

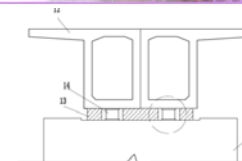
履带式金属屈服阻尼器 性能研究

清华大学土木工程系
潘鹏 邓开来 孙江波

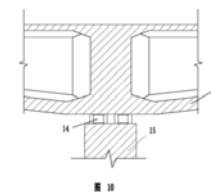
2015年7月2日

1

应用背景

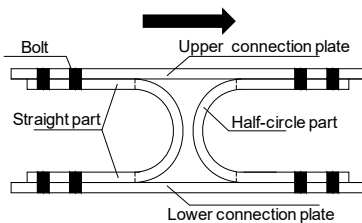


- 桥梁和桥墩间采用的隔震措施需要通过阻尼器限制大震变形
- 桥梁用阻尼器的特点：
 - 阻尼力大（数百吨）
 - 容许变形大（数十厘米）
- 目前常用的黏滞流体阻尼器和金属耗能阻尼器



2

履带式阻尼器构造



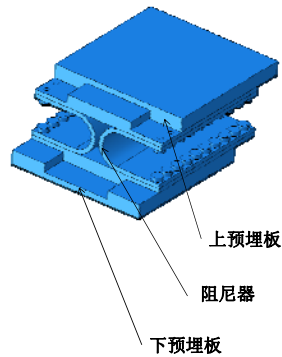
- U型耗能板
- 连接板（提供竖向约束）
- 该阻尼器安装于隔震层，工作过程中，U型耗能板在连接板之间碾压滚动，类似履带爬行

履带式金属屈服阻尼器工作原理

- 核心耗能元件为多块通过碾压实现弯曲变形进行耗能的履带状的金属板，利用钢材等良好的塑性变形能力强的金属材料实现耗能，并利用其弯曲变形实现较大的变形量；
- 金属板的上下表面分别与上连接板和下连接板固定连接，金属板在上下连接板之间滚动，圆弧上端下端为塑性屈服区；
- 塑性屈服位置不断变化，尽可能多的利用核心耗能元件的材料，并且能满足多圈数的低周疲劳试验。

桥梁履带式金属耗能阻尼器优点

- 性能稳定，耗能能力强
 - ✓ 利用钢材耗能，保证耗能性能稳定
- 抗疲劳性好
 - ✓ 在工作过程中，塑性屈服部位位置不断改变，可满足较多圈数的循环加载
- 可设计性强，适用范围广
 - ✓ 耗能元件的材质、尺寸、形状及数量均可设计
 - ✓ 可实现不同范围的屈服力，屈服位移、极限力和最大位移
- 连接形式多样，施工方便
 - ✓ 设计不同形式的连接板，可控制阻尼器工作平面外力学特征
 - ✓ 施工方便，无需特殊施工措施



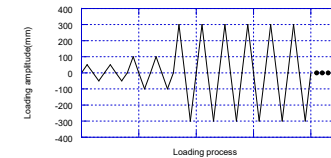
实验研究

试验研究：试件设计

	H	t	Width	备注
S1	300	16	200	标准试件
S2	300	16	200	无连接板约束
S3	300	25	200	耗能板厚度
S4	400	16	200	耗能板高度

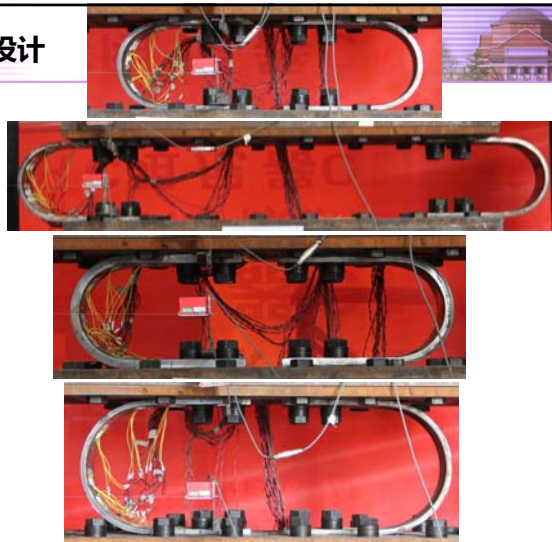
拟静力试验，加载制度

- 2*50mm
- 2*100mm
- 300mm至破坏



6

试件设计



7

加载设备

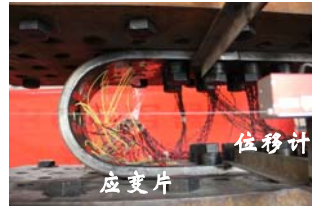
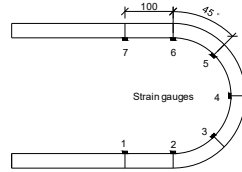


8

测量方案



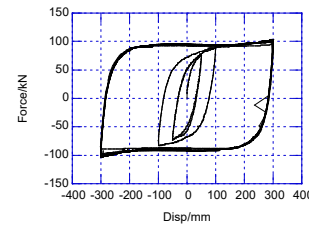
- 应变片：验证屈服点的移动
- 位移计：测上下连接板位移
- 作动器力传感器：测量阻尼器的恢复力



实验结果

试验结果：S1——理想的碾压滚动变形模式

- 滞回曲线饱满
- 恢复力：100kN
- 疲劳性能：17th 300mm加载断裂



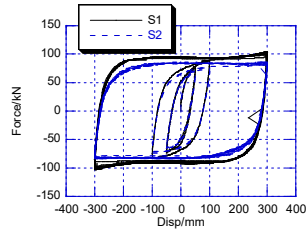
实验录像

10

实验结果

试验结果：S2——屈服点集中

- 滞回曲线饱满
- 恢复力：90kN，略小于S1
- 疲劳性能：12th 300mm加载断裂，显著弱于S1

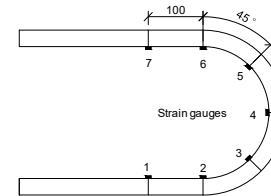


11

实验结果

试验结果：S2——屈服点集中

- S1应变分布均匀
- S2的4号应变片几乎没有变形
- 连接板的约束改变其变形模式



微应变	1	2	3	4
S1	2506	47351	42442	3792
S2	33658	20328	14139	256

12

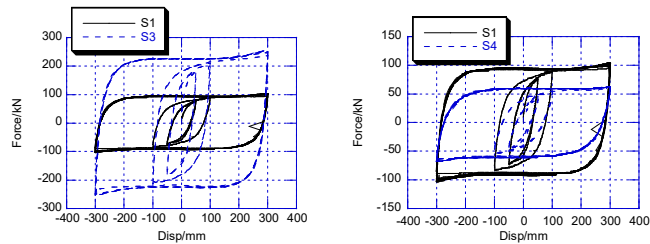
实验结果

➤ 试验结果: S3 ($t=25\text{mm}$) , S4 ($H=400\text{mm}$)

➤ 恢复力: S3显著提高 (255kN) ;

S4显著下降 (65kN) ;

➤ 疲劳性能: S3弱, 7th ; S4强, 28th



13

实验研究主要结论

- 上下连接板的约束作用对于提高阻尼器恢复力, 改善低周疲劳性能有明显作用;
- 耗能板厚度、耗能板高度对于阻尼器的恢复力有显著影响;

14

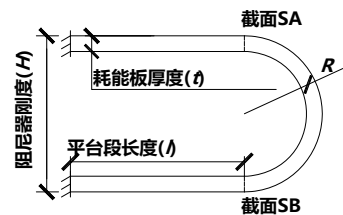
承载力计算

➤ 恢复力计算: 平衡方法——下限解

➤ 截面SA保持轴力, 弯矩, 剪力平衡, 位移协调

➤ 截面SA水平位移为 Δ

➤ 截面SA竖向位移和转角为0



$$F_{u1} = f_y \frac{bt^2}{4R + 2t/3}$$

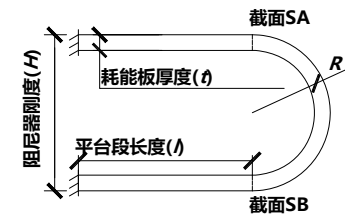
Deng K, Pan P. Development of crawler steel damper for bridges. Journal of Constructional Steel Research 2013, 85: 140-150.

15

承载力计算

➤ 恢复力计算: 虚功原理——上限解

➤ 虚功原理: 截面SA, SB出现塑性铰, 全截面屈服



$$F_{u2} \delta = 2M\theta = f_y \frac{2t^2b}{4t} \times \frac{\delta}{2R} = f_y \frac{t^2b\delta}{4R} \implies F_{u2} = f_y \frac{bt^2}{4R}$$

16

承载力计算

● 上限解 vs. 下限解

$$F_{u2} = f_y \frac{bt^2}{4R} \quad F_{u1} = f_y \frac{bt^2}{4R + 2t/3}$$

● 由于 $t \ll R$ 可以接受 (2个U型耗能板)

$$F_u = 2F_{u2} = f_y \frac{bt^2}{2R} = f_y \frac{bt^2}{H-t}$$

承载力计算值与实验结果对比

➤ 试验结果 vs. 理论计算

	T	H	B	试验(kN)	理论(kN)	误差
S1	16	300	200	100	50.48	49.52%
S3	25	300	200	255	127.27	50.09%
S4	16	400	200	65	37.33	42.56%

➤ 误差原因：钢材硬化在公式中没有考虑？

有限元分析

➤ 基于有限元模型的参数分析

➤ ABAQUS模型

➤ 耗能板-C3D8R单元

➤ 连接板-R3D4单元 (刚性)

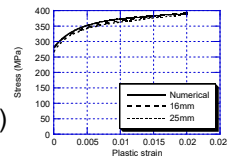
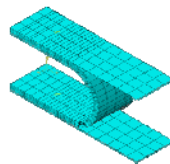
➤ 材料模型：循环金属硬化本构

➤ 随动硬化

$$\alpha = \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{\gamma_k} \left(1 - e^{-\gamma_k \bar{\epsilon}^{pl}} \right)$$

➤ 等方硬化

$$\sigma^0 = \sigma_0 + Q_\infty (1 - e^{-V \bar{\epsilon}^{pl}})$$

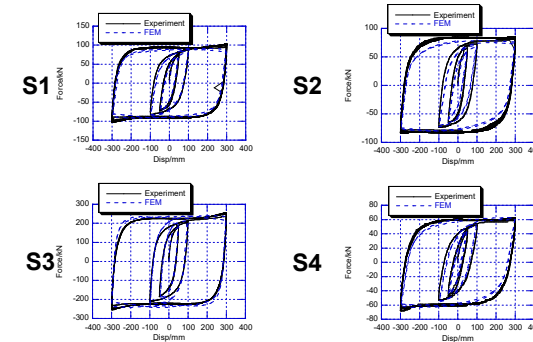


$\bar{\epsilon}^{pl}$: 等效塑性应变, 其余变量为模型参数, 通过材料试验可确定

19

有限元计算分析结果

➤ 有限元模型校核

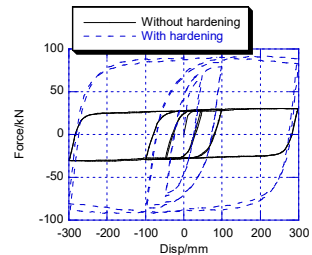


20

有限元计算分析

校核理论公式——不考虑硬化

理想弹塑性材料属性 vs. 考虑硬化材料属性



	FEM(kN)	理论 (kN)	误差
S1	51.46	50.48	1.94%
S3	137.80	127.27	8.27%
S4	40.80	37.33	9.29%

理论解精度可以接受

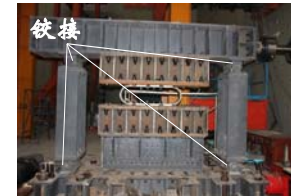
21

加载架下压的影响

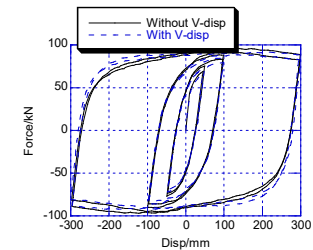
加载架下压影响

✓最大下量28mm

✓履带式阻尼器对竖向位移不敏感



• 大水平位移下载梁略微下压



22

补充的有限元分析

补充模型

耗能板厚度(mm)	耗能板高度(mm)	共20个模型
19, 22, 25, 28, 30	210, 240, 270, 300	20

加载制度

➢ 50mm, 100mm, 300mm各两圈

关注数据

➢ EPS (等效塑性应变, 和材料硬化直接相关)

➢ 恢复力

23

改进恢复力计算公式

改进分析公式

➢ EPS to t/H , 相关系数0.96

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \lambda t / H$$

硬化应力表达式

$$\alpha = \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \lambda t / H}) \quad \sigma^0 = \sigma_0 + Q_{\infty} (1 - e^{-\lambda t / H})$$

修正恢复力公式, 待定参数 $\bar{\lambda}$

$$F_u = (f_y + \sigma_h (1 - e^{-\bar{\lambda} t / H})) \frac{t^2 b}{H - t} \quad \text{硬化应力} \quad \sigma_h = Q_{\infty} + \sum \frac{C_k}{\gamma_k}$$

24

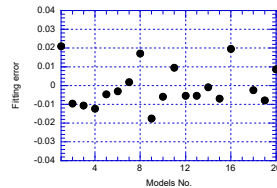
改进恢复力计算公式

➤ 确定 $\bar{\lambda}$

➤ 最小二乘法

$$\min \sum (F_{uFEM} - (f_y + \sigma_h(1 - e^{-\lambda vt/H})) \frac{t^2 b}{H-t})^2$$

➤ 拟合误差 < 4%



25

改进的恢复力计算公式

➤ 与试验结果校对

	试验(kN)	改进公式(kN)	误差
S1	100	91.22	-8.78%
S3	255	239.55	-6.06%
S4	65	64.63	-0.57%

➤ 公式精度较好

26

面内性能研究——小结

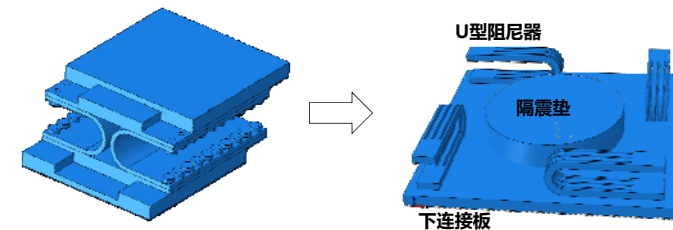
- 在面内方向有**优良的变形能力**，能提供稳定的恢复力；
- 通过上下限定理，得出了该阻尼器**恢复力的表达式**；
- 试验得出该阻尼器滞回曲线饱满，具有**稳定的耗能能力**和良好的**低周疲劳性能**；连接板的约束作用可改善该阻尼器的疲劳性能；
- 采用ABAQUS能准确地重现试验结果，同时也**验证了理论推导公式**，并大量补充了试件个数
- 通过回归分析，将**钢材硬化**纳入阻尼器恢复力计算公式，精度较好

27

隔震层中的应用

➤ 建筑的隔震层中能否应用？

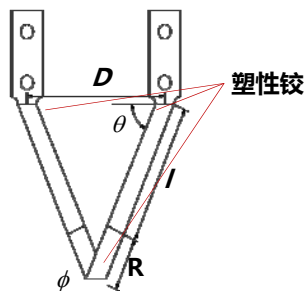
- 隔震层可能在两个方向有变形，面外方向的性能有待研究
- 采用新的构造，使其面外方向的性能具有更强的可设计性



28

面外性能研究

理论推导——虚功原理



变形协调

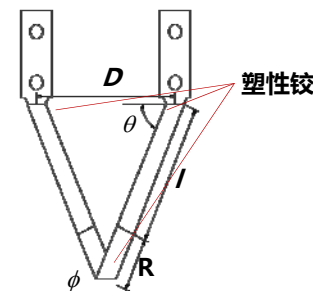
$$\begin{cases} \theta = \arccos \frac{D}{2(l+R)} \\ \phi = 2 \arcsin \frac{D}{2(l+R)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta\theta = \frac{\delta D}{(l+R)\sqrt{4-D^2/(l+R)^2}} \\ \delta\phi = \frac{2\delta D}{(l+R)\sqrt{4-D^2/(l+R)^2}} \end{cases}$$

29

面外性能研究

理论推导——虚功原理



$$\begin{cases} T_u = \tau_u Q = f_u Q / \sqrt{3} & Q = \int_A r dA \\ M_u = f_u t b^2 / 4 \\ F_u \delta D = 2M_u \delta\theta + T_u \delta\phi \end{cases}$$

$$F(D) = \frac{f_u (t b^2 / 2 + Q / \sqrt{3})}{(l+R)\sqrt{4-D^2/(l+R)^2}}$$

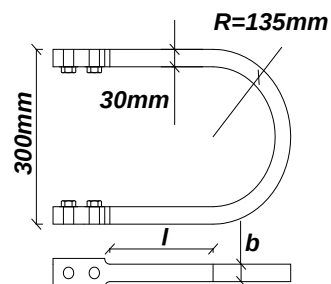
恢复力与变形幅值相关

30

面外性能研究

试验研究

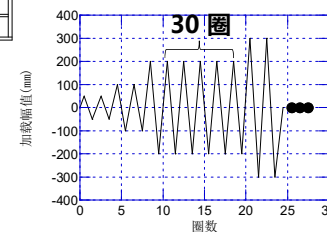
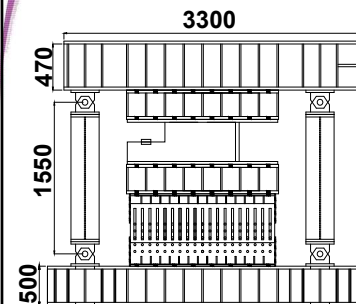
No.	b(mm)	l(mm)
S1	30	200
S2	20	200
S3	30	100
S4	30	300



备注：高度和厚度由面内恢复力设计确定

面外性能研究

试验研究——加载架和加载制度



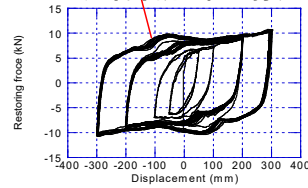
加载历程：
50mm*2, 100mm*2, 200mm*30, 300mm直到破坏

面外性能研究

试验结果

➤ S1 ($l=200\text{mm}$, $b=30\text{mm}$)

与加载架挤压, 摩擦力



➤ 3塑性铰变形模式

➤ 36th圈300mm疲劳断裂, 疲劳性能良好

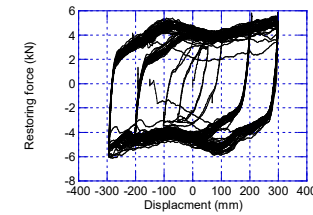
➤ 平台段端部断裂



面外性能研究

试验结果

➤ S2 ($l=200\text{mm}$, $b=20\text{mm}$)



➤ 3塑性铰变形模式

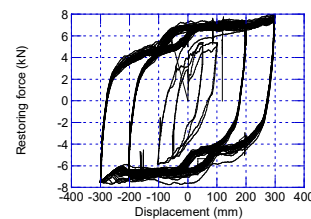
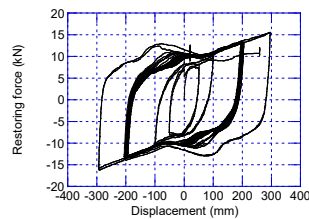
➤ 48th圈300mm疲劳断裂, 疲劳性能提高

➤ 承载力下降明显

面外性能研究

试验结果

➤ S3 ($l=100\text{mm}$, $b=30\text{mm}$), S4 ($l=300\text{mm}$, $b=30\text{mm}$)

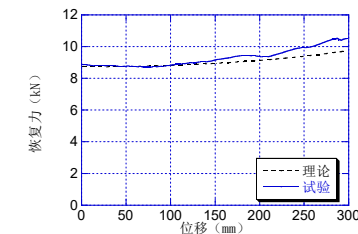


➤ S3: 恢复力提高, 疲劳性能下降 (2nd 300mm)

➤ S4: 恢复力下降, 疲劳性能提高 (40th 300mm)

面外性能研究

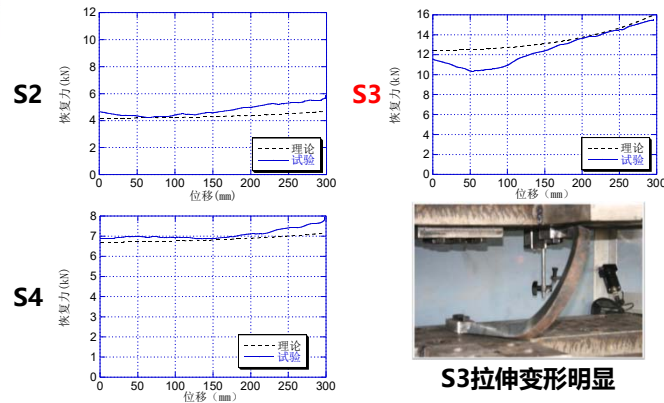
试验结果 vs. 理论计算——S1



➤ 理论计算与试验值吻合较好

面外性能研究

试验结果 vs. 理论计算——S2, S3, S4



面外方向试验结果汇总

➤ S4, $l=300\text{mm}$, $b=30\text{mm}$

No.	$b(\text{mm})$	$l(\text{mm})$	$F_u(\text{kN})$	断裂时
S1	30	200	9.87	36 th of 300mm
S2	20	200	5.92	48 th of 300mm
S3	30	100	15.32	2 th of 200mm
S4	30	300	7.87	40 th of 300mm

- 恢复力主要由阻尼器宽度控制
- 平台段长度太短导致低周疲劳性能较差

面外性能研究——小结

- 阻尼器在面外方向滞回性能稳定, 耗能能力较好;
- 面外方向的恢复力主要由阻尼器宽度控制: 宽度越大, 恢复力越高, 但低周疲劳性能有所下降;
- 阻尼器应保证足够的平台段长度: 平台段长度太短导致低周疲劳性能较差
- 理论推导公式具有良好的精度, 但平台段长度太短时, 阻尼器的变形模式与假定变形模式不符合, 公式误差较大。
- 设计建议:
 - 宽度与厚度比值在1~1.5之间
 - 平台段长度与最大设计变形比值: 1~1.6

Thanks for your attention!
谢谢!