

双排栓钉木-砼组合梁力学性能分析

刘一凡¹, 王鹏^{*1}, 王永慧², 史世伦¹, 李洛克¹, 彭俊源¹

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学城市学院, 昆明 650500)

摘要:为研究双排栓钉组合梁与单排栓钉组合梁界面滑移的关系, 基于单排栓钉胶合木-混凝土理论, 通过改变单排栓钉组合梁界面上栓钉滑移本构关系, 建立了双排以及多排栓钉组合梁界面滑移微分方程, 求解了双排栓钉组合梁在工程中常见的3种荷载作用下的解析解, 并类比了三排以及多排栓钉组合梁的界面滑移微分方程, 提出了双排栓钉组合梁抗弯刚度的计算方法。发现尽管木材是正交各向异性材料, 但是根据组合梁界面滑移的应变关系和胡克定律可知, 界面上的滑移应与受力方向一致的弹性模量有关。单排与双排栓钉微分方程的主要区别是双排特征系数是单排特征系数的2倍。即当双排栓钉刚度为K时等价于单排栓钉的2K, 因此抗弯刚度可等价成单排栓钉刚度为2K时进行计算。双排栓钉组合梁的滑移理论公式和抗弯刚度计算方法分别与Ansys数值模拟的结果一致, 证明了本方法分析双排栓钉组合梁界面滑移和抗弯刚度的可靠性和实用性。

关键词:双排栓钉胶合木-砼组合梁; 界面滑移; 抗弯刚度; Ansys有限元分析

中图分类号:O242.21

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)06-1060-06

1 引言

随着科技的进步, 钢材与混凝土逐渐代替木材成为主要的建筑材料。然而, 以钢材和混凝土结构为主要的建筑业却一直是能源消耗与污染的主要来源^[1]。相较之下, 木材作为一种可再生、可重复利用的天然资源, 同时也具有绿色、调温和观赏等优点。此外, 与钢材相比, 木材还具有更高的强度比^[2]。但我国对胶合木-混凝土组合梁研究较少, 缺乏相应的理论成果作为理论支撑, 其数值模拟也较少, 尤其是厘清组合梁各部件之间的传力机理、截面应力以及界面滑移对组合梁受力性能的影响^[3]。

目前, 关于钢-混组合梁的界面滑移理论已经十分成熟, 周东华等^[4]提出了考虑组合梁界面滑移刚度的新方法, 即有效刚度法, 其物理意义明确。然而, 对于胶合木-混凝土组合梁的刚度只能按文献[3]的 γ 法进行计算, 但该方法物理意义不明确。此外, 针对于双排以及多排组合梁的抗弯刚度计算还没有明确的理论。基于此本文提出了双排以及多排的抗弯刚度计算方法。

对于正交各向异性材料, 根据变形几何关系和胡克定律^[5]可知。如图1所示, 滑移的大小仅与x方向的弹性模量有关, 弹性模量越大, 则界面滑移变形越小。通过确定出相应的弹性模量, 就可基于界面上的变形几何方程和物理本构方程进而推导出界面滑移微分方程。并通过与ANSYS数值模拟进行对比分析来验证结果的正确性。

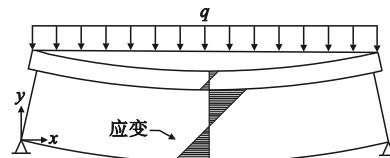


图1 组合梁界面应变及界面滑移
fig. 1 Combined beam interface strain and interface slip

2 双排组合梁滑移微分方程的建立

2.1 基本假定

基于弹性理论对双排栓钉胶合木-砼组合梁滑移进行推导。

对于双排栓钉胶合木-砼简支组合梁来说, 在承受荷载时, 木材、混凝土和连接件均保持在弹性

收稿日期:2023-07-12; 修改稿收到日期:2023-10-03。

基金项目:国家自然科学基金(51308269, 52068068, 51708486); 云南省基础研究计划(202301AT070450, 202201AT070110)资助项目。

作者简介:王鹏*(1979-), 副教授, 硕士生导师(E-mail: wangpengletter@163.com)。

引用本文:刘一凡, 王鹏, 王永慧, 等. 双排栓钉木-砼组合梁力学性能分析[J]. 计算力学学报, 2024, 41(6): 1060-1065.

LIU Yi-fan, WANG Peng, WANG Yong-hui, et al. Mechanical performance analysis of double-row bolted wood-concrete combination beams[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 1060-1065.

阶段。因此,为了简化起见,在分析滑移效应时可以近似地将组合梁作为弹性体来考虑,并做出三点基本假设,即

(1)组合梁界面上的纵向水平剪力与相对滑移成正比例关系;

(2)剪切连接件、木梁和混凝土翼板均处于弹性工作状态;

(3)木梁和混凝土翼板具有相同的曲率,并分别符合平截面假定,不考虑二者之间竖向掀起现象。

2.2 双排组合梁截面曲率及界面滑移应变关系

由假设(3)可以得到组合梁界面曲率

$$\phi = \frac{M_c}{E_c I_c} = \frac{M_w}{E_w I_w} \quad (1)$$

由图2可知,微元体力和弯矩的平衡关系为力的平衡条件

$$\sum F_x = 0$$

$$N_c = N_w = N \quad (2)$$

弯矩平衡条件

$$\sum M = 0$$

$$M = M_c + M_w + N \cdot d \\ = \phi \cdot (E_c I_c + E_w I_w) + N \cdot d \quad (3)$$

由式(3)可得组合梁截面曲率方程为

$$\phi = \frac{M - N \cdot d}{E_c I_c + E_w I_w} \quad (4)$$

式中 $M_c, N_c, E_c I_c, M_w, N_w, E_w I_w$ 分别为混凝土翼板和木梁的弯矩、轴力和抗弯刚度, d 为混凝土翼板形心至木梁形心之间的距离, M 为组合梁的截面弯矩, N 为组合梁的截面轴力。

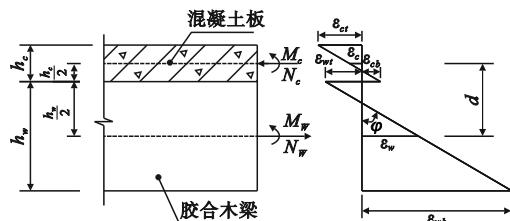


图2 组合梁截面应变

Fig. 2 Strain diagram of composite beam section

根据图2所示,交界面上相对滑移为

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{cb} - \epsilon_{wt} = \phi \cdot \frac{h_c}{2} - \frac{N_c}{E_c A_c} - (\frac{N_w}{E_w A_w} - \phi \cdot \frac{h_w}{2}) \\ = \phi \cdot d - (\frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_w A_w}) N \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)并化简可得

$$\Delta\epsilon = \frac{d}{EI} \cdot M - \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \cdot N \quad (6)$$

式中 EI 为混凝土翼板和木梁抗弯刚度之和, $EI = E_c I_c + E_w I_w$, $d = h_c/2 + h_w/2$, β 为组合梁的组合系数,仅与组合梁截面参数和材料特性有关,其值反映组合作用的大小。

$$\beta = \frac{E_c A_c \cdot E_w A_w \cdot d^2}{(E_c I_c + E_w I_w)(E_c A_c + E_w A_w)} \quad (7)$$

2.3 双排组合梁界面的几何关系

如图3所示,组合梁界面滑移几何关系为:

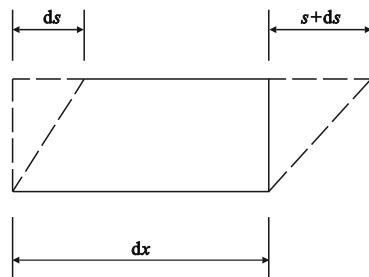


图3 组合梁界面几何关系

Fig. 3 Interface geometry of composite beams

根据组合梁界面滑移几何关系可得组合梁界面几何方程为

$$\Delta\epsilon = \frac{dS}{dx} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)并求导得

$$\frac{d^2 S}{dx^2} = \frac{d}{EI} \cdot V - \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \cdot \frac{dN}{dx} \quad (9)$$

式中 dx 为组合梁的纵向微段, dS 为组合梁纵向微段上的微小滑移。 S 和 V 分别为组合梁界面滑移和横截面上的剪力。 S 和 V 分别为组合梁界面滑移和横截面上的剪力。

2.4 双排组合梁界面的本构关系

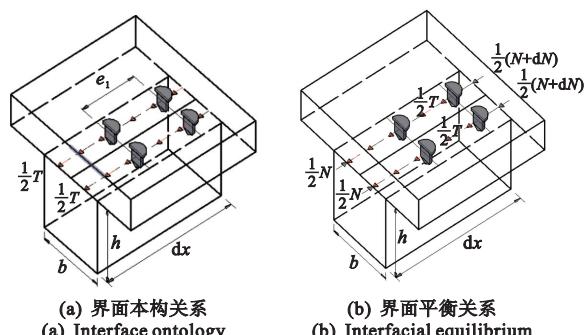


图4 双排组合梁界面关系
(a) Interface ontology
(b) Interfacial equilibrium

fig. 4 Interface relationship of double-row combination beams

如图4(a)所示,双排组合梁界面上的剪切连接件近似平均分担界面剪力流,故剪切连接件的本构关系为

$$\frac{1}{2} \cdot T \cdot e_i = K \cdot S \quad (10)$$

式中 T, e_i, K 和 S 分别为双排组合梁界面上的剪力流、连接件的间距、刚度和滑移。

2.5 双排组合梁界面的平衡关系

如图4(b)所示,布置双排栓钉后,分别对横截面上的应变起到约束作用。相当于将上梁下表面压回来,把下梁上表面拉回去^[6]。因此双排组合梁界面上的剪切连接件可以看似平均分担轴力,可得组合梁界面的平衡关系为

$$\frac{1}{2}N - \frac{1}{2}T \cdot dx = \frac{1}{2}(N + dN) \quad (11)$$

将式(11)化简可得

$$dN = -Tdx \quad (12)$$

将式(10)代入式(12)可得

$$\frac{dN}{dx} = -\frac{2K}{e_i} \cdot S \quad (13)$$

2.6 双排组合梁界面滑移微分方程标准形式

将含有本构关系和平衡条件的式(13)代入几何关系式(9)得界面的滑移控制微分方程为

$$\frac{d^2S}{dx^2} - 2 \cdot \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \cdot S = \frac{d}{EI} \cdot V$$

$$\text{令 } \lambda_i^2 = 2 \cdot \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI}, \gamma = \frac{d}{EI} \quad (14)$$

则化简式(14)得到标准形式的滑移微分方程。

结构在任意荷载作用下,栓钉等间距布置,能确定出唯一的 λ_i^2 , γ 和 V 。将这些参数代入式(14),就可以得到式(15)。

$$\frac{d^2S}{dx^2} - \lambda_i^2 \cdot S = \gamma \cdot V(x) \quad (15)$$

此微分方程是双排栓钉组合梁的微分方程,区别于单排栓钉组合梁微分方程,主要是双排特征系数 λ_i^2 的是单排 ω_i^2 的2倍,主要原因就是双排栓钉平均承担界面剪力流。

3 双排组合梁滑移微分方程求解

3.1 均布荷载作用下双排滑移微分方程求解

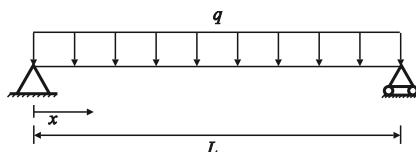


图 5 均布荷载双排组合梁计算简图

Fig. 5 Sketch of calculation for double-row combination beam with uniform load

如图5所示,双排胶合木-砼简支组合梁在均布荷载作用下剪力函数为

$$V(x) = \frac{qL}{2} - qx = q(L/2 - x) \quad (0 \leq x \leq L) \quad (16)$$

式中 q 为作用在双排组合梁上的均布荷载值, L 为简支组合梁的跨度。

将式(16)代入(15)得

$$\frac{d^2S}{dx^2} - \lambda_i^2 \cdot S = \gamma \cdot q \left(\frac{L}{2} - x \right) \quad (17)$$

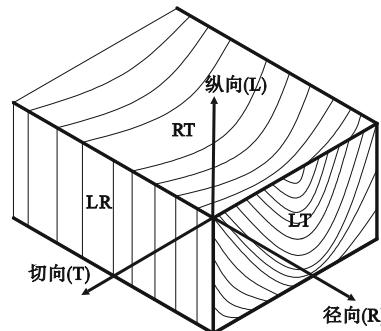
引入边界条件 $S'(0)=0, S(L/2)=0$,可得均布荷载作用下的解析解

$$S(x) = \frac{\gamma q}{\lambda^3} \left[\frac{\sinh \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right)}{\cosh \left(\frac{\lambda L}{2} \right)} - \lambda \left(\frac{L}{2} - x \right) \right] \quad (18)$$

4 胶合木-砼双排组合梁模拟计算

4.1 胶合木材料属性

组织构造和生长环境等因素决定了木材的正交各项异性,即在不同的切面上,木材的物理性质和力学强度因之而异^[7]。因此,常利用木材三个切面上的特征来识别木材,研究木材的性质和用途,如图6所示。在ANSYS数值模拟计算中可以采用正交各向异性的solid45单元模拟木梁。



L—纵向; RT—横切面; R—径向; LR—径切面;
T—弦向; LT—弦切面。

图 6 木材正交三向轴和三向切面
fig. 6 Wood orthogonal three-way axes and three-way sections

表 1 胶合木弹性阶段各项参数

Tab. 1 Parameters of the elastic phase of glued laminated wood

E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa	G_{xz}/MPa
11532	942	620	611	723	193

4.2 混凝土材料属性

由于组合梁在荷载作用下,木梁和混凝土翼板均处于弹性阶段,所以混凝土弹性模量考虑弹性阶段即可。C35混凝土弹性模量为 $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$,泊松比为0.2,其立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}=35 \text{ N/mm}^2$ 。

4.3 栓钉材料属性

栓钉的本构关系采用了Lukaszewska等^[8]提出的SST+S型模型拟合的连接件本构关系。如

图 7 所示,该连接件使用一根直径为 20 mm,长为 47 mm 的钢管嵌入木梁中,并通过一根六角头螺栓实现抗剪连接件的组成,栓钉的剪切刚度按文献[8]的 $K = 5.9 \times 10^3 \text{ N/mm}$ 计算。

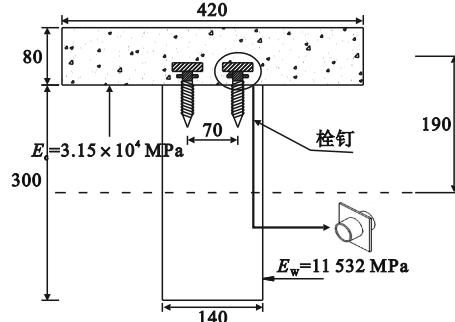


图 7 组合梁截面尺寸及材料参数
Fig. 7 Section dimensions and material parameters of the combined beam

4.4 模型的建立

4.4.1 组合梁截面参数

木梁和混凝土材料均为线弹性,混凝土 C35 的弹性模量为 $E_c = 3.15 \times 10^4 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu_c = 0.2$;木梁的弹性模量则依照表 1 各项数据取值,其数值主要引用文献[9]。

单个抗剪连接件刚度取 $K = 5.9 \times 10^3 \text{ N/mm}$;栓钉纵向间距 $e_1 = 120 \text{ mm}$,横向间距 $e_2 = 70 \text{ mm}$;其余混凝土与木梁截面尺寸如图 7 所示,栓钉布置如图 8 所示。

对于栓钉的模拟,可以使用 COMBIN39 单元。COMBIN39 是一个具有非线性功能的单元,其可以输入荷载-变形(F-D)曲线。因此可以利用该单元的 F-D 曲线定义栓钉刚度,从而实现对剪切连接件的模拟。

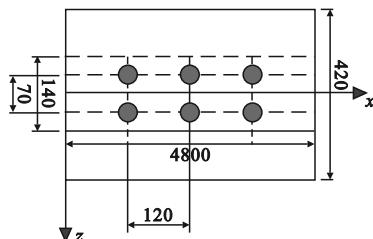


图 8 栓钉布置平面图
Fig. 8 Plan of peg arrangement

4.4.2 有限元模型的建立

因为结构具有对称性,所以按 1/2 结构进行建模分析,并在对称面上施加对称边界条件。

双排胶合木-砼简支组合梁界面间的栓钉采用 Combin39 弹簧单元^[10-13]来模拟,混凝土板及木梁分别采用实体单元 solid65 和 solid45 单元进行模拟。

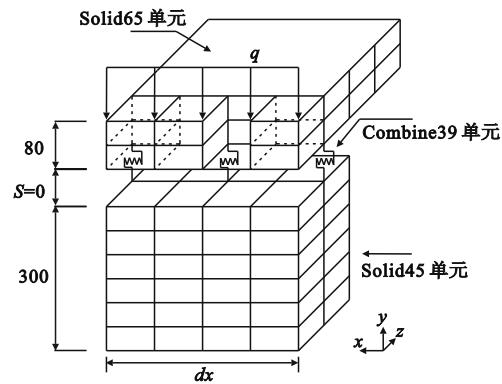


图 9 有限元模型
Fig. 9 Finite element model

4.4.3 荷载布置形式与算例验证

为了验证双排胶合木-砼组合梁界面滑移公式的正确性,图 10 的均布荷载组合梁解析解和数值解滑移对比如图 11 所示。

由图 11 结果可知,采用式(18)与有限元数值模拟的误差最大均为 5%~6%,同时也证明了双排组合梁界面滑移微分方程的正确性。

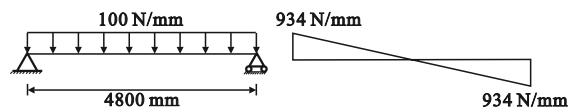


图 10 均布荷载组合梁及剪力流
Fig. 10 Homogeneous load combination beam and shear flow diagrams

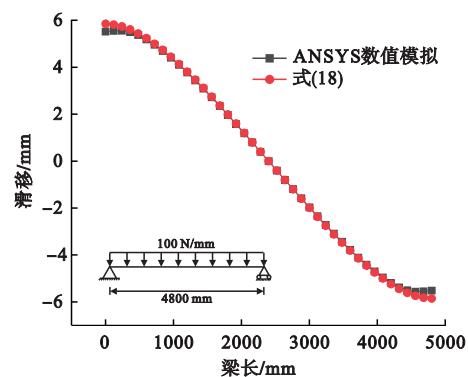


图 11 均布荷载滑移对比
Fig. 11 Comparison of uniform load slip

5 双排与单排组合梁界面滑移分析

5.1 双排与单排栓钉特征系数分析

双排滑移微分方程

$$\frac{d^2 S}{dx^2} - \lambda_i^2 \cdot S = \gamma \cdot V(x) \quad (19)$$

单排滑移微分方程

$$\frac{d^2 S}{dx^2} - \omega_i^2 \cdot S = \gamma \cdot V(x) \quad (20)$$

$$\text{式中 } \omega_i = \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI}, \lambda_i = 2 \cdot \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI}$$

从上述公式可以明显看出双排特征系数 λ_i 是单排 ω_i 的 2 倍。主要原因在于双排组合梁界面上的栓钉各自承担了界面上一半的剪力流,如图 4(a)所示。

即双排组合梁界面上的平衡方程为

$$\frac{1}{2} \cdot T \cdot e_i = K \cdot S \quad (21)$$

而单排组合梁界面上的平衡方程为

$$T \cdot e_i = K \cdot S \quad (22)$$

正因为不同的本构方程,才会产生不同的滑移特征系数,从而衍生出不同的滑移微分方程。类比于此,不难想象三排、四排以及 n 排界面滑移本构方程为

$$\frac{1}{n} \cdot T \cdot e_i = K \cdot S \quad (23)$$

这样就可得到 n 排的界面滑移本构方程

$$\frac{d^2 S}{dx^2} - \lambda_n^2 \cdot S = \gamma \cdot V(x) \quad (24)$$

$$\text{式中 } \lambda_n = n \cdot \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI}$$

6 双排与单排组合梁抗弯刚度分析

6.1 双排与单排组合梁抗弯刚度分析

对于胶合木-混凝土组合梁的有效刚度可以采用文献[3]的 γ 法,但 γ 方法的物理意义不明确,是否可以采用文献[4]中钢-混组合梁的有效刚度法呢?但以上两种方法都是针对单排组合梁而提出的有效刚度,那么双排组合梁的有效刚度该如何计算呢?

从前面的分析可以得到,单排与双排的主要区别是特征系数的不同,即

$$\lambda_i = 2 \cdot \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \quad (25)$$

$$\omega_i = \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \quad (26)$$

如果把双排的栓钉刚度进行折减,即 $K_{0.5} = \frac{1}{2} * K$ 。把

$K_{0.5}$ 代入式(25)就能得到

$$\lambda_i = \omega_i = \frac{K}{e_i} \cdot \frac{1+\beta}{\beta} \cdot \frac{d^2}{EI} \quad (27)$$

将双排栓钉的刚度折减后,双排栓钉的滑移等价于单排栓钉的滑移微分方程。即刚度折减后,双排组合梁可以等效为单排组合梁的界面滑移,但这仅在栓钉横向均匀的情况下成立。

鉴于双排栓钉刚度为 K 等价于单排栓钉刚度为 $2K$ 的滑移微分方程,则可按照文献[4]的方法和文献[3]的 γ 法来计算有效刚度。然而,在计算过程中需要考虑木材的正交各向异性性质,因此只考虑与受力方向一致的弹性模量,而栓钉刚度依旧按上文取值。根据文献计算出 EI_{eff} ,采用公式

(28)进行挠度计算。截面尺寸及截面参数如图 7 取值,均布荷载计算结果如下。

$$f(x) = \int \int \frac{M(x)}{EI_{eff}} dx^2 + C \cdot x + D \quad (28)$$

由图 12 可知,采用 γ 法和有效刚度法计算出的挠度一致,并与 ANSYS 模拟双排的跨中挠度误差不超过 6%,因此可以用双排组合梁等价成单排组合梁的方法,并按文献[4]的有效刚度法进行计算。这样就使得在计算胶合木-砼组合梁抗弯刚度时,能够获得明确的物理意义。

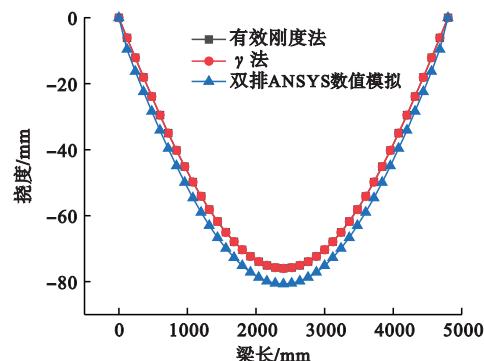


Fig. 12 Comparison of the deflection of the 3 methods

7 结 论

本文基于文献[10],通过改变组合梁的界面滑移本构关系,推导了双排组合梁界面的滑移微分方程,得到了不同的荷载形式和边界条件下的双排界面微分方程,并以此类比得出了 n 排界面的微分方程,并通过数值模拟,验证了公式的实用性。并且对特征系数 λ_i 和 ω_i 做了对比分析,得出了双排组合梁的刚度计算方法,并得出以下结论。

(1) 基于文献[4]有效刚度法,通过改变胶合木-混凝土组合梁上的界面滑移本构关系,得到了双排界面滑移微分方程,并以此类比出 n 排界面滑移微分方程,并确定木梁界面滑移应只与受力方向一致的弹性模量有关。

(2) 通过对双排特征系数 λ_i 和单排特征系数 ω_i 的分析,发现 λ_i 是 ω_i 的 2 倍,即双排栓钉刚度为 K 时,可以等价为单排栓钉刚度的 $2K$ 。借此可以利用 γ 法和钢-混组合梁的有效刚度法进行单排栓钉的刚度计算,其跨中误差为 5~6%,说明双排栓钉可以按照等价成单排栓钉的方法进行计算。

参 考 文 献 (References) :

- [1] 陆伟东,杨会峰,刘伟庆,等.胶合木结构的发展、应用及展望[J].南京工业大学学报(自然科学版),2011,33(5): 105-110. (LU Wei-dong, YANG Hui-feng, LIU Wei-qing, et al. Development, application and

- prospects of glulam structures [J]. *Journal of Nanjing Technology University (Natural Science Edition)*, 2011, **33**(5): 105-110. (in Chinese))
- [2] Yeoh D, Fragiocomo M, De Franceschi M, et al. State of the art on timber-concrete composite structures: Literature review. [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, **137**(10): 1085-1095
- [3] 江雨辰,胡夏闽.木-混凝土组合梁研究综述[J].建筑结构学报,2019, **40**(10): 149-157,167. (JIANG Yu-chen, HU Xia-min. Literature review of timber-concrete composite beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, **40**(10): 149-157,167. (in Chinese))
- [4] 周东华,孙丽莉,樊江,等.组合梁挠度计算的新方法—有效刚度法[J].西南交通大学学报,2011, **46**(4): 541-546. (ZHOU Dong-hua, SUN Li-li, FAN Jiang, et al. Effective stiffness method for calculation of deflection of composite beams [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, **46**(4): 541-546. (in Chinese))
- [5] 杨桂通.弹塑性力学引论[M].北京:清华大学出版社,2013. (YANG Gui-tong. Introduction to Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [6] 杨亚平.组合梁应力分析[J].青海大学学报(自然科学版),2003, **21**(6): 54-56, 67. (YANG Ya-ping. Stress analysis of combination beams[J]. *Journal of Qinghai University(Natural Science Edition)*, 2003, **21**(6): 54-56, 67. (in Chinese))
- [7] 陈伟.工程木-混凝土组合梁受力性能分析与试验研究[D].中南林业科技大学,2016. (CHEN Wei, Mechanical Behavior Analysis and Experimental Study on Mechanical Properties of Engineering Wood-Concrete Composite Beam[D]. Central South University of Forestry & Technology, 2016. (in Chinese))
- [8] Lukaszewska E, Johnsson H, Fragiocomo M. Performance of connections for prefabricated timber-concrete composite floors[J]. *Materials and Structures*, 2008, **41**(9): 1533-1550.
- [9] 杨海旭,董彦博,张茂花,等.胶合木-混凝土组合楼板受弯性能有限元分析[J].林产工业,2022, **59**(8): 34-39, 57(YANG Hai-xu, DONG Yan-bo, ZHANG Mao-hua, et al. Finite element analysis on the flexural behavior of glulam-concrete composite floor slabs[J]. *China Forest Products Industry*, 2022, **59**(8): 34-39, 57. (in Chinese))
- [10] 周东华,孙丽莉,樊江,等.弹性剪切连接组合梁的应力计算方法[J].工程力学,2011, **28**(3): 157-162. (ZHOU Dong-hua, SUN Li-li, FAN Jiang, et al. A method for calculation of stress of composite beams with elastic shear connections[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, **28**(3): 157-162. (in Chinese))
- [11] Ling Z B, Zhang H N, Mu Q M, et al. Shear performance of assembled shear connectors for timber-concrete composite beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, **329**: 127158
- [12] Dias A M P G, Jorge L F C. The effect of ductile connectors on the behaviour of timber-concrete composite beams[J]. *Engineering Structures*, 2011, **33**(11): 3033-3042.
- [13] 童根树.钢-混凝土组合梁的刚度[J].钢结构,2022, **37**(10): 50-52. (TONG Gen-shu. Rigidity of steel-concrete composite beams[J]. *Steel Construction*, 2022, **37**(10): 50-52. (in Chinese))

Mechanical performance analysis of double-row bolted wood-concrete combination beams

LIU Yi-fan¹, WANG Peng^{*1}, WANG Yong-hui², SHI Shi-lun¹, LI Luo-ke¹, PENG Jun-yuan¹
 (1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
 2. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study the relationship between the interfacial slip of double-row stud-combined beams and single-row stud-combined beams, based on the single-row stud-glued wood-concrete theory, the interfacial slip differential equations of double-row as well as multi-row stud-combined beams were established by changing the peg slip constitutive relationship on the interface of single-row stud-combined beams, the analytical solutions of double-row stud-combined beams under the action of the three kinds of loads commonly found in the engineering were solved, the interfacial slip differential equations of triple-row as well as multi-row stud-combined beams were analysed, and the computation method of the bending stiffness of the double-row stud-combined beams was put forward. Conclusion: Although wood is an orthotropic anisotropic material, it is known from the strain relationship and Hooke's law for interfacial slip in combined beams that the slip at the interface should be related to the modulus of elasticity in the same direction as the force. The main difference between single-row and double-row stud differential equations is that the double-row stud characteristic coefficients are twice as large as the single-row characteristic coefficients. That is, when the double-row peg stiffness K is equivalent to a single-row peg $2K$, the bending stiffness that can be equivalent to a single-row peg stiffness is calculated. The errors of the theoretical formulations of slip and flexural stiffness calculations of double-row stud-combination beams with Ansys numerical simulations, respectively, are around 5-6%, which proves the reliability and practicability of the present method for analysing the interfacial slip and flexural stiffness of double-row stud-combination beams.

Key words: double-row stud-glued laminated timber-concrete combination beams; interface slip; bending stiffness; ansys finite element analysis