

明挖隧道主体结构受温度梯度的影响分析

刘 亮

(东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为研究温度梯度对明挖隧道主体结构的影响规律, 以及如何加强结构的温度效应抗力、阻止和控制温度引起既有结构的开裂。以明挖隧道为研究对象, 分别建立敞开段、暗埋段三维计算模型, 针对不同温度梯度工况, 计算分析了明挖隧道主体结构内力受温度作用的影响。研究表明, 温度梯度作用产生的附加内力较大, 且对结构各部位的影响程度不同; 相同梯度温度作用下, 不同隧道断面产生的附加内力差异较大, 暗埋段较敞开段的温度效应更为显著, 在工程中应给予重视。

关键词: 明挖隧道; 温度梯度; 数值模拟; 结构内力

中图分类号: TU99

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0399-04

Analysis on Influence of Temperature Gradient on Main Structure of Excavated Tunnel

LIU Liang

(Southeast University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210096, China)

Abstract: To study the impact of temperature gradients on the main structure of excavated tunnels, and how to enhance the temperature effect resistance of the structure, prevent and control the cracking of the existing structure caused by temperature, taking an excavated tunnel as the research object, the three-dimensional calculation models are established for the open and buried sections, respectively. For the different temperature gradient conditions, the internal forces of the main structure of excavated tunnels affected by temperature are calculated and analyzed. The research results indicate that the additional internal forces generated by temperature gradients are relatively large, and the impacts on different parts of the structure vary. Under the same temperature gradient, the additional internal forces generated by different tunnel sections vary greatly. The temperature effect in the buried section is more pronounced than that in the open section, which should be given attention in engineering.

Keywords: excavated tunnel; temperature gradient; numerical simulation; structural internal forces

0 引 言

随着经济的发展, 城市规模的扩大, 交通拥堵问题日益严重^[1-6]。城市土地资源的紧张以及对城市景观的要求越来越高, 隧道成为城市道路快速化改造工程建设的主要方面^[7-12]。

长隧的洞口段及短隧的内侧温度接近于环境温度, 外侧受土体温变缓慢的影响, 使得隧道内外侧存在温差情况^[13-15]。尤其在温度急剧变化的天气, 结构温度梯度较大的问题更为突出^[16-18]。目前, 工程中对明挖隧道主体结构内力受温度梯度作用影响的认识尚且不足, 往往忽视了温度梯度对结构的影响。

文献[19-26]仅对大体积混凝土早期内外温差及温度变化效应进行了分析, 尚未考虑建成后温度对结构的影响。文献[27]局限于通过改善隧道结构约束条件实现对温度应力及其引起的裂缝控制, 未从增强结构抗力角度解决温度裂缝的问题。文献[28]研究表明隧道在施工及运营阶段, 均存在内外温差, 但有关温度梯度对隧道结构内力影响的研究尚且不足。为全面反映温度梯度对隧道结构内力的影响, 本文分别建立隧道敞开段、暗埋段主体结构的三维有限元计算模型, 为明挖城市隧道主体结构设计提供科学依据。

1 温度梯度基本方程

1.1 一维稳态温度场方程

由于隧道截面沿纵向(行车方向)无变化, 故在

收稿日期: 2024-12-20

作者简介: 刘亮(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地下工程设计与抗震等方面研究工作。

分析隧道温度场时假定截面温度分布沿纵向不变,简化为平面热传导一维稳态温度场问题进行分析。在板的厚度 z 方向热传导方程为^[30]:

$$\frac{d}{dz}\left[k(z)\frac{dT}{dz}\right]=0 \tag{1}$$

式中: $k=k(z)$ 为热传导系数。
由积分式(1)可得温度场的表达式为:

$$T(z)=\xi_1\int_{-h/2}^z\frac{d\eta}{k(\eta)}+\xi_2 \tag{2}$$

式中:积分常数 ξ_1 和 ξ_2 可由板上下表面的热条件确定。考虑 Dirichlet 热条件,即在板 $z=\pm h/2$ 处有确定的温度 T_1 和 T_2 :

$$T|_{z=-h/2}=T_1,\quad T|_{z=h/2}=T_2 \tag{3}$$

通过式(2)、式(3)可得到:

$$\xi_1=(T_2-T_1)/\int_{-h/2}^{h/2}\frac{d\eta}{k(\eta)},\quad \xi_2=T_1 \tag{4}$$

最终可确定由于热传导产生的温度场 $T(z)$ 的表达式。

1.2 温度梯度产生的等效弯矩方程

对板单元,温度梯度可用板上下面的温度差和板厚表示。温度梯度产生的等效弯矩如下:

$$M=\frac{\alpha Et^3\Delta T}{6(1-\nu)} \tag{5}$$

式中: α 为线性热膨胀系数; E 为弹性模量; I 为绕梁单元相应中和轴的惯性矩; ΔT 为单元两边缘(最外面)间的温度差; h 为单元截面两边缘间的距离; t 为板厚; ν 为泊松比。

2 计算实例

2.1 计算模型

以昆山某明挖隧道为例,隧道全长 630 m,其中暗埋段长 185 m,敞开段长 445 m。暗埋段为单箱两室箱型结构,敞开段采用 U 形结构形式,取隧道洞口暗埋段及敞开段各一幅计算。暗埋段单孔净宽 13.75 m,净高 6.3 m,侧墙、底板、顶板厚均为 1 m,中墙厚 0.8 m,横向、纵向均设置 4 排工程桩,顶板平均覆土厚度为 1 m。敞开段侧墙高度 6.7~7.8 m,净宽 28.3 m,侧墙、底板厚均为 1 m,横向设置 5 排工程桩,纵向设置 7 排工程桩。混凝土强度等级均为 C40。

顶板、底板及侧墙采用板单元模拟,工程桩采用节点弹簧模拟。土的平均重度按 19 kN/m³ 计算,静止土压力系数加权平均值取 0.6。底板位于③₁淤泥质粉质黏土层,侧墙从上至下主要位于①₄路基填

土、①填土、③_A粉土夹淤泥质粉质黏土、③₁淤泥质粉质黏土。边界条件采用仅受压节点弹性支承,底板基床系数为 5 000 kN/m³,侧墙水平基床系数加权平均值取 8 000 kN/m³。运用有限元软件 MIDAS GEN 建立三维的隧道计算模型,如图 1 所示。

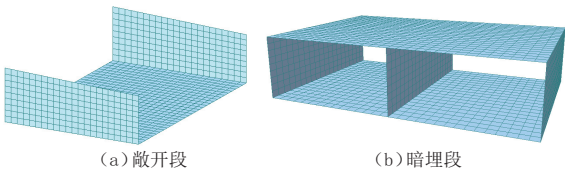


图 1 隧道有限元模型

2.2 有限元分析

文献[29]隧道位于珠海市,终年气温较高、年日温差小,暗埋段现场实测最大温度梯度为 5℃,测点位于暗埋段的中部,监测时间为 11 月—12 月份。本工程隧道位于昆山市,年最高气温为 39.2℃,极端最低气温-9.8℃,年日温差较大。鉴于隧道洞口及敞开段受温度影响更大,以及受一年四季环境温度的影响,故本文温度梯度取值为 10℃。本文取 3 种工况计算,为便于比较温度梯度对隧道主体结构的影响,见表 1。

表 1 工况汇总表

序号	工况	
1	工况一	永久荷载+可变荷载
2	工况二	永久荷载+可变荷载+温度梯度(T1)作用
3	工况三	永久荷载+可变荷载+温度梯度(T2)作用

注:T1=内侧(背土侧)温度-外侧(迎土侧)温度=10℃,T2=内侧温度-外侧温度=-10℃。

2.2.1 敞开段计算分析

隧道主体结构配筋主要受裂缝控制,因此本文给出 3 种工况下,敞开段底板及侧墙准永久组合的弯矩值,见表 2 及图 2。

表 2 敞开段准永久组合的弯矩值

序号	位置	工况一	工况二		工况三	
		弯矩/ (kN·m)	弯矩/ (kN·m)	增减 幅度/%	弯矩/ (kN·m)	增减 幅度/%
1	底板端	1 537	1 832	19.2	1 474	-4.1
2	底板跨中	430	187	-56.5	693	61.2
3	侧墙下端	1 498	17 93	19.7	1 435	-4.2

注:增减幅度=(工况二或工况三)-工况一/工况一

在工况二中,由于内侧温度大于外侧温度,在温度梯度 T1 的作用下,侧墙向隧道外侧变形,见图 3(a)。结构变形受到土体约束,底板端及侧墙下端弯矩增幅较大。在工况三中,内侧温度小于外侧温度,受温度作用影响,侧墙向隧道内侧变形,见图 3(b)。土体约束为仅受压,无法限制结构向内侧温度变形,

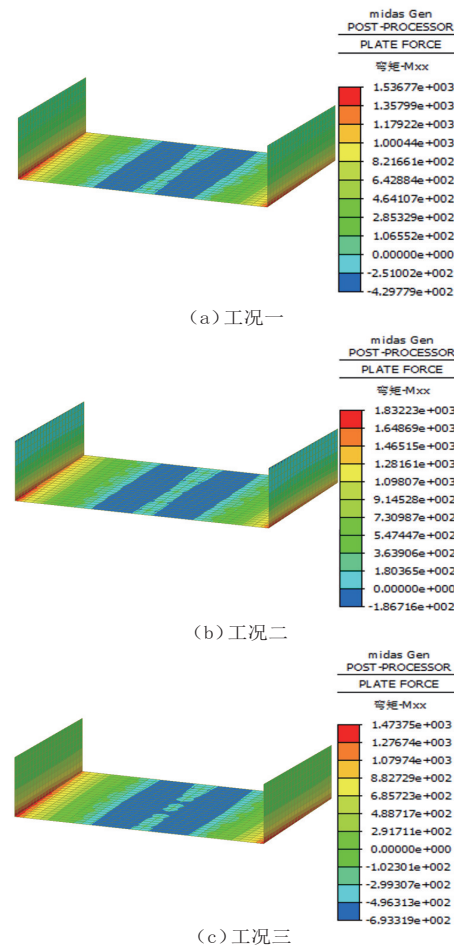


图2 敞开段弯矩云图

即侧墙近悬臂结构,故外高内低的温度作用对底板端及侧墙下端弯矩影响较小。受侧墙及土体约束,在后两种工况中,底板跨中弯矩变化幅度均在50%以上。其中外高内低的温度作用时,底板跨中弯矩增大,反之,底板跨中弯矩减小。表明底板跨中受温度作用影响较大。

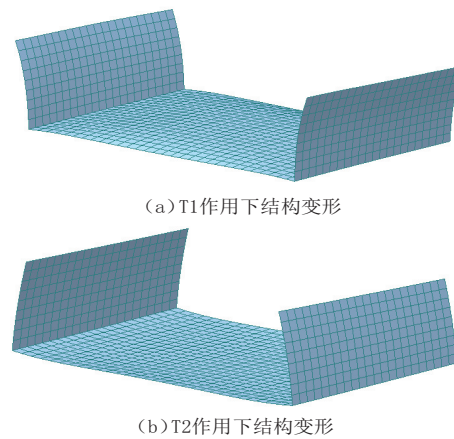


图3 敞开段在温度梯度作用下结构变形图

2.2.2 暗埋段计算分析

在3种工况下,暗埋段主体结构准永久组合的弯矩值,见表3及图4。

表3 暗埋段准永久组合的弯矩值						
序号	位置	工况一	工况二		工况三	
		弯矩/ (kN·m)	弯矩/ (kN·m)	增减 幅度/%	弯矩/ (kN·m)	增减 幅度/%
1	顶板端	686	1019	48.5	366	-46.6
2	顶板跨中	799	535	-33.0	1 061	32.8
3	顶板中间 支座	1 588	1926	21.3	1278	-19.5
4	底板端	911	1 256	37.9	588	-35.5
5	底板跨中	876	612	-30.1	1 130	29.0
6	底板中间 支座	1 645	1 984	20.6	1 345	-18.2
7	侧墙上端	696	1 034	48.6	371	-46.7
8	侧墙下端	922	1 272	38.0	595	-35.5

注:增减幅度=(工况二或工况三)-工况一/工况一

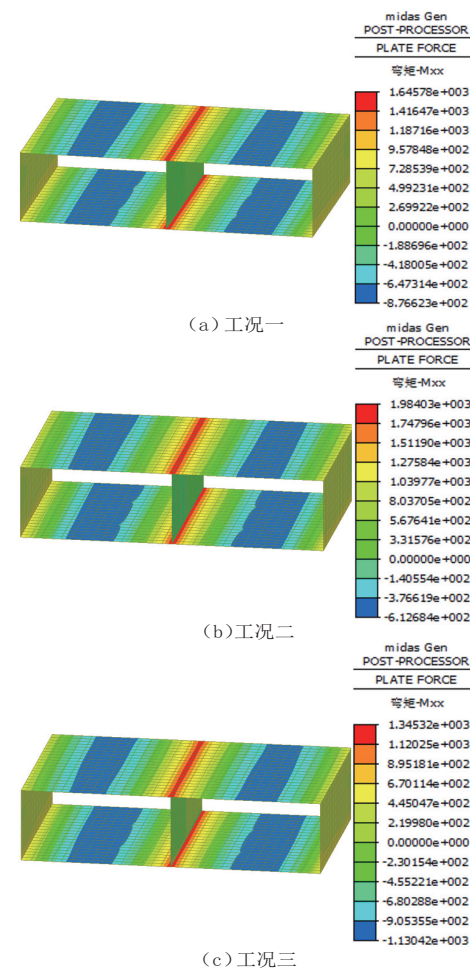


图4 暗埋段弯矩云图

隧道暗埋段采用单箱两室箱型的结构形式,为超静定结构,其高温侧膨胀受限出现压应力,低温侧收缩受限出现拉应力。工况一无温度作用,墙、板端部外侧受拉,板跨中内侧受拉。叠加温度梯度引起的附加内力后,温度作用 T_1 使得顶板、底板跨中弯矩减小,其余部位均出现较大增幅;温度作用 T_2 引起顶板、底板跨中弯矩增大,其余部位均出现较大降幅。

3 结 语

(1)当内侧温度高于外侧时,敞开段侧墙及底板端弯矩增幅较大,但当内侧温度低于外侧时,对侧墙及底板端的影响较小。此外,通过对比分析,隧道敞开段底板跨中受温度梯度影响较大。因此,在隧道结构设计时,敞开段受温度梯度的影响不容忽视。

(2)对于隧道暗埋段,后两种工况结构各部位弯矩的变化幅度均在18.2%~48.6%范围。表明温度梯度对本工程隧道暗埋段内力影响较大,在类似工程中,应加强其温度效应抗力。

(3)在同等温度梯度作用下,敞开段底板端及侧墙下端的弯矩增幅仅为4%左右,暗埋段弯矩各部位增幅在18%~46%。与隧道敞开段相比,暗埋段结构的温度作用效应更加显著,故要综合考虑温度梯度作用对不同隧道断面形式结构的影响。

参考文献:

- [1] 贾若,戴昇宏,黄霓,等.交通拥堵判别方法研究综述[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(4):124-139.
- [2] 陈玉婷,晏启鹏,毛剑楠,等.基于SIS传播理论的城市交通拥堵传播模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(6):103-110.
- [3] 廖苑伶,李喆,刘福平.呼和浩特市中心城区交通拥堵改善对策研究[J].城市道桥与防洪,2024(2):23-25.
- [4] 邵长桥,郑加菊.基于运行效率的交通拥堵度量和评价方法[J].北京工业大学学报,2022,48(4):401-407.
- [5] 梁军,彭嘉恒.考虑路网拓扑时变的交通拥堵自适应预测方法研究[J].中国公路学报,2022,35(9):157-170.
- [6] 丁涛,姜爱明,颜韬.城市交通拥堵组合治理政策仿真研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(3):402-409.
- [7] 田源,王明年,郭晓晗,等.城市隧道合建结构整体抗火安全性研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(8):2065-2074.
- [8] 孙铁轩,代明明,尧俊凯,等.明挖隧道回填压实过程中填土与衬砌的位移响应[J].铁道建筑,2023,63(5):115-119.
- [9] 陈慧,董磊.下穿隧道与涵洞合建节点处理[J].现代交通技术,2017,14(1):55-57.
- [10] 蒋华春,黄伟.既有地铁隧道上方新建明挖隧道施工控制方案研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(5):1231-1239.
- [11] 于程硕,丁文其,张清照.既有城市隧道衬砌结构的损伤评价计算方法探究[J].现代隧道技术,2018,55(5):11-18.
- [12] 胡文杰,徐洪钟.城市隧道基坑地下连续墙变形特性研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2018,37(4):97-103.
- [13] 唐波涛,王兴,王伟,等.季冻区高速公路隧道保温层铺设方法及温度场分布规律研究[J].公路交通科技,2023,40(5):152-161.
- [14] 张毅峰,刘琛尧,李国良,等.基于解析解的高地温圆形隧道温度场分布研究[J].武汉大学学报(工学版),2024,57(7):925-932.
- [15] 刘杰,朱小明,李晓民.寒区特长隧道斜井对隧道内温度影响实测研究[J].铁道工程学报,2024,41(1):67-75.
- [16] 姬繁,施劭鑫.深大基坑支护结构力学行为的温度效应分析[J].地下空间与工程学报,2024,20(1):298-309.
- [17] 王家赫,黄法礼,李化建,等.铁路隧道衬砌混凝土温度裂缝原因分析与防治措施[J].铁道建筑,2020,60(9):73-77.
- [18] 马林建,刘新宇,邱旭光,等.地下超长结构环境温度效应数值模拟分析[J].建筑结构,2011,41(7):111-114.
- [19] 周世康,康梦安,叶派平.隧道锚锚塞体大体积混凝土温度场监测与数值分析[J].施工技术,2017,46(20):130-134.
- [20] 余志鹏,张海松,于方,等.分层浇筑明挖隧道梯度混凝土墙体裂缝控制研究与应用[J].建筑结构,2022,52(增刊2):2706-2711.
- [21] 姚潇南,张孟喜,刘冰.穿湖隧道超大尺度混凝土施工期的温度效应[J].上海大学学报(自然科学版),2024,30(2):308-317.
- [22] 范中晶,郑晨路.基于深度学习的隧道混凝土温度滚动预测方法研究[J].隧道建设,2023,43(4):611-617.
- [23] 闫腾飞,包汉营,吕国鹏,等.混凝土内外温差置换养护系统及其数值应用[J].建筑结构,2023,53(1):1616-1620.
- [24] 李仁强,牌立芳,吴红刚,等.异形大体积混凝土水化热研究及仿真分析[J].科学技术与工程,2021,21(24):1671-1815.
- [25] 程井,左世杰,邹科辉.泵闸混凝土施工期智能温控关键信息识别[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):162-168.
- [26] 张烈霞.大体积混凝土筏板基础温度场的精确控制[J].科学技术与工程,2024,24(16):6862-6869.
- [27] 王海锋.基于约束条件的隧道衬砌混凝土温度裂缝研究[D].西安:长安大学,2022.
- [28] 丁云飞,高焱,包旭,等.草木沟隧道温度场实测与分析[J].科学技术与工程,2022,22(12):5051-5059.
- [29] 刘浩.内外温差对明挖隧道主体结构内力的影响研究[J].铁道标准设计,2016,60(6):65-70.
- [30] 陈鼎.温度荷载作用下功能梯度板的热响应研究[D].杭州:浙江理工大学,2019.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

