

文章编号:1671-8879(2012)05-0058-07

城市地下空间需求预测及其分布体系建立

苟长飞,叶 飞,张金龙

(长安大学 公路学院, 陕西 西安, 710064)

摘 要:地下空间需求量是制定城市地下空间开发战略目标和规划布局的重要基础。分析了城市地下空间需求量预测的作用与意义,总结了现有的 3 种城市地下空间需求量预测的方法,即分指标预测法、分系统预测法和分区位预测法,并分析了 3 种预测方法各自的优点与不足;提出了将分指标、分系统与分区位相结合并考虑需求时效性的综合预测法,阐述了综合预测法的总体思路,并分析了其优点。在综合预测法的基础上,提出了建立城市地下空间需求分布体系,建立了该体系的三维结构模型,讨论了该体系的建立方法。结果表明,将综合预测法所得到的预测结果导入地下空间需求分布模型,能使该模型具体化。

关键词:结构工程;地下空间;地下空间需求量;地下空间需求分布体系;综合预测法

中图分类号:TU91 **文献标志码:**A

Demand forecasting and demand distributional system development method of urban underground space

GOU Chang-fei, YE Fei, ZHANG Jin-long

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Demand for underground space is the foundation of strategic objective and planning of urban underground space. The function and significance of the demand forecasting of urban underground space were analyzed, three existing methods for demand forecasting, that are classified-index forecasting method, classified-system forecasting method and classified-location forecasting method were summarized and discussed, and their individual advantages and disadvantages were analyzed. A comprehensive forecasting method which combined all three forecasting methods mentioned above was proposed, with a consideration of the time-effectiveness of underground demand. The underlying concepts and advantages of the comprehensive demand forecasting method were then discussed. Based on the comprehensive forecasting method, a demand distributional system of urban underground space and its three-dimensional model were developed. The results show that the forecasting results of the comprehensive forecast method imported into the demand distribution model for underground space can make the mode specific. 1 tab, 3 figs, 13 refs.

Key words: structural engineering; underground space; demand for underground space; demand distributional system for underground space; comprehensive forecasting method

收稿日期:2011-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51178052)

作者简介:苟长飞(1987-),男,甘肃庆阳人,工学硕士研究生,E-mail:gouchangfei1987@126.com.

0 引言

随着中国城市化进程不断加快,城市中不断集聚的人、车等要素对城市空间的需求增大与当前有限的城市空间容量之间的矛盾日益突出,扩展城市空间成为解决这一矛盾最直接的方法^[1]。城市空间可以以扩大城市面积、建造高层建筑和开发地下空间 3 种方式扩展,其中,开发地下空间在缓解城市地面交通矛盾,提高城市空间容量、功能运行效率和土地集约度,以及改善城市环境等方面具有显著优势,因而许多城市已将地下空间的开发利用作为城市建设的重要部分,一些大城市也将较大规模的综合性地下空间开发提上了议事日程。可见,向地下要空间已成为 21 世纪城市发展的必然选择^[2]。地下空间的开发利用对城市建设起着至关重要的作用,地下空间原始介质是岩石或土壤,开发难度大、成本高,并且具有不可逆性。因此,地下空间的开发必须做好有预见性的长期使用规划。地下空间的规划应基于对地下空间现状的研究以及对城市一定期限内地下空间需求量发展的预测而提出。城市地下空间需求量是城市地下空间规划中的一个关键参量和重要依据。因此,在城市地下空间开发规划过程中,对地下空间需求量进行预测具有重要的现实意义。

随着地下空间开发研究的不断深入,国内外一些学者在对地下空间的需求预测方面做了许多研究:陈立道等通过预测上海市未来年份的城市人口,得到各年份的城市用地总需求量;对比城市实际陆地面积,得到地下空间总需求量,1997 年又提出采用系统工程方法预测地下空间需求量^[3-4]。Monnikhof 等提出影响地下空间开发需求的因素包括人口密度、建筑密度、就业密度、交通强度和功能混合性等^[5]。陈志龙等以城市发展目标为导向,提出分生态指标来预测出城市地下空间需求总量;并结合影响城市地下空间需求量的地面容积率、土地利用性质、区位、轨道交通、地下空间现状 5 个要素,建立了分区位的地下空间需求预测模型^[6-7]。文献^[8]将厦门市地下空间分成居住区地下空间、公共设施地下空间等多个单系统,根据各系统的特点对其需求量进行了预测。罗兰通过对日本东京地铁站域地下空间功能需求分析,构建了地铁站域地下空间开发强度的相关性指标体系^[9]。刘俊在对地下空间需求特征进行分析后,提出基于分系统的城市地下空间需求预测框架体系^[10]。本文在对已有预测方法进行总结的基础上提出综合预测法,并讨论了基于综

合预测法的地下空间需求分布体系的建立方法及应用前景。

1 现有地下空间需求预测方法

目前,中国提出了多种地下空间预测方法,概况起来,主要包括分指标预测法、分系统预测法和分区位预测法 3 种。

1.1 分指标预测法

分指标预测法是基于生态城市指标体系提出的,将对城市空间起控制作用的生态指标值与土地类型划分相结合,便可得到在生态指标体系基础上的城市空间需求总量^[11-12]。

$$S_z = (C_L + \frac{C_A}{n} + R_A + G_L)\beta P \quad (1)$$

式中: S_z 为城市空间需求总量(m^2); C_L 为城市人均建设用地指标; C_A 为城市人均建筑面积指标; n 为容积率,指项目规划建设用地范围内全部建筑面积与规划建设用地面积之比; R_A 为城市人均道路面积指标; G_L 为人均公共绿地指标; β 为开发强度系数; P 为城市人口。

城市空间需求总量确定后,引入空间协调系数 l (下部空间容量与上部空间容量之比),根据空间协调系数,确定城市地下空间需求总量 S_x 为

$$S_x = (C_L + \frac{C_A}{n} + R_A + G_L)\beta P \frac{l}{l+1} \quad (2)$$

式中: l 为空间协调系数。

1.2 分系统预测法

分系统预测法也可称为用地分类预测法,其基本思路是,将地下空间依据其功能不同,分为各个子系统(单系统),如居住区地下空间、公共设施地下空间、道路广场绿地地下空间、工业及仓储用地地下空间、交通轨道地下空间、地下停车场地下空间等;然后根据各系统的特点,选取适当的系数和指标,采用单向指标标定法推算出各系统地下空间需求量,再对各系统需求量求和,便可得到城市地下空间总体需求量^[10]。

1.3 分区位预测法

不同类型的城市用地对地下空间的需求强度不同,因而可以将城区按照用地主体类型的不同划分为不同等级的区位,即城市中心区、生活性片区、功能性片区等,各等级的区位又可进一步划分成不同需求等级的地块,这便是地下空间的需求分级。地下空间进行需求分级之后,可结合相似类型、规模城市的地下空间开发状况,确定各个需求级别的地下

空间需求强度,根据地面建设强度和轨道交通的影响对其进行校正。用地块面积乘以相应的需求强度,就可以得出该地块的地下空间理论需求量;然后将城区内各地块的地下空间需求除去已有的地下空间总量,便可得出地下空间的实际需求总量。由于这种预测方法中进行了不同层次的需求等级划分,因此也被称为层次分析法^[7]。

用数学方法来表示,则地下空间的需求 Q 函数可表示为

$$Q = \sum_{i=1}^m (\gamma_i \alpha_i \beta_i \delta_i d_i) - \sum_{i=1}^m e_i \quad (3)$$

式中: m 为分析区域内地块的总量; γ_i 为仅考虑地面建设强度时,结合专家经验赋值系统初步确定的地块地下容积率; α_i 为考虑土地利用性质时的校正系数; β_i 为考虑区位时的校正系数; δ_i 为考虑轨道交通时的校正系数; d_i 为地块面积; e_i 为地块内现状地下空间面积。

表 1 地下空间需求量预测方法分析

Tab. 1 Analysis of demand forecasting methods

预测法	系统性	主观性	适用性	局限性
分指标预测法	强(以整个城市的生态指标作为依据预测)	强(开发强度系数 β 和空间协调系数 l 的确定主观性强)	适用于整座城市或城市某一区域的地下空间需求总量的预测	无法得到城市在不同发展时期各个区位、各个功能系统的地下空间需求量
分系统预测法	较弱(侧重于城市各个功能的地下空间需求量预测,忽略了城市不同功能的地下空间之间的联系)	较弱(根据各个功能的实际需求特点来预测地下空间需求量,较适合于中国城市用地开发的实际机理)	适用于整座城市或城市某一系统(如城市交通系统)的地下空间需求总量的预测	无法得到城市在不同发展时期各个区位内的地下空间需求量
分区位预测法	较强(侧重于城市各个区位的地下空间需求量预测,但考虑了各个区位之间的相互影响)	较强(通过专家系统经验赋值来确定地下空间需求强度,但结合各区位特点来进行分层次分区位预测)	适用于整座城市或城市某一区域地下空间需求总量的预测	无法得到城市在不同发展时期各个功能系统的地下空间需求量

2 地下空间需求量综合预测法

2.1 综合预测法总体思路

所谓综合预测法,是指将分指标、分系统和分区位预测法结合起来,并且考虑地下空间需求量的时效性,预测城市地下空间在不同时期各个区位、各个系统需求量的方法。

在综合预测法中,将地下空间分别按照分区位和分系统两种方式划分,然后确定各区位的区域系统性强度和各系统的功能系统性强度,以此来判断哪种特性对各区位(或系统)地下空间需求量起主导性作用;若某区位的区域系统性较强,可认为区域特性对其地下空间需求量起主导作用;若某系统功能系统性较强,可认为功能特性对其地下空间需求量

1.4 现有预测方法分析

3种预测方法各具优点与不足,其各自特点分析见表1。由表1可以看出,在城市地下空间需求量预测时,若只采用以上3种方法中的一种,很难得到理想的效果。因为,同一城市不同区域的地下空间需求量各不相同,需要分区位进行;同一城市不同功能系统的地下空间需求量是不同的,需要分系统进行;地下空间的开发利用也应该满足生态城市各指标要求,需要分指标进行。另外,以上3种方法只对城市某一时期的地下空间需求量进行了预测,而地下空间的开发利用需要随着城市发展分期进行,城市某一时期的地下空间需求量预测结果远不能满足城市地下空间分期开发利用的要求。鉴于以上分析,城市地下空间开发利用急需一种能综合全面反映城市各个时期、各个区位、各个系统的地下空间需求量的预测方法,即综合预测法。

起主导作用。对于区域特性对其需求量起主导性作用的地下空间,如城市中心区地下空间,应依据分区位预测的方法进行预测;对于功能特性对其需求量起主导性作用的地下空间,如地下交通设施、市政公用设施等,应依据分系统预测的方法进行预测。用两种方法进行预测时,应考虑区域特性与功能特性之间的相互影响以及预测的时效性(各个时期地下空间的需求量不同)。得到两种方法的预测结果后,再根据生态指标对其进行校正,使其满足生态城市的要求。综合预测法的总体思路如下页图1所示。

2.2 区位预测和系统预测的结合

综合预测法的核心思想是从区位、系统、生态、时间4个角度综合分析地下空间的需求量,实施的难点在于如何调整好这4个角度之间的协同关系,

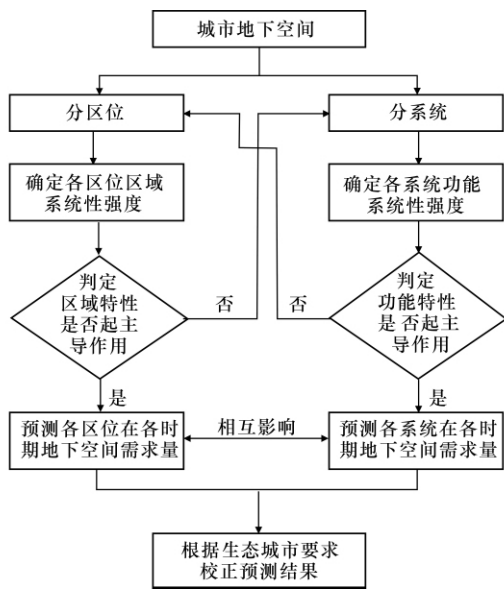


图 1 综合预测法思路

Fig. 1 Comprehensive forecasting method

尤其是区位预测和系统预测的协同关系。一定地下空间属于某一区位的同时也属于某一系统,如果在系统中和区位中都对其进行预测,不仅会因重复工作而造成人力财力的浪费,而且会让预测者又一次面临判定选择,这将增加预测的主观性,对预测不利。遵循系统优先原则可以解决这一问题:一般情况下,在进行区位预测时,对于系统预测已经得出结果的地下空间部分,可以直接引用,不必再进行重复性预测;但是,在进行系统预测时,对于区位预测已经得出结果的地下空间部分,却只可作为参考,不可直接引用。区位预测和系统预测的结合如图 2 所示。

进行某一系统地下空间需求量预测时,根据其特点,选取适当的系数和指标,采用单向指标标定法推算出该系统在不同区位的地下空间需求量,与前节所述不同的是,这里不仅是预测整个系统的地下空

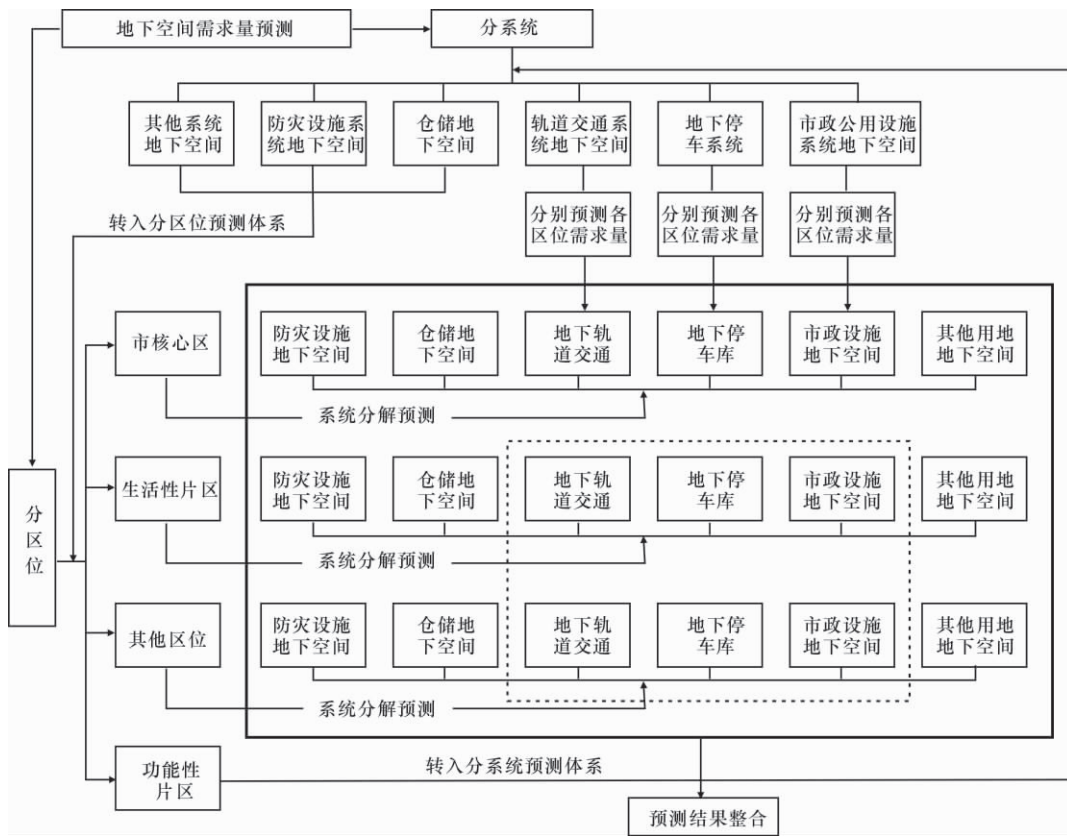


图 2 区位预测和系统预测的结合

Fig. 2 Combination of classified-location forecasting and classified-system forecasting

间总量,更重要的是要预测该系统在每一区位的地下空间需求量。这便要求在系统划分的基础上进行区位分解,例如预测轨道交通系统地下空间需求量时,将轨道交通系统分解为不同的区位,预测每一区位轨道交通地下空间需求量。但是,在区位分解预

测时不能忽视整个系统的整体性,即系统所在区位之间的相互联系,这也是由功能特性的整体性决定的,因为像轨道交通这种功能特性起主导作用的地下空间,各个区位之间的联系是非常紧密的。类似的系统还有地下市政设施系统等。进行某一区位地

下空间需求量预测时,基本上沿用 1.3 节中的方法,将该区位划分成不同需求等级的地块,确定各个需求等级的需求强度,以此来预测各个地块的地下空间需求量,不同的是省去了系统预测中已预测过的地下空间预测。

2.3 综合预测法的优点

综合预测法将城市地下空间的系统功能、区位特点和生态城市指标相结合,且考虑地下空间需求的时效性,来综合预测城市地下空间需求量。综合预测法与已有预测法相比,由于根据各地下空间的特点来选择预测途径(分区位或分系统),其预测机理更符合真实情况,其预测结果更为准确;由于考虑了系统与区位之间的交叉及相互影响,且以整个城市的生态指标作为修正依据,其预测过程系统性更强;由于预测结果反映了城市在不同发展时期各个区位、各个功能系统地下空间的需求量,其应用范围更为广阔。这种预测方法在继承已有方法优点的基础上,克服了其无法全面得到城市在不同发展时期各个区位、各个功能系统地下空间需求量的局限性,扩展了地下空间需求量预测的范围和结果。

为使城市的各项功能稳定、集约、高效的运转,人工环境与自然环境的关系和谐,形成良好的城市生态系统,城市地下空间的开发应该按照分区位、分功能、分时期且满足生态城市要求的原則,进行联合开发,而综合预测法所得到的结果完全适用于地下空间的联合开发。若能将综合预测法所得到的结果整合成一个城市地下空间需求分布体系,供地下空间规划、设计、施工、管理时调用,那将对地下空间的开发产生深远影响。

3 地下空间需求分布体系的建立

3.1 地下空间需求分布模型

城市地下空间需求分布是指地下空间在城市各个区位、系统以及建设时期的分布状况。从上节综合预测法的思路可知,地下空间从区位上可以分为市核心区、生活性片区、功能性片区等;从功能系统上可以分为轨道交通系统、地下停车系统、地下市政设施系统等;从城市建设时期上可按照时间划分。因此,根据地下空间的这种分布特性,可以建立一个以区位(R)、系统(S)、时期(T)为轴的三维空间结构,即地下空间需求分布模型,如图 3 所示。

模型 R 轴上的各个区位可进一步划分为更小的地块性区位,这种划分可结合行政区划进行,例如,生活性片区可划分为不同的生活小区;功能性片

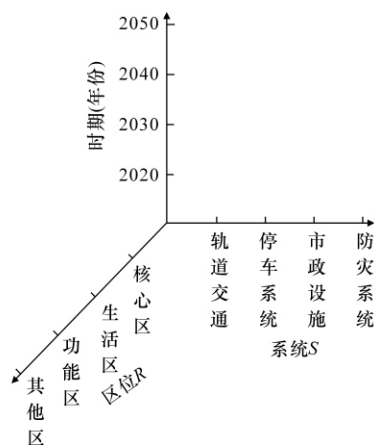


图 3 地下空间需求分布模型

Fig. 3 Demand distributional model for underground space

区可划分为不同的工业、经济开发区。模型 S 轴上的各个系统也可进一步划分成更小的子系统,例如市政设施系统可以划分为排水管道系统、能源供应系统、电力输送系统等。模型 T 轴上的时期也可以进一步划分成更小的时期,随着地下空间开发水平的提高,地下空间需求预测的时效性将不断增强, T 轴的时期划分也将不断精细。随着地下空间需求分布预测不断详细化,该模型上的三维空间点也不断被加密。由此,以区位、系统、时期为自变量,可以构造地下空间需求分布函数为

$$f = f(r, s, t)$$

式中: r 、 s 、 t 分别为地下空间所在的区位、功能和时期。

地下空间需求分布函数是一个非连续性函数,其值域由城市各个区位、系统在各时期的地下空间需求量组成,定义域由地下空间需求分布模型上的三维空间点组成。随着地下空间需求分布模型上的三维空间点不断被加密,地下空间需求分布函数也将趋于连续,这种连续化程度越高,表明地下空间需求分布模型越精细,其适用性也将随之增强。建立地下空间需求分布模型是为了建立地下空间需求量分布体系,该体系将全面反映城市地下空间的需求分布状况。

3.2 地下空间需求分布体系的建立方法

根据前面分析,将综合预测法所得到的预测结果导入地下空间需求分布模型,使该模型具体化,便可得到城市地下空间需求量分布体系,实施的具体步骤如下所述。

(1) 根据城市地下空间的分布特性,建立以区位、系统、时期为轴的地下空间需求三维分布模型。

(2) 采用计算机数据管理技术建立城市地下空

间需求分布的数据库模型,即将地下空间的需求分布模型进行数字化,形成数字化地下空间需求分布模型。

(3)采用综合预测法对城市各个建设时期不同区位、系统的地下空间需求量进行综合预测。

(4)将综合预测法预测所得的地下空间需求量按建设时期进行整合,得到各个建设时期的地下空间需求量在“区位-系统平面”上的数据分布。

(5)将整合后的城市每一建设时期的地下空间需求量数据分布导入地下空间需求分布的数据库模型。

(6)对导入结果进行必要的检查修正之后,便得到地下空间需求分布体系。

很明显,如此建立的地下空间需求分布体系是一个庞大的数据库系统。该系统包含了整个城市在不同建设时期各个区位、功能系统的地下空间需求量,随着地下工程数字化的发展和地下空间需求量综合预测法的应用与改进,该数据库的完整性和实用性将不断增强^[13]。

3.3 地下空间需求分布体系与数字地下空间的关系

数字地下空间与工程旨在实现对地下工程全生命周期的数字化,建成数据共享的信息管理平台。地下工程的整个生命周期包括地下工程规划和建设过程及后期的养护和管理、健康状态评估等,而地下工程的规划是其整个生命周期的开始,并且影响着整个生命周期的健康状况,合理的地下空间与工程规划必然离不开对地下空间需求量的科学预测。因此,完备的数字地下空间与工程也应该包括数字化的地下空间需求量分布。数字地下空间与工程应不仅为地下空间的开发提供准确的地质资料、设计信息、施工数据和监测信息等,还应为地下空间提供准确而全面的需求信息,以利于地下空间的规划、设计。随着数字地下空间与工程的发展,其数据库将不断扩展,地下空间需求分布体系及其数据库将融入数字地下空间与工程,并成为其不可或缺的组成部分。

4 结 语

(1)地下空间的开发利用应随着城市发展分期进行,目前常用的预测地下空间需求量的分指标预测法、分系统预测法和分区位预测法只能对城市某一时期的地下空间需求量进行预测,远不能满足城市地下空间分期开发利用的要求。

(2)提出了将城市地下空间的系统功能、区位特

点和生态城市指标相结合,且考虑地下空间需求时效性来预测城市地下空间在不同时期各个区位、各个系统需求量的综合预测法,预测机理更符合真实情况,预测结果更为准确,预测过程系统性更强,应用范围更为广阔。

(3)根据地下空间的分布特性,建立了以区位、系统、时期为轴的地下空间需求三维分布模型,并提出基于该模型建立地下空间需求分布体系的方法,将综合预测法所得到的预测结果导入地下空间需求分布模型,使该模型具体化。

参考文献:

References:

- [1] 王 敏. 城市发展对地下空间的需求研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
WANG Min. The research on demand for underground space by urban development [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [2] 王海阔, 陈志龙. 城市地下空间规划的社会调查方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1067-1070.
WANG Hai-kuo, CHEN Zhi-long. Study on the social survey method of urban underground space planning [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1067-1070. (in Chinese)
- [3] 陈立道, 陶一鸣, 韩广秀. 上海市地下空间需求预测[J]. 地下空间, 1990, 10(1): 25-33.
CHEN Li-dao, TAO Yi-ming, HAN Guang-xiu. The demand forecasting of Shanghai underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space, 1990, 10(1): 25-33. (in Chinese)
- [4] 陈立道, 朱雪岩. 城市地下空间规划理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
CHEN Li-dao, ZHU Xue-yan. Theory and practice on urban underground space planning [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese)
- [5] Monnikhof R, Edelenbos J, Van R. How to determine the necessity forecasting underground space; an integral assessment method for strategic decision-making [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 167-172.
- [6] 陈志龙, 王玉北. 城市地下空间规划[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
CHEN Zhi-long, WANG Yu-bei. The planning of city underground space [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2005. (in Chinese)
- [7] 陈志龙, 王玉北, 刘 宏, 等. 城市地下空间需求量预

- 测研究[J]. 规划师, 2007, 23(10): 9-13.
CHEN Zhi-long, WANG Yu-bei, LIU Hong, et al. Study on the prediction of underground space needs [J]. Chinese Journal of Planners, 2007, 23(10): 9-13. (in Chinese)
- [8] 清华大学, 同济大学. 厦门市地下空间开发利用规划说明书[R]. 厦门: 厦门市城市规划设计研究院, 2007: 27-37.
Tsinghua University, Tongji University. The manual about development & planning of Xiamen's underground space [R]. Xiamen: Xiamen Urban Planning and Design Institute, 2007: 27-37. (in Chinese)
- [9] 罗兰. 地铁站域地下空间开发与交通-土地特征相关性研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
LUO Lan. A correlation research between underground space development and transport-land features of subway station areas [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [10] 刘俊. 城市地下空间需求预测方法及指标相关性实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
LIU Jun. An empirical and methodological study on demand forecasting for urban underground space [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [11] 郑永来, 戴胜. 城市中央商务区生态地下空间规模预测[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 796-780.
ZHENG Yong-lai, DAI Sheng. Prediction of ecological underground spatial scale in central business district of a city [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 796-780. (in Chinese)
- [12] 唐福祥. 东莞市地下空间开发需求预测及岩土技术初探[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
TANG Fu-xiang. An elementary probe of subsurface demand forecasting and geotechnical techniques in dongguan [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [13] 李晓军, 朱合华, 解福奇. 地下工程数字化的概念及其初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1975-1980.
LI Xiao-jun, ZHU He-hua, XIE Fu-qi. Concept of digitalization of underground engineering and its preliminary application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 1975-1980. (in Chinese)
-
- (上接第 51 页)
- [4] 曾广武, 吴东粤. 单塔空间索面自锚式悬索桥缆索系统安装的施工监控[J]. 桥梁建设, 2008(5): 57-59.
ZENG Guang-wu, WU Dong-yue. Construction monitoring and control of cable system installation of a single tower and spatial cable plane self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Bridge Construction, 2008 (5): 57-59. (in Chinese)
- [5] 胡建华, 沈锐利, 张贵明, 等. 佛山平胜大桥全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 17-25.
HU Jian-hua, SHEN Rui-li, ZHANG Gui-ming, et al. A total bridge model study of the pingsheng bridge in Foshan [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (5): 17-25. (in Chinese)
- [6] 张俊平, 黄海云, 刘爱荣, 等. 空间缆索自锚式悬索桥体系转换过程中受力行为的全桥模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 108-115.
ZHANG Jun-ping, HUANG Hai-yun, LIU Ai-rong, et al. An overall bridge model test study on the mechanical behaviors in the process of system transformation of self-anchored suspension bridge with spatial cable system [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (2): 108-115. (in Chinese)
- [7] 王会利, 秦泗凤, 谭岩斌, 等. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 34(1): 57-59.
WANG Hui-li, QIN Si-feng, TAN Yan-bin, et al. Experiment research on self-anchored cable-stayed suspension bridge model [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2009, 34(1): 57-59. (in Chinese)
- [8] 赵煜, 汤金涛, 周勇军, 等. 三塔斜拉-自锚式悬索组合结构计算方法及参数分析[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(5): 573-579.
ZHAO Yu, TANG Jin-tao, ZHOU Yong-jun, et al. Calculation method and parameter analysis of self-anchored suspension and cable-stayed composite structure with three towers [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(5): 573-579. (in Chinese)
- [9] 颜东煌, 田仲初, 陈常松, 等. 岳阳洞庭湖大桥三塔斜拉桥全桥静动力模型设计[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(3): 50-54.
YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, CHEN Chang-song, et al. Static and dynamic model design of the total bridge of Yueyang tongting three tower cable-stayed bridge [J]. Journal of Changsha Communications University, 1999, 15(3): 50-54. (in Chinese)