

李肖南, 阎长虹, 许宝田, 等. 无锡某地基埋藏型岩溶发育特征及充填物来源[J]. 中国岩溶, 2015, 34(1): 79—85.
DOI: 10. 11932/karst20150111

无锡某地基埋藏型岩溶发育特征及充填物来源

李肖南^{1,2}, 阎长虹¹, 许宝田¹, 段成龙¹, 周殷康¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 新疆电力设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 研究埋藏型岩溶的发育特征和充填物来源对拟建超高层建筑的选址及持力层的选择具有重要意义。本文通过跨孔地震 CT 对溶洞和破碎带进行探测, 并对部分代表性溶洞的充填物进行比重试验、颗粒分析和 X 射线衍射分析, 结合现场工程地质情况, 研究了距地表以下 80 余米处岩溶的规模、分布情况、岩溶发育特征及溶洞充填物来源。结果表明: 溶洞发育规模较小, 面积多在 2 m² 以下, 在垂直方向具有多层性; 溶洞充填率达到 92.7%, 多为硬塑泥质全充填, 承载力较大, 可作为基础持力层; 溶洞填充物的矿物成分基本相同, 且与上覆基岩一致, 充填物来源主要为上覆基岩的剥蚀; 溶洞之间不存在大的连通通道, 且地下水位已降至场地溶洞以下, 故该处溶洞不会进一步发育, 不会对上部地基稳定性造成威胁。

关键词: 埋藏型岩溶; 跨孔地震 CT; 溶洞; 充填物来源; 持力层

中图分类号: P642.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4810(2015)01-0079-07

0 引言

岩溶是工程建设中经常遇到的不良地质现象, 容易引起地面塌陷、隧道突泥突水等问题。在岩溶地区工程建设中, 对岩溶充填物的成分、规模、来源及形成环境的分析研究是工程勘察要解决的关键问题之一^[1-2]。岩溶的发育特征、充填情况及充填物的来源会对建筑物的选址及持力层的稳定性造成一定影响。在岩溶地基之上建筑施工, 如果这些地带岩溶发育, 顶板薄, 溶洞缺少充填物或充填物变化流失快, 会造成塌穴和漏斗, 对地基上的建筑物影响很大^[3]; 若基岩中岩溶裂隙、溶沟溶槽发育, 且可能与下部溶洞连通, 节理裂隙将基岩切割成块体状, 溶沟溶槽被粘性土或碎石土充填, 在外力作用下将会产生位移, 从而会影响地基的稳定性; 溶洞充填物根据来源时间分为早期充填物和晚期充填物, 若溶洞多被早期剥蚀的硬塑状态的粘性土充填, 可通过计算充填物承载力来计算其对地基稳定性的影响^[4], 若溶洞充填物来自于晚期上覆基岩的剥蚀或其他溶洞运移而来, 则要进一步查明基岩剥蚀的规模及溶洞间连通通道大小, 来预估和评判其对地基稳定性的影响。故查明岩溶发育特

征、判断溶洞充填物来源对预测上述不良地质问题有着重要的意义。

唐基禹等^[5]提出溶洞充填物突出物质的成分取决于充填物的成分, 且对矿区岩溶充填物突出的机理及防治进行了详细的介绍; 李明波等^[6]根据溶洞充填物来源的不同, 将岩溶充填物分为三类: 机械沉积充填物、化学沉积充填物和塌积充填物; 白明洲等^[7]系统分析了岩溶管道粗颗粒沉积物的粒度、岩石及矿物成分、磨圆度组合等特征, 并探讨了碎屑沉积物的地质联系, 研究了沉积物的来源; 王宝清等^[8]根据方解石充填物的碳氧稳定同位素分布特征, 包裹体的均一温度和盐度, 阴极发光特征, 把方解石充填物分为早期充填物和晚期充填物。施泽进等^[9]人以野外观察结合地球化学方法将四川盆地某处的古岩溶类型划分为沉积期岩溶、表生期岩溶、埋藏期岩溶和褶皱期岩溶, 并对四类岩溶的差异性及充填物来源和特征进行了讨论; 任美镔^[10]基于可溶岩埋藏条件, 将岩溶分为裸露型岩溶、覆盖型岩溶、埋藏型岩溶, 并对这三类岩溶的特征及分布范围进行了梳理。蒋良文^[11]通过综合勘察和理论分析的方法, 对某隧道向斜埋深大型充填溶洞及其形成机制进行了分析和讨论。王建秀

第一作者简介: 李肖南(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 城市环境岩土工程。E-mail: lxxniju@163.com。

收稿日期: 2014-11-26

等^[12]分析了盖层土体与无填充薄顶板溶洞间力的传递作用。一些学者采用地质雷达、浅层地震以及电磁波 CT 等方法勘测岩溶的发育情况并在工程项目中成功应用^[13-16],对岩溶的发育成因和分布特征也有很多人做了探讨^[17-19]。

目前我国对沿海地区深部岩溶地基作为超高层建筑持力层的研究较少,特别是对埋深较大发育规模较小数量较多的溶洞研究更少。本文以无锡某地基为例,通过跨孔地震 CT 对溶洞和破碎带进行探测、解译成像,分析统计溶洞的规模及充填情况,对部分代表性溶洞的充填物取样进行室内试验,结合现场工程地质情况,对距地表以下 80 余米处岩溶的规模、分布情况、岩溶发育特征及溶洞充填物来源进行了定性分析,探讨岩溶发育特征和充填物对地基稳定性的影响。本文的研究成果可为苏锡常地区深部岩溶地基之上的超高层建筑的选址、设计和施工,及岩溶探测、地基稳定性分析和不良地质体处理提供参考。

1 工程场地概况

拟建燕莎南丰汇项目位于无锡市南长区永和路北侧。该工程主要由 1 幢 66 层公寓楼(250 m)、1 幢

50 层办公楼(229 m)及 5 层商业裙房组成,下设 4 层地下室。该场地地貌单元属长江三角洲冲积平原。在大地构造分区上此项目位于扬子断块区的下扬子断块内。在近场区范围内共有 5 条较大规模的断裂(图 1),即苏锡常断裂(F_1)、塔山—凤凰山断裂带(F_2)、和桥—阳山断裂(F_3)、北涸—南丰断裂(F_4)和顾山—虞山断裂(F_5)。近场区地层隶属江南地层区苏州—长兴地层小区,地层发育较齐全。区内大部分地区为第四系覆盖,基岩裸露区分布在江阴复式褶皱和太湖北岸。在本工程区揭露的基岩为三叠系青龙群地层,主要以灰岩及泥质灰岩为主,夹有少量白云岩,其具体岩性特征如下(自下而上介绍):①深灰、浅灰色中薄层碎屑灰岩,具缝合线构造和假豆粒构造;②灰白色厚层白云岩,灰白色中到厚层鲕状灰岩;③灰色中至薄层球粒状微晶白云质灰岩;④浅灰色中层微晶钙质白云岩;⑤深灰色中至厚层夹薄层隐晶灰岩,并夹有灰带红色含钙质白云岩和薄层泥质灰岩;⑥深灰色薄层隐晶灰岩;⑦深灰色薄层碎屑灰岩夹灰黄色隐晶白云质灰岩;⑧灰色厚层微晶灰质白云岩;⑨灰、深灰色中至厚层隐晶灰岩夹带肉红色白云岩(未见顶)。

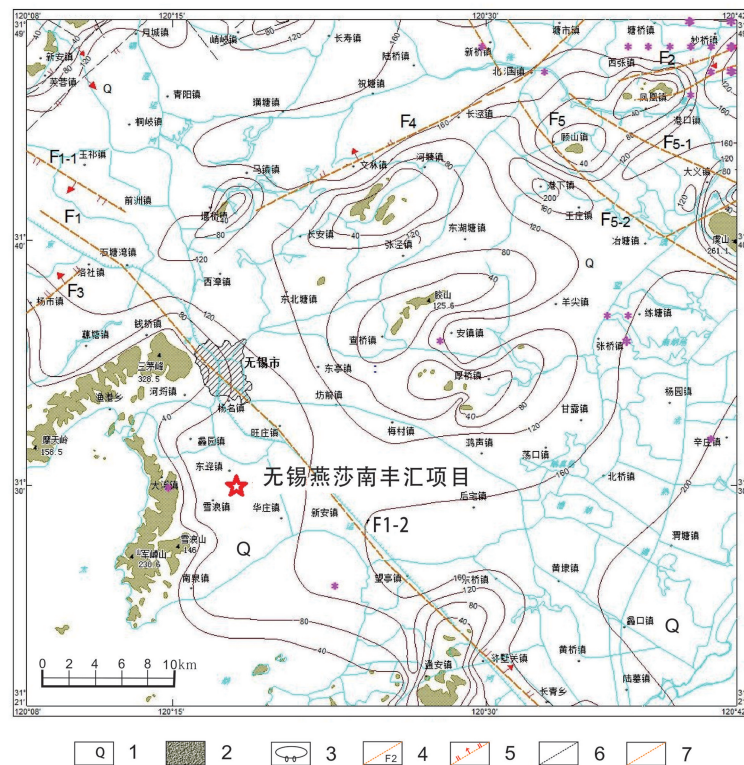


图 1 近场区地质构造图

Fig. 1 Map showing geological structures near the engineering site

1. 第四纪
2. 白垩纪前基岩露头区
3. N+Q 等厚线(m)
4. 主要断裂及编号
5. 正断层箭头倾向
6. 前第四纪断裂
7. 早、中更新世断裂

区域资料显示,地层层面向南西倾,倾角较缓,多在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间。裂隙发育,岩体破碎,由于基岩埋深较大,故岩体受上部岩土体自重应力作用,其结构面闭合度一般。场区内岩溶主要发育于三叠系青龙群地层中,主要有三个时期,即白垩纪以前、古近纪一新近纪及第四纪。岩溶发育的深度和方向受断裂构造控制,区内断裂构造有压性、压扭性,也有张性、张扭性,以压性和压扭性断裂构造为主。场区岩体中岩溶多沿裂隙发育,钻孔岩芯显示多个物探孔有溶蚀现象,部分钻孔岩溶较为发育,形成溶洞。但溶洞的规模、分布情况、充填情况等未有记载,直接在此地基上建超高层建筑将存在安全隐患。

2 研究方法

本次探测共完成了36个物探钻孔,钻孔间距为10 m左右,采用一孔与周围多孔联合测量方式选择100条测线,布孔及测线布置见图2。本次采用跨孔地震CT法对溶洞和岩体破碎位置进行探测,即选择在一钻孔内发射,另一个钻孔内接收。跨孔地震勘探数据记录系统采用具有高灵敏度、性能稳定的瑞典

RAS24 便携式数字地震仪,检波器采用重庆地质仪器厂生产的检波器(主频100 Hz),震源选择湖南奥成科技有限公司生产的电火花震源,激发电压最高达10 kV。激发和观测系统如图3所示,井孔深度一般110 m。井内布置一串12个检波器接收,道间距1 m,记录长度0.2 s,采样间隔0.125 ms;激发孔2内炮点间距为0.5 m,孔2内一点激发,孔1内12个点接收。

波速层析成像是采用弹性纵波在岩体中的传播速度作为目标参量,采用井间观测,通过计算分析弹性波在空间结构的传播速度来推断介质的空间分布情况。

在实测资料的数据处理中,按照数据滤波、拾取初至波走时、反演波速、CT图像成图的步骤进行。其中,CT图反映的是成像剖面内弹性纵波的波速等值线图。CT物探解译技术路线如图4所示。

从本次钻探的钻孔中选取四个钻孔中不同高度位置的十个岩溶充填物样品做比重试验、颗粒分析试验和X射线衍射分析试验,并结合跨孔地震CT结果进行对比分析。

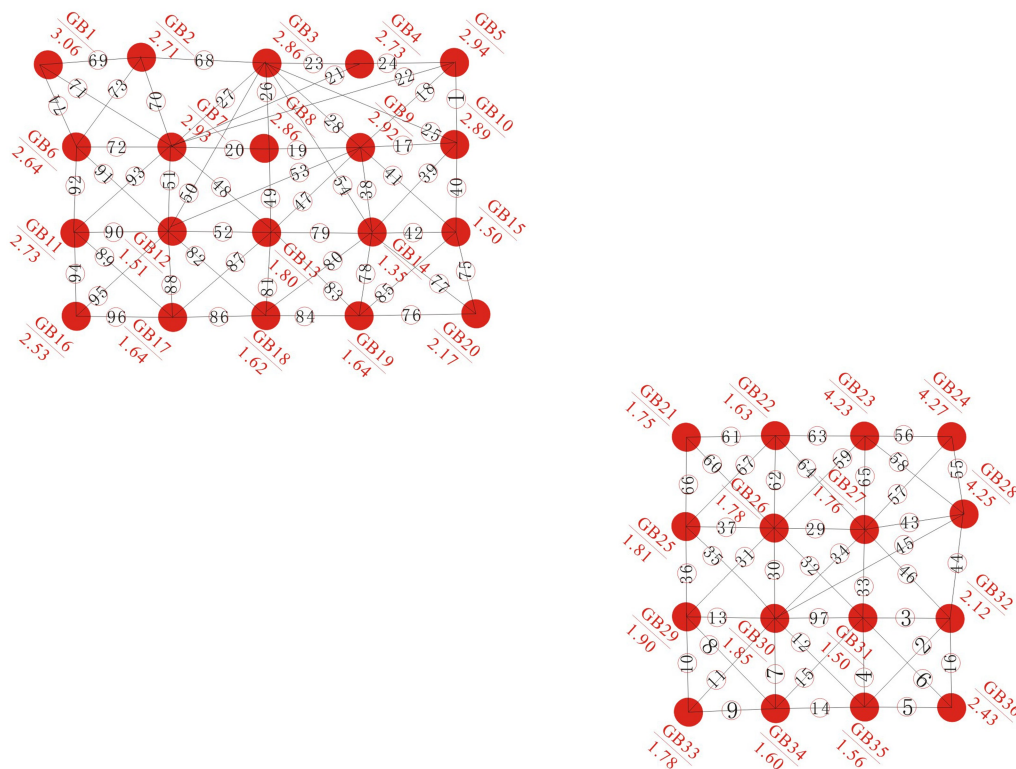


图2 钻孔及测线布置图

Fig. 2 Layout of boreholes and survey lines

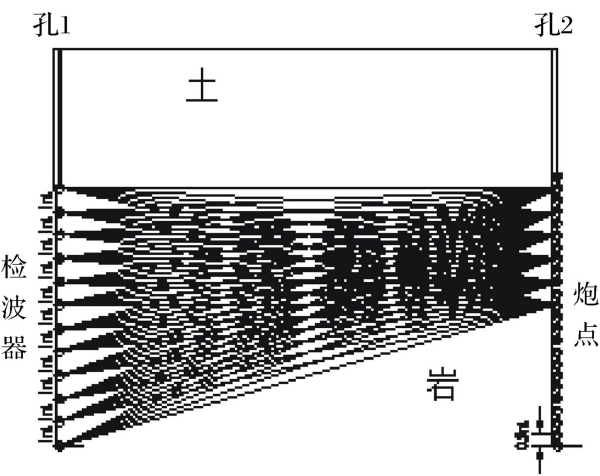


图 3 测线剖面观测系统简图

Fig. 3 Observation system of survey line profile

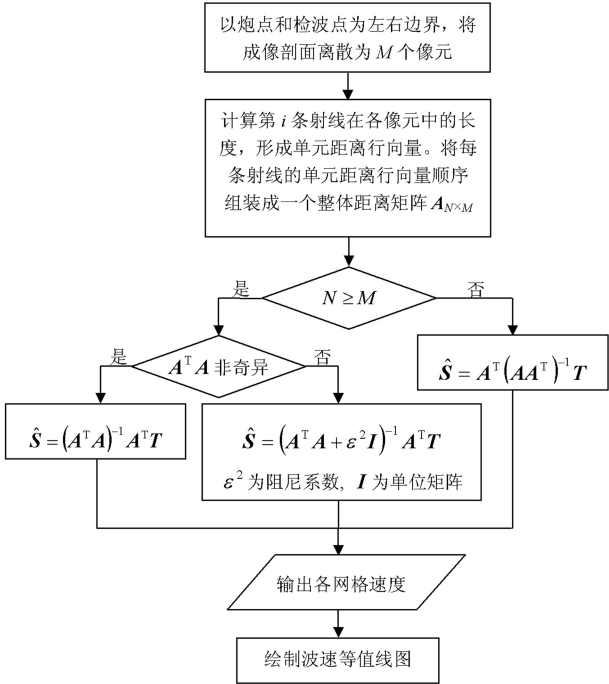


图 4 CT 物探解译技术路线

Fig. 4 Technical route of CT geophysical exploration and interpretation

3 结果与分析

3.1 岩溶发育特征

基岩埋深 76~86 m,土岩界面起伏较大,石芽较为发育,存在古沟壑。通过比较跨孔地震 CT 结果的速度分布和钻孔资料,可以得到孔内各层土层的纵波波速,将现场测试结果与钻探取芯结果进行对比发现(图 5),场地地质异常类型可分为:(1)未充填任何物

质的空溶洞,其纵波速度区间小于 700 m/s;(2)有泥质充填的溶洞,其纵波波速为 700~900 m/s;(3)完整性较好的灰岩,其纵波波速大于 2 100 m/s。取工程场区中某条测线波速等值线图为例(图 6)。GB17—GB12 间岩体波速等值线图共揭示了 7 个地质异常点,根据波速不同分别定义为未充填型溶洞、泥质充填型溶洞和裂隙,如表 1。



图 5 钻孔岩芯

Fig. 5 Picture of drill cores

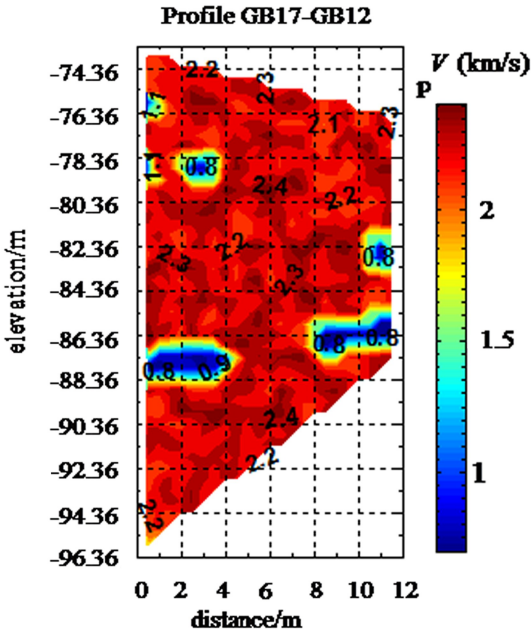


图 6 GB17-GB12 间岩体波速等值线图

Fig. 6 Contours of seismic wave velocity between GB17 and GB12

表 1 测线 GB17—GB12 波速信息
Table 1 Information of seismic wave velocity
between GB17 and GB12

编号	水平距离/m	标高/m	最低波速/m/s	性质
1	0~0.47	-75.55~-76.16	730	泥质充填 型溶洞
2	0~0.46	-78.67~-79.08	740	泥质充填 型溶洞
3	0~3.92	-86.74~-87.91	750	泥质充填 型溶洞
4	0~0.4	-95.32~-96.16	1 760	裂隙
5	2.43~3.23	-78.15~-79.01	770	泥质充填 型溶洞
6	10.47~11.21	-81.76~-82.83	750	泥质充填 型溶洞
7	8.15~12.41	-85.28~-86.34	760	泥质充填 型溶洞

跨孔地震 CT 试验解译结果发现,地基下部灰岩段岩溶比较发育,经对 97 条测线波速解译结果统计分析,共发现 274 处溶洞,其中 254 处溶洞被充填,充填率为 92.7%;239 处溶洞面积小于 2 m²,占总数的 87.2%。发现 271 处岩体破碎带,破碎带范围一般小于 3 m。溶洞和破碎带大多处于距地表 80 m 以下。场地岩溶数量汇总表如表 2。

表 2 场地岩溶数量汇总表
Table 2 Summary of karst amounts in the site

场地	溶洞数量	裂隙带数量
东侧(GB21—GB36)	104	122
西侧(GB1—GB20)	170	149

此场区断层为一压扭性逆断层,该断层形成于三

叠纪中期。一般而言,压性或压扭性断层的压迫力使断层面的断层泥、断层破碎带等结构比较紧密,透水性较差,易形成不透水或弱透水层,不利于岩溶的发育。但根据阎长虹等^[20]的研究,压性断裂的上盘在后期引张作用下也有利于岩溶的发育。研究区域是位于该断层的上盘,从勘查结果来看,此场区内岩溶发育数量较多。

研究区地下水埋深较深,部分溶洞中有方解石晶体和水锈,曾经为一含水层,溶洞与水流的联系密切,且断裂构造作用下岩石裂隙发育,为地下水提供了有利通道。根据勘测结果,串珠状溶洞较常见,即溶洞在垂直方向上具有多层性。但由于上覆第四系土层及基岩很厚,影响了降水入渗,不利于岩溶发育,因此场地内溶洞发育规模不大。

3.2 岩溶充填特征及来源

选取 10 个岩溶充填物样品,分别来自 26 号钻孔、28 号钻孔、34 号钻孔、36 号钻孔,并进行编号、试验。四个钻孔呈正方形分布,相隔 20 m 左右,岩芯取样完整,具有一定代表性。表 3 为所选溶洞充填情况汇总。

从上述表格中可以看出,同一个钻孔在不同高度有不同规模的溶洞,在垂直方向具有多层性。根据物探结果,溶洞的面积均小于 2 m²,规模较小。溶洞充填物均为硬塑泥质土,很坚硬,由于体积不规则,原状样无法做强度试验,但根据同类试验及参考文献,其承载力一般大于 150 kPa,根据《建筑地基基础设计规范》^[21],发育规模较小^[22],且埋深距基底较大的充填岩溶,可不考虑充填岩溶对地基稳定性的影响;但发育规模较大的充填岩溶或空腹岩溶,要进行一定的工程处理,以满足超高层建筑地基稳定性的需求。

表 3 溶洞充填情况
Table 3 Information of cave fillings

钻孔编号	溶洞编号	溶洞埋深/m	溶洞面积/m ²	充填状态	比重	矿物成分	基岩埋深/m
26 #	R01	82.2	1.88	硬塑泥质全充填	2.732	石英、方解石、斜方钙沸石	81.2
	R05	89	0.56	硬塑泥质全充填	2.733	石英、方解石、斜方钙沸石	
28 #	R02	82.7	0.64	硬塑泥质全充填	2.689	石英、斜方钙沸石	82.2
	R09	85	0.42	硬塑泥质全充填	2.670	石英、斜方钙沸石	
	R10	87	0.15	硬塑泥质全充填	2.730	石英、高岭石	
	R03	70	0.66	硬塑泥质全充填	2.719	石英、方解石、斜方钙沸石	
34 #	R06	78	1.90	硬塑泥质全充填	2.667	石英、方解石	82.7
	R07	81.2	1.97	硬塑泥质全充填	2.724	石英、方解石	
	R08	88.5	0.41	硬塑泥质全充填	2.668	石英、碳酸钙珍珠石、高岭石	
36 #	R04	82	0.21	硬塑泥质全充填	2.724	石英、斜方钙沸石	81.1

通过对充填物的矿物质分析可知,充填物主要以石英和方解石为主,部分充填物中含有斜长钙沸石、高岭石及珍珠石等,充填物的颜色以灰色、深灰色为主。同时取溶洞上部基岩的样品做 XRD 分析,基岩为青龙群灰色、深灰色、肉红色灰岩,灰岩成分以方解石为主,

含有少量的石英、粘土矿物等。经对比发现,充填物矿物成分、比重和岩样颜色均与部分上部溶洞一致。所以可断定岩溶充填物来自于基岩的溶蚀和剥落。

将同一钻孔垂直方向的岩溶充填物、同一埋深不同钻孔的岩溶充填物做对比,如图 7。

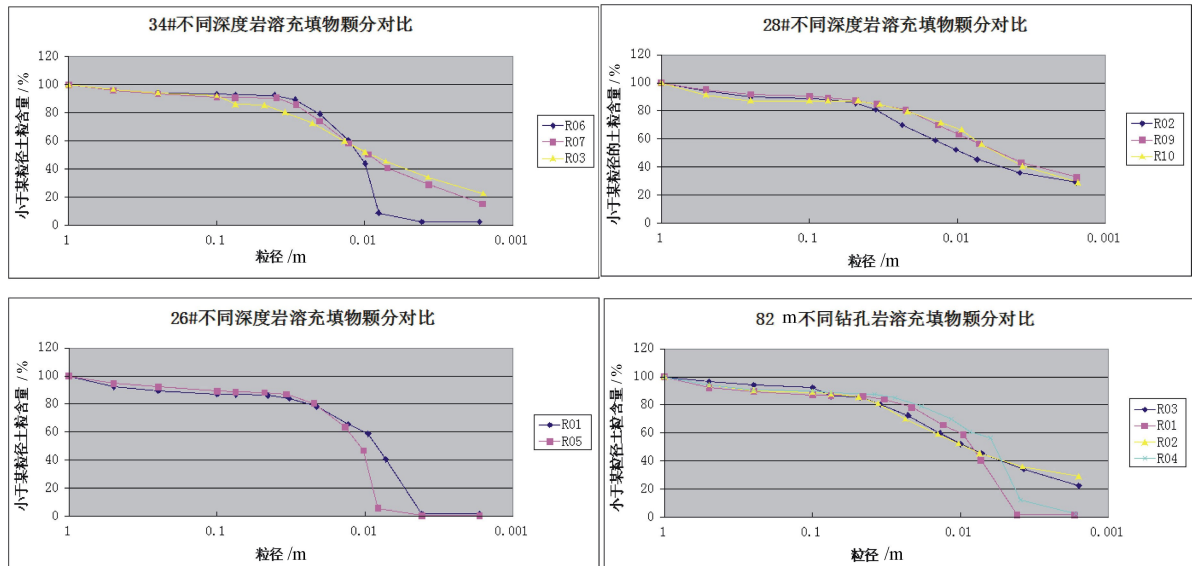


图 7 筛分后充填物颗粒级配对比曲线(样品编号与表 3 编号一致)

Fig. 7 Comparison of grain size distribution for fillings after screening (sample number is the same as Table 3)

比较 34# 中的颗分曲线,可以发现 R07 和 R03 的曲线基本重合,粒径大小及含量十分接近,说明二者具有相近的颗粒来源;R06 的粒径在 0.05 mm 处有一个陡降的过程, R06 中粒径大小在 0.01 ~ 0.05 mm 的含量所占比较高,接近 80%,颗粒以黏粒为主。28# 中三条曲线的走势基本相同,但 R09 和 R10 两条曲线更为接近,基本重合,说明 28# 中垂直方向颗粒有相近来源,且存在连通通道。26# 中两条曲线在粒径大于 0.025 mm 时曲线基本重合,但由于大于 0.025 mm 粒径的颗粒含量较少,只有不到 20%,在实验过程中误差可能较大,故 R01 和 R05 中粒径大于 0.025 mm 的颗粒不作比较。比较 82 m 处不同钻孔的四条曲线发现,颗粒粒径大于 0.05 mm 时基本重合,但由于大于 0.05 mm 粒径的含量较少,接近 20%,故粒径大于 0.05 mm 的部分不作比较,小于 0.05 mm 粒径的颗粒含量四条颗分曲线的区别比较明显,但其中 R03 和 R02 两条曲线基本重合。经过分析比较,且结合图 5 等相关波速等值线可以确定,各溶洞在水平和垂直方向没有大的连通通道,不会发育成更大的溶洞从而对地基稳定性造成威胁。

在做颗粒分析实验时^[23]发现烘干后的土样残余物中有部分磨圆度很好的球状锰结核,硬度不大,粒径

在 0.5~2 mm 之间,而锰结核一般表面粗糙;充填物中的斜方钙沸石属于水合硅铝酸钙矿物,通常是在有水的情况下生成;同时在充填物中发现水锈。上述三种现象可推测隔水层下部曾经受过水流的作用,是含水层(溶洞上覆基岩为不透水层或弱透水层,作为隔水层),充填物中的颗粒受冲刷作用,结核具有较好的磨圆度,也有利于形成斜方钙沸石及水锈。后期因为各种原因水位埋深不断下降,目前溶洞缺少水的作用,故该处溶洞不会进一步发育对上部地基造成威胁。

4 结 论

(1)工作区溶洞分布具有垂直方向多层性,溶洞较多但发育规模较小;溶洞填充率较高,多数为硬塑泥质全充填,根据相关试验、文献,可不考虑充填岩溶对地基稳定性的影响,可作为高层建筑的持力层。

(2)根据试验对比发现,溶洞充填物的矿物质成分基本相同,且与基岩一致,岩溶充填物来源部分为上覆基岩的剥蚀作用,溶洞间不存在大的连通通道,不会对上部地基稳定性造成威胁。

(3)工作区基岩下部曾经存在一含水层,目前水位已下降至勘测溶洞下,溶洞对上部地基威胁变小。

参考文献

- [1] 胡广韬,杨文元.工程地质学[M].北京:地质出版社,1987.
- [2] 蒋忠诚.我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J].中国岩溶,2010,29(4):350—354.
- [3] 林培源.岩溶地基的病害与灌浆处理[J].岩石力学与工程学报,1987,6(1):57—63.
- [4] 付博.昆明小哨机场航站楼区岩溶发育特征及地基稳定性评价[D].成都:成都理工大学,2008.
- [5] 唐基禹.岩溶矿区溶洞充填物突出的机理及防治[J].化工地质,1983,9(1):48—53.
- [6] 李明波.岩溶管道充填物结构特征及成因分析[J].人民黄河,2011,33(4):144—146.
- [7] 白明洲.宜万铁路八字岭隧道岩溶管道冲击物特征实验研究[J].工程地质学报,2007,15(1):16—21.
- [8] 王宝清,王凤琴,魏新善,等.鄂尔多斯盆地东部太原组古岩溶特征[J].地质评论,2006,80(5):700—704.
- [9] 施泽进,夏文谦,王勇,等.四川盆地东南部茅口组古岩溶特征及识别[J].岩石学报,2014,30(3):622—630.
- [10] 任美镒.岩溶学概论[M].北京:商务印书馆,1983.
- [11] 蒋良文,易勇进,贾中明.圆梁山隧道毛坝向斜埋深大型充填溶洞及其形成机制分析[J].铁道工程学报,2007,103(4):53—60.
- [12] 王建秀,杨立中,刘丹.铁路岩溶塌陷典型概念模型研究及实例分析[J].铁道工程学报,1999,(4):75—80.
- [13] 唐大荣.地面岩溶塌陷的高分辨率地震勘察[J].物探与化探,1994,18(1):35—39.
- [14] 刘保金.浅层地震勘探在岩溶调查中的应用效果[J].物探与化探,1996,20(6):474—477.
- [15] 李建来.水利水电工程物探的技术方法及其应用[J].水利科技,2000,(4):49—51.
- [16] 王玉海.井地地震CT技术在岩溶勘查中的应用研究[D].南京:南京大学,2011.
- [17] 桑琴,黄静,程超,等.蜀南地区茅口组古岩溶地貌与缝洞系统发育关系研究[J].中国岩溶,2012,31(2):212—219.
- [18] 蒲俊兵.重庆地区岩溶地下河发育与分布的基本特征[J].中国岩溶,2013,32(3):266—279.
- [19] 罗小杰.试论武汉地区构造演化与岩溶发育史[J].中国岩溶,2013,32(2):195—202.
- [20] 阎长虹,王玉英,罗国煜.压性构造对岩溶发育的控制作用:以贵州普定地区为例[J].地质评论,2008,54(3):343—347.
- [21] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].北京:北京建筑工业出版社,1988.
- [22] 邵勇,阎长虹,许宝田,等.小型溶洞对隧道稳定性的影响分析[J].地质评论,2012,58(2):519—525.
- [23] 李生林.土工试验原理及方法[M].南京:南京大学出版社,1994.

Development characteristics of buried karst under a foundation in Wuxi and sources of karst fillings

LI Xiao-nan^{1,2}, YAN Chang-hong¹, XU Bao-tian¹, DUAN Cheng-long¹, ZHOU Yin-kang¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Xinjiang Energy Power Design & Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The development characteristics of burial karst and sources of the karst fillings are very important for choosing the location of super-high buildings and bearing strata. This study employed the cross-hole seismic CT method to detect the caves and fracture zones of a foundation in Wuxi, and made indoor tests on samples of the karst fillings from the typical karst caves. Combined with the in-situ geological conditions, this paper presents a qualitative analysis of the scale, distribution and development characteristics of the karst and the sources of fillings which are more than 80 meters below the foundation. The results show that the karst is of a small size, the area of most caves is less than 2 m², and there are many layers in the vertical direction. The rate of cave filling reaches 92.7%, and the caves are mostly filled with hard plastic mud which has a large bearing capacity and can be used as the bearing layer of foundation. XRD analysis of mineral composition shows that the minerals of different cave fillings are generally the same, consistent with those of the overlying bedrock. Thus, the denudation of overlying bedrock is the main source of these fillings. There is no large connective channel between the caves, and the underground water level has dropped below the caves. It is therefore concluded that these caves will not further develop and pose no threat to the stability of the foundation. The results of this study will provide reference for the site selection, design and construction of super-high buildings, karst detection, stability analysis of foundations and the treatment of unfavorable geological bodies in the Suzhou-Wuxi-Changzhou areas, which are located on deep karst foundation.

Key words: burial karst; cross-hole seismic CT method; karst cave; sources of fillings; bearing layer

(编辑 吴华英)