



通航渡槽新型拉压双向限位装置 承载力试验研究*

聂利英¹, 庞曦辰¹, 韩 刘¹, 吴俊东², 陈小虎²

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为避免地震中结构缝止水碰撞破坏, 引发漏水危及槽内船只人员安全, 已开发出一种替代结构缝止水受力的新型拉压双向限位装置, 提出基于能力保护的设计方法并以有限元分析完成初步校验。对此装置进行静力拉伸试验, 通过试验结合有限元分析进一步验证其设计思想及方法得以实现且安全。在此基础上进行极限承载力与弹性上界(屈服点)的分析。结果表明, 极限承载力由少板侧的接触面局部应力达到材料抗拉强度导致的材料破坏决定, 但是不影响弹性上界的确定、销轴弯曲变形对装置整体变形的控制作用及其对板的保护作用; 装置弹性上界由整体变形量曲线控制, 此新型拉压装置基于能力保护的设计方法安全系数为 1.73。

关键词: 拉压双向限位装置; 能力保护; 静力拉伸试验; 极限承载力; 弹性上界

中图分类号: U642; TV672.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0090-10

Experiment of load-bearing capacity of novel bidirectional restrainer of navigable aqueducts

NIE Liying¹, PANG Xichen¹, HAN Liu¹, WU Jundong², CHEN Xiaohu²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: To avoid collision damage to the water stop at structural joints during earthquakes and prevent water leakage that endangers the safety of ships and personnel in the aqueducts, a novel bidirectional restrainer which bears the collision force instead of water stop and prevents the damage of water stop has been developed, and a design method based on capacity protection for this restrainer has been established and preliminary verified by finite element analysis. Static tensile experiments of this device are carried out. Through the experiments and corresponding finite element analysis of the restrainer, it is further verified that its design concept and method are practical and safe. The analysis of ultimate load-bearing capacity and the elastic upper limit (yield point) is performed. The results show that the ultimate load-bearing capacity is determined by the material failure caused by the local stress of the contact surface on the part with fewer plates reaching the tensile strength of the material, but it does not affect the determination of the elastic upper limit, and the control effect of the bending deformation of the pin on the whole deformation of the device and its protective effect on the plate. The elastic upper limit of the device is controlled by the whole deformation curve. The safety factor of the design method of this novel restrainer based on capacity protection is 1.73.

Keywords: bidirectional restrainer; capacity protection; static tensile experiment; ultimate load-bearing capacity; elastic upper limit

收稿日期: 2025-01-06

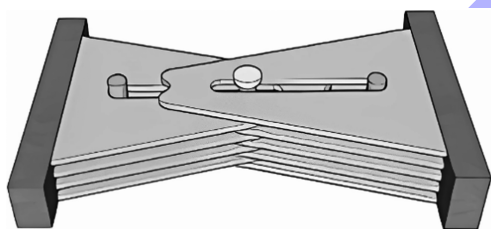
*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402003)

作者简介: 聂利英(1972—), 女, 博士, 副教授, 从事桥梁抗震研究。

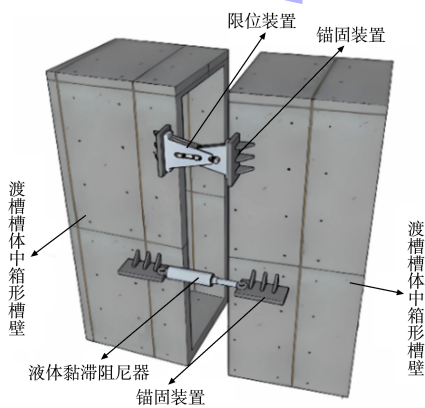
我国西部既是传统强震区,也是水利开发的重点区域。升船机与通航渡槽是过坝的快速通道,乌江构皮滩通航渡槽^[1]是典型的升船机与通航渡槽结构形式,见图 1a),纵向地震下此类结构易发生剧烈碰撞^[2]。通常情况下,升船机与通航渡槽内航行船只,为避免大震下结构缝止水破坏、漏水^[3],危及槽内船只及人员安全,开发出一种新型拉压双向限位装置^[4],见图 1b)。装置设置于结构缝两侧,见图 1c),地震发生时配合液体黏滞阻尼器等减震耗能装置,以限位方式替代止水承受拉、压碰撞,保护止水不被破坏。



a) 乌江构皮滩



b) 拉压双向限位装置



c) 安装

图 1 通航渡槽、拉压双向限位装置及其安装

Fig. 1 Navigable aqueducts, bidirectional restrainer and its installation

新型拉压双向限位装置主要由多板侧、少板侧及 3 根销轴组成。相邻槽体相向运动时,若相对位移超出结构缝止水允许压缩量,则拉压限位装置替代止水承受压力;反之,则拉压限位装置替代止水承受拉力。

该新型拉压双向限位装置本质上属于销轴耳板结构^[5-7]。传统销轴耳板结构有多种破坏模式,如耳板的端部劈拉、局部承压等破坏模式,销轴的剪切、弯曲等破坏模式。多路径的破坏模式对于结构控制不利,参考桥梁抗震中能力保护设计框架下的延性设计^[8-12]的设计思路,文献[13]针对此限位装置研究出单一路径控制破坏模式的设计方法。

桥梁抗震中能力保护设计框架下的延性设计,是通过延性构件和能力保护构件之间形成强度等级差,从而避免诸如剪切等脆性破坏,以及桩等难以观测的构件发生破坏。拉压双向限位装置受拉时,仅中间销轴受力,受压时则是两侧固定销轴同时受力,因此装置受拉时处于不利受力状态。在受拉状态下,多板侧、中间滑动销轴、少板侧为串联体系。因此,参考桥梁抗震中能力保护的设计思想,结合 GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[14]中销轴耳板连接结构设计方法,文献[13]针对此限位装置提出以销轴弯曲破坏保护多板侧与少板侧破坏的能力保护设计方法。

新型拉压装置及其设计方法均需要经试验检验。新型拉压双向装置为刚性限位装置,在弹性范围内工作。因此,进一步探索极限承载力以及弹性上界也很重要。基于以上阐述,本文的主要研究内容为:1) 设计试验模型,进行材料性质试验以及静力拉伸试验;2) 通过有限元分析与试验结果对照,对已提出的新型拉压装置基于能力保护设计方法的安全性、破坏模式是否由销轴弯曲控制做进一步验证;3) 基于有限元分析,进一步研究装置的极限承载力、弹性上界以及控制因素。

1 试验模型及参数

新型拉压装置及其设计方法需要经试验验证。装置受拉时处于不利受力状态，因此以受拉状态确定试验模型尺寸。试验前，首先根据 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》^[15] 的材料参数设计试验模型尺寸，然后购买材料并加工模型。

文献[13]针对此新型拉压限位装置提出的能力保护设计方法，即为参考桥梁抗震能力保护设计中 1.200~1.375 增强系数以及 Q235 钢材已有文献屈服强度试验均值与规范值之比为 1.34，确定设计外荷载放大调整系数 1.34；根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》，以设计外荷载确定销轴尺寸，以乘以放大调整系数 1.34 的设计外荷载确定耳板尺寸。

以设计外荷载 400 kN、装置为 4-5 板形式（少板侧为 4 板，多板侧为 5 板）、材料为 Q235 普通钢材、结构缝止水伸缩量各为 2 cm 设计试验模型。4-5 板形式中单片耳板平面尺寸见图 2，板厚 14 mm，销轴直径 41 mm。

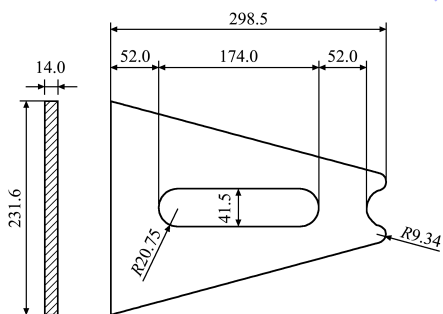


图 2 4-5 板限位装置单板尺寸（单位：mm）
Fig. 2 Single plate dimension of 4-5 plate restrainer
(unit: mm)

将 GB 50017—2017《钢结构设计标准》规定的各个验算指标的允许应力除以其设计模型的计算应力，则可得到各验算指标的安全系数。试验模型各验算指标的安全系数具体为：耳板的净截面抗拉、端截面抗拉、抗剪强度安全系数分别为 1.34、1.40、2.34；销轴的承压、抗剪切、抗弯安全系数分别为 1.83、3.04、1.07。其中，耳板的抗压验算同销轴的承压验算，不单独给耳板的抗压验算。对于耳板，净截面抗拉强度安全系数 1.34 为最低，同外荷载放大系数；对于销轴，抗

弯安全系数 1.07 为最低，且其承压以及抗剪安全系数均大于耳板的最低安全系数 1.34。由此可见，基于 GB 50017—2017《钢结构设计标准》得到的试验模型，其销轴的抗弯性能避免了耳板端部劈拉、销轴的剪切等其他破坏模式的发生。

本装置试验包含材料性质试验和静力拉伸试验两部分，材料性质试验原料均取自与拉压装置试验模型相同的板材、圆材。销轴与板件的材料性质试验结果见表 1。

表 1 材料性质试验数据
Tab. 1 Data of material property experiments

类型	组别	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断后 伸长率/%
销轴	C1	230	411	211	35.5
	C2	247	411	184	32.5
	均值	239	411	198	34.0
板件	P1	257	417	288	33.0
	P2	230	432	251	35.5
	均值	244	425	270	34.3

拉伸试验装置见图 3。试验模型共 2 组，最大施加荷载为设计外荷载的 2 倍，即 800 kN。两组模型分别以 2 种方式加载：1) 步长 100 kN，加载至 400 kN 后卸载至 0 kN，往复 3 次；第 4 次单向加载至 800 kN。2) 步长 100 kN，单向加载至 800 kN。



图 3 承载力试验加载装置
Fig. 3 Loading device for load-bearing capacity experiment

2 试验结果及有限元分析结果对比

拉伸试验中，新型拉压双向限位装置中的板件交叉贴压在中间滑动销轴上，板与板的间隙狭小，小于 0.5 mm，这使得在板与中间销轴表面贴应变片、布置数据线十分困难；直接测试销轴与板的应变和单板位移几乎不可能。试验中虽布置了一些，但测试数据受不同构件间挤压等影响很大，数据精度低，无法采信。因此，试验数据以

装置整体变形量, 即装置顶板与底板之间的相对位移量为主。

销轴耳板结构的变形总体上较为复杂。新型拉压双向限位装置中, 板的变形包含板的整体变形与局部弹塑性变形; 销轴包含整体的弯曲变形与局部弹塑性变形。各类变形采用与文献[13]相同的计量方式, 并结合有限元分析模型给予图示。与试验相对应的是有限元分析, 有限元建模同文献[13]。4-5 板装置有限元模型见图 4。图 4a) 中 A、B 间相对位移即为装置整体变形量, 反映装置两端底板的相对总位移及装置总体刚度。图 4b) 的 C 处为单板顶部凹槽中点, 图 4b) 的 D 处为板与销轴接触面; 以图 4b) 的 C 处节点与底板的相对位移量计为单板的整体变形量, 以图 4b) 的 D 处 3 点平均位移与 C 处的相对位移量计为单板的局部变形量。图 4c) 中的 E 与 F 处, 均针对销轴, 其中 E 处各点为销轴中心线与板厚度中心对应点, F 处是销轴与板的接触面; 以图 4c) 的 E 处的中间节点与边缘节点的相对位移计为销轴的弯曲变形量, 以图 4c) 中 F 区域两端节点的平均位移与中间节点位移的相对位移量计为销轴局部凹陷变形量。

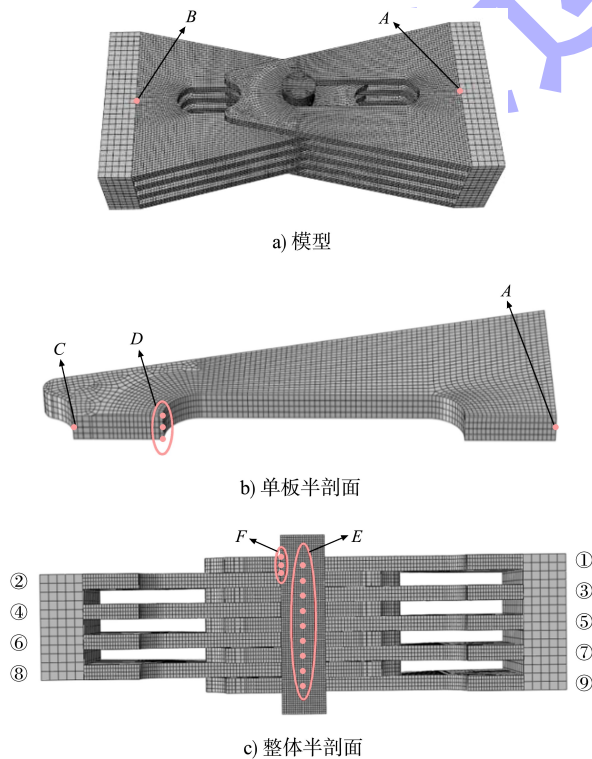


图 4 4-5 板限位装置有限元模型

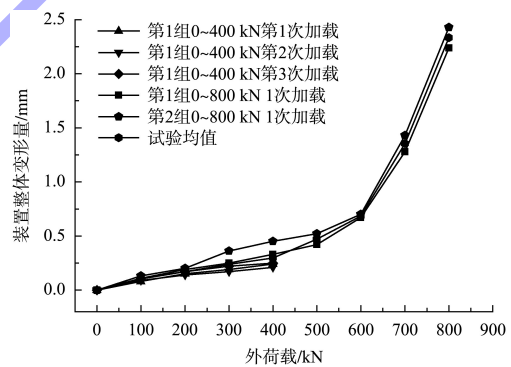
Fig. 4 Finite element model of 4-5 plate restrainer

板材、销轴各进行了 2 组材料性质试验, 见表 1。有限元分析中材料取值至少有 4 种组合, 分别为 P1-C1、P1-C2、P2-C1、P2-C2, 见表 2。此外, 还考虑了两种材料参数都取均值的工况, 因此共 5 组材料。绘制 2 组试验的外荷载-整体变形量曲线及均值线, 见图 5a)。其中, 外荷载 0~400 kN 段均值线取值方式为: 首先取第 1 组该区段 4 次加载的均值作为第 1 组试验值, 再与第 2 组试验值平均。表 2 中 5 组材料参数下整体变形量曲线的有限元分析结果与试验均值线的对比见图 5b)。

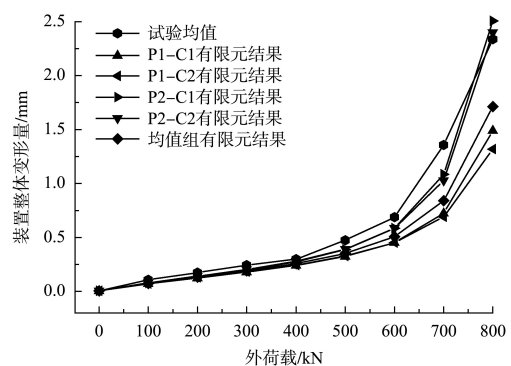
表 2 各材料组合下的变形量

Tab. 2 Deformations of each material combination mm

材料组合	荷载为 800 kN 时变形量			
	装置整体	多板侧⑤板	少板侧②板	销轴弯曲
P1-C1	1.488	0.131	0.198	0.743
P1-C2	1.314	0.119	0.186	0.556
P2-C1	2.506	0.184	0.408	1.092
P2-C2	2.397	0.169	0.403	0.907
均值组	1.709	0.138	0.250	0.724



a) 试验数据



b) 试验值与有限元结果对比

图 5 试验结果与有限元分析结果对比

Fig. 5 Comparison between experimental and finite element model results

由图 5a) 可见: 1) 在 0~400 kN 加载区间, 2 组试验的力-位移曲线保持线性, 装置在弹性范围; 2) 由 400 kN 加载至 800 kN 的历程中, 2 组试验在外荷载达到 500 kN 前装置仍处于弹性范围; 500~600 kN 加载区间表现出轻微非线性; 外荷载加至 600 kN 后非线性变形明显增强。

获得此试验模型尺寸的设计外荷载为 400 kN, 基于 GB 50017—2017《钢结构设计标准》的销轴抗弯安全系数 1.07 最低, 接近 1.0。试验中外荷载达到 500 kN 前装置处于弹性范围, 对比 400 kN 的设计外荷载, 试验结果说明: 基于能力保护设计理念、结合 GB 50017—2017《钢结构设计标准》提出的此新型拉压双向限位装置设计方法是偏于安全的。

由图 5b) 可见: 5 组材料组合中, P2-C1、P2-C2 组对应的有限元分析结果十分接近, 且与外荷载-整体变形量试验均值线吻合最好; P1-C2 参数组非线性变形能力最弱, 其余 2 组则位于中间。为深入理解图 5b) 中各材料组合下有限元分析结果与试验结果的异同, 各材料组合下的装置整体变形量、多板侧⑤板与少板侧②板的单板变形量、销轴弯曲变形量见表 2。其中, ⑤板与②板分别是多板侧与少板侧单板变形量最大者, 代表性较强; 销轴弯曲变形量则为与①板与⑤板对应的销轴中心节点的相对位移。

结合表 2 可知, P2-C1、P2-C2 组, 板的屈服强度最低, 少板侧变形量、销轴弯曲变形量均远大于其他组, 相应地对整体变形量贡献大; P1-C2

参数组中板与销的屈服强度均为最高, 非线性变形能力最弱。由此可见, 在试验模型尺度下, 有限元分析得到的装置整体变形量结果受板的屈服强度影响较大。

试验模型制作属于少量的小尺度构件加工, 材质离散性很难控制。试验与有限元分析结果对比显示, 有限元模拟中材料组合取 P2-C1、P2-C2 时与试验结果最为接近。试验最大外荷载为 800 kN 时, P2-C2 组有限元分析结果与试验值吻合最好, 因此后续分析以 P2-C2 组有限元分析结果为主。

本装置为多板与销的组合结构, 在受拉状态下, 中部销轴与板接触发生局部挤压, 板与销均发生局部弹塑性变形; 而且这部分变形在外荷载小于 400 kN 时就进入塑性。具体情况为: 局部挤压作用下, 外荷载达到 200 kN 时, 板的局部接触部分首先进入塑性; 外荷载达到 300 kN 时, 销轴的局部接触部分也进入塑性。外荷载 400 kN 时销轴与板局部塑性变形云图见图 6。

新型限位装置为对称结构, 因此取一半的单板观察分析即可, 具体为图 4c) 中的①、③、⑤、②、④板。4-5 板装置板与销轴的整体与局部变形量见图 7。⑤板与②板分别是多板侧与少板侧单板变形量最大者。将试验均值、装置整体变形、销轴弯曲变形以及代表多板侧、少板侧整体变形的⑤板、②板的单板变形量对比见图 8a), 图 8a) 的各变形量较设计外荷载 400 kN 时各自变形量的倍率见图 8b)。

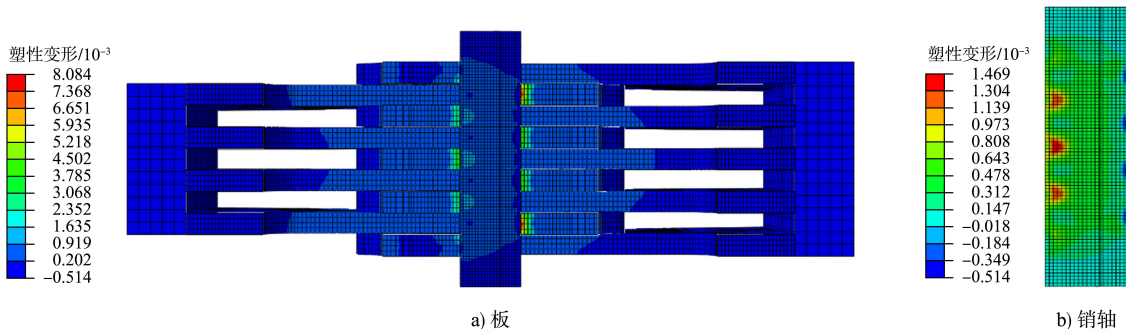


图 6 外荷载 400 kN 下装置塑性变形云图

Fig. 6 Plastic deformation cloud map under load of 400 kN

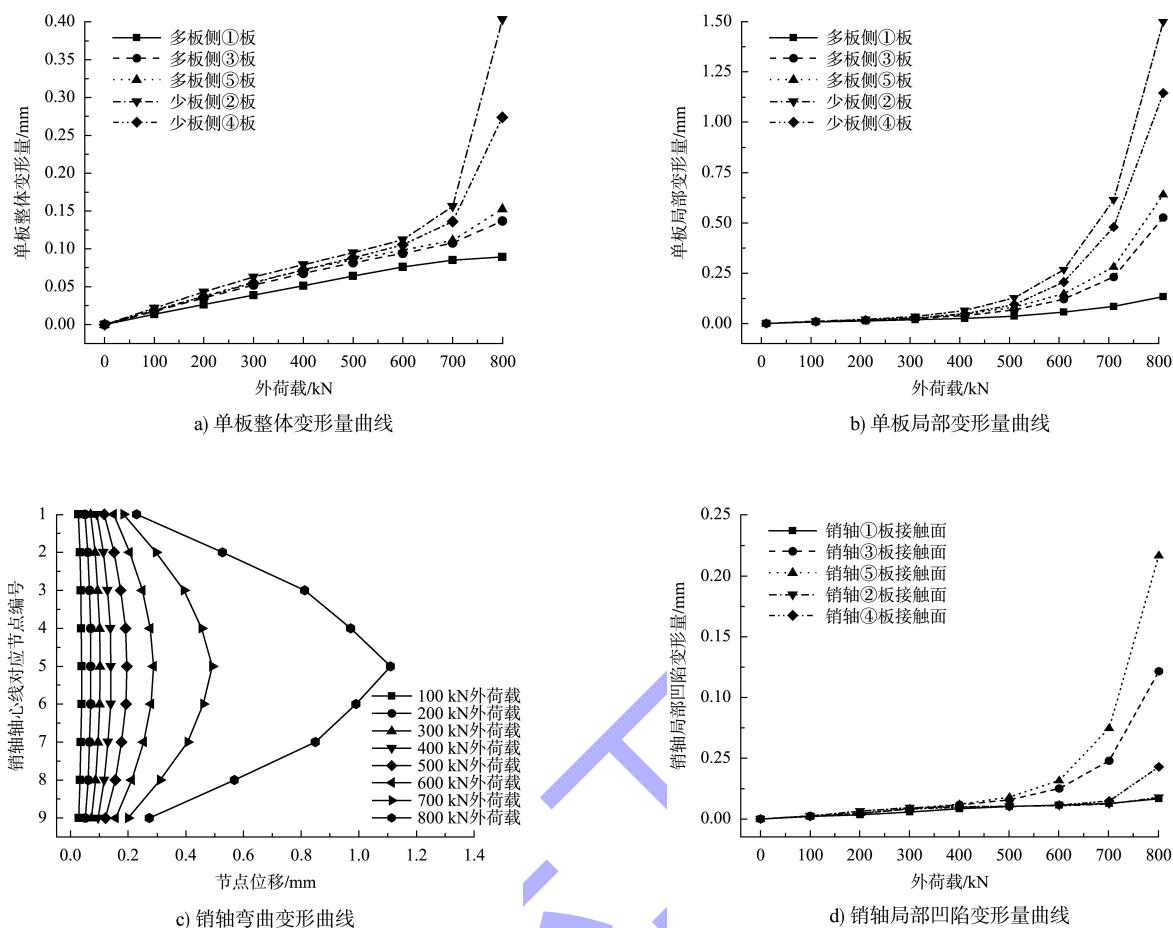


图 7 4-5 板装置外荷载-各单板与销轴的变形量曲线

Fig. 7 4-5 plate restrainer deformation curves of each single plate and pin

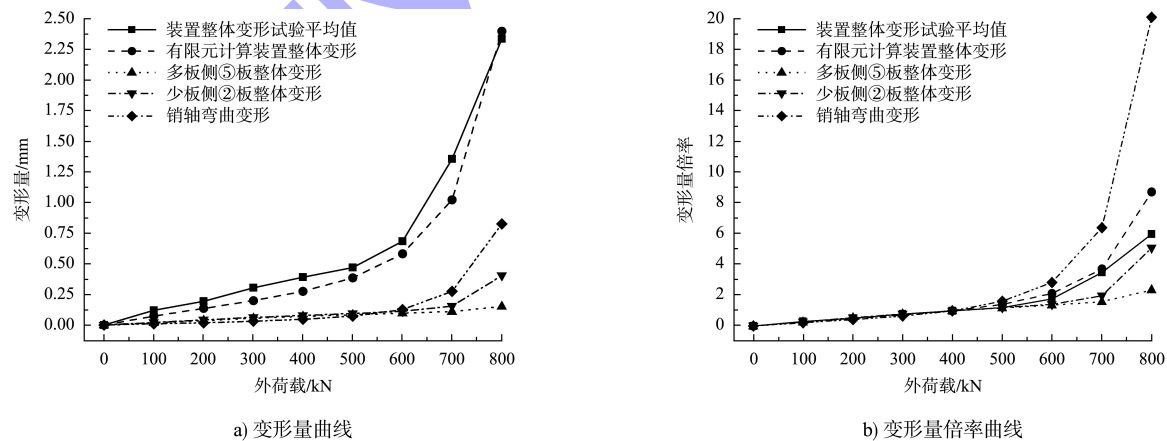


图 8 4-5 板装置各部分的外荷载-变形量曲线对比

Fig. 8 Load-deformation curves comparison of each component of 4-5 plate restrainer

由图 7a)、b) 可知, 少板侧单板的整体与局部变形量均大于多板侧, 少板侧主导板件部分变形; 由图 7d) 与 b) 的对比可知, 板的局部变形量始终大于销轴; 基于此, 图 7c) 显示出销轴整体偏移、弯曲向少板侧凸起的变形特点。

图 7a)、图 8a) 中少板侧整体变形量曲线加载至 600 kN 保持线性, 600~700 kN 开始出现轻微非线性; 多板侧整体变形量曲线加载至 700 kN 保持线性, 700~800 kN 开始出现很轻微的非线性。由图 8a)、b) 中各曲线对比可见, 400 kN 前所有变形量曲线均保持弹性; 由图 8b) 可以看出, 400~500 kN 销轴弯曲变形量曲线出现很轻微的非线性; 500~600 kN 非线性较明显, 超过 600 kN 则进入非线性快速增长阶段。对比三者可知, 多板侧进入非线性滞后于少板侧、少板侧进入非线性滞后于销轴, 由此可知, 板的确为被保护的构件。

由图 8b) 可见, 外荷载 400 kN 前各变形量倍率曲线重合; 外荷载超过 400 kN 时销轴弯曲变形量比值开始超越整体变形量比值; 外荷载大于 600 kN 时, 相较于整体变形量, 销轴弯曲变形量的非线性增长更快。由销轴弯曲变形量非线性增速大于整体变形量可知, 销轴弯曲变形控制了装置整体的变形特征。

3 极限承载力及弹性上界

新型拉压双向装置为刚性限位装置, 在弹性范围内工作, 因此需要了解弹性上界、进而了解已提出设计方法的相对安全性。在材料和构件的性能研究中, 通常以屈服点作为弹性上界。例如文献[16]~[18]均是关于构件屈服点的相关研究。在这些研究中, 最远点法^[9]在求取屈服点上, 具有物理意义明确、易于计算、适用性广的优势。对于此限位装置, 以最远点法求弹性上界需要极限承载力, 因此首先确定极限承载力。

由图 7b) 与 d) 的对比可见, 销轴的接触面局部变形远小于板接触面的局部变形, 因此随着外荷载的逐级增大, 板的接触面材料将率先断裂。新型限位装置试验是单向拉伸, 因此, 以其轴向最大塑性应变超过断后伸长率判断钢纤维断裂, 并以此确定极限承载力。

少板侧外侧板②、⑧板与销轴接触面处是局部塑性变形最大处。经有限元分析, 装置加载至 947.6 kN 时, ②、⑧板与销轴接触面的单元塑性应变首先达到材料的断后伸长率 35.5%, 见图 9。塑性应变达到材料断后伸长率意味材料发生破坏, 因此, 以 947.6 kN 作为装置极限承载力。

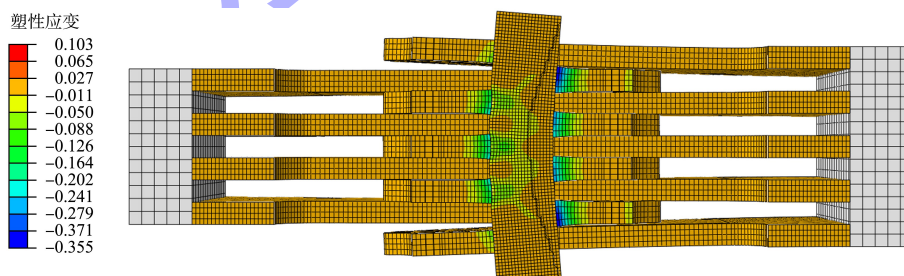


图 9 外荷载 947.6 kN 时塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain cloud map under external load of 947.6 kN

此外, 随外荷载的增加, 可以观察到中间销轴弯曲程度逐渐放大、多板侧的最外侧板, 即①、⑨板, 开始向外翘曲, 见图 10, 图中 U 为平动位移矢量和。定义板所在平面为面内, 板向外翘曲方向为面外, 选取图 4 中 C 点的面外水平位移表

征多板侧的最外侧板向外翘曲程度。

外荷载加载至 947.6 kN 时, 多板侧最外侧板面外位移与拉力方向的装置整体变形量随外荷载的变化曲线见图 11a); 图 11a) 的变形量除以 400 kN 时各自变形量的倍率曲线见图 11b)。可以

看出, 外荷载 400 kN 时拉力方向的整体变形量与多板侧最外侧板的面外位移分别为 0.274 和 0.124 mm, 面外位移为装置整体变形量的 45.3%。外荷载

947.6 kN 时整体变形量与面外位移分别为 7.182 和 6.048 mm, 面外位移为装置整体变形量的 84.21%。

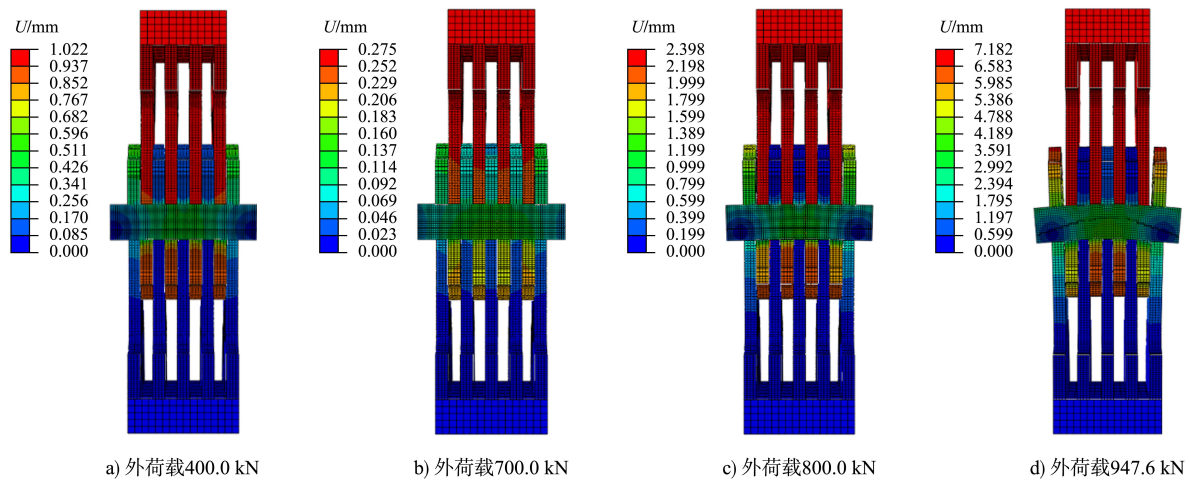
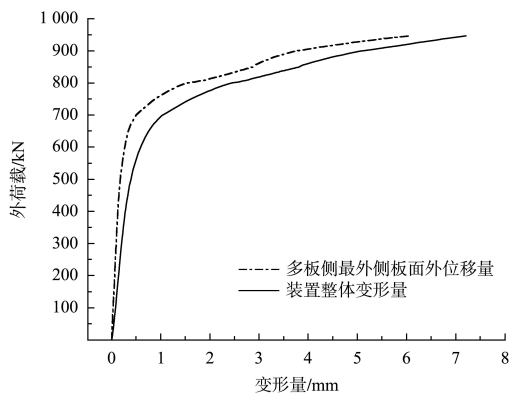
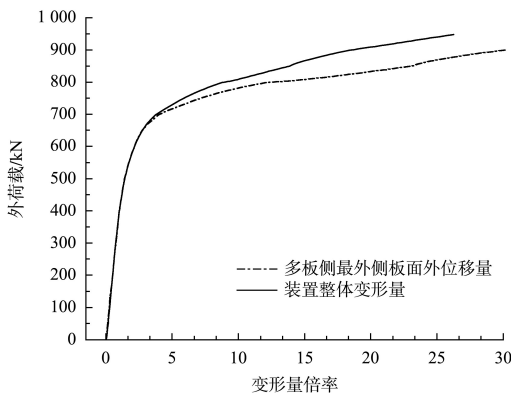


图 10 装置加载至破坏位移云图
Fig. 10 Deformation cloud map of restrainer under loading until failure



a) 变形量曲线



b) 变形量倍率曲线

图 11 多板侧最外侧板面外位移与装置整体变形量曲线
Fig. 11 Curves of displacement of outermost plate on multiple-plate side and overall deformation of restrainer

由图 11a) 可知, 装置整体变形量始终大于面外位移。由图 11b) 可知, 外荷载小于 700 kN 时, 整体变形量与面外位移的倍率曲线完全重合; 外荷载大于 700 kN 时, 面外位移倍率开始大于装置整体变形量, 且随着外荷载的增加, 此倍率增长速度快速变大。

图 11 中的 2 条外荷载-变形量曲线均是没有明显屈服点的曲线。因此以 947.6 kN 作为峰值点, 依据最远点法求取屈服点, 经计算得到面外位移曲线屈服点对应外荷载为 709.0 kN, 装置整体变形量曲线屈服点对应外荷载为 691.5 kN。由 2 条外荷载-变形量曲线的屈服点分析可知, 装置弹性上界由受拉方向的装置整体变形量曲线控制, 装置弹性上界屈服力应为 691.5 kN。

新型拉压双向限位装置为刚性限位装置, 由强度控制, 在弹性范围应用。在设计外荷载同为 400 kN 下, 第 1 节中销轴的抗弯安全系数是各验算指标中安全系数最低的, 为 1.07。装置弹性上界对应外荷载 691.5 kN 与设计外荷载 400 kN 之比为 1.73。由此可知, 以文献[13]中的方法设计试

验装置,安全系数为 1.73。

由以上分析可知:装置弹性上界由整体变形量曲线控制,受拉方向装置的整体变形量曲线屈服点为 691.5 kN,设计安全系数为 1.73。

虽然以板与销轴接触面轴线最大塑性应变超过断后伸长率判断钢纤维断裂,并以此确定极限承载力为 947.6 kN。图 6、图 7b)显示板与销轴接触面的局部挤压变形在外荷载 400 kN 前就已进入塑性状态,图 7a)显示加载至 600 kN 时板的整体变形量曲线保持线性,600~700 kN 出现轻微非线性,可以近似认为直到加载至 700 kN 前板的整体变形基本呈现为弹性,即加载至 700 kN 前此局部塑性变形基本不影响板的整体线弹性状态。

新型拉压双向装置为刚性限位装置,在弹性范围内工作。弹性上界可以认为是限位装置弹性承载力上限。在弹性上界范围内板的整体变形基本呈现为弹性,板的接触面局部塑性变形基本不影响板处于弹性状态。外荷载 400 kN 前销轴弹性、400~500 kN 销轴弯曲变形量曲线出现很轻微的非线性;500~600 kN 非线性明显,超过 600 kN 则进入非线性快速增长阶段;弹性上界内销轴弯曲变形的非线性也基本不影响装置整体的弹性状态。由此可知,在弹性上界范围内,销轴弯曲变形对装置整体变形起控制作用并对板起到保护作用,限位装置基于能力保护的设计方法得到进一步验证。

4 结论

1) 拉伸试验结果显示,当整体变形量曲线非线性明显时,外荷载加载至 600 kN;此值远大于设计外荷载 400 kN。因此,通过试验验证可知,已提出的设计方法偏安全。

2) 试验及其有限元分析结果表明:销轴弯曲变形量非线性增速大于整体变形量曲线;多板侧进入非线性滞后于少板侧、少板侧进入非线性滞后于销轴;此结果验证了销轴弯曲变形控制了装

置整体的变形特征,板件为被保护构件,实现了能力保护的设计思想。

3) 装置弹性上界由整体变形量曲线控制,整体变形量曲线屈服点为 691.5 kN;弹性上界范围内,板的整体变形基本呈现为弹性,板的接触面局部塑性变形不影响板基本处于弹性状态;销轴弯曲变形的非线性也基本不影响装置整体的弹性状态。

4) 新型拉压双向装置为刚性限位装置,在弹性范围内工作。基于弹性上界外荷载 691.5 kN 与试验设计外荷载 400 kN 的比值可知,基于能力保护的方法设计的试验装置,安全系数为 1.73。

参考文献:

- [1] 路万锋,吴俊东,王贵来,等. 构皮滩水电站通航建筑物第一级升船机形式与布置[J]. 水运工程, 2023(8): 109-113.
LUW F, WU J D, WANG G L, et al. Type and layout of first stage ship lift for navigation structures of Goupitan Hydropower Station [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 109-113.
- [2] 聂利英,林浩然,李守胜,等. 纵向地震作用下通航渡槽碰撞特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 73-82.
NIE L Y, LIN H R, LI S S, et al. Research on pounding of navigable aqueduct subjected to longitudinal ground motion [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2020, 40(2): 73-82.
- [3] 张勇. 葛洲坝 1 号船闸结构缝漏水处理工程实践[J]. 水运工程, 2001(5): 58-61.
ZHANG Y. Engineering practice of leakage treatment for the structural joint of Gezhouba No. 1 shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2001(5): 58-61.
- [4] 钮新强,聂利英,童迪,等. 一种通航渡槽结构缝拉压双向限位装置及其使用方法: CN202211183808. 9[P]. 2023-01-17.
NIU X Q, NIE L Y, TONG D, et al. A bidirectional tension

- and compression limiting device for structural joints of navigable aqueduct and its application method: CN202211183808. 9[P]. 2023-01-17.
- [5] 陈志华,刘琦,刘红波,等.索结构中销轴耳板连接破坏形式及承载力研究[J].建筑结构学报,2022,43(10): 295-306.
- CHEN Z H, LIU Q, LIU H B, et al. Study on failure pattern and bearing capacity of pin-plate connection in cable structures[J]. Journal of building structures, 2022, 43(10): 295-306.
- [6] 王仲衡,罗斌,张旻权,等.建筑索结构销轴耳板连接节点承载力试验研究和有限元分析[J].建筑结构学报,2020,41(11): 150-159.
- WANG Z H, LUO B, ZHANG M Q, et al. Experimental study and finite element analysis on bearing capacity of pin-connected plate joints [J]. Journal of building structures, 2020, 41(11): 150-159.
- [7] 郑帅恒,孙英,刘学.基于欧洲标准板桩码头钢拉杆设计计算方法[J].水运工程,2024(12): 82-87.
- ZHENG S H, SUN Y, LIU X. Calculation method for design of steel tie rods of sheet pile wharf based on European codes [J]. Port & waterway engineering, 2024 (12): 82-87.
- [8] PARK R, PAULAY T. Reinforced concrete structures[M]. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [9] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Specifications of seismic design for highway bridges: JTG/T 2231-01-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [10] 城市桥梁抗震设计规范: GJJ 166—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for seismic design of urban bridges: GJJ 166-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [11] AASHTO LRFD bridge design specification[S]. 8th Ed. Washington: American Associations of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [12] Seismic design criteria[S]. 2.0 Ed. Sacramento: California Department of Transportation, 2019.
- [13] 聂利英,韩刘,邵云澜,等.基于能力保护的新型拉压双向限位装置设计方法研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2024,46(2): 71-78.
- NIE L Y, HAN L, SHAO Y L, et al. Research on design method of a new tension-compression bidirectional restrainer based on philosophy of capacity protection[J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 2024, 46(2): 71-78.
- [14] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [15] 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- High strength low alloy structuralsteels: GB/T 1591-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [16] 冯鹏,强翰霖,叶列平.材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J].工程力学,2017,34(3): 36-46.
- FENG P, QIANG H L, YE L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(3): 36-46.
- [17] 殷晓三.无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J].地震工程与工程振动,2019,39(3): 143-150.
- YIN X S. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2019, 39(3): 143-150.
- [18] 夏振华.屈服点确定方法及其对结构抗震性能评估的影响[D].重庆:重庆大学,2020.
- XIA Z H. Yield point determination method and its effect on seismic performance evaluation of structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [19] 向照兴.轴向拉压波形钢板阻尼器的力学性能及减震效果研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- XIANG Z X. Study on mechanical properties and shock absorbing effect of axial tension compression corrugated steel plate damper [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

(本文编辑 王璁)