

文章编号:1001-831X(2004)03-0350-04

盾构施工中气泡应用效果评价研究*

秦建设¹, 朱 伟¹, 林进也²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 广州地铁总公司, 广州 510030)

摘 要: 鉴于国内目前气泡剂技术在辅助土压平衡式盾构施工中存在的一些问题, 本文在考虑气泡剂技术在土压平衡式盾构施工中的功效基础上, 从气泡剂自身性质和气泡混和土力学性质两方面着手, 结合土压平衡式盾构施工的原理, 阐述了气泡剂在盾构掘进施工中应用效果评价的手段及相应的指标, 为气泡剂技术在土压平衡式盾构中的应用和选择提供实际参考。

关键词: 土压平衡式盾构; 气泡剂; 效果评价

中图分类号: U455.43

文献标识码: B

1 前言

近几年来, 我国许多大城市, 伴随着城市交通流量的激增和地表空间的减小, 地下空间不断开发, 城市隧道施工过程中, 作为不影响城市商业、交通功能的盾构法以其施工对周围环境影响小、快速的机械化施工等优点而被广泛应用于城市地下空间开发工程, 尤其在地铁隧道工程中, 逐渐代替传统的明挖法、暗挖法, 成为一种较为普及的隧道成型工法^{[1][2]}。盾构法中, 土压平衡式盾构法因其适用地层范围较大、对周围环境要求较低及造价合理等优势而得到广泛的应用, 并且在国内外的隧道工程中应用规模不断扩大。

土压平衡式盾构法得以如此广泛应用, 主要因素取决于辅助材料在盾构掘进中的使用, 土压平衡式盾构施工中, 为了保证进入压力舱的土体具有满足正常施工条件的良好的塑性流动性、止水性等力学性质, 通常采取在开挖面及压力舱注入辅助材料进行土体改良, 国内外常用的添加剂^{[3][4]}主要有:

粘土矿物类; 界面活性材料类; 高吸水树脂类; 水溶性高分子类。其中, 界面活性材料中的气泡剂具有现场制作方便、环保、渣土处理简单及功能多样等优点而在土压平衡式盾构法中得到普遍采用。

盾构用气泡剂的使用至今已有近 30 年的历史, 特别是近十年来使用气泡来改良土质的做法日益得到工程界的重视, 应用范围和规模越来越大, 但是受诸多因素的影响, 对气泡添加剂的使用多数停留在凭施工经验的基础上, 理论上的研究不够, 国内在发泡剂产品的选择、气泡应用等方面存在极大的盲目性, 对气泡注入效果的评价目前也没有确定的方法及标准。因此, 提出一套评价气泡在盾构掘进施工中应用技术及效果评价方法, 对气泡剂技术在盾构工程中的应用有着积极的指导意义。

2 气泡剂技术在土压平衡式盾构掘进中的应用

气泡在盾构施工中的应用是通过无数小气泡组成的泡沫来实现的。通常我们所称的注入气泡实际上是注入泡沫。泡沫是典型的气-液二相系, 其 90% 以上为空气, 不足 10% 为气泡剂溶液; 而气泡剂溶液 90%~99% 为水, 其余为气泡剂原液。

气泡在土压平衡式盾构施工中的主要作用:

(1) 减少盾构机机械的磨损, 土压平衡式盾构机在砂土等摩擦性较大土体中掘进时, 与土体发生摩擦的刀具极易磨损, 通过在刀盘上注入气泡材料, 可以降低土体的摩擦性, 减小刀具的磨损。

(2) 调整压力舱内土体塑性流动性, 土压平衡

* 收稿日期: 2004-05-13 (修改稿)

作者简介: 秦建设 (1973-), 男, 山西夏县人, 博士生, 主要从事隧道盾构施工技术研究。

式盾构法掘进工程中,压力舱内土体性质如何,将直接影响盾构的顺利掘进,切削后的渣土具有良好的塑性流动性,不但可以能够使开挖面维持较好的支护压力,而且保证排土顺利进行,在盾构掘进中,由于地层的变化,未经处理进入压力舱的土体通常难以获得希望的塑性流动性,此时压力舱内容易发生“结饼”、“闭塞”^[5]等问题,影响施工。气泡的注入可以有效解决上述问题。

(3)降低渣土的透水性,土压平衡式盾构机在砂砾层等强透水层地基($k > 10^{-5} \text{ m/s}$)施工时,开挖面过高的水压力会导致盾构机螺旋排土器出口发生地下水大量流失,严重时会发生喷涌。影响掘进顺利进行,注入气泡可以有效降低渣土的渗透性,有效防止掘进中喷涌的发生及大量地下水的流失。

(4)降低切削渣土的内摩擦力,减少刀盘、螺旋排土器、运输带的磨损,降低刀盘扭矩,防止机器能耗过高发热而发生故。

3 气泡剂在应用中存在的问题及效果评价指标确定的意义

盾构掘进工程中,盾构机经过的地层条件千变万化,有些区间地层以砂土为主,渗透系数大,地下水易从开挖面渗入,导致开挖面失稳和螺旋排土器口喷涌发生。有些区间粘粒含量高,刀盘易发生黏附,导致开挖不畅、搅拌困难,压力舱内易发生结饼和闭塞。要想在上述土体中应用土压平衡式盾构顺利进行地铁隧道建设,必须对土压平衡式盾构压力舱内的土体进行改良,使之满足如下力学性质:土体不易固结排水;土体处于较理想塑性流动状态;土体具有较低的透水性。

目前,国内企业在地铁盾构隧道施工中从国外进口了发泡材料进行改善土压平衡式盾构土体性质,但对气泡添加材料的性能和评价标准都没有可借鉴的实例和资料,造成气泡在使用的过程中产生多种问题,例如:气泡的发泡倍率不够或过多的进行添加,对昂贵的添加材料造成大量的浪费;由于在盾构施工中不能合理有效及时的使用气泡添加材料或为了减小成本气泡的添加量不足,造成盾构舱内的土体性质没有得到有效的改良,“结饼”、“闭塞”、“喷涌”等问题继续发生。在广州、深圳地铁隧道施工中,由于压力舱发生“结饼”需要进行开舱处理而造成的开挖面土体坍塌事故多次发生。

科学应用气泡添加材料,作到适时,适量的注入气泡,就能有效的改善土压平衡式盾构压力舱内

土体的状态,使“结饼”、“闭塞”、“喷涌”等问题少发生或不发生,做到上述的前提条件首先是能够对气泡剂注入土体的效果评价有着比较明确的方法及手段。同时,目前国内的盾构隧道所用的发泡材料多为国外进口(法国及日本),造价较高,国内自主生产的发泡产品目前多处于研发阶段,尚未大量投入使用,面对未来各类品牌的发泡剂产品,有一套相应的气泡在盾构掘进中的功效评价指标,才能够使得承包商合理选择适用于自己的气泡剂产品。

4 气泡效果评价指标

确定气泡剂在土压平衡式盾构掘进中的应用效果,可从两方面考虑,即气泡剂材料自身的性质及气泡与开挖后土层混和所形成的气泡混和土的力学性质。

4.1 气泡剂自身性质

气泡剂自身的性质涉及气泡剂的发泡率、气泡的稳定性等。

4.1.1 发泡率

发泡率,又称“气泡倍数”,指一定质量发泡剂溶液所产生的气泡体积与原液体体积之比,它是衡量发泡剂质量的一项重要指标。其定义见下式。

$$ER = V_f / V_i \quad (1)$$

式中: V_f ——产生的气泡体积;

V_i ——气泡剂溶液体积。

目前应用于土压平衡式盾构施工中的气泡剂的发泡率为5~20,在同样情况下,发泡率越高,等量气泡剂产生的气泡越多,说明其具有高效性,但是发泡率与生成气泡的稳定性二者是相互影响的,较高的发泡率是牺牲气泡稳定性为代价的,当评价气泡性质时,仅仅发泡率高并不能说明气泡剂的优越,而应该结合下述其产生的气泡稳定性进行综合考虑。

由于气泡在压力舱内处于受压状态,同时通常情况下,气泡与土体发生混合是在压力状态下进行的。假定压力 \times 体积=常数,则当压力舱内支护压力为 p 时气泡的发泡率为:

$$ER = \frac{p_a}{p} (ER - 1) + 1 \quad (2)$$

上式中: p_a 为标准大气压, ER 为大气压下发泡率。

4.1.2 气泡的稳定性

气泡的稳定性是指气泡长时间静置于空气中而不破裂的性质,气泡的稳定性是衡量气泡优劣的

一个重要指标。稳定性的好坏由消泡率来反应,消泡率是衡量气泡稳定性的重要参数之一,其定义见下式。

$$FS = V_d / V_o = M_d / M_o \quad (3)$$

式中: V_d 为消散的气泡体积; V_o 为气泡初始体积; M_d 为消散的气泡质量; M_o 为气泡初始质量。

对于气泡的稳定性,有学者提出用半衰期的概念来描述^[6],即气泡体积消散一半所需要的时间。可采用图 1 所示的装置进行消泡率的测定试验。其过程如下:首先测定大容器中所盛的气泡的总质量,然后每隔一定时间(如 5 分钟或 10 分钟)测定量筒中气泡消散形成的液体质量,利用公式(3)即得出消泡率曲线,某气泡剂产品消泡率曲线示意图见图 2。

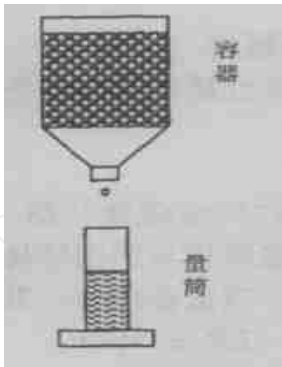


图 1 消泡装置示意图

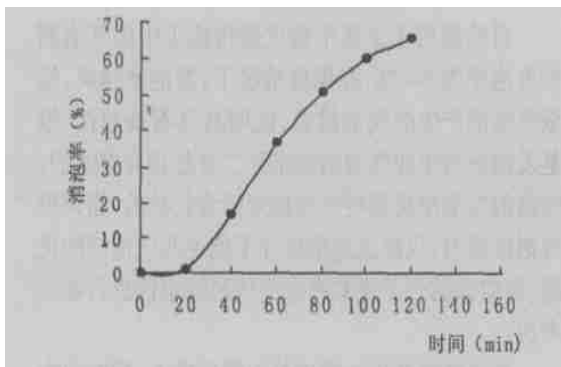


图 2 某气泡剂产品消泡曲线

盾构施工中,通常在刀盘、压力舱、螺旋排土器三处布置气泡的注入口,通过注入气泡将压力舱土体改良成“塑性流动状态”,并保持至螺旋排土器口顺利排出。这就要求气泡具有足够的稳定性,以满足能够存在于渣土中直至混合土从螺旋排土器排出。所以气泡稳定性的情况将直接影响其作用的发挥时间,通常盾构隧道所需气泡的稳定性要求可通过下述方法估计:

气泡消散 25 % 的时间不大于 T :

$$T = \frac{a}{V} \times \frac{R_2^2}{R_1^2} (L_1 + \frac{R_2^2}{R_1^2} L_2) \quad (4)$$

上式中: R_1, R_2 分别为压力舱及螺旋排土器直径; L_1, L_2 分别为压力舱及排土器长度; V —盾构机掘进速度; a —反应气泡与土体结合后稳定性增强的参数,与所混合的土体参数等有关。

举例说明,某盾构隧道工程中,压力舱直径 6m,长度 1.2m,螺旋排土器长度 9.5m,直径 0.7m,以每天推进 12m 速度考虑, a 取值为 1.5,则要求气泡稳定性到达消泡 25 % 所需的时间大于 1.9h。盾构施工是一个动态的过程,气泡材料作用的土体处于运动状态,气泡改良土体的作用仅要求于从开挖面到排土器出口这段运动过程中,所以气泡的稳定性将直接关系到改良效果的持续时间。气泡的发泡率作为一项可变参数,使得盾构承包商对其参数的选择带来困难,较高的发泡率可以做到在一定数量的气泡剂下产生更多的气泡,但是过高的发泡率与气泡的稳定性及土体改良效果都存在相互制约的关系,如何选择合理的发泡率来最大效用地发挥气泡的作用,需要针对不同盾构工程来进行决定。

4.1.3 气泡对环境的影响

由于气泡土的处理没有专门的措施,所以气泡剂的成分对环境的污染程度是确定气泡是否可用的一个主要指标。环保、无毒副作用的气泡剂是气泡应用的根本。

4.2 从气泡混和土的性质指标进行评价

气泡应用于盾构掘进工程中时,其作用的发挥是通过与土体结合而体现出来的,所以对气泡的评价侧重于其与开挖面切削土体混合后的性质,即气泡混合土性质。

4.2.1 气泡混合土渗透性

土压平衡式盾构机在砂砾层等强透水层地基施工时,开挖面过高的水压力会导致盾构机螺旋排土器出口发生地下水大量流失,严重时会发生喷涌。影响掘进顺利进行,这时可以通过在刀盘及压力舱注入气泡来减小土体的渗透性。此时评价气泡的指标是气泡混合土渗透系数的减小程度。一般要求,当用气泡减小土体渗透性时,要求渗透系数能够降低,见下表 1。

由于气泡与土体混合的充分程度会影响止水效果的差异。同时,不同的级配颗粒土体在加入相互气泡后渗透系数的降低差异很大。所以在评价气泡剂技术的止水性时,要结合混合土体的颗粒级

配情况确定。

注入气泡后土体渗透系数变化 表1

土类	原状土渗透系数	气泡混合土渗透系数
砂质砾石	$10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ m/s}$	10^{-5} m/s
粗砂、砂砾	$10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$	$10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$
细砂	$10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$	10^{-6} m/s
砂土、粉土	$10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$	$10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$

4.2.2 气泡用于增加土体塑性流动性

压力舱内的土体是一种非常特殊的土体,是由开挖面上切削下来的破碎土体在刀盘和压力舱部位注浆口注入气泡,经过搅拌翼板的搅拌、混合而充填在压力舱内的混合土体。目前,国内盾构隧道中使用气泡材料主要的目的是增加压力舱内土体的塑性流动性,防止或改善压力舱内的“闭塞”、“结饼”现象。

确定气泡混合土塑性流动性的指标可从以下试验着手^[7]:流塑性试验;液、塑限试验;拌和试验;固结实验;坍落度试验。

4.2.3 气泡用于降低土体的黏附性

降低土体的黏附性可以防止土体黏附于刀具及压力舱隔板及搅拌翼等结构而引起的刀具磨损及掘进扭矩及推力的增大,从而为保护盾构机顺利掘进。

气泡注入降低土体黏附性的效果判断可以通过测定气泡改良土体和金属表面黏附力的大小,即简单测定气泡混合土体试样在一定角度倾斜后的金属平板上的滑溜情况。其控制指标可定为气泡混合土试样在金属板上滑动所需的倾角,试验装置示意图见图3。

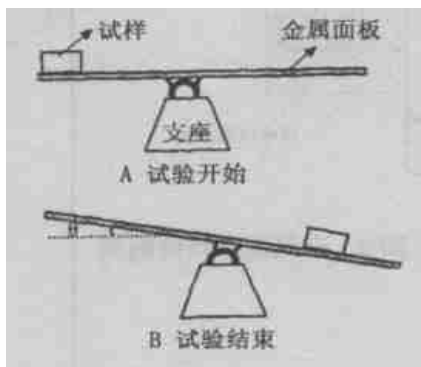


图3 气泡混和土粘附性试验示意图

4.2.4 气泡浸透试验

气泡浸透试验目的是研究注入的气泡对刀盘前方地层的浸透跑力。在一定的压力下,气泡过度

的浸透能力将会导致气泡用量增加,而且气泡混合土体提供的支持压力也可能不够充分。在测试试验中,将土样置于透明的圆筒中,然后注入气泡,施加压力,在活塞的推动作用下,观察气泡浸透到土样的深度。

5 结语

气泡剂技术在土压平衡式盾构中的应用效果评价方法的确定具有积极的工程意义,由文中分析可知:

(1) 气泡应用于盾构施工中有不同的目的,所以对气泡剂优劣性判定应该结合工程使用气泡的目的而言,例如对应用气泡增加土体的塑性流动性时,我们可以不考虑其止水性的优劣。同时,气泡性能的发挥是与原状土体的性质密切相关的,所以判断气泡效果应该考虑所应用的土质参数,同样的气泡对不同的土质会产生不同的气泡混合土特性,所以评价指标时应重点考虑气泡混合土的性质。

(2) 目前,在国内土压平衡盾构隧道工程应用中,关于气泡应用的效果评价建议采用下述指标进行控制以满足普通的工程需要。

气泡的稳泡时间,参考作者所提出的公式(4),其中参数取值需要通过工程应用反馈进一步确定;气泡的发泡率,应用于盾构工程的发泡率在5~20之间,视所用发泡剂材料所提供的参数,在保证稳泡时间的基础上,发泡率越高越好;气泡混合土黏附试验,气泡混合土在金属平板上滑动的极限倾角;坍落度试验,坍落度试验可以部分的反应土体的塑性流动性,它的优点在于现场容易实施。施工单位可以采用坍落度试验确定气泡的注入比;气泡混合土渗透试验要求改良后气泡混合土止水性控制在发生地下水喷涌的临界渗透系数^[8]以下。

(3) 气泡剂效果是相对所处理的土层条件而言的,不同的地质条件下,选择合理适用的气泡剂产品,才能做到既保证顺利施工又经济节省。

(4) 气泡剂的使用与添加量、添加时间等密切相关,在盾构掘进工程中,做到事前防范是关键,等到压力舱已经发生“闭塞”、“结饼”时再注入气泡材料效果不明显,气泡剂应用与否需根据盾构机掘进相关参数的反馈及施工经验确定,具体的理论参数尚需进一步完善。

(5) 关于气泡混合土性质研究,目前仅限于欧美日等几个国家的科研单位,各单(下转第358页)

正位于东侧的中点附近。

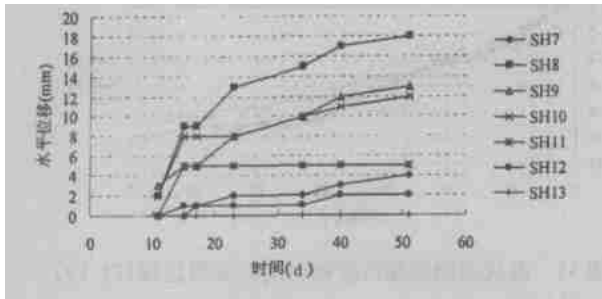


图 16 基坑北侧市政道路水平位移随时间的发展过程

图 16 是基坑北侧小区道路上 7 个监测点的水平位移随时间的发展情况,SH8 测点的位移值明显大于其它测点,原因有两点,一是该测点位于北侧

的中点附近,有空间效应的缘故,二是该测点正位于采用钢板桩围护结构(该部分围护钻孔灌注桩由于地下障碍物的影响而没有施工,后改为拉森钢板桩)的后侧,钢板桩围护结构刚度较小,导致位移较大。

在市政道路和小区道路上布置的 18 个位移监测点,其沉降监测结果数值很小,均不超过 2mm。

4 结论

上海市某基坑工程利用原有围护桩进行围护结构设计后的位移监测情况说明,空间效应、坑内土体加固、设置角撑等对基坑位移具有明显的控制作用。

参考文献:

- [1] 杨林德,肖蕤. 复合支护的可靠度分析[J]. 地下空间,2003,23(1):45-48.
- [2] 高文华,杨林德. 珠江玫瑰花园地下车库基坑围护结构监测分析[J]. 地下空间,1997,17(3):141-145.
- [3] 钟正雄,马忠政. 基坑工程监测数据库管理系统的设计及应用[J]. 地下空间,1998,18(5):323-328.
- [4] 刘国彬,侯学渊. 基坑工程发展的现状与趋势[J]. 地下空间,1998,18(5):400-405,412.
- [5] 赵永胜,王炳龙,周顺华. 基坑开挖施工对邻近建筑影响的监测分析[J]. 地下空间,2000,20(1):51-53.
- [6] 阳吉宝. 基坑工程施工对邻近建筑物影响的控制[J]. 地下空间,2000,20(3):221-224.
- [7] 雷用,徐军. 基坑工程邻近建筑物安全初探[J]. 地下空间,2000,20(4):282-285.
- [8] 张波,刘东燕,明成云. 某砂卵石基坑工程的变形观测试验研究[J]. 地下空间,2001,21(5):418-421.
- [9] 朱元青. 人工智能在深基坑支护工程中的应用[J]. 地下空间,2001,21(5):488-491.

(上接第 353 页)位研究气泡混合土土体性质时采用的方式及工具各不相同,所有很难有一个统一的指标来说明气泡混合土的性质,如粘滞性、流动性

等。相关评价指标的统一及标准还需要不断完善并制定相应的规程。

参考文献:

- [1] 尹旅超,朱振宏,李玉珍,袁少军,等译. 日本盾构隧道新技术[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1999.7.
- [2] B. Maidl, M. Herrenknecht, L. Anheuser. Mechanised Shield Tunnelling[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften GmbH, 1996.
- [3] George Milligan. Lubrication And Soil Conditioning In Tunnelling, Pipe Jacking And Microtunnelling, August 2000.
- [4] Babendererde, L. H. "Developments in polymer application for soil conditioning in EPB - TBMs[J]. Tunnels and Metropolises, Negro Jr. and Ferreira (eds.), Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 691 - 695.
- [5] G. Anagnostou and K. Kováči, Face stability conditions with earth - pressure - balanced shields[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 11, No. 22, pp. 165 - 173, 1996.
- [6] Cash, T. and Vine - Lott, K.M. Foam as a tunnelling aid: its production and use[J]. Tunnels and Tunnelling, Vol. 28, No. 4 (April 1996), pp. 22 - 23.
- [7] Sotiris Psomas, Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications, A thesis submitted for the degree of Master of Science to the Department of Engineering Science, St Hugh's College. 2001.
- [8] 魏康林. 土压平衡式盾构施工中喷涌问题的发生机理及其防治措施研究[D]. 南京:河海大学硕士论文,2003.3.

in front of the pile. This gives a foundation for further study.

[**Key words**] laterally loaded pile ; lateral displacement ; interaction

Assessment of the Foam Application in EPB Shield Tunneling QIN Jian-she et al (350)

[**Abstract**] The foam agent is used to regulate the soil condition during earth pressure balance (EPB) shield excavating , how to estimate the effect of the foam agent technique is very important and there are still some unknowns. Based on studying the tunnel boring method and property of foamed soil , some methods and judgment criteria for evaluation of the properties and effectiveness of the foam are discussed and some suggestions are given for its application and selection.

[**Key words**] earth pressure balance shield ; foam agent ; effectiveness assessment

Monitoring and Analysis of Displacement of a Foundation Pit in Soft Soil XIONG Jiu-hua et al (354)

[**Abstract**] The monitoring data of displacement of a foundation pit in Shanghai were introduced and analyzed in detail , in which the existing retaining piles were used again. The results show that the displacement of foundation pit could be controlled effectively by using spatial effect , by improving the soil in foundation pit and by setting the corner support.

[**Key words**] displacement ; monitoring ; retaining pile ; soft soil

Analysis on Steady State of Smoke in Highway Tunnel under Fire Mode FENG Lian et al (359)

[**Abstract**] In this paper , the method of 3D numeric simulation was employed to simulate the fire in certain tunnel and the velocity field and temperature field were analyzed. From the analysis , the characteristics of fire and the law of smoke development can be understood to a great degree , which may help developing effective measures to control the fire and provide theoretical background for emergency ventilation design in the tunnel.

[**Key words**] highway tunnel ; tunnel fire ; numeric simulation ; velocity field ; temperature field

Investigation on Geotechnical Environment around the Project near a Landfill Site in Chongqing

..... HUANG Zheng-ping (362)

[**Abstract**] A site investigation was carried out on the present situation of geotechnical environment , solid waste treatment and the volume and composition of the solid wastes for a project to be constructed in the urban area of Chongqing City. The problems in geotechnical environment and solid waste site are analyzed and some suggestions for their treatment are given. Results of investigation show , that around the project most natural slopes and slopes at solid wastes disposal site are stable at present , but with advance of the project some effective processing measures should be taken for their safety.

[**Key words**] city , geotechnical environment ; solid wastes ; environment pollution

Investigation on Basic Law of Urban Underground Space Development ZHU Da-ming (365)

[**Abstract**] Underground space development is a component of modern urban construction. Like all other things , it has its own law of movement. In order to avoid blindness in development and construction , the law of development should be followed to promote healthy development of underground space. In this paper , based on analysis of relationship among internal components and between internal and external components , the basic law of urban underground space development is investigated and summed up.

[**Key words**] urban underground space development ; basic law ; space demand ; whole coordination

Thinking about the Construction of Underground Parking Lots ZHOU Jian-nan et al (370)