

FRP 材料加固混凝土结构应用的新领域

——嵌入式(NSM)加固法*

李 荣 滕锦光

岳清瑞

(香港理工大学 土木及结构工程系 香港)

(国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心 北京 100088)

摘要: 嵌入式(NSM)加固法是 FRP 材料加固混凝土结构的一种新的应用形式,较外贴加固在某些方面具有明显优势。目前该技术在国内的研究应用尚属空白,对在该领域已有的国外文献从材料、试验研究、粘结性能和设计方法等几个方面进行了总结,可为国内今后开展相关的研究和应用提供借鉴和参考。

关键词: FRP 材料 嵌入式 混凝土 加固

A NEW TECHNIQUE FOR STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES

——NEAR-SURFACE MOUNTED FRP REINFORCEMENT

Li Rong Teng Jinguang

(Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University Hong Kong)

Yue Qingrui

(National Engineering Technology Research Center of Industrial Building Diagnosis and Rehabilitation Beijing 100088)

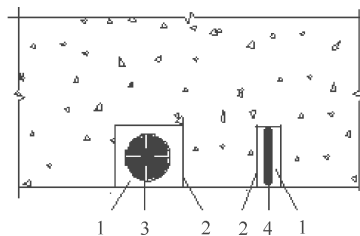
Abstract : Near-surface mounted (NSM) FRP reinforcement is emerging as a promising technique for the strengthening of concrete structures, as it offers some real practical advantages over externally bonded FRP reinforcement. This paper presents a state-of-the-art review of the existing international research on NSM reinforcement. Topics covered include materials, bond behaviour, flexural strengthening tests and design recommendations. It provides a basis for further research and application in China.

Keywords : FRP near-surface mounted concrete structure strengthening

1 概述

近年来,FRP 材料的研究和应用已经成为国际土木工程界的热点。在我国,粘贴 FRP 片材加固混凝土结构这种新型加固技术已较为普及,相关标准规程已经出台^[1]。除了外贴加固以外,开发 FRP 材料更新的应用途径成为国际上广为关注的问题。嵌入式(Near-surface Mounted,简称 NSM)加固法便是其中有代表性的一种。该工法通常的作法是:在混凝土表面剔槽,在槽内先注入约 1/2 的粘结材料,将 FRP 筋或板条放入槽中并轻压,使 FRP 筋或板条被粘结材料充分包裹,再在槽内注满粘结材料并将其表面修复平整,如图 1 所示。

与外贴 FRP 片材相比,嵌入式加固法除同样具有高强、高效、耐腐蚀等优点外,还有以下几方面的优势:1)表面处理工作量降低,外贴加固的表面打磨工序往往耗时较长,而嵌入式加固只需专用工具在混凝土表面剔槽,不需大面积处理,节省工期;2) FRP 材料因内置而得到较好的保护,其抗冲击性、耐



1—粘结材料;2—槽;3—FRP 筋;4—FRP 板条

图 1 NSM 加固法示意

久性、防火性能等得以提高,如用于桥面板负弯矩区加固具有明显优势;3)FRP 筋或板条可以较方便地锚固于相邻的构件上。

目前尚未见到国内有关 FRP 材料嵌入式加固研究和应用的文献,但近几年来,国外一些学者已相

* 本项目得到香港理工大学 Area of Strategic Development Scheme 的资助。
第一作者:李 荣 女 1971 年 2 月出生 硕士 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心高级工程师 2003.7~2004.1 香港理工大学访问学者

收稿日期:2003-11-20

继开展了有关的试验研究、理论分析和工程应用。本文对在该领域已有的国外文献进行总结和分析,可为国内今后开展相关的研究和应用提供借鉴和参考。

2 材料

嵌入式加固法所用的材料,主要包括 FRP 材料和粘结材料(即槽内填充材料)两部分。

从 FRP 种类上分,目前所采用的材料大都集中在 CFRP、GFRP 上,对 AFRP 还少有涉及。其中,对混凝土结构的加固采用 CFRP 居多,对砌体结构和木结构的加固,以 GFRP 为主。从产品类型上分,主要包括 FRP 筋、条带型的 FRP 板材(以下简称 FRP 板条)两种形式。FRP 筋因表面形状不同,可分为光圆筋(表面喷砂处理)和变形筋两大类,其中变形筋包括带肋、表面螺旋缠绕 FRP 条带等形式。

粘结材料即填入槽内的材料,通常采用环氧树脂,也有一些研究尝试采用水泥基材料代替环氧树脂,以提高其抗高温性、耐久性,并降低造价。由于 FRP 筋或板条受力是通过槽内填充材料传递剪切应力,因而粘结材料的性能是至关重要的。

3 试验研究

与外贴 FRP 片材相比,目前已有的关于嵌入式

加固研究的文献资料非常有限。已有的试验研究,主要集中在界面粘结性能试验和钢筋混凝土构件抗弯加固试验两大部分。

3.1 界面粘结性能试验

嵌入式加固的 FRP 筋或板条与混凝土之间有可靠的粘结和锚固,是 FRP 与混凝土这两种材料能够共同工作的基本前提。影响嵌入式加固粘结性能的因素很多,如 FRP 材料种类、FRP 筋表面形状、粘结材料类型、槽尺寸、粘结长度、混凝土强度等等。研究粘结机理的试验方法一般分为直接拉拔式和梁式两类。已有的 FRP 嵌入式界面粘结性能试验汇总见表 1。其中,De Lorenzis 等^[2~5]较为全面地研究了 FRP 筋的粘结性能,涵盖了较多种类的 FRP 筋、不同粘结材料及槽表面特征。其中,采用水泥砂浆的试件效果不太理想,破坏荷载均较采用环氧的低。Blaschko^[6]的试验中首次考虑了变量 α ,即 FRP 板条距混凝土试块边缘的距离,这在设计构造中是非常有意义的参数。Hassan and Rizkalla^[7,8]的试验并不是单纯的粘结性能试验,更接近于小梁的抗弯加固试验,通过配筋构造使受弯裂缝出现在跨中,研究不同锚固长度对极限荷载的影响。

3.2 抗弯加固试验

已有的 FRP 嵌入式抗弯加固试验研究汇总见

表 1 粘结性能试验研究汇总

项 目	De Lorenzis 等		Blaschko ^[6]	Rizkalla and Hassan	
	系列一 ^[2~4]	系列二 ^[4,5]		系列 A ^[8]	系列 B ^[7,8]
试验方法	梁式,倒 T 型,跨中上端为钢铰,下端有预切缝	直接拉拔式,C 型混凝土试块	直接拉拔式	梁式,T 型	梁式,T 型
混凝土强度 f'_c/MPa	27.6	20	*	*	48
FRP 种类及 截面尺寸	GFRP 带肋筋 $d=12.7\text{mm}$ CFRP 带肋筋 $d=9.5\text{mm}$ CFRP 光圆筋喷砂处理 $d=9.5、12.7\text{mm}$	GFRP 带肋筋 $d=9.5\text{mm}$ CFRP 带肋筋 $d=9.5\text{mm}$ CFRP 螺旋缠绕筋 $d=7.5\text{mm}$	CFRP 板条 厚 $t_f=1\sim 2\text{mm}$ 宽 $h_f=20\text{mm}$	CFRP 筋 *	CFRP 板条 厚 $t_f=1.2\text{mm}$ 宽 $h_f=25\text{mm}$
填充材料	环氧树脂	环氧树脂,水泥砂浆	环氧树脂	环氧树脂	环氧树脂
槽尺寸/ mm	宽=高= b_g ($k=b_g/d'$) $k=1.12\sim 2.67$	宽=高= b_g ($k=b_g/d'$) $k=1.24\sim 2.5$	宽 $b_g=t_f+3$ 深 $h_g=h_f+3$	*	宽 $b_g=5$ 深 $h_g=25$
槽表面特征	后切	后切,粗糙 预留,光滑	后切	后切	后切

注: d 为 FRP 筋的名义直径, d' 为 FRP 筋的实测直径;

* 具体不详。

表 2。所有试验结果均表明,FRP 筋或板条采用嵌入式加固对抗弯承载力的提高效果是非常显著的。在 De Lorenzis^[4,9]的试验中,大部分试件发生粘结失效破坏,FRP 筋的强度未得到充分发挥。试验中粘结破坏分两种情况,一种是环氧层发生纵向劈裂导

致与 FRP 筋粘结力丧失;另一种是沿钢筋位置混凝土出现纵向裂缝,部分混凝土保护层剥落。其中嵌入两根 FRP 筋的梁,由于两个槽间的净距、槽边距梁边的距离较小,槽周围混凝土应力叠加,使得半跨通长混凝土保护层剥落而破坏^[4](图 2)。



图2 抗弯加固试验

Taljsten and Carolin^[10,11]的试验表明,在FRP加固量相同的情况下,CFRP 方形筋伸过支座的试件承载力提高幅度最大,破坏形式为FRP 被拉断。锚固长度较小的两根梁发生粘结破坏。采用水泥砂浆的试件加固效果逊于采用环氧粘结的试件,后者体现

出较好的延性。这里所指的粘结破坏,与外贴FRP片材的剥离破坏相比,破坏的突然性和脆性有所降低。文献[11]还采用了高模量的CFRP 方形筋,承载能力提高幅度更大,但延性降低,也因粘结失效而破坏。

Rizkalla and Hassan^[8,12]模拟实际桥板的负弯矩区加固进行了预应力板的模型试验,每个试件由中部简支跨与两个悬臂跨组成。试验考虑了多种加固形式进行对比:CFRP 筋(两种)嵌入式加固、CFRP 板条嵌入式加固、外贴CFRP 板加固、外贴CFRP 布加固,均按承载力提高30%设计。试验结果表明,在加固量等参数完全相同的情况下,嵌入式加固破坏形式为混凝土被压碎,而外贴CFRP 板发生了剥离破坏,嵌入式加固效果明显优于外贴加固。

表2 嵌入式抗弯加固试验研究汇总

项 目	De Lorenzis 等		Taljsten and Carolin ^[10]	Rizkalla and Hassan ^[8,12]
	系列一 ^[4]	系列二 ^[4,9]		
构件形式	T 型梁,150mm×400mm L=3.9m	矩形梁,200mm×400mm, L=4.0m	矩形梁,200mm×300mm, L=3.6m	预应力板,8.5m×1.2m× 0.4m,悬臂、简支
混凝土强度 f'_c /MPa	34.5	15	60.7	45~50
FRP 种类及截面尺寸	CFRP 带肋筋 $d=12.7$ mm CFRP 光圆筋喷砂处理 $d=9.5, 12.7$ mm	CFRP 筋 $d=8$ mm CFRP 螺旋缠绕筋 $d=7.5$ mm	CFRP 方形筋表面粘 石英砂 10mm×10mm	CFRP 筋 $d=10$ mm CFRP 光圆筋喷砂 CFRP 板条 1.4mm×25mm
填充材料	环氧树脂	环氧树脂	环氧树脂,水泥砂浆	环氧树脂
槽尺寸/mm	宽=高= b_g	宽=高= b_g	15mm×15mm(环氧)	16mm×30mm
锚固长度	$k=b_g/d=2.0$ 伸过支座	$k=b_g/d=2.0$ 伸过支座	20mm×20mm(水泥) 伸过支座及断点, 距支座 300mm	5mm×25mm(用于板条) 伸过支座
承载力提高幅度	25.7%~44.3%	21.3%~60.6%	56.3%~92.4%	36%~43%

4 粘结性能

4.1 破坏模式

在已有的FRP 嵌入式界面粘结性能试验中所出现的破坏模式有下述几种:1)FRP 被拉断;2)FRP 一粘结材料界面破坏,FRP 被拔出;3)粘结材料层发生劈裂破坏;4)混凝土发生劈裂破坏;5)粘结材料一混凝土界面破坏。

De Lorenzis 等^[2~5]试验观察到的破坏模式有上述2)、3)、4)、5),且3)和4)有同时出现的情况。破坏模式2)只出现于表面光滑且仅进行简单喷砂处理的FRP 筋中。破坏模式5)只出现于当槽为预留,槽表面光滑时。大部分试件以劈裂破坏为控制破坏模式,在这种情况下,随着槽尺寸的增大和粘结材料强度的提高,极限荷载增大,且粘结材料抗劈裂能力提高,可使破坏模式从粘结材料层的破坏向混凝土破坏转化。

目前仅有Blaschko^[6]进行了FRP 板条嵌入式的

直接拉拔试验。该试验考虑了CFRP 板条距混凝土边缘的距离 a_r 。试验中观察到的破坏模式有混凝土角部劈裂破坏和胶层的破坏。由于该文献描述较为简单,具体的试验装置、试验过程和详细试验结果无法得知。

在嵌入式加固的实际工程应用中,往往采用现场切割槽的方法,槽表面粗糙,因而破坏模式5)可以不考虑。对于变形筋,破坏模式2)也不易发生。考虑粘结材料通常为环氧,去除这两种纯界面破坏,则粘结破坏存在两种控制模式:a)由FRP 一环氧界面粘结应力控制的破坏,相对薄弱层为环氧,对应破坏模式为环氧层的劈裂;b)由环氧一混凝土界面粘结应力控制的破坏,相对薄弱层为混凝土,对应破坏模式为混凝土的劈裂。而对于外贴FRP 片材加固,粘结破坏通常为胶与混凝土界面下几毫米处的混凝土剥离,即破坏仅由环氧一混凝土界面粘结应力所控制。

4.2 界面粘结强度

外贴 FRP 片材的界面粘结强度, 取决于有效粘结长度 L_e , 当粘结长度大于 L_e 时, 粘结长度增大而粘结强度保持不变, FRP 强度不能得到充分发挥, 这一点已被大量外贴 FRP 片材的界面粘结试验所证实^[13]。而对于内置钢筋或 FRP 筋的粘结锚固, 粘结强度随粘结长度增大而增大, 只要粘结长度足够长, 钢筋或 FRP 筋的抗拉强度可得到充分发挥。嵌入式 FRP 筋或板条的界面受力性能介于上述两者之间。

局部粘结-滑移关系是研究与界面粘结性能相关问题的基础。目前的研究结果表明^[13], 外贴 FRP 片材的局部 $\tau-s$ 曲线可采用图 3 所示的双直线型进行模拟。在对界面粘结机理的分析中, 引入断裂力学中的第二类破坏能 G_f , 对应于局部 $\tau-s$ 曲线下包围的面积。

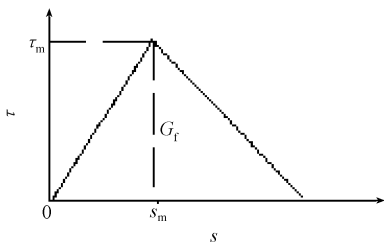


图 3 $\tau-s$ 曲线

De Lorenzis^[4] 通过试验获得的 $\tau-s$ 曲线, 因 FRP 筋种类、槽尺寸、破坏模式等不同而呈现不同的形态, 尤其是下降段较为复杂, 有直线型、直线加第三段水平直线对应残余摩擦型, 以及指数函数型等。

引入能量平衡关系^[4], 对于粘结界面的 $\tau-s$ 曲线下包围的面积为 $A_\tau(s)$, $\sigma-\epsilon$ 曲线下包围的面积为 $A_\sigma(\sigma)$, 两者存在关系如式(1):

$$\Sigma \cdot A_\tau(s) = A A_\sigma(\sigma) \quad (1)$$

其中, Σ 为粘结应力作用的周长, A 为拉应力作用的面积。对于线弹性材料:

$$A_\sigma(\sigma) = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2)$$

$$\text{可以解出: } \sigma(s) = \sqrt{2E \frac{\Sigma}{A} A_\tau(s)} \quad (3)$$

则粘结界面所能承受的最大拉应力为:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{2E \frac{\Sigma}{A} G_f} \quad (4)$$

如果粘结破坏的控制界面为 FRP 筋-环氧界面, 则 A 为 FRP 筋的截面积, Σ 为 FRP 筋的周长; 如果粘结破坏的控制界面为环氧-混凝土界面, 可以认为拉应力作用于 FRP 筋与环氧组成的换算截

面 A_0 (按弹性模量之比换算), Σ 为槽两侧边与底边的长度之和。

当 σ_{\max} 小于 FRP 筋的抗拉强度时, 说明存在有效锚固长度 L_e , 使得粘结长度大于 L_e 时, 界面所能承受的拉应力并不再增大。当 σ_{\max} 大于 FRP 筋的抗拉强度时, 说明不存在有效锚固长度 L_e , 粘结强度随粘结长度的增大而增大, 即若粘结长度足够长, 总能达到其抗拉强度, 使强度充分发挥。

沿用这种分析方法, 对于嵌入式 FRP 板条可以得到类似的结果。对于外贴 FRP 板条, 忽略胶的厚度, 则

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{2E_f G_f}{t_f}} \quad (5)$$

式(5)可改写为 $P_{\max} = b_f \sqrt{2E_f t_f G_f}$, 与文献[24]中基于断裂力学分析的粘结强度表达式的基本形式类似, 但未考虑宽度修正等系数的影响。

显然, 当 $\tau-s$ 曲线下包围的面积 G_f 趋近于无穷大时, 不存在有效锚固长度 L_e , 理论上若粘结长度足够长, 总能达到其抗拉强度。只有当 $\tau-s$ 曲线下包围的面积 G_f 有确定值, 如外贴 FRP 片材的双直线型(图 3)等, 才有可能存在有效锚固长度 L_e 。对于嵌入式 FRP 筋及板条, 目前对局部 $\tau-s$ 关系的研究成果尚不充分, 且与外贴 FRP 片材相比, 其受到的影响因素较多, 在何种情况下存在有效锚固长度 L_e 尚不能给出定论。因而有必要对此继续进行深入研究, 才能得到更为准确的界面粘结强度模型。

5 抗弯加固设计

由试验研究结果可以看出, 采用 FRP 筋或板条嵌入式抗弯加固梁的破坏模式, 除与传统钢筋混凝土理论一致的混凝土被压碎、FRP 被拉断破坏以外, 也有可能发生由于粘结失效的提前破坏^[4,9,10,11], 使 FRP 材料的强度未得到充分发挥。这一点与外贴 FRP 片材加固的剥离破坏极为相似。其中 FRP 板条与圆形筋相比, 较不容易发生粘结失效破坏^[6]。

在过去的几年中, 已有大量的有关外贴 FRP 片材或钢板剥离破坏性能的研究成果, 文献[14]对这些剥离强度模型进行了总结和分析, 并归为三大类: 基于抗剪承载力的模型、混凝土齿状模型、界面应力模型。相比之下, 目前对于嵌入式加固的粘结失效强度模型的研究还较少, 所提出的模型一般都是在原有外贴片材模型上的改进, 如 De Lorenzis and Nanni^[4,15] 的模型是对 Raof and Hassanen^[14] 外贴片材

的混凝土齿状模型的改进; Rizkalla and Hassan^[7,8] 提出的嵌入式 FRP 板条端部引起的粘结破坏模型, 是以 Malek 等^[14] 外贴 FRP 片材模型为基础, 属界面应力模型。上述模型都具有各自的局限性且未得到大量试验结果的验证。嵌入式加固的粘结失效破坏, 既可能由于端部切断点也可能由于中部的受弯或受剪裂缝处的应力集中而引起。抗弯加固设计的关键点归结为, 根据 FRP 筋或板条的延伸长度, 确定发生粘结破坏时 FRP 的有效应变(或应力)。

5.1 设计方法

对于单筋矩形截面, 若不考虑二次受力的影响, 当破坏模式是由混凝土被压碎控制时, 由平截面假定、力平衡关系(图 4)可以得到式(6)、(7)。其中, ϵ_{r1} 为不考虑粘结失效破坏时 FRP 的拉应变。当计算所得 ϵ_{r1} 大于 FRP 的设计极限拉应变时, 对应破坏模式为 FRP 被拉断, 取 $E_f \epsilon_{r1}$ 等于 FRP 的抗拉强度设计值, 即 f_{fd} 。

$$\begin{cases} f_c b x = f_y A_s + E_f \epsilon_{r1} A_f & (6) \\ x = \frac{0.8 \epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{r1}} h_{NSM} & (7) \end{cases}$$

式中 A_f —— FRP 筋或板条的截面面积;
 E_f —— FRP 的弹性模量;
 h_{NSM} —— FRP 筋或板条的中心至梁受压边缘的高度;
 x —— 混凝土等效矩形应力图受压区高度;
 f_c —— 混凝土轴心抗压强度设计值;
 ϵ_{cu} —— 混凝土极限压应变, 取 0.003 3。

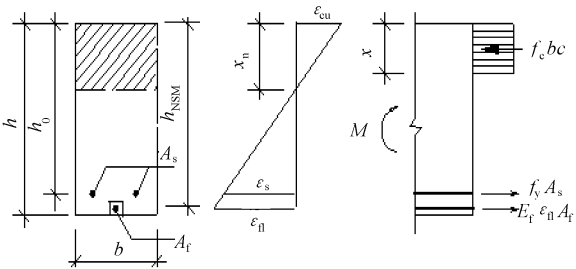


图 4 矩形截面正截面受弯承载力计算

设发生粘结失效破坏时 FRP 材料的有效拉应变为 ϵ_{r2} , 则达到受弯承载力极限状态时, FRP 材料的拉应力 σ_{fd} 应按式(8)取值:

$$\sigma_{fd} = \{f_{fd}, E_f \epsilon_{r1}, E_f \epsilon_{r2}\}_{\min} \quad (8)$$

确定 σ_{fd} 后, 即可根据力平衡和力矩平衡关系计算截面弯矩。 $\epsilon_{r2} = f(l_d)$, l_d 为从充分利用截面至 FRP 截断点的距离, 具体函数形式需要从确定嵌入式 FRP 筋或板条与混凝土间的粘结应力传递关系

得到。在混凝土构件剪弯区裂缝附近, FRP 与混凝土界面的受力状态为剪应力和正应力的复合受力, 较为复杂, 不能简单地由界面剪切试验(直接拉拔试验)的结果代入。目前的研究成果尚不充分, 从设计角度来说, 给出合理、安全、简化的 ϵ_{r2} 相对于 l_d 的表达式, 应是下一步研究的重点。文献[4]、[16]等提出, 采用嵌入式加固法的一个优点是可以锚固于相邻构件上, 表 2 中一部分抗弯加固试验均采用将 FRP 筋伸过支座一定距离来模拟这种状态, 但具体的锚固作法和要求, 文献中没有体现。如果加强支座锚固, 对于防止因端部切断点引起的粘结失效破坏是有效的。

5.2 构造措施

设 d 为 FRP 筋名义直径, t_f 、 h_f 分别为 FRP 板条厚度和高度, 如图 5 所示, 槽尺寸 b_g 、 h_g , 多条布置时槽净间距 a_g , 距梁边的距离 a_r 都是影响粘结性能的参数。显然, 槽的深度受钢筋保护层厚度的限制。文献[17]建议, 对 FRP 筋, 最小槽尺寸 b_g 、 h_g 不小于 $1.5d$; 对于 FRP 板条, 最小槽宽 b_g 不小于 $3t_f$ 且槽深 h_g 不小于 $1.5h_f$ 。文献[4]的推荐值为, 对光圆筋, $k = 1.5$ ($k = b_g/d$, $b_g = h_g$); 对变形筋, $k = 2.0$ 。

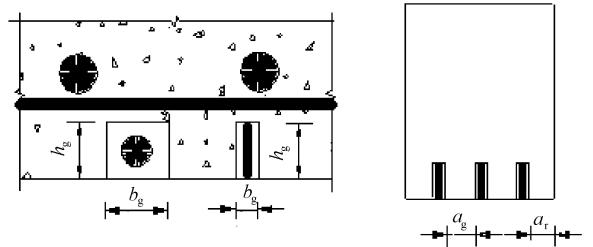


图 5 构造措施

5.3 材料选择

由于嵌入式加固所使用的 FRP 材料种类较多, 粘结性能也会有很大程度的不同。从 De Lorenzis 等^[2~4] 的试验结果可以看到, 表面光滑仅进行简单喷砂处理的 FRP 光圆筋, 粘结性能较差, 在 FRP-胶的界面容易发生破坏。带肋、表面螺旋缠绕 FRP 条带等的变形筋, 因为表面突起与混凝土间的机械咬合作用而具有较高的粘结强度, 这一点与变形钢筋类似。因而对承重构件进行抗弯加固时, 宜优先选用 FRP 变形筋。

采用高性能水泥砂浆替代环氧树脂进行嵌入式加固, 对于提高加固后结构的耐久性、降低成本非常有益, 是非常好的发展趋势。但其前提是要满足一定的物理和力学性能指标要求, 才能保证 FRP 与混

凝土间的可靠粘结。De Lorenzis 等^[4,5]采用水泥砂浆的试验效果并不理想。目前对此尚无标准可循,在工程应用时,应以可靠的试验结果为依据。

6 其他领域的研究和应用

文献[9]和文献[18]对嵌入式 FRP 筋施加预应力的抗弯加固进行了试验研究,文献[19]还进行了嵌入式 FRP 筋对混凝土梁进行抗剪加固的研究,均取得满意的试验效果。同时,也有一些采用嵌入式加固法对砌体结构^[20]、木结构^[21]加固的初步尝试。

与外贴 FRP 片材加固类似,FRP 嵌入式加固在相应研究成果完善、相关设计标准出台之前,已有了工程应用的实例^[4,22,23]。一方面说明该加固方法具有较好的市场前景,同时也说明加快研究和规范编制的进程是很迫切的。

7 结 语

1)试验证明,FRP 筋或板条采用嵌入式加固是一种非常有效的结构加固方法,具有广阔的发展前景。加固量相同的 FRP 板条,采用嵌入式加固的效果明显优于外贴加固。

2)嵌入式 FRP 筋或板条与混凝土间的粘结性能,受到 FRP 种类和表面形式、槽内填充材料的种类及性能、槽尺寸、净间距、距混凝土边缘距离、混凝土强度等多种因素的影响,还需进一步的试验研究以确定局部 $\tau-s$ 关系。

3)嵌入式 FRP 筋抗弯加固试验研究表明,也有可能出现粘结失效的提前破坏,FRP 强度未得到充分发挥,与外贴 FRP 片材的剥离破坏类似。这一点应在设计中加以考虑。根据延伸长度 l_d 确定发生粘结破坏时 FRP 的有效应变 ϵ_2 ,是后续研究应重点解决的问题。

参考文献

- 1 CECS 146:2003 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程
- 2 De Lorenzis L, Nanni A. Characteristics of FRP Rods as NSM Reinforcement. *Journal of Composites Construction*, ASCE, 2001, 5(2): 114~121
- 3 De Lorenzis L, Nanni A. Bond between NSM Fiber-Reinforced Polymer Rods and Concrete in Structural Strengthening. *ACI Structural Journal*, 1999(2): 123~132
- 4 De Lorenzis L. Strengthening of RC Structures with Near Surface Mounted FRP Rods. Ph. D. Thesis, Department of Innovation Engineering, University of Lecce, Italy; 2002
- 5 De Lorenzis L, Rizzo A, La Tegola A. A Modified Pull-out Test for Bond of Near-Surface Mounted FRP Rods in Concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2002, 33(8): 589~603
- 6 Blaschko M. Bond Behaviour of CFRP Strips Glued into Slits. *Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for*

- Concrete Structures. Singapore; 2003. 205~214
- 7 Hassan T, Rizkalla S. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2003, 7(3): 248~257
- 8 Rizkalla S, Hassan T. Effectiveness of FRP for Strengthening Concrete Bridges. *Journal of Structural Engineering International*, 2002, 3: 89~95
- 9 De Lorenzis L, Micelli F, La Tegola A. Passive and Active Near-Surface Mounted FRP Rods for Flexural Strengthening of RC Beams. *Proceedings of the Third International Conference of Composite in Infrastructures*, San Francisco, California; 2002
- 10 Taljsten B, Carolin A, Nordin H. Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Reinforcement of CFRP. *Advances in Structural Engineering*, 2002, 6(3): 201~213
- 11 Carolin A, Nordin H, Taljsten B. Concrete: Beams Strengthened with Near Surface Mounted Reinforcement of CFRP. *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong; 2001. 1 059~1 066
- 12 Hassan T, Rizkalla S. Flexural Strengthening of Prestressed Bridge Slabs with FRP Systems. *PCI Journal*, 2002; 47: 76~93
- 13 Teng J G, Chen J F, Smith S T, et al. *FRP-Strengthened RC Structures*, John Wiley and Sons Ltd, 2002
- 14 Smith S T, Teng J G. FRP-Strengthened RC Beams - I; Review of Debonding Strength Models. *Engineering Structure*, 2002, 24(4): 385~395
- 15 De Lorenzis L, Nanni A. Design Procedure of NSM FRP Reinforcement for Strengthening of RC Beams. *Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore; 2003. 1 455~1 464
- 16 Alkhrdaji T, Nanni A, Chen G, et al. Upgrading the Transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP. *Concrete International*, 1999, 21(10): 37~41
- 17 Parretti R, Nanni A. *NSM Design Guide*, Co-Force America Inc. and Hughes Brothers Inc., USA; 2003
- 18 Nordin H, Taljsten B, Carolin A. Concrete Beams Strengthened with Prestressed NSM Reinforcement. *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong; 2001. 1 067~1 075
- 19 De Lorenzis L, Nanni A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with NSM Fiber-Reinforced Polymer Rods. *ACI Structural Journal*, 1998(1): 60~68
- 20 Tumialan J G, Galati N, Namboorimadathil S M, et al. Strengthening of Masonry with Near Surface Mounted FRP Bars. *Proceedings of the Third International Conference of Composite in Infrastructures*, San Francisco, California. CD-ROM Version, 2002
- 21 Gentile C, Svecova D, Rizkalla S. Timber Beams Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2002, 6(1): 11~20
- 22 Hogue T, Cornforth R C, Nanni A. Myriad Convention Center Floor System Reinforcement. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, 1999. 1 145~1 161
- 23 Stone D, Tumialan G, Nanni A, et al. Near-Surface Mounted FRP Reinforcement: Application of an Emerging Technology. *Concrete (London)*, 2002, 36(5): 42~44