

文章编号: 1007-6069(2012)03-0120-06

# 竖向配预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能研究综述

司炳君<sup>1</sup> 张明生<sup>2</sup> 孙治国<sup>3</sup> 王东升<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 振动与强度测试中心 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 竖向配预应力钢筋混凝土桥墩( PRC 桥墩) 在桥梁工程中具有广阔的应用前景。总结了 PRC 桥墩产生以来国内外学者的主要研究成果, 并对其抗震能力进行了系统的归纳和分析, 主要包括预加压力、预应力筋用量、预应力度、预应力筋位置等因素对 PRC 桥墩残余变形、屈服后侧向刚度、水平承载力、耗能能力等抗震性能的影响。表明预应力筋的配置可有效减少残余变形、控制裂缝发展, 并提高结构的屈服后刚度。PRC 桥墩中的普通纵筋是保证桥墩延性耗能能力的关键, 但配筋率应保持在合理范围内。

**关键词:** 钢筋混凝土桥墩; 预应力筋; 抗震性能; 拟静力试验; 研究综述

中图分类号: U442.5<sup>+</sup>5

文献标志码: A

## Review of studies on seismic behavior of prestressed reinforced concrete bridge piers

SI Bingjun<sup>1</sup> ZHANG Mingsheng<sup>2</sup> SUN Zhiguo<sup>3</sup> WANG Dongsheng<sup>3</sup>

(1. Vibration & Strength Test Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China).

**Abstract:** Vertically prestressed reinforced concrete ( PRC) bridge piers have a wide application prospect in bridge engineering. Based on the review of the researches on seismic behavior of PRC bridge piers at home and abroad, some important findings on the seismic behavior of PRC bridge piers were introduced and summarized, including the influence of prestressing force, the amount and location of prestressing tendon and the prestressing ratio on the residual deformation, the lateral stiffness after yielding, horizontal carrying capacity and energy dissipation capacity of the PRC bridge piers. It is found that the prestressing tendon would reduce the residual deformation, delay the concrete cracking development and improve the lateral stiffness of the pier after yielding. The longitudinal reinforcement plays an important role in the energy dissipation capacity of the pier, ensuring the ratio of reinforcement in a reasonable range.

**Key words:** reinforced concrete bridge pier; prestressing tendon; seismic behavior; quasi-static tests; review

## 引言

随着基于性能/位移抗震设计思想的发展, 广大学者对钢筋混凝土桥墩极限变形能力的研究取得了不少成果<sup>[1-5]</sup>, 并开始关注不同受力阶段桥墩的破损情况<sup>[6-7]</sup>。1995年日本 Kobe 地震中 Hanshin 高速公路高架

收稿日期: 2011-08-13; 修订日期: 2012-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978042, 51008041), 地震工程与工程振动开放实验室基金项目(2009A07)

作者简介: 司炳君(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁与结构工程抗震研究. E-mail: sibingjun@yahoo.com.cn

桥中有大量桥墩尽管仅遭受轻微或中度破坏,但由于残余位移过大(大于1%)而不得不拆除重建<sup>[8]</sup>,并由此引起了人们对桥墩残余位移估计及控制问题的重视<sup>[9]</sup>。2008年我国汶川大地震中较多按现代规范设计的桥梁严重破坏亦为桥墩抗震亦提出了较多课题<sup>[10-12]</sup>。

钢筋混凝土桥墩中配置竖向预应力筋(简称PRC桥墩),一方面是在偏心受压的情况下防止出现拉应力和混凝土的过早开裂,另一方面则是满足施工方便、快捷需要而采用预制拼装混凝土桥墩<sup>[13-14]</sup>。研究表明配置竖向预应力混凝土桥墩在减少震后残余位移等方面具有特殊优势<sup>[15]</sup>。本文简要综述PRC桥墩抗震研究进展,并分析预加压力、预应力筋用量、预应力度、摆放位置等因素对PRC桥墩残余变形、屈服后刚度、耗能能力等的影响,以期推动及促进这种新型结构在我国桥梁工程的应用。

## 1 国内外研究概况

针对Kobe地震中大量桥墩残余位移过大的问题,日本学者Ikeda等率先开展了在整体现浇钢筋混凝土桥墩中配置竖向预应力筋以减少桥墩残余位移的研究;而预制拼装预应力混凝土桥墩则首先在美国提出,最初是为了满足施工方便、快捷的需要,后来为克服此类结构耗能能力低、不利于抗震的缺点,不同学者进行了一系列的专门研究<sup>[16-17]</sup>。

### 1.1 国外的研究概况

日本Ikeda等<sup>[18]</sup>认为,同普通钢筋混凝土柱相比,PRC墩柱具有更强的抗弯、抗剪能力,并具有较小的残余位移。为了证实预应力墩柱在抗震方面的优良性能,Ikeda等进行了一系列的试验研究与数值分析。试验构件截面尺寸为400mm×400mm,高度为1.5m,主要考察参数是混凝土强度、预加应力及预应力筋有无粘结。试验结果及后续数值分析表明,PRC柱的滞回曲线中出现明显的捏缩段,这说明PRC墩柱具有良好的屈服后刚度,可以极大的减少结构的残余变形。但是桥墩中加入预应力筋后削弱了结构的耗能能力,试验中预应力筋始终处于弹性阶段,能量耗散主要由普通钢筋承担。试验另一个重点考察因素是预加应力的影响,当预加应力分别为4MPa与8MPa时,结构的残余变形及耗能能力变化都不显著,因此作者得出结论:增加预加应力可以提高结构的水平承载力,但对残余变形及耗能能力影响不明显。

日本Zatar<sup>[19-20]</sup>认为,当前各国规范已能确保普通钢筋混凝土桥墩在地震过程中不产生超出限值的位移,但结构震后的可用性通常都遭到破坏,因此采取减少残余变形措施具有重要的经济意义。Zatar提出,确定一个精确的滞回恢复力模型以准确模拟PRC桥墩的受力性能,是PRC桥墩在工程实践中推广应用的前提。据此设计了包含7根PRC墩柱的抗震试验,试件类型从RC柱到PRC柱不等,加载主要为低周反复方式,另有2根柱采用拟动力加载。试件的抗剪与抗弯能力比设计为1.5:1,以确保试件弯曲破坏。试件截面尺寸400mm×400mm,剪跨比为4,轴向应力1MPa,混凝土抗压强度35MPa。试验结果仍可以看到PRC墩柱滞回曲线有明显的捏拢现象,Zatar也认为添加预应力筋使得试件即使在遭受较大的非线性变形的时候,仍然具有较好的复位能力。在试验分析的基础上,Zatar总结出了一个恢复力模型,该模型建立在Takeda三线性模型基础上,采用两卸载刚度,以确保在结构位移较小时,仍能精确计算能量耗散。进一步的数值分析结果显示,该模型能够较精确的模拟出试件的残余位移和耗能能力。Zatar最后总结认为:(1)PRC桥墩的自复位性和较小的残余位移使其具有应用在实际桥梁工程中的潜质;(2)与普通混凝土墩柱相比,PRC墩柱具有更小的残余裂缝,并且预应力度越高,其残余裂缝宽度越小;(3)PRC墩柱通常具有较小的耗能能力,这取决于构件所配预应力筋的数量。

Iemura<sup>[21]</sup>则开展了UBRC(unbonded bar reinforced concrete)墩柱的研究与推广工作。UBRC墩柱系指在普通钢筋混凝土墩柱中增设竖向无粘结筋(或无粘结高强钢棒),并在其锚固端头设置空隙,使之形成具有良好屈服后刚度的结构。Iemura认为UBRC结构具有良好屈服后刚度的原因是:无粘结筋在两锚具之间均匀变形,不出现应力集中,变形由墩柱全长均匀承受;并且由于锚固处空隙的存在,相对于普通纵筋而言,在塑性较区的应变非常小,在普通钢筋屈服后仍然处于弹性阶段。Iemura通过分析,认为这种新型结构的受力可概括为普通混凝土理想弹塑性行为与预应力钢筋弹性行为的叠加,因此具有较高的屈服后刚度。在对UBRC墩柱进行拟静力试验和伪动力试验的基础上,发现即使大震情况下,UBRC墩柱仍具有良好的抗震能力,且由于无粘结筋提供的弹性恢复力,墩柱残余变形很小。另一个值得关注的结论是,由于具有良好的屈服后刚度,使得按第一阶段强度设计的UBRC结构,在罕遇地震下仍可能表现出较好的抗震能力。

Sakai 和 Mahin 等<sup>[22-23]</sup>在太平洋地震工程研究中心(PEER)资助下,首先对256根不同参数的预应力混凝土桥墩进行了低周反复及动力加载下抗震性能的数值分析,涉及参数是:预应力筋(钢绞线)位置、无粘长度、预加应力、预应力筋比率、纵筋配筋率等。得出的主要结论如下:(1)桥墩残余位移随纵筋配筋率或轴向力的减小而减小;(2)在截面中心加入钢绞线其抗弯强度最好但需要以更好的方式约束核心混凝土,以防止较早压坏;(3)截面中心植入钢绞线束以替换等量的普通钢筋,可以使残余位移减小至原来的14%,并可以提高结构抗弯能力;(4)将普通钢筋采用无粘结处理方式(即采用UBRC结构)也可明显减少残余位移;(5)为获得较小的残余位移及综合的优良抗震性能,预加轴压比宜保持在0.05~0.1之间,普通纵筋配筋率不宜大于0.59%,预应力筋和普通纵筋配筋率不宜超过0.7%。他们还进行了5根在截面中心配置无粘结预应力筋的桥墩模型振动台试验<sup>[24]</sup>除了验证预应力筋对桥墩提供的复位能力外,还考虑了对普通纵筋采用无粘结的形式和外包钢套管对桥墩抗震能力的影响。试验结果表明,预应力桥墩在强烈地震作用下表现出良好的自复位能力,外包钢套管和普通纵筋采用无粘结方式的桥墩抗震能力更突出些。

预制拼装预应力混凝土桥墩因施工快捷亦得到广泛研究。Wang、Ou等<sup>[25-27]</sup>针对节段拼装预应力混凝土桥墩延性耗能能力差的特点,提出在拼装段的接缝处设置连续的耗能钢筋(ED筋)来改善桥墩的抗震能力,首先基于数值分析手段对这种结构的抗震能力进行了验证,其后又分别设计了4个高墩和4个普通墩试件,通过拟静力试验验证了这种新型结构的抗震能力。试件截面均为矩形空心形式,所不同的是,在高墩试件中预应力筋位于空心墩的薄壁之内,且预应力筋与ED筋均与周围混凝土粘结;而在后来进行的普通墩试件中,预应力筋位于截面空心部分,类似于体外预应力筋,且ED筋在节段连接处也与周围混凝土不粘结。试验结果表明,采用ED筋可有效改善节段拼装预应力混凝土桥墩的延性和耗能能力。Kim等<sup>[28]</sup>在节段拼装桥墩的接缝处设置连续的剪力连接装置以增强桥墩的抗剪能力,进行了5个试件的拟静力试验,并建立了精细化的有限元分析模型。试验结果表明这种结构形式在显著降低桥墩残余位移的情况下,还可有效提高桥墩的延性和耗能能力,其建立的有限元模型较好的模拟了桥墩的滞回曲线和接缝处的非线性力学行为。

## 1.2 国内的研究概况

早在20世纪70年拼装预应力混凝土桥墩已在我国铁路桥梁中获得了应用,主要出于节约材料和人力,加快施工进度等考虑。兰州交通大学陈兴冲等<sup>[29-30]</sup>针对拼装预应力混凝土桥墩梁-柱接头的抗震问题进行了早期的研究工作,包括数值分析与模型试验等,为此类结构的抗震设计提供了依据。近期王志强、葛继平等针对节段拼装预应力混凝土桥墩的抗震问题进行了研究。而苏小卒、叶列平等则是针对预应力混凝土建筑结构柱的抗震问题开展了相关研究,结构形式为整体现浇。

王志强、葛继平等<sup>[13-15,31-35]</sup>对节段拼装预应力混凝土桥墩的抗震问题进行了系统性的研究,他们通过模型拟静力试验和振动台试验,证实了节段拼装预应力混凝土桥墩的自复位能力,同时发现节段拼装预应力混凝土桥墩的破坏现象主要表现为塑性铰节段接缝的张开闭合,而不会发生现浇钢筋混凝土桥墩出现的塑性铰现象,且在节段拼装桥墩的接缝位置布置纵向耗能钢筋,可以延缓接缝的张开,增强构件的耗能能力。在数值分析技术上,他们发展了基于实体有限元模型、纤维模型和集中塑性铰模型的节段拼装桥墩数值分析技术,通过与试验结果的对比,证实了模型的准确性。

张荣、苏小卒<sup>[36]</sup>针对在高层和超高层钢筋混凝土外柱常常出现拉力而对结构不利的情况,考虑在柱中加预应力来改善此种情况。研究者设计了4根小尺寸竖向配预应力筋悬臂柱试件,通过变轴力的拟静力试验考察有无粘结及预应力束数量对柱抗震性能的影响。试验结果发现,由于预应力筋的高强特性,加入后结构的受拉承载力明显增强,滞回环宽度较窄,复位能力较强。因此,可在柱中加竖向预应力筋以改善其受力性能,该工作为竖向加预应力混凝土柱的进一步应用提供了理论基础。

叶列平、汪训流等<sup>[37]</sup>对PRC结构的自复位性能进行了较为详尽的阐述和研究。汪训流<sup>[38]</sup>制作了15根300mm×300mm尺寸的PRC柱试件,分为6组,分别讨论了外加轴压比、预加轴压比、预应力度、配筋指标、预应力筋配筋位置及方式等因素对试件受力性能的影响。实验结果表明,在柱中配置高强钢绞线,能够有效控制结构的残余变形,并明显改善结构的抗震性能,研究者还就各因素对结构受力性能的影响做了详细的讨论。

## 2 影响PRC墩柱抗震性能的因素分析

在总结国内外相关研究成果的基础上,分别讨论预加压力、预应力度、预应力筋位置等一系列因素对

PRC 墩柱的初始刚度、屈服后刚度、残余变形、水平承载力、耗能能力等抗震性能的影响。需要注意的是,由于竖向配置预应力钢筋混凝土桥墩本身分为整体现浇和预制拼装 2 种结构形式,对预应力筋而言又可分为有粘结和无粘结 2 种,且不同研究者的研究手段、试件数量、关注重点也不尽相同,因此得出的结论可能会有所差别,这里主要针对现浇整体式桥墩的研究成果进行讨论。

### 2.1 预应力度( prestressing ratio) 的影响

预应力度是指在预应力混凝土结构中施加的预应力的的大小程度。对 PRC 墩柱预应力度  $\lambda$  通常指预应力筋所能承受的弯矩与截面所能承受的弯矩之比,其公式为:

$$\lambda = f_{py}A_p / (f_{py}A_p + f_yA_s) \quad (1)$$

式中  $f_{py}$  为预应力筋屈服应力,  $A_p$  为预应力筋面积;  $f_y$  为普通纵筋屈服强度,  $A_s$  为普通纵筋面积。Zatar<sup>[20]</sup> 设计的 PRC 墩柱试验中,将预应力度作为主要的考察变量,分布范围从 0.00 至 0.86。通过 4 根对比件的研究发现,预应力度值发生改变,能对结构的延性抗震性能产生显著影响。当  $\lambda$  值处于较高水平时,PRC 墩柱的卸载刚度会明显降低,而结构的残余变形与裂缝宽度相应小很多。Sakai<sup>[23]</sup> 通过改变耗能钢筋数量和预应力筋数量两种方式改变预应力度,并进行了数值模拟,得出的基本结论基本同 Zatar 一致,但是并没有相应的量化分析。

### 2.2 预加轴压力( prestressing force ratio) 的影响

预加轴压力  $N_p$  指张拉时在预应力筋上所施加的力。预加轴压比  $\zeta$  的定义为:

$$\zeta = N_p / f_c A \quad (2)$$

式中  $f_c$  为混凝土抗压强度,  $A$  为截面面积。Iemura<sup>[21]</sup> 指出,PRC 墩柱的残余变形主要取决于试件的预应力筋数量,即使预应力筋不张拉,PRC 墩柱残余变形的减少仍然非常可观。Sakai<sup>[23]</sup> 数值模拟结果显示,当预应力筋不张拉,即预加轴压比为 0 时,试件的残余变形仍能减少 50% 左右,此后随预加轴压比增加而快速降低,但预加轴压比超过 10% 以后,其残余变形反而会有所增大。另外,预加轴压比还与结构的屈服后刚度和初始屈服力关系密切。当预加轴压比增大时,初始屈服力增大,屈服后刚度减小且变化剧烈。综合考虑到预加轴压力可以控制裂缝,减小裂缝宽度等优点,将预加轴压比控制在 5% ~ 10% 之间是比较合理的。

### 2.3 预应力筋用量的影响

这里用预应力筋配筋率:  $\rho_{ps} = A_p / A$ , 作为预应力筋用量的度量方法。根据 Sakai 分析结论<sup>[23]</sup>,当保持总配筋量不变,预应力筋配筋率增大时,结构的屈服后刚度明显增大,而残余变形、初始屈服力、最大水平力、耗能能力等因素没有明显变化。PRC 墩柱的屈服后刚度主要由处于弹性阶段的预应力筋提供,因此其值增大是显而易见的,而其他主要抗震性能没有明显变化,这与一般设想并不相符。综上,增大预应力筋比率对提高结构的抗震性能并没有明显效用,盲目增大预应力筋配筋率并不明智。将预应力筋配筋率保持在 0.3% ~ 0.6% 之间是比较合理的选择。

### 2.4 普通钢筋用量的影响

在 PRC 结构及 UBRC 结构中,普通钢筋一般用作耗能钢筋以保证结构延性耗能能力。据 Sakai<sup>[23]</sup> 的分析,当普通钢筋配筋率在 0.18% ~ 0.92% 之间变化时,若普通钢筋配筋率增大,PRC 墩柱的残余变形、水平承载力、屈服后刚度、耗能能力等都有所增加,总体来说,这对震后的修复不利。但如果减少普通钢筋用量,结构的承载力和耗能能力都会降低,所以必须经过更深入的研究,才能确定合适的普通钢筋配筋率。

### 2.5 预应力筋位置的影响

Iemura<sup>[21]</sup> 等将无粘结筋的位置发生改变以研究其对结构受力性能产生的影响。实验结果发现,当预应力筋用量不同时,结构的屈服后刚度几乎没有变化;而当无粘结筋摆放位置更接近边缘时,其屈服后刚度明显增大。据此, Iemura 认为,结构的屈服后刚度与预应力筋的摆放位置有很大关系。Zatar<sup>[20]</sup> 推荐的滞回模型中考虑了预应力筋摆放位置的影响,与 Iemura 得出的结论相似,当预应力筋更靠近边缘时,会导致计算的预应力筋比率增大,从而导致屈服后刚度增大。而 Sakai<sup>[23]</sup> 的研究结果表明,在截面中心加入预应力钢绞线,其抗弯强度最好,但是需要更好的约束核心混凝土,以防止压坏。汪训流等<sup>[38]</sup> 经过试验研究发现,改变预应力筋位置和配置方式,对结构抗震性能影响较小。

### 2.6 预应力筋有无粘结的影响

预应力筋在地震作用下保持弹性是发挥其优势的关键,此点看来通常无粘结预应力结构具有更大的优越性,甚至出现了使用无粘结高强钢筋并设置间隙的 UBRC 结构。Sakai、Zatar、王志强等的研究都表明,有

粘结结构通常能承受更大的水平力作用,但其复位能力要弱于无粘结结构,并有相对较大的残余位移。

### 3 结束语

配置竖向预应力筋的钢筋混凝土结构是桥梁工程发展的重要方向,本文总结了国内外开展的相关试验和理论研究的成果,主要认识为:

(1) 在钢筋混凝土桥墩中配置竖向预应力筋可延缓桥墩在地震作用下的开裂破坏,且预应力筋提供的恢复力可有效减少结构的残余位移。

(2) 不论是否施加预应力,在桥墩中植入的预应力筋都会使结构具有明显的屈服后刚度,这对减小强震下残余变形具有很好的作用。

(3) 在 PRC 桥墩设置普通纵向钢筋,可有效提高桥墩的延性耗能能力,但普通钢筋用量增大,结构的残余变形也会变大,因此,普通钢筋的用量需要在一个适宜范围内。

(4) 同有粘结预应力筋相比,无粘结预应力筋全长参与变形且共同分担应力,较晚地进入塑性阶段,可以更有效的减少残余变形。

(5) 采用合理的预应力度指标是 PRC 桥墩发挥性能优势的关键,确定合理预应力范围是 PRC 桥墩抗震设计急需解决的问题。

### 参考文献

- [1] 孙治国,王东升,杜修力,等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰约束箍筋用量研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 48-57.
- [2] 孙治国,王东升,郭迅,等. 钢筋混凝土墩柱等效塑性铰长度研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 56-64.
- [3] 熊朝晖,潘德恩. 钢筋混凝土框架柱侧向变形能力的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(2): 103-108.
- [4] Saatcioglu M, Razvi S R. Displacement - based design of reinforced concrete columns for confinement [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(1): 3-11.
- [5] Kowalsky M J, Priestley M J N, Macrae G A. Displacement - based design of RC bridge columns in seismic regions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(12): 1623-1643.
- [6] Lehman D, Moehle J, Mahin S, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(6): 869-879.
- [7] Sun Zhiguo, Si Bingjun, Wang Dongsheng, et al. Experimental research and finite element analysis of bridge piers failed in flexure - shear modes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 403-414.
- [8] Fujino Y, Hashimoto S, Abe M. Damage analysis of hanshin expressway viaducts during 1995 Kobe earthquake. I: Residual inclination of reinforced concrete piers [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2005, 10(1): 45-53.
- [9] Lee W K, Billington S L. Modeling residual displacements of concrete bridge columns under earthquake loads using fiber elements [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2010, 15(3): 240-249.
- [10] 孙治国,王东升,郭迅,等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 132-138.
- [11] 王东升,孙治国,李晓莉,等. 汶川大地震曲线梁桥震害及破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(5): 572-579.
- [12] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1377-1387.
- [13] 王志强,葛继平,魏红一,等. 节段拼装桥墩抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 147-154.
- [14] 刘丰,魏红一,王志强. PRC 桥墩抗震性能研究现状和展望[J]. 结构工程师, 2007, 23(5): 48-51.
- [15] 王志强,葛继平,魏红一. 东海大桥预应力混凝土桥墩抗震性能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1462-1466.
- [16] Kwan W P, Billington S L. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. I: Monotonic and cyclic analyses [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2003, 8(2): 92-101.
- [17] Kwan W P, Billington S L. Unbonded posttensioned concrete bridge piers. II: Seismic analyses [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2003, 8(2): 102-111.
- [18] Ikeda, S. Seismic behavior of reinforced concrete columns and improvement by vertical prestressing [C]// Proceeding of the 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1998: 879-884.
- [19] Zatar W A, Mutsuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(6): 740-749.
- [20] Zatar W A, Mutsuyoshi A H. Reduced residual displacements of partially prestressed concrete bridge piers [C]// Proceeding of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand 2000: 1-8.
- [21] Iemura, H, Takahashi Y, Sogabe N. Development of unbonded bar reinforced concrete structure [C]// Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B. C., Canada, 2004: 1-15.

- [22] Sakai J, Mahin S A. Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns [C]// Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B. C., Canada, 2004: 1-13.
- [23] Sakai J, Mahin S A. Analytical investigations of new methods for reducing residual displacements of reinforced concrete bridge columns [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2004.
- [24] Mahin S, Sakai J, Jeong H. Use of partially prestressed reinforced concrete columns to reduce post-earthquake residual displacements of bridges [C]// Proceeding of the Fifth National Seismic Conference on Bridges & Highways, San Francisco, CA, 2006: 1-12.
- [25] Ou Y C, Chiewanichakorn M, Aref A J, et al. Seismic performance of segmental precast unbonded posttensioned concrete bridge columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2007, 133(11): 1636-1647.
- [26] Wang J C, Ou Y C, Chang K C, et al. Large-scale seismic tests of tall concrete bridge columns with precast segmental construction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(2): 1449-1465.
- [27] Ou Y C, Wang P H, Tsai M S, et al. Large-scale experimental study of precast segmental unbonded posttensioned concrete bridge columns for seismic regions [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 136(3): 255-264.
- [28] Kim T H, Lee H M, Kim Y J, et al. Performance assessment of precast concrete segmental bridge columns with shear resistant connecting structure [J]. Engineering Structures, 2010, 32(5): 1292-1303.
- [29] 陈兴冲, 虞庐松, 田琪, 等. 拼装式双柱桥墩梁-柱接头抗震能力的评估[J]. 兰州铁道学院学报, 1998, 17(1): 6-10.
- [30] 田琪, 陈兴冲, 朱东生, 等. 拼装式桥墩接头的承载能力与滞回特性的试验研究[J]. 工程力学, 1999, 16(2): 107-113.
- [31] 葛继平, 魏红一, 王志强. 循环荷载作用下预制拼装桥墩抗震性能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 894-899.
- [32] 葛继平, 王志强, 魏红一. 干接缝节段拼装桥墩抗震分析的纤维模型模拟方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 52-57.
- [33] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩集中塑性铰模型的地震响应分析[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 185-190.
- [34] 高婧, 葛继平, 林铁良. 干接缝节段拼装桥墩拟静力试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 211-216.
- [35] 葛继平, 王志强. 干接缝节段拼装桥墩振动台试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 122-128.
- [36] 张荣, 苏小卒. 竖向加预应力钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(12): 1578-1582.
- [37] 叶列平, 林旭川, 汪训流. 预应力混凝土结构的自复位性能与抗震性能[C]. 第十四届全国混凝土及预应力混凝土学术会议, 长沙, 2007.
- [38] 汪训流. 配置高强钢绞线无粘筋混凝土柱复位性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.