第39卷第5期 计 算 力 学 学 报 Vol. 39, No. 5
2022年10月 Chinese Journal of Computational Mechanics October 2022

DOI:10.7511/jslx20210116001

PBL节点初始平动刚度计算及设计参数优化

王方旭, 杨霞林*, 刘世忠

(兰州交通大学 土木工程学院,兰州 730070)

摘 要:为研究钢桁腹混凝土组合箱梁中PBL(Perfobond Leiste)节点的初始平动刚度及其影响因素,首先基于组件法,运用卡氏第二定理推导出考虑了开孔钢板与混凝土间的界面剪切力和混凝土榫贡献的PBL节点的初始平动刚度表达式,其次以某工程实例为背景,结合有限元模型验证所推公式的合理性;在此基础上分析了混凝土强度、腹杆直径、腹杆壁厚、开孔钢板开孔孔径和开孔钢板厚度等构造参数对初始平动刚度的影响,并利用正交分析法对以上5个参数进行优化组合。研究结果表明,本文方法计算的PBL节点初始平动刚度结果与有限元计算结果间的误差在8.0%以内;相较运用解三角形计算腹杆平动位移的方法,采用卡氏第二定理不仅可以简化计算,还可以减小解三角形过程中因多次计算变形带来的误差累积;腹杆刚度对PBL节点整体平动刚度的贡献最大,可达到82.5%;保持原设中的混凝土强度不变,将腹杆直径增加20 mm,将钢腹杆壁厚增加4 mm,将开孔钢板开孔孔径增加4 mm,将开孔钢板厚度增加4 mm,可以将PBL节点理论初始平动刚度提高约25.7%。

关键词:PBL节点;平动刚度;组件法;正交分析法;参数优化

中图分类号:U443.4;U448.21 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-4708(2022)05-0574-08

1 引 言

钢桁腹混凝土组合梁的节点构造一般有钢盖箱节点、双套管节点和PBL节点[1]。其中主要依靠PBL剪力键来抵抗水平剪力的新型节点称为PBL节点,其构造如图1所示。该种剪力键是在钢板上贯穿钢筋形成的,既承担水平剪力,又能抵抗构件和混凝土构件之间的竖向掀起力[2]。在荷载作用之下,混凝土弦杆所受轴力在此突变,导致PBL节点区产生轴力差[3-5],同时在钢管腹杆上分别产生压力和拉力,PBL节点产生平动与转动变形,因此一般在受压腹杆中灌注混凝土。

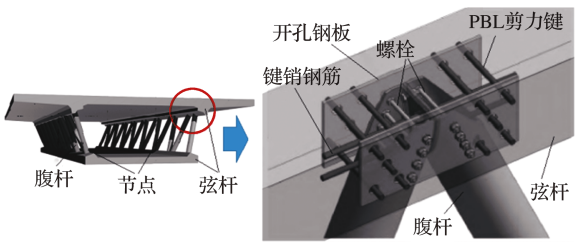


图1 PBL节点构造

Fig. 1 PBL node structure

众多学者对PBL节点的受力性能开展了相关研究工作。文献[6,7]对钢盖箱节点和双套管节点进行了试验和理论研究;端茂军等[3-5]通过试验对PBL节点的抗剪机理及承载力计算方法进行了研究,结果表明PBL节点弦杆节间的轴力差在节点区产生的竖向剪力是造成节点破坏的主要原因;王振海[8]通过对埋入式PBL剪力连接件的承载机理以及宏观力学行为的研究,提出了理想破坏形态下埋入式剪力连接件在承载全过程中的荷载滑移关系的统一计算公式;周凌宇等[9]对钢混凝土组合桁架节点力学性能进行试验研究,结果表明该节点的破坏模式主要有弦杆混凝土开裂破坏、腹杆屈曲破坏以及腹杆与耳板连接处屈服等;张花[10]的研究结果指出耳板式节点极限承载力明显高于外接式节点,整体刚度则相差不大。李炎等[11]基于组件法计算了PBL节点的初始平动刚度,但在推导腹杆水平位移时采用了多次解三角形的方法,导致计算变形过程中存在误差累积,且该文献将PBL剪力键假定为受剪力作用的短柱来考虑其剪切变形,未考虑开孔钢板与混凝土间的界面剪切力和混凝土榫对刚度的贡献,这与实际结构的抗力组成存在一定的差异。此外,文献[12,13]也开展了相关研究工作。

本文运用卡氏第二定理对腹杆刚度计算公式进行推导;解决了采用解三角形的方法计算腹杆平动位移时因多次计算变形引起误差累积的问题;同

收稿日期:2021-01-16;**修改稿收到日期**:2021-04-28.
基金项目:国家自然科学基金(51868040)资助项目.
作者简介:杨霞林*(1970-),女,硕士,教授
(E-mail:yxl06@163.com).

时在公式中考虑了开孔钢板与混凝土间的界面剪切力和混凝土隼对刚度的贡献；优化了影响 PBL 节点初始平动刚度（下称 PBL 节点刚度）的主要设计参数。

2　基于组件法的 PBL 节点刚度计算

2.1　组件法原理

如图 2 所示，组件法的基本原理是将节点拆分为若干个基本组件，利用线性或非线性弹簧模拟各拆分组件，通过弹簧的串并联组合计算来获得节点整体力学行为[14,15]。

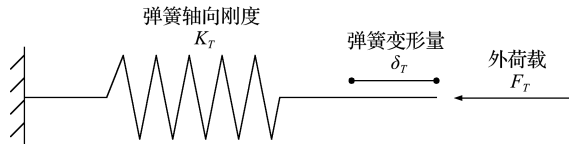


图 2　基本组件的弹簧模型

Fig. 2　Spring model of basic components

组件法通常将节点简化为受拉、受压和受剪 3 个不同的区域，在每个区域中，由各组件组成节点的整体响应。理论上，若节点的各个基本组件得以合理地表征，该方法可适用于任意节点形式和任意荷载条件[16]。对于组合节点，在纯钢节点的基础上，需考虑与混凝土相关的组件对节点受力性能的影响[10]。

2.2　PBL 节点平动刚度组成

根据 PBL 节点的结构形式，提供平动刚度的有混凝土弦杆、腹杆、PBL 剪力键和开孔钢板等，当 PBL 节点处于弹性工作状态时，水平荷载作用下产生的整体位移由各个组件的变形叠加而得，即节点的平动位移为弦杆端部中心点沿水平方向的位移终值[11]。

采用组件法计算 PBL 节点平动刚度时略去各组件的次要变形，将材料抽象为理想化的材料，做如下假定，(1) 各组件均处在线弹性阶段，符合小变形假定；(2) 节点的整体平动中心在弦杆加载端形心位置，混凝土弦杆、钢腹杆只考虑轴向变形，开孔钢板与 PBL 剪力键只考虑剪切变形。

基于以上假定，整体位移可表示为各组件水平位移之和，即 PBL 节点水平位移 $\delta_{总}$ 为

$$\delta_{总}=\Delta L_{XG}+\Delta L_{FGX}+\delta_p+\delta_v \tag{1}$$

式中 ΔL_{XG} 为弦杆受力变形引起的节点平动位移，ΔL_{FGX} 为腹杆受力变形引起的节点平动位移，δ_p 为 PBL 剪力键受力变形引起的节点平动位移，δ_v 为开孔钢板受力变形引起的节点平动位移。

则总的 PBL 节点刚度可表示为

$$K_{总}=\frac{F}{\delta_{总}}=\frac{1}{\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}+\frac{1}{K_3}+\frac{1}{K_4}} \tag{2}$$

式中 K_1 为弦杆平动刚度，K_2 为腹杆平动刚度，K_3 为 PBL 剪力键平动刚度，K_4 为开孔钢板平动刚度。

2.3　卡式第二定理

线弹性杆件或杆系的应变能 V_ε 对于作用在该杆件或杆系上的某一荷载之变化率，等于与该荷载相应的位移[17]，即

$$\Delta_i=\partial V_\varepsilon/\partial F_i \tag{3}$$

式中 V_ε 为杆件的应变能，F_i 为广义力，Δ_i 为相应的广义位移。

对于拉压杆件，则有

$$\Delta_i=\sum\frac{\partial V_{\varepsilon i}}{\partial F_i}=\sum\frac{l_i}{2E_iA_i}\times\frac{\partial F_{Ni}^2}{\partial F_i}=\sum\frac{l_i}{E_iA_i}\times F_{Ni}\times\frac{\partial F_{Ni}}{\partial F_i} \tag{4}$$

式中 l_i 为杆件的长度，E_i 为杆件材料弹性模量，A_i 为杆件横截面面积，F_{Ni} 为杆件所受的力。

3　PBL 节点各组件刚度计算

3.1　弦杆 K_1

参考文献[4]，该节点受力如图 3 所示。

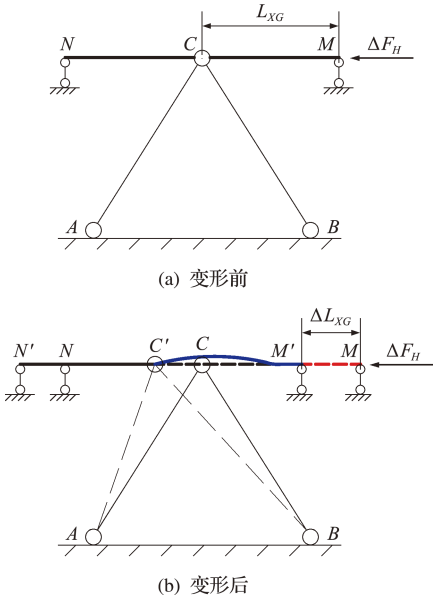


图 3　节点二弦杆受力

Fig. 3　Nodal second chord force diagram

根据卡氏第二定理，外荷载作用下弦杆 NC 和弦杆 MC 间轴力差 ΔF_H 引起的弦杆压缩变形，即端部点 M 由弦杆变形引起的水平位移 ΔL_{XG} 为

$$\Delta L_{XG}=\frac{L_{XG}}{E_cA_{XG}}\cdot\Delta F_H\cdot 1=\frac{\Delta F_H L_{XG}}{E_cA_{XG}} \tag{5}$$

式中 L_{XG} 为受压区长度，E_c 为混凝土弹性模量，A_{XG} 为弦杆横截面面积。

因此，可以得到弦杆受压区抗压刚度 K_1 为

$$K_1=\frac{\Delta F_H}{\Delta L_{XG}}=\frac{\Delta F_H}{\Delta F_H L_{XG}/(E_c A_{XG})}=\frac{E_c A_{XG}}{L_{XG}} \tag{6}$$

3.2 腹杆 K_2

腹杆受压时，可采用截面换算法计算腹杆的等效受压面积 A_{ceq}，其变形如图 4 所示。

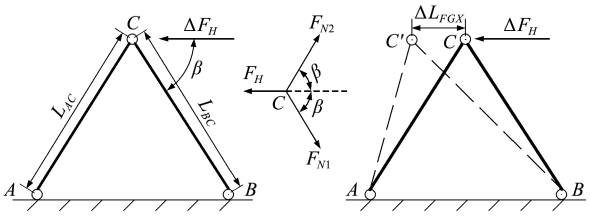


图 4 小变形下腹杆变形

Fig. 4 Small deformation lower web rod deformation diagram

根据卡氏第二定理，ΔF_H 引起点 C 的水平位移即由腹杆变形引起的图 3 中点 M 的水平位移 ΔL_{FGX} 为

$$\Delta L_{FGX}=\frac{L_{AC}}{E_c A_{ceq}}\cdot\frac{\Delta F_H}{2\cos\beta}\cdot\frac{1}{2\cos\beta}+\frac{L_{BC}}{E_s A_2}\cdot\frac{\Delta F_H}{2\cos\beta}\cdot\frac{1}{2\cos\beta}=\frac{\Delta F_H L_{AC}}{4\cos^2\beta}\left(\frac{1}{E_c A_{ceq}}+\frac{1}{E_s A_2}\right) \tag{7}$$

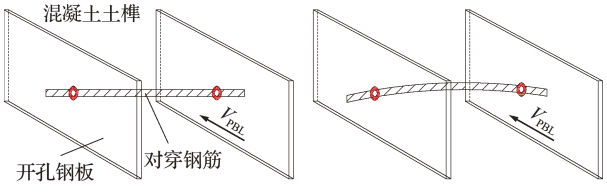
式中 β 为腹杆与水平弦杆的夹角，A_2 为受拉腹杆横截面积，E_s 为钢管弹性模量，L_{AC} 和 L_{BC} 为腹杆长度且相等。

因此，腹杆抗拉压刚度 K_2 为

$$K_2=\frac{\Delta F_H}{\Delta L_{FGX}}=\frac{4\cos^2\beta}{L_{AC}[1/(E_c A_{ceq})+1/(E_s A_2)]} \tag{8}$$

3.3 PBL 剪力键 K_3

ΔF_H 引起 PBL 剪力键受剪力 V_{PBL} 的作用，如图 5 所示，其弹性刚度主要包含两部分，一部分是由混凝土榫提供，另一部分由开孔钢板与混凝土界面间的剪切作用提供[8]。



(a) 变形前 (b) 变形后

图 5 PBL 剪力键受力

Fig. 5 PBL shear key force diagram

文献[8]指出单根钢筋对穿单块钢板形成单个 PBL 剪力键弹性阶段的刚度可计算为

$$K_3'=6788\sqrt{f_c\cdot A_c}-401800 \tag{9}$$

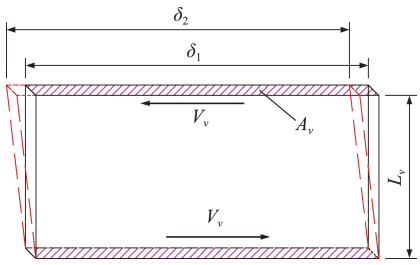
式中 K_3' 为单根埋入式剪力连接件的抗剪刚度，f_c 为混凝土的轴心抗压强度设计值，A_c 为混凝土榫横截面面积。

则 n 根钢筋贯穿两块钢板形成 $2n$ 个 PBL 剪力键的剪切刚度 K_3 为

$$K_3=2nK_3' \tag{10}$$

3.4 开孔钢板 K_4

ΔF_H 引起开孔钢板受剪力 V_v 的作用，只考虑剪切变形，其计算简图如图 6 所示。



注：δ_1 和 δ_2 分别为变形前后的有效长度。

图 6 开孔钢板剪切变形

Fig. 6 Shear deformation diagram of steel plate with hole

由 V_v 引起的剪切变形，即由开孔钢板变形引起的点 M（图 3）的水平位移 δ_v 可表示为

$$\delta_v=V_v L_v/(GA_v) \tag{11}$$

式中 G 为开孔钢板的剪切模量，L_v 为开孔钢板受剪区域的高度，A_v 为开孔钢板的有效抗剪面积。

可得单块开孔钢板抗剪刚度 K_4' 为

$$K_4'=\frac{V_v}{\delta_v}=\frac{V_v}{VL_v/(GA_v)}=\frac{GA_v}{L_v} \tag{12}$$

m 块开孔钢板的抗剪刚度 K_4 为

$$K_4=mGA_v/L_v \tag{13}$$

4 算例分析

4.1 PBL 节点细部构造

以文献[4,18]的钢桁腹混凝土组合箱梁为研究对象，图 1 的各细部参数列入表 1。

表 1 节点细部参数

Tab. 1 Node detail parameters

组件	几何尺寸/mm	数量	材料
混凝土弦杆	3900×650×550	1	C50
钢腹杆	351×16	2	Q345C
开孔钢板	1000×450×20	2	Q345C
开孔板开孔孔径	30	10	—
对穿钢筋	25	10	HRB400
键销钢筋	25	2	HRB400

4.2 有限元模型

采用 ANSYS 软件建立有限元模型，其中混凝

土弦杆和开孔钢板选用 SOLID185 单元模拟，钢腹杆选用 SOLID187 单元模拟，螺栓和端部连接钢板键销钢筋以及对穿钢筋选用 BEAM189 单元模拟，有限元模型如图 7 所示。假定分析过程中结构始终处于弹性阶段，钢材弹性模量取为 2.06×10^5 MPa，泊松比取为 0.3；混凝土弹性模量取为 3.45×10^4 MPa，取泊松比为 0.27。混凝土弦杆与 PBL 剪力键、开孔钢板、钢腹杆以及螺栓的连接均采用节点自由度耦合模拟。约束钢腹杆部分平动与转动自由度（Ux，Uy，Uz，URx，URy），让其只可绕下端（URz）转动；混凝土弦杆部分则只可在 XY 平面水平运动，约束（Uz，URx，URy）。

在弦杆端部横截面上施加法向的面荷载 ΔF_H，文献[4]的试验结果表明，当弦杆端部横截面上施加法向的面荷载在 0 kN～520 kN 的加载范围内，试件处于弹性状态。由于本文建立的 PBL 节点模型构造与文献[4]的试验模型构造相似，故将 ΔF_H 分别取为 100 kN，300 kN 和 500 kN 进行分析，即模型始终处于弹性阶段。

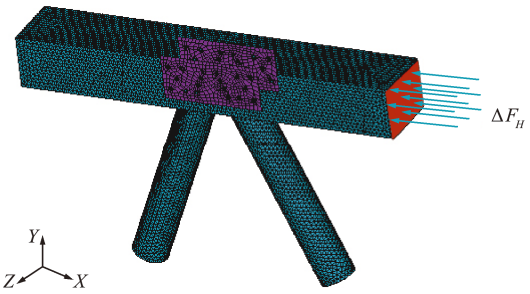


图 7　有限元模型

Fig. 7　Finite element model

4.3　计算精度对比

以 ANSYS 模型计算得到的荷载与位移的比值作为 PBL 节点初始平动刚度的标准结果，采用文献[11]所述方法以及本文所推公式计算得到的结果如图 8 所示。图 9 为根据组件法计算得到的各组件初始平动刚度占 PBL 节点总初始平动刚度的比例。

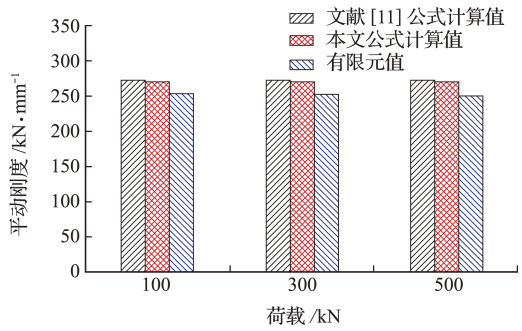


图 8　初始平动刚度对比结果

Fig. 8　Comparison result of initial translational stiffness

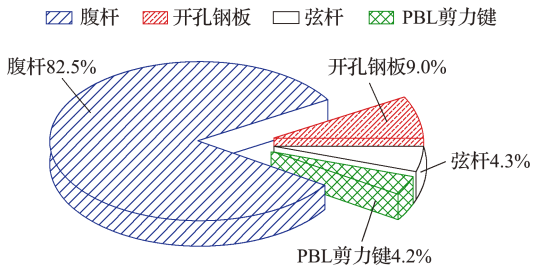


图 9　各组件初始平动刚度比例

Fig. 9　Initial translational stiffness ratio of each component

从图 8 可以看出，本文提出方法的计算结果较有限元模型计算结果偏大，是因为理论计算对节点进行了简化处理，忽略了节点处转动等复杂变形，只考虑平动变形；二者间的相对误差在 8.0% 以内，且小于文献[11]所推公式的计算误差，表明本文公式具有更高精度。

从图 9 可以看出，4.1 节所述的 PBL 节点中，钢腹杆对平动刚度的贡献最大，约占 82.5%，说明节点平动位移的产生主要来自腹杆的变形。另外 3 个组件对初始平动刚度的贡献由大到小依次为开孔钢板、混凝土弦杆和 PBL 剪力键。

5　基于正交分析的结构参数优化

5.1　PBL 节点平动刚度影响因素

本文在不改变其他参数的情况下，对混凝土强度 f_c、钢腹杆直径 D、钢腹杆壁厚 t、开孔钢板开孔孔径 d' 和开孔钢板厚度 t' 等 5 个因素建立不同的有限元模型进行分析。各分析参数取 5 个变量水平，列入表 2。

表 2　PBL 节点平动刚度影响因素

Tab. 2　Factors affecting translational stiffness of PBL nodes

因素水平	因素				
	f_c	D/mm	t/mm	d'/mm	t'/mm
Ⅰ	C40	331	14	26	16
Ⅱ	C45	341	18	28	18
Ⅲ	C50	351	16	30	20
Ⅳ	C55	361	20	32	22
Ⅴ	C60	371	22	34	24

为综合衡量不同单因素的影响，本文按相对增量比区分各影响因素的显著性，令显著性指标为

$$x=\Delta p_{\max}/\Delta Z_{\max} \tag{14}$$

式中 $\Delta p_{\max}$ 为影响指标参数增量，$\Delta Z_{\max}$ 为影响因素参数增量。

通过不同的有限元模型得到的单一参数变化下的平动刚度变化曲线如图 10 所示。

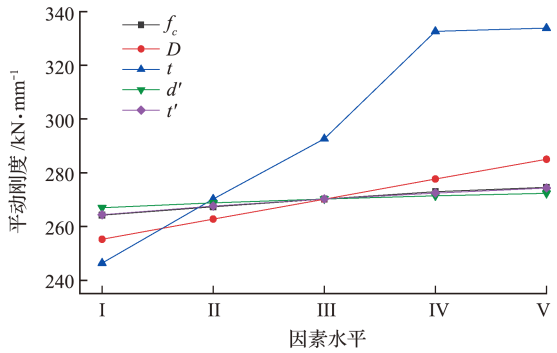


图 10 单因素下 PBL 节点平动刚度变化曲线

Fig. 10 Non-linear simulation analysis for the point area, the research results show that PBL

由图 10 可得 D, t, f_c, t'和 d'的显著性指标分别约为 0.966, 0.621, 0.089, 0.075 和 0.065, 可知腹杆直径对 PBL 节点的初始平动刚度影响最大。

5.2 多因素正交分析

5.2.1 建立正交因素表

不考虑各影响因素之间的相互作用, 选取正交表分别建立有限元模型进行分析。表 3 为加载至 500 kN 时的平动刚度值。

表 3 正交分析表

Tab. 3 Orthogonal analysis table

编号	因素					刚度 /kN·mm^{-1}
	f_c	D	t	d'	t'	
1	I	I	I	I	I	190.44
2	I	II	II	II	II	236.09
3	I	III	III	III	III	228.12
4	I	IV	IV	IV	IV	275.76
5	I	V	V	V	V	305.17
6	II	I	II	III	IV	236.71
7	II	II	III	IV	V	227.35
8	II	III	IV	V	I	262.04
9	II	IV	V	I	II	282.10
10	II	V	I	II	III	219.53
11	III	I	III	V	II	217.22
12	III	II	IV	I	III	256.87
13	III	III	V	II	IV	285.64
14	III	IV	I	III	V	218.98
15	III	V	II	IV	I	257.72
16	IV	I	IV	II	V	257.17
17	IV	II	V	III	I	262.12
18	IV	III	I	IV	II	209.77
19	IV	IV	II	V	III	259.56
20	IV	V	III	I	IV	243.43
21	V	I	V	IV	III	179.08
22	V	II	I	V	IV	208.24
23	V	III	II	I	V	252.90
24	V	IV	III	II	I	221.31
25	V	V	IV	III	II	280.91

由表 3 可知, 各影响因素中每个水平出现的频率均相同, 组合的情况比较全面。

定义极差 ΔR, 判别影响因素的主次顺序, 其表达式见式(15)。ΔR 越大, 则表示该影响因素影响越大。不同影响因素的极差计算结果列入表 4。

$$\Delta R=\max R_i-\min R_i \tag{15}$$

式中 R_i为某影响因素下所有包含该影响因素 i 水平的各个模型计算结果的总和。

表 4 极差计算结果

Tab. 4 Range calculation result

	因素				
	f_c	D	t	d'	t'
R_1	1235.58	1080.61	1046.97	1225.73	1193.63
R_2	1227.72	1190.68	1242.99	1219.74	1226.09
R_3	1236.44	1238.47	1137.42	1226.84	1143.17
R_4	1232.05	1257.72	1332.75	1149.68	1249.77
R_5	1142.44	1306.77	1314.11	1252.23	1261.57
ΔR	94.00	226.16	285.77	102.55	118.39

由表 4 可知, 腹杆壁厚 t 对应的极差 ΔR 最大, 混凝土强度 f_c对应的极差 ΔR 最小, 则各因素的主次顺序为 $t>D>t'>d'>f_c$。

5.2.2 基于直观分析的综合平衡法

利用直观分析将表 4 各影响因素主次顺序进行排列, 判断各影响因素对平动刚度的影响, 将表 4 中 R_i值除以 5 表示某个影响因素某水平对平动刚度的平均影响, 作为纵轴, 影响因素作为图的横轴, 如图 11 所示。

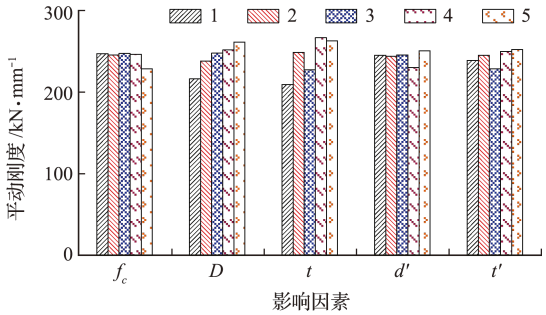


图 11 平动刚度影响因素指标直观分析

Fig. 11 Intuitive analysis chart of the influencing factors of translational stiffness

可以看出, 影响因素 t 中 R_4值最大, 所以影响因素 t 取水平为 IV, 同理可分析其他影响因素, 则最优组合为 t IV, D V, t'V, d'V和 f_cIII。

5.2.3 优化前后结果对比

选取理论值以及不同荷载下优化前后 PBL 节点的平动刚度值做比较, 如图 12 所示。

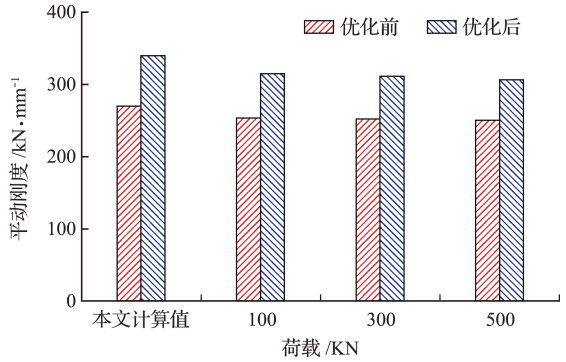


图 12　优化前后平动刚度直观比较

Fig. 12　Intuitive comparison chart of translational stiffness before and after optimization

可以看出，保持原设计混凝土强度 C50 不变，若将钢腹杆直径由 351 mm 增加至 371 mm，钢腹杆壁厚由 16 mm 增加至 20 mm，开孔钢板孔厚度由 20mm 增加至 24mm，并将孔径由 30 mm 增加至 34 mm，可将平动刚度提高 25.7%。

6　结　论

基于组件法，本文采用卡氏第二定理推导在弹性范围内考虑开孔钢板与混凝土间界面剪切力贡献的 PBL 节点的初始平动刚度表达式，并结合实际构造参数对 PBL 节点设计进行了优化分析，得到以下结论。

（1）采用卡氏第二定理计算钢腹杆平动刚度，较之解三角形的方法可减小因多次计算变形而带来的误差累积，且弹性范围内荷载越大，精度提高程度越大。

（2）考虑开孔钢板与混凝土间的界面剪切力以及混凝土榫对初始平动刚度的贡献后，计算的 PBL 剪力键抗剪刚度更接近实际状态，本文所提公式计算结果与有限元结果之间的误差在 8.0% 以内。

（3）就本文所分析的 PBL 节点中，腹杆刚度在整体刚度中的占比最大，约为 82.5%，其余组件对整体刚度的贡献大小依次为开孔钢板＞PBL 剪力键＞混凝土弦杆。

（4）保持原设中的混凝土强度不变，将腹杆直径增加 20 mm、将钢腹杆壁厚增加 4 mm、将开孔板开孔孔径增加 4 mm，将开孔钢板厚度增加 4 mm，可以将 PBL 节点理论初始平动刚度提高约 25.7%。

（5）本文的公式推导及有限元模型受力分析主要针对的是 PBL 节点处于弹性状态时，未考虑材料非线性的影响，后续工作需进行进一步的研究。

参考文献（References）：

[1] 阎卫国. 钢桁腹组合结构桥梁新型节点构造研究[J]. 公路交通科技，2013，**30**(10)：61-66，128.（YAN Wei-guo. Study on new joint structure in steel truss-web bridge[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*，2013，**30**(10)：61-66，128.(in Chinese)）

[2] 闫文华. PBL 键受力性能试验与理论研究[D]. 长安大学，2012.（YAN Wen-hua. PBL Shear Connectors' Mechanical Performance Test and Theoretical Studies [D]. Chang'an University，2012.(in Chinese)）

[3] 端茂军，刘　钊，张建东，等. 钢管腹杆-混凝土 K 形组合节点试验及仿真分析[J]. 桥梁建设，2017，**47**(5)：47-52.（DUAN Mao-jun，LIU Zhao，ZHANG Jian-dong，et al. Experiment and simulation analysis of K-shape composite joint of steel tube web members and RC chord[J]. *Bridge Construction*，2017，**47**(5)：47-52.(in Chinese)）

[4] 端茂军，刘　钊，张建东，等. 钢桁腹-混凝土组合结构桥梁新型 PBL-钢管节点试验研究[J]. 东南大学学报（自然科学版），2016，**46**(3)：572-577.（DUAN Mao-jun，LIU Zhao，ZHANG Jian-dong，et al. Experimental study on new PBL-steel tube joint for steel truss-webbed concrete slad composite bridges[J]. *Journal of Southeast University*(*Natural Science Edition*)，2016，**46**(3)：572-577.(in Chinese)）

[5] 端茂军. 轻型钢网架-混凝土组合结构桥梁基本受力性能及设计方法研究[D]. 东南大学，2018.（DUAN Mao-jun. Research on Structure Behavior and Design Method of Lightweight Steel Concrete Composite Bridges with Tubular Truss[D]. Southeast University，2018.(in Chinese)）

[6] 左東有次，日野伸一，園田佳巨，等. 複合トラス橋の格点構造の応力伝達機構に関する研究[J]. 構造工学論文集，2008，**54**A：778-785.（ZUO Dong-yi，SHINICHI Hino，YOSHIKO Yoshiki，et al. Study on stress transfer mechanism of composite truss bridges with lattice points [J]. *Journal of Structural Engi-*

neering,2008,**54**A:778-785.(in Japanese))

[7] 中島章典,橋本昌利.貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構とせん断耐力評価[J].土木学会論文集 A1(構造地震工学),2014,**70**(5):II_20-II_30.(Nakajima Jagiotori, Hashimoto Changli. Shearing mechanism and searing strength evaluation of drilling steel plate [J]. *Proceedings of the Society of Civil Engineering* A1(*Structural Seismology*), 2014,**70**(5):I_20-I_30.(in Japanese))

[8] 王振海.埋入式 PBL 剪力连接件力学特性及承载机理研究[D].西南交通大学,2012.(WANG Zhen-hai. Study on the Mechanical Property and Load-Bearing Mechanism of Embedded Perfobond RIB Shear Connectors[D]. Southwest Jiaotong University,2012.(in Chinese))

[9] 周凌宇,张 花,贺桂超.耳板式钢-混凝土组合桁架节点力学性能试验研究[J].中国铁道科学,2011,**32**(6):41-47.(ZHOU Ling-yu,ZHANG Hua,HE Gui-chao. Experimental Research on the mechanical properties of the steel-concrete composite truss joint with ear plate[J]. *China Railway Science*,2011,**32**(6):41-47.(in Chinese))

[10] 张 花.大跨度钢-混组合桁架节点刚度研究[D].中南大学,2012.(ZHANG Hua. The Stiffness of Steel-Concrete Composite Truss Node [D]. Central South University,2012.(in Chinese))

[11] 李 炎,周凌宇,郑 恒,等.钢-混凝土组合桁架外接式节点初始平动刚度研究[J].建筑结构学报,2015,**36**(S1):144-149.(LI Yan,ZHOU Ling-yu,ZHENG Heng,et al. Study on initial translational stiffness of steel-concrete composite truss external joints [J]. *Journal of Building Structures*,2015,**36**(S1):144-149.(in Chinese))

[12] 赵均海,樊军超,高伟琪.钢管混凝土柱-钢梁延伸式端板连接节点初始转动刚度计算模型[J].建筑结构学报,2021,**42**(2):103-111.(ZHAO Jun-hai,FAN Jun-chao,GAO Wei-qi. Calculation model for initial rotational stiffness of steel beam to concrete-filled steel tube column joints with extended end-plate[J]. *Journal of Building Structures*,2021,**42**(2):103-111.(in Chinese))

[13] 周凌宇,薛宪鑫.外接式组合桁架节点初始转动刚度研究[J].工程力学,2019,**36**(5):100-109.(ZHOU Ling-yu,XUE Xian-xin. Study on initial rotational stiffness of external composite truss joint[J]. *Engineering Mechanics*,2019,**36**(5):100-109.(in Chinese))

[14] 陈颖智,童乐为,陈以一.组件法用于钢结构节点性能分析的研究进展[J].建筑科学与工程学报,2012,**29**(3):81-89.(CHEN Ying-zhi,TONG Le-wei,CHEN Yi-yi. Research developments of component method for behavior of joints in steel structures[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*,2012,**29**(3):81-89.(in Chinese))

[15] EC-3. Design of Steel Structures[S]. Belgium: Commission of European Communities,2003.

[16] Rassati G A,Leon R T,Noè S. Component modeling of partially restrained composite joints under cyclic and dynamic loading[J]. *Journal of Structural Engineering*,2004,**130**(2):343-351.

[17] 孙训方,方孝淑,关来泰,等.材料力学(5 版)[M].北京:高等教育出版社,2009.(Sun Xun-fang,Fang Xiao-shu,GUAN Lai-tai,et al. *Mechanics of Materials*(5 Version)[M]. Beijing: Higher Education Press,2009.(in Chinese))

[18] 刘朵,张建东,阎卫国.南京绕越公路江山桥的设计与施工[J].公路,2013,**58**(12):80-83.(LIU Duo,ZHANG Jian-dong,YAN Wei-guo. Design and construction of Jiangshan bridge of Nanjing bypass Highway[J]. *Highway*,2013,**58**(12):80-83.(in Chinese))

[19] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.(FANG Kai-tai,MA Chang-xing. *Orthogonal Experiment Method*[M]. Beijing:Science Press,2001.(in Chinese))

[20] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范(JTG D62-2015)[S].北京:人民交通出版社,2015.(General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts(JTG D62-2015)[S]. Beijing: People's Communications Press,2015.(in Chinese))

[21] 郭会国.半刚性连接方管桁架结构的非线性分析[D].东南大学,2006.(GUO Hui-guo. Nonlinear Analysis of Squar Tubular Truss Structures with Semi-Rigid Connection[D]. Southeast University,2006.(in Chinese))

Calculation of initial translational stiffness of PBL node and optimization of design parameters

WANG Fang-xu，　YANG Xia-lin*，　LIU Shi-zhong

(School of Civil Engineering，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，China)

Abstract：In order to study the initial translational stiffness and its influencing factors of the PBL (Perfobond Leiste) node in the steel-truss-web-concrete composite box girder，firstly，based on the component method，the second theorem of Karnife was used to derive that the interface shear force between the steel plate and the concrete. The initial translational stiffness expression of the PBL node contributed by falcon，followed by an engineering example as a background，combined with the finite element model to verify the rationality of the formula；on this basis，effects of the concrete strength，web member diameter，and web member wall thickness are analyzed. The influence of structural parameters such as the hole diameter and the thickness of the holed steel plate on the initial translational stiffness is analysed，and the orthogonal analysis method is used to optimize the combination of the above five parameters. The research results show that the error between the initial translational stiffness of the PBL node calculated by the method proposed in this paper and the finite element calculation is within 8.0%；compared with the method of calculating the translational displacement of the web member by solving the triangle，the second theorem is used. Not only can the calculation be simplified，but also can the accumulation of errors caused by multiple calculation deformations in the process of solving the triangle be reduced；the stiffness of the web members contributes the most to the overall translational stiffness of the PBL node，which can reach 82.5%；the strength of the concrete in the original design is kept unchanged，increasing the web rod diameter by 20 mm，the steel web rod wall thickness by 4mm，the perforated plate hole diameter by 4 mm，and the perforated steel plate thickness by 4mm can increase the theoretical initial translational stiffness of the PBL node by about 25.7%.

Key words：PBL node；translational stiffness；component method；orthogonal analysis；parameter optimization

引用本文/Cite this paper：

王方旭，杨霞林，刘世忠. PBL节点初始平动刚度计算及设计参数优化[J]. 计算力学学报，2022，**39**(5)：574-581.

WANG Fang-xu，YANG Xia-lin，LIU Shi-zhong. Calculation of initial translational stiffness of PBL node and optimization of design parameters[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2022，**39**(5)：574-581.