

邻近桥桩暗挖地铁车站施工方案及桥桩 保护措施研究

李兆平¹, 朱元生²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中铁 19 局集团有限公司, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 北京地铁十号线呼家楼站邻近京广桥, 受桥桩位置制约, 车站主体结构采用分离结构型式, 原设计施工方案为 CRD 法, 由于车站主体结构沿走向邻近桥桩(距桥桩最近距离仅为 2.16 m), 施工风险大, 因此所选施工方案必须能够确保邻近桥桩的安全。通过工程类比和有限元数值分析, 选择对邻近桥桩保护最为有利的洞桩法(PBA)方案。根据邻近桥桩与地铁空间位置关系, 将邻近桥桩划分不同的风险等级, 采取相应的控制措施。在车站施工期间对桥桩变形和地表沉降进行跟踪监测。监测结果表明: 车站主体结构的施工方案合理, 对邻近桥桩的保护措施有效, 能够确保邻近桥桩和地铁车站施工的安全。

关键词: 隧道工程; 地铁车站; 施工方法; 邻近桥桩加固

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 3132 - 08

RESEARCH ON CONSTRUCTION METHOD OF METRO STATION ADJACENT TO BRIDGE PILES AND REINFORCEMENT MEASURES FOR BRIDGE PILES

LI Zhaoping¹, ZHU Yuansheng²

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., Liaoyang, Liaoning 111000, China)

Abstract: Hujialou metro station of Beijing metro No. 10 is designed to be adjacent to the Jingguang Bridge. Restricted by the bridge piles, the metro station structure is divided into two detached tunnels. In the primary design, the cross diaphragm(CRD) method is adopted. In view of the metro station structure adjacent to the Jingguang Bridge piles(the shortest distance between metro main structure and bridge piles is only 2.16 m) and the risk for metro station construction being great, the adopted metro station construction method should ensure the safety of adjacent bridge piles. According to similar engineering construction experience and finite element numerical analysis, the PBA(pile-beam-arc) construction method is adopted. The adjacent bridge pile risk grade is classified according to the bridge piles spatial location. The corresponding reinforcement measures are adopted according to bridge risk grade. The stratum subsidence and bridge pile displacement are measured during construction period. The monitoring result indicates that the PBA construction method for metro station is reasonable and the reinforcement measures for the adjacent bridge piles are effective.

Key words: tunneling engineering; metro station; construction method; reinforcement of adjacent bridge piles

收稿日期: 2007 - 11 - 14; **修回日期:** 2008 - 01 - 18

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8062016)

作者简介: 李兆平(1966 -), 男, 博士, 2000 年于北京交通大学获得博士学位, 现任教授, 主要从事地下结构设计以及地下工程施工的环境影响等方面的教学与研究工作。E-mail: Lizhaoping@263.net

1 引言

北京地铁线网大部分在城市中心区穿过, 这些地域已经建成各类高架桥、人行天桥等, 导致地铁站或区间隧道靠近桥梁基础布置。由于地铁施工引起的地层变形可能导致邻近桥梁基础发生沉降和承受附加应力, 如果桥梁基础的沉降或附加应力超过了一定的水平, 将可能使邻近桥梁出现损伤或使已经存在的损伤加剧, 影响桥梁的正常使用甚至出现安全问题, 因此邻近桥梁施工地铁具有极大风险。

北京地铁十号线呼家楼车站是一个典型的邻近桥梁布置的地铁车站。该站位于东三环京广桥两侧辅路下, 呈南北走向。受京广桥桥桩位置制约, 车站主体为两个分离的单洞形式, 每个分离的结构断面为单拱单跨双层结构, 断面标准宽度为 12.62 m, 高 15.72 m, 车站平面布置及主体结构断面型式分别见图 1, 2(图 2 中, 括号内数字表示车站结构在其他断面相应的尺寸, 因为车站结构沿纵向不是一个标准断面, 在其他断面上结构参数有变化)。

车站位于京广桥 19#~26#桥墩之间。京广桥跨朝阳北路, 主跨(21#~24#桥墩)为连续梁结构, 桥墩为钢筋混凝土墩柱和带预应力混凝土盖梁的预制墩柱, 承台尺寸 5.5 m×5.5 m, 支座为球型支座和盆式支座。桥面宽 28.0 m, 双向六车道, 设中央隔离带。基础均为桩基础, 桩型按端承摩擦桩考虑, 桩长为 20~29 m, 超过地铁结构底板 3.3~6.3 m, 桩径为

1.2 m, 4 根为一组。

车站主体结构与桥桩水平距离为 4.3~6.0 m, 车站北端横向设置的迂回风道距离桥桩结构的距离为 2.16~10.00 m。

近年来, 已经有学者就地铁施工对邻近桥梁影响问题进行了探讨, 但是目前关于邻近桥桩地铁施工对桥桩影响研究主要集中在对邻近桥桩影响预测及加固措施的选择等方面^[1~8]。作者认为, 地铁邻近桥梁施工问题是一个系统工程, 应从邻近桥桩地铁工程施工方案优化及邻近桥桩变形控制与加固两方面着手。选择的施工方案既能确保地铁施工安全, 又不对邻近桥梁的安全性构成威胁。控制与加固措施应根据桥桩与地铁结构的空间关系来确定, 将桥桩分成不同的风险等级, 对每个等级确定相应的加固措施。为此, 本文采取的研究思路如下:

(1) 施工前: 分析车站结构特点及其与邻近桥桩位置关系, 围绕邻近桥桩保护这个核心问题, 综合考虑工期、造价、安全等因素, 对车站施工方案进行研究。

(2) 施工过程中: 抓住邻近京广桥桩这个主要风险源, 根据不同的风险等级, 采取相应的加固保护对策, 并且强调在施工过程中对地层变形进行动态控制。

2 车站施工方案优化

2.1 原设计方案

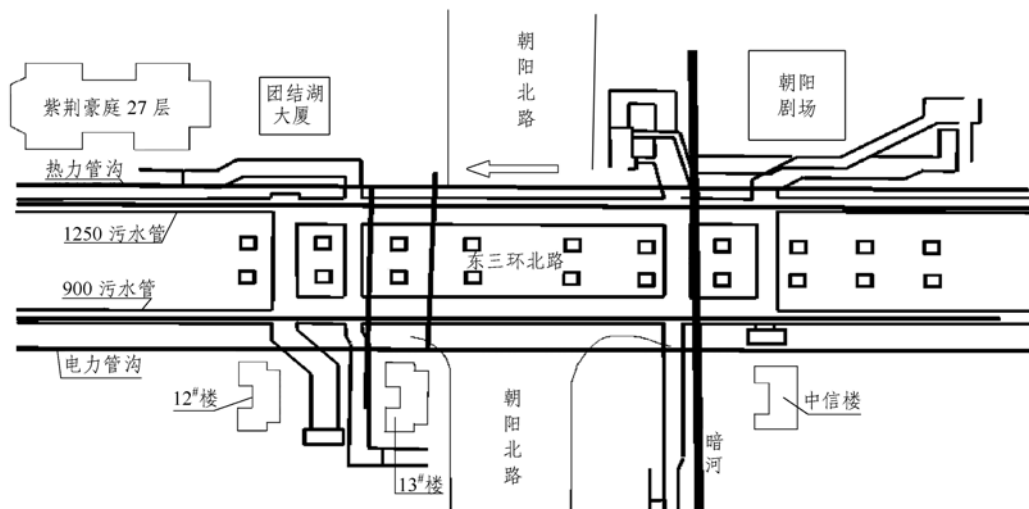


图 1 呼家楼车站平面布置
Fig.1 Plan of Hujialou metro station

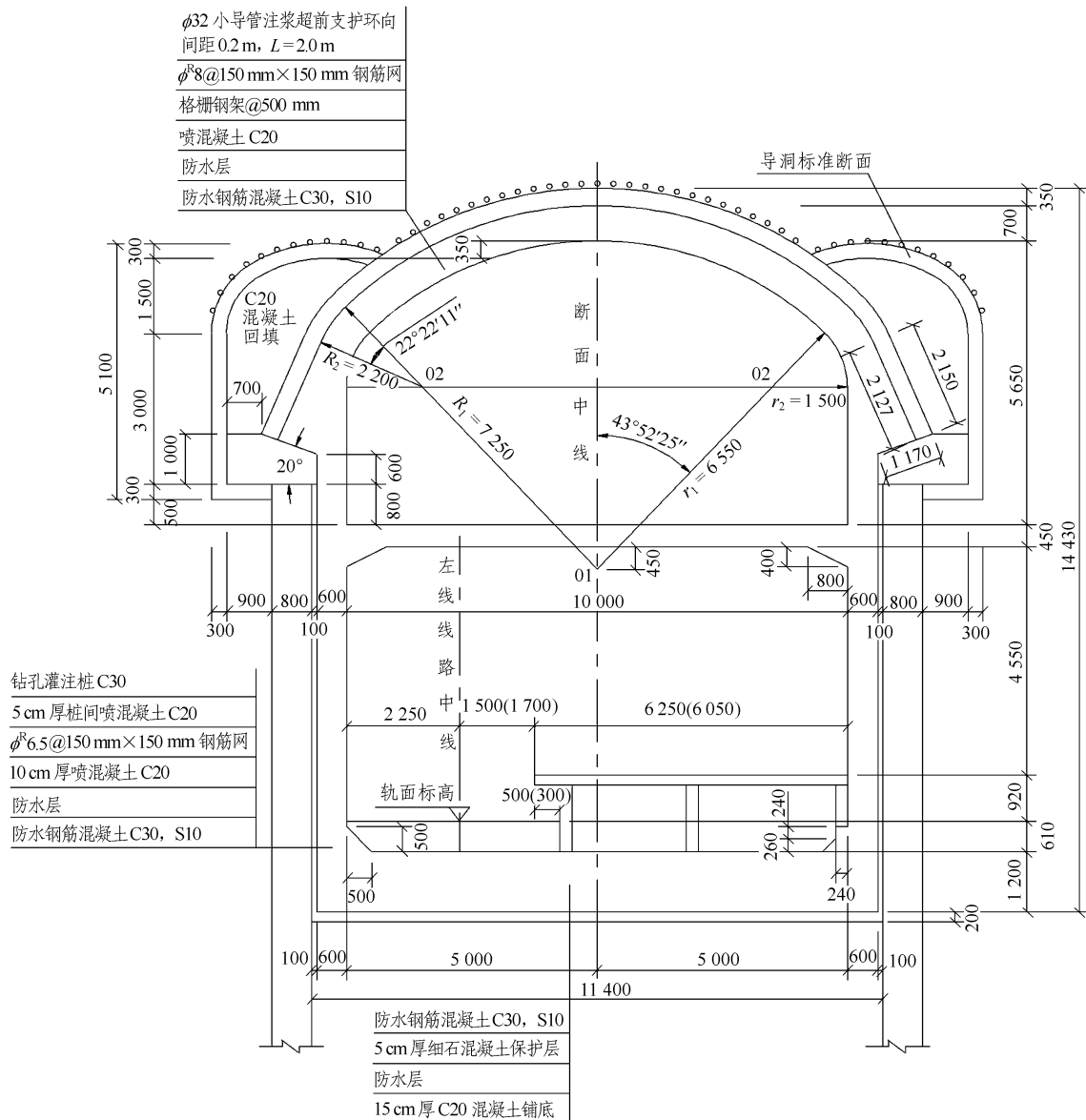


图 2 车站主体结构横断面图(单位: mm)

Fig.2 Cross section of station main structure(unit: mm)

车站主体结构初步设计的施工方案为 CRD 法, 即: 将车站断面分为 8 个小断面进行开挖, 并架设初期支护和临时支撑, 然后自下而上分段拆除临时支撑, 分段施作底板、站台层侧墙、中板、站厅层侧墙、顶拱。施工步骤详见图 3。

2.2 原设计方案存在的问题

(1) 车站主体采用高平直墙结构(主体断面: 12.62 m×15.72 m, 抬高段高 18.75 m)。侧压力大, 采用 CRD 法很难控制地层的侧向变形, 这种情况在拆除临时支撑形成二衬的过程中能更为严重。

(2) 车站主体为分离岛式车站, 主体结构与迂回风道、左右线行人联络通道及设备通道交叉, 交

叉口处受力转换复杂, 难以保证地层变形和桥桩变形在允许值范围内。

(3) 车站主体结构邻近桥桩, 是车站施工最大的风险源, 对地层侧向变形和竖向沉降控制标准高。

鉴于呼家楼车站的结构特点和邻近桥桩的环境特点, 因此需要对施工方案进行比选和优化。

2.3 车站施工方案优化

(1) CRD 法和洞桩法(PBA 法)施工方案的比选, 见表 1。

(2) 若采用洞桩法施工, 同时考虑整体顺作, 整体逆作, 站厅层和站台层分别顺作、整体逆作的 3 种方法, 并采用 FLAC^{3D} 软件对 CRD 法和 PBA 法

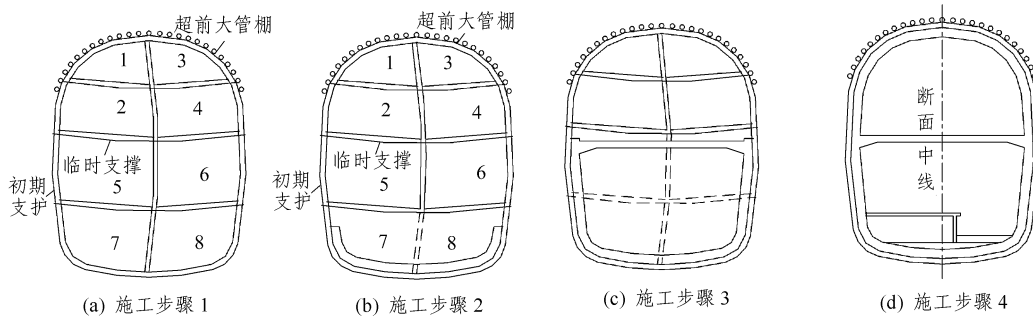


图 3 车站主体结构原设计的施工步骤

Fig.3 Primary construction method of metro main structure

表 1 呼家楼车站施工方案比较

Table 1 Comparison of construction methods of Hujialou metro station

施工方案	安全性	机械化	国内外现状	初期支护拆除比	地表沉降	力学特点	施工组织	优点	不足
CRD	安全度高,但有水地层施工较困难	不能使用大型机械	有成功建设地铁车站的工程实例	1.00(废弃工程多)	较大	受力体系多次转化	多工作面施工时容易相互干扰	技术上成熟,有大量的成功案例	施工分块较多,工序复杂,不利于大型机械作业;临时支护多,拆除量大,废弃工程量大;对地面沉降控制不利
PBA	施工过程安全度高,地下水较易整治	便于大型机械使用	国内北京地铁东单站、王府井站成功应用	1.30~1.35(废弃工程少)	较小(约为CRD法的55%)	受力转化少,受力明确	可以多工作面施工,便于施工组织	能够有效控制地层侧向变形,因此对邻近桥桩的保护十分有利	洞内进行钻孔灌注桩施工难度大、作业条件差;车站拱部开挖支护难度大,拱部开挖过程中的沉降控制难度大

的 3 种不同的施工顺序,选取标准断面进行了三维数值模拟分析,将不同施工方案所得的地表沉降值、桥桩水平位移以及 PBA 法不同施工顺序的拱部初期支护最大弯矩值分别列于表 2, 3。

表 2 不同施工方案的地表沉降和邻近桥桩变形

Table 2 Ground subsidence and adjacent bridge piles deformation for different construction methods

施工方案	施工顺序	地表沉降值/mm	桥桩水平变形/mm	桥桩最大弯矩值/(kN·m)
CRD		78.00	13.20	1 946.00
	整体顺作	70.30	11.86	1 084.00
PBA	整体逆作	64.70	9.57	918.90
	站厅层和站台层分别顺作、整体逆作	56.70	8.90	651.60

表 3 PBA 法不同施工顺序的拱部初期支护最大弯矩值

Table 3 The maximal bend moment of arch primary support by PBA method with different construction steps

施工顺序	拱部最大弯矩值/(kN·m)
整体顺作	206.39
整体逆作	170.33
站厅层和站台层分别顺作、整体逆作	159.87

由表 1~3 可知:

(1) 从地层沉降控制以及对邻近桥桩的保护

来看, PBA 法比 CRD 法具有优越性。本车站的设计单位也认为: 由于呼家楼车站位于东三环路面下, 紧邻京广立交桥, 周边环境复杂, 采用分离式结构设计, PBA 法施工, 能有效保护临近建(构)筑物^[9]。

(2) 在 PBA 法三种施工顺序中, 采用“站厅层和站台层分别顺作, 整体逆作”的施工方案更有利于控制邻近桥桩变形。

通过对 CRD 和 PBA 法引起的地表沉降、邻近桥桩变形和初期支护结构强度的比较, 并综合考虑造价、工期等因素, 最后确定本站主体结构采用“站厅层和站台层分别顺作、整体逆作”的洞桩法施工方案, 即 PBA 法具体施工步骤如下:

(1) 第 1 步: 施作小导洞和导洞内钻孔桩及桩顶冠梁, 在导洞内施作主体拱部格栅钢架拱脚;

(2) 第 2 步: 立模回填导洞内拱架及其背后空隙;

(3) 第 3 步: 拱部超前小导管注浆加固地层, 开挖上部土体至第一开挖面, 架设拱部格栅钢架, 施作初期支护;

(4) 第 4 步: 待拱脚回填混凝土和主拱初期支护达到设计强度后拆除临时竖撑, 向下开挖土体至中板下一定距离, 拆除永久结构断面范围内导洞格

栅钢架;

(5) 第 5 步: 施作中板和边墙, 站厅层封闭成环, 预留边墙钢筋;

(6) 第 6 步: 继续开挖土体到基底标高, 桩间喷混凝土, 施作底板垫层;

(7) 第 7 步: 铺设底板防水层及细石混凝土保护层, 浇筑底板及部分边墙;

(8) 第 8 步: 待底板达到一定强度, 跳拆钢支撑, 施作侧墙, 施做车站内部结构, 车站土建施工完成。

这也是国内首次在地铁车站施工中采用的一种洞桩法方案, 施工步骤见图 4。

3 施工中控制地层沉降的措施

3.1 地表沉降控制标准的合理确定

复杂环境下进行地铁车站的暗挖施工, 对周边环境的保护本质上体现在对地层变形的控制上。传统的地层沉降控制标准为 30 mm, 如果要达到上述标准, 就需要增加许多辅助的技术手段, 直接影响到工程造价, 在多数情况下, 这个标准应该放宽。通过对众多工程实例的分析, 王梦恕等^[10, 11]建议暗挖地铁车站的地表沉降控制值为 80 mm 之内。本工程施工中, 经过对施工方案的有限元计算, 并经专

家讨论认为, 地表最大沉降控制在 60 mm 之内较为经济合理。

3.2 施工过程中动态控制地层沉降

(1) 首先明确产生地层沉降的主要工序。根据数值模拟计算结果, 本工程所有工序中, 小导洞施工引起的地层沉降约占 30%, 拱部开挖支护(大弧扣拱)引起的地层沉降约占 50%, 扣拱结束以后的工序引起的地层沉降约占 20%, 因此关键是要控制好大弧扣拱(拱部开挖支护)引起的地层沉降。

(2) 根据 PBA 法特点, 将车站施工过程划分为小导洞开挖、拱部开挖支护、站厅层施工、站台层施工等 4 个主要阶段, 并确定各主要施工阶段的地表沉降控制目标(见表 4)。

(3) 如果监测得出的某一阶段施工造成的地表沉降没有超出本阶段的限定值, 则进行下个阶段的施工。

(4) 如果某一阶段施工造成的地表沉降超过限定值, 则重新确定后续的几个施工阶段的地表沉降限定值。

(5) 根据重新确定的地表沉降控制值, 对后续的施工方案进行调整, 从而确保总沉降量不超过控制值。

3.3 抓住影响地层沉降和桥桩变形的关键工序, 进行施工过程的控制

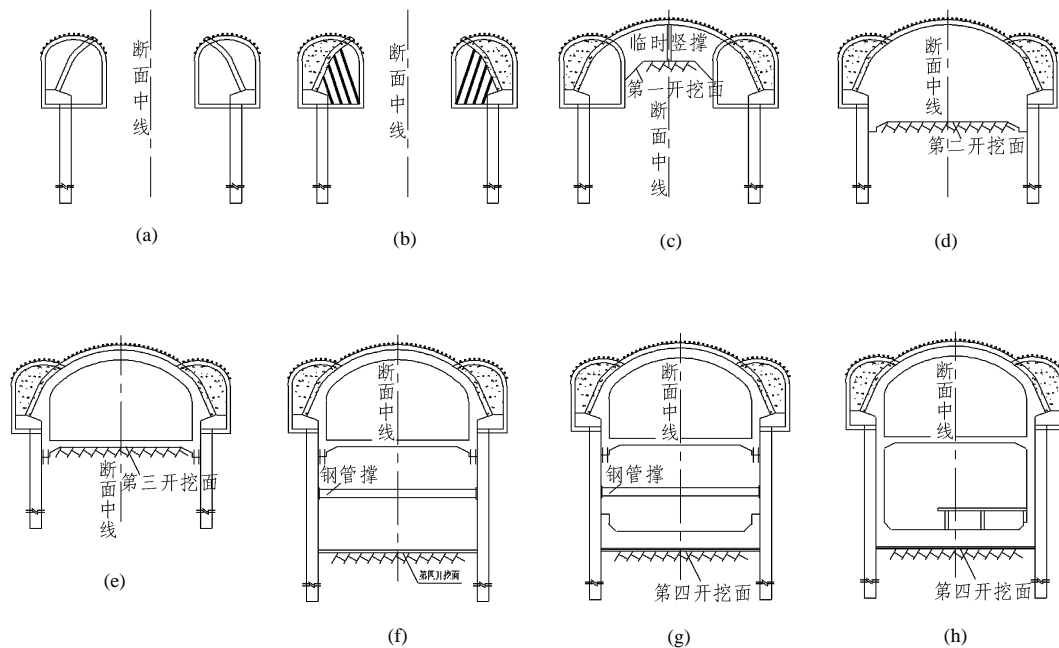


图 4 PBA 法施工步骤
Fig.4 Construction steps of PBA method

表 4 PBA 法各主要施工阶段的地表沉降控制目标值
Table 4 Objective values of ground subsidence for main construction phase of PBA method

主要施工阶段	地表沉降控制目标值/mm
小导洞开挖结束	20
扣拱结束	50
站厅层施工结束	55
站台层施工结束	60

根据本工程的施工经验, 认为应从以下几个方面对地层沉降进行过程控制:

(1) 车站主体初期支护结构分导洞内拱脚施工和主体拱顶大弧施工两阶段进行, 应采取有效措施保证两次施工的连接精度。

(2) 由于主洞与设备通道、人行通道以及风道存在交叉口, 交叉口处结构复杂, 应确保该处结构之间的顺利衔接。

(3) 由于扣拱之前要破除小导洞格栅, 应注意小导洞的破除对地层的扰动, 在破除之前, 沿纵向在破除位置提前注浆加固地层。

(4) 大弧扣拱可采用全断面台阶法、CD 法、CRD 法施工, 具体采用何种方法应结合地质条件、断面大小、扣拱位置来确定。根据呼家楼车站施工经验, 设备通道和人行通道等断面可以采取台阶法; 主洞与风道交叉部位的 5 m 范围内采取 CRD 法施工; 离开交叉口部位 5 m 后改用台阶法施工。

(5) 应采取有效措施确保大弧扣拱初期支护背后的空隙被填满, 这是控制地层沉降最关键的环节。

4 对邻近桥桩的控制与防护措施

对于邻近桥桩处理遵循“确定控制指标和控制标准→确定风险等级→确定工程处理措施→工程处理措施的效果监测”的处理程序。

4.1 邻近桥桩变形控制指标与控制标准

本工程采用顺桥向两相邻桥墩差异沉降、横桥向两相邻桥墩差异沉降、桥墩绝对沉降作为控制指标。

具体控制标准如下: 顺桥向两相邻桥墩之间的差异沉降不得超过 5 mm; 横桥向同一盖梁下相邻两桥墩之间的差异沉降不得超过 5 mm; 桥墩绝对沉降不超过 12 mm。

4.2 邻近桥桩风险等级划分

风险等级的确定及所对应的施工对策应能够将施工风险限定在一个合理、可接受的水平, 即在经济投入、技术方案、工期、劳动强度和综合效益方面达到最佳^[12]。根据北京地铁十号线关于邻近桥桩保护专家讨论会的意见, 结合本站邻近桥桩的分布以及施工方法特点, 作者认为, 应根据桥桩与地铁结构的空问关系, 将桥桩分成不同的防护等级, 对每个等级确定相应的加固措施。本文将本站邻近桥桩风险等级分为 A, B, C 三个等级, 分级依据和防护措施如下:

(1) A 级: 地铁结构和桥桩净距小于 3 m, 且桩长的 2/3 以上在地铁工程开挖影响破裂面范围以内。防护原则: 先加固, 后施工。

(2) B 级: 地铁结构和桥桩净距稍大于 3 m, 且桩长的 1/3~2/3 进入地铁工程开挖影响破裂面范围以内。防护原则: 边施工、边加固。

(3) C 级: 地铁结构和桥桩净距大于 3 m, 且不足 1/3 桩长在地铁工程开挖影响破裂面范围以内。防护原则: 先施工, 后加固, 并根据监测情况, 确定是否需要采取加固措施。

根据上述分级方法, 本站列入 A 级防护的有京广桥 19#~21#西侧桥墩, 共 5 个桥墩。列入 B 级防护的有: 京广桥 20#东侧桥墩、22#~26#共 11 个桥墩。桥墩编号详见图 5。

4.3 邻近桥桩加固措施

邻近桥桩加固措施以洞内对桥桩周围地层进行注浆加固为主。

(1) 在小导洞开挖过程中, 当开挖到桥桩位置附近, 在邻近桥桩一侧设置超前小导管, 从洞内注浆加固桥桩周围地层, 减小地层侧向变形;

(2) 在通过邻近桥桩地段, 减小隧道初期支护格栅钢架的纵向间距, 加设临时仰拱, 及时封闭;

(3) 施工中加强对施工工艺的控制, 采取“小分块、短进尺、强支护、快封闭”的手段, 减少对地层的扰动;

(4) 加强洞内和地面桥墩变形的监控量测;

(5) 洞内钻孔桩加密: 对邻近 A 级桥桩的小导洞内钻孔桩由 $\phi 800 \text{ mm} @ 1 200 \text{ mm}$ 加密为 $\phi 800 \text{ mm} @ 1 000 \text{ mm}$ 。

4.4 对邻近桥桩变形的监测

对车站范围内受施工影响的 16 根桥桩进行沉降监测。截止到 2006 年 10 月 22 日, 各监测点的最终沉降见表 5。桥桩最大沉降为 -11.63 mm, 最大差异沉降为 4.36 mm, 均发生在 A 级桥桩。图 6 为

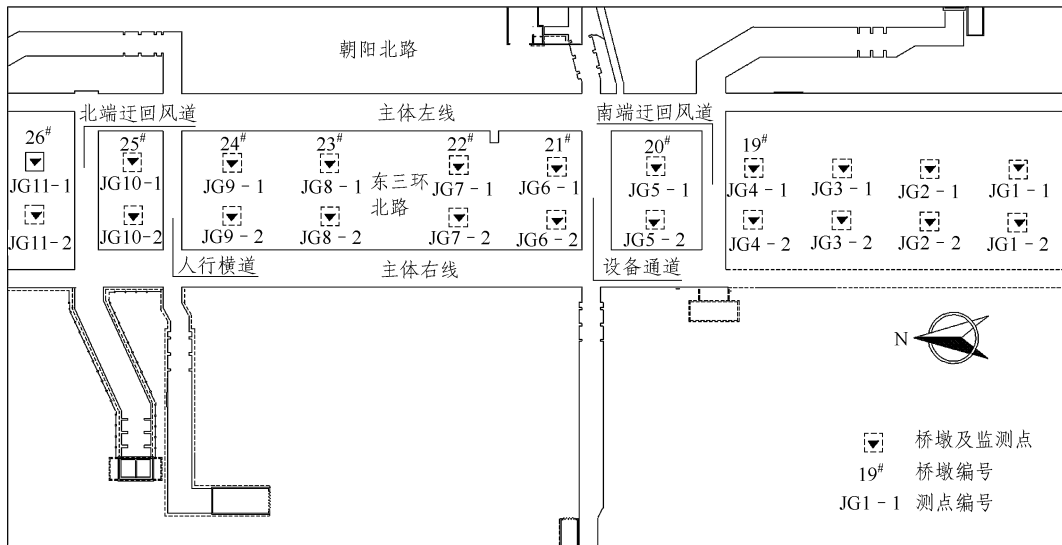


图5 邻近桥墩沉降监测点布置

Fig.5 Layout of monitoring points for adjacent piles subsidence

表5 邻近桥桩最终沉降

Table 5 Ultimate subsidence of adjacent bridge piles

测点编号	最终沉降/mm	测点编号	最终沉降/mm
JG4-1	-5.16	JG4-2	-5.17
JG5-1	-7.41	JG5-2	-5.33
JG6-1	-8.15	JG6-2	-6.96
JG7-1	-8.38	JG7-2	-6.48
JG8-1	-10.23	JG8-2	-9.24
JG9-1	-11.18	JG9-2	-9.43
JG10-1	-11.63	JG10-2	-9.75
JG11-1	-10.86	JG11-2	-10.52

车站北端迂回风道与人行横道之间的两桥桩的沉降与时间关系曲线。监测结果表明：邻近桥桩的各项变形指标都在控制范围内，采取的施工方案对邻近桥桩起到了很好的保护作用。

5 结论

(1) 根据呼家楼车站邻近桥桩的特点和车站结构特点，对适合车站施工的 CRD 法和洞桩法两种方法从施工安全性、造价、施工效率、施工组织等诸多方面进行了详细的探讨，确定本站采用暗挖洞桩法施工最为可靠。

(2) 根据对车站施工方案的综合分析，提出了“站厅层和站台层分别顺作、整体逆作”的 PBA 法，并成功应用到呼家楼车站施工中。根据工法特点，将车站施工过程划分为小导洞开挖、初期支护背后回填和大弧扣拱、站厅层施工、站台层施工等 4 个主要阶段，采取了在施工过程中动态控制地层沉降和桥桩变形的的方法，使地表沉降和桥桩变形得到了有效控制。

(3) 提出了地铁工程邻近桥桩风险等级划分方法，根据风险等级，制定了对邻近桥桩的控制与保护对策。在制定加固措施时，立足于洞内加固，通过采取“施工方案的优化、开挖步骤与开挖方法的调整、洞内注浆加固、注重施工过程的控制”等综合措施，保证了京广桥的安全。

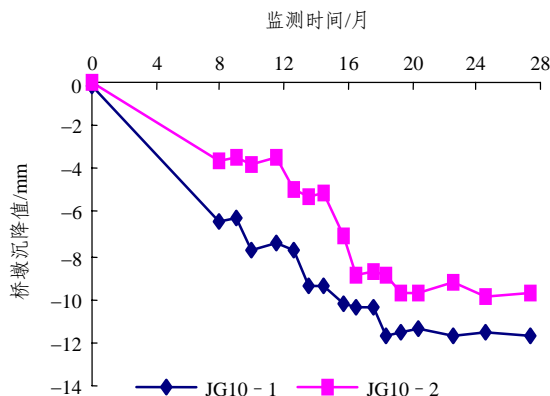


图6 车站北端迂回风道与人行横道之间的桥桩的沉降与时间关系曲线

Fig.6 Relation curves of time and subsidence of bridge pile between round about way in the north of the station and pedestrian passageway

参考文献(References):

- [1] 何海健, 刘维宁, 项彦勇, 等. 地铁施工对邻近桥桩影响的研究现状与探讨[J]. 都市轨道交通, 2006, 19(5): 85 - 88.(HE Haijian, LIU Weining, XIANG Yanyong, et al. Summary of current studies and discussions on the effects of metro construction on adjacent bridge piles[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, 19(5): 85 - 88.(in Chinese))
- [2] 何海健, 项彦勇, 刘维宁, 等. 地铁车站隧道群施工对邻近桥桩影响的数值分析[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(4): 54 - 59.(HE Haijian, XIANG Yanyong, LIU Weining, et al. Numerical analysis of the multiple tunneling effects at a metro station construction on adjacent bridge piles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006, 30(4): 54 - 59.(in Chinese))
- [3] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184 - 190.(LI Qiang, WANG Mingnian, LI Decai, et al. Effects of subsurface construction of metro station tunnel on existing pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 184 - 190.(in Chinese))
- [4] 丁恒. 地铁车站暗挖施工对邻近桥基的影响分析[J]. 隧道建设, 2006, 26(2): 4 - 8.(DING Heng. Analysis of effect on adjacent bridge foundations imposed by construction of metro station by mining method[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(2): 4 - 8.(in Chinese))
- [5] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 城市地铁施工邻近短桩桥基加固效果研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 99 - 103.(WU Bo, LIU Weining, SUO Xiaoming, et al. A study on the reinforcement of a short-piled overpass foundation in the vicinity of metro construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(7): 99 - 103.(in Chinese))
- [6] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 城市地铁施工对邻近长桩桥基的影响[J]. 都市轨道交通, 2006, 19(4): 50 - 52.(WU Bo, LIU Weining, SUO Xiaoming, et al. Effect of metro station construction on the adjacent long pile foundation[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, 19(4): 50 - 52.(in Chinese))
- [7] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 地铁施工方案对邻近桥基的沉降影响优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 434 - 437.(WU Bo, LIU Weining, SUO Xiaoming, et al. Optimal analysis of settlement effect on adjacent pile foundation induced by metro construction schemes[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 434 - 437.(in Chinese))
- [8] 吴波, 刘维宁, 索晓明, 等. 地铁施工邻近桥基加固效果三维数值分析[J]. 铁道工程学报, 2005, (5): 48 - 52.(WU Bo, LIU Weining, SUO Xiaoming, et al. Research on the reinforcing effect of adjacent short pile bridge foundation in metro station construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, (5): 48 - 52.(in Chinese))
- [9] 张美琴. 分离岛式暗挖车站的洞桩法结构设计[J]. 隧道建设, 2006, 26(4): 32 - 36.(ZHANG Meiqin. Structural design of separated island metro station constructed by means of pile-beam-arch mining method[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(4): 32 - 36.(in Chinese))
- [10] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004: 683 - 708.(WANG Mengshu. Technology of shallow tunnel excavation[M]. Hefui: Anhui Education Press, 2004: 683 - 708.(in Chinese))
- [11] 姚宣德, 王梦恕. 地下浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 030 - 2 035.(YAO Xuande, WANG Mengshu. Statistic analysis of guideposts for ground settlement induced by shallow tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 030 - 2 035.(in Chinese))
- [12] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13 - 20.(HUANG Hongwei. State of the art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13 - 20.(in Chinese))