

基于能量的新型消能摇摆结构体系抗震性能研究^①

刘 迪¹, 赵文兰², 徐树山¹, 杜永峰³

(1.商丘师范学院 建筑与土木工程学院,河南商丘 476000; 2.郑州大学工程学院,河南,郑州 450001;
3.兰州理工大学,甘肃 兰州 730050)

摘要:利用能量法分析新型消能摇摆结构体系在震动过程中的耗能机制,并对其抗震性能进行系统研究。以某已建成的 6 层框架结构为研究对象,建立新型消能摇摆结构体系的计算模型,利用 Opensees 软件获得新型消能摇摆结构体系在不同震动激励下的动力响应,分析其各子结构的耗能部位及所占比例。结果表明:新型消能摇摆结构体系的耗能机制更为合理,其抗震性能优于传统结构体系,为工程设计和研究提供一些参考。

关键词: 能量分析; 消能摇摆结构体系; 耗能机制; 抗震性能

中图分类号: TU442.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0114-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0114

Study on the Anti-seismic Property of Energy-based New Energy Dissipation Swing Structure System

LIU Di¹, ZHAO Wen-lan², XU Shu-shan¹, DU Yong-feng³

(1.College of Architecture and Civil Engineering, Shangqiu Normal University, Shangqiu, Henan 476000, China;
2.School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;
3.Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: The focus of this study was the characteristics leading to failure of frame structures in recent major disasters. This study analyzed a new system for energy dissipation using a stiff frame rocking structure. Energy consumption during seismic oscillations was analyzed using the energy method, and a systematic study of the system's the anti-seismic properties was conducted. With a six-floor frame structure as the research object, a calculation model for the new energy dissipation rocking structure was developed. The dynamic responses of the new system under different seismic oscillations were obtained using the OpenSEES software. Energy consumption and its role in the new were analyzed. Results of the research showed that the mechanism for energy consumption in the new rocking structure was more reasonable, and its anti-seismic properties were an improvement over traditional structural systems.

Key words: energy analysis; energy dissipation rocking structure system; energy consumption mechanism; seismic behavior

0 引言

上世纪中期,美国学者 Housner 提出了基于能量的抗震设计原则即在地震动过程中,能量通过地面传递给结构,并转化成各种不同类型的能量,如动

能、结构本身的阻尼耗能和变形能等,进而利用地震时能量输入与输出相平衡的原理构建能量平衡方程^[1]。有研究表明:在地震过程中输入耗能减震结

① 收稿日期:2014-08-08

基金项目:国家自然科学基金(51178211)

作者简介:刘 迪(1983—),男,讲师,博士,主要从事土木工程、防震减灾等方面的研究。Email:liudi@sqnc.edu.cn

构体系的能量必须与结构体系内部能量的储存、转换和消耗相平衡。

进入新世纪以来,基础隔震、消能减振、结构振动的主/被动控制等新的抗震技术和措施已经被广泛的接受和推广,并经历了实际地震考验^[2-5]。本文在前人的研究基础之上,以某已建成的实际工程为研究对象,构建新型消能摇摆结构体系,利用能量法对其在地震过程中的动力响应进行系统分析,为实际工程设计和施工提供理论依据。

1 计算模型的建立

1.1 新型消能摇摆结构体系设计方案

新型消能摇摆结构体系设计方案的基本思路是分析结构体系在灾害过程中的易损部位,设计既能够为结构体系提供抗侧刚度,在损伤后又不会对结构的竖向承载力产生较大影响的结构构件,同时兼顾施工建造难度使其易于修复和更换。根据上述设计思路和原则,利用钢管混凝土构件作为结构体系的主要抗侧构件,形成附设于传统结构体系之上的附属子结构,同时增设耗能限位装置。根据现有震害统计资料表明:在地震过程中框架结构体系容易出现柱上下端出现塑性铰,进而发生薄弱层破坏^[6-8]。本文通过对已有框架结构外部增设具有抗侧承载力和抗侧刚度较大的钢管混凝土摇摆刚架,将摇摆刚架与基础铰接,以允许摇摆刚架发生一定程度的转动,同时在摇摆刚架底部分别设置黏滞阻尼器形成新型消能摇摆结构体系。

1.2 算例模型的建立

以某建成的钢筋混凝土框架结构为研究对象,在已建成的钢筋混凝土框架结构住宅楼的基础上,利用通用结构设计软件 PKPM,根据新修订的《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010),来进行重新的设计。

研究对象为 6 层钢筋混凝土框架结构。首层为停车场,无填充墙;上部为住宅,有横向和纵向的填充墙。考虑填充墙影响后,底层刚度显著小于上部楼层刚度。所在地的抗震设防烈度为Ⅷ度,属于Ⅱ类第 2 组,场地特征周期 $T_g=0.4$ s,层高为 3.0 m,楼板厚度 120 mm。PKPM 有限元模型如图 1 所示。

模型设计中的楼面恒荷载取 5.0 kN/m²,活荷载取 2.0 kN/m²,组合系数取 0.5。除结构构件混凝土强度等级为 C30 外,非结构构件的混凝土材料强度为 C25。纵筋 HRB335,箍筋为 HPB235。横向

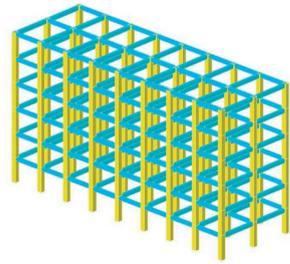


图 1 PKPM 模型

Fig.1 The PKPM model

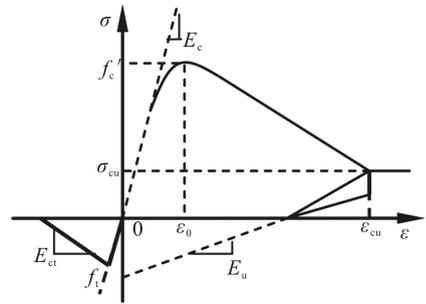


图 2 混凝土的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of the concrete

钢筋和板筋为 HPB235。

采用 OpenSees 的 nonlinear BeamColumn 纤维单元模拟钢筋混凝土框架结构的梁柱以及摇摆刚架的梁柱和支撑。混凝土采用的本构关系模型为 OpenSees 中的 uniaxial Material Concrete02,其本构关系模型见图 2。钢筋以及钢管混凝土所用的钢管采用的本构关系模型采用 OpenSees 中双线性随动强化模型 uniaxial Material Steel02,其本构关系模型见图 3。

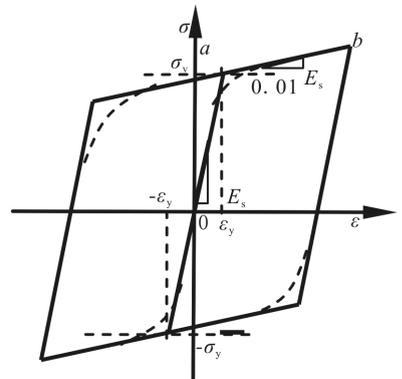


图 3 钢筋及钢管的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of the steel bar and steel pipe

新型消能摇摆结构体系示意图如图 4 所示。消能装置采用黏滞阻尼器,并利用 OpenSees 软件中 Maxwell Material 模型进行计算和分析。

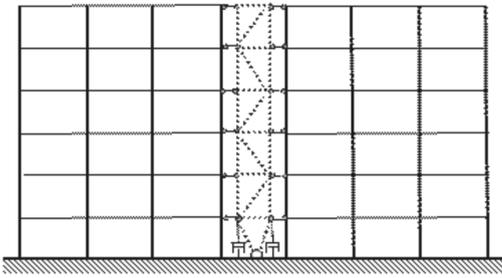


图4 新型消能摇摆结构体系示意图

Fig.4 Diagram of the new energy dissipation rocking structure system

利用于 Opensees 有限元软件分别构建了钢筋混凝土框架结构有限元模型和新型消能摇摆刚架结构体系的有限元计算模型。

曲哲和叶列平^[9]通过分析在多遇地震作用下不同刚度比的框架-摇摆墙结构,分析了不同刚度比下层间位移集中系数(DCF)与刚度比(摇摆墙刚度/框架刚度)的关系,拟合得到了不同层数结构的刚度需求,根据 Gregory A. MacRae^[10]的研究,提出了式(1)所示的刚度比 α ,其近似计算方法为式(2)和式(3)。

$$\alpha = k/K \quad (1)$$

$$k = 12E_{scm} I_{scm} h^3 + E_{scm} A_{sc} l^2 / L^3 \quad (2)$$

$$K = n \cdot 12E_c I_c / h^3 \quad (3)$$

式中, k 为摇摆刚架的层间剪切刚度; K 为原框架结构的层间刚度; h 为框架结构的高度; E_{scm} 、 I_{scm} 分别为钢管混凝土架柱和支撑的组合弹性模量和组合惯性矩; $A_{sc} = A_s + A_c$ 为钢管混凝土截面尺寸; E_c 、 I_c 分别为钢筋混凝土框架柱的弹性模量和惯性矩; n 为每层框架柱的数量; L 为摇摆钢架中支撑的长度; l 为摇摆钢架的跨度。

根据不同的刚度比将有限元模型分别命名为 RC 和 model1A,如表 1 所示。

表 1 Opensees 有限元模型

Table 1 Opensees finite element model

刚度比 α	0.010	0.100	0.250	0.500	0.750	1.000
新型消能摇摆结构	M1A	M2A	M3A	M4A	M5A	M6A

2 动力响应计算

2.1 地震波的选取

现行的《建筑抗震设计规范》(GB50010-2010)中 5.1.2-3 款,针对不同烈度和不同场地类别下的高层建筑,以及甲类或特别不规则建筑强制要求采用时程分析法做补充计算。同时规定地震动输入样

本为三组时应选取不少于 2 组实际强震记录和 1 组人工模拟的地震加速度时程。选取地震动输入如表 2 所示。

表 2 地震波

Table 2 Seismic wave

名称	ELCENTRO	NGA_no_1086 _SYL090	NGA_no_1602 _BOL090	兰州波
峰值/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	400	400	400	400

注:本文中,分别简称为 EL 波,SYL 波,BOL 波和 Lanzhou 波

2.2 能量分析

在对新型消能摇摆结构体系进行能量分析时,假定现有结构在地震过程中的总输入能量与结构体系本身所消耗的能量维持平衡,则在地震过程中地震动输入能量只会发生传递与转移,结构体系的动能和弹性应变能仅为地震动输入能量的转换而不能耗能。结构体系的耗能主要依靠其结构构件的滞回特性和其本身的耗能,依据平衡状态方程如果减小结构体系承担的耗能“重担”,就可以有效地避免结构构件的损伤和破坏。因此在新型消能摇摆结构体系的设计方案中将增设耗能器件于结构的某些关键部位如图 4 所示,使其在地震过程中大量消耗地震能量,从而达到保护主体结构的作用。

根据能量平衡的抗震设计原则,可以将能量平衡方程写成

$$E_k + E_d + E_h + E_s = E_{in} \quad (4)$$

式中, E_k 为结构体系的动能; E_d 为结构体系的阻尼耗能; E_h 为结构体系的弹性变形能; E_s 为结构构件的滞回耗能; E_{in} 为地震作用下结构输入能量。

$$E_k = \int_0^t \{\dot{X}\}^T [M] \{\dot{X}\} dt = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i \dot{x}_i^2 \right) \quad (5)$$

$$E_d = \int_0^t \{\dot{X}\}^T [C] \{\dot{X}\} dt = \sum_{i=1}^n \int_0^t C_i \dot{x}_i^2 dt \quad (6)$$

$$E_h + E_s = \int_0^t \{\dot{X}\}^T [F] dt = \sum_{i=1}^n \int_0^t f_i \dot{x}_i dt \quad (7)$$

$$E_{in} = - \int_0^t \{\dot{X}\}^T [M] [\delta] \ddot{x}_g dt = \sum_{i=1}^n \int_0^t (-m_i \ddot{x}_g \dot{x}_i^2) dt \quad (8)$$

由式(4)~(8)不难发现,在总输入能量不变的情况下,想要避免结构构件的损毁,需增加结构体系动能和弹性应变能、增加阻尼耗能等的占比。但若采取此设计方案势必将增大结构体系自身的刚度,即增大构件截面尺寸或提高其强度等级,这样必然会增大建筑结构在地震过程中的动力响应同时也会付出高昂的经济成本。故前文中采用的增设黏滞阻尼器以耗散地震能量的方法不失为一种较为理想的

选择。

3 计算结果分析

利用 Opensees 计算平台,对前文中的各有限元模型,分别按照现行抗震设计规范 5.1.2 条所要Ⅷ度罕遇的幅值沿模型 X 向输入进行弹塑性动力时程分析。

新型消能摇摆结构体系在不同类型地震动输入

下的层间位移角曲线如图 5 所示,各工况下 RC 结构已接近规范所要求的弹塑性层间位移角限值(1/50),且底层的层间位移角与顶层层间位移角相差巨大,从而形成了薄弱层,存在严重的安全隐患。编号为 M1A~M6A 计算模型在各工况下的层间位移角降为 RC 结构的 50%左右,底部层间位移角与顶层层间位移角的较为接近,各层变形趋于统一,有效地避免了薄弱层的出现。

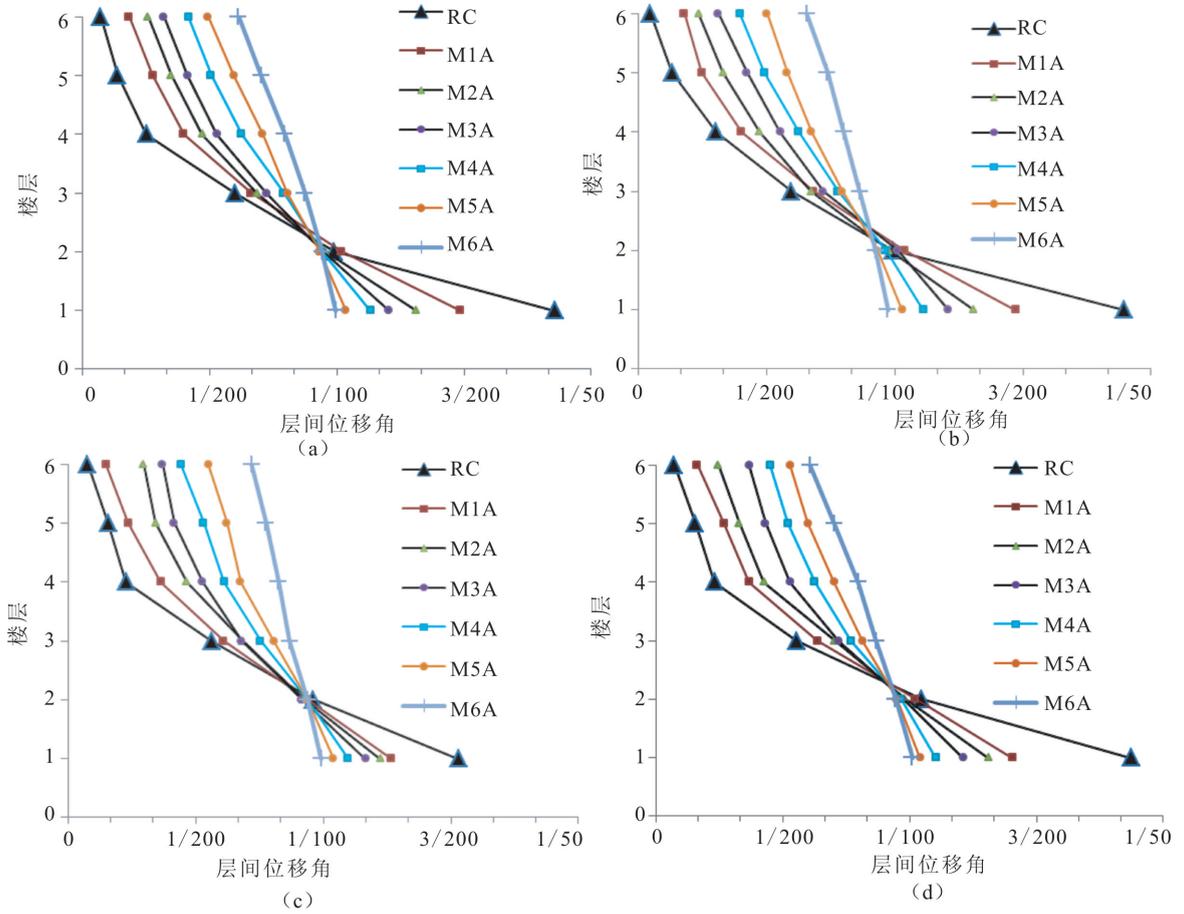


图 5 新型消能摇摆结构体系层间位移角

Fig.5 The inter-story drift ratio of new energy dissipation rocking structure

模型 M1A~M6A 在 BOL 波下的能量曲线如图 6 所示,通过分析发现:随着刚度比的增加,黏滞阻尼器的耗能曲线不断地降低,结构的耗能曲线逐渐抬升。根据能量平衡原则,在总输入能量不变的情况下,如结构自身的耗能占比增加,则黏滞阻尼器的耗能占比必将缩减;也正是逐渐增大的刚度比使得建筑结构上部各层的变形增加从而导致越来越多的结构构件加入到耗散地震能量的工作中来,在总输入能量不变的情况下,黏滞阻尼器的耗能占比减小。

为了更直观、更明了地对地震过程中黏滞阻尼

器耗能的情况进行分析,将黏滞阻尼器耗能在整个结构系统中的比例以数字形式进行量化,如表 3 所示。

4 结论

利用 Opensees 分析平台,分别对钢筋混凝土框架结构和新型消能摇摆结构进行了不同地震工况下的动力弹塑性时程分析与能量分析,结果如下:

(1) 新型消能摇摆结构体系可以有效地改变原结构的变形模式,显著的减小层间位移角幅值,抑制了薄弱层的出现从而避免发生层屈服机制破坏。

表3 黏滞阻尼器耗能占比

Table 3 The proportion of viscous dampers energy consumption

地震波		M1A/%	M2A/%	M3A/%	M4A/%	M5A/%	M6A/%
BOL	D	46.71	35.39	33.79	29.20	27.29	26.19
	S	53.11	64.51	66.08	70.41	72.30	73.48
EL	D	43.05	32.07	30.30	24.78	26.49	23.37
	S	56.56	67.59	69.25	73.11	74.96	76.43
Lanzhou	D	38.08	25.82	25.65	24.40	22.56	20.89
	S	61.76	74.08	75.43	77.34	79.03	74.19
SYL	D	46.12	34.91	33.25	28.30	26.71	25.77
	S	53.83	65.04	66.70	71.65	73.26	74.19

注:D—Dampere;S—Structure

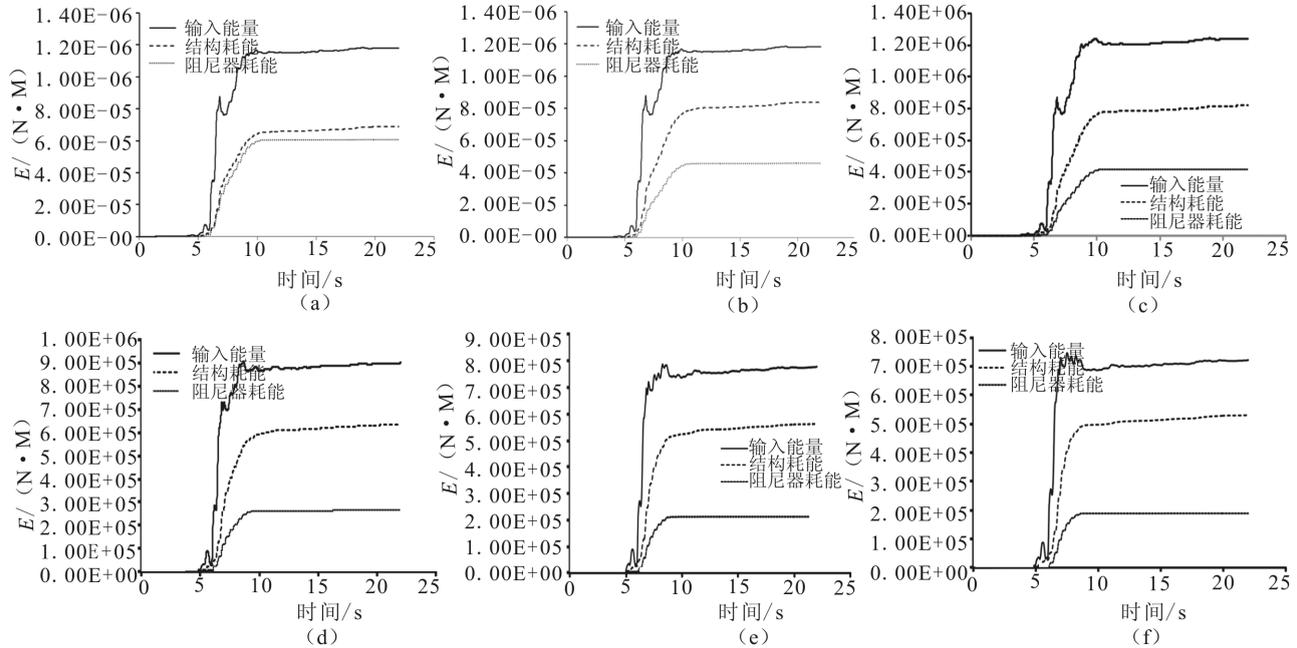


图6 Bol波工况下的能量分析

Fig.6 Energy analysis under Bol wave

(2) 当刚度比较小时,黏滞阻尼器可以显著地降低动力荷载作用下结构的动力响应,但是随着刚度比的增加,更多的结构构件参与耗能,黏滞阻尼器耗能占比逐步降低。

(3) 新型消能摇摆结构体系在罕遇地震动作用下,能够切实提高结构的抗倒塌性能。

参考文献 (References)

- [1] George W Housner. The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-417.
- [2] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1-10.
ZHOU Ying, LV Xi-lin. State of the Art on Rocking and Self-centering Structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10. (in Chinese)
- [3] 李慧, 刘迪, 杜永峰, 等. 基于虚拟激励法的框架-摇摆刚架结构

体系的动力可靠度研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(23): 170-174.

LI Hui, LIU Di, DU Yong-feng, et al. Dynamic Reliability of a RC Frame With Rocking of Moment Frames Based on Pseudo Excitation Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(23): 170-174. (in Chinese)

- [4] 李春锋, 杜永峰, 李慧. 阻尼连体结构地震响应影响参数研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 33-38.

LI Chun-feng, DU Yong-feng, LI Hui. Study of Seismic Response Influence Parameters on Damping Connective Structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 33-38. (in Chinese)

- [5] 李慧, 刘迪, 杜永峰. 近场多脉冲地震动作用下复合隔震结构抗震性能分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 563-568.

LI Hui, LIU Di, DU Yong-feng. The Seismic Behavior Analysis of Near-field Multi Pulse Ground Motion on Composite Isolated Structure[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 563-568. (in Chinese)

- [6] H wang H H M, Low Y K. Seismic Reliability Analysis of

- Plane Frame Structures[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2003, 4(2): 74-84.
- [7] 曹海韵, 潘鹏, 叶列平. 基于推覆分析混凝土框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 240-245.
CAO H Y, PAN P, YE L P. Pushover Analysis of RC Frame Rocking Wall Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 240-245. (in Chinese)
- [8] Weng Yuen Kam, Stefano Pampanin, Alessandro Palermo, et al. Self Centering Structural Systems With Combination of Hysteretic And Viscous Energy Dissipations[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2010, 39: 1083-1108.
- [9] 曲哲, 和田章, 叶列平. 摇摆墙在框架结构抗震加固中的应用[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 2-11.
QU Z, WADA Akira, YE L P. Seismic Retrofit of Frame Structures Using Rocking Wall System [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 2-11. (in Chinese)
- [10] MacRae G A, Kimura Y, Roeder C. Effect of Column Stiffness on Braced Frame Seismic Behavior[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 381-391.

历史记载亡人最多的明朝甘肃庆阳陨石雨事件

郭安宁, 赵乘程, 张向红, 吴建华

(中国地震局兰州地震研究所)

The Meteorite Shower of Ming Dynasty in Qingyang, Gansu ——An Event Causing Largest Number of Death in Historical Records

GUO An-ning, ZHAO Cheng-cheng, ZHANG Xiang-hong, WU Jian-hua

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

中国是世界上最早、最系统地观测与记载陨石的国家。《竹书纪年》上写道：“帝禹夏氏八年六月，雨金于夏邑”，这则关于公元前 2133 年坠落在山西夏县附近的铁陨石雨记载，是世界上第一次关于陨石雨的文字。在中国历史上，最为严重的陨石雨成灾的记录，是公元 15 世纪明代发生于陕西庆阳的陨石雨。《明史》、《明通鉴》、《二申野录》、《万历野获编》、《国榷》、《奇闻类纪摘抄》等多部史书都有相关记载^[1]。至于其时间，有些史书记为明英宗天顺四年（公元 1460 年）二月，有些则记于明孝宗弘治三年（公元 1490 年）二月或三月。《奇闻类纪摘抄》引用《寓园杂记》曰：“陕西庆阳县^①陨石如雨，大者四五斤、小者二三斤，击死人以万数，一城之人皆窜他所。”

从这段记载来看，庆阳的这次陨石雨相当密集，所降陨石数量巨大，死亡人数就达万人之多，给当地百姓造成了巨大伤亡和严重的社会恐慌，人们纷纷离开庆阳，前往别处逃难。

然而，这一记载的真实性却令人生疑，因为并没有现代的地质调查资料指出在当地发现大量陨石。对于这次陨石的成灾问题，文献从成灾机理与未来成灾方面^[2]作了研究。对于这次旷世奇灾，竟没有发现真实存在的陨石，可能的原因有两，一是打入地下后地表看不到，另外可能与其陨石的奇异特性有关，例如上世纪初著史的俄罗斯期通古期大爆炸，人们普遍认为是陨石击地事件，但找不到坠地的陨石实物。

2004 年 12 月 11 日晚 11 时 36 分，一个发出夺目亮光的热球状不明物体从兰州上空飞过，金城瞬间亮如白昼，随后，空中传出巨大的爆炸声，兰州方圆 100 km 的地方出现强烈的震撼。事发当晚有人猜测可能是陨石坠落，为此兰州警方

抽调大批警力连夜搜寻，但未找到不明物体的下落。甘肃省地震局专家测算出陨石坠落的位置距兰州 60 km 左右，方位在东北方向。兰州地区某雷达站当时曾监测到这一事件，确认飞行器往东北方向飞去。本次兰州陨石坠落事件除目击资料外，只有位于兰州地区的一个地震台网获得了完整的记录资料，这也是国内迄今为止获得的唯一一次记录陨石坠落的地震资料^[3]。由这次陨石击地事件判断，明朝庆阳的陨石雨事件中的陨石很可能是触地爆炸了，或者触地的特异性“消失”了。甘肃省庆阳这次陨石雨事件是中国历史上记载的伤亡人数最大的一次陨石成灾事件，对它的真实性及当时情况进行考证研究，无论对灾害和天文学研究的科学意义，还是对传承甘肃华夏文明的文化意义都是很大的。相关研究可以从两个方面展开，一是从地质开挖寻找陨石的存在，二是通过家谱来追索当时的情况。

陨石在古代的文献上被称为“雨铁”或“铁雨”，但曾有青海地震局杨明德（四川人）询郭增建，言其先祖曾亡于“天炭”，问天炭是何物？是否就是陨石？天炭指陨石是非常形象的，笔者曾在网上海搜这个名词，但未见该说法。因此天炭指陨石的说法需要有待考证，因过去此名词，在此提出。

参考文献 (References)

- [1] 《中国国家天文》编辑部. 中国古籍中的陨石记载[J]. 中国国家天文, 2012(6): 68-73.
- [2] 郭增建, 秦保燕, 编著. 灾害物理学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989: 254.
- [3] 荣代璐, 张元生, 李亚荣, 等. 2004 年 12 月 11 日兰州陨石坠落的地震台网记录分析[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1): 17-21.

① 今指甘肃庆阳