

岩溶塌陷区地基基础注浆加固施工实践

韦兴标, 邓 勇, 沈树连, 冯周飞

(广西水文地质工程地质勘察院, 广西 柳州 545006)

摘要: 本文结合工程实例, 针对某办公楼遭遇岩溶塌陷后出现墙体开裂、柱子变形的问题, 采用注浆法对该办公楼桩基础下部岩溶空洞及其上部塌陷的、松散土层进行注浆加固处理, 水泥浆经扩散、渗透、挤密等作用填充到溶洞内部及其上部土层中。改善溶洞充填物及其上部土层的力学性质能够提高办公楼桩端阻力和桩周土侧阻力, 确保办公楼地基基础的稳定性及其安全。

关键词: 岩溶塌陷; 注浆加固; 桩端端阻力; 桩周土侧阻力

中图分类号: TU42 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096 - 7195(2019)02 - 0049 - 05

作者简介: 韦兴标 (1967 -), 广西水文地质工程地质勘察院高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻孔灌注桩、软土地基加固、深基坑支护等施工技术与管理。E-mail: weixb878111@163.com。

Construction practice of grouting reinforcement for foundation in karst subsidence area

WEI Xing-biao, DENG Yong, SHEN Shu-lian, FENG Zhou-fei

(Guangxi Hydrogeological Engineering Geological Survey Institute, Guangxi 545006 China)

Abstract: In combination with engineering examples, to solve the problem of wall cracking and column deformation after karst collapse of an office building, this paper adopts grouting method to reinforce the karst holes in the lower part of the pile foundation and the loose soil layer collapsed in the upper part of the pile foundation of the office building. The cement slurry is filled into the inner part of the karst cave and its upper soil layer by diffusion, infiltration and compaction to improve the filling of the karst cave. The mechanical properties of the substance and its upper soil layer can improve the resistance at the tip of the pile and the side resistance of the soil around the pile, and ensure the stability and safety of the foundation of the office building.

Key words: karst collapse; grouting reinforcement; tip resistance of pile; side resistance of soil around pile

0 引 言

某公司办公大楼建筑占地面积长 16 m×12 m, 楼高 9 层, 建筑面积约 2000 m², 基础采用桩基础 (部分为人工挖孔灌注桩, 有效桩长 1~4.5 m, 桩端持力层为基岩; 部分桩为钻孔灌注桩, 有效桩长 6 m, 桩端持力层为可塑状黏土), 框架结构。2018 年 7 月 24 日该办公楼前、城市道路混凝土路面发生岩溶地面塌陷, 出现路面开裂, 裂缝长约 7.11 m, 张开 1~5.5 cm, 弧形凹陷, 裂面较平直。塌陷范围: 长约 15 m, 宽约 9 m, 深约 0.3~0.5 m; 受该岩溶地面塌陷影响, 该办公楼一至四楼前缘墙面出现 1~5 mm 裂缝和混凝土柱子变形现象。为避免该岩溶地面塌陷进一步发展和该办公楼变形加重, 设计采用注浆法对该岩溶地面塌陷区和该办公楼地基基础进行加固处理。经注浆加固处理后, 采用钻

探取芯法对注浆效果进行检测。检测结果: 该岩溶地面塌陷区岩溶空洞部分有纯水泥柱, 岩溶地面塌陷区上部塌陷的松散土体有水泥浆脉贯穿其中, 且塌陷区混凝土路面略有抬升; 该办公楼内部和屋檐下部的岩溶空洞部分也有纯水泥柱, 上部塌陷的松散土体有水泥浆脉贯穿其中, 注浆加固效果满足设计及施工规范要求, 工程质量合格。另外, 该办公楼下沉的柱子略有抬升, 墙面裂缝宽度变小。

1 塌陷区内工程地质特征与水文地质条件及其岩溶特征

1.1 塌陷区内工程地质特征

根据工程地质勘察资料, 场地岩土层自上而下

为：第四系人工堆积成因的素填土①（ Q_{4ml} ）、耕土②（ Q_{4pd} ）、残积形成的黏土③（ Q_{4cl} ），下伏基岩为泥盆系灰岩④（ D_{3r} ）等。场地内各岩土层特征描述如下：

第①层杂填土（ Q_{4ml} ）：主要由黏性土组成，局部含碎石，土质不均匀，呈褐色，稍密状态，稍湿。该层位于场地表面，所有钻孔均有分布，层厚0.5~1.6 m，平均层厚1.0 m。

第②层耕土（ Q_{4pd} ）：灰褐色，结构松散，稍湿，以粘性土为主，层面埋深为0.8~1.6 m，层厚0.3~1.0 m，平均层厚0.5 m。

第③层可塑状黏土（ Q_{4cl} ）：褐黄色，稍湿，可塑状，粘性较强，切面较光滑，无摇震反应，韧性较高，干强度较强。该层所有钻孔均有分布，层面埋深为0.5~2.0 m，层厚0.8~5.2 m，平均层厚2.1 m。该层做标准贯入试验12次，经杆长修正后锤击数为15击~19击/30 cm，平均值为17击/30 cm，该层承载力特征值为180 kPa，强度较高，压缩系数为 0.27 MPa^{-1} ，属中等压缩性土。

第④₁层强风化灰岩（ D_{3r} ）：灰白~浅灰色，隐晶质结构，厚层状构造，岩面埋深为1.9~5.6 m，层厚在0.1~2.4 m不等，呈不连续状分布，仅在ZK₁、ZK₃、ZK₆、ZK₇、ZK₆₋₁号等5个钻孔分布；多以鹰嘴岩、石崖、石笋、半边岩的形式出现，遇岩溶段岩芯较破碎，多呈颗粒状、半边岩状或块状。

第④₂层中风化灰岩（ D_{3r} ）：灰白色，致密坚硬，微风化，岩面埋深为2.2~15.5 m，岩石微细节理裂隙稍发育，节理内均被白色方解石充填，呈紧闭状，岩芯多为长柱状，少数为短柱状，岩体完整性好。

1.2 塌陷区内水文地质条件

根据工程勘察资料，结合场区水文地质环境及地形地貌特征，本场地内主要地下水类型为：

①层滞水：赋存于局部隔水层以上的上覆填土层中，水量相对贫乏，补给方式主要是受大气降水，初见水位在1.8~2.5 m。

②岩溶裂隙水：赋存于岩石层的岩溶裂隙、层理空隙及溶洞中，水量相对较大，略具承压性，补给方式主要是受大气降水及地下径流。

1.3 岩溶发育特征

根据钻探揭露的不良地质现象（溶洞），与场

地勘察物探低阻异常区推断的结果基本一致。16个勘察孔中，ZK₂、ZK₃、ZK₄、ZK₆、ZK₇、ZK₁₀、ZK₆₋₁等7个钻孔发现溶洞，场地钻孔遇溶洞率43.8%，线岩溶率为25.5%。溶洞最大洞高6.4 m，且在ZK₂、ZK₄、ZK₆等3个钻孔中揭露叠层溶洞，溶洞顶板厚度最薄仅0.1 m。钻探穿过溶洞有掉钻现象，掉钻长度为0.5~2.9 m。溶洞中充填软~流塑状粘性土，该场地溶洞极为不稳定。溶洞发育情况见表1。

根据《广西壮族自治区岩土工程勘察规范》（DBJ/T45-066-2018）中岩溶发育程度分级标准综合判定，该塌陷区场地岩溶强烈发育。

1.4 办公楼墙面开裂与混凝土柱子变形

根据地面调查及访问，2018年7月24日该办公楼前、城市道路混凝土路面上发生岩溶地面塌陷，出现路面开裂，裂缝长约7.11 m，张开1~5.5 cm，弧形凹陷，裂面较平直。塌陷范围：长约15.0 m，宽约9.0 m，塌陷深度约0.3~0.5 m。因受该岩溶地面塌陷影响，该办公楼1~4层楼房前缘、侧壁墙壁裂缝，缝宽1~5 mm，缝长6 m，其中一层楼墙面裂缝最宽、最长，裂缝呈“倒八字形”分布；同时该办公楼混凝土柱均存在不同程度的变形，沉降最大的混凝土柱为2号柱，在观测期间内已下沉2.29 mm，且仍有继续发展趋势，日前塌陷深度已发展到0.3~0.8 m，已严重威胁到该办公楼安全和城市道路交通安全。

2 岩溶地面塌陷和办公楼柱子变形及其墙面开裂原因分析

（1）岩溶地面塌陷的原因分析：根据塌陷区调查与勘察资料，该岩溶地面塌陷主要原因是由于地下水升降活动携带走溶洞、溶沟或溶槽中的泥砂和粘性土，逐步形成岩溶空洞；岩溶空洞附近土体在自重、路载等内外力作用下逐步坍塌，在岩溶空洞上部土层中形成土洞。岩溶空洞或土洞在内、外力作用下逐步坍塌，导致地面塌陷。

（2）办公楼柱子变形及其墙面开裂原因分析：该办公楼人工挖孔灌注桩仅开挖到基岩面，没有穿过溶洞，而钻孔灌注桩未钻到基岩，桩基础有效桩长相当有限，故桩基础抵抗变形能力有限；该办公楼因受岩溶地面塌陷的影响，塌陷区内地层变形较大，造成该办公楼混凝土柱子变形和墙面开裂。

表 1 溶洞发育情况

Table 1 Development of karst caves

孔号	名称	层顶高程/m	洞高/m	顶板岩层	顶板厚度/m	充填情况	稳定性评价
ZK ₂	溶洞	-7.45	0.50	破碎灰岩	0.7	流塑状~软塑状黏土	不稳定
	溶洞	-8.25	5.50	破碎灰岩	0.3	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₃	溶洞	-6.06	1.00	完整灰岩	2.4	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₄	溶洞	-4.66	6.10	破碎灰岩	1.4	流塑状~软塑状黏土	不稳定
	溶洞	-11.96	3.60	破碎灰岩	1.2	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₆	溶洞	-3.56	2.00	破碎灰岩	0.7	流塑状~软塑状黏土	不稳定
	溶洞	-5.66	5.90	破碎灰岩	0.1	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₇	溶洞	-3.90	2.60	破碎灰岩	0.2	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₁₀	溶洞	-5.80	3.00	完整灰岩	2.7	流塑状~软塑状黏土	不稳定
ZK ₆₋₁	溶洞	-5.95	6.40	破碎灰岩	0.3	流塑状~软塑状黏土	不稳定

3 办公楼地基基础注浆加固设计

3.1 办公楼地基基础注浆加固的目的

由于岩溶地面塌陷造成该办公楼上部主体结构混凝土柱变形、砌体墙面多处开裂和城市道路混凝土路面塌陷,为防止该岩溶地面塌陷进一步发展,采取钻孔注浆方式对该岩溶地面塌陷区内的基岩中溶洞、溶沟或溶槽和上部土洞及其塌陷松散土体进行注浆加固处理。注浆加固处理的目的:(1)在下伏基岩与土体之间形成一条水泥系隔离带,隔断岩溶地下水通道,堵住基岩面岩溶开口,阻止地表水下渗,隔断地下水的潜蚀作用;(2)水泥浆经扩散、渗透、密实等作用充填到溶洞的空洞或孔隙中去,防止洞壁土体崩塌;(3)水泥浆在泵压力作用下,对溶洞内的流塑状~软塑状黏土进行挤密等作用,并与洞内固体颗粒胶结、凝结、硬化等作用,形成结构稳定、低压缩性、高承载力复合地基土,提高溶洞充填物承载能力,从而提高桩端端阻力;同时对基岩上部土洞及其塌陷松散土体进行加固处理,水泥浆进入土洞及其塌陷松散土体内,同时水泥浆进入桩周土内,能有效地提高桩周土的侧阻力,确保该办公楼地基基础的稳定性和办公楼的安全。

3.2 注浆材料的选用

因部分注浆孔设置在办公楼内和紧靠办公楼周边,同时考虑到注入溶洞内的水泥浆凝结、硬化时间,避免因水泥浆过稀和凝结、硬化时间过长而加大办公楼墙面裂缝和变形量,注浆应选用凝结硬化时间短、强度高的 42.5 MPa 的普通硅酸盐水泥;水泥浆的水灰比应选用 W:C=1:1 和 0.8:1~0.5:1。

3.3 注浆加固处理范围

注浆加固处理范围:依据工程勘察资料,在该办公楼内及其附近并沿溶洞分布范围外扩 2.5 m 布

设注浆孔注浆,注浆加固面积:长约 26 m,宽约 17 m。加固深度范围:自溶洞底板以下完整基岩 0.5 m 至地面;结合本工程实际情况,加固深度为自深度 18.5 m 以上所有岩溶发育的溶洞、溶沟或溶槽及其上部塌陷的松散土体。

3.4 注浆孔的布设

针对岩溶地面塌陷区内的办公楼及其附近住宅楼,注浆孔有效扩散半径在粘性土中按 0.5 m 考虑,底部近基岩面按 1.0~1.5 m 考虑,下伏基岩溶隙裂隙按 4 m 考虑,对于已发生岩溶塌陷部位,注浆孔有效扩散半径按 3 m 考虑,注浆孔成排布置,共布置 12 排,排距 2.5 m,同排相邻两孔间距 2.5 m,呈梅花形布置;同排注浆孔注浆孔设计分 I 序孔、II 序孔,共 80 个注浆孔;如未能满足设计要求,应适当增加注浆孔进行补强,直到合格为止。

3.5 注浆压力的选用

该岩溶地面塌陷区办公楼地基基础注浆加固处理以水泥浆填充溶洞、裂隙,阻隔水流通道,提高溶洞充填物及其上部松散土层的承载力为目的,为避免造成办公楼抬升,本次注浆压力应采用低压注浆。注浆压力在岩层 0.3~0.5 MPa,土层 0.1~0.3 MPa,现场注浆压力应依据现场试验具体情况确定。

3.6 注浆施工顺序的确定

先施工奇数排注浆孔,后施工偶数排注浆孔;对于同一排注浆孔,先施工 I 序孔,后施工 II 序孔。II 序孔钻灌作业作为 I 序孔的检验和补充,若 II 序孔灌浆仍然未达到设计要求,则继续加密灌浆孔,直到合格为止。

4 钻孔注浆加固施工技术

4.1 注浆孔机械成孔施工技术

(1) 施工现场环境条件

因岩溶地面塌陷区为该办公楼前、城市道路路面, 现已塌陷至办公楼圈梁, 塌陷区长 15 m、宽 9 m、深度由原来的 0.3~0.5 m 发展为 0.5~0.8 m; 且大部分注浆孔设计在城市道路路面至办公楼前的区域, 少部分注浆孔设计在办公楼内及其屋檐下部, 还有部分注浆孔设计在前后两栋住宅楼之间的消防通道上。即该办公楼地基基础注浆加固处理区域为: 塌陷区内的城市道路混凝土路面、已变形的房屋(楼高 9 层)及其相邻沿街房屋(楼高 8 层)和相距约 6 m 后排房屋(楼高 8 层), 现场施工条件极其复杂。

(2) 现场施工机械设备的选用

a) 注浆孔成孔机械设备的选用: 根据现场踏勘, 大部分注浆孔布置在办公楼外部, 仅有少部分注浆孔布置在办公楼内的大厅内和屋檐下部及其相邻两排住宅楼的消防通道上。因该办公楼第一层和屋檐净高均为 3.6 m, 故注浆孔成孔设备选用 1 台 GY-100 型钻机、配备常规钻塔的钻机施钻办公楼外部注浆孔, 1 台 GY-100 型钻机、配备矮塔的钻机施钻办公楼内部和屋檐下部的注浆孔; 2 台 BW120 型泥浆泵抽送清水作为钻探冲洗液。

b) 注浆机械设备的选用: 因设计现场注水泥浆或水泥砂浆, 需要现场搅拌水泥浆或水泥砂浆, 且注浆压力低, 故选用水泥砂浆搅拌机和 BW150/75 型泥浆泵或砂浆泵各 1 台。

(3) 注浆孔机械成孔施工技术

a) 测量放样, 确定注浆孔位置: 依据设计图纸, 由测量工程技术人员采用经纬仪, 配合钢卷尺进行测量, 确定注浆孔位置; 注浆孔位置测量允许偏差控制在 2 cm 以内。

b) 注浆孔机械成孔施工技术

①注浆孔机械成孔技术: 对于房屋外的注浆孔, 采用 GY-100 型钻机进行机械成孔, 开孔直径 $\Phi 150$ mm 或 $\Phi 130$ mm, 终孔直径 $\Phi 110$ mm。路面混凝土采用金刚石钻头回转钻进, 清水作为钻进循环冲洗液; 回填土、耕植土等土层采用冲击取土法干作业成孔, 基岩采用金刚石钻头回转钻进, 清水作为钻进冲洗液; 对于溶洞内充填物, 采用长钻具、锤击取土法干作业成孔。对于房屋内、屋檐下部的注浆孔, 采用配备 3 m 矮塔的 GY-100 型钻机进行机械成孔, 开孔直径 $\Phi 110$ mm, 终孔直径 $\Phi 91$ mm; 地板砖采用金刚石回转钻进, 清水作为钻进循环冲洗液; 土层仍采用冲击取土法干作业成孔; 基岩采用金刚石回转钻进, 清水作为钻进循环冲洗液; 而

溶洞内充填物, 仍采用长钻具、锤击取土法干作业成孔。

②注浆孔成孔深度要求: 注浆孔深度要求进入基岩面以下不少于 3.0 m, 且钻至需注浆加固处理的溶洞底板以下 0.50 m 以上完整基岩, 方能终孔。

③钻孔施工记录要求: 在注浆孔钻进过程中, 应做好现场施工记录工作; 主要记录钻进过程土层取样、土层是否存在土洞, 基岩溶洞顶板、底板位置、溶洞高度, 洞内充填物等情况, 钻进时是否有掉钻现象等。

④钻孔异常情况处理: 钻进过程中, 如发现采取岩样与设计不符, 如溶洞底板下仍有溶洞时, 应及时与监理、业主、设计单位汇报, 由设计单位确定终孔深度。

4.2 注浆加固施工技术

(1) 注浆孔钻到设计孔深后, 安放注浆管。注浆管采用底部带花管(直径 6~8 mm 的多排孔眼, 花管长度约 0.6 m)并用封口胶密封的直径 50 mm 铁质水管作为注浆管, 注浆管安放到孔底, 注水洗管或注浆时提离孔底 5 cm。

(2) 注浆方法选用: 现场采用自下而上、逐段拔管注浆方法进行注浆。即当下一注浆段注浆满足设计要求后, 将注浆管往上拔起 0.5~0.6 m, 后对上一段注浆段进行注浆, 重复上述工序作业, 直到地面为止。

(3) 注浆孔注浆: 将搅拌好的水灰比 1:1 或 0.8~0.5:1 水泥浆, 水泥浆经筛网过滤, 采用注浆泵抽送, 经注浆泵、输浆管、注浆管进入注浆孔孔底、溶洞等受灌区。水泥浆通过渗透、扩散、挤密等作用, 渗透、扩散到溶洞或土体空洞及其孔隙中去, 排除空气和水, 同时与受灌溶洞中颗粒结合, 并对溶洞充填物进行挤密, 形成结构致密、强度较高的水泥石或水泥浆脉。

(4) 注浆量的初步确定: 理论上可按公式 $Q=KV\alpha\beta$ 进行确定, 现场注浆量应经试验后确定。

(5) 地面冒浆处理: 在注浆过程中, 如发现地面冒浆, 应立即停止注浆。

(6) 间歇式注浆: 当某注浆孔某一注浆段的注浆量明显少于设计注浆量, 且注浆过程中出现冒浆现象, 如某一注浆孔开始注浆时就出现冒浆, 为确保注浆质量, 应采取“间歇式注浆”。另外, 当某注浆孔某一注浆段的注浆量明显大于设计注浆量, 为减少水泥浆的无效扩散, 节约施工成本, 也应采取“间歇式注浆”方式注浆。

(7) 串浆现象及其处理: 串浆现象是指当某

注浆孔注浆时,水泥浆从其它钻孔(如前期勘察孔)冒出水泥浆的现象;串浆的处理:施工现场应立即停止注浆,待串浆孔内水泥浆凝结后,再对该注浆孔进行二次注浆,直到满足设计要求为止。

4.3 测量实时观测监控

为确保钻孔、注浆施工安全和已变形的办公楼墙体裂缝和变形控制在“规范”允许范围内和其相邻沿街房屋和相距约6 m后排房屋的完好,在钻孔、注浆施工前,应对已变形的办公楼墙面裂缝和变形柱子及其相邻沿街房屋和相距约6 m后排房屋进行测量观测,建立做好测量观测网站和数据,对墙面裂缝数量、长度、宽度和各变形柱子下沉量进行测量,并做好现场拍照工作,同时在墙面裂缝适当位置贴上薄纸,便于现场观察。

在钻孔、注浆加固施工过程中,利用施工前建立的测量观测网站和数据,对已变形的办公楼墙面裂缝和变形柱子及其相邻沿街房屋和相距约6 m后排房屋的抬升数据进行对比,指导现场钻孔、注浆施工。当垂直方向的抬升量或水平方向的变形量达到“测量变形观测规范”预警值时,应立即停止钻孔、注浆施工。

5 钻孔注浆加固施工注意事项

(1) 在钻注浆孔施工过程中,因采用清水循环钻进,应注意观察冲洗液是否漏失,尤其是串珠式叠层溶洞、塌陷松散土层等复杂地层中钻进,清水可能会带走颗粒,加大塌陷深度和塌陷范围,形成新塌陷;为避免加重塌陷,现场采取用1:1水泥浆替代清水作为冲洗液循环钻进。

(2) 为确保岩溶地面塌陷区办公楼地基基础注浆加固处理达到预期的目的,保证水泥浆在溶洞或溶沟或溶槽内的有效扩散半径,应先注入1:1~0.8:1的水泥浆,待其注浆量达到一定数量后,再改注0.6:1~0.5:1的水泥浆注浆。即先填充满基岩溶洞,再对其上部受灌地层进行注浆,预防因稀水泥浆带走溶洞内流塑状土颗粒,形成新塌陷。

(3) 为确保注浆泵能够抽送0.6:1~0.5:1的水泥浆进行有效地注浆,在搅拌0.6:1~0.5:1的水泥浆时,现场掺入HL型高效减水剂。

(4) 在注浆施工过程中,岩溶空洞逐渐被水泥浆充填,既要考虑岩溶空洞因注浆量不足或注浆压力过小而造成的注浆加固效果达不到设计要求,又要考虑因注浆量过大或注浆压力过高,可能引起办公楼抬升。故现场采取“在溶洞顶板密封胶栓塞

进行堵塞,先对岩溶空洞进行适当高压注浆;完成岩溶空洞注浆后,再对其上部塌陷松散土层进行适当低压注浆”的方法进行注浆加固处理,确保该办公楼地基基础注浆加固质量。

(5) 在钻孔、注浆施工过程中,测量技术人员应现场实时跟踪测量观测。在该办公楼地基基础注浆加固处理中,测量观测就是现场钻孔、注浆施工的“眼睛”,实时指导现场钻孔、注浆加固施工。

(6) 因施工现场地处市区内,现场须做好“围栏隔离施工”和“噪音、粉尘等各项标准须符合环保要求”。

6 注浆加固效果检测

注浆加固完成后,现场采用钻探取芯、标准贯入试验、重型触探等原位测试方法对受灌的岩溶空洞及其上部塌陷松散土层进行检测。检测结果:该岩溶地面塌陷区岩溶空洞部分有纯水泥柱,岩溶地面塌陷区上部塌陷的松散土体有水泥浆脉贯穿其中,且塌陷区混凝土路面略有抬升;该办公楼内部和屋檐下部的岩溶空洞部分也有纯水泥柱,上部塌陷的松散土体有水泥浆脉贯穿其中,这表明桩基础下部岩溶溶洞充填物得到有效地充填与加固,桩周土也得到有效充填与加固,桩端阻力和桩周土侧阻力得到提高。注浆加固处理效果满足设计及施工规范要求,工程质量合格。

7 结 论

在岩溶地面塌陷区内进行既有建筑物地基基础注浆加固施工,采取橡胶栓塞在基岩以下孔段封堵,先对岩溶空洞注浆,后对基岩上部松散土层注浆,较为圆满地完成该办公楼地基基础注浆加固施工任务,有效地防止该办公楼地基基础因岩溶地面塌陷而引发的墙面裂缝和混凝土柱子下沉的进一步发展,但在岩溶发育孔段注浆加固处理时,仍有水泥浆绕塞返浆,尤其是注浆孔遇鹰嘴岩或串珠式叠层溶洞地层,这是今后注浆加固处理探讨的课题。

参考文献:

- [1] 张永钧,叶书麟.既有建筑地基基础加固工程实例应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] JGJ123-2000 既有建筑地基基础加固技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [3] YSJ211-92 注浆技术规程[S].西安:西安交通出版社,1993.