

基于收缩徐变子程序 200 米级预应力混凝土 连续刚构桥应力演变规律分析

罗 伟¹, 陈为锋¹, 郭勇军¹, 徐 元¹, 杨雨阳², 陈卓异²

(1. 新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:主跨在 100~200 m 的桥梁以预应力混凝土连续刚构桥为主。在工程实践中,该类桥型普遍存在梁体开裂与跨中长期下挠不收敛等病害。采用 MIDAS 建立二维杆系模型进行结构分析,其理论基础主要为初等梁理论,所得应力与变形结果较为简化,难以反映箱梁受力不均、局部应力集中等三维空间效应,对长期挠度演化机理的揭示存在局限。基于 ABAQUS 建立三维实体有限元模型,可综合考虑剪力滞、翘曲、畸变及局部应力集中等影响因素,分析精度更高。为此,文章以主跨 240 m 的预应力混凝土连续刚构桥为研究对象,建立 ABAQUS 三维实体模型,并基于 Fortran 语言开发混凝土收缩徐变子程序,实现长期效应预测与空间应力演化分析,以期结构设计优化及长期下挠控制提供参考。结果表明:顶板与腹板应力在各浇筑块交界处、边跨/中跨合龙段及 0#块等位置较为集中;随时间推移,0#块最大应力随跨中挠度增长呈下降趋势;成桥 20 a 内腹板最大应力整体高于顶板;靠近预应力钢束区域应力呈波动分布,在浇筑块交界、张拉锚固点及 0#块处应力集中明显;0#块横隔板及其与顶、底板连接区为潜在裂缝损伤的高风险部位。

关键词:PC 连续刚构桥; ABAQUS 模型; 时程演变; 收缩徐变; 空间应力

中图分类号:U448.23;U448.35

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0020-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.038

Analysis of stress evolution patterns in 200-meter-class prestressed concrete continuous rigid frame bridges based on shrinkage creep subroutines

LUO Wei¹, CHEN Weifeng¹, GUO Yongjun¹, XU Yuan¹, YANG Yuyang², CHEN Zhuoyi²

(1. Xinjiang Beixin Road & Bridge Group Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: Bridges with main spans ranging from 100 m to 200 m are predominantly prestressed concrete continuous rigid-frame bridges. In engineering practice, such structures commonly suffer from girder cracking and non-convergent long-term mid-span deflection. Structural analyses employing two-dimensional frame models established via MIDAS are primarily based on elementary beam theory, yielding simplified stress and deformation results that fail to capture three-dimensional spatial effects such as uneven stress distribution in box girders and localized stress concentrations, thereby limiting the elucidation of long-term deflection mechanisms. In contrast, a three-dimensional solid finite element model established

收稿日期:2025-11-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51708047,51778069);长沙市自然科学基金资助项目(kq2202207);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ30018);长沙理工大学研究生科研创新项目(CLSJCX22031、CLSJCX22032)。

作者简介:罗 伟(1991—),男,工程师,从事公路、桥梁技术与材料研究。

通信作者:陈卓异(1985—),男,博士,教授,从事桥梁结构设计理论研究。

using ABAQUS can comprehensively account for influencing factors such as shear lag, warping, distortion, and localized stress concentration, thereby achieving higher analysis accuracy. To address these limitations, this study takes a prestressed concrete continuous rigid-frame bridge with a main span of 240 m as the research object. A three-dimensional solid finite element model is developed using ABAQUS, and a user subroutine for concrete shrinkage and creep is programmed using Fortran to enable long-term effect prediction and spatial stress evolution analysis. The objective is to provide a reference for structural design optimization and long-term deflection control. The results indicate that stresses in the top slab and webs are concentrated at the interfaces between casting segments, the side-span/mid-span closure segments, and segment 0[#]. Over time, the maximum stress at segment 0[#] exhibits a decreasing trend as mid-span deflection increases. Within 20 years after bridge completion, the maximum stress in the webs remains consistently higher than that in the top slab. The stress distribution near prestressing tendons exhibits fluctuations, with pronounced concentrations at casting segment interfaces, anchorage zones, and segment 0[#]. The diaphragm of segment 0[#] and its connections with the top and bottom slabs are identified as high-risk zones for potential cracking damage.

Key words: PC continuous rigid frame bridge; ABAQUS model; time-course evolution; shrinkage creep; spatial stresses

预应力混凝土连续刚构桥(PC 连续刚构桥)具有连续梁桥与 T 形刚构桥的多种优势,其常用跨径为 100~200 m,是大型桥梁建设中经常采用的一种结构体系。这种桥型的特点在于主梁的连续性和墩梁的固结性,它不仅综合了连续梁桥无需伸缩缝、行车平稳的优势,同时融合了 T 形刚构桥无需支座和无需体系转换的优点。此外,连续刚构桥在顺桥向和横桥向的抗弯刚度和抗扭刚度方面都表现出色,能够有效满足大跨度桥梁结构的受力需求,与拱桥、悬索桥、斜拉桥相比施工方便且经济指标更高。

近年来,PC 连续刚构桥发展迅速,在主跨 100~200 m 范围内的桥梁几乎完全由连续刚构桥所主导。虽然 PC 连续刚构桥具有着出色的结构性能,但其却存在着大跨径预应力混凝土连续刚构桥梁体开裂和跨中长期下挠不收敛等桥梁病害。2008 年以后,200 m 级别 PC 连续刚构桥建设较少,截至 2023 年,全球仅有大约 20 座全预应力混凝土连续刚构桥的跨径达到了或超过 240 m。以虎门大桥辅航道桥、黄石长江公路大桥、Koror-Babelthuap 等为代表的两百米级连续刚构,已发现严重的跨中持续下挠和箱体开裂问题,甚至导致了结构局部或整体破坏,造成了重大经济损失和不良社会影响。

目前,针对 PC 连续刚构桥的有限元分析大多数是基于桥梁专用有限元软件的二维杆系单元建模计算^[1-4]。二维杆系模型在桥梁结构设计计算中具有诸多优势:其设计简便易用,使用户能够轻松创建和编辑模型;其参数化建模支持灵活的设计比

较;同时,与其他模块的集成可实现多学科的耦合分析。但二维杆系模型通常无法考虑空间效应的影响,而 PC 连续刚构桥通常采用箱形作为主梁截面,其桥面宽度较大,因此结构的空间效应非常显著。因为受到剪力滞、翘曲、畸变以及局部应力过大的影响,截面无法再满足平截面假定的要求,使得结构应力的计算结果与真实的应力分布产生了一定的偏差^[5],因此仅采用二维杆系模型分析得出的结果不能良好地适应大跨度预应力混凝土连续刚构桥长期挠度收敛不明显的现状。

程永欢等^[6]利用 ANSYS 建立预应力连续刚构桥三维有限元模型,并结合健康监测系统采集的数据对实体模型进行修正,修正后的模型能够较好地反映桥梁结构的真实特性;为探究重载铁路连续刚构桥中三维徐变效应的影响,徐向锋等^[7]通过 ANSYS UPFs 进行二次开发,对比了不同规范下对长期挠度计算结果的影响;戴恩彬^[8]采用通用大型有限元仿真软件对该桥施工阶段和成桥运营阶段进行了计算分析,确定了初始预应力及损失、箱梁剪力滞效应、桥墩不均匀沉降、结构温差以及混凝土收缩徐变等因素对桥梁设计参数的影响;王新保等^[9]为了探究 PC 连续刚构桥成桥阶段的最优顶推力,使用 Matlab 中 $f_{\minimax}$ 函数工具箱和 ANSYS 进行了联合迭代优化求解,通过优化顶推力大幅降低了主梁的跨中下挠;为研究 PC 连续刚构桥在施工阶段空间受力特性,HAN 等^[10]基于 ABAQUS 有限元软件对连续预应力混凝土刚构桥(CPCR)进行长期分析,结果发现与时间相关的纵向预应力损失对长期结构刚度的影

响最大,而与时间相关的横向预应力损失对长期结构刚度的影响最小,而不同节段之间的接缝损坏对整体结构性能的影响有限;AHMAD 等^[11]采用有限元程序 ABAQUS 对桥墩进行非线性建模,并结合 CDB 本构对损伤进行描述,结果显示应力-应变关系、混凝土强度和构造都会对支柱响应产生重大影响;GUO 等^[12]将有限元与 MATLAB 程序结合,分析了作为桥梁动态响应指标的位移或应力影响系数,发现车辆行驶速度和车辆荷载重量的变化对组合梁动态效应的变化有一定影响,但这种变化并不显著。

从前述国内外学者的研究中不难看出,利用精细化模型对连续刚构桥进行建模分析,对比二维杆系模型存在建模复杂、计算时间较长等缺点,致使很多学者仅对桥梁部分结构进行精细化建模分析,很少有考虑全桥的实体建模分析,但因其建模更为贴合工程实际、计算结果更为准确、能够为工程提供较为具体的指导等优势受到青睐。本文以 (126 + 240 + 126) m 背景桥为基础建立 MIDAS 二维杆系模型与 ABAQUS 三维实体模型,同时为考虑混凝土收缩徐变的影响采用 Fortran 语言开发三维收缩徐变子程序。基于有限元模拟对各影响因素对桥梁结构下挠的影响进行参数敏感性分析,对全桥在不同阶段的应力情况进行细化分析。在此分析基础上,进行特大跨连续刚构桥的应力空间分布特征的细致研究,进一步探究箱梁腹板的损伤演化机理,建立合理的损伤演化模型,并对该桥型长期挠度的发展以及可能出现的损伤进行较为准确的预测。

1 FEA 全桥模型

本文采用 SOLIDWORKS 进行全桥建模(图 1),在忽略主桥纵向坡度与横向坡度影响的情况下,建立空间有限元模型,其实测结果与理论分析模型接近^[13],可考虑忽略主桥纵向坡度与横向

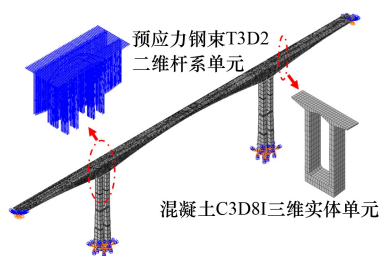


图 1 ABAQUS 全桥实体模型

坡度影响对模型进行一定的简化处理,存为 Parasolid 格式,建模完成后将该 SOLIDWORKS 模型另与三向预应力钢筋形状导入至 ABAQUS 中,在部件模块中装配到相应位置,基于 Fortran 语言开发三维收缩徐变子程序来考虑收缩徐变的影响。

如图 1 所示,本模型添加了横向、竖向以及纵向三向预应力,同时考虑了锚具压缩损失,对于本模型而言,准确地模拟预应力对混凝土结构的受力影响对实现全过程准确模拟至关重要。本计算模型采用降温法^[14-15]来给预应力钢筋添加预应力。

$$\Delta T = \frac{N}{\alpha EA} \quad (1)$$

式中: ΔT 为需要施加的降温值, $^{\circ}\text{C}$; N 为预应力钢筋的有效预应力, N ; α 为预应力钢筋的热膨胀系数(本文中取 1.2×10^{-5}), $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E 为预应力钢筋的杨氏模量, MPa ; A 为预应力钢筋的截面面积, mm^2 。

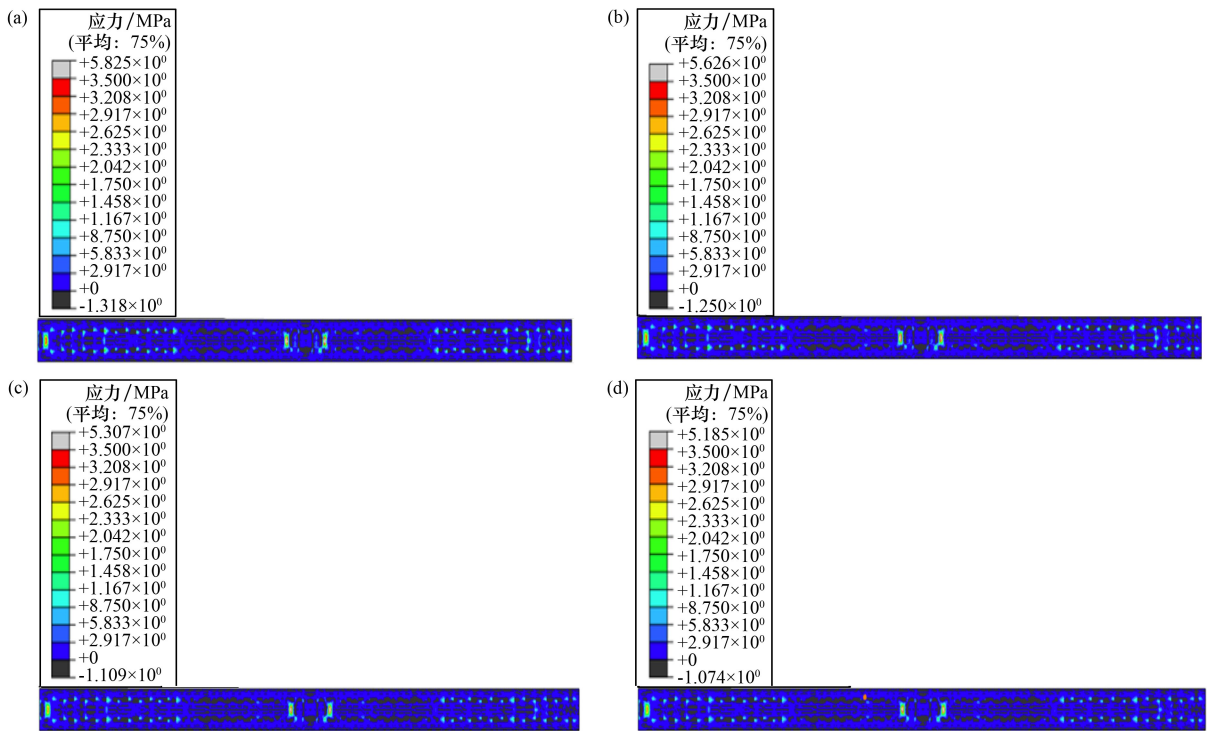
在有限元模拟中,施工阶段的模拟对评估结构行为、优化施工方案和设备、降低工程风险和成本,提高工程质量和进度有重要意义,在 ABAQUS 中施工阶段的模拟可通过生死单元法进行模拟^[16],在本模型中,从桥墩施工到收缩徐变共 20 a,分为 39 个施工阶段,第一个阶段为杀死除桥墩外的所有单元,同时给桥墩添加上对应边界条件,随后依次激活下一个施工阶段,并同时添加挂篮及湿重荷载,直至最大悬臂阶段,其后进行边合拢、中跨顶推、以及中合拢,施工顺序、边界条件与 MIDAS 模型保持一致,添加上二期恒载后进行 20 a 收缩徐变。

2 应力时程演变规律

利用有限元模拟计算,对桥梁结构进行详细的数值分析,以获得确切的空间应力分布演化情况,因结构对称,以下结果图皆为结构的一半。图 2 为刚构桥左边一半箱梁顶板在成桥时、成桥 1 a、成桥 10 a、成桥 20 a 应力演化分布情况,图中蓝色部分为应力较小区域,应力小于 1 MPa,白色区域表示应力超过 3.5 MPa,即应力较大区域。部分特征截面顶板拉应力随时间演化情况如表 1 所示。

2.1 顶板应力分析

由有限元结果可知,顶板主拉应力在腹板顶部区域、每个浇筑块的交接区域,边跨合拢段、



成桥时间/a: (a) 0; (b) 1; (c) 10; (d) 20

图 2 不同成桥时间下顶板空间应力演化情况

表 1 部分截面顶板最大应力 MPa

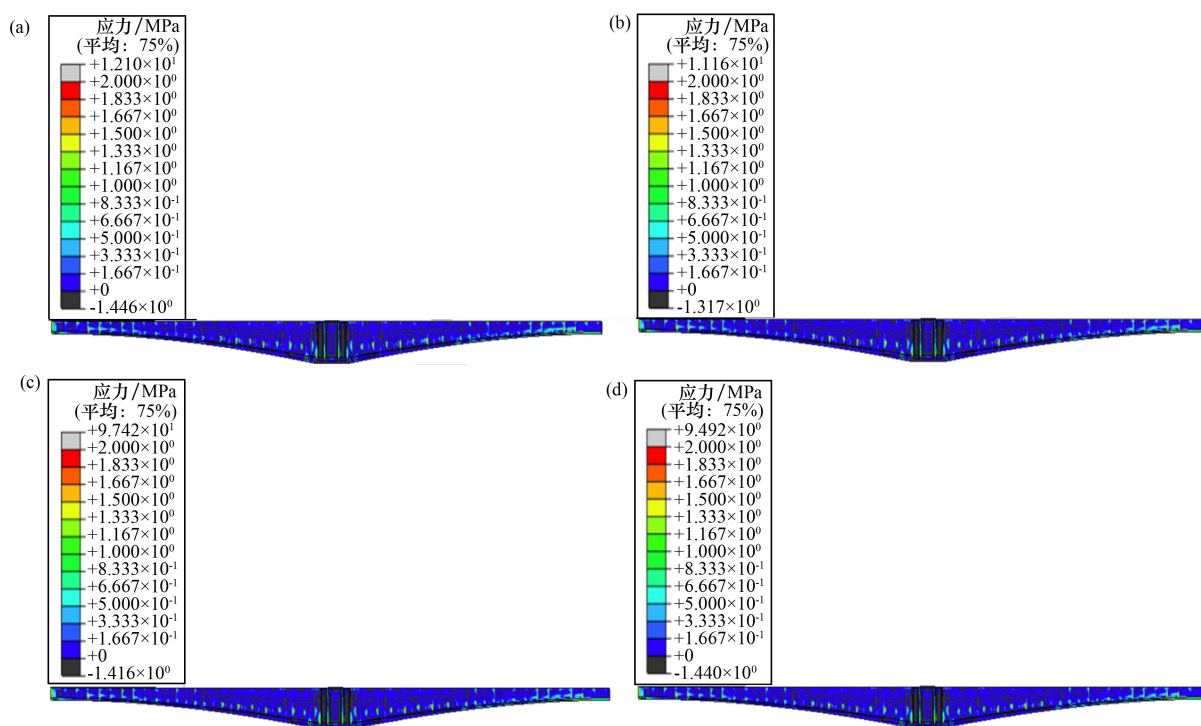
浇筑块	成桥时间/a				
	0	1	5	10	20
0# 块	5. 541	5. 331	4. 987	4. 827	4. 683
1/4 跨中	0. 364	0. 321	0. 292	0. 279	0. 271
跨中合拢	1. 876	1. 780	1. 654	1. 580	1. 529
1/2 边跨	0. 363	0. 327	0. 288	0. 276	0. 267
边跨合拢	3. 355	3. 286	3. 182	3. 112	3. 055

中跨合拢段、0#块位置分布较为突出,尤其是0#块顶板局部应力甚至可达 5.541 MPa,存在较大应力集中的情况,这与0#块承受载荷较大且受力情况复杂密不可分,因此这些区域为潜在开裂风险区域,同时由表中数据可以观察到顶板应力均存在不同程度的降低,其中中跨合拢段的最大应力由 1.876 MPa 下降到 1.529 MPa,下降幅度达到 18%,0#块的最大应力由 5.541 MPa 下降到 4.683 MPa,下降幅度达 15%,这是由于在施工阶段跨中部分存在一定的上拱,但随着时间的推移桥梁挠度的不断增大,导致0#块顶板压应力降低。

2.2 腹板应力分析

不同成桥时间下腹板空间应力演化情况如图 3 所示。由图 3 可知,成桥 20 a 时间内,腹板主应力基本控制在 0.2 MPa 内,应力随时间的变化幅

度并不明显。相较于顶板的应力,腹板的最大应力更大,应力分布情况也更为复杂,其原因为箱梁腹板受载较大,又受到预应力的作用,导致箱梁腹板受载状况更为复杂。在应力云图中也可观测到明显的预应力钢束对其的影响,尤其是靠近预应力钢束的位置存在波纹状应力分布;与顶板应力分布情况相似的是在0#块与每个浇筑块交界处会产生应力集中,0#块的应力情况尤为复杂且横隔板位置出现应力集中的现象较为突出。此外,可以观测到预应力张拉锚固点位置会产生较大的应力集中,主跨跨中的 1/4 ~ 1/2 位置处的应力较大且明显大于边跨相似位置的应力,而 0 ~ 1/4 位置处的应力较小且变化幅度也较小,1/4 ~ 1/2 位置也是此类桥梁产生裂纹的高发区,因此在该桥运营时有必要对该位置的应力重点监控以减少其开裂损伤风险。



成桥时间/a: (a) 0; (b) 1; (c) 10; (d) 20

图 3 不同成桥时间下腹板空间应力演化情况

2.3 0#块应力分析

PC 连续刚构桥顶板、底板、腹板和横隔板的交界处存在各种形状的承托倒角,且横向、纵向和竖向预应力管道的集中布置以及钢筋的密集分布使得结构受力呈现复杂的三维应力状态。

图 4 为 0#块在最大悬臂阶段、成桥、成桥 20 a 时的第一主应力图与第三主应力图。由图可知:最大悬臂状态的 0#块应力大部分位于 $-0.6 \sim 1.3$ MPa 区间内(受拉为正,受压为负),在预应力的作用下该阶段存在大量的压应力区域,底板与桥墩的连接位置尤为明显,同时可以观察到 0#块 3 个阶段都在该浇筑块与下一浇筑块顶板连接区域存在一定的应力集中。到成桥时 0#块的大部分区域应力值位于 $-0.4 \sim 1.5$ MPa 区间内,可以观察到该阶段压应力区域明显有所减少,但在横隔板与箱梁顶底板连接区域仍可以看到压应力的存在;横隔板的交界倒角区域的应力要明显大于横隔板的其他区域。成桥 20 a 时 0#块的应力则主要位于 $0.1 \sim 1.9$ MPa 区间内,应力分布更加匀称,除底板与墩顶连接区域外,其他位置基本呈现受拉状态。此外,由第三主应力云图可以看到,在这 3 个阶段 0#浇筑块的应力分布基本相似,均为受压状况,同时从图中可以明

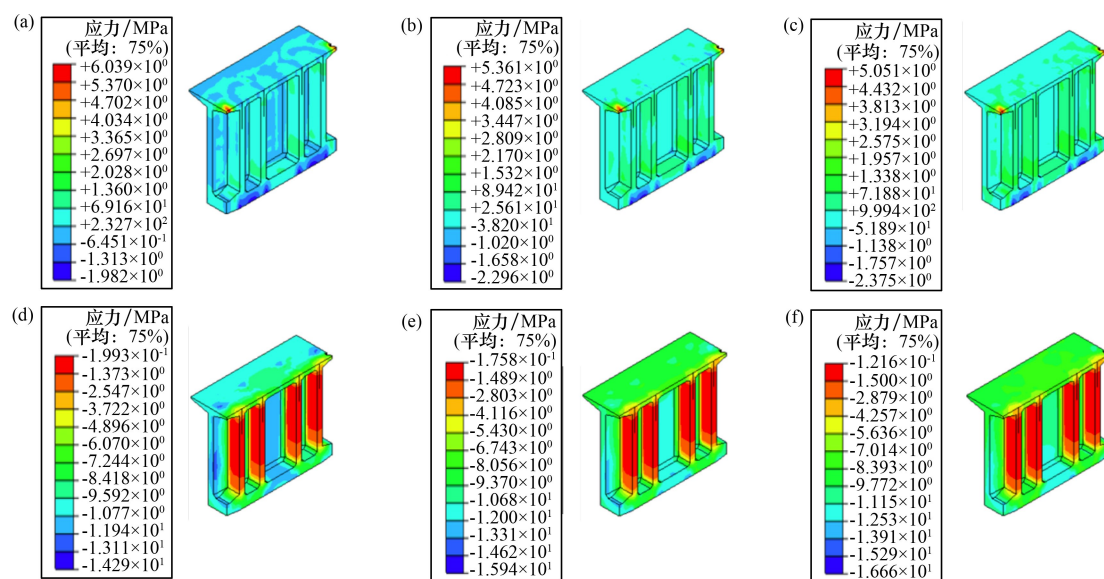
显分辨出压应力较小区域为除倒角的横隔板区域,图中最大的压应力为 16.6 MPa,依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018),未开裂状态下受压区混凝土最大压应力不应超过 0.5 倍的混凝土轴心抗压强度标准值。该桥使用 C60 混凝土,轴心抗压强度标准值为 38.5 MPa,计算结果表明,结构应力水平满足规范限值要求,但从以上结果仍然可以看出 0#块横隔板区域尤其是横隔板与顶底板连接区域为裂缝损伤高风险区域。

3 结 论

本文基于 FEA 模型对桥梁的空间变形发展规律、空间应力发展规律、三维收缩徐变效应下的预应力损失规律展开分析,得出结论如下。

(1) 顶板及腹板的应力在每个浇筑块的交接区域,边跨合拢段、中跨合拢段、0#块等位置相对较大,依照时间变化规律,0#块最大应力会随着时间的推移桥梁挠度的不断增大呈现逐渐下降的趋势。

(2) 成桥 20 a 时间内,相较于顶板的应力,腹板的最大应力更大,且腹板的应力分布情况受纵向预应力钢束布置位置影响较大。



(a) 最大悬臂阶段 0# 块第一主应力; (b) 成桥时 0# 块第一主应力; (c) 成桥 20 a 时 0# 块第一主应力;
(d) 最大悬臂阶段 0# 块第三主应力; (e) 成桥时 0# 块第三主应力; (f) 成桥 20 a 时 0# 块第三主应力

图 4 0# 块空间应力演化情况

(3) 靠近预应力钢束的位置存在波纹状应力分布,在 0# 块与每个浇筑块交界处、预应力张拉锚固点处会产生较大的应力集中,0# 块的应力情况尤为复杂且横隔板位置出现应力集中的现象较为突出;0# 块横隔板区域尤其是横隔板与顶底板连接区域为裂缝损伤高风险区域。

参考文献:

[1] 肖金军,何伟能,李纯,等. 基于配束和材料优化的连续刚构桥下挠控制技术[J]. 桥梁建设,2021,51(6): 31-38.

[2] 杨莹. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥长期下挠因素影响分析[D]. 西安:长安大学,2019.

[3] 韩朝辉. 预应力混凝土连续刚构桥长期下挠影响因素分析[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.

[4] 孙英琳. 大跨度连续刚构桥下挠机理及预警研究[D]. 济南:山东大学,2023.

[5] 黄伟,余健,李晓猛. 某连续刚构桥增设中墩加固方案研究[J]. 世界桥梁,2023,51(6):113-119.

[6] 程永欢,陈彦江,李勇,等. 基于环境激励的连续刚构桥模态参数识别及有限元模型修正[J]. 工业建筑,2014,44(增刊1):331-336.

[7] 徐向锋,赵香萍,张峰,等. 重载铁路连续刚构桥徐变精细化数值分析[J]. 山东大学学报(工学版),2015,45(4):69-74.

[8] 戴恩彬. 张家界大桥路澧水大桥设计与结构受力分

析[J]. 工程建设,2019,51(8):38-41.

[9] 王新保,陈老伍,余果. PC 连续刚构桥合龙顶推力优化方法研究[J]. 公路,2022,67(6):169-173.

[10] HAN X,LI W H,LI P F. Long-term deflection analysis of large-span continuous prestressed concrete rigid-frame bridges based on a refined modeling approach [J]. Applied Sciences,2023,13(17):9727.

[11] AHMAD A,AHMED A,IQBAL M,et al. Non-linear finite element modeling of damages in bridge piers subjected to lateral monotonic loading [J]. Scientific Reports,2023,13:13461.

[12] GUO B Q,WANG R Z,LU C,et al. Numerical investigation on the dynamic performance of steel-concrete composite continuous rigid bridges subjected to moving vehicles [J]. Sustainability,2021,13(24):13666.

[13] 梁湖清,唐孟雄,朱瑞林. 钢-混凝土组合结构桥梁拼宽设计与成桥试验研究 [J]. 广州建筑,2024,52(7):103-108.

[14] 张道明,梁力,尹新生,等. 预应力内荷载的新计算方法:直接内载法[J]. 工程力学,2007(3):104-109.

[15] 周全,张孝春. 后张法预应力混凝土箱梁桥静力试验与数值分析[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(2):112-115.

[16] 胡卓,谢忠球,吴敬龙,等. 预制装配式管廊的施工力学性能研究[J]. 应用力学学报,2023,40(4):855-864.