

余 虔, 王成成, 张莎莎, 等. 隐伏溶洞对机场地表稳定性影响模拟及处治技术[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1099-1109.

DOI: 10.11932/karst20240508

隐伏溶洞对机场地表稳定性影响模拟及处治技术

余 虔¹, 王成成², 张莎莎², 寇璟媛¹, 王志丰²

(1. 民航机场规划设计总院有限公司, 北京 100120;

2. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 广州白云国际机场扩建过程中岩溶强烈发育, 严重影响机场施工安全。文章采用 FLAC3D 数值模拟软件分析隐伏溶洞在不同厚跨比、高跨比及道基填筑厚度下对机场场区稳定性的影响规律, 并针对溶洞处治前后稳定性进行评价, 最后通过现场试验比较溶洞充填自密实土、泡沫混凝土及低标号混凝土的优缺点并进行处治效果评价。结果表明: 当厚跨比及高跨比减小, 道基填筑高度增大时, 溶洞位移及应力呈现增加趋势, 整体趋近于不稳定状态; 当厚跨比 >1 或高跨比 >2 时, 地基稳定; 对典型工况溶洞注浆处治后, 顶板竖向位移量最大为 0.6 mm, 降低 99.11%, 应力集中现象极大减弱。在广州白云机场溶洞处理施工中应优先采用低标号混凝土作为填充料进行大面积施工, 其次采用泡沫混凝土; 钻孔取芯法及孔内波速测井法检测表明溶洞处理效果良好。

关键词: 隐伏溶洞; 机场; 应力变化; 数值模拟; 稳定性评价; 混凝土注浆

创新点: 分析在道基填筑作用下不同厚跨比、高跨比的隐伏溶洞对机场场区稳定性的影响, 明确当厚跨比 >1 或高跨比 >2 时岩溶地基较稳定; 提出在广州白云机场三期扩建场区应优先采用低标号混凝土作为填充料进行大面积溶洞地基施工的处治技术。

中图分类号: TU457 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2024) 05-1099-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

在岩溶发育地区修建机场时, 由于岩溶发育使地面溶沟遍布, 地下溶洞严重影响场区地基稳定, 造成岩溶塌陷^[1-2], 这是穿越岩溶区的工程建设所要面临的主要工程灾害, 其严重影响到工程建造和安全运营^[3-5]。隐伏溶洞又因其隐蔽性给机场工程建设提出了极具挑战性的难题^[6-8]。

针对隐伏溶洞稳定性及处治技术问题, 众多学者进行了大量研究。刘自强等^[9-10]定性分析岩溶影响因素及发育规律, 运用 ABAQUS 有限元法探讨了外荷载下节理裂隙对岩溶地基的影响。赵明华

等^[11]基于 Schwarz 交替法并引入稳定系数, 分析了土洞半径、土洞位置以及侧压力系数对双孔土洞的稳定性影响。赵衡等^[12]引入 Griffith 强度准则对溶洞的稳定性进行评价。王良川^[13]采用数值模拟方法分析了地下水、碎石填充及公路车道荷载作用工况下岩溶地基附加应力规律。杨仕升等^[14]讨论广西岩溶发育成带性特点, 介绍了相应的岩溶工程场地处理方法。刘宏等^[15]结合线溶蚀率和面溶蚀率方法, 根据塑性区分布形态特征和位移量值结合方法对强溶蚀带岩溶地基稳定性进行了评价。曾玉等^[16]分析覆盖型岩溶发育特征及其对地基稳定性的影响, 提出岩溶地基的处理措施。Assadi 等^[17-18]研究平面应

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178310); 民航机场规划设计研究总院有限公司科研项目 (220221220342)

第一作者简介: 余虔(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 机场岩土工程设计。E-mail: 370912441@qq.com。

通信作者: 张莎莎(1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事地基处理及地下工程等的教学和科研工作。E-mail: zss_lx@126.com。

收稿日期: 2023-11-07

变作用下浅埋方形空洞的不排水稳定性,采用基于有限元离散化的两种数值分析,给出了由极限定理的数值表达式推导出的倒塌荷载的严格界限。吕江等^[19]研究了上覆土层厚度与溶洞直径对溶洞顶板的最大拉应力和竖向沉降的影响。吴平等^[20]利用有限元软件 ANSYS 建立地质结构模型,分析了溶洞分布不同位置时溶洞应力、位移变化趋势。

以上研究深入探讨了地基下伏溶洞稳定性问题,但关于隐伏溶洞对机场地表稳定性的影响及岩溶地基数值模拟与现场试验相结合的处治技术研究相对不足。

广州白云国际机场扩建区域岩溶强烈发育,溶洞无充填或充填物性质差,上覆地层含砂量丰富、渗透性好,水量补给充足,均不利于洞体稳定,严重影

响机场扩建安全施工。因此,本文依据数值模拟方法分析了溶洞在不同影响因素下对机场场区稳定性的影响规律,并对溶洞处治前后稳定性进行评价,最后通过现场试验对比溶洞不同处理方式的优缺点并检测处治效果,以期为华南地区岩溶处治措施选取提供参考。

1 机场场区概况

广州白云国际机场位于广州市白云区和花都区交界处,不良地质作用强烈,揭露的 132 个溶洞顶板厚度为 0.1~5.2 m,洞高 0.7~13.5 m,洞跨 0.5~11.7 m,大部分溶洞无充填或充填物性质差(表 1)。其场区岩土种类多且不均匀(图 1)。基岩主要为可溶性石

表 1 钻孔揭示的场区溶洞发育情况

Table 1 Development of karst caves revealed by drilling holes in the project

埋深/m	洞高/m	顶板厚度/m	洞跨/m	洞体充填情况	数量
13.5~28.2	0.8~7.9	0.3~3.6	0.9~6.7	无充填,钻进掉钻、漏浆	42
13.2~31	1.0~13.5	0.2~5.2	0.7~9.2	半充填,流塑状粉质黏土	45
14.7~28.5	0.7~7.9	0.6~4.4	0.5~7.4	半充填,软塑—可塑状粉质黏土	27
15.0~32.7	0.8~11.6	0.1~4.9	1.0~11.7	全充填,可塑、软塑状粉质黏土	18

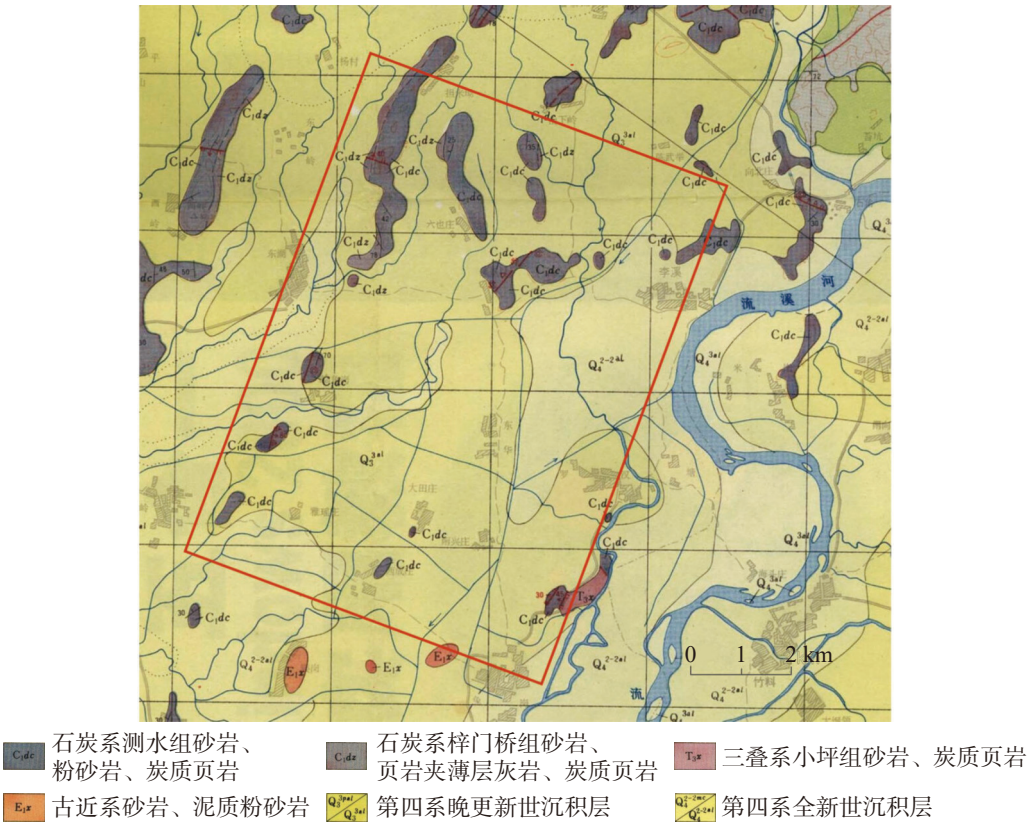


图 1 工程场区区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of the project site

灰岩,且溶岩裂隙水丰富,地下水沿节理、裂隙或石灰岩层理界面流动,形成溶蚀沟槽、溶洞和地下河。工程场区位于花县复向斜,岩体褶曲严重,受广从断裂影响,发育众多次级断层,其脆性岩体易破碎。在受到诸如桩基浇筑、地基施工、道路碾压等外力作用下,可能造成顶板破碎、地面发生不均匀沉降,不利于机场道面安全施工。因此,岩溶地基稳定性评价及处治技术研究至关重要。

为更真实反映场区岩土层情况,本次模拟中加入地层的模拟。根据地质勘察报告及现场试验,其土层物理力学参数如表 2 所示。

2 溶洞对机场场区稳定性的影响

2.1 模型概化与模拟方案

场区地层主要由素填土、砾砂、粉质黏土及石灰岩组成,岩体结构破碎且完整性较差。地下水类型为松散岩类孔隙水,水位埋深 4.38 m。考虑到边界效应的影响,将概化模型断面图沿纵向扩展 50 m,构建 100 m×50 m×50 m 的三维 FLAC3D 立体模型,在模型前后、左右及下部边界施加位移边界约束,上部边界为自由边界。计算采用 Mohr—Coulomb 本构模型,溶洞概化为一椭圆形,赋予相应土体参数并施加 130 kPa 飞机均布荷载求解,简化地质结构模型如图 2 所示,监测点分别取在地表、砾砂土层中、溶洞顶板和溶洞洞侧。

基本假定:鉴于地表起伏不大,假定地形为水平,鉴于场区内地下水升降幅度不大,忽略地下水影响;假定填土的初始应力为 0。

模拟过程:对建立好的模型进行参数设置,计算地层完整(假设未发育溶洞)情况下的初始应力场;得到初始应力场后,再将溶洞空间设为空,模拟溶洞

形成后的地下应力状态;施加工程设计荷载并设置监测点,同时将初始位移场和初始速度场设置为 0,模拟建筑荷载下溶洞围岩的应力状态;最后输出结果,进行稳定性分析。

研究厚跨比、高跨比及道基填筑厚度对机场场区的影响规律,定义厚跨比为溶洞顶板厚度与溶洞跨度的比值,定义高跨比为溶洞高度与溶洞跨度的比值,另外定义沉降比与应力比分别为存在溶洞与无溶洞时沉降比值与应力比值^[21]。

2.2 数值模拟结果及分析

2.2.1 厚跨比对机场场区稳定性的影响

图 3 为机场场区在不同厚跨比作用下溶洞位移、应力变化趋势图。由图 3 可知:当厚跨比(K_H)=0.2 时,顶板位移相对无溶洞状态时增加 96.1%,地层中部位移 65.1%,地表位移增加 47.7%,最大主应力和最小主应力增大值为 20.6%、18.3%;随厚跨比增大,溶洞对机场岩溶地基稳定性影响逐渐降低,趋近收敛;当 $K_H=1$ 时,溶洞对地表位移的影响仅为无溶洞时的 6.5% 左右,且应力增量也较小,近似于无溶洞状态。

2.2.2 高跨比对机场场区稳定性的影响

图 4 为机场场区在不同高跨比作用下溶洞位移、应力变化趋势图。由图 4 可知:当高跨比(K_G)=0.25 时,顶板位移增量 258.8%,地层中位移增量 148.3%,地表位移增量 61.7%,最大与最小主应力分别提高 18.2%、12.5%;当 $K_G>1$ 时,溶洞对机场场区稳定性影响曲线逐渐平缓,当 $K_G=2$ 时,位移增量与应力增量逐渐收敛,其中最大、最小主应力增量分别接近 8%、6%,位移增量也有较大幅度下降,逐渐趋于稳定。

表 2 岩土体的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩性	密度/kg·m ⁻³	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/°	抗拉强度/MPa
素填土	1 890	5.32	15.97	14.37	0.35	27.6	15.6	—
砾砂	1 940	11.11	33.33	30.00	0.35	0	34.0	—
粉质黏土	1 880	6.20	13.42	16.11	0.30	26.1	14.1	—
石灰岩	2 524	7 260.00	14 870.00	18 740.00	0.29	3 740.0	30.3	1.58
低标号混凝土	2 200	—	—	1 000.00	0.15	580.0	40.0	—
泡沫混凝土	910	—	—	310.00	0.20	120.0	8.0	—
自密实土	2 000	—	—	26.00	0.30	21.0	22.0	—

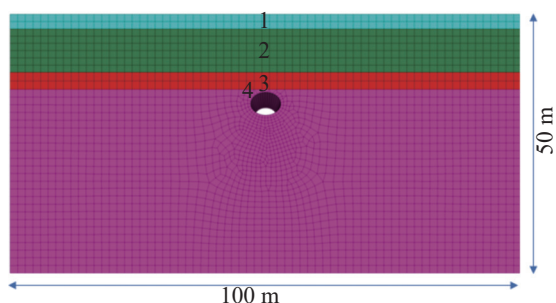


图2 地层位移监测点布置图

Fig. 2 Layout of monitoring points for strata displacement

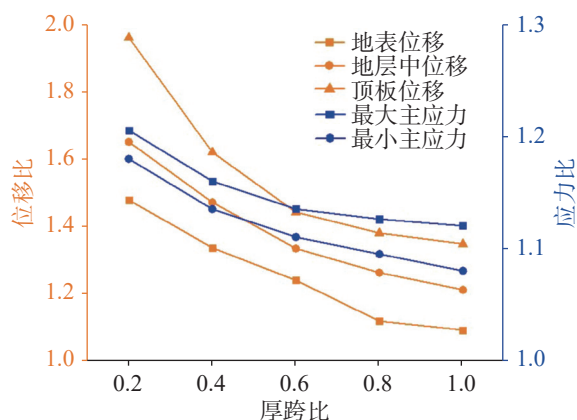


图3 不同厚跨比机场场区位移与应力变化

Fig. 3 Variations of displacement and stress with different thickness-span ratios in the airport

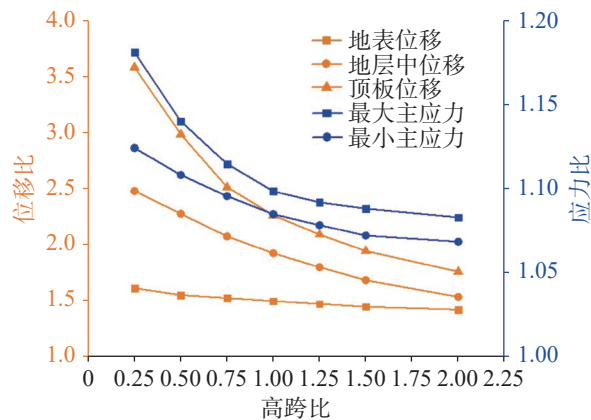


图4 不同高跨比机场场区位移与应力变化

Fig. 4 Variations of displacement and stress with different height-span ratios in the airport

2.2.3 道基填筑厚度对机场场区稳定性的影响

图5为机场场区在不同道基填筑厚度作用下溶洞位移、应力变化趋势图。由图5可知,当填筑厚度为2 m时,顶板位移增量10.1%,地层中位移增量3.2%,地表位移增量5.7%,最大与最小主应力分别提

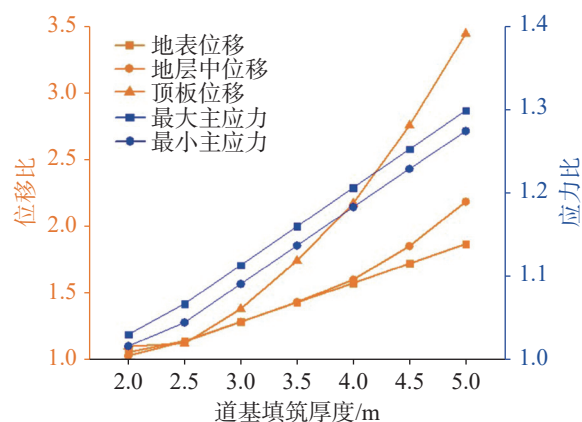


图5 不同道基填筑厚度机场场区位移与应力变化

Fig. 5 Variations of displacement and stress with different thicknesses of embankment filling in the airport

高3.1%、1.7%;当填筑厚度逐渐增加,顶板位移增量呈现指数增长,地层中部位移与地表位移增量较为平缓,最大、最小主应力呈现线性增大;增加到5 m时,顶板位移增量已达244.9%,最大、最小主应力分别增加29.9%和27.5%,可得道基填筑厚度对机场场区的稳定性起着至关重要的作用。

由以上分析可知,当厚跨比及高跨比较小,道基填筑较厚时,顶板厚度相对于洞跨而言,承载能力较弱,不足以承受上部荷载,存在顶板破裂、溶洞塌陷的隐患,可判定溶洞对机场的稳定性影响尤为严重,必须考虑进行一定的处治措施。

3 溶洞处治前后场区稳定性数值模拟

前文基于概化模型,通过数值计算分析了不同因素对机场溶洞的稳定性影响,明确了各因素对机场地基溶洞的影响效果,以此为基础,针对现场典型溶洞,开展溶洞处治前后的对比分析,以便更全面地评估处治前后溶洞的稳定性问题。

3.1 模型概化与模拟方案

根据广州白云机场扩建工程设计资料、岩溶发育情况、工程地质勘察钻探剖面图等各项资料,建立具有代表性的典型溶洞计算模型,分别进行不处理、充填水泥砂浆的数值计算分析。典型地质结构模型为:溶洞埋深21.3 m,顶板厚度0.5 m,洞高3.7 m,洞径为16.0 m,填充状态为无充填,溶洞形状简化为椭圆形,本构模型选取摩尔库伦模型。此溶洞厚跨比及高跨比均较小,极不稳定,采用数值模拟方法进行

稳定性评价。

3.2 溶洞处治前

为充分研究道基填筑作用下溶洞对机场场区的影响,在溶洞周围分别布置 5 个监测点分析溶洞洞顶及洞侧的竖向位移、最大主应力及最小主应力变化规律。

3.2.1 位移及塑性区分析

计算结果如图 6 所示(监测点取在溶洞顶板和溶洞洞侧处),破坏区主要分布在溶洞顶板处的石灰岩层中,主要表现为计算过程中的剪切破坏和张拉破坏,分布面积较大,已贯通至溶洞边缘处。

洞顶及洞侧围岩发生向下位移,其中洞顶处第 5 监测点位移最大,洞侧监测点 1 处位移最小,最大竖向位移分别是 0.02 cm、0.42 cm、1.23 cm、2.11 cm、2.79 cm,表明距离洞顶越远,围岩的沉降量越小;洞顶 5 处的沉降量过大已出现过大变形,可能引起地表不均匀沉降,溶洞稳定性较差。

3.2.2 应力分析

溶洞在外加荷载作用下围岩应力云图及变化曲线如图 7 所示。溶洞的存在使围岩的应力状态发生改变,计算模型出现应力重分布,新应力状态沿着溶洞中心线呈左右对称分布。岩体整体受压应力,埋深越大的岩体所受的压应力越大,溶洞顶部周围受局部拉应力。围岩最小主应力与最大主应力的分布特征基本相似,沿溶洞中心线左右对称分布,在溶洞周围出现应力集中现象。

各监测点围岩最大与最小主应力的变化规律趋

于一致。对于最大主应力曲线图,洞顶围岩 3 和 5 处出现拉应力,监测点 1、2 和 4 处应力出现压应力,均小于石灰岩抗拉强度;对于最小主应力曲线图,5 处监测点均为压应力,其中洞顶 5 及洞侧 1 应力增量较大,达到 10.13 MPa 和 11.63 MPa。

数值计算结果表明:因溶洞存在已严重影响了机场场区的地基稳定性,须对此处溶洞进行处理,经过调查研究并依据工程经验,决定采用注浆法灌注低标号混凝土、泡沫混凝土、自密实土进行处治。

3.3 溶洞处治后

3.3.1 位移及塑性区分析

为评价溶洞注浆处治效果,对注浆后充填溶洞的顶板位移、主应力及塑性区进行计算分析,水泥砂浆物理力学指标由室内试验确定。

溶洞注浆填充后,溶洞顶板的塑性区面积相对于处治前明显减小,仅在原有溶洞处出现张拉破坏。溶洞处填充的注浆材料对顶板起到了较强的支撑作用,从而有效避免了顶板的向上拉伸与破碎,溶洞顶板的稳定性也得到保证。

计算过程中监测点竖向位移随步数的变化曲线见图 8,溶洞各监测点竖向位移均随计算步增大而增加,到达 7200 步时平稳收敛。与处理前结果相比,其中洞顶 5 竖向位移最大为 0.16 cm,降低 94.2%。

3.3.2 应力分析

最大、最小主应力变化较为均匀,表明处理后的溶洞与附近岩体承载力较均衡,处理后的溶洞区域较好地承受了上部覆荷,并均衡地扩散给了附近岩

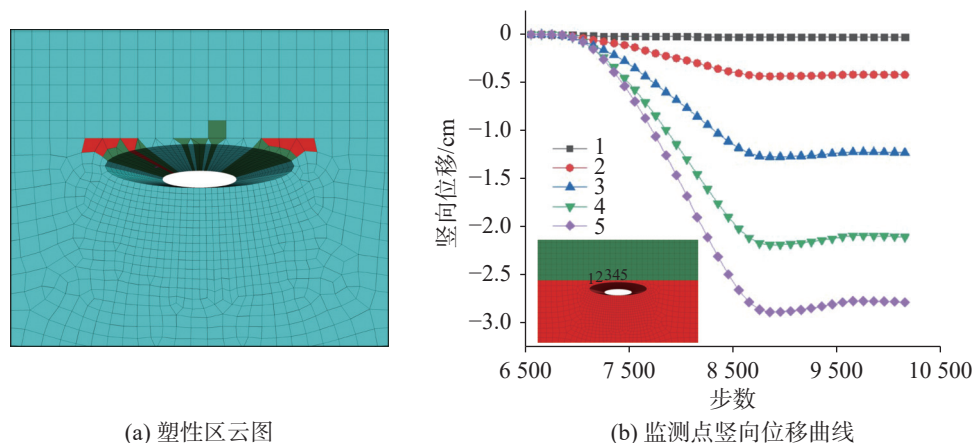


图 6 监测点竖向位移曲线及塑性区云图

Fig. 6 Vertical displacement curves of monitoring points and cloud map of plastic region

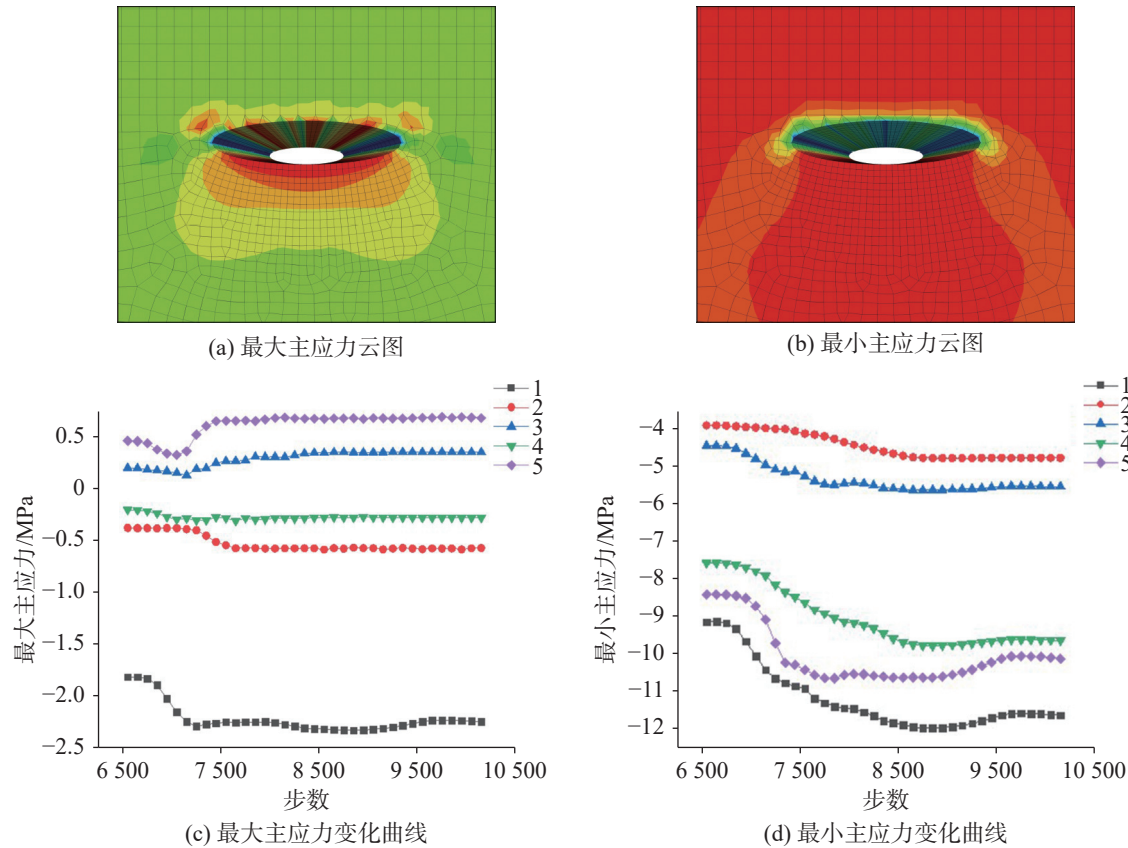


图 7 监测点最大、最小主应力曲线及云图

Fig. 7 Curves and nephograms of maximum and minimum principal stress of monitoring points

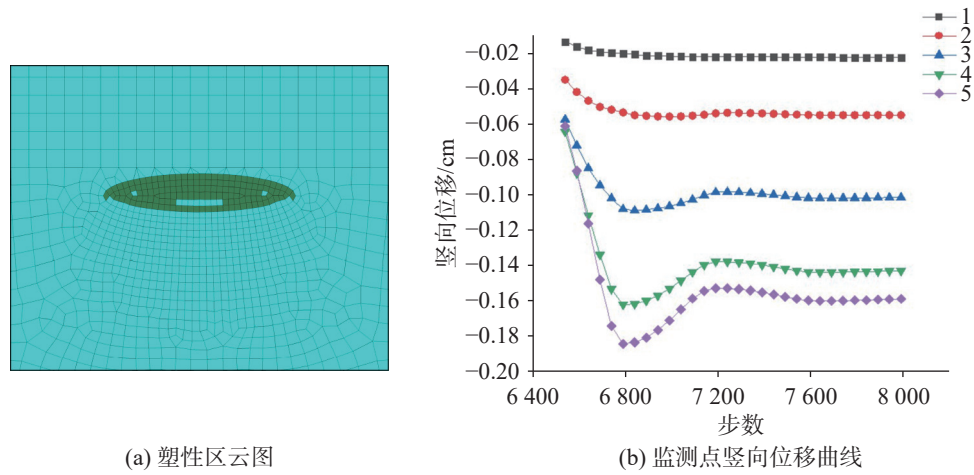


图 8 处治后监测点竖向位移曲线及塑性区云图

Fig. 8 Curves of the vertical displacement of monitoring points and the cloud image of plastic region after treatment

体,改变了受力状况,原有溶洞洞壁应力集中现象缓解。最大、最小主应力随步数的变化曲线如图 9 所示,洞顶 5 及洞侧 1 处最小主应力为 9.24 MPa 和 10.16 MPa,分别降低 8.7%、12.6%。

综上所述,溶洞采用注浆法填充处理后,溶洞对机场场区的稳定性影响大大降低,位移满足规范要

求,地基整体稳定性提高,注浆处治效果良好。

3.3.3 充填不同材料对比分析

由图 10 可知,充填低标号混凝土、泡沫混凝土、自密实土时,地表最大竖向位移分别为 6.45 cm、6.59 cm、6.76 cm;地层中最大竖向位移分别为 2.69 cm、

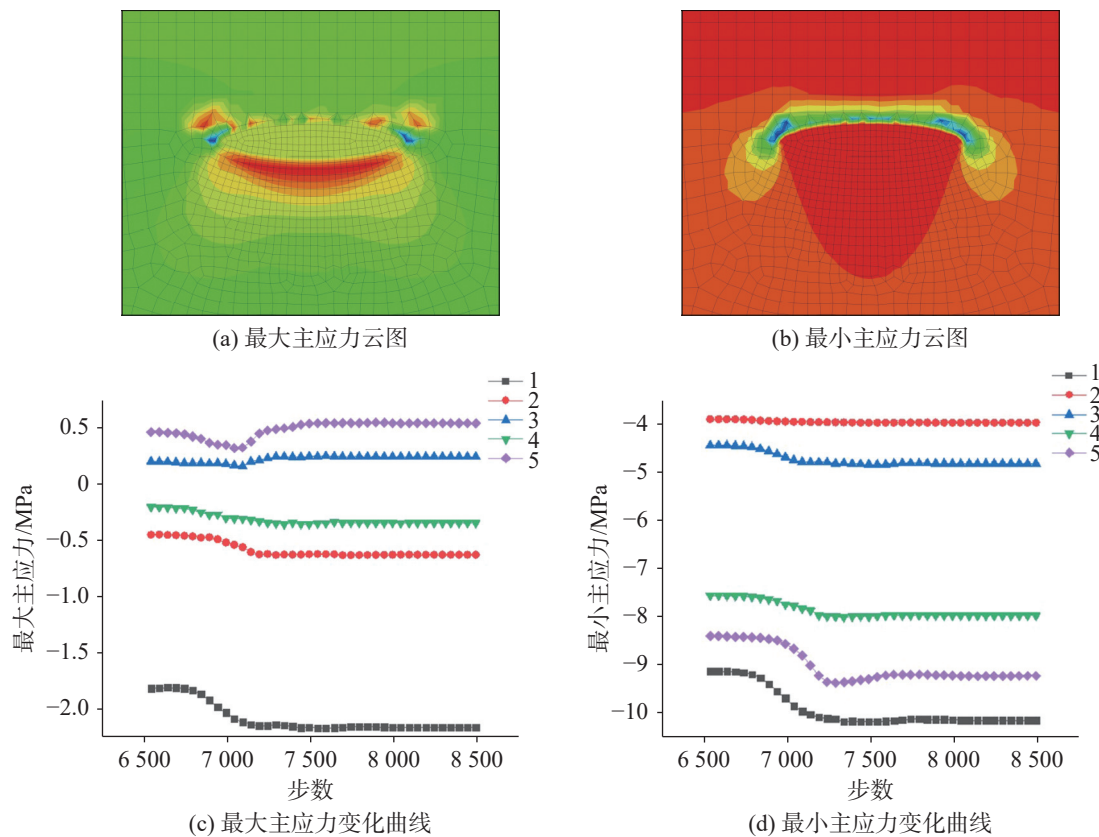


图 9 处治后监测点最大、最小主应力曲线及云图

Fig. 9 Maximum and minimum principal stress curves and nephograms of the monitoring points after treatment

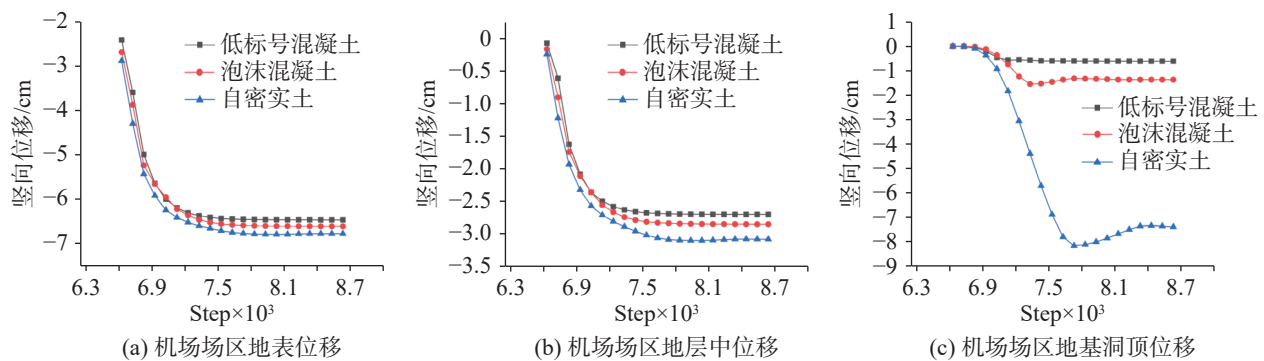


图 10 处治后监测点竖向位移曲线图

Fig. 10 Vertical displacement curves of monitoring points after treatment

2.85 cm、3.07 cm; 溶洞顶部最大竖向位移分别为 0.6 mm、1.36 mm、7.4 mm, 均满足沉降控制要求; 充填低标号混凝土沉降量最小、泡沫混凝土次之、自密实土最大。

由图 11 可知, 充填低标号混凝土、泡沫混凝土、自密实土时, 最大主应力为压应力, 大小分别为 0.34 MPa、0.41 MPa、0.54 MPa, 最小主应力为拉应力, 大小分别为 8.74 MPa、9.21 MPa、10.16 MPa, 这表明充填低标号混凝土应力值最小、泡沫混凝土次之、自

密实土最大。在溶洞处治时, 应优先采用低标号混凝土, 泡沫混凝土次之。

4 溶洞处治现场试验

为进一步增强处治方案的可靠性并对其进行实地验证, 开展现场试验, 以期获得更为准确和实用的数据支持。对于判断为不稳定的溶洞、土洞进行处理, 特选取 RX20-T7、TRX26-T1、TX20-T 进行土溶

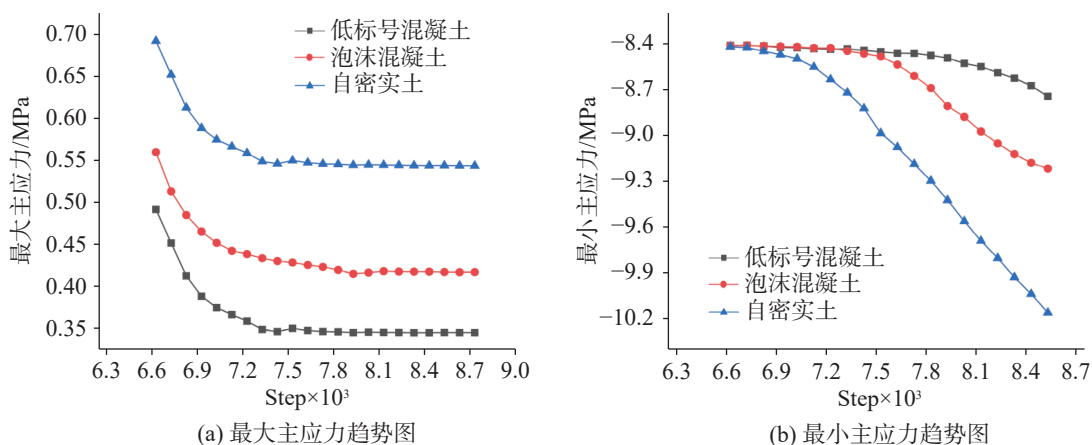


图 11 处治后监测点主应力曲线图

Fig. 11 Principal stress curves of monitoring points after treatment

洞试验段施工。

4.1 溶洞处理方式

根据广州白云机场前期溶洞和土洞处理工程经验,对于未充填和半充填类型的溶洞,采用高压灌注低标号混凝土与袖阀管注浆相结合的处理方法。对充填类型的溶洞,采取袖阀管注浆的处理方式。

4.2 注浆效果检测

4.2.1 钻孔取芯法

本次共完成编号为 RX20-T7、TRX26-T1、TX20-T 共 3 处溶洞的探测工作。结果表明:低标号混凝土、泡沫混凝土注浆后的标准贯入度、压缩性等指标均合格。

4.2.2 孔内波速测井

针对土洞 RX20-T7 布设 RX20-T7 测线(图 12)。根据现场实测,点号 1024 为注浆点。天然源面波反演波速剖面中,该土洞注浆点周边反演波速为 400~550 m·s⁻¹,注浆后注浆点 24.5 m~29.0 m 深度周边无明显的低波速区域。

针对土洞 TRX26-T1 布设 TRX26-T1 测线(图 13)。点号 1020、1024、1028 为注浆点。天然源面波反演波速剖面中,溶洞注浆点周边反演波速为 300~380 m·s⁻¹,注浆后注浆点 20~26 m 深度周边无明显的低波速区域。

针对土洞 TX20-T 布设 TX20-T 测线(图 14)。点号 1020~1032 为注浆范围,点号 1024、1030 为注浆点。天然源面波反演波速剖面中,该溶洞注浆点

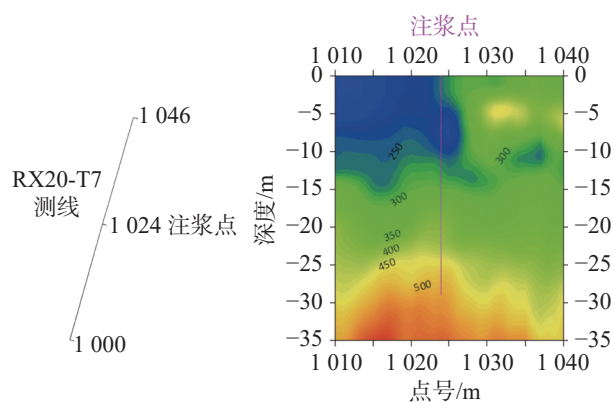


图 12 RX20-T7 测线布置及波速剖面图

Fig. 12 Layout of Line RX20-T7 and profile of wave velocity

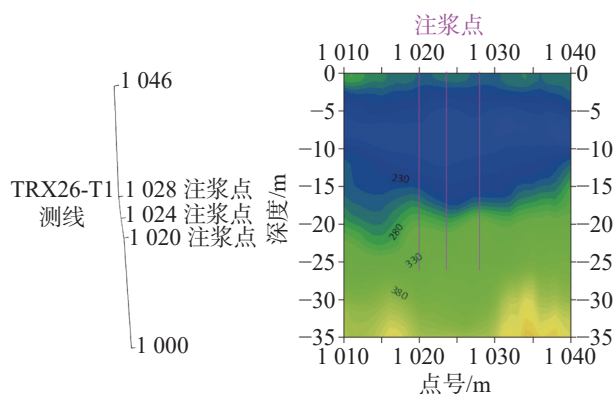


图 13 TRX26-T1 测线布置及波速剖面图

Fig. 13 Layout of Line TRX26-T1 and profile of wave velocity

周边反演波速为 400~500 m·s⁻¹,注浆后注浆点 28~35 m 深度周边无明显的低波速区域。

5 结 论

(1)研究区隐伏溶洞在当厚跨比及高跨比减小,

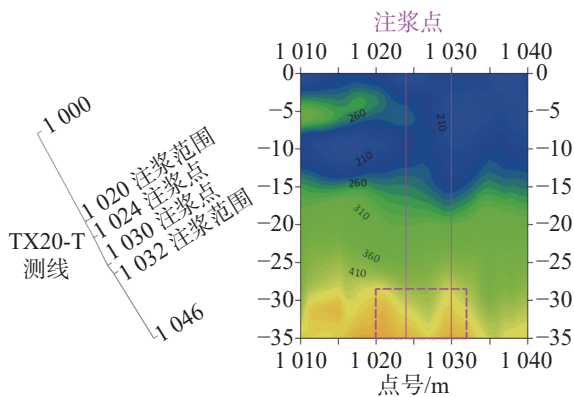


图14 TX20-T测线布置及波速剖面图

Fig. 14 Layout of Line TX20-T and profile of wave velocity

道基填筑厚度增大时, 溶洞位移及应力呈现增加趋势; 在厚跨比>1 或高跨比>2 时, 整体趋近于稳定状态, 溶洞稳定性较高, 可不进行处理。

(2) 采用低标号混凝土注浆处治后的溶洞顶板位移量仅为 0.6 mm, 较未处治时降低 99.11%, 应力集中现象大大减弱, 地基强度有所提高, 注浆效果良好。

(3) 在广州白云机场溶洞处理施工中应优先采用低标号混凝土作为填充料进行大面积施工, 其次采用泡沫混凝土。

参考文献

- [1] 蒋小珍, 冯涛, 郑志文, 雷明堂, 张伟, 马骁, 伊小娟. 岩溶塌陷机理研究进展[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 517-527.
JIANG Xiaozhen, FENG Tao, ZHENG Zhiwen, LEI Mingtang, ZHANG Wei, MA Xiao, YI Xiaojuan. A review of karst collapse mechanisms[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(3): 517-527.
- [2] 陈标典, 李喜, 熊启华, 李彧磊, 涂婧, 刘鹏瑞, 叶疆. 武汉纸坊-庙山老黏土区岩溶地面塌陷形成演化与监测[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 361-369.
CHEN Biaodian, LI Xi, XIONG Qihua, LI Yulei, TU Jing, LIU Pengrui, YE Jiang. Evolution and monitoring of karst ground collapse in the Zhifang-Miaoshan paleo-clay area of Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(2): 361-369.
- [3] 赵明华, 雷勇, 张锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 524-530.
ZHAO Minghua, LEI Yong, ZHANG Rui. Study of punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 524-530.
- [4] 杨晓华, 李爱明, 李吉富. 山区既有公路桥梁桩基下伏溶洞处治技术[J]. 公路, 2020, 65(10): 100-106.
YANG Xiaohua, LI Aiming, LI Jifu. Treatment technology for underlying caves of pile foundation of highway bridges in mountainous areas[J]. Highway, 2020, 65(10): 100-106.
- [5] 邓友生, 孟丽青, 蔡梦真, 孙雅妮, 李龙, 郑云方. 水泥土搅拌桩加固黄土路基稳定性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(3): 59-66.
DENG Yousheng, MENG Liqing, CAI Mengzhen, SUN Yani, LI Long, ZHENG Yunfang. Research on stability of loess roadbed reinforced with cement-soil mixing piles[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(3): 59-66.
- [6] 汪婧. 基于上限分析原理的岩溶桩基破坏模式与极限承载力计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(9): 2207-2214.
WANG Jing. Failure mode and ultimate bearing capacity of karst pile foundation based on upper-bound theorem[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2207-2214.
- [7] 张合青, 杨国荣, 魏弋锋. 广州白云机场土洞、溶洞的稳定性判别及其加固处理[J]. 地球与环境, 2005, 33(3): 36-40.
ZHANG Heqing, YANG Guorong, WEI Yifeng. Discrimination of stability of soil caves and solution caves in the process of construction of new Baiyun international airport in Guangzhou and their reinforcement[J]. Earth and Environment, 2005, 33(3): 36-40.
- [8] 丁春林, 甘百先, 钟辉虹, 周顺华. 含土洞、溶洞的机场滑行道路基稳定性评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1329-1333.
DING Chunlin, GAN Baixian, ZHONG Huihong, ZHOU Shunhua. Stability evaluation of airfield runway subgrade containing earth caves and karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1329-1333.
- [9] 刘自强, 马洪生, 牟云娟. 节理裂隙发育岩溶地基数值模拟稳定性分析[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 100-110.
LIU Ziqiang, MA Hongsheng, MOU Yunjuan. Numerical simulation analysis and evaluation of stability of the karst foundation with developed joints and fissures[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(1): 100-110.
- [10] 许汉华, 谢雨霖, 槐以高, 眭素刚, 肖经光, 李小双. 云南省高原型岩溶地基稳定性和适宜性评价[J]. 人民长江, 2022, 53(11): 99-105.
XU Hanhua, XIE Yulin, HUAI Yigao, SUI Sugang, XIAO Jingguang, LI Xiaoshuang. Evaluation on stability and suitability of plateau-type karst foundations in Yunnan Province[J]. Yangtze River, 2022, 53(11): 99-105.
- [11] 赵明华, 袁腾方, 陈言章, 杨超炜. 基于 Schwarz 交替法的岩溶区双孔土洞地基稳定性分析[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 49-55.
ZHAO Minghua, YUAN Tengfang, CHEN Yanzhang, YANG Chaowei. Stability analysis of double soil cave foundation in karst area based on Schwarz alternating method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 49-55.
- [12] 赵衡, 肖尧, 赵明华, 杨超炜. 路基下伏矩形溶洞的稳定性解析法[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 165-170, 180.

- ZHAO Heng, XIAO Yao, ZHAO Minghua, YANG Chaowei. Stability assessment method for subgrade with underlying rectangular cavity[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(2): 165-170, 180.
- [13] 王良川. 岩溶区路基下伏溶洞顶板稳定性分析及加固处理[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(5): 17-21.
- WANG Liangchuan. Stability analysis and reinforcement measurement for subgrade with concealed cave in karst region[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(5): 17-21.
- [14] 杨仕升, 何声, 蒙雷, 王永幸. 广西岩溶区地震地质灾害及工程场地处理[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(4): 790-796.
- YANG Shisheng, HE Sheng, MENG Lei, WANG Yongxing. Research on earthquake-induced geological disasters in the karst area in Guangxi and methods for engineering-site preparation [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2014, 36(4): 790-796.
- [15] 刘宏, 赵跃平, 郭相国, 王丹辉, 赵瑞峰. 强溶蚀带岩溶地基稳定性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2011, 31(3): 35-39.
- LIU Hong, ZHAO Yueping, WU Xiangguo, WANG Danhui, ZHAO Ruifeng. Stability analysis on intensively soluted karst ground[J]. *Mining Research and Development*, 2011, 31(3): 35-39.
- [16] 曾玉, 杨顿贤, 张娜. 覆盖型岩溶对工程建设的影响[J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2011, 30(Suppl.1): 697-699.
- ZENG Yu, YANG Zhenxian, ZHANG Na. The impact of covered karst in the engineering construction[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2011, 30(Suppl.1): 697-699.
- [17] Assadi A, Sloan S W. Undrained stability of shallow square tunnel[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(8): 1152-1173.
- [18] 吕心瑞, 郭兴威, 孙建芳, 夏东领, 李彦普, 丁炎志, 王斌. 深层碳酸盐岩储层溶洞垮塌物理模拟及分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1505-1514.
- LYU Xinrui, WU Xingwei, SUN Jianfang, XIA Dongling, LI Yanpu, DING Yanzhi, WANG Bin. Physical simulation and distribution prediction of karst cave collapsing in deepcarbonate reservoirs[J]. *Oil and Gas Geology*, 2022, 43(6): 1505-1514.
- [19] 吕江, 赵晖, 杨杓. 洞径和覆土厚度对强夯法加固岩溶地基设计参数影响研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(Suppl.1): 1918-1922.
- LYU Jiang, ZHAO Hui, YANG Biao. Study on influence of cave diameter and covering thickness on parameter design of dynamic compaction for foundation in karst area[J]. *Building Structure*, 2021, 51(Suppl.1): 1918-1922.
- [20] 吴平, 刘鹏, 吴学林. 基于钻孔 CT 溢洪道底部溶洞稳定性影响参数敏感性分析[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4): 117-120, 99.
- WU Ping, LIU Peng, WU Xuelin. Sensitivity analysis of parameters affecting stability of karst cave at the bottom of spillway based on drilling CT[J]. *Water Resources and Power*, 2021, 39(4): 117-120, 99.
- [21] 常洲, 魏研博, 冷浩, 晏长根, 刘发波, 黄平. 隐伏充填型溶洞对隧道稳定性影响与防治技术[J]. *公路*, 2022, 67(9): 439-445.

Impact of concealed karst caves on airport surface stability and treatment techniques

YU Qian¹, WANG Chengcheng², ZHANG Shasha², KOU Jingyuan¹, WANG Zhifeng²

(1. China Airport Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract If an airport is built in a karst area, a concealed karst cave will pose a challenge to the airport construction because of its concealment. The adverse geological effects in the site area of the third phase expansion project of Guangzhou Baiyun international airport are significantly pronounced. The roof thickness of 132 exposed karst caves ranges from 0.1 m to 5.2 m, the height varies from 0.7 m to 13.5 m, the span measures between 0.5 m and 11.7 m, and the buried depth ranges from 13.2 m to 32.7 m. Most of the karst caves exhibit no filling or poor filling properties. The groundwater at the site consists of loose rock pore water, with a water level depth of 4.38 m. The bedrock is mainly composed of soluble limestone. Additionally, the rock mass in the engineering site exhibits significant folding. Affected by the Guangcong Fault, many secondary faults are developed, and the brittle rock mass is easily broken. Consequently, the action of external forces such as foundation construction and road rolling likely cause the breakage of cave roofs and uneven settlement of ground, which is not conducive to the safe construction of airport pavement. Therefore, the stability evaluation and treatment technique of karst foundation are very important to the smooth

completeness of this project.

Based on the FLAC3D numerical simulation method, a 100 m×50 m×50 m three-dimensional calculation model was established to analyze the influence of different thickness-span ratios and high-span ratios of concealed karst caves on the stability of the airport site under the filling load of the roadbed. A comparative analysis was conducted to evaluate the displacement, plastic zone, and stress of typical karst caves before and after treatment, providing a comprehensive assessment of their stability. Finally, a field test was carried out with the combination of high-pressure pouring of low-grade concrete and sleeve valve pipe grouting. The treatment effects of filling karst caves with self-compacting soil, foam concrete, and low-grade concrete were compared and analyzed through various methods, including by core drilling, borehole wave velocity logging, geophysical prospecting tests, standard penetration tests, compressibility tests, and wave velocity profiling.

The results show that when the thickness-span ratio and height-span ratio of a concealed karst cave decrease and the filling height of the subgrade increases, the displacement and stress of the karst cave show an increasing trend and tend to be unstable as a whole. Compared with the span of the cave, the roof thickness is relatively insufficient, and the bearing capacity is inadequate to bear the upper load. This presents potential risks of roof breakage and cave collapse. It can be concluded that the cave will significantly affect the stability of the airport. When the thickness-span ratio (K_H) is greater than 1 or the height-span ratio (K_G) is greater than 2 for the concealed karst cave, the whole cave tends to be stable, indicating a high level of its stability. After addressing the typical working conditions of karst caves through a combination of high-pressure perfusion of low-grade concrete and sleeve valve tube grouting, it has been found that the displacement of the roof of the karst cave following the treatment of low-grade concrete grouting is only 0.6 mm. This represents a reduction of 99.11% compared to conditions without treatment. The phenomenon of stress concentration is significantly reduced, resulting in enhanced foundation strength and effective grouting outcomes. Based on the comparative analysis of numerical calculation and field test, it is proposed that low-grade concrete should be preferentially used as filling material in the treatment of concealed karst caves in the third phase expansion project of Guangzhou Baiyun airport, followed by foam concrete. This study can provide reference for the selection of karst treatment measures in South China.

Key words concealed karst cave, airport, stress variation, numerical simulation, stability evaluation, concrete grouting

(编辑 黄晨晖)