

地铁车站顺行密贴下穿既有隧道安全风险评估

牛晓凯^{1,2}, 张顶立¹, 高西洋², 苏 洁¹

(1.北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室,北京 100044;2.北京市市政工程研究院,北京 100037)

摘 要:借鉴已有的穿越工程安全风险评估手段,引入肯特法安全风险评估技术,从工前检测、工前评估、工中动态控制及工后评价 4 个方面入手,建立了适用于新建地铁顺行密贴下穿既有隧道结构的安全风险评估体系.通过工前检测和工前评估可以精准地掌握既有隧道结构的服役状态并确立合适的施工期间允许变形控制值;工中动态控制实时地反映了既有结构的变形情况,是该评估体系的重中之重;工后评估突出施工结束后对既有结构的检测及监测,以图评价整个施工过程对既有结构造成的影响.将该成果应用于新建北京地铁 15 号线奥林匹克公园站顺行密贴下穿大屯路隧道施工过程中,结果表明,穿越工程安全风险控制达到了预期的控制目标,确保了大屯路隧道在隧道施工过程中的安全运营.

关键词:地铁车站;既有隧道;风险评估;控制标准

中图分类号:U456.3 **文献标志码:**A

Safety risk assessment of paralalled and closely-attached metro station under-passing existing subway tunnel

NIU Xiaokai^{1,2}, ZHANG Dingli¹, GAO Xiyang², SU Jie¹

(1.Key Laboratory of Urban Underground Engineering , Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044,China;

2. Beijing Muntcipal Engineering Research Insutute, Beijing 100037, China)

Abstract:The existing safety risk assessment methods for crossing engineering and Kent safety risk assessment techniques are introduced and used. This paper establishes a safety risk assessment system for the construction of a newly built subway station which under passes existing tunnel structure, which is based on four aspects:the service state detection of existing tunnel structure, pre-construction evaluation, dynamic control during the construction and post-construction evaluation. The service state detection and the pre-construction evaluation can be used to get the accurate service state of existing structures and the appropriate allowable deformation control value during the construction can be ascertained; dynamic control during construction is the most important part of the evaluation system, it can be used to reflect the deformation of the existing structure in real time; the aim of post-construction evaluation is to evaluate the influence of the whole construction process on existing structures through the detection and monitoring of

收稿日期:2017-11-01
基金项目:国家自然科学基金(51678035);中央高校基本科研业务费专项资金(2017JBM092)
Foundation items:National Natural Science Foundation of China (51678035); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017JBM092)
第一作者:牛晓凯(1979—),男,北京市人,高级工程师,博士生.研究方向为隧道及地下工程检测、监测及安全风险评估,consultant@metronxk@126.com.
引用格式:牛晓凯,张顶立,高西洋,等. 地铁车站顺行密贴下穿既有隧道安全风险评估[J]. 北京交通大学学报,2018,42(3):95—102.
NIU Xiaokai,ZHANG Dingli,GAO Xiyang, et al. Safety risk assessment of paralalled and closely-attached metro station under-passing existing subway tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2018,42(3):95—102. (in Chinese)

existing structures after construction. The conclusion of this paper is applied in the engineering where Olympic Park station of Line 15 Beijing Subway closely attaches to the Datun-Road tunnel. According to the result analysis, the desired control goal has been achieved so that the safely operation of existing tunnel has been realized during the construction.

Keywords: subway station; existing tunnel; risk assessment; controlling criteria

近年来,国内外学者对新建隧道穿越既有建构
筑物进行了大量理论和实践研究,并成功保障了很多工程的顺利实施.万良勇等^[1]对新建地铁隧道“零距离”下穿既有车站施工技术进行了分析和研究;马骏^[2]研究了城市地铁硬岩隧道下穿既有隧道时,对既有结构的控制技术;张旭等^[3]以北京地铁 6 号线朝阳门站至东大桥站区间隧道垂直密贴下穿既有 2 号线朝阳门站为例,对新建隧道下穿既有地铁车站时,引起既有车站结构的沉降变形进行了研究;诸多研究成果表明,新建隧道下穿施工对既有建筑物沉降变形的影响虽然具有一般性规律,但还需具体问题具体分析^[4-7].Garner C D^[8]采用数值模拟的手段对地层沉降与新建地铁结构之间的配置进行了优化,以便控制既有结构的变形和地面沉降;王联平^[9]对暗挖隧道下穿既有地铁结构的施工技术进行了研究;江华^[10]对新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征进行了探索;Severi M^[11]对地铁隧道下穿佛罗伦萨历史中心施工过程中,既有结构的沉降变形进行了实测分析;文献[12-14]对暗挖隧道下穿既有地铁隧道、地铁车站等建筑物的关键技术、风险评估及控制标准进行了研究;很多学者借鉴模糊数学分析法的应用,将肯特法应用在穿越工程的风险评估中,诸如新建隧道对既有道路、桥梁及管道等的影响^[15-17].然而,当前并没有完整的隧道施工下穿既有隧道结构的安全风险评估方法,也无法提出精确的既有结构变形控制标准.

本文作者从文献调研入手,依托实际工程,将肯特法评估技术应用在穿越工程安全风险评估中,并提出了较为完整的新建地铁车站下穿既有隧道的安全风险评估体系.研究成果可为地铁车站施工下穿既有隧道等建构筑物的安全使用提供保障,具有重要的经济效益和工程应用价值.

1 既有隧道安全风险评估

北京地铁 15 号线奥林匹克公园站下穿大屯路隧道,区别于以往的有角度穿越情形,是国内首例大断面隧道长距离顺行密贴下穿既有隧道的典型工程.该工程具有如下特点:1)新建地铁车站开挖断面大,总宽 28.3 m,高 16.32 m;2)与既有大屯路隧道

长距离(车站总长 205.5 m)顺行密贴,施工风险大;3)既有隧道结构存在多处变形缝,易发生差异沉降;4)水文地质条件复杂.本文将针对该穿越工程的工程特点,从工前、工中、工后安全评价 3 个部分内容详细论述新建奥林匹克公园站顺行密贴下穿既有大屯路隧道安全风险评估技术.

1.1 肯特法风险评估体系介绍

肯特法(KENT)较早应用于输油管道类的工程风险评估.美国于 20 世纪 70 年代开始研究肯特危险指数评价方法,20 世纪 90 年代该方法被成功应用到油气管线的风险管理上^[18-19].该方法的优点在于不必建立精确的数学模型和计算方法,不必采用复杂的强度理论,而是在有经验的现场操作人员和专家意见的基础上,结合一些简单的公式进行打分评判,其评价的精确性取决于专家经验的全面性和划分影响因素的细致性、层次性.

肯特法是独立分析各影响因素后,进而求取指数和

$$S = T + C + D + O \tag{1}$$

式中: T 为第三方指数,包括活动程度、覆盖层厚度及地面设施等; C 为腐蚀指数,包括大气腐蚀、管道内腐蚀及埋地金属腐蚀等; D 为设计指数,包括管道安全系数、系统安全系数及疲劳等; O 为误操作指数,包括施工安全设计、管道施工及安全维护等.

再分析管道内物质的危险指数 M 和影响系数 N ,然后得到泄露指数 $P = M/N$.最后求指数和 S 与泄露影响指数 P 的比值,得到相对风险值 $K = S/P$.

在相关规范及前人研究成果的基础上,结合本工程实际情况,引入隧道指数 F_1 ,地层指数 F_2 及既有结构物指数 F_3 ,并考虑位置关系系数 S_1 和结构物重要性系数 S_2 ,指数之和 MF ,影响指数 MS 及相对风险值 K 对风险评估的影响,即可得到基于肯特法的既有隧道安全风险评估体系,如图 1 所示^[15-18].

改进后穿越既有隧道的肯特法风险评估体系中,指数越大,相应风险越高,其表示为^[15-17]

$$MF = F_1 \times F_2 \times F_3 \tag{2}$$

$$MS = S_1 \times S_2 \tag{3}$$

$$K = \frac{MF \cdot MS}{1000} = \frac{F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot S_1 \cdot S_2}{1000} \tag{4}$$

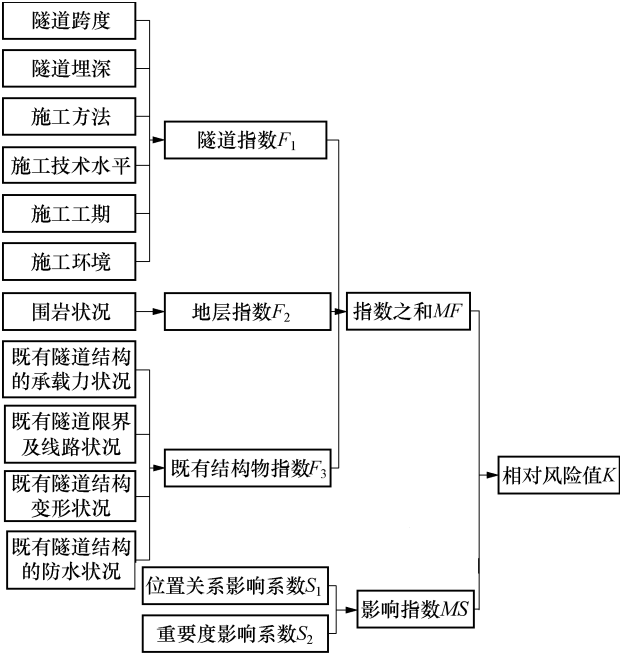


图 1 穿越既有隧道的肯特法风险评估模型

Fig.1 Kent risk assessment model of crossing existing structure

1.2 既有隧道安全风险评估流程

地铁车站穿越既有隧道风险安全评估及控制流程见图 2。

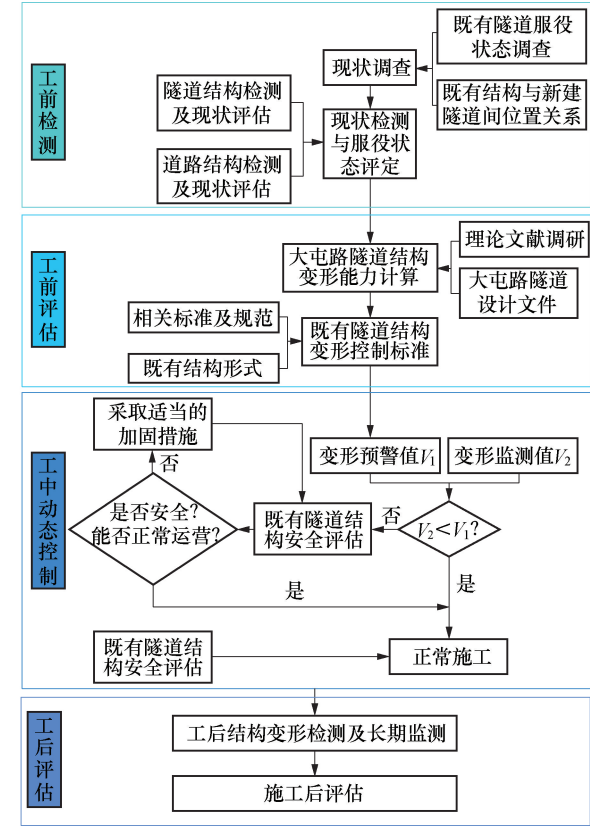


图 2 地铁车站穿越既有隧道风险安全评估及控制流程

Fig.2 Safety risk assessment and control process of subway station crossing existing tunnel

2 密贴下穿既有隧道工前风险评价

2.1 大屯路隧道现状评估

施工前,对既有隧道结构的现状进行详细调查,对既有结构进行工前评估,为后续控制标准的制定、新建车站施工风险评估、施工过程控制等提供依据^[3]。为此,首先收集了既有隧道、周边环境、地质水文情况等基本资料,然后对既有隧道结构进行了现状调查、结构检测和评估分析,在此基础上全面了解既有隧道结构的健康状态和承载状况。通过工前评估可知,主要成果有:

1)既有隧道结构底板以下地层依次为 ③₁ 粉质黏土、③₂ 黏土、④粉质黏土、④₂ 粉土砂、④₃ 粉细砂、⑥粉质黏土。上层滞水水位标高为 33.45 m,潜水水位标高为 26.68 m,层间水水位标高为 17.68 m,承压水水位标高为 12.32~13.66 m。新建地铁车站的底板位于⑥粉质黏土层,且车站主体结构开挖范围内存在多层地下水,施工风险较大。另外,新建地铁车站施工过程中拟采取较强的降水措施,这一措施极易造成既有结构的整体沉降偏大,威胁其营运安全。

2)既有隧道共有 8 个节段,主要分为单侧开口、双孔闭合框架和四孔闭合框架 3 种类型。隧道结构各节段尺寸不一,厚度不同,长度各异,且大多为异形框架结构,差异性较大。顺行密贴下穿施工时容易引起既有结构单节段的横向倾斜与扭转、相邻节段在变形缝处的差异沉降和较大错动。

3)穿越施工前对既有隧道进行了详细的工前检测,根据检测结果:①既有隧道南北两侧边墙分布有大量的竖向非结构性裂缝,少数裂缝宽度已超过规范许可值,个别裂缝存在渗水现象,但不影响正常通行;②隧道结构的混凝土强度满足设计要求,钢筋保护层厚度部分超过设计允许偏差值,但钢筋锈蚀概率很低;③雷达检测结果表明:隧道中道路路基内存在有个别浅层非密实区域。

综上所述,目前大屯路隧道的主体钢筋混凝土结构无严重损伤,技术状态基本完好,使用功能正常。

2.2 密贴下穿既有隧道风险等级评价

奥林匹克公园站穿越大屯路隧道的肯特法风险评估模型中,各分项指数的影响因素得分情况如表 1 所示。

文献调研发现,在采用肯特法对穿越既有隧道的风险进行评估时,风险值与风险等级应作如下规定:当相对风险值 $K < 250$ 时,风险等级为“低度”; $250 \leq K < 400$ 时,风险等级为“中度”; $400 \leq K <$

550 时,风险等级为“高度”; $K \geq 550$ 时,风险等级为“极高”^[14,16-19].根据穿越工程的实际情况,将表 1 中的得分带入到式(1)~式(4)可计算得到本穿越工程相对风险值 $K = 286.16$,风险等级评价为中度,后续施工过程中应采取针对性措施进行风险控制,将本穿越施工风险降到最低.

表 1 奥林匹克公园站穿越大屯路隧道综合评分表

Tab.1 The comprehensive score of Olympic Park station crossing Datun-Road tunnel

分项指数	影响因素	实际情况	得分
隧道指数 F_1	隧道跨度	新建车站采用四导洞洞桩法施工,跨度约为 28 m	10
	隧道埋深	既有隧道埋深小于 15 m	10
	施工方法	新建暗挖车站采用洞桩法施工	15
	施工技术水平	施工企业技术水平良好	15
	施工工期	施工工期较为紧张	3
	施工环境	一般	3
地层指数 F_2	围岩状况	IV 级围岩	70
既有结构物指数 F_3	既有隧道结构的承载力状况	大屯路隧道主体钢筋混凝土结构无严重损伤,技术状态基本完好,使用功能基本正常.	20
	既有隧道限界及线路状况	发现横向贯通裂缝 1 条,距边墙 2 m 处,宽度为 7.92 mm	10
	既有隧道结构变形状况	大屯路隧道南北两侧边墙分布的大量竖向裂缝当属非结构性裂缝,目前少数裂缝宽度已超过规范许可值,但不影响正常通行;并未在隧道顶板发现可见裂缝	28
	既有隧道结构的渗漏水状况	隧道边墙南侧有轻微渗水现象,部分裂缝处有轻微渗水痕迹	15
影响指数 MS	位置关系影响系数 S_1	新建车站和既有隧道密贴接触,极其邻近	1
	重要度影响系数 S_2	既有隧道属重要市政隧道,结构破坏造成的影响将极其严重	1

3 大屯路隧道穿越过程中安全评估

3.1 既有隧道变形控制标准制定

新建隧道施工影响下,对既有结构的有效管控需要借助合理的控制指标来实现.而基于结构承载力计算的结构应力指标,虽能从结构力学的角度揭示结构的实际受荷状态,但实时监测施工过程中结构的弹性模量和应力变化是比较困难的,而且成本较高.因此,对既有地下结构,通常采用结构变形作为主控项目来指导施工.施工对既有结构的外在影响体现为扰动引起的既有结构变形.基于此,很多学者对下穿施工引起既有结构的变形规律进行了总结,并提出了既有结构的沉降、倾斜、扭转等控制指标^[6-10].但上述研究均为有角度穿越情形,对于平行下穿情形下的既有结构控制标准的制定尚存在不足.

文献[3]通过对北京地区 10 个近距离下穿工程的 23 组数据进行拟合分析,认为下穿施工影响下既有结构的变形符合 peck 公式分布规律.为计算下穿施工影响下既有结构的变形,以新建隧道施工方向的反方向作为 y 轴方向,垂直向下作为 z 轴方向,利用右手法则建立坐标系 $o-xyz$, $a、b、c、d$ 表示穿越工程实施前底板平面上的 4 个点, $a'、b'、c'、d'$ 分别表示穿越工程实施后底板平面上的与 $a、b、c、d$ 相对应的 4 个点,将变形前的 $a、b、c、d$ 和变形后的 $a'、b'、c'、d'$ 连接,视为一个微元,如图 3 所示. $S_a、$

$S_b、S_c、S_d$ 分别为 $a、b、c、d$ 在 z 轴的沉降,整个穿越工程实施过程中,该微元的变形包括均匀沉降(或隆起)、旋转和扭曲.

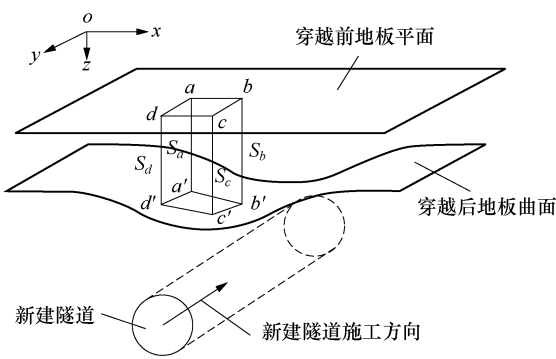


图 3 既有车站结构微元变形图

Fig.3 Deformation diagram of infinitesimal of existing structure

假定穿越施工完成后既有结构底板变形曲面方程为 $f(x,y)$,则结构扭曲变形为

$$T_w(x,y) = \partial^2 f(x,y) / \partial x \partial y \tag{5}$$

在实际工程中,对既有结构底板沉降的监测,通常以离散型单点的形式进行,因此可假定底板变形曲面 $f(x,y)$ 中,微元四角点的沉降是已知的,用 Δx 和 Δy 分别表示微元体在 x 轴和 y 轴方向上的长度,则即有结构底板在 ad 与 bc 方向的转角为

$$\theta_{ad} \cong \tan \theta_{ad} = (S_a - S_d) / \Delta y \tag{6}$$

$$\theta_{bc} \cong \tan \theta_{bc} = (S_b - S_c) / \Delta y \tag{7}$$

若 $\theta_{ad} = \theta_{bc}$, 则结构底板在穿越施工过程中发生均匀沉降(或隆起)与刚性旋转;若 $\theta_{ad} \neq \theta_{bc}$, 则结构底板在穿越施工过程中还发生了扭曲变形

$$T_w = (\theta_{ad} - \theta_{bc}) / \Delta x = [(S_a - S_d) - (S_b - S_c)] / (\Delta x \cdot \Delta y) \quad (8)$$

通过理论计算和既有监测成果可知, 即有地下结构在两变形缝之间的管节的扭转变形相对较小. 基于上述分析, 可以得出平行下穿施工情形下既有地下结构的变形指标为整体沉降和差异沉降. 在本工程中, 整体沉降即为大屯路隧道结构的整体沉降, 差异沉降是指既有隧道的中墙与边墙之间的差异沉降.

根据对既有隧道的现状评估结果, 在分析车站施工引起既有隧道变形模式的基础上^[12], 采用荷载—结构模型分析既有隧道结构在不同变形模式下的容许变形值. 在此基础上, 考虑风险等级及结构安全系数, 并制定本工程变形控制指标和标准, 见表 2.

表 2 既有大屯路隧道变形控制标准

Tab.2 Deformation control indexes of Datun-Road tunnel mm

不同节段	整体沉降	差异沉降
单侧开口段	74	28
双孔闭合框架段	48	20
四孔闭合框架段	46	20

允许变形值计算过程中, 结构强度通过永久荷载和基本可变荷载组合来验算, 混凝土抗压和抗剪极限强度的安全系数取 2.0, 抗拉极限强度的安全系数取 2.4, 另外施工中还应该根据工程实际实施情况

和监测反馈分析等对控制标准予以优化调整.

3.2 穿越施工过程大屯路隧道实时监测

为确保新建奥林匹克公园站下穿施工过程中既有大屯路隧道的安全, 需要对穿越施工过程中既有隧道进行实时监测, 通过监测数据实时分析既有隧道的安全状态.

本次穿越工程采用具备远程、实时、自动采集监测数据的自动监测系统对其进行 24 h 实时监测, 同时, 对关键监测项目及关键监测点采用人工监测进行校核, 双系统相对独立又相互印证, 确保了监测数据的准确性和可靠性. 监测点的布设充分考虑了新建地铁站施工引起的既有隧道结构变形情况及既有隧道结构的特点, 对隧道结构的整体沉降和差异沉降进行监测, 监测仪器为静力水准仪. 具体测点布置详如图 4 所示.

奥林匹克公园站下穿大屯路隧道自 2011 年 5 月 26 日施工开始, 至 2013 年 11 月 12 日主体结构全部施工完成, 共历时 900 d. 图 5 所示为大屯路隧道中墙测点历时沉降曲线, 由图中沉降曲线可以看到: 八导洞 PBA 法施工, 也就是工程刚开始时, 隧道中墙沉降速率较大; 工程因故暂停期间, 大屯路隧道中墙沉降缓慢; 采用四导洞 PBA 工法施作导洞、边桩及中桩时, 既有隧道中墙的沉降也比较缓慢; 采用四导洞 PBA 工法施作扣拱、站厅及站台层时, 施工开始时既有隧道中墙沉降较快, 随着施工的继续, 沉降速率逐渐变慢.

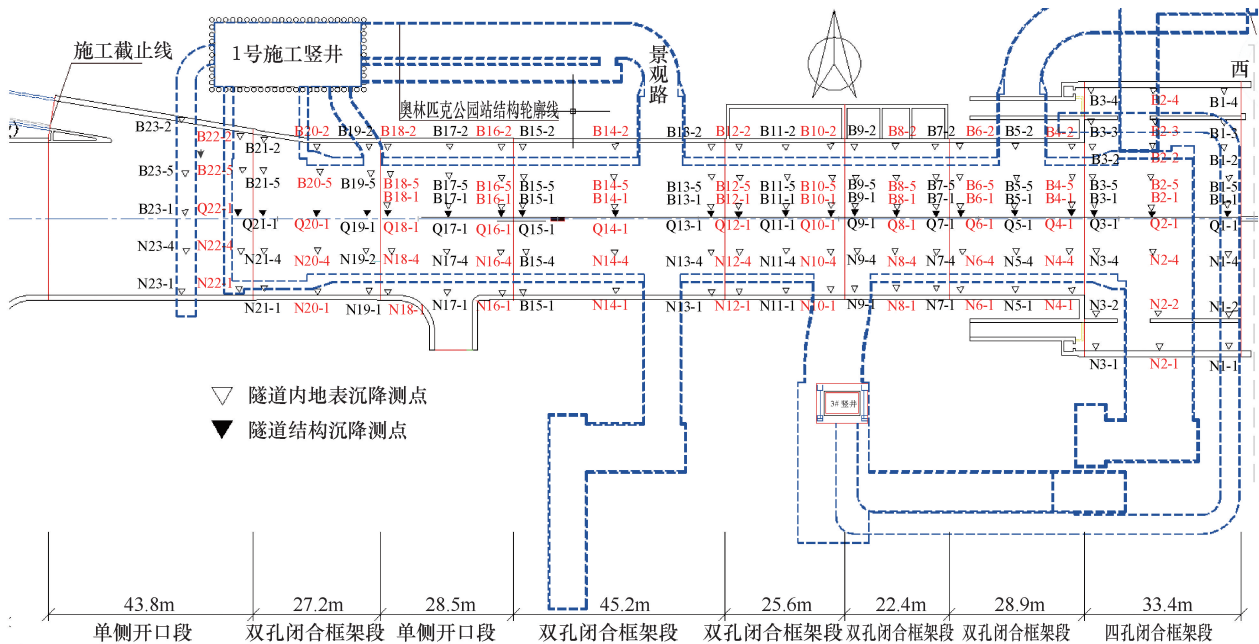


图 4 大屯路隧道测点布置图

Fig.4 Layout of monitoring points in Datun-Road tunnel

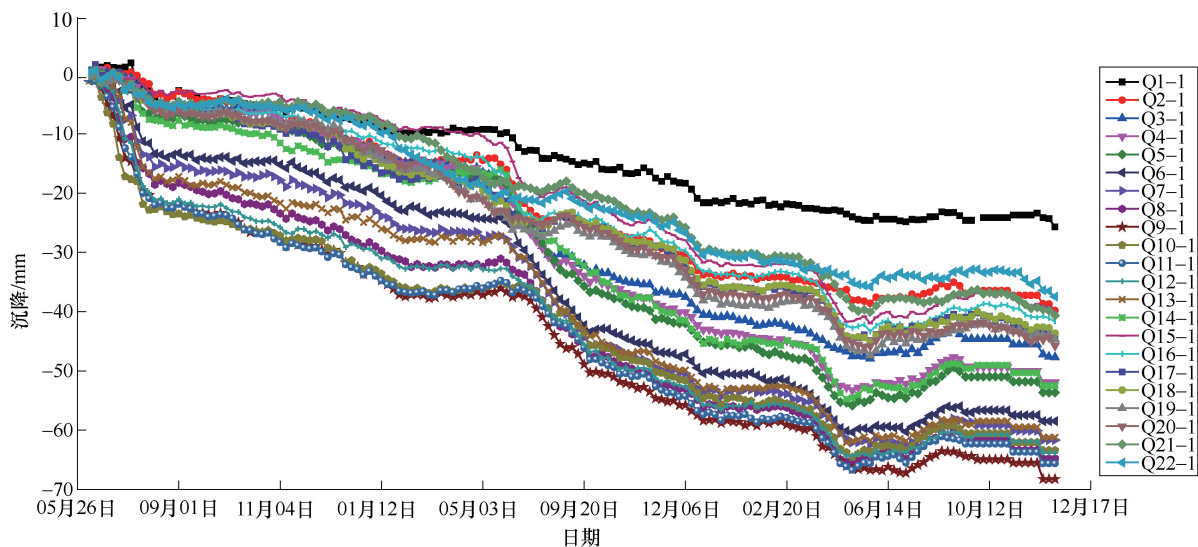


图 5 大屯路隧道中墙测点历时沉降曲线

Fig.5 Settlement with time curves of Datun-Rode tunnel in middle wall measuring point

3.3 穿越施工过程中大屯路隧道安全评估

施工过程中,以既有大屯路隧道的变形控制标准为依据,通过对其变形值的实时监测来对其安全状态进行评价.由图 5 可知,在隧道施工过程中,2013 年 6 月 14 日既有隧道整体沉降最大,以该日监测数据为例进行分析,具体沉降数值详见表 3.

表 3 既有大屯路隧道沉降值

Tab.3 Settlement of Datun-Road tunnel

测点位置	测点编号	总沉降 值/mm	整体沉降是否 超过控制标准	差异沉 降/mm	差异沉降是否 超过控制标准
四孔 闭合段	B1-2	-15.93	否	—	—
	Q1-1	-25.72	否	9.79	否
	N1-1	-18.62	否	-7.10	否
双孔 闭合段	B4-2	-30.91	否	—	—
	Q4-1	-47.88	否	16.97	否
	N4-1	-36.57	否	-11.31	否
双孔 闭合段	B7-2	-30.97	否	—	—
	Q7-1	-64.65	是	33.68	是
	N7-1	-47.82	否	-16.83	否
双孔 闭合段	B10-2	-36.97	否	—	—
	Q10-1	-63.39	是	26.41	是
	N10-1	-58.53	是	-4.86	否
双孔 闭合段	B13-2	-35.09	否	—	—
	Q13-1	-61.20	是	26.11	是
	N13-1	-49.78	是	-11.42	否
单侧 开口段	B16-2	-31.42	否	—	—
	Q16-1	-41.69	否	10.27	否
	N16-1	-27.89	否	-13.80	否
双孔 闭合段	B19-2	-34.18	否	—	—
	Q19-1	-44.68	否	10.50	否
	N19-1	-26.55	否	-18.13	否
单侧 开口段	B22-2	-29.11	否	—	—
	Q22-1	-37.49	否	8.38	否
	N22-1	-27.50	否	-9.99	否

由表 3 可知,测点 Q7-1、Q10-1、N10-1、

Q13-1、N13-1 的整体沉降超过相应控制标准,测点 B7-2~Q7-1、B10-2~Q10-1、B13-2~Q13-1 的差异沉降超过相应控制标准,其中测点 Q7-1 整体沉降最大,为 -64.65 mm,测点 B7-2~Q7-1 的差异沉降最大,为 33.68 mm.

上述沉降超标的测点主要分布于变形缝 3 与变形缝 4、变形缝 4 与变形缝 5 之间的节段.初步分析大屯路隧道沉降超标的原因是:1)车站主体结构赋存于软弱的富水粉质黏土层中,车站施工对土体扰动较大,土层变位大;2)车站施工采取了较强的降水措施,加之扣拱、站厅层及站台层等的施工本身应力释放较大,最终导致部分测点沉降超标.

由于既有大屯路隧道的控制标准是在考虑一定的安全系数的情况下确定的,存在一定的安全富余.初步判定既有大屯路隧道仍处于安全状态.

4 大屯路隧道工后安全评价

4.1 工后监测

新建奥林匹克公园站主体结构施工完成后,对大屯路隧道每天进行 1 次监测.由中墙各测点的沉降曲线可见,既有隧道的沉降基本趋于平稳,也就是说,新建奥林匹克公园站顺行密贴穿越施工完成后,大屯路隧道结构变形在容许变形范围之内.

4.2 工后检测

穿越施工完成后,对既有大屯路隧道进行了详细的工后检测,重点检测区域为变形缝 3 与变形缝 4、变形缝 4 与变形缝 5 之间的节段.通过与工前检测结果的对比分析发现:既有大屯路隧道除结构顶板新增 7 条长度为 0.5~2.3 m、宽度为 0.07~0.14 mm 裂缝外,其他部位并无新增裂缝出现,且原有裂

缝无明显发展迹象,因此,判定既有大屯路隧道结构仍然处于安全状态.

5 结论

本文以北京地铁新建 15 号线奥林匹克公园站密贴下穿大屯路隧道为背景,采用系统的安全风险评估手段,确保了地铁车站施工期间大屯路隧道的安全和正常运营.本文主要结论如下:

- 1)借鉴已有的穿越工程安全风险评估流程,建立了适用于新建地铁顺行密贴下穿既有隧道结构的安全风险评估方法,从工前检测、工前评估、工中动态控制及工后评价 4 个方面为穿越工程的顺利实施保驾护航;
- 2)通过工前检测能够掌握既有隧道的实际服役状态;工前评估是基于工前检测结果及相关文件,确定结构变形控制标准,并作为工中动态控制的依据;施工过程中采用自动检测设备对大屯路隧道结构的沉降情况进行监测,对关键项目及关键测点进行人工监测校核;
- 3)将肯特法应用到新建地铁车站对既有隧道结构的安全风险评估体系中,在保证风险评价符合实际的基础上,简化了风险评估过程.但其精确性取决于专家经验的全面性和划分影响因素的细致性、层次性,主观性较强.同时,如何对不同影响因素提出量化评价指标,还有待于进一步详细研究.

参考文献 (References):

[1] 万良勇, 宋战平, 曲建生, 等. 新建地铁隧道“零距离”下穿既有车站施工技术分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1):168—176.
WAN Liangyong, SONG Zhanping, QU Jiansheng, et al. Analysis of construction techniques for a metro tunnel approaching an existing station[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1):168—176. (in Chinese)

[2] 马骏. 城市地铁硬岩隧道下穿既有隧道施工控制技术[J]. 国防交通工程与技术, 2016, 14(1):49—52.
MA Jun. The construction control techniques for a hard-rock tunnel of the urban metro under-crossing an existing tunnel[J]. Traffic Engineering & Technology for National Defence, 2016, 14(1):49—52. (in Chinese)

[3] 张旭, 张成平, 韩凯航, 等. 隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(4):759—766.
ZHANG Xu, ZHANG Chengping, HAN Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunnelling beneath a subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39

(4):759—766. (in Chinese)

[4] 王刚, 李俊松, 张兴刚. 地铁区间暗挖隧道下穿既有铁路站场安全风险管理研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(9):93—98.
WANG Gang, LI Junsong, ZHANG Xinggang. Study on safety risk management of metro tunnel with hidden-digging method under-passing existing railway station [J]. Railway Standard Design, 2014, 58(9):93—98. (in Chinese)

[5] 刘建美, 刘洋. 地铁隧道近距离下穿既有地铁站变形规律和安全控制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6):202—207.
LIU Jianmei, LIU Yang. The settlement and controlling measures of subway station in short distance during the under-passing of metro tunnel construction[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(6):202—207. (in Chinese)

[6] 常翔. 地铁车站近接正交下穿既有地铁隧道的变形分析[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3):69—73.
CHANG Xiang. Deformation analysis of the subway station perpendicularly under-passing an existing subway tunnel with a small clear distance [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(3):69—73. (in Chinese)

[7] 李结元, 余群舟, 袁天海. 地铁暗挖隧道下穿既有车站风险控制分析[J]. 施工技术, 2017, 46(1):70—73.
LI Jieyuan, YU Qunzhou, YUAN Tianhai. Risk control analysis of subway tunnel under existing station[J]. Construction Technology, 2017, 46(1):70—73. (in Chinese)

[8] GARNER C D, COFFMAN R A. Subway tunnel design using a ground surface settlement profile to characterize an acceptable configuration[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2013, 35:219—226.

[9] 王联平. 暗挖区间隧道下穿既有地铁施工技术[J]. 铁道建筑, 2017(1):98—102.
WANG Lianping. Construction technology of running tunnel driving with mining method under passing existing metro structure[J]. Railway Engineering, 2017(1):98—102. (in Chinese)

[10] 江华, 张晋勋, 江玉生, 等. 新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1):159—164.
JIANG Hua, ZHANG Jinxun, JIANG Yusheng, et al. Characteristics of existing station deformation induced by the approaching construction of a new underlying shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1):159—164. (in Chinese)

[11] SEVERI M, VANNUCCHI G. Effects of the expected

settlements following excavation of a proposed underground subway tunnel in the historic centre of florence [J]. *Astrophysical Journal Supplement*, 2002, 173(2): 494—502.

[12] 王梦恕. 北京地铁浅埋暗挖施工法[J]. *岩石力学与工程学报*, 1989, 8(1): 52—62.

WANG Mengshu. The boring excavation method and construction in Beijing metro [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1989, 8(1): 52—62.(in Chinese)

[13] 牛晓凯, 张顶立, 刘美麟, 等. 新建地铁车站长距离密贴下穿既有隧道方案比选及实测变形分析[J]. *土木工程学报*, 2015(增 1): 270—274.

NIU Xiaokai, ZHANG Dingli, LIU Meilin, et al. Scheme comparison and measurement analysis of new-build subway station parallel under through existing tunnel in tight contact [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 270—274. (in Chinese)

[14] 张成平, 张顶立, 吴介普, 等. 暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(1): 69—73.

ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WU Jiepu, et al. Construction control of a newly-built subway station undercrossing the existing subway tunnel [J]. *China Railway Science*, 2009, 30(1): 69—73.(in Chinese)

[15] 陆新鑫, 徐秀丽, 李雪红, 等. 基于肯特指数法的桥梁施工安全风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(6): 165—171.

LU Xinxin, XU Xiuli, LI Xuehong, et al. Assessment of bridge construction safety risk based on kent index method [J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(6): 165—171. (in Chinese)

[16] 安永林. 结合邻近结构物变形控制的隧道施工风险评估研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.

AN Yonglin. Study on tunnel construction risk evaluation considering deformation standard of neighboring structures [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)

[17] 海占权. 城市浅埋暗挖隧道施工风险管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

HAI Zhanquan. Construction risk management research of the urban tunnel by shallow tunnel excavation method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)

[18] MALINOWSKA A A. Reliability of methods used for pipeline hazard evaluation in view of potential risk factors[J]. *Natural Hazards*, 2016, 83(1): 715—728.

[19] MOTAMEDZADEH M, MOHAMMADFAM I, HAMIDI Y. Health, safety and environment risk assessment in gas pipelines by indexing method: case of Kermanshah Sanandaj oil pipeline [J]. *Iran Occupational Health*, 2009, 6(3): 55—63.