

管道穿越高速公路安全影响分析

唐宇航

广东华路交通科技有限公司，广东 广州

收稿日期：2023年12月21日；录用日期：2024年1月22日；发布日期：2024年1月30日

摘要

随着各类涉路行为日趋增多，对涉路行为的安全评价结论成为行政许可的主要依据。本文以管道顶管穿越高速公路为例，针对管道穿越高速公路可能产生的影响进行分析，形成一套检查表格，并收集规范标准进行量化评价，同时对存在的安全隐患进行识别与评估，并提出相应的建议，为类似项目提供借鉴。

关键词

顶管施工，涉路工程，量化评价

Analysis of Safety Impact of Pipeline Crossing on Expressway

Yuhang Tang

Guangdong Hualu Transport Technology Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Dec. 21st, 2023; accepted: Jan. 22nd, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

With the increasing of various kinds of road behaviors, the conclusion of safety evaluation on-road behaviors has become the main basis for administrative licensing. This paper takes pipeline jacking through the highway as an example, analyzes the possible impact of the pipeline crossing the highway, forms a set of inspection forms, collects norms and standards for quantitative evaluation, identifies and evaluates the existing safety hazards, and puts forward corresponding suggestions

文章引用：唐宇航. 管道穿越高速公路安全影响分析[J]. 土木工程, 2024, 13(1): 121-130.

DOI: 10.12677/hjce.2024.131016

to provide a reference for similar projects.

Keywords

Pipe-Jacking, Road Related Engineering, Quantitative Evaluation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国经济的高速发展,各类基础设施建设如火如荼。建设过程中,新建管线与已有的高速公路存在平面交叉,需要进行涉路施工。在正常营运的高速公路上进行涉路施工,这一行为存在破坏原有道路结构及配套设施进而影响结构及行车安全的风险[1]。然而我国目前对于该类的涉路施工安全评价还没有统一的体系,评价内容模糊,评价标准较为分散,从而出现评价报告权威性不足,行政审批单位不能根据评价结论评判涉路行为的安全性的情况[2]。由于该类问题应用性较强,相关论文多以地方规范编制的评价报告形成,对相关的评价指标研究较少。本文以管道顶管穿越 G0421 高速公路项目安全评价项目为例,通过研究如何将该类项目对高速公路的安全影响形成一套检查清单并进行量化评价,为类似项目提供借鉴。

2. 项目概况

广东省某市政供水设施项目给水管采用顶管方式从 G0421 高速公路路基段穿越,交叉角度为 90° ,顶进长度为 145 m。给水管为 D1220 * 14 mm 钢管,外套 $\Phi 1650 * 165$ mm 的 III 级钢筋混凝土管进行防护;采用泥水平衡法顶管施工工艺;工作井和接收井均位于高速公路的建筑控制区外,采用沉井结构,不排水下沉;顶管段套管顶部距地面最小垂直净距为 3.64 m;由于施工井之间距离过长,顶力不够,剩余 60 m 需通过中继间完成顶进。为实现工程的质量管理及涉路安全,需编制给水管穿越 G0421 高速涉路施工保障公路、公路附属设施进行安全和质量技术评价,以提高施工规范性、减少涉路工程对公路结构的影响,并为交通主管部门的审批提供依据。

3. 评价因素

3.1. 设计评价内容

通过对《公路路线设计规范》《公路工程技术标准》《广东省公路管理局关于公路路政许可的实施办法》《给水排水工程顶管技术规程》等规范进行汇总:需要对管道涉路设计指标进行评价的有:管道穿越位置、敷设方式、覆土厚度、与公路交叉角度、对公路远期扩建影响、施工期间对公路建(构)物的影响。

3.2. 施工评价内容

对施工这一块的评价内容主要有:施工方案,应急预案,监测方案三项内容。并通过对施工方案进行风险评估,识别和评估施工过程中对高速公路造成不利影响的潜在风险及程度,并提出相应的策略,从而保障公路、公路附属设施的质量和安

4. 设计方案质量和安全技术评价

4.1. 管道穿越位置评价

参考《油气输送管道穿越工程设计规范》：油气管道不宜与公路、铁路反复交叉穿越；需要与公路、铁路交叉时，其穿越点宜选在公路、铁路的路堤段和管道的直线段，穿越宜避开高填方区、路、路两侧为同坡向的陡坡地段。当条件受限时也可从公路、铁路的桥梁下交叉穿越。

评价结论：本工程给水管道采用顶管方式，从高速路堤段穿越，该路段为一般填方路段($H < 20\text{ m}$)，因此管道敷设设置满足规范要求。

4.2. 管道敷设方式评价

《公路工程技术标准》：管道与各级公路相交叉且采用下穿方式时，应设置地下通道(涵)或套管，通道或套管应按相应等级的汽车荷载等级进行验算。

《公路路线设计规范》：本次修订在源引《标准》(2014)对应修订成果的基础上，综合考虑当前管道施工工艺和技术的发展(主要是顶管法施工工艺)，无论是管道施工期间，还是后期检查与维护，均无需开挖公路路基、对公路正常通行影响小等情况，明确要求管道与高速公路、一级公路交叉时可采用专用通道(涵)或套管等方式。

评价结论：该给水管道下穿高速公路时，采用外套 III 级钢筋混凝土管的防护方式，经复核能满足管道受力(见 3.5 节)，满足规范要求。

4.3. 管道覆土厚度评价

《广东省公路管理局关于公路路政许可的实施办法》：供水和排污管道在公路上埋设，管顶距路面基底应不小于 1.0 m ，距离边沟底应不小于 0.5 m ；供水、污水管道应有可靠的防漏措施。不得因渗漏而影响路基、路面的稳定。

《给水排水工程顶管技术规程》：管顶覆盖层厚度在不稳定土层中宜大于管道外径的 1.5 倍，并应大于 1.5 m 。

评价结论：根据设计图纸(如图 1 所示)，给水管道从高速公路路基段顶管穿越，顶管段套管顶部距地面和边沟底部的最小垂直净距分别为 3.64 m 和 2.44 m ，管道埋深满足规范要求。并设有 III 级钢筋混凝土管套管，能有效防止水管渗漏影响路基、路面稳定，防漏措施可靠。

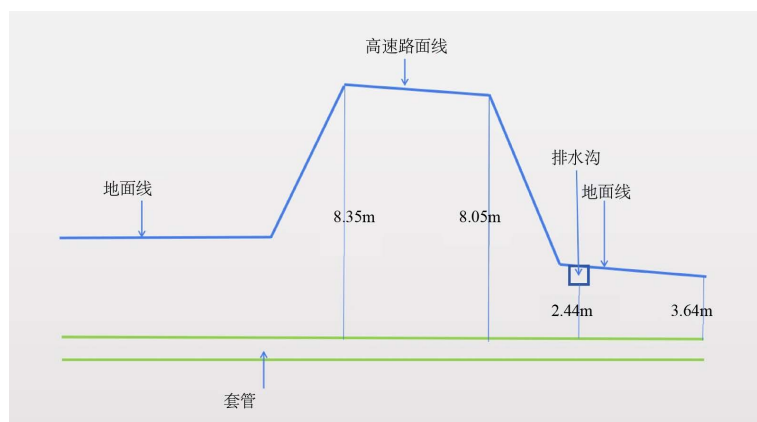


Figure 1. Section diagram of pipeline laying on highways
图 1. 管道在高速公路敷设断面图

4.4. 管道工程与公路交叉角度评价

《广东省公路管理局关于公路路政许可的实施办法》：管道与既有公路、桥梁交叉角度以垂直为宜，必须斜交时，应不小于 30°。

评价结论：本次给水管道穿越高速公路时，与高速公路交叉角度为 90°，交叉角度满足规范要求。

4.5. 套管结构受力评价

根据《公路工程技术标准》：管道与各级公路相交叉且采用下穿方式时，应设置地下通道(涵)或套管，通道或套管应按相应等级的汽车荷载等级进行验算。需要对套管进行验算，而规范中并未给出相关的计算公式，故可采用经验公式进行验算。套管在土壤中时，受到的荷载有两个，一个为车辆通过土壤传导至套管上的车辆荷载，另外一个为由于土的自重，套管需承受上方的土压力。

1) 车辆荷载附加应力如表 1 所示：

Table 1. Additional stress of vehicle load on the top surface of the casing
表 1. 套管顶面车辆荷载附加应力

被穿道路	车辆荷载重力标准值(KN)	实际覆土厚度(m)	应力扩散面积(m ²)	附加应力(KN/m ²)
高速公路	1430	8.05	659.80	2.16

注：考虑高速公路载重车实际情况，汽车荷载值按公路—I 级汽车荷载增加1.3安全系数数量。

2) 套管上方土压力计算

一般来说，套管上方土压力有两种计算，分别为土柱法和卸荷拱法，由于顶管施工穿越高速公路到路面的实际覆土深度为 8.05 m~8.35 m， $H > 2.5h_0$ ，故可采用卸荷拱理论进行计算[3]。管道覆土自路面以下依次为素填土，粉质黏土或粉细砂其重度分别为 19 KN/m³、19 KN/m³、20 KN/m³。

土压力作用下套管承受的荷载：

$$P_{\pm} = \frac{2}{3}\gamma_{\pm} \times 2r \left[h_0 + (h_0 - h') \operatorname{tg} \left(45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right) \right] = 72.00 \text{ KN/m}$$

套管受到的车辆荷载[4]： $W = 0.5D_{pm} \times P_{\text{车}} \times \left[u_1 + 2(1 - u_1) / \pi \right] = 1.96 \text{ KN/m}$

套管受到的总荷载： $P \leq P_{\pm} + W = 72 + 1.96 = 73.96 \text{ KN/m}$

若简单采用土柱法计算则： $P \leq P_{\pm} + W = 20 \times 8.35 + 1.96 = 168.96 \text{ KN/m}$ ，则套管结构受力不满足要求，需要减少管道埋深，则根据 3.7.1 节，路面沉降将增大，进而对行车安全影响增大。根据工程经验及研究表明：对于浅埋结构物其上方的竖向土压力可直接采用土柱法进行计算，但是随着埋深的增大，地层产生土拱效应使管道四周的松动土压力远小于全覆土重，因此评价时不能简单的采用土柱法计算套管受力。

评价结论：钢筋混凝土套管内径 1.65 m，壁厚 0.165 m，根据《顶进施工法用钢筋混凝土排水管》(JC/T 640-2010)标准，本项目钢筋混凝土套管裂缝荷载为 148 KN/m，破坏荷载为 222 KN/m。计算得出套管所承受的荷载为 73.9 KN/m，小于钢筋混凝土套管裂缝荷载及破坏荷载，因此套管结构受力满足要求。

4.6. 远期扩建评价

跨越段高速公路现状为双向八车道。本次考虑高速公路远期扩建方案为双向八车道扩建为双向十二车道，即两侧扩建 10 m (2 × 3.75 m 车道宽 + 2.5 m 左侧硬路肩)。本项目顶管穿高速公路，工作井与接收井均设置在高速公路两侧，根据设计图和施工方案，工作井和接收井为临时结构，施工完成后采用石屑

回填, 压实度 95%。因此主要考虑施工期间施工机械对管道破坏从而造成水管开裂, 进而使路基遭到浸泡, 会造成一定的安全风险。

考虑高速公路扩建施工时使用振动压路机, 应对扩建施工时套管进行受力分析。根据以往经验, 路基施工时压路机吨位一般不大于 32 吨, 现以 32 吨振动压路机为例进行计算。计算参数如下:

下穿高速公路扩建段管道最小覆土厚度 3.64 m, 建成后高速公路路面下管道最大覆土 8.35 m。同时考虑扩建前对路面进行清表, 路面清表深度为 30 cm。考虑压路机振动时振动荷载最大值为静载 1.5 倍, 计算套管上压路机荷载引起的竖向应力时, 车轮按其着地面积的边缘向下作 30°角分布。最不利荷载组合如图 2 所示。

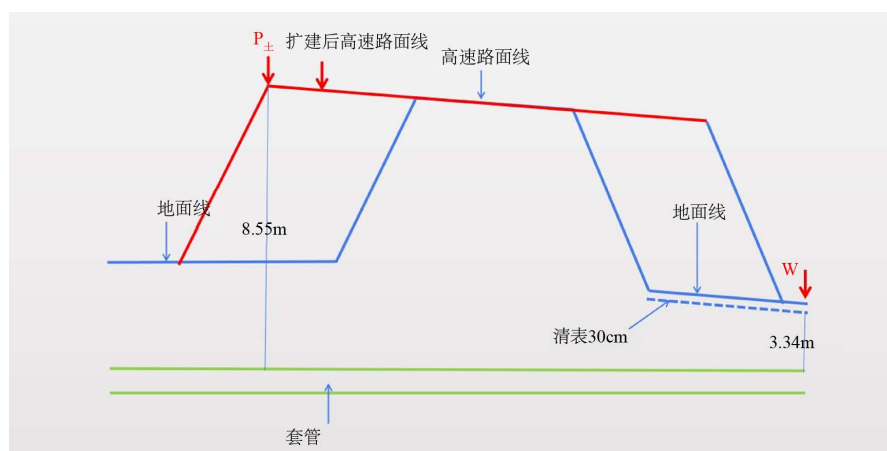


Figure 2. Schematic diagram of the most unfavorable load on pipelines under the action of road rollers

图 2. 管道在压路机作用下最不利荷载示意图

Table 2. The most unfavorable additional stress on the load of the casing top roller

表 2. 套管顶面压路机荷载最不利附加应力

压路机荷载重力标准(KN)	实际覆土厚度(m)	应力扩散面积(m ²)	附加应力(kN/m ²)
480	3.34	38.33	12.52

压路机荷载附加应力如表 2 所示:

套管受到压路机的荷载为: $W = 0.5D_{pm} \times P_{\perp} \times [u_1 + 2(1-u_1)/\pi] = 12.06 \text{ KN/m}$

套管受到的总荷载: $P \leq P_{\perp} + W = 72 + 12.06 = 84.06 \text{ KN/m}$

同时考虑给水管道的临近桥梁, 桥梁桩基施工过程中, 100 t 钻孔机从给水管上方土层驶过, 现以布置 100 吨钻机为例进行计算。此次计算考虑工况为给水管承受 100 t 钻孔机机械荷载及覆土压力。计算管道上机械荷载引起的竖向应力时, 车轮按其着地面积的边缘向下作 30°角分布。最不利荷载组合如图 3 所示。

钻孔机荷载附加应力如表 3 所示:

套管受到钻孔机的荷载为: $W = 0.5D_{pm} \times P_{\perp} \times [u_1 + 2(1-u_1)/\pi] = 16.28 \text{ KN/m}$

套管受到的总荷载: $P \leq P_{\perp} + W = 72 + 16.28 = 88.28 \text{ KN/m}$

评价结论: 钢筋混凝土套管内径 1.65 m, 壁厚 0.165 m, 根据《顶进施工法用钢筋混凝土排水管》(JC/T 640-2010)标准, 本项目钢筋混凝土套管裂缝荷载为 148 KN/m, 破坏荷载为 222 KN/m。计算得出套管在改扩建期间所承受的荷载为 84.06 KN/m 和 88.28 KN/m, 小于钢筋混凝土套管裂缝荷载及破坏荷载, 满

足高速公路远期扩建要求。

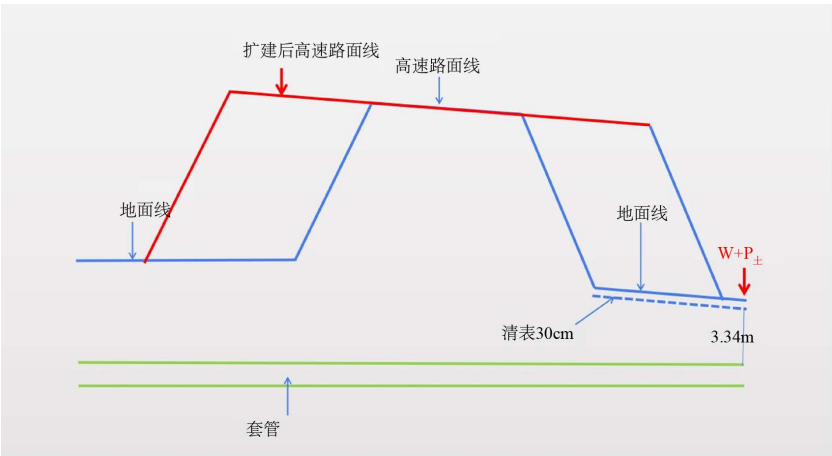


Figure 3. Schematic diagram of the most unfavorable load on the pipeline under the action of drilling machine

图 3. 管道在钻孔机作用下最不利荷载示意图

Table 3. The most unfavorable additional stress on the load of the casing top drilling machine

表 3. 套管顶面钻孔机荷载最不利附加应力

机械荷载重力标准(KN)	实际覆土厚度(m)	应力扩散面积(m ²)	附加应力(KN/m ²)
1000	3.34	38.33	26.09

4.7. 施工期间对公路建(构)物的影响

顶管施工期间对公路的影响主要为两部分，一部分是顶管施工造成的路面沉降进而影响行车安全，一部分是顶管顶力不够，引起管节破坏而造成路面沉降。因此需要评价路基路基沉降及施工顶力。

4.7.1. 路基路面沉降影响评价

穿越施工引起的地面沉降计算方法主要有经验法和解析法。目前工程界常采用 Peck 提出的地面沉降横向分布估算公式[5]：

$$S_{\max} = V_1 / 2.5i$$

式中：

$S_{\max}$ ——管道轴线上方的最大地面沉降量(m)；

I ——地面沉降槽宽度系数(m)；

V_1 ——管道单位长度的土体损失量(m³/m)，通常采用挖掘面面积的百分率来估算土体损失的大小，令 η 为土体损失百分率，则 $V_1 = \pi r^2 \eta$ 。如图 4 所示。

η 取值根据管道所处层位的土体性质确定，自稳性差、易流失的土取大值。参照盾构机掘进引起的最不利地层损失率 1%进行计算。

i 的经验公式为：

$$i = \frac{H}{2.5 \lg(45^\circ - \varphi/2)}$$

式中： H ——管道轴线至地面距离(m)；

Φ ——土的内摩擦角。

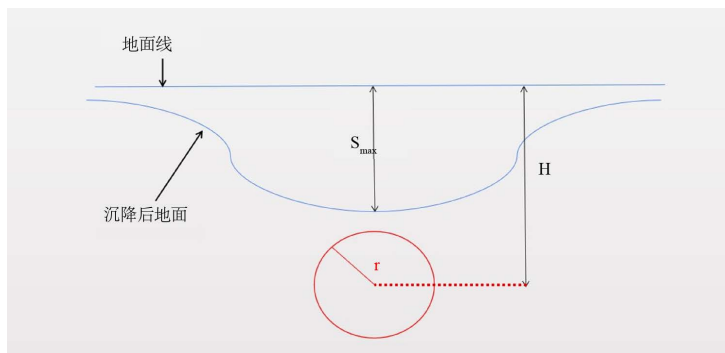


Figure 4. Peck -ground settlement diagram

图 4. Peck 地面沉降示意图

取管道下穿段离路面最近的位置处计算路面沉降量, $H = 8.05$ m, 该处管道地质为粉质黏土和粉细砂, 内摩擦角 φ 分别为 15° 和 20° , 按最不利土层计算, 结果如下:

$$i = \frac{H}{2.5 \tan(45^\circ - \varphi/2)} = \frac{8.05}{2.5 \tan(37.5^\circ)} = 4.19 \text{ m}$$

$$V_1 = \pi r^2 \eta = \pi \times 0.99^2 \times 0.01 = 0.031 \text{ m}^2$$

$$S_{\max} = V_1 / 2.5i = 0.031 / (2.5 \times 4.19) = 0.003 \text{ m} = 3 \text{ mm}$$

目前评价顶管施工造成的路面沉降为:《给水排水工程顶管技术规程》(CECS 246-2008)第 13.2.4 条规定,顶管造成的地面沉降量不应超过下列规定:1) 土堤小于或等于 30 mm;2) 公路小于或等于 20 mm。该指标主要从顶管施工质量方面考虑,而在通车环境下顶管施工,沉降值还需要从行车角度来考虑。根据人类工效学,道路交通是由人-机-环境组成的一个复杂的动态的人机系统,道路应遵从使驾驶人员安全、健康和舒适的原则进行设计。本文根据 Peck 提出的地面沉降横向分布估算公式基础上引入舒适性控制指标推导的路面沉降公式[6]:

$$S_{\max} = \frac{a_{y\max} i^2}{\sin \theta v^2}$$

其中: $a_{y\max}$ 根据人体舒适程度“没有不舒服”取 0.315; θ 为管道与公路交叉角度,取 90° ; $v = 100 \text{ Km/h} = 27.7 \text{ m/s}$ 。

计算可知在驾驶人员驾驶良好的情况下,路面最大沉降量应为 7 mm。

评价结论:本给水管道路在高速公路路基下穿时,采用顶管穿越的设计方案满足规范及行车安全要求。

4.7.2. 施工顶力评价

$$\text{管节允许顶力 } F_{de} = 0.5 \frac{\phi_1 \phi_2 \phi_3}{\gamma_{Qd} \phi_5} f_e A_p = 0.5 \frac{0.9 \times 1.05 \times 0.85}{1.3 \times 0.79} \times 14.3 \times 940828 = 5261.34 \text{ KN}。$$

$$\text{顶管机迎面阻力 } N_F = \frac{\pi}{4} D_g^2 \gamma_s H_s = \frac{\pi}{4} \times 1.98^2 \times 20 \times 8.35 = 522.03 \text{ KN}。$$

$$\text{管道总顶力 } F_0 = \pi D_1 L f_k + N_F = 3.14 \times 1.98 \times 14.5 \times 6.5 + 522.03 = 6381.74 \text{ KN} > F_{dc}。$$

根据地勘资料:顶管段管道土质大部分为粉质黏土,摩阻力取 6.5 kN/m^2 。

需设置中继间:

$$n = \frac{3.14 \times 2 \times 6.5 \times (145 + 50)}{0.7 \times 6000} - 1 = 0.9$$

取整数需设置 1 个中继间。

根据设计方案, 本项目设置了一个中继间, 位置为顶进后的 60 m, 满足规范要求。

$$F = f_0 + rsl$$

式中: F ——总推力(kn)。

f_0 ——初始推力(kn)。

r ——综合摩擦阻力(kpa)。

s ——管外周长 (m)。

l ——推进长度(m)。

顶管机顶进顶力: $3.14 \times 1.98 \times 85 \times 6.5 + 522.03 = 3957.03(\text{KN})$

采用 10 台 50 T 顶镐顶力为 500 T, 故中继间内布置一台油泵带动 10 台 50 T 小顶镐组成的中继间能够满足施工的需要。除去 85 米, 剩余 60 米。

中继间顶力: $F = 3.14 \times 1.98 \times 60 \times 6.5 + 522.03 = 2946.738(\text{KN})$

评价结论: 经过计算中继间的顶力富余量为: $1 - [2946.738 / (500 \times 9.8)] = 40\%$ 。根据《CECS 246-2008 给水排水工程顶管技术规程》12.5.4 中继间顶力富裕量, 第一个中继间不宜少于 40%, 其余不宜少于 30%, 满足规范要求。

5. 施工评价

1) 根据《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》(住房城乡建设部令第 37 号)本给水管道工程采用顶管施工, 属于超过一定规模的危险性较大的分部分项工程范围。经核查, 施工方案进行了危大方案专项专家评审, 能够满足安全施工要求。

2) 根据《生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则》(GB/T 29639-2020), 应急预案从事故危险性分析、组织机构及职责、预警预防、信息报告程序、应急物资与装备保障、现场应急处置及各方面事故应急处置措施等多个方面进行了阐述, 明确了事故发生后的各施工人员职责、确定了事故发生后的报告程序与信息处理方式、提出了各个施工阶段的应急处理手段。应急预案周全能满足工程需要。

3) 本项目在涉路施工方案中提出了施工监测方案, 监测方案中包括了监测点的位置及数量、监测频率、监控报警值、监测反馈及预警, 监测方案合理可行。

6. 风险评估

6.1. 项目施工期间风险分析及评价

6.1.1. 风险分析

1) 路面沉降

顶管施工过程, 由于顶进速率过快, 地下水位降低等人为因素导致的高速公路路面沉降, 从而影响行车安全。

6.1.2. 风险性评价

本评估小组选择 LC 法进行风险估测, 风险评估指标体系确定:

$$D = L \cdot C$$

式中: L ——风险事件发生的可能性大小; C ——后果严重程度; D ——风险等级。

D 值越大, 说明该系统危险性大。需要增加安全措施, 或改变发生事故的可能性, 或减轻事故损失, 直至调整到允许范围内。

评估小组对风险源进行估测，用 LC 法风险估测计算。在项目施工过程中对重大危险源进行重点控制，降低其发生的机率，避免事故发生。LC 法风险估测计算数见表 4。

Table 4. Summary of construction risk estimation
表 4. 施工风险估测汇总表

评价单元	主要危险因素	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	危险程度
施工过程单元	路面沉降	3	10	30	较大

评价结论：
从表 4 可以看出：管道施工过程中路面沉降为较大风险。

6.2. 项目运营期间对高速公路的风险分析及评价

本工程给水管管道施工过程中危险、有害因素有积水等。

6.2.1. 风险分析

积水：
由于第三方破坏或管道防腐设施失效导致给水管管道破裂，造成积水，进而造成高速公路路基遭到浸泡，会造成一定的安全风险。

6.2.2. 风险性评价

评估小组对风险源进行估测，用 LC 法风险估测计算。在项目运营过程中对重大危险源进行重点控制，降低其发生的机率，避免事故发生。LC 法风险估测计算数见表 5。

Table 5. Summary of operational risk estimation
表 5. 运营风险估测汇总表

评价单元	主要危险因素	<i>L</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	危险程度
运营过程单元	第三方破坏或管道防腐设施失效	1	5	5	较小

评价结论：
从表 5 可以看出：对项目运营过程单元评价所得结果为给水管管道因破裂发生积水事故的伤害为较小风险。

7. 风险管控措施及建议

从风险分析角度，管线穿越行为对公路的安全影响，主要表现为施工期间，顶管导致路面沉降的影响。因此为保障穿越路段的安全与质量，应做好以下措施：

- 1) 顶管施工前，施工人员要了解顶管段土质、地下水等情况；顶进过程中，确保顶进速度稳定，尤其是地质变化段，不能出现忽快忽慢和急度纠偏现象；维持泥水仓压力，避免因施工操作问题导致高速公路沉降。
- 2) 中继间接缝处要做好用橡胶带的止水措施；中继间顶进时，确保每次顶进长度为 20 cm 左右，避免顶力和顶进速度过大，导致中继间两端管道发生偏转，引起路面沉降，施工过程中应监测管道之间的转角，超过 1.2°应及时纠偏。

3) 本项目采用沉井法施工,根据地勘资料水位较高,施工过程中,应结合实际探挖情况和季节,关注地下水位情况,防止施工井封底后出现渗水,造成地下水位降低,进而导致高速公路沉降,若出现渗水情况,应视情况增加高压旋喷止水桩或采取其他防水措施。

4) 管道运营期间,建议给水管管理单位定期检查(随使用期增加,巡检次数应增加)、若水管出现泄漏后要及时制定相应的补救措施。

8. 结论

本文以工程项目为依托,有针对性地对涉路行为安全评价进行了较为系统地总结,并针对其中一些评价指标进行探讨,研究结论如下:

1) 针对管道穿越公路的套管受力计算,提出了应验算管道顶部承受的土压力及车辆荷载;土柱法计算土压力与实际偏高,会增大公路沉降值,影响行车安全。

2) 针对设计层面导致路面沉降的评价指标,本文创新性地从基于行车安全角度,总结公式并计算出本项目路面沉降控制指标应不大于 7 mm,相比于《给水排水工程顶管技术规程》中规定的 20 mm,增加了 65%的安全裕度。

3) 从风险分析角度,管线穿越行为对公路的安全影响,主要表现为施工期间,顶管导致路面沉降的影响,因此施工时应注意:顶进速率,管道偏转,地下水位等可能引起路面沉降的因素。

参考文献

- [1] 谢光宁,林芳燕,张奕龙.基于管道工程平行及穿越公路的安全评价分析[C]//中国公路学会养护与管理分会.中国公路学会养护与管理分会第十一届学术年会论文集.2021,4. <https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.002654>
- [2] 陈国佳.重要涉路行为安全评价技术研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2016.
- [3] 韩冰,阿力普江·杰如拉,王述红,等.基于普氏卸荷拱理论的矩形顶管顶推力预估方法研究[J].建筑设计管理,2017,34(9):84-89.
- [4] 康舒颜,吴志敏.天然气管道涉高速公路安全影响评价[J].广东公路交通,2021,47(4):120-124. <https://doi.org/10.19776/j.gdgljt.2021-04-0120-05>
- [5] 徐大伟,李薇,叶咸,等.天然气管道顶管穿越高速公路安全影响分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(12):314-316.
- [6] 郑俊,丁振杰,吕庆,等.新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(3):51-58+67.