

城市建筑地基基础占用空间遥感耦合探测技术方法

李宏钊, 刘长礼*, 吕敦玉, 刘松波, 张云, 卓子钧

LI Hongzhao, LIU Changli*, LYU Dunyu, LIU Songbo, ZHANG Yun, ZHUO Zijun

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China

摘要:城市建筑基础占用了大量的地下空间资源,这部分空间资源的三维分布信息对城市地下空间利用规划必不可少。但这方面的信息往往分散在各个工程建设机构中,不易获取。为解决建筑基础占用地下空间信息难以获取的问题,需探索出一种高效准确的探测技术。通过参考建筑地基基础计算方法,研究出一种建筑地基基础占用空间的测算方法;采用高分辨率遥感信息探测获取地面建筑相关参数,收集分析工程地质勘察资料获取相关岩土参数;将遥感探测、工程勘察获取的参数与建筑基础占用空间的测算方法结合,形成了一套用于测算建筑地基基础占用空间的遥感解译-地质工程相结合的探测技术。在郑州航空港区应用结果表明,该技术操作方便、高效快捷、探测结果准确,能够满足地下空间利用规划需要,有广阔的推广应用前景。

关键词:建筑地基基础占用空间;地下空间资源;遥感耦合探测;遥感解译;岩土工程

中图分类号: TU984.11⁺3; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)05-0798-09

Li H Z, Liu C L, Lyu D Y, Liu S B, Zhang Y, Zhuo Z J. Remote sensing & engineering geology survey technology for detection of occupied space by urban building foundation. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 798-806

Abstract: The foundation of urban building occupies and uses numerous underground resources of space. Therefore, it is essential and significant to use the information of underground space resources' three-dimensional distribution for the urban underground space utilization planning. Nevertheless, the information in this respect is often scattered among various engineering construction institutions, which makes them uneasy to obtain. In order to tackle the problem hard to get the access of some information about underground space occupied by building foundation, it is necessary to explore an efficient and accurate technology for detection. By referring to the calculation method of the rock foundation, a method was developed and advanced to calculate the space occupied by building a foundation. High-resolution remote sensing information was adopted to obtain relevant parameters of ground buildings, collect engineering and geological survey data, and analyze the relevant data to acquire geotechnical parameters. By combining the parameters obtained by remote sensing detection and engineering survey with the calculation method of the space occupied by building foundation, a set of detection technique with the combination of remote sensing interpretation and geological engineering was formed and developed to measure the space occupied by building foundation. The application results in Zhengzhou Airport Area indicate that the technology is convenient to operate, efficient, effective, and accurate. It can completely fulfill the needs of underground space utilization planning with broad prospects for promotion and application.

收稿日期: 2020-07-05; 修订日期: 2021-03-23

资助项目: 中国地质调查局项目《郑州城市地质调查》(编号: DD20189262) 和《黄河流域核心示范区(郑州)综合地质调查》(编号: DD20211309)

作者简介: 李宏钊(1990-), 男, 在读博士生, 地质工程专业。E-mail: 290057684@qq.com

* 通信作者: 刘长礼(1963-), 男, 博士, 研究员, 从事城市地质、环境地质研究。E-mail: 315850110@qq.com

Key words: building foundation space occupied; underground space resources; remote sensing & engineering geology survey detection; remote sensing interpretation; geotechnical engineering

城市化进程快速发展,但面临着发展空间紧缺的严重制约,开拓利用地下空间资源,把城市建在地下已经成为国内外的广泛共识^[1-6]。城市建筑地基基础要占用地下空间资源,尤其中国城市高楼林立,建筑地基基础占用地下空间不仅面积大深度也大,高层建筑基础的建设深度通常超过30 m,而超高层建筑,其地基基础的建设深度甚至可以达到地下50~100 m^[7]。这部分地面建筑的地基基础不仅占用了大量的地下空间,同时在修建地铁、管廊等线性工程时,由于工程跨越空间范围大,往往会与建筑地基基础发生冲突^[8-10]。因此,在进行城市地下空间利用规划时,不仅需要地下空间资源潜力数据,还需要准确获取建筑地基基础占用地下空间资源量与三维分布信息。

由于建筑地基基础自身的建设特点,很难通过实地调查直接获取相关信息,目前最有效的调查方法是收集实际建设资料,但这方面的信息往往分散在各个参与城市建设的工程建设机构中。现阶段除北京、上海等特大城市外,其他城市对相关资料缺乏有效的管理,加之相关法律法规不完善及保密性等原因,资料收集难度大。为解决这一问题,有专家学者尝试利用物探手段对城市内建筑基础建设情况进行探测,但由于城市内干扰较大且物探结果存在多解性,使探测准确性受到很大影响^[11]。部分学者通过统计,提出建筑物基础影响深度与建筑物高度具有一定正相关性,通常情况下建筑物高度越高,其地基基础影响深度越深,并据此提出利用高分辨率遥感解译提取建筑物高度,推算建筑物地基基础影响深度的方法^[12-13]。但实际上,建筑物地基基础的影响深度不仅与建筑物高度有关,还与地基基础类型、工程地质条件、建筑物类型等因素有关,仅依据建筑物高度与建筑基础影响深度的简单相关关系,推测建筑物地基基础影响深度,结果不确定性太大。同时,由于不同地区地质条件、施工条件均存在差异,同一高度建筑在不同地区的地基基础影响深度往往也存在较大差异,因此该方法在其他地区的适用性较低。本文将遥感探测技术、工程地质条件与地基基础占用空间测算方法结合,探索出一套建筑基础占用地下空间的遥感耦合探测

技术,以准确获取建筑地基基础占用地下空间的三维分布信息。

1 遥感耦合探测技术

1.1 研究思路

建筑地基基础占用地下空间指建筑物基础建设范围及影响建筑物安全的地基范围所占用的空间。要确定这部分空间的大小,需要对建筑物基础类型、埋深、尺寸、地基受力层范围等参数进行推算。在建筑物地基基础设计建设过程中,这些参数主要由建筑物荷载、建筑物所在区域的工程地质条件与施工技术手段等因素决定^[14-15]。如果能够获取建筑物上部荷载、建筑物所在区域的工程地质条件,以及实际施工技术手段等信息,就可以较准确地计算出所需的建筑物地基基础参数,并测算出建筑物地基基础占用的地下空间。

本文提出一种方法:利用遥感探测技术获取建筑物的高度、横截面积等信息,以估算建筑物的上部荷载;分析收集到的工程勘察资料,获取建筑物建设区域工程地质条件信息;咨询当地专家并结合实地调查,获取当地常用施工技术手段信息。将获得的信息与建筑物地基基础参数计算理论方法相结合,对建筑物基础类型、埋深、尺寸,以及地基安全范围等参数进行准确推算,进而构建数学模型,以准确推算建筑物地基基础占用地下空间。为提高该方法的可操作性,本文假定所有建筑物为均质棱柱体,基础受到的荷载为中心荷载。

1.2 遥感探测方法

利用遥感探测技术获取建筑物横截面积(A')与建筑物高度(H)的数据信息。

建筑物横截面积数据信息主要通过对卫星获取的高分辨率遥感数据,采用面向对象法进行解译获取。影像图制作参考《遥感平面影像图制作规范》(GB/T15968—2008)执行^[16],校正后的图面误差不超过1.6 mm,与地面控制点间的拟合精度控制在2个像元以内。

建筑物高度信息需要通过对建筑物高度进行反演获取,建筑物高度反演基于太阳、卫星、建筑物和阴影的成像几何关系(图1)。

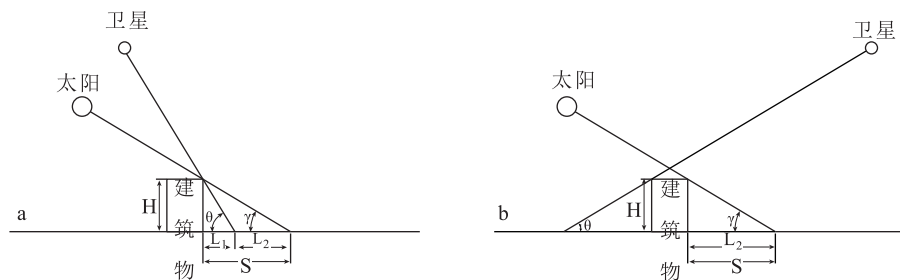


图1 太阳、卫星、建筑物和阴影的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship among sun, satellite, building and shadow

a—太阳与卫星位于建筑物同侧;b—太阳与卫星位于建筑物异侧

当太阳和卫星位于同一侧时(图1-a),阴影的实际长度 $S = H / \tan \theta$,影像上可见阴影长度为 $L_2 = S - L_1 = H / \tan \gamma - H / \tan \theta$,因此可计算建筑物高度 $H = L_2 \times \tan \theta \times \tan \gamma / (\tan \theta - \tan \gamma)$ 。当太阳和卫星位于建筑物两侧时(图1-b),建筑物阴影的实际长度 S 和遥感图上可见的阴影长度 L_2 相等,此时 $L_1 = 0$,阴影面积即为真实阴影面积,建筑物高度 $H = L_2 \times \tan \theta$ 。

在同一幅遥感图像内,卫星参数信息相同,则建筑物高度 H 与阴影长度 L 为正比关系,比例系数为 k ,即 $H = L \times k$ 。则通过实地测量某一建筑物的实际高度,并与影像中阴影的长度 L 建立联系,计算比例系数 k ,就可对遥感图像内其他建筑物高度进行计算^[17-18]。在获得建筑物高度后,根据建筑物层高就可计算出建筑物层数(N)。

1.3 工程地质参数获取

通过收集研究区工程勘察资料,获取区内土体类型、厚度、重度、地基承载力、土体含水率、粘粒含量等工程地质条件指标,分析求取各建筑地基岩土工程参数,为建筑地基基础占用空间测算做准备。

1.4 建筑地基基础占用空间测算方法

以建筑地基基础计算方法原理为指导,利用获取的建筑物信息、工程地质条件、施工情况等信息,按照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)等规范^[19-20],可推算建筑基础的类型、埋深、尺寸、地基受力层深度等参数,建立建筑地基基础占用地下空间计算的数学模型。

1.4.1 地基基础类型确定

利用遥感解译调查获得的建筑物信息,结合工程地质条件、地基岩土工程性质及当地专家意见,确定研究区各类建筑物主要采用的地基基础型式。

1.4.2 建筑物基础埋深主要影响因素

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)相关规定表明,建筑物基础的埋深主要由建筑物类型、有无地下设施及其型式构造、建筑荷载大小和性质、工程地质条件、邻近建筑物基础埋深等因素决定。当满足地基稳定和变形要求前提下,持力层承载力宜大于下层土,基础埋深需要满足建筑地下室建设需求,天然地基上的箱形和筏形基础埋置深度不宜小于建筑物高度的1/15,桩箱或桩筏基础的埋置深度(不计桩长)不宜小于建筑物高度的1/18,基础宜埋置在地下水位以上,存在相邻建筑物时,新建建筑物的基础埋深不宜深于原有建筑基础。依据这些信息,再结合当地工程地质条件和施工经验,便可对建筑物的基础埋深进行推算。

1.4.3 建筑物基础横截面积计算

(1) 独立基础/条形基础围占横截面积计算

对于独立基础或条形基础,其自身尺寸并不等于所占用的地下空间范围,这类基础自身尺寸可能较小。但因其修建通常分布于整个建筑物之下,基础所围占的空间已无规划利用价值。所以这类基础在计算横截面积时,应计算其围占范围的横截面积。通常情况下,这类基础建设范围的最外围修建在建筑物最外侧承重墙或承重柱之下,其所围占范围的横截面积(A)可以近似于建筑物的横截面积(A'),即:

$$A = A' \quad (1)$$

(2) 箱形/筏形基础横截面积计算

箱形或筏形基础的横截面积通常超过建筑物的底面积,不能通过建筑物横截面积直接近似获得,需要通过下列计算才能获得。

依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),基础在中心荷载作用下,需要满足基础底面上的平均压力小于或等于地基承载力特征值,即:

$$p_k = \frac{F_k + \gamma_G A d}{A} \leq f_a \tag{2}$$

式中, p_k —基础底面上的平均压力(kPa); F_k —上部结构传至基础顶面的竖向力值(kN); γ_G —基础及其上回填土的平均重度,一般近似取 20 kN/m³; A —基础底面积(m²); d —基础埋深(m); f_a —修正后的地基承载力特征值(kPa)。

修正后的地基承载力特征值 f_a 可以通过下式计算获得:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) \tag{3}$$

式中, f_{ak} —地基承载力特征值(kPa); η_b 、 η_d —基础宽度和埋置深度的地基承载力修正系数,天然地基土修正系数按基底下土的类别查表 1 取值,复合地基修正系数 $\eta_b=0$, $\eta_d=1$ ^[21]; γ —基础底面以下土的重度(kN/m³),地下水位以下取浮重度; b —基础底面宽度(m),当基础地面宽度小于 3 m 时按 3 m 取值,大于 6 m 时按 6 m 取值; γ_m —基础底面以上土的加权平均重度(kN/m³),位于地下水位以下的土层取有效重度。 F_k 为建筑物传至基础顶面的竖向力值,依据张俊红^[22]、陈建华^[23]的相关研究,结合陈涛^[24]《建筑结构荷载取值经验》提出的经验公式,可由公式(4)计算获得:

$$F_k = q * A' * N \tag{4}$$

式中, q —建筑物荷载效应组合经验值,具体见表 2; A' —建筑物的横截面积; N —楼层层数。

表 1 天然地基土承载力修正系数^[8]

Table 1 Correction factors for bearing capacity of natural foundation

土的类型	η_b	η_d
淤泥和淤泥质土	0	1.0
人工填土	0	1.0
e 或 IL 大于等于 0.85 的黏性土	0	1.0
红粘土	0	1.2
含水比 $\alpha_w > 0.8$	0	1.2
含水比 $\alpha_w \leq 0.8$	0.15	1.4
压实系数大于 0.95、粘粒	0	1.5
大面积压 含量 $\geq 10\%$ 的粉土	0	1.5
实填土 最大干密度大于 2100 kg/m ³	0	2.0
的级配砂石	0	2.0
e 及 I_L 均小于 0.85 的黏性土	0.3	1.6
粉砂、细砂(不包括很湿与饱和时的稍密状态)	2.0	3.0
中砂、粗砂、砾砂和碎石土	3.0	4.4

表 2 建筑物荷载效应组合经验值^[12]

Table 2 Empirical value of load effect combination of buildings

上部建筑结构类型	建筑物荷载效应组合 经验值/(kN·m ⁻²)	备注
框架结构	11~14	当建筑物高度较大时 (大于 20 层);可取上 限值,较低时取下限值
框架-剪力墙结构	12~15	
剪力墙结构	14~17	
框架-核心筒结构	13~15	

结合公式(2)(3)(4),箱形或筏形基础横截面积 A 可以表示为公式(5):

$$A = \frac{q * A' * N}{f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 0.5) - \gamma_G d} \tag{5}$$

1.4.4 建筑物地基受力层深度确定

建筑物地基指基础以下承受建筑上部结构荷载影响的那一部分土体。这部分空间直接影响建筑物的稳定与安全,在地下空间利用时应予以避让,因此这部分空间是建筑地基基础占用地下空间的重要组成部分,为确定这一部分空间占用的地下空间资源量就需要确定其深度。地基主要分为天然地基与人工地基两大类,对这 2 类地基的受力层深度需要通过不同的方法确定。

(1)天然地基受力层深度确定

天然地基是不需要人加固的天然岩土层,依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),条形基础底面以下 $3b$ (b 为基础底面宽度)深度范围为地基主要受力层,独立基础为其下 $1.5b$ 深度范围,且厚度均不小于 5 m(二层以下一般的民用建筑除外),而对箱型基础和筏形基础没有量化指标,为便于计算,并参考实际施工经验,本文将天然地基受力层深度 $Z_{\text{天然}}$ 统一设定为 5 m,以满足规范要求,而对于二层以下一般的民用建筑这一深度可适当降低,受力层深度为 $Z_{\text{天然'}}$ 。

(2)复合地基受力层深度确定

复合地基指部分土体被增强或被置换而形成的由地基土和增强体共同承担荷载的人工地基。对于复合地基,主要受力层为人工处理过的深度范围,其受力层深度 $Z_{\text{复合}}$ 为人工地基处理深度。

1.4.5 建筑地基基础占用地下空间计算

如上所述,建筑地基基础占用地下空间范围($V_{\text{地基基础}}$)包括建筑基础占用空间和地基安全空间占用的范围。通过前文所述方法获得的建筑地基基础埋深、基础尺寸、地基安全空间范围等参数信息,就可以对这部分地下空间范围进行计算,具体计算数学模型见表 3。

表 3 建筑物地基基础占用地下空间 $V_{\text{地基基础}}$ 计算数学模型

Table 3 Calculation formula of underground space resources occupied by building foundation

基础类型	地基处理类型	建筑物地基基础占用地下空间范围($V_{\text{地基基础}}$)
箱/筏形基础	复合地基	$V_{\text{地基基础}} = \left(\frac{q * A' * N}{f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) - \gamma_G d} \right) * (d + Z_{\text{复合}})$
箱/筏形基础	天然地基	$V_{\text{地基基础}} = \left(\frac{q * A' * N}{f_{ak} + \eta_b \gamma (b-3) + \eta_d \gamma_m (d-0.5) - \gamma_G d} \right) * (d + Z_{\text{天然}})$
独立或条形基础	天然地基	$V_{\text{地基基础}} = A' * (d + Z_{\text{天然}})$
二层以下一般的民用建筑独立或条形基础	天然地基	$V_{\text{地基基础}} = A' * (d + Z_{\text{天然}})$

2 应用实例——郑州航空港区建筑地基基础占用空间探测

2.1 郑州航空港区概况

研究区位于郑州市东南,距中心城区约 20 km,为中国首个航空港经济综合实验区,对地下空间需求特别旺盛。航空港区属华北地层区,区域地处山前缓倾斜平原地带,地形地貌总体较简单。区内 50 m 以浅地层以粉砂、细砂、粉土地层为主,地下水位埋深 10~26 m。现阶段,郑州市航空港区主要以地面建设为主,地下空间的开发利用还处于规划阶段,大量地面建筑地基基础在建设过程中已占用大量地下空间。为服务于郑州市航空港区城市地下空间规划,需探明建筑地基基础占用地下空间的三维分布信息。

2.2 遥感探测获取参数

利用遥感探测技术,获取了郑州航空港区建筑物横截面积(A')与建筑物高度(H)信息,以及各类建筑物数量(表 4)。

2.3 岩土工程参数

通过分析收集到的工程地质与岩土工程勘察资料,获取该区工程地质参数,具体结果见表 5。该

区垂向 50 m 深度范围内主要为第四系沉积物,为粉土、粉质粘土、砂土为主的多层结构,其中全新统及上更新统地层厚度小于 20 m,局部为 3~5 m。岩性以粉土、粉质粘土为主,夹 0~2 层粉细砂层,单层砂层厚度一般为 2~6 m,局部可达 20 m,地层分布情况见图 2。该区上部(全新统及上更新统):粉土地层的地基土承载力特征值一般为 110~150 kPa,砂层地基土承载力特征值一般为 150~200 kPa。对于 6 层以下的住宅楼或一般的工业厂房等,采用天然地基就能够满足上部荷载的要求,对于大于 6 层的多层或高层建筑建筑,以及荷载较大的工业厂房等,选择砂层作为持力层,即可满足要求;下部(中更新统及新近系)粉质粘土层地基土承载力特征值一般为 180~250 kPa,砂土地基土承载力特征值一般为 200~350 kPa,下部地层主要作为复合地基持力层。工作区内,没有不良土体分布,各类工程均可以找到适宜的持力层位。

2.4 航空港区建筑地基基础主要类型

通过咨询当地专家与实地调查,总结了研究区内各类建筑物结构类型、地下设施建设情况及地基基础建设特点,具体结果见表 6。

2.5 建筑地基基础占用空间测算

利用获取的建筑物横截面积(A')、建筑物高度(H)等建筑物信息,以及建筑物所在区域的地层分布情况、地基承载力、土体重度等岩土工程参数,结合专家意见及实地调查获取的研究区主要建筑结构类型及其常用地基基础型式等信息,依据表 3 中建筑物地基基础占用地下空间计算数学模型,可对航空港区建筑物地基基础占用地下空间进行计算。为了验证方法的准确性,收集部分建筑物的实际建设资料,并与本文提出的建筑地基基础占用地下空间遥感耦合探测技术方法计算结果进行对比,典型建筑物

表 4 研究区遥感探测获取建筑物信息

Table 4 Building information acquired from remote sensing in study area

建筑物类型	建筑数量/栋	建筑高度/m	建筑横截面积/m ²
高层商业建筑	35	40~60	974~2469
多层商业建筑	107	15~24	2294~9830
高层民用建筑	936	36~60	483~3979
多层民用建筑	289	10~18	245~2322
工业厂房	249	8~12	556~78503
仓储设施	219	6	5139~22145

表 5 研究区岩土工程参数
Table 5 Geotechnical engineering parameters of the study area

层位	时代	岩土名称	底板埋深/m	厚度/m	平均重度/(kN·m ⁻¹)	地基承载力/kPa
1-1	Qh ^{col}	粉砂	0~1.7	—	—	—
1-2	Qh	粉土	0.6~11.8	0.6~11.8	19.26	120~140
1-3	Qh	粉土夹粉砂	1.6~20.7	1.2~8.9	19.75	120~160
1-4	Qh	粉土	1.9~12.2	0.9~7.2	20.02	110~150
1-5	Qh	细砂	4.2~18.6	1.4~10	20.20	140~190
1-6	Qh	细砂	5.1~19.3	1.2~4.8	19.76	190~340
2-1	Qp ³	粉砂	1.8~5.7	1.8~3.2	20.28	100~140
2-2	Qp ³	粉土	1.6~21.4	0.7~11.7	19.91	100~170
2-3	Qp ³	粉砂	3.4~32.6	1.6~15.3	20.00	150~220
2-4	Qp ³	粉土	5.2~30.1	1.1~13.2	20.50	120~190
2-5	Qp ³	粉砂	7.8~40	1.4~14.6	20.16	180~290
2-6	Qp ³	粉质粘土	12.4~35.5	1.7~10.3	20.22	150~240
2-7	Qp ³	粉土	14.1~37.6	1.4~14.2	20.36	170~280
2-8	Qp ³	粉砂	20.4~54	1.3~16.8	19.97	250~320
2-9	Qp ³	粉质粘土	25.4~36.9	3.2~11.5	20.42	220~300
3-1	Qp ²	粉土	19~36.5	1.5~6	20.13	210~280

注: Qh^{col}—全新统; Qh—全新统; Qp³—上更新统; Qp²—中更新统

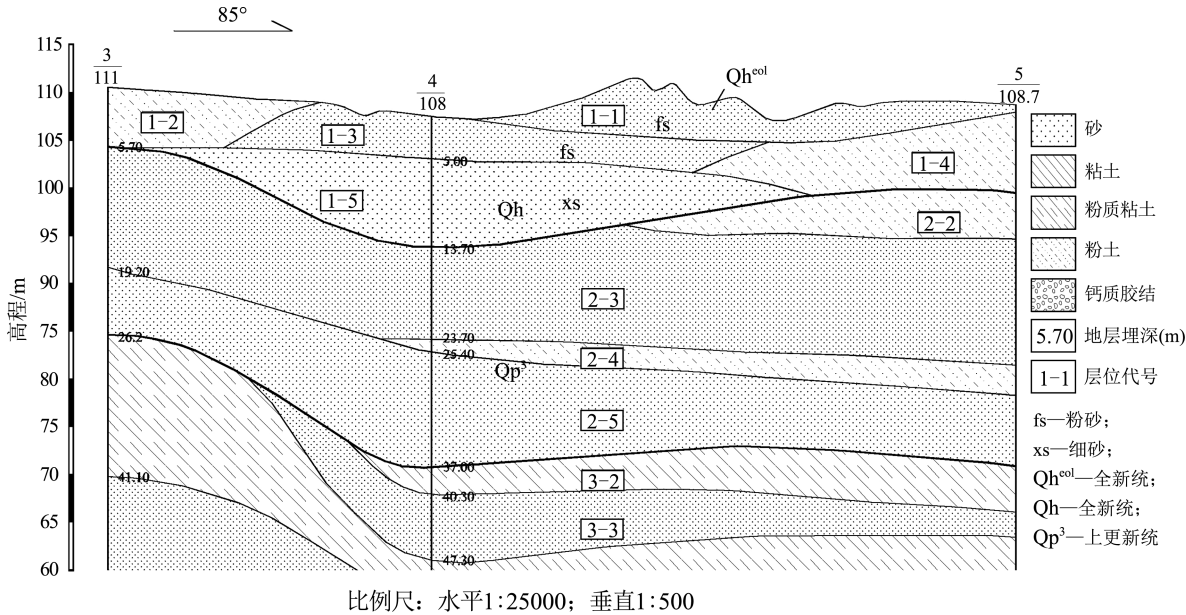


图 2 研究区地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of the study area

表 6 研究区不同建筑物地基基础类型
Table 6 Foundation types of different buildings in the study area

建筑物类型	建筑物结构	主要地下设施	地基处理类型	基础类型
高层商业建筑	框架-剪力墙结构	一或两层地下设施	CFG 桩复合地基	箱/筏形基础
多层商业建筑	框架结构	两层地下设施	天然地基	箱/筏形基础
高层民用建筑	框架-剪力墙结构	一或两层地下设施	CFG 桩复合地基	箱/筏形基础
多层民用建筑	框架结构	单层地下设施	天然地基	独立或条形基础
工业厂房	砼框架	无	天然地基	独立或条形基础
仓储设施	砼框架	无	天然地基	独立或条形基础

(收集到实际建设资料的建筑物)地基基础占用地下空间计算过程及结果见表7,比对结果见表8。

通过表8可以看出,本文提出的城市建筑物地基基础占用地下空间遥地耦合探测技术测算的建筑物地基基础影响深度误差在6%以内,测算的地基基础占用空间量通常比实际情况略小,误差在6%以内。误差主要来自于收集到的区域性工程地质调查资料与建筑物实际工程勘察资料在勘察位置上存在一定差异且精度较小,使获取的岩土工程参数与实际情况不一致,导致测算结果与实际情况存在误差。但整体上,测算结果与实际情况接近,可以准确查明建筑物地基基础占用地下空间的三维分布,满足城市地下空间规划需求。

2.6 郑州航空港区建筑地基基础占用地下空间
测算结果

利用本文提出的城市建筑物地基基础占用地下空间遥地耦合探测技术,对郑州市航空港区建筑物地基基础占用的地下空间资源量进行了测算,不同类型建筑地基基础占用地下空间资源总量及其影响深度结果见表9。为了使测算结果更直观有效地服务于未来郑州市航空港区地下空间规划,避免新规划地下空间与原有建筑物地基基础产生冲突,依据计算获取的建筑地基基础影响深度对研究区进行了分区,分区结果见图3。

3 结 论

(1)利用本文提出的遥地耦合探测技术对郑州航空港区内建筑物地基基础占用地下空间资源量进行了测算,测算的建筑物地基基础影响深度误差在6%以内,推算的地基基础占用空间量通常比实际情况略小,误差也在6%以内,完全可以满足航空港区地下空间规划。

(2)本文提出的建筑物地基基础占用地下空间遥地耦合探测技术主要依托于遥感探测技术、岩土工程学原理及工程地质性质参数。当获取到较准确的遥感探测结果与工程地质条件信息后,结合当地岩土专家经验确定基础类型,利用本文提出的数学模型对当地建筑物地基基础占用的地下空间进行测算。该方法在其他地质条件相似地区同样具有很高的推广应用价值。

(3)本文提出的遥地耦合探测技术主要适用于独立基础、条形基础、箱形基础与筏形基础,对于其他类型基础还需要进一步研究。

表7 典型建筑物地基基础占用地下空间量计算结果
Table 7 Calculation results of underground space occupied by typical building foundation

建筑物名称	建筑物高度 H /m	建筑物层数 N	建筑物横截面面积 A'/m^2	建筑物类型	建筑物结构	主要地下设施	钻孔编号	持力层选择	持力层埋深/m	基础埋深 d /m	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	基础类型	地基处理类型	修正后地基承载力 $f_{a'}/kPa$	基础影响深度	基础占用尺寸 A/m^2	基础占用空间 V/m^3
XX公租房	36	12	555	高层民用建筑	框架-剪力墙结构	二层地下室	Z62	1-5 细砂	5.8~10.4	8.1	150	筏形基础	CFG桩复合地基	294	23.1	663	15322
XX商业楼	45	15	1015	高层民用建筑	框架-剪力墙结构	一层地下室	Z48	1-3 粉砂	3.2~6.8	4.5	130	筏形基础	CFG桩复合地基	206	19.5	1769	34504
XX公寓楼	42	14	540	高层民用建筑	框架-剪力墙结构	一层地下室	Z63	1-3 粉砂	4.0~7.8	5.9	130	筏形基础	CFG桩复合地基	233	20.9	879	18365
XX企业总部	45	15	1067	高层商业建筑	框架-剪力墙结构	二层地下室	Z30	1-3 粉砂	4.5~10.7	7.6	130	筏形基础	CFG桩复合地基	265	22.6	1859	42016
XX学校	15	5	928	多层民用建筑	框架结构	一层地下室	Z37	1-2 粉土	3.3~5.5	4	120	独立基础	天然地基	225	9	928	8352
XX厂房	10	3	10000	工业厂房	砼框架	无	Z52	1-2 粉土	0.4~4.0	2.2	120	独立基础	天然地基	171	7.2	10000	72000

表 9 郑州市航空港区建筑物地基基础占用地下空间资源量
Table 9 Resources of underground space occupied by building foundation in the Zhengzhou airport area

分区	主要建筑类型	占用深度范围	占用地下空间资源量/10 ⁴ m ³
A 区	高层商用/民用建筑	地下 0~25m	5765
B 区	多层商业建筑	地下 0~15m	510
C 区	多层民用建筑	地下 0~10m	279
D 区	工业厂房	地下 0~7m	1550
E 区	物流仓储	地下 0~5m	413
合计			8518

参考文献

[1] Admiraal H, Cornaro A. Why underground space should be included in urban planning policy – and how this will enhance an urban underground future [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 214–220.

[2] Broere W. Urban underground space: solving the problems of today’s cities[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2016, 55: 245–248.

[3] Nelson P P. A framework for the future of urban underground engineering [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 55: 32–39.

[4] Bobylev N. Transitions to a High Density Urban Underground Space[J]. Procedia Engineering, 2016, 165: 184–192.

[5] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, (1): 112–113.

[6] 童林旭. 城市可持续发展的安全保障问题[J]. 城市发展研究, 1999, (6): 1–6.

[7] 罗秀兰. 高层建筑之地下空间权利冲突探析[J]. 中国土地科学, 2015, 29(5): 70–76.

[8] 王直民, 鲍海君, 黄莉. 城市地下空间开发利用中的桩基冲突及其规划[J]. 上海国土资源, 2018, 39(3): 73–77.

[9] 杨晓刚, 王睿, 黄伟亮. 基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析[J]. 地学前缘, 2019, 137(3): 77–83.

[10] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J]. 地学前缘, 2019, 137(3): 30–39.

[11] 周圆心, 何静, 徐旻. 基于遥感影像的城市地下空间资源量估算方法[J]. 城市地质, 2017, 12(3): 87–90.

[12] 何静, 郑桂森, 周圆心, 等. 城市地下空间资源探测方法研究及应用[J]. 地质通报, 2019, 38(9): 1571–1580.

[13] 陈志龙, 刘宏. 城市地下空间总体规划[M]. 南京: 东南大学出版社, 2011: 37.

[14] 贾宗团. 房屋建筑工程地基基础设计问题探析[J]. 工程建设与设计, 2016, (11): 16–18.

[15] 滕延京, 王卫东, 康景文, 等. 基础工程技术的新进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 1–21.

[16] GB/T 15968—2008, 遥感平面影像图制作规范[S]. 中国: 中国国家标准化管理委员会, 2008.

[17] 田峰, 陈冬花, 黄新利, 等. 基于形态学阴影指数的高分二号影像建筑物高度估计[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 844–850.

[18] 李嘉良, 张超, 齐红甲. 遥感影像提取建筑物高度的方法[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2013, (2): 127–131.

[19] GB 50007—2011. 建筑地基基础设计规范[S]. 中国: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.

[20] GB 50352—2019, 民用建筑设计统一标准[S]. 中国: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.

[21] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S]. 中国: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.

[22] 张俊红. 高层建筑岩土工程勘察工作量布置及评价若干问题探讨[C]//天津青年科技论坛. 天津市科协, 2012.

[23] 陈建华. 浅谈建筑桩基岩土工程勘察工作布置[J]. 甘肃科技, 2011, 27(6): 123–124.

[24] 陈涛. 建筑结构荷载取值经验[EB/OL]. (2014). [2020–03–21]. <https://wenku.baidu.com/view/1c55a4397fd5360cbb1adb39.html>.