第 42 卷 第 6 期	地震工程学报	Vol. 42 No.6
2020年11月	CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL	2020, November

董金爽,隋龑,薛建阳.附设黏滞阻尼器的传统风格建筑混凝土梁-柱节点动力循环荷载累积损伤分析[J].地震工程学报,2020, 42(6):1437-1443.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1437

DONG Jinshuang, SUI Yan, XUE Jianyang. Cumulative Damage Analysis of Beam-Column Joints in Traditional-Style Buildings with Viscous Damper under Dynamic Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6):1437-1443. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1437

附设黏滞阻尼器的传统风格建筑混凝土梁-柱节点 动力循环荷载累积损伤分析

董金爽^{1,2},隋 龑²,薛建阳²

(1. 海南大学 土木建筑工程学院,海南 海口 570228;2. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:为研究附设黏滞阻尼器的传统风格建筑混凝土梁-柱节点地震损伤演化规律,进行6个该类 型构件的动力荷载试验,并分别采用位移型、能量型及位移-能量混合型损伤模型对其进行全过程 评价,采用 Park-Ang 模型分析试件黏滞阻尼器型号、试件类型等因素对混凝土传统风格建筑梁柱 节点损伤行为的影响。研究结果表明:附设黏滞阻尼器可显著提升传统风格建筑节点的承载能力、 延性性能及耗能能力,结构的抗震性能得到较大幅度的提升;Park-Ang 损伤模型与 Banon 损伤模 型适用于传统风格建筑节点损伤演化规律的描述,建议对该类型节点的损伤规律表征选用该损伤 模型。黏滞阻尼器型号可在一定程度上影响传统风格建筑的损伤演化发展;设计阻尼力大的试件 虽然延性有所提高,但受荷过程中累积损伤也较大。

关键词:传统风格建筑;黏滞阻尼器;动力加载;损伤模型
中图分类号:TU398.9
文献标志码:A
文章编号:1000-0844(2020)06-1437-07
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1437

Cumulative Damage Analysis of Beam-Column Joints in Traditional-Style Buildings with Viscous Damper under Dynamic Cyclic Loading

DONG Jinshuang 1,2 , SUI Yan 2 , XUE Jianyang 2

School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China;
 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To study the earthquake damage evolution rule of the beam-column joint in traditionalstyle buildings with viscous damper under dynamic cyclic loading, a dynamic loading test was car-

收稿日期:2019-07-08

基金项目:海南省自然科学基金项目(519QN189);海南省重大科技计划项目(ZDKJ201803);国家自然科学基金项目(51208411);陕 西省科学技术研究发展计划项目(2013KW23-01);海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)1860)

第一作者简介:董金爽 (1989-),男,山东菏泽人,工学博士,讲师。E-mail:mlcxll@163.com。

通信作者: 隋 龑(1978-), 男, 黑龙江双城人, 工学博士, 副教授。E-mail: suiyanmyy @163.com。

ried out on six specimens. A damage model of displacement type, energy type, and displacementenergy type was used to evaluate the damage process. The results showed that the seismic behavior of the joints in traditional-style buildings with viscous damper is superior to that in buildings without viscous damper. The bearing capacity, ductility performance, and dissipation energy capacity of specimens with viscous damper are superior to those of buildings without viscous damper. The damage curves of the Park-Ang model and the Banon model can describe the earthquake damage evolution rule of the beam-column joint in traditional-style buildings. The type of viscous damper will affect the damage evolution and development of traditional-style buildings to a certain extent. Although the ductility of specimens with large design damping force is improved, the cumulative damage is also large under loading.

Keywords: traditional style buildings; viscous damper; dynamic loads; damage model

0 引言

传统风格建筑(又称仿古建筑)是一种对传统建 筑文化和民族建筑特色具有良好继承的新型建筑类 型,对目前我国城市发展和建设具有重要的工程意 义。现有研究^[1]及中国台湾武昌宫震害均表明,该 类型结构的节点受力形式不同于现代常规梁柱节 点,且对于其在地震作用下的损伤演化规律研究尚 未见报道。因此,正确掌握传统风格建筑梁-柱节点 在地震作用下的损伤演化规律,建立合理的地震损 伤评估模型,对深化传统风格建筑的弹塑性时程分 析、动力灾变机制认识、动力可靠性分析和震后安全 评估与应急处理均具有重大意义。

鉴于此,课题组设计了6个传统风格建筑梁-柱 节点试件,包括单梁-柱节点系列及双梁-柱节点系 列,对其施加动力循环荷载,研究动力荷载作用下其 累积损伤,并采用不同的损伤模型对其全过程进行 评价。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计的 6 个传统风格建筑梁-柱节点选取传统 风格建筑中具有代表性的双梁-柱节点及单梁-柱节 点为研究对象。各类型节点均为 3 个试件,各包括 1 个未附设及 2 个附设黏滞阻尼器的试件。试件编 号:双梁节点为 DLJ-1、DLJ-2、DLJ-3;单梁节点为 SLJ-1、SLJ-2、SLJ-3。其中 DLJ-1 与 SLJ-1 为未附 设阻尼器的对比试件。参照古建筑梁-柱节点基本 构造形式,根据《工程做法则例》^[2]中材份进行换算, 采用 1:2.6 的缩尺比,试件总高 2 650 mm,总宽 3 000 mm。各试件具体尺寸如图 1 所示。试件设 计轴压比 n=0.25。 试件上柱为方钢管混凝土结构,上柱中的钢管 一直贯通至下柱中一定长度,梁为普通钢筋混凝土 结构,如图 2 所示。

1.2 黏滞阻尼器选用

试验选用速度型黏滞阻尼器,该类型阻尼器主 要是通过调整其内部黏滞流体的不同流速从而实现 效能耗能的效果。

黏滞阻尼器阻尼力计算公式如式(1)[3]示。

$$F = CV^{\alpha} \tag{1}$$

式中:*F* 表示阻尼力;*C* 表示阻尼系数;*V* 为阻尼器 两端活塞的相对运动速度;*α* 为阻尼指数。

试验用黏滞阻尼器参数如表1所列。

1.3 加载制度

试验采用以正弦波为荷载形式的快速动力加 载制度,一方面是为了使速度型黏滞阻尼器有效地 发挥其功效,另一方面是为了研究在快速动力加载 情况下传统风格建筑节点的力学特性。加载设备 为高性能 MTS 电液伺服加载系统,通过输入正弦 波的频率及振幅实现快速动力加载。加载制度如 图 3所示。

试验加载装置如图 4 所示的柱端加载方式,首 先由 1 000 kN 千斤顶在柱顶施加竖向轴心荷载至 设计值,而后用 500 kN 电液伺服作动器在柱端施 加循环往复荷载。千斤顶与反力梁间设置滚轮,保 证千斤顶能够随柱顶实时水平移动。

2 主要试验结果

2.1 荷载-位移曲线

通过数据采集系统自动记录试件的柱顶水平荷载 *P* 和水平位移Δ,获取的荷载-位移滞回曲线如图 5所示。



试件编号	F /kN	<i>C</i> /(kN • s/m)	α	S / mm
DLJ-2(SLJ-2)	80	88	0.36	± 30
DLJ-3(SLJ-3)	50	60	0.30	± 30
法心地计位政				

注:S-设计位移

梁

由图 5 可知:

(1) 随着控制位移的不断增大,各试件滞回曲

(2)总体上,附设黏滞阻尼器试件的耗能能力 优于对比试件,说明附设黏滞阻尼器可在一定程度 上提升传统风格建的耗能能力及抗震性能。

2.2 承载能力、延性及耗能能力

段及塑性阶段,其耗能能力逐渐提升。

各试件特征点荷载、位移及延性系数 $\mu(\mu =$

 Δ_{m}/Δ_{y})如表 2 所列。其中 Δ_{m} 为破坏位移, Δ_{y} 为屈 服位移(由"Park 法"^[4]确定),破坏位移 Δ_{m} 取破坏 荷载为极限荷载的 85%时对应的位移, P_{u} 为峰值 荷载,相应的位移为 Δ_{u} ,破坏荷载 P_{m} 定义为 0.85 P_{u} ,相应的水平位移为破坏位移 Δ_{m} 。

采用等效黏滞阻尼系数 h。表征试件的耗能能力,计算结果列于表 3。

(1)附设黏滞阻尼器的双梁-柱节点屈服位移、破坏位移及延性系数分别为未附设黏滞阻尼器的双梁-柱节点的1.03、1.18、1.14倍;附设黏滞阻尼器的单梁-柱节点屈服位移、破坏位移及延性系数分别为未附设黏滞阻尼器的单梁-柱节点的1.17、1.19、1.04倍,说明附设黏滞阻尼器的试件具有良好的延性,满足抗震设计要求。



Fig.5 Hysteretic loops of $P-\Delta$

(2)通过与已有的试验结果^[5]相比较,极限荷载时,普通钢筋混凝土节点 h。约为 0.1,型钢混凝土 节点的 h。约为 0.3,本试验附设黏滞阻尼器的节点 试件,极限荷载时的等效黏滞阻尼系数为 0.182~ 0.279,高于普通混凝土梁-柱节点,接近于型钢混凝 土 节点,说明传统风格建筑混凝土梁-柱节点附设黏 表 2 试件特征点荷载及位移

Table 2	Load and	displacement	values	of	characteristic	point	of	specimen
---------	----------	--------------	--------	----	----------------	-------	----	----------

试件 屈服点		极降	 長点	破	坏点		亚拓	
编号	Ру	Δy	P _u	$\Delta_{\rm u}$	$P_{\rm m}$	$\Delta_{ m m}$	- μ	千均
DLI-1	42.2	28.3	53.0	52.2	45.1	68.1	2.41	2 66
DEJI	33.5	24.2	46.7	43.1	39.7	70.7	2.92	2.00
DLI-2	50.6	29.8	61.5	55.9	52.3	82.4	2.77	3.06
00, 2	45.9	25.2	54.5	56.7	46.3	84.4	3.35	0.00
DLI-3	57.6	26.3	61.5	52.8	52.3	75.7	2.88	3.02
DEJ 0	55.0	26.8	56.2	52.3	47.8	84.8	3.16	0.02
SL I-1	28.3	19.0	32.3	29.2	27.5	58.8	3.09	3 1 3
SLJ I	27.5	22.4	35.5	44.7	30.1	70.9	3.17	0.10
SLI-2	47.2	25.5	50.1	42.9	42.6	73.1	2.88	3 1 9
011 1	36.8	23.4	45.5	69.7	38.7	81.7	3.49	0.15
SL I-3	35.8	28.2	42.9	42.3	36.5	81.2	2.88	3 28
010 0	35.1	19.5	37.5	43.7	31.9	71.9	3.69	0.20

表 3 试件耗能指标

Table 3Index of energy dissipation

计供护已	h _e					
风什姍亏	屈服点	极限点	破坏点			
DLJ-1	0.085	0.128	0.141			
DLJ-2	0.124	0.195	0.275			
DLJ-3	0.122	0.182	0.271			
SLJ-1	0.144	0.192	0.223			
SLJ-2	0.197	0.271	0.392			
SLJ-3	0.187	0.279	0.397			

滞阻尼器后其耗能能力提高。

3 试件损伤演化分析

结构在强烈地震作用下产生较大的塑性变形而

导致其严重的破坏甚至于倒塌。因此,建立合理适用的结构在地震作用下的损伤倒塌评估机制是实现 结构可持续性性能设计的关键。由于地震作用的复 杂性及结构损伤发展路径的随机性,当前尚无统一 的结构损伤倒塌评价模型。当前常用损伤倒塌评价 模型主要有位移型^[6-7]、能量型^[8-9]、组合型^[10-12]。

采用常用结构损伤评估模型得到的试验试件的 损伤演化曲线如图 6 所示。定义开始加载时,各试 件的损伤均为 0,加载结束时各试件的损伤均为 1。 由图 6 可知:

(1)随着加载不断进行,各试件损伤指数不断 地增大,且不可恢复,表明各试件逐步由弹性阶段过



Fig.6 Application of different seismic damage models to the concrete beam-column joints in traditional-style buildings

渡到弹塑性阶段,并最终进入到塑性阶段。

(2)同一试件采用不同的损伤评估模型得到的 损伤演化曲线存在较大的差异,这是由于不同的损 伤评估模型考量的结构损伤影响因素不同及采用的 损伤影响因素数量不同而导致的。

3.1 损伤模型适用性分析

12

0.8

0.4

0

0

损伤指数D

由图 6 可知,各试件损伤全过程随模型的变化 规律如下:

(1) Newmark 损伤模型与 Mahin 损伤模型计 算的损伤演化曲线较为接近,但两者的损伤演化曲 线为显著的锯齿形,这是与实际地震作用下结构的 损伤演化规律不相符的,原因是由于两者采用延性 作为单一参数进行损伤计算。因此,此两者不适用 于传统风格建筑节点在快速动力作用下的损伤演化 描述。

(2) Gosain 损伤模型及 Darwin 损伤模型由于 其实质均为累积功模型,因此两者计算出的各试件

DLI-2

损伤演化曲线基本一致,尤其是加载后期,两条曲线 基本重合。基于 Gosain 损伤模型改进的 Hwang 损 伤模型与 Krawinkler 损伤模型同样适用于延性中 等的结构损伤演化描述。

(3) Park-Ang 损伤模型与 Banon 损伤模型均 为双参数损伤模型,两者均是基于大量试验数据拟 合得出的。两者的损伤演化曲线对于传统风格建筑 节点的描述也较为一致,且均考虑了黏滞阻尼器对 试件耗能的影响,因此建议采用此两者对传统风格 建筑损伤演化规律进行描述。

3.2 损伤影响因素分析

根据上述分析,选用 Park-Ang 损伤模型对相关因素,如阻尼器型号、试件类型等因素对试件损伤 演化规律进行探讨。

3.2.1 阻尼器型号

SL I-2

不同黏滞阻尼器型号对试件损伤演化规律的影响如图 7 所示。



损伤指数D

1.2

0.8



Fig.7 Influence of type of viscous damper on the development of specimen damage

由图7可知:

(1)布置黏滞阻尼器的各试件在加载全过程损 伤演化规律基本一致,即在加载初期损伤较小,随着 加载的进行,塑性累积损伤,试件损伤逐步增大;

(2)设计阻尼力大的试件在加载全过程中损 伤演化规律曲线位于设计阻尼力小的试件上部,说 明设计阻尼力较大的试件的延性要优于设计阻尼 力小的试件;加载前期,SLJ-2、DLJ-2试件的损伤 要大于 SLJ-3、DLJ-3试件,说明设计阻尼力大的试 件虽然延性有所提高,但受荷过程中累积损伤也 较大。

3.2.2 试件类型

不同试件形式对试件损伤演化规律的影响如 图 8 所示。 从图中可知,布置的黏滞阻尼器设计阻尼力较 大的试件的损伤演化规律曲线基本重合,说明所布 置的黏滞阻尼器显著地提高了单梁-柱节点的抗震 能力。

140

4 结论

(1)将黏滞阻尼器与传统风格建筑相结合,可 显著提升传统风格建筑的承载能力及耗能能力,从 而提高了其抗震性能。

(2) Park-Ang 损伤模型与 Banon 损伤模型对 传统风格建筑混凝土梁-柱节点损伤演化规律的描述与实际相符,建议对该类型节点的损伤规律表征 选用该损伤模型。

(3) 选用的黏滞阻尼器型号不同,试件的损伤



图 8 试件类型形式对试件损伤发展的影响

Fig.8 Influence of type of specimen on the development of specimen damage

演化规律不同,阻尼器设计阻尼力大的试件损伤发 展过程中会有所提前,累积损伤较大。

参考文献(References)

- [1] 谢启芳,李朋,葛鸿鹏,等.传统风格钢筋混凝土梁-柱节点抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2015,31(4):150-158.
 XIE Qifang,LI Peng,GE Hongpeng,et al.Experimental Study on Seismic Behavior of RC Column-beam Joint Built in Traditional Style[J].World Earthquake Engineering, 2015, 31(4): 150-158.
- [2] 梁思成.清工部《工程做法则例》图解[M].北京:清华大学出版 社,2006.
- [3] HOUSNER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural Control:Past,Present, and Future[J].Journal of Engineering Mechanics,1997,123(9):897-971.
- [4] ELNASHAI A S, BRODERICK B M, DOWLING P J. Earthquake-resistant Composite Steel/Concrete Structure [J]. The Structural Engineer, 1995, 73(8):121-132.
- [5] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].北京:科学出版社, 2007.

- [6] NEWMARK N M, ROSENBLUETH E. Fundamentals of Earthquake Engineering [M]. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1971.
- [7] KRAWINKLER H, ZOHREI M. Cumulative Damage in Steel Structures Subjected to Earthquake Ground Motions[J].Computers & Structures, 1983, 16(1):531-541.
- [8] DARWIN D, NMAI C K.Energy Dissipation in RC Beams under Cyclic Load [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(8):1829-1846.
- [9] GOSAIN N K,JIRSA J O,BROWN R H.Shear Requirements for Load Reversals on RC Members[J].Journal of the Structural Division,1977,103(7):1461-1476.
- [10] HWANG T H, SCRIBNER C F. R/C Member Cyclic Response during Various Loadings[J].Journal of Structural Engineering, 1984, 110(3): 477-489.
- [11] PARK Y J, ANG ALFREDOH S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4):722-739.
- [12] BANON H, BIGGS J, IRVINE H M. Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames[J]. ASCE J Struct Div, 1981, 107(9): 1713-1729.