

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.024

大体积混凝土承台温控仿真分析与智能控制研究*

陈康军

(湖南聚创建筑科技有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要: 针对实际工程项目,采用三维有限元软件 MIDAS/Civil 模拟分析桥梁承台大体积混凝土浇筑施工过程中温度及拉应力变化情况,据此制定合理可行的内部冷却管布置方案,设计并采用大体积混凝土智能控制系统实现大体积混凝土养护过程智能化。

关键词: 桥梁;大体积混凝土;承台;温控技术;仿真分析;智能控制

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)04-0101-05

混凝土成型过程中产生的大量水化热在内部积聚得不到有效散发,形成的温度梯度效应导致混凝土开裂的问题备受重视,桥梁承台、锚垫等大体积混凝土的温控一直是施工过程中的重点、难点,稍有不慎将导致巨大经济损失。即使普遍认为尺寸不大的混凝土,也时常因为温控不当导致混凝土开裂。某在建桥梁工程实心墩最小尺寸仅为 2 m,混凝土浇筑时由于温控措施考虑不周导致内部温度过高,拆模后表面温度迅速降低,造成内外温度变大,拆模 1 h 后表面产生大量裂纹。温度应力引起的裂缝具有裂缝宽、上下贯通等特点,对结构承载力、耐久性等都会产生很大影响。如不加以控制,裂缝将向深层发展,对工程结构带来很大安全隐患,甚至导致结构失效。该文以湖南官新(官庄一新化)高速公路马路口特大桥 6# 主墩承台大体积混凝土施工为例,采用三维有限元软件 MIDAS/Civil 对大体积混凝土承台温控技术进行研究。

1 工程概况

马路口特大桥为双塔双索面斜拉桥,主桥跨径为 160 m+500 m+160 m。6# 主墩承台为矩形截面,尺寸为 22.800 m×39.827 m×6.000 m(顺桥向×横桥向×厚度),塔座为高 2 m 的楔形体。基础采用 24φ2.8 钻孔灌注桩,横桥向、顺桥向桩中心距为 6 m。

主墩承台及塔座均采用 C45 混凝土,6# 墩承台按照 2.5 m+3.5 m 分层浇筑。采用图 1 所示冷却管布置方案,第一层浇筑体 2.5 m 布置 2 层水管,第

二层浇筑体 3.5 m 布置 3 层水管,层距均为 1.25 m。在水平方向,在浇筑体受环境温度影响较大的周边布置一圈冷却管,在受环境温度影响较小的中心区域单独布置冷却管。冷却管直径为 42 mm,壁厚为 2 mm,水平间距为 1.0 m。

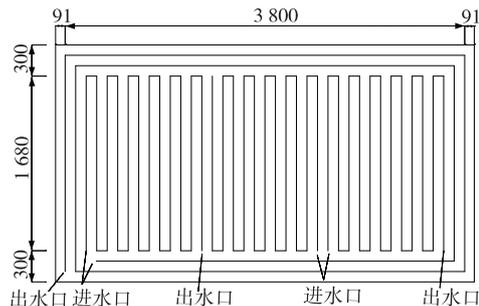


图 1 6# 墩承台第一、第二层冷却管平面布置(单位:cm)

2 仿真分析参数确定及模型建立

2.1 计算参数确定

(1) 混凝土参数。混凝土强度为 C45,其徐变与收缩系数曲线、强度发展曲线均由 MIDAS/Civil 软件自动给出(实验室未能提供该参数),混凝土比热为 1.046 kJ/(kg·°C),热传导率为 10.08 kJ/(m·h·°C)。

(2) 混凝土绝热温升函数。实验室提供的 C45 混凝土初始配合比见表 1,该配合比不能满足 28 d 强度要求。施工前对 C45 混凝土配合比进行调整,调整后配合比见表 1。水泥采用 P.O52.5 普通硅酸盐水泥,单方混凝土水泥用量采用规范推荐的最大值。

* 基金项目:长沙市科技计划项目(长科发[2021]4号)

表1 C45混凝土的配合比 kg/m³

配合比	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂
原配合比	322	138	686	1 119	175	4.6
调整后配合比	350	130	715	1 087	168	4.8

每千克水泥的水化热值由混凝土厂家提供, m 值根据 GB 50496—2018 附录 B 查表取 0.55, 混凝土绝热温升计算参数取值见表 2。据此得到初始配合比混凝土与调整配合比后混凝土的绝热温升公式分别为:

土绝热温升计算参数取值见表 2。据此得到初始配合比混凝土与调整配合比后混凝土的绝热温升公式分别为:

$$T(t) = 35.7(1 - e^{-0.55t}) \quad (1)$$

$$T(t) = 41.3(1 - e^{-0.55t}) \quad (2)$$

(3) 其他参数。冷却管进口水温为 20 °C, 流量

表2 混凝土绝热温升计算参数取值

配合比	混凝土比热 $C/$ [kJ·(kg·K) ⁻¹]	混凝土密度 $\rho/$ (kg·m ⁻³)	水泥用量 $W/$ (kg·m ⁻³)	水化热 $Q/$ (kJ·kg ⁻¹)	掺合料折减 系数 K	$WKQ/(C\rho)$
原配合比	0.98	2 500	322	340	0.80	35.7
调整后配合比	0.98	2 500	350	340	0.85	41.3

为 6.0 m³/h。冷却水对流系数为 371 W/(m²·K), 环境对流传热系数为 14 W/(m²·K)。根据计划浇筑时间, 参考该桥所在地区 2020 年 5 月的气温, 以“时间—温度”自定义函数形式输入。

2.2 仿真计算模型建立

采用 MIDAS/Civil 建立该桥 6# 主墩承台全尺寸模型, 该模型共划分为 8 636 个八节点实体单元 (见图 2)。为描述混凝土将热量传递给垫层的情况, 将垫层模拟为具有一定比热和热传导率的结构。由于 6# 墩垫层底部不与地基接触, 每层浇筑体及台座四周边界取为与大气接触的环境温度单元对流边界, 垫层底部节点按固结进行模拟计算。

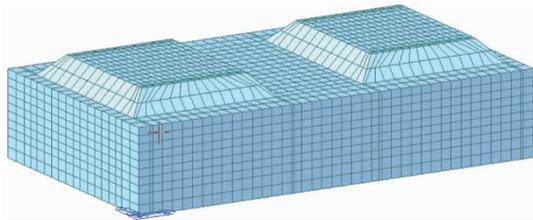


图2 承台仿真分析模型

3 混凝土浇筑过程温控分析

3.1 不设置内部冷却管时温度及应力分析

不设置内部冷却管的条件下, 以第一层混凝土浇筑为列, 7 d 龄期时内部温度达到 57 °C, 直至 28 d 时内部温度始终维持在 56 °C 以上, 说明自然冷却的效率不明显 (见图 3、图 4)。7 d 龄期时拉应力峰值为 3.08 MPa, 此时容许拉应力为 3.20 MPa, 安全系数为 1.04; 14 d 龄期时拉应力峰值为 3.99 MPa, 此时容许拉应力为 3.42 MPa, 拉应力峰值大于容许拉应力, 导致混凝土开裂 (见图 5、图 6)。

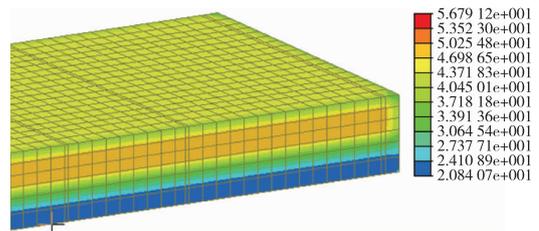


图3 不设置内部冷却管的条件下 7 d 龄期时温度场(单位: °C)

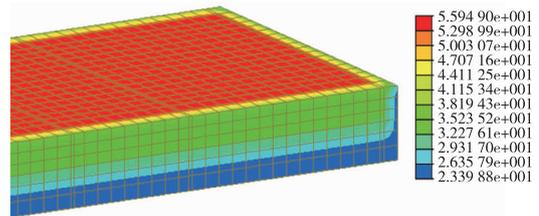


图4 不设置内部冷却管的条件下 28 d 龄期时温度场(单位: °C)

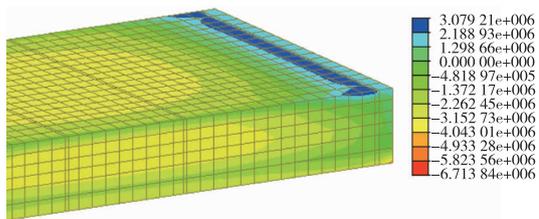


图5 不设置内部冷却管的条件下 7 d 龄期时拉应力(单位: Pa)

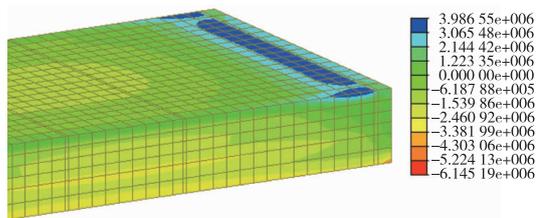


图6 不设置内部冷却管的条件下 14 d 龄期时拉应力(单位: Pa)

3.2 不同配合比时温度及应力分析

3.2.1 温度场

如图 7、图 8 所示,原混凝土配合比条件下第一、第二层浇筑 180 h 后混凝土内部分别出现 55.89 °C、55.94 °C 温度峰值;调整配合比后第一、第二层浇筑 180 h 后混凝土内部分别出现 59.32 °C、59.37 °C 温度峰值,满足规范中入模温升值不大于 50 °C 的要求(入模温度 20 °C);不同配合比时 2 层浇筑体温度峰值出现的时间基本相同,调整配合比后温度峰值升高约 3.4 °C。

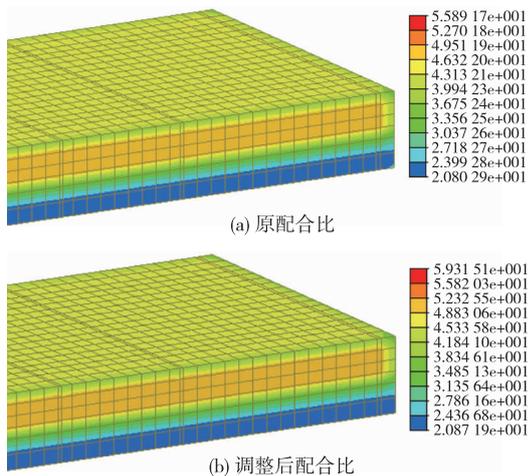


图 7 不同配合比时第一层混凝土浇筑后最高温度时刻温度场(单位:°C)

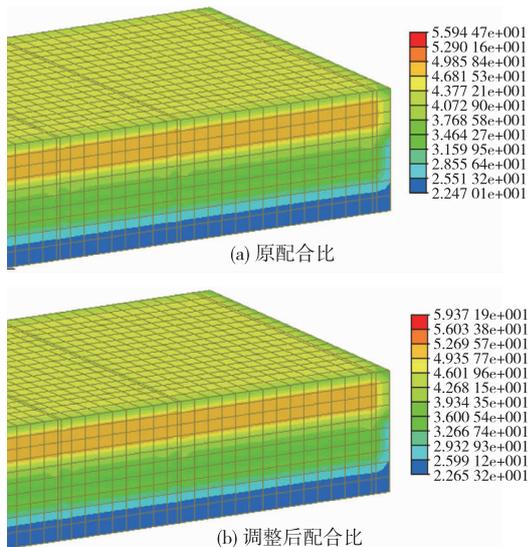


图 8 不同配合比时第二层混凝土浇筑后最高温度时刻温度场(单位:°C)

3.2.2 温度应力分析

如图 9、图 10 所示,原配合比条件下第一、第二层浇筑完成 192 h 后混凝土表面分别出现 2.13

MPa、2.22 MPa 拉应力峰值;调整配合比后第一、第二层浇筑完成 192 h 后混凝土表面分别出现 2.35 MPa、2.42 MPa 拉应力峰值;不同配合比时 2 层浇筑体拉应力峰值出现的时间基本相同,调整配合比后拉应力峰值升高约 0.22 MPa。

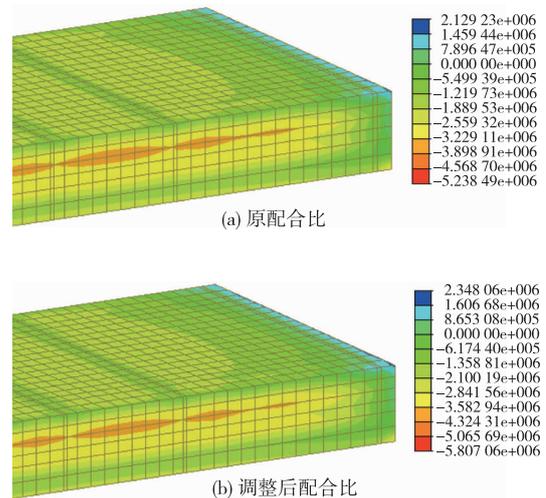


图 9 不同配合比时第一层混凝土浇筑后拉应力(单位:Pa)

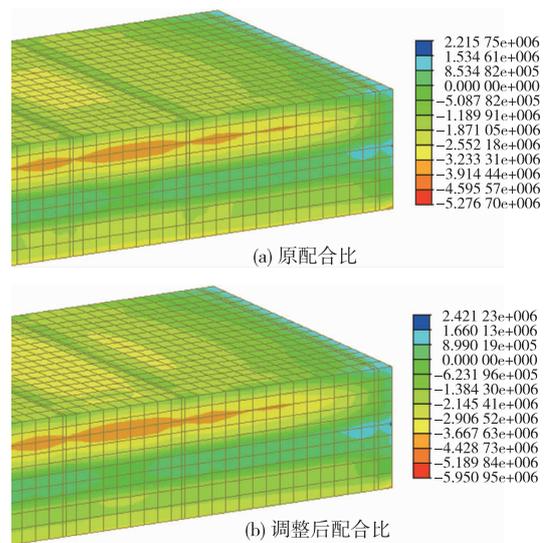


图 10 不同配合比时第二层混凝土浇筑后拉应力(单位:Pa)

3.2.3 温度及拉应力安全系数分析

分层浇筑时不同配合比下混凝土内外温差见表 3,温度应力及安全系数见表 4。原配合比条件下入模温升值、内外温差及 3 d、7 d、28 d、42 d 龄期拉应力均在规范要求范围内;调整配合比后上述指标符合规范要求,但温度峰值、拉应力峰值较前者提高,相应的拉应力安全系数较前者偏小,最小值出现在

第二层混凝土浇筑 7 d 左右,为 1.40,开裂的可能性很低,调整后 C45 混凝土配合比可行。

表 3 分层浇筑内外温差 $^{\circ}\text{C}$

结构部位	配合比	最高温度	最大内表温差
第一层	原配合比	55.93	20.40
第二层	原配合比	55.98	20.36
第一层	调整后配合比	59.26	22.67
第二层	调整后配合比	59.32	23.16

表 4 温度应力及安全系数

结构部位	配合比	温度应力/MPa				安全系数			
		3 d	7 d	28 d	42 d	3 d	7 d	28 d	42 d
第一层	原配合比	1.00	2.09	1.54	2.05	2.93	1.61	2.36	1.80
第二层	原配合比	1.16	2.20	2.24	2.13	2.53	1.53	1.63	1.64
第一层	调整后配合比	1.10	2.30	1.72	2.30	2.66	1.47	2.12	1.60
第二层	调整后配合比	1.28	2.41	1.92	2.38	2.29	1.40	1.90	1.55

水温及电动阀排出热水)等。

在每层混凝土浇筑体 1/2、1/4、1/8 处及近表面 5 cm、外表面设置温度传感器,分别编号为 $T_{1/2}^i$ 、 $T_{1/4}^i$ 、 $T_{1/8}^i$ 、 T_c^i 、 T_b^i 。另外,每层设置进、出水温度传感器 T_{js}^i 、 T_{cs}^i ,环境温度传感器 T_1 。冷却水泵额定流量为 $8 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,频率为 25~50 Hz,对应流量为 2~8 m^3/h 。

4.2 温度梯度控制

4.2.1 同一层相邻点温度梯度控制

相邻 2 个温度监测点 j 、 k 的温差按下式计算:

$$\Delta T_{j-k}^i = T_j^i - T_k^i \quad (3)$$

式中: i 为层数。

温差最大值 $\Delta T_{\max(j-k)}^i$ 满足式(4)时,控制该层冷却水泵频率为 25 Hz。

$$\Delta T_{\max(j-k)}^i \leq 15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$\Delta T_{\max(j-k)}^i$ 满足式(5)时,该层冷却水泵频率 B 在 25~50 Hz 内采用线性内插法确定,对应流量为 $(B/50)^2 \times 8 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

$$15 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{\max(j-k)}^i \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$\Delta T_{\max(j-k)}^i$ 满足式(6)时,控制该层冷却水泵频率为 50 Hz。 k 在外表面位置时加盖保温层。

$$\Delta T_{\max(j-k)}^i \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

4.2.2 同一位置相邻层温度梯度控制

相邻层的温差按下式计算:

$$\Delta T_j^{i-i+1} = T_j^i - T_j^{i+1} \quad (7)$$

ΔT_j^{i-i+1} 满足式(8)时维持相邻两层的冷却水泵频率。

4 大体积混凝土温度监测控制系统

4.1 系统简介

设计大体积混凝土监测控制系统,该系统由监测与控制两部分组成。监控系统由综合采集仪(应力应变与温度采集)与温度传感器、应力应变传感器组成,控制系统包括可编程逻辑控制器 PLC(中央处理器)、多级立式变频泵、水箱(设置加冷水泵调低

$$\Delta T_j^{i-i+1} \leq 15 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

ΔT_j^{i-i+1} 满足式(9)时,温度高的一层冷却水泵频率 B 在 25~50 Hz 内采用线性内插法确定,对应流量为 $(B/50)^2 \times 8 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

$$15 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_j^{i-i+1} \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

ΔT_j^{i-i+1} 满足式(10)时,调整温度高的一层(一般为近中心层)的冷却水泵频率为 50 Hz。 j 在外表面位置时加盖保温层。

$$\Delta T_j^{i-i+1} \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

4.3 进出口水温控制流程

$T_{\max} - T_1 \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件为“否”时,启动加水泵往水箱内加入冷水,开启水箱电动阀排水。再次检查水温直至该条件为“是”时停止排出热水和加入冷水。

4.4 降温过程控制流程

在遵循温度梯度原则的前提下,第 i 层 j 位置大体积混凝土整体降温速率控制模型为:

$$\Delta T_{ij} \leq 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d} \quad (11)$$

$$1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d} \leq \Delta T_{ij} \leq 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d} \quad (12)$$

$$\Delta T_{ij} \geq 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d} \quad (13)$$

满足式(11)时维持现状;满足式(12)时调整该层冷却水泵频率 B 在当前频率至 50 Hz 内采用线性内插法确定,对应流量为 $(B/50)^2 \times 8 \text{ m}^3/\text{h}$;满足式(13)时调整该层冷却水泵频率为 25 Hz。

当内部点降温速率与温度梯度控制原则冲突时,遵循温度梯度控制原则,在有可靠措施的基础上适当增大降温幅度。

5 温度监测结果及分析

根据现场温度监测结果,6#墩承台第一层混凝土温控过程中平均温度变化见图 11,第二层各时段监测温度变化与此差别不大。

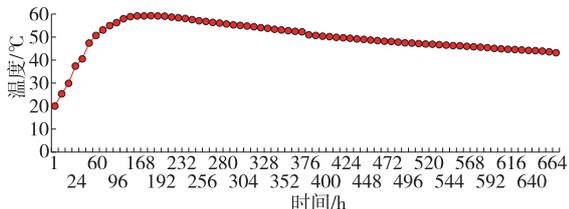


图 11 第一层混凝土中心特征点温度时程曲线

由图 11 可知:前 7 d 混凝土急剧升温,7 d 时温度热量积聚后达到峰值 59.5 °C;此后开始降温,相较于升温,降温速率较缓慢。停止通水(实际通水时间为 10 d)后通过自然散热温度下降幅度较平缓,降温速率约为 1.0 °C/d,各层混凝土最大升温值均未超过 40 °C,内外温差最大值均未超过 23 °C,均在规范允许范围内。

6 结论

以湖南官新高速公路马路口特大桥 6#墩承台大体积混凝土施工为背景,采用 MIDAS/Civil 模拟施工过程进行仿真分析与智能控制,得到以下结论: 1) 在采用 P.O52.5 高标号水泥、单方混凝土水泥用量达到规范推荐的最大极限值 350 kg/m³且采用普通硅酸盐水泥的极端条件下,采用合理有效的冷却管方案和表面保温保湿措施,能保证施工过程中温差及拉应力可控。2) 根据 2 种配合比混凝土温控过程的仿真分析结果,水泥用量增加会导致混凝土温度、拉应力峰值上升,开裂风险增大,但上升幅度

在可控范围内,满足现场施工要求。3) 采用大体积混凝土温度监测与控制系统可实现温度实时监测与数据分析,通过控制冷却水流量能保证温度梯度和整体降温幅度符合规范要求,同时节省监控工作量。

大体积混凝土施工中除事前进行计算分析、制订冷却降温方案外,还应通过采用低水化热水泥、降低入模温度、加强表面保温保湿、采取气温骤降天气及冷却水循环系统故障应急处置措施等确保施工过程中混凝土有效降温,避免混凝土开裂。

参考文献:

[1] 中交一公局集团有限公司.公路桥涵施工技术规范:JTG/T 3650—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.

[2] 罗卫华,邹团结,陈康军,等.混凝土智能蒸汽养护系统在桥梁预制构件中的应用研究[J].公路工程,2015,40(4):158—162.

[3] 赵一林.水泥混凝土智能养护系统在桥梁工程中的应用研究[J].公路工程,2014,39(2):284—287.

[4] 闵涛,罗亮,夏晚晖,等.水泥混凝土智能养护系统的设计与关键技术研究[J].公路工程,2014,39(2):158—161.

[5] 杨剑,陈康军.混凝土智能化施工技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[6] 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:GB 50496—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[7] 谭文滕,王荣兴,赵伟,等.基于温差控制的大体积混凝土智能温控系统及方法[J].公路,2020,65(10):211—215.

[8] 南航,林月妙,郑毅.温州瓯江北口大桥北锚碇大体积温控技术研究及应用[J].公路交通科技(应用技术版),2020(8):179—181.

收稿日期:2021—09—07

(上接第 100 页)

[3] 丁发兴,倪鸣,龚永智,等.栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J].建筑结构学报,2014,35(9):13—21.

[4] HIRAGI H, MATSUI S, FUKUMOTO Y. Derivation of strength equations of headed stud shear connectors-static strengths[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 35(3):1221—1232.

[5] CHEN X, SUGIURA K, WU C, et al. Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72;

84—96.

[6] 赵建,郑舟军.大跨度钢—混组合梁桥剪力群钉受力分析研究[J].桥梁建设,2013,43(3):48—53.

[7] 黄彩萍,张仲先,郑舟军,等.钢混组合结构中剪力钉群的力学性能及破坏机理试验研究[J].武汉理工大学学报,2015,37(2):100—105.

[8] 赖苑林.集束式长短剪力钉抗剪性能分析与试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.

[9] 刘益铭.大纵肋正交异性钢—高性能混凝土组合桥面板疲劳失效机理研究[D].成都:西南交通大学,2017.

收稿日期:2021—03—27