

多层摩擦耗能减震结构的减震分析

徐玉野, 王全凤, 罗漪, 许宏洲

(华侨大学 土木工程系, 福建泉州 362011)

摘要:在钢筋混凝土结构的层间恢复力模型采用线性强化弹塑性模型的基础上,从多自由度的角度对摩擦耗能减震结构进行减震分析。(1)以结构位移为考查目标,通过计算分析了多层摩擦耗能减震结构在地震波作用下,支撑刚度、耗能装置起滑位移对结构减震效果的影响及规律。(2)给出支撑刚度和耗能装置起滑位移偏差对摩擦耗能框架在地震作用下的反应偏差的分析方法,根据分析结果可以得知摩擦耗能支撑参数偏差对此类摩擦耗能框架地震响应的影响显著程度。

关键词:摩擦耗能支撑; 框架结构; 参数影响; 减震分析

中图分类号: TU37

文献标识码: A

Vibration Reduction Analysis of Multi-story Frame with Friction Energy Dissipation

XU Yu-ye, WANG Quan-feng, LUO Yi, XU Hong-zhou

(Department of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362011, P.R. China)

Abstract: Based on an elastic-linearly strain-hardening restoring force model for the inter-story of reinforced concrete structure, a vibration reduction analysis of multi-story frame with friction energy dissipation is given in this paper. (1) Aiming at the placement, the influence of brace stiffness and yielding displacement under earthquake waves on the vibration reduction and its rule are analyzed through computing. (2) Based on the vibration of brace stiffness and yielding displacement, an analysis on variation of seismic response of the frame with friction energy dissipation is given. From the analysis results, the influence of the variation of the brace stiffness and yielding displacement on the seismic reaction of the structure can be ascertained.

Keywords: friction energy dissipation brace; frame structure; parameter influence; vibration reduction analysis

摩擦耗能支撑是在多层及高层框架结构中实现结构减震控制的一种有效而经济的途径。摩擦耗能框架结构设计的关键,在于合理地确定摩擦耗能支撑的布置及其控制参数。由于在大震时,框架主体结构的刚度和阻尼都在变化,摩擦耗能装置的状态在附着和滑移之间交替变化,因此,摩擦耗能框架的设计是一个复杂的非线性问题。摩擦耗能支撑和摩擦耗能器安装的越多,结构在地震作用下的位移反应并不一定会越小。鉴于摩擦耗能减震结构减震分析的结论对摩擦耗能支撑参数的选取具有一定的指导意义,因此对摩擦耗能减震结构的减震进行分析是必要的。

* 收稿日期:2003-03-10

基金项目:福建省建设科技项目(闽建科[2001]44号)

作者简介:徐玉野(1978-),男,福建莆田人,硕士生,主要从事计算机在结构工程中的应用研究。

1 摩擦耗能框架的影响因素

文献[1]分析后认为:摩擦耗能框架的两个参数,耗能装置的起滑位移 Δu_{dy} 和支撑刚度 K_b ,对结构耗能减震效果有重要的影响。文献[1]在单自由度体系分析的基础上建议这两个参数的最佳取值范围为:

$$\beta = \Delta u_{dy} / \Delta u_{wy} \leq 2/3, \lambda = K_b / K_f = [2, 5], \lambda \beta = [1.25, 1.5] \quad (1)$$

式中: K_b ——耗能支撑在水平方向上的刚度;

Δu_{dy} ——摩擦耗能装置的起滑位移;

K_f ——设置摩擦耗能器的结构楼层侧向刚度;

Δu_{wy} ——设置摩擦耗能器的结构层间屈服位移。

《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)^[2]认为这两个参数宜满足下列要求:

$$\beta \leq 2/3, \lambda \beta \geq 0.8 \quad (2)$$

文献[3]运用耗能支撑参数优化方法,对代表短、中、长周期的三种结构的耗能支撑参数取值及变化范围进行了研究,研究认为:耗能支撑参数的取值范围并不是如文献[1]所述的确切值,而是随着主体结构的刚度及层间位移角限值而变化的,一般来说,主体结构的刚度越小,所需的耗能支撑初始刚度越大;文献[3]对耗能支撑偏差进行研究,得出结论:耗能支撑初始刚度和启动位移均宜增不宜减,刚度的增幅不宜超过 5%,而启动位移的增幅可达%。

由于上述文献都是从等效单自由度分析基础上总结出来的,而摩擦耗能器对混凝土框架结构的减震效果主要是在大变形情况下,此时结构已经进入弹塑性状态,等效单自由度分析方法是否合适值得推敲。在一定假设的基础上,以 6 层框架结构为例,分析摩擦耗能减震结构的影响因素。

2 摩擦耗能框架的计算模型

本文在弹塑性动力分析中,整体结构采用层间剪切模型,主体结构的滞回模型采用线性强化弹塑性模型,假设耗能支撑始终处于弹性状态,摩擦耗能器的滞回模型为理想弹塑性模型。对钢筋混凝土结构,取线性强化弹塑性模型的第二刚度系数为 0.05。

2.1 摩擦耗能减震结构的运动方程

当结构中有层设置摩擦阻尼器时,结构的运动方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = P(t) - HF(t) \quad (3)$$

式中: M, C, K 分别是结构的质量矩阵、阻尼和刚度矩阵; $P(t)$ 是激励向量, H 是控制力位置矩阵, 其中第 i 个列向量 $H_i = [0, \dots, 0, -1, 1, 0, \dots, 0]^T_{1 \times N}$ (-1 和 1 分别在第 k_{i-1} 和 k_i 行) 表示第 i 个摩擦阻尼器设置在结构的第 k_i 层, 作用在第 k_i 层和 k_{i-1} 层顶面位置处; $F(t)$ 是 l 维控制力向量, 其中的第 i 个元素 $F_i(t)$ 就是第 i 层耗能支撑的恢复力, 它是一非线性项。 $F_i(t)$ 的表达式如下:

$$F_i(t) = \begin{cases} -k_{bi} \times x_{di}(t) & \text{当 } |x_{di}(t)| \leq u_{dyi}, \text{ 即摩擦耗能元件处于附着阶段。} \\ -\text{sgn}(x_{di})F_{0i} & \text{当 } |x_{di}(t)| > u_{dyi}, \text{ 即摩擦耗能元件处于滑移阶段。} \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{bi} 为第 i 层设置的摩擦耗能支撑刚度; $x_{di}(t)$ 为第 i 层摩擦耗能支撑的层间相对位移; u_{dyi} 为第 i 层摩擦耗能装置的起滑位移; F_{0i} 为第 i 层摩擦耗能装置的起滑力, $F_{0i} = k_{bi} \times u_{dyi}$ 。

2.2 摩擦耗能器与斜撑的力-变形关系及其合成

假定摩擦型耗能器的力-变形关系为 Columb 摩擦型, 耗能支撑始终处于弹性状态。则摩擦耗能器与斜撑的力-变形及其合成如图 1。

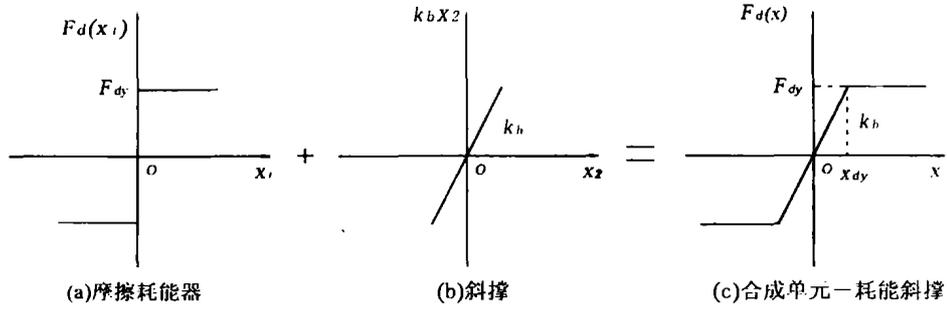


图1 摩擦耗能器、斜撑及其合成单元的力-变形关系

3 摩擦耗能减震结构在地震用下的弹塑性动力分析

3.1 分析方法

本文采用 Wilson- θ 对方程(1)进行求解。本文的积分步长 $\Delta t = 0.001$ s, 考虑到本文的积分步长较短, 因此对拐点引起的误差, 本文只进行力修正, 对位移不修正。采用瑞利阻尼假设, 临界阻尼比 0.05。阻尼矩阵根据结构当前的刚度重新计算阻尼系数, 并重新形成阻尼矩阵。

3.2 恢复力模型等价处理

对钢筋混凝土结构层间恢复力模型进行等价处理, 把线性强化弹塑性模型看成是线弹性模型和理想弹塑性模型的叠加, 如图 2 所示。

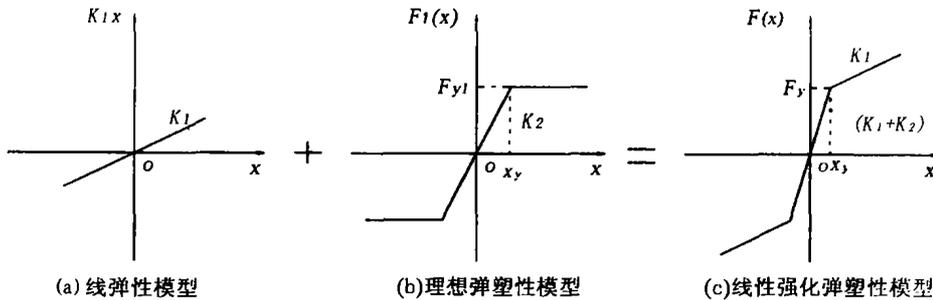


图2 结构恢复力模型的等价处理

这样处理便于程序的编制, 具体方法可概述如下: 在求得层间恢复力后, 扣除线弹性部分, 就是由理想弹塑性部分提供的恢复力, 如果这部分恢复力超过理想弹塑性模型的屈服荷载, 则取屈服荷载, 同时对层间恢复力进行修正。

4 多层摩擦耗能减震结构在地震波作用下的减震分析

为了分析的方便, 本文以 6 层框架结构为代表。假设摩擦耗能装置在结构各层都有布置, 结构各层的支撑刚度比相同, 起滑位移比相同。根据现行抗震设计规范对于钢筋混凝土框架结构基本周期的估计公式 $T = 0.075 H^{3/4}$, 根据 H 调整刚度, 使计算得到的结构第一振型的周期与之对应, 并把此时结构的刚度当成是较为合理的。主体结构各层的质量相同, 主体结构刚度分均匀和渐变两种, 6 层刚度均匀的框架主体结构的参数如表 1, 6 层刚度渐变的框架主体结构的参数如表 2; 同时适当调整结构刚度, 将各层刚度都除以 2 作为是较柔的结构, 将各层刚度都乘以 2 作为是较刚的结构, 这样一共就有 6 种结构参数。6 层结构第一振型的周期 T_1 如表 3。

本文考虑这六种结构分别受峰值 $a_{G \max}$ 为 220 cm/s^2 (7 度大震)、 400 cm/s^2 (8 度大震)、 620 cm/s^2 (9 度大震) 的 El Centro 地震波 (南北向, 持时 15 s) 的作用。支撑刚度比 $\lambda = K_b/K_f$ 取 0.2、0.5、

0.8、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10 共 17 种情况。起滑位移比 $\beta = \Delta u_{dy} / \Delta u_y$ 取 1/6、1/4、1/3、1/2、2/3、5/6 六种情况。6 层刚度均匀框架结构在 El Centro 地震波(南北向)作用下的最大层间位移和顶层最大位移见图 3。

表 1 6 层刚度均匀的框架主体结构的参数

楼层号	1	2	3	4	5	6
层高(m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
质量(10^6 kg)	1	1	1	1	1	1
刚度(kN/mm)	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
屈服位移(mm)	12	12	12	12	12	12

表 2 6 层刚度渐变的框架主体结构的参数

楼层号	1	2	3	4	5	6
层高(m)	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
质量(10^6 kg)	1	1	1	1	1	1
刚度(kN/mm)	1 365	1 265	1 165	1 065	965	865
屈服位移(mm)	12	12	12	12	12	12

表 3 6 层结构的周期

刚度	较柔	一般	较刚
刚度均匀	1.06	0.75	0.53
刚度渐变	1.06	0.75	0.53

根据图 3 所示各种情况下的地震反应分析结果大致可以得出下列结论:

1) 摩擦耗能支撑能够有效地减少结构的最大层间位移和顶层最大位移。

2) 刚度较柔的结构最大层间位移反应对由于起滑位移偏差引起的结构反应变化比刚度较刚的结构要大。

3) 与刚度均匀分布的框架结构相比,刚度渐变分布框架结构的最大层间位移反应要小,但顶层最大位移反应相差不大,有时甚至会有所增大。

4) 在规范建议的耗能支撑参数选取范围内,能够找到满足给定要求的支撑参数。但在有些情况下,比规范小的支撑刚度比也能满足层间位移角限值的要求。支撑参数的设计与结构的刚度、设防烈度、分析用的地震波有关。由于摩擦耗能支撑的弹塑性动力分析是一个高度非线性问题,较优耗能支撑参数设计没有明显的规律,只能对具体结构进行分析,因此对耗能支撑进行优化是很有必要的。

5) 本文研究工作是在结构各层都设置耗能支撑的基础上进行的。当然,可以考虑只在层间位移最大的楼层或层间位移较大的楼层设置耗能支撑,从而得到更好的经济效益。

5 耗能支撑参数偏差对摩擦耗能框架在地震作用下的反应影响

由于材料、施工等方面的原因,经常会导致实际的耗能支撑参数与设计的耗能支撑的不同,也就是出现偏差,因此,对支撑参数偏差引起的结构反应变化进行分析,设计人员就可以对设计的结构性能有更深入的了解。下面以一工程为例,给出偏差分析的方法。

6 偏差分析算例

对表 4 所示的结构,考虑结构受峰值为 400 cm/s^2 (8 度地震)的 El Centro 波南北向分量作用。结构各层的最大位移反应见表 5,表中弹塑性层间位移限值按层间位移角为 1/50 确定。

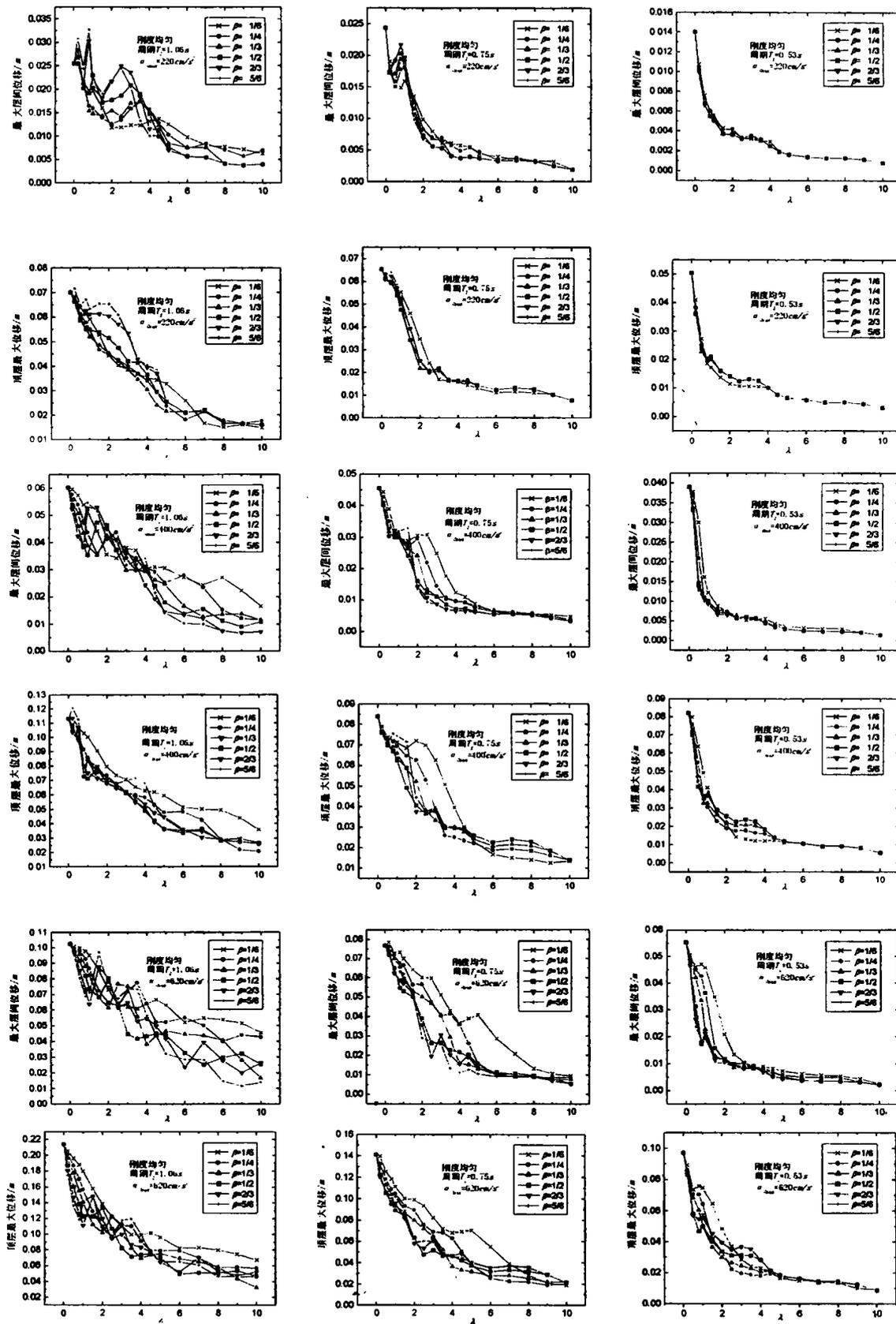


图3 6层刚度均匀结构在 El Centro 地震波作用下的最大层位移和顶层最大位移
(图中横坐标 λ 为支撑刚度比,即 $\lambda = K_b/K_f$)

表 4 6 层框架结构的参数

楼层号	1	2	3	4	5	6
层高(m)	5	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
质量(10 kg)	1	1	1	1	1	1
刚度(kN/mm)	320	480	480	480	480	480
屈服位移(mm)	12	12	12	12	12	12

表 5 6 层框架在 El Centro 地震波作用下各层的最大位移反应

楼层号	1	2	3	4	5	6
层间最大位移(mm)	123.4	11.0	11.7	13.4	11.5	7.2
弹塑性层间位移限值(mm)	100	72	72	72	72	72

从表 5 可以看出,这个框架的底层不能满足八度罕遇地震作用下 1/50 层间位移限值要求。拟采用摩擦耗能支撑进行加固。假设只在结构一层设置支撑,支撑刚度 320 kN/mm,起滑位移 7.2 mm。摩擦耗能框架受峰值为 400 cm/s²(八度大震)的 El Centro 波南北向作用下各层的最大位移反应见表 6,表中弹塑性层间位移限值按层间位移角为 1/80 确定。

表 6 6 层摩擦耗能框架在 El Centro 地震波作用下各层的最大位移反应

楼层号	1	2	3	4	5	6
层间最大位移(mm)	57.4	39.9	30.4	22.8	12.4	8.4
弹塑性层间位移限值(mm)	62.5	45	45	45	45	45

由表 6 可看出,设置摩擦耗能支撑后,摩擦耗能框架各个楼层均能满足罕遇地震作用下 1/80 层间位移角限值的要求。考虑支撑刚度发生 $\pm 15\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 的偏差,起滑位移发生 $\pm 15\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 的偏差。计算各种偏差后结构的最大层间位移反应,形成摩擦耗能框架结构偏差分析表,如表 7 所示。

表 7 支撑刚度和起滑位移发生偏差后摩擦耗能框架结构的最大层间位移反应(mm)

支撑刚度	0.85 k_b	0.9 k_b	0.95 k_b	1.0 k_b	1.05 k_b	1.10 k_b	1.15 k_b
起滑位移	81.9	79.2	76.1	72.8	69.2	64.8	60.4
0.85 Δu_{dy}	79.3	75.9	72.4	68.2	63.6	58.9	54.1
0.90 Δu_{dy}	76.2	72.6	67.7	62.8	57.8	52.8	47.7
0.95 Δu_{dy}	73.0	67.8	62.7	57.4	52.2	46.8	50.5 *
1.00 Δu_{dy}	68.6	63.1	57.6	52.1	47.4 *	51.2 *	54.9 *
1.05 Δu_{dy}	64.1	58.3	52.5	47.5 *	51.5 *	55.4 *	59.6 *
1.10 Δu_{dy}	59.5	53.4	47.2	51.3 *	55.5 *	59.8 *	62.7 *
1.15 Δu_{dy}							

注:表中带 * 表示最大层间位移发生在第二层;其余发生在第一层。

从表 7 可以明显看出,耗能支撑的参数偏差对摩擦耗能框架地震响应的影响显著程度和耗能支撑参数的有利偏差和不利偏差情况。如果支撑刚度或起滑位移变化导致结构最大层间位移反应减少,则该偏差就是有利偏差,反之就是不利偏差,从而可以用来指导施工。

参考文献:

- [1] 欧进萍,吴波,龙旭.结构被动耗能减震效果的参数影响[J].地震工程与工程振动,1998,18(1):60-70.
- [2] GB 50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [3] 洗巧玲.消能支撑框架结构的试验-理论研究[D].湖南长沙:湖南大学,2000.
- [4] 唐家祥.建筑隔震与消能减震设计[J].建筑科学,2002,18(1):21-27,44.
- [5] 吕西林,金国芳,吴晓涵.钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M].上海:同济大学出版社,1997.
- [6] 俞载道.结构动力学基础[M].上海:同济大学出版社,1987.
- [7] V. Ciampi, M. De Angelis, F. Paolacci. Design of yielding or friction-based dissipative bracings for seismic protection of buildings[J]. Engineering Structures, 1995, 17(5): 381-391.