

文章编号: 1000 - 1301 (2009) 05 - 0128 - 05

钢筋混凝土桥墩震后修复技术研究综述

孙治国¹, 司炳君², 王东升¹, 黄照南², 于德海¹

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;

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)

摘 要: 介绍了近几年破坏性地震中钢筋混凝土桥墩的典型震害, 总结了国内外利用 FRP 材料、钢套管、狗骨式杆等新型建筑材料对发生弯曲破坏、剪切破坏、纵筋搭接破坏以及空心截面桥墩的震后修复技术。研究表明, 采用合适的修复方案, 可以对地震损坏的桥墩进行成功修复, 使其承载力和延性得到较好的恢复。文中提到的桥墩震后修复方案可为地震、火灾、爆炸以及腐蚀老化后遭受损坏的钢筋混凝土结构的修复提供参考。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; 地震; 修复; FRP 材料; 钢套管; 狗骨式杆

中图分类号: U443

文献标志码: A

Review on the repair techniques for earthquake damaged RC bridge piers

SUN Zhiguo¹, SI Bingjun², WANG Dongsheng¹, HUANG Zhaonan², YU Dehai¹

(1. Institute of Road and Bridge Engineering Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;)

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

Abstract: The typical failure patterns of the bridge piers in recent earthquakes are summarized in this paper. Then, the state-of-the-art of repair techniques for earthquake damaged bridge piers by using FRP composites, steel jackets and dog bone bars are reviewed. It is concluded that the strength and ductility of the damaged bridge piers can be restored by using proper repair schemes. The repair techniques mentioned in this paper can be used for repair of damaged RC structures due to earthquake, fire, blast or corrosion.

Key words: RC bridge piers; earthquake; repair; FRP composite; steel jacket; dog bone bar

引言

国内外近期的破坏性地震, 如 1994 年美国 Northridge 地震、1995 年日本 Kobe 地震、1999 年台湾 Chi - Chi 地震以及 2008 年汶川大地震的震害表明, 现代钢筋混凝土桥墩具有较高的地震易损性, 作为生命线工程的重要组成部分, 桥墩毁坏将使现代化的交通网络中断, 造成巨大的经济损失和人员伤亡^[1]。

对地震损坏的钢筋混凝土桥墩进行修复加固, 不仅能够节约重建资金, 更重要的意义在于迅速恢复交通网络, 保证抗震救灾工作的及时开展。唐山大地震后, 铁道部大桥工程局对京山铁路上严重破坏的桥梁迅速开展了修复工作, 对其中的滦河大桥、蓟运河大桥桥墩均采用钢筋混凝土套箍修复加固, 为迅速恢复交通大动脉发挥了重要作用^[2]。Kobe 地震发生 40 天后, 日本建设省即发布了《兵库县南部地震被害道路桥的复旧标准(案)》, 日本运输省也于 1995 年 7 月制定了《有关新设铁道构造物的耐震设计的临时措施》和《即存铁

收稿日期: 2008 - 03 - 31; 修订日期: 2008 - 06 - 30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878033; 50978042); 地震行业科技专项项目 (200808021)

作者简介: 孙治国 (1980 -), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁抗震研究. E-mail: szg_1999_1999@163.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

道构造物的耐震补强紧急措施》等, 作为震后桥梁修复、加固的临时依据^[3]。鉴于开展钢筋混凝土桥墩震后修复工作的重要意义, 国外学者针对地震破坏的墩柱结构, 分别利用 FRP 材料、钢套管 (steel jackets)、狗骨式杆 (dog bone bar) 等现代建筑材料, 进行了一系列的研究工作。而我国目前研究的重点局限于对现有钢筋混凝土墩柱抗震加固技术的研究, 专门针对震破坏的桥墩进行的修复研究工作少之又少。汶川大地震充分证实了我国现存钢筋混凝土桥墩存在较大的地震危险^[4-6], 开展钢筋混凝土桥墩震后修复技术研究, 具有重要的经济意义和实用价值。

1 强震下钢筋混凝土桥墩的典型破坏形态

近几次破坏性地震造成的钢筋混凝土桥墩的典型破坏形态介绍如下:

(1) 弯曲破坏

桥墩截面较小, 剪跨比较大时因抗弯能力不足而造成破坏。主要破坏形式为: 塑性铰区混凝土保护层压碎脱落, 纵筋屈服, 桥墩裂缝主要为水平弯曲裂缝。在严重破坏情况下, 箍筋拉断、纵筋屈曲甚至拉断、塑性铰区核心混凝土压碎脱落。

(2) 剪切破坏

对于截面较大、剪跨比较小的桥墩, 当配箍不足时, 易发生剪切破坏, 主要表现为: 桥墩形成明显剪切滑移裂缝, 箍筋拉断。剪切破坏的桥墩延性和耗能能力差, 为脆性破坏形式。

(3) 弯剪破坏

是一种介于弯曲与剪切破坏之间的破坏形式, 为桥墩塑性铰区抗剪强度不足而发生的剪切破坏。

(4) 纵筋搭接破坏

为了施工方便, 早期设计的很多桥墩的纵筋不是贯通的, 而是在底座与桥墩连接处设置搭接 (lap splices), 强烈地震作用下, 当搭接长度不足, 且箍筋间距较大而不能形成对桥墩的有效约束时, 搭接部位很容易发生黏结破坏, 影响桥墩的抗震能力。

2 钢筋混凝土桥墩震后修复技术

2.1 桥墩震后修复使用的建筑材料

2.1.1 FRP 材料

FRP 材料是由纤维材料与基体材料按一定比例混合并经过一定工艺复合形成的高性能新型材料, 以其高强、轻质、耐腐蚀等优点, 在土木工程中得到广泛应用。目前常用的 FRP 主要为碳纤维材料 (CFRP)、玻璃纤维 (GFRP) 和芳纶纤维 (AFRP)。在结构工程中, FRP 产品的主要形式为纤维布、纤维片材、缠绕型材 (FRP 套筒) 等^[7]。

在钢筋混凝土桥墩的抗震加固和修复中, 可以用 FRP 材料缠绕桥墩, 其纤维丝的方向分为两种: 桥墩圆周方向和沿桥墩轴向。沿圆周方向的 FRP 材料可起到与箍筋相似的作用, 可以对核心混凝土形成有效约束, 提高了桥墩的抗剪强度和延性; 而沿桥墩轴向的 FRP 材料主要是提高桥墩的抗弯能力。

2.1.2 套管柱

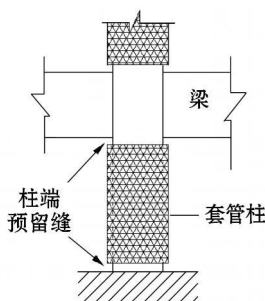


图 1 套管柱

Fig. 1 Details of tubed column

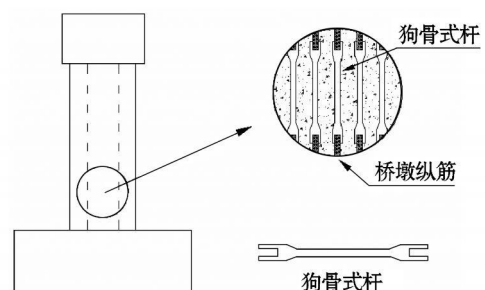


图 2 利用狗骨式杆修复拉断的纵筋示意

Fig. 2 Repair of fractured bars with dog bone bars

1985 年由 Tomii, Sakino 和 山岩 等人提出一种结构形式,即在钢筋混凝土柱中采用钢管作为横向约束,与钢管混凝土柱的不同在于,套管柱仅承受横向力。纵向在钢管与梁或柱脚之间预留缝隙,避免反复荷载下局部应力集中(图 1)。由于能够对核心混凝土提供有效约束,使用套管柱加固可以大大提高桥墩的抗剪强度、延性和轴向承载力^[8]。

2.1.3 狗骨式杆

台湾学者 Cheng 等人^[9]提出的一种新型钢筋拉杆,用于代替震后拉断或严重屈曲的纵筋(图 2),使用“狗骨式”杆的设计原则是其截面抗拉强度约为原有纵筋强度的 95%,以防止强度过高而使破坏区域转向桥墩底座或杆与纵筋的连接处。

2.2 不同破坏形态的钢筋混凝土桥墩震后修复技术

2.2.1 弯曲破坏桥墩的震后修复技术

修复的目的在于恢复桥墩的抗弯承载力和延性,对破坏较轻的桥墩,如保护层混凝土轻微脱落,纵筋仅屈服但没有屈曲的桥墩,可以通过外包 FRP 材料修复。对发生严重的破坏,纵筋已屈曲甚至拉断、核心混凝土压碎破坏的桥墩,一般可以通过外包钢套管、植筋并浇筑混凝土套箍等方案修复。

Lehman 等人^[10]对三个发生严重破坏和一个中度破坏的桥墩进行了震后修复试验研究。对于严重破坏的桥墩,当纵筋根数较少时,可以将压曲或拉断的纵筋截断,植入新的钢筋并通过机械咬合与原纵筋搭接;当纵筋较密时,因纵筋的机械咬合不便于施工,可以在破坏区域浇筑一个由锚固纵筋、箍筋和混凝土组成的套箍,使新的塑性铰在加固区域上部或在加固区域内形成;试验结果证明了修复方法的可行性。对于发生中度破坏的桥墩,仅将裂缝处灌注环氧胶,同时将塑性铰区脱落的混凝土补平,修复后桥墩的刚度比原桥墩小很多,但强度和延性性能与原桥墩相似。

对于发生严重破坏的桥墩,仅靠缠绕环向的 FRP 材料进行修复,效果很难保证。Saiidi 等人^[11]在环向和纵向均缠绕 FRP 材料,对两个发生严重破坏的桥墩进行修复。沿桥墩纵向利用 FRP 材料提供抗弯能力,沿桥墩环向缠绕 FRP 材料提供抗剪能力和延性;纵向的 FRP 包括 CFRP 和 GFRP 两层,以保证 CFRP 断裂后 GFRP 仍能承受荷载。试验结果表明,修复后的桥墩基本达到设计的抗弯能力。

对于钢套管和 CFRP 套箍修复效果的比较,Youm 等人^[12]通过对 6 个中度破坏桥墩的修复效果进行对比分析发现:无论钢套管还是 CFRP 套箍,均对桥墩延性有较大提高;钢套管修复的配箍不足的桥墩耗能和刚度均优于 CFRP 套箍;对于配箍充足的桥墩,使用钢套管和 CFRP 修复的桥墩耗能均与原桥墩相似。

台湾 Chi-Chi 地震的震害已经证实,在近断层地震动作用下,即使满足延性设计的钢筋混凝土桥墩仍有可能发生较为严重的破坏。Chang 等人^[13]利用 CFRP 材料,对两个满足延性设计需求的桥墩进行修复研究,一个为轻度损伤,一个呈严重破坏形态。试验结果发现,采用 CFRP 修复的桥墩强度和延性可得到一定的恢复,但仅靠 CFRP 材料对严重破坏桥墩进行修复是不够的。

2.2.2 剪切及弯剪破坏桥墩的震后修复技术

在近几年破坏性地震中,按照旧有规范设计的钢筋混凝土桥墩,由于配箍不足而引起的剪切破坏形态占较大比重。随着我国桥梁建设的发展,剪跨比小于 2 的短柱桥墩在城市桥梁和高速公路桥梁中日益增多,改善这类桥墩的抗震性能以及发展其震后修复技术非常重要。

Kobe 地震后,日本对许多发生严重破坏的桥墩进行了修复加固,为评价修复方案的可行性,Fukuyama 等人^[14]对 4 个发生严重剪切破坏的桥墩模型进行了修复研究工作。修复过程中,桥墩核心压碎的混凝土并未清除,而是通过高流动性的混凝土填充破坏面,并配合植筋、外包钢板等方法。试验结果表明,对于发生严重剪切破坏的桥墩,在压碎的核心混凝土不被清除、纵筋发生屈曲的情况下,仍能对其进行成功的修复;研究结论也表明,仅仅使用混凝土补平破坏面是难以保证桥墩延性的,而必须使用 FRP 或钢套管等进行有效约束。

其他学者也分别使用 FRP 纤维布^[15-16],预制 FRP 套箍^[17]以及钢套管^[18]等方法对发生剪切或弯剪破坏的桥墩进行修复,从研究结果来看,对于发生中度破坏的桥墩,由于 FRP 材料或钢套管对核心混凝土的有效约束,修复后的桥墩基本能得到比原桥墩更好的强度和延性特征。当桥墩发生严重破坏时,由于纵筋屈曲或拉断,仅靠 FRP 材料的约束作用对破坏区域进行修复是不够的,必须对破坏的纵筋进行修复,以保证修复后桥墩的强度。

Stoppenhagen 等人^[19]在框架柱破坏区域浇筑钢筋混凝土,从而形成扩大截面,对柱中发生严重剪切破坏

的框架结构进行了修复, 试验结果证实, 框架由原来柱的剪切破坏转为强柱弱梁的延性破坏形态, 修复方案非常成功。

2.2.3 纵筋搭接破坏桥墩的震后修复技术

纵筋搭接长度较短和约束箍筋不足是引起搭接破坏的直接原因, 地震作用下, 桥墩搭接部位产生相对滑移并引起混凝土出现垂直劈裂裂缝, 随着滑移量的加大, 垂直裂缝发展迅速, 混凝土保护层脱落, 引起桥墩承载力迅速下降。纵筋搭接破坏为脆性破坏形态, 对桥梁结构会造成严重破坏。

搭接破坏震后修复的核心问题是对破坏区域提供有效约束, 对此, 国外学者尝试利用不同的约束材料, 如 FRP 布^[20]、预制 FRP 套箍^[21]、钢套管^[22] 等对破坏区域进行修复。显然, 修复的效果取决于原桥墩的破坏程度以及修复技术是否能够对桥墩提供足够的约束。

从 Ghosh 等人^[20] 的试验结果看, 由于原桥墩破坏较为严重且仅采用 1 层 CFRP 布缠绕, 修复后桥墩的强度和刚度均小于原桥墩, 但桥墩延性仍能得到较好恢复。

采用预制 FRP 套箍并在套箍与桥墩之间灌注环氧树脂对柱形成主动约束, 是修复搭接破坏桥墩的一种有效方法, 修复后的桥墩强度、延性均能得到很好的恢复, 同时也大大减缓了地震荷载下桥墩的刚度退化过程^[21-22]。

Aboutaha 等人^[22] 对发生严重搭接破坏的大比例尺矩形截面柱进行了修复, 采用钢套管结合黏结锚杆或贯通的拉杆从而对柱形成有效约束, 试验结果证明, 修复后的柱强度和延性均有所提高, 而在钢套管上加贯通拉杆被证明是最有效的方式。

2.2.4 空心截面桥墩的震后修复技术

由于结构形式上的特殊性, 这里对空心截面桥墩的震后修复技术作一专门介绍。空心截面桥墩在增大桥梁刚度, 减小桥墩地震反应方面具有显著优点, 1997 年起, 台湾学者 Cheng 等人^[23, 24] 对空心截面桥墩的抗震性能进行了相对系统的研究, 研究计划共分 5 个专题, 其中一个专题就是专门研究空心截面桥墩的震后修复技术。

空心截面桥墩一般均配置内外两层纵筋, 由于施工困难, 对内层纵筋一般不进行处理。修复时, 首先将塑性铰区疏松的混凝土清除干净, 采用“狗骨式”杆代替外层拉断或严重屈曲的纵筋, 然后使用早强混凝土将破坏区域抹平, 最后使用 FRP 材料或钢套管约束桥墩, 以增加其延性变形能力和抗剪承载力。

试验结果表明, 使用“狗骨式”杆可以对拉断的纵筋进行有效修复, 且 FRP 材料和钢套管也能在一定程度上恢复了桥墩的变形能力和抗剪承载力。但由于未对内层屈曲的纵筋和桥墩塑性铰以外的混凝土裂缝进行处理, 修复后桥墩的初始刚度较差。且使用 FRP 材料修复的桥墩抗剪强度和延性恢复有限, 而使用钢套管修复的桥墩抗剪强度可恢复到原桥墩的 90% 以上。

3 结语

开展钢筋混凝土桥墩震后修复工作, 不仅要保证修复技术可靠, 还要求施工简单, 使修复后的桥墩能够快速使用, 从而为抗震救灾工作提供宝贵时间。本文中提到的修复加固技术, 由于仅限于在桥墩严重破坏的区域施工, 且多使用早强混凝土或水泥砂浆, 而 FRP 材料、钢套管以及“狗骨式”杆等材料均可以在工厂批量制作, 仅需现场安装, 一般在一周内均可达到修复目的, 具有很强的工程实用性。

以试验研究为主并借鉴桥墩抗震加固理论, 对破坏的桥墩进行修复设计是目前桥墩震后修复研究的主要特点, 由于计算中考虑混凝土和钢筋的损伤较为困难, 且修复过程中一般均对损坏的混凝土和钢筋进行修补, 从工程角度来讲, 这种设计方法是可行的, 也是易于被土木工程师接受的。

对震后损坏的钢筋混凝土桥墩进行修复, 显然不是以大量增加其强度和刚度为最优目标, 这不仅出于经济上的考虑, 更重要的是, 增大柱子的刚度, 会导致其承担的地震力增大。而在地震荷载作用下, 桥墩的耗能力和延性性能显然比其承载能力更为重要。因此, 寻求加固量与加固后桥墩的延性抗震能力之间的最优关系自然成为修复设计时必须考虑的因素。

由于结构形式上的相似性, 文中并没有对钢筋混凝土桥墩和框架柱作严格区分, 本文中提到的修复加固方法不局限于对震后损坏钢筋混凝土桥墩的修复加固, 还希望能够对爆炸、火灾或腐蚀老化后钢筋混凝土结构的修复加固起到抛砖引玉的作用。

参考文献:

- [1] 范立础. 现代化城市桥梁抗震设计若干问题[J]. 同济大学学报, 1997, 25(2): 147-154.
- [2] 刘恢先. 唐山大地震震害(第三册)[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [3] 孙利民 范立础. 阪神地震后日本桥梁抗震设计规范的修订[J]. 同济大学学报, 2001, 29(1): 60-64.
- [4] Li J Z, Peng T B, Xu Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.
- [5] 王东升, 郭 迅, 孙治国, 等. 汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(3): 84-94.
- [6] 孙治国, 王东升, 郭 迅, 等. 汶川大地震绵竹市回澜立交桥梁震害调查[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 132-138.
- [7] 叶列平, 冯 鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [8] 肖 岩. 套管钢筋混凝土柱结构的发展和展望[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 8-12.
- [9] Cheng C T, Yang J C, Yeh Y K, et al. Seismic performance of repaired hollow-bridge piers[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(5): 339-351.
- [10] Lehman D E, Gookin S E, Nacamuli A M, et al. Repair of earthquake-damaged bridge columns[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 233-242.
- [11] Saïidi M S, Cheng Z Y. Effectiveness of composites in earthquake damage repair of reinforced concrete flared columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 8(4): 306-314.
- [12] Youm K S, Lee H E, Choi S. Seismic performance of repaired RC columns[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(5): 267-276.
- [13] Chang S Y, Li Y F, Loh C H. Experimental study of seismic behaviour of as-built and carbon fiber reinforced plastics repaired reinforced concrete bridge columns[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2004, 9(4): 391-402.
- [14] Fukuyama K, Higashibata Y, Miyauchi Y. Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns[J]. Cement & Concrete Composites, 2000, 22(1): 81-88.
- [15] Haroun M A, Mosallam A S, Feng M Q, et al. Experimental investigation of seismic repair and retrofit of bridge columns by composite jackets[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 22(14): 1243-1268.
- [16] Iacobucci R D, Sheikh S A, Bayrak O. Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(6): 785-794.
- [17] Saadatmanesh H, Mohammad M R, Jin L. Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(2): 206-215.
- [18] Yoshimura K, Kikuchi K, Kuroki M. Seismic shear strengthening method for existing reinforced concrete short columns[C]. Proceedings of the ACI International Conference on Evaluation and Rehabilitation of concrete structures and Innovations in Design, SP-128. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991: 1065-1079.
- [19] Stoppenhagen D R, Jirs J O, Wylie L A. Seismic repair and strengthening of a severely damaged concrete frame[J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(2): 177-187.
- [20] Ghosh K K, Sheikh S A. Seismic upgrade with carbon fiber-reinforced polymer of columns containing lap-spliced reinforcing bars[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 227-236.
- [21] Xiao Y, Ma R. Seismic Retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997, 123(10): 1357-1364.
- [22] Aboutaha R S, Engelhardt M D, Jirsa J O, et al. Experimental investigation of seismic repair of lap splice failures in damaged concrete columns[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(2): 297-306.
- [23] Cheng C T, Mo Y L, Yeh Y K. Evaluation of as-built, retrofitted, and repaired shear-critical hollow bridge columns under earthquake-type loading[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2005, 10(5): 520-529.
- [24] Cheng C T, Yeh Y K, Mo Y L. Flexural repair of hollow rectangular bridge columns failed due to earthquake-type loading[J]. Materials and Structures, 2004, 37(10): 717-723.