

文章编号: 0451-0712(2004)11-0041-06

中图分类号: U441.3

文献标识码: A

# 桥梁板式橡胶支座与粘滞阻尼器组合使用的减震性能研究

蒋建军, 李建中, 范立础

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室 上海市 200092)

**摘 要:** 在分析几种减隔震装置的减震耗能机理的基础上,提出了粘滞阻尼器与板式橡胶支座组合使用的减震措施,并利用非线性时程地震反应分析方法,对这种组合装置的减震性能进行了研究。为了研究阻尼系数、阻尼指数和周期对减隔震桥梁地震反应的影响,本文做了大量的参数分析。研究结果表明,组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器,既能显著地减小结构地震力,又能有效地控制梁体位移及墩、梁相对位移。

**关键词:** 桥梁; 板式橡胶支座; 粘滞阻尼器; 减震性能

近年来,减隔震技术在建筑、桥梁结构上得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。减隔震的基本原理有3条:一是利用减隔震装置的柔性来延长周期,减小结构地震反应;二是利用阻尼器或耗能装置,来控制由于周期延长而导致的过大的墩、梁相对位移;三是必须能够支撑整个结构,保证结构在正常使用荷载作用下具有足够的刚度。目前应用到桥梁上的减隔震装置主要有:板式橡胶支座、滑动摩擦支座、铅芯橡胶支座、摩擦摇摆系统和各种阻尼器。大量试验表明:板式橡胶支座的力—位移滞回曲线是狭长的,可以近似作线性处

理,几乎没有耗能作用。如果在桥梁上单独使用板式橡胶支座,虽然能够延长结构周期,但是会带来很大的梁体位移及墩、梁相对位移。大量试验表明:粘滞阻尼器的力—位移滞回曲线非常饱满,耗能限位能力很强。在隔震桥梁上使用粘滞阻尼器,能在不增加结构地震力的情况下,有效地控制结构的位移反应,是一种合理有效的减隔震技术。

虽然粘滞阻尼器价格昂贵,但由于其显著的耗能限位能力,最近作为桥梁抗震保护装置的例子有很多,如:美国加州南部Vincent Thomas悬索桥,加

收稿日期: 2004-06-01

## Testing Study of Load-Transfer Behavior of Friction Piles in Soft Rock Area of Guizhou Province

GONG Cheng-zhong<sup>1,2</sup>, HE Chun-lin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;  
2. Huiyin Institute of Technology, Hui'an 223001, China)

**Abstract:** The cast-in-place pile is a commonly used style of foundation, however the theoretic research, experimental study and test research are far behind the application of engineering. On the basis of the results of static load tests and stress tests for two friction piles with great diameter in soft rock area of Guizhou Province, the skin friction and point bearing capacity and the load transfer behavior of piles are analyzed.

**Keywords:** geo-technological engineering; self-balancing static load test; soft rock; friction piles; bearing capacity behavior

州旧金山—奥克兰海湾大桥,加州圣地亚哥 Coronado 大桥,加州南部 91/5 公路立交桥,希腊西部 Rion—Antirion 斜拉桥等。其中加州南部 91/5 公路立交桥在两桥台上组合使用了人造橡胶支座和流体阻尼器。

到目前为止,对组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器的桥梁的地震反应研究还很少见,需要进一步深入地研究。这项研究主要由两部分组成:第一部分利用单墩模型对板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置的阻尼系数、阻尼指数和周期进行分析,给出这种组合装置的适用范围及其参数的合理取值范围;第二部分利用三跨连续梁桥对这种组合装置的减震性能进行分析研究,对几种减隔震设计方案进行比较,给出这种组合装置的优化设计方案。

1 粘滞阻尼器

粘滞阻尼器提供的阻尼力取决于活塞相对于容器的运动速度(或称连接点之间的相对速度),而不是取决于活塞的位移。在温度、收缩和徐变作用下,粘滞阻尼器的阻尼力很小;在地震作用下,阻尼力随活塞的运动速度增大而增大。粘滞阻尼器提供的阻尼力可以用下面的公式(1)描述:

$$F_D=C_a|\dot{u}|^\alpha\text{sgn}(\dot{u})$$
(1)

式中: $C_a$  为阻尼系数,单位为  $\text{kN}\cdot(\text{s}/\text{m})^\alpha$ ;  $\dot{u}$  是粘滞阻尼器活塞的运动速度;  $\alpha$  是阻尼指数;  $\text{sgn}()$  是关于  $\dot{u}$  的符号函数。当  $\alpha=1$  时粘滞阻尼器为线性;当  $\alpha\neq 1$  时为非线性。从抗震角度看,  $\alpha$  的取值在 0.3~1.0 范围内。

在减隔震桥梁上使用粘滞阻尼器时,粘滞阻尼器提供的阻尼力与弹性支座提供的恢复力之间存在

相位差。研究表明:组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器,当阻尼系数在一定范围内时,在地震作用下有:当位移最大时,速度最小,恢复力最大,阻尼力最小,有利于结构复位;当位移最小时,速度最大,恢复力最小,阻尼力最大,阻止结构偏离平衡位置。因此,粘滞阻尼器不会增加桥墩的受力,这与铅芯橡胶支座、摩擦摇摆支座和弹塑性阻尼器等有耗能能力的减隔震装置的的作用机理有本质上的差别。

2 单墩模型计算分析

影响板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置减震性能的关键参数有阻尼系数、阻尼指数和周期,另外,地震动输入和墩高也有较大的影响。为了分析这些参数对结构地震反应的影响,下面用两种单墩模型进行具体的研究。这两种单墩模型分别为 5 m 墩高和 10 m 墩高,单墩计算模型见图 1 所示,墩身屈服弯矩分别为  $7\,428\text{ kN}\cdot\text{m}$  和  $7\,483\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。单墩模型的参数见表 1。

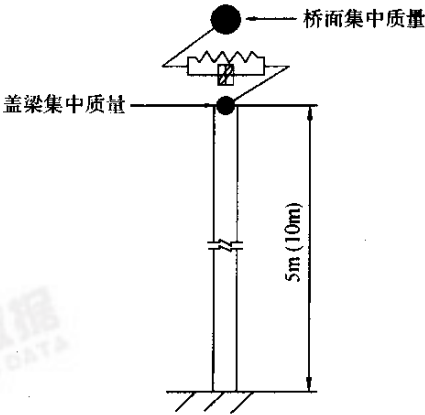


图 1 单墩计算模型

表 1 单墩模型参数

墩高	墩身截面 mm	上部结构重量 kN	盖梁重量 kN	桥墩重量 kN	混凝土 标号	纵筋 配筋率	轴压比
5 m	1 400×1 000	2 240	470	178	C40	3.30%	6.07%
10 m	1 400×1 000	2 240	470	357	C40	3.30%	6.44%

在墩顶组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器时,粘滞阻尼器的阻尼系数  $C$  的取值范围为 100~3 200  $\text{kN}\cdot(\text{s}/\text{m})^\alpha$ ,阻尼指数  $\alpha$  取值范围为 0.3~1.0。周期  $T$  的取值范围为 1.2~5.0 s。在对阻尼系数和阻尼指数进行参数分析时,板式橡胶支座的水平弹性刚度为  $4\,176\text{ kN}/\text{m}$ ,相应地,5 m 墩高模型的周

期为 1.50 s,10 m 墩高模型的周期为 1.73 s。在对周期进行参数分析时,板式橡胶支座的弹性刚度根据周期做相应的变化。另外,对阻尼指数进行参数分析时将粘滞阻尼器考虑为非线性,对阻尼系数和周期进行参数分析时均考虑为线性。

在进行非线性时程地震反应分析时,采用了 3

条不同场地的地震波,分别为:1940 年 EL Centro 南北分量地震波、1985 年 Mexico NOOE 分量地震波和 1984 年 Parkfield VERT 分量地震波。为了便于研究,地面峰值加速度均调整为  $0.341\text{ g}$ 。图 2 给出了 3 条地震波时程。单墩模型在墩底与地面固结,墩身保持弹性,地震动只在水平方向单向输入。

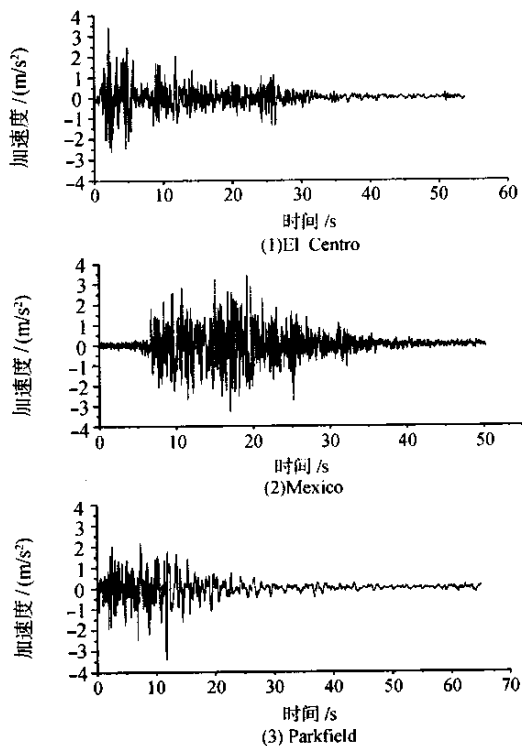


图 2 地震波时程

图 3 给出了单墩模型在 3 条地震波输入下,阻尼系数、阻尼指数和周期对结构地震反应的影响。图 3(1)表明:单墩模型在 3 种地震动输入时,墩底剪力先随阻尼系数的增大而减小;当阻尼系数  $C=0$  时,说明模型中只采用板式橡胶支座,此时墩底剪力较大;当  $C$  大于  $800\text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{\alpha}$  后,墩底剪力随  $C$  的增大而增大。图 3(2)表明:单墩模型在 3 种地震动输入时,梁体位移随  $C$  的增大而减小,当  $C$  较小时减小的较快,当  $C$  大于约  $1\,200\text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{\alpha}$  后,除 5 m 墩高模型在 Parkfield 地震波输入时还有较大梁体位移减小外,其余情况下的梁体位移减小非常缓慢;另外,5 m 墩高模型的梁体位移减小得快。图 3(3)表明:墩、梁相对位移随阻尼系数的增大而减小,当  $C$  大于约  $1\,200\text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{\alpha}$  后减小较慢,并且总体上看,5 m 墩高模型比 10 m 墩高模型减小得快。在对阻尼指数和周期进行参数分析时,为了充分利用

粘滞阻尼器的耗能限位作用,阻尼系数  $C$  取  $1\,200\text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{\alpha}$ 。图 3(4)表明:单墩模型的墩底剪力随阻尼指数的增大而减小。图 3(5)表明:10 m 墩高模型的梁体位移较 5 m 墩高模型的大许多,5 m 墩高模型的梁体位移随阻尼指数的增加而缓慢增加;10 m 墩高模型梁体位移的变化规律受地震动输入的影响较大, Parkfield 波输入时,梁体位移随阻尼指数的变化很小,而 El Centro 波和 Mexico 波输入时,梁体位移在阻尼指数为 0.8 处有最小值。图 3(6)表明:墩、梁相对位移随阻尼指数的增大而增大,当阻尼指数大于 0.8 后增加较快;另外 10 m 墩高模型的墩、梁相对位移较大。图 3(7)表明:在周期  $T$  大于 1.5 s 后,除 10 m 墩高模型的墩底剪力还有较大幅度降低外,其余情况下的墩底剪力几乎保持不变。图 3(8)表明:5 m 墩高模型的梁体位移受周期的影响很小,10 m 墩高模型的梁体位移随周期的增大有减小的趋势,当周期大于 2.5 s 后,梁体位移变化很小。图 3(9)表明:墩、梁相对位移在周期小于 2 s 时渐增,当周期大于 2 s 后几乎保持不变。

### 3 算例

为了分析板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置对桥梁的减震效果,下面以一座 3 跨连续梁桥为例进行具体分析。图 4 是 3 跨连续梁桥的计算模式,其中 1 号和 4 号墩墩高为 5 m,2 号和 3 号墩墩高为 10 m,桥墩材料及截面特性与单墩模型相同,梁重  $6\,720\text{ kN}$ ,假设梁体呈刚性,不考虑其侧向扭转,桥墩与地面刚性连接,墩身保持弹性,只在纵桥向输入地震波,地震波与单墩模型分析时相同。

为了比较分析粘滞阻尼器的分布情况对减震效果的影响,本文采用 3 条地震波,分别分析了 5 个方案。方案 1:在 2 号墩墩顶与梁底铰接,1 号、3 号和 4 号墩墩顶在纵桥向设滑动支座。方案 2:在各桥墩墩顶均设置板式橡胶支座,1 号和 4 号墩各设置 4 个,2 号和 3 号墩各设置 8 个,单个板式橡胶支座的弹性刚度为  $522\text{ kN}/\text{m}$ 。方案 3:在 1 号和 4 号墩墩顶各设置 4 个板式橡胶支座,在 2 号和 3 号墩墩顶各设置 8 个板式橡胶支座,并在 2 号和 3 号墩墩顶设置粘滞阻尼器,单个支座弹性刚度为  $522\text{ kN}/\text{m}$ ,粘滞阻尼器的阻尼系数为  $1\,200\text{ kN} \cdot (\text{s}/\text{m})^{0.8}$ ,阻尼指数为 0.8。方案 4:在 1 号和 4 号墩墩顶各设置 4 个板式橡胶支座,在 2 号和 3 号墩墩顶各布置 8 个板式橡胶支座,并在 1 号和 4 号墩墩顶设置粘滞阻尼器,粘滞阻尼器的阻尼系数为

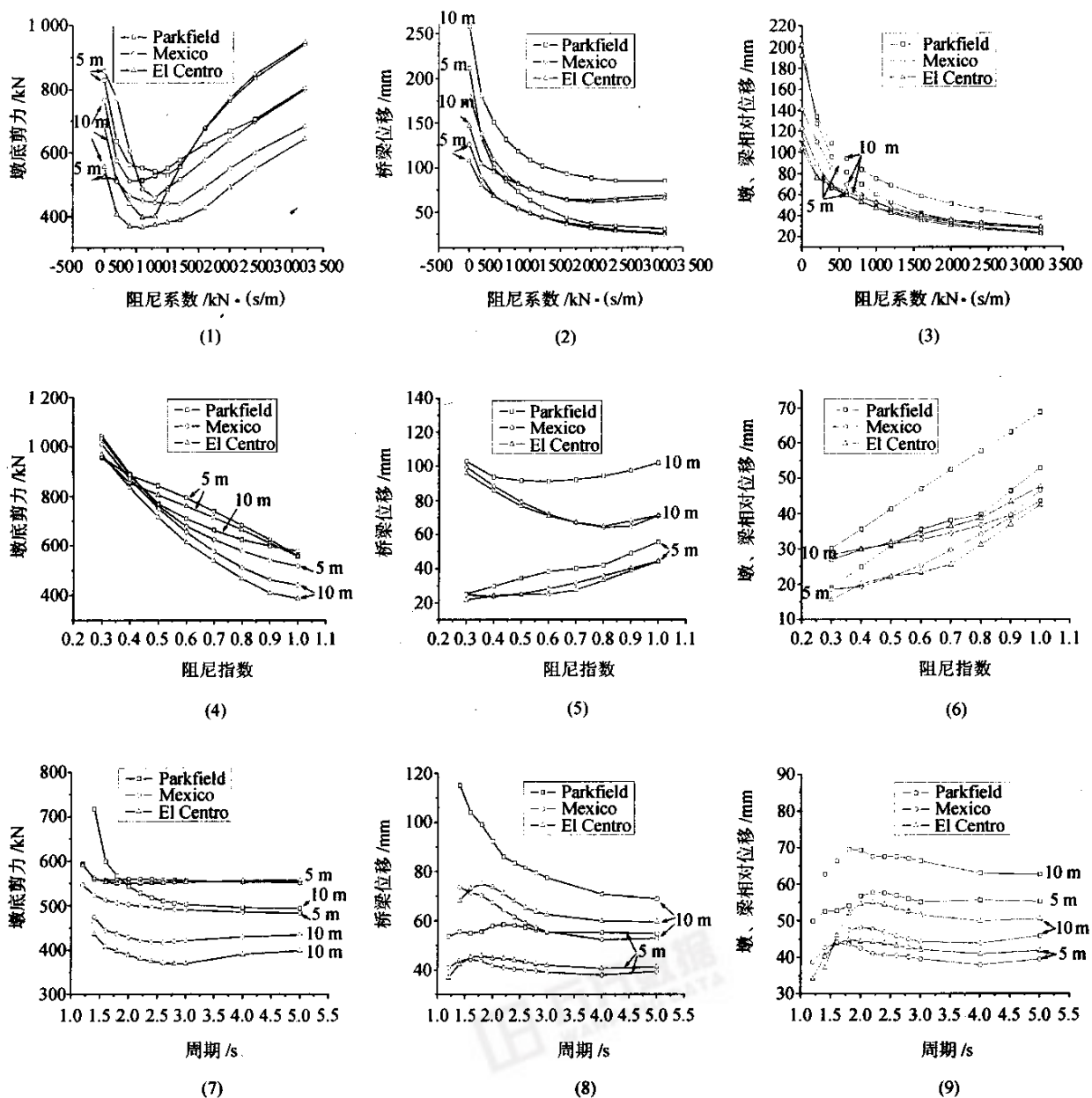


图 3 阻尼系数、阻尼指数和周期对结构地震反应的影响

1 200 kN · (s/m)<sup>0.8</sup>, 阻尼指数为 0.8, 单个支座弹性刚度为 522 kN/m。方案 5: 在各墩墩顶均设置板式橡胶支座, 其中 1 号和 4 号墩上设置 4 个, 2 号和 3 号墩上设置 8 个, 1 号和 4 号墩上粘滞阻尼器的阻尼系数为 400 kN · (s/m)<sup>0.8</sup>, 2 号和 3 号墩上粘滞阻尼器的阻尼系数为 1 200 kN · (s/m)<sup>0.8</sup>, 阻尼指数为 0.8, 单个支座的弹性刚度为 522 kN/m。

表 2 给出了连续梁桥在 3 条地震波输入下, 5 种方案的结构峰值反应。分析结果表明: 采用 2 号墩与梁

底较接的方式时, 2 号墩墩底弯矩远远大于屈服弯矩, 并且梁体位移也很大; 采用板式橡胶支座后, 2 号墩的受力有明显下降, 其余墩的受力有所增加, 同时增加了梁体位移; 在方案 2 的基础上, 在 2 号和 3 号墩上设置粘滞阻尼器后, 梁体位移平均减小 57%, 同时 2 号墩受力平均减小 14%; 在方案 2 的基础上, 在 1 号和 4 号墩上设置粘滞阻尼器后, 梁体位移平均减小 71%, 在 El Centro 波、Mexico 波和 Parkfield 波输入下, 2 号墩的受力较方案 2 分别减小 6%、35% 和

55%;在方案 2 的基础上,在各墩上设置粘滞阻尼器后,可以使各墩的墩底剪力分布均匀,但是对梁体位移控制作用不如方案 4。通过对方案 3、方案 4 和方案 5 的结构峰值反应比较可知:在矮墩上使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合装置的减震效果最好,不仅能够非常有效地控制梁体位移,还能使各墩墩底

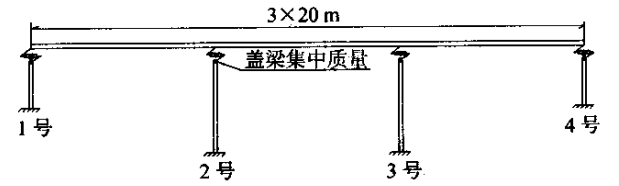


图 4 连续梁桥的计算模式

表 2 3 条地震波输入结构的峰值反应

地震波	方案	1 号、4 号墩 墩底剪力 kN	1 号、4 号墩 墩底弯矩 (kN·m)	2 号、3 号墩墩底剪力/kN		2 号、3 号墩墩底弯矩/(kN·m)		梁体位移 mm
				2 号墩	3 号墩	2 号墩	3 号墩	
El Centro	1	319.26	1 524.87	1 435.99	497.15	14 297.33	4 578.45	123.35
	2	450.77	2 207.52	512.70	512.70	4 979.55	4 979.55	132.68
	3	683.38	3 259.36	463.62	463.62	4 658.67	4 658.67	68.36
	4	708.34	3 457.36	481.85	481.85	4 502.27	4 502.27	47.43
	5	371.84	1 750.27	398.66	398.66	4 011.73	4 011.73	53.90
Mexico	1	527.19	2 577.18	1 781.71	605.80	18 004.09	5 731.05	156.01
	2	576.02	2 822.11	604.46	604.46	5 703.37	5 703.37	171.65
	3	911.58	4 371.97	508.46	508.46	5 047.17	5 047.17	66.46
	4	624.72	3 076.09	390.49	390.49	3 582.90	3 582.90	47.74
	5	429.98	2 072.54	455.01	455.01	4 486.25	4 486.25	53.78
Parkfield	1	351.83	1 646.42	2 871.54	565.34	28 592.22	5 247.66	246.49
	2	543.17	2 712.85	843.35	843.35	8 472.49	8 472.49	269.94
	3	722.7	3 530.07	704.12	704.12	7 013.89	7 013.89	106.74
	4	695.62	3 393.82	379.41	379.41	3 671.18	3 671.18	62.09
	5	442.68	2 162.92	557.34	557.34	5 484.90	5 484.90	79.34

弯矩分布均匀。

表 3 给出了连续梁桥在 3 条地震波输入下,方案 1、方案 2 和方案 4 的墩、梁相对位移峰值反应。从表中可以看出:方案 2 可以减小 3 号墩的墩、梁相对位移,同时又使 1 号和 4 号墩的墩、梁相对位移有所增加,并且在 Parkfield 地震波作用下,各墩的墩、梁相对位移均较大,板式橡胶支座的剪切变形过大,容易造成支座失效。在矮墩上设置粘滞阻尼器后,各墩的墩、梁相对位移有较大幅度的降低,可以控制在 50 mm 左右。

图 5 是在 El Centro 地震波输入下,方案 2 和方案 4 中 2 号墩墩底剪力与墩、梁相对位移时程。从图 5(1)可以看出:在 1 号和 4 号墩上设置粘滞阻尼器后,2 号墩墩底剪力峰值比只设置板式橡胶支座时稍小,并且衰减得快。从图 5(2)可以看出:在 1 号和 4 号墩上设置粘滞阻尼器后,2 号墩的墩、梁相对位移幅值比只设置板式橡胶支座时小许多,并且衰减得快。

表 3 墩、梁相对位移峰值反应 mm

地震波	方案	1 号、4 号墩	2 号墩	3 号墩
El Centro	1	122.86	0	116.81
	2	129.46	97.70	97.70
	4	46.20	56.72	56.72
Mexico	1	157.67	0	183.26
	2	170.46	136.90	136.90
	4	47.16	50.92	50.92
Parkfield	1	246.81	0	253.19
	2	264.11	196.81	196.81
	4	60.24	53.00	53.00

4 结论

本文利用非线性时程地震反应分析方法对 5 m 和 10 m 墩高单墩模型及 3 跨连续梁桥 5 种方案的结构地震反应进行了分析,研究了板式橡胶支座和粘滞阻尼器组合使用的减震性能,研究结果表明:



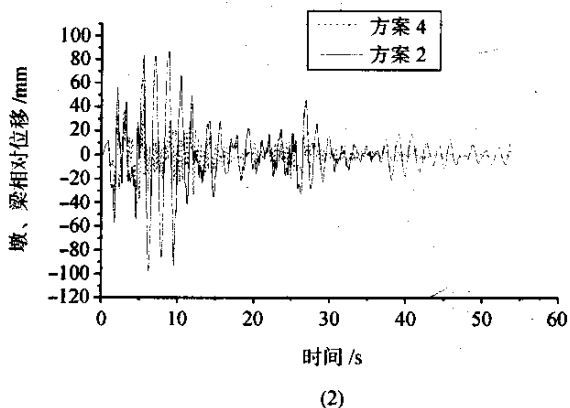
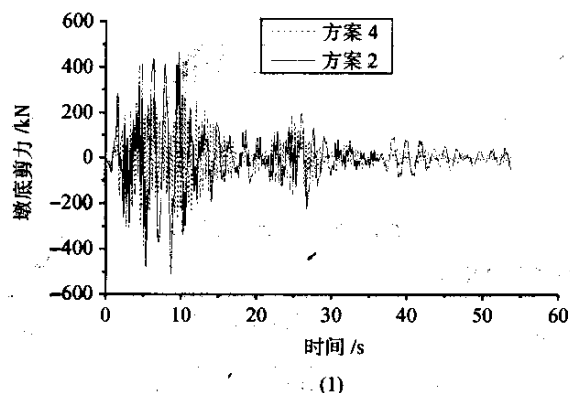


图 5 El Centro 地震波输入下, 方案 2 和方案 4 中  
2 号墩墩底剪力与墩、梁相对位移时程

(1) 组合使用板式橡胶支座和粘滞阻尼器, 可以在减小墩底剪力和弯矩的同时, 明显地减小梁体位移及墩、梁相对位移。

(2) 当粘滞阻尼器的阻尼系数和阻尼指数选择适当时, 可以在不增加墩底剪力的同时, 明显地减小梁体位移和墩、梁相对位移。

(3) 板式橡胶支座与粘滞阻尼器组合使用时, 当桥梁的周期大于 2 s 后, 其减震效果受周期的影响很小。

(4) 粘滞阻尼器使用在矮墩上时, 减震效果比在高墩上使用时好。

#### 参考文献:

- [1] 范立础, 王志强. 桥梁抗震减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 普瑞斯特雷, 等. 桥梁抗震设计与加固[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [3] 范立础, 袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究[J]. 同济大学学报, 1989, 17(4).
- [4] Chopra Anil K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- [5] Makris N. and Chang S P. Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolation structures[J]. Earthquake Engng Struct. Dyn, 2000, 29(5).

## A Study on Aseismic Performance of Combination of Laminated Rubber Bearing and Viscous Damper for Bridges

JIANG Jian-jun, LI Jian-zhong, FAN Li-chu

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The aseismic performance of the combination of laminated rubber bearing and viscous damper for bridges is studied with a nonlinear time-history analysis method in this paper. This kind of composite device is brought forward on the basis of aseismic principles of base isolation, such as flexibility and energy dissipation. A large number of parameter analyses are carried out in order to investigate the effects of damping coefficient, damping exponent and period on the seismic response of structures. Analysis results demonstrate that the composite device not only reduces seismic forces, but also controls displacements of deck or relative displacements between superstructure and piers.

**Key words:** bridge; laminated rubber bearing; viscous damper; aseismic performance