

多自由度体系滞回耗能的影响因素分析

于旭光, 郑宏, 刘志杰, 屈鹏东

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 多自由度体系的滞回耗能是基于能量抗震设计方法的重要指标。通过对三种场地的3条地震波记录为输入,以简化的双折线恢复力模型和三折线恢复力模型来研究不同峰值加速度、场地类别和频谱特性对多自由度体系的滞回耗能的影响。研究表明:不同的恢复力模型计算出的滞回耗能差异明显,随着地震动峰值加大,结构反应越剧烈,采用不同恢复力模型造成结构屈服状态不同,因此滞回耗能存在差异;从滞回耗能所占总输入能量比例来看,滞回耗能是起主导作用,是导致结构破坏和损伤的主要因素;滞回耗能所占总输入能的比例受恢复力模型、峰值加速度、场地类别和频谱特性影响较小。

关键词: 多自由度体系; 双折线恢复力模型; 三折线恢复力模型; 滞回耗能

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2012)04-0062-05

0 引言

对于工程抗震来说,结构的非线性分析^[1]是特别重要的,因为对于一般建筑物,在强烈地震作用下,结构会因局部损坏而改变其动力特性,一般改变是刚度降低,阻尼加大,从而进入非线性反应阶段。

结构非线性地震反应一般采用动力时程分析方法^[2],根据所选用的地震波和恢复力模型对结构进行动力时程分析,通过逐步积分方法得到结构位移、速度和加速度时程曲线,进而能得到结构的总输入能、滞回耗能和阻尼耗能曲线,这些曲线为结构抗震提供依据,也为计算地震作用下的损伤值提供了基础。

1 相对能量方程定义及求法

多自由度体系在地震作用下的运动方程为^[3]

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{y}(t)\} \quad (1)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为多自由度体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。当结构简化为层剪切模

型^[4]时,其表达式如下: $[M] = \begin{bmatrix} m_1 & & \\ & m_2 & \\ & & m_3 \end{bmatrix}$; $[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \\ -k_2 & k_3 + k_2 & -k_3 \\ & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$; 瑞雷阻尼 $[C] =$

$\alpha [M] + \beta [K]$, $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $\ddot{x}(t)$ 分别为 t 时刻体系相对于地面的相对位移、相对速度和相对加速度。将方程(1)两端分别左乘 $\{dx(t)\}^T$,然后在 $(t_i, t_i + \theta\Delta t)$ 上积分,得到

$$\int_{t_i}^{t_i + \theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [M] \{\ddot{x}(t)\} + \int_{t_i}^{t_i + \theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [C] \{\dot{x}(t)\} + \int_{t_i}^{t_i + \theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [K] \{x(t)\} = - \int_{t_i}^{t_i + \theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [M] \{\ddot{y}(t)\} \quad (2)$$

式中

收稿日期: 2012-09-26

作者简介: 于旭光 男 1984 年出生 硕士研究生

$$\begin{cases} \Delta E_k = \int_{t_i}^{t_i+\theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [M] \{\ddot{x}(t)\} \\ \Delta E_d = \int_{t_i}^{t_i+\theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [C] \{\dot{x}(t)\} \\ \Delta E_h = \int_{t_i}^{t_i+\theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [K] \{x(t)\} \\ \Delta E_i = - \int_{t_i}^{t_i+\theta\Delta t} \{dx(t)\}^T [M] \{\ddot{y}(t)\} \end{cases} \quad (3)$$

上述四者分别代表动能增量、阻尼增量、滞回耗能与弹性应变能之和增量、总输入能量增量。求解采用 Wilson- θ 方法,其中 $\theta = 1.4$,它是线性加速度方法的推广,采用的三条基本假设如下:在时间 $(t_i, t_i + \theta\Delta t)$ 内,① $\ddot{x}(t)$ 随时间 t 线性变化;② $\ddot{y}(t)$ 随时间 t 线性变化;③恢复力随位移 x 线性变化。由假设①,可得出

$$\begin{cases} \ddot{x}(t_i + h) = \ddot{x}(t_i) + \Delta\ddot{x}h/(\theta\Delta t) \\ \dot{x}(t_i + h) = \dot{x}(t_i) + h\ddot{x}(t_i) + \Delta\ddot{x}h^2/(2\theta\Delta t) \\ x(t_i + h) = x(t_i) + h\dot{x}(t_i) + \ddot{x}(t_i)h^2/2 + \Delta\ddot{x}h^3/(6\theta\Delta t) \end{cases} \quad (t_i \leq h \leq t_i + \theta\Delta t) \quad (4)$$

将(4)式代入(3)得出在时间 $(t_i, t_i + \theta\Delta t)$ 内的能量增量公式

$$\begin{cases} \Delta E_{ki} = m_i [\Delta\ddot{x}/2 + \ddot{x}_i(t_i)] \dot{x}(t_i) (\theta\Delta t) + m_i [\ddot{x}_i^2(t_i) + \ddot{x}_i(t_i) \Delta\ddot{x}_i + \Delta\ddot{x}_i^2/4] (\theta\Delta t)^2 \\ \Delta E_{di} = \frac{4\pi m_i \zeta}{T} \{ \dot{x}_i^2(t_i) (\theta\Delta t) + [\ddot{x}_i(t_i) \dot{x}_i(t_i) + \ddot{x}_i(t_i) \Delta\ddot{x}_i/3] (\theta\Delta t)^2 \} + \\ \frac{4\pi m_i \zeta}{T} [\ddot{x}_i^2(t_i)/3 + \Delta\ddot{x}_i^2/20 + \ddot{x}_i(t_i) \Delta\ddot{x}_i/4] (\theta\Delta t)^3 \\ \Delta E_{hi} = [f(t_i) + f(t_i + \theta\Delta t)] \Delta x_i/2 \\ \Delta E_{li} = -m_i [\ddot{x}_i(t_i) \ddot{y}_i(t_i) + \dot{x}(t_i) \Delta\ddot{y}_i/2] (\theta\Delta t) - \\ m_i [\ddot{x}_i(t_i) \ddot{y}_i(t_i)/2 + \Delta\ddot{x}_i \ddot{y}_i(t_i)/6 + \Delta\ddot{y}_i \ddot{x}_i(t_i)/3 + \Delta\ddot{y}_i \Delta\ddot{x}_i/8] (\theta\Delta t)^2 \end{cases} \quad (5)$$

2 力学模型及恢复力模型

采用层间剪切模型作为力学模型,为了研究不同恢复力模型对多自由度体系的影响,恢复力模型采用双线型和三线型模型^[5-6],如图1和图2所示。

双折线恢复力模型:在单调、比例加载(倒三角模式下沿竖向方向加载在节点处的荷载)下,逐步增大比例荷载 F_i ,得出每一层的层间剪力和层间位移曲线,然后根据“等能量法”等效成双折线恢复力模型,等效原则是层间剪力和层间位移曲线所围面积和双折线曲线所围面积相等。

三折线恢复力模型:①在单调、比例加载 F_i (倒三角模式下沿竖向方向加载在节点处的荷载)下,逐步增大比例荷载 F_i ,得出每一层的层间剪力和层间位移曲线。② F_e 为初始层间屈服层剪力,为这一层的构件出现第一个或第一批塑性铰时的层剪力; F_y 为最终屈服层剪力,为这一层的构件充分出现塑性铰时的层剪力; x_e 和 x_y 分别为 F_e 和 F_y 相对应的层间位移。等效原则是层间剪力和层间位移曲线所围面积和三折线曲线所围面积相等。

3 结构计算参数及结果

3.1 计算参数和能量曲线

计算采用三自由度体系,结构的计算参数如表1和表2所示,部分能量时程曲线如图3~图6。

3.2 双折线和三折线的能量反应

经计算后,采用双折线和三折线模型得出的结构的能量反应如表3和表4。

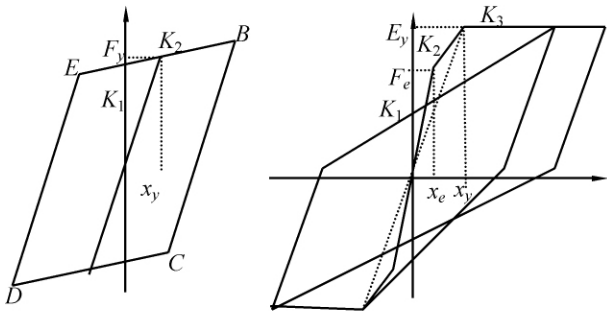


图 1 双线性恢复力模型

图 2 三线性恢复力模型

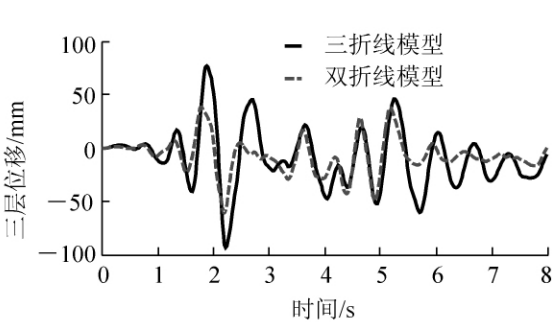


图 3 EL-Centro 波在 0.5g 下的三层位移对比

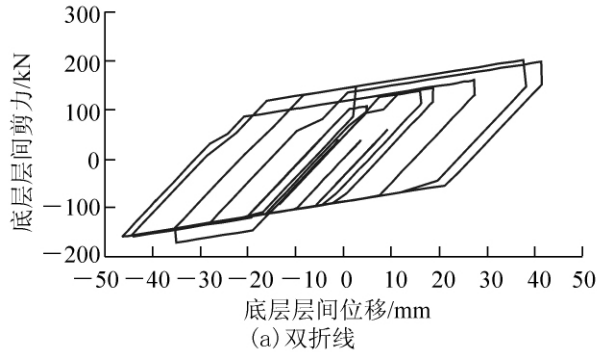


图 4 EL-Centro 波在 0.5g 下的底层层间剪力-层间位移滞回关系

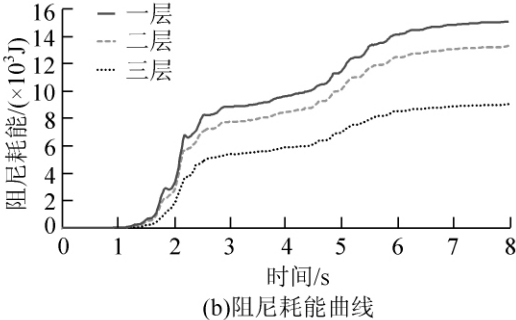
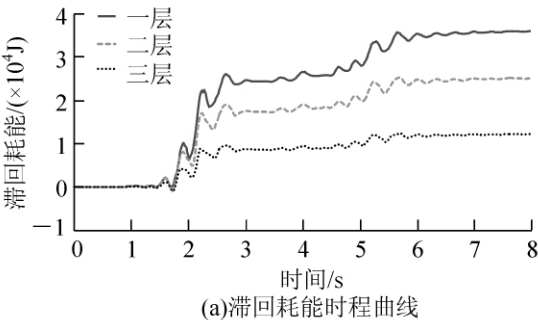
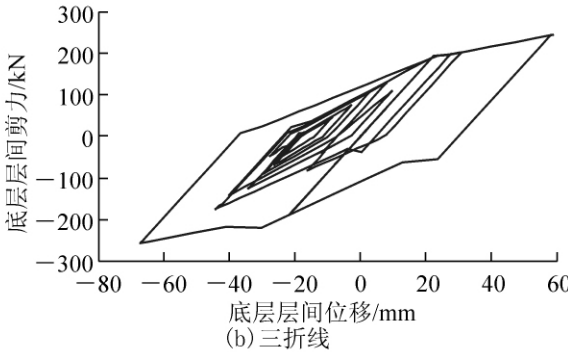


图 5 EL-Centro 波在 0.5g 下的滞回耗能时程曲线和阻尼耗能曲线(三折线)

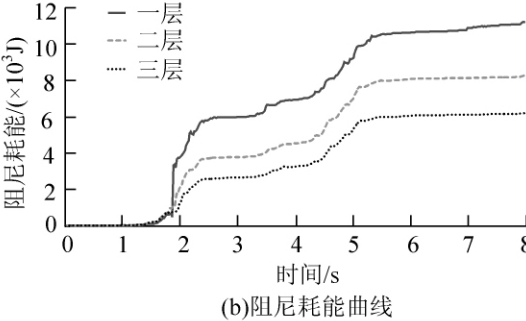
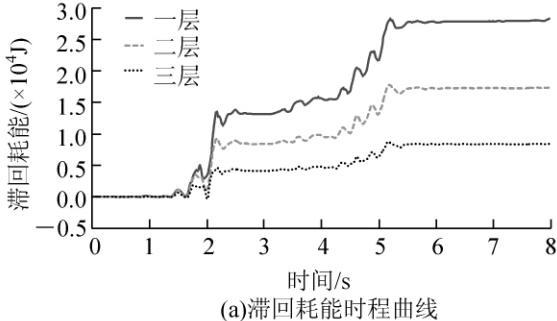


图 6 EL-Centro 波在 0.5g 下的滞回耗能时程曲线和阻尼耗能曲线(双折线)

表 1 采用双折线恢复力模型结构计算参数

层数	质量/kg	屈服位移/mm	第一刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	第二刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
一层	16 900	12.9	1.512×10^7	1.512×10^6
二层	15 810	9.4	2.012×10^7	2.012×10^6
三层	14 120	8.6	2.012×10^7	2.012×10^6

表 2 采用三折线恢复力模型结构计算参数

层数	质量 /kg	弹性位移 /mm	屈服位移 /mm	第一刚度/(N · m ⁻¹)	第二刚度/(N · m ⁻¹)	第三刚度/(N · m ⁻¹)
一层	16 900	6.3	21.8	1.512 × 10 ⁷	6.048 × 10 ⁶	1.512 × 10 ⁶
二层	15 810	4.9	18.9	2.012 × 10 ⁷	8.048 × 10 ⁶	2.012 × 10 ⁶
三层	14 120	4.2	17.2	2.012 × 10 ⁷	8.048 × 10 ⁶	2.012 × 10 ⁶

3.3 结果分析

- (1) 从图 3 可以看出,在弹性阶段,双折线和三折线的位移反应相接近,但当结构逐渐进入弹塑性阶段,由于三折线模型考虑刚度退化的影响,位移反应比双折线的大。
- (2) 从表 3 和表 4 对比可以看出,三折线计算出的总输入能量和滞回耗能比双折线大。就三折线而言(双折线类似),层间滞回耗能和阻尼耗能呈现沿层高逐渐变小的趋势,随着地震动峰值加大,总滞回耗能增大明显,但总滞回耗能占总输入能比例基本上差别不大。
- (3) 不同的场地条件和频谱特性计算出的滞回耗能不同,但是滞回耗能所占总输入能比例,随场地类别变化和频谱特性不大,滞回耗能基本上是结构耗能的主要方式。

表 3 采用双折线结构能量反应

地震波	峰值加速度/(m · s ⁻²)	总输入能 EI /J	总滞回耗能 EH /J	总阻尼耗能 ED /J
EL-Centro 波(Ⅱ类场地)	0.4g	41 230	24 230	17 000
	0.5g	79 160	54 070	25 090
	0.6g	126 100	85 670	40 430
Taft 波(Ⅲ类场地)	0.4g	67 680	31 440	36 240
	0.5g	159 320	94 740	64 580
	0.6g	249 120	165 700	83 420
宁河波(Ⅳ类场地)	0.4g	56 200	33 970	22 230
	0.5g	119 400	95 140	24 260
	0.6g	278 500	193 400	85 120

表 4 采用三折线结构能量反应

地震波	峰值加速度/(m · s ⁻²)	总输入能 EI /J	滞回耗能 EH /J			(EH/EI) / %	阻尼耗能 ED /J		
			一层	二层	三层		一层	二层	三层
EL-Centro 波(Ⅱ类场地)	0.4g	71 314	22 620	15 420	7 621	64.0	10 700	8 839	6 114
	0.5g	111 321	36 020	25 190	12 220	65.9	15 090	13 300	9 501
	0.6g	166 590	56 950	37 490	18 230	67.6	21 020	19 090	13 810
Taft 波(Ⅲ类场地)	0.4g	109 471	36 610	29 610	14 990	74.2	16 940	8 827	2 494
	0.5g	221 420	62 630	40 890	18 250	55.0	41 960	35 500	22 190
	0.6g	328 490	101 100	68 310	32 320	61.4	51 060	44 890	30 810
宁河波(Ⅳ类场地)	0.4g	96 708	34 510	23 020	10 910	70.7	11 600	10 020	6 648
	0.5g	183 730	68 860	45 450	21 680	74.0	18 460	16 940	12 340
	0.6g	328 720	122 100	73 270	38 030	71.0	32 800	32 190	30 330

4 结语

- (1) 不同的恢复力模型计算出的滞回耗能差异明显,随着地震动峰值加大,结构反应越剧烈,采用不同恢复力模型造成结构屈服状态不同,因此滞回耗能存在差异。
- (2) 从滞回耗能所占比例来看,滞回耗能起主导作用,是导致结构破坏和损伤的主要因素。
- (3) 滞回耗能所占总输入能的比例受恢复力模型、峰值加速度、场地类别和频谱特性影响较小。

参 考 文 献

[1] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 北京: 地震出版社,2006: 170-172.

[2] 丰定国,王清敏,钱国芳,等. 工程结构抗震 [M]. 北京: 地震出版社, 1994: 76-78.

[3] Fajfar P,Vidic T,Fischinger M. Seismic demand in medium and long-period structures [J]. Earthquake Eng and Structural Division,1989,18(4) : 1133-1144.

[4] 高菲,王倩. 层间结构的非线性地震反应分析 [J]. 工程建设,2008,40(1) : 16-21.

(下转第 76 页)

Analysis of Laws of Rail Profile Development of Heavy-haul Railway Curve

Zhan Gang¹, Xu Yude², Zhou Yu²

(1. Design Department of Railway Lines & Stations & Yards and terminals of

The Third Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Tianjin 300142, China;

2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Prolonging rail service life is critical to reduce maintenance and repair cost of railway. however there is no rail profiles data measured on a life cycle, also there is a lack of rail profiles analysis software. Drawing lessons from the railway railhead profile setting standards and acceptance criteria on the transverse of rail grinding(milling) operation, the rail profile management software (RPM) is developed for a suitable rail maintenance repair plan. Using the rail profile management software, rail profiles data of a sharp curve of heavy-haul railway is analyzed from the installation of new rail to its removal, concluding that the rail profile development follows a classic bathtub shape. Using the laws of rail surface development, magic wear rate could be used to guide preventive rail grinding (or milling) in stable period of rail wear development, and rail profiles should be repaired and remodeled before the rapid rail wear period .

Key words: heavy-haul railway; rail profile; rail wear; bathtub-curve; rail grinding

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 65 页)

陆新征,叶列平,廖志伟,等. 建筑抗震弹塑性分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2009: 29-30.

钱枷茹,方鄂华,马镇炎. 剪切刚度层模型恢复力特性骨架线的简化算法 [J]. 工业建筑,1996,26(1) : 22-27.

Influencing Factor Analyses of Hysteresis Energy of MDOF Systems

Yu Xuguang, Zheng Hong, Liu Zhijie, Qu Pengdong

(School of Civil Engineering Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The hysteresis energy of MDOF systems is an important index based on the seismic design method. Through three seismic waves recorded on three sites for the input, we simplify the bilinear and three line resiliency model to study the hysteresis energy effect of MDOF based on the peak value of acceleration, different type site classification and spectrum characteristics. The result indicates that the hysteresis energy based on the different resiliency model are significant differences, with the peak ground motion increasing, the structure has the violent reaction; As the structure yield state caused by different resiliency model is different, so the hysteresis energy consumption is different; From the ratio of the hysteresis energy in the total input energy, the hysteresis energy consumption plays the leading role, which is the main factors of structure destroy and injury; The hysteresis energy consumption proportion of total input is only under small influence of the resiliency model, peak acceleration, the different type site classification and spectrum characteristics.

Key words: the MDOF systems; bilinear resiliency model; three line resiliency model; hysteresis energy

(责任编辑 车轩玉)