

文章编号:1673-2049(2019)01-0013-09

快凝无机胶植筋锚固性能试验

尚守平¹, 黄新中¹, 杨甜^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东省建筑设计研究院, 广东 广州 510010)

摘要:基于目前有机胶普遍存在的弹性模量低、易老化、耐热性能差等问题,研制出一种高强快凝的新型无机胶。对该无机胶在水平面及竖直面混凝土基材上的植筋进行了拉拔试验,通过对比不同工况下的试验结果,探究了钢筋直径、混凝土强度、锚固深度以及植筋角度等因素对植筋锚固性能的影响。基于试验现象归纳了几种典型的破坏模式,并根据试验数据绘制了2种典型破坏模式的荷载-位移曲线,分析了植筋锚固的受力机理;从结构安全性和工程经济性角度出发,通过理论推导得出了锚固深度的近似计算公式,提出了一种简单而实用的植筋设计方法,将该方法应用于试验,并将得出的试验值与计算值进行了对比。结果表明:根据均匀剪切模型,28 d植筋试件的平均黏结强度可达19.65 MPa,甚至更高,超过《混凝土结构化学植筋技术规程》中A级胶所要求的黏结强度(11 MPa);所提出的植筋设计方法适用于各种不同工况,其锚固深度理论计算值和试验值吻合较好,可应用于今后的植筋设计中。

关键词:工程结构加固;无机植筋胶;拉拔试验;锚固性能;均匀剪切模型;植筋设计方法

中图分类号: TU526

文献标志码: A

Experiment on Anchorage Performance of Planting Rebar with Rapid-solidification Inorganic Adhesive

SHANG Shou-ping¹, HUANG Xin-zhong¹, YANG Tian^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. Architectural Design and Research Institute of Guangdong Province, Guangzhou 510010, Guangdong, China)

Abstract: Based on the problems of low modulus of elasticity, easy aging and poor heat resistance of organic adhesives, a new type of inorganic adhesives with high strength and rapid solidification was developed. Through the pull-out test of the planting rebar in the horizontal and vertical planes of concrete substrates with inorganic adhesive, and comparing the test results under different working conditions, the effects of rebar diameter, concrete strength, anchoring depth and the implanted angle on the anchorage performance of rebar planting were investigated. Several typical failure patterns were concluded based on the test phenomena, and according to the test data, the load-displacement curves of two kinds of typical failure modes were drawn, the anchorage stress mechanism of planting rebar was analyzed. From the view of structural safety and engineering economy, an approximate formula for calculating anchorage depth was obtained through theoretical deduction, and a simple and practical design method for planting rebar was proposed. The method was applied to the test, and the theoretical calculation values and the test values were compared. The results show that on the basis of uniform shear model, the average

收稿日期:2018-05-11

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAL03B01)

作者简介:尚守平(1953-),男,山东黄县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sps@hnu.edu.cn。

bond strength of steel specimen after 28 d can reach 19.65 MPa or even higher, far more than the bond strength of A grade adhesive (11 MPa) which was proposed in *Technical Regulation of Chemically-planted Steel Bars in Concrete Structures*. The proposed design method of planting rebar is applicable to various working conditions, and the theoretical calculation results of anchoring depth are in good agreement with the experimental values. The design method of planting rebar can be applied to the future design of planting rebar.

Key words: reinforcement of structural engineering; inorganic adhesive of planting rebar; pull-out test; anchorage performance; uniform shear model; design method of rebar planting

0 引言

近年来中国混凝土加固改造技术得到快速发展,随着新材料、新技术在加固领域的广泛应用,加固的方法和手段也越来越多样化,植筋技术因其独特的工程优越性而受到广泛应用^[1-3]。所谓植筋就是在已有混凝土结构或构件上按工程需要钻以适当孔径和深度,以黏结锚固材料作为媒介,使新增钢筋与混凝土黏结牢固,共同工作^[4]。Cook 等^[5-9]早在 20 世纪 70 年代就进行了大量的化学植筋试验,并在试验结果的基础上,总结了化学植筋的破坏模式及相应的极限承载力计算式。传统的植筋技术多以有机材料为锚固介质,如环氧树脂、聚酯树脂,这些材料均存在不耐高温、耐久性差及弹性模量低等问题^[10-11],因此有必要研制强度高、耐高温且耐久性好的无机胶。无机胶凝材料的研究始于国外,早在 1957 年前,Glukhovsky 等^[12-13]就进行了相关研究,并取得了大量成果。中国对于无机胶凝材料的研究开始较晚,但近 20 年在这一领域也取得了很大进展^[14-19],主要集中在胶凝材料的活性分析及植筋锚固性能上。最近几年,中国对于无机胶凝材料植筋的研究又有了进一步的发展,包括无机胶植筋的抗火性能、黏结滑移性能以及基于可靠度理论的植筋设计方法^[20-23]。

目前中国应用较多的有机胶为德国某品牌有机胶,该有机胶凝结时间一般为 20 min 左右,不适用于有快凝要求的植筋工程,且为非饱和树脂类有机物,植筋强度不高,还不耐高温,尤其是该有机胶易老化,耐久性不足 20 年,且施工及使用过程中对环境会造成污染。另外,市场上应用较多的无机胶多为水泥基类无机胶,此类无机胶耐久性虽有所改善,但收缩大,且凝结时间也很难达到某些工程的需求。

当前关于植筋的试验研究均是针对水平面,而实际工程中存在大量非水平面植筋工程,需要钢筋植入后快速凝固,以减少人工把持的时间。因此,本

文在以上研究成果及应用背景的基础上,以工业废料矿渣粉为主要原料,研制出一种高强快凝的无机植筋胶,通过试验对其水平面和竖直面的植筋锚固性能进行了分析研究,并在试验结果的基础上,提出了该新型无机胶的植筋设计方法。

1 无机胶凝材料配比试验

1.1 原材料及制备原理

本文所研制的无机胶凝材料主要由非水泥基粉料添加剂和固化添加剂按比例混合而成。粉料添加剂主要为矿渣粉,具有强碱性,固化添加剂主要由水玻璃和氢氧化钠 2 种碱激发剂组成,其比例见表 1。

表 1 立方体试块抗压强度

Tab. 1 Compressive Strength of Test Cube

分组	碱激发剂 比例/%	初凝时 间/min	抗压强度/MPa			
			3 d	7 d	14 d	28 d
1	11.1	15	40.10	61.82	59.54	57.37
2	11.1	5	43.80	78.61	95.39	98.76
3	11.1	11	41.30	65.07	76.34	84.27
4	11.1	7	35.70	57.19	61.79	92.76

混合时固化添加剂中的氢氧根离子和极性水分子能够进入矿渣玻璃体结构的内部空穴,与活性阳离子作用,形成水化产物高度过饱和的溶液,水化产物生长、成核,彼此交叉搭接,最终形成稳定的胶凝体。此胶凝体与水泥的酸碱性非常相似,相隔性很好,可与之较好地共同工作。

1.2 凝结时间与抗压试验

为了得到凝结时间短和强度高的配比,将矿粉、碱激发剂及水按不同的质量比制作了多组立方体试块,试块尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm,同时记录各组试块的初凝时间,初凝时间为 2 种添加剂均匀混合开始到胶凝材料在试模中明显凝结且翻转 90°不再流淌的时间。考虑到胶体材料强度的性质及工程进度对植筋工艺的要求,试验时主要测量胶凝材料 3,7,14,28 d 的抗压强度,不同配比下的试块均

在标准条件下养护 3,7,14,28 d,然后分别在材料试验机上进行抗压试验。胶体强度性能研究参照《水泥胶砂强度检测方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999)中规定的立方体抗压强度试验方法进行,并选取了其中 4 组具有代表性的配比试验结果,如表 1 所示。

1.3 配比试验结果分析

由表 1 可知,第 2 组试块 3 d 抗压强度即可达到 43.8 MPa,达到 28 d 抗压强度的 44.4%,7 d 抗压强度即可达到 78.61 MPa,达到 28 d 抗压强度的 79.6%,14 d 抗压强度达到 95.39 MPa,达到 28 d 抗压强度的 96.6%,且采用人工搅拌,第 2 组 5 min 左右就可达到初凝。由此可知,第 2 组无机胶在抗压强度和凝结时间方面均表现出较好的性能,可将该配比用于本次植筋试验。

2 拉拔试验

2.1 试验设计

为模拟实际工程条件,本次植筋试验所用基材均为预先制作好的若干混凝土试块(构造配筋),并搁置 1 年以上,尺寸为 500 mm×500 mm×300 mm,强度等级通过混凝土回弹仪测定,为 C20~C40 不等。钢筋选用直径为 8 mm 和 10 mm 的 HRB400 级带肋钢筋及直径为 12 mm 的 HRB335 级带肋钢筋,钢筋力学性能参数见表 2。为了探究混凝土强度、钢筋直径、植筋深度以及植筋角度对植筋锚固性能的影响,按 8*d*,10*d*,12*d*,15*d*(*d* 为钢筋直径)的锚固深度,以水平面、竖直面 2 种角度进行植筋。

表 2 钢筋力学性能参数

Tab.2 Mechanical Property Parameters of Rebar

<i>d</i> /mm	标称强度 <i>f_{yk}</i> /MPa	屈服强度 <i>f_y</i> /MPa	极限强度 <i>f_u</i> /MPa	伸长率/%
8	400	494	675	17.4
10	400	452	691	18.2
12	335	378	550	28.6

2.2 植筋

植筋的一般步骤为:放线定位→钻孔→清灰→洒水湿润→注胶→植入钢筋。植筋前需用钢丝刷清除钢筋表面浮锈。水平面植筋时,将制备好的无机胶灌入孔洞内,最后将钢筋缓慢旋转插入孔内;竖直面植筋时,将制备好的无机胶涂裹在钢筋锚固端,然后旋转插入孔内,到达孔底后拔出钢筋补胶,重复 3 或 4 次,直至有少许胶体挤出,最后用一块硬纸片套在钢筋上,避免胶体流出。植筋孔径视钢筋直径大

小而定,钢筋直径较小时一般取 *d*+4 mm,钢筋直径大于 16 mm 时取 *d*+6 mm,钢筋直径大于 20 mm 时取 *d*+8 mm。本次植筋试验的孔径如表 3 所示,植筋现场情况见图 1,2。

表 3 孔径技术要求

Tab.3 Technical Requirements of Pore Diameter

钢筋直径/mm	8	10	12
孔径/mm	12	14	16



图 1 水平面植筋

Fig.1 Planting Rebars in Horizontal Plane

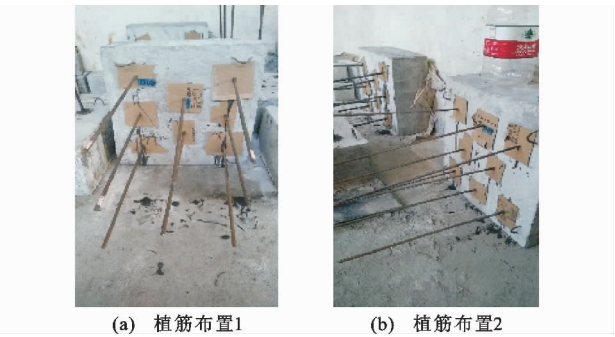


图 2 竖直面植筋

Fig.2 Planting Rebars in Vertical Plane

2.3 加载与数据采集

拉拔试验装置采用穿心式钢筋拉拔仪,通过手动油泵加压,测量精度为 0.01 kN;位于钢筋上端的百分表用于测量加载端的位移,测量精度为 0.01 mm。用记号笔于钢筋与混凝土基材交界处标记,试件破坏时,用游标卡尺测量钢筋根部的滑移量。拉拔试验为单调静力破坏性试验,加载方案按《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)的要求分级加载。钢筋屈服前,按 10%的极限拉拔荷载分级加载,每级荷载保持 5 min,记录荷载和与之对应的加载端位移;钢筋屈服后,以位移控制加载,记录位移和与之对应的荷载。试验装置如图 3,4 所示。

3 试验结果与分析

3.1 试验现象及破坏模式

本次试验共植筋 108 根,其中水平面植筋 72



图 3 试验装置照片
Fig. 3 Photo of Test Setup

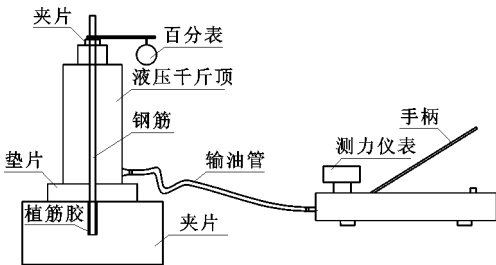


图 4 试验装置简图
Fig. 4 Diagram of Test Setup

根,竖直面植筋 36 根。从试验结果来看,本次试验的植筋试件有 2 种破坏模式:锚固黏结破坏(包括钢筋未屈服拔出、钢筋屈服后拔出)及钢筋强度破坏(钢筋拉断)。钢筋强度破坏试验现象如图 5 所示,锚固黏结破坏试验现象如图 6,7 所示。



图 5 钢筋拉断破坏
Fig. 5 Tensile Failure of Rebar

图 6 钢筋屈服后拔出
Fig. 6 Pull-out After Rebar Yield

3.2 荷载-位移曲线

根据记录的荷载-位移数据,选取了 6 个典型试件的试验结果绘制了荷载-位移曲线,如图 8,9 所示,试件分组见表 4。从图 8 可以看出,对于钢筋强度破坏的试件,加载初期,曲线较平缓,可能是由夹具滑移造成,随着夹具趋于稳定,曲线恢复正常且呈直线,位移值与荷载基本呈线性关系,钢筋与胶体间



图 7 钢筋未屈服拔出
Fig. 7 Pull-out Before Rebar Yield

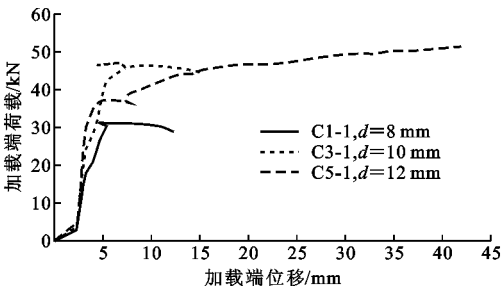


图 8 钢筋强度破坏的荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement Curves of Rebar Strength Damage

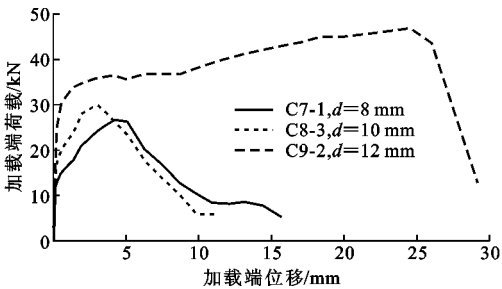


图 9 锚固黏结破坏的荷载-位移曲线
Fig. 9 Load-displacement Curves of Anchoring Bond Damage

主要为化学胶结力。随着荷载的增加,化学胶结力失效,摩擦力和机械咬合力开始发挥作用,加载端位移增长加快,曲线斜率快速减小,位移与荷载开始呈现非线性增长;荷载继续增加,钢筋进入屈服阶段,随后荷载基本维持不变,曲线近乎水平,加载端位移的增长明显变快,并伴随有轻微的混凝土开裂声,钢筋周围的混凝土表面逐渐出现环状裂纹,最终钢筋强化并因达到极限强度而发生颈缩破坏。由于钢筋断裂是瞬时的,所以曲线下降段无法测得。从图 9 可以看出,对于锚固黏结破坏的试件,前期试验现象及曲线变化趋势与钢筋强度破坏的试件类似,但后期由于胶体强度不足导致钢筋未破坏就被拔出,发生锚固黏结破坏,位移快速增长,承载力急剧下降,破坏呈现明显脆性,曲线没有明显的屈服平台,但是有明显的下降段。

表 4 植筋拉拔试验结果

Tab. 4 Pull-out Test Results of Planting Rebars

试件分组	d/mm	基材抗压强度 f_{ck}/MPa	破坏现象	浅锥体高度/ mm	钢筋根部滑移量 s/mm	极限拉拔力/kN	平均黏结强度/ MPa
C1-1	8	47.3	钢筋拉断	0.0	1.2	31.60	19.65
C1-2			钢筋拉断	0.0	0.6	31.80	15.82
C1-3			钢筋拉断	0.0	0.4	31.40	13.01
C1-4			钢筋拉断	0.0	0.3	32.28	10.70
C2-1		29.6	钢筋拉断	0.0	1.5	30.92	19.22
C2-2			钢筋拉断	0.0	0.8	31.51	15.67
C2-3			钢筋拉断	0.0	0.7	32.19	13.34
C2-4			钢筋拉断	0.0	0.5	31.11	10.32
C3-1	10	39.5	钢筋拉断	8.4	2.1	47.17	18.77
C3-2			钢筋拉断	0.0	1.5	47.79	15.21
C3-3			钢筋拉断	11.2	1.0	48.37	12.83
C3-4			钢筋拉断	0.0	0.5	47.74	10.13
C4-1		50.8	钢筋拉断	0.0	1.0	48.78	19.41
C4-2			钢筋拉断	0.0	0.9	47.52	15.13
C4-3			钢筋拉断	0.0	0.7	47.77	12.67
C4-4			钢筋拉断	0.0	0.4	48.33	10.26
C5-1	12	45.8	钢筋拉断	5.1	2.0	50.66	13.99
C5-2			钢筋拉断	6.4	1.4	50.95	11.26
C5-3			钢筋拉断	7.3	0.9	51.91	9.56
C5-4			钢筋拉断	8.5	0.7	52.44	7.73
C6-1		32.0	钢筋拔出	7.6		49.88	13.81
C6-2			钢筋拉断	10.8	2.0	53.01	11.72
C6-3			钢筋拔出	12.4		52.18	9.61
C6-4			钢筋拉断	12.1	1.6	52.37	7.72
C7-1	8	40.3	钢筋拔出	0.0		26.70	16.60
C7-2			钢筋拔出	0.0		30.13	14.99
C7-3			钢筋拔出	0.0		31.99	13.26
C7-4			钢筋拉断	0.0	1.6	32.35	10.73
C8-1	10	31.4	钢筋拔出	15.2		24.00	9.55
C8-2			钢筋拔出	0.0		28.00	8.91
C8-3			钢筋拔出	0.0		30.10	7.98
C8-4			钢筋拔出	0.0		20.00	4.24
C9-1	12	44.1	钢筋拔出	8.0		33.12	9.15
C9-2			钢筋拔出	12.3		46.82	10.35
C9-3			钢筋拔出	0.0		34.86	6.42
C9-4			钢筋拔出	12.4		45.52	6.71

注:试件组号 C1-1 中的第 1 个数字代表混凝土基材编号,1~6 代表水平面基材,7~9 代表竖直面基材;第 2 个数字代表植筋深度,1,2,3,4 分别代表 8*d*,10*d*,12*d*,15*d*。

3.3 拉拔试验数据统计

本次植筋试验所有的试验结果见表 4。试验中植筋试件的拉拔承载力 P 和钢筋加载端位移可直接测得,按均匀剪切模型计算平均黏结强度,如式(1)所示。均匀剪切模型假设钢筋拔出时其锚固区受到均匀剪应力,不考虑混凝土、胶体及钢筋三者之

间的变形协调。

$$\tau=P/(\pi dl_{\text{b}})$$

(1)

式中: τ 为无机胶与钢筋之间的平均黏结强度; l_{b} 为锚固深度。

3.4 无机胶植筋锚固性能的影响因素分析

试验主要探究了混凝土强度、钢筋直径、锚固深

度以及植筋角度等因素对植筋锚固性能的影响。

3.4.1 混凝土强度

混凝土强度对锚固性能的影响主要体现在混凝土基材对锚固体的约束能力,混凝土强度越高,抗拉强度越大,基材对锚固体约束能力越强。由 C5,C6 两组试件对比可知,当锚固深度 l_b 较小 ($l_b \leq 10d$) 时,极限拉拔力随基材混凝土强度的增大而增大;当锚固深度较大 ($l_b > 10d$) 时,极限拉拔力随基材混凝土强度的增大基本不变。混凝土强度较低的试件会发生锥体破坏,但随着基材强度提高,越不容易发生锥体破坏,即使有锥体破坏,锥体的高度也较小,如图 10 所示。此外,对比分析 C1,C2,C3,C4 的滑移量(图 11)可知,随着基材强度的提高,钢筋根部滑移量也随之减小。

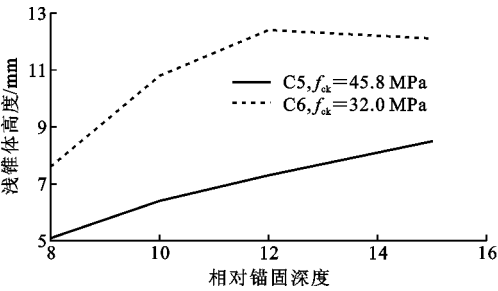


图 10 浅锥体高度变化趋势

Fig. 10 Height Change Trends of Shallow Cone

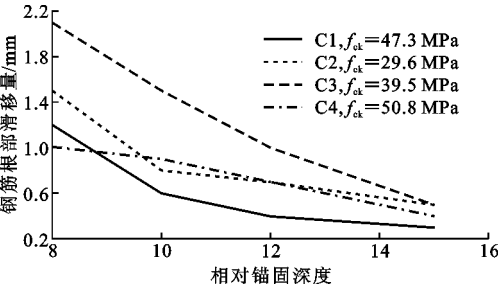


图 11 钢筋根部滑移量变化趋势

Fig. 11 Slip Change Trends of Rebar Root

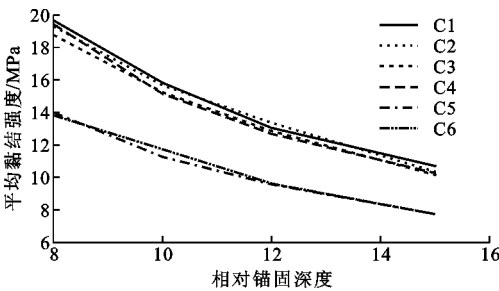
3.4.2 钢筋直径

水平面植筋试验中,直径 8,10 mm 的钢筋均发生拉断破坏,直径 12 mm 的钢筋有部分发生拔出破坏;竖直面植筋试验中,直径 8 mm 的钢筋在锚固深度为 $12d$ 的时候能够发生屈服,而直径 10,12 mm 的钢筋均发生拔出破坏。由此可见,随着钢筋直径的增大,锚固性能会逐渐变差,保证植筋锚固性能的安全锚固深度随之增大。

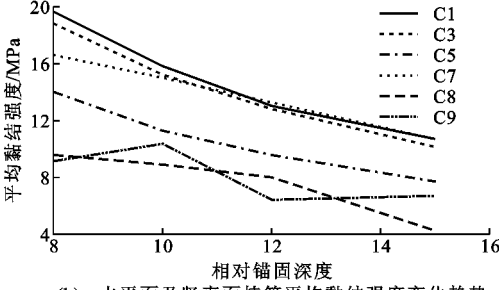
3.4.3 锚固深度

当锚固深度较大 ($l_b \geq 10d$) 时,水平面的钢筋都能够达到屈服,并且进入强化阶段,最终发生钢筋强

度破坏,有明显的预兆,属于延性破坏。当锚固深度较小 ($8d$) 时,直径较小 ($d \leq 10 \text{ mm}$) 的钢筋仍可达到屈服并发生颈缩拉断破坏;直径较大 ($d > 10 \text{ mm}$) 的钢筋被拔出或出现钢筋根部的锥体破坏,没有明显征兆,属于脆性破坏,设计时应予以避免。钢筋强度破坏的同组试验中,钢筋根部滑移量随着相对锚固深度的增加而减小,如图 11 所示。整体滑移量均比较小(不超过 2 mm),说明该无机胶植筋具有较好的锚固刚度。从试验结果可以看出,随着锚固长度增大,极限拉拔力增大,但是平均黏结强度却减小,如图 12 所示。这是因为锚固体的黏结应力会随着锚固深度的增大趋于不均匀,高应力区长度相对减小,从而导致平均黏结强度反而减小,如图 13 所示,其中, l_a 为高应力区段锚固长度, τ_{\max} 为黏结强度最大值。



(a) 水平面植筋平均黏结强度变化趋势



(b) 水平面及竖直面植筋平均黏结强度变化趋势

图 12 平均黏结强度变化趋势

Fig. 12 Change Trends of Average Bond Strength

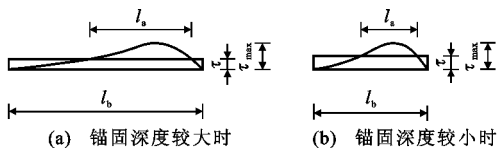


图 13 黏结强度与锚固深度关系

Fig. 13 Relationship Between Bond Strength and Anchoring Depth

3.4.4 植筋方向

相同锚固深度下,水平面植筋的黏结锚固性能最好,最容易得到保证,竖直面相对较差。植筋方向对锚固性能的影响主要在于施工过程中,施工工艺

及养护条件的缺陷会使无机胶的锚固质量变差,从而使得锚固性能有差异。由试验数据可以得出,植筋角度变化对锚固性能的折减会随着钢筋直径的增大而变大;直径 8 mm 的钢筋竖直面植筋在深度为 15*d* 时可满足要求,而直径 10,12 mm 钢筋在竖直面植筋深度为 15*d* 时仍无法满足锚固要求,需加大锚固深度。

4 植筋设计方法

根据本次试验中的植筋破坏形态及分析可知,在混凝土上植筋的破坏模式主要有锚固黏结破坏(钢筋拔出破坏或浅锥体破坏)及钢筋强度破坏。前者破坏模式下,因为植筋深度不足,导致钢筋强度未充分发挥就发生了钢筋与胶体的锚固失效;后者破坏模式下,由于植筋深度足够,能使钢筋强度充分发挥,但传统设计方法给出的锚固深度过于固定(一般为 15*d*),导致胶体强度未充分发挥,会造成一定程度的浪费,设计时应予以灵活考虑。为了既能保证植筋结构的安全性,又能满足工程的经济性,需要进行综合分析,得到适合各种工况的临界锚固深度。

无机胶的极限平均黏结强度为 $\tau_{0\max}$,主要受混凝土强度、钢筋直径的影响。假设钢筋强度破坏与黏结锚固破坏同时发生,即钢筋极限拉力 P_u 与胶体极限抗拔力 F_u 相等,锚固性能取决于钢筋的极限抗拉强度 f_{uk} 及无机胶的极限平均黏结强度 $\tau_{0\max}$,且此时的锚固长度为临界锚固长度 L_{cr} ,则

$$P_u=0.25\pi d^2 f_{uk} \tag{2}$$

$$F_u=\tau_{0\max}\pi dL_{cr} \tag{3}$$

$$L_{cr}=n_{cr}d \tag{4}$$

式中: n_{cr} 为临界相对锚固深度。

整理式(2)~(4)可得

$$\tau_{0\max}=0.25f_{uk}/n_{cr} \tag{5}$$

文献[24]根据大量植筋试验的数据统计,经回归分析得到无机胶植筋的极限平均黏结强度采用下式表示

$$\tau_{0\max}=(0.5+8/d)(0.5f_{ck}+11) \tag{6}$$

结合式(5),(6),可得

$$n_{cr}=\frac{0.25f_{uk}}{(0.5+8/d)(0.5f_{ck}+11)} \tag{7}$$

不同锚固条件下,临界相对锚固深度按下式进行修正计算

$$[n_{cr}]=\eta_1\eta_2\eta_3[n_{cr}]_0 \tag{8}$$

式中: $[n_{cr}]_0$ 为按式(7)计算的临界相对锚固深度初始值; η_1 为结构重要性系数,安全等级为一级时 $\eta_1=$

1.1,安全等级为二级时 $\eta_1=1.0$,安全等级为三级时 $\eta_1=0.9$; η_2 为钢筋类型影响系数,光圆钢筋 $\eta_2=2.25$,带肋钢筋 $\eta_2=1.0$; η_3 为植筋角度修正系数,水平面 $\eta_3=1.0$,竖直面 $\eta_3=1.3$,仰面 $\eta_3=1.5$ 。

实际工程中,如果已知混凝土强度、钢筋极限抗拉强度及钢筋直径,由式(7),(8)可推算出临界锚固深度。考虑本次试验的工况,结构安全等级取为二级,采用带肋钢筋,按上述设计方法计算的本次试验临界相对锚固深度如表 4,5 所示。

表 5 水平面植筋相对锚固深度

Tab. 5 Relative Anchorage Depth of Planting Rebar in Horizontal Plane

钢筋直径/ mm	相对锚固深度					
	C20		C30		C40	
	理论值	试验值	理论值	试验值	理论值	试验值
8	8.8	8	8.5	8	8.2	8
10	10.2	8	9.8	8	9.4	8
12	11.4	10	10.9	10	10.5	10

表 6 竖直面植筋相对锚固深度

Tab. 6 Relative Anchorage Depth of Planting Rebar in Vertical Plane

钢筋直径/ mm	相对锚固深度					
	C20		C30		C40	
	理论值	试验值	理论值	试验值	理论值	试验值
8	11.4	15	11.1	15	10.7	15
10	13.3	>15	12.7	>15	12.2	>15
12	14.8	>15	14.2	>15	13.7	>15

由表 5 可知,由于水平面施工质量容易得到保证,锚固深度理论值和试验值吻合较好。表 6 中竖直面植筋的理论值普遍小于试验值,可能由于植筋过程中虽然钢筋上套有小纸片防止胶体外流,但胶体固化前难免会有少许流出,导致胶层不密实,从而影响锚固性能。从拔出的钢筋锚固端上残留的光滑胶-气界面也可以验证,胶体的流出会导致锚固体内有空气进入,削弱了有效黏结面,使得锚固性能普遍偏低。今后可从施工工艺上进行改善,对竖直面甚至仰面工程植筋质量予以保证。

5 结 语

(1)与国外的有机胶、中国的水泥基无机胶相比,本文研制的新型无机胶初凝时间较短(约 5 min),28 d 立方体抗压强度可达 98.75 MPa,平均黏结强度高达 19.65 MPa,具有明显的优越性,可广泛用于植筋工程,尤其有快凝要求的植筋工程中,施工操作简单、便捷。

(2)水平面植筋试验中,小直径($d \leq 10$ mm)钢筋锚固深度大于 $8d$ 即可达到钢筋强度破坏,满足锚固要求,而大直径($d > 10$ mm)钢筋需要加大锚固深度($l_b \geq 10d$)才能满足锚固要求。竖直面植筋相对于水平面黏结强度虽有 30% 的折减,但如果施工质量得到保证,该无机胶仍具有较好的锚固性能。基于安全性和经济性原则,提出了适用于各种工况的植筋设计方法,可作为加固设计的参考。

(3)试验中钢筋的滑移量均不超过 2 mm,说明该无机胶植筋具有较好的锚固刚度。本文中计算胶体黏结强度采用均匀剪切模型,与实际受力机理有一定偏差,对于胶体黏结应力沿深度的变化规律需做进一步的研究。另外,本次植筋试验均为单调静力加载试验,对于植筋试件受动力荷载时的锚固性能也需要今后做进一步的研究,以完善植筋的抗震设计。

参考文献:

References:

- [1] 赵志方,赵国藩,刘健,等.新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J].建筑结构学报,2001,22(2):51-56.
ZHAO Zhi-fang,ZHAO Guo-fan,LIU Jian,et al. Experimental Study on Adhesive Tensile Performance of Young on Old Concrete[J].Journal of Building Structures,2001,22(2):51-56.
- [2] 张鑫,李安起,赵考重.建筑结构鉴定与加固改造技术的进展[J].工程力学,2011,28(1):1-11,25.
ZHANG Xin,LI An-qi,ZHAO Kao-zhong. Advances in Assessment and Retrofitting of Building Structures [J]. Engineering Mechanics,2011,28(1):1-11,25.
- [3] 孙立富,姜磊,张世涛.一种新型无机植筋胶粘结性能试验研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(2):94-96.
SUN Li-fu,JIANG Lei,ZHANG Shi-tao. Test Research on the Bonding Strength of Inorganic Planting Bar[J].Sichuan Building Science,2016,42(2):94-96.
- [4] 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.
KE Mei-sheng. Experimental Research and Engineering Application of Technique of Chemically-planted Steel Bar[J]. Construction Technology,2001,30(2):13-14.
- [5] COOK R A,DOERR G T,KLINGNER R E. Bond Stress Model for Design of Adhesive Anchors[J]. ACI Structural Journal,1993,90(5):514-524.
- [6] MCVAY M,COOK R A,KRISHNAMURTHY K.

- Pullout Simulation of Postinstalled Chemically Bonded Anchors[J].Journal of Structural Engineering,1996,122(9):1016-1024.
- [7] COOK R A. Behavior of Chemically Bonded Anchors [J]. Journal of Structural Engineering,1993,119(9):2744-2762.
- [8] COOK R A,KUNZ J,FUCHS W,et al. Behavior and Design of Single Adhesive Anchors Under Tensile Load in Uncracked Concrete[J]. ACI Structural Journal,1998,95(1):9-26.
- [9] COOK R A,KONZ R C. Factors Influencing Bond Strength of Adhesive Anchors [J]. ACI Structural Journal,2001,98(1):76-86.
- [10] LEE H S,NOGUCHI T,TOMOSAWA F. Evaluation of the Bond Properties Between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion[J]. Cement and Concrete Research,2002,32(8):1313-1318.
- [11] 孙金墀.混凝土结构植筋锚固刍议[J].建筑结构,2002,32(1):26-30.
SUN Jin-chi. Discussion on Planting Bar and Anchorage of Concrete Structures[J]. Building Structures,2002,32(1):26-30.
- [12] GLUKHOVSKY V D,ROSTOVSKAJA G,RUMYNA G V. High Strength Slag-alkaline Cements [C]//WILLIAMS P T. Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Amarkai AB and Congrex,1980:164-168.
- [13] DAVIDOVITS J. Geopolymers; Inorganic Polymeric New Materials[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,1991,37(8):1633-1656.
- [14] 吴其胜,李玉寿,李玉华.复合碱组分对矿渣-粉煤灰碱胶凝材料性能的影响[J].粉煤灰综合利用,2001(2):22-24.
WU Qi-sheng,LI Yu-shou,LI Yu-hua. Influence of Compound Alkali on the Performance of Alkali Activated Cement with the Slag and Fly Ash[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2001(2):22-24.
- [15] 赵三银,余其俊,乔飞,等.无机矿粉对碱激发碳酸盐胶凝材料性能的影响[J].武汉理工大学学报,2004,26(7):20-23.
ZHAO San-yin,YU Qi-jun,QIAO Fei,et al. Influence of Inorganic Mineral Powder on the Property of Alkali Activated-carbonatites Cementitious Material [J]. Journal of Wuhan University of Technology,2004,26(7):20-23.
- [16] 彭小芹,刘艳萌,钟安鑫,等.高强无机锚固材料的实验研究[J].重庆建筑大学学报,2007,29(2):113-

115.
PENG Xiao-qin, LIU Yan-meng, ZHONG An-xin, et al. Experimental Research on High-strength Inorganic Anchoring Material[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(2): 113-115.
- [17] 刘立新, 许化彬, 甘元初, 等. 水泥基无机黏结材料植筋承载力的试验研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(1): 5-8.
LIU Li-xin, XU Hua-bin, GAN Yuan-chu, et al. Experimental Investigation of the Bonded Rebar Bearing Capacity of Cement Based Inorganic Anchoring Material[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(1): 5-8.
- [18] 尚守平, 胡向军, 吴莉莉, 等. 快凝无机植筋胶栓试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 61-65.
SHANG Shou-ping, HU Xiang-jun, WU Li-li, et al. Experimental Research on Rapid-solidification Inorganic Planting Bolt[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(4): 61-65.
- [19] 尚守平, 李 宁, 胡向军. 快凝无机植筋胶栓的锚固强度与锚固刚度试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(9): 76-80, 19.
SHANG Shou-ping, LI Ning, HU Xiang-jun. Experimental Research on Anchoring Strength and Rigidity of Rapid-solidification Inorganic Planting Bolt [J]. Building Structure, 2015, 45(9): 76-80, 19.
- [20] 郑文忠, 陈伟宏, 张建华. 碱矿渣胶凝材料作胶粘剂的植筋性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(14): 10-14.
ZHENG Wen-zhong, CHEN Wei-hong, ZHANG Jian-hua. Experimental Research on Performance of Bonded Rebars with Alkali-activated Cementitious Material [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(14): 10-14.
- [21] 王 欣, 姜常玖, 惠守江, 等. 无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(4): 27-33.
WANG Xin, JIANG Chang-jiu, HUI Shou-jiang, et al. Fire Resistance Behavior of the Inorganically Post-installed Rebar Connection[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(4): 27-33.
- [22] 谢 群, 赵永强, 唐仕霖. 无机胶植筋构件粘结滑移性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2015, 47(6): 838-842.
XIE Qun, ZHAO Yong-qiang, TANG Shi-lin. Bond-slip Behavior of Post-installed Reinforcement in Concrete with Inorganic Adhesive [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(6): 838-842.
- [23] 丁红岩, 梁玉国, 高天宝. 基于可靠度理论的无机胶植筋设计方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2015, 47(1): 6-8, 45.
DING Hong-yan, LIANG Yu-guo, GAO Tian-bao. The Design Method of Inorganic Glue Bonded Rebars Based on Reliability Theory[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2015, 47(1): 6-8, 45.
- [24] 高天宝, 史文利, 杨树标, 等. 混凝土无机料植筋拉拔试验研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005, 22(1): 36-38, 53.
GAO Tian-bao, SHI Wen-li, YANG Shu-biao, et al. Experimental Research on Planting Bars with Inorganic Material in Concrete[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2005, 22(1): 36-38, 53.