

高烈度区长联大跨连续梁桥减隔震方案研究

陈露晔 杨世杰 欧阳静 陆潇雄 宋志远 袁江川

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘要] 基于长联大跨连续梁桥在高烈度区地震响应的特点,引入摩擦摆支座、液体粘滞阻尼器(FVD)等减隔震装置,提出了三种减隔震方案。采用非线性时程分析方法,深度剖析三种减隔震方案的减震效果。结果表明:摩擦摆支座方案会产生较大的墩梁相对位移,液体粘滞阻尼器方案,能够较好的限制墩梁相对位移,但固定墩内力减震效果有限,液体粘滞阻尼器(FVD)配合摩擦摆支座联合减隔震方案在实现限制墩梁位移的同时能够显著降低固定墩内力,是一种有效解决方案。

[关键词] 摩擦摆支座;液体粘滞阻尼器;减隔震;非线性时程分析;减震率

1 引言

长联大跨连续梁桥因其跨越能力大,比例协调,刚度大,结构简单,施工工艺成熟,伸缩缝少等众多优点,目前应用较为广泛。近年来连续梁桥正在向大跨、超长联的方向发展^[1]。长联大跨连续梁桥通常采用盆式橡胶支座,为了适应温度变化及混凝土收缩徐变的影响,全桥仅设置一个固定墩,全桥制动力由固定墩和其他桥墩的活动支座摩擦力共同承担,以满足桥梁的正常使用。由于只设置一个固定墩,在地震作用下,上部结构巨大的质量引起的地震力通常只能由固定墩承担,因此固定墩的抗震设计极为不利^[2-4]。通过减弱制动墩对主梁的约束来减小制动墩顶有效主梁质量和实现各墩协同抗震,是该类桥梁减隔震设计的主要思路^[5]。

近年来,国内外科研工作者和工程技术人员对这一课题进行了大量的研究。夏修身^[4]等采用双线性滞回模型模拟摩擦摆支座,通过对超长联大跨连续梁桥减隔震效果研究表明:摩擦摆支座隔震时能显著地提高其抗震性能。邵长江^[6]等通过对1/10缩尺模型的连续梁桥振动台

试验,对桥梁位移、加速度及应变响应进行了分析,结果表明:摩擦摆支座可以有效降低桥墩内力响应。杜桃明^[7]等通过对高烈度地区不对称刚构-连续梁桥减隔震设计研究,提出粘滞阻尼器方案能够有效控制墩底纵向弯矩、墩梁相对位移和梁端位移,减隔震效果明显。曹凤华^[8]等以液体粘滞阻尼器(FVD)对某高速公路连续梁桥进行抗震加固研究,结果表明:FVD装置可有效控制支座地震位移,效果显著。但针对高烈度区大跨长联连续梁桥采用上述减隔震装置抗震性能研究相对较少^[9]。

以某长联大跨连续梁桥为工程背景,采用摩擦摆支座、液体粘滞阻尼器(FVD)等减隔震装置,提出3种减隔震方案,以非线性时程分析方法,深入剖析这3种减隔震方案在罕遇地震下的减震效果。

2 动力分析模型

2.1 工程背景

某长联大跨连续梁桥桥址抗震设防烈度为8度,跨径为(50+8×100+50)m预应力混凝土连续梁桥。主梁截面形式为单箱单室直腹板变高箱梁。主梁跨中及边支点梁高3.2m,中支点

收稿日期:2021-09-22

作者简介:陈露晔(1983-),男,高级工程师,主要从事桥梁工程设计与研究工作。

梁高为 6.6m。材料为 C50 混凝土，箱梁底板下缘按二次抛物线变化，梁底抛物线方程为： $y = -0.001776x^2$ 。梁顶宽 9.4m，梁底宽度变化为 5.5m~6.5m，顶板厚度为 0.32m~0.70m，底板厚度为 0.32m~0.80m，上部结构总重 518435kN，桥型布置图见图 1，支点以及跨中截面尺寸见图 2。

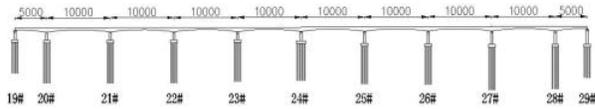


图 1 (50+8×100+50) m 连续梁桥总体布置 (单位: cm)

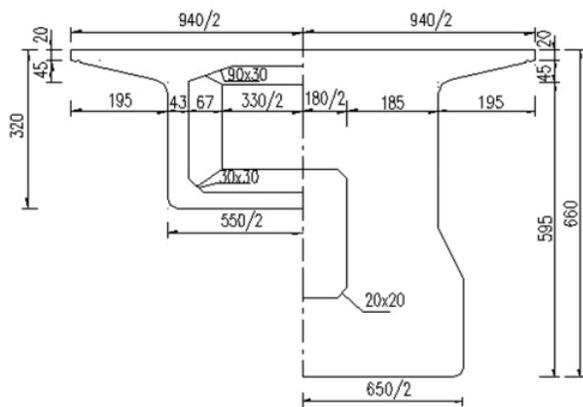


图 2 支点截面和跨中截面 (单位: cm)

2.2 减隔震装置减震机理及力学模型

2.2.1 摩擦摆支座减震机理

双曲面摩擦摆支座的主要构件是球型铸钢曲面和一个具有球型曲面的滑块，二者曲率半径相同。在水平地震力作用下，摩擦摆支座沿下支座摆动，球面的标高发生变化，上部结构高度随之增加，摩擦摆支座将一部分地震能量转化为势能，另一部分转化为摩擦产生的热能，从而达到消耗地震力，降低结构地震反应的目的。地震作用后，由于上部结构重力，使得摩擦摆支座能自动复位，大大节省人力调整。支座可以在任何方向滑动，支座的尺寸设计受最大地震设计位移控制。摩擦摆支座结构构造见图 3。

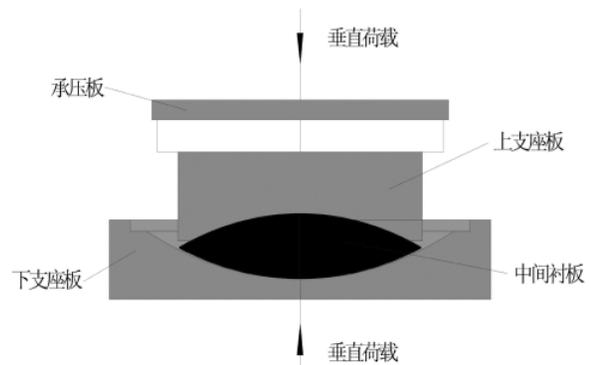


图 3 摩擦摆支座构造图

2.2.2 摩擦摆支座力学模型

当桥梁结构受到的地震力较小时，即地震力小于静摩擦力时，上部结构不发生滑动，当地震力大于静摩擦力时，摩擦摆支座发生滑动，随即发挥减隔震作用，滑动状态下，摩擦摆支座力与位移的关系见图 5。

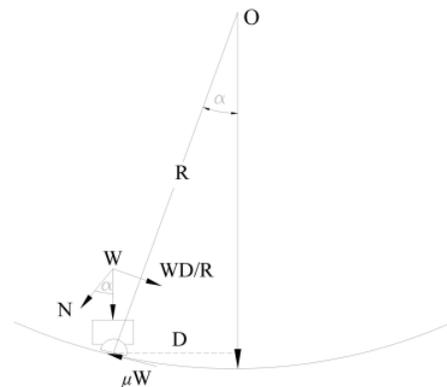


图 4 摩擦摆支座摆动机理

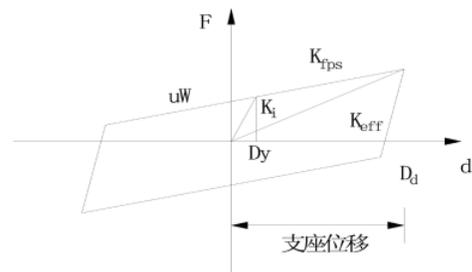


图 5 摩擦摆支座恢复力模型

摩擦摆支座本构关系为： $F = WD/R + \mu W (\text{sgn}\dot{D})$ 结构自重沿滑动曲面切线方向的分力提供恢复力，第二项为滑块与滑动曲面相对滑动

时产生的摩擦力。可见，摩擦摆支座的切向力 F 与支座的位移 D 及摩擦系数有关，通过调整滑动面的曲率半径 R 及滑动面的摩擦系数 μ 可以改变支座承担的地震力。

2.2.3 粘滞阻尼器 (FVD) 构造原理

FVD 装置由钢质圆柱缸体，活塞或节流孔和有机硅为流动介质组成。当结构受到水平地震力作用时，活塞杆在圆柱型缸体内往复运动，有机硅介质通过活塞与缸体之间的缝隙或节流孔从一个腔体流到另一个腔体内，并且与缸体产生剧烈的摩擦，同时产生巨大的节流阻尼，形成阻尼力。将地震荷载转化为液体粘滞阻尼器往复运动所产生的热能，耗散地震力，控制桥梁结构位移。阻尼器的构造见图 6 所示：

粘滞阻尼器相较于其他减隔震装置的主要特点是：第一，弹塑性阻尼装置、摩擦阻尼装置的屈服力或摩擦力是常值，对于液体粘滞阻尼器装置，当阻尼指数 $\alpha = 1$ 时，阻尼力与速度成正比，因此桥墩达到最大变形时，粘滞阻尼器的阻尼力最小，在桥墩变形速度最大时，粘滞阻尼器的阻尼力达到最大，此时桥梁变形最小，内力最小，因此阻尼器不会显著增加桥墩受力。第二，在正常使用状态下，液体粘滞阻尼器必须克服本身的屈服力或摩擦力后才能自由变形，然而阻尼器在正常使用状态下产生的抗力接近于零，因此不会影响桥梁结构的正常使用功能。

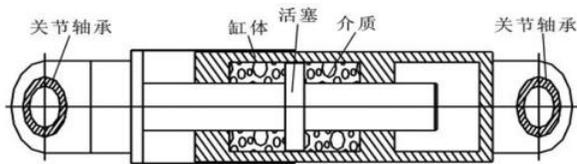


图 6 液体粘滞阻尼器构造图

2.2.4 粘滞阻尼器 (FVD) 力学模型

在 1991 年和 1993 年，Makris Constantinou 和 Symas 提出了基于 Maxwell 模型的计算模型并对其逐渐进行了完善和简化，常用的阻尼模型有 Kelvin 模型和阻尼-支撑组合模型，目前 Maxwell 模型是较为常用的模型见图 7 所示。

液体粘滞阻尼器的本构关系为： $F = Cv^\alpha$ ，公式中 F —表示阻尼力的大小； C —表示阻尼系数； v —表示阻尼器的相对运动速度； α —表示阻尼指数，由油缸内介质的性质决定。

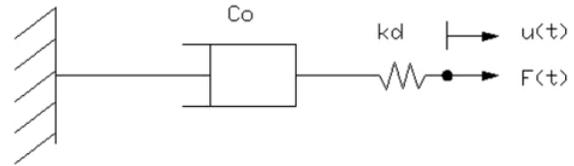


图 7 Maxwell 模型

2.3 有限元模型

基于有限元分析软件 Midas/Civil 2020 建立全桥空间有限元模型。主梁及桥墩均采用梁单元模拟，全桥共 392 个节点，336 个单元。边墩考虑邻跨梁体质量的影响，利用集中质量单元实现。24#墩为固定墩，墩梁之间的约束普通支座采用主从关系和弹性连接来模拟，摩擦摆支座和阻尼器采用软件自带支座模拟单元实现，基础采用 6 自由度约束模拟，全桥计算模型见图 8 所示。

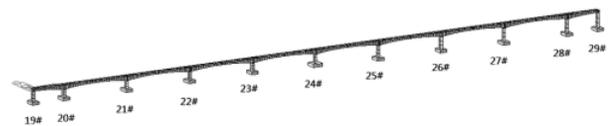


图 8 全桥计算有限元模型

2.4 地震动输入

采用场地地震安全性评价报告提供的三条 50 年超越概率 2%（罕遇地震）的场地加速度时程进行非线性时程反应分析。

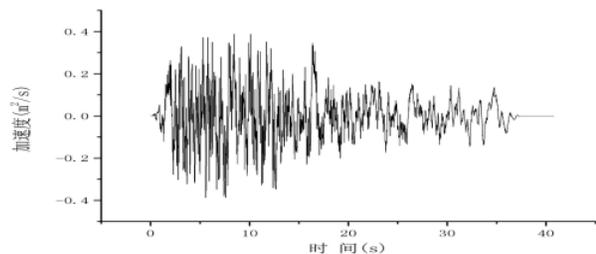


图 9 罕遇第一条人工地震波 (DM201)

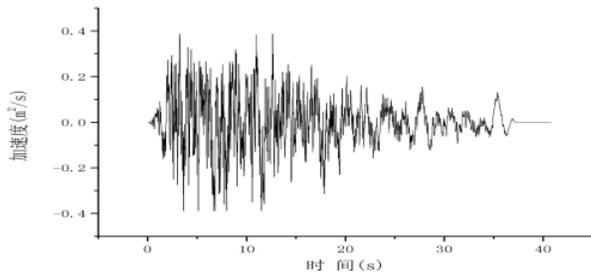


图 10 罕遇第二条人工地震波 (DM2022)

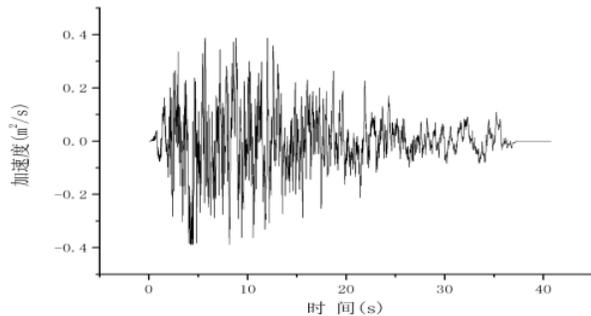


图 11 罕遇第三条人工地震波 (DM2023)

为了比较减隔震装置的减震效果,以墩底弯矩、墩底剪力和墩梁相对位移为研究对象,定义减震率如下:减震率=(非减隔震桥梁地震反应-减隔震桥梁地震反应)/非减隔震桥梁地震反应×100%

3 减隔震方案及减震效果分析

3.1 非线性分析方法

非线性时程分析方法利用直接积分法(Newmark-β法)进行非线性运动方程的求解。Newmark-β法是一种加速度法,依据时间增量内假定的加速度变化规律来计算结构动力响应,可以精确的考虑地基和结构的复杂作用、地震时程相位差及不同地震时程多分量多点输入、结构各种非线性因素,以及分块阻尼的影响,是公认的较为精确的方法,所以本桥采用非线性时程方法分析桥梁结构地震反应。

3.2 减隔震方案

常规连续梁桥通常设置普通盆式橡胶支座,为研究摩擦摆支座和粘滞阻尼器对桥梁的减震效果,定义四种工况如表 1 所示。

表 1 工况定义

工况 1	普通支座方案
工况 2	摩擦摆支座方案
工况 3	液体粘滞阻尼器配合普通支座方案
工况 4	液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案

3.3 减隔震效果分析

3.3.1 摩擦摆支座方案分析 (工况 2)

每个桥墩墩顶均布置两个摩擦摆支座,全桥共 11 个桥墩,共需布置 22 个摩擦摆支座,摩擦摆支座的布置见图 12 所示。



图 12 摩擦摆支座布置示意图

摩擦摆支座参数取值如下:曲面半径 R 分别取 3m、3.5m、4m、4.5m、5m、5.5m,摩擦因数 u 分别取 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07,经过对比分析,当曲面半径取 4m,摩擦系数取 0.03 时减震效果最佳。减震计算效果如表 2 所示。

表 2 工况 2 摩擦摆支座方案减震率

墩号	顺桥			横桥		
	弯矩	剪力	支座位移	弯矩	剪力	支座位移
19#墩	-12.54%	-3.15%	0.21%	41.57%	24.55%	-45.93%
20#墩	-269.82%	29.67%	4.50%	80.19%	71.47%	-76.69%
21#墩	-279.55%	24.82%	5.32%	81.54%	77.01%	-94.55%
22#墩	-264.66%	26.59%	1.95%	78.49%	74.79%	-34.67%
23#墩	-265.17%	25.35%	5.81%	81.49%	77.75%	-96.00%
24#墩	96.29%	12.00%	/	81.74%	71.72%	/
25#墩	-110.05%	26.37%	6.88%	75.39%	69.81%	-40.33%
26#墩	-102.92%	28.72%	-0.33%	79.72%	74.15%	-61.73%
27#墩	-92.22%	27.88%	5.25%	78.90%	65.36%	-20.53%
28#墩	4.25%	2.18%	2.24%	43.31%	20.33%	-23.36%
29#墩	-120.38%	91.23%	-2.57%	80.18%	76.47%	-30.81%

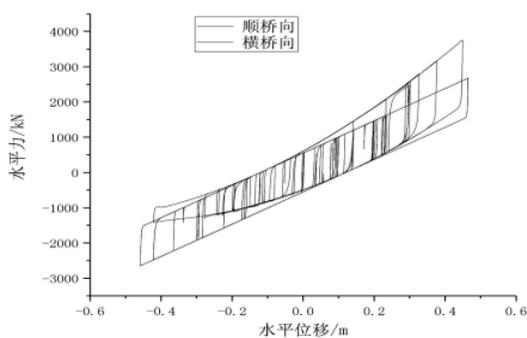


图 13 固定墩摩擦摆支座向滞回曲线

由表 2 和图 13 可知：

(1) 采用摩擦摆支座后，固定墩纵、横桥向墩底弯矩相比普通支座方案显著减小，顺桥向固定墩减震率为 96.29%，横桥向减震率为 81.74%，纵桥向支座位移减震率较小；横桥向活动墩支座位移减震率为负值，活动墩横桥向墩梁相对位移增加。

(2) 摩擦摆支座纵、横桥向滞回曲线饱满，较好的吸收了地震能量，有效发挥减隔震作用。

(3) 在高烈度地区，采用摩擦摆支座减隔震方案可有效提高桥梁抗震性能，固定墩墩梁相对位移达到了 48cm，墩梁相对位移较大。需根据桥梁实际使用情况，考虑设置防落梁装置。

3.3.2 液体粘滞阻尼器 (FVD) 方案分析 (工况 3)

液体粘滞阻尼器在 20#、21#、22#、23#、25#、26#、27#、28#墩各设置四个液体粘滞阻尼器，全桥共设置 32 个阻尼器，阻尼器通过外连杆杆端与主梁和桥墩相连，纵桥向布置，布置方式见图 14 所示：

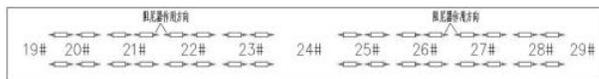


图 14 液体粘滞阻尼器布置方式

液体粘滞阻尼器参数取值：分别取阻尼系数 $C = 1000$ 、 $C = 1500$ 、 $C = 2000$ 、 $C = 2500$ 、 $C = 3000 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$ 、取阻尼指数 $\alpha = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.5 、 0.6 进行分析，当 $C = 2000 \text{ kN} \cdot$

$(\text{s/m})^\alpha$ ，阻尼指数 $\alpha = 0.4$ 时减震效果最佳。减震计算效果如表 3 所示。

表 3 液体粘滞阻尼器方案减震率

墩号	顺桥		
	弯矩	剪力	支座位移
19#墩	0.82%	-0.69%	68.13%
20#墩	-858.38%	-185.51%	75.40%
21#墩	-808.32%	-175.97%	75.83%
22#墩	-815.45%	-180.53%	75.79%
23#墩	-818.22%	-184.06%	77.73%
24#墩	66.35%	64.07%	/
25#墩	-436.41%	-155.64%	82.36%
26#墩	-398.37%	-141.02%	83.18%
27#墩	-407.11%	-148.63%	86.71%
28#墩	-0.36%	-0.93%	86.40%
29#墩	-453.25%	-150.12%	70.67%

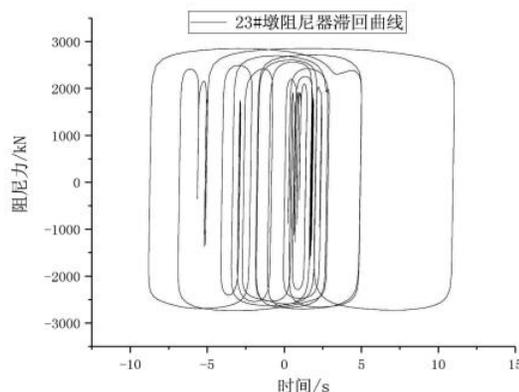


图 15 23#墩阻尼器滞回曲线

由表 3 和图 15 可知：

(1) 液体粘滞阻尼器在地震瞬间达到速度锁定值，活动墩发挥固定墩的功能，将地震力分担到活动墩上，各个墩协同抗震，固定墩设计得以优化。

(2) 顺桥向活动墩减震率为负值，固定墩墩底弯矩减震率达到 66%，位移减震率达到 68%~86%，液体粘滞阻尼器对限制纵桥向墩梁相对位移效果显著。

(3) 固定墩纵桥向墩底弯矩时程曲线峰值小于普通支座方案，横桥向固定墩、活动墩弯

矩时程曲线峰值相近，在纵桥向设置阻尼器对横桥向墩底内力减震影响不大。

(4) 23#墩液体阻尼器滞回曲线饱满，表明阻尼器充分发挥耗能减震的作用。

3.3.3 液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案分析 (工况4)

经过对比分析。摩擦摆支座和液体粘滞阻尼器最优参数取值分别为：曲面半径 $R = 4\text{m}$ ，摩擦系数 $\mu = 0.03$ ，阻尼系数 $C = 2000\text{kN} \cdot (\text{s}/\text{m}) \alpha$ ，阻尼指数 $\alpha = 0.04$ ，减震效果最佳。液体粘滞阻尼器布置角度为 45° 时，纵桥向和横桥向减震效果较好。液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案的减震效果见表4。

表4 摩擦摆支座配合液体粘滞阻尼器方案减震率

墩号	顺桥			横桥		
	弯矩	剪力	支座位移	弯矩	剪力	支座位移
19#墩	1.98%	0.60%	44.24%	79.22%	22.02%	32.12%
20#墩	-441.00%	-52.54%	50.61%	56.20%	61.24%	21.54%
21#墩	-415.00%	-53.41%	48.43%	87.71%	71.46%	53.90%
22#墩	-411.51%	-56.60%	45.94%	77.74%	68.59%	42.12%
23#墩	-414.63%	-59.26%	49.29%	69.89%	68.32%	50.47%
24#墩	95.03%	91.92%	/	82.85%	66.96%	/
25#墩	-174.84%	-46.78%	52.92%	73.69%	62.36%	34.06%
26#墩	-156.13%	-39.53%	50.17%	66.67%	68.20%	28.12%
27#墩	-155.42%	-40.56%	56.60%	79.12%	60.20%	58.33%
28#墩	12.29%	2.39%	59.92%	81.13%	23.59%	37.21%
29#墩	-189.90%	-45.38%	52.12%	64.96%	60.79%	49.81%

(1) 固定墩在纵、横桥向墩底内力减震效果显著，减震后墩底弯矩远远小于减震前即采用普通支座方案。

(2) 固定墩内力减小约95%左右，活动墩顺桥向减震率高达-440%，墩底内力增大，顺桥向地震作用时，活动墩同固定墩共同承担地震力。横桥向各个桥墩减震率为22%~71%，墩底内力减震效果显著。

(3) 固定墩在顺桥向位移减震率为44%~59%，在横桥向位移减震率为21%~53%，液体粘滞阻尼器对限制墩梁相对位移效果显著。

3.3.4 减隔震方案对比分析

基于以上三种减隔震方案的研究结果，针对定义的4种工况进行对比分析，对比结果见图16至图20所示。

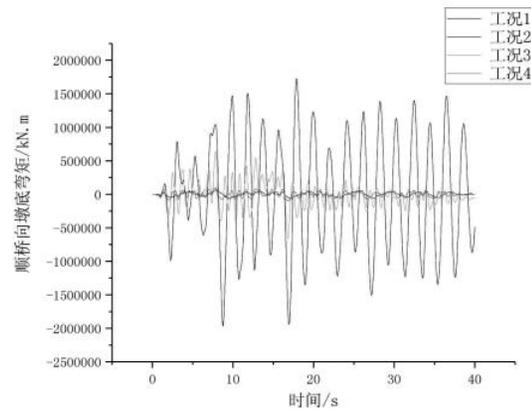


图16 固定墩顺桥向墩底弯矩时程

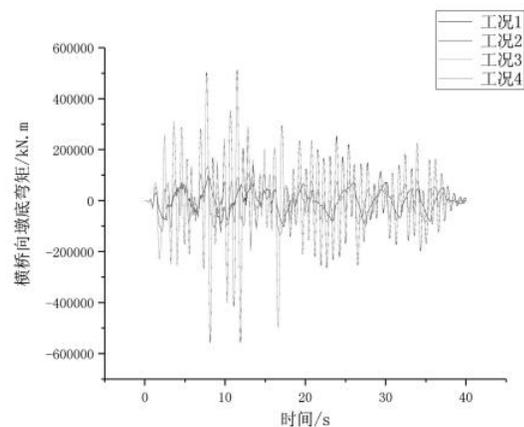


图17 固定墩横桥向墩底弯矩时程

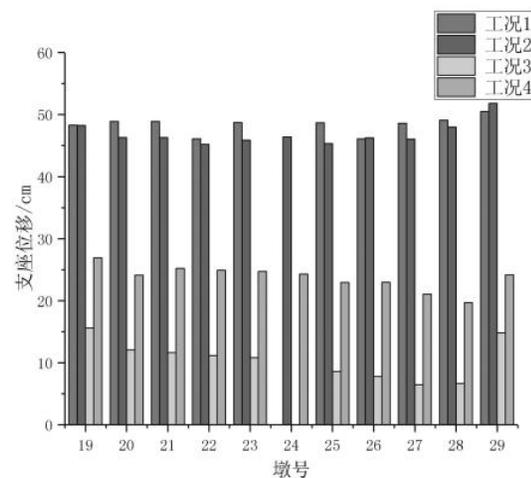


图18 顺桥向支座位移

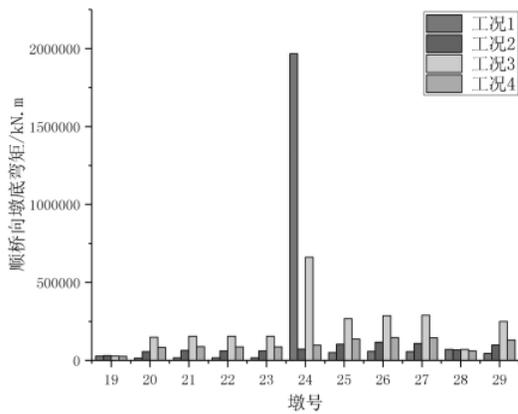


图19 顺桥向墩底弯矩

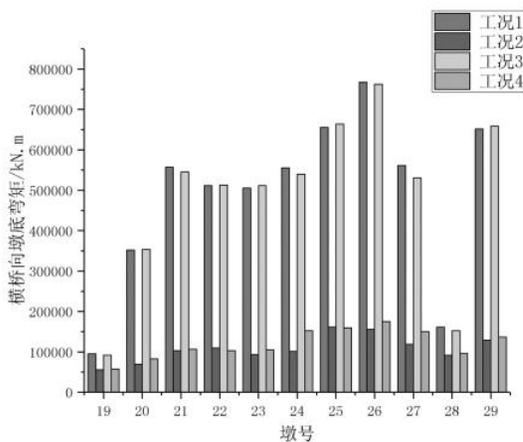


图20 横桥向墩底弯矩

(1) 由图16可知: 工况3减震效果明显优于工况1, 工况2减震效果与工况4相近, 但明显优于工况1和工况3。

(2) 由图17可知: 工况3和工况1结果接近, 工况2和工况4减震效果相近, 但明显优于工况1和工况3。

(3) 由图18至图20可知, 工况3位移减震效果最佳, 但在顺桥向和横桥向的内力减震效果弱于工况2和工况4。工况2对固定墩内力减震效果最佳, 但对位移减震效果有限。工况4对固定墩内力和支座位移减震效果显著。

4 结论

通过对长联大跨连续梁桥3种减隔震方案分析, 得到以下结论:

(1) 罕遇地震作用下, 三种减隔震方案均大幅降低顺桥向固定墩内力, 摩擦摆支座减隔震方案与液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案

对固定墩顺桥向减震效果相近, 但明显优于液体粘滞阻尼器配合普通支座方案。

(2) 液体粘滞阻尼器配合普通支座方案在罕遇地震作用下, 横桥向墩底弯矩相近, 对固定墩弯矩减震效果不明显, 另外两种减隔震方案在横桥向墩底弯矩减震效果显著。

(3) 摩擦摆支座方案对纵、横桥向支座位移减震效果不明显, 各个桥墩的纵、横桥向支座位移在50cm左右, 液体粘滞阻尼器配合普通支座方案对纵桥向墩梁相对位移减震效果最佳, 活动墩墩梁相对位移在16cm左右, 效果显著, 液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案对墩梁相对位移的减震效果介于前二者之间, 活动墩同固定墩支座位移在25cm以内。

(4) 液体粘滞阻尼器配合摩擦摆支座方案结合了摩擦摆支座和液体粘滞阻尼器的优点, 对长联大跨连续梁桥减隔震效果显著, 建议同类型桥梁抗震设计可参考此方案。

参考文献

- [1] 夏修身, 崔靛波, 陈兴冲, 李建中. 长联大跨连续梁桥隔震技术应用研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(04): 39-45.
- [2] 何庭国, 袁明, 陈列, 戴晓春. 福厦铁路跨越乌龙江长联大跨连续梁桥设计[J]. 桥梁建设, 2008(04): 43-46.
- [3] 宋子威, 蔡小培. 粘滞性阻尼器在高速铁路长联大跨连续梁中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(08): 1102-1105.
- [4] 夏修身, 崔靛波, 陈兴冲. 超长联大跨连续梁桥摩擦摆支座隔震研究[J]. 工程力学, 2015, 32(S1): 167-171.
- [5] 王力, 杨延超, 刘世忠, 虞庐松, 余建华, 方忠强. 长联大跨摩擦摆支座隔震连续梁桥多维地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(02): 129-137.
- [6] 邵长江, 肖正豪, 漆启明, 韦旺, 何俊明. 摩擦摆支座隔震铁路连续梁桥振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(14): 292-298+306.
- [7] 杜桃明, 叶仲韬, 刘洋, 宋松科. 高烈度地区不对称刚构-连续梁桥减隔震设计研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(03): 78-83.
- [8] 曹凤华, 刘畅. 采用黏滞流体阻尼器的桥梁支座抗震加固方法[J]. 桥梁建设, 2021, 51(01): 95-100.
- [9] 刘正楠, 陈兴冲, 马华军, 刘尊稳, 张永亮. 高速铁路大跨长联连续梁桥减隔震方案优化研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(04): 129-135.