

转体桥承台混凝土的配制及其工程应用

王学成¹, 姜瑞双^{2,3*}, 刘帅^{2,3}, 郭保林^{2,4}

(1. 齐鲁交通发展集团有限公司建设管理分公司, 山东 济南 250014; 2. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031; 3. 山东省混凝土材料与桥梁结构工程技术研究中心, 山东 济南 250031; 4. 在役桥梁性能评估及提升行业重点实验室, 山东 济南 250031)

摘要:针对转体桥承台混凝土方量大、强度要求高、易出现温度裂缝的问题,提出基于温度匹配养护,复合掺加矿物掺合料以优化混凝土配合比。以跨胶济铁路立交桥转体承台施工为例,配制的混凝土绝热温升值控制在 50℃左右,7 d 混凝土强度达到 55 MPa 以上,满足施工设计的 C55 混凝土的强度等级要求。同时,通过控制混凝土入模温度、浇筑过程、冷却水管设置及保温保湿养护等工序,确保高强度、大体积转体桥承台混凝土无温度裂缝施工。

关键词:转体桥承台; 温度匹配养护; 绝热温升; 配合比优化; 控制技术

1 前言

随着中国公共交通网的快速发展,公路和铁路网之间难免出现交叉。为保证高速公路、高速铁路、国省干道等重要交通网的顺畅通行,后建的高速公路往往采用转体结构形式跨越现有路网,承台的施工成为能否顺利转体的关键^[1]。“转体桥”结构重量大,单墩支撑,要求基础混凝土强度等级较高、单次浇筑量大。所以,保证混凝土的高强度、控制温差裂缝,成为转体桥承台施工的关键^[2]。

随着对大体积混凝土裂缝的深入研究,国内外学者提出了诸多措施及方法来减少或预测温度裂缝的产生。Cervera^[3]等基于混凝土养护和水化反应过程,建立了大体积混凝土热力学模型,以探究混凝土的浇筑、

养护等过程对大体积混凝土温度应力场的影响;Lawrence^[4]等试验研究了不同矿物掺合料对混凝土早期强度及开裂的影响,并利用有限单元法对其进行了分析。近年来,随着中国基础设施及水利工程的大力发展,大量学者对大体积混凝土的配制、温度裂缝的控制进行了研究^[5-7]。其中,林鹏^[8]等利用试验模拟了大体积混凝土真实温度场的演化规律;魏胜新^[9]等研究了粉煤灰复配缓凝型减水剂对混凝土水化热、绝热温升的影响,配制出大体积混凝土并成功应用于苏通大桥主塔承台,降低了超大体积混凝土内部温升,从而减少温度裂缝的产生;刘力^[10]等利用粉煤灰、矿粉等矿物掺合料复配水化温升抑制剂,制备出了满足施工要求的 C40 大体积混凝土,施工后的混凝土结构物未产生有害温度裂缝。

目前,中国部分学者已经利用水化热抑制剂或缓

文集(上册),2014.

[2] 苏强,吴东明,谢正元. 多股成品索锚碇锚固系统关键技术研究[J]. 中外公路,2018,38(4):197-200.

[3] 韩斌武,由金. 星海湾大桥锚碇锚固系统的施工控制[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(6):34-35.

[4] 吕治国,罗升,牛松山,等. 悬索桥含油预应力钢绞线锚固系统疲劳性能试验研究[J]. 中外公路,2011,31(6):37-40.

[5] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[6] JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S].

[7] GB/T 14370—2015 预应力筋用锚具、夹具和连接器[S].

[8] JT/T 329—2010 公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器[S].

[9] GB/T 26952—2011 焊缝无损检测 焊缝磁粉检测 验收等级[S].

收稿日期:2021-05-06(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFB1600100);2018年山东省交通运输厅科技计划项目(编号:2018B23,2019B29)

作者简介:王学成,男,高级工程师, E-mail:349613454@qq.com

* 通信作者:姜瑞双,男,硕士,工程师, E-mail:ruishuangjiang@163.com

凝型减水剂来控制混凝土绝热温升,同时对混凝土的性能也进行了研究^[11-13]。然而,不管是水化热抑制剂还是缓凝型减水剂,均以抑制水泥的水化反应来控制水化放热,进而延缓混凝土的早期强度发展。传统的水工大坝或桥梁承台混凝土的设计强度等级一般为 C30~C40,对混凝土的早期强度要求不高。但是,转体桥承台混凝土的设计强度等级一般为 C55,混凝土早期强度要求较高,采用常规的技术手段配制大体积混凝土并不适合。所以,在考虑大体积混凝土内部温升的同时,一定要兼顾混凝土早期强度的发展。该文基于混凝土的绝热温升,利用温度匹配养护技术,提出满足施工要求的大体积混凝土配合比,在控制混凝土水化温升的同时,保证混凝土早期性能。同时,以跨胶济铁路立交桥转体承台的施工为例,对实体结构的混凝土温度进行监测,研究大体积、高强度等级混凝土的配制及控裂技术。

2 工程概况及施工要求

该转体桥主墩共有 4 个承台,左 2[#]墩、右 5[#]墩承台尺寸为 16.5 m×21 m×5 m,每个承台 C55 混凝土体积为 1 732.5 m³,由于承台上方需安装转体球铰滑道,承台需分两次进行浇筑,第一次浇筑至滑道支架底部,高度 4.06 m,第二次浇筑至高度 5 m。左 5[#]墩、右

2[#]墩承台尺寸为 16.5 m×16.5 m×4 m,每个承台混凝土体积为 1 089 m³,亦分为两次浇筑,第一次浇筑高度 3.06 m,第二次浇筑至高度 4 m。

该承台混凝土设计强度等级为 C55,采用泵送方式浇筑,设计坍落度为(180±20) mm,混凝土具有良好的流动性、黏聚性和可泵性,严格控制混凝土裂缝的产生,不允许出现贯穿性温差裂缝,尽量减少混凝土干缩裂缝,确保承台混凝土的整体性。

根据工程实际情况,参考 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》、JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》^[14-15],经项目部专家讨论,对转体桥承台制定温控标准:混凝土的入模温度不宜超过 28 ℃,不应超过 30 ℃;承台混凝土在入模温度基础上的温升值不宜大于 50 ℃;承台混凝土的里表温差不宜大于 25 ℃;承台混凝土表面与大气温差不宜大于 20 ℃,不应大于 25 ℃。

3 试验

3.1 原材料选择

胶凝材料:水泥为 P. O. 52.5 级普通硅酸盐水泥,水泥的基本性质如表 1 所示。粒化高炉矿渣粉为 S95 级矿渣粉,基本性质如表 2 所示。粉煤灰为 F 类 I 级粉煤灰,基本性质如表 3 所示。

表 1 P. O. 52.5 级水泥的基本性质

密度/ (g·cm ⁻³)	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	标准稠度用水量 (以质量计)/%
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d		
3.16	190	245	5.3	7.6	35.8	59.6	373	28.8

表 2 矿渣粉的基本性质

密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	活性指数/%		流动度比/ %	SO ₃ 含量 (以质量计)/%	烧失量 (以质量计)/%
		7 d	28 d			
2.86	421	77	97	100	0.64	0.42

表 3 粉煤灰的基本性质

需水量比 (以质量计)/%	烧失量 (以质量计)/%	45 μm 筛余 (以质量计)/%	SO ₃ 含量 (以质量计)/%	28 d 活性 指数/%
93	3.41	5.0	1.07	45

粗、细集料:粗集料选用碎石,表观密度为 2 650 kg/m³,堆积密度为 1 440 kg/m³,压碎值为 9.1%,采用 5~10 mm 和 10~20 mm 两种级配,两者的比例为 2 : 8。细集料选用天然砂,表观密度为

2 640 kg/m³,堆积密度为 1 510 kg/m³,细度模数为 2.92,含泥量为 2.4%。

减水剂:减水剂选用 D6 型减水剂,含固量为 15.97%,减水率为 23%。

3.2 转体桥承台 C55 混凝土配合比

根据项目承台大体积混凝土施工设计要求,采取掺加矿物掺合料以降低混凝土的水化放热,在保证混

凝土工作性能的前提下,考虑到 C55 混凝土的早期强度要求,最终确定转体桥承台 C55 混凝土配合比如表 4 所示。

表 4 C55 混凝土配合比

各组分的含量/(kg·m ⁻³)							胶砂比
水泥	粉煤灰	矿粉	砂	碎石	水	减水剂	
350	90	50	700	1 050	165	5.6	7:10

3.3 试验方法

混凝土绝热温升:采用 NELD—TV810 型混凝土绝热温升试验箱,仪器配套的计算机自动采集温度数据。

混凝土试件的温度匹配养护和标准养护:温度匹配养护是根据混凝土绝热温升数据对混凝土试件进行养护,采用 CABR—LSB/Ⅱ型温度匹配养护试验箱进行;标准养护是将混凝土试件放置于温度(20±2)℃,相对湿度为 95%以上的标准养护室内进行养护。

混凝土拌和物工作性能:参照 GB/T 5080—2016《普通混凝土拌和物性能试验方法标准》测试混凝土拌和物的坍落度、扩展度以及含气量等性质,综合描述混凝土的和易性。

混凝土抗压强度:采用 YAW 4306 型微机控制电液伺服压力试验机测定混凝土抗压强度,压力机最大负荷 3 000 kN,测试参考依据为 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,试件尺寸 100 mm×100 mm×100 mm,测定龄期为 3、7、28、90 d。

混凝土抗渗性能:采用 NEL—PDU 型氯离子扩

散系数测定仪(NEL 法)和电通量法评价混凝土抗氯离子渗透性能。结果以氯离子扩散系数和电通量来表征,NEL 法根据 CCES 01—2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》、电通量法根据 JGJ/T 193—2009《混凝土耐久性检验评定标准》对混凝土的氯离子渗透性进行等级划分。

实体结构温度监测:采用 NEL—TWR 型温度无线监控仪对转体桥承台关键部位的混凝土温度进行监测。

4 结果与分析

4.1 混凝土拌和物工作性

由表 5 可以看出:所配制的 C55 混凝土坍落度达到 220 mm,扩展度达到 540 mm,黏聚性良好,无泌水、离析情况,且 1 h 坍落度经时损失为 20 mm,完全满足泵送要求。但由于胶凝材料用量较大,混凝土流动较慢,拌和物较黏稠,可通过调整减水剂种类,适当降低混凝土的黏度。

表 5 C55 混凝土拌和物的基本性质

强度等级	水胶比	坍落度/mm		扩展度/mm	含气量/%	和易性描述
		0 h	1 h			
C55	0.34	220	200	540	3.0	黏聚性、保水性良好,无泌水

4.2 绝热温升

该文以绝热温升试验来表征 C55 承台混凝土的水化放热特性,结果如图 1 所示。在考虑转体桥承台早期抗压强度发展下,兼顾混凝土的水化放热性能,最终掺加粉煤灰和粒化高炉矿渣粉以降低水化热^[16-18]。绝热温升曲线[图 1(a)]表明:C55 混凝土的绝热温升达到 51℃,且在成型完成 50 h 左右即达到了温峰值。温升速率曲线[图 1(b)]表明:成型完成前 20 h 混凝土的温升速率逐渐增大,在 18 h 左右达到了最大温升速率 1.75℃/h,随后温升速率逐渐降低,但混凝土内部温度一直在持续上升。此次 C55 混凝土的温升较大,

但满足设计要求,在后续的施工中,要增加辅助措施以控制混凝土的温度。

4.3 混凝土抗压强度

匹配养护是在考虑混凝土水化放热的基础上进行的养护,混凝土的水化温升为实体结构强度发展提供了较高的养护环境,匹配养护更能准确地表征实体结构混凝土性能发展。该文根据绝热温升曲线,对混凝土试件进行温度匹配养护,探究匹配养护和标准养护下混凝土试件的强度发展规律。

混凝土试件养护方式如图 2 所示。此次试验混凝土的出机温度为 23℃,在出机温度基础上的绝热温升

值,即为此次混凝土的温度匹配养护;将试件直接放入常规标准养护室内,即为标准养护。

C55 混凝土在匹配养护和标准养护下的混凝土强度发展如图 3 所示。两种养护方式下,混凝土的抗压强度均随着龄期的增加而增大。但是,匹配养护下,混

凝土试件强度要明显高于标准养护试件强度,尤其在 7 d 之前。结果表明,与标准养护的混凝土试件相比,匹配养护试件的 3 d 抗压强度提高了 26.5%,7 d 抗压强度提高了 22.0%。在 3 d 龄期时,匹配养护试件的抗压强度就达到 55 MPa,达到了 C55 混凝土的设计强度。

4.4 混凝土的抗氯离子渗透性能

表 6 为电通量法和 NEL 法测试 C55 混凝土 28 d 的抗氯离子渗透性能评价结果。由表 6 可知:与标准养护试件相比,匹配养护下的混凝土试件抗氯离子渗透性能略好,其中电通量降低了 39.8%,氯离子扩散系数降低了 55.7%。根据相关规范对混凝土渗透性评价,两种测试方式下,匹配养护试件的抗渗性比标准养护试件的抗渗性均要高一个等级。试验结果表明:在较高的温度匹配养护下,掺加粉煤灰和矿渣粉的混凝土获得了较好的耐久性能。

表 6 C55 混凝土不同养护方式下的抗氯离子渗透性能测试结果

养护方式	电通量/ C	氯离子扩散 系数/ (10 ⁻¹² m ² · s ⁻¹)	电通量法 渗透性 评价	NEL 法 渗透性 评价
标准养护	560	1.67	Q—Ⅳ	Ⅲ(低)
匹配养护	337	0.74	Q—Ⅴ	Ⅳ(很低)

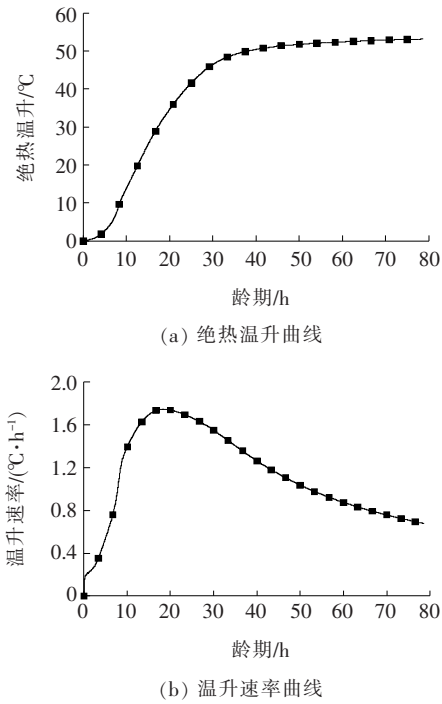


图 1 C55 混凝土的绝热温升试验

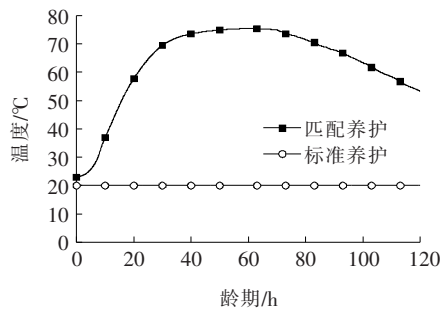


图 2 C55 混凝土试件的匹配养护和标准养护温度历程

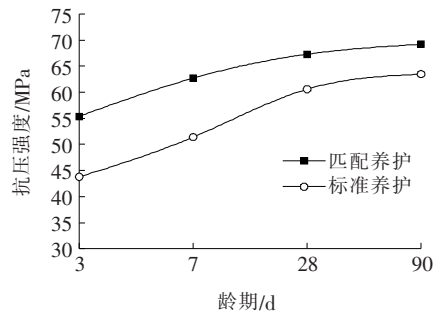


图 3 C55 混凝土不同养护方式下的抗压强度发展

5 工程应用

将试验室优化的 C55 混凝土应用到跨胶济铁路立交桥转体下承台,承台尺寸为 16.5 m×21 m×4.06 m,浇筑高度为 4 m。为控制混凝土的最高温度、里表温差,保证混凝土的顺畅浇筑,对施工过程进行了各方面控制。

5.1 混凝土入模温度控制

过高的入模温度会促进胶凝材料水化放热,加大水化放热速率,导致混凝土较高的温升值。根据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》、JTG/T F50—2011《公路桥涵施工技术规范》以及施工设计要求,混凝土入模温度不宜超过 28℃,不应超过 30℃。由于此次承台浇筑在夏季施工,故采用冰水进行混凝土的拌和,浇筑过程中实测混凝土入模温度为 25℃。

5.2 混凝土的浇筑

此次承台浇筑体量大,选用两台泵车同时浇筑,从短边的两侧开始浇筑,然后向对面长边推进。混凝土

浇筑时,严禁直冲模板,减少混凝土浇筑期间对上部模板的污染。泵管下料均匀,避免振捣棒赶料,单层浇筑高度控制为 30~40 cm。采用振捣棒振捣密实,避免振捣棒接触模板,并避免长时间振捣钢筋,振捣棒快插慢拔,振捣至混凝土停止下沉,不再冒出气泡,表面呈现平坦、泛浆为止,严禁过振。因此次浇筑的承台顶面留有较多钢筋及竖向预应力管,故浇筑顶板时严格控制混凝土的坍落度,以表层有凸起骨料为宜,顶面不再搓面、抹面。

5.3 混凝土的养护

因下承台浇筑完成后,还需进行上部承台浇筑,故顶面有较多预留钢筋以及竖向预应力管,覆盖较困难,所以顶面采用蓄水养护,且上部承台浇筑完成后才拆除侧模板。混凝土浇筑完成,并凝结硬化后,及时用冷却水管的循环水对顶面进行蓄水养护,现场养护如图 4 所示。蓄水养护时间持续 7 d。



图 4 转体桥承台的蓄水养护

5.4 冷却水管的布设

冷却水管直径除主输管为 80 mm 软管外,其他冷却水管均为 50 mm 钢管(壁厚 3.5 mm),管接头处缠生胶带,每套冷却水管成型后需做通水试验。水平布置于混凝土不同层面内,共布设两层,两层冷却管交错布置,冷却水管间距按 0.8 m 控制,安装时要确保位置准确、固定牢靠。承台冷水水管布置图如图 5、6 所示。

5.5 实体结构混凝土温度监测及拆模外观

对承台关键部位的混凝土温度变化历程进行监测,温度采集 170 h,表层混凝土温度降至环境温度后,停止温度的采集。各部位混凝土温度变化曲线如

图 7 所示。

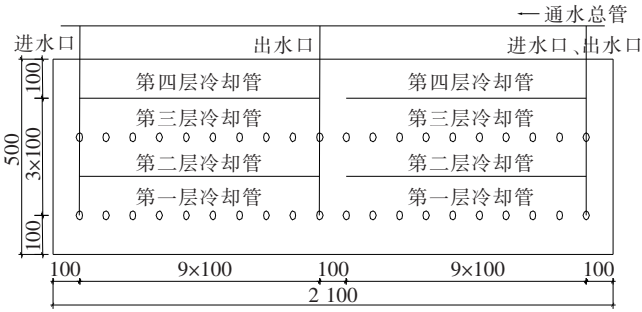


图 5 承台冷却水管立面布置图(单位:cm)

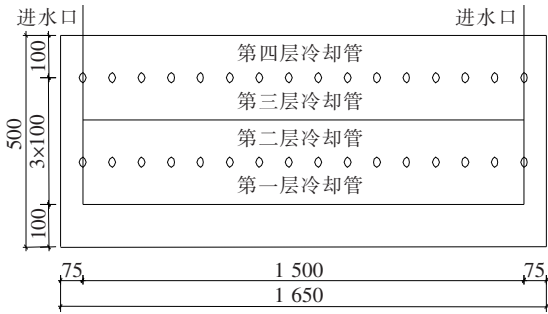


图 6 承台冷却水管侧面布置图(单位:cm)

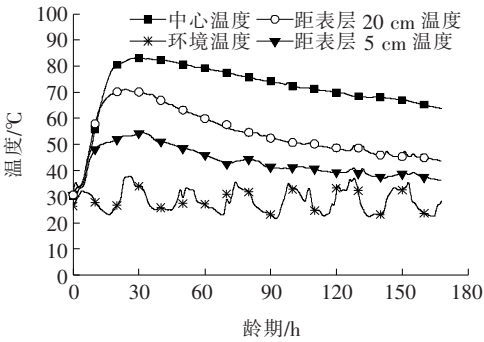


图 7 转体桥承台关键部位混凝土温度变化历程

由图 7 可知:夏季施工时的环境温度最低温为 23℃,最高温达到 38℃,混凝土的入模温度控制在 25℃。混凝土内部中心温度发展较快,在浇筑 30 h 后即达到了温峰值 75℃,整个过程温升值为 50℃,这与室内绝热温升试验的温升值大致相当,且温度达到峰值后缓慢降低。同时监测了侧模处表层位置以及距表层 20 cm 位置的混凝土温度。结果显示:距表层 20 cm 处混凝土温度在浇筑 30 h 后达到了温峰值 63.8℃,距表层 5 cm 混凝土温峰值为 51.7℃。表层混凝土通过钢模板直接与大气环境接触,温度变化较大,表层混凝土与环境的温差为 20~25℃。整个承台混凝土温度呈阶梯状变化,混凝土的里表温差为 22~25℃,混凝土表层与环境温差为 15~20℃,最大温差

为 23℃,满足施工设计要求。

承台侧模拆除后,侧面基本无温度裂缝,满足施工设计要求,有效保证了混凝土的耐久性能。经试验室测试同条件养护的混凝土试件,7 d 抗压强度达到 56 MPa。

6 结论

(1) 对于大体积结构物而言,控制水化热温升是关键,采用绝热温升试验,可预先掌握混凝土的绝热温升情况,为大体积混凝土配合比的优化提供可靠依据。该研究中优化后的 C55 混凝土最终绝热温升值为 50℃,满足规范要求。

(2) 与标准养护相比,考虑混凝土水化放热的温度匹配养护,才能更准确地表征实体混凝土的性能发展。匹配养护的试件,抗压强度提高了 22%~27%,抗氯离子渗透性能提高了一个等级。双掺粉煤灰和矿渣粉的混凝土在温度匹配养护下,不仅较快地获得了强度,而且具有较好的耐久性能。

(3) 利用矿物掺合料,优化大体积混凝土配合比,并配合辅助降温措施,做好施工过程控制,可避免温度裂缝的发生,保证结构物的耐久性能。该次转体桥承台设计的 C55 混凝土,通过配合比的优化、混凝土拌和物入模温度的控制、冷却水管的铺设以及正确的养护方式,混凝土里表最大温差为 25℃,表层混凝土与环境温差为 23℃,浇筑的转体桥承台无温度裂缝产生。

参考文献:

[1] 李忠良. 转体桥转体承台施工控制要点研究[J]. 国防交通工程与技术, 2015, 13(1): 8—11.

[2] 万华, 谭振华. 南洞庭特大桥主桥承台大体积混凝土防裂施工技术[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 141—144.

[3] Cervera. Thermo—Chemo—Mechanical Model for Concrete(I): Hydration and Aging[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(9): 1 018—1 027.

[4] Lawrence A M, Tia M, Ferraro C C, et al. Effect of Early Age Strength on Cracking in Mass Concrete Containing Different Supplementary Cementitious Materials: Experimental and Finite—Element Investigation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(4): 362—372.

[5] 邓志刚. 桥梁承台大体积混凝土温度控制[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 164—166.

[6] 鲁正刚, 王修信. 考虑水管冷却的大体积混凝土结构温度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1 172—1 178.

[7] 杨彦鑫, 周和祥, 马建林, 等. 大体积混凝土承台温度控制及分布规律[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(5): 1 497—1 502, 1 509.

[8] 林鹏, 胡杭, 郑东, 等. 大体积混凝土真实温度场演化规律试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(1): 27—32.

[9] 魏胜新, 王强. 超大体积承台混凝土性能研究与温控技术[J]. 混凝土, 2014(1): 127—131.

[10] 刘力, 湛文涛, 王欢, 等. C40 低温升抗裂大体积混凝土设计制备及其性能研究[J]. 混凝土, 2019(3): 106—110, 114.

[11] 郝兵, 赵文丽, 臧圣国. 水化热抑制剂对大体积混凝土性能的影响研究[J]. 建筑技术, 2017, 48(10): 1 073—1 075.

[12] 何贝贝, 侯维红, 纪宪坤, 等. 水化热抑制剂对大体积混凝土温度裂缝的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(11): 123—126, 138.

[13] 谢智刚, 王起才, 代金鹏, 等. 控制水化热外加剂对混凝土温度场影响的试验研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 76—82.

[14] GB 50496—2018 大体积混凝土施工标准[S].

[15] JTG/T F50—2011 公路桥涵施工技术规范[S].

[16] 乔明. 某特大桥承台大体积混凝土施工温控关键技术研究及应用[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 135—141.

[17] 吴浩, 盛余飞, 刘宇峰, 等. 槟城二桥大体积承台混凝土的配制技术[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 104—107.

[18] 吕寅, 徐敏. C40 低温升承台大体积混凝土性能及水化热检测监控[J]. 混凝土世界, 2019(1): 75—77.