

基于杠杆的位移放大型黏滞阻尼墙试验

孙飞飞¹, 吴坦焯², 莫刚², 邢加为³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 银川能源学院 建筑工程学院, 宁夏 银川 750105)

摘要: 为了解决传统黏滞阻尼墙需要较大墙面积来提供足够阻尼力的问题, 设计了一种基于杠杆的位移放大型黏滞阻尼墙。对传统黏滞阻尼墙和位移放大型黏滞阻尼墙的对比试件进行了滞回试验, 检验了位移放大型黏滞阻尼墙的放大效果。将传统黏滞阻尼墙阻尼力公式中引入位移放大倍数, 得到了位移放大型黏滞阻尼墙阻尼力公式, 计算结果与试验结果吻合较好。对位移放大装置间隙导致的滞回曲线滑移现象进行了模拟, 通过理论推导研究了间隙比对耗能降低率的影响程度。

关键词: 黏滞阻尼墙; 杠杆; 位移放大; 间隙

中图分类号: TU317.1; TU391

文献标志码: A

Experiment of Viscous Damping Wall with Displacement Amplification Lever

SUN Feifei¹, WU Tanye², MO Gang², XING Jiawei³

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Yinchuan Energy Institute, Yinchuan 750105, China)

Abstract: Traditional viscous damping wall (VDW) needs large wall area to provide large damping force. In order to solve this problem, a viscous damping wall with displacement amplification lever (VDW-DAL) was proposed. Hysteretic experiment of traditional VDW and VDW-DAL specimens was carried out to verify the amplification effect of VDW-DAL. After adding displacement amplification factor into damping force formula of traditional VDW, a new damping force formula for VDW-DAL was obtained and it fit well with the experimental results. The slip phenomenon of hysteretic curves caused by gap was simulated and the effect of gap ratio on energy dissipation reducing rate was analyzed by theoretical derivation.

Key words: viscous damping wall; lever; displacement amplification; gap

黏滞阻尼墙能够隐藏于建筑结构的墙体中, 既能耗散地震能量又不影响建筑的使用, 是一种能很好满足人们要求的消能减震构件。1986年, 日本学者 Miyazaki 等^[1]首次提出黏滞阻尼墙概念, 并对安装有黏滞阻尼墙的结构进行了振动台试验研究。1992年, 日本的 Miyazaki 等^[2]设计了世界上第 1 幢用黏滞阻尼墙减震耗能的建筑 SUT-Building。此后, 美国、中国等各国学者相继对黏滞阻尼墙在结构中的减震效果开展了试验和理论研究^[3-6]。目前, 关于黏滞阻尼墙构件的文献相对较少。张方、潘德恩^[7]对黏滞阻尼墙进行了动力学试验, 研究了其阻尼特性。闫峰^[8]对黏滞阻尼墙模型进行了力学性能试验, 并提出了力学性能计算公式。欧谨等^[9]进行了黏滞阻尼墙动力性能试验, 研究了黏滞阻尼墙的动力性能随环境温度、位移幅值及振动频率的变化规律。孙飞飞、莫刚^[10]提出了利用振动台研究黏滞阻尼墙构件性能的试验方法。

黏滞阻尼墙虽然具有很多优点, 但仍存在不足。其中很重要的一点就是黏滞阻尼墙为结构提供较大阻尼力时通常需要较大的阻尼墙面积, 而当阻尼墙面积较小时, 难以提供较高阻尼力。为了解决这一问题, 项潇潇等^[11]提出一种类似千斤顶液压机构的液压型放大装置来提高阻尼力。但是该装置对加工要求较高, 成本较大, 尚需通过试验检验其可行性。

利用杠杆可以方便地实现位移放大效果, 提高黏滞阻尼墙的阻尼力和耗能能力。为此提出了一种基于杠杆的位移放大型黏滞阻尼墙, 通过试验研究检验其性能, 并与传统黏滞阻尼墙换算结果进行对

收稿日期: 2016-07-26

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(14zz035)

第一作者: 孙飞飞(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢、钢-混凝土组合结构抗震分析和设计理论。

E-mail: ffsun@tongji.edu.cn

比,提出位移放大型黏滞阻尼墙阻尼力公式,并对位移放大装置间隙的影响进行分析。

1 位移放大型黏滞阻尼墙构造设计

借鉴并利用机械领域中的杠杆制作了一个带有位移放大装置的黏滞阻尼墙,其安装模型的三维图如图 1 所示.将内钢板插入外钢箱中,使内钢板顶部置于外钢箱顶部,两者接触部分做润滑处理.连接装置两端各固定一个杠杆,杠杆下部插于内钢板顶部的插槽中,杠杆上部插于上插槽中.上插槽与外钢箱上突出的钢板用螺栓连接成为一体,加载梁与连接装置的顶板相连.

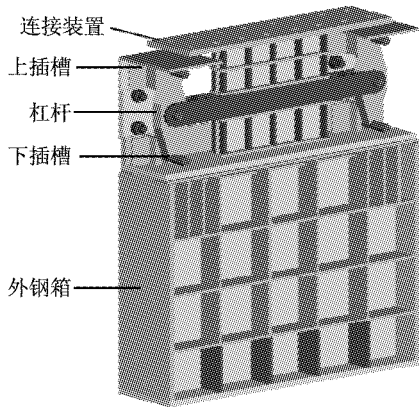


图 1 位移放大型黏滞阻尼墙三维图

Fig.1 Three-dimensional diagram of VDW-DAL

位移放大装置的工作原理如图 2 所示.当加载梁产生大小为 u 的右向水平位移时,连接装置也会产生向右的水平位移 u .由于上插槽与外钢箱相连,因此可以视为一个固定端,根据杠杆原理可以得到此时下插槽会产生 2 倍 u 的右向水平位移,由于下插槽与内钢板相连,因此内钢板的右向水平位移为

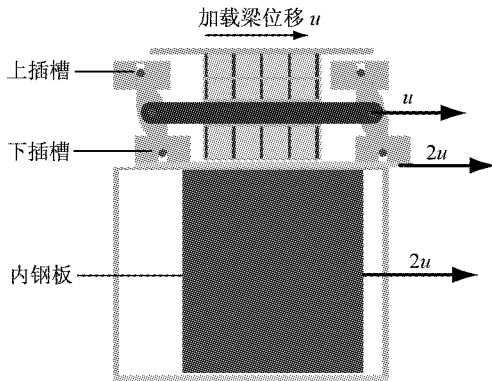


图 2 位移放大装置原理示意

Fig.2 Working principle schematic of displacement amplification device

$2u$.这样就可以通过这个装置达到位移放大的效果。

2 黏滞阻尼墙试验

2.1 加载装置及试件设计

试验在南京工业大学的建筑结构实验室中进行,根据实验室的总装配体和作动器的特点设计了阻尼墙的加载框架,加载框架包括加载梁、立柱和底梁.立柱顶端设计了 2 个滚轴,让加载梁与立柱的接触为滚动摩擦,减少加载梁运动时的摩擦力.用 2 个压梁将底梁压在地面上,限制底梁的上下翘动.底梁两侧各设置 1 个限位挡板,限制住底梁的水平位移.立柱固定在底梁上,2 个立柱顶端分别用 2 个滚轴将加载梁夹在中间,限制加载梁的上下翘动,同时将加载梁水平运动的滑动摩擦变为滚动摩擦,减少试验中的摩擦力影响。

设计加工了传统黏滞阻尼墙试件和位移放大型黏滞阻尼墙试件.2 个试件主要尺寸均相同,内钢板边长分别为 660 mm,745 mm,外钢箱边长分别为 1 000 mm,775 mm,位移放大型黏滞阻尼墙试件在传统黏滞阻尼墙试件基础上增加了位移放大装置.连接装置及杠杆部分的构造如图 3 和图 4 所示。

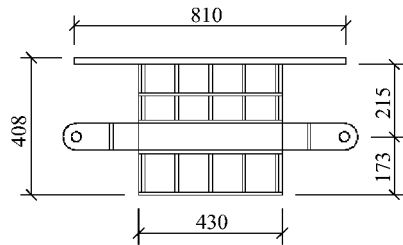


图 3 连接装置设计图(单位:mm)

Fig.3 Connecting device schematic (unit: mm)

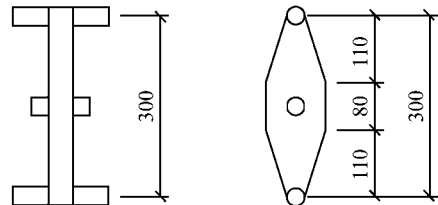


图 4 杠杆设计图(单位:mm)

Fig.4 Lever schematic (unit: mm)

二甲基硅油是一种无色无味的高聚物,具有无毒、不挥发、黏度随温度变化不敏感等优点,因此作为试验的黏滞阻尼材料.在黏滞阻尼墙中加入硅油使其液面高度为 700 mm.试验装置设计图如图 5 所示,传统黏滞阻尼墙和位移放大型黏滞阻尼墙实际装置如图 6 和图 7 所示。

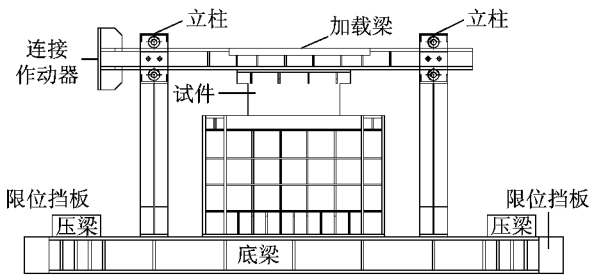


图 5 试验装置设计图
Fig.5 Test unit schematic

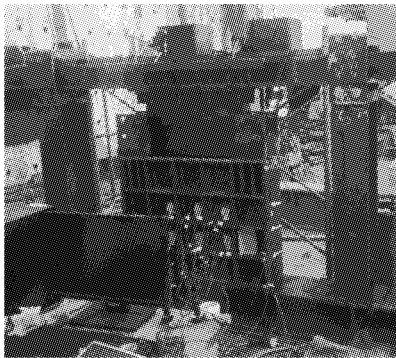


图 6 传统黏滞阻尼墙装置
Fig.6 Traditional VDW unit

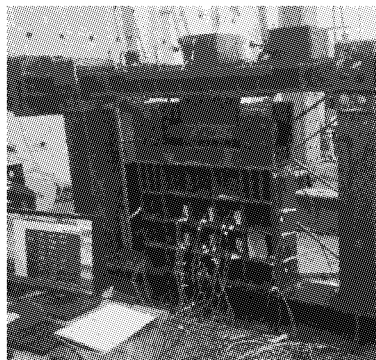


图 7 位移放大黏滞阻尼墙装置
Fig.7 VDW-DAL unit

2.2 试验工况

试验加载频率分别为 0.5 Hz 和 1.0 Hz,传统黏滞阻尼墙加载梁位移幅值分别为 10,15,20,25 和 30 mm,由于位移放大黏滞阻尼墙能够使内钢板位移放大 2 倍,因此加载梁位移幅值为 10,15 和 20 mm.加载均采用位移控制的正弦荷载,每个工况加载 5 个循环.试验记录了不同工况下的阻尼力和位移值,并得到了相应的滞回曲线.

2.3 试验结果

2.3.1 传统黏滞阻尼墙

试验测得各加载工况前后硅油的温度几乎没有变化.在试验加载过程中,加载梁滑动平稳,加载框架没有明显的变形及位移,位移幅值较大的工

况有硅油被挤出现象,某些工况能听到黏滞阻尼墙中有明显的空腔和较大气泡爆炸的声音.试验得到传统黏滞阻尼墙在不同工况下的滞回曲线如图 8 所示.

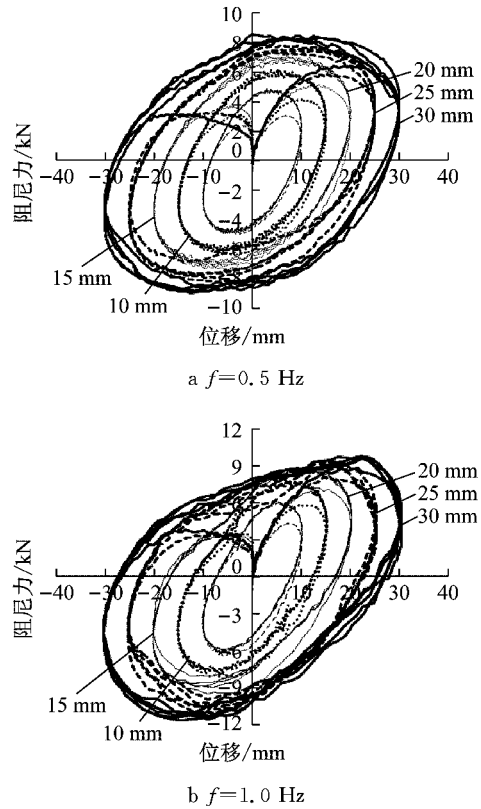


图 8 传统黏滞阻尼墙滞回曲线
Fig.8 Hysteretic curves of traditional VDW

从图中可以看出每种工况的滞回曲线都比较饱满,具备较好的耗能能力.滞回曲线的形状是倾斜的椭圆,说明黏滞阻尼墙有明显的动态刚度.通过图中不同工况下滞回曲线的比较,可以清楚看出在相同频率下黏滞阻尼墙的阻尼力是随着加载幅值的增大而增大的.

2.3.2 位移放大黏滞阻尼墙

在传统黏滞阻尼墙的基础上加入位移放大装置得到新型黏滞阻尼墙并按照上述工况进行试验,可以得到如图 9 所示的滞回曲线.在加载过程中,加载梁的滑动平稳,没有明显的转动;框架没有明显的变形和位移,外钢箱有轻微滑移,但位移计测量的是相对位移,因此外钢箱的滑移对滞回曲线形状影响很小;可以观察到内钢板的旋转,但旋转的角度不大,约为 0.6°;经过位移放大后的黏滞阻尼墙内外钢板间的相对位移较大,内部黏滞阻尼材料的扰动较大,能经常听到气泡爆裂的声音,并且有一些硅油被挤出钢箱.

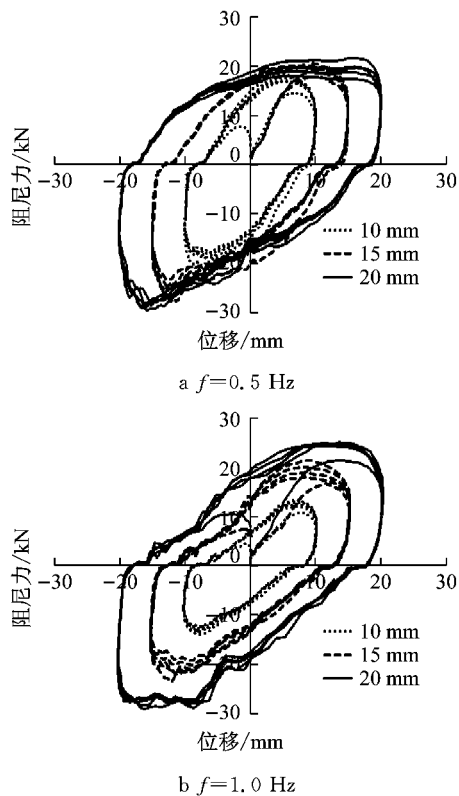


图 9 位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线
Fig.9 Hysteretic curves of VDW-DAL

从图中可以看出,位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线的波动情况比传统黏滞阻尼墙滞回曲线大,这一方面是因为试件的设计没有能够完全避免接触面的滑动摩擦,另一方面是因为内外钢板的相对位移被放大,硅油的扰动加强,内部的气泡增多,对黏滞阻尼力造成了较大的影响.从滞回环的形状来看,位移放大型黏滞阻尼墙仍有明显的动态刚度.从阻尼力的大小来看,位移放大型黏滞阻尼墙比传统黏滞阻尼墙的黏滞阻尼力有明显的提高,不同工况下传统黏滞阻尼墙阻尼力最大值 F_1 与位移放大型黏滞阻尼墙阻尼力最大值 F_2 的对比结果如表 1 所示.

表 1 不同工况下阻尼力最大值对比

Tab.1 Comparison of maximum damping forces under different working conditions

频率/ Hz	位移幅值/ mm	F_1 / kN	F_2 / kN	F_2 / F_1
0.5	10	4.86	18.49	3.80
	15	6.17	21.19	3.43
	20	7.08	21.78	3.08
1.0	10	6.09	13.38	2.20
	15	7.86	21.36	2.72
	20	8.98	24.93	2.78

从表 1 可以看出,当加载频率不同时,随着位移幅值的增大, F_2/F_1 的变化趋势并不相同.这是因为试验先进行了 0.5 Hz 时 20 mm 工况,由于位移放

大装置运动不够平顺,对硅油产生了过度的扰动,在之后进行的 1.0 Hz 时 10 mm 和 15 mm 工况过程中,由于受过度扰动的硅油在短时间内无法恢复到初始状态,导致这 2 个工况的最大阻尼力有一定程度的削弱.因此 1.0 Hz 时 10 mm 和 15 mm 这 2 个工况的 F_2/F_1 比值会存在不同程度的偏小,导致加载频率不同时,随着位移幅值的增大, F_2/F_1 的变化趋势不一致.

2.4 位移放大效果分析

具有位移放大功能的黏滞阻尼器能够加倍耗散地震能量.线性黏滞阻尼器的阻尼力 F_d 为

$$F_d = CV \quad (1)$$

式中: C 为黏滞系数; V 为相对运动速率.

假设黏滞阻尼器在正弦荷载作用下 $u = u_0 \cdot \sin(\omega t)$,其中 u_0 为位移幅值, ω 为圆频率,则线性黏滞阻尼器在上述荷载作用下循环 1 周的耗能 W 为

$$W = \pi C u_0^2 \omega \quad (2)$$

假设具有位移放大装置的黏滞阻尼器 A 和没有位移放大装置的黏滞阻尼器 B 同时受到上述正弦荷载作用,且位移放大装置将原结构的位移放大 a 倍,则在同一时刻 A 的位移和速率均是 B 的 a 倍,即 $u_A = a u_B, V_A = a V_B$. A 装置循环 1 周的耗能 W_A 为

$$W_A = a^2 \pi C u_0^2 \omega \quad (3)$$

因此 A 循环 1 周的耗能是 B 的 a^2 倍.

本次试验的位移放大型黏滞阻尼墙的 $a=2$,按照位移放大的原理,可以将传统黏滞阻尼墙各工况下滞回曲线的位移乘以 0.5、阻尼力乘以 2,得到与位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线相对应的换算曲线.位移放大型黏滞阻尼墙峰值指标与传统黏滞阻尼墙相应工况下峰值指标的对比结果如表 2 所示.位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线与传统黏滞阻尼墙相应工况下换算曲线的比较如图 10 所示.

表 2 位移放大型黏滞阻尼墙峰值指标与传统黏滞阻尼墙相应工况下峰值指标对比

Tab.2 Comparison of peak indexes between VDW-DAL and traditional VDW

工况 序号	工况特征	阻尼力/ kN	位移/ mm	速率/ (mm · s ⁻¹)
1	新型墙,0.5 Hz,10 mm	18.49	10.03	32.70
	传统墙,0.5 Hz,20 mm	7.08	20.02	63.20
2	新型墙,0.5 Hz,15 mm	21.19	15.06	48.20
	传统墙,0.5 Hz,30 mm	8.58	30.05	94.50
3	新型墙,1.0 Hz,10 mm	13.38	10.18	64.05
	传统墙,1.0 Hz,20 mm	8.98	20.28	126.57
4	新型墙,1.0 Hz,15 mm	21.36	15.28	95.88
	传统墙,1.0 Hz,30 mm	9.94	30.43	190.05

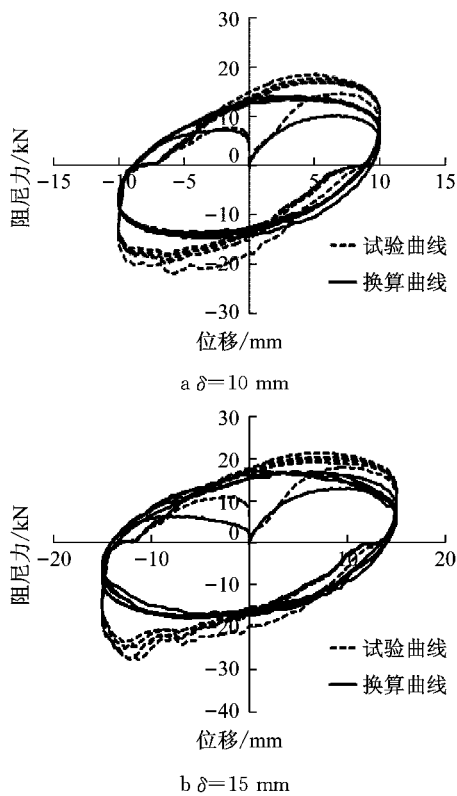


图 10 0.5 Hz 时位移放大黏滞阻尼墙与换算的传统黏滞阻尼墙滞回曲线比较

Fig.10 Comparison of hysteretic curves between VDW-DAL and converted traditional VDW at 0.5 Hz

从表 3 中可以看出,位移放大黏滞阻尼墙位移峰值和速率峰值与传统黏滞阻尼墙相应工况下比值介于 0.50 和 0.52 之间,基本满足线性放大规律,表明这 2 个峰值指标较为准确和稳定. 阻尼力峰值指标比值变化在 1.49 至 2.61 之间,造成该峰值指标比值波动较大的原因同样是由于硅油受到过度扰动,需要通过改进位移放大装置运动平顺度来减小比值的离散性. 但总体而言,位移放大黏滞阻尼墙基本实现了放大效果.

表 3 不同工况下峰值指标比值

Tab.3 Ratio of peak indexes under different working conditions

工况序号	阻尼力	位移	速率
1	2.61	0.50	0.52
2	2.47	0.50	0.51
3	1.49	0.50	0.51
4	2.15	0.50	0.50

注:表中比值均为位移放大黏滞阻尼墙与相应工况下传统黏滞阻尼墙之比.

图 10 中 2 类曲线大体能够重合,在到达位移较大处时阻尼力试验值大于换算值,这是由于摩擦力的影响造成的. 当到达最大位移后开始反向运动时,

可以观察到阻尼力试验值小于换算值,其主要原因是位移放大黏滞阻尼墙中位移放大装置的间隙影响了其性能.

3 位移放大黏滞阻尼墙阻尼力公式

在日本学者文献[1]提出的黏滞阻尼墙的计算公式基础上,考虑黏滞阻尼力 Q_d 和弹性恢复力 Q_k 两部分对黏滞阻尼墙的总黏滞抵抗力 Q_w 的影响,提出了如下黏滞阻尼墙的阻尼力公式表达式^[12]:

$$Q_w = Q_d + Q_k = \psi_d A \left(\frac{V}{H}\right)^\alpha + \psi_k A \left(\frac{\delta}{H^\gamma}\right) \quad (4)$$

式中: A 是有效接触面积; H 是黏滞材料厚度; $\psi_d = 7.729 \times 10^{-6}$, $\psi_k = 1.443 \times 10^{-5}$ 是与试验相关的系数,包括黏滞材料、温度和构件构造的影响等; α 是速率梯度系数, $\alpha = 0.2682$; γ 是间隙对动态刚度影响的系数, $\gamma = 1.405$.

式(4)计算的是内钢板受到的阻尼力,其中 V 和 δ 分别是内钢板相对于外钢箱的相对速率和相对位移. 根据理论力学的原理,具有位移放大装置的阻尼力计算公式只需将上式中的 V, δ 和整个公式计算的阻尼力前面乘以放大倍数 2,因此,可以得到位移放大黏滞阻尼墙的阻尼力计算公式为

$$Q_w = 1.862 \times 10^{-5} A \left(\frac{V}{H}\right)^{0.2682} + 5.772 \times 10^{-5} A \left(\frac{\delta}{H^{1.406}}\right) \quad (5)$$

图 11 是位移放大黏滞阻尼墙的试验曲线与公式计算曲线的比较. 从图中可以看出式(5)计算得到的滞回曲线与试验曲线总体上符合较好,但是由于构件本身精度不够以及位移放大装置间隙等影响,使得试验结果与计算结果尚有一定误差.

4 位移放大装置间隙的影响分析

4.1 间隙的模拟

从图 10 中可以看出位移放大黏滞阻尼墙的滞回曲线有明显的阻尼力为零的滑移段,该滑移段是由于放大装置中的间隙导致的. 从得到的滞回曲线上看,该间隙大小约为 3 mm. 滞回曲线在经过滑移段后会有较大的阻尼力升高. 但从整个滞回曲线来看,间隙的存在对黏滞阻尼墙的耗能能力有较大的削弱. 为了分析这一削弱影响,选取了 0.5 Hz 时 10 mm 和 15 mm 这 2 个试验工况进行间隙模拟. 图 12 是位移放大黏滞阻尼墙的单元连接示意图(M

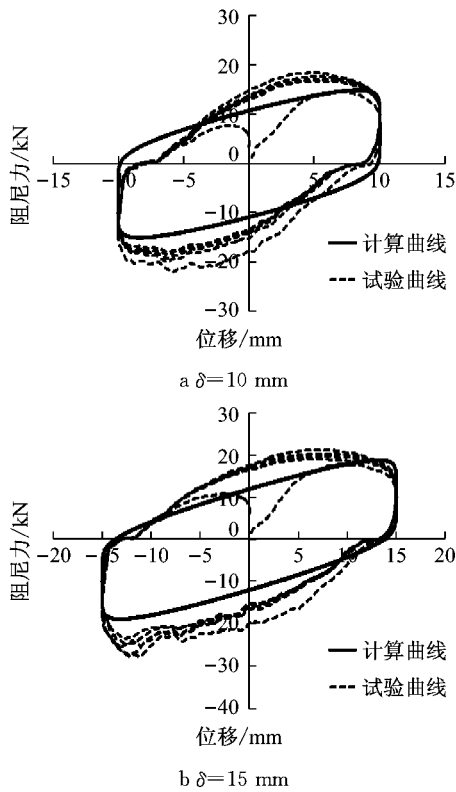


图 11 0.5 Hz 时位移放大型黏滞阻尼墙试验曲线与计算曲线比较
Fig. 11 Comparison between hysteretic curves of VDW-DAL and calculation results at 0.5 Hz

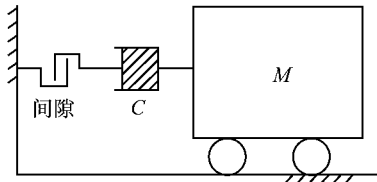


图 12 单元连接示意
Fig. 12 Schematic of unit connection

为黏滞阻尼墙质量), 间隙与黏滞阻尼墙串联, 利用 ANSYS 软件, 采用 combin37 单元模拟黏滞阻尼墙, 用 combin40 单元模拟间隙. 图 13 是 2 个工况在不同间隙下的曲线模拟, 可以看出间隙越大黏滞阻尼

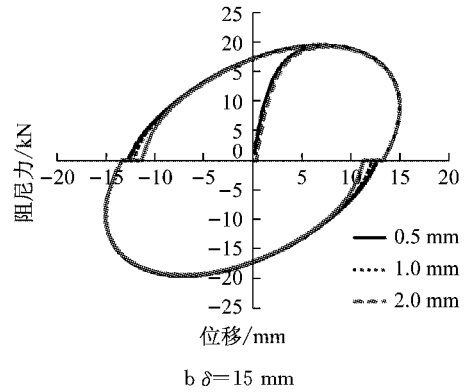
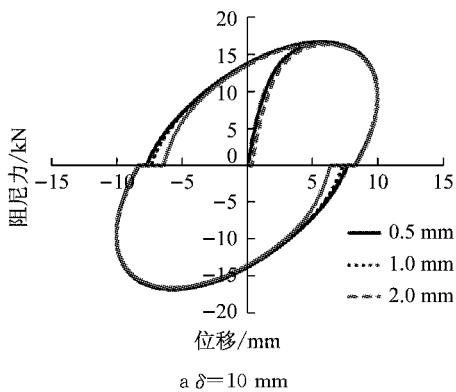


图 13 0.5 Hz 时不同间隙的模拟

Fig. 13 Simulation of different gaps at 0.5 Hz

墙的耗能能力损失越多. 通过试验曲线和模拟结果的比较, 最终采用的模拟参数如表 4 所示. 图 14 是 2 个工况的模拟结果. 从图 14 中可以看出, 模拟曲线和试验曲线能较好重合, 说明了计算模型的合理性.

表 4 0.5 Hz 时位移放大型黏滞阻尼墙模拟参数

位移幅值/ mm	动态刚度/ (kN · mm ⁻¹)	黏滞系数/ (kN · s · mm ⁻¹)	间隙/ mm	放大 系数
10	0.209 5	0.128 3	1.2	2
15	0.128 3	0.100 5	1.6	2

Tab. 4 Simulation parameters of VDW-DAL at 0.5 Hz

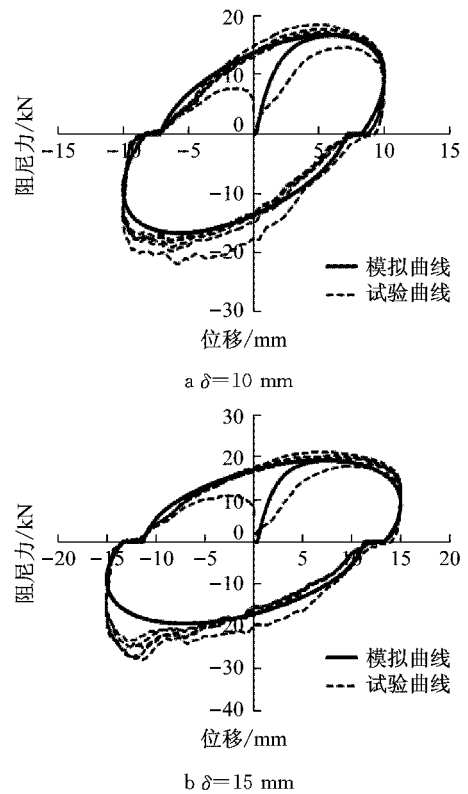


图 14 0.5 Hz 时位移放大型黏滞阻尼墙试验曲线和模拟曲线比较

Fig. 14 Comparison between experimental curves of VDW-DAL and simulated curves at 0.5 Hz

4.2 间隙对耗能能力的影响

由于黏滞阻尼墙依靠黏滞阻尼力耗能,弹性恢复力不耗散能量,因此可以去掉刚度部分,仅对黏滞阻尼力部分进行分析.图 15 中的椭圆曲线是利用本次试验某一工况的阻尼系数计算得到的椭圆滞回曲线,最大阻尼力为 17.53 kN,位移幅值为 10 mm,利用间隙模拟方法得到图 15 中另一条具有间隙的滞回曲线,其中间隙大小为 3 mm.

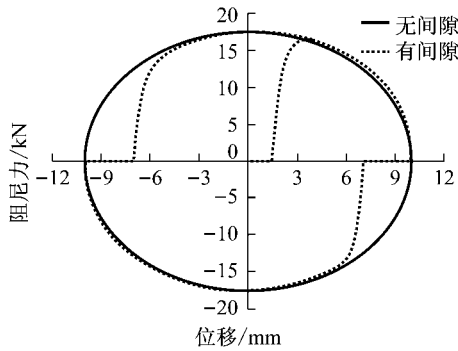


图 15 间隙对滞回曲线的影响

Fig.15 Influence of gaps on hysteretic curves

从理论上推导位移放大装置间隙对耗能的影响.将图 15 中的滞回曲线简化成如图 16 所示的理论模型,其中没有间隙的黏滞阻尼墙滞回曲线是图 16 中的椭圆曲线,最大阻尼力为 F_0 ,最大位移为 u_0 ;而具有间隙的黏滞阻尼墙滞回曲线缺失了图 16 中的阴影部分,其中间隙大小为 h .

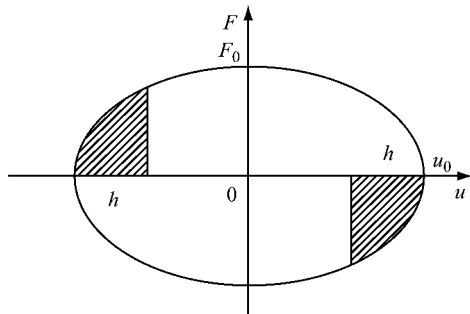


图 16 简化理论模型

Fig.16 Simplified theoretical model

定义间隙比 ξ 为

$$\xi = h/u_0 \tag{6}$$

通过计算可得图中阴影部分的面积 S 为

$$S = u_0 F_0 (\arccos(1 - \xi) - (1 - \xi) \sqrt{1 - (1 - \xi)^2}) \tag{7}$$

椭圆滞回曲线的面积 S_1 为

$$S_1 = \pi u_0 F_0 \tag{8}$$

因此,间隙的存在导致的耗能降低率 D 为

$$D = \frac{S}{S_1} = \frac{1}{\pi} (\arccos(1 - \xi) - (1 - \xi) \sqrt{1 - (1 - \xi)^2}) \tag{9}$$

利用上述理论公式可以得到图 15 中间隙导致的耗能降低率为

$$D = 51.8/550.42 = 9.4\%$$

从上述公式中可以看出,位移放大装置间隙对黏滞阻尼墙的耗能降低率仅是间隙比的单值函数.从图 17 的变化曲线来看,间隙比越大,耗能降低率越大,即黏滞阻尼墙的耗能能力降低得越多.在小震下,黏滞阻尼墙的位移幅值通常较小,因此间隙比比值较大,会极大程度地降低黏滞阻尼墙的耗能能力.从图中可以看出间隙比在 0.2 以内时,黏滞阻尼墙耗能降低率不超过 5%.

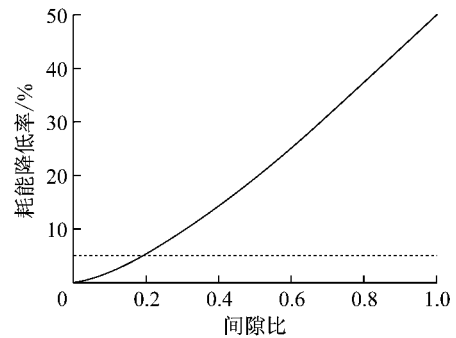


图 17 间隙对黏滞阻尼墙耗能能力的影响

Fig.17 Influence of gaps on energy dissipation capacity of VDW

5 结论

根据机械中的杠杆设计了一种位移放大装置,从而实现黏滞阻尼墙位移放大的构造要求.这种位移放大装置对构件加工精度的要求相对较低,只有局部需要采用机械加工.通过位移放大型黏滞阻尼墙试验测试了其耗能性能,并传统黏滞阻尼墙的耗能能力进行了对比,给出了位移放大型黏滞阻尼墙阻尼力的公式,考虑了位移放大装置的间隙对黏滞阻尼墙的影响.得到的主要结论如下:

(1) 位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线与传统黏滞阻尼墙相应工况下换算滞回曲线总体上吻合较好,验证了位移放大装置的有效性.

(2) 根据传统黏滞阻尼墙阻尼力公式,将其中的速率、位移和阻尼力分别乘以位移放大倍数,得到了位移放大型黏滞阻尼墙阻尼力公式.计算结果与试验结果能够较好地吻合,表明公式具有一定的合理性.

(3) 当间隙比控制在 0.2 以内时,耗能降低率不超过 5%。

试验中的位移放大装置与内钢板之间存在摩擦力及间隙,且位移放大装置运动不够平顺,使内钢板存在出平面位移,从而导致位移放大型黏滞阻尼墙滞回曲线不够饱满且存在滑移现象.本试验在一定范围内实现了线性放大效果,但在下一阶段的工作中仍需针对位移放大装置的构造开展专题研究,对其进一步改进与完善,解决位移放大装置运动平顺性问题,提高位移放大型黏滞阻尼墙性能的稳定性,使其能够在不同频率和位移幅值下满足线性放大效果。

参考文献:

- [1] MIYAZAKI M, KITADA Y, ARIMA F, *et al.* Earthquake response control design of buildings using viscous damping walls[C] // Proc. 1st East Asian Conference on Structural Engineering and Construction. Bangkok: [s,n], 1986: 1882-1891.
- [2] MIYAZAKI M, MITSUSAKA Y. Design of a building with 20% or greater damping[C] // Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid: CRC Press, 1992: 4143-4148.
- [3] REINHORN A, LI C. Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping. In Part 3: Viscous damping walls[R]. Buffalo: State University of New York, 1995.
- [4] 谭在树, 钱稼茹. 钢筋混凝土框架用粘滞阻尼墙减震研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(2):50.
TAN Zaishu, QIAN Jiaru. Study on earthquake response reduction of RC frames with viscous damping walls[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(2):50.
- [5] YEUNG Ngai, PAN Deen. The effectiveness of viscous-damping walls for controlling wind vibrations in multi-story buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 77:337.
- [6] 杜东升, 王曙光, 刘伟庆, 等. 粘滞流体阻尼墙在高层结构减震中的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9):87.
DU Dongsheng, WANG Shuguang, LIU Weiqing, *et al.* Analysis research and application of viscous wall dampers in a typical energy dissipation high-rise structure[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9):87.
- [7] 张方, 潘德恩. 含转动干扰粘性阻尼墙的阻尼特性试验研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1):85.
ZHANG Fang, PAN Deen. Dynamic test research of viscous-damping wall with rotation motion[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(1):85.
- [8] 闫锋. 粘滞阻尼墙耗能减振结构的试验研究和理论分析[D]. 上海:同济大学, 2004.
YAN Feng. Experiment and theoretical analysis of viscous damping wall energy dissipation system[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [9] 欧瑾, 刘伟庆, 章振涛. 粘滞阻尼墙动力性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(6):55.
OU Jin, LIU Weiqing, ZHANG Zhentao. Experimental study on dynamic performance of viscous damping wall[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005, 27(6):55.
- [10] 孙飞飞, 莫刚. 粘滞阻尼墙模型的振动台实验方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):536.
SUN Feifei, MO Gang. Experiment method on viscous damping wall by shaking table test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4):536.
- [11] 项潇潇, 刘文光, 吕春财, 等. 带位移放大装置新型阻尼墙结构的抗震响应分析[J]. 结构工程师, 2014, 30(6):104.
XIANG Xiaoxiao, LIU Wenguang, LV Chuncai, *et al.* Seismic response analyses of a viscous damper structure with the displacement amplification device[J]. Structural Engineers, 2014, 30(6):104.
- [12] 莫刚. 新型阻尼墙的试验研究[D]. 上海:同济大学, 2016.
MO Gang. Experiment and research of new damping walls[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.