

# 水泥基无机黏结材料植筋承载力的试验研究

刘立新<sup>1</sup>, 许化彬<sup>1</sup>, 甘元初<sup>2</sup>, 许 瑞<sup>3</sup>

( 1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002 2. 南华大学建资学院, 湖南 衡阳 421001 3. 中国矿业大学  
( 北京 ) 力学与建筑工程学院, 北京 100083 )

摘 要: 通过对水泥基无机黏结材料植筋承载力的拉拔试验研究, 分析了水泥基无机黏结材料植筋的破坏形态和破坏机理, 讨论并给出了极限锚固承载力计算公式及建议施工锚固长度表格. 通过与同条件下预埋钢筋、植筋后绑焊以及某有机黏结材料植筋承载力相比得到此水泥基无机黏结材料的工程适用性, 并在实际工程中得到验证.

关键词: 水泥基无机黏结材料; 植筋; 超细晶粒钢; 拉拔试验; 锚固长度

中图分类号: TU 502 + .6 ;TU 58 + 2 文献标识码: A

## 0 引言

近些年来植筋技术在混凝土加固修复工程中得到广泛应用. 植筋技术是一种混凝土结构加固技术, 植筋又称埋栽钢筋, 后埋, 生根等, 所谓植筋就是在已有混凝土结构或构件上根据工程拟需要钢筋以适当的钻孔孔径和深度, 采用黏结锚固材料使新增钢筋与混凝土黏结牢固, 使新增钢筋与原有钢筋共同工作, 并使新增钢筋发挥设计所期望的性能, 以有效地解决新老混凝土连接, 钢筋漏埋, 错埋等钢筋生筋问题<sup>[1]</sup>.

与普通混凝土相比, 植筋是在原有混凝土结构上进行, 属二次受力的组合结构, 植筋存在着钢筋——黏结锚固材料和黏结锚固材料——混凝土双重界面, 因此, 对植筋黏结锚固材料及其施工工艺等的要求也格外苛刻, 黏结锚固材料性能的优劣直接决定着植筋效果的好坏. 黏结锚固材料就其化学成分来说可分为有机黏粘结锚固材料, 无机黏结锚固材料和混合黏结锚固材料. 据市场统计有机黏结锚固材料相对价格高, 毒性大, 施工工艺复杂而且耐火耐高温性能比较差, 无机黏结锚固材料相对价格低, 施工工艺简单, 耐火性能较好, 耐老化, 可湿作业施工, 与有机黏结锚固材料相比较有很大优势, 市场前景较好. 因此对无机黏结锚固材料的开发和研究具有重要意义.

笔者通过水泥基无机黏结材料植筋( 超细晶粒钢筋 ) 的单调静力拉拔试验, 用试验验证了超细晶粒钢筋能用于植筋技术中, 分析了水泥基无机黏结材料用于植筋的工程适用性, 并分析了水泥基无机黏结材料植筋的破坏形态和破坏机理, 提出了水泥基无机黏结锚固材料植筋承载力计算公式和建议施工锚固长度表格.

## 1 试验概况

试验采用河南郑州长建公司生产的水泥基无机黏结材料进行植筋, 利用单调静力拉拔试验并控制钢筋滑移, 试验加载及量测装置见图 1. 为模拟实际工程条件, 本试验选择将钢筋植入以前废弃的混凝土构件上<sup>[2]</sup>, 用手动液压千斤顶进行加载, 加载等级根据《混凝土结构试验方法标准》( GB50152 - 92 ) 取用. 所植钢筋为直径 12, 25 超细晶粒 400 钢筋, 植筋孔径分别为 16 mm 和 32 mm, 在 3 种不同混凝土强度的混凝土块上分别按 8, 10, 15 植入, 每组 3 根, 样本数量计 54 根. 为量测钢筋滑移量, 在钢筋根部设置夹具固定百分表表架, 用两个百分表人工读取数值, 取平均值为滑移量, 用钻芯法测定混凝土强度<sup>[3]</sup>, 混凝土强度及超细晶粒钢筋实测值见表 1、表 2. 设计了同等条件下( 同混凝土强度、同锚固长度、同钻孔孔径 ) 水泥基无机黏结材料植筋和植筋后通电绑焊加长, 预

收稿日期 2005 - 12 - 05 ;修订日期 2005 - 12 - 30

基金项目 : 国家“ 863 ”计划资助项目( 2004AA33G050 )

作者简介: 刘立新( 1947 - ) 男, 湖北汉川人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构、砌体结构基本理论及应用研究.

埋钢筋以及有机黏结材料植筋极限拉拔力相比较的试件。

表 1 钢筋力学性能试验结果

Tab.1 Mechanical capacity of steel bar				
钢筋直径 /mm	拉力 /kN	屈服强度 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	拉力 /kN	极限强度 ( $N \cdot mm^{-2}$ )
12	52	460	67.8	600
25	252	513	342	697

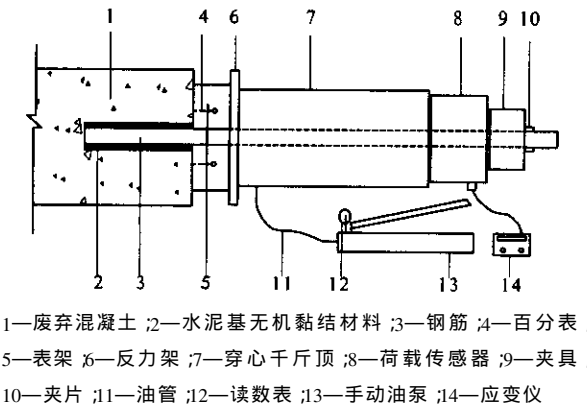


图 1 试验加载装置

Tab.1 Experimental load fixture

表 2 混凝土强度				
Tab.2 Strength of concrete				
混凝土	实测强度	$f_{cu}/$	$f_{ck}/$	$f_{tk}/$
设计强度	/kN	( $N \cdot mm^{-2}$ )	( $N \cdot mm^{-2}$ )	( $N \cdot mm^{-2}$ )
C40	252	71.5	45.9	3.02
C30	204	57.9	38.2	2.87
C20	188	53.4	35.5	2.80

说明:钻芯法<sup>[3]</sup>测定直径为 67 mm,长径比为 1 的标准芯样  $f_{cu}$ 、 $f_{ck}$ 、 $f_{tk}$ ,计算按混凝土设计规范<sup>[4]</sup>计算。

2 试验现象和破坏形态

试验为单调静力拉拔破坏性试验,试验时采用人工液压千斤顶加压,匀速单调缓慢加载,加载制度为:预加载至钢筋屈服荷载的 20% 后卸载,钢筋屈服前每 20% 钢筋屈服强度为一加载等级,钢筋屈服后取适量荷载为一加载等级,每个加载等级读取钢筋滑移量值,同时观察试件混凝土开裂情况,直至试件破坏(黏结锚固失效或者钢筋拉断)<sup>[5,6]</sup>。植筋拉拔试验的破坏过程基本一致,钢筋都能达到屈服强度,并且钢筋都能进入强化阶段。植筋的破坏形态以钢筋的屈服为标志,有明显的预兆。

在加载初期,荷载稳步上升,滑移量很小。当加载到一定程度,发现钢筋根部混凝土隆起,周围出现环状裂缝和起皮现象,这时能听到轻微混凝土开裂的声音。数据 = 8d 时,当继续加载可达到钢

筋屈服荷载,滑移量开始增大;继续加载,荷载能持续一段试件并保持不变,继而发生钢筋与黏结材料脱离,钢筋拔出; $l_a > 8d$  时,继续加载,荷载略有增加直至钢筋颈缩被拉断。破坏后混凝土基材都发生或多或少的表层锥形破坏,但无发生深层破坏。

图 2 给出了直径 25 的超细晶粒 400 MPa 钢筋锚固长度分别为 8d(200 mm)、10d(250 mm)、15d(375 mm)植筋拉拔试件典型的荷载-滑移曲线。由图可以看出,曲线大致可分为三个阶段,即弹性阶段、准弹性阶段和屈服强化阶段(残余段由于试验条件有限未测到)。当荷载小于某一值时,加载端的滑移与荷载保持直线关系,即弹性阶段,对应的弹性阶段的荷载为钢筋屈服荷载 80%,对应的滑移量约为 0.3 mm,曲线斜率反映了植筋的黏结刚度,黏结刚度并不以锚固长度的改变而变化。继续加载,钢筋进入准弹性阶段,荷载滑移曲线呈非线性,曲线有一转折点,斜率增大,黏结刚度短暂增大,锚固长度的增长并没有明显提高承载力,继续加载直至钢筋达到屈服,钢筋进入屈服强化阶段,在荷载变化很小的情况下,滑移量急剧增大,能达到 4~6 mm,直至极限承载力  $F_u$ ,可以看出锚固长度对极限承载力有略微影响,但不明显,但在同一荷载下,不同锚固长度的植筋试件滑移量不同,滑移量随锚固长度的增长而减小。达到极限后曲线能进入残余段,但试验条件有限,曲线的下降段未能测到。从图中可以看到,当达到极限承载力的时候, $F_u$  接近钢筋的极限承载力,荷载滑移曲线趋于平缓,说明用此水泥基无机黏结材料植筋的破坏有明显预兆,属延性破坏,能满足工程需要。

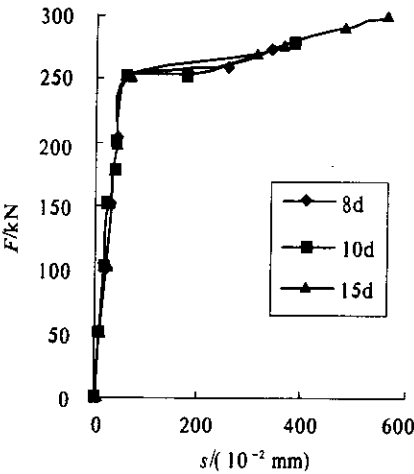


图 2 荷载-滑移曲线

Fig.2 Load-slip curve

对于水泥基无机黏结材料完全固化的植筋,

当锚固长度达到  $l_a \geq 8d$  时,都能使钢筋达到屈服且进入颈缩阶段,植筋的破坏为钢筋屈服,有明显的预兆;由相关文献 [7] 知,当锚固长度较小时,发生黏结锚固破坏,没有明显的预兆,锚固长度直接影响着植筋强度,植筋深度不够,破坏呈脆性,不能充分发挥所植筋的强度。

3 锚固承载力建议公式及建议施工锚固长度

相关文献 [8] 指出,化学植筋连接破坏形态式分为三种类型,即锚固钢材破坏,混凝土基材破坏,拔出破坏。当锚固长度较小,发生混凝土基材或拔出破坏,由于本试验中植筋的锚固长度超过临界锚固长度,试验破坏都是锚固钢材破坏,具有明显的塑性变形,破坏荷载的离散性较小,与其它黏结材料植筋相比较,锚固长度相对较小。受拉承载力可按工程结构后锚固技术规程计算<sup>[8]</sup>,即

$$N_{Rds} = N_{Rk,s} / \gamma_{RS,N} \tag{1}$$

$$N_{Rk,s} = A_S f_{stk} \tag{2}$$

式中: $N_{Rk,s}$  为植筋钢材破坏受拉承载力标准值; $\gamma_{RS,N}$  为植筋钢材破坏受拉承载力分项系数; $A_S$  为植筋应力截面面积; $f_{stk}$  为植筋极限抗拉强度标准值。

适当的锚固长度和钻孔孔径不仅能使所植钢筋达到极限强度,满足强度的要求,而且能减少施工难度,避免不必要的材料浪费,根据实际试验结果及现场施工经验给出了此水泥基无机黏结材料植筋的钻孔孔径和建议施工锚固长度,具体见表 3。

表 3 建议施工锚固长度

Tab.3 Suggested anchoring length in construction

mm		
钢筋直径 d	钻孔孔径 D	锚固长度 $l_a$
10	14	100
12	16	120
14	18	140
16	20	160
18	22	180
20	25	200
22	30	220
25	32	250

4 对比试验分析

试验设计了同等条件下水泥基无机黏结材料植筋效果与预埋钢筋的极限拉拔力比较,与某有机黏结材料植筋效果进行比较,并与通电绑焊后植筋效果比较。根据上文分析取锚固长度均为 10 d,进行拉拔试验,具体数据表 4。从对表 4 的分析中可以得到:

(1) 此水泥基无机黏结材料的植筋效果比预埋钢筋极限拉拔力有大幅度提高,样本数 18 个,总体平均提高 14.78%。可以看出此无机黏结材料可很好的用于结构加固中。

(2) 此水泥基无机黏结材料的植筋效果和有机黏结材料的植筋效果相当,可以替代有机黏结材料应用于实际工程中。

(3) 植筋在通电绑焊加长后 10 min 进行拉拔试验,锚固强度有所下降,极限拉拔力平均下降 8.45%,无大幅度降低,而且焊接工艺的好坏直接影响锚固强度。

表 4 对比试验极限拉拔力样本数据表

Tab.4 Comparison of ultimate strength

编号	$F_{u1}/\text{kN}$	$F_{u2}/\text{kN}$	$\frac{F_{u2} - F_{u1}}{F_{u2}}/\%$	编号	$F_{u1}/\text{kN}$	$F_{u2}/\text{kN}$	$\frac{F_{u2} - F_{u1}}{F_{u2}}/\%$
25-250-1	306	312	1.92	14-140-3	59	72	18.32
25-250-2	280	272	-2.94	16-160-1	77	82	6.15
18-180-1	100	109	8.26	16-160-2	75	82	8.90
18-180-2	95	104	8.65	16-160-3	70	88	20.27
18-180-3	焊头断落	95	—	18-270-1	82	109	25.23
14-140-1	52	70	25.70	18-270-2	95	104	8.54
14-140-2	61	72	15.17	18-270-3	99	104	4.81

说明: $F_{u1}$ 和  $F_{u2}$ 分别对应相应条件下极限拉拔荷载,编号为 25-250 和 25-250 的  $F_{u1}$ 为有机黏结材料植筋, $F_{u2}$ 为无机黏结材料植筋;编号为 18-180 的  $F_{u1}$ 对应的条件为植筋后通电绑焊, $F_{u2}$ 为植筋后无通电;编号为 14-140、16-160 和 18-270  $F_{u1}$ 的条件为植筋后预埋, $F_{u2}$ 的条件为无机黏结材料植筋。

## 5 工程实例

廖峪沟高架桥、仁存沟高架桥、英峪沟高架桥为连霍国道主干线郑州至洛阳高速公路控制性咽喉工程。郑洛高速公路于 1995 年年底建成通车,截止到目前,已投入运营近 10 年时间。在各种因素的影响下,在投入使用后不久,由于使用荷载超限、后期预应力损失影响、施工质量方面、设计方面等各方面的原因,导致三座高架桥上部结构各跨主梁的腹板均出现了不同程度的开裂现象(主要是靠近墩台的斜裂缝),个别部位出现了表面混凝土剥离、钢筋及钢绞线裸露的现象。为确保该桥满足正常使用情况下结构的极限承载力,改善箱梁腹板的主拉应力情况,避免裂缝进一步的发展,增大箱梁最小压应力储备,增大安全储备,并保证加固后桥梁梁体外观如新。在此加固工程中主要采用了体外预应力张拉的方法提高承载力,主要的技术措施就是植筋。本工程中采用此水泥基无机黏结材料植筋,植筋 30 000 多根,质检部门进行了现场检验,并按规范要求抽取适当比例抽样进行现场钢筋拉拔试验,并将试验结果与设计要求进行比较,该工程所植钢筋抽样试验均满足设计要求。

## 6 结论

- (1) 超细晶粒钢筋植筋可代替普通钢筋用于植筋;
- (2) 由拉拔试验的观察分析,得出此水泥基

无机黏结材料植筋锚固受力过程的四个临界状态和受力阶段,即弹性阶段、准弹性阶段、屈服强化阶段和残余段;

(3) 通过对不同条件下拉拔试验资料的统计,验证了此水泥基无机黏结材料植筋锚固极限承载力的计算公式在混凝土结构后锚固技术规程中的应用;

(4) 工程应用中通常在植筋后钢筋通过绑焊加长,此水泥基无机黏结材料植筋后通电绑焊,承载力虽有所下降,但不明显,能满足工程设计要求;

(5) 通过对比得出此水泥基黏结材料植筋的工程适用性,并在实际工程中得到应用。

## 参考文献:

- [1] 柯梅生. 化学植筋技术的试验研究与工程应用[J]. 施工技术, 2001, 30(2): 13~14.
- [2] 赵更歧. 植筋黏结锚固性能的实验研究[D]. 郑州: 郑州大学硕士论文, 2001: 13~18.
- [3] CECS 03-88, 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].
- [4] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].
- [5] 徐有邻, 沈文都, 汪洪, 等. 变形钢筋-混凝土黏结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院结构所, 1990.
- [6] 毛达岭, 刘立新, 范丽. HRB500 钢筋黏结锚固性能及设计建议[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(2): 54~57.
- [7] 佟百龙, 冀玉秋, 纪全武, 等. 钢筋植筋锚固参数研究[J]. 东北公路, 2003, 26(3): 97~100.
- [8] JGJ145-2004 混凝土结构后锚固技术规程[S].

## Experimental Investigation of the Bonded Rebar Bearing Capacity of Cement Based Inorganic Anchoring Material

LIU Li-xin<sup>1</sup>, XU Hua-bin<sup>1</sup>, GAN Yuan-chu<sup>2</sup>, XU Rui<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Architecture, Resource and Environment Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China; 3. School of Mechanics and Architecture, China University of Mining and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the bearing capacity experimental investigation of bonded rebar by using the cement based inorganic anchoring material, failure form and mechanism of this material is analyzed. A corresponding calculating formula on the ultimate anchoring strength of this material and a suggested table in construction of anchoring length are put forward. By comparing the ultimate bearing capacity with embedded bar in advance in the same condition, welding on bonded rebar and bonded rebar by using the organic anchoring material, the engineering applicability of the cement based inorganic anchoring material is obtained, and tested in the actual project.

**Key words:** cement based inorganic anchoring material; bonded rebar; ultra-fine grain steel; pull-out experiment; anchoring length