

结构弹塑性地震反应 中的阻尼试验方法研究

1-134

①
97.19(4)
1-7

黄宗明 赖明 白绍良
(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU313.2

摘要 对结构弹塑性动力反应中的滞回恢复力和阻尼分别给出了明确的定义, 据此提出了动力试验和静力试验相结合, 将弹塑性滞回恢复力和阻尼力分离开来的结构试验方法, 并通过3对共6个小型单层钢框架的试验, 对该方法的可行性进行了证实。

关键词 滞回恢复力和阻尼, 阻尼试验研究, 弹塑性动力反应

中图法分类号 TU313.2

随着结构地震反应弹塑性动力时程分析方法应用的日益广泛, 一般建筑结构分析中如何选取阻尼的问题越来越突出。对于阻尼模型, 由于时程分析方法方便采用多种不同形式的阻尼矩阵, 目前仅以瑞雷阻尼为基础的拓展形式就有8种之多^[1]; 对于阻尼比, 由于目前各种阻尼分析方法均基于线性弹性振动理论^[2], 因而, 取得的只是一种等价线性化的阻尼比, 显然, 这样的阻尼比是不适用于弹塑性动力时程分析的。

由于目前的结构动力试验方法不能将结构进入弹塑性阶段后的阻尼力和恢复力区别开来, 故目前关于结构进入弹塑性阶段后的阻尼研究现状是, 虽然人们已经认识到不同阻尼模型和阻尼比对结构各种反应物理量的影响是不可忽略的, 但究竟采用哪一种模型比较符合实际, 相应的阻尼比值应取多少, 还是一个尚无法确切回答的问题。结构进入弹塑性后的阻尼问题的研究要取得实质性的进展, 首要的关键是要通过有效的结构试验方法, 直接将结构的弹塑性滞回恢复力和阻尼分离开来, 以便对阻尼有一个比较客观的认识。本文就这个问题进行了初步探索。

1 对结构地震反应分析中阻尼和恢复力的定义

单自由度体系在地面运动作用下的动平衡方程为

$$f_i + f_d + f_s = 0 \quad (1)$$

式中 f_i 、 f_d 和 f_s 分别为系统的惯性力、阻尼力和恢复力。其中惯性力

$$f_i = -m \ddot{x}_0(t) \quad (2a)$$

收稿日期: 1996-05-22

黄宗明, 男, 1957年生, 教授

国家自然科学基金资助项目

$$\ddot{x}_a(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) \tag{2b}$$

式中 $\ddot{x}_a(t)$ 为质块的绝对加速度, $\ddot{x}(t)$ 为质块相对于地面的加速度, $\ddot{x}_g(t)$ 为地面运动加速度。

式(1)表明,系统的恢复力与阻尼力之和等于惯性力,或者说,前二者共同平衡惯性力。在结构动力试验中,绝对加速度 $\ddot{x}_a(t)$ 可以很容易地直接测得,因而阻尼力与恢复力之和可以很容易地由试验直接得到。困难在于通过动力试验既不能量测结构的恢复力,也不能直接量测结构的阻尼力,因而无法将阻尼力和恢复力,或阻尼耗能和滞回耗能区别开来,使得结构弹塑性动力时程分析中的阻尼问题难以确定。

要解决这个问题,必须首先对结构动力分析中的恢复力和阻尼的含义作出比较合理的解释,进而给出明确的定义。本文从恢复力入手来分析这个问题。

1.1 加载速率对力-位移曲线或应力-应变曲线的影响

结构或构件在动荷载作用下的荷载-位移曲线或应力-应变曲线与在静荷载作用时的情况是有差异的。国内外大量的试验已经证实^{[3][4][5][6]},对于同一结构或构件的等位移加载,动力作用的峰值力大于静力作用时的峰值力;对于等外力加载,动力作用的位移或应变小于静力作用时的位移或应变。这种现象在荷载-位移图或应力-应变图上,表现为动力作用的曲线高于静力作用的曲线,且具有加载速率越快或应变速率越高,这种提高的幅度就越大的规律。

归纳起来,在地震作用下,一般结构构件的刚度与静力作用相比基本上没有多大变化,材料的最大应力或构件的峰值承载力约提高 10%左右。

1.2 动力加载下力-位移曲线或应力-应变曲线抬高的原因分析

出于研究材料的刚度和强度的目的,工程界普遍将动力作用下结构构件的力-位移曲线或应力-应变曲线抬高的现象看成是材料强度提高的结果。吴育才^[7]对这种认识进一步作了具有一定说服力的解释,他认为这主要是由于在动荷载作用下,结构或构件的应变没能象静荷载作用下那样得以比较充分完成的结果,并通过在阶形柱的伪静力加载试验中,连续读取每一测点的应变值,证实了应变的发展和传递确实要经历一定的时间过程。

本文认为,如果从结构动力分析的观点来认识这个问题,动力作用下结构构件的力-位移曲线和应力-应变曲线抬高除了有材料强度提高的因素之外,还有阻尼的作用。图 1(a)是单自由度体系直接受动荷载作用的情形, $f(t)$ 是以一定加载速率施加的外荷载, $x(t)$ 为相应的顶端位移历程;图 1(b)是该单自由度体系受地面运动作用的情形,其中 $x_g(t)$ 为地面位移, $\ddot{x}_g(t)$ 为地面运动加速度。假设在该地面运动作用下系统的相对位移与受外荷载 $f(t)$ 直接作用时的位移历程完全相同,亦为 $x(t)$ 则应有

$$f(t) = m \ddot{x}_a(t) \tag{3}$$

其中 $\ddot{x}_a(t)$ 为系统的绝对加速度反应。又由系统的力平衡方程(1),有

$$m \ddot{x}_a(t) = f_0 + f_s \tag{4}$$

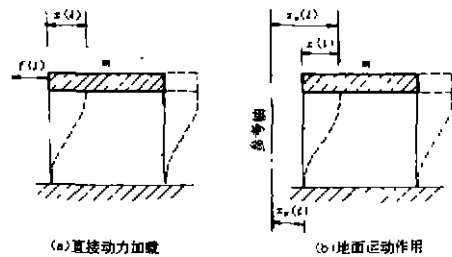


图 1 系统受直接动力作用和受地面运动作用的对照

所以

$$f(t) = f_0 + f_s \quad (5)$$

式(5)表明,通过直接动力加载施加给结构或构件的荷载实际上是由阻尼力和恢复力两部分来平衡的。如果根据粘滞阻尼理论假设,阻尼应力与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 成正比,亦得到应变速率越大阻尼力越大的结论。因此,在动荷载作用下,阻尼同强度的提高一样,也是客观存在的事实。但是,由于无法通过试验直接量测阻尼力,因而无法知道动力作用下结构构件峰值力或峰值应力的提高部分中,有多少是属于材料强度提高的成分,又有多少是属于阻尼的影响成分。

1.3 实际结构地震反应分析中材料弹性模量和强度的取值

由于影响结构或构件在动载作用下峰值力或应力提高的因素复杂,而且对地震作用下结构构件的反应频率来说,无论对于钢筋、混凝土的最大应力还是对整个构件的峰值力,提高的幅度并不很大,目前世界国都没有对结构地震反应分析中构件材料的弹性模量和强度取值作特殊的规定,一般仍按相应的静力设计规范取值。

1.4 结构地震反应分析中恢复力和阻尼的定义

根据以上分析,本文这样定义结构地震反应分析中的恢复力和阻尼:结构在振动过程中的恢复力滞回曲线取为按照与动力反应相同的位移历程对该结构进行静力加载所得到的力-位移曲线,滞回耗能是该静力加载滞回曲线所围的面积,阻尼耗能为动力反应的惯性力-位移滞回曲线(即 $m\ddot{x}_a-x$ 曲线,其中 \ddot{x}_a 为结构的绝对加速度反应, m 为结构的质量)所围面积与静力滞回曲线所围面积之差。

这样定义结构在地震反应分析中的恢复力和阻尼主要基于以下两个方面的考虑:

1) 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,即认为静力作用下没有阻尼可言。本文将阻尼定义为相同位移条件下动力加载和静力加载的差别正是反映了这种认识。这样定义的阻尼将诸如材料强度的提高等一类既对结构反应有一定影响但又不便在分析中加以体现的因素统统归结到阻尼中去反映,就分析而言,概念更清晰,处理更方便。

2) 结构抗震设计规范中,对材料的弹性模量和强度等,均未从加载速率影响的角度作有别于相应静力设计规范的规定;结构恢复力模型及其参数一般也是根据静力试验的结果确定的,并没有考虑加载速率的影响。这意味着在地震反应分析的实际应用中实质上采用的是静力恢复力,本文对恢复力的定义只不过进一步从理论上明确了这个已经得到工程界广泛认同的事实,与长期形成的习惯作法没有矛盾。

2 阻尼试验研究方法

根据以上对结构恢复力和阻尼的定义,可以通过动力试验和静力试验相结合的方法,将结构弹塑性振动中的阻尼和恢复力分离开来。试验方法的具体步骤如下:

- 1) 设计制作两个(一对)完全相同的单自由度结构模型;
- 2) 对模型之一进行动力试验,记录其绝对加速度反应时程 $\ddot{x}_a(t)$ 、相对位移反应时程 $x(t)$ 和台面运动加速度时程 $\ddot{x}_e(t)$;
- 3) 对另一模型进行位移控制的静力加载试验,控制位移等于前述动力试验所记录的

位移反应时程曲线 $x(t)$; 通过力传感器直接测出与位移 $x(t)$ 对应的恢复力时程 $R(t)$, 此 $R(t)$ 即为动力试验中的结构恢复力 f_s ;

4) 由 $E_R = \int f_s dx$ 求出滞回耗能; 由 $E_D = \int m \ddot{x}_0 dx - \int f_s dx$ 求出阻尼耗能, 从而实现了将滞回耗能和阻尼耗能的分离。

在这里明确知道恢复力 f_s 去识别阻尼, 与同时对恢复力和阻尼进行识别的方法有本质区别, 从而使对于阻尼的识别结果比较客观。

对于 n 个 ($n > 1$) 自由度的体系, 其中任一质点 i 的力平衡方程仍可写为式 (1) 的形式

$$f_h + f_{D_i} + f_{S_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

于是, 采用与单自由体系相同的试验方法, 可以测得结构振动过程中作用于每个质点上的恢复力 f_{S_i} 。但必须注意的是, 由于多自由度系统中任一质点上的恢复力在任一时刻 t 都与其它质点在该时刻的位移状态相关, 因此, 在根据动力试验的位移时程曲线进行静力加载试验时, 尽管对加载速率的均匀性并没有严格的要求, 但必须保持在整个加载过程中各个质点间的相对位移过程与动力试验的结果一致。这样的静力位移加载宜采用计算机控制, 目前在拟动力试验设备上实现这种加载是完全可能的。

3 试验模型及加载、量测装置

3.1 试验模型

本文采用由四根矩形钢立柱上配一重量为 4.8 kN 的混凝土质块所构成的小型单层钢框架结构作为试验模型, 共设计了三对, 根据立柱长度的不同, 分别命名为 T1、T2 和 T3。

3.2 加载装置及测点布置

试验在上海同济大学土木工程防灾国家重点试验室振动台室完成。

动力试验采用该试验室的模拟地震振动台进行。质块侧立面(图 2)中部和边部各布置一个加速度传感器和一个位移传感器, 以便通过这两点的记录对比, 对质块在振动过程中的扭转作出判断; 另用一加速度传感记录台面运动加速度。

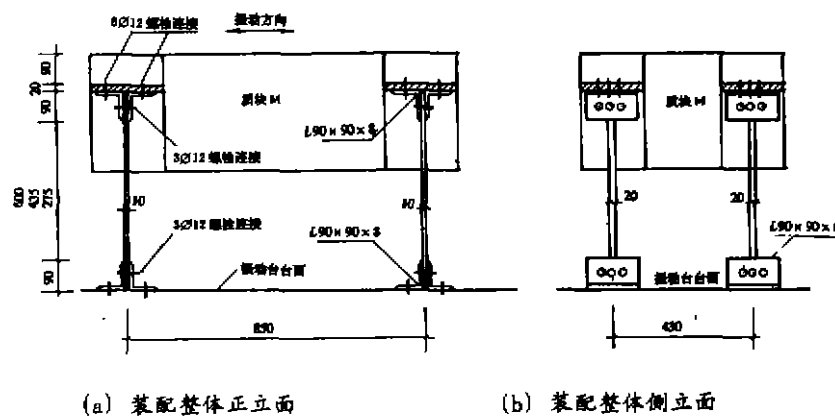


图 2 试验模型整体装配图 (单位: mm)

为了保证静力试验和动力试验中试验模型的约束条件相同,静力试验亦利用该振动台进行。静力试验模型与振动台台面的连接完全同动力试验。为了实现位移控制的静力加载,另在振动台台面附近的地面上设置一反力架,由反力架上伸出一粗螺杆,串以一应变拉压力传感器,与质块上的钢套杆相连,限制质块的水平位移。令振动台台面按动力试验记录的质块相对位移反应时程 $x(t)$ 作均匀缓慢的运动,控制台面运动的每一个峰点与 $x(t)$ 的峰点相等,台面位移即为质块与台面的相对位移,反力架约束力即为与位移 $x(t)$ 相对应的模型静力恢复力 $f_s(t)$,由此得到的静力加载滞回曲线 $x(t) - f_s(t)$ 被认定是结构动力试验时的恢复力滞回曲线。

4 对试验结果的初步分析

本文共进行了8次具有代表性的弹塑性动力试验及其对应的静力加载对比试验。这8次试验的动力滞回曲线与静力滞回曲线的图形对比参见文献^[8],有关数值指标的对比见附表。

附表 弹塑性动力试验及其静力对比试验的有关结果

试验基本数据			反应谱分析 试验方法	最大位移 (mm)		最大力 (N)		滞回面积 (N·mm) 动力面积 $A_{D,n} \times 10^3$ 静力面积 $A_{S,n} \times 10^3$	面积比 $A_{D,n} / A_{S,n}$	
试验编号	输入波形	延性反应 μ		+	-	+	-			
T111	EL	1.44		动力	12.99	-10.54	5 610	-5 003	1.861	0.426
				静力	13.94	-11.16	6 413	-5 644	0.793	
T112	MEL	2.14		动力	19.28	-14.50	6 290	-5 895	1.508	0.790
				静力	20.60	-15.73	7 354	-6 409	1.192	
T121	4 Hz正弦	2.41		动力	21.73	-21.10	6 042	-5 949	133.947	0.802
				静力	21.49	-21.32	5 595	-5 576	107.40	
T124	4 Hz正弦	2.95		动力	26.56	-24.22	6 677	-6 788	219.27	0.877
				静力	26.28	-24.02	6 419	-6 137	192.39	
T127	2 Hz正弦	2.62		动力	52.25	-52.48	3 969	-3 905	34.50	0.815
				静力	52.22	-53.88	3 821	-3 818	28.129	
T38	MEL	1.56		动力	46.68	-37.80	2 370	-2 053	0.551	0.583
				静力	46.42	-37.20	2 284	-2 005	0.321	
T39	EL	1.73		动力	45.75	-51.95	2 316	-2 375	1.447	0.536
				静力	45.71	-52.52	2 309	-2 288	0.776	
T310	EL	2.83		动力	43.31	-84.82	2 177	-2 522	3.576	0.867
				静力	43.31	-84.66	2 184	-2 534	3.100	

从滞回曲线的形态看,动力试验与静力试验的结果是相似的,二者遵循完全相同的滞回规律,具有相似的形状。

从滞回曲线的幅值来看,在位移幅值相等的条件下,大多数试验的静力加载恢复力幅值都略小于或接近于动力加载的惯性力幅值。但 T111 和 T112 试验有所例外,在这两对试验中,静力试验的恢复力幅值反而大于地动力试验的惯性力幅值约 10%。我们分析产生这种反常现象主要有三个方面的原因,一是试验的位移幅值不大,因而动力试验和静力试验在位移滞回曲线上峰值的差异本身就不明显。二是该两对试验的静力加载位移控制不够准确,实际静力加载位移幅值大于动力反应位移幅值约 7%,而此时模型的恢复力仍处于上升阶段,因而得到较大的惯性力幅值。如果排除这个因素的影响,则静力恢复力幅值与动力惯性力幅值就很接近。三是在静力加载装置中,模型质块与反力架之间的连接存在着一定程度的竖向约束,质块由于侧移引起的向下运动受到了向上的约束力作用,从而减小了质块作用于立柱的竖向压力,导致静力恢复力峰值的提高。如果在静力试验中在质块与螺杆之间采用铰接,或者改变加载方式,振动台固定不动,完全去掉对上部质块的约束,直接采用两台千斤顶分别从两端对质块进行位移控制加载,其结果可能会有所改善。从滞回曲线所围的面积来看,所有 8 次试验的静力滞回曲线所围面积 A_{sm} 均小于动力滞回曲线所围的面积 A_{dm} ,对于 T111 和 T112 两次试验也不例外。这个结果是很正常的,因为 A_{dm} 代表结构的总耗能,而 A_{sm} 则代表结构的非弹性变形所引起的滞回耗能,二者之差为阻尼耗能。

从滞回耗能 A_{sm} 以及滞回耗能在总能量中所占的比例 (A_{sm}/A_{Dym}) 来看,二者受位移延性反应的影响很大,在同一类地面运动作用下,延性反应越大,滞回耗能的绝对值及其在总耗能中所占的比例也越大。

有了实测的结构弹塑性滞回恢复力和阻尼耗能,采用弹塑性动力时程分析方法就不难对阻尼模型及其参数的合理性作出判别^[9]。

5 结 语

本文提出将建筑结构在弹塑性振动中的恢复力定义为根据动力反应的相同位移进行静力加载时所施加给结构的力;结构的滞回耗能为该静力加载滞回曲线所围的面积,阻尼耗能为动力滞回曲线与静力滞回曲线所围面积之差。据此给出了采用动力试验与静力试验相结合研究结构弹塑性振动中阻尼问题的试验方法,并在三对不同自振周期的小型单层钢框架上对该方法进行了实施,试验结果表明,采用该方法将滞回耗能和阻尼耗能区分开来是可行的。

参 考 文 献

- 1 Leger P. and Dussault S. Seismic - energy Dissipation in MDOF Structures, J. Struc Engrg ASCE, 1992, 118(5)
- 2 Hart G. C. and Vasudevan R. Earthquake Design of Buildings: Damping J. Struct Div ASCE, 1975, 101(1)
- 3 陈肇元等. 钢筋混凝土梁在静速和快速变形下的弯曲性能. 清华大学抗震抗爆工程研究室, 科学研究报告第 4 集, 1986
- 4 H. 克拉温克勒, P. D. 蒙卡日. 动力模型的相似要求. 混凝土结构动力模型. Harms, H. G. 著, 朱世杰译, 北京: 地震出版社, 1987
- 5 Wakabayashi, M Design of Earthquake - Resistant Buildings, McGraw - Hill Book Company, 1986
- 6 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析, 上海: 同济大学出版社, 1985

