

钢筋混凝土框架结构耗能分析¹

叶献国 许政 常磊

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要 本文从能量的观点, 利用 CANNY 程序对普通钢筋混凝土框架结构进行了分析。通过对 3 种不同框架结构在不同地震动(31 条)输入下的能量反应分析, 研究了滞回耗能及阻尼耗能与总输入能的关系。针对本文模型的计算结果, 给出了滞回耗能与总输入能关系的表达式, 并初步探讨了其影响系数。研究表明, 滞回耗能及阻尼耗能与总输入能之间有良好的线性关系。

关键词: 能量反应 能量分配 滞回耗能 时程分析

引言

自上世纪 50 年代 Housner 首次提出采用能量方法进行结构抗震设计思想后, 众多学者对其展开了大量研究。由于基于能量概念的分析和设计方法, 综合考虑了力和位移这两个重要的结构设计参数, 而且可以考虑强震持时对结构损伤的影响, 因此与其他方法相比, 能够更全面地反映地震作用的特性及其对结构的影响(熊仲明等, 2005; 周云等, 2008)。

在结构能量反应上, 国内外的研究多集中在简单弹塑性 SDOF 体系的能量反应与地震动强度指标之间的关系(程光煜等, 2008; Kunnath 等, 2004), 对结构的总输入能、滞回耗能的计算及其相应的影响因素的分析(肖明葵等, 1996; 史庆轩等, 2005)也较多, 但仍未见具有复杂本构模型的混凝土结构上展开能量反应及耗能分配的统计研究的相关报道。本文采用弹塑性非线性杆系有限元程序(CANNY), 建立了 3 个不同高度的混凝土框架结构, 在大量地震动输入下展开统计分析研究, 对结构总输入能、滞回耗能及阻尼耗能与地震输入、结构特性间的关系作了相应的分析。

1 多自由度体系能量方程

以相对能量方程为基础, 并定义相关能量项(叶献国, 1998), 可得到相对能量方程:

$$\int \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)d\mathbf{u}(t) + \int \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)d\mathbf{u}(t) + \int \mathbf{r}(t)\mathbf{u}(t)d\mathbf{u}(t) = \int -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{u}}_g(t)d\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

式中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 $\mathbf{u}(t)$ 、 $\mathbf{r}(t)$ 、 \mathbf{I} 、 $\ddot{\mathbf{u}}_g(t)$ 分别为体系质量矩阵、阻尼矩阵、 t 时刻相对位移列向

1 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划(90715016); 安徽省自然科学基金项目(070415220)

[收稿日期] 2011-04-03

[作者简介] 叶献国, 男, 生于 1954 年。墨西哥国立大学博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。主要研究方向: 工程结构抗震。

E-mail: yexg428@yahoo.com.cn

量、 t 时刻模型滞回抗力列向量、对角矩阵（元素为 0 或者 1）、 t 时刻地震动输入值。

相对能量方程（1）可改写为：

$$E_k + E_d + E_s = E_I \quad (2)$$

式中， E_k 、 E_d 、 E_s 、 E_I 分别为动能、阻尼耗能、滞回耗能（包括弹性能）、地震动总输入能。

2 总输入能在滞回耗能与阻尼耗能间的分配

Kunnath 等（2004）认为，结构单位质量总滞回耗能 $E_{H\mu}$ 是单位质量总输入能 E_I 的一部分（式 3），并与 SDOF 体系的位移延性有关，而单位质量总输入能 E_I 则可表述为地震动各强度指标的一个函数。

$$E_{H\mu} = cE_I \quad (3)$$

式中， $c = 1.13 \frac{(\mu-1)^{0.82}}{\mu}$ ； μ 为位移延性。

为了进行分析研究，本文按照我国现行规范，利用 PKPM 软件设计了以下 3 种有相近平面布置但高度不同的普通框架结构，同时利用 CANNY 程序分别建模，在大量地震动输入下展开了能量反应的统计分析。

（1）框架模型 A：4 层（徐秀丽，2008），混凝土强度等级 C20；底层层高 5.2m，其余各层层高 3.6m，结构总高 19.6m；部分边柱取 400mm×500mm，其余均为：400mm×400mm。

（2）框架模型 B：8 层，底层层高为 3.6m，其余各层层高为 3.3m，结构总高 26.8m；柱子尺寸为 550mm×550mm，混凝土强度等级 C30，其它信息以及结构平面布置均和上面的 4 层框架一样。

（3）框架模型 C：12 层，底层层高为 3.6m，其余各层层高为 3.3m，结构总高 39.9m；柱子尺寸为 600mm×600mm，混凝土强度等级 C30，其它信息以及结构平面布置也均和上面的 4 层框架一样。

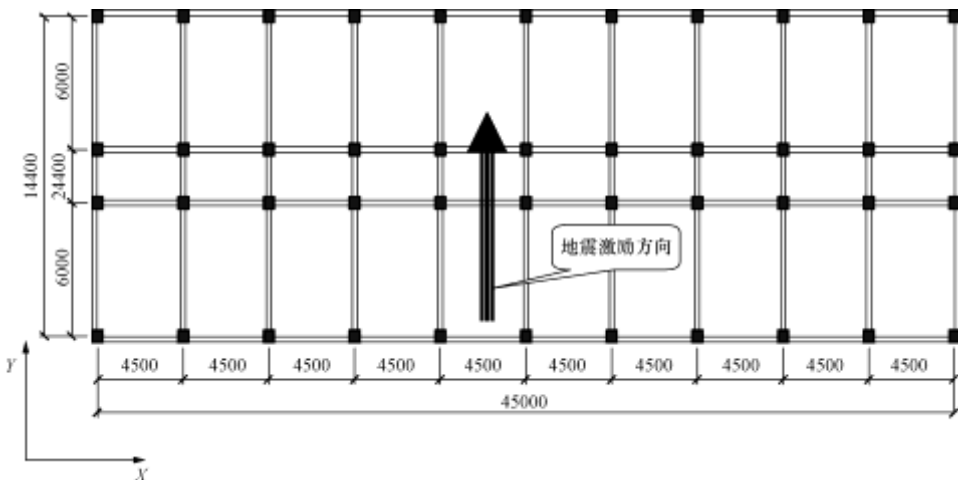


图 1 结构模型（A、B、C）平面布置图

Fig. 1 Plane drawing of structure model (A, B, C)

其他具体信息(3种模型一样)如下:钢筋混凝土框架结构,结构重要性系数1.0,钢筋直径 $\geq 12\text{mm}$ 的采用HRB335钢筋,其余采用HPB235钢筋,抗震设计地震第一分组;烈度7度(0.1g),II类场地,框架抗震等级三级。结构平面布置如图1所示。

采用CANNY建模时,对4层结构其配筋信息等采用徐秀丽(2008)的设计配件数据,对8层和12层框架采用PKPM设计配件数据。利用CANNY程序,建立主梁(单轴弹簧模拟)单元和柱(MS弹簧模拟)单元。梁单元采用CANNY中具有代表性的CP3模型(Li Kangning, 2004),柱单元采用CP7模型进行模拟。利用PEER强震记录数据库,选择一系列强震动记录(主要为C类),同时均选择其中1个水平分量按峰值加速度统一调整至220Gal输入结构Y向,展开弹塑性反应分析。各分量名及对应地震特性见表1。

表1 各地震记录特性

Table 1 Characteristics of the seismic records

输入记录分量	地震名	时间	台站名	震级	震源深度(km)	震中距(km)	V_{s30} (m/s)	USGS
A-PAS270.AT2	Borrego Mtn	1968.04.09	475 Pasadena - Athenaeum	6.8	-	203	-	B
CSM095.AT2	San Fernando	1971.02.09	111 Cedar Springs, Allen Ranch	6.6	-	86.6	-	A
I-ELC180.AT2	Imperial Valley	1940.05.19	117 El Centro Array #9	7.2	-	8.3	-	C
NGA0007-C-FRN135.AT2	Northwest Calif-02	1941.02.09	Fermdale City Hall	6.60	-	97.00	219.3	C
NGA0014-SBA132.AT2	Kern County	1952.07.21	Santa Barbara Courthouse	7.36	16	88.39	515.0	B
NGA0015-TAF021.AT2	Kern County	1952.07.21	Taft Lincoln School	7.36	16	43.49	385.4	B
NGA0161-H-BRA315.AT2	Imperial Valley-06	1979.10.15	Brawley Airport	6.53	9.96	43.15	208.7	C
NGA0165-H-CHI012.AT2	Imperial Valley-06	1979.10.15	Chihuahua	6.53	9.96	18.88	274.5	C
NGA0188-H-PLS135.AT2	Imperial Valley-06	1979.10.15	Plaster City	6.53	9.96	54.26	345.4	C
NGA0329-H-C4A090.AT2	Coalinga-01	1983.05.02	Parkfield - Cholame 4AW	6.36	4.6	58.53	338.5	C
NGA0332-H-C06000.AT2	Coalinga-01	1983.05.02	Parkfield - Cholame 6W	6.36	4.6	61.16	338.5	C
NGA0349-H-GH2090.AT2	Coalinga-01	1983.05.02	Parkfield - Gold Hill 2E	6.36	4.6	43.53	338.5	C
NGA0523-IND000.AT2	N. Palm Springs	1986.07.08	Indio - Coachella Canal	6.06	11	52.66	345.4	C
NGA0723-B-PTS315.AT2	Superstition Hills-02	1987.11.24	Parachute Test Site	6.54	9	15.99	348.7	C
NGA0744-BVW310.AT2	Loma Prieta	1989.10.18	Bear Valley #12, Williams Ranch	6.93	17.48	70.71	331.2	C
NGA0745-BVU310.AT2	Loma Prieta	1989.10.18	Bear Valley #14, Upper Butts Rn	6.93	17.48	91.41	376.1	B
NGA0860-H05090.AT2	Landers	1992.06.28	Hemet Fire Station	7.28	7	72.51	338.5	C
NGA0881-MVH000.AT2	Landers	1992.06.28	Morongo Valley	7.28	7	21.29	345.4	C
NGA0951-JAB220.AT2	Northridge-01	1994.01.17	Bell Gardens - Jaboneria	6.69	17.5	45.26	308.6	C
NGA0953-MUL279.AT2	Northridge-01	1994.01.17	Beverly Hills - 14145 Mulhol	6.69	17.5	13.39	355.8	C
NGA0976-COM140.AT2	Northridge-01	1994.01.17	Hacienda Heights - Colima	6.69	17.5	61.20	337.0	C
NGA0995-PEL090.AT2	Northridge-01	1994.01.17	LA - Hollywood Stor FF	6.69	17.5	23.61	316.5	C
NGA1031-LV5000.AT2	Northridge-01	1994.01.17	Leona Valley #5 - Ritter	6.69	17.5	52.44	446.0	B
NGA1094-SOR315.AT2	Northridge-01	1994.01.17	West Covina - S Orange Ave	6.69	17.5	57.64	308.6	C
NGA1099-WOO090.AT2	Double Springs	1994.09.12	Woodfords	5.90	5	16.89	345.4	C
NGA1766-32075140.AT2	Hector Mine	1999.10.16	Baker Fire Station	7.13	5	77.04	271.4	C
NGA1785-0525a360.AT2	Hector Mine	1999.10.16	Fun Valley	7.13	5	75.77	345.4	C
NGA1794-22170360.AT2	Hector Mine	1999.10.16	Joshua Tree	7.13	5	52.29	379.3	B
NGA2709-CHY035-E.AT2	Chi-Chi, Taiwan-04	1999.09.22	CHY035	6.20	18	25.67	473.9	B
NGA3207-TCU107-N.AT2	Chi-Chi, Taiwan-05	1999.09.22	TCU107	6.20	10	62.20	473.9	B
NGA3258-CHY014-N.AT2	Chi-Chi, Taiwan-06	1999.09.25	CHY014	6.30	16	77.29	473.9	B

A、B、C 三种结构模型在各地震输入下的总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能之间的离散点关系图（及其线性拟合）如图 2—图 4 所示（ E_s 为 CANNY 中的滞回耗能）。

从图 2—图 4 可以看出，总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能之间有很好的线性关系，且对于本文中的 3 种框架模型，阻尼耗能线性拟合的斜率要高于滞回耗能线性拟合的斜率，框架模型 A、B、C，阻尼耗能线性拟合的斜率分别为 0.6726、0.6004、0.5120，也即随着楼层的增加，阻尼耗能的斜率逐次减小，而滞回耗能线性拟合的斜率则表现出逐渐增加。由于地震结束时结构动能很小，可以认为总输入能为总滞回耗能与总阻尼耗能之和。考虑总滞回耗能与总输入能之间的关系，A、B、C 三种模型的结果可用线性公式表达为：

$$E_s = c_1 E_I - e_0 \tag{4}$$

式中，系数 c_1 为斜率，对不同模型取值不同，根据图 2—图 4，对 A、B、C 的取值分别为 0.3275、0.3995、0.4631。

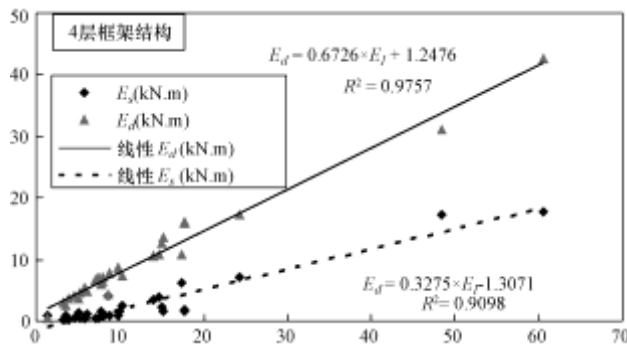


图 2 各地震输入下模型 A 总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能的关系

Fig. 2 The relationship between hysteretic energy (and damping energy) with total input energy of model A under input of different ground motion records

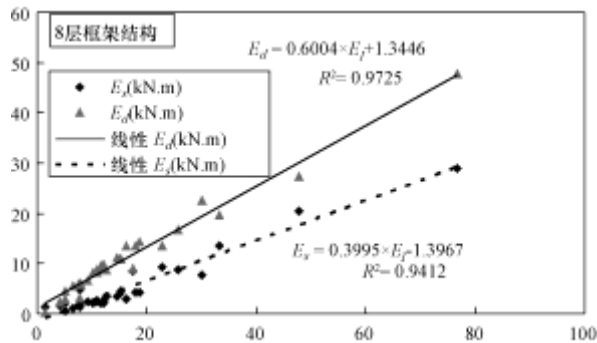


图 3 各地震输入下模型 B 总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能的关系

Fig. 3 The relationship between hysteretic energy (and damping energy) with total input energy of model B under input of different ground motion records

对于滞回耗能与总输入能之间的关系，考察式（4）与式（3），可知本文中多自由度体系拟合的公式与 Kunnath 等（2004）单自由度体系的公式相似。由式（3）中系数 c 的表达式，可反

算出 A、B、C 三个模型分别等价成单自由度体系的位移延性 μ ，其取值分别为 1.3057、1.4384、1.5959。可见，对于滞回耗能及总输入能，无论是单自由度体系还是多自由度体系都有很好的线性关系。

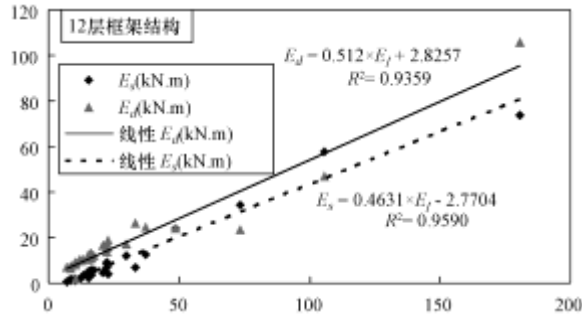


图 4 各地震输入下模型 C 总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能的关系

Fig. 4 The relationship between hysteretic energy (and damping energy) with total input energy of model C under input of different ground motion records

但是，对于 Kunnath 等（2004）所提出的公式（3），还无法由总输入能 E_T 估算多自由度体系的滞回耗能 E_s ，因为难以对多自由度体系的等效单自由度延性系数 μ 定义及取值。

对多自由度结构影响 c 的因素中，可明确的有：

- （1）体系中各杆件位移延性；
- （2）体系中各杆件变形（主要为弯曲）的滞回模型；
- （3）体系中各杆件损伤发展程度（尤其是耗能指标，可直接表征杆件耗能大小）。

3 结论

本文通过对不同普通框架结构在地震动输入下的能量反应分析，研究了滞回耗能及阻尼耗能与总输入能的关系，可以得出以下结论：

- （1）总滞回耗能（及总阻尼耗能）与总输入能之间有良好的线性关系，且对于本文所分析的 3 种框架模型，阻尼耗能与总输入能的关系线性拟合的斜率要高于滞回耗能的斜率。
- （2）在多自由度模型中，本文推广了 Kunnath 等（2004）针对 SDOF 体系提出的滞回耗能占总输入能一定比例的结论，且在本文所分析的地震动输入下，各模型的线性关系较好。
- （3）本文初步给出了系数 c 的影响因素，但对其确定方法，仍有待深入研究。

此外，本文主要考察的是 3 个高度不同的框架结构模型，结构其它因素的改变以及不同结构类型对以上结果的影响，仍有待于进行深入的研究。

参考文献

- 程光煜，叶列平，2008. 弹塑性 SDOF 系统的地震动输入能量谱. 工程力学，**25**（2）：28—39.
- 史庆轩，熊仲明，李菊芳，2005. 框架结构滞回耗能在结构层间分配的计算分析. 西安建筑科技大学学报，**37**（2）：174—188.
- 肖明葵，刘波等，1996. 抗震结构总输入能量及其影响因素分析. 重庆建筑大学学报，**18**（2）：20—33.

- 熊仲明, 史庆轩等, 2005. 框架结构基于能量地震反应分析及设计方法的理论研究. 世界地震工程, **21** (2): 141—146.
- 徐秀丽, 2008. 混凝土框架结构设计. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 叶献国, 1998. 建筑结构弹塑性地震反应中的能量表达及应用. 合肥工业大学学报, **21** (5): 9—16.
- 周云, 乐登等, 2008. 设计用地震动总输入能量谱研究. 工程抗震与加固改造, **30** (5): 1—7.
- Kunnath S.K., Chai Y.H., 2004. Cumulative damage-based inelastic cyclic demand spectrum. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **33**: 499—520.
- Li Kangning, 2004. CANNY Technical Manual. Singapore: CANNY CONSULTANT PTE LTD.

Analysis of Hysteretic Energy of RC Frame Structures

Ye Xianguo, Xu Zheng and Chang Lei

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract This paper analyzed ordinary RC frame structures with CANNY program in the viewpoint of energy. Through the energy response analysis of three different frame structures under input of 31 different ground motion records, the relationship of the hysteretic energy and damping energy with the total input energy was studied. The relational expression of the hysteretic energy and damping energy was given based on the model in this article, with coefficient factors in the expression preliminary studied. The study showed that the hysteretic energy and damping energy had a good linear relationship with the total input energy.

Key words: Energy response; Energy distribution; Hysteretic energy; Time-history analysis