

蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 等. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.

DOI: 10.11932/karst20230304

岩溶塌陷机理研究进展

蒋小珍¹, 冯涛², 郑志文³, 雷明堂¹, 张伟³, 马骁¹, 伊小娟²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质调查局岩溶塌陷防治创新中心, 广西桂林 541004; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031; 3. 广东省地质环境监测总站, 广东广州 510510)

摘要: 岩溶塌陷机理是开展岩溶塌陷监测、预警、防控及治理工作的基础。长期以来, 岩溶塌陷机理研究都是以事后调查的定性推测为主, 缺乏必要的科学观测数据支持, 导致目前的岩溶塌陷机理仍然处于假设阶段, 并成为岩溶塌陷灾害监测预警与防治方面的理论瓶颈问题。文章总结了近年来国内外岩溶塌陷机理的最新研究进展, 提出目前的岩溶塌陷机理都可以归结为土岩体的渗透变形, 但其临界或破坏指标还需进一步探讨, 此外指出随着高频采样的水压力、加速度计及声波等传感器的实用化, 塌陷机理研究将面临着从静水压力到动水压力方面的挑战, 并且压力脉动造成的气蚀破坏、共振破坏也将是下步探究的重点。

关键词: 岩溶塌陷; 形成机理; 渗透变形; 动水压力; 气蚀; 共振

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)03-0517-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国可溶岩分布面积达 344 万 km²(其中裸露、覆盖型 206 万 km², 埋藏型 138 万 km²), 占国土面积的 1/3 以上, 是世界上岩溶最发育、类型最齐全的国家之一。岩溶塌陷是岩溶区特有的地质灾害, 据全国重点地区岩溶塌陷调查资料, 截至 2021 年, 我国有记录的岩溶塌陷计 3 800 处, 其中 90% 以上为土层塌陷, 主要分布在西南、华南地区的桂、黔、湘、赣、川、滇、鄂、渝等省(区、市), 以及华北、东北地区的冀、鲁、辽等省。在全国 337 个地级以上城市中, 有 105 个分布在岩溶塌陷高易发区; 我国已建成的高速铁路有 2 000 km 穿越岩溶塌陷高易发区, 中长期规划建设的高速铁路, 有 1 800 km 位于岩溶塌陷高易发区^[1]。岩溶塌陷主要发育在覆盖型岩溶区, 地势相对平坦, 随着城市化的发展, 它的隐蔽性、突发性特

点, 更让人防不胜防。在我国约有 75% 以上的岩溶塌陷属于人类工程活动诱发, 并已成为岩溶区城市和重大工程建设、自然资源开发面临的主要地质环境安全问题。深入剖析岩溶塌陷地质灾害的形成机理, 是开展岩溶塌陷监测预警、建立岩溶区地质灾害综合防治体系建设的基础和条件。

1 岩溶塌陷机理研究现状

岩溶塌陷的影响不仅在我国日趋严重, 同时也是世界性的地质灾害重视的问题。据统计, 中国、美国、加拿大、南非、意大利、法国、英国、德国、俄罗斯、土耳其等 23 个国家都发生过岩溶塌陷灾害。岩溶塌陷问题直至 20 世纪 70 年代才得到世界范围的广泛关注。1973 年, 国际工程地质协会在西德汉诺威首次举行了“岩溶塌陷与沉降: 与可溶岩有关

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077273); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021003)

第一作者简介: 蒋小珍(1970—), 女, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事岩溶地质灾害防治研究。E-mail: 511036641@qq.com。

收稿日期: 2022-09-10

程地质问题”国际讨论会;从1984起,每两年举办一次“岩溶塌陷和岩溶工程与环境影响多学科国际讨论会”。岩溶塌陷研究从最初的岩溶塌陷特征及发育规律描述,逐渐过渡到岩溶地质条件调查方法、勘探方法、风险性评价及管理的研究。

中国对岩溶塌陷的研究分为以下四个阶段:第一阶段,20世纪80年代以前,主要是针对岩溶充水矿山生产过程中诱发岩溶塌陷开展一些零星研究;第二阶段,20世纪80年代,开展了长江流域、典型矿山、水源地和贵昆等铁路沿线岩溶塌陷调查及小型物理模型试验;第三阶段,20世纪90年代是重点城市的岩溶塌陷勘查,涉及武汉、玉林、唐山、铜陵、桂林市、深圳龙岗6个城市,在此期间,中国地质科学院岩溶地质研究所(简称“岩溶所”)建成大型物理模拟实验室,再现了上述5个城市岩溶塌陷的形成过程及塌陷主要影响因素,如矿山抽(排)水、降雨、河流水位的暴涨暴落等;第四阶段,2000年始,中国地质调查局启动了全国范围内的岩溶塌陷调查工作,截至2021年,已完成桂中、湘中、湘西、鄂东、珠三角、黔中、皖南、皖北、苏北等岩溶塌陷重点分布区1:5万岩溶塌陷地质调查70多个图幅,约3万km²。此外2000年始,国家自然科学基金委加大了对岩溶

塌陷研究的投入,先后启动了17个项目,其中15项涉及抽水、桩基、盾构、隧道施工及矿山排水、列车振动、极端气候及自然条件诱发岩溶塌陷的机理研究,2项是关于岩溶塌陷的预测防治研究。

岩溶塌陷的机理研究始于20世纪30年代,前苏联学者最早提出了潜蚀理论,即在渗流作用下土体颗粒发生移动的现象,其中包括机械侵蚀及化学溶蚀两种作用方式。从20世纪80年代初期开始,学者们对岩溶塌陷的形成机理进行了更深入的探讨。徐卫国^[2]通过煤矿开采疏干排水、水库蓄水引发的岩溶塌陷及处理经验,提出了真空吸蚀论;苏建三^[3-4]等提出“气蚀、气爆”论;20世纪90年代,陈国亮^[5]根据铁路建设、运营中遇到的岩溶塌陷问题,提出压力差效应;此外,国内其他学者^[6-7]根据地面出现塌陷坑的观察及描述,提出了重力效应、冲爆效应、振动效应、荷载效应、根蚀效应等。20世纪90年代,美国的T.M.Sharp^[8]根据水力学理论推导,提出岩溶塌陷的水力劈裂效应及计算方法(表1)。岩(土)体水力劈裂研究,在水利大坝上研究较为深入,通过研究岩(土)体在水压力作用下,会在岩体或土体中引起裂缝的发生与扩展,反映了水压力作用下岩(土)体的力学响应以及结构变化^[9]。

表1 文献中塌陷致塌机理类型

Table 1 Types of collapse mechanisms in previous studies

致灾机理类型	描述	理论
潜蚀论	覆盖岩溶地区,在地下水流的渗流作用下,渗透压力或水力梯度较大时,产生管涌、流土,引起土层破坏,产生土洞,最后发生塌陷	水力学→达西定律→渗透变形破坏
真空吸蚀论	密封条件比较好的岩溶空腔中,过水断面由小变大或地下水位突然下降都会产生负压吸蚀作用,空腔上覆土体不断剥落,最终发生塌陷	水力学→达西定律→渗透变形破坏
压力(压强)差效应	地下水位的变动在封闭的岩溶空腔中引起足够的压力差时,会对覆盖层产生气蚀和潜蚀作用,多种压力作用下,土体遭到破坏,产生地面塌陷	水力学→达西定律→渗透变形破坏
水力劈裂论	地下水位的快速上升下降、气爆产生的荷载将会增大土体中的瞬时孔隙水压力,导致土体裂纹的扩展与闭合,进而裂隙不断扩大或土洞壁发生片状脱落形成地面塌陷	水力学→达西定律→渗透变形破坏
气爆论	落水洞被封堵后,雨季地下水水位瞬猛上涨,对覆盖层产生向上的正压顶托力,顶托力较大时,会击破堵体产生塌陷。或人为的爆破、地震或极端气候,使溶洞顶板坍塌,塌陷岩土体堵塞岩溶管道,在岩溶管道中产生高压气团,在岩溶覆盖层土体强度较弱的地方产生冲爆作用与水击作用,降低覆盖层内聚力,导致塌陷发生	土力学→极限平衡理论、流体力学、地震学→渗透变形破坏
化学溶蚀论	人为排放的酸碱溶液或地下水的溶蚀使岩溶空洞扩大或周围土体强度降低,当土体自重力大于土洞顶板的承重力时,发生塌陷	化学
共振论	轨道交通位于覆盖型岩溶上方或者地下水面波动作用于覆盖层,当波动频率与覆盖层固有频率相同时引发塌陷	物理学
液化论或振动论	外力振动或地震作用于土体,导致岩溶地区饱水砂土产生液化、软化效应,抗剪强度瞬间降为零,上覆土体流入岩溶空腔,产生塌陷	地震学

土体水力劈裂研究,主要采用现场原位测试、室内三轴仪、离心机等进行水力劈裂实验,测试工作已形成比较成熟的技术方法。例如,1976年,美国的Teton坝溃坝后,坝上进行了两组现场水力劈裂试验。试验结束后对坝体试验段开挖显示,绝大多数试验段形成的劈裂缝为垂直缝,且裂劈面几乎垂直于坝轴线方向,显示水力劈裂在溃坝过程中发挥了重要作用。室内试验最初采用模型试验槽,然后采用三轴仪,研究中空圆柱土试样的水力劈裂破坏方式、劈裂面方向及裂缝的扩展方式。近十年,离心机试验也开始应用于黏性土水力劈裂性能研究^[10]。土的水力劈裂破坏机理主要包括剪切破坏、张拉破坏。孔壁周围径向和切向应力的差异导致剪切破坏;张拉破坏理论是当最小有效应力成为负值且超过土体的抗拉强度时,则发生水力劈裂。也有学者认为,水力劈裂是两种机理的共同作用^[11]。因此,土的抗拉强度是控制土体水力劈裂的重要力学参数。王军玺^[9]指出,地下土体存在原始裂隙,在渗透水压力作用下,这些裂隙发生扩展,最终贯通取决于水压楔劈效应,但还没有充分的证据来证明其合理性。与剪切破坏机理相应的判断准则摩尔-库伦强度理论,依据弹塑性力学理论,很难解释裂缝的扩展;而与张拉破坏机理相应的水力劈裂判断准则分为总应力准则和有效应力准则。上述试验均显示,土体的起裂压力与围压、土的不排水剪强度、试样中心孔径与试样直径的比例、土的超固结比、初始应力比、加压速度等有关。

岩体水力劈裂研究方面,刘得潭等^[12]通过室内试验认为:岩体水力劈裂临界水压力与材料强度和轴向压应力存在正相关关系,轴向压应力较材料强度对水力劈裂临界水压力影响大;水力劈裂临界水压力与初始裂缝开度、初始缝长呈负相关关系;随着缝内水压的增大,岩体初始裂缝的裂尖扩展,形成损伤劣化区、宏观裂缝,从而导致岩体失稳破坏。理论模型大致可以分为两类:一类是将岩体看作裂隙介质,认为水在岩体内部是以裂隙流的形式存在和运动;另一类是将岩体视为等效连续介质,引入损伤的概念来描述随岩体应力状况的变化,岩体内裂隙的发展情况,水压力视为体积张力,建立损伤变量与渗透系数之间的关系。损伤的含义主要是指岩体内部裂隙的发生及扩展,在几何意义上意味着承载面积的缩小。谢兴华等^[13]在裂隙岩体渗流-应力耦合渗

流研究中指出:目前研究水力劈裂的一个重要假设是裂隙附近岩石为非渗透性或低渗透性,水是在均匀介质内渗透,实际上这是一种假想的水流态,裂隙岩体内水的流动是以裂隙流为主伴有渗流的混合水流体。当岩体内裂隙较大时,更符合裂隙流(管道流)的水力条件。

表1显示,目前已有的岩溶塌陷形成机理研究基本上是根据塌陷的地质条件、影响因素进行宏观的推断,缺乏必要的科学观测数据支持。

众所周知,岩溶塌陷灾害具有隐蔽性和突发性的特点,其形成须具备以下三个基本条件,即下伏基岩岩溶发育、上覆一定厚度覆盖层、地下水活动。而地下水活动作为塌陷的主要动力,其作用表现在水的溶蚀搬运及水位变化引起岩溶空腔水气压力突变两个方面。所以,对于塌陷的机理研究必须紧紧抓住岩溶管道水流这一实体进行剖析。何宇彬等^[14]认为,只有研究地下岩溶管道水流、水气压力特征的水动力条件,才能抓住塌陷的真正机理。这也是涉及地下水动力条件变化的潜蚀、真空负压、压强差、水力劈裂等岩溶塌陷机理占主流的原因。事实上,地下水动力条件变化的破坏机理都可以归结为岩土体的渗透变形破坏,即岩土体在地下水渗透力(动水压力)的作用下,部分颗粒或整体发生移动,引起岩土体的变形和破坏的现象。在岩溶塌陷形成过程中,由于地下水动力条件的改变,地下水的渗透力对岩溶空腔顶板岩(土)体作用方式及方向会有所不同。

土力学的极限平衡理论机理考虑的是溶(土)洞的顶板稳定性问题,是岩溶塌陷发育过程的最后阶段,地表荷载的变化只是缩短地面出现塌陷坑的时间。由于未考虑地下水的作用,因此认为其作为塌陷的主要机理有待商榷。

上述岩溶塌陷机理研究涉及水力学、土力学、地震学等不同的学科,岩溶塌陷机理不仅与静水压力变化有关,而且须考虑动水压力的作用,这将是未来岩溶塌陷机理研究面临的新挑战。

2 研究趋势

随着精细化光纤、加速度计及声纳等测量技术的应用,地下水气压力突变(或地下水位)的监测频率由低频(24 h·次⁻¹)逐渐向高频(5 min·次⁻¹~0.01 s·次⁻¹)发展,将有利于宏观上岩溶塌陷判别指标的确定。

定以及动水压力条件下的岩溶塌陷微观机理分析,从而有效的应用于岩溶塌陷灾害的防治。

2.1 岩溶塌陷的判据研究

当前岩溶塌陷机理研究仍然处于定性的宏观分析阶段,如何量化这些致塌因子,如多大土层渗透坡降、负压值、压强差、共振频率等诱发因子会导致岩溶塌陷的发生?如何获取这些临界参数?进而解决岩溶塌陷的判据指标等问题仍任重道远。

水利水电岩土工程领域对土体渗透变形有着深入系统的研究,将临界渗透坡降作为判断土体发生渗透变形破坏的判据,形成了根据土的颗粒级配判断渗透变形类型的方法和指标,制定了粗粒土渗透变形试验规程,但是临界渗透坡降如何与地下水动力条件(地下水位监测数据)耦合未有相关的研究。2000年始,中国地质科学院岩溶地质所研发了室内原状土样的渗透变形试验装置,较好地解决了裂隙发育条件下土样渗透变形破坏测试问题,但相关的临界指标仍然在探索中。姜伏伟等^[15]提出将土体孔隙等效为圆管,根据管道流理论,推导潜蚀作用临界条件表达式,并设计了潜蚀作用试验装置及试验方法,依据渗透水头—渗透流量的半对数图,确定土体渗透变形破坏临界坡降,然后根据电子扫描显微镜测试土体孔隙直径,理论计算土体潜蚀作用发生的地下水临界波动速度,以此数据与野外实测地下水气压力波动速率进行对比,判断在现有的水力条件下,土体是否会发生破坏,进而发展到地面塌陷。该方法存在的主要问题是土体孔隙直径测试的不是原状样,临界渗透坡降指标与野外实测地下水气压力波动速率难以建立有效的、真正的关系。

岩土体水力劈裂临界水压力(起裂压力)是判定岩(土)体在水压力作用下发生劈裂破坏的判据,但是,引起水力劈裂的最小水压力(水力劈裂的发生)的判断准则尚不统一。因此,有必要结合水力劈裂临界水压力,并考虑土体渗透变形破坏指标及岩溶地下水动力条件重新建立有效的关联。

2012年至今,中国地质科学院岩溶地质研究所先后在广州白云区金沙洲、湖南宁乡煤炭坝、安徽铜陵狮子山、广西来宾吉利、重庆中梁山等地建成岩溶塌陷监测示范站,对岩溶地下水动力条件进行监测。通过钻孔埋设振弦式孔隙水压力传感器,采样间隔5~20 min,在密闭状态下对岩溶管道裂隙系

统中的水气压力进行监测^[16-17],持续多年的监测较好地捕捉到岩溶塌陷形成过程中岩溶管道裂隙系统中水(气)压力变化的突变过程,如广西来宾市吉利村岩溶塌陷监测站,在极端降雨天气条件下,获得了地下河系统中不同部位(或与大气交换通畅程度)地下水气压力突变值不同,并且其增长、消散特征也不同^[18];湖南宁乡大成桥监测站首次获得了矿山开采、闭矿疏干区岩溶水位变化、恢复的全过程监测数据,获取了疏干区在开采、水位恢复两个阶段出现的岩溶水位突变及塌陷过程信息^[19-20],而这种突变在岩溶塌陷形成过程中具有重要的指征意义。以上监测工作,基本达到了对触发岩溶塌陷地下水动力条件把握的目的^[21-22]。对上述监测站数据分析表明:塌陷的主要诱因是水气压力的突变。获取水气压力突变临界值与监测频率、监测点是否恢复至原来的地质条件(承压状态)密切相关。

因此,野外岩溶地下水气压力监测、渗透变形破坏指标参数的确定需进一步深化,是下步岩溶塌陷机理研究的工作重点之一。

2.2 动水压力对岩土体的破坏机理研究

以上岩(土)体的渗透变形破坏研究主要考虑的是静水压力作用,基本未考虑动水压力作用。近年来,岩土体内的动水压力作用逐步得到重视。高铁无砟轨道水力劈裂研究表明^[23]:裂纹内水压力最大值出现在裂纹尖端,随着加载频率的增加,裂纹内孔隙水压力呈增大趋势,且与加载频率基本呈二次方关系。2018-2019年中国地质科学院岩溶地质研究所采用光纤水压力传感高频采样技术^[24],对岩溶空腔排水试验模型中的水气压力进行高频监测($100\text{次}\cdot\text{s}^{-1}$),捕捉到排水过程中,密封的岩溶空腔水气压力具有脉动现象^[25],即具有一定频率的动水压力特征(图1),而且动水压力的变化幅度(100 cm)远大于静水头压力变化幅度(水位至排水口的高度60 cm);同时,实验中3次发现水气压力的突降伴随明显的共振效应。因此,动荷载及压力脉动作用下,岩土体裂隙破坏机理过程有待于进一步的研究。

2.2.1 压力脉动的基础理论研究

压力脉动就是压力随时间发生周期性变化的现象,指压力作用于被作用对象上并不均匀,在某个部位有较集中的或是较大的压力,且这种压力单次持

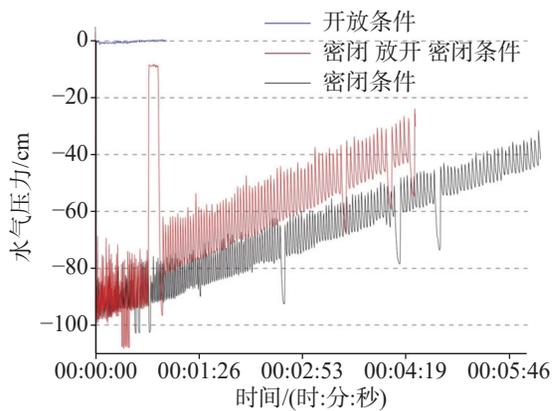


图 1 不同密封、开放条件下的水位下降,岩溶空腔水气压力变化图(频率变化 0.98-2.88Hz,突然的压力变小腔体会发生振动)

Fig. 1 Water level decrease under different sealing and opening conditions and water-gas pressure variation in karst cavity (frequency change: 0.98-2.88Hz, vibration of cavity with a sudden decrease in pressure)

续的时间短,并呈现一定的周期性。该压力不是静压力,而是具有一定频率的动压力。除了典型的气流压力脉动是活塞式压缩机的固有特性,压力脉动是水工建筑(压力管道、水轮机、水泵等)面临的主要问题,压力脉动特性已成为衡量大型水力机组性能的重要指标^[26-28]。如水电厂尾水压力、调压井的水位波动都具有脉动特征^[29-30]。目前压力脉动的主要研究包括以下方面:理论方程的描述、压力脉动的分析方法、共振破坏、压力脉动的防治措施^[31-32]。

压力脉动的数学方程主要采用流体力学的理论,其传播主要包括:渗流模型、瞬变流模型、振荡型模型^[33]。三种模型较好地解释了岩土体中压力脉动传播的不同阶段:当压力脉动水头小于阻力(取决于渗透系数)时,脉动压力以渗流速度传入岩土体;当脉动水压大于阻力时,压力脉动是以压力波进行传播,而不是靠水体的运动速度来传播,压力波速度与泊松比、弹模、管道的厚度及管内径有关,与流速无关。通过瞬变流模型的连续方程、运动方程,可计算瞬态水压力的最大值、最小值、气穴体积及流量;此外振荡型模型则是用来描述脉动压力差引起水体的振荡运动(共振)。

压力脉动信号分析方法主要基于 Fourier 变换的频域分段-时域反演法、交叉小波变换等方法^[34],分析引起压力脉动的扰动源、估算压力脉动的主要分布频率、揭示不同频率成分对水压脉动极值的影响。瞬态流理论较为成熟的就是有压管道中的水锤或水

击效应^[35]。圆管中的水击计算所用的连续性方程和运动方程已成功应用于科学研究和管道工程,其主要是从水力包络线计算入手,进行压力最高值及最低值的计算,并提供不同时间频率的计算结果,如节点压力、流量、流速变化过程。已有的、使用广泛的商用软件 Bentley Hammer 采用瞬态水力分析算法(特征线法 MOC)进行方程求解^[36],可在毫秒级的时间序列连续变化过程中,计算整段管线中的瞬时水头、空气含量的变化过程,即压力波动的产生、发展和延续过程,并对于压力变化和如何设置保护提供了全过程数据分析支持^[37-38]。此外,计算流体力学(CFD)瞬态动力响应仿真软件 Fluent、ANSYS-CFX、AMESim,可计算流场的压力脉动值及变化趋势,并对压力脉动进行频域分析;对输送管路系统中影响脉动频率的因素进行了影响分析,找出影响源,建立输送管路低频压力脉动的计算公式^[39]。

根据已有的流体力学压力脉动研究成果,作为天然形成的、形态极不规则的岩溶管道裂隙系统在地下水运动过程中产生水气压力脉动在所难免,在水气压力脉动的作用下,岩溶空腔顶板的岩(土)体将可能像水工结构一样产生共振破坏或气蚀破坏,导致抗拉强度降低、最后发生破坏和塌陷。因此上述压力脉动理论为岩溶管道水气压力脉动的水力计算提供了较好的研究基础。

2.2.2 气蚀(空蚀)破坏

水气的高频脉动对载体产生气蚀或空蚀破坏,流体力学也称为气穴、空化、水锤、水击等现象,广泛存在于输水管道、泵、水轮机等流体机械和其他工业设备中。气蚀是由于液流流道中的流体连续性受到破坏,局部形成低压,使液体在该处汽化而引起大量微气泡爆发性生长,微气泡急剧生长成大气泡后随液流至压力高处突然溃灭,对流道壁面产生高达几百个大气压的冲击,造成壁面材料剥蚀。微气泡的生成与溃灭具有随机性,并通过流体传递^[40-41]。在流体机械中由于影响条件相对简单,研究更为深入,如气蚀的测定、水击波速测量、水击数学模型及理论计算^[42-46]。

德国 A.W. Momber^[47]开展了水流气蚀作用压碎混凝土分选骨料(城市建筑垃圾再利用)的试验研究,采用水流气蚀室试验了 5 组不同抗压强度的混凝土。水流压力为 1.1 MPa,通过堰后 0.17 MPa,试验结果

表明混凝土抗压强度越低,气蚀率越大,砂浆强度C25的气蚀量达 $160\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$,且破坏主要发生在骨料与砂浆结合处。

在气蚀的监测诊断方面^[48-49],国内外主要研究方法包括:

(1)能量法 当气蚀发生时,特性曲线急剧下降。通常在离心泵气蚀特性曲线上取扬程曲线急剧变化阶段中扬程下降3%的点作为离心泵气蚀发生的临界点。

(2)噪声法 水泵气蚀时会产生噪声,一些研究人员利用声压传感器作探头,置于距离泵体一定距离的位置上,当泵内气蚀发展到强烈阶段时,汽泡破灭时的噪声通过泵体,传到泵外,传感器拾取信号,并对其进行噪声频谱分析,判断是否已经气蚀。

(3)振动法 利用加速度计作为探头,将其固定于泵壳或泵轴上,采集泵内的振动信号,把由电机、离心泵、风扇等引起的振动视为背景振动信号,由气泡破裂引起的振动信号作为气蚀故障信号,从而判别泵内是否发生气蚀。

(4)压力脉动法 气蚀发生时离心泵内流场的压力脉动与正常工作时有显著的不同,因此可通过对泵进、出口压力进行动态测试和频谱分析判断是否发生气蚀。

在减轻气蚀作用方面,掺气减压已成为输水结构减轻气蚀的重要途径,董志勇^[50]通过直流式水洞中分别对高速水流空化区、空蚀区的掺气特性进行了较为系统的试验研究,指出掺气可有效地防止或减轻应有的空蚀破坏程度。即使砼强度较低,只要在水流中掺入适量空气就可避免砼表面的空蚀破坏,也可大大放宽对砼表面不平整度的要求。反之,若不掺气,即使砼的强度很高,也会发生空蚀破坏。马洪琪^[51]在水力式升船机工程调试过程中,针对输水系统阀门段出现了较为突出的空化和振动问题,研发了稳压减振箱与阀前环向强迫掺气装置,使充水阀门抗空化性能增强30%~40%,水流条件明显改善,压力脉动降低50%~95%;有效地解决了高水头工业阀门空化振动难题。董志勇和王国玉等^[50,52]开展了通气减轻气蚀作用的试验研究,赵云秀^[53]系统总结了通过通风掺气设计,减轻过水建筑物气蚀破坏的基本思路,包括泄水建筑物在大流量、高流速工况需设置掺气设施以减少气蚀破坏;大坝潜孔检修门与工作门之间需设置通、排气孔;压力管道进口闸门后

亦应设置通、排气孔。

此外,远距离输水工程中的水锤作用,对泵及水管的破坏是不容忽视的^[53-54]。国际金融机构(如世界银行和亚洲银行等)在评估受贷款的输水工程项目全过程中,要求必须提交水锤分析、危害预测以及水锤防护等方面的设计研究报告书,否则不予评估。为了有效防止维修停泵时出现的真空负压和供水水锤作用的影响,在管道高程突变处增加注水阀或注气阀,研究试验中指出:注气阀口径越大,空气腔内真空值越小,反之亦然;如果进气口径足够大,则空气腔内真空值为0,即保持为一个大气压。但是研究结果无具体的注气阀口径尺寸或相对比例值。

地质方面,1662年雷诺等科学家通过简单的试验开始研究水中的气穴现象^[55];饱和和密实砂在非排水三轴压缩试验中也存在气穴现象^[56],Dariusz Gawin用有限元方程进行了饱和孔隙介质中的气穴数值模拟^[57]。近年来,英国泰晤士河隧道地质钻探中遇到高压气团,并且该气团含氧量低^[58]。J. Standing针对此问题开展研究^[59];英国伦敦盆地在18世纪由于工业的发展,地下水位大幅下降达70 m,到19世纪60年代中叶,地下水位逐渐回升;通过室内模拟试验,模拟了含水层水位下降然后补给,气体的产生和聚集过程。试验结果认为:①含水层水位下降阶段产生的气穴现象,释放的空气上升至弱透水层的底部聚集,当含水层得到补给,地下水位上升时,该空气被加压,形成高压气团;②气穴现象形成的气体量与试样颗粒大小成正比关系。

以上气蚀破坏的理论、测试方法及减轻气蚀作用方面引用到岩溶塌陷的机理及防治研究将具有较好的借鉴意义。

2.2.3 共振破坏

共振是激振力的频率与其作用的结构固有频率接近或相同时,相互间产生的振动现象。在持续的共振频率作用下,结构的阻力不足以消耗相互激励的能量时,结构的振动是不稳定的,振动幅度将越来越大,直至损坏。共振破坏在土木工程中是必须考虑的问题,特别是桥梁^[60],世界各国都已颁布高速铁路共振问题的相关标准^[61]。此外,输流管道振动问题也一直受到学术界和工程界的重视与研究。有压管道共振研究主要是通过室内、室外试验及有限元数值模拟进行共振模态分析,获取输流管道的固有

频率、阻尼比和模态振型,为管道系统的振动特性分析、振动故障诊断和预报提供依据。李光旭^[62]认为当充液直圆管水体固有频率与激振力的频率接近,会造成管道的共振破坏。因此认为导致输送管道共振的原因包括两个方面:一是输送管道系统中的水(气)压力脉动的激振力频率造成管道中水体的共振,引起管道的振动;二是由于激振力的倍频基本与管道固有频率一致导致管道的共振。由于管道为均质体,管道系统的固有频率与管道的刚度及质量有关,而刚度与管径、壁厚、弯头数量、支吊架状况等因素有关^[63],因而解决振动现象发生的措施主要在管道的薄弱环节增加减振装置或阻尼器、减少弯头、支吊架处理等。

在岩溶区,自然形成的岩溶管道系统(溶洞、岩溶裂缝、岩溶裂隙),形状极不规则,管道裂隙空腔上伏第四系土体(充填物)性质复杂,如黏土、含砾石黏土、粉质黏土、砂、砾石等。岩溶管道系统空腔顶部的岩土体固有频率、地下水流体的固有频率如何测量?和水气压力脉动频率之间的关系如何?共振现象导致岩(土)体中空隙水压力值成倍数增长,还是激振力的垂直振动导致空腔顶部岩土体的变形与破坏?这些问题都有待于进一步的研究。

3 结 论

由于目前的岩溶塌陷机理成因理论尚处在假设阶段,缺乏成熟的塌陷机理理论指导^[64],已成为岩溶塌陷灾害预测与防治方面的理论瓶颈问题。

随着岩溶塌陷地下水动力条件监测技术的提出及完善,以及室内、野外地下水气压力监测数据的积累认为:岩溶水气压力的突变是岩溶塌陷发生的主要诱因,其机理就是岩(土)体的渗透变形破坏,但其判别指标还需进一步的研究。

此外,通过模型试验、流体力学等相关学科的综合分析,动水压力的气蚀破坏、共振破坏机理是不容忽视的,相关的压力脉动理论、测试方法及防治措施都可以引入到岩溶塌陷的机理、监测及防治,并开展进一步的研究。

参考文献

[1] 雷明堂,戴建玲,等.湘西鄂东皖北地区岩溶塌陷1:5万环境地质调查报告[R].中国地质科学院岩溶地质研究所,2018.

- [2] 徐卫国.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.
XU Weiguo. The implication of suction action for ground subsidence in karst mining area[J]. Geological Review, 1981, 27(2): 174-180.
- [3] 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.
CHEN Guoliang. Cause and prevention of karst collapse[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [4] 苏建三.岩溶水管道流的气、水压力问题[A]//中国地质学会第二届岩溶学术会议论文集[C].科学出版社,1982:241.
SU Jiansan. Discussions on the groundwater-air pressure in karst system[A]//Proc. 2nd Conference on karst, Geological Society of China[C]. Science Press, 1982: 241.
- [5] J R Little. Relationship of modern sinkhole development to large-scale photolinear features, Proc[A]//1st multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst[C]. Balkema, Rotterdam, 1984, 189-196.
- [6] 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(4):32-34.
KANG Yanren. Collapse causing models in karstic collapse process[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1992(4): 32-34.
- [7] 高宗军.岩溶地面塌陷形成机理与成因模式研究:以山东泰安-莱芜为例[J].中国工程科学,2008,10(4):38-43.
GAO Zongjun. Study on the mechanism and cause mode of the karst collapse: Taking Tai'an-Laiwu for example[J]. China Engineering Science, 2008, 10(4): 38-43.
- [8] Thomas M Tharp. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkhole[J]. *Engineering Geology*, 1999, 52: 23-33.
- [9] 王军玺,陈金淑,陶虎,石喜.土质心墙坝水力劈裂试验研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(1):132-144.
WANG Junxi, CHEN Jinshu, TAO Hu, SHI Xi. Advances in experimental research on hydraulic fracturing in earth-and-rock-fill dam with central soil core[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(1): 132-144.
- [10] 牛起飞,侯瑜京,梁建辉,彭翥.坝肩变坡引起心墙裂缝和水利劈裂的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(12):1935-1941.
NIU Qifei, HOU Yujing, LIANG Jianhui, PENG Chong. Centrifuge modeling of cracking and hydraulic fracturing in core dams induced by abrupt change of bank slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1935-1941.
- [11] 章定文,刘松玉.土体中水力劈裂研究进展[J].水利水运工程学报,2006(2):71-78.
ZHANG Dingwen, LIU Songyu. State of hydraulic fracturing in soils[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2006(2): 71-78.
- [12] 刘得潭,沈振中,徐力群,邱莉婷,江婷.岩体水力劈裂临界水压力影响因素及机理研究[J].水利水运工程学报,2018,4(4):30-37.
LIU Detan, SHEN Zhenzhong, XU Liqun, QIU Liting, JIANG Ting. Experimental studies on influence factors and mechanism

- of critical water pressure of hydraulic splitting in rock mass[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018, 4(4): 30-37.
- [13] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. *岩土力学*, 2004(2): 330-336.
XIE Xinghua, SU Baoyu. A review of fracture rock hydraulic fracturing research[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004(2): 330-336.
- [14] 何宇彬, 徐超. 论喀斯特塌陷的水动力因素[J]. *水文地质工程地质*, 1993(5): 39-42.
HE Yubin, XU Chao. Discussions on the hydrodynamics of karst collapse[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1993(5): 39-42.
- [15] 姜伏伟, 雷明堂, 管正德, 吴远斌. 土洞发育水动力判据及应用研究[C]. 全国工程地质学术年会, 2014.
JIANG Fuwei, LEI Mingtang, GUAN Zhengde, WU Yuanbin. Hydrodynamic criterion and application of karst soil cavities[C]. *National Annual Conference on Engineering Geology*, 2014.
- [16] 雷明堂, 李瑜, 蒋小珍, 甘伏平, 蒙彦. 岩溶塌陷灾害监测预报技术与方法初步研究: 以桂林市柘木村岩溶塌陷监测为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004(Supp.1): 148-152.
LEI Mingtang, LI Yu, JIANG Xiaozhen, GAN Fuping, MENG Yan. Preliminary study on the technology and method of sinkhole collapse monitoring and prediction: As an example of sinkhole collapse monitoring station in Zhemu village, Guilin City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004(Supp.1): 148-152.
- [17] 蒋小珍, 雷明堂. 岩溶塌陷灾害的岩溶地下水气压力监测技术及应用[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 786-791.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Monitoring technique and its application of karst groundwater-air pressure in karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 786-791.
- [18] JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang. Formation mechanism of large sinkhole collapses in Laibin, Guangxi[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(24): 1-13.
- [19] JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, GAO Yongli. New karst sinkhole formation mechanism discovered in a mine dewatering area in Hunan, China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(3): 625-635.
- [20] PAN Zongyuan, JIANG Xiaozhen. Mechanism of sinkhole formation during groundwater-level recovery in karst mining area, Dachengqiao, Hunan Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(24): 799-812.
- [21] 李瑜, 朱平, 雷明堂, 蒋小珍, 戴建玲, 蒙彦. 岩溶地面塌陷监测技术与方法[J]. *中国岩溶*, 2005, 24(2): 103-108.
LI Yu, ZHU Ping, LEI Mingtang, JIANG Xiaozhen, DAI Jianling, MENG Yan. Monitoring technology for karst collapse[J]. *Carsologica Sinica*, 2005, 24(2): 103-108.
- [22] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 廖武林. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2007(3): 126-130.
ZHANG Lifen, ZENG Xiasheng, YAO Yunsheng, LIAO Wulin. Summary of karst sinkhole in China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007(3): 126-130.
- [23] 杨荣山, 曹世豪, 谢露, 刘学毅, 江晓禹. 列车荷载与水耦合作用下的无砟轨道水力劈裂机理分析[J]. *铁道学报*, 2017, 39(6): 95-103.
YANG Rongshan, CAO Shihao, XIE Lu, LIU Xueyi, JIANG Xiaoyu. Hydraulic fracturing mechanism of slab track under coupling effect of train load and water[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(6): 95-103.
- [24] 曹细冲, 蒋小珍. 矿井疏干区岩溶塌陷的水击气爆作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
CAO Xichong, JIANG Xiaozhen. Water hammer and gas explosion of karst collapse in mine drainage area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [25] 马骁, 蒋小珍. 岩溶空腔水气压力脉动效应的发现及意义[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(3): 404-410.
MA Xiao, JIANG Xiaozhen. Discovery and significance of water-gas pressure pulsation effect within karst cavity[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(3): 404-410.
- [26] 杨建东, 胡金弘, 曾威, 杨桀彬. 原型混流式水泵水轮机过渡过程中的压力脉动[J]. *水利学报*, 2016, 47(7): 858-864.
YANG Jiandong, HU Jinhong, ZENG Wei, YANG Jiebin. Transient pressure pulsations of prototype francis pump-turbines[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(7): 858-864.
- [27] 钱忠东, 陆杰, 郭志伟, 张建军. 水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(8): 672-678.
QIAN Zhongdong, LU Jie, GUO Zhiwei, ZHANG Jianjun. Characteristics of pressure fluctuation in pump-turbine under turbine mode[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(8): 672-678.
- [28] 李琪飞, 刘超, 王源凯, 权辉. 异常低水头下水泵水轮机压力脉动特性分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2017, 43(2): 59-64.
LI Qifei, LIU Chao, WANG Yuankai, QUAN Hui. Analysis of pressure fluctuation characteristics of pump-turbine under abnormally low head[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2017, 43(2): 59-64.
- [29] 宋希杰, 刘超, 杨帆, 查智力, 严天序, 黄佳卫. 水泵进水池底部压力脉动特性试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 196-203.
SONG Xijie, LIU Chao, YANG Fan, ZHA Zhili, YAN Tianxu, HUANG Jiawei. Experiment on characteristics of pressure fluctuation at bottom of pumping suction passage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 196-203.
- [30] 郑源, 汪宝罗, 屈波. 混流式水轮机尾水管压力脉动研究综述[J]. *水力发电*, 2007(2): 66-69.
ZHENG Yuan, WANG Baoluo, QU Bo. Study on the pressure pulse in the draft tube of francis turbine[J]. *Hydro Power*, 2007(2): 66-69.
- [31] 孙淑清. 调压井水位波动会引起机组振动: 天生桥水电站机组振动试验结果与经验教训[J]. *水电站机电技术*, 1997(4): 68.
SUN Shuqing. Fluctuation of water level in surge shaft cause unit vibration—Results and lessons from vibration test of units in Tianshenqiao Hydropower Station[J]. *Electromechanical Technology of Hydropower Station*, 1997(4): 68.

- [32] Yeon-Whan Kim, Young-Shin Lee. Damage prevention design of the branch pipe under pressure pulsation transmitted from main steam header[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2008, 22(4): 647-652.
- [33] 李昕, 陈婧, 马震岳. 混凝土蜗壳结构在脉动压力作用下的疲劳破坏[J]. *黑龙江大学学报*, 2018, 9(2): 7-12, 51.
LI Xin, CHEN Jing, MA Zhenyue. Fatigue failure on concrete spiral case structure under pulsation pressure[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2018, 9(2): 7-12, 51.
- [34] 李爱华, 朱江, 李成华. 缝隙中脉动压力传播模型的进一步探讨[J]. *水利学报*, 2015, 46(5): 626-630.
LI Aihua, ZHU Jiang, LI Chenghua. Further discussion on propagation model of fluctuating pressure within cracks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(5): 626-630.
- [35] 寇攀高, 邓磊, 刘平, 吴长利. 基于频域分段-时域反演法的抽水蓄能机组大波动过渡过程水压脉动信号分析[J]. *大电机技术*, 2016(6): 41-47.
KOU Pangao, DENG Lei, LIU Ping, WU Changli. The pressure fluctuation signal analysis of pump hydraulic turbine based on segment in frequency domain and peak analysis in time domain[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2016(6): 41-47.
- [36] 杨雯, 欧阳于蓝, 宋子明, 孙亚全. 长距离多支线重力原水输水管道关阀水锤分析及防护措施[J]. *净水技术*, 2018, 37(3): 87-94.
YANG Wen, OUYANG Yulan, SONG Ziming, SUN Yaquan. Analysis and prevention measures of valve-closure water hammer for gravity raw water pipelines system with long-distance and multi-branches[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(3): 87-94.
- [37] Sadanand T S D. Hydraulic transient analysis of kolar water pipeline using bentley hammer V8i-A case study[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2014, 3(9).
- [38] 王玉林, 刘元成. Bentley Hammer软件在泵站水锤防护中的应用[J]. *中国水运(下半月)*, 2012, 12(9): 86-87.
WANG Yulin, LIU Yuancheng. The application of bentley hammer software in water hammer protection of pump station[J]. *China Water Transport (The second half of the month)*, 2012, 12(9): 86-87.
- [39] 王琰, 康雅, 李政帅, 苏喆, 沈磊, 赵慧君, 巫京京. 基于Bentley Hammer V8i的长距离输水管道停泵水锤模拟分析[J]. *给水排水*, 2013, 49(4): 114-117.
WANG Yan, KANG Ya, LI Zhengshuai, SU Zhe, SHEN Lei, ZHAO Huijun, WU Jingjing. Simulation analysis on water hammer caused by pump failure in long distance water transmission pipe line based on Bentley Hammer V8i[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 49(4): 114-117.
- [40] 史淑娟, 周浩洋, 陈二锋, 谷良贤, 赵涛. 输送管路低频压力脉动研究[J]. *强度与环境*, 2014, 41(3): 8-14.
SHI Shujuan, ZHOU Haoyang, CHEN Erfeng, GU Liangxian, ZHAO Tao. Research on pressure fluctuation of low frequency phenomenon in rocket[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2014, 41(3): 8-14.
- [41] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
HUANG Jitang. Principle and application of cavitation and cavitation erosion[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991.
- [42] 王勇. 泵汽蚀研究现状及展望[J]. *水泵技术*, 2018(1): 1-10.
WANG Yong. Research status and prospect of pump cavitation[J]. *Pump Technology*, 2018(1): 1-10.
- [43] 马富银, 杨国平, 吴伟蔚. 泵的空化现象研究进展[J]. *流体机械*, 2011, 39(4): 30-34.
MA Fuyin, YANG Guoping, WU Weiwei. Development of cavitation study on pump[J]. *Fluid Machinery*, 2011, 39(4): 30-34.
- [44] 刘凯, 杜润, 柯坚. 气蚀的CFD评价方法[J]. *液压气动与密封*, 2011(5): 32-35.
LIU Kai, DU Run, KE Jian. Evaluation method of cavitation erosion with CFD[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2011(5): 32-35.
- [45] 秦耀东, 杜德军, 张海林. 垂直饱和流阶跃输入下稳态-瞬态-稳态过程研究: 均匀饱和土柱中水击现象分析[J]. *水利学报*, 2001(9): 28-34.
QIN Yaodong, DU Dejun, ZHANG Hailin. Analysis of water hammer in an uniform saturated soil column[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(9): 28-34.
- [46] 蒋明, 赵赋. 槽头式野战管线水击波速测量研究[J]. *后勤工程学院学报*, 2004(4): 21-25.
JIANG Ming, ZHAO Fu. Study on measurement of water hammer wave velocity in field pipeline with slot head[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2004(4): 21-25.
- [47] Cameron Stanley, Gary Rosengarten, Brian Milton, Tracie Barber. Investigation of cavitation in a large-scale transparent nozzle[S]. F2008-SC-001, 2008.
- [48] A W Momber. Aggregate liberation from concrete by flow cavitation[J]. *International Journal of Mineral*, 2004, 74: 177-187.
- [49] 吴道虎, 李朝晖. 基于声学的水轮机状态监测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
WU Daohu, LI Zhaohui. Study on acoustics based condition monitoring technique of hydro turbines[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [50] 董志勇, 吕阳泉, 居文杰, 蔡新明, 丁春生. 高速水流空化区和空蚀区掺气特性的试验研究[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(4): 63-65.
DONG Zhiyong, LYU Yangquan, JU Wenjie, CHAI Xinming, DING Chunsheng. Experimental study of aerated characteristics in cavitation region of high velocity flow[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(4): 63-65.
- [51] 马洪琪. 水力式新型升船机关键技术研究[J]. *水利学报*, 2018, 49(4): 446-455.
MA Hongqi. Research on the key technologies of hydraulic new type ship lift[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(4): 446-455.
- [52] 王国玉. 通气对空蚀的影响及高速摄影观察[J]. *水力发电学*

- 报, 2001(1): 48-57.
- WANG Guoyu. Ventilation effects on cavitation erosion around a hollow-jet valve[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2001(1): 48-57.
- [53] 赵云秀. 过水建筑物通风掺气设计[J]. *云南水力发电*, 2016, 32(6): 96-100.
- ZHAO Yunxiu. The ventilation and aeration design of overflow structures[J]. *Yunnan Water Power*, 2016, 32(6): 96-100.
- [54] 熊水应, 关兴旺, 金锥. 多处水柱分离与断流弥合水锤综合防护问题及设计实例[J]. *给水排水*, 2003, 29(7): 1-6.
- XIONG Shuiying, GUAN Xingwang, JIN Zhui. Problems and design example of comprehensive protection for water hammer due to cavities collapsing with water column separation at multi-points[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, 29(7): 1-6.
- [55] Caupin F, Herbert E. Cavitation in water: A review[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006(7): 1000-1017.
- [56] K J McManus, R O Davis. Dilation-induced pore fluid cavitation in sands[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(1): 173-177.
- [57] Dariusz Gawin, Lorenzo Sanavia. Simulation of cavitation in water saturated porous media considering effects of dissolved air[J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 81(1): 141-160.
- [58] Newman T G, Ghail R C, Skipper J A. Deoxygenated gas occurrences in the lambeth group of central London[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology*, 2013, 46: 176-177.
- [59] J Standing, R Ghail, D Coyne. Gas generation and accumulation by aquifer drawdown and recharge in the London Basin[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2013, 46: 293-302.
- [60] 夏禾, 郭薇薇, 张楠. 车桥系统共振机理和共振条件分析[J]. *铁道学报*, 2006(5): 52-58.
- XIA He, GUO Weiwei, ZHANG Nan. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006(5): 52-58.
- [61] 周勇政. 高速铁路共振问题相关标准研究[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(9): 182-186.
- ZHOU Yongzheng. Study on specifications of high speed railway resonance[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(9): 182-186.
- [62] 李光旭, 李万平, 李环. 充液直圆管道水体固有频率分析[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2008(2): 134-140.
- LI Guangxu, LI Wanping, LI Huan. Analysis of the inherent frequency of water in a cylinder pipe[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008(2): 134-140.
- [63] 郝励. 基于 Bentley Autopipe 的往复压缩机管线模拟及振动原因分析[J]. *机械研究与应用*, 2017, 30(1): 52-55.
- HAO Li. Pipeline simulation and vibration analysis of reciprocating compressor based on Autopipe Bentley[J]. *Mechanical Research & Application*, 2017, 30(1): 52-55.
- [64] 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): 171-178.
- LUO Xiaojie, LUO Cheng. Three-Mechanism Theory (TMT) of karst ground collapse and its application[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 171-178.

A review of karst collapse mechanisms

JIANG Xiaozhen¹, FENG Tao², ZHENG Zhiwen³, LEI Mingtang¹, ZHANG Wei³, MA Xiao¹, YI Xiaojuan²

(1. Key Laboratory of Karst Collapse Prevention, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. Guangdong Institute for Geo-Environment Monitoring, Guangzhou, Guangdong 510510, China)

Abstract Karst collapse is a global geohazard and has been reported to occur in 23 countries, including China, the United States of America, Canada, South Africa, Italy, France, the United Kingdom, Germany, Russia, and Turkey. The mechanism of karst collapse is the basis for its monitoring, early warning, prevention and treatment. For a long time, studies on the mechanism of karst collapse have been mainly based on the qualitative speculation of the investigation after karst collapse, involving geological conditions and influencing factors of the collapse. They lack support of scientifically defensible data, hence resulting in the hypothetical stage of current studies on karst collapse mechanism. This has become a technical bottleneck in the prediction and prevention of karst collapse hazard.

Karst collapse hazards are characterized by concealment and suddenness. Among the existing collapse events in China, more than 90% are soil collapse. Studies on karst collapse in China started in the 1980s and have gone through approximately four phases, (1) The sporadic karst collapse research in selected mines; (2) The karst collapse inventory and small-scale physical modeling in Yangtze River Basin, and representative mines and railroads; (3) The karst collapse reconnaissance and large-scale physical modeling in urban areas including Wuhan, Yulin, Tangshan, Tongling, Guilin, and Shenzhen; (4) The systematic nation-wide karst collapse reconnaissance. Since 2000, National Natural Science Foundation of China has increased investment in the studies on karst collapse involving groundwater

pumping, foundation piling, tunneling, drainage in mines, and train vibration and in the studies on karst collapse mechanisms induced by extreme climate. At present, there are about eight karst collapse mechanisms according to previous studies, such as subduction, vacuum negative pressure, pressure difference, hydraulic fracturing, gas explosion, chemical dissolution, resonance, liquefaction, etc. These processes are closely associated with changing underground hydrodynamic conditions.

With a profound analysis of definitions and theoretical basis of karst collapse mechanism, this study proposes that most of the above mechanisms can be attributed to seepage deformation of soil. This means, under the action of groundwater seepage force or dynamic water pressure, some particles of the whole soil mass will move, causing deformation and destruction of soil or rock mass. During the formation of karst collapse, the action mode and direction of groundwater seepage force on karst cavities roof soil will be different because of the change of groundwater dynamic conditions. The limit equilibrium theory of soil mechanics considers the roof stability of karst cavities, which is the last stage in the development of karst collapse; the effect of surface load is only to shorten the time of ground collapse.

Finally, it is pointed out that due to the practicability of water-air pressure with high-frequency sampling, accelerometer and acoustic wave sensors, the research direction on collapse mechanisms will be changed from hydrostatic pressure to hydrodynamic pressure, a challenge that should be faced with. The cavitation damage and resonance damage caused by pressure pulsation will also be the future research focus, and the corresponding critical seepage deformation or damage indicators need to be further studied the prevention and control of geological disasters of karst collapse.

Key words karst collapse, formation mechanism, seepage deformation, hydrodynamic pressure, cavitation damage, resonance damage

(编辑 张玲)

(上接第 516 页)

northwestern Guangxi. The results show that the content differences and variance coefficients of six mineral components in limestone soil of karst area in northwestern Guangxi are large. The average content of SiO_2 is up to 55.72%, while the variance coefficient is the smallest (37.50%). The sum of SiO_2 and Al_2O_3 accounts for 85.22% of the total six mineral components. The spatial patterns of the six mineral components are quite different from each other, and fit different models of mineral components. The spatial autocorrelation of SiO_2 is medium, but the autocorrelations of Al_2O_3 and MnO are weak, and their ranges are long in good spatial continuum. CaO , Fe_2O_3 and MgO are characterized by strong spatial autocorrelations with short ranges. The spatial distribution of minerals is closely related to the main nutrients and topographic characteristics. The spatial variation of Al_2O_3 and Fe_2O_3 is mainly affected by the altitude. The bare rock rate is the main topographic factor affecting the spatial variation of SiO_2 , MnO and MgO , and the gradient is the main factor affecting the spatial distribution of CaO . A principal component analysis show that the soil mineral is an important factor affecting the spatial variation of limestone soil, especially SiO_2 . On a large regional scale, various topographic factors affect the spatial variation limestone soil minerals, and hence impacting the spatial distribution of limestone soil.

Key words minerals, karst, spatial variation, limestone soil

(编辑 张玲)