

预制拼装桥墩抗震技术发展及展望

陈宏¹, 李静², 张菊辉², 管仲国³

(1. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330038; 2. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海市 200093;

3. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海市 200092)

摘要: 预制拼装桥墩符合可持续发展要求, 具有施工高效、构件质量高等优点。为促进预制拼装桥墩的技术进步和实际工程应用, 从连接构造及其抗震性能、高性能材料的应用等方面, 总结了相关技术的发展。结果表明: 预制拼装桥墩在抗震性能方面具有潜力, 并展现出一定优势; 然而, 预制拼装桥墩与现浇桥墩在裂缝分布、钢筋应变和接头变形等方面存在差异, 需进一步探索提高位移延性和耗能能力的方法; 后张预应力预制拼装桥墩有自复位能力, 但墩底混凝土的损伤修复困难, 可通过混合式连接方法改善。高新材料如UHPC、CFRP和SMA的应用, 有助于提高其抗震性能, 未来可聚焦于损伤修复技术、耐久性改进和多项劣化耦合作用的影响, 以进一步提升预制拼装桥墩的性能。

关键词: 预制拼装桥墩; 连接形式; 抗震性能; 桥梁工程

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0070-06

Development and Prospect of Seismic Technology of Prefabricated Bridge Piers

CHEN Hong¹, LI Jing², ZHANG Juhui², GUAN Zhongguo³

(1. Nanchang Urban Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 2. College of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. State Key Laboratory of Civil

Engineering Disaster Prevention, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Prefabricated bridge piers meet the requirements of sustainable development and have the advantages of high construction efficiency and high component quality. In order to promote the technological progress and practical engineering application of prefabricated bridge piers, the technological development is summarized from the connection structure and its seismic performance, the application of high-performance materials and other aspects. The results show that prefabricated bridge piers have potential in seismic performance and show certain advantages. However, there are differences between the prefabricated bridge piers and cast-in-place piers in terms of crack distribution, reinforcement strain and joint deformation, and it is necessary to further explore the method to improve the displacement ductility and energy-consuming capacity. The post-tensioned prestressed prefabricated bridge piers have self-resetting ability, but the concrete damage at the bottom of the pier is difficult to repair, which can be improved by hybrid connection methods. The application of high-tech materials such as UHPC, CFRP and SMA can help to improve the seismic performance. In the future, the focus can be on the damage repair techniques, durability improvement, and the effects of coupled effects of multiple deteriorations to further enhance the performance of prefabricated bridge piers.

Keywords: prefabricated bridge piers; connection forms; seismic performance; bridge engineering

0 引言

预制拼装桥墩以其高效的施工、精准的质量控制及对交通的最小干扰, 成为桥梁建设的重要创新

技术。通过在工厂预制构件, 减少现场施工时间和对交通的影响, 提高了工程进度和质量, 在环保和可持续性方面具有潜在优势^[1]。故研究预制拼装桥墩有助于桥梁建设的效率和可持续性, 还为应对不同设计要求提供了灵活的解决方案^[2-3]。

随着预制拼装桥墩技术的不断发展, 已有多座在低烈度区的桥梁工程案例使用该类型桥墩。在预制拼装桥墩的设计、制造和施工过程中, 应特别注意连接处的加固措施和质量控制, 以确保桥墩在地震

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408359; 52278527)

作者简介: 陈宏(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事桥梁设计方向工作。

通信作者: 张菊辉(1981—), 女, 工学博士, 副教授, 从事桥梁抗震、混凝土结构耐久性的研究工作。电子信箱: zhjhui@usst.edu.cn

等极端情况下能够保持良好的性能和稳定性。

本文根据不同的连接方式综述了预制拼装桥墩节点连接构造的不同及其抗震性能,梳理了高性能新材料在预制拼装桥墩上的应用。最后,分析了预制拼装桥墩的发展态势,以期技术的进步与实践提供参考。

1 预制拼装桥墩体系节点连接构造及其抗震性能

1.1 灌浆套筒或波纹管连接

灌浆套筒连接桥墩是指在预制墩身节段之间、墩身节段与承台以及盖梁之间,通过在桥梁预制构件中预留孔洞,并在其中安装连接件,再利用高强度混凝土灌浆材料将孔洞填充,形成牢固的连接^[4]。灌浆波纹管与灌浆套筒类似,只是在节段对应位置处预埋的是波纹管,详如图 1 所示。王志强等^[5]研究了采用灌浆套筒和灌浆金属波纹管两种形式预制拼装混凝土柱的抗震性能,其各项性能指标与现浇试件相比并无明显的不足。

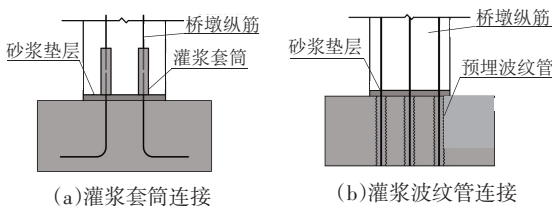


图 1 灌浆套筒及波纹管连接示意图^[2]

魏红一等^[6]的研究表明,灌浆套筒连接的预制试件在拟静力试验下损伤较小,初期裂缝出现于墩身,后期裂缝集中于接缝处。接缝处的纵筋屈曲、断裂破坏,而箍筋与核心混凝土基本完整。套筒预埋于承台,其塑性铰行为与现浇试件相似;套筒预埋于墩柱的试件,在套筒部位刚度大,套筒高度范围内裂缝很少,裂缝集中于接缝和套筒顶部,在套筒的上部也可能形成塑性铰。而从 Yan 等^[7]的试验结果来看,预制拼装桥墩的抗震性能与现浇连接相似,但裂缝的分布、钢筋的应变和接头的变形是不同的,预制试件的屈服和极限位移高于传统现浇试件。此外,预制试件的裂缝分布更加稀疏,且很少出现在灌浆套筒区域。Pang 等^[8]提出了一种新型灌浆波纹管连接方式,相对于传统的灌浆波纹管连接方式,采用了较大直径的钢筋以及波纹管;拟静力试验结果表明,预制构件弯曲变形大约 90% 都集中在梁柱界面处,而在现浇连接中,变形分布得更加均匀。

1.2 现浇湿接缝连接

在现浇湿接缝连接中,混凝土构件的两个相邻部分在施工过程中分开浇筑,并在接缝处形成湿接缝面,也就是未完全凝固的混凝土表面。在接缝形成后,通常会在接缝内加入钢筋以增强其连接强度,使桥墩形成一个整体^[9],以确保两个混凝土部分之间的连续性和稳定性,如图 2 所示。在我国早期的东海大桥、杭州湾跨海大桥^[10]中,部分桥墩采用了现浇湿接缝的连接方式,且技术上运用了整体吊装方式,而随后在港珠澳大桥^[11]等桥梁工程中,部分桥墩也采用了现浇湿接缝连接方式。

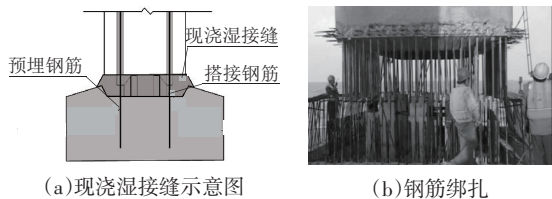


图 2 现浇湿接缝连接^[12]

湿接缝连接使得混凝土结构的构件在接缝处具有较高的连续性,有利于提高整体结构承载能力。通过在湿接缝中加入钢筋,可以增强连接的强度,使得接缝处能够承受较大的荷载和应力,从而提高了结构的抗震性能和耐久性^[12];但现浇湿接缝需要在混凝土未完全凝固之前进行施工,对施工质量要求较高,且受天气等因素影响较大。若湿接缝处的质量不佳或钢筋锈蚀,可能会导致接缝处的裂缝或损坏,维修和加固难度较大。Kim 等^[13]对墩柱节段之间用湿接缝连接的试件进行了拟静力试验,获得的延性比为 4.67,横向强度约为总施加竖向荷载的 26%。这种良好的延性和较高的耗能能力,表明此类预制桥墩可以在中高地震区使用,但主要的屈服和破坏仍发生在现浇区域,且现浇湿接缝连接方式较其他连接技术施工难度较高,对后续工程养护影响较大,目前已较少采用^[14]。

1.3 承插式连接

承插式连接在连接桥墩与承台方面运用广泛,预制桥墩与承台之间不需要提前预埋钢筋连接,而是直接将预制桥墩插入到承台预留的孔洞中,并用混凝土材料将承台与桥墩之间的空隙黏结,使之形成一个整体^[15-16],如图 3 所示。

查阅文献^[18-20]可知,桥墩的最小承插深度大多在 1.0D~1.5D(D 为墩身直径)之间。而徐艳等^[21]的研究表明不同承插深度试件的抗震性能与现浇试件

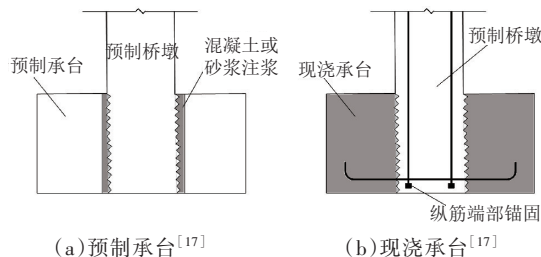
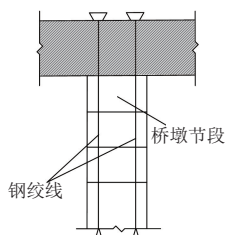
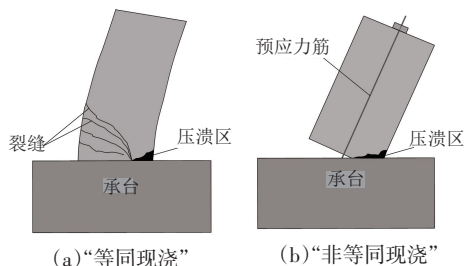


图3 承插式连接示意图

基本一致,其中 $0.7D$ 试件最为接近。随着承插深度的增大,墩身变形符合嵌岩桩的变形特点。Wang等^[22]针对采用承插式连接的圆形截面桥墩,采用循环往复加载试验的方法,得出了承插式连接的预制桥墩与同参数现浇桥墩的一些抗震指标。试验结果表明,在滞回性能方面,采用承插式连接的预制桥墩具有较明显的捏拢效应(构件在低周反复荷载作用后,随着加载位移的增加,滞回曲线的滞回环的宽度逐渐减小,导致结构的刚度和强度出现退化的现象),但其耗能能力要稍差。Si等^[23]表明承插式连接采用锯齿形剪力键可有效防止垂直裂缝的发展,并需增强连接部位的锚固能力。

1.4 后张拉预应力连接

预应力连接预制桥墩结合了预应力混凝土技术和预制构件技术,如图4所示。通常情况下,预制混凝土构件在工厂中制造并进行预应力处理,然后在现场组装和连接形成完整的桥墩结构,连接方式可通过预应力钢束、预应力筋或其他预应力构件来实现^[24]。按抗震性能分类,用后张拉预应力连接桥墩属于“非等同现浇”连接方式,其受力方式与“等同现浇”连接方式不同,如图5所示。

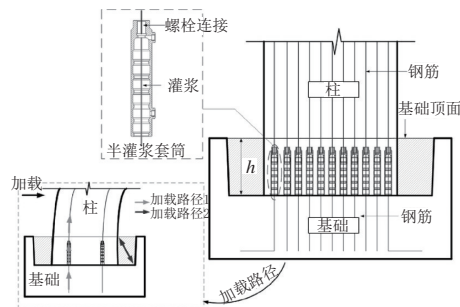
图4 预应力连接示意图^[25]图5 “等同现浇”连接与“非等同现浇”桥连接力示意图对比^[2]

Ou等^[26]为减少地震时的预应力损失,增强柱的抗震性,使用了连续穿过柱节的黏结低碳钢条(也称为ED消能条)。试验设计了4个大型试件,其中有三个试件的预应力值为混凝土抗压强度与桥墩截面的面积乘积($f_c A$)的 0.072 倍,一个试件的预应力值为 $0.021 f_c A$ 。横向循环加载试验表明,带有ED消能条的桥墩具有出色的抗漂移能力,足以在地震频发的地区使用。但其自复位能力和延性能力会受到一定程度的削弱,接缝区域的混凝土压溃情况更为显著,导致局部损伤加重。

总体而言,后张预应力预制拼装桥墩虽然有自复位能力强的特点,并且通过一定的改善能够提高其耗能能力,但在众多研究中发现桥墩墩底混凝土的局部损伤现象较为普遍,使受损后的修复工作较为棘手,亟须一种合理的方式改善墩底的局部损伤。

1.5 其他新型连接方式

Xu^[27]等提出了一种预制桥墩与承台之间的新型连接,如图6所示。它结合了半灌浆套筒(Half Grouted Sleeves)和承插式(Socket-type)连接,因此被称为HGS-S。结果表明,使用HGS分担部分地震作用力,故而HGS-S连接可改善承插式连接的性能,从而减少所需的开挖深度和相应的现场施工操作。

图6 新型HGS-S连接装置和加载路径示意图^[27]

Zhu等^[28]设计了一种带有外部可更换耗能装置(Post-tensioned Reinforced Concrete Bridge Pier with External Replaceable Energy Dissipaters, PRCB-ERED)的后张法预制钢筋混凝土桥墩,如图7所示。通过改变核心耗能钢板中的初始后张预应力和核心耗能钢板尺寸等参数,进行拟静力试验,结果显示随着初始后张预应力的增加,刚度和承载能力都得到了提高,并实现了更好的自我修复效果。在核心耗能钢板厚度相同但初始后张预应力不同的试验条件下,预制桥墩的耗能能力与承载能力基本相同。

Cai等^[29]设计了一种在底部安装了可更换的外部辅助钢剪力板阻尼器(Auxetic Steel Shear Panel

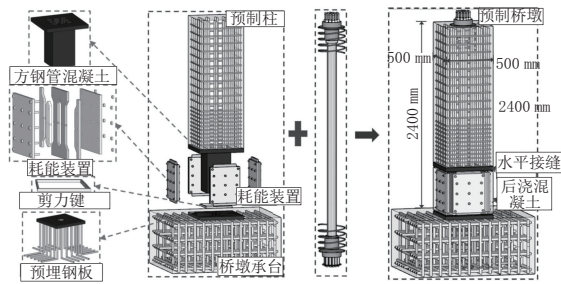


图 7 PRCB-ERED 装置示意图^[28]

Dampers, ASSPDs) 的新型后张法预制节段式桥墩 (Segmental Concrete Post-tensioned Segmental Bridge Piers, SC-PSBPs), 并在中间节段安装了连接钢板, 通过实验和数值模拟研究了 SC-PSBPs 的抗震性能。试验结果表明, SC-PSBP 配有无粘结后张法预应力筋和 ASSPD, 具有稳定的滞后响应和自复位能力, 且对混凝土的破坏极小。塑性变形主要集中在 ASSPD 上, 且中间连接钢板在整个加载过程中都表现出弹性。

2 高性能新材料的运用

2.1 超高性能混凝土

超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 是近年来发展起来的一种先进混凝土材料, 其开发旨在创造一种具有卓越性能的混凝土, 以应对日益严苛的工程要求, 并提升建筑结构的耐久性。Yang 等^[30]研究对比了墩底节段采用低碳钢加固的传统混凝土预制桥墩与采用低碳钢加固的 UHPC、不加固的 UHPC 预制桥墩的抗震性能。结果表明, 使用 UHPC 的桥墩破坏最小, 但墩底节段中是否用低碳钢加固对预制桥墩的损伤影响不大。Zhang 等^[31]使用灌浆波纹钢套管和现浇 UHPC (缩写为 GS-UHPC) 的混合连接方式, 该 GS-UHPC 接头不会在相邻预制节段钢筋混凝土 (Reinforced Concrete, RC) 桥墩之间断开, 从而提高了结构的完整性, 并加快了结构的施工速度。在循环荷载作用下, GS-UHPC 在连接钢筋屈服前具有良好的变形回弹, 且在连接钢筋屈服后, 能量耗散良好。此外, 结构的骨架曲线轮廓与单调荷载下的“荷载-挠度”曲线几乎重合, 随着接头断开或 RC 破裂, 等效刚度下降。

2.2 碳纤维增强复合材料

碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 具有高强度和高刚度等优点, 同时该材料轻量化, 耐腐蚀性强, 设计自由度高, 便于震后更换^[32], 且 CFRP 不易受到腐蚀、氧化或化学侵蚀的

影响, 因此在恶劣环境下也具有较长的使用寿命^[33]。Wang 等^[34]使用 CFRP 材料和抗摇摆外部金属耗能器加固预制混凝土桥墩, 设计并制造了两个 1/6 比例的预制桥墩, 分别采用灌浆套筒连接 (SFP) 和灌浆套筒预应力筋复合连接 (SSFP)。SFP 和 SSFP 的初始地震破坏包括墩身开裂、混凝土剥落或破碎以及墩底接缝开裂。这种加固方法能明显减小试件的水平位移, 具有良好的抗摇摆能力, 耗能能力相对提升, 有效提高了加固桥墩试件的延性。Zhao 等^[35]设计了 3 个预制节段式桥墩试件, 研究是否采用 CFRP 加固以及采用 CFRP 加固时是否具有初始损伤在循环荷载下的响应。对比普通钢筋混凝土试件, 采用 CFRP 加固的桥墩试件的漂移率、水平承载力、总累积耗能和初始刚度分别提高了 75%、0.71%、115% 和 8.23%, 且用 CFRP 修复过的桥墩试件, 相同性能分别提高了 25%、0.64%、47% 和 4.29%。因此, CFRP 可用于预制节段式桥墩的震前加固和震后修复, 但由于 CFRP 的约束效应, 损伤被转移到了加固区域之外。

2.3 形状记忆合金

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 是一种新型智能金属材料, 具有超弹性效应和形状记忆效应。SMA 材料最显著的特点是其形状记忆效应, 当 SMA 受到外部热源激活或受到力的作用时, 它可以从一种形状恢复到之前设定的原始形状^[36]。Javier 等^[37]在 UHPC 柱与基础连接的临界区, 用具有超弹性的镍钛形状记忆合金 (SMA) 钢筋代替了普通钢筋。镍钛形状记忆合金 (SMA) 钢筋用于穿过柱和基础之间的界面, UHPC 柱承受恒定压力和循环侧向荷载的作用。由于使用了先进的材料, 连接处在没有任何明显损坏的情况下出现了弯矩-转角行为。由于 UHPC 的损伤程度低且镍钛 SMA 杆件的超弹性, 在测试过程中观察到的残余变形较小。Li 等^[38]采用了混凝土填充双层钢管 (Concrete-Filled Double Skin Steel Tube, CF DST) 预制节段, 该系统内部由形状记忆合金 (SMA) 杆和外部钢制抗震装置组成。可在不增加支柱残余变形的情况下耗散能量, 而外部耗能装置则可进一步提高桥墩的耗能能力, 减少局部混凝土挤压损伤。

2.4 工程水泥基复合材料

工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composites, ECC) 材料是一种由水泥、粉煤灰、矿物粉和高性能聚合物改性剂组成的高性能混凝土。ECC 具有一定程度的自修复能力, 即在裂缝形成后, 可通

过吸收水或在裂缝处形成新的水泥凝胶来修复自身,其耐久性比普通混凝土更好,能够在恶劣环境下长期使用^[39-40]。林上顺等^[41]提出新型构造形式,使用工程水泥基复合材料与预制榫卯结构结合,利用ABAQUS软件进行了结构的有限元分析。分析结果表明,各试件的ECC现浇段均未发生破坏,与现浇ECC湿接缝连接的试件相比,这种ECC混合式连接的预制拼装桥墩的峰值荷载增大了25.74%~30.03%,极限位移增大了22.75%~106.39%,残余位移下降了43.70%~61.42%。

3 各类连接形式的对比分析

预制拼装桥墩节点的连接发展出了多种构造形

式,根据国内外众多学者的研究,总结对比出了不同连接方式的优缺点以及抗震性能等,如表1所列。现有预制拼装技术各有优缺点,实际工程一般结合施工条件与结构需求,并考虑工程质量与施工效率,选择相应的连接方式。由表1可知,灌浆套筒或波纹管连接技术还需进一步研究改进,以实现在高震区的应用。现浇湿接缝连接在高低震区均可采用,但现场仍存在大量的现浇混凝土作业。承插式连接则需要注意承插深度,高震区条件下应适当增加承插深度。将预制拼装连接技术原理与其他抗震措施结合使用能消除部分不利因素,如结合外置耗能装置,通过提高耗能能力、减震和限位等方式提高桥梁的抗震性能。

表1 不同连接方式对比

连接形式	抗震体系	技术特点	主要优缺点	抗震性能
灌浆套筒或波纹管连接	等同现浇	预制部分与其他部位之间预留孔洞,安装连接件	在非强震区优势明显;对施工精度要求高	抗震性能与现浇连接相当,强震区抗震性能需进一步验证
现浇湿接缝连接	等同现浇	两相邻部分分开浇筑,在接缝处形成湿接面	连接部位具有较好的可靠性和耐久性;现场仍有较大量现浇混凝土作业	结构的整体稳定性和承载能力较好,主要的屈服和破坏仍发生在现浇区域
承插式连接	等同现浇	直接将预制桥墩插入到承台预留的孔洞	施工方便,整体性能好;为提高抗震性能增大承插深度,承台厚度增大	抗震性能与现浇试件基本一致,随着承插深度的增加,承插式桥墩的抗震性能提高,后趋于稳定
后张拉预应力连接	非等同现浇	结合预应力技术和预制构件技术	不需要考虑连接过程中的钢筋浇筑等问题;需要严格的设计和施工要求,以确保有效传力和连接稳定性	有自复位的特点,具有较好的抗震性能,破坏形式往往为局部混凝土压坏
外置耗能装置	—	拥有外部耗能装置,减少耗能,能够更换	可根据工程需求进行调整,具有较好的可控性;设计、制造和安装成本相对较高,需要定期检查和维护	通过提高耗能能力、减震和限位等方式提高桥梁的抗震性能,具体的抗震性能受材料选择、设计和安装等多个因素的综合影响

4 结 语

(1)灌浆套筒或波纹管连接、现浇湿接缝连接、承插及插槽式等连接方式都致力于加强桥梁的整体抗震性能,旨在确保其连接部位具有足够的强度和稳定性,其抗震性能均与传统的现浇连接相当。但在裂缝分布、延性、耗能能力等方面有所差异。选择合适的连接方式需要考虑到具体的工程要求、地震影响以及结构设计等因素。

(2)后张预应力预制拼装桥墩自复位能力强,能够提高其耗能能力,是较为理想的抗震结构,但墩底混凝土的局部损伤现象较为普遍,受损后的修复工作较为困难。在后续研究中,应采取措施改善这种情况。例如采取混合式连接方法,将其他预制节段桥墩连接方式与之结合,减少墩底混凝土的局部损伤。

(3)高新材料的应用有利于改善预制节段桥墩的抗震性能。UHPC具有高强度和耐久性,且与传统

混凝土相比有明显优势,采用UHPC的预制桥墩在拟静力试验中表现出良好的抗震性能,尤其与承台承插式连接节点相结合。CFRP加固可提高承载能力,但可能会降低耗能水平,CFRP的参数变化对桥墩抗震性能影响较小。此外,SMA材料具有形状记忆效应,ECC具有自修复性,能有效减少损伤和残余变形,延长使用寿命。

在未来,需进一步研究使用高性能新材料在提高抗震性能方面的应用潜力,尤其是在预制节段桥墩的震前加固和震后修复中的作用。由于施工顺序不同于传统方法,预制拼装桥墩结构不可避免地会出现接缝,如预制桥梁的纵向和横向接缝、梁柱接缝等。接缝处呈现出不均匀的微观结构,导致物理和化学性质的差异。这些界面会破坏结构的完整性,使组合结构的完整性低于整体结构。未来应加强对预制拼装桥墩的耐久性方面研究,了解其在服役期间受到锈蚀影响的程度以及相应的力学性能变化。针对预制拼装桥墩中接缝区段易受施工工艺等条件

影响的问题,提出改进和优化的方案,以增强其整体的耐久性。充分考虑多项劣化耦合作用的影响,尽可能减少预制拼装桥墩在恶劣环境下的性能退化。

参考文献:

- [1] 项贻强,竺盛,赵阳.快速施工桥梁的研究进展[J].中国公路学报,2018,31(12):1-27.
- [2] 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.
- [3] Zhao B, Wu D, Zhu H Q. New Modular Precast Composite Shear Wall Structural System and Experimental Study on its Seismic Performance [J]. Engineering Structures, 2022(264): 114381.
- [4] 张子飏,邓开来,徐腾飞.预制装配式混凝土桥梁结构2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):183-191.
- [5] 王志强,卫张震,魏红一,等.预制拼装联接件形式对桥墩抗震性能的影响[J].中国公路学报,2017,30(5):74-80.
- [6] 魏红一,肖伟,王志强,等.采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(7):1010-1016.
- [7] Yan Q S, Chen T Y, Xie Z Y. Seismic Experimental Study on a Precast Concrete Beam-Column Connection with Grout Sleeves[J]. Engineering Structures, 2018(155): 330-344.
- [8] Pang J B K, Eberhard M O, Stanton J F. Large-Bar Connection for Precast Bridge Bents in Seismic Regions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(3): 231-239.
- [9] 许子宜,张子飏,徐腾飞.预制装配式混凝土桥梁结构2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增刊1):288-296.
- [10] 别业山,肖海珠,舒思利.杭州湾跨海铁路大桥总体设计[J].桥梁建设,2023,53(增刊2):22-28.
- [11] 郭熙冬.港珠澳大桥承台墩身工厂化预制施工技术[J].桥梁建设,2014,44(2):107-111.
- [12] 石岩,张智超,钟正午,等.预制装配式桥墩连接类型及抗震性能研究综述[J].世界地震工程,2022,38(2):205-219.
- [13] Kim D H, Moon D Y, Kim M K, et al. Experimental Test and Seismic Performance of Partial Precast Concrete Segmental Bridge Column with Cast-in-Place Base [J]. Engineering Structures, 2015(100): 178-188.
- [14] 林上顺,张建帅,夏樟华,等.装配式RC桥墩研究现状及展望[J].土木与环境工程学报(中英文),2024(3):1-14.
- [15] Haraldsson O S, Janes T M, Eberhard M O, et al. Seismic Resistance of Socket Connection between Footing and Precast Column [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(9): 910-919.
- [16] 李航,刘朵,王阳春,等.承插式连接预制拼装桥墩抗震性能试验研究[J].桥梁建设,2024,54(1):95-102.
- [17] Osanai Y, Watanabe F, Okamoto S. Stress Transfer Mechanism of Socket Base Connections with Precast Concrete Columns[J]. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 1996, 93(3): 266-276.
- [18] 韩艳,王龙龙,刘志浩.承插式预制桥墩在车辆碰撞下的动力响应模型试验研究[J].振动与冲击,2021,40(22):267-274;288.
- [19] Chen M, Corte W D, Jiang H, et al. Experimental Study on Direct-shear Behaviour of Narrow Joints in Socket Connections for Precast Pier-to-Pile Footing Systems[J]. Structures, 2024(61): 106006.
- [20] 李理,徐传昶,熊辉,等.承插式预制混凝土桥墩抗震性能试验与数值模拟[J].地震工程与工程振动,2023,43(5):213-220.
- [21] 徐艳,曾增,葛继平,等.承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(12):1706-1711.
- [22] Wang Z Q, Qu H Y, Li T T, et al. Quasi-Static Cyclic Tests of Precast Bridge Columns with Different Connection Details for High Seismic Zones[J]. Engineering Structures, 2018(158): 13-27.
- [23] Si X L, Wen J N, Zhang G D, et al. Seismic Performance of Precast Double-Column Pier with UHPC-Filled Socket Connections[J]. Engineering Structures, 2023(285): 13.
- [24] Mander J B, Cheng C T. Seismic Resistance of Bridge Piers Based on Damage Avoidance Design[J]. Technical Report NCEER, 1997: 97-104.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Xu W J, Gu M J, Chen X, et al. Seismic Performance of Precast Segmental Piers with a Novel Combined Half-Grouted Sleeve-Socket (HGS-S) Connection[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023(175): 108220.
- [28] Zhu Y Q, Wu J, Zhang J Y, et al. Experimental and Theoretical Investigations of Post-Tensioned Precast Reinforced Concrete Bridge Pier with External Replaceable Energy Dissipaters[J]. Engineering Structures, 2023(294): 116719.
- [29] Cai X N, Zhu Y Z, Wang J J, et al. Seismic Behavior of Self-Centering Precast Segmental Bridge Piers with External Auxetic Steel Shear Panel Dampers[J]. Structures, 2023(58): 105647.
- [30] Yang C C, Okumus P. Ultrahigh-Performance Concrete for Posttensioned Precast Bridge Piers for Seismic Resilience[J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(12): 04017161.
- [31] Zhang Y, Zhu Y, Chen Q, et al. Precast Columns Connected with Grouted Corrugated Steel Sleeves and UHPC Tenon Under Combined Bending and Compression[J]. Engineering Structures, 2021(235): 112080.
- [32] Elgawady M A, Booker A J, Dawood H. M. Seismic Behavior of Posttensioned Concrete-Filled Fiber Tubes[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(5): 616-628.
- [33] Moustafa A, Elgawady M A. Shaking Table Testing of Segmental Hollow-Core FRP-Concrete-Steel Bridge Columns[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(5): 04018020.
- [34] Wang S J, Xu W, Wang J, et al. Experimental Research on Anti-Seismic Reinforcement of Fabricated Concrete Pier Connected by Grouting Sleeve based on CFRP and PET Materials[J]. Engineering Structures, 2021(245): 112838.
- [35] Zhao J F, Cui Q F, Li X, et al. Experimental Study on the Plastic Hinge Region of Precast Segmental Bridge Piers Strengthened by CFRP [J]. Structures, 2023(55): 1853-1860.
- [36] 孙国钧.形状记忆合金增强复合材料梁的弯曲[J].复合材料学报,1995(4):119-124.
- [37] PEREIRO-BARCELÓ J, Bonet J L, Rueda-Garcia L, et al. Cyclic Response of Precast Column-to-Foundation Connection Using UHPC and NiTi SMA Reinforcements in Columns [J]. Engineering Structures,