

文章编号: 1007-6069(2009)03-0008-07

利用 FRP 材料的钢筋混凝土桥墩震后 修复效果影响因素分析

司炳君¹, 黄照南¹, 孙治国², 王东升²

(1 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 2 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为研究基于 FRP 材料的钢筋混凝土桥墩震后修复技术, 以 Seible 等提出的基于 FRP 材料的桥墩抗震加固设计计算公式为基础, 分析了填补材料、箍筋等因素对震后破坏桥墩修复效果的影响。提出以折减系数 k 表示箍筋震后抗剪承载力损失; 采用高流动性早强混凝土作为填补材料时, 混凝土强度应比原桥墩混凝土强度适当提高; 为使修复后的钢筋混凝土桥墩承载力和延性得到较好地恢复, 需考虑 FRP 用量及粘贴形式、桥墩纵筋、长细比、截面形式、轴压比等因素对修复效果的影响。

关键词: 钢筋混凝土桥墩; FRP 材料; 修复; 填补材料; 折减系数

中图分类号: U445.6

文献标志码: A

Analysis of the influence factors for repair of earthquake-damaged
RC bridge piers by using FRP composites

SIB Bingjun, HUANG Zhaoan, SUN Zhiguo, WANG Dongsheng

(1 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

Abstract: To research the repair techniques for earthquake-damaged RC bridge piers by using FRP composites, the influence factors for repair effects including padded materials and transverse steels of the piers are evaluated based on the pier retrofit formulation suggested by Seible. The reduction factor k shows the loss of strength in the transverse steels under earthquakes. When the high fluidity and early strength concrete is used for padded material, the concrete strength should be higher than the original strength of the piers. Also, the influence factors including amounts of FRP composites and bonding forms, longitudinal steel slenderness ratio, section shape, and axial load ratio of the bridge piers must be taken into account in order to restore the strength and ductility of the damaged bridge piers.

Key words: RC bridge piers; FRP composites; repair; padded material; reduction factor

引言

国内外近期发生的破坏性地震如 1989 年美国 Loma Prieta 地震、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^[1-4], 对相当多经过抗震设计的城市立交桥和高架桥造成了严重破坏。从震害分析来看, 大部分严重破坏和倒塌的桥梁结构, 其根源都是由于桥墩的抗震性能不足, 延性及耗能能力较差是其主要缺陷^[5-7]。

收稿日期: 2008-11-10 修订日期: 2008-12-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (50308027); 地震行业科技专项项目 (20080821)

作者简介: 司炳君 (1971-), 男, 副教授, 主要从事桥梁抗震研究。E-mail: sibingjun@yahoo.com.cn

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

作为生命线工程的重要组成部分, 桥梁震害将会带来巨大的经济损失和人员伤亡, 对震后破坏的桥墩进行快速修复对于迅速恢复交通网络、保证抗震救灾工作的及时开展以及节约震后重建资金意义重大。国内外学者针对震后破坏的桥墩结构, 分别利用 FRP 材料、钢套管等进行修复^[5-8]。其中 FRP 材料因其具有高强、轻质、安装方便、施工速度快、维护费用低、耐腐蚀等优点而受到国内外学者的广泛关注。

显然, 对震后损坏的桥墩进行修复不仅以大量增加其强度和延性为最终目标, 随着基于性能抗震设计思想的发展, 寻求加固量与桥墩抗震性能之间的最优关系成为设计者需要考虑的重要问题。而目前大多数学者利用 FRP 材料对钢筋混凝土桥墩进行抗震加固时, 以 Seble 等提出的桥墩抗震加固修复理论及粘贴厚度计算公式为基础, 再根据各自试验的不同提出一些改进。震后修复与抗震加固桥墩的显著不同之处在于初始损伤的存在, 本文根据 Seble 等提出的 FRP 加固钢筋混凝土桥墩的计算公式, 对其所包含的影响桥墩震后修复效果的因素进行了分析讨论。

1 基于 FRP 材料的桥墩抗震加固计算公式^[9]

1.1 剪切加固

圆形截面:

$$t = \frac{\frac{V_d}{\varphi_v} - (V_c + V_s + V_p)}{\frac{\pi}{2} \times 0.004 E_f \cdot D} \quad (1a)$$

矩形截面:

$$t = \frac{\frac{V_d}{\varphi_v} - (V_c + V_s + V_p)}{2 \times 0.004 E_f \cdot D} \quad (1b)$$

式中: V_d 为桥墩的设计抗剪承载力; φ_v 为抗剪系数; V_c 、 V_s 、 V_p 分别为混凝土、横向箍筋、轴向压力对抗剪强度的贡献; E_f 为 FRP 的弹性模量; D 为钢筋混凝土桥墩直径。

1.2 弯曲加固

$$t_f = 0.1 \frac{D(\varepsilon_{cu} - 0.004) f'_{cc}}{f_{fu} \cdot \varepsilon_{ju}} \quad (2)$$

式中: f'_{cc} 为约束混凝土强度; f_{fu} 和 ε_{ju} 分别为 FRP 的环向极限抗拉强度和极限应变; ε_{cu} 为约束混凝土的极限压应变。

$$\varepsilon_{cu} = \Phi_u \cdot \zeta_u \quad (3)$$

式中: Φ_u 为极限曲率; ζ_u 为中和轴深度。

上述公式主要用于对抗震能力不足的钢筋混凝土桥墩进行加固设计, 是否可以用于震后损坏桥墩的修复还有待研究。因为破坏的桥墩有混凝土压碎脱落, 纵筋屈曲, 箍筋屈服甚至断裂等初始损伤。因此, 当采用该计算公式对震后破坏的桥墩进行修复时, 应考虑两类桥墩之间的差异, 分析填补材料 (高流动性混凝土、素混凝土、非收缩性砂浆、环氧树脂胶等)、箍筋、FRP 用量及粘贴方式以及桥墩纵筋、长细比、截面形式、轴压比等因素对震后修复效果的影响, 为震后破坏的桥墩进行修复提供更加直接的理论基础。

2 主要影响因素

2.1 填补材料

对震后损坏的钢筋混凝土桥墩进行修复, 首先应将倾斜的桥墩扶正, 将塑性铰区疏松的混凝土清除干净, 然后用填补材料 (高流动性混凝土、素混凝土、非收缩性砂浆或环氧树脂胶等) 填补破坏区域, 并在外裹 FRP 的约束作用下工作。这些填补材料对修复加固效果有很大的影响, 以前采用的填补材料修复钢筋混凝土桥墩都要等 7 天以上才能通车, 这对于震后救灾是不可接受的。因此, 寻求快速凝结的填补材料是非常必要的。

Saadmanesh 等^[5]进行了采用素混凝土填补破坏桥墩的修复试验, 试验结果表明, 在 FRP 约束作用下,

混凝土桥墩的承载力能够恢复到原始柱水平, 延性提高较大。Fukuyama等^[6]进行了分别采用高流动性混凝土、素混凝土、非收缩性砂浆等材料填补破坏区域的试验, 试验结果表明采用非收缩性砂浆修复混凝土柱时, 其承载力能够恢复到原始水平, 但延性相对降低; 以高流动性混凝土、素混凝土填补破坏区时, 桥墩承载力、延性都能够达到原始柱水平。司炳君等^[8]进行了采用环氧树脂胶填补破坏区域的试验, 由于环氧树脂胶和砂、石子等浇注的套箍具有高强、高韧性的特点, 修复后的桥墩破坏区上移, 桥墩承载力和延性均得到较好恢复甚至提高, 表明环氧树脂胶的修复效果好。

填补材料除了要填补塑性铰区压碎脱落的混凝土外, 还需对桥墩塑性铰外混凝土裂缝进行处理。高流动性混凝土可以较好地填补塑性铰外混凝土裂缝, 使里面开裂的混凝土能够很好地粘结在一起, 同时新老混凝土结合处能够很好的组合成一体。当采用普通素混凝土作为填补材料时, 其流动性较差, 难以填补混凝土内的裂缝, 修复后的桥墩延性较差。非收缩性砂浆作为填补材料流动性好, 新老混凝土结合较好, 但由于砂浆内部无粗骨料, 因而抗压、抗拉强度较差。虽然以非收缩性砂浆修复的桥墩在外界 FRP约束作用下其承载力能够达到原来水平, 但一旦修复区域出现裂缝, 承载力将会迅速下降, 出现脆性破坏, 因此对于承受往复动力作用的桥墩, 不宜采用非收缩性砂浆作为填补材料。环氧树脂胶具有高流动性、高强、高韧性等特点, 作为填补材料可以填补混凝土内的裂缝, 新老结合处能够很好地结合, 当环氧树脂胶固结后, 其强度比原混凝土强度高, 修复后的桥墩延性好。

根据以上分析, 高流动性混凝土、素混凝土、环氧树脂胶等都可以很好地作为填补材料, 但由于环氧树脂胶价格较高, 一般仅适用于修复严重破坏的重要桥墩构件。实际工程中为快速修复破坏的桥墩, 且节约震后重建资金, 建议选用高流动性早强混凝土作为填补材料, 同时结合外界 FRP约束材料对破坏区进行修复, 使通往灾区的交通尽早贯通, 对于震后救灾意义非常重大。

文献[10]中提出混凝土强度随龄期增长缓慢增长, 表明在选取填补材料时需考虑混凝土强度。因此, 修复破坏的旧桥墩时, 新浇注的高流动性早强混凝土强度应比原来柱混凝土设计强度适当提高, 这样新老混凝土强度相差不大, 可以在 FRP约束作用下更好地工作; 对于近期修建的钢筋混凝土桥墩进行修复可采用原强度的高流动性早强混凝土。

2.2 配箍的影响

Seible等^[9]提出的抗剪加固 FRP层数计算公式中考虑了箍筋对抗剪强度的贡献。该公式是针对抗震能力不足的钢筋混凝土桥墩进行抗震加固而言的。由于严重破坏桥墩的箍筋都已屈服甚至断裂, 利用 FRP材料进行修复后, 箍筋能够提供的抗剪承载力和约束作用有限, 因此, 实际需要的 FRP用量肯定大于以该公式计算得到的数据。

就箍筋与 FRP复合材料之间的约束关系, 国内外学者进行了一系列研究^[11, 12], Saadam anesh等^[11]根据能量法推导出约束混凝土的应力-应变模型, 考虑了混凝土、纵向钢筋、FRP的作用, 结合 FRP约束钢筋混凝土墩柱的本构关系, 可以计算出相应的约束箍筋作用。戴庆星等^[12]进行了螺旋箍筋与 CFRP二者约束混凝土的研究, 文中提出利用叠加原理计算总的侧向承载力。

为使 Seible等^[9]提出的抗剪加固 FRP层数计算公式能较准确地应用于震后桥墩的修复, 本文建议将箍筋提供剪力 V_s 乘以折减系数 k_s 根据上述文献[12]中提出的叠加原理和文献[13, 14]中提出的相关系数, 以及修复原则——震后修复的钢筋混凝土桥墩承载力应不低于原始承载力水平, 延性性能满足设计要求, 推导出桥墩震后修复的箍筋承载力折减系数 k_s 的关系式, 折减系数 k_s 的具体推导过程见附录。

$$k_s = 0.85 \cdot k_c \cdot k_v \cdot \frac{A - \sqrt{A^2 - 16V_s B}}{8V_s} \quad (4)$$

式中: k_c 为桥墩截面形状系数, 对各截面的具体取值参照文献[13]; k_v 为 FRP套箍影响系数, 表达式参照文献[14]。

由此可知, 折减系数 k_s 大小与箍筋屈服强度、FRP极限抗拉强度和弹性模量、桥墩柱轴压比、混凝土强度、截面直径等因素有关。因此, 对于震后剪切破坏桥墩所需 FRP用量计算公式可表示为:

圆形截面:

$$f = \frac{\frac{V_0}{\phi_v} - (V_c + kV_s + V_p)}{\frac{\pi}{2} \times 0.004 E_j \cdot D} \quad (5a)$$

矩形截面:

$$f = \frac{\frac{V_0}{\phi_v} - (V_c + kV_s + V_p)}{2 \times 0.004 E_s \cdot D} \quad (5b)$$

2.3 FRP用量及粘贴方式

国内外学者对基于 FRP 材料的钢筋混凝土桥墩柱抗震加固的材料用量和粘结方式^[5, 7, 8, 15-17]进行了研究, 研究表明: 采用 FRP 加固钢筋混凝土桥墩时, 加固效果跟层数和粘贴方式有关, 层数越多加固效果越好, 但当 FRP 层数达到一定厚度时, 影响不明显; 整体式包裹方式比条带式包裹方式提供的约束效果好一些, 条带式包裹的间距和空隙的大小对柱的约束作用影响较大, 间距或空隙越大, 约束作用越弱, 当间距或空隙达到一定程度时, FRP 对核心混凝土几乎丧失约束作用。

对严重破坏的桥墩进行震后修复时, 由于破坏的桥墩修复时需使用填补材料进行填补, 且桥墩内的箍筋也已屈服甚至拉断, 对核心混凝土的约束作用明显减少, 因此在快速修复桥墩时建议采用 FRP 整体式包裹, 可有效地弥补震后箍筋损伤的缺陷, 为破坏区域核心混凝土提供足够的约束力。当采用 FRP 整体式包裹时, FRP 之间的搭接长度要符合规范要求, 避免因搭接长度不足而提前破坏; 同时, 多层整体式包裹的 FRP 搭接区需要错开, 避免因搭接区过于集中而出现应力集中, 致使该区域的 FRP 过早达到极限抗拉强度而断裂失效。

3 次要影响因素

3.1 纵向钢筋

在 FRP 修复加固钢筋混凝土墩柱的试验研究中, 对于纵筋对 FRP 加固效果的影响研究较少。由于纵向受力钢筋起到结构骨架作用, 一旦屈服或断裂, 构件将失去原有的承载能力^[18]。采用 FRP 修复纵筋严重屈曲或拉断的桥墩时, 需对纵向钢筋进行处理, 使其重新构成骨架作用。台湾 Chi-Chi 地震震害经验^[19]表明, 地震中破坏的桥墩除塑性铰区混凝土压碎脱落外, 纵向钢筋也严重屈曲, 甚至拉断。对于纵向钢筋的处理方法的研究, Cheng 等^[20, 21]提出采用“狗骨式”杆对严重屈曲或断裂的纵向钢筋进行替换, 在 FRP 约束作用下, 以“狗骨式”杆修复震后桥墩, 其承载力及延性能够达到或超过原始柱水平。

采用 FRP 复合材料快速修复钢筋混凝土墩柱时, 除了对严重屈服或断裂的钢筋进行处理外, 一般不额外增加纵向钢筋。当纵向受力钢筋在地震力作用下只是屈服而稍微压曲时, 只需尽量校直; 而对于严重屈曲或拉断的纵筋, 需要以新的钢筋替换, 具体措施可以参考 Cheng 等提出的方法。然而, 当破坏的桥墩中只有一两根纵向钢筋断裂时, 可以焊接相同型号的钢筋进行处理。

3.2 长细比

长细比是指构件的计算长度 L_0 与其截面的回转半径 i 之比, 对于矩形截面为 L_0/B 。国内外学者对试件长细比是否影响 FRP 加固钢筋混凝土桥墩抗震性能进行了大量研究, Ami 等^[22, 23]进行了 24 根 FRP 约束混凝土圆形柱的试验, 分别考虑了不同层数时 4 种不同长细比 ($2 \leq \lambda \leq 5$)。试验结果表明: 随着长细比的增大, 桥墩承载能力有所下降; 在长细比相同的条件下, 随着 FRP 用量的增加, 墩柱的承载力有所提高; 并结合试验数据提出了相应计算约束混凝土强度公式:

$$f'_{cu} = f'_{cu1} \left[0.0288 \left(\frac{L}{D} \right)^2 - 0.263 \left(\frac{L}{D} \right) + 1.418 \right] \quad (6)$$

式中: f'_{cu1} 为长细比 $\lambda = 2$ 时相同 FRP 层数的约束混凝土强度平均值。

根据 Seible 等^[11]提出的计算公式, 公式 (2) 中的 f'_{cu} 仅与 FRP 约束作用和混凝土强度有关, 其大小为 $1.5 f'_c$, 而公式 (6) 在计算约束混凝土强度时除约束作用外, 还考虑了长细比的影响。表明对于长细比较大的桥墩, 采用 FRP 修复加固时, 如果仍按照 Seible 等假定的约束混凝土的强度, 计算出的 FRP 用量将不能满足实际所需用量, 因为长细比较大的桥墩在轴向力和水平力作用下, 会发生弯曲变形 (侧向挠度), 出现大偏心受压破坏或失稳。因此, 当采用 FRP 修复该类细长桥墩柱时, 建议考虑长细比这一影响因素。

3.3 桥墩截面形式

实际工程中桥墩的截面形式种类较多,包括圆形、矩形(包含正方形)、喇叭口形等。其中圆形、矩形截面桥墩用途最广,随着城市交通的发展,大量的喇叭口形桥墩在立交桥和高架桥中被使用。关于截面形式对桥墩抗震加固性能的影响,一些学者进行了相应的研究,Ami等^[22]进行了 FRP包裹方形和圆形截面的约束试验,试验结果表明,构件的截面形状对 FRP加固混凝土柱的增强效果有很大影响,其中纤维布约束圆柱的增强效果最优,方形截面由于角部应力集中而使 FRP过早断裂,影响了加固效果。潘景龙等^[24]也进行了碳纤维环氧树脂复合材料缠绕混凝土柱的试验,发现随着横截面曲率的增大,CFRP约束效果更好。Teng等^[23]对 FRP包裹椭圆形柱的受力性能进行了研究,表明 FRP约束作用随椭圆形截面的长轴和短轴之比(也称形状比)增大而明显下降。Saïid等^[26]对喇叭口形的混凝土柱进行了加固试验,结果与潘景龙所得结果相吻合。

不同横截面对 FRP修复加固效果的影响为:矩形截面(方形) < 倒圆角矩形截面 < 椭圆形截面 < 圆形截面。因此,在实际工程中,需根据不同的横截面设计不同方案,使 FRP约束效果充分地发挥。FRP修复矩形截面时往往因角部纤维布应力集中而过早破坏,因此修复加固该类桥墩时,一般采用倒圆角的处理方法,倒角的半径应满足《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[27]规定,但由于结构内部纵向钢筋的限制,倒角半径很难达到文献^[27]的要求值。为避免角部应力集中致使 FRP过早断裂破坏,建议对矩形截面桥墩进行修复加固时把矩形截面变成椭圆形截面。

3.4 轴压比

轴压比是影响钢筋混凝土桥墩延性的重要因素之一,国内外学者就轴压比对 FRP修复钢筋混凝土墩柱中的效果进行了研究。Lacobucci^[7]进行了 4 种不同轴压比的试验,结果表明:在 FRP层数和其他参数相同的情况下,随着轴压比的增大,FRP约束效果减弱,桥墩延性系数降低,但随着 FRP量的增加,轴压比大的柱延性可以明显改善,承载力也得到了相应的提高。其他学者也对轴压比的影响^[24-28]进行了试验研究,结果与 Lacobucci 所得结果相吻合。

由上述学者所得结论可知,FRP修复加固轴压比较大的钢筋混凝土桥墩,桥墩承载力与延性的增加不同步,即当承载力达到原始柱水平时,桥墩柱的延性性能还没有达到设计要求,而在桥墩柱达到承载力设计要求时所需要的 FRP用量上,增加一两层 FRP用量后,柱的延性才可以明显改善。因此,在采用 FRP快速修复较大轴压比的钢筋混凝土墩柱时,为使修复后的桥墩柱延性性能满足要求,轴压比这一影响因素不可忽略。

4 结论

由于采用 FRP快速修复震后严重破坏桥墩的理论尚不完善,许多学者对严重破坏的桥墩进行修复时,利用结构的相似性和 FRP约束机理,引用 Seible 等提出的 FRP抗剪、抗弯加固公式计算 FRP的用量。但是,Seible 等提出的公式是针对抗震性能不足的桥墩进行加固而提出的,为使该类公式能够应用到震后破坏桥墩柱。本文根据两类桥墩结构的差异,对严重破坏的桥墩在应用该计算公式中所包涵的影响因素进行了分析,并就箍筋约束作用的消减对 Seible 等提出的抗剪加固公式进行了修改。主要结论如下:

(1) 由于高流动性早强混凝土具有高流动性、易和性、早强性,对塑性较外的混凝土裂缝可以较好地修复。当修复龄期较长的桥墩时,选取的高流动性混凝土强度应比原混凝土设计强度适度提高,以便新老混凝土强度相差不大。

(2) 严重破坏的桥墩中塑性较区的箍筋大都屈服甚至断裂,箍筋对混凝土的约束作用将明显降低,因此在计算箍筋剪力时需考虑箍筋应力损失,提出以折减系数 k 来表示箍筋应力损失大小,折减系数 k 大小与箍筋屈服强度、FRP极限抗拉强度和弹性模量、桥墩轴压比、混凝土强度、截面直径等因素有关。

(3) 采用 FRP修复钢筋混凝土桥墩时,建议采用整体式包裹方式,多层搭接区应该错开,避免应力集中而使 FRP过早断裂;同时纵向钢筋、长细比、截面形式、轴压比等次要因素的影响不可忽略。

附录

原桥墩箍筋的侧压力 P = 修复后桥墩的箍筋侧压力 P_1 + FRP的侧压力 P_2

$$P = kP_1 + P_2 \quad (f1)$$

箍筋对核心混凝土最大的侧压力 P

$$P = \frac{f_h A_s}{2d_{he}} \quad (f2)$$

式中: A_s 为螺旋箍筋桥墩的间接钢筋换算截面面积

$$A_s = \frac{\pi d_{he} a_k}{S_k} \quad (f3)$$

将式 (f3) 代入式 (f2) 可得

$$P = \frac{f_h a_k}{2d_{he} S_k} \quad (f4)$$

由于修复后桥墩箍筋对核心混凝土最大的侧压力只有原桥墩的 k 倍, 所以

$$P = kP = k \frac{f_h a_k}{2d_{he} S_k} \quad (f5)$$

箍筋对核心混凝土最大的侧压力 P_2

$$P_2 = \frac{2k_n f f_i}{D} \quad (f6)$$

式中: k_n 为 FRP 片材厚度折减系数

$$k_n = 1 - \frac{E_f t}{420000} \quad (f7)$$

假定:

$$\alpha = \frac{f_h \cdot d_{he} \cdot S_k}{D \cdot a_k \cdot f_h} \quad (f8(a))$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} \times 0.0004 E_f \cdot D \quad (f8(b))$$

$$V = \frac{V_0}{\phi_v} - V_c - V_p \quad (f8(c))$$

$$\gamma = 840\pi \cdot D \quad (f8(d))$$

将式 (f7(a)), (f4), (f5), (f6), (f7), (f8(b)), (f8(c)) 代入式 (f1) 可得

$$\frac{f_h a_k}{2d_{he} S_k} = k \frac{f_h a_k}{2d_{he} S_k} + \frac{2 \left[1 - \frac{E_f (V - V_s)}{420000 \cdot \beta} \right] \cdot \frac{V - V_s}{\beta} \cdot f_i}{D} \quad (f9)$$

将式 (f8(a)), (f8(d)) 代入式 (f9) 化简可得

$$4V_s^2 k + (4\gamma V_s - 8VV_s - \frac{\gamma\beta}{\alpha}) k + 4V - 4\gamma V + \frac{\gamma\beta}{\alpha} = 0 \quad (f10)$$

再假定:

$$A = 8V \cdot V_s - 4\gamma V_s + \gamma \cdot \frac{\beta}{\alpha} \quad (f11(a))$$

$$B = 4V - 4\gamma V + \gamma \cdot \frac{\beta}{\alpha} \quad (f11(b))$$

解方程 (f10) 可得

$$k = \frac{A - \sqrt{A^2 - 16V_s^2 B}}{8V_s} \quad (\text{正根舍去}) \quad (f12)$$

上述式中: f_h 为螺旋箍筋的抗拉强度; a_k 为螺旋箍筋的单根截面面积; d_{he} 为截面核心混凝土的直径; S_k 为螺旋箍筋间距。

为了使公式具有通用性, 应该考虑箍筋的具体形式和 FRP 套管的影响。因此, 折减系数 k 表达式为式 (4)。

参考文献:

- [1] Mitchell D Bruneau M Williams M et al Performance of bridges in the 1994 Northridge earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering 1995 22(2): 415—427.
- [2] Kawashima K Seismic Performance of RC bridge piers in Japan: an evaluation after the 1995 Hyogo-ken nanbu earthquake [J]. Progress in Structural Engineering and Materials 2000 2(1): 82—91.
- [3] Yao T H Chung C F Seismic effect on highway bridges in Chi-Chi earthquake [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE 2004 18(1): 47—53.
- [4] 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.
- [5] Saadmanesh H Ehsani M R Jin L Repair of earthquake-damaged RC columns with FRP wraps [J]. ACI Structural Journal 1997 94(2): 206—214.
- [6] Fukuyama K Hashibara Y Miyauchi Y Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns [J]. Cement & Concrete Composites 2000 22(1): 81—88.
- [7] Lacobucci 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.
- [8] Si B J Sun Z G Ai Q H et al Rapid repair of severely earthquake damaged bridge piers [J]. The 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures Greece 2007 16—18.
- [9] Seible F Priestley M J N Hegemier G A et al Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets [J]. Journal of Composites for Construction ASCE 1997 1(2): 52—62.
- [10] 普瑞斯特雷 M J N 塞勃勒 F 卡尔维 G M 桥梁抗震设计与加固 [M]. 袁万城, 胡勃, 崔飞, 等译. 北京: 人民交通出版社, 1999: 181—182.
- [11] Saadmanesh H Ehsani M R Li M W Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite wraps [J]. ACI Structural Journal 1994 91(4): 434—447.
- [12] 戴庆星, 张征文. CFRP加固钢筋混凝土螺旋箍筋柱极限承载力分析 [J]. 公路交通科技, 2003 20(4): 57—58.
- [13] 滕锦光, 陈建飞, 史密斯 S T 等. FRP加固混凝土结构 [M]. 李荣, 滕锦光, 顾磊译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] Pantelides C P Yan Z H Confinement model of concrete with externally bonded FRP jackets or posttensioned FRP shells [J]. Journal of Structural Engineering ASCE 2007 133(9): 1288—1296.
- [15] 顾冬生, 吴刚, 吴智深, 等. FRP加固钢筋混凝土圆柱破坏模式及纤维应变特性研究 [J]. 世界地震工程, 2008 24(2): 60—67.
- [16] 王苏岩, 韩双. 纤维增强复合材料 (FRP) 加固混凝土柱性能研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2004 24(1): 97—104.
- [17] Hosseini A Khabozi A R Faqeeh S Seismic performance of high-strength concrete square columns confined with carbon fiber reinforced polymers [J]. Canadian Journal of Civil Engineering 2005 32: 569—578.
- [18] Youn K S Lee H E Choi S Seismic performance of repaired RC columns [J]. Magazine of Concrete Research 2006 58(5): 267—276.
- [19] Chang S Y Li Y F Loh C H Experimental study of seismic behaviors of as-built and carbon fiber reinforced plastics repaired reinforced concrete bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering ASCE 2004 9(4): 391—402.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Amir M Mohsen S Michel S et al Effect of column parameters on FRP-confined concrete [J]. Journal of Composites for Construction ASCE 1998 2(4): 175—185.
- [23] Amir M Mohsen S Thomas B Slenderness limit for hybrid FRP-concrete columns [J]. Journal of Composites for Construction ASCE 2001 5(1): 26—34.
- [24] 潘景龙, 王雨光, 来文汇. 混凝土柱截面形状对纤维包裹加固效果的影响 [J]. 工业建筑, 2001 31(6): 17—19.
- [25] Teng J G Lam L Compressive behavior of carbon fiber reinforced polymer-confined concrete in elliptical columns [J]. Journal of Structural Engineering ASCE 2002 128(12): 1535—1543.
- [26] Saidi M Sanders D H Gorjanovic F et al Seismic retrofit of non-prismatic RC bridge columns with fibrous composite [J]. Proc of 12WCEE Paper No 0143 Auckland New Zealand Jan, 2000.
- [27] CECS 146 2003 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [28] 高献陶, 忠, 杨有福, 等. 大轴压比下 FRP约束混凝土柱滞回性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2005 35(9): 11—14.