

陈得良,朱梓铭,陈昌萍. 基于 ANSYS 的地铁车站大体积混凝土侧墙裂纹机理分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1):24-30. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.004

CHEN D L, ZHU Z M, CHEN C P. Research on Crack and Temperature Stress of Mass Concrete Side Wall of Subway Station Based on ANSYS [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(1):24-30. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.01.004

# 基于 ANSYS 的地铁车站大体积混凝土 侧墙裂纹机理分析

陈得良<sup>1\*</sup>, 朱梓铭<sup>1</sup>, 陈昌萍<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410076;2.厦门理工学院 土木工程与建筑学院,福建 厦门 361000)

**摘要:**针对地铁车站大体积混凝土侧墙施工过程中出现的裂纹问题,借助有限元软件,对大体积混凝土侧墙进行了温度应力分析,并探讨了裂纹成因与规律.在考虑新老混凝土界面层热膨胀率变化的基础上,利用弹簧单元模拟了混凝土侧墙边界上的约束作用,并通过选取不同的边界约束强度和温度荷载等参数,对混凝土侧墙温度应力进行了参数化分析.研究结果表明:侧墙的温度应力分布规律能较好地反映厦门地铁站侧墙的裂纹分布规律和成因,侧墙端部的裂缝与温度作用下侧墙端部较大的剪应力或第一主应力有关,侧墙中部的垂直裂缝与温度作用下侧墙中部较大的 $X$ 方向正拉应力有关.适当增强侧墙与地连墙的约束强度,同时减弱侧墙与底部基础间的约束作用,对控制侧墙底部裂缝的发展较为有利.侧墙与地连墙间后浇筑混凝土产生的水化热减缓了侧墙的降温收缩,能适当降低侧墙底部的拉应力.

**关键词:**大体积混凝土;新老混凝土界面;侧墙;有限元;温度应力;裂纹

中图分类号:TU375.401

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2022)01-0024-07

## Research on Crack and Temperature Stress of Mass Concrete Side Wall of Subway Station Based on ANSYS

CHEN Deliang<sup>1</sup>, ZHU Ziming<sup>1</sup>, CHEN Changping<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** Aiming at cracks in the construction of mass concrete side walls of the subway station, the thermal stress analysis of the mass concrete side wall of subway station is carried out with finite element software, and the causes and laws of the cracks are discussed. On the basis of considering the change of thermal expansion rate between new and old concrete interfacial layers, the restraint effect on the boundary of concrete side wall is simulated with spring element, and the temperature stress of concrete side wall is parameterized and analysed by selecting different parameters, such as boundary restraint strength and temperature load. Results show that the temperature stress distribution law of the side wall can well reflect the crack distribution law and cause of the side wall of Xiamen metro station. The cracks at the end of the side wall are related to the larger shear stress or the first principal stress at the end of the side wall under the action of temperature. The vertical crack in the middle

收稿日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778551)

\*通信作者,E-mail: deliang\_chen@126.com

of the side wall is related to the larger  $X$ -direction normal tensile stress in the middle of the side wall under the action of temperature. It is beneficial to control the development of cracks at the bottom of the side wall by appropriately enhancing the restraint strength of the side wall and the diaphragm wall and weakening the restraint between the side wall and the bottom foundation. The hydration heat generated by pouring concrete between the side wall and the ground connecting wall slows down the cooling shrinkage of the side wall and can appropriately reduce the tensile stress at the bottom of the side wall.

**Keywords:** mass concrete; new and old concrete interface; side wall; FEM; temperature stress; crack

地铁车站等大体积混凝土结构由于比表面积较小,水化热散失较慢,混凝土在早期升温迅速且容易形成较大的内外温差.又由于结构受到约束,大体积混凝土结构会产生较大的温度应力并产生开裂.有众多学者对混凝土结构的温度应力进行过研究.文献[1]对大体积混凝土承台温度进行了有限元分析,得到了与实测温度-时间曲线规律和温度分布规律较为一致的仿真结果,认为根据混凝土温度梯度及时采取合理的养护措施能有效避免出现有害裂缝;文献[2]通过参数化的建模分析,探究了粉煤灰掺量、浇筑温度、养护条件等因素对大体积混凝土里表温度及表面拉应力的影响,提出适当增加粉煤灰掺量可以降低表面拉应力,降低浇筑温度并提升环境温度有助于防裂;文献[3]对地下车库 C40 大体积混凝土温度应力和应变进行了试验研究,认为在混凝土中掺入密实剂能显著降低混凝土表面应力;文献[4]将混凝土结构中的应力与完全约束下的应力之比来表示约束程度,提出了一种根据约束程度预测混凝土结构温度应力的方法;文献[5]基于 ABAQUS 开发了模拟混凝土温度及应变的有限元计算程序,并基于试验结果,提出了在数值模拟中能更好反映早期混凝土应变变化规律的混凝土热膨胀系数变化模型.

基于工程实际,综合考虑了地铁混凝土侧墙的温度变化、约束条件和裂缝发展情况,对温度场进行了监测和数值模拟,监测结果验证了温度场模拟的正确性,在之后应力场分析中,考虑了早龄期混凝土热膨胀系数的非线性变化,并结合侧墙裂纹的分布特点以及工程施工情况,对大体积混凝土侧墙的温度应力进行了分析.

## 1 模型建立

### 1.1 混凝土侧墙模型

以厦门某地铁车站为工程背景,车站某分段混凝土侧墙长 20 m,高 5 m,厚 0.9 m,混凝土等级为 C45,侧墙内外两侧布置钢筋,钢筋的混凝土保护层厚度为 50 mm,地铁车站侧墙结构如图 1 所示.结构上部为新浇筑混凝土侧墙,侧墙两端沿地铁纵向无混凝土约束,侧墙外侧为地连墙,后期将在侧墙与地连墙间筑混凝土,侧墙底部为混凝土底梁,底梁有较高的刚度,相应的侧墙有限元模型如图 2 所示.

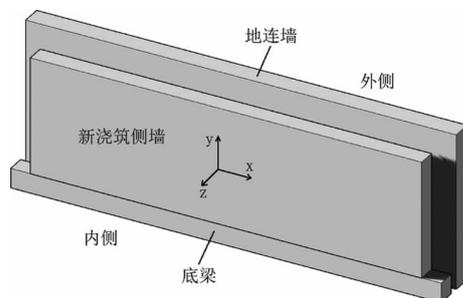


图 1 侧墙结构

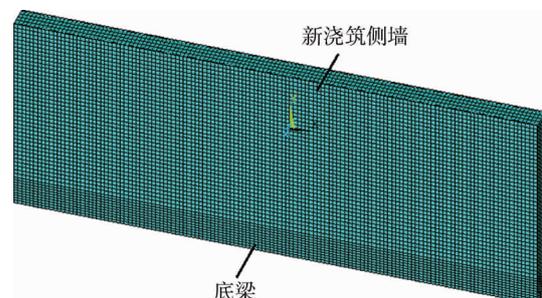


图 2 混凝土侧墙有限元模型

在进行温度场有限元分析时,将侧墙单元底部节点与底梁单元顶部节点温度耦合;应力场模型中,为分析不同边界约束强度对侧墙应力的影响,约束底梁单元节点位移,用弹簧单元 COMBIN14 连接侧墙单元底部节点和底梁单元顶部节点(即界面层节点).通过弹簧单元的形变来模拟混凝土侧墙边界上的约束效应和黏结滑移<sup>[6]</sup>.钢筋与混凝土的黏结滑移作用同样通过弹簧单元 COMBIN14 连接各材料单元节点的方式来模拟.弹簧单元的连接方式见图 3.在温度场分析中,钢筋采用 LINK33 杆单元,混凝土为 SOLID70

实体单元,将钢筋和混凝土单元的节点温度进行耦合.为进行应力分析,将温度场模型中 SOLID70 实体单元和 LINK33 杆单元转变为 SOLID65 实体单元和 LINK180 杆单元.

新老混凝土界面的弹簧单元 COMBIN14 的刚度系数  $K$  与混凝土界面剪切模量相关,相关抗剪强度计算方法可参考文献[7].考虑到新老混凝土界面凿毛施工、水泥砂浆浇筑和养护条件等因素引起的黏结强度变化,新老混凝土界面的弹簧单元刚度系数  $K$  在  $10^7 \sim 10^8$  取值.

模拟钢筋混凝土黏结滑移的弹簧单元 COMBIN14 的刚度系数  $K$  与混凝土弹性模量  $E$ 、混凝土泊松比  $\mu$ 、钢筋与混凝土黏结接触面积  $A$ 、构造钢筋横截面周长  $C$ 、钢筋混凝土黏结接触区域钢筋长度  $L$  有关.

$$K = \frac{GA}{2L} = \frac{GLC}{2L} = \frac{GC}{2}. \quad (1)$$

式中: $K$  为弹簧单元刚度系数; $G$  为混凝土剪切模量; $C$  为构造钢筋横截面周长; $A$  为钢筋与混凝土黏结接触面积; $L$  为钢筋混凝土黏结接触区域钢筋长度.用混凝土弹性模量  $E$  替换剪切模量  $G$ ,即  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ,有

$$K = \frac{EC}{4(1+\mu)}. \quad (2)$$

## 1.2 新老混凝土界面层的变形

新浇筑的侧墙与底梁间存在新老混凝土界面,如何考虑混凝土界面处的约束作用是模拟中的难点与重点.由于混凝土界面层剪切模量和热膨胀率的差异,在混凝土升温阶段,混凝土界面层会产生较大的变形;而在降温阶段,随着混凝土强度的提升,混凝土界面层的变形与升温阶段相比较小.一般认为<sup>[8-10]</sup>,早龄期混凝土热膨胀系数在初凝前后数值较大,在终凝后热膨胀系数迅速减小.因此新老混凝土界面层,即水平接缝处通常有明显的凸出或不平整.将混凝土界面层的变形考虑到有限元模型中,如图4所示.

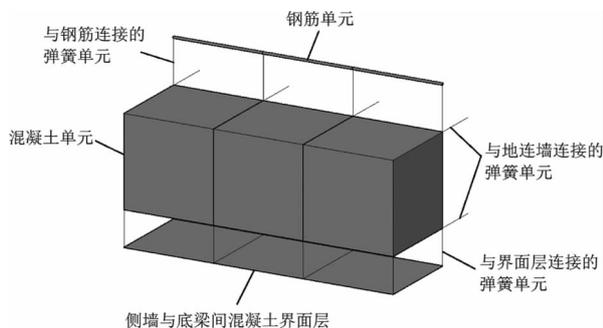


图3 弹簧单元连接方式

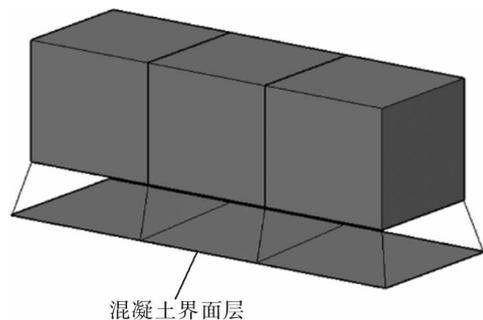


图4 界面层发生变形

材料温度应变的表达式为

$$\varepsilon_T = \alpha_T \Delta T. \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_T$  为温度应变; $\alpha_T$  为热膨胀率; $\Delta T$  为温度变化值.

为了在有限元软件中模拟材料热膨胀率变化引起的温度应变,可通过改变  $\Delta T$ ,等效模拟材料热膨胀率  $\alpha_T$  的变化.在不考虑外约束时,同样的温度荷载,对参考温度的适当调整只引起结构整体体积的微小变化,对结构内应力的影响可忽略.提取温度场模拟结果中新老混凝土界面上的温度时程曲线,将降温阶段的温度曲线调整为平缓曲线,再将其作为温度荷载输入应力场模型中,以模拟混凝土界面层变形产生的应力变化.

## 2 温度场模拟

为了监控厦门地铁侧墙在混凝土浇筑后一段时间内的温度变化情况,在侧墙中心埋设温度传感器并进行温度监测.通过温度监测,发现混凝土升温普遍在浇筑后第30h左右达到峰值,最高温度约为57℃,其温度变化曲线见图5的现场实测温度曲线.

同时为了分析地铁侧墙温度应力,首先对地铁侧墙进行温度场分析.温度场模型中,新老混凝土间的热传导系数默认为混凝土间的热传导系数,并且区分了拆模前后侧墙表面与空气的对流散热系数.温度场数值分析中各材料参数取值如表 1 所示.

表 1 温度场模拟材料参数

序号	名称	数值	单位
1	混凝土热传导系数	8.595	$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
2	混凝土比热	0.963	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
3	钢筋热传导系数	239.76	$\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
4	钢筋比热	0.465	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
5	拆模前对流散热系数	65	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$
6	拆模后对流散热系数	72	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$

文献[11-12]给出了混凝土绝热温升的数值模拟和试验研究结果,有限元分析中混凝土生热率采用式(4)的指数型函数:

$$T(\tau) = T_0(1 - e^{-m\tau}). \quad (4)$$

式中: $T_0$ 为最终水化热; $\tau$ 为混凝土龄期; $m$ 为由试验数据拟合确定的材料常数.

文献[13]提出生热率函数的常数  $m$  的合理选择区间为 0.7~1.1,本文  $m$  取值为 1.0.基于以上数据模拟得到的侧墙中心温度变化曲线与现场实测温度曲线对比见图 5.

图 5 中通过 ANSYS 模拟得到的混凝土温度时程曲线与现场实测得到的温度时程曲线基本吻合,表明混凝土温度场材料参数选取和生热率函数选取都比较合理.

图 6 给出了侧墙横截面的温度场云图,图 6 中最高温出现的位置接近侧墙中部中心,而最低温出现在底梁以及侧墙各棱边处.侧墙中心温度分布较为均匀,温度变化梯度小,而侧墙边缘由于与空气有对流散热,温度变化梯度较大.

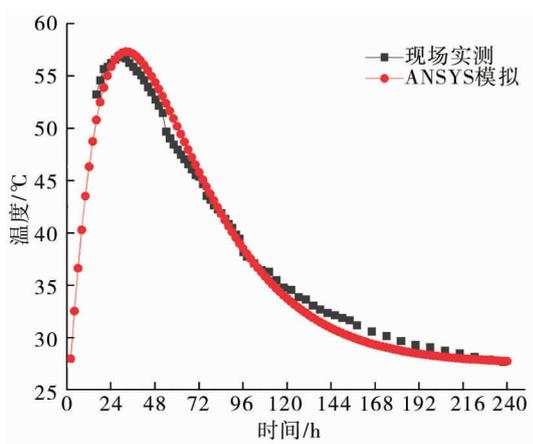


图 5 侧墙中心温度时程曲线

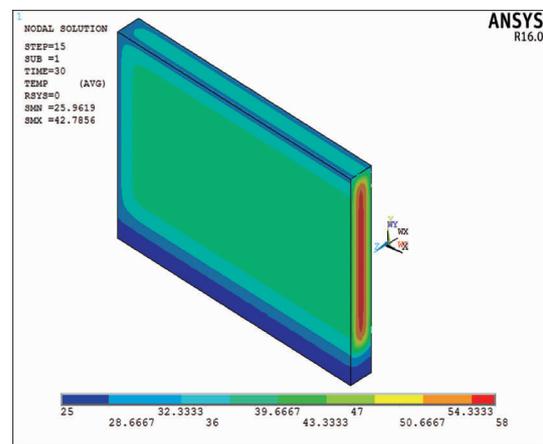


图 6 第 30 h 侧墙横截面温度场

混凝土侧墙温度场模拟完毕,将温度场全部分析结果进行保存,在之后的应力分析中可随时调用相关温度数据.

### 3 基于不同混凝土边界约束强度的温度应力场模拟

#### 3.1 侧墙裂纹监测

混凝土侧墙在拆模后表面出现了数条裂缝,少量裂缝有渗漏情况,如图 7 所示.裂缝分布规律为通常出现在侧墙与底梁的新老混凝土交界面,侧墙底部两端出现了向外侧发展的  $45^\circ$  角斜裂缝,左侧斜裂缝长约 0.5 m,右侧斜裂缝长约 0.8 m,中部则出现了 4 条竖直裂缝,裂缝长度从 0.3~0.5 m 不等,其内侧面裂纹位置如图 8 所示.



图7 侧墙照片

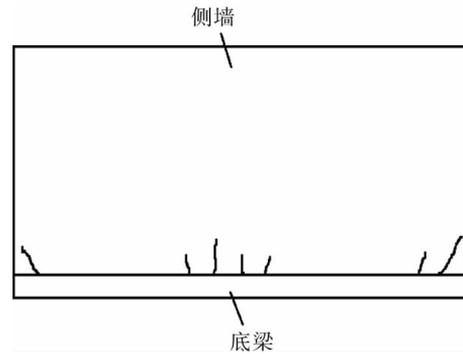


图8 混凝土侧墙的裂纹分布

### 3.2 混凝土侧墙温度应力场模拟

早龄期混凝土侧墙的温度应力不仅与混凝土的温度和强度有关,还与侧墙边界约束强度有关.侧墙边界约束包括侧墙与底梁、侧墙与地连墙2种约束,其中底梁对侧墙的约束作用还应考虑新老混凝土界面层变形引起的约束变化.在实际施工中,侧墙在浇筑后第50 h完成了拆模,在侧墙浇筑后第160 h左右,完成了侧墙和地连墙之间混凝土的浇筑.

对于第160 h在侧墙与地连墙间浇筑混凝土的考虑,一方面,随着该后浇部分混凝土强度的增长,它必然对侧墙形成一定的约束,但其难以对已形成较高强度且表面光滑的侧墙外侧面产生较大的切向约束力;另一方面,当浇筑完侧墙与地连墙之间的混凝土后,该部分的混凝土由于水化热必然产生相应的温升,此时的温升也必然对侧墙的后续温度应力产生影响.有限元分析时,侧墙与地连墙间混凝土的水化热使侧墙外侧在第160 h~第190 h温度逐渐升至40℃,之后至第240 h温度逐步降至32℃.

由于地铁施工现场施工条件的差异,每段侧墙与底梁、侧墙与地连墙之间的约束强度不会完全相同.为此模型中侧墙与底梁间弹簧刚度 $K$ 值分别取 $5 \times 10^7$ ,  $1 \times 10^8$ ,  $2 \times 10^8$  N/m,侧墙与地连墙间弹簧刚度 $K$ 值分别取 $0$ ,  $1 \times 10^7$ ,  $2 \times 10^7$  N/m.

图9和图10分别给出了侧墙在第60 h和第150 h的剪应力云图,底梁弹簧 $K$ 值取 $5 \times 10^7$  N/m,地连墙弹簧 $K$ 值取 $0$  N/m.

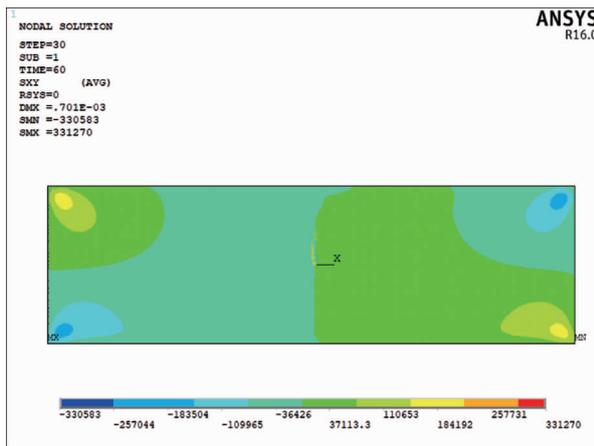


图9 第60 h侧墙剪应力云图

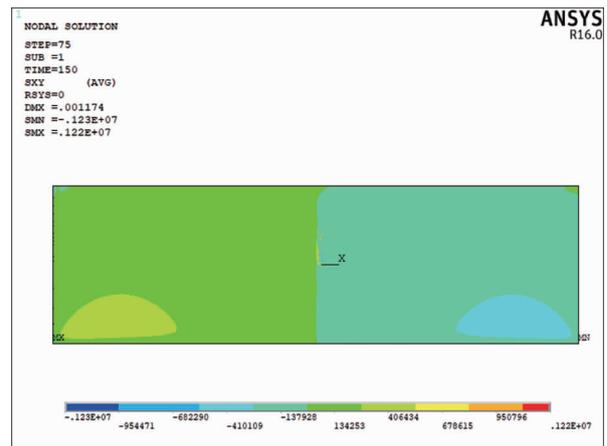


图10 第150 h侧墙剪应力云图

图9表明,混凝土浇筑后第60 h,侧墙升温,底梁限制了侧墙的膨胀变形,底部剪应力方向指向侧墙中心,最大剪应力为0.33 MPa;图10表明,混凝土浇筑后第150 h,随着侧墙温度下降,底梁限制了侧墙的收缩变形,侧墙端部剪应力方向相反,最大剪应力为1.23 MPa.将图8中裂纹分布情况与图10中剪应力分布情况进行对照可知,剪应力较大的区域与侧墙底部两端斜裂缝产生区域相重合.通过进一步查看该区域混凝土单元应力分布情况,可知侧墙底部斜裂缝的产生与侧墙底部较大的剪应力有关.

为了进一步分析地下连续墙对侧墙的约束作用,选取不同的弹簧刚度 $K$ 值,分析侧墙与地连墙间不

同约束强度对侧墙端部拉应力的影响.将侧墙与底梁间的弹簧刚度设定为  $4 \times 10^8$  N/m,侧墙与地下连续墙的弹簧刚度从  $0.25 \times 10^8$  取至  $2.0 \times 10^8$  N/m,共分为 6 组.得到侧墙端部最大第一主应力曲线如图 11 所示.

图 11 表明,当侧墙底部约束强度较大,侧墙端部最大第一主应力在拆模前后有明显的突变.取图 11 各个曲线 50 h 之后最大第一主应力的平均值进行统计,得到规律如图 12 所示.

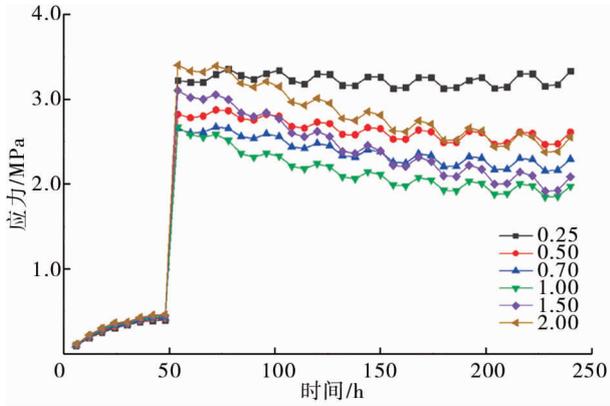


图 11 侧墙端部最大第一主应力曲线

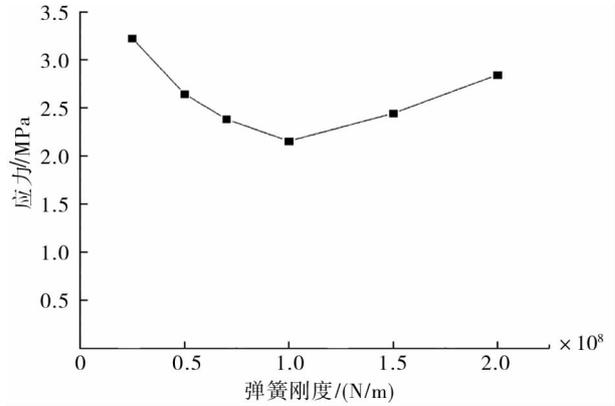


图 12 弹簧刚度对侧墙最大第一主应力的影响

图 12 中两端高、中间低的曲线表明,侧墙最大第一主应力的最小值出现在弹簧单元刚度系数  $K$  值等于  $1.0 \times 10^8$  N/m 时,弹簧单元刚度系数  $K$  值过大或者过小都会使侧墙最大第一主应力明显增加.

为了分析侧墙中部裂缝处的应力状况,图 13 和图 14 给出了侧墙与底梁界面、侧墙与地连墙界面在不同约束强度时,侧墙中部裂缝处沿厚度方向的“底部中心”和“底部边缘”位置的  $X$  方向正应力时间历程图,同时图 13 和图 14 还展示了侧墙与地连墙之间浇筑混凝土发生温度变化时的应力变化情况.

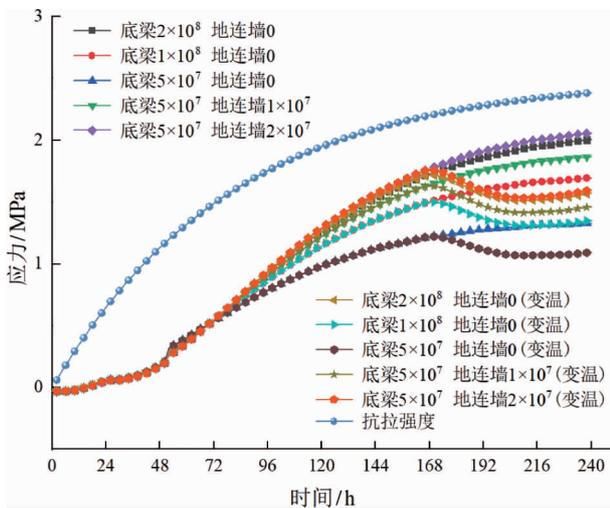


图 13 侧墙底部中心  $X$  方向正应力曲线

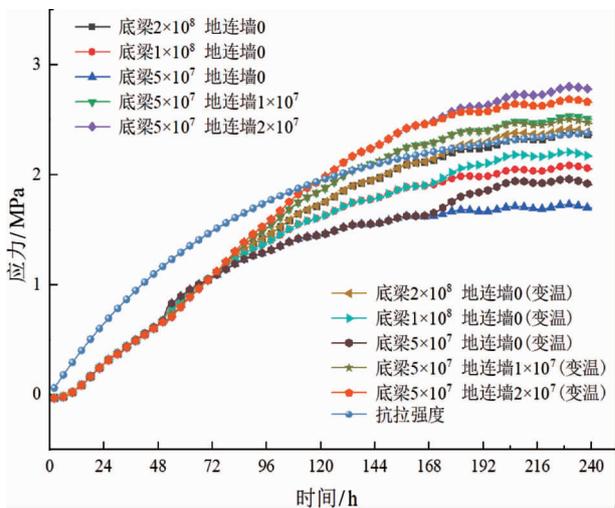


图 14 侧墙底部边缘  $X$  方向正应力曲线

图 13 和图 14 表明,混凝土侧墙在拆模时出现了  $X$  方向正应力突然小幅增加的情况,而增加侧墙与地连墙的约束强度可以防止侧墙在拆模时出现较大的应力突变,在侧墙与地连墙之间弹簧刚度为  $1 \times 10^7$  N/m 和  $2 \times 10^7$  N/m 时,侧墙底部  $X$  方向正应力曲线更加平滑.

在拆除模板后,侧墙底部的应力随着时间逐步增长,在不考虑第 160 h 浇筑混凝土引起的温度变化时,在浇筑 216 h 后,应力曲线逐渐平缓.在约束强度增大时,应力曲线峰值也明显增加.

在考虑第 160 h 浇筑混凝土引起的温度变化时,侧墙“底部中心” $X$  方向正应力出现明显的下降,而侧墙“底部边缘” $X$  方向正应力出现了小幅的增长,但没有改变侧墙“底部边缘”应力曲线与抗拉强度曲线的大小关系.由此可见侧墙与地连墙之间新浇筑混凝土引起的温度变化有助于控制侧墙的温度应力.

通过比较图 13 和图 14 中不同弹簧刚度条件下应力曲线的最大值以及应力曲线和抗拉强度曲线之间的关系,发现侧墙“底部边缘”拉应力明显大于“底部中心”拉应力,在底梁弹簧刚度大于等于  $1 \times 10^8$  N/m

时,以及底梁弹簧刚度为  $5 \times 10^7$  N/m,地连墙弹簧刚度大于等于  $1 \times 10^7$  N/m 时,“底部边缘”拉应力超过混凝土抗拉强度.

## 4 结论

1)侧墙温度应力分析成果较好地解释了厦门地铁站侧墙裂纹的成因和分布规律.侧墙底部边缘表面处拉应力较大,底部两端的  $45^\circ$ 角斜裂缝与侧墙端部较大的剪应力或第一主应力有关,而侧墙中部的竖直裂缝与侧墙中部  $X$  方向正拉应力有关.

2)适当减小侧墙与底梁间的边界约束强度,使侧墙与底梁、侧墙与地连墙之间的约束强度保持在一个合理的范围,才能使侧墙在变形时受力更加均匀,从而降低侧墙端部的拉应力和开裂风险.

3)在混凝土降温收缩阶段,侧墙与地连墙间新浇筑混凝土引起的温度变化有效降低了侧墙底部拉应力,减缓了侧墙的降温收缩,对控制裂缝的产生和发展较为有利.

## 参考文献:

- [1] 雷元新,符耀东,陈景辉.大体积混凝土温度有限元分析及温度梯度限值研究[J].施工技术,2018(8):97-101.
- [2] 孙增智,田俊壮,石强,等.承台大体积混凝土里表温差梯度与温差应力有限元模拟[J].交通运输工程学报,2016,16(2):18-26.
- [3] 杜帆,杜红秀.大面积混凝土温度应力试验研究[J].混凝土,2016(12):130-133.
- [4] Cha S L, Lee Y, An G H, et al. Prediction of thermal stress in concrete structures with various restraints using thermal stress device[J]. Computers & Concrete, 2016, 17(2): 173-188.
- [5] 崔激,冀天竹,吴甲一.热膨胀系数对早期混凝土性状影响试验[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(3):355-361.
- [6] 刘俊卿,朱超,刘超,等.基于三维弹簧联结模型的装配式叠合梁受力性能数值模拟研究[J].混凝土,2018(1):138-143.
- [7] 毛德均,钱永久.新老混凝土界面抗剪强度计算方法[J].建筑结构,2016,46(15):65-68.
- [8] 陈波,丁建彤,蔡跃波,等.基于温度-应力试验的混凝土早龄期应变分离及热膨胀系数计算[J].水利学报,2016,47(4):560-565.
- [9] 张涛.早龄期混凝土热膨胀系数研究[J].建筑技术,2016,47(1):51-55.
- [10] Yeon J H, Choi S, Won M C. In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38: 306-315.
- [11] 王国杰,郑建岚.水泥基材料绝热温升曲线特征及速率表达式[J].建筑材料学报,2014,17(5):875-881.
- [12] 王立成,吴迪,鲍玖文,等.早龄期混凝土温度场分布的细观数值仿真分析[J].水利学报,2017,48(9):1015-1021.
- [13] 李少波,陈昌萍,刘永森,等.基于 ANSYS 的地铁车站钢筋混凝土侧墙温度应力仿真分析[J].施工技术,2018,47(21):20-23.