴永华,谢春波,朱洵. 陆家街地区岩溶塌陷形成机制及预测评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,1994(S1):118-123.
- [13] 胡亚波,刘广润,肖尚德,等. 一种复合型岩溶地面塌陷的形成机理:以武汉市烽火村塌陷为例[J]. 地质科技情报,2007,26(1):96-100.
- [14] 郑小战. 广花盆地岩溶地面塌陷灾害形成机理及风险评估研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [15] 肖明贵. 桂林市岩溶塌陷形成机制与危险性预测[D]. 2005,长春:吉林大学.
- [16] 苏阳,曾克强,陈孟芝. 桂林市岩溶土洞塌陷的形成机制及治理措施[J]. 矿产与地质,2007,6:692-694.
- [17] 王建庆. 覆盖型岩溶土洞塌陷机制及其稳定性研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2003.
- [18] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制[J]. 中国地质灾害与防

- 治学报, 2009, 3: 52-55.
- [19] 左平怡. 论岩溶地面塌陷的形成过程与机理[J]. 中国岩溶, 1987, 6(1): 71-79.
- [20] 刘长礼, 贺可强, 高宗军. 岩溶地面塌陷的机理分析及其预测模型[J]. 河北地质学院学报, 1993, 16(3): 264-270.
- [21] 陈星, 黄润秋. 岩溶塌陷的地质概化模型[J]. 水文地质工程地质, 2002, 6: 30-34.
- [22] 张丽芬, 曾夏生, 姚运升, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126-130.
- [23] 刘广润, 程伯禹. 岩溶塌陷的类型、成因机制及防治途径——兼论武汉市岩溶塌陷勘查工作要点[J]. 工程地质学报, 2001, 4: 414-417.
- [24] 侯超群, 董满生, 逢焕平. 松散土体型地面塌陷成因分析及机理研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 63-67.
- [25] 杨立中, 王建秀. 国外岩溶塌陷研究的发展及我国的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997(S1): 14-18.
- [26] 高宗军. 岩溶地面塌陷预测模型初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 66-71, 85.
- [27] 杨德才. 水城岩溶判断抽水塌陷研究[J]. 岩土工程届, 2002, 5(6): 21-23.
- [28] 赵汉中. 工程流体力学(I) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application

LUO Xiaojie¹, LUO Cheng²

(1. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan, Hubei Province, P. R. of China, 430010; 2. China Machinery Third Investigation and Design Institute Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430014, China)

Abstract In order to provide theoretical basis for the prediction, monitoring, prevention and emergency response of karst ground collapse, the development law of karst ground collapse is summarized. It is considered that the soil body, karst and inducing factors are the three elements leading to karst ground collapse. Karst provides passage and storage space for the failed soil body. The geotechnical properties of soil determine the ways of soil collapse: "clay block" collapse, sand particle leakage and soft soil loss. According to the mode of soil collapse, the Three—Mechanism Theory of (TMT) of karst ground collapse, which is composed of "soil cave type collapse", "hourglass type collapse" and "mud flow type collapse", is put forward here. In cohesive soil and dense sandy soil layers, under the action of the external force, the ground collapse caused by the failure of soil cave roof is called soil cave collapse. The ground collapse caused by the leakage of sand particles in the loose sand layer above the soluble rock is called hourglass collapse. The surface collapse caused by the loss of soft soil above the soluble rock to the soluble rock under the action of external force is called mudflow collapse. The TMT focuses on the way of soil collapse, which not only explains the phenomenon of karst ground collapse, but also answers the question of "how to collapse". The inducing factors are the external influencing factors of ground subsidence, not the constituent elements of collapse mechanism. Inducing factors produce acting force, which changes the movement state of soil particles, making the soil particles from "static" to "moving", and the soil mass from "stability" to "collapse". According to the TMT, a comprehensive geological prediction method of karst ground collapse is proposed, and a deterministic prediction model of soil collapse based on three collapse mechanisms is established. The monitoring, prevention and emergency measures of karst ground collapse are systematically summarized, and a complete karst ground collapse ideological system from theory to practice is formed.

Key words soil—cave type karst ground collapse, hourglass type karst ground collapse, mudflow type karst ground collapse, collapse prediction, collapse monitoring, collapse prevention, collapse emergency measures

(编辑 张玲)