

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.10.010

二次受力粘钢加固 PC 箱梁力学性能研究

侯 洋^{*1}, 张连振¹, 曹朋辉²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006;
2. 北京新桥科技发展有限公司, 北京 100089)

摘要:为解决国内 PC 箱梁桥腹板粘贴钢板抗剪加固后在正常使用状态下缺乏明确设计理论的问题,从 PC 箱梁腹板粘贴钢板对其抗弯刚度和斜裂缝宽度的影响为切入点,采用线性叠加原理、刚度分配理论研究了 PC 箱梁受弯构件腹板粘贴钢板加固后二次受力状况下加固构件的抗弯刚度与斜裂缝宽度计算方法,通过 Abaqus 仿真分析软件,建立了二次受力状况下 PC 箱梁桥的实体有限元模型,并将模拟结果与理论计算结果进行了比较。结果表明:当腹板斜裂缝宽度较大时,可以忽略腹板混凝土的抗弯刚度,理论公式计算结果与有限元模拟结果相近,抗弯刚度计算公式初步可用;针对斜裂缝宽度的计算,通过荷载-裂缝宽度影响曲线发现,当荷载小于某临界值时,荷载与斜裂缝宽度近似呈现出线性相关规律,此时可利用刚度分配理论对斜裂缝宽度进行计算,但当荷载增大到一定程度时,结构发生二次应力重分配裂缝发展出现明显拐点,刚度分配理论不再适用,此时建议采用较大的裂缝修正值。综上所述,当裂缝宽度在某限值之下时在荷载作用下钢板、混凝土、箍筋传力机制比较明确,线性叠加原理、刚度分配理论可以适用,一旦裂缝宽度超过限值,钢板对裂缝发展的抑制作用明显减弱,传力机制较为复杂,以上理论不再适用。

关键词:桥梁工程;钢板加固;理论分析;PC 箱梁桥;抗弯刚度;斜裂缝

中图分类号:U449.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)10-0079-08

Study on Mechanical Properties of PC Box Girder Strengthened with Bonded Steel under Secondary Stress Condition

HOU Yang^{*1}, ZHANG Lian-zhen¹, CAO Peng-hui²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150006, China;
2. Beijing Xinqiao Technology Development Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: In order to solve the problem of the lack of a clear design theory for the PC box girder bridge webs under normal use after bonding steel plates on the webs for shear reinforcement, starting from the influence of the PC box girder webs bonded steel plates on its flexural stiffness and the width of oblique cracks, using the linear superposition principle and stiffness distribution theory, the calculation methods of flexural stiffness and oblique crack width of reinforced PC box girder components under secondary stress condition after bonding steel plates to their webs are studied. The solid finite element model of the PC box girder bridge under the secondary stress condition is established by using Abaqus simulation analysis software, and the simulation result is compared with the theoretical calculation result. The result shows that (1) When the width of the oblique crack in the web is large, the flexural stiffness of the web concrete can be ignored. The calculation result of the theoretical formula is similar to the finite element simulation result, and the calculation formula of the flexural stiffness is preliminarily available. (2) For the calculation of the oblique crack width, it is found from the influence curve of load vs. crack width that the load and the oblique crack width

收稿日期:2021-09-21

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2020JQ-377)

作者简介(*通讯作者):侯洋(1996-),男,河南温县人,博士。(yanghou1996@foxmail.com)

approximately present a linear correlation rule when the load is less than a certain critical value. At this time, the stiffness distribution theory can be used to calculate the oblique crack width. However, when the load increases to a certain extent, secondary stress redistribution occurs in the structure, the crack development appears an obvious inflection point, and the stiffness distribution theory is no longer applicable, it is recommended to use a larger crack correction value at this time. In summary, when the crack width is below a certain limit, the force transmission mechanism of the steel plate, concrete and stirrup under the load is relatively clear, the linear superposition principle and the stiffness distribution theory can be applied. Once the crack width exceeds the limit value, the inhibition of the steel plate on the crack development is obviously weakened, and the force transmission mechanism is more complicated, so the above theory is no longer applicable.

Key words: bridge engineering; steel plate reinforcement; theoretical analysis; PC box girder bridge; bending stiffness; oblique crack

0 引言

随着经济水平的飞速提高,国内交通事业也大踏步地向前发展,各种公路、铁路桥梁迅速崛起,建设速度不断加快。据近两年的数据统计,国内公路、铁路桥梁接近百万座,其中较为典型的当属PC箱梁桥。但目前国内外许多PC箱梁桥出现了腹板斜裂缝,此病害的出现降低了结构的极限承载力,影响了行车的舒适性。为了减轻此病害的影响常用粘贴钢板加固法对原结构进行处理。通过分析近些年国内外粘钢加固文献可知^[1-15],虽然已有大量学者对底板粘贴钢板加固钢筋混凝土矩形截面或者T形截面梁开展了大量而卓越的研究,但对腹板粘贴钢板加固尤其是针对PC箱梁的腹板粘贴钢板加固仍缺乏足够的认识,尚未形成相关理论计算公式。因此,有必要对PC箱梁腹板粘贴钢板加固之后结构的受力特点进行分析。本研究通过建立粘钢加固后结构的理论模型,根据变形叠加和刚度分配原则提出了一种针对PC箱梁腹板粘钢加固之后抗弯刚度和斜裂缝宽度的计算方法,并通过数值计算验证了上述理论,可为PC箱梁桥及类似桥梁腹板粘钢加固后结构的受力特性研究提供参考。

1 腹板粘钢PC箱梁抗弯刚度研究

为了更好地对PC箱梁腹板开裂后结构的抗弯刚度进行分析,首先将腹板斜裂缝进行分类。预应力钢筋混凝土箱梁腹板斜裂缝可根据形成机理的不同,分为腹剪斜裂缝和弯剪斜裂缝两种形态。其中腹剪斜裂缝,是垂直于主拉应力方向的斜裂缝比竖向裂缝先行产生引起的,裂缝走势如图1(a)所示;而弯剪斜裂缝又可根据弯曲裂缝与斜裂缝出现先后顺

序的不同分为形态I和形态II两种,其中形态I:在剪跨区内PC箱梁底板弯曲应力超限,导致结构出现细微的竖向裂缝,随着荷载的不断增大,腹板主拉应力增大,竖向裂缝逐渐转变为斜裂缝,裂缝走势如图1(b)所示。形态II:在剪跨区内竖向弯曲裂缝与斜裂缝几乎同时出现,而后随着荷载的增大,两者相交共同向作用点延伸形成主斜裂缝,裂缝走势如图1(c)所示。

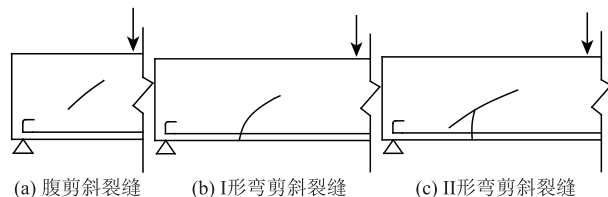


图1 PC箱梁斜裂缝形态

Fig. 1 Morphology of inclined cracks in PC box girder

在计算结构抗弯刚度之前本研究引入以下基本假定:

- (1) 裂缝出现后混凝土即退出工作不再具备抗弯承载能力。
- (2) 剪跨区出现斜裂缝,结构依然适用平截面假定。
- (3) 构件为欧拉-伯努力梁即不考虑剪切变形对结构的影响。

根据基本假定(1)和不同的斜裂缝形态,将开裂后剪跨区的截面分别换算为截面形式a和截面形式b进行抗弯刚度计算,如图2所示。

根据剪跨区的受力特点对换算截面进行力学分析,如图3~4所示。首先假定顶板和底板的面积分别为 S_1 , S_2 ; I_{cr} 为开裂截面惯性积;顶板绕X轴的惯性积为 I_{x1} ,底板绕X轴的惯性积为 I_{x2} ;顶板和底板转动弯矩分别为 M_u , M_d ;由顶板和底板轴向力形

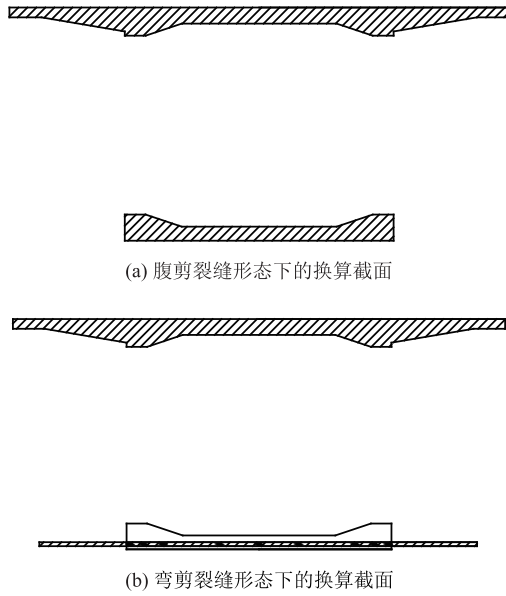


图 2 换算截面

Fig. 2 Conversion sections

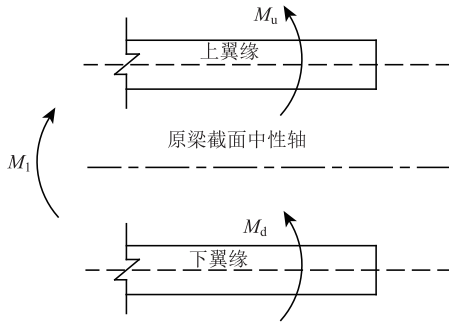


图 3 截面力学分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sectional mechanical analysis

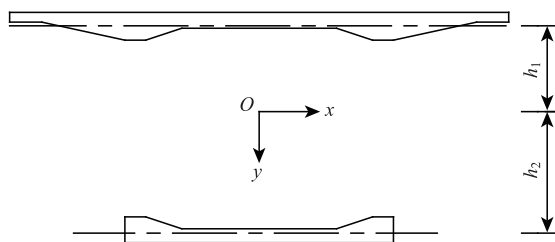


图 4 截面基本特性的计算

Fig. 4 Calculation of basic features of section

成的转动弯矩为 M_1 , 转动惯矩为 $I_1 = S_1 h_1^2 + S_2 h_2^2$ 。

则:

$$M = M_u + M_d + M_1, \quad (1)$$

$$I_{cr} = I_{x1} + I_{x2} + I_1. \quad (2)$$

剪跨区截面的抗弯刚度对整个构件的挠度存在影响, 是精确评估构件抗弯刚度不可忽略的问题。为探明剪跨区截面加固后对构件抗弯刚度的具体影响, 本研究将等刚度均质梁分为腹板开裂区和截面

完好区两部分考虑, 图 5 给出了腹板开裂后构件的抗弯刚度分布情况。其中, l_{cr1} , l_{cr2} , l_0 分别为梁体两端斜裂缝开裂区段和截面完好区段且令 $l_{cr1} + l_{cr2} = l_{cr}$ 。由图 5 (a) 可知构件实际刚度沿梁长方向分布不均匀, 为方便计算按照抗弯刚度相等原则可将不等刚度构件转换为等刚度构件如图 5 (b) 所示。具体计算方法见式 (3)~(10)。

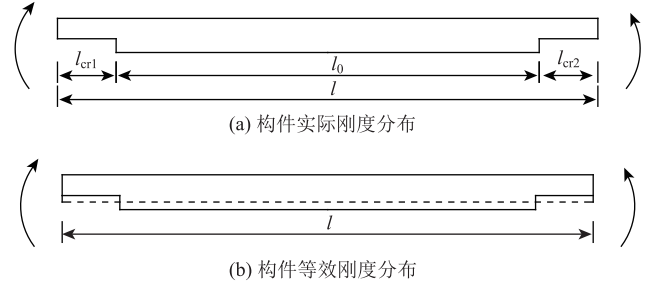


图 5 开裂截面刚度计算图示

Fig. 5 Schematic diagram of calculating stiffness of cracked section

$$\frac{B_{cr}}{l_{cr}} + \frac{B_0}{l_0} = \frac{B_e}{l}, \quad (3)$$

即:

$$B_e = \frac{B_0 B_{cr} l}{l_{cr} B_0 + l_0 B_{cr}}, \quad (4)$$

式中, B_{cr} 为开裂截面的刚度; B_0 为原截面的刚度; B_e 为构件的等效刚度。

假定 (2) 表明, 受力变形叠加原则在此理论模型中依然适用, 对于开裂后结构的实际位移等于开裂前结构的位移与开裂后结构的位移之和, 如图 6 所示。 θ , θ_1 , θ_2 分别为结构的实际转角, 结构开裂前的转角和结构开裂后的转角。

$$\theta = \theta_1 + \theta_2, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{M_s}{B}, \quad (6)$$

$$\theta_1 = \frac{M_0}{B_0}, \quad (7)$$

$$\theta_2 = \frac{M_2}{B_e}, \quad (8)$$

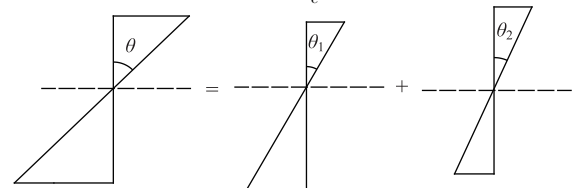


图 6 结构实际转角计算图示

Fig. 6 Schematic diagram of calculating actual rotation angle of structure

式中, $M_s = M_0 + M_2$, 将式 (6) ~ (8) 代入到式 (5) 中则腹板开裂后构件的实际刚度为:

$$\frac{1}{B} = \frac{M_0/M_s}{B_0} + \frac{1 - M_0/M_s}{B_e} \quad (9)$$

整理式 (4) 与式 (9), 腹板开裂后构件的实际刚度可按式 (10) 计算:

$$\begin{cases} \frac{1}{B} = \frac{M_0/M_s}{B_0} + \frac{1 - M_0/M_s}{B_e} \\ B_e = \frac{B_0 B_{cr} l}{l_{cr} B_0 + l_0 B_{cr}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中, M_0 为开裂前截面弯矩值; M_s 为短期效应计算弯矩值; B_0 为腹板开裂前构件在 M_0 作用下的刚度; B_e 为腹板开裂后构件在 M_2 作用下的等效刚度; B_0 , B_{cr} 为完好截面的刚度、腹板开裂截面的刚度。

为简单量化说明结构抗弯刚度变化, 给出式 (11) 计算简支梁在不同荷载模式下的跨中挠度:

$$\omega_{mid} = \frac{C}{6EI} P, \quad (11)$$

式中 C 与加载位置和荷载模式有关。

2 粘钢加固 PC 箱梁斜裂缝宽度研究

归纳总结国内外钢筋混凝土结构裂缝计算方法可以发现, 目前裂缝的计算理论主要分为以下两大类: 一是通过受力分析, 获得影响裂缝形成的主要因素, 进而建立相应的裂缝宽度计算公式。二是进行大量的试验, 通过数理统计相关理论对试验数据进行分析, 得到与裂缝宽度正相关的参数, 进而建立裂缝宽度计算公式。以上两种方式各有利弊, 但方式二需要进行大量的试验, 本研究采取方式一对 PC 箱梁腹板斜裂缝进行分析。

由于 PC 箱梁腹板粘贴钢板后结构受力复杂, 为简化分析模型, 本研究做了以下基本假定:

(1) 影响斜裂缝宽度的主要因素为箍筋应变、钢筋形状、构件受力时间、受力性质以及配箍率和箍筋直径。

(2) 在应力二次重分配之前, 斜裂缝宽度与箍筋应变呈正相关关系。

(3) PC 箱梁腹板出现裂缝即可认为腹板混凝土完全退出工作, 不再参与结构抗剪, 实际当裂缝刚出现时混凝土仍然参与部分抗剪工作, 此时为了与实际相匹配, 可将箍筋抗剪系数适当折减。

(4) 腹板开裂后刚度分配原则仍然适用。

根据以上基本假定当 PC 箱梁腹板开裂后未粘钢

加固之前箍筋承担的剪力可见式 (12) ~ (13)。其中 C_{sv} 为箍筋承担的剪力比例。

$$V'_1 = C_{sv} (V_1 - V_{cr}), \quad (12)$$

$$C_{sv} = \frac{A_{sv} E_{sv}}{A_{sv} E_{sv} + A_{sb} E_{sb} \sin \theta_{sb} + A_p E_p \sin \theta_p}, \quad (13)$$

式中, A_{sv} , A_{sb} , A_p 分别为斜截面投影长度内箍筋、弯起钢筋和预应力钢筋的截面面积; E_{sv} 为配置在同一截面处箍筋的弹性模量; E_{sb} 为配置在同一截面处弯起钢筋的弹性模量; θ_{sb} 为弯起钢筋的切线与构件水平纵向轴线的夹角; E_p 为预应力钢束弹性模量; θ_p 为预应力钢束的切线与构件水平纵向轴线的夹角。

预应力结构斜截面开裂荷载 V_{cr} 按参考文献 [16] 的建议公式如下:

$$V_{cr} = \left(\frac{2.45}{\lambda + 3.5} + \frac{20\rho}{\lambda + 1.1} \right) f_t b h_0 + \frac{0.35 N_{p0}}{\lambda}, \quad (14)$$

式中, λ 为结构的加载剪跨比, 当 $\lambda > 1.5$ 时, 取 $\lambda = 1.5$; 当括号第 2 项剪跨比 $\lambda > 3$ 时, 取 $\lambda = 3$ 。 N_{p0} 为有效预压力。 h_0 为梁有效截面高度。

根据文献 [17] 中的抗剪承载力计算公式, 箍筋应变可按式 (15) 计算。

$$\varepsilon_{sv} = \frac{V_{sv}}{CE_{sv} A_{sv}} + \varepsilon_{cr}, \quad (15)$$

式中, ε_{cr} 为混凝土开裂应变; s_v 为斜截面内箍筋间距; A_{sv} 为原梁斜截面内配置在同一截面的箍筋各肢总截面面积。

腹板粘贴钢板加固之后, 结构发生应力重分布此时箍筋剪力分配系数按式 (16) 计算:

$$C'_{sv} = \frac{A_{sv} E_{sv}}{A_{sv} E_{sv} + A_{sb} E_{sb} \sin \theta_{sb} + A_p E_p \sin \theta_p + \psi_{vb} A_{sp} E_{sp}}, \quad (16)$$

式中 ψ_{vb} 为考虑钢板与混凝土粘贴效果的折减系数取 0.65。

综上, 将箍筋应变按照两个阶段分别进行表示:

$$\begin{cases} \varepsilon_{sv} = \frac{V'_1 s_v}{E_{sv} A_{sv} c} + \frac{V'_2 s_v}{E_{sv} A_{sv} c} + \varepsilon_{cr} \\ V'_1 = C_{sv} (V_1 - V_{cr}) \\ V'_2 = C'_{sv} (V - V_1) \end{cases}, \quad (17)$$

式中 V_1 为结构钢板加固时的剪力值。

参考文献 [14] 对于裂缝宽度的计算同时结合国内外学者的研究, 提出 PC 箱梁腹板斜裂缝宽度计算公式如下^[18]:

$$W_{tk} = C_v C_s C_1 C_2 C_3 \varepsilon_{sv} \left(\frac{40 + d}{0.3 + 10\rho} \right), \quad (18)$$

式中, C_v 为考虑到其复杂的受力状态, 综合作用本研究取 1.5。 C_s 为考虑到截面受力面积根据形状不同而造成一定的差异, 本研究取 1.5。

3 有限元模型建立与验证

以陕西某 PC 箱梁桥为例, 按照应力等效原则建立粘钢加固 PC 箱梁实体有限元模型, 其中缩尺后箱梁截面尺寸如图 7 所示, 材料特性见图 8、图 9 及表 1。

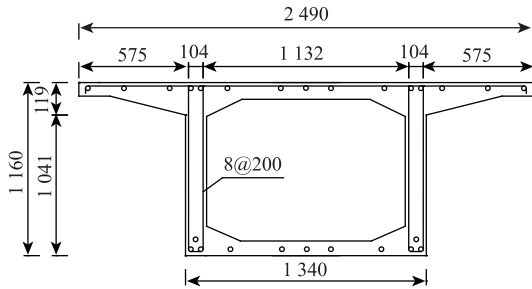
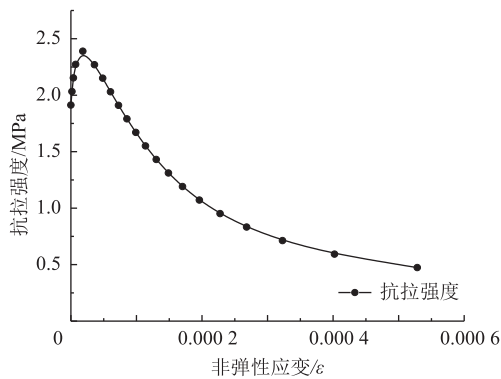
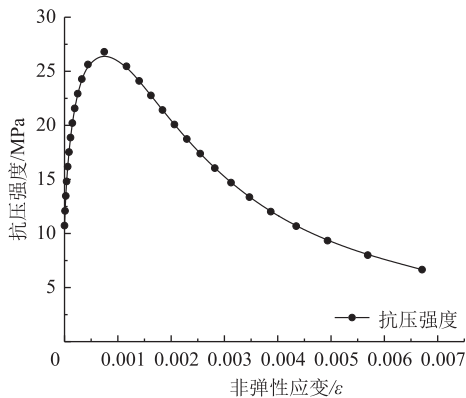


图 7 PC 箱梁横截面配筋 (单位: mm)

Fig. 7 Reinforcement of cross-section of PC box girder (unit: mm)



(a) 混凝土受拉本构曲线

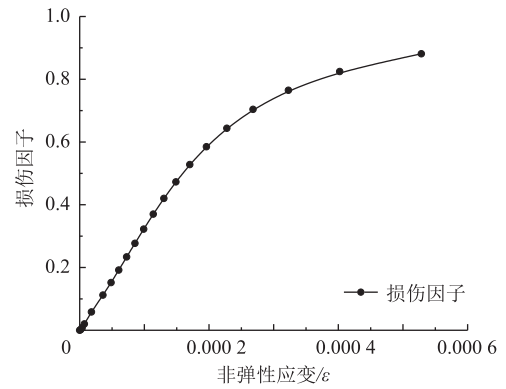


(b) 混凝土受压本构曲线

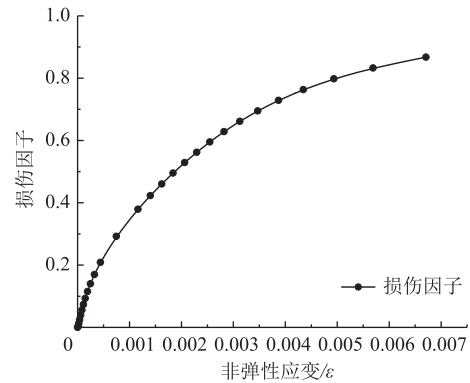
图 8 混凝土本构曲线

Fig. 8 Concrete constitutive curve

通过大型通用有限元计算软件 Abaqus 建立 PC 箱梁实体有限元模型全桥共 7 150 个单元, 如图 10



(a) 混凝土受拉损伤因子曲线



(b) 混凝土受压损伤因子曲线

图 9 混凝土损伤因子曲线

Fig. 9 Curve of concrete damage factor

所示。其中混凝土采用塑性损伤本构, 具体参数如表 2 所示。当 PC 箱梁发生剪压破坏时, 结构损伤状态如图 11 所示。

表 1 PC 箱梁材料

Tab. 1 PC box girder materials

项目	规格	数量/根	直径/mm
混凝土	C40	—	—
预应力钢束	1×7 标准型 $S = 54.8 \text{ mm}^2$	5	9.5
普通钢筋	HRB400	9	12
箍筋	HRB335	31@200	8

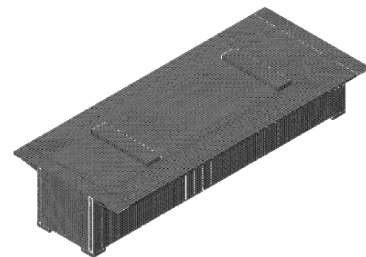


图 10 PC 箱梁有限元模型

Fig. 10 PC box girder finite element model

表 2 C40 混凝土塑性损伤参数
Tab. 2 Plastic damage parameters of C40 concrete

膨胀角	偏心率	f_{b0}/f_{c0}	K	黏性参数
38	0.1	1.16	0.666 67	0.000 5

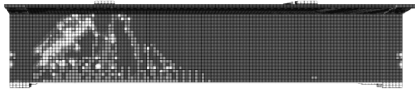


图 11 PC 箱梁损伤云图
Fig. 11 Nephogram of PC box girder damage

根据 Abaqus 计算结果, PC 箱梁的极限荷载为 830 kN, 规范计算值为 741.8 kN, 有限元计算值为规范计算值的 1.12 倍。综合有限元计算值和结构整体的损伤状态可说明, 有限元建模过程中相关材料参数的选择符合实际情况。由于结构二次受力状态模拟较为困难, 本研究按照以下加载方案模拟结构的二次受力, 该方法采用加载方式使得混凝土单元产生损伤, 更接近于桥梁实际的受力状态, 加载方案见图 12。

- (1) 一期加载: 在剪跨比为 1.12 情况下加载至结构出现裂缝, 此时记为状态 I。
- (2) 粘贴钢板: 维持状态 I, 在箱梁腹板两侧粘贴钢板, 此时记为状态 II。
- (3) 二期加载: 在状态 II 上继续加载至结构发生破坏。

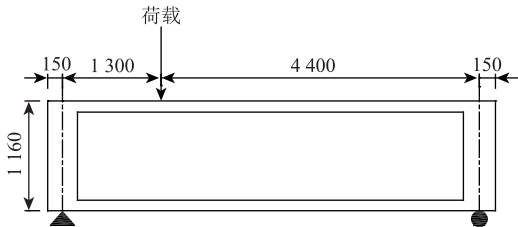


图 12 加载方案 (单位: mm)
Fig. 12 Load scheme (unit: mm)

根据上述建模方法和加载方案分别建立竖粘钢板 (PBCS-1) 和斜粘钢板 (PBCX-1) 的 PC 箱梁有限元模型, 并对加载过程中的数据进行分析, 见表 3、表 4。

表 3 PBCS-1 跨中挠度值对比
Tab. 3 Comparison of mid-span deflection values of PBCS-1

挠度/mm	荷载/kN				
	651	673	695	717	739
FEM 值 ω_{fm}	0.89	0.93	0.99	1.05	1.13
理论值 ω_{tm}	0.84	0.87	0.90	0.93	0.97

表 4 PBCX-1 跨中挠度值对比
Tab. 4 Comparison of mid-span deflection values of PBCX-1

挠度/mm	荷载/kN				
	648	679	709	740	771
FEM 值 ω_{fm}	0.86	0.88	0.91	0.95	1.00
理论值 ω_{tm}	0.84	0.88	0.92	0.97	1.01

针对跨中挠度, 由表 3 和表 4 可知对于 PBCS-1 (竖粘钢板) 和 PBCX-1 (斜粘钢板), 随机取一段外荷载 (小于结构发生二次应力重分布的临界荷载) $|w_{fm}-w_{tm}|_{max}=0.09\text{ mm}$ 占总挠度的 10%。由于箱梁发生剪压破坏为脆性破坏, 跨中挠度较小, 此时跨中挠度对计算过程以及单元的选择极为敏感, 可认为 10% 误差在可接受范围内。还应注意的是虽然表中数据有限元计算值与理论值差别不大, 但随着荷载增大, 理论值按一次线性增加, 有限元计算值有明显的非线性增大趋势, 两者逐渐偏离, 但总体上结构跨中挠度仍然很小, 这是由结构破坏脆性模式决定的。

针对箍筋应变和斜裂缝宽度, 在有限元计算过程中, 随机取一部分开裂后的荷载 (此荷载小于临界荷载), 并读取结构的箍筋应变值和裂缝宽度值。同时, 运用本研究计算方法计算在相同荷载作用下结构的箍筋应变值与裂缝宽度值, 将两者整理比较见表 5~8, 其中计算时 $V_1=650\text{ kN}$ 。

表 5 PBCS-1 箍筋应变值对比
Tab. 5 Comparison of stirrup strain values of PBCS-1

应变值	荷载/kN				
	776	803	858	901	946
FEM 值 ε_{sv}	430	467	511	547	586
理论值 ε_{tv}	513	521	539	553	568
$\varepsilon_{tv}/\varepsilon_{sv}$	1.19	1.12	1.05	1.01	0.97

表 6 PBCX-1 箍筋应变值对比
Tab. 6 Comparison of stirrup strain values of PBCX-1

应变值	荷载/kN				
	809	910	1 017	1 083	1 204
FEM 值 ε_{sv}	445	527	584	620	695
理论值 ε_{tv}	538	578	621	647	696
$\varepsilon_{tv}/\varepsilon_{sv}$	1.21	1.10	1.06	1.04	1.00

提取表 5~6 数据绘制为图 13 散点图。从图可知在相同荷载作用下, PBCS-1 (竖粘钢板) 与 PBCX-1 (斜粘钢板) 的箍筋应变理论值相同, 但有限元计算值两者存在差异, 且在相同荷载作用下 PBCX-1 (斜粘钢板) 的有限元计算值小于 PBCS-1 (竖粘钢

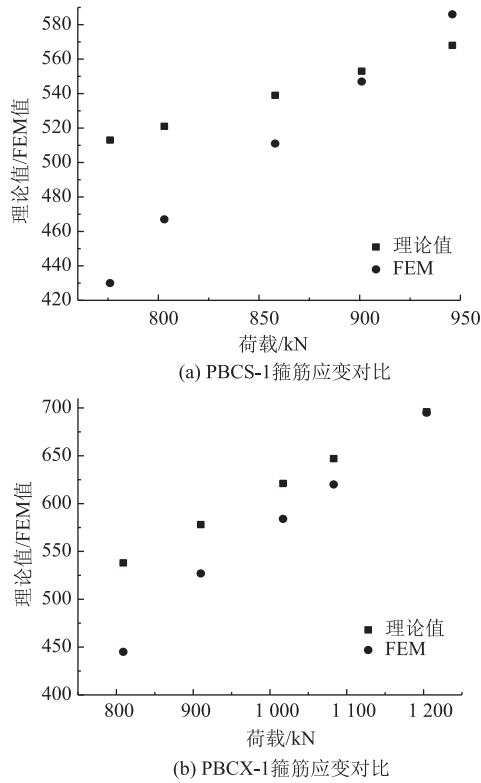


图 13 不同计算方法箍筋应变对比分析

Fig. 13 Comparative analysis of stirrup strains with different calculation methods

表 7 PBCS-1 斜裂缝宽度值对比

Tab. 7 Comparison of oblique crack width values of PBCS-1

宽度值/mm	荷载/kN				
	776	803	858	901	946
FEM 值 w_{sk}	0.136	0.139	0.150	0.160	0.169
理论值 w_{tk}	0.148	0.151	0.156	0.160	0.164
w_{tk}/w_{sk}	1.09	1.08	1.04	1.00	0.97

表 8 PBCX-1 斜裂缝宽度值对比

Tab. 8 Comparison of oblique crack width values of PBCX-1

宽度值/mm	荷载/kN				
	809	910	1 017	1 083	1 204
FEM 值 w_{sk}	0.138	0.152	0.172	0.186	0.206
理论值 w_{tk}	0.156	0.167	0.180	0.187	0.201
w_{tk}/w_{sk}	1.13	1.10	1.04	1.00	0.98

板) 有限元计算值。其原因是按照刚度分配理论, 竖粘钢板的刚度与斜粘钢板的刚度在垂直于桥梁纵轴线方向相同, 因此两者理论计算值一致。而实际过程中斜粘钢板不仅存在垂直于桥梁纵轴线方向的刚度还存在平行于桥梁纵轴线方向的刚度, 此部分刚度有利于抑制斜裂缝的开展, 延长腹板混凝土的工作时间。

将上述应变数据代入式 (18) 中可得到 PBCS-1 (竖粘钢板) 与 PBCX-1 (斜粘钢板) 在荷载作用下的斜裂缝宽度值, 并将两者计算结果绘制为图 14。经分析发现当外荷载小于结构二次应力重分配的力时, 有限元计算值与裂缝宽度值相吻合最大误差为 13%。但当荷载超过此临界值时, 有限元裂缝宽度发生显著的增大, 此时在进行裂缝宽度计算时, 建议采用较大的 C_v 修正值这样保证足够的安全性。同时, 本研究数据仅代表有限元模拟得到的数据与真实数据会存在偏差, C_v 和 C_s 取值还需要进一步研究。

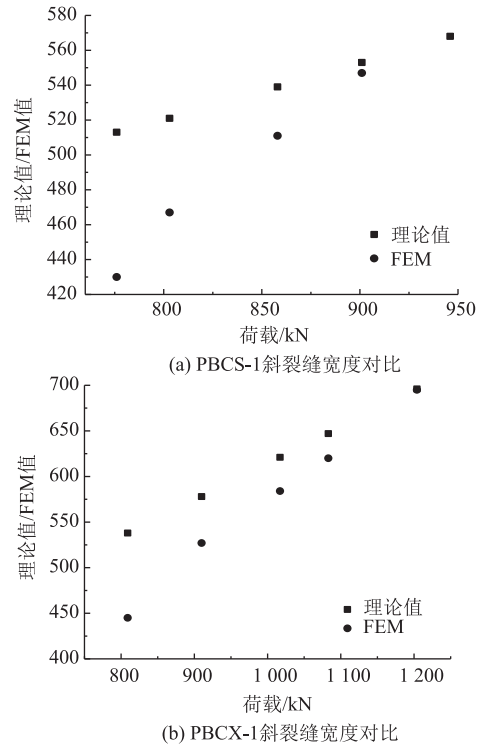


图 14 不同计算方法斜裂缝对比分析

Fig. 14 Comparative analysis of oblique cracks with different calculation methods

4 结论

目前国内许多 PC 箱梁腹板出现斜裂缝后, 往往采用粘贴钢板加固的方法对其进行处理, 但规范仅考虑了粘贴钢板加固对结构抗剪承载力的影响, 对于加固后结构的抗弯刚度和斜裂缝宽度, 规范中并未给出明确的计算方法。

PC 箱梁腹板开裂后结构进入弹塑性状态, 此时粘贴钢板加固后结构抗弯刚度和斜裂缝宽度的计算影响因素众多且复杂, 对其完全理论推导难度很大。因此本研究通过引入开裂后腹板混凝土完全丧失抗弯刚度的假定和刚度分配理论, 对粘钢加固 PC 箱梁的

抗弯刚度和斜裂缝宽度进行理论计算,虽然引入的一些基本假定与实际情况有所偏差,但对初步建立腹板粘钢加固后构件的挠度和斜裂缝宽度计算方法具有较大的参考价值。有限元模拟结果初步表明,以上所提出的计算方法是基本可行的,且该计算思路不仅适用于腹板钢加固 PC 箱梁,而且可以推广至其他构件。

参考文献:

References:

- [1] 李淑慧. 浅谈公路旧桥的加固 [C] // 2012 年 8 月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京: 中国对外经济贸易出版社, 2012: 60-61.
LI Shu-hui. Talking about Reinforcement of Old Highway Bridges [C] // Proceedings of the Academic Exchange Conference on Construction Technology and Management. Beijing: China Foreign Economic and Trade Press, 2012: 60-61.
- [2] JAYAPRAKASH J, SAMAD A A A, ABBASOVICH A A, et al. Shear Capacity of Precracked and Non-precracked Reinforced Concrete Shear Beams with Externally Bonded Bi-directional CFRP Strips [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22 (6): 1148-1165.
- [3] KUO W W, CHENG T J, HWANG S J. Force Transfer Mechanism and Shear Strength of Reinforced Concrete Beams [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (6): 1537-1546.
- [4] 励东东. 粘贴加固预应力砼连续箱梁桥的受力特性分析 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
LI Dong-dong. Analysis of Stress Characteristics of Prestressed Concrete Continuous Box Girder Bridge with Paste Reinforcement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [5] 接金亮. 粘钢加固预应力混凝土 T 梁抗剪计算研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
JIE Jin-liang. Research on Shear Calculation of Prestressed Concrete T-beam Reinforced with Bonded Steel [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [6] 王婧. 粘钢加固预应力混凝土箱梁力学性能研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
WANG Jing. Research on Mechanical Properties of Prestressed Concrete Box Girder Reinforced with Bonded Steel [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [7] 叶欣, 高磊, 熊文, 等. 粘贴双 L 形钢板加固 PC 简支 T 梁的抗剪性能 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (2): 93-102.
YE Xin, GAO Lei, XIONG Wen, et al. Shear Performance of PC T-beam Strengthened with Double L-shaped Steel Plate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (2): 93-102.
- [8] 付一小, 叶见曙, 熊文, 等. CFRP 布混合粘贴加固 RC 梁斜截面抗剪性能研究 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (1): 64-71.
FU Yi-xiao, YE Jian-shu, XIONG Wen, et al. Study on Shear Performance of RC Beam Oblique Section Strengthened with Hybrid Bonding CFRP Sheets [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (1): 64-71.
- [9] 李妮. 粘钢加固混凝土梁的静力试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
LI Ni. Static Test Research on Concrete Beams Reinforced with Bonded Steel [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [10] 鲍安红, 殷学纲. 考虑钢板剥离影响的加固混凝土梁抗剪承载力研究 [J]. 应用力学学报, 2005, 22 (4): 613-617.
BAO An-hong, YIN Xue-gang. Resist-shearing Capacity of Concrete Beam Bonded by Steel-sheets [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22 (4): 613-617.
- [11] 栾好发. 粘贴钢板加固钢筋混凝土 T 梁抗弯模型试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
LUAN Hao-fa. Experimental Study on Flexural Resistance Model of Reinforced Concrete T-beam Reinforced with Steel Plates [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [12] 甘元初. 锚贴钢板加固钢筋混凝土梁受剪性能的研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
GAN Yuan-chu. Research on Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Anchoring Steel Plates [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [13] JTG/T 22—2008, 公路桥梁加固设计规范 [S].
JTG/T 22—2008, Specifications for Strengthening Design of Highway Bridges [S].
- [14] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
JTG 3362—2018, Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [15] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [16] 李凤兰, 李芳. 预应力混凝土梁斜截面抗裂计算方法 [J]. 华北水利水电学院学报, 1997, 18 (1): 32-35.
LI Feng-lan, LI Fang. Method of Calculating Shear-cracking Strength of Prestressed Concrete Beams [J]. Journal of North China Institute of Water Resources and Electric Power, 1997, 18 (1): 32-35, 55.
- [17] GB 50367—2006, 混凝土结构加固设计规范 [S].
GB 50367—2006, Code for Design of Strengthening Concrete Structure [S].
- [18] 许学娟. 粘钢加固钢筋混凝土受弯构件设计计算方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2013.
XU Xue-juan. Research on Design and Calculation Method of Reinforced Concrete Flexural Members Strengthened by Bonding Steel [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.