

文章编号:1673-9469(2024)06-0073-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.011

## 带缺陷的装配式浆锚连接拉拔性能研究

杨凯淳,姚菲\*,庄佳纯

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

**摘要:**为研究装配式浆锚搭接连接节点处灌浆缺陷对连接性能的影响,进行了39个含不同位置、不同长度缺陷的浆锚连接试件的单向拉伸试验,研究了灌浆缺陷种类与灌浆缺陷程度对浆锚连接受拉性能的影响规律。结果表明,当缺陷程度不超过40%时,缺陷分布类型对浆锚连接的受拉性能影响不大,对于缺陷程度为50%、60%的各类缺陷试件,峰值荷载从大到小依次是离散缺陷、端部缺陷、中部缺陷。实际工程中最应避免的是灌浆料中部缺陷,其次是灌浆料离散缺陷,最后是灌浆料端部缺陷。综合位移比变化趋势的转折点体现出随着缺陷程度的增大,试件破坏模式由钢筋拉断转变为钢筋拔出。

**关键词:**冲击回波法;浆锚连接;缺陷;粘结滑移;单向拉伸试验;拉拔破坏

中图分类号:TU37

文献标识码:A

## Study on the Pulling Performance of Prefabricated Grout-filled Lap Joint with Defects

YANG Kaichun, YAO Fei\*, ZHUANG Jiachun

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** To investigate the effect of grouting defects on the connection performance of prefabricated grout anchor lap joints, 39 grout anchor connection specimens with different positions and lengths of defects were tested using uniaxial tensile tests. The influence of grouting defect types and degrees on the stress performance of grout anchor connections was studied. The results show that when the defect level does not exceed 40%, the distribution type of defects has little effect on the stress performance of the grout anchor connection. For various types of defect specimens with defect levels of 50% and 60%, the peak load from large to small is the discrete defect, end defect, and middle defect. The most important thing to avoid in practical engineering is the defect in the middle of the grouting material, followed by the discrete defect of the grouting material, and finally the defect at the end of the grouting hole. The turning point of the comprehensive displacement ratio trend reflects that as the degree of defect increases, the failure modes of the specimens change from steel bar failure to bar pull-out.

**Key words:** impact echo method; grout-filled lap joint; defects; bond-slip; unidirectional tensile test; pull-out failure

在现代装配式建筑工程中,浆锚钢筋搭接连接技术因其出色的工程性能和施工便利性,已经广泛应用于钢筋混凝土构件的湿连接节点中<sup>[1-3]</sup>。然而,各种不可避免的缺陷,如节点灌浆不饱满、灌浆料强度缺陷、施工过程中的误差等,都可能对

浆锚搭接连接的拉拔性能产生影响<sup>[4]</sup>。尽管近年来对浆锚搭接连接性能的研究取得了一些进展,但对缺陷因素如何影响其拉拔性能的研究仍然不足。

浆锚钢筋搭接连接技术在国内外均历经了长

收稿日期:2024-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52478248);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202086)

作者简介:杨凯淳(1998-),男,江苏东台人,硕士研究生,主要从事结构检测与加固研究。

\*通信作者:姚菲(1983-),女,湖南凤凰人,博士,副教授,主要从事结构检测与加固研究。

期深入的研究探索。国外方面,Sagan 等<sup>[5]</sup>开展钢筋非接触搭接的往复荷载拉压试验,证实该连接方式相较传统搭接连接具备更高承载力;Smith 等<sup>[6]</sup>研究表明,横向约束钢筋对改善试件连接性能效果显著,且在搭接长度达标的情况下,非接触搭接连接性能稳定可靠;Belleri 等<sup>[7]</sup>针对金属波纹管浆锚搭接连接的预制试件实施低周反复加载试验,证明了此连接方式可实现钢筋应力的有效传递。国内众多专家学者亦在该领域积极耕耘。赵立财<sup>[8]</sup>研究了锚杆长度与直径对应力的影响,发现锚杆长度对应力分布起主导作用,直径次之;寇海磊等<sup>[9]</sup>深入剖析锚杆应力与荷载的内在联系,得出极限拉应力及界面破坏位移随直径减小而增大的规律;吴涛等<sup>[10]</sup>全面解析浆锚连接的工作机理、受力特性以及不同连接方式的关键要点,精准指出存在的问题并为国内浆锚体系发展建言献策;马军卫等<sup>[11]</sup>制作 144 个试件开展拉拔与反复拉压试验,充分验证了浆锚搭接连接操作简便且安全可靠的特性;徐文杰<sup>[12]</sup>制作 80 个构件开展拉拔试验,结合冲击回波法深入探究了质量因素对浆锚搭接连接性能的影响程度。

现有的浆锚搭接连接研究多集中于理论与试

验,意在提升拉拔性能,未考量浆锚搭接端缺陷对力学性能的影响情况。本研究基于常见的浆锚搭接灌浆缺陷种类设计拉拔试验,分析缺陷的位置、长度对拉拔性能的影响,为加强装配式结构的施工质量控制及准确评估装配结构的受力性能提供参考依据。

## 1 试验概述

### 1.1 试件设计

本文制作了 39 个单向拉伸试件,考虑了 3 种不同灌浆缺陷,分别是浆锚搭接连接端部缺陷、中部缺陷、离散缺陷,见图 1。

在浆锚钢筋中部粘贴 2 道应变片,应变片最大量程为 20 000 微应变,灵敏度系数为 2.0。通过在浆锚钢筋上缠绕珍珠棉模拟缺陷,并包裹防水的透明胶,确保灌浆过程中缺陷位置固定不变。应变片粘贴及中部、离散缺陷试件的制作见图 2。

端部缺陷、中部缺陷和离散缺陷分别设计 30%、40%、50%和 60%长度的缺陷程度,每种缺陷程度、无缺陷工况各浇筑 3 个试件,共 39 个,试验结果取每组 3 个构件的平均值。依据试件实际浆

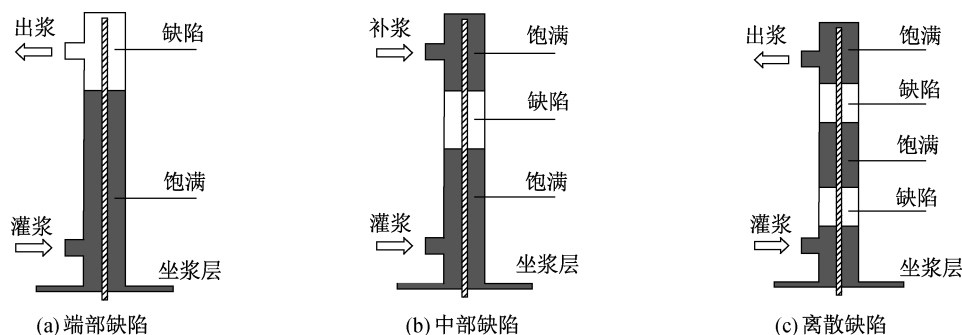


图 1 试件缺陷种类

Fig. 1 Defect type of of specimens



图 2 应变片粘贴及缺陷模拟

Fig. 2 Pasting of strain gauges and simulation of defects

锚连接锚固长度  $l_a$  计算缺陷长度,需首先计算浆锚连接基本锚固长度  $l_{ab}$ 。

为满足浆锚搭接节点处的强度要求和缺陷设计要求,  $l_{ab}$  依据《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)<sup>[13]</sup> 设计,选用高强度灌浆料以确保与钢筋的粘结力。在  $l_{ab}$  的相关计算中,多数学者采用周围混凝土的抗拉强度设计值,导致计算的  $l_{ab}$  富余值过大。根据 Henin 等<sup>[14]</sup> 提出的设计方法,钢筋的  $l_{ab}$  可由钢筋抗拉屈服力与钢筋表面粘结应力的比值得到,钢筋表面的粘结应力由钢筋与灌浆料间的粘结作用提供。因此,本文采用公式(1)计算  $l_{ab}$ ,灌浆料轴心抗拉强度设计值  $f_t = 2.04 \text{ N/mm}^2$ ,选用 16 mm HRB335 钢筋,钢筋的抗拉强度设计值  $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$ ,锚固筋的外形系数  $\alpha$  取 0.14,带肋钢筋直径  $d$  取 16 mm,经计算,  $l_{ab}$  为 329 mm。为制作模具的方便性和实际考虑,适当增大该数值,  $l_{ab}$  取 350 mm,约为钢筋直径的 22 倍。  $l_a$  计算方法见公式(2)。

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (1)$$

$$l_a = \zeta_a l_{ab} \quad (2)$$

式中:  $\zeta_a$  为锚固长度修正系数,无量纲,本文取 1.0。

根据式(2)计算得到  $l_a$  为 350 mm,据此计算试件缺陷长度,见表 1。

表 1 缺陷工况设计

缺陷程度/%	缺陷长度/mm
30	105
40	140
50	175
60	210

《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)<sup>[15]</sup> 规定,钢筋浆锚搭接连接接头应采用水泥基灌浆料,灌浆料 3 d 龄期的抗压强度应  $\geq 55 \text{ MPa}$ ,28 d 龄期的抗压强度应  $\geq 80 \text{ MPa}$ 。本文制作 15 个灌浆料试块开展灌浆料抗压试验,试块尺寸为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ ,灌浆料抗压试验测得 3、28 d 龄期的抗压强度分别为 58.79、86.42 MPa,满足规范要求。

混凝土设计水泥、水、砂、石子的配合比为 1 : 0.46 : 13.47 : 2.73,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),试件外包混凝土采用 C30,长宽高分别为 150、150、350 mm,中间单排单列居中插入铝制波纹管预留空间,插入 16 mm HRB335 钢

筋,最后倒入高强度灌浆料(标准含水率为 11%),  $l_a$  为 350 mm,总长为 450 mm。考虑到后续加载试验的便利性,在试件的加载端,预埋钢筋的伸出部分长为 100 mm,自由端与试件表面平齐,具体示意图见图 3。

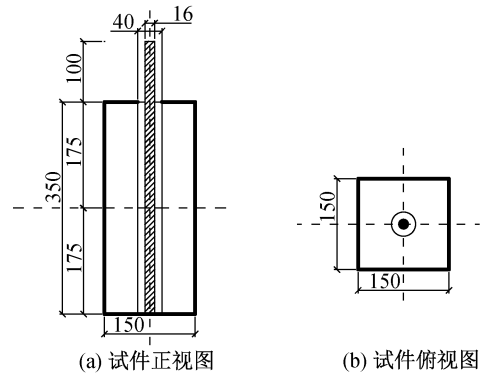


图 3 试件示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of the specimen(unit:mm)

## 1.2 试件加载方式

试件加载使用万能材料试验机,最大量程 1 000 kN,设定加载速率为 0.5 kN/s,先加载至钢筋抗拉强度设计值  $f_y$  的 60%,然后卸载到 0,再以相同的速率加载直至受拉试件破坏。为测量试件位移,在试验机旁安装量程为 50 mm 的高敏感位移计,并通过磁性表盘固定于浆锚钢筋裸露在外的自由端,如图 4 所示。

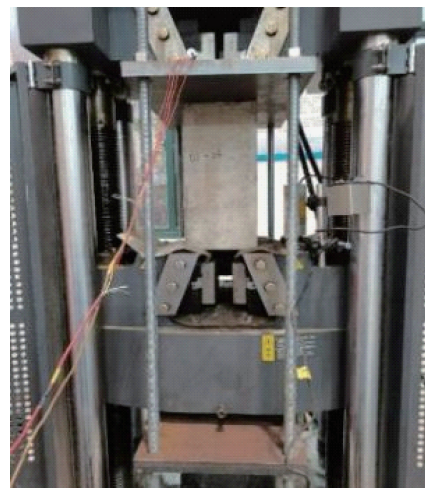


图 4 试件拉伸

Fig. 4 Tensile tests of specimens

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试件破坏形式

根据缺陷工况设计,对 39 个浆锚搭接连接试

件进行单向受拉试验。试验过程中,灌浆饱满的无缺陷试件和缺陷相对较小试件未出现较大滑移,随着荷载继续增大,最终的破坏形式为钢筋拉断破坏。缺陷较大的试件随着荷载的增大,承载能力和变形能力有所下降,在加载至峰值荷载时突然下降,下降段斜率陡增,最终发生钢筋拔出破坏。试件加载及破坏形态如图5所示。

## 2.2 数据分析

为方便衡量浆锚搭接连接的力学性能,定义数据特征点如下:定义峰值荷载比为各工况试件峰值荷载值与无缺陷试件峰值荷载值之比;定义综合位移比为各工况试件峰值荷载对应位移与无缺陷试件峰值荷载对应位移之比、各工况最大位

移与无缺陷试件最大位移之比的平均值。

测量得到的试件各特征点数据如表2所示。可以看出,端部缺陷试件都发生了拉断破坏。对于端部缺陷,缺陷程度为50%的试件综合位移比是无缺陷试件的1.56倍,缺陷程度为60%的试件达到了无缺陷试件的1.761倍,随着缺陷程度的增加,峰值荷载没有较大削弱,综合位移比变大,说明浆锚连接的变形能力因为较大缺陷的存在受到了影响。

中部缺陷试件中较小缺陷试件最终破坏形式为钢筋拉断破坏,峰值荷载值与无缺陷试件相比几乎没有差异,试件的变形能力也没有受到较大影响。较大缺陷试件最终破坏形式为钢筋拔出破坏,峰值荷载值、综合位移比整体呈现随着缺陷程度的增大而下降的趋势。

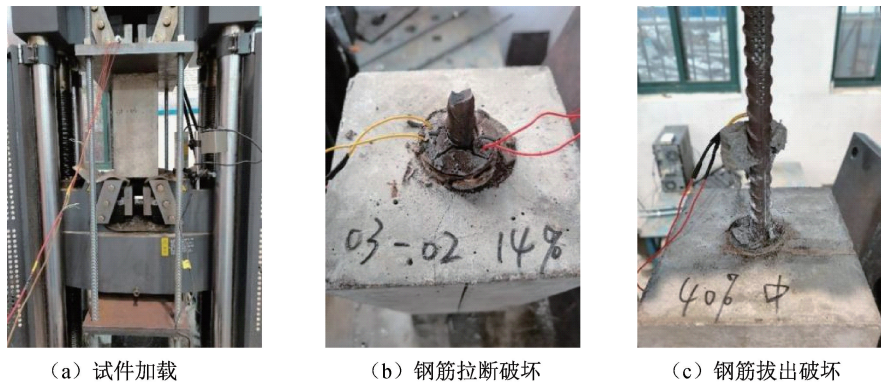


图5 试件加载及破坏形式

Fig. 5 Specimen loading and failure mode

表2 无缺陷试件与缺陷试件各特征点数据表

Tab. 2 Data table for characteristic points of non defective and defective specimens

试件名称	峰值荷载 /kN	峰值荷载对应的 位移/mm	最大位移 /mm	峰值 荷载比	综合 位移比	破坏形式
无缺陷	130.66	30.78	36.05	1.000	1.000	钢筋拉断
端部缺陷 30%	127.81	37.68	42.97	0.978	1.208	钢筋拉断
端部缺陷 40%	126.79	41.57	45.36	0.970	1.305	钢筋拉断
端部缺陷 50%	124.50	48.59	55.57	0.953	1.560	钢筋拉断
端部缺陷 60%	124.75	55.71	61.71	0.955	1.761	钢筋拉断
中部缺陷 30%	126.96	34.31	42.28	0.972	1.144	钢筋拉断
中部缺陷 40%	130.25	31.25	44.60	0.997	1.126	钢筋拔出
中部缺陷 50%	121.98	32.76	35.17	0.934	1.020	钢筋拔出
中部缺陷 60%	118.67	23.14	24.02	0.908	0.709	钢筋拔出
离散缺陷 30%	127.41	27.27	40.14	0.975	1.000	钢筋拉断
离散缺陷 40%	125.88	36.22	41.80	0.963	1.169	钢筋拉断
离散缺陷 50%	127.99	37.03	44.99	0.979	1.226	钢筋拉断
离散缺陷 60%	128.01	29.84	37.42	0.980	1.004	钢筋拉断

离散缺陷试件均表现为钢筋拉断破坏,与无缺陷试件相比,峰值荷载值相差不大、最大位移有所增加,但对比发现,各工况离散缺陷的最大位移较端部缺陷都有所下降,这是因为在粘结力足够时,钢筋会在成型的灌浆料中慢慢滑动直至发生拔出破坏。而离散缺陷将钢筋与灌浆料的粘结力在锚固区域内被分割成长度相等的两小段,导致锚固范围内的粘结力数值较小,从而使得节点的极限承载力由原本主要依赖粘结力转为依赖钢筋的抗拉强度,最终导致钢筋被拉断。因此,钢筋与灌浆料的相对滑移也相对减少。

将试验得到的数据绘制成不同缺陷程度下各类缺陷的荷载-位移曲线图,见图6。由图6和表2可知,当缺陷程度为30%和40%时,荷载-位移曲线趋势基本相同,且峰值荷载基本一致,不同缺陷类型试件的浆锚连接性能相差不大。随着缺陷程度增大,不同缺陷类型试件的差异逐渐增大。对于缺陷程度为50%、60%的各类缺陷试件,荷载-位移曲线的峰值荷载值从大到小依次是离散缺陷、端部缺陷、中部缺陷,最大位移从大到小依次是端部缺陷、离散缺陷、中部缺陷。再结合试件的破坏形式,可知缺陷的位置对浆锚连接性能的影响较大,实际工程中最应避免的是灌浆料

中部缺陷,其次是灌浆料离散缺陷,最后是灌浆料端部缺陷。

### 2.3 缺陷对极限荷载及位移的影响分析

定义缺陷长度比为缺陷长度与钢筋搭接锚固长度之比,为了探究不同缺陷类型对浆锚连接性能的影响,提取缺陷长度比、峰值荷载比与综合位移比,通过拟合数据得到其相互关系。

端部缺陷试件综合位移比-缺陷长度比关系图见图7,可以看出,综合位移比与缺陷长度比大体呈二次函数变化。当缺陷长度比 $\leq 60\%$ ,试件的破坏形式都是钢筋拉断破坏,但当缺陷长度比 $> 50\%$ 时,由2.3节可知浆锚连接的变形能力已经受到较大影响。综上,认为端部缺陷的缺陷长度比 $\leq 50\%$ ,即锚固长度 $\geq 11d$ ( $d$ 为钢筋直径)时,对浆锚连接影响较小,可以忽略其影响。

中部缺陷峰值荷载比、综合位移比与缺陷长度比关系图见图8。由图8(a)可知,对于中部缺陷试件,随着缺陷长度比的增加,试件的峰值荷载比呈线性下降趋势。由图8(b)可知,当缺陷长度比介于 $0\% \sim 30\%$ 时,综合位移比随着缺陷长度比的增加而上升,当缺陷长度比大于 $30\%$ 时,综合位移比随着缺陷长度比的增加而下降,结合前面的

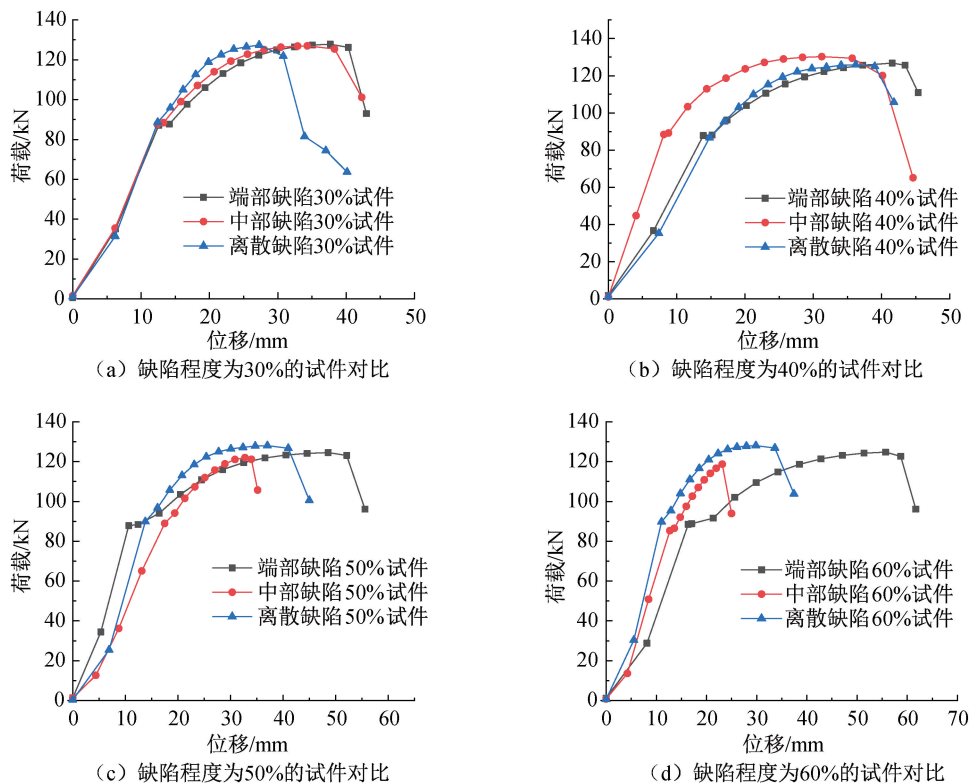


图6 不同缺陷程度下各类缺陷试件的荷载-位移曲线对比图

Fig. 6 Comparison of load displacement curves

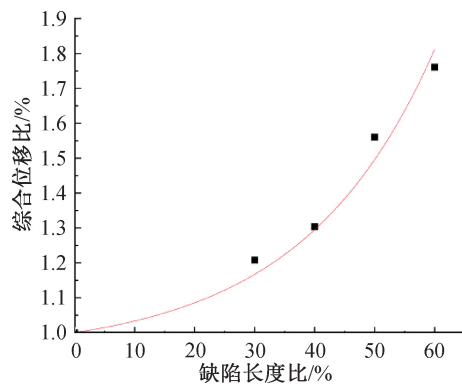
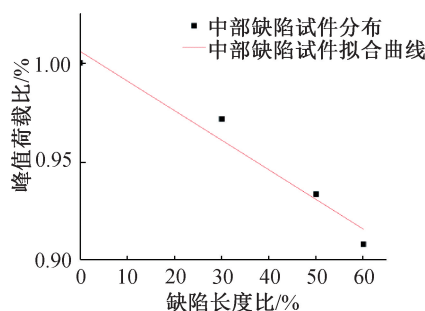


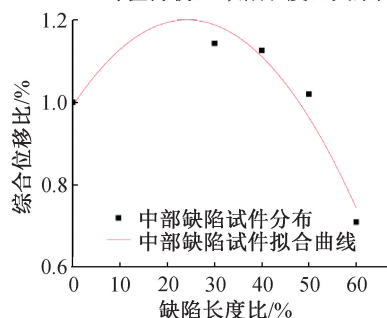
图7 端部缺陷试件综合位移比-缺陷长度比关系图

Fig. 7 Relationship diagram of Combined displacement ratio-defect length ratio specimen with end defects

试验可知当缺陷长度比小于30%时,试件为钢筋拉断破坏,当缺陷长度比大于30%时,试件为钢筋拔出破坏。综合位移比变化趋势的转折点也体现出随着缺陷程度的增大,试件破坏模式由钢筋拉断到钢筋拔出的转变。



(a) 峰值荷载比-缺陷长度比关系图



(b) 综合位移比-缺陷长度比关系图

图8 中部缺陷试件

Fig. 8 Middle defect specimen

### 3 结论

1) 当缺陷程度不超过40%时,缺陷分布类型对浆锚连接的受力性能影响不大,随着缺陷程度增大,不同缺陷类型试件的受力性能差异逐渐增大。

2) 对于缺陷程度为50%、60%的各类缺陷试件,峰值荷载从大到小依次是离散缺陷、端部缺陷、中部缺陷。最大位移从大到小依次是端部缺

陷、离散缺陷、中部缺陷。实际工程中最应避免的是灌浆料中部缺陷,其次是灌浆料离散缺陷,最后是灌浆料端部缺陷。

3) 综合位移比变化趋势的转折点体现出随着缺陷程度的增大,试件破坏模式由钢筋拉断转变为钢筋拔出。

### 参考文献:

- [1] 张伟. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [2] 王亚超, 李俊峰, 蒋世林, 等. 装配式混凝土结构设计关键连接技术研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 91-94+106.
- [3] 黄宇星, 祝磊, 叶楨翔, 等. 预制混凝土结构连接方式研究综述[J]. 混凝土, 2013(1): 120-126.
- [4] 徐文杰, 陶里, 郑清林. 浆锚搭接连接缺陷分类及形成机理[J]. 施工技术, 2018, 47(21): 88-91.
- [5] SAGAN V E, GERGELY P, WHITE R N. Behavior and design of noncontact lap splices subjected to repeated inelastic tensile loading[J]. Aci Structural Journal, 1991.
- [6] SMITH, LOUISE C. Noncontact lap splices in bridge column-shaft connections[J]. Equations. 1997, 1-55.
- [7] BELLERI A, RIVA P. Seismic performance and retrofit of precast concrete grouted sleeve connections[J]. Pci Journal, 2012, 57(1): 97-109.
- [8] 赵立财. 隧道围岩中注浆锚杆的应力分布及影响因素研究[J]. 河北工程大学(自然科学版), 2021, 38(3): 63-68.
- [9] 寇海磊, 荆皓, 徐客, 等. 基于分段式模型考虑界面损伤的GFRP锚杆-砂浆粘结性能数值模拟[J]. 河北工程大学(自然科学版), 2021, 38(3): 30-36+54.
- [10] 吴涛, 刘全威, 张磊, 等. 预制混凝土构件钢筋约束浆锚连接技术发展展望[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 776-780.
- [11] 马军卫, 尹万云, 刘守城, 等. 钢筋约束浆锚搭接连接的试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(2): 32-35+79.
- [12] 徐文杰. 装配式混凝土结构浆锚连接质量因素影响的试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2018.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154-162.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(责任编辑 张爱丽)