

一种锚固FRP片材的体外预应力新方法

卓 静^{1,2} 李唐宁¹ 邢世建¹ 周 密¹

(1 重庆大学 重庆 400045 2 重庆交通科研设计院 重庆 400067)

摘 要:设计构思一种全新的体外锚固FRP片材预应力加固方法,充分利用波形齿夹具锚的特点,采用两端先固定,再中间紧固,强迫FRP片材几何伸长产生预拉力。利用从成渝高速公路上拆除的桥梁旧构件,进行体外锚固碳纤维布预应力加固试验,试验结果证明,该方法施加预应力十分简单方便、工艺切实可行,无须专门的张拉设备,并且显著地提高了加固效果,具有十分广阔的推广应用前景。

关键词:预应力 碳纤维布 加固 波形齿夹具锚

引言

将FRP片材简单地粘贴在结构构件表面进行加固,直到构件加载破坏时FRP片材中的拉应力不高,材料的强度得不到很好的发挥。特别在实际加固工程中,被加固构件上往往存在着初始荷载,此时若采用普通的FRP片材加固方法,则在二次受力过程中FRP片材的应变将比梁中钢筋的应变滞后更多,加固效果就更加不明显。为了充分有效地利用FRP片材高强度的特点,取得较好的加固效果,预拉FRP片材的加固技术就具有重要的应用价值。通过对FRP片材进行预张拉,产生的初始预应力可用来平衡结构的一部分自重或荷载,从而能够充分发挥FRP片材的增强效果,诸如大大推迟裂缝的开展和减小裂缝宽度,有效地增强结构的刚度,减小结构构件的挠度,缓解内部钢筋的应变,提高钢筋的屈服荷载和结构的极限承载能力^[1-3]。

然而,FRP片材预应力技术经过若干年的发展,仍然停留在实验室阶段,由于存在种种问题很难将其实用化^[4]。首先是张拉机具设备复杂、操作步骤繁琐且吨位低,欧洲EMPA实验室开发的FRP片材预张拉设备,其最大拉力仅50kN,适用加固长度仅10m^[2]。日本茨城大学吴智深教授^[4]开发的FRP片材预张拉设备,集成了较多的先进技术,如采用真空泵装置等,是目前最先进的FRP张拉设备,但其吨位仍然不大,国内的一些单位开发的张拉设备亦有类似的情况。

其次是有效的端部锚固措施,由于预应力会引起FRP片材端部的剪应力集中,从而导致FRP片材早期的剥离破坏发生^[1-3, 5],针对这个问题目前的解决办法有两种,其一是在靠近FRP片材端部的地方逐步减少张拉应力并在应力变化处采用螺栓锚钉或U形FRP纤维片材加以锚固,其二是在靠近FRP片材端部的地方用逐步减少层数的方法并使用U形FRP纤维片材锚固^[4]。综观国内外开发的各种FRP片材预应力加固技术,其难于实用化的根本原因在于以往的试验研究中还没有一种适用于在现场使用的FRP片材的夹具和锚具,没有能实现对FRP片材有效的锚固,而这又是预应力加固技术中最关键的环节。相应地由于FRP片材缺乏可靠的夹具和锚具,其配套的预应力张拉设备和张拉工艺受到极大的制约,使得现有的张拉设备难于在张拉吨位上取得较大的突破,同样也限制了FRP片材预应力加固技术的使用范围。

为了解决现有FRP片材预应力张拉和锚固的技术难题,专门针对FRP片材开发了波形齿夹具锚^[6-7]。波形齿夹具锚夹持和锚固FRP片材的可靠性已通过多次试验得到了验证^[8],其锚固性能也远远优于U形FRP片材或螺栓^[9]。根据波形齿夹具锚的特点,特别设计了一种全新的体外锚固碳纤维带预应力加固方法(发明专利02128047.9),其操作工艺十分简单、方便,无须特殊的设备,仅对螺栓进行紧固操作就可以完成对FRP片材进行预应力张拉和锚固。以下是对该方法的预应力原理进行的研究,并以实桥构件进行了试验验证。

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《土木工程学报》2007.No.1)

1 体外锚固FRP片材预应力加固方法的原理

1.1 波形齿夹具锚夹持和锚固FRP片材产生预应力的基本原理

如图1(a),一直线长度为 l 的FRP片材,其两端部被固定约束。当在FRP片材的中部采用波形齿夹具锚进行夹持时,将强迫FRP片材伸长。由于波形齿夹具锚的波形齿面的弧线展开长度与其平面的投影长度存在长度差 δ ,故当波形齿夹具锚的上、下波形齿面完全压紧吻合时,FRP片材将伸长 δ ,如图1(b)。这个强迫伸长值使得FRP片材中产生预拉力:

$$F = EA \frac{\delta}{l} \quad (1)$$

式中: F 为FRP片材建立预拉力; E 为FRP片材的抗拉弹性模量; A 为FRP片材的截面积; l 为FRP片材在两固定端之间的净长度; δ 为波形齿夹具锚的波形齿面的弧线展开长度与其水平投影长度之差。

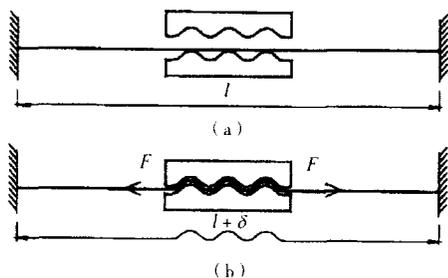


图1 波形齿夹具锚对FRP片材施加预应力的示意图

在实际的结构加固时,FRP片材的两端部固定约束可以通过固定在结构上的波形齿夹具锚来实施,因此实现上述FRP片材的预应力张拉与锚固需要3个或3个以上数量的波形齿夹具锚就可以进行,即先对FRP片材的两端用固定的波形齿夹具锚进行锚固,形成两个锚固点,然后在两个锚固点之间,再用波形齿夹具锚进行夹持和锚固,从而在FRP片材内产生预拉力。

1.2 多点锚固FRP带的预应力原理

类似地,在加固较长结构时需要在多个点锚固FRP片材,仍然可以运用第1.1节的基本预应力原理对FRP片材进行多点夹持和锚固。例如,如图2,采用5个波形齿夹具锚对FRP片材进行预应力张拉并锚固,可以采用如下的预应力加固技术方案:

第一步,如图2(a)预先将5个波形齿夹具锚的下波形齿板固定在被加固的结构上,然后将FRP片材的两端在波形齿夹具锚A、E处进行锚固,形成2个锚固点。

第二步,如图2(b)同时合上波形齿夹具锚B、D的上波形齿板,并同步均匀地拧紧螺栓,使波形齿夹具锚B、D的上、下波形齿面完全压紧并吻合。为了简化起见,假定忽略FRP片材的全部预应力损失,包括假定被加固的结构保持刚性,即被加固的结构不会由于FRP片材的预应力的偏心荷载发生变形(弯曲和压缩)引起的损失等,那么,在此理想状况下波形齿夹具锚B、D强迫A、E两个锚固点之间的FRP片材被强迫伸长了 2δ ,产生了如下的预拉力:

$$F_1 = EA \frac{2\delta}{l_{AE}} \quad (2)$$

第三步,如图2(c)再合上波形齿夹具锚C的上波形齿板,并均匀地拧紧螺栓,使波形齿夹具锚C的上、下波形齿面完全压紧并吻合。为了简化起见,同样作第二步的假定,那么,在理想状况下波形齿夹具锚C强迫B、D两个锚固点之间的FRP片材被强迫伸长了 δ ,产生了如下的预拉力增量:

$$\Delta F_2 = EA \frac{\delta}{l_{BD}} \quad (3)$$

将式(2)+式(3)可得到在波形齿夹具锚B、D两个锚固点之间FRP片材中的预拉力:

$$F_2 = F_1 + \Delta F_2 = EA \left(\frac{2\delta}{l_{BD}} + \frac{\delta}{l_{AE}} \right) \quad (4)$$

当然,考虑到实际操作时,还会有各种各样的预应力损失。如构件偏心受压受弯变形引起的损失,中间锚具未能完全吻合产生的损失,等等,这方面的研究工作需要进一步展开。

1.3 体外锚固FRP带预应力加固技术的特点

(1) FRP片材在被加固结构上实现了多点的有效锚固,保证了FRP片材预拉力的可靠传递。特别是当预张拉吨位较大时,普通的U形FRP片材锚固或螺栓锚固根本无法实现,多点的可靠锚固不但可以承担预张拉力,而且可以承担后期荷载产生的拉力增量。

(2) 在该技术中对FRP片材的预张拉操作简单、方便,无须特殊的设备,仅对螺栓进行紧固操作就可以完成对FRP片材进行锚固和预应力张拉。这一特点使得该方法易于工程实用。

(3) FRP片材中的预拉力在多个锚固点之间按施工顺序进行分配,每个锚固点只承担部分

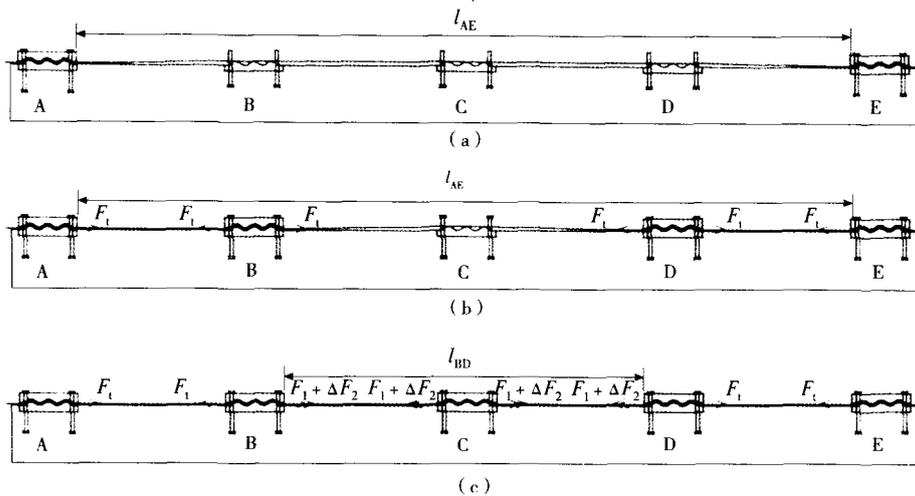


图2 串联波形齿夹具锚对FRP片材施加预应力的示意图

FRP片材的预拉力。这一特点有助于在锚固点处的锚固区设计变得较简单，特别是对已有结构加固时，锚固点上的吨位越小，越容易实现锚固区的设计和施工。

(4) FRP片材在不同的锚固区段，不同的施工顺序，其预拉力分布是不同的。这一特点对跨度较大的桥梁结构加固具有重要意义，例如对跨度较大的简支梁，跨中部分需要的预应力较大，往两边需要的预应力逐渐减小，采用该技术施工后的FRP片材的预拉力分布可以满足这个要求。

(5) 采用该技术进行预应力加固时，RPF片材可以不必进行在被加固结构表面的粘贴施工。这主要是由于波形齿夹具锚对FRP片材进行集中锚固，FRP片材的宽度较小，而层数相应较大，粘贴面黏结力发挥的作用已经退居次要地位，也就是说即使FRP片材没有粘贴在被加固结构上，对加固效果的影响不大。

2 体外锚固碳纤维布预应力加固试验

2.1 试验构件简介

本试验所用构件为普通钢筋混凝土桥梁简支板，全部来自成渝高速公路上拆除的旧构件。成渝高速公路建成于20世纪90年代，是我国最早修建的高速公路之一。运营多年后，发现大量的钢筋混凝土结构开裂，需要对桥梁结构的使用性能、承载能力进行检测、评估，并进一步提出加固维修方案。试验构件均为实心板，混凝土设计标号为C25，计算跨径为7.70m，构件截面的具体尺寸与配筋情况见图3。

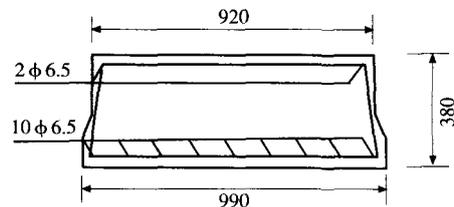


图3 8m板横截面尺寸与配筋(单位: mm)

对8m桥板，按业主原先委托设计提供的方案，将在板底满贴2层碳纤维布进行加固。但是，对该桥板来说，宽度较大，而厚度较小，是无法设置U形箍等附加锚固措施的。众所周知，碳纤维布容易发生剥离破坏，剥离破坏时，碳纤维布的强度发挥较低；而且碳纤维布的层数越多，剥离破坏越容易发生。此外，成渝高速公路上有非常多的需要加固的桥梁，其跨径远大于8m，若仍采用碳纤维布加固，粘贴的层数将很多，加固经济效果将显著下降，碳纤维布加固将受到极大的限制。为此，经我们建议，采用本文提出的体外锚固碳纤维布预应力加固技术对8m板进行碳纤维布预应力加固试验，以探索对8m或更大跨径的桥梁结构进行碳纤维布预应力加固的可行性。

由于在该加固技术中使用了预应力，并且碳纤维布有可靠的锚固措施，能够大幅度地提高碳纤维布的强度利用率，因此在设计加固方案时，我们大幅度减少了碳纤维布的用量，如图4，采用两条长6000mm、宽500mm、厚0.167mm的碳纤维布，每条碳纤维布在加固时按50mm宽折叠成10层的碳纤维带（实际用量相当于板底满贴一层布的用量），并在4个点进行体外锚固预应力加

固。对碳纤维布端部锚固后的照片见图6，对碳纤维布中间夹持锚固产生预拉力的照片见图5。

采用预应力加固的构件有3块板，其编号为CF1、CF-2、CF-3，此外又用3块未加固的桥板（裸-1、裸-2、裸-3）作对比加载试验。

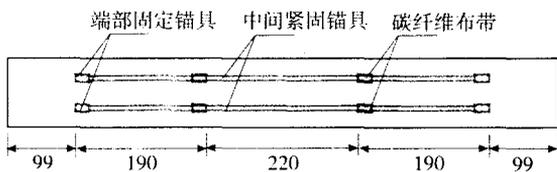


图4 板底粘贴碳纤维带预应力加固平面图（单位：cm）

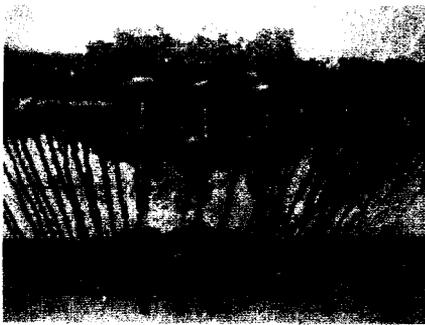


图5 中间锚固并施加预拉力的照片



图6 碳纤维带端部锚固照片

2.2 预拉力的估算

本试验所使用的波形齿夹具锚，其波形齿面的弧线长度与水平投影长度之差为24mm，而碳纤维带在其两个端部锚固点之间的净长度为5600mm，故按照式（2）有，一条碳纤维带在理想条件下的预拉力为：

$$\frac{F_p}{2} = E \frac{A}{2} \frac{2\delta}{l} = 235000 \times \frac{167}{2} \times \frac{2 \times 24}{5600} = 168.2 \text{ kN}$$

两条碳纤维带的总预拉力为：

$$F_p = 168.2 \times 2 = 336.4 \text{ kN}$$

但是在本试验中，当紧固中间两个锚固点的锚具时，由于工具简陋、施工经验不足等原因，碳纤维带中的预拉力不能达到式（2）所述的理

想状态。此外，本试验在进行体外锚固碳纤维布预应力加固过程中，由于张拉时碳纤维布处于浸胶状态，应变片无法粘贴，不能通过测试其应变了解其拉力变化情况，因此，本试验未能实现对碳纤维带的预应力的测量。如何测试FRP带中预应力的测量以及计算预应力损失有待进一步研究。

2.3 测试和加载方案

为了测试碳纤维带的受力情况，沿其长度方向每隔20cm设置一个应变片；此外，在构件的主筋上也设置了应变片，以测试主筋的受力情况。为了测试加载过程中的挠度变化，在L/2处左右各安装了1个位移计。

为了模拟汽车轮载，设计了如图7所示的加载方案，通过分配梁实现轮距1.20m。由于构件本身已经开裂，加载时不考虑寻找开裂荷载，按每级20kN的荷载逐级进行加载。

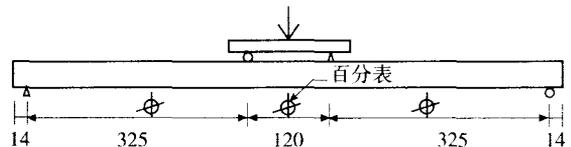


图7 试验加载示意图

2.4 试验结果及分析

试验采用的旧构件都是已经开裂的构件，由于在构件的侧面事先涂刷了涂料，覆盖了原有的裂缝，因此加载时观察到的“开裂荷载”都比较接近，即当荷载达到8t左右时，原有的裂缝即张开。但在随后的加载过程中，未加固的构件弯曲裂缝发展较快，特别是在加载的后期，裂缝宽度发展迅速，构件挠度迅速加大并直至荷载无法维持，表明构件已经达到了极限荷载。裸板构件破坏时，板顶表面混凝土无明显压碎现象，表明是板底主筋屈服后构件发生了弯曲破坏。

采用了体外锚固碳纤维带预应力加固的构件，弯曲裂缝的发展相对较慢，并且，在加载后期，跨中竖向裂缝上部开始水平分叉，特别是当接近极限荷载时，在两加载点间压区混凝土出现水平裂缝，板顶较大范围内的混凝土被压溃后突然掀起而丧失承载能力。加载的过程中未发现碳纤维带在夹具内的滑移，构件破坏后大部分的碳纤维带完好无损，测得的最大应变值在7000 $\mu\epsilon$ 左右。由于碳纤维带与板底大部分是没有粘接

的,完全依靠夹具的锚固,因此也就不存在剥离的问题。在加载的后期,应变测试表明板底主筋已经屈服。

以上试验现象和加载结果表明加固构件是板底主筋屈服后,碳纤维带继续承担板底的拉力,在其还没有达到极限强度前,板顶混凝土发生类似“超筋破坏”的特征,大块混凝土被压碎。因此,加固构件的极限承载力得到显著的提高(见表1)。

表1 试验极限荷载(单位:kN)

项目	裸板			CF带		
	裸板-1	裸板-2	裸板-3	CF-1	CF-2	CF-3
试验值	324	364	353	430	400	400
平均值		347			410	
提高值		-			63	
提高系数		-			18.2%	

将各构件跨中测得位移取平均值,可以得到如图8所示各构件的荷载-挠度曲线。需要说明的是,构件CF-1的数据由于数据采集计算机出现意外而未能保存下来,因此图中缺少CF-1的荷载-挠度曲线;此外,试验所用的位移计最大量程为100mm,而且在加载试验的后期,出于安全考虑位移计都被提前拆除,因此图中的每条曲线未能给出最后阶段的荷载挠度曲线。

在图8中,构件CF-2和CF-3的挠度没有计入碳纤维带施加预应力后的反向挠度影响(由于是先进行碳纤维带预应力加固,然后将桥板吊装就位进行加载试验),其初始位移是从0开始的。因此单纯从图8来看,各构件在加载的前期,荷载-挠度比较接近;当荷载大于150kN后,荷载-挠度曲线开始拉开差距;当荷载大于300kN时,加固构件和未加固构件的差距就十分大了。从图8中还可以看出,未加固构件的荷载-挠度曲线在荷载为300kN左右开始发生较大的转折,而加固构件在350kN左右才发生。因此,尽管碳纤维带与板底没有粘贴,从图8中仍然可以充分看出,加固构件的极限承载力得到了十分显著的提高,变形性能得到改善。

此外,在加固试验中测到的碳纤维带的最大拉应变约 $7000\mu\varepsilon$ 。这个应变值是从加载开始测试的(由于碳纤维带在预应力张拉和锚固时,构件是立放的),因此加载前,碳纤维带中的应变(包括预应力和自重引起的)不包含在这个值中。

碳纤维带在整个加载过程中的应力增量大约为:

$$7000 \times 10^{-6} \times 2.35 \times 10^5 = 1645 \text{ MPa}$$

即使不考虑预应力和自重引起的应力增量,本试验中碳纤维带的强度发挥仍然是非常高的,远超过现行加固规程中按厚度进行折减后的强度值。从另一个角度讲,加固构件的碳纤维带与板底混凝土表面具有较大的空隙,碳纤维带与加固构件完全没有粘贴上,加固构件承载力的提高完全依靠相当于体外预应力筋的碳纤维带。如果没有预应力的作用,以及波形齿夹具锚的锚固作用,要达到本试验的加固效果是难以想象的。

此外,考虑到本次试验是第一次使用体外锚固预应力技术,试验过程中出现了事先未预料到的技术问题,如夹具刚度问题、碳纤维带与板底空隙、人工紧固力不足等,如果这些问题得到改进,碳纤维带的预拉力会更高,其强度发挥就更大,加固效果就更好。

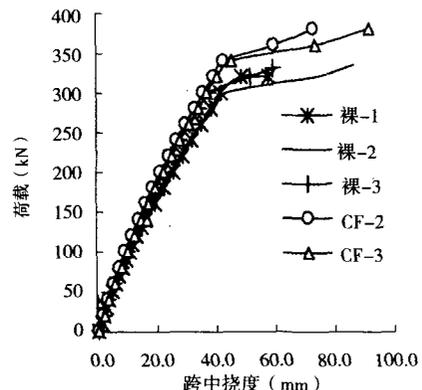


图8 荷载-挠度曲线

3 结论和建议

通过本文的理论分析和试验研究,可以得到如下结论:

(1) 体外锚固FRP片材的预应力加固技术充分利用了波形齿夹具锚的特点,采用两端先固定,再中间紧固的操作工艺对FRP片材进行预应力张拉和锚固,受力明确,锚固可靠,技术简单、实用,解决了以往的预应力加固方法存在的多种技术难题。

(2) 通过对实际桥梁构件进行加固,首次尝试了这种全新的碳纤维布预应力加固法,事实证明,采用两端先固定,再中间紧固的预应力工艺是切实可行的,并且非常简单方便。

(3) 碳纤维带预应力加固试验结果表明通过对碳纤维布进行预张拉, 能够大幅度提高碳纤维布的强度利用率, 取得较好的加固效果。

(4) 尽管加固构件的碳纤维带与板底混凝土表面有较大的空隙, 但由于锚具的锚固作用以及预应力的作用, 碳纤维带仍然能够发挥较大的作用。这表明采用体外锚固碳纤维带预应力加固时, 可以不进行碳纤维带与混凝土表面的粘贴工作, 这将更进一步地简化加固工艺, 减少施工工作量, 降低原材料的使用量。

(5) 需要再强调一下的是, 碳纤维布预拉力的计算是预应力加固计算的重要内容之一。本文未能解决这个问题, 如何测试和计算碳纤维布中的预拉力, 需要进一步研究。建议在以后的试验中, 可以将碳纤维带的部分长度预先浸胶固化并贴上应变片, 然后进行体外锚固预应力加固时就可以测试其预拉阶段和加载阶段的应变变化; 或者建议在碳纤维带中混杂光纤传感器, 运用更先进的技术进行测试。

(6) 采用体外锚固碳纤维布并施加预应力加固的构件, 出现了很多现行加固规程无法解决的新问题, 如何解决这些问题, 将在后续工作中进行仔细的研究。

(上接第15页)

致谢

本文的研究工作得到江苏省普通高校自然科学研究计划资助(02KJB560001), 以及江苏省结构工程重点实验室研究项目资助(KJSS0212)。南京工业大学结构工程试验中心对论文的试验给予了大力支持, 作者在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Sennah K M, Kennedy J B. Load distribution factors for composite multicell box girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 1999, 4(1): 71-78
- [2] Okeil A M, El-Tawil S. Warping stresses in curved box girder bridges: case study [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 487-496
- [3] Sennah K M, Zhang Xuesheng, Kennedy J B. Impact factors for horizontally curved composite box girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(6): 512-520
- [4] Samaan M, Sennah K, Kennedy J B. Distribution factors for curved continuous composite box-girder bridges [J]. ASCE, Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(6): 678-692
- [5] 王拥军. 北京市西四环复兴路立交变截面连续钢组合梁设计[C]//第十四届全国桥梁学术会议论文集. 南京:2000: 877-879
- [6] 方志禾, 陈桂英. 预应力钢与混凝土组合连续梁的设计实践—44m+64m+44m 阜成路立交主桥[J]. 北京建筑工程学院学报, 1995, 11(3): 67-78 (Fang Zhihe, Chen Guiying. Design and practice of continuous box girder bridge of prestressed steel and concrete composite—an intersection bridge of Fucheng Road with 44m+64m+44m [J]. Journal of Beijing Institute of

参考文献

- [1] Wu Zhishen, Tanabe K, Matsuzaki T, et al. A retrofitting method for concrete structures with externally prestressed carbon fiber sheets [J]. Journal of Structural Engineering, 1998 44A:299-1308
- Stocklin I, Meier U. Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips [C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Fiber-reinforced Plastics for reinforced concrete Structures (FRPRCS-5). Cambridge, UK:2001:291-296
- Triantafillou T C, Deskovic N, Deuring M. Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets [J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(3):235-244
- 吴智深, 岩下健太郎, 牛赫东. PBO纤维片材预应力外粘结加固集成新技术 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(9):18-24 (Wu Zhishen, Iwashita Kentaro, Niu Hedong. Study on strengthening technique with prestressed PBO Fiber Sheet [J]. Engineering Science, 2005, 7(9):18-24 (in Chinese))
- Zhuo Jing, Li Tangning. An innovative WSGG anchor of FRP sheet [C]// ACMBS-IV. 2004, 8:86
- 卓静. 高强度复合材料波形齿夹具锚-中国, ZI02244587.0 [P]. 2002 (Zhuo Jing. Wave-shaped-gear-grip of high strength composite: China, ZI02244587.0 [P]. 2002 (in Chinese))
- 卓静, 李唐宁. FRP片材波形齿夹具锚的原理 [J]. 土木工程学报, 2005, 38(10):48-53
- (Zhuo Jing, Li Tangning. The mechanics of an innovative wave-shaped-teeth-grip anchor of FRP laminations or sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10):48-53 (in Chinese))
- Zhuo Jing, Li Tangning. The mechanism of an innovative WSGG anchor of FRP laminations [C]// ISSEYE-8. 2004, 7: 805-811
- 卓静, 李唐宁, 章庆学等. 波形齿夹具锚固碳纤维布加固混凝土梁试验研究 [J]. 建筑结构, 2005, 35(7):63-66 (Zhuo Jing, Li Tangning, Zhang Qingxue, et al. Test on beams strengthened with carbon fiber sheets and anchored by wave-shaped-gear-grip anchorage [J]. Building Structure, 2005, 35(7):63-66 (in Chinese))
- Civil Engineering and Architecture, 1995, 11(3): 67-78 (in Chinese))
- 李余华. 石家庄南环大桥大跨度钢箱梁架设[J]. 铁道建筑技术, 2000, (3): 4-7 (Li Yuhua. Erection of long-span steel box girder of Shijiazhuang Nanhuan Bridge [J]. Railway Construction Technology, 2000, (3): 4-7 (in Chinese))
- 张俊平, 黄道沸. 大跨度异形结合梁设计与分析计算[J]. 桥梁建设, 2000, (4): 29-31 (Zhang Junping, Huang Daofei. The design and analysis of large span steel-concrete composite beam [J]. Bridge Construction, 2000, (4): 29-31 (in Chinese))
- 侯文崎, 叶梅新. 连续结合梁桥负弯矩区混凝土板裂缝宽度控制方法研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 109-112 (Hou Wenqi, Ye Meixin. Methods for controlling crack width of concrete slab in negative moment area of continuous composite bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1): 109-112 (in Chinese))
- 马少杰, 史志强, 白玲. 连续组合梁桥负弯矩区混凝土板开裂机理的研究[J]. 桥梁建设, 2003, (4): 15-18 (Ma Shaojie, Shi Zhiqiang, Bai Ling. Study of cracking mechanism of concrete slab in continuous composite girder bridge negative moment area [J]. Bridge Construction, 2003, (4): 15-18 (in Chinese))
- 高勇. 北京地铁八通线三跨连续结合梁桥设计构思[J]. 山西建筑, 2003, 29(15): 109-110 (Gao Yong. Design of three-span continuous steel-concrete composite beam bridge in Beijing metro 8-pass line [J]. Shanxi Architecture, 2003, 29(15): 109-110 (in Chinese))
- 张南, 洪英维. 体外索钢箱-混凝土组合梁力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 60-66 (Zhang Nan, Hong Yingwei. Mechanical performance of steel-concrete composite box beams with external tendons [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 60-66 (in Chinese))