

地铁区间盾构隧道施工的掘进单元控制法

周顺华, 季 昌

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为探索复杂多变地层和环境下盾构精细化掘进技术, 提出以掘进单元链取代传统按区间控制的理念, 定义了掘进单元的内涵、划分原则、划分步骤和应用条件, 并进一步形成了一套地铁区间盾构隧道施工的掘进单元控制方法. 最后将掘进单元控制法运用于杭州地铁 1 号线穿越钱塘江工程, 针对性控制 55 个掘进单元, 首次成功采用土压平衡盾构穿越钱塘江.

关键词: 盾构区间; 掘进单元; 施工参数; 地质条件

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Driving Unit Control Method for Shield Metro Tunnel Construction

ZHOU Shunhua, JI Chang

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Driving unit chain concept was put forward to explore the shield refinement tunneling technology in complex and changeable strata and environment instead of the traditional control method according to the interval length. Then four key elements of driving unit were defined including the connotation, the principle of division, the steps and the application conditions. Subsequently, a new method of driving unit control in construction of shield metro tunnel was established, which was applied to the Hangzhou Metro Line 1 project across the Qiantang River. By the targeted control of 55 driving units, the earth pressure balance shield was adopted successfully for the project crossing the Qiantang River for the first time.

Key words: shield interval; driving unit; driving parameters; stratigraphic condition

度超过 400 km.

根据工程地质条件, 可以将盾构隧道所处的地层分为以下类型^[1-2]: 软土地层, 如天津、上海、武汉、杭州、宁波等城市; 砂卵石地层, 如成都、长沙、北京等城市; 复合地层, 如广州、深圳、南京等城市; 黄土地层, 如西安、兰州等城市. 除上述典型地层之外, 还常常面临着复杂交错地层, 甚至在小范围之内交互出现几种工程性质极差比较大的土层, 例如岩层与泥层交互出现、粘土层与卵石层交互出现, 或者小范围内含有沼气层、离散分布的漂石等^[3-6]. 此外, 除了地层突发多变, 地面条件或地表环境也会有一些突变. 从严格定义上讲, 随着前述条件的变化, 施工控制参数都应随之调整, 但在实际施工中很难做到能够及时调整施工参数, 故还需要改变盾构掘进施工控制的理念, 并改进相应的掘进控制方法.

1 地铁区间隧道盾构掘进控制现状

我国地铁施工中所采用的盾构机除极少数越江地段选用泥水平衡盾构机外, 绝大多数采用直径 6.1~6.3 m 的土压平衡盾构机, 掘进施工控制涉及以下如下问题: 盾构机型的选择, 主要取决于地层性质, 机型选择的恰当与否决定了能否顺利施工^[7-8]; 土仓压力的设定, 其与盾构机械的刀盘面板形式、土层性质以及地面超载等因素有关^[9]; 掘进速度的设定, 其与同步注浆泵的配置、注浆管路、管片拼装以及出渣量等因素有关; 同步注浆材料及工艺, 目前同步注浆材料主要分惰性浆液和可硬性浆液, 注浆工艺除了与配置有关外, 主要需要确定注浆压力和注浆量、不同注浆管路的注浆顺序等^[10]; 盾构机的纠偏控制, 其既与盾构隧道的线型、盾构机的姿态有关, 也与纠偏方法和纠偏量的控制有关. 现阶段在施工参数的研究方面, 对平衡土压力的设定计算方法研

现阶段我国约有 400 台盾构机在地下掘进施工地铁盾构区间隧道, 每年建成的地铁盾构隧道总长

收稿日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(51478353)

第一作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下与隧道工程. E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

通讯作者: 季昌(1987—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为盾构施工力学. E-mail: 09jichang0419@tongji.edu.cn

究比较多,但从计算土压力如何落实到实际控制研究不足,一般通过出渣量进行控制^[11-12]。纠偏控制主要通过千斤顶分区设定推力并配合轴线偏移量的实际观测实现纠偏。同步注浆与姿态控制、掘进速度等密切相关,可见施工参数之间是相互影响,盾构掘进质量应该是若干参数的综合控制效果的总体现^[13-16]。正是因为前述原因,在现场施工控制中更多是由盾构司机或各工种的操作人员根据自己的熟练程度结合盾尾间隙量凭经验进行掘进控制。

尽管有不少文献涉及盾构掘进的施工参数研究,但现阶段要将研究成果应用于实际工程建设尚有诸多问题需要突破,其中最关键的是以下两点:①需要建立科学的盾构掘进施工控制方法;②需要解决人、盾构机、土层三者之间的信息传递与交换,并实现人对盾构机的科学操控。要实现人、机、地的交互,需要解决人与机、机与地、人与地等之间交换什么信息,以及以什么方式实现交换,为此本文将在现行盾构掘进施工控制的基础上,提出掘进单元控制法,为建立交换信息和实现控制提供基础,为地铁区间盾构隧道施工的精细化控制和智能控制提供一种新的思路。

2 盾构区间掘进单元控制法

一般地铁盾构区间的长度大约为1 km左右,个别情况仅400~500 m,也有极个别距离超过3 km的,但总体上1 km左右居多。对多数城市来说,在1 km范围之内无论是地质资料还是外部的环境变化都是很有限制的,于是盾构隧道的施工从盾构机选型到掘进施工参数的制定通常以线路的区间作为单元进行实际控制。随着我国地铁建设的发展,盾构掘进施工遇到环境变化,地质变化等挑战越来越多,传统的区间长度作为控制单元已不适合复杂环境条件下的施工控制,有必要提出新的掘进单元划分方法。

2.1 盾构掘进单元的内涵

构成单元必须具备两个条件:单一性和稳定性。就盾构隧道施工而言,形成掘进单元必须在某一区段内具有相同的施工参数,而且盾构机械性能稳定,盾构机操作手的熟练程度相当。换言之,构成掘进单元应具备以下五个要素:地质条件、环境条件、机械条件、隧道线型、具体的操作和管理方式,以上五个要素在工程意义上相同时,可以作为一个施工掘进单元。

2.2 掘进单元划分

当机械设备性能稳定和施工队伍管理方式稳定的前提下,掘进单元的划分主要依据地层和环境条件,并考虑隧道线型的影响。一般针对某隧道区间,可以先粗分单元,然后在粗分单元的基础上进行细分单元。

2.2.1 粗分掘进单元

粗分掘进单元可从施工的环境条件和大致的大致地层变化进行分类,依据环境条件可以分为四类单元:越江单元、穿建筑物单元、穿交通线路单元和穿管线单元。根据地层特征可以分为:粘土单元、砂土单元、卵砾石单元、岩石单元和复合单元。根据线型可以分为直线单元和曲线单元,变坡段作为特殊的竖曲线,应列入曲线单元。

2.2.2 细分掘进单元

在粗分掘进单元的基础上,进行单元类型的组合归类,如越江粘土单元或越江砂土单元等,然后结合施工参数进行细分单元,将某一单元形式中施工参数相同的区段作为一个细分的基本掘进单元。基本单元的划分尺度可以根据施工参数控制精度要求通过计算确定。以土压平衡盾构的土仓平衡压力为例,当施工控制要求比较高时,可根据0.1 MPa的变化幅度划分基本单元的长度;当施工控制条件宽裕时,可以采用0.2 MPa平衡压力大小的变化量作为基本单元的长度;反之,当施工控制极为严格时,基本单元的尺度可以采用(0.02-0.05) MPa的变化量来划分。最小的基本单元可以划分到一环管片宽度。

2.2.3 基本单元类型

决定基本单元大小的主要指标是施工参数,依据基本单元中施工参数的特征,基本单元大致可分为以下四种类型:①均匀单元,这是最理想的基本单元,在单元中各要素不发生变化;②渐变单元,这类单元能在施工控制精度要求之内保持施工参数固定值,但前后单元的施工参数均有不同,且参数的变化沿单元方向递增或递减;③波动单元,前后单元的施工参数或大或小呈波动形变化;④奇异单元,这是非常特殊的单元,在单元内奇异物出现,使施工参数发生突变,如掘进中遇到漂石、孤石等。

2.3 掘进单元的应用条件

盾构隧道的施工采用掘进单元法进行控制,需要以下基本条件:①成熟稳定的施工队伍;②相对完善的施工管理体系;③足够细致的详勘资料;④科学合理的施工参数计算方法。这四类之间的关系如图1所示,当满足以上基本条件时,掘进单元控制

法才能够更好的应用于工程实践中。

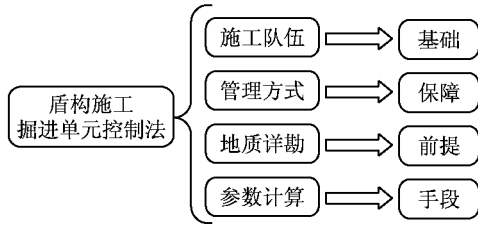


图 1 掘进单元的应用条件及其作用

Fig.1 Application conditions of driving unit and its functions

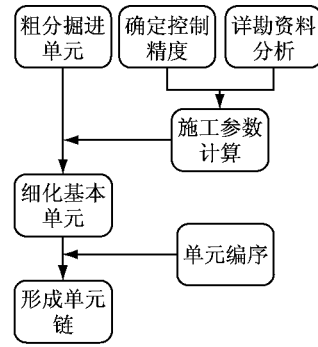


图 2 掘进单元应用流程图

Fig.2 Application flow chart of driving unit

2.4 掘进单元控制的应用方法

盾构隧道施工采用掘进单元控制应遵循以下基本流程:① 粗分掘进单元;② 在粗分单元基础上结合详勘资料进行施工参数计算,并确定掘进施工控制的精度要求,然后细化基本单元,再对基本单元进行编号,最后形成掘进控制的单元链,单元链中应包含管片的序号,从而实现施工控制. 如图 2 所示为掘进单元应用流程图.

3 案例分析

针对杭州地铁 1 号线穿越钱塘江工程面临的地质变化大和隧道覆土厚度变化大的特点于 2007 年

提出分区设定施工参数的概念,这是掘进单元思想的雏形,如图 3 所示为该工程从江南风井到江北风井之间的区段,共 1 600. 912 m,江面宽 1 300 m,以往的技术论证均以泥水盾构为主,然而实际施工中采用土压平衡盾构. 隧道穿越主要有粉砂夹砂质粉土、砂质粉土、淤泥质粉质粘土、粉质粘土、含砂粉质粘土、细砂、圆砾等土层,各土层软硬不均,性质差别较大;江南岸存在两层承压水,承压水头值差别较大;沿线环境变化较大,要穿越江南风井、钱塘江大堤、江北风井等,且江中段盾构隧道覆土厚度变化较大、施工中可能会受到潮汐的影响等;因此该工程施工环境复杂,风险高,对施工控制提出更高的要求.

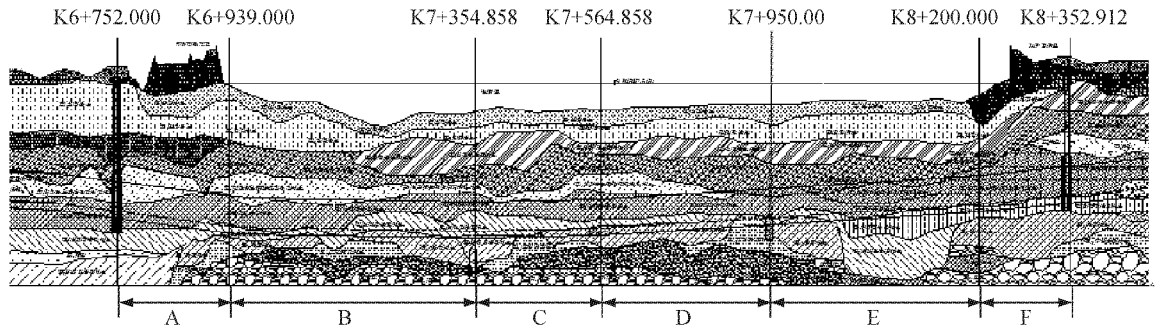


图 3 杭州地铁 1 号线越江段粗分掘进单元图

Fig.3 Layout of rough classification of driving units for the cross river section of Hangzhou metro line 1

3.1 越江段粗分掘进单元

根据盾构隧道越江段的线形、盾构穿越土层特性及构筑物的情况,从盾构施工控制的角度,如表 1 和图 3 所示,将盾构越江段分为 6 个粗分掘进单元(A,B,C,D,E 和 F).

(1)A 单元长 187 m,以-27.088%的坡度穿越闻涛路和南岸防洪堤,主要穿越淤泥质粉质粘土. 主要特点:盾构隧道坡度大,基本接近地铁设计规范的限值,掘进姿态控制和开挖面稳定控制较难;在穿越防洪堤的区段,盾构隧道上部为流塑的淤泥质粉质粘

土,下部为可塑到硬塑的粉质粘土,存在“上软下硬”的情况,对掘进控制影响较大;由于地貌特点和防洪堤的存在使隧顶上覆土变化较大,掘进时可能需根据实际情况对土仓压力做出及时调整.

(2)B 单元长 355 m,穿越土层主要为富含承压水的砂卵石地层. 有以下特点:隧道断面下部为细砂和圆砾,上部为粉质粘土和淤泥质粉质粘土,盾构掘进时的受力不均,姿态控制难度大;穿越的细砂、圆砾层为承压水含水层,水量丰富,渗透系数较大,水头压力较高,土仓内外的土压平衡不易建立;土仓内

的渣土渗透系数较大或螺旋机内的土塞不足以抵抗前方的水压力时,将会在螺旋输送机的出口处产生喷涌,严重时可能会引起开挖面的坍塌。

(3)C单元先以+4%的纵坡推进210 m,之后坡度增大为+12.7%向北岸推进140 m,穿越土层主要为富含承压水的细砂层和粉质粘土。有以下特点:该单元处于江中,所穿越的细砂层渗透系数较大,承压水头高,掘进控制不好时可能引起流砂。其次,承压水层对同步注浆浆液存在稀释作用,同步注浆材料和注浆量均需做特殊调整,以确保对管片周围空隙的有效填充。

(4)D单元以12.7%纵坡向北岸推进,长250 m,穿越土层为粘性土层。本段土质松软,渗透系数较小,在施工中应对土仓压力做即时调整,避免施工对江底土层的过大扰动,同时需采取有效措施防止刀盘结饼。

(5)E单元以12.7%纵坡向北岸推进,埋深14.0~18.0 m,长250 m。本单元主要穿越的砂质粉

土层及隧道顶板上方的粉砂层均与钱塘江水体有密切的联系,且上覆土层逐渐减小,盾构在此段推进时应注意避免与上部水体连通,因为一旦形成通道则会产生流土、流砂现象。同时应注意推进速度和推进压力大小,避免产生冒顶现象,致使隧道和江水贯通。

(6)F单元以+10%纵坡穿越北岸防洪堤,到达江北风井,隧顶埋深14.0~21m,长152m,穿越土层主要为砂质粉土层和淤泥质粉质粘土层。在本段盾构穿越土层与E区段相同,但由于盾构从河床底部进入防洪堤,本段的控制重点是盾构姿态的调整和土仓压力的设置,尽量减小盾构穿越对江堤的影响。

通过前述杭州地铁1号线越江段根据地质条件、环境条件、机械条件、隧道线型等因素的粗分掘进单元,达到了在进一步细分A~F等6个粗分单元之前,初步明确了盾构施工参数上下限范围,减少了细分单元的难度,并有利于更科学地细化盾构施工参数。

表1 杭州地铁1号线越江段粗分掘进单元

Tab.1 Rough classification of driving units for the cross river section of Hangzhou metro line 1

粗分单元	里程	坡度	穿越主要地层	隧顶土覆土/m	穿越构筑物
A	K6+752~K6+939	-27.088%	淤泥质粉质粘土	18~26	南岸防洪堤
B	K6+939~K7+350	-3%	淤泥质粉质粘土、粉质粘土圆砾、细砂	17.5~21.2	江中段
C	K7+350~K7+700	+4%,+12.7%	细砂层和粉质粘土	18~21.2	江中段
D	K7+700~K7+950	+12.7%	粘性土层	16~18	江中段
E	K7+950~K8+200	+12.7%	砂质粉土、粉砂层	12.81~18	江中段
F	K8+200~K8+352	+10%	砂质粉土、淤泥质粉质粘土	14~21	北岸防洪堤

3.2 越江段细分掘进单元

细分掘进单元时需要先对土仓压力设定进行计算。盾构掘进时土仓压力的合理设置是建立在在对刀盘前方水土压力准确计算的基础之上的,选择合适的计算方法对掘进面静止土压力值进行准确计算进而维持刀盘前方土体的稳定。根据掘进土层断面是粘性土层还是砂性土层,分别采用水土合算和水土分算的方法计算出竖向压力,然后针对不同土层选择合理侧土压力系数计算出水平侧土压力,最后得到土压力预设值。

对单元A(0~156环)范围内土压力进行计算,然后按照控制精度在0.03 MPa进行分割,一共分为14个细分单元(A₁~A₁₄)。如图4a所示为A单元划分后各细分单元的环号范围和土压力范围,其中最长的细分单元A₅是从30~62环,这说明在这段里

程内土仓压力变化更加缓慢,在满足精度控制要求下看作一个单元进行控制掘进。同理对单元B,C,D,E和F进行划分,详细情况见表2。图4展示各粗分单元内部的细分单元数量和土压力变化。

3.3 形成越江段单元链

将细化的基本单元A₁~A₁₄、B₁~B₁₁、C₁~C₇、D₁~D₈、E₁~E₇、F₁~F₈相串联,形成具有55个掘进单元的单元链,以每个单元设定一个土压力,相邻单元采用变换土压力的方法进行越江段控制。

通过形成的钱塘江越江段盾构土仓压力参数施工单元链控制技术,有效解决了盾构江下保压的难题,顺利穿越钱塘江江下深切槽、抵御住江水和潮汐影响、并成功穿复杂多变地层。在国际上首次采用加泥式土压平衡盾构穿越超过1300 m宽的大型江河(钱塘江)的成功案例。

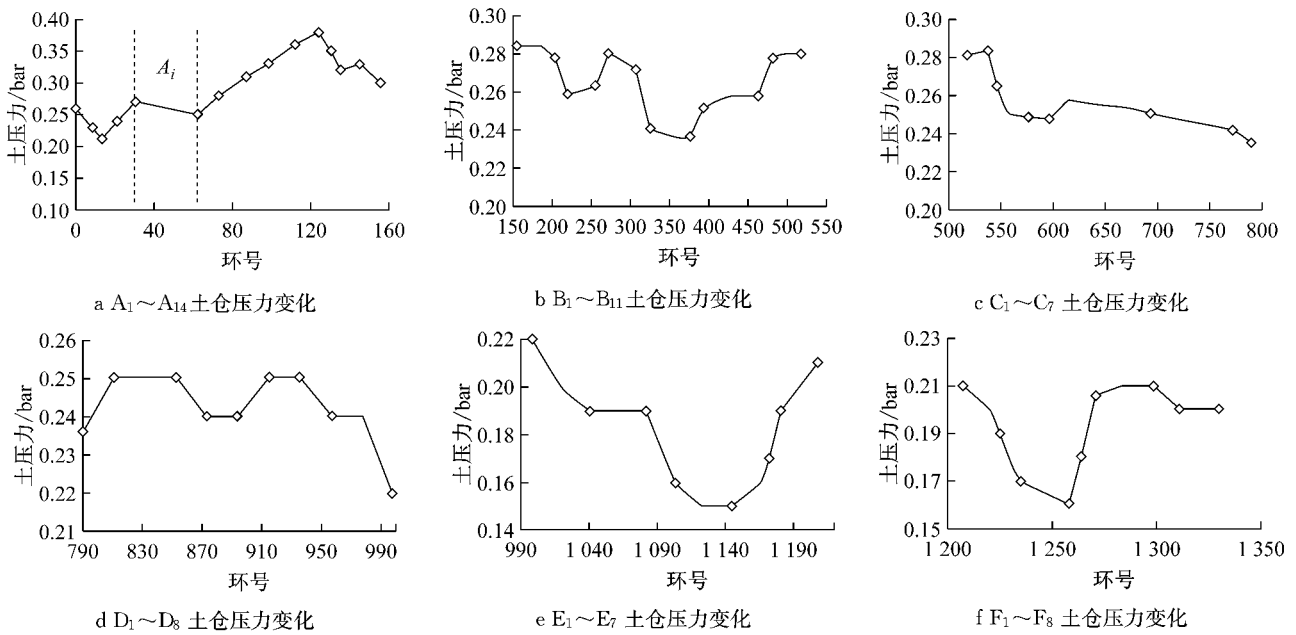


图 4 越江段细分单元土仓压力变化

Fig.4 The earth pressure variation of detailed classification of driving units for the cross river section

表 2 杭州地铁 1 号线越江段细分单元

Tab.2 Detailed classification of driving units for the cross river section of Hangzhou metro line 1

粗分单元名称	A	B	C	D	E	F
环数范围	0~156	156~518	518~790	790~998	998~1 207	1 207~1 330
划分精度/MPa	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
细分单元数量	14	11	7	8	7	8

4 结语

盾构隧道施工是迄今机械化程度最高的施工方法,正因为如此,现实中常常形成过度依赖施工机械的思想,而忽视了施工中的主动控制,本文提出了施工掘进单元控制方法,希望依托先进的施工机械,再融入主动控制思想,从而提高盾构隧道施工的品质。
致谢 本文研究得到了课题组全体成员以及中铁建大桥局(原中铁十三局)、宏润建设等单位的配合与支持,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 刘宣宇,邵诚. 盾构机自动控制技术现状与展望[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 152.
 LIU Xuanyu, SHAO Cheng. Present status and prospect of shield machine automatic control technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 152.
 [2] 郑刚,路平,曹剑然. 基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 3604.
 ZHENG Gang, LU Ping, CAO Jianran. Risk analysis based on

the parameters sensitivity analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3604.
 [3] 邹春华,周顺华,徐正良,等. 基于位移反分析法的盾构掘进面土压力计算[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 53.
 ZOU Chunhua, ZHOU Shunhua, XU Zhengliang, et al. calculation of the earth pressure on the excavation face of the shield tunnel based on the inverse displacement analysis method [J]. Chinese Railway Science, 2010, 31(4): 53.
 [4] 季昌,周顺华,许恺,等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3619.
 JI Chang, ZHOU Shunhua, XU Kai, et al. Field test research on influence factor of upward moving of shield tunnel segments during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3619.
 [5] 许恺,季昌,周顺华. 砂性土层盾构掘进面前土体改良现场试验[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 147.
 XUKai, JI Chang, ZHOU Shunhua. Soil conditioning field test before heading face of EPB shield in sandy soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 147.
 [6] 王洪新,傅德明. 土压平衡盾构平衡控制理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 61.
 WANG Hongxin, FU Deming. Theoretical and test studies on balance control of EPB shields[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(5): 61.