

大体积混凝土足尺模型裂缝控制应用研究

Research on Application of Crack Control for Mass Concrete Full-scale Model

刘 拼¹, 郭城瑶¹, 秦哲煊¹, 杨永民², 王丙垒¹, 徐 可¹

(1. 武汉三源特种建材有限责任公司, 湖北 武汉 430082; 2. 仲恺农业工程学院, 广东 广州 510225)

摘 要: 依托某质子肿瘤治疗中心项目, 采用大掺量粉煤灰降低水化热的思路、选用高性能膨胀抗裂剂配制 C35 补偿收缩混凝土进行大体积混凝土足尺模型试验, 严格控制混凝土施工过程并监测温度和应变, 取得良好的裂缝控制效果。结果表明: 环境温度 21~25 ℃、混凝土入模温度约 30 ℃时, 4.68 m×4.68 m×4.68 m 足尺模型内部最高温度 65.1 ℃、里表温差局部大于 25 ℃; 足尺模型表层温度与环境温度的温差在 10 ℃以下时, 混凝土仍处于微膨胀状态、表层应变 65.9~219.6 $\mu\epsilon$ 。

关键词: 高性能膨胀抗裂剂; 补偿收缩; 大体积混凝土; 足尺模型; 裂缝控制

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2023) 03-0010-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.010

LIU Pin¹, GUO Chengyao¹, QIN Zhehuan¹, YANG Yongmin², WANG Binglei¹, XU Ke¹

(1. Wuhan Sanyuan Special Building Material Co., Ltd., Wuhan 430082, China;

2. Zhongkai Agricultural Engineering College, Guangzhou 510225, China)

Abstract: Based on a proton tumor treatment center, the full-scale model test of mass concrete was carried out by using a large amount of fly ash which was used to reduce the hydration heat and the high performance expansion anti-crack agent to prepare C35 shrinkage compensating concrete. The concrete construction process was strictly controlled, the temperature and strain were monitored and the application effect of mass concrete crack control was good. The results show that when the ambient temperature was 21~25 ℃ and the temperature of mixture placing to mold was about 30 ℃, the maximum temperature inside the 4.68 m×4.68 m×4.68 m full-scale model was 65.1 ℃ and temperature difference of core and surface was more than 25 ℃; when the temperature difference between the surface temperature of the full-scale model and the ambient temperature was below 10 ℃, the concrete was still in expansion state and the strain of the surface layer was 65.9~219.6 $\mu\epsilon$.

Keywords: high performance expansion anti-crack agent; shrinkage-compensating; mass concrete; full-scale model; crack control

0 引言

某质子肿瘤治疗中心项目用地面积约 5999.85 m², 总建筑面积 35073 m², 地下工程 3 层、面积约为 14528 m², 设有质子区治疗中心。质子区为大体积混凝土结构, 墙体厚度 1000~4119 mm、板厚 1000~4680 mm, 混凝土采用 C35P10、浇筑量约 23645.67 m³。质子区大体积混凝土结构承担防辐

作者简介: 刘拼 (1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事混凝土膨胀剂及混凝土裂缝控制技术研究

收稿日期: 2022-05-16

射功能、不允许出现贯通裂缝,因此对混凝土的抗裂性能要求高。根据美国混凝土学会(A/8520I)、日本建筑学会标准(JASS5)、德国混凝土规范 DNI 1045、英国建筑规范 BS 882 以及我国 GB 50496-2018《大体积混凝土施工标准》等对大体积混凝土的定义可知^[1],现浇混凝土结构几何尺度大、胶凝材料水化热在结构内部积聚不易散发,易导致结构内外温差过大,在约束条件下降温阶段容易产生温降裂缝,需采取有效措施解决胶凝材料水化热及随之引起的混凝土结构体积变化问题,有效降低混凝土的开裂风险。

在大体积混凝土结构实际施工过程中,常用措施除了采用永久施工缝、后浇带、跳仓法、膨胀加强带、无缝施工、水平分层间歇等施工方法^[2-5],控制混凝土入模温度,数据监测,保温保湿养护等外,采用粉煤灰或复合使用粉煤灰和磨细矿渣粉等大掺量矿物掺合料设计混凝土配合比以降低大体积混凝土的绝热温升^[6-7]、基于补偿收缩混凝土技术采用掺加混凝土膨胀剂的补偿收缩混凝土在温降阶段产生适度膨胀以抵抗温降收缩^[7-9]。Nguyen 等^[10]从控制混凝土浇筑体内外温差的角度研究保温层厚度对其影响,指出在混凝土养护初期加厚保温层以预防和限制裂缝;Seo 等^[11]优化冷却水管布置方法即提出垂直布置冷却水管,并在大体积混凝土降温试验中应用,相对于未布置冷却水管的大体积混凝土结构可降温 8~14℃;李东等^[12]基于水化反应动力学原理和水泥水化机理,对不同粉煤灰掺量的水化热试验数据拟合得到了考虑掺加掺合料的放热模型,用以预测混凝土的水化放热量和水化温升历程;文献[13-14]采用补偿收缩混凝土技术和水平分层间歇法相结合的方法,降低大体积混凝土结构内部温度、补偿收缩,降低混凝土结构因收缩出现裂缝的风险。

针对质子肿瘤治疗项目,开工前进行足尺模型试验,提前对大体积混凝土配合比设计,对大体积混凝土浇筑、温度应变监测、施工过程控制等进行演练,将试验结果作为后续项目实体结构

施工方案的重要编制依据,以期为大体积混凝土结构裂缝控制提供指导。

1 试验研究

根据质子肿瘤治疗项目质子区混凝土的特点和要求,选取质子区的厚墙(机电管线预留预埋量大且复杂、钢筋密集)作为模拟对象,混凝土 C35P10。足尺模型结构尺寸 4.68 m×4.68 m×4.68 m,下设 5.18 m×5.18 m×0.2 m 混凝土底座,详见图 1。

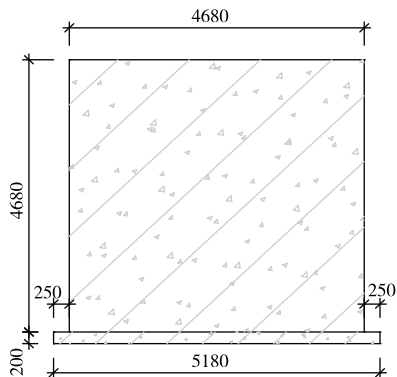


图 1 足尺模型
Fig. 1 Full-scale model

1.1 混凝土原材料及混凝土配合比

水泥为海螺(英德)普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,比表面积 354 m²/kg,初凝时间 152 min(>45 min)、终凝时间 237 min(<600 min);粉煤灰为沙角电厂 F 类 I 级,细度(45 μm 方孔筛筛余)11.4%、需水量比 94%;河砂产地东莞、采用细度模数 2.7 的 II 区中砂,含泥量 0.8%、泥块含量 0.2%;碎石产地惠州,5~25 mm 连续粒级,含泥量 0.4%、泥块含量 0.2%,针片状含量 8%,压碎指标 7.4%,空隙率 45%;减水剂产地深圳五山、聚羧酸减水剂,型号 WC-PC;采用自来水;采用 SY-G 型高性能膨胀抗裂剂,水中 7 d 限制膨胀率 0.040%,满足 GB/T 23439-2017《混凝土膨胀剂》^[15]的规定;采用 SY-KS 多功能抗侵蚀防腐剂,其各指标满足 JC/T 1011-2006《混凝土抗硫酸盐类侵蚀防腐剂》的规定。原材料化学成分详见表 1。基于补偿收缩混凝土技术

材料科学

和以大掺量粉煤灰降低水化热，对混凝土配合比进行研讨、试配，最终配合比详见表 2，其中粉煤灰掺量 40.1%。

表 1 原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of materials

%

组成	Loss	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃
水泥	3.18	61.31	1.96	3.66	5.84	16.18	2.18
粉煤灰	1.97	7.03	1.04	5.68	31.00	39.61	1.12
SY-G	9.40	54.63	5.05	0.61	2.41	5.57	25.24
SY-KS	3.48	50.40	1.08	2.63	3.81	36.23	2.22

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

kg/m³

强度/ 抗渗等级	水	水泥	粉煤灰	碎石	砂	SY-G	SY-KS	减水剂
C35P10	147	190	148	1042	780	31	31	13.7

注：混凝土坍落度控制（180±20）mm。

1.2 试验方案

依据 GB 50496-2018《大体积混凝土施工标准》，足尺模型试验入模温度控制在 30℃及以下。足尺模型设置 7 个测点，钢筋绑扎过程中，将 VWS-15 振弦式混凝土应变计固定在相应的测点位置，详见图 2。布置原则为：测点布设在混凝土浇筑体平面对称轴的半条轴线上；沿混凝土厚度方向，应至少在表层、底层和中心布置测点；表面测点和底层测点位于混凝土表面以内、底面以上 50 mm 处。数据采集自混凝土浇筑至相应测点后开始，1~4 d 监测 1 次/2 h、5~8 d 监测 1 次/4h、监测 1 次/8 h；当内部温度高于 60℃时，监测 1 次/1 h，直至温度不再升高时采用监测频率。

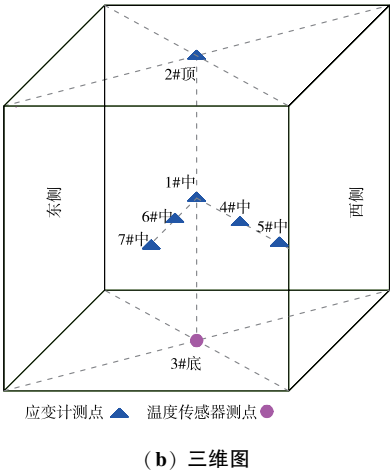
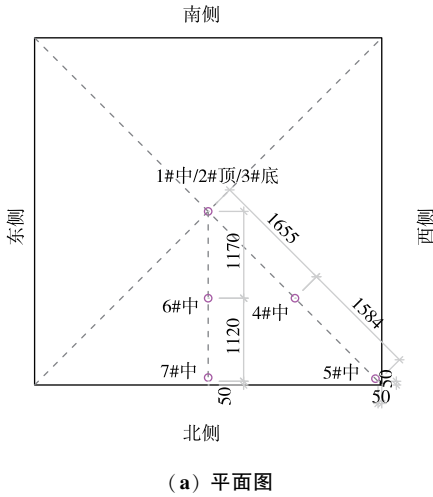


图 2 测点布置图
Fig. 2 Monitoring points layout

2 混凝土施工过程控制

足尺模型 4 月下旬浇筑成型。采用天泵浇筑，混凝土总量约 103 m³，一次浇筑完成。安排 4 辆运输车进行浇筑。搅拌站驻场人员和总包工程人员对每车混凝土都进行坍落度检测，保证浇筑混凝土质量。

浇筑时，直接使用天泵 3 m 下料管浇筑，一次下料厚度控制在 300~400 mm；沿高度方向分 3 层（约 1.5 m、1.5 m、1.68 m）间歇浇筑，间歇时间约 2 h，在下层混凝土初凝前浇筑上层混凝土，确保浇筑密实、增加散热机会且防止爆模；振捣时，插入到下层尚未初凝的混凝土中约 50~100 mm；同时检查模板是否空鼓，若出现空鼓使用振捣棒在外侧模板振捣。

浇筑当天 11:16 第一车砂浆通泵，足尺模型开始浇筑时刻为 12:22；对各车次的混凝土入模温度等进行检测，结果详见表 3，除第 1、2、8 和 9 车混凝土入模温度略高于 30℃外其他均在 29℃左右。现场同条件试块 7d 的抗压强度 27 MPa，达到设计强度 77%。

足尺模型顶面：浇筑次日 13:57 左右（混凝土终凝前）进行二次抹面，随后覆盖薄膜并用彩胶布遮挡；浇筑第三天 9:27 左右拆除彩胶布、顶面砌筑砌块，13:00 左右开始蓄水养护，水深 10 cm 且水温同环境温度。

足尺模型侧面：浇筑第三天 13：00 拧开西侧、北侧对拉螺杆螺丝帽 1 环（松模），采用 PE 管喷淋装置对模板进行洒水降温，洒水时间段为 9：00~17：00、2 小时一次（带模 9 d）。浇筑后第 9 天表面温度和环境温度温差降到 20℃ 以下，当日 9：40 拆除北侧面模板，拆除后未发现施工冷

锋、蜂窝麻面、漏筋等现象，表观质量良好，局部有效错台 5 mm，整体观感良好，随后拆除剩余 3 侧面模板，管线口处、螺栓口处均无裂缝；当日 14：30 对拆除模板后的 4 侧面进行保湿养护，即 PE 管喷淋装置洒水养护，喷淋时间段为 7：00~20：00、3~4 次/h。

表 3 混凝土施工时相关参数
Table 3 Parameters related to concrete construction

序列	环境温度/℃	混凝土入模温度/℃	空气湿度/%	浇筑时间	浇结时间	坍落度/mm	扩展度/mm
1	24	30.4	68	12：22	13：00	200	420
2	24	30.5	66	13：00	13：20	—	—
3	25	30	65	13：20	13：43	200	400
4	25	29.7	68	13：43	14：05	—	—
5	25	29.5	66	14：30	15：00	210	530
6	24	29.3	64	15：31	15：50	—	—
7	23	29.6	67	16：42	17：03	190	400
8	23	30.1	68	18：13	19：15	—	—
9	23	30.2	84	20：37	21：14	—	—
10	22	29.8	81	23：14	23：39	—	—
11	23	29.7	80	0：36	1：05	—	—
12	22	29.5	84	2：15	2：48	—	—
13	21	29.9	91	3：00	3：28	—	—

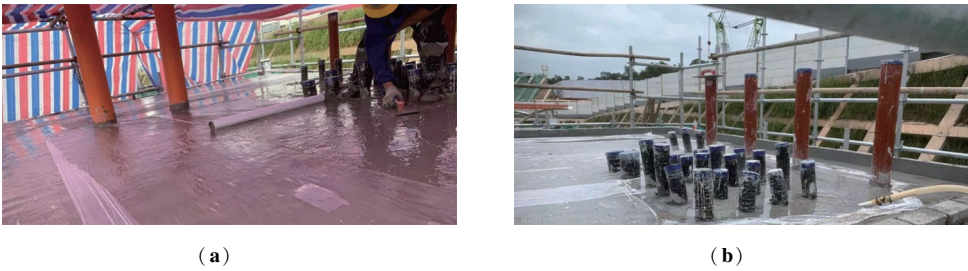


图 3 顶面养护
Fig. 3 Curing condition of top



图 4 侧面养护
Fig. 4 Curing condition of side

3 结果与讨论

3.1 混凝土温度变化分析

足尺模型各测点温度变化曲线详见图 5（注：施工过程中，3#底处温度传感器和 6#中处应变计受损无法监测数据故图中未显示）。由图可知：

- (1) 混凝土浇筑后，足尺模型各测点温度变化基本可分为 3 个阶段即急剧升温阶段、缓慢升温阶段和降温阶段，其中降温阶段足尺模型自内部中心向外部各测点的单位时间内降温幅度逐渐增大；
- (2) 足尺模型自内部中心向外部各测点处最高温度分别为 1#中处 65.1℃、4#中处 63.5℃、2#顶

材料科学

处 56.3℃、7#中处 53.5℃和 5#处 51.0℃，模型内部中心温度最高，因 1 中#和 4 中#与表面的距离分别为 2.34m、1.17 m，距离表面较远、内部水化热不易散发、温度变化基本不受外界环境变化的影响，降温速率小于 2℃/d 的设定温控指标，表层测点处与外界热对流较为强烈、降温速率大于 2℃/d；同一平面内（模型 1/2 高度平面内），1 中#、4 中#和 7 中#（5#中）到达温峰依次历时 118.6 h、68.6 h、34.6 h，距离模型内部中心越远，到达温峰所需时间越短且温峰值越低，另外 5#中测点位于两侧面相交的阳角附近处，其散热边界优于 7#中测点故其温度低于 7#中；不同高度处，1 中#和 2#顶到达温峰依次历时 118 h、38.6 h，距离模型内部中心越远，到达温峰所需时间也越短且温峰值也越低。

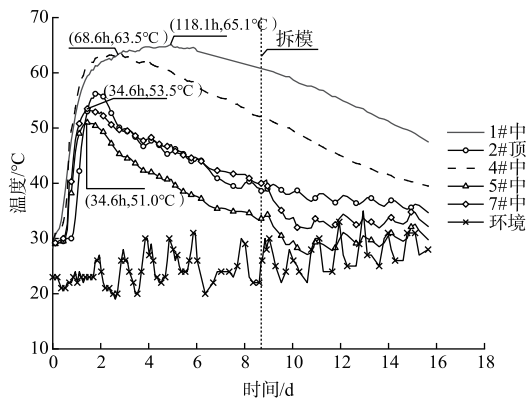


图 5 足尺模型温度曲线
Fig. 5 Temperature curve of full-scale model

足尺模型里表温差变化曲线详见图 6。由图可知，模型顶面采用先覆盖薄膜+彩胶布遮挡、后蓄水养护措施，1 中#与 2#顶温差始终低于 25℃；152.6 h~286 h 期间模型内部中心（1#中）与表层阳角处（5#中）温差大于 25℃，模型阳角在此期间除单层木模板之外未增加保温措施，同时 209.1 h 时拆除模板、213.9 h 时进行洒水养护，均使模型内部中心与表层阳角处温差加剧；拆模后，233.2 h~258.7 h 期间模型内部中心（1#中）与侧面表层（7#中）温差大于 25℃，现场采取洒水养护措施、无保温措施，模型内部有较大温度梯度、具有一定开裂风险。

足尺模型表层温度与环境温度温差变化曲线

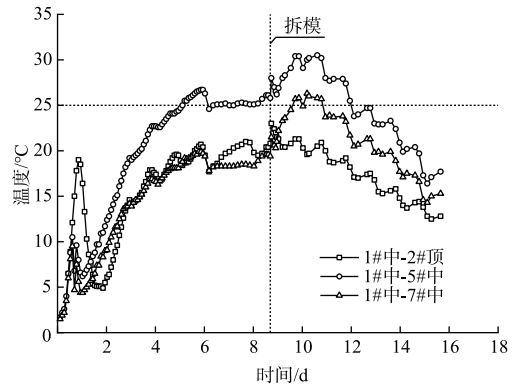


图 6 里表温差变化曲线
Fig. 6 Curve of temperature difference of core and surface
详见图 7，2#顶、5#中和 7#中分别在 156.6 h、86.6 h 和 160.6 h 以后，与环境温度的温差小于 20℃，并为逐渐降低趋势，而拆模时间在 209.1 h 左右，满足拆模时混凝土表面温度与环境最大温差小于 20℃的要求。

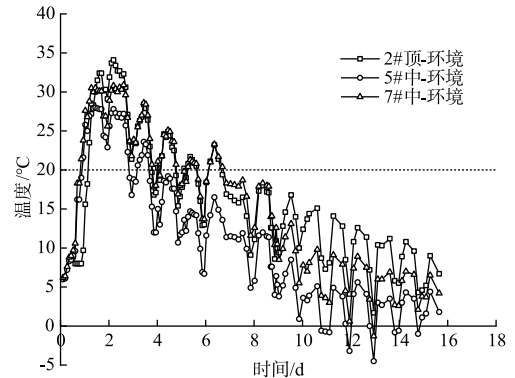


图 7 表层温度与环境温度温差变化曲线
Fig. 7 Curve of surface and ambient temperature difference

3.2 混凝土应变变化分析

足尺模型各测点应变变化曲线详见图 8。由图可知：（1）足尺模型中混凝土应变的变化历程基本可分为 2 个阶段，即应变增长和应变降低，应变最大值范围为 367.7~615.1 $\mu\epsilon$ ；（2）足尺模型中各测点所在位置处因约束程度、温湿度情况不同，各时间段应变存在一定差别，模型内部中心处应变最大、距离模型内部中心越远应变越低；（3）结合图 8 可知，当表层测点处温度与环境温度的温差在 10℃以下时，混凝土仍处于微膨胀状态，且此时模型顶面和侧面表层应变值 65.9~219.6 $\mu\epsilon$ 。

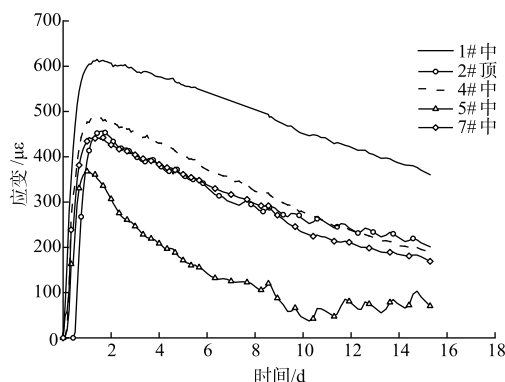
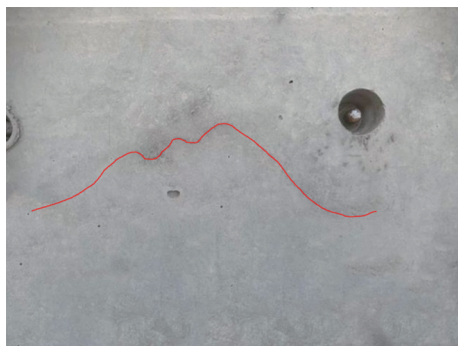


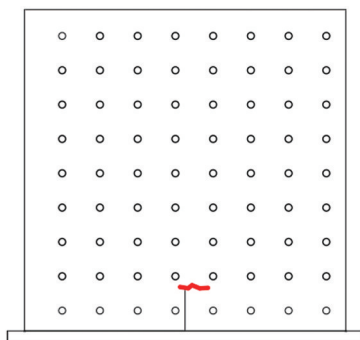
图 8 足尺模型应变曲线
Fig. 8 Strain curve of full-scale model

3.3 应用效果

拆模时对足尺模型进行裂缝排查,在北侧面发现一条裂缝,其位于沿高度方向底部向上 600 mm、沿长度方向中心处,裂缝长度 250 mm、宽度 0.2 mm,水平走向,详见图 9;持续跟进足尺模型裂缝情况,该裂缝没有发展变化且未发现其他新增裂缝;足尺模型整体效果良好。



(a) 局部图



(b) 裂缝分布图(北侧面)

图 9 应用效果

Fig. 9 The application effect

裂缝分析:裂缝位于对拉螺杆橡胶垫下方、两个止水螺杆之间,可能由于①保护层 25 mm、此处振捣不到位,②受到上部螺杆橡胶垫阻隔以致下部骨料少、浆料多,底部骨料沉降过大产生的骨料沉降裂缝。

4 结论

4.68 m×4.68 m×4.68 m 足尺模型混凝土采用大掺量粉煤灰降低水化热的思路、选用 SY-G 型高性能膨胀抗裂剂配制具有一定膨胀性能的补偿收缩混凝土,严格把控混凝土的施工过程,取得良好的控制效果,为后续项目实体结构以及类似混凝土结构提供参考依据。主要结论如下:

(1) 环境温度 21~25 ℃、混凝土入模温度 30 ℃左右,足尺模型内部最高温度 65.1 ℃、内部与侧面表层温差局部大于 25 ℃,具有一定开裂风险;模型内部中心温度高、应变大,距离模型内部中心越远到达温峰所需时间越短;模型阳角处温度低、散热较快,降温阶段需加强保温;

(2) 采用蓄水养护措施,即蓄水深度 10 cm、水温同环境温度且保证水不渗漏、不流动,可使里表温差<25 ℃;

(3) 足尺模型表层温度与环境温度的温差在 10 ℃以下时,混凝土仍处于微膨胀状态、表层应变 65.9~219.6 με,取得良好的裂缝控制效果。

参 考 文 献

- [1] 王新刚. 大体积混凝土温度应力实用计算方法及控裂工程实例 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 1-2.
- [2] 郭卓维. 超长超厚大体积混凝土无缝施工技术研究与应 [D]. 西安建筑科技大学, 2020. 9-27.
- [3] 黄华, 林成栋, 张立国, 等. 大体积混凝土在沈阳乐天世界工程中的应用 [J]. 混凝土, 2013 (9): 108-111.
- [4] 李昂. 大体积混凝土基础底板跳仓法施工研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2016. 11-45.
- [5] 徐至钧. 混凝土结构裂缝预防与修复 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010. 165-167.
- [6] 王强, 阎培渝, 周予启, 等. 超高层建筑大体积混凝土设计与施工关键技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [7] 赵顺增, 游宝坤. 补偿收缩混凝土裂渗控制技术及其应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(下转第 133 页)

研究与应用

- [9] 高毅轩, 王辉明, 刘晋. 基于 M-T 均匀化理论的玄武岩纤维混凝土弹性模量和抗压强度分析 [J]. 科学技术创新, 2021, 14: 156-159.
- [10] 凌建军. 高强度玄武岩机制砂混凝土抗压强度及非线性预测模型研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (3): 124-130.
- [11] 韩笑. 基于高阶块体元-有限元建模的混凝土微观数值分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 56-62.
- [12] ABHILASH P T, SATYANARAYANA P V V, THARANI K. Prediction of compressive strength of roller compacted concrete using regression analysis and artificial neural networks [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6 (4): 218-227.
- [13] IAN G, YOSHUA B, AARON C. Deep Learning [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [14] MARTIN T H, HOWARD B D, MARK H B, et al. Neural network design [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [15] LATIF S D. Developing a boosted decision tree regression prediction model as a sustainable tool for compressive strength of environmentally friendly concrete [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021.
- [16] SALAMI B A, OLAYIWOLA T, OYEHAN T A, et al. Data-driven model for ternary-blend concrete compressive strength prediction using machine learning approach [J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: 124152.
- [17] LYU F, FAN X Y, DING F X, et al. Prediction of the axial compressive strength of circular concrete-filled steel tube columns using sine cosine algorithm-support vector regression [J]. Composite Structures, 2021, 273: 114282.
- [18] 金浏, 赵瑞, 杜修力. 混凝土抗压强度尺寸效应的神经网络预测模型 [J]. 北京工业大学学报, 2021, 47 (3): 260-268.
- [19] AL H, HAWRAA S J, et al. Artificial intelligence-based compressive strength prediction of medium to high strength concrete [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 14: 1-14.
- [20] 陈明. MATLAB 神经网络原理与实例精解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 76-90.

(上接第 71 页)

- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 补偿收缩混凝土应用技术规程: JGJ/T178-2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. 2-3.
- [9] 袁学成. C40P10 大体积混凝土研究与制备 [C] //第七届全国混凝土膨胀剂学术交流论文集, 2018: 171-174.
- [10] Nguyen T C, Luu X B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation [J]. Magazine of Civil Engineering, 2019, 88 (4): 70-79.
- [11] SEO T S, KIM S S, LIM C K. Experimental study on hydration heat control of mass concrete by vertical pipe cooling method [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2015, 14 (3): 657-662.
- [12] 李东, 张晔琛. 混凝土水化放热模型的实验分析和计算 [J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2021, 27 (4): 795-802.
- [13] 刘拼, 徐智丹, 张登科, 等. 大体积混凝土板式结构裂缝控制应用技术研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (9): 35-39+43.
- [14] 刘拼, 张登科, 徐智丹, 等. 大体积混凝土侧墙裂缝控制技术应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (5): 84-87+109.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 混凝土膨胀剂: GB/T 23439-2017 [S]. 中国标准出版社, 2018.