

混凝土桥梁结构混凝土强度等级不足的 FRP 补强研究

崔学常¹ 张锡祥²

(1. 云南省保山市重点公路建设管理处, 云南 保山 678000; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 介绍了混凝土桥梁结构因混凝土强度等级不足采用 FRP 补强间接提高其强度等级的结构原理、结构效果和工程应用研究成果, 并指出 FRP 补强是使混凝土强度等级不足的缺陷结构变为合格结构的简单有效方法。

关键词: 混凝土桥梁; 强度等级; 纤维增强复合材料; 结构补强; 承载能力; 抗变形能力

中图分类号: U443

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2013) sup. 1-0792-07

FRP Reinforcement for Concrete Bridge Structure of Deficient Concrete Strength Class

Cui Xuechang¹, Zhang Xixiang²

(1. Yunnan Baoshan Management Department for Major Highway Construction, Baoshan 678000, Yunnan, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The structural principle, structural effects and engineering application results of fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete bridge when the concrete strength classification was deficient were introduced. It was also pointed out that FRP reinforcement method was a simple and effective way to make such a defective structure into an acceptable one.

Key words: concrete bridge; strength classification; fiber reinforced polymer (FRP); structure reinforcement; bearing capacity; deformation resistance

0 引言

混凝土桥梁结构的混凝土强度等级是反映其结构材料承载能力和抗变形能力的重要力学性能指标。因材料缺陷或施工失误造成的混凝土结构强度等级不足是桥梁结构的常见病害。提高缺陷混凝土结构强度等级使其成为合格结构而继续安全使用是桥梁病害处治对桥梁工程师提出的新的技术要求。

直接提高缺陷结构的混凝土强度等级, 目前理论分析基本可行的方法是聚合物浸渍混凝土 (Polymer-Impregnated Concrete, PIC) 方法^[1]。该法通过涂刷或压注聚合物树脂浸渍缺陷结构混凝土, 使聚合物树脂填充缺陷结构混凝土内一定深度的微孔隙并与其反应生成新的聚合物混凝土, 使缺陷结构的混凝土强度等级借助新混凝土更致密的结构材料组成和更优的材料力学性能得到直接恢复和提高。

间接提高缺陷结构的混凝土强度等级, 目前理论、试验研究技术可行和工程应用较成功的方法是纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 补强方法^[2]。该法通过在缺陷结构混凝土表面增加

FRP 薄壳外层与缺陷结构共同构成新的 FRP-混凝土复合结构, 使缺陷结构的混凝土强度等级借助 FRP 外层优异力学性能对新结构承载能力和抗变形能力的提高贡献得到间接恢复和提高。

直接法概念清晰, 原理科学, 但聚合物树脂浸渍混凝土结构的深度有限, 且技术实施难度较大, 尤其是大型桥梁结构、构件的聚合物浸渍混凝土较难实现, 故工程上几乎没有应用; 间接法不仅概念清晰、原理科学, 而且 FRP 外层结构效果一目了然, 技术实施简单易行。并且, FRP 外层对原结构、构件的截面尺寸和结构自重增加微乎其微以致可忽略不计; 对缺陷结构、构件混凝土强度等级不足的差额, 可通过灵活选择 FRP 外层的材料种类、构造形式及补强数量方便地补足或适当提高, 故工程应用较方便也易获得成功。

笔者对混凝土强度等级不足的桥梁结构、构件进行了 FRP 补强, 介绍了直接提高其承载力和间接提高其强度等级的理论、试验研究初步成果和工程应用效果。并通过 FRP 补强的结构原理与结构效果分析, 指出 FRP 补强间接提高混凝土强度等级的方法是使混凝土强度等级不足的缺陷结构变为合格

结构的最为简单有效办法,可供业界类似桥梁结构病害处治参考。

1 结构原理介绍

1.1 原理

混凝土桥梁结构的混凝土强度等级,就是该结构边长为 150 mm 的立方体试件的抗压强度标准值,可由按标准方法制作并养护 28 d 龄期的标准试件按照标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 MPa 计)确定^[3-4]。

混凝土桥梁结构因混凝土强度等级不足采用 FRP 补强间接提高其强度等级的结构原理,就是该结构的立方体受压试件环向表面连续包裹围束的碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)薄壳外层对试件构成的环向围束抗压力学效

果。因碳纤维(CF)材料的拉伸强度比结构钢约高 10 倍,弹性模量二者相当,断裂伸长率比结构钢约低 10 倍,故 CFRP 薄壳外层对试件的围束作用约束了试件混凝土的横向膨胀变形,提高了试件的极限压应变,使试件混凝土不易压碎,从而可在直接提高试件抗压强度的前提下间接提高缺陷结构的混凝土强度等级。

1.2 试验验证

1.2.1 试件设计与制作

设计 4 组(每组 3 件)边长为 150 mm 的 C25 立方体受压试件,进行有/无 FRP 环向围束及不同 FRP 围束方式的对比压缩试验。3 组检验 FRP 补强效果的试件 FRP 条带环向围束面积 A_f 占试件环向表面积 A_c 的百分比 K_A 为 33.3%、50.0%、75.0%。各组试件环向表面的 CFRP 围束条带的形式和数量如图 1。

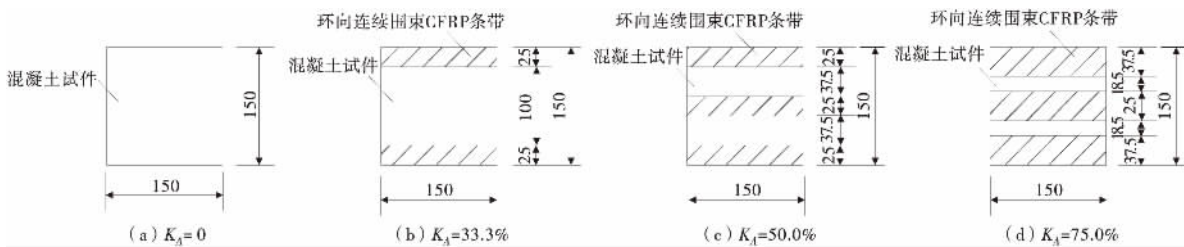


图 1 混凝土立方体受压试件的 FRP 围束形式设计

Fig. 1 The shape of concrete cube sample confined by circumferential FRP for compression test

4 组试件按照标准方法进行制作并放在养护间内养护 28 d。用于检验 FRP 补强效果的 3 组试件,养护 21 d 后在养护间内对其分组按图 1 形式进行环向连续围束 CFRP 条带的成型制作,制作完成后与对比组试件一道继续养护至 28 d 取出进行压缩试验。

1.2.2 试验结果分析

4 组试件在万能试验机上按 5 mm/min 的加载速率进行连续加载和自动记录的压缩试验。试验结果如表 1。根据试验结果推定的试件混凝土强度等级与 CFRP 补强形式的关系如图 2 和图 3。

表 1 标准压缩试件环向连续围束 CFRP 条带补强的压缩试验结果

Table 1 Compression test results of standard sample reinforced by continuously circumferential CFRP band confining

试件组别	试件 CFRP 围束 面积比 K_A /%	试件抗压强度				试件混凝土 强度等级	CFRP 补强提高的混 凝土强度等级比例 /%
		均值 μ_f /MPa	标准差 σ_f /MPa	变异系数 δ_f /%	标准值 $f_{cu,k}$ /MPa		
1	0	29.0	1.13	3.90	27.1	C27	0
2	33.3	31.5	1.95	6.19	28.3	C28	3.7
3	50.0	41.1	4.10	9.98	34.4	C34	25.9
4	75.0	43.1	1.84	4.27	40.1	C40	48.1

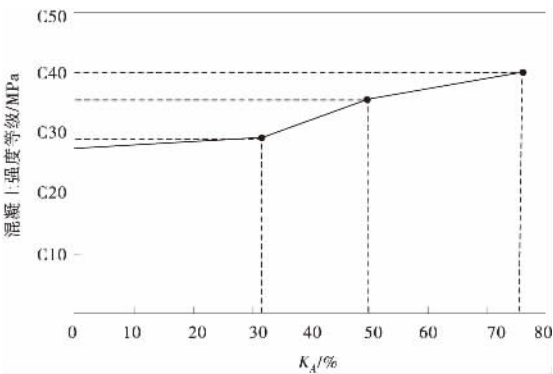


图 2 试件混凝土强度等级与 CFRP 围束面积比关系曲线
Fig. 2 The relationship between concrete strength class and CFRP confined area proportion for compression test sample

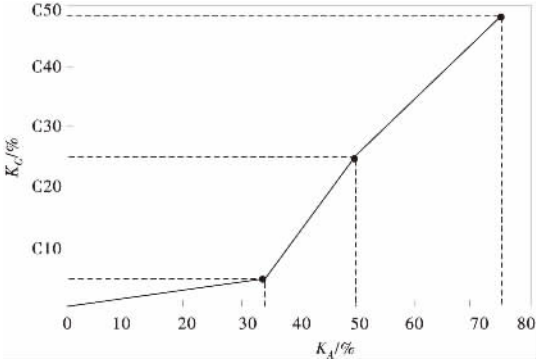


图 3 试件混凝土强度等级提高比例与 CFRP 围束面积比关系曲线
Fig. 3 The relationship between concrete strength class rising proportion and CFRP confined area proportion for compression test sample

分析表1及图2、图3试件混凝土强度等级与CFRP围束面积关系曲线,可得如下结论:

1) 试件表面环向连续围束CFRP条带对试件抗压补强,可提高试件的混凝土强度等级,并且试件的混凝土强度等级随着试件的CFRP围束面积增大而增大;试件的CFRP围束面积比 K_A ,可作为FRP补强的设计控制参数。

2) 试件的CFRP围束面积分别为试件环向表面积的1/3、1/2和2/3时,试件的混凝土强度等级分别提高约1/25、1/4、1/2; $K_A=1/2$ 的混凝土强度等级提高比例较适中(提高1级以上)且较经济,可作为实际工程应用确定CFRP围束面积的设计参考指标。

1.3 结论应用

根据混凝土立方体受压试件FRP围束抗压补强的结构原理分析和试验验证,可得到FRP补强能直接提高其抗压强度和间接提高其混凝土强度等级的结论。

对实际工程的混凝土桥梁结构,因其受力模式一般为拉、压、弯、剪、扭多种组合的复杂受力模式,故混凝土桥梁结构的混凝土强度等级不足的FRP补强,不能简单地照搬立方体受压试件FRP围束抗压补强的FRP构造方式,而须根据缺陷结构的结构

形式、受力模式及混凝土强度等级不足的差额综合分析,设计对缺陷结构受力帮助最大和混凝土强度等级提高比例适中的FRP外层构造形式,使其与原混凝土结构复合构成FRP-混凝土复合结构,通过使新结构达到设计混凝土强度等级标准的合格结构的承载能力和抗变形能力且延性和耐久性也相应提高的方式,使缺陷结构的混凝土强度等级间接提高而继续安全使用。

2 结构效果

因混凝土桥梁结构用作弯曲(含剪切)和压缩(含轴压和偏压)受力构件最能发挥混凝土抗压强度高的材料性能优势,故笔者重点对承受弯曲和压缩的混凝土桥梁结构的混凝土强度等级不足采用FRP补强间接提高其强度等级的FRP结构形式、补强后的结构效果进行了专门研究,得到一些可指导工程应用的初步研究结论。

2.1 受弯构件FRP补强的结构效果

2.1.1 FRP补强的结构形式与结构原理

以钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)简支梁为例,当梁的混凝土强度等级不足时,采用在RC梁的底面受拉区增加FRP薄板或在梁的截面四周增加FRP薄壳与RC梁构成FRP-RC复合梁(图4)。

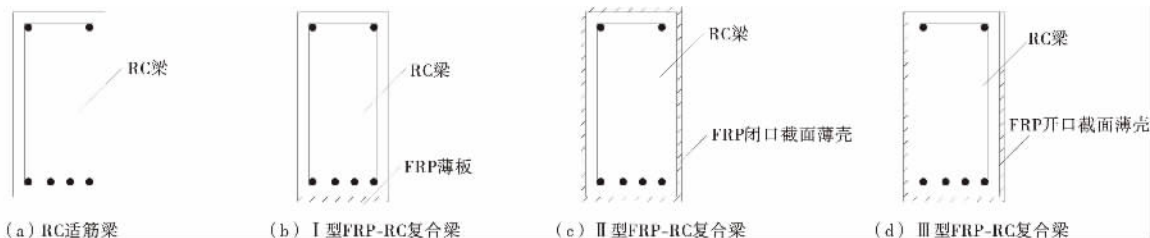


图4 受弯构件混凝土强度等级不足的FRP补强结构形式

Fig. 4 The shape of FRP reinforcement structure for bended concrete element of deficient concrete strength class

I型FRP-RC复合梁通过受拉区外缘的FRP薄板增大拉区的受拉承载力和压区的混凝土受压高度使梁的抗力弯矩增大;II型FRP-RC复合梁通过拉区FRP薄壳提供的受拉承载力增量和压区混凝土围束抗压增加的受压承载力增量合成使抗力弯矩增大;III型FRP-RC复合梁通过拉区FRP薄壳提供的受拉承载力增量及压区混凝土受压高度增大提供的受压承载力增量合成使抗力弯矩增大;II型复合梁和III型复合梁FRP薄壳的“外置箍筋”作用还可增大梁的抗剪承载力,从而达到混凝土强度等级提高后的合格梁的承载能力。此外,I、II、III型复合梁还能提高RC梁的抗变形能力、抗裂能力和增大其延性,并对梁的裂缝提供防止水气进入腐蚀钢筋的防锈保护和防止混凝土碳化的封闭保护,使梁的安全性和耐久性都得到提高,从而达到混凝土强度等级补足后的合格梁的结构标准。

2.1.2 FRP补强的结构效果

受弯构件混凝土强度等级不足,根据其受力模式和强度等级不足的差额,采用图1中的3种FRP补强结构形式,可获得如下结构效果^[2]:

1) 以梁中钢筋达到屈服极限作为比较标准,I型GFRP-RC复合梁和CFRP-RC复合梁比普通RC适筋梁的受弯极限承载能力分别提高20%和40%左右,II型GFRP-RC复合梁的受弯极限承载力可提高50%以上,III型CFRP-RC复合梁的受剪承载力可提高20%左右。

2) 以梁的最大裂缝宽度作为比较标准,I型GFRP-RC复合梁达到普通RC适筋梁《桥规》^[4]规定的最大裂缝宽度对应的荷载时,裂缝宽度减小30%~40%;以《桥规》^[4]规定的裂缝开展宽度来确定梁的受弯承载力,I型GFRP-RC复合梁比RC梁的承载力可提高15%~30%。

3) 以梁的正常工作极限状态的挠度控制作为比较标准,在 RC 适筋梁破坏前,I 型 GFRP-RC 梁比 RC 梁的挠度减小不多,I 型 CFRP-RC 梁比 RC 梁的挠度可减小 60% 左右;II 型 GFRP-RC 梁的挠度比 RC 梁减小 30% 左右,并且破坏前具有比 RC 梁更大的挠度,即增大了梁的延性。

4) 以梁的动态疲劳性能作为比较标准,I 型 GFRP-RC 梁随着疲劳次数的增加,对梁承载能力、抗变形能力和延性增大的作用越明显,疲劳循环 50 万次后,I 型 GFRP-RC 梁的钢筋最大应变约为 RC 梁的 85%,跨中挠度为 60%,开裂高度减小约 70%,疲劳循环 200 万次的疲劳寿命是 RC 梁的 3 倍。

2.2 受压构件 FRP 补强的结构效果

2.2.1 FRP 补强的结构形式与结构原理

以 RC 适筋柱为例,当柱的混凝土强度等级不足时,采用沿柱径向表面连续围束 CFRP 条带(轴心受压柱)和同时增加柱受拉面 FRP 薄板(偏心受压柱)与 RC 柱复合构成 FRP-RC 复合柱(图 5、图 6)。

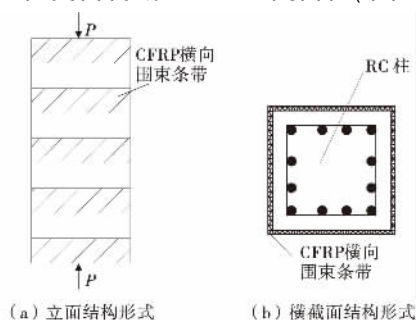


图 5 轴心受压 FRP-RC 复合柱结构形式

Fig. 5 The shape of FRP-RC composite column compressed axially

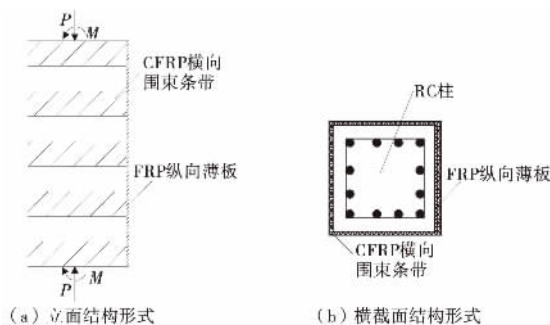


图 6 偏心受压 FRP-RC 复合柱结构形式

Fig. 6 The shape of FRP-RC composite column compressed eccentrically

轴心受压 FRP-RC 复合柱通过 CFRP 横向围束条带对 RC 柱受压横向膨胀变形构成的环向约束,可使混凝土的极限压应变提高,从而推迟受压区混凝土的压碎;偏心受压 FRP-RC 复合柱在此基础上,还借助受拉一侧柱面上的 FRP 纵向薄板提供的受拉承载力增量及受压一侧混凝土受压面积增大共同构成的抗力弯矩增大效果,达到混凝土强度等级提高后才具备的更高的受压承载力。此外,轴心受压

和偏心受压 FRP-RC 复合柱的 CFRP 横向围束条带和纵向薄板的补强作用,可使柱中纵向受力钢筋的塑性变形性能充分发挥。CFRP 横向约束条带在配合箍筋对 RC 柱混凝土构成双重约束作用时,既使混凝土在压应力达到峰值后还表现出较好的变形性能,还使箍筋的应变发展缓慢和量值降低,最终使柱的延性得到显著改善,达到甚至超过原设计强度等级的合格柱的延性。并且,CFRP 横向围束条带对 RC 柱的连续围束作用及其对 RC 柱最外层混凝土的最直接围束作用,使其比箍筋对混凝土的围束和套箍的作用更大和更直接。

2.2.2 FRP 补强的结构效果

受压构件的混凝土强度等级不足,根据其受力模式和强度等级不足的差额,采用图 5 和图 6 中的 FRP 补强结构形式,可获得如下结构效果^[2]:

1) 以柱中钢筋屈服和混凝土压碎破坏作为设计控制条件,轴心受压柱的破坏模式,仍是压区混凝土达到极限压应变而使构件压坏;偏心受压柱的破坏模式,则是柱中弯矩最大截面的 FRP 纵向薄板和(或) CFRP 横向围束条带达到其极限抗拉强度而使构件破坏,但轴心受压和偏心受压 CFRP-RC 复合柱破坏时的极限受压承载力都比 RC 柱提高 20% 以上,并使 RC 柱的变形性能显著改善,对于高强混凝土 RC 柱,FRP 补强可使混凝土的极限压应变提高两倍左右^[5]。

2) 以柱中裂缝作为比较对象,轴心受压和偏心受压 FRP-RC 复合柱的裂缝,比 RC 柱裂缝出现较晚,发展较慢,裂缝宽度较小,形成主裂缝的数量也较少,并且复合柱的裂缝分布范围由 RC 柱的约 2 倍柱宽长度范围扩大到约 4 倍柱宽长度范围,使柱受应力集中影响的破坏程度降低和破坏过程增长,最大可获得延性增大 1 倍以上的结构效果^[5]。

3) 偏心受压 FRP-RC 复合柱的 CFRP 横向约束条带,对 RC 柱箍筋以外混凝土的直接约束作用,能比箍筋更有效地防止柱中纵向钢筋切断截面周围的剪切破坏,提高柱的剪切延性 1 倍左右,使柱抵抗剪切破坏的能力得到较大提高。

3 工程应用

3.1 FRP 抗压补强工程应用

3.1.1 工程概况及结构缺陷

三跨连续梁公路桥的中间桥墩,为 3 个矩形截面的混凝土独柱式桥墩。中墩混凝土浇筑施工时,标高为 284.00 ~ 286.83 m 的墩顶段混凝土因突然停电改用人工插捣浇筑,使其 28 d 龄期的检测混凝土强度等级降低到 C27,比设计混凝土强度等级 C30 低 11.1%,判定该墩为混凝土质量不合格的缺陷结构。经多次技术讨论和专家评审,采用了笔者提交

的中墩缺陷段 FRP 抗压补强间接提高其混凝土强度等级的设计方案。

3.1.2 结构措施与工程效果

中墩缺陷段因活载弯矩产生的偏心影响较小,故按轴心受压构件对中墩缺陷段进行 CFRP 环向约束抗压补强,见图 7。

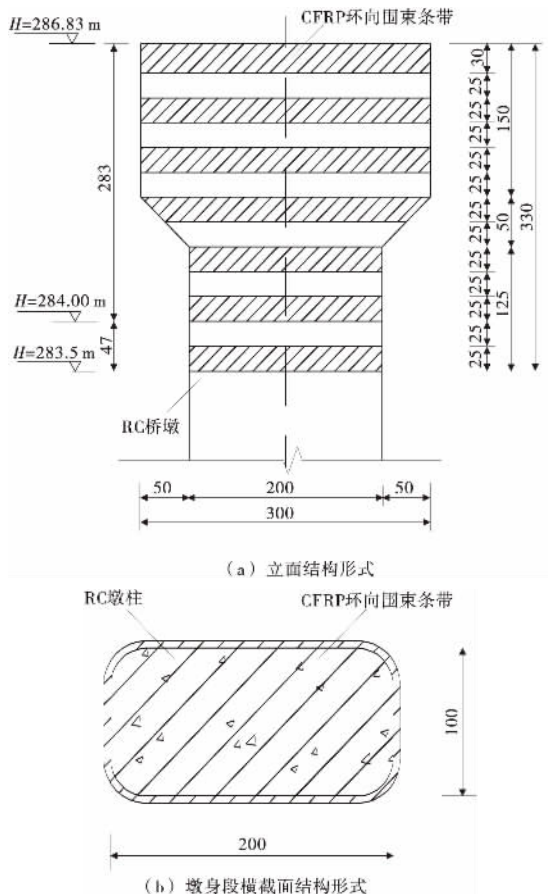


图7 桥墩墩顶混凝土强度等级不足的 FRP 抗压补强结构形式(单位: cm)
Fig.7 The shape of bridge pier top reinforced by FRP for compressing resistance when the top is of deficiency in its concrete strength class

CFRP 条带由墩帽顶向超出缺陷段一定长度的墩身内间隔布置,每个条带由 1 层厚度为 0.167 mm、密度为 300 g/m^2 的 I 级 CF 布浸渍桥梁结构胶密实黏贴包裹于桥墩缺陷段混凝土表面,使 CF 布固化后向内收缩而紧箍桥墩缺陷段并与其复合构成 CFRP-RC 复合墩柱。经质检站同步试验检测,中墩缺陷段 CFRP 围束抗压结构措施使混凝土强度等级由 C27 提高到 C34,强度等级提高 25.9%,超出设计强度等级 13.

3%。表明 FRP 补强不仅使中墩混凝土强度等级得到补足变为合格结构,而且还因其局部承载能力、抗变形能力和延性、耐久性都有提高,故判定结构缺陷段经 FRP 补强处治后的结构安全性和耐久性不会低于桥墩未处治段,能保证该墩在桥梁设计基准期内正常工作。桥梁经常性检查也证明,该墩自 2006 年处治至今,未发现任何结构缺陷。

3.2 FRP 抗弯补强工程应用

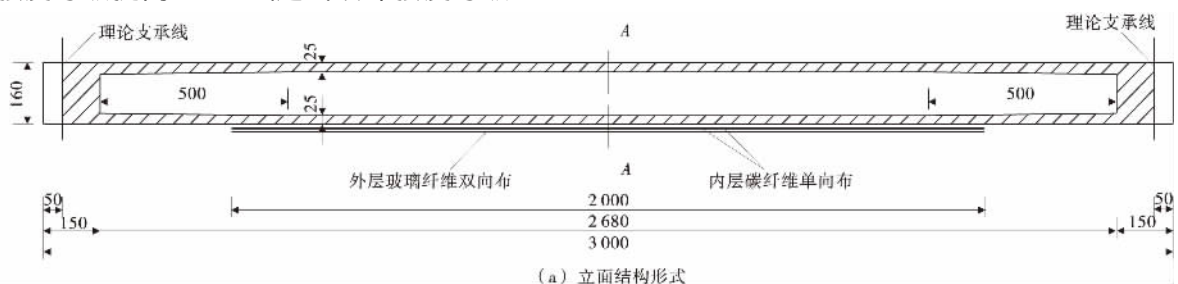
3.2.1 工程概况及结构缺陷

两跨 30 m 混凝土简支梁公路桥的桥道梁,为单箱三室预应力混凝土箱梁结构,箱梁混凝土因分两次浇筑施工而使其底板局部混凝土强度偏低,底板跨中段 28 d 龄期的检测混凝土强度为 42.6 MPa,比设计混凝土强度等级 C50 约低 15%。桥梁成桥模式结构检算和荷载试验虽都证明箱梁结构承载能力极限状态和正常使用极限状态都能满足规范要求,但因其降低了设计的安全储备而判定为不合格结构。设计方要求提高箱梁底板的混凝土强度等级,达到设计强度等级的抗弯承载力受力标准。

3.2.2 结构措施及工程效果

箱梁底板跨中段混凝土强度等级不足的 FRP 抗弯补强,在底板跨中 20 m 长度范围对应腹板和侧板位置粘贴 2 层厚度为 0.167 mm、密度为 300 g/m^2 的 CF 单向布进行抗弯、抗裂补强,再在其外面粘贴 1 层与底板同宽、厚度为 0.2 mm、密度为 210 g/m^2 的 GF 双向布进行延性和耐久性提高补强,构成与图 4(b) 类似的 I 型 FRP-RC 复合梁(图 8)。其中,CFRP 薄板的纤维方向与梁轴线方向一致,CFRP 薄板的经、纬向与梁的轴向、横向一致。

通过对箱梁设计模式、成桥模式和补强模式的抗弯承载力结构检算,在不计 GFRP 薄板抗弯承载力贡献的前提下,CFRP-RC 复合梁跨中截面的承载能力极限状态抗弯承载力,比 RC 梁成桥模式和设计模式分别提高约 26% 和 21%,达到并超出了箱梁设计混凝土强度等级标准的抗弯承载力标准,桥梁加固施工完成后的荷载试验检验,箱梁底板跨中截面的拉应力比成桥模式降低约 15%。表明该桥桥道梁通过 FRP 补强提高原梁抗弯承载力而间接提高其混凝土强度等级的设计目的达到。



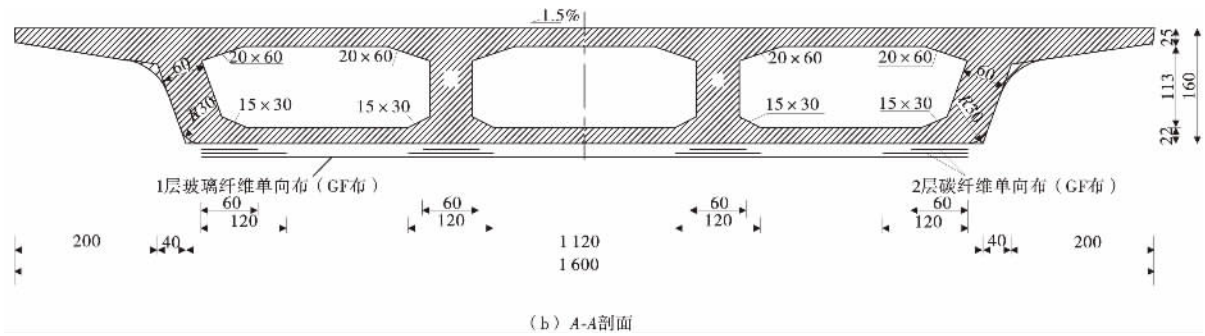


图 8 预应力混凝土简支箱梁底板混凝土强度等级不足的 FRP 抗弯补强结构形式

Fig. 8 The shape of bending-resistant FRP reinforcement structure for PC box beam floor of deficient concrete strength class

3.3 FRP 抗剪补强工程应用

3.3.1 工程概况及结构缺陷

水电站大坝坝顶人行桥,为每跨 15 m 的 11 跨连续刚构桥,桥道梁为次梁及桥面板整体现浇结构形式。第 8 跨次梁因施工混凝土配合比错误使其混凝土强度等级由设计的 C25 降为实测的 C20,结构检算不计梁中弯起钢筋作用(设计将此作为安全储备)时,主次梁成桥模式的承载能力极限状态抗剪承载力分别比设计模式降低 13.4% 和 2.2%,判定该跨为缺陷结构,要求对该跨次梁进行抗剪补强,使其达到设计混凝土强度等级对应的抗剪承载力标准。

3.3.2 结构措施与工程效果

对主次梁梁端约 1 倍梁高长度范围采用内层厚度为 0.167 mm 的 CF 单向布和外层厚度为 0.6 mm 的 GF 双向布浸渍桥梁结构胶构成宽度和净间距都

为 10 cm 的 FRPU 型条带,作为“外置箍筋”对主次梁进行抗剪补强,并与原主次梁复合构成图 2 形式的Ⅲ型 FRP-RC 复合梁(图 9),设计采用的外层 GFRP U 型条带,除提高梁的抗剪承载力外,还具有提高梁的剪切延性和结构耐久性作用。经对主次梁设计模式、成桥模式和加固模式的结构检算,加固模式的主、次梁承载能力极限状态的抗剪承载力,比成桥模式提高 20.8% 和 17.8%,比设计模式提高 4.6% 和 15.3%,表明该桥第 8 跨次梁采用 FRP 抗剪补强并构成Ⅲ型 FRP-RC 复合梁共同承载,不仅使其达到并超过了设计混凝土强度等级标准的抗剪承载力,而且还使其抗剪延性和结构耐久性都有较大提高。该桥第 8 跨次梁自 2002 年补强使用至今,桥梁经常性检查未发现任何结构缺陷,表明 FRP 补强提高混凝土强度等级不足的桥道梁的抗剪承载力有效且简单。

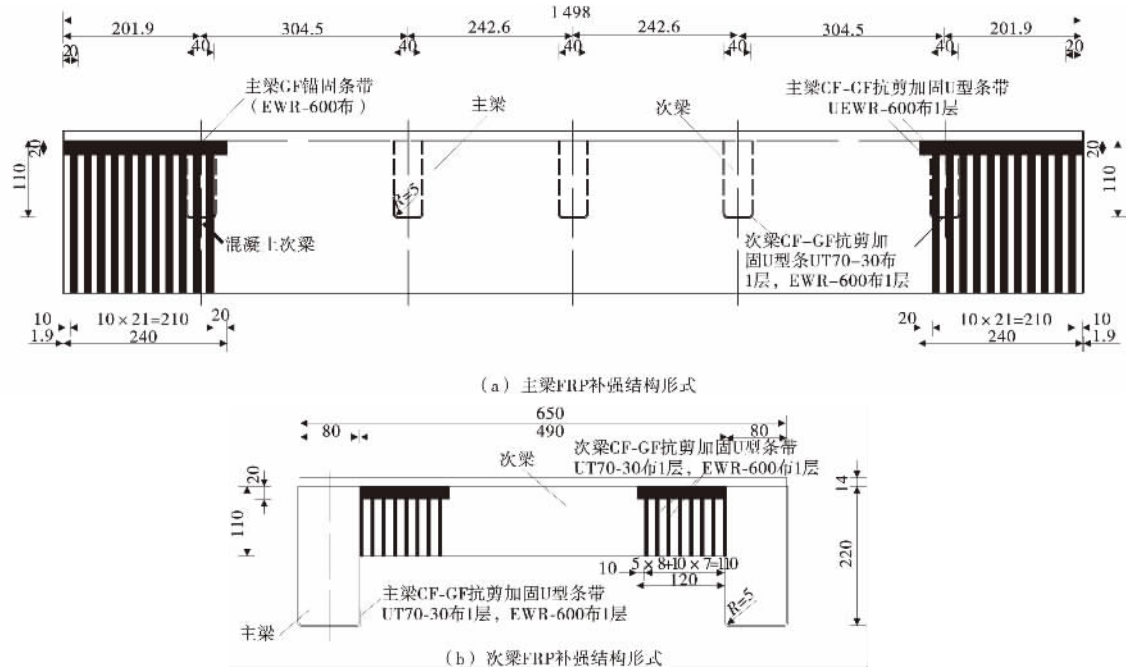


图 9 人行桥主次梁混凝土强度等级不足的 FRP 抗剪补强结构形式

Fig. 9 The shape of beam and girder construction for pedestrian bridge reinforced by FRP for shearing resistance when the construction is of deficiency in its concrete strength class

4 结 论

1) 混凝土桥梁结构因混凝土强度等级不足采用 FRP 补强使其从缺陷结构变为合格结构,不论是受弯(含受剪)或是受压(含偏心受压)受力模式,理论、试验研究和工程实践都证明其技术可行。

2) 混凝土桥梁结构采用 FRP 补强间接提高其混凝土强度等级不足的结构原理,一是 FRP 补强结构形式对立方体受压试件围束抗压产生的约束混凝土横向膨胀变形和提高混凝土极限压应变带来的抗压强度提高的直接作用;二是 FRP 补强结构构造与原结构复合构成 FRP-RC 复合结构产生的集二者材料之长和复合结构优势对原结构性能显著改善和提高的间接作用。

3) 混凝土桥梁结构采用 FRP 补强间接提高其混凝土强度等级的结构效果,是其能最直接和最有效的提高混凝土强度等级不足的缺陷结构的承载能力、抗变形能力和结构延性、耐久性,达到和超过设计混凝土强度等级对应的合格结构的受力标准。

4) FRP 补强间接提高缺陷结构混凝土强度等级的方法,不仅概念清晰、原理科学,而且施工简单,效果显著且一目了然,对原结构截面尺寸改变和自重增大微乎其微而可忽略不计,对混凝土强度等级补足和提高可调可控并便于实现,具有较高的技术经济价值和工程应用前景。

参考文献(References):

- [1] 梁乃兴. 聚合物改性水泥混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
Liang Naixing. Polymer Modified Cement Concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 1995.
- [2] 张锡祥, 代彤. 桥梁结构常见病害及其 FRP 防护、加固、修复新技术[C]//林文修. 土木工程结构鉴定、加固与改造技术的新进展: 第7届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议论文集. 重庆: 重庆出版社, 2004: 697-703.
Zhang Xixiang, Dai Tong. The bridge structure common diseases and FRP protection, reinforcement, repair technology [C]//Lin Wenxiu. New Progress in Civil Engineering Structure Identification, Reinforcement and Reconstruction Technology: The 7th Session of the National Building Identification and Strengthening Academic Conference Proceedings. Chongqing: Chongqing Press, 2004: 697-703.
- [3] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB 50010—2002 Code for Design of Concrete Structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [4] JTG D 62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
JTG D 62—2004 Code for Design of Highway Bridge Reinforced Concrete and Prestressed Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [5] 赵彤, 谢剑. 碳纤维布补强加固混凝土结构新技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
Zhao Tong, Xie Jian. Carbon Fiber Reinforcement Technology of Concrete Structure [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.

(编辑: 刘 韬)

(上接第787页)

荷载与爆炸源位于内车道或外车道关联很小。在局部损伤的情况下,箱梁不会发生压溃。在爆炸荷载作用下,主梁的轴力在爆炸后的振动过程中变化较小,基本都在15%以内。局部拉索索力则会发生较大变化,爆炸源位于外车道(近拉索)的情况比内车道产生的索力变化更大。结果表明,在外车道上爆炸时,由于冲击荷载对主梁产生的扭矩作用,靠近爆炸点侧的拉索增幅远大于远离爆炸点侧拉索索力增幅,断索风险相比更大。

参考文献(References):

- [1] Mahoney E E. Analyzing the Effects of Blast Loads on Bridges using Probability, Structural Analysis, and Performance Criteria [D]. Washington D. C.: University of Maryland, 2007.
- [2] Williamson E B, Marchand K A. Recommendations for blast-resistant design and retrofit of typical highway bridges [C]// Structures Congress, Structural Engineering and Public Safety. St. Louis, Missouri, U. S. A: American Society of Civil Engineers, 2006: 1-6.
- [3] TM5-1300 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions [S]. Washington D. C.: Departments of the Army, the Navy, and the Air Force, 1990.

- [4] Luccioni B, Ambrosini D, Danesi R. Blast load assessment using hydrocodes [J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1736-1744.
- [5] 于文静, 赵金城, 骆华勋. 不同率相关模型对工字钢梁抗爆炸冲击动力响应分析的影响 [C]// 第十届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 上海: 上海交通大学, 2007: 986-991.
Yu Wenjing, Zhao Jincheng, Luo Huaxun. The effect of different rate model for the response analysis of I steel beams under blast loads [C]// Symposium of the Tenth National Modern Structural Engineering. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007: 986-991.
- [6] Riedel W, Thoma K, Hiermair S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500: Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]// Proceedings of the Ninth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Berlin: Bundes Republik Deutschland, 1999: 315-322.
- [7] Malvar L J, Crawford J E, Wesevich J W, et al. A plasticity concrete material model For DYNA3D [J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(9/10): 847-873.
- [8] Tang E K C, Hao H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, part I: Model development and response calculations [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10): 3180-3192.
- [9] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual (Version 971) [M]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2007: 1646-1658.

(编辑: 朱汉容)