

# 基于Pasternak双参数模型的滑坡段埋地管道受力分析方法

张家铭, 尚玉杰, 王荣有, 王殿龙

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉, 430074)

**摘要:** 为改进基于Winkler模型的弹性地基梁法固有缺陷, 提高计算精度, 引入Pasternak双参数模型, 考虑土弹簧间相互作用, 提出一种考虑轴向载荷的滑坡段埋地管道受力分析方法, 通过参数分析讨论轴向载荷、地基反力系数及地基剪切刚度对滑坡段管道受力变形性状的影响。研究表明: 基于Pasternak双参数模型的滑坡段管道受力变形分析方法比基于Winkler模型的弹性地基梁法具有更高的精度, 更符合工程应用; 轴向载荷对滑坡段管道受力变形影响显著, 在管道强度设计和校核中不能忽略; 地基反力系数较大时, 荷载对临近单元体的传力性减弱, 管道受力变形性状主要受地基反力系数影响; 地基剪切刚度较大时, 荷载对临近单元体的传力作用较强, 减弱土体对管道的约束作用, 影响管道受力变形性状。

**关键词:** Pasternak双参数模型; 参数分析; 轴向载荷; 地基反力系数; 地基剪切刚度

中图分类号: TB125

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

文章编号: 1672-7207(2020)05-1328-09



## Force analysis method of buried pipeline in landslide section based on Pasternak double-parameter model

ZHANG Jiaming, SHANG Yujie, WANG Rongyou, WANG Dianlong

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to improve the inherent defects and improve the calculation accuracy of elastic foundation beam method based on Winkler model, a force analysis method based on Pasternak double-parameter model was introduced. Considering the shear action between soil spring, an analysis method of buried pipeline in landslide section which considers axial load was presented. The effects of axial load, foundation reaction coefficient and foundation shear stiffness on the deformation behavior of pipelines, caused by force, in landslide section were discussed through parameter analysis. The results show that the force analysis of buried pipeline in landslide based on Pasternak double-parameter model is more accurate and suitable than the elastic foundation beam method based on Winkler model. The effect of axial load on the deformation of pipeline which is aroused by force in landslide section is significant. It can not be neglected during the verification and design of buried pipeline in landslide section. When the coefficient of subgrade reaction is greater, the deformation behavior of the pipeline is mainly affected by the coefficient of subgrade reaction because force transmission of the load to the adjacent element is weakened. When the shear stiffness of foundation is greater, force transmission of the load to the adjacent unit

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-09-06

基金项目(Foundation item): 湖北省安全生产科技专项资金资助项目(XQDSJC18032) (Project(XQDSJC18032) supported by the Special Funds for Safe Production and Technology Program of Hubei Province)

通信作者: 张家铭, 博士, 副教授, 从事滑坡灾害治理研究; E-mail: zjmm@163.com

body is strengthened, which affects the deformation behavior of the pipeline.

**Key words:** Pasternak double-parameter model; parametric analysis; axial load; coefficient of subgrade reaction; shear stiffness of foundation

近年来,长输管道工程迅猛发展,已成为能源输送的重要手段之一,其中很大一部分管道需要穿越地质环境复杂、滑坡灾害频发的地段,严重威胁着管道的安全运营。对处于滑坡作用下的埋地管道,目前常用有限单元法或基于 Winkler 模型的弹性地基梁法进行分析计算。近年来,有限单元法在研究管土接触问题中得到了广泛应用。譬如在滑坡段埋地管道应力应变分布随参数变化规律研究<sup>[1-2]</sup>、滑坡作用下埋地管道强度失效分析<sup>[3]</sup>、滑坡段管道内力变形分析<sup>[4-7]</sup>、埋地管道的安全下埋深度及多跨管段间相互作用研究<sup>[8-9]</sup>等方面都有广泛的应用;朱勇等<sup>[10]</sup>采用有限元分析与模型试验相结合的方法对滑坡作用下管道受力变形进行了研究。虽然有限单元法适应性强,能够处理复杂问题,但因其使用较为复杂,在对实际工程问题的分析上尚有一定困难。基于 Winkler 模型的弹性地基梁法则假定土体是由离散弹簧组成的弹性体,地基反力与埋地管道上任一点的位移成正比,将管道看成小变形的半无限长梁,研究了管道的应力及变形特性<sup>[11-14]</sup>。与有限单元法相比较,基于 Winkler 模型的弹性地基梁法概念比较明确,求解简单,实用性更高,但该方法没有考虑土弹簧间的相互作用,在具有少许黏性或具有传力性土介质中应用误差较大。Winkler 模型在描述实际土体的连续性态中的固有缺陷及弹性连续介质模型在数学上的复杂性加速了双参数弹性模型的发展,其主要沿着2个方向进行。第一种是从弹性连续介质模型开始并引入约束或简化位移分布与应力的某些假设,Vlasov 模型是其中的典型代表,但其土模型公式是以变分法的应用为基础的,在求解中涉及到参数迭代,计算过程较为复杂<sup>[15-17]</sup>。第二种是由不连续的 Winkler 模型产生的并在各个弹簧之间提供力学的相互作用以消除其不连续的性态,Pasternak 模型是其中的典型代表,其采用2个参数来综合反映土体特征,假设土弹簧单元与一层只能产生剪切变形而不可压缩的竖向单元相连接,考虑了土弹簧间传力作用,反映了土体变形连续性,更符合土体的受力变形特性,由此得

到了广泛的应用<sup>[17-18]</sup>。张望喜等<sup>[19]</sup>以能量变分法原理为基础研究了地基反力模量为常数的水平受荷桩解答,提高了计算精度;魏东旭等<sup>[20]</sup>采用考虑剪力的双参数模型,获得了双参数地基推力长桩的有限差分解,提高了推力桩的设计计算水平;梁发云等<sup>[21]</sup>采用改进的地基反力模量,提出了一种可考虑剪切作用的水平受荷桩的简化分析方法,可明显提高水平受荷桩的计算精度。综上所述,Pasternak 双参数模型运用于水平受荷桩的分析计算中,提高了水平受荷桩的设计水平与计算精度。而在滑坡作用下埋地管道受力变形的计算中多采用基于 Winkler 模型的弹性地基梁法,在具有少许黏性或具有传力性土介质中应用误差较大。鉴于此,本文作者基于 Pasternak 模型,提出一种考虑轴向载荷的滑坡段埋地管道受力分析方法,讨论轴向载荷、地基反力系数及地基剪切刚度对滑坡段埋地管道受力变形性状的影响,该方法比基于 Winkler 模型的弹性地基梁法具有更高的计算精度。

## 1 滑坡作用下埋地管道力学模型

在滑坡作用下,埋地管道受滑坡体推力作用会发生变形,其力学模型可以简化成 Pasternak 弹性地基上的连续梁模型(图1)。图1所示平面为管道在滑坡作用下发生变形的平面。图1中: $q$ 为滑坡体对管道的作用力, N/m;  $l$ 为滑坡体宽度, m。为了简便计算,做出如下假设:

- 1) 假设下滑土体对埋地管道的压力  $q$  沿滑坡宽度  $l$  均匀分布<sup>[22]</sup>, 且不计下部土体对管道的支撑作用(最危险工况);
- 2) 在滑坡作用下, 下滑土体对管道的压力是导致管道变形的主要作用力, 管道自身及管内介质重力作用对管道变形影响较小, 故忽略其重力作用对管道变形的影响;
- 3) 假设管道沿轴向刚度均匀, 不考虑管与管连接处的端效应, 将其看成整体;
- 4) 假设管道变形和受力关于截面  $C$  对称。

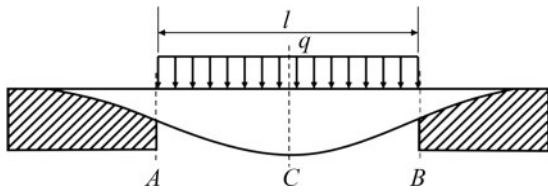


图1 滑坡作用下管道力学模型

Fig. 1 Mechanical model of pipeline under landslide

### 1.1 Pasternak 双参数地基模型

Pasternak 双参数弹性模型是在 Winkler 弹性模型的基础上假设各弹簧单元间存在着剪切的相互作用。这种相互作用是通过将弹簧单元与一层只能产生横向剪切变形而不可压缩的竖向单元相连接(图2)实现的<sup>[18]</sup>。在二维情况下,模型可以用下式表示:

$$q(x) = kw(x) - G_p \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (1)$$

式中:  $q(x)$  为地基的反力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $k$  为地基反力系数,  $\text{kN/m}^3$ ;  $w(x)$  为埋地管道挠度,  $\text{m}$ ;  $G_p$  为地基剪切刚度,  $\text{kN/m}$ 。

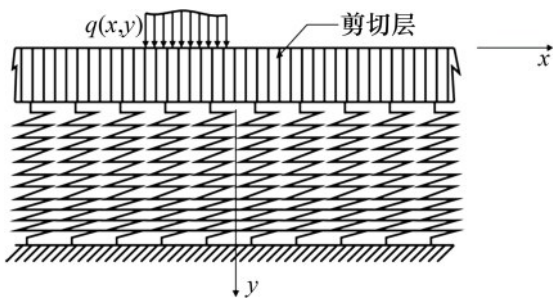


图2 Pasternak 双参数地基模型

Fig. 2 Pasternak double-parameter foundation model

当式(1)中  $G_p=0$  时,该模型即退化为 Winkler 模型。

### 1.2 Pasternak 双参数弹性模型常数的确定

描述双参数模型的常数  $k$  和  $G_p$ , 可采用下列方法得出<sup>[17]</sup>。

方法一: 常数  $k$  和  $G_p$  可由现场试验测定(例如载荷板试验)。

方法二: 可认为常数  $k$  和  $G_p$  与土介质的弹性常数(例如土体弹性模量  $E_s$ 、土体泊松比  $\nu_s$ 、孔隙比  $e$  等)有关, 可由实验室确定。

方法三: 可将常数  $k$  和  $G_p$  与土介质弹性常数  $E_s$  和  $\nu_s$  关联起来, 并根据土与基础相互作用问题的解

类比而得。

TERZAGHI 等<sup>[23-25]</sup>对用荷载板试验测定地基反力系数  $k$  进行了详细评述。研究表明从荷载板试验测定  $k$  受板的尺寸、形状、埋置深度等因素影响,  $k$  并不是土介质的固有性质。在确定  $G_p$  时, 不仅需要量测荷载板的沉降量, 还需要量测出临近荷载板处土表面的挠度。由于双参数土基础的界面挠度局限于非常临近的加载面, 一般的常规荷载板试验难于量测, 导致误差较大。因此, 一般不建议采用这种方法确定  $G_p$ 。

方法三将模型常数与土介质弹性常数  $E_s$  和  $\nu_s$  关联起来, 根据土与基础相互作用问题的解类比得到常数取值, 与方法一和二相比不需进行繁杂试验, 且精度符合工程需求。因此, 本文采用方法三确定模型常数。方法三可将双参数地基模型的常数与弹性常数  $E_s$  和  $\nu_s$  加以联系。其中 VLAZOV 等<sup>[15]</sup>提出的经验公式比较具有代表性, 如下式所示:

$$\begin{cases} k = \frac{E_s}{H(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \\ G_p = \frac{E_s H}{6(1+\nu_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_s$  为地基土的弹性模量,  $\text{kPa}$ ;  $\nu_s$  为地基土的泊松比;  $H$  为弹性层厚度,  $\text{m}$ 。

YAO 等<sup>[26]</sup>通过数值模拟技术对受水平荷载作用影响的桩侧土范围进行了研究, 认为其受影响范围为  $11d$  ( $d$  为桩的直径)。因此, 近似地将该范围作为地基土的弹性层厚度, 即  $H=11D$  ( $D$  为埋地管道的外径), 实际上  $H$  的取值与土性质有关。

## 2 挠度和内力分析

将图1所示的埋地管道分成2部分进行分析, 滑坡体外管道和滑坡段管道。

### 2.1 滑坡体外管道分析

建立图3所示力学模型,  $X$  轴为未发生滑坡时的管道轴线,  $Y$  轴为滑坡周界的左侧边界。  $\omega_0$  为滑坡周界处管道挠度,  $\text{m}$ ;  $M_0$  为滑坡周界处管道弯矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $\theta_0$  为滑坡周界处管道转角,  $\text{rad}$ ;  $S_0$  为管道轴力,  $\text{N}$ 。滑坡段管道对滑坡体外管道作用以剪力  $0.5ql$ 、弯矩  $M_0$  及轴力  $S_0$  代替(滑坡周界处管道

转角很小, 可近似认为轴力  $S_0$  平行于  $X$  轴)。由于轴力  $S_0$  主要影响管道轴向变形, 因此忽略轴力对管道横向变形的影响, 将滑坡体外管道看成是 Pasternak 弹性地基上的半无限长梁。

为了计算方便, 统一规定: 弯矩以管道上侧纤维受拉为正; 管道轴力以拉力为正。

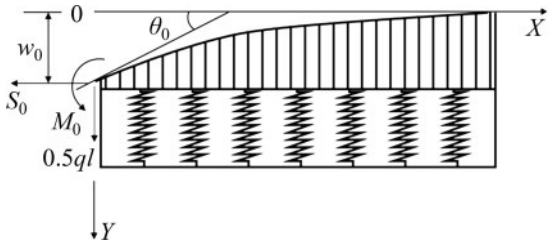


图3 滑坡体外管道力学模型

Fig. 3 Mechanical model of landslide external pipeline

将埋地钢管看成梁, 其挠度  $Y$  与荷载  $q$ 、地基压力  $p$  之间的关系为

$$EI \frac{d^4 Y}{dX^4} = q - p \tag{3}$$

式中:  $E$  为钢材的弹性模量, Pa;  $I$  为管道的截面惯性矩,  $m^4$ 。

根据 Pasternak 弹性地基模型, 式(3)可写成

$$EI \frac{d^4 Y}{dX^4} + kDY - G_p D \frac{d^2 Y}{dX^2} = q \tag{4}$$

式中:  $D$  为管道的外径, m。

滑坡段管道对滑坡体外管道的作用是其变形的的主要原因, 因此荷载  $q$  可以近似忽略。代入式(4)可得

$$EI \frac{d^4 Y}{dX^4} + kDY - G_p D \frac{d^2 Y}{dX^2} = 0 \tag{5}$$

式(5)的通解为

$$Y = C_1 e^{\alpha X} + C_2 e^{-\alpha X} + C_3 e^{\beta X} + C_4 e^{-\beta X} \tag{6}$$

式中:  $\alpha = \sqrt{\frac{G_p D + \sqrt{D(DG_p^2 - 4EI k)}}{2EI}}$ ,  $\beta = \sqrt{\frac{G_p D - \sqrt{D(DG_p^2 - 4EI k)}}{2EI}}$ 。

由定性分析可知, 当  $X \rightarrow \infty$  时,  $Y \rightarrow 0$  可知  $C_1 = C_3 = 0$ , 因此式(6)变为

$$Y = C_2 e^{-\alpha X} + C_4 e^{-\beta X} \tag{7}$$

由式(7)可得管道任意截面转角  $\theta$ 、弯矩  $M$  及剪

力  $Q$  的表达式:

$$\theta(X) = \frac{dY}{dX} = -C_2 \alpha e^{-\alpha X} - C_4 \beta e^{-\beta X} \tag{8}$$

$$M(X) = -EI \frac{d^2 Y}{dX^2} = -C_2 EI \alpha^2 e^{-\alpha X} - C_4 EI \beta^2 e^{-\beta X} \tag{9}$$

$$Q(X) = -EI \frac{d^3 Y}{dX^3} = C_2 EI \alpha^3 e^{-\alpha X} + C_4 EI \beta^3 e^{-\beta X} \tag{10}$$

原点处的边界条件为

$$\begin{cases} M|_{X=0} = M_0 \\ Q|_{X=0} = 0.5ql \end{cases}$$

由此解得

$$\begin{cases} C_2 = \frac{0.5ql + M_0 \beta}{EI \alpha^2 (\alpha - \beta)} \\ C_4 = \frac{0.5ql + M_0 \alpha}{EI \beta^2 (\beta - \alpha)} \end{cases} \tag{11}$$

挠度  $w_0$  和转角  $\theta_0$  为

$$\begin{cases} w_0 = \frac{0.5ql(\alpha + \beta) + M_0(\alpha^2 + \alpha\beta + \beta^2)}{EI \alpha^2 \beta^2} \\ \theta_0 = \frac{0.5ql + M_0(\alpha + \beta)}{EI \alpha \beta} \end{cases} \tag{12}$$

### 2.2 滑坡段管道分析

建立图4所示力学模型,  $x$  轴为未发生滑坡时的管道轴线,  $y$  轴为滑坡周界的左侧边界。滑坡体外管道滑坡段管道的作用力以剪力  $0.5ql$ 、弯矩  $M_0$  及轴力  $S_0$  代替。

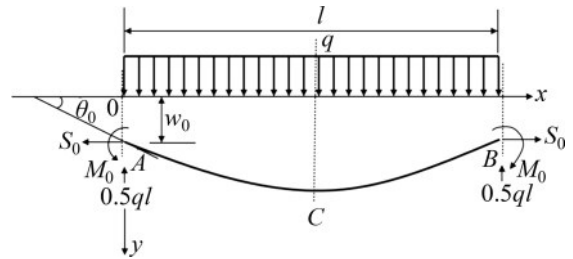


图4 滑坡段管道力学模型

Fig. 4 Mechanical model of landslide section pipeline

对滑坡段  $l$ , 管道弯曲的微分方程为

$$EI \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = M_0 + S_0 [y(x) - w_0] + 0.5qx^2 - 0.5qlx \tag{13}$$

方程的解为

$$y(x) = D_1 e^{\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} + D_2 e^{-\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} - \frac{q}{2S_0}x^2 + \frac{ql}{2S_0}x + \left(w_0 - \frac{M_0}{S_0} - \frac{qEI}{S_0^2}\right) \quad (14)$$

由对称性及边界条件 $y|_{x=0} = \omega_0$ 可得

$$\begin{cases} D_1 = \frac{M_0 S_0 + qEI}{\varphi S_0^2} \\ D_2 = \frac{M_0 S_0 + qEI}{\varphi S_0^2} \cdot e^{l\sqrt{\frac{S_0}{EI}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\varphi = 1 + e^{l\sqrt{\frac{S_0}{EI}}}$ .

滑坡周界 $x=0$ 处管道转角为

$$\theta_0 = D_1 \sqrt{\frac{S_0}{EI}} \delta + \frac{ql}{2S_0} \quad (16)$$

式中:  $\delta = 1 - e^{l\sqrt{\frac{S_0}{EI}}}$ .

根据变形协调性, 滑坡体内、外管道在交界处挠度和转角相等。从以上分析可知, 挠度相等条件已经满足。至于转角相等条件, 由式(12)与式(16)可知

$$\frac{0.5ql + M_0(\alpha + \beta)}{EI\alpha\beta} = D_1 \sqrt{\frac{S_0}{EI}} \delta + \frac{ql}{2S_0} \quad (17)$$

由式(17)可得 $M_0$ 为

$$M_0 = \frac{\frac{q\sqrt{EI}\delta}{\varphi\sqrt{S_0^3}} + \frac{ql}{2S_0} - \frac{ql}{2EI\alpha\beta}}{\frac{\alpha + \beta}{EI\alpha\beta} - \frac{\delta}{\varphi\sqrt{S_0EI}}} \quad (18)$$

由式(14)可得滑坡段管道任意截面转角 $\theta$ 和弯矩 $M$ 的表达式为:

$$\theta(x) = \frac{dy}{dx} = D_1 \sqrt{\frac{S_0}{EI}} e^{\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} - D_2 \sqrt{\frac{S_0}{EI}} e^{-\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} - \frac{q}{S_0}x + \frac{ql}{2S_0} \quad (19)$$

$$M(x) = -EI \frac{d^2y}{dx^2} = -D_1 S_0 e^{\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} - D_2 S_0 e^{-\sqrt{\frac{S_0}{EI}}x} + \frac{qEI}{S_0} \quad (20)$$

由式(14)可得管道在 $x=l/2$ 处中点挠度 $f$ 为

$$f = D_1 e^{\frac{l}{2}\sqrt{\frac{S_0}{EI}}} + D_2 e^{-\frac{l}{2}\sqrt{\frac{S_0}{EI}}} + \frac{ql^2}{8S_0} + \left(w_0 - \frac{M_0}{S_0} - \frac{qEI}{S_0^2}\right) \quad (21)$$

### 2.3 纵向位移计算

为了求解上述模型中的未知参量 $S_0$ , 补充管道纵向位移的关系式。

以滑坡体内管道为研究对象, 根据管道轴向应变的几何非线性关系可得

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \quad (22)$$

式中:  $\varepsilon_x$ 为管道轴向应变;  $u$ 为管道轴向位移, m。

根据材料力学胡克定律, 管道轴向应变表达式为

$$\varepsilon_x = \frac{S_0}{EA} \quad (23)$$

式中:  $A$ 为管道的截面积,  $m^2$ 。

联立式(22)和式(23)可得

$$\frac{du}{dx} = \frac{S_0}{EA} - \frac{1}{2} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \quad (24)$$

为了方便计算, 滑坡体内挠曲线近似取为 $y = f \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$ 。由式(24)可得

$$u(x) = \left(\frac{S_0}{EA} - \frac{f^2 \pi^2}{4l^2}\right)x - \frac{f^2 \pi}{8l} \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) \quad (25)$$

由截面 $C$ 的轴向位移为0, 可得

$$S_0 = \frac{f^2 \pi^2 EA}{4l^2} \quad (26)$$

联立式(21)和式(26)可解得 $S_0$ 。

## 3 管道强度校核

由于管道是薄壁, 一般情况下可以忽略径向应力, 因此, 管道的应力状态可以简化为环向应力和轴向应力的双轴应力状态<sup>[12]</sup>。

管道轴向应力 $\sigma_x$ 及环向应力 $\sigma_\theta$ 的计算公式为:

$$\sigma_x = \frac{S}{A} + \frac{pD}{4t} + \frac{M}{W} \quad (27)$$

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2t} \quad (28)$$

式中:  $S$ 为管道轴力, N;  $M$ 为管道弯矩, N·m;  $W$ 为管道截面抗弯模量,  $m^3$ ;  $p$ 为管道输送压力, Pa;  $t$ 为管道的壁厚, m。

根据强度理论, 可对上述应力状态进行组合, 判别管道的可靠性。Mises 屈服准则为常用的强度理论。

Mises 屈服准则也被称为最大形状改变比能条件, 其应力表达式为

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (29)$$

对于管道, 多属平面问题,  $\sigma_3=0$ , 因此式(29)可简化为

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (30)$$

式中:  $\sigma_{eq}$ 为当量应力, Pa;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别为第一、第二和第三主应力, Pa。

## 4 算例分析及结果讨论

根据上述算法, 使用 MATLAB 计算软件, 编写了管道受力、变形计算程序, 并以忠武输气管道沿线小担子垭滑坡<sup>[12]</sup>为例, 对管道受力、变形特性进行了分析。

斜坡地层为志留系龙马溪组黄绿色页岩, 表层覆盖残坡积碎块石土, 滑体厚度为2~4 m, 平均宽度 $l=40$  m, 管道从滑坡体中下部通过。滑坡体变形模量 $E_0=0.035$  GPa, 泊松比 $\nu_s=0.35$ , 滑坡体对管道的作用力 $q=4.35$  kN/m。

管道材料为 X65 型钢, 弹性模量 $E=207$  GPa,

最低屈服极限 $\sigma_s=450$  MPa。管道规格为 $\Phi 711$  mm $\times$ 7.9 mm, 即外径 $D=711$  mm, 壁厚 $t=7.9$  mm, 管道输送压力 $p=4.0$  MPa。

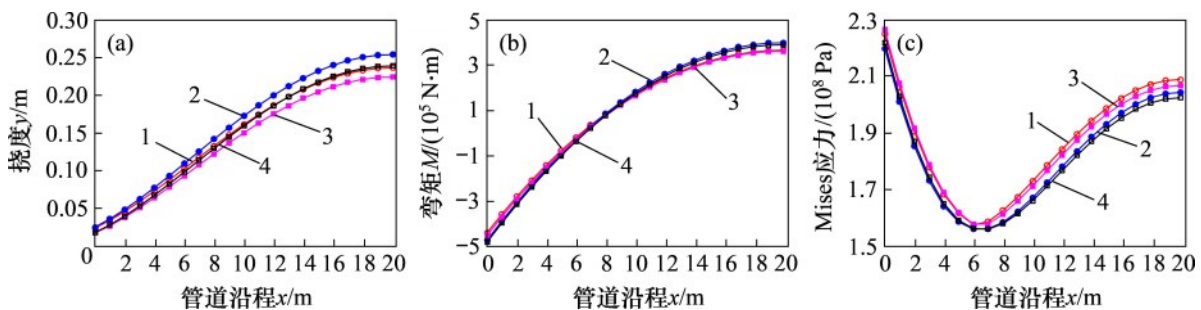
由于模型参数受多种因素影响, 针对不同工况和土体情况划分不同参数取值较为困难。因此, 本文针对特定的工况对参数进行取值, 并以此为标准选取较大值、较小值研究各参数对管道受力变形的影响作用。为研究轴向载荷、地基反力系数及地基剪切刚度对管道变形和受力的影响, 分别对考虑轴向载荷和不考虑轴向载荷、不同地基反力系数及不同地基剪切刚度条件下管道受力变形进行计算。

### 4.1 轴向载荷

为了研究轴向载荷对管道变形和受力的影响, 分别计算 Pasternak 地基模型和 Winkler 地基模型管道在考虑轴向载荷和不考虑轴向载荷作用下的挠度、弯矩和 Mises 应力。计算结果见图 5(由于管道变形对称, 因此取管道长度 $l/2$ 进行计算)。

由图 5(a)可知: 考虑轴向载荷作用时, 2 种地基模型计算的挠度都要小于不考虑轴向载荷时的计算结果, 说明轴向载荷对减小管道变形有利, 在设计计算时应给予考虑。由于双参数弹性模型弥补了 Winkler 模型在描述实际土体连续性态中所固有的缺陷, 因此考虑轴向载荷的 Pasternak 模型具有更高的计算精度。

由图 5(b)~(c)可知: 考虑轴向载荷作用时, 2 种地基模型计算所得弯矩要小于不计轴向载荷时的计算结果, 管道 Mises 应力大于不计轴向载荷时的计算结果。截面 A 与截面 C 弯矩及 Mises 应力取极值, 应该作为管道强度设计和校核的控制点,



(a) 挠度; (b) 弯矩; (c) Mises 应力

- 1—考虑轴向载荷(Pasternak); 2—不考虑轴向载荷(Pasternak);
- 3—考虑轴向载荷(Winkler); 4—不考虑轴向载荷(Winkler)。

图5 管道挠度、弯矩及 Mises 应力与管道沿程的关系

Fig. 5 Relationship between pipeline deflection, bending moment, Mises stress and pipeline

并将其作为研究重点。

轴向载荷并没有改变管道受力、变形的变化规律，但对计算结果产生了显著影响，在管道强度的设计和校核中是不可忽略的，因此下述各节计算中均考虑轴向载荷。

### 4.2 地基反力系数

计算不同地基反力系数管道挠度、弯矩及 Mises 应力。计算结果见图 6。

由图 6 可知：管道挠度、截面 C 上的弯矩与 Mises 应力随地基反力系数的增加呈下降趋势，而截面 A 上的弯矩与 Mises 应力呈上升趋势。地基反力系数的增加，加强对管道截面 A 上的约束，增大弯矩载荷，提高 Mises 应力水平；土体对管道截面 A 上约束的加强，减小截面 C 上的弯矩，降低 Mises 应力水平。

当地基反力系数较大时，Pasternak 地基模型与 Winkler 地基模型的计算结果相近(图 6)。因为地

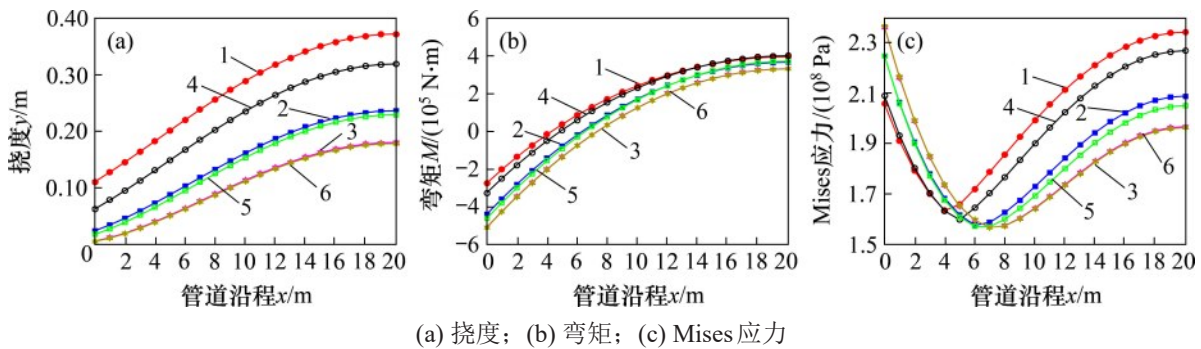
基反力系数较大时，荷载对临近单元体的传力作用减弱，管道受力变形性状主要受地基反力系数影响，Pasternak 模型近似退化为 Winkler 模型。

### 4.3 地基剪切刚度

计算不同地基剪切刚度管道挠度、弯矩及 Mises 应力，计算结果见图 7。

由图 7 可知：管道挠度、截面 C 上的弯矩及 Mises 应力随地基剪切刚度增加呈上升趋势，而截面 A 上的弯矩及 Mises 应力呈下降趋势。地基剪切刚度的增加，加强土弹簧间的传力性能，减弱土体对管道截面 A 上的约束，减小截面 A 的弯矩载荷，降低 Mises 应力水平；土体对管道截面 A 上约束的减弱，增加截面 C 上的弯矩，提高 Mises 应力水平。

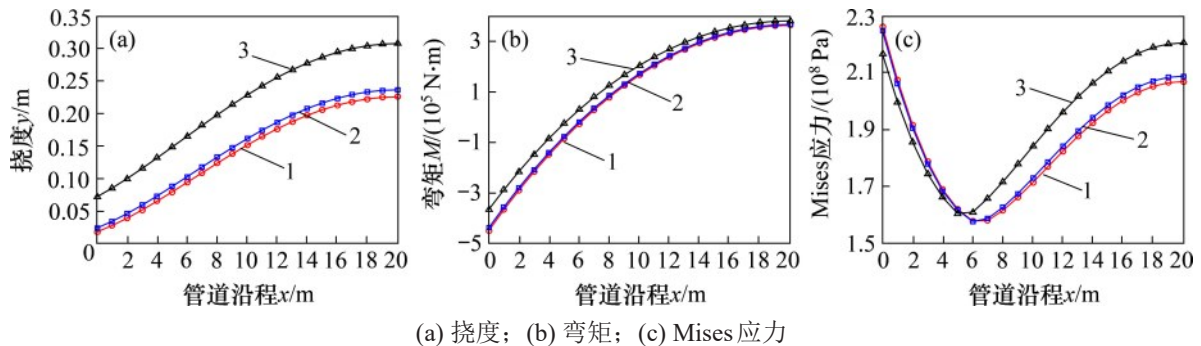
地基剪切刚度较大时，荷载对临近单元体的传力作用较大，减弱土体对管道的约束作用，地基剪切刚度对管道受力变形性状有较大影响，这



1— $k=1.015 \text{ MN/m}^3$  (Pasternak); 2— $k=10.15 \text{ MN/m}^3$  (Pasternak); 3— $k=101.5 \text{ MN/m}^3$  (Pasternak); 4— $k=1.015 \text{ MN/m}^3$  (Winkler); 5— $k=10.15 \text{ MN/m}^3$  (Winkler); 6— $k=101.5 \text{ MN/m}^3$  (Winkler)。

图 6 不同地基反力系数时管道挠度、弯矩及 Mises 应力与管道沿程关系

Fig. 6 Relationship between pipe deflection, moment and Mises stress and pipeline under different coefficient of subgrade reaction



1— $G_p=3.3794 \text{ MN/m}$ ; 2— $G_p=33.794 \text{ MN/m}$ ; 3— $G_p=337.94 \text{ MN/m}$ 。

图 7 不同地基剪切刚度时管道挠度、弯矩及 Mises 应力与管道沿程关系

Fig. 7 Relationship between pipe deflection, moment and Mises stress and pipeline under different shear stiffness of foundation

也是基于Winkler模型的弹性地基梁法误差较大的原因。

## 5 结论

1) 基于Pasternak模型的滑坡段管道受力分析方法弥补了基于Winkler模型的弹性地基梁法的固有缺陷,能够考虑荷载对临近单元体的传力性,具有更高的计算精度。

2) 轴向载荷对减小管道变形有利,对滑坡段管道受力影响显著,在埋地管道强度设计和校核中不能忽略。

3) 地基反力系数较大时,荷载对临近单元体的传力作用减弱,管道受力变形性状主要受地基反力系数影响,Pasternak模型近似退化为Winkler模型,2种模型计算结果相近。

4) 地基剪切刚度较大时,荷载对临近单元体的传力作用较大,减弱了土体对管道的约束作用,对管道受力变形性状有较大影响。

### 参考文献:

- [1] HAN Bing, WANG Zhiyin, ZHAO Honglin, et al. Strain-based design for buried pipelines subjected to landslides[J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(2): 236-241.
- [2] 吴玉良,徐国瀚,王国付,等.滑坡灾害中埋地管道稳定性分析[J].*中国安全生产科学技术*, 2018, 14(12): 73-77.  
WU Yuliang, XU Guohan, WANG Guofu, et al. Stability analysis of buried pipeline in landslide disaster[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(12): 73-77.
- [3] 李华,徐震,杨永和,等.滑坡作用下的埋地管道强度失效分析[J].*化工设备与管道*, 2012, 49(6): 54-57.  
LI Hua, XU Zhen, YANG Yonghe, et al. Strength failure analysis of buried piping loaded with landslide[J]. *Process Equipment & Piping*, 2012, 49(6): 54-57.
- [4] 陈利琼,宋利强,吴世娟,等.基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析[J].*天然气工业*, 2017, 37(2): 84-91.  
CHEN Liqiong, SONG Liqiang, WU Shijuan, et al. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2): 84-91.
- [5] 唐正浩,邓清禄,万飞,等.滑坡作用下埋地管道的受力分析与防护对策[J].*人民长江*, 2014, 45(3): 36-39.  
TANG Zhenghao, DENG Qinglu, WAN Fei, et al. Stress analysis and protection measures of buried pipeline loaded with landslide[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(3): 36-39.
- [6] 黄坤,卢泓方,吴世娟,等.穿越滑坡体埋地输气管道应力分析[J].*应用力学学报*, 2015, 32(4): 689-693.  
HUANG Kun, LU Hongfang, WU Shijuan, et al. The stress analysis of buried gas pipeline crossing the landslide[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(4): 689-693.
- [7] 张会远,管巧艳,骆晓阳,等.管道穿越滑坡下静力学与数值模拟对比分析[J].*煤田地质与勘探*, 2017, 45(1): 85-89.  
ZHANG Huiyuan, GUAN Qiaoyan, LUO Xiaoyang, et al. Comparative analysis of statics and numerical simulation of buried gas pipeline crossing landslide[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 85-89.
- [8] 由小川,庄苗,张效羽,等.高压天然气管线在地质灾害下的失效分析[J].*天然气工业*, 1999, 19(4): 77-81.  
YOU Xiaochuan, ZHUANG Zhuo, ZHANG Xiaoyu, et al. Failure analysis of high-pressure gas pipeline under the condition of geologic hazards [J]. *Natural Gas Industry*, 1999, 19(4): 77-81.
- [9] 耿光伟,倪玲英,张鲁飞.基于AutoPIPE的滑坡对输气管线的破坏研究[J].*工业安全与环保*, 2018, 44(3): 5-7, 45.  
GENG Guangwei, NI Lingying, ZHANG Lufei. Study of the destruction of landslide on pipeline based on AutoPIPE[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2018, 44(3): 5-7, 45.
- [10] 朱勇,林冬.横向管道滑坡有限元模型的建立及验证[J].*油气储运*, 2017, 36(5): 563-567.  
ZHU Yong, LIN Dong. Establishment and validation of a finite element model for transverse pipeline landslides[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(5): 563-567.
- [11] 邓道明,周新海,申玉平.横向滑坡过程中管道的内力和变形计算[J].*油气储运*, 1998, 17(7): 18-22.  
DENG Daoming, ZHOU Xinhai, SHEN Yuping. Calculation of pipeline inner force and distortion during transverse landslide body[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 1998, 17(7): 18-22.
- [12] 王磊.滑坡作用对输气管道危害的初步研究[D].武汉:中国地质大学工程学院, 2008: 21-51.  
WANG Lei. A preliminary study on gas-transporting pipeline harm caused by the deformation of landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences. Faculty of Engineering, 2008: 21-51.
- [13] 吴锐,梅永贵,邓清禄,等.滑坡作用下输气管道受力分析[J].*建筑科学与工程学报*, 2014, 31(3): 105-111.  
WU Rui, MEI Yonggui, DENG Qinglu, et al. Stress analysis of buried gas pipeline under landslide load[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2014, 31(3): 105-111.
- [14] YUN Long, KANG Le. Reliability analysis of high pressure buried pipeline under landslide[J]. *Applied Mechanics and*



- Materials, 2014, 501/502/503/504: 1081–1086.
- [15] VLASOV V Z, LEONTIEV U N. Beams, plates and shells on elastic foundation[M]. Moskva: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Fiziko-Matematicheskoi Literatury, 1960: 112–170.
- [16] SUN K. Laterally loaded piles in elastic media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120: 1324–1344.
- [17] 塞尔瓦杜雷 A P S. 土与基础相互作用的弹性分析[M]. 范文田, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984: 269–285.
- SELVADURAL A P S. Elastic analysis of soil-foundation interaction[M]. FAN Wentian, trans. Beijing: China Railway Publishing House, 1984: 269–285.
- [18] PASTERNAK P L. Fundamentals of a new method of analyzing structures on an elastic foundation by means of two foundation constants[M]. 2nd ed. Moscow: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literatury po Stroitelstvu Arkhitekture, 1954: 55–103.
- [19] 张望喜, 易韦建, 陈友坤, 等. 双参数地基推力长桩的水平位移解析解[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 34–38.
- ZHANG Wangxi, YI Weijian, CHEN Youkun, et al. Analytical solutions about horizontal displacement of laterally loaded long piles under double-parameter foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 34–38.
- [20] 魏东旭, 田大鹏, 张贺, 等. 双参数地基推力长桩的有限差分分解[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(6): 106–109.
- WEI Dongxu, TIAN Dapeng, ZHANG He, et al. Finite difference solutions of laterally loaded long-piles under double-parameter foundation[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(6): 106–109.
- [21] 梁发云, 李彦初, 黄茂松. 基于 Pasternak 双参数地基模型水平桩简化分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 300–304.
- LIANG Fayun, LI Yanchu, HUANG Maosong. Simplified method for laterally loaded piles based on Pasternak double-parameter spring model for foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 300–304.
- [22] 勃洛达夫金. 埋设管线[M]. 冯亮, 译. 北京: 石油工业出版社, 1980: 149–163.
- BLODAVKIN. Buried pipelines[M]. FENG Liang, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1980: 149–163.
- [23] TERZAGHI K. Evolution of coefficients of subgrade reaction[J]. Géotechnique, 1955, 5(4): 297–326.
- [24] TENG W C. Foundation design[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc, 1962: 38–79.
- [25] BOWLES J E. Foundation analysis and design[M]. 2nd ed. New York: McGraw Hill, 1977: 55–103.
- [26] YAO Wenjuan, YIN Wuxian, CHEN Jun, et al. Numerical simulation of a super-long pile group under both vertical and lateral loads[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2010, 13(6): 1139–1151.

(编辑 杨幼平)