

超长环形大体积防微振地基混凝土的研究 与工程应用

杨柳¹, 金鹭云¹, 杨家琦², 冯鹏³, 任锦龙⁴, 张健⁵

(1.北京建工新型建材有限公司, 100015, 北京; 2.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 100083, 北京; 3.清华大学, 100084, 北京; 4.北京建工集团有限责任公司, 100055, 北京; 5.北京国际建设集团有限公司, 100054, 北京)

摘要:为满足超长环形大体积地基混凝土的防微振技术要求,分析混凝土裂缝对结构振动特性的影响,配制防微振混凝土并计算防微振混凝土最大浇筑尺寸。基于绝热温升指标的配合比正交设计确定其基准参数为:水胶比 0.66、胶材总量 250 kg/m³、掺合料掺量 66%。从混凝土强度和收缩方面优化基准配合比,确定配合比为 m(水泥):m(粉煤灰):m(矿粉):m(砂):m(石)=1:1.4:0.5:8.75:10.7,水胶比为 0.57。大体积换填混凝土的最长尺寸不超过 20 m 时,其各项指标均满足工程需求。

关键词:防微振混凝土;振动特性;配合比设计

中图分类号: TU 74 文献标志码: B 文章编号: 1000-4726(2021)09-1028-05

RESEARCH AND ENGINEERING APPLICATION OF ULTRA-LONG ANNULAR MASS FOUNDATION CONCRETE PREVENTING MICRO-VIBRATION

YANG Liu¹, JIN Lu-yun¹, YANG Jia-qi², FENG Peng³, REN Jin-long⁴, ZHANG Jian⁵

(1.BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China; 2.School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, 100083, Beijing, China; 3.Tsinghua University, 100084, Beijing, China; 4.Beijing Construction Engineering Group Co., Ltd., 100055, Beijing, China; 5.Beijing International Construction Group Co., Ltd., 100054, Beijing, China)

Abstract: In order to meet the technical requirements for preventing micro-vibration of the ultra-long annular mass foundation concrete, the influence of concrete cracks on structural vibration characteristics was analyzed, the concrete preventing micro-vibration was prepared, and the maximum pouring size was calculated. Based on the orthogonal design of the mixing ratio of the adiabatic temperature rise index, the datum parameters were determined as follows: the water binder ratio is 0.66, the total amount of cementitious materials was 250 kg/m³, and the proportion of admixture was 66%. The datum mixing ratio was optimized from the aspect of concrete strength and shrinkage, the mixing ratio was determined as: m(cement):m(fly ash):m(mineral powder):m(sand):m(stone)=1:1.4:0.5:8.75:10.7, and the water binder ratio was 0.57. When the longest size of mass replacement concrete did not exceed 20 m, all indexes met the engineering requirements.

Keywords: concrete preventing micro-vibration; vibration characteristics; mixing ratio design

近年来,随着国家不断加强原创科技的政策支持,大型科学装置不断建设并陆续投入使用。高能同步辐射光源项目即为在建的大型科学装置之一,该项目的防微振要求较高,要求振动频率为 1~100Hz 的地面振动在 1s 内的均方根位移积分小于 25 nm。

为此,需对存储环隧道、实验大厅和线站棚屋的地基进行 C15 素混凝土换填处理,换填混凝土需具有防微振性能,即为防微振混凝土,其密度不小于 2.35 t/m³,弹性模量不小于 2.2 × 10⁴ N/mm²,泊松比为 0.16~0.24,剪切波速不小于 2000 m/s。换填深度为 3 m,周长达 1.5 km,换填部分采用跳仓法和后浇

带法施工。

为满足防微振要求,本文从防微振混凝土结构振动特性分析、防微振混凝土配合比设计和最大浇筑尺寸三方面进行研究。

1 温度裂缝对混凝土换填层振动特性的影响

在钢筋混凝土结构中,混凝土只承受压力,钢筋用于抵抗拉力,而换填工程采用的 C15 素混凝土,抗拉强度仅为抗压强度的 1/10~1/20,且混凝土是一种抗变形能力差的脆性材料,极易开裂,由于没有钢筋限制,混凝土的裂缝将随机开展,影响结构的振动特性,降低防微振效果,须分析裂缝对混凝土防微振效果的影响,采取相应措施控制裂缝的产生及发展,使其满足防微振要求。

收稿日期: 2021-06-25

作者简介:杨柳(1989—),男,山西长治人,工程师,硕士,
e-mail: 352335568@qq.com.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.1 模型信息

采用 ABAQUS 建立三维实体有限元模型, 采用完全积分的六面体单元 (C3D8) 建模。将换填层圆环形平面简化为矩形, 其边长为 31 m × 27 m, 其他尺寸与实际情况一致。

对裂缝的宽度和深度进行参数分析, 宽度取 2 mm, 4 mm, 6 mm; 深度取 500, 1000, 1400, 1800, 2000 (mm), 对组合得到的 15 种情况进行计算。将底部土层视为无限大刚性体, 与模型底部刚接, 错层处的悬臂部分也视为与下一仓混凝土刚接。模型几何信息与边界条件如图 1 所示。

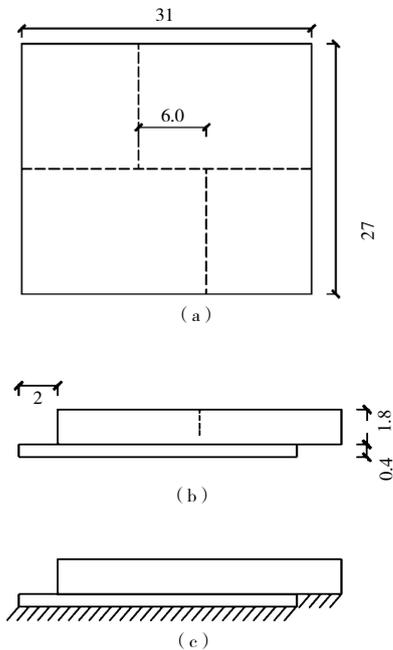


图 1 几何模型与边界条件示意 (m)
(a) 俯视; (b) 侧视; (c) 边界条件

为便于进行参数分析, 避免裂缝底部出现应力集中, 使用一层薄弱单元来模拟裂缝。裂缝单元同样采用六面体单元 (C3D8) 建模, 该层单元的厚度与裂缝宽度相同, 材料属性取微小值, 弹性模量为 3 kPa (约为混凝土的 1/10000), 密度为 2.5 kg/m³ (约为混凝土的 1/1000)。

1.2 计算过程

为比较网格划分单元大小对计算结果的影响, 进行网格收敛性分析。为方便计算, 两层混凝土材料性质均设定为 $E_c=30000\text{MPa}$, $\nu=0.2$, $\rho=2490\text{kg/m}^3$, 分别取单元特征尺寸为 1, 0.75, 0.5, 0.25 (m), 计算结果如图 2 所示。

单元特征尺寸小于 0.75 m (单元数量约 7000 个)

时, 计算结果趋于收敛。综合计算精度及计算效率, 考虑取单元特征尺寸为 0.25 m, 研究弹性模量与一阶频率的关系, 计算结果见表 1。

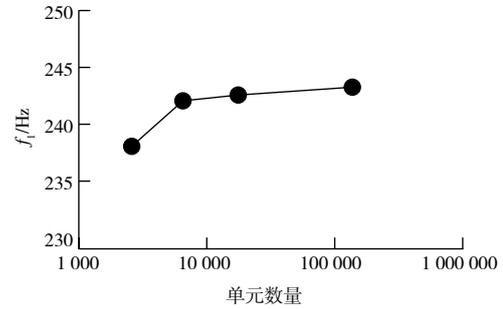


图 2 网格收敛性分析

表 1 弹性模量与一阶频率计算结果

| E_c/MPa | ν | $\rho/(\text{kg/m}^3)$ | f_1/Hz |
|------------------|-------|------------------------|-----------------|
| 35000 | 0.2 | 2490 | 262.75 |
| 30000 | 0.2 | 2490 | 242.78 |
| 25000 | 0.2 | 2490 | 222.07 |

对上述结果进行线性拟合, 结果如图 3 所示。

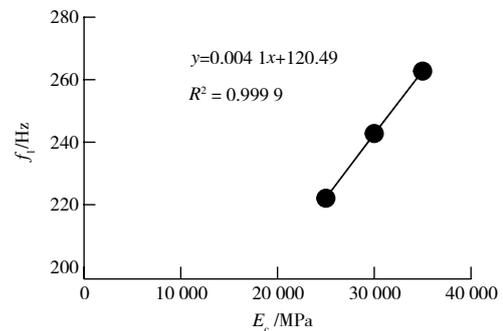


图 3 等效弹性模量换算

由此可得到一阶频率和弹性模量的关系近似为:

$$f_1=0.0041E_c+120.49 \quad (1)$$

对本工程结构进行计算时, 上、下两层按实际的材料属性分层建模, 通过有限元分析得到未开裂结构的一阶频率为 239.58 Hz, 利用得到的关系求解未开裂的等效弹性模量 $E_c=29046\text{MPa}$ 。

有限元计算不同裂缝宽度 W_{cr} 和裂缝深度下的一阶频率, 并换算成等效弹性模量 E_{eq} , 利用未开裂结构的等效弹性模量 E_r 归一化处理, 结果如图 4 所示。无裂缝和有裂缝结构的一阶振型如图 5 所示。

1.3 模拟结果分析

本研究通过结构一阶自振周期计算结构的等效弹性模量, 进而通过等效弹性模量的变化反映裂缝对结

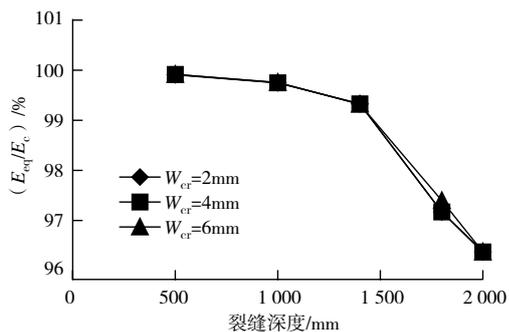


图 4 裂缝深度及裂缝宽度的影响

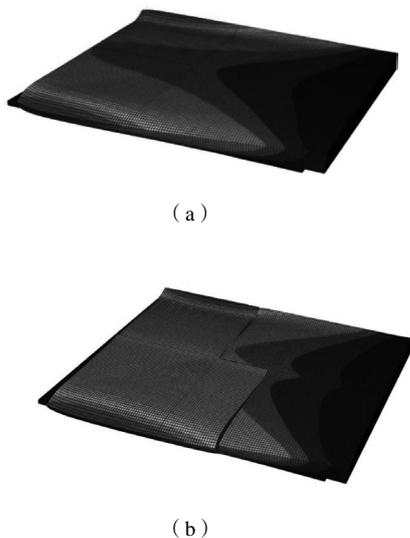


图 5 一阶振型示意 (计算机截图)
(a) 无裂缝; (b) 有裂缝

构整体振动特性的影响。

根据以上结果可知, 裂缝宽度对振动特性影响较小, 裂缝深度对振动特性影响较为显著。裂缝深度小于 1.4m 时, 开裂结构的振动特性与未开裂的较接近, 随裂缝加深, 结构等效弹性模量快速降低, 但仍保持在未开裂结构的 95% 以上。

2 配合比设计

2.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥; 细骨料选择同一产地、同一基坑、高强度、低含泥量、低碱活性的 II 区中砂, 其细度模数为 2.6~2.9; 粗骨料采用 5~25mm 连续级配的石子; 掺合料选用微珠含量较高的 F 类 II 级粉煤灰和 S95 级粒化高炉矿渣粉; 外加剂为聚羧酸高性能减水剂。

2.2 配合比正交设计与分析

选取粉煤灰和矿粉双掺方式, 以大幅度减少水

泥用量、降低水化热与大体积混凝土的内外温差, 防止大体积混凝土开裂。考虑到水胶比、胶材总量、矿物掺合料掺量是影响大体积混凝土抗压强度和裂缝的关键因素, 故选用正交表 $L_9(3^3)$ 做三因素三水平的正交试验, 其因素与水平见表 2。本试验的砂率为 42%, 减水剂掺量为 1%, 配合比见表 3。

表 2 因素与水平

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------|---------------------------------|---------------|
| | 水胶比 (A) | 胶材总量 (B) / (kg/m ³) | 掺合料掺量 (C) / % |
| 1 | 0.64 | 230 | 56 |
| 2 | 0.66 | 250 | 66 |
| 3 | 0.68 | 270 | 76 |

表 3 C15 混凝土 $L_9(3^3)$ 正交配合比

| 编号 | W/B | B | W | C | FA | KF | S | G | AN4000 |
|----|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|------|--------|
| 1 | 0.64 | 230 | 147 | 55 | 123 | 51 | 829 | 1144 | 2.3 |
| 2 | 0.64 | 250 | 160 | 85 | 83 | 83 | 813 | 1127 | 2.5 |
| 3 | 0.64 | 270 | 173 | 119 | 130 | 22 | 799 | 1108 | 2.7 |
| 4 | 0.66 | 230 | 152 | 101 | 64 | 64 | 825 | 1144 | 2.3 |
| 5 | 0.66 | 250 | 165 | 85 | 116 | 49 | 812 | 1123 | 2.5 |
| 6 | 0.66 | 270 | 178 | 65 | 176 | 29 | 797 | 1105 | 2.7 |
| 7 | 0.68 | 230 | 156 | 78 | 130 | 22 | 823 | 1141 | 2.3 |
| 8 | 0.68 | 250 | 170 | 60 | 95 | 95 | 809 | 1121 | 2.5 |
| 9 | 0.68 | 270 | 184 | 119 | 107 | 44 | 795 | 1102 | 2.7 |

注: W/B 为水胶比; B 为胶材总量 (kg/m³); W 为水 (kg/m³), C 为水泥 (kg/m³); FA 为粉煤灰 (kg/m³); KF 为矿粉 (kg/m³); S 为砂 (kg/m³); G 为石 (kg/m³); AN4000 为减水剂 (kg/m³)。下同。

绝热温升是控制大体积混凝土开裂的重要指标, 混凝土绝热温升正交试验结果和分析见表 4、表 5。

由表 5 可知, 水胶比对混凝土绝热温升的影响最大, 胶材总量的影响次之, 矿物掺合料掺量的影响最小。

以绝热温升最低为试验指标确定的 3 个因素的最优组合为 $A_2B_2C_2$, 因此, 确定混凝土配合比基准参数为: 水胶比 0.66, 胶材总量 250kg/m³, 掺合料掺量 66%。

2.3 配合比优化设计与分析

为提高混凝土强度、减少收缩裂缝, 且使混凝土

表4 绝热温升正交试验结果

| 编号 | 因素 | | | 绝热温升 /°C (入模温度 20°C) |
|----|------|-------------------------|-----|-------------------------|
| | A | B/ (kg/m ³) | C/% | |
| 1 | 0.64 | 230 | 76 | 35.6 |
| 2 | 0.64 | 250 | 66 | 36.8 |
| 3 | 0.64 | 270 | 56 | 39.0 |
| 4 | 0.66 | 230 | 56 | 36.2 |
| 5 | 0.66 | 250 | 66 | 34.5 |
| 6 | 0.66 | 270 | 76 | 37.1 |
| 7 | 0.68 | 230 | 66 | 37.0 |
| 8 | 0.68 | 250 | 76 | 36.2 |
| 9 | 0.68 | 270 | 56 | 34.7 |

表5 绝热温升正交分析

| 分析指标 | 绝热温升 /°C | | |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| | A | B | C |
| k_1 | 37.1 | 36.3 | 36.6 |
| k_2 | 35.9 | 35.8 | 36.1 |
| k_3 | 36.0 | 36.9 | 36.3 |
| 极差 | 1.2 | 1.1 | 0.5 |
| 优水平 | A ₂ | B ₂ | C ₂ |

注: k_1 、 k_2 、 k_3 分别指 A、B、C 三因素的 1 水平、2 水平、3 水平所对应的绝热温升的平均值。

拌合物具有良好的工作性,在绝热温升最优的基础上对上述配合比进行优化,优化配合比见表 6。对优化配合比进行相应的试验研究,结果见表 7。

表6 优化配合比

| 序号 | W/B | B | (FA+KF)/B | W | C | FA | KF | S | G | AN4000 |
|----|------|-----|-----------|-----|-----|-----|----|-----|------|--------|
| 1 | 0.66 | 250 | 0.66 | 165 | 85 | 116 | 49 | 812 | 1123 | 2.5 |
| 2 | 0.61 | 270 | 0.66 | 165 | 92 | 128 | 50 | 834 | 1106 | 3.51 |
| 3 | 0.57 | 290 | 0.66 | 165 | 100 | 140 | 50 | 875 | 1070 | 4.35 |

表7 优化配合比试验结果

| 序号 | 28d 强度 / MPa | 坍落度 / mm | 弹性模量 / $\times 10^4$ N/mm ² | 泊松比 | 剪切波速 / (m/s) |
|----|--------------|----------|--|------|--------------|
| 1 | 20.3 | 175 | 2.68 | 0.17 | 2163 |
| 2 | 22.7 | 165 | 2.74 | 0.17 | 2195 |
| 3 | 23.8 | 165 | 2.99 | 0.19 | 2247 |

在保证混凝土拌合物工作性良好的前提下,降低坍落度有利于减少混凝土的收缩。从表 7 可看出,

3 组优化配合比的试验结果均符合工程要求,从中选取抗压强度高、坍落度小且剪切波速富余系数较高的第 3 组配合比为工程配合比。

3 超长体积防微振素混凝土最大浇筑尺寸计算

温度裂缝是最常见、也是危害最大的一种裂缝。大体积混凝土存在温度梯度且不易散热,因此须严格控制本工程大体积换填混凝土的温度裂缝。首先进行混凝土的绝热温升计算,之后从温度收缩应力方面计算大体积防微振素混凝土的最大浇筑尺寸。

3.1 混凝土绝热温升计算

根据实际经验,一般龄期为 3d 时混凝土的水化热温度最高,故计算 3d 龄期的绝热温升。北京地区 9 月份平均气温为 24°C 左右,对大体积混凝土进行热工计算,结果见表 8。

表8 大体积混凝土热工计算结果 °C

| 拌合物温度 | 拌合物出机温度 | 浇筑温度 | 绝热温升 (3d) | 内部最高温度 | 表面温度 |
|-------|---------|------|-----------|--------|------|
| 21.3 | 22.1 | 22.7 | 29.8 | 49.5 | 31.6 |

混凝土内部最高温度与表面温度之差为 17.9°C,混凝土表面温度与大气平均温度之差为 7.6°C,各项温度指标均满足规范要求。

3.2 基于温度收缩应力计算防微振混凝土的最大浇筑尺寸

大体积混凝土开裂的主要原因是其抗拉强度较低,主拉应力是控制本工程大体积换填混凝土的主要应力。假设:跳仓法施工中每仓混凝土的厚度远小于其他 2 个方向的尺寸;换填混凝土处于弹性约束状态,则任意点的实际位移由约束位移和自由位移 2 部分组成。从理论和实践经验可知,主拉应力为换填混凝土中部剪应力为零的水平应力。考虑徐变对大体积混凝土的影响,主拉应力的计算公式为:

$$\sigma_{x\max}^* = -E\alpha T \left(1 - \frac{1}{\cosh(\beta \frac{L}{2})}\right) H(t, \tau) \quad (2)$$

式中: $\beta = \sqrt{\frac{C_x}{HE}}$, E 为换填混凝土弹性模量; α 为膨胀系数,通常为 $(6\sim 12) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; T 为换填混凝土与周围环境的相对温差; L 为换填混凝土长度; $H(t, \tau)$ 为应力松弛系数,一般养护条件下取 0.5; C_x 为比例系数,对于低强度等级素混凝土,其取值

为 $(60\sim 100)\times 10^{-2}\text{N/mm}^3$; H 为换填混凝土厚度。

为防止大体积换填混凝土开裂, 温度收缩应力需不超过抗拉强度:

$$\sigma_{x\max}^* \leq f_t \quad (3)$$

经计算, L 应不大于 20m。

通过分析大体积混凝土的温度应力, 其浇筑尺寸最长不宜超过 20m。

4 应用效果

上述配合比已用于防微振地基换填工程(图6)。对施工现场混凝土的性能进行实时监测并分析混凝土温度、抗压强度和剪切波速和开裂情况, 配合比设计阶段与施工阶段的性能对比如图7所示。

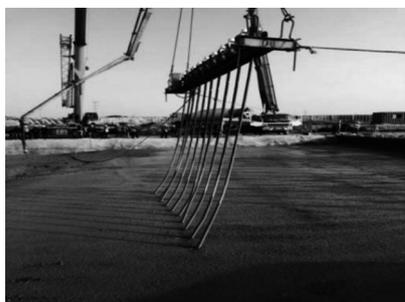


图6 换填施工现场

现场监测的混凝土最高温度出现在浇筑后的第3天, 该值和里表温差与计算值接近且更有利于现场施工, 混凝土发生裂缝的可能性更小。混凝土抗压强度和剪切波速的现场监测值围绕试验检测值上下浮动且波动较小, 现场混凝土浇筑最长尺寸不超过 20m 时, 未出现开裂现象。

5 结束语

(1) 在大体积防微振混凝土中, 裂缝宽度对振动特性影响较小, 裂缝深度对振动特性影响较显著。在裂缝深度小于 1.4m 时, 开裂结构的振动特性与未开裂的较接近, 随裂缝加深结构等效弹性模量快速降低, 但仍保持在未开裂结构的 95% 以上。

(2) 在水胶比、胶材总量和矿物掺合料掺量三个因素中, 水胶比对混凝土绝热温升的影响最大, 胶材总量的影响次之, 而矿物掺合料掺量的影响最小。

(3) 当配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{矿粉}):m(\text{砂}):m(\text{石})=1:1.4:0.5:8.75:10.7$, 水胶比为 0.57 时, 混凝土及其拌合物均具有较好的工作性和力学性能, 该配合比已成功应用于高能同步辐

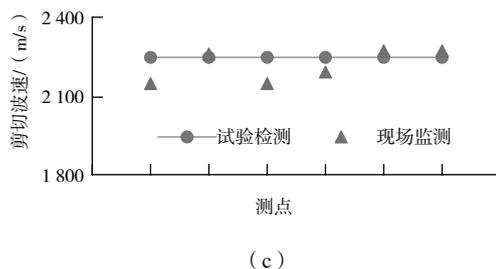
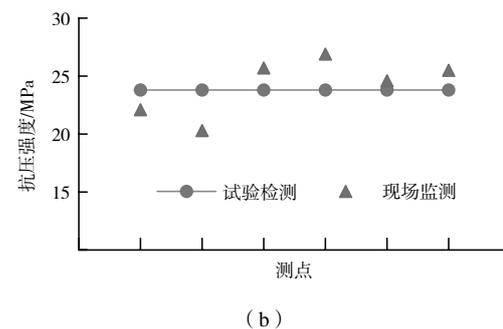
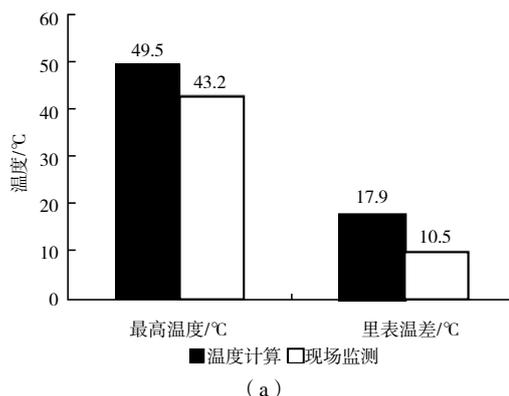


图7 配合比设计阶段与施工阶段性能对比

(a) 温度对比; (b) 抗压强度对比; (c) 剪切波速对比

射光源项目的地基换填工程。

(4) 为防止大体积混凝土开裂, 混凝土的最长浇筑尺寸不宜超过 20m, 实践证明, 该施工方式取得了良好效果。

参考文献

- [1] 郝兵, 张广勇, 孔凡敏, 等. 高温高湿条件下大体积混凝土的研究与应用[J]. 建筑技术, 2019, 50(8): 955-958.
- [2] 张豫川. C45 大体积混凝土配合比设计及在港澳大桥拱北隧道中的应用[J]. 市政技术, 2019, 37(3): 245-247, 251.
- [3] 郝兵, 衣丽娇, 曹长柱. 大体积混凝土配合比设计及在高温环境中的应用[J]. 建筑技术, 2017, 48(10): 1039-1042.
- [4] 单体庆, 李秋义, 郭远新, 等. 基于地铁工程的大体积混凝土配合比优化[J]. 混凝土, 2019(1): 146-149.
- [5] 袁学成. C40P10 大体积混凝土研究与制备[J]. 商品混凝土, 2018(1): 59-61.
- [6] 李峰. 大体积混凝土施工的裂缝控制途径[J]. 工程施工, 2019(1): 196-197.
- [7] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [8] 张巨松. 混凝土学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.