

天然气管道定向钻穿越高速公路质量控制与安全措施

刘新峰, 刘福林, 尹泽政

(广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘要:天然气管道下穿高速公路涉路工程危险性较高,对公路及其附属设施影响较大,给高速公路运营及远期扩建带来安全隐患。文中通过工程实例对天然气管道下穿高速公路路基的设计方案进行探讨,分别从天然气管道下穿对高速公路路基沉降的影响、压路机与高速公路堆载对管道的影响、天然气管道应力与位移控制等方面进行分析,提出有针对性的保护措施,为涉路工程质量和安全评价提供借鉴。

关键词:公路;天然气管道;高速公路;路基沉降;管道应力;位移控制

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0075-06

近年来中国各地相继颁布涉路工程施工质量和安全评价管理规范^[1-3],旨在规范化管理涉路工程施工,规避工程施工及各工程之间的远期冲突、安全隐患。天然气管道涉路工程在公路相关规范中有明确规定^[4-5],是涉路工程管理的关注重点之一。《广东省交通运输厅关于公路路政许可涉路施工质量和安全技术评价的管理办法》^[1]对管线下穿高速公路的评价要点包括穿越位置、管线埋深、远期规划、交叉角度、水平净距、施工、意外险情处理、路面路基沉降与修复等,还要求围绕涉路工程施工方案合理性、运营安全保障、公路改扩建影响等对既有公路结构物功能及运营安全进行评价,但并未明确指出安全性评价的具体内容。本文以天然气管道下穿高速公路路基工程为例,从高速公路路基沉降、压路机与高速公路堆载对管道的影响、管道应力与位移控制等方面对天然气管道涉路施工安全性进行分析。

1 天然气管道涉路工程的风险

天然气管道事故发生原因有第三方施工损害、土体移动、管壁腐蚀及材料、设计和施工缺陷等。设计缺陷包括管道抗压、抗拉、抗弯所需管壁厚度不足,埋深不合理,防腐措施不当及未考虑远期外界因素对管道的影响等。管道沿线的警示、警告标志及指示标志清楚与否也会影响管道运营安全。

天然气管道施工对高速公路的主要影响:高速公路路面发生较大沉降,进而影响车辆通行安全性;

天然气泄漏引发爆炸,损坏高速公路结构,导致交通事故,造成人员伤亡。

高速公路对天然气管道的影响:汽车尤其是重型运载车通过时,荷载作用通过地面传递至管道或形成冲击力反复作用在管道上,使管道发生蠕变,加上土压力、土体形变的叠加作用,管道发生变形甚至破裂、爆炸;远期高速公路扩建,路面大面积堆载造成管道压应力增大、变形过大,管道次生应力增加,导致管道破损、泄漏;压路机碾压可能导致管道承受压力过大而变形破坏,造成安全事故。

2 工程概况

广东省粤西天然气主干管网阳江—江门干线于江门市台山市大江镇岐岭村采用水平定向钻下穿新台(新会—台山)高速公路路基,管径为 813 mm,壁厚为 20.5 mm,钢管屈服强度为 485 MPa,设计压力为 9.2 MPa。定向钻穿越长度为 790.7 m,曲线段管顶距离路基顶面 17.0 m、距离路基坡脚 12.5 m,水平段管顶与地面的最大距离为 17.5 m。如图 1 所示,

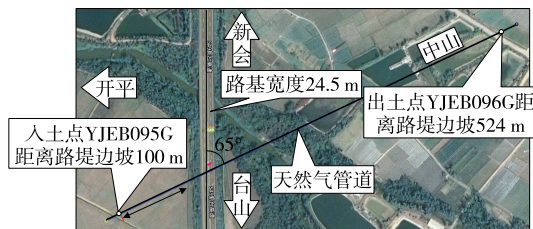


图 1 天然气下穿高速公路工程平面图

入土点、出土点均位于水田中,场地开阔,附近有乡村道路通行,交通方便,穿越工程等级为中型;下穿位置高速公路路基宽度为24.0 m,路基高度为4.5 m。

3 对高速公路路基沉降的影响

CECS 246: 2008《给水排水工程顶管技术规范》要求穿越施工造成的公路路面沉降应小于或等于20 mm。根据JTG 5210—2018《公路技术状况评定标准》,路面局部沉降损坏程度中,轻度为沉陷深度10~25 mm,行车无明显颠簸感;重度为沉陷深度大于25 mm,行车有明显颠簸感。天然气管道一般采取定向钻工艺施工和顶管工艺施工,施工过程中对土体的扰动及扩孔孔壁与管道外壁之间泥浆失水收缩均会引起地层发生变形,导致高速公路路基产生沉降。沉降计算一般采用Peck经验公式:

$$S_{\max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为管道轴线上方的最大地面沉降量(m); V_s 为管道单位长度的土体损失量(m^3/m), $V_s = \pi r^2 \eta$; r 为孔道半径(m); η 为土体损失率(%); i 为地面沉降槽宽度系数(m), $i = H/[2.5 \times \tan(45^\circ - \varphi/2)]$; H 为顶管埋深(m); φ 为土体内摩擦角($^\circ$)。

利用Peck经验公式计算管道施工引起的沉降有两种思路:一种是采用土体损失率法;另一种是假设扩孔孔壁与管道外壁之间的空隙量为土体损失量,即 $V_s = \pi(r^2 - d^2/4)$ (d 为管道外径)。顶管施工中管道外径与钻孔直径的空隙较小,而定向钻施工中管道外径与钻孔直径相差较大,钻孔外径为管道外径的1.2~1.5倍,空隙较大,对土体的扰动及土体损失均较大。根据经验,建议顶管施工时采用以空隙量为土体损失量的方法,定向钻施工时采用土体损失率法。

土体损失率根据土体性质、施工工艺及工程经验选取,目前针对地铁盾构施工引起地面沉降的土体损失率研究较多,土体损失率 η 取0.2%~3.01%;对于黏土, η 通常取0.5%~2.5%;对于均质土, η 通常取0.5%~2.0%,其中砂土取0.5%,软土取1%~2%^[6]。针对定向钻施工工艺的土体损失率研究缺乏。本文根据工程经验,确定定向钻下穿高速公路时土体损失率 η 为3%~6%。

该项目按照六级扩孔,每级扩孔相差100~200 mm,最终成孔为1 200 mm。穿越位置地层从上自下为素填土、粉质黏土、中粗砂和砂质黏土、全

风化花岗岩,管道位于中粗砂层中。管道距离路基顶面16.7 m,按照土层厚度加权法取土体综合内摩擦角为20°,损失率 η 取6%,按照Peck经验公式计算得路基最大沉降为2.9 mm,小于路面轻度沉陷深度限值(10~25 mm),不影响高速公路行车安全。建议在管道回拖完成后采用水泥砂浆置换管道与孔壁环空隙内的泥浆,以减小土体损失率。

4 压路机对管道的影响

远期高速公路路基加宽,压路机施工对管道的影响主要为压路机荷载的影响及压路机振动的影响(见图2)。在一个周期内,压路机施工荷载随时间的变化见式(2)~(4)^[7]。

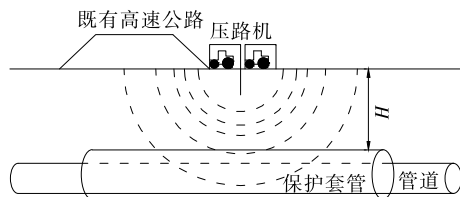


图2 压路机对管道影响示意图

$$\begin{cases} P = G + F_0 \sin \omega t, G + F_0 \sin \omega t \geq 0 \\ P = 0, G + F_0 \sin \omega t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$p = \frac{P}{LB} \quad (3)$$

$$B = \frac{d}{2} \sin \beta \quad (4)$$

式中: P 为振动轮对被压实层施加的垂直作用力; G 为振动轮净质量; F_0 为激振力; ω 为振动角速度; t 为时间; p 为振动压应力,振动钢轮与被压实层材料的接触面近似为矩形,并假设振动压应力均匀分布; L 为振动轮宽度; B 为振动轮接地宽度; d 为振动轮直径; β 为振动轮阻角,取8.836^[8]。

根据式(2)~(4),运用土力学原理,按照应力扩散角法或布辛内斯克解^[9]可计算得到一定深度范围内管顶的压应力。

压路机引起的管道振动速度计算公式为:

$$v_{\text{速度}} = 2\pi f_0 A_{r\text{线位移}} \quad (5)$$

$$A_{r\text{线位移}} = A_0 \left[\frac{r_0}{r} \xi_0 + \sqrt{\frac{r_0}{r}} (1 - \xi_0) \right] e^{-f_0 a_0 (r - r_0)} \quad (6)$$

式中: $v_{\text{速度}}$ 为振动速度; f_0 为基础上压路机的扰力频率(Hz); $A_{r\text{线位移}}$ 为距振动基础中心 r 处地面上的振动线位移(m); A_0 为振动基础的振动线位移(m);

r_0 为圆形基础半径(m); ξ_0 为无量纲系数; α_0 为地基土能量吸收系数(s/m)。

依据 GB 50040—96《动力机器基础设计规范》^[10],无套管穿越公路时,管道埋深为 17.5 m,车辆荷载对管道产生的环向应力为 0.064 kPa。路基压实阶段,XS220 压路机的振幅为 2 mm,振动轮宽度为 2.13 m,振动轮接地宽度为 0.123 m,振动频率为 33 Hz,对管顶产生的压力为 9 kPa,引起的管道振动速度为 0.6 cm/s,按控制标准 7 cm/s^[11]取 2 倍安全系数为 3.5 cm/s。管道埋深为 17.5 m 时压路机压力与振动不会影响管道安全。

车辆荷载作用影响深度为路面以下 3~6 m^[10],3 m 以内影响较显著,3~6 m 影响急剧减小。依据上述公式计算 1~6 m 管顶埋深下 XS220 压路机对管道压力和振动的影响,结果见图 3、图 4。

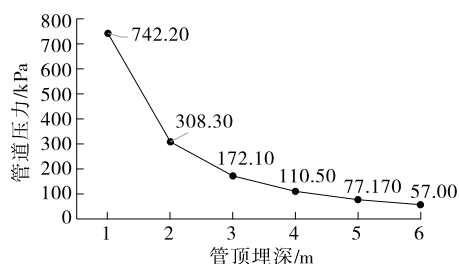


图3 不同埋深下压路机对管道的压力

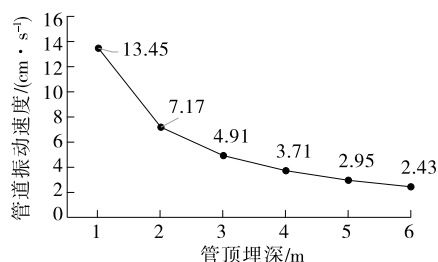


图4 不同埋深下管道的振动速度

由图 3 可知:路基扩建填土范围内,管顶埋深为 1 m 时,管道承受的压路机压力为 742.2 kPa;埋深为 2 m、3 m、4 m、5 m 时,压力分别减小 58%、77%、85%、90%。

由图 4 可知:管顶埋深为 4 m 时,管道振动速度为 3.71 cm/s,大于 3.5 cm/s,不满足要求;埋深为 5 m 时,管道振动速度为 2.95 cm/s,小于 3.5 cm/s,满足要求。

综合分析,管顶埋深 4 m 内应考虑压路机压力和振动的影响。

5 高速公路堆载对管道的影响

钢管在压力作用下的强度是否满足要求主要通

过径向稳定性和环向容许应力校核。高速公路路基堆载及运营车辆荷载作用下管道的环向应力可参考文献[11]、文献[12]附录 F 确定,水平定向钻施工时还应考虑管道在回拖过程中的弯曲应力、拉应力、环向屈服应力。

钢管周围外部环向应力计算公式^[13]如下:

$$F_{hc} = 1.31\delta_s / [1.15 + (\delta_s / F_{he})] \quad (7)$$

式中: F_{hc} 为容许环向屈服应力(MPa); δ_s 为钢管壁厚(m); F_{he} 为弹性环向失效力(MPa)。

土压力产生的管道环向应力 δ_{he} ^[12]为:

$$\delta_{he} = K_{he} B_e E_e \gamma D \quad (8)$$

式中: K_{he} 为钻孔方式下土压力作用下管道环向应力的刚度系数; B_e 为土压力埋深影响系数; E_e 为土压力挖掘系数; γ 为土壤的容重(kN/m³); D 为穿越管道外直径(m)。

车辆荷载产生的管道环向循环应力 δ_{hh} ^[12]为:

$$\delta_{hh} = K_{hh} G_{hh} R L F_i \omega \quad (9)$$

式中: K_{hh} 为公路车辆荷载产生环向循环应力的刚度系数; G_{hh} 为公路环向循环应力的几何因素; R 为公路路面类型系数; L 为公路车辆车轴类型系数; F_i 为冲击系数; ω 为车轮均布荷载标准值。

按照文献[14]计算管道径向稳定性,公式如下:

$$\begin{cases} \Delta_x \leq 0.03D \\ \Delta_x = \frac{ZKWD_m^3}{8EI + 0.061E_s D_m^3} \end{cases} \quad (10)$$

$$W = W_1 + W_2 \quad (11)$$

$$I = \frac{\delta_n^3}{12} \quad (12)$$

式中: Δ_x 为钢管水平方向最大变形(m); D 为钢管外径(m); Z 为钢管变形滞后系数,取 1.5; K 为基床系数; W 为作用在单位管长上的总竖向荷载(N/m); D_m 为钢管平均直径(m); E 为钢材的弹性模量(Pa); I 为单位管长截面惯性矩(m⁴/m); E_s 为土壤的变形模量(Pa); W_1 为单位管长上的竖向永久荷载(N/m); W_2 为地面可变荷载传递到管道上的荷载(N/m); δ_n 为钢管壁厚(m)。

定向钻施工时管道应力根据文献[13]按照最不利情况计算。该项目管道回拖工况下,钢管承受的拉应力 $f_t = 49.9 \text{ MPa} < 0.9\delta_s = 436.5 \text{ MPa}$,满足要求;钢管承受的允许弯曲应力 $F_b = 330.48 \text{ MPa}$,钢管承受的弯曲应力 $f_b = 70 \text{ MPa} < F_b$,满足要求;钢管承受的容许环向屈服应力 $F_{hc} = 118.65 \text{ MPa}$,钢管承受的外部环向应力 $f_h = 14.2 \text{ MPa} < F_{hc}/1.5 =$

79.1 MPa,满足要求。

穿越管段在扩孔回拖时,应验算空管在泥浆压力作用下的径向屈曲失稳性能。根据设计资料,泥浆压力 $P_s = 0.324$ MPa,钢管椭圆率未知,假定椭圆率 $f_0 = 3\%$,经计算,钢管弹性变形临界压力 $P_{cr} = 7.51$ MPa,极限外压为 $P_{yp} = 4.51$ MPa, $P_s \leq F_d \cdot P_{yp} = 1.8$ MPa (F_d 为穿越管段强度设计系数,一般取 0.4),满足要求。

现阶段高速公路扩建宽度为 11.15 m,路基填土高度为 4.5 m,采用水泥搅拌桩加固地基,处置深度为 6 m,管顶距离处置地基地部的最近距离为 6.7 m(见图 5),管道受到水泥搅拌桩及路基填土和车辆荷载的影响。经计算,扩建后,管道埋深为 17.5 m 时,公路土压力作用下管道环向应力为 74.4 MPa,小于容许环向屈服应力 $F_{hc}/1.5 = 79.1$ MPa,满足要求。

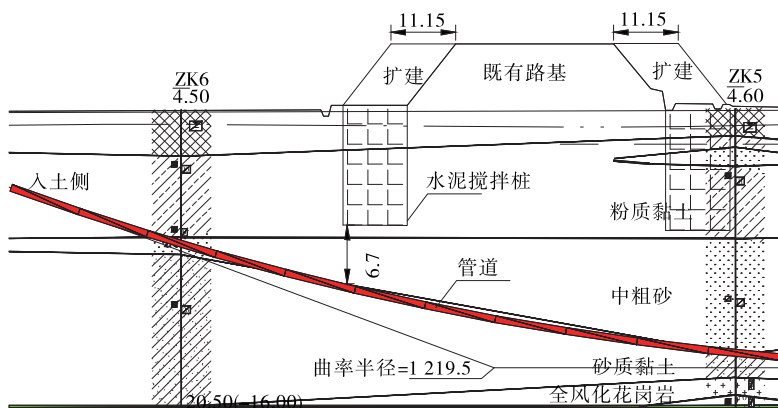


图 5 高速公路扩建示意图(单位:m)

钢管水平位移允许值为 24.39 mm。管道埋深为 17.5 m 时,在土压力与车辆荷载作用下管道产生的最大水平位移为 18.7 mm < 24.39 mm,径向稳定性满足要求。

6 管道局部应力与位移控制

管道计算中除考虑上覆土压力作用与施工过程中应力外,还应考虑高速公路远期扩建对管道局部应力与位移的影响。高压、超高压天然气管道允许沉降量 h 按式(13)计算。该项目 10 m 范围内允许差异沉降量为 8.2 mm。

$$h = 0.8(L/2)^2 / (2R) \quad (13)$$

式中: L 为管道单节管长度,该项目取 10 m; R 为管道敷设半径,该工程为 1 219.5 m。

高速公路路基远期扩建采用大面积水泥搅拌桩加固地基,新路基填筑后,管道将产生较大位移及次生应力,可能引发安全事故。采用 MIDAS NX 建立有限元模型进行分析,土层选用修正摩尔-库伦本构模型,土体采用实体单元模拟,管道采用植入式梁单元模拟。为减小边界效应,模型长度取 180 m,高度取 40 m,宽度取 50 m(见图 6)。土层参数见表 1。当管道弯曲下穿高速公路路基时,还应计算管道局部拉压应力是否满足强度要求。计算结果见图 7~10。

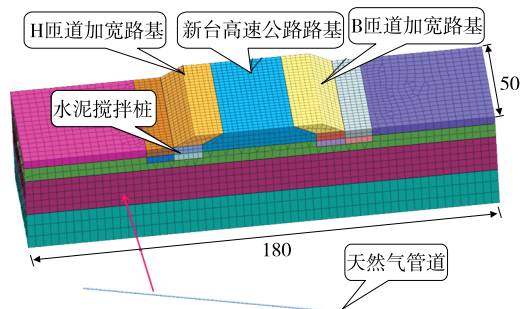


图 6 有限元模型(单位:m)

表 1 土层的计算参数

土层	天然密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
填土	1 700	7.6	5.0	5
粉质黏土	1 920	25.6	14.2	15
中粗砂	1 800	0.0	35.0	30
全风化花岗岩	1 870	14.8	29.5	200

由图 7~10 可知:管道埋深调整前管道最大纵向位移为 1.76 mm,最大竖向位移为 12.88 mm,大于 8.2 mm,不满足要求;管道最大轴向拉应力为 58.68 MPa,加载位置弯曲应力最大为 72.68 MPa。为保证安全,结合地质情况,建议加大管道的埋深,使管道在道路远期扩建范围内水平通过,即管顶距

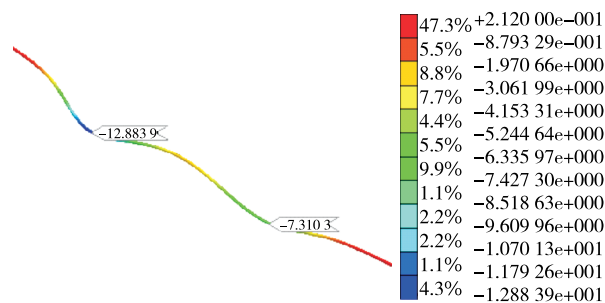


图 7 管道埋深调整前管道竖向位移(单位: mm)

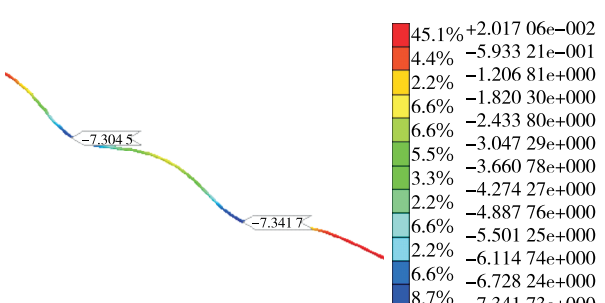


图 11 管道埋深调整后管道竖向位移(单位: mm)

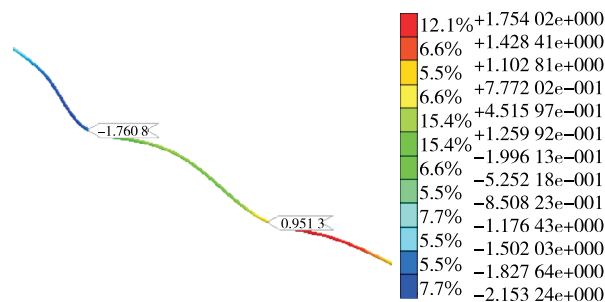


图 8 管道埋深调整前管道纵向位移(单位: mm)

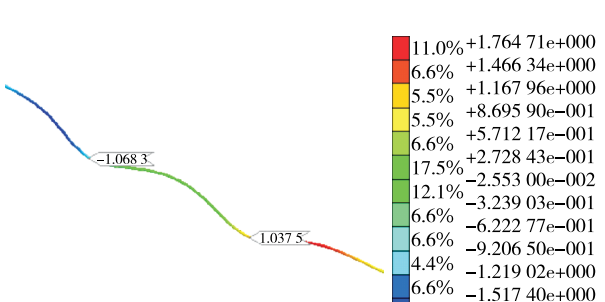


图 12 管道埋深调整后管道纵向位移(单位: mm)

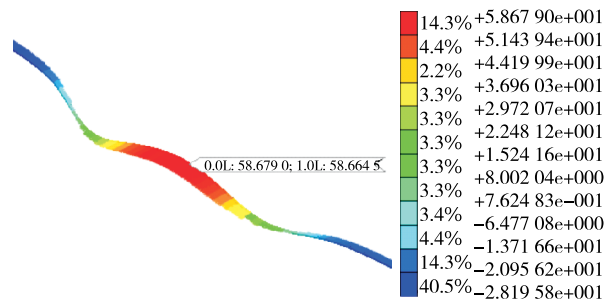


图 9 管道埋深调整前管道轴向拉应力(单位: MPa)

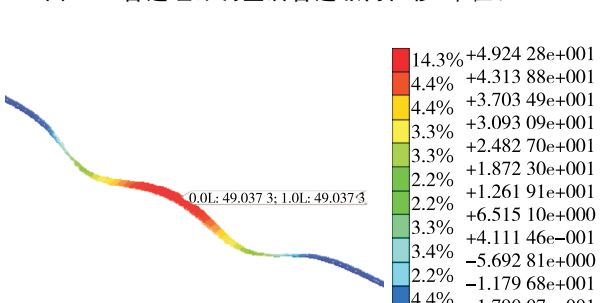


图 13 管道埋深调整后管道轴向拉应力(单位: MPa)

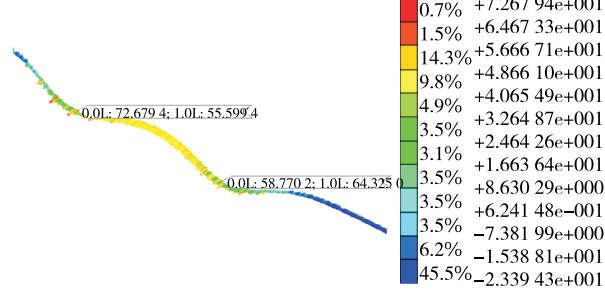


图 10 管道埋深调整前管道弯曲应力(单位: MPa)

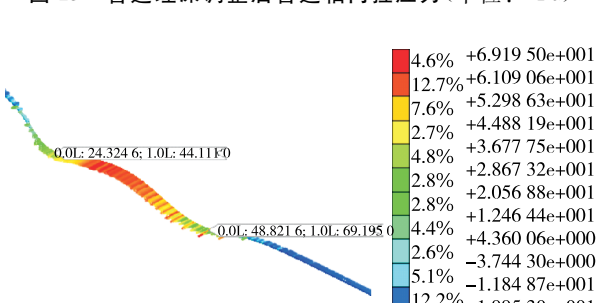


图 14 管道埋深调整后管道弯曲应力(单位: MPa)

离地面埋深均为 17.5 m,此时管底接近全风化花岗岩层。调整后管道位移与应力见图 11~14,调整前后管道位移和应力对比见表 2。

由表 2 可知:将管道弯曲段调平,埋深增加 5 m 后,天然气管道竖向位移减小 43.0%,为 7.34 mm,小于 8.2 mm,满足管道变形要求;管道拉应力为 49.24 MPa,比调平前减小 16.1%;弯曲应力为 69.20 MPa,比调平前减小 4.8%。

表 2 管道埋深调整前后管道位移和应力对比

埋深/ m	竖向位 移/mm	纵向位 移/mm	拉应力/ MPa	弯曲应 力/MPa
12.8	-12.88	-1.76	58.68	72.68
17.0	-7.34	-1.07	49.24	69.20
减小比例/%	43.0	39.2	16.1	4.8

7 结论

(1) 天然气管道下穿高速公路时,路基沉降计算中,顶管施工时采用以空隙量为土体损失量的方法;定向钻施工时采用土体损失率法,土体损失率取3%~6%。

(2) 天然气管道下穿高速公路应设置地下通道(涵)或套管,如未设置保护套管,应对管道受力进行验算。

(3) 管道下穿高速公路应考虑高速公路远期扩建中堆载对管道振动、次生应力与位移的影响,埋深4 m内应考虑压路机压力与振动的影响。

(4) 为保障管道安全,建议管道下穿高速公路路基段采取水平线形穿越的方式,管道两端采用柔性接头。

(5) 采用水泥砂浆对管道与孔壁环空间隙内的泥浆进行置换,尽量减小土体损失率。

(6) 加强管道沿线标志与警示牌设置,防止道路施工时在管道浅埋段上方堆载。

参考文献:

- [1] 广东省交通运输厅.广东省交通运输厅关于公路路政许可涉路施工质量和安全技术评价的管理办法:粤交[2020]1号[A].广州:广东省交通运输厅,2020.
- [2] 安徽省公路管理局,安徽省公路路政总队,交通运输部公路科学研究所.涉路工程安全评价规范:DB 34/T 2395—2015[S].合肥:安徽省交通运输厅,2015.
- [3] 云南省公路路政管理总队,云南省公路工程监理咨询公司,重庆蒙韬交通工程设计咨询有限公司.涉路项目工程技术评价规范:DB 53/T 2020—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

- [4] 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:JTG D20—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [5] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [6] 魏纲.盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J].岩土工程学报,2010,32(9):1354—1361.
- [7] 周正峰,凌建明,梁斌,等.机坪输油管道荷载附加应力分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1219—1224+1262.
- [8] 支喜兰,江晓霞,沙爱民.路面基层振动压实作用下的底基层应力[J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(3):33—36.
- [9] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学[M].北京:清华大学出版社,2022.
- [10] 中华人民共和国机械工业部.动力机器基础设计规范:GB 50040—1996[S].北京:中国标准出版社,1996.
- [11] 中国石油天然气股份有限公司管道分公司,中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司,中国石油天然气股份有限公司西部管道分公司,等.油气管道地质灾害风险管理技术规范:SY/T 6828—2011[S].北京:石油工业出版社,2011.
- [12] 中国石油天然气集团公司.油气输送管道穿越工程设计规范:GB 50423—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [13] 中国石油天然气管道工程有限公司,中国石油天然气管道局穿越分公司,中国石油天然气管道科学研究院.油气输送管道工程水平定向钻穿越设计规范:SY/T 6968—2013[S].北京:石油工业出版社,2013.
- [14] 中国石油天然气集团公司.输气管道工程设计规范:GB 50251—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.

收稿日期:2022-05-24

(上接第70页)

- [15] 张青哲.土基振动压实系统模型与参数研究[D].西安:长安大学,2010.
- [16] MOONEY M A, RINEHART R V, FACAS N W, et al. Intelligent soil compaction systems[R]. NCHRP Report 676, 2010.
- [17] KRÖBER W, FLOSS R, WALLRATH W. Dynamic soil stiffness as quality criterion for soil compaction[C]//Geotechnics for Roads, Rail Tracks, and Earth Structures, 2001:188—199.
- [18] MOONEY M A, ADAM D. Vibratory roller integrated

measurement of earthwork compaction: An overview[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2007.

- [19] 西南交通大学.铁路路基填筑工程连续压实控制技术规程:TB 10108—2011[S].北京:中国铁道出版社,2011.
- [20] FACAS N W, MOONEY M A. Characterizing the precision uncertainty in vibratory roller measurement values[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(1):43—51.

收稿日期:2022-05-20