

地铁区间隧道暗挖法施工因预降水而诱发地表沉降分析*

李志

(陕西省土地工程建设集团有限责任公司延安分公司, 716099, 延安//助理工程师)

摘要 为了预测地铁区间隧道暗挖法施工前预降水诱发的地表沉降量,依据群井降水作用下含水层水位降低、土体有效应力变化的过程,建立了单元土体固结压缩模型;基于有效应力原理和一维固结压缩理论,得到了含水层水位降深、土体压缩系数及初始孔隙比与隧道上方地表沉降量的关系。其预测结果可用于评价地面道路、建(构)筑物稳定性,为现场施工提供指导参考。最后通过工程实例验证以上分析过程的合理性。

关键词 地铁隧道;暗挖法施工;地表沉降;有效应力;固结压缩

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.011

Analysis of Ground Settlement Induced by Pre-precipitation in Metro Tunnel Construction by Covered Excavation Method

LI Zhi

Abstract In order to predict the ground settlement induced by pre-precipitation before the covered excavation of subway tunnel, a unit soil consolidation compression model is established, based on the aquifer water level lowering process and the soil effective stress changing under the effect of group well dewatering. Then, according to the effective stress principle and one-dimensional consolidation compression theory, the relationship between the water level depth drop in the aquifer, the soil compressibility and the initial void ratio, thus the ground settlement above the tunnel is obtained. The prediction results can be used to evaluate the stability of ground road and buildings, providing guidance for the site construction. Finally, the rationality of above-mentioned analysis process is verified by practical engineering examples.

Key words metro tunnel; covered excavation method; ground settlement; effective stress; consolidation compression

Author's address Yan'an Branch of Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., 716099, Yan'an, China

现阶段,地铁区间隧道施工常用的方法有明挖法、浅埋暗挖法及盾构法等^[2]。明挖法施工适用于地面建筑物少、地表干扰小地段^[3]。盾构法施工隐蔽性好、机械化程度高,但造价普遍较高且无法应用于断面结构复杂地段。浅埋暗挖法施工工艺简单、灵活,使用范围广,可以根据施工现场监测数据及时调整施工工艺。

暗挖法施工很容易受到地下水的影响,当地下水位较高时,为保证安全顺利施工,需采取合理降水措施将地下水位降至隧道结构安全距离以下。地下水位降低带来的直接后果就是引起土体变形,尤其对于西安地区,黄土广布,地面重要建筑物众多,道路交通密集,一旦土体变形量较大,诱发地表沉降,后果非常严重^[4]。

现阶段,关于地铁区间隧道暗挖法施工的研究多集中于暗挖法施工过程引起的地表沉降及施工工艺^[5-6],有关施工前预降水诱发地表沉降量的研究较少。文献[7]采用解析法和数值模拟方法分析了施工降水诱发的地表沉降量。文献[8]探讨了降水引起地表沉降的机理、危害性以及控制措施。

黄土属特殊的区域性土,湿陷性特征明显,水敏感性强,在含水层水位降低后的地表沉降情况相当复杂。本文基于有效应力原理及一维固结压缩理论,考虑到土体重度会随含水率变化而变化,分析了降水导致含水层土体有效应力的变化情况,进而预测地铁区间隧道暗挖法施工前预降水诱发的地表沉降量;为现场降水与隧道暗挖法施工提供参考。

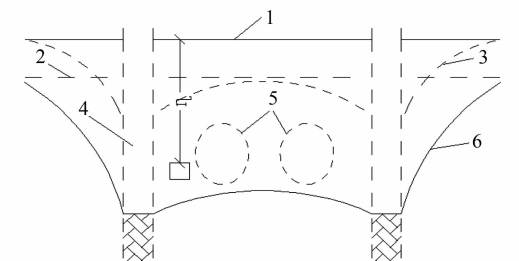
1 降水诱发地表沉降的机理

为满足区间隧道暗挖法施工要求,在施工前需采取合理降水措施将含水层水位降至隧道结构底板以下 1.5 m 处^[9]。工程上通常在隧道两侧布置群井,通过群井共同作用来降低含水层水位。群井降水等效半径和影响半径均可用“大井法”基坑降水

* 国家自然科学基金资助项目(51508462)

原理求得。

降水之前,原始水位线以下的土体可看做由固相土颗粒和液相孔隙水组成的饱和土体,由土颗粒和孔隙水共同承担土体所受的荷载。降水之后,含水层水位降至设计深度,原始水位与降水后稳定水位之间土层的孔隙水压力减小,土体承受的有效应力增大,单元土体产生固结压缩。当整个含水层中水位变化区域土体均产生固结压缩时,就会形成一定范围的地表沉降。含水层水位降低导致地表沉降示意图如图1所示。



注: 1——地表; 2——原始水位线; 3——地表沉降曲线; 4——等效大井; 5——拟开挖隧道; 6——降水后水位

图1 含水层水位与隧道结构示意图

2 单元土体固结压缩模型

天然土体由大小不同的颗粒组成,具有散粒、多孔及可压缩等特性。当外力增大时,骨架产生压缩,颗粒之间孔隙减小,宏观表现为产生一定量的固结压缩。在距地面 η 处取 $dr \times ds$ 的微小单元土体。单元土体的初始有效应力为 σ_1 ,降水导致有效应力增大 $\Delta\sigma$ 。假设土颗粒和孔隙水均不具有压缩性,土体压缩主要是由于土中孔隙体积减少,而且水位降低后单元土体仅产生了无侧向的竖向变形,则单元土体因排水而产生的压缩量为 Δs (如图2示)。

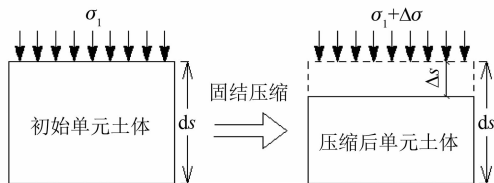


图2 单元土体固结压缩

3 地表沉降量计算

3.1 有效应力改变量分析

假设原始地下水位线深度为 h_0 ,水位降至深度为 h_1 处即可满足施工要求。降水导致的土层有效应力变化如图3示。

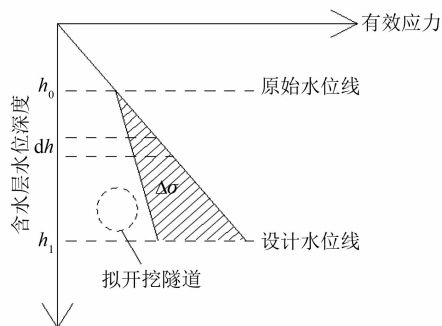


图3 降水导致土层有效应力变化示意图

分析含水层水位降低前后的土层有效应力变化情况。设未降水时土体应力为 σ_1 ,孔隙水压力为 u_1 ,则根据有效应力原理,其有效应力 σ_{1E} 为:

$$\sigma_{1E} = \sigma_1 - u_1 = h_0 \gamma_1 + (h_1 - h_0) (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \quad (1)$$

式中:

γ_1 ——正常含水土体重度;

γ_w ——水的重度;

γ_{sat} ——土体饱和重度。

设降水后的单元土体应力为 σ_2 ,孔隙水压力为 u_2 ,则有效应力 σ_{2E} 为:

$$\sigma_{2E} = \sigma_2 - u_2 = h_1 \gamma_1 \quad (2)$$

因此,有效应力变化量 $\Delta\sigma_E$ 为:

$$\Delta\sigma_E = (h - h_0) (\gamma_1 + \gamma_w - \gamma_{\text{sat},1}) \quad (3)$$

若含水层水位降低区域包含多个土层,则任意土层 i 的有效应力变化量可表示为:

$$\Delta\sigma_{iE} = \Delta h_i (\gamma_i + \gamma_w - \gamma_{\text{sat},i}) \quad (4)$$

式中:

Δh_i ——土层 i 的水位降深;

γ_i ——土层 i 的正常含水土体重度;

$\gamma_{\text{sat},i}$ ——土层 i 的土体饱和重度。

3.2 隧道上方地表沉降量计算

含水层水位的降低,会导致含水层中土体固体骨架承担的有效应力增加,进而造成已经稳定的地层产生新的固结沉降变形。

土体固结通常包括两个阶段:①孔隙水消散造成土体固结,也称主固结;②有效应力稳定后,土体颗粒间相互滑移呈镶嵌排列以及颗粒表面水膜产生蠕变变形过程,也称次固结^[10]。工程上计算预降水诱发地表沉降量一般只考虑主固结过程。

在区间隧道暗挖施工过程中,若在保证整个隧道结构及周围安全距离内均不受地下水影响,就需

含水层水位降至隧道结构安全距离以下(如图 3 所示)。此时,隧道结构上方土体均会产生固结压缩。按照一维固结压缩理论,降水导致土层产生的固结压缩量 Δs 为:

$$\Delta s = \frac{\int_0^{h_1-h_0} \alpha_v(\gamma + \gamma_w - \gamma_{sat}) h dh}{1 + e} \tag{5}$$

简化计算可得:

$$\Delta s = \frac{\alpha_v(\gamma + \gamma_w - \gamma_{sat}) (h_1 - h_0)^2}{2(1 + e)} \tag{6}$$

式中:

α_v ——土体压密系数;
 e ——土体初始孔隙比。

当水位降深区域包含多个土层时,应分别计算各土层固结压缩量,再计算降水诱发总地表沉降量,即:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{v,i}(\gamma_i + \gamma_w - \gamma_{sat,i}) \Delta h_i^2}{2(1 + e_i)} \tag{7}$$

式中:

S ——总地表沉降量;
 $\alpha_{v,i}$ ——土层 i 的土体压密系数;
 e_i ——土层 i 的土体初始孔隙比。

4 工程实例分析

选取西安地铁 2 号线某区间水文地质参数,分析预降水诱发的地表沉降量。该段水文地质条件简单,对施工造成影响的只有地下潜水,正常水位线在地下 11.5 m 处。隧道底部距地表 17.5 m,洞径为 6 m。隧道上覆土层自上而下分别是素填土、新黄土、饱和软黄土、粉质黏土。各土层主要地质参数如表 1 所示。为满足安全施工要求,将含水层水位降至地下 19.0 m 处;降水方案采用内径为 500 mm、外径为 600 mm 的降水井,滤管长 1.5 m,井间距为 20 m。降水井布置示意图如图 4 所示。

表 1 隧道上方各土层物理力学参数

土层名称	厚度/ m	正常含水重度/ (kN/m³)	饱和重度/ (kN/m³)	压缩 系数	孔隙 比
素填土	4	17.3	18.8	0.31	0.87
新黄土	5	18.9	19.4	0.38	0.78
饱和软黄土	5	18.6	19.2	0.41	0.94
粉质黏土	6	19.4	19.7	0.28	0.71

根据表 1 数据计算可得,当含水层水位由地下 11.5 m 降至 19.0 m 时,诱发的地表沉降量为 25.52

mm。而现场监测得到的地表沉降值为 22.71 mm。这说明证明本文研究成果与实际情况较符合,验证了该分析计算方法的合理性。

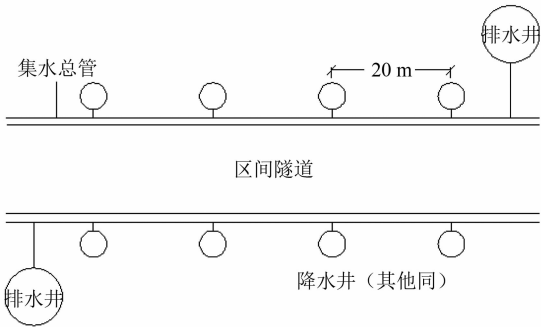


图 4 降水井布置示意图

根据 DGJ 08-11—2010《建筑地基基础设计规范》,楼房基础沉降量应满足:

$$\begin{cases} l \leq 30 \text{ mm} \\ \Delta l \leq \min(0.004 b) \end{cases}$$

式中:

l ——楼房地基沉降量;
 Δl ——楼房基础不均匀沉降量;
 b ——楼房基础的长度或宽度。

由于整个隧道结构宽度较小,且降水后暗挖隧道区域含水层水位差别不大,故计算得到的预降水诱发隧道结构上方地表沉降量基本一致,满足建筑物的不均匀沉降要求。此降水工程诱发地表沉降量的理论计算最大值为 25.52 mm,接近规范要求的 30 mm。这说明可以按照预先设计方案进行降水施工,但应加强监测,一旦出现较大沉降立刻停止降水并采取相应保护措施。

5 结论

- 1) 若土体含水率发生变化,其重度也会改变。在计算有效应力变化量时,应考虑土体重度变化的因素。当水位降低区域包含多个土层时,应分别计算每层土体的固结压缩量,再计算地表沉降量。
- 2) 结合西安地铁 2 号线某区间降水施工工程背景,当含水层水位从地下 11.5 m 降至 19.0 m 时,理论计算的地表沉降量为 25.52 mm,接近沉降控制标准 30 mm。故可以按照预先设计降水方案进行施工但要采取相应监测与保护措施。
- 3) 本文研究内容可用于分析黄土地区地铁区间隧道暗挖施工前预降水过程诱发地表的沉降情

(下转第 53 页)

结论:

1) 大断面矿山法隧道开挖对先施工的小净距盾构隧道影响较大,能使盾构隧道发生 4~9 mm 的位移值,使盾构管片产生的弯矩值为 80~170 kN·m。因此,开挖之前应对盾构隧道进行加固处理(如土体加固、洞内增加临时钢支撑等),以保证大断面矿山法隧道的施工安全和盾构隧道结构的安全。

2) 对比盾构隧道位移和管片弯矩的模拟结果发现,CRD 四步开挖法对盾构隧道明显更不利。因此,大断面矿山法隧道开挖时应减小分部开挖的断面,遵循“短开挖、强支护、快封闭”的原则。另外,采用 CRD 六步开挖法时,靠近盾构隧道的部分施工对盾构扰动更大,故推荐靠近盾构隧道一侧后开挖的 CRD 六步开挖法。

3) 当采用靠近盾构隧道一侧先开挖的 CRD 六步开挖法施工时,随着开挖长度的增长,盾构隧道位移逐渐累积增大。盾构隧道结构位移的监测值和模拟值随 L 的变化趋势是基本一致的。

参考文献

- [1] 蒋彪,肖岩,李凌宜.大跨度超小净距暗挖地铁隧道施工方法模拟优化分析[J].铁道科学与工程学报,2011,8(5): 46.
- [2] 杨会军,刘虹阳.浅埋暗挖小净距隧道应力集中现象分析[J].铁道工程学报,2010,27(1): 42.
- [3] 刘艳青,钟世航,卢汝绥,等.小净距并行隧道力学状态的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5): 590.
- [4] 包德勇.近距离交叠隧道施工影响的数值模拟[J].地下空间

与工程学报,2011,7(1): 127.

- [5] 祝志恒,阳军生,董辉.双洞隧道施工引起地表移动的多参数反分析研究[J].岩土力学,2010,31(1): 293.
- [6] 李文华.大断面超小横净距双线地铁隧道施工控制技术研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [7] 汪敏,廖少明,侯学渊.近距离重叠地铁隧道盾构法施工地面变形预测[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(9): 1141.
- [8] 毕继红,江志峰,常斌.近距离地铁施工的有限元数值模拟[J].岩土力学,2005,26(2): 277.
- [9] 龚建伍.扁平大断面小净距公路隧道施工力学研究[D].上海:同济大学,2008.
- [10] 刘艳青,钟世航,卢汝绥,等.小净距并行隧道力学状态的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5): 590.
- [11] 石祥锋,寇鼎涛.小净距矿山法盾构隧道施工的数值模拟分析[J].华北科技学院学报,2015,12(5): 64.
- [12] 孔祥兴,夏才初,仇玉良,等.平行小净距盾构与 CRD 法黄土地铁隧道施工力学研究[J].岩土力学,2011,32(2): 516.
- [13] 陶连金,孙斌,李晓霖.超近距离双孔并行盾构施工的相互影响分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9): 1856.
- [14] 赵明.小净距盾构隧道施工力学效应现场监测与数值模拟分析[D].北京:北京工业大学,2012.
- [15] 易小明,张顶立,陈铁林.厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11): 2302.
- [16] 于宁,朱合华.盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J].岩土力学,2004,25(8): 1330.
- [17] 张冬梅,黄宏伟.盾构推进引起地面沉降的粘弹性分析[J].岩土力学,2001,22(3): 311.
- [18] 王建.地铁盾构隧道结构设计的工况及设计参数研究[J].城市轨道交通研究,2013(8): 70.

(收稿日期:2018-12-11)

(上接第 48 页)

况,评价地面道路及建(构)筑物稳定性,为降水及后续施工提供参考;能够为类似工程提供借鉴。

参考文献

- [1] 李芳,王紫蓼,霍守峰.地铁暗挖区间隧道下穿既有建筑物施工安全分析[J].智能城市,2016(10): 163.
- [2] 王立志.谈城市地铁区间隧道施工方法[J].山西建筑,2012,38(30): 197.
- [3] 秦锋.城市地铁区间隧道施工方法探讨[J].现代城市轨道交通,2017(5): 32.
- [4] 李超人,周传波,陈东,等.双线盾构施工引起地表及建筑物沉降规律研究[J].城市轨道交通研究,2017(6): 108.
- [5] 刘静,田晓艳.地铁浅埋暗挖施工对地表沉降及邻近桥基的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(3): 60.

- [6] 王亮,袁东.浅埋暗挖施工技术在砂性地层地铁隧道施工中的应用[J].四川水泥,2016(10): 37.
- [7] 徐霖,杨微,张华祥,等.暗挖隧道施工降水引起地层沉降的计算[J].市政技术,2014,32(1): 84.
- [8] 陆云涌,高博,马涛.地铁暗挖法施工中降水引起地面沉降问题的探讨[J].城市地质,2015(增刊2): 12.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部发布.湿陷性黄土地区建筑基坑工程安全技术规程[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 蔡欣.西安地铁施工基坑降水与地面沉降规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [11] 漆泰岳.地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J].岩土工程学报,2012,34(7): 1283.

(收稿日期:2018-06-28)