

注浆加固对盾构施工沉降控制成效的概率评估

蓝沐林¹ 沈梦芬¹ 何 溯¹ 徐 全² 陈浙徽¹ 鲍丽春¹

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 310014, 杭州; 2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 243071, 马鞍山)

摘 要 [目的] 为了减少盾构隧道下穿建筑物时的地层扰动, 有必要研究盾构隧道下穿建筑物过程中注浆加固的沉降控制效果。[方法] 以杭州地铁 12 号线下沙路某区段盾构隧道下穿桩基建筑物为例, 基于 FLAC 3D 有限差分软件, 分别采用确定性分析与可靠度分析两种方法, 评估了注浆加固措施对盾构施工引起的基础沉降控制成效。[结果及结论] 在确定性分析中, 现场实测数据和数值分析结果均表明, 建筑物基础的最大沉降发生在先开挖隧道一侧; 注浆加固技术能够有效降低盾构开挖引起的建筑物基础沉降, 使建筑物沉降值满足规范设计要求。在可靠度分析中, 以黏聚力和内摩擦角为随机变量, 采用拉丁超立方抽样-响应面-有限差分法评估注浆加固的控制效果, 发现注浆加固可以有效提高建筑物基础的结构可靠度, 以及显著降低计算沉降值的不确定性。与确定性分析方法相比, 可靠度分析方法由于考虑了参数的不确定性, 在描述建筑物基础结构安全性方面更为合理, 能够用于评估复杂盾构隧道开挖工程的控制措施有效性。

关键词 盾构隧道; 沉降控制效果; 注浆加固

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.027

Probabilistic Evaluation of Grouting Reinforcement on Settlement Control Effectiveness in Shield Tunneling Construction

LAN Mulin¹, SHEN Mengfen¹, HE Su¹, XU Quan², CHEN Zhehui¹, BAO Lichun¹

(1. Zhejiang University of Technology College of Civil Engineering, 310014, Hangzhou, China; 2. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., 243071, Maanshan, China)

Abstract [Objective] In order to reduce the ground disturbance when the shield tunnel underpasses buildings, it is necessary to study the settlement control effect of grouting reinforcement during shield tunneling under the buildings. [Method] Taking the shield tunnel of Hangzhou Metro Line 12 passing under the pile foundation building in a certain section of Xiasha Road as an example, and based on the FLAC 3D finite difference software, two methods of deterministic analysis and reliability analysis are adopted respectively to evaluate the effectiveness of grouting reinforcement measures in controlling foundation settlement caused by shield construction. [Result & Conclusion] In the deterministic analysis, both the on-site measured data and the numerical analysis results show that the maximum building foundation settlement occurs on one side of the tunnel that is first excavated; grouting reinforcement technology can effectively reduce the building foundation settlement caused by shield excavation, making the building settlement value meets the specification design requirements. In the reliability analysis, the cohesion and internal friction angle are used as random variables, and the Latin hypercube sampling-response surface-finite difference method is adopted to evaluate the control effect of grouting reinforcement. It is found that the grouting reinforcement can effectively improve the structural reliability of the building foundation and significantly reduce the uncertainty of the calculated settlement value. Compared with the deterministic analysis method, the reliability analysis method is more reasonable in describing building foundation structure safety by taking the uncertainty of the parameters into account, and can be used to evaluate the effectiveness of control measures in complex shield tunnel excavation projects.

Key words shield tunnel; settlement control effect; grouting reinforcement

0 引言

盾构法是一种隧道开挖的施工方法, 已在地铁隧道建设中获得了广泛应用^[1-2]。由于城市管线散布情况复杂, 建筑物分布密集, 盾构隧道开挖将不可避免地出现下穿既有管线、建(构)筑物等情况^[3-4]。盾构隧道开挖过程会对周围土体产生扰动, 改变土体原有的应力状态, 导致开挖区域周围土体发生位移, 引起建筑物基础的不均匀沉降^[5-6]。因此, 研究如何减少盾构隧道下穿建筑物时的地层扰动, 对控制建筑物沉降有重要的意义。

目前, 盾构隧道施工穿越建筑物的沉降控制措施主要有: 加强盾构隧道支护结构、盾尾加厚注浆、

地基加固、在隧道与建筑物之间设置隔离桩等。其中,设置隔离桩的方法对隧道与建筑物之间的距离有一定的要求,不适用于隧道下穿建筑物的情况,而地基加固与盾尾加厚注浆的应用较为广泛,已有学者对加厚注浆的沉降控制效果及影响因素进行了相关研究。文献[7]结合数值模拟与工程实测方法,研究了注浆预加固技术对盾构隧道下穿高耸结构工程引起的基础倾斜及层间位移角的影响,研究结果表明,盾构隧道穿越前对高耸结构进行注浆预加固能有效降低基础倾斜及结构层间位移角。文献[8]结合数值模拟与工程实测方法,分析了洞内深孔注浆加固措施的技术参数对加固效果的影响,研究结果表明,深孔注浆加固技术可以有效减少盾构施工对砌体结构的影响,保证建筑物的安全与正常使用。文献[9]以常州地铁2号线盾构下穿建筑物为例,采用FLAC 3D软件进行数值模拟,研究了洞内二次注浆的地层沉降控制效果。综上所述,注浆加固技术可以有效降低隧道开挖对土体的扰动,减少土层位移。

但这些研究方法考虑的土体参数均为确定性的土体参数,忽略了土体参数的变异性影响,而天然土体受到地质成因、构造活动及人类活动等影响,土体参数的变异性是客观存在的,土体参数的变异性对隧道开挖引起的地层应力响应具有显著的影响。因此,在注浆加固技术中考虑土体参数变异性是十分必要的。文献[10]提出基于三维非线性有限元与响应面、JC(当量正态化)法相结合的可靠度计算方法,解决了大型复杂结构功能函数无法显示、表达的问题,且计算精度满足要求,计算效率高。文献[11]结合了具体的隧道工程,运用有限元响应面法对所确定的最危险截面进行数值分析,计

算隧道衬砌可靠度指标。文献[12]将随机场理论引入盾构隧道地面沉降的可靠度分析,研究了多个土层、多元及统计相关的岩土参数空间变异性对岩土工程的影响。可靠度研究对于隧道工程的安全性分析具有重要的意义,但大多文献针对控制措施的加固效果、隧道本身沉降及地面沉降的可靠性评估进行研究,对于隧道下穿高层结构建筑物的基础变形、加固措施等研究,尚未将土体参数的不确定性考虑其中。

鉴于此,本文采用FLAC 3D有限差分软件,针对杭州地铁12号线下沙路某区段盾构隧道下穿桩基建筑物的施工过程进行数值模拟分析,对土体参数分别采用确定性与非确定性两种分析方法,结合现场实测数据,分析注浆加固技术的加固效果。本文研究可为盾构隧道工程下穿建筑物加固措施的安全性评估提供参考与借鉴。

1 工程概况

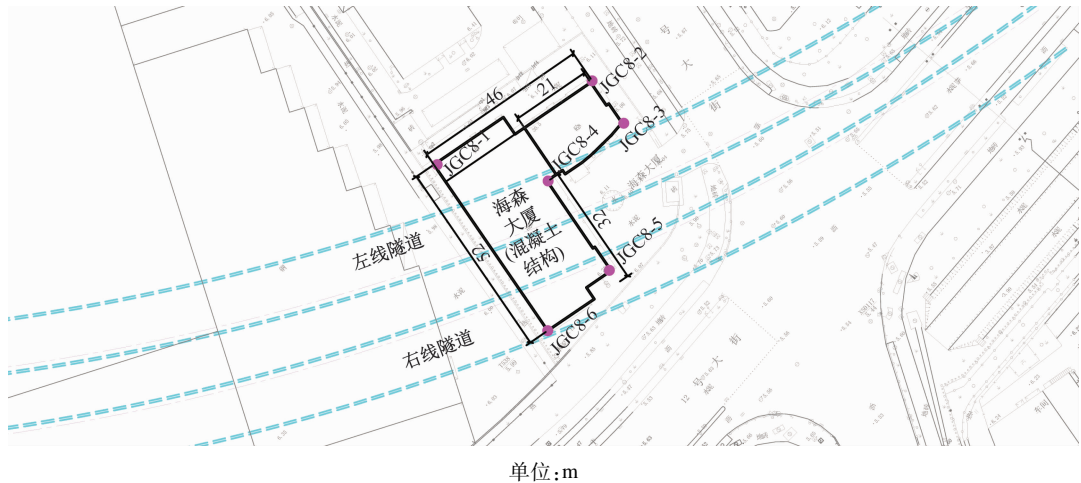
1.1 工程简介

杭州地铁12号线下沙路某区段采用盾构法施工,该区段隧道为双线并行的圆形结构形式,两线间距为11 m。该地铁施工区间下穿高层桩基建筑物,该建筑物跨度较大,对地面不均匀沉降较为敏感。该建筑物的地上结构主要为6层框架结构,地下结构采用直径为0.5 m的夯扩桩基础,桩长为11 m,隧道与桩底的净距为12.6 m。隧道埋深为23 m,外径为14.5 m,管片衬砌厚度为0.6 m,注浆层厚度为0.25 m。右线隧道先于左线开挖。区间隧道与建筑物的平面位置关系示意图如图1所示。根据岩土工程勘察报告,隧道穿越土层的物理力学参数如表1所示。

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	弹性模量/MPa	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	土层厚度/m	泊松比
① ₁ 杂填土	5	18.7	3	15	2	0.17
② ₃ 砂质粉土	36	19.0	4	28	6	0.25
③ ₅ 砂质粉土夹粉砂	28	19.0	4	25	6	0.25
③ ₆ 粉砂	38	19.3	3	28	5	0.25
③ ₇₋₁ 层状粉砂	14	18.6	5	15	12	0.25
⑥ ₂ 淤泥质粉质黏土	10	16.8	12	10	9	0.35
⑧ ₂ 粉质黏土	40	17.4	18	12	10	0.30
⑩ ₁ 全风化中粗砂岩	60	19.3	35	16	10	0.14



注:JGC8-1—JGC8-6 为建筑物基础的竖向位移监测点。
图 1 区间隧道与建筑物的平面位置关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the plane position relationship between the interval tunnel and buildings

1.2 沉降控制方案

盾构隧道下穿海森大厦难度较大,主要表现在:穿越地层多为粉砂层、淤泥质黏土,含水量大,土层对盾构隧道开挖引起的扰动较为敏感,且该建筑物基础为桩基础,桩底距隧道最近距离仅为 11 m,小于 1 倍洞径,建筑物基础沉降控制难度较大。为保证建筑物沉降控制达到标准,在盾构隧道下穿建筑物时,对海森大厦基础底部采用三排袖阀管跟踪注浆进行基础加固,三排袖阀管长度分别为 5 m、11 m、12 m,注浆倾角分别为 75°、90°、75°,注浆压

力控制在 0.5 ~ 1.5 MPa,浆液扩散半径为 1 m,浆液采用水泥-水玻璃泥双浆液。同时,在盾构隧道穿越海森大厦的范围内采取洞内加厚注浆,注浆范围扩大至中线上侧 3 m,隧道上侧 180°处,浆液为水泥-水玻璃泥双浆液。盾构注浆加固断面示意图如图 2 所示。

1.3 监测方案及变形控制标准

为使盾构隧道能够顺利穿越建筑物基础,根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》与 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》

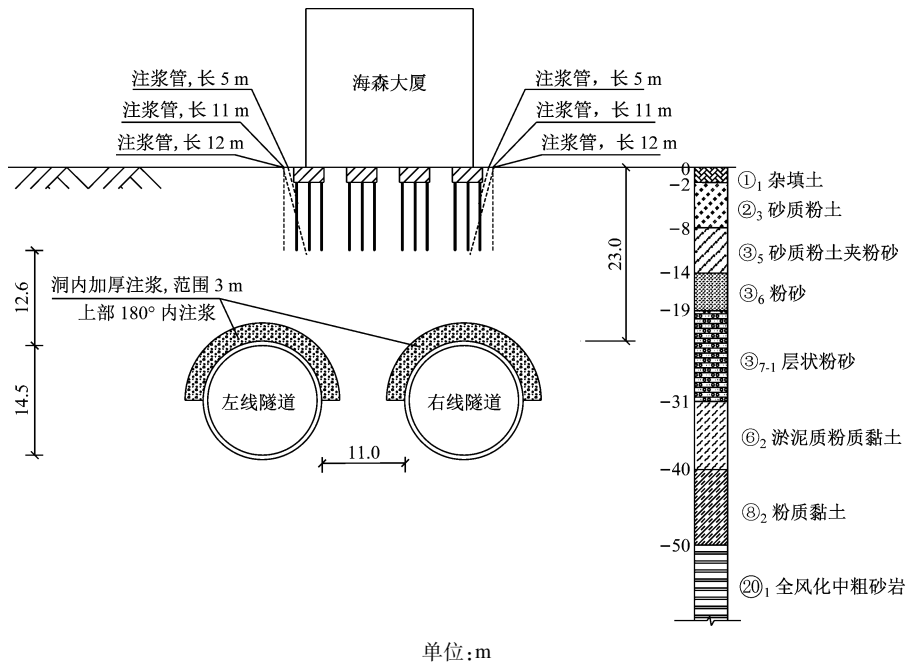


图 2 盾构注浆加固断面示意图
Fig. 2 Cross-section diagram of shield grouting reinforcement

的建筑物基础沉降控制标准及监测方案建议,在隧道穿越基础至结束的过程中,建筑物沉降累计值应不超过 15 mm,建筑物倾斜累计值应不超过 1‰。结合现场实测情况,监测点主要设置在建筑物角落、承重柱等位置。建筑物基础监测点布置示意图如图 3 所示。

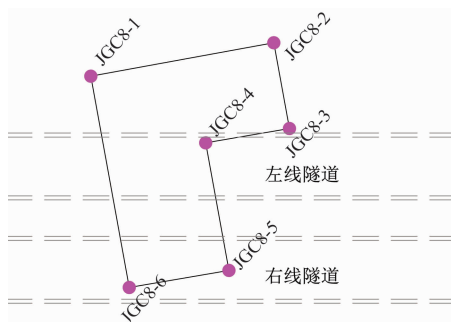


图 3 建筑物基础监测点布置示意图

Fig.3 Layout diagram of building foundation monitoring points

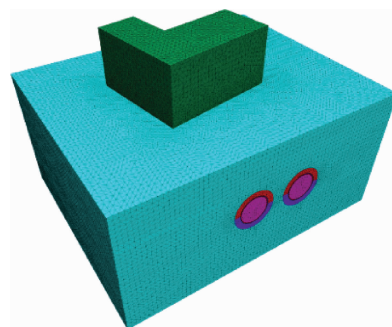
2 建立数值分析模型

2.1 数值计算模型

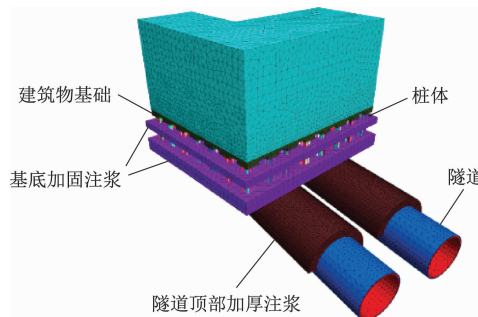
先采用 Rhino 软件按照实际尺寸对土体、隧道、建筑物等进行建模,接着使用内置的 Griddle 插件划分网格,考虑到网格的划分对计算结果的影响,在盾构隧道开挖扰动大的区域进行网格加密处理,以提高计算结果的精确度,最后利用内置接口将模型导入 FLAC 3D 软件。为降低隧道开挖的边界效应影响,设定模型边界至隧道外边缘的距离大于 3 倍洞径,且建筑物外边缘至模型边界的距离大于 30 m,模型尺寸为 137.5 m(长)×110.0 m(宽)×65.0 m(高),模型的左、右、前、后、底部及建筑物四周设置边界速度条件为 0,顶部为自由边界。土层采用 Mohr-Coulomb 本构模型,建筑物、建筑物基础、注浆体及衬砌采用实体弹性单元模拟,盾壳和桩体分别采用 Shell 与 Pile 结构单元模拟。有限元数值计算模型示意图如图 4 所示。

2.2 开挖工况及过程模拟

为研究注浆加固技术对建筑物基础沉降控制的效果,将数值模拟分为两种工况:①工况 1——考虑注浆加固技术;②工况 2——不考虑注浆加固技术。两种工况的地层、建筑物与隧道等参数一致,其主要材料参数如表 2 所示。



a) 数值计算模型



b) 注浆加固细节图

图 4 有限元数值计算模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of finite element numerical calculation model

表 2 主要材料参数

Tab.2 Main material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)
盾壳	3.5×10^5	0.200	75
衬砌管片	3.6×10^4	0.167	25
注浆(硬化后)	1.0×10^3	0.300	25
桩体	8.0×10^4	0.175	28
建筑物及基础	3.0×10^4	0.150	15

盾构隧道施工过程模拟按照现场实际情况,先开挖右线隧道再开挖左线隧道,具体模拟步骤为:①对各土层进行参数赋值,设置边界条件与重力加速度,计算土体在自重条件下的初始应力场,达到平衡状态后将位移场、应力场清零;②对建筑部分模型赋值,采用 Pile 结构单元模拟桩体,计算增加建筑物后的土层应力场,达到平衡状态后进行位移场、应力场清零;③采用 Null 模型模拟开挖过程,盾构机长度为 10 m,开挖方式为跳跃式开挖,每步开挖 2 m;④对隧道开挖处的土体施加与土体侧压力相反的均布荷载,以模拟掌子面压力,盾尾处进行衬砌支护及同步注浆;⑤在隧道右线开挖完毕后,重复上述开挖步骤,直至双线开挖完毕。

3 基于 LHS (拉丁超立方抽样)-响应面的可靠度分析

3.1 LHS-响应面-有限差分法

对于含有多种复杂随机变量的盾构隧道下穿建筑物工程而言,其功能函数与各随机变量之间的关系是很难用显示函数式表达的,而响应面法可以对工程结构取一系列的设计点,将这些取样点代入有限元软件进行计算,即可获得系统响应值,再建立一个显式函数式,通过这一系列数据确定显示函数式的待定系数,最后即可获得一个近似响应面。

假设结构中含有相互独立的随机变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则结构的实际功能函数可以表示为 $y = G(X_i)$, 该功能函数在理论上难以求出准确的表达式。本文以二次函数式 $y = g(X_i)$ 作为拟合真实功能函数的响应面函数, 其与真实功能函数同样含有随机变量 X_i , 则结构可靠度分析的响应面模型可以表示为:

$$y = g(X_i) = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (1)$$

式中:

a_0, b_i, c_i ——待定系数。

显而易见,确定待定系数至少需要 $2n+1$ 个样本点,本文采用 LHS 确定待定系数。LHS 是一种分层抽样方法,能将所输入的随机变量组合相对均匀地填满整个试验区间,且每个试验变量水平只使用一次。与 Monte Carlo 抽样方法相比,LHS 能够在确保较高采样精度的前提下,具有更高的计算效率。与正交试验设计、均匀试验设计等试验方法相比,LHS 对随机变量特征值的估计效果更好,且随机性更强。

LHS 具体计算步骤为:

1) 确定所需样本点个数 M , 把随机变量 X_i 的概率分布函数等分为 M 个互不重叠的子区间, $x_{i1} < x < x_{i2}, x_{i2} < x < x_{i3}, \dots, x_{iM} < x < x_{iM+1}$ (x 为通过 LHS 抽样得到的具体随机变量数值)。

2) 利用逆变换法在每个区间内为 X_i 抽取一个样本。假设 U 服从 $[0, 1]$ 的均匀分布, 在第 m 个区段生成的随机变量 x_{im} 可以表示为:

$$x_{im} = F_{X_i}^{-1} \left(\frac{m-1}{M} + \frac{u}{M} \right) \quad (2)$$

式中:

u —— U 的一个样本;

F_{X_i} ——随机变量 X_i 的分布函数。

通过式(2)可为 X_i 生成 M 个随机数。

3) 将逆变换法应用于 X_i 中的每一个随机变量,每个随机变量都能生成 M 个随机数。按顺序逐级生成各随机变量的 M 个随机数,将其排序在一起所组成的随机向量中的各变量之间具有正相关性。为了保持各变量之间的独立性,将各随机变量的 M 个随机数顺序打乱,然后重新组合成 M 组样本点。

在 LHS 取得样本点的随机向量组后,结合有限差分软件生成结构响应值,并代入式(1)进行多元回归分析,即可得到结构的响应面函数。在得到响应面函数后,建立关于建筑物基础沉降的极限状态方程,由 Monte Carlo 法求得可靠度指标。

Monte Carlo 法是可靠度分析的重要方法,在模拟次数足够多的情况下具有极高的准确性,其主要计算步骤为:根据随机变量特征值进行随机抽样,将所得样本点代入极限状态函数方程,判断结构是否失效;统计样本点的失效个数,计算出结构的失效概率 P_f , 并通过 P_f 求得结构的可靠度。在 LHS-响应面-有限差分法中,求得结构的极限状态方程后,可使用 Monte Carlo 法对随机变量特征值进行随机抽样,并将抽样所获得的所有样本点代入极限状态方程进行计算,即可获得结构的可靠度及失效概率。LHS-响应面-有限差分法的具体实施流程见图 5。

3.2 确定随机变量

在盾构隧道下穿建筑物工程中,基础沉降的影响因素较为复杂,因此本文在不影响计算精度的情况下进行简化计算,将变异性较大的参数设置为随机变量,其余参数假定为定值。根据地质勘察报告及已有文献研究^[13-14],选取开挖面所在土层的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 作为随机变量,不考虑二者之间的相关性。随机变量统计特征如表 3 所示。

表 3 随机变量统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of random variables

随机变量	统计特征		
	分布类型	均值	标准差
c/kPa	正态分布	5	2
$\varphi/(\circ)$	正态分布	15	5

3.3 极限状态方程

在可靠度理论中,极限状态方程一般可以表示为:

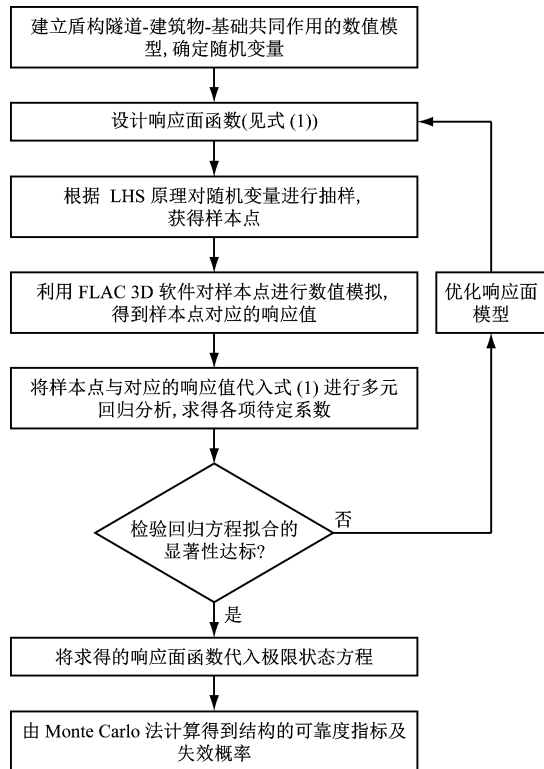


图5 LHS-响应面-有限差分法流程示意图

Fig. 5 Flow chart of LHS-response surface-finite difference method

$$Z = R - Q \quad (3)$$

式中:

 Z ——结构功能函数; R ——结构抗力; Q ——荷载作用效应。

对于隧道下穿建筑物所引起的基础沉降极限状态,将 FLAC 3D 有限差分软件计算所得沉降值作为 R ,则结构功能达到正常使用的极限状态标志为 R 达到规定的限值 Q 。在此基础上,结合式(3),盾构隧道下穿建筑物基础沉降可靠度分析的极限状态函数可以表示为:

$$Z = R(c, \varphi) - 15 \quad (4)$$

随着随机变量 c, φ 的变化, R 的计算值会有不同的计算结果,这将直接影响 Z 的计算结果。根据 Z 可判断建筑物基础沉降是否在规定的沉降累计值范围内, $Z < 0$ 、 $Z = 0$ 、 $Z > 0$ 分别表示建筑物基础处于可靠、极限、失效状态。

4 计算结果与分析

4.1 基于确定性方法的注浆加固效果评估

双线盾构隧道开挖完毕后,两种工况下,各竖

向位移监测点的数值计算值与实测值对比如图 6 所示。分析工况 1 与实测数据可知:通过基底注浆加固与隧道上方加厚注浆技术等保护措施,能将建筑物最大沉降值控制在 10 mm 以内;右线上方的竖向位移监测点沉降值较大,建筑物左侧的监测点沉降值较小,其最大沉降值发生在监测点 JGC8-5、JGC8-6 处,实测沉降值约为 7 mm。这是由于右线隧道先行开挖,对土体产生了先期扰动,且 JGC8-5 与 JGC8-6 位于右线隧道正上方,在左线通行后,对隧道上方土体造成了二次扰动,而建筑物桩基左侧有一部分不在隧道上方,其沉降相对较小,因此产生了这样的沉降分布规律。分析工况 2 与实测数据可知:采用基底注浆加固与隧道加厚注浆技术能有效控制盾构隧道下穿建筑物基础的沉降,其最大沉降值减少了约 46%。综上所述,工况 1 的基础竖向位移监测曲线与实测值较为接近,其数值计算结果略大于实测值,符合规范要求。

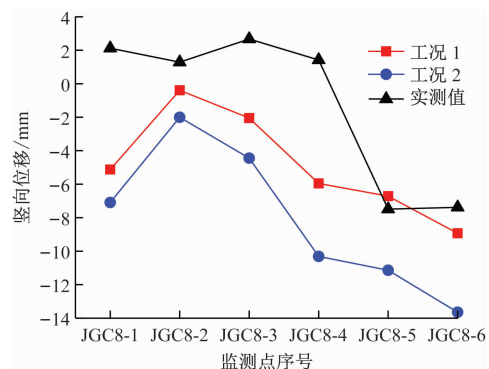


图6 两种工况下各竖向位移监测点的数值计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between the numerical calculation values and the measured values of each vertical displacement monitoring point under two working conditions

基础沉降最大值发生在监测点 JGC8-5、JGC8-6 处,故对这两个监测点在开挖过程中的竖向位移变化进行时程分析。两种工况下,不同竖向位移监测点的竖向位移时程曲线如图 7 所示。当开挖步数约为 5 步,即右线隧道掌子面距桩基础约为 20 m 时,盾构隧道开始对建筑物基础沉降产生影响。随着开挖步数的增加,掌子面与建筑物间的距离逐渐缩短,隧道开挖对建筑物周围土体的扰动也逐渐增大,因此沉降值也随之增大。当开挖步数达到 55 步,即右线隧道开始开挖时,沉降值实测数据突然增大。这是由于实际工程中,右线开挖完毕后,左

线与之相隔约 200 m,且此处路段右线与左线开挖时间间隔约为 1 个月,图中数据是右线隧道开挖至距监测点 30 m 处开始记录的,在此期间建筑物基础存在自然沉降,且左线开挖是隧道第二次穿越建筑物,其开挖会使地层的扰动增加,从而加剧地面沉降。左线开挖后,没有采用注浆加固技术的工况 2 的建筑物沉降逐渐加大,而采用了注浆加固技术的工况 1 的建筑物沉降则趋于平稳。工况 1 的数值计算曲线变化趋势与实测值较为接近,能较好地还原实际工程情况,其计算方法较为合理。

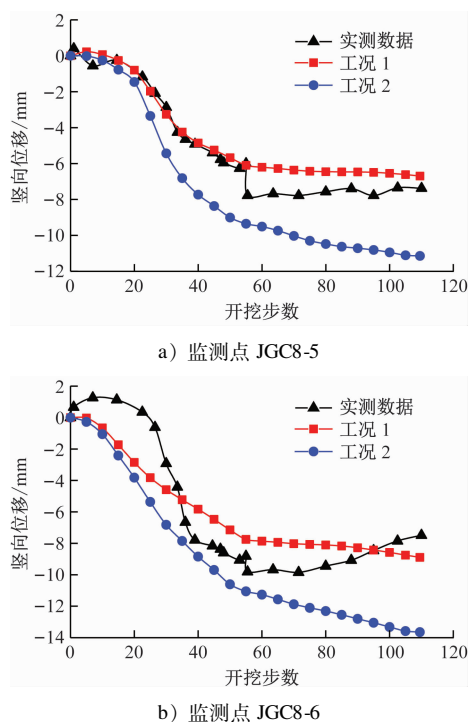


图 7 两种工况下不同竖向位移监测点的竖向位移时程曲线
Fig. 7 Time-history vertical displacement curves of different vertical displacement monitoring points under two working conditions

4.2 基于可靠度方法的注浆加固效果评估

以隧道开挖扰动区土层的 c 、 φ 为随机变量,其结构可靠度分析的响应面模型可以表示为:

$$R = a_0 + a_1 c + a_2 \varphi + b_1 c^2 + b_2 \varphi^2 \quad (5)$$

式(5)含有 5 个待定系数,因而至少需要 5 个样本点求解。由于更多的样本点能使拟合的响应面函数在一定程度上更加贴近实际功能函数,故本文选择 10 个样本点进行拟合。根据 LHS 分层抽样原则,基于表 3 进行随机取值,将随机取得的 10 组样本点通过 FLAC 3D 有限差分软件进行计算。由前文分析可知,数值计算结果与实测值的最大沉降

值均发生在 JGC8-6 处,故选取监测点 JGC8-6 处沉降值作为响应面函数的响应值。当响应值超过规范允许的 15 mm 时,即可认为建筑物基础结构处于失效状态。根据 LHS 分层抽样原则设计试验,两种工况下,10 组样本点在监测点 JGC8-6 处的数值计算结果如表 4 所示。

表 4 两种工况下 10 组样本点在监测点 JGC8-6 处的数值计算结果

Tab. 4 Numerical calculation results of 10 sets sample points at monitoring point JGC8-6 under two working conditions

样本点 序号	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	沉降值/mm	
			工况 1	工况 2
1	5.70	10.10	9.68	14.14
2	3.79	19.34	9.20	14.31
3	5.10	7.06	11.72	18.11
4	4.60	14.08	8.78	13.61
5	8.39	15.27	8.91	13.85
6	6.55	17.83	9.04	14.04
7	7.51	16.65	8.95	13.83
8	2.92	13.21	9.11	13.69
9	4.24	11.96	9.26	13.75
10	1.90	23.72	10.02	15.64

将表 4 的样本点及计算结果代入式(5)进行拟合,工况 1 的响应面函数 $R_{\text{有}}$,以及工况 2 的响应面函数 $R_{\text{无}}$ 可以表示为:

$$R_{\text{有}} = 16.3863 + 0.1951c - 1.0048\varphi - 0.0132c^2 + 0.0307\varphi^2 \quad (6)$$

$$R_{\text{无}} = 24.8253 + 0.4282c - 1.6252\varphi - 0.0262c^2 + 0.0515\varphi^2 \quad (7)$$

两个拟合模型的回归平方和系数均接近 1,显著性良好。基于上述拟合的响应面函数,在 MATLAB 软件中编制相应的 Monte Carlo 程序进行抽样计算,求解结构的可靠度。两个响应面函数的失效概率均值随 Monte Carlo 计算次数的变化关系,如图 8 所示。由图 8 可知:两个响应面函数的失效概率均值在 2 500 次 Monte Carlo 抽样计算后达到稳定; $R_{\text{有}}$ 与 $R_{\text{无}}$ 的失效概率均值在 10 000 次 Monte Carlo 抽样计算后分别趋于 0 和 0.27。由此可知,注浆加固技术能有效降低盾构下穿建筑物时的基础沉降失效概率,提高可靠度,为隧道开挖提供安全保障。

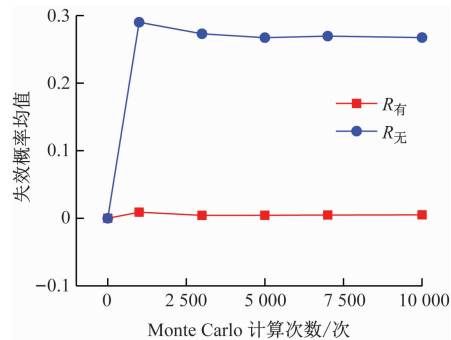
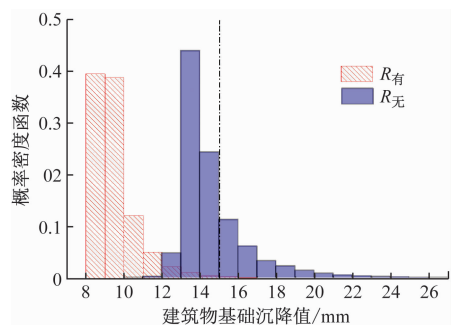


图8 两个响应面函数的失效概率均值随 Monte Carlo 计算次数的变化关系

Fig. 8 Changing relationship between failure probability mean values of two response surface functions and Monte Carlo calculation numbers

基于上述两种工况,对响应面函数进行 10 000 次 Monte Carlo 抽样计算。监测点 JGC8-6 处,两个响应面函数的基础沉降概率密度直方图如图 9 所示。在无加固措施情况下,响应面函数计算所得的基础最大沉降值分布范围为 11 ~ 25 mm,其均值与方差约为 14.66 mm、 1.85 mm^2 ,说明无加固措施时,盾构隧道下穿建筑物基础有较高的概率使其沉降值超过规定的 15 mm,致使建筑物基础结构处于失效状态。而采用注浆加固技术后,能有效减少盾构隧道开挖对土层的扰动,减少建筑物基础沉降,其响应面函数计算所得的沉降值分布范围为 8 ~ 16 mm,均值与方差约为 9.56 mm、 1.13 mm^2 。由图 9 可知:相较于无加固措施情况,采用注浆加固技术后的沉降值分布范围大幅减小,且只有极小部分超过了规定的 15 mm。由此可知,基底注浆加固与隧道加厚注浆技术不仅能有效控制地面建筑物的沉降,还能降低沉降的方差,降低沉降计算结果的不确定性。



注:虚线代表基础沉降极限值 15 mm。

图9 两个响应面函数的基础沉降概率密度直方图

Fig. 9 Basic settlement probability density histograms for two response surface functions

两种工况下的可靠性统计指标如表 5 所示。与工况 1 相比,工况 2 的可靠度指标与失效概率分别相差了约 76% 与 98%。采用注浆加固技术后,建筑物基础沉降值能有效控制在安全范围内,且建筑物基础的可靠度指标有了大幅提升,失效概率大幅降低。

表5 两种工况下的可靠性统计指标

Tab.5 Reliability statistical indicators under two working conditions

工况	可靠度指标	失效概率
工况 1	2.569	0.005 1
工况 2	0.621	0.267 3

5 结语

本文采用确定性分析法与可靠度分析法,分别评估了注浆加固技术在盾构隧道下穿建筑物基础时的沉降控制效果,并结合现场实测数据进行验证,获得了双线隧道下穿建筑物基础的沉降规律及注浆加固措施的加固效果。主要获得以下结论:

1) 双线隧道下穿建筑物工程中,建筑物基础的最大沉降发生在先开挖隧道侧,在实际工程中应对先开挖侧建筑物基础进行重点关注。

2) 注浆加固技术能够有效减少隧道开挖对周围土层的扰动,减少地面沉降,对建筑物基础起到保护作用。基于确定性分析,采用注浆加固技术能使建筑物基础最大沉降值减小 46%,使得建筑物基础沉降满足规范要求。

3) 在无加固措施工况下,建筑物基础最大沉降值分布范围为 11 ~ 25 mm;采用注浆加固技术后,建筑物基础最大沉降值分布范围为 8 ~ 16 mm。注浆加固措施不仅能减小基础沉降数值,还能降低沉降计算结果的不确定性。

通过确定性方法与可靠度方法对实际工程的分析可知,注浆加固技术能将建筑物基础沉降有效控制在安全范围内,提高建筑物基础结构的可靠度,降低失效概率。其中,可靠度方法在确定性方法的基础上考虑了土体参数的不确定性,在描述基础结构安全性方面更为合理,适用于复杂的盾构隧道开挖工程控制措施的有效性评估。

参考文献

[1] 朱连臣. 盾构隧道穿越泉域强富水灰岩地质掘进控制技术

- [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 160.
- ZHU Lianchen. Excavation control technology of shield tunneling through the geology of water-rich limestone in spring area[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 160.
- [2] 吴柯, 张晓平, 刘浩, 等. 粉质黏土地层超大直径泥水盾构隧道地表变形与施工参数相关关系研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1555.
- WU Ke, ZHANG Xiaoping, LIU Hao, et al. Correlation between surface deformation and construction parameters in silty clay ground tunneling with super large diameter slurry shield TBM[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1555.
- [3] 雷崇, 刁维科. 盾构下穿时既有国铁站房的受力分析及加固方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 85.
- LEI Chong, DIAO Weike. Stress analysis and reinforcement scheme of shield tunnel under-passing existing national railway station building[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 85.
- [4] 沈俊, 晏莉, 傅金阳, 等. 叠线盾构隧道并行下穿燃气管线影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊1): 449.
- SHEN Jun, YAN Li, FU Jinyang, et al. Influence analysis of parallel underpass gas pipeline of overlapped shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 449.
- [5] 李荡, 高睿. 盾构隧道侧穿高层建筑物时隔离桩的作用研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 55.
- LI Dang, GAO Rui. Research on effect of isolation piles when shield tunnel crossing high-rise building laterally[J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 55.
- [6] 苏秀婷, 陈健, 李明宇, 等. 大直径泥水盾构隧道穿越复杂环境地层变形敏感性研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1587.
- SU Xiuting, CHEN Jian, LI Mingyu, et al. Sensitivity analysis of deformation of large diameter mudwater shield through complex environment[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1587.
- [7] 姚爱军, 张剑涛, 宋晓风, 等. 盾构隧道下穿高耸结构筏板基础的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 75.
- YAO Aijun, ZHANG Jiantao, SONG Xiaofeng, et al. Influence of metro shield tunneling crossing high-rise raft foundation structure[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(1): 75.
- [8] 李梓亮, 汤劲松, 赵书银, 等. 盾构隧道下穿砌体结构住宅群的施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 115.
- LI Ziliang, TANG Jinsong, ZHAO Shuyin, et al. Construction technology of shield tunnel undercrossing masonry structure residential group[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 115.
- [9] 杨益, 李兴高, 秦睿成, 等. 富水软土地层盾构隧道下穿建筑物沉降分析及控制研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(增刊2): 647.
- YANG Yi, LI Xinggao, QIN Ruicheng, et al. Study on settlement analysis and control of shield tunnel passing through buildings in water-rich soft soil stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2): 647.
- [10] 陈建康, 朱殿芳, 赵文谦, 等. 基于响应面法的地下洞室结构可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 351.
- CHEN Jiankang, ZHU Dianfang, ZHAO Wenqian, et al. Structure reliability analysis of underground cavern based on response surface method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 351.
- [11] 吴德兴, 汪波, 黄强, 等. 基于有限元响应面法的隧道衬砌可靠度分析[J]. 铁道建筑, 2007, 47(3): 53.
- WU Dexing, WANG Bo, HUANG Qiang, et al. Reliability analysis of tunnel lining based on finite element response area method[J]. Railway Engineering, 2007, 47(3): 53.
- [12] 王长虹, 朱合华, 徐子川, 等. 考虑岩土参数空间变异性的盾构隧道地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 270.
- WANG Changhong, ZHU Hehua, XU Zichuan, et al. Ground surface settlement of shield tunnels considering spatial variability of multiple geotechnical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 270.
- [13] 谷彧. 苏州地区隔湖组下段岩土参数不确定性研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- GU Yu. Study on uncertainty of geotechnical parameters in the lower member of Gehu Formation in Suzhou area[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [14] JUANG C H, WANG L, LIU Z, et al. Robust geotechnical design of drilled shafts in sand: new design perspective[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12): 2007.
- 收稿日期:2022-11-11 修回日期:2023-01-05 出版日期:2024-12-10
Received:2022-11-11 Revised:2023-01-05 Published:2024-12-10
• 通信作者:蓝沐林,工程师,1149973522@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821