

# 浅埋暗挖隧道近距施工引起的上覆地铁结构 变形分析

王剑晨, 张顶立, 张成平, 房 倩, 苏 洁, 陈立平

(北京交通大学 城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 北京地铁 4 号线宣武门站分离式双洞隧道近距离垂直下穿既有 2 号线地铁车站。从整体变形和单个块体位移 2 个角度对既有车站实测位移进行分析, 得出浅埋暗挖隧道近接施工分步开挖过程中上覆地铁结构的变形规律: (1) 既有地下结构整体沉降符合 Peck 曲线变形规律, 而 2 个变形缝之间的块体结构位移则以转动为主, 呈现刚体运动特征; (2) Peck 公式拟合得到的地层损失率为 0.118%~0.187%, 其大小与既有地下结构是否存在、开挖断面大小无明显联系, 而与新建隧道支护体系架设时机及刚度密切相关; (3) 拟合得到沉降槽宽度系数为 2.44~3.87, 为相同埋深天然地层的 1.05~1.62 倍, 沉降槽宽度系数与支护体系刚度无关, 而与工前地层加固、既有地下结构的存在有关, 且其大小与开挖面积基本呈线性关系。研究结果可为类似工程提供借鉴及参考。

**关键词:** 隧道工程; 近接施工; 结构位移; Peck 公式

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2014)01-0090-08

## ANALYSIS OF STRUCTURAL DEFORMATION OF OVERLYING SUBWAY STATION INDUCED BY APPROACHING TUNNEL EXCAVATION IN SHALLOW DEPTH

WANG Jianchen, ZHANG Dingli, ZHANG Chengping, FANG Qian, SU Jie, CHEN Liping

(Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Separated two-track tunnels of Beijing Metro Line No.4 Xuanwumen station vertically cross beneath Line No.2 Xuanwumen station. Analyzing the measured displacement of the existing station structure both from the global deformation and the single structural block displacement, we obtain the deformation law of the overlying existing structure during excavation by steps. Research shows that: (1) The existing underground structure's integral settlement complies with Peck formula, but the displacement of single block between two movement joints is rotation mainly and presents rigid body rotation. (2) The ground loss ratio fitted by Peck formula is 0.118% - 0.187%. It is unrelated to the existence of the underground structure and the size of excavation section, but it is associated with the new tunnels' supporting time and supporting stiffness. (3) The settlement trough width coefficient fitted by Peck formula is 2.44 - 3.87, which is the 1.05 - 1.62 times than the coefficient of natural stratum. It is unrelated to supporting stiffness, but it is associated with the reinforcement method, the existence of underground structure and the size of excavation section. The research result can provide reference for the similar engineering.

**Key words:** tunnelling engineering; approaching construction; structural displacement; Peck formula

**收稿日期:** 2013-02-20; **修回日期:** 2013-07-24

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732102); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012YJS076); 北京市科委计划项目(Z121100000312021)

**作者简介:** 王剑晨(1985-), 男, 2008年毕业于北京交通大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事城市地下工程方面的研究工作。E-mail: 176499209@qq.com。通讯作者: 张顶立(1963-), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: zhang-dingli@263.net

## 1 引言

随着我国城市化进程的加快, 各大城市都在积极开展城市轨道交通建设。新建隧道近接施工, 不可避免地会对既有地铁结构产生扰动<sup>[1-2]</sup>。在保证新建隧道安全的同时, 更需要严格控制既有地铁结构的变形。若变形过大, 将导致隧道净空、轨距和轨面标高等不能满足列车正常运营要求, 影响其正常使用功能<sup>[3-4]</sup>。因此, 近接施工成为地铁建设中风险等级最高的工程。正确分析和可靠预计新建隧道施工引起的既有地下结构的变形, 是人们十分关心的课题<sup>[5-6]</sup>。

张成平等<sup>[7-9]</sup>对受北京地铁 5 号线崇文门站下穿施工影响的既有地铁结构实测位移进行分析, 认为既有地下结构位移以沉降为主, 隧道结构扭转变形和横向差异沉降都很小, 且既有地下结构沉降呈“刚体”位移特征, 最大沉降发生在变形缝处。

预测隧道开挖引起的地表位移的经验法中, Peck 公式最简便, 应用也最为广泛。韩焯等<sup>[10]</sup>运用 Peck 公式对国内外 12 个近接施工案例进行分析, 发现既有地下结构变形与天然地层变形类似, 呈现比较明显的“柔性”特征, 给出了预测近距离下穿施工既有结构变形的的方法。

上述 2 种观点从不同角度对既有地下结构实测变形进行了分析, 前者主要考虑 2 个变形缝之间的块体变形, 而后者从整体角度出发, 分析受施工影响的所有块体的组合变形。针对上述 2 种不同的观点, 本文结合北京地铁 4 号线宣武门站分离式双洞隧道垂直下穿既有 2 号线车站工程, 从整体变形和单个块体位移 2 个角度, 对既有车站底板实测位移进行分析, 考虑了分步开挖对既有结构变形的影响, 得到浅埋暗挖隧道近距施工引起的上覆地铁结构变形规律。研究结果可为类似工程提供借鉴及参考。

## 2 工程概况

北京地铁 2 号线宣武门站建于 19 世纪 60 年代末, 至今已运营近 44 a。车站结构为 C30 钢筋混凝土矩形框架结构, 长 172.33 m、宽 19.7 m、高 7.85 m, 底板厚度 0.9 m, 侧墙厚度为 0.7 m, 顶板厚度 1.0 m, 每 27 m 设置一条变形缝。2006 年经专业机构检测, 除耐久性方面稍许降低外, 结构总体状况良好。

新建地铁 4 号线宣武门站单层段垂直下穿既有 2 号线车站, 单层车站设计为双洞分离式平顶直墙矩形隧道。单洞结构宽 9.85 m、高 9.0 m, 两洞净间距 4.1 m。既有车站顶板埋深 4.5 m, 底板埋深 17.0 m, 新建车站顶板埋深 18.9 m, 底板埋深 27.4 m。新建车站顶板与既有车站底板间隔仅 1.9 m, 穿越长度 24.4 m。新建双洞隧道中心线与既有车站变形缝 2 平行。4 号线与 2 号线平面位置如图 1 所示。

既有车站底板与新建车站顶板之间地层上层为中细砂层, 下层为粉质黏土层, 有少量上层滞水, 管棚位于粉质黏土层; 新建车站开挖范围内, 上层为粉质黏土层, 下层为卵石圆砾层。

采用施作管棚及注浆方式对单层段地层进行加固。其中, 管棚为  $\phi 300$  mm 钢管, 纵向长 27.4 m, 管内注浆填充。单层段采用分步开挖方法进行施工, 单层段开挖顺序、管棚布置及注浆范围如图 2 所示。

4 号线单层段施工顺序为: (1) 在既有车站底板与单层段结构外轮廓间施作管棚; (2) 根据图 2 中的注浆范围对单层段全长范围内的土体进行注浆加固, 随后按顺序分步开挖及支护, 设置临时钢支撑 (H22a 型钢), 通长设置, 各导洞及时封闭; (3) 拆除钢支撑、施作二衬。

在 2 号线宣武门站底板布置了静力水准仪监测结构变形, 测点布置如图 3 所示。南北两侧竖向沉降规律相同。本文选择北侧 18 个测点进行分析。

本工程中, 既有地下结构变形可以分解为 2 个部分: 一部分是施作管棚及注浆加固造成的既有地下结构抬升; 另一部分是各导洞施工造成的既有地下结构下沉。本文针对各导洞施工造成的既有地下结构变形进行分析, 不考虑施工前既有地下结构已有变形及施作管棚、注浆加固对既有地下结构的抬升作用。根据施工进度, 将实际施工过程简化为以下施工步: (1) 1 导洞开挖、施作初支; (2) 2 导洞开挖、施作初支及临时钢支撑; (3) 3 导洞开挖、施作初支及临时钢支撑; (4) 4 导洞开挖、施作初支及临时钢支撑; (5) 拆除临时钢支撑、施作二衬。

## 3 既有地下结构整体变形规律分析

### 3.1 天然地层隧道开挖引起的上覆地层变形规律

1969 年, R. B. Peck<sup>[11]</sup>对隧道施工引起的地表沉降问题进行了研究, 认为隧道开挖引起的地表横向沉降槽可以用高斯分布拟合, P. B. Attewell 等<sup>[12-13]</sup>提出了著名的计算地表沉降的 Peck 公式。单洞隧道开挖引起的地表沉降为

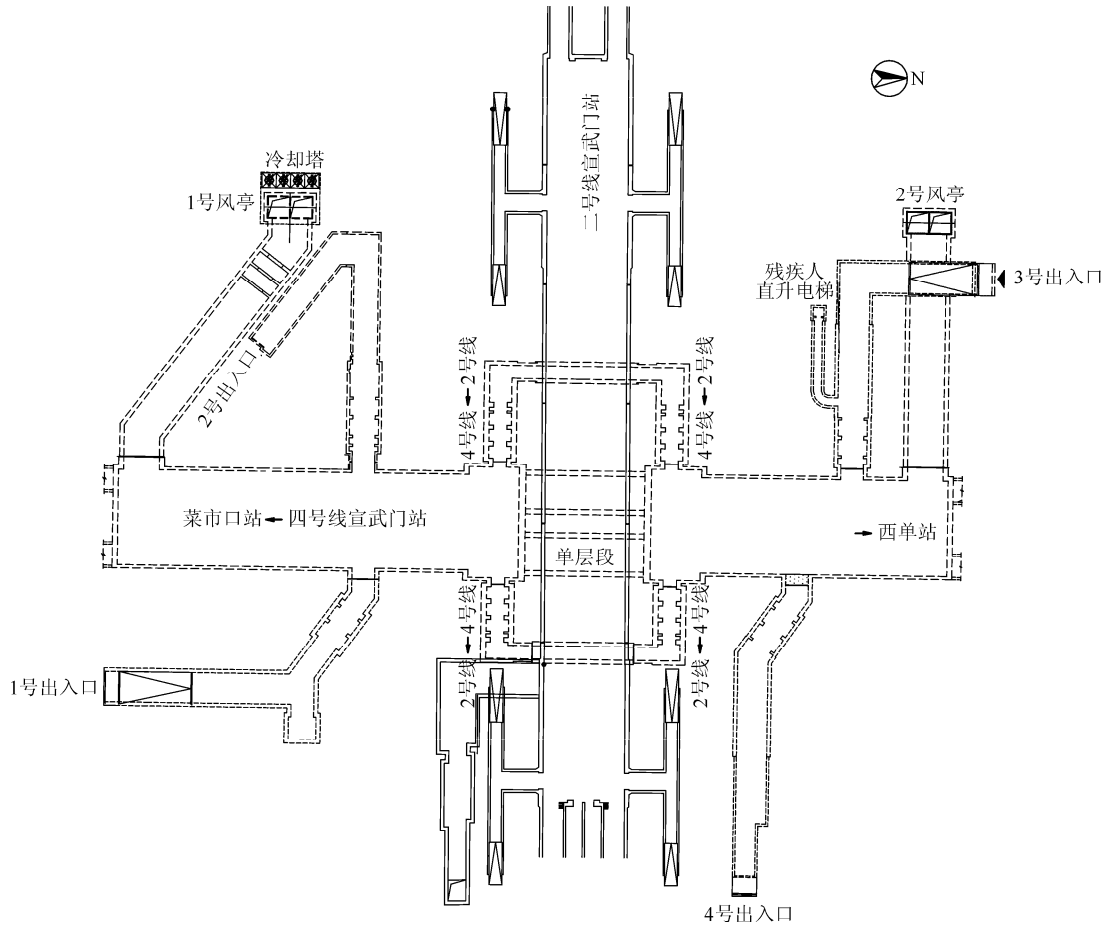


图 1 既有车站与新建车站平面位置图

Fig.1 Plan of position relationship between existing station and new station

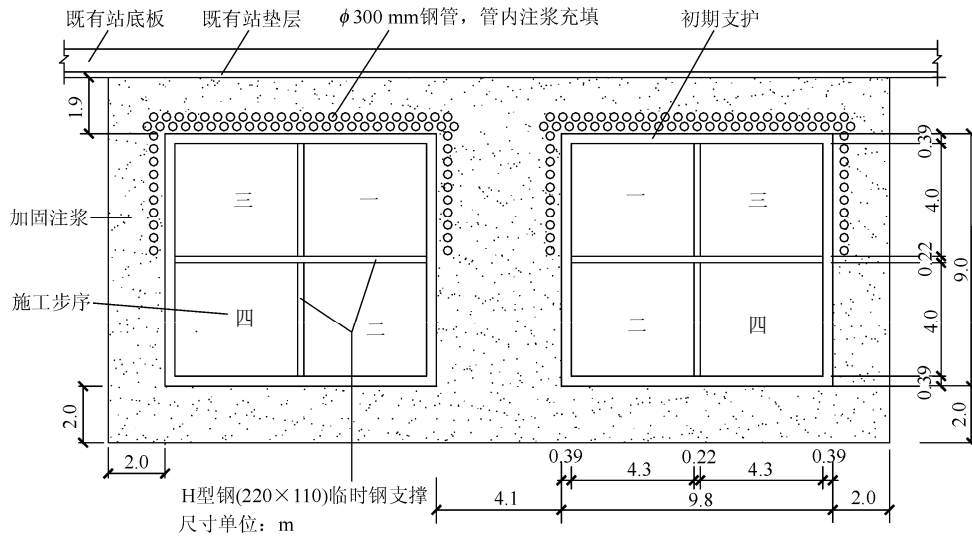


图 2 施工步序

Fig.2 Construction step

$$s(x) = \frac{AV_1}{i\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

处的地表沉降(mm),  $i$  为从沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离(m),  $V_1$  为地层损失率。

R. J. Mair 等<sup>[14]</sup>给出了地层中任意深度  $z$  处沉降槽宽度  $i(z)$  的表达式:

式中:  $A$  为开挖面积,  $s(x)$  为距离隧道中心轴线  $x$

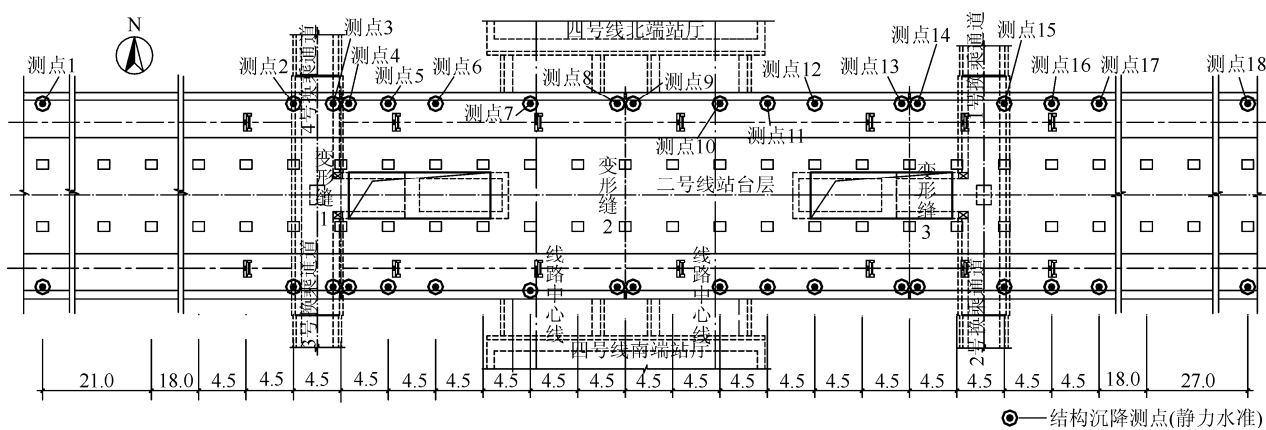


图 3 2 号线宣武门站测点布置图(单位: m)

Fig.3 Arrangement of monitoring points in Xuanwumen station of Line No.2(unit: m)

$$i(z) = K(z)(z_0 - z) \quad (2)$$

式中:  $K(z)$ 为沉降槽宽度系数, 与土性有关, 土体黏聚性越强,  $K(z)$ 值越大;  $z_0$ 为新建隧道轴线深度。单洞隧道开挖地表变形如图 4 中开挖洞 1, 2 的 Peck 曲线所示。

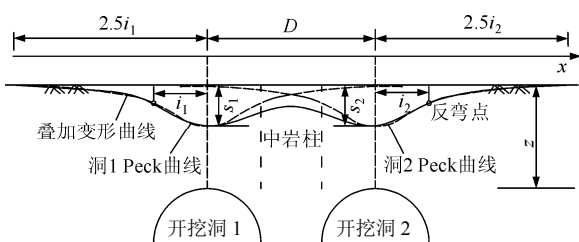


图 4 隧道开挖地表变形

Fig.4 Subsurface settlement caused by tunneling

R. J. Mair 等<sup>[14]</sup>根据硬黏土和软黏土中的实测资料, 发现  $K(z)$ 随深度的增加而减小, 韩焯等<sup>[15]</sup>基于 R. J. Mair 等<sup>[14]</sup>的研究, 根据黏性土与砂性土特点, 对 Mair 公式进行修正, 公式表达式为

$$K(z) = \frac{1 - a(z/z_0)}{1 - z/z_0} \quad (3)$$

式中:  $a$ 为考虑地层的参数, 对于黏性土可取 0.65, 对于砂性土取 0.50。

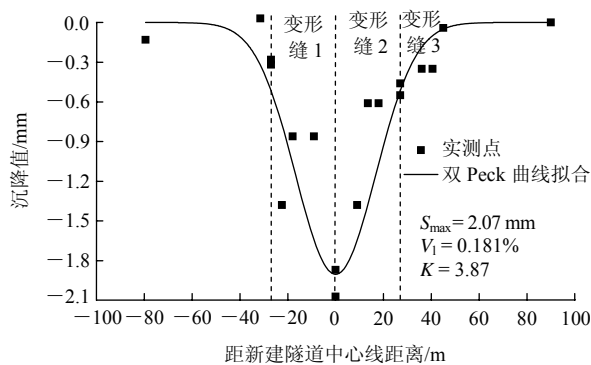
刘波等<sup>[16]</sup>按照叠加原理, 得到相同埋深的双洞隧道开挖引起的地表沉降计算公式为

$$s(x) = \frac{A_1 V_{11}}{\sqrt{2\pi i_1}} \exp\left[-\frac{\left(x - \frac{D}{2}\right)^2}{2i_1^2}\right] + \frac{A_2 V_{12}}{\sqrt{2\pi i_2}} \exp\left[-\frac{\left(x + \frac{D}{2}\right)^2}{2i_2^2}\right] \quad (4)$$

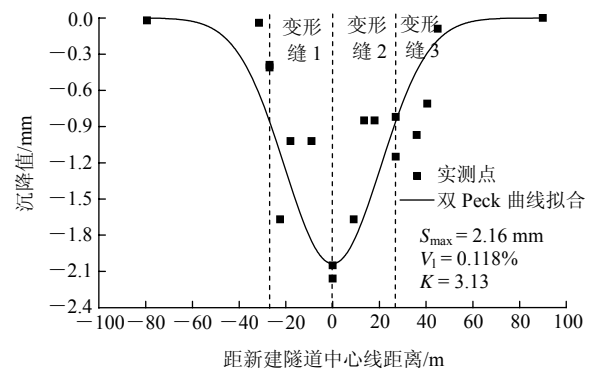
式中:  $A_1, A_2$ 分别为第一、二条隧道横截面积;  $V_{11}, V_{12}$ 分别为第一、二条隧道修建引起的地层损失率;  $i_1, i_2$ 分别为第一、二条隧道修建引起的沉降槽宽度;  $D$ 为 2 个隧道中心间距。双洞开挖地表变形如图 4 中叠加变形曲线所示。

### 3.2 Peck 公式拟合既有地下结构变形

新建车站为双洞分离式隧道, 采用式(4)对 2 号线底板各施工阶段变形进行拟合。其中,  $z_0$ 取各阶段新建隧道横截面形心埋深,  $z$ 取 2 号线宣武门站底板埋深。由于双洞同时开挖且施工方法相同, 令  $V_{11} = V_{12}, K_1 = K_2$ 。结果如图 5 和表 1 所示。



(a) 第一步施工



(b) 第二步施工

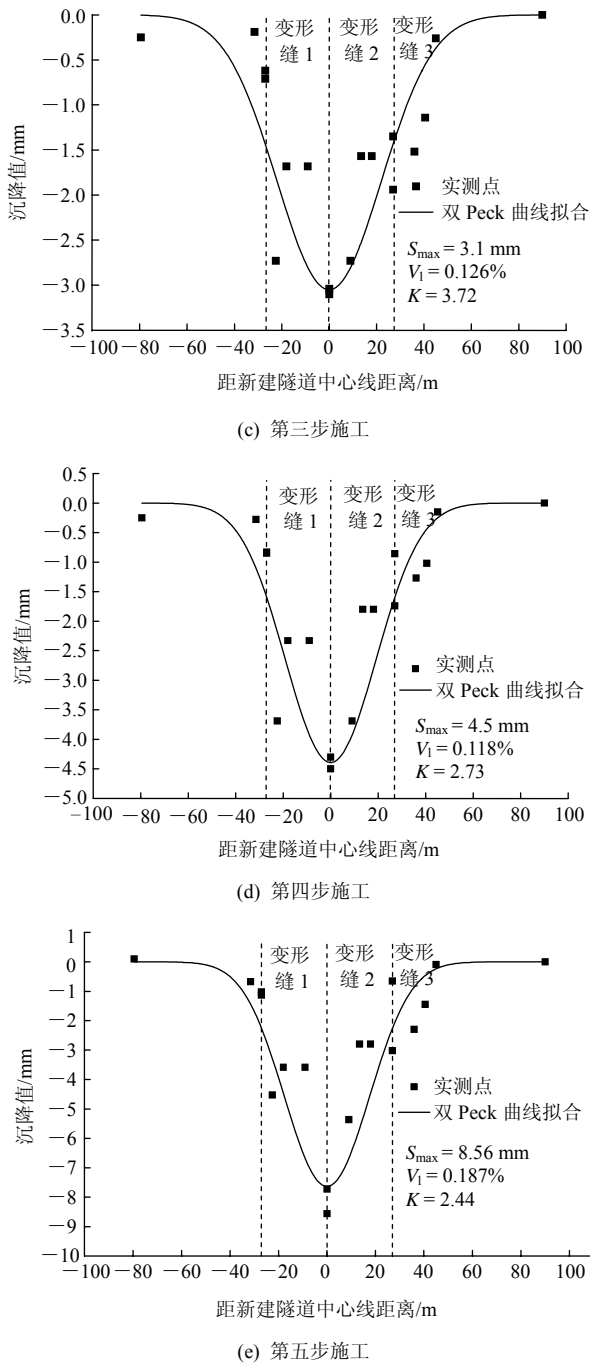


图5 地铁4号线宣武门站施工引起的2号线车站沉降  
Fig.5 Settlements of Line No.2 station caused by excavation of Xuanwumen station of Line No.4

表1 Peck 公式拟合沉降的相关参数

Table 1 Relevant parameters of settlement fitted by Peck formula

施工阶段	$S_{max}/mm$	$A/m^2$	$D/m$	$z_0/m$	$z/m$	确定调节系数	$V_1/\%$	$K$
第一步	2.07	22.05	9.00	21.15	17	0.89	0.181	3.87
第二步	2.16	44.10	9.00	23.40	17	0.76	0.118	3.13
第三步	3.10	66.15	12.26	21.90	17	0.74	0.126	3.72
第四步	4.50	88.20	13.90	23.40	17	0.84	0.118	2.73
第五步	8.56	88.20	13.90	23.40	17	0.88	0.187	2.44

从图5可以看出:

(1) 施工结束时, 既有地下结构底板最大沉降值为 8.56 mm, 其中第一步沉降量占最终沉降量的 24.2%, 第二、三、四步沉降量较小, 分别为 1.1%, 10.9%和 16.4%, 第五步由于拆除临时钢支撑, 造成沉降量大幅度增加, 达到 47.4%。

(2) 确定调节系数(判断拟合精度的参数, 值越接近 1, 拟合曲线越接近实测值)最大为 0.89, 最小为 0.74。拟合结果与实测值较吻合, 说明近接施工分步开挖过程中, 既有地下结构变形与天然地层变形类似, 符合 Peck 曲线变形规律, 呈现“柔性”特征。

(3) 尽管单层段为双洞隧道垂直下穿既有车站, 但由于双洞间距小、开挖面积大, 各个导洞开挖造成的地层变形严重叠加, 因此拟合得到的 Peck 曲线并未呈现双“凹槽状”变形, 而是单“凹槽状”变形。

### 3.3 地层损失率分析

表1中, 地层损失率  $V_1 = 0.118\% \sim 0.187\%$ 。新建隧道支护采用型钢材料, 各导洞开挖面积小、进尺短、支护及时, 有效控制新建隧道洞周收敛, 因此地层损失率保持在较低水平。与北京地区天然地层(没有既有地下结构存在情况下,  $V_1 = 0.22\% \sim 6.90\%$ )<sup>[17]</sup>相比,  $V_1$  值略小于天然地层范围, 其大小与既有地下结构是否存在无明显联系<sup>[10]</sup>。韩焯等<sup>[10]</sup>分析北京地铁下穿工程(10号线下穿1号线, 5号线下穿2号线)得出: 采用注浆辅助措施的  $V_1$  值为 0.20%~0.25%, 未采用注浆辅助措施的  $V_1$  值为 0.76%~0.97%。本文拟合值与采用注浆辅助措施的结果基本相同。

分步开挖过程中  $V_1$  值的变化情况如图6所示。前4步施工过程中, 临时钢支撑施作逐渐增多, 起到“横撑和柱”的作用, 显著提高支护体系刚度, 控制隧道收敛变形的作用愈加明显,  $V_1$  值逐渐降低。第五步施工时, 临时钢支撑被拆除, 支护体系刚度降低, 支护反力小于围岩压力, 新建隧道受到挤压而收敛, 所以  $V_1$  值增大。

将第一步  $V_1$  值与第五步进行对比可知, 二者大小基本相等, 且远大于第二、三、四步。第一、五步支护体系相同, 均不存在临时钢支撑, 第五步开挖面积为第一步的4倍, 说明  $V_1$  值大小与施工方法、临时钢支撑存在密切相关, 而与开挖面积没有明显关联。

### 3.4 沉降槽宽度系数分析

表1中, 沉降槽宽度系数  $K = 2.44 \sim 3.87$ , 既有隧道底板埋深为 17 m, 所处地层为细砂层与粉质黏

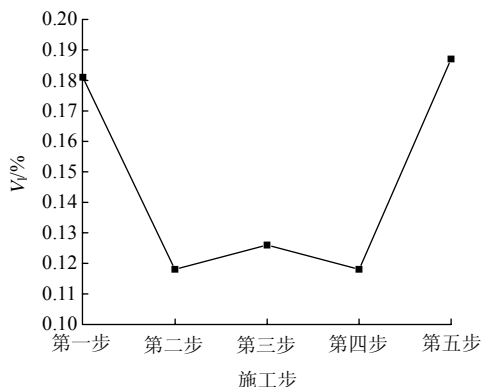


图 6 分步开挖对  $V_1$  的影响

Fig.6 Effect of stepped excavation on  $V_1$

土层互层。与相同埋深的天然地层相比, 拟合值约为修正 Mair 值的 1.05~1.62 倍。根据式(2), (4)计算, 在  $V_1$  不变的情况下, 既有地下结构变形范围是天然地层变形范围的 1.05~1.62 倍, 而最大沉降值为天然地层的 95%~62%。韩焯等<sup>[10]</sup>认为, 新、旧隧道间距越大,  $K$  值越小, 统计得到  $K$  值为 0.86~1.21(间距为 7.87, 10.70 m)。考虑到本文中下穿工程新旧隧道间距仅 1.9 m, 本文  $K$  值与韩焯等<sup>[10]</sup>统计规律基本一致。

$K$  值较天然地层值大, 一方面是工前施作管棚、注浆加固增强了土体的强度和黏聚力所造成的, 另一方面也是隧道开挖引起的地层变形在传播过程中受既有地下结构吸收和阻隔的结果。为比较相同埋深、相同开挖面积及方法情况下天然地层变形与既有地下结构变形的差异, 采用式(4)进行计算, 第五步施工结束后天然地层变形与既有地下结构变形曲线如图 7 所示, 图 7 中,  $z_0 = 23.4$  m,  $z = 17$  m,  $A = 88.2$  m<sup>2</sup>,  $D = 13.9$  m, 地层损失率取 0.187%。

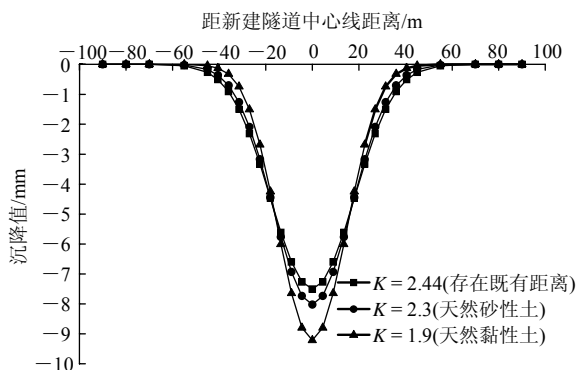


图 7 天然地层沉降与既有地下结构沉降对比

Fig.7 Comparison of deformation of natural stratum and existing construction

图 7 中, 随着  $K$  值的增大, 沉降槽竖向变形减小, 水平向受影响范围增大。从能量角度来看, 新建隧道开挖造成的地层变形、应力调整等均可归结

为岩土体中原有聚集的能量因开挖而释放的过程。新建隧道开挖释放的能量在向地表传播过程中受既有地下结构(大刚度)的影响, 一部分以变形能的形式存储在既有地下结构中, 使既有地下结构产生附加变形(弯曲或扭转), 另一部分能量被既有地下结构阻隔, 不能向上传播而只能向水平方向扩散, 使更广范围的既有地下结构受到影响(刚体运动, 沉降或转动)。因此, 与天然地层变形相比, 既有地下结构的竖向变形较小, 而水平向受影响范围较广。

分步开挖过程中,  $K$  值变化如图 8 所示。由图可知, 随着施工的进行, 既有地下结构最大沉降逐渐增大, 沉降槽逐渐变深,  $K$  值呈现逐渐减小的趋势, 第二~五步  $K$  值分别减小为第一步的 80.9%, 96.1%, 70.5%和 63.0%。施工过程中, 由于开挖形状的变化, 在第三步施工时  $K$  值还出现波动(增大)的现象。产生该现象的原因是: 第二步施工时 2 号导洞位于 1 号导洞下方, 新建隧道最大宽度为 4.9 m, 而第三步施工时, 3 号导洞位于 1 号导洞侧方, 新建隧道最大宽度增大为 9.8 m; 由于新建隧道与既有地下结构间距较小, 3 号导洞的施工造成既有地下结构受影响范围突然增大, 因此  $K$  值出现突变。比较不同施工方法的  $K$  值变化可知, 支护体系刚度变化对  $K$  值没有明显影响。

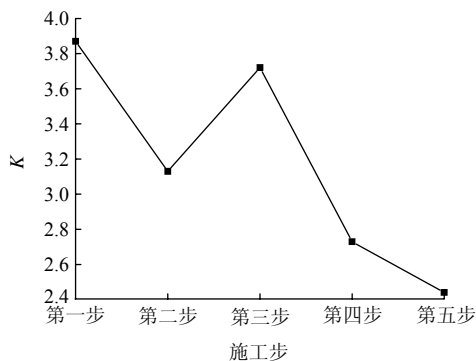


图 8 分步开挖对  $K$  的影响

Fig.8 Effect of stepped excavation on  $K$

新建隧道开挖面积与  $K$  值的关系如图 9 所示。由图可知, 两者基本呈线性关系, 随着开挖面积的增大,  $K$  值减小。同时, 受开挖形状的影响, 在开挖面积  $A = 60 \sim 70$  m<sup>2</sup> 时,  $K$  值出现波动(增大)。对开挖面积与  $K$  值的关系进行拟合, 公式为

$$K = 4.216 - 0.017A \quad (5)$$

#### 4 既有地下结构块体变形规律分析

姚海波<sup>[9]</sup>认为, 目前北京既有地铁车站结构一

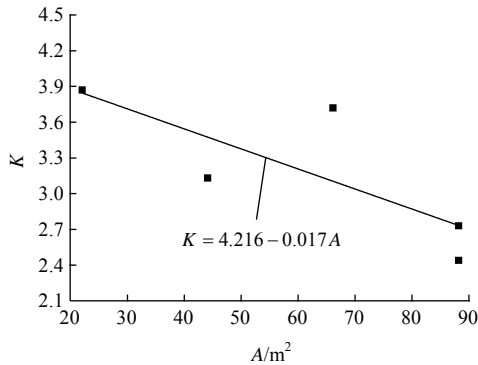


图 9 开挖面积对 K 的影响  
Fig.9 Effect of excavated area on K

一般为整体式钢筋混凝土浇注结构，其纵向、横向刚度都很大。在近接工程中，由于变形缝的存在，既有地下结构类似于分段的箱梁结构，两变形缝之间的块体可采用刚体运动规律进行分析。

#### 4.1 两变形缝之间结构的变形分析

各施工阶段块体变形如图 10 所示。

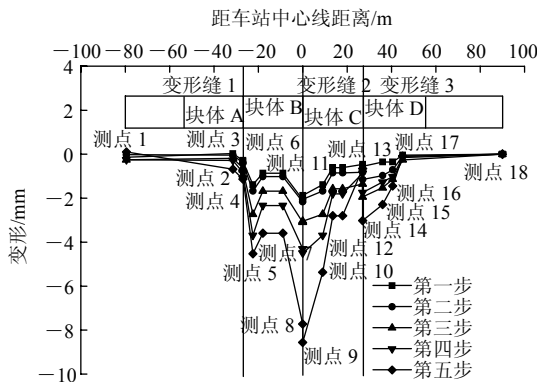


图 10 各施工阶段块体变形  
Fig.10 Displacements of blocks in each step

图 10 中，在施工影响范围内，4 个块体由于自身刚度不均匀、与新建隧道的相对位置不同、工前地层加固导致土体强度不均匀等原因，受到的扰动各不相同。块体受扰动情况如表 2 所示。

表 2 块体受扰动情况  
Table 2 Disturbing states of blocks

块体编号	主要扰动情况	扰动类型
A	整体倾斜	刚体转动
B	整体沉降+倾斜，在测点 6、7 位置沉降相对较小，呈“凸”状变形	整体沉降、刚体转动、弯曲变形
C	整体沉降+倾斜	整体沉降、刚体转动
D	测点 17 为拐点，测点 17~14 倾斜，测点 17、18 无变形	弯曲变形

从表 2 中可以看出，块体以刚体转动为主，同时伴随着整体沉降及弯曲变形。块体转动量为

$$\sin \theta = (S_{左} - S_{右}) / L \quad (6)$$

式中： $\theta$  为块体转动角度； $S_{左}$ ， $S_{右}$  分别为块体左、右端沉降值； $L$  为块体长度。计算得到各块体转动角度如表 3 所示。

表 3 块体转动角度  
Table 3 Rotation angles of blocks

施工步骤	转动角度/(°)			
	块体 A	块体 B	块体 C	块体 D
第一步	0.000 2	0.003 7	0.003 0	0.000 8
第二步	0.000 4	0.003 7	0.002 6	0.001 6
第三步	0.001 2	0.005 1	0.003 6	0.002 5
第四步	0.001 7	0.007 3	0.007 7	0.002 3
第五步	0.002 9	0.014 2	0.016 8	0.004 1

由表 3 可知，随着施工的进行，块体转动角度逐渐增大。块体 B、C 受施工扰动较明显，最大转动角度分别为 0.014 2° 和 0.016 8°，而块体 A、D 受施工扰动较小，最大转动角度分别为 0.002 9° 和 0.004 1°。施工过程中，块体 C 在变形缝 3 左侧测点 13 处第三步结束时沉降为 1.35 mm，之后由于转动过大，在第四、五步结束后分别上抬 0.49 和 0.20 mm。

图 10 中，各施工阶段，4 个块体的转动及沉降沿变形缝 2 基本呈对称分布。尽管在变形缝处存在不连续沉降，但 4 个块体整体沉降呈现“链状”特征，与天然地层变形类似，可以采用 Peck 公式进行描述及分析(见节 3)。

#### 4.2 块体间铰接分析

由于下沉和转动，在变形缝两侧，2 个块体顶部会产生汇聚、挤压甚至铰接。当块体下方土体沉降量较大，且两块体间铰接处剪切力小于咬合力时，块体将与土体分离。

由图 10 可知，近接工程结束时，块体 A、B 在变形缝 1 处最大沉降值为 1.13 mm，沉降量较小，与土体同步下沉，两块体挤压作用不明显。块体 B、C 在变形缝 2 处上、下错动，错动值为 0.84 mm。分析认为，两块体挤压产生的铰结构受到的剪切力大于咬合力，铰接点分离，两块体间没有力学联系或仅为假铰接触。块体 C、D 与块体 B、C 情况类似。因此，2 号线既有地下结构块体间在变形缝处没有因相互咬合、铰接而形成三铰拱，各块体与土体协同变形，没有出现与土体分离而悬空的危险情况。

### 5 结 论

(1) 两变形缝之间的既有地下结构受到近距离下穿施工扰动，呈现刚体位移特征，以转动及沉降

为主。随着分步开挖的进行, 块体转动量逐渐增大。多个块体组合后整体则呈现“柔性”特征, 符合Peck曲线变形规律。

(2) 采用Peck公式进行拟合, 地层损失率  $V_1 = 0.118\% \sim 0.187\%$ , 与既有地下结构是否存在、开挖断面大小无明显联系, 而与支护体系架设时机、刚度密切相关。

(3) 沉降槽宽度系数  $K = 2.44 \sim 3.87$ , 是相同埋深处天然地层的1.05~1.62倍。 $K$ 值较大的原因: 一方面是工前施作管棚、注浆加固增加了土体的强度和黏聚力; 另一方面也既有地下结构存在对土体变形影响的结果。同时,  $K$ 值大小与支护体系刚度变化无关, 而与开挖面积基本呈线性关系。

### 参考文献(References):

- [1] 刘招伟, 杨世武. 杭州某市政隧道过既有铁路暗挖施工技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 353 - 357.(LIU Zhaowei, YANG Shiwu. Undercutting construction technology of a municipal tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 353 - 357.(in Chinese))
- [2] 戴宏伟, 陈仁朋, 陈玉敏. 地面新施工荷载对临近地铁隧道纵向变形的影响分析研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 312 - 316.(DAI Hongwei, CHEN Renpeng, CHEN Yunmin. Study on effect of construction loads on longitudinal deformation of adjacent metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 312 - 316.(in Chinese))
- [3] 侯艳娟, 张顶立. 浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险分析及评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 3 718 - 3 726.(HOU Yanjuan, ZHANG Dingli. Safety risk analysis and assessment of complex buildings in shallow-buried large-span tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 3 718 - 3 726.(in Chinese))
- [4] 李奎, 李志业, 高波. 既有地铁车站结构安全性评估方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1 193 - 1 199.(LI Kui, LI Zhiye, GAO Bo. Study of safety evaluation method for existing metro station structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1 193 - 1 199.(in Chinese))
- [5] 陈孟乔, 杨广武. 新建地铁站近距离穿越既有地铁隧道的变形控制[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 53 - 59.(CHEN Mengqiao, YANG Guangwu. Deformation control of a newly-built subway station crossing the adjacent existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 53 - 59.(in Chinese))
- [6] 李围, 何川. 盾构隧道近接下穿地下大型结构施工影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1 277 - 1 282.(LI Wei, HE Chuan. Study on construction influence of shield tunnels traversing adjacently under underground large-scale structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1 277 - 1 282.(in Chinese))
- [7] 张成平, 张顶立, 王梦恕. 大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 805 - 810.(ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu. Structural deformation of overlying subway tunnels induced by tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 805 - 810.(in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 姚海波. 大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[博士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2005.(YAO Haibo. Research on construction technology of large section tunnel crossing under the existing subway tunnel by means of shallow tunneling method[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [10] 韩焯, 刘赫炜, STANDING J R. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 134 - 141.(HAN Xuan, LIU Chengwei, STANDING J R. Structural settlement of existing tunnel caused by new tunnel excavated underneath[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 134 - 141.(in Chinese))
- [11] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969: 225 - 290
- [12] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: Blackie, 1986: 10 - 50.
- [13] RANKIN W J. Ground movement resulting from urban tunnelling: predictions and effects. engineering geology of underground movements[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on the Engineering Group of the Geological Society, UK. Nottingham: Nottingham University, 1988: 79 - 92.
- [14] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315 - 320.
- [15] 韩焯, 李宁, STANDING J R. 地铁隧道施工引起地层位移规律的探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 609 - 613.(HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. Study on subsurface ground movement caused by urban tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 609 - 613.(in Chinese))
- [16] 刘波, 陶龙光, 丁城刚, 等. 地铁双隧道施工诱发地表沉降预测研究与应用[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3): 356 - 361.(LIU Bo, TAO Longguang, DING Chenggang, et al. Prediction for ground subsidence induced by subway double tube tunneling[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(3): 356 - 361.(in Chinese))
- [17] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23 - 35.(HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23 - 35.(in Chinese))