文章编号:1674-2974(2024)09-0046-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024086

基于地层变异性的大直径盾构隧道鲁棒性设计

张冬梅[1,2],李海云[1,2†],黄忠凯[1,2],谭飞[3],朱美恒[4],杨光[4],高俊华[4]
[1. 同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092;
2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室,上海 200092;
3. 中国地质大学(武汉) 工程学院,湖北 武汉 430074;
4. 中交隧道工程局有限公司 上海机场联络线项目部,江苏 南京 211106]

摘 要:大直径盾构隧道面临着复杂地层带来的挑战,传统的设计方法往往选择钻孔揭示的最不利地层断面或者采用平均化的地层,无法准确反映掘进面临的真实地层情况.因此,利用现有钻孔勘察信息建立耦合马尔可夫链模型,确定盾构掘进过程中最可能穿越的典型地层断面.采用不同设计参数展开数值模拟,以盾构隧道收敛变形相关指标的标准差作为鲁棒性指标,提出了一种基于地层变异性的大直径盾构隧道鲁棒性设计方法.研究结果表明,耦合马尔可夫链模型的最典型断面为盾构隧道提供了更准确的地层条件,使得鲁棒性设计更具适用性.最后,对现阶段常用的地层设计方法进行了优化,确保掘进过程中地层选择更接近实际情况,在有效降低隧道建设成本的同时,使得隧道具备更好的鲁棒性.

关键词:地层变异性;岩土参数变异性;耦合马尔可夫链模型;鲁棒性
中图分类号:U452.2 **文献标志码**:A

Robust Design of a Large Diameter Shield Tunnel Based on Stratigraphic Variability

ZHANG Dongmei[1,2], LI Haiyun[1,2†], HUANG Zhongkai[1,2], TAN Fei[3], ZHU Meiheng[4], YANG Guang[4], GAO Junhua[4]
[1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
4. Project Department of Shanghai Airport Connecting Line, CCCC Tunnel Engineering Bureau Co., Ltd., Nanjing 211106, China]

Abstract: The design of large-diameter shield tunnels is challenging due to the complex stratigraphy. Conventional design methods relied on borehole data to identify favorable stratigraphic sections or averaged stratigraphy. However, these methods failed to depict accurately during the tunnel excavation. To address the issue,

* **收稿日期**:2023-09-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52238010),National Natural Science Foundation of China(52238010);国家重点研发计划课题资助项目(2022YFC3800905),National Key Research and Development Program of China(2022YFC3800905);上海市"科技创新行动计划"优秀学术/技术带头人计划项目(22XD1430200),Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan Excellent Academic/Technical Leaders Program(22XD1430200);同济大学学科交叉联合攻关项目(2022-3-ZD-07),Tongji University Interdisciplinary Joint Research Project (2022-3-ZD-07)
作者简介:张冬梅(1975—),女,山东菏泽人,同济大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail: 2232582@tongji.edu.cn

this study first proposes a new approach by constructing a coupled Markov chain model using existing borehole data to determine the most possibly crossed dominant strata during shield tunneling. Subsequently, numerical simulations with various design parameters are conducted, the standard deviation related to convergence deformation of large-diameter shield tunnels is used as the robustness index, and a robust design of large-diameter shield tunnels based on stratigraphic variability. Study results show that the dominant strata of the coupled Markov chain model provide a more precise assessment of stratigraphy for shield tunnels. Moreover, the robust design based on the refined stratigraphic condition is more suitable for practical implementation. The commonly used strata design approaches at present are optimized to guarantee that the strata chosen are close to the actual situation during tunneling, which can effectively reduce the tunnel construction cost and enable the tunnel to have better robustness.

Key words: stratigraphic variability; geotechnical parameter variability; coupled Markov chain model; robustness

大直径盾构隧道穿越多重地层,导致其受力条件复杂[1-3].因此,准确描述大直径盾构穿越区间的地层形态,并将其作为盾构横断面设计的有效依据,是合理设计盾构隧道的关键.

目前国内外众多学者对地层变异性开展了大量研究.Deng等[3]在Chessa[4]开发的二维马尔可夫链模型的基础上进行了扩展,提出了一种模拟两方向转移概率的广义耦合马尔可夫链方法.Huang等[5]和Gong等[6]通过自相关函数来表征不同单元之间的空间相关性.Zhao等[7]和Deng等[8]提出用广义耦合马尔可夫链模型来模拟地层的变异性.上述研究通过关键地层参数的勘察数据,采用不同方法最大化利用地层信息[9-12].近年来,较多学者也对大直径盾构隧道的特性开展了研究[13-14].Zhang等[15]从隧道受力和收敛变形两方面研究了大直径盾构隧道穿越多层地层的力学行为.李守巨等[16]采用最不利荷载组合,对琼州海峡隧道盾构管片截面进行了设计.朱瑶宏等[17]在盾构隧道的纵剖面设计中提出,隧道可能穿越各个地层,结构设计中需要考虑埋深找到最不利工况.在实际应用中,为了便于管片制造,通常会在盾构隧道的通用选型设计时考虑最不利的工况,或者仅考虑深埋等典型工况[18].

已有研究结合不确定性分析和优化模型,开展鲁棒性设计[19-20].陈坤等[21]结合地层抗力系数和荷载-结构法,采用约束算法研究了盾构隧道的鲁棒性设计.华雨杉等[22]结合双层衬砌输水盾构隧道的受力特点引入不确定性,权衡设计的适应性和经济性.而盾构隧道穿越的地层和其力学性能是有变化的[23-24],仅通过设置地层弹簧的方式,未能综合考虑地层对大直径盾构隧道的影响.因此,需充分利用地层的相关参数确定盾构隧道最可能经过的典型地层断面,结合鲁棒性设计评估结构对地层的适应能力,使盾构选型更贴合掘进过程.

为了解决盾构隧道穿越地层形态变化的问题,提出一种考虑地层变异性和岩土参数变异性的盾构隧道鲁棒性设计方法.结合佛山市季华路地铁线路的设计资料,并充分利用现有的钻孔信息.首先,建立基于耦合马尔可夫链的地层随机场模型,通过概率统计分析得出盾构隧道最可能穿越的典型地层断面.然后在此基础上,引入岩土参数的变异性,并在保证结构安全可靠的条件下,以隧道收敛变形的相关指标作为鲁棒性指标,评估地层变异性对盾构隧道鲁棒性的影响程度,从而证明地层模拟的可行性和适应性.最后,对盾构隧道实际设计方法进行优化,综合考虑掘进过程和钻孔信息,为大直径盾构隧道的设计提供具有可行性的建议.

1　基于钻孔条件的地层变异性模型

Krumbein于1968年提出马尔可夫链模型在模拟地层序列中的运用,Park等[25]和Do等[26]通过将二维或三维马尔可夫链在不同方向上耦合,进一步将模型扩展到更高维度.耦合马尔可夫链模型具有明确的意义,并且能够有效地模拟多种类型地层的随机分布.

为更真实地模拟地层变异性,采用Park等[25]提出的耦合方法,充分利用钻孔数据.如图1所示,将

待建模区域离散为若干个大小相同的单元.单元状态的转移概率如式(1)所示.

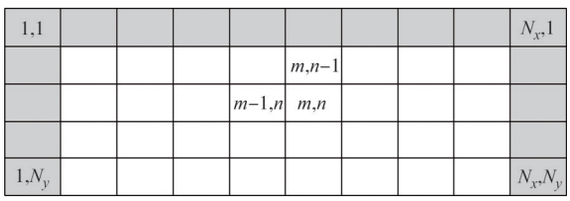


图1 耦合马尔可夫链状态表示

Fig.1 Coupled Markov state representation

$$p_{\mathrm{lt,klq}}=P\left(\frac{Z_{m,n}=S_{\mathrm{k}}}{Z_{m-1,n}=S_{\mathrm{l}},Z_{m,n-1}=S_{\mathrm{t}},Z_{N_x,n}=S_{\mathrm{q}}}\right)=\frac{p_{\mathrm{lk}}^{\mathrm{h}}p_{\mathrm{kq}}^{\mathrm{h}(N_x-m)}p_{\mathrm{tk}}^{\mathrm{v}}}{\sum_{f=1}^{M}p_{\mathrm{lf}}^{\mathrm{h}}p_{f\mathrm{q}}^{\mathrm{h}(N_x-m)}p_{\mathrm{tf}}^{\mathrm{v}}} \tag{1}$$

式中:$p_{\mathrm{lt,klq}}$为单元(m,n)处于S_{k}状态的概率;N_y为最右边单元格的列号;假设单元$(m-1,n)$、$(m,n-1)$和$(N_x,n-1)$分别处于S_{l}、S_{t}和S_{k}状态;$p_{\mathrm{kq}}^{\mathrm{h}(N_x-m)}$和$p_{f\mathrm{q}}^{\mathrm{h}(N_x-m)}$分别为水平方向上$(N_x-m)$步长从$S_{\mathrm{k}}$、$S_f$到$S_{\mathrm{q}}$的概率.

Deng等[3]基于Walther定律提出了一种估算转移次数矩阵的方法.已知垂直转移计数矩阵$\boldsymbol{T}^{\mathrm{v}}$时,水平转移计数矩阵$\boldsymbol{T}^{\mathrm{h}}$如式(2)所示.

$$\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{h}}=\begin{cases}\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{v}},i\neq j\\K\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{v}},i=j\end{cases} \tag{2}$$

该定律指出,不同地层在垂直和水平方向的沉积顺序相同,因此不同类型地层的转换次数相同($T_{mn}^{\mathrm{h}}=T_{mn}^{\mathrm{v}},m\neq n$).由于在相同的地质环境中共同沉积,所以假设地层的平均倾斜度都相同,令$K=T_{mn}^{\mathrm{h}}/T_{mn}^{\mathrm{v}}$,$K$是唯一未知的参数.所有单元从一个状态转移到其自身的概率总是高于其他状态.如果钻孔揭示三种地层,则垂直转移计数矩阵如式(3)所示.

$$\boldsymbol{T}^{\mathrm{v}}=\begin{bmatrix}T_{11}^{\mathrm{v}}&T_{12}^{\mathrm{v}}&T_{13}^{\mathrm{v}}\\T_{21}^{\mathrm{v}}&T_{22}^{\mathrm{v}}&T_{23}^{\mathrm{v}}\\T_{31}^{\mathrm{v}}&T_{32}^{\mathrm{v}}&T_{33}^{\mathrm{v}}\end{bmatrix} \tag{3}$$

耦合马尔可夫链模型的具体步骤如下:

1)利用钻孔信息计算垂直转移概率矩阵$\boldsymbol{T}^{\mathrm{v}}$.

2)假设N_{k}个K值$(K_1,K_2,\cdots,K_{N_{\mathrm{k}}})$用于计算水平转移概率矩阵$\boldsymbol{T}^{\mathrm{h}}$.

3)模拟条件由两侧距离最近的钻孔提供.

4)由每个单元状态概率的积表示钻孔岩土类型出现的概率P_{l},即式(4):

$$P_{\mathrm{l}}=P\left(Z_{m,1}=S_{k_1}\right)\cdots P\left(Z_{m,n}=S_{k_n}\right) \tag{4}$$

式中:$P(Z_{m,n}=S_{k_n})$为单元(m,n)的状态转化为S_{k_n}的概率;k_n为单元在竖直方向上的个数.取N_{k}个结果中P_{l}最大时对应的K值,用于后续地层模拟.蒙特卡罗模拟地层时一般取1 500次即可满足精度要求[8],模拟取2 000次.

2 基于随机场的盾构穿越地层模型

在考虑地层变异性的基础上得到最大穿越概率的典型横断面,引入一次二阶矩法来描述每一层岩土性质的内在变异性,真实反映盾构隧道穿越地层多维度性质的变化.

2.1 工程概况

采用佛山市季华路西延线隧道的勘察设计资料.综合考虑各种因素,确定盾构隧道的内径为13.7 m,管片厚度为0.65 m.在掘进起始方向的480 m范围内,共有12个钻孔,编号从SD059到SD128.

如图2所示,对钻孔所得的地层进行线性插值和概化,得到现有设计参考的平均化地层.根据地质勘查报告,隧道洞身主要穿过黏土、砂岩和砾岩,分别用红色、蓝色和黄色来表示,并将钻孔条件作为后续地层模拟的边界条件.

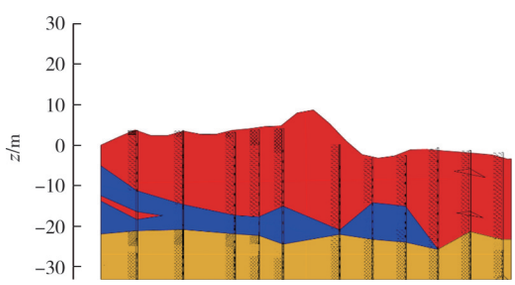


图2 纵断面钻孔图

Fig.2 Longitudinal borehole profile

表1列出了各地层压缩模量的统计参数.压缩模量的平均值在6.54~33.23 MPa之间,变异系数在0.33~0.55之间.由于各地层压缩模量存在较大差异,引入地层变异性模型模拟地层边界,并在地层边界内考虑岩土参数的不确定性.

表1 部分钻孔统计信息

Tab.1 Some borehole statistics

地层	压缩模量范围/MPa	均值/MPa	变异系数
中风化泥岩	4.50~9.29	6.54	0.55
中风化砂岩	2.72~24.70	12.39	0.33
中风化砂砾岩	2.72~23.70	13.95	0.44
中风化玄武岩	15.80~58.40	33.23	0.48

2.2　基于耦合马尔可夫链的地层随机场模型

利用耦合马尔可夫链模型和钻孔数据,结合蒙特卡罗模拟,预测地层在水平和竖直方向上的分布,并确定最佳参数以进行地层模拟.

2.2.1　钻孔信息转换

为了建立一个二维耦合马尔可夫链模型,用于描述盾构穿越的地层,将所有钻孔投影到盾构掘进方向上,并重新标记为D1~D12.以图3为例,选择前7个钻孔进行分析.在新的坐标系中,横轴表示盾构掘进方向,纵轴表示垂直方向.

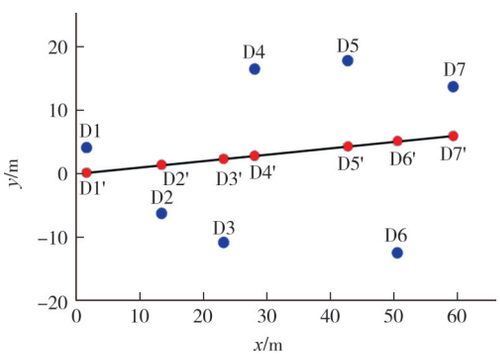


图3　钻孔相对位置

Fig.3　Relative position of borehole

在所有的钻孔中,钻孔长度从-24.5 m到20 m不等.水平方向上,钻孔之间的最大间距为13 m.投影结果如式(5)所示.

$$y = -0.129\,90x + 0.451\,9 \tag{5}$$

2.2.2　耦合马尔可夫链模拟

根据式(3)计算出竖直方向转移概率矩阵,如表2所示.

表2　竖直方向转移概率矩阵

Tab.2　Vertical transition probability matrix

地层状态	黏土	砂岩	砾岩
黏土	0.867 8	0.086 2	0.045 98
砂岩	0.130 4	0.826 1	0.043 48
砾岩	0	0	1

表3为从蒙特卡罗模拟中抽样出的水平方向转移概率矩阵,验证了Walther定律中提出的沉积地层在水平方向上的拓展长度远大于竖直方向.

2.2.3　预测结果

K为8~12时,地层模拟效果较好[3].假设N_k个不同的K值,结合蒙特卡罗模拟结合式(4)找到最合适的K值.垂直采样间隔设置为钻孔所揭示的地质单元的最小厚度.

表3　水平方向转移概率矩阵

Tab.3　Horizontal transition probability matrix

地层状态	黏土	砂岩	砾岩
黏土	0.836 7	0.163 3	0
砂岩	0.399 8	0.600 2	0
砾岩	0.194 9	0.091 4	0.713 7

经验证,K取8.4时P_1对应最大,地层模拟效果最好.其中一次模拟的地层如图4所示,黏土、砂岩、砾岩分别对应1、2、3.

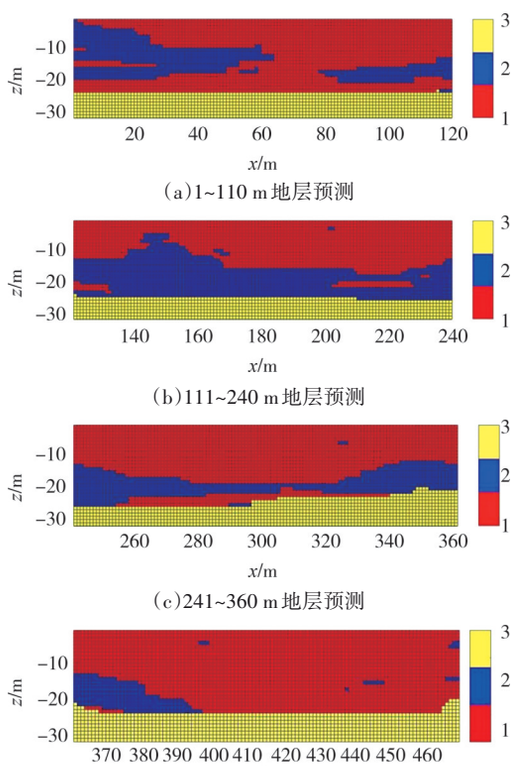


图4　耦合马尔可夫链预测

Fig.4　Coupled Markov formation prediction

2.2.4　准确性验证

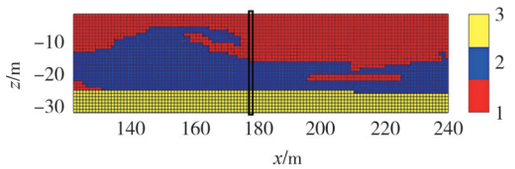
提取钻孔Jz-Ⅲ20-S18和SD116钻孔信息,验证模拟地层真实性,选取情况如表4所示.

表4　钻孔布置方案

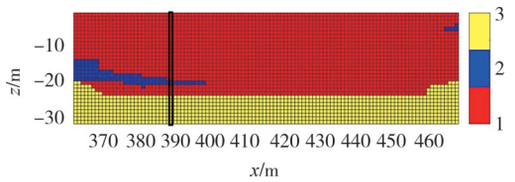
Tab.4　Drilling layout plan

钻孔	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
选取	√	√	√	√		√	√	√	√		√	√

图5中展示了其中一种情况的模拟结果.通过以10个钻孔信息作为模拟边界条件,剩余钻孔作为验证信息,成功将模拟精确度提高到95.67%.与图2中仅使用线性插值方法得出的地层相比,耦合马尔可夫链模拟的地层更能反映真实情况.



(a)钻孔 Jz-Ⅲ20-S18 预测



(b)钻孔 SD116 预测

图 5 耦合马尔可夫链模型验证

Fig.5 Coupled Markov formation prediction

2.2.5 典型穿越地层选择

通过勘察设计资料,获得盾构掘进过程中的埋深变化以及相应的掘进长度.在耦合马尔可夫链模拟的地层中,结合盾构穿越的区间进行统计分析.蒙特卡罗模拟生成的地层情况存在多种可能性,但盾构最常穿越的典型地层断面分布情况趋于一致.

如图6所示,该断面状态下隧道中心埋深20.36 m,上覆土为黏土,黏土底部对应标高-12.13 m,隧道穿越砂岩和砾岩,岩性转换边界对应的标高为-21.45 m,为后续地层模拟提供基础.

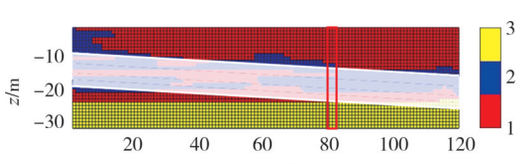


图 6 盾构穿越埋深对应

Fig.6 Shield crossing buried depth

3 基于模拟地层的鲁棒性设计模型

利用最常穿越地层和相应岩土参数的力学特性,为数值模拟提供更准确的地层条件.在确保盾构隧道安全的前提下,评估与收敛变形相关的鲁棒性指标,并使用多目标优化方法获取适宜的鲁棒性设计方案.

3.1 力学模型

Zhang 等[15]已证明地层-结构法在模拟复合地层条件下的有效性.如图7所示,模型高60 m,宽100 m,中心有一外径15 m的隧道.结合设计指标,将管片厚度、管片配筋率和接头螺栓进行转换,得到适用于ABAQUS模型的设计参数:管片厚度h、管片等效模量E_{con}和等效接头转角刚度K_θ.在模拟出的最易穿过的地层的基础上,引入一次二阶矩法考虑岩土参数的变异性,生成48个设计案例.

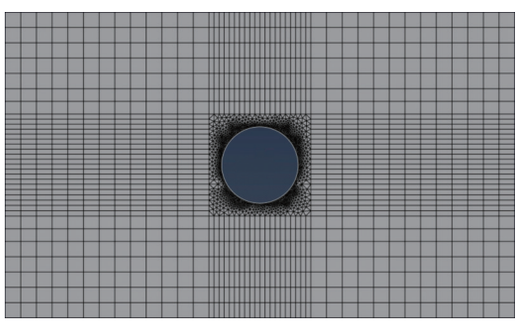


图 7 有限元模型

Fig.7 Finite element model

3.2 鲁棒性指标

《盾构法隧道施工及验收规范》(GB 50446—2017)[27]中要求盾构法隧道的公路隧道成型后验收标准为衬砌圆环椭圆度≤0.8%,《地铁设计规范》(GB 50157—2013)[28]规定盾构隧洞的最大收敛变形必须控制在0.4%D ~0.6%D,并考虑单环模拟(通缝拼装)的刚度折减,设定收敛变形极限值为Δ_u=100 mm.定义正常使用极限状态安全系数F_s如式(6)所示,其中Δ_x、Δ_y分别为断面水平收敛变形和竖向收敛变形.

$$F_s = \frac{\Delta_u}{\max(\Delta_x, \Delta_y)} \tag{6}$$

大直径盾构隧道在穿越复合地层时不可避免地面临复杂多变的地质条件.为了有效评估衬砌结构对这种地层的适应能力,选取安全系数F_s的变异系数δ作为鲁棒性指标,如式(7)所示,反映安全性的变异程度,即鲁棒性指标δ越小,鲁棒性越好.

$$\delta = \frac{F_{s\,std}}{F_{s\,mean}} \tag{7}$$

3.3 多目标优化模型

依据上述设计流程与背景,将优化的问题简化为二维优化问题.优化参数为管片厚度h、管片配筋率ρ和横向接头螺栓直径D_b,结合设计资料,建立成本函数如式(8)所示:

$$P_m = P_c V_c + P_s m_s + P_b m_b \tag{8}$$

引入各类成本参数,符号说明见表5.

根据现场的设计概算资料,取衬砌混凝土单价1 200 元/m^3,钢筋单价3.883 元/kg,接头螺栓单价

表5　符号说明

Tab. 5　Symbol description

符号	意义	单位
P_c	衬砌混凝土单价	元/m^3
P_s	钢筋单价	元/kg
P_b	接头螺栓单价	元/kg
V_c	混凝土用量	m^3/m
m_s	钢筋用量	kg/m
m_b	接头螺栓总质量	kg/m

9.73元/kg.各材料的用量计算参照式(9).

$$\begin{aligned} V_c &= \pi\left[R^2-(R-h)^2\right] \\ m_s &= 2\pi(R-h/2)\rho h \\ m_b &= n\pi D_b^2/4 \end{aligned} \tag{9}$$

式(10)仅考虑优化材料相关成本,不代表单位长度隧道建设的总费用.

$$\begin{aligned} C_{ost} = {} & 81\,842.5\times h\times(1-\rho)+ \\ & 2\,498\,880.6\times A_b\times l_b+3\,280\,110.66\times\rho\times h \end{aligned} \tag{10}$$

结合定价和盾构设计情况,得出每延米所需管片、钢筋以及螺栓的单价,具体如表6所示.

表6　盾构具体工程费用对应

Tab. 6　Shield specific engineering costs corresponding

种类	数量	每延米数量	每延米费用/元
管片混凝土	44 335.16 m^3	30.118 m^3	22 864.31
钢筋	7 282.02 t	5.045 15 t	12 836
8.8级M36螺栓	31 458套	21.37套	892.872

初始方案是季华路隧道项目的实际设计参数:管片配筋(6ϕ25+8ϕ22)/环,ρ=1.194%,h=0.65 m,D_b=36 mm.盾构隧道段横断面设计综合考虑建筑限界、设备限界及综合误差等因素.管片厚度设计过小,则衬砌环变形量越大,对施工中的拼装和隧道防水越不利;管片厚度设计过大,则会影响建筑限界.综合考虑大直径盾构隧道断面的特点,选取各待优化设计参数的上下界如表7所示.

结合数值模拟得到隧道在不同设计下的鲁棒性,对算例参数进行影响性分析和归一化处理后,得到设计与鲁棒性指标的表达式,如式(11)所示.

表7　设计参数限值

Tab. 7　Design parameter limits

设计参数	限值
h/m	[0.40,0.60]
ρ/%	[0.2,4.0]
D_b/mm	[20,40]

$$\begin{aligned} \delta = {} & -0.117\,9-3.163\,5\times\rho+0.501\,9\times h+ \\ & 5.718\,8\times D_b+2.087\,1\times\rho\times h+ \\ & 26.606\,4\times D_b\times\rho-13.307\,7\times D_b\times h \end{aligned} \tag{11}$$

每一种设计都有对应的鲁棒性和成本,成本越高相应鲁棒性越好,但影响程度难以评估.引入双目标优化方法权衡鲁棒性和经济性,筛选不同Pareto组中的最优解,获得完整的Pareto前沿面.

3.4　不同地层选择方法

从工程实际设计方法出发,不考虑地层变异性.第一种方法选取钻孔统计得到的最不利地层进行设计.第二种对比方法采用线性插值法,直接得到地层.最后统一对比不同设计的鲁棒性,在现阶段设计基础上提出有效建议.

4　参数研究

4.1　基于地层模拟的鲁棒性分析的盾构最优设计

通过NSGA-Ⅱ算法获得的Pareto前沿如图8所示.在Pareto该前沿上,鲁棒性最优点Knee Point的设计费用为8.606 3万元.这个最佳效益点是通过成本函数和鲁棒性函数共同决定的,并且与陈坤等[21]和华雨杉等[22]的设计结果相符.

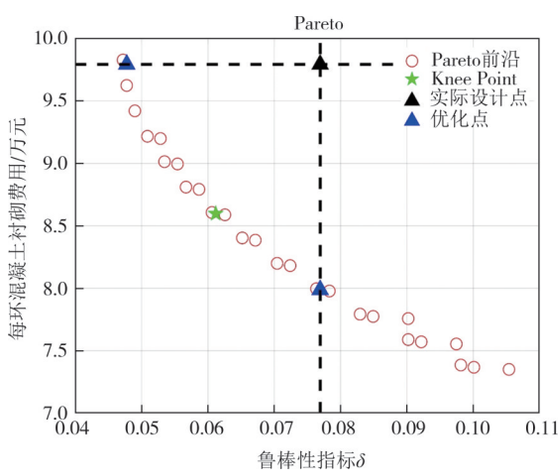


图8　基于NSGA-Ⅱ优化的Pareto前沿

Fig.8　Pareto based on NSGA-Ⅱ optimization

鲁棒性指标从0.05增加到0.062时,衬砌费用迅速下降至8.606 3万元,而当鲁棒性指标从0.062增加到0.09时,衬砌费用变化不明显.故Knee Point具有较高的鲁棒性,并且与Zhang等[15]提出的鲁棒性设计相吻合.结合实际设计方案,保持费用为9.791万元不变,可将鲁棒性指标从0.058提升至0.076;或者在保持鲁棒性不变的情况下,成本节省近1.8万元.在减

少 18.38% 的设计成本的同时,鲁棒性提高了约 31.03%.各设计点的具体比较如表 8 所示.

表 8 计算结果对比

Tab. 8 Comparison of calculation results

设计点	h/mm	ρ/%	D_b/mm	P_m/万元	δ
实际点	0.65	1.194	36	9.791	0.077 6
优化点 1	0.60	1.036	36	9.791	0.049 1
优化点 2	0.60	1.4	34	7.981 4	0.077 6
最优点	0.60	1.6	36	8.606 3	0.060 59

4.2 不同地层设计选择对鲁棒性的影响

使用和 3.3 节中一致的设计区间,结合工程设计中较常采用的两种地层选择方法,即基于钻孔所得的最不利地层模型和加权平均地层模型,对盾构隧道展开鲁棒性设计.

如图 9(a)所示,当选择最不利地层时,鲁棒性最优点 Knee Point 的设计费用为 9.376 万元,其对应的鲁棒性指标为 0.0716 4.最不利地层模型的设计未考虑地层的变化,导致低估了地层的影响,从而高估了实际设计的鲁棒性,对设计的安全性产生影响.而在图 9(b)中,加权平均地层模型综合考虑了整体钻孔的信息和埋深的变化,Knee Point 的设计费用为 8.706 3 万元,对应鲁棒性为 0.068 82,相比最不利地层更为优越.

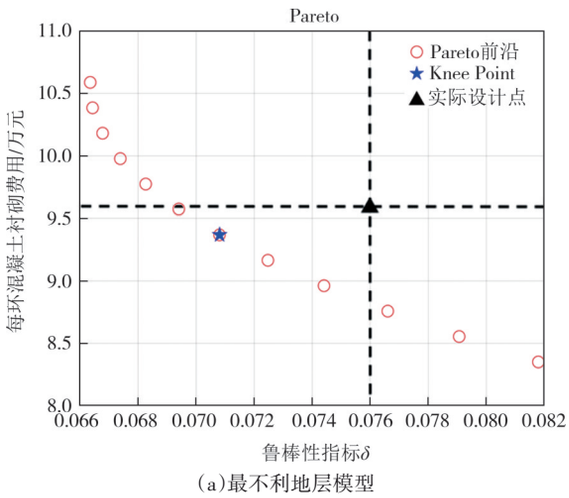
如表 9 所示,耦合马尔可夫链模拟的地层条件下的最优解相比于两种地层条件最优设计点,具有更强的鲁棒性,并且建设成本也更低.预测地层模型越准确,设计的鲁棒性就越好,即鲁棒性指标越小.因此,通过准确预测地层条件,可以使盾构具备更可靠的鲁棒性设计.

4.3 基于工程设计的优化建议

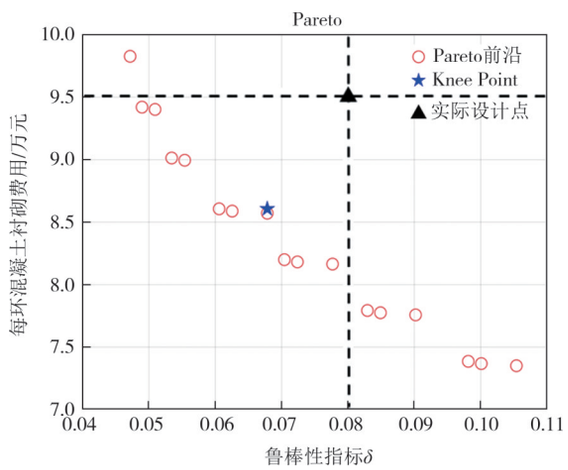
蒙特卡罗模拟需要大量计算,为了提高效率,综合考虑工程中常采用的加权平均地层、地铁隧道穿越埋深情况.采用 2.2.5 节中提出的典型穿越断面选择方法,得到最易穿越的断面如图 10 所示.

该断面状态下隧道中心埋深 21.6 m,上覆土为黏土,隧道穿越砂岩和砾岩,岩性转换边界对应的标高为−23.45 m,与耦合马尔可夫链模型模拟的结果相近.

如图 11 所示,基于该地层条件展开了鲁棒性设计,得到对应的 Pareto 前沿.该 Knee Point 的最优造价为 7.895 万元,对应设计的管片厚度为 0.64 m,配筋率为 1.19%,螺栓直径为 34 mm.对应的鲁棒性指标为 0.063 5.与耦合马尔可夫链地层模型相比,成本稍低,但鲁棒性也相应减弱.



(a)最不利地层模型



(b)加权平均地层模型

图 9 考虑不同地层条件下的 Pareto 前沿

Fig.9 Pareto frontier under stratigraphic conditions

表 9 不同地层模型对比

Tab. 9 Correlation of different stratigraphic models

设计点	h/mm	ρ/%	D_b/mm	P_m/万元	δ
最不利地层	0.62	1.736	36	9.791 0	0.071 64
加权平均地层	0.55	1.62	34	8.706 4	0.068 82

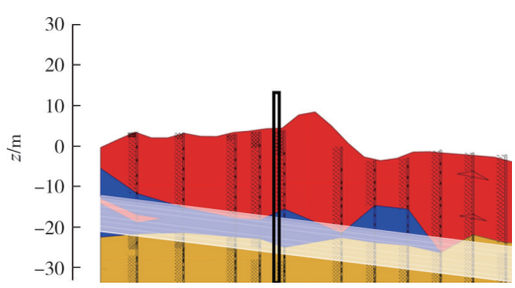


图 10 基于实际设计的优化地层选择

Fig.10 Optimal formation selection based on actual design

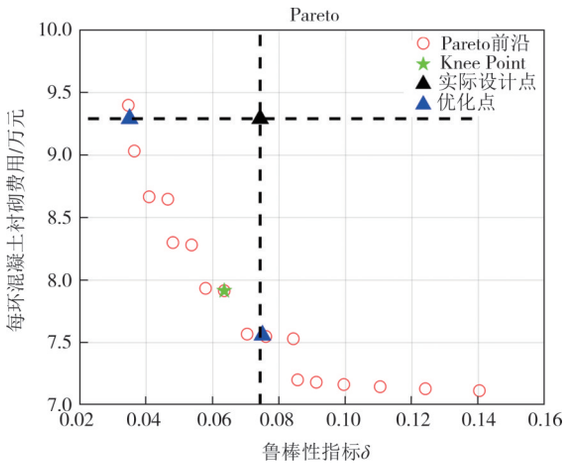


图 11　优化地层选择的 Pareto 前沿

Fig.11　Pareto frontier for optimal formation selection

5　结 论

通过对具体工程案例的分析,利用钻孔信息进行地层模拟,得到大直径盾构隧道最可能经过的典型断面.在考虑结构对岩土参数变异敏感性和大直径盾构隧道建设成本的基础上,形成一个约束目标优化问题,建立了一套大直径盾构隧道的鲁棒性设计框架.得到的主要结论如下:

1) 大直径盾构隧道所处地层环境复杂,通过结合钻孔勘探的信息,能更精确地预测盾构开挖阶段所经过的地层分布情况,更加准确地描述盾构周边地层条件.

2) 盾构隧道穿越区间的地层边界和内部岩土参数存在较大变异性,选取鲁棒性指标时考虑安全系数的响应,精确评价结构的鲁棒性,进而结合设计进行优化.

3) 盾构隧道横断面设计时,应引入穿越地层变化的理念,综合考虑掘进穿越过程和钻孔所得条件,提升盾构隧道的鲁棒性,并保证计算效率,为大直径盾构隧道的设计提供可靠的依据.

4) 为大直径盾构隧道设计提供了切实可行的鲁棒性设计框架,并对大直径盾构隧道地层分布做出了较准确的预测,为工程提供了有价值的参考.

参考文献

[1] JUANG C H, ZHANG J, SHEN M F, et al. Probabilistic methods for unified treatment of geotechnical and geological uncertainties in a geotechnical analysis[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 148-161.

[2] WANG C H, WANG K, TANG D F, et al. Spatial random fields-based Bayesian method for calibrating geotechnical parameters with ground surface settlements induced by shield tunneling[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(4): 1503-1519.

[3] DENG Z P, LI D Q, QI X H, et al. Reliability evaluation of slope considering geological uncertainty and inherent variability of soil parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 92: 121-131.

[4] CHESSA A G. A Markov chain model for subsurface characterization: theory and applications [J]. Mathematical Geology, 2006, 38(4): 503-505.

[5] HUANG H W, GONG W P, KHOSHNEVISAN S, et al. Simplified procedure for finite element analysis of the longitudinal performance of shield tunnels considering spatial soil variability in longitudinal direction [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 64: 132-145.

[6] GONG W P, ZHAO C, JUANG C H, et al. Stratigraphic uncertainty modelling with random field approach[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 125: 103681.

[7] ZHAO C, GONG W P, LI T Z, et al. Probabilistic characterization of subsurface stratigraphic configuration with modified random field approach[J]. Engineering Geology, 2021, 288: 106138.

[8] DENG Z P, JIANG S H, NIU J T, et al. Stratigraphic uncertainty characterization using generalized coupled Markov chain [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(10): 5061-5078.

[9] 张东明, 代鈜锋, 王慧, 等. 考虑地层变异的浅基础承载力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1412-1419.
ZHANG D M, DAI H F, WANG H, et al. Analysis on shallow foundation capacity considering geological heterogeneity [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5): 1412-1419.(in Chinese)

[10] ZHANG D M, DAI H F, WANG H, et al. Investigating the effect of geological heterogeneity of strata on the bearing capacity of shallow foundations using Markov random field[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2021, 7(4): 04021060.

[11] 赵森森, 张冬梅, 黄忠凯. 大直径盾构隧道分布式凹凸榫受力特性[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 54-62.
ZHAO S S, ZHANG D M, HUANG Z K. Mechanical characteristics of distributed mortise-and-tenon of large-diameter shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 54-62.(in Chinese)

[12] 张冬梅, 刘杰, 李保军, 等. 大直径盾构隧道斜螺栓环缝抗剪特性研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 142-153.
ZHANG D M, LIU J, LI B J, et al. Shearing behavior of circumferential joints with oblique bolts in large diameter shield tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 142-153.(in Chinese)

[13] ZHANG D M, ZHOU W D, BU X H, et al. Failure mechanism and stiffness degradation of double lining with inner R/FRC lining subjected to internal water pressure [J]. Tunnelling and

Underground Space Technology,2022,130:104737.

[14] ZHANG D M, CHEN C C, ZHANG D M. Ground surface movement of shallow-buried large-sectional tunnel under full-ring pipe-jacking roof and ground freezing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2022,127:104600.

[15] ZHANG D M,CHEN S,WANG R C,et al. Behaviour of a large-diameter shield tunnel through multi-layered strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104062.

[16] 李守巨,刘军豪,刘文怡. 琼州海峡隧道盾构管片内力分析及截面设计[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(3):547-552.
LI S J, LIU J H, LIU W Y. Internal force analysis and section design for shield tunnel segments in Qiongzhou strait[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2018,37(3): 547-552.(in Chinese)

[17] 朱瑶宏,夏杨于雨,董子博,等. 通用环错缝拼装盾构隧道结构设计计算参数研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):114-121.
ZHU Y H,XIA Y Y Y,DONG Z B,et al. Calculation parameters of a shield tunnel structure with a staggered segmental tunnel lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 114-121.(in Chinese)

[18] 赵子蓬, 刘国彬, 白云. 高水压大直径盾构隧道管片设计[J]. 公路交通技术, 2018, 34(增刊1):98-106.
ZHAO Z P, LIU G B, BAI Y. Design of the shield tunnel segments with large diameter in high water pressure [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(Sup.1): 98-106.(in Chinese)

[19] DODIGOVIĆ F, IVANDIĆ K, KOVAČEVIĆ M S, et al. Modified, reliability-based robust geotechnical design method, in accordance with eurocode 7 [J]. Applied Sciences, 2021, 11(18):8423.

[20] GAO K,DO D M, CHU S,et al. Robust topology optimization of structures under uncertain propagation of imprecise stochastic-based uncertain field[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 175: 109238.

[21] 陈坤, 黄宏伟, 张东明,等. 基于约束多目标优化算法的盾构隧道设计方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 81-86.
CHEN K, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Constrained multi-objective optimization algorithm based design method of shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup.1): 81- 86.(in Chinese)

[22] 华雨杉, 黄宏伟, 陈坤, 等. 双层衬砌输水盾构隧道鲁棒性设计方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(9): 145-155.
HUA Y S, HUANG H W, CHEN K, et al. Robust design method of water conveyance shield tunnel with double lining[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(9): 145-155.(in Chinese)

[23] 黄大维, 冯青松, 刘开富, 等. 基于弯矩最小化的地铁盾构隧道横断面优化设计分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 159-166.
HUANG D W, FENG Q S, LIU K F, et al. Analysis for optimal design of cross section of metro shield tunnel based on minimum bending moment[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 159-166.(in Chinese)

[24] 李春良, 王方彦, 张立辉, 等. 复杂条件下的地铁盾构隧道的力学行为研究[J]. 铁道学报, 2016, 38(5): 103-109.
LI C L, WANG F Y, ZHANG L H, et al. Study on mechanical behavior of metro shield tunnel under complex conditions [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(5): 103-109.(in Chinese)

[25] PARK E, ELFEKI A, DEKKING M. Characterization of subsurface heterogeneity: integration of soft and hard information using multidimensional coupled Markov chain approach [J]. Developments in Water Science, 2005, 52: 193-202.

[26] DO N A, DIAS D, ORESTE P, et al. 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 115-127.

[27] 盾构法隧道施工及验收规范: GB 50446—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Code for construction and acceptance of shield tunnelling method: GB 50446—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.(in Chinese)

[28] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.(in Chinese)