

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.056



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑灌浆料龄期的钢筋-金属波纹管浆锚连接 锚固性能试验研究

郭家旭¹, 胡少伟¹, 齐浩¹, 聂影², 陶修², 赵轩², 罗李鹏³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 402460;
3. 重庆巨龙管业有限公司, 重庆 401122)

摘要:为研究钢筋-金属波纹管浆锚连接的锚固性能,设计制作18组连接件,并完成拉拔试验。基于试验结果研究钢筋锚固长度 l_a 、灌浆料龄期 T 与螺旋箍筋约束对浆锚连接锚固性能的影响。试验结果表明,所有锚固钢筋均经历完整的弹性阶段与屈服阶段,最终试件表现为钢筋粘结-滑移破坏、钢筋拉断两种破坏形式。当灌浆料龄期 $T=3d$ 时,试件均发生粘结-滑移破坏;当灌浆料龄期 $T=7d$ 且锚固长度 $l_a \geq 13d$ 时,试件均出现钢筋断裂破坏;当灌浆料龄期 $T=28d$ 时,无配箍试件锚固长度 $l_a=7d$ 时、配箍试件 $l_a=5d$ 时出现钢筋断裂破坏。提高钢筋锚固长度、灌浆料龄期与配置螺旋箍筋约束有利于试件的极限强度提高,并趋近钢筋实验抗拉强度,显著降低钢筋的弹性阶段滑移量,提高初始刚度,提升试件的锚固性能。实际工程中,当孔径比不小于2.6时,为确保3d与7d锚固性能,锚固长度应大于13d;为确保正常工作中钢筋充分发挥其力学性能,锚固长度应不小于10d。

关键词:浆锚连接;锚固性能;金属波纹管;锚固长度;灌浆料龄期;螺旋箍筋约束

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)02-0108-09

Experimental study on anchorage property of rebar-metallic bellows slurry anchor connection considering grout age

GUO Jiayu¹, HU Shaowei¹, QI Hao¹, NIE Ying², TAO Xiu², ZHAO Xuan², LUO Lipeng³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 402460, P. R. China; 3. Chongqing Julong Pipe Industry Co., Ltd., Chongqing 401122, P. R. China)

Abstract: In order to study the anchorage property of rebar-metallic bellows slurry anchor connection, 18 groups of connection specimens were designed and fabricated in this study, and the pull-out tests were completed. The influences of anchorage length l_a , grouting material curing age T and spiral confinement on the

收稿日期: 2022-01-19

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jcsx-gksbX0013); 国家自然科学基金(52130901); 重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0003)

作者简介: 郭家旭(1995-), 男, 主要从事钢-混组合结构研究, E-mail: guojiayu@cqu.edu.cn。

胡少伟(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hushaowei@cqu.edu.cn。

Received: 2022-01-19

Foundation items: Technology Innovation and Application Development Project of Chongqing (No. cstc2019jcsx-gksbX0013); National Natural Science Foundation of China (No. 52130901); Innovation Group Science Foundation of the Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-cxttX0003)

Author brief: GUO Jiayu (1995-), main research interest: composite construction, E-mail: guojiayu@cqu.edu.cn.

HU Shaowei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hushaowei@cqu.edu.cn.

anchorage property of the connection were analyzed based on the test results. The experimental results show that all the anchored rebars had undergone integral elastic stage and yielding stage, and the ultimate performance of specimens were bond slip failure and rebar fracture. When $T=3$ d, bond-slip failure occurred in all specimens. When $T=7$ d and $l_a \geq 13d$, rebars fractured. When $T=28$ d, specimens whose $l_a=7d$ without stirrup and $l_a=5d$ with stirrup began to failure of rebar fracture. With application of spiral confinement and the increase of anchorage length and grout age, the ultimate strength of specimens increased first and then approached to the tensile strength of rebar, the maximum sliding displacement of rebars in the elastic stage decreased significantly, the initial stiffness of specimens increased, and anchorage property improved significantly. In engineering practice, when $D/d \geq 2.6$, the anchorage length should be greater than $13d$ to ensure the anchorage performance of 3 d and 7 d. In order to fully exert its mechanical properties in normal work stage, anchorage length is prohibited to be less than $10d$.

Keywords: slurry anchor connection; anchorage property; metallic bellows; anchorage length; grout age; spiral confinement

随着基础设施建设与建筑工业化的不断推进,传统现浇施工的短板,如施工效率低、生产成本低、环境污染大等问题愈加受到关注。预制拼装建造技术作为实现建筑工业化的关键技术,要求在预制工厂生产主要构件,并运输至现场完成拼装,以实现构件标准化设计、工厂化生产,具有构件质量稳定、节能环保、施工效率高等优势^[1-2],目前已广泛应用于装配式建筑与大型桥梁建造中。

胡少伟等^[3]、聂建国等^[4]对钢-混凝土组合结构的研究表明,钢筋与混凝土的连接可靠性是决定整体结构安全的重要因素。预制钢-混组合构件间钢筋的连接常采用机械连接、焊接、灌浆套筒连接与金属波纹管浆锚连接等形式,笔者基于钢筋-金属波纹管浆锚连接开展锚固性能研究。余琼等^[5]对27个带肋钢筋-灌浆料连接件进行了拉拔试验,研究了试件的破坏模式和黏结强度随保护层厚度、钢筋直径和钢筋锚固长度的变化规律。Wu等^[6]采用钢筋-金属波纹管浆锚连接实现了钢梁与预制混凝土柱的拼装,并研究了采用该连接形式的组合框架的抗震性能。Tazarv等^[7]采用镀锌管灌注高强灌浆料连接基础与柱,并研究了低周往复荷载作用下试件的力学性能,结果表明试件的抗震性能较现浇试件得到较大改善。金峤等^[8]提出了含FRP约束环的钢筋搭接结构,并研究了约束环内径与壁厚、混凝土强度、搭接长度对锚固性能的影响。陈俊等^[9-11]通过试验得到了钢筋-金属波纹管浆锚连接受轴向拉力作用下的荷载-滑移曲线,研究了孔径比、钢筋锚固长度对金属波纹管浆锚连接的锚固性能影响,并研究了采用金属波纹管浆锚连接的预制混凝土柱-基础连接的抗震性能。何宇等^[12]研究了钢管混凝土柱内横向预埋金属波纹管对钢筋的黏结锚固性能,提出了不同孔径比时的建议锚固长度。王浩等^[13]研究了锚

固长度、孔径比和螺旋箍筋约束对钢筋的黏结刚度影响。Hosseini等^[14-15]研究了螺旋箍筋及箍筋间距对钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能的影响,试验得出箍筋间距为25 mm时滑移量较小。

钢筋-金属波纹管浆锚连接的锚固性能受较多因素影响,现有研究主要针对钢筋锚固长度、孔径比、螺旋箍筋等因素对试件锚固性能的影响,但对灌浆料养护时间的研究较少。灌浆料的龄期对其力学性能的影响不容忽视,随龄期增长,浆体逐步硬化、强度逐步提高。灌浆料早期强度与后期强度存在较大差异,其早期强度很大程度上决定了钢筋-金属波纹管浆锚连接的早期锚固性能。而钢筋-金属波纹管浆锚连接的早期锚固性能是影响预制拼装技术施工效率的重要因素,优秀的早期锚固性能使施工阶段结构具备较高的承载力,确保施工的安全性,并提高施工效率。故将灌浆料龄期作为变量,有必要研究不同灌浆料龄期钢筋-金属波纹管浆锚连接的锚固性能。笔者设计制作18组共计54个试件,进行单调加载,研究钢筋锚固长度 l_a 、灌浆料龄期 T 与螺旋箍筋约束对钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能的影响。试验采用自配制水泥基灌浆料,以验证自配制灌浆料性能,灌浆料制备基于团队对高性能混凝土长期研究^[16-17]。

1 试验

1.1 试件设计及制作

设计18组共54个钢筋-金属波纹管浆锚连接试件,以研究水泥基灌浆材料养护龄期 T 、钢筋锚固长度 l_a 与内配螺旋箍筋对锚固性能的影响。采用直径 $d=25$ mm的HRB400型钢筋,壁厚为2 mm、直径 $D=65$ mm的金属波纹管,此时孔径比 $D/d=2.6$ 。设置水泥基灌浆材料的养护龄期 T 分别为3、7、28 d,

以考虑灌浆料龄期对连接试件锚固性能的影响。参考相关研究^[18],设置锚固长度 l_a 分别为 $5d$ 、 $7d$ 、 $10d$ 、 $13d$ 、 $16d$,较大的锚固长度取值范围使灌浆料

龄期不足28 d时能够表现出不同的破坏形式。并对锚固长度为 $5d$ 的各龄期试件通常配置间距25 mm的螺旋箍筋,分组编号与具体参数见表1。

表1 试件参数与试验结果

Table 1 Parameters of the specimen and test result

编号	l_a/d	T/d	\bar{f}_y/MPa	\bar{f}_u/MPa	$\bar{\tau}/MPa$	破坏形式
A05	5	3	216.351	235.921	24.031	钢筋粘结-滑移破坏
A07	7	3	216.559	271.683	19.767	钢筋粘结-滑移破坏
A10	10	3	214.049	297.332	15.143	钢筋粘结-滑移破坏
A13	13	3	219.534	305.503	11.968	钢筋粘结-滑移破坏
A16	16	3	219.491	313.340	9.974	钢筋粘结-滑移破坏
B05	5	7	218.000	256.264	26.103	钢筋粘结-滑移破坏
B07	7	7	217.201	295.598	21.507	钢筋粘结-滑移破坏
B10	10	7	216.551	305.235	15.545	钢筋粘结-滑移破坏
B13	13	7	217.157	306.307		钢筋断裂
B16	16	7	219.812	309.889		钢筋断裂
C05	5	28	216.135	303.674	30.932	钢筋粘结-滑移破坏
C07	7	28	216.269	305.410		两根钢筋拉断,一根钢筋粘结-滑移破坏
C10	10	28	217.201	313.179		钢筋断裂
C13	13	28	217.886	315.108		钢筋断裂
C16	16	28	219.815	311.892		钢筋断裂
A05g	5	3	216.281	263.510	26.841	钢筋粘结-滑移破坏
B05g	5	7	215.834	269.739	27.475	钢筋粘结-滑移破坏
C05g	5	28	216.154	306.217		一根钢筋拉断,两根钢筋粘结-滑移破坏

注:编号中字母A、B、C分别表示灌浆材料养护龄期分别为3、7、28 d;编号中的g表示配置螺旋箍筋约束。

开展锚固性能试验的试验平台如图1所示,每个预埋金属波纹管预成孔的中心间距取250 mm,以避免相邻试件相互干扰导致试件承载力降低。钢筋长度统一取1 250 mm,并在锚固长度外100 mm范围内设置无黏接段,以防止试件端部应力集中导致灌浆材料局部破坏,并减少施工中因钢筋定位产生的误差。预埋金属波纹管长度取 $(l_a + 100)$ mm,确保钢筋锚固端与无黏接段由灌浆料充分包裹。截取预埋钢筋与金属波纹管,对钢筋设置无黏接段并编号,对金属波纹管两端进行封堵处理,避免平台浇筑时混凝土进入金属波纹管,钢筋、金属波纹管处理见图2。随后绑扎钢筋骨架、支模、完成预埋金属波纹管的定位。平台浇筑采用C40混凝土,待试验平台养护至28 d时,将不同编号的钢筋对中插入配套的金属波纹管并灌注团队自配制的高强微膨胀水泥基灌浆材料,养护至试验龄期。浇筑混凝土与灌注水泥基灌浆材料时,分别留置1组 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的混凝土立方体标准试块与4组 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 水泥基灌浆材料棱柱体标准试块,并与试件同条件养护。

1.2 材性测试

按照《普通混凝土物理力学性能试验方法标

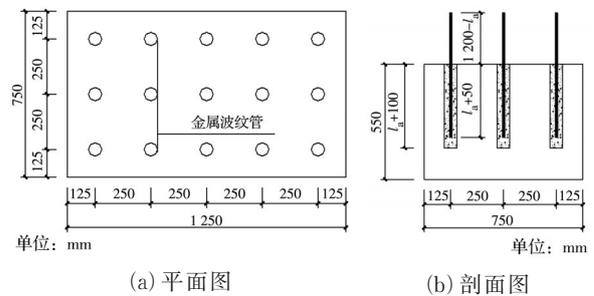


图1 试验平台设计

Fig. 1 Design of test platform

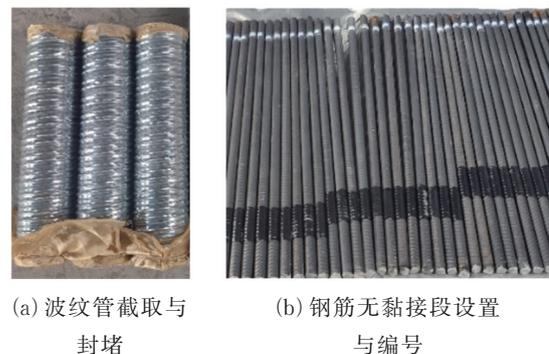


图2 波纹管与钢筋处理

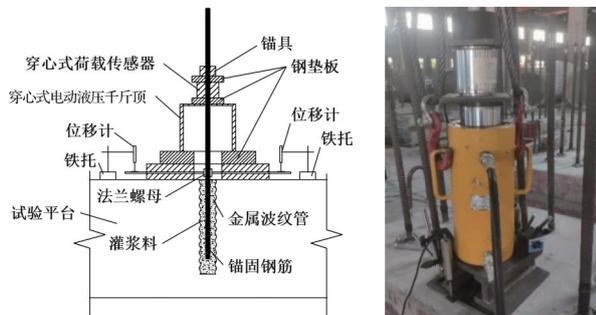
Fig. 2 Pretreatment of metallic bellows and rebars

准》(GB/T 50081—2019)和《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021),对预留混凝土试

块与灌浆料试块进行抗压强度测试,测得28 d混凝土抗压强度平均值为45.89 MPa,自配制高强微膨胀水泥基灌浆材料1 d抗强度为25.96 MPa、3 d抗压强度为46.20 MPa、7 d抗压强度为62.40 MPa、28 d抗压强度为74.54 MPa。测试结果表明自配置水泥基灌浆材料的抗压强度满足《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)要求,性能优良。对公称直径25 mm的HRB400级钢筋进行轴向拉伸试验,屈服强度、抗拉强度平均值分别为452.58、647.27 MPa。

1.3 加载方式与测量内容

试验加载装置如图3所示,其中千斤顶为穿心式电动液压千斤顶,起重量为50 t、行程为200 mm;锚具为适配直径25 mm变形钢筋的三叶夹片式锚具。试验中采用量程500 kN的穿心式荷载传感器测量钢筋轴向拉力 F ;采用两个量程为50 mm的应变式位移传感器测量钢筋的粘结-滑移量 s ,由法兰螺母固定在钢筋上的引出板为位移传感器提供两个对称的滑移量测点,钢筋的粘结-滑移量 s 取两测点位移读数的平均值。加载采用单调连续加载,屈服前加载速度为15~20 kN/min,屈服后下调至为3~5 kN/min,持续加载至钢筋拉断或荷载下降超过20%时,终止加载。



(a) 示意图

(b) 实物图

图3 试验加载装置

Fig. 3 Loading device of the test

2 试验结果

2.1 破坏形式

对18组钢筋-金属波纹管浆锚连接试件进行轴向拉伸试验,各组试件的强度特征值与破坏形式见表1。其中,试验组C07、C05g表现出不同的破坏形式。

试验中,连接件表现出的破坏形式分为钢筋拉断与钢筋粘结-滑移破坏,破坏时钢筋均已屈服。可能出现的破坏现象还包含试件在钢筋屈服前即出现粘结-滑移破坏,但就该试验设计中给出的最不利

锚固长度与最短灌浆料龄期,该破坏现象未出现。试验中未出现金属波纹管拔出,且同时混凝土未出现明显压碎,仅出现少量裂纹。

未配置螺旋箍筋约束时,灌浆料养护龄期为3 d的所有试验组均出现粘结-滑移破坏;灌浆料养护龄期为7、28 d的试件,随锚固长度的增加,破坏形式由粘结-滑移破坏转变为钢筋拉断,出现钢筋断裂的锚固长度分别为13d、7d。配置螺旋箍筋约束的试件,锚固长度 $l_a=5d$ 、灌浆料龄期为28 d时即出现钢筋拉断破坏。出现钢筋拉断破坏时,钢筋的断面位置随机。其中试验组C07、C10中出现断裂破坏的一根钢筋在破坏时伴随着灌浆料被压碎,清除表面被压碎的灌浆料碎块后,下部灌浆料仍保持密实状态,其余钢筋拉断的试件未出现灌浆料被压碎的现象。当钢筋发生粘结-滑移破坏时,金属波纹管内水泥基灌浆材料未被压碎,部分试件灌浆料表面出现裂缝,详见图4。



图4 试件的破坏形式

Fig. 4 Failure mode of specimens

钢筋受拉时,钢筋肋纹对灌浆料产生斜向压力,斜向压力可分解为轴向分力与径向分力,分别使灌浆料受剪与环向受拉。当环向拉力较大造成灌浆料被劈裂或轴向剪力较大克服了钢筋与灌浆料界面间的摩擦阻力与机械咬合力时,发生粘结-滑移破坏。当钢筋达到极限承载力时,环向拉力未使得灌浆料发生劈裂破坏且轴向剪力未克服摩擦阻力与机械咬合力时,发生钢筋断裂破坏。因试件制作时无粘接段置于灌浆料内过短,且外荷载较大,应力集中较为明显,导致灌浆料局部破坏,表现为表面灌浆料被压碎。

2.2 荷载-滑移($F-s$)曲线

图5给出了各试件的荷载-滑移($F-s$)曲线,其变

化趋势同钢筋的应力-应变关系曲线相似,所有试件在拉拔试验中均经历弹性阶段、塑性阶段和弹塑性

阶段,图中能观察到明显的屈服平台。分析图 5 与表 1 信息可以发现:

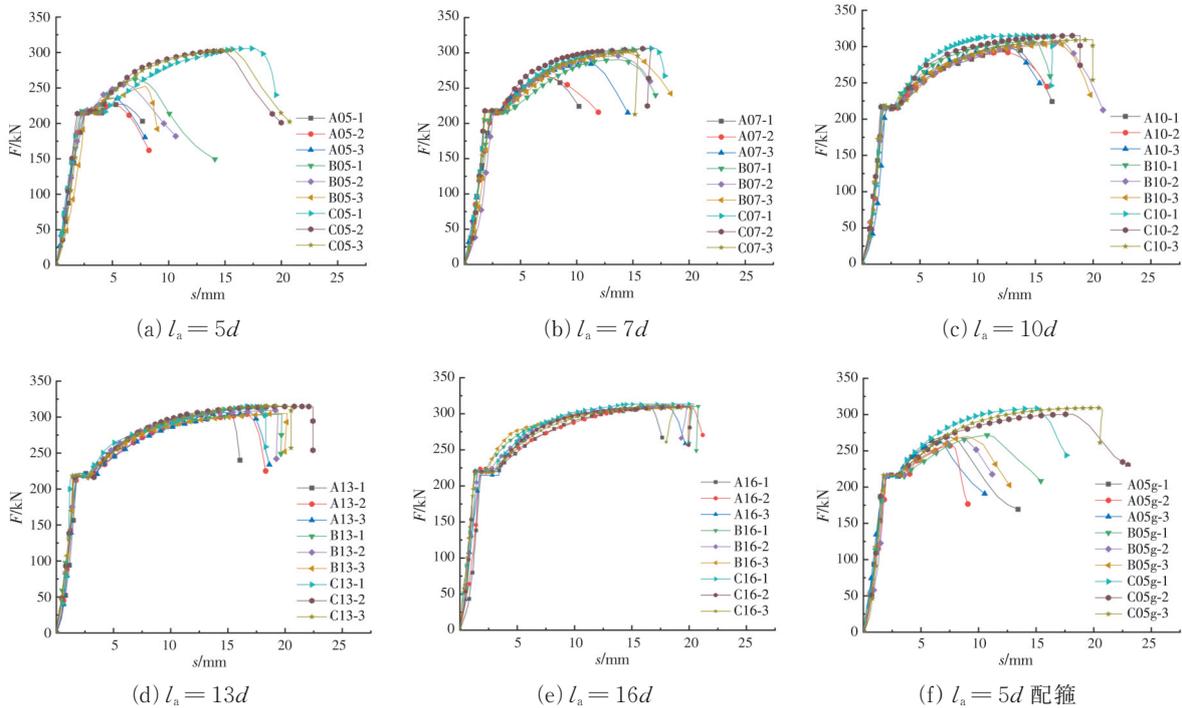


图 5 $F-s$ 曲线

Fig. 5 $F-s$ curves

1) 达到钢筋极限荷载约 70% 前,试件处于弹性阶段,此阶段 $F-s$ 曲线斜率极大,滑移量随荷载迅速增大缓慢增加。能够观察到各组试件的曲线在弹性阶段斜率相差较大,表明各组试件的初始刚度存在较大差异。钢筋进入屈服阶段后,试件荷载无明显变化,滑移量急剧增大。钢筋进入强化阶段后持续加载,部分试件出现粘结-滑移破坏,破坏时荷载陡降、滑移量急剧增大;其余试件在达到极限荷载后,滑移量持续增大,荷载略微降低,随后钢筋出现颈缩并最终被拉断,破坏时荷载陡降,但滑移量无明显变化,甚至减小。

2) 未配置螺旋箍筋约束的试件,灌浆料龄期为 3 d 的试验组均发生粘结-滑移破坏,随锚固长度的增加,极限荷载与最大滑移量显著提高;龄期为 7 d 的试验组随锚固长度增加,在锚固长度为 13d 时出现钢筋断裂破坏,极限荷载与破坏前最大滑移量增大;龄期为 28 d 的试验组极限荷载变化较小,均接近钢筋的实验极限荷载,且锚固长度为 7d 时出现钢筋拉断破坏,最大滑移量在锚固长度小于 13d 时随锚固长度增加有明显增大。

3) 配置螺旋箍筋约束的 3 组试件,除试件 C05g-3 出现钢筋拉断破坏外,均出现粘结-滑移破坏,其中 A05g、B05g 试验组的最大滑移量较小。

4) 大多数试验组的 $F-s$ 曲线在达到极限荷载前

均出现较大滑移,使锚固作用在钢筋滑移过程中得到充分发挥。以上现象表明钢筋-金属波纹管浆锚连接具备较好的延性。对龄期 3、7、28 d 的试件,锚固长度分别仅需达到 10d、7d、5d 即可使试件的极限荷载达到钢筋实测极限荷载的 90%;且对龄期 7、28 d 的试件,锚固长度取 13d、7d 即可使试件出现钢筋断裂破坏,表明钢筋-金属波纹管浆锚连接能够充分发挥钢筋的强度。但对比测得的试件强度特征值与钢筋实测强度特征值,试件强度特征值较低,主要原因是钢筋在锚固时未完全处于竖直状态、试验加载时未完全对中^[10]。总体上看,钢筋-金属波纹管浆锚连接具有较强的可靠性,团队自配制水泥基灌浆材料性能优良。

3 锚固性能影响因素分析

3.1 锚固长度

依据表 1 绘制各组试件极限抗拉强度平均值 \bar{f}_u 随锚固长度 l_a 的变化曲线,如图 6 所示。灌浆料龄期较短时,随锚固长度的增加,试件极限抗拉强度逐渐增加并趋于钢筋实验抗拉强度,灌浆料龄期 $T=3$ d 时, A07 试验组较 A05 试验组 \bar{f}_u 提高 15.16%, A09 试验组较 A07 试验组提高 9.44%;灌浆料养护龄期 $T=7$ d 时, A07 试验组较 A05 试验组 \bar{f}_u 提高 15.34%。灌浆料龄期为 28 d 时,试件极限强

度均已接近钢筋实验抗拉强度,此时锚固长度的提高对试件极限强度无显著影响。分析表明,当锚固条件较差,即灌浆料龄期与锚固长度均较短时,试件极限强度远小于钢筋的实验抗拉强度,此时通过提高钢筋锚固长度能够促进试件极限强度提高。

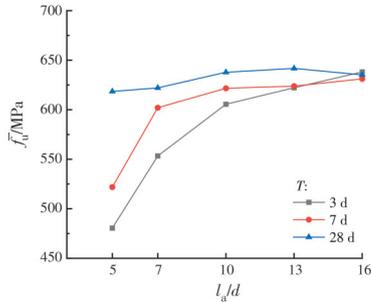


图 6 \bar{f}_u 随锚固长度 l_a 的变化曲线

Fig. 6 \bar{f}_u - l_a curves

试验中,共 13 个试件组出现粘结-滑移破坏,其中 11 组试件破坏形式一致,计算其黏结应力。假设锚固钢筋的黏结应力沿钢筋锚固长度均匀分布,由式(1)计算钢筋平均黏结应力,结果见表 1。

$$\bar{\tau} = F_u / (\pi d l_a) \quad (1)$$

式中: $\bar{\tau}$ 为平均黏结应力; F_u 为极限试件极限荷载; d 为锚固钢筋直径; l_a 为锚固长度。

发生粘结-滑移破坏试件的平均黏结应力随锚固长度的增加而减小,这是由于锚固长度增加提高了试件的极限荷载,但黏结应力沿钢筋锚固长度上分布不均匀,黏结应力靠近加载端较大,远离加载端则较小^[19],导致了平均黏结应力减小。

由 F - s 曲线中提取各试件弹性阶段滑移量,并求各试验组弹性阶段滑移量平均值 $\bar{\Delta}_s$,绘制 $\bar{\Delta}_s$ 随锚固长度 l_a/d 的变化曲线,如图 7 所示,以表征锚固长度对钢筋-金属波纹管浆锚连接初始刚度的影响。可见各龄期试件的弹性阶段滑移量 $\bar{\Delta}_s$ 均随锚固长度的增加而减小,表明锚固长度的增加使钢筋-金属波纹管浆锚连接获得更优异的初始刚度,与早期研究结论一致^[13]。

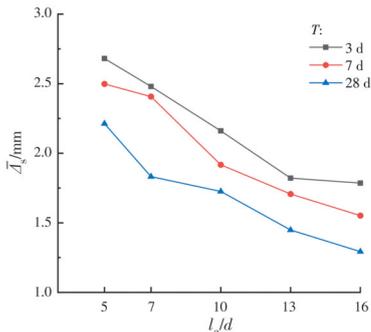


图 7 $\bar{\Delta}_s$ 随锚固长度 l_a 的变化曲线

Fig. 7 $\bar{\Delta}_s$ - l_a curves

3.2 灌浆料龄期

灌浆料龄期 T 对试件极限抗拉强度平均值 \bar{f}_u 的影响如图 8 所示。锚固长度 l_a 取 $5d$ 、 $7d$ 、 $10d$ 时,灌浆料龄期 T 对试件 \bar{f}_u 的影响显著,各组试件的极限抗拉强度平均值随着养护龄期增长而提高,且在灌浆料龄期为 $T=28d$ 时接近钢筋实验抗拉强度,其中 l_a 为 $5d$ 、 $7d$ 的试件 \bar{f}_u 增幅较大。锚固长度 l_a 取 $13d$ 、 $16d$ 时,试件的极限抗拉强度均已接近钢筋实验抗拉强度, T 对 \bar{f}_u 的影响较小。

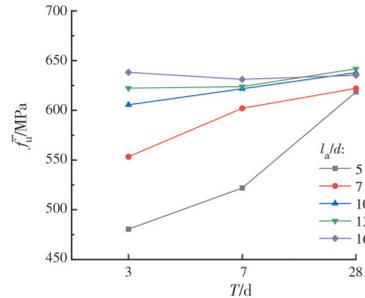


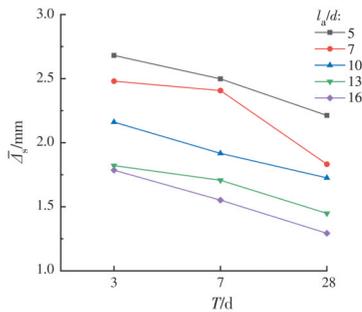
图 8 \bar{f}_u 随灌浆料龄期 T 的变化曲线

Fig. 8 \bar{f}_u - T curves

图 9 给出了相同锚固长度下弹性阶段滑移量平均值 $\bar{\Delta}_s$ 随灌浆料龄期 T 的变化曲线。分析可知, $\bar{\Delta}_s$ 随灌浆料龄期 T 增长而降低,表明试件的初始刚度随养护龄期的增长出现了明显提高。且锚固长度 l_a 小于 $10d$ 时,钢筋的平均黏结应力 $\bar{\tau}$ 随龄期 T 的增长小幅增加。由于带肋钢筋与灌浆料间的黏结应力由界面间的化学胶结力、摩阻力与机械咬合力构成,其中化学胶结力较小且在加载初期即被克服,故黏结应力主要由摩阻力和机械咬合力构成^[20]。钢筋受拉时,钢筋肋纹对灌浆料产生斜向压力,斜向压力可分解为轴向分力与径向分力,分别使灌浆料受剪与环向受拉。养护龄期增长,灌浆料内中后期膨胀组分逐步水化,增强了灌浆料径向扩张作用,使得波纹管内壁受到的扩张力增大,进而增强了波纹管对灌浆料的约束作用,提高了钢筋与灌浆料间的摩阻力与机械咬合力。同时随龄期增长,金属波纹管内灌浆料强度提高,试件在受轴向拉力作用下钢筋与灌浆料间的咬合齿不易被剪断,提高了试件的初始刚度与平均黏结应力。但由于钢筋的黏结应力的不均匀分布,远端黏结应力较小,故平均黏结应力增长仅在锚固长度较小时表现明显。

随灌浆料龄期增加,灌浆料水化程度提高、强度逐渐增大,导致在相同锚固长度条件下,试件极限荷载、最大滑移量在一定锚固长度范围内增大,极限荷载锚固长度为 $7d$ 及以下时显著增大,最大滑移量在锚固长度为 $10d$ 以下时增大较明显。

为获得较好早期锚固性能,锚固长度取值应较

图9 $\bar{\Delta}_s$ 随灌浆料龄期 T 的变化曲线Fig. 9 $\bar{\Delta}_s$ - T curves

大。当锚固长度 $l_a \geq 13d$ 时,虽然龄期 $T=3d$ 的试件均发生粘结-滑移破坏,但灌浆料龄期为3、7d的试件其弹性阶段滑移量平均值 $\bar{\Delta}_s$ 均小于2mm,抗拉强度平均值 \bar{f}_u 接近钢筋实验抗拉强度,锚固性能优良。因此锚固长度 $l_a \geq 13d$ 时,可确保钢筋-金属波纹管浆锚连接在灌浆料龄期为3、7d时具备优秀的锚固性能。当锚固长度 $l_a \geq 7d$ 时,龄期 $T=28d$ 的试件弹性阶段滑移量平均值 $\bar{\Delta}_s$ 均小于2mm,抗拉强度平均值 \bar{f}_u 均接近钢筋实验抗拉强度,但 $l_a=7d$ 时,一个试件出现了粘结-滑移破坏。为确保结构的安全性,正常工作中钢筋充分发挥其力学性能,锚固长度 l_a 应不小于 $10d$ 。

3.3 螺旋箍筋约束

将A05、B05、C05三组试件作为对照,在金属波纹管中加入采用公称直径为6mm光圆钢筋制成的间距为50mm、直径为50mm的螺旋箍筋,制成A05g、B05g、C05g三组试件。配置螺旋箍筋约束的3个试验组与其对照组的弹性阶段滑移量平均值 $\bar{\Delta}_s$ 、极限抗拉强度平均值 \bar{f}_u 、最大滑移量平均值 \bar{s}_m 见表2,并计算三者的偏差率 q ,以表征螺旋箍筋约束对钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能的影响。

表2 配箍试件与对照组的试验结果和偏差率

Table 2 Test results and deviation rate of specimens with stirrup and treatment group

编号	$\bar{\Delta}_s$ /mm	\bar{f}_u /mm	\bar{s}_m /mm	$q(\bar{\Delta}_s)/\%$	$q(\bar{f}_u)/\%$	$q(\bar{s}_m)/\%$
A05	2.681	230.010	5.303			
A05g	1.990	263.510	7.257	-25.77	14.57	36.85
B05	2.498	256.264	7.069			
B05g	1.872	269.739	9.521	-25.06	5.26	34.69
C05	2.213	303.674	15.669			
C05g	1.716	306.217	17.869	-22.46	0.84	14.04

配置螺旋箍筋约束的试件相对对照组,各龄期试件的弹性阶段滑移量均减少超过20%,最大滑移量也出现明显增长,表明配置螺旋箍筋约束显著提高了钢筋-金属波纹管浆锚连接的初始刚度与延性,有效提高试件的锚固性能。配置螺旋箍筋约束有

助于提高试件极限抗拉强度,但随龄期增长,提升效果逐步减弱。分析表1可知,配置螺旋箍筋约束还提高了试件的平均黏结应力。

螺旋箍筋约束的作用同金属波纹管类似,钢筋在轴向拉力作用时,灌浆料将钢筋施加的径向分力传递给螺旋箍筋,使螺旋箍筋受拉,产生收缩趋势,为核心区灌浆料提供径向约束^[21],提高了钢筋与灌浆料间的摩阻力与机械咬合力。同时波纹管箍筋能够抑制核心区斜裂缝发展,减小裂缝宽度,促使裂缝均匀分布,从而提高灌浆料的抗裂性能,并提升试件的锚固性能^[22]。

4 锚固长度取值及对比

在孔径比 $D/d=2.6$ 的条件下,灌浆料龄期为3、7d时,试件的极限强度接近钢筋实验抗拉强度,且具备较好的初始刚度;灌浆料龄期为28d时,锚固长度为 $7d$ 即出现钢筋断裂破坏,锚固长度取 $10d$ 时均表现为钢筋断裂破坏,初始刚度较高。

考虑足够安全储备,给出孔径比 $D/d \geq 2.6$ 时的钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固长度建议取值。为确保优异的3、7d锚固性能,使连接件的极限强度趋于钢筋极限抗拉强度,锚固长度宜不小于 $13d$;为确保正常工作中钢筋充分发挥其力学性能,使钢筋出现断裂破坏,锚固长度应不小于 $10d$ 。

参考《混凝土结构设计规范(2015年版)》(GB 50010—2010)对钢筋的锚固长度计算公式为

$$l_a = \zeta_a l_{ab} = \zeta_a \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (2)$$

式中: ζ_a 为锚固长度修正系数,取 $\zeta_a=1.0$; α 为钢筋外形系数,对带肋钢筋取0.14; f_y 、 f_t 分别为钢筋抗拉强度设计值与灌浆料轴心抗拉强度设计值; d 为钢筋直径。钢筋屈服强度标准值参考公式 $f_{yk}=f_{ym}(1-1.645\delta_s)$ 计算, f_{ym} 为钢筋屈服强度平均值,依据材性试验取452.58MPa, δ_s 参考研究^[23]取0.0641, $f_{yk}=404.86$ MPa,考虑 $\gamma_s=1.1$ 材料强度分项系数, $f_y=368.05$ MPa, f_t 参考C70混凝土轴心抗拉强度设计值,取2.14MPa。

美国规范ACI 318-11给出的钢筋锚固长度简化计算公式,对6号(公称直径19.1mm)及以下钢筋采用式(3)计算,对7号(公称直径22.2mm)及以上钢筋采用式(4)计算。

$$l_d = \left(\frac{f_y \psi_i \psi_e}{25 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad (3)$$

$$l_d = \left(\frac{f_y \psi_i \psi_e}{20 \lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b \quad (4)$$

式中: l_d 为变形钢筋的锚固长度,应不小于12 inch; f_y 为钢筋屈服强度的设计值(Psi),取53 340.75Psi; f_c' 为混凝土抗压强度,Psi, $\sqrt{f_c'}$ 应不大于 $100\sqrt{\text{Psi}}$,参考材料性试验 $f_c'=10\ 802.93\ \text{Psi}$,取 $\sqrt{f_c'}=100\sqrt{\text{Psi}}$; ϕ_1 、 ϕ_e 分别为钢筋位置、涂层系数,均取1.0; λ 为轻骨料混凝土系数,取1.0; d_b 表示钢筋公称直径。

参考式(2)~式(4),带入试验数据,计算得到中、美规范的锚固长度及笔者给出的建议锚固长度如表3所示。

表3 锚固长度对比

Table 3 Comparison of anchorage length values

公式来源	锚固长度 l_a
中国规范 GB 50010—2010	24.08d
美国规范 ACI318-11 6号及以下钢筋	21.34d
美国规范 ACI318-11 7号及以上钢筋	26.67d
研究建议取值	10d

由表3可知,采用钢筋-金属波纹管浆锚连接所需的锚固长度远小于按照中国规范 GB 50010—2010与美国规范 ACI 318-11计算所需的钢筋锚固长度。由于波纹管对内部灌浆料的约束作用,提高了灌浆料的力学性能,同时阻碍了钢筋与灌浆料界面的相对滑移,有效提高了钢筋的黏结锚固性能。

5 结论

通过拉拔试验,研究了锚固长度 l_a 、灌浆料龄期 T 与螺旋箍筋约束对钢筋-金属波纹管浆锚连接锚固性能的影响,得到如下结论:

1)试验中,所有钢筋-金属波纹管浆锚连接试件表现为筋断裂破坏与粘结-滑移破坏,并确保连接件失效时钢筋均已屈服。

2)未配置螺旋箍筋约束的试件,灌浆料龄期 $T=3\text{d}$ 的试件均发生粘结-滑移破坏;灌浆料龄期 $T=7、28\text{d}$ 的试件随锚固长度增加破坏形式由粘结-滑移破坏转变为断裂破坏,出现断裂破坏的锚固长度分别为 $13d$ 与 $7d$ 。

3)随钢筋锚固长度与灌浆料养护龄期增长,试件的极限强度先增大后趋于钢筋实验抗拉强度,钢筋的弹性阶段最大滑移量明显降低,初始刚度提高,锚固性能明显提升。

4)孔径比 $D/d \geq 2.6$ 时,为确保优异的3、7d锚固性能,锚固长度宜不小于 $13d$;为确保正常工作中钢筋充分发挥其力学性能,锚固长度应不小于 $10d$ 。

5)钢筋-金属波纹管浆锚连接中配置螺旋箍筋约束能够大幅降低钢筋弹性阶段滑移量,提高最大

滑移量,且能够有效促进灌浆料养护时长不足试件的极限抗拉强度,显著提高试件锚固性能。

参考文献

- [1] 李宪军, 邓美林, 何廷树. 装配式建筑套筒灌浆连接系统膨胀约束关键技术研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(9): 43-48.
LI X J, DENG M L, HE T S. Research on the key technology of restrained expansion of the sleeve grouting connection system in prefabricated building [J]. Building Structure, 2021, 51(9): 43-48. (in Chinese)
- [2] 毛小勇, 高奕昕. 约束浆锚搭接连接高温性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 117-123.
MAO X Y, GAO Y X. Experimental research on connection performance of restraint grouting-anchoring overlap-joint of steel bar subjected to high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 117-123. (in Chinese)
- [3] 胡少伟, 赵克宇, 喻江. 复合弯扭作用下预应力单箱组合梁的扭转承载能力分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 1-6.
HU S W, ZHAO K Y, YU J. Analysis on the torsional bearing capacity of prestressed single-box composite beam under combined bending and torsion [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(2): 1-6. (in Chinese)
- [4] 聂建国, 熊辉, 胡少伟. 开口截面钢-混凝土组合梁弯扭性能的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11): 6-10, 66.
NIE J G, XIONG H, HU S W. Experimental analysis on steel-concrete composite beams with open section under combined flexure and torsion [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 6-10, 66. (in Chinese)
- [5] 余琼, 许雪静, 尤高帅. 带肋钢筋与灌浆料黏结性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 91-101.
YU Q, XU X J, YOU G S. Experimental study on bond behavior for ribbed steel bars and grout [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 91-101. (in Chinese)
- [6] WU Y T, XIAO Y, ANDERSON J C. Seismic behavior of PC column and steel beam composite moment frame with posttensioned connection [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(11): 1398-1407.
- [7] TAZARV M, SAIIDI M S. UHPC-filled duct connections for accelerated bridge construction of RC columns in high seismic zones [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 413-422.
- [8] 金峤, 李京龙, 孙丽, 等. 含FRP约束环钢筋锚固性能

- 试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 998-1007.
- JIN Q, LI J L, SUN L, et al. Experimental study on anchorage performance of steel bars with FRP confined rings [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(6): 998-1007. (in Chinese)
- [9] 陈俊. 预制混凝土底层柱抗震性能试验研究与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- CHEN J. Experimental research and analysis on seismic performance of precast concrete bottom column [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [10] 陈俊, 肖岩, 尹齐. 预埋波纹套管的钢筋-高强浇筑料黏结锚固性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 140-147.
- CHEN J, XIAO Y, YIN Q. Bonding strength of rebar anchorage in embedded corrugated sleeve with high strength grout [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(7): 140-147. (in Chinese)
- [11] 陈俊, 肖岩. 纵筋浆锚连接预制柱的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 63-73.
- CHEN J, XIAO Y. Experimental study on seismic behavior of precast concrete column with longitudinal reinforcement grouting-anchoring connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 63-73. (in Chinese)
- [12] 何宇, 刘汗青, 霍静思, 等. 钢管混凝土预埋波纹管浆锚钢筋连接件抗拔性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(3): 22-29.
- HE Y, LIU H Q, HUO J S, et al. Pull-out test study of rebar anchorage in embedded corrugated sleeve in the concrete-filled steel tubular column [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(3): 22-29. (in Chinese)
- [13] 王浩, 柳家为, 石棚, 等. 钢筋-金属波纹管灌浆连接的锚固性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 215-221.
- WANG H, LIU J W, SHI P, et al. Experimental study on anchorage performance of rebar-corrugated metal duct for grout splicing [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 215-221. (in Chinese)
- [14] HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A, OSMAN M H, et al. Bond behavior of spirally confined splice of deformed bars in grout [J]. Construction and Building Materials, 2015, 80: 180-194.
- [15] HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A. Effects of spiral confinement to the bond behavior of deformed reinforcement bars subjected to axial tension [J]. Engineering Structures, 2016, 112: 1-13.
- [16] WANG Y M, HU S W, HE Z. Mechanical and fracture properties of fly ash geopolymer concrete additive with calcium aluminate cement [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(18): 2982.
- [17] ZHANG P, WANG K X, WANG J, et al. Mechanical properties and prediction of fracture parameters of geopolymer/alkali-activated mortar modified with PVA fiber and nano-SiO₂ [J]. Ceramics International, 2020, 46(12): 20027-20037.
- [18] 潘南君. 预埋金属波纹管浆锚钢筋锚固性能试验研究[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2018.
- PAN N J. Experimental study of anchoring performance of steel bars anchored into the embedded metal bellows [D]. Xiangtan, Hunan: Xiangtan University, 2018. (in Chinese)
- [19] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.
- XU Y L, SHEN W D, WANG H. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete [J]. Journal of Building Structures, 1994, 15(3): 26-37. (in Chinese)
- [20] WALKER P R, BATAYNEH M K, REGAN P E. Bond strength tests on deformed reinforcement in normal weight concrete [J]. Materials and Structures, 1997, 30(7): 424-429.
- [21] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 116-123.
- [22] 鞠彦忠, 沈浩, 王德弘, 等. 活性粉末混凝土梁柱节点抗裂性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1203-1209.
- JU Y Z, SHEN H, WANG D H, et al. Experimental study on crack resistance of reactive powder concrete beam-column joints [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1203-1209. (in Chinese)
- [23] 邵卓民, 沈文都, 徐有邻. 钢筋砼的锚固可靠度及锚固设计[J]. 建筑结构学报, 1987, 8(4): 36-49.
- SHAO Z M, SHEN W D, XU Y L. The reliability and design for anchorage of reinforcing bars [J]. Journal of Building Structures, 1987, 8(4): 36-49. (in Chinese)