

文章编号: 1674-599X(2021)04-0043-06

环境温度作用下地下主体结构水化热分析

AMOUSSOU Ekoe, 陈卓异, 李传习, EZOULA A.Solange

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究水化热-环境温度耦合作用下地下主体结构的温度场分布规律, 以公常路中山大学深圳校区段下穿改造工程为背景, 采用FEA有限元软件对该底板进行混凝土水化热模拟, 并与自动化监测获得不同施工环境温度下主体结构底板混凝土的内外温度进行对比分析。研究表明: 选择合适的环境温度下施工, 可以有效控制大体积混凝土水化热温差。在施工环境温度过低的情况下, 采取有效保温措施。在施工环境温度变化较大的情况下, 选择水化热低水泥。

关键词: 混凝土; 水化热; 环境温度; 有限元分析

中图分类号: TV544⁺91

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.005

Analysis of hydration heat of underground main structure under the effect of ambient temperature

AMOUSSOU Ekoe, CHEN Zhuo-yi, LI Chuan-xi, EZOULA A.Solange

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the distribution of temperature field of the main underground structure under the coupling effect of hydration heat and ambient temperature, the FEA finite element software was used to simulate the temperature field based on the underpass reconstruction project of the Gongchang road at the position of the Shenzhen campus of the Sun Yan-sen University. The automatic monitoring data of the internal and external temperature field of floor concrete of main structure was analyzed and compared under different construction ambient temperatures. The results show that the temperature difference of hydration heat of mass concrete can be effectively control at a suitable construction ambient temperature. Effective heat preservation measures need to be taken to prevent temperature cracks, when the ambient temperature of construction is low. In the case of large variation in the construction ambient temperature, cement with low heat of hydration should be selected.

Keywords: concrete; hydration heat; ambient temperature; the finite element analysis

混凝土凝固过程中存在水化放热现象。对于大体积混凝土而言, 由于单位面积上混凝土厚度增加, 早期水化热会引起较大的温度应力, 导致混凝土开裂, 严重影响结构的安全性、耐久性。因此, 有效控制大体积混凝土水化热产生的温度相当重要。

地下主体结构的抗渗要求高, 结构厚度大于1 m, 需要控制混凝土结构的内外温差不大于25℃, 避免混凝土开裂。而在水化热-环境温度耦

合作用下, 地下主体结构的温度场如何分布是防止混凝土开裂的基础。国内外学者对浇筑混凝土内外温差的影响因素进行大量研究。王倩^[1]指出降低混凝土温度最直接方法是减少水泥含量, 但会影响其强度。补充胶凝材料(如灰分和高炉矿渣)降低混凝土的水化热有限^[2-3]。布置管冷来达到降低混凝土中心温度具有可行性^[4]。但在实际施工应用过程中, 进行混凝土配合比控制的同时, 对现浇混凝土进行合理养护, 保证养护环境的温度和

收稿日期: 2020-12-23

作者简介: AMOUSSOU Ekoe(1992—), 男, 长沙理工大学硕士。

湿度,避免混凝土结构水化热开裂。王愉康等人^[5]结合理论计算、试配制、微调整等方法,得出混凝土配合比中各种材料的最佳组成比例,达到降低混凝土水化热的效果。马乐等人^[6]采用了铺盖湿土工布、薄膜、干麻袋对高层楼基础承台混凝土进行保温、保湿养护,达到降低混凝土内外表面的温差效果。张桂芳等人^[7]通过建立某大跨拱桥MIDAS FEA模型,得出温度场、力场分布和水化热的规律,并提出合适的大体积混凝土表面养护和内部降温措施。汪建群等人^[8-14]通过分析MIDAS FEA模型和实际工程数据结果,提出跨海大桥承台混凝土温度场与施工环境温度和混凝土入模温度的关系。但是对地下主体结构在水化热-环境温度耦合作用下的温度场研究不足,影响了地下主体结构施工质量。为了探索施工环境温度对大体积混凝土水化热的影响规律,提出有效的温控方法。本研究以公常路中山大学深圳校区段下穿改造工程为背景,拟采用FEA软件对不同环境温度下的底板进行水化热模拟,并与自动化监测获得不同施工环境温度下的主体结构底板混凝土内外温度进行对比分析,以期类似工程施工水化热控制提供借鉴。

1 工程概述

公常路中山大学深圳校区段的下穿改造工程,起点位于光侨路交叉路口西侧,终点东至东莞边界,全长约3.56 km。其中,地下道路长2.645 km(封闭段2.220 km,敞开段0.425 km)。该工程主体结构混凝土强度为C40补充收缩砼,抗渗等级为P8。垫层采用C20混凝土,厚度为10 cm。主体结构防水等级为二级,防水体系包括混凝土结构自防水、施工缝和变形缝等接缝防水,附加防水层辅助排水措施。主体结构如图1所示。

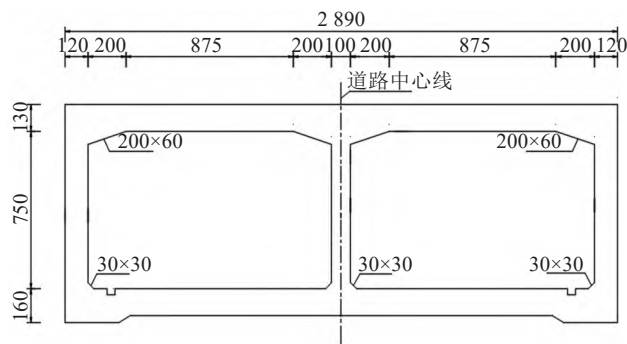


图1 地下主体结构(单位:cm)

Fig. 1 Underground main structure(unit:cm)

2 模型建立

2.1 模型参数及边界条件

本研究对2个不同断面进行研究。断面1桩号为K1+710,断面2桩号为K1+120。断面1和断面2的主体结构尺寸一致。为提高效率,利用底板的对称性,建立1/2模型。假设:施工过程中,环境土体参数保持不变,底板实际厚度为1.3 m,一次性浇筑,底板中部和表面混凝土入模时间一致,土体距底板底部5 m位置的温度为固定值,混凝土表面的对流系数为常数,底板底部为直接接触土体,断面环境温度为实际环境温度的平均值。

本模型根据实际工程及施工周边环境的情况选定计算参数。由于主体结构的对称性,断面1以及断面2底板模型分别取1个测点进行研究。底板以下的土体厚度取5 m。土体固定温度条件参数取20℃。实际工程中,施工环境温度随时间变化。为简化模型计算,取环境平均温度作为施工环境温度。断面1混凝土浇筑时间为2020年1月下旬,根据当时气候情况,得到底板施工与养护过程中环境平均温度为15℃。断面2混凝土浇筑时间为2019年9月初,环境平均温度为30℃。混凝土入模温度控制在20℃,混凝土表面对流系数为12 kcal/m²·h·℃,建模计算时,考虑混凝土收缩徐变和自重。

底板温度场FEA模型共有2 010节点,1 465单元。其中,底板混凝土占864节点,565单元;土体占1 332节点,900单元。底板混凝土和土体连接采用共节点方式;共节点数量为186。模型中底板宽度为5 m。模型如图2所示。

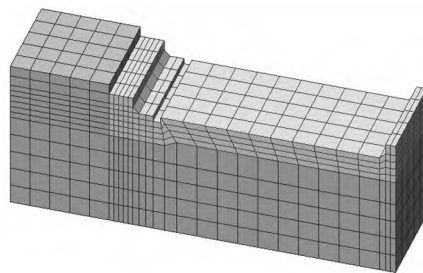


图2 底板温度场FEA模型

Fig. 2 FEA model of the temperature field of the bottom plate

底板混凝土采用C40。根据混凝土配合比计算混凝土比热和导热系数。考虑混凝土初始温度

20℃，根据《大体积混凝土温度应力与温度控制》20℃对应的材料热性能参数见表1。混凝土导热系数及比热计算见表2。

表1 材料热性能参数表

Table 1 Thermal performance parameter of material		
材料名称	比热/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	导热系数/ $\text{kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})^{-1}$
普通硅酸岩水泥	0.456	4.446
粉煤灰、矿粉	0.456	4.446
砂	0.699	11.129
石子（石英岩）	0.691	16.910
水	4.187	2.160
外加剂	4.187	2.160

2.2 计算结果分析

断面1距混凝土表面0.65 m位置对应的N236节点，在浇筑3 h后，温度达到最大值62.51℃；距混凝土表面0.05 m位置对应的N96节点，在浇筑32 h后，温度达到最大值33.47℃，最大内外温差值为29.04℃。

断面2距混凝土表面0.65 m位置对应的N236节点，温度在浇筑32 h后，达到最大值65.99℃；距混凝土表面0.05 m位置对应的N96节点，在浇筑25 h后，温度达到最大值48.80℃，最大内外温差值为21.51℃。温度数据见表3。断面1和断面2的FEA模型32 h模拟结果如图3~4所示。

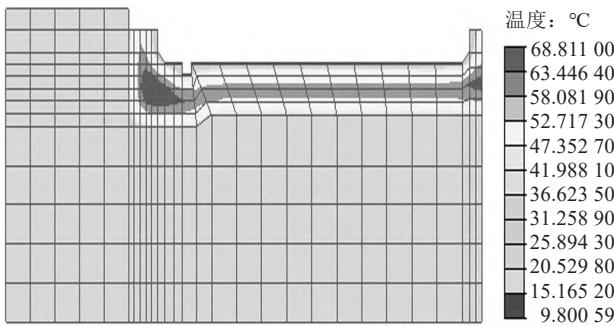


图3 断面1浇筑32h后温度分布云图
Fig. 3 Temperature distribution diagram of the section 1 after 32 hours of pouring

表2 混凝土水化热参数计算表

Table 2 Calculation table of concrete hydration heat parameters							
掺合物	掺合物用量/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	比例	相对用量/ %	掺合物比热/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	掺合物导热系数/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
水泥	343.000	1.000	14.3	0.456	4.446	0.065	0.634
砂	674.000	1.970	28.0	0.699	11.129	0.196	3.118
碎石	1 101.000	3.210	45.8	0.691	16.910	0.316	7.740
水	162.000	0.470	6.7	4.187	2.160	0.282	0.145
粉煤灰	46.000	0.134	1.9	0.456	4.446	0.009	0.085
矿粉	37.000	0.108	1.5	0.456	4.446	0.007	0.068
膨胀剂	37.000	0.108	1.5	4.187	2.160	0.064	0.033
外加剂	5.556	0.016	0.2	4.187	2.160	0.010	0.005
合计	2405.600		100.0			0.949	11.829

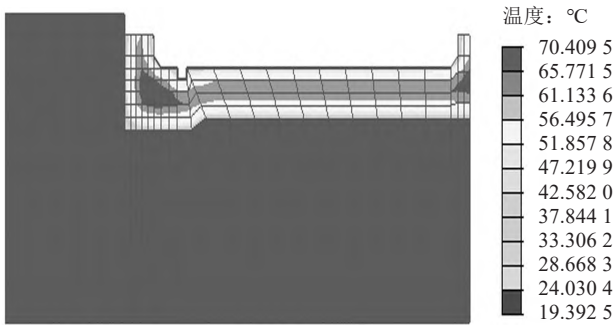


图4 断面2浇筑32h后温度分布云图
Fig. 4 Temperature distribution cloud diagram of section 2 after 32 hours of pouring

从图3中可以看出，在混凝土浇筑32 h后，断面1底板中心温度最大值达到68.81℃，测点对应位置温度达到62.51℃。从图4中可以看出，在混凝土浇筑32 h后，断面1底板中心温度最大值达到70.41℃，

测点对应位置温度达到65.99℃。模型中断面1和断面2的混凝土温度与时间关系如图5~6所示。

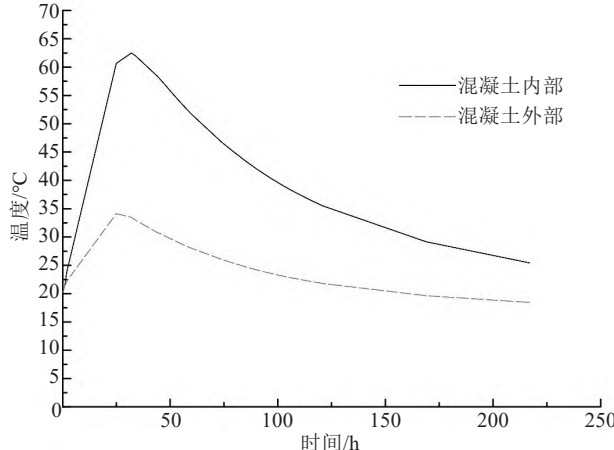


图5 断面1混凝土内外温度模型曲线
Fig. 5 Curve of internal and external temperature of concrete in the section 1

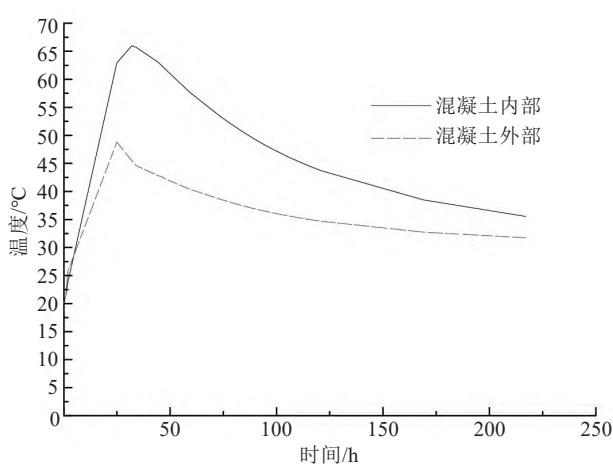


图6 断面2混凝土内外温度模型曲线

Fig. 6 Curve of internal and external temperature of concrete in the section 2

表3 FEA 温度数据

Table 3 FEA temperature data °C						
时间/h	断面1 (环境温度 15°C)			断面2 (环境温度 30°C)		
	内温度	外温度	内外温差	内温度	外温度	内外温差
0	20.0	20.0	0	20.0	20.0	0
1	21.3	21.3	0	21.3	21.3	0
2	23.8	22.2	1.6	23.8	25.8	1.9
25	60.7	34.1	26.6	63.0	48.8	14.2
32	62.5	33.5	29.0	66.0	44.5	21.5
34	62.0	33.0	29.0	65.7	44.6	21.1
44	58.4	30.8	27.6	63.2	42.9	20.3
46	57.6	30.5	27.1	62.5	42.6	19.9
48	56.7	30.1	26.6	61.8	42.2	19.5
50	55.9	29.7	26.1	61.0	41.9	19.1
52	55.0	29.4	25.6	60.3	41.5	18.7
54	54.1	29.0	25.1	59.6	41.2	18.3
56	53.3	28.7	24.6	58.9	40.9	17.9
58	52.5	28.3	24.2	58.2	40.6	17.5
60	51.7	28.0	23.7	57.5	40.3	17.2
74	46.7	26.1	20.7	53.3	38.6	14.7
78	45.5	25.6	19.9	52.2	38.1	14.1
84	43.7	24.9	18.9	50.7	37.5	13.2

3 温度场试验

3.1 测试方法

为确定水化热引起的温度场，断面1和断面2的底板混凝土表面、中心、底部安装了温度传感

器，传感器连接采集模块，自动采集温度数据，通过网络平台读取数据。每个断面共设3个测点，每个测点安装3个传感器。测点布置图如图7所示。本研究以每个断面的底板左幅中间位置测点为参考对象，以距混凝土表面0.05 m位置的传感器数据为混凝土表面数据，以距混凝土表面0.65 m位置的传感器数据为混凝土中心数据。

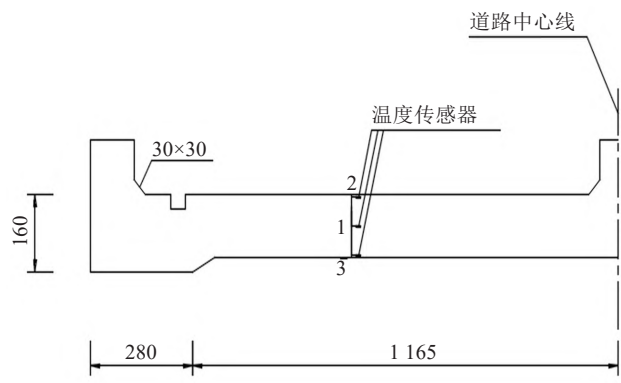


图7 测点布置(单位: cm)

Fig. 7 Layout of measuring points(unit:cm)

3.2 试验结果

断面1和断面2的混凝土实测温度与时间关系如图8~9所示。

断面1底板混凝土内部温度在浇筑32 h后，达到最大值60.7°C；混凝土外表温度在浇筑25 h后，达到最大值37.6°C，最大内外温差值为28.4°C。断面2混凝土内部温度在浇筑34 h后，达到最大值67.7°C；混凝土外表温度在浇筑34 h后，达到最大值49.1°C，最大内外温差值为22.5°C。实测温度数据见表4。

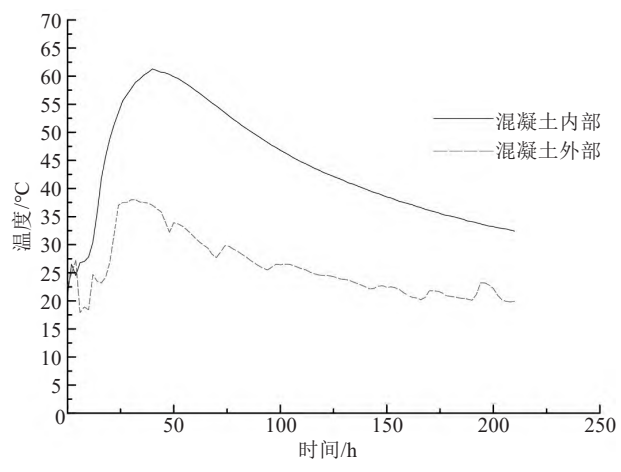


图8 断面1混凝土内外温度实测曲线

Fig. 8 The measured curve of internal and external temperature of concrete in the section 1

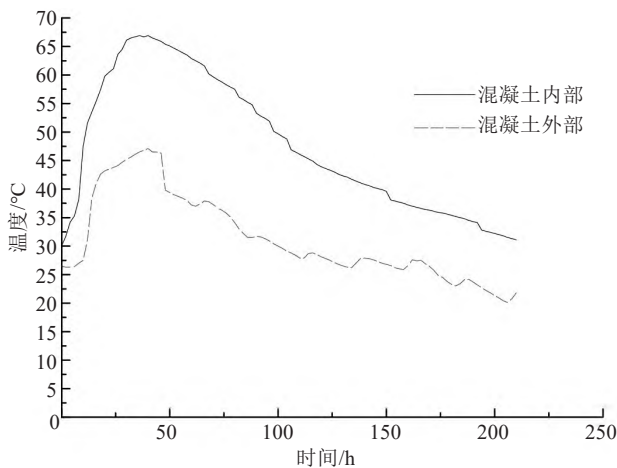


图9 断面2混凝土内外温度实测曲线图

Fig. 9 The measured curve of internal and external temperature of concrete in section 2

表 4 实测温度数据

Table 4 The measured temperature data °C

时间/h	断面1（环境温度 15℃）			断面2（环境温度 30℃）		
	内温度	外温度	内外温差	内温度	外温度	内外温差
0	20.6	22.5	1.9	30.0	26.5	3.5
1	24.5	23.9	0.6	30.0	28.4	1.6
2	26.5	24.9	1.6	31.7	28.3	3.4
25	58.9	37.6	21.3	64.6	46.1	18.5
32	60.7	35.9	24.8	67.5	48.6	18.9
34	60.6	32.2	28.4	67.7	49.1	18.6
44	60.3	33.9	26.4	67.2	48.5	18.7
46	59.9	33.7	26.2	66.9	48.3	18.6
48	59.6	33.3	26.3	66.4	47.8	18.6
50	59.1	32.7	26.4	66.1	46.4	19.7
52	58.6	32.5	26.1	65.7	45.2	20.5
54	58.1	31.2	26.9	65.3	44.7	20.6
56	57.5	29.8	27.7	64.9	42.4	22.5
58	53.5	29.2	24.3	64.5	42.0	22.5
60	52.3	27.8	24.5	63.9	41.6	22.3
74	50.7	26.7	24	59.8	38.3	21.5
78	49.7	25.2	24.5	58.9	37.1	21.8
84	45.8	23	22.8	56.7	35.2	21.5

从图5~6和图8~9中可以看出，底板混凝土中心温度变化规律一致。混凝土中心温度在浇筑32 h后达到最大值，然后缓慢下降。降温过程中，底板中心温度未出现回升现象。从图5~6中可以看出，混凝土内部和外部的温度曲线图平滑。从图8~9中可以看出，混凝土内部曲线较平滑，而混凝土表面曲线明显粗糙。表明：实际工程中，

混凝土表面直接受到环境温度波动的影响。

由表3~4可知，断面1最大内外温差值29.04℃，大于断面2最大内外温差值21.51℃。实测断面1最大内外温差值28.4℃，大于断面2最大内外温差值22.5℃。表明：在施工环境温度为30℃时，混凝土最大内外温差值相比施工环境温度为15℃时的小。

4 结果分析

实测温度数据与模型变化规律一致且结果比较吻合。由断面1数据可见，混凝土表面实测最大温度值与模型最大温度值相差4.13℃。其原因为：①本模型未考虑混凝土养护的影响，而实际工程采用覆盖物进行配合养护，混凝土表面全部覆盖严密，并保持覆盖物内有凝结水。②本模型未考虑混凝土模的作用，而实际工程中底板拐角部分采用导热系数为163.29 kJ/(m·h·K)的钢板作为模板。③本模型中未考虑环境温度的波动。④实际工程中，温度传感器埋设的位置与模型对应节点有一定误差。⑤本模型未考虑底板底面接触的封底混凝土影响。⑥本模型未考虑底板中部与表面的混凝土入模时差，实际工程中混凝土中部与表面浇筑时间相差3 h。

无论模型结果或实测温度，混凝土水化热引起的温度值在环境温度为15℃时往往比环境温度为30℃时的小。混凝土最大温度值与环境温度的关系见表5。

表5 混凝土最大温度值与环境温度的关系

Table 5 Relationship between the maximum temperature of concrete and the ambient temperature °C

项目	环境温度 15℃		环境温度 30℃	
	模型	实测	模型	实测
内部	62.51	60.7	65.99	67.7
外表	33.47	37.6	48.80	49.1

5 结论

通过实际量测出来的温度谱与有限元模拟结果进行对比，得出结论为：

1) 环境温度每增加15℃，混凝土中心温度至少增加3.48℃。因此，选择合适的环境温度下施

工,可以有效控制大体积混凝土水化热温差。

2) 混凝土内外温差随着施工环境温度的降低而增大。环境温度每降低 15℃,混凝土内外温差值增加至少 4.9℃。因此,在施工环境温度过低情况下,需要考虑采取有效保温措施,以防出现温度裂缝。

3) 施工环境温度对大体积混凝土表面温度的影响很大。在施工环境温度容易出现突变情况下,需考虑选择水化热低水泥。

参考文献(References):

- [1] 王倩. 大体积混凝土开裂及控制[J]. 江西建材, 2017 (12):123,125. (WANG Qian. Mass concrete cracking and control [J]. Jiangxi Building Materials, 2017(12):123,125. (in Chinese))
- [2] 罗超云,李志生,周立. 嘉绍大桥承台超大体积混凝土无冷却水管温控技术研究[J]. 公路, 2012, 57(7): 101-106. (LUO Chao-yun, LI Zhi-sheng, ZHOU Li. Technical research on temperature control of mass concrete without cooling water pipe of Jiashao bridge pile cap[J]. Highway, 2012, 57(7): 101-106.(in Chinese))
- [3] Wang J C, Yan P Y. Influence of initial casting temperature and dosage of fly ash on hydration heat evolution of concrete under adiabatic condition[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2006, 85(3): 755-760.
- [4] 张清旭, 宁晓骏, 陈旭, 等. 大体积混凝土承台水化热分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 33-37. (ZHANG Qing-xu, NING Xiao-jun, CHEN Xu, et al. Analysis of hydration heat of the mass concrete cap[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 33-37. (in Chinese))
- [5] 王愉康, 陈才. 大体积混凝土配合比设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(5): 115-118. (WANG Yu-kang, CHEN Cai. Mix design of mass concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(5): 115-118.(in Chinese))
- [6] 马乐, 符耀东, 雷元新. 大体积混凝土施工的养护措施及温度控制[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2016, 34(4): 59-64. (MA Le, FU Yao-dong, LEI Yuan-xin. Maintenance measures and temperature control of mass concrete construction[J]. Journal of Foshan University(Natural Science Edition), 2016, 34(4): 59-64. (in Chinese))
- [7] 张桂芳, 梁天贵, 曾有艺, 等. 大体积砼水化热分析及温控措施[J]. 公路与汽运, 2018(5): 102-105. (ZHANG Gui-fang, LIANG Tian-gui, ZENG You-yi, et al. Analysis of hydration heat of mass concrete and temperature control measures [J]. Highways & Automotive Applications, 2018(5): 102-105.(in Chinese))
- [8] 汪建群, 魏桂亮, 刘杰, 等. 跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 25-31. (WANG Jian-qun, WEI Gui-liang, LIU Jie, et al. Measurement and analysis of hydration heat in massive concrete pile cap of a sea-crossing bridge[J]. Bridge Construction, 2020, 50(3): 25-31.(in Chinese))
- [9] 孙亭亭, 祝向群, 马锋, 等. 温度效应作用下混凝土桥墩应力的影响研究[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2015, 28(1): 70-74. (SUN Ting-ting, ZHU Xiang-qun, MA Feng, et al. Influence study of concrete piers stress under the temperature effect[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology(Natural Science Edition), 2015, 28(1): 70-74.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准:GB50496-2018 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.(Ministry of Housing and Urban-rural Development of the people's Republic of China. Chinese Standard for construction of mass concrete: GB50496-2018 [S]. Beijing: China Beijing: China Planning Press, 2018. (in chinese))
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the people's Republic of China. Chinese code for design of concrete structures: GB50010-2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015. (in chinese))
- [12] Tej P, Vacek V, Kolisko J, et al. Computer nonlinear analysis of the formation and development of cracks in a reinforced concrete slab loaded by a planar uniform load [J]. Key Engineering Materials, 2014, 606: 229-232.
- [13] NetAnswer. Report rep25: Early age cracking in cementitious systems - report of RILEM technical committee 181-EAS - early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems[J]. Materials & Structures, 2013.
- [14] 葛俊颖. 桥梁工程软件midas Civil使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013. (GE Jun-ying. Guide for bridge engineering software midas Civil[M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in chinese))