

文章编号:1671-6833(2021)02-0025-06

装配式结构钢筋连接界面的破坏演化规律研究

李悦, 孟文君, 高崇铭, 吴琦琦

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 为了获取装配式混凝土结构钢筋浆锚连接界面的破坏演化规律, 借助数字散斑相关方法(DSCM), 对装配式混凝土结构进行了纵向钢筋浆锚连接拉拔试验。通过观测钢筋浆锚连接的破坏过程, 并对散斑图像进行分析, 研究了装配式混凝土结构浆锚连接钢筋受力变形演化特征、锚固体系受力和位移场演化特征、锚固体系受力和应变场演化特征。研究结果表明: 锚固剂的厚度会影响锚固体系的破坏模式及锚固极限承载力; 在锚固体系中, 拉拔力沿钢筋从加载端向自由端不断传递, 且锚固剂厚度越大, 传递距离越深; 在拉拔过程中, 锚固体系的变形主要集中在锚固剂与混凝土交界面, 并随荷载的增加沿钢筋向体系内部扩展; 在拉拔力作用下, 加载初期试件的第一主应变与最大剪切应变主要存在于加载端钢筋周围的灌浆料区域, 随着拉拔力增加, 应变向混凝土基体与灌浆料黏结界面扩展, 直至与黏结界面处应变相衔接。

关键词: 浆锚连接; DSCM; 拉拔试验; 变形场; 应变场

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.010

0 引言

装配式结构是以预制构件为主体, 通过钢筋与混凝土的锚固连接构成的一种快速拼装结构。装配式结构上的钢筋锚固质量常受到孔洞成型方式、灌浆质量等方面的影响。其中锚固体系的传力规律作为核心问题之一, 其研究尚不成熟。因此, 开展钢筋连接界面的破坏演化规律研究, 对装配式结构的设计及应用具有重要的理论和工程应用价值^[1-3]。

国内外学者对钢筋锚固进行了大量的探索与研究。理论方面, 王明恕等^[4]在试验的基础上提出钢筋锚固段剪力中性点理论, 并由此建立了钢筋全长锚固力学模型。尤春安等^[5]建立了锚固体系界面力学模型, 推导出界面应力分布的理论解。试验方面, 朱自强等^[6]通过拉拔试验确定了锚固钢筋的锚固力计算方法。刘立新等^[7]对采用扩大套头锚固的热轧带肋钢筋与混凝土黏结试件进行了拉拔试验, 获得了黏结强度计算公式。朱焕春等^[8]通过试验获得了钢筋周边混凝土的受力破坏形式及钢筋锚固体系应力沿纵深的传递规律。

目前的研究集中在钢筋锚固力学模型及承载力计算方面, 但是对锚固体系传力机理, 钢筋与锚固剂、锚固剂与混凝土界面传力规律研究还不完善, 还需要深入研究, 为钢筋锚固体系的理论和应用提供依据。因此, 本文针对钢筋、锚固剂、混凝土界面间的破坏演化规律开展钢筋浆锚连接界面拉拔试验, 以数字散斑相关方法为手段, 通过观测加载过程中锚固体系表面变形场演化趋势, 研究钢筋锚固体系在拉拔过程中应力-应变演化规律, 为装配式结构钢筋锚固连接的设计和应用提供参考。

1 试验部分

1.1 试验模型

常规的钢筋拉拔试验采用混凝土圆柱体作为基体, 模型的荷载、约束条件和几何模型均为轴心对称, 在加载过程中模型内部钢筋和混凝土的应力、应变也为轴心对称。因此, 为了对钢筋、锚固剂、混凝土界面间的破坏演化规律进行观测, 获取锚固体系表面变形场演化规律, 设计采用半圆柱体作为拉拔试验模型, 如图1所示, 并在模型上下

收稿日期: 2020-10-30; 修订日期: 2020-12-05

基金项目: 北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/062); 北方工业大学毓优人才支持计划(XN012/044)

作者简介: 李悦(1979—), 男, 河南安阳人, 北方工业大学副教授, 博士, 主要从事构筑物抗震及减灾研究, E-mail: liyue@ncut.edu.cn。

两端设置钢箍作为离面位移约束,以保证加载过程中模型及荷载始终为轴心对称状态。

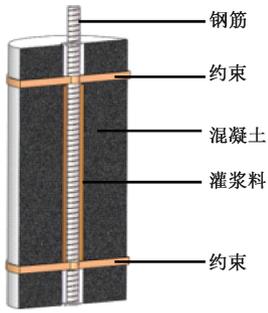


图1 试件模型轴测图

Figure 1 Axonometric view of the specimen model

模型采用 HRB400 螺纹钢,直径为 25 mm,黏结长度为 600 mm。混凝土按照水泥、砂、碎石的质量比为 1:0.95:2.46 的比例配置,混凝土基体高度为 700 mm。模型制作时,将混凝土浇筑到内径为 350 mm、长度为 700 mm 的半圆形模具中,并布设 PVC 管作为钢筋及灌浆料的后期浇筑预留孔径。在混凝土完成初凝以后,取出预埋在混凝土基体中的 PVC 管。将钢筋放置在模型中心预留孔洞,并浇注灌浆料进行锚固。在模型养护完成后,在钢筋、灌浆料和混凝土界面人工布设黑底白点散斑。

1.2 试验工况

为了分析黏结剂厚度对钢筋锚固体系连接界面破坏演化规律的影响,制作了 4 种不同黏结剂厚度的试件,试件的编号及具体参数见表 1。

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	钢筋直径/mm	黏结剂孔径/mm	黏结剂厚度/mm	钢筋埋置方式
sj-40	25	40	7.5	1/2 埋置
sj-50	25	50	12.5	1/2 埋置
sj-75	25	75	25.0	1/2 埋置
sj-160	25	160	92.5	1/2 埋置

1.3 试验加载及观测系统

采用液压拉拔仪配合反力架作为试验的加载系统,如图 2 所示。加载时将拉拔仪置于反力架面板上,试件置于反力架下部以保证试件轴心受拉。

加载过程中,采用 2 台 CCD 工业相机对试件轴面进行观测。1 号相机采集整个试件轴面的图像,2 号相机采集试件上部受拉端重点观测区域图像,如图 3 所示。采集预加载阶段试件轴面作为初始图像,待每级荷载稳定后,再次采集轴面图像,并记录荷载及应变。重复该过程,直至试件破坏。



图2 试验加载系统

Figure 2 Test loading system

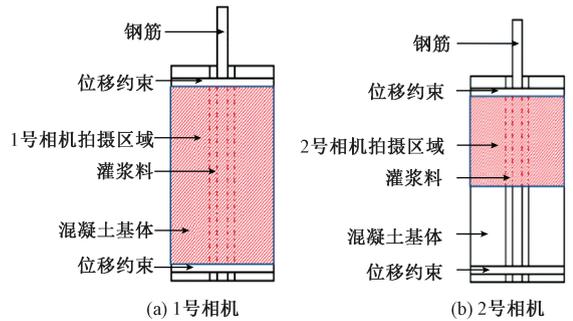


图3 图像采集区域

Figure 3 Image acquisition area

同时,为了获取荷载在试件内部的传递规律,在钢筋上沿加载端向自由端共布置 5 个测点。测点位置如图 4 所示。

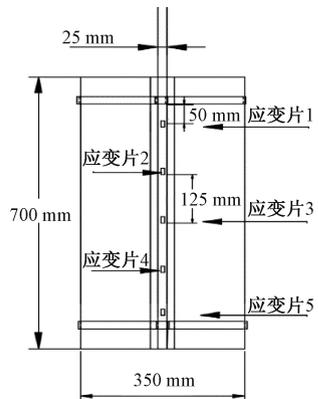


图4 钢筋测点布置

Figure 4 Layout of reinforcement measuring points

2 结果与分析

2.1 破坏过程

试验过程中,各试件的破坏过程相似。以 sj-40 为例,试验加载开始后,在加载端开始出现裂隙,并由钢筋与灌浆料的交界面向混凝土外侧扩展,直至有灌浆料或混凝土剥落,最终灌浆料被挤碎,

钢筋锚固体系被破坏,如图 5(a)所示。试件 sj-50 和试件 sj-75 在加载端灌浆料与混凝土交界面处的混凝土和灌浆料剥落,如图 5(b)~5(c)所示。而试件 sj-160 的灌浆料在加载端处形成锥形体拉出破坏,如图 5(d)所示。由此可见,锚固体系的破坏模式与锚固剂厚度有关。

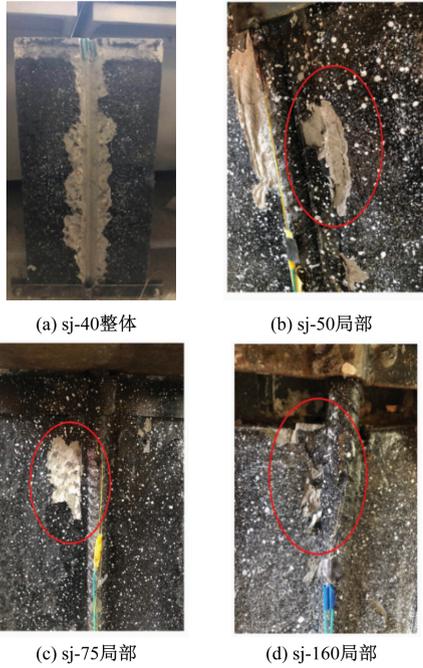


图 5 试件破坏图

Figure 5 Specimen failure

表 2 为各试件破坏时的最大拉拔力。从表 2 可以看出,对于钢筋浆锚连接试件,随灌浆料厚度的增大,试件破坏时的拉拔力也随之增大。

表 2 试件破坏时的拉拔力

Table 2 Pulling force when the specimen broken

试件编号	灌浆料厚度/mm	锚固承载力/kN
sj-40	7.5	49.00
sj-50	12.5	69.04
sj-75	25.0	76.34
sj-160	92.5	96.08

2.2 钢筋受力变形演化规律分析

图 6 为加载过程中钢筋应变沿纵向轴线的演化规律。由图 6 可见,拉拔力在试件内沿钢筋从加载端向自由端逐步传递。并且,当 sj-40 和 sj-50 上的拉拔力传递到测点 2 位置处时,钢筋锚固便发生破坏。而 sj-160 中的拉拔力则至少传递至测点 4 深度处,钢筋锚固才发生破坏。因此,灌浆料厚度越大,荷载向试件内部传递相对也越深。另外,各个测点荷载-应变演化规律比较相似,尤其是 sj-160,沿轴向变形较为一致。

2.3 锚固体系变形场演化规律分析

由于采用半圆柱体试件,观测面的变形场是以钢筋为轴的对称图像,故选取观测面的一半作为分析区域。

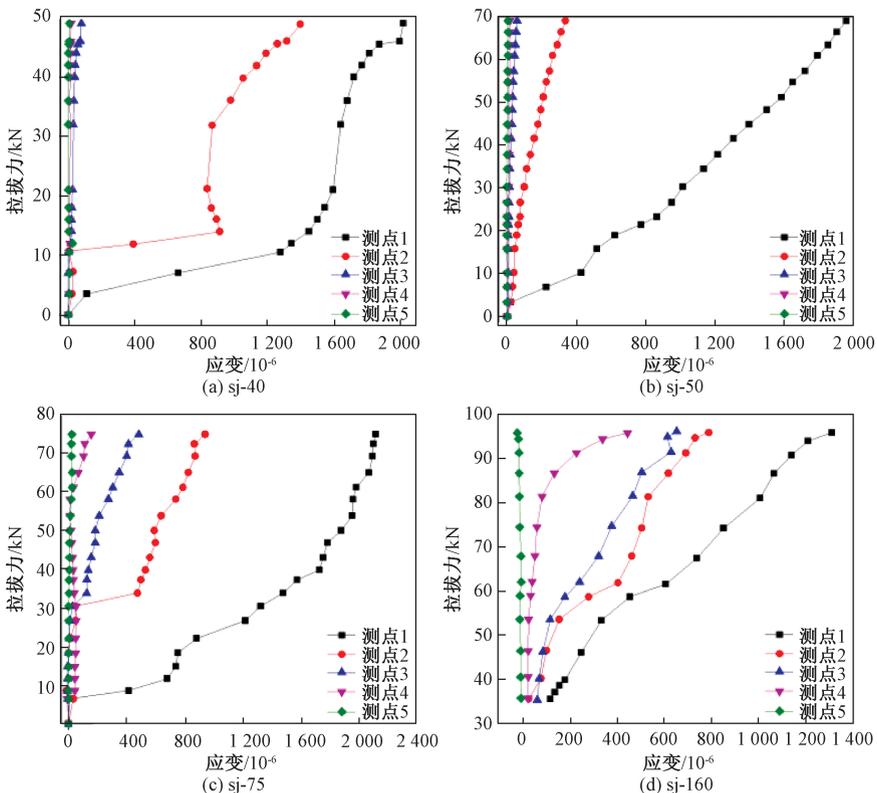


图 6 钢筋拉拔力-应变关系曲线

Figure 6 Reinforcement pulling force-strain relationship curve

2.3.1 钢筋浆锚连接界面位移场演化规律分析

数字散斑相关技术是通过变形前后散斑图像进行位置搜索,分析各区域灰度分布差异实现位置和应变的测量。同一坐标系中,前、后散斑图灰度分布可用函数 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 分别表示如下:

$$f(x, y) = \text{int} \left\{ \sum_{i=1}^n I_i^0 \exp \left(- \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{a_i^2} \right) \right\}; \quad (1)$$

$$g(x, y) = \text{int} \left\{ \sum_{i=1}^n I_i^0 \exp \left(- \frac{(x - x_i^*)^2 + (y - y_i^*)^2}{a_i^2} \right) \right\}. \quad (2)$$

式中: int 为取整数; n 为子区内散斑颗粒数; a_i 表示散斑颗粒大小; I_i^0 表示第 i 个散斑颗粒的随机分布光强; (x_i, y_i) 、 (x_i^*, y_i^*) 分别表示变形前、后第 i 个散斑颗粒的中心坐标。

通过上式的计算,可以获得试件观测表面应变场变化特征^[9-14]。

以试件 sj-160 为例,选取试件受到典型荷载作用时整体区域,采用 Vic-2D 图像分析系统进行计算与分析,获得试件表面位移场,绘制位移场云图,从而对钢筋浆锚连接界面变形演化规律进行研究。

图 7 为试件的水平向位移场云图,图中竖线为灌浆料与混凝土基体的分界面,在分析时规定像素从左向右移动为正。由图 7 可以看出,在水平向混凝土及灌浆料均趋向于背离钢筋方向变形,且自加载端至自由端位移量越来越小。随着拉拔力增大,位移也随之增大。而由于在灌浆料与混凝土界面的材料的不连续性,在界面处的等

值线易发生波动,并随拉拔力增大,该现象由加载端逐渐向自由端传递,当拉拔力达到 96 kN 时,波动已完全传递至自由端。灌浆料及混凝土界面处水平变形量均大于其同一高度位置处。

图 8 为试件 sj-160 纵向位移场云图,计算时规定像素从向上向下移动为正。由图 8 可知,在荷载作用下纵向位移场均为负,且越靠近钢筋,位移值越大,并随拉拔力的增加,位移值也随之增大。当拉拔力达到 62 kN 时,在 50 mm 深度处出现集中增大现象,且随着拉拔力的增加,区域范围也逐渐增大,同时试件的位移也显著增加。当拉拔力增加到 96 kN 时,等值线在灌浆料与混凝土界面发生突变,在混凝土侧区域,等值线基本水平分布;而在灌浆料区域,同一水平高度,距离钢筋越近,灌浆料的位移越大,且在距钢筋 25 mm 处,加载端附近的灌浆料发生位移集中现象。

2.3.2 钢筋浆锚连接界面应变场演化规律分析

在已有变形场的基础上,利用拉格朗日展开式计算试件观测表面的应变场分布:

$$\varepsilon_x = \frac{d_u(x, y)}{d_x}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \frac{d_v(x, y)}{d_y}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{d_u(x, y)}{d_y} + \frac{d_v(x, y)}{d_x}. \quad (5)$$

通过对位移场的计算,可以获得观测面第一主应变(ε_1)场分布,仍以试件 sj-160 为例,如图 9 所示。加载初期, ε_1 主要集中于加载端灌浆料区域内,拉拔力越大, ε_1 也越大。当拉拔力达到 75 kN 时, ε_1 的影响距离沿深度向自由端传递,加载末期拉拔力达到 96 kN 时,混凝土基体与灌浆

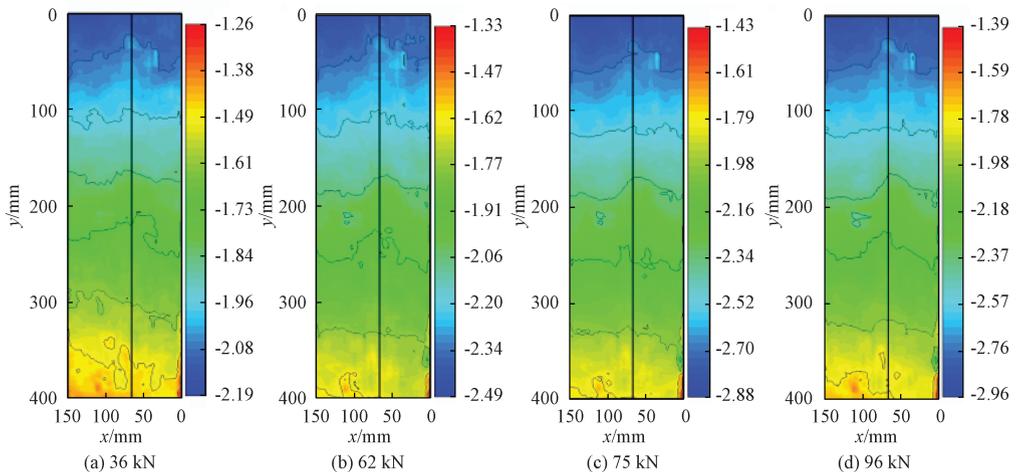


图 7 试件 sj-160 水平向位移场云图

Figure 7 Cloud image of horizontal displacement field of sj-160

料黏结界面处的应变逐渐向两侧扩张,直到与钢筋周围的应变值相衔接,试件破坏。

在第一主应变场的基础上,通过式(6)可以进一步获得观测面的最大剪切应变分布场云图,如图 10 所示。

$$\gamma = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \quad (6)$$

式中: ε_1 为第一主应变, ε_2 为第二主应变, γ 为最大剪切应变。

由图 10 可知,加载初期, γ 主要存在于加载端钢筋附近的灌浆料区域,随着拉拔力不断增大,在加载端钢筋附近,灌浆料区域的剪应变影响范围向试件深处扩展,混凝土基体与灌浆料连接界面处的应变及两侧区域的应变也随之增大。当拉拔力达到 96 kN 时,灌浆料区域内的应变值随锚固深度增加而减小,加载端附近钢筋的灌浆料应变最大,此时界面处应变略大于两侧的应变,试件破坏。

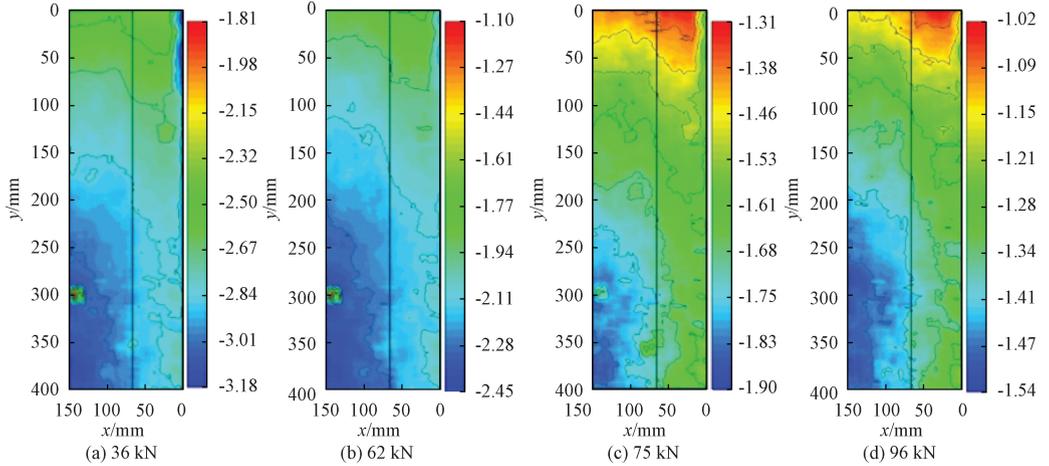


图 8 试件 sj-160 纵向位移场云图

Figure 8 Cloud image of vertical displacement field of sj-160

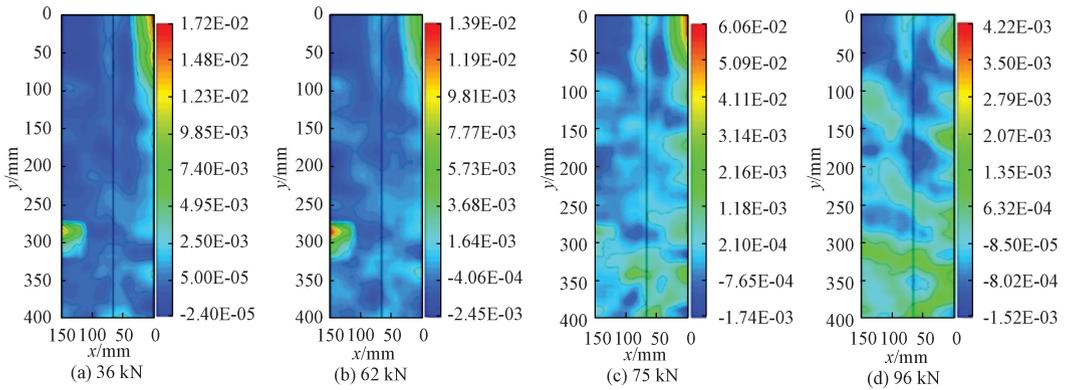


图 9 试件 sj-160 第一主应变分布场云图

Figure 9 Cloud image of ε_1 distribution field of sj-160

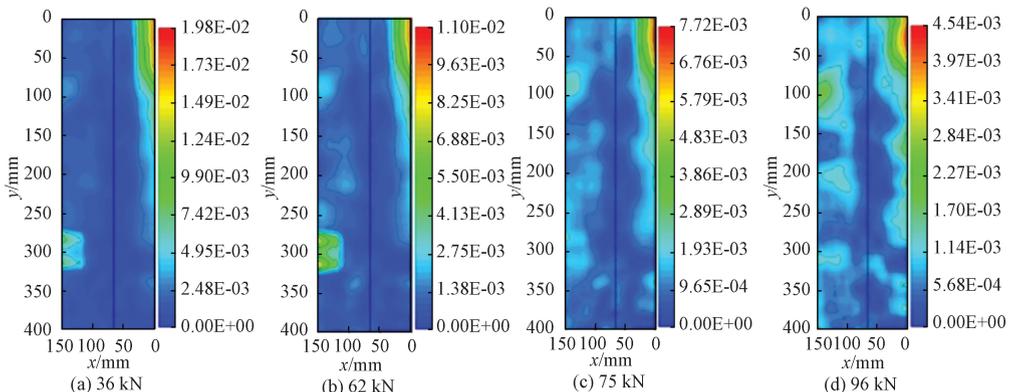


图 10 试件 sj-160 最大剪切应变分布场云图

Figure 10 Cloud image of γ distribution field of sj-160

3 结论

(1)受锚固剂厚度的影响,锚固体系产生了钢筋被拉出和混凝土劈裂2种破坏模式,且锚固体系的承载力随锚固剂厚度的增加而增大。

(2)沿锚固体系纵深方向,荷载由加载端向自由端不断传递,影响深度随锚固剂厚度的增加而增大。在横向,锚固体系的变形首先产生在锚固剂与混凝土黏结面,之后向混凝土内部扩展。

(3)在加载初期,观测面第一主应变与最大剪切应变首先出现在加载端钢筋周边灌浆料区域,并向灌浆料与混凝土基体黏结界面扩展。

参考文献:

- [1] 张立,袁永强.装配式剪力墙连接国内研究现状及展望[J].河南科技学院学报(自然科学版),2019,47(3):22-27.
- [2] 祝雯,黄石明,高梓贤.装配式混凝土结构钢筋套筒灌浆料的研究现状及发展趋势[J].广州建筑,2017,45(3):22-26.
- [3] 周金富,潘阿二.预制混凝土结构浆锚连接锚固性能综述[J].工业技术创新,2019,6(3):103-106.
- [4] 王明恕,何修仁,郑雨天.全长锚固锚杆的力学模型及其应用[J].金属矿山,1983(4):24-29.
- [5] 尤春安,战玉宝,刘秋媛,等.预应力锚索锚固段的剪滞-脱黏模型[J].岩石力学与工程学报,2013,32

(4):800-806.

- [6] 朱自强,何现启.全长锚固锚杆拉拔试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(增刊1):115-118.
- [7] 刘立新,赵镇,张龔,等.带扩大套头钢筋机械锚固性能的试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2008,29(3):103-107.
- [8] 朱焕春,荣冠,肖明,等.张拉荷载下全长粘结锚杆工作机理试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):379-384.
- [9] 孟利波,马少鹏,金观昌.数字散斑相关测量中亚像素位移测量方法的比较[J].实验力学,2003,18(3):343-348.
- [10] 芮嘉白,金观昌,徐秉业.一种新的数字散斑相关方法及其应用[J].力学学报,1994,26(5):599-607.
- [11] LU H,CARY P D.Deformation measurements by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient [J]. Experimental mechanics, 2000,40(4):393-400.
- [12] 刘光利,姜红艳.数字散斑相关方法的原理及土木工程应用简介[J].安徽建筑大学学报,2015,23(6):52-58,62.
- [13] ZHANG J,SWEEDY A,GITZHOFFER F,et al.A novel method for repeatedly generating speckle patterns used in digital image correlation [J]. Optics and lasers in engineering,2018,100:259-266.
- [14] 张昕,乐金朝,刘汉东.PIV 测量技术在锚板板周土体变形场研究中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(5):20-23.

Study on Failure Evolution Law of Reinforcing Bar Connection Interface of Precast Structure

LI Yue, MENG Wenjun, GAO Chongming, WU Qiqi

(College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to obtain the failure evolution law of the reinforced grout anchor connection interface of pre-fabricated concrete structures, a longitudinal steel bar anchor connection test was carried out on a prefabricated concrete structure by the digital speckle correlation method (DSCM). By observing the failure process of steel bar anchor connection and analyzing the speckle image, the evolution characteristics of the stress of the fabricated concrete structure anchor, the evolution characteristics of the force field of the anchor system, and the evolution characteristics of the strain field of the anchor system were studied. The results showed that: ① The thickness of the anchoring agent would affect the failure mode and the ultimate bearing capacity of the anchoring system. ② In the anchoring system, the pulling force was continuously transmitted along the steel bar from the loaded end to the free end, and the greater the thickness of the anchoring agent, the greater the transmission range is. ③ During the drawing process, the deformation of the anchoring system was mainly concentrated at the interface between the anchoring agent and the concrete, and expanded along the steel bar to the inside of the system as the load increases. ④ Under the pulling force, in the initial, the first principal strain and the maximum shear strain mainly existed in the grouting area around the reinforcement at the loading end. As the pulling force increased, the strain expanded to the bonding interface between the concrete matrix and the grouting material until it connects with the strain at the bonding interface.

Key words: anchor connection; DSCM; drawing test; deformation field; strain field