

砂砾地层浅埋盾构隧道开挖对地表变形的影响

叶友林¹,路志旺²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究隧道在不同拱顶覆土厚度、不同盾尾注浆弹性模量、不同土体强度下盾构掘进诱发地表变形的规律,并分析土拱的形成与深浅埋隧道的关系。方法 基于沈阳地铁10号线一期工程中医药大学站至松花江街站区间的勘探地质条件和开挖获得盾构开挖参数,采用数值模拟和现场实测进行比较分析。结果 在浅覆土厚度条件下,地表沉降量随着注浆弹性模量的增加而逐渐减小,地表竖向位移随内摩擦角的增大而逐渐减小。当注浆弹性模量不低于2 MPa时,模拟值与实测值近似吻合,地表沉降量随着覆土厚度的增加而逐渐减小。土拱的形成在一定程度上受内摩擦角的影响,主要成因与拱顶覆土厚度有关,隧道拱顶是否形成完整椭球体状土拱可作为隧道深浅埋划分的依据。结论 砂砾地层浅埋盾构隧道开挖时,拱顶覆土厚度、土体强度对地表变形影响很大,合理的初始注浆弹性模量,可在一定程度上改善地表变形。

关键词 浅埋隧道;砂砾地层;数值模拟;地表变形;盾构开挖

中图分类号 TU47;U455.43

文献标志码 A

Impact of Shallow-Buried Shield Tunneling in Sand-Gravel Strata on Surface Deformation

YE Youlin¹, LU Zhiwang²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The law of surface deformation induced by shield tunneling under different vault cover thickness, shield tail grouting modulus of elasticity and soil strength is studied, and the relationship between the formation of earth arch and deep or shallow buried tunnel is analyzed. Based on the exploration geological conditions and shield excavation parameters obtained from the excavation of the interval between the University of Chinese Medicine Station and Songhua River Street Station of Shenyang Metro Line 10 for the Phase I Project, numerical simulation and field measurements were used for analysis. The results showed that surface settlement decreases with increasing

收稿日期:2021-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52008269);辽宁省教育厅面上项目(2018011666-301)

作者简介:叶友林(1985—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事盾构隧道结构变形及控制方面研究。

elasticity modulus of grouting under shallow overburden thickness; the vertical deformation of the ground surface slows down with increasing internal friction angle. The monitoring data are similar to simulated values when the grouting stiffness is not less than 2 MPa. The formation of the earth arch at the top of the tunnel vault is influenced to some extent by the internal friction angle, but its main cause is related to the thickness of the overburden at the top of the vault. Therefore, the depth of the tunnel excavation can be classified based on the formation of a complete ellipsoidal earth arch at the top of the tunnel vault. During the excavation of shallow shield tunnel in gravel stratum, the overburden thickness and soil strength of arch crown have a great impact on the surface deformation. Furthermore, a reasonable initial grouting modulus of elasticity value can improve the surface deformation to a certain extent.

Key words: shallow buried tunnels; sand and gravel strata; numerical simulation; surface deformation; shield excavation

随着城市地铁的兴起^[1],充分利用地下空间,浅地层进行盾构隧道开挖成为研究重点。砂砾地层由于其具有结构松散,分布不均,黏聚力低,塑性低,压应力大,拉应力小,离散性强^[2],开挖深度较低往往会导致相当大的地表沉降。针对盾构隧道开挖引起的地层变形的研究方法一般有现场监测法、模型试验法、理论解析法和数值仿真法。韦猛等^[3]基于成都地铁17号线监测数据,利用回归分析法计算出沉降槽的宽度,并结合盾构参数推导出该区域最大沉降计算公式。周尚荣^[4]基于沈阳地铁一号线监测数据,分析了砂砾地层中盾构开挖面压力的平衡原理以及诱发地表沉降的原因。现场监测法虽然直观,但对地表沉降的监测频率并不算太高,而且信息回馈也很慢。模型试验法是基于小尺度模型来重现真实地面,讨论不同因素对土层变形的影响,宫志群等^[5]开展了盾构开挖室内模型试验,考虑了不同土体损失率和荷载作用,得到了隧道围土和地表位移的规律。张顺金^[6]利用实验的方法,从浆液的性能和砂砾地层的结构特性考虑,研究了在砂砾地层进行注浆的可行性。在解析方面,魏纲等^[7]采用修正的 Loganathan 公式研究隧道开挖地层损失对土体变形的影响,得到的解与实测数据对比分析,验证修正解的精确性。

傅鹤林等^[8]基于 Покровский 当层法和 Loganathan 修正公式研究了复合地层浅埋盾构掘进对地表变形的影响,并提出软弱夹层厚度等效的概念。解析法虽然在预测地层变形方面具有一定的优势,但在实际工程分析中存在明显的不足。吕玺琳等^[9]利用 ABAQUS 软件,研究了支护压力和地层损失对富水砂卵石地层的影响,吴建文^[10]采用三维数值仿真法,结合上海浅埋盾构隧道工程研究盾构前进过程的地表沉降和土压力的变化规律。为进一步研究浅埋盾构隧道开挖导致砂砾地层的变形机制,笔者建立三维有限元模型模拟盾构隧道开挖,研究注浆弹性模量、土体强度、覆土厚度的变化对地层变形的影响,所得结果与已有地表沉降值吻合较好。

1 工程背景

沈阳地铁10号线一期工程北起丁香公园站南至张沙布站。线路长27 km,是沈阳地铁线网中“双L”线中的一条线路,构成了沈阳地铁组合环线的北环和东环。其中中医药大学站至松花江街站区间全长为1 223.92 m,采用盾构法施工。覆土厚度4.5~13.8 m,掘进地层以砂砾地层为主。隧道外径为6.0 m内径为5.65 m,开挖直径 D 为6.2 m,环宽1.2 m,隧道中心埋深为7.6~16.9 m,掘进断面如图1所示。

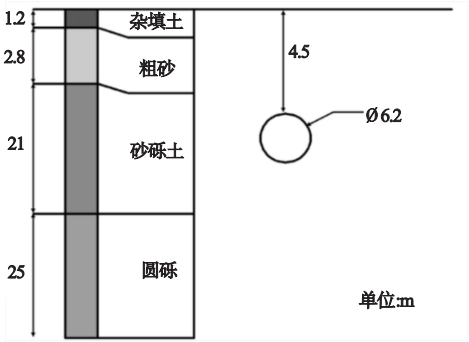


图 1 掘进断面示意图

Fig. 1 Diagram of the excavation section

2 三维数值模型的建立

2.1 模型的建立及边界条件的确定

利用大型数值模拟软件 ABAQUS 对盾构隧道开挖引起的地层变形进行三维弹塑性有限元分析,模型边界选取 $3D \sim 5D$, 地层几何模型的尺寸在 X 、 Y 、 Z 向的分别为 60 m、48 m、45 m,开挖面在 XZ 平面,开挖方向沿 Y 轴正向开挖,且模型底部边界固定,侧边竖向位移自由,顶面没有任何约束。开挖模型的建立及网格的划分如图 2 所示。

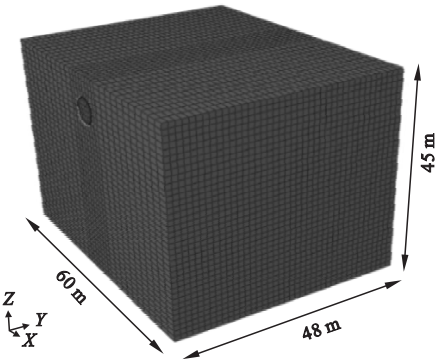


图 2 模型建立及网格划分

Fig. 2 Modeling and mesh generation

2.2 有限元模型的材料与参数

土体本构为考虑弹塑性的摩尔库伦本构模型(见图 3)。Mohr-Coulomb(MC)准则假定:当材料中任意点的剪应力达到一个与同一平面上的法向应力成线性关系的数值时,就会发生屈服。MC 模型的屈服面可以用 3

种应力不变量表示:

$$P = -\frac{1}{3}\sigma \cdot I. \tag{1}$$

$$q = \left(\frac{3}{2}(S:S)\right)^{\frac{1}{2}}. \tag{2}$$

$$r = \left(\frac{9}{2}S \cdot S:S\right)^{\frac{1}{3}}. \tag{3}$$

式中: p 为等效压力应力; q 为 Mises 等效应力; r 为偏应力第 3 不变式, I 为单位矩阵, S 为偏应力张量, σ 为法向应力。

$$S = \sigma + PI. \tag{4}$$

MC 准则可表示为

$$F = R_{MC}q - P\tan\varphi - c. \tag{5}$$

$$R_{MC}(\theta,\varphi) = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin(\theta + \pi/3) + \frac{1}{3}\cos(\theta + \pi/3)\tan\varphi. \tag{6}$$

式中: φ 为 MC 屈服面在 $R_{MC} - q$ 的斜率; c 为材料的内聚力; θ 为内摩擦角。

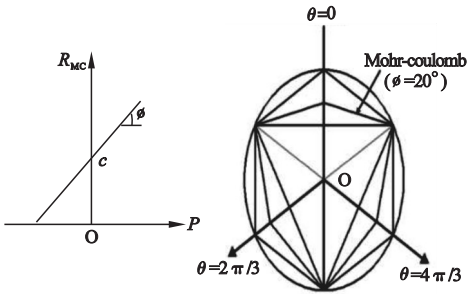


图 3 莫尔-库伦屈服面

Fig. 3 Mohr-Coulomb yield surface

土体采用 C3D8R 实体单元进行模拟,其材料参数如表 1 所示。衬砌、注浆层也采用实体单元进行模拟。盾构采用 S4R 壳单元模拟。衬砌、注浆层、盾构均采弹性材料,土层参数如表 2 所示。根据实际工程经验,盾构舱内支护掌子面开挖土体的压力大小一般取静止土压力,一般为 0.1 ~ 0.25 MPa,注浆压力一般在 0.1 ~ 0.3 MPa^[11]。为防止支护力和注浆压力过大导致地表发生隆起,掌子面支护力和盾尾注浆压力的取值最终取值分别为 0.18 MPa 和 0.2 MPa。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soils

岩土名称	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	弹性模量/MPa
杂填土	18.0	10.00	15.00	—
粗砂	18.0	0.00	31.00	17.5
砾砂	19.5	0.00	35.00	28.5
圆砾	19.2	0.00	38.00	77

表 2 衬砌、注浆及盾构机参数

Table 2 Lining, grouting and shield machine parameters

材料名称	厚度/ m	重力密度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌	0.35	25	2.85×10^4	0.2
注浆层	0.1	20	2	0.3
盾构机	0.1	78	2.0×10^5	0.3

2.3 盾构隧道在开挖过程的模拟

对模型进行简化,根据盾构实际施工进度计算推进距离,最终确定每次推进步长设定为 4.8 m(4 个管片环宽度),隧道开挖过程不考虑时间间隔,即盾构向前掘进一步,衬砌、注浆也随即跟进一步,模拟开挖方法采用生死单元法,开挖模拟如图 4 所示。

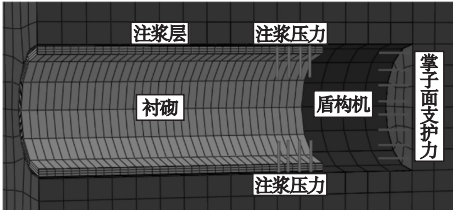


图 4 隧道开挖模拟

Fig. 4 Tunnel excavation simulation

具体施工步骤:

- (1)地应力平衡,初始应力场只考虑自重作用,采用 ODB 导入法通过多次地应力平衡使地应力平衡在 10^{-5} 左右。
- (2)盾构长度为 4 环,故需要先激活 4 环盾构,杀死前 4 环土体,并激活第 1 环处的掌子面支护力。之后分析步模拟一环一环推进。

(3)先杀死第 5 环土体和第 1 环盾构,激活第 5 环盾构、第 1 环衬砌和注浆层,激活第 1 环注浆压力和第 5 环掌子面支护力。

(4)依次开挖直至最后 1 环衬砌完毕。

3 数值模拟结果分析

3.1 覆土厚度对地表变形的影响

为探究拱顶覆土厚度对地表沉降的影响,分析覆土厚度分别为 4.5 m、7.5 m、10.5 m、13.5 m 地表沉降的位移,其中内摩擦角 $\varphi=35^\circ$ 、注浆弹性模量 $E=2\text{ MPa}$,其他条件均不变。

图 5 为地表竖向位移随着隧道拱顶覆土厚度的变化规律符合高斯分布。由图可知,随着拱顶覆土厚度的增加,地表竖向位移逐渐减小,沉降槽的宽度逐渐增大,且隧道左右两侧土体由于隧道开挖致使土体自身产生剪切作用,表现为先隆起后沉降,覆土厚度为 4.5 m 时,隧道左右两侧呈隆起状态,最大隆起量达到了 3.9 mm。覆土厚度为 13.5 m 时,从隧道左右土体两端到隧道轴线上地表位移逐渐减小,且均为负值。

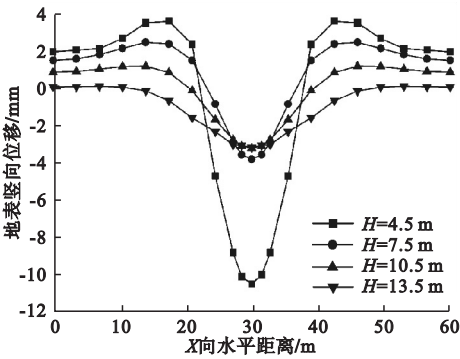


图 5 横向地表变形曲线

Fig. 5 Curve of transverse surface deformation

图 6 为土体竖向位移云图,随着覆土厚度的增加,隧道开挖对地表的影响范围逐渐加大,出现了土拱效应,通过位移云图可以清晰看出,随着覆土厚度的增加,隧道拱顶正上方逐渐形成土拱,但未有具体的形状,当覆土厚度小于 $2D$ 时,开挖扰动直接作用于地表,

使其在地表处的云图最大位移由-14.82 mm降到了-4.94 mm,当覆土厚度大于2*D*时,土拱已经完全形成,其形态表现为椭球体^[12],且土拱并未延伸至地表,这一形态充分发挥了其对上部土体的支撑作用,

且对地表的影响范围较大。因此,可将隧道拱顶上方是否产生完整椭球体土拱作为判定砂砾地层隧道埋深的依据。笔者结论与宋佳宁^[13]对深浅埋隧道划分理论基本吻合。

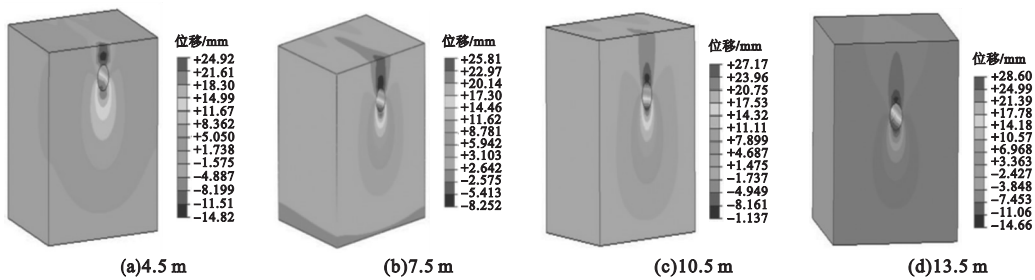


图6 土体竖向位移云图

Fig. 6 Soil vertical displacement cloud

图7为地表竖向最大位移-覆土厚度的关系。

不同,指出地表沉降随着埋深的增加表现为先增大后减小,这也说明了不同地层盾构开挖诱发地表变形规律不同。

3.2 注浆层材料参数的选择

盾构施工中盾尾壁后注浆对其进行量化非常困难,为此将其简化为一个同厚度、只考虑弹性、匀质的等代层^[16],图8为注浆层即为等代层。

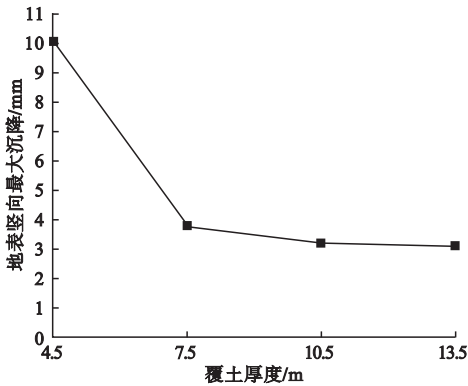


图7 地表竖向最大位移-覆土厚度的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between maximum vertical displacement of surface and overburden thickness

由7图可以看出,在一定程度上,隧道拱顶覆土厚度对地表竖向最大沉降值有较大的影响,拱顶覆土厚度越小,地表沉降变化量将显著增加,拱顶覆土厚度达到一定值时,地表竖向最大沉降值变化并不明显,说明在砂砾地层进行盾构施工诱发地表沉降将随覆土厚度的增加而逐渐减小。笔者结论与 Zhang Junwei 等^[14]基于颗粒流在砂砾地层不同埋深诱发地表沉降的规律基本一致。但与路德春等^[15]等基于应力路径分析法在黏土地层不同埋深对地表变形所得规律在浅埋段有所

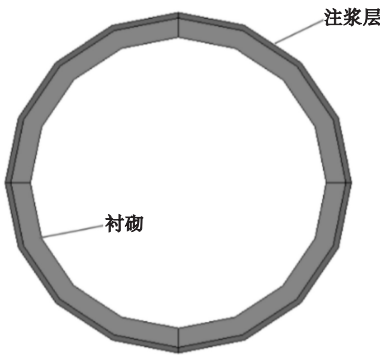


图8 注浆层

Fig. 8 Grouting layer

及时注浆是控制开挖间隙诱发地层沉降的有效办法,但该方法所采用的浆液应具有短时硬化、刚度大、抗剪强度低等特点,不同地层隧道开挖沉降控制标准也不同。注浆效果取决于注浆材料的性能,尤其是注浆弹性模量。盾尾注浆弹性模量根据龄期的不同可分为初始液态浆液阶段、1d 固化阶段、28 d

固化阶段 3 个阶段,其弹性模量分别约为 0.9 MPa、5 MPa、300 MPa,因笔者只研究开挖阶段,故着重考虑初始注浆段到 1d 固化阶段浆液弹性模量的变化对地表变形的影响。表 3 为注浆弹性模量分别为 0.9 MPa、1.5 MPa、2 MPa、3 MPa、5 MPa 时,4.5 m 埋深处盾构隧道开挖诱发地表最大位移量。

表 3 地表竖向最大位移

Table 3 The maximum vertical displacement of the surface		
浆液变化阶段	注浆弹性模量/MPa	地表竖向最大位移/mm
初始液态	0.9	-48.573 3
	1.5	-21.586 1
	2	-11.217 6
	3	-1.911 3
1 d 固化	5	4.799 4

图 9 为根据地表竖向变形模拟数据得到的注浆阶段拟合曲线。

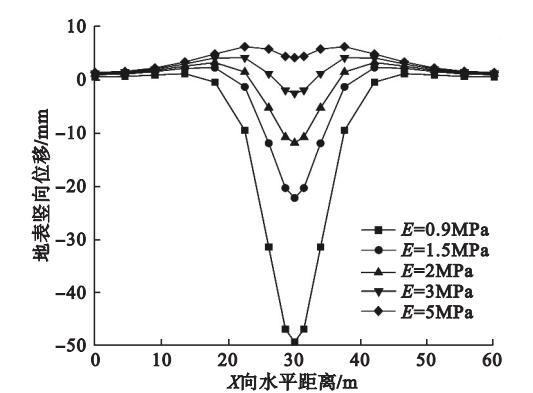


图 9 横向地表变形曲线

Fig. 9 Transverse deformation curve of surface

由图 9 可以看出,距隧道轴线 $2D$ 范围以外的区域,地表呈隆起状态,且地表竖向位移随注浆弹性模量的增加而增加。距隧道轴线 $2D$ 范围以内的区域地表沉降,沉降量随注浆弹性模量的增加而减小,但对地表的影响范围却逐渐加大。结合表 3 可以发现,注浆弹性模量在 0.9 ~ 1.5 MPa 内,地表位移变化量最大,由 -48.573 3 mm 变化到 -21.586 1 mm,变化量达到了 56%,在 1.5 ~ 3 MPa 内,地表位移变化量匀速增加。当 $E > 3$ MPa 时,地表竖向位移由负变为正,过大的

初始注浆弹性模量会引起地表隆起,最大隆起量小于 10 mm,处于可控范围内。

图 10 为内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,隧道上覆土厚度分别取 4.5 m、10.5 m、13.5 m 时,地表竖向最大位移随注浆弹性模量的变化情况。由图可知,地表竖向最大位移随注浆弹性模量的增加表现为先减小后增大,这是因为弹性模量较大的浆液具有较高的压缩性,更好地填补了因盾构开挖而引起的地层损失,减小了地层的沉降,随着覆土厚度的增大,地表竖向最大位移逐渐减小,在浅覆土厚度情况下,隧道拱顶覆土厚度的增加,有效抑制了注浆弹性模量对地表变形的影响,但当覆土厚度大于 $2D$ 时,抑制现象并不明显。笔者结论与徐英晋^[17] 基于深埋黏性土地层得出的结论基本一致。

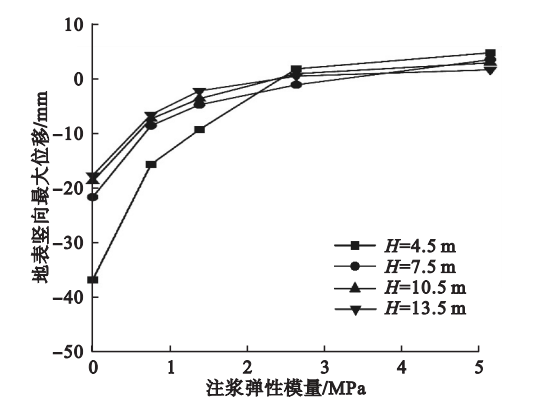


图 10 地表竖向最大位移 - 注浆弹性模量关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between maximum vertical displacement value of surface and slurry modulus of elasticity

考虑到工程实际,对于地表位移量的控制,国内外地表位移变化量允许值分布在 20 ~ 30 mm,金大龙等^[18] 将其近似等效为开挖面直径的 0.2% ~ 0.3%。笔者以 0.3% 开挖洞径为砂砾地层地表位移变化量的控制标准也是合理的。保守起见,砂砾地层盾构隧道开挖初始注浆弹性模量的选取应不低于 1.5 MPa。

3.3 土体强度参数的改变对地层变形的影响

对于砂砾地层,内摩擦角是影响土体强度的关键参数,在研究内摩擦角对隧道开挖

地层变形的影响时,保持模型其他参数不变,按照内摩擦角分别为 20° 、 25° 、 30° 、 35° 、 40° 进行计算(见图 11)。由图可以看出地表竖向变形量随着内摩擦角的增大而减小,其主要原因是,支护力不变的情况下,减小内摩擦角导致土体强度降低很难满足盾构开挖所需土体稳定性,导致土体变形过大。

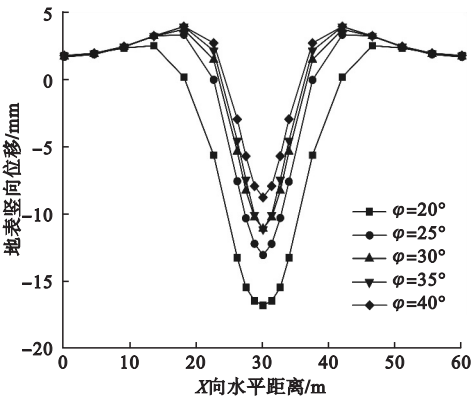


图 11 横向地表变形曲线

Fig. 11 Transverse deformation curve of surface

图 12 为注浆层弹性模量 $E=2\text{ MPa}$, 隧道上覆土厚度分别取 4.5 m 、 7.5 m 、 10.5 m 、 13.5 m 时,地表最大竖向位移随内摩擦角的变化情况。从图 12 中可以看出,土体内摩擦角越大,地表最大竖向位移越小,当内摩擦角达到一定值时,其变化速率近乎为 0,这是由

于拱顶上覆土体形成土拱引起的。 $H<1.5D$ 时,内摩擦角与地表最大竖向变形的关系受覆土厚度的影响较大,当 $H>1.5D$, $\varphi 130^{\circ}$ 时地表最大竖向位移受覆土厚度的影响变化并不明显。当 $\varphi=35^{\circ}$ 时,隧道开挖引起地表最大竖向位移随着覆土厚度的增加分别为: 11.172 mm 、 3.725 mm 、 3.133 mm 、 3.0334 mm 。

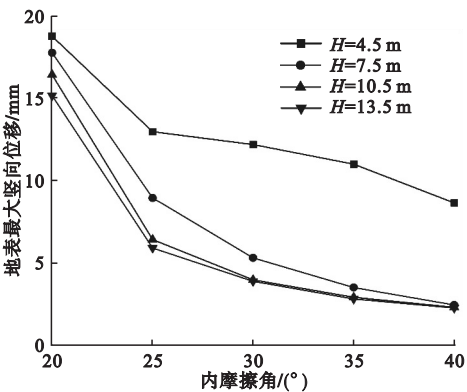


图 12 地表最大竖向位移 - 土体内摩擦角关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between maximum vertical displacement of the ground surface and friction angle within the soil

图 13 为 $H=4.5\text{ m}$ 、 $H=7.5\text{ m}$ 、 $H=13.5\text{ m}$, $E=2\text{ MPa}$ 时,土体的竖向变形云图。

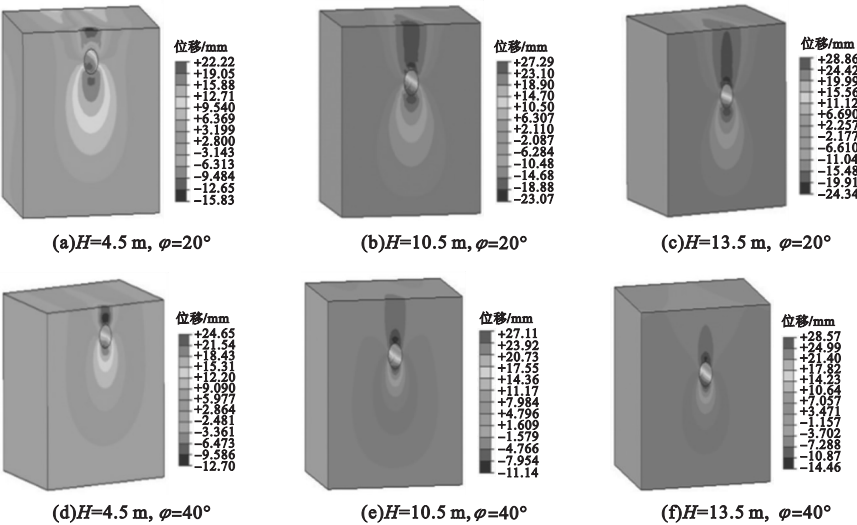


图 13 土体竖向位移云图

Fig. 13 Soil vertical deformation clouds

拱顶覆土厚度小于 $2D$ 时,随着内摩擦角的增大,上覆土已有土拱逐渐形成,但没有形成完整的椭球状,且其直接作用于地表,并未起到对上部土体的支撑作用,拱顶覆土厚度大于 $2D$ 时,随着内摩擦角的增加,隧道拱顶上方逐渐形成椭球体状土拱,所表现出的位移云图同随拱顶覆土厚度增加的位移云图有些类似,证明了内摩擦角的增大,一定程度上可以保证隧道上覆土体的稳定。

4 现场测量与数值模拟比较

对数值模型 XZ 平面沿 Y 轴平移 12 m、24 m 得到两测量断面 A、B,测点分别布置于距隧道轴线左右两侧 0 m、6.2 m、12.4 m、18 m。将测量后的数据与数值模拟结果进

行对比分析。图 14 为实测与模拟结果对比。由图可知,在截面 A、B 处, $E = 2\text{ MPa}$ 时,A、B 段的沉降趋势基本一致,数值模拟地表最大沉降量分别为 13.56 mm、14.32 mm,实测数据最大沉降量分别为 11.30 mm、12.20 mm,可发现实测数据小于模拟数据,但变化量不大,可以认为,数值模拟应力释放比实际的快,模拟沉降数据比实测数据大也是合理的。由图 14 (b) 可知, $E = 2\text{ MPa}$ 时,模拟数据与实测数据地表最大沉降量误差为 14.8%,而 $E = 0.9\text{ MPa}$ 时,模拟与实测误差达到了 43.5%,验证了笔者给出砂砾地层盾构隧道开挖初始注浆弹性模量不应低于 1.5 MPa 的结论是合理的。

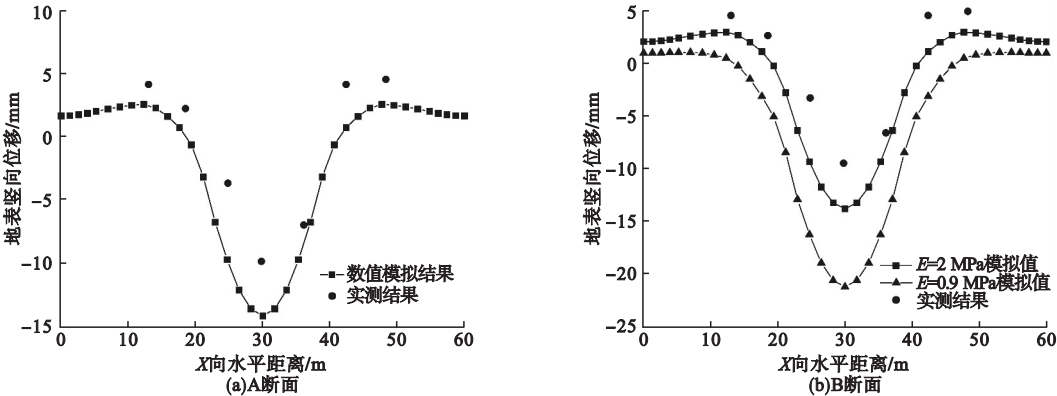


图 14 实测与模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of measured and simulated results

5 结 论

- (1)在不改变其他条件的情况下,地表沉降量随着注浆弹性模量的增加而逐渐减小;根据地表变形随注浆弹性模量变化的曲线,可将 0.3% 开挖洞径作为砂砾地层地表位移变化的控制标准。
- (2)内摩擦角是土体强度的关键参数,地表竖向位移量随着内摩擦角的增大而减小; $H < 1.5 D$ 时,内摩擦角与地表竖向变形的关系受覆土厚度的影响较大;内摩擦角越大,拱顶上覆土体土拱形成的现象就越明显。
- (3)实测数据小于模拟数据,但变化趋

- 势基本一致,当注浆弹性模量不低于 2 MPa 时,可近似认为二者吻合。
- (4)地表竖向位移量受拱顶覆土厚度的影响显著,地表沉降量随着覆土厚度的增加而逐渐减小,当达到一定厚度时,最大沉降值曲线趋于平缓;产生了土拱效应,随着拱顶覆土厚度的增加土拱形态由复杂体逐渐形成椭球体,因此可根据形成完整椭球体土拱所对应的埋深来划分隧道属于深埋还是浅埋。

参考文献

[1] 孙雅珍,李卿辰,岳青青,等. 基坑开挖对近接既有地铁隧道的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(6):

- 1055 – 1063.
(SUN Yazhen, LI Qingchen, YUE Qingqing, et al. Analysis on influence of foundation pit excavation on adjacent existing subway tunnels [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(6): 1055 – 1063.)
- [2] 黄威然, 杨书江. 砂与砂砾地层盾构工程技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(HUANG Weiran, YANG Shujiang. Shield engineering technology in sand and gravel stratum [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [3] 韦猛, 方中杨, 柴冰冰, 等. 砂卵石地层盾构隧道地表最大沉降量预测 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 110 – 115.
(WEI Meng, FANG Zhongyang, CHAI Bingbing, et al. Prediction of the maximum surface settlement of shield tunnel in sandy cobble stratum [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2021, 40(5): 110 – 115.)
- [4] 周尚荣. 砂砾地层土压平衡盾构施工地表沉降分析与控制 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
(ZHOU Shangrong. Analysis and control of ground subsidence in shield construction with soil pressure balance in sand and gravel strata [D]. Changsha: Central South University, 2010.)
- [5] 宫志群, 徐吉祥, 李阳, 等. 盾构隧道开挖引起围土变形模型试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 546 – 553.
(GONG Zhiquan, XU Jixiang, LI Yang, et al. Model test of study on deformation law of soil around shield tunnel excavation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(S2): 546 – 553.)
- [6] 张顺金. 砂砾地层渗透注浆的可注性及应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
(ZHANG Shunjin. Research on the grout ability and application of permeation grouting in sand and gravel stratum [D]. Changsha: Central South University, 2007.)
- [7] 魏纲, 魏新江, 龚慈, 等. 软土中盾构法隧道引起的土体移动计算研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 995 – 999.
(WEI Gang, WEI Xinjiang, GONG Ci, et al. Study on calculation for shield tunneling-induced ground movements in clays [J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(6): 995 – 999.)
- [8] 傅鹤林, 张加兵, 黄震, 等. 复合地层中浅埋盾构隧道开挖引起的地层位移及应力预测分析 [J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 97 – 106.
(FU Helin, ZHANG Jiabing, HUANG Zhen, et al. Prediction and analysis of ground displacement and stress caused by the excavation of a shallow-buried shield tunnel in a composite stratum [J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(4): 97 – 106.)
- [9] 吕玺琳, 赵庚成, 蔡剑韬. 盾构隧道施工扰动诱发富水砂层地陷变形数值模拟 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(5): 104 – 109.
(Lü Xilin, ZHAO Yucheng, CAI Jiantao. Numerical simulation of ground subsidence induced by shield tunnel construction disturbance in water-rich sandy stratum [J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(5): 104 – 109.)
- [10] 吴建文. 浅埋盾构隧道施工对地层变形影响研究 [J]. 路基工程, 2017(3): 216 – 219.
(WU Jianwen. Study on impact of shallow-buried shield tunnel construction on stratal deformation [J]. Subgrade engineering, 2017(3): 216 – 219.)
- [11] 庞巍. 盾构掘进过程中既有隧道反应分析研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008.
(PANG Wei. Analysis and study responses of existing tunnel during shield advancing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.)
- [12] HUANG J, ZHANG Y, OUYANG X, et al. Lagged settlement in sandy cobble strata and earth pressure on shield tunnel [J]. Mathematical biosciences and engineering, 2019, 16(6): 6209 – 6230.
- [13] 宋佳宁. 浅埋多孔隧道的无限元 – 有限元法数值研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
(SONG Jianing. Numerical study of shallow buried porous tunnel by infinite-finite element and element [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.)
- [14] ZHANG J W, HUANG L, PENG T. Stability analysis of shield excavation face based on particle flow in different depths of sandy gravel stratum [J]. Advances in civil engineering, 2019, 2019(2): 1 – 14.
- [15] 路德春, 曹胜涛, 张波, 等. 隧道开挖围岩土压力拱效应分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1421 – 1430.
(LU Dechun, CAO Shengtao, ZHANG Bo, et al. Soil arching effect during tunnel excavation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(6): 1421 – 1430.)
- [16] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388 – 392.
(ZHANG Yun, YIN Zongze, XU Yongfu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2002, 21(3): 388 – 392.)
- [17] 徐英晋. 同步注浆条件下盾构施工引起的隧道和地表沉降及其控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
(XU Yingjin. The settlement of tunnel and ground surface caused by shield construction under grouting condition and controlling control [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- [18] 金大龙, 李兴高. 砂土地层盾构隧道开挖面支护压力与地表变形关系模型试验研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 44 – 51.
(JIN Dalong, LI Xinggao. Model test of the relationship between the face support pressure and ground surface deformation of a shield-driven tunnel in sand stratum [J]. Modern tunnelling technology, 2015, 52(2): 44 – 51.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)