

# 基于有限位移的中小跨径梁式桥 抗震概念设计

刘振宇 庄卫林 蒋劲松

(四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院 成都 610000)

**摘要:**以中小跨径梁式桥的抗震设计方法为研究对象,对汶川地区的中小跨径梁式桥进行了系统、全面的震害调查,总结了梁式桥的震害形式,采用统计分析的方法分析了各类构件的损伤情况,探明了汶川地震中梁式桥具有主梁移位多、支座、挡块震害多、桥墩震害少、主梁落梁少的显著特点;通过振动台试验和数值模拟方法,对梁式桥梁震害的机理进行了研究。结果表明,主梁与板式橡胶支座间的相对滑动起到隔震作用,减小了桥墩的地震内力响应,明显减少了桥墩震害,桥面连续协调了主梁位移,桥台约束了主梁的纵向位移是汶川地震中落梁少的主要原因。根据中小跨径梁式桥震害分析和机理研究,提出了利用主梁与支座间产生有限相对滑动、减小上部结构加速度响应,减少桥墩损伤的抗震设计概念。

**关键词:**有限位移 桥梁 抗震设计

## 1 引言

梁式桥的抗震设计主要有延性抗震设计和减隔震设计两种方法。延性抗震通过结构选定部位的塑性变形来消耗地震能量,延长结构周期,从而减少结构破坏<sup>[1]</sup>,减隔震体系是减震和隔震的统称,就机理而言是两种不同的抗震设计方法。由于常用的减震装置和隔震元件常常是合二为一的,如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座等,因此一般统称为减隔震设计。

汶川地震后,交通运输部对四川、甘肃、陕西三省重灾区及极重灾区所有高速公路、国省干线公路和具有典型破坏特征的农村公路及市政桥梁开展了震害调查,共调查桥梁2207座,其中位于在地震实际烈度为7度~11度的地区的简支梁共958座。这些梁式桥大多建于1990~2008年间,其抗震设计方法大多为早期的单一强度设计方法,即设计中只考察桥梁构件(主要是桥墩)在地震作用下的强度,这一方法的缺陷在众多文献中均有论述。

依据建设时桥梁抗震设计所依据的规范或计算分析来看,在汶川地震中,许多梁式桥应该倒塌,至少大量的桥墩应该被剪坏或压溃,而震害情况与预期的情况有明显差别,而且与美国Northridge地震、日本阪神地震地震中大量桥墩受

损的情况也明显不同。这一现象促使我们去思考目前梁式桥的抗震设计方法。

本文从汶川地震的简支梁的震害总结入手,归纳了简支梁桥的主要震害现象,对简支梁桥的主要构件震害进行了统计分析,采用振动台试验和数值模拟分析的方法,揭示了桥墩震害和主梁移位机理,在此基础上提出了梁式桥基于有限位移的中小跨径梁式桥抗震设计的构想。

## 2 汶川地震简支梁桥震害调查及统计分析

### 2.1 汶川地震区简支梁桥构造特点

在对汶川地震简支梁桥震害进行统计分析前,有必要首先了解汶川地震区简支梁桥的构造特点。如前文所述,汶川地震中,位于在地震实际烈度为7度~11度的地区的简支梁共958座,主梁的截面形式一般有T形梁、I形梁、空心板、实心板、小箱梁等,跨度在10m~50m间,以16m~40m跨度为主,3~5跨主梁通过桥面连续连接成一联。桥墩形式主要有钢筋混凝土圆形截面排架墩、钢筋混凝土矩形空心墩、钢筋混凝土实心矩形墩和圪工墩4种,其中以圆形截面排架墩最为普遍,圪工墩仅用于个别修建年代较早的桥梁。支座形式有主要有板式橡胶支座、垫层支座两种,垫层支座一般用于跨度不超过10m的小桥,绝大多数桥梁采用板式橡胶支座。多数桥梁

采用单一强度设计方法进行抗震设计,部分桥梁仅进行了抗震构造设计。

## 2.2 简支梁桥主要震害现象

调查表明,简支梁的主要震害现象包括:

(1)主梁移位,甚至发生落梁;(2)主梁碰撞,梁端开裂(3)墩梁相对位移导致支座滑移或严重剪切变形;(4)桥墩出现开裂、倾斜、压溃、剪断、倾覆等破坏;(5)桥台侧墙、背墙破坏、锥坡局部开裂、台后填土下沉,(6)伸缩缝震害。

伸缩缝震害、桥台锥坡震害与桥梁结构的承载能力无关,这里不作讨论,仅就前4项震害进行统计分析。此外,汶川地诱发的次生地质灾害导致了大量的桥梁受损,但从严格意义来说,这

属于地质灾害的范畴,与桥梁的抗震性能并无直接关系。因此,本文的统计分析和其后的研究,均针对直接震害进行。

## 2.3 简支梁桥震害概况

在实际烈度为7度~11度区域内的958座简支梁桥,大桥及特大桥共170座,中桥共383座,小桥共405座,出现中等以上震害的桥梁共146座,占简支梁桥总数的15.2%。在实际烈度为7度的区域内未出现严重破坏的简支梁桥;在8度、9度区,严重破坏率(承载能力受损)仅分别为0.5%、8.5%,未出现完全失效的桥梁;10度及11度区,桥梁严重破坏率和失效率级破坏率分别为28.6%、5.7%,失效桥梁共4座,仅占桥梁总数的0.4%。简支梁桥各烈度区域内桥梁破坏率如图1所示。

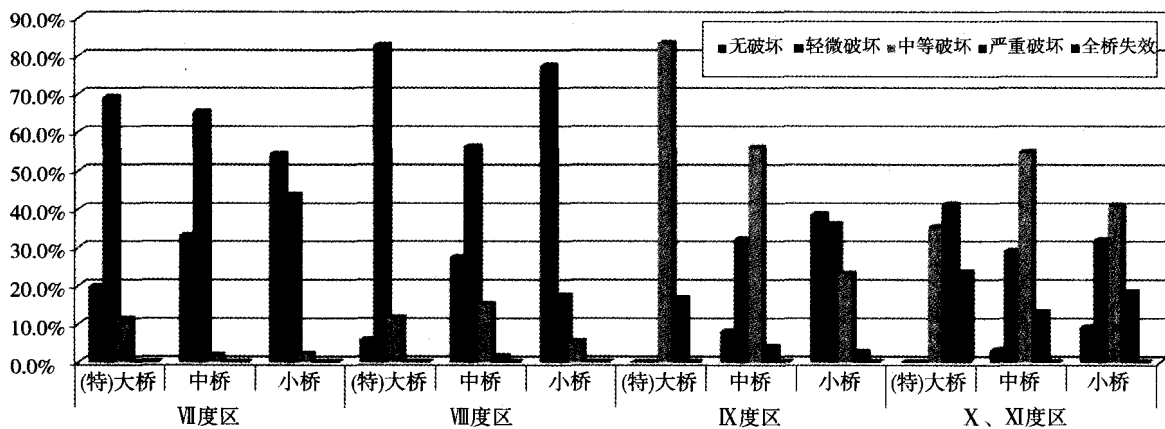


图1 不同长度简支体系桥梁在不同烈度区的震害率

从图中看出,相同烈度区域内,简支梁桥破坏严重程度随桥梁长度的增加而加重,大、中、小桥的震害均成随烈度增加而增加的趋势,出现失效的均为10度、11度区的大桥或特大桥。综合烈度和桥梁长度两个因素来看,简支梁桥桥梁长度越长、烈度越高震害程度越严重。

## 2.4 主梁震害

调查区域内简支梁共有3298跨,所有桥跨均未发现主梁破坏、开裂等结构性震害,震害主要形式为主梁移位。区域内共有36跨梁体发生落梁,出现落梁的简支梁桥均为位于实际烈度为10度及11度区域内的大桥。除落梁外,还有96跨梁体发生严重移位(主梁失去可靠支承),511跨梁体出现一般移位。在发生移位的桥跨中,大桥

的移位率高于中、小桥,较高烈度区域移位率大于较低烈度区域。不同规模简支梁桥主梁破坏比例如图2、图3所示。

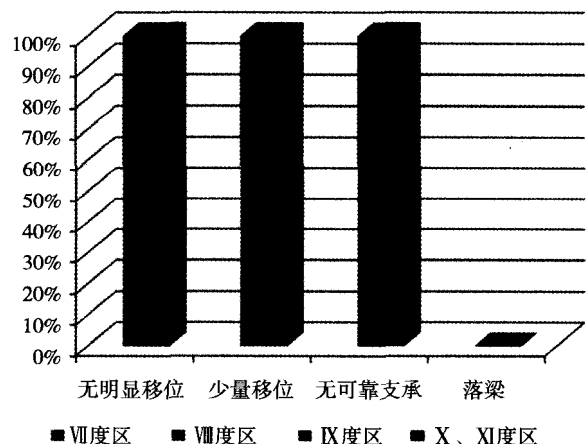


图2 中小桥主梁移位比率统计

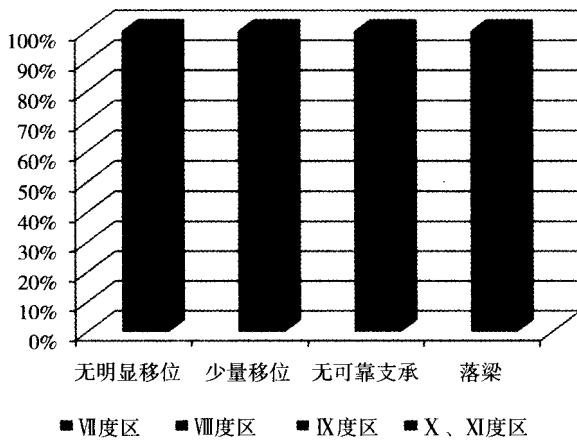


图3 (特)大桥主梁移位比率统计

统计表明，出现移位的桥跨共607跨（不含落梁），占总数的18.4%；中小桥主梁移位率远低于大桥（特大桥）的主梁移位率。发生落梁的梁跨（36跨）中有29跨，尚未施工完成，而处于运营状态的桥梁中，并未出现国外历次地震中常见的“多米诺骨牌”式的大范围落梁的现象，主梁移位均为整跨（单跨桥）或整联（多跨桥）的整体移位，主梁表现出良好的整体性，即使对于横向移位较大甚至出现横向落梁震害的桥梁，在

表1 10度、11度区内桥简支梁墩震害统计

桥墩类型	破坏等级	$P_A$ 未破坏 (个)	$P_B$ 一般破坏 (个)	$P_C$ 严重破坏 (个)	$P_D$ 完全失效 (个)	合计 (个)
钢筋混凝土排架墩		103	12	11	18	144
钢筋混凝土独柱墩		14	0	9	0	23
圬工重力式桥墩		13	0	1	3	17
合计		130	12	21	21	184

## 2.7 简支梁桥震害小结

统计分析表明，对于采用板式橡胶支座的简支梁桥，最为常见也最为直观的震害表现为支座震害，桥梁震害率、主梁移位率和支座震害率分别为15.2%、18.4%和16.6%，支座震害率基本决定了主梁移位率和桥梁震害率。对比支座震害、主梁震害和桥墩震害可以看出，汶川地震中简支梁桥具有支座震害多、主梁震害多、桥墩震害少的显著特点，这一特点与国内外其他地震中简支梁桥的表现明显不同。而且，虽然出现了大量的主梁移位，但主梁落梁的数量十分有限。

可以看出，汶川地震中简支梁桥总体上实现了“中震不坏，大震不倒”的设防目标，那么能

一联之内主梁也基本保持顺直。

## 2.5 支座、挡块震害

所有简支梁桥中，发生支座破坏的组数为1092组，占总数6596组的16.6%；发生挡块破坏的组数为720组，占总数4283组的16.8%。这与主梁发生移位比例19.5%接近。且与主梁破坏情况类似，发生破坏的支座、挡块也多为位于较高烈度的大规模桥梁中。

## 2.6 桥墩震害

共调查2316个桥墩，出现震害的桥墩较少，共56个桥墩出现震害，震害率为2.3%，远低于主梁、支座、挡块的破坏率。桥墩震害形式主要有墩柱底开裂、墩顶开裂、墩柱底塑性铰、压溃、倾斜、盖梁、开裂破坏，桥墩倒塌等。在7度~9度区内，仅有甘肃省毛坝桥2号、3号桥墩出现桥墩轻微开裂。其余出现破坏的桥墩均位于10度、11度区内，详见表1。值得补充的是，失效的钢筋混凝土排架墩主要为跨越断层的映秀顺河桥（15个桥墩），扣除此桥墩数后，完全失效的桥墩仅6个，严重破坏（承载力受损）的桥墩也仅21个。

否得出简支梁桥采用单一强度抗震设计即可满足设防目标的结论呢？要回答这一问题，需要对简支梁桥的震害机理进行分析。

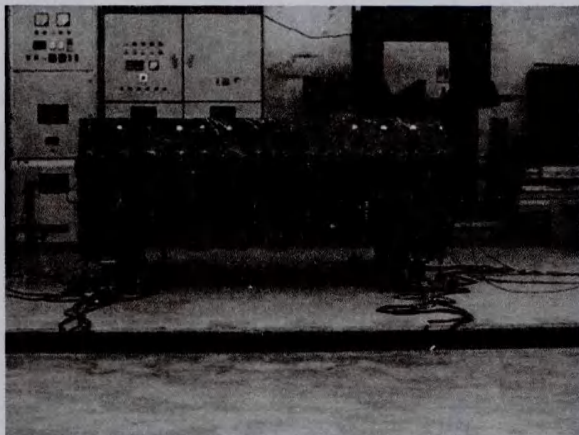
## 3 简支梁桥震害原因分析

支座是连接主梁和下部结构的构件，虽然支座依据支承反力选用对应型号即可完成设计，但功能却十分重要，地震时其作用更为明显。地震荷载作用下，上部结构的地震作用通过支座传递至桥墩，汶川地震中的简支梁桥普遍使用板式橡胶支座是，在支座构造上与国内外其他地震中的简支梁桥有明显区别。要解释主梁移位率高、桥墩破坏少的原因，需从板式橡胶支座在地震中的作用入手。

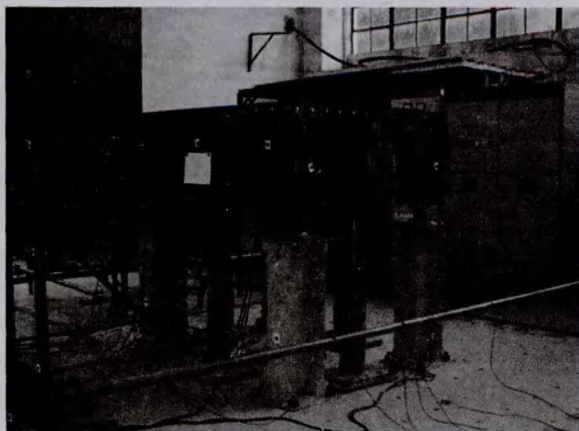
### 3.1 振动台试验分析

为解释上述现象,选取寿江大桥为原型进行振动台试验。该桥结构的震害主要集中在主梁移位,支座破坏等方面,是汶川地震中较为典型的橡胶支座简支梁桥的震害。

试验模型与原型按照相似比原则进行缩尺,根据模型比例设计了模拟上部结构质量的质量块、板式橡胶支座、下部结构支承。测试的内容包括上部结构位移、支座位移、传递至下部结构的三向力,考察的因素主要为下部结构刚度的影响。为此设计了两个试验模型如图4所示,模型A为下部结构刚度较大的情况(无钢立柱)、模型B为下部结构刚度较小的情况(以钢立柱模拟)。



(a) 安装完成的试验模型A



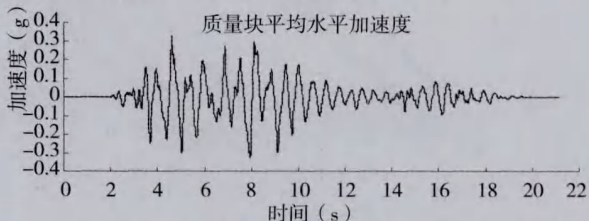
(b) 安装完成的试验模型B

图4 振动台试验模型

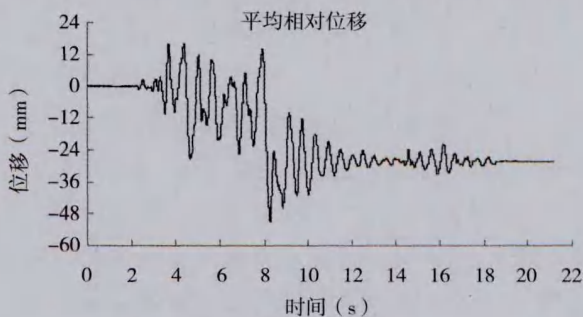
模型A、B均进行了6个工况的试验,输入的激励为汶川地震绵竹清平台N/S分量,采用水平

输入,加速度峰值由0.3g分7级逐步增大至1.2g,限于篇幅,文中在图5、图6仅分别给出了模型A、模型B,在加速度峰值为1.2g时的上部质量块加速度时程、支座位移时程、支座剪力与位移曲线。

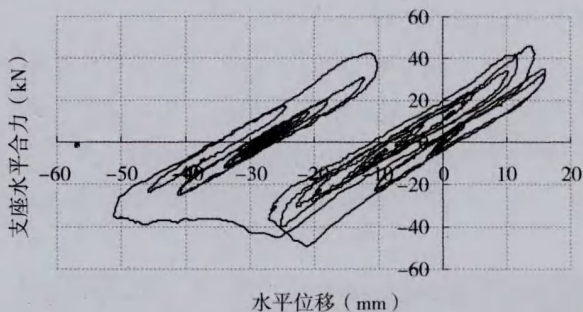
由图5、图6可以看出,地震波水平向输入下,模型A质量块的最大加速度反应仅为台面地震波PGA的30%左右,模型B质量块的加速度时程也仅为台面地震波PGA的25%左右。这表明,上部结构地震效应并不随地震动加速度的增加而增加。由于主梁与桥墩是通过板式橡胶支座的摩擦力连接的,主梁振动传递至桥墩的水平力小于或等于支座与主梁间的摩擦力,一旦摩擦力破坏,主梁与支座间产生相对滑动,主梁水平地震力即不再增加。由此可以推知,梁式桥采用橡胶支座可以起到有效的隔震作用,减小了上部结构的地震作用,从而保护了桥墩。



(a) 模型A工况18(台面加速度1.22g)上部质量块加速度时程

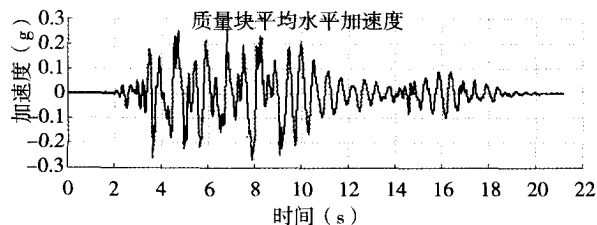


(b) 支座水平位移时程

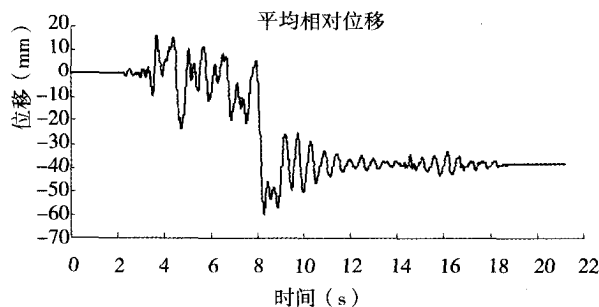


(c) 支座水平合力-位移曲线

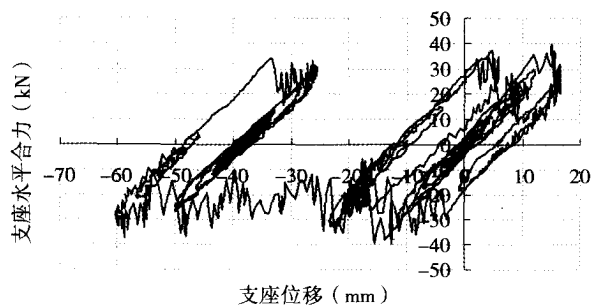
图5 模型A台面加速度1.22g时主要结果



(a) 模型B台面加速度1.20g上部质量块加速度历程



(b) 支座水平位移历程



(c) 支座水平合力-位移曲线

图6 模型B台面加速度1.20g时的主要结果

从图中还可以看出,一旦梁体与橡胶支座间产生滑动,梁体位移迅速增加,因此板式橡胶支座的隔震作用是以支座的破坏和主梁位移失去限制为代价的,这一点从上文中主梁移位率与支座破坏率基本相同也可得到证实。由此可以解释为什么汶川地震中出现了大量的主梁移位现象。

### 3.2 数值模拟分析

为进一步探明采用板式橡胶支座的简支梁桥桥墩的地震响应特性,解释虽然汶川地震中出现大量的主梁移位,但落梁数量却不多的原因,进行了都汶高速6座桥梁进行增量动力分析(IDA分析),计算中考虑了桥面连续的影响。主梁、桥墩均采用弹性梁单元模拟,板式橡胶支座采用状态非线性弹簧单元模拟,以库仑摩擦模型建立力-变形关系,滞回模型如图7所示。

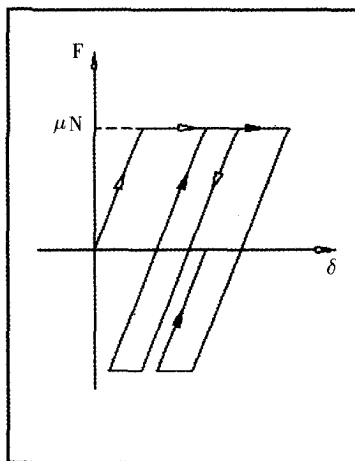


图7 支座滞回模型

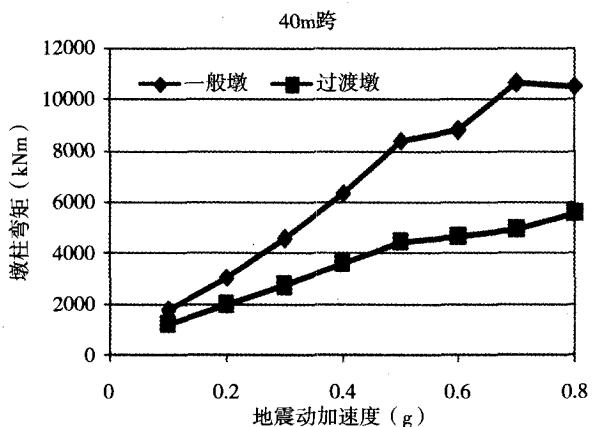
在进行地震非线性地震反应分析时,任意时刻支座受到的水平力为 $F$ 。当 $F < F_{cr}$ 时,支座水平方向发生相应的弹性变形 $\delta = F/k$ , $k$ 为支座单元的水平剪切刚度;当 $F \geq F_{cr}$ 时,支座进入滑动状态。

计算模型在伸缩缝处考虑了主梁与桥台、主梁与主梁间的碰撞,碰撞采用Kelvin模型模拟,碰撞间隙为伸缩缝宽度6cm。

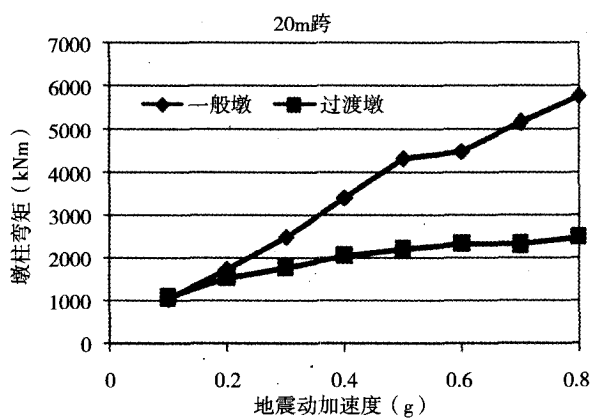
地震输入采用汶川地震绵竹清平台三分量地震波,同时考虑了水平向和竖向地震动的作用,地震动峰值加速度分别从0.1g以0.1g为步长增大至0.8g。限于篇幅,这里仅给出了某20m跨(下称模型1)和某40m跨(下称模型2)简支梁桥典型桥墩墩底顺桥向弯矩及对应的支座水平剪力随地震动峰值加速度的变化情况,分别如图8所示。

由于计算模型中主梁、桥墩采用的是弹性梁单元,由线弹性理论可知,随着地震加速度的增加,桥墩的内力响应应成正比增大。但从图8(a、b)来看,墩底的弯矩响应并不满足这一规律。由图8(d)中给出的20m跨、40m跨度桥梁支座水平剪力随地震动加速度的变化情况可以看出,在0.5g~0.6g时支座摩擦力即遭到破坏,此后支座的水平剪力增加很小;从图8(c)也可看出,在地震动加速度峰值为0.6g时,在进入强地震动段不久,支座即已屈服,即主梁与支座间出现了相对滑动,使得上部结构的地震作用不能全部传递至桥墩,减小了桥墩的地震响应,从而保护了桥墩。得到了与振动台试验相同的结论。

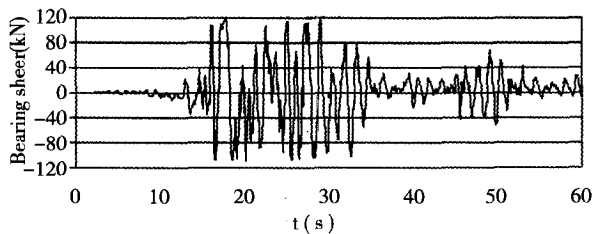




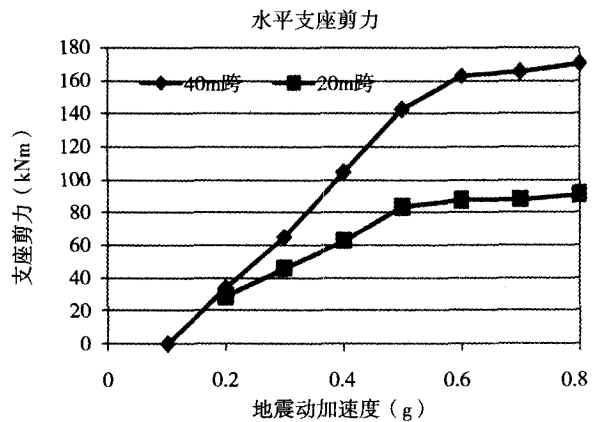
(a) 模型2桥墩弯矩随加速度变化



(b) 模型1桥墩弯矩随加速度变化



(c) 模型2简支梁支座剪力时程(0.6g)



(d) 简支梁支座水平剪力

图8 简支梁桥墩弯矩和支座水平剪力随加速度的变化

进一步考察主梁位移可以看出(图9),对于采用桥面连续的简支梁桥,在伸缩缝处各联主梁的纵向位移均有一定差异,但在一联内主梁的位移却是基本相同的,这表明桥面连续将一联内的各跨主梁联接为整体,在水平地震荷载作用下,各联是整体受力的。震害调查也表明,采用桥面连续后即使主梁出现大幅位移横向位移,一联内主梁依然保持顺直(图10)。

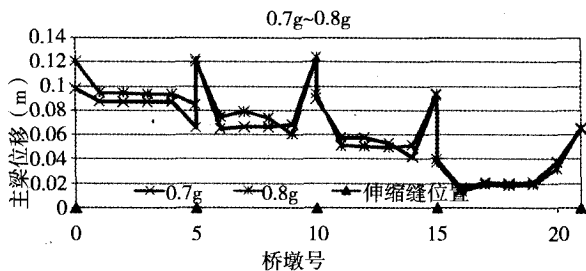


图9 0.7g~0.8g时模型1墩梁相对位移



图10 0.7g~0.8g时模型1墩梁相对位移

而对于各跨均采用伸缩缝连接的桥梁,由于伸缩缝的存在给主梁位移提供了空间,每经过一道伸缩缝,墩梁相对位移即有较为明显的增大;另一方面,由于伸缩缝数量多,主梁间存在复杂的碰撞过程,主梁间的碰撞也会增大墩梁相对位移。

由上述分析可以看出,桥面连续是重要的抗震措施,其作用有二,其一减少了伸缩缝的数量,减小了主梁位移的空间,也减少了主梁碰撞的出现;其二,桥面连续起到了连梁装置的作用,协调了各跨的位移,从而有效减小了主梁的最大位移。连梁装置的作用在唐山地震等其他地震中均已得到验证,也是规范中推荐采用防落梁装置。汶川地震中简支梁虽未主动设置连梁装

置,但客观上,桥面连续起到了连梁装置的作用。

从图9还可以看出,右端主梁的纵向位移均6cm左右,这与伸缩缝的宽度基本相等,这表明,桥台对主梁的纵向位移有较好的约束作用。图11给出的模型1主梁与桥台的碰撞力时程也表明在18s~27s间,主梁与桥台发生了多次碰撞,

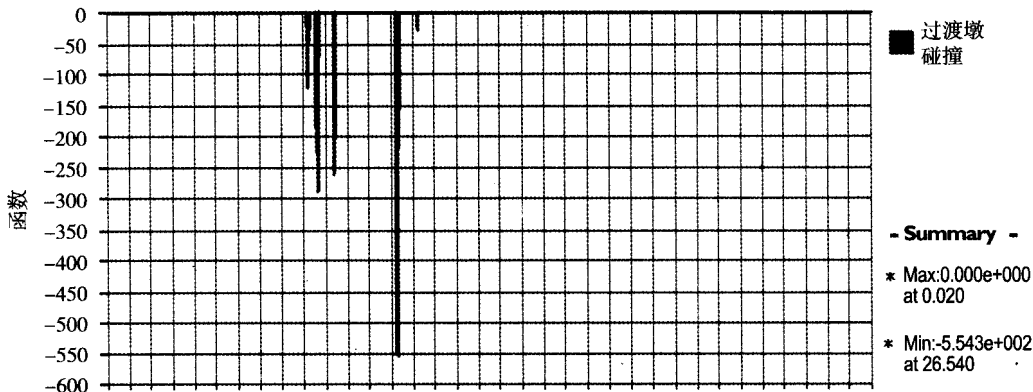


图11 模型1主梁与桥台墩碰撞力时程(0.8g)

#### 4 中小跨径梁式桥抗震概念设计的有关建议

板式橡胶支座有一定隔震作用在唐山地震时即有一定认识,但当时认为主梁与支座间易发生滑动,增大了落梁风险,因此在《公路桥梁抗震细则》中要求验算支座的抗滑能力。但从震害调查及其分析的结果来看,即使主梁与支座间出现相对滑动也不一定会导致主梁落梁的后果,相反,主梁与支座间的相对滑动减小了上部结构的地震作用,从而减小了桥墩的地震响应,有效保护了桥墩。这一宝贵的震害经验在以后的抗震设计中是可以利用的,据此提出中小跨径梁式桥抗震概念设计的有关建议如下:

(1) 对于板式橡胶支座,在地震中可以允许主梁与支座间出现相对位移,只要位移量有限、可控,主梁不失去可靠支承,这一相对位移反而可以起到减小桥墩地震内力响应保护桥墩的作用。

(2) 桥面连续是简支梁桥重要抗震措施,即可以减少伸缩缝数量,减小主梁位移的空间同时还增强了上结构的整体性,这对于减少落梁震害具有重要作用。

(3) 桥台对于显著主梁位移尤其是顺桥向位移十分重要,适当增大桥台背墙的厚度,在背墙与主梁间设置撞击缓冲装置(如橡胶垫等),

桥台对主梁的纵向位移施加了约束,有效控制了主梁的纵向位移,减小了落梁风险。反之,若桥台背墙破坏,将使桥台的对主梁位移的约束大为减弱,虹口高原桥、湍江河大桥等出现纵向落梁的桥梁,多伴有桥台破坏的情况。可以看出,桥台是约束主梁纵向位移的重要部件。

既可减少桥台震害,又可以充分发挥桥台限制主梁位移的作用。

(4) 对于多联长桥,可在2~3联间设置大刚度抗震限位墩,起到桥台限制主梁位移的作用,将多联长桥通过抗震限位墩分为多联短桥,从而增强桥墩对主梁的限位,减小支座与主梁间的相对位移。

(5) 梁式桥的主梁、桥墩、支座、桥台、桥面连续是一个完整的抗震系统,在抗震设计中应综合应用。

(6) 应尽快研究支座与主梁相对位移的分级定量指标,对不同烈度区提出不同的位移指标要求,使汶川地震的震害经验可以尽快纳入规范。

#### 5 结语

汶川地震简支梁桥的震害经验及震害分析表明,主梁与支座间的相对滑动释放了主梁的地震作用,桥面连续协调了一联内主梁位移,起到了连梁装置的作用,桥台约束了主梁的纵向位移,上述措施的综合应用可以达到减小桥墩地震响应和有效限制主梁位移的目的,弥补了板式橡胶支座对主梁位移约束过弱的缺点,形成了一种新型设计方法。应尽快研究支座与主梁相对位移的分级定量指标,推广这一震害经验。