

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202006014

岩溶位置及组合效应对隧道的地震响应分析*

李明达^{1,2}, 张 昱^{1,2}, 周 晶^{1,2}

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究岩溶地区隐伏溶洞对隧道结构的地震动响应特性, 基于粘弹性人工边界理论, 编写了等效荷载时程施加程序, 计算并分析了隧道结构环向五种岩溶位置($0^\circ\sim 180^\circ$)及其八种位置组合效应对隧道结构地震响应特性的影响。结果表明: 结构的节点加速度响应随其距围岩顶部距离的增大而增大。两个单独溶洞(90° 、 180°)作用与其组合效应相比, 180° 位置的溶洞对拱底的加速度响应具有一定的减弱作用。位置组合效应条件下, 结构应力变化较大的范围为结构环向的 $1/4$; 由于溶洞的相互作用, 结构的应力包络图略小于两个单个溶洞作用下包络图的最外缘。无论单个溶洞还是位置组合效应下, 结构应力受影响较大的范围均在拱肩及拱脚附近。研究结果对隧道结构设计、建设及监测具有指导意义。

关键词: 隧道; 地震响应; 粘弹性边界; 溶洞; 主拉应力; 主压应力

中图分类号: TU354 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0472-08

Seismic Response Analysis of Tunnel under Karst Cave Locations and Combinatorial Effect

LI Mingda^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, ZHOU Jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To investigate the seismic response of tunnels under concealed caves in the karst cave zone, the program of equivalent load time history was compiled, based on the viscous-spring boundary principle. Detailed discussions were presented regarding the seismic response of tunnels under different conditions, such as five karst cave locations at the structural circumference and eight positional combination effects. The results show that the node acceleration response of structures increased with the increase in distance between the node and the top surface of the surrounding rock. Compared with the combinatorial effect of the cave at 90° and 180° locations, the cave at 180° has a certain weakening effect on the acceleration response of the structure bottom. Under the positional combination effect, the stress variation range is roughly a quarter of the structure. Due to the interaction of the karst caves, the structural stress envelope diagram is slightly smaller than the outermost edge of the envelope diagram under the action of two single caves. Whether the action of a single cave or the combinatorial effect, the influence range of structural stress under karst caves is around the spandrel and arch foot of

* 收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-09-04

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0802402)资助

作者简介: 李明达(1992—), 男, 博士研究生。主要从事抗震方面研究。E-mail: 837407645@qq.com

the structure. The conclusions drawn in this study provide a practical reference for the design, construction, and monitoring of similar projects.

Keywords: tunnel; seismic response; viscous-spring boundary; karst cave; principal tensile stress; principal compressive stress

引言

为更好地缓解城市交通、运输等压力,世界各国都在大力发展地下空间以满足需求。近些年一些地铁车站、区间隧道等地下空间结构,在大型地震动作用下遭受了严重的破坏,如1995年日本阪神地震, Daikai 车站出现了明显的变形和损伤,严重区段甚至出现了整体的坍塌破坏,此后地下隧道结构抗震分析受到了国内外越来越多的关注。

由于地下结构地质的复杂性,特别是在岩溶地区的隧道工程,在地震作用下,地层可能会产生较大的变形和位移,使得结构产生严重的损伤甚至破坏,进而造成巨大的经济损失及人身伤害。目前岩溶地区隧道的相关研究,大多关注受溶洞导致的围岩应力、位移的变化特点,从施工和静力角度研究溶洞对隧道工程的影响,如齐勇^[1]研究了单个溶洞不同位置对隧道施工力学特性的影响。赵明阶等^[2-6]分别通过数值计算及试验研究了岩溶对隧道变形、围岩稳定性及安全距离等的影响。对于岩溶地区盾构隧道的动力响应特性研究相对较少,并且多是针对存在单个溶洞的情况进行研究^[7-8],然而,岩溶地区实际存在的溶洞大多以多个溶洞并存或溶洞群的形式为主。因此研究不同岩溶位置及组合效应对隧道工程的地震动力响应影响非常有必要。

本文以大连地铁五号线典型断面为背景,基于粘弹性人工边界理论,建立有限元模型,在不同岩溶位置及组合效应条件下,对隧道结构的地震动力响应特性进行研究,研究结果对隧道设计、建设及监测具有一定指导意义。

1 工程概况

大连地铁五号线线路全长 24.48 km,其中火车站站-梭鱼湾南站区间(火梭区间)线路全长 3 310 m,采用单洞双线大直径盾构隧道建设方案。隧道结构为双层衬砌,外径为 11.8 m,内径为 10.8 m,环宽为 2.0 m,管片厚度为 0.5 m。由于结构设计中二衬

不作为受力构件,在本文计算中不予考虑。

火梭区间地质条件较为复杂,区间纵断面地质示意如图 1 所示。根据勘察资料,勘察深度范围内主要包括杂填土、淤泥、粉土、粉质黏土、中砂、卵石等地层;下部基岩为中风化白云质灰岩、中风化钙质板岩、中风化板岩等,且存在辉绿岩侵入岩脉。场地内主要的不良地质作用为岩溶,专勘资料表明,区间内主要存在三个溶洞群,两个溶洞群位于海域段,一个溶洞群位于陆域段。

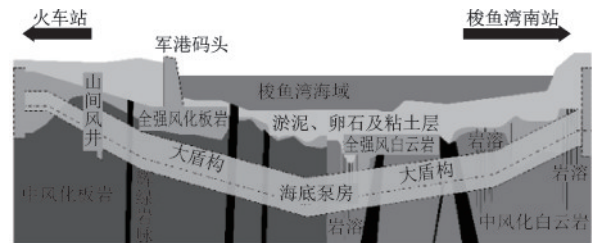


图 1 纵断面地质示意

Fig. 1 Geological map of the vertical section

通过钻探及跨孔弹性波 CT 探测对几米到十几米的溶洞勘测精度较高,但溶洞在 2 m 以内时,可能会存在未能探测的隐伏溶洞。隧道在建设过程中会安全通过隐伏溶洞区域,但运营中在动荷载等作用下,可能会导致管片开裂、错位、破裂等现象,进而造成严重事故。本工程处在华北地震区中的郯庐地震带,该地震带曾发生过多次破坏性地震,一旦发生地震,对于结构将造成不可逆转的伤害。

2 模型建立及计算工况

本文将实际的围岩结构简化为匀质基岩,忽略地下水的影响,并取结构埋深为 20 m。研究表明当计算模型取 3~5 倍结构跨径时,边界影响较小^[9],所以计算模型尺寸横向长度取为 84 m,竖向取为 68 m。

2.1 模型参数

依据大连地铁 5 号线火梭区间地质详勘报告,围岩材料及衬砌结构材料力学参数见表 1,围岩材料屈服准则采用郑颖人等^[10]提出的 DP3 平面应变摩尔-库伦匹配。

表 1 材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

| 材料 | 灰岩 | 衬砌结构 |
|-------------------------------------|-------|--------|
| 厚度/m | — | 0.5 |
| 弹性模量 E/MPa | 300 | 34 500 |
| 泊松比 μ | 0.35 | 0.2 |
| 密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 2 700 | 2 500 |
| 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 20 | — |
| 黏聚力 c/MPa | 100 | — |

根据《建筑抗震设计规范》^[11]规定,大连地区抗震设防烈度为Ⅶ度,设计基本地震加速度值为0.10g,设计地震分组为第二组,选取经修正后的El-centro地震波,峰值加速度(PGA)为0.10g,地震波由基岩底部垂直入射,加速度时程曲线如图2所示。

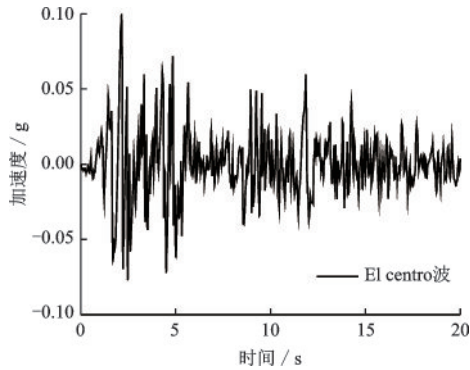


图 2 El centro 波

Fig. 2 El centro wave

国内岩溶盾构隧道加固范围一般取距隧道2~5 m,本文计算中选取距隧道衬砌外缘一定范围内设置溶洞,为简化计算将溶洞取为圆形。

2.2 模型边界处理

粘弹性人工边界能够准确地模拟截断边界外半无限介质的弹性恢复能力,并能有效消除外行波在截断边界上的反射作用^[12]。其准确性及高效性也得到了证实,并已经在地下结构中得到了广泛的应用^[13-14]。因此本文采用粘弹性人工边界以保证结构系统的震动输入准确性,即通过在有限元边界上将地震动波动转化为作用于人工边界节点上的等效荷载。

边界上等效物理体系的弹簧系数为:

$$K_n = \alpha_n \frac{G}{R} \times A_i; K_t = \alpha_t \frac{G}{R} \times A_i \quad (1)$$

阻尼系数为:

$$C_n = \rho c_p \times A_i; C_t = \rho c_s \times A_i \quad (2)$$

式中, K_n 和 C_n 分别是弹簧和阻尼器在法线方向上的系数; K_t 和 C_t 分别是弹簧和阻尼器在切线方向上的系数; α_n 和 α_t 分别为法线方向和切线方向上弹簧的修正系数; R 为每一个边界点到力加载点的距离; G 和 ρ 分别为介质的剪切模量和介质密度; c_p 和 c_s 分别为介质中压缩波和剪切波的传播速度; A_i 是边界节点 i 的影响区域。

刘晶波等^[12,15]提出,在二维粘弹性人工边界中,推荐 α_t 和 α_n 的取值范围分别为 $[0.35, 0.65]$ 和 $[0.8, 1.2]$ 。本计算中 α_t 和 α_n 的取值为0.5和1.0。

作用在边界节点上的等效荷载可由下式表示:

左侧边界上等效节点荷载为:

$$\begin{cases} F_x^{-x} \\ F_y^{-x} \end{cases} = \begin{cases} (K_n u^f + C_n \dot{u}^f - \sigma_x^f A_i) \\ (K_t v^f + C_t \dot{v}^f - \tau_{xy}^f A_i) \end{cases} \quad (3)$$

右侧边界上等效节点荷载表示为:

$$\begin{cases} F_x^x \\ F_y^x \end{cases} = \begin{cases} (K_n u^f + C_n \dot{u}^f + \sigma_x^f A_i) \\ (K_t v^f + C_t \dot{v}^f + \tau_{xy}^f A_i) \end{cases} \quad (4)$$

底边界上等效节点荷载表示为:

$$\begin{cases} F_x^{-y} \\ F_y^{-y} \end{cases} = \begin{cases} (K_t u^f + C_t \dot{u}^f - \tau_{yx}^f A_i) \\ (K_n v^f + C_n \dot{v}^f - \sigma_y^f A_i) \end{cases} \quad (5)$$

式中,等效节点荷载 F_j^i 上标表示人工边界节点所在面的外法线方向,下标表示节点力在各方向上的分量; $u^f, \dot{u}^f, v^f, \dot{v}^f$ 表示传播介质中节点处自由场的水平向位移、速度和竖向位移、速度; $\sigma_x^f, \tau_{xy}^f, \sigma_y^f$ 为节点处自由场的应力,位移、速度、应力的计算公式可参考文献^[16]。

粘弹性人工边界选用 ANSYS 中的 COMBIN14 单元模拟弹簧和阻尼器,采用 APDL 语言编写了粘弹性边界等效节点荷载时程施加程序用于结构地震动输入。

2.3 有限元模型

数值模拟采用大型通用有限元软件 ANSYS,计算采用地层—结构模型。梁建文等^[17]表明,在二维隧道模型计算时,采用 PLANE42 和 BEAM23 单元模拟衬砌结构,结果相差很小。故本文计算中衬砌结构与围岩均采用 PLANE42 单元进行计算。溶洞的数值模拟采用“空场力学模型”计算^[18]。根据地勘资料,选取火梭区间内典型断面,建立二维有限元模型。模型示意及有限元模型如图3、4所示。

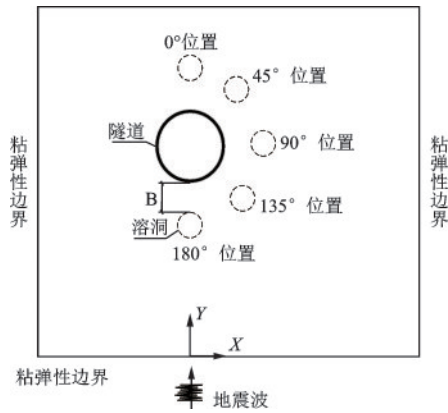


图3 二维模型示意

Fig. 3 2D model schematic diagram

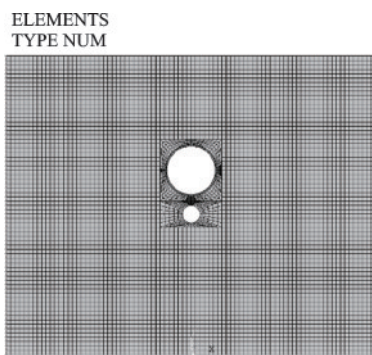


图4 二维有限元模型

Fig. 4 2D finite element model

模型建立之后,首先将整体结构在静力条件下做地应力平衡;其次进行土体静力开挖模拟隧道形成过程;最后在此基础上对结构底部及侧向施加粘弹性边界条件,再对整体结构进行地震动分析。结构动力分析中阻尼确定是很重要的,本模型采用瑞利阻尼,按照5%的阻尼比^[8,17]来确定瑞利阻尼的两个比例系数。

2.4 计算工况

本文首先通过五种单个溶洞位置对结构加速度、应力响应的影响程度进行探讨,由于结构对称,溶洞位置分布于结构中线的右侧,如图3所示。其次依据单个溶洞影响程度的大小,选取有代表性的两个溶洞位置与其组合效应进行对比,研究这三种工况对结构的加速度、应力响应的影响程度。最终将五个位置的溶洞两两组合,通过数值模拟计算,得到八种位置组合工况下结构的应力响应,位置组合工况见表2,并依据计算结果得出结论。

表2 工况组合

Table 2 Summary of the test conditions

| 工况 | 溶洞位置 | | 工况 | 溶洞位置 | |
|-----|------|------|-----|------|------|
| 工况1 | 0° | 45° | 工况5 | 45° | 90° |
| 工况2 | 0° | 90° | 工况6 | 45° | 135° |
| 工况3 | 0° | 135° | 工况7 | 90° | 135° |
| 工况4 | 0° | 180° | 工况8 | 90° | 180° |

3 计算结果及分析

3.1 溶洞位置对结构的影响

为研究各溶洞位置对结构地震响应的影响,以洞隧间距B为2m,溶洞洞径为2m为例计算得到单个溶洞在不同位置下,隧道结构内缘对应节点的X方向加速度时程响应。以溶洞位置在180°位置为例,结构内缘加速度响应如图5所示。

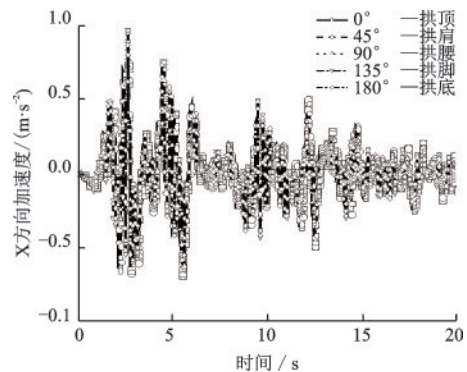


图5 结构内缘加速度时程响应

Fig. 5 Acceleration response of inner edge

如图5所示,结构内缘各节点加速度时程曲线趋势基本一致,拱顶到拱底节点峰值加速度(PGA)依次为0.705、0.729、0.920、0.984、0.967 m/s^2 ,即各节点的PGA值基本随着结构节点至围岩顶部距离的增大而增大。受溶洞位置的影响,拱底节点PGA值较拱脚略小。

如图6所示,为不同溶洞位置条件下,结构内缘主拉应力峰值包络图,可以看出结构应力所受影响范围与溶洞位置紧密相关。溶洞在0°、90°、180°位置时对结构的影响范围较大,影响范围为结构的四分之一部分,且包络图向溶洞所在位置靠拢。图中各工况主拉应力峰值最大值出现在拱肩及拱脚附近,在强震作用下更易发生破坏。溶洞位于90°位置的条件,包络图最大值节点靠近拱腰为4.527 MPa,

由于地震波输入为剪切波,加之溶洞位于结构侧部,故对结构应力影响较大。而溶洞位置在 45° 和 135° 条件下,拱肩及拱脚附近的主拉应力峰值包络图均小于无溶洞时,这是因为地震波作用下,传递过程中对结构横向影响较大,而溶洞位置并非在主要影响区域。

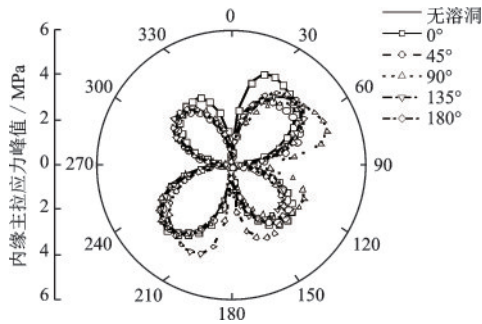


图6 结构内缘主拉应力峰值包络

Fig. 6 Envelope diagram of peak principal tensile stress for the inner edge

表3为单个溶洞作用下结构内缘各节点主应力峰值,结合图6可以看出,溶洞对结构的应力影响范围主要为其所在侧。各工况中溶洞位于 90° 和 180° 位置时对结构影响较大。溶洞位于 90° 时,拱腰节点主拉应力为 0.850 MPa ,与无溶洞相比放大了2.6倍。溶洞位于 180° 时,拱底节点拉应力为 0.640 MPa ,与无溶洞相比放大了4.6倍。

表3 结构内缘节点主拉应力峰值

Table 3 Peak principal tensile stress of the inner edge

单位:MPa

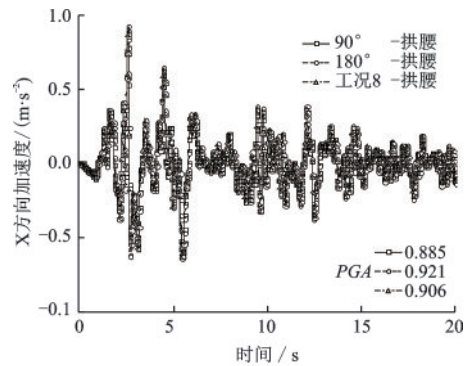
| 溶洞位置 | 拱顶 | 拱肩 | 拱腰 | 拱脚 | 拱底 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 无溶洞 | 0.111 | 3.967 | 0.236 | 3.324 | 0.114 |
| 0° | 0.582 | 3.861 | 0.231 | 3.440 | 0.119 |
| 45° | 0.348 | 3.426 | 0.470 | 3.316 | 0.109 |
| 90° | 0.340 | 3.822 | 0.850 | 3.249 | 0.397 |
| 135° | 0.107 | 3.992 | 0.285 | 2.883 | 0.376 |
| 180° | 0.109 | 4.106 | 0.471 | 3.247 | 0.640 |

3.2 位置组合效应对结构的影响

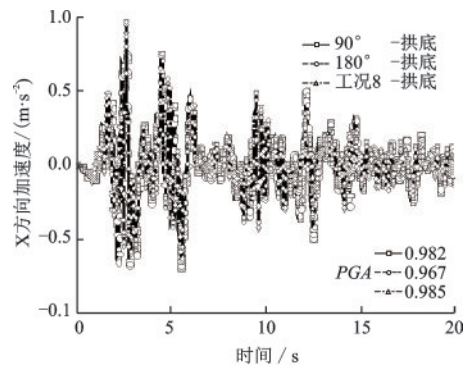
根据上文计算结果可知,本文研究的五个溶洞位置中,位于 0° 、 90° 、 180° 位置的溶洞对结构影响较大,而另两种工况影响较小,且影响程度相似。因此选取对结构影响较大的 90° 和 180° 位置的溶洞,位置组合以工况8为例,分析单个溶洞与工况8条件下结构内缘拱腰及拱底节点X方向加速度时程响

应,如图7所示。

各工况下加速度时程曲线走势一致,各工况对于拱底的影响均大于拱腰。图7(a)中溶洞在 180° 位置时拱腰的PGA值最大,为 0.921 m/s^2 ,小于工况8。图7(b)中拱底时程曲线的PGA值在溶洞位于 180° 时最小,而另两种工况基本一致,无溶洞时拱底PGA值为 0.961 m/s^2 ,相对于工况8,溶洞位于 180° 时对拱底的加速度响应具有一定的减弱作用。



(a) 结构内缘拱腰加速度时程曲线



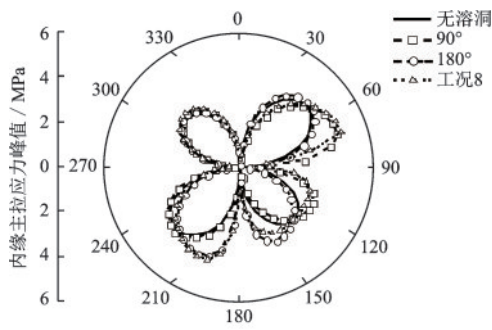
(b) 结构内缘拱底加速度时程曲线

图7 结构内缘加速度时程响应

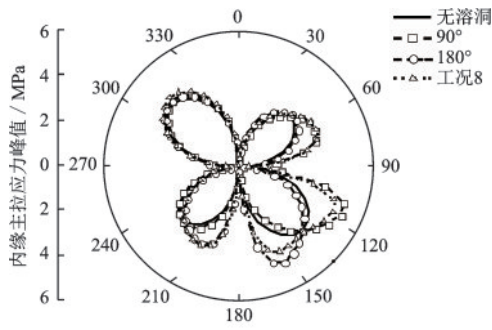
Fig. 7 Acceleration response of inner edges

图8为 90° 、 180° 单个溶洞及工况8的主拉、压应力峰值包络图。工况8组合溶洞对结构的影响范围主要为结构环向 30° 到 210° 。溶洞位于 180° 位置时,结构内缘拱脚附近所受应力最大,主拉、压应力峰值最大值分别为 4.276 MPa 和 4.660 MPa 。溶洞位于 90° 位置时结构内缘拱肩附近受拉应力最大,为 4.527 MPa ,拱脚附近受压应力最大,为 4.955 MPa 。工况8的结构应力包络图大致是两种单个溶洞作用下包络图最外缘的组合,由于在两个溶洞共同作用下,对整体结构的应力分布具有一定的减弱作用,因此在图中可以看到,结构右侧拱腰到拱底的包络图略小于单个溶洞最外缘。主拉、压应力峰值最大

值分别为 4.702 MPa 和 4.623 MPa。



(a) 结构内缘拱腰加速度时程曲线



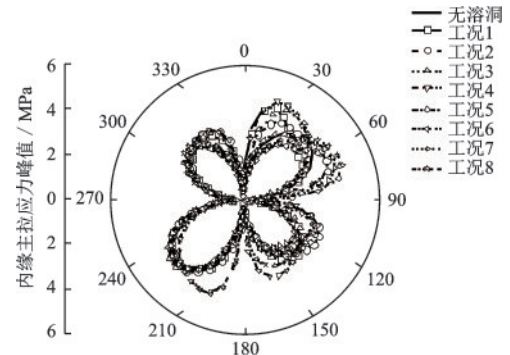
(b) 结构内缘拱底加速度时程曲线

图 8 结构内缘主应力峰值包络图

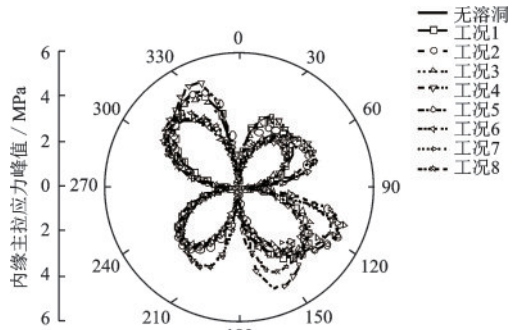
Fig. 8 Envelope diagram of peak principal tensile stress for the inner edges

图 9、表 4 分别为 8 种工况下结构内缘的主拉、压应力峰值包络图及节点应力峰值。各工况中结构应力的影响范围受 0°、90°、180° 溶洞所在位置主导,除工况 1、工况 8 外,影响范围大致为结构环向的 1/4。各工况应力包络图略小于两个单独溶洞作用下包络图的最外缘形状,溶洞的相互作用使得对整体结构的应力分布具有一定的减弱作用。相比于无溶洞条件下,无论是主拉应力还是主压应力,各工况对结构应力的影响范围主要为拱肩及拱脚附近。

从表 4 中可以看出,与无溶洞工况相比,位置组合效应条件下的结构节点应力峰值多大于无溶洞。以主拉应力峰值为例,各工况中,工况 1 条件下拱顶节点的主拉应力峰值最大为 1.064 MPa,相比无溶洞条件放大了 8.59 倍;工况 8 条件下的拱腰、拱底节点的主拉应力峰值分别为 1.286 MPa 和 1.081 MPa,与无溶洞条件相比,放大了 4.45 倍和 8.48 倍。结合图 9 与前文所述无论是单个溶洞还是位置组合效应下的结构应力响应,位于 0°, 90° 和 180° 位置的溶洞对结构应力分布起主要作用。



(a) 主拉应力峰值包络图



(b) 主拉应力峰值包络图

图 9 位置组合效应下结构内缘主应力峰值包络图

Fig. 9 Envelope diagram of peak principal tensile stress for inner edges under the different position combination

表 4 位置组合效应下结构内缘节点主拉应力峰值

Table 4 Peak principal tensile stress for inner edges under the different position combination

单位:MPa

| 工况 | 主拉应力峰值 | | | | 主压应力峰值 | | | |
|------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 | 最大值 | 拱顶 | 拱腰 | 拱底 | 最大值 |
| 无溶洞 | 0.111 | 0.236 | 0.114 | 3.967 | 0.150 | 0.458 | 0.158 | 3.978 |
| 工况 1 | 1.064 | 0.243 | 0.115 | 4.407 | 0.347 | 0.471 | 0.201 | 4.631 |
| 工况 2 | 0.543 | 0.624 | 0.366 | 4.153 | 0.484 | 0.311 | 0.316 | 4.900 |
| 工况 3 | 0.242 | 0.506 | 0.364 | 4.481 | 0.256 | 0.747 | 0.401 | 4.439 |
| 工况 4 | 0.742 | 0.404 | 0.748 | 4.658 | 0.179 | 0.605 | 0.171 | 5.044 |
| 工况 5 | 0.144 | 1.379 | 0.403 | 4.562 | 0.217 | 0.400 | 0.326 | 4.981 |
| 工况 6 | 0.404 | 0.170 | 0.397 | 4.092 | 0.299 | 0.205 | 0.463 | 4.093 |
| 工况 7 | 0.352 | 0.842 | 0.177 | 4.382 | 0.537 | 0.281 | 0.193 | 5.022 |
| 工况 8 | 0.329 | 1.286 | 1.081 | 4.702 | 0.055 | 0.434 | 0.376 | 4.623 |

4 结 论

通过建立有限元模型,计算并分析了不同岩溶

位置及组合效应条件下,隧道结构的震动力响应特性,所得结论如下:

(1)结构的加速度响应与结构节点位置有关,单个溶洞作用与工况8条件下相比,单个溶洞(180°)对于拱底的加速度响应具有一定的减弱作用。

(2)结构应力响应的影响范围受0°、90°、180°溶洞所在位置主导,且引起应力变化较大的范围为结构环向的1/4。

(3)由于位置组合效应下溶洞的相互作用,结构的应力包络图略小于两个单个溶洞作用下包络图的最外缘。无论单个溶洞还是位置组合效应条件下溶洞的主要影响范围在结构的拱肩及拱脚附近。

根据本文结果,在岩溶区隧道的结构设计应特别加强拱肩、拱脚的抗震性能。对大连地铁5号线火梭区间施工及后期运营应加强上述结构部位的监测,采取必要措施提高结构稳定性。但对于含水溶洞对结构的影响需要后续进一步研究。

参考文献:

- [1] 齐勇. 不同位置岩溶洞对大断面隧道施工力学特性影响研究[J]. 北方交通, 2018, 10: 91-94.
Qi Y. Research on mechanics characteristic of construction of large section tunnel in karst area [J]. Northern Communications, 2018, 10: 91-94. (in Chinese)
- [2] 赵明阶, 敖建华, 刘绪华, 等. 岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 213-217.
Zhao M J, Ao J H, Liu X H, et al. Model testing research on influence of karst cave size on stability of surrounding rockmasses during tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213-217. (in Chinese)
- [3] 高诗明. 下伏岩溶地层地铁盾构隧道结构受力特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
Gao S M. Research on force characteristic of subway shield tunnel's structure in underlying karst stratum [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese)
- [4] Wang W, Gao S M, Liu L F, et al. Analysis on the safe distance between shield tunnel through sand stratum and underlying karst cave [J]. Geosystem Engineering, 2019, 22(2): 81-90.
- [5] 李哲, 于丽, 王明年, 等. 岩溶随机分布对围岩等效抗压强度的影响规律研究[J]. 路基工程, 2017, 4: 48-51.
Li Z, Yu L, Wang M N, et al. Study on the influencing law of random distribution of karst on the equivalent compressive strength of surrounding rock [J]. Subgrade Engineering, 2017, 4: 48-51. (in Chinese)
- [6] 潘东东, 李术才, 许振浩, 等. 岩溶隧道承压隐伏溶洞突水模型试验与数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 828-836.
Pan D D, Li S C, Xu Z H, et al. Model tests and numerical analysis for water inrush caused by karst caves filled with confined water in tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 828-836. (in Chinese)
- [7] 罗泽军, 张清照, 何一韬, 等. 大直径盾构隧道双层衬砌管片结构计算[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 79-87.
Luo Z J, Zhang Q Z, He Y T, et al. Calculation of the double-layer lining segment structure of large-diameter shield tunnels [J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(5): 79-87. (in Chinese)
- [8] 何聪. 穿越岩溶区隧道地震响应特性及减震措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
He C. Study on seismic response characteristics and shock absorption measures of tunnels crossing karst area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [9] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [10] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005, 21(3): 1-6.
Zheng Y R, Zhao S Y, Song Y K. Advance of study on the strength reduction finite element method [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 21(3): 1-6. (in Chinese)
- [11] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
Liu J B, Gu Y, Du Y X. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075. (in Chinese)
- [13] Li P, Song E X. Three-dimensional numerical analysis for the longitudinal seismic response of tunnels under an asynchronous wave input [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 229-243.
- [14] Huang J, Du X, Jin L, et al. Impact of incident angles of P waves on the dynamic responses of long lined tunnels [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynam-

ics, 2016, 45(15): 2435-2454.

- [15] Liu J B, Du Y X, Du X L, et al. 3d viscous-spring artificial boundary in time domain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 5(1): 93-102.
- [16] 周晨光. 高土石坝地震波动输入机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Zhou C G. Research on the mechanism of seismic wave input about high rockfill dam [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 梁建文, 于军港, 张季, 等. 基于黏弹性边界的地铁双隧道地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增1): 274-279.
Liang J W, Yu J G, Zhang J, et al. Seismic response

analysis of metro twin tunnels by the viscous-spring boundary[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (Sup 1): 274-279. (in Chinese)

- [18] 宋战平. 隐伏溶洞对隧道围岩-支护结构的稳定性影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
Song Z P. Research on the influence of concealed karst caverns upon the stability of tunnels and its support structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)



(上接第 471 页)

- [15] Xu Y, Han Q H, Liu Y M. Experimental study and numerical simulation of the progressive collapse resistance of single-layer latticed domes [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(9): 1-15.
- [16] 张月强, 丁洁民, 张峥. 大跨度钢结构抗连续倒塌动力分析关键问题研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 49-56.
Zhang Y Q, Ding J M, Zhang Z. Study on key issues of dynamic analysis for anti-progressive collapse of large-span steel structure [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 49-56. (in Chinese)
- [17] Tian L M, Wei J P, Hao J P, et al. Dynamic analysis method for the progressive collapse of long-span spatial grid structures [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 23(4): 435-444.

- [18] Tian L M, Wei J P, Hao J P. Optimisation of long-span single-layer spatial grid structures to resist progressive collapse [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 394-405.
- [19] 田黎敏, 魏建鹏, 郝际平. 大跨度单层空间网格结构连续性倒塌动力效应分析及简化模拟方法研究 [J]. 工程力学, 2018, 35(3): 115-124.
Tian L M, Wei J P, Hao J P. Dynamic effect analysis of progressive collapse and simplified simulation method of large-span single-layer spatial grid structures [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(3): 115-124. (in Chinese)
- [20] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构稳定性 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 102-109.
Shen S Z, Chen X. Stability of latticed domes [M]. Beijing: Science Press, 1999: 102-109. (in Chinese)