

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.02.010

# 断裂作用对输水管道的影晌效应研究

董航凯

(陕西省引汉济渭工程建设有限公司, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 输水工程不可避免地要穿越活动断裂带地段,容易受到断裂带上下盘错动影响产生变形破坏,危及工程安全。通过依托引汉济渭二期南干线输水管道工程,构建穿越秦岭北缘活动断裂带输水管道的三维数值模型,研究输水管道在断裂作用下的变形规律、力学响应和破坏特征,揭示断裂活动对输水管线的破坏机理。结果表明,断裂带的错动会使管道中部发生沉降变形,且变形呈对称分布并随着断裂带错距的增大而增大;断裂带区域管道顶部与底部出现压应力与拉应力集中,在两侧部位出现剪应力集中;管道剪应力在断裂上下盘附近呈反对称分布,同时侧壁中线剪应力峰值随着与管道错距增加而增加。此研究成果可为后续秦岭北缘活动断裂区域修建输水工程提供技术参考。

**关键词:** 断裂作用;引汉济渭;输水管道;三维数值模型

中图分类号: TV675

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0066—06

## Effects of Fractures on Water Pipelines

DONG Hangkai

(Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710024, China)

**Abstract:** The water conveyance project inevitably passes through the active fault zone, which is prone to deformation and failure caused by the dislocation of the upper and lower wall of the fault zone. Once the dislocation of the fault occurs, the safety of the project will be seriously endangered. Based on the water pipeline project of the second Phase of Hanjiang - to - Weihe River Water Transfers Project, a three - dimensional numerical model of the water pipeline crossing the active fault zone in the northern margin of The Qinling Mountains is established to analyze the deformation law, mechanical response and failure characteristics of the water pipeline under the action of fracture, and to reveal the disaster mechanism of the water pipeline caused by fracture activity. The results show that the subsidence deformation occurs in the middle of the pipeline due to the fracture, and the deformation is symmetrically distributed and increases with the increase of the fault zone spacing. In the fracture zone, compressive stress and tensile stress are concentrated at the top and bottom of the pipeline, and shear stress is concentrated at both sides of the pipeline. The shear stress of the pipeline is antisymmetric near the upper and footwall of the fracture, and the peak value of the shear stress in the middle of the lateral wall increases with the increase of the wrong distance from the pipeline. The research results can provide technical reference for the construction of water conveyance projects in the active fault area of the northern margin of The Qinling Mountains.

**Keywords:** faults; Hanjiang-to-Weihe River Water Transfers Project; water pipeline; 3 - D numerical model

秦岭北缘断裂带地处渭河与秦岭造山带的交界处。近年来,地质灾害频发,据统计发生在秦岭北缘活动断裂上的灾害占渭河盆地的24%。引汉济渭二期工程是国家2020年及后续重点推进150项重

大水利工程<sup>[1-2]</sup>,多年平均配水量达13.5亿m<sup>3</sup>。南干线输水管道穿越秦岭北边缘活动断裂带,容易受到断裂带上下盘错动影响,将直接承受较大的挤压,容易产生变形与变位<sup>[3-6]</sup>,造成难以估量的严重

收稿日期:2021-11-12

修稿日期:2021-12-09

基金项目:陕西省水利科技计划项目“耦合预报信息的引汉济渭工程调度规则优化设计”(2020slkj-4)

作者简介:董航凯(1986—),男,硕士,工程师,主要从事引汉济渭工程技术与建设管理工作。E-mail:120480712@qq.com

后果。为了探索隧道在活动断裂错动作用下的纵向变形和衬砌围岩力学响应,亟需开展断裂错动作用下输水管道致灾机制的研究。

目前,郭熹等<sup>[7]</sup>、李玉波<sup>[8]</sup>、李立民等<sup>[9]</sup>的研究表明,输水管道极易在断裂区域产生渗漏涌水现象。徐复兴等<sup>[10]</sup>的研究表明,活动断裂带对输水管道稳定及选线影响较大。赵毅等<sup>[11]</sup>的研究表明,断裂、滑坡易使管道出现悬空病害,进一步导致断裂发生。谭忠盛等<sup>[12]</sup>、资西阳<sup>[13]</sup>研究表明断裂带地区输水管道易出现围岩破碎、洞室漏水等现象,严重影响工程施工。所以跨断裂带输水管道常采取柔性衬砌接头<sup>[14]</sup>、链式衬砌设计<sup>[15-16]</sup>、设置变形缝<sup>[17]</sup>等工程措施提高管道抗错断能力。同时,跨断裂带地区对输水管道变形及应力的影响研究也逐步开展。梅伟<sup>[18]</sup>基于管道应变失效准则,分析了活动断层下管线与断层交角处理地管道轴向最大应变;薛景宏等<sup>[19]</sup>建立冻融循环情况下管-土相互作用模型,对断层区域管道在温度作用下的应力应变分布规律进行了研究;赵力等<sup>[20]</sup>针对使用水压致裂法对跨断层管道进行了三维地应力反演分析。然而,因为秦岭北缘断裂活动本身的复杂性、输水管道的高度非线性,所以相关性研究多局限于理论层面,较少针对实际工程开展研究。

鉴于此,文章依托引汉济渭南干线输水管道实际工程,基于引汉济渭工程秦岭北边缘断裂地区地质特点,通过构建穿越活动断裂带输水管道的三维数值模型,研究断裂作用下输水管道的变形规律、力学响应和破坏特征,阐明了断裂活动对输水管线的破坏机理,为类似实际工程提供技术参考。

## 1 跨断裂带输水管道理论

针对断裂带下管道结构的响应特征,借鉴已有模型,构建了断裂带错动下管道纵向剖面响应的计算模型,如图 1 与图 2 所示。由于断裂带错动对非影响区的影响为零,在做增量分析时只考虑错动影响区( $AB$ 段)和过渡影响区( $A'A, BB'$ 段)。其中  $A'$  和  $B'$  是衔接这两个区域的节点,错动对这两点处管道内力和变形的同样为零。根据圣维南原理,假定  $A'$  和  $B'$  距离断裂带范围无限远,该假定不影响断裂带范围内的计算。

根据半无限长梁的特性,如图 2 所示,点  $A'$  和  $B'$  的相对位移量与活动性断裂带的错动量一致,均为  $D_y$ 。由于  $AB$  段与  $A'A$  和  $BB'$  段基岩的岩性差异,而导致了其围岩地基系数的差异。

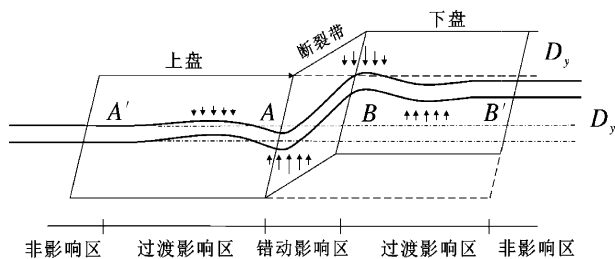


图 1 断裂带错动影响下的管道响应示意图

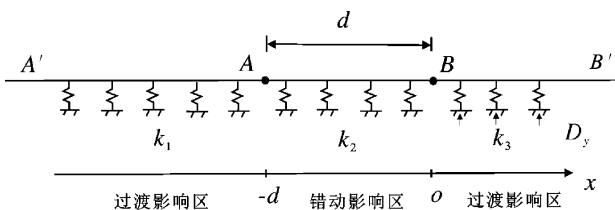


图 2 断裂带错动下的管道纵向剖面响应计算模型

为了简化计算,本文在求解模型时采用如下假设:

- (1) 假定将管道简化为一个条形基础,满足连续性、各向同性和均匀性。
- (2) 管道与围岩(地层)受力与变形关系满足 Pasternak 双参数弹性地基梁模型假定。
- (3) 断裂带的错动速度可忽略不计,且不考虑管道、围岩的惯性效应和断裂带错动沿管道纵向分量的影响。
- (4) 忽略初始状态下的管道结构受力情况,仅研究因错动导致的管道内力和变形增量,且认为受力和变形增量呈线性相关。

Pasternak 双参数弹性地基梁假设将地基看做弹簧,在地基弹簧和长梁之间的连接看作一个不可压缩薄层,并且该薄层仅受到纵向剪切力的影响从而产生竖向剪切变形。Pasternak 模型通过剪切层表征相邻地层的相互作用。Pasternak 模型方程为:

$$EI = \frac{d^4 y}{dx^4} + kby - Gb \frac{d^2 y}{dx^2} = q(x) \quad (1)$$

其中: $EI$  为梁的抗弯强度,  $N \cdot m^2$ ;  $k$  为地基系数,  $N/m^3$ ;  $b$  为长梁宽度,  $m$ ;  $G$  为围岩垂直剪切刚度,  $N/m$ ;  $q(x)$  为外部荷载,  $N/m$ 。

令:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{kb}{4EI}}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{k}{G}}, \quad \rho = \frac{\beta^2}{\gamma^2} \quad (2)$$

则式(1)可以简化为:

$$y^{(4)} - 4\beta^2 \rho y'' + 4\beta^4 y = \frac{q(x)}{EI} \quad (3)$$

当  $q(x) = 0$  时,式(3)的通解为:

$$y = e^{\varphi x} (c_1 \cos \bar{\omega} x + c_2 \sin \bar{\omega} x) + e^{-\varphi x} (c_3 \cos \bar{\omega} x + c_4 \sin \bar{\omega} x) \quad (4)$$

其中:  $c_1, c_2, c_3, c_4$  为待定系数,  $\bar{\omega}, \varphi$  为 Pasternak 模型弹性特征参数,表达式为:

$$\varphi = \beta \sqrt{1 + \rho}, \bar{\omega} = \beta \sqrt{1 - \rho} \quad (5)$$

采用图 2 所示的计算模型,根据假定(2),假定  $BB'$  发生大小为  $D_y$  (单位 m) 的位移。假设  $B$  点坐标为  $(0,0)$ ,则  $A$  点的坐标为  $(-d,0)$ ,其中  $d$  为断裂带的宽度。

$A'A$  半无限长梁的挠度方程为:

$$y(x < -d) = y_1 = e^{\varphi_1 x} (A_1 \cos \bar{\omega}_1 x + A_2 \sin \bar{\omega}_1 x) + (A_3 \cos \bar{\omega}_1 x + A_4 \sin \bar{\omega}_1 x) \quad (6)$$

其中:  $\varphi_1, \bar{\omega}_1$  表示  $A'A$  段的弹性特征系数。方程满足无穷远处的边界条件:

$$x \rightarrow -\infty, y_1 \rightarrow 0 \quad (7)$$

当  $A_3 = 0, A_4 = 0$  时,

$$y_1 = e^{\varphi_1 x} (A_1 \cos \bar{\omega}_1 x + A_2 \sin \bar{\omega}_1 x) \quad (8)$$

同理可得  $B'B$  段:

$$y(x > 0) = y_3 = e^{-\varphi_3 x} (A_{11} \cos \bar{\omega}_3 x + A_{12} \sin \bar{\omega}_3 x) - D_y \quad (9)$$

其中:  $\varphi_3, \bar{\omega}_3$  表示  $BB'$  段的弹性特征系数。

$AB$  段为错动影响区,其挠度曲线为:

$$y(-d < x < 0) = y_2 = e^{\varphi_2 x} (A_5 \cos \bar{\omega}_2 x + A_6 \sin \bar{\omega}_2 x) + e^{-\varphi_2 x} (A_7 \cos \bar{\omega}_2 x + A_8 \sin \bar{\omega}_2 x) \quad (10)$$

由式(8)、式(9)、式(10)可得:断裂错动下管道纵向挠度曲线方程为:

$$y = \begin{cases} e^{\varphi_1 x} (A_1 \cos \bar{\omega}_1 x + A_2 \sin \bar{\omega}_1 x) \\ e^{\varphi_2 x} (A_5 \cos \bar{\omega}_2 x + A_6 \sin \bar{\omega}_2 x) \\ e^{-\varphi_2 x} (A_7 \cos \bar{\omega}_2 x + A_8 \sin \bar{\omega}_2 x) \\ e^{-\varphi_3 x} (A_{11} \cos \bar{\omega}_3 x + A_{12} \sin \bar{\omega}_3 x) - D_y \end{cases} \quad (11)$$

由于在  $A, B$  两点处管道的挠度、转角等都是连续的,因此式(11)满足下面连续性条件。

在  $A$  处:

$$\begin{cases} y_1 \big|_{x=-d} = y_2 \big|_{x=-d} \\ y'_1 \big|_{x=-d} = y'_2 \big|_{x=-d} \\ \frac{y''_1}{EI_1} \big|_{x=-d} = \frac{y''_2}{EI_2} \big|_{x=-d} \\ \frac{y'''_1}{EI_1} \big|_{x=-d} = \frac{y'''_2}{EI_2} \big|_{x=-d} \end{cases} \quad (12)$$

在  $B$  处:

$$\begin{cases} y_2 \big|_{x=0} = y_3 \big|_{x=0} \\ y'_2 \big|_{x=0} = y'_3 \big|_{x=0} \\ \frac{y''_2}{EI_2} \big|_{x=0} = \frac{y''_3}{EI_3} \big|_{x=0} \\ \frac{y'''_2}{EI_2} \big|_{x=0} = \frac{y'''_3}{EI_3} \big|_{x=0} \end{cases} \quad (13)$$

## 2 引汉济渭二期南干线输水管道

### 2.1 工程概况

引汉济渭二期工程南干线全长 100.41 km,由隧洞、箱涵、倒虹、渡槽及分退水设施组成,始端设计流量 47 m<sup>3</sup>/s。

秦岭北缘断裂带为渭河断陷与秦岭山地的分界线。它东起蓝田岱峪、沔峪口、楼观台、黑河口、山门口、清姜河一带至宝鸡市,西出盆地进入甘肃境内。区内全长 218 km,一般断裂带宽度达几米至数十米。该断裂带由东向西总体走向分别为东西向、北西西向、近东西向,倾向北,倾角大多为 70°左右。近 5000 年,断裂带垂直断距在 7 m ~ 12 m 左右,活动速率达 1.5 mm/a ~ 3.1 mm/a。此外该断裂水平运动特征也较为明显,断裂带内部分河流横跨断裂后向西偏转,显示断裂呈左旋扭动,断裂错断第四纪地层。

### 2.2 三维数值模型构建

此次拟建的地质模型原始高程为 200 m ~ 1 120 m。模型表层厚度约为 10 m 的黏质黄土,成分以黏粒为主,含大量花岗岩风化物,土质不均;其下层为花岗岩,成分以石英、长石为主,块状构造,岩质坚硬,表层岩体风化程度较强;花岗岩中距地表约 50 m 处夹杂一层厚度约为 20 m 的压碎岩,其原岩为花岗岩,受构造影响较为严重,节理裂隙发育。输水管道长度为 168 m,最大埋深 120.6 m,最小埋深 20 m,内径为 2.7 m,外径为 3.0 m,型号采用 DN2600 - PCCP,直埋敷设。

依托引汉济渭南干线输水管道实际工程,构建的三维模型如图 3 所示。计算区域取 100 m × 40 m × 30 m,上盘区域取 57 m,下盘区域取 43 m,断裂带与管道中心线交于 60 m 处。衬砌内半径 2.7 m,外半径 3.0 m。混凝土等级为 C50,考虑管片纵向接头的影响,对其刚度乘以 0.6 折减系数。裂缝沿横向贯通整个计算区域,倾角为 80°。岩土物理参数如表 1 所示。

表 1 岩土物理参数表

地质类型	密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	泊松比	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
黏质黄土	1.83	20	0.35	22.22	7.41
花岗岩	2.59	70	0.22	41.67	28.69
断层物质	2.30	47	0.29	37.30	18.22
压碎岩	2.30	55	0.27	39.86	21.65

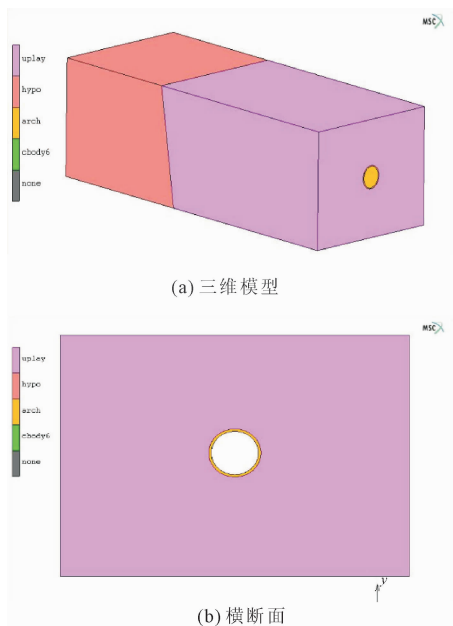


图 3 管道三维模型及横断面图

在使用 FLAC<sup>3D</sup> 进行模拟时,常使用在模型边界部分设置低维网格(如二维网格与一维网格),来实现土体模型的自由运动状态,保证面波在边界处能够达到与无限场地等效的反射效果,将波的反射对仿真分析的影响降到最低;接触条件则为典型断层接触模型;屈服准则采取双剪统一屈服准则与拉伸屈服准则。

### 3 断裂作用对输水管道的影响效应分析

#### 3.1 断裂作用下输水管道的变形规律

图 4 为管道在底部错距达到 50 cm 时的竖向变形及位移云图。图 5 为管道中线在不同断裂错距工况下的相对沉降变形曲线。由图可知,断裂会使管道中部发生沉降变形,且变形相对于断裂带位置基本呈对称分布,管道相对变形随着断裂带错距的增大而增大。管道在距端部 40 m ~ 60 m 区段的变形最为剧烈,该段位于上盘距断裂带 0 m ~ 20 m 范围内,相对变形最大点位于上盘距断裂带 10 m 附近。管道最大变形量随错距的变化如表 2 所示,当错距为 50 cm 时,最大变形量达 12.475 cm。



图 4 管道位移云图(变形 × 50)

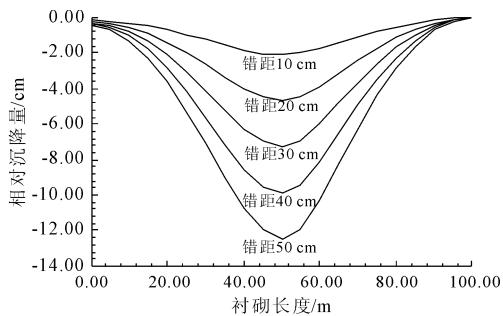


图 5 管道相对沉降量曲线

表 2 管道最大相对变形量随错距的变化

底部错距/cm	10	20	30	40	50
变形量/cm	-2.094	-4.631	-7.279	-9.889	-12.475

#### 3.2 断裂作用下输水管道的力学响应

图 6 和图 7 为管道在底部错距为 50 cm 时的应力云图。由图可见,管道在断裂带附近的变形区内底部受拉、顶部受压。图 8 和图 9 为输水管道底部和顶部的应力变化曲线。底部断裂错距分别为 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm。由图可见,随着断裂错距的增大,在断裂变形区内,管道底部拉应力增大、顶部压应力增大。

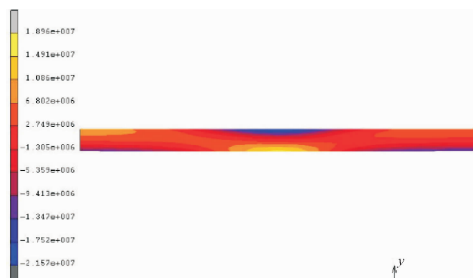


图 6 管道纵向应力云图

表 3 给出了在不同错距时,出现在管道底部和顶部的最大拉、压应力值。管道最大受拉、受压点出现在上盘内距裂缝 10 m 附近。当错距为 5 cm 时,管道底部最大拉应力为 1.55 MPa。当错距为 50 cm

时,管道底部最大拉应力达到 17.8 MPa。

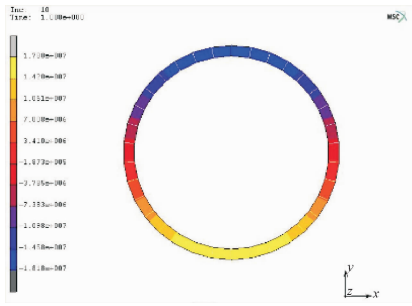


图 7 管道纵向应力云图横截面

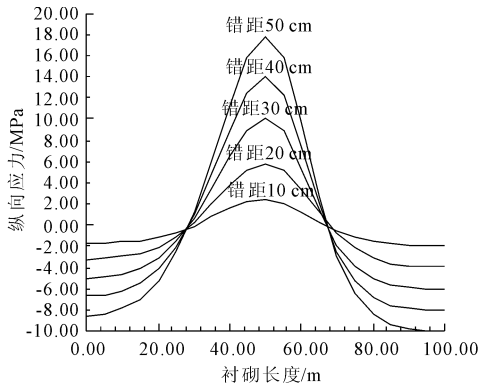


图 8 管道衬砌底部纵向应力曲线

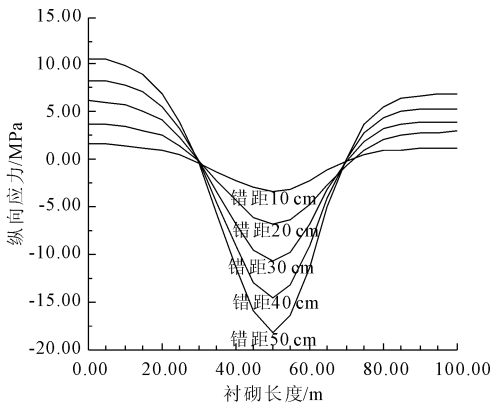


图 9 管道衬砌顶部纵向应力曲线

表 3 不同错距时管道最大纵向应力

底部错距/cm	5	10	20	30	40	50
管道顶部应力/MPa	-2.07	-3.33	-6.79	-10.82	-14.59	-18.18
管道底部应力/MPa	1.55	2.43	5.80	10.07	14.00	17.80

### 3.3 断裂作用下输水管道的破坏特征

图 10—图 13 为输水管道在底部断裂带错距 50 cm 时的破坏应力云图。由图可知,在断裂带附近位于上盘和下盘的管道的剪应力呈反对称形态,且最大剪应力发生在管道的侧壁上,而管道顶部和底部的剪应力则较小。图 13 为管道侧壁中线在模型底

部错距分别为 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 时的剪应力变化曲线。由图可见,管道侧壁中线剪应力值与管道错距呈现明显正相关趋势。上盘最大剪应力出现在距地裂缝 20 m ~ 25 m 范围内,下盘最大剪应力出现在地裂缝带附近。表 4 给出了不同错距时上、下盘管道侧壁最大剪应力值。由以上发现,在断裂作用下,由于向下弯沉,使管道形成拉、压应力的集中区,拉、压应力的最大点均出现在沉降变形最大的管道横断面上。

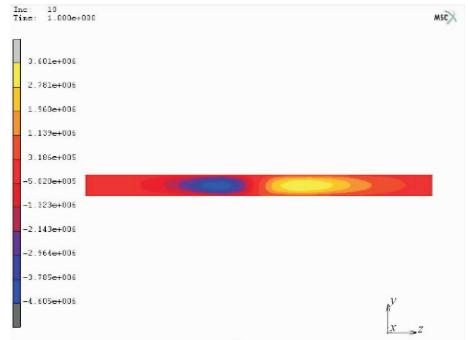


图 10 管道剪应力云图

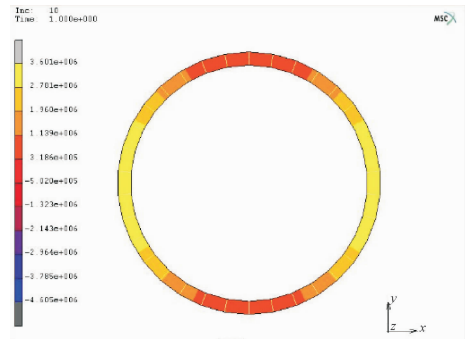


图 11 管道断面剪应力云图(上盘)

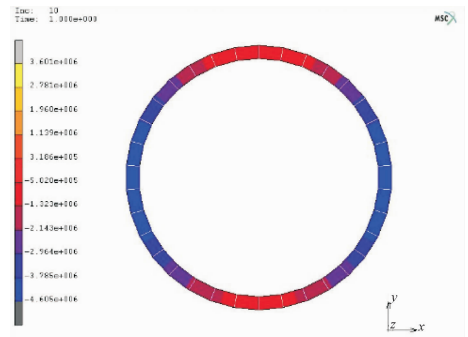


图 12 管道断面破坏应力云图(下盘)

表 4 不同错距时管道侧壁最大剪应力

施加错距/cm	10	20	30	40	50
上盘剪应力/MPa	0.6463	1.3569	2.1494	2.8840	3.5818
下盘剪应力/MPa	-0.7164	-1.4380	-2.6520	-3.6560	-4.5530

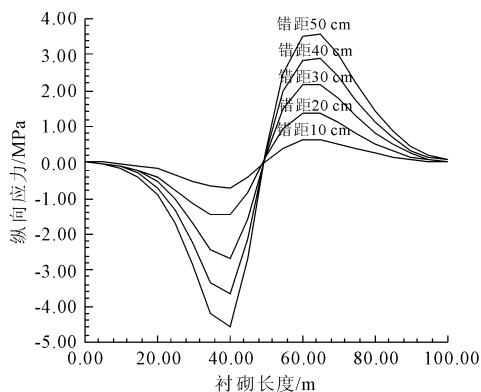


图13 管道侧壁破坏应力曲线

因此断裂带区域输水管道侧壁要做好抗剪措施,保护管道因沉降在影响产生的反对称应力集中。尤其在断裂带上下盘附近的管道最大沉降处两侧将分别产生拉应力与压应力集中区域,更需加强监测与保护,平衡应力流动,减小管道因剪力集中从而出现的破坏隐患。

## 4 结 论

(1) 断裂带区域管道相对变形随着断裂带错距的增大而增大。当错动距离为 50 cm 时,管道相对变形可达 12.475 cm。错动范围对管道变形影响较高,随着错动范围增加,管道靠近断层区域局部将产生较大沉降,断裂风险高。

(2) 管道沉降变形相对于断裂带成明显对称分布,且在断裂上盘岩体处变形最为剧烈。相对变形最大点位于上盘距断裂带 10 m 附近。

(3) 管道在断裂带区顶部与底部分别出现压应力与拉应力集中现象,需在对应部位采取工程措施进行关注与保护,保证输水管道最大应力指标不超过控制指标。

(4) 管道剪应力在断裂上下盘附近呈反对称分布,同时管道侧壁中线剪应力峰值随着与管道错距增加而明显增加。在两侧剪应力集中区域应加强监测与保护措施,及时平衡应力流动,避免管道侧向破坏。

### 参考文献:

[1] 杜小洲. 引汉济渭秦岭输水隧洞关键技术问题及其研究进展[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 138-142.

[2] 李凌志. 引汉济渭秦岭特长输水隧洞[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1): 148-151.

[3] 许学良, 马伟斌, 付兵先, 等. 穿越活动断裂带隧道致灾模式及对策分析[J]. 铁道建筑, 2021, 61(12): 81-

85.

[4] 周佳媚, 程毅, 邹仕伟, 等. 断层错动及地震作用下隧道力学特性研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 138-144.

[5] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1876-1884.

[6] 钮新强, 张传健. 复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 523-536.

[7] 郭熹, 柴军瑞. 引汉济渭秦岭隧洞突涌水原因及涌水量预测[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 113-117.

[8] 李玉波. 引汉济渭工程深长隧洞突水综合预报与治理[J]. 人民黄河, 2018, 40(9): 133-138.

[9] 李立民, 刘国平, 许增光, 等. 引汉济渭引水隧洞穿椒溪河段突涌水数值模拟[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 119-121.

[10] 徐复兴, 练操, 朱萌, 等. 引通济安深埋隧洞穿越北川——映秀断裂工程地质问题分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 104-108.

[11] 赵毅, 滕建强, 杨耀辉, 等. 管道悬空灾害的分布式光纤实时监测方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 103-108.

[12] 谭忠盛, 王秀英, 万飞, 等. 关角隧道突涌水防治技术体系研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 1-7.

[13] 资西阳. 断层破碎带隧道突涌水灾害风险等级评价研究[J]. 公路, 2021, 66(12): 410-416.

[14] 王杰, 盛俭, 赵梦丹, 等. 断层错动对隧道工程影响研究的若干进展[J]. 防灾科技学院学报, 2021, 23(4): 34-42.

[15] 赵坤, 陈卫忠, 赵武胜, 等. 逆断层错动作用下隧道衬砌铰接设计参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3411-3421.

[16] 姬云平. 穿越活断层铰链式衬砌隧道减震措施动力响应研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 909-919.

[17] 马董礼, 翟朝娇, 张国治, 等. 现浇混凝土综合管廊变形缝设置间距优化研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 301-307.

[18] 梅伟. 跨断层埋地连续管道最佳管线-断层交角研究[J/OL]. 中国农村水利水电: 1-11[2022-01-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20211216.0951.028.html>.

[19] 薛景宏, 王香, 董孝曜. 断层两侧差异性土壤冻融对埋地管道力学性能影响研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 138-144.

[20] 赵力, 张忠东, 李立民, 等. 引汉济渭工程秦岭输水隧洞初始地应力场特征及反演分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 90-96.