

圆形钢圈限位装置力学性能试验 与数值模拟研究

王占飞¹, 吴 煊¹, 顾 威², 刘爱霞³, 任 浩¹

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省交通高等专科学校道路与桥梁工程系, 辽宁 沈阳 110122; 3. 沈阳城市建设学院土木工程学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要 目的 探究圆形钢圈限位装置设计参数对其力学性能的影响。方法 以截面高度 h 、截面厚度 w 、钢圈半径 R 和导向轮半径 r 为研究变量制作了多组试验试件与数值分析模型, 并通过单调加载试验和弹塑性数值分析, 获得了不同设计参数下圆形钢圈限位装置的力-位移曲线。系统分析了各设计参数对圆形钢圈限位装置力-位移曲线变化趋势、宏观变形过程、初期刚度 K_1 、二期刚度 K_2 、极限承载力 F_u 与极限位移 δ_u 的影响。结果 随着 R 的增大, δ_u 显著增大, K_1 显著减小, K_2 缓慢减小, F_u 几乎不变; 随着 r 的增大, δ_u 逐渐减小, K_1 和 K_2 逐渐增大, F_u 缓慢增大; 随着 h 的增大, K_1 和 F_u 显著增大, K_2 缓慢增大, δ_u 的变化微乎其微; 随着 w 的增大, K_1 、 K_2 和 F_u 显著增大, 对 δ_u 无影响。结论 改变参数 R 、 r 、 h 及 w 不会影响圆形钢圈限位装置力-位移曲线的变化趋势及其宏观变形过程, 但会对其初期刚度 K_1 、二期刚度 K_2 、极限承载力 F_u 与极限位移 δ_u 产生较大影响。

关键词 桥梁工程; 钢圈限位装置; 参数影响; 力学性能; 数值模拟

中图分类号 U442.55; U443.3

文献标志码 A

Experimental Study and Numerical Simulation on Mechanical Properties of Circular Steel Ring Restrainer

WANG Zhanfei¹, WU Huan¹, GU Wei², LIU Aixia³, REN Hao¹

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Road and Bridge Engineering, Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, China, 110122; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: In order to investigate the influence of the design parameters of the circular steel ring restrainer (CSRR) on its mechanical properties, a large number of CSRR test specimens were

收稿日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51938009); 辽宁省桥梁安全工程专业技术创新中心2021年度开放基金项目(2021-05)

作者简介: 王占飞(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震及钢桥腐蚀疲劳等方面研究。

fabricated and subjected to monotonic tests. Subsequently, finite element (FE) models of CSRRs with the same as the test specimens were established, and the material parameters, interaction and boundary conditions used in numerical simulation are verified to be effective. Then, several groups of FE models of CSRRs were established based on the steel ring radius R , the guide pulley radius r , the cross-section height h , and the cross-section width w , and FE analysis was performed to further explore the influence of the design parameters on the mechanical properties of CSRRs. According to the test results and the FE results, it can be concluded that the variation trend of force-displacement curves and the macroscopic deformation processes of CSRRs will be not affect with the change of the design parameters, but the design parameters will significantly affect the mechanical properties of CSRRs. i. e., with the increase of R , δ_u of CSRRs increases, K_1 and K_2 decrease, and F_u is almost constant. As the r increases, K_1 , K_2 and F_u increase slightly, but δ_u decreases obviously. With the increase of h , K_1 , K_2 and F_u increase, and δ_u remains unchanged. With the w increases, K_1 , K_2 and F_u increase significantly, while δ_u does not change significantly.

Key words: bridge engineering; steel ring restrainer; parameter influence; mechanical properties; numerical simulation

桥梁作为生命线工程,如何提高其抗震性能,使其肩负起抗震救灾和灾后重建的重任尤为重要。历次桥梁震害调查表明,因桥梁上、下部结构间的相对位移超过设计限值,而引发落梁破坏是桥梁丧失使用功能的主要原因^[1-3]。因此,吴文朋等^[4-9]众多专家学者对防落梁装置进行了大量研究。其中采用多级多水准抗震设防思想的新型限位装置受到了广泛关注。如近年来王占飞等^[10]提出了一种具有缓冲能力、且可根据不同地震等级提供不同限位刚度的钢圈防落梁限位装置。相关研究表明^[11-13],钢圈限位装置具备优异的力学性能,能够有效降低桥梁在地震作用下出现落梁的风险。此外,该限位装置按其形状可分为椭圆形和圆形两种构造形式^[11]。目前,学者们致力于椭圆形钢圈限位装置的结构优化,而很少涉及圆形钢圈限位装置。圆形钢圈限位装置具有启动速度快、构造简单以及力学性能稳定等优势,可广泛应用于地震高发区。然而,设计参数对圆形钢圈限位装置抗震性能的影响如何,尚未可知。基于此,笔者以圆形钢圈限位装置为研究对象,通过单调加载试验和有限元分析,探寻各设计参数对其宏观变形过程、力-位移曲线变化趋势及力学性能的影响,研究

成果可为圆形钢圈限位装置的结构优化提供理论参考。

1 圆形钢圈限位装置

圆形钢圈限位装置(CSRR)可根据桥梁类型安装在如图1所示的上、下部结构之间,从而控制桥梁上下部结构的相对位移。该限位装置由限位钢圈、导向轮和连接板3部分构成。在地震作用下,外荷载会带动导向轮在限位钢圈内滑动,并利用限位钢圈对导向轮的约束,限制上下部结构的相对位移。

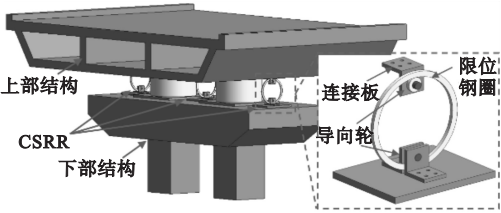


图1 圆形钢圈限位装置及安装位置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of CSRRs and its installation position

圆形钢圈限位装置在水平外荷载作用下的典型力-位移曲线^[13]如图2所示。当桥梁遭遇E1地震作用时,该装置可快速进入工作状态,并提供较小刚度 K_1 和承载力,保证桥梁的交通运输功能;而在遭遇E2地震作

用时,该装置可在刚度 K_1 及现有承载能力的基础上,快速形成刚度 K_2 并大幅提升其承载力,限制结构的相对位移,防止落梁。同时,在刚度 K_1 向刚度 K_2 转变的过程中,该装置还可提供一段刚度缓冲区域,因此可有效避免刚度突变对结构的不利冲击。

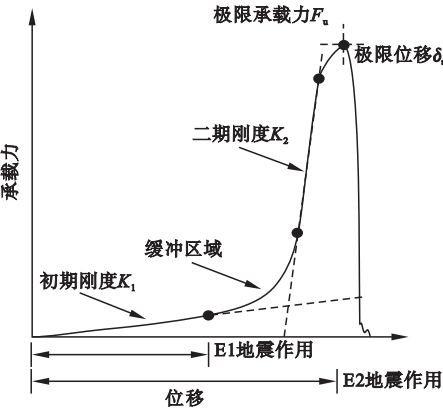


图2 圆形钢圈限位装置典型力-位移曲线

Fig.2 Typical force-displacement curve of CSRRs

2 试验研究

2.1 试验试件设计

圆形钢圈限位装置设计参数如图3所示,包括截面高度 h 、截面宽度 w 、限位钢圈半径 R 和导向轮半径 r 。

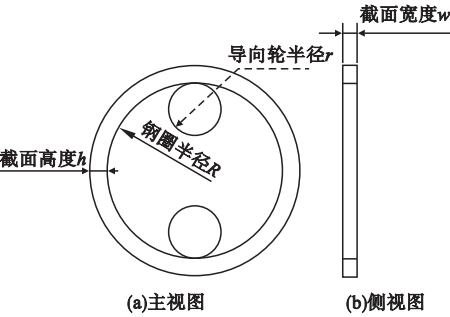


图3 圆形钢圈限位装置设计参数

Fig.3 Design parameters of CSRRs

为探究各设计参数对圆形钢圈限位装置力学性能的影响,笔者设计了5个试验试件进行加载试验。所有试件均采用 Q235 钢材制作,试件参数见表1。

表1 试件设计参数

试件编号	h	w	R	r
CSRR1	12	10	120	20
CSRR2	12	10	145	20
CSRR3	12	10	170	20
CSRR4	12	10	170	45
CSRR5	12	10	170	70

2.2 材性试验

为确定所选钢材的基本力学性能,对所涉及 Q235 钢材进行材质试验。笔者对用于制作试件的 Q235 母材取样,并依据我国现行试验标准对其进行静力加载试验^[14]。得到基本材料参数:屈服应力 σ_y 为 293.71 MPa、极限应力 σ_u 为 424.15 MPa、弹性模量 E 为 209.79 GPa、泊松比 ν 为 0.25、伸长率 δ 为 38.14%。

为确保数值模拟中设置的材料参数有效反映材料在塑性阶段的非线性,笔者采用 PLT 方法^[15]确定了 Q235 钢材的真实应力-应变曲线。PLT 公式如下:

$$\left\{\begin{aligned}\sigma &= \left(\frac{\sigma_n}{\varepsilon_n^{\varepsilon_n}}\right) \times \varepsilon^{\varepsilon_n}, & \varepsilon < \varepsilon_n; \\ \delta &= \sigma_n (1 + \varepsilon - \varepsilon_n) - \frac{\sigma_n}{1+n} (\varepsilon - \varepsilon_n)^{1+n}, & \varepsilon > \varepsilon_n.\end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中: σ 为真实应力; ε 为真实应变; σ_n 为颈缩时的真应力; ε_n 为颈缩时的真应变; n 为模型参数,依据文献[16]取 0.9 计算。

为在数值模拟中精确模拟材料的断裂失效过程,笔者采用 Jia-Kuwamura 的断裂理论^[15]建立了 Q235 钢材的延性断裂模型:

$$dD = \begin{cases} 0, & T < -\frac{1}{3}; \\ \frac{d\varepsilon_{eq}^p}{\chi e^{-\frac{3}{2}T}}, & T > -\frac{1}{3}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为应力三轴度; ε_{eq}^p 为等效塑性应变; χ 为模型参数,参照文献[16]取 2.5 计算; D 为损伤因子,当 $D = 1$ 时发生断裂。

图4为拉拔试件试验与数值模拟对比结果。从图中可以看出,有限元分析获得的承载

力-位移曲线与试验结果高度吻合,故验证了笔者所选本构模型与延性断裂模型的正确性。

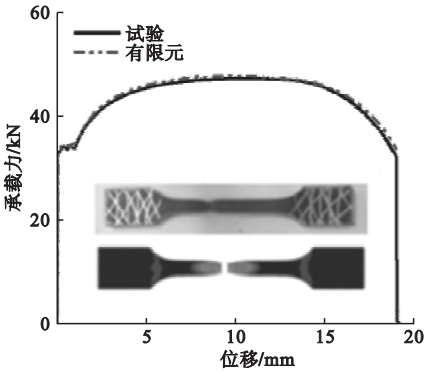


图4 材性试验结果与有限元分析结果对比

Fig. 4 Comparison of the material test and FEA results of a tensile coupon

2.3 试验方案

用于加载圆形限位钢圈的试验装置如图5所示。装置由加载梁、底座、导轨、上下螺杆及上下滑块组成。其中底座采用螺栓固定于地面;加载梁通过高强度螺栓与MTS连接;钢圈及导向轮试件则装配于上下螺杆间。试验采用位移控制:试验开始,伴随MTS提供位移逐渐增加,下螺杆及下导向块固定不动,上螺杆则带动上导向轮及滑块向前运动,迫使钢圈变形直至其断裂失效。对于试验中的数据采集:试验中试件反力由MTS自动记录,位移由布置的3个位移计测得。

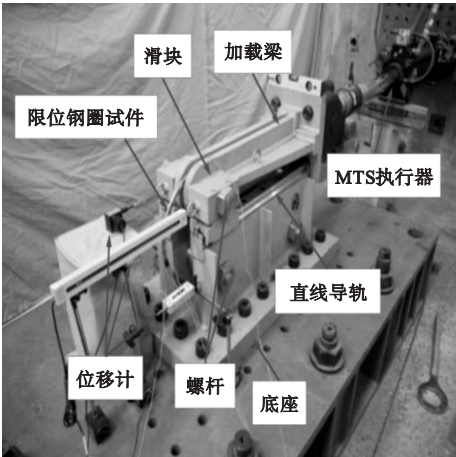


图5 试验装置

Fig. 5 Experimental devices

2.4 试验结果分析

试验所获得试件宏观变形过程总体一致,均经历了如图6(a)~图6(d)所示的四个阶段。笔者以CSRR1试件为例进行说明,试验开始时,导向轮位于限位钢圈上下两侧,此时限位装置未进入工作状态;随着位移增加,导向轮开始在限位钢圈内滑动,此时限位钢圈出现弯曲变形(见图6(a));随着位移继续增加,钢圈弯曲变形愈渐明显,并逐渐开始向拉伸变形过渡(见图6(b));当位移进一步增加,限位钢圈被完全拉直(见图6(c)),最终在位移加载至一定程度后颈缩、断裂(见图6(d))。

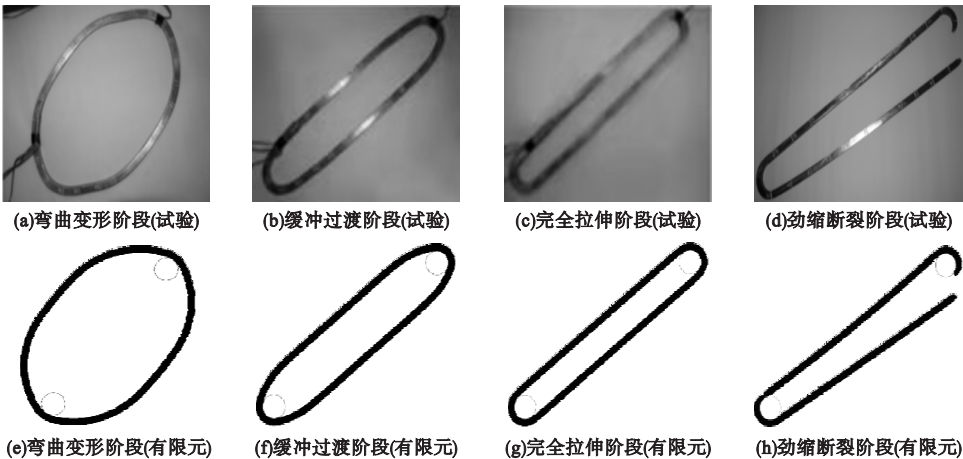


图6 圆形钢圈限位装置宏观变形过程

Fig. 6 Deformation process of CSRR obtained by tests and FEAs

试件的承载力-位移曲线如图 7 所示。从图中可以看出,随参数 R 和 r 的变化,圆形钢圈限位装置力-位移曲线的变化趋势无明显改变,均符合图 2 所示典型力-位移曲线的变化趋势:加载初期,仅形成较小刚度 K_1 与承载力;随着位移继续增加,承载力开始快速提升,并在此阶段形成数值较大的稳定刚度 K_2 ;最终在达到极限承载力后失效。由此可见,改变参数并不会对圆形钢圈限位装置力-位移曲线的变化趋势产生影响。此外,从图 7 还可以看出,随着 R 增加,限位装置极限位移 δ_u 显著增长;随着 r 增加,极限位移 δ_u 、刚度 K_1 、 K_2 及承载力 F_u 也有明显变化。由此表明,设计参数会显著影响圆形钢圈限位装置的力学性能。因此在数值模拟中,笔者重点研究各参数对圆形钢圈限位装置 K_1 、 K_2 、 F_u 及 δ_u 的影响。

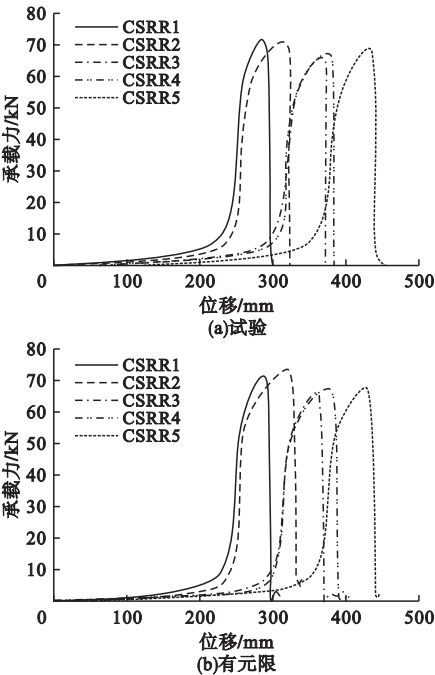


图 7 承载力-位移曲线
Fig. 7 Force-displacement curves

3 数值模拟

3.1 模型建立及有效性验证

3.1.1 数值模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立了圆形

钢圈限位装置数值分析模型(见图 8)。其中,选取解析刚体(Analytical rigid)模拟上下导向钢轮,选取 4 节点线性缩减积分壳单元(CPS4R 壳单元)模拟限位钢圈。分析中,所涉及材料本构模型及延性断裂模型参考上述材性试验确定;边界条件则与试验相同,包括下导向轮完全固定,上导向轮单调加载。对于导向轮与钢圈间的接触设置,文中选取面-面接触,其中法向采用硬接触,切向采用库伦摩擦接触,摩擦系数考虑为 0.1。

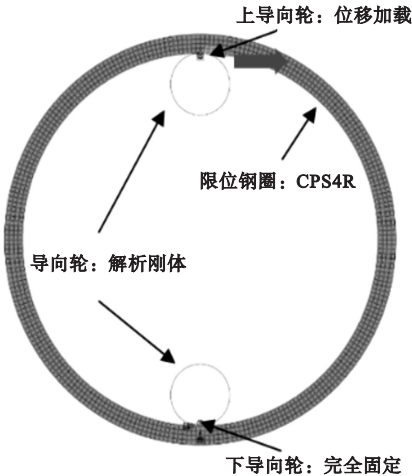


图 8 圆形钢圈限位装置有限元模型
Fig. 8 Finite element model of CSRRs

3.1.2 有效性验证

建立与试件尺寸相同的圆形钢圈限位装置模型,并通过弹塑性分析获得了其力-位移曲线(见图 7)及宏观变形过程(见图 6(e)~图 6(h))。可以看出,有限元分析获得钢圈限位装置力-位移曲线与试验结果吻合良好,所得变形过程也与试验过程整体一致。故验证了数值模拟中建模方式、本构模型、延性断裂模型及边界条件设置的有效性。

3.2 单参数量化分析

为进一步探究设计参数对圆形钢圈限位装置力学性能的影响,笔者建立了 4 组共 21 个不同设计参数的圆形钢圈限位装置数值分析模型进行研究,模型尺寸及分析结果见表 2。

表2 有限元模型设计参数

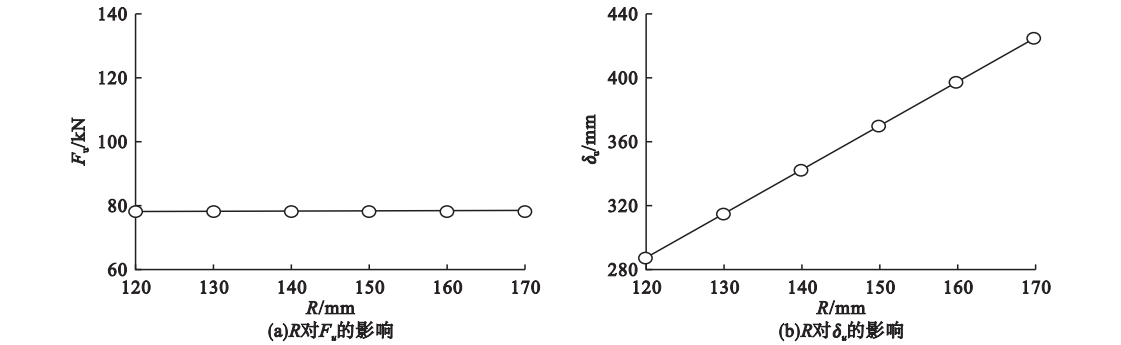
Table 2 Design parameters of FE models

分组	编号	截面高度 h/mm	截面宽度 w/mm	钢圈半径 R/mm	导向轮半径 r/mm	初期刚度 $K_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	二期刚度 $K_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	极限承载力 F_u/kN	极限位移 δ_u/mm
对照组	FE1	12	10	170	20	18.03	2 193.98	78.63	425.00
	FE2	12	10	120	20	19.77	2 315.42	78.60	397.50
	FE3	12	10	130	20	21.56	2 397.03	78.54	370.00
1组 (改变 R)	FE4	12	10	140	20	23.98	2 463.46	78.51	342.50
	FE5	12	10	150	20	26.70	2 527.99	78.50	315.00
	FE6	12	10	160	20	30.16	2 586.19	78.54	287.50
2组 (改变 r)	FE7	12	10	170	30	18.46	2 298.09	79.84	402.50
	FE8	12	10	170	40	18.66	2 398.12	81.21	382.50
	FE9	12	10	170	50	19.01	2 567.12	82.18	360.00
	FE10	12	10	170	60	20.57	2 699.48	83.29	337.50
	FE11	12	10	170	70	21.92	2 817.45	84.21	315.00
3组 (改变 h)	FE12	10	10	170	20	13.02	2 345.02	65.72	420.00
	FE13	14	10	170	20	25.46	2 343.01	90.82	420.00
	FE14	16	10	170	20	32.04	2 417.12	103.26	420.00
	FE15	18	10	170	20	39.17	2 610.57	115.69	422.50
	FE16	20	10	170	20	47.73	2 769.03	128.11	422.50
	FE17	12	8	170	20	14.44	1 750.05	62.90	425.00
4组 (改变 w)	FE18	12	12	170	20	21.64	2 506.39	94.32	425.00
	FE19	12	14	170	20	25.23	2 927.53	110.06	425.00
	FE20	12	16	170	20	28.68	3 508.47	125.77	425.00
	FE21	12	18	170	20	32.48	3 950.04	141.47	425.00

3.2.1 限位钢圈半径 R 的影响

图9为不同半径 R 下,圆形钢圈限位装置的力学性能。从图可知,钢圈半径 R 由120 mm增加至170 mm时,圆形钢圈限位装置的极限位移 δ_u 由287.5 mm增大到425 mm,涨幅达到47.8%;初期刚度 K_1 及二期刚度 K_2 由30.16 kN/m、2 586.19 kN/m

减小至18.03 kN/m、2 193.98 kN/m,分别减少了40.2%及15.2%;而极限承载力 F_u 则基本保持在78.5 kN不变。由此可见,随 R 增加,圆形钢圈限位装置的 δ_u 会显著增加, K_1 会显著减小,同时 K_2 也稍有降低,但 F_u 则基本保持不变。



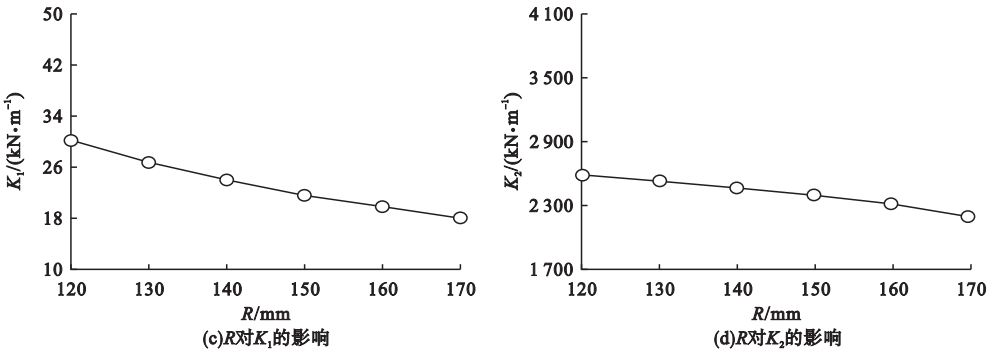


图 9 钢圈半径 R 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响

Fig. 9 Influence of R on mechanical properties of CSRRs

3.2.2 导向轮半径 r 的影响

不同导向轮半径 r 下,圆形钢圈限位装置的力学性能如图 10 所示。从图可知,当导向轮半径 r 由 20 mm 增大到 70 mm 时, F_u 增加

7.1%; δ_u 减小了 26%; K_1 及 K_2 也分别增加了 28.4% 及 21.5%。由此可见,随导向轮半径 r 增加,圆形钢圈限位装置的 K_1 及 K_2 会明显增加, F_u 也会略微提升,但 δ_u 则会显著减少。

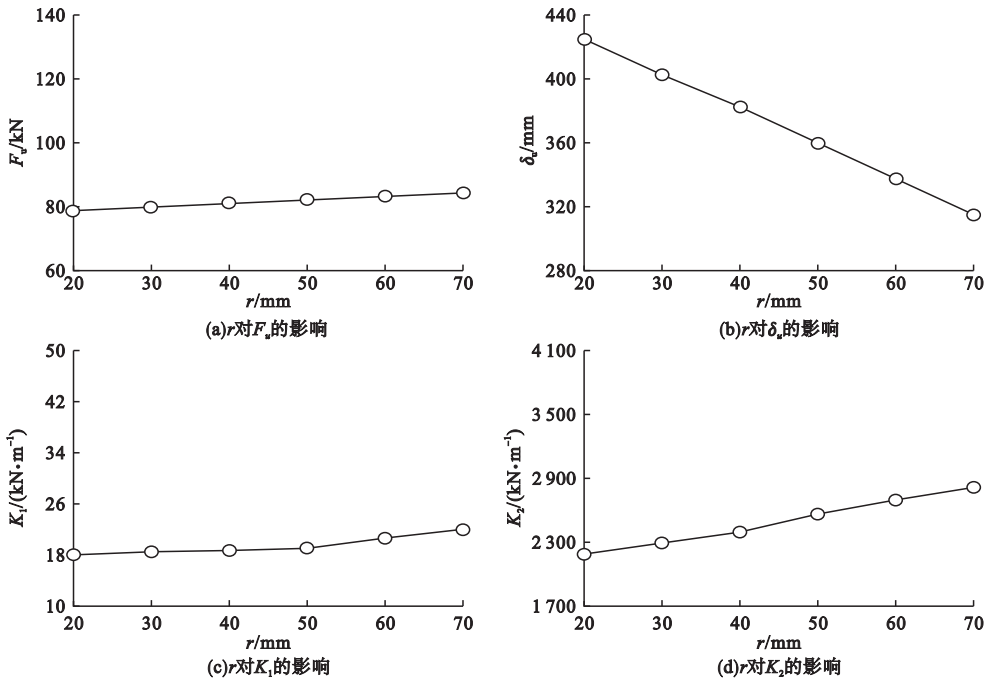


图 10 导向轮半径 r 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响

Fig. 10 Influence of r on mechanical properties of CSRRs

3.2.3 截面高度 h 的影响

图 11 反映了截面高度 h 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响。从图中可以看出,在截面高度 h 由 10 mm 到 20 mm 过程中,圆形钢圈限位装置的 F_u 由 65.72 kN 增大至 128.11 kN,涨幅接近一倍;而 δ_u 虽有所波动,但总体稳定在 422.5 mm。随着 h 增加,

圆形钢圈限位装置的 F_u 会显著提升,但 δ_u 则不会有明显改变。此外,随着 h 增加,圆形钢圈限位装置的刚度 K_1 会大幅提升,同时刚度 K_2 也会有略有增长。

3.2.4 截面宽度 w 的影响

截面宽度 w 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响如图 12 所示。从图中可以看出,

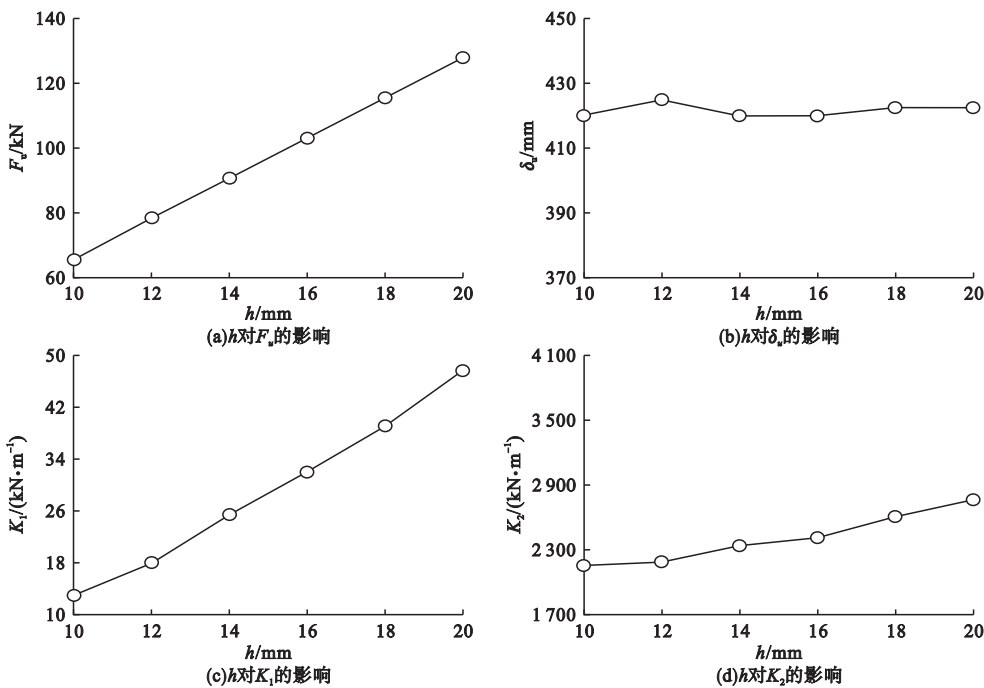


图 11 截面高度 h 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响

Fig. 11 Influence of h on mechanical properties of CSRRs

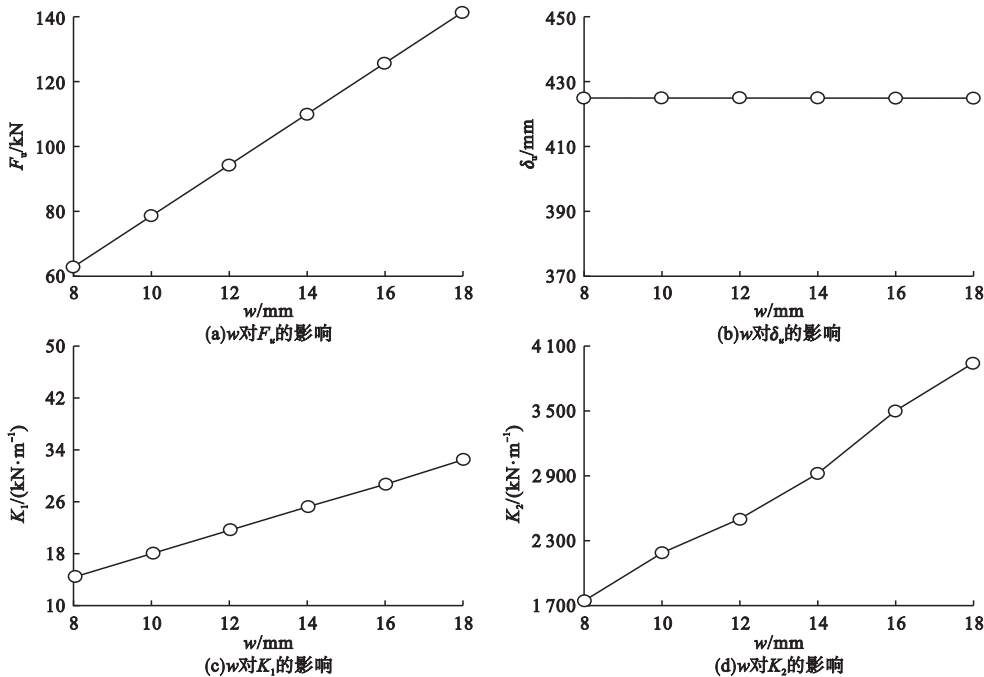


图 12 截面宽度 w 对圆形钢圈限位装置力学性能的影响

Fig. 12 Influence of w on mechanical properties of CSRRs

随着 w 增加, F_u 、 K_1 及 K_2 提升, 而 δ_u 保持不变。即随着截面宽度 w 增加, 圆形钢圈限位装置刚度 K_2 会大幅提升, 而 K_1 仅有少量增长。

4 结 论

(1) 设计参数 R 、 r 、 h 和 w 不会影响圆形钢圈限位装置的宏观变形过程。从启动到最终断裂破坏, 圆形钢圈限位装置均会大致经

历4个阶段:弯曲变形阶段、缓冲过渡阶段、完全拉伸阶段、及颈缩断裂阶段。

(2)设计参数 R 、 r 、 h 和 w 不会改变圆形钢圈限位装置力-位移曲线的变化趋势。在加载初期仅形成较小刚度 K_1 与承载力,而后随着位移继续增加,其承载力与刚度开始快速提升,最终在达到极限承载力后失效。

(3) R 、 r 、 h 和 w 会显著影响圆形钢圈限位装置的力学性能:即随着 R 上升, δ_u 显著增大, K_1 显著减小, K_2 缓慢减小, F_u 几乎不变;随着 r 上升, δ_u 逐渐减小, K_1 和 K_2 逐渐增大, F_u 缓慢增大;随着 h 上升, K_1 和 F_u 显著增大, K_2 缓慢增大, δ_u 基本不变;随着 w 上升, K_1 、 K_2 和 F_u 显著增大,而 δ_u 无明显改变。

参考文献

- [1] LI J Z, PENG T B, XU Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2008, 7 (4): 337 - 344.
- [2] HAN Q, DU X L, LIU J B, et al. Seismic damage of highway bridges during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 8 (2): 263 - 273.
- [3] 王东升,郭迅,孙治国,等.汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J].地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 84 - 94.
(WANG Dongsheng, GUO Xun, SUN Zhiguo, et al. Damage to highway bridges during Wenchuan earthquake [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2009, 29 (3): 84 - 94.)
- [4] XIANG N, GOTO Y, OBATA M, et al. Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: a state-of-the-art review [J]. Engineering structures, 2019, 194(1): 77 - 93.
- [5] GUO J, ZHONG J, DANG X, et al. Influence of multidirectional cable restrainer on seismic fragility of a curved bridge [J]. Journal of bridge engineering, 2019, 24(3): 1 - 13.
- [6] 吴文朋,周权,张红运,等.桥梁结构抗震挡块的研究现状与展望[J].地震工程与工程振动, 2020, 40(1): 103 - 120.
(WU Wenpeng, ZHOU Quan, ZHANG Hongyun, et al. Research review and prospect of the anti-seismic retaining block for the bridge structures [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2020, 40(1): 103 - 120.)
- [7] WON J, MHA H, CHO K, et al. Effects of the restrainer upon bridge motions under seismic excitations [J]. Engineering structures, 2008, 30(12): 3532 - 3544.
- [8] TIAN Q, HAYASHIKAWA T, SONG G, et al. Study on the effect of cable restrainers stiffness on the seismic performance of curved viaducts combined use of steel stoppers [J]. Journal of earth-quake and tsunami, 2019, 13(2): 1 - 16.
- [9] LX A, PENG C A, ZI B. Development and validation of a versatile hysteretic model for pre-compressed self-centering buckling-restrained brace [J]. Journal of constructional steel research, 2021, 177: 106473.
- [10] 王占飞,孙巨搏,程浩波,等.缓冲型防落梁钢圈限位装置力学性能研究[J].桥梁建设, 2018, 48(6): 18 - 23.
(WANG Zhanfei, SUN Jubo, CHENG Haobo, et al. Study on mechanical properties of a steel ring restrainer with buffer capacity [J]. Bridge construction, 2018, 48(6): 18 - 23.)
- [11] SUN J, ZHANG Q, WANG Z, et al. Experimental and numerical study on steel ring restrainers with rectangular section [J]. Journal of constructional steel research, 2021, 177: 106458.
- [12] SUN J, WANG Z, XUE D, et al. Concept and behavior of a steel ring restrainer with variable stiffness and buffer capacity [J]. Journal of earthquake and tsunami, 2020, 14(4): 2050020.
- [13] 王占飞,张强,李航,等.缓冲型防落梁钢圈限位装置力学性能试验[J].中国公路学报, 2021, 34(2): 9.
(WANG Zhanfei, ZHANG Qiang, LI Hang, et al. Experimental study on mechanical properties of steel ring restrainers with buffer capacity [J]. China journal of highway and transport, 2021, 34(2): 9.)
- [14] 中华人民共和国国家质量监督局.钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T2975—2018 [S].北京:中国标准出版社, 2018.
(State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Sampling location and sample preparation for mechanical properties test of steel and steel products: GB/T2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.)
- [15] JIA L J, GE H B, SHINOHARA K, et al. Experimental and numerical study on ductile fracture of structural steels under combined shear and tension [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(5): 04016008.
- [16] WANG Z, REN H, ZHANG Q, et al. Mechanical performance of steel ring restrainers with corrosion damage [J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 26(3): 1295 - 1315.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)