

· 振动控制 ·

提高建筑物抗震能力的一种新技术

—基础滑动摩擦减震—

田千里

(中国科学院力学研究所)

一、前言

地震会给人类造成极大的灾害,因而设法提高建设物的抗震能力是工程界十分关心的一个课题,国内外对这方面进行了大量研究并取得了许多显著的成果。其中之一就是在建筑物底部加基础减震器,由多层钢板—橡胶叠合而成的水平剪切减震器,可以衰减由地面传往上部结构的振动能量,从而提高其抗震能力。近十多年来这种减震器已逐步在工程实践中应用,因为建筑物的基频都比较低,采用这种减震器会导致在风载作用下的不稳定,所以必须同时安装滞后阻尼器或其它风力掣动器,即在正常情况下阻尼器或掣动器将结构与基础锁紧,隔振器不起作用。当地震超过一定烈度后阻尼器塑性屈伏,或是掣动器打开,隔振器发挥作用,衰减地表传至上部结构之振动,抑制结构响应。基础隔振的极端情况是取消隔振器,将建筑物直接座落在基础上(或者垫一层垫片)如图1,为防止建筑物垂直起落将其底板与基础锚紧,通过预压弹簧调整摩擦力使得建筑物在风载与中等烈度地震作用下不发生滑动,此时建筑物就如同一般地固定在基础上的结构一样,设计时就按这个状态对结构进

行强度计算。当地震烈度增加,建筑物底部切力也相应增大,一旦超过摩擦力后建筑物就开始在基础上滑动,所以摩擦装置好比是安全锁,限制了建筑物底部切力之最大幅度,地面持续运动,建筑物在基础上往复滑动,通过摩擦耗散能量,又好比是阻尼器,这种抗震技术极为简单、经济,因而很有吸引力,60年代就曾被人推荐^{[1][2]},但并未引起注意,近年来才受到了广泛的重视,如在83年的国际地震工程与结构动力学杂志上就连续发表了几篇有关这方面的研究报告,其中两篇是美国国家科学基金的合同项目^{[3][4]},加拿大的Montréal就有两个大学在研究摩擦减震的机理。

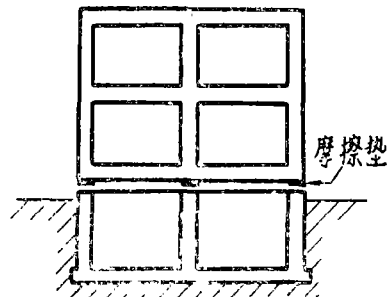


图1 摩擦减震示意图

二、国内在这方面的研究情况

1978~1981年一机部抗震办公室与航天部703所在研究高压电气设备减震技术时曾对这种类型的减震器进行过试验研究。高压电器的绝缘支撑都是陶瓷结构，其抗震性能很差。一机部抗震办公室经过调研决定在其底部加剪切式减震器，703所研制了一种阻尼胶垫 QS-78-195，加在棒式绝缘子底部后取得了良好的减震效果，体系的自然频率基本上没有改变，共振时的放大倍数降低了4~8倍。实际上这是一种滑动摩擦减震装置。绝缘子结构共振时底部切力超过摩擦力后，根部就沿阻尼胶垫滑动，而在非共振区时摩擦力大于根部切力，不发生滑动，因而体系自然频率不变，但他们没有弄明白这种装置的减震机理，所以将该阻尼垫用于其他电气设备时均未取得减震效果^{[5][6]}。

一机部抗震办公室鲍臻与李成泉在研究高桩码头的减震方法时，曾对这种装置进行了模型试验与计算分析^[7]，结果表明采用这种技术可以使危险节点之最大应力降低5~8倍。最近我们在研究海洋平台上部结构的减震方案时进行了一些简单的模型实验，也取得了明显的减震效果^[8]。

钢质导管架桩基海洋平台是海上开采石油的主要建筑物，它长年承受海浪冲击，有时还会受到冰块撞击与地震激励，环境十分恶劣，平台上的生活组块是职工休息的场所，在大风浪和钻杆起落，机械设备运转，直升飞机起飞等状态下会发生摇晃，而且经常受到泥浆泵、电机启动时的振动与干扰，因此采取措施设法降低住房的噪声与振动是设计人员很关心的一个问题。可是由于振动环境复杂而平台的基频又很低，减震十分困难。曾经有一座平台因住房晃动影响过

生产，后来采取了许多加固措施但均没有取得减震效果，因为振动响应最大反应在平台一桩基系统的基频，住房位于平台顶部，加强顶部并不能改变系统的基频振型与响应。平台的基频在1赫兹左右，也无法采用一般的减震器，所以在住房底部采用滑动摩擦减震措施应不失为一简单可行的方案，住房底部大梁通过垫片支撑在甲板大梁上，用卡箍箍紧，当振动响应超过一定极限时接合面间发生相对滑动，从而将住房底部之最大切力限止在摩擦力的范围之内，其构造与原理如图2。

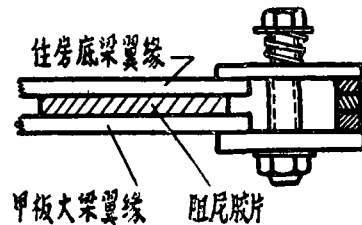


图2 滑动节点构造

为了定性地了解其减震效果，我们在实验室内作了模拟实验，用一悬臂结构代表平台住房，底部放置E-R-A胶片与3M压敏胶组成的垫片，(实验证明用毛毡垫片也可以取得相似的效果)，用压板将结构底部砧盘压在滑台上，对系统进行正弦扫描激振，实验仪器方块图如图3。

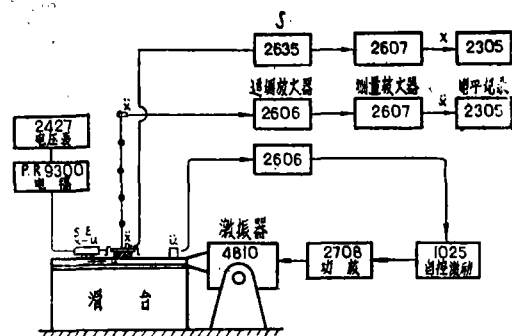


图3 实验方块图

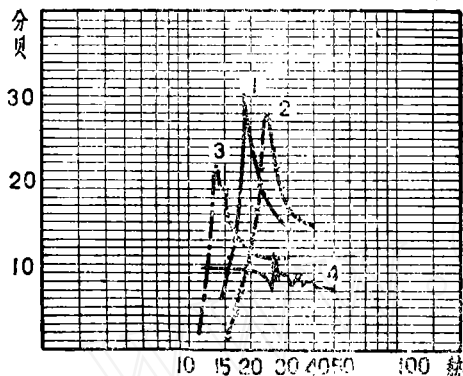


图4 结构顶部响应 \ddot{x} 与根部响应 X

- 1 —— 无垫片结构顶部 \ddot{x} 响应
 2 $\times-\times-\times$ 有垫片(螺栓扭力矩 $2\text{kg}\cdot\text{m}$)结构顶部 \ddot{x} 响应
 3 $\cdot-\cdot-\cdot$ 有垫片(螺栓扭力矩 $0.5\text{kg}\cdot\text{m}$)结构顶部 \ddot{x} 响应
 4 —— 结构根部位移 X 响应, (有垫片)

结构的频率响应如图4, 顶部为加速度频响, 根部为位移频响, 台面激励用B. K. 1025控制为恒位移正弦波, 图4中实线是未加垫片时固端结构之响应, $\times-\times-\times$ 线为加垫片后, 每个螺栓预紧力矩为 2.0 公斤一米时之响应, $\cdot-\cdot-\cdot$ 为加垫片后, 压板放松, 螺栓预紧力矩减小为 0.5 公斤一米时之响应, 由图可见, 未加垫片, 基频共振时顶部最大响应为 31 分贝, 加垫后允许一定滑动, 最大响应降为 28 分贝, 放松螺栓使摩擦力减小, 滑动量增大, 结构基频稍有降低, 但响应幅度下降了 9 个分贝, 用荷兰S. E. 位移传感器通过电桥放大再用B. K. 2427数字电压表测得的位移绝对值很小, 对结构性能没什么影响, 说明这种减震方案是可行的, 当然这只是粗略地作了一次定性实验, 要正式用之于实际还得经过现场测试和考验。

三、需要开展的研究工作

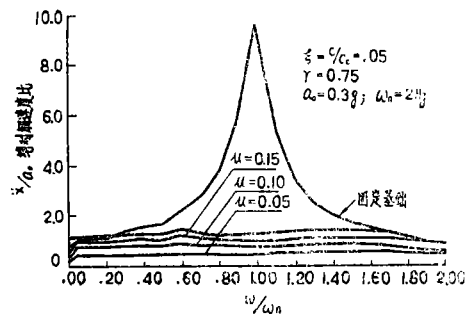
虽然这种减震技术已经显示了它的优越性, 但是要正式用于工程设计中还须要做大

量的研究工作, 主要有以下两方面的工作。一是材料与工艺方面的问题, 重要的是能够控制摩擦力, 但摩擦力对环境与载荷都十分敏感, 当湿度、正压力变化, 以及发生多方向滑动时摩擦力都会发生变化, 反复滑动还会使接合面磨损, 因此既要设计出能够维持正压力为恒定值的装置, (如采用预压弹簧)又要研制出高摩擦系数的耐磨垫片, 用电火花对滑动面进行表面加工可以显著地提高其摩擦系数与耐磨性, 这些方面的研究已经取得了一些成果, 还需要进一步发展。另一方面问题是要有一套设计计算方法与程序。由于摩擦力的非线性给分析计算带来了一定困难, 但是如果不能通过计算确定摩擦系数, 激励振幅, 结构特性等参数与响应及滑移量间的关系则无法将这种技术用于设计, 文献(3)对一个单自由度体系模型进行了上述参数的数值分析研究, 得到了一些结果, 其中一组曲线如图5, 由之可以看到:

(1) 滑动后的结构响应谱与频率无关

(2) 响应幅度只取决于摩擦系数, 摩擦系数愈小, 响应愈低, 但滑移量增大, 故减震效果要在响应幅度与滑移量之间作一个折衷选择。

(3) 滑动后的结构响应显著的低于不滑动的固端结构之响应。



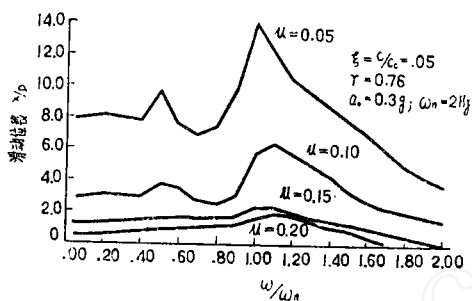


图5 顶部加速度与底部滑移量频响曲线

ζ = 结构阻尼系数 γ = 质量比 = $\frac{m_1}{m_1 + m_2}$
 a_0 = 基础加速度幅度 μ = 摩擦系数
 ω_n = 结构自然频率

文献^[4]分析了与^[3]中相同的模型,指出滑动结构具有几个超谐共振频率,当系统在它的固定基础自然频率 ω_n 被激励时,滑动会降低它的峰值响应,但当激励频率低于 ω_n 时滑动会导致某些频率的响应高于固定基础系统的响应。如图6 A μ 愈大(摩擦系数愈大)这种情况愈严重,但对于 r 较大的系统,即细长结构或头重脚轻的悬臂结构高次谐波会消失如图6 B。

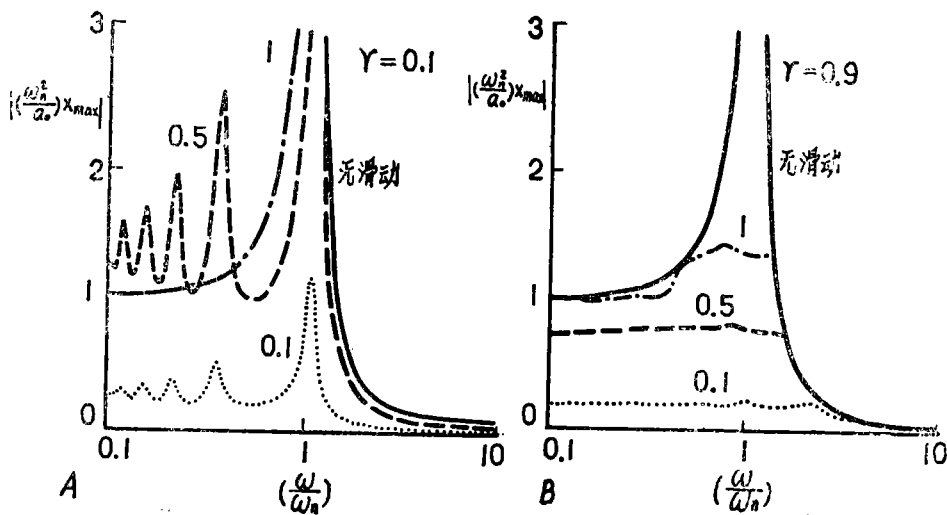
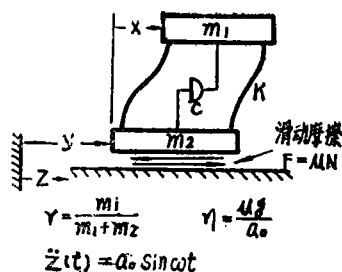


图6 周期解之峰值位移频率响应

以上两篇文献都是针对高谐激励的,文献^[9]研究了轮摩擦控制的刚体质量在随机地

震激励下的累积滑移量,给出了滑移量之均方根值与摩擦系数的关系曲线如图7。

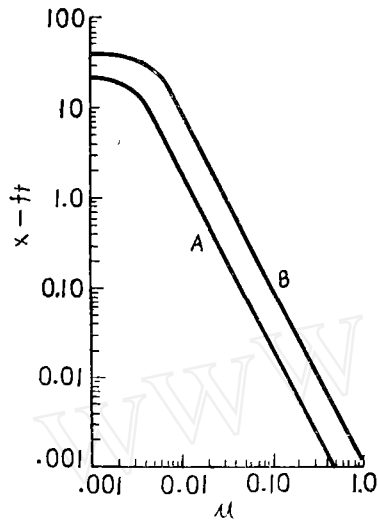


图7 滑移量均方值与摩擦系数的关系曲线

A—RMS 滑移量在 Taft (1952)地震后
B—RMS 滑移量在 El Centro (1940)地震后

由图7, 可以估计基频远大于地震激励频谱的刚性结构, 在地震激励下的滑移量与摩擦系数之关系, 例如一个重力结构, 其固有频率均在地震激励谱带之上, 座落在滑动基础上, 摩擦系数 $\mu = 0.057$, 则结构在地震时之水平加速度将被限制于 $5.7\%g$, 在相当于EL Centro(1940)的地震作用下, 最大滑移量小于0.53英尺(0.16米)的概率为90%, 最大滑移量小于0.88英尺(0.27米)的概率为99%。

以上的分析结果都只是针对单自由度模型的, 但也指出了使用这种隔振技术应注意的一些问题, 如滑移量与响应幅度及摩擦系数的关系问题, 低于系统之自然频率滑动时会出现超谐共振问题等。一般悬臂结构在基频共振时其根部切力响应最大。为了降低这个响应的峰值, 可以利用摩擦滑动技术使结构在基频附近刚刚进入共振放大区时就开始滑动, 从而使根部切力限制在摩擦力范围之内。为了避免在低频发生超谐振动, 当结构在进入基频共振区以前应保证它不发生滑

动, 因此摩擦力应有个下限。在共振区, 结构滑动之滑移量与摩擦系数有关, 从实际允许的滑移量出发, 对摩擦力也应有个下限, 取这两个下限中数值较大的一个作为设计下限, 由之计算减震效率。由于实际结构都是复杂的多自由度体系, 以上参数对响应影响的分析还得进一步研究, 这方面的文章还很少, 我们在文献^[10]中提出了一个计算悬臂结构干摩擦隔振的方法, 令粘弹性隔振器的刚度 k 与阻尼 C 等于零就可得到单纯干摩擦隔振问题的滑动解

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}_n + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}_n + \mathbf{K}\mathbf{X}_n = -\mathbf{M}\{1\}\ddot{y}_n \quad n = 1, 3, 5 \dots \infty \quad (1)$$

$$M_0\ddot{y}_n + Q_n = \frac{8F_0}{\pi} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (2)$$

$$\text{令 } Q_n = \bar{Q}_n \ddot{y}_n$$

\bar{Q}_n 为结构底座承受单位加速度之简谐运动时其根部产生的切力, 可以由SAPV求得

$$\text{故 } \ddot{y}_n = \frac{8F_0}{\pi(M_0 + \bar{Q}_n)} \cdot \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (3)$$

代入(1)式便可求得 \mathbf{X}_n , 与其他相应之结构响应。

这个解是针对连续周期性滑动的, 如果摩擦力较大, 在一个周期内会出现滑动——停止——滑动现象, 则应另作分析。对于复杂结构在复杂加载作用下的分析还须要进一步研究。

四、干摩擦节点减震

结构的阻尼约百分之九十来源于其节点, 因而增大节点阻尼是降低振动水平的有效方法, 上述在建筑物底部构造允许滑动的减震措施是摩擦节点的一个特例, 摩擦节点还可以放置在建筑物梁柱接合处, 斜撑交点, 与剪切墙之垂直接合面之间, 如图8^[11], 这些节点在一般风载作用下犹如刚性节点,

只在大地震后发生滑移, 如果布置得合理就可以使响应大大降低, 而建筑物构件仍保持在弹性受力范围内。地震以后, 只须将螺栓

放松, 构件之弹性将使建筑物恢复到原来的形状, 然后再将螺栓重新拧紧。因此对建筑物将不发生任何破坏。

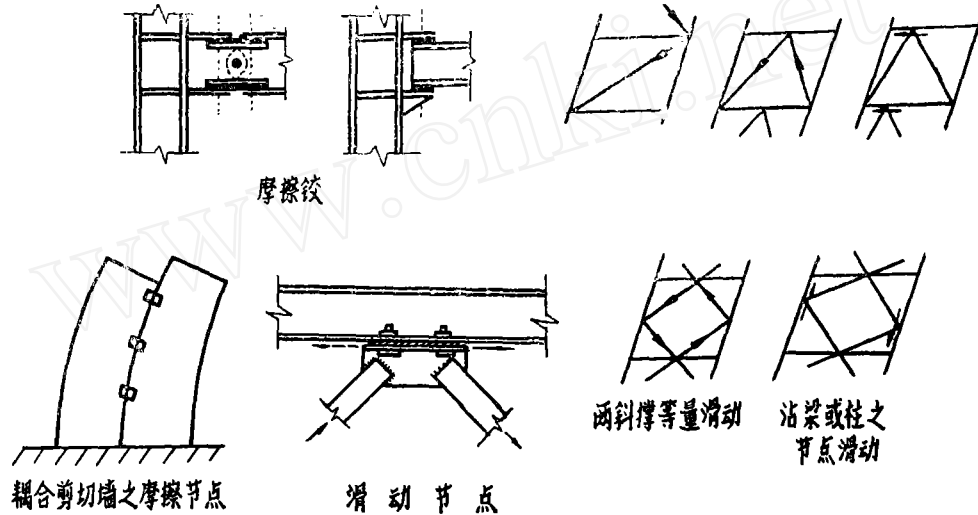


图8 各种摩擦滑动节点

对于具有摩擦节点的复杂结构的动力分析, 国外也很重视, 已经有了专用的计算程序, 目前国内还没有这种计算程序, 对于高层建筑或其他复杂结构往往具有成千上万个自由度, 而摩擦节点, 只加在其中很少数的自由度上, 但为了合理布置这些节点的位置, 选择摩擦系数, 须要有一个计算程序能对之进行计算, 我们在文献^[12]中, 用统计

线性化法将摩擦力化为等效粘性阻尼力, 处理了具有干摩擦节点Q复杂结构在稳态随机激励下的响应分析。对于任意载荷及非平稳随机作用下之响应分析还须要作进一步的研究。摩擦节点减震简单方便是很有吸引力的一种技术, 本文只是作一简略介绍, 许多工作有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Newmark, N. M., "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments", Rankine Lecture, British Geotechnical Society, 1965
- [2] Williams, J. H., Jr., "Designing Earthquake-Resistant Structures", Technology Review, Vol. 76, No 1, PP. 37-43. (1973)
- [3] N. Mostaghel, et al. "Response of Sliding Structures to Harmonic Support Motion" Earthqua. Engng. & Struct. Dyn. Vol. 11. 355-366 (1983).
- [4] B. Westermo and F. Udawadia. "Periodic Response of a Sliding Oscillator System to Harmonic Excitation" Earthqua. Engng. & Struct. Dyn. V. 11. 135-146 (1983)
- [5] S. H. Crandall, et al "Accumulated Slip of a Friction-Controlled Mass Excited by Earthquake Motions" Trans. A. S. M. E. J. A. M. Vol. 41. No 4. 1094-1098 (1974)
- [6] 田千里, 李盛章, "用SAPV程序计算具有干摩擦之隔振问题" 振动与冲击 1982年第4期 PP. 28-33
- [7] Cedric Marsh, A. S. Pall "Friction Devices to Control Seismic Response" Dynamic Response of Structures.
- [8] 田千里 "具有离散阻尼器的结构动力分析" 固体力学学报1983年第2期, 186-196页