

管道埋深对管-土耦合应力的影响规律浅析

吴小刚, 张土乔, 张仪萍, 李 洵

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:考虑管-土间应力的耦合特性、管道在动力作用下强烈的非线性特征等, 讨论了管-土耦合应力在各种典型工况下受管道埋深因素影响的变化规律. 结果表明: 管道埋深对管-土耦合应力起着重要的影响作用, 为管道系统的可靠性设计和正常运行的动态控制提供了必要的计算实例及技术依据.

关键词:管道埋深; 管-土系统; 耦合应力

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)06-0004-03

管道作为物流运输的一种有效手段在现代工农业生产和人民生活中起着重要的作用, 是除公路、铁路、水运和航空以外的第五大运输方式. 20 世纪以来, 越来越多的国内外学者把管道受力性状问题作为他们的研究对象, 早在 20 世纪 60 年代末 Newmark^[1]就对地下管线受力特性进行了研究.

地下管线是一种特殊的地下结构, 周围受到土体介质的约束, 运动特性受到很大限制, 惯性力影响较小. 特别对于动力作用下的管道, 会表现出强烈的非线性行为特征, 即在趋势性变形基础上耦合着震荡性特点. 趋势性反映了管道变形的最终归宿, 变形逐渐减小趋于稳定, 或者逐渐增大而失稳, 以获得另外一种平衡, 反映着管道系统受力的复杂性和动态变化性; 震荡性则反映了应力作用是动态变化的, 包含随机性和周期性等特点. 所以, 复杂的管-土耦合应力问题难以通过一般解析方法得以解决, 必须借助现场测试技术、有限元分析理论等方法加以研究. 本文采用数值分析技术讨论了管-土耦合应力在静土压力、动力作用、土体位移等典型情况下受管道埋深因素影响的变化趋势.

1 静土压力下管道埋深的影响

根据 Barnard, Russel E 的试验^[2], 不同材料的管道(管径为 76 cm)埋设在公路下面时, 静态的管顶应力与管道埋深间的关系如图 1 所示.

邵炜等^[3]通过分析 GOODMAN 单元与 DESAI 薄层单元, 用线性薄层单元来模拟管-土接触面模型, 对静态砂土下管道受埋深影响的特性进行了研究,

得到: 随着管道埋深增大, 法向应力曲线略为上移, 幅度不大; 切向应力分布曲线则基本不变.

上述结果与图 1 的应力变化有略微差异, 因为图 1 反映的是浅埋管线性状, 而邵炜等则研究 40 m 以内的深埋管线性状. 所以, 浅埋管线的管-土静应力受管道埋深的影响比深埋管线幅度要稍微大一些; 对同一种管线来说, 切向应力的变化幅值则要比法向低.

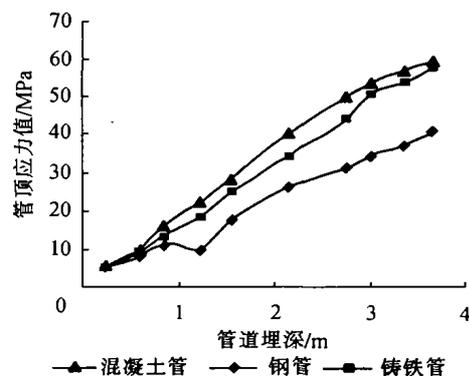


图 1 静土压力下管-土应力与管道埋深关系曲线

对于一般工程中埋设的管道来说, 土性变化对管-土应力影响仍占据主导地位. 只有当埋深很大时, 土性对于管道所受的大应力来说影响很小, 因为深埋管道应力分布曲线会重新回落, 即此时应力曲线的渐近线位置与土性无关.

2 动力作用下管道埋深的影响

目前, 动力作用下的地基模型可以采用弹性应力波在粘弹性半空间体中传播形式进行描述, 其应力表述式^[4]如下:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278088)

作者简介: 吴小刚(1977—), 男, 浙江东阳人, 博士研究生, 从事管道工程、基础工程以及管道与基础的动力相互作用等研究.

$$\begin{Bmatrix} \hat{\sigma}_{yy} \\ \hat{\tau}_{xy} \\ \hat{\tau}_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (2\mu + \lambda)m_1^2 - \lambda(k_x^2 + k_z^2) & 2i\mu k_x m_2 & -2i\mu k_z m_2 \\ -2i\mu k_x m_1 & \mu(m_2^2 + k_x^2) & -\mu k_x k_z \\ -2i\mu k_z m_1 & \mu k_x k_z & -\mu(m_2^2 + k_z^2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中： λ, μ 为拉梅常数， $k_p = \omega/c_p, k_s = \omega/c_s, c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}, c_s = \sqrt{\mu/\rho}, m_1^2 = k_x^2 + k_z^2 - k_p^2, m_2^2 = k_x^2 + k_z^2 - k_s^2, k_x$ 和 k_z 分别表示沿 x 轴和 z 轴的波数， A, B, C 为待定系数。该式描述应力波传播至管道埋深位置 y 处的应力数值。

应力波作用下的地下管道受周围土体约束，通过土介质的传递应力与土体一起参与振动。然而，土介质被视为使管道产生振动的促使体的同时，在与管道接触部位还可以产生阻止管道振动的剪切应力。因此，管-土系统存在两种工作原理的耦合：埋入土中的管道加入振动过程，管道的振动是由土介质应力传播引起的；同时，振动管道置于土介质中，土介质阻止振动过程。所以，动力作用下的管-土耦合系统受力性状更为复杂，体现着强烈的非线性行为特征。了解土体的动力特性成为管-土耦合系统受力性状分析的前提。

2.1 土体动力特性

动力作用下的土体参数具有应力依赖性、粘弹塑性、非线性和滞后性等特点。动力作用下的管道随着埋深的增加，振动加速度和土颗粒移动的幅度会明显下降。在低频振动中加速度、土颗粒速度和位移从土层上部迅速下降，且从根本上仍然取决于土体本身的特性。

根据不同深度土颗粒振动试验数据的处理，其中包括日本学者 K KANAI, T TANARA 和 S LOSIZAVA 所获得的数据^[5]，提出下式：

$$\xi = a_h/a_0 = 0.2 + 0.8e^{-0.25h} \quad (2)$$

其中： ξ 为管道埋深 h 处的振动加速度 a_h 与地表加速度 a_0 的相互关系。该关系式反映了对于振动周期不小于 0.2 s 的长波传播时土体振动加速度随管道埋深而下降的特点。

2.2 动力作用下管道埋深与管土应力关系

采用有限元对管-土协同受动力效应引起的应力响应进行模拟。实例采用在砂土中管径为 1.0 m 的预应力混凝土管，土体摩擦角为 45°，动力波型为 E_1 -centro，加速度幅值取 0.4 g (g 为重力加速度)。砂

土动力模型采用等效线性粘弹性模型，表示土体在动力作用下的应力是由弹性恢复力和粘性阻尼力共同承担，但是土体的刚度与阻尼随着动应变幅度而变化，体现土动应力与动应变关系的非线性、滞后性特征。管-土接触面则采用常用的 GOODMAN 无厚度接触单元，该单元体现随着接触面相对位移的增加，剪切刚度衰减很快。当相对位移超过限值，接触面剪应力达到强度而屈服时采用残余剪切强度，从而得到应力受管道埋深影响曲线(图 2)。

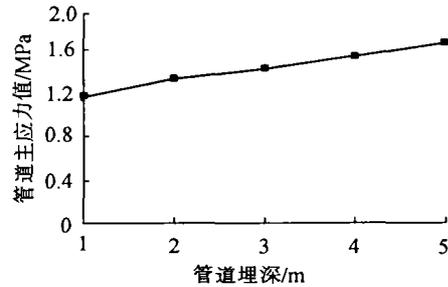


图 2 管道主应力与管道埋深关系曲线

由图 2 可知，管道的最大主应力随着管道埋深的增加有所增加，但是幅度很小，特别是在工程所能允许的埋深范围内增加幅度不明显。

3 土体位移下管道埋深的影响

为了表征管-土位移情况下的应力变化，利用 ABAQUS 软件模拟土中管道受到土体位移作用时管道埋深对其侧向、竖向应力的影响效应分别进行表述。

该有限元模型属于平面应变问题^[6]，采用弹-塑性 Mohr Coulomb 准则：

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi'$$

同时，弹性阶段采用剪切模量定义为

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

对于塑性阶段，则采用最大剪切模量

$$F = A_{lat}(c' + \sigma' \tan \varphi')$$

经计算，侧向管-土应力、竖向管-土应力与管道埋深关系见图 3 和图 4。

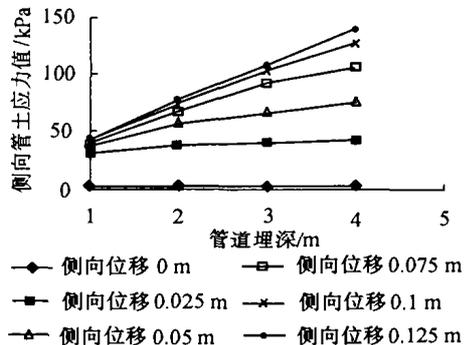


图 3 侧向位移时管-土应力与管道埋深关系曲线

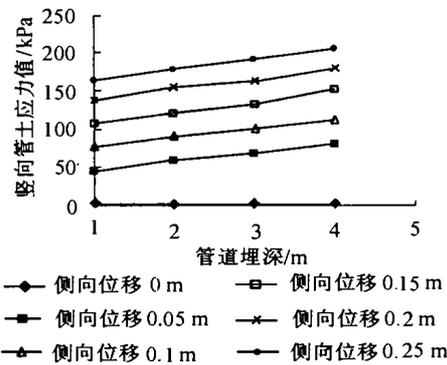


图4 竖向位移时管-土应力与管道埋深关系曲线

图3和图4的数据显示:管道的埋深对管-土耦合应力的变化存在一定的影响.在其他参数确定的情况下,属近似线性关系,影响幅度不大.对于管-土存在相对位移的类型,其管侧应力与管顶应力的变化幅度却是明显不同的,即侧向位移产生的侧向应力相对比竖向位移产生的竖向应力要快得多.

4 结 语

a. 数值方法较好地再现了管道与周围土体接触耦合应力的变化特性,并有较高的模拟精度,是目前管道受力性状研究中常用的计算手段.

b. 动力作用下的管-土接触应力变化包括两方面:随着管道埋深增加,土体的阻尼作用愈加明显,导致动应力在传播至管道前衰减增加,管-土间所受应力变小;随着管道埋深增加,管-土相互约束作用更加明显,管道参与动应力变化、土体振动的积极性增加,导致管-土间所受应力变大.通过文中有限元数值分析,实例中的管-土耦合应力随着管道埋深的增加而增大,表明动应力的衰减较管土约束力的增加快得多,但是总体的增加幅度随着工况、土性等的不同而存在差异.

c. 通过管道埋深对管-土耦合应力的影响敏感性分析可知,在静土压力作用下,随着埋深的增加,接触面应力略有变化,从数值分析中显示其幅度不大,即埋深因素对管道耦合应力变化的贡献值较小(浅埋时稍大一些);同时,对于大埋深管道,随埋深增加,管-土耦合切向应力的分布曲线存在渐近线,即各影响因素(包括土性等主导因素在内)的影响效果均减小.

参考文献:

[1] Newmark N M, Hall W J. Pipeline design to resist large fault displacement[J]. Earthquake Engineering Res Inst, 1975. 416 ~ 425.
 [2] 勃洛达夫金. 埋设管线[M]. 北京:中国石化出版社, 1985. 36 ~ 37.
 [3] 邵伟, 金峰, 王光纶. 用于接触面模拟的非线性薄层单元

[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999(2): 34 ~ 38.

[4] Hung H-H, Yang Y-B. Elastic waves in visco-elastic half-space generated by various vehicle loads[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2001, 21(1): 1 ~ 17.
 [5] 格赫显 A C. 管道的抗震设计施工与监护[M]. 刘昆译. 北京:地震出版社, 1992. 74 ~ 75.
 [6] Jacqueline V R Musman, Alvaro M Costa, Claudio Amaral, et al. Pipeline visualization, simulation and monitoring in unstable areas affected by soil movements at Serra Do Mar-brazil[A]. Proceedings of IPC'02 4th International Pipeline Conference [C]. September 29-October 3, 2002, Calgary, Alberta, Canada. 202 ~ 207
 [7] Rbert Kuik, Eric Jager, Gerard Stallenberg, et al. The Influence of land use and depth of cover on the failure rate of gas transmission pipelines[A]. Proceedings of IPC'02 4th International Pipeline Conference [C]. September 29-October 3, 2002, Calgary, Alberta, Canada. 158 ~ 161.
 [8] 李昕, 周晶, 陈健云. 考虑土体非线性特性的直埋管道-土体系统的动力反应分析[J]. 计算力学学报, 2001, 18(2): 167 ~ 172.
 [9] Takada S, Higashi S. Shell model FEM analysis for jointed buried pipelines [A]. Proc of China-Japan Sympon Lifeline Earthq Eng [C]. Beijing: Science Press, 1990. 145 ~ 152.

(收稿日期:2003-03-16 编辑:傅伟群)

欢迎订阅 2004 年《水电能源科学》(季刊)

《水电能源科学》是由国家教育部主管、中国水力发电工程学会和华中科技大学共同主办的学术性刊物——中国水力发电工程学会会刊. 刊物面向从事水、电、能源开发与研究的科研工作者、管理人员及相关大专院校的师生, 主要反映水资源开发、利用和保护的科技进展与动态, 报道水利水电建设及其相关学科的新理论、新技术、新方法以及工程应用的新成果.

《水电能源科学》大 16 开本印刷, 正文 88 页, 每册定价 6.00 元, 全年 24.00 元. 全国各地邮局均可订阅, 邮发代号: 38 - 111. 若有漏订者, 也可直接汇款到编辑部函购.

编辑部地址: 430074 武汉华中科技大学

电话: (027)87542126

传真: (027)87543892

E-mail: sdny@x263.net

