

隧道下穿既有结构物引起的地表沉降控制标准研究*

陈星欣 白 冰

(北京交通大学 土木建筑工程学院 北京 100044)

摘 要 解决好隧道下穿既有结构物引起的地表沉降问题,对城市地下交通和高速铁路的建设具有重要的意义。在调研国内大量隧道下穿开挖引起的地表沉降控制标准和方法的基础上,根据隧道下穿公路、铁路、隧道和建筑物时引起的地表沉降的不同特点,结合隧道的施工、开挖面积、埋深和工程地质条件等因素,对隧道下穿不同的结构物提出不同的控制沉降措施和建议沉降标准。作者认为,目前的隧道下穿引起的地表最大沉降控制标准是不合理的,沉降控制标准应综合考虑既有结构物的特点、地质条件和施工特点等因素。

关键词 隧道 地表沉降 下穿 沉降控制标准 沉降控制措施

中图分类号:U456.3 文献标识码:A

CONTROL STANDARDS FOR SETTLEMENT OF GROUND SURFACE WITH EXISTING STRUCTURES DUE TO UNDERGROUND CONSTRUCTION OF CROSSING TUNNELS

CHEN Xingxin BAI Bing

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract Ground settlements due to construction of underground tunnels crossing existing structures are an important issue. It is often encountered in the development of underground traffic and high speed railways lines. This paper investigates the ground settlement standards and methods caused by tunnel excavation. According to the different characteristics of roads, railways, tunnels and buildings, and including different construction characteristics, excavation areas, depths and engineering geological conditions, different existing structures have different control measures and recommended standards. So, the current standards of ground settlements are unreasonable in tunnels crossing, because the characteristics of the existing structure, geological conditions and construction features may not be taken into account in the ground settlement standards.

Key words Tunnel Ground settlement, Crossing, Settlement standard, Control measure

1 引 言

随着隧道与地下工程学科的发展,我国的地下

结构日益多样化、复杂化。近年来以暗挖隧道形式穿越既有结构物的工程逐渐增多,如施工措施不当往往会造成巨大的经济损失和不良的社会影响。因此,解决隧道下穿问题,是发展隧道与地下工程的一

* 收稿日期:2010-06-01;收到修改稿日期:2010-10-18.

第一作者简介:陈星欣,主要从事复杂条件下的岩土特性研究. Email: caoshangfei332@163.com

个关键。目前,在国内的工程中给出的地表沉降控制标准主要是根据专家意见或经验笼统地确定地表最大沉降为 30mm。实际上,不同的环境条件和工程条件这个值并不一样,实际工程实践也证实了这一点,因此,深入开展隧道下穿引起的地表沉降控制标准的研究无疑是非常重要的。地表沉降变形包括建筑物沉降、既有公路的沉降、既有铁路的路基和轨面的沉降以及既有桥基的沉降等。

国内已有关于隧道下穿引起的地表沉降控制标准的研究主要有:姚宣德等^[1]综合运用模糊聚类分析方法对实地调研数据进行统计分析,得出在目前工程条件下浅埋暗挖法的地表沉降控制值;张鹏等^[2]对隧道正交下穿公路的情况,以路面平整度和路面行驶的舒适性为依据,得出了隧道开挖对路面纵向影响范围内的最大沉降值和相应的路面沉降控制基准;吴波^[3]从地面环境要求和地层与结构稳定性方面对隧道下穿引起的地表沉降控制标准做了大量的分析,提出把周边建筑物和地层的最小允许沉降值作为最后的控制标准值;李文江等^[4]通过隧道施工引起地层变位的一般规律分析隧道下穿既有构造物的影响,并以规范规定的既有构造物允许不均

匀沉降值作为控制目标对长春站南北广场地下通道的具体情况进行分析,最后得出了隧道施工引起的地表沉降控制基准。安永林等^[5]从地层围岩稳定、经验公式和相关规范的角度探讨隧道无邻近结构物段的地表沉降控制标准,并以武广客运专线浏阳河隧道为实例进行验证。

上述研究只针对单一的工程实例或工程领域,很难全面反映隧道下穿引起的地表沉降控制的整体现状。本文根据隧道下穿公路、铁路、隧道和建筑物时引起的地表沉降的不同特点,对我国众多成功经验进行分析和总结,最后提出隧道下穿引起的地表沉降控制措施和建议标准。

2 隧道下穿引起的地表沉降及分析

2.1 隧道下穿公路

隧道下穿公路时,如何控制路面的绝对沉降和纵横向差异沉降,是下穿施工顺利进行的重点和难点,公路纵向沉降主要影响行车舒适性,横向沉降影响行车安全和路基的稳定性(表 1)。

表 1 隧道下穿公路
Table 1 Tunnels crossing roads

工程名称	岩土性质	施工方法	断面尺寸和埋深	地表沉降值
北京地铁机场线下穿机场高速公路 ^[6]	粉质黏土和粉细砂,为Ⅵ级围岩	台阶法	隧道拱顶与高速公路路面净距 2.98 ~ 6.14m	设计路面沉降 ≤ 20mm,横断面差异沉降 ≤ 0.15%,实测值分别为: 18mm, 0.11%
笔架山隧道下穿高速公路 ^[7]	人工填碎石土以及全、强风化岩体	CRD 法,长管棚超前支护	单洞双线隧道,断面较大,埋深为 1.5 ~ 2.4m	设计地表沉降 ≤ 30mm,实测值: 5 ~ 10mm
万松岭隧道下穿景区公路 ^[8]	砂岩、泥岩和灰岩、炭质页岩	双侧壁法开挖,大管棚支护	隧道宽 17.65m,高 12.14m,隧道拱顶至路面 6m	设计地表沉降 ≤ 30mm,实测值: 20 ~ 25mm
贺家庄隧道下穿张三公路 ^[9]	黏质黄土,Ⅴ级围岩	大管棚支护,短台阶开挖	隧道宽 15.2m,高 13.1m,隧道拱顶至路面 12.5m	实测路面最大沉降 29mm
函谷关隧道下穿连霍公路 ^[9]	砂质新黄土,有严重湿陷性	大管棚超前支护,CRD 法开挖	隧道宽 16m,高 13m,隧道拱顶至路面 40m	设计要求路面沉降 < 50mm,实测最大沉降 59mm

以北京地铁机场线下穿首都机场高速公路^[6]为例详细说明隧道下穿公路的特点。该隧道设计为双线分离单洞隧道,隧道以 15° 夹角斜下穿机场高速公路约 300m,左右线隧道结构净距约为 3.48 ~ 4.46m,采用台阶法施工。施工技术措施:(1)防止土体坍塌,采用超前大管棚支护和全断面注浆技术;(2)采用台阶法开挖,开挖时加临时仰拱,并及时架设钢格栅和锁角锚管;两隧道间土体采用在隧道侧墙上布置小导管注浆加固技术,有效地控制了地表沉降;(3)上台阶核心土挖除后,及时做临时仰拱对

上台阶进行封闭,并对初期支护背后空隙充填注浆。监测表明隧道开挖期间下穿机场高速公路路面沉降最大值为 18mm,最大纵向差异沉降率 0.085%,最大横向差异沉降率为 0.11%,满足设计及相关要求。

以阆乡黄土隧道下穿某高速公路为例进行控制标准实例分析。采用文献^[5]推导的公式计算地表最大容许沉降值:

$$[S_{\max}] = \frac{i}{0.61} \eta = \frac{i}{0.61} K \tan \beta$$

式中, K 为经验系数, 在软岩中 $K = (1.1 \sim 1.3) \times 10^{-3}$, 在硬岩中 $K = 1 \times 10^{-3}$; i 为沉降槽宽度系数, 即曲线拐点到隧道中心的距离。

该隧道下穿段上覆土深度为 23m, 围岩主要类型为 V 级新黄土, 围岩的内摩擦角取为 25° , K 取 1.2×10^{-3} , 根据经验 i 取 12m, 则 $[S_{\max}] = 37\text{mm}$ 。结合公式计算, 取最大地表沉降控制标准为 35mm。

从笔架山隧道工程^[7]可以看出, 长管棚超前支护配合 CRD 法开挖, 能有效地控制路面沉降。但同样的施工方法应用于函谷关黄土隧道^[9], 虽然隧道埋深较大, 但引起的路面沉降达 59mm, 这主要是由于隧道施工对有严重湿陷性的黄土的扰动很大, 沉降主要发生在隧道下部与仰拱开挖期间, 施工时应及时封闭成环。在贺家庄黄土隧道^[9]中, 由于很好地控制上、中、下台阶的步距, 最大沉降量只有 29mm, 说明短台阶法适合没有湿陷性的黄土地层。此外, 在隧道下穿公路的大部分工程中都采用了大

管棚超前支护, 这是防止路面坍塌的必要手段, 但施工管棚也会造成一定的地表沉降, 在施工中必须注意此点。

结合已有的工程实例, 建议确定最大地表沉降控制标准时应考虑公路等级: 隧道下穿重要的高速公路, 建议最大控制标准为 20~40mm; 隧道下穿低等级公路, 建议最大控制标准为 40~55mm, 此时隧道施工造成了路面的沉降, 虽然在短时间内会影响行车的舒适性, 但不影响行车。

2.2 隧道下穿铁路

隧道下穿引起的地表沉降对既有铁路线路的影响主要表现在两个方面^[4]: 一方面可能造成铁路两股钢轨的相对高差超限; 另一方面可能造成沿铁路线路方向的竖向平顺性超限。隧道正交下穿施工时, 轨道的前后高低不平顺是控制既有铁路安全运营的主要因素(表 2)。

表 2 隧道下穿铁路
Table 2 Tunnels crossing railways

工程名称	岩土性质	施工方法	断面尺寸和埋深	地表沉降值
某地铁隧道下穿铁路 ^[10]	粉质黏土层, 属于很湿、软塑、高压缩性土	盾构法	隧道外径 6.2m, 埋深 9.0m	铁路路基中心上方地表沉降量为: 下行线 25.88mm, 上行线 40.77mm
武汉长江隧道下穿武九铁路 ^[11]	富含地下水的砂土层	盾构法	隧断直径 11m, 最小埋深 20m	实测最大沉降值 64mm
圆明园隧道下穿城铁 ^[12]	亚黏土、黏土、含地下水	台阶法	隧道宽度 5.7m, 高度 4.2m, 埋深 7.6m	设计要求: 运营中沉降 $\leq 30\text{mm}$, 实测旁管的沉降 50.07mm
拾荷隧道下穿铁路 ^[13]	围岩比较破碎, 节理发育, 风化严重	矿山法开挖, 长管棚注浆支护	埋深 10m	设计要求 $\leq 30\text{mm}$, 实测下沉量最大 10mm
隧道穿越广州火车站站场 ^[14]	软塑状淤积层泥质粉砂	盾构法	隧道直径 5.4m, 覆土厚度为 9~26m	设计要求地表沉降 $\leq 10\text{mm}$, 轨道差 $\leq 4\text{mm}$, 实测分别 5.4mm, 1mm

以某个地处软土地区的地铁隧道工程^[10]为例, 详细说明隧道下穿铁路的特点。该盾构隧道以近乎正交状态穿越国家一级双线铁路, 下穿铁路处的覆土厚度约为 9.0m, 竖曲线的坡度约为 2%, 平面上表现为直线段, 下穿段为含水量较高的软弱地层。轨道的不平顺加大轮轨间的冲击力, 对轨道结构和基床会造成严重的破坏。在盾构正式推进前, 采用复合浆液对该下穿段铁路路基进行注浆加固。铁路路基中心为主加固区, 通过打斜孔分层注浆, 而对于路基边坡则采用直孔注浆方式。最终铁路路基中心上方地表最大沉降量为: 下行线 25.88mm, 上行线 40.77mm。下穿区域轨道最大沉降量为: 下行线 40mm, 上行线 32mm。沉降变形槽的中心最终处于两条隧道之间, 并明显靠近后推进的上行线隧道。

盾构隧道下穿铁路比一般情况下盾构推进引起的地表沉降要大, 并且总沉降量主要是由后续沉降构成的, 这主要由土体的蠕变所造成, 尤其在软土地区这种现象更加明显^[10, 11]。盾构施工时, 同步注浆和二次注浆对抑制地表沉降效果明显^[14]。在破碎岩体中采用矿山法施工时, 控制沉降的关键在于减小爆破对围岩的振动^[13]。

盾构隧道下穿铁路时, 结合已有的工程实例和经验, 建议最大地表沉降控制标准设定为 30~50mm。此外, 线路轨道的不平顺宜按照《铁路线路维修规则》确定。

2.3 隧道下穿既有隧道

新建地铁隧道施工会引起地层产生移动和变

表3 隧道下穿既有地铁隧道

Table 3 Tunnels crossing existing subway tunnels

工程名称	岩土性质	施工方法	断面尺寸和埋深	地表沉降值
北京地铁5号线崇文门站下穿地铁隧道 ^[15]	粉土、砾石夹黏土	柱洞法结合超前管幕施工	断面 24.21×1.42m, 新建隧道顶板距既有隧道底板约 2m	隧道结构沉降控制标准为 36mm, 实测值 16.75mm
城市隧道下穿电缆隧道 ^[16]	素填土和粉质黏土	台阶法	电缆隧道距左右线隧道距离分别为 4.23m 和 4.60m	电缆隧道的最大沉降量为 28mm
盾构隧道斜交下穿地铁车站 ^[17]	第四纪全新世冲洪积粉土层	盾构法	隧道直径为 6m, 距既有车站底板 9m	东、西侧墙沉降分别为 10.7mm, 8mm
越江隧道下穿运营地铁隧道 ^[18]	粉质黏土, 粉砂等	盾构法	隧道直径 11.36m, 与既有隧道最小近距 3.57m	最大地表沉降量为 3.82mm

形,导致赋存于地层中的既有隧道结构随之发生移动和变形,进而引起隧道净空的变化和轨道的变形。因此,必须有效地控制既有隧道的整体变形,特别是变形缝处的沉降变形(表3)。

以北京地铁5号线崇文门暗挖车站下穿既有地铁隧道^[15]为例详细说明下穿既有地铁隧道的特点。该隧道采用柱洞法施工并结合超前管幕施工的控制技术。沉降控制措施有:(1)为控制土体坍塌和周围土体和既有地铁隧道结构的沉降变形,采用超前管幕、全断面注浆和跟踪注浆等措施;(2)采用护轨、轨距拉杆和扣轨梁等措施对既有地铁结构进行加固。监测结果表明:超前管幕施工引起既有地铁隧道结构沉降达 9.52mm;侧洞管幕施工完成时,道床与隧道脱离且隧道结构变形缝处累计沉降量超限,此处为施工控制的重点部位;采用抬升注浆对既有地铁隧道结构变形缝处累计沉降量超限进行处理,最终将沉降量控制在 16.75mm 以内;对道床与隧道间脱离区域进行充填注浆处理,确保了施工期间既有地铁线路的运营安全。

新建地铁施工前应对既有地铁结构进行详细的评估,对薄弱处采用加设轨距拉杆,扣轨梁及护轨等措施进行加固处理^[15]。已有经验表明,充分利用隧道结构的整体性可以很好地减少既有结构的沉降变形^[17]。对于盾构隧道,以较快的掘进速度穿过既有结构段,既可以减少对土体的扰动,又可为后面的二次补浆等变形控制措施提供施作空间。在下穿施工时,控制好既有地铁变形缝处的沉降是新建地铁成功的关键,可以采用抬升注浆和充填注浆等手段控制地铁结构的整体沉降和变形缝处的差异沉降。

结合表3中的工程实例,隧道下穿既有隧道时,建议既有隧道结构最大沉降控制标准为 30~40mm,变形缝最大沉降差为 10~15mm,制定控制

标准前应对既有隧道进行详细的现场评估。

2.4 隧道下穿建筑物

隧道施工引起的地表沉降和变形对建筑物的影响程度,与地层特征、建筑物的基础与结构型式和建筑物与隧道的相对位置有很大关系^[4]。一般情况下,地表均匀沉降对于建筑物的安全性和正常使用并不会产生太大的影响,而地表过量的不均匀沉降将导致房屋基础开裂,结构框架荷载增加,引起高层建筑的倾斜等严重危害,因此地表的不均匀沉降是施工控制的重点(表4)。

以北京市北三环路热力外线工程和平东桥-太阳宫西路段^[19]为例,详细说明隧道下穿建筑物的施工特点。该隧道斜下穿一古老群房,其纵向穿越宽度达 30m,拱顶覆土为 5.5m,该群房整体布局为正方形,为浅基础的砖砌结构。该下穿段为富水的粉质黏土和粉土层,含水量高,渗透系数小,排水困难,抗扰动能力差。沉降控制措施为:(1)选定在不降水的条件下,采用水平长管棚支护技术预支护土体;(2)在导坑上半断面注浆来实现施工止水、固土、均匀沉降,采用交联等边三角形布置注浆孔,洞内采用放射形布置,从内到外隔孔进行注浆。监测结果表明:管棚的施作引起了较大的地表沉降,最大沉降达 13mm,可以通过调整施工顺序,先进行第一次注浆,再打设管棚,以此减少地表的沉降。通过两次注浆加固,隧道第二次开挖后,群房分布区域的沉降稳定在 10mm,每个阶段房屋沉降偏斜率均小于 0.0005,开挖对房屋的影响由原先的 4 级或 5 级降到 2 级以下,确保了建筑物的正常使用。

隧道下穿建筑物主要是控制建筑物的差异沉降,张顶立^[23]的试验结果表明,隧道开挖造成建筑物基础的差异沉降控制在 20mm 以内可保证建筑物

表4 隧道下穿桥基和建筑物
Table 4 Tunnels crossing buildings

工程名称	岩土性质	施工方法	断面尺寸和埋深	地表沉降值
北京市北三环路热力工程下穿群房 ^[19]	填土和可塑-软塑状粉土和粉质黏土	台阶法施工,长管棚预支护土体和上半断面注浆	隧道宽度4.7m,高度3.9m,拱顶覆土5.5m	实测值最大地表沉降30mm,沉降偏斜率<0.0005mm
九华山隧道穿越段明城墙 ^[20]	节理、裂隙极发育,为IV级围岩	三导洞方法开挖,注浆加固城墙基础	隧道顶部距城墙底部20.5m	实测城墙基础最大沉降4.18mm
武隆隧道下穿群房 ^[21]	V级围岩	台阶法开挖	隧道埋深9.55m	地表沉降<20mm
公路隧道下穿密集建筑物 ^[22]	杂填土和亚黏土层	地面注浆和洞内注浆	最小埋深9m	设计房屋要求≤50mm,实测最大沉降64mm,差异沉降23mm
厦门机场路穿越密集建筑物群 ^[23]	VI级全风化花岗岩	台阶法施工结合注浆加固	最小埋深9m	实测地表沉降最大值约为90mm

的安全。地面微型桩注浆^[20]或地面注浆与隧道洞内注浆相结合^[22]可以有效地加固地层,实现对建筑物的可靠抬升,并有效地抑制了建筑物后续沉降和差异沉降。

结合已有的工程实例,隧道下穿建筑物时,建议最大地表沉降标准为30~70mm,建筑物沉降偏斜率小于0.0005mm,制定标准时应考虑建筑物的类型和建筑物与隧道的相对位置。

3 结 论

(1)目前,隧道下穿引起的地表沉降控制标准尚没有统一,大多数工程要求地表最大沉降量小于30mm的标准是偏高的,在不影响工程安全性的前提下,国内标准可适当放宽,这有利于大量节约投资。

(2)地表沉降控制标准是安全施工的依据,应根据现场情况和监控量测信息不断地进行修正。

(3)公路、铁路、隧道、建筑物等的结构和荷载形式差别很大,下穿施工时,控制的重点各异,因此,下穿不同的既有结构物的控制标准的差异很大。

(4)地表沉降主要与围岩性质和隧道的形状有关,围岩性质越差,地表允许沉降越大,除常规的支护手段外,还可以采用超前小导管注浆、地面注浆与洞内注浆相结合、保留核心土和锁脚锚杆等手段控制地表沉降。

参 考 文 献

[1] 姚宣德,王梦恕.地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J].岩土力学与工程学报,2006,25(10):2030~2035.

Yao Xuande, Wang Mengshu. Statistic analysis of guideposts for ground settlement induced by shallow tunnel construction. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(10):2030~2035.

[2] 张鹏,谭忠盛.浅埋隧道下穿公路引起的路面沉降控制基准[J].北京交通大学学报,2008,32(4):137~140.

Zhang Peng, Tan Zhongsheng. Pavement settlement standard induced by shallow buried tunnel to under-traverse highway. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008,32(4):137~140.

[3] 吴波.复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[D].成都:西南交通大学.2003.

Wu Bo. Study of subsidence induced by urban subway tunneling on complicated conditions. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.

[4] 李文江,刘志春,朱永全.铁路站场下暗挖隧道地表沉降控制基准研究[J].岩土力学,2005,26(7):1165~1169.

Li Wenjiang, Liu Zhichun, Zhu Yongquan. Ground surface settlement control norm for tunneling under railway station region in soft soil. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(7):1165~1169.

[5] 安永林,彭立敏,张峰,等.隧道施工时地表沉降监测控制标准探讨[J].岩土力学,2009,30(supp2):446~451.

An Yonglin, Peng Limin, Zhang Feng, et al. Discussion on settlement standard of ground surface during tunnelling. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(s2):446~451.

[6] 帖卉霞.浅埋近距隧道下穿高速公路差异沉降率理论分析与施工措施[J].铁道标准设计,2008,(4):94~97.

Tie Huixia. Analysis of sedimentation rate and construction measures for super shallow buried tunnels passing underneath expressways. Railway Standard Design, 2008,(4):94~97.

[7] 赵纪平.超浅埋隧道下穿高速公路、国道施工技术研究[J].隧道建设,2009,29(4):441~445,465.

Zhao Jiping. Construction technology for super-shallow-buried tunnels passing underneath expressways and national highways. Tunnel Construction, 2009,29(4):441~445,465.

[8] 曹冠凯.大跨公路隧道通过景区公路的施工与监测[J].隧道建设,2006,26(1):67~69,73.

Cao Guankai. Construction and monitoring of large span highway tunnel crossing underneath highway in scenic resort. Tunnel Con-

- struction, 2006, **26**(1): 67 ~ 69, 73.
- [9] 王晓州. 大断面黄土隧道建设技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
Wang Xiaozhou. Construction technology for loess tunnels with large cross section. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [10] 吕培林, 周顺华. 软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J]. 中国铁道科学, 2007, **28**(2): 12 ~ 16.
Lü Peilin, Zhou Shunhua. Analysis on upper rail settlement in soft ground resulting from shield tunneling across main railway line. China Railway Science, 2007, **28**(2): 12 ~ 16.
- [11] 季大雪. 武汉长江隧道盾构下穿武九铁路沉降影响分析[J]. 铁道工程学报, 2009, **10**(ser. 133): 59 ~ 63.
Ji Daxue. Analysis of the influence of underpass shield of Wuhan Yangtze River Tunnel on settlement of Wuhan-Jiujiang Railway. Journal of Railway Engineering Society, 2009, **10**(ser. 133): 59 ~ 63.
- [12] 杜小虎, 阎晋卫, 韩继锋, 等. 隧道下穿城铁施工期间线路变形监测方法的探讨[J]. 铁道建筑技术, 2004, (5): 28 ~ 30.
Du Xiaohu, Yan Jiwei, Han Jifeng, et al. Discussion on monitoring methods of line deformation during tunnelling. Railway Construction Technology, 2004, (5): 28 ~ 30.
- [13] 叶超明, 郑智军, 陈小满. 拾荷隧道下穿铁路段设计与施工技术要点[J]. 重庆交通学院学报, 2001, **20**(2): 106 ~ 109.
Ye Chaoming, Zheng Zhijun, Chen Xiaoman. Main points of the design the Shihe tunnel and construction technique of beneath the railway. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, **20**(2): 106 ~ 109.
- [14] 洪开荣. 盾构隧道穿越广州火车站站场的设计与施工[J]. 现代隧道技术, 2002, **39**(6): 34 ~ 37.
Hong Kairong. Design and construction of shield driven tunnel crossing the station yard of Guangzhou railway station. Modern Tunnelling Technology, 2002, **39**(6): 34 ~ 37.
- [15] 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. China Railway Science, 2009, **30**(1): 69 ~ 73.
- [16] 李俊光, 黄鑫, 杨小礼. 城市隧道下穿电缆隧道时的数值计算分析及变形沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, **5**(1): 68 ~ 71.
Li Junguang, Huang Xin, Yang Xiaoli. Numerical simulation and settlement prediction of subway locating under cable tunnels. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, **5**(1): 68 ~ 71.
- [17] 李东海, 刘军, 萧岩, 等. 盾构隧道斜交下穿地铁车站的影响与监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(suppl): 3186 ~ 3192.
Li Donghai, Liu Jun, et al, Xiao Yan. Research on influence and monitoring of shield tunnel obliquely crossing beneath existing subway station. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(s1): 3186 ~ 3192.
- [18] 李家平. 上海西藏南路越江隧道下穿运营地铁隧道变形分析[J]. 施工技术, 2009, **38**(9): 5 ~ 7, 26.
Li Jiaping. Analysis on deformation operating metro tunnel caused by undercrossing construction of South Xizang Road crossing-river tunnel in Shanghai. Construction Technology, 2009, **38**(9): 5 ~ 7, 26.
- [19] 姚海波, 王梦恕, 张顶立等. 热力隧道下穿地面建筑物的安全评价与对策[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 112 ~ 116.
Yao Haibo, Wang Mengshu, Zhang Dingli, et al. Security aspect and measurements while tunneling of the thermal power tunnel from below buildings on ground surface. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 112 ~ 116.
- [20] 孙尚业, 蒋美蓉, 王波等. 九华山隧道穿越段明城墙沉降的三维数值分析[J]. 解放军理工大学学报, 2007, **8**(1): 58 ~ 62.
Sun Shangye, Jiang Meirong, Wang Bo, et al. 3-D numerical analysis of settlement of city wall of Ming dynasty of Jiu-huashan tunnel traversing position. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, **8**(1): 58 ~ 62.
- [21] 林存友. 复杂条件下的隧道施工技术研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, **16**(s1): 16 ~ 18.
Lin Cunyou. Tunnel construction technique in complex conditions. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2003, **16**(s1): 16 ~ 18.
- [22] 逢铁铮. 全程注浆在隧道穿越既有建筑物中的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3451 ~ 3458.
Pang Tiezheng. Experimental study of whole process grouting used in tunnel passing through existing structures. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3451 ~ 3458.
- [23] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟等. 浅埋大断面软岩隧道施工影响下建筑物安全性控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(1): 95 ~ 102.
Zhang Dingli, Li Pengfei, Hou Yanjuan, et al. Experimental study on safety control of buildings during construction of shallow-buried soft rock tunnel with large-section. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(1): 95 ~ 102.