张花高速澧水大桥索塔基础大体积混凝土温控

张玉平,李传习,张 磊,刘海宽

长沙理工大学土木与建筑学院,长沙 410004

摘要　结合张花高速澧水大桥索塔基础大体积混凝土施工,根据热传导和有限元基本原理,应用 MIDAS 软件建立了澧水大桥索塔基础大体积混凝土温控计算模型。根据计算结果确定了温控方案,对大体积混凝土施工全过程进行实时温度监测,实现了大体积混凝土温度控制的信息化施工,为混凝土冷却水通水和保温保湿养护等温控措施提供了依据。大体积混凝土浇注完成后,索塔基础未出现温度裂缝,达到了预期目标。工程实践表明本文采用的大体积混凝土温度控制方法和流程有效,可供桥梁索塔基础等大体积混凝土施工借鉴。

关键词　桥梁工程;索塔基础;大体积混凝土;温控;MIDAS 软件

中图分类号　U448.36　　**文献标识码**　A　　**doi**　10.3981/j.issn.1000-7857.2012.34.010

Mass Concrete Temperature Control of Lishui Bridge Tower Foundation in Zhanghua Highway

ZHANG Yuping, LI Chuanxi, ZHANG Lei, LIU Haikuan

School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

Abstract　According to the basic principle of heat conduction and FEM, mass concrete FEM model of Lishui Bridge tower foundation is established by using software MIDAS. Temperature controlling scheme is determined based on the calculation results. Temperature of Lishui Bridge tower foundation is monitored in order to provide evidence for temperature controlling measures including water cooling, heat preservation and moisture retention, etc. Information construction for mass concrete temperature control is implanted. Low thermal cement should be used in mix design of concrete. Adding a certain amount of fly ash into concrete is helpful to control temperature of mass concrete. Cooling water should run through cooling pipe after mass concrete poured, and stop when cooling rate is close to or even greater than 2.0℃/d. If temperature of mass concrete is going up after stopping cooling water, cooling water should run through again. Heat preservation should be done when the inner-surface temperature difference is close to or even greater than 25℃. The temperature controlling scheme is repeated until temperature of mass concrete is stable. Analysis results are introduced. There have been not temperature crack on the surface of tower foundation after mass concrete was poured. Therefore expected target is realized. Engineering practice indicates temperature controlling method and technological process that are introduced in the article are reasonable and effective, and can be used as references for mass concrete construction of bridge tower foundation.

Keywords　bridge engineering; tower foundation; mass concrete; temperature control; MIDAS

0　引言

混凝土结构物最小尺寸不小于 1m 的大体量混凝土,或预计会因混凝土中胶凝材料水化引起的温度变化和收缩而导致有害裂缝产生的混凝土称为大体积混凝土[1]。由于大体积混凝土具有结构厚、体积大和施工较复杂等特点,除了要满足强度、刚度和耐久性的要求外,还必须控制温度裂缝的

收稿日期:2012-09-12;修回日期:2012-11-16

基金项目:湖南省交通科技项目(201014);长沙理工大学桥梁与隧道工程省重点学科基金项目(10CA09);桥梁工程湖南省普通高校重点实验室基金项目(09KA03)

作者简介:张玉平,副教授,研究方向为桥梁结构理论与大跨度桥梁施工控制,电子信箱:zyp5032@163.com;李传习(通信作者),教授,研究方向为桥梁结构理论与大跨度桥梁施工控制,电子信箱:lichuanxi2@163.com

产生和开展。混凝土浇筑后,水泥的水化作用会产生大量的水化热,从而使混凝土温度升高且体积膨胀,当外部混凝土受到地基和内部混凝土约束产生的拉应力超过材料的抗拉强度时就会产生表面裂缝;待混凝土达到最高温度后,随着热量的散发,混凝土温度逐渐下降直到稳定,在此过程中混凝土体积发生收缩,若内部混凝土受到地基和混凝土自身约束产生的拉应力超过材料的抗拉强度时会产生贯穿裂缝。这些裂缝的产生和发展将影响到结构的整体性和耐久性,因此,在大体积混凝土施工中如何防止因水泥水化热引起的裂缝是技术人员长期关心和研究的问题[2-8]。

人类对大体积混凝土性能及质量的关注是从对水坝质量的控制开始的。至 20 世纪 60 年代,有关水工混凝土温度裂缝的控制研究已经取得了较多的成果,形成了一套比较有效的防裂措施。中国大体积混凝土水工工程建设起步较晚,从 20 世纪 50 年代开始研究大体积混凝土的温度裂缝问题,防裂技术发展迅速,日趋成熟[2-5]。三峡大坝能够成功建设的前提之一就是大体积混凝土防裂技术的成熟。目前,大体积混凝土广泛应用于大跨度桥梁的主要受力部位。由于桥梁工程中混凝土结构的混凝土配合比、边界条件和结构尺寸等都与水工工程中的不同[1,6],提出并完善一套适用于桥梁工程的温控防裂技术正日益受到桥梁工程师的重视。国内竣工的桥梁中,有的虽然在施工中也采取了一些温控措施,但是由于重视不够,没有实现温控信息化施工或是温控措施不够及时和准确等原因仍然出现了温度裂缝,甚至出现了贯穿性的温度裂缝[9-12]。一旦出现超过范围的裂缝,必将留下严重的安全隐患,轻则导致结构损伤,需要维修加固,重则导致桥梁垮塌,造成巨大的生命、财产损失。

本文以湖南省张花高速公路(张家界至花垣高速公路)澧水大桥索塔基础大体积混凝土施工为背景,给出其大体积混凝土温控方案、措施和监测分析结果,以期为防止索塔基础等大体积混凝土温度裂缝的产生提供有力的保证,为桥梁中大体积混凝土温度裂缝的防控提供参考和借鉴。

1 工程背景

张花高速澧水大桥位于张家界永定区与湘西自治州永顺县的交界处,横跨澧水河峡谷,该谷顶宽 420m,谷顶与谷底高差约 280m。澧水河两岸均为溶蚀、侵蚀构造成因的岩溶地质。澧水大桥主桥设计为单跨简支钢桁梁悬索桥,三跨的跨径布置为 200m+856m+190m,大桥立面布置见图 1(其中,f/l 表示悬索桥的矢跨比),主缆矢跨比为 1/10,2 根主缆横向间距为 28m。全桥共设 69 对吊索,吊索标准间距为 12m。钢桁梁全长 854m,桁高 6.5m,桁宽 28m,节间长度 6m,在桥塔下横梁处设竖向支座和横向抗风支座,跨中设柔性中央扣。索塔采用门式框架结构,两岸均采用重力式锚碇。

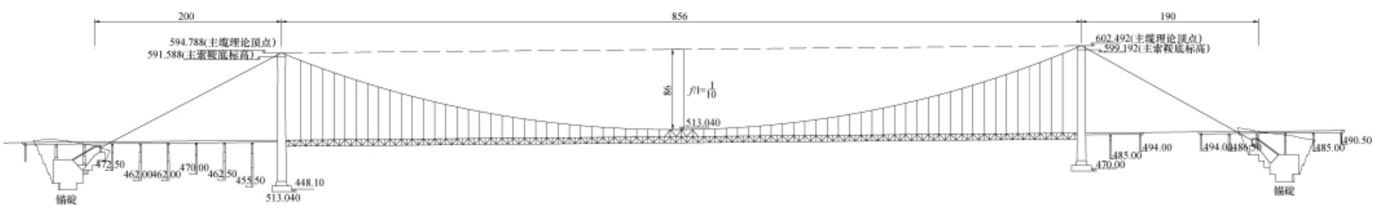

图 1　澧水大桥立面布置(单位:m)

Fig. 1　General layout of Lishui Bridge (unit: m)

澧水大桥两岸(张家界岸和花垣岸)索塔基础分左右 2 幅,扩大基础尺寸相同,长宽高均为 21m×17m×6m。基础嵌固在基坑内,采用 C30 混凝土,混凝土设计配合比的材料用量如表 1 所示。扩大基础分 3 层浇筑,第 1 层浇注厚度 3m,浇筑量为 1071m^3;第 2 层浇注厚度 1.2m,浇筑量为 428.4m^3;第 3 层浇注厚度 1.8m,浇筑量为 642.6m^3。

表 1　每方混凝土设计配合比材料用量

Table 1　Material consumption of 1m^3 concrete design mix proportion

材料名称	材料用量/kg
水泥	253
粉煤灰	136
砂	763
石	1053
水	175
外加剂	2.72
合计	2382.72

2 温控计算

2.1 计算参数的确定

(1) 混凝土弹性模量

经试验,测得混凝土弹性模量如表 2 所示。

表 2　混凝土的弹性模量

Table 2　Elastic modulus of concrete

设计强度	弹性模量/10^{4}MPa				
	3d	5d	7d	14d	28d
C30	2.47	3.02	3.19	3.36	3.57

(2) 混凝土的劈裂强度与轴拉强度

经试验,测得混凝土的劈裂强度与轴拉强度如表 3 所示。

表 3　混凝土的抗拉强度

Table 3　Tensile strength of concrete

设计强度	强度类别	抗拉强度值/MPa				
		3d	5d	7d	14d	28d
C30	劈裂强度	1.75	2.01	2.19	2.47	2.52
	轴拉强度	1.58	1.81	1.97	2.22	2.27

(3) 混凝土绝热温升

经试验,测得水泥的水化热如表 4 所示。

表 4　水泥的水化热

Table 4　Hydration heat of concrete

龄期/d	水泥水化热/(kJ·kg^{-1})	C30 胶凝材料水化热/(kJ·kg^{-1})
1	66.4	23.4
2	156.0	99.7
3	186.0	131.8
5	226.5	165.0
7	246.0	180.0

(4) 冷却水管的布置参数

混凝土内设置冷却水管,冷却水管的水平间距和竖直间距一般为 0.75m。冷却水和冷却水管的计算参数取值见表 5。

表 5　冷却水和冷却水管参数和取值

Table 5　Parameter values of cooling water and cooling pipe

参数	取值
比热/(J·N^{-1}·℃$^{-1}$)	428.6
对流系数/(J·m^{-2}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	4184000
流入温度/℃	可先根据预测气温假定,仿真计算时取实测值
管径/m	0.028
流量/(m^3·h^{-1})	1.080

(5) 混凝土热力学参数

混凝土的热力学参数取值见表 6。

表 6　混凝土热力学参数

Table 6　Thermodynamics parameters of concrete

参数	取值
比热/(J·N^{-1}·℃$^{-1}$)	96
导热系数/(J·m^{-1}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	11500
线膨胀系数/℃$^{-1}$	0.000009
表面放热系数/(J·m^{-2}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	31360

注:表面放热系数主要取决于吹经结构表面的风速和结构表面粗糙度等参数。结构表面的风速可实测得到,壁面粗糙度可按粗糙表面考虑。

Notes: Coefficient of surface heat transfer depends on wind speed and roughness of structure surface. Wind speed of structure surface can be measured, and roughness of structure surface is rough.

(6) 大气气温

为确定温控方案,进行温控计算时,大气气温参考张家界气象站所测 2006—2009 年的月平均气温和月最高、最低气温资料取值;在温控实施过程中进行温控仿真计算时,大气气温取实测值。

(7) 混凝土入模温度

为确定温控方案,进行温控计算时,混凝土入模温度取预测大气气温减 3℃;在温控实施过程中进行温控仿真计算时,入模温度取实测值。

2.2　计算模型

采用 MIDAS 软件进行澧水大桥索塔基础温控计算,根据对称性取 1/4 结构进行建模。采用实体单元模拟索塔基础,共计 6384 个单元,7540 个节点。索塔单元模型见图 2,管冷的模拟见图 3。

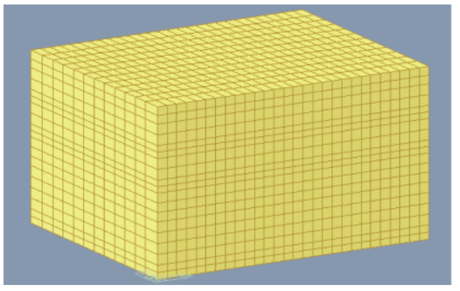

图 2　张家界岸索塔基础计算模型

Fig. 2　Calculation model of tower foundation close to Zhangjiajie

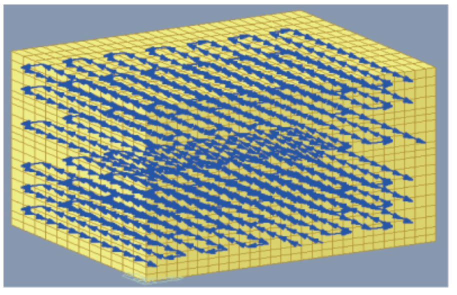

图 3　管冷模拟示意图

Fig. 3　Schematic drawing of simulating cooling water pipe

3　施工现场温控

3.1　温控监测流程

为掌握大体积混凝土温控信息,检验施工质量和温控效果,以便及时调整和改进温控措施,在混凝土浇筑过程中进行了混凝土浇筑温度的监测,在养护过程中进行了混凝土浇筑体升降温、内表温差、降温速率及环境温度等监测。测温采用实时测温方法,本文采用的温控监测流程见图 4。

施工现场温控监测会及时提供信息,反映大体积混凝土浇筑块体内温度变化的实际情况及所采取的温控技术措施效果,可为施工组织者在施工过程中及时、准确采取温控对策提供科学依据。

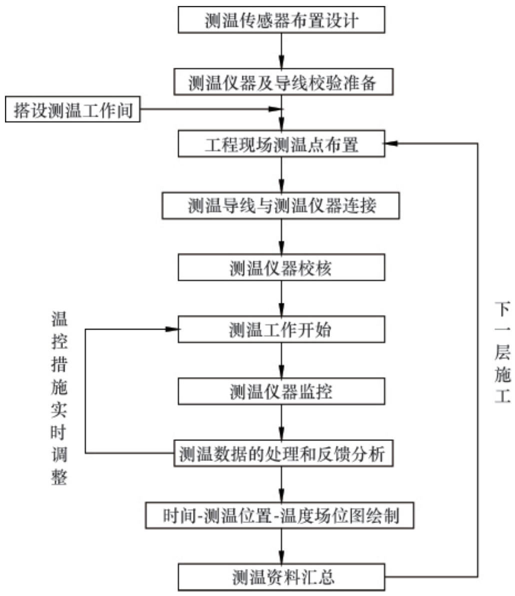

图 4　温控监测流程图

Fig. 4　Flow chart of temperature control monitoring

3.2　混凝土层温度测点布置

根据索塔基础结构对称特点，将混凝土层温度测点布置在 1/4 范围。考虑大体积混凝土浇筑时间不一致,温度测点应在各区域均匀布置,且中心区为重点。花垣岸左幅索塔基础第 1 层混凝土的温度测点见图 5,所有混凝土层(包括张家界岸和花垣岸左幅、右幅所有层)的温控测点布置与此相似。

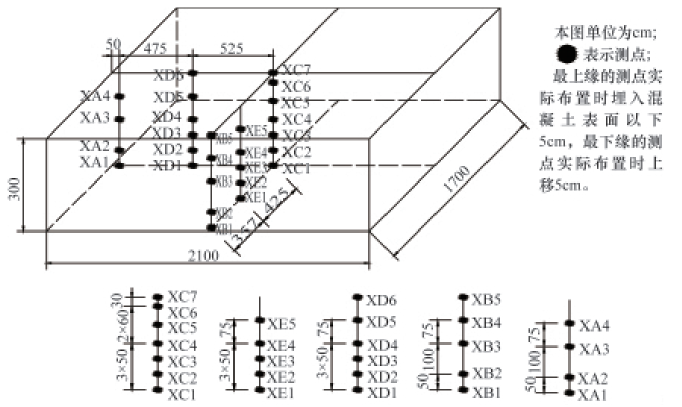

图 5　花垣岸左幅索塔基础第 1 层砼温度测点布置示意图

Fig. 5　Schematic drawing of temperature measuring point layout in left tower foundation close to Huayuan

3.3　测量项目和频率

每层混凝土施工中和施工后需测量或观测的项目及其观测频率见表 7。

表 7　大体积混凝土温控的测量项目和频率

Table 7　Measurement items and frequency of mass concrete temperature control

测量项目	测量方法	测量频率
混凝土层内部温度(即混凝土层内测点温度)	埋设热电偶温度传感器,用测温系统实时测量	一般在混凝土层浇筑完成后即开始测试,在浇筑期间及浇筑后 7d,宜不大于 2h 测读 1 次;7d 之后宜 4h 测读 1 次;14d 之后宜 8h 测读 1 次（如需要);在以后的测试中不应少于 24h 测读 1 次(如需要)
气温	在结构外背阴通风处放置 1 个热电偶温度传感器,用测温系统实时测量,同时记录天气情况	
冷却水管进水口和出水口温度	在冷却水管进水口和出水口埋入热电偶温度传感器,用测温系统实时测量	
混凝土外表面温度	粘贴热电偶温度传感器进行测量	
混凝土外表面风速	用风速计测量	风速变化较大时 2h 测量 1 次，风速变化较小时 8h 测量 1 次
冷却水流量	用流量计或水表测量	调整冷却水流量时测读
混凝土出机温度	用温度计或点温计测量	混凝土浇筑过程中 2h 测量 1 次
混凝土原材料温度	用温度计或点温计测量	混凝土浇筑过程中 2h 测量 1 次
混凝土内部应变	埋设振弦式应变计,用应变仪测读	混凝土浇筑后前 7d 每隔 8—12h 测试 1 次,7d 之后每隔 24h 测试 1 次

3.4　温控措施实时调整

在大体积混凝土浇筑后,要根据实时温度测试结果及时采取相应措施。

(1) 混凝土浇筑后即可通冷却水,当发现混凝土中心降温速率接近或大于 2.0℃/d 时则停止通水,停水后如果温度转为上升,则再通少量水,这样反复调整直到混凝土中心降温速率小于 2.0℃/d。在温度较高的夏季,需要用冷水机制冷冷却水。

(2) 如发现内表温差接近或大于 25℃且降温速率接近或大于 2.0℃/d 时,要采取保温措施:蓄水(应采用从冷却水管流出的温水)保温的蓄水深度应大于 10cm;及时对混凝土表面进行覆盖或设置二层缓冲层进行养护;混凝土侧面拆模后悬

挂保温材料。如遇到气温突降时(2d内平均气温下降6℃以上),除对刚浇筑的混凝土层采取保温措施外,还应对20d龄期内混凝土采取保温措施。在温度寒冷的冬季,还可以向混凝土内部的管道内通入热水进行养护,因此工地上还应备好热水锅炉。

(3)选择较适宜的气温下浇筑大体积混凝土,尽量避开炎热天气。在炎热的夏季,对骨料应采取防晒措施并浇水降温;混凝土入模时,采取通风散热措施,加快热量的散失。

(4)在尽量减少混凝土内部温升的前提下,大体积混凝土的养护是一项关键且重要的工作,必须切实做好。养护主要是保持适宜的温度及湿度条件,混凝土的保温措施常常也起保湿的效果,因此兼有两方面的作用。

4 温度监测结果及分析

根据所测各混凝土层温度,绘制了张家界岸右幅和花垣岸左幅索塔基础各混凝土层平均温度曲线。由图6和图7知,各混凝土温度层都有急剧升温和缓慢降温的过程,直到达到稳定温度阶段;混凝土浇筑完成后,其升温一般只有2—3d,达到峰值后,高温持续时间较短,一般约2—6h,升温速度明显快于降温速度;在第2—3层混凝土分别浇筑后,第1—2层混凝土温度均有一定幅度的上升。索塔基础混凝土浇筑后,水泥水化热对混凝土的温度影响起主导作用,约10d后混凝土的温度随环境气温的变化出现一定波动,但变化比较平缓,约15d之后变化更趋平缓。

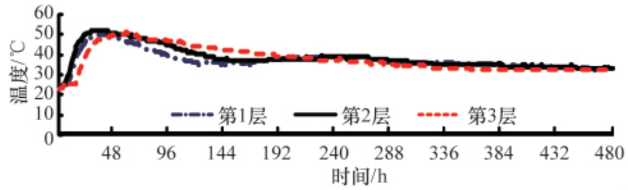

图6　张家界岸右幅索塔基础各层混凝土平均测温曲线

Fig. 6　Average measured temperature curves of every layer concrete in right tower foundation close to Zhangjiajie

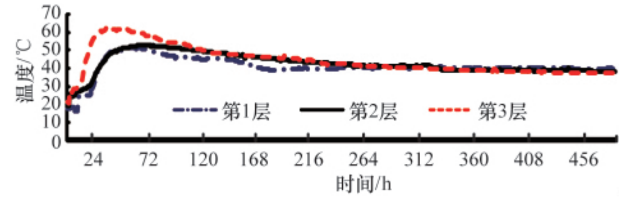

图7　花垣岸左幅索塔基础各层混凝土平均测温曲线

Fig. 7　Average measured temperature curves of every layer concrete in left tower foundation close to Huayuan

根据监测数据,计算张家界岸索塔基础(花垣岸略)主要温控指标(表8)。本工程的主要温控指标中,2个混凝土层的降温速率,即右幅和左幅索塔基础第3层的降温速率最大值为2.1℃/d,稍大于规范推荐限制值2.0℃/d;其余所有温控指标均在规范推荐限制值以内。各混凝土层内表温差最大值在19.0—24.4℃之间,低于规范推荐限制值25.0℃;混凝土升温最大值在26.0—41.8℃之间,低于规范推荐限制值50.0℃;混凝土表面与大气温差最大值在16.0—18.0℃之间,低于规范推荐限制值20.0℃。

表8　张家界岸索塔基础主要温控指标

Table 8　Main temperature control indexes of tower foundation close to Zhangjiajie

主要温控指标	右幅索塔基础第1层	右幅索塔基础第2层	右幅索塔基础第3层	左幅索塔基础第1层	左幅索塔基础第2层	左幅索塔基础第3层
内表温差最大值/℃	24.4	22.0	23.1	19.0	24.0	23.0
降温速率最大值/(℃·d^{-1})	1.9	2.0	2.1	1.7	1.6	2.1
混凝土升温最大值/℃	35.6	26.0	41.8	33.2	29.3	37.0
混凝土表面与大气温差最大值/℃	18.0	18.0	18.0	16.0	18.0	16.0

除了以上温控监测结果,在施工现场经过认真检查,未发现混凝土表面出现温度裂缝。

5 结论

(1)大体积混凝土施工前,应通过温控计算确定温控方案,合理分层和分块,确定冷却水管的布置方案;并应在大体积混凝土的配合比设计中选用中低热水泥,且掺入一定量的粉煤灰,从而有效降低水泥水化热。

(2)大体积混凝土浇筑后即可通冷却水,当发现混凝土中心降温速率接近或大于2.0℃/d时,则停止通水,停水后如果温度转为上升,可通少量水,这样反复调整直到混凝土中心降温速率小于2.0℃/d。如发现内表温差接近或大于25℃且降温速率接近或大于2.0℃/d时,要采取保温措施。

(3)张花高速澧水大桥索塔基础没有出现温度裂缝,表明本文采用的温度控制措施有效防止了混凝土结构裂缝的产生,可供其他桥梁的大体积混凝土施工参考和借鉴。本文采用的大体积混凝土温控技术已成功应用于张花高速澧水大桥的锚碇大体积混凝土施工。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50496—2009 大体积混凝土

施工规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 12-15.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. GB 50496—2009 code for construction of mass concrete [S]. Beijing: China Planning Press, 2009: 12-15.
[2] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 30-36.
Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 30-36.
[3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 41-45.
Wang Tiemeng. Crack control in engineering structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 41-45.
[4] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1991: 121-156.
Liu Xingfa. Temperature stress analysis of concrete structure[M]. Beijing: China Communications Press, 1991: 121-156.
[5] 中华人民共和国水利部. SL 319—2005 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 36-40.
The Ministry of Water Resources of the PRC. SL 319—2005 code for design of concrete gravity dam [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 36-40.
[6] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望 [J]. 水利学报, 2006, 57(12): 1424-1432.
Zhu Bofang. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 57(12): 1424-1432.
[7] 臧华, 刘钊, 文武松, 等. 苏通大桥辅桥箱梁节段水化热效应的仿真分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 46-52.
Zang Hua, Liu Zhao, Wen Wusong, *et al*. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2007, 24(5): 46-52.
[8] 石大为. 超高墩承台水化热温度测试及数值分析 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2011, 7(6): 77-81.
Shi Dawei. *Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Version*, 2011, 7(6): 77-81.
[9] 蒋林华, 仇高山, 李士伟, 等. 桥梁承台大体积高性能混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2010, 32(1): 38-44.
Jiang Linhua, Chou Gaoshan, Li Shiwei, *et al*. *Concrete*, 2010, 32(1): 38-44.
[10] 刘耀东, 白应华, 余天庆, 等. 基于 MIDAS 的大体积混凝土承台管冷技术优化研究[J]. 混凝土, 2009, 31(9): 48-54.
Liu Yaodong, Bai Yinghua, Yu Tianqing, *et al*. *Concrete*, 2009, 31(9): 48-54.
[11] 邓波, 张国志, 汪发红, 等. 四渡河大桥承台塔座大体积混凝土的温度与裂缝控制[J]. 施工技术, 2006, 55(8): 38-44.
Deng Bo, Zhang Guozhi, Wang Fahong, *et al*. *Construction Technology*, 2006, 55(8): 38-44.
[12] 朱建勋, 唐自平. 武广客运专线桥梁承台大体积混凝土施工技术[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(12): 47-53.
Zhu Jianxun, Tang Ziping. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 24(12): 47-53.

(责任编辑　孙秀云,马骁骁)

·学术动态·

第十四届全国生物材料大会

“第十四届全国生物材料大会”将于 2013 年 9 月 22—25 日在西安市召开，该会由中国生物医学工程学会生物材料分会主办。

征稿范围：(1)生物医用高分子材料；(2)生物医用无机非金属材料；(3)生物医用金属材料；(4)生物医用复合材料；(5)组织工程与干细胞；(6)纳米生物材料及纳米技术；(7)生物矿化与仿生制备；(8)生物材料的表面修饰及其生物应答特性；(9)药物多功能载体与控释；(10)生物医学材料的组织再生及临床应用研究；(11)生物材料表征和生物相容性评价；(12)骨科生物力学和力学生物学；(13)生物材料及医疗器械的先进加工成型技术研；(14)其他。

摘要截稿日期：2013 年 4 月 30 日。

论文截稿日期：2013 年 6 月 30 日。

电子信箱：ninbrc@163.com。

大会网站：http://www.c-nin.com/download/%E7%94%9F%E7%89%A9%E6%89%80.htm。