

长输管道横坡敷设不同卸荷方案的稳定性分析

寇 乾 (国家管网集团西部管道有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 油气管道穿越山区段需进行横坡敷设, 在开辟作业带时可能引起黏质边坡失稳, 因此需对边坡进行削方卸荷, 采用不同的卸荷方案对边坡稳定系数有较大影响, 传统的瑞典条分法未考虑条块间的作用力, 计算结果偏于保守, 而简化毕肖甫法考虑条块间的作用力, 计算结果更接近实际情况。通过对两种卸荷方案计算结果对比分析, 长边沿坡顶方向卸荷方案的稳定系数更大, 经济性也更好, 为长输管道横坡敷设施工提供了一定参考。

关键词: 长输管道; 横坡敷设; 削方卸荷; 毕肖甫法

“十四五”期间, 全国油气管道建设进入快车道, 部分地区地质条件复杂, 管道敷设穿越山区段时不可避免的采用横坡敷设, 由于开挖作业带、管沟等施工活动可能引起黏质边坡失稳, 从而影响管道的建设和运行。因此在施工时不可避免的要对边坡进行削方卸荷, 考虑不同卸荷方案对边坡稳定系数及施工造价的影响, 通过采用毕肖甫法计算, 为管道横坡敷设施工提供参考。

1 管道横坡敷设的不稳定因素

横坡敷设指的是管道基本沿边坡坡面的等高线敷设。管道施工时需开劈施工作业带, 对边坡土体扰动, 形成新的路堑边坡, 在管沟开挖时, 增加了边坡的不稳定性, 极易发生滑动破坏, 对管道施工的安全性和后期运行维护都会造成严重不利影响。

2 管道施工边坡稳定性评价

黏质边坡的抗剪强度主要来源于土颗粒的摩擦强度和黏聚强度。由于粘聚力的存在, 边坡失稳不会像无黏性土 (比如细砂) 一样平面滑动, 根据土体极限平衡理论, 均质黏性土坡的滑动面为对数螺旋曲面, 形状近似于圆柱面, 在断面上可认为是圆弧形。以下通过对扫线边坡及不同卸荷方案条件下的稳定系数进行定量计算。

2.1 稳定系数计算

瑞典条分法忽略条块间的作用力, 计算得到的稳定系数较小, 偏于保守, 而毕肖甫法考虑了条块间的作用力, 计算精确, 更接近实际情况, 通常计算结果比瑞典条分法高 10% 左右。不考虑地下水和附加荷载影响, 根据静力平衡和力矩平衡, 则有:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m\theta_i} (c_i l_i \cos\theta_i + G_i \tan\rho_i)}{\sum_{i=1}^n G_i \sin\theta_i}$$

$$m\theta_i = \cos\theta_i + \frac{\tan\rho_i \sin\theta_i}{F_s}$$

式中:

F_s 为边坡稳定性系数;

c_i 为第 i 计算条块滑动面的黏聚力 (kPa);

ρ_i 为第 i 计算条块滑动面的内摩擦角 ($^\circ$);

l_i 第 i 计算条块滑动面长度 (m);

θ_i 为滑动面倾角 ($^\circ$);

G_i 第 i 计算条块宽度自重 (kN/m)。

2.2 最危险滑动面确定

通常滑裂面是任取的, 假定一个滑裂面, 可以计算出相应的稳定系数, 真正能代表边坡稳定性的应是所有稳定系数的最小值, 此时的滑裂面应是最危险的滑裂面。确定滑裂面的圆心和半径工作量较大, 目前普遍采用随机搜索法、遗传算法、神经网络法、蚂蚁算法等仿生学的方法。费伦纽斯 (Fellenius W) 提出经验方法, 对于均匀黏质边坡, 最危险的滑裂面一般通过坡脚, 通常在边坡设计中 36° 线法及 4.5H 线法就是铁路和公路边坡设计中寻找最危险圆弧圆心位置的常用简化方法。因最危险滑裂面和圆心确定不是本文探讨的主要内容不再赘述。

2.3 原始边坡稳定系数计算

某长输油气管道工程沿着横坡开辟作业带后, 坡高 H 为 30m, 坡角 45° , 黏土重度 γ 为 20kN/m^3 , 黏聚力 c 为 10kPa, 内摩擦角 26.6° , 滑动圆弧半径 R 为 50m, 将滑动土体分为 6 个土条 (等分圆弧), 滑裂圆弧面通过坡脚, 土条中心线与竖向线的夹角为 θ_i (见图 1), 按照简化毕肖甫法计算边坡的稳定系数见表 1、表 2。

通过迭代计算, 原始边坡的稳定系数 $F_s=1.177$, $F_s > 1$ 即边坡滑裂面上的土条总的抗滑力矩大于滑动

力矩，边坡处于稳定状态。

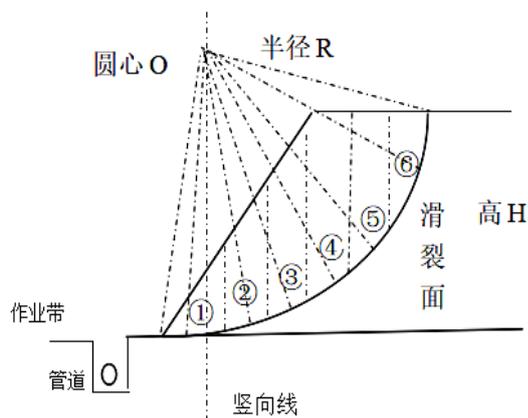


图 1

2.4 两种卸荷方案

2.4.1 卸荷方案一

顺坡面方向削方卸荷，长边平行于坡面为 12m，短边平行于坡顶 6m，其余条件不变（见图 2），卸荷方案一边坡稳定系数计算见表 3、表 4。

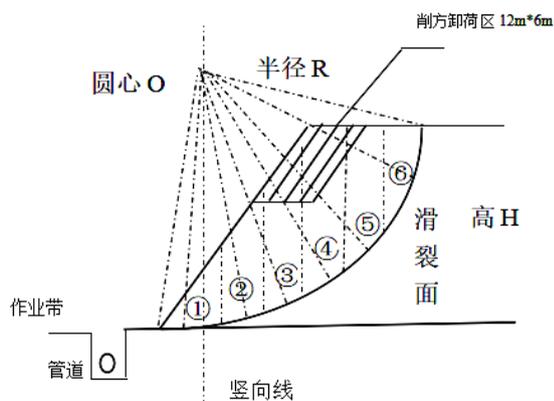


图 2

通过迭代计算，方案一的边坡稳定系数 $F_1=1.204$ ， $F_1 > F_s$ ，边坡处于稳定状态。

2.4.2 卸荷方案二

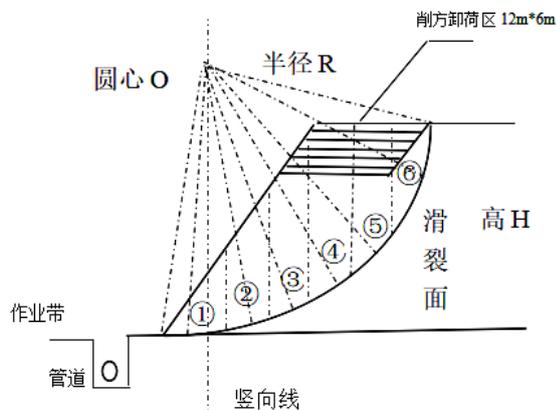


图 3

沿坡顶方向削方卸荷，长边平行于坡顶为 12m，短边平行于坡面 6m，其余条件不变（见图 3），卸荷方案二边坡稳定系数计算见表 5、表 6。

通过迭代计算，方案二的边坡稳定系数 $F_2=1.230$ ， $F_2 > F_s$ ，边坡处于稳定状态。

3 计算结果分析

计算结果表明：边坡稳定系数 $F_2 > F_1 > F_s$ ，即在卸荷土方量相同的情况下，方案二的边坡稳定性大于方案一，方案一的边坡稳定性大于原始边坡。当改变坡角角度或边坡高度时，通过计算同样可以得到上述结论。

4 应用实例

某长输油气管道通过低山丘陵地段，谷底和山脊均不具备敷设条件，只能沿等高线横向敷设，要进行作业带的扫线施工，通常会先对作业带的上部边坡进行削方处理，然后会在在作业带坡脚处砌筑挡土墙进行防护，实践表明：采用方案二的削方卸荷方式，取得了更好的边坡稳定性和经济性。

5 结论

通过对原始边坡和两种卸荷方案进行计算分析及实例应用，可以得出以下结论：

①在边坡坡角不变的条件下，相同的削方量，长边沿坡顶方向卸荷（方案二）比长边沿坡面方向卸荷（方案一）的稳定系数更高，因此在措施项目费用清单计价中，采用方案二可以获得更好的经济性；

②深基坑放坡开挖过程中，长边沿基坑坡顶削方卸荷也更容易使边坡稳定。

参考文献：

- [1] 陈希哲. 土力学地基基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 李明等. 边坡最危险滑动圆弧圆心位置的程序搜索及其应用 [J]. 南华大学学报, 2004(09).
- [3] 郭存杰等. 油气管道横坡敷设边坡稳定性计算 [J]. 油气储运, 2016(11).
- [4] 孙哈南. 浅谈圆弧滑动面的验算法 [J]. 黑龙江交通科技, 2010(02).
- [5] 王进. 长输油气管道横坡敷设设计 [J]. 现代矿业, 2016(09).

作者简介：

寇乾 (1987-)，男，2009年毕业于哈尔滨工业大学工程管理专业，工程师，现主要从事油气管道工程项目管理工作。

表 1 毕肖普法边坡稳定系数计算表 (假设 $F_s=1.5$, 计算值为 $F_s=1.223$)

| 土条号 | θ_i | $\sin\theta_i$ | $\cos\theta_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i / F_s$ | m_{θ_i} | $G_i \sin\theta_i$ | c_i | $G_i \tan\alpha_i$ | $(c_i + G_i \tan\alpha_i) / m_{\theta_i}$ |
|----------|---------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|-------|--------------------|---|
| 1 | -3° | -0.052 | 0.999 | -0.026 | -0.017 | 0.982 | -40.036 | 90 | 404.19 | 503.248 |
| 2 | 7.4° | 0.129 | 0.992 | 0.065 | 0.043 | 1.035 | 309.925 | 90 | 1201.26 | 1247.594 |
| 3 | 17.73° | 0.305 | 0.953 | 0.153 | 0.102 | 1.055 | 1161.888 | 90 | 1904.735 | 1890.744 |
| 4 | 28.06° | 0.47 | 0.882 | 0.235 | 0.157 | 1.039 | 2273.212 | 90 | 2418.312 | 2414.16 |
| 5 | 38.39° | 0.621 | 0.784 | 0.311 | 0.207 | 0.991 | 2708.463 | 90 | 2180.717 | 2291.339 |
| 6 | 48.69° | 0.751 | 0.66 | 0.376 | 0.251 | 0.911 | 1221.316 | 90 | 813.127 | 991.358 |
| Σ | | | | | | | 7634.768 | | | 9338.443 |

表 2 边坡稳定系数计算表

| 序号 | 假设值 | 计算值 λ_i |
|----|-------|-----------------|
| 1 | 1.5 | 1.223 |
| 2 | 1.38 | 1.208 |
| 3 | 1.24 | 1.226 |
| 4 | 1.236 | 1.182 |
| 5 | 1.215 | 1.184 |
| 6 | 1.195 | 1.180 |
| 7 | 1.175 | 1.177 |

表 3 毕肖普法边坡稳定系数计算表 (假设 $F_1=1.35$, 计算值为 $F_1=1.213$)

| 土条号 | θ_i | $\sin\theta_i$ | $\cos\theta_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i / F_s$ | m_{θ_i} | $G_i \sin\theta_i$ | c_i | $G_i \tan\alpha_i$ | $(c_i + G_i \tan\alpha_i) / m_{\theta_i}$ |
|----------|---------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|-------|--------------------|---|
| 1 | -3° | -0.052 | 0.999 | -0.026 | -0.019 | 0.98 | -42.036 | 90 | 404.19 | 412.44 |
| 2 | 7.4° | 0.129 | 0.992 | 0.065 | 0.048 | 1.04 | 309.925 | 90 | 1201.26 | 1241.59 |
| 3 | 17.73° | 0.305 | 0.953 | 0.153 | 0.113 | 1.066 | 1076.859 | 90 | 1765.343 | 1740.472 |
| 4 | 28.06° | 0.47 | 0.882 | 0.235 | 0.174 | 1.056 | 1935.715 | 90 | 2059.272 | 2035.295 |
| 5 | 38.39° | 0.621 | 0.784 | 0.311 | 0.23 | 1.014 | 2433.236 | 90 | 1959.127 | 2020.835 |
| 6 | 48.69° | 0.751 | 0.66 | 0.376 | 0.279 | 0.939 | 1221.316 | 90 | 813.127 | 961.797 |
| Σ | | | | | | | 6935.015 | | | 8412.429 |

表 4 边坡稳定系数计算表

| 序号 | 假设值 | 计算值 λ_i |
|----|-------|-----------------|
| 1 | 1.35 | 1.213 |
| 2 | 1.29 | 1.218 |
| 3 | 1.255 | 1.226 |
| 4 | 1.215 | 1.206 |
| 5 | 1.205 | 1.204 |

表 5 毕肖普法边坡稳定系数计算表 (假设 $F_2=1.245$, 计算值为 $F_2=1.232$)

| 土条号 | θ_i | $\sin\theta_i$ | $\cos\theta_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i$ | $\sin\theta_i \tan\alpha_i / F_s$ | m_{θ_i} | $G_i \sin\theta_i$ | c_i | $G_i \tan\alpha_i$ | $(c_i + G_i \tan\alpha_i) / m_{\theta_i}$ |
|----------|---------------|----------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|-------|--------------------|---|
| 1 | -3° | -0.052 | 0.999 | -0.026 | -0.021 | 0.978 | -42.036 | 90 | 404.19 | 505.307 |
| 2 | 7.4° | 0.129 | 0.992 | 0.065 | 0.052 | 1.044 | 309.925 | 90 | 1201.26 | 1236.839 |
| 3 | 17.73° | 0.305 | 0.953 | 0.153 | 0.123 | 1.076 | 1076.859 | 90 | 1765.343 | 1724.296 |
| 4 | 28.06° | 0.47 | 0.882 | 0.235 | 0.189 | 1.071 | 2029.488 | 90 | 2159.03 | 2099.935 |
| 5 | 38.39° | 0.621 | 0.784 | 0.311 | 0.250 | 1.034 | 2337.012 | 90 | 1881.653 | 1906.821 |
| 6 | 48.69° | 0.751 | 0.66 | 0.376 | 0.302 | 0.962 | 979.311 | 90 | 652.005 | 771.315 |
| Σ | | | | | | | 6690.559 | | | 8244.513 |

表 6 边坡稳定系数计算表

| 序号 | 假设值 | 计算值 λ_i |
|----|-------|-----------------|
| 1 | 1.245 | 1.232 |
| 2 | 1.230 | 1.230 |