

陈家祠广场地下空间基坑围护工程设计

潘 健, 周 森*

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 陈家祠广场地下空间工程具有开挖面积大、地质条件复杂、周边临近世界文化遗产和城市轨道交通线、工期紧等特点。立足于安全、可行、合理的设计与施工原则, 重点进行了基坑围护结构方案比选分析, 深入设计了以旋挖桩与内衬墙相结合的“桩墙合一”、以地下层楼盖结构为水平内支撑的逆作法围护结构。对基坑工程的不确定性因素进行了分析, 选取支护结构变形特性的可靠度指标, 运用蒙特卡洛有限元方法计算了围护结构失效概率。工程项目如期安全实施, 实现了为保证 2010 广州亚运会圆满成功提出的要求, 表明“桩墙合一”的逆作法方案及其各项设计参数对于陈家祠广场地下空间基坑围护工程是可行的。

关键词: 陈家祠广场; 基坑工程; 方案比选; 逆作法; 安全评估

中图分类号: TU437.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S1-0135-06

作者简介: 潘 健(1963-), 男, 广东广州人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程设计和风险分析工作。E-mail: cvpan@scut.edu.cn。

Design of support structures for foundation pit of underground space of Chen Clan Academy Cultural Square

PAN Jian, ZHOU Sen

(College of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The underground space project of Chen Clan Academy Cultural Square adjacent to world cultural heritage and urban rail transit lines is characterized by large excavation face, complex geological conditions and limited construction period. Based on the design and construction principles of safety, feasibility and rationality, different support structures for foundation pit are analyzed and compared. The top-down construction method featured with spun digging pile-lining wall interaction and basement floor system working as the horizontal interior bracing is elaborately designed. Through discussing uncertainties of the foundation pit, the reliability index on the basis of deformation of support structures is established, and the failure probability of support structures is calculated by Monte-Carlo FEM. The project is carried out safely and on schedule, satisfying the requirements put forward with the purpose of ensuring the 2010 Asian Games successfully held. It is indicated that pile-wall interaction with adverse construction as well as the relevant design parameters is reasonable and adequate to the support structures for the foundation pit of Chen Clan Academy Cultural Square.

Key words: Chen Clan Academy Cultural Square; foundation pit; scheme selection; top-down construction method; safety assessment

0 引 言

随着城市中心地带用地紧张的加剧, 城市建设向地下发展的力度也逐步加大。北京、上海、深圳、广州、武汉、重庆、天津等 20 余个大中城市相继开始或完成了以城市地铁、商业街等为主体的地下空间开发规划和大型设施的建设^[1]。在城市繁华闹市区进行深基坑开挖往往会面临施工场地狭小, 周边环境复杂等问题。此类情况下, 除保证基坑开挖过程中基坑自身安全性之外还要在设计阶段充分考虑基坑开挖对周围

建筑物(构筑物)的影响, 以选择合理的支护方案和制定详细的监测方案^[2]。陈家祠广场地下空间工程基坑围护设计面临开挖面积大、地质条件复杂、周边场地狭小、工期紧、临近历史古迹和地铁线等突出问题, 如何设计一个能够在规定时间内完成项目施工并保证周边安全的基坑围护工程是本文探讨的主要课题。

收稿日期: 2011-04-20

*通讯作者

1 工程概况

1.1 工程背景

陈家祠广场（全称“陈家祠岭南文化广场”）扩建后由陈家祠与周边绿化广场组成，占地约 70000 m²，是集岭南传统建筑艺术、民间传统工艺展示、群众文化活动中于一体的城市文化广场。新广场的改造按照北京故宫的“一园一轴”传统结构规划，同时延续岭南古祠堂“五间三进”的轴线，形成前区和后区。前区为占地约 10000 m²的绿化广场及相关配套设施，将陈家祠的全貌凸显出来；后区为广场扩建二、三期工程，用于发展博物馆、画室、“西关”小吃商铺等文化产业。前庭广场则初步设计修建占地面积为 10000 余 m²的两层地下停车场及配套交通设施，预计提供近 600 个公共停车位，用以缓解景区“停车难”的问题。

扩建前，整个陈家祠旅游区仅由陈家祠博物馆和市民广场组成。景区范围偏小，旅游项目单一，“西关”文化内涵发掘不够，致使景区旅游氛围不足；虽然陈家祠享誉海内外，但其正前方却被一所中学遮挡，周边又聚集着杂乱无章的破旧民居、仓库、商铺等，居住使用条件差、配套设施滞后。为此，需要根据“以陈家祠为核心，打造岭南文化片区”的功能定位和“四街一区”迎亚运工程的规划，对陈家祠广场及周边环境进行综合整治，着力打造一个具有岭南建筑特色和人文气息，集旅游、休闲、文化、娱乐于一体的陈家祠岭南文化广场。

1.2 周边环境条件

所建工程项目位于广州市荔湾区中山七路与康王北路交汇处，北侧毗邻陈家祠，南侧紧邻地铁一号线，西侧与荔湾区人民政府大楼相邻，东侧与地铁八号线

相邻。场地西侧的市三十二中学已经人工拆迁平整。建筑±0.000 相当于广州城建高程 7.37 m，地下空间基坑顶标高为-0.07 m，底标高为-12.170 m，开挖深度为 12.100 m，设计等级为一级^[3]。基坑北侧与陈家祠相距约 22 m，顶边距用地红线约 4.80 m；南面临近中山七路，顶边距用地红线最短约 23.9 m，紧邻地铁一号线，顶边距地铁车站主体内边线最短约 8.98 m；西侧距荔湾区人民政府大楼约 22.6 m，顶边距用地红线约 3.10~5.50 m；东侧与地铁八号线相邻，顶边与地铁车站主体内边线最短约 8.15 m，工程场地及周边环境如图 1 所示。

1.3 工程地质与水文地质条件

根据钻探揭露的情况，场地土层主要由人工填土①、淤泥层②、第四系残积层③、白垩系上统沉积岩层④组成，基岩为白垩系上统泥质粉砂岩。场地代表性土层分布及物理力学指标如表 1 所示^[4]。

表 1 场地土层分布及物理力学指标

Table 1 Strata and physical and mechanical parameters of soils

土层编号	土层名称	层厚 h/m	黏聚 强度 c/kPa	内摩 擦角 φ/(°)
① ₁	混凝土层	0.20~0.80	—	—
① ₂	杂填土	0.90~5.70	10	10.0
②	淤泥	0.60~8.10	4	4.1
③ ₁	粉质黏土	0.80~13.30	24	14.0
③ ₂	含砂粉质黏土	0.70~6.90	35	17.0
④ ₁	全风化泥质粉砂岩	2.00~7.20	37	17.0
④ ₂	强风化泥质粉砂岩	0.60~5.70	100	32.0
④ ₃	中风化泥质粉砂岩	0.60~10.10	300	33.0
④ ₄	微风化泥质粉砂岩	2.10~14.70	500	35.0

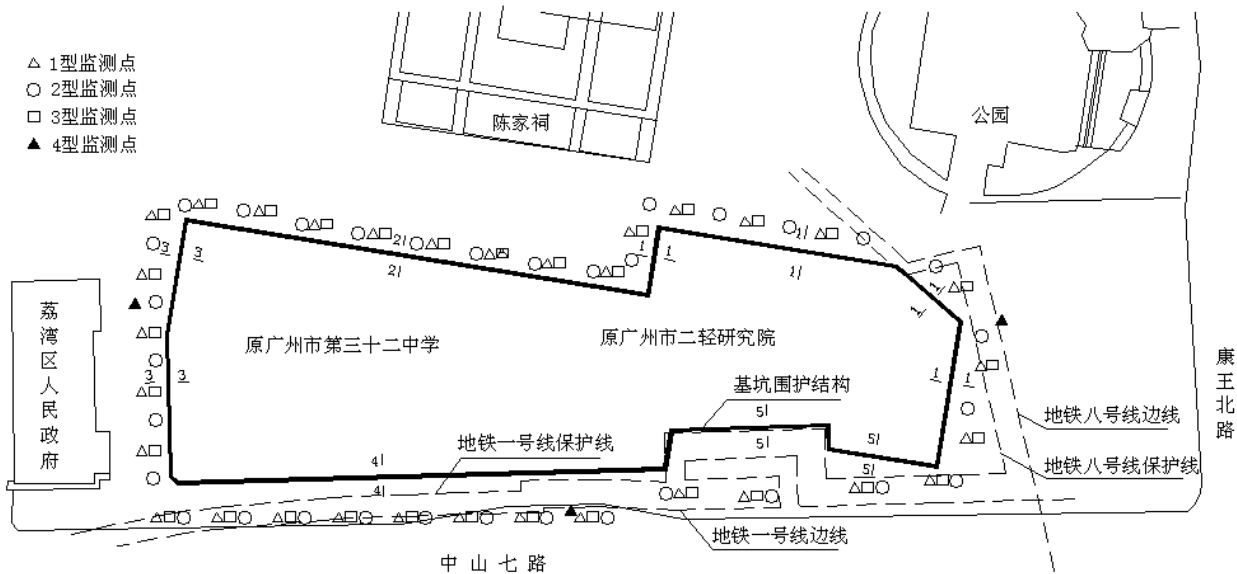


图 1 陈家祠广场地下空间工程场地及周边环境示意图

Fig. 1 Surrounding space and layout of excavation of underground space project

按含水介质及埋藏条件,场地地下水属基岩裂隙水及上层滞水。顶部人工填土层①属上层滞水含水层。层②淤泥、层③₁粉质黏土、层③₂含砂粉质黏土和层④₁全风化带属细粒土,含水贫乏,属相对隔水层。基岩裂隙水主要赋存于层④₂强风化泥质粉砂岩及层④₃中风化泥质粉砂岩,具承压性、各向异性,在节理裂隙较发育的地段赋存丰富,透水性强。层④₄微风化泥质粉砂岩,岩体较完整,裂隙不发育,透水性较差,含水率不大。地下水的补给来源主要是大气降水及侧向迳流补给。地下水的水位受大气降水影响较大,雨季地下水位上升,旱季地下水位下降。

1.4 施工条件

地下空间工程基坑周长为 532.7 m,面积为 10442.6 m²。场地经过拆迁平整后,勘察工作于 2009 年 10 月完成,基坑围护设计施工图需要在 2010 年 2 月提交。2010 年 11 月,第 16 届亚运会在广州举行。为确保亚运各项工作顺利进行,相关文件要求亚运期间全市建筑工地的停工时间为 9 月 30 日至 12 月 22 日,对于亚运会前不能完成的项目要立即停工并做好场地清理工作。工程项目施工的有效工期只有 6 个月,基坑围护工程是整个项目的难点,常规施工工期需要半年时间,且需要连续作业,一旦停下来,不但存在安全隐患,而且影响工程质量。

2 基坑支护方案比选分析

2.1 工程特点

项目位于广州市城区中心地带,是最有名的商业繁华区之一,康王路和中山七路是两个重要的商业地带;地铁一号线、八号线和陈氏书院位于场地周围;施工阶段正值广州市“迎亚运”的关键时期。因此工程在客观上面临着周边场地狭小、文物古迹保护及地铁运营影响、工期紧张等特点。根据工程勘察结果以及周边工程项目施工经验来看,场地地质主要问题是淤泥层分布较广,基坑深度影响范围内的土层含砂比例较高,在高水头作用下容易发生土体渗流破坏,引起周边场地和建筑物沉降破坏。

2.2 基坑围护结构选型

基坑围护工程工法形式可以分为顺作法和逆作法两种。顺作法包含的围护结构类型主要有放坡开挖、土钉支护、水泥土重力式挡墙、板式支护体系等。逆作法的主要结构类型有地下连续墙(亦可顺作)、密排桩与内衬墙组成的“桩墙合一”体系^[5]。

(1) 板式支护体系

板式支护体系总体上可以概括为基坑周边围护体+坑内支撑体系。围护体常用类型有钢板桩、型钢水泥土搅拌墙和钢筋混凝土灌注排桩等。坑内支撑体系常见有钢筋混凝土支撑、钢支撑和锚杆体系等。

a) 钢板桩支护

通常采用定型轧制的钢板桩连续构件布置,并通过构件边缘设置的通长锁口相互咬合,形成既能止水又能共同承力的连续壁。施工简单,投资经济,但由于其本身刚度较小,变形控制能力较弱,通常结合钢支撑或锚拉杆构成共同作用体系。

b) 型钢水泥土搅拌墙(SMW工法)

它是在水泥土搅拌桩形成的初期插入 H 型钢、槽钢或拉森板桩等芯材形成的同时具有支护和防渗功能的围护型式。水泥土搅拌桩和型钢相互作用使两者的优势增强,能够满足深坑较大水平力的支护需要。工艺操作简单,质量控制方便,施工过程对周边环境的影响小,钢材可回收利用,经济效益较好^[6]。

c) 钻孔灌注排桩

排桩在基坑围护类型中应用较为广泛,具有刚度大、抗弯能力强、变形相对较小的优点,可做到工程桩与支护桩共用,经济效益较好。施工时无震动,对周围临近建筑物影响较小。由于本文基坑开挖深度较深,因而悬臂式排桩围护结构已不适用,排桩+内支撑体系就成为选型的重点。受场地限制,基坑顶边距用地红线最短约 3.10 m,为避免因侵占红线外的地下空间引发一些后续不必要的纠纷,排桩+锚杆体系方案可排除,着重考虑排桩+混凝土支撑体系。排桩+混凝土支撑体系,除具有排桩围护自身优点外,还能够充分发挥混凝土支撑主要发挥抗压作用的材料特性,对机械化要求程度不高,占用场地较少,施工费用较低,结构安全性好,施工便于控制。

(2) 逆作法

逆作法利用主体工程地下结构作为基坑支护结构,并采取地下结构由上而下的设计施工方法,围护体、支撑及立柱可以与结构主体部分结合起来。逆作法的优点是:①围护体、支撑及立柱均采用主体结构,可避免材料浪费,经济效益较为显著;②地下室自身结构层梁板作围护结构内水平支撑,可以获得较大的水平刚度,利于控制变形,保护周边环境,同时也避免了支撑设置和拆除产生的二次变形对周围环境的影响;③可缩短施工周期,施工现场文明,有利于城市建设。

目前,国内深基坑采用逆作法施工的围护结构使用最多的是地下连续墙。对于市区建筑密度大,临近建筑物及周围环境对沉降变形敏感,施工场地狭窄,施工工期紧张,软土地基大面积的 3 层或多于 3 层的

地下室结构施工是十分有效的^[5]。采用逆作法施工的地下连续墙，比较符合本文基坑的工程特点，是可以采用的方案。不足之处是，地下连续墙的造价相对较高，从文中基坑的地质条件来看，淤泥层的平均厚度约 4.03 m，仅局部达到 8.10 m，且地下室为两层，基坑开挖深度不足 13 m，若全部设置成地下连续墙，则围护结构安全储备的余量过大。逆作法的另外一种围护结构为密排桩与内衬墙组成的“桩墙合一”体系，该方案除具有地下连续墙逆作法的一些优点外，适用于地下室层数小于 3 层的情况，可以节省材料，满足安全、经济、合理的原则。

经多次反复比较论证，最终确定了旋挖桩与内衬墙结合，以地下层楼盖结构作为内支撑的逆作法施工方案。

3 基坑围护结构设计

3.1 支护桩设计

支护桩采用 $\phi 1200@1400$ 的旋挖桩。桩身和冠梁均采用 C30 混凝土、HRB335 及 HRB400 级钢筋现浇。桩身混凝土浇筑应达到桩顶标高以上 $1.2D$ (D 为桩径)，纵向主筋混凝土净保护层厚度为 70 mm；冠梁纵向主筋混凝土净保护层厚度为 50 mm，冠梁浇筑前凿除浮渣至桩身设计标高，将桩身预留纵筋（长度 $\geq 35d$ ， d 为纵筋直径）锚入冠梁。桩型分为 A、B、C 三种，其中剖面 1-1 采用 A 型桩，4-4 采用 B 型桩，2-2、3-3 和 5-5 采用 C 型桩，桩身入土深度根据不同剖面情况深过基底 4~9 m 不等，且进入中风化岩层不小于 0.5 m，剖面 1-1~5-5 划分见图 1，桩身配筋及剖面如图 2、表 2 所示，表中“Ⅲ”表示三级钢筋。除特别注明外，文中钢筋直径、长度与间距、冠梁尺寸、桩径及相关尺寸、长度和厚度单位均为 mm，标高单位为 m。旋挖桩与地下室楼板采用植筋连接^[7]。

表 2 支护桩配筋表

Table 2 Reinforcement of structural piles

桩型	①	②	③
A	32 Ⅲ 28	Ⅲ 12@150	Ⅲ 20@2000
B	32 Ⅲ 25	Ⅲ 12@150	Ⅲ 20@2000
C	32 Ⅲ 22	Ⅲ 12@150	Ⅲ 20@2000

3.2 止水与降水措施

沿支护桩外侧设置双排 $\phi 600@400$ 的搅拌桩止水帷幕，采用 42.5R 普通硅酸盐水泥，水泥用量为 80 kg/m，掺入比为 15%，水灰比 0.5。采用 4 搅 4 喷喷浆法工艺施工，搅拌桩施工提拔速度不小于 0.8 m/min。桩身长度为 14 m，且进入不透水层不小于 1.5 m。为增强截水效果，在每两根旋挖桩间另加一根双管高压旋喷桩。搅拌桩止水帷幕适用于黏土、淤泥质土和粉土地基，止水效果好，造价相对较低。降水采用基坑内井点降水的方法，降水深度控制在基底以下 1 m 左右。止水和降水两者结合，可减少降水的总出水量，缩小降水的影响范围，减少坑外的水位下降及临近地面沉降。

3.3 内衬墙

在支护桩与地下室主体结构间浇筑 400 mm 厚的钢筋混凝土，支护桩内侧桩间土清理后用 C30 混凝土填充并与内衬墙一起浇筑。内衬墙的设置可增强支护桩的强度和刚度，并提高围护结构的防渗性能。1-1 剖面地层分布及支护结构剖面如图 3 所示。

3.4 施工流程设计

基坑围护结构采用逆作法施工，利用首层、地下一层、底板为旋挖桩提供水平支撑。施工流程如下所示：施工止水搅拌桩→施工旋挖桩并作为地下室外墙→施工旋挖桩间旋喷桩→施工基桩并作为地下室框架柱→做地模并施工首层梁板→开挖地下一层土方，然后做地模，施工地下一层梁板→开挖地下二层土方，做垫层、防水层及基础底板→顺序施工地下一层、首层后浇部分梁板。

4 施工监测设计

4.1 基坑监测方案

工程项目在施工过程中挖掘土方卸载、抽水、失水、振动、加载等工序，可能会使临近陈家祠产生变形、倾斜或沉降等现象；地铁隧道设施结构横截面可能产生水平或竖向位移，隧道整体可能产生不均匀纵向变形，隧道结构受影响的局部结构整体可能发生横向或竖向变形；基坑自身各项指标都要在一定的范围内以确保安全性。因此基坑施工应与现场监测相结合，对现场监测所得信息进行分析，及时将信息反馈，做到“信息化施工”。

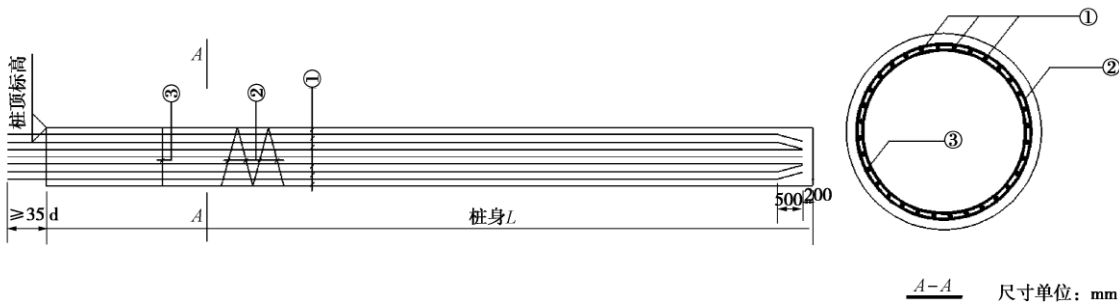


图 2 桩身配筋立面和剖面大样

Fig. 2 Elevation and profile sample of reinforcement for structural piles

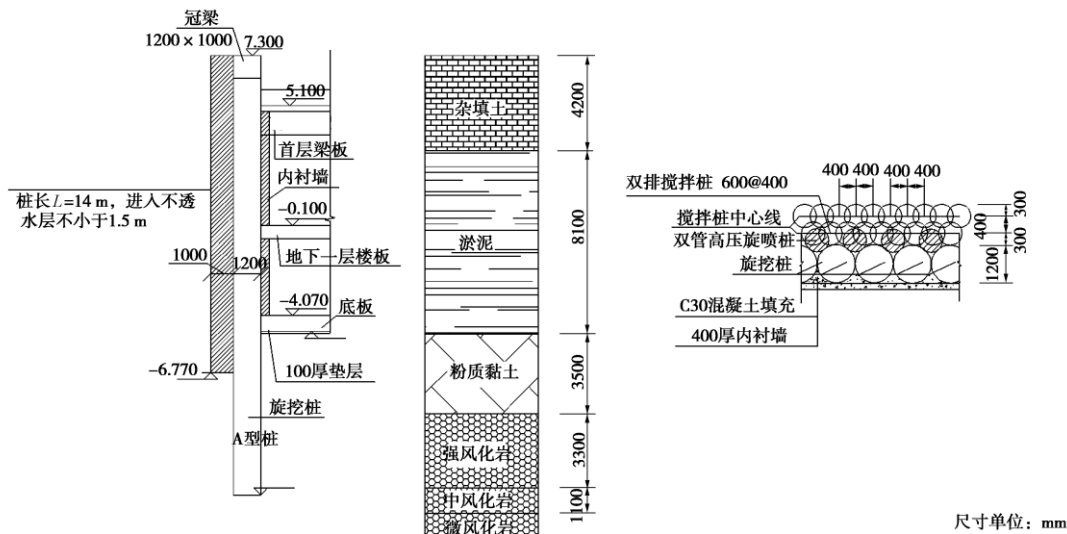


图 3 典型剖面（1-1）地层分布及支护结构布置

Fig. 3 Distribution of soils for typical profile 1-1 and layout of support structures

基坑开挖和地下结构建设至±0.000期间，对基坑支护结构和基坑周边进行支护结构水平位移、支护结构变形、土体侧向变形、地下水位、土压力、桩内力等的监测是基坑监测的关键。支护结构监测内容及监测项目报警值如表 3 所示，监测点 1~4 的具体布置见图 1。

表 3 支护结构监测内容及监测项目报警值

Table 3 Content and alarm values of monitoring

测点 编号	监测项目	位置或监 测对象	测点布置 说明	报警 值
1	支护结构 水平位移	围护结构 上端部	孔间距 15m	24 mm
	支护结构 变形	围护结构 内	同一孔测点间 距 0.5 m	24 mm
2	地下水位	基坑周边	孔间距 15 m	
3	土体侧向 变形	周围土体	孔间距 15 m	24 mm
4	土压力	基坑周围	取 4 点	
	陈家祠、地 铁线变形	陈家祠、地 铁一号及 八号线站 内	由第三方监测 单位根据现场 情况深化设计	
5	桩内力	支护桩	总数的 5%(均 匀取点)	170 MPa

除上表所示的监测内容以外，还要随时检测基坑周围地面超载状况及基坑渗漏水状况。本基坑侧壁安全等级为一级，其位移要求为：①地面最大沉降量≤0.15%H；②围护结构最大水平位移≤0.2%H，且≤24 mm（H 为基坑开挖深度）^[8]。

4.2 应急措施

当发现桩身最大水平位移大于24 mm或变形速率突增大于5 mm/d时，应即刻停止开挖并通知相关人员

现场研究处理。在采取有效措施后才允许继续开挖，施工单位的施工组织设计必须要有可行有效的应急措施；必要时可采取坡顶卸载、纯水泥浆灌填裂缝区域、坡脚反压土堆或沙包、设置预应力锚杆加固地基等处理；保持对周边建筑物及道路沉降及变形观测，若变形异常超过规范容许值，轻微者进行坡顶卸载，严重时需及时疏散相关人员。

5 基坑设计安全性评估

5.1 基坑工程设计的可靠度

基坑场地土体在漫长复杂的地质作用和人类活动的影响下，其工程特性表现出较大的空间变异性。同时由于我们还不能够对土体工程性质、材料性质、荷载作用及效应、计算模型等内容进行十分准确的评判，基坑工程设计中将表现出土性参数不完全确定性、几何尺寸不确定性、荷载不确定性以及计算模型不确定性等。所有这些不确定因素，使得单一的安全系数并不能够完全确切地表征工程的安全程度。

5.2 围护结构变形特性的可靠度指标

由于围护结构是随基坑开挖过程逐渐受载的，因此在不同时间和条件下，围护结构可能对应不同的极限状态方程。以 $X_i(t)$ ， $i=1, 2, \cdots, n$ ，表示基坑支护结构的土性参数、几何尺寸、材料特性、荷载及计算模型等随机变量，则围护结构的工作状态如下所示。

$$Z(t) = g(X_i(t))$$

< 0

失效状态，

$= 0$

极限状态，

> 0

可靠状态。

(1)

根据围护结构的功能要求，围护结构的极限状态

可分为承载能力极限状态、正常使用极限状态和整体稳定极限状态,对应依次引入强度可靠度、刚度可靠度和稳定性可靠度^[9]。强度可靠度、刚度可靠度和稳定性可靠度分别是指支护结构在服务期内满足承载力要求、变形要求及稳定性的概率。可靠度计算的关键是要确定事件失效的判别标准,对于特定的一个基坑围护结构来说,事件失效的模式多且复杂,本文尝试建立围护结构变形特性的可靠度指标。定义围护结构的极限状态为

$$Z(t) = L_{\max} - L(X_i(t)) \quad (2)$$

式中 L_{\max} 表示围护结构允许的最大水平位移,取 24 mm; $L(X_i(t))$ 表示服务期内 t 时刻围护结构水平位移。由于支护结构的变形性状是随着基坑开挖动态变化的,为简化分析,可靠度计算以几个典型工况为对象,采取连续迭代、前后衔接的方法进行。典型工况简述如下:①工况 1 为初始工况,计算土体自重应力场,不考虑土体位移场;②工况 2 为做地模和首层梁板施工;③工况 3 为开挖地下一层土方和一层梁板施工;④工况 4 为开挖地下二层土方和垫层、底板浇筑。

针对本文基坑情况,确定土体黏聚强度 c 、内摩擦角 φ 、旋挖桩直径 D 、混凝土弹性模量 E 、附加荷载 q 为随机变量,运用蒙特卡洛有限元方法计算支护结构失效概率。先初步假定 5 个随机变量的概率分布,然后进行随机抽样并转换为正态分布随机数,将抽样值分组代入功能函数,确定结构是否失效,并据此确定结构失效概率。分析结果显示,工况 1 和 2 的失效概率为 0,表明围护结构最大水平位移没有超过 24 mm;工况 3 和 4 的失效概率计算结果也表明这两种工况下围护结构水平位移超过最大允许水平位移是小概率事件。

6 结 论

(1) 旋挖桩与内衬墙相结合,以地下层楼盖为内支撑的逆作法基坑围护结构设计充分考虑了陈家祠广场地下空间基坑围护工程的特点,设计方案确定与实施过程体现了安全、合理和相对经济的原则。

(2) 围护结构变形的可靠度和失效概率计算结果能够初步反映基坑工程安全性。

(3) 由于施工场地土层的不完全确定性以及基坑开挖可能对陈家祠和地铁线运营产生影响,需要制定合理的工程施工方案。既要保证基坑自身变形的稳定性,又要使基坑开挖对周围建筑物(构筑物)产生的影响处于可控制的安全范围内,做到动态设计和信息化施工。

参考文献:

[1] 张季超,丁晓敏,庞永师,等.广州市城市地下空间开发利

用分析[J]. 工程力学, 2009, 26(增刊 2): 106 - 113. (ZHANG Ji-chao, DING Xiao-min, PANG Yong-shi, et al. Analysis for development and utilization of underground space in Guangzhou[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2): 106 - 113. (in Chinese))

[2] 姚 斌, 吴 坚. 在市中心紧邻地铁和保护建筑的大型深基坑设计与施工[J]. 建筑施工, 2008, 30(6): 428 - 430. (YAO Bin, WU Jian. Design and construction of large and deep foundation pit adjacent to metro and protective building in city center[J]. Building Construction, 2008, 30(6): 428 - 430. (in Chinese))

[3] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

[4] 广州中煤江南基础工程公司. 陈家祠广场及周边环境综合整治工程岩土工程勘察报告[R]. 广州: 广州中煤江南基础工程公司, 2009. (Guangzhou Central Mines Jiangnan Foundation Engineering Corporation. Geotechnical investigation report for comprehensive regulation project of Guangzhou Chen Clan Academy Cultural Square and nearby environment[R]. Guangzhou: Guangzhou Central Mines Jiangnan Foundation Engineering Corporation, 2009. (in Chinese))

[5] 龚晓南, 高有潮. 深基坑设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Design and construction handbook for deep foundation pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))

[6] JGJ/T199—2010 中华人民共和国住房和城乡建设部. 型钢水泥土搅拌墙技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (JGJ/T199 — 2010 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for soil mixed wall[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))

[7] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))

[8] DBJ/T15—20—97 建筑基坑支护工程技术规范[S]. 广州: 广东省建设委员会, 1997. (DBJ/T15—20—97 Specification for retaining and protection in building excavation engineering[S]. Guangzhou: Construction Committee of Guangdong Province, 1997. (in Chinese))

[9] 边亦海. 基于风险分析的软土地区深基坑支护方案选择[D]. 上海: 同济大学, 2006. (BIAN Yi-hai. Selection of supporting

system for deep excavations in soft soil area based on risk

analysis[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)