

文章编号: 1002-0268 (2001) 04-0051-04

隔震桥梁动力特性分析

曾 攀¹, 闫贵平²

(1. 广州市中心区交通项目领导小组办公室, 广东 广州 510030; 2. 北方交通大学, 北京 100044)

摘要: 考虑铅芯橡胶支座和桥梁结构的非线性特性, 把支座和桥梁当作一个整体考虑, 建立连续梁桥隔震体系全桥模型。通过大量的时程分析, 对隔震桥梁的动力特性进行了系统的研究。

关键词: 铅芯橡胶支座; 地震响应; 连续梁桥

中图分类号: U442.55

文献标识码: A

Research on Dynamic Characteristics of Isolated Bridges

ZENG Pan¹, YAN Gui-ping²

(1. Guangzhou City Center Transport Project Office, Guangdong Guangzhou 510030, China;

2. Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, the dynamic characteristic of continuous bridges equipped with isolation bearings are investigated by nonlinear time-history analysis. The property of seismic excitation and the structural parameters of bridge are changed. The nonlinear properties and mutual effect of lead-rubber bearing and bridge structure are also considered.

Key words: Lead-rubber bearing; Seismic response; Continuous bridge

0 前言

在我国桥梁工程中广泛应用的橡胶支座有板式橡胶支座、叠层橡胶支座、盆式橡胶支座和聚四氟乙烯滑板组合支座等。铅芯橡胶支座是一种在国外桥梁中常采用的减隔震装置, 它是由普通叠层橡胶支座插入铅芯形成。由于铅芯能同时耗散地震能量和增加静荷载下的刚度, 满足隔震体系的大部分要求, 因此在国外隔震桥梁中经常采用。板式-滑移橡胶支座在国外桥梁中采用也较多。为了在我国桥梁工程中更好地应用新型隔震支座, 有必要对各种减(隔)震支座和普通橡胶支座的性能进行比较研究。

为了使铅芯橡胶支座达到最好的减震效果并为桥梁延性抗震设计提供参考, 有必要对铅芯橡胶支座的耗能特性、等效线性化分析方法、考虑减隔震装置后桥梁的延性抗震设计问题等进行深入研究。本文建立了隔震连续梁桥体系全桥模型, 将支座和桥梁作为一

个整体考虑, 通过改变支座参数、桥梁结构参数等, 进行了大量的时程分析, 对上述问题进行了系统的研究。

1 分析模型、算例和结构振动方程

1.1 桥墩和支座的动力分析模型

当考虑桥墩的非线性时, 一般认为在强震作用下, 桥墩很快达到受拉区混凝土开裂的工作阶段, 本文在计算中即取桥墩截面开裂后的刚度进行分析。假定桥墩的塑性铰发生在桥墩底部, 用非线性梁单元来模拟桥墩的非线性特性。桥墩的恢复力模型选用了双线性恢复力模型。

铅芯橡胶支座的力-位移滞回曲线非常复杂, 精确的分析必须采用非线性分析, 计算量相当大。本文用双线性模型代替铅芯橡胶支座的滞回模型, 双线性模型的参数有屈服强度、初始剪切刚度和屈服后剪切刚度等3个参数。对叠层橡胶支座, 假设其剪切刚度

为定值，参数的取值来自试验数据。对于板式橡胶支座和板式-滑板橡胶支座，采用自由度的耦合和释放来处理。

1.2 算例

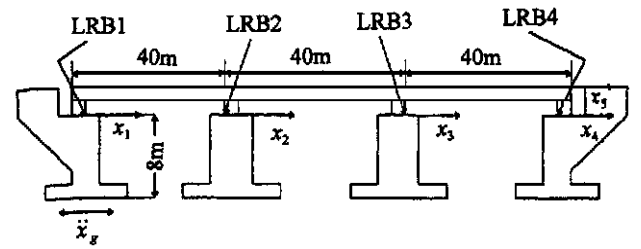


图 1 隔震桥梁算例的平面图

图 1 为隔震桥梁算例的平面图^[1]。梁体的延米重量为 11.5t，桥墩 1 和桥墩 4 的延米重量为 9.6t，抗推刚度为 215 906kN/m，桥墩 2 和桥墩 3 的延米重量为 4.8t，抗推刚度为 107 953kN/m。

选取了两种铅芯橡胶支座，第一种布置在桥墩 1 和桥墩 4 之间，第二种布置在桥墩 2 和桥墩 3 之间。

铅芯橡胶支座的力学参数值 表 1

类型	初始刚度 N/cm	屈服后刚度 N/cm	屈服强度 N	竖向刚度 kN/cm
1	160000	24000	200000	16000
2	190000	29000	240000	18000

1.3 结构振动方程

$[M][\ddot{x}] + [C][\dot{x}] + [K][x] = -[M][I]\ddot{x}_g$

式中，[M] 为质量矩阵；[K] 为刚度矩阵；[C] 为阻尼矩阵，在本文的计算中，采用瑞利阻尼

$[C] = a[M] + b[K]$

2 地震波的选取和调整

本文所采用的相应设计烈度的地震作用，由地震记录乘以相应的系数得到。如果台站烈度为 7，其相应的地震最大加速度为 a_x ，若要计算烈度为 8 度时的地震响应，则与之对应的最大加速度为 $2.0a_x$ ，与 9 度对应的最大加速度为 $4.0a_x$ ，依此类推。地震波一般沿桥的纵向输入。选取的地震波为 El-Centro 波。

3 计算结果分析

3.1 不同橡胶支承体系比较

考虑了以下几种橡胶支承体系：（1）板式橡胶支承体系，在梁体和桥墩间用铰接模拟；（2）叠层橡胶支承体系，用线性弹簧模拟，刚度参数参考国外试验结果；（3）铅芯橡胶支座体系，用水平非线性弹簧模拟^[2]，参数见表 1；（4）板式-滑移橡胶支座体系，在

桥墩 1 上用铰接模拟板式支座，在其余的桥墩墩顶上用自由度释放的方式模拟滑移支座。输入 8 度 El-Centro 波，进行动力时程分析，表 2 列出了不同支承体系算例的计算结果。

不同支承体系峰值响应 表 2

支承体系	板式支座	叠层支座	铅芯支座	板式-滑移支座
梁体位移	1.02	8.51	9.31	2.13
桥墩 1 墩顶位移	1.02	0.39	3.83	2.13
桥墩 2 墩顶位移	1.02	0.69	4.57	1.05
桥墩 1 墩底弯矩	0.26E5	0.71E4	0.69E4	0.95E5
桥墩 2 墩底弯矩	0.14E5	0.62E4	0.41E4	0.13E7

注：表中单位位移为 cm，弯矩为 kN·m。

从表 2 可以看出，采用铅芯橡胶支座体系桥墩 1 和桥墩 3 的墩底弯矩相对于板式支座体系的减小幅度分别达到 73.46% 和 70.71%；和叠层橡胶支座体系相比，梁体和两个桥墩的相对位移分别为叠层橡胶支座体系相对位移的 67.49% 和 60.61%，且内力的分配比较合理；采用板式-滑移橡胶支座降低了桥墩 2 的墩底弯矩，但桥墩 1 分担的内力过大。可见，铅芯橡胶支座体系相对于其他的支座体系，既能有效减小作用于桥墩的内力，又可以有效控制梁体和桥墩墩顶的相对位移和合理分配地震力。

3.2 铅芯橡胶支座的耗能特性分析

表 3 列出了加铅芯橡胶支座前后算例结构的基频和隔震度。定义隔震度为隔震桥梁的自振周期和非隔震桥梁的自振周期的比值。

加隔震支座前后结构的基频和隔震度 表 3

工况	基频 (Hz)	周期 (s)	隔震度
未使用隔震支座	1.4806	0.67	1.8
使用隔震支座	0.81415	1.23	1.8

从表 3 可以看出，采用铅芯橡胶支座后结构周期得到延长。图 2 为加铅芯橡胶支座前后桥墩 1 墩底弯矩的时程响应（输入 8 度 El-Centro 波），可以看出，加入隔震支座后，明显降低了桥墩中的地震力，从而可显著降低对桥墩延性的需求。图 3 为加隔震支座前后梁体的加速度响应时程，加隔震支座后加速度的折减系数达到了 0.6。图 4 为在 8 度和 9 度 El-Centro 波作用下桥墩 2 的墩底弯矩的时程响应，可以看出，从桥墩的内力响应来看，随烈度水平的增加，桥墩内力峰值的增加并不与地震烈度水平增加成比例增加，而是要小一些（增加倍数仅为 1.51），即隔震效果增加。这表明隔震桥梁在高烈度水平地震作用下得到了更好的保护作用。总之，铅芯橡胶支座通过延长结构的周期，从而避开地震能量集中的范围，降低了结构的地震力，且在高烈度地震作用下有更好的保护作用。

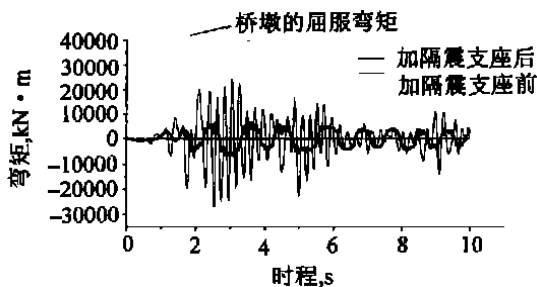


图2 加铅芯橡胶支座前后中墩的墩底弯矩的时程响应

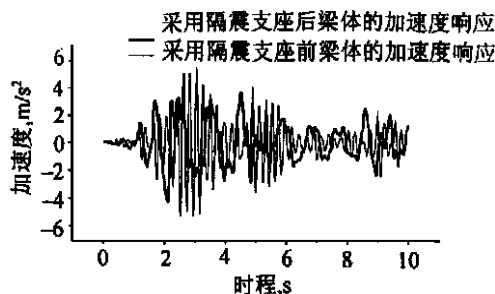


图3 加铅芯橡胶支座前后梁体的加速度时程响应

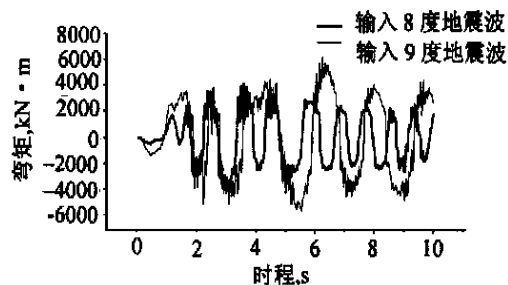


图4 在8度和9度地震波作用下中墩墩底弯矩

3.3 采用铅芯橡胶支座等效线性化模型的精度分析
在隔震桥梁的初步设计阶段，为了简化分析过程，常采用等效线性化方法进行分析，在该方法中，铅芯橡胶支座等隔震支座所用模型为等效线性化模型。国内目前的相关研究多将梁体简化为刚体，采用单自由度分析模型来研究这种方法的精度问题，本文根据实际的算例模型，对此进行了探讨。

在本文中取铅芯橡胶支座的等效刚度 $k_{\text{eff}} = \frac{f_{\text{max}}}{u}$ ；

等效阻尼比 $\xi_{\text{eff}} = \frac{\Delta E_B}{2\pi k_{\text{eff}} u^2}$ 。 u 为最大强度 f_{max} 对应的位移， ΔE_B 为双线性滞回环的面积。

两种模型峰值响应 表4

计算结果	双线性模型	等效线性化模型
梁体位移	9.31	10.51
梁体加速度	4.28	3.65

注：表中单位位移为 cm，加速度为 m/s^2 。

从表4的计算结果来看，采用等效线性化模型考虑隔震支座有一定的精度，因此，在隔震桥梁初步设计阶段可以采用这种方法。

3.4 考虑减隔震装置后的延性抗震设计问题

目前所采用的减隔震装置在开发研制的过程中，基本上是以桥梁结构的线性地震响应降低的程度作为指标来优化其阻尼、刚度等设计参数。考虑到减隔装置一般是在高烈度地震区的桥梁上采用，即使经过减、隔震设计，结构也可能会产生不同程度的延性变形，这就存在如何对采用减、隔震装置的桥梁进行合理延性抗震设计问题^[3]。

由于上部结构隔离后，桥墩的响应趋向于成为一个下部固结上部约束的独立结构，为了分析问题的方便性，本文从前述的算例模型中抽取出单墩模型，通过改变桥墩的高度改变其刚度，从而改变结构的自振周期。定义 k 为桥墩墩底弯矩和屈服弯矩（桥墩1和桥墩2的屈服弯矩分别为 $4\text{E}7\text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $2\text{E}7\text{kN}\cdot\text{m}$ ）的比值，图5为输入9度 El-Centro 波，对应于各桥墩高度，在加隔震支座前后 k 值的变化曲线。

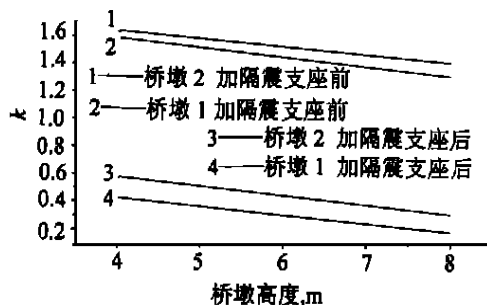


图5 k 随桥墩高度的变化曲线

从图5中可以看出，在9度 El-Centro 波作用下，对应于结构的各种自振周期，非隔震桥均已进入塑性，而隔震桥对于9度 El-Centro 波还处于弹性，可见隔震设计提高了结构抗震性能的要求。从图5还可以看出桥墩在弹性范围工作时，铅芯橡胶支座的减震效果（定义为隔震前后内力的减小幅度）随桥墩高度的增加即桥梁的自振频率的降低而减弱。

考虑了桥墩的非线性后，由于本文的算例结构隔震度较大，在地震作用下非弹性变形主要集中在铅芯橡胶支座上，桥墩并没有发生屈服。当隔震度较小时，桥墩屈服可能会先于隔震装置屈服。考虑到地震作用的随机性和铅芯橡胶支座等隔震装置质量的不确定因素，作者建议：（1）对于可能发生的地震达到特性如频率、地面加速度或持续时间等要予以足够重视；（2）设置某些结构，通过其破坏来防止整体的灾难性破坏；（3）在设计阶段适当考虑结构的非线性响

应特性，当考虑桥墩的非线性时，根据动力时程分析方法或简化分析方法得到桥墩在对应水准地震作用下的最大变形和延性比等，进而根据相应的损伤判别公式计算其损伤程度（反映桥墩的非弹性变形），校核是否满足预期的性能指标^[4]。

3.5 多向地震激励的影响

目前，研究人员对桥梁进行时程分析时，常常忽略竖向地震激励的影响，对此作者认为对于使用隔震装置桥梁的桥梁来说，对上部结构起作用的荷载除了竖向静载外，就仅有竖向地震动的作用，而隔震装置并不具备对竖向振动的隔震性能，因此需要考虑竖向地震动的作用。对于竖向地震激励，加速度仪记录到的垂直向加速度一般比相应的水平向加速度低，在本研究中假定竖向加速度与水平向加速度的比值为 2/3。

多向输入地震激励时梁体的加速度响应峰值 表 5		
工况	纵向	纵向和垂向
梁体加速度响应峰值	3.901	4.112
梁体加速度响应平均值	0.809	0.848

注：加速度单位 m/s^2 。

对墩高为 8m 的连续梁桥算例（考虑桥墩的非线性），在纵向输入、纵向和竖向输入地震激励进行地震响应分析，梁体的加速度时程峰值和平均值见表 5。从表 5 可以看出，对于铅芯橡胶隔震支座，同时经历水平方向、竖向地震激励，桥梁的水平向加速度响应较仅受水平向激励的加速度响应相比，要略大一些，但增大值很小。这是由于铅芯橡胶支座具有很大的竖向刚度，竖向地震激励对桥梁的纵向地震响应的贡献不大。计算结果表明在使用了铅芯橡胶支座的连续梁桥纵向水平地震响应分析中可以仅考虑纵向地震激励的作用，忽略竖向地震激励的作用。

4 结论

本文对使用了铅芯橡胶支座的连续梁桥进行了地震响应分析。得出的结论主要有：

（1）本文在进行连续梁桥地震响应分析时，将支座和桥梁结构作为一个整体考虑，并考虑了桥墩和支座的非线性特性，进行时程分析，这种方法较以往的响应谱等方法有明显的优点。

（2）加入了隔震支座后，通过延长结构的周期，避开地震能量的集中范围，明显降低了桥墩中的地震力，从而可显著降低对桥墩延性的需求。

（3）铅芯橡胶支座隔震桥梁在高烈度水平地震作用下得到了更好的保护作用。

（4）采用等效线性化模型考虑隔震支座有一定的精度，因此，在隔震桥梁初步设计阶段可以采用这种方法。

（5）在设计隔震桥梁时，应考虑以隔震装置抗震为主，将非弹性变形和耗能主要集中在这些装置上，选取较大的隔震度，避免桥墩屈服先于隔震装置屈服。

（6）在使用了铅芯橡胶支座的连续梁桥纵向水平地震响应分析中可以仅忽略竖向地震激励的作用。

参考文献：

[1] System identification of a bridge with lead-rubber bearings. Computers & Structures, 2000.

[2] 李建中，袁万城，范立础. 桥梁减震优化设计. 计算结构力学及其应用, 1995 (增).

[3] 闫贵平，钟铁毅等. 铁路桥梁二阶段抗震设计参数研究. 铁道部科技司项目 (98G32), 2000.

[4] 王志强. 隔震桥梁分析方法及设计理论研究. 同济大学博士论文, 2000.