

文章编号:1673-5005(2010)01-0105-04

管道穿越土质边坡斜竖井设计参数的确定方法

王芝银¹, 袁鸿鹄¹, 王 怡¹, 曾志华², 马兰平²

(1. 中国石油大学 城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:基于边坡稳定性分析理论,提出一种管道井式穿越黄土冲沟边坡确定设计参数的新方法。该方法首先通过对边坡稳定性进行分析,寻找出边坡潜在最危险滑动面的形状及位置,然后由此结果确定管道斜井或竖井的安全井口位置、井长或井深、水平巷道长度和斜井极限倾角等设计参数,并给出井口与边坡坡肩安全距离、斜井倾角、井长等设计参数的计算公式。研究表明:只要管道穿越斜井或竖井布设在边坡潜在最危险滑动面之外,并充分考虑施工影响,则管道工程的施工对边坡的稳定性影响较小;新方法简捷实用,可用于油气管线穿越各类土质边坡或冲沟时确定设计参数。

关键词:设计参数;管道穿越;斜竖井;安全距离;土坡稳定性

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

New method of determining design parameters of inclined shaft for oil-gas pipeline crossing along soil slope

WANG Zhi-yin¹, YUAN Hong-hu¹, WANG Yi¹, ZENG Zhi-hua², MA Lan-ping²

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China)

Abstract: Based on the stability analysis theory of slope, a new method of determining design parameters for traversing the loess gully or slope in pipeline well was presented. In the method, the stability analysis was firstly carried out to find the shape and the position of the potential dangerous sliding surface of slope. Then the design parameters of inclined or vertical pipeline well, such as the safety cut, the length or depth and the limit obliquity of well and the length of horizontal opening, were determined. The corresponding formulas for calculating design parameters were established. The results indicate that if only the pipeline well is located outside the potential dangerous sliding surface of slope and the construction influence is fully considered, the excavating effect on the slope stability and the pipeline safety can be neglected in theory. The new method is useful and of shortcut, and it can be used for determining design parameters for traversing the loess gully or slope.

Key words: design parameters; pipeline crossing; inclined shaft; safety cut; slope stability

随着西气东输、陕京二线、兰郑长等油气管道工程的建设,长输油气管线不可避免地要通过局部山区、黄土冲沟、黄土塬等地段,沿线地貌复杂多变,地形陡峭,修建施工便道和管道爬坡困难^[1-2],这就为长输油气管道工程的设计理论和施工技术提出了新课题。目前井式(如斜井、竖井)穿越法已成为管道穿越大中型冲沟、台地、黄土塬区域采用的方法之

一^[3-6],与传统埋地敷设法相比,井式穿越法不仅避免了对冲沟边坡周围自然生态环境与地表植被破坏大、施工土建工程量大等诸多问题,而且克服了地貌恢复和水工保护的困难,既有利于施工,也满足了环保的要求。与此同时,只要设计合理,还可以有效地避免由于开挖施工导致水土流失、山体滑坡、滑塌等次生地质灾害的发生,保证管道工程的安全稳定。

收稿日期:2009-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50774090)

作者简介:王芝银(1956-),女(汉族),陕西扶风人,教授,博士,博士生导师,主要从事岩土力学及工程应用方面的教学与科研工作。

目前斜竖井施工设计往往依赖于现场经验,还没有相对可靠的理论依据。笔者基于土质边坡稳定分析理论,提出一种确定管道井式穿越工程设计参数的新方法。该方法充分考虑不影响边坡稳定安全的基本原则,建立管道斜井或竖井的各类设计参数的理论计算公式,完成对油气管线穿越土质边坡或冲沟的设计参数的确定。

1 土质边坡管道井式穿越结构形式

管道通过高陡土质冲沟或边坡的井式穿越法主要分为斜井穿越法和竖井加横向水平巷道穿越法两种,其结构形式如图1所示。

图1 管道线路井式穿越结构形式

Fig. 1 Structural form of pipeline inclined shaft

由图1可以看出,斜井穿越法与竖井加横向水平巷道穿越法在空间结构上基本类似。竖井可视为是斜井的一种特殊情况,即竖井是斜井倾角等于90°的极端情况。由于竖井这种特殊性,使得竖井到达坡脚需要较长的水平横向巷道。由此可见,井式穿越法的空间结构主要设计参数有:坡顶井口(入口)安全位置、坡脚井口(出口)位置、斜井倾角或竖井深度、坡底开挖作业坑位置等。正确合理地确定这些设计参数,是确保油气管道工程施工期和运行期长期安全可靠、边坡长期稳定的重要前提条件。根据边坡或冲沟坡体稳定性分析理论,无论在均质边坡还是非均质土坡条件下,潜在最危险滑动面大多为正则或非正则倾斜面或弧形面。为了确保管道线路位于稳定土体内,管道斜竖井必须位于潜在最危险滑动面之外(图1)。本文中提出在坡体比较规则、土质可近似为均质材料的情况下,采用传统土坡稳定性分析方法,寻找潜在最危险滑动面,而对土坡形态形貌较复杂的情况,采用数值模拟方法或数值模拟分析中的强度折减法寻找潜在最危险滑动面,然后,由此结果进行斜竖井空间结构设计参数的确

定。

2 井式穿越土质边坡设计参数的确定

2.1 边坡潜在最危险滑动面确定

考虑未施工前近似均质简单土质边坡,采用瑞典条分法或简化毕肖普法进行土坡稳定性分析,从中获取不含管道斜竖井的土坡安全系数、潜在最危险滑动面圆心位置和圆弧半径。

(1) 安全系数^[7]。

$$\text{瑞典法: } K_s = \frac{cL + \gamma b \tan \varphi \sum h_i \cos \theta_i}{\gamma b \sum h_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

简化毕肖普法:

$$K_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{\theta_i}} [c'b + (W_i - u_i b) \tan \varphi']}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

其中

$$m_{\theta_i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi'}{K_s} \sin \theta_i$$

式中, K_s 为土坡稳定安全系数; c 为凝聚力; φ 为摩擦角; γ 为密度; L 为滑弧长度; b 为土条宽度; h_i 为土条平均高度; θ_i 为土条底面中点的法线与竖直线的交角; W_i 为土条的自重; u_i 为孔隙水压力; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角。

当用毕肖普法不计孔隙水压力影响时,可用总应力法分析得到,即将式(2)中 u_i 取0, c' 和 φ' 分别用 c 和 φ 代替即可。

(2) 潜在最危险滑动面圆心位置与半径。通过式(1)或式(2)计算得到最小安全系数,对应圆弧圆心和半径即为潜在最危险滑动面圆心与半径,由其圆心坐标即可确定圆心位置。

2.2 斜井和竖井基本设计参数确定

根据确定的潜在最危险滑动面位置,将管道穿越斜井或竖井布设在边坡潜在最危险滑动面之外。此外,由管道工程施工实践知,坡顶井口距坡肩的最小距离不应小于15 m^[5]。另据弹性理论及大量数值模拟分析^[8-9]可知,被开挖土体对周围土体的影响范围一般为开挖空间尺寸的3~5倍,在此范围以外所进行的工程活动对坡体稳定性的影响可以忽略不计。井式穿越方式(图1)设计中的几类参数计算公式如下:

(1) 坡顶竖井井口(中心)到坡肩的安全距离为

$$D_s \geq \frac{(3 \sim 5)D}{2} + D_{sp} \text{ 或 } D_s \geq 2D + D_{sp} \quad (3)$$

式中, D_s 为竖井井口(中心)到坡肩的安全距离; D 为竖井的直径; D_{sp} 为坡顶滑动面到坡肩的距离。

(2) 开挖斜井或水平巷道断面中心点到坡脚的水平或垂直距离为

$$h_s \geq \frac{(3 \sim 5)h}{2} \text{ 或 } h_s \geq 2h. \quad (4)$$

式中, h_s 为开挖斜井或水平巷道断面中心点到坡脚的水平或垂直距离; h 为斜井或水平巷道断面的总高度。

(3) 坡脚开挖作业坑中心点到坡脚的水平距离为

$$h_p \geq \frac{(3 \sim 5)b_{op}}{2} \text{ 或 } h_p \geq 2b_{op}. \quad (5)$$

式中, h_p 为坡脚开挖作业坑中心点到坡脚的水平距离; b_{op} 为开挖作业坑的宽度。

(4) 斜竖井断面形状及尺寸。竖井断面形状以圆形为最佳,也可根据水平地应力的各向差异设计成椭圆形:长轴沿较大水平地应力方向;长轴与短轴之比最好与两水平地应力之比相同;其尺寸由管径大小确定,以施工和安装管道的可行尺寸直接给出设计尺寸。对于斜井,考虑到现场施工条件、工程地质条件、工程造价以及现场的人性化设计等众多因素,断面形状以直墙或曲墙拱形为基本形式,高跨比 1:1 为最佳尺寸。由大量穿越冲沟斜井不同尺寸的模拟分析^[9] 得知,高跨比为 0.92 ~ 1.25 时,断面尺寸的变化对斜井稳定性影响较小。

基于以上原则,设断面直径或短轴长度或宽度为 B ,管道直径为 d ,则断面尺寸为

$$B \geq d + (350 \sim 380) \text{ mm}, B_{\min} \geq 1100 \text{ mm};$$

$$0.92B \leq h \leq 1.25B, B \leq 1300 \text{ mm};$$

$$0.92B \leq h \leq 1.20B, B > 1300 \text{ mm}.$$

断面最佳尺寸为 $h \approx B$ 。

(5) 竖井井深及井底通往坡底的水平巷道长度。管道竖井的井深至少是 $H + h_s$,当竖井开挖到达坡底水平位置时,距坡脚具有相当一段距离,此距离内必须开挖水平巷道。因此,当井口位置确定之后,便可根据冲沟边坡的几何参数给出水平巷道的长度,即竖井井底至坡脚出口的水平距离为水平巷道的长度。

2.3 几个重要设计参数

斜井几个重要设计参数包括斜井倾角、斜井井口与坡肩的安全距离、斜井长度等。对坡体比较规则、土质可近似为均质材料的情况,通过土坡稳定性分析方法,寻找出的潜在最危险滑动面为圆弧面,设

其圆心坐标为 $O(x_{0m}, y_{0m})$,半径为 R_{0m} ,如图 2 所示。

图 2 管道斜井设计参数与潜在最危险滑动面的关系

Fig. 2 Relation between inclined shaft parameters and slip surface

根据图 2 所示坐标系,可写出潜在最危险滑动面的方程为

$$(x - x_{0m})^2 + (y - y_{0m})^2 = R_{0m}^2. \quad (6)$$

设沿斜井纵向顶板的连线 SD 通过点 $S(x_s, y_s) = S(0, h_s)$,且与 x 坐标轴的夹角为 α ,则直线 SD 的方程为

$$y - y_s = x \tan \alpha. \quad (7)$$

由于直线 SD 与潜在最危险滑动面相切,则联立式(6)和式(7)并化简得到

$$(1 + \tan^2 \alpha)x^2 + 2(y_s \tan \alpha - y_{0m} \tan \alpha - x_{0m})x + y_s^2 - 2y_s y_{0m} = 0. \quad (8)$$

因直线 SD 与潜在最危险滑动面只有一个切点,则必有下式成立:

$$(y_s \tan \alpha - y_{0m} \tan \alpha - x_{0m})^2 - (1 + \tan^2 \alpha)(y_s - 2y_{0m})y_s = 0. \quad (9)$$

$y_s = -h_s$ 为已知值,因此,由式(9)可解出 $\tan \alpha$ 。

于是,根据图 2 所示几何关系可得到斜井井口与边坡坡肩安全距离为

$$D_{si} = (H - y_s)/\tan \alpha - Hn. \quad (10)$$

斜井长度为

$$\overline{SD} = (H - y_s)/\sin \alpha. \quad (11)$$

式中, D_{si} , H , n , $\overline{SD}$ 分别为斜井井口与坡肩的安全距离、土坡坡高、坡比的倒数和斜井的长度。

考虑到斜井开挖施工对冲沟边坡具有一定范围的影响,特别是边坡安全系数值在 1.0 附近的情况,为了不影响边坡的稳定性状态,在设计斜井时,应根据以上计算结果将斜井向稳定土体内(潜在最危险滑动面的滑床区内)平移一定的距离。因此,建议式(10)改写为

$$D_{si} = (H - y_s)/\tan \alpha - Hn + h_s. \quad (12)$$

式中的 h_s 由式(4) 确定。

对于实际冲沟形态地貌复杂的边坡问题,应用传统条分法已无法寻找潜在最危险滑动面,但可首先利用数值方法较逼真地模拟冲沟或边坡的地形地貌,通过强度折减法对强度参数的不断折减,找到临界状态时的潜在最危险滑动面^[10-11] 的位置及形状,然后建立潜在最危险滑动面的数学方程,并按照与本节完全相同的过程建立斜竖井设计参数的计算公式。由于采用数值方法确定滑动面无须对其形状进行假定,且可以考虑复杂的地形地貌,因此所获得的滑动面可能是不规则的形状,也可能是由多个非正则潜在滑动面组成,具体的形状函数需要针对具体问题通过数值模拟得到。

3 实例分析

根据传统条分法和以上建立的计算公式,利用某管线穿越黄土冲沟的地质资料和试验力学参数^[9],对冲沟东西坡进行稳定分析,确定斜井的设计参数。冲沟边坡几何与力学参数如表1所示。其中斜井断面最大尺寸(断面高度)为1.5 m。西坡用瑞典法和毕肖普法计算的井口安全距离分别为42.05,32.94 m,斜井长分别为103.86和97.13 m,斜井倾角分别为33.35°和36.00°,滑弧半径分别为120.566和130.194 m,滑弧圆心坐标分别为(-44.464 m,112.068 m)和(-54.867 m,118.068 m),安全系数分别为0.999和1.016。东坡用瑞典法和毕肖普法计算的井口安全距离都为55.53 m,斜井长分别为115.83和115.92 m;斜井倾角分别为28.80°和28.78°,滑弧半径分别为106.351和106.345 m,滑弧圆心坐标分别为(-29.372 m,102.215 m)和(-29.352 m,102.214 m),安全系数分别为1.01和1.032。

表1 冲沟几何与力学参数

Table 1 Geometric and mechanical parameters of gully

位置	坡高 H/m	坡长 L/m	坡角 $\beta/(^\circ)$	容重 $\gamma/$ $(kN \cdot m^{-3})$	黏结力 F/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
西坡	54.09	65.20	50.42	17.400	46.27	27.28
东坡	52.81	77.10	48.96	17.754	48.91	26.35

由于东坡和西坡的斜井断面高度均为1.5 m,则由式(4)得到,斜井与坡脚垂直距离均为3.0 m,而斜井与坡脚水平距离为4.56 m(东坡)和5.46 m(西坡)。

由上述分析可见,冲沟边坡的安全系数均位于1.0附近,即近似处于极限平衡状态,因此管道斜井

一定要位于潜在滑弧面以外,并应用式(10)对设计参数进行修正,即依据斜井断面尺寸对井口安全距离增加 h_s ,并将斜井整体向稳定土体内平移 h_s 。

4 结束语

提出了一种基于潜在最危险滑动面来确定管道穿越土质冲沟边坡斜竖井设计参数的新方法。新方法实用、简捷,能在斜竖井设计阶段有效避开冲沟边坡潜在最危险滑动区,且在开挖施工阶段对边坡的稳定性不产生有效的影响。

参考文献:

- [1] 吴宏,李波. 西气东输工程隧道内管道施工新方法[J]. 油气储运,2003,22(6):47-52.
WU Hong, LI Bo. Latest methods used to build the pipe in land tunnels in west-east gas project[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003,22(6):47-52.
- [2] 邹勇. 油气管道穿(跨)越黄土冲沟的岩土工程问题[J]. 天然气与石油,1997,15(3):40-42.
ZOU Yong. Oil & gas pipeline crossing under Loess gulch-rock and soil mechanics[J]. Natural Gas and Oil, 1997,15(3):40-42.
- [3] 梁国俭. 黄土塬地区管道施工方法——斜井穿越法[J]. 石油工程建设,2007,33(3):23-25.
LIANG Guo-jian. Oblique well crossing method—a pipeline construction method in loess plateau[J]. Petroleum Engineering Construction, 2007,33(3):23-25.
- [4] 李贵宾,陈兵剑. 义马-郑州煤气管道工程斜井穿越施工方法[J]. 管道技术与设备,2001(3):18-19.
LI Gui-bin, CHEN Bing-jian. A new construction method of inclining well crossing used in Yima-Zhengzhou city gas pipeline project[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2001(3):18-19.
- [5] 程家富,叶继东,裴建设. 开挖斜(竖)井在陡坡处敷设长输管道的施工方法[J]. 石油工程建设,2000,26(5):19-21.
CHENG Jia-fu, YE Ji-dong, PEI Jian-she. Method of lay down pipeline with drilling inclined/vertical well at the steep location[J]. Petroleum Engineering Construction, 2000,26(5):19-21.
- [6] 祖宝华. 黄土塬施工遇“梁”受阻,800米斜井解围[N]. 石油管道报,2004-11-22(4).
- [7] 赵树德. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [8] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1982.

(下转第113页)