

# 隧道大体积混凝土温度场及温度应力的有限元分析\*

韩文娟 万连建

(江海职业技术学院,江苏 扬州 225000)

**摘要:**隧道工程由于混凝土浇筑量大,施工中常常出现内部水化热不易散出、里表温差过大等现象,该温差引起的温度应力超出混凝土的极限抗拉强度,则产生温度裂缝。为了实现施工中的裂缝控制,文章运用Midas Gen有限元软件建立某隧道工程的三维模型,模拟计算出浇筑完成至240h该隧道各点的温度场及温度应力。结果表明:结构内部最高温度出现在中心区域,在浇筑完成12h时上升达到最高55.7℃;结构表面最高应力则表现出先升高后下降的趋势,最高应力出现在浇筑完成48h,数值达到442107N/m<sup>2</sup>。根据模拟计算结果,提出该隧道施工防裂措施和建议,为同类工程施工提供借鉴。

**关键词:**大体积混凝土;温度场;温度应力;有限元分析

**中图分类号:** TU755

**DOI:** 10.3969/j.issn.1672-9846.2019.04.017

**文章编号:** 1672-9846(2019)04-0085-10

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



目前,大体积混凝土广泛应用于土木工程的各个领域。实践表明,大体积混凝土在施工期间,由于早期水泥的水化热反应释放大量的热量,而该热量不能及时散出,进而导致混凝土内部出现较高的温升,形成过高的温度梯度,混凝土在降温收缩过程中受到边界约束,产生较大的温度应力,一旦该应力超出混凝土龄期的极限抗拉强度,往往导致温度裂缝的出现。

对于隧道工程,由于混凝土浇筑量大,隧道最小几何尺寸常常超出1m,达到大体积混凝土标准<sup>[1]</sup>,混凝土在形成强度的过程中产生的里表温差及温度应力导致混凝土开裂。隧道工程中的裂缝不但造成钢筋锈蚀,影响美观,更是对结构的耐久性和抗渗性提出了较高的考验。长期以来,国内外许多学者致力于大体积混凝土的裂缝防控。早在二十世纪九十年代,Emborg<sup>[2]</sup>等提出水泥水化反应放出的大量热量使得混凝土早期开裂的理论,进一步指出针对早期裂缝的控制原则以及应

对早期裂缝的措施。Rahimi<sup>[3]</sup>等对大体积碾压混凝土坝展开温度场及温度应力的研究,在充分考虑徐变的前提下提出了新型温度控制数值计算方法,在工程中应用较好。朱伯芳<sup>[4-5]</sup>院士是国内最早开始大体积混凝土温度应力研究的学者,形成了关于水化热及温度应力的计算方法理论。徐俊<sup>[6]</sup>等学者研究在同等条件下采用堆石混凝土技术,大体积混凝土内部产生的水化热更少,温度更低,对裂缝的控制更加有效。谷坤鹏<sup>[7]</sup>等学者在研究浇筑珠港澳大桥东人工岛现浇暗埋段隧道大体积混凝土时,通过工程调研、解析法理论计算及有限元仿真分析等手段对温度裂缝展开研究,提出了控制并解决隧道侧墙和底板温度裂缝的关键技术。雷元新<sup>[8]</sup>等学者运用ANSYS有限元软件对大体积混凝土承台温度场进行分析,揭示了混凝土内部温度分布规律,探讨了温度梯度对混凝土裂缝的影响,归纳了温度梯度的预警值。

虽然对于大体积混凝土温度场及温度应力的

\* 收稿日期:2019-09-11

**作者简介:**韩文娟(1980-),女,江苏盐城人,江海职业技术学院土木工程学院讲师,主要从事建筑结构、结构施工技术研究。

万连建(1978-),男,江苏兴化人,江海职业技术学院土木工程学院院长,副教授,主要从事施工技术、混凝土研究。

研究很多,然而一直以来,深入了解混凝土内部温度较为常见的是采用经验公式计算,该方法未考虑混凝土内部温度变化的连续性,通过公式分开计算构件的内外约束力,难以准确完整反映混凝土浇筑体实际温度场及温度应力情况。为解决这一问题,本文以某隧道大体积混凝土工程为例,运用 Midas Gen 有限元软件建立该隧道三维模型,数值模拟计算出浇筑体完成施工至 240h 时隧道各点的温度及应力,根据模拟结果,有针对性地提出裂缝防治措施,为同类工程施工提供借鉴。

## 1 有限元法基本理论及 MIDAS 分析软件

有限元法是将连续体离散化的一种数值计算方法<sup>[9-11]</sup>,在高速计算机飞速发展的今天,广泛应用于工程技术的许多领域。有限元法分析问题首先将待求连续体分散为有限个连接于节点的基本单元,接着选择位移插值函数,处理三维问题时经常使用的位移插值函数为:

$$\delta = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) \delta_i \quad (1)$$

式中,  $\delta_i (i=1, 2, 3, \dots, 8)$  为结点位移值,  $N_i(\xi, \eta, \zeta)$  为相应的形函数,可选择为:

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_i) (1 + \eta \eta_i) (1 + \zeta \zeta_i) \quad (2)$$

式中,  $(\xi_i, \eta_i, \zeta_i)$  为终点局部坐标值。

局部坐标  $(\xi, \eta, \zeta)$  到整体坐标  $(x, y, z)$  的变换采用同样的形函数,即:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} \quad (3)$$

分析单元的力学特性,形成单元平衡方程。有限元法对于各向同性材料的本构方程常常表示为:

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (4)$$

单元结点应变与位移的关系式表达为:

$$\{\epsilon^e\} = [B] \{\delta^e\} \quad (5)$$

式中,  $\{\epsilon\}$  为单元内任意一点的应变矩阵,  $[B]$  为单元应变矩阵。

将(5)代入(4)得到:

$$\{\sigma\} = [D][B] \{\delta^e\} \quad (6)$$

式中,  $\{\sigma\}$  为单元内任意一点的应力阵列,  $[D]$  为与单元材料有关的弹性矩阵。

经过推导,得到单元的平衡方程:

$$[K] \{\delta\}^e = \{P\}^e \quad (7)$$

集合单元的平衡方程,建立系统的平衡方程:

$$[K] \{\delta\} = \{P\} \quad (8)$$

式中,  $[K]$  为整体刚度矩阵,  $\{\delta\}$  为连续体的结点位移阵列,  $\{P\}$  为荷载阵列。

引入边界约束条件后,根据方程(8)即可求得各单元结点处的位移值,根据方程(6)可求得单元内任意一点处的应力。

有限元分析软件 Midas<sup>[12-13]</sup>,用于建筑领域包括 Midas Gen、Midas Building 和 Midas FEA 三个部分。本文采用的 Gen 软件具有人性化的操作界面,见图 1,提供了模型建立、施工模拟、水化热分析、弹塑性分析等一系列全过程的设计。Midas 利用能量守恒原理的热平衡方程对大体积混凝土进行水化热分析,通过有限元方法计算出各节点的温度及应力,有助于探究混凝土内部温度场及应力场的变化,控制温度裂缝的形成。

## 2 有限元分析结果与讨论

### 2.1 工程概况

某新建隧道工程位于主城区,施工条件复杂。该工程起始桩号 K0+870,终止桩号 K2+630,全长 1760m。主体结构混凝土强度等级 C40,底部垫层混凝土强度 C20,采用分段施工,每段浇筑长度 30m,分三次浇筑,第一次浇筑底板,第二次浇筑侧墙,最后浇筑顶板。该隧道工程顶板及侧墙最厚处达 1.2m,底板最厚处达到 1.4m,根据《大体积混凝土施工规范》(编号:GB 50496-2018),该工程达到大体积混凝土标准。本文选取 K1+370~K1+820 段,底板、顶板及侧墙有最大厚度的 11-11 横截面处作为有限元分析对象,该横截面具体尺寸见图 2。

### 2.2 隧道大体积混凝土有限元分析结果与讨论

#### 2.2.1 K1+370~K1+820 段隧道结构模型的建立

选择侧墙、底板及顶板存在最大厚度的隧道 K1+370~K1+820 段作为有限元温度场和温度应力分析的对象。建模参数上部混凝土比热 0.25,热传导率 2.3,底部垫层比热 0.2,热传导率 1.7;对流系数取 13kcal/m<sup>2</sup>\*hr\*[C];对流边界设置为与空气接触的各面;热源设置为上部混凝土,最大绝热温升 41℃,导温系数取 759W/(m·K);施工阶段定义为一次浇筑完成,入模温度为 5℃,时间设为 240h。考虑隧道横断面的对称性,使用 1/2 模型做

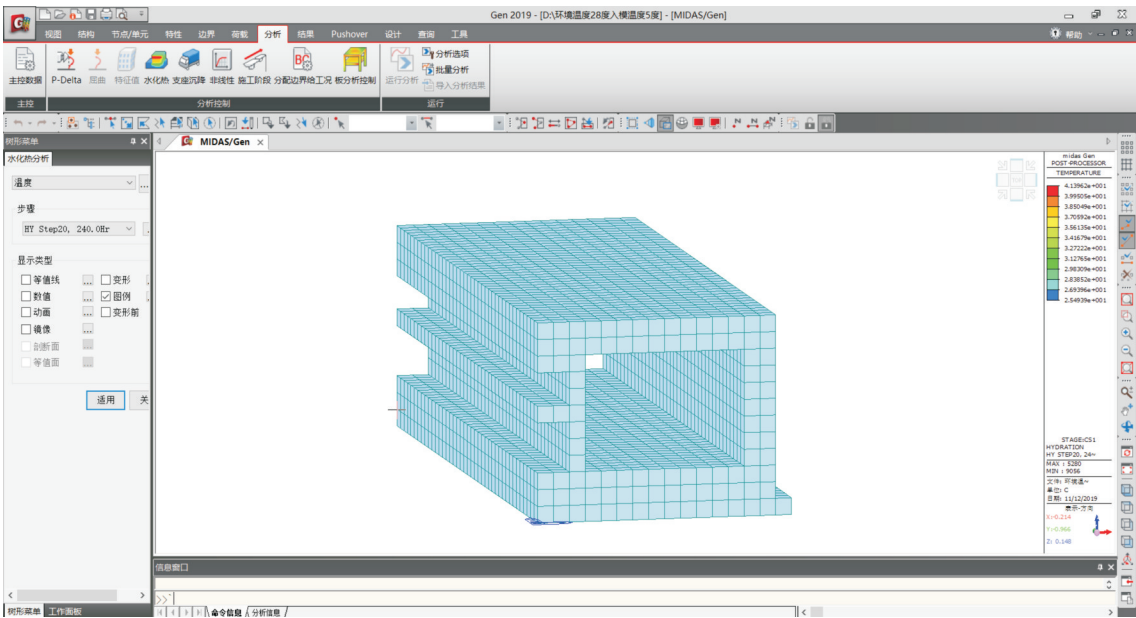


图 1 Midas Gen 操作界面

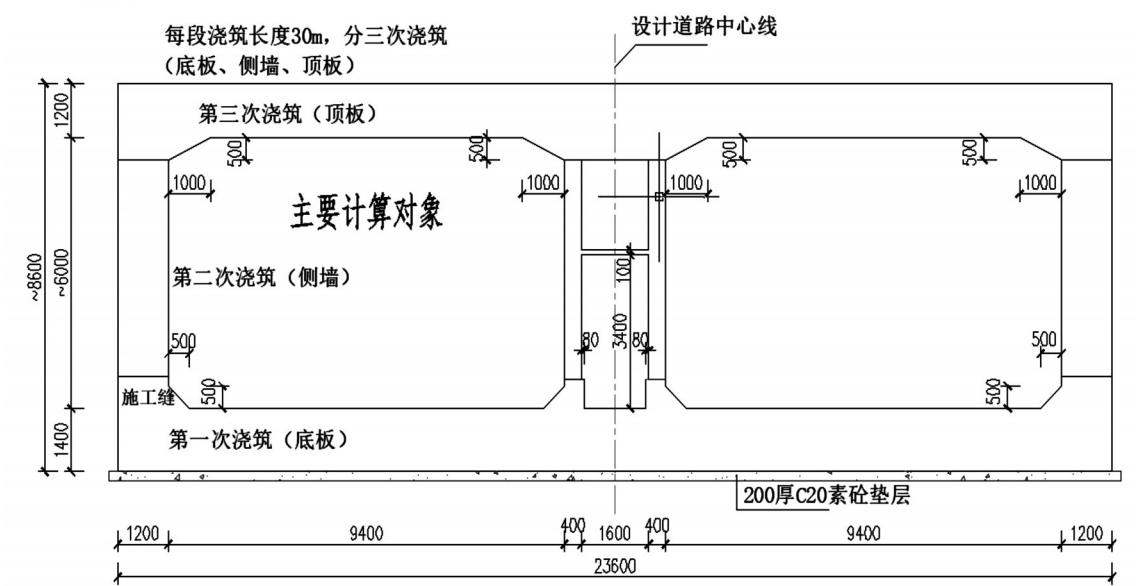


图 2 隧道内部横断面图

模拟分析,使用对称模型可以缩短分析时间,同时便于查看混凝土内部温度场及温度应力,建立模型见图 3。

2.2.2 隧道大体积混凝土温度场有限元模拟结果与讨论

该项目施工处于夏季,白天天气温度较高,不利于大体积混凝土浇筑过程中内部水化热的散发,建议选择夜晚时段浇筑施工,因此该有限元模拟时外界环境温度设定夏季夜晚温度 28℃。采用 Midas Gen 有限元软件模拟计算隧道浇筑完成至 240h 时各点的温度数值见图 4。该温度场云图表

示隧道各点温度随时间变化的情况,右部图例从下到上,随着颜色的加深,温度越来越高。

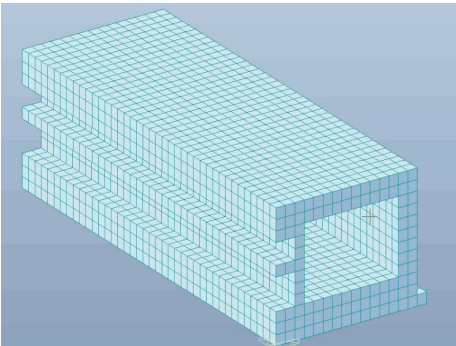
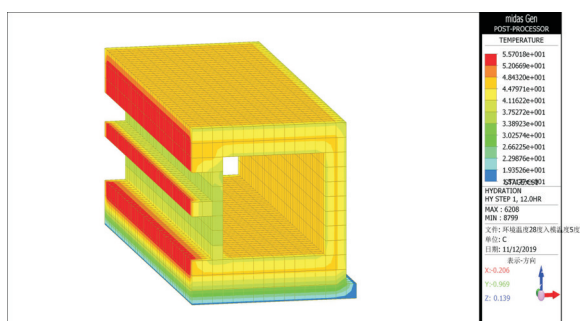
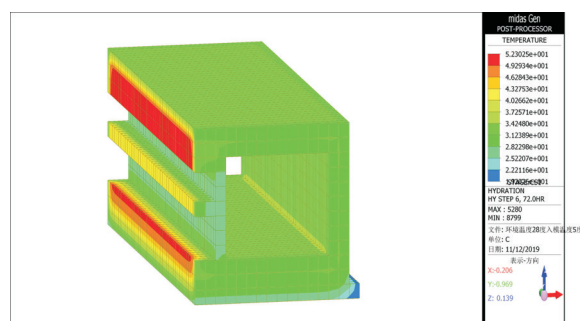


图 3 隧道计算模型

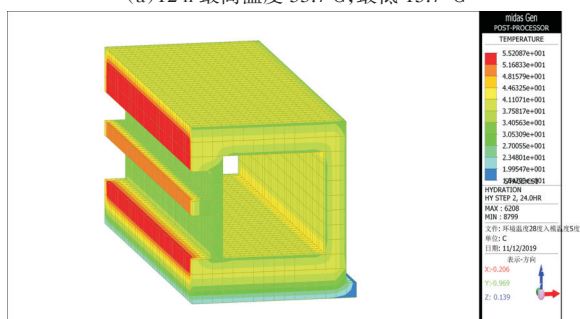




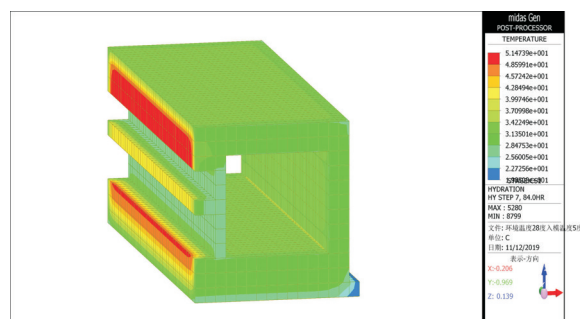
(a) 12 h 最高温度 55.7°C, 最低 15.7 °C



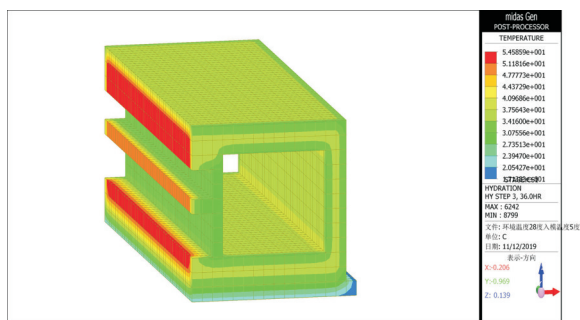
(f) 72h 最高温度 52.3°C, 最低 19.2 °C



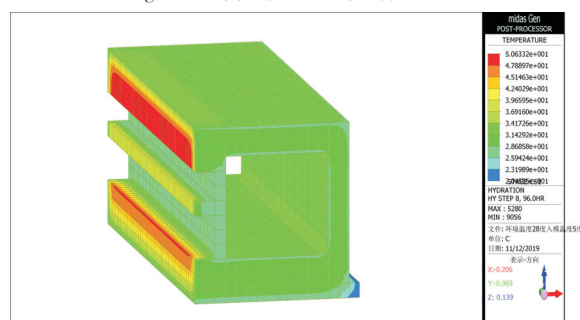
(b) 24 h 最高温度 55.2°C, 最低 16.4 °C



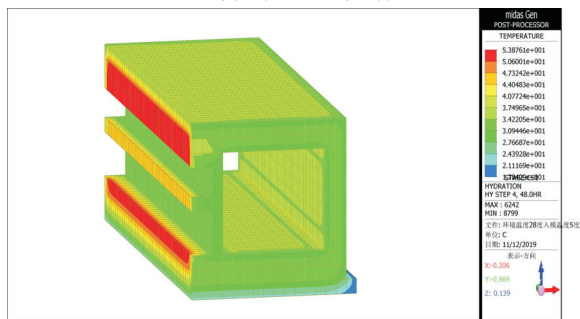
(g) 84h 最高温度 51.5°C, 最低 19.9 °C



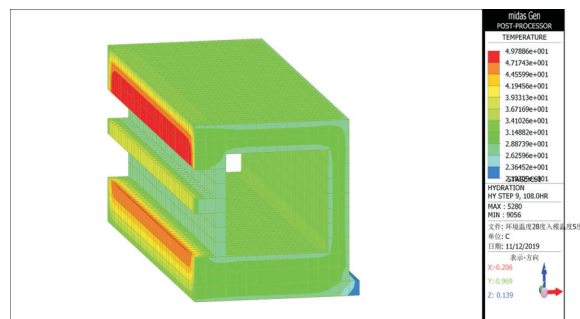
(c) 36h 最高温度 54.6°C, 最低 17.1 °C



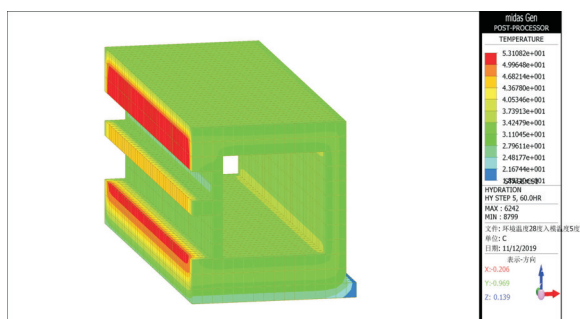
(h) 96h 最高温度 50.6°C, 最低 20.5 °C



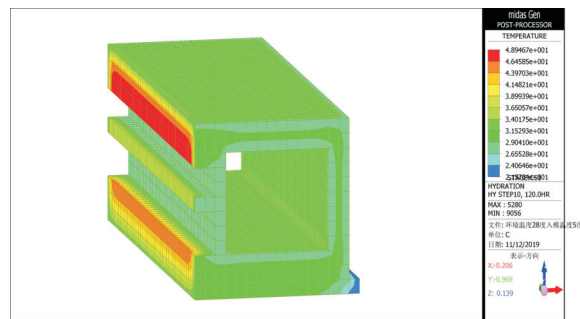
(d) 48h 最高温度 53.9°C, 最低 17.8 °C



(i) 108h 最高温度 49.8°C, 最低 21.0 °C



(e) 60h 最高温度 53.1°C, 最低 18.5 °C



(j) 120h 最高温度 48.9°C, 最低 21.6 °C



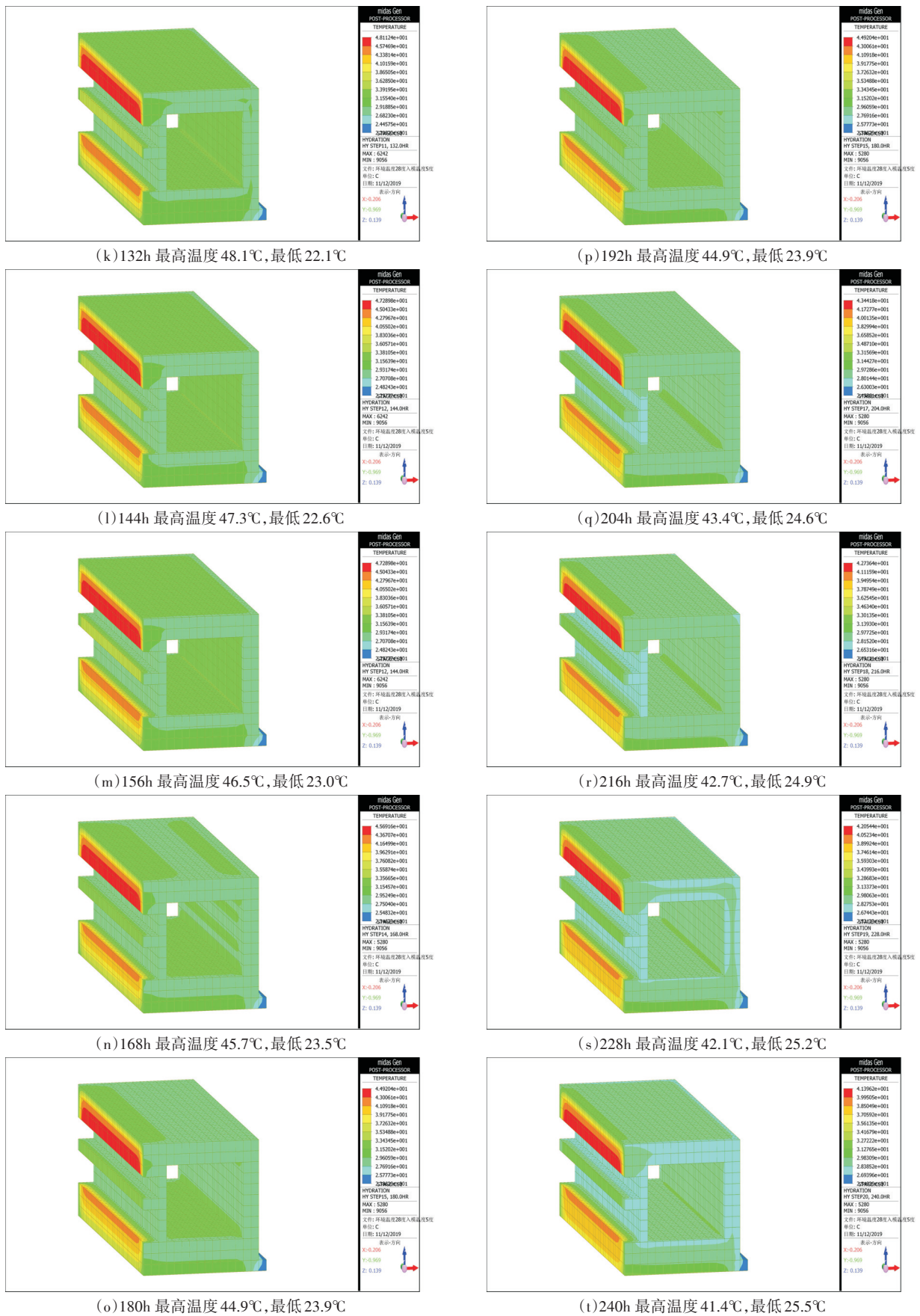
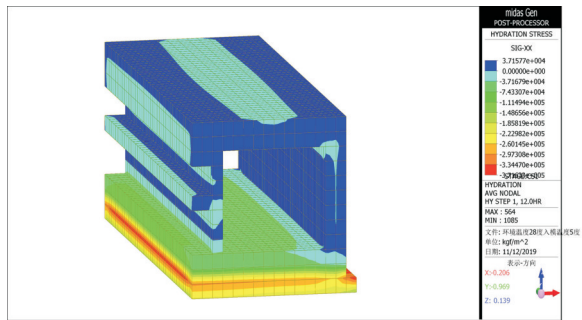


图 4 隧道大体积混凝土温度场随时间变化云图

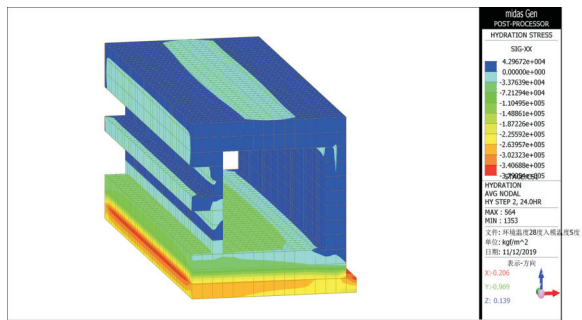


2.2.3 隧道大体积混凝土温度应力有限元模拟结果与讨论

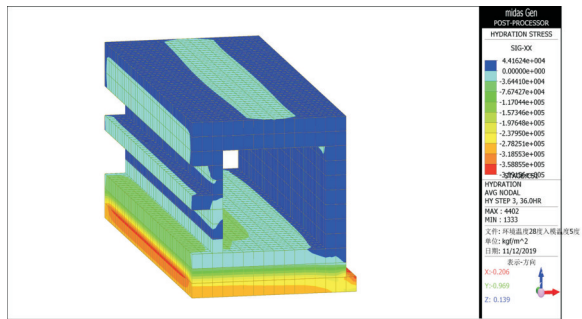
采用 Midas Gen 有限元软件模拟计算隧道浇筑完成至 240h 时各点的应力数值见图 8。该应力变化云图表示隧道各点应力随时间变化以及大小分布情况,右部图例从下到上,随着颜色的降低,应力越来越高。



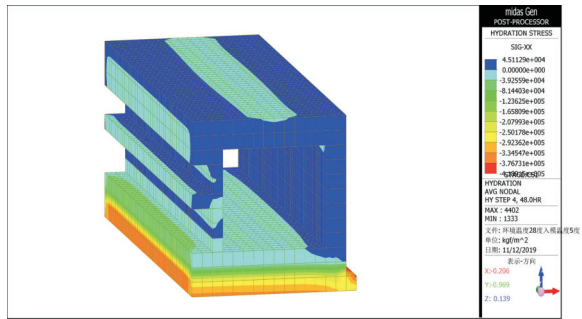
(a)12h 最高应力 364139N/m<sup>2</sup>



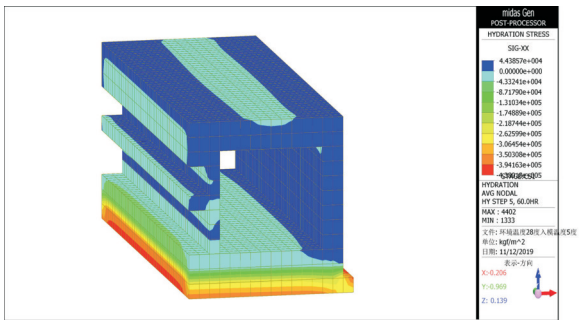
(b)24h 最高应力 421077 N /m<sup>2</sup>



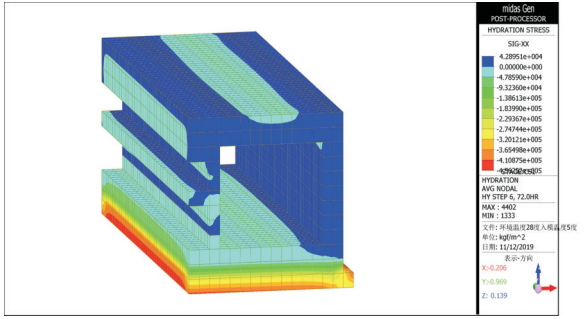
(c)36h 最高应力 432788 N /m<sup>2</sup>



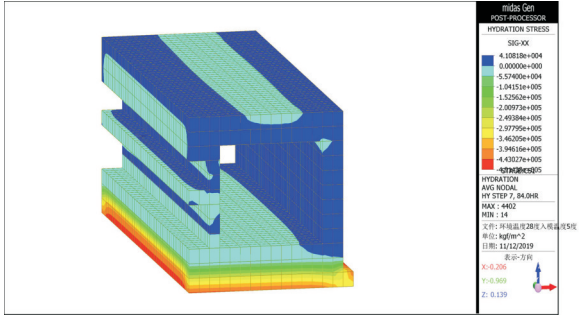
(d)48h 最高应力 442107 N /m<sup>2</sup>



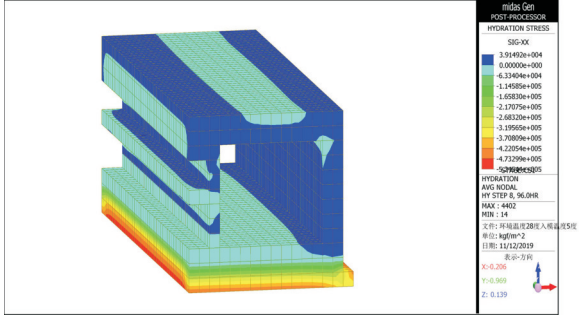
(e)60 h 最高应力 434983 N /m<sup>2</sup>



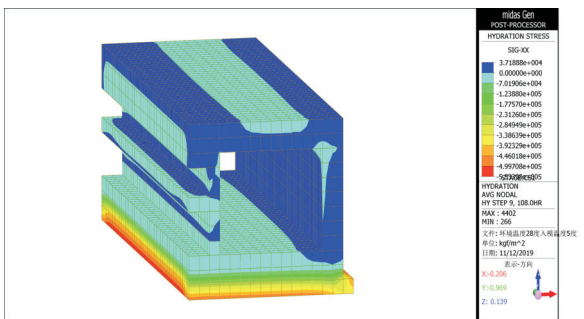
(f)72h 最高应力 420371 N /m<sup>2</sup>



(g)84h 最高应力 402604 N /m<sup>2</sup>

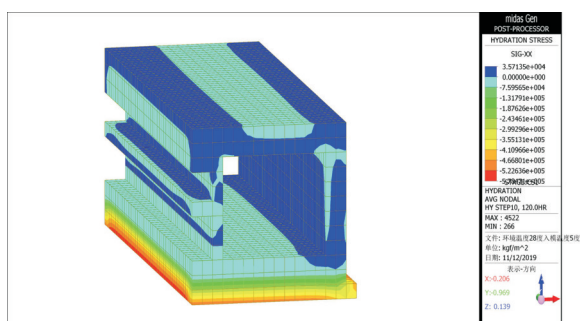


(h)96h 最高应力 383660 N /m<sup>2</sup>

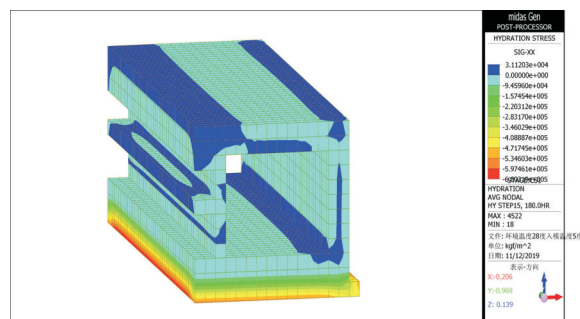


(i)108h 最高应力 364452 N /m<sup>2</sup>

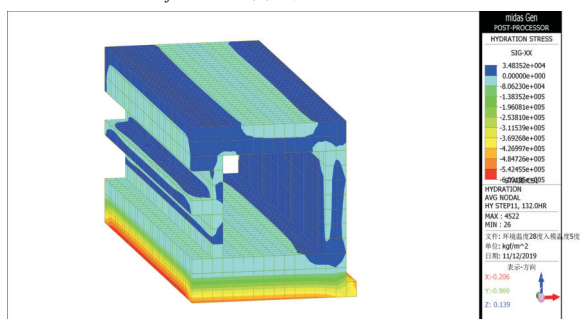




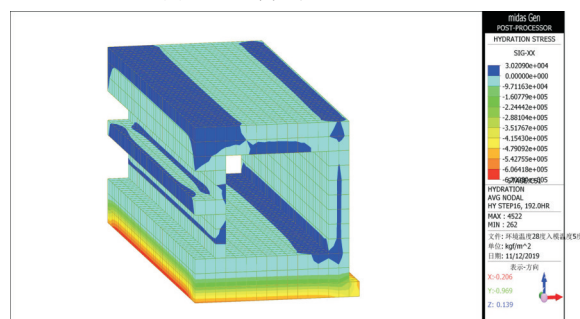
(j)120h 最高应力 349997 N/m<sup>2</sup>



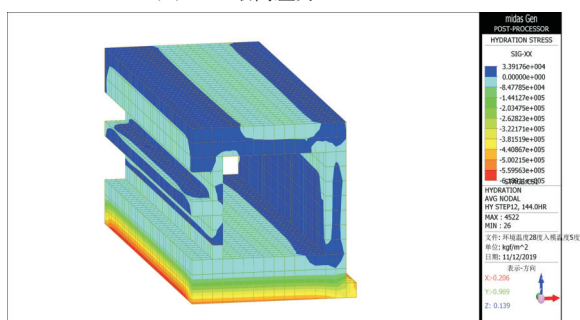
(o)180h 最高应力 304976 N/m<sup>2</sup>



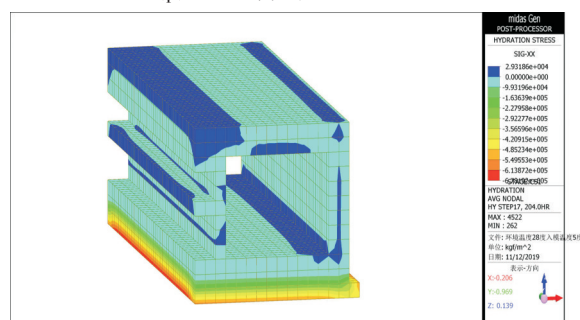
(k)132h 最高应力 341383 N/m<sup>2</sup>



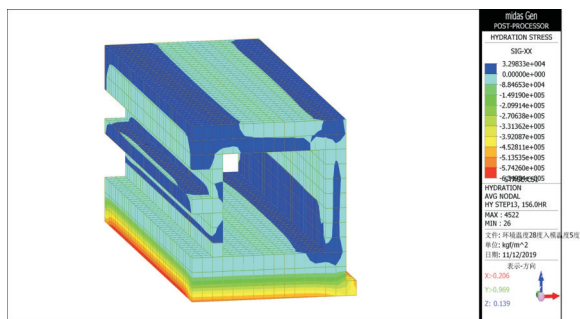
(p)192h 最高应力 296048 N/m<sup>2</sup>



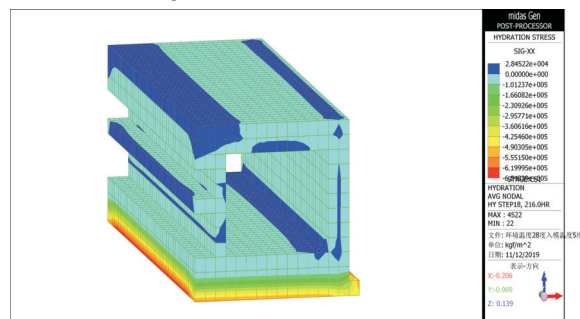
(l)144h 最高应力 332396 N/m<sup>2</sup>



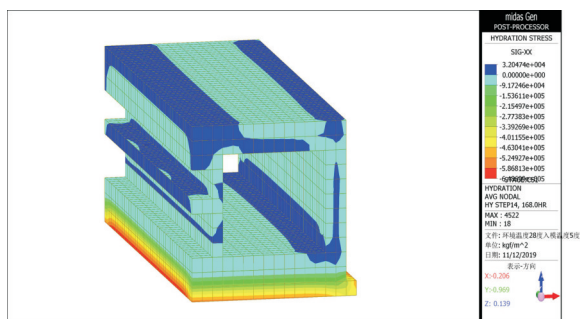
(q)204h 最高应力 287326 N/m<sup>2</sup>



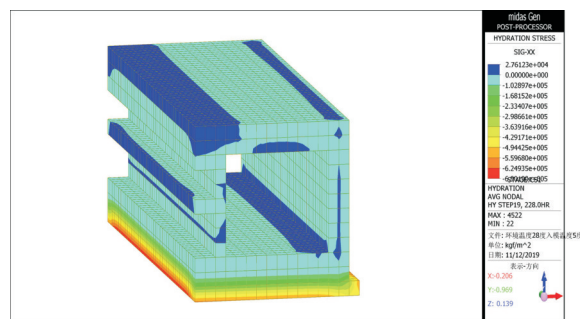
(m)156h 最高应力 323233 N/m<sup>2</sup>



(r)216h 最高应力 278830 N/m<sup>2</sup>



(n)168h 最高应力 314061 N/m<sup>2</sup>



(s)228h 最高应力 270598 N/m<sup>2</sup>

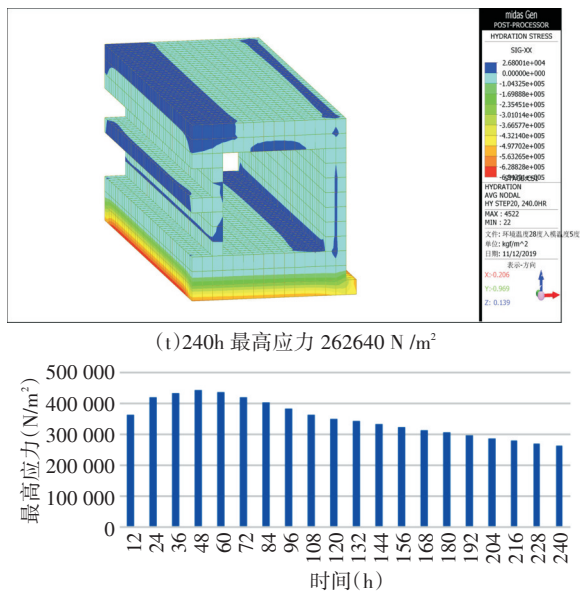


图 8 隧道大体积混凝土最高应力随时间变化云图及线图

根据有限元软件模拟计算结果可知,混凝土浇筑完成早期,最高应力出现于隧道侧墙及顶板的两端,这些位置最易产生裂缝,应作为混凝土裂缝控制的重点部位。随着时间的推移,应力逐渐降低,最高应力出现于侧墙与底板、侧墙与顶板交接处。从线图中不难看出,混凝土温度应力表现出先升高后下降的趋势,最高应力出现在浇筑完成 48h,数值达到 442107 N/m<sup>2</sup>,随后,应力逐渐降低,至 240h 最高应力降至 262640 N/m<sup>2</sup>。

水泥水化热反应生成大量的热量,该热量使混凝土产生膨胀变形,由于内外温差,内部变形受到外界约束,因此,混凝土内部产生压应力,外表面则表现为拉应力。该隧道工程主体结构采用 C40 混凝土,轴心抗拉强度设计值<sup>[14]</sup>为 1710000 N/m<sup>2</sup>,对比有限元模拟计算结果,隧道浇筑施工过程产生的最高应力未超过混凝土极限抗拉强度,该隧道浇筑过程温度裂缝可控。

综合考虑有限元模拟计算结果,为了更好防控温度裂缝,除准确布置冷凝管外,建议施工单位从材料方面入手,采取以下控制温度裂缝措施。

(1)掺用高效混凝土膨胀剂补偿温降收缩和自收缩。建议采用新型高效 MgO 类混凝土膨胀剂,能够产生足够的有效膨胀,可以部分补偿混凝土降温阶段的温度收缩以及胶凝材料水化过程中的自收缩。

(2)采用 P II 52.5 水泥替代 PO42.5 水泥,结合本工程具体的结构形式,在满足混凝土强度的情

况下减少水泥,增加粉煤灰,以降低水化反应温度,缩小结构内外温差梯度。

(3)采取水化调控型化学外加剂和大掺量粉煤灰技术削弱温峰,控制温升速率。由于结构混凝土的快速温升主要源于水泥水化加速期的集中放热,这一过程可以通过掺加化学外加剂和矿物掺合料来进行调控。

(4)粗细骨料采用高强混凝土适用材料,减少混凝土早期因材料含泥、含粉而导致的塑形开裂。

### 3 结语

本文基于某隧道大体积混凝土浇筑施工,运用 Midas Gen 有限元软件建立该隧道三维模型,模拟计算出隧道浇筑完成至 240h 时各点的温度数值及应力情况,得到了较为全面的大体积混凝土温度场变化云图及温度应力变化云图,同时将混凝土内部监控实测温度与有限元模拟计算结果对比,吻合度较高,结论如下。

(1)混凝土浇筑完成后,最高温度出现于混凝土内部,隧道中心区域温度最高,在浇筑完成 12h 时,达到最高温度 55.7℃,10 天后逐渐降低至 41.4℃;内部最低点的温度由 12h 的 15.7℃逐渐上升至 240h 后的 25.5℃。

(2)混凝土浇筑完成初期,最高应力出现于隧道侧墙及顶板的两端,该位置应作为混凝土裂缝防治的重点部位。随着时间的推移,应力逐渐降低,最高应力出现于侧墙与底板、侧墙与顶板交接处。混凝土表面最高应力出现在浇筑完成 48h,数值达到 442107 N/m<sup>2</sup>,随后,应力逐渐降低,至 240h 时最高应力降为 262640 N/m<sup>2</sup>。

根据模拟计算结果,建议施工单位在隧道内部温度最高区域布置冷凝管,降低结构里表温差;从材料方面入手,采取事前控制措施,降低混凝土表面最高温度应力,达到防控温度裂缝的目标。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工规范:GB 50496-2018 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[2] EMBORG M, BERNANDER S. Assessment of risk of thermal cracking in hardening concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(10):2893-2912.

[3] RAHIMI A, NOORZAEI J. Thermal and Structural Analysis of Roller Compacted Concrete (R.C.C) Dams by Finite Element Code [J]. Australian Journal of Basic and Applied Science, 2011, 5(12):2761-2767.

- [4] 朱伯芳. 弹性徐变体有限元分区异步长算法[J]. 水利学报, 1995(7): 23-27, 15.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [6] 徐俊, 江昔平. 堆石混凝土在大体积混凝土中的温度场分析[J]. 混凝土, 2013(7): 33-36.
- [7] 谷坤鹏, 于铜, 陈克伟, 等. 大尺度现浇暗埋段隧道裂缝控制关键技术[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(11): 4-7.
- [8] 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, 47(8): 97-101.
- [9] BAZANT Z P, 等. 钢筋混凝土有限元分析[M]. 周氏, 李咏偕, 许庆尧, 译. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [10] 江见鲸, 陆新征. 混凝土结构有限元分析[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [11] CLOUGH R W. Thoughts about the origin of the finite element method[J]. Computer and Structures, 2011, 79(22-25): 2029-2030.
- [12] 北京迈达斯技术有限公司. Midas Gen 工程应用指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [13] Midas Gen 用户手册[Z]. 北京迈达斯技术有限公司, 2014.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范(2015年版): GB50010-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(上接第62页)

的主导性和学生主体性的统一,思想政治理论教师要不断提高自身的理论水平和教学能力,围绕学生、关照学生、服务学生,牢固树立“以学生发展为中心”的教育理念,充分提高学生学习的积极性、主动性;在教学方式方法上,要坚持灌输性和启发性、显性教育和隐性教育相统一;在教学形式上,要把理论教学和实践教学、校内教学和校外教学、网络线上教学和线下教学有机结合起来,不断拓展思想政治理论课教学空间;在教学主体配置上,要积极构建党、政、行、企合力育人格局,形成思政课教师、辅导员、专业课教师、企业人员、学校党政领导、政府领导进课堂、讲思政的教育氛围。

#### (五)服务行业,为交通事业发展培根铸魂

对于交通运输类高职院校思想政治理论课而言,要在大力推进习近平新时代中国特色社会主义思想“进教材、进课堂、进头脑”的同时,把行业文化、企业文化、区域文化和工匠精神、劳模精神、职业素养有机融合到课堂教学中来,做到“统一性与多样性的统一”,增强思政课教学服务社会、服务行业和服务企业的能力。例如,加强对交通文化内涵的挖掘,用以不断丰富思政课教学资源;根据院校实际,与当地交通行业中较为典型的企业联合,不断拓展思政课教学的实践教学场所;聘请交通行业优秀典型人物进校园,开展榜样教学;组建具有交通行业的社团,积极开展第二课堂思政课教学等。

#### 注释:

- ① 本次网络调查的院校分别为:安徽交通职业技术学院、北京交通运输职业学院、重庆交通职业学院、福建

船政交通职业学院、甘肃交通职业技术学院、广东交通职业技术学院、广西交通职业技术学院、贵州交通职业技术学院、哈尔滨铁道职业技术学院、河北交通职业技术学院、河南交通职业技术学院、黑龙江交通职业技术学院、湖北交通职业技术学院、湖南交通职业技术学院、吉林交通职业技术学院、江西交通职业技术学院、辽宁省交通高等专科学校、南京交通职业技术学院、内蒙古交通职业技术学院、青海交通职业技术学院、山东交通职业学院、山西交通职业技术学院、陕西交通职业技术学院、上海交通职业技术学院、四川交通职业技术学院、天津交通职业学院、武汉交通职业学院、云南交通职业技术学院、浙江交通职业技术学院(排名不分先后)。

- ② 2019年6月,教育部职业教育与成人教育司公示了200所国家优质校名单。

#### 参考文献:

- [1] 张烁. 习近平主持召开学校思想政治理论课教师座谈会强调 用新时代中国特色社会主义思想铸魂育人 贯彻党的教育方针落实立德树人根本任务[N]. 人民日报, 2019-03-19(1).
- [2] 佚名. 北京交通运输职业学院思政部简介[EB/OL]. <http://www.bjtt.edu.cn/yxszt/bmgltx/szb.htm>.
- [3] 赵静. 新时代交通运输高职院校思想政治理论课建设情况调查[J]. 南通航运职业技术学院学报, 2018, 17(3): 95-99.
- [4] 严珏. 高职院校思想政治理论课教学存在的问题与对策: 评《高职院校思想政治理论课: 改革现状与出路》[J]. 新闻战线, 2018(12): 164.
- [5] 姚昌, 张晓波. 高校思想政治理论课教学现状分析与改进对策[J]. 思想理论教育, 2015(11): 67-70.