

管道下穿对既有铁路的影响及加固对策研究

高友长

(中南建设集团有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 正交下穿管道施工对上跨铁路道床扰动较大, 采用常规管道施工技术难以保证既有铁路的运营安全。为研究下穿管道对既有铁路道床变形的影响, 探索合理的下穿管道施工方案, 文中以潍坊高新区浞钢中水管道工程为背景, 采用 FLAC^{3D} 有限差分软件建立正交下穿既有铁路线的管道三维数值模型, 对注浆加固、管棚支护及强化管片 3 种加固方案进行研究, 重点对道床变形、管片内力和管道变形进行对比分析。结果表明, 管道施工将导致铁路道床产生较大不均匀沉降, 道床沉降以管道轴线为中心线对称分布, 管道与道床轴线交点位置沉降最大; 既有铁路荷载对下穿管片管片应力和变形的影响显著, 道床下方的管片应力和变形最大; 地层注浆加固、管棚支护及强化管片都能减小管道施工对道床的扰动, 其中地层注浆加固方案效果最显著。

关键词: 地下工程; 管道开挖; 注浆加固; 铁路道床; 道床沉降

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0143-05

近年来, 随着经济的发展, 城市地下空间开发规模日益增大, 城市管道的敷设范围逐渐扩大, 新建管道不可避免地需要下穿既有运营铁路线。根据新建管道与既有铁路线相对位置关系, 可分为下穿或邻近两类, 下穿类又可分为正交下穿、斜交下穿及平行下穿 3 种情况。相关研究表明, 正交下穿施工对既有铁路线扰动影响最大, 施工风险最高, 为确保既有铁路线的安全, 需制订严密的施工控制方案。

对管道下穿既有铁路的控制方案已有一些研究, 如冯印针对超大直径顶管群顶进穿过京沪铁路路基, 通过仿真计算分析了不同管道顶进次序对铁路路基及轨道变形的影响, 提出了袖阀管注浆加固路基方案; 刘金国对比分析了注浆结合钢套管支护和仅注浆加固对燃气管道下穿既有铁路施工的影响; 张磊对管道交叉下穿既有运营铁路线进行了研究; 赵大亮建立结构—路基—土体有限元模型, 研究了洞内加固和注浆加固对铁路路基的扰动效应。上述研究提出的加固方案基本属于同一类型, 没有研究不同类型加固方案的加固效果。随着地下空间的发展及空间利用率的提升, 管道正交下穿既有运营铁路线工程将增加, 选取对道床扰动最小、最经济的加固方案尤为重要。该文通过 FLAC^{3D} 有限差分软件构建管道正交下穿既有运营铁路模型, 对地层注浆加固、管棚支护及强化管片 3 种下穿铁路管道的施工方案进行对比, 分析其对铁路道床变形的影响, 为正交下穿既有铁路的管道工程施工提供参考。

1 工程概况

1.1 工程说明

潍坊高新区浞钢中水管道工程是潍坊高新技术产业开发区管委会的节能减排重点环保项目。该工程管线需正交下穿胶济客专、胶济线及潍坊特钢集团调车线铁路, 下穿段长度约 35 m, 管道埋深最浅约 2 m, 道床下方拱顶距离道床表面约 8.6 m, 管道内径为 1 600 mm, 管片厚度为 160 mm。管线与铁路线路的位置关系见图 1。

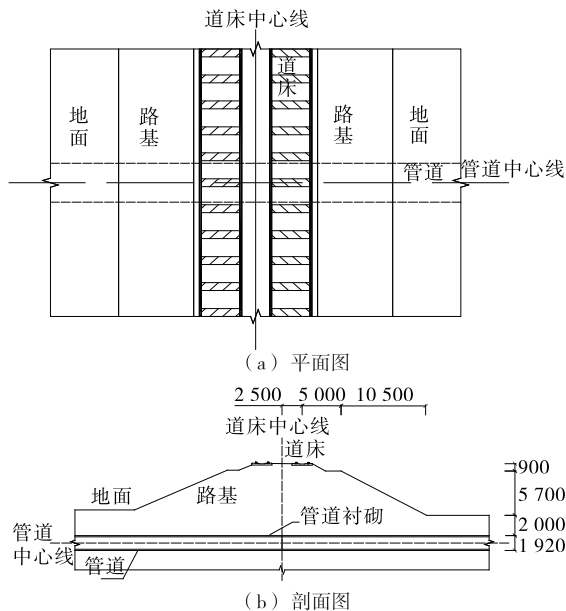


图 1 管道与铁路的位置关系(单位: mm)

1.2 土层条件

管道穿越土层主要为粉土层。路基以下的岩土层自上而下分别为:素填土,以黏性土为主,场区普遍分布,平均厚度 0.98 m;粉土,平均厚度 2.20 m;粉质黏土,硬塑,干强度及韧性中等,平均厚度 5.80 m;全风化凝灰岩,极软岩,极破碎,岩石基本质量等级为 V 级。各地层的主要物理力学参数见表 1。

表 1 各地层的物理力学参数

地层名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形 模量/ GPa	泊松 比	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚 力/ kPa
素填土	16.0	5	0.35	10.0	14.3
粉土	17.3	15	0.30	19.1	16.6
粉质黏土	18.6	30	0.28	20.9	32.0
全风化凝灰岩	20.0	300	0.25	35.0	75.0

1.3 施工支护方案

该工程采用外径为 1 920 mm 的小型土压平衡盾构机施工,管道采用钢筋砼管,砼强度等级为 C35。管道下穿正在运营的铁路线,为减少运营铁路道床变形,结合工程现场条件,拟采用地层注浆加固、管棚支护及强化管片 3 种加固方案对道床变形进行控制。

(1) 地层注浆加固方案。在管道下穿前,先对管道下穿地段采取静压注浆加固处理。如图 2 所示,为方便掘进,注浆花管采用塑料袖阀管,内径 25 mm,壁厚 8 mm,注浆管间距 1.2 m,排距 1.2 m,梅花形布置,注浆处理深度为地下 6 m,注浆范围为铁路坡脚外 10 m,加固纵向长度为管道中心线左右各 5 m,注浆管与水平面夹角为 30° 。

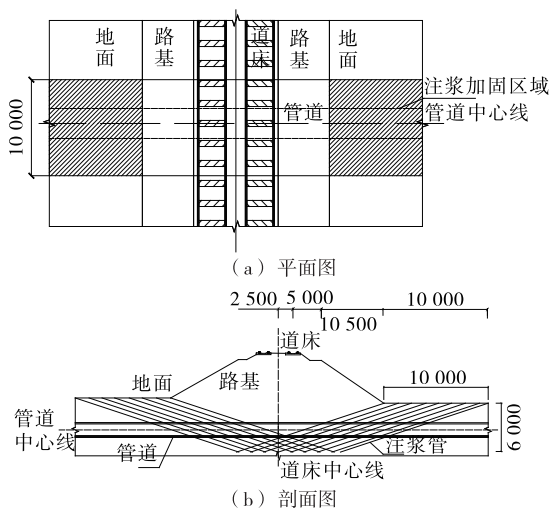


图 2 地层注浆加固方案示意图(单位:mm)

(2) 管棚支护方案。在管道下穿前,布置管棚支护。如图 3 所示,管棚与管片外壁的距离为 500 mm,管棚钢管采用 $\phi 108$ mm 无缝钢管,壁厚 6 mm,节长 6 m,环向间距 200 mm,均匀布置在管道的上半圆周范围内,呈水平角度插入。

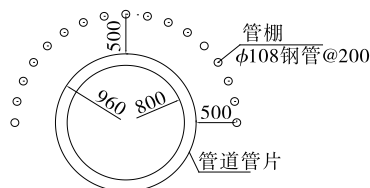


图 3 管棚支护布置示意图(单位:mm)

(3) 强化管片方案。主要是适当提高砼管片强度,管片预制时采用提高水泥标号、优化砼配合比、蒸压养护等措施将砼强度等级提高至 C50。

2 数值模型建立

2.1 计算模型

采用 FLAC^{3D} 软件建立三维有限差分模型,土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型,管道管片、路肩及道床采用实体线弹性模型构建。模型底部(Z向)距离管道中心线 12.4 m,顶部距离管道中心线 2.8 m,左右两侧距离管道中心线 20.0 m,模型纵向(Y向)取 70.0 m。路基部分尺寸按照图 2 构建。模型底面限制 Z 方向位移;前后侧面限制 X 方向位移;左右侧面限制 Y 方向位移;地表为自由边界。网格划分原则为距离盾构开挖部分较近的地方划分较密,较远的地方划分较稀疏。管道正交下穿铁路路基模型见图 4。

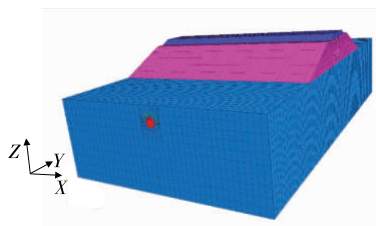


图 4 管道正交下穿铁路路基计算模型

2.2 计算参数

计算模型主要涉及土层、管道管片、路基、道床、管棚及注浆加固层。土层物理力学参数根据表 1 选取,管道管片、路基、管棚、道床按表 2 赋值。根据公路、水利部门的统计资料,地层注浆加固数值模拟时,加固区土层的粘聚力、内摩擦角和弹性模量可相应提高 20%,该工程注浆加固区域土层参数按该原

则选取。管棚采用线弹性实体单元模拟。

表 2 支护材料的物理力学参数

结构名称	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/GPa
C35 管片	2 500	0.25	34.5
路基	2 500	0.28	11.0
道床	2 350	0.20	50.0
管棚	2 600	0.25	14.0
C50 管片	2 750	0.23	40.2

既有铁路为有砟轨道,采用 60 kg/m 的重型铁轨,截面面积为 77.45 cm²,两条铁轨之间距离为 1.6 m;采用木质枕木,轨枕长 2.6 m,轨枕及扣减重 3.7 kN/根。根据《铁路路基设计规范》,速度目标值为 200 km/h 以下的客运专线,可将火车活载、铁轨等按照与路基本体重度相同的矩形土体进行换算。通过计算,道床上部荷载可转化为约 3 m 厚的矩形土体,等效为 0.75×10⁵ Pa 的均布荷载。

3 计算结果与分析

通过构建的数值计算模型对不加固处理、地层注浆、管棚支护及强化管片 4 种情况下穿施工中道床沉降、管片应力和管道的拱顶沉降进行分析,评价施工方案的控制效果。

3.1 道床沉降变形对比分析

如图 5、图 6 所示,道床沉降呈 V 形槽状,最大沉降出现在管道轴线与道床轴线相交处;随着离管线距离的增大,道床沉降减小,距离管道轴线大于 10 m 后道床沉降已极小。不对管道下穿段进行加固时,道床最大沉降为 4.56 mm,位于管道轴线与道床轴线相交处,距离管线 10 m 范围最大沉降差达 3.98 mm,道床的不均匀沉降明显,超过了《铁路路基设计规范》中 120 m 范围内不均匀沉降不大于 3 mm 的规定。采用地层注浆加固时,道床最大沉降为 1.84 mm,同时道床沉降快速发育区域的范围有所减小,管道轴线左右两侧 10 m 范围内最大沉降差为 1.42 mm;采用管棚支护时,道床最大沉降为 2.71 mm,道床不均匀沉降较明显,道床沉降快速发育的范围基本不变,管道轴线左右两侧 10 m 范围内最大沉降差为 2.38 mm;强化管片后,道床最大沉降为 2.57 mm,管道轴线左右两侧 10 m 范围内最大沉降差为 2.24 mm。3 种加固方案均能减小道床沉降和沉降影响区域,其中对道床变形影响最小的加固方式是地层注浆,效果较差是的管棚支护。

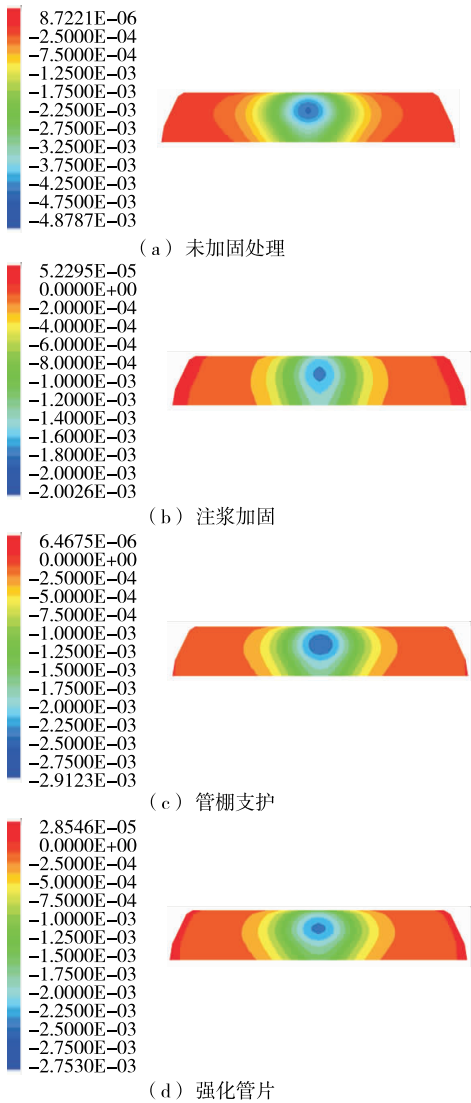


图 5 道床沉降云图对比(单位:m)

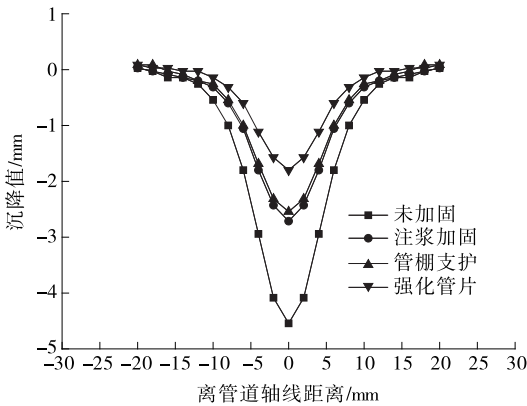


图 6 道床沉降曲线对比

3.2 管片应力对比分析

如图 7 所示,下穿管道应力最大的管片位于道床中心线下部,两侧管片应力逐渐减小,上部荷载对

管道的应力影响显著。未采取加固措施时,管道最大拉应力为 5.84×10^5 Pa;采取注浆加固措施时,管道最大拉应力为 4.59×10^5 Pa,这是由于土层通过注浆后其强度提高,更易形成坍落拱,减小了管道上部荷载;管棚支护后,上部结构一部分荷载由管棚承受,管道最大拉应力有所下降,为 4.92×10^5 Pa,但由于管棚刚度较小,管道最大拉应力下降不明显;加强管片后,由于管片变形减小,管道周边应力释放较小,作用在管道上的土层压力较大,管道最大应力提高,为 6.50×10^5 Pa。



图7 管片应力云图对比(单位:Pa)

3.3 管道拱顶沉降对比分析

如图8、图9所示,管道拱顶的沉降趋势与管道应力分布趋势近似,最大沉降出现在道床中线的正下方。未采取加固措施时,最大沉降为11.50 mm;

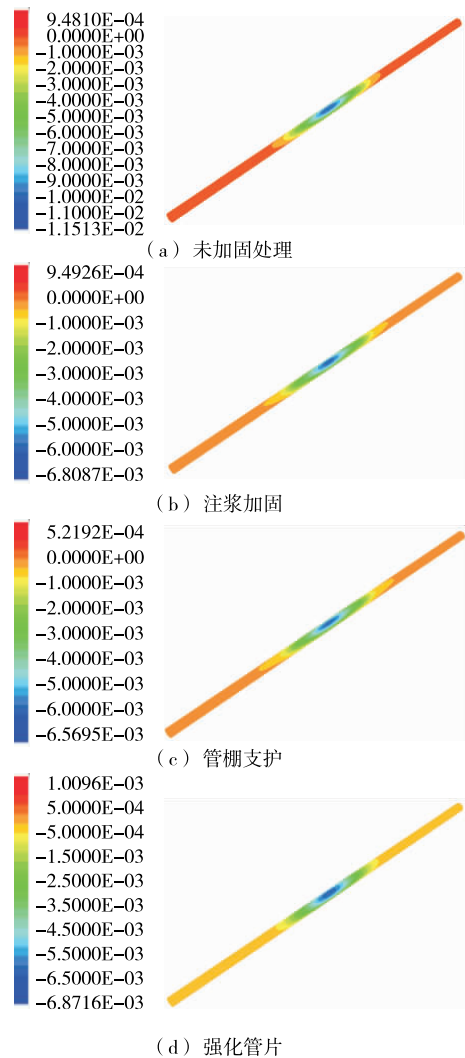


图8 管道拱顶沉降云图对比(单位:mm)

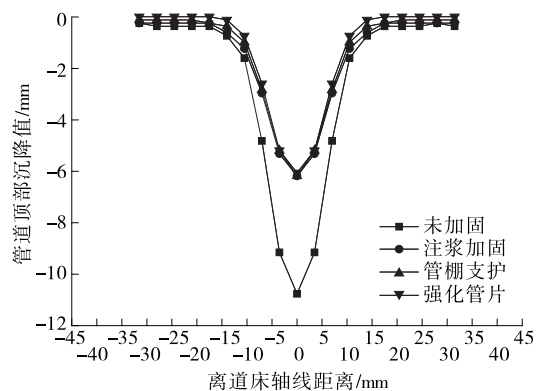


图9 管道拱顶沉降曲线对比

地层注浆加固后,管道周边土体强度提高、土压力减小,管道变形量也减小,管道最大拱顶沉降为 6.20 mm;采用管棚支护时,管道拱顶最大沉降为 6.25 mm,管棚支护对减小管道拱顶最大沉降有显著作用;提高管片强度,管片的强度和刚度均增大,对减

小拱顶沉降的作用较为直接,管道拱顶最大沉降为 6.25 mm。3 种加固方案对减小管道拱顶沉降都有显著作用,其中地层注浆加固和管棚支护是通过减小管道上部荷载从而减小管道拱顶沉降,而提高管片强度是通过提高管道自身刚度来减小管道拱顶沉降,与前面 2 种加固方案的变形控制机理不同。

3.4 加固方案综合对比分析

上述施工方案中的道床沉降、管片应力和管顶沉降结果对比见表 3。

表 3 不同加固方案的加固效果对比

加固方案	道床最大沉降/mm	道床 10 m 内最大沉降差/mm	管道最大应力/Pa	管顶最大沉降/mm
未加固	4.56	3.98	5.84×10^5	11.50
注浆加固	1.84	1.42	4.59×10^5	6.20
管棚支护	2.71	2.38	4.92×10^5	6.25
加强管片	2.57	2.24	6.50×10^5	6.25

从表 3 可看出:1) 采用注浆加固地层时,道床最大沉降减小 62.2%,最大沉降差减小 66.5%;采用管棚支护时,道床最大沉降减小 44.3%,最大沉降差减小 43.9%;采用强化管片措施时,道床最大沉降减小 47.2%,最大沉降差减小 47.2%。3 种方案均能减少道床沉降和沉降差,其中注浆加固效果更好。2) 注浆加固和管棚支护方案对管片最大应力有减小的作用,其中注浆加固方案的效果最明显,管道最大应力减小 21.8%;而加强管片反而使管道最大应力增大 10.7%。3) 3 种方案对减小管顶最大沉降都有作用,其中注浆加固地层的效果最显著,管顶最大沉降减小 42.5%;管棚支护与加强管片方案对减小管顶最大沉降的效果一致,均减小 42.1%。

地层注浆加固方案对减小道床和管道的扰动最明显,且施工较方便,工程造价也较低;管棚支护加固方案虽然对道床及管道的扰动都有一定减弱效果,但在前期施工即打设管棚时,由于钻孔的影响,会对道床产生扰动;改变管道自身强度和刚度的加固方案对减小对道床的扰动有一定效果,但对道床不均匀沉降的控制效果较差,且自身内力会有所增加。综上,3 种管道下穿铁路路基施工加固对策中注浆加固的效果最佳,同类工程可参考使用。

4 结论

(1) 管道下穿铁路路基会对上部道床产生较大扰动,施工中需重视管道施工带来的扰动,下穿管道

采取有效的加固方案,确保铁道交通运营安全。

(2) 下穿管道施工将导致铁路道床产生较大不均匀沉降,道床沉降以管道轴线为中心线对称分布,管道与道床轴线交点位置沉降最大,道床沉降分布呈 V 形槽状。

(3) 既有铁路荷载对下穿管线管片应力和管道拱顶沉降的影响显著,道床底的管片应力和管道拱顶沉降最大。

(4) 注浆加固、管棚支护及强化管片加固方案均能减小道床和管道的变形,其中注浆加固对道床和管道变形的控制效果最佳,建议采用地层注浆加固方案施工下穿管道。

参考文献:

[1] WU Quanli, Wang M, Zhu L, et al. Construction technology for the shield tunnel passing under the existing metro line at the launching end[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(4).

[2] Zhang M, Fan J, Pan B Y. Analysis on construction influence of the underpass of oblique crossing subway tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 716—717.

[3] 冯印. 超大直径顶管群下穿京沪铁路的设计研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8).

[4] 刘金国. 燃气管道下穿既有铁路施工方法[J]. 铁道建筑, 2018(6).

[5] 张磊. 港清三线输气管道下穿京沪铁路工程设计[J]. 中国高新技术企业, 2014(3).

[6] 赵大亮. 地铁隧道下穿对既有铁路的影响分析及加固对策[J]. 铁道建筑技术, 2017(12).

[7] Robert D J. A modified Mohr-Coulomb model to simulate the behavior of pipelines in unsaturated soils[J]. Computers & Geotechnics, 2017, 91.

[8] 孙子正, 李术才, 刘人太, 等. 软流塑地层注浆加固作用量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1).

[9] 李志平, 李留玺. 隧道管棚支护技术及其数值模拟[J]. 科技创新导报, 2015(13).

[10] TB 10001—2016. 铁路路基设计规范[S].

[11] 黄宝柱. 注浆技术在地面沉陷控制中的研究与应用[J]. 矿山测量, 2015(6).

[12] 牟锐. 下穿公路隧道大管棚施工地表沉降研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3).