

盾构隧道不均匀沉降原因分析及应对措施研究

王泽洋^{1,2,3}, 赵玉成^{1,2}, 杨 茜^{1,2}, 兰庆男^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 随着城市的发展,地下空间的进一步开发,既有隧道周边复杂的环境会使隧道结构产生变形和沉降,这对隧道结构安全和列车的行车安全都会造成一定的影响。以上海软土地铁盾构隧道和北京地铁机场线的纵向不均匀沉降案例为例,分析了盾构隧道产生纵向不均匀沉降的原因,并根据相应的影响因素提出了应对措施。以期能够对地铁设计和运营人员提供参考。

关键词: 盾构隧道;纵向不均匀沉降;原因分析;应对措施

中图分类号: U457.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0053—06

Analysis on the Reasons of Non-uniform Settlement of Shield Tunnel and the Response Measures

WANG Zeyang^{1,2,3}, ZHAO Yucheng^{1,2}, YANG Qian^{1,2}, LAN Qingnan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Road and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: With the development of the city and further development of the underground space, the periphery complex environment of the tunnels will led the tunnel structure to be deformed and settled, which would erect some influence on the structural safety of the tunnel and the driving safety of the train. By taking the Shanghai soft soil subway shield tunnel and the longitudinal uneven settlement case of the shanghai shield tunnel in soft soil and Beijing airport line as the example, This paper analyzed the reasons of non-uniform settlement of shield tunnel and proposed countermeasures according to the influence factors.

Keywords: shield tunnel; non-uniform settlement; reasons; response measures

随着我国经济的不断发展,城市化水平不断提高,城市人口越来越多。为了解决大中型城市的交通出行问题,越来越多的城市开始立项建设地铁。2000 年以前,我国仅有北京、天津、香港、上海、广州这五座城市运营地铁。2000 年之后,地铁建设进入高峰期,截止到 2018 年 10 月份,我国已有 36 座城市拥有地铁,地铁运营里程超过 5 306 km。从地铁的运营状况来看,地铁在建成之后都会出现大大小小的问题,其中纵向不均匀沉降现象最为典型,对隧道结构的损害最大。如何能有效控制地铁隧道的沉

降和在保证地铁正常运营状态下的修复、养护工作是运营单位今后要面临的挑战。

1 盾构隧道不均匀沉降案例分析

1.1 上海地铁

自 1990 年上海地铁 1 号线正式开工建设以来,上海轨道交通建设期已经近 30 年,运营总里程超过 705 km,其中大部分是采用盾构法施工的地下线路。上海地铁的隧道大部分处于高含水率、高孔隙比、高灵敏度的软弱黏土层,在此类地层中修建地铁缺少

加固,加强隧道的承载力^[5]。整个隧道的维修加固历时 8 a,可见,一次灾害的发生对隧道的结构、后期维修都增加了很多困难。

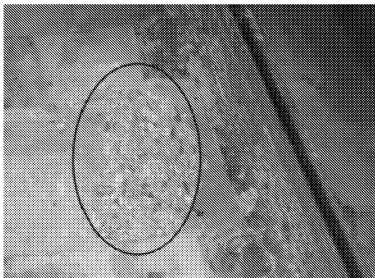


图 2 混凝土脱落

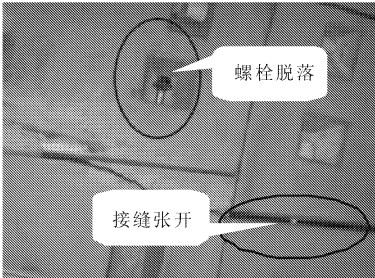


图 3 接缝张开、螺栓脱落

1.2 北京地铁机场线

2014 年 8 月 17 日,机场线司机在列车行驶途中感觉车体出现下沉。随即,北京地铁运营公司对 K4 + 838.4—K4 + 876.8 里程段内的的隧道进行检查,发现在东西线 40 m 的范围内管片出现多处错台、渗漏水、道床剥离现象。T2 航站楼至三元桥西线共有渗漏 8 处、贯穿裂缝 10 条、错台 11 处,主要发生在拱顶及拱底接缝处,最大错台 19 mm;T2 航站楼至三元桥东线共有渗漏 18 处、裂缝 23 处、错台 31 处,主要发生在拱底附近,最大错台 20 mm;T2 航站楼至 T3 航站楼区间隧道共有渗漏 18 处、裂缝 2 处、错台 34 处,主要发生在拱脚处,最大错台 20 mm^[6]。管片边角压溃见图 4。

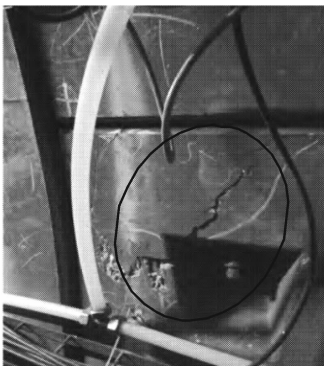


图 4 管片边角压溃

通过地质勘探以及北京地区的地质情况可知,北京地区地层主要由砂、砂卵石、圆砾及黏质粉土、粉质黏土、粉土等组成。机场线位于北京东部,该区域地铁所处地层为黏性土、粉土和砂层,发生局部沉降的的地铁下部土层为粉土和粉细砂。地质剖面图见图 5。由于当时处于汛期,连续的强降雨使得地铁下卧土层处于饱和状态,列车荷载作用下粉土和粉细砂发生液化流失,导致机场线出现了严重的纵向不均匀现象^[7]。通过地面注浆加固、洞内注浆堵漏、道床治理等措施,隧道结构和道床沉降趋于稳定^[6]。这是北京地铁第一次出现局部沉降事件,为以后的监测预警与修复治理提供了经验。

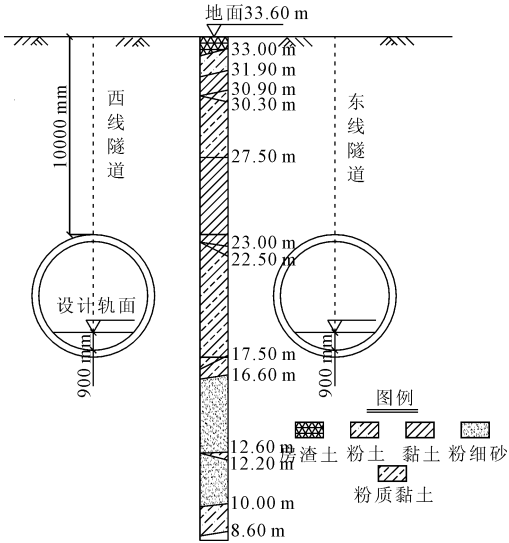


图 5 灾害发生位置地质剖面图

2 盾构隧道不均匀沉降原因分析

对于城市地铁盾构隧道来讲,影响隧道沉降的因素有很多,在隧道的不同阶段影响因素是不一样的,本节从施工期和运营期两个方面来介绍盾构隧道产生不均匀沉降的原因。

2.1 施工期间对隧道沉降的影响

施工期的沉降主要是由盾构工法施工所产生的沉降。盾构工法因盾构直径、隧道埋深和地质状况及各单位施工状况的不同。引起盾构隧道的沉降变形有以下几个因素。

(1) 盾构开挖对周围土体的扰动。盾构掘进时,如果推进速度相对于出土速度比较慢,围岩无法通过自身来维持原来的稳定状态,开挖掌子面前方的围岩会出现松动,严重的可能导致崩塌,造成地层中土体损失,从而引起地面的沉降和管片环的沉降。

(2) 当隧道所处地层地下水位较高而采取降水

措施时,根据土力学原理,这时土颗粒之间的有效应力增加,土体会再次进行固结沉降,从而导致管片环的二次沉降^[8]。

(3) 同步注浆不及时、不充分。

(4) 盾构机转弯、盾构机仰头推进、盾尾纠偏等都会使隧道出现超挖现象,加之同步注浆的不及时,使管片环在开挖初期就产生一定的沉降。现有的案例表明,地铁运营后,隧道超挖引起的盾构隧道沉降会持续很长时间,对隧道结构产生较大的影响。

(5) 盾构壳与地层的摩擦和剪切作用,造成土体的扰动,使得土体在相当长的时间内持续沉降。

(6) 盾构推进导致障碍物的移动,使地层在盾构通过后产生空隙引起的沉降。

尽管现有的盾构技术已经足够成熟,大多数情况下能够将地层与隧道的变形控制在一定的范围内。但是当盾构施工工序复杂,周围土体复杂导致对地层扰动过大时,盾构在施工阶段就会出现不均匀沉降,导致每一环之间的差异沉降大,并且分布不规律。根据现有的监测数据表明,盾构推进依然是软土地层施工期隧道产生沉降的重要原因。下图 6 为日本某地铁盾构施工过程中地面与隧道的沉降曲线。隧道埋深 15 m,盾构机为土压平衡盾构,外径 9.8 m,长 9.115 m。图中显示当盾构机到达时,地表沉降跟隧道沉降都非常小,当盾构机开始开挖工作时,隧道的沉降迅速增大,当盾构机外壳整体经过衬砌环时,隧道沉降达到最大,超过 40 mm,盾尾通过衬砌环后,地面沉降和隧道沉降趋于稳定,隧道的沉降大于地表的沉降,在其他的地铁施工监测中都有类似的曲线。

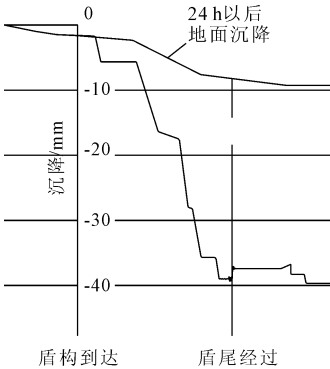


图 6 盾构施工过程中地面与隧道沉降曲线

(6) 隧道下卧土层不均一。在相同的施工条件下,在不同性质的地层中进行盾构法开挖产生的瞬时沉降和固结沉降不同。如图 7 为上海打浦路越江隧道沿轴线方向的沉降曲线图。地铁线路较长时,

隧道的标高往往不一致,沿线会穿越不同性质的土层,这时隧道埋深、隧道所在土层、下卧土层的性质都在随时变化,这种差别会导致隧道在施工期就发生不均匀的沉降。软土压缩模量低、灵敏度高,扰动较为敏感,在盾构经过时会产生较大的沉降且难以收敛;砂性土压缩模量高、灵敏度高,扰动产生的沉降小,隧道经过这种地层时产生的沉降也就小。打浦路越江隧道投入运营后,处于砂性土层的隧道总沉降只有 40 mm ~ 50 mm,而处于软土中的隧道沉降则高达 100 mm,两者的沉降差异很大。

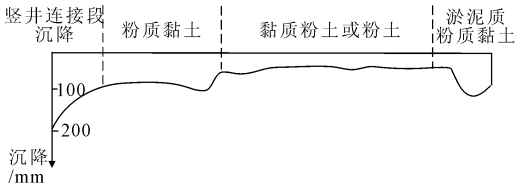


图 7 上海打浦路越江隧道沉降曲线图

2.2 运营期间隧道沉降的原因

地铁建成开始运营后,引起隧道产生纵向不均沉降的因素就更多了。实际工程的施工监测数据及竣工后的监测数据表明,运营期产生的沉降占隧道总沉降的很大一部分。隧道在长期运营过程中产生沉降变形的影响因素主要有以下几个方面:

(1) 地铁所在地区地层的整体沉降。由于各种工程活动的影响,如地下水的开采、建筑施工、各类降水等都会使地层发生整体沉降。地层沉降影响范围和发展速率在不同空间、时间上具有很大的差异性。文献[9]指出上海地区地表年平均沉降为 6.4 mm,中心城区平均地面沉降则为 7.6 mm,最大沉降超过 10 mm。通过监测数据发现,地层发生整体沉降的区域隧道沉降往往也比较大。

(2) 复杂的地质条件。以上海地区为例,上海地区地表浅层为第四纪海相沉积,厚度高达 200 m ~ 300 m。地铁车站及区间埋深为地下 10 m ~ 40 m,穿越的地层多为饱和淤泥质黏性土层,该土层经过扰动后,强度显著降低,固结时间长,累积变形量大。各类施工数据表明,只要对周边土体产生扰动,变形会在较长时间内持续增加。通过分析可知饱和软土和砂性土对隧道产生的威胁最大,一定要加强施工中的质量控制。

(3) 列车振动引起下卧土层的液化或振陷。饱和砂土、粉土受到列车动荷载作用,其土体结构丧失,强度下降,转变为类似液体的状态。振陷是隧道下部土体受到列车循环荷载而产生的附加沉降。分析表明,隧道的防水质量、接缝的施工质量、列车动

荷载、行车密度、振动频率和地层条件等都会影响地层的振陷。在隧道建成初期,土体受到扰动后固结沉降没有完成,隧道在列车振动作用下沉降的速率有加大的趋势;随着隧道运营时间的增加,振动引起隧道的沉降会逐渐减小。

(4) 施工质量。案例2表示,凡是在施工阶段发生过质量事故或者有过对隧道扰动较大的施工行为时,在隧道运营后其沉降变形也会比较大。所以在施工过程中一定要注意尽量减小对地层的扰动,提高施工质量。当施工某处发生较大的质量问题时,要采取注浆等加固措施及时进行处理,将施工质量问题对隧道的影响减小到最小。

(5) 隧道周边进行的建筑加卸载施工。随着城市的不断发展,在既有隧道周围会增加越来越多的高层建筑,高层建筑的基础施工不可避免要进行排水作业,一个深基坑可能要抽排上万方的地下水,这对地层的影响是不可逆转的^[10]。施工完成后,建筑荷载所产生的附加应力也会引起隧道的附加沉降;案例4表明,当隧道上方进行大量堆土后,会使该区域内隧道产生较大的结构变形,堆载卸除之后,隧道仍然无法恢复到原来的状态,修复所花费的时间和成本都非常大,给运营部门造成很大的麻烦。

(6) 邻近隧道的施工。城市地铁涉及多个地铁车站的换乘,新建地铁线路的建设不可避免要穿越既有线路,新线施工引起的结构变化,地层的损失都会使既有隧道结构产生差异沉降^[11]。所以,在新线路施工之前必要时一定要做好地层的加固,施工过程中加强对既有隧道的监测,达到预警值时及时采取措施。

(7) 隧道下卧土层的水土流失。当隧道周围为粉土或砂质粉土,隧道产生裂隙之后,在动水压力作用下,土颗粒会随水流经管片裂隙进入隧道,导致隧道周围,尤其是下卧土层的水土不断流失,管片结构在自重和列车荷载作用下不断下沉,导致隧道结构出现变形,也会加大隧道的纵向不均匀沉降。

(8) 特殊的地下结构。靠近地铁端部一般会设置旁通道加强车站的通风,区间中部会设置旁通道,用来在发生灾害时乘客的撤离和救援人员的进入。由于其结构的特殊性,会采用冻结法施工,当结构施工完成后,地层土变得饱和,会使隧道产生不均匀的沉降;建设期,因施工条件不足,车站不能满足抗浮要求,会在有的车站设置倒滤层,由于常年排水,统计表明,设有倒滤层的车站会产生较大的纵向不均匀沉降,倒滤层的设置是今后设计需要考虑的问题。

(9) 根据统计,小曲率半径范围内隧道沉降较大、道床破坏严重,有的小曲率半径处的轨道已经全部更换。所以,在设计中尽可能避免小曲率半径,如果因为线路规划不可避免会出现小曲率半径,应当在实际施工中采取特殊的措施,如在小曲率半径处严格控制注浆量,从而在源头上进行控制。

3 应对措施

盾构隧道过大的差异沉降对隧道结构来讲是巨大的威胁。由上一节的分析可知,引起隧道产生纵向沉降的因素有很多,本节从地区的地质特点、城市规划与线路规划相结合、设计、施工、周边环境特点等因素出发,制定适合本地区的隧道保护技术标准,为之后的新建工程提供依据,确保既有隧道的安全。

3.1 预防措施

(1) 健全本地区隧道保护的相关规范和条例。对隧道的保护不仅仅是地铁公司、施工单位的责任,政府主管部门应当牵头建设单位、设计单位、施工单位等,组织制定本地区的隧道建设、安全保护条例。以法律的形式规范地铁邻近相关工程的建设与施工^[12]。

(2) 制定科学的安全保护技术标准^[13]。地铁隧道一般由引道段、暗挖段、隧道段等几部分组成,由于其结构形式的不同,各区段的安全保护标准也不同。在制定标准时,应根据各部分的结构形式、埋深、施工特点等,针对不同情况下、不同新建构筑物进行分析计算,再根据隧道现状、隧道运营安全要求,结合现有的工程案例进行综合分析。

(3) 对隧道结构进行定期的健康评估。对隧道进行定期的检查,能够及时反应隧道的养护状态,能够反映隧道对新建工程的承受能力。任何一种附加影响都会对隧道结构产生或大或小的削弱,我们要做的是将影响控制在隧道结构正常使用的范围内,实现隧道结构安全与新建工程的双赢结果。如果只是单纯套用标准,而不结合隧道的实际情况,将可能会造成土地资源的浪费,或者其他严重的后果。

(4) 优化设计、施工方案。地铁作为百年大计工程,应当与城市的中长期规划相结合,地铁线路的规划应根据地下管线、地下构筑物、工程地质、城市的水文地质条件、结构类型、施工方法等因素,并经过经济比较确定。

在比较复杂的工况条件下,应加强地质勘探,根据特殊的地层,制定特殊的隧道结构和施工方案,并做好充分的方案论证。在上部荷载、地层发生突变

的部位,通过设置合理的变形缝来减少隧道的差异沉降。

当盾构隧道穿越既有隧道时,要求既有线路变形在 5 mm 之内,难度很大。施工中需采取以下措施:

① 在进行隧道穿越施工前,一定要进行盾构机试推或者模拟推进,优化施工参数(盾构平衡压力、推进速度、出土速度等),将盾构施工对环境的影响减小到最小。

② 信息化施工。在穿越过程中,监测系统和信号传递系统应采取实时采集和传输,使得施工技术人员能够实时了解到运营隧道的沉降变形,不断调整盾构推进各项参数。

③ 下穿既有隧道可能会引起既有隧道的隆起,为控制隧道隆起,可在轨枕下侧采用钢砂进行加载,要根据实际情况进行压载重量的量化分析。

④ 二次注浆。数据表明,盾构穿越结束初期,既有线路沉降较快,对既有隧道顶部和下部进行二次注浆,可减缓既有线路的沉降,持续的注浆会使隧道逐步稳定,甚至使下沉的隧道上抬。最后采用置换注浆、土体加固等方式,使运营地铁线路达到最终稳定。

(5) 采用数字化技术建立隧道全寿命周期管理系统^[14]。

3.2 治理措施

结合盾构隧道衬砌结构的特点,从以下几个方面来阐述隧道病害的治理措施。

(1) 微扰动双液注浆法。对于治理隧道沉降,经过科研工作者的努力,总结出了微扰动双液注浆工艺^[15]。微扰动双液注浆法是根据隧道的预测曲线进行分区分阶段的注浆措施,在隧道纵向注浆实施少量多次的注浆,从而实现隧道抬升和稳固地层的作用。

(2) 采用聚氨酯和环氧树脂材料堵漏。隧道接缝处的渗漏主要为接缝处渗水,隧道壁后注入聚氨酯材料,聚氨酯遇水发泡,在隧道外壁形成一层隔水膜,阻止水流通过接缝进入隧道。当隧道渗漏过于严重或堵漏效果不明显时,可在隧道接缝处进行隔断密封注浆。在隧道封顶块,宜采用刚性环氧树脂材料,在封顶块以下,宜采用弹性环氧树脂材料。

(3) 加固措施。隧道结构产生裂缝或混凝土破碎时,要采取一定的加固措施。加固分为地层加固和隧道结构加固。通过洞内注浆加固和地面注浆加固能够稳固隧道结构周边的地层,为下一步的钢板

加固创造条件。洞内加固主要有张贴芳纶布加固和钢板环加固^[15]。芳纶布断裂强度极高,在洞内裂缝较大部位,采用刚性材料张贴,能够阻止裂缝进一步发展,随后在盾构环内采用钢板加固,增强已变形隧道的承载能力,能够起到很好的效果。

4 结 语

本文通过分析上海地铁和北京地铁出现的纵向不均匀沉降的案例,得出如下结论:

(1) 下卧土层的不均一是隧道产生不均匀沉降的最根本的原因。

(2) 隧道上方的新建工程是使隧道产生沉降的重要因素。因此,在隧道安全界限内进行项目规划,一定要做好评估,避免对隧道产生不可逆的影响。

(3) 城市地铁盾构隧道的规划、设计、施工一定要遵循“事前考虑、事中控制、事后监测”的原则,保证隧道结构的安全。

(4) 应当加强基于 GIS 和 BIM 等数字化技术在隧道全寿命周期管理的应用,实现隧道在设计、施工、运营和养护各个阶段的监测,真正实现隧道的可视化、信息化。

参考文献:

- [1] 闫静雅,王如路. 上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J]. 自然灾害学报, 2018,27(4):178-187.
- [2] 王如路,周贤浩,余泳亮. 近年来上海地铁监护发现的问题及对策[C]//中国土木工程学会快速轨道交通委员会学术交流会地下铁道专业委员会第十四届学术交流会论文集. 2001:239-242.
- [3] 王如路. 上海地铁盾构隧道纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道,2009(4):1-6,56.
- [4] 汪小兵,王如路,刘建航. 上海地铁隧道某区段不均匀沉降的成功治理[J]. 地下工程与隧道,2012(3):1-6,64.
- [5] 邵华,黄宏伟,张东明,等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [6] 熊树章,骆建军,苏道振,等. 论地铁土建设施病害治理及其在地铁安全运营方面的联动性[J]. 北京交通大学学报,2016,40(3):82-87.
- [7] 方宇翔,田 乙,康 成,等. 循环荷载作用下不均质地层中盾构隧道纵向响应研究[J]. 地震工程学报, 2019,41(1):42-50.

(下转第 87 页)

非线性加速蠕变特性。

(3) 基于 Origin 数据分析软件中的非线性最小二乘拟合功能所建立模型能较好地描述软岩试样各级应力水平下的蠕变特性,试验曲线和模型拟合曲线高度吻合,多组相关系数均在 0.94 以上。

(4) 岩石蠕变参数随应力水平不断变化,相同围压下,瞬时弹性模量 E_t 随加载应力的增大而减小;黏性系数 η_1 决定的稳态蠕变速率随加载应力的增大而增大。

参考文献:

- [1] Shao J F, Zhu Q Z, Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. Computers and Geotechnics, 2003,30(7):549-555.
- [2] 李亚丽,于怀昌,刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2012,33(7):2035-2040.
- [3] 孙 钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106.
- [4] 夏才初,王晓东,许崇帮,等. 用统一流变力学模型理论辨识流变模型的方法和实例[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1594-1600.
- [5] 徐卫亚,杨圣奇,褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):433-447.
- [6] 余成学. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(10):2006-2011.
- [7] 蒋昱州,张明鸣,李良权. 岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究及其参数识别[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(4):832-839.

- [8] 周家文,徐卫亚,杨圣齐. 改进的广义 Bingham 岩石蠕变模型[J]. 水利学报,2006,37(7):827-830.
- [9] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [10] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400.
- [11] 田 佳. 深埋软岩供水隧洞蠕变特性研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(4):182-189.
- [12] 于超云,唐世斌,唐春安. 荷载与水共同作用对红砂岩蠕变特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):24-29.
- [13] Tsai L S, Hsieh Y M, Weng M C, et al. Time - dependent deformation behaviors of weak sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008,45(2):144-154.
- [14] 陈沅江,潘长良,曹 平,等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学,2003,24(2):209-214.
- [15] 宋勇军,雷胜友,韩铁林. 一种新的岩石非线性黏弹塑性流变模型[J]. 岩土力学,2012,33(7):2076-2080.
- [16] 朱昌星,阮怀宁,朱珍德,等. 一种新的非线性黏弹塑性流变模型[J]. 长江科学院院报,2008,25(4):53-55.
- [17] 徐卫亚,杨圣奇,谢守益,等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II):模型分析[J]. 岩土力学,2005,26(5):693-698.
- [18] 唐 佳,彭振斌,何忠明. 基于岩体蠕变试验的 Burgers 改进模型[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(9):2414-2424.

(上接第 58 页)

- [8] 王 湛. 软土地层中盾构隧道结构沉降与变形机制分析[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [9] 魏子新,王寒梅,吴建中,等. 上海地面沉降及其对城市安全影响[J]. 上海地质,2009(1):34-39.
- [10] 高 超,陈 涛,翟 超,等. 建筑工程施工对临近地铁安全性影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):77-80,125.
- [11] 杨 喜,朱 颖. 盾构隧道下穿高铁桥梁安全影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):212-218.
- [12] 葛世平,王如路,刘建航. 抓紧地铁隧道渗漏和不均

- 匀沉降的监测预警和有效治理[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(3):4.
- [13] 曹文宏,申伟强. 长大隧道安全保护条例制订初议[J]. 地下工程与隧道,2012(1):1-5,55.
- [14] 林晓东,李晓军,林 浩. 集成 GIS/BIM 的盾构隧道全寿命管理系统研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(6):963-970.
- [15] 汪小兵,王如路,刘建航. 上海软土地层中运营地铁隧道不均匀沉降的治理方法[J]. 上海交通大学学报,2012,46(1):26-31.