

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.04.011

装配式桥墩抗震性能的提升方法研究进展

张于晔^{1,2}

(1. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;
2. 南京理工大学 理学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对提高装配式桥墩抗震性能的不同方法, 从结构刚度、抗剪能力、自复位能力、延性耗能和施工便易性等方面对比分析了其优缺点、适用性及研究思路等。首先, 基于装配式桥墩抗震设计的难点和抗震性能的主要缺陷, 提出该问题的研究背景; 其次, 分别从改进结构形式与材料、节段连接方式以及设置耗能装置等角度, 归纳对比了国内外提升装配式桥墩抗震性能的主要措施; 然后, 剖析了这些措施的相关研究思路与研究方法。在此基础上, 提出有待进一步研究的主要问题, 即完善适合于装配式桥墩的理论分析方法, 开展装配式双柱墩的抗震性能研究, 提高装配式桥墩建造的便利性与经济性, 并从桥梁体系的角度来分析其抗震性能。

关键词: 桥梁工程; 桥墩; 对比分析; 预制装配; 抗震性能; 提升方法

中图分类号: U443.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)04-0072-08

Research Progress of Methods for Improving Seismic Performance of Prefabricated Bridge Piers

ZHANG Yu-ye^{1,2}

(1. Key Laboratory of Concrete and Pre-stressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;
2. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: In view of the methods for improving the seismic performance of prefabricated bridge piers, the advantages and disadvantages, applicability and research methodologies are compared and analyzed from the aspects of structural stiffness, shear capacity, self-resetting ability, ductile energy dissipation and construction convenience. First, the research background of the problem is put forward based on the difficulties in seismic design and the main drawbacks of the seismic behavior of prefabricated piers. Second, the main measures to enhance the seismic performance of prefabricated piers are summarized and compared from the aspects of improving structure types and materials, segment connection modes and setting energy dissipation devices. Then, the relevant research ideas and methodologies of these measures are analyzed. Based on this, the main issues need to be further studied are put forward, that is to improve the theoretical analysis method for prefabricated piers, to carry out the research on the seismic behavior of prefabricated double-column piers, to improve the convenience and economy of prefabricated piers, and to analyze their seismic performance from the perspective of bridge system.

Key words: bridge engineering; bridge pier; comparative analysis; prefabricated assembly; seismic performance; improving method

收稿日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508276); 中国博士后科学基金项目(2015M570399); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30915011329); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放基金项目(CPCSME2014-02)

作者简介: 张于晔(1986-), 男, 江西九江人, 博士后. (zyy86@seu.edu.cn)

0 引言

近年来随着工程结构工业化进程的加速,装配式桥墩在国内外跨海大桥引桥、城市高架桥等的下部结构中得到广泛应用(如我国港珠澳大桥、美国 Louetta Road 高架桥等)^[1-4],有望成为一种主流的桥墩结构形式。装配式桥墩通常也被称为预制拼装桥墩,其与整体现浇桥墩相比,具有人工用量少、施工工期短、质量易保证、对环境的影响小、自复位能力强等优势^[5-7]。然而,由于预制拼装桥墩在地震作用下的损伤机理尚未明晰,其地震安全性尚待提高,目前其主要用于非抗震设防区或低抗震设防区的桥梁结构,在中、强震区桥梁结构中的应用受到限制^[8-9]。

为了提升装配式桥墩的抗震性能,国内外学者深入研究其地震损伤机理,着重分析其易损部位和薄弱环节,并通过改变预制桥墩节段形式及连接方式、采用新型结构材料、不同构件相组合以及设置耗能装置等方法来增强其抗震性能,以提高采用此类桥墩的桥梁结构在地震作用下的安全性。而较少有文献对这些方法进行系统的论述,因此本文将近期国内外提升装配式桥墩抗震性能的主要方法进行分类和对比(重点分析2010年以来的研究成果),为相关的研究与工程实践提供参考借鉴。

1 问题背景介绍与分析

预制桥梁体系主要包括预制拼装主梁和预制拼装桥墩(装配式桥墩),而预制拼装桥墩与预制拼装主梁相比,其研究与工程应用相对较少^[10]。通常是现场的施工条件将桥墩分成若干节段,在工厂进行预制,然后运至施工现场进行组装。由于预制拼装桥墩的诸多优势,其主要适用于桥梁总长较大、桥墩相对较高、墩数较多的桥梁(见图1(a)城市高架桥)^[11],以及现场施工条件比较复杂,施工空间有限的桥梁(见图1(b)跨海大桥引桥)^[12-13]。

然而,预制拼装桥墩的抗震性能一直是工程界比较关注的问题,也是此类型桥墩设计的难点。按照节段间接缝的不同,节段拼装桥墩的拼装接头通常采用承插、钢筋锚固、扣环、法兰盘、后张预应力等形式^[8]。后张预应力体系节段之间采用干接缝或胶接缝方式处理,再采用后张预应力的方式连接成整体,从而设计成摇摆桥墩体系^[1]。由于预应力节段拼装桥墩的纵向主筋在接缝处不连续,使其与整体现浇的桥墩相比,剪切强度会大幅减小^[8]。在地



(a) 美国达拉斯机场高架桥

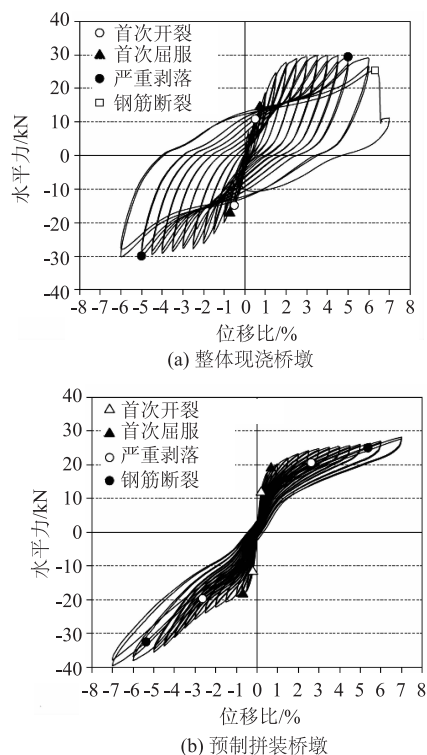
(b) 杭州湾跨海大桥引桥

图1 装配式桥墩工程应用实例^[11-12]

Fig. 1 Engineering applications of prefabricated bridge piers^[11-12]

震作用下,预制拼装桥墩主要存在以下几方面的劣势:

(1) 预制拼装桥墩的延性和滞回耗能能力较弱^[8-10](如图2所示,滞回环所包围的面积表征桥墩的耗能能力),使其可能发生脆性破坏,这是预制拼装桥墩在中、强震区应用受到限制的重要原因。



(a) 整体现浇桥墩

(b) 预制拼装桥墩

图2 桥墩水平力-位移滞回曲线^[8]

Fig. 2 Hysteretic curves of lateral force vs. drift of piers^[8]

(2) 地震时预制拼装桥墩的塑性铰区节段在较大纵向压应变下形成柱脚的刚性转动,可能导致该区域节段保护层混凝土大量开裂甚至压碎^[9],因此,有必要较大幅度提升此类桥墩墩底塑性铰区混凝土的抗裂能力。

(3) 桥墩各节段主要依靠预应力连接,在较大水平地震作用下其抗剪能力相对较弱,而且各节段可能发生相对转动,节段接缝处在转动时因承受较

大的局部应力而较易发生损坏^[14-15]。

2 相关问题的主要研究现状分析

针对装配式桥墩的力学特点,国内外学者基于本国的相关桥梁设计规范、场地条件和结构设计制造水平等基本条件,利用理论分析、试验与数值模拟等手段,从改进结构形式与材料、节段连接方式以及设置耗能装置等角度来提升其抗震性能。

2.1 不同构件相组合

在装配式桥墩研究早期,有学者希望通过采用不同构件相组合的方式增强其抗震性能。Hewes^[9]在预制拼装桥墩的底部节段钢套筒对素混凝土进行约束,通过循环加载试验证明采用钢套筒约束时结构整体性更好,滞回耗能能力增加,但是不同形式的节段间刚度差别较大,其他节段成为薄弱环节。为此,Chou等^[16]对2个钢套筒约束混凝土节段拼装桥墩进行拟静力试验,对桥墩所有节段的混凝土都用钢套筒进行约束,以增强结构耗能和抗弯能力,并减小结构的残余位移。Motaref等^[17]在节段拼装桥墩底部设置弹性橡胶垫,采用水泥基复合材料增强并用碳纤维布(CFRP)包裹部分节段,以增加墩柱耗能并减小底部节段的损坏。ElGawady等^[18]则在各节段采用混凝土与FRP套筒相组合,FRP套筒同时起到混凝土浇注模版、保护内部混凝土及抗剪等作用。Guerrini等^[19]采用内外均布置钢筒,高性能混凝土在钢筒中间灌注的空心组合形式。上述这些方法均可在一定程度上增强拼装桥墩的抗震能力,但可能会较大幅度增加施工难度或工程造价,同时桥墩不同构件在地震作用下的协同受力问题成为设计难点。

2.2 设置耗能装置

在装配式桥墩中设置耗能装置,是为了增加其在地震作用下的耗能能力,从而提升其安全性。一般耗能装置可分为内置耗能钢筋和外置耗能器。

(1) 耗能钢筋

OU, CHOU, 葛继平, 布占宇等^[14,16,20-21]在预制拼装桥墩设置耗能钢筋,如图3(a)所示。通过耗能钢筋减小预制桥墩的曲率,抑制接缝的张开,耗能钢筋一般设计强度较小,通过在地震下的拉伸压缩甚至被拉断而耗能。Roh^[22]等从理论上分析了耗能钢筋屈服强度和屈服后刚度比对预应力摇摆桥墩地震响应的影响,从而为建立精确的数值分析模型提供基础。Moon等^[23]采用形状记忆合金(SMA)作为拼装桥墩的耗能钢筋,并通过循环往复拟静力分析证明采用SMA可大幅提高结构的阻尼比。

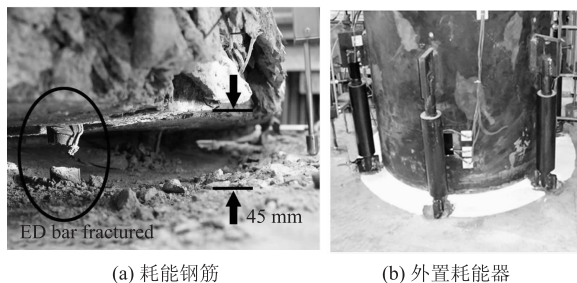


图3 预制拼装桥墩耗能装置^[14,19]

Fig. 3 Energy dissipation devices of prefabricated bridge piers^[14,19]

(2) 外置耗能器

为了提升安装的方便性以及震后的可修复性,不少学者尝试在墩柱的关键部位附设外置耗能器。如图3(b)所示,Guerrini等^[19]在承台与底部节段间锚固6根低碳钢筋,通过钢筋的滞回特性来增加结构耗能与自复位能力。ElGawady等^[24]在桥墩底部节段设置橡胶垫,并在墩柱与基座间设置钢角组成耗能体系。Guo等^[25]将附有改性材料的铝棒作为外置耗能器,该耗能器被设计为在小震时保持整体联接,在中强震时可能发生损坏,并且易于拆除和更换。目前还主要基于试验来分析外置耗能器的相关力学性能,难以从理论上进行精确定量分析。

2.3 采用新型结构材料

(1) 混凝土材料

预制拼装桥墩由于有接缝的存在,节段间在地震作用下会发生相对转动,为提高结构的抗裂性和延性,通常采用改进的混凝土材料。Billington等^[26]在预制桥墩潜在塑性铰区节段采用纤维增强水泥复合材料,试验表明这种体系较传统拼装桥墩具有更好的延性和耗能能力,并且残余位移更小,裂缝更细且相对分散。Trono等^[27]将预制墩柱设计成沿基础面的摇摆体系,在摇摆柱底部采用混杂纤维混凝土(HYFRC,其中钢纤维体积率为1.3%,聚乙烯醇纤维体积率为0.2%),以增强柱底的抗压破坏能力和体系的滞回耗能能力。Cruz Noguez, Motaref等^[28-29]通过在墩底采用工程水泥基复合料(ECC)并设置相应的附件,增加了结构的延性和承载能力,减小了塑性铰区的损伤和残余位移。

(2) 筋材

此外,由于接缝在水平作用下可能发生张开闭合,这一定程度上增加了墩柱内部钢筋腐蚀的概率,可能影响结构的耐久性。为此,Guo, Ibrahim等^[25,30]采用玄武岩纤维筋(BFRP筋)代替普通钢

筋,研究表明BFRP筋可满足预制桥墩的力学要求,并且该体系在较大的位移响应时可以保持稳定的屈服后刚度,同时BFRP筋与周围混凝土的黏结条件对结构性能影响较大。Shrestha等^[31]在桥墩中采用SMA筋代替普通钢筋,同时在塑性铰区采用ECC,试验结果表明采用SMA筋可有效增强墩柱自复位能力,减小其在较大响应时的损伤。

2.4 改进节段形式与连接方式

(1) 节段形式

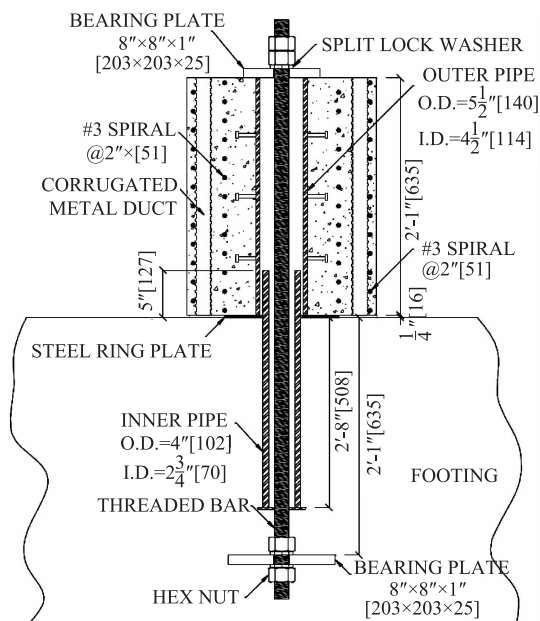
在节段形式方面,装配式桥墩通常是在水平方向上进行分段,而对于高度相对较小的桥墩,可以考虑在竖直方向进行划分,或者将整个墩柱作为一个节段。Hosseini等^[32]在竖向将预制柱分为两部分,外部由ECC制成高强套管,内部浇注普通混凝土,ECC管即可作为浇注模板,便于施工,又可提高结构延性和耗能。Haraldsson等^[33]将预制墩柱作为一个节段,再插入承台并将纵筋锚于基础,这可省去现场拼装过程,大幅提升桥梁下部结构建造效率。

(2) 节段与承台连接

在节段连接方式方面,由于底部节段受力较集中而容易发生损伤,因此底部节段与承台的连接较为重要。Wang等^[34]设计了在墩柱与基础之间采用现浇接头的预应力装配式桥墩,作为一种可供选择的连接形式。Ou, Kim等^[35,36]将墩柱的底部区域与承台整体现浇,其余部分采用预应力节段形式,需确保在地震作用下现浇段可以形成塑性铰,试验表明这种混合结构形式具有较好的耗能能力和屈服性能。Mehrsoorush等^[37]为增大装配式桥墩的非弹性循环往复变形能力,开发了一种墩柱与承台之间的“管钉式”连接形式,如图4(a)所示,用以传递两者间的剪力和弯矩,通过试验表明“管钉式”接头可以在发生轻微损伤的前提下抵抗较大的力和位移响应,同时可以达到与整体现浇连接相近的抗震性能。

(3) 节段间的连接

装配式桥墩在发生弯曲破坏前,接缝处可能先发生剪切破坏^[38],因此还需提高桥墩节段间的抗剪能力。一种方式是在节段接触面涂以环氧树脂水泥胶薄层,以提升结构抗剪能力和不透水性^[10]。另一种方式是在各节段设置子母剪力键^[4,39],剪力键的设置不仅可以增强桥墩的抗剪刚度和整体性,还有助于节段拼装时的定位,提高施工的方便性和定位精度,如图4(b)所示。



(a) “管钉式”接头



(b) 剪力键

图4 节段连接方式的改进^[37,39]

Fig. 4 Improvement of segment connections^[37,39]

2.5 不同提升方法的对比分析

综上所述,不同构件(钢套筒、FRP套筒等)相组合可较大提高结构的刚度和抗剪能力,减小结构的残余位移,简化核心混凝土构件的配筋,但不同构件间是否能够很好结合并共同受力是难点问题。设置耗能装置是为了提升结构耗能能力,内设耗能钢筋不仅可增加耗能,还能减小结构响应,但会增大结构设计与施工难度,而外置耗能器的主要难点在于理论分析方面。采用新型混凝土材料可减小桥墩关键部位的损伤,提高结构延性,而由于这类材料(如混杂纤维混凝土、ECC等)目前还未大范围应用,因而材料本构关系不够清晰,且成本相对较高。采用新型筋材可提升结构自复位能力及耐久性等,但这类筋材(如BFRP筋、SMA筋等)与周围混凝土

土的黏结性能可能不及钢筋。在改进节段形式与连接方面，通过改变节段划分形式可进一步提高施工的方便性和效率。改进节段与承台的连接主要是为了更好地传递墩柱与承台间的剪力与弯矩，使其同时发挥整体现浇与装配式桥墩的优势；而改进节段间的连接则主要是为了提升抗剪能力与整体性，但可能会增加结构制作方面的难度。

为了更简洁清晰地表述以上提升装配式桥墩抗震性能的方法，从各提升方法的主要作用、存在的不足等角度将其分类列于表 1。

表 1 装配式桥墩抗震性能的主要提升方法

Tab. 1 Main methods for enhancing seismic behavior of precast piers

提升方法	具体形式	主要作用	存在的不足之处
不同构件相组合	钢套筒等	提高结构刚度与抗剪能力，简化配筋	不同构件间的协同作用
	耗能钢筋	增加结构耗能，减小结构响应	增大结构设计与施工难度
设置耗能装置	外置耗能器	提升结构耗能与自复位能力	较难进行精确的理论分析
	混凝土材料	减小桥墩关键部位的损伤，提高结构延性与承载能力	材料本构关系尚不够明晰，成本相对较高
采用新型材料	筋材	可提升结构自复位能力及耐久性	筋材与混凝土的黏结不强
	节段形式	提高施工的方便性和效率	不适用于较高的桥墩
节段形式与连接	与承台连接	更好传递墩柱与承台间的作用力	存在现浇段，影响效率
	节段间连接	提升结构抗剪能力与整体性	增加结构制作的难度

3 相关研究思路与研究方法分析

3.1 主要研究思路

从体系上看，提高桥梁结构抗震性能的方式包括提高结构能力和减小结构需求两个方面。

在提高结构能力方面，对于装配式桥墩而言，主要是从两个角度，一是提高桥墩的强度、刚度及承载力等：如早期的采用钢套筒约束以提升刚度^[9,16]，采用新型混凝土材料以提高强度和承载力^[27]，改进节段连接形式以提高抗剪能力^[10,39]；二是增强桥墩的延性，桥墩作为桥梁体系的重要延性构件，增强其延性对提高体系的抗震能力具有重要作用。前述的采用纤维混凝土^[26-27]、ECC^[28-29]等均作为增强装配式桥墩的延性，以提升桥梁体系的抗震能力。

在减小结构需求方面，对于采用装配式桥墩的桥梁，要减小桥墩的地震需求，一般需进行专门的减隔震设计。减震是利用特制减震构件或者装置，使结构在强震时首先进行塑性，以消耗传入结构体系的能量。在装配式桥墩中设置耗能钢筋^[14,16,20-21]和外置耗能器^[19,24-25]，均可增大结构阻尼，在地震时耗散更多能量，起到减震效果。隔震是利用隔震体系，阻止地震能量传入主体结构，如设置隔震支座。而针对装配式桥墩的隔震支座研究，较少见相关报道。

3.2 相关研究方法

对于装配式桥墩的抗震性能，研究方法主要包括试验研究、数值分析和解析方法等。

(1) 试验研究方法有多种形式，较常见的是拟静力试验^[9,15,25]，即对墩柱进行循环往复加载，获得结构的荷载-位移滞回曲线，从而分析结构的延性、残余位移、耗能及承载能力等。拟静力试验是用静力方法来分析结构振动时的性能，分析结果可能与实际地震过程中的结构性能存在差异。为此，装配式桥墩的振动台试验研究在逐步增多^[20,29]，以更为直接地分析此类桥墩在震时的性能和破坏模式。

(2) 数值分析目前常采用纤维单元法和实体单元法。纤维单元法的特点是其单元同一截面的不同纤维可具有不同的材料特性，以模拟不同材料（如钢筋、混凝土、预应力筋）的力学特征及其相互作用。BU，CHOU^[15,40]等基于纤维单元法，利用OpenSees、PISA等软件分析装配式桥墩的抗震性能。实体单元法可较好地分析预应力筋及节段接缝的力学行为^[10]，但对计算机的运算能力和效率要求较高。随着有限元技术的发展，采用ABAQUS等^[1,40]实体单元模型进行装配式桥墩的有限元分析逐渐显现其优势。

(3) 由于装配式桥墩抗震分析涉及到强非线性及动力问题，提出合理可靠的解析方法难度较大，但解析方法可直接用于确定相关设计公式^[10]。已有学者^[35,41-42]通过参数简化推导出装配式桥墩抗震分析的解析方法，并与试验或数值分析结果进行校验，获得了较好的结果。

4 需要进一步研究的问题

从近年国内外的相关文献和以上分析可以看出，提升装配式桥梁墩柱抗震性能的方法主要集中在不同构件相组合、设置耗能装置、采用新型结构材料以及改进节段形式与连接方式等方面，并通过试验

等方式证明这些方法具有良好的抗震增强作用。然而由于不同研究条件和手段的差异,这些方法还存在一定的局限性和不足之处,以下几个主要问题有待进一步研究:

(1) 针对装配式桥墩抗震性能提升方法的研究通常主要是基于试验或数值模拟开展的,而相关的理论分析成为相对薄弱环节。为了更好地研究装配式桥墩在地震作用下的传力机理、塑性区形成机制、节段接缝的力学行为等难点问题,有必要加强理论分析与计算推导,得到其在地震作用下受力关键部位的设计经验公式,从而更好地运用于实际工程条件下的桥梁抗震设计。

(2) 装配式桥墩研究当前以单柱墩为主,较少涉及装配式双柱墩的抗震性能研究,而双柱式桥墩在实际桥梁结构中应用广泛。双柱式桥墩在顺桥向与横桥向地震作用下的塑性铰形成机制不同,且受轴力的影响导致其抗震分析更为复杂。因此,如何提升装配式双柱墩的抗震性能还有待进一步研究。

(3) 部分提升方法虽然能够增强装配式桥墩的抗震性能,但同时也较大提高了结构设计与施工难度,这不利于其在实际工程中的广泛应用。因此作为与工程实践密切联系的应用研究,还需要考虑设计施工的便利性与经济性,对这些方法进行适当简化,使其同时具有受力性能和构造上的优势。

(4) 目前相关研究主要集中于装配式桥墩构件,而较少从桥梁结构体系的角度来研究其抗震性能。对于采用装配式桥墩的桥梁结构,桥墩构件采用不同的抗震增强方法,改变其与上部主梁、下部基础的连接方式等对整个桥梁结构体系的抗震性能会有怎样的影响,针对这些问题还缺乏定量的分析,因此还有待进一步深入研究。

5 结论

对于桥梁结构而言,桥墩是直接影响其抗震性能的关键构件。与传统现浇桥墩相比,装配式桥墩在诸多方面具有明显的优劣,但从地震工程学的角度看,装配式桥墩在构造形式上具有先天的劣势,阻碍了其在震区桥梁结构中的应用和发展。因此,研究其抗震性能的提升方法具有十分重要的意义。目前装配式桥墩的抗震性能在欧美等发达国家成为研究热点,而我国在此方面的研究相对较少,这不能满足我国在本领域的工程实践需要。虽然可以在某些方面借鉴国外研究成果,但由于我国桥梁结构所处的场地条件、地震动输入条件、桥梁设计相关

规范及施工工艺等均有自身特点,因此还需要基于本国实际情况,有针对性地研究提升装配式桥墩乃至桥梁体系抗震性能的合理方法。

参考文献:

References:

- [1] DAWOOD H, ELGAWADY M, HEWES J. Behavior of Segmental Precast Posttensioned Bridge Piers under Lateral Loads [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17 (5): 735–746.
- [2] ELGAWADY M A, SHALAN A. Seismic Behavior of Self-Centering Precast Segmental Bridge Bents [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16 (3): 328–339.
- [3] 景强. 基于实体退化虚拟层合单元预制桥墩承载力分析 [J]. *公路交通科技*, 2016, 33 (3): 71–75.
JING Qiang. Analysis of Capacity of Prefabricated Bridge Pier Based on Degenerated Solid Virtual Laminated Elements [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33 (3): 71–75.
- [4] 孙业发, 刘长义, 王海波, 等. 港珠澳大桥墩柱干接缝结构匹配预制技术 [J]. *中国港湾建设*, 2015, 35 (8): 49–52.
SUN Ye-fa, LIU Chang-yi, WANG Hai-bo, et al. Matching Precast Technology in Piers Dry Joints of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. *China Harbour Engineering*, 2015, 35 (8): 49–52.
- [5] BILLINGTON S L, BARNES R W, BREEN J E. A Precast Segmental Substructure System for Standard Bridges [J]. *PCI Journal*, 1999, 44 (4): 56–73.
- [6] BILLINGTON S L, BREEN J E. Improving Standard Highway Bridges with Attention to Cast in Place Substructures [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2000, 5 (4): 344–351.
- [7] CHENG C T. Shaking Table Tests of A Self-Centering Designed Bridge Substructure [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30 (12): 3426–3433.
- [8] 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.
- [9] HEWES J T. Seismic Design and Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns [D]. San Diego: University of California, 2002.
- [10] 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.
WANG Zhi-qiang, GE Ji-ping, WEI Hong-yi, et al.

- Recent Development in Seismic Research of Segmental Bridge Columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29 (4): 147–154.
- [11] BERTSIMAS D, FRANKOVICH M. Air Traffic Flow Management at Airports: A Unified Optimization Approach [C] // *Proceedings of the 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. Chicago: The European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2013.
- [12] 王媛媛. 节段拼装桥梁抗震数值分析模型研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
WANG Yuan-yuan. Research on Numerical Analytical Model of Seismic Behavior for Precast Segmental Prestressed Concrete Bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [13] BREEN J E. Design of Bridges for Urban Transportation [C] // *Proceedings of 16th Congress of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. Lucerne, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2000.
- [14] 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.
- [15] 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*, 2015, 21 (2): 04015043.
- [16] CHOU C C, CHEN Y C. Cyclic Tests of Post-tensioned Precast CFT Segmental Bridge Columns with Unbonded Strands [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35 (35): 159–175.
- [17] MOTAREF S, SAIIDI M, SANDERS D. Shake Table Studies of Energy-dissipating Segmental Bridge Columns [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19 (2): 186–199.
- [18] ELGAWADY M, 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.
- [19] GUERRINI G, RESTREPO J I, MASSARI M, et al. Seismic Behavior of Posttensioned Self-centering Precast Concrete Dual-Shell Steel Columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141 (4): 04014115.
- [20] 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 Ji-ping, WANG Zhi-qiang. Shake Table Tests of Segmental Bridge Columns with Match-cast Dry Joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28 (9): 122–128.
- [21] 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 Zhan-yu, TANG Guang-wu. Seismic Performance Investigation of Unbonded Prestressing Precast Segmental Bridge Piers with Energy Dissipation Bars [J]. *China Railway Science*, 2011, 32 (3): 33–40.
- [22] ROH H, OU Y C, KIM J, et al. Effect of Yielding Level and Post-yielding Stiffness Ratio of ED Bars on Seismic Performance of PT Rocking Bridge Piers [J]. *Engineering Structures*, 2014, 81: 454–463.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] GUO T, CAO Z, XU Z, et al. Cyclic Load Tests on Self-centering Concrete Pier with External Dissipators and Enhanced Durability [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2016, 142 (1): 04015088.
- [26] BILLINGTON S L, YOON J K. Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-reinforced Concrete [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2004, 9 (4): 353–363.
- [27] TRONO W, JEN G, PANAGIOTOU M, et al. Seismic Response of a Damage-Resistant Recentering Posttensioned-HYFRC Bridge Column [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20 (7): 04014096.
- [28] NOGUEZ C A C, SAIIDI M S. Performance of Advanced Materials during Earthquake Loading Tests of a Bridge System [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139 (1): 144–154.
- [29] MOTAREF S, SAIIDI M, SANDERS D. Shake Table Studies of Energy-dissipating Segmental Bridge Columns [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19 (2): 186–199.
- [30] IBRAHIM A M A, WU Z, FAHMY M F, et al. Experimental Study on Cyclic Response of Concrete Bridge Columns Reinforced by Steel and Basalt FRP Reinforcements [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20 (3): 04015062.
- [31] SHRESTHA K C, SAIIDI M S, CRUZ C A. Advanced Materials for Control of Post-earthquake Damage in Bridges

- [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24 (2): 025035.
- [32] HOSSEINI F, GENCTURK B, LAHPOUR S, et al. An Experimental Investigation of Innovative Bridge Columns with Engineered Cementitious Composites and Cu-Al-Mn Super-elastic Alloys [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24 (8): 085029.
- [33] 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.
- [34] WANG Z, GE J, WEI H. Seismic Performance of Precast Hollow Bridge Piers with Different Construction Details [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2014, 8 (4): 399–413.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] MEHRSOROUSH A, SAHIDI M S. Cyclic Response of Precast Bridge Piers with Novel Column-base Pipe Pins and Pocket Cap Beam Connections [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21 (4): 04015080.
- [38] 王军文, 张伟光, 李建中. 预应力混凝土空心墩拟静力试验与数值分析 [J]. 桥梁建设, 2015, 45 (3): 63–69.
- WANG Jun-wen, ZHANG Wei-guang, LI Jian-zhong. Quasi-static Tests and Numerical Analysis of Prestressed Concrete Hollow Pier [J]. Bridge Construction, 2015, 45 (3): 63–69.
- [39] KIM H S, CHIN W J, CHO J R, et al. An Experimental Study on the Behavior of Shear Keys According to the Curing Time of UHPC [J]. Engineering, 2015, 7 (4): 212–218.
- [40] ZHANG Q, ALAM M S. Evaluating the Seismic Behavior of Segmental Unbonded Posttensioned Concrete Bridge Piers Using Factorial Analysis [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21 (4): 04015073.
- [41] 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.
- [42] CHOU C C, CHANG H J, HEWES J T. Two-plastic-hinge and Two Dimensional Finite Element Models for Post-tensioned Precast Concrete Segmental Bridge Columns [J]. Engineering Structures, 2013, 46 (1): 205–217.

(上接第6页)

- [15] 沙爱民, 李亚非, 秦雯. 基于数字图像处理技术的沥青混合料运动特性 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31 (6): 1–5.
- SHA Ai-min, LI Ya-fei, QIN Wen. Movement Characteristics of Asphalt Mixture Based on Digital Image Disposal Technology [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31 (6): 1–5.
- [16] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2012a 完全自学一本通 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- LIU Hao, HAN Jing. Completely Self-taught in the MATLAB R2012a [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.
- [17] 李想, 梁乃兴, 赵毅. 基于数字图像技术沥青路面集料离析的研究 [J]. 中外公路, 2014, 34 (4): 90–93.
- LI Xiang, LIANG Nai-xing, ZHAO Yi. Research on Asphalt Pavement Aggregate Segregation Based on Digital Image Technology [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34 (4): 90–93.
- [18] 潘艳珠, 吴文亮, 王端宜. 基于数字图像处理技术的沥青混合料级配离析评价方法 [J]. 中外公路, 2011, 31 (4): 221–224.
- PAN Yan-zhu, WU Wen-liang, WANG Duan-yi. Study on Evaluation Method of Asphalt Mixture Gradation Segregation Based on Digital Image Processing Technology [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2011, 31 (4): 221–224.