

大尺寸钢筋混凝土异形板梁桥开裂机理 与对策分析

许琴东¹, 邢震², 张玉彬², 于西尧³, 徐晨¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 兴泰建设集团有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010000;
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要 目的 分析大尺寸钢筋混凝土异形板梁桥的开裂机理, 通过改变支座约束方式来提高异形板梁桥的抗裂性能, 降低大尺寸钢筋混凝土异形板最大裂缝宽度。**方法** 模型分析中施加自重、收缩徐变和车道荷载, 分析上述荷载下异形板梁桥的变形、支座反力、结构应力和受拉损伤分布等特征; 同时引入最大裂缝宽度计算公式, 对异形板的开裂特征进行分析。**结果** 上述荷载作用下, 异形板斜向布置的支座之间的挠度较大, 支座未出现超载或脱空。此外, 异形板底面应力水平比顶面更高; 混凝土受拉损伤分布与支座布置形式有紧密关系。**结论** 通过对支座约束方式进行合理的调整, 可以有效优化异形板梁桥的抗裂性能, 最大裂缝宽度减小幅度为 32.8%。

关键词 大尺寸异形板; 开裂机理; 支座布置; 有限元分析; 最大裂缝宽度

中图分类号 TU375; U443.31

文献标志码 A

引用格式: 许琴东, 邢震, 张玉彬, 等. 大尺寸钢筋混凝土异形板梁桥开裂机理与对策分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 577-585. (XU Qindong, XING Zhen, ZHANG Yubin, et al. Analysis of cracking mechanism and countermeasures for large-size reinforced concrete girder bridges with shaped slabs[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(4): 577-585.)

Analysis of Cracking Mechanism and Countermeasures for Large-Size Reinforced Concrete Girder Bridges with Shaped Slabs

XU Qindong¹, XING Zhen², ZHANG Yubin², YU Xiyao³, XU Chen¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Xingtai Construction Group Co. Ltd., Inner Mongolia, Hohhot, China, 010000; 3. Beifang Investigation, Design & Research Co. Ltd., Tianjin, China, 300222)

Abstract: The work aims to analyze the cracking mechanism of large-size reinforced concrete special-shaped plate girder bridge, improve the crack resistance of special-shaped plate girder bridge by changing the bearing constraint method, and reduce the maximum crack width of large-

收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978501); 内蒙古鄂尔多斯科技计划项目(2022YY035)

作者简介: 许琴东(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事钢与组合结构桥梁等方面研究。

size reinforced concrete special-shaped plate. In the model analysis, self-weight, shrinkage and creep, and lane loads were applied to analyze the deformation, bearing reaction, structural stress, and tensile damage distribution of the special-shaped plate girder bridge under the above loads. At the same time, the calculation formula of the maximum crack width is introduced to analyze the cracking characteristics of the special-shaped plate. Under the above load, the deflection between the supports arranged obliquely by the special-shaped plate was large, and the support did not overload or disengage. In addition, the stress level of the bottom surface of the special-shaped plate is higher than that of the top surface; the distribution of concrete tensile damage is closely related to the arrangement of bearings. The crack resistance of the special-shaped plate girder bridge can be effectively optimized by reasonable adjustment of the bearing restraint mode, and the maximum crack width is reduced by 32.8 %.

Key words: large-size shaped slabs; cracking mechanism; bearing arrangement; finite element method; maximum crack width

随着城市交通运输量的迅速增长,各地城市中修建了大量的高架桥和立交桥,其中的匝道部分受到线形及连通性等方面的要求,往往会出现不规则的桥梁,这些桥梁的宽度、中心线方向、支承边与中心线的交角并不都是固定不变的,因此被称为异形桥梁。

异形板梁桥因其形状不规则、配筋复杂、支撑点较多且分布灵活等特点,形成了复杂的受力性能。曹保刚^[1]利用有限元软件对某钢筋混凝土立交异形板桥进行计算分析,发现与传统梁式桥不同,异形板桥在跨中处不仅有沿跨度方向的弯矩,还有较大的横向弯矩。李文治等^[2]通过建立实体仿真模型,对珠江路立交拼宽项目中一处钢筋混凝土板梁异形端部进行受力特征分析,结果表明异形板在局部凹角处存在应力集中现象,在结构不利区域进行配筋设计可以使钢筋配置更加合理。陈伟等^[3]以贵州瓦窑溪异型板桥为研究对象,分别建立了板壳模型、实体模型和空间梁格模型,进行有限元数值模拟和现场实桥试验,结果表明在自重及车道荷载作用下,异形板处于双向受力状态,设计时需要考虑横向受力钢筋的布置。

约束条件对异形板梁桥的内力分布有很大的影响。张春玉等^[4]通过对北京东三环国贸立交桥一期异形板区域的横梁受力进行分析,发现其抗剪能力不足,采用了 π 形钢

盖梁结合测力可调支座组合体系对中横梁主动支顶,改善横梁受力。武占科^[5]以某现浇混凝土简支异形板为例,分析了异形板梁支座的受力特点,结果表明,布置支座时应尽量使支撑反力分布均匀,同时避免出现支座超载或脱空现象。沈志文^[6]对现浇异形板梁桥进行工程实例分析,发现异形连续板梁桥弯扭耦合效应显著,在连续梁两跨宽度变化段转角处应力较大,且各支座反力分布较为不均匀。

大尺寸混凝土在施工过程中水化热高、收缩应力大,容易开裂。目前国外学者通过对钢筋混凝土结构进行试验研究和理论分析,明确了混凝土收缩、配筋率、钢筋类型、异形板长短边之比等因素对钢筋混凝土结构开裂的影响^[7-13]。王庆贺等^[14]基于收集的15组混凝土收缩试验结果,评价了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2017)中混凝土干燥收缩模型的可靠性,结果表明现有模型会低估大尺寸混凝土的干燥收缩终极值。丁加亮等^[15]通过有限元计算发现,异形板长短边之比越大,弯矩越分散,其狭窄区域越容易产生裂缝。常国力等^[16-17]采用理论分析并结合工程案例,论证了钢筋混凝土结构的裂缝宽度计算方法。

综上所述,异形板梁具有复杂的受力性能,且约束条件对异形板的受力影响较大,但

目前对于通过改变支座约束方式来优化大尺寸异形板梁桥抗裂性能的研究较少。基于此,笔者以某现浇普通钢筋混凝土板梁桥为背景,构建有限元模型,分析在自重、收缩徐变及车道荷载共同作用下,异形板梁桥的变形、支座反力、混凝土主拉应力及混凝土受拉损伤分布,并针对支座约束条件对异形板梁桥进行参数化分析,研究异形板梁桥的抗裂性能。研究表明,通过改变支座约束方式可以有效提高异形板梁桥的抗裂性能。

1 工程概况

笔者研究的异形板桥为现浇普通钢筋混凝土板梁桥,是桥梁工程的引桥,结构高度为1 m。由于四个方向连接的主桥截面不同、方向不正交,因此结构形式为异形结构。图1、图2、图3分别为异形板梁桥平面图、钢筋布置图及剖面图。异形板采用C40混凝土,整体轮廓长×宽为104.3 m×68.5 m;钢筋采用HRB400钢筋,主要分为水平筋,竖向筋以及悬臂筋。水平筋间距10 cm,横向和斜向交叉布置构成钢筋网片;竖向筋间距50 cm,连接顶、底面水平的钢筋网片形成钢筋骨架;悬臂筋间距10 cm,沿悬臂布置。



图1 异形板梁桥平面图

Fig. 1 Plan of shaped plate girder bridge

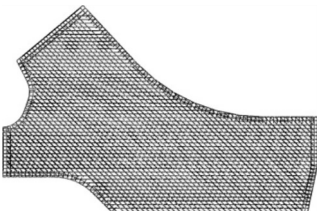


图2 钢筋布置图

Fig. 2 Reinforcing steel arrangement

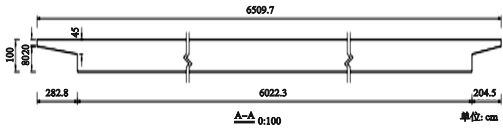


图3 异形板梁桥剖面图

Fig. 3 Profile of shaped plate girder bridge

异形板梁桥的施工方法采用的是支架现浇法,先在支架模板上浇筑混凝土,并进行养护,最终撤去支架,使异形板落在支座上。板底部共设有29个板式橡胶支座,设计容许转角0.009 1 rad,水平刚度3.53 kN/mm,竖向刚度1 422 kN/mm,支座布置如图1圆圈所示。

2 有限元模型建立

2.1 模型概况

图4、图5、图6分别为模型有限单元图、钢筋单元图及支座布置图。笔者采用ABAQUS有限元软件建立实体有限元模型进行分析,模型中混凝土和钢筋分别采用C3D8R实体单元和T3D2桁架单元进行模拟,钢筋采用embedded嵌入混凝土。模型支撑在底部29个板式橡胶支座上。分步施加自重、收缩徐变和车道荷载。



图4 有限元模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of finite element model

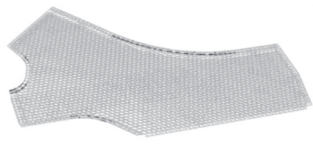


图5 钢筋单元

Fig. 5 Reinforcing steel element diagram

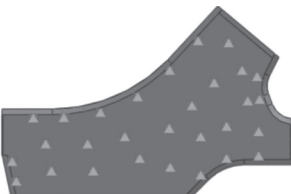


图6 支座布置

Fig. 6 Support arrangement diagram

2.2 材料本构

钢筋屈服强度为 469 MPa,弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。引入 C40 混凝土损伤本构,对混凝土损伤进行分析。混凝土

材料塑性损伤参数参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18] 设置,膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,材料本构关系如图 7 所示。

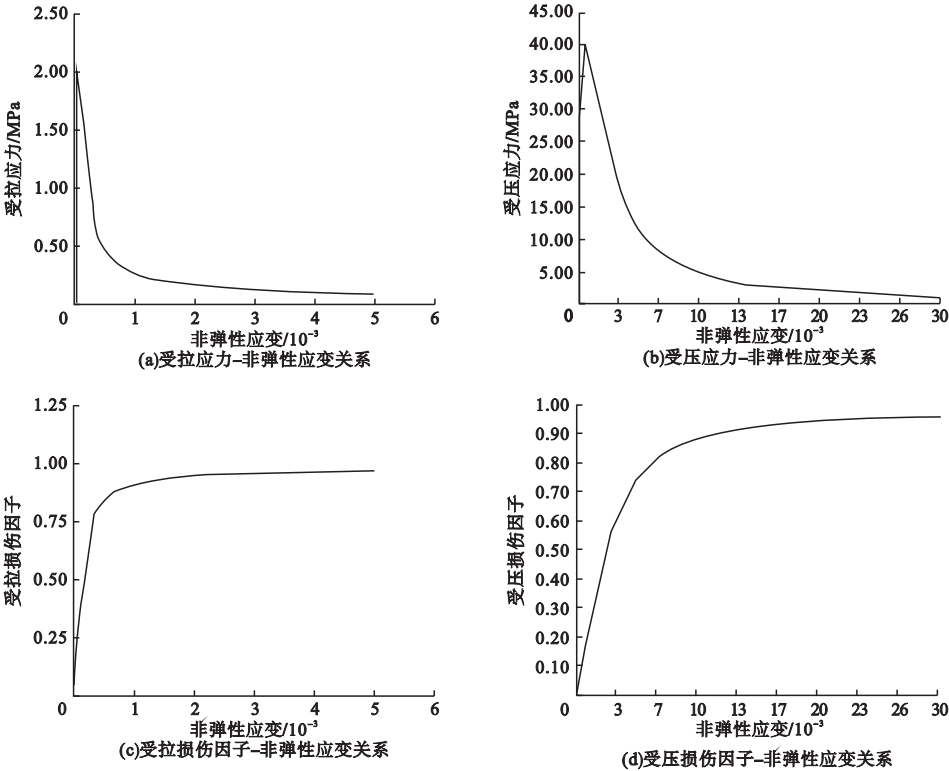


图 7 混凝土本构关系
Fig. 7 Concrete constitutive relation

2.3 模型荷载

收缩的施加采用降温法来模拟,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)^[19] 计算得到异形板收缩应变终值为 -210×10^{-6} ,但考虑到异形板混凝土落在支座前已完成了大部分收缩,结合 C40 混凝土收缩曲线,最终取异形板落在支座后的收缩应变终值 -50×10^{-6} ,对应降温幅度 $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

采用改变弹性模量的方法模拟异形板的徐变效应,混凝土徐变系数计算如下:

$$\varphi = \varphi_{\infty} \frac{(t - t_0)^{0.6}}{(t - t_0)^{0.6} + 10} \tag{1}$$

式中: φ 为龄期为 t 时的徐变系数; φ_{∞} 为徐变系数终值。

徐变折算系数为

$$\gamma = \frac{1}{1 + \varphi} \tag{2}$$

得到考虑徐变变形的换算弹性模量为

$$E_{\varphi} = \gamma E \tag{3}$$

徐变的施加采用 ABAQUS 中的子程序设置混凝土弹性模量随时间的连续变化,计算得到混凝土浇筑完成 3 650 d 时异形板梁桥的徐变效应结果。

根据《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)^[20] 规定,桥梁结构的整体计算应采用车道荷载,其中车道荷载由均布荷载和集中荷载组成,均布荷载标准值为 10.5 kN/m,集中荷载标准值的选取:当桥梁计算跨径小于或等于 5 m 时,取 180 kN;当桥梁计算跨径等于或大于 50 m 时,取 360 kN;当桥梁计算

跨径在 5 ~ 50 m 时,采用直线内插求得。本模型计算跨径 32.5 m,插值得到集中荷载为 290 kN。

2.4 支座刚度模拟

板式橡胶支座采用 connector 单元模拟,connector 单元的刚度属性根据《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JTT 842—2012)^[21] 设置为水平刚度 3.53 kN/mm、竖向刚度 1 422 kN/mm,connector 单元与板底面的连接采用耦合连接。

3 结果与分析

3.1 变形与支反力分析

在自重、收缩徐变和车道荷载等工况的组合作用下,异形板竖向变形和支反力分别如图 8、图 9 所示。

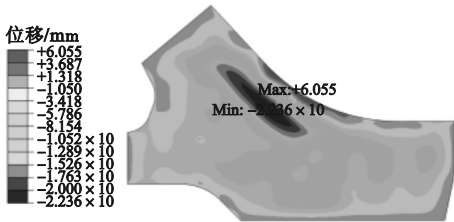


图 8 组合作用下竖向变形图

Fig. 8 Vertical deformation under combined action

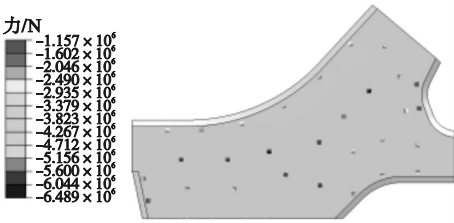


图 9 组合作用下支座竖向受力图

Fig. 9 Vertical force diagram of support under combined action

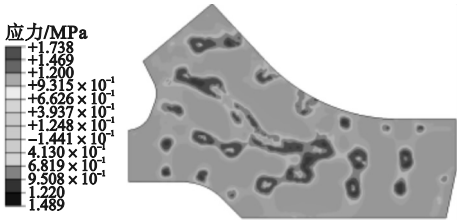
从图 8 可以看出,异形板上挠最大值出现在板半径最大的边缘悬臂位置,最大值为 6.055 mm;下挠最大值出现在异形板斜向布置的板式橡胶支座之间的跨中区域,最大值为 22.36 mm;板整体竖向挠度不大。

从图 9 可以看出,考察板式橡胶支座的受力,支座受力的整体趋势为沿板边缘布置

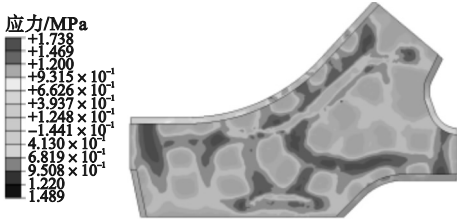
的支座受力小,中间支座受力大。支座竖向受力最大值为 6 489 kN,最小值为 1 157 kN,方向均竖直向下,且均小于《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JTT 842—2012)^[21] 中规定的支座承载力 7 581kN,说明支座未出现脱空和超载现象。

3.2 混凝土主拉应力分析

不同工况组合作用下异形板混凝土主拉应力如图 10 所示。从图中可以看出,异形板混凝土的最大主拉应力为 1.738 MPa。顶面整体应力水平不高,主拉应力较大值主要出现在板下方放置了支座的位置,并呈现出相邻支座位置处的顶板主拉应力云图颜色相连的趋势。异形板底面整体应力水平较高,仅在支座位置附近的主应力较小。从图中可以看到,在异形板顶面和底面的斜向的较大主拉应力带的中心部位裹住了一条应力较小的应力带,分析原因是由于该区域异形板混凝土出现了受拉开裂,发生了应力重分布。



(a)混凝土顶板



(b)混凝土底板

图 10 混凝土主拉应力云图

Fig. 10 Contour plots of main tensile stress in concrete under combined action

3.3 混凝土受拉损伤分布规律

不同工况组合作用下异形板顶面和底面混凝土损伤分布如图 11 所示。从图中可以看出,异形板顶面和底面受拉损伤均有较大的发展。异形板顶面受拉损伤分布区域主要

在三个主应力较大的支座连成的线上。分析原因是由于该区域两侧各有三条车道,而车道下方并没有支座支撑,再加上混凝土收缩的作用,从而导致中间支座处的顶面受拉损伤较大。异形板底面受拉损伤分布区域在两排支座中间,这也是异形板挠度最大的区域。对比异形板的结构应力云图可以看到,异形板顶面和底面的混凝土受拉损伤与应力云中应力重分布区域是吻合的。

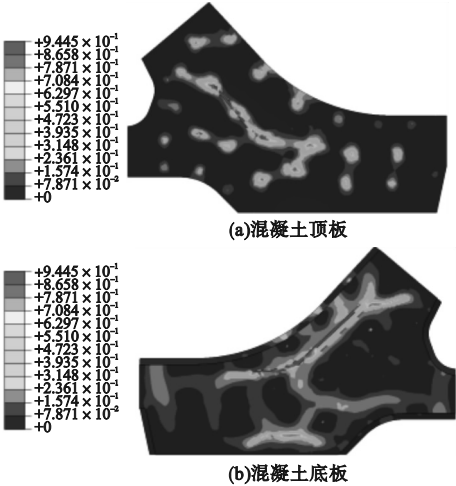


图 11 组合作用下混凝土受拉损伤分布图

Fig. 11 Concrete tensile damage distribution

综上所述,从异形板的竖向变形、支座处竖向受力、结构应力及混凝土损伤的分布规律中可以看出,异形板的受力特征和支座的分布有很大关系。因此,笔者将引入最大裂缝宽度计算公式,从调整支座约束方式入手,对异形板进行抗裂设计优化。

4 抗裂设计优化

4.1 最大裂缝宽度计算理论

异形板底面产生的最大裂缝宽度依据文献[18]进行计算。异形板的裂缝控制等级为三级,作为钢筋混凝土构件,最大裂缝宽度可按荷载准永久组合并考虑长期作用影响的效应计算。

最大裂缝宽度应符合

$$w_{\max} \leq w_{\lim} \tag{4}$$

式中: w_{\max} 为按照荷载的标准组合或准永久

组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度; w_{\lim} 为最大裂缝宽度限值,根据文献[18],钢筋混凝土结构在Ⅳ类环境中,最大裂缝宽度限值取为0.15 mm。

异形板作为钢筋混凝土受弯构件,按荷载标准组合或准永久组合并考虑长期作用影响的最大裂缝宽度计算式为

$$w_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_s}{E_s} (1.9c_s + 0.08 \frac{d_{\text{eq}}}{\rho_{\text{te}}}) \tag{5}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{\text{tk}}}{\rho_{\text{te}} \sigma_s} d_{\text{eq}} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i v_i d_i} \tag{6}$$

$$\rho_{\text{te}} = \frac{A_s + A_p}{A_{\text{te}}} \tag{7}$$

式中: α_{cr} 为构件受力特征系数,根据文献[18],钢筋混凝土受弯构件的受力特征系数取值为1.9; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数;当 $\psi < 0.2$ 时,取 $\psi = 0.2$;当 $\psi > 1.0$ 时,取 $\psi = 1.0$;对直接承受重复荷载的构件,取 $\psi = 1.0$; σ_s 为钢筋混凝土构件纵向受拉普通钢筋应力; E_s 为钢筋的弹性模量,根据设计要求取值为 2.06×10^5 MPa; c_s 为最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离,文中取值为40 mm; ρ_{te} 为按有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率,对无粘结后张构件,仅取纵向受拉普通钢筋计算配筋率,在最大裂缝宽度计算中,当 $\rho_{\text{te}} < 0.01$ 时,取 $\rho_{\text{te}} = 0.01$; A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积; A_s 为受拉区纵向普通钢筋截面面积; A_p 为受拉区纵向预应力筋截面面积; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋的等效直径,文中取值为28 mm; d_i 为受拉区第*i*种纵向钢筋的公称直径; n_i 为受拉区第*i*种纵向钢筋的根数; v_i 为受拉区第*i*种纵向钢筋的相对粘结特性系数;根据文献[18],普通带肋钢筋的相对粘结特性系数为1.0。

笔者通过异形板有限元模型计算异形板底面裂缝处的钢筋受拉应力,并计算出裂缝处的受拉混凝土截面面积以及受拉区纵向普通钢筋截面面积,从而计算出最大裂缝宽度。

4.2 支座约束方式的优化策略

异形板底部板式橡胶支座的水平刚度为 3.53 kN/mm,竖向刚度为 1 422 kN/mm,其具有竖向刚度大、水平刚度小的特点,对水平方向的位移约束较小。笔者将异形板底部 29 个板式橡胶支座中的部分支座的约束方式调整为固定支座,即增大支座对水平方向位移的约束,以此来优化异形板的受力。选取上节计算得到的混凝土受拉损伤最严重区域附近的支座,共设计了 4 种约束条件的改进策略,分别进行混凝土受拉损伤分布及裂缝宽度的计算,之后将计算得到的结果与改

进前的结果进行对比并评价优化效果。各约束条件的调整方式见表 1。

表 1 异形板约束条件改进策略		
Table 1 Constraint improvement strategies		
优化策略	调整方式	支座序号
策略一	橡胶支座变固定支座	9、14、17
策略二	橡胶支座变固定支座	7~9、14~17、20
策略三	橡胶支座变固定支座	5~10、13~20
策略四	橡胶支座变固定支座	1~29

4.3 优化策略对比

不同约束方式计算得到的异形板受拉损伤分布图如图 12 所示。

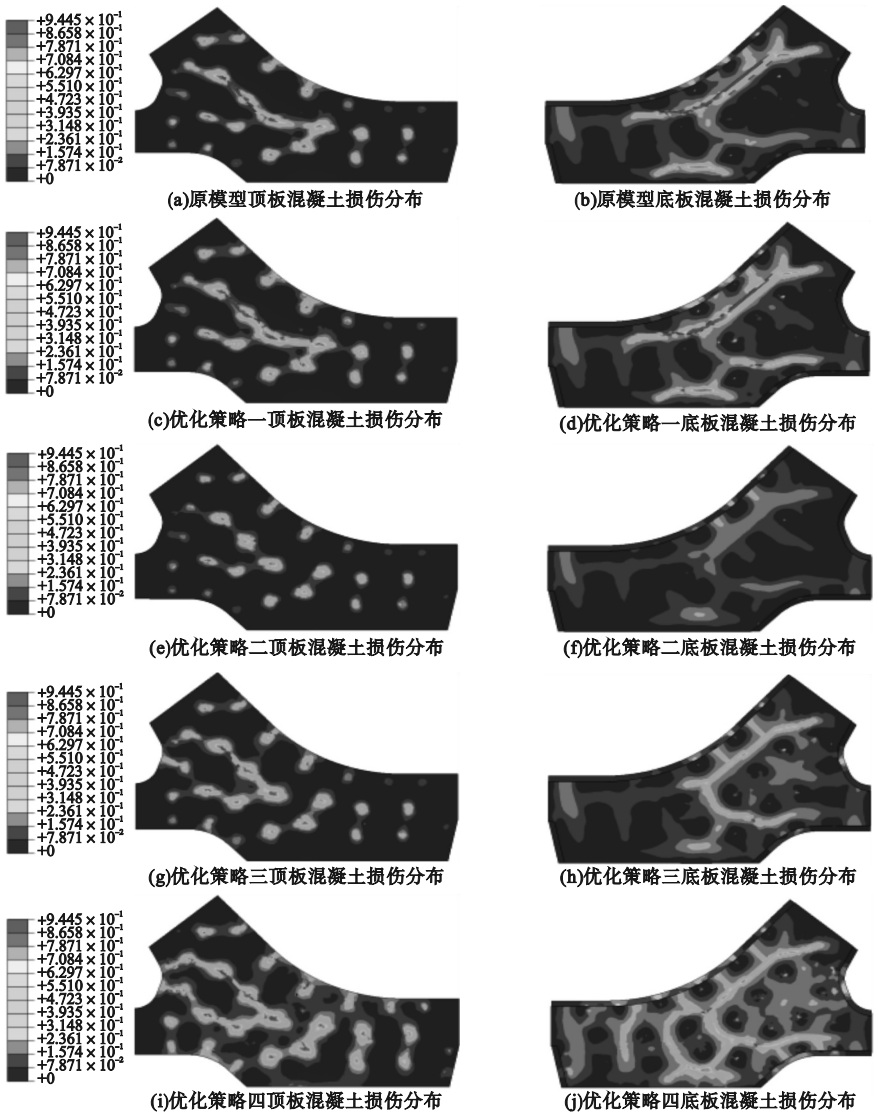


图 12 混凝土受拉损伤对比图

Fig. 12 Comparison of concrete tensile damage under different bearing restraint methods

从图中可以看出,通过改变支座约束方式,可以有效降低异形板的混凝土受拉损伤程度。对比发现,优化策略二、三、四对减小混凝土损伤的效果较明显,其中策略二的效果最好,策略三和策略四虽然能减小原本受拉损伤严重部分的损伤程度,但也会在别的地方产生新的损伤,分析原因是支座对板的横向约束增大,混凝土的收缩受到更多约束,产生了更大的次应力导致。

为了更精细化的评价各个优化策略的优化效果,通过文献[18]中的最大裂缝宽度计算公式,计算出各个优化策略下异形板底面的最大裂缝宽度,并以自重、收缩徐变和车道荷载作用下异形板底面产生的最大裂缝宽度为基准,横向比较不同策略下异形板的开裂损伤程度。不同优化策略计算得到的异形板底面受拉钢筋最大拉应力以及最大裂缝宽度结果见表2。通过对比可以看出,仅在自重、收缩徐变和车道荷载作用下,异形板中钢筋最大拉应力为128.2 MPa,产生的裂缝最大宽度为0.142 mm。在约束条件一中,钢筋最大拉应力减小为120.3 MPa,产生的最大裂缝宽度减小为0.122 mm,减小幅度为13.7%;在约束条件二中,钢筋最大拉应力减小为109.3 MPa,产生的最大裂缝宽度减小为0.095 mm,减小幅度为32.8%;在约束条件三中,钢筋最大拉应力减小为112.6 MPa,产生的最大裂缝宽度减小为0.103 mm,减小幅度为27.1%;在约束条件四中,钢筋最大拉应力减小为115.4 MPa,产生的最大裂缝宽度减小为0.110 mm,减小幅度为22.2%。

表2 异形板裂缝宽度对比结果

Table 2 Comparison of crack widths of profiled slabs with different bearing constraints

优化策略	钢筋最大拉应力/MPa	最大裂缝宽度/mm	裂缝减小幅度/%
原模型	128.2	0.142	0
策略一	120.3	0.122	13.7
策略二	109.3	0.095	32.8
策略三	112.6	0.103	27.1
策略四	115.4	0.110	22.2

综上所述,优化结果整体呈现出随着被调整的板式橡胶支座数量的增多、优化效果先增加后减小的趋势。通过对支座约束方式进行合理的调整,可以有效优化异形板梁桥的整体受力。

5 结 论

(1)在自重、收缩徐变及车道荷载的作用下,异形板挠度最大值出现在异形板斜向布置的板式橡胶支座之间的跨中区域,支座未出现脱空和超载现象。

(2)在自重、收缩徐变及车道荷载的作用下,顶面及底面的混凝土均因混凝土开裂出现了应力重分布现象。

(3)在自重、收缩徐变及车道荷载的作用下,异形板顶面和底面受拉损伤均有较大的发展。

(4)引入最大裂缝宽度计算公式对无梁板进行抗裂设计优化,共设计了四种优化策略,优化结果整体呈现出随着被调整的板式橡胶支座数量的增多,优化效果先增加后减小的趋势,最大裂缝减少幅度为32.8%。结果表明,通过对支座约束方式进行合理的调整,可以有效优化异形板梁桥的抗裂性能。

参考文献

[1] 曹保刚. 城市立交异形板桥的力学特征及工程应用[J]. 中外公路, 2020, 40(增刊2): 147-150.
(CAO Baogang. Mechanical characteristics and engineering applications of shaped plate bridges for urban interchanges [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(S2): 147-150.)

[2] 李文治, 曹东国, 王晓军, 等. 城市立交拼宽工程中异形板梁的局部受力分析及配筋探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2017(3): 117-120.
(LI Wenzhi, CAO Dongguo, WANG Xiaojun, et al. Analysis of local stress and discussion of reinforcement of special-shaped plate beam in urban interchange widening project [J]. Urban roads bridges & flood control, 2017(3): 117-120.)

[3] 陈伟, 贺国京, 刘敬坤. 钢筋混凝土异形板桥梁受力性能研究[J]. 湖南交通科技, 2016, 42(1): 78-81.
(CHEN Wei, HE Guojing, LIU Jingkun. Study on the stress performance of reinforced

- concrete shaped slab bridges [J]. Hu' nan communication science and technology, 2016, 42(1): 78 - 81.)
- [4] 张春玉, 付丙峰. 异形板桥梁主动加固施工技术研究[J]. 市政技术, 2014, 32(6): 51 - 55. (ZHANG Chunyu, FU Bingfeng. On the construction technology of active reinforcement for special-shaped slab bridge [J]. Journal of municipal technology, 2014, 32(6): 51 - 55.)
- [5] 武占科. 现浇混凝土异形板梁桥支座布置分析[J]. 上海公路, 2013(3): 37 - 39. (WU Zhanke. Research on bearing arrangements of cast-in-place reinforced concrete specially-shaped slab bridge [J]. Shanghai highways, 2013(3): 37 - 39.)
- [6] 沈志文. 城市立交异形板梁桥空间分析[J]. 企业技术开发, 2013, 32(4): 26 - 27. (SHEN Zhiwen. The space analysis of city irregular plate beam overpass [J]. Technological development of enterprise, 2013, 32(4): 26 - 27.)
- [7] 张鹏飞, 孙广, 刘洪涛, 等. 异形板桥桩基托换力学行为及变形规律研究[J]. 应用力学学报, 2024(4): 1 - 11. (ZHANG Pengfei, SUN Guang, LIU Hongtao, et al. Research on mechanical behavior and deformation law of pile foundation underpinning of special shaped slab bridge [J]. Chinese journal of applied mechanis, 2024(4): 1 - 11.)
- [8] ROGHANI H, NANNI A, BOLANDER J E. Early-age cracking behavior of concrete slabs with GFRP reinforcement [J]. Materials, 2023, 16(8): 1 - 20.
- [9] GOSZCZYNSKA B, TRAMPCZYNSKI W, TWORZEWSKA J. Analysis of crack width development in reinforced concrete beams [J]. Materials, 2021, 14(6): 1 - 25.
- [10] CHIU C K, SAPUTRA J, PUTRA M D T K. Crack-controlled design methods of RC beams for ensuring serviceability and reparability [J]. Structural engineering and mechanics, 2022, 82(7): 757 - 770.
- [11] LI Z Z, ZHU H T, DU C X, et al. Experimental study on cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading [J]. Composite structures, 2021, 267(6): 1 - 16.
- [12] WANG L, ZHANG J W, CHEN W, et al. Short term crack width prediction of CFRP bars reinforced coral concrete [J]. Engineering structures, 2020, 218(7): 1 - 12.
- [13] CERVENKA V, RIMKUS A, GRIBNIAK V, et al. Simulation of the crack width in reinforced concrete beams based on concrete fracture [J]. Theoretical and applied fracture mechanics, 2022, 121(10): 1 - 14.
- [14] 王庆贺, 董国明, 杨金胜, 等. 考虑尺寸效应的大尺寸混凝土干燥收缩预测方法研究[J]. 混凝土, 2023(3): 1 - 6. (WANG Qinghe, DONG Guoming, YANG Jinsheng, et al. Prediction model for drying shrinkage of large-size concrete considering size effects [J]. Concrete, 2023(3): 1 - 6.)
- [15] 丁加亮, 丁慧文, 曹敏, 等. 大型地铁车站临时异形板受力分析研究[J]. 科学技术创新, 2022(15): 110 - 113. (DING Jialiang, DING Huiwen, CAO Min, et al. Stress analysis of temporary special-shaped slab in large subway station [J]. Scientific and technological innovation information, 2022(15): 110 - 113.)
- [16] 常国力. 钢筋混凝土梁裂缝宽度计算分析[J]. 科学创新与应用, 2023(32): 87 - 90. (CHANG Guoli. Calculation and analysis of crack width of reinforced concrete beam [J]. Technology innovation and application, 2023, (32): 87 - 90.)
- [17] 戴永琪, 刘晓青. 钢筋混凝土结构裂缝宽度计算[J]. 水利水电工程学报, 2023(6): 101 - 108. (DAI Yongqi, LIU Xiaoqing. Crack width calculation of reinforced concrete structure [J]. Hydro-science and engineering, 2023(6): 101 - 108.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communication Press, 2018.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of the municipal bridge: CJJ 11—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座: JT/T 842—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2013. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. High damping seismic isolation rubber bearings for highway bridges: JT/T 842—2012 [S]. Beijing: China Communication Press, 2013.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)