

高速铁路隧道近接施工对既有市政隧道影响分析

路军富¹, 贾媛媛², 魏龙海³

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 西华大学, 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039; 3. 中交第二公路规划勘察设计研究院, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 针对成都某新建城际铁路隧道近接下穿既有市政管线隧道的设计和施工方案, 运用有限差分法和流固耦合理论, 分析研究了降水以及新建隧道施工过程中, 上部既有市政管线隧道的受力特性及位移变化规律, 研究结果表明: 既有管线隧道衬砌结构应力和位移变化及分布规律几乎一致, 交叉处界面位移最大, 并沿隧道纵向向两端逐渐减小且呈对称分布; 交叉处 30m 范围内, 拱顶纵向应力主要为负值即压应力, 仰拱纵向应力主要为正值即拉应力; 降水施工对上部市政管线隧道的影响远大于新建隧道施工造成的影响, 前者所引起的沉降约占 75%~80%, 后者所引起的沉降约占 20%~25%; 降水施工所引起的纵向最大拉应力为新建隧道施工引起的 1.39~3.39 倍。所以, 降水施工前应采取一定的特殊辅助措施, 以保证降水施工时结构安全性。

关键词: 既有市政隧道; 近接施工; 降水施工; 力学特性

中图分类号: U45 **文献标志码:** A

0 引言

近年来, 城市地下铁道以及地下公路隧道日益增多, 新建隧道与既有市政管线隧道近距、重叠、交叉等情况不断出现, 然而新建隧道施工引起围岩应力重分布, 当既有隧道位于围岩应力重分布区域内时, 引起既有市政管线隧道位移和结构内力发生变异, 从而对其结构安全产生不利影响^[1-3], 因此, 开展新建隧道施工对近接既有市政隧道影响研究具有重要的工程实际意义。目前, 国内外对新建隧道及其近接和交叠等施工力学行为已进行了研究^[4-7]。针对高速铁路隧道正交下穿市政污水管道、煤气管线隧道和自来水管线隧道, 笔者采用有限差分法和流固耦合理论, 对高铁隧道施工对既有市政管线隧道的影响进行了三维数值分析, 获得既有市政管线隧道受施工降水及新建高铁隧道施工影响后的结构力学特性及位移变化规律, 确定最佳施工方案。

1 流固耦合计算基本理论

采用 FLAC3D 模拟多孔介质(如土体)中流

体流动, 孔隙水压力的消散引起土体中位移的变化, 流体在孔隙介质中的流动依据 Darcy 定律, 流-固耦合过程满足 Biot 方程。关键控制方程如下^[8]:

(1) 平衡方程。对于小变形, 流体质点平衡方程为

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v \quad (1)$$

式中: q_v 为被测体积的流体源强度, 1/s; q_i 为渗流速度, m/s; ξ 为单位体积孔隙介质中流体体积的变化。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: P 为孔隙压力; α 为 Biot 系数; M 为 Biot 模量, N/m²; ε 为体积应变; T 为温度; β 为考虑流体和颗粒热膨胀系数, 1/℃。

(2) 运动方程。流体的运动用 Darcy 定律来描述, 对于均质、各向同性固体和流体密度是常数时, 该方程表示为

$$q_i = -k[P - \rho_j x g_j] \quad (3)$$

式中: k 为介质的渗透系数, m²/Pa·s; ρ_j 为流体

收稿日期: 2011-04-10; 修订日期: 2011-06-07

基金项目: 四川省青年科技基金资助项目(09ZQ026-083)

作者简介: 路军富(1978-), 男, 河南辉县人, 成都理工大学讲师, 博士, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作,

E-mail: lujunfu@126.com.

密度, kg/m^3 ; $g_j (j=1, 2, 3)$ 为重力加速度的 3 个分量, m/s^2 。

(3) 本构方程. 体积应变的改变会引起流体孔隙压力的变化, 同时孔隙压力的变化导致体积应变的发生. 孔隙介质本构方程的增量形式为

$$\Delta \bar{\sigma}_{ij} + \alpha \Delta P \delta_{ij} = H_{ij}^* (\sigma_{ij}, \Delta \varepsilon_{ij}) \quad (4)$$

式中: $\Delta \bar{\sigma}_{ij}$ 为应力增量; H_{ij}^* 为给定函数; ε_{ij} 为总应变。

(4) 相容方程. 应变率和速度梯度之间的关系为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中: v_i 为介质中某点的速度。

(5) 边界条件. ① 给定水压力; ② 给定边界外法线方向流速分量; ③ 不透水边界; ④ 透水边界, 采用如下形式给出。

$$q_n = \frac{k}{r} (P - P_c) \quad (6)$$

式中: q_n 为边界外法线方向流量分量; k 为渗透系数, m/s ; r 为水的容重; P_c 为渗流出口处的孔隙水压力。

2 新建隧道近接施工对既有管线隧道影响计算概况

2.1 施工过程模拟

2.1.1 降水施工对既有管线隧道影响模拟

本工程采用轻型井点降水法, 地下水位为地表下 4 m, 隧道两侧设置 $\Phi 60$ cm 降水群井, 其距隧道边墙距离约为 15 ~ 20 m, 井纵向间距 15 ~ 20 m, 降水至设计标高时, 新建高铁隧道施工。

2.1.2 新建高铁隧道施工过程模拟

新建隧道采用双侧壁导坑法施工, 见图 1。隧道先进行左导坑①部开挖, 同时施建其周边初期支护和临时支护, 钻设径向锚杆后复喷混凝土至设计厚度; 滞后①部掌子面一段距离后, 进行左导坑②部开挖, 完成左侧壁导坑初支封闭成环; 依据同法进行右侧壁导坑③和④部施工, 封闭成环后进行中导坑⑤⑥⑦⑧⑨部施工。最后待初期支护基本稳定后, 拆除临时横撑。

2.2 支护参数

初期支护钢架采用 I25b, 纵向间距 0.5 m, 拱部 140° 范围采用 $\Phi 42$ 双层小导管浆加固, 采用水泥-水玻璃双液浆, 水泥浆水灰比 1:1, 水泥浆和

水玻璃质量比为 1:1。第一层小导管长 3.5 m, 环向间距 0.3 m, 纵向间距 1 m, 外插角 30 ~ 35°。第二层小导管长 2.5 m, 环向间距 0.3 m, 纵向间距 1 m, 外插角 10 ~ 15°。上半断面掌子面设置 $\Phi 25$ 纤维锚杆, 长 8 m, 水平间距 0.8 m, 梅花形布置, 纵向间距 6 m, 锚杆内注水泥浆, 拱脚及边墙处设置锁脚锚杆。

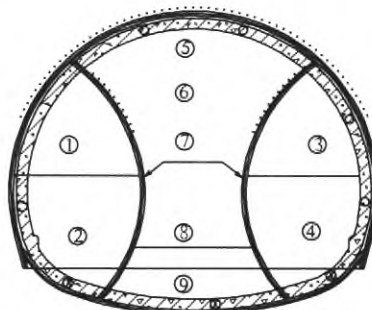


图 1 双侧壁导坑法施工工序示意图

Fig. 1 Disposal chart of construction process of both side heading method

2.3 计算参数

围岩以及既有市政管线隧道和新建隧道的物理力学参数, 见表 1。

2.4 计算模型

本研究采用三维模型计算, 上部市政管线隧道与下部新建隧道在水平面上的投影近似正交, 管线隧道拱顶二衬距地面 3.9 m, 底部二衬在新建隧道初期支护上方 2.2 m, 新建隧道顶部埋深 13.4 m, 底部埋深 26.1 m, 跨度 14.7 m。模型计算范围: 沿上部管线隧道纵向 (X 方向) 取 60 m, 下部开挖隧道纵向 (Z 方向) 取 40 m, 土层厚度 (Y 方向) 取 60 m; 降水井深度达地表以下 23 m, 其底部侵入基岩中, 该层为非含水层。

模型的边界条件: 前后左右面水平约束, 下边界竖向约束, 上边界 (地表) 为自由边界。整体模型加重力场 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; 降水井侧壁为零水压边界, 外边界为定水头边界。计算模型如图 2 所示。

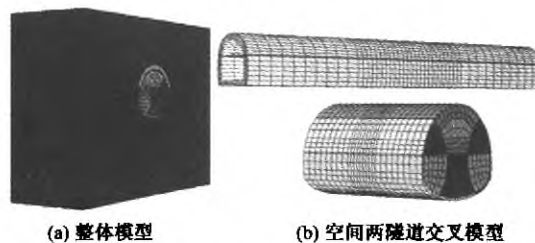


图 2 近接上下交叉隧道整体三维模型

Fig. 2 3D model of up-down cross adjacent tunnel

表 1 围岩及支护结构物理力学参数

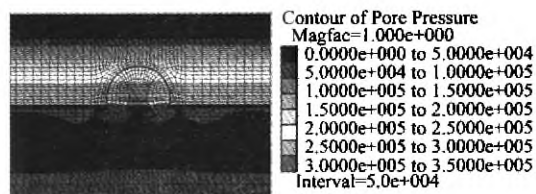
Tab.1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and support

介质	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	泊松比 μ	摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 $E/$ MPa	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	厚度/ m
填土	19.5	25	0.30	12	7.2	1.2×10^{-6}	2.5
粉质土	19.5	30	0.30	12	7.2	1.2×10^{-6}	6.0
卵石土	21	5	0.23	40	35.0	0.02	13.0
泥岩	24	5	0.20	55	1 300	1.9×10^{-7}	基岩
加固圈	23	—	0.25	—	10.1	—	—
管线隧道	初支	23	—	—	28 000	—	—
	二衬	25	—	—	31 000	—	—
下穿隧道	初支	23	—	—	28 000	—	—
	二衬	25	—	—	310 000	—	—

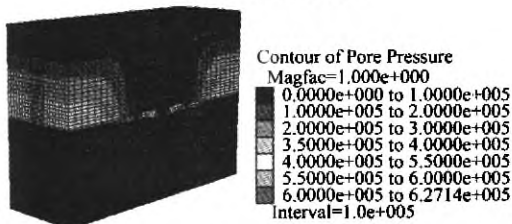
3 数值计算结果分析

3.1 施工降水对既有管线隧道影响结果分析

降水前和降水完成后两阶段,土层内水压分布云图,见图 3。由图 3 可知,降水完成后,新建隧道上方及其周围的水压力,由降水前最大水压力 0.15~0.2 MPa 逐渐降至 0 MPa。



(a)降水前水压力分布



(b)降水完成后水压分布云图

图 3 不同降水阶段土层水压分布云图

Fig.3 Distribution cloud picture of water pressure of soil layer at different dewatering construction stages

3.1.1 既有管线隧道结构位移分析

(1)各降水阶段上部管线隧道位移分析。通过降水计算结果可知降水完成后上部管线隧道位移分布云图见图 4。由图 4 可知,降水完成后,两隧道交叉处,既有管线隧道位移下沉量最大,且沿隧道纵向向两端逐渐均匀减小。

各降水阶段,上部既有管线隧道交叉处衬砌结构拱顶和仰拱竖直位移变化规律见图 5。由图 5 可知,随着降水施工不断进行,隧道竖直位移逐渐增加,降水前期位移增加速率较大,降水施工后期位移下沉量增加减缓;衬砌结构拱顶和仰拱结构

位移几乎相同,变形规律几乎一致。

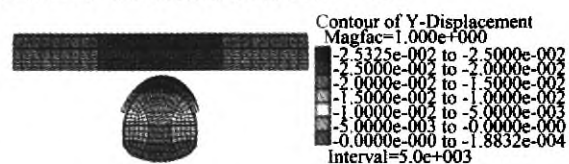


图 4 降水完成后上部管线隧道位移分布云图

Fig.4 Distribution cloud picture of displacement of existed pipeline tunnel after dewatering construction

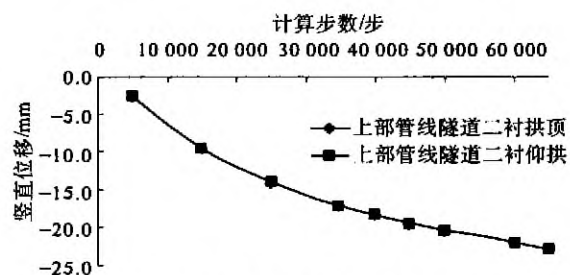


图 5 交叉处截面各降水阶段二衬位移变化规律

Fig.5 Curves of vertical displacement of second lining at infall section at different dewatering construction stages

(2)上部既有管线隧道整体沉降分析。降水完成后上部既有管线隧道二次衬砌沿纵向拱顶和仰拱下沉位移量变形规律见图 6。图 6 中横坐标 0 处即为上下隧道交叉位置处。

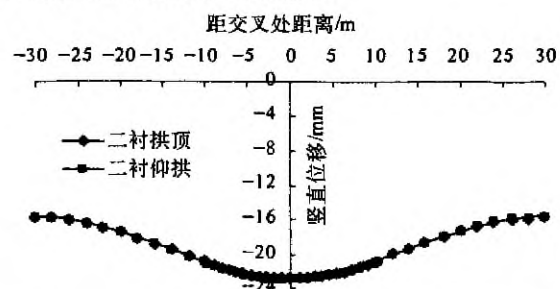


图 6 降水完成后沿纵向二次衬砌竖直位移变化规律

Fig.6 Curves of vertical displacement of secondary lining along longitudinal direction

由图 6 分析可知:降水完成后,交叉处截面下

沉量最大,量值约为 22.89 mm,沿纵向向两端逐渐减小,位移沿纵向两边呈对称分布;上部既有管线隧道中间与两端差异沉降约为 7.40 mm,大于控制基准(不超过 5 mm)的要求。

3.1.2 既有管线隧道结构纵向应力分析

各降水阶段上部既有管线隧道交叉处截面初期支护及二次衬砌拱顶和仰拱纵向应力变化规律如图 7 所示。由图 7 可知:随着降水施工不断进行,仰拱处和拱顶处分别表现为拉应力和压应力,降水初期阶段纵向应力增加速率较大,随着降水施工推进,其应力增加缓慢;初期支护仰拱最大拉应力为 1.92 MPa;二次衬砌仰拱最大拉应力为 1.54 MPa。

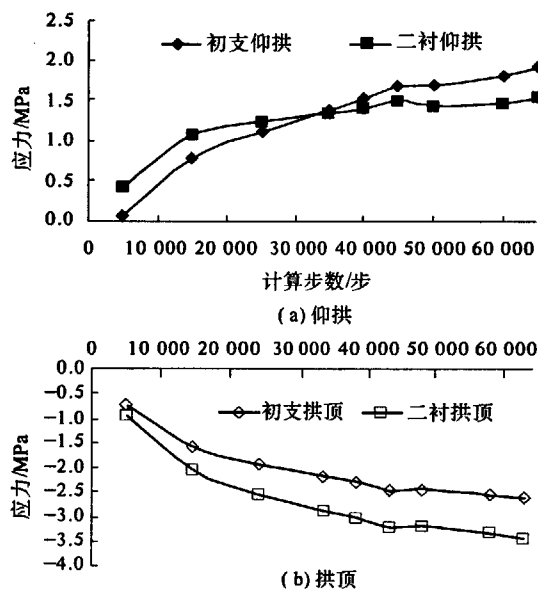


图 7 各降水阶段交叉处截面仰拱及拱顶纵向应力

Fig. 7 Curves of longitudinal stress of infill Arch Crown section and intert section at different dewatering stages

分析降水完成后上部既有管线隧道沿纵向二次衬砌截面拱顶和仰拱处纵向应力变化规律,见图 8。由图 8 可知:降水施工完成后交叉处 30 m 范围内,拱顶和纵向应力分别为压应力和拉应力;隧道两端处拱顶拉应力最大,约为 3.09 MPa;隧道中间处仰拱最大拉应力约为 1.54 MPa;距交叉处既有隧道沿纵向结构应力几乎呈对称分布。

3.2 新建隧道施工对既有管线隧道影响分析

降水完成后进行新建高铁隧道施工,分析下穿隧道开挖完成后上部既有管线隧道位移和内力分布规律,评价其安全性。

3.2.1 既有管线隧道结构位移分析

(1)上部既有管线隧道竖直位移分析。下穿隧道开挖完成后,上部既有管线隧道二次衬砌沿

纵向竖直位移变化规律如图 9 所示。

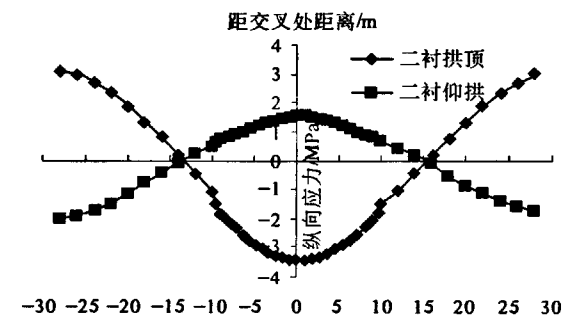


图 8 降水完成后,沿纵向二次衬砌纵向应力变化规律

Fig. 8 Curves of longitudinal stress of secondary lining along longitudinal direction

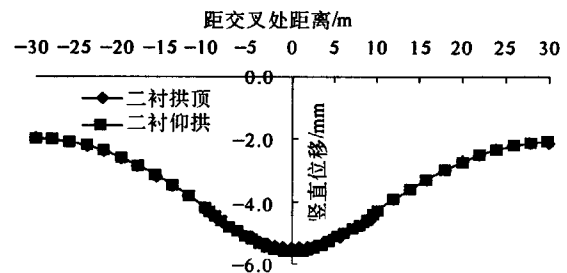


图 9 二次衬砌沿纵向竖直位移变化规律

Fig. 9 Curves of vertical displacement of secondary lining along longitudinal direction

由图 9 可知:沿隧道纵向,二次衬砌竖直位移由交叉处向两端逐渐减小,呈抛物线分布;交叉处二次衬砌拱顶下沉位移为 5.48 mm,仰拱下沉位移为 5.67 mm;隧道中间与两端差异沉降约为 3.58 mm,小于控制基准(5 mm)的要求。二次衬砌拱顶和仰拱位移变化规律趋于一致。

(2)各开挖部进尺对交叉处断面位移影响分析。通过开挖 17 步后开挖完毕,当初支稳定后,临时支撑拆除,18~21 步为临时支撑拆除计算步,各施工步开挖对交叉处上部管线隧道位移影响如图 10。由图 10 可知:随着下穿隧道开挖不断推进,交叉处断面下沉位移不断增加,左右导坑开挖以及中导坑开挖前,管线隧道下沉速率较小,下沉量约占总下沉量的 29.2%;中导坑开挖到中导坑通过交叉处断面时,管线隧道下沉速率较快,下沉量约占总下沉量的 60%;隧道拆除临时支撑通过交叉处位置时,管线隧道下沉速率增大,拆除完成后下沉量约占总下沉量的 8.6%。

3.2.2 既有管线隧道结构纵向应力分析

(1)新建隧道施工完毕纵向应力分布。上部管线隧道沿纵向二次衬砌截面拱顶和仰拱处纵向应力变化规律如图 11 所示。

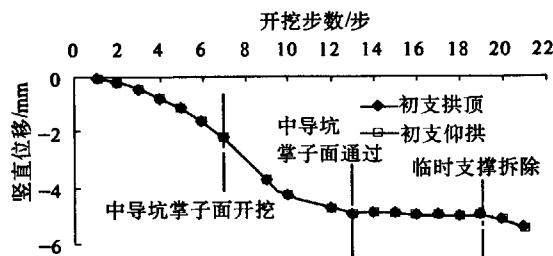


图 10 交叉处竖直位移随新建隧道施工步分布规律
Fig. 10 Curves of vertical displacement of secondary lining with excavation steps

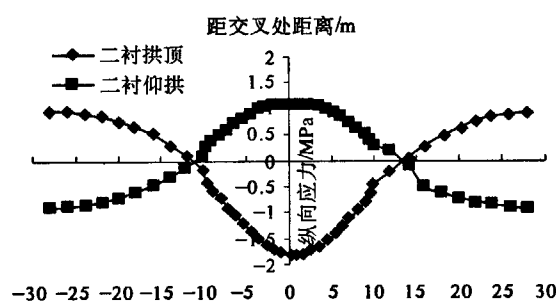


图 11 沿纵向二次衬砌纵向应力变化规律
Fig. 11 Curves of longitudinal stress of secondary lining along longitudinal direction

由图 11 可知:交叉处 20 m 范围内,二次衬砌拱顶和仰拱纵向应力分别为压应力和拉应力,两端处拱顶最大拉应力为 0.97 MPa,中间位置仰拱最大拉应力为 1.11 MPa;距交叉处管线隧道纵向结构应力几乎呈对称分布。

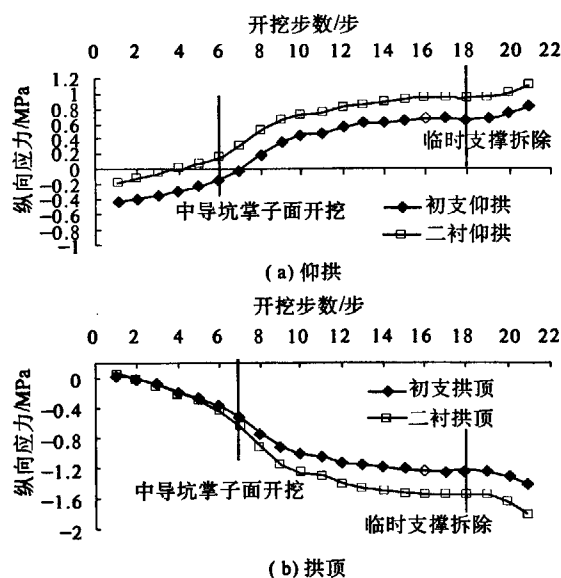


图 12 仰拱及拱顶纵向应力随新建隧道施工步分布规律
Fig. 12 Curves of longitudinal stress of invert and arch crown of secondary lining with excavation steps

(2) 各开挖部进尺对交叉处截面纵向应力影

响如图 12 所示。由图 12 可知:随着下穿隧道施工不断推进,仰拱纵向应力表现为拉应力,结构最终拉应力约为 1.11 MPa,拱顶纵向应力表现为压应力;中导坑掌子面施工到中导坑掌子面通过,管线交叉处纵向应力增加速率较快;隧道拆除临时支撑通过该位置时,管线隧道纵向应力再次突然增加。

4 结论

降水施工对既有市政隧道影响如下:

(1) 随着降水施工不断进行,既有管线隧道结构位移和应力量值逐渐增加,降水初期阶段其增加速率较大,后期阶段增加缓慢;

(2) 降水施工对既有隧道初支和二衬位移和应力影响规律几乎一致,交叉处竖直位移最大,并沿隧道纵向两端逐渐减小且呈对称分布;

(3) 降水施工引起的既有隧道中间与两端差异沉降约为 7.31 mm,均大于控制基准(5 mm)的要求,因此在不采取特殊辅助措施的情况下,不宜进行降水;

(4) 距交叉处既有管线隧道两端的应力几乎呈对称分布,交叉处 30 m 范围内,拱顶纵向应力主要为压应力,而仰拱主要为拉应力;

(5) 上部管线隧道初期支护仰拱的最大拉应力为 2.62 MPa,超过 C25 喷射混凝土的极限抗拉强度(1.3 MPa),二次衬砌拱顶最大拉应力为 3.09 MPa,超过 C30 混凝土极限抗拉强度(2.2 MPa)。

下穿隧道近接施工对既有隧道影响如下:

(1) 中导坑施工对上部既有管线隧道变形影响较大,中导坑开挖到通过交叉处断面时,管线隧道下沉速率较快,下沉量约占总下沉量的 60%;

(2) 交叉处 20 m 范围内,初期支护拱顶纵向应力为压应力,仰拱纵向应力为拉应力,距交叉处管线隧道两端的应力几乎呈对称分布;

(3) 上部既有管线隧道初期支护在仰拱的最大拉应力为 0.84 MPa,满足强度要求;二次衬砌在仰拱的最大拉应力 1.11 MPa,满足强度要求。

综上,降水所引起的沉降约占 75% ~ 80%,下穿隧道施工所造成的沉降约占 20% ~ 25%;降水所引起的纵向最大拉应力是下穿隧道施工所引起纵向最大拉应力的 1.39 ~ 3.39 倍。所以,在降水施工前应采取一定的特殊辅助措施,以保证降水施工的顺利进行。

参考文献:

- [1] 关宝树. 隧道设计要点集[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 赵旭峰,王春苗,孙景林,等. 盾构近接隧道施工力学行为分析[J]. 岩土力学,2007,28(2):409 - 414.
- [3] 靳晓光,李晓红. 深埋交叉隧道动态施工力学行为研究[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2008,30(2):32 - 36.
- [4] 龚伦. 上下交叉隧道近接施工力学原理及对策研究[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2007.
- [5] 廖少明,余炎,彭芳乐. 盾构近距离穿越相邻隧道施工的数值解析[J]. 岩土力学,2004,25(增刊):224 - 226.
- [6] 刘传利,漆泰岳,谭代明,等. 近接隧道施工工序的数值模拟研究[J]. 隧道建设,2009,29(1):49 - 53.
- [7] 白海卫. 新建隧道下穿施工对既有隧道纵向变形的影响和工程措施研究[D]. 北京:北京交通大学土木工程学院,2007.
- [8] 李廷春,李术才,陈卫忠,等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报,2004,26(3):397 - 401.

Study on the Influence of the Tunnel of High-speed Railway Adjacent Excavation on Existing Municipal Tunnel

LU Jun-fu¹, JIA Yuan-yuan², WEI Long-hai³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 3. The Second Highway Survey Design and Research Institute, China Communications, Wuhan 430056, China)

Abstract: Based on the design and construction of a new intercity railway tunnel construction in up-down cross existing municipal pipeline tunnel in Chengdu, the stress characteristics and displacement law of existing municipal pipeline tunnel in the process of dewatering construction and tunnel adjacent excavation were demonstrated with theory of fluid-solid coupling of finite discrete method(FDM). The study results show that the variation and distribution of stress and displacement of primary support and secondary lining of existing municipal pipeline tunnel tend to be uniform, the value of displacement of infall section is the largest, which gradually decreases from the infall section to the ends along the longitudinal direction of the existing tunnel; the longitudinal stress at arch crown of tunnel is compressive stress and at invert of tunnel is tension stress in range of 30m in infall position; the influence value of dewatering construction is more larger than the influence of new tunnel construction on existing municipal pipeline tunnel, the proportion of displacement caused by dewatering construction is about 75 ~ 80 percent and the proportion of displacement caused by tunnel adjacent excavation is about 20 ~ 25 percent, the largest longitudinal tension stress caused by dewatering construction may be 1.39 ~ 3.39 times of the largest longitudinal tension stress caused by tunnel adjacent excavation. Therefore, it is necessary to take some measures to guarantee safety of the existing tunnel.

Key words: existing municipal tunnel; close-space construction; dewatering construction; mechanical characteristics