

某在建地铁车站主体结构开裂原因分析及整治^{*}赵秀绍^{1,2} 余超^{1,2**} 冯金³ 石钰锋^{1,2}

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 330013, 南昌;

2. 华东交通大学土木工程国家实验教学示范中心, 330013, 南昌;

3. 中铁四局集团第五工程有限公司, 332703, 九江//第一作者, 副教授)

摘 要 针对某地铁车站施工过程中站厅层侧墙部位及顶板部分区域混凝土开裂的现象, 结合具体施工状况进行定性分析, 依次对混凝土材料及地下水因素进行排查; 建立力学模型分析, 并利用 ABAQUS 有限元软件对该车站受力情况进行分析, 得到其主拉应力场, 进而对裂缝发生的区域进行推测。结果表明: 若回填过程中使用大型压路机直接压实, 则会使得车站顶板最大拉应力增加近一倍, 会加大混凝土开裂的可能性; 土体弹性模量的增加, 能够使车站顶板最大拉应力得到有效控制, 因此基底土体的加固能有效防止地铁车站混凝土开裂; 钢便桥范围对顶板最大拉应力影响不大, 但会改变顶板受拉范围, 因而应尽量铺设较小范围的钢便桥。此外, 还对裂缝治理措施及其效果进行了介绍, 可为其他类似工程提供借鉴。

关键词 地铁车站; 主体结构; 裂缝处理

中图分类号 TU312⁺.3; U231.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.014

Cause Analysis and Treatment of the Main Body Structure Cracks at A Metro Station Under Construction

ZHAO Xiushao, YU Chao, FENG Jin, SHI Yufeng

Abstract In response to the phenomenon of concrete cracking in the side wall of station hall and part of the roof area during the construction of a metro station, qualitative analysis combined with specific construction conditions is conducted, the concrete materials and groundwater factors are investigated in turn. On this basis, a mechanical model is established and the stress of the station is analyzed by ABAQUS finite element software, from which the main tensile stress field is obtained, and the locations of possible crack occurrence are speculated. The results show that if the large compaction roller is used for direct compaction during the back filling process, the maximum tensile stress of the station roof will be doubled, that increases the possibility of concrete cracking; while the increase

of the soil elastic modulus can effectively control the maximum tensile stress of the station roof, therefore the reinforcement of the base soil can effectively prevent concrete cracking at metro station. The research also shows that although the range of steel bridge has little effect on the maximum tensile stress of the roof, it will change the tension range of the roof, so steel temporary bridges should be laid in a smaller range. In addition, crack control measures and the effects are introduced, providing reference for other similar projects.

Key words metro station; main body structure; crack treatment

First-author's address State Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

地铁车站在修建过程中受多种因素影响, 可能会发生主体结构开裂, 进而影响车站的安全及耐久性产生。业内各方对此都较为重视。

当前, 针对地铁车站主体结构开裂现象的研究的成果主要是从混凝土温度应力方面进行分析的。文献[1]发现, 由温度场的变化而引起的变形荷载是造成内衬墙开裂渗漏的最主要原因; 文献[2]认为, 混凝土水化热升温后的温度降低(即内外温差)是引起地铁车站主体结构开裂的主要原因; 文献[3]的分析结果表明, 控制混凝土内外温差是控制混凝土开裂的必要条件而非充分条件; 文献[4]设计的混凝土结构, 在浇筑后 7 d 内采用带模板养护方案, 可有效解决混凝土温差引起的开裂问题; 文献[5]从施工技术出发, 通过降低混凝土水化热等途径, 来减少因施工技术而产生的裂缝。

本文针对某在建地铁车站主体结构开裂现象, 分析了主体结构裂缝产生的原因, 并介绍了修补裂缝的措施。

^{*} 国家地区科学基金项目(51668018, 51768020); ^{**} 通信作者

1 工程概述

1.1 工程概况

某地铁车站所在区域地层由上自下依次为素填土、粉质黏土、残积砂质黏性土、全风化花岗岩机散体状强风化花岗岩。施工范围内地下水主要为松散岩类孔隙水、风化残积岩孔隙裂隙水机基岩裂隙水。

该地铁车站全长 206.1 m,其主体结构为地下二层双柱三跨钢筋混凝土框架结构;站台层净高 6.16 m,站厅层净高 4.95 m;采用明挖顺作法(局部盖挖)施工。主体结构封顶后,对降水井进行回填并封孔。为保证该站所在路段交通顺畅,在道路交叉口位置布设临时钢便桥。

钢便桥左侧车站主体结构长 96.45 m,右侧车站主体结构长 51.15 m。具体平面位置关系及车站结构剖面图如图 1~3 所示。钢便桥左右两侧车站主体结构施工完成后,开始进行车站上方土体回填。当土方回填完成后发现,车站顶板及侧墙处的混凝土结构发生了开裂。

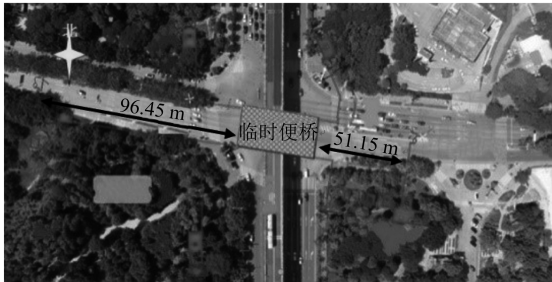


图 1 在建地铁车站平面布置图

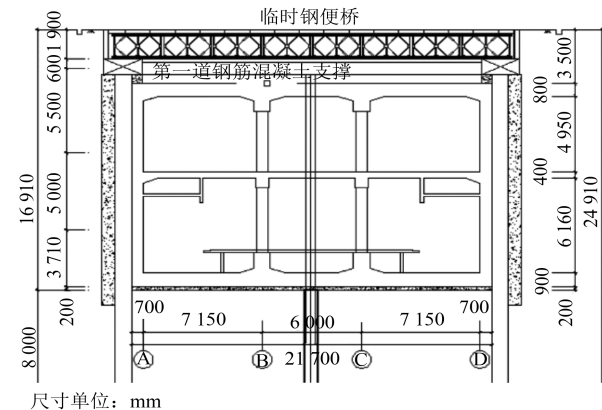


图 2 主体围护结构横剖面图

1.2 裂缝分布特征

车站顶板裂缝主要发生在站厅层第 11~12 轴的顶板纵梁之间,以及第 13~18 轴的整块顶板位

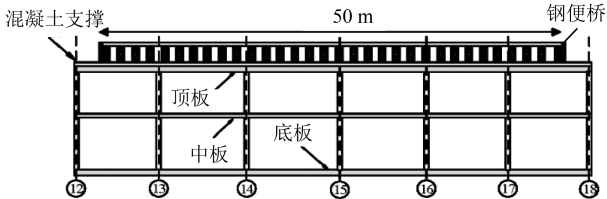


图 3 钢便桥位置关系图

置。裂缝大多沿着垂直于车站线路方向分布,少数裂缝沿平行于车站线路方向分布。各裂缝间距为 2 m 左右。裂缝长约 6 m,裂缝宽度为 0.02~0.10 mm,属于上下贯穿性裂缝。

侧墙裂缝主要出现在第 11~18 轴之间,裂缝主要沿竖直方向分布。站台层裂缝大多从底板倒角上方约 0.5 m 处延伸至中板底;站厅层裂缝一般从顶板底延伸至中板顶。

2 裂缝产生原因分析

由于施工条件不同,混凝土结构裂缝产生的因素也不尽相同。通过分析文献[6-7]发现,混凝土结构的裂缝主要有两种:①结构性裂缝,主要由于结构承受的荷载过大,结构应力达到极限,进而导致结构开裂破坏;②非结构性裂缝,由于混凝土结构自身的材料特性及其内部应力等作用,产生非受力性的变形变化,进而形成结构开裂。

2.1 现场施工条件分析

中板与站台层侧墙、顶板与站厅层侧墙均为整体浇筑。浇筑后检验结果表明,各板墙的混凝土性质较稳定,各板墙间混凝土差异性小。裂缝产生后,对顶板及站厅层侧墙混凝土进行质量检测,检测结果见表 1。

表 1 混凝土抗压强度检测统计表

部位	混凝土 标号	试验 数/次	合格 率/%	强度平均 值/MPa	强度最小 值/MPa
站厅层左侧墙	C35	10	100	50.2	46.5
站厅层右侧墙	C35	9	100	45.1	38.1
顶板、梁	C35	40	100	47.2	37.1

由表 1 可知,站厅层顶板及侧墙各部分的混凝土强度均合格。而裂缝仅在 11~18 轴范围内发生,其余轴线范围内均无裂缝产生,故推测车站结构开裂由混凝土材料因素而造成的可能性较小。

在基坑开挖及主体结构施作过程中,施工方严格控制基坑降水操作及降水井的监测。开裂现象产生后,对降水井重新开孔,井底水位未发现上升现象。此外,全风化花岗岩渗透系数较小,水位上

升速率较慢,所以短时间内地下水位还未出现明显上升。因而推测车站主体结构开裂由地下水因素造成的可能性较小。

2.2 力学分析

在顶板上部土方回填过程中,1~12 轴范围内采用残积砂质黏性土进行填充,共回填 7 层,每层厚度为 0.5 m,使用压路机进行分层压实。18~24 轴范围内共回填 6 层,每层厚度为 0.5 m,采用残积砂质黏性土回填并分层压实。

在车站主体结构受力示意图(图 4)中,m 区域为 1~12 轴线区域土体回填部分,n 区域为 18~24 轴线区域土体回填部分,k 区域为 11~18 轴线区域便桥范围。由于裂缝是在 m、n 区域土方回填后产生,且仅在 k 区域内发生,故本文推测:由于 m、n 区域荷载过大,故 k 区域内主体结构部位产生了较大的拉应力,从而使得顶板及侧墙位置发生开裂现象。

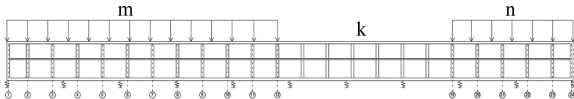


图 4 车站主体结构受力示意图

2.3 有限元分析

本文通过 ABAQUS 有限元软件建立二维模型,对车站主体结构应力变化进行分析。如图 5 所示,模型长 500 m、高 100 m。结合现场地质勘测报告及相应文献得到的土层物理力学参数如表 2 所示,车站各部位的材料参数如表 3 所示。



图 5 车站主体结构有限元模型图

表 2 土层物理力学参数

土层名称	厚度/m	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
素填土	3	18	29.1	46.5	8.9	0.30
黏土	13.21	18.7	30.0	38.1	27.5	0.28
全风化花岗岩	5	19.4	26.0	38.6	32.5	0.26
中风化花岗岩	78.79	22	100	38	200	0.28

模型的模拟将从回填荷载、土体弹性模量变化、钢便桥范围大小等 3 个方面进行考虑。为得出影响趋势,只考虑混凝土材料的弹性部分而未考虑其塑性,故车站主体结构采用线弹性模型。土体使用 M-C 本构模型进行模拟。模型侧面为位移边界,限制水平位移;底部为固定边界,限制水平位移和

表 3 车站主体结构各部位材料参数

部位	高度/m	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
顶板	0.80	23.50	31.5	0.15
中板	0.60	23.50	31.5	0.15
底板	0.90	23.50	31.5	0.15
站厅层边墙	4.95	23.50	31.5	0.15
站台层边墙	6.16	23.50	31.5	0.15
顶柱	4.95	4.44	2.9	0.15
底柱	6.16	4.44	2.9	0.15

注:由于采用二维模型进行模拟,故柱体参数按等效原则折减

垂直位移;模型顶面为地表,取为自由边界。

为得出压路机施工的影响趋势,压路机荷载为局部荷载、均布施加。具体工况见表 4。

表 4 计算工况

工况	回填土荷载/kPa		压路机荷载/kPa	基底土体弹性模量/MPa	钢便桥长度/m
	m 区域	n 区域			
工况一	63	54	0	32.5	50
工况二	63	54	0	32.5	70
工况三	63	54	0	32.5	30
工况四	63	54	0	32.5	50
工况五	63	54	60	32.5	50

使用 ABAQUS 软件进行有限元模拟,结果见图 6。由图 6 a) 可见,仅考虑回填土荷载的情况下,车站顶板上表面的最大拉应力约为 0.54 MPa。对比图 6 e),若覆土回填过程中使用压路机直接压实,可能会使得顶板上表面拉应力扩大接近一倍,使顶板混凝土更容易产生拉裂缝。

对比图 6 a)、6 b)、6 c) 发现,若钢便桥长度增至 70 m,则地铁车站顶板受到拉应力的范围会增大,可能会导致更大区域混凝土结构开裂;若钢便桥长度减少至 30 m,则车站顶板所受到的最大拉应力会略微减小,有利于减少车站顶板开裂。

对比图 6 a) 和图 6 d) 不难看出,当对土体进行加固、使得基底土体弹性模量增至 10 倍时,车站顶板上表面拉应力会显著减小,最大拉应力值约减小了 15%。通过注浆加固,基底全风化花岗岩的弹性模量会呈指数型增长^[8];通过旋喷加固,更能将基底土体弹性模量增大数百倍^[9]。因此,对基底进行加固能有效控制裂缝的产生。

3 裂缝处理

车站部分结构开裂后,可通过采用背后注浆的方式进行修复。案例车站修补所用的主要材料是 LB-91 改性环氧树脂化学注浆液。这是一种由改性环氧树脂及固化剂组成的新型化学注浆补强材

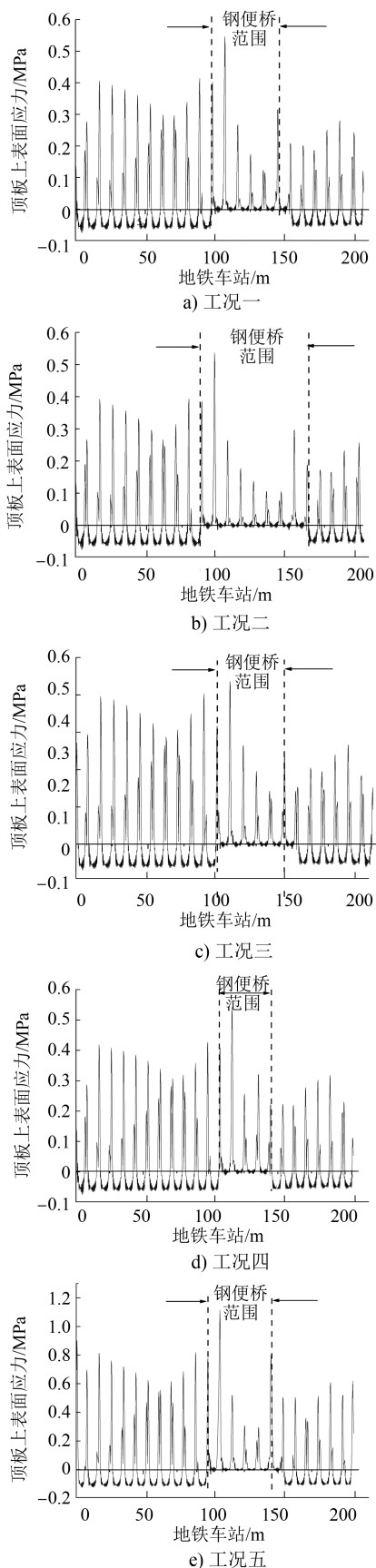


图6 不同工况下的顶板上表面应力分布

料,不仅具有低黏度、高强度等优点,还具有橡胶相改性环氧树脂的效果。

修补前,先对样品裂缝破损处进行试修补,并对修补处的强度、墙体色差及新旧结合面粘结强度进行检测;检测结果满足要求后,再进行正式修补作业。具体施工工序如图7所示。

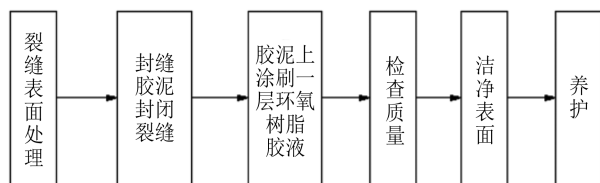


图7 裂缝治理施工工序

1) 灌浆前进行裂缝表面处理。将裂缝表面的灰尘、浮渣及松散层等污物清理干净,并用有机溶剂将裂缝两侧 20~30 mm 范围内的结构表面擦洗干净、保持干燥,然后使用丙酮等有机溶剂对准备封闭裂缝处进行清洁处理。

2) 将拌和好的封缝胶泥均匀地刮涂在构件表面裂缝处,使裂缝完全封闭。

3) 在胶泥封闭的裂缝上涂刷一层环氧树脂胶液。

第一遍处理完毕后,80%的裂缝及漏水情况可以得到有效处理,少数裂缝需处理 2~3 次。在完成注浆处理后,补强材料在混凝土结构内部会产生一定的粘结和封闭效果,使顶板及侧墙的裂缝得到有效封堵及封闭。实际使用结果表明,裂缝注浆处理后,再无渗漏现象发生。

4 结语

本文分析了某在建地铁车站主体结构裂缝发生的原因。

1) 该地铁车站主体结构裂缝并非由混凝土材料及地下水渗透导致。

2) 使用 ABAQUS 有限元软件建立二维平面应变模型,分析结果表明,在两侧土体回填过程中,压路机的压实作用使得车站站厅层顶板产生较大拉应力。车站主体结构裂缝可能由此产生。

3) 减小钢便桥长度可以减小地铁车站顶板所受的拉应力,降低顶板开裂的可能性。基底弹性模量的增加对减小车站拉应力有较好的表现,故在车站主体结构施作前对基底进行加固是防止车站裂缝产生的有效措施之一。

(下转第 65 页)

表 5 车门设备的安全功能 SIL 分析表

安全功能	无此功能的影响	严重程度	<i>E</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>E、P、C</i> 的取值依据	R_{TH}	$R_{TH,m}$	SIL
准确打开车门	车门打不开,紧急情况下乘客无法逃生。到站后非站台侧车门打开	2	0.1	0.01	1	<i>E</i> :只在紧急模式下; <i>P</i> :设有紧急解锁装置;司机室设有两套开门按钮; <i>C</i> :无措施	$1\times10^{-10}\leqslant <1\times10^{-9}$	$1\times10^{-7}-<1\times10^{-6}$	SIL2
车门保持关闭	车门意外打开(或车门误打开),乘客跌落至轨道	2	0.1	0.01	1	<i>E</i> :在少数情况下发生 <i>P</i> :车门装有锁闭系统;只有同时接收到零速度列车线信号和开门指令列车线信号车门才能打开; <i>C</i> :无	$1\times10^{-10}\leqslant <1\times10^{-9}$	$1\times10^{-7}-<1\times10^{-6}$	SIL2
车门紧急解锁	车门无法解锁,紧急情况下乘客无法逃生	3	0.1	0.01	1	<i>E</i> :只在紧急模式下; <i>P</i> :设置有内外紧急解锁装置;司机室设有两套开门按钮; <i>C</i> :无	$1\times10^{-9}\leqslant <1\times10^{-8}$	$1\times10^{-6}-<1\times10^{-5}$	SIL1
障碍物检测	未检测到障碍物,乘客被夹住不能移动,列车运行导致乘客伤亡	3	0.1	0.1	0.1	<i>E</i> :在少数情况下发生; <i>P</i> :设置防挤压功能;当车门夹着物体时,车门自动打开,释放物体; <i>C</i> :设置防夹胶条	$1\times10^{-9}\leqslant <1\times10^{-8}$	$1\times10^{-6}-<1\times10^{-5}$	SIL1
列车需在车门全部关闭和锁闭状态下启动	车门开着而列车启动,乘客跌落导致伤亡	2	0.01	0.01	1	<i>E</i> :极少情况下发生; <i>P</i> :当车门未全关闭会切除牵引;司机通过车门检测系统检测到; <i>C</i> :无	$1\times10^{-10}\leqslant <1\times10^{-9}$	$1\times10^{-6}\leqslant <1\times10^{-5}$	SIL1

4 结语

本文以风险矩阵为基础,通过可容忍风险边界确定可容忍风险概率;基于 IEC 61508:2000 标准,对可容忍风险概率进行校正,对轨道交通车辆系统安全功能进行 SIL 分析。通过分析系统 SIL 以确定系统风险承受能力,采取适当措施对风险进行管控,保障列车运行安全。以某车辆车门子系统为例,进行了 SIL 分析方法应用,结论验证了该方法的合理性,为车辆各子系统 SIL 分析研究提供了理论依据。

参考文献

[1] International Electro technical Commission Std. Functional Safe-

(上接第 61 页)

在施工过程中除考虑混凝土施工工艺外,还需注意土体回填过程中土体的回填速度产生的荷载大小及压实过程中动荷载的大小。切实从施工各阶段抓起,贯彻好“预防为主”的思想。只有这样,才能有效减少施工过程中混凝土结构的裂缝。

参考文献

[1] 齐锋,陈晓宝. 对复合式地铁站内衬墙开裂原因的探讨[J]. 施工技术,2006(10): 55.
[2] 谭谨. 地铁车站主体结构混凝土开裂温度场数值分析[D]. 长沙:湖南工业大学,2015.
[3] 张翠强,田力达,李六连,等. 基于监测数据的地铁车站混凝土早期开裂风险评估[J]. 建筑结构,2017(增刊1): 939.
[4] 许尚农,钟可,黄毅翔,等. 长沙地铁 4 号线车站侧墙带模板

ty of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems; IEC 61508;2000[S]. Geneva;International Electro technical Commission Std,2010.
[2] CENELEC. Railway applications-Communications,signaling and processing systems. Safety related electronic systems for signaling; EN 50129;2018[S]. Brussels;CENELEC,2018.
[3] CENELEC. Railway Applications-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)-Part 2;Systems Approach to Safety; EN 50126; 1999 [S]. Brussels;CENELEC,2017.
[4] WEI G. Prediction of soil settlement caused by double-line parallel shield tunnel construction [J]. Disaster Advances, 2013 (6): 23.

(收稿日期:2018-10-26)

养护技术研究[J]. 施工技术,2017(20): 87.
[5] 段岳强,林金华. 浅谈地铁车站结构侧墙裂缝控制的施工技术[J]. 城市建设理论研究,2018(1): 139.
[6] 陈肇元,崔京浩,朱金铨,等. 钢筋混凝土裂缝机理与控制措施[J]. 工程力学,2006(增刊1): 86.
[7] 朱耀台,詹树林. 混凝土裂缝成因与防治措施研究[J]. 材料科学与工程学报,2003(5): 727.
[8] 袁敬强,陈卫忠,黄世武,等. 全风化花岗岩注浆加固特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016(增刊1): 2876.
[9] 周振强. 连拱隧道浅埋暗挖法施工对地面下沉控制与试验研究[C]//中国市政工程协会. 城市地下空间开发与地下工程施工技术高层论坛论文集. 北京:北京市市政工程总公司(集团),2004.

(收稿日期:2018-10-19)