

拉索限位装置对跨断层桥梁地震响应的影响

谷屹童, 袁万城, 党新志

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以一座三跨连续梁桥为工程背景, 选择典型的近断层脉冲地震动, 应用非一致激励的非线性时程分析方法, 对考虑滑冲效应的跨断层桥梁地震响应进行计算, 研究不同断层位置的情况下拉索限位器对跨断层桥梁地震响应的影响, 并对拉索限位器的自由程和限位刚度进行参数分析。结果表明: 应用拉索限位器可以有效地减小跨断层桥梁的位移响应, 同时桥墩的受力会有所增加; 跨断层桥梁的地震响应对限位器自由程的变化更加敏感。

关键词: 跨断层桥梁; 近断层脉冲地震动; 滑冲效应; 拉索限位器; 地震响应

中图分类号: U441⁺.3

文献标志码: A

Effect of Cable Restrainers on Seismic Response of Cross-fault Bridges

GU Yitong, YUAN Wancheng, DANG Xinzhi

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

Abstract: In this paper, the seismic response of a three-span fault-crossing continuous girder bridge subjected to near-fault pulse-like seismic ground motions is calculated considering the fling-step effect. Typical near-fault pulse-like ground motion records are selected and nonlinear response history analyses are adopted in an asynchronous excitation scenario. The effect of cable restrainers on the seismic response of fault-crossing bridges is investigated under different fault locations. In addition, parametric analyses on lateral restraining displacement and lateral stiffness of the cable restrainer are conducted. Results show that using the cable restrainer can effectively mitigate the displacement response of fault-crossing bridges while it enlarges the pier-bottom moment; seismic responses of a fault-crossing bridge are more sensitive to changes in the lateral restraining displacements of the

cable restrainer.

Key words: fault-crossing bridge; near-fault pulse-like ground motion; fling-step effect; cable restrainer; seismic response

跨越活动断层的桥梁结构在地震时具有较高的破坏风险, 为此许多国家的规范明确指出, 禁止或避免跨越断层建设桥梁^[1]。然而, 在实际工程中, 往往由于诸多客观条件的限制, 建设跨断层桥梁不可避免。因此, 研究跨断层桥梁的地震响应是十分必要的。

Goel 等^[2-3]基于结构动力学理论, 提出了考虑跨断层桥梁处于线弹性阶段和进入非线性阶段的简化分析方法。杨怀宇等^[4-5]研究了跨断层地震动作用下简支梁桥的地震响应, 并分析了使用铅芯橡胶支座和挡块对桥梁响应的影响。惠迎新等^[6]对跨断层连续梁桥的地震响应及合理跨越角度的研究发现, 当桥梁垂直跨越断层时, 结构的受力合理性和经济性最优。

相比于远场地震而言, 近断层地震有更强的破坏力。1992 年美国 Landers 地震、1999 年中国台湾 Chichi 地震和土耳其 Kocaeli 地震等都是典型的近断层地震, 这些地震均造成了大量的人员伤亡和结构破坏^[7]。近断层地震在平行于断层方向上具有显著的滑冲效应, 主要特征为位移时程突变形地面永久位移, 从而使桥梁在断层两侧出现较大的位移差异。为了避免跨断层桥梁在近断层地震下发生落梁等震害, 需要采取措施限制滑冲效应引起的过大的桥梁横向位移响应, 而国内外相关研究较少。

自 1971 年美国 San Fernando 地震以来, 拉索限位器凭借其良好的限位能力开始在桥梁上广泛应

收稿日期: 2020-02-20

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE19-B-19); 国家自然科学基金(51978512, 51778471); 山东省交通运输科技计划(2017B75)

第一作者: 谷屹童(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: guyitong@tongji.edu.cn

通信作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁抗震。

E-mail: yuan@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

用^[8-9]。以一座三跨连续梁桥为工程背景,对考虑滑冲效应的跨断层桥梁横向地震响应进行计算,研究不同断层位置的情况下,拉索限位器对跨断层桥梁的限位效果,并对拉索限位器的设计参数进行了分析,为实际工程中跨断层桥梁的抗震设计提供了参考和依据。

1 拉索限位装置

选用Gu等^[10]提出的连通式拉索限位器(CCR)研究拉索限位器对考虑滑冲效应的跨断层桥梁地震响应的影响。连通式拉索限位器通常安装在主梁和桥墩(或盖梁)之间,主要由上顶板、下底板、拉索和索夹等组成,具体构造如图1所示。

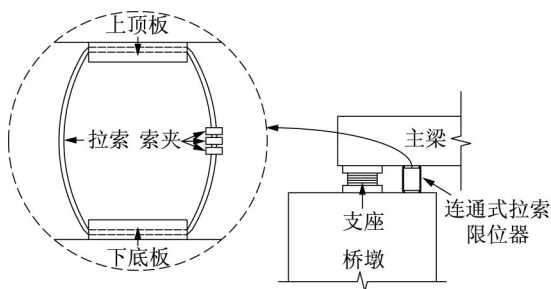


图1 连通式拉索限位器

Fig.1 Coiled cable restrainer

连通式拉索限位器与传统拉索限位器的力-位移曲线对比如图2所示。可以看出,连通式拉索限位器的特点在于能够在正、负方向上均发挥限位作用。

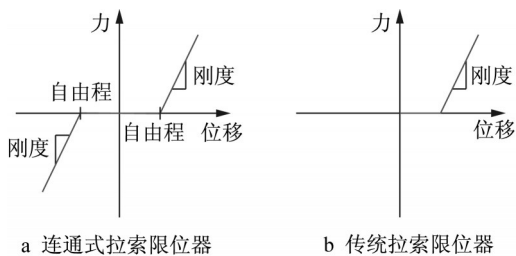


图2 拉索限位器的力-位移关系

Fig.2 Force-displacement relationship of cable restrainers

连通式拉索限位器有两个主要设计参数,分别为自由程和限位刚度。自由程确保了限位器不会限制桥梁结构在正常使用状态下发生的变形,限位刚度影响桥梁的位移响应和下部结构的能力需求。自由程和限位刚度的具体设计方法可以参照文献^[10]。

2 工程实例

2.1 有限元模型建立

以一座 3×30 m三跨预应力混凝土连续梁桥为工程背景进行有限元分析,桥型布置如图3所示。主梁由6片小箱梁组成,宽25 m,有限元模型中简化为单主梁进行模拟;桥墩为双柱墩,间距4.7 m,截面尺寸 $1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$,墩高10~11 m,计算时均取10.6 m;盖梁高2.5 m,宽1.9 m;基础采用桩基础形式。其中,主梁材料为C50混凝土,桥墩及盖梁材料为C40混凝土。全桥均采用板式橡胶支座,边墩横向布置12个支座,型号为GYZ D300,支座高度为74 mm,单个支座水平刚度为 $1\,600 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$;中墩横向布置6个支座,型号为GYZ D600,支座高度为150 mm,单个支座水平刚度为 $3\,084 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。有限元模型中,将中墩和边墩的横向多个支座均简化为两支座。

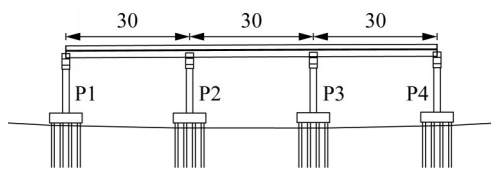


图3 桥型布置(单位:m)

Fig.3 Layout of the bridge(unit:m)

采用加州大学伯克利分校开发的结构分析程序OpenSees进行有限元分析^[11]。主梁、盖梁及桥墩均采用线弹性单元模拟;对于支座,考虑板式橡胶支座在大位移下会发生滑动的特性,认为当板式橡胶支座的水平位移达到100%橡胶层厚度时开始发生滑动,采用Elastic-Perfectly Plastic单元对其进行模拟^[12],如图4所示。图4中, K 为支座刚度, Q 为支座屈服力($Q=K\Delta$,其中 Δ 为支座发生滑动时的位移)。连通式拉索限位器采用Elastic-Perfectly Plastic Gap单元对正、负两个方向分别进行模拟,而后将正负方向的材料并联,限位器自由程取0.10 m,限位刚度取 $45\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,如图5所示。图5中, $K_{\text{正}}$ 和 $K_{\text{负}}$ 分别表示正负方向的限位刚度, $u_{\text{正}}$ 和 $u_{\text{负}}$ 分别表示正负方向的限位器自由程。桩基础采用土弹簧模拟。

2.2 地震动输入

针对考虑滑冲效应的近断层地震,国外学者提出了多种模拟方法。Hisada等^[13]和Hamidi等^[14]基于理论的格林函数来模拟近断层地震动。Hoseini Vaez等^[15]提出了由谐波和多项式组成的近断层地震模型,这一模型能够精确模拟地震中的长周期成

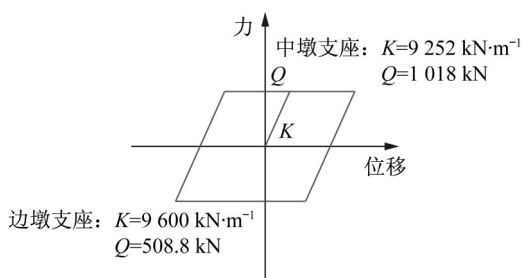


图4 板式橡胶支座示意图

Fig.4 Schematic diagram of laminated rubber bearing

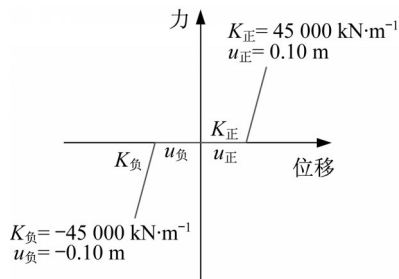


图5 连通式拉索限位器示意图

Fig.5 Schematic diagram of coiled cable restrainer

分。Burks等^[16]从具有滑冲效应的实测波和人工波中提取了一系列滑冲脉冲时程,并提出了对脉冲幅值和周期的预测模型。Yadav等^[17]认为滑冲效应引起的地震可以看作是脉冲地震和非脉冲地震的叠加,并以此对具有滑冲效应的地震动进行模拟。

从Burks等^[16]整理的具有显著滑冲效应的地震波数据库中选取三条Chichi地震波(TCU052、TCU068、TCU071),经缩放后作为有限元模型的地震动输入。在断层两侧,输入模型中的地震波大小相等,方向相反。缩放后的三条地震波位移时程如图6所示。计算时,采用非一致激励的非线性时程方法将地震动位移时程横桥向输入结构。

2.3 工况

为了研究不同断层位置及拉索限位器对于跨断层桥梁地震响应的影响,工况设置如下:

(1) 工况1

断层从边跨(P1和P2之间)穿过时,地震动输入方向如图7所示。具体工况设置如表1所示。

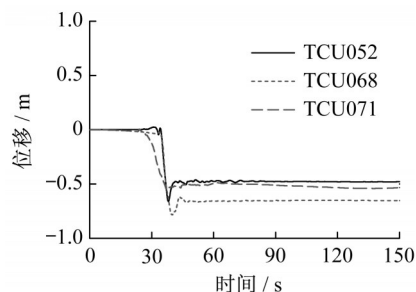
(2) 工况2

断层从中跨(P2和P3之间)穿过时,地震动输入方向如图8所示。具体工况设置如表2所示。

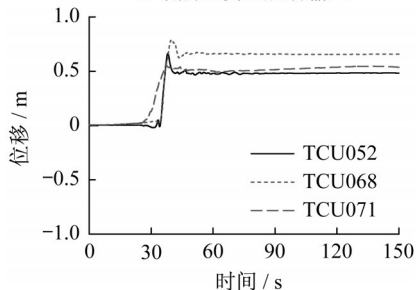
3 结果分析

3.1 工况1下的桥梁响应

当断层从边跨(P1和P2之间)穿过时,震后各个



a 断层左侧地震动输入



b 断层右侧地震动输入

图6 地震动位移时程

Fig.6 Displacement time-history of input ground motions



图7 工况1地震动输入方向示意图

Fig.7 Schematic diagram of ground motion input direction in Case 1

表1 具体工况(工况1)

Tab.1 Details of Case 1

工况号	工况描述
1-1	无拉索限位器
1-2	P1墩处安装拉索限位器
1-3	P1和P2墩处安装拉索限位器
1-4	P1、P2和P4墩处安装拉索限位器

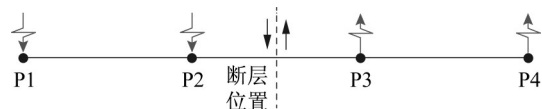


图8 工况2地震动输入方向示意图

Fig.8 Schematic diagram of ground motion input direction in Case 2

表2 具体工况(工况2)

Tab.2 Details of Case 2

工况号	工况描述
2-1	无拉索限位器
2-2	P2和P3墩处安装拉索限位器
2-3	全桥安装拉索限位器

工况的桥梁线型如图9所示。从图9可以看出,安装了拉索限位器后,桥梁的线型发生了较明显的变

化,主要表现为扭转和面外弯曲。

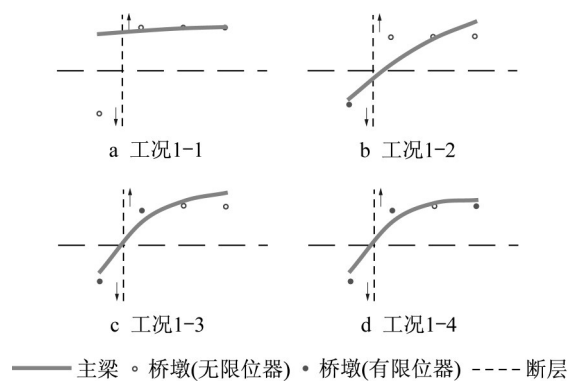


图 9 工况 1 中主梁的线型
Fig.9 Bridge alignment in Case 1

工况 1 中,各桥墩处最大支座位移、最大墩底弯矩和最大墩底扭矩如表 3 和表 4 和所示。表 3 中位移正负代表方向,表 4 中括号内的数值为墩底扭矩,下同。图 10~12 给出了 TCU068 作用下的地震响应。

断层从边跨穿过,工况 1-1 中断层左侧 P1 墩的支座位移响应最大,在 TCU068 作用下,位移峰值达到 1.25 m;对于断层右侧而言,邻近断层位置的 P2 墩的支座位移响应较大,最大位移为 0.16 m,距离断层较远的 P3 和 P4 墩的支座位移响应较小。墩底响应方面,P1 墩的墩底扭矩较大,P2 墩的墩底弯矩较大,P3、P4 墩的墩底弯矩和墩底扭矩均较小。

表 3 工况 1 支座最大位移响应

Tab.3 Maximum displacement of the bearings in Case 1 (单位:m)												
墩号	不同地震波作用下各工况最大位移											
	TCU052				TCU068				TCU071			
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4
P1	-1.08	-0.14	-0.17	-0.18	-1.25	-0.14	-0.19	-0.20	-0.83	-0.13	-0.16	-0.16
P2	0.10	0.43	0.18	0.18	0.16	0.57	0.21	0.21	0.10	0.35	0.16	0.16
P3	0.07	0.07	-0.09	-0.07	0.03	0.07	-0.11	-0.08	-0.04	0.05	-0.07	-0.07
P4	0.06	-0.25	-0.20	-0.11	-0.05	-0.29	-0.25	-0.11	-0.04	-0.09	-0.14	-0.11

表 4 工况 1 墩底最大弯矩和扭矩响应

Tab.4 Maximum moment and torsional moment at the bottom of piers in Case 1 (单位:kN·m)												
墩号	不同地震波作用下各工况墩底最大弯矩或扭矩											
	TCU052				TCU068				TCU071			
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4	1-1	1-2	1-3	1-4
P1	3 370 (2 249)	7 381 (2 664)	10 422 (2 641)	11 824 (2 641)	3 833 (2 738)	6 890 (2 745)	12 450 (2 780)	13 106 (2 780)	4 588 (2 187)	6 437 (2 782)	9 196 (2 753)	9 196 (2 753)
P2	5 342 (1 419)	6 577 (4 006)	15 710 (4 186)	15 527 (4 149)	6 967 (1 965)	6 990 (4 740)	20 165 (4 874)	20 043 (4 895)	6 336 (1 432)	7 162 (3 240)	14 159 (3 451)	14 794 (3 438)
P3	3 886 (438)	4 008 (2 215)	5 647 (1 201)	4 759 (946)	2 472 (693)	4 161 (2 840)	6 473 (1 395)	5 347 (988)	3 380 (444)	4 311 (1 599)	5 039 (1 111)	4 944 (943)
P4	3 695 (393)	3 839 (1 681)	4 187 (832)	5 070 (415)	2 822 (313)	3 456 (2 047)	3 645 (888)	4 648 (336)	3 490 (385)	4 662 (1 054)	4 774 (831)	4 126 (543)

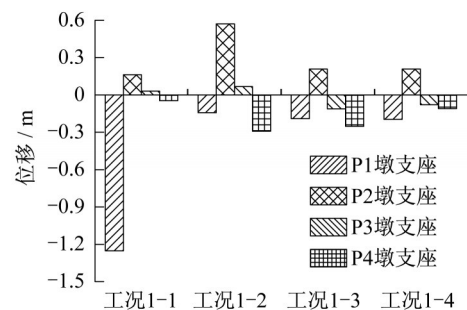


图 10 支座最大位移(TCU068)
Fig.10 Maximum displacement of the bearings in Case 1(TCU068)

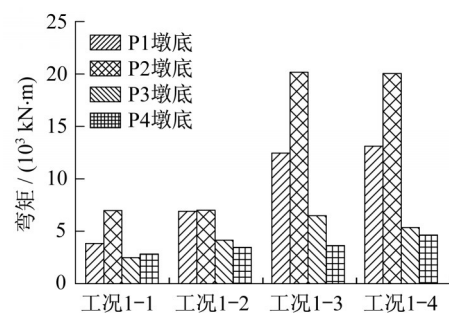


图 11 墩底最大弯矩(TCU068)
Fig.11 Maximum moment at the bottom of piers in Case 1(TCU068)

在工况 1-2 中,P1 墩的支座位移响应显著减小,在 TCU068 作用下,支座最大位移仅为 0.14 m;P2 和 P4 墩的支座位移由于主梁的扭转而增加,P3 墩的支座位移则基本不变。墩底响应方面,P1 墩的墩底

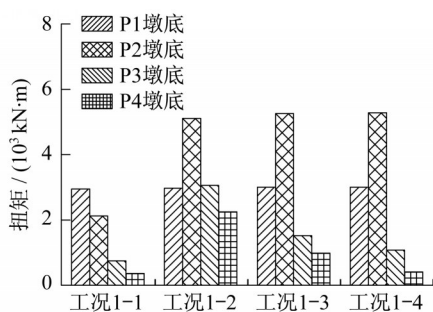


图 12 墩底最大扭矩(TCU068)

Fig.12 Maximum torsional moment at the bottom of piers in Case 1(TCU068)

弯矩增加,墩底扭矩基本不变;P2、P3和P4墩的墩底扭矩增加,墩底弯矩基本不变。这是由于P1墩处的拉索限位器在地震作用下限制了墩梁间的相对位移,拉索绷紧产生回复力,导致P1墩的墩底弯矩增加,而由于主梁此时发生了较明显的扭转,使得P2、P3和P4墩的墩底扭矩增大。

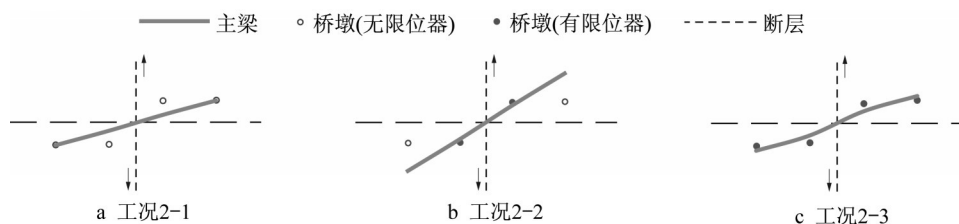


图 13 工况2中主梁的线型

Fig.13 Bridge alignment in Case 2

工况2中,各桥墩处最大支座位移、最大墩底弯矩和最大墩底扭矩如表5和表6所示。图14和图15给

出了TCU068作用下的桥梁地震响应,由于结构对称,图中只给出断层左侧P1和P2墩处的地震响应结果。

在工况1-3中,相比于工况1-2而言,P2墩的支座位移减小,而由于主梁的扭转,P3墩处出现反向的位移响应,P1和P4墩的支座位移基本不变;墩底响应方面,P1、P2和P3墩的墩底弯矩增大,P3和P4墩的墩底扭矩减小。

在工况1-4中,相比于工况1-3而言,P4墩的支座位移减小,P1、P2和P3墩的支座位移和各桥墩的墩底弯矩及墩底扭矩无明显变化。

3.2 工况2下的桥梁响应

由以上分析可知,当断层从连续梁桥边跨穿过时,在边墩和邻近断层的中墩位置安装拉索限位器可以有效减小桥梁的位移响应。

当断层从中跨(P2和P3之间)穿过时,震后各个工况的桥梁线型如图13所示。与工况1不同的是,在没有安装拉索限位器时(工况2-1)主梁已经发生扭转;工况2-2中,主梁的扭转相比于工况2-1而言有所加剧;工况2-3中,主梁会同时发生扭转和弯曲。

表 5 工况2支座最大位移响应

Tab.5 Maximum displacement of the bearings in Case 2

(单位:m)

墩号	不同地震波作用下各工况最大位移								
	TCU052			TCU068			TCU071		
	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
P1	-0.06	0.75	0.13	0.05	0.90	0.13	0.05	0.38	0.12
P2	-0.38	-0.17	-0.21	-0.47	-0.17	-0.25	-0.31	-0.16	-0.18
P3	0.38	0.17	0.21	0.47	0.17	0.25	0.31	0.16	0.18
P4	0.06	-0.75	-0.13	-0.05	-0.90	-0.13	-0.05	-0.38	-0.12

断层从中跨穿过,在工况2-1中,离断层较远的P1墩支座位移、墩底弯矩及墩底扭矩较小,靠近断层位置的P2墩的支座位移、墩底弯矩及墩底扭矩较大。

在工况2-2中,P2墩的支座位移响应显著减小,但P1墩的支座位移响应出现激增,这是因为P2墩处拉索限位器的拉索绷紧后,给上部结构一个加速度,使得主梁梁端被甩出,导致P1墩的支座位移增大。墩底响应方面,P2墩的墩底响应有所增加,P1

墩的墩底响应基本不变。

在工况2-3中,相比于工况2-2而言,边墩支座位移激增的问题明显改善,此时各个桥墩的支座位移大小趋于相等。墩底响应方面,各个桥墩的墩底弯矩均会有所增加,墩底扭矩则基本不变。

由以上分析可知,当断层从连续梁桥中跨穿过时,全桥均安装拉索限位器可以更好地减小桥梁的位移响应。

表 6 工况 2 墩底最大弯矩和扭矩响应

Tab.6 Maximum moment and torsional moment at the bottom of piers in Case 2 (单位:kN·m)

墩号	不同地震波作用下各工况墩底最大弯矩和扭矩								
	TCU052			TCU068			TCU071		
	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
P1	3 450 (2 374)	3 450 (2 244)	7 209 (2 274)	2 937 (2 448)	3 332 (2 306)	8 044 (2 279)	3 782 (2 326)	4 306 (2 368)	5 689 (2 188)
P2	6 395 (3 425)	15 421 (4 956)	20 017 (4 236)	6 365 (3 902)	15 130 (4 925)	24 685 (4 889)	7 247 (2 855)	13 398 (4 416)	16 859 (3 597)
P3	6 350 (3 421)	15 443 (4 964)	20 130 (4 225)	6 478 (3 891)	15 171 (4 919)	24 853 (4 883)	7 302 (2 852)	13 408 (4 400)	16 464 (3 607)
P4	3 446 (2 365)	3 458 (2 238)	7 371 (2 260)	3 041 (2 466)	3 518 (2 311)	8 231 (2 287)	3 876 (2 298)	4 808 (2 380)	5 999 (2 181)

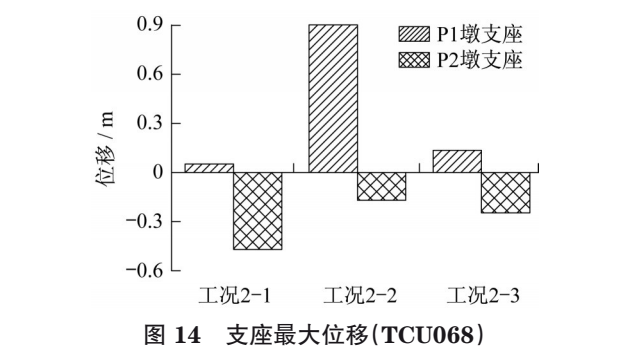


图 14 支座最大位移(TCU068)

Fig.14 Maximum displacement of the bearings in Case 2(TCU068)

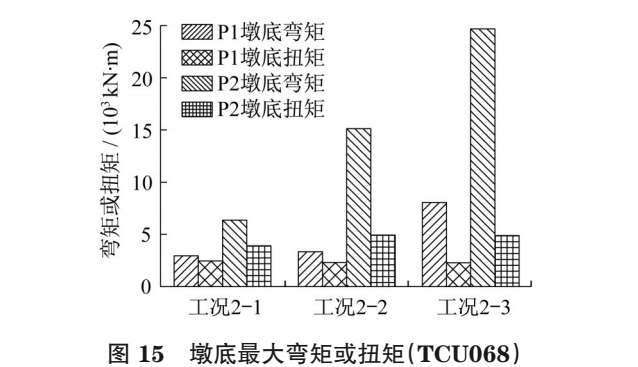


图 15 墩底最大弯矩或扭矩(TCU068)

Fig.15 Maximum moment and torsional moment at the bottom of piers in Case 2(TCU068)

4 限位器参数的选取

在实际工程中,拉索限位器的自由程和限位刚度对限位效果和下部结构的受力有直接影响。本节主要研究不同拉索限位器设计参数对跨断层桥梁地震响应的影响规律。选取的有限元模型同第3节,假设断层从中跨穿过,全桥均安装拉索限位器。鉴于篇幅,仅列出 TCU068 作用下的计算结果,在另外两条地震波作用下,桥梁的地震响应有相似规律。

4.1 自由程的选取

取限位刚度为 $45\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,自由程变化范围为 $0.05\sim0.25\text{ m}$,每 0.05 m 为一级。计算结果如图 16 所示。图 16 中,自由程为零表示不安装拉索限位器。

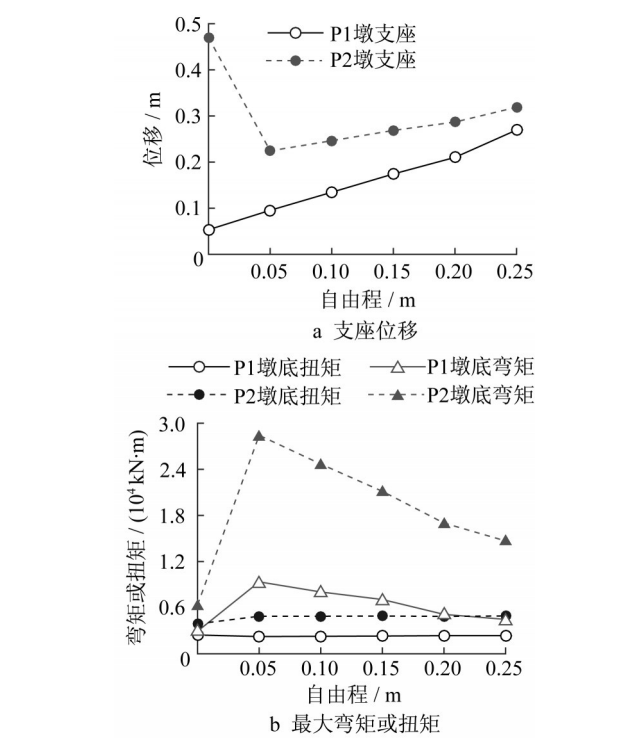


图 16 拉索限位器自由程对跨断层桥梁地震响应的影响

Fig.16 Seismic responses of cross-fault bridge at various lateral restraining displacements

从图 16 可以看出,在全桥安装拉索限位器时,增加限位器自由程对跨断层桥梁的支座位移响应和墩底弯矩影响较大,而对墩底扭矩影响较小。随着限位器自由程的增大,支座位移响应呈线性增大趋势,墩底弯矩响应呈线性减小趋势,这表明跨断层桥梁的地震响应对限位器自由程的变化较为敏感。

4.2 限位刚度的选取

取拉索限位器自由程为0.10 m,限位刚度变化范围为 $1.5 \times 10^4 \sim 9.0 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,每 $1.5 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 为一级,计算结果如图17所示。图17中,限位刚度为零表示不安装拉索限位器。

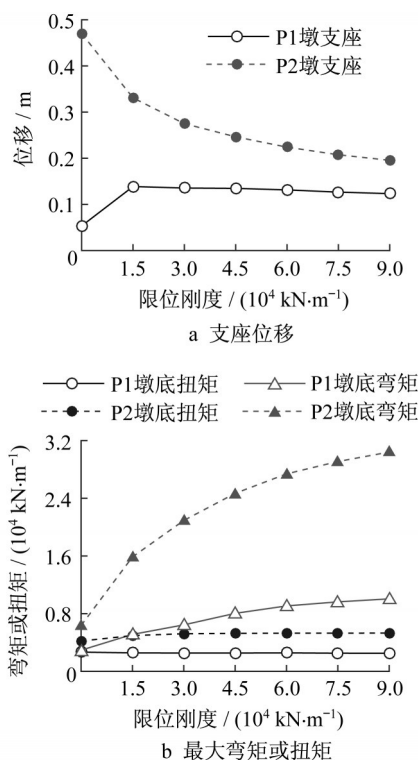


图17 限位器刚度对跨断层桥梁地震响应的影响

Fig.17 Seismic responses of cross-fault bridge at various lateral stiffnesses

从图17可以看出,在全桥安装拉索限位器时,增加限位刚度对跨断层桥梁P1墩(边墩)处支座的位移响应和各桥墩的墩底扭矩影响较小,对P2墩(中墩)处支座位移响应和各墩的墩底弯矩影响较大,但并没有呈线性变化趋势。当限位刚度增大时,P1墩和P2墩的支座位移差异逐渐减小,并且趋于接近限位器自由程的大小;P1墩和P2墩的墩底弯矩差异则呈现出逐渐增大的趋势。这表明在使用拉索限位器时,选择过大的限位刚度并不一定带来更显著的限位效果。

通过以上分析可知,为了可以有效减小跨断层桥梁的位移响应,同时保证桥梁下部结构不发生破坏,要合理地选择连通式拉索限位器的自由程和限位刚度,其中桥梁的地震响应对限位器自由程的变化更为敏感。

4.3 限位器的设计流程

连通式拉索限位器的设计流程如图18所示。

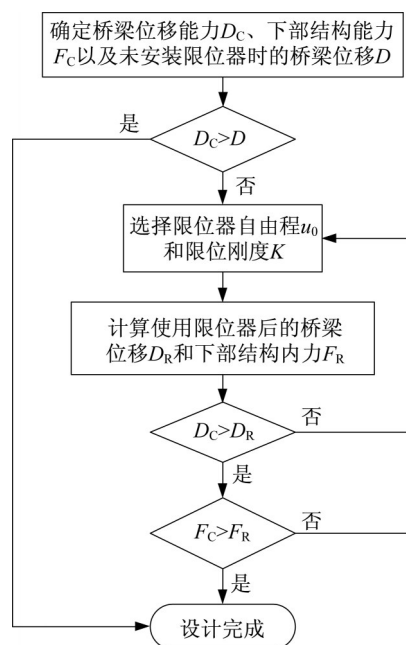


图18 连通式拉索限位器设计流程

Fig.18 Flow chart of coiled cable restrainer design

5 结论

(1)当断层位于连续梁桥边跨位置时,邻近断层的边墩支座位移较大,断层另一侧的桥墩支座位移较小,此时在邻近断层两侧的桥墩处安装拉索限位器可以有效地减小桥梁的位移响应。

(2)当断层位于连续梁桥中跨位置时,中墩处支座位移响应较大,边墩的支座位移响应较小,此时全桥均安装拉索限位器可以有效地减小桥梁的位移响应。

(3)考虑滑冲效应的跨断层桥梁地震响应对限位器自由程的变化更为敏感。自由程越小,限位刚度越大,拉索限位器的限位效果越好,但此时桥墩受力会比较大。因此,在实际工程中要对拉索限位器的参数进行合理地设计。

(4)对于不等跨或不等墩高的连续梁桥以及其他形式的桥梁,断层位置和拉索限位器对考虑滑冲效应的跨断层桥梁地震响应的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 惠迎新,王克海,何文杰.跨断层桥梁非一致激励输入模型适用性研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(5):100.
HUI Yingxin, WANG Kehai, HE Wenjie. Applicability research on multi-support excitation input model of bridges crossing fault [J]. Journal of Architecture and Civil

- Engineering, 2016, 33(5): 100.
- [2] GOEL R K, CHOPRA A K. Linear analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones [J]. Journal of Bridge Engineering: ASCE, 2009, 14(3): 203.
- [3] GOEL R K, CHOPRA A K. Nonlinear analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones [J]. Journal of Bridge Engineering: ASCE, 2009, 14(3): 216.
- [4] 杨怀宇, 李建中. 断层地震动对隔震桥梁地震响应的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(8): 1144.
YANG Huaiyu, LI Jianzhong. Response analysis of seismic isolated bridge under influence of fault-crossing ground motions [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(8): 1144.
- [5] 杨怀宇, 刘闯. 隔震支座及挡块在跨断层简支梁桥中的效用[J]. 结构工程师, 2016, 32(5): 98.
YANG Huaiyu, LIU Chuang. Performances of isolation bearings and retainers in a simply supported bridge across a fault [J]. Structural Engineers, 2016, 32(5): 98.
- [6] 惠迎新, 王克海, 吴刚, 等. 跨断层桥梁地震响应分析及合理跨越角度研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 6.
HUI Yingxin, WANG Kehai, WU Gang, *et al.* Seismic responses of bridges crossing faults and their best crossing angles [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 6.
- [7] 刘启方, 袁一凡, 金星, 等. 近断层地震动的基本特征[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(1): 1.
LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, *et al.* Basic characteristics of near fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1.
- [8] SAIIDI M S, MARAGAKIS E, FENG S. Evaluation of the current caltrans seismic restrainer design method [R]. Reno: University of Nevada, 1992.
- [9] SAIIDI M, MARAGAKIS E, ABDEL-GHAFFAR S, *et al.* Response of bridge hinge restrainers during earthquakes field performance, analysis, and design [R]. Reno: University of Nevada, 1993.
- [10] GU Y, YUAN W, DANG X. Test and numerical study on the seismic performance of a cable restrainer for girder bridges [C]//20th Congress of IABSE. New York: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2019: 1697-1706.
- [11] McKENNA F. OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation [J]. Computing in Science and Engineering, 2011, 13(4): 58.
- [12] 李冲, 王克海, 李悦, 等. 板式橡胶支座摩擦滑移抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 162.
LI Chong, WANG Kehai, LI Yue, *et al.* Experimental study on seismic performance of laminated rubber bearings with friction slipping [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(1): 162.
- [13] HISADA Y, BIELAK J. A theoretical method for computing near-fault ground motions in layered half-spaces considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1154.
- [14] HAMIDI H, KHOSRAVI H, SOLEIMANI R. Fling-step ground motions simulation using theoretical-based Green's function technique for structural analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 232.
- [15] HOSEINI VAEZ S R, SHARBATDAR M K, GHODRATI AMIRI G, *et al.* Dominant pulse simulation of near fault ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(2): 267.
- [16] BURKS L S, BAKER J W. A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 80: 119.
- [17] YADAV K K, GUPTA V K. Near-fault fling-step ground motions: characteristics and simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 101: 90.