

基于 HSS 模型预测曲线顶管施工对建筑物沉降的影响

郑翥鹏^{1*}, 周耿坚¹, 黄 铖², 廖斯汉³

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门路桥百城建设投资有限公司, 福建 厦门 361009; 3. 福建建工集团有限责任公司, 福建 福州 350003)

摘要: [目的] 曲线顶管施工因其非开挖优势在城市地下管网建设中应用广泛, 但施工扰动易引发邻近建筑物非对称沉降. 传统 MC(Mohr-Coulomb)模型难以准确表征土体小应变硬化特性及动态施工过程, 亟需更合理的模拟方法. 本文旨在探讨基于 HSS(hardening soil small-strain)模型的数值分析在曲线顶管施工建筑物沉降预测中的适用性. [方法] 以厦门市东山变进出线地下综合管廊(二期)B段曲线顶管工程为依托, 建立土体-顶管-建筑物三维有限元耦合模型, 采用 HSS 模型对施工过程进行模拟, 并与 MC 模型及现场监测数据进行对比分析. [结果] HSS 模型预测结果与实测值的相对误差为 5%~10%, 明显优于 MC 模型; 建筑物近管侧沉降量显著高于远管侧, 不均匀沉降主要集中于施工扰动阶段; 曲线顶管施工存在不均匀沉降角问题, 但其挤土效应有助于减小整体沉降. [结论] HSS 模型能更真实地反映曲线顶管施工对建筑物沉降的影响规律, 对顶进参数优化及施工方案改进具有参考价值, 为复杂城市环境下顶管施工安全控制提供科学依据.

关键词: 曲线顶管; 建筑物沉降; HSS 模型; 数值模拟; 土体扰动

中图分类号: U 456.3

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)06-1041-07

Prediction of the impact of curved pipe jacking construction on building settlement based on HSS model

ZHENG Zhupeng^{1*}, ZHOU Gengjian¹, HUANG Cheng², LIAO Sihan³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Xiamen Road & Bridge Baicheng Construction Investment Co., Ltd., Xiamen 361009, China; 3. Fujian Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: [Objective] Curved pipe jacking is widely applied in urban underground utility construction due to its trenchless advantages. However, the soil disturbance during construction often induces asymmetric settlement of adjacent buildings. The conventional Mohr-Coulomb (MC) model endures limitations in capturing soil small-strain hardening behavior and dynamic construction effects. This study aims to evaluate the applicability of the hardening soil small-strain (HSS) model in predicting building settlement induced by curved pipe jacking construction. [Methods] Taking the curved pipe jacking section of the Dongshan in/outlet underground utility tunnel (Phase II, Section B) in Xiamen as a case study, we developed a three-dimensional coupled soil-pipe-building finite element model. The HSS model was employed to simulate the construction process, and these results were compared with those of the MC model and field monitoring data. [Results] The HSS model predictions showed a relative error of only 5%~10% from the measured data, demonstrating higher accuracies than the MC model. The settlement on the building side closer to the pipe was significantly greater than that on the far side, with uneven settlement mainly occurring during the disturbance stage of construction. Moreover, a non-uniform settlement angle was identified, while the soil squeezing effect of curved pipe jacking helped mitigate overall settlement. [Conclusion] The HSS model provides a realistic representation of building settlement induced by curved

收稿日期: 2025-02-26 录用日期: 2025-06-03

基金项目: 福建省科学技术计划项目(2022-K-256)

* 通信作者: xpeng@xmu.edu.cn

引文格式: 郑翥鹏, 周耿坚, 黄铖, 等. 基于 HSS 模型预测曲线顶管施工对建筑物沉降的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(6): 1041-1047.

Citation: ZHENG Z P, ZHOU G J, HUANG C, et al. Prediction of the impact of curved pipe jacking construction on building settlement based on HSS model[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(6): 1041-1047. (in Chinese)



pipe jacking. It offers valuable guidance for optimizing jacking parameters and improving construction schemes, thereby contributing to safer underground infrastructure development in complex urban environments.

Keywords: curved pipe jacking; building settlement; HSS model; numerical simulation; soil disturbance

曲线顶管技术因其适应复杂地形和减少地表开挖的优势,被广泛应用于城市地下管网建设中.然而,施工过程中土体扰动引发的建筑物沉降问题,尤其是曲线段顶管对邻近建筑物的非对称沉降影响,已成为制约工程安全的关键因素.

王鹏飞等^[1]研究双线隧道和上部建筑物的耦合作用对地面变形的影响.詹涛等^[2]融合卷积神经网络(CNN)和长短时记忆神经网络(LSTM)能够更加稳定和准确地预测建筑物的沉降情况.屈浩等^[3]结合工程实测数据对盾构侧穿后建筑物不均匀沉降和应变情况进行分析.张晋勋等^[4]研究了 HSS(hardening soil small-strain)模型参数的敏感性,增强理解模型中各参数对结果的影响,辨识关键影响参数.董鑫等^[5]在基坑工程采用 HSS 模型进行分析研究,验证了该模型的适用性及可靠性,该研究中考虑了建筑物与土体之间的耦合作用,但对于土体产生小应变时的非线性特征考虑不足.

传统沉降预测 MC(Mohr-Coulomb)模型已有大量的研究^[6-8],但 MC 模型难以精确刻画土体小应变硬化特性及施工动态过程,这是由于土体发生小应变时,土体应力应变发生非线性变化^[9-11],而 MC 模型将此过程简化为线性关系.如果使用未考虑土体小应变特性的土体本构模型进行分析,土体剪切模量的计算值通常会偏小,从而导致数值分析结果普遍表现为变形计算值过大.

HSS 模型通过引入土体小应变特性,能够更真实地反映土体在施工中的力学响应^[12].本研究通过搭建 HSS 模型,使得土体强度、刚度及小应变参数能够在不同施工进度下进行动态调整,这种动态调整能力使 HSS 模型在复杂施工工况下,能持续准确地反映土体变形规律,为建筑物沉降预测提供可靠依据.

1 工程概况

1.1 项目概况

本研究涉及的工程(厦门市东山变进出线地下综合管廊工程(二期,B段曲线顶管工程))位于厦门市翔安区翔安南路,该工程曲线顶管施工段总长度为 460 m.工程完工后,该管道工程将承担包括给水管、再生水管、中高压电缆及通信线路在内的多种市政重要任

务.考虑到需避开既有民房,并避免因明挖施工导致现状交通中断,故采用曲线顶管施工工艺.顶管施工中,管道顶进总长度为 460 m,其中顶管的进出洞口各设置 20 m 直线段,中间曲线段由半径为 650 m 的圆弧构成,长度约为 420 m,管节每节长度为 2 m.

房屋与管道相距 8.4 m 位于工程起始位置处.顶管管节选用 D3200 型号的专用钢筋混凝土管,水泥为强度等级不低于 42.5R 的普通硅酸盐水泥,管壁厚度为 32 cm,管节长度为 2 m,接口形式为钢承口,管道底部平均埋深为 16 m.在地质条件方面,该曲线顶管工程主要穿越残积砾质黏性土及全风化花岗岩等地层.工程平面布置图如图 1 所示.

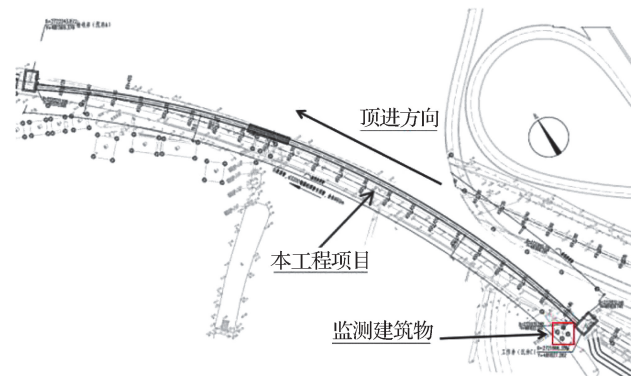


图 1 曲线顶管工程的平面布置

Fig. 1 Floor plan of curved pipe jacking project

1.2 地质情况

工程场地自上而下共划分为 4 个地层,依次为:素填土、粉质黏土、残积砾质黏性土及场地下部的全风化花岗岩.在进行曲线顶管工程的规划与施工过程中,必须对这些各异的地貌单元进行详尽的地质勘察与评估,精准测量土体相关参数,以确保数值模拟计算的精确性,从而确定最优的施工方案及预防措施.

黏土层与全风化花岗岩在力学参数上存在显著差异,全风化花岗岩以其高强度和高承载力,被视为理想的下卧层地质.场地整体呈现出上软下硬的复合地层特征.本工程管道主要分布于残积砾质黏性土层中,其下卧层为全风化花岗岩,沿管道路径土层厚度略有变化.详细的地质情况已通过地质勘查获取,具体数据见表 1.

1.3 监测方案

本工程监测方案依据《城市轨道交通工程监测技

表 1 地质状况
Tab. 1 Geological conditions

岩土名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	天然快剪/kPa		承载力特 征值 f_{ak} / kPa	厚度/ m
		黏聚力 c_k	内摩擦角 ϕ_k		
素填土	18.5	16.2	14.0	70	≈2
粉质黏土	19.3	26.1	19.8	150	≈3
残积砂质 黏性土	18.6	23.8	23.3	200	≈10
全风化花 岗岩	19	—	—	280	≈8

术规范》中关于盾构法隧道施工监测的相关规定,通过监测地表与临近建筑物沉降,分析曲线顶管施工对周边环境的影响. 沉降监测采用 Leica TS09PLUS 全站仪,控制点 CJB 1~CJB 47 的间距为 10 m,建筑物测点布置于 4 个角点,如图 2 所示. 工程中监测数据的获取遵循以下方案:

- 1) 测点布置:沿管道走向设置沉降观测点,监测顶管施工引起的地面沉降或隆起情况. 每 10 m 布置 1 个沉降观测点,并在临近建筑物四周布置测点.
- 2) 观测频率:在钢筋混凝土管道顶进过程中,每日早晚各进行 1 次观测,记录监测数据;顶管机顶进并远离后,需适时进行地表沉降监测并记录,以确保安全;若观测结果出现显著变化或遭遇暴雨等异常情况,应增加观测频次,并及时将结果通报设计单位,以便采取相应措施.
- 3) 监控预警:管道结构出现开裂;最大水平位移超

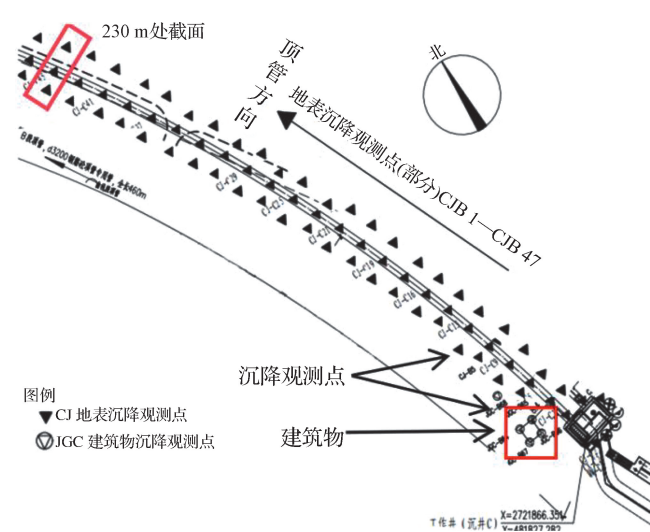


图 2 监测点位布置
Fig. 2 Layout of monitoring points

过 20 mm;道路路面水平位移超过 20 mm 或附近地面裂缝宽度超过 10 mm;地面隆起或沉降量超过 20 mm.

2 数值模拟

2.1 HSS 模型简介

HSS 模型由 Benz^[13] 在经典 HS(Hard-Soil)模型基础上发展而来,其核心在于引入土体小应变刚度特性及非线性剪切模量衰减机制,弥补了传统 MC 模型在小应变范围内力学响应表征不足的缺陷,用 HSS 模型进行数值分析得到的结果通常与监测数据更为接近^[14]. HSS 模型通过双屈服面框架(剪切硬化与压缩硬化)描述土体复杂力学行为,其本构方程可表达为:

剪切屈服面:

$$f_1 = q - p \tan \phi - c, \quad (1)$$

压缩屈服面:

$$f_2 = p - p_c. \quad (2)$$

式中: f_1 为屈服函数, f_2 为塑性势函数, $q = \sqrt{3}J_2$ 为偏应力, J_2 为偏应力第二不变量, p 为平均有效应力, ϕ 为有效内摩擦角, c 为黏聚力, p_c 为压缩硬化参数.

HSS 模型涉及强度参数、刚度参数及小应变参数共计 11 个参数,通过表 2 中三轴 CU 或 CD 试验可以获取所需 4 个强度参数:有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 ϕ' 、剪胀角 Ψ 、破坏比 R_f ; m 为刚度应力水平相关幂指数,取值为 0.5;剪胀角 Ψ 控制塑性体应变,本模型中假设发生塑性应变时,土体体积不变, $\Psi = 0^\circ$.

小应变刚度特性通过非线性剪切模量衰减函数表征:

$$G = G_0 \left(\frac{\gamma_{0.7}}{\gamma + \gamma_{0.7}} \right)^m, \quad (3)$$

式中: G_0 为初始剪切模量, $\gamma_{0.7}$ 为剪切模量衰减至 0.7 G_0 时的参考剪应变, γ 为当前剪应变, m 为材料衰减指数.

由于全风化花岗岩强度远大于软土层,不属于小应变土体,所以在本模型中采用 MC 模型描述其应力应变路径,主要参数取值如下: $c' = 100 \text{ kPa}$, $\phi' = 50^\circ$, $E'_{ref} = 45 \text{ MPa}$, $G_{ref} = 18 \text{ MPa}$, $E_{ocd} = 54 \text{ MPa}$, $\nu = 0.25$. 本模型最后的参数取值如表 2 所示.

2.2 有限元模型

本文开展了网格敏感性分析及模型验证. 首先,针对网格划分方案,对比了 3 种不同网格密度(粗网格的最小元素因子为 1×10^{-2} ,单元数为 18 540;中等网格的最小元素因子为 1×10^{-3} ,单元数为 51 650;细

表 2 HSS 模型参数
Tab. 2 Parameter of HSS model

岩土名称	强度参数				刚度参数							小应变参数	
	$c'/$ kPa	$\phi'/$ (°)	$\Psi/$ (°)	R_f	$p^{ref}/$ kPa	$E_{oed}^{ref}/$ MPa	$E_{50}^{ref}/$ MPa	$E_{ur}^{ref}/$ MPa	ν_{ur}	K_0^{nc}	m	$G_0^{ref}/$ MPa	$\gamma_{0.7}$
素填土	16.2	14.0	0	0.9	100	4.1	4.1	12.3	0.2	0.758	0.5	22.2	4.0×10^{-4}
粉质黏土	25.6	20.1	0	0.9	100	4.7	4.7	14.1	0.2	0.656	0.5	28.2	2.5×10^{-4}
残积砂质黏性土	23.8	23.3	0	0.9	100	5.1	5.1	15.3	0.2	0.605	0.5	30.6	2.5×10^{-4}

注:全风化花岗岩强度远大于软土层,模型中采用传统 MC 模型。

网格的最小元素因子为 5×10^{-4} ,单元数为 103 200) 下的建筑物 A 点沉降计算结果.结果显示,与中等网格相比,粗网格预测值的相对偏差达 12.3%,而细网格的相对偏差仅为 2.8%,表明中等网格方案在计算效率与精度间达到最优平衡.通过对比 HSS 模型沉降计算值与实测沉降分布规律,发现二者在沉降梯度、影响范围及非对称特征上较为接近,相关系数达到 0.93,进一步佐证了模型的可靠性.

本文采用 Plaxis 3D 软件进行模拟分析,该软件已在众多复杂岩土工程项目的有限元分析中得到广泛应用,并在多个实际工程中发挥着重要作用.如图 3 所示,本模型尺寸设定为 $110 \text{ m} \times 260 \text{ m} \times 19 \text{ m}$,设定 Y 轴正向为顶进方向.管道内径为 3 200 mm,管壁厚度为 32 mm,管道埋深位于模型标高 -16 m 处.管道每节长 2 m,总计 230 环.模型地表标高设为 0 m,地下水位位于 -8 m.地层与管道采用 10 节点实体单元进行网格划分,借助 Plaxis 3D 软件的优化网格及 3D 网格划分功能,网格划分中最小元素大小因子为 1×10^{-3} ,最终生成 30 928 个节点和 51 650 个单元.本模型相对于实际工程所做的简化假设包括:

1) 模型边界设定为固定端约束条件,仅上表面为自由表面,这是由于当产生土体扰动时,距离很远的位置影响很小,在模型的边界设定固定端约束,可以简化计算,且对计算结果影响较小;

2) 建筑物按实际尺寸建模,忽略门窗及房屋内设施的质量;

3) 依据实际工期进行简化,每段顶进时步长设定为 1.0 d 或 0.5 d.

如图 4 所示,管节与土壤的接触通过定义界面单元来实现,界面单元的节点与管道边界节点形成一组节点对,与土壤边界也形成一组节点对,从而表达结构与土体之间的相对位移关系.在节点对之间,通过两个弹性弹簧来模拟结构与土体之间的力传导和相对滑动.图中边界处节点之间存在一定距离,只是为了表示节点对的存在,实际计算中它们是相同坐标.

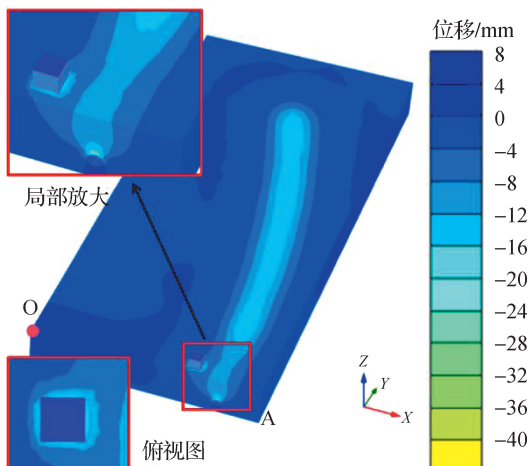


图 3 有限元模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the finite element model

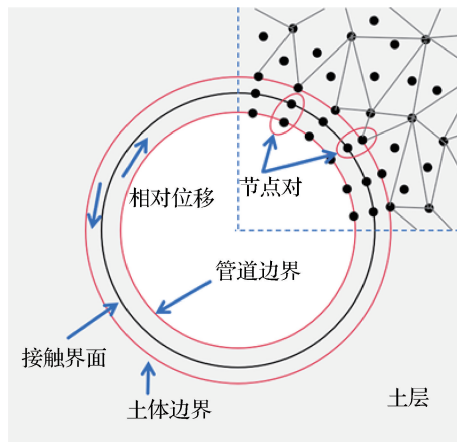


图 4 管土接触示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pipe-soil contact

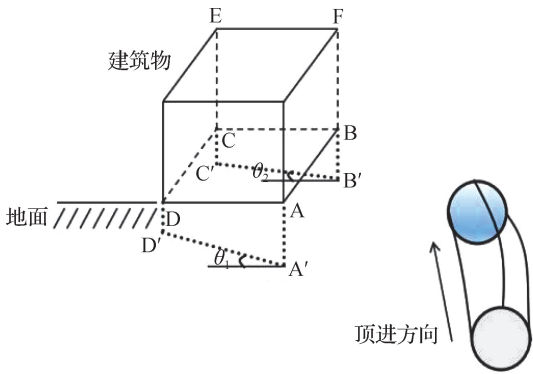
2.3 数值模拟结果分析

本工程中临近建筑物位于曲线顶管起始段,与顶管管道的水平距离为 8.4 m,建筑物将受到土体开挖扰动而引起沉降,本研究采用 HSS 模型预测的建筑物

沉降结果与传统 MC 模型计算结果进行对比,结合工程监测数据进行验证.

顶管管道穿越并远离建筑物后,建筑物的沉降情况如图 5 所示.由于建筑物 4 个角点与管道的距离各异,曲线顶管引起的地表沉降存在差异,其中靠近建筑物一侧的 A、B 两点沉降量大于 C、D 两点的沉降量. B 点受顶管弧线向内的挤压影响,沉降量比 A 点低 5.59 mm; D 点与管道距离最远,沉降量比 C 点低 2.27 mm.

建筑物的不均匀沉降会导致倾斜角的出现,倾斜角度过大可能对建筑结构造成损害.因此,在顶管过程中需进行监测预警.本工程中,ABF 面与 CDE 面产生的角度较大,其中 $\theta_1 = 0.091^\circ, \theta_2 = 0.016^\circ$,该角度不会对建筑物造成显著破坏.



$AA' = 17.36 \text{ mm}, BB' = 11.77 \text{ mm}, CC' = 10.08 \text{ mm}$
 $DD' = 7.81 \text{ mm}, \theta_1 = 0.091^\circ, \theta_2 = 0.016^\circ.$

图 5 建筑物沉降示意图

Fig. 5 Schematic diagram of building settlement

通过有限元模型进行数值分析计算后,曲线顶管通过后临近建筑物 A 和 B 点的下沉情况分别如图 6 和 7 所示.在顶管工程通过后,临近建筑物周围的土壤因自重和挖掘过程中的扰动而迅速下沉,并随着顶管机远离建筑物,沉降速度逐渐减小.当顶管机远离建筑物 20 m 之后,下沉逐渐稳定.计算结果显示,靠近顶管施工区域的建筑物 A、B 点沉降较大,受施工活动的影响较为显著,监测数据 A 点最大沉降为 17.66 mm, B 点最大沉降为 12.55 mm,由于 B 点受到曲线顶管的挤土压力,其最大沉降比 A 点小 5.11 mm. MC 模型沉降值明显比监测数据大,而 HSS 模型沉降值与监测数据较为吻合, HSS 模型曲线在顶管机接近阶段呈现陡峭上升趋势,随后随顶管远离逐渐趋于稳定,有效捕捉了施工扰动阶段土体刚度动态对沉降速率的控制作用.

图 8 与 9 对比了远管侧 C 和 D 点沉降的数值模拟与实测结果. C 点实测最大沉降量为 10.75 mm, D

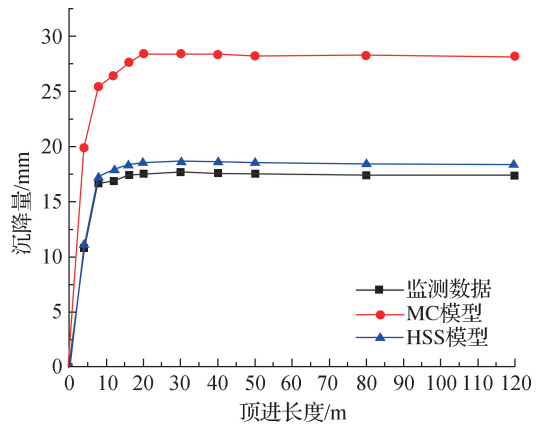


图 6 建筑物 A 点沉降变化

Fig. 6 Change of settlement at point A of the building

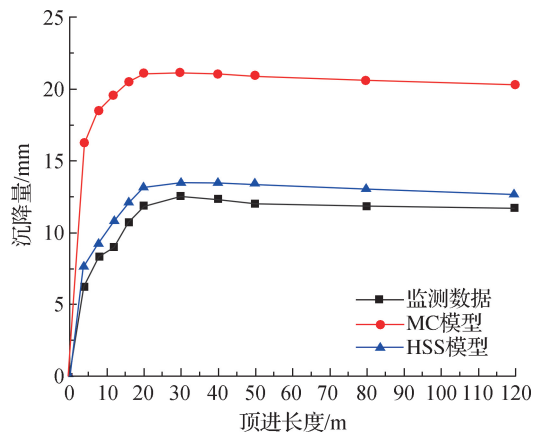


图 7 建筑物 B 点沉降变化

Fig. 7 Change of settlement at point B of the building

点实测最大沉降量为 8.20 mm, HSS 模型预测值分别为 11.79 mm 和 8.92 mm, 而 MC 模型预测值分别为 22.39 mm 与 17.73 mm, 误差较大. HSS 模型曲线显示,远管侧沉降量随顶管机远离沉降速率趋近于零,

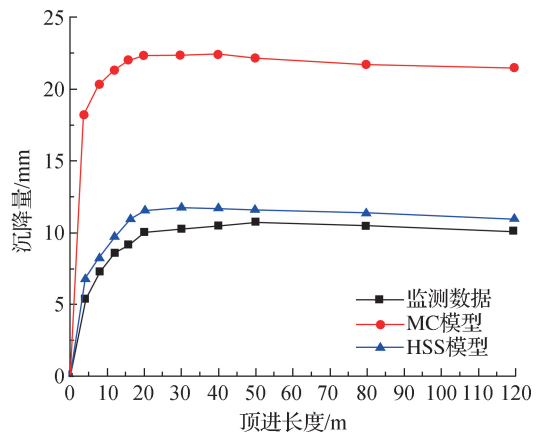


图 8 建筑物 C 点沉降变化

Fig. 8 Change of settlement at point C of the building

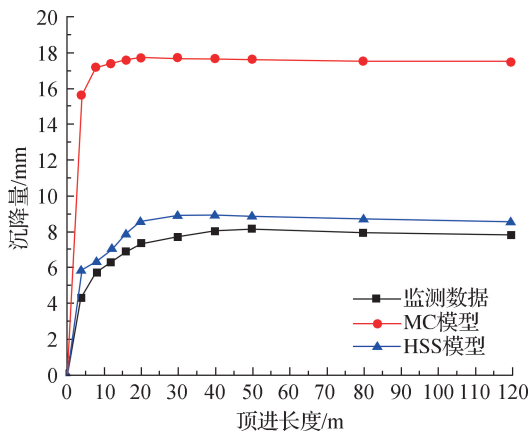


图9 建筑物D点沉降变化

Fig. 9 Change of settlement at point D of the building

表明土体扰动范围受限于顶管施工动态影响区。C点因距离顶管轴线水平距离12 m,其沉降量较水平距离为18 m的D点多2.55 mm,反映了土体挤压力随距离衰减的空间效应。HSS模型在远管侧低应变范围内仍保持较高预测精度。此结果进一步验证了HSS模型在复杂施工工况下对沉降的表征能力。

图10为基于HSS模型数值模拟得到的建筑物Z轴变形云图。云图显示,顶管施工后建筑物Z轴变形呈显著空间非对称分布,Z轴变形最大值集中于邻近顶管一侧(A、B点区域),最大值为21.38 mm,而远管侧(C、D点区域)逐渐减小至18.20 mm。Z轴变形分布特征表现为以顶管轴线为中心向四周扩散,且受土

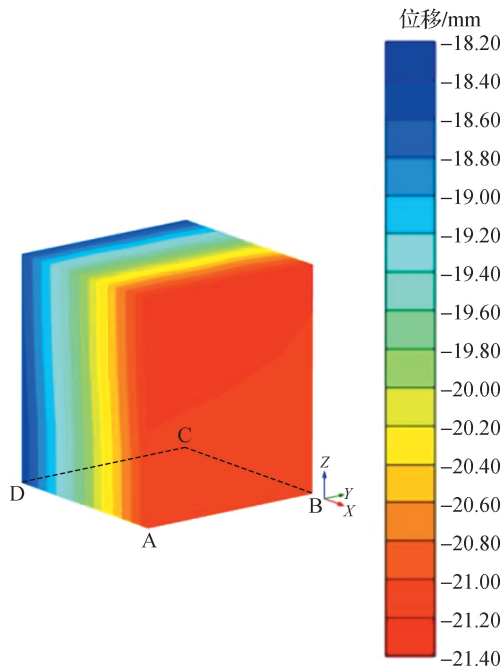


图10 建筑物沉降云图

Fig. 10 Settlement contour of buildings

体挤压力与施工扰动影响,近管侧沉降梯度明显大于远管侧。此外,建筑物自身重力加剧了沉降的不均匀性,沉降云图颜色梯度变化直观反映了这一现象。HSS模型通过捕捉土体小应变硬化特性,精准刻画了施工动态过程中剪切模量的非线性衰减规律,使得沉降云图形态与现场监测数据较为吻合,进一步验证了模型对复杂施工扰动效应的表征能力。

图11为基于HSS模型模拟的建筑物中点截面沉降云图,描绘了顶管施工扰动下建筑物沿垂直管道轴线方向的沉降分布。云图表明,沉降集中于管道正上方区域,并沿深度方向呈“V”形扩散,沉降梯度随距离管道轴线增加而显著减小。受土体小应变刚度衰减与施工动态卸载效应影响,近管侧土体剪切模量快速降低,导致该区域沉降速率高于远管侧。建筑物自重进一步加剧了沉降的空间非对称性,使其截面沉降云图呈现明显的“沉降漏斗”形态。

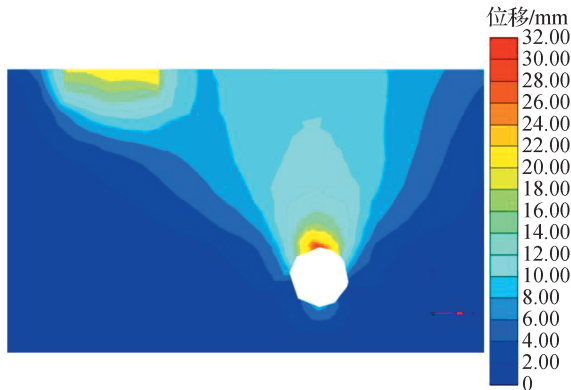


图11 建筑物中点截面沉降

Fig. 11 Settlement of the midpoint section of the building

尽管HSS模型在整体沉降预测中表现出较高的精度,但在仍存在一定误差,可能与以下因素有关:

1) 土体参数的空间变异性。土体的力学参数(如黏聚力、内摩擦角、初始剪切模量等)在实际工程中存在空间变异性。虽然HSS模型能够有效捕捉土体的小应变硬化特性,但是土体参数的实际分布可能与模型假设存在一定偏差,如实际工程中各土层厚度分布不均匀等。

2) 模型简化假设的影响。模型中忽略了建筑物内部结构的复杂性,同时也假设地层参数均匀分布等。这些简化假设可能在一定程度上影响了沉降预测的精度。

3) 监测数据的局限性。在实际监测过程中,测点布置的密度、监测设备的精度及环境因素(如温度变化、降水等)都可能对监测数据的准确性产生影响。

3 结论

本研究基于 HSS 模型的数值模拟,结合厦门市东山变进出线地下综合管廊工程(二期)B 段曲线顶管工程的实际监测数据,深入分析了曲线顶管施工对邻近建筑物沉降的影响规律,并对比了 HSS 模型与传统 MC 模型的预测效果。HSS 模型通过双屈服面框架和非线性剪切模量衰减函数,精准地模拟了土体在小应变范围内的力学响应,从而在顶管机接近和远离建筑物的过程中,准确反映了沉降速率的变化趋势。这一特性使得 HSS 模型在复杂施工工况下对沉降的表征能力显著优于传统 MC 模型,为施工阶段的沉降预测提供了更为可靠的理论依据。预测结果与实测值的误差仅为 5%~10%,显著优于传统 MC 模型。

在工程应用方面,建议如下:

1) 强化施工扰动阶段的监测频率:施工扰动阶段(顶管机距离建筑物 20 m 以内)是沉降发展的主要阶段,占总沉降量的 75%以上。在此阶段,应增加监测频次,确保及时掌握沉降动态,以便采取相应的控制措施。

2) 优化顶进参数:结合 HSS 模型的预测结果,优化顶管施工中的顶进参数(如顶进速度、注浆压力等),以降低施工扰动对土体的影响,从而有效控制沉降速率。

3) 关注不均匀沉降角:曲线顶管施工对邻近建筑物的沉降影响呈现显著空间差异性,建筑物的不均匀沉降可能导致倾斜角的出现,进而对建筑结构造成潜在威胁。在施工过程中,需重点关注不均匀沉降角的变化,确保其在安全范围内,避免对建筑物造成显著破坏。

4) 结合 HSS 模型进行施工方案设计:在类似工程中,可以提前利用 HSS 模型进行数值模拟,结合实际地质条件和施工工艺,优化施工方案,减少施工对周边环境的影响。

参考文献:

[1] 王鹏飞,邹利,乙珂豪,等.考虑双线掘进和建筑结构耦合作用时地铁盾构下穿建筑物施工的地面沉降规律[J].城

市轨道交通研究,2025,28(2):1-6.

- [2] 詹涛,黄浩.基于盾构施工进度与时空因素的临近建筑物沉降预测研究[J].土木工程学报,2024,57(增1):117-121.
- [3] 屈浩,张波,张振义,等.盾构隧道侧穿引发砌体建筑物变形损伤实例研究[J].现代隧道技术,2024,61(3):119-130.
- [4] 张晋勋,赵刚,张雷,等.HSS模型在盾构模拟中的应用及参数敏感性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(增2):618-625.
- [5] 董鑫,周峰,王旭东,等.基坑数值分析中HSS模型参数试验及应用[J].科学技术与工程,2023,23(18):7878-7885.
- [6] 胡聪,郝英奇.双线平行顶管在不同间距下施工的模式试验与数值模拟分析[J].建筑结构,2021,51(增2):1854-1860.
- [7] 潘涛.软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J].水文地质工程地质,2022,49(1):101-108.
- [8] 李永运,钟小春,何纯豪,等.浅覆土矩形顶管施工对邻近基桩的影响规律研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(增1):205-211.
- [9] MA Z G, XIE X F, JIA H, et al. Prediction and application of surface settlement of shallow buried tunnels taking into account strata slip cracks[J]. Processes, 2023, 11(5):1575.
- [10] TANG J, LI S C, ZHU Y F. Measurement and analysis of settlement induced by rectangular pipe jacking in silt stratum [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1):8347227.
- [11] 黄伯麒,朱合华.硬化土模型体积屈服机制及其本构积分算法研究[J].岩土力学,2015,36(增1):31-37,42.
- [12] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等.上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(2):269-278.
- [13] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [14] 尹骥.小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J].岩土工程学报,2010,32(增1):166-172.

(责任编辑:汪 军)