

新型钢管铅芯阻尼器数值模拟及耗能能力分析

沈金生^{1, 2}, 吴成杰², 安新正², 申彦利², 刘利伟², 贾少卓²

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300073; 2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 以传统钢管铅芯阻尼器为基础, 通过改进得到一种新型钢管双铅芯阻尼器, 并在此基础上运用 ABAQUS 有限元模拟软件对其抗震性能进行模拟分析。模拟结果表明, 在用铅量较少的情况下, 新型钢管双铅芯阻尼器相对于单铅芯阻尼器的极限荷载增大 183 kN, 极限位移增大近一倍, 滞回曲线面积明显增大并且等效阻尼系数增大 15%。通过模拟结果表明, 其耗能能力较优。

关键词: 钢管铅芯阻尼器; 有限元分析; 耗能减震; 结构改进

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

Numerical Simulation and Energy Dissipation Analysis of a New Type of Steel Tube Damper

SHEN Jinsheng^{1, 2}, WU Chengjie², AN Xinzheng², SHEN Yanli², LIU Liwei², JIA Shaozhuo²

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300073, China; 2.College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038, China)

Abstract: Based on the traditional steel tube lead damper, a new type of steel double-core damper was obtained through improvement. Based on this, the ABAQUS finite element simulation software was used to simulate the seismic performance. The simulation results show that the limit load of the new steel double-core damper is 183kN, the limit displacement is nearly doubled, and the hysteresis curve area obviously increases compared with the single lead damper. And the equivalent damping coefficient increases by 15%. The simulation results show that the energy consumption is better.

Key words: lead-filled steel tube damper; finite element; energy dissipation; Structural improvement

铅在常温条件下做塑性循环时不会发生累积疲劳现象, 因此常被用来制作减震耗能阻尼器^[1-2]。铅挤压阻尼器最早是由新西兰 Robinson^[3] 提出的, 其原理是利用铅挤压过程中的变形来耗散能量。刘明明^[4] 利用形状记忆合金 (shape memory alloys, SMA) 的超弹性以及金属铅的屈服耗能特性, 开发出一种剪切型复合耗能自复位阻尼器。彭凌云^[5] 提出一种铅块直接嵌固在钢板和固定板之间的剪切型板式剪切型铅阻尼器。周云^[6] 基于“多种耗能机制共同耗能”的理论, 综合铅和钢的材料特点, 提出了一种钢管铅芯阻尼器编号为 LFSTD1, 并进行了试验研究。因此关于钢管铅芯阻尼器的核心问题是分析研究阻尼器滞回耗能能力, 考虑在结构减震、

隔震的作用分析^[7-8]。基于以上研究现状, 对传统钢管阻尼器 LFSTD1 铅芯的数量、尺寸进行改进, 提出了一种新型阻尼器编号为 LFSTD2, 并评价了新型双铅芯阻尼器的塑性耗能性能及抗震性能。

1 钢管铅阻尼器改进

如图 1、图 2 所示, 阻尼器 LFSTD1、LFSTD2 均采用钢管套铅芯的结构形式, 两端设置挤压头钢管中间部分进行削弱; 采用钢管中间部削弱, 可以使端部应力减小、整体受力均匀, 起到保护端头焊缝作用。上下为厚度 15 mm, 半径 100 mm 的圆形钢板。

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51378169)

作者简介: 沈金生 (1979-), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 从事混凝土结构与抗震方面的研究。

如图 3、图 4 和表 1 所示, 新型钢管双铅芯阻尼器 LFSTD2 改变铅芯直径, 由单铅芯变为双铅芯。挤压头和钢管直径随之减小, LFSTD2 仅仅改变原阻尼器 LFSTD1 的部分几何尺寸, 其各个部分连接方式沿用 LFSTD1 的连接方式。

2 钢管铅芯阻尼器抗震分析

2.1 有限元建模

采用 ABAQUS 有限元软件进行建模, 对模型进行抗震试验模拟分析。钢管铅芯阻尼器实际上钢管通过焊接形式与上、下端板焊接在一起, 铅芯与钢管之间不需要焊接处理。钢管与铅芯具有同向耗能能力, 钢管与铅芯在工作时共同受力协同工作。在建模中为真实还原钢管、铅芯与端板的连接, 钢管、铅芯通过绑定约束与端板连接, 在主从面选择上钢管、铅芯为从面, 端板为主面。而钢管和铅芯的接触中法向接触为硬接触, 切线采用库伦摩擦。在 ABAQUS 网格模块中具有多种单元划分形式, 根据钢管阻尼器力学行为特点宜采用八结点线性六

面体杂交积分, 即 C3D8R。阻尼器网格划分如图 5 所示, 钢管和铅芯的网格宜采用中性轴算法进行计算。在 ABAQUS 中应采用边界条件中的完全固定将阻尼器底部固定, 在阻尼器顶部选择参考点施加水平往复荷载。在顶面设置参考点, 将参考点与顶面耦合, 并约束除加载方向的其他方向所有自由度。完成上述步骤后, 进行作业提交分析。

2.2 阻尼器材料本构

铅采用等向强化模型符合铅的本构, 即在塑性变形后仍然保持各项同性^[9]。本文主要研究力学指标因此不考虑密度, 铅的弹性模量为 $E=1.7\text{e}4\text{ MPa}$, 泊松比为 0.42, 塑性屈服强度 $f_y=10.5\text{ MPa}$ 。钢管钢材采用双折线弹性 - 强化模型, 此模型在弹性阶段为斜率较大的斜直线, 进入塑性屈服阶段发展为平缓的斜直线, 一般取弹性模量的 2%, 特点是应力应变的关系唯一, 因此在 ABAQUS 属性模块输入弹性和塑性两组参数, 弹性模量 $E=2.05\text{e}5\text{ MPa}$, 泊松比 0.3, 屈服强度 $f_y=235\text{ MPa}$, 极限强 $f_u=400\text{ MPa}$,

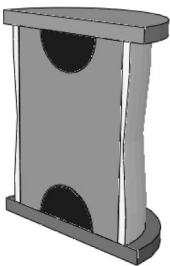


图 1 LFSTD1 构造示意图
Fig.1 LFSTD1 construction

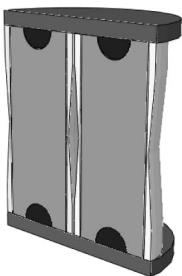


图 2 LFSTD2 构造示意图
Fig.2 LFSTD2 construction

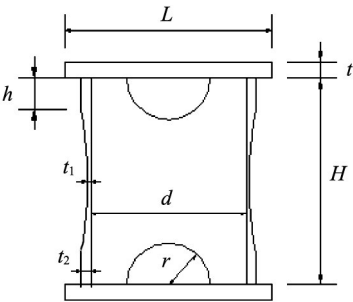


图 3 LFSTD1 剖面图
Fig.3 LFSTD1 section view

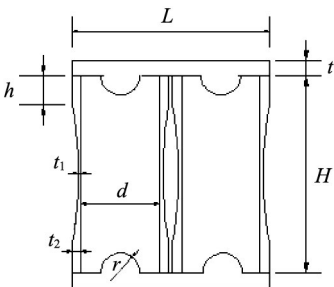


图 4 LFSTD2 剖面图
Fig.4 LFSTD2 section view

表 1 阻尼器尺寸
Tab.1 Damper dimensions

编号	高度 H/mm	宽度 L/mm	铅芯直径 d/mm	加强段厚 t_1/mm	中间段厚 t_2/mm	加强段长 h/mm	挤压半径 r/mm	钢板厚度 t/mm	铅芯体积 V/mm^3
LFSTD1	200	200	150	9	3	30	40	15	3 532 500
LFSTD2	200	200	80	9	3	30	20	15	1 004 800

尼器的弹性刚度 K_1 相差不大。LFSTD1 的极限荷载 F_u 比 LFSTD2 的极限荷载 F_u 大 183 kN; 极限荷载对应位移也不相同, 后者明显大于前者。在加载到 20 mm 时 LFSTD1 极限承载力下降, 表明达到极限荷载值钢管破坏。LFSTD2 在 38 mm 时出现极限荷载, 极限承载能力强于 LFSTD1, 极限位移 u_u 比 LFSTD1 增大近 1 倍。等效阻尼系数 $\zeta_e^{[11]}$ 反映的是阻尼器耗能能力, 等效阻尼系数分别为 0.45、0.52, 等效阻尼系数大 15%。而 u_u/u_y 表明的是模型的延性, 数值越大表明模型延性越优, 后者的 u_u/u_y 增大 69%, 因此新型阻尼器延性较优。在相同加载制度下, 两个阻尼器弹性阶段工作能力相同, 在到

达屈服阶段以后双铅芯构造形式耗能能力明显优于单铅芯阻尼器, 通过滞回曲线和性能指标分析可得双铅芯塑性性能较好、耗能能力强、抗疲劳性能好。

4 结 论

1) 改变铅芯构造后阻尼器极限荷载未降低, 根据模拟试验结果显示极限荷载大于传统结构形式, 极限位移是传统的 1.84 倍, 滞回曲线面积是传统的 1.74 倍, 弹性刚度与原构造接近, 但延性和耗能能力明显优于原构造。

2) 两组模型钢管部分的应力最大值都出现在中



图 7 钢管铅芯阻尼器应力分布云图
Fig.7 Stress map of the LFSTD

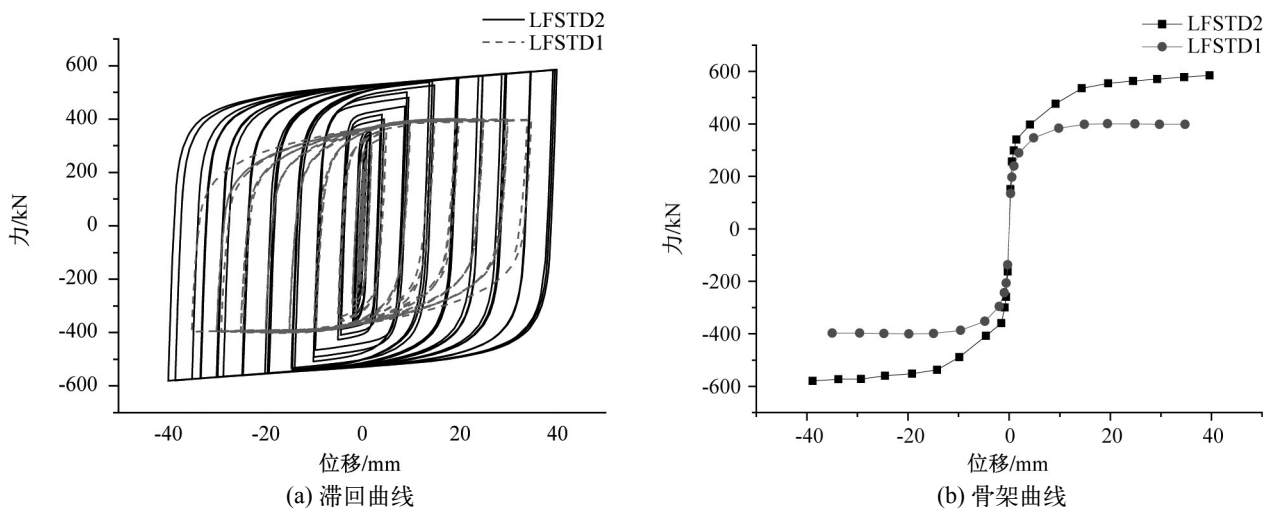


图 8 滞回曲线和骨架曲线
Fig.8 Hysteresis curve and skeleton curve

表 3 阻尼器性能参数
Tab.3 Performance Indicators of Dampers

编号	性能参数							
	屈服荷载 F_y	屈服位移 u_y	极限荷载 F_u	极限位移 u_u	弹性刚度 K_1	极限刚度 K_2	等效阻尼系数 ζ_e	u_u/u_y
	/kN	/mm	/kN	/mm	/(kN·mm ⁻¹)	/(kN·mm ⁻¹)		
LFSTD1	202	0.37	401	38.49	54.59	0.104	0.45	104.03
LFSTD2	214	0.40	584	70.78	53.50	0.082	0.52	176.95

(下 转 第 20 页)

2) 平行粘结参数对粘聚力的影响按敏感程度从强到弱为: 胶结抗拉强度 = 胶结抗剪强度 > 平行粘结弹性模量 = 线性弹性模量 > 平行粘结刚度比 > 线性刚度比。

3) 平行粘结参数对内摩擦角的影响按敏感程度从强到弱为: 胶结抗剪强度 > 胶结抗拉强度 = 线性弹性模量 > 平行粘结弹性模量 > 线性刚度比 = 平行粘结刚度比。

参考文献:

- [1] 刘畅, 陈晓雪, 张文, 等. PFC 数值模拟中平行粘结细观参数标定过程研究 [J]. 价值工程, 2017, 36(26): 204-207.
- [2] 许强, 黄曼, 马成荣. 基于颗粒流的模拟岩石结构面细观参数敏感性研究 [J]. 科技通报, 2018, 34(1): 72-

78.

- [3] 曹智. 砂泥岩及其颗粒料力学特性 PFC 模拟方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [4] 王誉霖. 近似级配条件下砂土力学性质差异及其 PFC 分析方法的研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 周赛. 引江济淮试验工程崩解岩的强度特征及防护措施研究 [D]. 南京: 河海大学, 2018.
- [6] 李德. 基于宏观实验数据的岩土材料细观参数反演 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [7] 何树江. 基于颗粒流的灰岩细观力学参数标定方法及其敏感性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] 邢炜杰, 余湘娟, 高磊, 等. 基于颗粒流离散元的黏性土三轴剪切试验数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 119-124.

(责任编辑 李新)

(上接第 10 页)

部, 两端应力相对较小; 同时, 新型钢管铅芯阻尼器两端应力分布更加均匀。表明优化后的阻尼器可以有效防止端部应力集中。

3) 本次有限元建模能较好地模拟两种钢管铅芯阻尼器的实际耗能能力, 参数分析较为准确。同时, 改进后的钢管双铅芯阻尼器耗能能力较好, 塑性耗能能力优于传统单铅芯阻尼器, 延性有较大幅度的提升, 为以后钢管铅芯阻尼器的应用提供可靠的有限元分析数据与模拟结果。

参考文献:

- [1] 李松瑞. 铅及铅合金 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [2] 周云. 金属耗能减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013: 8.
- [3] ROBINSON W H, GREENBANK L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an Earthquake [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1976, 4(3): 251-259.

- [4] 刘明明, 李宏男, 付兴. 一种新型自复位 SMA- 剪切型铅阻尼器的试验及其数值分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(6): 52-57.
- [5] 彭凌云, 闫维明, 何浩祥. 板式剪切型铅阻尼器的试验研究及有限元分析 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 183-187.
- [6] 周云, 卢德辉, 邓雪松, 等. 钢管铅阻尼器的性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 28(6): 1-15.
- [7] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制 [J]. 建筑结构学报, 2002(2): 2-12.
- [8] 史三元, 郭维光, 陈鑫, 等. 高层钢结构抗震消能体系的力学性能分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2008, 25(4): 1-3.
- [9] 卢德辉, 周云, 邓雪松, 等. 钢管铅阻尼器耗能机理研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(12): 45-51.
- [10] JG/T 209—2012, 建筑消能阻尼器 [S].
- [11] 卢德辉, 周云, 邓雪松. 钢管铅芯阻尼器性能分析研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 215-221.

(责任编辑 王利君)