

设计计算

地震裂缝错位作用时埋地管道的有限元分析

张进国* 吕英民

(石油大学(北京))

张进国 吕英民:地震裂缝错位作用时埋地管道的有限元分析,油气储运,1997(2)16,28~30。

摘 要 地震作用可引起地层沉陷、土壤液化、地层裂缝错位,对埋地管道有很大的破坏作用,为保障管道安全运行,必须开展管道抗震研究,使埋地管道能抵御一定烈度的地震力。分析地震裂缝错位对埋地管道的作用,根据最小势能原理,推导出在地震裂缝错位作用下埋地管道的有限元方程,利用该方程可计算埋地管道在地震裂缝错位作用下的位移、内力及应力,并提供了计算实例。

主题词 埋地管道 防震设计 有限元法 计算方法

地震对埋地管道的破坏十分严重,将直接造成关系国计民生的重要产品(如油、气、水)的停产、停运,还会引起一些致命的次生灾害,如火灾、环境污染

染等^[1]。因此,埋地管道应能抵御一定裂度的地震作用。地震对埋地管道的破坏,往往是由地震时的地层沉陷、土壤液化、地层裂缝错位引起的^[2]。本文针对

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} \quad (2)$$

式中 ϵ_i —— 百分误差,

$\bar{\epsilon} = 100 \times (\text{计算值} - \text{实测值}) / \text{实测值}$;

n —— 参加评估的数据组数。

分析压降误差时,把实测值作为“标准值”,把计算值作为“被评估值”,利用式(1)和式(2)求出平均百分误差和标准偏差。如果平均百分误差和标准偏差都比较小,那么该组“被评估值”与“标准值”比较吻合,即计算的压降值比较准确。如果在相同条件下计算的压降平均误差和标准偏差最小,那么,该公式是在该条件下最佳压降计算公式。以储运实验室两相流实验架水平管道的实测压降数据为例,用 Beggs-Brill 公式计算所得压降的平均百分误差为 -12.1%、标准偏差为 10.2%,用 Dukler II 公式计算所得压降的平均百分误差为 -18.5%、标准偏差

为 15.3%,可见用 Beggs-Brill 公式计算误差小,比较准确。因此,在气液混输管道的设计时,遇到同类似的情况,可以采用 Beggs-Brill 公式计算压降值。

用同样的方法也可筛选出给定条件下计算截面含液率的最佳公式。这样,可以采用该截面含液率计算公式来构造“混合模型”压降计算公式,以便得到压降最佳值。

为更好地服务于科研和生产,需对数据库进行完善和更新,删除一些过时的公式,增加一些近期发表的计算公式和“混合模型”计算公式;增加国内外气液混输管道的数据;补充增压、清管、防腐等方面的数据。此外,还需将该软件输入、输出界面汉化,以扩大用户。

参 考 文 献

1. 冯叔初等:油气集输,石油大学出版社(东营市),1989。
2. 杜小勇等:ORACLE 关系数据库系统教程(V 5.10 版),中国科学院希望高级电脑技术公司,1990。

(收稿日期:1996-07-16)

编辑:康力平

地震裂缝错位作用下的埋地管道进行研究,利用最小势能原理得到地震裂缝错位作用下的有限元分析方程,可为埋地管道抗震设计提供理论依据。

一、计算模型

地震时,埋地长直管道的某截面(A截面)处,地层发生裂缝并沿与管道轴线成 α 角的方向发生错位,错位距离为 $\Delta(\overline{A'A'})$,在裂缝附近,由于土壤的作用,管道轴线由原来的直线状态变为曲线,如图1所示。

考虑到管道很长,取管道附近足够长的一段管道进行分析,分析段长度为 L ,管道一端相对于另一端的横向位移为 $\Delta y = \Delta \cdot \sin\alpha$,纵向位移 $\Delta x = \Delta \cdot \cos\alpha$ 。取图1所示的 oxy 坐标系,管道的 x 截面横向位移为 $w(x)$,纵向位移为 $u(x)$,则边界条件为:

$$\begin{cases} x=0 \text{ 处}, u=0, \frac{\partial u}{\partial x}=0, w=0, \frac{\partial w}{\partial x}=0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0 \\ x=L \text{ 处}, u=\Delta x, \frac{\partial u}{\partial x}=0, w=\Delta y, \frac{\partial w}{\partial x}=0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0 \end{cases} \quad (1)$$

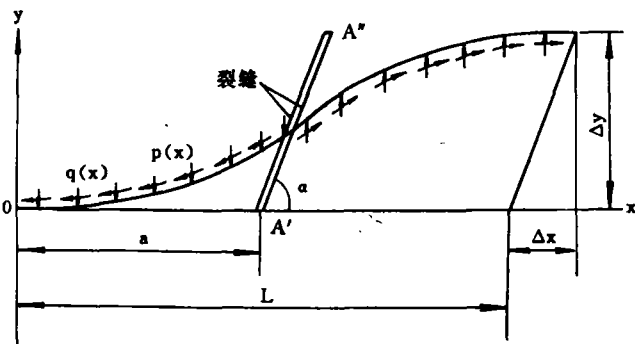


图1 管道计算模型

土壤对管道的作用等效成线性弹簧^[3],其横向作用线性刚度系数为 k_y ,纵向作用线性刚度系数为 k_x ,其大小分别为土壤对管道的横向、纵向作用力与管道相对于土壤的横向、纵向位移之比,其值取为^[3]:

$$\begin{cases} k_y = 3G_s \\ k_x = 2G_s \end{cases} \quad (2)$$

式中 G_s ——土壤的剪切弹性模量。

土壤对管道的横向作用力为:

$$\begin{cases} p(x) = -k_y u(x) & (0 \leq x \leq a) \\ p(x) = k_y [\Delta y - u(x)] & (a < x \leq L) \end{cases} \quad (3a)$$

土壤对管道的纵向作用力为:

$$\begin{cases} q(x) = -k_x u(x) & (0 \leq x \leq a) \\ q(x) = k_x [\Delta x - u(x)] & (a < x \leq L) \end{cases} \quad (3b)$$

二、有限元分析

取两结点平面杆梁单元将管道离散化,单元 e 如图2所示。

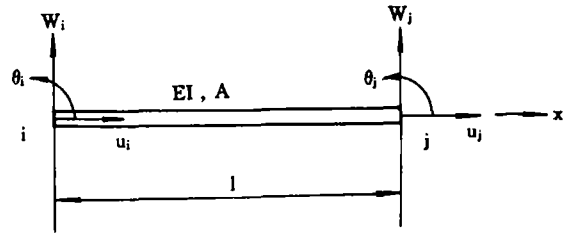


图2 平面杆梁单元

单元内横向位移 $w(x)$ 和纵向位移 $u(x)$ 分别为:

$$w(x) = [N_w(x)] \{\delta_w^e\} \quad (4)$$

$$u(x) = [N_u(x)] \{\delta_u^e\} \quad (5)$$

式中 $[N_u(x)]$ ——纵向位移形函数矩阵;

$[N_w(x)]$ ——横向位移形函数矩阵;

$\{\delta_u^e\}$ ——单元 e 纵向位移列阵;

$\{\delta_w^e\}$ ——单元 e 横向位移列阵。

$$\{\delta_u^e\} = [u_i u_j]^T \quad (6)$$

$$\{\delta_w^e\} = [w_i \theta_i w_j \theta_j]^T \quad (7)$$

$$[N_u(x)] = [N_{u_1}(x) N_{u_2}(x)] \quad (8)$$

$$[N_w(x)] = [N_{w_1}(x) N_{w_2}(x) N_{w_3}(x) N_{w_4}(x)] \quad (9)$$

$$N_{u_1}(x) = 1 - (x/l)$$

$$N_{u_2}(x) = x/l$$

$$N_{w_1}(x) = (2x^3 - 3lx^2 + l^3)/l^3$$

$$N_{w_2}(x) = (x^3 - 2lx^2 + l^2x)/l^3$$

$$N_{w_3}(x) = -(2x^3 - 3lx^2)/l^3$$

$$N_{w_4}(x) = (x^3 - lx^2)/l^3$$

杆梁单元的变形能 U_p^e 为:

$$\begin{aligned} U_p^e &= \frac{1}{2} \int_0^l EI w'^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l EA u'^2 dx \\ &= \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [k_p^e] \{\delta^e\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $[k_p^e]$ ——单元刚度矩阵;

$\{\delta^e\}$ ——单元位移列阵。

$$\{\delta^e\} = [u_i w_i \theta_i u_j w_j \theta_j]^T \quad (11)$$

$$[k_p^e] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (12)$$

与杆梁单元相接触的土壤变形能 U_s^e 为:

在 $0 \leq x \leq a$ 段

$$U_s^e = \frac{1}{2} \int_0^a k_{xy} w^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^a k_{sx} u^2 dx \\ = \frac{1}{2} \{\delta^e\} [k_s^e] \{\delta^e\} \quad (13a)$$

在 $a < x \leq L$ 段

$$U_s^e = \frac{1}{2} \int_a^L k_{xy} (\Delta y - w)^2 dx + \frac{1}{2} \int_a^L k_{sx} (\Delta x - u)^2 dx \\ = \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [k_s^e] \{\delta^e\} - \{p_0^e\}^T \{\delta^e\} \\ + \frac{1}{2} (k_{xy} \Delta y^2 + k_{sx} \Delta x^2) \quad (13b)$$

式中 $[k_s^e]$ 、 $\{p_0^e\}$ 分别为:

$$[k_s^e] = \begin{bmatrix} \frac{k_{sx} l}{3} & & & & & \\ 0 & \frac{13k_{xy} l}{35} & & & & \\ 0 & \frac{11k_{xy} l^2}{210} & \frac{k_{xy} l^3}{105} & & & \\ \frac{k_{sx} l}{6} & 0 & 0 & \frac{k_{sx} l}{3} & & \\ 0 & \frac{9k_{xy} l}{70} & \frac{13k_{xy} l^2}{420} & 0 & \frac{13k_{xy} l}{35} & \\ 0 & -\frac{13k_{xy} l^2}{420} & -\frac{k_{xy} l^3}{140} & 0 & -\frac{11k_{xy} l^2}{210} & \frac{k_{xy} l^3}{105} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\{p_0^e\} = \left[\frac{k_{sx} l \Delta x}{2} \frac{k_{xy} l \Delta y}{2} \frac{k_{xy} l^2 \Delta y}{12} \frac{k_{sx} l \Delta x}{2} \frac{k_{xy} l \Delta y}{2} - \frac{k_{xy} l^2 \Delta y}{12} \right]^T \quad (15)$$

单元系统(包括杆单元及与杆单元相接触的土壤)总的变形能 U^e 为:

$$U^e = U_s^e + U_p^e \quad (16)$$

由最小势能原理,当单元系统处于平衡状态时有^[4]:

$$\frac{\partial U^e}{\partial \{\delta^e\}} = 0 \quad (17)$$

得单元系统平衡方程

$$\begin{cases} [k^e] \{\delta^e\} = 0 & (0 \leq x \leq a) \\ [k^e] \{\delta^e\} = \{p_0^e\} & (a < x \leq L) \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{式中 } [k^e] = [k_s^e] + [k_p^e] \quad (19)$$

由集合方程(18)得结构平衡方程^[4]

$$[k] \{\delta\} = \{p_0\} \quad (20)$$

$$\text{式中 } [k] = \sum_{e=1}^N [k^e] \quad (21)$$

$$\{p_0\} = \sum_{e=1}^N \{p_0^e\} \quad (22)$$

$\{\delta\}$ ——结构位移列阵;

N ——管道分析段的单元总数;

$\{p_0\}$ ——扩展到整个结构中的列阵。

求解平衡方程(20)可得到管道结构位移列阵 $\{\delta\}$,进而可对管道进行内力、应力及强度计算^[4]。

设某工程中某埋地管道,其管道外径为 630 mm,壁厚为 20 mm,地震时土壤发生裂缝并沿与管道轴线成 80° 角的方向错位,错位距离为 1 m,现计算土壤剪切弹性模量分别为 1×10^4 Pa、 1×10^5 Pa 及 1×10^6 Pa 时管道内最大应力。

利用本文推出的有限元方程对该问题进行求解,得到管道内的最大应力分别为 117 MPa、389 MPa 和 1 225 MPa。

由以上分析及计算可见,本文根据最小势能原理推导出的地震裂缝错位作用下埋地管道的有限元分析方程,其物理意义清楚,能方便有效地计算地震裂缝错位作用下埋地管道的位移、内力及应力,为工程中埋地管道的抗震设计提供理论依据。

参 考 文 献

1. Ariman, T. & Muleski, G. E.: A Review of the Response of Buried Pipelines Under Seismic Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1981, 133~151.
2. Hahn, G. D. & Sritharan, S.: Lateral Response of Underground Pipelines to Earthquakes, Computers and Structures, 1994 (3) 53, 601~611.
3. Zerva, A. H-S, A. & Wen, Y. K.: Lifeline Response to Spatially Variable Ground Motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 361~379.
4. 傅之智(译):工程中的有限元法,科学出版社(北京),1991.

(收稿日期:1996-09-19)

编辑:艾德谔