

基坑开挖引起的下卧隧道隆起变形 及计算深度研究

郭院成^{1,2}, 李承霖¹, 靳军伟^{1,2}, 李明宇^{1,2}

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学地下工程安全与质量控制
河南省工程实验室, 河南 郑州 450001)

摘要 目的 基于弹性理论, 采用二阶段法, 研究基坑开挖对下卧隧道竖向隆起的影响. 方法 首先基于 Boussinesq 解与土体 $e-lgp$ 模型、Mindlin 解与土体 $e-lgp$ 模型, 采用分层总和法计算出隧道轴线处由于基坑土体开挖引起的土体位移, 然后将土体位移作为被动荷载, 作用于被动状态的弹性地基梁模型得到隧道竖向位移, 结合 4 个实例确定合理的计算深度. 结果 基坑开挖引起的坑底土体隆起位移可以用高斯曲线来拟合; 基于 Boussinesq 解的基坑隆起位移, 计算深度宜取隧道轴线以下, 基坑开挖深度的 0.89 倍; 基于 Mindlin 解的基坑隆起位移, 计算深度宜取隧道轴线以下, 基坑开挖深度的 0.72 倍. 结论 基于弹性理论, 采用二阶段法计算基坑开挖引起的下卧隧道隆起变形是合理的, 基于 Mindlin 解的计算结果更符合隧道隆起的规律.

关键词 隧道隆起; Mindlin 解; Boussinesq 解; $e-lgp$ 模型; 计算深度

中图分类号 TU45

文献标志码 A

Research on Subway Tunnel Heave Induced by Foundation Pit Excavation and Determination of Calculation Depth

GUO Yuancheng^{1,2}, LI Chenglin¹, JIN Junwei^{1,2}, LI Mingyu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Henan Engineering Laboratory for Underground Engineering Safety and Quality Control, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001)

Abstract: A two-stage method considering inelastic theory is proposed to calculate tunnel heave. Firstly, based on Boussinesq solution and the deformation calculation of $e-lgp$ model, Mindlin solution and the deformation calculation of $e-lgp$ model to calculate the tunnel-position soil deformation with the layer-summation method. Then with a Winkler elastic foundation beam model, the displacement

收稿日期: 2018-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508520); 河南省住房和城乡建设科技计划项目(K1816)

作者简介: 郭院成(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事基坑支护及地铁隧道保护等方面研究.

of soil is regarded as a passive load to get the subway tunnel heave induced by foundation pit excavation is studied in this paper. The reasonable calculation depth is determined by the examples. On elastic theory, the research results show that the soil heave can be fit by Gaussian curve; Based-Boussinesq solution, the calculated depth below the tunnel should be 0.89 times that of foundation pit depth; Based Mindlin solution, the calculated depth below the tunnel should be 0.72 times that of foundation pit depth. it is reasonable to calculate the subway tunnel heave induced by foundation pit excavation by the two-stage method. The calculation curve based Mindlin solution is more consistent with the rule of tunnel heave.

Key words: tunnel heave; mindlin solution; Boussinesq solution; e -lgp model; calculation depth

随着城市地下空间工程的大量建设,邻近运营地铁隧道的基坑工程逐渐增多,开挖深度也越来越大,合理开发利用城市地下空间是亟须解决的问题^[1-4]. 基坑开挖卸荷引起坑底土体应力状态发生改变,产生隆起,进而造成下卧运营地铁隧道结构变形,可引发地铁运营安全问题.

基坑下卧隧道隆起量与基坑开挖深度、基坑面积、地层参数、隧道刚度等多种因素有关. 对于面积较大的基坑,其最大隆起量主要发生在基坑中心位置且主要与卸荷量有关. 目前关于基坑开挖引起的下卧隧道的隆起变形计算,主要基于土体回弹变形和弹性地基梁模型,采用二阶段法计算,第一阶段:计算隧道轴线土体位移;第二阶段:利用弹性地基梁模型计算基坑开挖时下卧隧道的竖向位移. Zhang Zhiguo^[5]提出采用 Mindlin 解计算基坑壁与坑底卸荷的附加应力,然后基于 Winkler 地基模型建立地铁隧道纵向变形影响的基本微分方程,根据 Galerkin 方法转为一维有限元方程进行计算. 戴宏伟等^[6]采用两阶段应力法,分析了地铁隧道受邻近地表施工荷载的影响,研究了土体参数、隧道位置、隧道参数和荷载位置变化时对隧道变形的影响. J. E. Crofts 等^[7]提出了分别从基坑壁膨胀、支护结构弯曲、基坑壁与维护结构接触和坑内回填四部分出发估算地下管线水平位移. A. Klar 等^[8]通过将管道视为 Winkler 地基梁推导出了集中荷载作用下管道轴线上的沉降曲线,并与数值解进行对比.

原有的计算理论在计算隧道变形时未考虑隧道本身的变形规律,且在计算深度方面存在不足. 基于此,笔者通过 Boussinesq 解、Mindlin 解和 e -lgp 模型组合算法,采用被动土体位移模式下的弹性地基梁模型,探讨隧道变形规律,并结合 4 个案例确定了两种计算模型下合理的应力影响计算深度. 研究表明采用二阶段法计算基坑开挖引起的下卧隧道隆起变形是合理的,基于 Mindlin 解的计算结果更符合隧道隆起的规律.

1 理论计算

计算方法分为两阶段^[9]:

(1) 将基坑开挖简化为矩形荷载分布下 Boussinesq、Mindlin 解和 e -lgp 模型相组合问题,求解天然场地下基坑开挖引起的隧道位置土体的竖向位移.

(2) 采用土体位移模式下的弹性地基梁模型依据土体位移求解隧道竖向位移.

1.1 土体位移

针对基坑开挖引起的坑底回弹问题,杨建民^[10]根据土的侧限压缩试验及 e -lgp 模型,计算得出各层土的隆起量:

$$s = \frac{C_e}{1 + e_0} \Delta \lg p H. \quad (1)$$

其中 $\Delta \lg p$ 可由式(2)确定:

$$\Delta \lg p = \lg \frac{\sigma_z + \sigma_p}{\sigma_p}. \quad (2)$$

式中: C_e 为回弹指数; e_0 为开挖卸载前的孔隙比; p 为开挖卸载后的竖向应力, kPa; H 为开

挖前计算土体的高度, m ; 土体应力由 Boussinesq、Mindlin 解求出。开挖前基坑底部以下土体应力由自重应力 σ_p 和所挖去土体自重均布荷载引起的附加卸载应力 σ_z 两部分组成, 开挖完成后仅剩余自重应力部分 σ_p 。

1.2 隧道隆起位移

1.2.1 基本假设

- (1) 采用弹性地基梁模型, 将隧道视为埋置于土体中的弹性地基梁。
- (2) 土体与隧道之间变形协调。
- (3) 忽略隧道轴力对隧道竖向位移的影响。

1.2.2 隧道位移计算

将隧道视为被动土体位移作用下的弹性地基梁, 取一微元段 dx (见图 1), 建立竖向平衡方程^[11]:

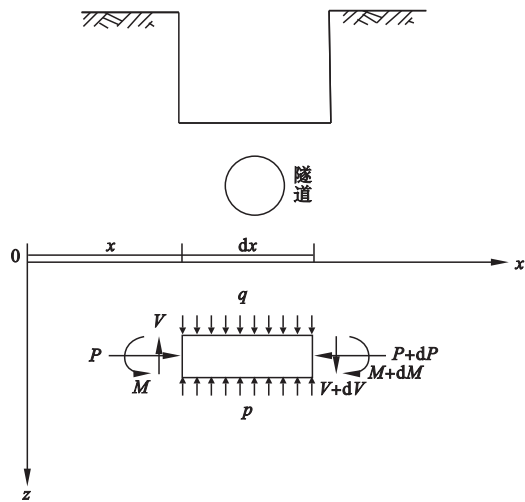


图 1 隧道纵向微元

Fig. 1 Tunnels longitudinal microelement

$$\frac{d^4 z(x)}{d(x)^4} + 4\lambda^4 z(x) = 4\lambda^4 s(x).$$
 (3)

式中: $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$; k 为地基刚度系数; z 和 s 均为关于 x 的函数。

式(3)即为土体位移对隧道位移影响的控制方程。

Biot^[11]、Vesic^[13] 以及 Christian 和 Van

marcke^[14] 通过对弹性地基长梁的试验研究证实, 地基刚度系数明显受梁的刚度影响, 对于地基刚度系数 k 的取值, 笔者根据 Vesic^[13] 的解:

$$k = \frac{0.65E_s}{1 - \nu_s^2} \left(\frac{D^4 E_s}{EI} \right)^{\frac{1}{12}}.$$
 (4)

式中: ν_s 为土体的泊松比; D 为隧道的直径, m ; E_s 为土体弹性模量; EI 为隧道的抗弯刚度, 周泽林^[15] 提出, 由于隧道的管片拼装问题, 隧道纵向刚度较理想状态小, 并认为折减系数应取为 $1/6$, 根据其结论, 计算中对其抗弯刚度进行折减。

式(4)中土体的弹性模量 E_s 可根据压缩回弹试验得到的体积模量计算得出, 体积模量计算如下:

$$E_s = \frac{3(1 - 2\nu_s)(1 + e_0)p'}{k}.$$
 (5)

$$k = 0.434C_e.$$
 (6)

式中: e_0 为土体初始孔隙比; k 为土体对数体积模量; p' 为土体有效自重应力。

联立式(1)得:

$$S = \frac{3(1 - 2\nu_s)p'}{0.434E_s} \Delta \lg pH.$$
 (7)

对于天然场地, 基坑开挖导致坑底隆起, 坑底下方隧道位置处土体的竖向位移 $s(x)$ 采用高斯函数进行拟合:

$$s(x) = S_{\max} \exp(-bx^2).$$
 (8)

式中: 最大土体位移 S_{\max} 由计算基坑中心处隧道位移土体的方法所得, 即 $x=0$ 时的值. b 的值根据角点法分别计算隧道位置土体沿隧道长度上点的竖向应力拟合确定。

对式(3)进行求解, 根据有限差分近似计算可得:

$$\frac{d^4 z(x)}{dx^4} = \frac{z(x+2h) - 4z(x+h) + 6z(x) - 4z(x-h) + z(x-2h)}{h^4}.$$

带入式(3)可得:

$$\frac{1}{h^2} z(x+2h) - \frac{4}{h^4} z(x+h) + \left(\frac{6}{h^4} + 4\lambda^4 \right) z(x) - \frac{4}{h^4} z(x-h) + \frac{1}{h^4} z(x-2h) = 4\lambda^4 s(x).$$

写成矩阵形式如下:

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{D}^{-1}4\lambda^4\boldsymbol{S}.$$
(9)

式中: \boldsymbol{D} 为系数矩阵,由步长 h 的取值而定; \boldsymbol{S} 为土体位移矩阵; \boldsymbol{Z} 为隧道位移矩阵.

2 算例验证

2.1 实例 1

世纪大道杨高路的立交工程基坑近似正方形^[16],开挖宽度 34 m,深度为 7.4 m,地铁二号线隧道在基坑中心两侧 8.5 m 处(见图 2),隧道中心深度 17.4 m,隧道顶距离基坑底部 6.9 m.

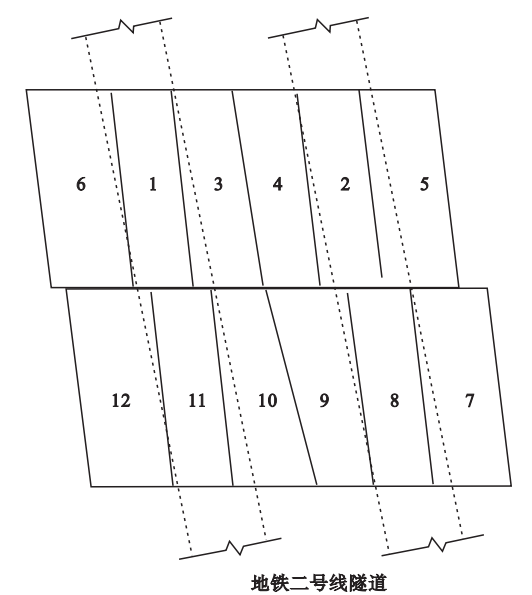


图 2 基坑与隧道平面图

Fig. 2 Layout of excavation and tunnels
上海市杨高路工程地质条件见表 1,隧道参数见表 2.

表 1 土层参数

Table 1 Properties of soil layer

埋深 /m	名称	重力密度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
4.8	灰色砂质粉土	18.7	6.0	31.0
8.6	灰色淤泥质粉质黏土	17.3	13.0	17.0
17.4	灰色淤泥质黏土	16.9	14.0	12.5
20.8	灰色粉质黏土	18.2	18.5	16.0

表 2 隧道参数

Table 2 Properties of tunnels

重力密度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
27	36 000	0.2

采用 Boussinesq、Mindlin 解和 $e - \lg p$ 模型组合算法,每 3 m 分为一层计算,计算深度取至隧道中心以下 24 m(地表以下 41.4 m),约为基坑深度 3 倍,然后利用分层总和法计算隧道中心位置(17.4 m)土体累积隆起量.

通过在坑底施加所挖土重力大小相等方向相反的荷载,并且忽略基坑侧向土挤压产生的变形.计算参数见表 1 和表 2,分层计算开挖卸荷产生的荷载,由此可得出基坑底部卸去的均布力 $p = 134.74$ kPa. 由于勘探深度过浅达不到三倍坑深,故按杨建民给出的取值方法^[10]和文献[17]中土体初始孔隙比 e_0 在 1.44 ~ 0.71 时取为 1.075,泊松比取为 0.25. C_e 在 0.019 ~ 0.044,取中间值 $C_e = 0.0315$,根据式(1)进行计算. 基坑隆起模式采用式(8)高斯曲线进行拟合.

基于 Boussinesq 解和 $e - \lg p$ 模型结合求解,计算结果见表 3 ~ 表 6.

表 3 隧道中心处土体回弹量(Boussinesq 解)
Table 3 Soil rebound at the center of the tunnel (Boussinesq)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4 ~ 20.4	18.9	77.971	196.78	6.601	23.934
20.4 ~ 23.4	21.9	68.5491	251.38	4.770	17.333
23.4 ~ 26.4	24.9	60.3291	305.98	3.560	12.563
26.4 ~ 29.4	27.9	53.219	360.58	2.724	9.003
29.4 ~ 32.4	30.9	47.094	415.18	2.125	6.280
32.4 ~ 35.4	33.9	41.825	469.78	1.687	4.154
35.4 ~ 38.4	36.9	37.29	524.38	1.359	2.467
38.4 ~ 41.4	39.9	33.38	578.98	1.108	1.108

表4 距隧道中心 5m 处土体回弹量(Boussinesq 解)

Table 4 Soil rebound at 5m form the center of the tunnel (Boussinesq)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	75.184	196.78	6.400	23.214
20.4~23.4	21.9	66.093	251.38	4.617	16.814
23.4~26.4	24.9	58.241	305.98	3.446	12.198
26.4~29.4	27.9	51.478	360.58	2.639	8.752
29.4~32.4	30.9	45.66	415.18	2.064	6.113
32.4~35.4	33.9	40.65	469.78	1.641	4.049
35.4~38.4	36.9	36.327	524.38	1.324	2.408
38.4~41.4	39.9	32.588	578.98	1.083	1.083

表5 距隧道中心 10m 处土体回弹量(Boussinesq 解)

Table 5 Soil rebound at 10m form the center of the tunnel (Boussinesq)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	66.545	196.78	5.762	21.067
20.4~23.4	21.9	58.779	251.38	4.155	15.305
23.4~26.4	24.9	52.166	305.98	3.114	11.150
26.4~29.4	27.9	46.483	360.58	2.399	8.036
29.4~32.4	30.9	41.569	415.18	1.887	5.637
32.4~35.4	33.9	37.300	469.78	1.511	3.749
35.4~38.4	36.9	33.58	524.38	1.228	2.238
38.4~41.4	39.9	30.329	578.98	1.010	1.010

表6 距隧道中心 17m 处土体回弹量(Boussinesq 解)

Table 6 Soil rebound at 17m form the center of the tunnel (Boussinesq)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	45.842	196.78	4.143	16.016
20.4~23.4	21.9	42.163	251.38	3.067	11.874
23.4~26.4	24.9	38.747	305.98	2.359	8.807
26.4~29.4	27.9	35.588	360.58	1.862	6.448
29.4~32.4	30.9	32.678	415.18	1.499	4.586
32.4~35.4	33.9	30.011	469.78	1.225	3.087
35.4~38.4	36.9	27.574	524.38	1.014	1.862
38.4~41.4	39.9	25.357	578.98	0.848	0.848

计算深度为 41.4 m 时,以距隧道中心距离为横坐标,隧道隆起量为纵坐标,将(0, 23.934)、(5, 23.214)、(10, 21.067)、(17, 16.016)代入式(8),拟合土体位移方程: $s(x)=23.934\exp(-0.00139x^2)$. 计算结果见图3.

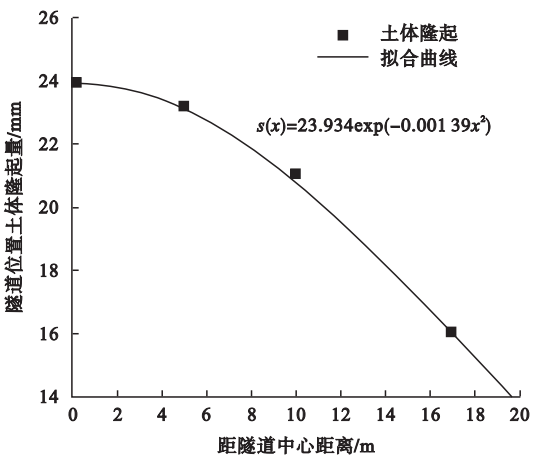


图3 基坑开挖引起隧道位置土体隆起计算结果

Fig. 3 Calculated values for the soil heave at the tunnel

笔者通过土体隧道的耦合方法带入式(9),得到隧道竖向位移 Boussinesq 解、 $e - \lg p$ 模型结合求解计算结果为 22.92 mm.

同理计算深度为 32.4 m 时,将(0, 19.780)、(5, 19.166)、(10, 17.317)、(17, 12.930)代入式(11),拟合土体位移方程: $s(x)=19.780\exp(-0.00147x^2)$,得隧道竖向位移 18.87 mm. 计算深度为 26.4 m 时,得隧道竖向位移为 14.19 mm. 计算深度为 23.4 m 时,得隧道竖向位移为 10.79 mm. 隧道实际变形最大值为 13.00 mm^[16].

基于 Mindlin 解和 $e - \lg p$ 模型结合求解,得到隧道中心处土体、距隧道中心 5 m 处土体、距隧道中心 10 m 处土体、距隧道中心 17 m 处土体回弹量,计算结果见表 7 ~ 表 10.

表 7 隧道中心处土体回弹量(Mindlin 解)

Table 7 Soil rebound at the center of the tunnel (Mindlin)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	84.397	196.78	7.059	25.745
20.4~23.4	21.9	74.443	251.38	5.130	18.686
23.4~26.4	24.9	65.583	305.98	3.841	13.556
26.4~29.4	27.9	57.829	360.58	2.942	9.716
29.4~32.4	30.9	51.105	415.18	2.296	6.774
32.4~35.4	33.9	45.301	469.78	1.821	4.477
35.4~38.4	36.9	40.299	524.38	1.464	2.657
38.4~41.4	39.9	35.986	578.98	1.192	1.192

表 8 距隧道中心 5m 处土体回弹量(Mindlin 解)

Table 8 Soil rebound at 5m form the center of the tunnel (Mindlin)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	81.752	196.78	6.872	25.008
20.4~23.4	21.9	71.937	251.38	4.977	18.136
23.4~26.4	24.9	63.344	305.98	3.721	13.159
26.4~29.4	27.9	55.905	360.58	2.851	9.437
29.4~32.4	30.9	49.49	415.18	2.228	6.586
32.4~35.4	33.9	43.963	469.78	1.769	4.359
35.4~38.4	36.9	39.196	524.38	1.426	2.590
38.4~41.4	39.9	35.079	578.98	1.164	1.164

表 9 距隧道中心 10m 处土体回弹量(Mindlin 解)

Table 9 Soil rebound at 10m form the center of the tunnel (Mindlin)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	72.955	196.78	6.237	22.710
20.4~23.4	21.9	64.067	251.38	4.490	16.473
23.4~26.4	24.9	56.599	305.98	3.357	11.983
26.4~29.4	27.9	50.259	360.58	2.581	8.626
29.4~32.4	30.9	44.822	415.18	2.028	6.045
32.4~35.4	33.9	40.126	469.78	1.621	4.017
35.4~38.4	36.9	36.047	524.38	1.316	2.396
38.4~41.4	39.9	32.491	578.98	1.080	1.080

表 10 距隧道中心 17m 处土体回弹量(Mindlin 解)

Table 10 Soil rebound at 17m form the center of the tunnel (Mindlin)

分层深度/m	计算点深度/m	σ_z /kPa	σ_p /kPa	分层回弹量/mm	累计回弹量/mm
17.4~20.4	18.9	48.345	196.78	4.345	16.854
20.4~23.4	21.9	44.498	251.38	3.223	12.509
23.4~26.4	24.9	40.9189	305.98	2.483	9.286
26.4~29.4	27.9	37.605	360.58	1.962	6.803
29.4~32.4	30.9	34.548	415.18	1.581	4.841
32.4~35.4	33.9	31.737	469.78	1.293	3.260
35.4~38.4	36.9	29.163	524.38	1.071	1.966
38.4~41.4	39.9	26.813	578.98	0.896	0.896

表 11 实例 1 计算结果

Table 11 Calculated values of example 1

计算深度/m	Boussinesq 解/mm	Mindlin 解/mm	实测值/mm
23.4	10.79	11.52	13
26.4	14.19	15.18	13
32.4	18.87	20.21	13
41.4	22.92	24.56	—

从表 11 计算结果可以发现,随着计算深度的增加,Boussinesq 解和 Mindlin 解的结果都逐渐增大,因此合理的确定计算深度是本理论计算的一个关键.另外 Boussinesq 解和 Mindlin 解相比,在数值上偏小,但是区别并不是很大.当计算深度取至 26 m 左右时,与实测结果接近.

2.2 实例 2

深圳市某新建公路隧道位于已建地铁 11 号线上方^[15],并与之线共线,下卧隧道外径为 6.0 m、厚度 0.35 m.研究段明挖基坑平面长 40 m、宽 16 m、开挖深度 8 m,隧道纵轴线与基坑底部的水平净距 6 m、竖直净距 10 m.

文献[15]提供的地质资料见表 12,根据弹性模量可以直接算出土体位移,计算结果见表 13.

表 12 土层参数表

Table 12 Properties of soil layer				
土层厚度 /m	土层名称	重力密度/ (kN · m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比
4	填土层	17.5	0.092	0.34
10	黏土层	18.0	0.081	0.32
16	砾质黏土	18.5	0.120	0.32
40	花岗岩	20.0	0.162	0.30

表 13 实例 2 计算结果

Table 13 Calculated values of example 2			
计算深度/ m	Boussinesq 解/mm	Mindlin 解/mm	实测值/ mm
21	—	2.67	4.4
24	3.97	4.54	4.4
27	5.16	5.90	4.4
42	8.37	9.52	—

从表 13 计算结果可以看出,随着计算深度的增加,Boussinesq 解和 Mindlin 解的结果都逐渐增大.另外 Boussinesq 解和 Mindlin 解相比,在数值上偏小,但是区别并不是很大.当计算深度取 24 m 左右时,与实测结果接近.

2.3 实例 3

上海市东方路下立交工程^[18]地铁 2 号线上行线隧道在东方路立交工程基坑正下方穿过,隧道与基坑中心线夹角 45°,基坑形状近似为长 26 m、宽 18 m 的矩形,开挖深度 6.5 m,隧道中心线距离基坑底部 12.3 m.通过角点法计算出 45°处的竖向应力,根据工程勘探资料,回弹指数 C_e 在 0.057 ~ 0.016 时取 0.365,初始孔隙比 e_0 在 1.351 ~ 0.667 时取 1.01,泊松比取为 0.25.通过参数分层取值法进行修正,土体参数见文献[18].隧道隆起位移计算结果见表 14.

表 14 实例 3 计算结果

Table 14 Calculated values of example 3			
计算深度/ m	Boussinesq 解/mm	Mindlin 解/mm	实测值/ mm
18.3	13.65	14.84	16.9
21.3	17.10	18.77	16.9
24.3	19.72	21.52	16.9
33.3	23.88	26.06	—

从表 14 计算结果可以发现,随着计算深度的增加,Boussinesq 解和 Mindlin 解的结果都逐渐增大.另外 Boussinesq 解和 Mindlin 解相比,在数值上偏小,但是区别并不是很大.当计算深度取至 21 m 左右时,与实测结果接近.

2.3.1 实例 3 修正

由于在不知计算深度时,笔者取值 3 倍的坑深进行讨论,实例 2 和实例 4 勘探深度均达到 3 倍坑深,即达到讨论范围,故采用分层取值法计算,然而实例 3 由于勘探深度过浅,这里先通过文献[10]中土体参数的取值方法进行取值,计算结果见表 14,可粗略得知实例 3 的合理计算深度介于 18.3 ~ 21.3 m,即可以在勘探深度 28.84 m 以内使用参数分层取值法进行修正,当计算深度为 15.3 m、18.3 m 时,计算结果接近实测值(见表 15).

表 15 计算结果修正

Table 15 Modified calculated values		
计算深度/m	Boussinesq 解/mm	Mindlin 解/mm
15.3	10.58	11.43
18.3	17.3	18.84

2.4 实例 4

J. Shi^[19]进行了一系列离心机试验和三维数值模拟来研究基坑开挖对下卧隧道的影响:离心机采用 60 g 加速度,隧道直径 6 m,基坑深 9 m,长宽均为 18 m,隧道中心距离基坑底为 6 m,试验砂为 Toyoura sand,土体参数见表 16,隧道参数见表 17.

表 16 土层参数
Table 16 Properties of soil layer

重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	初始孔 隙比	泊松比	回弹指数
15.112	0.98	0.25	0.019

表 17 隧道参数
Table 17 Properties of tunnels

重力密度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
22	35 000	0.2

通过在坑底施加所挖土重力大小相等方向相反的荷载,并且忽略基坑侧向土挤压产生的变形.计算所挖的重力时土的密度取值 $1.542\text{g}/\text{cm}^3$,可得出基坑底部卸去的均布力 $p=136\text{ kPa}$. 初始孔隙比 e_0 取 0.98, C_e 取 0.019,基坑隆起模式采用式(8)拟合曲线,计算结果见表 18.

表 18 实例 4 计算结果

Table 18 Calculated values of example 4

计算深度/ m	Boussinesq 解/ mm	Mindlin 解/ mm	实测值/ mm
18	—	4.93	7.6
21	6.58	7.97	7.6
24	8.26	9.98	7.6
27	9.43	11.37	7.6
42	12.06	14.43	—

从表 18 计算结果可以发现,随着计算深度的增加,Boussinesq 解和 Mindlin 解的结果都逐渐增大.另外 Boussinesq 解和 Mindlin 解相比,在数值上偏小,但是区别并不是很大.当计算深度取至 24m 左右时,与实测结果接近.

从以上计算实例中可以发现,不论采用 Boussinesq 解还是 Mindlin 解,应力解都需要有计算深度参数,且对结果有较大影响.根据图 3 可知,隧道位移处土体的隆起量可以采用式(8)曲线进行拟合.

3 确定计算深度

笔者分别对 4 个工程案例不同影响深度下隧道竖向隆起的关系进行分析.基坑与隧道位置如图 4 所示,其中 Z 为计算深度, h 为坑深, c 为隧道中心与坑底的距离.不同案例计算结果见表 19.

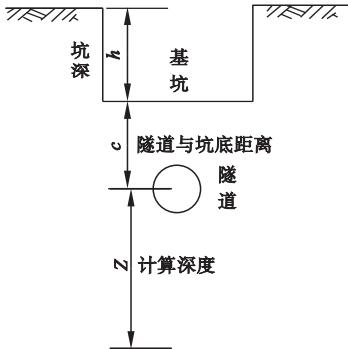


图 4 基坑与隧道位置

Fig. 4 Location of tunnel and excavation

表 19 实例对比

Table 19 Comparison between the projects

工程案例	Boussinesq 解		Mindlin 解	
	Z/h	$S_{\text{理论}}/S_{\text{实测}}$	Z/h	$S_{\text{理论}}/S_{\text{实测}}$
世纪大道杨高路的 立交工程	3.24	1.76	3.24	1.90
	2.03	1.45	2.03	1.56
	1.22	1.09	1.22	1.18
深圳隧道工程	0.81	0.83	0.81	0.89
	3.00	1.90	3.00	2.16
	1.13	1.17	1.13	1.34
	0.75	0.90	0.75	1.03
	0.375	—	0.375	0.61
东方路立交工程	0.92	1.02	0.92	1.11
	0.46	0.63	0.46	0.68
离心机试验	3.00	1.59	3.00	1.90
	1.33	1.24	1.33	1.50
	1.00	1.09	1.00	1.31
	0.67	0.87	0.67	1.05
	0.33	—	0.33	0.65

将表 19 中数据整理得出曲线见图 5、图 6,图中横坐标为计算深度 Z 与坑深 h 的比值,纵坐标为隧道竖向位移理论值 $S_{\text{理论}}$ 与实测值 $S_{\text{实测}}$ 的比值(1.0 表示两者数值一致).

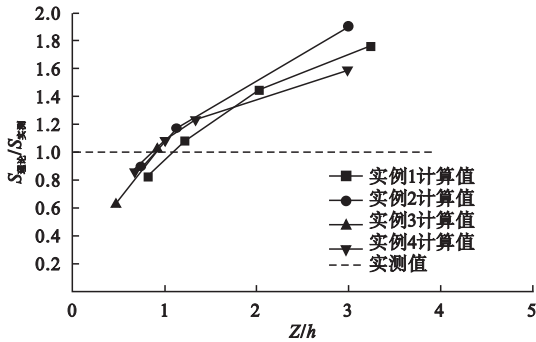


图5 计算深度与隧道实测隆起量关系 (Boussinesq)

Fig. 5 The relationship between the calculation depth andthe monitoring values for the longitudinal heave(Boussinesq)

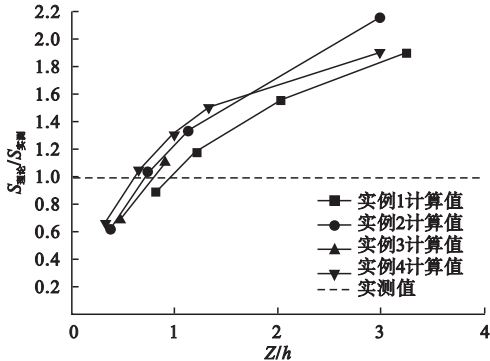


图6 计算深度与隧道实测隆起量关系(Mindlin)

Fig. 6 The relationship between the calculation depth andthe monitoring values for the longitudinal heave(Mindlin)

由图5、图6可以看出,以上4个实例 Boussinesq 解的 Z/h 为 0.87 ~ 1.08, Mindlin 解的 Z/h 为 0.63 ~ 0.97,明显看出实例1 计算深度与其余三个案例相差较大,分析由于没有按照分层取值法进行计算,杨建民^[10]方法略有偏差,然而工程勘探资料的缺失导致无法进行参数的分层取值,所以将其舍弃,故修正后的 Boussinesq 解的 Z/h 为 0.87 ~ 0.90, Mindlin 解的 Z/h 为 0.63 ~ 0.80, Z/h 对 Boussinesq 解、 $e - \lg p$ 模型计算深度宜取其中间值 0.89, Mindlin 解、 $e - \lg p$ 模型计算深度宜取其中间值 0.72.

将 Boussinesq、Mindlin 解和 $e - \lg p$ 模

型组合算法得到的隧道隆起曲线与文献 [19] 中离心机试验得到的实测值进行对比分析. Boussinesq 解取 0.89 倍计算深度(约 23.01m), Mindlin 解取 0.72 倍计算深度(约 21.48m)进行计算,结果如图7所示.

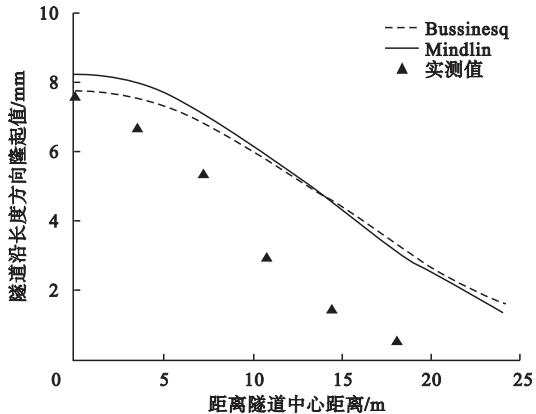


图7 基坑开挖引起隧道纵向隆起实测与计算结果比较

Fig. 7 Comparison between the monitoring data and the calculated values for the longitudinal heave

从图7可以看出,基于 Boussinesq 解、Mindlin 解和 $e - \lg p$ 模型组合算法,计算结果与文献[19]离心机试验得到的实测值较为接近,其中 Mindlin 解得到的隧道隆起曲线规律较好.误差的产生是由于笔者为了简化算法在合理的误差范围内只探讨了坑深与计算深度的关系,然而对于基坑下有隧道时,应力的影响深度不光与坑深 h 有关,同时也受隧道轴线距离坑底高度 c 等因素影响.

4 结 论

(1) 笔者采用“二阶段法”基于 Boussinesq 解与土体 $e - \lg p$ 模型、Mindlin 解与土体 $e - \lg p$ 模型,通过分层总和法计算基坑底部以下土体的隆起,进而依据弹性地基梁理论分析隧道的隆起变形.

(2) 根据4个实例的实测数据,坑底土体竖向位移采用高斯曲线拟合是合理的;计算深度基于 Boussinesq 解,宜取隧道轴线以下基坑开挖深度的 0.89 倍; Mindlin 解计算

深度宜取隧道轴线以下基坑开挖深度的0.72倍。

(3)通过比较两种基于 Boussinesq 解和 Mindlin 解的计算结果,发现基于 Mindlin 解的计算结果更符合隧道隆起的规律。

参考文献

- [1] 钱七虎.城市可持续发展与地下空间开发利用[J].地下空间,2003,23(1):83-86.
(QIAN Qihu. Sustainable development of the cities and the development and utilization of underground space [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2003, 23 (1):83-86.)
- [2] 顾岷.我国城市轨道交通发展现状与展望[J].中国铁路,2011(10):53-56.
(GU Min. Currentstatus and prospects of urban rail transit development in China [J]. China railway, 2011(10):53-56.)
- [3] 童林旭.中国城市地下空间的发展道路[J].地下空间与工程学报,2005(1):1-6.
(TONG Linxu. The way of development of urban underground space in China[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2005(1):1-6.)
- [4] 李刚强.地下空间开发与利用[J].建材发展导向,2018(9):8-9.
(LI Gangqiang. The development and utilization of underground space [J]. Development guide to building materials, 2018(9):8-9.)
- [5] ZHANG Z, HUANG M, WANG W. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering [J]. Tunnelling and underground space technology, 2013, 38:244-253
- [6] 戴宏伟,陈仁朋,陈云敏.地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J].岩土工程学报,2006,28(3):312-316.
(DAI Hongwei, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2006, 28(3):312-316.)
- [7] CROFTS J E, MENZIES B K, TARZI A I. Lateral displacement of shallow buried pipelines due to adjacent deep trench excavations [J]. Geotechnique, 1978, 28(2):212-220.
- [8] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, et al. Soil-pipe interaction due to tunnelling; comparison between Winkler and elastic continuum solutions [J]. Geotechnique, 2005, 55(6):461-466.
- [9] 张治国,张孟喜,王卫东.基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J].岩土力学,2011,32(7):2085-2092.
(ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnel due to founda-

- tion pit excavation [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(7):2085-2092.)
- [10] 杨建民,李嘉.基坑底分层隆起量的实用计算方法[J].岩土力学,2014(5):1413-1420.
(YANG Jianmin, LI Jia. A practical method for calculating layer wise rebound at the bottom of foundation pit [J]. Rock and soil mechanics, 2014(5):1413-1420.)
- [11] 杜浩鸣,粉土地区基坑开挖对下卧地铁隧道变形影响研究[D].郑州:郑州大学,2017.
(DU Haoming. Research on influence of foundation pit excavation on subway tunnel deformation in silty area [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [12] BIOT M A. Bending of an in finite beam on an elastic foundation [J]. Journal of applied mechanics, 1937, 59:1-7.
- [13] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solids [J]. Journal of engineering mechanical, 1961, 87:35-53.
- [14] CHRISTIAN G R, VANMARCKE J T. Tolerance of buildings to differential settlements [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1976, 13(11):137-150.
- [15] 周泽林,陈寿根,涂鹏,等.基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J].岩土力学,2017, 38(12):1001-1011.
(ZHOU Zelin, CHEN Shougen, TU Peng, et al. Coupling method for analyzing influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38(12):1001-1011.)
- [16] 吉茂杰,刘国彬.开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J].同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(5):531-535.
(JI Maojie, LIU Goubin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation [J]. Journal of tongji university (natural science), 2001, 29(5):531-535.)
- [17] 陆宏伟.世纪大道杨高路立交地铁保护段基坑设计[J].城市道桥与防洪,2002(2):44-48.
(LU Hongwei. Design on excavation in the project of Century Avenue and Yanggao Road underpass considering the protection of near metro line [J]. Road bridge flood, 2002(2):44-48.)
- [18] 徐凌,黄宏伟.基坑开挖对下卧地铁隧道的影响研究[J].岩土工程学报,2008(增刊1):164-166.
(XU Ling, HUANG Hongwei. Effect of foundation pit excavation on underlying metro tunnels [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008(S1):164-166.)
- [19] SHI J, NG C W W, CHEN Y. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel [J]. Computers & geotechnics, 2015, 63:146-158.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)