水　利　学　报
2021年1月　SHUILI　XUEBAO　第52卷　第1期

文章编号：0559-9350(2021)01-0103-09

碾压式导电混凝土电热试验与供电模式分析

张梦溪[1]，李明超[1]，张津瑞[1]，胡　昱[2]

（1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室，天津　300350；
2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京　100084）

摘要：我国的建坝重心不断向高寒地区转移，工程经验表明，低温作用下碾压混凝土坝越冬层面所在高程附近易发生温度开裂，给该类坝型温控防裂提出了更高的要求。传统的外置保温措施在大仓面上的铺设和拆除必然会提高施工成本，同时降低施工效率。针对上述问题，制备了一种能够适用于碾压工艺的导电混凝土材料(ERCC)，测试了大尺寸碾压试件ERCC层的电热温升性能，基于测试数据反演了ERCC的导热系数和比热容；根据热流量平衡关系推导了坝体内外温差与抵御寒潮所需通电电压的$U-\Delta T$定量模型，利用电-热-结构耦合的方法模拟了气温骤降作用下越冬层面温度场和应力场演变过程，以典型测点温度平稳度为目标优化每日供电方式，通过优化结果验证了所推导模型的可靠性；通过对比气温骤降条件下“薄层表面保温+ERCC通电加热”与“常规保温材料”两组共9个温控方案的温度、应力以及经济成本，发现所提出的供电模式在改善温度和应力分布方面具有优良的效果，可为解决坝体越冬层面温控问题提供新的思路。

关键词：碾压混凝土坝；碾压式导电混凝土；越冬层面；温控；$U-\Delta T$模型；供电模式；电-热-结构耦合仿真

中图分类号：TV431　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20200277

1　研究背景

近年来，为充分开发水能资源，我国的水利水电工程建设重心已逐步向高寒高海拔地区迁移。当冬季气温过低时，碾压混凝土(Roller Compacted Concrete，RCC)坝停止施工直至第二年气温回升，停工的混凝土上表面即为越冬层面，由于混凝土坝越冬层面受寒潮影响，其高程附近容易产生较大的内外温差，从而在上下游表面附近与越冬停浇面中间部位引起较大的拉应力，进而造成越冬层面处混凝土开裂，如：辽宁观音阁碾压混凝土坝在1991—1994年经历的3个越冬层面的上、下游侧均出现了开裂现象[1]；日本玉川碾压混凝土坝越冬层面的施工缝出现了明显开裂现象[2]。高寒地区严苛环境对碾压混凝土坝建设材料提出了更高的要求，越冬层面处一旦出现水平裂缝，将会直接影响碾压混凝土坝体安全。而随着工程建设经验的积累，逐渐形成“基础温差适当放宽，内外温差从严控制”的高RCC坝温控设计理念。因此，作为易产生温差的关键部位，越冬层面的温控防裂设计已成为关键问题。

为降低越冬层面混凝土开裂的可能性，坝工界目前主要采取以下三类措施：(1)在越冬层面上采取外部保温措施，减少冬歇期坝体混凝土与严寒环境的热交换以控制混凝土坝体的内外温差。保温措施包括覆盖一定厚度的棉被、挤塑式聚苯乙烯隔热保温板[3]、人造雪层[4]等表面防护措施[5-6]，但混凝土坝特别是基础强约束区混凝土的浇筑仓面较大，混凝土越冬时保温层面积较大，保温被层数可达15～20层，外部保温层的覆盖范围和覆盖厚度增加必然会提高施工成本，同时降低施工效率；(2)在越冬层面布置保温层的基础上，通过在碾压混凝土坝体中布置预留缝、诱导缝[7]、人工短缝[8]等结

收稿日期：2020-04-27；网络首发时间：2020-12-23
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201221.1654.002.html
基金项目：国家自然科学基金项目(51879185)；国家大坝安全工程技术研究中心开放基金项目(CX2019B02)
作者简介：张梦溪(1994-)，博士生，主要从事水利工程仿真与优化分析研究。E-mail：zhangmx@tju.edu.cn
通讯作者：李明超(1979-)，教授，主要从事水利工程仿真与优化分析研究。E-mail：LMC@tju.edu.cn

构降低坝体的强约束，释放过大的温度应力。但这类结构在一定程度上会破坏坝体的整体性，往往需要在切缝的基础上设计布置辅助防护结构(止水、槽钢等)；(3)在布置保温层的基础上，采用微膨胀混凝土补偿温降收缩，或通热水降低混凝土内外温差，进而降低因温度应力产生开裂的可能[9]。此外，针对混凝土坝的温控问题，中国水利水电科学研究院总结了多年的研究成果和工程实践经验，开发了大型水利工程仿真软件SAPTIS[10-11]，提出适用于高混凝土坝的“九三一”温度控制模式[12]。随着信息化、数字化、智能化技术及传感技术的进步，近年来已逐步实现了混凝土温控防裂的智能化技术[13-15]，目前该技术正在丰满重建工程、黄登、白鹤滩、乌东德等工程全面应用。但是上述方法大多采用外部措施保温，以期阻止坝体表面热量的散失，不能通过材料的自发生热对热量损失进行有效补偿，难以从根本上解决高寒地区碾压混凝土坝的越冬层面温控问题。

新型混凝土材料的提出可为解决水工结构工程问题提供科学的指导[16]。导电混凝土(Electrically Conductive Concrete， ECC)因其既有混凝土材料良好的力学性能兼备优异的电热性能，在桥梁、路面以及机场跑道的融雪除冰应用方面初露头角[17-18]，已初步应用于损伤诊断、工程监测、地面采暖、道路桥梁除冰融雪工程和接地工程等多个方面[19-21]，故针对ECC这类电热型混凝土的研究与开发具有非常广阔的前景和重要的实用意义。然而，现有研究更多的聚焦于材料层面[22-24]， 侧重于掺入的导电介质的种类[25]和掺量对其导电性能、电热性能[26-28]、压阻特性[29]、力学性能和电磁屏蔽等性能的影响。目前，将导电混凝土应用于大型水工结构的研究鲜有报道，合理有效地利用其电热性能可为高寒地区温控防裂提供新的解决思路。此外，ECC在路面桥梁等工程应用时，多重点关注导电混凝土结构的融雪除冰能力，尚未形成一套针对大体积混凝土结构温控的精确供电模式。

本文基于导电混凝土的设计思路，提出了能够适用于碾压工艺的导电混凝土材料(Electrically conductive roller-compacted concrete，ERCC)，根据热流量平衡关系推导了坝体内外温差与抵御寒潮所需通电电压的$U-\Delta T$定量模型，基于电热温升试验结果反演了ERCC热力学参数，利用电-热-结构耦合方法模拟了气温骤降作用下越冬层面温度演变过程，以典型测点温度平稳度为目标优化每日供电方式，将优化结果与理论计算结果对比，验证所推导模型的可靠性，最后对比常规保温材料的温度和应力计算，分析供电模式的优良效果。

2 计算原理与方法

2.1 $U-\Delta T$模型 假定通电后ERCC材料均匀产热与散热，当混凝土表面与气温存在温差时，在气温作用下，会发生热量的交换，若气温低于混凝土温度，混凝土表面会出现热量流失，单位时间混凝土表面流失的热流量为：

$$q_a=\beta\left(T_c-T_a\right)S \tag{1}$$

式中：β为表面放热系数，J/(m^2·s·℃)；T_c与T_a分别为混凝土表面温度和气温，℃；S为混凝土与空气接触的面积。

根据焦耳定律，电阻为R(单位Ω)的ERCC试件在两侧电压U(单位V)的作用下，单位时间产生并传递至上表面的热量为：

$$q_r=k\frac{U^2}{R} \tag{2}$$

式中：k为表面热量传递系数，$0<k\leqslant 1$，通常状况下可取为1，认为ERCC产生的电热全部用于抵御气温降低造成的热量散失；R可由ERCC的电阻率ρ、ERCC层面厚度l和截面积S按下式进行计算：

$$R=\rho\frac{l}{S} \tag{3}$$

为防止越冬层面内外温差过大，减弱冷空气作用下越冬层面的温降作用，当混凝土水化基本完成后，单位时间内ERCC越冬层面产生的热量q_r应等于混凝土与空气交换的热量q_a，即$q_r=q_a$，联立式(1)—(3)可得能够抵御寒潮的ERCC层两侧的电压(补偿电压)如下：

$$U=\sqrt{\frac{\beta\left(T_c-T_a\right)\rho l}{k}}=\sqrt{\frac{\beta\cdot\Delta T\cdot\rho l}{k}} \tag{4}$$

式(4)即为$U-\Delta T$模型，其意义在于，可根据实测的坝体与气温的温差计算得到保证混凝土表面温度平稳的供电电压，为ERCC的应用提供理论支撑。

2.2 供电模式优化 为验证所推导模型的准确性，采用电热耦合有限元数值模拟方法分析温度场演化过程，设第i天的供电电压为$U(i)$，先后对内外温差一定和气温骤降两种工况下的供电模式进行优化，由于通电加热后会有部分热量向坝内传递，为防止内部温度升高过多，控制坝体内部温度梯度不宜过大，同时避免外部温度降低过大，选取ERCC层的表面、中部、底部3个高程的典型测点，使3个测点的变异系数之和最小，因此，该优化问题的目标函数为：

$$\min\sum_{j=1}^{m}CV(j)=\min\sum_{j=1}^{m}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_j(i)-\bar{T}_j\right)} \tag{5}$$

式中：$CV(j)$为第j个测点多日温度的变异系数；m为参与计算的测点个数；n为计算的总天数；$T_j(i)$为第j个测点在第i日的计算温度；$\overline{T_j}$为每个测点的多日平均气温。以每日的供电电压$U(i)$，作为优化变量，满足约束条件为：

$$0\leqslant U(i)\leqslant 40 \tag{6}$$

经过一阶优化算法优化后即可得到在温差一定和气温骤降条件下越冬层面温度平稳度最优的供电方式，其结果可用于验证$U-\Delta T$模型的可靠性。

3 ERCC性能测试与参数反演

3.1 碾压式导电混凝土 从经济角度考虑，选取相对便宜的炭黑作为导电介质掺入混凝土拌合物中，ERCC材料的设计配合比如表1所示。由于导电相材料的掺入会明显降低拌合物的流动性[30]，进而影响其成型质量。针对这一问题，提出采用振动碾压的施工方式，浇筑了尺寸为3000 mm×700 mm×300 mm的大尺寸碾压试件，并在试件内部水平布设一对间距200 mm的黄铜网电极，采用JP3060D直流稳压电源以恒定30 V电压连续通电145 min，每间隔10 min记录一次K型热电偶记录的内部温度数据。

表1 碾压式导电混凝土设计配合比

单位用水量/(kg/m³)	粗骨料/(kg/m³)	水泥/(kg/m³)	粉煤灰/(kg/m³)	炭黑体积掺量/%	表面活性剂/%	减水剂/%	砂率/%
125	1146	210	90	11.4	4.0	1.0	42.0

3.2 ERCC热力学性能 根据供电电压与测得的电流，即可计算ERCC的电阻R，再根据式(3)即可计算出现有配合比情况下的电阻率。再利用电热耦合数值模拟结果和热电偶实测电热温升曲线，使二者均方根误差最小，即可反演得到ERCC的导热系数和比热容，试验测试与反演结果如表2所示。实测温度时程变化与利用反演参数计算的温升曲线的对比如图1所示，可以发现二者吻合良好，均方根误差仅为0.273℃，采用均质材料开展模拟时，表2中参数与试件尺寸无关，可用于第4节工程算例的模拟与优化分析。

表2 ERCC热力学性能

比热容J/(kg·℃)	导热系数W/(m·℃)	密度/(kg/m³)[1)]	电阻率/(Ω·m)*
1086.00	2.86	2301.66	5.87

注：1)试验测试结果

4 工程算例分析

4.1 有限元模型与边界条件 本节算例采用的计算模型选自我国某一等大(1)工程的碾压混凝土二道

坝中宽22 m的④号坝段，由于基础强约束区最不利于坝体温控防裂，本文选取该RCC重力坝段基础强约束区坝高0～16.5 m范围进行计算，考虑气温对混凝土的影响深度和碾压施工便利，设置ERCC越冬层面厚度为0.5 m，位于坝高16.0～16.5 m范围内，三维有限元模型网格如图2所示。

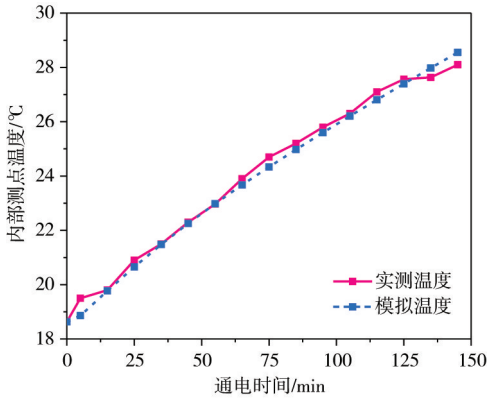


图1　恒压作用下ERCC温升测试与反演结果

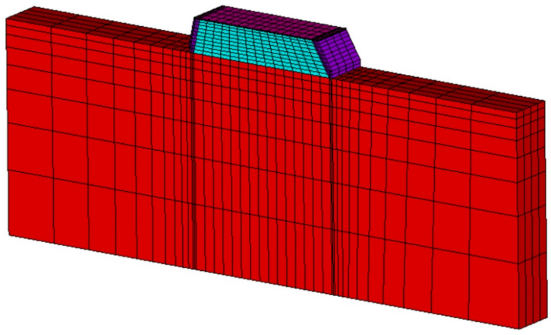


图2　RCC重力坝基础强约束区及ERCC越冬层面有限元模型

数值仿真过程中涉及的材料主要包括ERCC、内部RCC、外部RCC和基岩，这4种材料热力学参数如表3所示。采用瞬态热-电-结构耦合分析，开展坝体温度场与应力场的仿真计算，对ERCC上下表面分别施加0和30 V的电压荷载，坝体和基岩的初始温度分别设置为15和11 ℃，对于内外温差一定的工况，环境温度分别设置为15、8、1、-6、-13、-20、-27和-34 ℃共8个恒定温度，获得最优的每日补偿电压；对于温度骤降的工况，以3天内降低39.7℃的大幅温度骤降的正弦曲线表示气温T随时间t的变化过程：

$$T=\begin{cases}-2.8-39.7\sin\dfrac{\pi}{6}(t-1) & 1\leqslant t\leqslant 7\\ -2.8 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

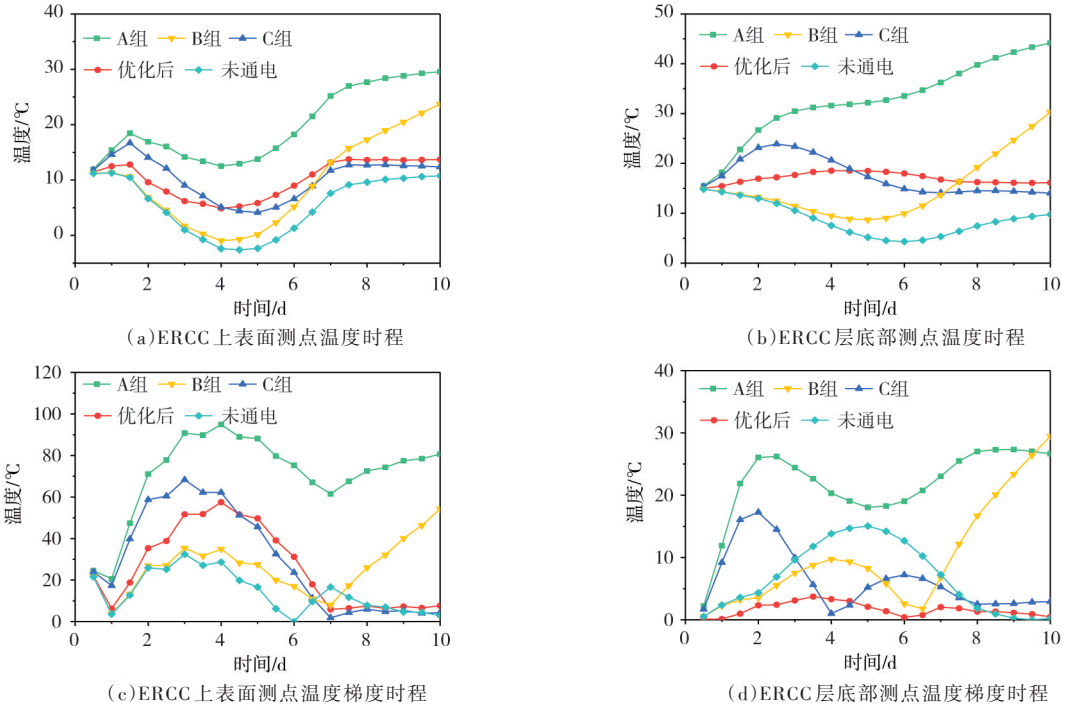
表3　坝体材料热力学参数

	计算单位	ERCC	内部RCC	外部RCC	基岩
导热系数λ	kJ/(m·h·℃)	10.29	6.62	6.74	9.67
热交换系数β	kJ/(m^2·h·℃)	45.70	45.70	45.70	45.70
比热容c	kJ/(kg·℃)	1.086	0.867	0.853	0.921
线膨胀系数α	10^{-6}/℃	4.56	4.50	4.49	5.57
密度ρ	kg/m^3	2302	2476	2450	2800
泊松比μ		0.167	0.167	0.167	0.25
弹性模量	GPa	29.20	31.60	38.60	14.80

4.2　$U-\Delta T$模型数值验证　为说明采用合适补偿电压的有益效果，依托于本工程算例的RCC坝模型设计以下3种供电方案作为对照组。A组：气温骤降时以恒定的电压$U(i)$= 30 V供电；B组：$U(i)$= 3 t，V；C组：$U(i)$= 30 -3 t，V；t为时间，d。优化后供电方式与简单通电方式作用下ERCC越冬层面典型节点的温度和温度梯度变化过程如图3所示，可以看出供电方式对ERCC层各个部位的温度时程影响较大；若补偿电压U过小，无法抵御气温骤降带来的混凝土表面温降；若补偿电压U过大，则会导致大量电热向坝体内部传导，使得RCC坝核心温度过高，同样不利于温控防裂。因此，需根据气温和越冬层面表面温度的变化，对每日的补偿电压U进行优化分析。由图3(a)(b)可知，优化后的供电方式下ERCC温度时程最平稳，在20℃的气温骤降条件下，ERCC层顶部测点和底部测点(ERCC-RCC界面)的最大温差分别为8.86 ℃和3.52 ℃，均为所有方案中最小，表明优化补偿电压能够实现坝体表面温度和内部温度的平稳控制；两个典型测点的温度梯度时程变化如图3(c)(d)所示，优化后的供电方式下ERCC-RCC界面处温度梯度最小，但对于表面的空间温度梯度控制效果一般。因此，对于自发热型导电混凝土层仍需要采取一定的表面保温措施以配合可调控的内部生热，进一步

提升越冬层面温度和梯度的控制效果。

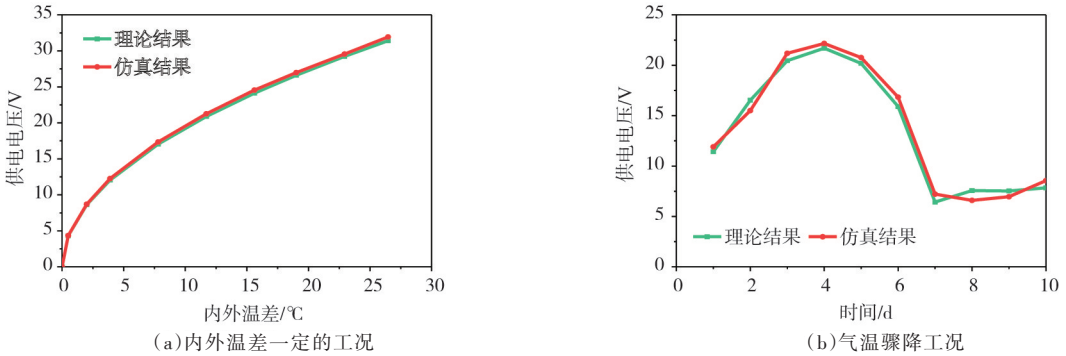
为验证所推导的$U-\Delta T$模型，将优化结果与理论计算结果进行对比，如图4(a)为内外温差一定的工况下补偿电压变化过程，图4(b)为气温骤降工况下每日的补偿电压的变化过程，由于图4(b)优化变量的个数(10个)多于图4(a)中变量个数(1个)，变量的增多使得图4(b)中理论结果与仿真结果的差异略大于图4(a)；但总体来说由$U-\Delta T$模型(k=1)计算的补偿电压与热电耦合仿真优化获得的补偿电压吻合良好，直接验证了所推导$U-\Delta T$模型的准确性与可靠性，故在实际应用中应时刻监控越冬层面的表面温度和气温的变化，进而根据二者温差计算最优的补偿电压，以期实现RCC坝越冬层面的实时温控。



(a)ERCC上表面测点温度时程　(b)ERCC层底部测点温度时程

(c)ERCC上表面测点温度梯度时程　(d)ERCC层底部测点温度梯度时程

图3　ERCC越冬层面典型位置温度及梯度变化



(a)内外温差一定的工况　(b)气温骤降工况

图4　不同工况下理论计算与数值仿真补偿电压对比

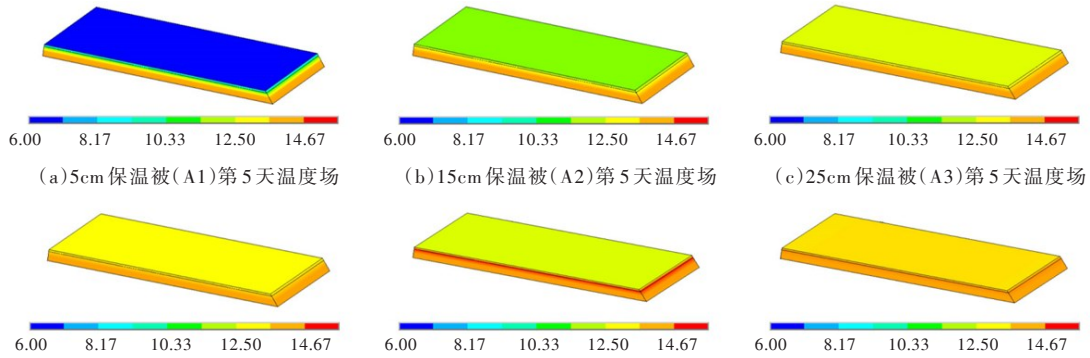
4.3　温控效果评价　为进一步说明ERCC保护层的温控防裂效果，依托于本工程算例的RCC坝有限元模型分别计算了式(7)的气温大幅骤降条件下未通电(A组)、$U-\Delta T$模型补偿电压作用下(B组)的温度场与应力场的演化过程，选用导热系数为0.15 kJ/(m·h·℃)的橡塑海绵保温被作为表面防护[6]，1 cm厚保温被单价为10元/m^2，对比方案中涉及的保温被厚度分别为5、15、25和35 cm。根据各方案的等效放热系数、测点最大温差平均值和最大拉应力(表4)可知，铺设保温被和布置ERCC层均能减小坝体温差与温度应力，且采用ERCC+保温被的温控措施效果最优；从温控效果角度分析，通过对比方案A3(25 cm保温被)与方案B1(ERCC+5cm保温被)、方案A4(35 cm保温被)与方案B2(ERCC+15 cm保温被)的温度场(图5)与温度应力，发现对于本文条件，布置ERCC层能够减少铺设厚度约20 cm保

温被。

随后对比基于本工程算例各个方案的施工成本、运行(供电)成本和冬歇期的总成本，ERCC层的施工成本包含混凝土材料成本与铜网电极成本，运行成本则是根据每日供电所消耗的电量成本，假设冬歇期为4个月120天，算得各方案的成本如表4所示，可以发现：(1)从成本角度分析，ERCC层的施工成本与20 cm保温被的成本接近；(2)ERCC层的运行成本低于其施工成本，且随着保温被厚度的增加，运行成本降低明显；(3)ERCC层的施工和运行成本仍可进一步优化，减小ERCC层的厚度能够降低ERCC体量和总电阻，这样既减少了施工成本，同时提升了电热效果进而减小了运行成本。

表4　不同方案温控效果与成本估算

对比方案	A0	A1	A2	A3	A4	B0	B1	B2	B3
保温被厚度/cm	0	5	15	25	35	0	5	15	25
等效热交换系数/(kJ/(m²·h·℃))	45.70	2.82	0.98	0.59	0.42	45.70	2.82	0.98	0.59
是否通电	否	否	否	否	否	是	是	是	是
最大温差平均值/℃	9.92	2.38	0.95	0.58	0.42	4.44	0.49	0.45	0.19
最大拉应力/MPa	6.61	1.28	0.43	0.22	0.13	4.19	0.25	0.04	0.002
施工成本/万元	0.0	8.8	26.4	44.4	61.6	36.6	45.4	62.9	80.6
运行成本/(元/d)	0	0	0	0	0	2578	311	112	66
冬歇期120 d总成本/万元	0	8.8	26.4	44.4	61.6	67.5	49.1	64.2	81.4

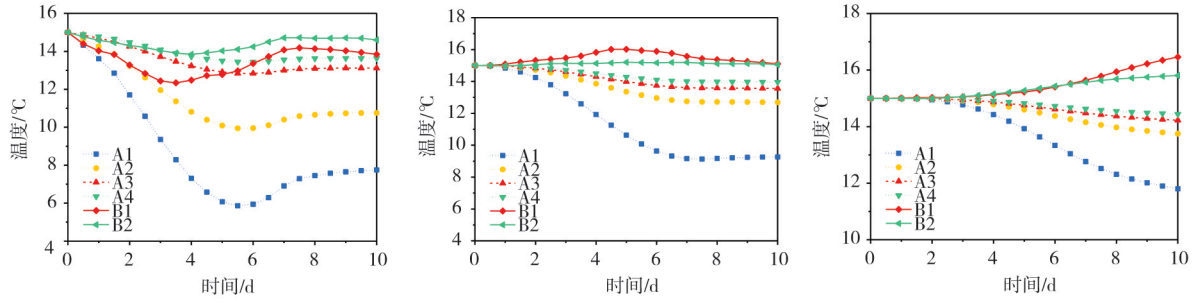


(a)5cm保温被(A1)第5天温度场　(b)15cm保温被(A2)第5天温度场　(c)25cm保温被(A3)第5天温度场

(d)35cm保温被(A4)第5天温度场　(e)5cm保温被+ERCC(B1)第5天温度场　(f)15cm保温被+ERCC(B2)第5天温度场

图5　不同温控措施下RCC坝越冬层局部温度场(单位：℃)

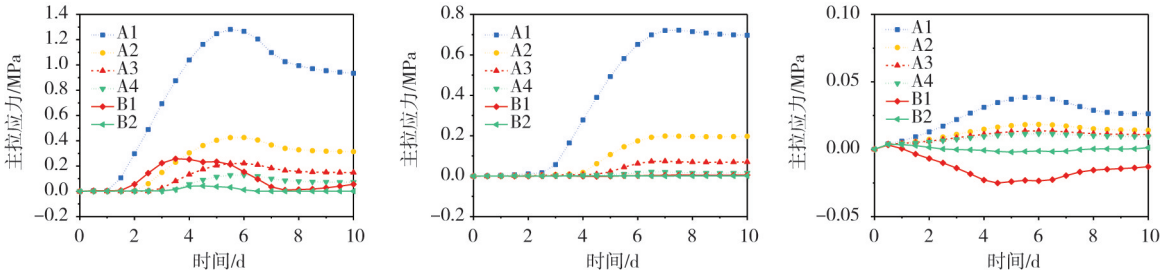
在表面布置薄层保温被的情况下，虽然铺设20 cm橡塑海绵保温被的保温效果与ERCC层接近，但二者温控机理截然不同。如图6、图7所示，仅采用保温被的方案A1—A4，坝体的最大温降与保温被的厚度呈负相关，且经历寒潮之后，坝体不同高程均出现不同程度的不可逆温降，进而在坝体不同高程均产生不利的拉应力，原因在于保温被重点为表面防护，通过降低坝体混凝土与空气的热量交换，以阻热的方式实现冬歇期的温控，坝体内部温度不可避免的由温降产生拉应力；相比而言，ERCC重点为温度调控，通过将电能转化为热能，以自发热补偿温降造成的热量散失，以实现坝体温度平稳控制。对于成本和温度应力接近的方案，如方案A3与B1、方案A4与方案B2，ERCC上表面的温度和应力时程变化接近，但在ERCC-RCC界面处，方案B1和B2的温度及应力时程变化更



(a)ERCC上表面坝高16.50m测点　(b)ERCC-RCC界面底部坝高16.00m测点　(c)RCC内部坝高14.89m测点

图6　不同温控措施下ERCC越冬层面典型位置温度时程

加平稳，在RCC内部测点处温度最大仅升高1.5 ℃，并产生0.025 MPa的压应力，表明通电产热仅有相当少的热量传向坝体内部，其余热量均用于抵御气温骤降的影响，这样使得ERCC层内部主拉应力水平较低进而降低沿表面至坝体内部的拉应力区的深度。因此，采用薄层表面防护+通电加热的方式对越冬层面的温控防裂效果优于传统的表面保温措施。



(a)ERCC上表面坝高16.50m测点　(b)ERCC-RCC界面底部坝高16.00m测点　(c)RCC内部坝高14.89m测点

图7　不同温控措施下ERCC越冬层面典型位置主拉应力时程

5　结论

根据导电混凝土的设计思路，配制了能够通电发热且适用于碾压施工的碾压式导电混凝土ERCC，通过试验和反演获得了ERCC的多个热力学参数，推导了坝体内外温差与抵御寒潮所需通电电压的$U-\Delta T$定量模型，最后通过电-热-结构耦合数值仿真验证了推导模型的可靠性，根据温度和应力的时程变化过程，可以得到以下结论：(1)ERCC具有优良的电热性能，可通过改变其两侧电压实现电热温升的灵活控制；(2)在RCC坝越冬层面布置ERCC并采用合适的供电方式能够有效改善坝体的温度分布、降低温降拉应力并减少拉应力区深度；(3)所提出$U-\Delta T$模型与数值仿真优化后的结果吻合良好，为RCC坝智能实时温控提供新的思路；(4)在表面铺设薄层保温被的情况下，布置ERCC层与铺设20 cm橡塑海绵保温被的温控效果和经济成本接近，可在不增加经济成本的前提下，ERCC层替代一定厚度的保温被，进而减少布置和拆卸表面保温材料对施工进度的影响。

鉴于碾压式导电混凝土在水工结构的应用研究仍处于起步阶段，后续研究可围绕以下三个方面展开：(1)本文主要针对0.5 m厚的ERCC层展开研究，后续研究应考虑成本和温控效果，对ERCC层厚度进行优化设计分析；(2)本文主要针对全断面布设铜网这种电极形式展开研究，后续研究可针对电极的布置形式的优化设计展开；(3)碾压混凝土坝中往往铺设冷却水管来降低水化热，若能将ERCC这类电热型混凝土与冷却措施相互配合，可进一步提升混凝土坝的温控效果。

参　考　文　献：

[1] 黄淑萍，胡平，岳耀真．观音阁水库碾压混凝土大坝温度应力仿真计算研究[J]．水力发电，1996(7)：40-44，69．

[2] 司政，牛芙蓉，李守义，等．严寒地区碾压混凝土坝越冬层面温控防裂研究[J]．应用力学学报，2017，34(6)：1040-1047，1215．

[3] ZHU B．Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]．Butterworth-Heinemann，2013．

[4] 常昊天，姚宝永，刘志国，等．丰满水电站重建工程坝块越冬停浇面保温措施研究[J]．水利水电技术，2016，47(11)：52-54，60．

[5] CHEN B，HE M，HUANG Z，et al．Long-tern field test and numerical simulation of foamed polyurethane insulation on concrete dam in severely cold region[J]．Construction and Building Materials，2019，212：618-634．

[6] 张国新，刘茂军，李松辉，等．高寒区混凝土坝长间歇薄层浇筑越冬保温方法[J]．水利水电技术，2016，47(6)：25-28．

[7] 李明超，张梦溪，王孜越．考虑诱导缝的碾压混凝土重力坝控裂结构温度场与温度应力数值分析[J]．水利学报，2017，48(5)：551-559，567．

[8] 司政，黄灵芝，宋志强，等．人工短缝对严寒地区碾压混凝土坝越冬层面应力的释放效果[J]．西安理工大学学报，2013，29(1)：38-44．
[9] NGUYEN V，TONG F，NGUYEN V N．Modeling of autogenous volume deformation process of RCC mixed with MgO based on concrete expansion experiment[J]．Construction and Building Materials，2019，210：650-659．
[10] 张国新．SAPTIS：结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J]．水利水电技术，2013，44(1)：31-35，44．
[11] 周秋景，张国新．SAPTIS：结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之二)[J]．水利水电技术，2013，44(9)：39-43，48．
[12] 张国新，刘毅，李松辉，等．“九三一”温度控制模式的研究与实践[J]．水力发电学报，2014，33(2)：179-184．
[13] 张国新，刘毅，刘有志，等．高混凝土坝温控防裂研究进展[J]．水利学报，2018，49(9)：1068-1078．
[14] 林鹏，李庆斌，周绍武，等．大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J]．水利学报，2013，44(8)：950-958．
[15] 李松辉，张国新，刘毅，等．大体积混凝土防裂智能监控技术及工程应用[J]．中国水利水电科学研究院学报，2018，16(1)：9-15．
[16] LI M，ZHANG M，HU Y，et al．Mechanical properties investigation of high-fluidity impermeable and anti-cracking concrete in high roller-compacted concrete dams[J]．Construction and Building Materials，2017，156：861-870．
[17] HAN B，ZHANG L，OU J．Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures[M]．Singapore：Springer，2017．
[18] 赵庆新，张津瑞，赵冉冉．炭黑掺量对水泥基材料微波吸收性能的影响及机理[J]．硅酸盐学报，2011，39(12)：2013-2020．
[19] DOWNEY A，D′ALESSANDRO A，BAQUERA M，et al．Damage detection，localization and quantification in conductive smart concrete structures using a resistor mesh model[J]．Engineering Structures，2017，148：924-935．
[20] WON J，KIM C，LEE S，et al．Thermal characteristics of a conductive cement-based composite for a snow-melting heated pavement system[J]．Composite Structures，2014，118：106-111．
[21] MALAKOOTI A，THEH W，SADATI S，et al．Design and full-scale implementation of the largest operational electrically conductive concrete heated pavement system[J]．Construction and Building Materials，2020，255：119229．
[22] SASSANI A，CEYLAN H，KIM S，et al．Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete[J]．Construction & Building Materials，2017，152：168-181．
[23] ZHANG J，XU L，ZHAO Q．Investigation of carbon fillers modified electrically conductive concrete as grounding electrodes for transmission towers：computational model and case study[J]．Construction and Building Materials，2017，145：347-353．
[24] SUN G，LIANG R，LU Z，et al．Mechanism of cement/carbon nanotube composites with enhanced mechanical properties achieved by interfacial strengthening[J]．Construction and Building Materials，2016，115：87-92．
[25] DONG W，LI W，SHEN L，et al．Piezoresistivity of smart carbon nanotubes (CNTs)reinforced cementitious composite under integrated cyclic compression and impact[J]．Composite Structures，2020，241：112106．
[26] LEE H，PARK S，CHO S，et al．Correlation analysis of heating performance and electrical energy of multi-walled carbon nanotubes cementitious composites at sub-zero temperatures[J]．Composite Structures，2020，238：111977．
[27] KIM G，YANG B，RYU G，et al．The electrically conductive carbon nanotube (CNT)/cement composites for accelerated curing and thermal cracking reduction[J]．Composite Structures，2016，158：20-29．
[28] WANG C，CHEN Q，FU H，et al．Heat conduction effect of steel bridge deck with conductive gussasphalt concrete pavement[J]．Construction and Building Materials，2018，172：422-432．
[29] DONG W，LI W，LU N，et al．Piezoresistive behaviours of cement-based sensor with carbon black subjected to various temperature and water content[J]．Composites Part B：Engineering，2019，178：107488．
[30] WANG D，WANG Q，HUANG Z．Investigation on the poor fluidity of electrically conductive cement-graphite paste：Experiment and simulation[J]．Materials and Design，2019，169：107679．

(下转第 119 页)

Study on the gravity wave induced by the diurnal variation of outflow discharge in the Three Gorges Reservoir

JI Daobin[1,2], ZHOU Zhexuan[1], YANG Zhongyong[1,2], LONG Lianghong[1], WANG Yaoyao

(1. *College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *China*;
2. *Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *China*)

Abstract: Diurnal variation of water level has been observed in Three Gorges Reservoir (TGR), which is driven by the outflow discharge fluctuation, and would travel toward upstream along TGR as a gravity wave. The mechanism of generation and propagation along the reservoir is still unclear. To study the generation mechanism and propagation process of this gravity wave, the field data of discharge and water level during January and October, 2018 was analyzed with methods of wavelet transform and filter analysis. The main results included: (1) the amplitudes of diurnal wave were proportional to accumulated discharge, and inverse proportional to background water level, which can be evaluated by a formula derived in this paper; (2) The wave amplitude experienced a decrease-increase process, while the phase increased gradually, in the process of upstream travelling, under the influence of bottom friction, transverse section, discharge from branches, as well as background water level.

Keywords: Three Gorges Reservoir; outflow discharge fluctuation; gravity wave; wave propagation in a reservoir

(责任编辑：李福田)

(上接第110页)

Experimental study on the electro-thermal performance of ERCC and its power supply mode analysis

ZHANG Mengxi[1], LI Mingchao[1], ZHANG Jinrui[1], HU Yu[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin* 300350, *China*;
2. *State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Engineering experience indicates that temperature cracking is easy to occur near the height of overwintering layer of RCC dams under the low temperature. More dams are being constructed in China's frigid region, which puts forward higher requirements for temperature control of concrete dams. The laying and dismantling of the traditional external insulation measures on the large warehouse surface will inevitably increase the cost and reduce efficiency in construction. In view of the above problems, a new type of electrically conductive roller compacted concrete (ERCC)is introduced in this paper. The electric temperature increase of large-scale ERCC layer specimen was tested, and the thermal conductivity and specific heat capacity of ERCC was inversed according to the test data. Then, the quantitative calculation model of voltage required to resist the cold wave (U)and the temperature difference inside and outside the dam (ΔT)are deduced according to the heat flow balance. The evolution process of temperature field and stress field of overwintering layer under the action of sudden temperature drop was simulated by the coupling method of electricity-heat-structure. The power supply mode is optimized with the temperature stability of typical measuring points as the objective function. The reliability of the $U-\Delta T$ model has been verified by the optimization results. Comparing the temperature, stress and cost of 9 schemes for temperature control, including "thin layer surface protection+ERCC electrified heating" and "conventional insulation materials", the power supply mode has a favorable effect in improving the temperature and stress distribution, which can provide a new way to solve the problem of temperature control of overwintering layer.

Keywords: RCC dam; ERCC; overwintering layer; temperature control; $U-\Delta T$ model; power supply mode; structural-thermoelectric simulation

(责任编辑：杨　虹)