

考虑管土耦合的机坪垂直管道应力分析

王成杰* 梁斌* 刘硕† 许晶禹†,1)

*(中国航空油料有限责任公司, 北京 100088)

†(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 机坪输油管网供油是目前民用航空领域供油的主要方式之一. 实际工程中, 机坪管网垂直管道受混凝土道面移位作用容易产生变形甚至破坏. 为了解机坪垂直管道变形乃至破坏的机理, 通过 ANSYS 软件对多种规格和底部三通连接方式的机坪垂直管道进行了有限元分析, 管道和填埋土层之间的相互作用采用 $P-y$ 曲线法进行模拟. 通过室内物理模型实验校核并调整了 $P-y$ 曲线参数. 研究表明, 除底部三通外, 填埋土层约束下垂直管道也出现了一个高应力区, 应力分布状况只与填埋土层分布和混凝土道面移位量有关. 最后通过现场案例分析, 给出了管道破坏点位置, 与现场检测结果相符.

关键词 垂直管道, $P-y$ 曲线, 有限元分析, 应力分布

中图分类号: TE832 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-16-169

STRESS ANALYSIS FOR APRON VERTICAL PIPES TAKING ACCOUNT OF PIPE-SOIL COUPLING INTERACTION

WANG Chengjie* LIANG Bin* LIU Shuo† XU Jingyu†,1)

*(China National Aviation Fuel Co Ltd, Beijing 100088, China)

†(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Kerosene supply through apron network is one of the major methods for civil aviation kerosene supply. In practical engineering, vertical pipes in apron network maybe deformed or even broken due to slippage of concrete pavement. In this work, for sake of studying the mechanism for vertical pipes deformation and damage, FEM analysis has been performed on apron vertical pipes with different norms and tee types, in which $P-y$ curves has been applied to simulate interaction between pipe and soil. Parameters for $P-y$ curves have been determined through indoor physical model tests. The results show that the section with high stress besides tee in the bottom came out as result of backfill soil. And the stress distribution on the vertical pipes is related to the backfill layer distribution and slippage of concrete pavement. At last, through analysis of certain field case, failure point is ascertained, which is in accordance with test result.

Key words vertical pipe, $P-y$ curves, finite element method analysis, stress distribution

机坪输油管网供油是目前民用航空领域供油的主要方式. 与长输管线不同, 机坪垂直管网是一个多点锚固结构. 管路上会在多个位置安装支管穿越垂

直土层和混凝土道面, 上接阀门为民航飞机提供航空煤油供应. 浇筑混凝土道面对加油栓井套筒构成约束作用, 形成对机坪埋地管道的多点约束. 受季

2016-05-13 收到第 1 稿, 2016-05-29 收到修改稿.

1) E-mail: xujingxu@imech.ac.cn

引用格式: 王成杰, 梁斌, 刘硕等. 考虑管土耦合的机坪垂直管道应力分析. 力学与实践, 2016, 38(6): 624-630

Wang Chengjie, Liang Bin, Liu Shuo, et al. Stress analysis for apron vertical pipes taking account of pipe-soil coupling interaction. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(6): 624-630

节性温差影响, 混凝土道面会产生热胀冷缩作用, 温差产生的变形量在单个方向上累积可达厘米量级. 在这种状况下, 加油栓井下接的机坪垂直管道会在混凝土道面滑移下产生剪切变形. 在实际工程中, 出现了机坪垂直管道受混凝土道面滑移剪切变形甚至破坏的情况. 机坪垂直管道的破坏易造成航煤泄漏, 威胁机场安全运营, 因此需要详细研究机坪垂直管道的应力分布状况, 了解机坪垂直管道受剪破坏的机理, 在此基础上对机坪埋地管网的铺设做出合理建议. 本文将通过 ANSYS 有限元软件建立考虑管道-砂土耦合作用的机坪垂直管道模型, 对垂直管道应力分布进行详细分析.

机坪垂直管道为埋地结构, 混凝土道面下分层(自上向下: 混凝土道面、水稳层、砂土层和细砂层) 填埋, 不同土层砂土的密实度和粒径不同. 机坪垂直管道在混凝土道面滑移作用下, 会向单侧移动, 对同侧的砂土造成挤压, 砂土受挤压变形的同时对垂直管道产生反向应力. 这是一个非线性管道-砂土耦合过程, 只有详细考虑管道-砂土的耦合作用才能使机坪垂直管道应力分析真实可靠.

对于本文涉及到的管道-砂土耦合作用问题, 主要考虑的是管道横向受载, 与土中埋深的竖直桩类似, 其耦合问题可以参考桩的水平承载力计算方法^[1-3]. 随着竖直桩的广泛采用, 桩基础水平承载力的计算方法逐渐发展. 常见的桩的水平承载力计算方法有极限平衡法、弹性地基反力法和 $P-y$ 曲线法 3 种^[4]. 极限平衡法只适用于刚性大、埋深浅的刚性短桩. 本文的垂直管道相对混凝土道面和水稳层是柔性结构, 不适用极限平衡法. 极限抗力法假定地基土是弹性体, 将桩视为弹性地基中的竖直梁, 其实质是求解挠曲微分方程

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + \bar{p}(z, y) = 0 \quad (1)$$

其中, E 为桩材弹性模量, I 为截面惯性矩, EI 为抗弯刚度, $\bar{p}(z, y)$ 为作用于桩身微元体的线载荷.

由于土壤只在小变形范围内可以视为弹性体, 上文提到的适用范围有限, 本文涉及到的问题不适用极限抗力法解决. 考虑到机坪垂直管道受滑移剪切变形可能导致砂土产生塑性变形的问題, 用 $P-y$ 曲线法不失为一种理想的选择. 在地基土符合文克尔模型假设下, 通过割线模量 E_s 建立起 $P-y$ 之间的关系(图 1)

$$P = E_s y \quad (2)$$

式中, E_s 为割线模量, 它与深度 z 和位移 y 有关, 即

$$E_s = f(z, y) = F(z, P) \quad (3)$$

给出沿深度变化的 $P-y$ 曲线后, 可以通过迭代法得到式(1)的解. $P-y$ 曲线的确定方式为桩侧单位面积的极限水平土抗力标准值, 可按照下列公式计算

$$\text{当 } z < z_r : P_u = (C_1 z + C_2 d) \gamma z \quad (4)$$

$$\text{当 } z > z_r : P_u = C_3 d \gamma z \quad (5)$$

式中, C_1 , C_2 和 C_3 是计算参数, 根据土壤条件选取; P_u 是地面以下 z 深度处单位桩长的极限水平土抗力的标准值(kN/m); z 是地面以下桩的任一深度(m); d 是桩径或者桩宽(m); γ 是土的容重(kN/m³). 砂土中桩的 $P-y$ 曲线, 在缺乏现场试验资料时, 可按下列公式确定

$$P = \psi \cdot P_u \cdot \tanh\left(\frac{Kz}{\psi P_u} y\right) \quad (6)$$

$$\psi = \left(3.0 - 0.8 \frac{z}{d}\right) > 0.9 \quad (7)$$

式中, P 是地面以下 z 深度处作用于桩上的极限水平土抗力标准值(kN/m), ψ 是计算系数, K 是土抗力的初始模量(kN/m³).

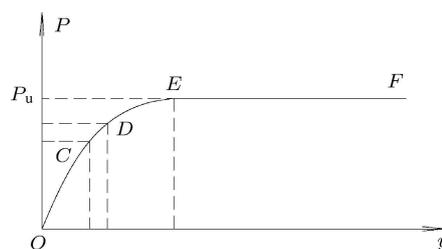


图 1 砂土某一高程点的 $P-y$ 曲线

目前, 很多学者从不同角度发展和修正了 $P-y$ 曲线, 使之能够更准确地反应实际的工程条件^[5-9]. Bai 等^[10] 在钢质柔性立管分析中通过 $P-y$ 曲线法模拟了立管与土壤之间的相互作用. 胡立万等^[11] 用 $P-y$ 曲线法对砂性土及黏性土地基中的板桩码头进行了计算, 并与传统 m 法的计算结果进行了对比. 张建勇^[12] 首次将 $P-y$ 曲线法引入有限元软件 ANSYS 中, 利用 combin39 弹簧单元对桩土间相互作用实现了等效集中的非线性数值模拟. 齐志会等^[13] 提出正冲压固定平台有限元计算模型中基础边界条件的一种简化方法, 将 2 个水平方向的扭转自由度简化为弹簧边界元.

对于本文的机坪垂直管道问题, 由于其为浅埋深不饱和土, 套用规范中的经验参数会产生偏差. 因此, 本文将通过实体砂土-管道室内剪切实验对机坪垂直管道埋深范围内的埋填砂土 $P-y$ 曲线进行调整校核, 验证 $P-y$ 曲线法模拟管道-砂土耦合作用的机坪垂直管道有限元模型的准确性, 并进一步用验证后的模型进行现场实例分析.

1 管道-砂土耦合机坪垂直管道有限元模型准确性验证

$P-y$ 曲线的实质是对垂直管道不同高程位置施加非线性弹簧, 非线性弹簧的劲度系数 k 随弹簧变形量变化而变化, 通过非线性弹簧模拟土体对垂直

管道的作用. 这种计算方法计算效率高, 但土壤弹簧刚度需要在规范的基础上进行校核调整. 为此, 进行了机坪埋地管道剪切实验.

实验中机坪垂直管道规格为 DN400-150, 即主管管径 406.4 mm, 壁厚 9.5 mm, 支管管径 168 mm, 壁厚 6 mm; 底部三通连接形式分为冲压三通和对焊支管台三通两种.

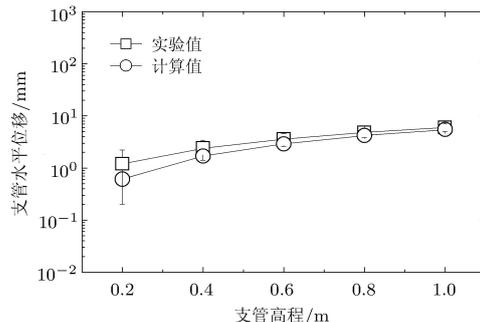
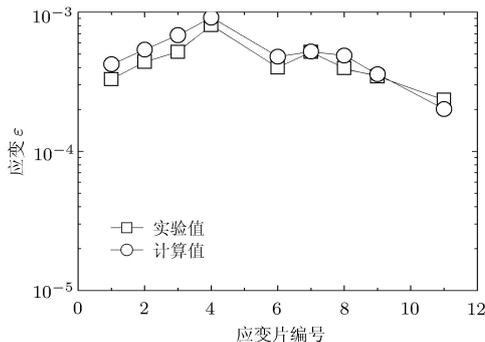
室内模型的布置埋填土层分为细砂层、砂土层、水稳层和混凝土道面层, 通过千斤顶对混凝土道面进行加载, 模拟混凝土道面滑移对垂直管道的剪切作用. 在本文中, 选取机坪垂直管道不同点的应变和垂直管道不同高程的水平位移作为数值模拟和室内实验的对照标准 (图 2).



图 2 实验模型和监测点

选取混凝土道面剪切位移为 12.2 mm 时底部三通连接方式为冲压三通的机坪垂直管道的有限元计算结果和实验结果进行对比 (图 3(a)), 有限元模型中的非线性弹簧刚度经过调整后, 各个测试点的应变和有限元模型对应位置的应变较为符合; 分析对比支管各高程 (高程定义为支管某一点相对于主管最顶部的距离) 水平变形量的计算值和实验值, 测试点最大水平位移约为 6 mm, 计算值和实验值的误

差在 1 mm 以内 (图 3(a)). 对底部连接方式为支管台三通的垂直管道选取 13 mm 混凝土道面剪切位移下的有限元计算结果和实验结果进行对比. 结果显示, 各个测试点应变和相应的计算值较为相符, 不同高程水平变形量的计算值和实验值误差在 1 mm 内 (图 3(b)). 通过以上两组实验可以证明, $P-y$ 曲线方法模拟管道-砂土耦合作用在机坪垂直管道应力分析中是准确可行的.



(a) 冲压三通

图 3 数值模拟和实验测试结果对比

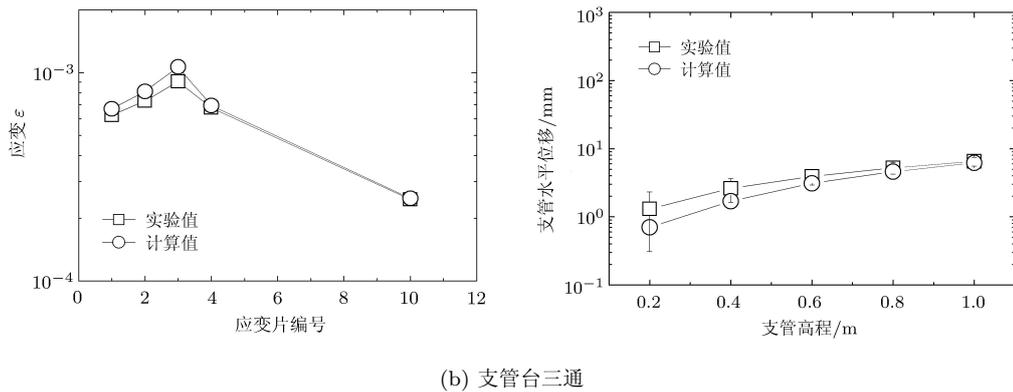


图 3 数值模拟和实验测试结果对比 (续)

2 机坪垂直管道应力有限元分析

为对机坪垂直管道应力进行有限元分析,需首先建立有限元模型.机坪垂直管道涉及到多种主管规格和多种底部三通连接方式.结合工程实际,本文选取了支管规格为 DN150,主管规格为 DN300、DN350、DN400、DN500 和 DN600 的冲压三通和支管台三通进行系统的有限元分析.在 ANSYS 有限元软件中,通过 solid185 三维实体单元模拟垂直管道主体;用 combin39 单元模拟土体对管道的作用,combin39 单元是非线性弹簧单元,根据 $P-y$ 曲线定义和室内实验的校核结果定义 combin39 单元的刚度;通过 pipe16 管单元砂土作用力传递到垂直管道主体上(连接 solid185 单元和 combin39 单元).其中相同高程的 pipe16 单元节点和管道内壁节点耦合 x 和 y 方向的位移自由度,图 4(b) 中 Δ 即为耦合符号.钢材的本构关系采用双线性本构关系(屈服强度 245 MPa,杨氏模量 206 GPa,第二阶段线性模量

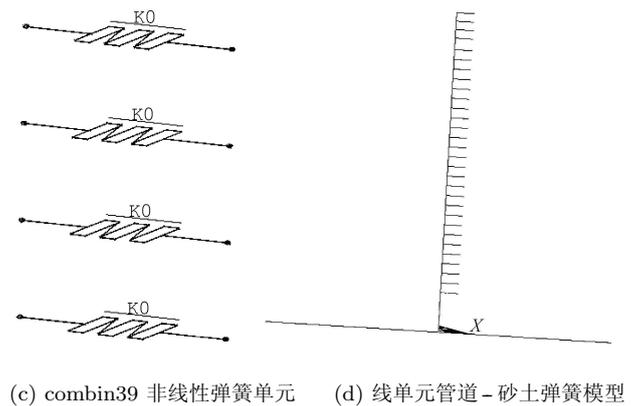
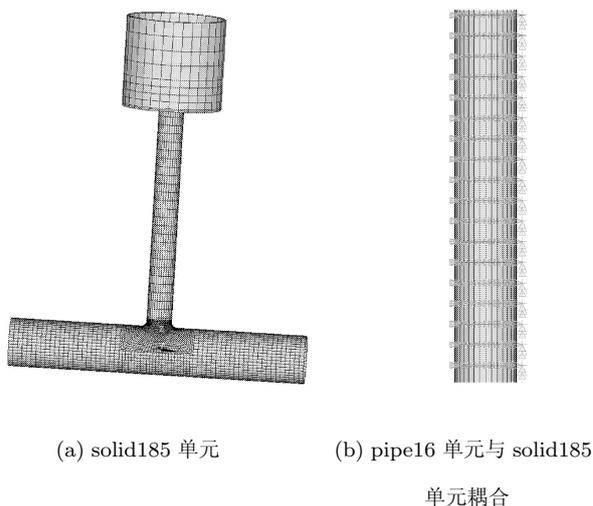


图 4 机坪垂直管道有限元模型

0).边界条件方面,约束主管两侧结点所有自由度,同时约束砂土弹簧端点所有的自由度.对支管顶部施加 2 mm、5 mm 和 8 mm 剪切位移作为 3 个工况,进行有限元分析.

2.1 砂土约束对垂直管道的影响

为研究埋地管道埋土对垂直管道的约束作用,需要对比无约束垂直管道的受力状况.从图 5 中可以看出,在有埋土约束下,垂直管道在水稳层和砂土层交界的位置出现了反弯点.出现这种状况是由于相对下层砂土,水稳层是刚度很大的土层,水稳层在混凝土道面带动下产生滑移;垂直管道中水稳层以上的部分在外部约束作用下产生强制位移,承受大剪切作用,水稳层下的砂土层没有主动位移,对砂土层中的垂直管道部分也有较强的约束,这样垂直管道承受了剪切作用.由于垂直管道变形协调作用,在砂土层和水稳层交界处出现了变形曲线的反弯点.结合图 6 研究垂直管道应力分布,发现与无砂土约束的垂直管道相比,有砂土约束的垂直管道在反弯点附近出现了高应力分布,这样垂直



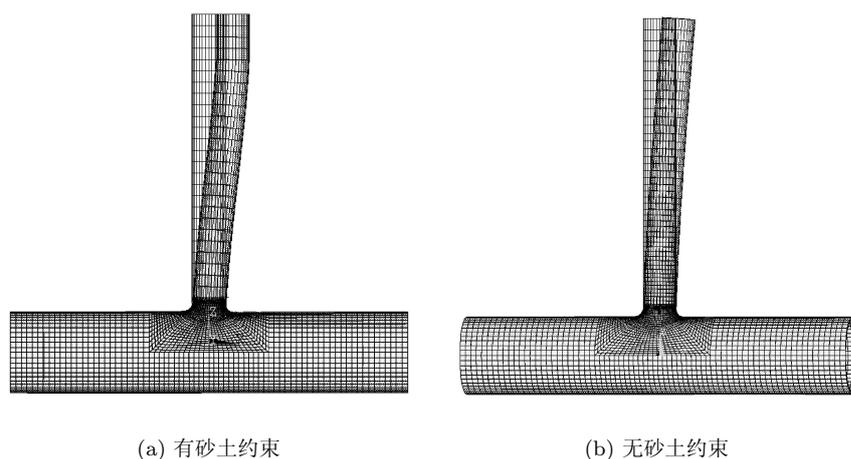


图5 底部连接方式为冲压三通的 DN400-150 垂直管变形对比

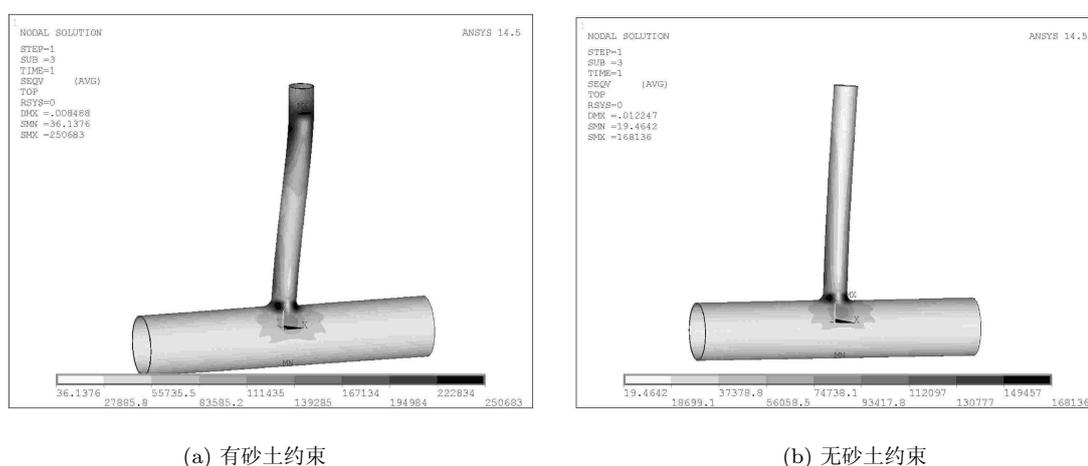


图6 底部连接方式为冲压三通的 DN400-150 垂直管应力对比

管道出现了两个应力较高的区域——底部三通和垂直管道穿越土层交界的位置，这两个位置都可能产生屈服破坏，在实际现场中，后者已出现过严重的剪切破坏案例。

对比有无砂土约束下的底部三通应力分布状况可以发现，相同顶部剪切位移加载下，砂土约束使底部三通最大应力增加，这是受砂土层水稳层剪切作用导致的。

2.2 不同规格和底部三通连接的机坪垂直管道应力分布对比分析

图7为8mm支管顶部剪切位移下垂直管道的应力分布状况。从图中可以看出，与前文一致，对于底部连接方式为冲压三通和支管台三通的机坪垂直管道，均出现了两个高应力区，垂直管道上部水稳层-砂土层交界处和底部三通位置。因此，垂直管道

上部水稳层-砂土层交界位置和底部三通连接位置需要重点关注。

将10组模型在2mm、5mm和8mm三个加载工况下的应力分布状况提取出来形成表1。从表中可以发现相对底部三通，支管的最大应力变化受底部主管规格和三通连接方式的影响很小，可以认为DN150垂直管道上部最大应力只与顶部剪切位移量有关，也就是说垂直管道应力分布状况只与填埋土层分布和混凝土道面滑移有关；同种规格垂直管道在相同加载状况下冲压三通的应力小于支管台三通的应力，这与不同三通连接方式本身的力学性能有关；对于同种规格不同底部三通连接方式的垂直管道，对焊支管台三通最大应力大于垂直管道最大应力，垂直管道最大应力大于冲压三通最大应力，当管道屈服后，继续加载应力重新分布(如图8所示)。

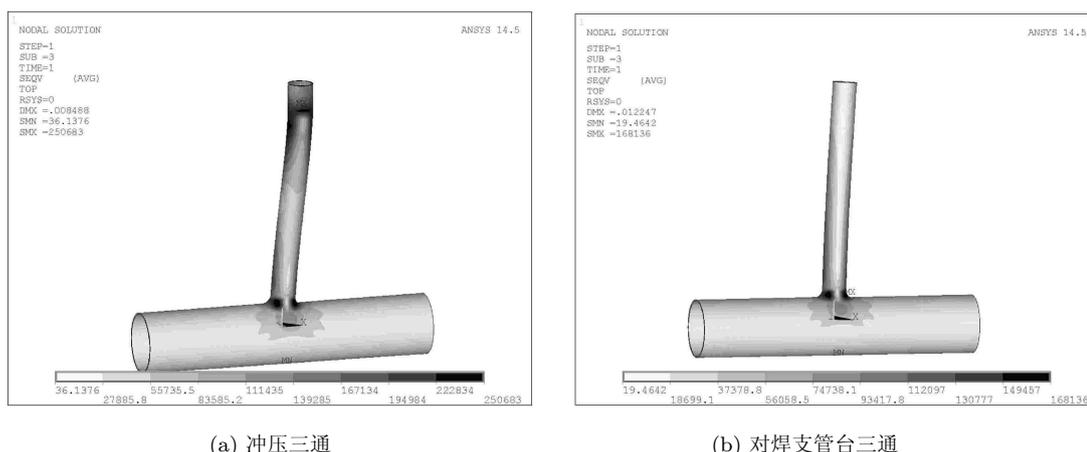


图 7 支管顶部 8 mm 水平位移下垂直管道应力分布

表 1 不同规格和工况下的机坪垂直管道应力分布 (单位: MPa)

支管顶部剪切位移	2 mm		5 mm		8 mm	
	垂直管道	底部三通	垂直管道	底部三通	垂直管道	底部三通
DN300 冲压三通	70.8	59.3	176.6	148.3	249.2	234.3
DN300 支管台三通	74.3	80.6	185.4	201.7	249.5	262.9
DN350 冲压三通	71.3	63.5	177.8	159.2	250.3	241.3
DN350 支管台三通	75.6	87.1	186.0	217.7	250.0	262.3
DN400 冲压三通	71.5	64.2	178.2	160.9	250.7	246.1
DN400 支管台三通	74.7	87.9	186.3	220.4	246.6	266.7
DN500 冲压三通	72.3	61.9	167.1	143.7	252.4	245.3
DN500 支管台三通	73.5	92.4	183.4	231.9	248.1	277.2
DN600 冲压三通	67.2	47.7	185.1	128.9	252.6	203.6
DN600 支管台三通	73.8	86.4	183.9	216.7	248.5	265.5

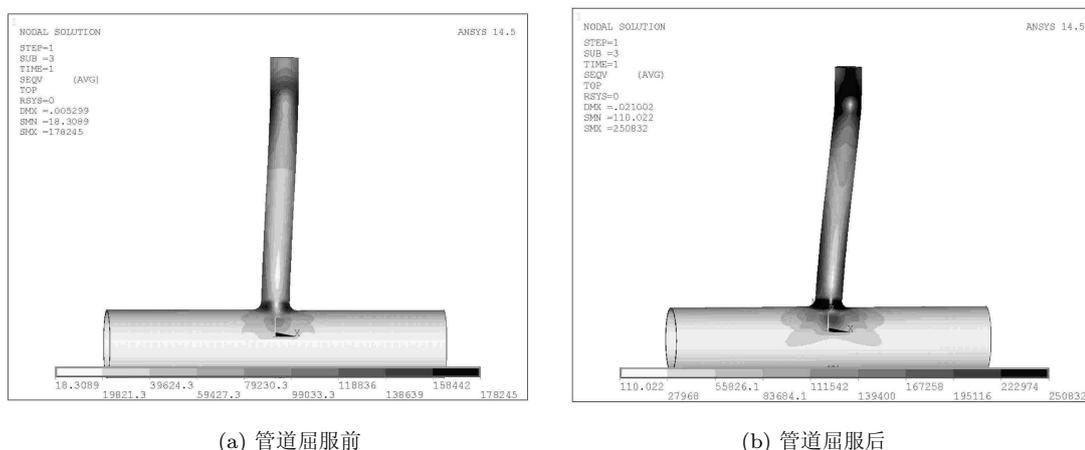


图 8 应力重新分布前后对比图

3 现场案例分析

在某机场输油管网系统中,出现了 Z 形加油栓井支管受剪切破坏的状况.为分析 Z 形支管破坏机理,同时进一步验证数值模拟的准确性,本文对 Z 形支管建立了考虑回填土约束的 ANSYS 有限元模

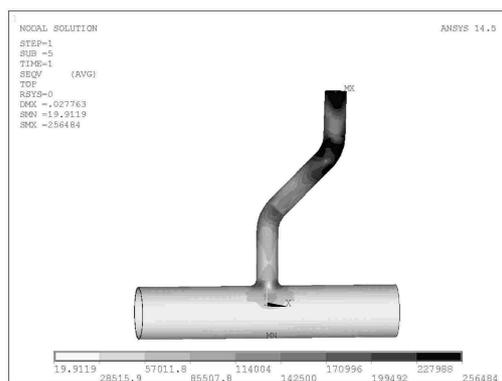
型,并进行了加载求解.Z 形管支管由上下两个 45° 弯头组成,承受水平向右的剪切位移加载.模型尺寸和规格与前文类似,主管两端固支约束,支管顶部施加 40 mm 道面位移.

通过计算得到的管道应力分布如图 9 所示.从

图中可以看出,除支管顶部与井筒连接的位置出现了高应力区之外,上部弯头也出现了高应力区,应力值达 246 MPa 后,开始进入塑性区域,与现场中支管出现泄漏的位置相符.上部弯头出现破坏泄漏的原因主要为:一方面支管顶部水稳层和混凝土道面是强约束,带动支管顶部向右移动,对支管整体产生了大扭矩;另一方面,下部弯头以下通过三通与主管相连,刚度较大,且底部砂土约束刚度强于上部砂土层,整个支管中上部弯头附近是刚度最小的位置,在大弯矩作用下外侧受压,内侧受拉,因此出现了高应力区.



(a) 现场图



(b) 应力云图

图9 Z形支管现场和数值模拟对比图

4 结论

针对机坪垂直管道应力分析问题,本文采用数值仿真软件 ANSYS 建立了考虑管道与砂土耦合作用的三维实体有限元模型进行了数值分析,管道与砂土间的耦合作用采用 $P-y$ 曲线模型分析.通过室内机坪埋地管道剪切实验对数值模拟的准确性进行了调整校核.通过对 5 组不同规格不同底部三通连接方式的机坪垂直管道进行数值分析,最终发现:(1) 砂土、水稳层和混凝土道面的约束改变了垂直

管道加载后的变形挠曲线和应力分布,垂直管道在刚度相差较大的相邻土层交界面处出现了反弯点,使得垂直管道除底部三通外,在反弯点位置也出现了高应力区;(2) 在回填土约束作用下, DN150 垂直管道的最大应力只与埋土分布和混凝土道面滑移量有关,与底部三通连接方式和底部主管规格无关;(3) 同种规格垂直管道在相同加载状况下冲压三通的应力小于对焊支管台三通的最大应力,支管最大应力介于对焊支管台三通和冲压三通的应力之间,当管道屈服后,继续加载,应力重新分布.最后通过现场案例分析,给出管道破坏点位置,与现场检测结果相符.通过本文工作,可以对机坪垂直管道在混凝土道面滑移下的破坏机理有详细了解,进而对机坪输油管道设计施工提出指导性建议.

参考文献

- 1 陈明,李镜培.砂土地基中开挖过程对立柱桩的影响分析.力学与实践,2014,36(1):59-63
- 2 张向东,范世兴,张学磊等.考虑桩土共同作用的钻孔桩承载性状分析.力学与实践,2012,34(5):41-47
- 3 任艳荣,刘玉标,顾小芸.用 ABAQUS 软件处理管土相互作用中的接触面问题.力学与实践,2004,26(6):43-45
- 4 杨进良.土力学.北京:中国水利水电出版社,2009
- 5 Choo YW, Kim D. Experimental development of the $P-y$ relationship for large-diameter offshore monopiles in sands: centrifuge tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 142(1): 04015058
- 6 Georgiadis K, Georgiadis M. Development of $P-y$ curves for undrained response of piles near slopes. *Computers and Geotechnics*, 2012, 40: 53-61
- 7 Heidari M, Naggar HE, Jahanandish M, et al. Generalized cyclic $P-y$ curve modeling for analysis of laterally loaded piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 63: 138-149
- 8 Papadopoulou MC, Comodromos EM. Explicit extension of the $P-y$ method to pile groups in sandy soils. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(3): 485-497
- 9 Gavin K, Igoe D, Li W. Evaluation of CPT-based $P-y$ models for laterally loaded piles in siliceous sand. *Géotechnique Letters*, 2014, 4(2): 110-117
- 10 Bai X, Huang W, Vaz MA, et al. Riser-soil interaction model effects on the dynamic behavior of a steel catenary riser. *Marine Structures*, 2015, 41: 53-76
- 11 胡立万,郝军,陈鹭.用 $P-y$ 曲线法计算板桩结构.港工技术,2001,(1):24-26
- 12 张建勇.浅海独桩平台有限元分析及合理结构型式研究.[硕士学位论文].天津:天津大学,2005
- 13 齐志会,杨树耕.导管架平台结构分析中基础边界条件的影响.中国海上油气(工程),2004,15(6):5-8

(责任编辑:刘希国)