许国敏,张先可,黄河,等.预应力混凝土桥墩及其抗震性能研究新进展[J].地震工程学报,2027,49(1):1-14.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250827001

Xu Guomin, Zhang Xianke, Huang He, et al. Recent advances in research on prestressed concrete bridge piers and their seismic performance[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 1-14. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250827001

预应力混凝土桥墩及其抗震性能研究新进展

许国敏[1], 张先可[2], 黄 河[1], 康 玲[3], 柏颢原[3], 贾俊峰[2], 田 里[2]

(1. 四川成绵苍巴高速公路有限责任公司成都分公司,四川 成都 618206;
2. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124;
3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610041)

摘要: 强震作用下不仅要避免桥梁结构倒塌以保证通行人员安全,同时应关注桥梁损伤以考虑震后快速恢复通行功能和修复问题。预应力混凝土桥墩在桥梁抗震方面的优势受到关注,其墩内预应力筋既能为墩柱提供良好的恢复力,又能有效控制震后墩柱损伤,在一定程度上可减小桥梁残余位移以提高震后功能快速恢复性。文章分别从现浇混凝土桥墩和预制拼装桥墩两个方面综述预应力混凝土桥墩及其抗震性能研究新进展。首先,简要介绍预应力混凝土桥墩的发展背景,总结墩内配有竖向预应力筋的现浇钢筋混凝土桥墩的研究成果;其次,围绕耗能方式、抗剪措施、墩底损伤控制措施以及理论分析方法等方面介绍和总结预应力连接预制拼装桥墩的研究新进展;最后,基于当前国内外理论研究、技术研发和工程应用现状总结预应力混凝土桥墩发展趋势。结果表明:相较于现浇钢筋混凝土桥墩,预应力混凝土桥墩震后残余位移显著减小,一般情况下需配置耗能装置以提升耗能能力,使墩柱局部损伤减小。预应力连接技术在摇摆自复位抗震桥墩及多节段预制拼装桥墩建设中具有显著优势,而预应力混凝土桥墩数值建模方法、自复位桥墩性能化抗震设计方法及工程验证、预应力连接预制高墩及其抗震性能和耐久性能、预应力筋锚固与施工技术、先张法预应力混凝土桥墩及其抗震性能等是未来值得关注的重要方向。

关键词: 预应力混凝土桥墩;墩内预应力;后张预应力;自复位桥墩;预应力连接预制桥墩;抗震性能

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2027)01－0001－14

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250827001

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20154);四川省交通运输科技项目(2022-ZL-05)

第一作者简介: 许国敏(1980－),男,硕士,高级工程师,主要从事防灾减灾和防护工程研究。E-mail:342493527@qq.com。

通信作者: 贾俊峰(1982－),男,博士,教授,主要从事装配式预应力混凝土桥墩抗震性能研究。E-mail: jiajunfeng@bjut.edu.cn。

Recent advances in research on prestressed concrete bridge piers and their seismic performance

Xu Guomin[1], Zhang Xianke[2], Huang He[1], Kang Ling[3], Bai Haoyuan[3], Jia Junfeng[2], Tian Li[2]

(*1.Chengdu Branch of Sichuan Chengmiancangba Expressway Construction & Development Group Co., Ltd., Chengdu 618206, Sichuan, China*;
2.State Key Laboratory of Bridge Engineering Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3.Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Under strong earthquakes, it is essential not only to prevent bridge collapse to ensure the safety of passing personnel but also to control bridge damage to facilitate rapid postearthquake functional recovery and repair. Prestressed concrete bridge piers have attracted increasing attention owing to their advantages in seismic resistance. The internal prestressing tendons in these piers can provide favorable restoring forces while effectively limiting postearthquake damage, thereby reducing residual displacements and enhancing functional recoverability to a certain extent. This paper reviews recent advances in research on prestressed concrete bridge piers and their seismic performance, covering both cast-in-place and precast assembled piers. It begins with a brief introduction to the development background of prestressed concrete piers and summarizes research findings on cast-in-place reinforced concrete piers incorporating internal vertical prestressing tendons. Subsequently, recent advances in research on precast assembled piers with prestressed connections are reviewed and synthesized, with particular emphasis on energy dissipation methods, shear resistance measures, pier-base damage control strategies, and theoretical analytical approaches. Finally, based on current theoretical developments, technological progress, and engineering applications worldwide, the future trends in the development of prestressed concrete bridge piers are outlined. The results indicate that, compared with cast-in-place reinforced concrete piers, prestressed concrete piers exhibit significantly reduced residual displacements after earthquakes, generally require supplemental energy dissipation devices to enhance energy dissipation capacity, and suffer less localized damage. Prestressed connection technology offers notable advantages for the construction of rocking self-centering seismic piers and multisegment precast assembled piers. Future research should focus on several key directions, including numerical modeling methods for prestressed concrete bridge piers, performance-based seismic design methods and engineering validation of self-centering piers, seismic and durability performance of precast tall piers with prestressed connections, anchorage and construction techniques for prestressing tendons, and the seismic behavior of pretensioned prestressed concrete bridge piers.

Keywords: prestressed concrete bridge piers; internal prestressing; post-tensioned prestressing; self-centering piers; precast bridge piers with prestressed connections; seismic performance

0 引 言

我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位,属于典型的地震多发国家。桥梁是城市与区域间连接的枢纽节点工程,更是震后抢险救灾和灾后重建的生命线通道。强震作用下,桥梁倒塌或严重损伤不仅直接威胁通行人员的生命安全,更会中断震后抢险救灾与灾后重建的生命线通道,进而加剧区域损失。近年来,我国相继发生的多次强震中都有桥梁发生严重破坏

甚至倒塌，因此桥梁抗震防灾工作任重道远[1-2]。

桥梁延性抗震设计允许桥墩在强震作用下形成塑性铰，塑性铰区的弹塑性变形既能消耗地震能量，又能降低结构刚度，进而延长结构自振周期、避开强震激励的卓越周期，最后在一定程度上降低桥梁地震响应。1995年日本兵库县南部地震中，许多钢筋混凝土桥墩由于墩柱塑性铰区损伤严重而产生较大残余位移，在修复过程中对严重受损和残余位移较大的受损桥墩进行了重建。从震后调查结果来看[3]，591个严重破坏的桥墩中有129个桥墩因残余位移超过15 cm而不得不重建。此后，日本规范[4]指出，桥墩震后残余位移超过1%时，震后修复成本高于重建成本，减小震后桥墩残余位移成为关注焦点。另外，强震后人们对恢复生活秩序的迫切需求对桥梁震后快速功能恢复及结构修复提出了更高要求。

本文系统综述了预应力混凝土（Prestressed Concrete，PC）桥墩及其抗震性能的研究进展，重点关注现浇桥墩和预制拼装桥墩两个方面。首先，详细介绍了现浇钢筋混凝土桥墩中竖向预应力筋的应用及其抗震性能的试验研究和理论分析进展。其次，围绕耗能方式、抗剪措施、墩底损伤控制措施以及理论分析方法，全面总结了预应力连接预制拼装桥墩的最新研究成果。最后，基于当前国内外理论研究、技术研发和工程应用现状，探讨了PC桥墩的发展趋势，旨在为桥梁抗震防灾理论技术的发展和工程实践提供参考。

1　竖向预应力现浇混凝土桥墩及其抗震性能

1.1　抗震性能研究

钢筋混凝土（Reinforced Concrete，RC）桥墩在钢筋屈服后刚度显著降低，表现为典型的弹塑性行为，会产生较大的塑性形变[5]。1998年Zatar[6]从PC梁在卸载及非弹性变形后具有的弹性恢复能力与低延性特点中受到启发，提出了在桥墩中混合使用普通钢筋和预应力钢绞线（图1）。结合RC桥墩高延性、优异耗能能力与PC结构自复位性能、抑制混凝土开裂的优势，PC桥墩不仅具有良好的耗散地震能量的能力，而且能有效减小残余位移。PC桥墩在地震作用下的残余位移主要取决于预应力筋参数[7]。由振动台试验结果可以得出（图2），在与RC桥墩相同轴压比的情况下，将部分纵筋替换为预应力筋后，PC桥墩残余位移显著减小[8]。在与RC桥墩不同轴压比的情况下，当普通纵筋被预应力钢绞线替换比例较高时，PC桥墩损伤程度显著大于替换比例较低的情况，且预应力筋的应力损失幅值随之增大。

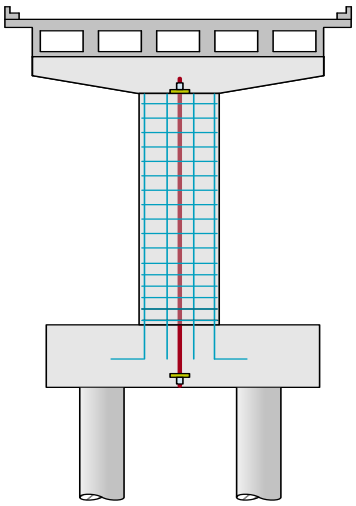


图1　预应力混凝土桥墩示意图

Fig. 1　Schematic diagram of a prestressed concrete bridge pier

多数纵筋被钢绞线替换后的桥墩塑性铰高度降低，塑性变形集中在墩底更小范围，类似摇摆桥墩行为（图3、4）[9]。预应力筋与混凝土的结合方式主要有黏结与无黏结两种方式。张荣等[10]通过拟静力试验发现有黏结预应力墩柱的最大侧向承载力和耗能能力要优于无黏结预应力墩柱，但有黏结预应力筋容易发生局部屈服，导致墩柱残余位移较大[11]。随后Wang等[12]利用OpenSees有限元软件平台并采用Truss单元模拟预应力筋，通过在预应力筋与墩柱之间建立多个刚臂单元，实现二者的协调变形以模拟有黏结预应力与墩柱间的相互作用，分析了有黏结PC桥墩的抗震性能。应力分布更均匀的无黏结预应力筋减小了强震后的预应力筋损伤。Larkin等[13]提出一种曲线布置无黏结预应力筋的方案，以便震后对预应力筋进行更换。

RC桥墩主要通过塑性铰区纵筋塑性变形和混凝土破碎耗散能量，由于PC桥墩相对RC桥墩减少了纵筋面积，所以耗能能力明显较弱[14]。诸多学者通过拟静力试验[13-16]、拟动力试验[15]和振动台试验[17]研究发现，纵筋面积的增加提高了PC桥墩的侧向承载力和耗能能力，但降低了桥墩的延性，增大了残余位移[18]。Lee等[14]通过集中塑性铰模型对其振动台试验进行分析，结果表明该模型可很好地反映墩柱的峰值位移和残余位移。合理控制残余



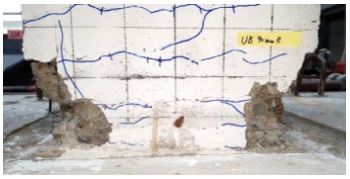
图 2 振动台试验[8]

Fig. 2 Shaking table test[8]

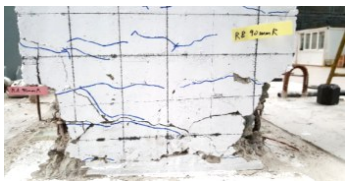


图 3 无黏结高强钢筋[9]

Fig. 3 Unbonded high-strength steel reinforcement[9]



(a) RC 桥墩破坏



(b) PC 桥墩破坏

图 4 桥墩破坏模式[9]

Fig. 4 Failure modes of bridge piers[9]

变形是PC桥墩抗震设计的关键要素之一，通过优化预应力筋的配置和耗能钢筋的设计，能够有效减小震后残余位移。同时，适当提高预应力筋的初始张拉力，并合理设定耗能钢筋的配筋率，不仅可以增强桥墩的耗能能力，还能避免产生过大的残余位移。Salkhordeh等[19]提出一种后张节段桥墩作为整体的替代方案以加快施工过程，并改善桥梁在残余变形方面的性能，但该方案可能面临节点连接强度和耐久性等方面的挑战。Nie等[20]介绍了各种耗能装置在摇摆墩中的应用，并在桥墩损伤控制和残余变形控制的基础上，提出了相应的耗能装置设计方法。Shrestha等[21]通过同时考虑最大变形和残余变形，应用了一种基于概率性能的抗震评估方法，对形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)加筋桥墩的抗震性能进行评估，以防止由于SMA弹性模量相对较低而引起的桥墩最大变形增加。但此方法在应用中需要大量的数据支持和复杂的计算，操作难度和成本也会相应增加。黄云青等[17]研究了不同连接方式对预制拼装桥墩抗震性能的影响。贾俊峰等[22]通过试验研究了外置可更换耗能器的预制拼装自复位桥墩的抗震性能，提供了关于残余变形控制的实验证据。为增强预应力混凝土桥墩的耗能能力和避免应力集中，可在墩底处设置无黏结耗能钢筋[15-16]。

Sakai等[16]在太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)资助下，对256根不同参数的预应力混凝土桥墩进行拟静力试验，考虑了预应力钢绞线位置、无黏结长度、预加应力、预应力筋比率和纵筋配筋率等参数的影响[23-24]，系统研究后发现，竖向配置预应力筋可有效减小裂缝宽度和残余位移，提高桥墩承载能力和抗弯刚度。混凝土桥墩残余位移随纵筋配筋率或轴向力的增大而增大，将普通钢筋采用无黏结处理方式可明显减少残余位移。建议预加轴压比保持在0.05～0.1，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%。

根据已有研究成果来看，混凝土桥墩中配置竖向预应力筋可有效提高桥墩屈服后刚度，减小混凝土开裂以及震后残余位移。由于预应力混凝土桥墩的耗能能力较弱，一般需在墩底处配置耗能钢筋，但耗能钢筋配置过多将增大残余位移。因此，合理平衡预应力筋和耗能钢筋配置面积，使桥墩拥有良好耗能能力同时避免过大的残余位移是预应力混凝土桥墩应考虑的重要问题。

1.2 理论研究

预应力筋PC桥墩抗弯、抗剪承载力计算与传统RC桥墩有较大差别。1980年Thompson等[25]开发了一种理想化模型以体现往复循环荷载作用下，PC构件的弯矩-曲率特性，该模型适用于PC构件和RC构件。但在较大位移情况下PC构件模型比实际模型表现出更明显的收缩滞后，而RC模型中也无法明确定义弯曲裂缝。另外，预应力筋配筋较少的截面在出现小位移幅值时，该模型的表现不如Takeda模型[26]。Nigel等[27]对Thompson模型[25]进行了改进，以克服在大变形收缩滞后的差异。Okamoto等[28]提出了一种适用于开裂后和屈服前阶段的预应力混凝土构件分析模型，该模型虽在残余位移预测方面存在局限，但在大位移幅值工况下可有

效估算累积吸收能量。Zatar等[29]所提出的恢复力模型充分考虑了预应力筋、普通钢筋的面积以及布置位置的影响，该模型在预测最大位移和滞回性能方面具有良好精度。现浇PC桥墩的抗震设计理论计算模型均以截面力矩平衡为核心，将预应力筋的初始张拉力及侧向加载后的应力增量纳入计算，通过弯矩-曲率关系推导水平力-位移响应。不同模型的差异主要体现在预应力筋应变计算精度、大变形下的本构模拟，以及是否考虑黏结滑移效应。总体而言，传统钢筋混凝土桥墩的计算分析模型对预应力混凝土桥墩难以直接适用，预应力混凝土桥墩应充分考虑预应力筋及其张拉力的影响，高强预应力筋和混凝土的黏结性能则是影响其抗侧承载力的重要因素。

1.3　国内外规范对比

中国规范[30-31]、美国规范[32]、欧洲规范[33]和日本规范[4]中关于预应力混凝土桥墩抗震设计的内容均基于各自地震环境、工程实践与技术理念形成差异化体系，但“避免强震倒塌、控制残余位移及提升震后修复效率”的核心目标一致。轴压比、残余位移等关键参数也高度相同，并且均采用性能化设计保证预应力系统与耗能体系的协同工作。中国规范按公路、城市等工程类型细分，并与6～9度抗震设防烈度衔接，以灌浆套筒[2]和金属波纹管连接[34]为核心，强调节段拼装施工精度与海洋环境防腐体系，突出关注速度脉冲效应；美国规范采用立即使用性能（Immediate Occupancy，IO）、生命安全性能（Life Safety，LS）和防止倒塌性能（Collapse Prevention，CP）的水准划分，整合超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete，UHPC）[35]、SMA[36-37]等新型材料与外置可更换耗能装置[38]，并加入地震全寿命损失评估以平衡安全与维护成本；欧洲规范强调损伤可控与全生命周期性能，推动标准化纤维混凝土、工程水泥基复合材料（Engineered Cementitious Composites，ECC）应用[39-41]，细化了黏结预应力筋连接与多节段接缝协同变形计算，通过性能系数折减弹性地震力，以适配多国地震动分区的差异；日本规范聚焦近断层地震应对，以残余位移1%墩高作为“修复-重建”经济分界点，围绕干接缝和剪力键设计，突出节段对位精度与预应力损失控制[3]。相关对比分析可为跨区域工程设计、不同规范补充新型结构体系，以及复杂场景应对等内容提供理论参考。

2　预应力连接预制拼装混凝土桥墩抗震性能

已有研究和工程实践表明，预应力连接技术可用于预制桥墩与盖梁、承台的连接，尤其对于多节段预制桥墩的连接具有显著优势[42-43]。美国新泽西胜利大桥、加拿大联邦大桥[44]、乔治凯蒂斯大桥以及我国的东海大桥、港珠澳大桥[30]（图5）都采用了预应力连接预制拼装桥墩。

在施工技术方面，新泽西胜利大桥采用高强度钢绞线作为预应力筋，通过精确计算确定预应力筋的数量、直径和布置方式，以确保桥墩在地震作用下的稳定性和自复位能力。用干接缝或湿接缝技术实现节段间的连接，是通过预应力筋的张拉和锚固形成整体结构。东海大桥和港珠澳大桥的桥墩都采用了大型节段预制技术，通过浮运和整体吊装方式进行安装，并针对海洋高腐蚀环境构建了全方位防腐体系。在所面临挑战方面，包括施工精度要求高，需确保预制节段制造与拼装的精确性；海洋环境下的腐蚀问题突出，需采取有效防腐措施；施



(a) 新泽西胜利大桥　(b) 东海大桥　(c) 港珠澳大桥

图5　预应力连接预制拼装桥墩典型工程

Fig. 5　Typical projects of precast assembled piers with prestressed connections

工安全风险大，高空和复杂海况下作业；同时，还需应对技术复杂度高、团队协调困难以及极端气候和地质条件带来的额外考验。

预应力混凝土桥墩在多节段预制高墩及强震区的抗震性能受到国内外关注[45-46]。施工的关键工艺包括预应力筋的张拉、锚固以及预制节段的拼装。施工控制关键点在于确保预应力筋的张拉力均匀分布，避免局部应力集中，同时保证预制节段的精确对位和连接质量。谭逸波等[43]聚焦于分节式预制墩身干接缝施工关键技术，为施工工艺和控制要点提供了重要参考。包龙生等[34,47]研究了预应力连接型装配式混凝土桥墩的受力性能及施工控制效果，但缺乏对不同荷载组合下预应力连接的长期性能衰减规律的研究，以及施工控制误差对桥墩最终受力状态的影响程度等方面的探讨。Tong等[48]指出有黏结预应力筋可改善预制节段式桥墩的抗震性能，但对于有黏结预应力筋在复杂地震动作用下的力学响应机制缺乏考虑。Cai等[49]提出混合配筋节段拼装的方法，通过在节段之间增加耗能钢筋和自复位筋连接，实现提升桥墩的抗震和自复位能力。该方法对于耗能钢筋和自复位筋的最佳配置比例和连接方式需进一步优化。Nikbakht等[50]借助试验及数值仿真手段，系统研究了损伤严重的预应力节段拼装桥墩滞回特性、耗能能力、变形能力等抗震性能，并在此基础上提出了位移延性与屈服位移的设计模型，但试验过程未考虑更广泛的工况及复杂边界条件。预应力连接预制拼装桥墩主要通过精轧螺纹钢筋或钢绞线连接承台与预制墩柱[51]（图6）。预应力连接预制拼装桥墩通过减弱墩底的竖向约束，使墩底接触界面在强震作用下可产生开口，接触截面的开、合可以起到减小刚度、增大自振周期并减少桥墩的塑性变形的作用，进而减小桥墩的损伤[52]。将精轧螺纹钢筋作为预应力筋的预制拼装桥墩，在拟静力试验中预应力损失严重，在钢筋屈服后桥墩加载刚度显著降低，而将钢绞线作为预应力筋的预制拼装桥墩，其预应力损失较小，具有良好复位能力[53]。可实现震后墩柱自复位效果的无黏结预应力钢绞线技术受到广泛关注[54]。Mander等[55]和Palermo等[56]开展了无黏结预应力连接预制拼装桥墩拟静力试验，研究表明该桥墩残余位移显著减小，具有优异的自复位能力。随着预应力数量和初始应力的增加，桥墩自复位能力会进一步增强，但其耗能能力远不如现浇桥墩且底部节段损伤严重，预应力筋连接预制桥墩的耗能能力还有待进一步提升。

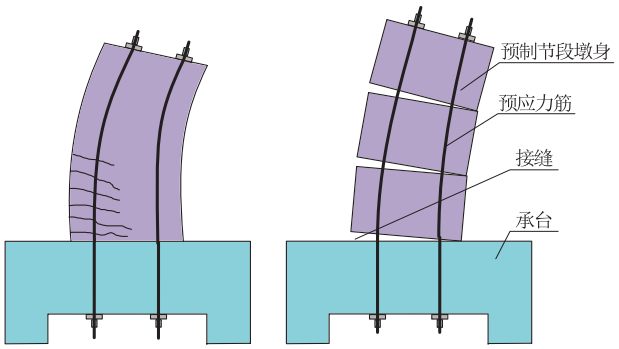


图6 预应力连接预制拼装桥墩示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a precast assembled pier with prestressed connections

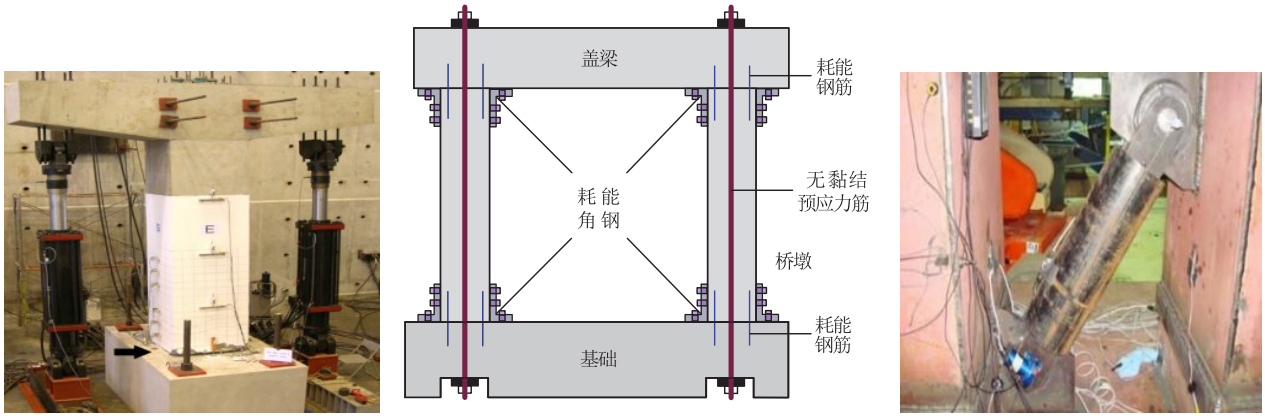
近断层区域地震动与远场地震有显著不同，主要体现在脉冲型速度峰值高、位移需求大、竖向地震动显著及方向性效应强四个方面[57]。Li等[58-59]将近场地震波划分为破裂前方、破裂及破裂后方区域，通过频谱分析表明破裂前方区域和破裂区域地震动低频成分显著，而破裂后方区域高频成分显著。同时提出了一种将高频背景记录与简单等效脉冲相结合的合成人工近断层脉冲型地震动新方法，为后续近断层地震作用下结构动力响应研究提供参考。近断层脉冲型地震动会使预应力混凝土桥墩的峰值位移大于远场地震动的，并且高能量输入对预制拼装节点的损伤风险较高。司炳君等[60]通过对比近断层地震动下摇摆-自复位桥墩和RC桥墩的地震响应，发现随着耗能钢筋配筋率增加，摇摆-自复位桥墩墩顶最大位移角和预应力筋最大应力均减小。预应力混凝土桥墩在近断层区域的应用在理论上可行，但面临巨大挑战，未来应对接缝形式改进、预制拼装技术及耗能装置升级等方面进行研究，以确保预应力桥墩在近断层区域的安全。

2.1 抗震能力提升技术研究

由于预应力连接预制桥墩在预制墩柱接缝处纵筋不连续，设计目标一般要求强震下预应力筋保持弹性。因此，地震作用下墩柱的耗能主要来源于接缝处局部混凝土损伤及破碎，所以墩柱耗能能力略有不足。早期研发的预应力连接预制拼装桥墩没有采用耗能增强措施，耗能能力方面与现浇桥墩差异显著，只能用于低烈度区。为提高预应力连接预制拼装桥墩耗能能力，促进其在高震地区应用，Palermo等[61]和Ou等[62-64]开展了设置耗能钢筋的干

接缝节段拼装桥墩拟静力试验研究，结果表明在接缝处增加耗能钢筋后，桥墩的耗能能力有显著提升，残余位移略有增加。Zou 等[38]提出了一种功能分离式减隔震装置，通过集成外部可更换耗能组件以提升预应力节段预制桥墩的抗震性能。Wang 等[65]研究纵筋配筋率、抗剪配筋率、预应力筋数量等参数与延性系数之间的关系，揭示了纤维增强聚合物（Fiber Reinforced Polymer，FRP）约束对预制装配式桥墩抗震性能的提升机制。此后，学者针对预应力筋初始张拉应力、配筋率、耗能钢筋配筋率及轴压比等主要参数对预制拼装桥墩抗震性能的影响进行了深入研究[66-69]。总体而言，桥墩的残余位移主要与预应力筋和耗能钢筋的配置有关。预应力筋初始张拉力增加、桥墩轴压比增大，造成桥墩侧向承载力略有提高，墩底混凝土破坏程度也随之增加。预应力筋面积增加，桥墩的初始刚度几乎不变，峰值承载力和屈服后刚度增加，残余位移和等效黏滞阻尼比减小。

为提高桥墩耗能能力并同时控制残余位移，需合理设置耗能钢筋和预应力筋。Palermo 等[61]和 Ou 等[63]分别定义了预应力混凝土桥墩的设计参数 λ 和耗能钢筋贡献率 λ_{ED}，并推荐 λ 值在 1.15～1.25 之间，λ_{ED} 不超过 35%。葛继平等[70]开展了现浇钢筋混凝土桥墩、无黏结预应力混凝土桥墩以及节段拼装桥墩拟静力试验和振动台试验，考虑了是否设置耗能钢筋和预应力筋有无黏结等因素影响，结果表明有黏结预应力在较大激励下容易发生屈服，墩柱侧向位移随之增大。Lin 等[71]开展的墩底节段现浇节段拼装桥墩拟静力试验研究表明，该桥墩耗能能力与现浇桥墩基本相同，并且由于在接缝处设置剪力键，墩身各节段之间滑移现象并不明显。由于内置耗能钢筋震后损伤难以更换，学者开始研究外置可更换式耗能装置。目前应用于预应力连接预制拼装桥墩的外置耗能装置主要有外置角钢[72-73]、剪切钢板[74]和外置防屈曲钢筋[75-76]等（图 7）。研究发现，外置消能装置的自复位桥墩与普通 RC 桥墩相比，其滞回曲线较饱满，耗能性能良好，而且地震作用下产生的墩柱残余位移显著降低，有利于墩柱的震后



(a) 桥墩拟静力试验[63]　(b) 外置角钢摇摆桥墩[72]　(c) 屈曲约束支撑[74]

图 7　预制拼装桥墩抗震能力提升研究

Fig. 7　Research on seismic capacity improvement of precast assembled piers

修复。

2.2　抗剪措施研究

节段拼装桥墩在各节段间仅有贯通的预应力筋穿过，无纵筋连接。该连接方式抗剪能力主要由预应力筋和摩擦力提供，在地震作用下易产生节段间相对滑移。为提高桥墩抗剪能力和耐久性，节段间接缝处常设置剪力键、后浇湿接缝或涂抹环氧树脂。单个剪力键干接缝应力高于多个剪力键干接缝，但单个剪力键干接缝的延性稍差[77-80]。胶接干接缝的抗剪性能受到环氧树脂厚度影响[81-82]，建议环氧树脂厚度在 2 mm 以内[79]。

2.3　墩底损伤控制措施研究

预应力连接预制拼装桥墩在遭受强震后，墩底区域混凝土损伤严重，传统减小墩底损伤的方式是在墩底处加密箍筋[55]。贾俊峰等[54,83-84]采用钢管混凝土预制节段桥墩，拟静力试验研究表明混凝土在钢管约束下几乎没有损伤，具有良好的自复位能力；之后针对预制钢筋混凝土桥墩采用 FRP 包裹约

束[85]也是基于类似目的。随着高性能材料的开发以及应用,在桥墩中逐渐探索采用工程水泥基复合材料ECC[39]、纤维混凝土[40-41]和UHPC[35]等高性能材料,产生了更高的承载力,延性增加而残余位移更小,墩柱局部损伤减小。

2.4 理论分析研究

除试验研究外,采用ABAQUS和OpenSees等软件建立有限元模型也是抗震性能研究的常用手段,并且此类方法可进行参数化分析,提高研究效率和经济性。SMA具有小应变下保持弹性,大应变下应变硬化的特点,将SMA作为预制桥墩耗能筋可提供高延性和稳定的能量耗散能力[36-37]。在数值模型中定义不同的接触类型可模拟预应力筋、耗能钢筋、SMA的黏结状态及节段间相互作用[86-87]。预应力连接预制桥墩常用的理论模型包括集中塑性铰模型[88](图8)、纤维模型[88-89](图9)和多弹簧模型[90-91]。集中塑性铰模型将桥墩的滞回特性用两个旋转弹簧代替,墩柱则用弹性梁柱单元。纤维模型需定义桥墩中各纤维的位置及约束关系;而多弹簧模型则是在墩底摇摆界面处建立多个零长度、仅受压弹簧以模拟摇摆界面的接触行为。

从大量的试验和有限元模拟中可以发现,预应力筋连接的预制拼装桥墩具有良好的抗震能力,但其力学分析模型仍不完善。Ou等[62]认为在消压阶段之后,由于节段间接缝张开导致曲率分析不符合平截面假定,因此提出了适用于接缝的曲率分析模型,该模型可反映接缝张开时耗能钢筋和钢铰线的应变。随后将节段拼装桥墩在推覆过程分为三个阶段,即墩底现浇段开裂、屈服以及达到极限状态[64],建立了每个阶段沿墩高方向的曲率分布,通过弯矩-曲率计算节段拼装桥墩Pushover曲线。Bu等[92]提出了简化的Pushover分析模型,可较好地模拟耗能钢筋的应变变化。随后布占宇等[93]在之前的研究基础上提出了节段拼装桥墩多节点转动Pushover分析模型,在考虑预应力筋产生P-Δ效应的同时,可计算任意接缝处的受力与转角。Chou等[94]建立了一种双塑性铰分析模型,以预测节段强度不相等的预制柱抗震性能。以上提出的分析模型可以准确地预测地震作用下预制柱的响应,但是,由于中性轴深度的不确定性,必须对模型进行迭代以满足截面受力平衡方程,从而导致计算复杂。

现有大部分PC桥墩的抗震设计理论分析模型都需要迭代计算,为避免迭代计算,Wang等[88]建立了无黏结后张预制节段拼装空心桥墩非迭代分析模型,该模型可同时考虑节点转动、弯曲变形和剪切变形的贡献,能快捷高效地预测桥墩Pushover行为;Wang等[89]还建立了一个不需要迭代的无黏结后张预应力筋的分析模型,并划分了三个阶段:消压阶段,耗能钢筋屈服阶段和大变形阶段。在消压阶段,可以将预制柱视为等效的现浇柱,其他两个阶段的中性轴高度可以通过受力平衡方程来计算。李宁等[95]基于桥墩的变形行为和非线性变形特征,考虑底部耗能钢筋和混凝土变形不协调引起的应变渗透效应,利用“图乘法”和“修正的等效悬臂梁理论”提出了一种不需要迭代的变形分析模型,并与循环往复加载试验、已有变形分型模型和OpenSees开发的纤维模型进行了对比,所提模型适用于中高烈度区自复位桥墩的抗震设计。虽然以上模

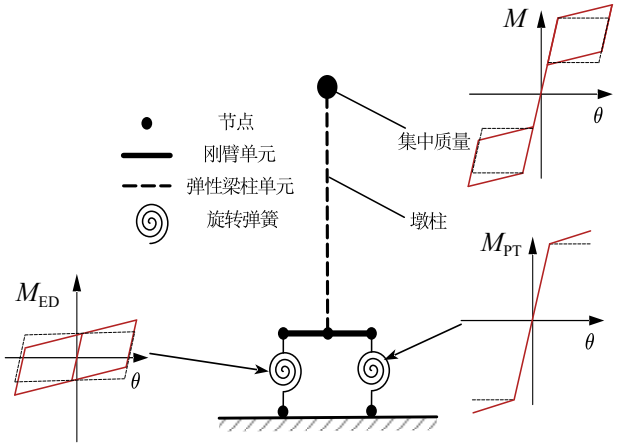


图8 预应力节段拼装桥墩集中塑性模型

Fig. 8 Lumped plasticity model of a prestressed segmentally assembled bridge pier

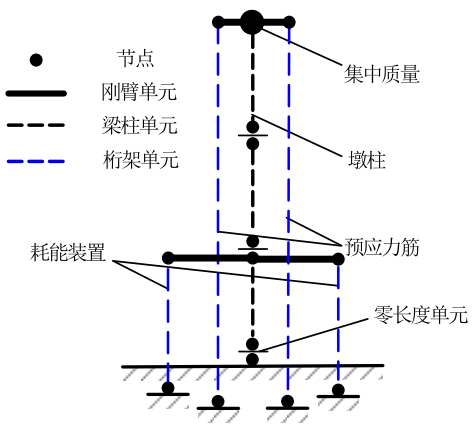


图9 预应力节段拼装桥墩纤维模型

Fig. 9 Fiber model of a prestressed segmentally assembled bridge pier

型避免了迭代计算，但 Wang 等[89]的分析模型只适用于矩形截面的预制拼装桥墩，而李宁等[95]的分析模型只适用于圆截面的预制钢管混凝土节段拼装桥墩。Zhang 等[96]提出了非迭代的计算模型，可用于计算预制节段拼装桥墩和钢管混凝土节段拼装桥墩的荷载-变形曲线，并提出了一种简化三段式模型计算圆钢管摇摆节段墩的骨架曲线。

3　采用预应力混凝土桥墩的桥梁体系抗震性能

预应力混凝土桥墩的抗震性能是桥梁抗震设计的重要基础。为全面评估桥梁整体性能，对其结构体系的抗震性能分析不可或缺，而目前针对采用预应力混凝土桥墩的桥梁体系抗震性能研究仍相对有限。在现有研究成果中，Li 等[97]对预制节段拼装 UHPC 柱支撑桥梁结构的地震易损性和地震全寿命损失进行了数值评估，与整体式 RC 桥梁相比，预制节段式 UHPC 桥梁具有相似的峰值加速度和更大的峰值位移；Sideris 等[98]对一种混合滑动-摇摆后张节段桥梁系统进行了一系列振动台试验，结果表明，滑动主导节点具有较高的耗能能力和适中的自复位能力，摇摆主导节点具有较高的自复位能力，但耗能能力较低。针对预制节段 RC 桥墩桥梁体系，Zhang 等[99]聚焦于两种盖梁-上部结构连接形式，对预制节段 RC 桥墩桥梁体系的抗震性能进行了试验研究，结果表明，与非抗震橡胶支座连接相比，固定连接可以在节段柱的第一个节点处产生更大的冲击力；Zhao 等[100]对预制节段桥梁的地震响应进行了数值研究；Lee 等[101]分析了 PBEE 框架中自复位后张预应力 RC 柱支撑的桥梁系统的地震易损性并评估了经济损失。此外，钟学琦等[102]提出了一种新型摇摆机械铰以减少由于自复位桥墩的摇摆界面压力所造成的混凝土压碎和预应力损失，并基于非线性时程分析方法对比采用了摇摆铰和球形铰桥梁的地震响应；赵建锋等[103]在近断层地震下对预制拼装桥墩桥梁进行非线性动力时程分析，以探究碰撞效应对桥梁地震响应的影响以及节段数目、节段长度、初始预应力、接缝刚度等参数对桥梁碰撞效应的影响，为近断层区域预制拼装桥墩桥梁的抗震设计与参数优化提供了重要参考。

4　预应力混凝土桥墩发展趋势与展望

预应力混凝土桥墩因优异的自复位能力、震后残余位移控制效果及损伤可控性，成为强震区桥梁建设的关键构件，近年来取得了一系列的研究成果。然而仍需从以下 4 个方面展开深入研究：

（1）现有集中塑性铰模型、纤维模型对预应力筋-混凝土界面黏结滑移特性、多节段接缝协同变形及复杂地震动下的非线性行为等刻画不足。承插连接钢管混凝土桥墩模型能够考虑插入承台部分钢管与周围混凝土的黏结滑移、钢管局部屈曲以及屈曲后撕裂等过程，而混合连接钢管混凝土桥墩模型能够再现出接缝的摇摆行为[104-105]。未来应推动数值建模方法的标准化，统一建模流程和参数选取标准。

（2）自复位桥墩作为一种新型抗震结构体系，其性能化抗震设计方法尚不成熟。近年来试验研究为设计优化提供了关键支撑，新型预应力混凝土摇摆自复位桥墩通过优化塑性铰区截面设计和预应力筋布置，使桥墩侧向承载力提升 80% 以上，残余位移偏移比控制在 1% 以内[106]。未来应进一步探索自复位桥墩在近断层脉冲型地震等复杂工况下的响应规律，明确不同性能等级对应的设计参数阈值。

（3）预应力体系与新型材料、新型耗能装置的融合发展，可以提升桥墩抗震韧性及自复位能力。Dong 等[107]研究开发了两种具有完全复位能力和部分复位能力的自复位耗能支撑，并基于 Bouc-Wen 模型构建数学恢复力模型来捕捉自复位结构的旗形滞回行为。未来将进一步优化 SMA、ECC 等新型材料[108]与预应力筋的界面黏结性能，明确耗能钢筋与自复位筋的最佳配置比例，开发可更换的外置耗能装置。

（4）预应力混凝土桥墩在长期运营、地震作用后的损伤规律及维修加固技术仍缺乏系统研究[101]。使用超高性能纤维增强混凝土加固节段拼装摇摆混凝土桥墩，有效改善了界面处混凝土的局部损伤[109]。未来需建立预应力桥墩性能演化模型，制定震后快速修复指南，明确不同损伤等级对应的修复方案。

5　结论

预应力混凝土桥墩已在中国、美国等国家的桥梁建设中得到示范性应用，尤其在预制节段桥墩方面表现出良好的发展潜力。我国预应力混凝土桥墩也正处于研究和示范应用阶段，在港珠澳大桥、

成都羊犀立交和若铁路等公路、铁路桥梁建设中成功应用,对推动预应力混凝土桥墩技术发展和工程实践起到积极作用。本文归纳总结了预应力混凝土桥墩及其抗震性能研究方面的最新进展,从关键技术、分析模型等方面进行了总结,得到主要结论如下:

(1) 预应力混凝土桥墩在强震区的适用性及抗震设计方法仍不完善,缺乏相关的技术标准和设计规范。当前规范仅初步涉及预应力混凝土桥墩的预制拼装桥墩方面的连接技术,对抗震分析模型、细节构造、抗震设计方法等缺乏具体的规定,仍需开展预应力混凝土桥墩抗震研究,从而形成相关技术标准规范,为工程设计提供依据。

(2) 当前预应力混凝土桥墩大都采用后张有黏结预应力施工方式,可能存在灌浆不密实、耐久性差、有安全隐患、施工工序增加等问题,发展有黏结先张预应力混凝土桥墩具有一定的潜在应用前景。积极探索先张预应力混凝土桥墩施工技术,揭示其抗震机理并发展相应的抗震设计方法,是未来值得关注的方向。

(3) 结合当前工程韧性抗震国际前沿,充分发挥高强预应力材料特征,发展基于无黏结预应力的自复位桥墩及桥梁结构新体系,完善结构消能、自复位及震后修复关键技术,建立相关的计算分析模型,是未来桥梁韧性抗震的重要发展方向和途径。

(4) 预应力混凝土桥墩正在逐步推广应用于桥梁工程建设,但其全生命周期内的耐久性能及地震后潜在的维修加固需求值得关注。结合其工程特征,发展高耐久型预应力混凝土桥墩合理结构和构造,探讨强震损伤后结构的维修加固技术及其可行性、有效性,是推动其在强震区应用的前瞻性方向。

参考文献(References)

[1] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 1-23.
Wang Jingquan, Wang Zhen, Gao Yufeng, et al. Review on aseismic behavior of precast piers: new material, new concept, and new application[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(3): 1-23.

[2] 葛继平, 夏樟华, 江恒. 灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 221-230, 266.
Ge Jiping, Xia Zhanghua, Jiang Heng. Biaxial quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 221-230, 266.

[3] Editorial Committee for the Report on the Hanshin-Awaji Earthquake Disaster. Report on the Hanshin-Awaji earthquake disaster. Building Series 4 [R]. Kyoto : Earthquake Disaster Institute of Japan, , 1998.

[4] 平成24-611 道路橋示方書·同解説—V 耐震設計編[S].

[5] Iemura H, Takahashi Y, Sogabe N. Development of unbonded bar reinforced concrete structure[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada: WCEE, 2004: 1537.

[6] Zatar W. Dynamic response behavior of prestressed concrete piers under severe earthquake[J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 1998, 20(3): 1003-1008.

[7] Zatar W, Mustuyoshi H. Residual displacements of concrete bridge piers subjected to near field earthquakes[J]. Structural Journal, 2002, 99(6): 740-749.

[8] Mahin S, Sakai J, Jeong H. Use of partially prestressed reinforced concrete columns to reduce post-earthquake residual displacements of bridges[C]//Proceedings of 5th National Seismic Conference on Bridges and Highways. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006: B25.

[9] Liu X X, Li J Z, Tsang H H, et al. Experimental evaluation of seismic performance of unbonded prestressed reinforced concrete column[J]. Engineering Structures, 2020, 208: 109913.

[10] 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.
Zhang Rong, Su Xiaozu. Experimental study on aseismic behavior of R.C. columns with vertical prestressing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(12): 1578-1582.

[11] 陈彦江, 丁梦佳, 许维炳, 等. 预制拼装桥墩体系及其抗震性能研究进展[J]. 中国公路学报, 2022, 35(12): 56-76.
Chen Yanjiang, Ding Mengjia, Xu Weibing, et al. Research process for seismic performance of the prefabricated concrete pier system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(12): 56-76.

[12] Wang H L, Wang H, Qin S F, et al. Seismic analysis of prestressed bridge pier based on fiber section[J]. Procedia Engineering, 2011, 21: 354-362.

[13] Larkin A S, Sanders D H, Saiidi M S. Unbonded prestressed columns for earthquake resistance [C]//Proceedings of the Structures Congress 2012. Chicago, Illinois, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 539-548.

[14] Lee W, Jeong H, Billington S, et al. Post-tensioned structural concrete bridge piers with self-centering characteristics [J]. Structural Engineering Research Frontiers, 2007: 1-15.

[15] Mutsuyoshi H, Maki T, Zatar W A. Seismic behavior of partially prestressed concrete piers[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2001, 2001(669): 27-38.

[16] Sakai J, Mahin S A. Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada:WCEE, 2004: 1622.

[17] 黄云青, 赵建锋. 不同连接方式对预制拼装桥墩抗震性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(6): 38-43.
Huang Yunqing, Zhao Jianfeng. Influence of different connection modes on seismic performance of precast segmental assembly bridge pier[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2019, 40(6): 38-43.

[18] 葛继平, 王志强, 李建中, 等. 装配式预应力混凝土双柱桥墩抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(3): 192-198.
Ge Jiping, Wang Zhiqiang, Li Jianzhong, et al. Recent development in seismic performance of prestressed concrete precast segmental double-column piers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 192-198.

[19] Salkhordeh M, Govahi E, Mirtaheri M. Seismic fragility evaluation of various mitigation strategies proposed for bridge piers[J]. Structures, 2021, 33: 1892-1905.

[20] Nie L X, Jiang L Z, Zhou W B, Et Al. Evaluation of rocking seismic isolation performance of railway tall piers with different energy dissipation devices[J]. Structures, 2023, 56: 104923.

[21] Shrestha B, Li C, Hao H, et al. Performance-based seismic assessment of superelastic shape memory alloy-reinforced bridge piers considering residual deformations[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(7): 1050-1069.

[22] 贾俊峰, 魏博, 欧进萍, 等. 外置可更换耗能器的预制拼装自复位桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 154-162.
Jia Junfeng, Wei Bo, Ou Jinping, et al. Tests for seismic performance of prefabricated self-centering bridge piers with external replaceable energy dissipator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 154-162.

[23] 孙治国, 王东升, 司炳君, 等. 采用预应力筋进行RC桥墩地震损伤控制的试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 107-116.
Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Si Bingjun, et al. Experimental research on the seismic damage control techniques for RC bridge piers by using prestressing tendons[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 107-116.

[24] 王军文, 张伟光, 艾庆华. PC与RC空心墩抗震性能试验对比[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 76-85.
Wang Junwen, Zhang Weiguang, Ai Qinghua. Comparative experiment on seismic performance of PC and RC hollow piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 76-85.

[25] Thompson K J, Park R. Seismic response of partially prestressed concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(8): 1755-1775.

[26] Takeda T, Sozen M A, Nielsen N N. Reinforced concrete response to simulated earthquakes[J]. Journal of the Structural Division, 1970, 96(12): 2557-2573.

[27] Nigel P M J, Jian R T. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons[J]. PCI Journal, 1993, 1: 58-69.

[28] Okamoto S. Nonlinear analytical study on precast prestressed concrete frame building[J]. Symposium of Modern Prestressing Techniques, 1993, 1: 49-56.

[29] Zatar W, Mutsuyoshi H. Reduced residual displacements of partially prestressed concrete bridge piers[C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: WCEE, 2000: 1111.

[30] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].
JTG/T 2231-01—2020 Specifications for seismic design of highway bridges[S].

[31] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
JTG 3362—2018 Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S].

[32] LRFDBDS-10-2024 AASHTO LRFD bridge design specifications[S].

[33] BS EN 1998-2 2025 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—part 2: bridges[S].

[34] 包龙生, 张远宝, 桑中伟, 等. 波纹管连接装配式桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 242-249.
Bao Longsheng, Zhang Yuanbao, Sang Zhongwei, et al. Quasi-static test and numerical simulation analysis for seismic performance of fabricated assemble bridge piers base on bellows connection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12): 242-249.

[35] Wang Z, Wang J Q, Tang Y C, et al. Seismic behavior of precast segmental UHPC bridge columns with replaceable external cover plates and internal dissipaters[J]. Engineering Structures, 2018, 177: 540-555.

[36] Roh H, Reinhorn A M. Hysteretic behavior of precast segmental bridge piers with superelastic shape memory alloy bars[J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3394-3403.

[37] Moon D Y, Roh H, Cimellaro G P. Seismic performance of segmental rocking columns connected with NiTi martensitic SMA bars[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(4): 571-584.

[38] Zou S, Wenliuhan H, Liu Y H, et al. Seismic isolation technology for prestressed segmental precast piers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107362.

[39] Varela S, Saiidi M. A bridge column with superelastic NiTi SMA and replaceable rubber hinge for earthquake damage mitigation[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 075012.

[40] Billington S L, Breen J E. Improving standard bridges with attention to cast-in-place substructure[J]. Journal of Bridge

Engineering, 2000, 5(4): 344-351.

[41] Billington S L, Yoon J K. Cyclic response of unbonded post-tensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9 (4): 353-363.

[42] 陈韶章, 苏宗贤, 陈越. 港珠澳大桥沉管隧道新技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 396-403.
Chen Shaozhang, Su Zongxian, Chen Yue. New technologies used for immersed tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge project[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5): 396-403.

[43] 谭逸波, 谭昱, 陈儒发, 等. 分节式预制墩身干接缝施工关键技术应用研究[J]. 公路, 2015, 60(11): 83-86.
Tan Yibo, Tan Yu, Chen Rufa, et al. Study on application of key technology in dry joint construction of segmental precast pier shaft[J]. Highway, 2015, 60(11): 83-86.

[44] Gettu R, Mobasher B, Carmona S, et al. Testing of concrete under closed-loop control[J]. Advanced Cement Based Materials, 1996, 3(2): 54-71.

[45] 司炳君, 张明生, 孙治国, 等. 竖向配预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能研究综述[J]. 世界地震工程, 2012, 28(3): 120-125.
Si Bingjun, Zhang Mingsheng, Sun Zhiguo, et al. Review of studies on seismic behavior of prestressed reinforced concrete bridge piers [J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28 (3): 120-125.

[46] 王震, 王景全. 预应力节段预制拼装桥墩抗震性能研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(6): 88-97.
Wang Zhen, Wang Jingquan. Review of seismic performance of prestressed segmental precast and assembled piers[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33 (6): 88-97.

[47] 包龙生, 赵春艳, 张远宝, 等. 预应力连接型装配式混凝土桥墩受力性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(1): 29-41.
Bao Longsheng, Zhao Chunyan, Zhang Yuanbao, et al. Study on mechanical properties of prestressed concrete bridge piers[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(1): 29-41.

[48] Tong T, Zhuo S Y, Liu Z, et al. Improving seismic behaviors of precast segmental piers with bonded prestressed tendons [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(2): 179-198.

[49] Cai Z K, Wang Z Y, Yang T Y. Experimental testing and modeling of precast segmental bridge columns with hybrid normal- and high-strength steel rebars[J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 945-955.

[50] Nikbakht E, Rashid K. Investigation on seismic performance and functionality of self-centring post-tensioned segmental columns[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14(6): 730-742.

[51] Wang J Q, Wang Z, Tang Y C, et al. Cyclic loading test of self-centering precast segmental unbonded posttensioned UHPFRC bridge columns[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(11): 5227-5255.

[52] 杜修力, 周雨龙, 韩强, 等. 摇摆桥墩的研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(5): 1-11.
Du Xiuli, Zhou Yulong, Han Qiang, et al. State of the art on rocking piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(5): 1-11.

[53] Bu Z Y, Ou Y C, Song J W, et al. Cyclic loading test of unbonded and bonded posttensioned precast segmental bridge columns with circular section[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(2): 04015043.

[54] Jia J F, Zhang K D, Wu S W, et al. Seismic performance of self-centering precast segmental bridge columns under different lateral loading directions [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111037.

[55] Mander J B, Cheng C T. Seismic resistance of bridge piers based on damage avoidance design[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1997.

[56] Palermo A, Pampanin S, Calvi G M. Concept and development of hybrid solutions for seismic resistant bridge systems [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9 (6): 899-921.

[57] 李帅, 王景全, 颜晓伟, 等. 近断层地震动空间分布特征对斜拉桥地震响应影响[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 94-104.
Li Shuai, Wang Jingquan, Yan Xiaowei, et al. Influence of spatial distribution characteristics of near-fault ground motions on seismic responses of cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 94-104.

[58] Li S, Wang W Z, Wang M D, et al. Multi-fault rupture focal mechanism simulation using spectral element method and its application to seismic analysis of a multi-span continuous highway bridge[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2025, 54(12): 3130-3150.

[59] Li S, Zhang F, Wang J Q, et al. Effects of near-fault motions and artificial pulse-type ground motions on super-span cable-stayed bridge systems [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3): 04016128.

[60] 司炳君, 谷明洋, 孙治国, 等. 近断层地震动下摇摆-自复位桥墩地震反应分析[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 87-97.
Si Bingjun, Gu Mingyang, Sun Zhiguo, et al. Seismic response analysis of the rocking self-centering bridge piers under the near-fault ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 87-97.

[61] Palermo A, Pampanin S, Marriott D. Design, modeling, and experimental response of seismic resistant bridge piers with posttensioned dissipating connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1648-1661.

[62] 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, 2007, 133(11): 1636-1647.

[63] 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, 2010, 136(3): 255-264.

[64] Ou Y C, Oktavianus Y, Tsai M S. An emulative precast segmental concrete bridge column for seismic regions[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(4): 1441-1457.

[65] Wang H, Zhang Y, Qin S. A study on ductility of prestressed concrete pier based on response surface methodology[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2016, 6(6): 1253-1257.

[66] 朱钊, 李源, 贺拴海, 等. 无黏结预应力组合耗能钢筋装配式桥墩抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(6): 58-65.
Zhu Zhao, Li Yuan, He Shuanhai, et al. Research on seismic performance of prefabricated segmental piers with unbonded tendons and energy-dissipating rebar connections[J]. Bridge Construction, 2022, 52(6): 58-65.

[67] 布占宇, 唐光武. 无黏结预应力带耗能钢筋预制节段拼装桥墩抗震性能研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 33-40.
Bu Zhanyu, Tang Guangwu. Seismic performance investigation of unbonded prestressing precast segmental bridge piers with energy dissipation bars[J]. China Railway Science, 2011, 32(3): 33-40.

[68] Zhou Y L, Han Q, Du X L, et al. Shaking table tests of post-tensioned rocking bridge with double-column bents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 04019080.

[69] 张凯迪, 贾俊峰, 郭彤, 等. 预应力连接预制节段桥墩抗震性能数值仿真分析[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(6): 176-184.
Zhang Kaidi, Jia Junfeng, Guo Tong, et al. Numerical analyses on seismic performance of precast segmental prestressed bridge columns[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(6): 176-184.

[70] 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.
Ge Jiping, Wang Zhiqiang. Shake table tests of segmental bridge columns with match-cast dry joints[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 122-128.

[71] Lin J C. The shear transfer behavior of precast prestressed hollow rectangular bridge columns[D]. Tainan: National Cheng Kung University, 2000: 23-49.

[72] 孙治国, 谷明洋, 司炳君, 等. 外置角钢摇摆-自复位双柱墩抗震性能分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 40-49.
Sun Zhiguo, Gu Mingyang, Si Bingjun, et al. Seismic behavior analyses of rocking self-centering double column bridge bents using external angles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 40-49.

[73] Elgawady M A, Sha' Lan A. Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(3): 328-339.

[74] El-Bahey S, Bruneau M. Bridge piers with structural fuses and bi-steel columns. I: experimental testing[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(1): 25-35.

[75] El-Bahey S, Bruneau M. Bridge piers with structural fuses and bi-steel columns. II: analytical investigation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(1): 36-46.

[76] 郭佳. 基于性能的新型自复位桥墩抗震理论与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2012: 50-52.
Guo Jia. Performance based research on the seismic theory and test of new self-centering pier[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 50-52.

[77] Jiang H B, Wei R B, John M Z, et al. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete dry joints in precast segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 04016085.

[78] Liu T X, Wang Z, Guo J, et al. Shear strength of dry joints in precast UHPC segmental bridges: experimental and theoretical research[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24: 04018100.

[79] Zhou X M, Mickleborough N, Li Z. Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1): 3-11.

[80] Bu Z Y, Zhang X, Ye H H, et al. Interface shear transfer of precast concrete dry joints in segmental columns[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 257-272.

[81] Buyukozturk O, Bakhoum M M, Beattie S M. Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(12): 3380-3401.

[82] Shamass R, Zhou X M, Wu Z Y. Numerical analysis of shear-off failure of keyed epoxied joints in precast concrete segmental bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22: 04016108.

[83] Jia J F, Zhang K D, Wu S W, et al. Vertical cracking at girder ends during post-tensioning of prefabricated prestress concrete bridge T-girders[J]. Structural Concrete, 2021, 22(5): 3094-3108.

[84] 贾俊峰, 刘洋, 邱灿星, 等. 往复荷载下自复位CFST桥墩预应力工作及损失机理试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 176-187.
Jia Junfeng, Liu Yang, Qiu Canxing, et al. Experimental study on prestressed working and loss mechanism of self-centering CFST bridge columns under cyclic load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(4): 176-187.

[85] Guo T, Cao Z L, Xu Z K, et al. Cyclic load tests on self-centering concrete pier with external dissipators and enhanced durability[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142: 04015088.

[86] 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 & Structural Dynamics, 2008, 37(12): 1449-1465.

[87] Li C, Hao H, Bi K M. Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2017, 148: 373-386.

[88] Wang Z, Wang J Q, Zhu J Z, et al. Energy dissipation and

self-centering capacities of posttensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns[J]. Structural Concrete, 2020, 21(2): 517-532.

[89] Wang Z, Wang J Q, Liu T X, et al. An explicit analytical model for seismic performance of an unbonded post-tensioned precast segmental rocking hollow pier[J]. Engineering Structures, 2018, 161: 176-191.

[90] Marriott D, Pampanin S, Palermo A. Quasi-static and pseudo-dynamic testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replaceable dissipaters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2009, 38(3): 331-354.

[91] Marriott D, Pampanin S, Palermo A. Biaxial testing of unbonded post-tensioned rocking bridge piers with external replacable dissipaters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(15): 1723-1741.

[92] Bu Z Y, Ou Y C. Simplified analytical pushover method for precast segmental concrete bridge columns[J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(5): 805-822.

[93] 布占宇, 张旭, 叶晗晖, 等. 预制节段拼装桥墩多节点转动推覆分析方法及试验验证[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 258-267.
Bu Zhanyu, Zhang Xu, Ye Hanhui, et al. Multi-joint rotation analytical pushover method for precast segmental bridge columns and experimental validation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 258-267.

[94] Chou C C, Chen Y C. Cyclic tests of post-tensioned precast CFT segmental bridge columns with unbonded strands[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(2): 159-175.

[95] 李宁, 张双城, 李忠献, 等. 预制拼装钢管混凝土自复位桥墩变形分析模型及验证[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 135-143.
Li Ning, Zhang Shuangcheng, Li Zhongxian, et al. Deformation analysis model and validation for precast segmental concrete filed steel tube self-centering bridge column[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 135-143.

[96] Zhang K D, Jia J F, Li N, et al. Analytical model for evaluating lateral force capacity of precast concrete-filled steel tube column[J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115106.

[97] Li S, Zhao T Y, Alam M S, et al. Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of a seismic resistance bridge system with post-tensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns[J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111321.

[98] Sideris P, Aref A J, Filiatrault A. Large-scale seismic testing of a hybrid sliding-rocking posttensioned segmental bridge system[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(6): 04014025.

[99] Zhang N. Dynamic properties and application of steel fiber reinforced self consolidating concrete to segmental bridge columns in moderate-to-high seismic regions[M].New York: State University of New York at Buffalo, 2014.

[100] Zhao L F, Bi K M, Hao H, et al. Numerical studies on the seismic responses of bridge structures with precast segmental columns[J]. Engineering Structures, 2017, 151: 568-583.

[101] Lee W K, Billington S L. Performance-based earthquake engineering assessment of a self-centering, post-tensioned concrete bridge system[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(8): 887-902.

[102] 钟学琦, 李建中, 高浩原, 等. 基于摇摆机械铰连接的自复位桥墩抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 52-59.
Zhong Xueqi, Li Jianzhong, Gao Haoyuan, et al. Research on seismic performance of self-centering bridge pier based on rocking mechanical hinge connection[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 52-59.

[103] 赵建锋, 孟庆一, 刘雪飞. 近断层地震动下预制拼装桥墩桥梁结构碰撞响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 69-80.
Zhao Jianfeng, Meng Qingyi, Liu Xuefei. Pounding response of bridge with precast segmental bridge piers under near-fault ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 69-80.

[104] 陈挺地, 王胜斌, 冯克岩, 等. 不同连接构造的预制拼装钢管混凝土桥墩数值模拟与地震响应特点[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7): 134-143.
Chen Tingdi, Wang Shengbin, Feng Keyan, et al. Numerical simulation and seismic response characteristics of prefabricated assembled concrete filled steel tube columns with different connection constructions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(7): 134-143.

[105] Moshiri N, Martinelli E, Czaderski C, et al. Bond behavior of prestressed CFRP strips-to-concrete joints using the EBROG method: experimental and analytical evaluation[J]. Journal of Composites for Construction, 2023, 27: 04022104.

[106] 彭涛, 王军文, 郝玉军, 等. 新型预应力混凝土摇摆自复位桥墩抗震性能研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(6): 93-103.
Peng Tao, Wang Junwen, Hao Yujun, et al. Seismic performance of the new rocking self-centering prestressed concrete bridge piers[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(6): 93-103.

[107] Dong H H, Wang C, Han Q, et al. Re-centering capability of partially self-centering structures with flag-shaped hysteretic behavior subjected to near-fault pulsed ground motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 186: 108892.

[108] Qian H, Ye Y X, Yan C B, et al. Experimental study on the seismic performance of self-centering bridge piers incorporating ECC and superelastic SMA bars in the plastic hinge regions[J]. Structures, 2022, 46: 1955-1967.

[109] Gholipour G, Muntasir Billah A H M. Numerical investigation on the dynamic behavior of UHPFRC strengthened rocking concrete bridge piers subjected to vehicle collision[J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116241.

(本文编辑:贾源源)