

DOI: 10.7672/sgjs2025110024

# 海底隧道盾构段并行活动断层影响研究

武哲书<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;  
2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063)

[摘要] 依托胶州湾第二海底隧道工程, 针对隧道盾构段与沧口断裂并行的情况, 采用有限元数值模拟方法, 探究活动断层破碎带接触面形态、宽度及其与隧道距离等因素对隧道结构的影响。研究表明, 断层上下盘围岩相互作用影响围岩位移场及应力场, 进而影响隧道结构变形及受力; 断层破碎带软弱程度对隧道结构的影响较小; 断层破碎带越宽且距隧道距离越远, 断层错动作用对隧道的影响越小。

[关键词] 海底隧道; 断层; 衬砌; 受力; 变形; 数值模拟

[中图分类号] U45

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)11-0024-05

## Study on the Influence of Parallel Active Fault on Shield Section of Subsea Tunnel

WU Zhesu<sup>1,2</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China;

2. State-local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnel Technology, Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** Based on the Second Jiaozhou Bay Subsea Tunnel project, this study investigates the impact of active fault fracture zone contact surface morphology, width, and distance from the tunnel on shield tunnel segment structures through finite element simulations, focusing on the scenario where the shield tunnel section runs parallel to the Cangkou Fault. The research results show that the interaction mechanism between the hanging wall and footwall directly influences the displacement and stress fields of surrounding rock, thereby affecting tunnel deformation and internal forces. The softness degree of the fault fracture zone shows limited impact on tunnel structures. The wider the fault fracture zone and the farther the distance from the tunnel, the smaller the influence of fault dislocation on the tunnel.

**Keywords:** subsea tunnels; fault; lining; force; deformation; simulation

## 0 引言

随着我国社会和技术的进步, 跨海隧道建设日益增多, 海底地质环境复杂, 隧道常受附近活动断层的影响。活动断层在地质活动中可能发生蠕滑或黏滑错动, 易导致隧道结构产生变形、开裂甚至坍塌, 是威胁隧道结构安全的关键因素之一。

活动断层影响隧道结构安全时, 主要存在隧道正交或斜交穿越活动断层、隧道与活动断层近距离并行的形式。隧道穿越活动断层对自身结构的危害最大, 近年来已有隧道工程不可避免地穿越区域断裂, 如天山胜利隧道穿越区域性活动断裂博罗科努—阿其克库都克断裂<sup>[1]</sup>, 狮子山隧洞穿越程海—

宾川断裂<sup>[2]</sup>等, 隧道穿越活动断层影响研究逐渐得到关注<sup>[3-5]</sup>。

对于隧道与活动断层近距离并行的工况, 目前已有学者开展了相关研究, 如吴明等<sup>[6]</sup>根据西安地铁3号线所处地质条件, 开展了平行于地裂缝的地铁隧道避让距离研究; 王杰等<sup>[7]</sup>以康西瓦断裂为依托, 利用有限元方法对隧道与断层破碎带不同间距、不同断层位错量下的隧道结构反应规律和变形特征进行了对比分析; 胡旭东<sup>[8]</sup>采用间接边界元法以高精度模拟近断层场地地震动, 并在此基础上, 结合黏弹性人工边界和等效荷载的外源波动输入方法, 采用 ANSYS 有限元软件构建隧道及邻近土体数值分析模型并进行求解; 贺凯<sup>[9]</sup>通过大型物理模型试验与数值模拟仿真分析相结合, 确定近距离平

行条件下断层与隧道结构的安全距离。但目前对海底隧道平行于活动断层的相关研究较少,由于海底隧道工程的重要性,平行活动断层对海底隧道结构的影响分析对于保障海底隧道建设和运营安全具有重要意义。

本文以胶州湾第二海底隧道为工程背景,采用数值模拟方法,研究隧道盾构段与沧口断裂并行时断层错动对隧道结构的影响,对活动断层破碎带接触面形态、宽度及其与隧道的距离等因素进行了分析。

## 1 工程概况

胶州湾第二海底隧道位于山东省青岛市,是联系胶州湾两岸东西蓝色经济区的重要快速货运及客运通道,是支撑青岛以环胶州湾区域为中心、以胶州湾东西两翼为新增长极的“一带、五区、多支撑点”蓝色经济区发展总体格局的重要交通基础设施。

胶州湾第二海底隧道全长 17.48km,隧道采用双孔主隧道+中间服务隧道的布置方式。根据工程地质条件,黄岛岸隧道主要位于花岗岩地层,采用钻爆法施工;青岛岸海域位于强风化、中风化地层,采用盾构法施工,盾构段长度 3.25km。盾构隧道外径 15m,内径 13.7m,采用通用楔形环管片,管片环宽 2.1m,服务隧道盾构段外径 7.7m,内径 7m,环宽 1.6m。盾构隧道横断面如图 1 所示。



图 1 盾构隧道横断面

Fig. 1 Cross section of shield tunnel

## 2 活动断层与海底隧道盾构段的位置关系

胶州湾第二海底隧道连接青岛与黄岛,穿越胶州湾水域,场区地形地貌及地质条件较复杂。根据区域地质资料成果,区域性沧口断裂从场区经过。沧口断裂在胶州湾内分为南段和中段部分,沧口断裂中段以东为火成岩分布区,陆域段分布有花岗岩;沧口断裂中段以西的断陷盆地区为沉积岩分布区,岩性主要为砾岩、泥岩和砂岩等。沧口断裂南段两盘均为火成岩分布区,岩性主要为花岗岩、花岗斑岩,间夹多条辉绿岩岩脉。根据已有资料,沧口断裂为具有右旋分量的正断层,具有较高的角度(平均 75°左右),总体走向 45°。盾构段位于沧口断裂中段,估计最大位错量为 0.9m。

主线隧道在青岛港附近与沧口断裂存在一定

距离的并行,北线里程桩号 NK17+000.000 处与沧口断裂距离约 280m,最近处(里程桩号 NK18+491.000)距沧口断裂约 50m。由于该段沧口断裂与隧道盾构段小角度平行,沧口断裂对盾构隧道不同位置纵向受力变形的影响较小,因此为便于分析,仅建立隧道与地层平面应变模型。

## 3 有限元计算模型建立

根据活动断层与盾构隧道的位置关系,建立如图 2 所示有限元模型。隧道埋深 56m,左线边界距活动断层最近水平距离 50m,活动断层破碎带宽度取 6m,边界施加法向约束,忽略渗流对结构的影响,模拟自重应力场、隧道开挖、衬砌施工及断层错动等阶段。材料参数取值如表 1 所示。

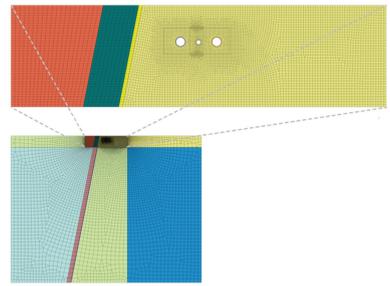


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the materials

材料名称	弹性模量/ GPa	泊松 比	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
C35 混凝土	31.50	0.20	24.5	—	—
围岩	22.75	0.36	20.9	6.72	42
断层破碎带	0.50	0.36	18.0	0.10	25

## 4 平行活动断层影响分析

目前通过海洋地质勘探准确探明沧口断裂破碎带物理力学性质存在一定困难,因此对断层破碎带接触面形态、断层破碎带宽度、破碎程度及其与盾构隧道距离等因素对隧道结构的影响进行分析,以确保隧道结构在不同工况下的稳定性与安全性。

### 4.1 断层破碎带接触面形态的影响

活动断层的错动模式不同,对隧道衬砌变形与受力的影响不同<sup>[10]</sup>,断层破碎带与两侧围岩的咬合程度影响断层错动时两侧围岩变形形态。当断层破碎带与围岩咬合较好时,断层破碎带边界与围岩位移一致;当断层破碎带与围岩咬合程度较差时,断层破碎带与下盘围岩边界处近似摩擦滑移。在断层破碎带与下盘围岩交界面上设置摩擦接触面,接触面切向刚度分别取 0.001, 0.1 $\text{kN}/\text{mm}^3$ ,当断层

发生错动时,不同断层破碎带与下盘围岩咬合程度下断层破碎带及隧道周围位移场分布如图 3 所示。

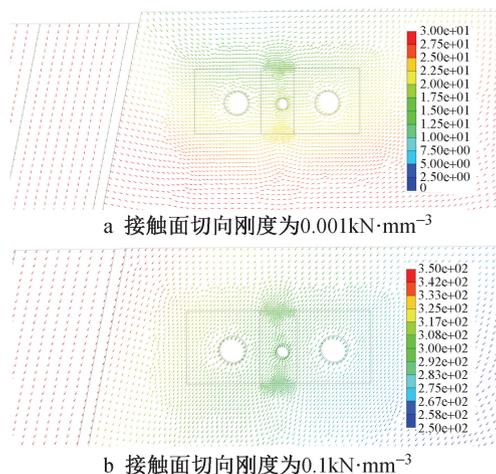


图 3 不同咬合程度下断层破碎带及隧道周围位移场分布(单位:mm)

Fig. 3 Displacement field distribution around fault fracture zone and tunnels under different interlocking degrees (unit: mm)

由图 3 可知,当断层破碎带与下盘围岩咬合程度较差时,下盘围岩主要受断层错动的挤压作用,整体向右侧发生位移。当断层破碎带与下盘围岩咬合程度较好时,下盘围岩受到断层错动变形的影响,整体向断层错动方向发生位移,距断层较近的左侧隧道也向断层错动方向发生位移。

当断层发生错动时,不同断层破碎带与下盘围岩咬合程度下的隧道衬砌受力如图 4 所示,图中黑线轮廓为断层错动之前隧道所在位置。由图 4 可知,当断层破碎带与下盘围岩咬合程度较差时,左线隧道拱脚位置最小主压应力最大,为 2.29MPa,同时隧道与围岩共同受到断层错动的挤压,整体向右侧位移,但位移量较小,为 21.53mm。当断层破碎带与下盘围岩咬合程度较好时,左线隧道拱腰位置最小主压应力最大,为 3.28MPa,同时隧道整体向断层方向移动,最大位移为 313.67mm。

#### 4.2 断层破碎带破碎程度的影响

通过海洋地质勘探准确探明沧口断裂破碎带具体组成成分及破碎程度存在困难,因此无法准确获取断层破碎带物理力学参数。通过改变单元材料弹性模量近似表征不同软硬及破碎程度的断层破碎带,分别取弹性模量为 0.5, 5, 25GPa, 当弹性模量取 0.5GPa 时,表示断层破碎带相对破碎、成分质地较软,当弹性模量取 25GPa 时,表示断层破碎带相对完整、成分质地较硬。

当断层发生错动时,不同断层破碎带弹性模量

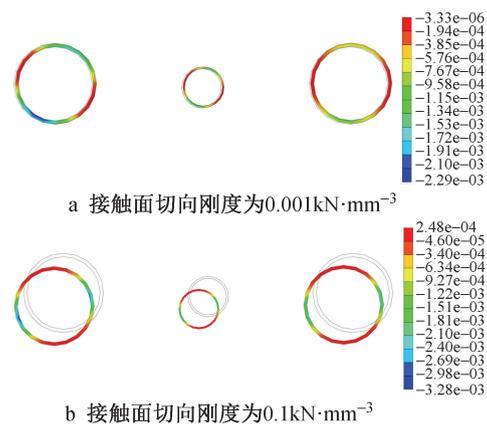


图 4 不同咬合程度下隧道衬砌最小主应力(单位:  $10^3$  MPa)  
Fig. 4 Minimum principal stresses of the tunnel linings under different interlocking degrees (unit:  $10^3$  MPa)

下的下盘围岩与断层接触边界位移如图 5 所示。由图 5 可知,由于断层破碎带与下盘围岩咬合程度不同导致断层错动时下盘围岩受力机制不同,因此下盘围岩与断层接触边界位移模式不同。当接触面切向刚度为  $0.1 \text{ kN/mm}^3$  时,断层破碎带弹性模量越大,下盘围岩与断层接触边界位移越大。但在断层破碎带弹性模量相差 50 倍的情况下,竖向位移差最大约为 20mm,这表明不同断层破碎带软弱程度对于下盘围岩变形的影响较小。

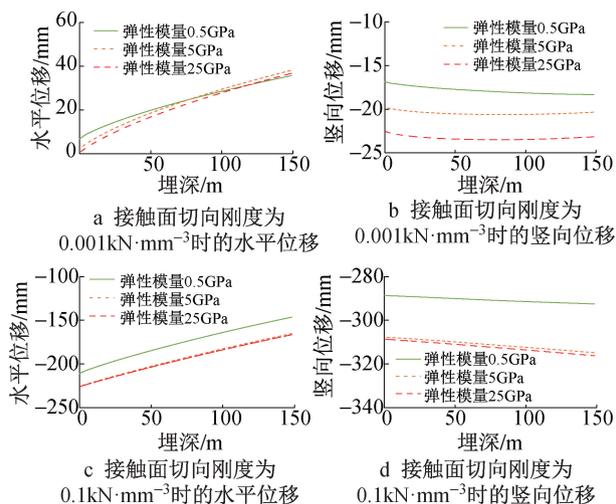


图 5 不同断层破碎带弹性模量下的下盘围岩与断层接触边界位移曲线

Fig. 5 Displacement curves at the contact boundary between footwall and the fault under different elastic modulus of the fault fracture zone

当断层发生错动时,不同断层破碎带弹性模量下隧道衬砌最大主压应力分布如图 6 所示。由图 6 可知,当断层破碎带弹性模量分别为 5, 25GPa 时,断层错动引起隧道衬砌最大主压应力分别为 2.11,

2. 14MPa,与断层破碎带弹性模量为 0.5GPa 时的 2. 29MPa 相差不大,这表明断层破碎带软弱程度对隧道衬砌结构的影响较小,主要因为断层上下盘两侧远场边界相对固定且约束较强,较为软弱的断层破碎带对于完整围岩的约束作用相对较小,因此较为软弱的断层破碎带对两侧围岩变形与受力的影响较小,仅在局部范围内产生少许差异,且对距断层一定距离的隧道衬砌结构影响较小。

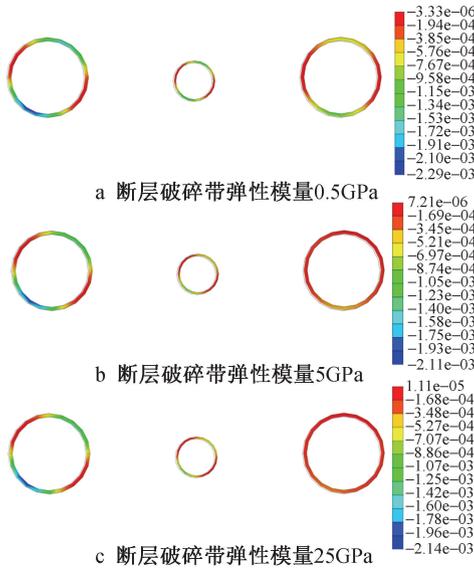


图 6 不同断层破碎带弹性模量下隧道衬砌最大主压应力(单位:  $10^3$  MPa)

Fig. 6 Maximum principal compressive stresses of tunnel linings under different elastic modulus of the fault fracture zone (unit:  $10^3$  MPa)

### 4.3 断层破碎带宽度的影响

为分析断层破碎带宽度的影响,建立断层破碎带宽度分别为 6, 30, 60m 的模型,计算隧道在断层错动作用下的受力与变形。计算得到不同断层破碎带宽度下与隧道中心相近高程点(图 7 中红点所示)处围岩水平位移分布如图 8 所示。由图 8 可知,随着断层破碎带宽度的增加,下盘围岩水平位移逐渐减小,即断层对下盘围岩变形的影响逐渐减弱,对隧道衬砌变形的影响也逐渐减弱。

当断层发生错动时,不同断层破碎带宽度下隧道衬砌最大主压应力分布如图 9 所示。由图 9 可知,当断层破碎带宽度为 30m 时,断层错动引起左线隧道拱脚处最大主压应力为 1. 39MPa,当断层破碎带宽度为 60m 时,该区域最大主压应力为 1. 09MPa,相比断层破碎带宽度为 6m 时的 2. 29MPa 明显减小,即断层破碎带越宽,该区域最大主压应力越小,这表明断层破碎带越宽,断层错动作用对隧道结构的影响越小。

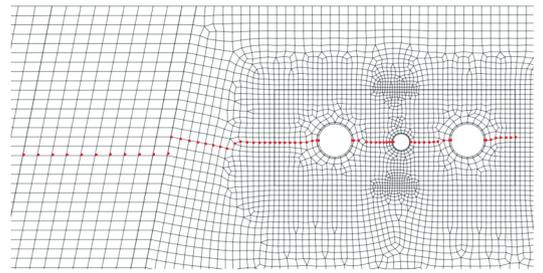


图 7 与主线隧道中心相近高程点位置示意

Fig. 7 Position of points at the same elevation as the center of main line tunnels

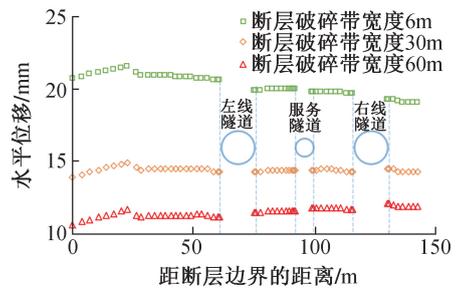


图 8 不同断层破碎带宽度下围岩水平位移曲线

Fig. 8 Horizontal displacement curves of surrounding rock under different width of fault fracture zone

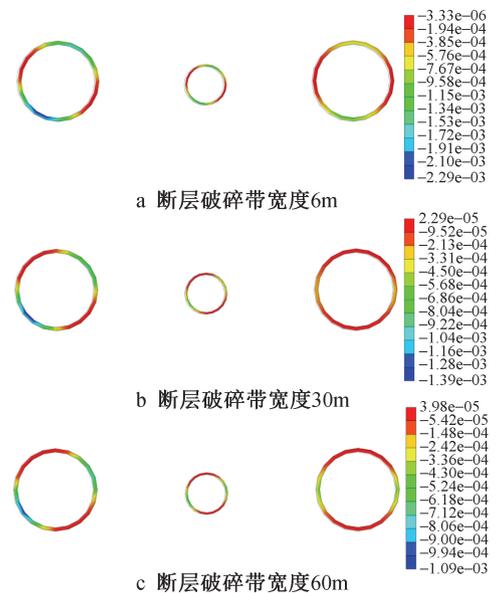


图 9 不同断层破碎带宽度下隧道衬砌最大主压应力(单位:  $10^3$  MPa)

Fig. 9 Maximum principal compressive stresses of tunnel lining under different widths of fault fracture zone (unit:  $10^3$  MPa)

### 4.4 断层破碎带与隧道距离的影响

为分析断层破碎带与隧道距离的影响,分别取断层破碎带与隧道距离为 15, 50, 100m,计算断层错动作用下隧道水平位移,如图 10 所示,图中黑线轮

廓为断层错动前隧道所在位置。隧道拱顶、拱底、左右拱腰位置水平位移如图 11 所示。

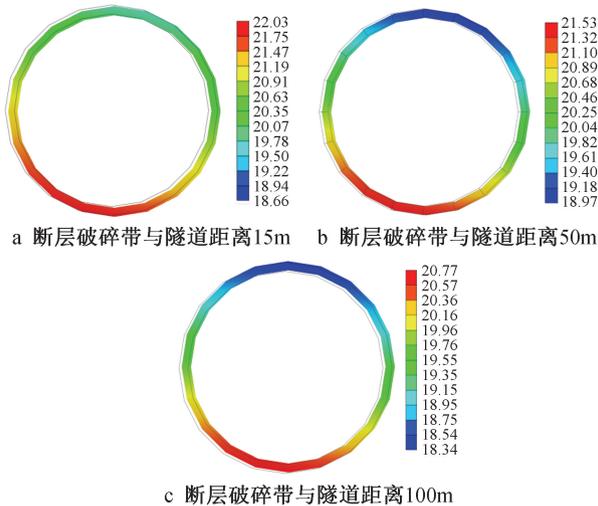


图 10 不同断层破碎带与隧道距离下左线隧道水平位移(单位:mm)

Fig. 10 Horizontal displacement of the left line tunnel under different fault fracture zone and tunnel distance (unit: mm)

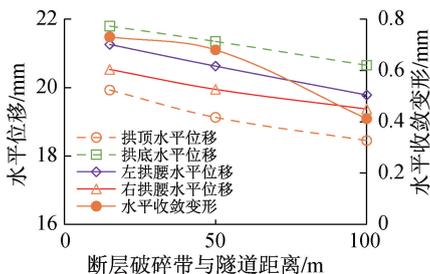


图 11 不同断层破碎带与隧道距离下衬砌结构水平位移曲线

Fig. 11 Horizontal displacement curves of lining structure under different distance between fault fracture zone and tunnel

由图 10 可知,左线隧道在断层错动作用下整体向右位移,拱脚水平位移最大,拱顶水平位移最小。由图 11 可知,当断层破碎带与隧道距离为 15m 时,断层错动对隧道衬砌变形的影响最大,此时隧道水平位移和水平收敛变形均达最大。当断层破碎带与隧道距离增大时,隧道水平位移逐渐减小,同时隧道水平收敛变形逐渐减小,当断层破碎带与隧道距离为 50,100m 时隧道水平收敛变形分别为 0.68, 0.41mm,可见平行于隧道的断层错动对隧道结构变形的影响较小。

## 5 结语

本文依托胶州湾第二海底隧道工程,针对隧道盾构段与沧口断裂并行的情况,为研究断层错动对

隧道结构的影响,对活动断层破碎带接触面形态、宽度及其与隧道的距离等因素进行了分析,主要得出以下结论。

1) 活动断层上下盘围岩的相互作用直接影响断层错动时下盘围岩位移场及应力场变化,进而引起受断层错动影响的隧道变形及受力变化。因此在分析盾构隧道受与之平行的活动断层错动影响时,需通过地质勘探尽可能多地探明活动断层性质及断层附近应力场分布,以便更准确地进行数值模拟分析。

2) 断层破碎带软弱程度对隧道的影响较小,主要原因在于软弱的断层破碎带对于完整围岩的约束作用相较于围岩自身远场的约束作用小,断层错动作用下,对两侧围岩变形与受力的影响较小。

3) 断层破碎带越宽,断层错动作用对隧道的影响越小。

4) 当断层破碎带距隧道 50m 以上时,整体上平行于隧道的断层错动对隧道结构变形的影响较小。

下盘围岩和隧道结构变形与断层性质及断层-围岩相互作用机制相关,可根据超前地质预报及其他地质勘察技术获得断层更详尽的参数,采用有限元-离散元耦合方法对围岩-断层-隧道结构体系进行更精细的模拟分析。

## 参考文献:

- [1] 崔景川,刘开之,彭文波,等. 天山胜利隧道穿越活动断裂抗断设防范围研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(9): 88-92.  
CUI J C, LIU K Z, PENG W B, et al. Research on anti-fracture fortification range of Tianshan Shengli Tunnel across active fault [J]. Construction technology, 2022, 51(9): 88-92.
- [2] 刘俊峰,郝俊锁,李勇,等. 狮子山隧洞地质问题与施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(11): 121-126.  
LIU J F, HAO J S, LI Y, et al. Geological problems and construction techniques of Shizishan Tunnel [J]. Construction technology, 2022, 51(11): 121-126.
- [3] 崔光耀,伍修刚,王明年,等. 汶川地震区跨断层带公路隧道震害形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 108-114.  
CUI G Y, WU X G, WANG M N, et al. Highway tunnel damage caused by earthquake and its mechanism crossing fault zone in Wenchuan Earthquake Area [J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2018, 29(2): 108-114.
- [4] 朱合华,禹海涛,韩富强,等. 穿越活动断层隧道抗震韧性设计理念与关键问题[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 193-204.  
ZHU H H, YU H T, HAN F Q, et al. Seismic resilience design principles and key issues for tunnels crossing active faults [J]. China journal of highway and transport, 2023, 36(11): 193-204.

(下转第 87 页)

- [ 2 ] 柳明亮,李翔宇,邢国华,等.大跨空间轮辐式弦支桁架结构施工过程监测与模拟分析[J].建筑科学与工程学报,2023,40(1):95-102.  
LIU M L, LI X Y, XING G H, et al. Construction process monitoring and simulation analysis of large-span spatial spoke chord truss structure [J]. Journal of architecture science and engineering, 2023,40(1): 95-102.
- [ 3 ] 秦学锋,侯文崎,林泓志,等.多重体系转换对大跨无柱地下空间结构力学行为影响[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10):2703-2714.  
QIN X F, HOU W Q, LIN H Z, et al. Influence of multiple system transformation on the mechanical behavior of long-span non-column underground spatial structure [J]. Journal of railway science and engineering, 2021,18(10): 2703-2714.
- [ 4 ] 姬帅,芦继忠,凌亚青,等.钢结构拼装胎架研制及其在大跨度钢桁架中的应用[J].建筑结构,2018,48(15):66-70.  
JI S, LU J Z, LING Y Q, et al. Development of steel structure assembly jig and its application in large-span steel trusses [J]. Building structure, 2018,48(15): 66-70.
- [ 5 ] 肖魁,贾水钟,贾君玉,等.上海图书馆东馆悬挂结构方案设计与研究[J].建筑结构,2022,52(1):1-6.  
XIAO K, JIA S Z, JIA J Y, et al. Design and research on the suspension structure scheme of Shanghai Library East Hall [J]. Building structure, 2022,52(1): 1-6.
- [ 6 ] 沈海英,张潇南.嘉兴万科邻里中心悬挂钢结构施工模拟分析[J].施工技术(中英文),2022,51(21):119-122,132.  
SHEN H Y, ZHANG X N. Construction simulation analysis of core-tube suspension steel structure of Jiaxing Vanke neighborhood center [J]. Construction technology, 2022, 51(21): 119-122,132.
- [ 7 ] 中国建筑一局(集团)有限公司,中国建筑股份有限公司.建筑施工临时支撑结构技术规范:JGJ 300—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.  
China Construction First Group Corporation Limited, China State Construction. Technical code for temporary support structures in construction:JGJ 300—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013.
- [ 8 ] 刘洋,刘永添,余永辉,等.某带悬挑复杂连体办公楼结构设计与分析[J].建筑结构,2023,53(8):54-61.  
LIU Y, LIU Y T, YU Y H, et al. Structural design and analysis of a complex connected office building with cantilever [J]. Building structure, 2023,53(8): 54-61.
- [ 9 ] 邱斌,杨会伟,雷宏刚,等.太原植物园大跨悬挑钢结构优化分析[J].太原理工大学学报,2020,51(1):43-49.  
QIU B, YANG H W, LEI H G, et al. Optimization analysis of large-span cantilever steel structures in Taiyuan Botanical Garden [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(1): 43-49.
- [ 10 ] 石开荣,潘文智,许洁槟,等.拆撑对高层悬挑转换桁架结构内力的影响[J].工业建筑,2019,49(7):129-132,175.  
SHI K R, PAN W Z, XU J B, et al. The effect of dismantling braces on the internal force of high-rise cantilever transfer truss structures [J]. Industrial construction, 2019, 49(7): 129-132,175.

## (上接第28页)

- [ 5 ] 武哲书,孙文昊,肖明清,等.胶州湾第二海底隧道穿越活动断层抗错断结构方案研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(5):826-836.  
WU Z S, SUN W H, XIAO M Q, et al. Antidisllocation structure design of Jiaozhou Bay Second Subsea Tunnel crossing an active fault[J]. Tunnel construction,2023,43(5):826-836.
- [ 6 ] 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,2015,23(5):1020-1029.  
WU M, PENG J B, HE K, et al. Numerical analysis of dislocation of ground fissure on the metro tunnel paralleling to the ground fissure's strike [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(5): 1020-1029.
- [ 7 ] 王杰,盛俭,赵梦丹,等.康西瓦断裂错动对近断层隧道影响的数值模拟分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(3):235-242.  
WANG J, SHENG J, ZHAO M D, et al. Numerical simulation analysis of the influence of Karakax fault dislocation on near-fault tunnel [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2022,42(3):235-242.
- [ 8 ] 胡旭东.近断层浅埋隧道结构动力响应分析[J].施工技术(中英文),2024,53(9):40-46.  
HU X D. Analysis of the structural dynamic response of near-fault shallow-buried tunnel [J]. Construction technology, 2024, 53(9): 40-46.
- [ 9 ] 贺凯.小角度斜交与近距离平行条件下地铁隧道与地裂缝相互作用的模型试验研究[D].西安:长安大学,2012.  
HE K. Model test on the interaction between metro tunnel and ground fissure under the condition of tunnel crossing with small angle and paralleling with short distance to ground fissure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [ 10 ] 周光新,崔臻,盛谦,等.活动断裂错动位移模式对隧洞变形与内力的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(6):1323-1330,1349.  
ZHOU G X, CUI Z, SHENG Q, et al. Study on the deformation and internal force of the tunnel under the displacement pattern of the active fault zone [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2021, 41(6): 1323-1330,1349.