

文章编号: 1006- 2106(2000) 04- 0054- 05

简支梁桥减(隔)震性能分析

张 骏* 阎贵平

(北方交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

提 要: 本文采用有限元程序分析了减(隔)震铁路简支梁桥的地震反应特点。隔震支座采用铅芯橡胶支座(LRB),分析中分别采用三线性、双线性考虑了桥墩、支座的非线性特性。分析结果表明,与线性理论相反,采用减(隔)震支座并不一定显著增大结构的位移反应;此外,桥梁结构的内力和延性需求都大为降低,改善了桥梁结构的受力情况。

主题词: 简支梁桥; 铅芯橡胶支座; Wilson- θ 法; 延性

中图分类号: U445 **文献标识码:** A

1 前 言

现今对于桥梁结构抗震研究的主要方向,已从单纯加大构件的刚度、强度的抗震设计思想变为利用外加设备来隔离或消散地震能量,以减少进入结构体系的地震能,同时也降低了为了耗能而必须利用主体结构材料的非线性行为的要求。因此,新的抗震设计观念正从要求“大震不倒”,进而要求当结构装设保护系统后,在中等地震时,结构只受到较轻的损伤,在强震作用下,所受到的损伤可修,需要置换或维修的主要是结构的保护装置。

对隔震系统而言,即是由隔震器的侧向刚度较低的特性来降低传入结构的地震力。一般而言,隔震的形式可以分为橡胶式、滑动式和混合式。其主要作用是通过隔震系统,延长结构的自振周期,减少传入结构系统的地震力。隔震装置基本上必须具有较低的水平刚度,以改变结构的振动周期来降低地震反应,并配合使用阻尼器提高系统耗能效率,以控制结构位移在容许的范围以内^[1]。

隔震系统虽能有效地隔绝地震能量的输入,但需考虑结构使用性位移的限制,因此设计隔震结构时,必须考虑隔震后所增加的相对位移是否会造成结构系统在使用上及功能上的不便。因而,一般认为,采用减(隔)震,通过延长结构的振动周期,动力荷载会降低,

然而位移会因周期的偏移而显著增大。这种观点对线性体系是正确的,在强震作用下隔震结构也会进入非线性状态,因而位移增大并不一定总是发生。通过正确地设计隔震支座,在减小动力荷载的同时,位移可以保持相对较小值。本文对铁路三跨简支梁桥的地震反应进行了研究。

2 隔震特性

叠层橡胶支座是由多层橡胶和钢板交替给合所构成的,由于薄钢板对橡胶的横向变形产生约束,使得支座承载时具有高铅直刚度的特性,但在水平方向,薄钢板不影响橡胶的柔韧性,具有低的水平刚度,以延长结构周期减少结构动力反应。叠层橡胶支座的行为在数值模拟中通常用线性模式模拟叠层橡胶支座的力学性能。铅芯橡胶支座(见图1)是目前最普通的一种隔震系统。新西兰、美国和日本桥梁隔震多采用铅芯支座^{[2][3]},它是由橡胶支座填充铅芯而构成。其橡胶部分提供较低的侧向刚度,以延长结构周期降低地震力;铅的剪切屈服应力较小(约为10 MPa),在塑性变形条件下具有较好的疲劳特性,被认为是一种较好的阻尼器,铅芯屈服后可产生滞变耗能作用以降低隔震结构的位移。铅芯橡胶支座在滞变加载实验中的滞回曲线近似呈现为双线性的行为,故在数值模拟中采用双线性模式模拟铅芯橡胶支座的行为。

* 收稿日期: 2000- 10- 12 张 骏 硕士 男 1973年出生

3 桥梁结构数值模拟及减(隔)震支座的讨论

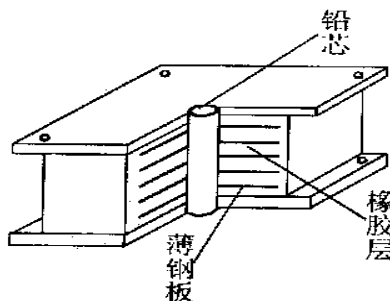


图 1 铅芯橡胶支座

为研究减(隔)震桥梁在地震荷载作用下的非线性地震反应,编制了非线性分析程序。本程序在每一时间段采用切线刚度阵对结构进行逐步分析。该程序主要流程如下:(见图 2)

3.1 桥梁模型



图 3 三跨简支梁桥简图

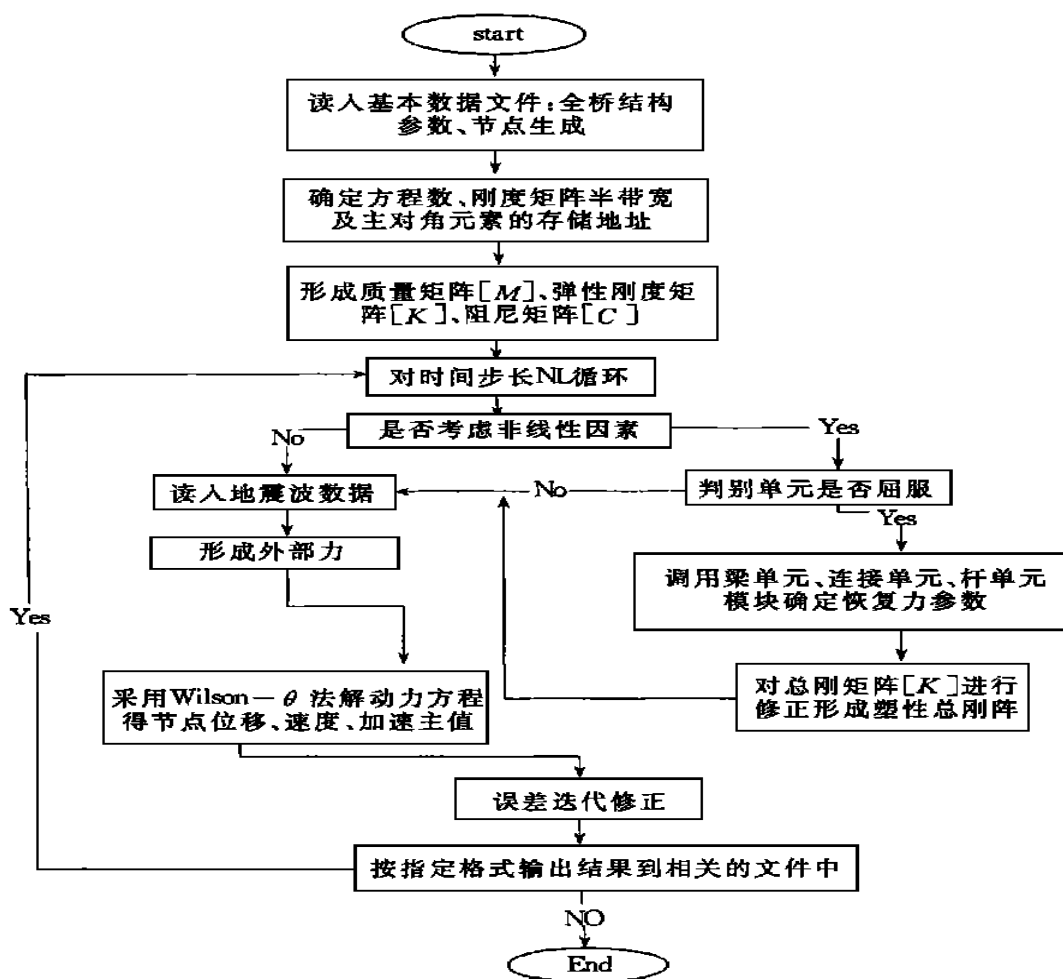


图 2 有限元分析程序流程图

表 1 桥梁截面、材料性质

	上部结构	桥墩
截面面积 (m^2)	7.8146	5.0
杨氏模量 E (N/m^2)	$2.5E10$	$2.5E10$
惯性矩 (m^4)	72.07/7.14	1.892/0.1704
材料密度 (t/m^3)	2.5	2.5

梁桥^[4],每跨长度为 32 m,桥墩高度为 10 m,桥墩截面尺寸为 5.0×1.0 m,混凝土为 C30,钢筋采用 T20MnSi 桥梁结构的模型简图见图 3,结构参数、材料性质见表 1

(1)上部结构(主梁)采用空间梁单元模拟:

(2)桥墩的非线性采用 Takeda 三线性空间梁单

元模拟:

本文数值分析中采用的桥梁模型为铁路三跨简支

(3) 由于结构为非线性, 因此其刚度矩阵随时间变化, 对非线性结构动力反应分析, 最有效的方法是逐步积分法, 在时间 t 至 $t + \Delta t$ 的时间间隔内, N 个自由度体系结构的运动增量方程为:

$$[M]\{\Delta \ddot{Y}\} + [C]\{\Delta \dot{Y}\} + [K]\{\Delta Y\} = \{\Delta P\} \quad (1)$$

式中 $\{\Delta \ddot{Y}\}$, $\{\Delta \dot{Y}\}$, $\{\Delta Y\}$ 分别是 t 至 $t + \Delta t$ 时间间隔内结构的加速度、速度和位移增量; $[K]$ 为 t 时刻的剪切刚度阵, $\{\Delta P\}$ 为 t 至 $t + \Delta t$ 时间间隔内结构所受的荷载增量。本文采用 Wilson- θ 法求解动力微分方程, 当 $\theta > 1.37$ 时, 具有无条件稳定和较好的精度, 分析模型仅考虑了直线桥。

(4) 柱基: 本文为简化计算, 所有桥墩基础均采用固结, 未考虑土-结构相互作用;

(5) 桥台假定为刚性很大

3.2 铅芯橡胶支座的模拟

本文在进行动力分析时, 依据铅芯橡胶支座屈服、卸载状况而改变其侧向刚度, 如图 4 所示。当铅芯橡胶支座屈服后, 式中的 k_1 (k) 变为 k_2 (ak), 而卸载时由 k_2 变换为 k_1 , 在分析过程中, 假设压力屈服点和拉力屈服点之间的距离为定值, 且 $k_1 = 10k_2$ [17] 此外, 在本文中将铅芯支座假设为剪切构件, 在侧向具有刚度, 其刚度矩阵元素如下:

$$\begin{bmatrix} k_v & & & & & \\ 0 & k_1 & & & & \\ 0 & 0 & k_1 & & & \\ -k_v & 0 & 0 & k_v & & \\ 0 & k_1 & 0 & 0 & k_1 & \\ 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 & k_1 \end{bmatrix}$$

对 称

其中, k_v 为支座的竖向刚度

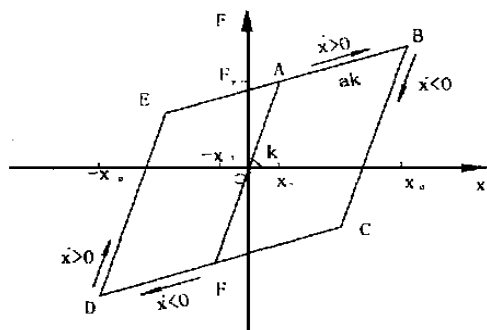


图 4 双线性模型的力与位移关系

采用双线性滞变单元模拟隔震支座模型, 如图 5 未考虑支座竖向变形的影响。隔震支座在每一方向的非线性采用相同的水平弹簧单元表示。[8][9] 虽然在某些情况下, 双轴动力反应耦合是明显的。然而, 对隔震支座双轴动力反应, 由 Saidi 等 [10] 根据 SDOF 模型

分析表明, 在两种情况下, 反应的幅值和频率成分非常接近; 在双向输入地震波情况下, 位移幅值就峰值和频率而言也类似。因此, 为简化处理, 分析中未考虑耦合效应。

隔震支座屈服力取为 $0.05W$ (W 为上部结构的重量), [11] 假定上部结构所有支座采用相同的隔震支座。地震动输入为南北分量 1941 El-Centro 记录, 将其地面加速度峰值为 $0.351g$ 调整到 10 度地震。

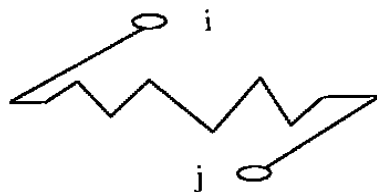


图 5 支座单元

3.3 关于屈服的定义:

桥墩的屈服力是进行延性抗震设计的基本参数, 其定义方式的不同, 将导致整个结构设计参数定义与量值的变化。比较常用的有以下几种: (1) 截面最外侧钢筋屈服时; (2) 受拉区一定比例的钢筋屈服时; (3) 最外侧受压混凝土屈服时; (4) 受压区一定比例的混凝土屈服时; (5) 桥墩的力-位移曲线中出现明显转折时。其中 (1) 和 (2) 是根据钢筋的应力-应变特性来定义的, 由于钢筋的屈服应力的随机性较小, 且在截面上分布比较简单, 理论计算所得到的屈服值最接近于试验结果, 同时考虑到 (2) 的定义具有较大的主观因素, 因此在分析中采用 (1) 的定义方法来确定。对梁单元而言, 计算所有单元的杆端弯矩, 确定塑性铰是否形成, 塑性铰仅在一个方向可自由转动, 而在另一个方向截面仍可保持弹性行为。桥墩的滞回曲线见图 6, 本文中延性系数采用转角延性比。

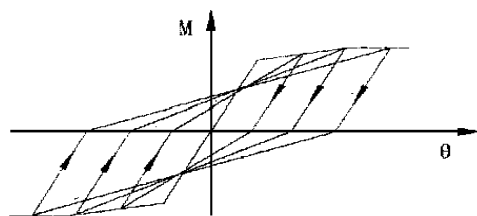


图 6 桥墩滞回曲线

3.4 结果分析

从图 7 可见, 线性与非线性差别非常明显, 线性响应的位移时程曲线仍在中性轴的附近波动, 而非线性响应的时程曲线却不在中性轴附近波动, 而是发生了一定的漂移, 并且非线性响应要比线性响应大得多。

产生这种现象的原因在于, 线性响应计算采用的

是结构的线弹性刚度矩阵,没有考虑结构屈服后的刚度降低;结构的非线性响应计算则采用了弹塑性刚度矩阵,考虑了结构屈服后的刚度降低。在地震激励作用下,结构刚度开始发生屈服时,结构刚度降低还不是太明显,所得非线性、非线性与线性响应的结果相差不大;但是结构发生比较大的屈服时,结构的刚度降低很大,所得结构的非线性位移响应明显大于线性响应,同时结构的平衡位置也将发生改变,曲线将不在中性轴附近波动。图 7同时表明了隔震桥梁墩顶的位移时程,可以看出,隔震明显改变了桥梁的动力特征。与传统的延性抗震相比,采用隔震支座后,桥梁仍基本上可以保持在弹性范围内,降低了桥墩对延性的需求。由结果可得出,隔震在纵向减少墩顶峰值位移达到 57%。采用弹塑性耗能量,桥墩的最大延性系数要求为 4.3,而采用减(隔)震支座则可以保持低的延性需求,从而减小了结构本身的破坏。从图 8可见,采用减(隔)震支座后,墩顶的加速度响应亦大为降低。同时,对上部结构而言,从图 9可以看出,采用隔震支座并不一定显著增大梁体的位移,与弹塑性抗震相比较,隔震的梁体位移亦能保持在比较理想的范围内。

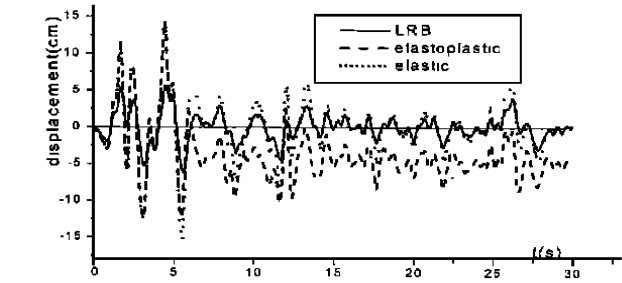


图 7 墩顶位移反应时程曲线

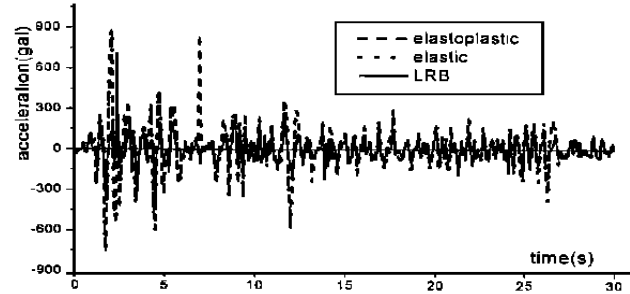


图 8 墩顶加速度反应时程曲线

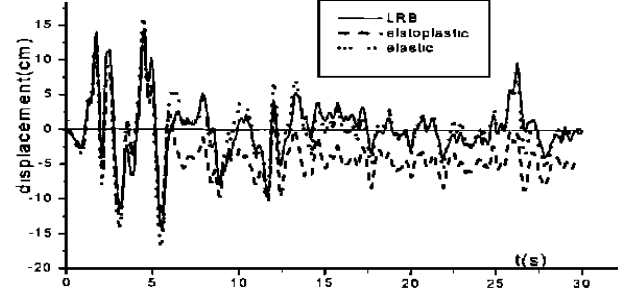


图 9 梁体位移反应时程曲线

散来源,图 10表明了墩顶隔震支座在顺桥方向的滞回曲线。可见,支座发生了显著的屈服,耗散了大量的能量。上述结果表明,隔震显著地减少了桥墩的屈服程度,支座的耗能能力在地震中发挥了显著的作用。

表 2 El-Centro波输入下桥梁结构的峰值反应

反应值	弹塑性	减(隔)震
桥墩底剪力 (kgf)	3.333E+ 03	2.12E+ 03
墩底弯矩 (kgf·cm)	1.75E+ 08	7.96E+ 07
墩顶位移 (cm)	14.74	6.3
中跨梁体位移 (cm)	16.93	15.2
边跨梁体位移 (cm)	22.1	24.07
桥台剪力 (kgf)	1.44E+ 06	1.35E+ 05

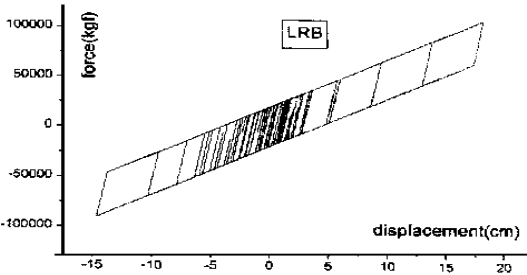


图 10 墩顶支座力位移曲线

从表 2可见,采用减(隔)震同时也降低了桥墩的内力。桥墩的地震力有两部分,一部分是梁体传来的地震力,另外的是桥墩本身所受的地震力,两者可能是和或差的关系,而在 LRB的作用下,桥墩和梁体之间发生了动力相互作用,削弱了地震作用。

4 结论

本文研究了隔震支座对铁路三跨简支梁桥抗震性能的影响,包括位移和内力的影响。结果表明,在强震作用下要求弹性地抵抗地震荷载既不经济也不切实际,而采用弹塑性耗能虽可以改善结构的受力状况,但是结构(桥墩)经历了较大的非线性变形,也给震后的修复工程造成了困难,与之相比,采用隔震支座可以减少峰值位移达到 57%,地震隔震同时也降低了桥墩的延性需求,由 4.3降低至基本保持在弹性范围内,改善了结构的受力状况。当然,本文的结果只是针对 El-Centro波得出的,因此还需要进一步分析结构在不同地震波下的响应特点以及隔震支座参数的非线性优化。

参考文献

[1] 范立础,桥梁抗震[M].同济大学出版社。
[2] Billings I J, Kirkcaldie D K. Base isolation of bridges in New Zealand[C]. Proceedings US - NZ Workshop on Seismic Resistance of Highway Bridges. 1985.
[3] Mayes R L. Current applications of seismic base isolation

- in U. S. bridges [C]. Proceedings US- NZ Workshop on Seismic Resistance of Highway Bridges. 1985.
- [4] “九五”国家重点科技攻关计划专题.高速铁路线桥结构与技术条件(标准)的研究报告之十二:高速铁路中小跨度桥梁桥式合理布置和合理结构的研究[R].北方交通大学土建学院.
- [5] Takeda T Nielson N N, Sosen MA. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake [C]. Proc. of ASCE, Dec. 1970, 96(st 12): 2557- 2573.
- [6] Robinson W H. Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquake [J]. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1982, (10): 593- 604.
- [7] 李建中, 辛学中. 连续梁桥减震、隔震体系非线性地震反应分析 [J]. 地震工程与工程振动, 1998, (3).
- [8] Hwang J S, Lin Y C. Quasi-static and dynamic hysteresis of lead-rubber seismic isolation bearings [J]. J. Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering, 1998, 10 (3): 515- 524.
- [9] Saidi M, Maragakis E, Griffin G. Effect of base isolation on the seismic response of multi-column bridges [J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(4): 411- 419.
- [10] Turkington D H, Carr A J. Seismic design of bridges on lead-rubber bearing [J]. J. ASCE, 1989, 115(12): 3000- 3016.
- [7] 李建中, 辛学中. 连续梁桥减震、隔震体系非线性地震反

STUDY ON BASE ISOLATION ON THE SEISMIC RESPONSE OF SIMPLY-SUPPORTED BEAM BRIDGE

ZHANG Jun, YAN Gui-ping

Dept. of Civil Eng, Northern Jiaotong University

Abstract In this paper, a nonlinear model for time-step analysis of simply-supported beam bridges subjected to earthquake motions was developed. The focus of the study was on elastomeric isolations with lead cores. The hysteretic behavior of isolators and the column was taken into account by trilinear and bilinear model respectively. The nonlinear analysis showed that, contrary to linear theory prediction, the use of isolators does not necessarily increase the displacement of the superstructure. Furthermore, it was showed that properly designed isolators could reduce both the ductility demand and internal force in RC bridge columns substantially.

Keywords simply-supported beam bridge; lead-rubber bearing; Wilson θ method; ductility

“全路工程质量现场会”召开

2000年 10月 19日至 21日全路工程质量现场会在秦沈线召开。

据铁道部建设管理司有关人士介绍,此次工程质量现场会,是继 1998年南昆线工程质量现场会之后又一次全路性工程质量现场会。两年多来,全路建设战线广大干部职工坚持科技引路,把好质量源头,组织创优活动,强化检查监督,使铁路总体工程质量始终处于可控和上升状态。

现场会期间,秦沈线改良土路基、时速 300 km路基试验段、桥涵路基过渡段和基床表层填筑以及软基处理试验段、重型箱梁运架、级配碎石搅拌站等众多观摩点,使与会代表们大开眼界。设计时速 160 km以上的秦沈客运专线作为中国铁路现代化标志性工程,自 1999年 8月 16日开工以来,各参建单以高标准、高起点,科技领先,管理出新,积极探索控制工程质量的新方法,取得了令人瞩目的优异成绩,为全路工程质量工作树立了样板,积累了经验。

现场会上,秦沈客运专线建设总指挥部以及中铁二局集团、中铁十一局、中铁大桥局、铁三院秦沈指挥部和铁科院秦沈监理站等单位交流了经验。

铁道部总工程师王麟书和有关司局、中心领导,工程、建筑总公司负责人,各工程局局长、安质处长,各设计院院长、总工程师,各铁路局(集团公司)主管副局长、基建处长出席了会议。部工程管理中心所属内昆线、西安南京线、神延线总指挥部指挥长列席了会议。

(刘红涛 刘鑫)