

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.04.016

基于流固耦合分析的地铁车站施工缝渗漏破坏特征研究

赵嘉辉, 武科, 张政, 崔帅帅, 张前进

(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 依托哈尔滨地铁人民广场站工程, 采用数值计算分析方法, 基于流固耦合分析理论, 研究了地下水通过地铁车站施工过程中预留的施工缝渗透地铁车站结构内部的力学机理, 分析了渗透过程中地铁车站应力、应变分布特征与孔压分布规律。研究表明: 在地下水渗流与侵蚀作用下, 孔压水透过车站施工缝侵入地铁车站结构, 不仅致使地铁车站结构预留施工缝处产生较大孔隙水压力, 而且较易导致在结构土体自重以及孔隙水压力共同作用下地铁车站结构的应力应变发生改变, 从而引起地铁车站底板处发生渗漏破坏。因此, 在实际工程中, 应加强在施工缝处的防渗措施以及车站底板的加固措施。

关键词: 地铁车站; 施工缝; 流固耦合; 力学机理; 数值计算

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)04—0093—05

Leakage Characteristics of Subway Station Construction Joints Based on Fluid-solid Coupling Analysis

ZHAO Jiahui, WU Ke, ZHANG Zheng, CUI Shuaishuai, ZHANG Qianjin

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: By taking the Harbin Metro People's Square Station project as an example, this paper adopted numerical calculation analysis method based on fluid-solid coupling analysis theory to analyze the mechanical mechanism of the penetration of groundwater through the subway station construction during the construction of the metro station. We also analyzed the stress, strain distribution characteristics and pore pressure distribution of metro stations during the infiltration process. Research results show that under the action of groundwater seepage and erosion, the pore water pressure invades the subway station structure through the construction joint of the station, which not only causes the large pore water pressure at the construction joint of the subway station structure, but also easily leads to the self-weight and pore water in the structural soil. Therefore, in the actual project, the anti-seepage measures at the construction joints and the reinforcement measures at the station floor should be strengthened.

Keywords: metro station; construction joint; fluid-solid coupling; mechanical mechanism; numerical calculation

随着城市地面交通拥挤形势不断加剧, 城市交通已经开始转入地下, 地铁逐渐成为了人们出行的首选, 对大部分修建在岩土体内的地铁车站来说, 由于长期受地下水的侵蚀及压力渗透作用, 一旦防水措施失效, 就易出现渗流水现象。渗流水的存在, 不仅会危及地铁的运营及设备安全, 缩短混凝土结构的使用寿命, 而且因渗流水潮湿引起的霉菌还会危

害人们的身体健康。因此, 防水效果的好坏决定了地铁车站工程项目的成败。为此, 如何控制防水工程质量和主体结构质量是地铁渗流水成败的关键。目前国内外很多专家都对地下结构渗流进行了研究, 在国内, 朱彦鹏通过建立三维渗流数值模型, 分析得出在深基坑车站开挖过程中, 最大沉降位置更靠近围护结构^[1]。于洋, 杨双锁, 刘光宇等通过渗

流耦合模拟建立了深基坑土体变形的一般规律^[2]。刘建强,吕永胜等人通过模拟基坑开挖,验证了先人基坑开挖沉降一般规律^[3-7]。通过前人的研究,地下水会使基坑结构产生应变^[8-12]。

因此,本文依托哈尔滨地铁人民广场站工程,结合现场实地调研,采用数值计算分析方法,基于流固耦合分析理论^[13-15],对车站结构的应力、应变以及孔隙水压力方面进行模拟计算,并且对关键点的数据进行提取。通过改变地质条件,绘制不同条件下的孔压随时间变化曲线图,结合现场监测数据对地铁车站渗流进行研究,总结地下结构渗流规律。

1 工程概况

哈尔滨市轨道交通 2 号线一期工程人民广场车站(见图 1),位于经纬街与友谊路交叉路口处,为 2 号线与 3 号线的换乘车站,两条线 T 型换乘,2 号线沿经纬街设置,3 号线沿友谊路设置。该车站为地下二层岛式车站。地下一层为站厅层,地下二层为站台层。有效站台中心里程处轨面标高为 95.328 m,底板埋深约为 18.82 m,顶板覆土厚约 2.27 m,车站纵向设置 2‰ 单坡。人民广场站结构平面内包尺寸为 245.0 m(长)×21.3 m(宽)/25.2 m(盾构加宽处),主体结构底板埋深约 24.82 m,为地下三层构筑物。

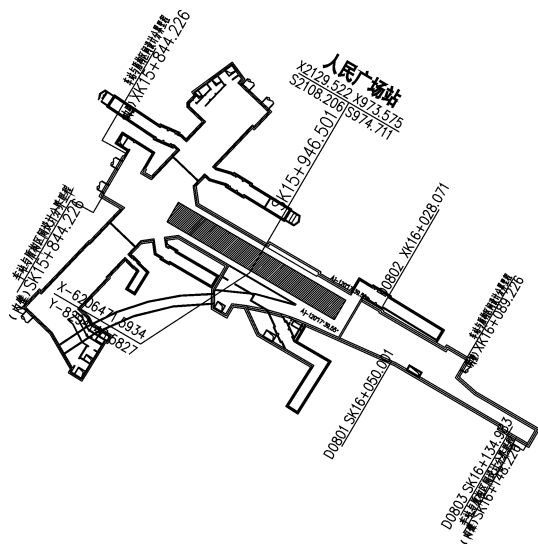


图 1 人民广场站平面示意图

本工程基坑采用明挖顺筑法施工,围护结构采用 900 mm 厚地下连续墙,标准段基坑沿竖向采用 4 道混凝土支撑,联络线基坑采用 1 道混凝土撑 + 3 道钢支撑,端头井处基坑在最下方增设一道钢支撑。地下一层出入口、风道等附属结构采用 600 mm 厚地下连续墙,由于基坑较浅,约为 10 m,采用三道钢支撑支护体系。工程采用全外包防水。人民广场站

所在地层为松花江漫滩区,地形平缓,起伏不大。根据钻探揭示及对地层成因、年代的分析,河漫滩地层主要由第四系全新统人工堆积层(Q_4^{ml})、第四系全新统低漫滩冲积层(Q_4^{pl})、第四系下更新统东深井组冰水堆积层(Q_1^{2al})、白垩系嫩江组(K_{2n})组成。

2 数值模拟计算

2.1 数值计算模型

地铁车站的建立是一个连续混凝土浇筑的过程,因此在新浇与后浇混凝土之间会形成一个结合面,这个结合面就是施工缝。在整个地铁车站混凝土结构中,施工缝往往是力学性质最复杂,最容易发生渗流的位置。由于地铁车站断面型式一致性与受力特征一致性的特点,本次模拟截取地铁车站 10 m 范围作为分析单元进行数值计算研究(见图 2),模型由主体车站结构、施工缝、防水层以及厚度为 0.9 m 的地连墙构成,整个模型尺寸为 63 m×10 m×49 m,地下水位在 -2 m 处,该车站为地下二层岛式车站,考虑到地铁行车限界及乘客的方便、舒适等多项因素,设计车站地下一层站厅层层高 3.5 m,设计车站地下二层站台层层高 6 m,地铁车站混凝土层厚 0.5 m,并在车站混凝土结构外包防水层如图 3 所示,车站混凝土两侧施作宽 0.9 m,深 26 m 的地连墙。根据施工规范,施工缝每浇筑 5 m 施作一个,施工缝厚 8 mm 如图 4 所示。为了提高模拟与实际的拟合度,建立了与实际地质工况一致的不均匀地层,各层土及车站结构如图 5 所示。

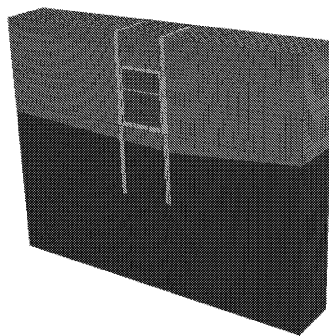


图 2 地铁车站三维模型

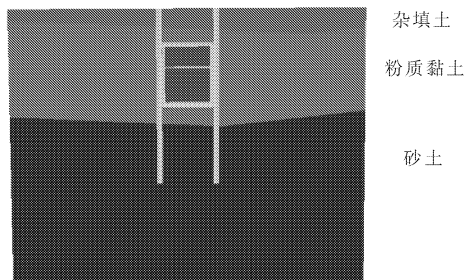


图 3 车站土体分层图

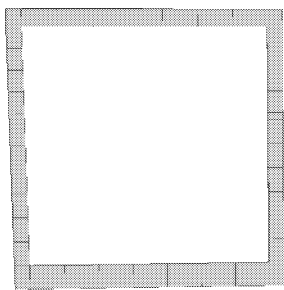


图 4 地铁车站施工缝图

2.2 模拟计算分析方法

(1) 边界条件。在模型的前后以及左边界施加法向位移约束,模型顶部为自由面,不施加约束,模型底部施加竖向位移约束。

(2) 模型建立。建立模型各个部分,并在施工

缝处利用网格细化工具,对施工缝处进行了网格细化工作,以求达到更加接近实际的结果。

(3) 数值计算。数值计算分为两个阶段,第一阶段为施加重力阶段,第二阶段为施加孔隙水压力,本文重点研究第二阶段,各层土和车站结构材料计算参数如表 1 所示。

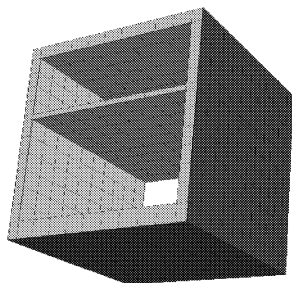


图 5 地铁车站防水层图

表 1 各层土的计算参数

岩土介质	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
杂填土	1600	5	6	10	12
粉质黏土	1860	18	9	26	20
砂土	2100	32	15	32	25
车站结构	2500	14800	12000	—	—

3 模拟计算结果分析

3.1 车站应力、应变分析

图 6 和图 7 分别给出了车站应变和应力分布云图,由图可知:

(1) 由于车站是混凝土结构,车站重力大于周围土体,因而土体成下沉趋势,随着深度的加大,土体逐渐由松散变为坚硬,应变也随之降低。

(2) 车站中板处发生较大向上方向应变,这是由于受两侧土体挤压,而周围没有土体抵抗变形。

10^5 Pa。在实际工程中,地铁车站在应力场、土体重力以及地铁运行震动的共同影响下,车站底板以及底板与侧墙交接处极易发生形变,应增加支护措施,防止产生较大变形甚至结构破坏。

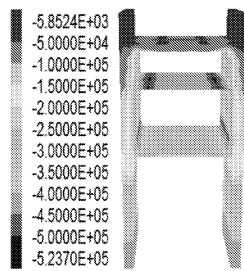


图 7 车站应力云图

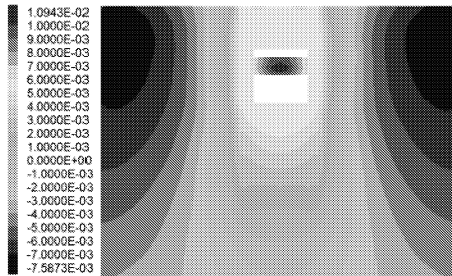


图 6 车站应变云图

3.2 孔压分析

图 8 给出了车站孔压分布云图,土层为饱和水状态,地下水位在 -2 m 处,由静水压强公式。由图 8 可知:由于静水自重,图中孔压从上至下成线性增加,在模型底部达到最大值 2.3112×10^5 Pa。车站是不透水的混凝土结构,所以在车站混凝土结构中的孔隙水压力几乎为零,水只能透过具有一定的渗透能力的施工缝进入车站结构,因此,只在施工缝及其周围看到有水渗入。地连墙和防水材料是相对较差的材料,在地连墙附近,水绕过地连墙,沿着地连墙周围对结构产生压力。由于土体是不均匀的,在

(3) 随着深度的增加,地连墙受到的土压力不断增大,两侧地连墙受方向向内的压力,在地连墙底部应力达到最大值 4.237×10^5 Pa,车站底板与侧墙连接处所受的应力达到整个结构最大值 $5.237 \times$

同一深度下,不同地点的水压力是不同的,这是由于达西定律中的渗透系数 K 决定的,在水力梯度,水头损失及渗流路径长度等条件相同时,渗透系数越大,则相应的单位时间内的渗流量越大,孔隙水压力越大,这也就解释了模型中孔隙水压力不呈直线均匀分布的现象。

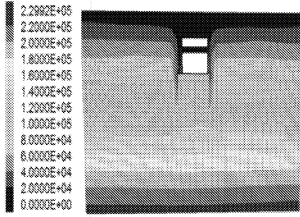


图 8 车站孔压云图

图 9 和图 10 是施工缝孔压的细节云图,由图可知:

(1) 当地下水位为 -2 m 时,水通过透水的地下连续墙和施工缝进入车站内部,导致车站施工缝四周出现明显渗流情况,由于车站混凝土结构是不透水的,而施工缝是具有微小透水性的,因此,孔压仅仅围绕施工缝分布,并且孔压在施工缝处的数值明显高于周围。

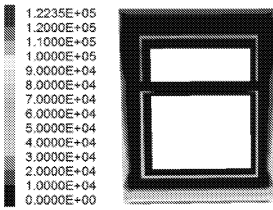


图 9 施工缝孔压细节正视图

(2) 在车站底板附近土质为粉砂、粗砂,由于砂土具有比较小的黏聚力,在受到底板附近向上的孔隙水压力下,半径较小的沙土土粒会透过防水层及施工缝进入车站内部结构,产生渗流灾害,由于孔隙水压力随着深度的不断增加呈线性增长,因此,孔隙

水压力在车站底板中间附近达到最大值 $6 \times 10^4\text{ Pa}$ 。由此可见,地铁车站渗流的主要位置就是施工缝所在处。在车站施工时,应着重在地铁车站施工缝处添加防水材料。

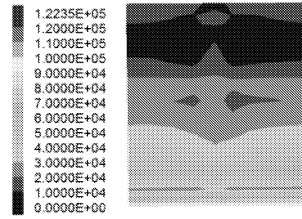


图 10 施工缝孔压细节侧视图

3.3 不同地下水位下的孔压变化

为了更好的探究地下水对地铁车站的影响,在地铁车站底板施工缝中点处提取了随着计算步数的增加,孔压的变化曲线图,并改变地下水位,得到不同地下水位下的曲线图。图 11(a)是地下水埋深为 -2 m 时的孔压随步数变化图,由图可知:施加静水压力后,随着计算步数,孔隙水压力不断增加,直到到达最大值 $1.60 \times 10^5\text{ Pa}$,随后孔隙水压力稍微下降,逐渐趋于 $1.40 \times 10^5\text{ Pa}$ 达到平稳状态,图 11(b)和图 11(c)是变化地下水位为 -10 m 和 -20 m 时的孔压变化曲线图,由图可知:在地下水位为 -10 m 和 -20 m 时,孔隙水压力也随着计算步数逐渐分别增加到 $1.55 \times 10^5\text{ Pa}$ 、 $1.50 \times 10^5\text{ Pa}$,随后分别降低到 $1.10 \times 10^5\text{ Pa}$ 、 $1.00 \times 10^5\text{ Pa}$,通过比较可以得知,在不同地下水位下,孔隙水压力的变化趋势大致相同,但最大孔隙水压力随着地下水位的下降也随之减小。三种地下水位下,在孔压达到顶峰前,孔压随计算步数的增加呈近似直线的形态增加,这也符合达西定律所定义的在土体渗透系数较小并且达到初始水力梯度时,在渗透发生下,渗透速度呈直线增长态势。在实际工程中,可以通过降低地下水来减小孔隙水压力,以减轻地铁车站渗流灾害的状况。

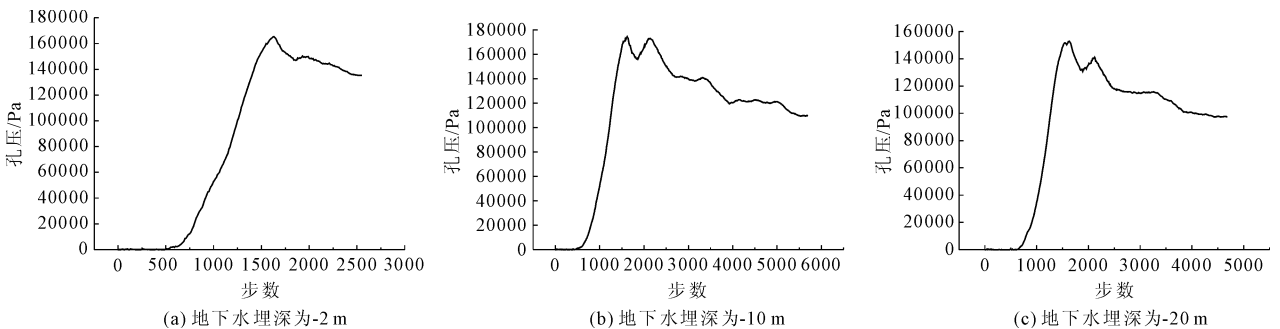


图 11 不同地下水位下孔压随步数变化图

4 结 论

通过数值分析方法,基于流固耦合分析理论,研究了地下水对车站预留施工缝的渗流规律以及各项力学机理,分析了车站发生渗流过程中,车站产生的应变、应力以及孔隙水压力分布规律。结果表明:

(1) 在施工过程中,应加大中板处的混凝土强度,着重增加其在抗弯、抗压方面的能力,避免车站中板因受到较大的压力和弯矩产生向上的隆起。

(2) 施工过程中,要在车站地板以及与侧墙交接处施加一定的加固措施,又或者适当增加立柱的数量,使其分担一部分上部荷载所产生的压力,避免应力集中产生结构破坏。

(3) 在车站防水作业时,可以在车站四周铺设防水性能优良的防水材料,增加车站的防水性能,并着重加强施工缝处的防水性能,并在车站施工缝处安装引流措施,减小渗漏的影响。

参考文献:

- [1] 朱彦鹏,吴意谦. 某地铁车站深基坑变形规律数值模拟及优化[J]. 兰州理工大学学报,2014,40(1):108-113.
- [2] 于洋,杨双锁,刘光宇,等. 太原地铁车站基坑变形规律三维数值模拟研究[J]. 施工技术,2016,45(7):74-77.
- [3] 刘建强,吕永胜,王建博,等. 深圳地铁8号线海山车站深基坑施工模拟研究[J]. 公路,2017,62(3):275-280.
- [4] 向贤华. 基于流固耦合作用的富水砂卵石地层深基坑变形特性分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(6):80-84.
- [5] 王猛,苏卫强,吕苑,等. 加固措施对富水断层破碎带隧洞围岩稳定的影响研究[J]. 水利与建筑工程

学报,2018,16(2):200-204.

- [6] 张培印,李顺群. 流固耦合对基坑开挖变形性状的影响研究[J]. 工程勘察,2014,42(5):16-20.
- [7] Huang M, Liu X R, Zhang N Y, et al. Calculation of foundation pit deformation caused by deep excavation considering influence of loading and unloading[J]. Journal of Central South University, 2017,24(9):2164-2171.
- [8] Lian B Q, Hu B, Wang X G. Monitoring and numerical analysis on the foundation pit excavation for mingdu station of wuhan subway[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,96(13):7-12.
- [9] Li Y, Chai J, Xu Z. Analysis of influence of seepage on stability of foundation pit[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017,207:012093.
- [10] 孙海霞,张科,陈四利,等. 考虑渗流影响的深基坑开挖三维弹塑性数值模拟[J]. 沈阳工业大学学报,2015,37(5):588-593.
- [11] 周勇,王晓莉,朱彦鹏,等. 兰州地铁湿陷性黄土深基坑在降低水位条件下的渗流稳定性分析[J]. 中国铁道科学,2017,38(1):86-94.
- [12] 徐建国,于松聆,王刚,等. 基于流固耦合理论的隧道围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):66-71.
- [13] 张冬冬,孙瑞瑞,袁新明,等. 基于ADNIA的基坑渗流有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(4):21-24.
- [14] 李宏安,冯雨润之,李玲利,等. 基于数值模拟的福州某地铁站基坑地下水控制方案研究[J]. 公路交通科技,2016,33(2):88-95.
- [15] Liu Z R, Qiu H B, Peng M Q. Study of seepage and stability of foundation pit under continuous rainy conditions[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,501-504:83-87.