

考虑脱空及环向摩擦的钢抱箍力学分析与计算

孙立军, 张晨*, 康招旭

(中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为研究抱箍环向摩擦与局部脱空对抱箍受力性能的影响, 假定被箍墩柱为刚体、半圆箍身为固支梁, 采用力学理论开展受力分析并推导解析计算公式。以抱箍与墩身接触面的环向、竖向摩擦力系数的矢量和不超过接触面最大静摩擦力系数作为约束条件, 对抱箍上部承载力与箍身截面弯矩公式进行拟合, 得到抱箍的极限抗滑力、箍身极限弯矩随抱箍脱空角度变化的计算公式。结果表明: 抱箍的极限抗滑力随脱空角度增大而增大; 箍身最大弯矩出现在半圆箍端部, 任意上部荷载对应的箍身极限弯矩值随脱空角度的增大而减小; 同时箍身极限弯矩值随环向摩擦力系数的增大而减小。采用有限元及数值模拟与足尺试验对解析公式进行验证, 证明该解析公式具备工程适用性, 可为实际工程提供设计依据。

关键词: 钢抱箍; 公式推导; 环向摩擦; 局部脱空; 极限抗滑力计算; 箍身极限弯矩计算

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0054-11

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20250219002

Mechanical Analysis and Calculation of Steel Hoops Considering Separation and Circumferential Friction

SUN Lijun, ZHANG Chen*, KANG Zhaoxu

(The Fourth Engineering Co., Ltd. of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhu 241000, China)

*Corresponding author: 2662527196@qq.com

Abstract: In order to study the influence of circumferential friction and local separation on the mechanical behavior of a hoop, it was assumed that the hooped pier column was a rigid body and the semi-circular hoop body was a fixed-end beam. A mechanical analysis was conducted based on mathematical principles, and analytical formulas were derived. Based on the condition that the magnitude of the vector sum of the circumferential and vertical friction coefficients between the hoop and pier did not exceed the maximum static friction coefficient of the contact surfaces, formulas for the upper bearing capacity of the hoop and the bending moment of the hoop body section were fitted. The calculation formulas for the ultimate sliding resistance of the hoop and the ultimate bending moment of the hoop body as functions of the separation angle of the hoop were then obtained. The results show that the ultimate sliding resistance of the hoop increases with the increase of the separation angle. The maximum bending moment of the hoop body occurs at the end of the semi-circular hoop, and the ultimate bending moment corresponding to any upper load decreases with the increase of the separation angle. The ultimate bending moment also decreases with the increase of the circumferential friction coefficient. The analytical formulas were subsequently verified using finite element analysis and full-scale tests, confirming their engineering applicability and their ability to guide practical engineering applications.

Keywords: steel hoop; formula derivation; circumferential friction; local separation; ultimate sliding resistance; calculation of ultimate bending moment of hoop body

收稿日期: 2025-02-19

作者简介:

孙立军(1973—), 男, 学士, 正高级工程师, 主要从事桥梁工程方面的研究。E-mail: 55071666@qq.com。

通信作者:

张晨(1996—), 女, 学士, 助理工程师, 主要从事桥梁工程方面的研究。E-mail: 2662527196@qq.com。

钢抱箍通常安装于圆形墩(柱)顶部,依靠高强螺栓预紧力使钢抱箍与墩(柱)紧密贴合,在抱箍与被箍构件的接触界面产生环向压应力,进一步借助界面摩擦力传递并承受外荷载^[1]。抱箍具有构造简单、装拆便捷等优点,已在桥梁、建筑等领域得到广泛应用^[2-4]。

钢抱箍除大量用作临时支撑体系外,近年来也逐步应用于永久结构加固工程。但箍身与墩柱之间属于非线性接触边界,同时受螺栓预紧、加载偏心、温度变化等多重因素耦合作用,受力机理复杂,值得进一步深入研究。董中亚等^[5]假设箍身对墩柱的径向压力以及摩擦力沿环向均匀分布,考虑竖向荷载产生的弯矩效应,推导得到抱箍竖向承载力计算公式,该公式已在工程中被普遍采用。党育等^[6]通过有限元仿真与缩尺试验验证了该公式的合理性,并从安全角度对抱箍实际工程的设计与施工给出控制建议。古松等^[7]开展缩尺模型试验研究发现,钢抱箍与墩(柱)之间会产生局部脱空现象,箍身环向应力呈现“两端高、中部低”的分布特征。顾颖等^[8]考虑脱空效应开展钢抱箍受力分析,给出钢抱箍脱空角度、位移与抱箍几何尺寸的对应关系表。上述研究深化了对抱箍受力机理的认识,但推导得到的承载力公式在工程应用中仍存在一定局限性。

现有工程计算方法大多只考虑抱箍整体滑移失效模式,假定在螺栓预紧、竖向加载等工况下,箍身作用于墩柱的径向压力沿环向均匀分布^[5]。而工程现场实际施工中,抱箍与墩身之间常出现局部脱空(图1);螺栓预紧过程中,箍身与墩柱接触面产生的环向摩擦力还会改变原有受力分布状态。理论假定和工程实际存在偏差,造成抱箍整体抗滑移承载力的计算精度不足。

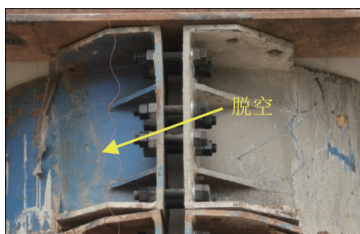


图1 钢抱箍局部脱空现象

Fig. 1 The local separation phenomenon of steel hoop

综上,钢抱箍应用场景广泛,但现有计算理论尚不完备,加之现场施工质量管控不规范,由抱箍失效引发的安全质量事故时有发生(图2),造成人员伤亡与财产损失。因此有必要对抱箍失效机理开展深入研究。

为此,本文提出:在脱空效应与环向摩擦共同作用下,钢抱箍箍身与墩柱接触面的径向压力沿环向呈非均匀分布。为聚焦脱空效应、环向摩擦的影响规律,分析过程假定环境温度恒定,暂不考虑温度对抱箍承载力的影响。系统分析抱箍螺栓预紧阶段与承载阶段的受力特



图2 钢抱箍滑移破坏现象

Fig. 2 The slip damage phenomenon of steel hoop

征,基于基础力学原理揭示抱箍失效机理,推导钢抱箍受了解析公式。此外,为验证公式的可靠性,该研究还构建了有限元模型,并开展了足尺试验研究,通过对比理论计算结果与有限元及试验结果,验证公式的适用性。研究成果可为工程中钢抱箍的设计与验算提供参考。

1 钢抱箍受力机理

1.1 工作原理

本文以端部法兰板-水平环板组合传力形式的钢抱箍为研究对象,结构形式如图3所示。钢抱箍由两块半圆形无肋钢板拼装而成;半圆箍连接处设置端部法兰板,竖向布置水平环板作为传力构件,共同形成牛腿结构承担上部荷载。

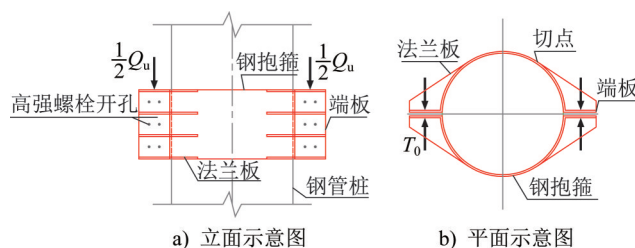


图3 钢抱箍结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of steel hoop structure

对半圆箍连接处高强螺栓施加预紧力 T_0 ,抱箍对接缝隙逐步闭合;该过程中箍身与墩(柱)接触面产生环向摩擦力,造成箍身截面拉力沿环向非均匀分布,进一步引起接触面径向压力的环向非均匀性。此外,由于 T_0 作用点相对箍身端部存在偏心距,会产生附加力矩,促使抱箍与墩柱表面出现局部脱空^[8]。

当外荷载 Q_0 作用于抱箍牛腿时,抱箍与墩(柱)接触面径向压力所产生的竖向摩阻力 F 与外荷载 Q_0 相互平衡,以此维持抱箍支撑体系稳定。

1.2 钢抱箍抗滑承载力计算

假设半圆箍身的单侧脱空角度为 α ,箍身端部与被箍墩(柱)保持接触并在端部产生环向摩擦,抱箍脱空段受力如图4所示。

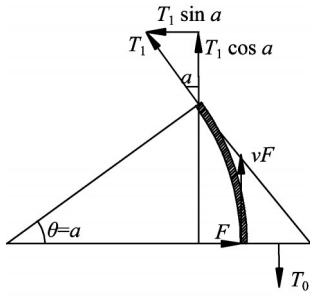


图4 钢抱箍环向脱空段受力分析图

Fig. 4 Force analysis diagram of circumferential separation section of steel hoop

由 $\sum X=0, \sum Y=0$ 可得:

$$\begin{cases} T_1 \sin a = F \\ T_1 \cos a + vF = T_0 \end{cases} \quad (1)$$

整理上式可得:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{1}{v \sin a + \cos a} T_0 \\ F = \frac{\sin a}{v \sin a + \cos a} T_0 \end{cases} \quad (2)$$

令 $k_1 = \frac{1}{v \sin a + \cos a}, k_2 = \frac{\sin a}{v \sin a + \cos a}$, 整理式(2)可得:

$$\begin{cases} T_1 = k_1 T_0 \\ F = k_2 T_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_1 为箍身脱空段与非脱空段交界处截面拉力; F 为墩柱抱箍箍身端部径向集中力; v 为箍身与墩柱接触面的环向静摩擦力系数。

取未脱空段抱箍环向微元体进行受力分析(图5)。

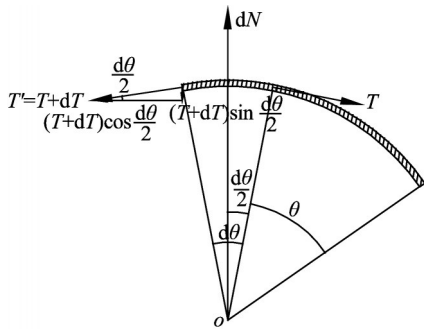


图5 钢抱箍环向微元受力分析图

Fig. 5 Force analysis diagram of circumferential micro-element of steel hoop

由环向与径向力平衡条件可得:

$$\begin{cases} T \cos \frac{d\theta}{2} - (T + dT) \cos \frac{d\theta}{2} - v dN = 0 \\ T \sin \frac{d\theta}{2} + (T + dT) \sin \frac{d\theta}{2} - dN = 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据高等数学知识有: $\lim_{\frac{d\theta}{2} \rightarrow 0} \cos \frac{d\theta}{2} = 1, \lim_{\frac{d\theta}{2} \rightarrow 0} \sin \frac{d\theta}{2} = \frac{d\theta}{2}$

$\frac{d\theta}{2}$, 代入式(4)并忽略式中高阶无穷小后可得:

$$v dN = dT \quad (5)$$

$$dN = T d\theta \quad (6)$$

式中: T 为墩柱抱箍箍身截面拉力; N 为墩柱抱箍箍身径向压力; θ 为抱箍圆弧上任意一点相对于法兰板处的角度。

联立式(5)、(6)可得, 并代入式(3)可得:

$$-v d\theta = \frac{1}{T} dT \Rightarrow \int_a^\theta v d\theta = \int_T^{T_1} \frac{1}{T} dT$$

$$T = T_1 e^{-v(\theta-a)} = \begin{cases} k_1 e^{-v(\theta-a)} T_0 & \theta \in \left[a, \frac{\pi}{2} \right] \\ k_1 e^{-v(\pi-a-\theta)} T_0 & \theta \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi-a \right] \end{cases} \quad (7)$$

由竖向力平衡条件可知:

$$\mu F + \int_a^{\frac{\pi}{2}} \mu dN = \frac{Q}{4} \quad (8)$$

联立式(3)、(6)、(7)可得:

$$\frac{Q}{4} = \frac{\mu T_0}{v(v \sin a + \cos a)} \left[1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}-a\right)v} + v \sin a \right] \quad (9)$$

$$\text{令 } k_3 = \frac{\mu}{v(v \sin a + \cos a)}, k_4 = e^{-\left(\frac{\pi}{2}-a\right)v}, k_5 = v \sin a$$

并整理式(9)可得:

$$\frac{Q}{4} = k_3(1 - k_4 + k_5) T_0 \quad (10)$$

式中: Q 为预紧力 T_0 对应抱箍能承受的上部荷载总和其极限值; T_0 为法兰板处高强螺栓预紧力值; μ 为箍身与墩柱接触面竖向静摩擦力系数。

1.3 钢抱箍箍身极限弯矩计算

将半圆箍身简化为两端固支梁, 基于梁端挠度、转角均为零的边界条件; 假设两侧牛腿对称加载 $\left(\frac{Q_u}{4}\right)$ 工况下, 此时梁跨中转角与剪力同样为零。基于以上条件, 推导钢抱箍箍身极限弯矩计算公式。

由 $p = \frac{dN}{RH d\theta}$, 联立式(6)、(7)可得:

$$p = \begin{cases} 0 & \theta \in [0, a] \cup [\pi-a, \pi] \\ \frac{k_1 T_0 e^{-v(\theta-a)}}{RH} & \theta \in \left[a, \frac{\pi}{2} \right] \\ \frac{k_1 T_0 e^{-v(\pi-a-\theta)}}{RH} & \theta \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi-a \right] \end{cases} \quad (11)$$

式中: p 为抱箍箍身板对墩柱的径向压强; R 为抱箍箍身半径; H 为抱箍箍身高度。

由式(11)可知,箍身对墩柱的径向压强由脱空段端部向箍身中点环向逐步衰减,箍身竖向受力如图6所示。

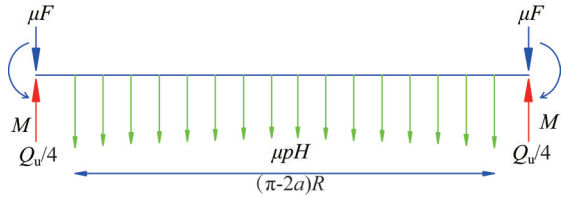


图6 等效箍身竖向受力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of vertical force on equivalent hoop body

距离箍身左端点 x 处截面剪力为:

$$V_x = \frac{Q_u}{4} - \mu F - \mu \int p dx H \quad (12)$$

式中: V_x 为距箍身左端点距离 x 的截面剪力。

联立式(3)、(11)可得:

当 $\theta \in [0, a]$ 时:

$$V_x = \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \quad (13)$$

当 $\theta \in \left[a, \frac{\pi}{2}\right]$ 时:

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 - \mu \int k_2 T_0 e^{-v(\theta-a)} d\theta \\ &= \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 + k_3 T_0 e^{-v(\theta-a)} + C_1 \end{aligned} \quad (14)$$

将 $V_a = \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0$ 代入式(14)得到 $C_1 = -k_3 T_0$,

整理得:

$$V_x = \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 + k_3 T_0 (e^{-v(\theta-a)} - 1) \quad \theta \in \left[a, \frac{\pi}{2}\right] \quad (15)$$

距离箍身左端点 x 位置的截面弯矩:

$$M_x = \int V_x dx \quad x \in \left[0, \frac{\pi R}{2}\right] \quad (16)$$

式中: M_x 为距离箍身左端点 x 位置的截面弯矩。

当 $\theta \in [0, a]$ 时,联立式(14)可得:

$$\begin{aligned} M_x &= \int \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 d(R\theta) \\ &= \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) R\theta + C_2 \end{aligned} \quad (17)$$

当 $\theta \in \left[a, \frac{\pi}{2}\right]$ 时,联立式(9)、(15)可得:

$$\begin{aligned} M_x &= \int \frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 + k_3 T_0 (e^{-v(\theta-a)} - 1) d(R\theta) \\ &= \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) R\theta + \\ &\quad k_3 T_0 R \left(-\frac{e^{-v(\theta-a)}}{v} - \theta \right) + C_3 \end{aligned} \quad (18)$$

将 $\theta = 0$ 代入式(17)可得:

$$M_0 = C_2 \quad (19)$$

将 $\theta = a$ 代入式(18)可得:

$$M_x = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) aR + k_3 T_0 R \left(-\frac{1}{v} - a \right) + C_3 \quad (20)$$

根据高等数学可得:

$$M_{aR} - M_0 = \int_0^{aR} V_x dx = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) aR \quad (21)$$

式中: M_{aR} 为距箍身端部 aR 处的截面弯矩。

将式(19)、(20)代入式(21)可得:

$$C_3 = k_3 T_0 R \left(\frac{1}{v} + a \right) + C_2 \quad (22)$$

将式(22)代入式(20)得:

$$\begin{aligned} M_x &= \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) R\theta + k_3 T_0 R \left(-\frac{e^{-v(\theta-a)}}{v} - \right. \\ &\quad \left. \theta + \frac{1}{v} + a \right) + C_2 \quad \theta \in \left[a, \frac{\pi}{2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

根据材料力学理论,代入式(17)、(23)得到转角和挠度计算公式如下:

当 $\theta \in [0, a]$ 时:

$$y' = \int M_x dx = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) \frac{R^2 \theta^2}{2} + C_2 R\theta + C_4 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} y &= \int y' dx = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) \frac{R^3 \theta^3}{6} + C_2 \frac{R^2 \theta^2}{2} + \\ &\quad C_4 R\theta + C_5 \end{aligned} \quad (25)$$

式中: y' 为距离箍身左端点 x 位置的截面转角; y 为距离箍身左端点 x 位置的截面挠度;

将固定支座位移边界条件 $y'_0 = 0, y_0 = 0$ 代入式(24)、(25)可得: $C_4 = 0, C_5 = 0$ 。将 $\theta = a$ 代入式(24),可得:

$$y'_{\text{left}-aR} = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) \frac{R^2 a^2}{2} + C_2 aR \quad (26)$$

式中: $y'_{\text{left}-aR}$ 为距箍身端部 aR 处的截面左段推导的截面转角。

当 $\theta \in \left[a, \frac{\pi}{2}\right]$ 时:

$$\begin{aligned} y' &= \int M_x dx = \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) \frac{R^2 \theta^2}{2} + \\ &\quad k_3 T_0 R^2 \left(\frac{e^{-v(\theta-a)}}{v^2} - \frac{\theta^2}{2} + \frac{\theta}{v} + a\theta \right) + \\ &\quad C_2 R\theta + C_6 \end{aligned} \quad (27)$$

将 $\theta = a$ 代入式(27),可得:

$$\begin{aligned} y'_{\text{right}-aR} &= \left(\frac{Q_u}{4} - k_2 \mu T_0 \right) \frac{R^2 a^2}{2} + \\ &\quad k_3 T_0 R^2 \left(\frac{1}{v^2} + \frac{a^2}{2} + \frac{a}{v} \right) + C_2 aR + C_6 \end{aligned} \quad (28)$$

式中: $y'_{\text{right}-aR}$ 为距箍身端部 aR 处的截面右段推导的截面转角。

因为 $y'_{\text{left}-aR} = y'_{\text{right}-aR}$, 联立式(26)、(28)可得:

$$C_6 = -k_3 T_0 R^2 \left(\frac{1}{v^2} + \frac{a^2}{2} + \frac{a}{v} \right) \quad (29)$$

因箍身跨中转角 $y'_{\frac{\pi R}{2}}$ 、剪力 $V_{\frac{\pi R}{2}}$ 为 0, 即 $y'_{\frac{\pi R}{2}} = 0$,

$V_{\frac{\pi R}{2}} = 0$, 整理式(27)、(29), 可得:

$$C_2 = \frac{Q_u R \left[8(1-k_4) + \pi^2 v^2 k_4 - 4a(\pi-a)v^2 - 4(\pi-2a)v \right]}{16\pi v^2 (1-k_4+k_5)} \quad (30)$$

将式(30)代入式(17)、(23)开展推导, 可知箍身最大弯矩出现在端点处。因此, 箍身极限弯矩表达式为:

$$M_0 = \frac{Q_u R \left[8(1-k_4) + \pi^2 v^2 k_4 - 4a(\pi-a)v^2 - 4(\pi-2a)v \right]}{16\pi v^2 (1-k_4+k_5)} \quad (31)$$

由结构受力对称性, 当 $x = \pi R$ 时, $M_{\pi R} = M_0$ 。

2 抗滑承载力及弯矩公式拟合

开展公式拟合目的是简化计算公式, 为钢抱箍在实际工程中的设计应用提供参考。结合工程经验, 半圆抱箍单侧脱空角度达到 $\frac{\pi}{3}$ 时, 整个抱箍的脱空弧长将达到 $\frac{4\pi}{3} R$ (R 为墩柱半径)。根据现场调研, 脱空角度选取 $\left[0, \frac{\pi}{3}\right]$ 时, 可满足工程普适性要求。

竖向静摩擦系数与环向静摩擦系数矢量和不应大于箍身与墩柱接触面最大静摩擦系数。钢-混凝土界面摩擦系数受表面粗糙度、法向应力、环境湿度等多因素影响, 其数值具有显著不确定性。现行规范^[10]推荐取值为 0.4, 实际工程设计常用取值区间为 0.2~0.4。刘将辉^[11]开展法向应力作用下钢-混凝土界面摩擦性能试验研究, 结果表明: 钢-混凝土界面摩擦系数范围为 0.4~1.2, 当法向应力不大于 2 MPa 时, 摩擦系数随法向应力增大而降低; 当法向应力大于 2 MPa 时, 摩擦系数波动趋于平缓, 稳定在 0.4~0.8 区间。

综合工程实际经验与已有研究成果, 本文钢-混凝土界面摩擦系数取值区间为 0.2~0.8。后续理论推导与公式化简分析中, 以 0.3 为例开展推导, 再扩展至全参数区间构建参数对照表。

2.1 抗滑承载力计算公式拟合

取钢-混凝土界面最大静摩擦系数 0.3, 有 $\sqrt{\mu^2 + v^2} \leq 0.3$, 竖向与环向静摩擦系数定义域如图 7 所示。

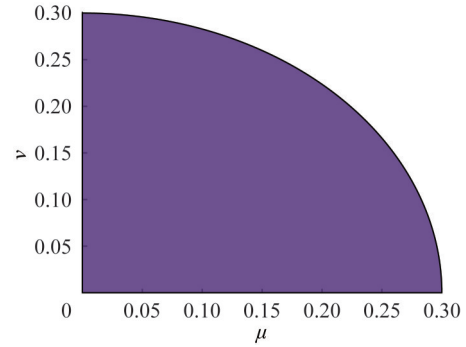


图7 双向摩擦系数分布图

Fig. 7 Distribution diagram of bi-directional friction coefficient

对于螺栓数量及布置形式确定的抱箍, 箍身拉力 T_0 为定值, 式(10)可表达为三元函数:

$$Q_u = f(\mu, v, a) = \frac{4\mu T_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}-a\right)v} + v \sin a \right)}{v(v \sin a + \cos a)} \quad (32)$$

将 a 的定义域 $\left[0, \frac{\pi}{3}\right]$ 做 99 等分, 共得到 100 个 a 值, 借助 MATLAB 遍历计算, 得到当 a 固定时, 在不同 μ, v 组合下, Q_u 的最大值 $Q_{u\max}$, 绘制对应关系曲线见图 8。

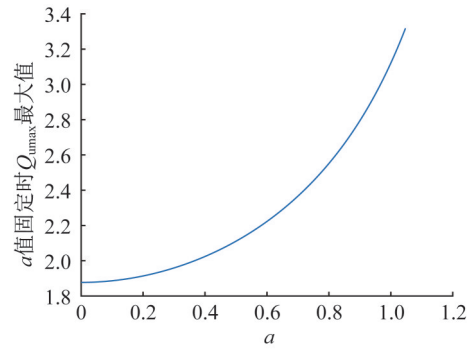


图8 $Q_{u\max}$ 与 a 的关系

Fig. 8 The relationship between $Q_{u\max}$ and a

由图 8 可知, $Q_{u\max}$ 随着 a 的增大而增大。对曲线进行拟合得到:

$$Q_{u\max}(a) = Q_{u\max}(0) h(a) \quad (33)$$

其中, 利用软件拟合 $h(a)$ 得到:

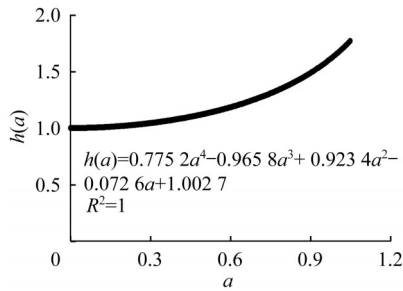
$$h(a) = 0.7552a^4 - 0.9658a^3 + 0.9234a^2 - 0.0726a + 1.0027 \quad (34)$$

式中: $h(a)$ 为脱空角度为 a 时箍身极限抗滑力与脱空角度为 0 时箍身极限抗滑力的拟合关系式。

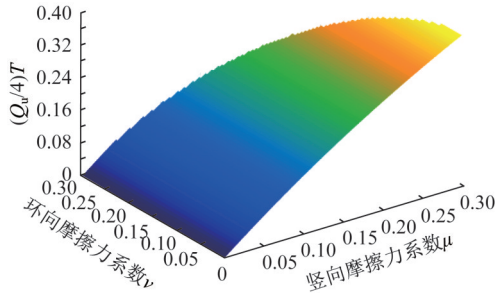
绘制 $h(a)$ 图像如图 9 所示, 当 $0 \leq a \leq \frac{\pi}{3}$ 时, $1 \leq h(a) \leq 1.76$ 。

当 $a = 0$ 时, 此时式(32)可简化为一个二元函数:

$$Q_{u(0)} = f(\mu, v) = \frac{4\mu T_0}{v} \left[1 - e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)v} \right] \quad (35)$$

图9 $h(a)$ 分布图Fig. 9 Distribution diagram of $h(a)$

利用 MATLAB 绘制在 (μ, v) 定义域内 $Q_{u(0)} = f(\mu, v)$ 函数曲面图像, 如图 10 所示。

图10 $Q_{u(0)}$ 的函数曲面图像Fig. 10 Function surface graph of $Q_{u(0)}$

由图 10 可知, $Q_{u(0)}$ 在 $(\mu_{\max}, 0)$ 内取得最大值:

$$Q_{u\max(0)} = \lim_{(\mu, v) \rightarrow (\mu_{\max}, 0)} f(\mu, v) = 2\pi\mu_{\max}T_0 \quad (36)$$

因此, 当 $\sqrt{\mu^2 + v^2} \leq 0.3$ 时抱箍极限抗滑力计算公式为:

$$Q_{u\max}(a) = 2\pi\mu_{\max}T_0h(a) \quad (37)$$

依据上述方法, 对 $\sqrt{\mu^2 + v^2} \in [0.2, 0.8]$ 范围内的抗滑力计算公式进行拟合, 得到拟合表达式为:

$$Q_{u\max}(a) = 2\pi\mu_{\max}T_0h'(a) \quad (38)$$

$$h'(a) = s_1a^4 + s_2a^3 + s_3a^2 + s_4a + s_5 \quad (39)$$

式中: s_1, s_2, s_3, s_4 及 s_5 为函数 $h'(a)$ 的系数。

钢-混凝土界面摩擦系数与函数 $h'(a)$ 系数对照值见表 1。

2.2 极限箍身弯矩计算公式拟合

前文推导表明箍身最大弯矩出现在连接板处:

$$M_0(a) = \frac{Q_u R}{4} \cdot \frac{[8(1-k_4) + \pi^2 v^2 k_4 - 4a(\pi-a)v^2 - 4(\pi-2a)v]}{4\pi v^2(1-k_4+k_5)} \quad (40)$$

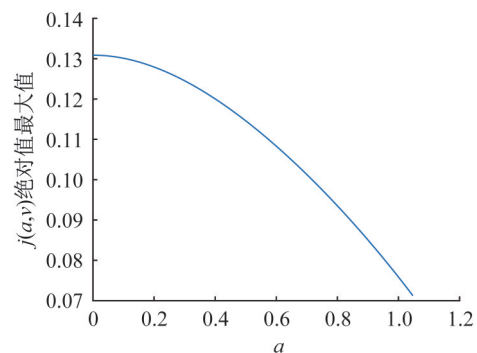
表1 摩擦系数与 $h'(a)$ 系数对应取值Table 1 Coefficient of friction corresponding to $h'(a)$ coefficient value

摩擦系数	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5
0.20	0.776 6	-0.967 7	0.924 5	-0.072 7	
0.25	0.775 9	-0.966 8	0.924 0	-0.072 6	
0.30	0.775 2	-0.965 8	0.923 4	-0.072 6	
0.35	0.774 5	-0.964 9	0.922 9	-0.072 5	
0.40	0.773 7	-0.964 0	0.922 3	-0.072 4	
0.45	0.773 0	-0.963 1	0.921 8	-0.072 3	
0.50	0.772 3	-0.962 1	0.921 3	-0.072 2	1.002 7
0.55	0.771 6	-0.961 2	0.920 7	-0.072 1	
0.60	0.770 9	-0.960 3	0.920 2	-0.072 1	
0.65	0.770 2	-0.959 4	0.919 6	-0.072 0	
0.70	0.769 5	-0.958 4	0.919 1	-0.071 9	
0.75	0.768 8	-0.957 5	0.918 6	-0.071 8	
0.80	0.768 1	-0.956 6	0.918 0	-0.071 7	

令:

$$j(a, v) = \frac{[8(1-k_4) + \pi^2 v^2 k_4 - 4a(\pi-a)v^2 - 4(\pi-2a)v]}{4\pi v^2(1-k_4+k_5)} \quad (41)$$

将 a 的定义域 $\left[0, \frac{\pi}{3}\right]$ 99 等分得到 100 个 a 值, 通过 MATLAB 遍历求解, 得到在固定 a 值下 $|j(a, v)|$ 的最大值 $|j(a, v)|_{\max}$ 绘制关系曲线见图 11。

图11 $|j(a, v)|_{\max}$ 与 a 的关系Fig. 11 The relationship between $|j(a, v)|_{\max}$ and a

由图 11 可知, $|j(a, v)|_{\max}$ 随 a 的增大逐步减小, 将图像拟合得到:

$$|j(a, v)|_{\max} = |j(0, v)|_{\max} k(a) \quad (42)$$

其中:

$$k(a) = 0.1034a^3 - 0.4969a^2 - 0.028a + 1.0015 \quad (43)$$

利用软件绘制 $k(a)$ 分布如图 12 所示, 当 $0 \leq a \leq \frac{\pi}{3}$ 时, $0.544 \leq k(a) \leq 1$ 。

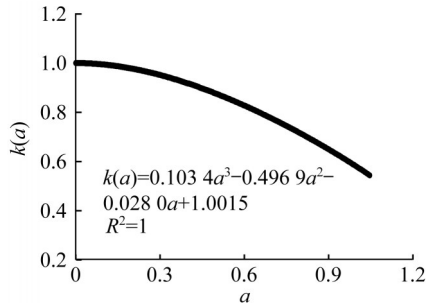


图 12 $k(a)$ 分布图

Fig. 12 Distribution diagram of $k(a)$

当 $a = 0$ 时:

$$g(v) = j(0, v) = \frac{[8(1 - k_4) + \pi^2 v^2 k_4 - 4\pi v]}{16\pi v^2 (1 - k_4)} \quad (44)$$

利用软件绘制 $g(v)$ 分布图如图 13 所示。

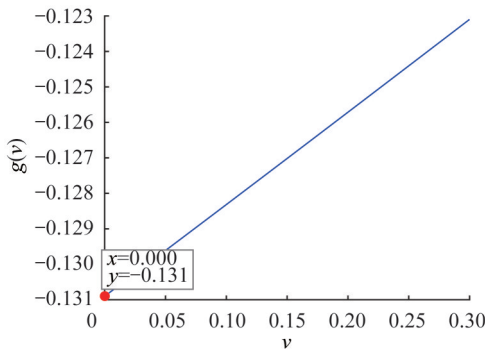


图 13 $g(v)$ 分布图

Fig. 13 Distribution diagram of $g(v)$

拟合得到:

$$g(v) = 0.026v - 0.1309 \quad v \in (0, 0.3] \quad (45)$$

当 $0 < v \leq 0.3$ 时, $-0.1309 \leq g(v) \leq -0.1231$, $g(v)$ 最大值与最小值相差比例(((最大值-最小值)/最大值)×100%)为 5.9%。

根据文献[8], 确定构造的抱箍脱空角度 a 为定值, 螺栓预紧力 T_0 可视为常量。由式(32)可知, 实际工程中抱箍承受的上部荷载 Q_u 可对应多组 (μ, v) 值。考虑到 $j(0, v)$ 最大值与最小值相差比例(((最大值-最小值)/最大值)×100%)为 5.9%, 无论 Q_u 对应的 (μ, v) 取值如何, 从工程偏安全角度, 可直接取 $j(0, v) = -0.13$ 计算连接板位置的箍身弯矩 M_0 。因此, 当 $\sqrt{\mu^2 + v^2} \leq 0.3$ 时, 任意上部荷载 Q_u 所对应的箍身极限弯矩计算公式可简化为:

$$M_{0\max}(a) = -0.13Q_u Rk(a) \quad (46)$$

依据上述方法, 对 $\sqrt{\mu^2 + v^2} \in [0.2, 0.8]$ 范围内的箍身弯矩计算公式进行拟合, 得到拟合后公式为:

$$M_{0\max}(a) = g'(v)Q_u Rk'(a) \quad (47)$$

$$k'(a) = t_1 a^3 + t_2 a^2 + t_3 a + t_4 \quad (48)$$

式中: t_1, t_2, t_3 及 t_4 为函数 $k'(a)$ 的系数。

钢-混凝土界面摩擦系数与函数 $k'(a)$ 系数对照值见表 2。

表 2 摩擦系数与 $k'(a)$ 系数对应取值

Table 2 Coefficient of friction corresponding to $k'(a)$ coefficient value

摩擦系数	t_1	t_2	t_3	t_4
0.20		-0.496 9	-0.028 0	
0.25		-0.496 9	-0.028 0	
0.30		-0.496 9	-0.028 0	
0.35		-0.496 9	-0.028 0	
0.40		-0.496 9	-0.028 0	
0.45		-0.496 9	-0.028 0	
0.50	0.103 4	-0.496 9	-0.028 1	1.001 5
0.55		-0.496 9	-0.028 1	
0.60		-0.496 9	-0.028 1	
0.65		-0.496 8	-0.028 1	
0.70		-0.496 8	-0.028 1	
0.75		-0.496 8	-0.028 1	
0.80		-0.496 8	-0.028 1	

当 $0.3 < v \leq 0.55$ 时, $-0.1231 \leq g'(v) \leq -0.1165$, $g'(v)$ 最大值与最小值相差比例(((最大值-最小值)/最大值)×100%)为 5.3%; 当 $0.55 < v \leq 0.8$ 时, $-0.1165 \leq g'(v) \leq -0.1100$, $g'(v)$ 最大值与最小值相差比例(((最大值-最小值)/最大值)×100%)为 5.6%。

综上所述, 当 $0.3 < v \leq 0.55$ 时, 任意上部荷载 Q_u 对应的箍身弯矩计算公式可拟合为:

$$M_{0\max}(a) = -0.123Q_u Rk'(a) \quad (49)$$

当 $0.55 < v \leq 0.8$ 时, 任意上部荷载 Q_u 对应的箍身弯矩计算公式可拟合为:

$$M_{0\max}(a) = -0.117Q_u Rk'(a) \quad (50)$$

3 试验及有限元验证

3.1 试验验证

3.1.1 试验概述

为确定足尺抱箍试验中钢-混凝土界面的摩擦系数, 开展法向应力作用下的界面摩擦性能试验。试验试件包

含 Q355B 钢制滑移钢板(尺寸为 $170\text{ mm} \times 154\text{ mm} \times 20\text{ mm}$)、C50 混凝土试块(尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$)、定制钢制夹具与 10.9s 级 M20 高强螺栓(图 14)。在螺栓杆中部对称粘贴应变片,采用东华 DH3819N 静态应力应变测试分析系统实时采集应变,并换算得到螺栓预紧力,即为滑移钢板承受的法向压力。

试验设计 5 组工况,通过扭矩扳手对螺栓施加 5 种预紧扭矩,分别为 $550\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $700\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $850\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $1\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $1\,150\text{ N}\cdot\text{m}$ 。采用电液伺服万能试验机施加竖向加载,加载采用力控制模式,加载速率为 $9\text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$,分级施加竖向荷载,同步记录加载力与滑移位移。

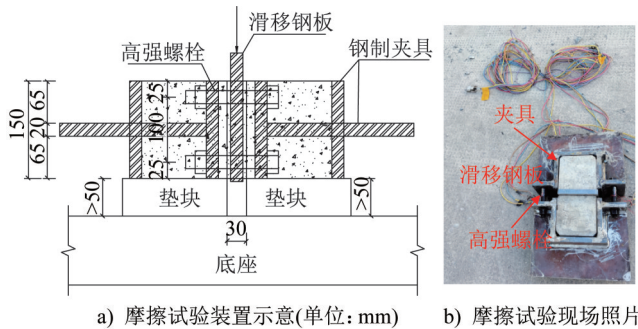


图 14 摩擦试验装置

Fig. 14 Friction test setup

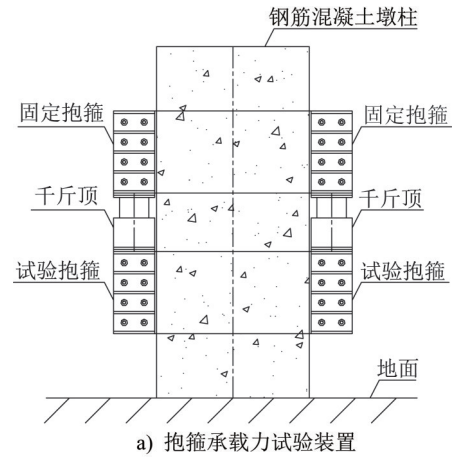
钢抱箍承载力足尺试验采用与摩擦系数试验同批次的 C50 混凝土与 Q355B 钢材。现场浇筑 3 根直径为 1.3 m 的 C50 钢筋混凝土墩柱;制备 6 套规格统一的抱箍(3 套为固定抱箍,3 套为试验抱箍),抱箍高度为 700 mm,箍身厚度为 16 mm,装配 10.9 s 级 M16 高强螺栓。

抱箍承载力试验装置如图 15 所示,在混凝土墩柱上安装上下双层钢抱箍;上层抱箍作为反力架,螺栓预紧力施加至规范^[12]规定最大预紧力的 90%;下层抱箍作为试验抱箍,按照试验方案施加螺栓预紧力。在试验抱箍螺栓及箍身端部上下边缘粘贴应变片,使用东华 DH3819N 静态采集系统记录应变数据。

试验根据螺栓预紧力分为三组,抱箍螺栓预紧力分别取 800 kN 、 $1\,120\text{ kN}$ 、 $1\,440\text{ kN}$ 。按照规范^[12]要求初拧螺栓,施拧过程依据应变片读数动态调整预紧力。

抱箍螺栓施拧完成后,采用两台 300 t 液压千斤顶在抱箍环板位置分级加载:先按照抱箍极限抗滑承载力的 30%、50%、70% 分级加载,每级持荷 2 min;当加载至抱箍极限抗滑承载力的 70% 后,降低加载速率,改为每级 50 kN 加载,每级持荷 30 s,直至抱箍发生明显滑移。

试验过程中,千斤顶输出力与伸出位移由油泵智能控制系统读取;抱箍发生滑移瞬间的千斤顶总顶力即为实测抗滑承载力。



a) 抱箍承载力试验装置



b) 抱箍承载力试验现场照片

图 15 抱箍承载力试验装置

Fig. 15 Load-bearing capacity test setup for hoop

3.1.2 试验结果

选取 5 组界面摩擦试验的代表性荷载-位移曲线,见图 16,界面摩擦响应符合库仑摩擦定律。

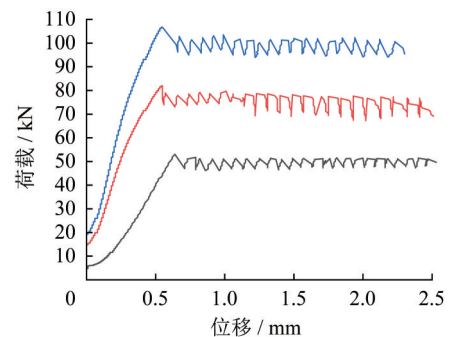


图 16 钢-混凝土界面摩擦系数试验的荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves of steel-concrete interface friction coefficient test

对试验数据进行拟合分析,得到钢-混凝土界面静摩擦系数为 0.25,试验结果见表 3(表内摩擦力为单接触面摩擦力,已完成界面数量修正)。

钢抱箍承载力试验根据螺栓预紧力分为 3 组,每组进行 5 次试验,记录滑移临界状态的加载力以及箍身端部上下缘应变差值,结果见表 4。

3.2 有限元分析验证

采用 ANSYS 软件建立钢抱箍及墩柱的实体有限元模型(图 17),墩柱直径为 1.3 m,抱箍尺寸与足尺试验试件一致。

表3 钢-混凝土界面摩擦系数试验结果
Table 3 Test results of steel-concrete interface friction coefficient

工况	法向压力/kN	摩擦力/kN	实测摩擦系数
1	213.3	52.7	0.247
2	266.7	60.8	0.228
3	320.0	81.9	0.256
4	373.3	97.8	0.262
5	426.7	106.7	0.250

表4 钢抱箍承载力试验结果

Table 4 Load-bearing capacity test results of steel hoop

试验组号	预紧力/kN	实测抗滑承载力/kN	实测上下应变差/($\times 10^{-4}$)	换算箍身弯矩/(kN·m)
1-1	800	2 048.8	4.3	116.3
1-2		2 019.1	4.5	121.4
1-3		1 893.5	4.1	109.4
1-4		1 761.7	4.5	120.6
1-5		1 947.2	4.0	106.6
2-1	1 120	2 660.2	6.3	170.6
2-2		2 823.2	6.3	170.7
2-3		2 689.3	6.4	172.8
2-4		2 490.2	6.8	182.4
2-5		2 461.6	6.2	167.7
3-1	1 440	3 836.3	7.5	203.0
3-2		3 453.7	7.9	213.9
3-3		3 297.4	7.4	198.1
3-4		3 567.7	8.3	223.3
3-5		3 664.7	7.9	213.4

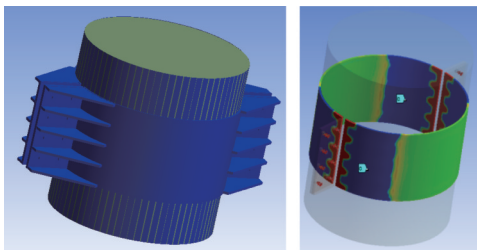


图17 钢抱箍有限元模型及脱空区域

Fig. 17 Finite element model of steel hoop and separation area

钢抱箍与墩柱之间设置接触边界,摩擦系数取足尺试验实测值0.25。有限元模型同样设置与试验一致的三组预紧力工况,在抱箍端部施加竖向荷载,加载至钢抱箍

达到滑移临界状态。有限元计算得到的钢抱箍承载力结果见表5。

表5 有限元分析结果

Table 5 Finite element analysis results

工况	抗滑承载力/kN	箍身弯矩/(kN·m)
1	1 854.3	110.8
2	2 467.8	150.6
3	3 242.8	195.9

3.3 结果对比

本次试验得到钢-混凝土界面摩擦系数实测值为0.25,根据拟合后的抱箍承载力计算公式,得到抱箍抗滑承载力设计值为:

$$Q_{\text{umax}}(a)=2.109T_0 \quad (51)$$

抱箍箍身弯矩设计值为:

$$M_{0\text{max}}(a)=-0.061Q_u=-0.129T_0 \quad (52)$$

分别将800 kN、1 120 kN、1 440 kN三组预紧力代入式(51)、(52),并与足尺试验及有限元结果进行对比,见图18、19。

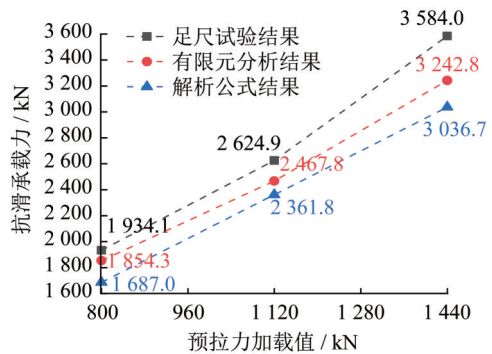


图18 不同预紧力条件下抗滑承载力计算结果

Fig. 18 Calculation results of anti-sliding load-bearing capacity under different pretension force conditions

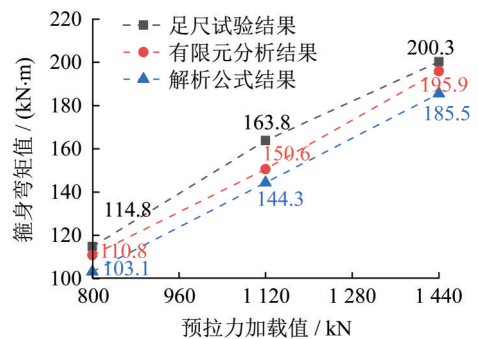


图19 不同预紧力条件下箍身弯矩计算结果

Fig. 19 Calculation results of hoop body bending moment under different pretension force conditions

对比分析结果表明:解析公式计算结果与试验、有限元结果整体吻合,抗滑承载力最大偏差为15.3%,平均偏差为9.1%;箍身弯矩最大偏差为11.9%,平均偏差为7.6%。偏差来源于局部温度影响、实际有效预紧力波动、摩擦系数随箍身环向压力变化等多重因素^[11];并且解析公式计算结果整体偏安全,安全储备可控,可以满足工程安全使用要求,能够用于指导工程实践。

4 结论

本文针对钢抱箍开展受力理论分析,建立同时考虑脱空效应与环向摩擦的抱箍抗滑承载力、箍身弯矩理论计算公式;通过数值拟合得到简化工程公式,并采用有限元仿真、足尺试验开展验证,得到主要结论如下:

(1) 抱箍极限抗滑承载力随脱空角度增大而提高;脱空角度为0条件下,当箍身与墩柱接触面竖向静摩擦系数趋近最大值、环向静摩擦系数趋近于0时,抱箍竖向承载力达到峰值。

(2) 箍身最大弯矩出现在箍身端部位置,极限弯矩随脱空角度增大而降低。对确定几何参数的钢抱箍,任意上部荷载对应的箍身极限弯矩均不超过本文拟合公式计算结果,最大误差为5.9%,精度可满足工程设计,适用于箍身极限弯矩验算。

(3) 箍身截面拉力由箍身端部向跨中逐步衰减,端部截面拉力最大。若后续通过试验进一步明确抱箍承载阶段环向、竖向摩擦系数之间的对应关系,则上部荷载 Q_u 作用下箍身最大截面拉力计算精度可以进一步提升,该问题有待后续继续开展研究。

本文综合考虑局部脱空与环向摩擦作用完成钢抱箍受力推导,给出抱箍极限抗滑力、箍身极限弯矩的计算表达式。经足尺试验与有限元验证,该套解析公式具备工程适用性,可为同类钢抱箍工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 黄修平,范世磊,曾健,等.界面橡胶对钢抱箍承载力的影响[J].土木工程与管理学报,2021,38(3):59-64.DOI:10.3969/j.issn.2095-0985.2021.03.010.
HUANG Xiuping, FAN Shilei, ZENG Jian, et al. Effect of rubber spacer on bearing capacity of steel hoops[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(3): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0985.2021.03.010. (in Chinese)
- [2] 黎景光.柔性轻型抱箍在墩柱式盖梁中的应用[J].中外公路,2005,25(5):91-93. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2005.05.027.
LI Jingguang. Application of flexible light hoop in pier and column capping beam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(5): 91-93. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2005.05.027. (in Chinese)
- [3] 焦绪学,梁靖皓,冯光华.基于不同约束条件的钢抱箍承载力试验研究[J].港工技术,2021,58(3):56-60. DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20210313.
JIAO Xuxue, LIANG Jinghao, FENG Guanghua. Experimental study on bearing capacity of steel hoop under different constraint conditions[J]. Port Engineering Technology, 2021, 58(3): 56-60. DOI: 10.16403/j.cnki.ggjs20210313. (in Chinese)
- [4] 吴刚,吕国玉.后支架抱箍梁式非常规吊篮安装的结构与验算[J].建筑技术,2023,54(4):419-422. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2023.04.009.
WU Gang, LYU Guoyu. Structure and check calculation of installation of unconventional hanging basket with hoop beam with rear support[J]. Architecture Technology, 2023, 54(4): 419-422. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2023.04.009. (in Chinese)
- [5] 董中亚,刘艳琛,郭雪.钢抱箍结构的力学分析与计算[J].水运工程,2010(6):19-26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2010.06.006.
DONG Zhongya, LIU Yanchen, GUO Xue. Mechanical analysis and calculation of steel hoop[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(6): 19-26. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4972.2010.06.006. (in Chinese)
- [6] 党育,刘晨旭,谢鹏飞,等.抱箍承载力的有限元分析及试验研究[J].兰州理工大学学报,2019,45(6):120-126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2019.06.021.
DANG Yu, LIU Chenxu, XIE Pengfei, et al. Finite element analysis of bearing capacity of hoop and its experiment[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2019, 45(6): 120-126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2019.06.021. (in Chinese)
- [7] 古松,吕勇康,顾颖,等.钢抱箍受力特性与承载能力试验研究[J].公路交通科技,2023,40(12):74-81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.009.
GU Song, LYU Yongkang, GU Ying, et al. Experimental study on mechanical characteristics and bearing capacity of steel hoop[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(12): 74-81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.009. (in Chinese)
- [8] 顾颖,古松,邓继清,等.考虑脱空效应的钢抱箍受力理论分析[J].桥梁建设,2023,53(6):95-102. DOI: 10.10051/j.issn.1003-4722.2023.06.013.
GU Ying, GU Song, DENG Jiqing, et al. Theoretical analysis of mechanical property of steel hoops considering detachment effect[J]. Bridge Construction, 2023, 53(6): 95-102. DOI: 10.10051/j.issn.1003-4722.2023.06.013. (in Chinese)
- [9] 王俊强,王松林.抱箍法钢盖梁在独柱墩桥梁抗倾覆加固中的应用浅析[J].城市建设理论研究(电子版),2015(9):2953. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2015.09.2557.
WANG Junqiang, WANG Songlin. Analysis on the application of steel capping beam with hoop method in anti-overturning reinforcement of single-column pier bridge[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2015(9): 2953. DOI: 10.3969/

