

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.005



地震序列下拉索模数伸缩缝联间限位分析

王建国,袁万城,高康,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:主震作用下桥梁结构可能已发生联间相对变位,强余震作用将进一步加剧桥梁上部结构的碰撞或落梁灾害,以某连续梁桥为例进行地震序列分析,并对比有无拉索模数伸缩缝两种情况下的地震响应,结果表明:拉索模数伸缩缝能够有效限制主余震各阶段联间相对位移,对避免主震后产生联间残余位移的桥梁结构在强余震作用下发生碰撞、落梁具有重要意义;同时,拉索模数伸缩缝使桥梁各联间协同作用,从而墩梁相对位移得到相应的控制,桥墩受力亦有所改善。

关键词:地震序列;拉索模数伸缩缝;联间位移

中图分类号:U442.5;TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)03-0035-06

CMEJs' effect in limiting relative displacement between girders with excitation of seismic sequence

Wang Jianguo, Yuan Wancheng, Gao Kang, Dang Xinzhi

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Residual displacement between girders would have occurred after the main shock. And it would get further destroy (like pounding and unseating) with the excitation of aftershocks. Conclusions draw from the comparison on the response of continuous bridge with or without Cable-sliding expansion joints (CMEJs) under the excitation of seismic sequence. Relative displacement between girders gets effective restrained during the whole seismic process with the CMEJs which get great meaning for avoiding pounding and unseating. With the contribution of the CMEJs, all the girders work together causing the relative displacement between girder and the pile decreased. And the pier force also gets optimized.

Keywords: Seismic sequence; Cable-sliding modular expansion joints (CMEJs); relative displacement between girders

收稿日期:2015-12-24

基金项目:国家自然科学基金(51478339,51278376,91315301);土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE14-B-14);江西省科技计划(20151BBG70064)

作者简介:王建国(1993-),男,主要从事桥梁抗震研究,(E-mail)wjgnky@163.com。

袁万城(通信作者),男,教授,博士生导师,博士,(E-mail)yuan@tongji.edu.cn。

Received:2015-12-24

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51478339,51278376, 91315301); Foundation of State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering(No. SLDRCE14-B-14); Foundation of Scientific Project for Jiangxi Province(No. 20151BBG70064)

Author brief: Wang Jianguo(1993-), main interest: aseismic of bridges, (E-mail)wjgnky@163.com.

Yuan Wancheng(corresponding author), professor, doctor supervisor, (E-mail)yuan@tongji.edu.cn.

地震是一种时间和空间上具有丛集效应的不确定性作用,主震发生后往往伴随着余震的发生,通常情况下主震震级越高其余震震级亦越高,对结构的破坏作用亦越大。余震作用下的桥梁可能为主震后带有损伤和残余位移的结构,其发生将进一步加剧桥梁结构的震害程度,甚至成为导致结构破坏的决定性因素^[1]。

Ragunandan 等^[2]、Amadio 等^[3]、Lee 等^[4]、Hatzigeorgiou 等^[5]分析地震序列下结构的响应,发现考虑主震影响的余震作用的响应明显大于不考虑主震时的情况。在过去的震害记录中,不乏余震中毁坏的工程结构:1976 年唐山大地震中,滦河大桥在 7.8 级的主震中并未倒塌,而是在 15 h 后 7.1 级的强余震中桥墩折断、桥梁落架、倒塌;1952 年, Bakersfield 城毁于主震发生 1 个月后 5.8 级的强余震中^[6-7]。

桥梁上部结构的破坏形式主要包括落梁和碰撞^[7],强余震作用在主震后存在残余位移的桥梁结构上,其上部结构进一步破坏的可能性显著增加。针对上部结构的落梁问题,黄小国等^[8]对比了美国和日本防落梁装置的效果;张煜敏等^[9]分析了连梁装置的防落梁效果,发现连梁装置可有效的限制墩、梁的相对位移以及联间相对位移^[10],然而连梁装置不能避免联间相向位移以防止碰撞。针对上部结构的碰撞破坏,王军文等^[11]对连续梁桥地震作用下的碰撞反应参数进行了分析,Bi^[12-13]分析了橡胶阻尼的防碰撞效果以及碰撞对桥梁结构的影响,指出碰撞作用危害严重应避免,此外,现今各国学者就碰撞对桥梁的影响看法也不统一。袁万城提出了一种拉索模数伸缩缝装置^[14],该装置既可以限制联间相对位移避免落梁,又可以限制梁间相向位移避免上部结构的碰撞。

1 拉索模数伸缩缝工作原理

拉索模数伸缩缝将传统模数伸缩缝(图 1)两端的支撑箱体与支撑横梁用贯穿的拉索连在一起,根据设计需要给出拉索自由程并对称固定在两边的支撑箱体,如图 2 中(a)、(b)、(c)所示。在强震作用下,支承箱体(纵向位移箱)、支承横梁之间相对位移得到有效的限制,避免前后梁体相互碰撞,消耗强震能量,有效控制落梁与梁体碰撞损坏^[14]。当联间相对位移小于拉索自由程时(图 2(d)中 gp),拉索不起作用;当联间相对位移大于拉索自由程时,拉索开始

发挥作用,其刚度为 K ,拉索模数伸缩缝的本构模型如图 2(d)所示。

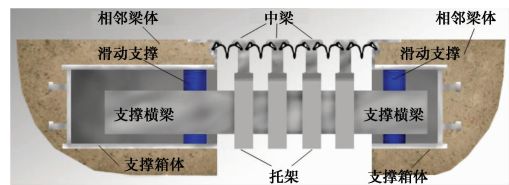
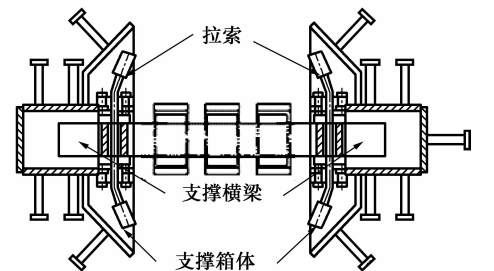
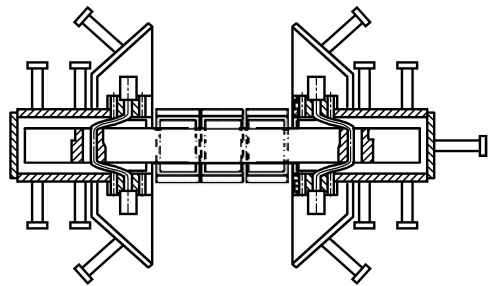


图 1 模数伸缩缝

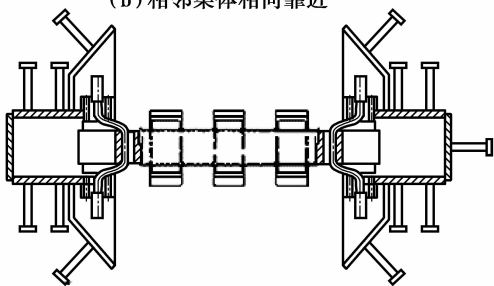
Fig. 1 Cross-section view of the modular expansion joints



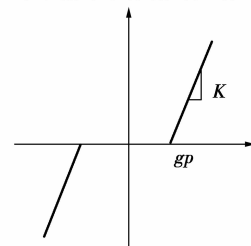
(a) 正常情况示意图



(b) 相邻梁体相向靠近



(c) 相邻梁体相对运动



(d) 拉索模数伸缩缝本构关系

图 2 拉索模数伸缩缝构造及其本构关系

Fig. 2 Schematic diagram of symmetrical cable-sliding expansion joints and force-displacement relationship

2 地震序列的选取

据统计,在中国已发生的地震中主-余型地震约占地震发生总数的 60%^[15]。中国台湾主震为 7.6 级的 CHI-CHI 地震序列规模惊人,震级 6.5 级以上强余震在主震后的 7 d 内就发生过 4 次,是全世界相当罕见的例子^[16]。本文通过太平洋地震研究中心(PEER)数据平台筛选出主震震级大于 6.7 级、主震峰值加速度(PGA)大于 0.4 g 且余震比较突出的 CHI-CHI 波、MK180 波、Nothridge 地震序列波,如图 3 所示,并以获得的原始序列波作为激励进行加速度时程分析,各地震序列波峰值加速度如表 1 所示。

通常落梁、碰撞多发生在纵桥向,本文仅就纵桥向地震响应进行分析。计算时通过将主、余震经剪波处理为一条加速度时程波,在生成主余震的地震波时,以相邻主、余震之间间隔 100 s^[17]来模拟实际地震中主余震之间时间间隔,100 s 无加速度的间隔,足以使结构在前一个地震中停止振动。

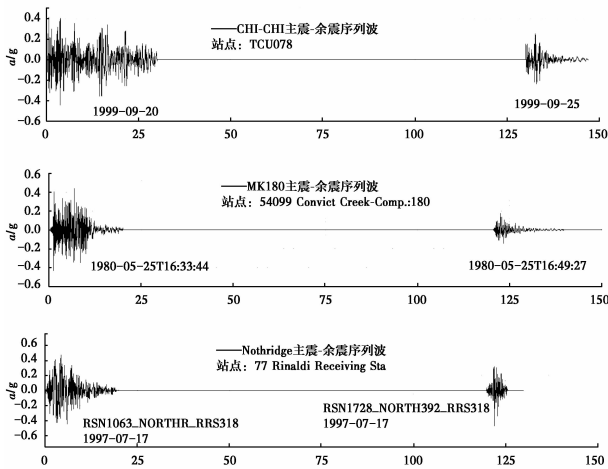


图 3 地震序列加速度时程

Fig. 3 Time history of seismic sequence

表 1 地震序列主、余震峰值加速度
Table 1 PGA of the seismic sequence

地震序列	主震 <i>g</i>	余震 <i>g</i>
CHI-CHI	0.443	0.254
MK180	0.44	0.178
Nothridge	0.472	0.475

3 实例分析

以某三联多跨连续梁桥为例进行地震序列下拉索模数伸缩缝联间限位分析,该连续梁桥上部为宽 26 m 的预应力箱梁结构;下部采用不等高双柱式框架墩,P4~P7 墩高 18.8 m,其余墩高 10 m,基础为方形承台下布置钻孔灌注桩。支座采用普通板式橡胶支座,考虑支座的非线性影响。利用 SAP2000 建立三维有限元分析模型,如图 4 所示。主梁、桥墩采用框架单元模拟;承台底桩土作用采用 6 弹簧模拟,弹簧刚度由“m”法确定;支座采用理想弹塑性(Plastic Wen)单元模拟,支座参数根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02—01—2008)确定,其中,边界墩与过渡墩屈服力(P1、P4、P7、P10)为 500 kN,中间墩屈服力为 1 000 kN;伸缩缝采用具有图 2(d)本构的 Multi linear 单元模拟。

通常伸缩缝本身具有伸长和压缩长度,本文中不考虑温度和车辆冲击效应,主要讨论地震作用下拉索模数伸缩缝的联间限位效果,通过对中国多数中等跨径桥梁伸缩缝分析,最终选择伸缩缝 10 cm 作为分析参考,即认为联间相向位移超过 10 cm 时发生碰撞。本文不考虑构造或锚栓失效影响,并根据文献[18]关于拉索伸缩缝拉索自由程的设置原则取拉索自由程为 5 cm,刚度为 $k=2 \times 10^4$ kN/m。

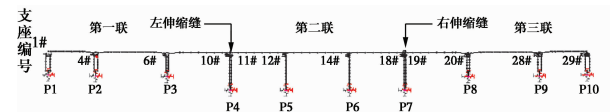


图 4 桥梁有限元模型

Fig. 4 Finite-element modal of bridge

4 地震响应分析

通过对比地震序列下有、无拉索模数伸缩缝的地震响应,分析拉索模数伸缩缝的限位效果。为表达方便,记设置拉索模数伸缩缝的体系为 Y,反之为 N。由于本文选取模型为对称结构,所以只就第一联与第二联间的响应进行分析。此外,图 5、图 7 中对地震序列中主、余震的位移峰值进行了标注。

4.1 联间相对位移

由图 5 可知:地震序列作用下联间相对位移围绕某振动平衡位置进行往复变化。未设置拉索模数伸缩缝情况下联间相对位移最大值超过伸缩缝的允

许位移量(10 cm),发生了碰撞;使用拉索模数伸缩缝之后,联间相对位移最大值控制在了拉索自由程 5 cm 附近,有效地避免了碰撞的发生。当联间相对位移超过拉索自由程之后,各主梁共同运动,联间的相向运动相互抵消,传至支座顶部的力减小,支座与主梁间的滑动位移量减小,最终在主震发生后,联间相对位移的残余值(振动平衡位置的变化)明显降低,对避免强余震作用下的碰撞具有重要的意义。

图 5(a)中,主震发生后,联间已存在残余位移,余震作用在主震后变位的结构上,拉索模数伸缩缝使联间相对位移仍然限制在自由程 5 cm 附近,而未采用拉索模数伸缩缝时,余震作用下联间最大相对位移达到 10 cm,造成联间碰撞。拉索模数伸缩缝降低了主震作用后存在残余变位的结构在余震作用下进一步发生碰撞的可能性。

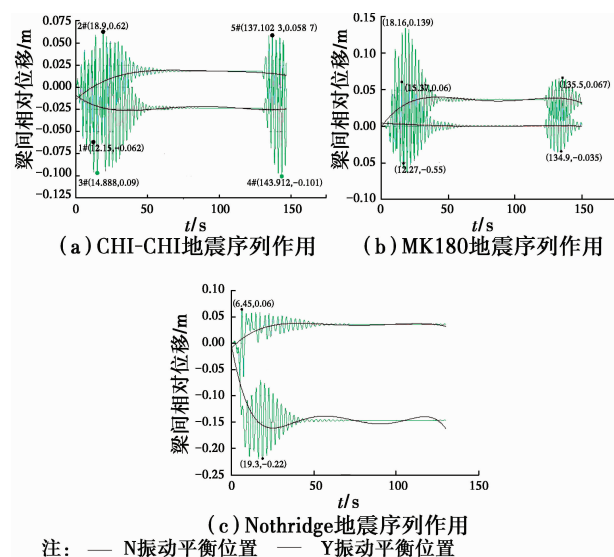


图 5 地震序列作用下联间相对位移历程

Fig. 5 Time history of displacement between girders with the excitation of seismic sequence

4.2 墩梁相对位移

强震作用下,拉索模数伸缩缝将各联主梁联系在一起,共同承受强地震序列作用,由图 6 可知:除 P5、P6 墩梁相对位移峰值(即 12#、14# 支座变形量)略有增大外,其余各墩的墩梁相对位移均有不同程度的减小。其中 CHI-CHI 地震作用下,有、无拉索模数伸缩缝两种情况第一联与墩 P4 间最大位移分别为 10、15 cm(如图 7(a)中的 1#、2# 点所示),拉索模数伸缩缝使墩梁相对位移降低 30%。

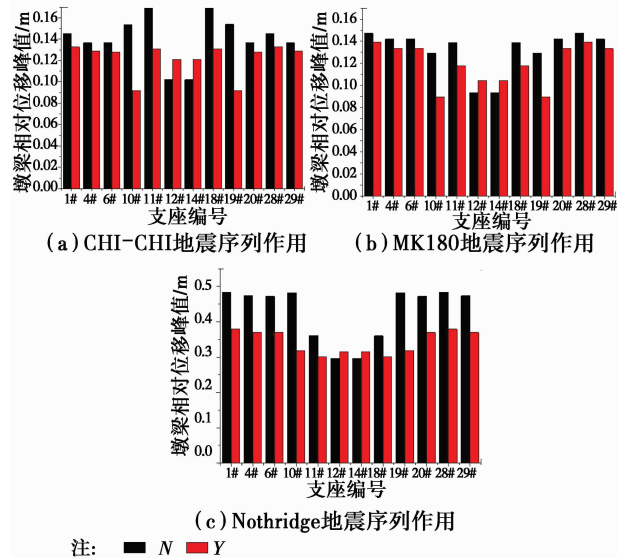


图 6 地震序列作用下墩梁相对位移峰值

Fig. 6 Peak displacement between girder and piers with the excitation of seismic sequence

由图 7 可知:无论是否应用拉索模数伸缩缝,墩梁相对位移在整个地震序列过程中都表现出围绕某一振动平衡位置往复振动。设置拉索模数伸缩缝后,墩梁相对位移明显小于未使用拉索模数伸缩缝时的情况;并且主震后,设置拉索模数伸缩缝时墩梁间残余位移明显小于未设置拉索模数伸缩缝情况。

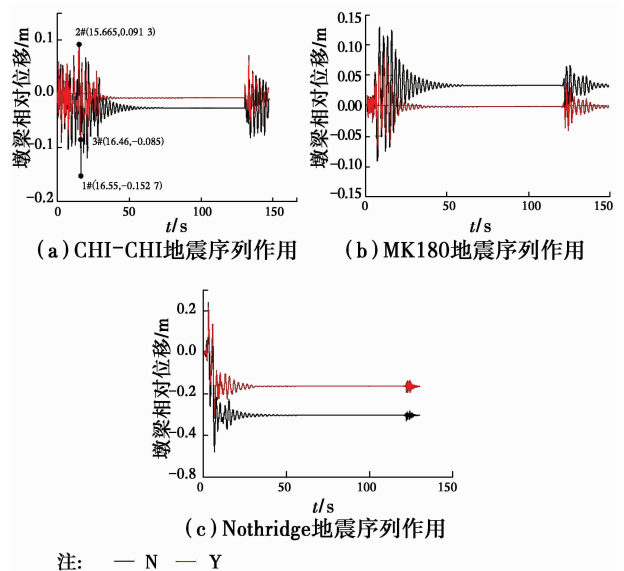


图 7 地震序列作用下第一联与 P4 墩相对位移历程

Fig. 7 Time history of displacement between girder1 and pier4 with the excitation of seismic sequence

4.3 墩底剪力

由于上部结构产生的惯性力达到了支座的摩擦屈服力,导致上部结构传递到墩底的剪力达到最大

值,除过渡墩之外的各墩底剪力峰值差别较小。拉索模数伸缩缝将各联主梁连为一体,使得各联之间的相对运动相互抵消从而减小过渡墩的剪力峰值,由图8可知,采用拉索模数伸缩缝之后,过渡墩(P4、P7)的剪力峰值明显降低。在本文中地震序列作用下拉索受力最大值未超过4 100 kN(如表2所示),通过拉索模数伸缩缝作用实现了力与位移的更为合理的平衡状态。

表2 地震序列下拉索轴力峰值

Table 2 Time peak force of the cable with the excitation of seismic sequence

地震序列波	拉索轴力峰值/kN
CHI-CHI	2 588
MK180	4 032
Nothridge	2 915

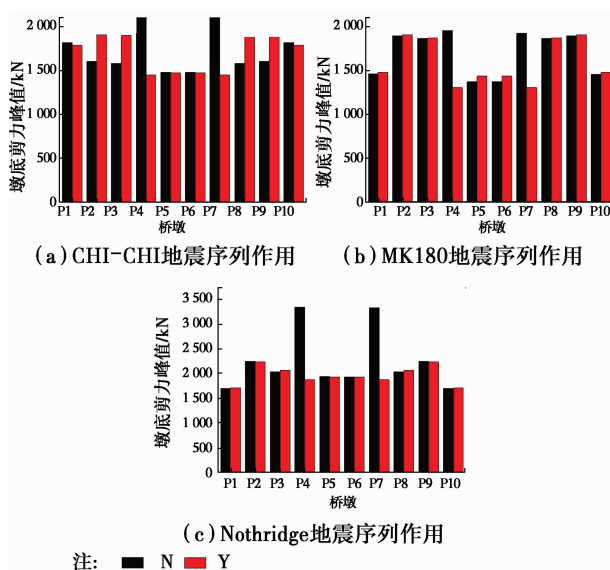


图8 地震序列下墩底剪力峰值

Fig. 8 The peak shear force at bottom pier with the excitation of seismic sequence

5 结 论

以某连续梁桥为例进行了有、无拉索模数伸缩缝两种情况下的地震序列分析,并通过考虑支座摩擦屈服效应模拟了墩梁之间相对滑移,进而得到了联间残余位移。对比两种情况下的动力响应后得出如下结论:

1)在整个地震序列过程中,拉索模数伸缩缝使得联间相对位移得到有效的控制,避免了联间碰撞;墩梁间相对位移减小,从而降低发生落梁灾害的可

能性。

2)余震作用在主震后存在残余变位的桥梁结构上,将加剧桥梁结构的震害,拉索模数伸缩缝使联间残余位移显著减小,从而避免余震作用下桥梁进一步发生碰撞的可能性。

3)强震作用下,拉索伸缩缝将各联主梁联系在一起共同运动,各支座协同作用,传递到墩底的剪力得到更为合理分配。

参考文献:

- [1] ZHANGS, WANG G, SA W. Damage evaluation of concrete gravity dams under mainshock - aftershock seismic sequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 50(1): 16-27.
- [2] RAGHUNANDAN M, LIEL A B, LUCO N. Aftershock collapse vulnerability assessment of reinforced concrete frame structures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44 (3): 419-439.
- [3] AMADIO C, FRAGIACOMO M, RAJGELJ S. The effects of repeated earthquake ground motions on the non-linear response of SDOF systems [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32 (2): 291-308.
- [4] LI Q, ELLINGWOOD B R. Performance evaluation and damage assessment of steel frame buildings under main shock - aftershock earthquake sequences [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(3): 405-427.
- [5] HATZIGEORIOU G D, BESKOS D E. Inelastic displacement ratios for SDOF structures subjected to repeated earthquakes [J]. Engineering Structures, 2009, 31(11): 2744-2755.
- [6] 张煜敏. 考虑强震序列作用的连梁装置分析研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [7] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [8] 黄小国,李建中,张哲. 连续梁桥纵桥向防落梁装置结构模式对比研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009,37(9): 1146-1152.
- [9] HUANG X G, LI J Z, ZHANG Z. Comparative

- research on modes of longitudinal unseating prevention system for continuous bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(9): 1146-1152. (in Chinese)
- [9] 张煜敏, 赵国辉, 刘健新. 地震序列下桥梁连梁装置的防落梁效果分析[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 53-56.
ZHAGN Y M, ZHAO G H LIU J X. Analysis on collapse-proof effectiveness of unseating-prevention device under earthquake sequences [J]. Journal of Catastrophology, 2010(3): 53-56. (in Chinese)
- [10] 张煜敏, 刘健新, 赵国辉. 地震序列作用下桥梁结构的响应及抗震措施[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 137-141.
ZHAGN Y M, LIU J X ZHAO G H. Seismic responses and aseismic measures of bridges under earthquake sequences[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2010, 30(2): 137-141. (in Chinese)
- [11] 王军文, 李建中, 范立础. 非规则梁桥伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 54-59.
WANG J W LI J Z FAN L C. Effect of pounding at expansion joints on seismic response of irregular girder bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 54-59. (in Chinese)
- [12] BI K, HAO H. Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions[J]. Engineering Structures, 2013, 46(1): 62-76.
- [13] SHRESTHA B, HAO H, BI K. Effectiveness of using rubber bumper and restrainer on mitigating pounding and unseating damage of bridge structures subjected to spatially varying ground motions [J]. Engineering Structures, 2014, 79(1): 195-210.
- [14] 同济大学. 抗震限位桥梁拉索模数伸缩缝装置: CN203834347U [P/OL]. 2014-09-17. <http://epub.sipo.gov.cn/dxb.action/0184868.7>.
Tongji university. Cable-sliding expansion joints' effect in limiting relative diaplacement; CN203834347U [P/OL]. 2014-09-17. <http://epub.sipo.gov.cn/dxb.action/0184868.7>. (in Chinese)
- [15] 周仕勇, 许忠淮. 地震序列研究综述[J]. 中国地震, 1999(3): 72-81.
ZHOU S Y, XU Z H. A review on earthquake sequence research[J]. Earthquake Research in China, 1999(3): 72-81. (in Chinese)
- [16] 张煜敏, 刘健新, 赵国辉. 地震序列下落梁震害的防灾设计分析[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 159-163.
ZHANG Y M, LIU J X, ZHAO G H. Analysis on anti-disaster design for girder falling damage under earthquake sequences[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 159-163. (in Chinese)
- [17] ZHAI C H, WEN W P, CHEN Z Q, et al. Damage spectra for the mainshock - aftershock sequence-type ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 45(1): 1-12.
- [18] GAO K, YUAN W, CAO S, et al. Seismic performance of cable-sliding modular expansion joints subject to near-fault ground motion [J]. Latin American Journal of Solids & Structures, 2015, 12(7): 1397-1414.

(编辑 胡 玲)