

# 综合管廊大角度斜穿地裂缝的变形及受力特征研究

王启耀, 卢刚刚, 张亚国, 胡志平, 王少卿

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 根据西安地裂缝的分布特征和活动方式, 结合综合管廊规划情况, 采用有限元软件 ABAQUS 建立以  $70^\circ$  大角度斜穿地裂缝的双舱综合管廊模型, 研究分析了在活动地裂缝环境下管廊的受力变形特征. 计算结果表明, 管廊结构除产生较大的纵向弯曲变形外, 还伴随有横向剪切变形和扭转变形; 在活动地裂缝作用下, 管廊在上盘 85 m 和下盘 80 m 内纵向应力变化显著, 但这一显著变化范围不随地裂缝活动而变化; 剪应力在地裂缝段最大, 并呈“V”形变化趋势, 而在上、下盘段表现出先增大后减小的变化特征; 管廊底部脱空区开始出现于上盘近地裂缝处, 并不断向上盘远端扩展. 因此在结构设计时, 应适当提高地裂缝两侧管廊结构的抗弯、抗剪承载力及裂缝宽度要求或采取分段设缝、设置柔性接头等措施.

**关键词:** 综合管廊; 地裂缝; 脱空区; 受力变形特征

中图分类号: TU 99

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0825-08

## Study on the deformation and force characteristics of utility tunnel crossing ground fissure with the large angle

WANG Qiyao, LU Ganggang, ZHANG Yaguo, HU Zhiping, WANG Shaoqing

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Based on the distribution and movement towards ground fissures in Xi'an and combined with the planning of utility tunnel, a two-cabin utility tunnel model crossing ground fissures with the large angle  $70^\circ$  has been established using finite element software ABAQUS to analyze the force and deformation characteristics of utility tunnel under the active ground fissures environment. The numerical results show that the deformation of utility tunnel is mainly longitudinal displacement, accompanied by transverse shear and torsional deformation. Under the action of active ground fissures, the longitudinal stress of utility tunnel varies significantly in hanging wall 85m and footwall 80m but this significant range does not change with the activity of ground fissures. The shear stress in the range of ground fissure is the maximum and presents a “V” shape, and the shear stress shows the characteristics of first increasing and then decreasing in hanging wall and footwall. The emptying area at the bottom of utility tunnel begins to appear in the near ground fissure in hanging wall and continuously expands to the distal hanging wall. Therefore, anti-bending and anti-shearing capability and crack width requirements of utility tunnel on both sides of ground fissures should be properly increased or measures of segmentation and setting up flexible joints should be taken in structural design.

**Key words:** utility tunnel; ground fissure; emptying area; the force and deformation characteristics

地裂缝是一种特殊的地质灾害. 自 20 世纪 50 年代以来, 由于自然和人为等因素的影响, 西安地区已先后出现了 14 条主地裂缝和 4 条次生地裂缝, 分布面积约  $250 \text{ km}^2$ , 对邻近的建筑物和穿越其的管道、隧道等地下构筑物造成了严重的破坏<sup>[1-2]</sup>.

综合管廊是指建于城市地下用于容纳两类及以上城市工程管线的构筑物及附属设施, 是一种现代化、智能化、集约化的新型市政基础设施<sup>[3]</sup>. 作为一种线性生命线工程, 西安地区的综合管廊

必然会穿越地裂缝. 因此, 地裂缝对管廊结构的影响效应已成为亟待解决的问题.

目前, 较多学者采用数值模拟<sup>[4-9]</sup>和模型试验<sup>[10-14]</sup>的方法, 对地铁隧道跨地裂缝的受力变形规律、围岩压力变化特征等进行了研究, 并已经取得相当多的成果. 尽管地铁隧道与综合管廊同属地下结构, 但地铁隧道和管廊在断面形式和埋深等方面的区别, 导致管廊的受力变形特征不同于地铁隧道. 武华侨<sup>[15]</sup>分析了管廊在逆断层、走滑断层环境下的响应规律; 朱琳<sup>[16]</sup>建立了综合管

收稿日期: 2019-01-31

修改稿日期: 2019-11-04

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-095); 陕西省住房城乡建设科技研发项目(2016-K72)

第一作者: 王启耀(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土及地下工程方面的研究及教学工作. E-mail: qiyao wang@chd.edu.cn

廊有限元模型,得到了地裂缝环境下不同位错量、不同结构埋深和不同结构断面形式对土体表面沉降、管廊结构受力特性及底部脱空的影响特征;闫钰丰等<sup>[17]</sup>采用 Midas GTS 软件建立三维多舱综合管廊模型,分析了活动地裂缝环境下分段管廊结构的受力变形特征。在这些研究中,仅对管廊以正交方式穿越地裂缝的受力变形特征进行了分析,而根据西安地裂缝分布特征和管廊规划现状,可以发现管廊大多以斜交的方式穿越地裂缝。因此,对管廊斜穿地裂缝的研究就显得尤为重要。

西安地裂缝总体走向大致为 NE65°~NE85°,倾角为 80°左右,总长度约 160 余 km,呈带状横贯西安市区<sup>[2]</sup>。城市综合管廊一般建于城市道路之下,在西安市棋盘式道路格局下,南北走向的管廊将以 65°~85°的大角度穿越地裂缝,而东西走向的管廊则以小于 35°的小角度穿越地裂缝。在西安地区 14 条( $f_1 \sim f_{14}$ )地裂缝中,总体走向直接为 NE70°的有三条( $f_4$ 、 $f_5$ 和 $f_{10}$ );此外, $f_1$ 灞三角洲至广运潭段、 $f_3$ 北石桥至西安化工厂段以及 $f_7$ 北岭至丈八招待所段等位置,地裂缝走向也为 NE70°<sup>[2]</sup>。基于此,本文选取 70°为斜穿角度,建立双舱综合管廊三维有限元模型,分析大角度斜穿活动地裂缝时管廊结构的受力变形规律,为跨地裂缝段管廊结构设计和施工提供参考。

## 1 三维有限元建模

### 1.1 模型参数

利用有限元软件 ABAQUS 建立三维有限元模型,如图 1 所示。管廊结构模型为某实际工程,外轮廓尺寸为 8.4 m × 4.7 m × 200 m,底板厚 0.6 m,中隔板为 0.4 m,侧、顶板为 0.5 m,上覆土层厚度为 3 m。土体尺寸为 60 m × 30 m × 200 m;地裂缝倾角为 80°。为表述准确,作如下规定: X 方向定义为纵向, Y 方向为横向或水平, Z 方向为竖向。

模型土体假定为理想弹塑性材料,采用 Mohr-Coulomb 准则;对管廊结构则进行弹性分析,模型参数见表 1。

表 1 模型材料参数  
Tab. 1 Material parameters

材料	弹模 /MPa	泊松比	容重 /kN · m <sup>-3</sup>	粘聚力 /kPa	摩擦角 /°
黄土	10	0.30	18.8	38.0	25.0
混凝土	30 000	0.17	24.0		

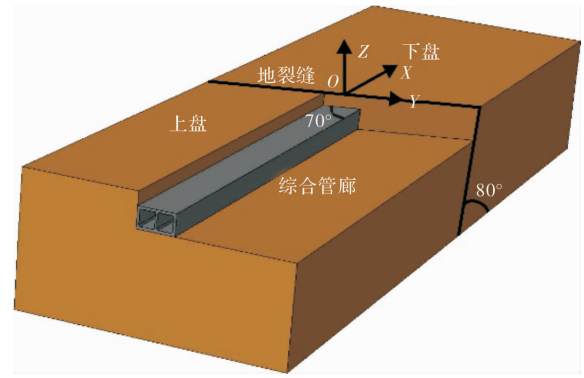


图 1 综合管廊有限元模型

Fig. 1 Finite element model of utility tunnel

### 1.2 地裂缝模拟

地裂缝是通过设置上下盘土体接触面间的接触作用来模拟的,即以下盘土体接触面为主表面,上盘土体接触面为从表面,并建立主从表面间的法向和切向接触关系,从而实现地裂缝的模拟。西安地裂缝活动类似于正断层的蠕动,具有三维运动变形特征,即垂直位移、水平张拉和扭动,其中垂直位移量远大于水平张拉量和扭动量,并且在 10 m 以下地裂缝的张拉量很小,而管廊结构埋深较浅,所以在模拟时只考虑地裂缝的竖向位移量<sup>[14]</sup>。结合历史监测资料,考虑到西安地裂缝活动的不确定性和复杂性,在未来百年内西安地铁隧道穿越地裂缝段的垂直位移量均按 50 cm 进行设防<sup>[2,18-20]</sup>;而城市综合管廊与地铁隧道同为地下线性结构,设计使用年限为 100 a<sup>[3]</sup>,所以地裂缝活动量取建议值 50 cm。地裂缝活动通过设置模型边界条件来模拟,即将模型顶部设置为自由面,四周侧面设置为法向约束,固定下盘底部,通过在上盘底部施加竖向位移模拟来上下盘的错动,竖向位移分 5 次施加,分别为  $S=10$  cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm。

## 2 综合管廊变形分析

### 2.1 纵向变形分析

在活动地裂缝环境下,管廊结构变形与上盘土体沉降量、土体-管廊结构间的相互作用有关,图 2 给出了当地裂缝活动量为 50 cm 时,模型竖向位移云图。由图可知,管廊在上盘的竖向位移量大于下盘,发生了明显的弯曲变形,沿纵向可将其分为上盘远端变形区、地裂缝段变形区和下盘远端变形区三个变形段。

结合图 3 可知,管廊在上盘远端发生整体沉降变形,在下盘远端发生翘起变形,在地裂缝两侧

管廊则表现为弯曲变形,并且随着地裂缝活动量的增加,其变形量逐渐增大。

地裂缝活动引起管廊结构破坏,主要是由地裂缝两侧土体不均匀沉降导致管廊产生较大的弯曲变形引起的。由图3可知,管廊弯曲变形区的范围大致为 $-50\sim 35$  m,即上盘50 m,下盘35 m;因此,可将弯曲变形区视为管廊的变形设防区。

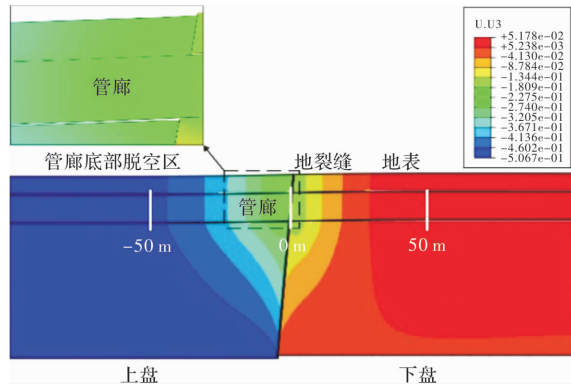


图2 模型竖向变形云图( $S=50$  cm)

Fig. 2 Model vertical deformation nephogram ( $S=50$  cm)

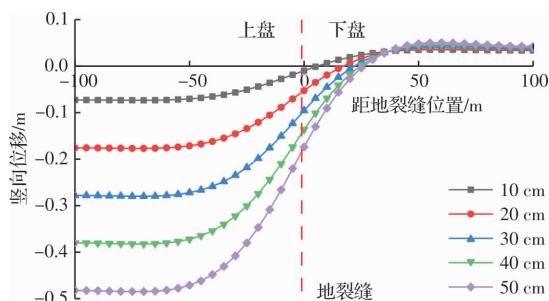


图3 管廊纵向变形曲线

Fig. 3 Longitudinal deformation curve of utility tunnel

## 2.2 横断面变形分析

为研究地裂缝环境下管廊横断面变形特征,选取图2中 $-50$  m、 $0$  m和 $50$  m处三个结构横断面进行分析。图4(a)为沿纵向 $-50$  m处的横断面变形图,位于上盘远端整体沉降变形区,有较为明显的竖向位移和横向剪切变形;图4(b)为地裂缝处( $0$  m)的横断面变形图,其竖向位移量小于图4(a),但横向剪切变形量大于图4(a);图4(c)为 $50$  m处横断面变形图,处于下盘远端翘起变形区,竖向位移量和横向剪切变形量最小。

随着地裂缝活动量的增大,各横断面的变形量也在逐渐增大,但横向剪切变形增量却是逐渐减小的,表明当地裂缝活动到一定程度时,横向剪切变形不再受地裂缝的影响。由图4还可以看出,左、右侧墙和中隔板的顶部横向变形量均大于底部;左侧墙在上盘的竖向位移量都小于右侧

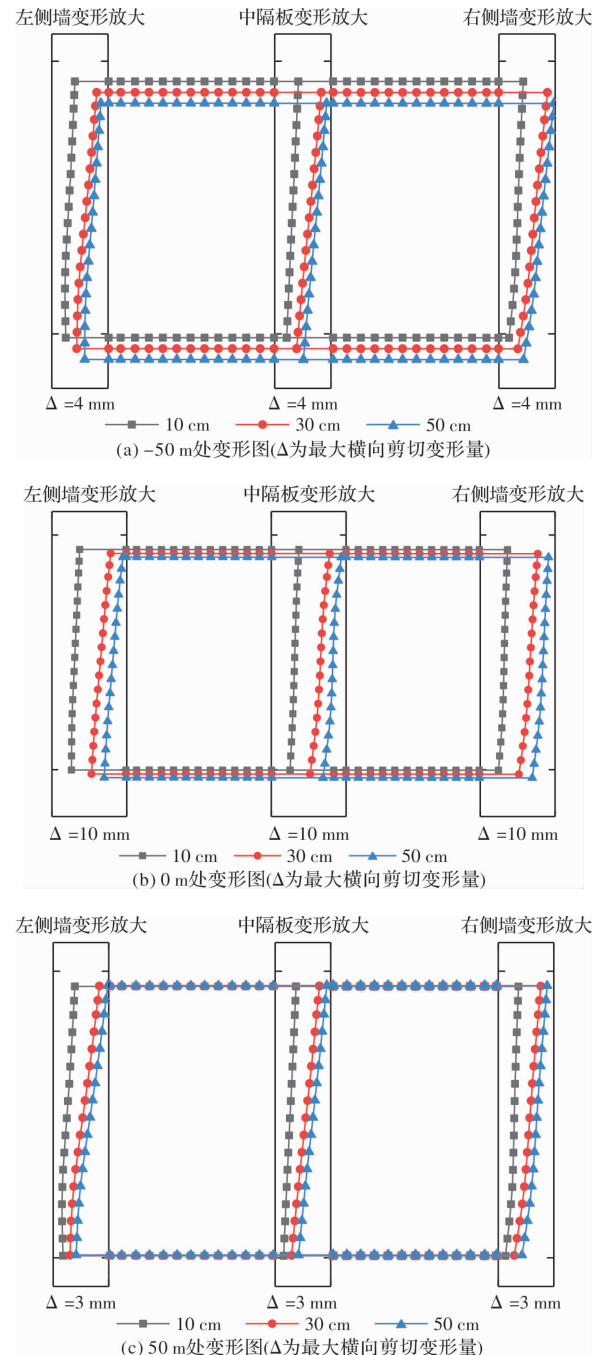


图4 横断面变形图

Fig. 4 Cross section deformation diagram

墙,而下盘则刚好相反,即左侧墙的竖向位移量大于右侧墙;这说明在活动地裂缝环境下,除纵向弯曲变形外,管廊横断面内还伴随有明显的剪切和扭转变形。由于管廊是斜穿地裂缝的,当上下盘土体开始错动时,位于地裂缝处( $0$  m横断面)的底板与上盘土体之间的相互作用发生变化,使得底板在上盘受到的地基反力小于下盘,表现为左、右舱室有相对转动的趋势;当上下盘土体继续错动时,左、右舱室的受力差异逐渐增大,即扭矩逐渐增大,从而产生剪切和扭转变形。

### 2.3 底部脱空区分析

脱空区可由管廊底板与下部土体间的竖向位移变化量和接触应力变化特征确定,即当底板竖向位移量与地基土竖向位移变化量不一致或底板与土体间接触应力为0时,底部将产生脱空区。

由图5和图6可知,脱空区出现在上盘近地裂缝处。当地裂缝活动量小于40 cm时,底板与下部土体竖向位移变化趋势一致;当地裂缝活动量达到40 cm时,上盘近地裂缝处开始出现脱空区,此时底板和下部土体的位移分别为0.148 m和0.152 m,脱空区长度约为3 m;随着地裂缝活动量的不断增大,脱空区范围逐渐变大;当地裂缝活动量达到50 cm时,脱空区长度约为16 m,此时底板和下部土体竖向位移分别为0.188 m和0.224 m,如图2所示;这说明在地裂缝活动量较小时,不会产生脱空区,只有当地裂缝发展到一定程度时,脱空区才会出现。

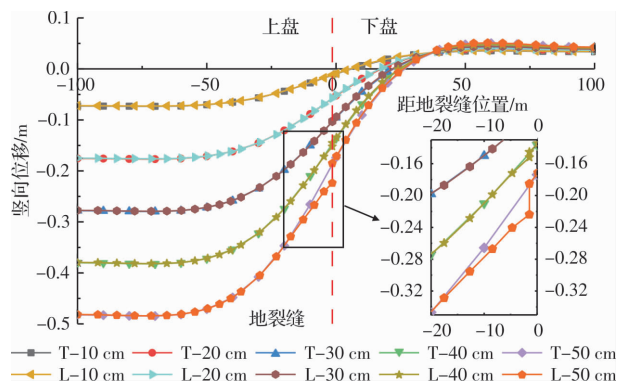


图5 底板和下部土体竖向变形曲线

Fig. 5 Vertical deformation curve of the baseplate and lower soil

根据管廊底板与土体间接触应力变化曲线(图6)可知,地裂缝活动对接触应力的影响范围为上盘50 m,下盘40 m(图6中为-50 m~40 m)。随着地裂缝活动量的增加,上盘段接触应力逐渐减小,下盘段接触应力却逐渐增大,并且越靠近地裂缝位置,接触应力变化越大;当地裂缝活动量达到40 cm时,上盘近地裂缝处接触压力减小到0,脱空区开始出现,并不断向上盘远端扩展扩大。在上下盘远端的接触应力受地裂缝活动影响小,变化基本稳定。

当地裂缝活动时,由于管廊与土体变形不协调,使得近地裂缝处上盘底板与土体间的相互作用变弱,主要表现在此处底板受到的地基反力逐渐变小;当地基反力减小到0时,表明底板与土体分离或接触应力为0,脱空区开始出现;从此时起,在地裂缝两侧的管廊结构受力会有所变化。管廊结构一般受到的荷载有结构自重、上覆土压

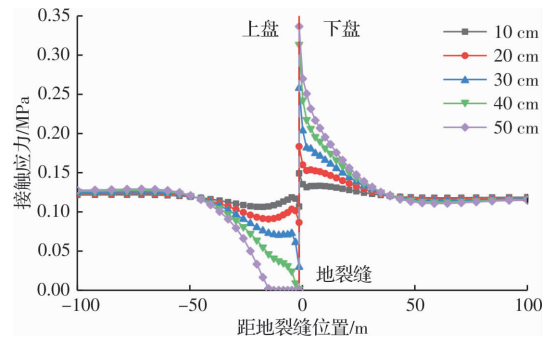


图6 底板与土体间接触应力曲线

Fig. 6 The contact stress curve between the baseplate and lower soil

力、侧向土压力以及地基反力等,由于处于脱空区位置的管廊不再受到地基反力的作用,结构上原有荷载(结构自重和上覆土压力等)沿结构纵向向下盘传递,而下盘土体对管廊的竖向变形还具有一定抑制作用,这使得下盘结构与土体间的相互作用变强,进而引起在下盘段近地裂缝处接触应力不断增大。

### 3 综合管廊应力分析

#### 3.1 纵向应力分析

上下盘土体间的相对运动导致管廊结构产生较大的弯曲变形,从而引起管廊纵向应力的剧烈变化。图7给出了管廊纵向应力云图,可以看出,地裂缝两侧底板和顶板的纵向应力大于其他位置,并且底板和顶板在上、下盘所处的应力状态也不同,主要表现为底板在上、下盘分别处于受拉和受压状态,而顶板则正好相反。

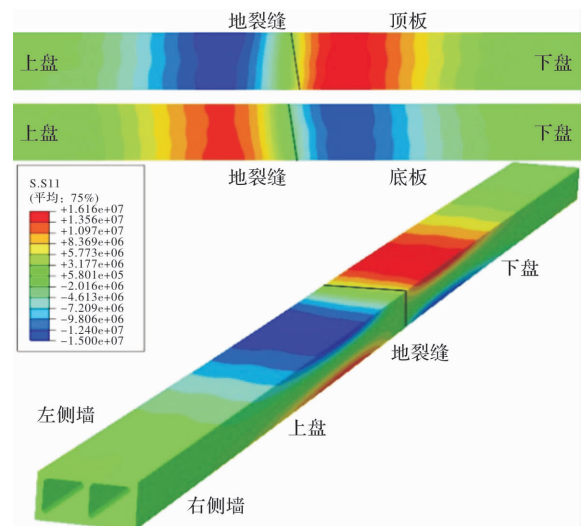


图7 管廊纵向应力云图( $S=50$  cm)

Fig. 7 Longitudinal stress nephogram of utility tunnel ( $S=50$  cm)



通过分析管廊纵向应力曲线(图 8)可知,从地裂缝处到上下盘远端,底板和顶板纵向应力呈现出先增大后减小的变化趋势,并在上盘 30 m 和下盘 20 m 处达到最大;其次,随着地裂缝活动量的增大,底、顶板纵向应力逐渐增大,除地裂缝处和上下盘远端增幅较小外,其它部位纵向应力都有较大增长。由图 8(a)可知,底板纵向应力在-85~75 m(上盘 85 m 和下盘 75 m)间随地裂缝活动变化显著,但这一应力显著变化段(-85~75 m)却未随地裂缝活动量的增大而发生明显变化,图 8(b)中顶板纵向应力变化显著段(-85~80 m)随地裂缝活动量的增大也未有明显变化。因此,可以认为地裂缝活动仅在一定范围内对底、顶板纵向应力有显著影响,并且此范围不随地裂缝活动而产生明显变化。

此外,当地裂缝活动量为 10 cm 时,底板和顶板的最大拉应力分别为 2.12 MPa 和 2.91 MPa,均大于 1.43 MPa(C30 混凝土轴心抗拉强度设计值),说明此时混凝土可能已经开裂,且顶板先于底板出现裂缝;而当地裂缝活动量达到 50 cm 时,底板和顶板最大压应力才大于 14.3 MPa(C30 混凝土轴心抗压强度设计值),混凝土被压碎。综上所述,在结构设计时,应适当提高地裂缝两侧管廊的抗弯承载力和裂缝宽度要求,必要时采取分段设缝措施,减小管廊受力。

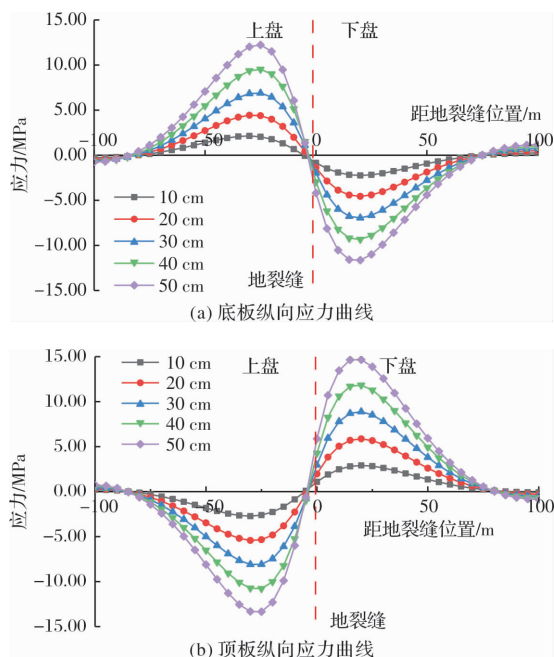


图 8 管廊纵向应力曲线

Fig. 8 Longitudinal stress curve of utility tunnel

### 3.2 竖向剪应力分析

当地裂缝活动时,由于上下盘不同的约束作

用,导致管廊结构会受到较大的剪力作用。从竖向剪应力云图(图 9)可以看出,管廊左、右侧墙和中隔板的竖向剪应力大于底板和顶板,并且最大剪应力出现在地裂缝处。通过对比发现,右侧墙和中隔板在上盘的竖向剪应力大于左侧墙,而在下盘左侧墙和中隔板的剪应力大于右侧墙,这与左、右侧墙的竖向位移量在上下盘的变化规律相一致。

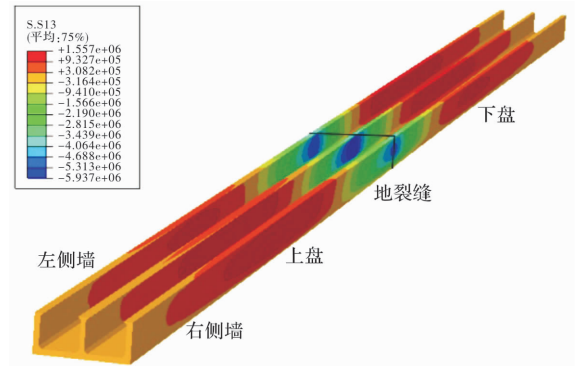


图 9 管廊竖向剪应力云图( $S=50$  cm)

Fig. 9 Vertical shear stress nephogram of utility tunnel ( $S=50$  cm)

为说明管廊竖向剪应力的变化特征,绘制左、右侧墙和中隔板的竖向剪应力曲线,如图 10 所示,并将其分为上盘段、地裂缝段和下盘段三个变化段进行分析。上盘段为竖向剪应力为 0 处到上盘远端,下盘段是下盘竖向剪应力为 0 处到下盘远端,地裂缝段则处于上盘段和下盘段之间。

由图 10 中可知,管廊竖向剪应力沿纵向大体呈现出“倒 W”状。在上盘段和下盘段,竖向剪应力都呈现出先增大后减小的变化趋势,且方向一致;地裂缝段的竖向剪应力方向与上下盘段相反,呈现“V”形变化趋势,即越靠近地裂缝,竖向剪应力越大,到地裂缝处时达到最大。此外,中隔板竖向剪应力曲线关于地裂缝对称;而左、右侧墙剪应力曲线却无此特征,但通过对比图 10(a)和(b)可以发现,左侧墙上盘段和右侧墙下盘段的竖向剪应力大小相近、方向相同,并且左侧墙下盘段和右侧墙上盘段之间也有此规律,所以可认为左侧墙与右侧墙竖向剪应力关于地裂缝中心对称。

随着地裂缝活动量的增大,管廊竖向剪应力不断增大,其“倒 W 状”趋势也越来越明显,尤其是地裂缝段的“V”形特征变化最为明显。在三个变化段内,峰值点处的竖向剪应力增量最大,并向两侧逐渐减小至 0,且地裂缝段的应力增量远大于上、下盘段。随着上盘沉降量的增大,中隔板竖向剪力分布区和主受剪区的范围基本保持不变,而对于左、右侧墙而言,地裂缝段这一受剪区的

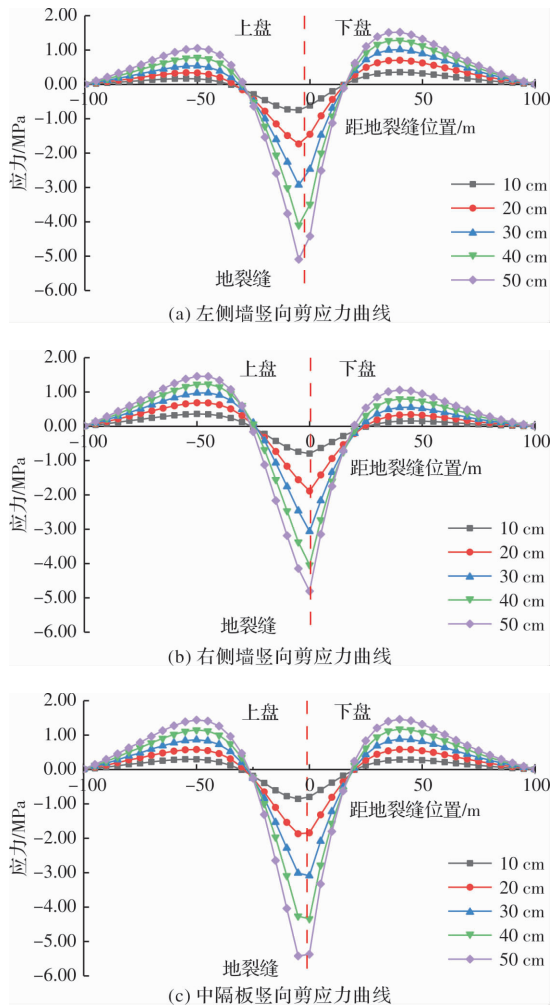


图10 管廊竖向剪力曲线

Fig. 10 Vertical shear curve of utility tunnel

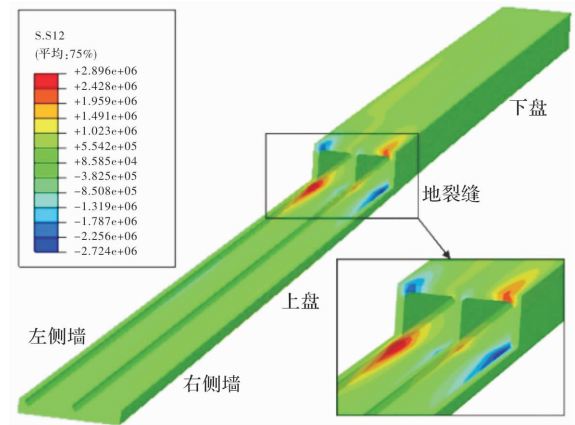
范围有小幅缩减。

### 3.3 水平剪应力分析

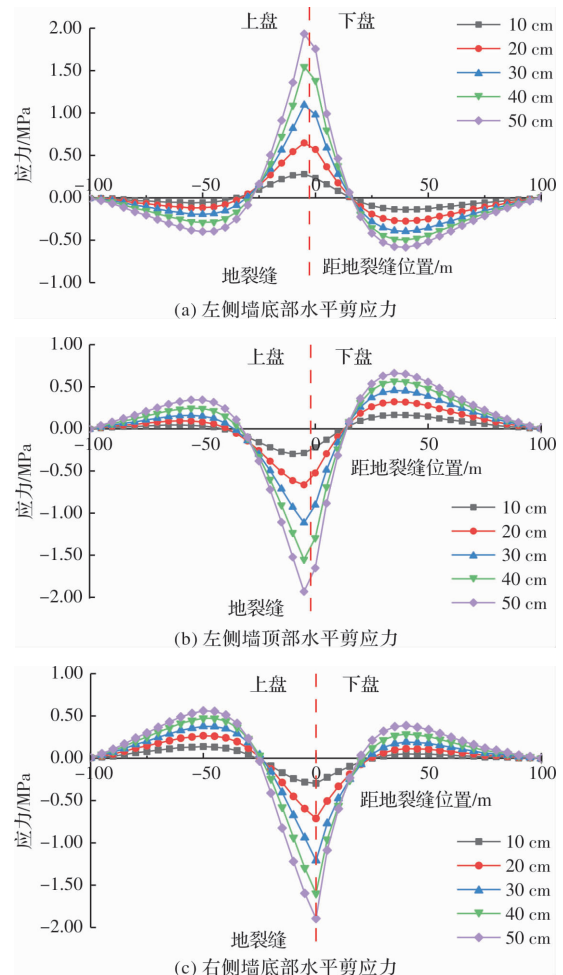
图11为管廊水平剪应力云图。由图可见,在地裂缝位置,管廊结构腋角处的水平剪应力较大,并且左侧墙和右侧墙腋角处的水平剪应力大于中隔板处。因此,主要分析了左侧墙和右侧墙顶、底部的水平剪应力变化特征。

由图12可知,管廊水平剪应力变化规律与竖向剪应力变化规律相似,呈“W”或“倒W”状,同样按上盘段、地裂缝段和下盘段三个变化段分析。上盘段和下盘段的水平剪应力呈现出先增大后减小的变化趋势;在地裂缝段则呈现出“V”形或“倒V”形变化特征。左侧墙上盘段水平剪应力小于下盘段,右侧墙上盘水平剪应力则大于下盘段;与竖向剪应力变化特征相似;另外,左、右侧墙底部和顶部水平剪应力的方向也是相反的。

水平剪应力同样随着上下盘错动量的增加逐渐增大。在上盘段内,左侧墙峰值点处的水平剪应力增量随着地裂缝活动量的增加而逐渐增大;

图11 管廊水平剪应力云图( $S=50\text{ cm}$ )Fig. 11 Horizontal shear stress nephogram of utility tunnel ( $S=50\text{ cm}$ )

在下盘段内,其增量则逐渐减小;而在地裂缝段内,峰值点处增量大小变化不明显,但总是大于上盘段和下盘段的水平剪应力增量。与左侧墙不同,右侧墙在上盘段和地裂缝段内峰值点处的水平剪应力增量都是不断减小的,只有下盘段的增量是不断增大的。此外,从图12中还可以看出左右侧墙受剪区的范围随着地裂缝活动是有所变化的。



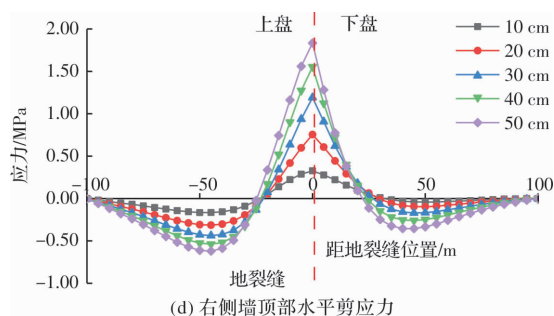


图12 管廊水平剪应力曲线图

Fig. 12 Horizontal shear stress curve of utility tunnel

在地裂缝处,水平和竖向剪应力都大于其他位置,并且随地裂缝活动量的增大,其变化也是最显著的。管廊结构在地裂缝两侧所受到的荷载种类和大小不同,是导致地裂缝处竖向剪应力最大的主要原因;而水平剪应力在地裂缝处最大主要是由管廊横断面的剪切变形最大引起的。所以,应适当提高地裂缝处管廊的抗剪能力或采取分段设缝措施。

## 4 结论

通过建立大角度斜穿地裂缝的双舱综合管廊有限元数值模型,分析了跨地裂缝段管廊结构的变形与受力特征,得到以下主要结论:

(1)管廊结构的纵向弯曲变形主要分为上盘远端整体沉降变形、地裂缝段内弯曲变形和下盘远端翘起变形三个变形区段;横断面的剪切变形和扭转变形主要是由于管廊斜穿地裂缝使得左右舱室受力状态不同引起的。

(2)在活动地裂缝作用下,斜穿地裂缝的管廊结构纵向应力变化显著,底板和顶板在上下盘分别处于不同的状态;从地裂缝处到上下盘远端,结构纵向应力呈现出先增大后减小的趋势,并在上盘30 m和下盘20 m处达到最大。结构剪应力在地裂缝段呈“V”形变化特征,即越靠近地裂缝,剪应力越大,并在地裂缝处达到最大;而上盘段和下盘段内的剪应力则表现出先增大后减小的变化趋势。

(3)地裂缝活动仅在一定范围内对管廊的纵向应力有显著影响,并且此范围不随地裂缝活动而发生明显变化,在结构设计时,应提高此范围内管廊的抗弯承载力和裂缝宽度要求;管廊的主要受剪区随地裂缝活动量的增大会有小幅变化,地裂缝两侧剪应力较大,应采取分段设缝或设置柔性接头等措施,减小结构受力。

## 参考文献 References

- [1] 彭建兵. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.  
PENG Jianbing. Active faults and geological hazards in Weihe basin[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1992.
- [2] 彭建兵, 张勤, 黄强兵, 等. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
PENG Jianbing, ZHANG Qin, HUANG Qiangbing, et al. Hazard of ground fissure in Xi'an[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合管廊工程技术规范: GB/T 50838-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for urban utility tunnel engineering: GB/T 50838-2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [4] 邓亚虹, 彭建兵, 范文, 等. 地裂缝活动环境下盾构隧道双层衬砌性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S2): 3860-3867.  
DENG Yahong, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Analysis of double-layered behaviors of shield tunnel active moving ground-fissures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008 (S2): 3860-3867.
- [5] 邓龙胜, 范文, 闫芙蓉, 等. 地裂缝活动对跨越裂缝带地铁隧道的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 481-487.  
DENG Longsheng, FAN Wen, YAN Furong, et al. Effect of activities of ground fissures on crossing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 481-487.
- [6] 袁立群, 门玉明, 刘洪佳, 等. 西安出露及隐伏地裂缝与地铁隧道相互作用数值模拟分析[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 11-13, 33.  
YUAN Liqun, MEN Yuming, LIU Hongjia, et al. Numerical simulation and analysis of interaction between exploited and concealed ground fissures and metro tunnel in Xi'an[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 11-13, 33.
- [7] 吴明, 彭建兵, 黄强兵, 等. 小角度穿越地裂缝带的地铁隧道衬砌性状分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(7): 44-49, 58.  
WU Ming, PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, et al. Analysis of metro tunnel crossing ground fissures in small angle[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(7): 44-49, 58.

- [8] 吴明, 彭建兵, 贺凯, 等. 地铁隧道受平行向地裂缝错动影响数值分析[J]. 工程地质学报, 2015, (5): 1020-1029.  
WU Ming, PENG Jianbing, HE Kai, et al. Numerical analysis of dislocation of ground fissures on the metro tunnel paralleling to the ground fissure's strike[J]. Journal of Engineering Geology, 2015(5): 1020-1029.
- [9] 孟振江, 彭建兵, 黄强兵, 等. 地铁隧道相交地裂缝的破坏特征及结构抗裂设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 88-97.  
MENG Zhenjiang, PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, et al. Failure characteristic of ground fissures in metro tunnel intersection and structural anti-crack design[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 88-97.
- [10] 黄强兵, 彭建兵, 石玉玲, 等. 地裂缝活动对地铁区间隧道地层应力与位移影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1525-1532.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, SHI Yuling, et al. Experimental study on effect of active ground fissures on stress and displacement change laws of strata near metro tunnels[J]. Chinese of Journal Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1525-1532.
- [11] 范文, 熊炜, 彭建兵, 等. 分段式地铁隧道穿越地裂缝带的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 138-143.  
FAN Wen, XIONG Wei, PENG Jianbing, et al. Model tests on segmental subway tunnel crossing ground fissure belt[J]. Chinese of Journal Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 138-143.
- [12] 胡志平, 彭建兵, 黄强兵, 等. 地铁盾构隧道 30°斜穿地裂缝的物理模拟试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(4): 63-68.  
HU Zhiping, PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, et al. Physical modeling test on shield tunnel crossing ground fissure with 30°[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(4): 63-68.
- [13] 胡志平, 彭建兵, 黄强兵, 等. 箱型隧道 30°斜穿活动地裂缝的变形破坏模式试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 105-111.  
HU Zhiping, PENG Jianbing, HUANG Qiangbing, et al. Physical model test of box tunnel crossing active ground fissure with 30°[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 105-111.
- [14] 黄强兵, 杨涛, 王震, 等. 跨地裂缝地铁隧道竖向地层压力计算方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1705-1711.  
HUANG Qiangbing, YANG Tao, WANG Zhen, et al. Calculation of vertical strata load of metro tunnel crossing ground fissure zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1705-1711.
- [15] 武华侨. 综合管廊在断层位移作用下的反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
WU Huaqiao. Response analysis of utility tunnel under fault[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [16] 朱琳. 黄土地区地裂缝对综合管廊的危害性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
ZHU Lin. Study on the harm of ground fissures on integrated pipe gallery in loess area[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [17] 闫钰丰, 黄强兵, 杨学军, 等. 地下综合管廊穿越地裂缝变形与受力特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1203-1210.  
YAN Yufeng, HUANG Qiangbing, YANG Xuejun, et al. Research on the deformation and force characteristics of underground utility tunnel crossing ground fissure[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1203-1210.
- [18] 黄强兵, 彭建兵, 范文, 等. 西安地铁二号线沿线地裂缝未来位错量估算及工程分级[J]. 工程地质学报, 2007(4): 469-474.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Estimation of the maximum displacement of ground fissures along Xi'an metro line2 and its engineering classification[J]. Journal of Engineering Geology, 2007(4): 469-474.
- [19] 黄强兵, 彭建兵, 王启耀, 等. 地铁隧道穿越地裂缝带的结构抗裂预留位移量[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2669-2675.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, WANG Qiyao, et al. Reserved displacements for anti-crack design of metro tunnel passing through active ground fissures zones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2669-2675.
- [20] 黄强兵, 彭建兵, 樊红卫, 等. 西安地裂缝对地铁隧道的危害及防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 781-788.  
HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, FAN Hongwei, et al. Metro tunnel hazards induced by active ground fissures in Xi'an and relevant control measures[J]. Chinese of Journal Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 781-788.

(编辑 吴海西 桂智刚)