

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.020

新建公路跨越既有石油管道安全防护技术研究*

段利河¹, 赵亮¹, 陈阵¹, 王平让²

(1. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136; 2. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 新建公路跨越既有石油管道时,会对石油管道产生一定影响,采用合适的跨越方案避免或减小对既有石油管道的影响十分必要。文中结合某跨越石油管道的新建公路项目,针对不同埋深的跨越段,提出钢筋混凝土涵洞和钢筋混凝土盖板 2 种跨越方案,并通过理论分析和数值模拟验证跨越方案的可行性。结果表明,在路堤自重、路面及车辆荷载作用下,涵洞和盖板跨越方案均可有效控制石油管道的变形和受力,对石油管道影响均较小,不会对石油管道的安全和正常运行造成不利影响,特别是涵洞跨越方案,其影响更小;石油管道埋深越小,受公路施工的影响越大,同时随着石油管道埋深增大,石油管道的变形逐渐减小。

关键词: 公路;石油管道;跨越方案;安全防护;钢筋混凝土涵洞;钢筋混凝土盖板

中图分类号:U418.7

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0101-06

新建工程在既有管道上方施工,会导致管道局部变形甚至损伤,施工前对管道受力和变形进行正确预测非常重要^[1-3]。郜新军等基于实际工程,分析了基坑开挖过程中不同加固方法对管线变形的影响并通过数值模拟进行了验证^[4];施有志等采用数值模拟方法分析了厦门地铁一号线某基坑开挖工程,通过划分影响区的方法得到了邻近管线的影响规律^[5];骆驰等针对某古镇隧道工程,分析并提出了下穿高压输油管道隧道工程的施工及运营期风险处理措施^[6];张学进针对杭州市某隧道下穿地下管线工程,通过数值模拟分析得到了在淤泥地质层中隧道距地表距离、与管线不同夹角等对管线的影响^[7]。公路跨越既有石油管道时一般采用路基通过方案或桥梁跨越方案^[8]。新建公路受路线线形的影响,不可避免地会与输油管道小角度交叉跨越,不满足《公路路线设计规范》的相关要求,需采取特殊的跨越措施^[9-10]。本文结合某新建公路跨越既有石油管道工程,通过数值模拟对石油管道的受力和变形进行研究,分析不同埋深、不同跨越方案对既有石油管道的影响,并验证跨越方案的可行性。

1 工程概况

1.1 路线交叉情况

受地形限制,某新建公路路线在某城际高铁东侧约 240 m 处与石油管道交叉 2 次:第一交叉段,管

道与左、右幅路基中心交叉角度分别为 38° 和 31° ,交叉长度约 107 m,该段范围内管道埋深为 2.0~2.3 m,路基填高约 1.2 m;第二交叉段,管道与左、右幅路基中心交叉角度分别为 168° 和 169° ,交叉长度约 240 m,该段范围内管道埋深为 1.2~10.5 m,路基填高约 1.2 m(见图 1)。管道采用直径为 559 mm 的钢管,设计输送压力为 8.0 MPa。

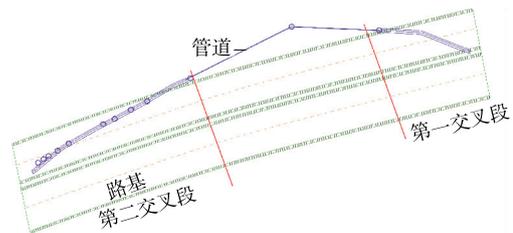


图 1 公路与石油管道交叉段平面图

1.2 跨越方案比选

在既有石油管道上方进行公路施工,目前常用的跨越方案有桥梁、路基、涵洞和刚性盖板 4 种。

(1) 桥梁跨越方案。桥梁跨越方案能有效避免车辆荷载对石油管道的影响,在 4 种方案中对管道的影响最小。但采用桥梁跨越方案时桥梁基础必须远离管道影响范围,会加大桥梁跨度,增加投资。此外,桥梁基础施工会对管道产生不利影响,若考虑后期可能增设公路线路,则需要修建更大跨度的桥梁,投资会进一步增加。

* 基金项目:河南省科技攻关计划(社发领域)项目(192102310489;202102310243)

(2) 路基跨越方案。路基跨越方案可以将车辆荷载平均分散到地面,减小管道的局部受力。和桥梁跨越方案比较,路基跨越方案投资明显降低,但难以避免对下埋管道特别是浅埋管道产生影响。为降低对下埋管道的影响,常采取增加路基高度和宽度的措施,但既有公路规划标高已定,同时增加路基高度和宽度会导致公路路线衔接困难,也会增加工程造价。

(3) 涵洞跨越方案。涵洞是为公路排水或穿越相交道路、管道或其他障碍物而建造的结构物。涵洞洞身不仅能保证水流通过,还能起到承载车辆荷载的压力和上部填土质量的作用。与路基跨越方案相比,涵洞跨越方案虽然造价较高,但其对浅埋管道的影响较小。

(4) 刚性盖板方案。刚性盖板方案是在道路上方跨越管道部分设置钢筋混凝土盖板,该方案施工容易,造价较低。刚性盖板可有效增加管道上方的受力面积,减弱管道受到的局部压力。此外,刚性盖板施工对下方管道产生的扰动较小,可避免管道由于施工而受到影响。

综上,4种方案中桥梁跨越方案和路基方案优势不大。对于浅埋管道,涵洞具有足够的强度和稳定性,能保证管道在荷载作用下不产生明显位移和变形,具有较高的可靠性和耐久性。对于深埋管道,刚性盖板方案可大幅降低造价,并且可为后期公路改扩建预留空间。因此,该公路跨越石油管道推荐采用涵洞和刚性盖板方案。

1.3 跨越方案设计

该石油管道在第二交叉段的埋深变化较大,受上方填土荷载和车辆荷载的影响更大。根据相关石油管道保护条文及规范,结合现场建设环境、地质条件等因素,为避免公路施工及运营等相关附加荷载对管道结构造成损害,保证石油管道的正常运营,针对第二交叉段不同埋深地段分别提出以下跨越方案:对于埋深小于3.5 m的地段,采用4.0 m×2.0 m钢筋混凝土涵洞跨越方案,保护总长度为119 m(见图2);对于埋深大于3.5 m的地段,采用在距管道顶3.0~9.0 m处设置钢筋混凝土盖板的跨越方案(见图3)。

根据JTG D20—2017《公路路线设计规范》,公路与油气输送管道相交时,以正交为宜,若斜交,其交叉锐角角度应大于30°^[11]。该项目第二交叉段管道与右幅路基中心交叉角度为169°,不满足规范要

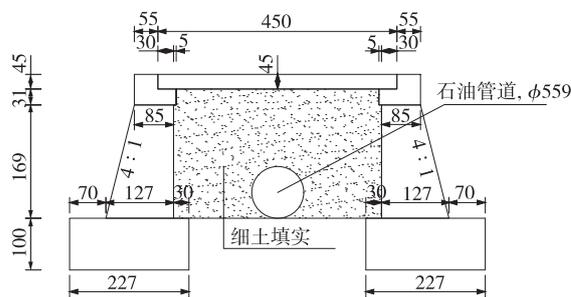


图2 钢筋混凝土涵洞跨越方案(单位:cm)

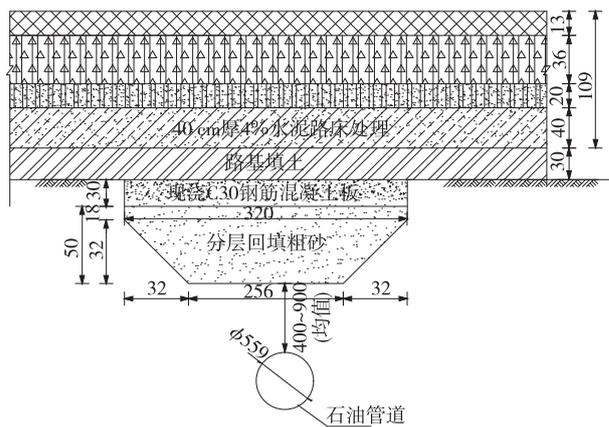


图3 钢筋混凝土盖板跨越方案(单位:cm)

求,需对石油管道的受力和变形进行研究,分析不同跨越方案对管道的影响,并验证方案的可行性。

2 理论分析

2.1 管道沉降位移计算

借鉴Attewell P. B.等提出的隧道周围土体形变规律经验计算公式,将石油管道简化为地基梁,计算管道周围土体的竖向位移。设坐标原点为开挖面正上方地表点, x 轴为垂直于管道的轴线方向, y 轴为在开挖平面内与 x 轴垂直的方向, z 轴和管道轴线平行,以开挖方向为正,有:

$$\omega = f(x, y, z) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \left[G\left(\frac{z-z_0}{i}\right) - G\left(\frac{z-z_f}{i}\right) \right] \quad (1)$$

式中: ω 为管道的竖向位移; V_s 为地层损失; i 为横向宽度系数; z_0 为开挖起点; z_f 为开挖终点; $G(\cdot)$ 表示正态概率积分。

2.2 管道安全系数计算

为确保公路施工不会对既有石油管道的安全造成影响,计算在不同跨越方案下受力最不利状态(管道沉降最大时)时管道的安全系数。将管道受力简化为偏心受压构件,其强度安全判别公式如下:

$$KN \leq \varphi \alpha R_a b h_0 \quad (2)$$

式中: K 为安全系数; N 为轴向力; φ 为构件的纵向弯曲系数; α 为轴力的偏心影响系数; R_a 为管道的极限抗压强度; b 为管道截面宽度; h_0 为管道截面厚度。

3 数值计算模型

3.1 数值模型计算区域

该交叉段石油管道最小埋深为 1.8 m,埋深小于 3.5 m 时采用涵洞保护方案,埋深大于 3.5 m 时采用刚性盖板保护方案。由于交叉距离、工程规模和方案布置不同,综合考虑多种因素的影响,对第二交叉段选择 2 个典型段落进行数值模拟分析(见图 4)。

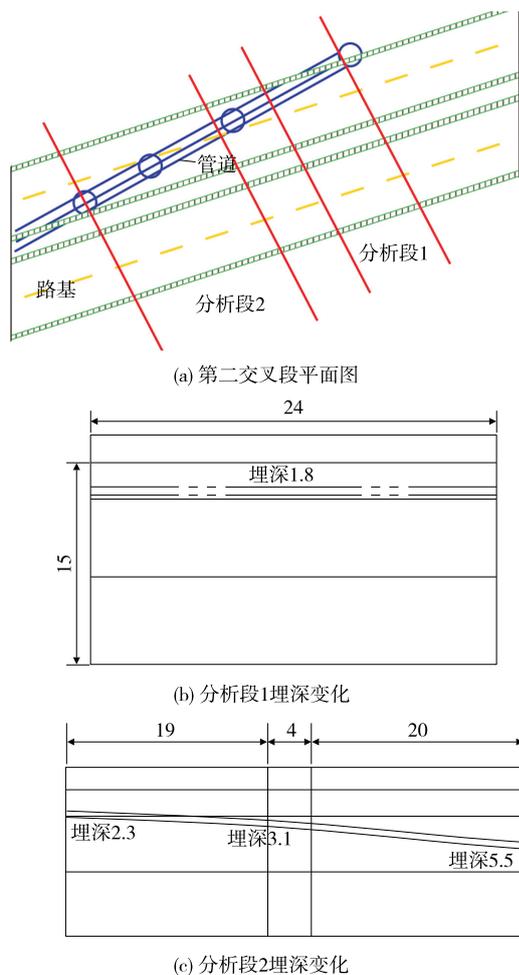


图 4 数值模型计算区域示意图(单位:m)

3.2 数值模型和边界条件

分析段 1 数值计算模型宽 42.5 m,纵向长 24 m,计算深度 15 m(从原地表向下取 15 m),整个计算模型共划分为 236 146 个网格(见图 5)。

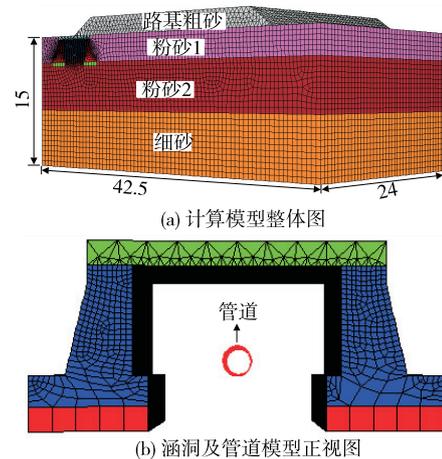


图 5 分析段 1 数值计算模型(单位:m)

分析段 2 数值计算模型宽 42.5 m,纵向长 43 m(包含 23 m 涵洞段及 20 m 盖板段),计算深度 15 m(从原地表向下取 15 m),整个计算模型共划分为 367 820 个网格(见图 6)。

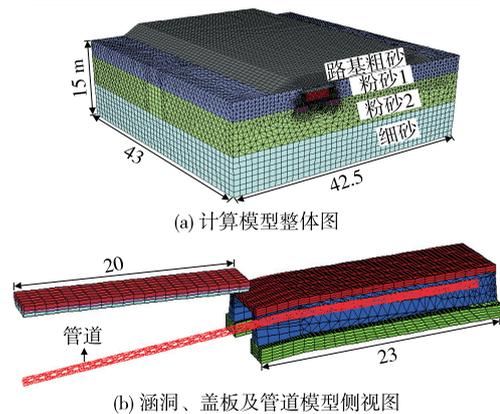


图 6 分析段 2 数值计算模型(单位:m)

路堤填土及下部土体采用摩尔—库伦准则,混凝土墩、盖板及管道采用弹性模型。路堤填土、下部土体、混凝土墩、盖板采用实体单元模拟,管道采用壳单元模拟。模型四周采用侧向约束,底面采用全部约束,顶面不进行约束,自由变形。路面施加车辆荷载,车辆荷载根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》的规定确定^[12],管道内施加 8 MPa 压力。

3.3 数值计算参数

根据地质勘察报告,将数值计算模型深度范围内土层分为 5 层,各层的物理力学参数见表 1,混凝土和管道的物理力学参数见表 2。

3.4 施工过程模拟

数值模型计算过程如下:1) 自重应力平衡;2) 铺设管道,施加管道运营压力;3) 涵洞、盖板施

表1 土层的计算参数

土层名称	重度/ (kN·m ⁻³)	压缩模 量/MPa	泊松比	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/(°)
粉砂1	18.0	10	0.30	0	28
粉砂2	19.5	12	0.38	0	34
细砂	20.5	37	0.40	0	38
回填土	20.5	37	0.40	0	38
路基粗砂	20.5	46	0.40	0	42

表2 混凝土盖板及管道的计算参数

名称	弹性模量/GPa	泊松比
混凝土	30	0.20
管道	205	0.30

注:管道直径 559 mm,壁厚 8.1 mm,内压 8 MPa。

工,路堤填土,施加路面车辆荷载。

4 数值分析结果

4.1 分析段1计算结果

4.1.1 土体沉降位移

为便于分析,沿管道铺设方向设置2个计算剖面,分别位于 $z = -10$ m 和 $z = -20$ m 处(见图7)。分析段1不同剖面的土体沉降位移见图8。

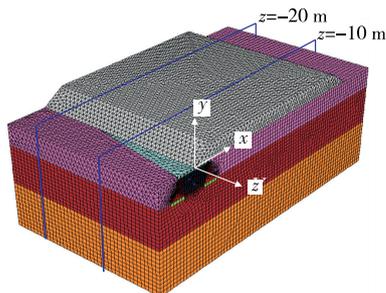


图7 分析段1数值模型计算剖面示意图

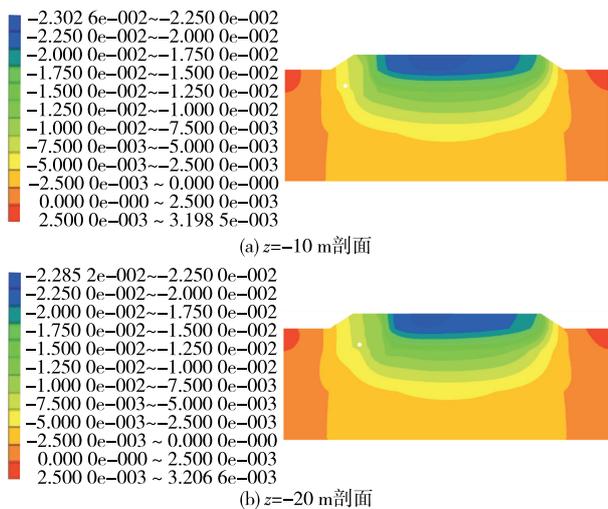


图8 分析段1不同剖面沉降位移云图(单位:m)

由图8可知:在路堤自重及路面、车辆荷载作用下,剖面的沉降位移与剖面的深度成反比,最大位移沉降量约为 2.3 cm,总体地表沉降较小;最大沉降位移出现在路面,随着向两侧延伸,位移逐渐趋于稳定。

4.1.2 石油管道变形

分析段1石油管道的最终位移见图9。

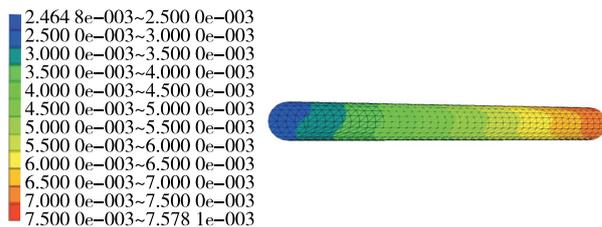


图9 分析段1石油管道最终位移云图(单位:m)

由图9可知:分析段1石油管道的最大位移为 7.58 mm,最小位移为 2.46 mm。根据实际工程资料,管道两接头间的沉降差不得超过管道长度的 2/‰。分析段1管道长度为 24 m,其沉降差不得超过 48 mm。采用盖板跨越方案,管道变形满足要求,跨越方案合理。

4.1.3 石油管道应力

公路施工前,埋设于地下的管道具有一定的初始环向应力,初始纵向应力很小。公路施工产生的外部荷载会导致管道产生附加应力。分析段1石油管道的第1、第2及第3主应力见图10。

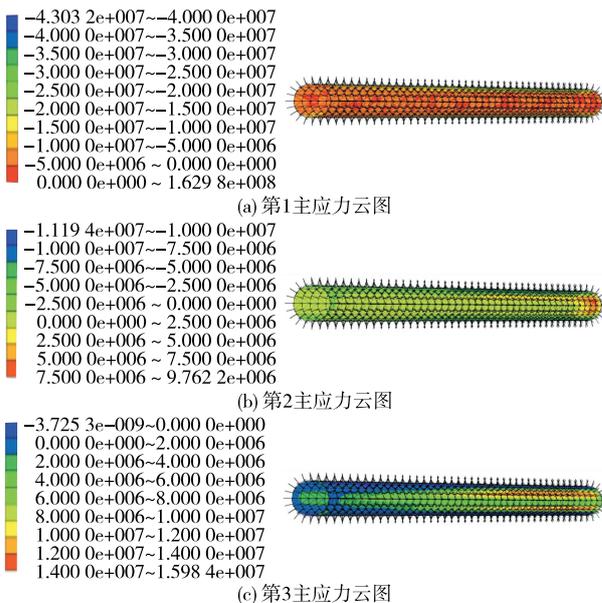


图10 分析段1石油管道主应力云图(单位:Pa)

由图10可知:管道的最大拉应力、最大压应力分别出现在管道末端和管道顶部,管道侧面主要表

现为环向压应力。分析段 1 石油管道的最大主应力约为 43.2 MPa,远小于石油管道 450 MPa 的屈服强度。从管道受力角度来看,跨越方案满足要求。

4.2 分析段 2 计算结果

4.2.1 土体沉降位移

为便于分析,沿管道铺设方向设置 4 个计算剖面,分别位于 $z = 10\text{ m}$ 、 $z = 20\text{ m}$ 、 $z = 30\text{ m}$ 和 $z = 40\text{ m}$ 处(见图 11)。分析段 2 不同剖面的土体沉降位移见图 12。

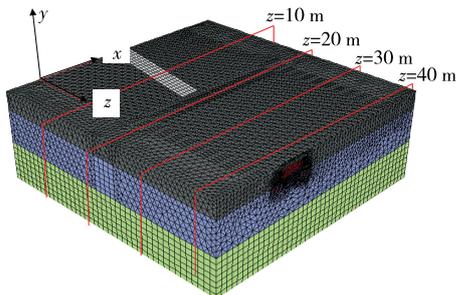


图 11 分析段 2 数值模型计算剖面示意图

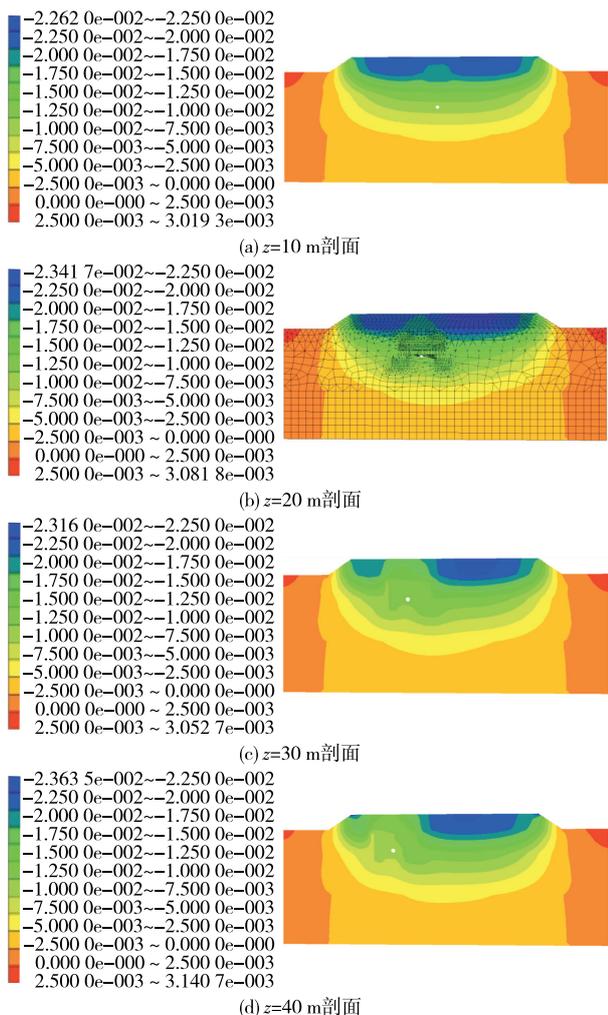


图 12 分析段 2 不同剖面沉降位移云图(单位:m)

由图 12 可知:在路堤自重及路面、车辆荷载作用下,涵洞和盖板跨越方案均可有效控制石油管道的位移,其中涵洞跨越方案的效果更明显。分析段 2 的最大沉降位移约为 2.4 cm,总体地表沉降较小,最大沉降位移出现在路面,随着向两侧延伸,位移逐渐趋于稳定。

4.2.2 石油管道变形

分析段 2 石油管道的最终位移见图 13。

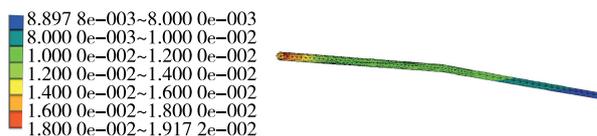


图 13 分析段 2 石油管道最终位移云图(单位:m)

由图 13 可知:在路堤自重及路面、车辆荷载作用下,分析段 2 石油管道的最大位移为 19.2 mm,且随着管道埋深增大,位移逐渐减小。由于石油管道离地表较近,管道变形实际上可近似反映地表沉降,地表沉降最大值为 24 mm。根据实际工程资料,管线两接头间的沉降差不得超过管道长度的 2/‰。分析段 2 管道长度为 43 m,其沉降差不得超过 86 mm,表明涵洞和盖板方案对控制管道变形均非常有效。

4.2.3 石油管道应力

分析段 2 石油管道的第 1、第 2 及第 3 主应力

见图 14。

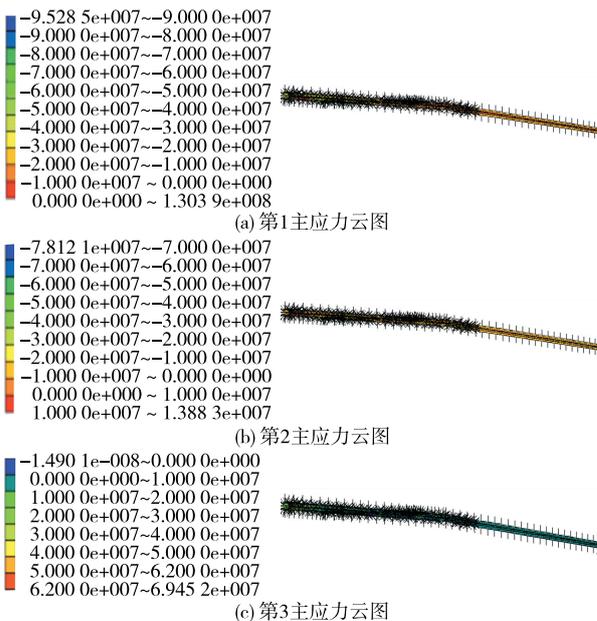


图 14 分析段 2 石油管道主应力云图(单位:Pa)

由图 14 可知:管道的最大拉应力、最大压应力分别出现在管道末端和顶部,管道侧面主要表现为

环向压应力。分析段2管道的最大主应力约70 MPa,小于管道450 MPa的屈服强度。从应力角度分析,跨越方案满足控制要求。

4.3 跨越方案对比分析

根据式(1)、式(2)分别计算涵洞和盖板跨越方案下管道的沉降位移和安全系数,验证数值分析的正确性及两种方案的合理性。

分析段1和分析段2施工后,石油管道的最大实测沉降分别为7.9 mm和20.0 mm,按式(1)计算的最大沉降分别为8.5 mm和21.6 mm,理论计算相对误差分别为7.6%和8.0%。数值分析的相对误差为4%。由于理论分析中地基梁算法未考虑管道与土体间的耦合作用,数值分析结果更精确。

分别对分析段1和分析段2取开挖方向1 m为1个计算单元,将轴向力带入式(2),计算得到安全系数分别为 $K_1=3.18$ 、 $K_2=2.97$,均大于规范要求的安全系数2.0,表明两种跨越方案都能保证石油管道的受力安全,具有良好的荷载分散功能; $K_1 > K_2$,从一定程度上表明涵洞方案比盖板方案更能有效控制管道变形和受力,保护性能更优。

5 结论

采用三维数值模拟分析新建公路跨越既有石油管道时管道的变形和受力特征,得出如下结论:1)在路堤自重、路面及车辆荷载作用下,涵洞和盖板跨越方案均能有效控制石油管道的变形和受力,其中涵洞方案的控制效果更优。2)公路下方石油管道离地面越近,受公路施工的影响越大,同时随着石油管道埋深增大,管道位移逐渐减小。3)涵洞和盖板跨越方案施工对石油管道的影响均较小,不会对石油管道的安全和正常运行造成不利影响。

目前该公路交叉范围内涵洞和盖板已顺利完成

施工,取得了良好的安全防护效果。

参考文献:

[1] 关中原,高辉,贾秋菊.油气管道安全管理及相关技术现状[J].油气储运,2015,34(5):457-463.

[2] 田鲁鲁,周锦强,郭永发,等.柱洞法施工地铁车站邻近管线变形控制技术[J].城市轨道交通研究,2020,23(7):69-73+78.

[3] 娄国充.铁路隧道下穿既有路基沉降规律及控制标准研究[D].北京:北京交通大学,2012.

[4] 郜新军,段鹏辉,王磊.基坑开挖对邻近管线变形影响及控制措施研究[J].郑州大学学报(工学版),2020,41(5):66-71.

[5] 施有志,葛修润,李秀芳,等.地铁深基坑施工对周边管线影响数值分析[J].中山大学学报(自然科学版),2017,56(6):83-93.

[6] 骆驰,雷俊峰,石继训.公路隧道下穿高压输油管道的安全风险控制研究[J].现代隧道技术,2019,56(1):200-204.

[7] 张学进.淤泥质土浅埋暗挖隧道下穿既有管线影响研究[J].铁道工程学报,2020,37(7):77-83.

[8] 周超.公路跨越既有铁路隧道的方案设计与研究[J].隧道建设,2014,34(1):32-40.

[9] 吴为义,孙宇坤,张土乔.盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析[J].中国铁道科学,2008,29(3):58-62.

[10] 刘晓强,梁发云,张浩,等.隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J].岩土力学,2014,35(S2):217-222+231.

[11] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTGD20-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[12] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵通用设计规范:JTGD60-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

收稿日期:2022-02-07

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱,它们盗用“公路与汽运”的名称,非法向外征稿并收取审稿费、版面费,严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗,本刊郑重声明:

1 本刊的网址为 <http://glyqy.csust.edu.cn>。互联网上以“公路与汽运”名义建立的其他网站都是假冒的,此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊唯一的投稿邮箱是 gongluyuqiyun@163.com,除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为,并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

《公路与汽运》编辑部