

地铁隧道盾构法施工对环境的影响研究*

黄润秋 戚国庆

(成都理工大学地质灾害防治国家专业实验室 成都 610059)

摘要 目前,城市地铁隧道施工主要是采用盾构法。依据现有的文献资料以及施工经验,针对盾构法施工引起地面沉降、盾构法施工引起的附加应力对周围环境的影响、盾构法施工排水及防水的影响和地震作用对盾构法施工隧道的影响进行了探讨,并认为,盾构法隧道施工引起地面沉降的根本原因是施工对周围土体的扰动和施工过程中地下水疏排产生的一定范围的地面沉降。同时,从粘性土层中盾构法隧道的地震响应和盾构法隧道砂土层围岩的地震液化判别方法两个方面论述了地震作用对盾构法施工隧道的影响。

关键词 隧道工程,盾构法施工,地面沉降,附加应力,冻结法,地震液化,环境工程

分类号 U 455.43

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)增 1-2464-05

STUDY ON THE INFLUENCE OF SUBWAY BY SHIELD TUNNELING ON ENVIRONMENT

Huang Runqiu, Qi Guoqing

(National Laboratory of Geological Hazard and Engineering Geological Environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059 China)

Abstract At the present time, the shield tunneling is a main method of the subway tunneling in city. In this paper, the influence of subway by shield tunneling on environment, such as surface subsidence, subsidiary stress due to shield tunneling, drainage and waterproof, and the influence of earthquake on shield tunnel, are studied, according to existing documentation and construction experience. Based on this, the viewpoint is presented that the main reason of generating surface subsidence is that construction disturbs surrounding soil in the process of shield tunneling, and another reason is the drainage groundwater. The effect of earthquake on tunnel by shield driven is discussed on the aspect of earthquake response of the tunnel by shield driven in clay soil and identification of earthquake-caused ground liquefying in sandy soil around tunnel by shield driven.

Key words tunneling engineering, shield construction, surface subsidence, subsidiary stress, freezing work method, earthquake-caused ground liquefying, environment engineering

1 引言

地铁运输具有快速、正点、安全、舒适、运量大、能耗低、污染小等优点,因此,地铁可望成为 21 世纪城市的主要公共交通工具。我国是世界上最大的发展中国家,地铁建设起步较晚,但发展迅速。

当今社会随着人们环保意识提高,选择对周边环境影响较少的施工方法在今后将显得日益重要。在现代城市中由于煤气、自来水、电力、通信等各种管道设施都埋设在地下,使得地铁等公共设施在路面下修建将更加困难。

盾构法施工,由于具有地面影响小、机械化程度高、安全、工人劳动强度低、进度快等优点^[1],

2003 年 3 月 31 日收到初稿,2003 年 5 月 20 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90102002)。

作者 黄润秋 简介:男,39 岁,现任成都理工大学副校长、教授、博导,主要从事地质工程方面的研究工作。

近年来发展较快, 将成为今后城市地铁隧道的主要施工方法。盾构法施工会对周围环境产生一定程度的影响。例如: 盾构法施工将引起不同程度的地面沉降、盾构法施工过程中导致的地下水疏排而引起一定范围的地面沉降、地震作用也会对盾构法施工的隧道产生一定的影响。本文对目前我国在盾构法隧道施工中的环境工程问题进行了探讨。

2 盾构法施工引起地面沉降

盾构法施工会引起地层移动而导致不同程度的地面和隧道沉降, 当沉降达到一定程度时就会影响地面建筑、地下设施和隧道本身的正常使用。

盾构推进过程中产生地面沉降的根本原因是施工对周围土体的扰动^[2]。盾构推进过程中产生的地面沉降由以下 5 个部分组成^[3~6]: (1) 盾构到达前的地面沉降 δ_1 , 占总沉降量的 0.0%~4.5%; (2) 盾构到达时的地面沉降 δ_2 , 占总沉降量的 0.0%~44.0%; (3) 盾构通过时的地面沉降 δ_3 , 占总沉降量的 0.0%~38.0%; (4) 盾构通过后的瞬时地面沉降, 占总沉降量的 20.0%~100.0%; (5) 地表后期固结沉降 δ_5 , 占总沉降量的 4.0%~32.0%。

前 4 种沉降(δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4)可以通过选择施工机械和施工参数加以控制, 但无论采用什么样的机械和施工参数, 盾构推进总会在一定程度上扰动土体, 因此, 后期固结沉降 δ_5 会或多或少地存在, 是无法消除的。

可见, 地面沉降主要是弹塑性剪切变形、主固结变形和压缩变形三者叠加而成的。因此, 对地面沉降进行理论分析时, 不能忽视地层扰动、剪切应变和压密现象, 总沉降应包括建筑空隙产生的弹塑性变形和剪应变产生的固结(即挤压致密)沉降量。

实践表明, 盾构通过时地表中心沉降量 δ_3 与扰动范围有较好的线性关系, 并且还和盾构推力、建筑空隙的注浆时间间隔、注浆回填率、埋藏深度、隧道直径之比、土层性质等相关, 而且, 盾构开挖面的变形还和盾构直径的 4 次方成正比例关系^[7]。

3 盾构法施工引起的附加应力对环境的影响

以盾构前进方向为 x 轴, 铅垂方向为 z 轴, 垂直于盾构前进方向为 y 轴, 建立坐标系, 如图 1 所示。盾构轴线距地表距离为 H , 隧道半径为 r 。通

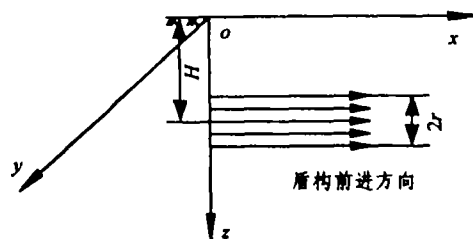


图1 盾构法施工坐标系

Fig.1 The coordinate system of shield construction

过数值模拟, 可求得盾构推进在土中引起的附加应力分布^[8]。

3.1 σ_x 的环境影响

盾构垂直于地下管线上下通过时, 或在盾构左右范围内有地下建(构)筑物和桩体时, 盾构推进在土体中引起的 σ_x 会使地下管线或地下建(构)筑物沿盾构推进方向产生挠曲变形。

σ_x 的影响范围为: 以隧道纵轴线为对称轴, 靠近盾构面位置处, 沿 y 轴左右影响范围为 $1.2r$, 沿 z 轴上下影响范围约 $1.6r$, 距离推进面 $(2.2\sim 2.6)r$ 以外时, σ_x 沿 y, z 的影响范围均为 $2.4r$ 。

3.2 σ_y 的环境影响

盾构推进除沿推进方向在土中产生附加应力外, 在侧向也产生附加应力, 进而会对盾构两侧的建筑(构)筑物产生不良影响。

σ_y 沿 y 轴的影响范围靠近盾构推进面约 $2r$, 沿 z 轴的影响范围较小, 约 $1.6r$, 沿 y, z 轴 σ_y 的影响范围大于 σ_x 的影响范围。

3.3 σ_z 的环境影响

σ_z 主要引起地面沉降或隆起。 σ_z 沿 y 轴左右的影响范围约 $1.2r$, 沿 z 轴的影响范围为: 靠近推进面的地方, 沿 z 轴上下影响范围约 $2.8r$, 距离推进面 $5m$ 处, 沿 z 轴上下影响范围约 $3.4r$ 。

3.4 τ_{xz} 的环境影响

τ_{xz} 可能引起盾构面前方土体塑性区的发展, 使土体发生剪切破坏。

τ_{xz} 不象 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 那样随 x 的增大发生应力扩散, 而是在距离盾构中心线 $1.6r$ 的范围内, τ_{xz} 已基本上消散。

4 盾构法施工排水的影响

地铁隧道不可避免地要经过含水量较高的地层(如上海地铁所处地层大多为饱和含水软粘土层), 所以, 必将受到地下水的影响^[9]。

4.1 盾构法施工排水的影响范围

盾构法施工排水不仅会使开挖范围内的水位降低,而且会引起开挖区附近一定范围内的地下水位下降,在隧道附近一定范围内形成水位凹槽。从国内外发展现状来看,隧道疏干影响半径的确定一直是难于突破的重要水文地质问题,不同学者、不同单位给出的计算公式往往差别较大。

(1) 文[10]提供的疏干影响范围 R 的计算公式为

$$R = [r_0^2 + 30KS^2(1 + 0.00015r_0^2)]^{0.5} \quad (1)$$

式中: $r_0 = 0.25L$, L 为疏干长度; K 为渗透系数; S 为降深。

(2) 文[11]渗沟流量计算中,给出了一个渗沟影响范围 R 的计算公式为

$$R = 3000S\sqrt{K} \quad (2)$$

4.2 盾构法施工排水引起地面沉降

排水引起的地面沉降,是由于含水层(组)内地下水位下降,水压降低,使粒间应力即有效应力增加的结果。根据 Terzaghi 定律,有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= \sigma + u \\ \Delta\sigma_T &= \Delta\sigma + \Delta u \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_T 为上覆荷重引起的总应力; σ 为作用在骨架上的应力; u 为地下水压强; $\Delta\sigma_T$, $\Delta\sigma$, Δu 分别为总应力、骨架应力和水的压强增量。

由于上覆荷重引起的总应力不变,即 $\Delta\sigma_T = 0$, 故 $\Delta\sigma = -\Delta u$ 。如果土体因含水系统和外界发生水力联系,产生水头增量(水头升高或降低) Δh , 则有

$$\Delta\sigma = \Delta u = \gamma \Delta h \quad (4)$$

式中: γ 为水的容重,且 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。

土体固结变形引起的地面沉降可根据排水影响范围,应用比奥(Biot)的“真三维固结理论”或太沙基(Terzaghi)的“拟三维固结理论”计算,也可根据 $e-\lg p$ 曲线,应用建筑物“实用沉降计算方法”计算。

5 盾构法施工防水及环保型施工技术

5.1 聚胺脂隔水

上海地铁 2 号线隧道施工的过程中,在陆家嘴路—河南路站盾构进入黄浦江前,先要穿越 100 m 的全断面粉砂土地层,粉砂土地层含水量大,透水性好,而粉砂土的位置又处于防汛墙旁,为防止黄

浦江江水透过粉砂土进入盾构内,采取了压注聚胺脂来切断江水的通道。当盾构一进入全断面粉砂土,就开始在盾尾后 3 环位置通过管片注浆孔压注聚胺脂形成隔水环箍,每 3 环压注聚胺脂 400 kg。这样,在粉砂土中盾构总是被聚胺脂包围,消除了江水侵入盾构的后患^[12]。

5.2 提高混凝土抗渗性

上海地铁 1 号线隧道防水采用了提高混凝土抗渗性的方法^[13]。在混凝土中加磨细粉煤灰(10%~15%)与 SN-2 型减水剂,选择合理的配合比,并采用整套正确的浇筑、振捣和蒸汽养护工艺,提高了管片的密实性与抗裂性,从而解决了管片自防水问题。

5.3 “环保型”施工技术——地层冻结技术

地层冻结加固技术是一种封水性好、强度高、复原性好的环保型施工技术,在我国矿山凿井领域得到了广泛应用^[14]。但受技术和造价等因素的影响,尚未被城市地下工程所广泛接受。随着冻结技术工艺的改进,加上冻结工法的主材在市场价格结构的整体调整中的低成本化趋势,地层冻结工法在地下工程中逐渐显现竞争力,它将对城市地下工程设计和施工带来便利。

盾构法施工是地铁区间隧道施工的发展趋势。大规模的盾构法施工,不但不会削弱地层冻结技术的应用优势,相反地为地层冻结创造了更多机会。因为,盾构的进出洞以及区间隧道之间的联络通道是地层冻结的用武之地,与降水、连续墙、帷幕相比,它的环保性能好,能保护水资源和地层结构,成本也相对较低。

6 地震对盾构隧道的影响

盾构法施工的地铁隧道,由于其具有埋深浅、纵向刚度小的特点,而且近期已经或即将修建的一些地铁隧道多处于易液化的粉土、粉细砂层之中,而其中由于饱和砂土液化所引起的震害后果就更加严重。所以,地铁隧道的抗震液化问题就更加引起人们的重视。

盾构隧道的抗震分析方法主要采用拟静力法和动力数值分析法。

拟静力法有地震系数法和反应位移法。地震系数法,其基本思想是将作用在地下结构上的地震力等效为静力,其作用的位置为构件的重心,大小为结构重力乘以设计地震系数;反应位移法,即不考

考虑地下结构本身的惯性力和阻尼项,而仅把地下结构看作一根弹性地基梁,通过一系列弹簧与地层连接,这样,地下结构所受的地震力由周围土层的位移所决定,通过土层变形来计算结构的地震响应。

动力数值分析法是近年来发展起来的一种方法,该方法可以很好地处理介质中的非均匀性、各向异性、非线性、复杂的几何形状及边界条件,并且在计算精度上较为可靠。

盾构隧道地震响应的动力数值分析显示,隧洞顶的动位移、动弯矩(只受地震作用)时程曲线的振动周期基本相同,当地震作用减弱后,两者也出现了衰减趋势^[15]。在地震作用下,盾构隧道的埋深越大、洞径越大、洞体衬砌的弹模越高,则洞顶的动位移就越小。

目前,城市地铁尚无成熟的抗震规范,只能借助其他规范,由于考虑问题的侧重点不同,因而适用条件也有所差异。文[16]结合文[17],提出了一种地震液化判别方法。首先,对地铁盾构隧道在7度地震作用下的液化情况进行初步判别;然后,对隧道在最不利情况下的围岩压力,利用动三轴进行液化试验,并结合有效应力进行有限元计算分析,从而比较精确地确定液化等级及范围,具体作法为:

(1) 初步判别:饱和的砂土或粉土,当其地质年代为第四纪晚更新世(Q₃)及其以前时,可判定为不液化土;当粉土的粘粒(粒径小于0.005 mm的颗粒)含量,在7, 8和9度地震情况下,分别大于10%, 13%和16%时,可判定为不液化土。当初步判定为可液化土层时,应进一步采用标准贯入试验进行判别。对存在液化土层的地基,再进一步探明各液化土层的深度和厚度,计算液化指数,并根据其液化指数划分液化等级。

(2) 动三轴液化试验:为进一步研究地震液化的影响和注浆加固后的效果,利用动三轴试验,通过试验判别和结构分析手段对区间隧道的砂层液化问题进行研究,研究的主要问题为:① 地铁开挖后土层是否液化及液化的范围;② 注浆加固以后的液化范围。

(3) 计算分析^[16]:可考虑采用孔压消散的 Biot 动固结方程、Hardin-Drnevich 的等效线性的动力本构模型、Masing 两倍法的加载、卸载准则以及徐志英对砂的动孔压经验模型。

减少地震液化破坏的措施可分为两大类:土质改良措施,即改良土的性质以避免发生地震液化现象;结构改良措施,即用结构加强的方法来避免结

构发生破坏。

建筑物的抗液化处理措施有避开、换填、注浆加固、加密(振冲加密、爆炸加密、砂桩挤密法等)、增压、围封、排水、深基础等。由于城市地铁盾构隧道的特殊性,在上述处理措施中有许多是无法在盾构隧道中采用的。而在盾构隧道施工过程中要采用注浆的方法来填充衬砌管片和岩土层之间的空隙,因此,可认为采用注浆加固的方法是比较可行的办法之一。

7 结 论

(1) 地铁运输具有快速、正点、安全、舒适、运量大、能耗低、污染小等优点。因此,地铁可望成为21世纪城市的主要公共交通工具。我国是世界上最大的发展中国家,地铁建设起步较晚,但发展迅速。我国地铁的研究是从1956年由北京开始的,当时曾进行过暗挖工程试验,1964年开始地铁设计与施工方法的研究,1965年7月1日,我国第1条地铁在北京正式开工;此后,天津、上海、广州等城市投入了修建地铁的筹备工作。目前,北京、天津、上海、广州、青岛、南京等城市已建成或正在施工的地铁工程近百公里,我国地铁隧道施工先后采用了明挖法、暗挖法、盖挖法、盾构法、沉管法等方法,有的已达到了国际先进水平^[18~24]。

(2) 地铁隧道盾构法施工引起的地面沉降按时间先后可以分为5个阶段,每个阶段的变形机理都不相同:① 先期沉降的变形机理为土体压缩产生的弹塑性变形;② 盾构到达时沉降的变形机理为土体固结;③ 盾构通过时沉降的变形机理为土体的弹塑性变形;④ 盾尾空隙沉降的变形机理为土体的弹塑性变形;⑤ 长期延续沉降的变形机理为土体的蠕变压缩变形。

地面沉降变形的影响范围主要受两类剪切破坏面的控制,地面沉降是盾构推进过程中在土中引起的附加应力 σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xz} 造成的。 σ_x 会使地下管线或地下建(构)筑物沿盾构推进方向产生挠曲变形; σ_y 会对盾构两侧的建(构)筑物产生不良影响; σ_z 主要引起地面沉降或隆起; τ_{xz} 可能引起盾构面前方土体塑性区的发展,使土体发生剪切破坏。

(3) 盾构法施工过程中,需要对地下水进行“疏排”或“封堵”。“疏排”地下水往往会在疏干影响范围内引起地面沉降;“封堵”地下水常用的方法是注浆。冻结法是一种封水性好、强度高、复原性

好的环保型施工方法,它将会在城市地下工程中得到广泛应用。

(4) 我国是个地震灾害发生多的国家,随着社会的进步与发展,城市地铁建设的步伐越来越快,对地铁的抗震研究显得越来越重要。早期,地下工程界认为隧道抗震主要在洞口,而洞身是与地层一同振动,不至于产生破坏。近年来的震害表明,地震的破坏不仅仅在洞口,洞身也常常受到不同程度的破坏,特别是在城市交通中发挥重要作用的地下铁道,一旦发生震害将影响城市交通,而且修复的难度很大,对于采用盾构法施工的地铁隧道,由于其具有埋深浅、纵向刚度小的特点,通过对盾构法施工的地铁隧道的动力数值模拟,发现隧洞顶的位移、弯矩(只受地震作用)时程曲线的振动周期几乎同时随地震输入波发生变化,并且洞体埋深越大、洞径越大、衬砌弹模越大,盾构隧道的地震反应越弱。由于近期已经或即将修建的一些地铁隧道多处于易液化的粉土、粉细砂层之中,而其中由于饱和砂土液化所引起的震害后果就更加严重,因此,地铁隧道的抗震液化问题就更加引起人们的重视。

参 考 文 献

- 张庆贺,朱忠隆. 21 世纪地铁施工技术展望[J]. 施工技术, 1999, 28(1): 9~10
- 徐永福. 盾构推进引起地面变形的分析[J]. 地下工程与隧道, 2000, (1): 21~25
- 刘洪洲. 盾构施工对软土地层沉降影响综述[J]. 公路隧道, 2001, (3): 5~10
- 孙 钧, 袁金荣. 盾构施工扰动与地层移动及其智能神经网络预测[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 261~267
- 黄宏伟, 臧小龙. 盾构隧道纵向变形研究分析[J]. 地下空间, 2002, 22(3): 244~251
- 刘小兵, 韩玉华. 浅埋地铁盾构施工的地表下沉预测[J]. 长沙铁道学院学报, 1990, 8(3): 27~35
- 乔宗昭. 盾构法隧道沿线临近建筑物的保护与控制[J]. 地下工程与隧道, 1989, (4): 14~22
- 张冬梅, 黄宏伟, 林 平等. 地铁盾构推进引起周围土体附加应力的分析[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 379~394
- 温竹茵, 张庆贺, 郑 坚等. 盾构法隧道防水堵漏技术[J]. 施工技术, 1999, 28(4): 13~14
- 中华人民共和国国家行业标准编写组. 铁路供水水文地质勘测规范(TB10049-96)[S]. [s. l.]: [s. n.], 1996
- 中华人民共和国国家行业标准编写组. 公路排水设计规范(JTJ018-97)[S]. [s. l.]: [s. n.], 1997
- 周文波, 吴惠明. 上海地铁二号线盾构法隧道施工难题浅述[J]. 上海市政工程, 2000, 55(3): 68~77
- 朱祖熹. 上海地铁一号线工程防水得失谈[J]. 中国建筑防水, 1996, (6): 1~5
- 周晓敏, 王梦恕, 张项立等. 地层冻结技术在北京地铁施工中的应用分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(3): 61~64
- 孙海涛. 软土层中盾构隧道地震反应分析[J]. 福建建筑, 2000, 65(1): 53~55
- 王胜平, 阎高翔. 南京地铁一号线许府巷—南京站盾构区间地震液化分析[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(2): 19~23
- 中华人民共和国国家行业标准编写组. 建筑抗震设计规范(GBJ11-89)[S]. [s. l.]: [s. n.], 1989
- 张国祥. 弹塑性随机介质法及其在隧道施工引起的岩层位移及应力分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 596~600
- 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679~683
- 丁春林, 朱世友, 周顺华. 地应力释放对盾构隧道围岩稳定性和地表沉降变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1 633~1 638
- 张庆贺, 朱忠隆, 杨俊龙等. 盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 699~703
- 黄宏伟, 张冬梅. 盾构隧道施工引起的地表沉降及现场监控[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 814~1 820
- 白李妍, 张 弥. 隧道工程环境影响的动态优化控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 393~397
- 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