

隧道下穿建筑物施工变形预测算法

Prediction Algorithm for Construction Deformation of Tunnel Undercrossing Buildings

史俊沛

(广东重工建设监理有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 由于隧道下穿建筑物施工过程较为复杂, 传统的建筑物施工变形预警系统大多基于二维的地理信息系统, 往往具有可视化能力弱, 模型预测准确度可靠差等缺点, 提出基于改进 BIM 的隧道下穿建筑物施工变形预测算法。通过分析施工过程中建筑物产生的沉降变形, 获取建筑施工节点变形向量, 构建三维地质 BIM 模型, 将建筑物节点变形向量输入至三维地质 BIM 模型中, 通过在三维 BIM 地质模型上叠加动态的体元栅格三维空间场数据, 不仅实现了数据的升维表达, 同时也解决了传统静态 BIM 地质模型实时性和协同性表达弱的缺点, 完成隧道下穿建筑物施工变形的预测。实验结果表明: 所提方法可准确预测隧道下穿建筑物墙体的挠曲变形, 具有较高的预测精度。

关键词: 改进 BIM 模型; 隧道下穿建筑物; 变形预测

中图分类号: U452 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0098-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.018

SHI Junpei

(Guangdong Zhonggong Project Management Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: Due to the construction process of tunnel undercrossing buildings is relatively complex, most of the traditional building construction deformation early warning systems are based on 2D geographic information systems, which often has disadvantages such as weak visualization ability and poor reliability of model prediction accuracy. Therefore, a tunnel undercrossing building construction deformation prediction algorithm based on improved BIM is proposed. By analyzing the settlement deformation of the building during construction, the deformation vector of the building construction node is obtained, the 3D geological BIM model is built, and the deformation vector of the building node is input into the 3D geological BIM model. By superimposing the dynamic volumetric grid 3D space field data on the 3D BIM geological model, the data is not only expressed in ascending dimensions, but also solves the shortcomings of the weak real-time and collaborative expression of the traditional static BIM geological model. Complete the prediction of the construction deformation of the tunnel undercrossing buildings. The experimental results show that the proposed method can accurately predict the bending deformation of the building wall under the tunnel, and has high prediction accuracy.

Keywords: improve the BIM model; tunnel underpass buildings; deformation prediction

0 引言

随着城市化进程的加速和交通网络的不断完善, 隧道建设在城市发展中扮演着至关重要的角色^[1]。然而, 隧道施工往往面临复杂的地质条件和周边环境的挑战, 特别是在下穿建筑物时, 如何确保施工过程中的结构安全、减少对周边环境的影响, 成为

作者简介: 史俊沛 (1984—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 房屋建筑工程。

收稿日期: 2023-11-15

亟待解决的问题^[2-3]。因此,对隧道下穿建筑物施工变形进行准确预测,不仅有助于提前发现潜在的安全隐患,还能为施工方案的优化提供科学依据,确保隧道施工的安全性和可靠性,对保障人民生命财产安全、促进城市可持续发展具有重要意义。

学者周中等^[4]在 Peck 公式的基础上,考虑隧道刚度对变形预测产生的影响,构建变形预测模型,获取预测结果;戴轩等^[5]首先分析了建筑物施工的实测数据,在此基础上,构建建筑物施工的有限元模型,获得建筑物的应力变化、土形变化和纵向挠曲变化,实现变形预测。但是上述两种方法获得的挠曲变形与实际值差别较大,预测效果较差。黄震等^[6]分析了建筑物在施工过程中的形态特征,以及隧道在施工过程中的结构变形,通过有限元数值分析方法结合上述分析结果预测建筑物施工变形,但是经过实验分析可知该方法的预测精度较低。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于改进 BIM 的隧道下穿建筑物施工变形预测算法。

1 施工变形预测方法设计

1.1 变形位移参数计算

通过 Winkler 地基模型^[7-8]分析隧道下穿建筑物由于隧道叠交穿越而导致的纵向沉降问题。

利用间隙参数 h 度量地层损失,计算公式为:

$$h = \xi + I_{3D} + H_p \quad (1)$$

式中: I_{3D} 为弹塑性变形; H_p 为物理间隙; ξ 为超挖参数。

由于施工技术水平和机械性能的提高,弹塑性变形 I_{3D} 和超挖 ξ 产生的影响逐渐较小,因此可以得出物理间隙 H_p 是影响间隙参数的关键因素。当产生地层损失时,会出现物理间隙 H_p ,附近的土地此时会移动到间隙空间,导致土体变形,降低了隧道下穿建筑物的安全性。

设 $i_r(r)$ 表示径向位移,其计算公式如下:

$$i_r(r) = -\frac{\varepsilon}{3} \left(\frac{\varepsilon}{t} \right)^2 \quad (2)$$

用 $G(x_0, y_0, z_0)$ 表示直角坐标系中处于半径为 ε 间隙处的点,那么在 z 轴方向上,点 $A(x, y, z)$ 和点 $G(x_0, y_0, z_0)$ 产生的位移可用 \bar{i}_{z1} 表示:

$$\bar{i}_{z1} = -\frac{\varepsilon^3}{3} \frac{z - z_0}{\eta_1^3} \quad (3)$$

式中: η_1 为由于倾斜而产生的水平位移。

隧道下穿建筑物施工场地属于半无限土地,而上述方程属于无限位移方程,因此需要用半无限体求解问题代替无限体求解问题,设 $G'(x_0, y_0, -z_0)$ 表示点 $G(x_0, y_0, z_0)$ 的镜像点,两个点的体积碰撞相等,因此在 z 轴方向中,点 $A(x, y, z)$ 产生的位移 \bar{i}_{z2} 可通过下式计算得到:

$$\bar{i}_{z2} = \frac{\varepsilon^3}{3} \frac{3z^3 - z(x^2 + y^2)}{\eta_2^3(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)} \quad (4)$$

式中: η_2 为由于倾斜而产生的垂直位移。

考虑地表在建筑施工过程中产生的附加剪应力,利用下式重新计算 z 轴方向中点 $A(x, y, z)$ 产生的位移 \bar{i}_{z3} 。

$$\bar{i}_{z3} = \frac{z}{\eta_3} + \frac{1-2\nu}{\eta_3(\eta_3+z)} \quad (5)$$

式中: $\eta_3 = [(x-\beta)^2 + (y-\chi)^2 + z^2]^{1/2}$; ν 为土体泊松比。

在上式的基础上获得任意间隙单元在施工过程中造成的 z 轴方向位移 \bar{i}_z , 其表达式为:

$$\bar{i}_z(x, y, z) = \frac{3(\bar{i}_{z1} + \bar{i}_{z2} + \bar{i}_{z3})}{4\pi\varepsilon^3} \quad (6)$$

土体在 z 轴方向的位移受到多种因素的影响,如隧道开挖、支护结构、地下水、土体性质等,那么隧道下穿建筑物施工造成土体在 z 轴方向中产生的位移 Δz 可以表示为:

$$\Delta z = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \alpha_i \cdot \beta_j \cdot \gamma_k \cdot f(x, y, z) \quad (7)$$

式中: Δz 为土体在 z 轴方向的位移; α_i , β_j 和 γ_k 为与隧道参数、土体性质、地下水位等因素相关的系数; $f(x, y, z)$ 表示位置函数; n_1 , n_2 , n_3 分别为与隧道参数、土体性质、地下水位相关的系数数量。

1.2 建筑土层性质参数计算

通过公式描述建筑本身性质以及土层性质:

$$k = \sqrt{\frac{R_s F^4}{RO} \frac{0.65R_s}{1-\nu^2}} \quad (8)$$

式中: R_s 为地基土压缩模量; k 为地基基床系数; F 为隧道外径; O 为隧道截面惯性矩。

根据上式分析构建建筑物地基和隧道单元的土

岩土力学

层刚度矩阵 $[L_s]^e$ 、 $[L_t]^e$ ：

$$\begin{cases} [L_s]^e = \int_0^l L\{\varphi\} \{\varphi\}^T dx \\ [L_t]^e = \int_0^l RO \left\{ \left[\frac{d^2\varphi}{dx^2} \right] \left[\frac{d^2\varphi}{dx^2} \right]^T \right\} dx \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\{\varphi\}$ 为插值函数向量； φ 为插值函数。

集成上述方程，得到隧道下穿建筑物施工引起的土层变形向量 $\{G\}$ ：

$$\{G\} = \{I\} ([L_t] + [L_s]) \quad (10)$$

1.3 基于三维 BIM 地质模型的变形预测

将上述获取的位移与土层变形向量输入至 BIM 模型中，通过蚁群算法优化三维 BIM 地质模型的相关参数，实现隧道下穿建筑物施工变形预测^[9-10]。在 BIM 模型参数优化的过程中，蚁群算法可以根据位移与土层变形向量的实际情况，自动调整模型参数，使模型更加符合实际施工情况。

为动态模拟隧道下穿建筑物施工变形全过程，构建三维地质 BIM 模型，构建具体过程如下：

(1) 构建三维地质模型。通过 Revit 软件构建三维地质模型，运用该模型编制隧道下穿建筑物施工全过程进度计划，并将施工全过程分解成不同的工作包。

(2) 联络施工全过程进度信息。通过 Revit 软件构建的三维模型，确保工作包与构建集一一对应，启动 Navisworks 软件的模拟性能，对建筑土层变形特性进行模拟^[11-12]。

然后采用蚁群算法对构建的三维地质 BIM 模型进行优化，通过蚁群算法优化三维 BIM 地质模型的相关参数，在 BIM 模型参数优化的场景中，蚁群算法可以将 BIM 模型的参数视为蚂蚁需要寻找的“食物”（即最优解），而将位移与土层变形向量的实际情况作为蚂蚁在寻找食物过程中的“环境信息”。将建筑土层性质参数与变形位移参数预测误差最小化作为优化目标，获得 BIM 模型的最佳参数。通过下式估计建筑土层性质参数与变形位移参数预测结果与实际结果 y_i 之间的偏差 MSE ：

$$MSE = \left\{ l \sum_{i=1}^l [y_i - f(x_i)]^2 \right\}^{-1} \quad (11)$$

将建筑土层性质参数与变形位移参数预测误差最小化作为优化目标，获得 BIM 模型的最佳参数。

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示 BIM 模型中需要优

化的参数，将参数集合共分为 n 层，获得 N 个点，将其作为优化目标。通过在三维 BIM 地质模型上叠加动态的体元栅格三维空间场数据。

在 x_1 层中随机放置 m 个体元栅格三维空间场数据，通过转移规则将数据转移到下一层 x_{i+1} 中，重复转移步骤，将体元栅格三维空间场数据转移到第 x_n 层，用 τ_{ijk} 表示数据密度，则转移概率 P_{ijk} 为：

$$P_{ijk} = \frac{\tau_{ijk}^\gamma \iota_{i+1,k}^\kappa}{\sum_{l=1}^N \tau_{ijk,l}^\gamma \iota_{i+1,l}^\kappa} \quad (12)$$

式中： γ 为信息启发因子； κ 为期望启发因子； ι_{ijk} 为路径的启发函数。

在搜索最优 BIM 模型参数的过程中，通过在三维 BIM 地质模型上叠加动态的体元栅格三维空间场数据，不仅实现了建筑土层性质参数与变形位移参数数据的升维表达，同时也解决了传统静态 BIM 地质模型实时性和协同性表达弱的缺点，通过下式更新建筑土层性质参数与变形位移参数三维空间场数据：

$$\tau_{ijk} = \tau_{ijk}(1 - \sigma) + \sum_{i=1}^m \Delta\tau^i \quad (13)$$

式中： $\Delta\tau^i = W/F(X_i)$ ， $F(X_i)$ 为在循环过程中三维空间场数据获得的目标函数值， W 为形变强度； σ 为挥发系数。

利用目标函数值 $F(X)$ 计算三维空间场数据在 x_{i+1} 层选择点 k 的启发函数：

$$\iota_{i+1,k} = \frac{1}{F(X)} \quad (14)$$

经过 N 次循环，通过 m 个三维空间场数据获得的最优解 $X^{(l)}$ ，在此基础上，重新设置三维空间场数据的搜索空间，重复上述过程，当 $X^{(2)}$ ， $X^{(3)}$ ，... 符合 $\max(\Delta_i) < \varphi_0$ （ φ_0 为提前设定的精度）时，输出 BIM 模型的最优参数，即最优预测结果。

2 实验与分析

为了验证基于改进 BIM 的隧道下穿建筑物施工变形预测算法的整体有效性，选取某隧道下穿建筑物施工工程为研究对象，将文献 [4] 方法和文献 [5] 方法作为对比方法展开测试。测试中隧道下穿建筑物施工的主要地层类型见表 1。建筑物墙体与水平地面夹角为 90° 和 70° 时的墙体拉应变矢量分布，

如图 1 所示；采用所提方法、文献 [4] 方法、文献 [5] 方法预测建筑物的挠曲变形，如图 2 所示。采用所提方法预测建筑物在施工过程中的墙体挠曲变形时，在不同夹角条件下，获得的预测结果与实际结

表 1 主要地层类型参数

Table 1 Parameters of main formation types

地层类型	泊松比	天然密度 / (g/cm ³)	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°
淤泥质粉细砂	0.35	1.80	3.90	3.2	21.0
全风化泥质粉砂岩	0.26	2.14	5.77	31.0	22.3
粉质黏土	0.29	2.00	5.82	14.7	13.0
可塑状粉质黏土	0.26	2.11	6.35	20.0	19.0

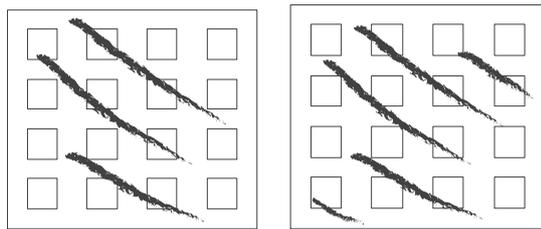
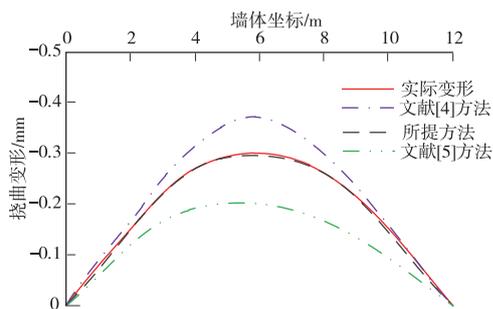
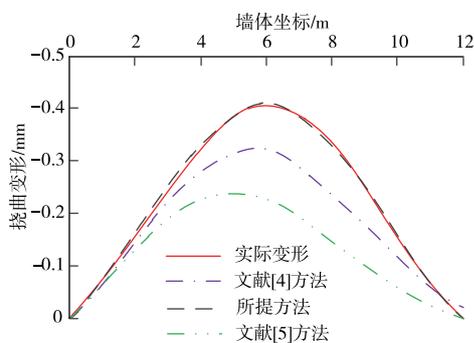


图 1 墙体拉应变矢量分布
Fig. 1 Wall tensile strain vector distribution



(a) 夹角为 90°



(b) 夹角为 70°

图 2 不同方法的挠曲变形预测结果

Fig. 2 Deflection deformation prediction results of different methods

果基本相符，验证了所提方法具有良好的适用性。

采用所提方法、文献 [4] 方法和文献 [5] 方法对隧道下穿建筑物施工变形预测精度进行对比分析，对比结果如图 3 所示。所提方法的隧道下穿建筑物施工变形预测精度最高可达 99.9%，而文献 [4] 方法和文献 [5] 方法的隧道下穿建筑物施工变形预测的精度最高仅为 78%。所提方法的隧道下穿建筑物施工变形预测精度最高，是因为所提方法采用优化了 BIM 模型的参数，从而提高了预测结果的精度。

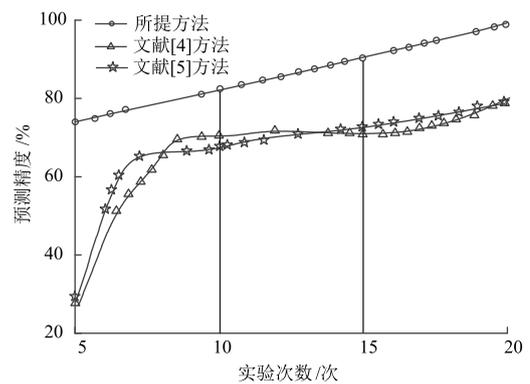


图 3 预测精度对比结果

Fig. 3 Comparison results of prediction accuracy

3 结论

隧道下穿建筑物的施工会影响建筑物附近的土体，造成土体变形和地层位移，进而影响建筑物的整体稳定性，目前隧道下穿建筑物施工变形预测算法存在挠度变形预测结果不准确、预测精度低的问题，提出一种基于改进 BIM 的隧道下穿建筑物施工变形预测算法，该算法将变形向量输入优化后的 BIM 模型中，可精准地完成隧道下穿建筑物施工变形预测。

参 考 文 献

- [1] 史天亮, 王文光. 信息观和粒子群算法在城市交通拥堵中的研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (4): 19-25.
- [2] 魏英华. 北京地铁 16 号线区间隧道下穿 4 号线施工变形模拟分析与控制 [J]. 铁道建筑, 2020, 60 (2): 75-78, 115.
- [3] 赵良云, 张运涛. 暗挖隧道下穿既有地铁站变形控制及影响分析 [J]. 西安科技大学学报, 2020, 40 (5): 878-886.
- [4] 周中, 陈云, 缪林武. 基于当层法的新建隧道下穿既有隧

岩土力学

- 道引起的变形预测模型研究 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (5): 99-103, 135.
- [5] 戴轩, 郭旺, 程雪松, 等. 盾构隧道平行侧穿诱发的建筑纵向沉降实测与模拟分析 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (1): 233-244.
- [6] 黄震, 张陈龙, 傅鹤林, 等. 环境荷载作用下盾构隧道断面变形特征分析 [J]. 铁道工程学报, 2021, 38 (1): 49-54, 71.
- [7] 马建军, 王满, 刘家宇, 等. 基于 Winkler 地基理论的横向受荷长桩非线性动力响应模型试验 [J]. 振动与冲击, 2021, 40 (1): 39-44, 67.
- [8] 付光明, 彭玉丹, 安晨, 等. Winkler 地基上各向异性薄板弯曲的精确解-广义积分变换解 [J]. 计算力学学报, 2020, 37 (1): 92-97.
- [9] 李加彪, 谭跃. 采用自制条形码的建筑物变形沉降监测新技术 [J]. 建筑技术, 2019, 50 (11): 1332-1334.
- [10] 谢雄耀, 张永来, 周彪, 等. 盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (10): 1781-1789.
- [11] 朱瑞, 闫汝华, 任云峰, 等. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36 (5): 2264-2273.
- [12] 沈小娜. 基于 BIM 模型的室内环境布局系统设计 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (16): 129-132.
- [13] 邓璘, 王琳, 盛步云, 等. 基于变邻域蚁群算法的自动光学检测路径规划 [J]. 计算机工程与设计, 2020, 41 (2): 354-360.
- [14] 郑娟毅, 程秀琦, 付姣姣. 改进蚁群算法在 TSP 中的应用研究 [J]. 计算机仿真, 2021, 38 (5): 126-130, 167.

(上接第 63 页)

支护上的作用力较大, 围岩水平收敛变形较小, 作用在支护上的应力相对较小。

4 结语

通过建立简单的梁/板模型对拱部水平泥砂互层岩体开挖后的受力和变形过程进行系统性分析, 结合现场实测与数值模拟分析, 主要得出如下结论:

(1) 分别得出在第三强度理论与不同临界状态下, 水平层岩可承受的最大正应力和剪应力值表达式, 较合理的解释了水平层岩的受力破坏特性。

(2) 推导出水平层岩变形挠度方程, 基本可以反映水平层岩变形特性。将理论推导计算结果与实测沉降值对比分析, 在量级和趋势上, 能够较好的显示出拱顶水平层岩的变形特点。

(3) 从数值分析结果来看, 拱顶部位沉降范围较大, 拱部围岩应力在洞顶部一定范围开始释放, 显示出拱顶离层及塌落拱效应的影响, 数值模拟的结果与实测结果趋势基本一致, 显示出及时支护、控制拱部变形的重要性, 为类似工程提供了良好的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 夏磊. 层状岩体力学特性及水力压裂应力阴影效应研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.

- [2] 张会仙. 反倾层状岩体弯曲破坏判据及数值实现 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [3] 何兴. 水平层状岩体洞室顶板力学模型及锚固效应研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [4] 张乾. 高地应力(近)水平岩层隧道开挖稳定性及初支结构受力特性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [5] 徐帮树, 张万志, 石伟航, 等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48 (6): 1248-1255.
- [6] 周星. 层状软岩隧道稳定性及受力变形特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [7] 罗彦斌, 陈建勋, 王利宝, 等. 考虑层间黏聚力的水平层状围岩隧道顶板力学模型计算 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (10): 230-237, 265.
- [8] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [9] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [10] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [11] 卢泽霖. 水平层状围岩隧道顶板力学模型与稳定性研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- [12] 吴顺川, 李利平, 张晓平. 岩石力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [13] 李世强. 重庆涪丰石高速方斗山隧道病害处治方案研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.