

# 注浆技术和树根桩法加固桥梁桩基

罗桂东

(北京市市政工程管理处,北京 100045)

**摘要:**以北京地铁五号线隧道穿越玉蜓立交桥桥区处需对桥梁桩基进行加固处理的工程为例,分析了桩基加固的原因,介绍了注浆技术和树根桩法加固桩基的原理和优点以及应用注浆技术和树根桩法对桩基进行的加固设计。实践证明,采用上述两种方法加固桩基取得了很好的成效。

**关键词:**注浆技术;树根桩法;加固;桥梁桩基;土体

**中图分类号:**U443.17 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)02-0127-05

## 0 前言

2001年7月13日,北京申办2008年第29届奥运会取得成功,为北京快速轨道交通等城市基础设施工程建设提供了十分宝贵而又难得的机遇。正在兴建的地铁五号线、四号线、十号线及奥运支线,即将兴建的九号线一期工程及首都机场线,这些项目均将在2008年奥运会召开前建成通车。以地铁为主要干线的快速轨道交通运输系统,因其快速、准时、安全、运载能力大以及对环境影响小的特点而成为世界许多大、中城市发展公共交通的必然选择。北京地铁线路多位于桥区,需穿越桥梁,以地铁五号线线路南城段为例,穿越的桥梁有:刘家窑立交桥、玉蜓立交桥、南护城河跨河桥、109中学天桥、崇文

中医院天桥以及法华寺天桥等。地铁隧道开挖施工势必引起的地表沉降与变形对既有桥梁的正常使用将产生一定影响,往往会引起桩基的沉降与变形,导致桩基承载力降低,造成桥梁上部结构变形,当变形过大时将危及桥梁结构的使用功能。为了确保桥梁正常使用,必须控制因地铁隧道施工引起的桥梁桩基的沉降与变形,因此,如何采取有效、合理的技术措施对桥梁桩基进行加固,阻止桥梁地基沉降与变形,确保桥梁正常使用,这是我们工程技术人员必须解决的课题。注浆技术和树根桩法的应用是解决这一课题的有效途径。

## 1 工程概况

### 1.1 概述

地铁五号线是北京市轨道交通线网规划中的一条重要南北向干线,线路南起丰台区宋家庄,北至昌平区太平庄北站,线路全长27.6 km。

收稿日期:2005-11-22

作者简介:罗桂东(1972-),男,江西人,工程师,从事旧桥维修与加固工程设计工作。

管桩桩径的大小选用合适的锤重,Φ40的管桩通常采用9 t锤,Φ60的管桩通常采用15 t锤。动力打桩时的重点是控制好贯入度,既要使桩基到达设计承载力,又要避免桩基打到岩面上后出现桩身倾斜、断桩或桩头破损等情况。贯入度可采用Hiley(海利)打桩公式估算:

$$s = \frac{\gamma E}{Q_{sk}} \cdot \frac{W + Pe^2}{W + P} - \frac{c}{2}$$

若无确定经验,应通过试打,结合PDA打桩分析仪等进行承载力测定后确定。管桩施工后的检测包括:长度、垂直度、完整性等。

若采用管桩结合注浆或高压旋喷的形式时,还涉及注浆和旋喷的施工。浆液通常采用425#普通硅酸盐水泥,水灰比1.0。浆液可根据需要添加水

玻璃,以加快凝固避免顺裂隙流失,也可采用间歇多次注浆的方法解决流失问题。注浆工艺可采用袖阀管法进行渗透或劈裂注浆。高压旋喷的压力要求大于20 MPa,旋喷桩有效直径约为0.5 m。加固土体通常在28 d后进行钻孔取芯检验,检验的主要内容还包括:整体性和均匀性、有效直径、垂直度、强度、固结体的溶蚀和耐久性等等。

## 4 结语

岩溶地区桥梁桩基设计难度大、施工风险高,预应力管桩基础在一定条件下是不错的方案,近年来在不少工程中有应用,但理论与经验还不是很成熟,希望本文的内容能对设计与施工有所帮助。

地铁隧道线路遇玉蜓立交桥桥区段分叉为左线和右线穿越玉蜓立交桥 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 匝道桥和 3<sup>#</sup> 通道桥(图 1), 地铁隧道与桥梁基础距离较近, 约为 -0.06~2.78 m 之间(隧道侵入桥基为负)。为了确保桥梁基础稳定及土体密实, 将地铁隧道施工对桥梁基础的扰动减少到最低程度, 最大限度地防止由于隧道施工对桥梁造成不利影响。根据北京地铁新线工程桥桩加固方案专家论证会议精神, 需对上述桥梁基础进行加固, 限于篇幅, 本文仅对上述 2<sup>#</sup> 匝道桥桩基加固工程的设计情况作详细阐述。

地铁隧道右线从 2<sup>#</sup> 匝道桥 35<sup>#</sup> 和 36<sup>#</sup> 桥桩之间穿越(图 1), 隧道里程桩号为 K3+680, 2<sup>#</sup> 匝道桥上部结构为现浇混凝土连续梁结构, 桥梁基础为混凝土灌注桩, 桩径为  $\Phi 1000$  mm, 隧道结构为单洞“马蹄”形结构, 桥桩与隧道之间的水平净距为 2.5 m 和 2.78 m。

## 1.2 地质情况

加固范围内地层自上而下依次为粉土填土①层, 厚度 6.3 m; 粉土③层, 厚度 3.8 m; 粉细砂④层, 厚度 6.2 m; 粉质粘土⑥层, 厚度 2.3 m; 粘土⑦层, 厚度 1.2 m; 粘土⑧层, 厚度 1.3 m; 卵石圆砾⑨层, 厚度 1.4 m; 粉质粘土⑩层, 厚度 5.7 m。本次加固范围内, 按照地铁隧道无水施工的要求, 隧道施工方已采用辐射井降水技术将地下水排除, 因此, 不用考虑地下水对加固工程的影响。

## 1.3 工程实施的难点

任何工程设计方案的选定必须考虑方案的可实施性。该工程施工现场场地复杂, 地表以下有 6.3

m 厚杂填土, 并有多条管线从桥区穿过, 桥下净空约为 3 m, 作业空间狭小, 施工机械要在桥下作业, 桥桩和隧道结构之间间距较近。加固设计方案的选定应考虑上述因素对方案可实施性的影响。

## 2 桩基加固的原因

### 2.1 隧道开挖引起的地层位移造成桩基的沉降与变形

地球表层土体是亿万年地质作用的产物, 它们处于应力平衡状态。在地表面以下开挖无论采取何种方式(如浅埋暗挖或盾构方式)开挖都要取走部分土体, 都会扰动土体, 使之失去原有平衡, 于是, 土体势必产生沉降与变形, 国内外大量的实践和理论研究都证明了这一点。文献[1]显示, 因地下开挖引起的地面塌陷已在国内 23 个省区发现 800 多处, 塌陷坑超过 3 万个, 每年经济损失超过 10 亿元。针对地面沉降问题, 刘宝琛等应用随机介质理论, 研究了近地表开挖引起的地表移动和变形问题; 杨天鸿等对广州地铁二号线隧道施工引起海珠广场地表沉降事故进行了数值模拟分析, 再现了土体沉降破坏的全过程, 阐明了沉陷事故的原因; 钱源研究了广州地铁客村联络线岔口浅埋暗挖法隧道工程地面沉降原因, 认为土体的开挖是造成地表沉降的主要原因之一。土体发生沉降与变形必然产生许多与岩土工程有关的问题, 例如与本文有密切关系的灌注桩桩基承载力问题。

灌注桩桩基在竖向荷载作用下, 其单桩轴向承载力与桩径、桩的强度、入土深度(桩长)以及桩基周围土体物理力学指标( $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$ )有关, 对于既有桩, 桩

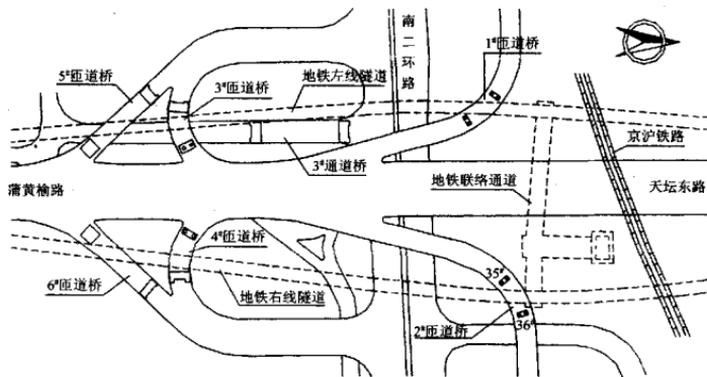


图 1 地铁 5<sup>#</sup> 线隧道穿越玉蜓立交桥桥区平面图

径、桩强度与桩长已是定值,因此,桩的承载力关键取决于桩基周围土体的工作性能。当桩基周围土体发生沉降和变形时势必导致桩基发生沉降与变形。张汎等<sup>[2]</sup>采用大型商业软件3D-8,结合北京地铁五号线下穿某桥梁的实际问题(图2),进行了三维仿真分析,研究了地铁隧道施工对桥梁桩基的影响,其结论如下:隧道开挖后不仅使桥桩产生水平位移,而且产生垂直位移,当桥桩的差异沉降过大时会导致桥梁上部结构产生附加应力,从而危及桥梁正常使用。隧道开挖引起的地层位移是影响桩基变形的最主要因素,因此,采用有效、合理的技术措施控制地层变形,对桩基进行加固,确保桥梁正常使用,是一项非常有必要的工作。

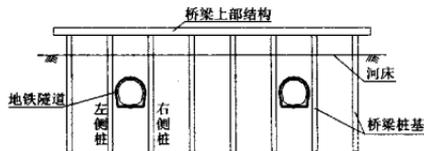


图2 分析地铁隧道施工对桥梁桩基产生不利影响简图

## 2.2 施工降水引起的地表沉降造成桩基沉降和变形

为了满足地铁隧道无水施工要求,隧道施工方采用了辐射井降水技术在玉蜓桥区进行施工降水,施工降水势必引起地层失水固结,同时,在降水过程中少量土体随水流失,从而导致桩基周围土体地层发生位移,引起地表沉降,影响桩基正常承载力的发挥,因此,有必要采取合理的技术措施改善桩基周围土体的工作性能,保证桩基的正常承载力,确保桥梁正常使用。

## 3 注浆技术和树根桩法加固桩基的原理与优点

### 3.1 原理

#### 3.1.1 注浆技术

注浆技术(亦称灌浆技术),是指利用液压、气压或电化学原理,通过注浆管把浆液均匀地注入地层中,浆液以填充、渗透和挤密的方式,将土颗粒或岩石裂隙中的水分和空气排除后占据其位置,经一定时间后,浆液将原来松散的土粒或裂隙胶结成一个整体,形成一个结构新、强度大、防水性能高和化学稳定性良好的“结石体”。注浆的实质在于胶结、增强与加固。注浆使松散、被扰动的低品质的土体材质变成高品质的材质,即改变土体的 $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$ 值。

对桩侧进行压力注浆即要解决因地铁隧道施工及降水施工引起的桩周地层的扰动、松散问题,改善桩周土体的工作性能,使土体固结、稳定,提高其抗压、抗剪的能力,进而保证桩基承载力正常发挥,达到加固桩基的目的。

#### 3.1.2 树根桩法

树根桩(亦称微型桩),它是就地灌注的小直径钢筋混凝土桩,直径为 $\Phi 75 \sim 300$  mm,在20世纪30年代由意大利的F. Lizzi首创,小直径灌注桩可以竖向、斜向设置,网状布置如树根状,故称为树根桩。在该工程中的加固原理为:利用树根桩、树根桩与树根桩之间的土体以及树根桩桩顶的联系梁共同形成的隔离墙将既有灌注桩桩基周围的土体与隧道施工影响区域进行隔离,减少桩基周围的土体因隧道施工而扰动的程度,控制桩基周围土体的位移和变形,保证桩周土体稳定,达到加固桩基的目的。隔离墙主要承受地铁隧道施工引起的侧向土压力和地基差异变形。

#### 3.2 优点:

注浆施工方法和树根桩的压浆成桩施工工艺具有如下共同优点:

- (1) 所需施工场地较小,适合于桥下狭小空间施工,一般平面尺寸为 $0.6 \sim 1.8$  m<sup>2</sup>,净空高度为 $2.1 \sim 2.7$  m即可施工。
- (2) 施工时噪音小,钻机操作时振动小,对既有桩基和地铁隧道结构产生不利影响小。
- (3) 所有的施工操作都可在地面上进行,因而比较方便。
- (4) 施工时因成孔小,因而对地层土体几乎不产生任何应力,对地层扰动范围小,对既有桩基和地铁隧道结构较为安全。
- (5) 布孔、布桩灵活,由于成孔小,在狭小的空间内,可以灵活布孔、布桩。
- (6) 地层适应性强,可在各种类型的土中注浆与制作树根桩。

## 4 加固方案的形成与加固设计

原设计采用旋喷法注浆加固桩基,由北京市市政工程管理处施工。在施工开始进行试钻过程中出现如下情况:试孔1钻至地面下17.5 m时,试孔2钻至地面下17.2 m时,试孔3钻至地面下17.4 m时,发生落钻,护壁水泥浆大量渗漏,压力表显示值为0,渗漏的水泥浆去向不明,钻杆也无法提出,钻具被埋,工程被迫终止。通过分析施工方反映的上

述情况,我们认为该桩基加固范围内地下存在空洞,后经业主委托北京城建勘察设计院有限责任公司测试中心现场勘察,得出如下结论:该桩基加固范围内地下的确存在空洞,钻探资料表明,钻孔所揭露的地下空洞最大厚度为0.7 m,空洞埋深大致分布在地面下16.3~17.5 m之间,位于粉质粘土砂质粉土层中,由于原桥桩基加固范围内地下发现空洞,采用旋喷注浆加固技术无法成孔,原设计无法实施。针对桩基加固范围内地下存在空洞的现状情况,通过方案比选,考虑到注浆技术和树根桩法具有前文中所述的优点,经过北京地铁新线工程桥桩加固方案专家组研究论证同意后确定新的加固方案,采用注浆技术和树根桩法对桩基进行加固处理。具体加固设计如下:

#### 4.1 填充注浆加固

对于发现空洞的区域和地层采用灌注石灰、粉煤灰浆的方法对空洞进行填充并密实相关土体。石灰和粉煤灰配合比采用1:4(重量比),为防止浆液流失,注浆施工时要求采用先外圈后内部的施工方法进行。注浆孔间距顺桥方向为1.2 m,垂直桥方向为1.04 m,竖向填充注浆范围为地面以下16.06~18.81 m之间(图3)。

#### 4.2 树根桩法加固

在桥梁桩基和地铁隧道之间设置单排树根桩,在树根桩桩顶设置钢筋混凝土联系梁。树根桩、桩顶联系梁以及树根桩及树根桩之间的土体共同形成的隔断墙将桥梁桩基和地铁隧道施工区域隔开,极

大地减少桩基周围土体因地铁隧道施工而产生的扰动程度,对桩基加固起最主要的作用。

树根桩桩径为 $\Phi 300$  mm,布置间距0.7 m,桩长22.82 m(图3);树根桩采用压浆工艺成桩,注浆材料与注浆参数如下:

(1)材料:树根桩灌注水泥浆采用P.052.5普通硅酸盐水泥,水灰比0.5:1,桩身填充骨料采用5~15 mm级配碎石,含泥量要求 $\leq 1\%$ ,桩身混凝土强度大于C20,桩顶联系梁采用C25普通混凝土浇筑,注浆管材选用 $\Phi 25$ 聚乙烯耐高压管。

(2)注浆参数:注浆泵的最大工作压力为4.5 MPa,注浆起始压力为1.0 MPa,注浆压力(入浆口)压力采用0.3~0.5 MPa。此外,为了增大树根桩侧摩阻力,要求在树根桩根部、中部1 m范围内采用二次高压注浆工艺。二次高压注浆可在前一次注浆后45~60 min之间进行,开启压力为2.0~4.0 MPa。同时,为了防止邻孔串浆,注浆顺序按跳孔间隔注浆方式进行。

#### 4.3 压密注浆加固

在树根桩和桥梁桩基之间设置注浆孔,对桩基靠近隧道一侧的土体进行压密注浆(图3)。填充注浆、树根桩以及压密注浆共同形成综合力量控制桩基周围地层位移,保护桩基。压密注浆材料与注浆参数如下:采用P.052.5普通硅酸盐水泥,水灰比为1:1,注浆压力2.0 MPa,注浆速度7~10 L/min。同树根桩压浆成桩注浆一样,为防止邻孔串浆,注浆顺序按跳孔间隔注浆方式进行,注浆管材

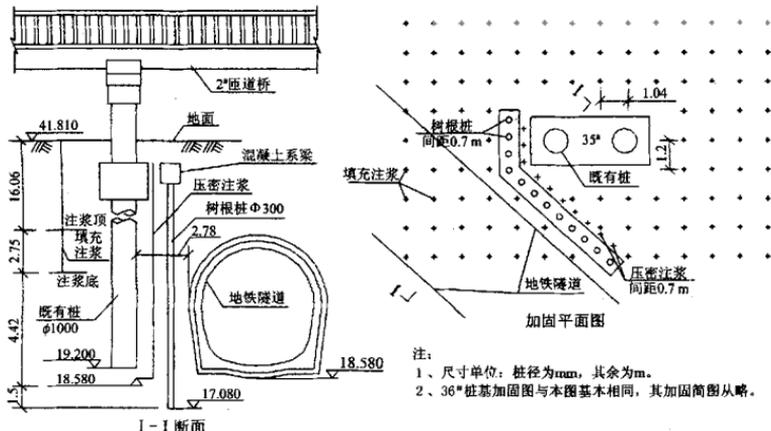


图3 2<sup>号</sup>匝道桥35#桩基加固简图

同样选用  $\Phi 25$  聚乙烯耐高压管。

#### 4.4 注浆量确定

在实施注浆过程中,注浆液不可能完全充满土的孔隙体积,而且容易串流到设计范围以外,因此,加固设计中浆液灌注量,按下述球形扩散理论公式<sup>[3]</sup>进行计算。

$$Q=K \times V \times n$$

式中:  $Q$ ——浆液用量

$V$ ——加固土的体积,加固土的体积与加固半径有关,加固半径是注浆管周围的土可以得到加固部分的半径,考虑到施工现场地基条件较为复杂,该工程加固半径按 0.8 m 考虑

$n$ ——加固土的平均孔隙率,根据该工程地基土实际情况,孔隙率取值按 20% 考虑

$K$ ——安全系数,该工程按 1 考虑

### 5 加固效果

该工程自 2004 年 7 月 25 日开始施工,至 2004 年 9 月 9 日施工结束,为了追踪加固效果,北京市九通衢桥梁检测所对加固的玉蜓立交桥 2<sup>#</sup> 匝道桥 35<sup>#</sup>、36<sup>#</sup> 桥桩进行的沉降值跟踪监测成果如表 1<sup>[5]</sup> 所示,表中结果显示,35<sup>#</sup>、36<sup>#</sup> 桥桩累计沉降值均未达到沉降控制值(5 mm),玉蜓立交桥为重要桥梁,根据北京地铁新线工程桥桩加固方案专家论证,其桥桩沉降控制值为 5 mm。

表 1 2<sup>#</sup> 匝道桥 35<sup>#</sup>、36<sup>#</sup> 桥桩沉降观测值表

名称	05年5月19日05年3月27日05年6月7日05年6月16日				累计沉降值	
	(第62次)	(第63次)	(第64次)	(第65次)		
35 <sup>#</sup> 桥桩	42.48353 m	42.47950 m	42.48108 m	42.47974 m	42.48065 m	3.38 mm
36 <sup>#</sup> 桥桩	42.48138 m	42.47700 m	42.47794 m	42.47701 m	42.47779 m	3.59 mm

实践证明,采用注浆技术和树根桩法加固桥梁桩基,稳固了桩基周围土体、控制了桩基沉降和变形,保证了桩基承载力的正常发挥,确保了桥梁正常使用,达到了预期目的。2<sup>#</sup> 匝道桥 35<sup>#</sup>、36<sup>#</sup> 桥桩加固工程共完成注浆量 460 m<sup>3</sup>。此外,由我设计公司设计的玉蜓立交桥其它匝道桥(1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>)及通道桥(3<sup>#</sup>)基础加固工程相继竣工完毕,沉降监测成果<sup>[5]</sup>显示,基础累计沉降值均在控制值以内,加固效果良好,共完成注浆量 1770 m<sup>3</sup>(含 2<sup>#</sup> 匝

道桥),基础加固工程结算总投资为 520 万元。玉蜓立交桥基础加固工程中,注浆完成量之大,在北京市桥梁基础加固工程中尚属首次,并为工程取得了较好的经济效益和社会效益。

### 6 结语

(1) 通过应用注浆技术和树根桩法对桥梁桩基进行加固设计并且成功实施表明:注浆技术和树根桩法对提高桥梁桩周土层的物理力学参数( $c$ 、 $\varphi$ 、 $E$ ),控制桩基周围地层沉降、变形,阻止桩基的沉降与变形,保证桥梁正常使用是非常有效的。

(2) 注浆施工方法和树根桩的压浆成桩施工工艺具有设备简单、操作简便、布孔灵活、地层适应性强以及周围土体扰动范围小等优点,可在低矮、狭小的空间施工,在其它施工方法施工条件不具备的情况下,采用注浆方式加固桩基是一种可行、有效的选择方案。

(3) 注浆技术是一种新的技术,由于注浆施工的浆液注入地层的不均匀性,给注浆效果与评估带来困难,到目前为止,还没有成熟的检测手段和方法来评估注浆加固施工质量,相关规范也无规定,需积累一定的检测资料,规范与之相应的检测手段和方法。

(4) 树根桩桩径较小,桩的长细比较大,抵抗侧向变形的能力较弱,采用单排树根桩组成的隔断墙,其受力优势以及桩与土共同工作的特性都还有待于进一步探讨。

#### 参考文献

- [1] 刘军. 北京地铁施工中若干环境岩土工程问题[J]. 市政技术, 2004, (增刊): 226-227.
- [2] 张凯等. 隧道施工引起地层位移对桥梁桩基的影响分析[J]. 市政技术, 2005, (增刊): 86-89.
- [3] 张永钧等. 既有建筑地基基础加固技术规范(第1版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 5
- [4] 凌治平. 基础工程(第1版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
- [5] 地铁五号线沿线桥梁通道(刘家窑—樱花西街)沉降监测成果表[R]. 北京: 北京市九通衢桥梁检测所, 2004-2005.

· 短讯 · 我国第一辆新型“三动力”混合客车日前在江苏省无锡市宣布研制成功。

这种车辆能够使用电、天然气和柴油三种能源作为动力,因而比一般车辆更省油、动力更强劲,行驶距离更长。