

8

建筑结构 . 弹塑性 . 振动 . 阻尼识别
带回系统

第 18 卷 第 2 期
1996 年 6 月

重庆建筑大学学报
Journal of Chongqing Jianzhu University

Vol. 18 No. 2
Jun. 1996

77-84

结构弹塑性振动阻尼识别中的滞回恢复力处理

黄宗明 肖明葵[✓] 白绍良 TU 311.3
(重庆建筑大学)

摘 要 根据三对共 6 个小型单层钢框架的动力-静力对比试验数据, 采用动力时程分析方法进行阻尼识别, 讨论了识别过程中如何处理结构的实际非线性滞回恢复力以及恢复力对阻尼识别结果的影响问题。

关键词 弹塑性振动, 阻尼识别, 滞回恢复力

中图法分类号 TU311.3

在结构地震反应分析中, 为了数学处理上的方便, 通常把除去结构非弹性变形耗能以外的其它耗能因素抽象为阻尼。这样, 强烈地震输入给结构的能量主要通过结构的阻尼和非弹性变形这两种方式来耗散, 结构在振动中的惯性力由阻尼力和恢复力来平衡。阻尼的合理性只能通过结构动力试验来证实。然而, 目前的结构动力试验方法不能直接提供结构的阻尼力或阻尼耗能, 只能提供结构的惯性力, 即阻尼力和恢复力之和, 而不能将二者分离。对于弹性振动的情况, 结构的恢复力可以根据其实测频率或刚度确定, 从而可以根据输入输出识别出阻尼; 对于弹塑性振动的情况, 结构刚度不断变化, 要想比较准确地描述结构恢复力颇为困难, 从而使阻尼问题变得相当复杂。

传统的阻尼识别方法如自振衰减法、共振法以及传递函数的富氏变换法^[1]等均基于线性弹性振动理论, 对于弹性振动中的阻尼分析是很有效的。但当其用于进行结构弹塑性振动中的阻尼识别时, 实质上是把系统的非弹性变形耗能因素也归结为阻尼, 所得到的是一种等价线性化的阻尼比, 从而普遍得出结构进入非线性的程度越高阻尼比越大、结构在弹塑性振动时的阻尼比约为弹性振动时的阻尼比的 10 倍的结果^{[1],[2]}。这种等价线性化的分析方法的适用范围是很有限的, 即使是在结构位移延性反应不太大的情况下, 对于最大位移反应单一指标等效, 该方法也可能产生不小的误差^[3]; 对于结构位移延性反应较大或要求整个位移反应时程曲线等效的情况, 这种用一个粘滞阻尼系统去等价一个弹塑性滞回系统的作法就更加无能为力了。动力时程分析方法是目前求解结构弹塑性地震反应问题的最有效的方法, 显然, 等价线性化阻尼比用于该方法是不恰当的。结构动力弹塑性分析要求在阻尼的识别中必须考虑结构的非弹性滞回恢复力, 将阻尼和滞回恢复力区分开来。本文根据三对小型单层框架的动力-静力对比试验数据, 对结构弹塑性振动阻尼识别中系统滞回恢复力的处理问题进行讨论。

收稿日期: 1996-03-23

黄宗明, 男, 1957 年生, 副教授, 重庆建筑大学建筑工程学院(630045)

国家自然科学基金资助项目

1 结构试验

考虑到题的复杂性,采用力学性能比较简单的小型单层框钢架作为试验模型。试验工作在同济大学土木工程防灾国家重点试验室振动台室完成。

1.1 试验原理

本文采取动力试验与静力试验相结合的方法获取结构在弹塑性振动中的滞回恢复力。具体做法是,试验模型成对制作,其中一个用于动力试验,另一个用于进行位移控制的静力加载试验,所施加的位移与动力试验模型所经历的位移历程完全相同,即两个完全相同的模型经历完全相同的位移历程,所不同的是,一个是静力位移,而另一个则是动力位移。由于在结构分析中,通常把阻尼看作是结构的动力特性,而把静力作用下抵抗结构变形的所有因素看成是恢复力,因此可以把阻尼定义为相同位移条件下动力加载和静力加载耗能的差别,认为静力试验所测得的位移曲线即为相应动力试验的恢复力滞回曲线。关于这个问题的认识作者在文献[4]中有比较详细的讨论。

1.2 试验模型

本文采用由四根矩形钢立柱上配一重量为 4.8kN 的混凝土质块所构成的小型单层钢框

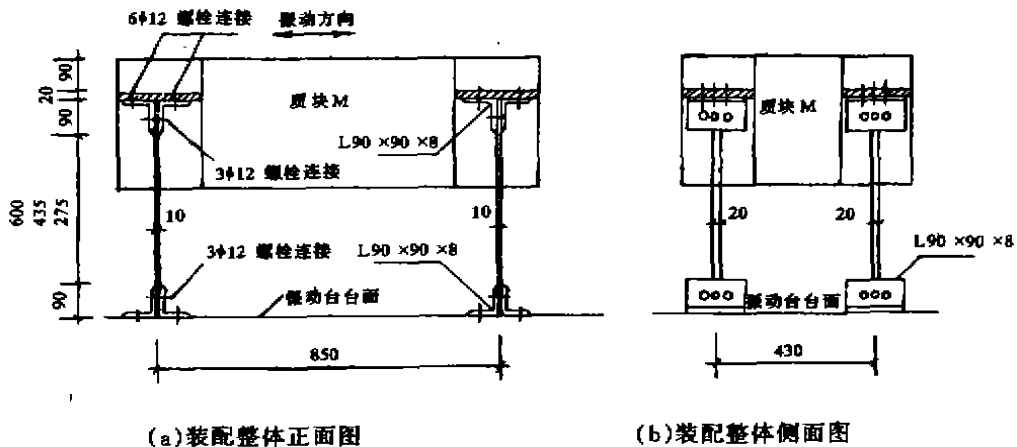


图 1 试验模型整体装配图(单位:mm)

架作为试验模型,共设计了三对,分别命名为 T_1 、 T_2 和 T_3 。立柱材料为 Q235 钢,所有立柱断面均为 $20\text{mm} \times 10\text{mm}$,为减小模型刚度,截面短边位于台面振动方向。每一对模型立柱的长度不同,由此控制三对模型具有不同的自振周期,模型 T_1 、 T_2 和 T_3 的立柱长度分别为 275、435 和 600 毫米。

1.3 试验内容

动力试验的台面输入采用加速度控制。所选取的加速度时程为两条不同类型的实际地震加速度记录和具有不同频率的正弦波。两条实际地震加速度记录为修正后的 Imperial Valley 地震(1940, 5, 18)EL-Centro S00E 记录和 Bear Valley 地震(1972, 9, 4)Melendy Ranch N29W 记录。前者代表中长持时不规则地面运动,后者代表近场大脉冲型地面运动。试验中

逐次加大输入加速度的幅值,获得不同程度的结构反应。定义延性反应系数 $\mu = \frac{X_{max}}{X_e}$,其中 X_{max} 为模型的绝对最大位移反应, X_e 为极限弹性位移,定义为一次加载恢复力曲线上从直线段到曲线段的转折点所对应的位移,由静力试验取得。 $\mu \leq 1$ 者可以认为是完全弹性反应动力试验, $\mu > 1$ 者为弹塑性动力试验。本文利用三对模型共进行了14对弹塑性动力试验及其对应的静力加载对比试验,除去其中6次接近重复或进入塑性不多(μ 略大于1)的试验之后,共有8次具有代表性的弹塑性动力试验供进行分析之用,其 μ 值在1.44~2.95之间分布。

2 阻尼识别方法

2.1 等效目标

本文选用位移反应时程曲线的位移平方和作为阻尼的等效目标。位移时程曲线是结构动力反应最全面的描述。文献[4]中还曾采用绝对最大位移反应和总滞回耗能反应作为等效目标,对比分析表明以位移平方和作为等效目标的识别结果离散性小,可靠程度高,且同时能满足绝对最大位移反应的要求。计算位移时程曲线与实测位移时程曲线的误差可以用它们的位移平方和相对误差 ERR_{SSD} 来表示:

$$ERR_{SSD} = \frac{\sum X_i^2 - \sum X^2}{\sum X_i^2} \quad (1)$$

式中 $\sum X_i^2$ 为试验实测的位移平方和; $\sum X^2$ 为识别过程中分析所得位移平方和。取误差限为5%,当 $|ERR_{SSD}|$ 小于给定的误差限时,识别完成。为了实现位移时程曲线的等效,识别中需对位移时程曲线分段进行误差计算。因为当结构进入弹塑性阶段后,往往并不是围绕着零位置振动,常常伴随着位移的偏移,在这种情况下,有可能出现 ERR_{SSD} 的绝对值较小,但位移时程曲线却差别较大的现象。此时可根据实际位移时程的变化情况,对其进行分段,将每一曲线段的时间轴平移到位移平均值上,使之在每一分段内大致以新的时间轴为中心振动,对于新轴按式(1)进行误差计算。实践证明这样求得的位移平方和误差能够较好地反映位移时程曲线的吻合情况,也便于根据 ERR_{SSD} 的正、负来判别阻尼比的大小。

2.2 阻尼模型

瑞雷阻尼是结构地震反应分析中最为广泛采用的阻尼模型,当其推广用于结构弹塑性动力分析时,由于系统刚度的变化,被拓展为三类八种不同的形式^[5],根据文献[6]的研究结果,在弹塑性动力分析中宜取与弹性动力分析相同的阻尼形式 $C = 2m\omega_0\zeta$,其中 C 为阻尼系数, m 为系统的质量, ω_0 为系统的初始圆频率, ζ 为阻尼比。本文的分析即采用该阻尼模型。

2.3 识别过程

本文直接利用动力时程分析原理进行阻尼识别,因为动力时程分析方法便于反映结构的弹塑性滞回恢复力。识别过程采用二分试算法。对于给定的阻尼模型,先取一初始阻尼比进行时程分析,本文取结构的实测自振阻尼比 $\zeta = 0.01$ 作为初始阻尼比。当 $ERR_{SSD} < 0$ 时,表明计算位移平方和大于实测位移平方和,于是增大阻尼比值,重新进行时程分析;反之,当 $ERR_{SSD} > 0$ 时,则表明计算位移平方和小于实测位移平方和,于是减小阻尼比,继续进行时程分析。如此反复进行,不断调整阻尼比值,直到误差 $|ERR_{SSD}|$ 减小到允许范围为止,这时的阻尼比值就是识别出的阻尼比值。

3 系统滞回恢复力的处理

由于阻尼和恢复力共同影响结构的动力响应,在系统识别中它们是互相关联的,恢复力是否符合实际将直接影响到阻尼识别结果的可信度。虽然通过前述静力对比试验测得了每一次弹塑性振动试验中模型的滞回恢复力,但如何将其应用到阻尼识别过程中去,仍存在着一些技术处理的问题。

结构动力时程分析中取用结构恢复力的目的是为了据以获得结构在任意时刻 t 的切线刚度 K_t 。虽然从理论上讲 K_t 可由静力对比试验记录的力-位移滞回曲线记录的一阶微分得到,但是由于该滞回曲线是离散值,且存在一定程度的噪声干扰,即使经过滤波平滑处理后,其数值微分仍然是跳跃的、与实际物理现象不符。另外,由于静力试验与动力试验不同步,二者的结果无法在时间轴上对应,这也给分析带来困难。因此,我们不直接采用静力试验的力-位移滞回曲线的数值微分作为 K_t ,而是选用一连续光滑的解析函数辅之以适当的滞回规则来拟合实测静力滞回曲线,以此来反映模型的力-位移滞回规律,然后通过对该解析函数取一阶微分,得到系统的瞬时切线刚度 K_t ,这样求得的 K_t 也是光滑连续的。

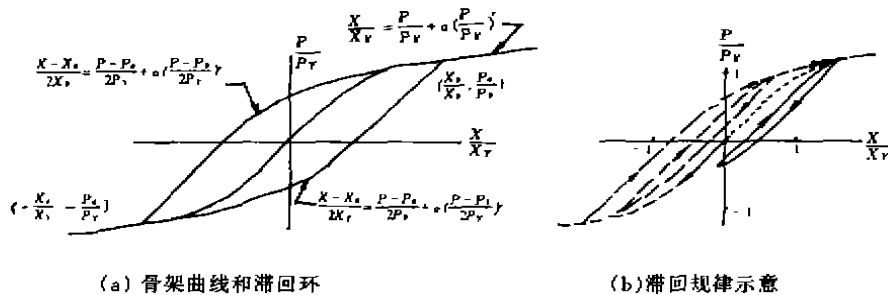
本文选用 Jennings^[7] 所提出的基于 Ramberg-Osgood 曲线的滞回模型,并根据试验的具体情况对该模型加以适当修正,对本文实测滞回曲线逐一进行拟合。

3.1 改进的 Ramberg-Osgood 模型

模型的骨架曲线或一次单调加载曲线为

$$\frac{X}{X_Y} = \frac{P}{P_Y} + \alpha \left(\frac{P}{P_Y} \right)^r \quad (2)$$

上升和下降段的滞回曲线为:
$$\frac{X - X_0}{2X_Y} = \frac{P - P_0}{2P_Y} + \alpha \left(\frac{P - P_0}{2P_Y} \right)^r \quad (3)$$



(a) 骨架曲线和滞回环

(b) 滞回规律示意

图 2 修正的 Ramberg-Osgood 滞回曲线

式中 X 和 P 分别为系统的相对位移和恢复力;参数 r 是大于 1 的正奇数,以满足回线关于原点的对称性; α 是大于零的常数; X_Y 和 P_Y 为位移和力的特征值; $(\frac{X_0}{X_Y}, \frac{P_0}{P_Y})$ 是加载的反向点,也是每一段曲线的起点。骨架曲线和滞回环示于图 2(a)中。

X_Y 、 P_Y 、 α 和 r 四个参数决定着滞回曲线的形状,是在拟合中需要识别的参数。在 r 一定的条件下, α 值越小,滞回环越瘦削,当 $\alpha = 0$ 时,滞回环趋近于直线,表示线弹性恢复力;在

α 一定的条件下, r 值越大, 滞回环越饱满, 当 $r \rightarrow \infty$ 时, 模型趋近理想弹塑性滞回: $\frac{X_Y}{P_Y}$ 为加载或卸载的初始刚度、控制滞回环的倾斜度。以上四个参数的不同组合, 可以构造不同形状的软化滞回环。

对式(2)或(3)求一阶微分 dP/dX , 得到系统的切线刚度

$$K_t = \frac{1}{(1 + \alpha r \cdot Z^{r-1})} \frac{P_Y}{X_Y} \quad (4)$$

式中, 对于骨架曲线, $Z = \frac{P}{P_Y}$; 对于上升段或下降段曲线, $Z = \frac{P - P_0}{2P_Y}$ 。

模型的滞回规律为: 系统的力-位移值由以最近一次荷载反向点为起点的上升段或下降段曲线给出, 若 P/P_Y 值越出了上、下边界, 则按相应的边界曲线取值, 此后力-位移曲线亦继续沿此边界曲线进行, 直到荷载反向。这里的边界曲线由最外层的上升段或下降段曲线和骨架曲线所构成的外包线形成。

图 2(b) 为受一般随机地面运动作用时的滞回情形。关于回线方程的求解及边界曲线的确定详见文献[7], 此不赘述。

3.2 对实测恢复力的拟合

本文所据以进行分析的 8 次弹塑性动力试验的位移延性都不是很大 ($\mu \leq 3$), 试验结果表明, 对于简谐输入的情况, 结构的位移反应基本上也是简谐的, 没有明显的偏移、刚度和强度也没有明显的退化, 稳态阶段的滞回环几乎是重合的, 因而可以直接采用常参数的 Ramberg-Osgood 模型对实测恢复力滞回曲线进行拟合, 但对于不同的试验, 结构恢复力的 Ramberg-Osgood 参数不完全相同。

对于采用实际地震记录作为输入的情况, 结构位移反应发生了明显的偏移, 其恢复力滞回环不象在简谐输入作用下那样是由小到大地、对称地、一环套一环地变化直到稳态, 而是相当不规则的, 这时若采用常参数的 Ramberg-Osgood 模型就不能很好地拟合实测滞回曲线。本文采用变参数的方法来达到较为准确地对实测滞回曲线进行描述的目的, 即在必要时对实测滞回曲线的每一条上升或下降曲线段采用不同的参数 X_Y 、 P_Y 、 α 和 r 来描述。虽然在一次振动台试验中结构经历许多次往复位移, 其滞回环有多条上升和下降曲线, 但是当结构在弹性振动阶段或进入塑性不多的振动阶段时, 往复位移不大, 其滞回环非常狭窄、接近直线, 这时, 只要通过 P_Y/X_Y 值控制住滞回曲线的倾斜度, 模型参数的其它变化对结构反应的影响都不大, 因此可以只对弹塑性反应中的最大几圈滞回环进行变参数拟合, 而在其它时段, 仍然采用常参数。

另外, 当位移延性较大时, 滞回曲线的顶部较为平缓, 甚至还有出现下降段的情形 (图 3), 这也是直接采用 Jennings 所提出的 Ramberg-Osgood 模型所不能描述的。对于这样的情形, 本文根据实际情况, 在 Ramberg-Osgood 模型中插入一段不同斜率的直线段来逼近实际滞回曲线。

对实测滞回曲线的拟合误差用恢复力相对误差 ERR_F 和滞回面积相对误差 ERR_A 两个指标来反映, 它们的表达式分别定义为

$$ERR_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_{oi} - F_i}{F_{oi}} \right| \left| \frac{F_{oi}}{F_{o\max}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$ERR_A = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (6)$$

式(5)中, F_{0i} 和 F_i 分别为与位移 X_i 相对应的实测恢复力和按 Ramberg - Osgood 模型的计算恢复力; F_{0max} 为实测恢复力的绝对最大值; N 为实际滞回曲线记录的离散点总数。 $\left| \frac{F_{0i}}{F_{0max}} \right|^{\frac{1}{2}}$ 是本文引入的权重函数, 其目的是为了突出绝对值较大的恢复力对滞回曲线形状的影响, 因为对于同样的相对误差, 力的绝对值越大, 对滞回曲线的影响越显著。恢复力相对误差 ERR_F 主要反映滞回曲线形状及刚度变化的误差。式(6)中, A_0 为实测滞回曲线所围面积, A 为按 Ramberg - Osgood 模型的计算滞回曲线所围的面积, 因而滞回面积相对误差 ERR_A 所反映的是耗能能力的误差。

对 Ramberg - Osgood 模型参数的识别采用复合形法^[8]与人工调整试算相结合的方法进行。采用 ERR_F 和 ERR_A 双重误差控制, 其误差限均为 5%。

图 3 是对位移延性较大的一次试验的实测滞回曲线的拟合情况, 其台面输入为 EL - Centro 地震记录。

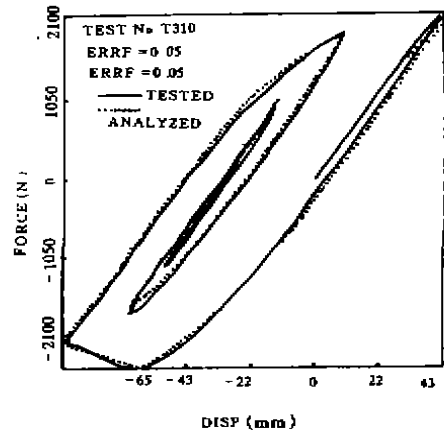


图 3 实测与拟合滞回恢复力曲线对比

4 恢复力对阻尼识别结果的影响分析

4.1 滞回恢复力符合实际时的识别结果

当按前述方法处理每一次试验的滞回恢复力时, 所完成的阻尼识别的统计结果如表 1 所示, 其中的绝对最大位移误差为实测绝对最大位移反应与用识别出的阻尼比进行时程分析时的分析绝对最大位移反应之间的相对误差。由于位移平方和是阻尼识别的等效目标, 因而对于每一次试验, 其误差均小于 5%。

从表中可以看出, 当阻尼识别中所取结构滞回恢复力与实际相符合时, 识别出的阻尼比与弹性振动或自由振动时的阻尼比相同, 没有延性反应越大阻尼比越大的规律^[9]; 识别结果表明, 不但绝对最大位移反应而且整个位移反应时程曲线都与实测结果吻合得很好。图 4 是以 EL - Centro 波作为输入, 延性反应较大的一次试验 T310 的实测与分析位移时程曲线的对比, 其中实线为实测结果, 虚线为分析结果。虽然结构产生了明显的塑性位移, 但分析结果与实测结果仍吻合得很好。

4.2 滞回恢复力误差对阻尼识别结果的影响

为了考察在阻尼识别中恢复力的误差对识别结果的影响, 本文根据前述的 8 次弹塑性动力试验数据, 将实测恢复力的加载和卸载刚度分别给以 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 和 $\pm 15\%$ 等 6 种不同程

表 1 恢复力符合实际时的阻尼识别结果

	阻尼比	绝对最大 位移误差	位移平方和 误差
均值	0.010	4.8%	<5%
标准离差	0.00398	3.5%	<5%

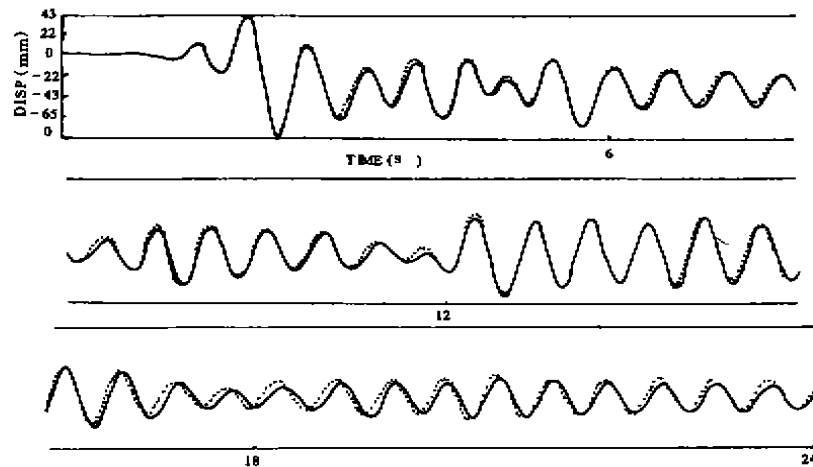


图 4 T310 分析与实测位移反应时程对比($C = 2m\zeta\omega_0, \zeta = 0.01, \mu = 2.83$)

度的误差, 而其它参数不变, 重新进行了阻尼识别, 其结果见表 2。从表中可以看到, 仅当恢复力刚度误差为 5% 时, 能够基本满足位移平方和及绝对最大位移反应等效的要求, 但识别出的阻尼比有所提高; 而对其它 5 种恢复力误差, 其识别结果的阻尼比偏差以及位移平方和误差和绝对最大位移误差都较大, 不能通过调整阻尼比达到位移时程曲线等效的目的。这证实了恢复力的误差对结构反应的影响是很显著的, 阻尼比只能在一定的范围内与恢复力互补, 要想做到位移时程反应等效, 必须进行弹塑性动力时程分析。关于阻尼和恢复力的相关性问题的作者在文献[10]中有比较详细的讨论。

表 2 恢复力有不同刚度误差时的阻尼识别结果

刚度误差	识别结果		
	阻尼比均值 标准离差	位移平方和误差(%) 标准离差(%)	最大位移误差(%) 标准离差(%)
5%	0.013/0.007	3.87/2.69	4.77/5.71
10%	0.013/0.019	10.67/7.19	10.46/13.56
15%	0.012/0.016	17.4/14.35	18.2/21.44
-5%	0.013/0.011	6.86/7.72	11.0/17.2
-10%	0.032/0.025	7.1/6.9	13.7/19.0
-15%	0.028/0.018	15.0/31.5	7.6/8.6

5 结 语

结构处于弹塑性振动中的阻尼识别必须考虑结构的实际滞回恢复力,识别中所取恢复力是否符合实际直接影响到识别结果的可信程度。采用动力试验与静力试验相结合的方法可以取得结构在振动中的滞回恢复力,分段采用修正的 Ramberg - Osgood 滞回模型可以很好地拟合实测滞回恢复力并能方便地应用到阻尼识别中去。当阻尼识别中所取结构滞回恢复力与实际相符时,识别出的阻尼比值与结构弹性振动时的阻尼比值相同,没有结构延性越大阻尼比越大的规律。

参 考 文 献

- 1 Hart G. C., and Vasudevan R. Earthquake design of buildings: damping, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST1, Jan 1975
- 2 Newmark N. M. and Hall W. J. Seismic design criteria for nuclear facilities. Proc. Fourth World Conf. on Earth quake Engrg., Santiago, Chile, 1969
- 3 Iwan W. D. and Gates N. C. Estimating earthquake response of simple hysteretic structures. Jour. Engrg. Mech., ASCE, 105(3), 1979
- 4 黄宗明. 结构地震反应时程分析中的阻尼研究. 重庆建筑大学博士学位论文, 1995
- 5 Leger P. and Dussult S. Seismic - energy dissipation in MDOF structures, J. Struc. Eng. ASCE, Vol. 118(5), 1992
- 6 Huang Z. M., Bai S. L. and Lai M. Identification of damping of structures in inelastic range, Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996
- 7 Jennings P. C., Earthquake response of a yielding structure, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 91, EM4, 1965
- 8 万耀青, 梁庚荣, 陈志强编. 最优化计算方法常用程序汇编. 北京:工人出版社, 1983
- 9 黄宗明, 白绍良, 赖明. 结构地震反应时程分析中的阻尼问题评述. 地震工程与工程振动, 1996(2)
- 10 黄宗明, 赖明, 白绍良. 结构动力反应分析中阻尼和恢复力的相关性. 世界地震工程, 1996(1)

(编辑: 袁江)

On Hysteretic Restoring Force in Damping Identification of Structures in Elasto - plastic Range

Huang Zongming Xiao Mingkui Bai Shaoliang

(Chongqing Jianzhu University)

Abstract Based on the data of inelastic dynamic - static comparison tests of three pairs of SDOF small steel frames, the problem of hysteretic restoring force in damping identification of structures in elasto - plastic range is investigated.

Keywords damping identification, elasto - plastic vibration, hysteretic restoring force