

摩擦型自复位耗能拉索减震加固分析

贾慧娟¹, 王际帅², 郭彤², 宣卫红¹, 陈育志¹

(1. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为提高建筑抗震性能并减小震后残余变形,提出了一种摩擦型自复位耗能拉索(FSCEDT),根据加固机理分析了其在工作阶段的受力状态。为验证 FSCEDT 减震加固的适用性,以需要进行抗震加固的某6层框架结构为例,对其加固前后多遇和罕遇地震下的弹性和弹塑性动力时程进行分析。结果表明:FSCEDT 具有良好的自复位性能,能够显著减小结构在地震中的动力响应和震后残余变形,可以应用于结构的抗震和加固,具有显著的经济效益和应用价值。

关键词:自复位;摩擦型;拉索;耗能;抗震加固

中图分类号:TU37

文献标识码:A

文章编号:1672-755X(2021)04-0074-05

Analysis on Seismic Reinforcement of a Friction-type Self-centering Energy Dissipating Tendon

JIA Hui-juan¹, WANG Ji-shuai², GUO Tong², XUAN Wei-hong¹, CHEN Yu-zhi¹

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to improve the seismic performance of buildings and reduce the residual deformation after earthquake, a new type of friction-type self-centering energy dissipating tendon (FSCEDT) is proposed. The stress states of FSCEDT in each working stage are analyzed according to its reinforcement mechanism. In order to verify the applicability of seismic reinforcement of FSCEDT, a 6-story frame structure that needs seismic reinforcement is taken as an example to analyze the elastic and plastic dynamic time course under frequent and rare earthquakes before and after reinforcement. The results show that FSCEDT has good self-centering performance. It can significantly reduce the dynamic response during an earthquake and the residual deformation of the structure after the earthquake. It can be applied to the seismic reinforcement of the structure, and has significant economic benefits and value.

Key words: self-centering; friction-type; tendon; energy dissipating; seismic reinforcement

为减少地震灾害对建筑结构的影响,现有建筑结构的设计和加固都考虑了结构的抗震性能。现有结构抗震加固设计思路大致可分为两种^[1]。一种是通过增加结构自身的强度、刚度和延性。这种被动依靠结构自身抗力的传统抗震方法,耗散地震能量以结构的损伤为代价,故结构在震后往往产生难以修复的损伤和破坏。另一种思路是在建筑结构内设置消能隔震、减震装置来耗散地震输入能量。在结构遭受地震

收稿日期:2021-10-26

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51580251);江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(jz-062);江苏省青蓝工程;江苏省高校自然科学基金面上项目(17KJB560004)

作者简介:贾慧娟(1985—),女,陕西延安人,讲师,博士,主要从事结构抗震与减震等方面的研究。

作用时产生阻尼力,从而减小了主体结构的地震响应。随着“可恢复功能抗震城市”概念的提出,结构抗震设计重点逐渐由抗倒塌设计向可修复设计转变,残余变形成为评价震后结构可修复程度的重要指标^[2]。

在支撑框架体系中广泛使用的防屈曲耗能支撑是一种双向受力支撑,防屈曲耗能支撑具有优异的滞回特性和较好的抗低周疲劳性能,避免出现普通支撑受压曲的现象,但防屈曲耗能支撑仍存在制作工艺复杂、自重高、震后残余变形较大和支撑损伤程度难以确定的问题^[3-4]。结构在震后产生残余变形和损伤,需要昂贵的修复费用,并会对结构本身和结构的使用性能造成各种不利的影响。文献[5]表明,当残余层间位移角超过 0.005 时,结构的修复成本将超过重建成本。基于普通支撑存在的不足,可恢复性耗能支撑应运而生。文献[6]指出采用自复位耗能支撑加固的框架比采用防屈曲支撑(BRB)加固的框架具有更小的峰值层间位移、损伤和横向残余变形。文献[7]指出具有复位功能的支撑与其他类型支撑相比具有结构残余变形小、结构损伤小和震后结构易于修复的显著优点,其构造和受力特征符合建筑工业化及结构可修复的新型设计理念。然而目前现有的自复位耗能支撑多为双向受力支撑,为了避免受压屈曲问题和实现自复位的功能,普遍存在造价高昂、构造复杂和变形能力有限的弊端。

随着高强材料的发展,单向受力支撑也开始被广泛应用于结构的减震领域,大量研究表明单向受力支撑能够提高结构的抗侧刚度、侧移延性、极限承载力和有效耗能能力^[8-10]。基于现有结构支撑不足和研究现状,本文提出了一种摩擦型自复位耗能拉索(friction-type self-centering energy dissipating tendon, FSCEDT)。FSCEDT 通过双向交叉布置来实现支撑的功能,充分利用了拉索高强的特性,且具有良好的耗能能力、复位能力和极强的变形能力,大幅降低了支撑的造价和自重,提高了结构在多遇和罕遇地震作用下的抗震性能和可修复性能。

1 FSCEDT 的理论荷载-位移关系

FSCEDT 由摩擦复位单元、拉筋和连接单元组成(图 1)。连接单元一端安装在拉索主体部分,另一端安装在被加固结构上。拉筋用于连接摩擦复位单元和连接单元,采用高强度和高弹性伸长率的材料。摩擦复位单元由内槽、外槽、复位筋、摩擦板和高强螺栓组成。摩擦板夹持在内槽和外槽之间,摩擦力的大小可通过高强螺栓的预紧力来调节。复位筋采用高弹性伸长率的筋材,复位筋的初始张拉荷载能够克服摩擦力,摩擦复位单元就能实现自恢复功能。

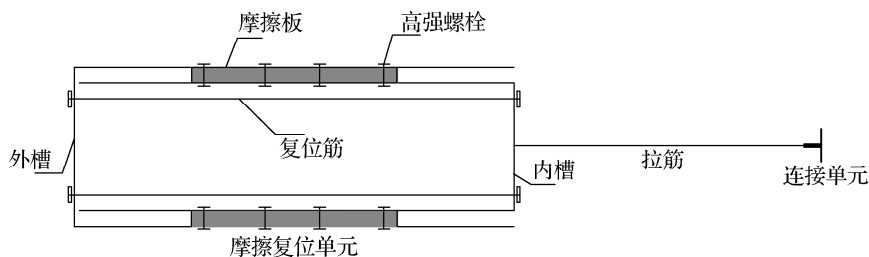


图 1 FSCEDT 的构造

图 2 和图 3 分别为 FSCEDT 的加载示意和理论荷载-位移关系,其中 l_n 为摩擦复位单元长度, l_w 为连接单位长度, F 为荷载, x 为变形。由图 3 可知,在加载情况下,当 FSCEDT 承受的轴向荷载小于复位筋初始张拉荷载与摩擦力之和时,仅拉筋发生弹性伸长变形;当 FSCEDT 承受的轴向荷载大于两者之和时,

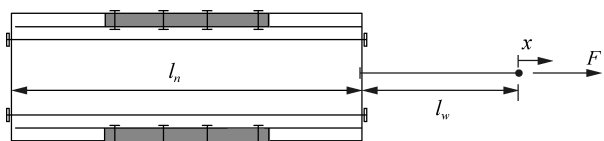


图 2 FSCEDT 的加载示意

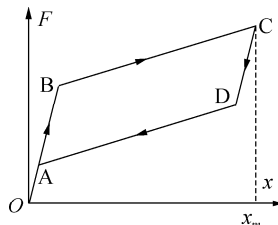


图 3 FSCEDT 理论荷载(F)-位移(x)关系

摩擦耗能正向启动。在卸载情况下,当 FSCEDT 承受的轴向荷载大于复位筋初始拉张荷载与摩擦力之差时,仅拉筋发生弹性回缩变形;当 FSCEDT 承受的轴向荷载小于两者之差时,摩擦耗能反向启动,摩擦复位单元逐渐复位。

2 工程介绍

2.1 工程概况

某 6 层 4 跨的框架教学楼,二类场地,第 2 地震设计分组,结构平面布置见图 4(a),结构立面布置见图 4(b)。楼面和屋面恒荷载标准值取 $6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,楼面活荷载标准值取 $3.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,隔断墙和围护墙荷载标准值取 $8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。8.0 m 跨梁、6.0 m 跨梁、2.7 m 跨梁、1~3 层柱和 4~6 层柱的截面尺寸($\text{mm}\times\text{mm}$)分别为 250×600 、 200×450 、 200×400 、 400×400 和 300×400 ,混凝土均为 C45,钢筋均为 HRB400。由于该地区抗震设防烈度由 6 度增加为 7 度,故需要进行抗震性能分析。

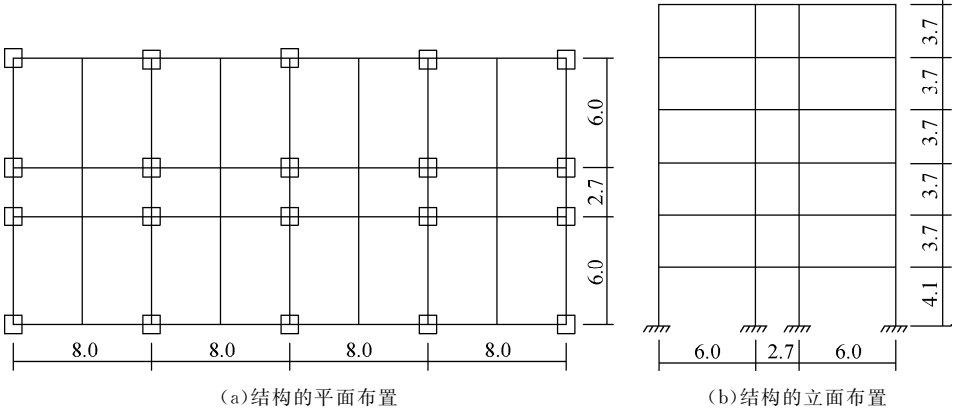


图 4 结构的平面和立面布置(单位:m)

2.2 原结构抗震性能

根据结构场地类别、设计地震分组和规范反应谱的频谱特性,选择了 7 条天然地震波(分量标志为 H1),如表 1 所示。用 SAP2000 对该框架结构进行 7 度多遇地震下的弹性时程分析和反应谱分析,提取基底剪力结果如表 2 所示。由表 2 可知,7 条时程曲线计算所得的结构基底剪力均大于反应谱计算所得基底剪力的 65%,且平均值不小于后者的 80%,符合规范要求^[8]。该结构在 7 度多遇地震下的反应谱分析和弹性时程分析的层间位移角结果如图 5 所示,可知该结构需要进行抗震加固。

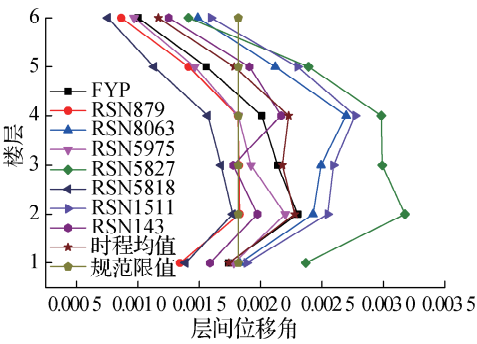


图 5 弹性时程和反应谱结果

表 1 地震波信息

编号	名称	震级	时间
1	El Mayor-Cucapah	7.2	2010
2	Imperial Valley-06	6.5	1979
3	Landers	7.3	1992
4	Chi-Chi, Taiwan(China)	7.6	1999
5	Tabas, Iran	7.3	1978
6	Iwate, Japan	6.9	2008
7	Christchurch, New Zealand	6.2	2011

表 2 反应谱分析和动力分析最大基底剪力情况

项目	基底剪力/kN	误差/%
FYP(反应谱)	692.56	—
RSN5818	557.95	19.44
RSN1511	797.17	15.10
RSN8063	721.86	4.23
RSN5827	933.53	34.79
RSN879	538.75	22.21
RSN143	648.36	6.38
RSN5975	729.06	5.27
7 条自然波的均值	702.41	15.34

3 加固后地震作用分析

3.1 复位耗能拉索模拟与布置

采用 SAP2000 软件 LINK 单元中的 Multilinear Elastic 和 Multilinear Plastic 单元并联连接^[9]来模拟双向布置的 FSCEDT,参数设置见表 3。其中,Multilinear Plastic 单元提供耗能能力,Multilinear Elastic 单元提供恢复力,并联连接后的滞回曲线和双向布置的耗能拉索的理论滞回曲线见图 6。

表 3 LINK 单元连接属性

单元类型	初始刚度/($\times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	屈服强度/N	屈服后刚度/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)
Multilinear Elastic	1.0	60 000	10 000
Multilinear Plastic	0.2	60 000	0

Multilinear Elastic 和 Multilinear Plastic 模拟的支撑滞回曲线的包络面积与双向布置的耗能拉索的包络面积基本相等,呈旗帜形,并且在整个加载路径中大部分路径的出力都是相等的,故采用该方法来模拟结果是足够精确的。FSCEDT 在结构中的布置情况见图 7。

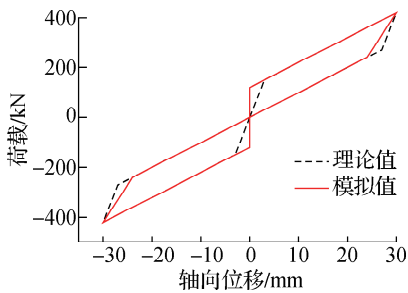


图 6 拉索理论滞回曲线和模拟滞回曲线

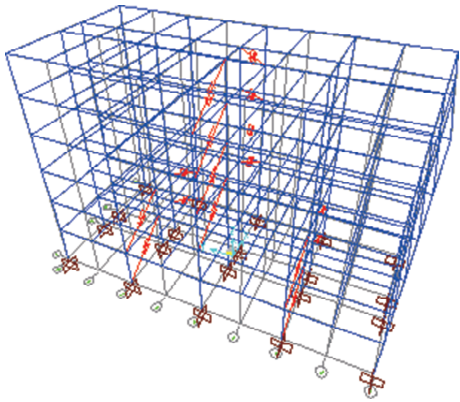


图 7 FSCEDT 布置图

3.2 加固前后结构的弹性和弹塑性动力分析

对加固前后的结构进行 7 度多遇地震下的反应谱分析和弹性时程分析,分析结果见图 8。其中,结构 2 层到 4 层的层间位移角加固前反应谱结果与加固前时程均值均大于规范限值,采用 FSCEDT 加固后结构的层间位移角大幅度减小并满足了规范限值的要求。

为研究加固前后结构在 7 度罕遇地震下的结构响应,采用 SAP2000 对加固前后的结构进行弹塑性动力时程分析,结果如图 9 所示,采用 FSCEDT 加固后结构的层间位移角大幅度减小。

图 10 为加固前后的残余层间位移均值的对比,从图中可以看出,采用 FSCEDT 加固后罕遇地震作用下的层间位移显著减小,验证了采用 FSCEDT 加固的高效性和可行性。

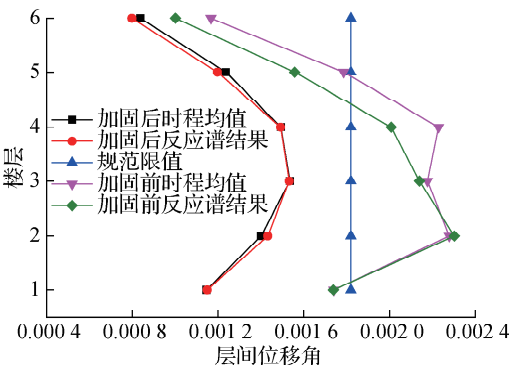


图 8 加固前后多遇地震弹性时程和反应谱结果对比

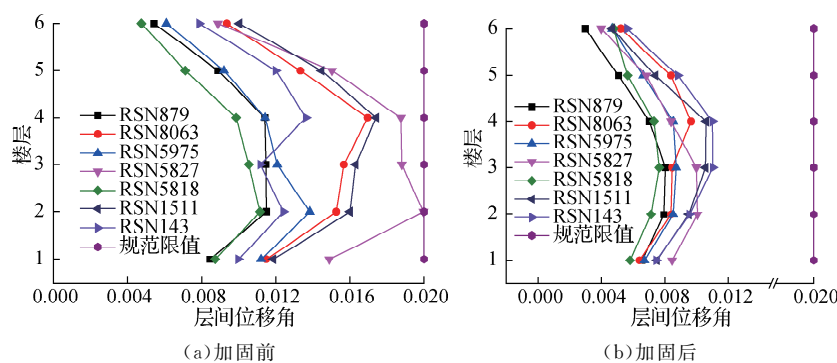


图 9 加固前后罕遇地震下弹性时程结果

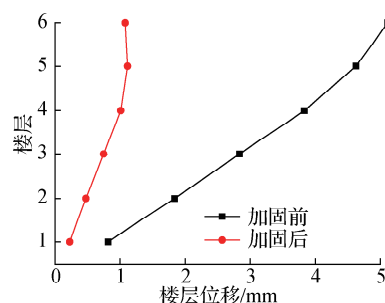


图 10 加固前后时程分析残余变形均值

4 结 论

本文提出了一种摩擦型自复位耗能拉索(FSCEDT),分析了其在各个工作阶段的受力状态。以某 6 层框架结构为例,开展了多遇和罕遇地震下的弹性和弹塑性动力时程分析,得出主要结论如下: 1)FSCEDT 的滞回曲线呈旗帜形,具有较好的自复位能力和耗能性能,能够有效地减小建筑结构的地震响应。2)在多遇地震作用下,FSCEDT 的引入能够有效减小多层框架结构的层间变形,可满足既有建筑结构抗震加固的要求。3)在罕遇地震作用下,FSCEDT 能够较大幅度减小多层框架结构的残余变形,可有效提高建筑结构震后功能恢复效率和减少建筑修缮费用。

参考文献:

- [1] 宋永生,王际帅,宣卫红,等.带自复位功能的耗能减震阻尼器研究进展[J].金陵科技学院学报,2019(1):40-46
- [2] 牟翠翠,张立明.工程抗震中的隔震技术研究综述[J].建材技术与应用,2016(3):12-14
- [3] 常召群,刘伯权,韩萌,等.新型自复位摩擦耗能阻尼器的设计及其数值模拟分析[J/OL].工业建筑:1-9[2021-11-18].<https://doi.org/10.13204/j.gyjzG20080402>
- [4] 韩少渊.新型自复位变摩擦耗能装置理论与数值分析[J].噪声与振动控制,2021,41(1):224-228
- [5] MCCORMICK J, ABURANO H, IKENAGA M, et al. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements[C]. Beijing: Chinese Association of Earthquake Engineering, 2008
- [6] TREMBLAY R, LACERTE M, CHRISTOPOULOS C. Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1): 108-120
- [7] 张爱林,叶全喜,詹欣欣,等.具有复位功能的支撑研究综述[J].北京工业大学学报,2016,42(9):1338-1344
- [8] 池沛,董军,彭洋,等.一种新型自复位耗能拉索支撑的理论研究与数值分析[J].振动与冲击,2016,35(21):171-176,219
- [9] 刘学春,林娜,张爱林,等.索支撑-钢框架结构滞回性能研究[J].钢结构,2015,30(4):48-53
- [10] 凌育洪.自复位记忆合金阻尼器的数值模拟及工程应用[D].广州:华南理工大学,2013

(责任编辑:湛 江)