张煜敏，翁光远，程凯凯，等. 不同减隔震支座组合对连续梁桥抗震性能影响分析[J]. 灾害学，2023，38(4)：34－38，55. [ZHANG Yumin，WENG Guangyuan，CHENG Kaikai，et al. Study on the Influence of Different Isolation Bearing Combinations on the Seismic Performance of Continuous Beam Bridge [J]. Journal of Catastrophology，2023，38(4)：34－38，55. doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2023.04.007.]

不同减隔震支座组合对连续梁桥抗震性能影响分析*

张煜敏，翁光远，程凯凯，兰官奇，李光玲

（西安石油大学 土木工程学院，陕西 西安 710065）

摘　要：针对连续梁桥设置了不同组合的减隔震支座，采用动力时程分析方法探讨桥梁结构的抗震性能，对比分析了不同支座的减隔震效果。研究发现采用板式橡胶支座组合时，桥梁结构的各项地震响应均相对较大，支座承受的水平剪力相对较小；采用高阻尼橡胶支座组合时，支座的滞回耗能使地震作用下的主梁位移以及桥墩墩底弯矩、剪力、墩顶位移均有所减小，桥梁结构的抗震性能相对较好。减隔震设计能在一定程度上减小地震引起的桥梁结构损伤。

关键词：连续梁桥；减隔震支座；抗震性能；减隔震设计

中图分类号：X43；U447；P315；X915.5　**文献标志码**：A　**文章编号**：1000－811X(2023)04－0034－06

doi：10.3969/j.issn.1000－811X.2023.04.007

为了减小地震作用对桥梁结构的破坏，抗震措施被广泛用于桥梁结构中，减隔震支座是其中较为成熟、应用很广的措施[1-2]。常见的减隔震支座类型有板式橡胶支座[3-4]、铅芯橡胶隔震支座[5-6]、高阻尼橡胶隔震支座等[7-8]。对不同支座减隔震性能的研究，有利于提高桥梁结构的抗震理论认知，进而保障桥梁结构在大烈度地震作用下不致产生严重破坏[9]。

国内外目前针对连续梁桥减隔震支座抗震性能的研究，主要涉及不同支座类型及不同烈度地震荷载的影响[10-12]。CARDONE D 等[13]给桥梁配备了不同的隔震系统，包括铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座(HDR)、摩擦摆支座和低阻尼橡胶支座(LDR)的组合，通过采用非线性时程分析方法对连续梁桥和多跨简支梁桥隔震系统的分析研究，结果表明基于位移的方法配置支座可以使桥梁在桥墩保持弹性的情况下达到预期的目标位移分布。YAMAMOTO 等[14]针对隔震支座研究发现，对于瞬时荷载作用下的桥梁结构，隔震支座能够有效减小结构承受的地震输入，同时会影响结构的地震特性。王秀兰等[15]研究了高烈度区中小跨径连续梁桥桥墩与支座的不同组合形式对结构响应的影响，研究表明需要综合考虑支座变形及其抗滑性，高烈度区中小跨径梁桥推荐采用圆柱墩配高阻尼橡胶支座的组合形式，该组合形式下结构抗震性能最佳。高健峰等[16]研究了不同减隔震支座对跨断层简支梁桥横向地震响应的影响，结果表明减隔震支座的引入可减小下部结构地震响应水平，使桥梁结构的各项响应分布均匀化，但通常会伴随主梁位移和支座位移的增大。钟海强等[17]对比了一种新型组合橡胶支座和板式橡胶支座的地震响应，结果表明组合橡胶支座等效刚度小、位移和耗能能力强，能够避免支座滑动，并显著减小支座位移和桥墩弯矩。

尽管针对连续梁桥减隔震支座的抗震性能研究在方法学、机理分析、数值模型等方面均得到了验证。但在实际工程中，多跨梁桥减隔震支座的选择不仅仅以单一类型作为参考，也会考虑不同减隔震支座类型及其组合；目前仍然缺少此方面的研究，特别是不同地震作用下滑动支座与高阻尼橡胶支座组合的隔震效能。本文通过建立有限元模型，研究不同支座组合对连续梁桥抗震性能的影响，从而为实际工程中桥梁支座的选择提供合理建议。

1　工程概况及有限元模拟

1.1　工程概况

本文的研究对象是一座 3×50 m 连续梁桥，桥墩高度分别为 35 m、50 m、50 m、35 m，墩台采用桩基础，桥梁布置如图 1 所示。主梁所采用混凝土强度等级为 C50，桥墩混凝土强度等级为 C30。主梁由 T 梁组成，桥面总宽 12.25 m，T 梁高2.8 m。桥墩采用薄壁空心墩，桥墩截面为 6 m×4 m，最小截面壁厚为 0.5 m，最大截面壁厚 1 m。墩顶盖梁长

* 收稿日期：2023－01－28　　修回日期：2023－05－05

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174061)；陕西省自然科学基础研究计划面上项目(2021JM－406；2022JM－279)；陕西省自然科学基础研究计划青年项目(2022JQ－467；2022JQ－301)

第一作者简介：张煜敏(1983－)，女，汉族，甘肃平凉人，工学博士，副教授，主要从事桥梁结构抗震及振动控制研究.
E－mail：zhangyumincorn@163.com

11.8 m、宽 4.2 m、高 2.4 m，承台横断面为 8.3 m×8.3 m 的正方形、高 3 m，桩基础直径 2 m。

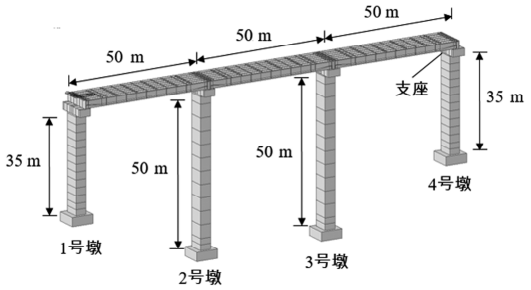


图 1　桥梁布置图

采用非线性有限元程序 Midas/Civil 对桥梁结构进行三维有限元建模，在建模过程中采用集中质量系统和小离散段的方法模拟桥梁系统的上部结构和下部结构[18]。主梁及桥墩采用弹性梁单元模拟，支座采用非线性单元模拟。

1.2　支座有限元模型与参数

本文的研究涉及三种不同类型的支座，分别为：板式橡胶支座（LRB），滑动式高阻尼橡胶支座（LNR）和高阻尼橡胶支座（HDR），其中 1 号墩与 4 号墩采用同一型号支座，2 号墩及 3 号墩采用同一型号支座，具体参数由表 1 给出。支座均采用双线性弹塑性弹簧单元模拟，LRB 和 LNR 支座的恢复力模型如图 2a 所示。图 2 中K_0为屈服前刚度，x_{0y}为屈服位移，F_{0y}为滑动摩擦力。HDR 支座具有非线性变化，模拟为如图 2b 所示的双线性恢复力力学模型。图中K_1 为屈服前刚度，K_2为屈服后刚度，s_y 为屈服位移量，s_d为设计位移，F_y为屈服力，F_d为设计位移引起的支座剪力[19]。

根据桥梁设计规范中对 50 m T 梁支座参数选取的建议，分别选择 LBR、LNR、HDR 三种类型的支座进行组合，支座的选择主要参考其支撑反力的大小，支座的组合工况为：

工况 1，四个桥墩处均采用板式橡胶支座（LRB）。

工况 2，1 号、4 号墩处设置能够疏散水平地震作用的滑动式高阻尼橡胶支座，2#、3#墩处设置等效阻尼比为 10% 的高阻尼橡胶支座（LNR + HDR）。

工况 3，四个桥墩处均采用等效阻尼比为 10% 的高阻尼橡胶支座（HDR）。

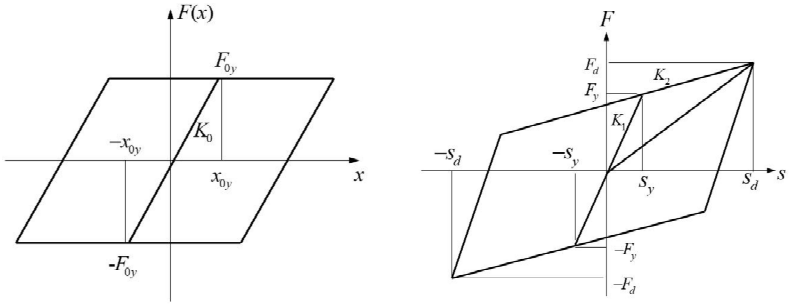
三种工况中，LRB 及 LNR 支座仅有水平刚度，HDR 支座具有屈服前及屈服后刚度，各支座的物理参数如表 1 所示。

2　地震荷载

本桥所处工程场地类别为 II 类，抗震等级采用Ⅶ度设防，为了分析桥梁结构在不同等级地震作用下的各项响应，分别采用桥梁所在场地 100 年超越概率为 40% 及 2% 的地震时程（E1、E2 地震波各三条）对桥梁结构进行动力时程分析，且 E1、E2 的三条地震波之间具有自相关性。图 3 分别为三条 E1 地震波 401、402、403，以及三条 E2 地震波 21、22、23。E1 地震及 E2 地震作用下的各项地震响应均采用三条地震波分析得到的包络值。

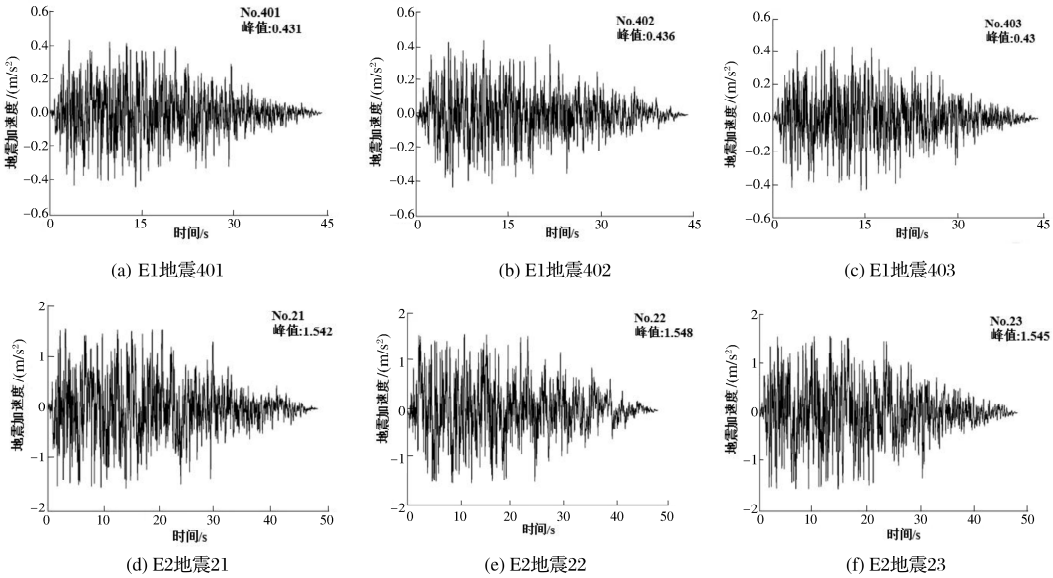
表 1　支座的设计参数

工况	1	1	2	3	2，3
支座类型	LRB	LRB	LNR	HDR	HDR
桥墩位置	1#，4#	2#，3#	1#，4#	1#，4#	2#，3#
支座尺寸/mm	350×400×101	500×600×130	320×420×137	320×420×137	520×620×187
竖向刚度/(kN/m)	726 480	1 356 817	735 000	875 000	1 427 000
初始水平刚度/(kN/m)	–	–	–	4 690	7 510
屈服后水平刚度/(kN/m)	–	–	–	1 340	2 150
水平等效刚度/(kN/m)	1 792	3 158	2 220	1 700	2 720
容许位移/mm	120	150	150	140	220
极限位移/mm	–	–	–	210	330



(a) LRB支座与LNR支座　　(b) HDR支座

图 2　支座双线性恢复力模型



(a) E1地震401 (b) E1地震402 (c) E1地震403

(d) E2地震21 (e) E2地震22 (f) E2地震23

图 3 地震加速度时程波

3 结构地震响应分析

3.1 位移响应

桥梁结构在地震作用下均会发生一定的位移响应，尤其在支座与梁端的位移值得关注。桥梁在 E2 地震作用下的整体位移云图如图 4 所示。

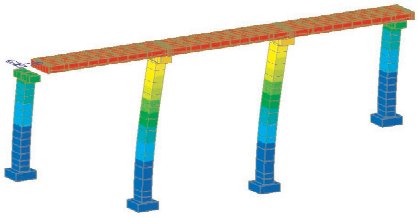


图 4 E2 地震作用下桥梁位移云图

3.1.1 墩顶位移

将 E1 地震及 E2 地震作用下不同工况中各墩墩顶处的位移进行总结(表 2)。由图 4 中桥梁的整体位移云图及表 2 中各墩墩顶位移响应可见，结构位移响应整体呈对称趋势。不同工况中，2 号及 3 号墩处的墩顶位移明显高于 1 号及 4 号墩，几乎为其 3 倍左右。分析其原因，是由于 2 号及 3 号墩高度均相对较高，其抗推刚度小于 1 号及 4 号墩，在地震作用下中墩处便会发生比边墩处更大的位移。

表 2 不同工况 E1、E2 地震作用下墩顶位移 cm

地震等级	墩号	纵向位移			横向位移		
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
E1 地震	1	2.00	1.87	1.53	0.82	0.80	0.76
	2	4.74	5.32	3.50	3.28	2.94	2.86
	3	4.74	5.32	3.50	3.32	2.98	2.89
	4	1.98	1.87	1.53	0.83	0.79	0.77
E2 地震	1	13.61	13.80	10.75	5.74	5.26	4.42
	2	39.41	30.27	29.15	24.43	17.89	18.73
	3	39.41	30.27	29.14	24.74	18.04	18.90
	4	13.48	13.71	10.62	5.83	5.39	4.53

E1 地震作用下，墩顶纵向位移的最大值出现在工况 2 中，横向位移最大值出现在工况 1 中。E2 地震作用下，墩顶纵、横向最大位移均出现在工况 1 中。工况 3 中，E1、E2 地震作用下的墩顶各项位移均最小，E2 作用下墩顶位移几乎是工况 1 的 75%。

3.1.2 支座位移

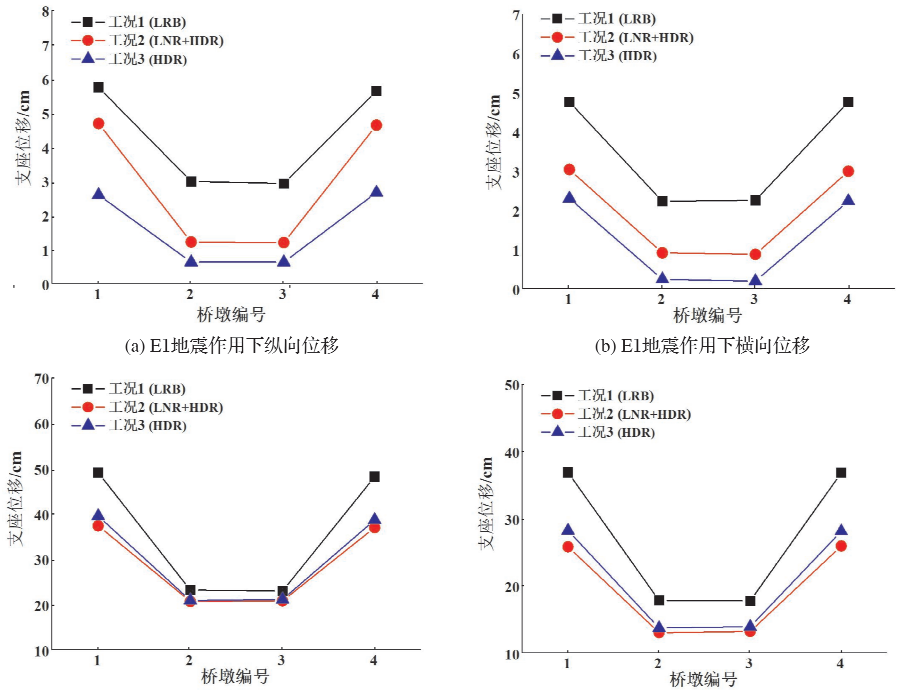
由图 4 中桥梁的整体位移云图可见，E2 地震作用下桥梁上、下部结构之间有较大的相对位移。支座处于桥梁上、下部结构之间，能够通过在地震中发生变形以减小输入桥梁上部结构的地震作用。

图 5 为 E1 地震及 E2 地震作用下不同工况中各墩处的支座位移。整体上来说，支座位移在 1 号墩和 4 号墩处的位移量明显高于 2 号及 3 号墩；不同工况下支座位移呈对称形态。E2 地震作用下支座位移是 E1 地震作用下支座位移的 10 倍左右。图 5a 和图 5b 分别为 E1 地震作用下各工况中支座的纵、横向位移。支座位移在不同桥墩处的变化趋势一致，1 号墩处位移量较大，2 号墩处位移量急剧减小且与 3 号墩位移量较为接近，4 号墩处位移量急剧增大并接近 1 号墩的位移量。支座纵向及横向位移最大值均出现在工况 1 中，最小值均出现在工况 3 中。图 5c 和图 5d 分别为 E2 地震作用下各工况中支座的纵、横向位移。不同工况中支座位移的变化趋势与 E1 地震作用下相似，最大值均出现在工况 1 中，而工况 2 和 3 的支座位移相近。

不同工况中，1、4 号墩处的支座位移几乎是 2 号墩及 3 号墩处的 2 倍。主要是由于 1、4 号桥墩高度较低、抗推刚度较大，当该处支座刚度较小时传至下部结构的地震作用相对减少；而 2、3 号墩墩高较高、相对较柔，当该处支座刚度较大时，下部结构承受的地震作用较大。因此，在地震作用下 1、4 号墩的墩顶位移便远小于 2、3 号墩，使得该处上、下部结构的相对位移较大，支座产生较大变形。在 E2 地震作用下 1、4 号墩处的支座纵向位移均超过了支座极限变形量，意味着支座发生了破坏。

3.1.3 支座滞回曲线

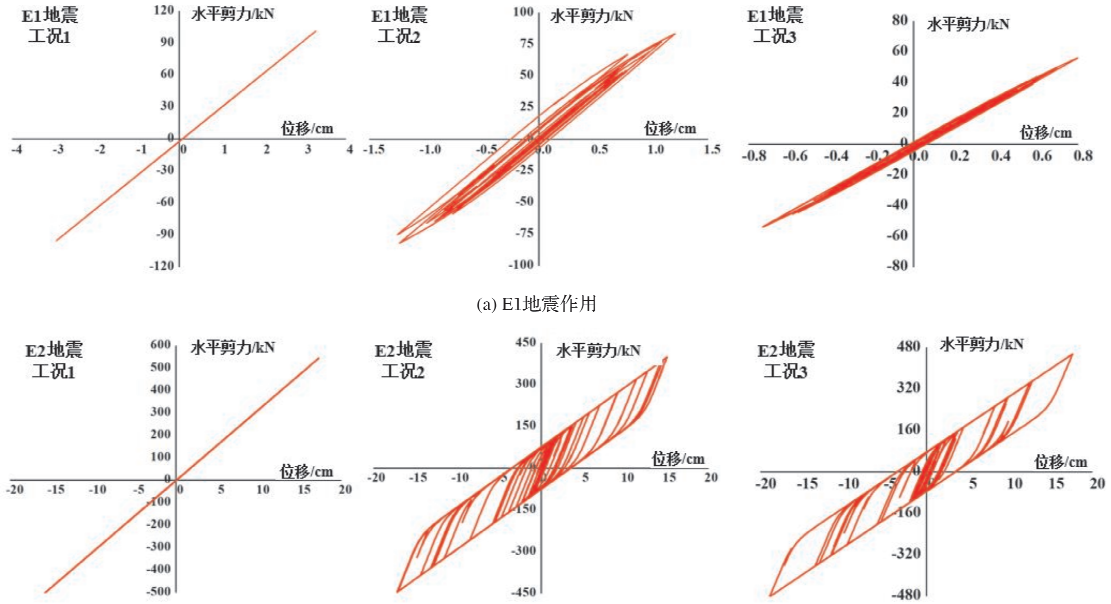
支座的变形能力及在地震作用下的滞回变形能够直观反映支座的减隔震效果。



(a) E1地震作用下纵向位移　(b) E1地震作用下横向位移

(c) E2地震作用下纵向位移　(d) E2地震作用下横向位移

图 5　不同工况中支座位移



(a) E1地震作用

(b) E2地震作用

图 6　不同工况中 2 号墩处支座滞回耗能曲线

本研究中 HDR 支座的力学性能具有非线性特征，当支座处承受的水平地震力超过其屈服力时，便会发生屈服，从而产生滞回耗能、减小结构地震输入。支座的滞回曲线能够表征支座的变形及耗能特征，为了对比分析不同工况中支座的耗能特性，将 E1 及 E2 地震作用下不同工况中 2 号墩处支座的滞回曲线进行对比（图 6）。图 6a、图 6b 分别为 E1、E2 地震作用下不同工况中 2 号墩处支座的滞回曲线。因工况 1 中桥梁均采用板式橡胶支座，支座的内力与位移变化呈线性；工况 2、3 中 2 号墩处采用 HDR 支座，支座刚度呈非线性，且有一定的阻尼，一旦在地震中发生位移，便能起到滞回耗能作用。E1 地震作用下三种工况中 2 号墩支座的最大位移分别为 3.28 cm、1.25 cm、0.81 cm，水平剪力最大值分别为 101 kN、84 kN、57 kN。工况 2 及工况 3 中的支座在地震作用下虽未发生屈服，但也有一定的耗能。

E2 地震作用下三种工况中 2 号墩支座的最大位移分别为 20.31 cm、17.21 cm、18.91 cm，水平剪力最大值分别为 644 kN、446 kN、482 kN。工况 1 中支座的内力与位移变化呈线性；工况 2 及工况 3 中 2 号墩处 HDR 支座的内力与位移变化均呈非线性，在地震作用下发生了屈服，且发挥了较大的隔震耗能作用；工况 3 中支座的耗能大于工况 2，HDR 支座的耗能远大于 LRB 支座。

3.1.4　主梁位移

表 3 为 E1 地震与 E2 地震作用下不同工况中的纵向及横向主梁位移。由表 3 中各项位移可见，

无论在 E1 地震还是 E2 地震作用下，工况 1 中主梁的位移最大，工况 3 中最小，工况 2 及工况 3 中的主梁位移分别为工况 1 对应主梁位移量的 80% 左右。说明 LNR 与 HDR 支座都具有一定的减隔震效果，HDR 支座的隔震效果更好，能够有效减小传至桥梁上部结构的地震作用。工况 1 中主梁位移分别为 E1 地震时纵向 7.71 cm 和横桥向 5.58 cm，E2 地震时纵桥向 62.27 cm 和横桥向 42.67 cm。对于主梁在 E2 地震作用下的较大位移，应考虑在梁端设置限位措施。

表 3 不同工况 E1、E2 地震作用下主梁位移 cm

地震等级	纵向位移			横向位移		
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
E1 地震	7.71	6.54	4.11	5.58	3.84	3.10
E2 地震	62.27	50.76	49.83	42.67	31.02	32.50

3.2 内力响应

桥墩的墩底弯矩与水平剪力影响着桥梁下部结构在地震作用下的抗震安全性，理论上来说墩底弯矩及剪力越小，桥梁下部结构的抗震安全性越高。

3.2.1 桥墩墩底弯矩

表 4 统计了 E1 地震与 E2 地震作用下桥梁在三种工况中的桥墩纵、横向墩底弯矩。由表 4 可见，在 E1 地震作用下采用不同支座时桥梁的纵向墩底弯矩差异明显，其中工况 1 中 4 个墩底弯矩均较高，4 号墩处弯矩高于 3 号墩；工况 2 中，不同桥墩的墩底弯矩变化较大，中间两个墩底弯矩值较大而两侧墩底弯矩值较小；工况 3 中，桥梁 4 个墩的纵向墩底弯矩整体较其他两个算例的纵向墩底弯矩小，4 号墩处弯矩亦高于 3 号墩。分析 4 号墩处弯矩相对较大的主要原因，是由于桥墩较低，抗推刚度相比 3 号墩更大。

表 4 不同工况 E1、E2 地震作用下墩底弯矩 kN·m

地震等级	墩号	纵向墩底弯矩			横向墩底弯矩		
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
E1 地震	1	31 098	28 773	23 788	26 202	25 897	25 193
	2	36 035	42 109	28 130	47 891	43 654	42 569
	3	33 951	40 152	26 179	48 401	44 154	42 981
	4	36 100	34 885	28 700	26 612	26 388	25 499
E2 地震	1	225 203	227 984	174 939	181 892	170 044	143 151
	2	291 431	224 088	205 691	347 034	254 778	268 294
	3	289 352	222 130	203 742	351 350	256 692	270 437
	4	229 075	233 699	180 546	186 390	175 081	147 402

不同工况中各桥墩横向墩底弯矩变化较为类似，1 号和 4 号墩的墩底弯矩均小于 2 号和 3 号墩，结构整体响应呈对称状态。

工况 3 中纵、横向墩底弯矩均相对其他两个工况小，意味着 HDR 支座表现出了较为理想的减隔震效果。

E2 地震作用下各墩的纵向墩底弯矩在不同工况中呈先增大后减小的变化趋势，采用隔震支座时(工况 2、工况 3)不同桥墩的墩底弯矩值较为接近，比采用非隔震支座时(工况 1)均明显较小，几乎是工况 1 中的 70%。意味着 LNR 与 HDR 支座的采用可以很好地起到隔震作用，尤其在 E2 地震作用下隔震支座可以较大幅度削弱传递到桥墩的地震作用。工况 2 中 1 号及 4 号墩所采用的 LNR 支座刚度较小、桥墩较低，而 2 号及 3 号墩采用的 HDR 支座刚度较大、桥墩较高，因此四个桥墩承受的地震作用非常相近。尽管工况 2 与工况 3 在 2、3 号墩采用了一样的支座，但工况 2 中两个墩的墩底弯矩均比工况 3 中大。E2 地震作用下各墩的横向墩底弯矩均呈先增大后减小的对称变化趋势，采用隔震支座的工况墩底弯矩(工况 2 和工况 3)几乎是采用非隔震支座(工况 1)的 80%。

3.2.2 桥墩墩底剪力

表 5 统计了 E1 地震与 E2 地震作用下桥梁在三种工况中的桥墩纵向及横向墩底水平剪力。由表 5 中数据可见，总体而言各墩纵、横向墩底剪力最大值均出现在工况 1 中，采用隔震支座时(工况 2、工况 3)桥墩的墩底剪力是采用非隔震支座时(工况 1)的 80% 左右。在同一工况中 E1、E2 地震作用下 2 号、3 号墩的纵向墩底剪力比 1 号、4 号墩的小。

表 5 不同工况 E1、E2 地震作用下墩底剪力 kN

地震等级	墩号	纵向墩底剪力			横向墩底剪力		
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 1	工况 2	工况 3
E1 地震	1	1 166	1 025	863	1 046	756	694
	2	783	749	550	922	850	858
	3	822	786	586	930	855	866
	4	1 036	865	728	1 061	763	730
E2 地震	1	6 655	6 441	5 232	6 139	5 582	5 046
	2	5 717	4 073	4 176	6 011	4 545	5 006
	3	5 756	4 110	4 212	6 065	4 588	5 047
	4	6 548	6 293	5 104	6 236	5 658	5 105

E1 地震作用下，除了工况 1 外，横向墩底剪力沿着桥梁纵轴线呈先增大后减小的趋势，主要是由于各支座均处于弹性范围内，墩底剪力受到墩高与支座刚度的共同影响，规律与纵向墩底剪力有所不同。E2 地震作用下，各工况横向墩底剪力沿着桥梁纵轴线呈先减小后增大趋势，各墩剪力均较为接近。对比工况 2 及工况 3 的横向墩底剪力，由于工况 3 中 1 号及 4 号墩均采用 HDR 支座，在地震后发生屈服刚度较低，从而导致传向墩体的地震作用减小。

总之，减隔震支座的采用能够有效减小地震作用下桥梁的墩底剪力，意味着 LNR 与 HDR 支座的采用可以很好地起到耗能隔震的作用。

4 结论与讨论

本文对比分析了桥梁结构采用不同类型支座后在 E1、E2 地震作用下的地震响应，对不同支座的减隔震性能进行了模拟研究、分析了支座在地震作用下的力学表征，并着重分析了采用不同支座组合对桥梁在地震作用下支座位移、桥墩弯矩、主梁位移等的影响。得到以下主要结论：

(1)当桥梁结构各墩均采用板式橡胶支座时(工况 1)，桥梁主梁、支座、墩顶的纵、横向位移量均大于其他两种采用隔震支座的工况；不同墩的墩底弯矩和墩底剪力均高于其他两个工况，且在 E2 地震时尤为明显。

(2)当桥梁 1 号及 4 号墩采用滑动式高阻尼橡胶支座、2 号及 3 号桥墩采用高阻尼橡胶支座时(工况 2)，桥梁结构的各项地震响应大多介于其他两种工况之间，且 2 号及 3 号桥墩的墩底弯矩、剪力、墩顶位移等地震响应与工况 3 更为接近。

(3)当桥梁结构各墩均采用 HDR 支座时(工况 3)，桥梁主梁位移、桥墩墩底弯矩、剪力以及墩顶位移几乎均低于采用滑动支座及高阻尼橡胶支座组合的情况(工况 2)，且明显低于工况 1，桥梁结构不同地震响应的数值均为其他工况的 60% ~90%。意味着高阻尼橡胶支座的采用可以很好地起到耗能隔震的作用。

(4)E2 地震作用下，不同工况 1、4 号墩处的支座纵向位移均超过了支座极限变形量，意味着支座发生了破坏。且主梁纵、横向位移也相对较大，对于此类情况，应考虑更换抗震性能较高的支

(下转第 55 页)

roughness, engineering geological rock group, distance from faults, distance from roads, normalized vegetation index (NDVI) and land use type. Based on a GIS platform and open source MaxEnt software, two landslide susceptibility zoning map is conducted using two sampling types of centroid of landslide scarp and centroid of landslide body or boundary. The model training and prediction accuracies all proved the validity of the model. Meanwhile, the model built - in Jackknife test model revealed that the distance from the road, elevation and NDVI all are heavy contributed to the landslides happen and sampling ways do influence the results by influencing the topography index. ROC curve shows that a higher training accuracy using centroid of landslide body or boundary is appeared, and the LR class index is better than results using centroid of landslide scarp. While the latter performed better on test accuracy than the former one.

Keywords: landslide; MaxEnt model; LR Class index; landslide susceptibility assessment; the Central Yunnan Water Diversion Project

(上接第 38 页)

座或在梁端采用限制过大位移的限位型抗震措施。

(5)受桥墩高度差异影响，对于本研究中中墩相对较高的桥梁结构，需特别注意边墩抗推刚度对下部结构各项地震响应的影响，其墩底弯矩与墩底剪力均会相对较大。

桥梁结构的地震响应受许多因素影响，本文所研究的桥梁结构及支座形式均具有一定针对性，在后续研究中仍可以对其他结构类型的桥梁结构及支座减隔震效果进行深入分析。

参考文献：

[1] 石岩，王东升，韩建平，等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动，2017，37(5)：118－128.
[2] ZHANG Y M, SHI Y, LIU D K. Seismic effectiveness of multiple seismic measures on a continuous girder bridge[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 1－22.
[3] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报，2021，34(2)：1－97.
[4] 李建中，管仲国. 桥梁抗震设计理论发展：从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报，2017，30(12)：1－9，59.
[5] 刘宝石，任祥香，薛斌，等. 小尺寸铅芯橡胶支座力学性能试验研究[J]. 土木工程学报，2022，55(S1)：112－117，125.
[6] 万华平，卫志成，苏雷，等. 基于系统地震易损性的桥梁隔震支座优化设计[J]. 地震工程与工程振动，2021，41(5)：69－78.
[7] ZHANG Y M, LI J W. Effect of material characteristics of high damping rubber bearings on aseismic behaviors of a two－span simply supported beam bridge[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020: 1－8.
[8] 常亮，赵映翔，汤先来，等. 近场地震动作用下隔震桥梁的易损性分析[J]. 武汉理工大学学报，2021，43(6)：54－60.
[9] 马楠，陈砚，朱锋. 采用减隔震支座的桥梁抗震分析[J]. 灾害学，2019，34(S1)：170－173.
[10] 曾永平，董俊，陈克坚，等. 九度地震区高铁简支梁减隔震体系适应性分析[J]. 铁道工程学报，2020，37(2)：46－52.
[11] NAKATA N, ERB R, STEHMAN M. Mixed force and displacement control for testing base－isolated bearings in real－time hybrid simulation[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(6): 1055－1071.
[12] 刘洋，林均岐，刘金龙，等. RC 梁桥震后可恢复性评价方法研究[J]. 灾害学，2017，32(4)：224－229.
[13] CARDONE D, DOLCE M, PALERMO G. Direct displacement－based design of seismically isolated bridges[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2009, 7(2): 391－410.
[14] YAMAMOTO K, FUJITA K, TAKEWAKI I. Instantaneous earthquake input energy and sensitivity in base－isolated building[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2011, 20(6): 631－648.
[15] 王秀兰，梁鹏，孟极，等. 地震高烈度区中小跨径连续梁桥支座与桥墩组合选型研究[J]. 公路，2015，60(8)：59－66.
[16] 高健峰，李建中，方志伟. 不同减隔震支座对跨断层桥梁地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动，2021，41(4)：48－59.
[17] 钟海强，袁万城，党新志，等. 适用于中小跨径梁桥的组合橡胶支座减震性能[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2022，50(8)：1136－1144.
[18] 张煜敏，翁光远，代建波，等. 梁桥高阻尼橡胶支座的减隔震效果与优化配置研究[J]. 灾害学，2019，34(2)：16－20.
[19] 魏威，袁涌，谭平，等. 考虑压力影响的高阻尼橡胶隔震支座速度相关性本构模型及其地震响应研究[J]. 土木工程学报，2020，53(2)：23－32.

Study on the Influence of Different Isolation Bearing Combinations on the Seismic Performance of Continuous Beam Bridge

ZHANG Yumin, WENG Guangyuan, CHENG Kaikai, LAN Guanqi, LI Guangling

(*School of Civil Engineering, Xi' an Shiyou University, Xi' an* 710068, *China*)

Abstract: For a continuous beam bridge with different combinations of isolation bearings, its mechanical behaviors were studied by the time－history dynamic analysis method in order to compare and analyze the aseismic effects of different bearings. It is found during the study that a bridge with combination of laminated rubber bearings has relatively large seismic responses and the bearings have relatively small horizontal shear force. A bridge with combination of high damping rubber bearings has relatively small girder displacement, bending moment and shear force of pier bottom, and small displacement of pier top under an earthquake due to the hysteretic energy of the bearings, so the bridge structure has relatively good seismic performance. The seismic isolation design can reduce the damage of bridge structure caused by earthquake to a certain extent.

Keywords: continuous beam bridge; isolation bearings; seismic performance; seismic isolation design