

DOI: 10.11779/CJGE2015S2039

隧道开挖对地面房屋影响的三维数值分析与评估

邹文浩^{1, 2}, 徐 明^{1*}

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京 100081)

摘 要: 城市地铁建设需要针对隧道开挖对地面房屋的影响进行合理的评估。采用能够考虑土体小应变刚度特征的本构模型, 通过三维数值模拟以计算典型工况下隧道开挖引起的地面不同位置框架结构房屋变形, 进而分别采用 Burland 方法及改进的 Boone 方法对房屋所受的影响进行评估, 并将两种方法的评估结果进行对比。结果表明, 采用 Burland 方法可能会低估框架结构房屋所受的影响, 从而导致预测结果偏于不安全。同时, 采用改进的 Boone 方法的预测结果表明, 框架结构房屋的损坏很可能出现在地表沉降曲线反弯点附近的位置。

关键词: 隧道开挖; 房屋结构; 土体变形; 数值模拟; 小应变刚度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S2-0202-08

作者简介: 邹文浩(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事隧道工程的研究。E-mail: zouwenhao0308@163.com。

3D numerical analysis and evaluation of the influence of tunneling on frame buildings

ZOU Wen-hao^{1, 2}, XU Ming¹

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Buildings on the ground surface are inevitably influenced by tunneling. This paper presents the results of a 3-D numerical analysis on the deformation of a frame structure induced by tunneling using small-strain stiffness model for soils. The numerical results are compared with those predicted by the Burland method and the modified Boone method. The comparison demonstrates that the predicted results of Burland method are not reliable in some cases, and may seriously underestimate the deformation of frame buildings.

Key words: tunneling; building structure; soil deformation; numerical simulation; small-strain stiffness

0 引 言

地下交通系统尤其是地铁轨道交通因其运能大、经济效益好及空间利用率高等显著特点, 近年来在中国各大主要城市得到发展迅速。然而, 地铁隧道多建设于城市中心的繁华地段及主要商圈附近, 这些区域地面遍布着密集的建筑物, 既有较新的多高层建筑, 也有年久失修的老建筑物, 甚至还有诸如北京雍和宫、上海外滩万国建筑博览群这样有着重要历史意义的文物保护建筑。隧道开挖对地层土体的扰动势必会威胁到这些结构物的安全, 甚至酿成严重事故。

因此, 针对隧道开挖对周围房屋建筑的影响进行合理的评估, 进而在规划、设计和施工中选择合适的方案及应对措施, 对于减少工程安全事故发生、加快城市现代化建设、保持社会安定和谐及可持续发展都具有重要的意义。

1 现有评估方法

目前国内地铁工程中通常将房屋最大沉降、差异沉降或房屋倾斜作为判断标准, 带有很大的经验性。而国外工程中得到较为广泛应用的是 Burland 等^[1]在 2001 年提出了一种评估方法, 本文称之为 Burland 方法。另外, Boone^[2]提出了一种针对隧道开挖对框架结构房屋的影响的评估方法, 本文称之为 Boone 方法。

1.1 Burland 方法

Burland 方法首先假设房屋为完全柔性, 随着地表土体变形而变形; 然后以沉降槽反弯点为界将房屋分成两个区域: 上凸区(hogging zone)和下凹区(sagging zone), 分别对这两个区域进行考虑(图 1); 进而基于

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272280; 50808109)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

Timoshenko 梁理论, 通过式 (1) ~ (4) 求得房屋的最大拉应变 ε_{\max} , 并将其与造成砖墙不同损伤程度的极限拉应变进行对比, 从而对房屋受损程度进行评估^[3]。

$$\varepsilon_{\text{bmax}} = \frac{\Delta}{L \left(\frac{L}{6H} + \frac{EH}{4GL} \right)}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{dmax}} = \frac{\Delta}{L \left(\frac{HL^2}{18I} \frac{G}{E} + 1 \right)}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\text{br}} = \varepsilon_{\text{bmax}} + \varepsilon_{\text{h}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{dr}} = \varepsilon_{\text{h}} \frac{(1-\nu)}{2} + \sqrt{\varepsilon_{\text{h}}^2 \left(\frac{1+\nu}{2} \right)^2 + \varepsilon_{\text{dmax}}^2} \quad (4)$$

上式 Δ 为梁的最大挠度; L 为梁的宽度; E 为梁的杨氏模量; G 为梁的剪切模量; H 为梁的高度; I 为梁的截面惯性矩; $\varepsilon_{\text{bmax}}$ 为纯弯情况下梁的最大拉应变; $\varepsilon_{\text{dmax}}$ 为纯剪情况下梁的最大拉应变; ε_{h} 为梁的水平拉应变, 即梁沿长度方向的伸长量与梁长的比值。 ε_{br} 和 ε_{dr} 中的较大值为最大拉应变 ε_{\max} 。

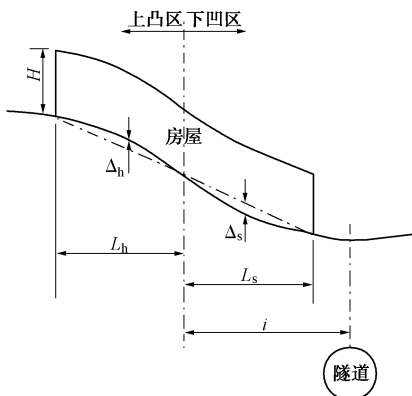


图 1 Burland 方法的房屋变形示意图

Fig. 1 Deformation of buildings

虽然 Burland 方法得到了较为广泛的应用, 但也有很大的局限性: ①Burland 方法最初是针对英国较老的砖石房屋提出的, 仅仅通过调整 E/G 的取值来粗略地考虑不同结构形式房屋的抗剪能力, 例如砖石砌体房屋的 E/G 取 2.6, 而框架结构房屋的 E/G 取为 12.5^[3]。②该法完全忽略了房屋自身刚度对变形的约束, 假设房屋完全随着地面变形而变形。③该方法中人为将房屋划分为互不相关的上凸区和下凹区单独进行考虑, 忽略了房屋的结构整体性。

1.2 Boone 方法

Boone 方法的大致思路为:

(1) 假设框架结构房屋随原地面变形而变形, 以地面沉降曲线反弯点为界把房屋分为上凸区与下凹区分别进行分析。

(2) 取其中一榀框架进行分析, Boone 认为钢筋混凝土框架结构梁和柱之间的连接为刚性连接, 则一榀框架中梁在受到两端柱差异沉降的作用后变形类似于一个反弯点位于跨中的“S”形曲线, 且假设梁以跨中为界左右两部分都弯曲成圆弧状, 这样则可得到梁上任意一点的挠度。

(3) 由于这榀框架中的填充墙的转动受到位于填充墙左右两端的框架柱限制, 填充墙基本上随着上下两端的框架梁变形而变形, 在填充墙沿着梁长度方向 1/4 处至 3/4 处的剪应变较大。然后计算总拉应变 ε_t (total tensile strain) 及主拉应变 ε_p (principal tensile strain)。

(4) 最后把 ε_t , ε_p 与墙体裂缝的累计宽度联系起来, 通过计算得到的累计裂缝宽度来评估房屋的受损程度。

虽然 Boone 方法对框架结构的变形有着更为深入的分析, 但是该方法也存在着一些不足: ①也是假设房屋随地表土体发生变形, 没有考虑房屋刚度对变形的影响。②把房屋分成上凸区和下凹区单独进行分析, 忽视了房屋的整体性。③对一榀框架梁的变形进行分析时假设缺乏理论根据, 认为梁在两端柱差异沉降的作用下变形类似于一个反弯点位于跨中的“S”形曲线, 并以跨中为界左右两部分都弯曲成圆弧状。

2 本文对 Boone 方法的改进

本文就 Boone 方法上述 3 个不足提出改进, 大致思路是:

首先采用三维数值模拟得到隧道开挖引起的地面房屋结构变形情况, 而不是采用原地面沉降曲线, 从而能够充分考虑房屋结构和土的相互作用。

然后分析框架结构中每一榀框架的变形, 认为钢筋混凝土框架结构梁和柱之间的连接为刚性连接, 在隧道或基坑开挖的影响下, 一榀框架的变形主要有刚体转动 tilt 和两端柱的差异沉降 Δ , 可通过这榀框架的 4 个角点 (A, B, C, D) 的位移求得 (图 2):

$$\text{tilt} = \frac{(H_C - H_B) + (H_D - H_A)}{2H}, \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{(V_B - V_A) + (V_C - V_D)}{2}, \quad (6)$$

式中, H_A , H_B , H_C , H_D 是角点 A、B、C、D 的水平位移, V_A , V_B , V_C , V_D 是角点 A、B、C、D 的竖向位移。

由于梁的长度与厚度比值较大, 可将其当成两端固支的欧拉梁进行分析 (图 3), 减去梁的两端框架柱差异沉降中和刚体转动有关的部分之后, 则梁受右端支座沉降 $\Delta - L \cdot \text{tilt}$ 作用, 对其进行求解得梁上任意一

点的挠度为

$$\omega = \frac{3(\Delta - L \cdot \text{tilt})x^2}{L^2} - \frac{2(\Delta - L \cdot \text{tilt})x^3}{L^3} \quad (7)$$

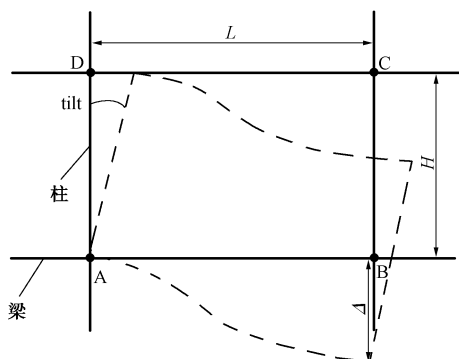


图 2 一榀框架的变形示意图

Fig. 2 Deformation of a frame

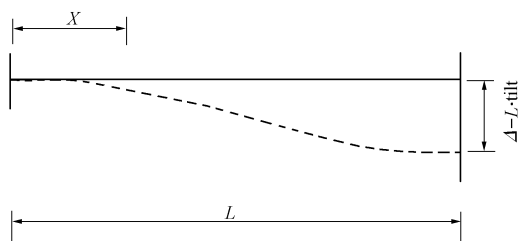


图 3 梁的变形分析原理图

Fig. 3 Analysis principle of beam deformation

由于框架柱轴向变形非常小, 可认为这榀框架上下两端梁的变形基本一致。而填充墙的转动受到两端框架柱的限制, 基本上随着梁的变形而发生变形, 其变形模式主要为纯剪变形, 则墙上任意一点剪应变为

$$\gamma = \frac{\partial \omega}{\partial x} = \frac{6(\Delta - L \cdot \text{tilt})x}{L^2} - \frac{6(\Delta - L \cdot \text{tilt})x^2}{L^3} \quad (8)$$

当 $x = \frac{L}{2}$ 时剪应变最大:

$$\gamma_{\max} = \frac{1.5\Delta}{L} - 1.5\text{tilt} \quad (9)$$

最后通过下式计算主拉应变 ε_p , 预测房屋受损程度。

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{\max}}{2}\right)^2} \quad (10)$$

式中 ε_x 为框架梁轴向应变, ε_y 为框架柱轴向应变。

3 小应变本构模型及其验证

3.1 土体小应变模型

本文提出的改进的 Boone 方法中需要采用三维数值模拟, 以合理预测隧道开挖引起的地面结构变形。研究表明, 采用支护措施较强的盾构法施工时, 其周

围大部分土体的应变一般在 0.01%~0.1% 范围内^[4-9]。国外不少学者^[5, 10-14]通过室内三轴试验、现场变形监测等分析手段发现土体在小应变范围内表现出高度非线性、高模量等特点。Simpson 等^[15]、Jardine^[10]通过数值模拟对隧道和基坑开挖等实际工程进行分析发现, 考虑土体小应变刚度特性得到的计算结果和现场观测结果更接近, 而不考虑土体小应变刚度特性时会带来很大偏差。因此, 为了合理地预测隧道开挖对房屋等结构的影响, 有必要采用能反映土体小应变刚度特性的本构模型。

本文中土体本构模型采用如式 (11) 所示的幂函数形式来表示小应变范围内土体切线剪切模量 G_{\tan} 和偏应变 ε_q 之间的关系。该模型最初由 Dasari 提出^[16], 是一种非线性小应变本构模型 (图 4)。由于弹性模型难以考虑土体达到强度之后的应力应变状态, 故本文引入莫尔-库仑屈服准则以考虑土体进入塑性时的状态, 从而能够较好地描述距离隧道较近土体的变形情况^[17]。

$$G_{\tan} = Ap' \varepsilon_q^n \quad (\varepsilon_{q(\min)} < \varepsilon_q \leq \varepsilon_{q(\max)}) \quad (11)$$

式中, A , n , $\varepsilon_{q(\min)}$, $\varepsilon_{q(\max)}$ 为土体本构模型参数, p' 为平均有效应力。

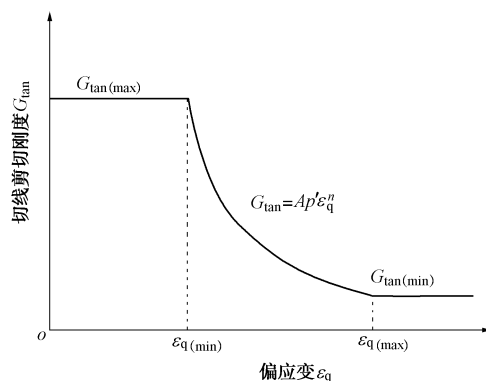


图 4 切线剪切刚度和偏应变的关系

Fig. 4 Relationship between tangent shear stiffness and deviator strain

3.2 模拟效果验证

为了检验该本构模型模拟隧道开挖对地面建筑物影响的效果, 本文对 Farrell 等^[18]的一组土工离心机试验进行了模拟。

Farrell 和 Mair 通过一组离心机试验研究了隧道开挖引起的地面结构物的变形情况。离心机试验模型具体尺寸如图 5 所示, 试验用土为 Leighton Buzzard Fraction E silica sand。离心机加速度逐步加至 75g, 接着用电泵向外缓慢抽油来模拟隧道开挖导致的隧道体积损失率 (2%)。对地面结构物则采用 400mm 长的铝制板来代替, 铝制板都位于隧道正上方, 通过在不同

试验中变化铝制板的厚度来模拟不同刚度的房屋。

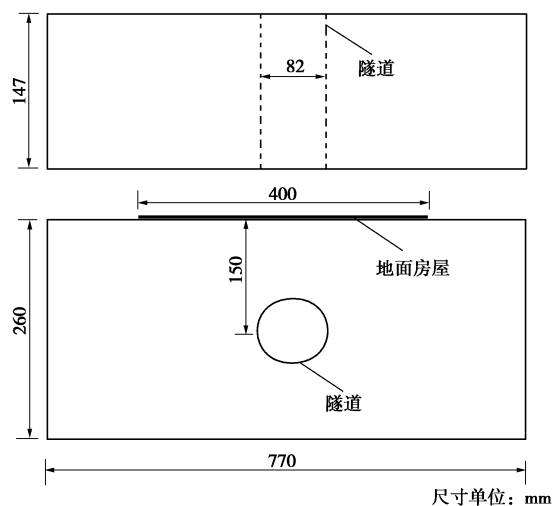


图 5 离心机试验模型具体尺寸示意图
Fig. 5 Dimensions of centrifuge test model

本文对上述离心机试验进行数值模拟。单元划分如图 6 所示，隧道直径为 6.15 m，埋深为 8.25 m，隧道轴线距底部的距离为 21 m。土体模型参数如下表 1 所示，对于结构物与土体之间的界面采用一层厚度为 0.2 m 的实体单元进行模拟。铝板用 shell 壳单元进行模拟，参数见表 2。

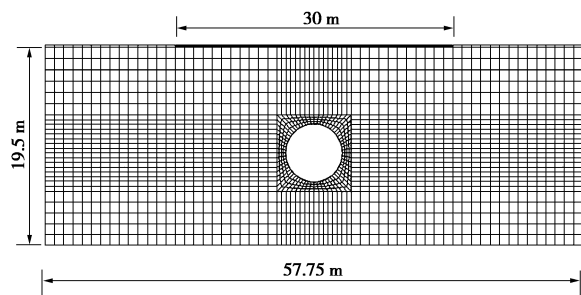


图 6 数值模型尺寸示意图
Fig. 6 Dimensions of numerical model

表 1 土体参数

Table 1 Soil parameters

| K_0 | γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) | A | n | $\varepsilon_{q\min}$ /% | $\varepsilon_{q\max}$ /% | ν | c /kPa | φ /($^\circ$) | ψ /($^\circ$) |
|-------|--|-----|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-------------|----------------------------|-------------------------|
| 0.8 | 16.0 | 0.9 | -0.65 | 0.001 | 5 | 0.35 | 0 | 32 | 16 |

表 2 shell 单元参数

Table 2 Parameters of shell elements

| 算例 编号 | 杨氏模量 E/GPa | ν | $t_{\text{shell}}/\text{mm}$ | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ |
|----------|------------------------|-------|------------------------------|--|
| GF | 无 shell 单元 | | | |
| STR-1 | 70 | 0.3 | 120 | 27.0 |
| STR-2 | 70 | 0.3 | 375 | 27.0 |
| STR-3 | 70 | 0.3 | 750 | 27.0 |
| STR-4 | 70 | 0.3 | 1500 | 27.0 |

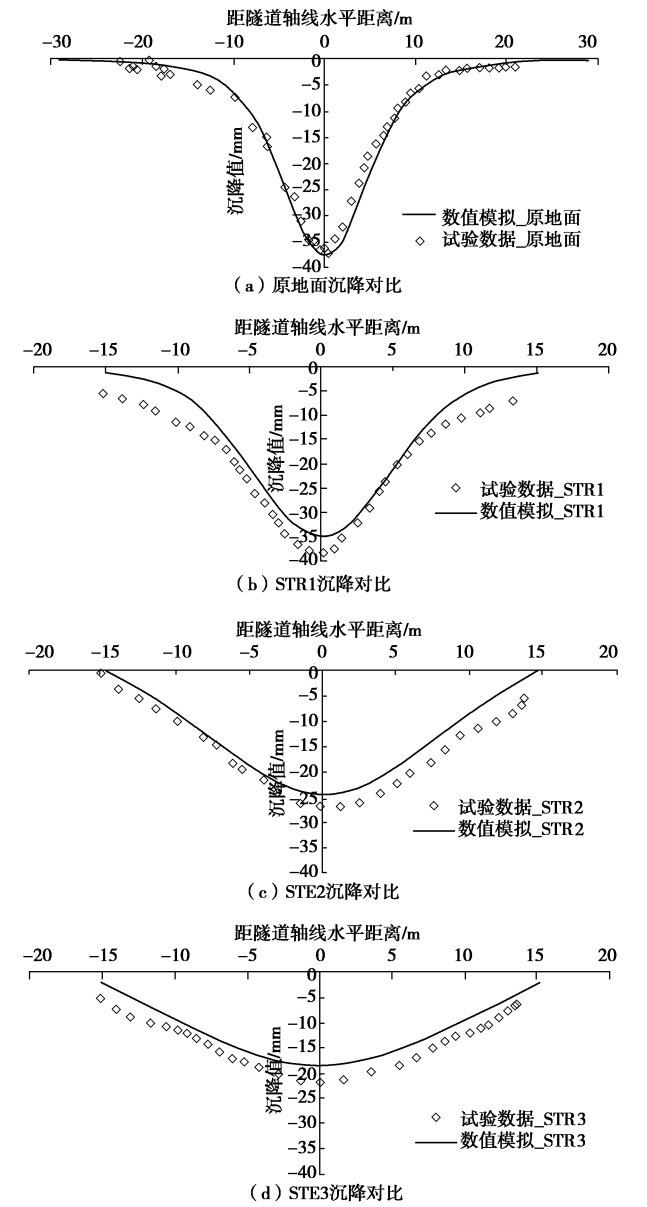
具体模拟步骤为：

(1) 建立模型网格，赋予土体参数，施加边界条件，然后生成初始地应力场。

(2) 在模型中加入 shell 单元，计算达到平衡状态。

(3) 位移清零（只关注隧道开挖引起的地层及结构物变形），然后使用位移控制法^[19]对隧道进行开挖。位移控制法的主要特点为采用控制位移的手段控制隧道开挖断面向隧道最终断面的收敛。该法的优点是计算效率高，且能较为精确地实现所需地层损失率。

图 7 是数值模拟结果与试验数据的对比图。总体来说，采用小应变本构模型的数值模拟能够较好地反映土与地面结构的相互作用。只有当房屋刚度很大时（STR-4），数值模拟得到的房屋沉降与试验数据才有一定差异。同时还可发现，当房屋刚度增加时，房屋与土的相互作用增强，完全忽略房屋刚度而采用原地



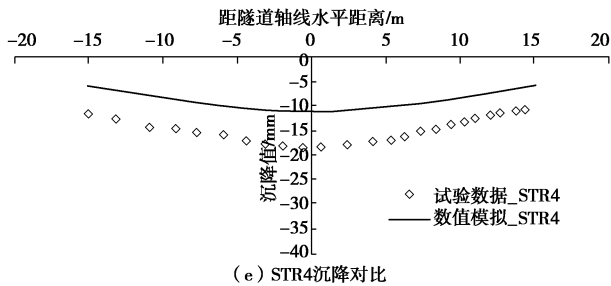


图 7 数值模拟结果与试验数据对比

Fig. 7 Comparison between numerical results and experimental data

4 对框架结构的三维模拟

本节首先通过三维数值模拟计算典型工况下隧道开挖引起的地面框架结构的变形，进而分别采用 Burland 方法及改进 Boone 方法对房屋所受的影响进行评估，最后将两种方法的评估结果进行对比。

4.1 三维模型及模拟流程介绍

模型尺寸如图 8 所示，对于框架结构房屋建立三维模型，楼板用 shell 单元模拟，板厚取 150 mm，框架柱用 beam 单元模拟，截面为矩形截面，尺寸为 400 × 400 mm，混凝土楼板和框架柱的杨氏模量都取 23 GPa，泊松比都取 0.15。 e 为房屋宽度的中心线与隧道中心的水平距离。本节共考虑 3 种不同房屋位置的工况：①工况 1 中 $e=0$ m，即房屋位于隧道正上方；②工况 2 中 $e=24$ m，即房屋最右端位于隧道正上方；③工况 3 中 $e=30$ m，房屋最右端与隧道轴线水平距离为 6 m。

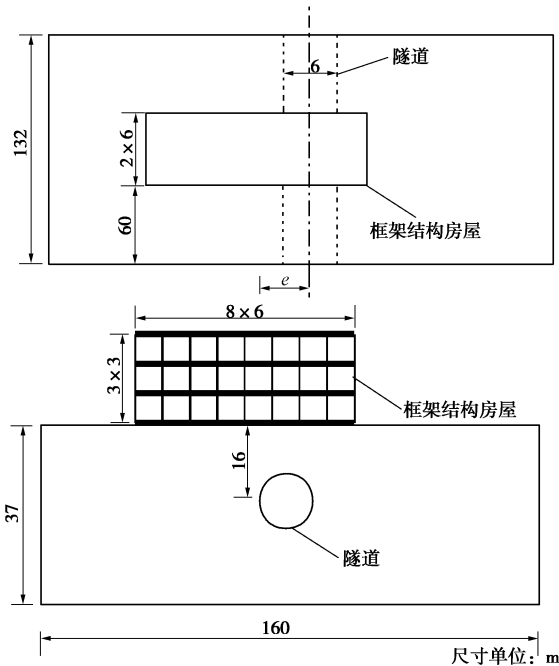


图 8 数值模型尺寸示意图

Fig. 8 Dimensions of numerical model

三维数值模型如图 9 所示。土体采用本文所述小应变本构模型模拟，模型参数如表 1 所示。对于结构与土体之间的界面采用一层厚度为 0.2 m 的实体单元进行模拟。

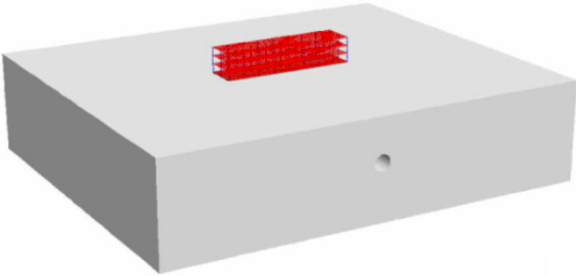


图 9 三维数值模型（算例 1）

Fig. 9 3D numerical model

具体模拟步骤为：①建立数值模型网格，赋予土体参数，施加边界条件，然后生成初始地应力场；②在模型中加入用来模拟房屋的 shell 单元和 beam 单元，并设置好 shell 单元和 beam 单元之间的连接（刚性连接），在每层 shell 单元上分级施加 10 kPa 的均布荷载，进行计算使模型达到平衡；③位移清零，然后使用位移控制法对隧道开挖，直至地层损失率达到 1.5%。

4.2 不同评估方法预测结果

(1) Burland 方法的预测结果

Burland 方法中完全忽略房屋刚度，因此首先需要预测原地面土体的变形情况。通过数值模拟得到没有房屋情况下原地面竖向沉降与水平位移（图 10，11）。

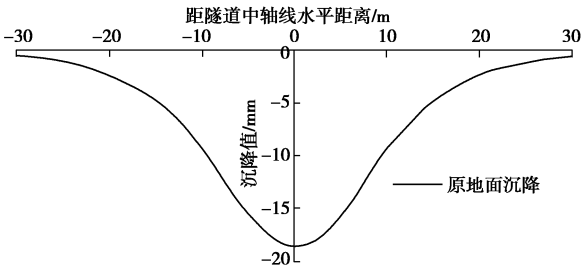


图 10 三维数值模拟得到的原地面沉降

Fig. 10 Green field settlement got by 3D numerical simulation

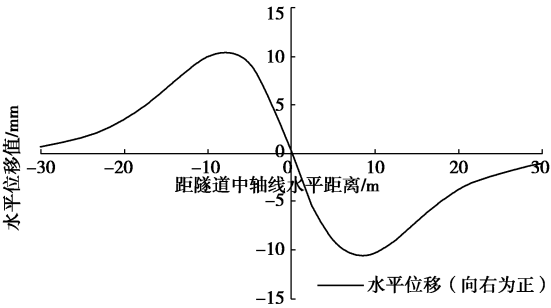


图 11 数值模拟得到的原地面水平位移（向右为正）

Fig. 11 Horizontal displacement of Green field got by 3D numerical simulation (right as positive)

表 3 Burland 方法预测结果
Table 3 Predicted results of Burland method

| 房屋位置 | 区域 | ε_h | ε_{bmax} | ε_{dmax} | ε_{br} | ε_{dr} | ε_{max} |
|-----------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| $e=0\text{ m}$ | 上凸区 | 5.48×10^{-4} | 1.67×10^{-5} | 1.26×10^{-4} | 5.65×10^{-4} | 5.72×10^{-4} | 5.72×10^{-4} |
| | 下凹区 | -1.15×10^{-3} | 2.36×10^{-4} | 3.69×10^{-4} | -9.16×10^{-4} | 2.69×10^{-4} | 5.72×10^{-4} |
| $e=24\text{ m}$ | 上凸区 | 2.63×10^{-4} | 3.73×10^{-5} | 1.08×10^{-4} | 3.01×10^{-4} | 2.98×10^{-4} | 3.01×10^{-4} |
| | 下凹区 | -1.15×10^{-3} | 5.50×10^{-5} | 1.72×10^{-4} | -1.10×10^{-3} | 1.95×10^{-4} | 3.01×10^{-4} |
| $e=30\text{ m}$ | 上凸区 | 2.29×10^{-4} | 3.81×10^{-5} | 9.53×10^{-5} | 2.68×10^{-4} | 2.60×10^{-4} | 2.68×10^{-4} |
| | 下凹区 | -1.29×10^{-4} | 6.54×10^{-7} | 6.12×10^{-6} | -1.28×10^{-4} | 1.96×10^{-5} | 2.68×10^{-4} |

以原地地面沉降槽反弯点把地面房屋分成上凸区和下凹区分别进行考虑。以房屋位于隧道正上方的情况（工况 1）为例，房屋位于上凸区和下凹区的几何及位移情况如下图 12 所示。然后通过式（1）～（4）计算上凸区和下凹区的 ε_{max} 。

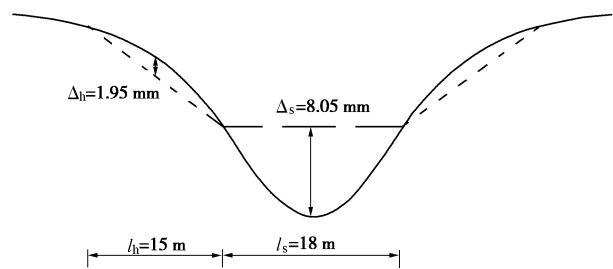


图 12 上凸区及下凹区宽度及位移情况（工况 1）

Fig. 12 Width and displacement of hogging and sagging zones

通过 Burland 方法对上述 3 种不同房屋位置工况的预测结果如表 3 所示。可见 3 个工况的最大拉应变 ε_{max} 都出现在上凸区，并且都与该区域的水平拉应变 ε_h 比较接近。然而，原位观测、模型试验以及数值模拟研究均发现，由于房屋的水平抗拉刚度较大，房屋的实际水平应变相对于原地面的水平应变几乎可以忽略不计^[20]。例如，工况 1 用 Burland 方法预测得到的上凸区水平应变为 5.48×10^{-4} ，而在对框架结构的三维数值模拟中得到的房屋底板上凸区的水平应变只有 1.87×10^{-6} 。可见由于没有考虑房屋的水平抗拉刚度，Burland 方法极大地夸大了房屋的水平应变。

Burland 方法通过把房屋划分为上凸区和下凹区单独分析其变形情况，忽略了房屋的整体性，对工况 1 中上凸区求得的最大刚体转动达到 6.12×10^{-4} ；而在对框架结构的三维数值模拟中工况 1 得到的房屋刚体转动最大值却只有 0.43×10^{-4} 。由于 Burland 方法高估计了房屋的刚体转动，导致房屋的应变情况被严重低估。

Burland 方法中把房屋简化成跨中受集中力作用的简支梁来分析房屋的变形情况，这样最大挠度 Δ 出现在跨中，而实际中上凸区和下凹区的 Δ 不一定出现在跨中。因此，Burland 方法得到的挠曲线可能更为平缓，导致挠曲线变化率和最小曲率半径在一定程度上

被低估，这种情况下得到的 ε_{bmax} 和 ε_{dmax} 显然较实际情况要小。

（2）改进的 Boone 方法的预测结果

改进的 Boone 方法中首先通过三维数值模拟分析隧道开挖引起的房屋变形，以提取框架结构所有节点的位移；进而采用式（5）～（10）对每一榀框架的变形进行计算，求得每一榀框架的主拉应变 ε_p ，对框架结构房屋的受损程度进行评估。

图 13 显示的是 3 个工况主拉应变最大值所在那榀框架的角点位移情况（mm）及其在房屋中的位置。

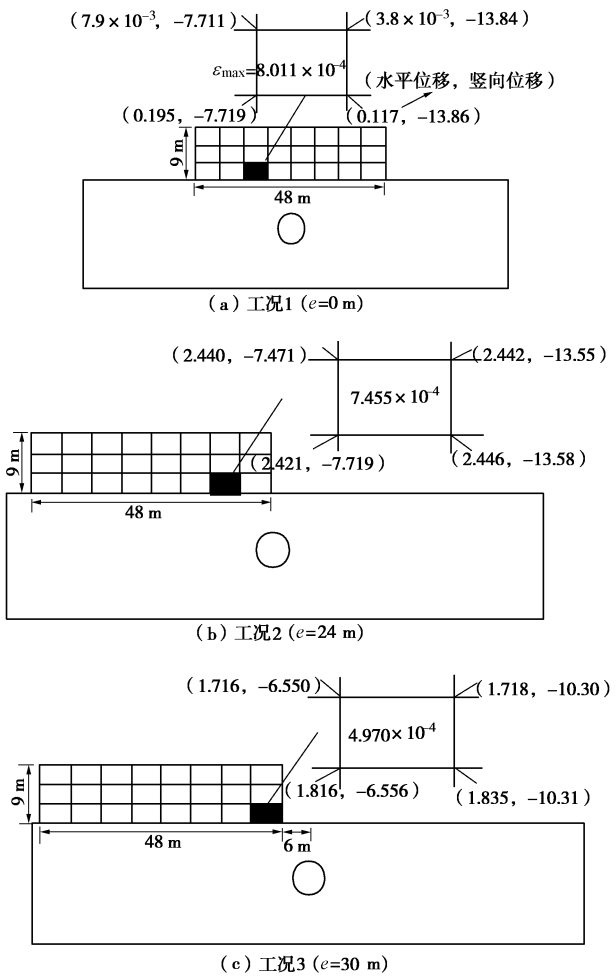


图 13 主拉应变最大值所在那榀框架的角点位移情况

Fig. 13 Angular nodal displacement of Frame with maximum principal strain

结果显示 3 个工况中 ε_{max} 都位于房屋位于地表沉

降反弯点附近的区域，且随着 e 的增大， ε_{\max} 呈现出越来越小的趋势。

4.3 预测结果对比分析

Burland 方法的几个假设中一部分夸大房屋的变形，而另一部分又低估房屋的变形，其预测的结果往往会较大程度地偏离实际情况。而改进的 Boone 方法既考虑了房屋刚度的影响，又考虑了房屋的整体性。

表 4 Burland 方法与改进 Boone 方法的结果对比

Table 4 Comparison of predicted results between Burland method and improved boone method

| 最大 拉应变 | 房屋位置 | Burland 方法 | 改进 Boone 方法 |
|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| ε_{\max} | $e=0\text{ m}$ | 5.72×10^{-4} | 8.01×10^{-4} |
| | $e=24\text{ m}$ | 3.01×10^{-4} | 7.46×10^{-4} |
| | $e=30\text{ m}$ | 2.68×10^{-4} | 4.94×10^{-4} |

对比 Burland 方法与改进 Boone 方法的评估结果发现，前者预测的房屋最大应变为后者的 0.4~0.7 倍（见表 4），这说明 Burland 方法在对框架结构房屋尤其是低层框架结构房屋进行预测时很可能会低估房屋的变形，导致预测结果偏于不安全。

5 结 语

城市地铁建设需要针对隧道开挖对地面房屋的影响进行合理的评估。本文首先对 Burland 方法和 Boone 方法的原理及存在的问题进行了讨论，并对 Boone 方法进行了改进。同时，验证了在数值模拟中采用能够考虑土体小应变刚度特征的本构模型能够较好地反映土与地面结构的相互作用。在此基础上，通过采用该本构模型的三维数值模拟以计算典型工况下隧道开挖引起的地面框架结构的变形，进而分别采用 Burland 方法及改进的 Boone 方法对房屋所受的影响进行评估，并将两种方法的评估结果进行对比。结果表明，采用 Burland 方法可能会低估框架结构房屋所受的影响，从而导致预测结果偏于不安全。同时，采用改进的 Boone 方法的预测结果表明，框架结构房屋的损坏很可能出现在地表沉降曲线反弯点附近的位置。

参考文献:

[1] BURLAND J B, STANDING J R, JARDINE P M. Assessing the risk of building damage due to tunnelling-lessons from the Jubilee Line Extension, london[C]// Proceedings of the 14th Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, 2001: 17 - 44.

[2] BOONE S J. Ground-movement-related building damage[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(11):

886 - 896.

[3] BOSCARDIN M, CORDING E. Building response to excavation-induced settlement[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(1): 1 - 21.

[4] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavations[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, 1993, **97**(1): 27 - 41.

[5] IZUMI K, OGIHARA M, KAMEYA H. Displacements of bridge foundations on sedimentary soft rock: A case study on small-strain stiffness[J]. Géotechnique, 1997, **47**(3): 619 - 632.

[6] WONG H, CHUA T S. Ground movements due to pile driving in an excavation in soft soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(1): 152 - 160.

[7] CHANG Y O, RICHALD N H, WEI J L. Surface settlement during shield tunnelling at CH218 in Taipei[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(1): 159 - 168.

[8] 罗富荣, 国 斌. 北京地铁天安门西站“暗挖逆筑法”施工技术[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 32 - 37. (LUO Fu-rong, GUO Bin. Construction technology of “tunneling and top-down method” at west tian’anmen station in metro of Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **35**(1): 159 - 168. (in Chinese))

[9] 王海波, 徐 明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 39 - 43. (WANG Hai-bo, XU Ming, SONG Er-xiang. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 39 - 43. (in Chinese))

[10] JARDINE R J, POTTS D M, FOURIE A B, et al. Studies of the influence of nonlinear stress-strain characteristics in soil-structure interaction[J]. Géotechnique, 1986, **36**: 377 - 396.

[11] COLE K W, BURLAND J B. Observation of retaining wall movements associated with a large excavation[C]// Proceedings of 5th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Madrid, 1972.

[12] ST JOHN H D. Field and theoretical studies of behavior of ground around deep excavations in London Clay[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1975.

[13] WROTH C P. In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics[C]// Proceedings of Geotechnical Engineering Division Specialty Conference on In Situ

- Measurement of Soil Properties, ASCE, 1975: 181 – 230.
- [14] BURLAND J B. Contribution to discussion on Session 4[C]// Proceedings of 7th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton, 1979: 137.
- [15] SIMPSON B. Retaining structure-displacement and design. 32nd Rankine Lecture[J]. Géotechnique, 1992, **42**(4): 541 – 576.
- [16] DASARI G R. Modelling the variation of soil stiffness during sequential construction[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1996.
- [17] 邹文浩, 徐 明. 考虑土体小应变刚度特征时隔断结构保护效果的三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 203 – 209. (ZOU Wen-hao, XU Ming. 3D numerical analysis of the mitigation effect of separation pile and diaphragm wall with the consideration of soil small strain stiffness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 203 – 209. (in Chinese))
- [18] FARRELL R P, MAIR R J. Centrifuge modeling of the response of buildings to tunneling[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Zurich, 2010: 549 – 554.
- [19] CHENG C Y, DASARI G R, CHOW Y K, et al. Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**: 450 – 466.
- [20] 徐 明, 邹文浩, 章龙管. 房屋刚度对隧道开挖引起的土体变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(4): 838 – 848. (XU Ming, ZOU Wen-hao, ZHANG Long-guan. The influence of building stiffness on soil deformation induced by tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(4): 838 – 848. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)