

后锚固复材筋在混凝土中的锚固性能研究

叶英杰 姚 彤 徐玉康 何骏飞 徐 凯 邱天赐

(南京工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要 为研究不同粘结介质、筋体表面形状、锚固长度等对锚固性能的影响, 本文对各试验结果进行了分析, 试验发现选用高性能混凝土 (RPC) 作为粘结介质时粘结强度相对较高, 锚固性能较好; 本文针对不同筋体表面形状和筋体锚固长度进行了分析, 研究其与锚固性能的关系, 筋体表面形状以及锚固长度很大程度上决定锚固性能; 本文对根据试验结果得出的荷载-滑移曲线进行了分析, 同时对锚固破坏过程各个阶段也进行了研究分析, 旨在为相关人员提供参考。

关键词 植筋 后锚固 FRP 复材筋 钢筋

中图分类号: TU755

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)12-0036-03

在我国, 植筋技术已被广泛应用于旧房翻新、房屋加固、桥梁结构等工程领域中, 用于结构加固或提高结构性能等。植筋是将钢筋植入混凝土结构钻孔中, 用结构胶等粘合剂进行加固, 又称为后锚固钢筋技术。后锚固技术的便捷性、安全性和高效性使其在工程中越来越重要, 应用范围越来越广。由于传统钢筋在潮湿和非中性 (pH) 环境下极易锈蚀和被腐蚀, 使得结构性能下降, 严重影响结构的安全性、可靠性, 尤其在近河、近湖、近海地区, 效应更加明显。新型纤维增强复合材料 (FRP), 其相比于传统钢筋, 具有很好的抗电磁性能、密度小重量轻且耐腐蚀等优点, 能较好地取代传统钢筋, 大大提高结构的使用寿命。相对于混凝土而言, 环氧石英砂、环氧砂以及超高性能混凝土 RPC 作为粘结介质的锚固性能更好。

1 破坏形式分析

经对植筋拉拔试验研究发现, 主要的破坏形式有三种: 筋与粘结介质的粘结面破坏、筋拉断破坏、复合破坏 (锥体破坏)。

1.1 筋与粘结介质的粘结面破坏

发生破坏时, 混凝土部分与胶体部分发生相对滑移, 胶层围绕在筋体表面被一起拔出或者胶体粘结在混凝土表面, 筋体被光筋拔出^[1]。若筋体为螺纹筋, 筋体表面的凹凸与胶体能产生更好的粘结作用, 增大了机械咬合力, 筋体与粘结介质的粘结力大于混凝土与粘结介质的粘结力, 此时易发生胶层与筋体一起被拔出; 相反, 若为光圆筋, 则破坏多为光筋拔出。

1.2 拉断破坏

筋体承受的拉力超过其极限抗拉强度, 导致筋体的断裂破坏, 其埋深大于等于临界锚固深度。

有粘结面内拉断破坏以及自由长度内拉断破坏两种情况。当其中部分纤维丝被拉断后, 一定数量的纤维丝会分离出来, 继续增加荷载, 筋在最薄弱处发生破坏。^[2] 其多发生在粘结介质强度很高且锚固深度较深的情况下, 虽能很好地满足锚固条件, 但其性能过剩导致不经济。

1.3 复合破坏

由于埋置较浅, 筋体在未发生屈服阶段混凝土已经达到最大抗拉承载力, 发生脆性破坏。此类情况, 筋体性能未能被充分利用。

发生破坏时, 上层的筋体会携带着一圈被破坏的混凝土一起被拔出, 下部筋体发生滑移, 连同胶体一起被拔出, 整体形式为: 上部为混凝土锥形破坏, 下部为滑移破坏。当筋体的直径较大时, 粘结面面积较大, 粘结介质传递的径向力不足, 导致混凝土发生开裂。不断增加荷载, 粘结介质和筋体之间的粘结力不断增大, 发生粘结破坏, 最终形成复合破坏。此类破坏形式多发生于锚固深度相对较浅的情况下。此类破坏较为危险, 发生时没有明显的破坏征兆, 为突然性破坏。

2 纤维增强复合材料 (FRP)

FRP 筋是一种新型的复合材料, 相对于传统钢筋, 性能极佳, 在大部分领域能很好地取代传统钢筋。其抗拉强度远高于传统钢筋, FRP 筋的极限抗拉强度一

★基金项目: 本文系南京工程学院大学生科技创新基金项目 (TB202209006)。

般为 2000MPa, 其中部分强度达到 3500MPa 左右, 对于传统钢筋而言, 优势十分明显。且其密度小质量轻, 密度仅为传统钢筋的五分之一, 能有效减轻结构自重。耐腐蚀性能好, FRP 能很好地应用于近海建筑、桥梁、隧道等易被腐蚀的环境中, 其中碳纤维复材筋的耐久性相对较好。电磁绝缘性能好, 能很好地适用于如雷达站、微波站等有特殊要求的建筑。抗疲劳性能好, 碳纤维复材筋的抗疲劳性能明显优于传统钢筋, 但其中玻璃纤维复材筋的抗疲劳性能略逊于传统钢筋。^[3]

FRP 筋抗拉弹性模量低, 导致其受力后的变形比较大, 明显大于传统钢筋, 其应用于混凝土结构中时, 结构受拉后的裂缝较大。抗剪强度低, 尤其是其横向抗剪强度极低, 极易受剪力破坏, 在应力集中处纤维丝易断裂, 因此针对 FRP 筋, 会为其制作专门的锚具, 以减少因剪力导致的破坏。热稳定性差, 耐火耐高温性能差, 在高温环境下, FRP 筋的性能会急剧下降。

FRP 筋相比于传统钢筋, 在抗拉强度、抗腐蚀、电磁绝缘等方面优点十分明显, 充分利用 FRP 筋超强的抗拉性能并合理避开其缺点是 FRP 筋成功使用于工程实践的关键。

FRP 筋与混凝土之间的粘结力分析有如下几方面。

2.1 粘结力的组成和作用

形同传统钢筋与混凝土之间的粘结力, 新型纤维增强复合材料 (FRP) 和混凝土之间的粘结力的主要组成为:

1. 因温度变化或吸湿引起的混凝土收缩或 FRP 筋的膨胀所产生的化学吸附力。

2. FRP 筋与混凝土摩擦面上产生的阻碍相对运动的力。

3. 由搭接、埋设长度、弯钩等产生的 FRP 筋的机械咬合力。

4. 通过防止 FRP 筋表面的机械咬伤、摩擦或变形而产生的混凝土挤压所产生的合力。

光圆 FRP 筋表面较光滑, 导致混凝土与筋体的作用面只存在化学吸附力和微小的摩擦力, 具有较低的粘结强度。带肋纤维增强复合材料 (FRP), 则与混凝土的粘结作用力与一般普通钢筋相似。与一般钢筋相异的是纤维增强复合材料 (FRP) 的硬度、强度与混凝土相比较低。所以, 当发生滑移破坏时, 化学作用产生的粘着力消失后, 粘结力就主要由摩擦力承担; 而对于带肋 FRP 筋, 粘结力主要依靠机械咬合力维持, 其中化学粘结力和摩擦力的作用较小。

2.2 FRP 筋与混凝土粘结性能的影响因素

影响粘结性能的主要因素^[4]为:

1. 混凝土强度。以钢筋混凝土为例, 混凝土强度提高, 粘结强度也会有相应的提高。而两者之间的关系主要为: 粘结强度与混凝土的抗压强度或者抗拉强度的平方根成正比。

2. FRP 筋的埋入长度。FRP 筋混凝土与钢筋混凝土相似, 在整个埋长范围内粘结应力分布不均匀。当 FCR 钢筋的埋入长度增加, 粘结强度则会相应地减小, 所以过度增加埋入深度, 粘结效应增加并不明显。

3. 横向箍筋。在混凝土内部配置横向箍筋可以有效预防试件径向和纵向发生劈裂破坏, 同时也能大大改善 FRP 筋混凝土的粘结性能。

4. FRP 筋的自身性能。例如纤维筋的表面形状、直径、种类等。其中 FRP 筋的表面形状与普通钢筋一致, 分为光圆型表面和螺纹型表面。在其他条件相同情况下, 光圆型表面的 FRP 筋和螺纹型表面的 FRP 筋相比, 螺纹型表面的 FRP 筋的粘结效应远好于光圆型表面的 FRP 筋。

5. 环境因素。FRP 筋混凝土粘结性能会随着温度的变化有明显变化, 另外, 处于不同的环境 FRP 筋混凝土试件的粘结性能也会受到影响, 例如强酸环境、强碱环境等。

6. 其他因素。FRP 筋混凝土的粘结性能还受诸多因素影响, 还需要进行不断的研究和探索。

3 锚固性能分析

3.1 粘结介质对锚固性能的影响

粘结介质的种类及强度对筋体的锚固性能影响极大, 不同种类、不同强度的粘结介质针对不同材料、不同直径的筋体之间的粘结力存在很大差异, 因此选择合适种类、强度的粘结介质对锚固性能极为重要。试验选取了直径 10 毫米的碳纤维复材筋 (CFRP)、15 倍筋直径作为埋深长度为试验条件, 使用包括普通混凝土、活性粉末混凝土、环氧类粘结剂在内的三种粘结介质, 进行大量拉拔试验, 研究粘结介质对锚固性能的影响。经大量试验做出各粘结介质的荷载-滑移曲线, 发现当选取普通混凝土作为粘结介质时, 筋体产生滑移后, 相比于其他两类粘结剂, 滑移速度的增加更加迅速, 在很短时间内锚固就会失效。在 15 倍筋直径为埋深, 以环氧砂作为粘结介质, 筋体开始有滑移时, 施加的拉力为 20 KN; 以高性能混凝土作为粘结介质时, 出现滑移时的荷载为 38 KN。而在 25 倍、30 倍筋直径为埋深的试验条件下, 环氧砂为粘结介质出现滑移时的荷载大于以高性能混凝土作为粘结介质时的荷载。以环氧砂作为粘结介质, 滑移开始发生后, 滑移速度会迅速增加至完全失效, 而以高性能混凝土

为粘结介质时, 滑移速度相对较小, 且趋于稳定^[5]。试验中使用的环氧砂抗压强度大于混凝土的抗压强度, 而高性能混凝土的抗压强度又大于环氧砂的抗压强度, 故高性能混凝土的失效粘结力最大, 环氧砂次之, 普通混凝土最小。试验发现, 不同种类的粘结介质对锚固性能的影响是不尽相同的。

3.2 锚固长度和筋体表面形状对锚固性能的影响

筋体与混凝土的锚固性能主要由粘结介质与筋体表面的化学胶着力、筋体与胶层接触面的摩擦力以及筋体表层凹凸不平产生的机械咬合作用决定。试验发现, 当粘结介质为普通混凝土时, 压纹筋的锚固粘结作用基本完全由机械咬合力决定, 粘结介质为环氧砂和高性能混凝土时, 粘结作用中机械咬合力分别占比 70% 和 85%, 即压纹筋的锚固性能很大程度上取决于机械咬合力。

试验用不同条件下筋的极限抗拉强度代表此条件下的锚固性能, 试验选用碳纤维复材筋研究发现, 在对锚固端进行打磨的试验条件下, 增大筋体的埋深即锚固长度, 所有碳纤维复材筋的抗拉强度也随之增加。碳纤维复材筋在打磨条件下, 平均粘结强度随锚固长度的增大不断减小, 达到一定锚固长度后减小的速度变缓, 最后趋于平稳。对于 7 毫米光圆筋, 在打磨的试验条件下, 不断增大锚固长度, 平均粘结强度表现为先增大后减小^[6]。对于光圆筋, 进行环氧胶膜粘砂, 在保证一定的锚固长度条件下, 锚固性能较佳。对于螺纹筋, 由于机械咬合力较大, 使用环氧树脂粘砂, 能较好地利用材料性能, 发挥出较佳的锚固作用。

当筋体埋入深度较浅时, 筋体多发生复合破坏即锥形破坏, 承载力很小, 钢筋的能力没有发挥出来即被破坏, 且破坏多呈现为脆性破坏。逐渐增加埋入深度, 筋体会有屈服现象, 出现有预兆性的破坏。当埋深达到甚至超过 15 倍筋体直径长度时, 筋体均会出现屈服现象, 当筋体直径较小时, 也会发生延性破坏。随着筋体埋入深度的继续增加, 筋体的承载力相差不大, 但对出现滑移后残余的粘结强度影响较大。

3.3 荷载-滑移曲线分析

根据试验结果做出大量荷载-滑移曲线图, 发现对于不同种类的筋, 都出现某一定值, 从 0 开始不断施加荷载, 当荷载加至该值之前, 荷载与加载端的滑移量总保持某一线性关系, 即可视为锚固粘结性能的弹性阶段, 粘结刚度可由该曲线的斜率近似代表。埋深较浅时, 其弹性阶段的曲线斜率相对较小。随着埋

深的增大, 弹性阶段的曲线斜率也随之增大。当埋深达到某一固定有效长度后, 其弹性阶段的曲线斜率不再增加。

继续加载, 即超出其弹性范围后, 筋体开始出现屈服, 荷载-滑移曲线转为非线性关系, 曲线斜率开始减小。在该阶段, 埋深的长度影响植筋的极限承载力, 在一定范围内, 埋深较深则植筋的极限承载力越大, 当埋深达到一定长度时, 继续增加埋深对极限承载力的提升几乎没有影响。荷载达到粘结破坏时的最大荷载值后, 进入残余阶段, 曲线变为不规则发展, 滑移急剧增大^[7]。此时, 粘结介质与混凝土之间的粘结力已近乎完全失效, 仅靠破坏面的机械咬合力以及摩擦力作为残余粘结力。随着埋深的增大, 残余粘结力会随之增大。

4 结语

本文对拉拔试验中植筋的破坏形式、影响锚固性能的影响因素以及荷载-滑移曲线进行了试验分析, 试验结果如下:

1. 植筋的拉拔试验, 主要的破坏形式有三种: 筋与粘结介质的粘结面破坏、筋拉断破坏、复合破坏(锥体破坏)。其中, 最理想的破坏形式为筋的拉断破坏。
2. 纤维增强复合材料(FRP)在大部分情况下能很好地取代传统钢筋, 甚至性能更佳。
3. 压纹筋的锚固粘结作用主要由机械咬合力决定。
4. 不同种类的粘结介质对锚固性能的影响是不尽相同的, 其中高性能混凝土(RPC)效果较好。
5. 筋体埋深对滑移后残余粘结强度影响较大, 埋深越大, 残余应力越大。

参考文献:

- [1] 卜良桃, 全玥, 罗兴华. 高性能水泥复合砂浆中无机胶植筋拉拔试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(04): 57-59, 81.
- [2] 李彪, 杨勇新, 岳清瑞. 碳纤维筋锚固性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(12): 79-83.
- [3] 熊学玉, 许立新, 胡家智. 化学植筋的拉拔试验研究[J]. 建筑技术, 2000, 31(06): 383-384.
- [4] 朱浮声, 张海霞. FRP 筋与混凝土粘结滑移力学性能研究综述[J]. 混凝土, 2006(02): 12-15.
- [5] 方志, 梁栋, 蒋田勇. 不同粘结介质中 CFRP 筋锚固性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006(06): 47-51.
- [6] 周新刚. 混凝土植筋锚固性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(07): 1169-1173.
- [7] 郭恒宁. FRP 筋与混凝土粘结锚固性能的试验研究和理论分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.