

周洁军,程峰,吴迪,等.有机骨架材料充填地下溶洞的支护性能及稳定性分析[J].中国岩溶,2020,39(3):417-425.
DOI:10.11932/karst20200308

有机骨架材料充填地下溶洞的支护性能及稳定性分析

周洁军¹,程峰²,吴迪²,谢廷勇¹,苏夏征¹

(1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:基于有机骨架材料的吸附作用,分析有机物质降低岩石矿物电解质的电导性质的作用机理,通过渗透试验、抗疲劳试验等验证了有机骨架材料良好的透水性能、抗疲劳性能、抗冲击性能及胶结泥化性能,在静载条件下对实际溶洞进行充填应用,验证了充填效果及材料性能,并建立仿真模型研究了下沉位移的变化规律。结果表明:有机复合材料能够使矿物元素活度系数变小,介电常数降低,与矿物颗粒结合后会形成稳定的晶格结构;有机骨架材料作为治理溶洞的充填材料,其结构性、耐久性都优于传统的充填材料,可满足岩溶地面塌陷治理工程中强度、稳定性与渗透性的材料要求,有效的提高了基础的抗沉降能力;实际充填施工过程中的数值分析与现场监测的位移变化规律与沉降趋势都具有较好的一致性,表明数值模拟的计算参数选取合理,得出的仿真变形规律可应用于指导工程施工。

关键词:有机物;骨架材料;结构性能;数值模拟

中图分类号:TU753.8 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)03-0417-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

我国岩溶分布面积约345万km²,岩溶作用易造成岩体结构的变形破坏,形成大量的溶洞、裂隙、暗河等地下径流通道,是发生岩溶塌陷等地质灾害的重要条件。据统计^[1],我国已发生的有记录的岩溶塌陷3500余处,塌陷坑40000多个,每年因发生岩溶地面塌陷地质灾害所造成的经济损失多达数十亿元,尤其是对城市建筑物、道路等构筑物的危害程度大,据统计每年因岩溶地面塌陷造成的道路路面坍塌、建筑地基破坏就多达数千起^[1,4]。目前对于岩溶塌陷的防治工作在成因机理、风险评价、监测预警等方面取得了较好的研究成果^[2,4],但是在岩溶塌陷预

处置和后期治理等方面开展的研究工作还不多,特别是对溶洞的治理,多采用注浆措施^[2-4],缺少有效的治理方法和材料。

传统的治理方法有很多,但大都是在灾害发生后,采用充填的方法治理,材料一般为常规的水泥、砂石等无机混合材料。这样的治理仅能短时间消除灾害带来的危害,无法从根本上彻底有效地治理,还会诱发二次灾害,不仅浪费工程费用,还破坏了地质环境。岩溶孔洞的形成机理主要是地下水对岩体溶蚀作用,单纯地采用无机材料充填治理,仅能短时间控制孔洞的扩张,无法消除溶洞形成的根本原因——地下水径流的影响^[4-6,18]。无机材料充填后,因其渗透性较差,阻碍了地下水的有效径流,往往造成地下

基金项目:广西科技重大专项课题(桂科AA17204047-1);广西第六批特聘专家专项经费资助项目、桂林重点专项科技项目(20180101-2);广西自然科学基金项目(2019GXNSFAA245011);广西十百千人才计划资助项目(2016047)

第一作者简介:周洁军(1986-),男,工程师,从事地质灾害防治方面的工作。E-mail:513574217@qq.com。

通信作者:程峰(1980-),男,博士,教授,从事土木工程新材料与环境岩土工程方面教学与科研工作。E-mail:chf46629@126.com。

收稿日期:2019-08-16

水另辟径流路径,形成新的径流通道,进而在治理区的外围又形成了新的孔洞。在岩溶孔洞的充填治理中提高承载力是增强溶洞稳定性最有效的手段,可以通过短时间提高支撑应力,减轻塌陷带来的危害。但是治理岩溶地面塌陷地质灾害应综合考虑多种因素,特别是在治理中,既要考虑孔洞稳定性治理效果,又要考虑对地下水的影响,因此选取治理填充材料尤为重要。

岩溶地面塌陷灾害具有隐蔽性、突发性和不可预测性等特点,治理难度大^[5,14]。治理岩溶区地下孔洞的传统充填材料存在成本高、渗透性差、易流失、耐腐蚀性差、破坏地下水径流方式等诸多缺点;而强夯、爆破、跨越、桩基等方法因工程规模大、经济投入高而不利于推广应用。如何开发切实可行的岩溶区地下孔洞充填材料已经成为当前亟待解决的问题。

基于此,本文通过研究有机骨架材料的吸附作用,分析了有机物质降低岩石矿物电解质的导电性质的作用机理,通过渗透试验、抗疲劳试验等研究有机骨架材料良好的透水性能、抗疲劳性能、抗冲击性能及胶结泥化性能,在静载条件下对实际溶洞进行充填应用,测试其充填效果及材料性能。通过建立仿真模型,研究不同材料充填溶洞后位移下沉的变化规律,并将实测数据与理论数据进行对比,验证数值仿真结果对施工指导的可靠性。

1 有机充填材料的作用机理

1.1 有机骨架材料作用机理

治理岩溶区塌陷,充填材料是至关重要的,它直接决定塌陷治理的效果和工程成本。为了达到岩溶区地下孔洞的胶结充填,既可以提前预防地面塌陷灾害的发生,消除安全隐患,避免地表塌陷灾害的发生,又能够提高城市地下空间的稳定性,增加城市地质安全指数的目的,有机胶结充填材料的研发与使用得到了民生和工程地质领域的普遍重视。

根据矿物胶结作用原理,岩石胶体矿物离子遇到水分子后,会在周围形成的水化膜,离子与水分子此时会产生聚集效应,其相互作用产生的能量具有一定的吸附效应^[3,17]。当充填材料与岩石壁接触后,水分子会紧靠离子一起定向移动,为吸附作用腾出空间。由于有机充填材料分子能量值较大,大于水分子之间的氢键能,容易使岩体的表面平衡结构破坏,形成新的结构体,尤其在温度变化时更为明显。

岩石矿物离子与周围的水分子在发生可逆反应过程中更易于脱离能量母体,具有独立运动的能力,不断地与外界物质发生交换,当遇到能量较高的有机物时,即发生吸附反应^[3,5],岩石矿物电解质的导电性质和活度系数变小,介电常数降低,矿物颗粒与有机物质会形成稳定的晶格结构(图1)。

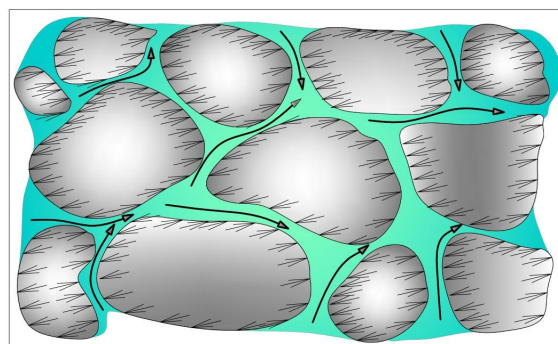


图1 有机材料晶格结构

Fig. 1 Lattice structure of organic materials

1.2 有机骨架材料的结构

采用水泥、粉煤灰、发泡剂改性镁粉等原料制备的发泡充填材料,能克服材料快速反应而大量放热的问题^[3,5,9],但是,合成的充填材料强度较低、渗透性差,无法满足岩溶区所需充填材料对支撑强度和持久性、环保性等的技术要求,尤其是无法避免在对大型溶洞的治理中存在承载力不够、破坏含水层结构等缺陷。也有学者采用惰性材料、胶凝材料、水、发泡剂、稳泡剂、缓凝剂研发了用于矿山开采巷道充填、采空区顶板支护的充填材料^[2,16,19],该膨胀性充填材料具有流动性好、初凝时间长、早期强度高、弱膨胀性的特征,但由于初凝时间长,受到地下水径流的影响较大,在治理溶洞的充填工程中流失严重,导致堵漏效果差,工程成本高,甚至治理失败。有关无机充填材料的研发也层出不穷,如高水率快凝充填材料、矿用高水速凝胶结充填复合材料、粉煤灰水泥基充填材料等^[8,10,17],这些材料虽具有固水性能高、快速凝结硬化、早期强度大、胶结体抗压强度高等优点,但仍存在凝结时间内受地下水径流的影响大、膨胀性差与岩土体胶结能力较差等诸多缺点,无法满足强度或渗透性的要求,导致治理效果不能得到有效保证。

在实际工程应用中,为确保充填材料结构的稳定性和对周围环境的环保性,有机骨架不能具备化学活性,只能允许发生物理作用,因此要求材料具有

弱碱性,且有良好的稳定性。研究表明,聚酸酐型材料具有氢键的自识别功能,能够自行将分子结构基元组装成有序晶体,再通过原位反应从氢键连接转变为共价键连接方式,且这种连接方式在任意温度下都能有效地保持晶体的结晶度。另外,材料结构在解析后,可将有序结构和化学结构统一起来形成一个完整的整体^[4,6,13],也可通过共价键等强化化学键形成的三维扩展结构的多孔材料,目前典型的做法就是将分子结构基元通过氢键联系,并借助 π - π 堆积形成稳定晶格,通过羧酸-脒盐桥的方式构造氢键连接的有机骨架材料^[5,11,13]。

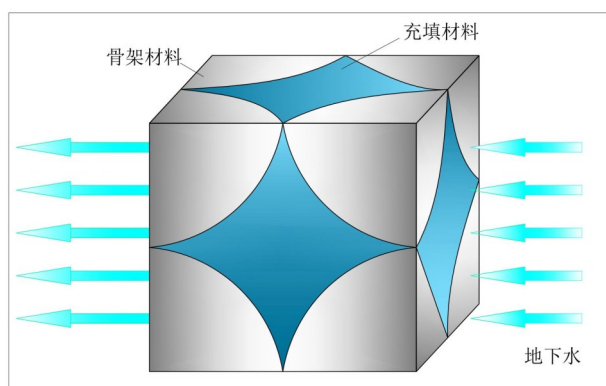


图2 骨架材料工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of skeleton material

1.3 有机骨架材料的成分组成

本文所研究的充填材料,主要由硬质有机骨架材料、发泡材料和无机灌注材料组成,其中:硬质有机骨架材料由聚酸酐型材料、聚氨酯和邻苯二甲酸酐组成,无机灌注材料由沸石、石膏和硫酸钠组成;结构泡沫材料由脲甲醛(尿素与甲醛反应得到的聚合物)和聚氨酯(聚氨基甲酸酯)组成。此外还包括现有技术中常规的添加剂组分,如缓凝剂、止水剂和活化剂等。缓凝剂、止水剂和活化剂的用量及选择均与现有技术相同。缓凝剂可采用氯化钠、硼酸钠、硫酸钠或硫酸镁等;止水剂为疏水型聚氨酯注浆液,活化剂为乙炔醇或醚类物质,其中醚类物质可以是二甲醚、乙醚或二苯醚等。

2 骨架结构材料的性能试验

2.1 透水性试验

按有机骨架材料配比方案要求制备试块材料,尺寸为200 cm×200 cm标准试块,制作10块。其材料

配比组成为无机混合材料、聚苯乙烯和邻苯二甲酸酐按1:3.2:2.9组成,其中无机混合材料由沸石、石膏和硫酸钠按1:1.5:1.2比例组成;结构泡沫材料由脲甲醛和聚氨酯按1:3.0的比例组成;有机激发胶结材料和结构泡沫材料的配合比为1:2.5;缓凝剂为硫酸镁,占充填材料总重量的0.001%;止水剂为SUP-202单液型疏水型聚氨酯注浆液,占充填材料总重量的0.001%;活化剂为乙炔醇,占充填材料总重量的0.001%。

按照常规的水泥砂浆配比方案制备试块,配比(重量比)按照按水:水泥:砂=1:2.1:2.6的比例要求,用同样的方法将其制成尺寸为200 cm×200 cm标准试样,制作10块,制备材料需契合充填过程的实际情况,不需要搅拌。试样制备完成后需养护28天,然后采用YT020型透水性测试仪对两种试样进行透水试验,并测定透水系数 k 。试验结果见图3。

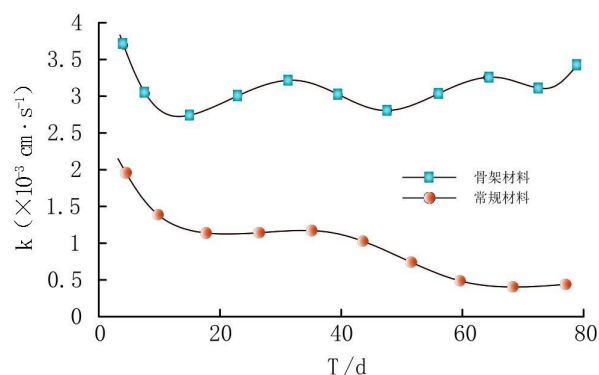


图3 材料透水性能对比

Fig. 3 Comparison of water permeability of materials

由图3可知,水泥砂浆制成的试块透水系数 k 为0.5~2.0,属于弱渗透性;按骨架材料配比制备的试块透水系数 k 为2.5~4.0,属于强渗透性,满足地下水渗流的要求,表明有机骨架充填材料具有良好的透水性,在地下溶洞充填治理的工程中,不会影响地下水的径流方向,可有效避免因充填治理改变地下水渗流场而引发周边发生岩溶塌陷。

2.2 抗疲劳性试验

骨架材料试样制备按照透水性试验试样制备方法,制作150 cm×150 cm标准试块5块;常规材料水泥砂浆试块制备按水:水泥:砂=1:2.1:2.0比例配制,制作150 cm×150 cm标准试块5块。水泥砂浆制备试块过程不需要搅拌,在试块盒中自然凝固形成。养护28天,采用SPL-30A型疲劳试验机对其进

行加载试验,荷载采用往返荷载,根据往返荷载次数与循环应力之间的关系判别抗疲劳性的能力,其关系曲线见图4、图5。

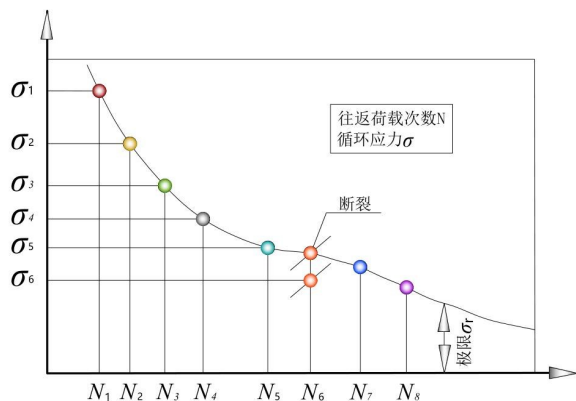


图4 常规材料抗疲劳性能

Fig. 4 Fatigue resistance of conventional materials

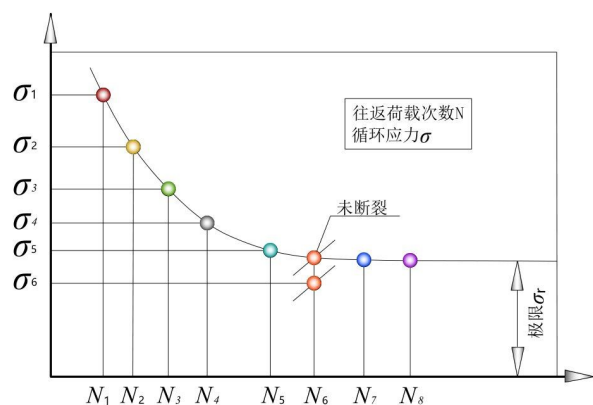


图5 骨架材料抗疲劳性能

Fig. 5 Fatigue resistance of skeleton material

由图4、图5试验结果可看出,由常规材料制备的水泥砂浆试块在 $N_1 \sim N_8$ 往返荷载作用5次后,材料即发生了断裂,强度也明显降低,且断裂后极限荷载值达到最小;而有机骨架材料制成的试块经 $N_1 \sim N_8$ 往返荷载8次作用后,仅在试件表面有轻微的拉裂,试块的完整性与强度基本未变,断裂后极限荷载趋于稳定状态,荷载值也远大于水泥砂浆试块的极限荷载值。

2.3 抗冲击性试验

按照透水性试验方法制备相同的 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$ 标准骨架材料试块,制作5块。水泥砂浆配比按常规的水:水泥:砂=1:2.5:2.0的配比方案,制成 $250\text{ cm} \times 250\text{ cm}$ 标准试块,制作5块,水泥砂浆制备试块过程不需要搅拌,在试块盒中自然凝固形成。

养护28天,采用JB-30A全自动试验机反复加载冲击荷载,并根据显示屏频率变化曲线变化来判别抗冲击性能,由JB-30A试验机的微机屏显示抗冲击力大小。

试验后经试验机屏显读数,水泥砂浆的试块抗冲击力为2.5 kN,有机骨架材料试块的抗冲击能力为4.1 kN。有机骨架材料的抗冲击性能明显高于传统的水泥砂浆试块,表明所制备的有机骨架材料具有良好的抗剪性能。试验后抗冲击的频率规律结果见图6、图7。

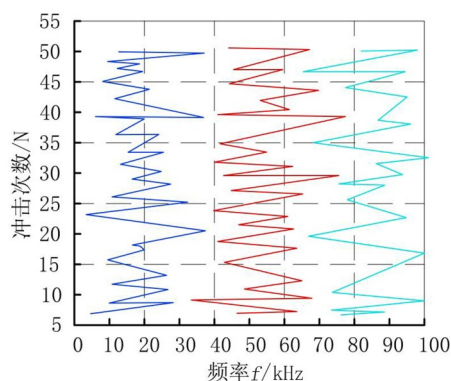


图6 常规材料抗冲击性能

Fig. 6 Impact resistance of conventional materials

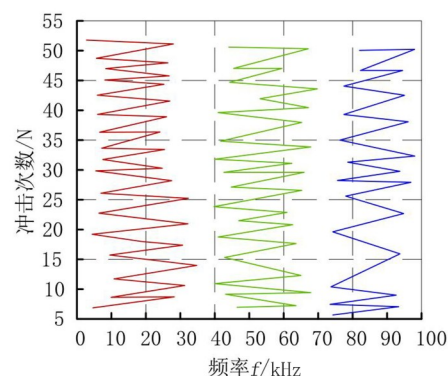


图7 有机骨架材料抗冲击性能

Fig. 7 Impact resistance of organic skeleton materials

图6、图7试验频率曲线结果可看出,常规的水泥砂浆材料在受到冲击后,频率曲线变化较为混乱,不仅频率大小变化不一,而且凸点较多,其在受到外力冲击后不能够很好地回弹,结构体容易发生塑性变形并损坏,表明其抗冲击性能不甚好;反观有机骨架材料,在多次循环冲击后,频率变化曲线较规律,没有出现较为明显的凸点与凹点,结构体具有较好的回弹性能,柔韧性较好,整体抗冲击性能较水泥砂浆优越,并且能满足充填材料的强度要求。

2.4 胶结泥化试验

骨架材料试块制备按照有机材料混合物：泥土=1：1 的比例方案制备试块,骨架材料配比方案同透水试验;水泥砂浆试块的配比按水泥砂浆：黏土=1：1 配制,其中水泥砂浆按水：水泥：砂=1：2.4：2.2 比例配制。试验试块制备完成后放置 24 h 后做冲刷试验。试验通过水体持续冲刷试块,时间为 48 h,测试样品的质量损失,即可获得胶结泥化性能指标,试验结果见图 8。

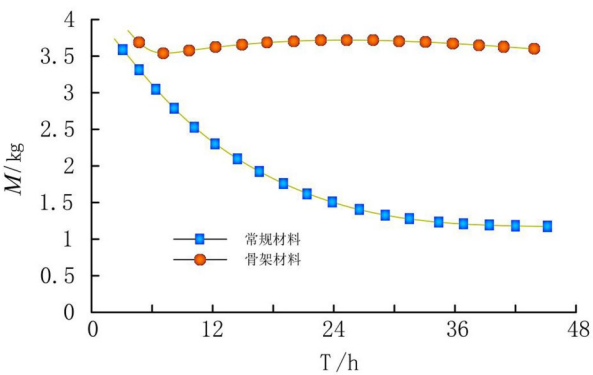


图 8 有机骨架材料胶结泥化性能

Fig. 8 Cementation performance of organic skeleton materials

由图 8 可以看出,常规材料水泥砂浆制备的混合试块在水流持续冲刷下,黏土脱落量非常大,达到 80% 以上;而在相同时间、相同冲刷作用下,有机骨架材料的黏土脱落量非常小,仅为 3.6%,几乎没有任何损坏。由此可见,有机骨架材料有着良好的胶结泥化性能,对于充填治理地下溶洞的固化效果明显优于常规的水泥砂浆。

以上试验结果表明,有机骨架材料渗透性、结构性以及强度方面都优于传统的充填材料,在治理岩溶地面塌陷工程中应用,可满足强度与稳定性要求,使治理后的溶洞具有优良的地下水径流功能、稳定抗沉降能力,同时也能满足工程对充填强度的要求。

3 工程试验实例

3.1 工程概况

在桂林市高新产业园区,采用有机骨架材料与常规材料充填,治理 2 个大小相似的地下溶洞,1 号溶洞直径约 3.4 m,洞深 5.5 m,地下埋深约 6.5 m;2 号溶洞直径约 3.28 m,洞深 5.7 m,地下埋深约 6.7 m。经超声波探测仪探测,两溶洞形状均大致为椭圆形,

溶洞内基本没有充填物,地质勘探超前探孔发现,溶洞内有地下水,水量中等,流速 3 cm·s⁻¹。溶洞的示意图见图 9。

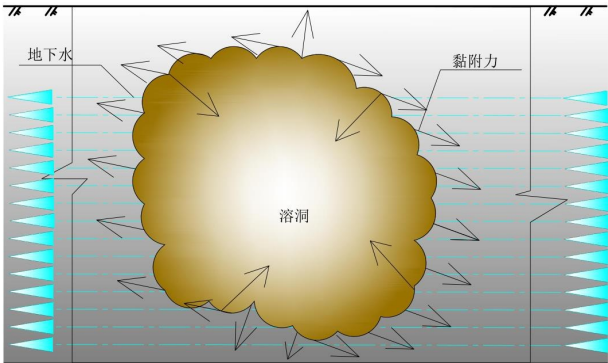


图 9 溶洞分布形状示意图

Fig. 9 Schematic diagram of karst cave distribution shapes

根据工程地质勘察资料,场地内由上至下主要地层为:①第四系残、坡积层,硬塑状砂质黏土,含少量风化白云岩;②泥质白云岩夹角砾状灰岩,细晶结构,裂隙较发育;③碳酸盐岩,灰色中厚层状,局部夹泥质粉砂岩,岩体较完整。场地地质条件比较复杂。钻探取芯,采用室内常规试验对岩石的物理力学性能指标进行测试,试验结果见表 1。

表 1 岩石物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of rocks

试样 编号	剪切模 量/GPa	体积模 量/GPa	容重 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	黏聚力 c/MPa	内摩擦 角 $\varphi/^\circ$
1	0.512	1.846	21.95	0.371	31
2	0.523	1.615	23.72	0.352	29
3	0.547	1.433	22.43	0.347	34
4	0.512	1.127	21.84	0.362	28
5	0.453	1.246	23.42	0.371	29
6	0.547	1.357	24.14	0.353	31
7	0.471	1.776	23.66	0.375	32

3.2 工程验证

试验采用两种材料方案进行充填治理,在治理后对其充填效果、强度要求、渗透特性等进行比较,方案一采用传统水泥砂浆配制充填材料,按常规水泥砂浆进行配比,水：水泥：砂=1：2.4：2.7。施工先采用 QZJ100B 钻机钻孔,钻孔倾角 35°,钻孔直径 20 cm。再采用 BW-118 高压注浆机注浆,注浆压力控制在 0.3 MPa 左右,压力最大限值为 3 MPa,达到

上限值注浆即停止。施工过程按照相关规范要求,充填后需达到水泥养护龄期后才能对其进行检测,保证检测质量。充填施工 28 天后,进行静载试验,在溶洞上方放置 3 吨的重力锤,放置 42 天后测试其位移变化量。

检测设备采用 SIR-2 型地质雷达探测仪,测试结果可验证充填效果、透水性能、强度要求等指标。1 号溶洞的探测结果如图 10、图 11 所示。

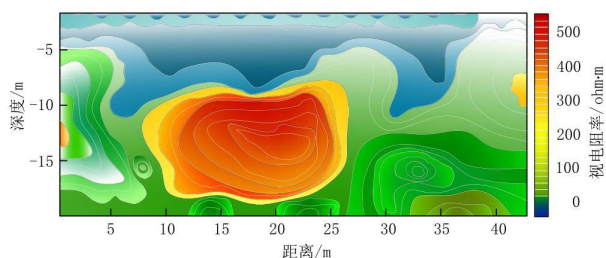


图 10 水泥砂浆材料充填后等值线图

Fig. 10 Contours of cement mortar material after filling

由图 10 可看出,水泥砂浆材料充填溶洞的效果较差,充填率仅为 30% 左右,且充填物质分布不均匀,水泥砂浆材料浪费严重,多数流失,材料与岩石壁咬合能力差,充填后的强度远不能达到支护强度的要求,充填后形成的固体物堵塞了地下水原有的径流通道,改变了径流方向,引发了溶洞新的扩展渠道。

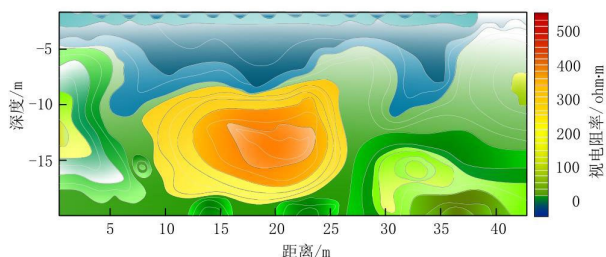


图 11 有机骨架材料充填后等值线图

Fig. 11 Contours of organic skeleton material after filling

由图 11 可以看出,有机骨架材料充填溶洞的效果较好,充填率几乎达到了 100%,且充填物质分布较均匀仅有中间位置出现轻微异常,材料使用率较高,随地下水流失少,材料附壁咬合能力较好,充填后的强度基本达到支护强度的要求,充填后形成的固体物由于透水性较好,对地下水的径流方向没有影响,整个溶洞体积呈收缩趋势;另外充填材料具有一定的膨胀性,相对于水泥砂浆用料更为节省,经济价值更具优势。

4 数值模拟验证

4.1 建立模型

地下溶洞围岩材料的初始本构模型采用理想弹性模型 (Mohr-Coulomb)^[8,12];充填后计算采用 FLAC3D-Null 模型。充填前支护初期应力计算采用 FLAC3D-Shell 单元格法^[9,14,16],计算中只考虑岩体自重应力的影响;充填施工过程中注浆可通过数值模拟中的参数控制来实现,为了计算简便,可取代表性参数的平均值作为控制指标,根据表 1 力学指标的特征,选取的岩石的力学控制指标为:黏聚力为 0.35 MPa,内摩擦角为 31°,围岩容重为 22 KN·m⁻³。充填后支护应力采用实体单元计算,计算结果为溶洞实际的位移变化情况。

由于地下溶洞的实际形状不规则,为方便计算,在建模时要适当对其主要尺寸方位进行简化^[10-13]。一般将其简化为半椭球形状,如图 12 所示。

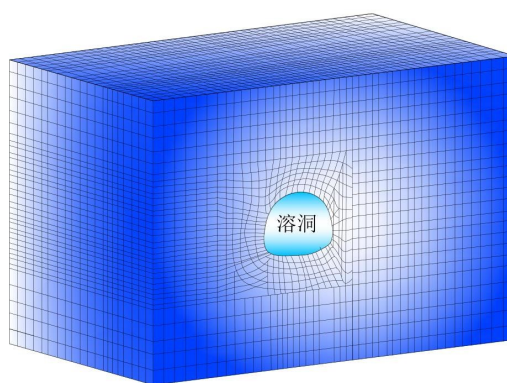


图 12 仿真计算模型

Fig. 12 Simulation calculation model

根据溶洞的位置特征确定计算范围:上边界为 7 m (Z⁺方向),下边界为 10 m (Z⁻方向),纵向长度为 19 m (Y⁺方向),其中左边界为 8 m (X⁺方向),右边界为 11 m (X⁻方向)。水平方向施加左右边界约束条件,竖直方向顶部为自由边界,底部施加边界约束条件。

根据地质勘测资料中所确定的溶洞位置和规模,在其周围布置 6 个监测点,测量静载试验时各监测点水平方向和竖直方向的位移。为避免受到其他外界因素的干扰,在溶洞的同一断面上布设洞顶、左右溶洞壁的下沉位移监测点,监测记录的周期及频率为:1-7 d,1 次·d⁻¹;15 d-1 个月,1 次·d⁻¹;1-2 个月,3~4 次/周。

4.2 仿真结果分析

根据溶洞特征位置监测点静载条件下的实测数

据以及数值模拟结果,将各点最终统计结果取平均值后对比,对比结果见表2。

表 2 实测和数值计算位移对比
Table 2 Comparison of measured and calculated displacement

特征位置	水平位移			竖直位移		
	计算值/cm	实测值/cm	误差/%	计算值/cm	实测值/cm	误差/%
洞顶1	9.512	9.127	4.22	10.362	10.738	-3.50
左洞壁1	6.153	6.246	-1.49	7.371	7.476	-1.40
右洞壁1	6.247	6.357	-1.73	8.353	8.519	-1.95
洞顶2	1.512	1.446	4.56	4.371	4.483	-2.49
左洞壁2	1.423	1.615	-11.89	2.352	2.519	-6.63
右洞壁2	1.247	1.433	-12.98	2.347	2.461	-4.63

从表2可以看出,现场实测的水平、竖向位移值均小于数值计算的结果,这是由于数值计算未考虑地下水渗流的影响,而在实际施工中地下水对充填体有一定的冲刷作用,并且会造成一定的流失,对充填效果及支撑强度都存在一定的影响,因此这部分位移会随着地下水的作用被释放掉了。从表中还可以看出,现场实测值与数值模拟所得结果,相对误差最大为12.98%,最小为1.4%,二者基本一致。

利用布设在溶洞上的测量设备对同一断面的6个监测点进行96 d的不间断观测,并利用模型进行拟合,得到静载条件下溶洞充填后的围岩位移变化规律,其位移与时间的关系如图13~16所示。

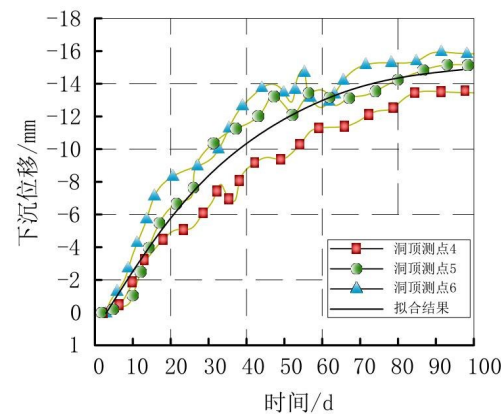


图 13 1号溶洞洞顶竖向位移
Fig. 13 Vertical displacement of No. 1 cave roof

从图13~16数值模拟结果可以看出,拟合结果与现场现场实测数据结果的曲线有较好的一致性。由曲线可以看出,两种材料充填后的溶洞在静载作

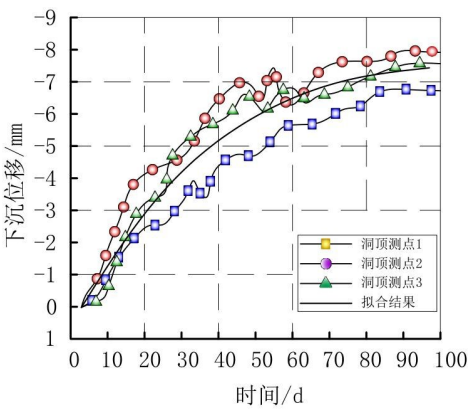


图 14 2号溶洞洞顶竖向位移
Fig. 14 Vertical displacement of No. 2 cave roof

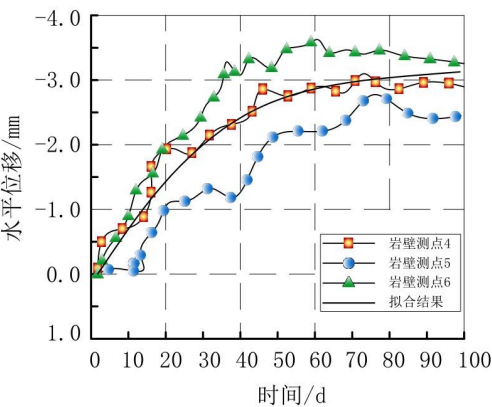


图 15 1号溶洞洞壁水平位移
Fig. 15 Horizontal displacement of No. 1 cave wall

用下最大沉降量都为洞顶竖向位移,而左右溶洞壁的水平方向沉降量都远小于竖直方向,表明充填物附壁膨胀作用增加了围岩的水平支撑应力,限制了水平方向产生的位移;由图中还可以看出,骨架材料

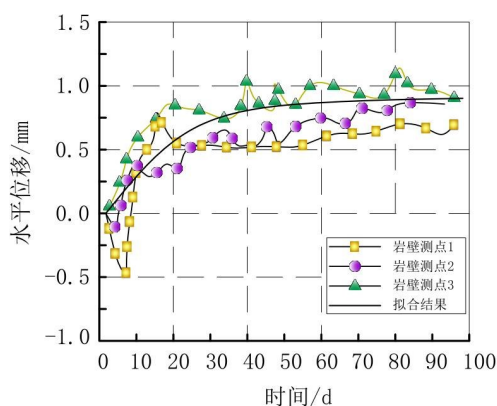


图 16 2号溶洞洞壁水平位移

Fig. 16 Horizontal displacement of No. 2 cave wall

充填后的溶洞发生的下沉位移不论在水平方向还是竖直方向都远小于水泥砂浆材料。骨架材料的支撑作用更为突出,由于骨架材料膨胀性能较好,在局部点位对岩土体产生了挤压荷载,甚至水平方向产生负向位移;反观水泥砂浆材料,由于附壁能力差,且流失较多,在静载条件下,产生的位移变形比较大,支护效果与充填效果均不太理想。上述实测结果基本与数值模拟分析得出的规律一致,表明数值模拟可较准确地反映实际情况。

5 结 论

(1)骨架材料的有机物质所发生的吸附反应,有效地降低了岩石矿物电解质的电导性质,使矿物元素活度系数变小,介电常数降低,与矿物颗粒结合后会形成稳定的晶格结构;

(2)有机骨架材料作为溶洞充填材料,具有良好的透水性能、抗疲劳性能、抗冲击性能、胶结泥化性能,其结构性、强度方面都优于传统的充填材料,可满足岩溶地面塌陷治理工程中对强度、稳定性与渗透性的要求,提高了基础的抗沉降能力;

(3)通过充填施工过程中数值分析与现场监测结果对比,二者的位移变化规律比较接近、位移沉降趋势有较好的一致性,表明数值模拟的计算参数选取合适情况下,其模拟的仿真变形规律可以指导工程施工。

参考文献

- [1] 肖力源. 岩溶地面塌陷区地质灾害治理措施分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(32): 3451.
- [2] 周建新, 董向楠. 地面塌陷地质灾害应急处置技术方法研究

- [J]. 区域治理, 2018(50): 182-184.
- [3] 孙怀凤, 吴启龙, 陈儒军, 等. 浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 652-661.
- [4] 王康, 孙熔正, 杨新安. 充填型浅层岩溶隧道溶洞处理技术研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 23-28.
- [5] 赵美成. 矿用固化泡沫充填技术在哈拉沟煤矿的应用[J]. 陕西煤炭, 2018, 37(3): 77-81.
- [6] 和法国, 谌文武, 韩文峰, 等. 高分子材料SH固沙性能与微结构相关性研究[J]. 岩土力学, 2009, 12: 3803-3807.
- [7] 任新红, 郭永春, 王清海, 等. 覆盖型岩溶潜蚀塌陷临界裂隙开度模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012(3): 84-87.
- [8] 吴庆华, 张伟, 刘煜, 等. 基于物理模型试验的岩溶塌陷定量研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 52-58.
- [9] 朱川曲, 崔栋歌, 周泽, 等. 岩溶矿区采动裂隙发育及溶洞破坏特征相似模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 93-100.
- [10] 靳红华, 王林峰, 杨培丰. 覆盖型岩溶塌陷的可靠性分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(11): 112-116.
- [11] 石立国, 刘俊, 罗丁, 等. 喀斯特地貌特性地基基础综合处理技术[J]. 施工技术, 2017, (21): 75-80.
- [12] Antonio Santo, Paolo Budetta, Giovanni Forte, et al. Karst collapse susceptibility assessment: A case study on the Amalfi Coast [J]. Geomorphology, 2017, 285: 247-259.
- [13] Hou Xian'gang, Shi Wenhao, Yang Yang, et al. A non-linear flow model for the flow behavior of water inrush induced by the karst collapse column [J]. RSC ADVANCES, 2018, 8(3): 1656-1665.
- [14] Huang Fu, Zhao LianHeng, Ling TongHua, et al. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 91: 133-138.
- [15] Liu Honglei, Li Lianchong, Li Zhichao. Numerical Modelling of Mining-induced Inrushes from Subjacent Water Conducting Karst Collapse Columns in Northern China [J]. MINE WATER AND THE ENVIRONMENT, 2018, 37(4): 652-662.
- [16] R Sharapov, N Lodigina. Calculation of the Strip Foundation on Solid Elastic Base, Taking into Account the Karst Collapse [A]//IOP Conference Series[C]: Materials Science and Engineering, 2017, 221(1): 012-023.
- [17] Li J P, Nie Q K, Liu Q S, et al. Risk assessment method of karst ground collapse based on weight back analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1395-1400.
- [18] Paul L. Broughton; Darrell Cotterill. Breccia pipe and sinkhole linked fluidized beds and debris flows in the Athabasca Oil Sands: dynamics of evaporite karst collapse-induced fault block [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology 2017, 65(1): 200-234.
- [19] Frumldn Amos, Zaidner Yossi, Na'aman Israel, et ai. Sagging and collapse sinkholes over hypogenic hydrothermal karst in a carbonate terrain [J]. Geomorphology 2015, 229: 45-57.
- [20] Arul Kumar M, Capolungo L, McCabe R J, et al. Characteriz-

- ing the role of adjoining twins at grain boundaries in hexagonal close packed materials. [J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1): 38-46.
- [21] 贺炜,李昆,王芳洪.防岩溶塌陷加筋垫层大比例模型试验及设计理论研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(5):980-988.
- [22] 张少波,简文彬,洪儒宝,等.水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J].工程地质学报,2019,27(3):659-667.

Analysis of support performance and stability of the underground karst cave filled with organic skeleton material

ZHOU Jiejun¹, CHENG Feng², WU Di², XIE Tingyong¹, SU Xiazheng¹

(1. China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co. Ltd., Guilin, Guangxi 541004, China; 2. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Based on the adsorption of organic skeleton material, we analyzed the mechanism of organic materials reducing the conductivity of rock mineral electrolytes. The good water permeability, fatigue resistance, impact resistance and cementation performance of the organic skeleton material are verified by penetration tests and anti-fatigue tests. Under the condition of static load, we made an actual cave filling application to verify the filling effect and material performance and obtain the variation law of subsidence displacement by establishing a simulation model. The results show that the organic composite material can reduce the activity coefficient of mineral elements, decrease the dielectric constant, and form stable lattice structure when combined with mineral particles. As the filling material for karst cave treatment, organic skeleton material is superior to the traditional filling material in terms of structure and durability, which can meet the material requirements of strength, stability and permeability in the karst ground collapse treatment project, and effectively improve anti-settlement ability of the foundation. The numerical analysis in site filling construction process is well consistent with displacement change law and settlement trend from field monitoring, which indicates that the calculation parameters of the numerical simulation are reasonable, and the simulation deformation law obtained can be applied to guide project construction.

Key words organic matter, skeleton material, structural performance, numerical simulation

(编辑 张玲)