

基于保险丝理念的内凹型蜂窝芯型挡块的抗震分析^{*}

顾鑫 王天珩 常军[†] 翟慕赛

(苏州科技大学 土木工程学院, 苏州 215011)

摘要 为了提高我国中小跨径桥梁挡块的抗震性能,保证桥梁在中小震时下部结构的稳定性,防止主梁在大震下由于挡块刚度的变化产生的落梁破坏或对下部结构的不利影响,基于“保险丝”理念和负泊松比拉胀和耗能特性设计出了一种新型抗震挡块.首先通过 Midas Civil 得出挡块刚度的设计值;然后运用 ABAQUS 对挡块进行拟静力分析得到力一位移曲线,进而研究挡块的相关参数;最后将简化的力学模型应用到 Opensees 中,进行地震响应分析,从而验证挡块的抗震性能.通过增加内凹型蜂窝芯的胞体厚度,挡块强度逐渐增大,初始刚度也随之提高,耗能情况较优;实桥分析可得中小地震下挡块强度处于弹性或上升阶段,地震响应参数随之变大;在地震较大情况下挡块处于强度退化阶段,刚度降低,地震响应参数随之减小.因此,内凹型蜂窝芯型挡块能够实现“保险丝”性能,起到限位以及保护桥梁下部结构的作用,由于负泊松比拉胀特性,挡块破坏后也只需更换蜂窝芯.

关键词 蜂窝芯型挡块, 保险丝性能, 负泊松比结构, 桥梁抗震

中图分类号:U441.3

文献标志码:A

Seismic Analysis of the Concave Honeycomb Core Retaining Retainer Based on the Fuse Concept^{*}

Gu Xin Wang Tianheng Chang Jun[†] Zhai Musai

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011)

Abstract In order to improve the seismic performance of retainers for small and medium-span bridges in China, to ensure the stability of the substructure of bridges in small and medium earthquakes, and to prevent the main girder from falling girder damage or adverse effects on the substructure due to the change of retainer stiffness in large earthquakes, a new type of seismic retainer is designed based on the concept of “fuse” and the negative Poisson’s ratio of tensile and expansion and energy-consuming characteristics. A new type of seismic retainer is designed based on the concept of “fuse” and negative Poisson’s ratio tensile expansion and energy dissipation characteristics. Firstly, the design value of the stiffness of the retainer is obtained by Midas Civil; then the force-displacement curve is obtained from the proposed static analysis of the retainer using ABAQUS, and then the relevant parameters of the retainer are studied; finally, the simplified mechanical model is applied to Opensees to conduct seismic response analysis, so as to verify the seismic performance of the retainer. By increasing the cell thickness of the concave honeycomb core, the strength of the retainer gradually increases, and the initial stiffness also increases, and the energy dissipation is better; the real bridge analysis shows that the strength of the retainer is in the elastic or rising stage under small and medium earthquakes, and the seismic re-

2024-09-27 收到第 1 稿,2024-10-24 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51908395),江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22-1569),National Natural Science Foundation of China(51908395),Research and Practice Innovation Program for Graduate Students in Jiangsu Province (SJCX22-1569).

[†] 通信作者 E-mail:changjun21@126.com

sponse parameter becomes larger; the retainer is in the degradation stage under large earthquakes, and the stiffness decreases, and the seismic response parameter decreases. Therefore, the concave honeycomb core retainer can realize the “fuse” performance, play the role of limiting and protecting the substructure of the bridge, and only need to replace the honeycomb core after the retainer is damaged due to the negative Poisson’s ratio tensile expansion characteristics.

Key words honeycomb core retaining retainer, fuse concept, negative Poisson ratio structure, bridge seismic

引言

我国中小跨径梁式桥大多选用板式橡胶支座,主梁在大震作用下容易发生相对滑动,与挡块之间发生剧烈碰撞,从而造成挡块破坏率远高于桥墩破坏率^[1],同时国内采用的大多为整体式混凝土挡块,设计时只是作为一种构造设计^[2],且我国现行的各种桥梁抗震设计规范^[3,4]中尚缺乏关于挡块设计和挡块力学分析模型的说明,对于挡块形式和配筋没有统一要求,因此,忽略了对挡块的抗震计算。

挡块主要分为三种类型:橡胶挡块、钢筋混凝土挡块和钢挡块。橡胶挡块通过设置橡胶垫片起到缓冲作用,但随着橡胶强度增大其变形能力会减弱,造成垫片利用率变低^[5],较难设计出准确的参数以满足实桥的抗震要求;钢筋混凝土挡块通过配筋和设置滑移面来满足桥梁抗震要求,大都为脆性破坏,整体式挡块以斜剪和平剪破坏为主,滑移式挡块主要发生滑移破坏^[6],破坏后强度退化快,缺乏延性变形能力;钢挡块又分为X型钢挡块、H型钢挡块、钢板挡块和工字型钢挡块,有较为稳定的塑性变形能力,且设计尺寸可控,能根据实桥来进行设计,但由于其弹塑性力学模型屈服阶段强度不断上升,因此大震下,其刚度变大可能会对下部结构带来不利影响^[7]。

所以,美国 Caltrans 抗震设计规范^[8]提出了结构“保险丝”设计理念,通过对挡块的结构设计来降低地震惯性力对下部结构的不利影响,即把挡块作为可牺牲的延性耗能构件,降低主梁传递给墩柱的惯性力,避免墩柱地震时过快损坏,从而达到桥梁在罕遇地震下不垮塌的目的。Megally 等^[9,10]结合“保险丝”理念进行了一系列试验研究,总结出了关于挡块的构造细节与抗震设计方法,其成果已被最新的 Caltrans 规范采纳。徐略勤等^[11]基于结构“保

险丝”理念提出了在役桥梁抗震挡块的改造方法。所设计的新型抗震挡块在中小震下处于弹性状态或强度发展阶段;在大震下处于强度退化状态,从而发挥了结构“保险丝”的作用。王克海等^[12]提出了“多道设防、分级耗能”的桥梁抗震设计理念,在桥梁横向抗震中,挡块的耗能设计就显得尤为重要。因此,基于结构“保险丝”设计理念^[13],可以把挡块设计成为一种两水准设防结构。第一阶段,在各级地震过程中,可以将损伤有效地控制在挡块上,并保证其强度和桥梁整体的安全性。第二阶段,地震过后,可以很容易更换挡块承载结构,从而快速恢复桥梁通行功能,降低震后成本。上述两水准设防理念已成为桥梁结构抗震设计的重要发展趋势^[14]。

负泊松比结构具有较高的剪切模量、断裂韧性、压痕阻力和抗冲击能力,广泛应用于汽车制造、航空航天、武器工业等领域^[15]。尤其是负泊松比结构的“拉胀效应”使得其能量吸收的能力得到了显著的提升。內凹型蜂窝作为典型的负泊松比结构,当处于压缩状态时,弹性模量会随体积压缩比的增大而增大,材料会向内部聚集,瞬时密度增大,表现出较高的刚度^[16]。且在同尺寸下,內凹六边形结构展示出比正六边形结构更高的平台应力,其耗能能力要优于正六边形蜂窝结构^[17],并且由于其拉胀特性使得受压后作为挡块的“保险丝”结构更易更换。Gibson 等^[18]根据欧拉梁理论公式,结合弹性力学的知识,将蜂窝胞体简化成线弹性梁,并且推导出蜂窝结构的面内压缩时的各项解析式。

基于可牺牲挡块的设计理念和负泊松比结构拉胀特点^[19],本文提出了一种新型的內凹型蜂窝芯型抗震挡块,在中小震下能够通过弹塑性变形耗散地震力,大震时通过“保险丝”结构破坏的强度退化保证下部结构的稳定性,并由三角钢板支撑的后部结构防止落梁破坏。新型挡块设计依据公式,步骤

明确,综合三种常见挡块的优势,同时弥补了短板。

1 内凹型蜂窝芯抗震挡块的构造及基本原理

根据已有正六边形蜂窝芯型挡块的研究成果^[20]可知,正六边形蜂窝芯型抗震挡块在 30 mm 位移加载内的滞回曲线不够饱满,强度退化过快,耗能能力不稳定,如图 1 所示。在此基础上设计一种内凹型蜂窝芯型抗震挡块来提高抗震性能。

内凹型蜂窝芯抗震挡块的构造分为三部分:背部三角钢板固定支撑、内部内凹型蜂窝芯结构和外部可活动刚性围挡结构,如图 2 所示。蜂窝胞体设计为内凹六边形,三角支撑与底部、背部钢板焊接连接,挡块由底部螺栓孔与盖梁连接。

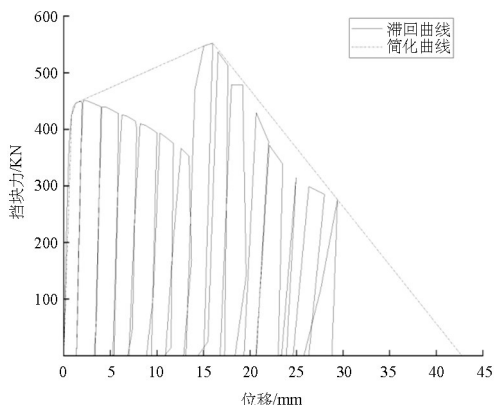


图 1 正六边形蜂窝芯型抗震挡块力-位移曲线

Fig. 1 Force-displacement curve of regular hexagonal honeycomb core type seismic retaining retainer

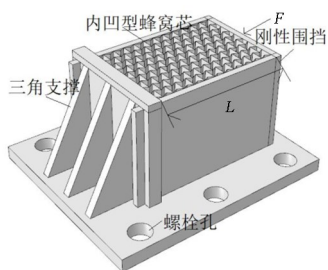


图 2 蜂窝芯型抗震挡块构造图

Fig. 2 Structure diagram of honeycomb core type seismic retaining retainer

结合内凹六边形蜂窝结构的基本理论^[21,22],得出蜂窝芯的设计尺寸公式。蜂窝结构面内压缩分为 x 轴和 y 轴两个方向,本文研究的压缩方向为沿 y 轴的方向,如图 3 所示,其中尺寸参数 h 为蜂窝单胞水平壁长, l 为斜壁长, θ 为内凹角, t 为壁厚。

由于蜂窝芯结构为内凹正六边形,因此图 3 中参数选取为 $\theta=30^\circ$, $h=2l$ 。蜂窝结构参数设计公式推导如下:

蜂窝塑性坍塌时的应力上限 σ_{pl} 为

$$\sigma_{pl} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: A 为蜂窝结构 y 方向的面积, F 为蜂窝结构所能承受的外力。

由于挡块背部三角支承的刚度远远大于内凹型蜂窝芯的设计刚度,因此挡块的设计刚度近似于蜂窝芯的刚度,内凹型蜂窝芯轴向刚度 k 为

$$k = \frac{E_c A}{L} \quad (2)$$

式中: k 为内凹蜂窝芯型挡块沿 y 轴的轴向刚度, L 为内凹蜂窝芯型挡块沿 y 轴的轴向长度。

蜂窝塑性坍塌时的应力上限计算公式^[18]为:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin\theta)\sin\theta} \quad (3)$$

式中: σ_{ys} 为蜂窝铝材料的屈服强度。

线弹性阶段 y 轴方向的等效杨氏模量^[18]为:

$$E_c = E_s \frac{\rho^*}{\rho_s} = E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\cos^3\theta} \quad (4)$$

式中: ρ^* 为内凹蜂窝结构的相对密度, ρ_s 为内凹蜂窝铝材料的密度, E_s 为内凹蜂窝铝材料的弹性模量。

实际计算中,首先根据实桥设计出挡块外围构件的尺寸,然后对全桥施加地震波得出该桥的最大横向力,并将该横向力作为设计力;根据公式(1)计算出蜂窝塑性坍塌时的应力上限,通过公式(2)得出蜂窝芯的等效弹性模量;由于蜂窝芯材料的屈服强度、密度、弹性模量已知,可以根据公式(3)、(4)计算出蜂窝芯胞体的各个尺寸。

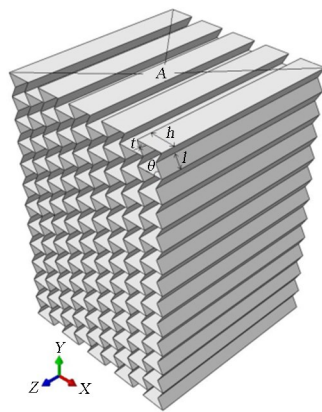


图 3 内凹型蜂窝芯结构尺寸

Fig. 3 Concave honeycomb core structure size

2 基于“保险丝”性能的挡块设计

2.1 模拟设计方案

国内混凝土挡块一般设计为矩形截面,常规尺

寸如图4所示^[23].因此,内凹型蜂窝芯型挡块也设计成矩形截面,并通过外围钢板来限制内部蜂窝芯的变形.蜂窝结构尺寸与常规混凝土挡块的大小相近.

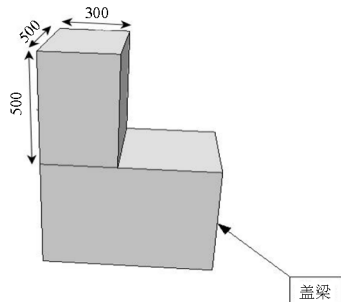


图4 常规挡块尺寸图(单位:mm)

Fig. 4 Normal retainer size diagram (unit: mm)

在确定整体尺寸后,蜂窝芯的尺寸设计取决于挡块所受到的横向力大小.采用 Midas Civil 有限元软件分析寿江大桥的案例,寿江大桥为七跨三联的桥面连续简支梁桥,跨径布置为 $3 \times 30 \text{ m} + 3 \times 50 \text{ m} + 13 \text{ m}$;其中 30 m 跨和 50 m 跨为简支 T 梁, 13 m 跨为简支空心板, 30 m 跨采用双柱式圆形桥墩, 50 m 跨采用矩形单柱式桥墩; 13 m 跨采用四氟滑板式橡胶支座,其他均为板式橡胶支座.全桥示意图如图5.

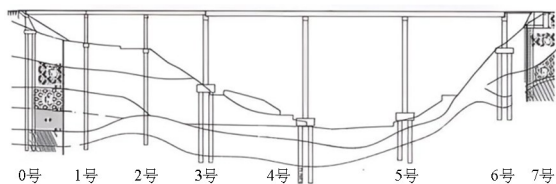


图5 寿江大桥示意图

Fig. 5 Diagram of Shoujiang Bridge

全桥模型如图6所示,场地设计基本加速度峰值 $A=0.2g$;抗震设防类别:B类;地震基本烈度:Ⅷ度.桥梁设计参数如下:上部结构主梁横断面为四榀 T 梁,桥宽为 9.0 m ,结构材料采用 C40;每榀 T 梁安置 1 个板式橡胶支座,支座型号为 GYZ $400 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$;下部结构桥墩顺桥向尺寸为 2.4 m ,横桥向为 4.0 m ,3、4、5、6 号墩依次高 39.3 m 、 59.8 m 、 56.8 m 、 17.8 m .盖梁高 1.8 m ,宽 2.4 m ,横桥向长度为 7.84 m ,结构采用 C30 混凝土.

首先沿横桥向加载处理后的 E2 地震波,且只取到峰值加速度的前 40 s ,得出基本地震时主梁的最大横向力,输入的地震动时程波如图7所示.根据公路桥梁抗震设计规范与动参数区划图^[24]中峰值加速度与烈度区的对照,把图7中的地震加速度

峰值调整至 $0.45g$ 输入.在输入地震动时程波后,模型运行分析得到 4 号墩处横向力的大小随时间变化曲线如图8所示,由于新型挡块只需考虑主梁对其的压力,所以只取正向力.得到 4 号墩在地震作用下所受最大横向力为 629 kN ,结合内凹六边形蜂窝结构计算公式,取 650 kN 为挡块所受的设计横向力.

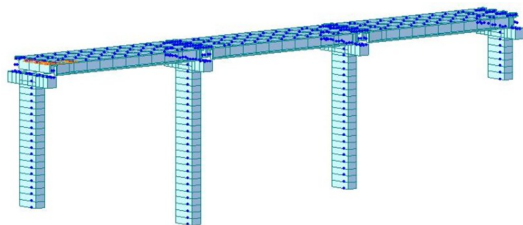


图6 全桥有限元模型

Fig. 6 Full bridge finite element model

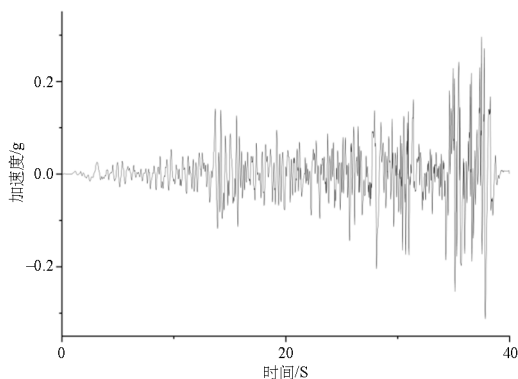


图7 地震动时程曲线

Fig. 7 Ground motion time history curve

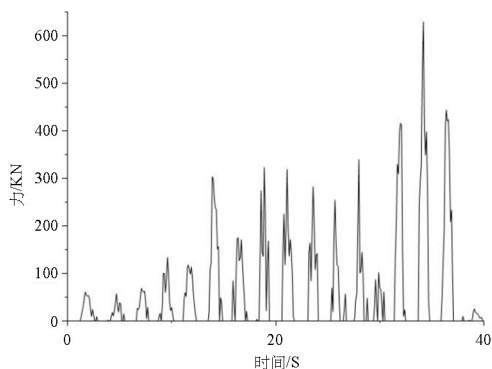


图8 4号墩横向力时程图

Fig. 8 Lateral force time history diagram of pier 4

在得到横向力后,通过第一节中的公式设计蜂窝胞体参数,并且通过 ABAQUS 有限元软件验证设计挡块是否满足“保险丝”性能要求.具体步骤如下:

(1)参照常规挡块,设计蜂窝芯整体尺寸为 $280 \text{ mm} \times 415 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$;

(2)结合公式(1)~(4),确定胞体斜壁长 l 为 20 mm ,水平壁长 h 为 40 mm ,壁厚 t 取值为

2.0 mm、3.0 mm、4.0 mm；

(3)通过调整蜂窝壁厚的大小来比较分析内凹型蜂窝芯挡块的力—位移曲线的影响情况；

(4)采用 ABAQUS 有限元软件验证设计的挡块参数是否满足“保险丝”性能指标。

ABAQUS 数值仿真分析时所选材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数表					
Table 1 Material parameter table					
材料	密度/ (t/mm ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服应力/ MPa	厚度/ mm
Q420	7.85×10^{-9}	2.06×10^5	0.28	420	30
6063-O	2.7×10^{-9}	6.90×10^4	0.33	50	2.0/3.0/4.0

对挡块进行拟静力分析以模拟地震时主梁对挡块的碰撞行为。采用循环递增位移加载,位移加载增幅为 2 mm。分析挡块加载后的力—位移曲线来确定是否满足“保险丝”性能要求。加载步骤如图 9 所示。

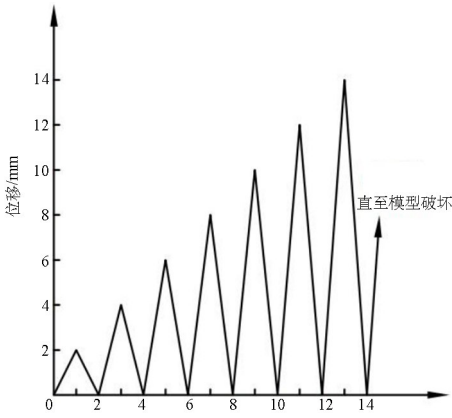


图 9 加载步骤图
Fig. 9 Loading procedure diagram

2.2 抗震挡块数值模拟结果

蜂窝结构横向力达到最大值时的损伤变形如图 10 所示。在挡块强度处于最大值时,背部钢板和背部梯形支撑没有发生屈曲变形的现象,即钢板固定支撑结构始终处于弹性阶段。

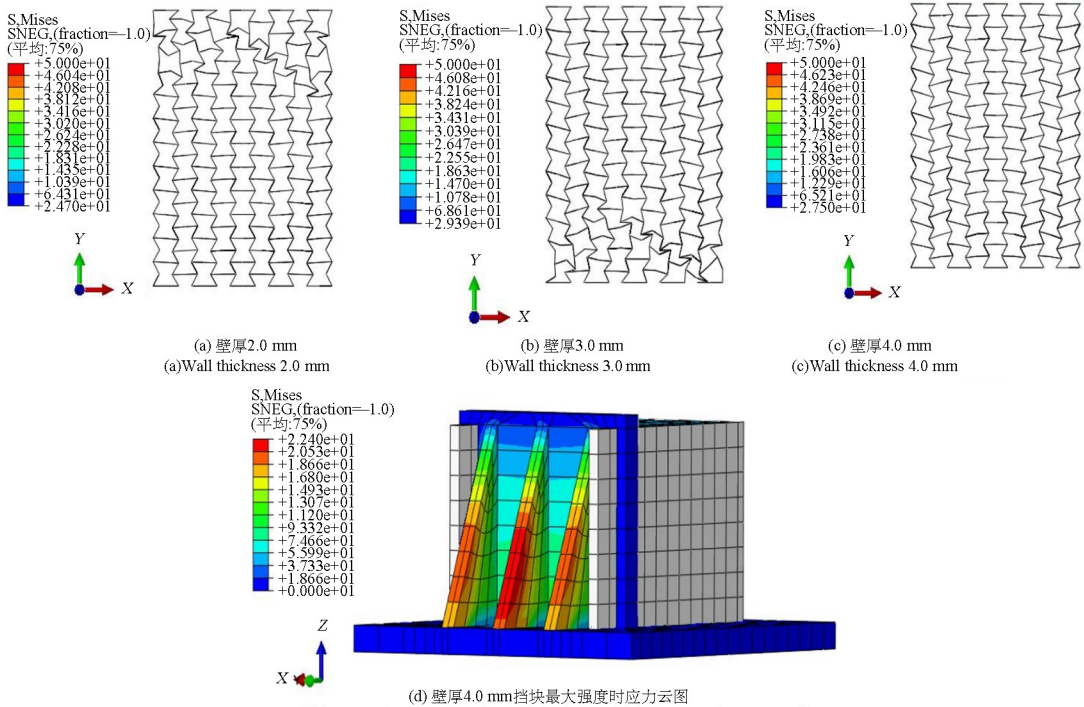


图 10 模型损伤变形图
Fig. 10 Model damage deformation diagram

拟静力分析所得的挡块力—位移曲线,如图 11 所示。当加载至破坏时,胞体壁厚为 2.0 mm 的内凹型蜂窝芯结构为脆性破坏,蜂窝芯的承载力到达峰值后断崖下跌,抵抗变形弱且耗能能力低,破坏前无征兆,主梁可能会发生落梁破坏而造成桥

梁失去承载功能。蜂窝壁厚设置为 3.0 mm 时,塑性变形能力增强,滞回曲线饱满耗能效果好,使得内凹型蜂窝芯在变形过程中的反力相较于壁厚 2.0 mm 时变大很多,且蜂窝芯的强度退化情况要优于 2 mm 的工况。蜂窝壁厚为 4.0 mm 时,由于壁

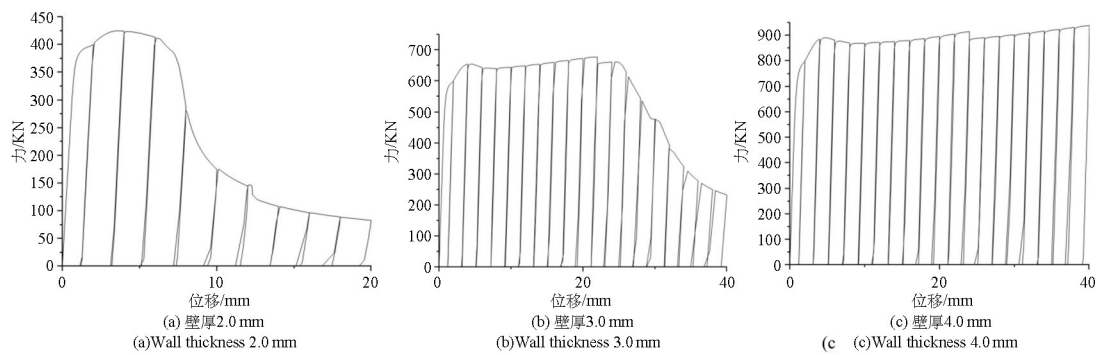


图 11 挡块力—位移曲线
Fig. 11 Retainer force-displacement curve

厚的增加,内凹型蜂窝芯的承载力也得到提高,其耗能力要高于 3.0 mm 的蜂窝芯,明显优于 2.0 mm 的蜂窝芯,但作为“保险丝”构件,其并没有发生强度退化的现象,刚度越来越高,可能会对下部结构产生不利影响.

把抗震挡块的力—位移曲线简化成三个阶段,大致分为弹性、塑性和强度退化.在此情况下,随着位移的继续增加,挡块承载力会在塑性阶段保持一个平稳上升后开始进入强度退化阶段而逐步降低.然而当壁厚增加到 4 mm 时,挡块承载力和耗能效果提高的同时,强度退化也会随之延后.

3 新型挡块抗震效果分析

3.1 桥例及有限元模型

由于寿江大桥的 1~3 跨桥墩较低,主要以纵向破坏为主,而 4~6 跨桥墩较高,所受地震横向力较为明显,且 6 号墩横向倾斜度较高^[25],所以本文选取寿江大桥的 3~6 号墩进行研究.

通过建立全桥模型并通过下部结构的地震响应来分析蜂窝芯型挡块的抗震性能.全桥模型采用寿江大桥 3~6 号段的桥墩,并通过 OpenSees 有限元软件建立分析模型.

在 OpenSees 有限元模拟中,基于寿江大桥 50 m 跨横截面,建立模型,如图 12 所示.

由于不考虑其破坏,桥墩与主梁均采用弹性梁单元模拟^[26];挡块用两节点单元模拟,支座则采用零长单元进行模拟.单墩有限元模型如图 13 所示.

在汶川地震中,支座多表现为较大的滑移变形,因此在设计时应当考虑到支座的滑移效应.本文根据 Xiang 等^[27]对于板式橡胶支座的滑移激励

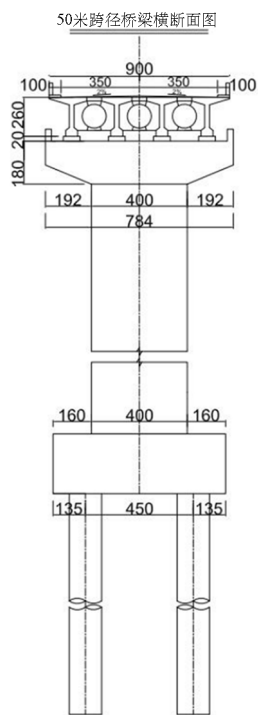


图 12 寿江大桥横截面图
Fig. 12 Cross-section of Shoujiang Bridge

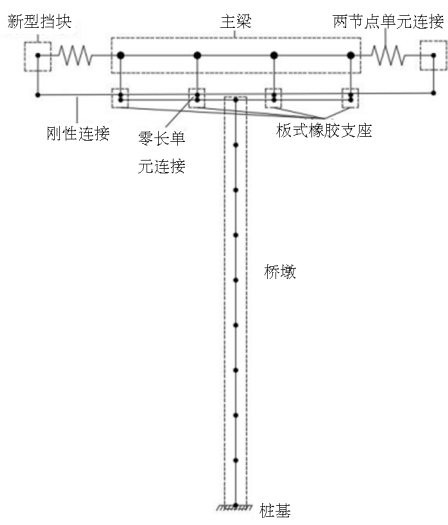


图 13 OpenSees 有限元模型
Fig. 13 OpenSees finite element model

3.2 抗震效果分析

采用 OpenSees 有限元软件计算得到主梁最大横向位移和墩底最大弯矩剪力来验证蜂窝芯型抗震挡块在三种不同地震下是否满足“保险丝”性能指标。

通过不同地震波下的主梁最大横向位移得出,内凹型蜂窝芯型抗震挡块受到频遇地震作用下的位移很小,蜂窝芯基本处于弹性阶段;当提高地震加速度值到基本地震时,主梁的横向位移开始变大,并随着 PGD 的增大在 No. 6 时达到最大值;在罕遇地震作用下,主梁横向位移随着 PGD 的增大达到最大值,并且位移峰值在设计承载范围内,如图 18 所示。

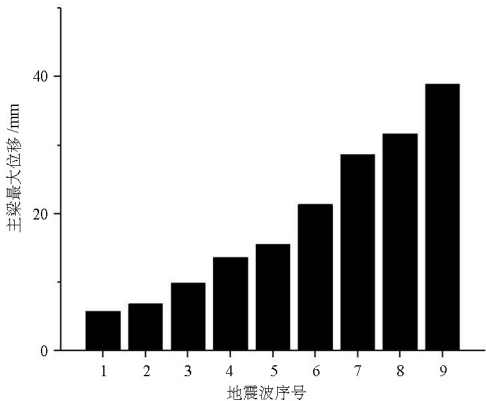


图 18 不同地震波下的主梁最大横向位移
Fig. 18 Maximum transverse displacement of main beam under different seismic waves

通过挡块在不同地震情况下对下部结构传递的最大剪力得出,在频遇地震和基本地震下,此时挡块强度处于不断上升的趋势,如时程波 No. 1~No. 6 所示。当发生罕遇地震时,即时程波 No. 7~No. 9,挡块由于蜂窝芯的强度退化导致刚度急剧下降,剪力迅速变小,证明上部结构传递给桥墩的惯性力降低了,同时又起到了限位的作用,如图 19 所示。

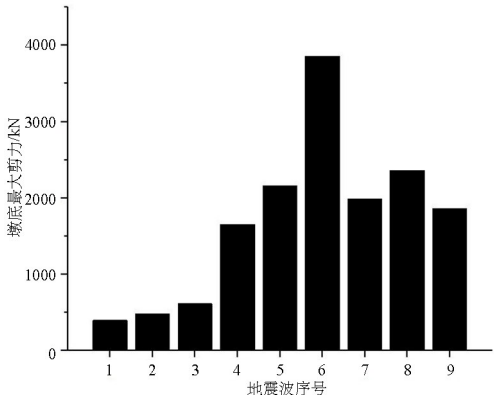


图 19 不同地震波下墩底最大剪力
Fig. 19 Maximum shear force at pier bottom under different

接着再通过对比不同地震下墩底所受的最大弯矩可知,当地震加速度增大时,4 号墩墩底所受弯矩也随之增大,而达到罕遇地震加速度时,弯矩明显降低,说明墩底没有发生明显的破坏,进而满足挡块对下部结构的“保险丝”性能的要求,如图 20 所示。

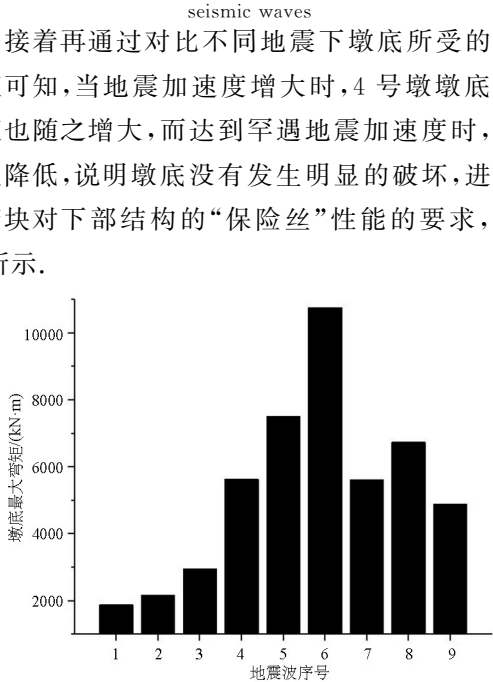


图 20 不同地震波下墩底最大弯矩
Fig. 20 Maximum bending moment of pier bottom under different seismic waves

4 结语

(1)对比拟静力加载下正六边形蜂窝芯型抗震挡块的力—位移曲线图,当胞体壁厚在 3~4 mm 时,内凹型蜂窝芯型挡块的承载力要更强,耗能效果更好,强度在 20 mm 位移加载内没有发生退化,其抗震性能优于前者。

(2)由力—位移曲线得出,胞体壁厚在 3.0 mm 与 4.0 mm 之间的蜂窝芯型抗震挡块破坏时的强度变化分为弹性和强度上升两个阶段,滞回曲线饱满且强度平稳上升,并且位移在 20 mm 内没有发生强度退化的现象,满足挡块“保险丝”理念的要求。因此,调整蜂窝胞体壁厚能满足挡块在不同桥梁上的强度和变形能力,实现“保险丝”性能。

(3)内凹型蜂窝芯抗震挡块由于负泊松比结构优良的延性,可以在其承载力范围内发挥良好的耗能与限位功能。通过对比相同整体尺寸下,不同胞体厚度的内凹型蜂窝芯型挡块得出,当壁厚为 3.0 mm 时,挡块在中小震下处于弹性或强度发展阶段,此阶段下部结构的地震响应随着加速峰值的增大而增大;在大震下,挡块强度开始退化,减小了上部结构传递给下部结构的惯性力的同时,保护了下部结构。

(4)新型挡块的受力主要由蜂窝铝芯承担,因而罕遇地震下,相较于正六边蜂窝在受压后轴向膨

胀可能对于刚性围挡的不利破坏,当蜂窝芯发生压溃破坏时,负泊松比的拉胀特性使结构受压会发生收缩,体积变小,震后只需更换蜂窝芯即可。

参考文献

- [1] 管仲国, 李建中. 城市高架桥合理抗震体系选择与经济性对比[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 91—98.
GUAN Z G, LI J Z. Structural performance and cost comparison of different seismic resisting systems for urban expressway viaducts [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 91—98. (in Chinese)
- [2] 石岩, 王军文, 秦洪果, 等. 桥梁抗震挡块研究进展[J]. 世界地震工程, 2013, 29(2): 90—95.
SHI Y, WANG J W, QIN H G, et al. Review of recent development in seismic shear keys of bridges [J]. World Earthquake Engineering, 2013, 29(2): 90—95. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02—01—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
Guidelines for seismic design of highway bridges: JTG/T B02—01—2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁抗震设计规范: CJJ 166—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban bridges: CJJ 166—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 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 W P, ZHOU Q, ZHANG H Y, 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. (in Chinese)
- [6] 陈乐生. 汶川地震公路震害调查—桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
CHEN L S. Report on highways' damage in the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: China Commu-
- nications Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 王克海, 孙永红, 韦韩, 等. 汶川地震后对我国结构工程抗震的几点思考[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 54—59.
WANG K H, SUN Y H, WEI H, et al. Comments on seismic strengthening for structural engineering in china after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(11): 54—59. (in Chinese)
- [8] Caltrans SDC 1.7. Caltrans seismic design criteria [S]. California: California Department of Transportation, 2013.
- [9] SILVA P F, MEGALLY S, SEIBLE F. Seismic performance of sacrificial exterior shear keys in bridge abutments [J]. Earthquake Spectra, 2009, 25(3): 643—664.
- [10] BOZORGZADEH A, MEGALLY S, RESTREPO J I, et al. Capacity evaluation of exterior sacrificial shear keys of bridge abutments [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 555—565.
- [11] 徐略勤, 李建中. 可牺牲抗震挡块的两水准设计方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 59—66.
XU L Q, LI J Z. Dual-level design method of sacrificial aseismic retainers [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 59—66. (in Chinese)
- [12] 王克海, 韦韩, 李茜, 等. 中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 115—121.
WANG K H, WEI H, LI Q, et al. Philosophies on seismic design of highway bridges of small or medium spans [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 115—121. (in Chinese)
- [13] EL-BAHEY S, BRUNEAU M. Buckling restrained braces as structural fuses for the seismic retrofit of reinforced concrete bridge bents [J]. Engineering Structures, 2011, 33(3): 1052—1061.
- [14] HAN Q, ZHOU Y L, OU Y C, et al. Seismic behavior of reinforced concrete sacrificial exterior shear keys of highway bridges [J]. Engineering Structures, 2017, 139: 59—70.
- [15] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. 力学学报, 2019, 51(3): 656—687.
REN X, ZHANG X Y, XIE Y M. Research progress in auxetic materials and structures [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(3): 656—687. (in Chinese)

- [16] 于靖军, 谢岩, 裴旭. 负泊松比超材料研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(13): 1—14.
YU J J, XIE Y, PEI X. State-of-art of metamaterials with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13): 1—14. (in Chinese)
- [17] 宫晓博, 刘宇鸿, 于昌利, 等. 不同泊松比蜂窝结构抗冲击性能数值分析[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(2): 38—47.
GONG X B, LIU Y H, YU C L, et al. Numerical analysis of impact resistance of honeycomb structures with different Poisson's ratios [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(2): 38—47. (in Chinese)
- [18] 吉布森, 阿什比. 多孔固体结构与性能 [M]. 刘培生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. LIU P S. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [19] 朱绍涛, 李静, 张伟. 负泊松比蜂窝夹层板的多周期运动研究[J]. 动力学与控制学报, 2021, 19(5): 33—38.
ZHU S T, LI J, ZHANG W. Multiple periodic motions of a honeycomb sandwich plate with negative poisson's ratio [J]. Journal of Dynamics and Control, 2021, 19(5): 33—38. (in Chinese)
- [20] 顾鑫, 常军. 蜂窝芯型挡块的设计及抗震性能研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 270—274, 294.
GU X, CHANG J. Design and anti-seismic performance of honeycomb core retainers [J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(6): 270—274, 294. (in Chinese)
- [21] 乔扬, 赵至诚, 谢晶, 等. SLM 钛合金蜂窝结构的面内压缩力学行为[J]. 兵工学报, 2023, 44(3): 629—637.
QIAO Y, ZHAO Z C, XIE J, et al. In-plane compressive mechanical behavior of SLM titanium alloy honeycomb structure [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(3): 629—637. (in Chinese)
- [22] 臧雪宇, 亢路宽. 蜂窝型抗震耗能挡块设计及试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(8): 114—119.
ZANG X Y, QI L K. Design and experimental study of honeycomb retainers for seismic energy-dissipation [J]. Industrial Construction, 2021, 51(8): 114—119. (in Chinese)
- [23] 徐略勤, 李建中. 新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 111—118, 199.
XU L Q, LI J Z. Design and experimental investigation of a new type sliding retainer and its efficacy in seismic fortification [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 111—118, 199. (in Chinese)
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [25] 李晓蒙. 汶川地震寿江大桥震害机理及地震响应参数分析[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究所, 2016.
LI X M. Seismic damage mechanism and seismic response analysis of the shou jiang bridge in Wenchuan earthquake [D]. Beijing: Institute of Highway Science, Ministry of Transport, 2016. (in Chinese)
- [26] 项长生, 赵竞. 不同阻尼器对连续梁桥横向抗震性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 102—110.
XIANG C S, ZHAO J. Influence of different dampers on transverse seismic performance of continuous beam bridges [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(1): 102—110. (in Chinese)
- [27] XIANG N L, LI J Z. Experimental and numerical study on seismic sliding mechanism of laminated-rubber bearings [J]. Engineering Structures, 2017, 141: 159—174.