

文章编号: 1007-2861(2009)03-0306-04

基于接触单元的埋地管线有限元抗震分析

陈家伟, 叶志明, 陈玲俐

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘要: 埋地管线有多种简化计算模型, 但计算结果相差较大. 管土之间的相互作用可以看成管土接触问题, 利用接触单元建立埋地管线及土体三维实体模型, 并对地震荷载作用下的管线进行应力计算, 给出了最大轴向应力. 对比规范方法、理论方法、梁-土弹簧模型、管土接触模型的4种计算结果, 现有简化模型的计算结果偏小, 偏于不安全.

关键词: 地下管线; 管土接触; 地震分析; 有限元法

中图分类号: TU 96.1

文献标志码: A

Seismic Finite-Element Analysis of Buried Pipeline Based on Contact-Element

CHEN Jia-wei, YE Zhi-ming, CHEN Ling-li

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: There are some simple models of pipeline with clearly different results. Interaction between the pipeline and soil can be considered as pipe-soil contact. Based on the pipe-soil contact model, a 3D finite-element model of buried pipeline and soil is established in the paper. Seismic responses of pipeline and the axis stress are given. Comparison among several methods including the standard method, a theoretical method, the beam-soil-spring model and the proposed pipe-soil contact model show that the results of simple models are too small and not safe enough.

Key words: buried pipeline; pipe-soil contact; seismic analysis; finite element methods (FEM)

埋地管线是城市供水、排水、供气、供热、输油等系统的重要组成部分, 担负着生命线工程的主要功能. 在城市中, 管线绝大多数埋设在地下且数量多, 其抗震能力比较脆弱. 在地震时, 管线的破坏将严重影响城市的正常生产、生活, 同时维修十分不便, 影响震后救灾的进行, 甚至产生次生灾害(如火灾、爆炸等), 致使城市及工矿企业处于瘫痪状态, 加重了地震危害^[1]. 地下管线的破坏原因有很多, 主要分为

两种: 地面大位移和地震波动引起的破坏, 其中大位移包括了地裂、土体滑移、土壤液化等.

国内外学者对地下管线进行了大量的研究^[2,4]. 最早对埋地管线的研究始于1967年的N. M. Newmark^[5], 其基于2个假定: 惯性力忽略不计和管土同步运动. 20世纪70年代, 日本学者提出了管土之间存在相互作用的理论, 进而提出了弹性地基梁模型; T. Ariman 和 G. E. Muleski 等^[6]提出了圆柱壳理论, 假定管道为弹性各向同性的薄圆柱壳. 20世

收稿日期: 2008-02-25

基金项目: 上海市科委重大基础研究资助项目(04JC14035)

通信作者: 叶志明(1954~), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为计算力学和工程力学. E-mail: zmeye@staff.shu.edu.cn

纪80年代, S. K. Datta^[7]及其合作者采用薄壳模型对管线在地震作用下的响应进行了全面的研究. 1994年, 何玉敖和梁建文^[8-9]采用薄壳有限元对在荷载作用下的管线性能和失稳进行了分析. 1998年, S. Takada和梁建文^[10]采用薄壳单元对跨断层管线进行了有限元分析. 2000年以后, 随着计算机水平的不断发展, 对地下管线的各种有限元数值模拟不断涌现^[11-12]. 从上可以看出管线的研究发展历程: 管土同步到管土相互作用, 梁模型到壳模型, 解析及经验解到数值分析. 本工作利用 ANSYS 分析软件, 基于接触单元建立埋地管线及土体三维实体模型, 并对结果进行了比较分析.

1 埋地管线理论计算方法

在地震波作用下, 场地土中的不同质点产生相对位移, 这种位移通过土体传到地下管线. 由于管线与土体之间存在摩擦及压力, 将使管线产生轴向和横向变形. 通常认为, 对于地下的直埋管线, 弯曲应力与轴向应力相比很小, 可以忽略不计, 但是对于三通及弯头处必须考虑弯曲应力. 文献[4]指出, 由于管线的自身重量与周围土体相比较小, 且周围土体对管线又有较大的约束, 所以在地震波作用下的地下管线动力效应很小. 在计算地震反应的时候可以不考虑动力作用.

1.1 规范

《室外给水排水和煤气热力工程抗震设计规范》GB50032—2003 给出了地下焊接直管道抗震验算公式^[13]为

$$\varepsilon = \zeta U \frac{\pi}{L}, \quad (1)$$

式中, U 为土体最大水平位移标准值, L 为地震波波长, ζ 为传递系数.

$$U = \frac{K_H g T_g^2}{4\pi^2}, \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{1}{1 + \frac{EA}{K} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2}, \quad (3)$$

式中, E 为管线材料的弹性模量, A 为管线的横截面积, D 为管线的平均直径, K 为管道轴向单位长度土地基的弹性系数.

1.2 简化方法^[14]

假定: (1) 地震波在传播过程中是保持波形不变的剪切波; (2) 埋地管线与周围土体变形相同, 即

管线的轴向应变等于周围土体沿管线轴向的正应变. 由弹性波动理论可以得知, 一般正向传播的位移可以表示为

$$u = \varphi(x + v_s t), \quad (4)$$

式中, u 为土体质点位移, 方向与 x 正交, x 表示剪切波传播方向, v_s 为剪切波传播速度. 分别对 x, t 求导, 土体的剪切应变为

$$\gamma(t) = V(t)/v_s. \quad (5)$$

供水管线轴向方向与剪切波传播方向的夹角为 β , 由投影原理得出管轴方向的应变为

$$\gamma'(t) = \frac{1}{2} \gamma(t) \sin 2\beta. \quad (6)$$

当 $\beta = 45^\circ$ 时, γ' 有如下最大值:

$$\gamma'_{\max} = \frac{1}{2} \gamma_{\max} = \frac{V_{\max}}{2v_s}. \quad (7)$$

同样引入传递系数 ζ .

2 地下管线有限元分析方法

地下管线有限元研究方法模型主要有平面梁-土弹簧模型、空间板壳模型^[10,15]. 第一种模型将管线模拟成梁单元, 将土体模拟成弹簧, 同时考虑土弹簧单元和管线单元的非线性特征. 该方法可以较全面地考虑到管线的轴向及横向变形, 算法简便, 便于应用. 空间板壳单元模型将管线模拟成矩形薄板构建的折板体系, 可以考虑管线壳体单元及土体的非线性特征. 该模型的优点在于大大缩减总体刚度矩阵, 不足之处在于迭代计算步骤过多, 效率较低.

管土之间相互作用可以看成管土接触问题. 接触问题比较复杂, 接触单元中参数的选取、接触面的设定等非常重要, 本工作对管土接触模型进行了初步的探讨.

2.1 基于平面梁-土弹簧模型的管线有限元分析

平面梁-土弹簧模型及土弹簧参数^[16]见图1~图3.



图1 梁-土弹簧模型

Fig. 1 Beam-soil-spring model

轴向弹簧的作用力是单位长度所受的土摩擦力, 弹簧屈服位移取 $Z_0 = 0.2 \sim 0.5$ cm (砂土), $0.5 \sim 1.0$ cm (黏土). 弹簧的力-位移关系见图2.

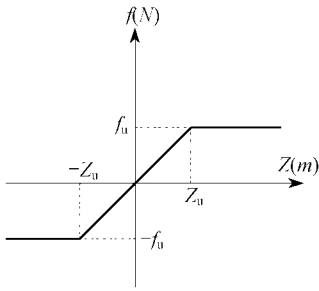


图2 轴向土弹簧非线性模型

Fig.2 Nonlinear model of axis spring

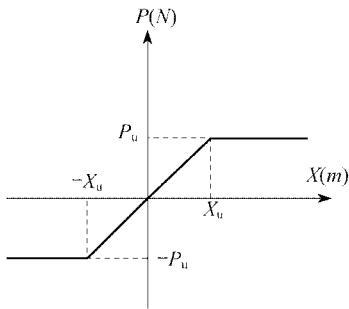


图3 横向土弹簧非线性模型

Fig.3 Nonlinear model of transverse spring

$$f_u = f_s L = 0.75 \pi \mu D H \gamma_s L, \quad (8)$$

式中, f_u 为屈服力, f_s 为单位长度下的管土滑动摩擦力, D 为直径, H 为管线的埋深, γ_s 为回填土的容重, μ 为管土之间的摩擦系数, L 为单元长度。

横向弹簧刚度主要与土的剪切模量有关,取

$$K = 2G = 2V^2 \cdot \gamma_s / g, \quad (9)$$

$$X_u = (0.02 \sim 0.10) g (H + D/2), \quad (10)$$

式中, K 为横向土弹簧刚度, G 为土剪切模量, X_u 为屈服位移。

2.2 基于接触模型的管线有限元分析

接触问题需要准确追踪接触前多个物体的运动以及接触后物体之间的相互作用,正确模拟接触面之间的摩擦行为需要较大的计算资源.接触有两个较大的难点:(1)接触区域未知,表面与表面会突然接触或者突然不接触,这会导致系统刚度的突然变化;(2)接触包括摩擦,如何选择正确的摩擦类型非常重要。

在模拟地下管线时,可以假定管土之间始终保持接触,不存在法向分离.主要参数选取如下。

(1) 表面作用模式

接触表面作用模式有4种选择:①法向单边接触;②粗糙接触,用来模拟无滑动的、表面相当粗糙的摩擦接触问题,对应于摩擦系数无限大;③不分

开的接触,用来模拟一旦接触就不分开的问题,不分开是指对法向接触而言,允许有相对滑动;④绑定接触,用来模拟接触一旦发生,表面在所有方向都被绑定的问题,一旦接触就再也不能脱开也不允许有相对滑动.本研究选择第三种作用模式。

(2) 选择摩擦类型

在库仑摩擦模型中(见图4),两个接触面在开始相互滑动之前,界面上会有剪应力产生,这种状态为粘合状态(stick).库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力,一旦剪应力超过此值后,两个表面之间将开始相互滑动,这种状态为滑动状态(sliding).粘合-滑动计算决定一个点从粘合状态到滑动状态或从滑动状态变到粘合状态.摩擦系数是任一非负值,本研究中取0.3.本工作的有限元模型和接触单元模型如图5和图6所示。

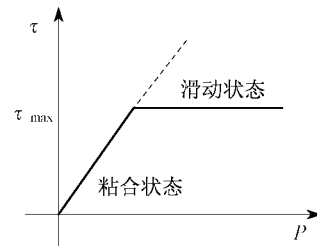


图4 摩擦模式

Fig.4 Friction model

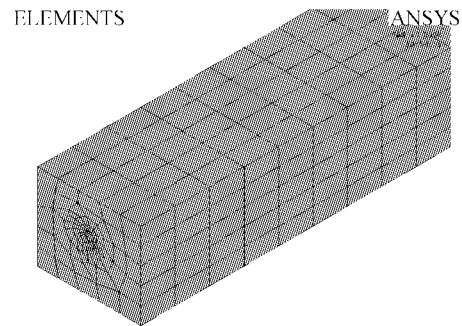


图5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

3 有限元计算结果

为了比较不同地震波下的轴向应力,地震波加速度峰值统一调整为 $0.1g$,分别采用梁-土弹簧模型、接触模型和简化方法计算,得到轴向应力如表1和图7所示。

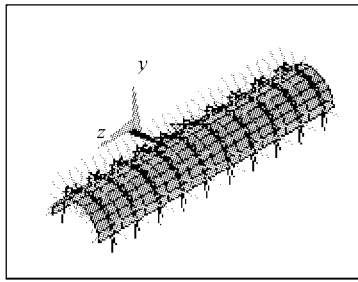


图6 接触单元模型

Fig.6 Contact element model

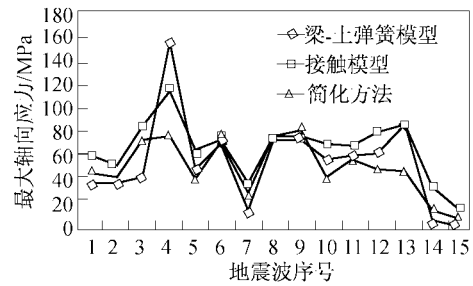


图7 不同方法的计算结果

Fig.7 Results of different methods

表1 地震荷载下的轴向应力

Table 1 Axial stress of pipeline in earthquake

地震波序号	峰值加速度($\times g$)	峰值速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	峰值位移/cm	最大轴向应力/MPa		
				梁-土弹簧模型	管土接触模型	简化计算
1	0.1	10.14	3.25	38.74	61.75	45.63
2	0.1	9.95	2.34	38.37	52.08	42.75
3	0.1	16.28	5.41	43.97	85.55	73.26
4	0.1	17.01	7.99	154.75	114.61	76.55
5	0.1	9.33	3.39	49.19	64.98	41.99
6	0.1	15.97	4.34	71.31	73.67	71.87
7	0.1	6.74	0.75	15.65	38.35	30.33
8	0.1	17.25	4.65	73.47	77.10	77.63
9	0.1	18.13	4.63	73.86	76.88	81.59
10	0.1	9.61	4.11	58.33	71.14	43.25
11	0.1	13.02	3.87	61.15	68.51	58.59
12	0.1	10.83	5.01	63.25	81.09	48.74
13	0.1	10.46	5.52	86.35	86.77	47.07
14	0.1	3.39	0.54	7.54	34.45	16.31
15	0.1	2.14	0.18	2.36	16.89	9.63

4 结束语

本研究利用管土接触模型对地下管线以及土体进行了三维有限元实体建模,计算了管线在不同地震荷载作用下的最大轴向应力反应.从结果可以看出:即使在地震峰值加速度、场地条件、管线条件都相同的情况下,相同的方法得到的最大轴向应力值也不尽相同;同一地震荷载,各种方法计算的结果相差明显.规范方法计算得到管线最大应力均值为62.21 MPa,梁-土弹簧模型计算结果平均值为45.59 MPa,简化方法结果为50.93 MPa,接触模型结果为66.92 MPa,管土接触模型结果比梁-土弹簧模型和简化方法结果大31.8%和23.9%,比规范方法大7.55%,较接近规范方法.管土接触模型更加符合实际情况,现有的有限元模型结果和简化方法偏于不安全,模型有待于进一步改进.

参考文献:

- [1] 赵成钢,冯启民.生命线地震工程[M].北京:地震出版社,1994:3-10.
- [2] 甘文水,侯忠良.地震行波作用下埋设管线的反应计算[J].地震工程与工程振动,1988,8(2):79-86.
- [3] 甘文水,侯忠良.地震行波作用下三维埋设管线反应分析[J].工业建筑,1992,21(2):200-204.
- [4] TAKADA S, TNANABE K. Three-dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines [J]. J of Pressure Vessel Technology, 1987, 109(1):35-42.
- [5] NEWMARK N M, HALL W J. Pipeline design to resist large fault displacement [C] // Proc of US Conf on Earthq Eng. Oakland: ERRI, 1975:416-425.

(下转第315页)