

近断层板式橡胶支座连续梁桥减震方法研究



向需文^{1,*}, 刘菁稳²

¹ 华润置地 (武汉) 有限公司, 湖北武汉 430061

² 东深智水科技 (深圳) 股份有限公司武汉分公司, 湖北武汉 430070

摘要: 针对中国板式橡胶支座桥梁由于支座与梁体间弱连接, 在地震作用下常发桥梁碰撞、落梁等灾害的现状, 以双线性单元考虑板式橡胶支座的滑动效应, 采用 ANSYS 软件建立了某典型板式橡胶支座连续梁桥的空间动力计算模型, 选择脉冲型近场地震动和无脉冲型地震动作为输入, 进行了非线性地震反应时程分析。研究了近断层脉冲型地震动作用下在某墩引入铅芯橡胶支座和布置粘滞阻尼器两种减震方式的减震效果。结果表明, 近断层地震动的脉冲效应会显著增大桥梁响应。引入铅芯橡胶支座能有效的减小梁体位移和残余位移, 尤其是对残余位移能够很好地控制, 但是会对引入恢复力机制的桥墩带来一定的损伤; 粘滞阻尼器在一定程度上能够减小支座位移和残余位移, 且布置在较矮桥墩或桥台时减震效果更佳, 但由于恢复力机制的缺乏, 无法从根本上控制残余位移。

关键词: 板式橡胶支座; 近场地震动; 铅芯橡胶支座; 粘滞阻尼器

DOI: [10.57237/j.jsts.2024.01.001](https://doi.org/10.57237/j.jsts.2024.01.001)

Study on Seismic Response Control Methods for Continuous Beam Bridges with Plate Rubber Bearings in Near-Fault Regions

Xiang Xuwen^{1,*}, Liu Jingwen²

¹ China Resources Land (Wuhan) Co., Ltd, Wuhan 430061, China

² Dongshen Zhishui Technology (Shenzhen) Co., Ltd. Wuhan Branch, Wuhan 430070, China

Abstract: Aimed at the occurred seismic damage of bridge collision or unseating of girders in continuous bridges whose laminated rubber bearings are weakly connected with the pier and girder, the spatial element calculating model in which the sliding effect is characterized by a bilinear element of a typical continuous bridge on laminated rubber bridge was established by the finite program ANSYS. Based on the near-fault pulse-like ground motions and ground motion records without pulse effect, the seismic response analysis of the bridge using nonlinear time history method was carried out. The focus of this paper is to study the damping effect of the method in which laminated rubber bearings at the middle pier of the continuous were replaced by lead-rubber bearings and the method in which viscous dampers were used in the proper position of the bridge under the near-fault pulse type ground motion input. The results show that the pulse effect of the near-fault pulse-like ground motions significantly increases the bridge response. The use of LRB can effectively

*通信作者: 向需文, 2292467399@qq.com

reduce support displacement and residual displacement of the bridge, but the pier at which LRB are installed will be damaged to some extent. Viscous dampers can reduce maximum and residual displacement of the support to some certain extent, and the damping effect is better when the viscous dampers are arranged on the shorter piers or abutments, but the residual displacement can't be controlled fundamentally due to the lack of restoring force.

Keywords: Laminated Rubber Bearings; Near-Fault Earthquakes; Lead Rubber Bearings; Vicious Dampers

1 引言

中国中小跨径桥梁多采用两端桥台布置四氟滑板支座，而中间桥墩布置板式橡胶支座的形式。据汶川桥梁震害调查[1]显示，该类桥梁震害特征主要是梁体与板式橡胶支座顶面发生相对滑动，梁体产生较大位移，进而引起落梁、伸缩缝处梁体碰撞、挡块破坏等。尽管板式橡胶支座的设置起到了一定的隔震作用，但提供的摩擦耗能有限，梁体的位移响应仍然较大。针对地震位移较大的桥梁，不少学者做出了相应的减震研究，也取得了比较好的结果。如汤虎，李建中通过引入铅芯橡胶支座很好的控制了梁体地震位移以及残余位移[2]。王志强等和邓稳平等文献在桥梁的合适位置布置粘滞流体阻尼器，选择适当的阻尼器参数后能有效的降低结构关键部位相对位移，减轻相邻构件的碰撞[3, 4]。

近场地震动对结构有强烈的破坏作用，大大增大结构响应[5-7]。1994 年的美国 Northridge 地震、1995 年日本的 Kobe 地震、1999 年台湾的 Chichi 地震、2008 年的汶川地震都具有明显的速度和位移脉冲效应。其对工程的严重不利影响已引起了广泛关注。国内外学者对近场地震动的基本特征以及近场地震动的破裂向前方向性与滑冲效应对结构的影响进行了研究[8-12]，而针对近断层地震动作用下的板式橡胶支座桥梁的响应以及各种减震方法是否有效，目前的研究较少。

本文利用 ANSYS 有限元软件建立了某典型板式橡胶支座桥梁的空间有限元模型，在近场地震动输入下，对在某墩改设铅芯橡胶支座、设置粘滞阻尼器两种减震措施进行参数敏感性分析，提出了合理的地震位移控制措施，旨在为板式橡胶支座连续梁桥的减震设计和研究提供参考。

2 工程背景

海南省中宫岭 1 号大桥位于直线段上，跨越山谷及谷底冲沟。路线纵坡 2.3%，墩台采用平行布置。桥

梁上部结构为 5 跨跨度 25m 的装配式预应力混凝土箱型连续梁，采用多箱单独预制简支安装，现浇连续接头的先简支后连续的结构体系。梁高 1.6m，桥宽 12.75m；桥梁下部结构为分离式双柱式桥墩，柱距 7.3m，墩柱为直径 1.4m 的圆形截面，墩高 9.64m~16.05m，每个桥墩盖梁上布置 8 个板式橡胶支座，0 号桥台和 5 号桥台采用四氟滑板橡胶支座 GYZF4300×65，中间桥墩均采用普通板式橡胶支座 GYZ400×69。

3 动力计算模型及动力特性分析

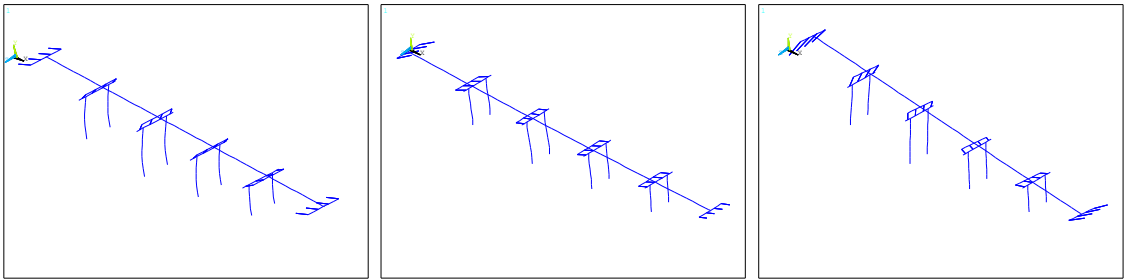
3.1 动力计算模型

常用的桥梁模型有脊骨梁模型、梁格模型、板壳元和实体有限元模型。各种建模方式都有其优缺点，需根据实际计算条件进行合理的选择。本文主要是研究连续梁桥在地震作用下的动力特性以及引入减震装置后的减震效果，对模型的精度要求并不是特别高，选用计算代价更小的脊骨梁模型即可满足工程要求。因此本文最终确定为脊骨梁建模方案，主梁、虚拟横梁、桥墩均用 beam4 单元模拟，桥墩底部固接，不考虑桩土相互作用。采用双线性分析单元 combin40 模拟板式橡胶支座的滑动性能，主要的力学参数包括初始刚度 K_1 、特征强度 F_{cr} 、屈服后刚度 K_2 。初始刚度 K_1 为支座未发生滑动时的剪切刚度，每个支座处的总水平剪切刚度 $K_j = nk$ ， n 为在该支座处设置的橡胶支座个数， k 为单个橡胶支座的剪切刚度，按照公路桥梁板式橡胶支座规范进行计算[13, 14]。屈服后刚度 K_2 为支座滑动后的剪切刚度，板式橡胶支座和四氟滑板支座滑动后没有恢复力机制，因此 K_2 可近似取为 0。特征强度为支座滑动时的临界力，可表示为支座接触面的动摩阻系数与支座承受的竖向反力乘积。参考公路桥梁板式橡胶支座规范，四氟滑板支座的动摩阻系数取为 0.06，板式橡胶支座的动摩阻系数为 0.2。

3.2 动力特性分析

采用子空间迭代法对该桥前 30 阶振型进行动力特性分析，限于篇幅，本文仅列举了前三阶振型及其对应的频率于图 1：

通过分析该桥的自振频率和振型可知，对于隔震梁桥，通常情况下，一阶振型是纵飘，纵飘振型的过早出现对于降低结构在地震作用下的内力有着重要的作用，但是由此引起的过大墩梁相对位移必须引起重视。



(a) 主梁纵飘，0.82353Hz (b) 主梁横飘，0.9724Hz (c) 主梁转动，1.1307Hz

图 1 桥梁前三阶模态

表 1 地震动资料

类型	编号	地震事件	记录站台	PGA/PGV (1/s)
脉冲型	1	Imperial Valley-07, 1979	El-centro	3.367
	2	Northridge-01, 1994	Jen-022	3.63
	3	Kobe, Japan, 1995	Takatori	5.02
无脉冲型	4	Northridge-01, 1994	HBL-HNT-000	16.35
	5	Northridge-01, 1994	Tustin-E Sycamore	19.51
	6	Northridge-01, 1994	Elizabeth Lake	20.89

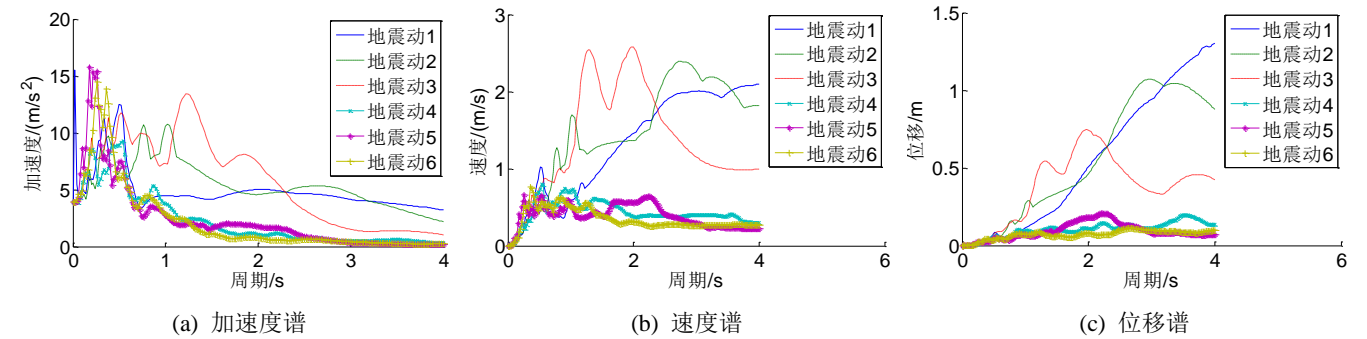


图 2 调幅后 6 条地震动反应谱

4 地震动输入

本文采用非线性时程分析法对桥梁进行地震响应分析，根据《公路桥梁抗震设计细则》[15]，对于未做地震安全性评价的桥址，按设计加速度反应谱合成相应的加速度时程。为考虑地震动的随机性，设计加速度时程不得少于三组。为考虑近断层脉冲型地震动的影响，从太平洋地震工程中心的地震波数据库中选择脉冲型地震动和无脉冲型地震动各 3 条，如表一所示。其中，

编号 1~编号 3 为近断层脉冲型地震动，编号 4~编号 6 为无脉冲型地震动。假定桥梁位于地震烈度 9 度区，将各条地震波的加速度时程曲线峰值调整为 0.4g，g 代表重力加速度。图 2 为调幅后 6 条地震动所对应的加速度谱、速度谱、位移谱。可以发现，相对于无脉冲型地震动，脉冲型地震动的反应谱谱值更大，反应谱谱值的峰值段更长，下降的也较为缓慢，含有更多的长周期成分，因此对主频较低的桥梁的地震响应影响更大。

5 近断层脉冲型地震动的影响

保持板式橡胶支座与梁底接触面的摩擦系数为0.2, 以表1中的6条调幅后的地震动作为输入, 研究脉冲型地震动对桥梁地震反应的影响。图3(a)为各地震动输入下0号桥台处、2号墩处某支座位移幅值(WYFZ)

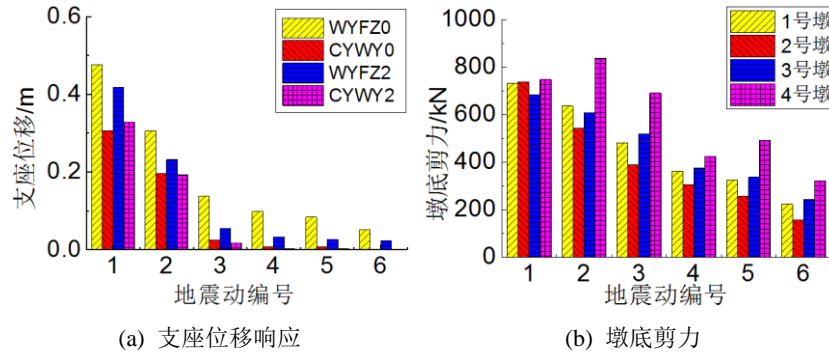


图3 不同地震动输入下桥梁关键部位响应

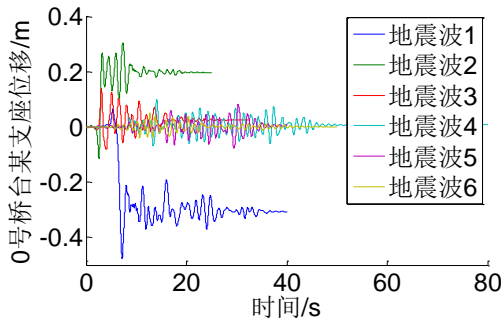


图4 不同地震动输入下支座位移时程

图4为各地震动输入下0号桥台处某支座位移时程曲线, 从图中可以看出, 在脉冲型地震动输入下, 梁体的位移幅值较大, 且在梁体朝某个方向发生较大位移后, 后续的地震惯性力不足以将梁体拉回到原来的平衡位置, 而在新的平衡位置往复运动, 产生较大的残余变形。实际工程中, 常常伴有余震的存在, 多次残余变形的累积会使得梁体离平衡位置越来越远, 可能会导致落梁现象发生, 因此应引起足够重视。

从上述分析可以看到, 近场脉冲型地震动危害性较大, 对桥梁位移响应、内力响应影响明显。实际上, 隔震桥梁频率较低, 而近断层脉冲型地震动能量集中在低频率, 可能会使结构处于共振区, 因此脉冲型地震动作用下桥梁响应较大; 而无脉冲型地震动能量通常集中在高频区, 驱动力的频率远大于桥梁的自振频率, 荷载转换快, 桥梁来不及做出相应的反应, 因而

以及残余位移(CYWY), 图3(b)为不同地震动输入下中间各桥墩剪力。可以发现, 尽管地震动的加速度峰值均为0.4g, 但是不同地震动输入下, 桥梁响应差别较大。与无脉冲型地震动相比, 近断层脉冲型地震动作用下桥梁墩梁相对位移、残余位移以及各墩剪力增大显著。

无脉冲型地震动作用下桥梁响应会更小。

6 桥梁减震研究

对于板式橡胶支座连续梁桥, 板式橡胶支座的存在起到了延长结构周期, 降低地震力的作用, 但是这也必然会导致结构位移的增大, 尤其是在本文的脉冲型地震动作用下可能会产生落梁。为了减小结构的位移反应, 可以引入阻尼机制进行耗能。总体来说, 阻尼机制的引入方式有两种。其一, 改善板式橡胶支座的橡胶特性, 开发具有高阻尼的橡胶支座如铅芯橡胶支座。铅芯橡胶支座是在普通板式橡胶支座中心加入铅芯, 利用铅芯的剪切变形耗散地震能量, 具有良好的耐久性。其二, 引入外来的阻尼机制如粘滞阻尼器, 板式橡胶支座与粘滞阻尼器的共同作用, 一方面在风和较小地震作用下时, 板式橡胶支座提供刚度满足桥梁的正常使用要求, 另一方面在较大地震作用下时阻尼器产生耗能减小地震位移。

6.1 引入铅芯橡胶支座减震

6.1.1 引入恢复力机制对梁体响应的影响

从前面的计算结果可以发现, 在脉冲型地震动作用下, 板式橡胶支座会有较大的残余位移, 这是由于板式橡胶支座发生滑动后恢复力机制的缺乏, 仅仅靠反向地震惯性作用并不能保证梁体恢复到原来的平衡

位置, 因此探究恢复力机制对梁体位移影响非常有必要。本文在普通板式橡胶支座的动摩阻系数为 0.2、1 号地震动输入下, 仅在 2 号墩引入恢复力机制, 在板式橡胶支座发生滑动后, 引入 K_2 分别为 0.4, 0.8, 1.2, 1.6MN/m, 其余参数不变, 计算得到的结果如图 5。

图 5 为恢复力机制 K_2 对各桥墩处某支座地震位移

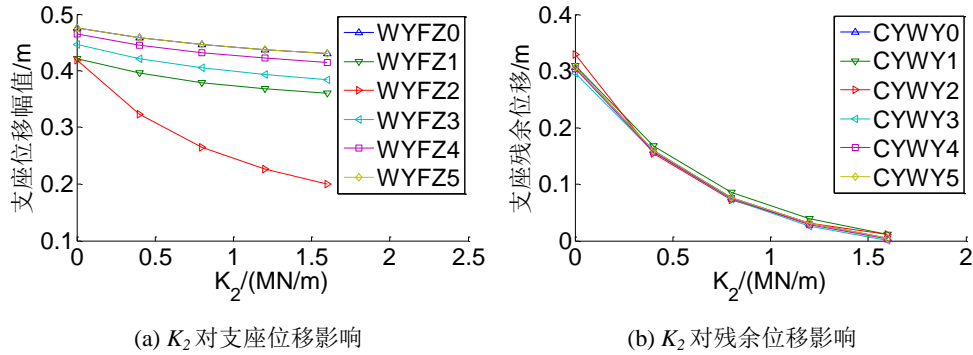


图 5 K_2 对梁体响应的影响

6.1.2 引入铅芯橡胶支座的控制方法

由上述的分析可以发现, 恢复力的存在能够有效的减小桥梁支座残余位移, 但对桥梁支座位移的减小有限。要想使桥梁支座位移和残余位移均能减小, 需合理的设置屈服前后刚度以及屈服力。铅芯橡胶支座具有良好的滞回性能, 在桥梁隔震设计中应用广泛。铅芯的存在增加了其初始剪切刚度, 铅芯屈服后接近于普通叠层橡胶支座。根据铅橡胶支座的特点, 本文在该桥梁的某一中间桥墩改设铅芯橡胶支座, 其余各墩仍然设置板式橡胶支座。采用这种设置方式, 通过铅芯橡胶支座提供制动力所需的初始刚度, 而其余墩仍设普通板式橡胶支座, 保证了梁在温度等荷载作用下的所需的变形。此外, 在桥梁遭遇强震作用, 铅芯屈服, 普通板式橡胶支座发生滑动时, 铅芯橡胶支座仍能提供接近于普通叠层橡胶支座的剪切刚度。这种恢复力机制的存在改变了桥梁的随遇平衡状态, 有效的减小了梁体残余位移。

将 2 号墩改设铅芯橡胶支座, 研究铅芯橡胶支座不同参数对梁体位移等的影响。铅芯橡胶支座初始刚度 K_1 设为 20MN/m, 屈服后刚度与屈服前刚度比分别为 0、0.02、0.04、0.06、0.08, 铅芯屈服力分别为 0.05N、0.1N、0.15N、0.2N, N 为支座城承受的竖向反力。

的影响, 可以看到, 各墩支座位移幅值和残余位移均随 K_2 的增加而减小。引入恢复力机制的桥墩支座位移减小速度的要比未引入恢复力机制的桥墩快。相对于支座位移, 支座残余位移减小的更快, 残余位移得到了较好的控制, 说明引入恢复力是控制支座残余位移的关键。

图 6 为铅芯橡胶支座不同参数对 2 号墩某支座最大位移、2 号墩某支座残余位移、2 号墩墩底剪力减震效果的影响。定义减震率为原支座数值减去 LRB 数值后除以原支座数值的百分比, 负数表示桥梁响应的放大。由图 6 可以看出:

① 铅芯橡胶支座的引入能够有效的减小桥梁支座位移响应, 且对残余位移的减震效果尤为突出。以 $K_2/K_1=0.06$, $F_{cr}/N=0.2$ 为例, 2 号墩支座位移和残余位移分别减少 54.5% 和 91.6%。相对于原来的板式橡胶支座, 铅芯橡胶支座有更大的初始刚度来控制支座位移, 在铅芯屈服后, 铅芯橡胶支座仍存在恢复力机制, 因此对残余位移的控制特别有效。

② 在 K_2/K_1 一定时, 铅芯屈服力的增加也能提高位移减震率。然而, 随着 K_2/K_1 的增大, 不同铅芯屈服力下的位移减震率曲线越来越靠近, 也就是说铅芯屈服力的增加对减震率的贡献越来越小。铅芯橡胶支座减震的关键是设置合理的屈服后刚度与屈服前刚度的比值。

③ 铅芯橡胶支座的引入, 特别是在 K_2/K_1 较大时, 桥梁位移响应能得到很好的控制, 但是这也会带来引入恢复力机制的桥墩剪力的增大, 桥墩可能产生一定的塑性损伤。实际工程中桥墩是作为延性构件进行抗震设计的, 因此轻微的损伤是可以接受的。

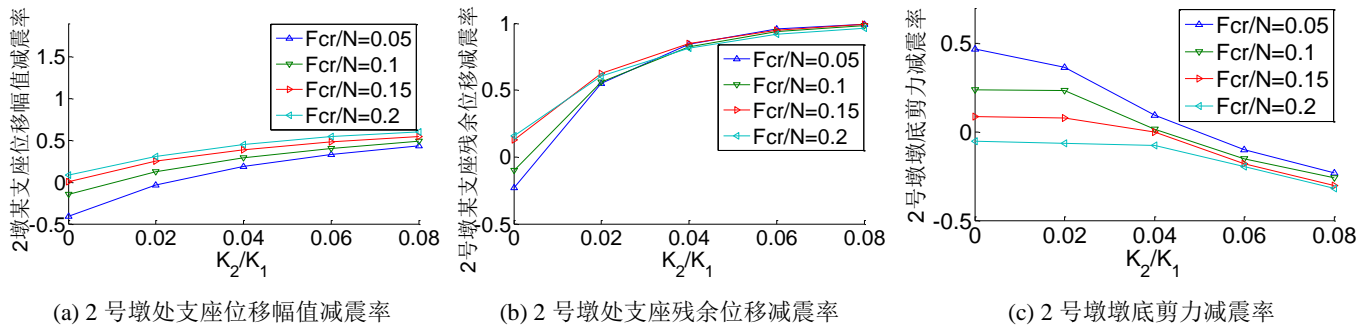


图6 铅芯橡胶支座不同参数下2号墩支座位移及墩底剪力减震率

6.2 引入粘滞阻尼器减震

橡胶支座作为柔性支撑，在一定程度上能够延长结构周期，起到一定的隔震作用，但提供的阻尼耗能有限，限位能力不足。而对于近断层脉冲型地震动，会存在较大的速度脉冲，选用速度型阻尼器进行耗能，可能是个有效的减震方法。Talyan N. 等和 Zhen L 等提出了在橡胶支座桥梁中引入粘滞阻尼器的减震方法，一方面利用柔性的橡胶支座延长结构周期，减小地震惯性力；另一方面利用阻尼器耗散地震能量，减小地震反应[16, 17]。

在原板式橡胶支座桥梁模型中设置粘滞阻尼器，输入地震波 1，为考虑粘滞阻尼器不同布置位置的减震效果，设置了三种粘滞阻尼器的设置工况：工况一在中间 1~4 号墩均设置粘滞阻尼器；工况二在 1、3、4 号桥墩设置粘滞阻尼器；工况三只在两端桥台设置粘滞阻尼器。

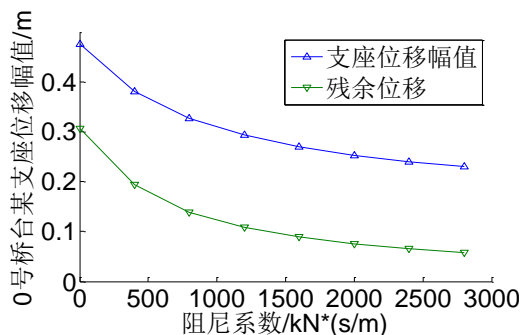
图 7、图 8、图 9 分别给出了三种工况下粘滞阻尼器不同参数对梁体最大位移、梁体残余位移及各墩墩底剪力的影响。从图中可以看出：

① 在板式橡胶支座桥梁中组合使用粘滞阻尼器能有效减小梁体地震位移及残余位移，但同时增大了设置粘滞阻尼器桥墩（桥台）的地震反应。随着阻尼

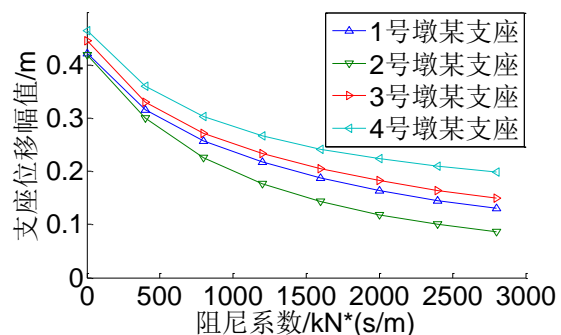
系数的增大，梁体位移、残余位移等的减小越来越缓慢，说明阻尼系数的选取并不是越大越好。

② 通常情况下，梁体地震位移及残余位移、支座位移随阻尼系数的增加而减小，设置粘滞阻尼器的桥墩（桥台）剪力随阻尼系数增加而增加，而未设粘滞阻尼器桥墩剪力随阻尼系数增大反而减小，这是由于阻尼器承担了部分地震作用，减轻了未设粘滞阻尼器桥墩的响应。

③ 桥墩墩高分别为 1 号墩 14.209m、2 号墩 16.443m、3 号墩 13.538m、4 号墩 10.094m，4 号桥墩最矮，2 号桥墩最高。从图 7 可以看到，随着阻尼系数的增加，矮墩的支座位移减小的慢，高墩的支座位移减小的快；矮墩的剪力增大的快，而高墩的剪力增大的慢。设在高墩的阻尼器最大阻尼随阻尼系数变化并不大，说明设在该处的阻尼器并没有发挥明显的作用。图 8 相对于图 7 仅仅是去除了设在高墩处的阻尼器，可以发现两种工况下各关键部位的响应差别并不大。实质上，阻尼力不仅与阻尼系数相关，还与速度相关，图 7(e)给出的是随阻尼系数变化各支座最大速度变化曲线，可以发现矮墩支座的最大速度减小的慢，逐步趋于稳定，而高墩支座的最大速度减小的快。因此粘滞阻尼器设在矮墩上减震效果更好。



(a) 0号桥台支座位移



(b) 中间桥墩支座位移

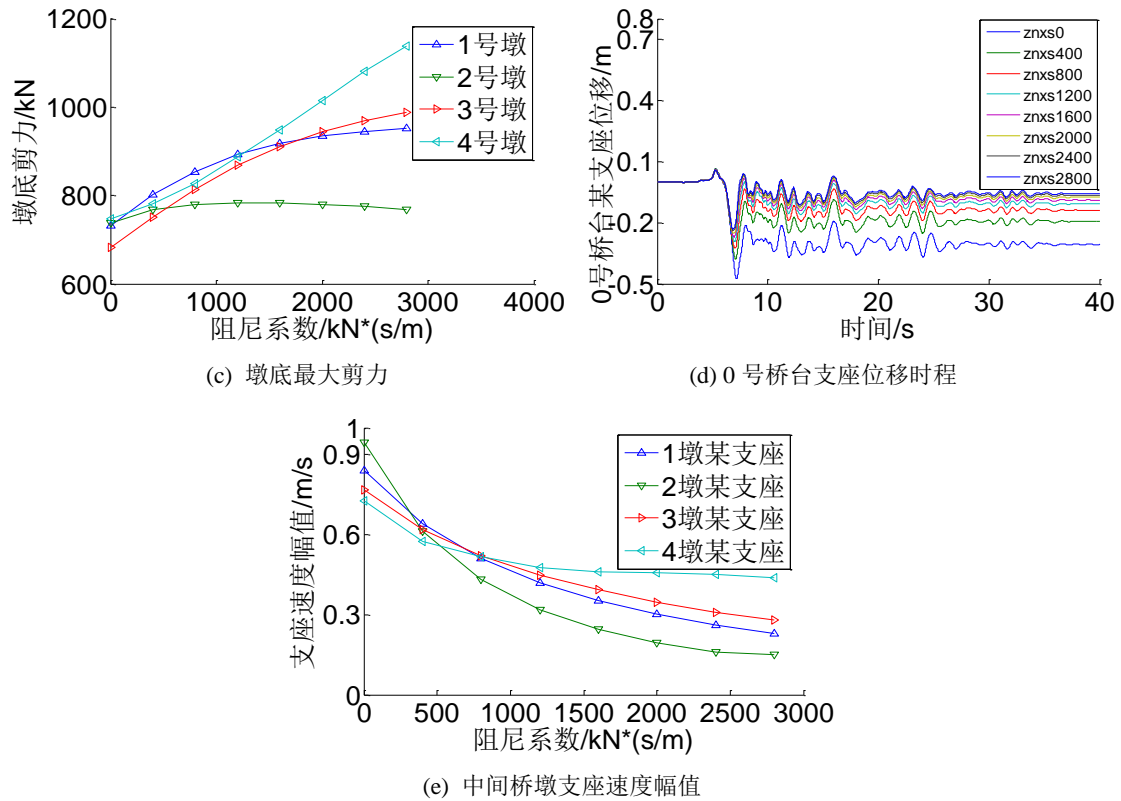


图7 工况1下桥梁各处响应

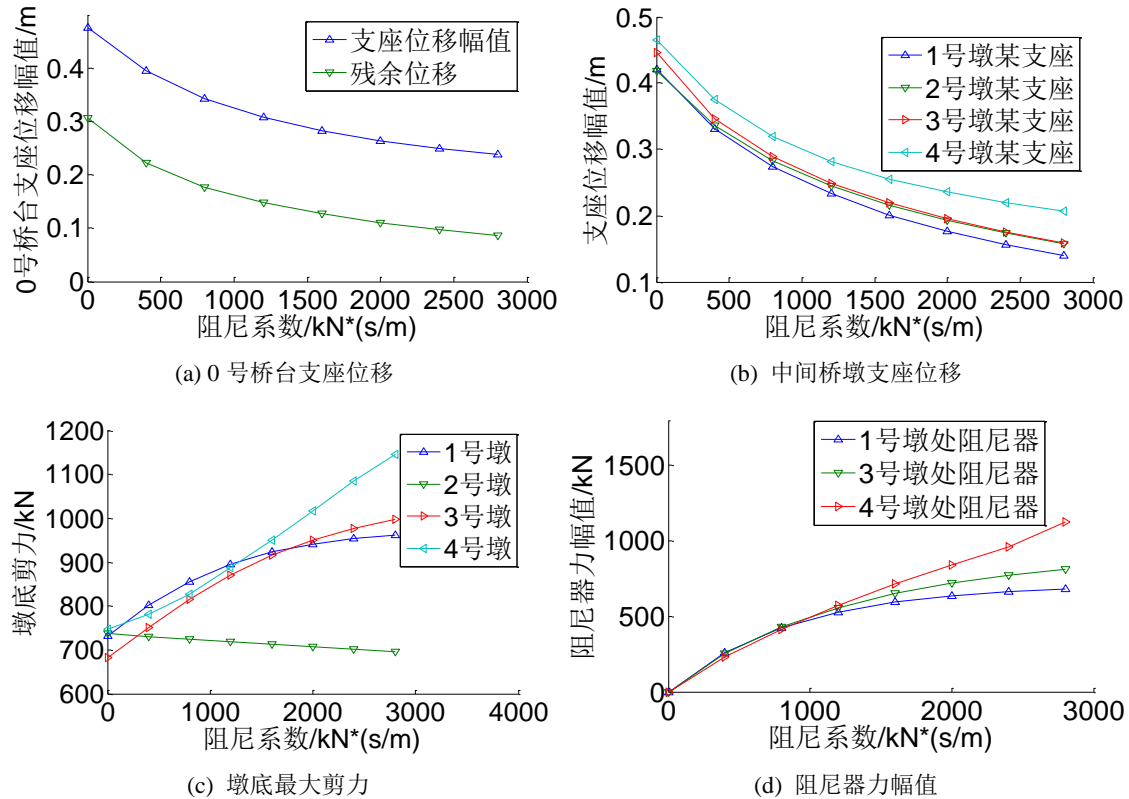


图8 工况2下桥梁各处响应

④ 以阻尼系数为 $2800\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ 为例, 工况 2 桥台支座位移幅值减小 49.9%, 残余位移减小 71.9%、4 号墩剪力增大 53.4%。而工况 3 桥台支座位移幅值减小 55.5%、梁体残余位移 68%、中间墩剪力均减小。在布置的粘滞阻尼器数量更少的情况下, 工况 3 的综合减

震效果比工况 2 好, 当然这种优势是以增大桥台受力为代价换来的。在实际工程中, 桥台一般为刚性桥台。因此, 当桥台的稳定性满足时, 在桥台布置粘滞阻尼器可以达到较好的减震效果。

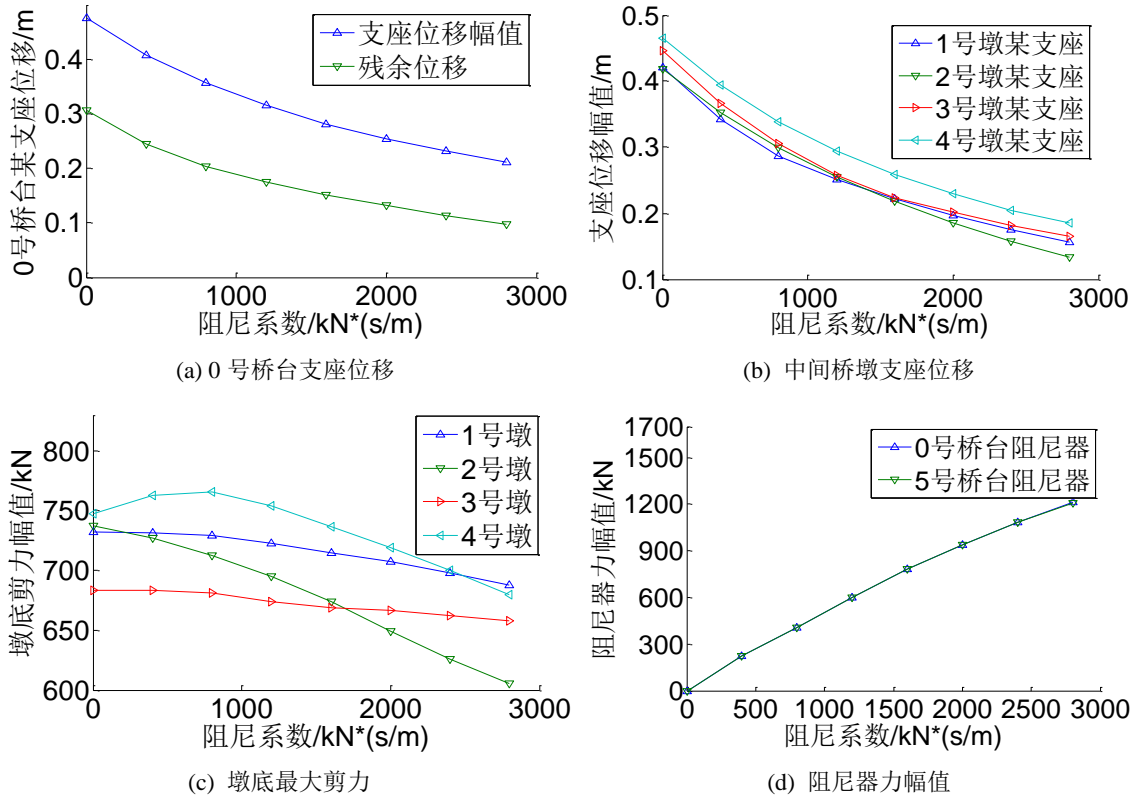


图9 工况3下桥梁各处响应

7 结论

本文通过建立某桥梁的空间有限元模型, 考虑板式橡胶支座的滑动作用, 研究了地震动频谱特性对该类桥梁响应的影响, 并进一步对比研究了铅芯橡胶支座、粘滞阻尼器、拉索减震的减震效果, 得出如下结论:

- (1) 相对于无脉冲型地震动, 近断层脉冲型地震动会使结构产生更大的支座位移、残余位移以及较大的墩底剪力。
- (2) 在板式橡胶支座隔震梁桥某中间墩引入铅芯橡胶支座能够较好的提供恢复力, 帮助梁体恢复到原来位置。该方法能有效的减小梁体位移和残余位移, 尤其是对残余位移能够很好地控

制。当然, 这在一定程度上会增大引入铅芯橡胶支座桥墩的地震反应, 但这种损伤是可接受的。

- (3) 粘滞阻尼器在一定程度上能够减小梁体地震位移和残余位移, 尤其是布置在较矮的桥墩或者桥台时减震效果更佳, 但由于恢复力机制的缺乏, 无法从根本上控制残余位移。
- (4) 铅芯橡胶支座减震和粘滞阻尼器减震各有优缺点, 可以综合利用, 如设置一种具有刚度的阻尼器, 从而使梁体位移和残余位移都能得到较好的控制, 而桥墩的受力也能得到改善。

参考文献

- [1] Li Jianzhong, Peng Tianbo, Xu Yan. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.
- [2] 汤虎, 李建中. 板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法 [J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 110-116.
- [3] 王志强, 胡世德, 范立础. 东海大桥粘滞阻尼器参数研究 [J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 37-42.
- [4] 邓稳平, 王浩, 李爱群, 等. 高烈度区连续梁桥减震的粘滞阻尼器参数分析 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 92-97.
- [5] Jiang L, Zhong J, Yuan W. The pulse effect on the isolation device optimization of simply supported bridges in near-fault regions [C] // Structures. Elsevier, 2020, 27: 853-867.
- [6] Zhong J, Zhu Y, Han Q. Impact of vertical ground motion on the statistical analysis of seismic demand for frictional isolated bridge in near-fault regions [J]. Engineering Structures, 2023, 278: 115512.
- [7] Güneş N. Effects of near-fault pulse-like ground motions on seismically isolated buildings [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 52: 104508.
- [8] 贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 1-12.
- [9] Mazza F, Vulcano A. Effects of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated r.c. framed buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(41): 211-232.
- [10] Gazetas G, Garini E, Anastasopoulos I, et al. Effects of near-fault ground shaking on sliding systems. [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1906-1921.
- [11] Sengupta A, Quadery L, Sarkar S, et al. Influence of Bidirectional Near-Fault Excitations on RC Bridge Piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(7).
- [12] 江义, 杨迪雄, 李刚. 近断层地震动向前方向性效应和滑冲效应对高层钢结构地震反应的影响 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 103-110.
- [13] JT/T 4-2004, 公路桥梁板式橡胶支座 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] JT/T 663-2006. 公路桥梁板式橡胶支座规格系列 [S].
- [15] JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则 [S].
- [16] Talyan N, Elias S, Matsagar V. Earthquake response control of isolated bridges using supplementary passive dampers [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2021, 26(2): 04021002.
- [17] Zhen L, Dejian L, Leihua P, et al. Study on the damping efficiency of continuous beam bridge with constant cross-section applied by lead rubber bearings and fluid viscous dampers [J]. Noise & Vibration Worldwide, 2020, 51(4-5): 85-92.

作者简介

向需文

1993 年生, 硕士, 二级建造师. 研究方向为桥梁减隔震研究.

E-mail: 2292467399@qq.com