

实测温度场下连续刚构桥施工开裂分析与防治

靳利娜

(上海同亘科技有限公司, 上海市 201802)

摘要: 针对某六跨预应力连续刚构箱梁施工过程中出现的底板纵向和斜向裂缝问题,通过现场裂缝检测、温度监测与有限元仿真分析,系统研究了裂缝成因并提出了防治措施。桥梁检测结果表明,裂缝主要分布于节段接缝处,且伴随明显温升效应。基于热力耦合有限元模型,揭示了混凝土早龄期水化热导致的温度梯度与约束应力是裂缝产生的主因;底板局部最大拉应力达4.8 MPa,超过C55混凝土抗拉强度。通过优化冷却水管布置方案,可有效控制裂缝发展。研究成果可以为同类桥梁施工期裂缝防控提供理论依据与工程参考。

关键词: 连续刚构桥;温度效应;有限元分析;裂缝防治

中图分类号: U445.7⁺¹

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0248-05

Cracking Analysis and Prevention Measures of Continuous Rigid Frame Bridge in Construction Stage Based on Measured Temperature Field

JIN Lina

(Shanghai Tonggen Technology Co., Ltd., Shanghai 201802, China)

Abstract: The investigation into the causes of longitudinal and diagonal cracks in the bottom plate that appeared during the construction of a four-span prestressed continuous rigid box girder is presented. In order to propose preventive measures through on-site crack detection, temperature monitoring and finite element simulation analysis was adopted. The results of the bridge inspection demonstrate that the cracks are predominantly distributed at the joints of the segments and are accompanied by a discernible temperature rise effect. Utilising a thermodynamic coupling finite element model, it was determined that the temperature gradient resulting from the hydration heat of the concrete at the early age and the restraining stress were the primary causes of the cracks. The maximum local tensile stress in the base plate was recorded as 4.8 MPa, which exceeded the tensile strength of C55 concrete. The development of cracks can be effectively mitigated by optimising the arrangement scheme of the cooling water pipe. The research findings provide a theoretical foundation and an engineering reference point for the prevention and control of cracks during the construction period of similar bridges.

Keywords: continuous rigid frame bridge; temperature effect; finite element analysis; crack control

0 引言

连续刚构桥采用墩梁固结的结构体系,兼具连续梁桥与T形刚构桥的双重优势:既继承了连续梁桥无伸缩缝、行车舒适性高的优势,又融合了T形刚构桥不设支座、施工过程无须体系转换的构造特点。这种结构形式显著提高了桥梁整体刚度,增强了梁桥的跨越能力,在工程上广泛应用^[1]。

虽然预应力混凝土连续刚构桥的设计理论与施工工艺随着桥梁的建设实践在不断地进步和完善,但是由于混凝土材料自身抗拉强度低,且在桥梁施

工过程中现场环境比较复杂,混凝土须经历凝结硬化、强度缓慢增长的过程,在温度、水化热、收缩徐变和施工工艺等影响下混凝土更容易开裂,影响桥梁的耐久性。王蔚丞等^[2]借助ABAQUS有限元软件对连续刚构桥的悬臂施工进行模拟,结果表明,当竖向预应力张拉滞后箱梁腹板的竖向拉应力值超过原混凝土的抗拉强度设计值会导致箱梁腹板开裂;赵兴华等^[3]从材料、施工工艺、混凝土配合比等方面对连续刚构桥的混凝土裂缝进行分析和控制;陈金义等^[4]研究了腹板钢束偏位对连续刚构箱梁桥开裂的影响;Wei等^[5]探索了混凝土刚构桥施工过程中裂缝的规律,分析了施工过程中腹板开裂的原因;Zeng^[6]揭示了温度对大跨度连续刚性框架桥梁的影响规律,为后续连续刚框架桥梁温度问题的分析提供了

收稿日期: 2025-04-22

作者简介: 靳利娜(1989—),女,工学硕士,工程师,从事桥梁工程检测和监测工作。

参考;王子进等^[7]对某大跨连续刚构桥的节段进行建模,系统分析了施工阶段的预应力损失对裂缝发展的影响。

综上,目前国内外学者对于混凝土连续刚构梁桥在施工阶段的开裂问题已有一定研究,但是根据现场实测温度场数据对连续刚构桥的施工阶段进行精细化实体有限元分析的研究工作还比较少。本文针对某六跨预应力连续刚构箱梁施工过程中出现的底板纵向和斜向裂缝问题,通过现场裂缝检测、温度监测与 ANSYS 实体有限元仿真分析,系统研究了裂缝成因,并提出了相应防治措施。本研究能够为类似工程提供参考,减少混凝土刚构桥在施工阶段裂缝的产生,对提高混凝土桥梁的耐久性有重要意义。

某六跨预应力混凝土连续刚构桥的跨径布置为 (40+75+80+80+75+40)m,单幅主梁为单箱双室,梁宽为 15 m,支点梁高为 5 m,跨中梁高为 2.5 m,梁高按照抛物线渐变,采用挂篮悬臂浇筑施工。

2 施工现场裂缝检测与温度场监测

2.1 裂缝检测

选取 6#块作为典型节段,其箱梁外侧的底板裂缝分布图如图 1 所示,外底板均存在纵向、斜向裂缝,裂缝由靠近墩侧的节段间施工缝往跨中延伸,裂缝性状表现为节段接缝处端头缝宽较大,延伸后逐渐变细。裂缝宽度介于 0.08~0.16 mm,使用超声法检测得外底板裂缝深度范围介于 12~40 mm。

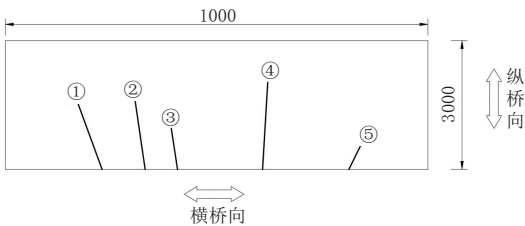


图 1 6#块底板裂缝分布图(单位:cm)

6#块箱梁内侧底板裂缝分布图如图 2 所示,存在纵向裂缝和腹板斜裂缝,其中斜向裂缝走向为从施工缝处往跨中延伸,角度大致为 10°~30°。裂缝宽度介于 0.08~0.12 mm,箱内腹板裂缝深度范围介于 26~43 mm。

2.2 温度场检测

2.2.1 测试断面与测点布置

针对 6#块开展早龄期水化作用影响下的温度测试工作,桥梁断面温度测点布置如图 3 和图 4 所示。

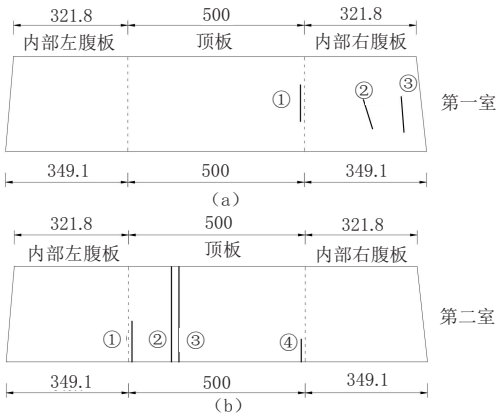


图 2 6#块箱内裂缝分布展开图(单位:cm)

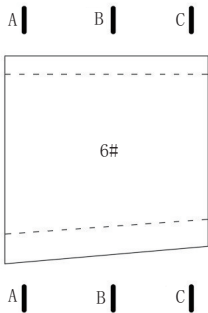


图 3 6#块温度测试断面

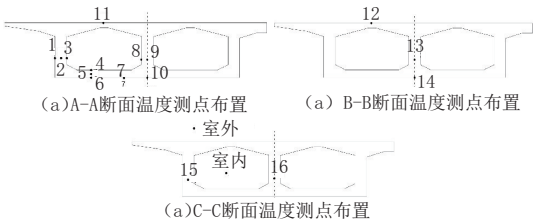


图 4 6#块温度测点断面布置

2.2.2 测试结果

经过测试,顶板最高温为 45℃,分布均匀,下降较快,后期随着环境温度涨落。

腹板倒角位置处最高温为 62.4℃,腹板中部最高温为 57.2℃,温度变化平缓。边腹板内表温差约为 8℃,中腹板内外温度接近。

底板温度分布不均匀,其中 14 号点在腹板正下方,同时此处箱内布置一道横隔板,温度较高,达到 74.7℃。10 号点温度次之,达到 61℃。其他底面温度分布较为均匀,在 44~50℃之间。根据同位置监测,底板最大正温差为 5.7℃。

3 实体有限元数值模拟

为明确裂缝成因,基于温度检测结果,开展温度计算参数的识别工作,然后基于热力耦合仿真分析,对早龄期温度分布、应力分布规律进行探明,为处治措施的制定提供依据。

3.1 模型参数

采用ANSYS软件建立实体有限元模型,材料为C55混凝土材料,考虑徐变的影响,参考CEB-FIP规范^[8]取值,28 d弹性模量为 3.55×10^4 MPa,混凝土的徐变取值按经验数值模型。

参考经验值,混凝土导热系数选取 $2.33\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ^[9]。顶面对流系数取10,底面、侧面、端面对流系数取8,内腔顶面与侧面对流系数取6,底面对流系数取15,内部对流系数取2,表面(墩柱)对流系数取 14 ^[10]。胶凝材料水化热量以其他工程经验参考,选取水化放热量及水化速率,如表1所列^[11]。混凝土绝热温升、水化速率计算公式^[11]如下:

$$T = \frac{Q}{cm}$$
$$Q(t) = Q(1 - e^{-1.5t})$$

式中: T 为绝热温升; Q 为热量; $Q(t)$ 为 t 龄期累计释放热量; c 为混凝土的比热容,取 $0.96\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; m 为混凝土质量,取 $2\,500\text{ kg}/\text{m}^3$; t 为时间。

表1 配合比(绝热温升)计算

材料	含量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水化热/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	总热量/ $(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$
水泥	270	407	109 890
粉煤灰	98	155	15 190
矿粉	122		18 910
总热量/ $(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$			143 990
绝热温升/ $^{\circ}\text{C}$			60.0

3.2 模型几何

墩顶块段为0~1#块段,考虑墩柱对温度以及应力影响,同步建立墩柱模型,为精细化分析,将人孔以及泄水孔建入模型。为提高计算效率,考虑结构对称性,建立1/4模型。悬浇块段分析主要针对4~6#块,考虑结构对称性,建立单侧悬臂的1/2模型。

4 模型计算结果和裂缝成因分析

4.1 温度拟合

以最高温及地面温度作为目标温度进行拟合,并与2.2节中实测温度进行对比,如图5所示,从图中可以看出有限元模型计算得到的温度效应与实测数据拟合效果良好。

4.2 混凝土应力

4.2.1 墩顶现浇0#及1#块

0~2 d升温期结构表面温度较低,表现出拉应力,内部温度高,表现为压应力,随着温度降低,内部压应力逐渐下降,转变为受拉应力。

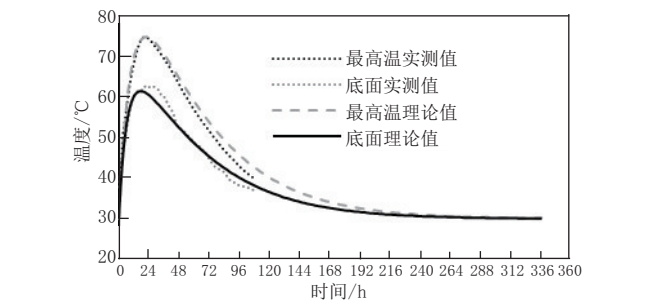


图5 有限元模型温度与实测温度对比

沿实际裂缝发生方向,即泄水孔位置向外扩展的方向切分底板(见图6)。可见,在泄水孔位置产生应力突变,最大拉应力达到 4.8 MPa ,这是裂缝产生于该位置的主要原因,随后裂缝沿着拉应力方向扩展,应力得到释放,其他位置由于应力普遍在 2.5 MPa 以内,因此此处开裂、受拉应变释放后,其他位置暂未发生开裂现象。

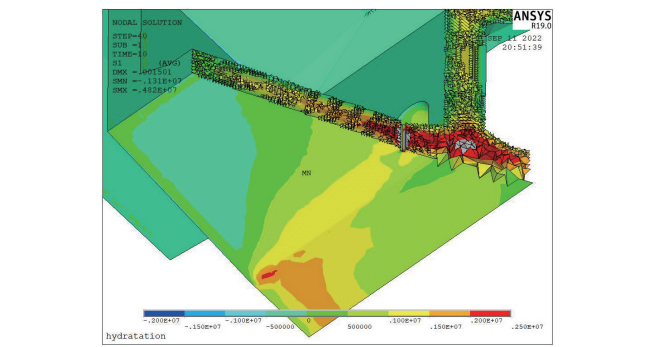


图6 沿裂缝方向切片图(单位:Pa)

从0#及1#块的计算结果可以看出,箱梁整体升降温受墩柱的约束,产生外约束拉应力,是裂缝产生的内在原因,同时泄水孔位置削弱了界面,产生应力集中,是裂缝开展在泄水孔位置的原因。拉应力水平在 2.5 MPa 以下,略超出混凝土抗拉强度设计值,拉应力水平并不显著,因此现场开裂并不严重。从拉应力分布的情况,结合析白现象,初步判定裂缝为贯通开裂。

4.2.2 悬臂浇筑4#至6#块

在0~2 d的升温阶段,结构呈现出明显的温度应力特征:表面温度较低,处于拉应力状态;内部因温度较高而呈现压应力。随着温度逐步下降,结构内部的压应力持续减小,最终转为拉应力。至第10 d时,中腹板拉应力数值在 $1.0\sim 2.2\text{ MPa}$ 区间;底板底面拉应力范围为 $0.8\sim 1.5\text{ MPa}$,整体受拉效应相对较弱。

经分析发现,顶板与底板核心区域呈现出较高的拉应力状态,其中温度应力在施工第5~6 d达到峰值。通过对底板及顶板断面进行剖切(见图7至图9),观测到顶板应力分布特征如下:4#块应力值

达 4.3 MPa,5#块与 6#块应力处于 1.5~2.0 MPa;底板内部应力分布规律为:靠近前一节段部位,4#块应力范围在 2.5~3.0 MPa,5#块与 6#块应力为 2.0~2.5 MPa,而远离节段结合面的区域,应力逐渐衰减至 1.0~1.5 MPa。

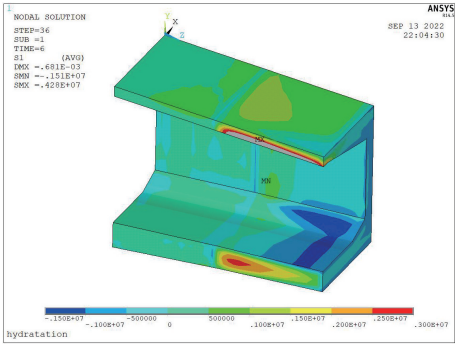


图 7 4#块混凝土应力图(单位:Pa)

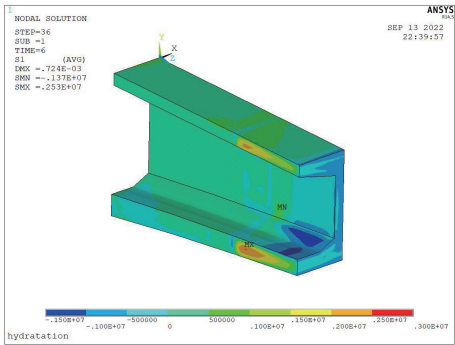


图 8 5#块混凝土应力图(单位:Pa)

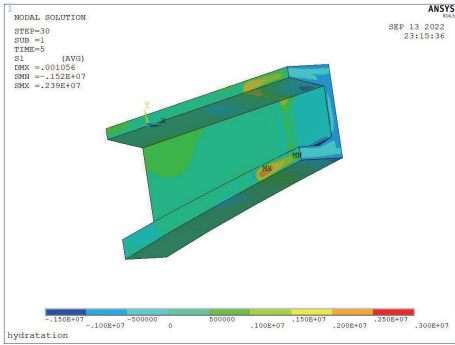


图 9 6#块混凝土应力图(单位:Pa)

4.3 裂缝成因分析

基于早龄期混凝土强度随时间增长的特性,选取典型块段对其强度与应力关系展开分析。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[12],C55 混凝土抗拉强度标准值及设计值分别为 2.74 MPa 和 1.89 MPa。

对 1#块进行分析,如图 10 所示,混凝土龄期为 10 d 时,采用标准强度计算抗裂安全系数仅有 1.05,而采用设计强度安全系数为 0.72,1#块具有较高的开裂风险。

对 4#块至 5#块进行分析,如图 11 所示,其中 4#

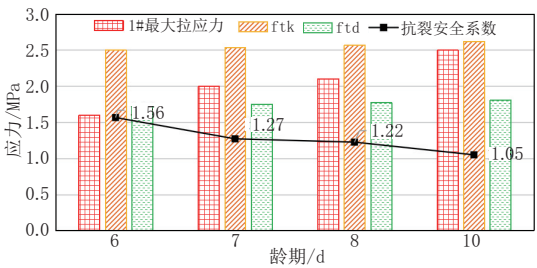


图 10 1#块实际应力与混凝土抗拉强度对比分析(单位:MPa)

块底板与顶板的拉应力均超出抗拉强度标准值,抗裂安全系数偏低;而其余块段的底板应力与抗拉强度标准值近乎持平,抗裂安全系数维持在 1.0 左右,顶板抗裂安全系数呈递增态势,处于 1.2~1.6。

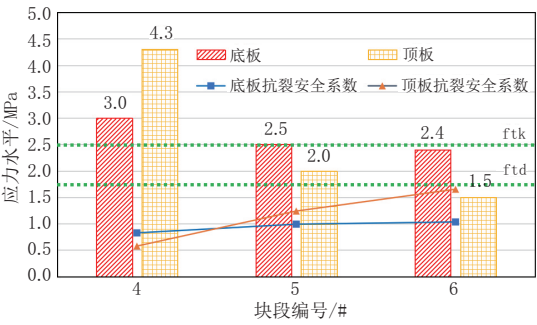


图 11 4#至 6#块实际应力与混凝土抗拉强度对比分析(单位:MPa)

综合裂缝分布情况以及有限元仿真分析裂缝成因及影响因素,裂缝成因如下:

- (1)裂缝主要成因为受块段之间外约束影响,水化温度变形产生受拉应力,导致顶板及底板的开裂;
- (2)各块段受到的约束强度不同,因此应力水平不同,4#块应力水平较高,1#、5#、6#拉应力水平略低,且随着悬臂增加,拉应力水平逐步降低;
- (3)普通 C55 混凝土抗拉强度相较于温度应力,抗裂安全富余度不足。

5 裂缝控制措施建议

5.1 处置措施

由于裂缝成因为块段之间的相互约束,大体积混凝土浇筑时产生的水化热导致的拉应力超过混凝土自身的抗拉强度,因此本文主要考虑通过增设冷水管的方式来降低水化温度,从而降低温度应力来减少裂缝的产生。主要考虑管冷间距 50 cm 和 100 cm 间距两种方案,如图 12 和图 13 所示。

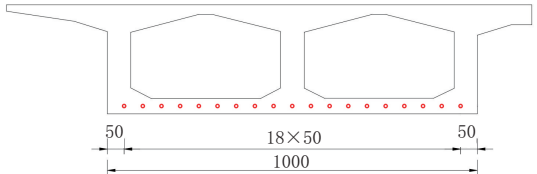


图 12 管冷间距为 50 cm(单位:cm)

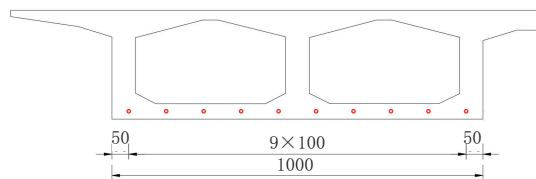


图13 管冷间距为100 cm(单位:cm)

5.2 冷却水管布置方案比选

对5.1节提出的两种方案,以6#块段为例通过有限元模型分析进行方案比选,主要参数设置参照3.1节。

5.2.1 管距50 cm方案

冷水管距50 cm情况下,在浇筑后第1日到达最高温69.8℃。底板温度得到明显降低,最高温仅有48℃,内表温差小于5℃。

根据温度计算温度应力,提取典型时刻应力如图14所示。底板、顶板在3~6 d拉应力缓慢上升,到达最大值。底板应力相较于未布设管冷情况,拉应力水平得到较大幅度削减,由1.5~2.5 MPa下降至0.8~1.5 MPa之间。顶板应力较相较于未布设管冷情况,拉应力水平有所提升,由1.0~1.5 MPa上升至2.2~2.9 MPa之间。

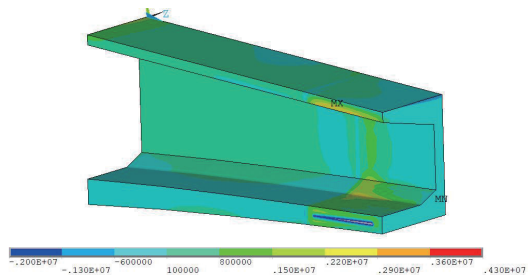


图14 6#第6天块段应力分布剖切图(管距50 cm)(单位:Pa)

从计算结果可以看出,对底板进行降温后,顶板与底板之间出现应力重分布及转移的现象,底板应力有所好转,但顶板应力显著增加。

5.2.2 管距100 cm方案

冷水管距100 cm情况下,与水管间距50 cm方案的温度极值相同,4#在浇筑后第1日到达最高温69.8℃。底板温度得到明显降低,最高温仅有48℃,内表温差小于5℃。由于水管的间距变大,平均温度有所上升。

根据温度计算温度应力,提取典型时刻应力如图15所示。底板应力相较于未布设管冷情况,拉应力水平得到一定幅度削减,由1.5~2.5 MPa下降至0.8~1.8 MPa之间。顶板应力较相较于未布设管冷情况,拉应力水平有所提升,由1.0~1.5 MPa上升至2.2~2.8 MPa。

与管冷50 cm间距的结果相似,对底板进行降温后,顶板与底板之间出现应力重分布及转移的现象,

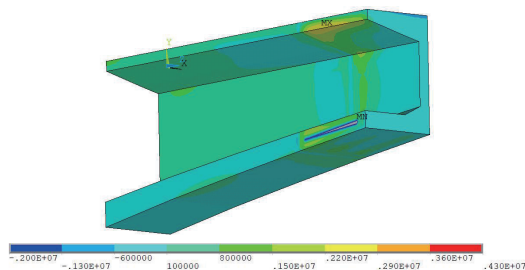


图15 6#块第6天应力分布剖切图(管距100 cm)(单位:Pa)

底板应力有所好转,但顶板应力增加。然而间距100 cm,底板与顶板应力均介于管冷50 cm以及无管冷之间,顶底板应力相对更为均匀。

5.2.3 冷水管效果对比

将计算结果对比于表2所列,采用水管会增加顶板的应力水平,水管间距增大,对顶板受力更为有利,虽然峰值下降不多,但高应力区域占比下降。从顶底板受力均衡考虑,水管布置不宜过密,建议采用管距为100 cm方案。

表2 不同管距水管效果对比表

位置	底板	顶板
无水管	1.5~2.5 MPa; 结合面附近应力较高	1.0~1.5 MPa; 结合面附近应力较高
管距50 cm	0.8~1.5 MPa; 底板整体受拉水平较低	2.2~2.9 MPa; 高应力区域面积大
管距100 cm	0.8~1.8 MPa; 底板整体受拉水平较低	2.2~2.8 MPa; 高应力区域面积减少

6 结 语

本文通过热力耦合有限元模型对某六跨预应力连续刚构箱梁施工期的开裂现象进行了系统的分析,并对两种不同的冷水管布置方式进行了对比,得出以下结论。

(1)连续刚构箱梁施工期间产生的裂缝与水化热引发的温度梯度及约束应力密切相关。热力耦合分析证实混凝土早龄期最大拉应力超设计抗拉强度,是裂缝产生的关键诱因。

(2)浇筑过程中在箱梁底板设置冷却水管是减少开裂的有效手段。但冷却水管会增大顶底板之间的温差,从而提高顶板的拉应力水平,因此冷水管不宜设置过密。

参考文献:

- [1] 王海斌.高墩大跨混凝土连续刚构桥抗震性能试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
- [2] 王蔚丞,黄香健,黎娅,等.大跨连续刚构桥梁腹板施工裂缝成因分析研究[J].混凝土,2024(3):188-192.
- [3] 赵兴华,陈建光,李浩博.高温多雨地区大跨径连续刚构桥梁裂缝

(下转第278页)