

城市桥梁模型地震反应的振动台实验研究

张宏远

(北京市市政工程设计研究总院,北京市 100045)

摘 要:该文以北京市某立交桥中墩为原型,进行了桥梁模型地震反应的振动台实验研究,考察了分层橡胶支座对模型地震反应的影响,为桥梁结构的抗震设计提供实验依据。

关键词:桥梁模型;分层橡胶支座;振动台实验;频谱特性;地震反应

中图分类号:U446 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2007)03-0091-03

1 实验目的

地震动是桥梁设计需要考虑的外部作用之一,减小结构的地震作用、提高桥梁的抗震能力,始终是设计人员关心的问题。对于城市中小跨径桥梁中广泛使用的分层橡胶支座,人们一般认为由于它剪切刚度较小,可以延长结构的自振周期,降低结构的地震作用,有利于提高桥梁的抗震能力。但是,结构的地震反应不仅与结构的自振特性有关,还与地震动的频谱特性有关,分层橡胶支座对不同地震波作用下结构反应的影响还需要进一步研究。

振动台实验是研究结构地震反应最直接的方法之一^[1]。通过观测结构模型在地震波作用下的反应,掌握结构的动力特性和地震响应特点,为桥梁的抗震设计理论提供实验基础,改进和完善桥梁抗震设计方法^[2]。本文通过桥梁模型的振动台实验,考察了分层橡胶支座对不同地震波作用下模型反应的影响,为桥梁结构的抗震设计提供实验依据。

2 实验模型的设计与制作

实验模型以北京市某立交桥中墩为原型,由于振动台最大承载能力的限制,模型的几何相似比例确定为1:5,根据相似律准则可以得到模型的相似系数,见表1。

表1 模型相似关系(模型/原型)

几何	应力	质量	弹性模量	位移	加速度	时间
1/5	1/1	1/25	1/1	1/5	1/1	1/2.2

模型墩柱高2 m,采用C30混凝土制作,配置10根Φ12的纵向钢筋和间距20 cm的Φ6箍筋。墩柱顶部架设一根工字型钢梁,钢梁内填充铁块

作为上部结构质量。模型底座为一块16 cm厚的混凝土板,用螺栓固定在振动台面上。模型的参数见表2。

表2 模型参数

墩柱截面	0.2m×0.4 m
墩柱净高	2 m
混凝土标号	C30
上部结构重量	3t
纵筋配筋率	1.5%
箍筋配筋率	0.3%

实验使用的分层橡胶支座由专业生产厂家制作,支座外径105 mm,高68 mm,由15层橡胶片、14层钢片和顶底钢板组成,橡胶片和钢片的厚度均为2 mm,顶底钢板的厚度各为5 mm。分层橡胶支座分为三种,内径分别为50 mm、25 mm和0(无孔),制作完成后,使用电子激振器对支座进行激振,测得支座的自由振动曲线,从而得到支座的刚度。分层橡胶支座的剪切刚度见表3。

表3 分层橡胶支座的剪切刚度

内径	50 mm	25 mm	0(无孔)
刚度	581 N/mm	534 N/mm	557 N/mm

实验在北京工业大学的一维振动台上进行,振动台面尺寸3 m×3 m,最大载重量10 t,最大加速度2.5 g,最大位移1.2 cm,工作频率0.1~50 Hz。分层橡胶支座的顶底钢板用螺栓与钢梁底和墩顶连接,考虑到结构模型的稳定性,每个墩柱顶布置两个支座支承钢梁。模型制作完成后,输入不同频率的正弦波,测得模型的一阶自振频率,见表4。

表4 模型的自振频率

支座类型	内径50mm	内径25mm	内径0(无孔)
自振频率	2.41Hz	2.39Hz	2.42Hz

实验输入的地震波选用了具有不同频谱特性的EL-centro波、San Francisco波、天津宁河波等3条地震波,其中EL-centro波的频率范围较宽, San Francisco波的高频分量较多,天津宁河波则

收稿日期:2006-10-18

作者简介:张宏远(1965—),男,北京人,高级工程师,从事桥梁结构设计和研究工作。

是以低频周期为主的波形。在实验输入时,对3条地震波进行了时间压缩和幅值调整。实验过程中共使用了5个加速度传感器和4个位移传感器,分别布置在台面、墩底、墩顶和梁上,测量相应位置的加速度和位移。实验模型和传感器布置见图1。

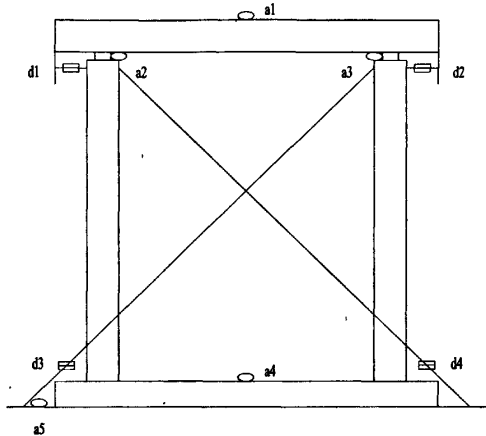


图1 实验模型和传感器布置图

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

将El-centro波、San Francisco波、天津宁河波的加速度峰值设定为0.1 g、0.2 g和0.3 g,作为振

动台台面加速度输入,测量模型钢梁相对于墩顶的位移、墩顶相对于台面的位移、各个加速度传感器测点的加速度响应。

由于振动台控制技术的局限性,对于同一条地震波,每一次实验的振动台台面输入不可能完全相同,为了对实验结果进行比较分析,将模型的反应按输入的加速度峰值进行标准化。假设模型处于线弹性状态,标准化反应可按下式计算:

标准化反应值 = $\frac{\text{台面标准加速度峰值}}{\text{墩底加速度峰值}} \times \text{实际反应值}$

标准化以后的实验结果如表5~表7所示,其中结构种类1~3分别表示内径为50 mm、25 mm和0(无孔)的分层橡胶支座模型,放大系数为梁顶加速度与基础加速度的比值,位移比为墩梁相对位移与梁顶位移的比值。

从实验结果看,虽然使用了不同的分层橡胶支座,但由于三种橡胶支座的剪切刚度变化不大,对实验结果的影响并不明显,因此,在下文的讨论中,取三种橡胶支座模型反应的平均值作为实验结果进行分析。

3.2 不同地震波下模型反应的比较分析

不同地震波下钢梁与墩顶之间的最大相对位移,见图2。从图2中可以看出,El-centro波和天津宁河波作用下,钢梁与墩顶之间的相对位移较

表5 EL-centro 波的模型反应

结构种类	基础加速度	钢梁加速度	放大系数	墩梁相对位移	墩顶位移	位移比
1	0.1 g	0.136 g	1.36	2.81 mm	1.47 mm	0.66
2	0.1 g	0.106 g	1.06	3.05 mm	1.32 mm	0.70
3	0.1 g	0.133 g	1.33	3.29 mm	1.13 mm	0.74
1	0.2 g	0.228 g	1.14	6.04 mm	2.64 mm	0.70
2	0.2 g	0.195 g	0.98	5.72 mm	2.29 mm	0.71
3	0.2 g	0.248 g	1.24	6.51 mm	2.20 mm	0.75
1	0.3 g	0.302 g	1.01	8.74 mm	3.20 mm	0.73
2	0.3 g	0.305 g	1.02	9.70 mm	3.27 mm	0.74
3	0.3 g	0.430 g	1.43	13.15 mm	4.39 mm	0.75

表6 San Francisco 波的模型反应

结构种类	基础加速度	钢梁加速度	放大系数	墩梁相对位移	墩顶位移	位移比
1	0.1 g	0.043 g	0.43	0.65 mm	0.36 mm	0.65
2	0.1 g	0.041g	0.41	0.82 mm	0.42 mm	0.66
3	0.1 g	0.045 g	0.45	0.73 mm	0.29 mm	0.71
1	0.2 g	0.083 g	0.42	1.31 mm	0.70 mm	0.65
2	0.2 g	0.077 g	0.38	1.68 mm	0.80 mm	0.68
3	0.2 g	0.082 g	0.41	1.51 mm	0.56 mm	0.73
1	0.3 g	0.110 g	0.37	2.07 mm	1.13 mm	0.65
2	0.3 g	0.103 g	0.34	2.62 mm	1.18 mm	0.69
3	0.3 g	0.126 g	0.42	2.74 mm	1.05 mm	0.72

表7 天津宁河波的模型反应

结构种类	基础加速度	钢梁加速度	放大系数	墩梁相对位移	墩顶位移	位移比
1	0.1 g	0.117 g	1.17	2.74 mm	1.37 mm	0.67
2	0.1 g	0.115 g	1.15	3.29 mm	1.47 mm	0.69
3	0.1 g	0.124 g	1.24	3.20 mm	1.06 mm	0.75
1	0.2 g	0.230 g	1.15	5.92 mm	2.30 mm	0.72
2	0.2 g	0.240 g	1.20	7.90 mm	2.90 mm	0.73
3	0.2 g	0.223 g	1.11	6.00 mm	1.94 mm	0.76
1	0.3 g	0.396 g	1.32	12.39 mm	4.58 mm	0.73
2	0.3 g	0.348 g	1.16	13.45 mm	4.04 mm	0.77
3	0.3 g	0.469 g	1.56	15.02 mm	5.28 mm	0.74

大,而且随着台面加速度的增大,相对位移还有进一步加大的趋势,而 San Francisco 波作用下钢梁与墩顶之间的相对位移较小。这主要是因为 El-centro 波和天津宁河波的长周期分量较多,分层橡胶支座对其反应比较强烈,而 San Francisco 波主要是高频分量,分层橡胶支座对其敏感性较弱。

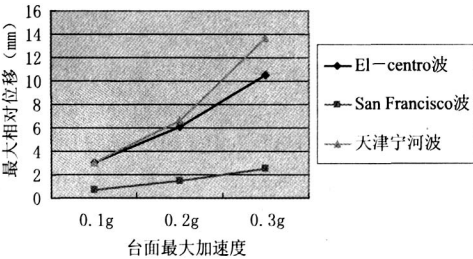


图2 钢梁与墩顶之间的最大相对位移

不同地震波下支座变形与钢梁位移的比值见图3。从图3中可以看出,El-centro 波和天津宁河波作用下,支座变形与钢梁位移的比值较大,而 San Francisco 波作用下,支座变形与钢梁位移的比值相对较小,说明长周期地震波作用下支座变形在结构反应中所占的比例较大,对于高频分量为为主的地震波,支座变形在结构反应中所占的比例较小。

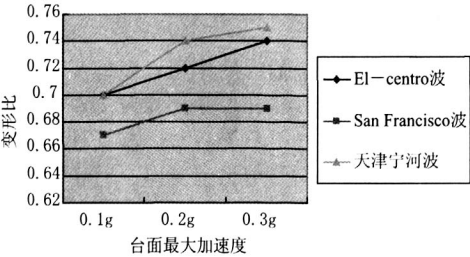


图3 支座变形与钢梁位移的比值

不同地震波下钢梁的最大加速度反应见图4。从图4中可以看出,El-centro 波和天津宁河波

作用下钢梁的加速度反应明显大于 San Francisco 波作用下钢梁的加速度反应,而且随着台面加速度的增大,这种差别更加明显。这是因为随着台面加速度的增大,支座的变形也相应加大,等效剪切刚度降低,模型的周期变长,在长周期地震波的作用下,模型的反应更加剧烈。

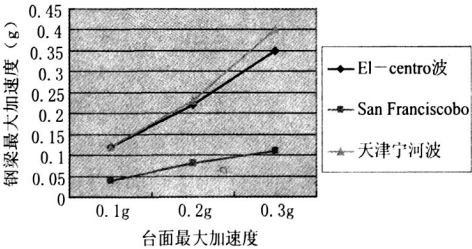


图4 钢梁的最大加速度反应

不同地震波下模型的加速度放大系数见图5。从图5中可以看出,El-centro 波和天津宁河波作用下模型的加速度放大系数均大于1,而 San Francisco 波作用下模型的加速度放大系数小于0.5,这表明由于分层橡胶支座的剪切刚度较小,对于高频地震波具有明显的隔震作用,而对于长周期地震波,分层橡胶支座的减震效果并不显著。

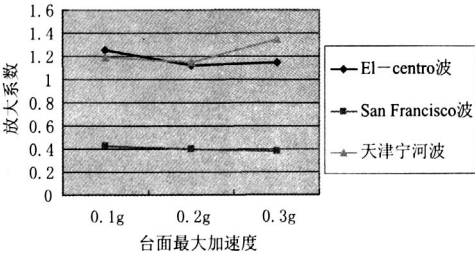


图5 模型的加速度放大系数

4 结论

(1)模型的地震反应随着输入地震波加速度的增大而增加,但对于不同的地震波增加的幅度

Push-over 分析在桥梁抗震性能评价上的研究现状

王 维

(西南交通大学, 四川成都 610031)

摘 要:目前在桥梁抗震性能评价中多倾向于采用非线性时程分析计算桥梁地震响应,但是存在着工作量大,计算复杂等问题。而在基于结构位移/性能的抗震思想下,采用塑性倒塌机构分析(即 push-over)方法来评价地震作用下桥梁的抗震性能具有广泛的应用前景。该文就目前 push-over 分析应用于桥梁抗震性能评价在国内外的研究现状做了归纳总结,并对此做出适当的评价和展望。

关键词: push-over 分析; 桥梁; 抗震性能

中图分类号: U442.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716 (2007)03-0094-03

0 引言

目前对于桥梁结构抗震性能评价主要采用的方法包括了弹性反应谱法、非线性时程分析法、塑性倒塌机构(推倒)分析(即 push-over)等。基于弹性假设的反应谱是一种拟动力分析方法,能反应地震动强度和平均频谱特性,但是难以反应结构开裂后进入非弹性阶段的特性。建立在计算机程序分析基础上的非线性时程分析法,是目前评价桥梁地震行为中相对而言最成熟、最完善的方法。但是该方法在现有桥梁抗震性能评价的应用中还是存在着一些问题。非线性时程分析方法的技术复杂,计算工作量大,结果处理繁杂,并且结果的准确性很大程度上都依赖于输入的地震波,然而在同一地区不可能发生完全相同的两次地震。所以时程分析所选用的地震波实际上不能真正反映该地区未来可能发生的地震作用情况,分析结果具有较大的偶然性。而塑性倒塌机构分析(push-over)则因其计算过程简单、实用,在桥梁抗震性能评价中具有广泛的应用前景。

1 push-over 分析的研究现状

收稿日期:2006-10-24

作者简介:王维(1982-),女,四川成都人,研究生,从事桥梁结构抗震研究。

不同。对于长周期分量较多的地震波,模型的地震反应增幅较大;对于以高频分量为主的地震波,模型的地震反应增幅较小。

(2)由于结构的地震反应与地震动的频谱特性有关,仅用地震动的峰值加速度评判桥梁的地震反应是不够的,必须考虑地震动的其它特征指标。

(3)分层橡胶支座对模型的地震反应有明显的影响。当地震波主频较高时,分层橡胶支座能够

塑性倒塌机构分析(push-over)的提出是在20世纪七八十年代,但是当时并没有得到重视和进一步的研究。建立在对目标位移或形成机构的思想上的 push-over 方法,体现的是基于结构位移/性能的抗震思想,因此随着90年代以后基于结构性能/位移的抗震设计的概念提出和广泛接受,使得该方法得到重视和发展。

由于 push-over 方法的简单实用,目前,国外工程界大多数都已将 push-over 方法作结构抗震性能评价的一种方法纳入各国的规范。例如:美国加州结构工程师协会的 SEAOC Vision 200(1996);应用技术委员会的 ATC-40(1997);联邦应急管理局(FEMA-274);建筑抗震安全委员会(BSSC)的 NEHRP(1998);欧洲模式规范(Eurocode-8);日本的 PRESS 钢筋混凝土建筑结构设计指南等。

Push-over 方法在引入我国后近年来也得到了广泛的重视,如:《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)中,就已经明确纳入 push-over 分析,即规范条文 3.6.2 中所提到的静力弹塑性分析。而在桥梁方面《交通部桥梁抗震规范》(征求意见稿)中也将 push-over 方法纳入其中。

Push-over 分析在大多数通用软件中可以实现,只要软件可以进行非线性分析,以及具有逐级加载功能。在部分软件中也专门设置了 push-over 分析功能,如:应用于平面结构分析的

起到隔绝地震能量输入的作用,模型反应明显降低;当地震波周期较长时,分层橡胶支座减小模型地震反应的效果并不显著。因此,根据地震动的频谱特性选择适当的分层橡胶支座,对于提高桥梁结构的抗震性能非常重要。

参考文献

[1]范立础.桥梁抗震[M].同济大学出版社,1997.

[2]范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].人民交通出版社,2001.