

大型地铁车站主体结构运营期安全分析与 安全监测方案设计*

江中华

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

摘要 针对武汉复兴路地下车站主体结构的运营安全问题,采用三维全尺寸模型精细化数值分析手段,研究了运营期不同边界条件和不利荷载工况下的结构力学响应。研究表明:地基加固处理不当将诱发楼板和纵梁出现局部沉降过大问题,立柱间的最大差异沉降增加43%;降水、高层建筑修建等地表超载工况下顶板沉降增加33%,总沉降达51.9 mm,地表超载不应超过设计超载值;局部发育的溶洞对车站主体结构受力及变形影响较小,可以忽略。结合设计状态和极端工况下的结构受力性能分析结果,探明了运营期需重点关注的结构受力薄弱部位、变形显著区段及监测指标,制定了各指标的控制和预警标准。

关键词 地铁车站;主体结构;运营安全;监测方案

中图分类号 U231⁺4;X951

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.01.013

Safety Analysis and Safety Monitoring Scheme Design of Large Metro Station Main Structure During Operational Period

JIANG Zhonghua

Abstract For the operational safety of the main structure of Wuhan Fuxing Road underground station, the structural mechanical response with different boundary conditions and unfavorable loading conditions during the operational period is studied by means of refined numerical analysis using a three-dimensional full-size model. The study shows that: improper foundation reinforcement treatment will induce excessive local settlement of floor slabs and longitudinal beams, and the maximum differential settlement between columns increases by 43%; the top slab settlement increases by 33% in condition of ground surface overload such as precipitation and construction of high-rise buildings, and the total settlement reaches 51.9 mm, while the ground surface overload should not exceed designed overload value; the locally developed cavities have insignificant effect on the force and deformation force on the main structure

of the station, thus it can be overlooked. Combining the results of the structural force performance analysis at design stage and under extreme working conditions, the parts of structural force weakness, significant deformation zones and monitoring indexes that require emphatical attention during the operational period are identified, and the control and early warning standards for each index are formulated.

Key words metro station; main structure; operation safety; monitoring scheme

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

随着城市交通基础设施的快速发展,大型地下交通枢纽不断出现。由于其地下空间结构体系复杂,周围工程环境变化较大,对于沉降和变形的要求较高,传统的平面框架模型计算方法已不能精确反应结构的真实受力情况^[1],进而造成结构截面和配筋尺寸等参数不合理^[2],不同的工程之间由于工况不同又难以借鉴,因此需要针对相应的工况进行合理的数值模拟来得到结构的受力变形性能。

针对平面框架模型计算结果的缺陷,文献[3-5]通过有限元软件建立车站三维模型,分析发现车站二维模型的计算结果比车站三维模型的大,计算结果不符合结构的真实受力情况;文献[6-8]详细分析了车站端头井、中庭等位置开孔对结构的影响;文献[9-10]探讨了结构受力改善的相关措施;文献[11-13]结合车站的不利工况,研究车站梁板不同刚度比对结构的影响,并给出优化建议。城市的快速发展使得不同结构之间的近距作业日益频繁,新建建筑不可避免地会对车站运营造成影响。在运营期,车站周边地表堆载导致地铁车站箱体结构沉降表现出非连续性,基底土体产生的塑性应变导致

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0802205)

卸荷后结构仍存在不可恢复的残余变形^[14]。同时周边地下水位的变化也会对车站结构产生不利影响,水位上升时,隧道会发生整体上浮,威胁行车安全,但对结构应力影响不大^[15-17]。周围基坑开挖深度大于车站深度时,车站会产生较大不均匀沉降^[18-20]。

由于现有文献的研究未全面考虑运营期可能发生的工程活动对地铁车站结构的影响,并且地铁车站结构形式存在差异,结构性能分析难以直接借鉴已有成果。因此,对于新建的大型地下空间工程,有必要针对其运营期可能存在的工程活动,开展不利工况下主体结构力学响应分析,研究结构受力薄弱区域,进而制定相应的健康监测方案,指导运营安全监测和诊断工作的开展。

1 车站主体结构受力性能精细化模拟方法

复兴路地下车站为武汉市 3 条地铁线路(新建 5 号线、11 号线及既有 4 号线)的大型换乘枢纽站。5 号线和 11 号线基本呈平行布置。5 号线主体长 786 m,采用两层单柱双跨和双柱三跨结构;11 号线主体长 244 m,全部采用两层单柱双跨结构;既有 4 号线车站与 5 号线车站线路交角 90°,4 号线主体长 157 m,为三层双柱三跨结构。5 号线和 11 号线换乘节点长约 81 m、宽约 50 m,采用地下两层四柱五跨结构和纵梁体系,顶板厚 1 000 mm,中板厚 400 mm,底板厚 1 000 mm。图 1 为车站主体结构的标准段横截面及全局剖面图。车站主体结构总体上可划分为 11 号线始发段、11 号线标准段以及 5 号线和 11 号线合建段,这 3 段的结构形式各异。车站修建于长江一级阶地岩溶塌陷区,基底埋深为 20 m,顶板覆土埋深为 3.8 m。揭露土层主要为杂填土、粉质黏土、粉质黏土夹粉土、粉砂粉土粉质黏土互层、粉细砂、中粗砂夹砾卵石及下覆基岩。

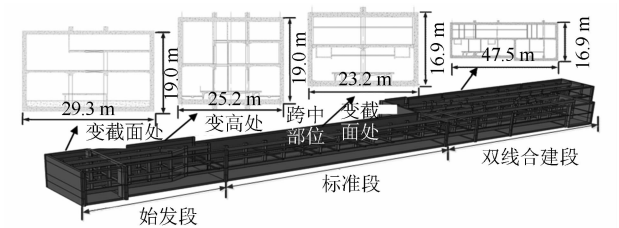


图 1 武汉地铁复兴路站车站主体结构剖面图
Fig. 1 Wuhan Metro Fuxing Road Station main structure cross-sectional drawing

基底软土承载力相对较低,且局部发育岩溶。

结合周边复杂的建构筑物环境及后期地块规划,运营期可能面临施工期地基处理效果不佳、基底存在未处理的溶洞和地表超载等不利工况,危及运营安全。因此,有必要在考虑设计初始状态的基础上,分析潜在不利工况对运营安全的影响,探明主体结构的受力薄弱环节,针对性地设计并实施健康监测,以指导运营安全管控。

通过采用荷载结构法和构建三维精细化数值模型进行模拟计算。依据车站设计图按全尺寸建立实体数值模型。在边界条件方面,在围护结构和底板四周施加垂直于表面的水土压力,土体对墙体(底板)的约束作用采用水平、竖向的非线性弹簧模拟(仅受压)。不同结构的材料及本构关系如表 1 所示。节点位置取结构中心点,单元平均尺度为 1 m。

表 1 不同结构的材料及本构关系
Tab. 1 Material and intrinsic structure relationship of different structures

结构	材料	单元类型	本构关系
立柱	C50 混凝土	实体单元	塑性损伤
梁、板、边墙、围护结构	C35 混凝土	实体单元	塑性损伤
钢筋	纵筋:HRB400	梁单元	理想弹塑性
	箍筋:HRB300	梁单元	理想弹塑性

设计荷载包括永久荷载和标准可变荷载。通过组合工况确定结构自重、水土压力、设备质量等,然后分析设计条件下的结构受力变形状态。结合车站周边环境,以及运营期车站结构及周边可能存在的地基处理不佳、地表超载和底部溶洞发育等不利工况,进行模拟分析,模拟方法如表 2 所示。

表 2 针对影响车站结构的不利工况的模拟方法
Tab. 2 Simulation methods for unfavorable working conditions affecting the station structure

不利工况	模拟方法
地基处理不佳	弱化原有基床系数(45 MPa/m),弱化到 15 MPa/m、25 MPa/m 和 35 MPa/m
地表超载	取消溶洞位置接地弹簧
底部溶洞发育	选取结构薄弱区域,局部施加竖向荷载

控制标准参照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》相关规定,如表 3 所示。

2 运营期车站结构受力性能分析

2.1 设计荷载下的结构受力性能

考虑后续分析工况对围护及外墙影响不大,且

表 3 基于国家标准的车站结构变形控制表

Tab.3 Station structure deformation control based on national standards

不利工况	模拟方法
构件挠度	构件长度>9m,挠度<构件长度/300
立柱沉降差	小于 5‰立柱距离
裂缝宽度	迎水面小于 0.2 mm;背水面小于 0.3 mm

设计荷载最不利工况下围护及主体外墙结构安全储备较高,因此主要分析板、梁和柱等构件的变形和受力情况。

各层板最大主应力云图如图 2 所示。顶板应力水平最高,中板次之,底板最低;最大压应力仅为 7.6 MPa,而各层板受压安全储备较高,因此不受影响;11 号线始发段变高处的顶板拉应力超过抗拉强度,验算裂缝宽 0.3 mm,其余部位拉应力均小于抗拉强度。竖向变形方面,同样表现为:顶板沉降最大,底板沉降最小。顶板最大沉降量为 35.1 mm,略小于允许的挠度值为 37.0 mm;中层板沉降为 32.1 mm;底板最大最大沉降 6.6 mm。跨中处底板上浮 6.9 mm。跨中处底板上浮 6.9 mm。底板竖向位移云图如图 3。



图 2 各层板最大主应力云图

Fig. 2 Maximum principal stress contour plot for each layer of the plate



图 3 底板竖向位移云图

Fig. 3 Vertical displacement contour plot of the bottom plate

各层板下的纵梁、横梁、纵梁的应力水平和变形幅度相对较大。顶层纵梁混凝土应力水平最高,局部拉应力达到抗拉强度,压应力最大为 11.2 MPa,如图 4 所示。顶层纵梁竖向位移最大,约为 14.0 mm,小于规范要求的 34 mm。

相比各层板和梁,各区域立柱的应力水平最高,其中双线合建段最大拉应力和压应力分别为 2.7 MPa 和 22.4 MPa,如图 5 所示。11 号线标准段立柱沉降值最大,为 14 mm;相邻立柱柱顶最大差异沉降为 3.2 mm,小于规范要求的 5‰ $l \approx 36.9$ mm(l 为

立柱间水平距离)。



图 4 顶层纵梁最小主应力云图

Fig. 4 Top plate Longitudinal beam minimum principal stress contour plot

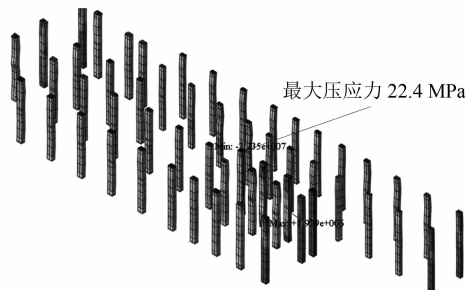


图 5 双线合建段立柱轴向应力云图

Fig. 5 Axial stress contour plot of column in joint construction area

从应力、变形及裂缝控制要求来看,均满足设计要求。11 号线始发段、变高处及双线合建段变截面处存在应力集中问题,而 11 号线标准段跨中处为整体变形最大处。上述区域可以认为是受力薄弱部位,运营期应加强关注。

2.2 地基处理效果不佳对主体结构的影响

从分析结果来看,地层抗力的削弱不会引起主体结构受力形态的显著变化。具体表现为:

1) 如图 6 所示:顶板、中板和底板仍表现为:顶板应力水平最高,中层板次之,底板最低。随地层抗力减小,底板拉应力水平增幅最大,极值从 1.0 MPa 增加至 1.4 MPa,顶板拉应力也出现小幅度增加,而中板应力基本不变。如图 7 和图 8 所示:顶板沉降仍表现为横向“W”型对称分布的沉降槽和纵向跨中“深槽”型沉降槽;顶板沉降增幅较小,跨中最大处沉降仅增加 2.5%,由 35.1 mm 增至 36.0 mm;底板竖向变形最为显著,跨中部位的底板隆起量从 6.8 mm 增加至 13.1 mm,端部底板的沉降量从 6.6 mm 增加到 9.2 mm,最大增幅 93%。

2) 如图 9 所示:顶层纵梁、中层纵梁和底层纵梁的最大拉应力基本不变;底层纵梁的最大压应力增幅为 14%,达到 8 MPa;各层纵梁沉降近似线性增加,其中底层纵梁增幅最大,从 6.83 mm 扩大为 9.66 mm。

3) 如图 10 所示:立柱柱顶的沉降分布规律同

样没有明显变化,仍表现为跨中最大、两侧较小;地基处理不当、地层抗力折减至 15 MPa/m 时,引起的沉降量最大增加 3.6 mm,增幅为 25%;柱间的最大差异沉降值为 4.6 mm,仍小于规范要求的 $5‰l \approx 36.9$ mm。

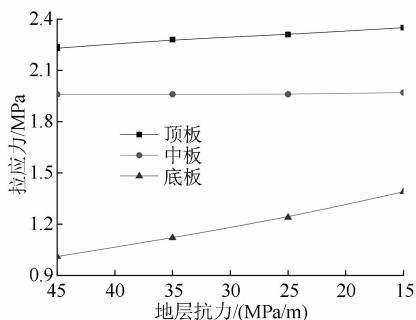


图 6 顶板、中板和底板的最大拉应力变化规律

Fig. 6 Maximum tensile stress variation law of top plate, middle plate and bottom plate

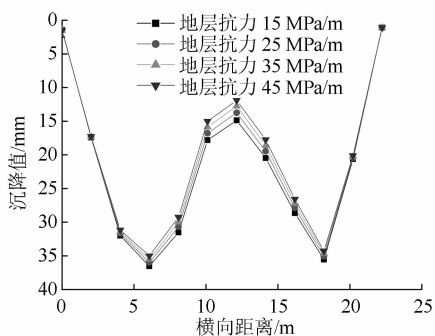


图 7 顶板沉降的横向分布规律

Fig. 7 Distribution pattern of top plate settlement (Horizontal)

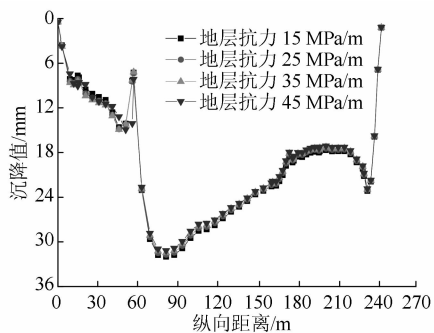


图 8 顶板沉降的纵向分布规律

Fig. 8 Distribution pattern of top plate settlement (Longitudinal)

由于侧边地层的约束及荷载水平未出现变化,基底地层抗力的削弱对底部结构(底板、底梁)的影响最为显著,但并未引起差异沉降超限、出现新增裂缝等问题。确保坑底地基处理效果,可以有效控

制结构的拉应力水平和变形程度。

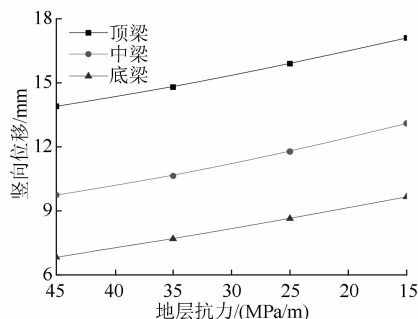


图 9 梁的竖向位移变化规律

Fig. 9 Vertical displacement variation law of the beam

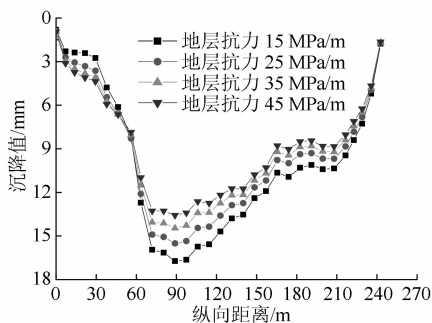


图 10 立柱沉降的空间分布规律

Fig. 10 Distribution law of column settlement

2.3 地表超载对主体结构的影响

由设计荷载下的计算结果分析可知,地下车站结构始发段变截面和变高处存在应力集中,标准段顶板沉降值最大,合建段立柱压应力最大。针对如图 11 中的 4 个敏感区域,模拟每个区域局部堆载 100 kPa 对结构的影响。

为绘图方便,以位置 0 代表设计荷载下的计算结果,横轴 1~4 代表图 11 中标识的 4 处堆载区域。局部超载作用下,车站结构不同区域的沉降差异较为显著,11 号线标准段(堆载区域三)增幅最大,顶板最大沉降值增加 33%,总沉降达到 51.9 mm,其他区域顶板沉降增幅控制在 2 mm 以内。地表局部超载导致堆载区域一、堆载区域二和堆载区域三立柱的最大压应力增加 2.1 MPa,堆载区域立柱的最大压应力增加 5.8 MPa,如图 12~14 所示。

综合不同堆载状态下的结构受力与变形结果分析,运营期需严格控制超载,特别是 11 号线标准段堆载区域三的地表超载不应超过设计超载值。

2.4 底部揭露溶洞对主体结构的影响

针对图 11 提及的 4 个结构敏感区域,单独分析每个区域揭露溶洞对结构的影响。结合周边区域

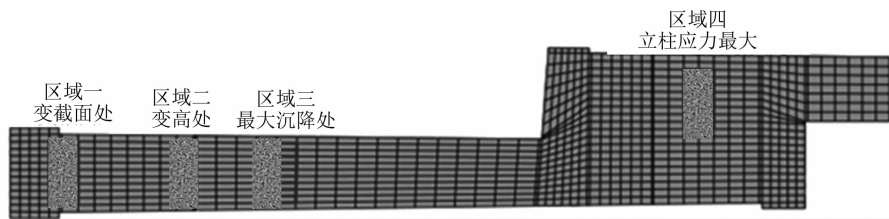


图 11 局部堆载位置示意图

Fig. 11 Diagram of local stacking position

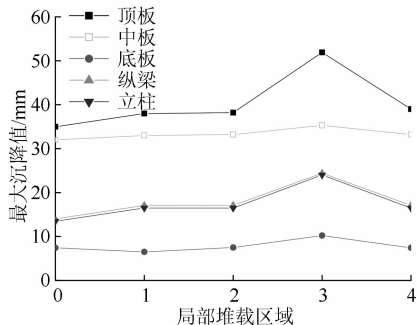


图 12 不同堆载区域下结构沉降值

Fig. 12 Settlement values of structures under different stacking areas

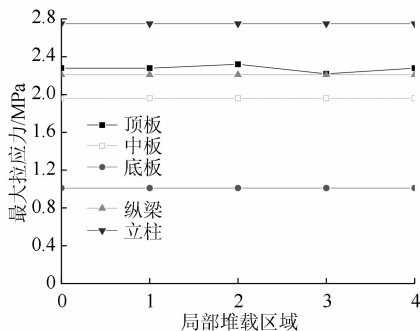


图 13 不同堆载区域下结构最大拉应力

Fig. 13 Maximum tensile stress of the structure under different stacking areas

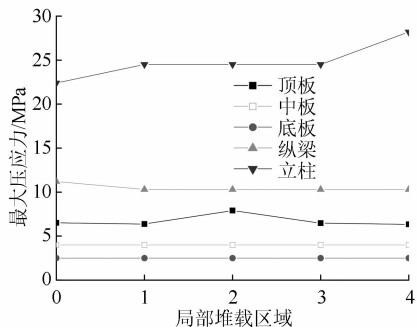


图 14 不同堆载区域下结构最大压应力

Fig. 14 Maximum compressive stress of the structure under different stacking areas

既有工程的地基处理结果,按圆形模拟溶洞,半径设置为 3 m。计算结果如图 15~16 所示。由于底板刚度较大,局部揭露溶洞引起的结构沉降和拉压应力变幅极小,受力变形状态与无溶洞工况基本相同。因此,可以忽略底部局部揭露溶洞对结构运营安全的影响。

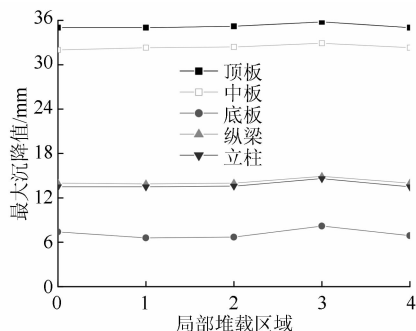


图 15 不同溶洞位置下结构沉降值

Fig. 15 Settlement values of structures under different cave locations

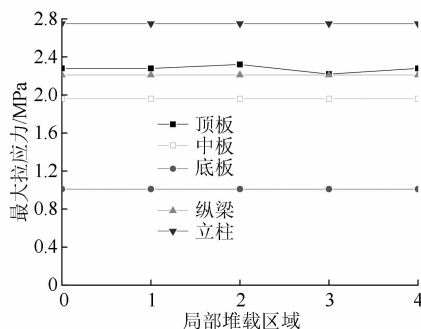


图 16 不同溶洞位置下结构拉应力

Fig. 16 Structural tensile stresses under different cave locations

3 车站主体结构健康监测方案分析

依据上述分析结果可知,不同区段主体结构的内力响应差异较大。从运营安全角度考虑,选择监测断面时应重点关注结构体系复杂区域(如刚度突

变区域、结构不连续区域等)、结构强度薄弱区域(如受力峰值区域、承载力最小区域等)、周边环境复杂区段(如不良地质区域、地质状况发生变化区

域等),同时可选择 1~2 处标准断面进行对比分析。最终,确定车站主体结构健康监测断面如图 17 所示。

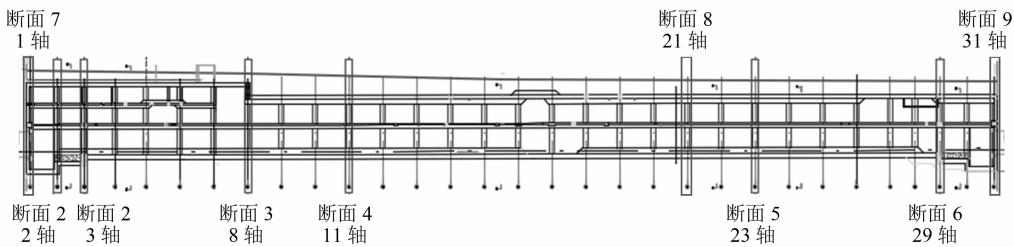


图 17 车站主体结构健康监测断面布置图

Fig. 17 Station health monitoring cross-section layout

- 1) 断面 1、断面 3 和断面 5 位于结构变截面处,存在应力集中,结构拉压应力较大,存在开裂风险;
- 2) 断面 7、断面 8 和断面 9 位于车站两侧端头位置,属结构不连续区域,受力情况复杂,容易发生不均匀沉降;
- 3) 断面 2、断面 4 和断面 6 属于结构薄弱部位,断面 2 结构拉应力较大,断面 4 结构沉降值最大,断

面 6 立柱受力最大。
复兴路站的监测项目主要为结构外部荷载(水、土压力)和关键部位的混凝土拉压应力。以双线合建段异型结构处的断面 5 为例,结合结构受力计算分析结果,确定结构承载及使用性能方面的薄弱部位,据此确定外部荷载和混凝土应力的测点,如图 18~19 所示。

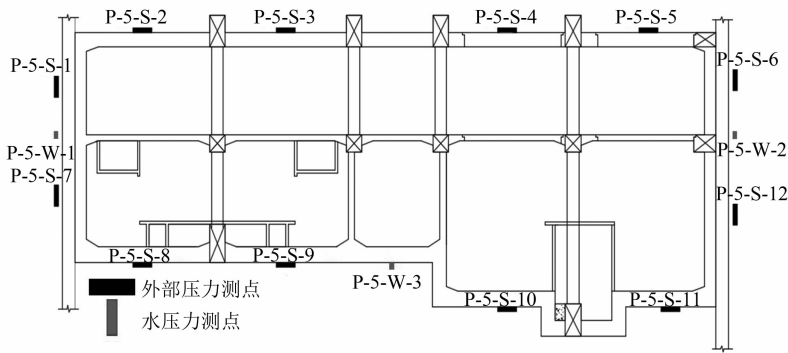


图 18 断面 5 外部荷载测点

Fig. 18 Section 5 external load measurement points

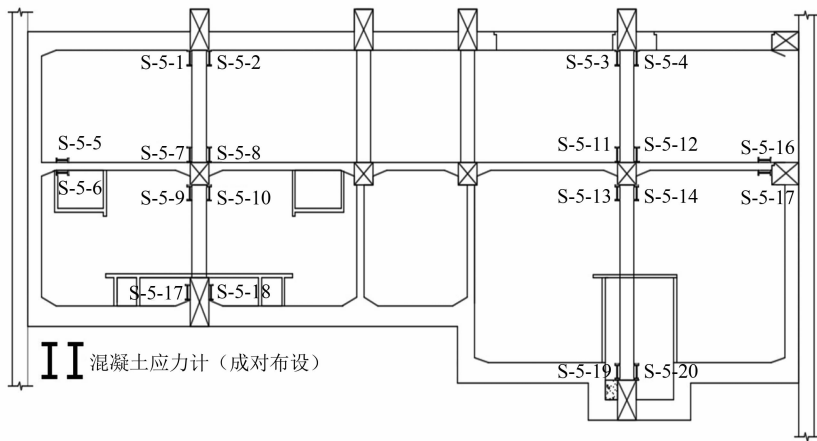


图 19 断面 5 薄弱部位应力测点

Fig. 19 Section 5 weak point stress measurement points

采用两级标准进行数据管控(见表 4),取混凝土抗拉强度和抗压强度设计值的 80%作为预警值,取混凝土抗拉强度和抗压强度设计值的 100%作为报警值,各级标准见表 4。

表 4 车站主体结构构件预警和报警管控标准
Tab.4 Station main structure construction early warning and alarm control standards 单位: MPa

构件	正常值	预警值	报警值
柱压应力	0~18.5	18.5~25.9	>25.9
柱拉应力	0~1.5	1.5~2.1	>2.1
其余结构压应力	0~13.4	13.4~18.7	>18.7
其余结构拉应力	0~1.3	1.3~1.8	>1.8

4 结论

1) 在考虑运营初始状态(设计荷载工况)的基础上,局部揭露溶洞对主体结构受力与变形特性基本没有影响,可以忽略;地基处理不当和地表超载均会对主体结构造成一定程度的不利影响,其中地基处理不当对底部结构影响最大,底板竖向变形增幅最大为 93%,应力增幅最大为 40%,柱间差异沉降增加 43%,达到 4.6 mm,但仍满足规范要求;标准段跨中区域的地表超载最大,结合应力与开裂控制标准,建议标准段和合建段地表附加荷载不应超过设计超载值。

2) 从力学层面分析确定了单线始发段的变截面部位、变高部位、标准段的大跨跨中部位、双线合建段的变截面处与跨中部位为主体结构受力薄弱点,进而依据数值分析结果确定了外部荷载和结构应力的测点布设方案,确定了结构应力的预警与报警标准。

目前已依据该方案优化了复兴路站健康监测实施方案。未来有必要进一步分析基于长期监测和运营安全检查数据的健康状态量化评价方法,动态评估结构损伤程度及损伤部位,以指导类似大型地下车站结构的运营安全管控工作。

参考文献

[1] 潘佩君. 不均匀地层地铁车站结构内力分析和减少沉降方法研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.
PAN Peijun. Analysis on the internal forces of the subway station structure laying on the uneven ground and research on the methods of reducing the settlement[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
[2] 王博. 明挖地铁车站整体建模结构受力分析[J]. 铁道标准设计,2012(11):75.

WANG Bo. Structure stress analysis by integrated modeling for open-cut metro station [J]. Railway Standard Design, 2012 (11): 75.
[3] 杨建学. 明挖地铁车站不同计算方法计算结果比较[J]. 甘肃科技,2009(13):133.
YANG Jianxue. Comparison of calculation results by different methods for open-cut subway stations[J]. Gansu Science and Technology, 2009(13):133.
[4] 代坤. 明挖地铁车站空间计算模型与平面计算模型的对比分析[J]. 隧道建设,2010(增刊1):254.
DAI Kun. Comparative analysis on 3D computation model and 1D computation model for metro stations constructed by cut and cover method[J]. Tunnel Construction, 2010(S1):254.
[5] 丁春林. 含结构节点的地铁车站空间受力分析[J]. 地下空间,2003(3):281.
DING Chunlin. Analysis of spatial load on metro station with structural joints[J]. Underground Space, 2003(3):281.
[6] 高志宏. 盾构端头井结构设计中的若干问题研究[J]. 四川建筑,2010(2):153.
GAO Zhihong. Study of some problems in structure design of shield and soil shaft[J]. Sichuan Architecture, 2010(2):153.
[7] 黎钜宏,盛建龙,邓静,等. 地铁车站端头盾构井的空间分析[J]. 都市快轨交通,2013(6):73.
LI Juhong, SHENG Jianlong, DENG Jing, et al. Spatial analysis of end shield well of a subway station[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013(6):73.
[8] 丁春林. 地铁车站端头井受力计算模型研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(5):621.
DING Chunlin. Study on calculation model of end well for metro station[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007(5):621.
[9] 徐军林,江建红,杜欣. 地下车站中庭结构三维有限元分析及应用[J]. 铁道勘测与设计,2013(3):66.
XU Junlin, JIANG Jianhong, DU Xin. 3D finite element analysis and application of underground station atrium structure [J]. Railway Survey and Design, 2013(3):66.
[10] 谢婷婷. 基于 FEM 的地下车站端头井三维分析及工程应用[J]. 铁道勘测与设计,2012(6):45.
XIE Tingting. 3D analysis and engineering application of underground station end shafts based on FEM[J]. Railway Survey and Design, 2012(6):45.
[11] 黎钜宏. 地铁地下车站主体结构内力变化规律的分析研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
LI Juhong. Analysis and research on variation nature of internal force of subway underground station main structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
[12] 周小华. 地铁车站箱型结构计算浅析[J]. 铁道建筑技术, 2003(2):14.
ZHOU Xiaohua. Brief analysis of computation of box structure for metro station[J]. Railway Construction Technology, 2003 (2):14.