

文章编号: 1005-0523(2025)02-0087-08



地热源作用下盾构隧道地震响应研究

张玄¹, 肖颖¹, 梁寿¹, 余嘉轲², 王睿³, 胡黎明³

(1. 中交二公局第三工程有限公司, 陕西 西安 710018; 2. 浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310013; 3. 清华大学土木水利学院, 北京 100084)

摘要: 为探究地热源作用下盾构隧道的抗震安全性能, 以西安地铁10号线工程为背景, 采用有限元数值模拟再现了地热源作用下盾构隧道的地震响应, 并分析了不同地热源与隧道相对位置的影响。研究表明, 地热源会显著放大隧道管片近热源段的应力水平, 同时减小该部分接头的张开量, 对远离热源部分则基本无影响; 热源与隧道的距离会影响隧道管片的应力水平, 但对接头的张开量基本无影响; 地热源作用会显著影响热源附近盾构隧道的接头张开量和应力, 但对加速度、倾斜角等则基本无影响。该研究可为未来类似工况的设计提供参考。

关键词: 岩土工程; 盾构隧道; 地热源; 地震; 数值模拟; 有限元

中图分类号: TU435; [U25]

文献标志码: A

本文引用格式: 张玄, 肖颖, 梁寿, 等. 地热源作用下盾构隧道地震响应研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(2): 87-94.

Study on Seismic Response of Shield Tunnel Under the Action of Geothermal Source

Zhang Xuan¹, Xiao Ying¹, Liang Shou¹, Yu Jiako², Wang Rui³, Hu Liming³

(1. CCCC-SHEB Third Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. Zhejiang Huadong Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310013, China; 3. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To investigate the seismic safety performance of shield tunnels under geothermal source effects, based on Xi'an Metro Line 10 project, finite element numerical simulation was adopted to reproduce the seismic response of shield tunnels under geothermal sources, and the influence of different relative positions between geothermal sources and the tunnel was analyzed. The results show that geothermal sources significantly amplify the stress levels in tunnel segments near the heat source while reducing the joint opening displacements in these areas, with minimal impact on sections far from the heat source. The distance between the heat source and the tunnel affects the stress levels in tunnel segments but has little influence on joint opening displacements. Geothermal sources significantly affect joint opening displacements and stress in shield tunnels near the heat source but have negligible impact on parameters such as acceleration and tilting angles. The research can provide reference for the design of similar working condition in the future.

Key words: geotechnical engineering; shield tunnel; geothermal source; earthquake; numerical simulation; finite

收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52038005, 52022046)

element

Citation format: ZHANG X, XIAO Y, LIANG S, et al. Study on seismic response of shield tunnel under the action of geothermal source[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 87-94.

盾构隧道作为城市轨道交通中的重要结构,一般是由钢筋混凝土管片和接头螺栓连接而成,其抗震安全受到广泛关注^[1]。在实际工程中,盾构隧道在施工期和运营期常遇到多种复杂荷载,如上部荷载、临近结构施工、地热设施等^[2],尤其当这些复杂荷载与地震共同作用时,会对盾构隧道的抗震安全性提出更高的要求。地热设施常见于我国北方城市中,随着西安、沈阳等城市地铁不断兴建,盾构隧道穿越地热设施的情况难以避免。地热设施,如地热管道、地热泵等,通过在隧道周边形成非均匀的温度场,使盾构隧道内部产生附加温度应力,当附加应力较大时可能会降低盾构隧道的抗震性能。因此,研究地热源作用下盾构隧道的地震响应,对保证其抗震安全性能有所助益。

针对盾构隧道的地震响应方面的研究开始较早,国内目前已有大量相关研究,如Zhu等^[3]研究了简化设计方法对可液化与不可液化土层中盾构隧道地震响应的适用性,简化方法对不可液化土中的结构响应计算较为准确,对可液化土中的结构响应计算则误差较大。目前也有一些学者对复杂条件下的盾构隧道地震响应展开了研究,如张贯达^[4]研究了施工中穿越断层破碎带的盾构隧道掌子面的地震响应,发现掌子面位移与地震加速度峰值呈近似线性关系。吴宏等^[5]研究了穿越不同相对密度饱和砂土的盾构隧道三维地震响应,发现在交界处隧道更易发生破坏。这些工作主要聚焦于不同的土体特性对隧道地震响应的影响,而针对热源与地震共同作用下的隧道影响相关工作目前仍较少研究。张稳军等^[6]研究了地震和火灾耦合作用下盾构隧道管片结构损伤和防水性能,发现盾构隧道管片中震下仍有较好的防水性能,大震下防水性能完全丧失。因此,研究热源与地震耦合作用下的隧道响应可以为设计提供参考,具有一定的研究价值。

地热设施常布设于城市主城区地下空间中,在城市地铁线路的建设过程中难免遇到盾构隧道侧穿地热设施的场景。西安地铁10号线1标段工程中,地铁线路侧穿地热泵,热泵与盾构隧道的最小

距离约3 m,出于安全考虑,需要分析热源对盾构隧道地震响应的影响。为此,提出将热源产生的温度荷载纳入到动力时程计算中,采用热-力耦合动力时程分析算法,探究热源产生的非均匀温度场作用下盾构隧道地震响应。

以西安地铁10号线工程为背景,采用ABAQUS有限元计算软件模拟了热源作用下盾构隧道的地震响应,并通过改变热源的方位、距离等,研究了热源与隧道相对位置对隧道结构地震响应的影响,分析了隧道管片的应力水平、接头的张开量、隧道倾斜角等地震响应。本研究为未来类似工况如穿越地热设施的隧道、地下管道、深井等在设计上提供了参考。

1 地热源作用下盾构隧道的地震响应

1.1 数值计算模型

西安地铁10号线1标段项目中,东风路站—未央湖站区间为盾构区间,全长2 066.891 m。该区段盾构侧穿地热泵,热泵与盾构隧道的最小距离约3 m,且该地区设防烈度为8度,设计基本地震动峰值加速度为0.2g。

根据西安地铁10号线工程设计与实际勘察资料,本文在有限元软件ABAQUS中建立了如图1(a)所示的计算模型。土层共分为4层,从地表向下依次为回填土、粉质黏土、中砂、砾砂。各层土均采用了考虑温度效应的摩尔-库伦本构模型,即在摩尔-库伦本构模型的基础上,加入了土体的导热系数、热膨胀系数与比热3个参数,从而实现对土层在地热源作用下温度、变形和应力的模拟。各土层的具体参数见表1,取值由地勘资料结合邻近地区其他地铁项目中的土层参数确定^[7-8]。地震动如图1(b)所示,截取了El Centro波的前20 s进行计算,加速度峰值为0.2g,从土体底部水平输入,土体左右两侧边界为捆绑边界,顶部为自由边界,土体阻尼取为瑞利阻尼。

隧道管片模型如图2所示,由6块标准盾构隧道管片组成。隧道外径为6.2 m,厚0.35 m,相邻管

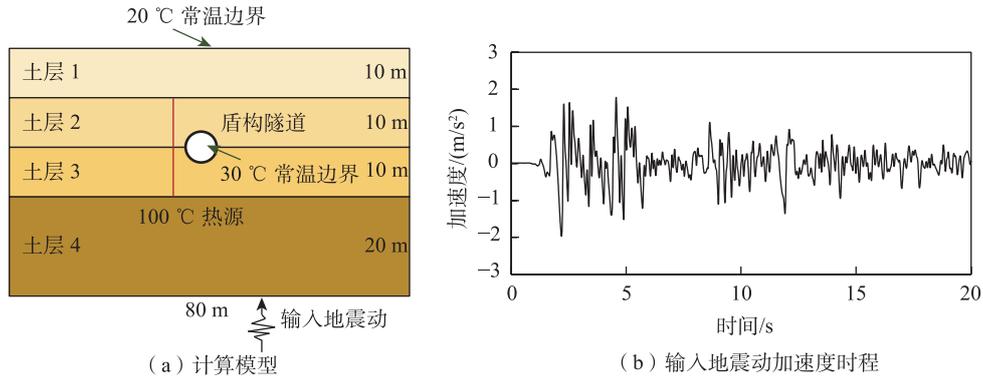


图1 计算模型与地震动时程
Fig. 1 Calculation model and ground shaking timescale

表1 土体参数
Tab.1 Soil parameter

土性/土层 编号	密度/ (g/cm ³)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	导热系数/ [W/(m·K)]	热膨胀系数/ K ⁻¹	比热/ [J/(kg·K)]
1	1.80	18.7	10	19.5	3	5×10 ⁻⁷	840
2	1.66	8.2	14	20.0	3	5×10 ⁻⁷	840
3	1.73	10.4	0	28.0	3	5×10 ⁻⁷	840
4	1.80	15.4	0	30.0	3	5×10 ⁻⁷	840

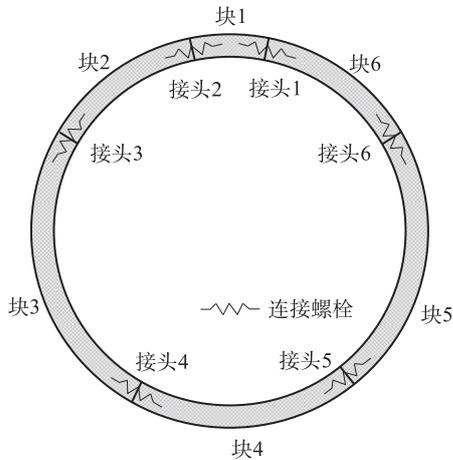


图2 隧道管片几何模型
Fig. 2 Tunnel segment geometric mode

表2 管片参数

参数	值
密度/(g/cm ³)	2.5
首段弹性模量/MPa	35 000
次段弹性模量/MPa	600
屈服强度/MPa	25.3
泊松比	0.167
导热系数/[W/(m·K)]	1.8
热膨胀系数/K ⁻¹	1×10 ⁻⁵
比热/[J/(kg·K)]	970

土体、管片与管片之间热传导无损失。

地热源布置如图1(a)中红色实线所示,位于隧道侧边,与实际工程背景一致。此外,为探究不同地热源与隧道相对位置的影响,还设置了地热源位于隧道顶部、底部,以及不同距离的计算工况,具体计算方案见第2节。模拟中温度边界设置为土体顶部20℃常温边界,隧道内壁30℃常温边界。需要指出的是,由于计算采用了二维平面应变,地热源则选用了线性布置,相较于实际工程会高估地热源的影响,计算结果从设计方面考虑较为保守。

片之间均由螺栓连接。管片采用考虑温度效应的混凝土随动硬化模型,即在随动硬化模型的基础上加入了管片的导热系数、热膨胀系数和比热3个参数,具体参数见表2。螺栓采用ABAQUS中的非线性相互作用方式进行模拟。管片和土体均采用温度-变形耦合的平面应变4节点单元(CPE4T)。

管片与土体的接触设置为切向摩擦系数0.4,法向为硬接触。管片与管片之间切向摩擦系数为0.5,法向同为硬接触。出于简化考虑,设置管片与

计算步骤共有5步:①令未开挖的土层在重力作用下固结,产生初始应力场;②应力平衡后,利用ABAQUS中的生死单元功能进行开挖,并激活隧道

管片单元,重新平衡隧道和土体中的应力场;③令土体顶部和隧道内部的温度边界生效,再次平衡应力场;④施加地热源并升温至目标温度,计算至热传导平衡;⑤施加地震动,记录隧道管片的应力、变形等。

1.2 数值分析结果

图3给出了场地不同埋深处远场与近场土体的加速度时程。从不同埋深的远场和近场土体加速度反应可以看出,在土层2,3,4中,远场和近场的地震加速度响应均显著减小,仅在土层1中发生了放大。同样地,不同埋深处的远场和近场加速度峰值的差异表明了地下结构在一定程度上会减少地震动的强度。

图4给出了有热源和无热源作用下地表土体的加速度时程与盾构隧道倾斜角时程。其中,隧道倾斜角定义为隧道顶底之间最大相对位移与外径之比^[9-10]。从图4中可以看出,隧道倾斜角的峰值出现

于5.49 s,峰值为0.44%,且有无热源情况下,土体加速度与隧道倾斜角的时程曲线高度一致。这表明温度变化对土体的影响较小,有无地热源存在对土体的变形基本无影响,而地下结构的变形受周围土体的约束作用十分明显,因此隧道的倾斜角同样基本不受地热源的影响。

图5展示了有热源和无热源情况下,隧道管片各个方向的最大平均Mises应力水平图和放大倍数图。最大平均Mises应力为地震中该方向所有管片单元Mises应力平均值的最大值,放大倍数为有热源情况下最大平均Mises应力与无热源情况下最大平均Mises应力的比值。从图5中可以看出,在布置热源的一侧,Mises应力显著增加,最大放大倍数可达1.66倍;而在另一侧热源的影响基本消失,有热源和无热源的情况其Mises应力基本相同。

图6给出了有热源和无热源情况下,接头1~接

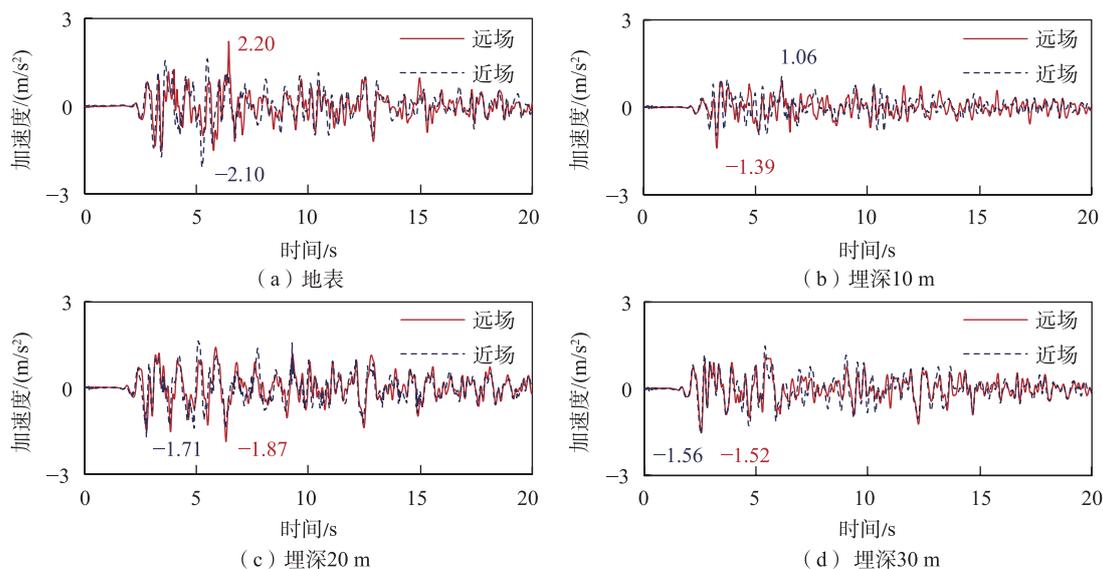


图3 远场与近场土体加速度时程

Fig. 3 Far-field and near-field soil acceleration timescales

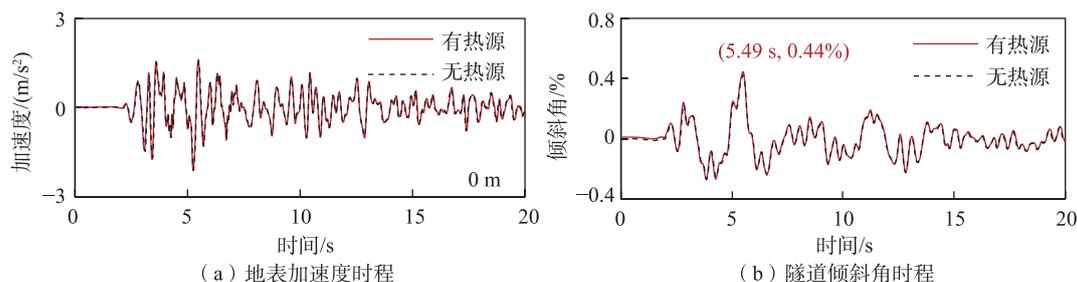


图4 有无热源情况下地表加速度时程与隧道倾斜角时程

Fig. 4 Ground acceleration timescales and tunnel inclined angle with and without heat source

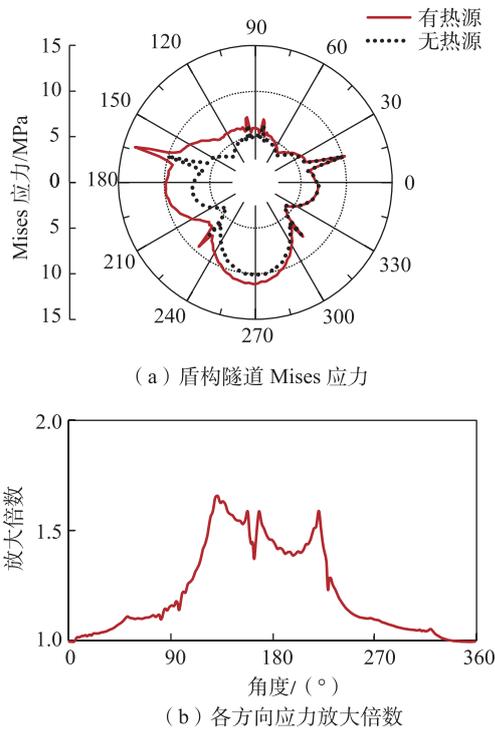


图5 有无热源情况下盾构隧道 Mises 应力与应力放大倍数
 Fig. 5 Mises stress and stress amplification factor in shield tunnel with and without heat source

头6外缘的张开量时程曲线。从图6中可以看出,对于接头2~接头5,有热源情况下接头张开量普遍减小,其中接头3和接头4最为明显,这是由于热源作用下,管片产生热胀,限制了地震中管片的变形,而接头3和接头4距离热源最近,限制最明显^[11-14]。接头6位于热源另一侧,热源基本无影响,其张开量与无热源情况下基本一致。接头1则发生了有热源下张开量增加的情况,这主要是受到了接头2的影响,由于块1较小,接头1与接头2的变形相互影响显著,两者的张开量之和总是接近0。

2 地热源与隧道相对位置的影响

为了研究地热源与隧道相对位置的影响,设计了如表3所示的模拟方案,主要分为两类:①研究不同方位热源作用下隧道的地震响应,为方案1,方案2,方案3;②研究不同距离热源作用下隧道的地震响应,为方案1,方案4,方案5,方案6。其中方案1与1.2节中相同。

2.1 不同热源方位的影响

若热源位于隧道的不同方位,隧道周边的温度场会有显著区别,隧道的地震响应也会有所区别。

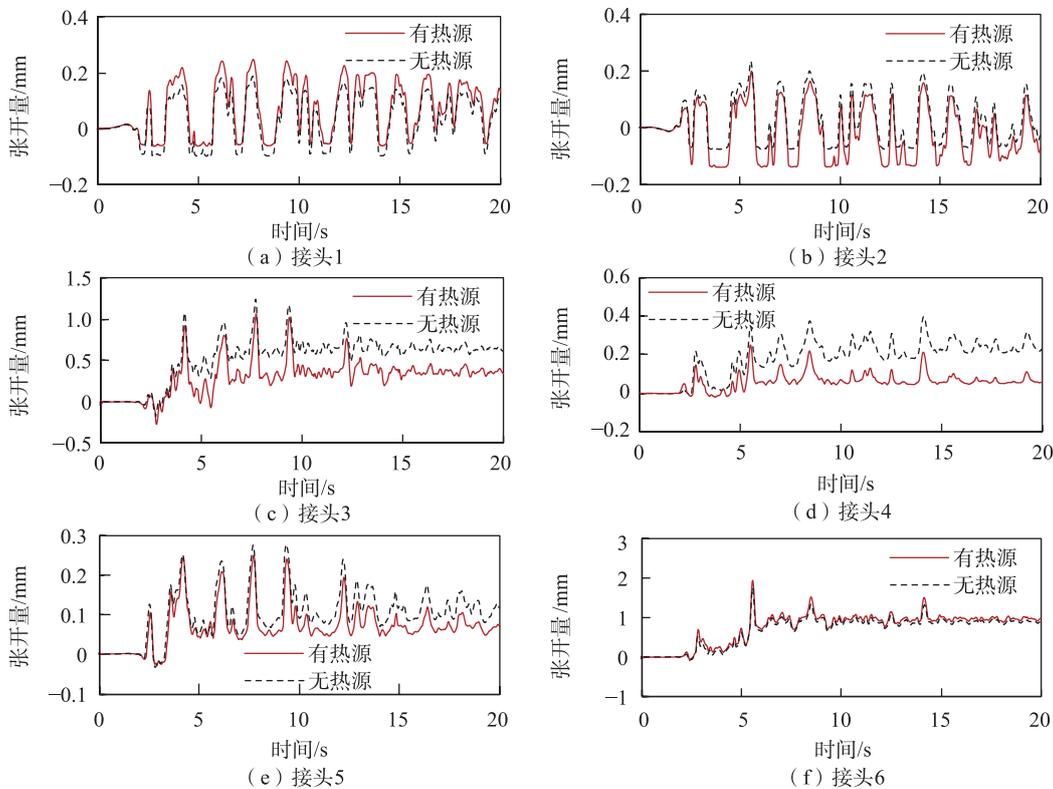


图6 有无热源情况下隧道接头外缘张开量时程
 Fig. 6 Spread timescales of joint outer edge with and without heat source

表3 计算方案
Tab.3 Computational scheme

方案	热源方位	热远距离/m
1	左侧	1.0
2	上侧	1.0
3	下侧	1.0
4	左侧	0.1
5	左侧	2.0
6	左侧	3.0

图7给出了热源位于不同方位时隧道各方向的最大平均应力和放大倍数,其中放大倍数为与无热源情况下 Mises 应力的比值。从图7中可以发现热源附近的放大倍数最大,热源对侧的 Mises 应力基本无变化。当热源在上方时放大倍数最大,为 1.82;当热源在下方时放大倍数最小,为 1.51,但同时需要注意到热源在上方时的最大 Mises 应力值要小于热源在侧方和下方的最大 Mises 应力值。

图8给出了不同方位热源情况下管片接头2外缘的张开量时程曲线。当热源在上方和下方时,接头张开量响应规律与热源在左侧时基本一致,表现为靠近

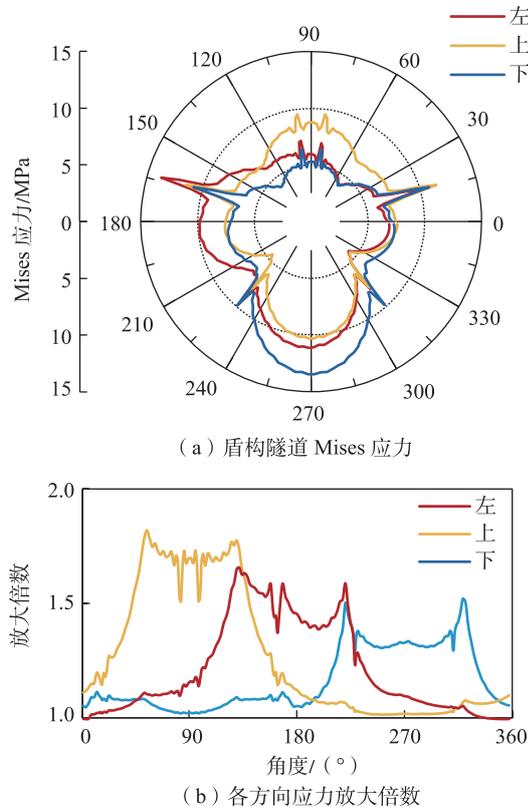


图7 不同热源方位下盾构隧道 Mises 应力与放大倍数
Fig. 7 Mises stress and stress amplification factor in shield tunnel at different heat source orientations

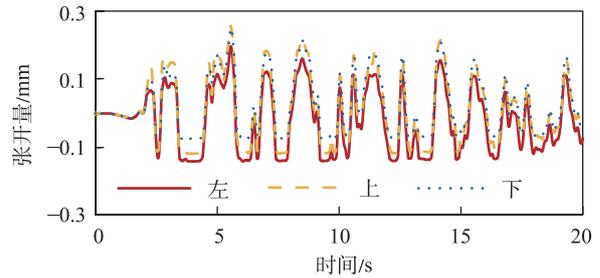


图8 不同热源方位下接头2张开量
Fig. 8 Spread of Joint 2 for different heat source orientations

热源处的张开量显著减小,远离热源处的张开量与无热源情况基本一致。以接头2为例进行分析,热源在下方的情况中接头与热源相隔较远,此时张开量与无热源的情况类似;热源在上方和侧方的情况中接头与热源较接近,此时张开量显著减小。

2.2 不同热源距离的影响

热源距离对隧道的地震响应存在影响,当热源足够远时,隧道的地震响应与无热源的情况一致。图9给出了热源在左侧不同距离时各方向的最大平

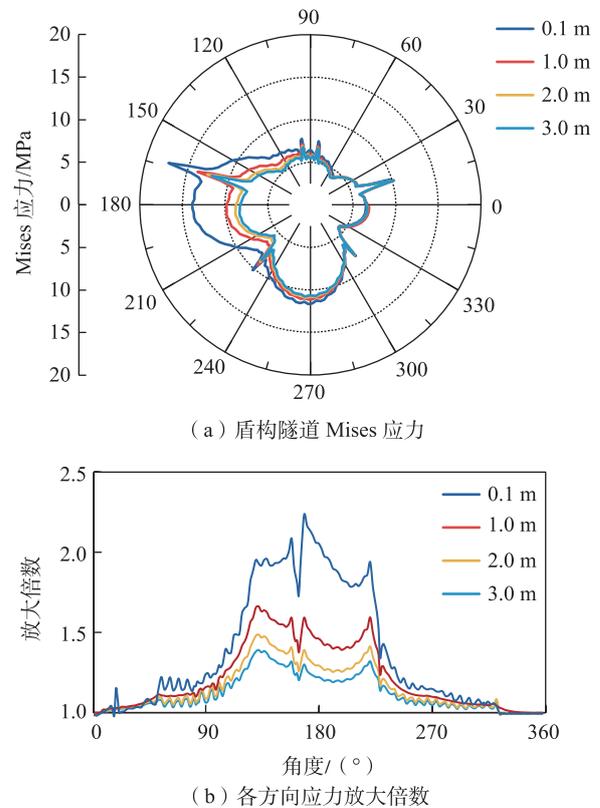


图9 不同热源距离下盾构隧道 Mises 应力与放大倍数
Fig. 9 Mises stress and stress amplification factor in shield tunnel at different heat source distances

均Mises应力图与放大倍数,其中放大倍数为与无热源情况下Mises应力的比值。从图9中可以看出,距离增加热源的影响减小,当距离为2 m与3 m时,两者的Mises应力接近,可以判断当热源距离大于2 m时,热源的影响趋于稳定。距离为0.1 m时,放大倍数最大为2.24,而实际工程的距离一般大于0.1 m,因此该值可作为设计中的保守估计。

图10给出了距离为0.1 m和1 m情况下接头2外缘的张开量时程曲线,可以发现两者十分接近,表明热源距离对接头的张开量影响较小。其余接头以及距离为2 m和3 m的情况与此类似,因此这里不再赘述。

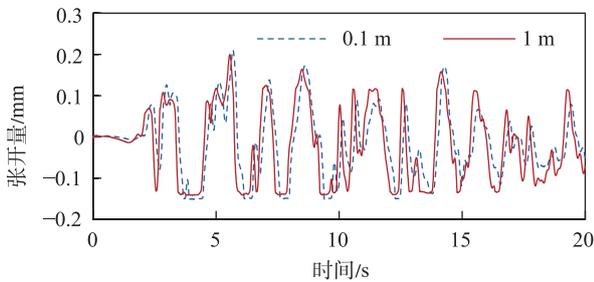


图10 不同热源距离下接头2张开量
Fig. 10 Spread of Joint 2 at different heat source distances

3 结论

以西安地铁10号线工程为背景,采用了ABAQUS有限元数值模拟的方法,研究了地热源作用下盾构隧道地震响应,并分析了不同方位与热源距离的影响,得到以下结论。

1) 地热源作用下,土体的加速度与无地热源时基本一致,表明土体变形基本不受地热源影响。隧道的变形也与无地热源时基本一致,基本不受地热源影响。

2) 地热源作用下,靠近热源处隧道管片的Mises应力显著增加,接头张开量减小;远离热源处隧道管片的Mises应力与无热源时相近,接头张开量也相近。

3) 热源位于不同方位时,管片的Mises应力与接头张开量变化规律基本一致。随着热源距离增加,管片的Mises应力减小,但接头张开量基本不变。

参考文献:

[1] 何川,耿萍. 盾构隧道实用抗震计算方法研究[J]. 中国

公路学报, 2020, 33(12): 15-25.

HE C, GENG P. Research on practical seismic analysis methods of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 15-25.

[2] 魏井申,柴天建,郭文杰,等. 基于能量法的地表堆载引起邻近隧道沉降研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 28-34.

WEI J S, CHAI T J, GUO W J, et al. Study on settlement of adjacent tunnel caused by surface surcharge based on energy method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 28-34.

[3] ZHU T, WANG R, ZHANG J M. Evaluation of various seismic response analysis methods for underground structures in saturated sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103803.

[4] 张贯达. 地震作用下海底盾构隧道穿越断层破碎带掌子面失稳机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.

ZHANG G D. Research on instability mechanism of excavation face in undersea shield tunnel crossing fault fracture zone under earthquake[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[5] 吴宏,叶治,张宇亭,等. 穿越不同密实度饱和砂土地层的盾构隧道地震响应三维数值分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1204-1216.

WU H, YE Z, ZHANG Y T, et al. Numerical study on seismic behavior of shield tunnel crossing saturated sandy strata with different densities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1204-1216.

[6] 张稳军,来涛涛,张高乐. 震后火灾作用下大断面盾构隧道复合管片结构损伤及防水性能分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 69-74.

ZHANG W J, LAI T T, ZHANG G L. Structural damage and waterproof performance analysis of composite segment in large section shield tunnels under post-earthquake fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 69-74.

[7] 田新宇. 黄土地区富水砂层盾构下穿高铁环境微扰动施工技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.

TIAN X Y. Study on the micro disturbance construction technology of high-speed railway environment under the shield of water rich sand layer in loess area[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

[8] 李照祥. 考虑地裂缝影响的西安地铁隧道衬砌结构受力分析及评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.

- LI Z X. Study on stress analysis and evaluation of crack lining structure of Xi'an metro crossing ground[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [9] YAO Y Z, ZHANG S G, SHI L, et al. Effects of shaft inclination angle on the capacity of smoke exhaust under tunnel fire[J]. *Indoor and Built Environment*, 2019, 28 (1): 77-87.
- [10] WANG T, TANG Y H, WANG Z, et al. Flame spread over cables in a utility tunnel: effect of longitudinal wind and inclination angle[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104848.
- [11] LI P F, FENG W, GAO X J, et al. Mechanical properties of segment joints in subway shield tunnels by a full-scale test[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2024, 18:1845-1864.
- [12] KONG C, GAO X Q, WANG F, et al. Analysis of mechanical properties and joint selection for secondary linings in drill and blast tunnels with prefabricated invert arch: case study of a single-line railway tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 144: 105560.
- [13] FAN X, YANG Z J, LI K H. Effects of the lining structure on mechanical and fracturing behaviors of four-arc shaped tunnels in a jointed rock mass under uniaxial compression[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 112: 102887.
- [14] LI K, ZHANG Z Z, GUO H Y, et al. Prediction method of pipe joint opening-closing deformation of immersed tunnel based on singular spectrum analysis and SSA-SVR[J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 135: 103526.



第一作者:张玄(1986—),男,本科,高级工程师,研究方向为轨道交通和施工建设管理。E-mail:1586827@qq.com。



通信作者:余嘉轲(1996—),男,博士,研究方向为土动力学和土工抗震工程。E-mail:yu_jiakuo@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)