

文章编号: 1005-0523(2005)01-0040-04

复合材料加固技术中粘结破坏问题的探析

范毅, 童谷生, 朱成九

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌, 330013)

摘要: 纤维增强塑料(FRP)复合材料用于结构构件的加固、修补是一项新技术. 本文侧重总结和分析了该技术在应用中存在的关键问题, 讨论了影响结构粘结破坏的主要因素和改善粘结破坏、提高加固效率的技术措施.

关键词: 复合材料; 加固; 粘结破坏

中图分类号: TM392.3

文献标识码: A

1 引言

对混凝土结构加固处理是上世纪六十年代开始的^[1]. 传统的加固法有增大截面法、外包钢加固法、预应力加固法、增设支点法和粘贴钢板法等. 近年来国内外加固界兴起一种全新的技术含量高的补强加固方法—外贴纤维增强塑料(FRP)加固技术. 采用外部粘贴碳纤维布加固混凝土结构以改善其性能的技术在国内外已有广泛的试验研究和工程应用, 取得了一批成果. 与其他外部粘贴材料加固结构技术相似, 该技术是通过粘结材料在混凝土结构构件的外表面粘贴纤维布, 使纤维布与混凝土共同受力, 达到加固的目的. 研究与实践结果表明^[2~4], 用纤维布加固混凝土结构的成功与否主要取决于纤维布与混凝土两者之间粘结性能的优劣. 在两者的粘结质量有保证的情况下, 纤维布的优良物理力学性能可以得到充分发挥, 加固的可靠性高. 反之, 粘结性能差时可能会导致在材料性能没有充分发挥之前发生粘结界面的剥离破坏, 既造成材料浪费, 又降低了加固应有的可靠性. 因此, 国内外在关于碳纤维布加固混凝土结构技术的研究中, 粘结性能一直是重要研究内容之一. 本文就复合材

料加固技术中粘结破坏问题进行归纳和探讨.

2 剥离粘结破坏机理

研究发现^[5,6], 粘结破坏发生在高应力集中区, 即材料不连续或开裂处. 起源于应力集中区的粘结裂缝的传播路径, 取决于加固材料和基层界面的破坏性质、加固材料和基层材料的弹性性质及强度. 剥离破坏通常有如下四种形式^[7]: A型: 混凝土保护层剥离破坏; B型: FRP片材沿梁底剥落; C型: 由于弯剪裂缝造成FRP片材沿梁纵向剥落; D型: 由于弯曲裂缝开展过宽造成FRP片材沿梁纵向剥落. 混凝土保护层剥离破坏往往发生在FRP片材端部.

由于FRP片材在梁的剪跨区截断, 造成端部产生较高的粘结剪应力和剥离正应力, 若混凝土强度低, 弯剪裂缝开展较宽, 将造成端部混凝土保护层剥落, 并沿梁的纵向发展. 如果混凝土强度较高, 梁的抗剪能力较高, 端部高的粘结剪应力和剥离正应力将造成FRP片材在端部剥落, 并沿梁的纵向发展. 这种破坏形式FRP片材上往往带有微小的混凝土颗粒. 如果梁的剪跨较大, 粘结长度足够或FRP片材端部有可靠的锚固措施, 在梁的剪跨区弯剪裂缝处很可能发生FRP剥离, 并向片材端部发展. 如

收稿日期: 2004-09-15

作者简介: 范毅(1972-), 男, 福建建瓯人, 华东交通大学在读硕士研究生.

果梁的抗剪承载力足够高,抗弯承载力较低,弯曲裂缝开展过宽,往往在跨中弯曲裂缝处,FRP沿梁的纵向剥落,FRP断裂经常伴随这种破坏形式.这种破坏形式由于随着剥离的开展,界面间的高应力逐渐释放降低,剥离面逐渐变小.

3 粘结破坏的理论研究

对于粘结锚固破坏国内外一些学者进行了力学分析并得到了应力解.这些分析可归纳为三类:1) 基于弹塑性理论的解^[8,9];2) 基于线弹性断裂力学的解^[10];3) 半理论半经验的解^[11~13];基于弹性理论的解中比较有代表性的是 Roberts 的解^[8]. Roberts 将分析方法分为三个阶段,最后的解由叠加得到. Roberts 认为当最大粘结剪应力在 3MPa ~ 5MPa 之间时将发生剥离破坏. 瞿尔仁^[9]基于弹性梁理论,对粘胶层采用双线性模型以反映其非线性变形特性,建立了 FRP 加固混凝土梁层间应力弹塑性分析的基本方程,并给出了层间剪应力和拉应力解的形式和求解步骤. Christopher^[10]基于断裂力学理论,分析了裂缝处 FRP 的锚固作用,给出了裂缝处粘结剪应力的分布. Rabinovitch^[11]提出了一种高阶封闭解的形式. Swamy^[12]等在大量试验的基础上,经理论推导给出补强材料与混凝土表面之间发生粘结破坏的准则. 王荣国^[13]等分析了 FRP 加固的钢筋混凝土梁最大和最小裂缝间距,将裂缝间的混凝土保护层作为分析对象,简化为在粘结剪应力作用下的悬臂梁,给出了剥离弯矩的计算方法.

4 粘结剥离破坏的影响因素分析

粘结破坏的机理复杂,影响因素较多,国内外大量的学者对此纷纷展开研究,取得了众多的成果.目前研究发现其影响因素主要有:

1) 混凝土强度

混凝土的强度是最主要的影响因素.混凝土与外粘复合材料板间的粘结强度在一定的混凝土强度范围内随混凝土强度增加而增加.混凝土强度越低,越易发生剥离. Swamy^[12]把极限粘结应力同混凝土棱柱体强度联系起来,得出混凝土强度在 25~70 N/mm²间对应的粘结强度在 6.0~8.0 N/mm²间,同时得出试验确定的峰值界面粘结应力为 2τ , τ 是弹性剪切应力. Ranish 和 Rostay^[14]也把粘结强度和混凝土抗拉强度联系在一起,认为最大粘结应力等于

混凝土抗拉强度的 $\sqrt{2}$ 倍. Chajes^[15]经试验得出结论是表面处理会影响粘结强度,粘结节点破坏模式是由混凝土受剪强度所决定的. 杨勇新^[3]等人经试验研究得出粘结强度与混凝土强度的平方根基本呈线性关系.

2) 粘结剂的性能及粘贴层厚度因素

研究^[13,16]发现:粘结胶的剪切模量越小剪应力集中程度越低,发生粘结破坏的可能性越小,且大多数胶粘剂的粘结性能随胶层厚度的增加而降低.粘剂厚度愈大,胶粘剂的内应力与热变形愈大,粘结性能将下降;胶层较薄时,有利于极性分子的定向作用,同时由于胶层缺陷、气泡、裂纹、收缩等原因造成的内应力也相应减少.但胶层太薄则会引起缺胶,导致强度下降.

3) 载荷形式的影响

用碳纤维布加固混凝土构件时,碳纤维布与混凝土的粘结界面可能处于受剪、受拉、受压、受扭等简单受力状态,也可能处于剪一拉、剪一压、弯一拉、弯一扭、弯一压等复合受力状态,根据碳纤维布在混凝土结构构件中加固部位和作用的不同,碳纤维布与混凝土之间粘结界面的应力状态有所不同,界面粘结破坏极限值也存在差异. 杨勇新^[17]等人的研究表明:混凝土强度等级相同时,推拉(压力作用在粘结界面的平面内)作用下的粘结强度值最大;正拉(拉力作用于粘结界面的法向)作用下次之;拉剪(拉力作用于粘结界面的平面内)作用下再次之;弯拉(粘结界面受弯曲拉伸荷载作用)作用下最小. Barnes^[18]等人的研究显示,外贴复合材料钢筋混凝土加固件在疲劳载荷作用下,粘结破坏问题变得突出.

4) 环境因素影响

虽然复合材料自身的具有卓越的耐环境腐蚀能力,但复合材料加固构件的环境耐久性仍是结构加固技术中一个重要的问题.对用复合材料加固的混凝土构件在冻融、干湿及温度循环条件下的性能研究^[19]发现:在冻融、干湿、温度循环条件下会引起混凝土与复合材料界面损伤,从而导致粘结破坏问题. 任慧韬^[20]等对 FRP 加固混凝土结构在受到冻融循环影响的试验发现,在冻融循环条件下 FRP 与混凝土结构之间的粘结强度会降低,不同的胶降低的程度不同.

5) FRP 材料的用量及端部构造形式

由于粘结剂的剪切强度、剪切变形是一定的,超过其极限剪应变后粘结层即产生界面微裂缝,随

着微裂缝的不断扩展,界面最后发生剥离破坏,且混凝土的拉、剪强度也是一定的,所以粘贴 CFRP 片材加固有其限度,过量粘贴会导致界面无法传递足够的剪应力而使得 CFRP 的强度无法得到充分利用,并且在构件承受较大荷载时容易出现粘结破坏^[17,21].研究^[11,22,23]还显示:FRP 片材的端部构造形式(FRP 片材的宽厚比,端头的几何形式)会影响端头的应力集中程度,从而加剧或减轻粘结剥离破坏的程度.

6) 锚固长度及附加锚固措施

外贴纤维增强塑料与被加固的钢筋混凝土构件能够协同工作依靠的是混凝土与胶、胶与 FRP 之间的粘结应力,而 FRP 要充分发挥加固补强的作用就必须保证有足够的粘结锚固长度来完成应力的传递.如果 FRP 的锚固长度不足,FRP 不仅不能发挥其应有的作用,而且由于 FRP 端部存在较大的应力集中,这样会导致 FRP 与混凝土之间的撕裂粘结破坏.大量的试验^[24~27]研究显示:在粘结长度不足时,FRP 板端部增设附加锚固措施,可有效地减小粘结破坏.

5 工程应用中粘结剥离破坏预防措施和建议

1) 提高混凝土强度.混凝土强度对加固件的粘结强度有重大的影响,当混凝土抗压强度低于 C15 时,不宜采用外贴 FRP 加固法.

2) 择适当的粘结剂.不同的碳纤维片材与不同的树脂类粘结材料之间的复合效应不同,粘结质量有较大的差别,因此,要求在采用粘贴碳纤维片材对混凝土结构进行加固修复时,使用的碳纤维片材、树脂类粘结材料配套、协调.粘结剂应具有对碳纤维的浸润性、良好的工艺性、很强的粘合力、很低的收缩性和吸水性、很好的稳定性和较高的机械强度,并且要注意粘结剂的使用条件要和施工环境相符.建议使用纤维厂家提供的配套粘结剂.

3) 增加锚固长度和加设附加锚固措施.粘结应力与锚固长度有关,锚固长度短则局部粘结应力就大,容易发生剥离.因此纵向抗弯加固碳纤维布的锚固长度在可能的情况下应尽量长一些,一般建议伸到构件的支座边缘.板端附加锚固措施可有效地减小甚至防止板端粘结破坏的发生,增加构件的延性,是一项有效的技术措施.因此建议在 FRP 片材端锚固长度范围内及梁受集中荷载处设 U 型箍.U 形箍净距不大于梁高的 1/4,高度不小于梁高的 1/

2,每道 U 形箍量不小于梁底 CFRP 加固量的 1/2.

4) 碳纤维布的层数不宜过多.在保证足够的加固量的前提下,尽量减少碳纤维布的层数可以降低加固材料的整体刚度,降低剥离应力.根据研究与应用经验,一般情况下,构件同一部位粘结碳纤维布的层数不宜超过 3 层.如计算用量超过 3 层,建议改用粘贴钢板或 FRP 板加固.

5) 严格控制施工质量.保证碳纤维布粘贴面平整,粘结剂饱满、均匀,使碳纤维布受到纵向拉应力后横向尽量不发生受力不均匀现象,这样有利于保证碳纤维布与混凝土的整体粘结效果,抑制剥离的发生和发展.

6) 构件表面处理应严格.对于用外部粘贴材料进行结构加固的技术,构件表面处理也是一个关键问题.如果表面处理达不到要求,就会导致粘结界面薄弱,粘结强度降低,造成加固失效.

6 结束语

复合材料是近年来蓬勃发展并得到广泛应用的一种新型材料.复合材料以其轻质高强、成形方便、耐腐蚀、易施工等优点越来越受到土建行业的青睐.但粘结破坏是影响 FRP 材料应用的一个重要因素.粘结破坏会造成加固件的承载力、延性降低,发生脆性破坏,在加固设计、施工中必须高度重视.

参考文献:

- [1]吴辉琴,胡小桂.纤维增强复合材料加固混凝土结构的研究[J].广西工学院学报,1999.
- [2]吴辉琴,黄任常.用多层碳纤维布对梁进行抗弯加固的构造措施探讨[J].广西大学学报(自然科学版),2003.
- [3]杨勇新,胡云昌,岳清瑞,陈小兵.碳纤维布加固混凝土受弯构件的剥离破坏及其防治[J].工业建筑,2001.
- [4]L. Ascione, L. Feo. Modeling of composite laminates. Composites, Part B 31(2000)535-540.
- [5]Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca. Progress on understanding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. Construction and Building Material, 2003.
- [6]曾宪桃,段敬民.粘贴玻璃钢板加固混凝土梁胶粘层法向应力解析[J].桥梁建设,2002,(6).
- [7]Marco Arduini, Angelo Di Tommaso, and Antonio Nanni. Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams[J]. ACIS Structural Journal, 1997,(7-8):363-370.
- [8]Roberts. T. M., Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentration in the Adhesive Layer of Plated RC Beams

- [J]. *Structural Engineering*, 1989, (12), 228—233.
- [9]瞿尔仁,韩振峰,何刚,杨木旺,张业平. FRP加固混凝土梁层间应力的弹塑性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003;02. 208—212.
- [10]Christopher K. Y. Leung. Delamination Failure in Concrete Beams Retrofitted Materials in Civil Engineering, 2001 (3—4); 106—133.
- [11]O. Rabinovitch, Y. Frosting. High Order Approach for the Control of Edge Stresses in RC Beams Strengthened with FRP Strips[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, (7); 799—809.
- [12]Swamy RN, Jones R, Chairf A. Shear adhesion properties of epoxy resin adhesives. *Int. Symp.*, 1986.
- [13]王荣国,戴成雷,赵景海,张晓晶. CFRP加固混凝土梁式结构早期破坏理论的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002.
- [14]Ranish EH, Rostasy FS. Bonded steel plates for the reduction of fatigue stress of coupled tendons in multi span bridges. *Int. Symp.*, 1986.
- [15]Chajes MJ, Finch WW, Januszka TF, Thomson, TA. Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete. *ACI Struct J* 1996; 208—17.
- [16]贺学军,周朝阳. 粘钢加固钢筋混凝土结构粘结性能影响因素的研究[J]. 建筑技术, 2002, (12).
- [17]杨勇新,叶列平,岳清瑞. 碳纤维布与混凝土的粘结强度指标[J]. 工业建筑, 2003.
- [18]Barnes RA, Mays GC. Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates. *Compors Constr* 1999, 3(2); 63—72.
- [19]Chajes MJ, Thomson TA Jr, Farschman CA. Durability of concrete beams externally reinforced with composite fabrics. *Constr Build Mater* 1995; 9(3). 141—8.
- [20]任慧韬,胡安妮,赵国藩. 纤维增强塑料与混凝土粘结抗冻融性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2003. 43(4).
- [21]彭晖,尚守平,王海东,曾令宏. 用预应力CFRP对RC梁的加固工艺研究. 建筑技术开发, 2003, (5).
- [22]屈文俊,黄海群. 粘贴多层碳纤维布抗弯加固的构造分析[J]. 施工技术, 2003, (6).
- [23]E. E. Etman, A. W. Beeby. Experimental programe and analytical study of bond stress distributions on a composite plate bonded to a reinforced concrete beam. *Cement & Concrete Composites* 22(2000)281—291.
- [24]赵景海,张晓晶. CFRP加固混凝土梁式结构早期破坏理论的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002. (3).
- [25]张明武,余建星,王有志,张慎伟. FRP补强加固RC梁粘结破坏机理研究[J]. 建筑结构学报, 2003; 06.
- [26]叶列平,方团卿,杨勇新,岳清瑞. 碳纤维布在混凝土梁受弯加固中抗剥离性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2003, (33); 2.
- [27]王滋军,刘伟庆,姚秋来. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁锚固方式试验研究[J]. 工业建筑, 2003, (2).

Probing to Issue of Bond Failure Existing in Fibre Reinforced Polymers Used for Strengthening

FAN Yi, TONG Guosheng, ZHU Cheng-jiu

(School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: Using of fibre reinforced plastic (FRP) composite materials for strengthening and repair of structural members is a new technique. This paper mainly addresses a crucial issue related to application of the technique and analyses important factors which affect bond failure, meanwhile, provides some methods to improve effectiveness of reinforcement and to decrease potentialities of bond failure.

Key words: FRP; strengthening; bond failure.