

大规格高强功能性钢筋机械连接接头力学性能研究

刘冬¹, 穆银超², 张明晨^{1*}

¹中冶检测认证有限公司, 北京

²北京森普世建筑材料有限公司, 北京

收稿日期: 2024年1月2日; 录用日期: 2024年3月7日; 发布日期: 2024年3月13日

摘要

利用不锈钢棒材和40Cr合金钢制作套筒, 根据相关标准进行套筒参数设计, 分别用于 $\Phi 40$ mm高强不锈钢钢筋和 $\Phi 36\sim\Phi 50$ mm高强抗震钢筋机械连接。通过单向拉伸试验、高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验测试钢筋机械连接件的强度和变形能力, 根据试验结果分析钢筋机械连接件在服役过程中遭受风载、弱震和强震后的性能变化。试验结果表明: $\Phi 40$ mm高强不锈钢钢筋机械连接件和 $\Phi 36\sim\Phi 50$ mm高强抗震钢筋机械连接件都能达到JGJ 107-2016标准中的I级接头要求。

关键词

大规格高强钢筋, 不锈钢钢筋, 抗震钢筋, 机械连接, 力学性能

Research on Mechanical Properties of Large-Specification High-Strength Functional Steel Mechanical Splices

Dong Liu¹, Yinchao Mu², Mingchen Zhang^{1*}

¹Inspection and Certification Co., Ltd., MCC, Beijing

²Beijing Senpushi Building Materials Co., Ltd., Beijing

Received: Jan. 2nd, 2024; accepted: Mar. 7th, 2024; published: Mar. 13th, 2024

Abstract

The couplers is made of stainless steel bar and 40Cr alloy steel, and the couplers parameters are

*通讯作者。

文章引用: 刘冬, 穆银超, 张明晨. 大规格高强功能性钢筋机械连接接头力学性能研究[J]. 冶金工程, 2024, 11(1): 11-17. DOI: 10.12677/meng.2024.111002

designed according to the relevant standards, which are used for the mechanical splices of $\Phi 40$ mm high-strength stainless steel bars and $\Phi 36\sim\Phi 50$ mm high-strength seismic steel bars. The strength and deformation ability of the reinforcing mechanical splices were tested by uniaxial tensile test, high-stress repeated tensile-compression test and large deformation repeated tensile-compression test, and the performance changes of the reinforcing mechanical splices after being subjected to wind load, weak earthquake and strong earthquake during service were analyzed according to the test results. The test results show that the mechanical splices of $\Phi 40$ mm high-strength stainless steel bars and the mechanical connectors of $\Phi 36\sim\Phi 50$ mm high-strength seismic steel bars can meet the requirements of Class I joints in JGJ 107-2016 standard.

Keywords

Large-Specification High-Strength Steel Bars, Stainless Steel Bars, Seismic Bars, Mechanical Splices, Mechanical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

住建部印发的《“十四五”建筑业发展规划》中提出“大力发展装配式建筑”的任务，明确了到 2025 年装配式建筑占新建建筑比例达到 30% 以上的发展目标。我国大力发展装配式建筑推动产业结构调整升级，对钢筋连接件的需求急剧增加。钢筋连接关系到建筑结构在静态和动态载荷下的稳定性，根据连接接头不同，钢筋连接形式可主要分为三类：搭接连接、焊接连接和机械连接[1] [2]。钢筋机械连接被称为“第三代钢筋接头”，具有安装简单、节约钢材和性能可靠等优点[3] [4]，逐渐取代了传统的钢筋搭接工艺，广泛应用于公路、桥梁、水利工程等建筑领域。

根据钢筋机械连接用套筒的不同，钢筋机械连接可分三大类：直螺纹套筒机械连接、锥螺纹套筒机械连接和挤压套筒机械连接，其中直螺纹套筒机械连接是最常见的钢筋机械连接方式[5]，通过套筒与钢筋之间螺纹的紧密贴合实现拉应力在钢筋之间传递。Kheyroddin 等[1]通过试验测试了 $\Phi 10$ mm、 $\Phi 20$ mm、 $\Phi 25$ mm 钢筋通过螺纹连接和锻造连接的力学性能，研究表明螺纹连接对塑性的影响和钢筋连接件数量紧密相关，而锻造连接对塑性的影响和钢筋连接件数量无关。Bompa 等[6]对比分析了采用不同套筒的钢筋机械连接件的性能特点，并研究套筒尺寸对机械连接件的强度和伸长率的影响。后续试验中，Bompa 等[7]研究了在拉压应力循环条件下 $\Phi 16$ mm、 $\Phi 20$ mm 钢筋螺纹机械连接接头的性能，发现试验后由于螺纹接头变形，导致机械连接件的残余变形稍微大于钢筋，但差值小于 0.2 mm；螺纹接头变形主要发生在试验初期，试验后期无明显变化。李向民等[8]应用 40Cr 合金钢作为钢筋套筒连接高强钢筋，对 $\Phi 20$ mm、 $\Phi 25$ mm 规格的高强钢筋机械连接接头性能进行研究，提出应制定适用于 40Cr 合金钢套筒的尺寸标准。冯俊等[9]对比了 $\Phi 14\sim\Phi 32$ mm 规格的钢筋机械连接件的力学性能，研究表明 45 号碳素钢经等径角挤压工艺处理后制作套筒，可满足高强钢筋的机械连接要求。胡晓依[10]采用 45 号碳素钢设计了新型螺纹套筒，实现 $\Phi 20$ mm、 $\Phi 25$ mm 规格的 600 MPa 级高强热轧钢筋机械连接性能达到 I 级要求。

跨海大桥、核电工程、特高层建筑等重点建设工程主要采用 $\Phi 36\sim\Phi 50$ mm 大规格 HRB500E 高强不锈钢钢筋、抗震钢筋，随着建筑物向大跨度、高层化、多样化方向发展和建筑工程的对质量安全要求提高，这两类钢筋的机械连接件需求将会持续增长。然而目前钢筋机械连接研究主要针对普通规格的热轧

带肋钢筋, 大规格高强钢筋机械连接力学性能的研究较少, 因此本文针对 500MPa 大规格高强不锈钢钢筋、抗震钢筋机械连接展开研究。

2. 试验设计

2.1. 原材料

2.1.1. 大规格高强钢筋

试验用 $\Phi 40$ mm 高强不锈钢钢筋系富佰新材料(浙江)有限公司生产; 试验用 $\Phi 36$ mm、 $\Phi 40$ mm 高强抗震钢筋由凌源钢铁股份有限公司生产, $\Phi 50$ mm 高强抗震钢筋系阳春新钢铁有限责任公司生产。此 4 种钢筋的力学性能参数如表 1 所示。

Table 1. Mechanical property parameters of large-specification high-strength steel bars

表 1. 大规格高强钢筋力学性能参数

直径/mm	钢筋级别	屈服强度/MPa	抗拉强度/mm	最大力下总伸长率/%
40	HRB500S	655.0	793.3	19.4
36	HRB500E	561.7	743.3	14.0
40	HRB500E	566.6	750.0	13.9
50	HRB500E	516.6	691.6	14.0

2.1.2. 套筒

对于 $\Phi 40$ mm 不锈钢钢筋, 根据 JG/T 163-2013《钢筋机械连接用套筒》[11]标准要求, 选用了与钢筋母材同材质的棒材作为套筒原材料。对于 $\Phi 36$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 50$ mm 抗震钢筋, 选用高于标准 JG/T 163-2013 要求的 40Cr 合金钢作为套筒原材料。螺纹的设计对连接件的性能至关重要[2], 根据 GB/T 197-2018《普通螺纹公差》[12]标准中要求, 基于螺纹加工的成本、连接件的性能稳定性, 对套筒螺纹进行设计加工, 套筒的基本参数如表 2 所示。

Table 2. Basic parameters of the couplers

表 2. 套筒基本参数

适应钢筋规格	适应钢筋强度级别	套筒类型	型号	牙型角/(°)	螺距/mm	套筒尺寸/mm	
						外径	长度
40	HRB500S	剥肋滚轧直螺纹套筒连接	标准型	70	3	65.0	95.0
36	HRB500E	剥肋滚轧直螺纹套筒连接	标准型	75	3	56.5	85.5
40	HRB500E	剥肋滚轧直螺纹套筒连接	标准型	75	3	62.5	92.5
50	HRB500E	剥肋滚轧直螺纹套筒连接	标准型	60	3.5	80.0	120.0

2.1.3. 试件设计

根据 JGJ107-2016《钢筋机械连接技术规程》[13]中对于钢筋机械连接试件型式检验的要求, 单向拉伸试件、高应力反复拉压试件和大变形反复拉压试件分别选用 3 个样品进行, 试件数量设计如表 3 所示。

2.2. 试验方法

采用 1500KPX 万能材料试验机及其自带的数据采集系统, 对接头试件进行单向拉伸试验、高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验, 如图 1 所示。根据文献[11] [13], 需要分别测试不同试验中机械连接

件的抗拉强度、残余变形、最大力下总伸长率和破坏形式。

Table 3. Specimen test design list/piece

表 3. 试件试验设计列表/个

编号	试验组	单向拉伸试验	高应力反复压力试验	大变形反复拉压试验
40S	40-HRB500S	3	3	3
36E	36-40Cr	3	3	3
40E	40-40Cr	3	3	3
50E	50-40Cr	3	3	3



Figure 1. Universal material testing machine and test photos

图 1. 万能材料试验机及试验照片

3. 试验结果分析

3.1. 大规格高强不锈钢钢筋机械连接件

40S 机械连接件的试验结果如表 4 所示。在单向拉伸试验中，3 个钢筋机械连接件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的极限抗拉强度标准值 630 MPa，此时钢筋连接接头尚未发生破坏，试件在套筒外钢筋母材发生断裂，3 个试件的最大力下总伸长率均大于 6.0%，残余变形 u_0 均小于 0.14 mm。在高应力反复拉压试验中，3 个试件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值，接头未发生破坏，断裂发生在套筒外钢筋母材区域；高应力反复拉压后残余变形 u_{20} 均小于 0.3 mm，平均值为 0.08 mm。大变形反复拉压试验后，3 个试件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值，套筒外钢筋母材发生断裂，接头未发生破坏；残余变形 u_4 均小于 0.3 mm，平均值为 0.03 mm，残余变形 u_8 均小于 0.6 mm，平均值为 0.12 mm。

连接件在单向拉伸试验中的强度和残余变形，是衡量连接件能否满足正常使用的基本指标。在单向拉伸试验中，40S 机械连接件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值 630 MPa，且破坏形态为钢筋拉断，表明钢筋母材的抗拉强度低于机械连接接头，通过套筒实现了性能可靠的机械连接，保证连接接头的强度高于完整的钢筋。连接件在单向拉伸试验中会出现塑性变形，导致机械连接件拉断

后产生残余变形。在服役过程中,残余变形的存在导致建构筑物经受外力产生的裂纹难以闭合,不利于结构稳定性。40S 机械连接件在单向拉伸试验中的残余变形平均值小于 I 级接头标准要求的 0.14 mm,表明 40S 机械连接件应用于钢筋混凝土结构中能满足建构筑物基本的服役性能。

建构筑物在服役过程中会遭受风载、地震等自然灾害,结构中的钢筋机械连接接头在经历反复拉压会导致接头松动,因此需要通过高应力反复拉压试验、大变形反复拉压试验测试钢筋接头经受拉压力反复影响时的性能。高应力反复拉压试验对应于风载或弱震对结构性能的影响,测试连接件在承受多次拉应力、压应力重复交替后,且未进入屈服状态时,是否会出现严重变形或强度低于钢筋抗拉强度的标准值,导致结构性能不能满足服役性能要求。40S 机械连接件的残余变形 u_{20} 平均值为 0.08 mm,实测抗拉强度均高于 630 MPa,表明钢筋继续连接件在服役过程中能经受风载、弱震的干扰,保证结构的正常服役。大应力反复拉压试验等效于强震对结构性能的影响,钢筋连接件吸收、消耗地震能量,发生较大的塑性变形,连接接头发生松动、强度降低。40S 机械连接件的残余变形 u_4 平均值和残余变形 u_8 平均值均分别低于 0.3 mm 和 0.6 mm,实测抗拉强度均高于 630 MPa,表明钢筋连接件在服役过程中,承受 2 倍和 5 倍于钢筋屈服应变的大变形情况下,仍能维持结构经受 4~8 次反复拉压而不发生破坏。

综上试验结果分析,根据 JGJ 107-2016 可知,40S 机械连接接头符合 I 级标准。

Table 4. Test results of large-specification high-strength stainless steel bars mechanical splices

表 4. 大规格高强不锈钢钢筋机械连接件试验结果

编号	单向拉伸试验				高应力反复拉压试验			大变形反复拉压试验			
	f_{msl}^0 /MPa	A_{sgl} /%	u_0 /mm	破坏形态	f_{msl}^0 /MPa	u_{20} /mm	破坏形态	f_{msl}^0 /MPa	u_4 /mm	u_8 /mm	破坏形态
40S	780	14.7	0.21	钢筋拉断	775	0.05	钢筋拉断	775	0.02	0.11	钢筋拉断
	780	14.2	0.06	钢筋拉断	775	0.03	钢筋拉断	785	0.04	0.15	钢筋拉断
	785	14.6	0.14	钢筋拉断	780	0.15	钢筋拉断	780	0.03	0.11	钢筋拉断

3.2. 大规格高强抗震钢筋机械连接件

36E、40E、50E 机械连接件的试验结果如表 5 所示。3 种规格的机械连接件在单向拉伸试验中的实测极限抗拉强度均大于 HRB500E 钢筋的抗拉强度标准值 630 MPa,而且接头未发生破坏,断裂均发生在套筒外母材区域。3 种规格的机械连接件在单向拉伸试验中的最大力下总伸长率均大于 6.0 mm,36E、40E、50E 的最大力下总伸长率平均值分别为 11.7%、11.2%、12.2%;36E、40E、50E 残余变形 u_0 平均值均小于 0.14 mm,分别为 0.04、0.09、0.09 mm。在高应力反复拉压试验中,3 种规格的机械连接件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值 630 MPa,接头未发生破坏,断裂发生在套筒外钢筋母材区域;高应力反复拉压后,36E、40E、50E 机械连接件的残余变形 u_{20} 平均值分别为 0.25、0.10、0.07 mm,均小于 0.3 mm。大变形反复拉压试验中,3 个规格的机械连接件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值 630 MPa,套筒外钢筋母材发生断裂,接头未发生破坏;36E、40E、50E 机械连接件的残余变形 u_4 平均值均小于等于 0.3 mm,平均值分别为 0.25、0.27、0.26 mm;3 种规格的机械连接接头的残余变形 u_8 均小于 0.6 mm,平均值分别为 0.47、0.46、0.46 mm。

36E、40E、50E 机械连接件的实测极限抗拉强度均大于钢筋母材的抗拉强度标准值 630 MPa,且破坏形态为钢筋拉断,表明机械连接接头抗拉强度高于钢筋母材,通过套筒实现了性能可靠的机械连接。36E、40E、50E 机械连接件在单向拉伸试验中的残余变形平均值均小于 I 级接头标准要求的 0.14 mm,表明钢筋机械连接件应用于钢筋混凝土结构中能满足建构筑物基本的服役性能。36E、40E、50E 机械连

接件经高应力反复拉压试验后, 残余变形 u_{20} 平均值均小于 0.3 mm, 实测抗拉强度均高于 630 MPa, 表明钢筋继续连接件在服役过程中能经受风载、弱震的干扰, 保证结构的正常服役。大应力反复拉压试验中, 36E、40E、50E 机械连接件的残余变形 u_4 平均值和残余变形 u_8 平均值均分别低于 0.3 mm 和 0.6 mm, 实测抗拉强度均高于 630 MPa, 表明钢筋连接件在服役过程中, 承受 2 倍和 5 倍于钢筋屈服应变的大变形情况下, 仍能维持结构经受 4~8 次反复拉压而不发生破坏。

综上试验结果描述, 根据 JGJ 107-2016 可知, 36E、40E、50E 机械连接接头符合 I 级标准。

Table 5. Test results of large-specification high-strength seismic bars mechanical splices

表 5. 大规格高强抗震钢筋机械连接件试验结果

编号	单向拉伸试验			高应力反复拉压试验			大变形反复拉压试验				
	f_{msl}^0 /MPa	A_{sgt} /%	u_0 /mm	破坏形态	f_{msl}^0 /MPa	u_{20} /mm	破坏形态	f_{msl}^0 /MPa	u_4 /mm	u_8 /mm	破坏形态
36E	740	11.6	0.03	钢筋拉断	750	0.17	钢筋拉断	745	0.26	0.35	钢筋拉断
	735	11.6	0.05	钢筋拉断	750	0.27	钢筋拉断	745	0.26	0.68	钢筋拉断
	740	11.8	0.03	钢筋拉断	750	0.31	钢筋拉断	745	0.24	0.38	钢筋拉断
	745	11.2	0.16	钢筋拉断	720	0.05	钢筋拉断	720	0.30	0.46	钢筋拉断
40E	730	11.1	0.08	钢筋拉断	715	0.17	钢筋拉断	715	0.28	0.50	钢筋拉断
	720	11.2	0.02	钢筋拉断	710	0.09	钢筋拉断	715	0.24	0.43	钢筋拉断
	685	12.2	0.09	钢筋拉断	685	0.07	钢筋拉断	685	0.26	0.49	钢筋拉断
50E	690	12.3	0.08	钢筋拉断	685	0.07	钢筋拉断	690	0.28	0.47	钢筋拉断
	690	12.1	0.11	钢筋拉断	690	0.07	钢筋拉断	685	0.24	0.43	钢筋拉断

4. 结语

根据 JGJ 107-2016《钢筋机械连接技术规程》, 采用与不锈钢钢筋同材质的棒材和 40Cr 合金钢作为原材料制作套筒, 根据 JG/T 103-2013《钢筋机械连接用套筒》、GB/T 197-2018《普通螺纹公差》, 设计加工钢筋机械链接套筒, 分别应用于 $\Phi 40$ mm 高强不锈钢钢筋和 $\Phi 36$ mm、 $\Phi 40$ mm、 $\Phi 50$ mm 高强抗震钢筋机械连接。钢筋机械连接件通过单向拉伸试验、高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验测试强度和变形能力。

结合试验测试的钢筋机械连接件的力学性能数据, 分析了连接件经历风载、弱震和强震干扰的力学性能变化, 证明上述连接件在受到一定程度上的外界影响后, 仍能维持建构物的结构服役性能稳定。试验后, 上述钢筋机械连接件均在套筒外钢筋发生断裂, 表明机械连接接头强度高于钢筋母材; 且机械连接件断裂后的残余变形平均值均小于 JGJ 107-2016 中 I 级接头标准值, 表明采用本文套筒设计参数, 可实现大规格高强功能性钢筋机械连接接头达到 JGJ 107-2016 中 I 级接头要求。

参考文献

- [1] Kheyroddin, A. and Dabiri, H. (2020) Cyclic Performance of RC Beam-Column Joints with Mechanical or Forging (GPW) Splices: An Experimental Study. *Structures*, **28**, 2562-2571. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.071>
- [2] Dabiri, H., Kheyroddin, A. and Dall'Asta, A. (2022) Splice Methods Used for Reinforcement Steel Bars: A State-of-the-Art Review. *Construction and Building Materials*, **320**, Article ID: 126198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126198>
- [3] Dabiri, H., Kheyroddin, A. and Faramarzi, A. (2022) Predicting Tensile Strength of Spliced and Non-Spliced Steel Bars Using Machine Learning- and Regression-Based Methods. *Construction and Building Materials*, **325**, Article ID:

126835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126835>
- [4] Kheyroddin, A., Mohammadkhah, A., Dabiri, H., *et al.* (2020) Experimental Investigation of Using Mechanical Splices on the Cyclic Performance of RC Columns. *Structures*, **24**, 717-727. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.043>
- [5] Zhao, E., Song, C., Zhang, X., *et al.* (2022) Experimental Study on Monotonic, Cyclic Mechanics and Fatigue Performance of Pressed Cone Sleeve Splices. *Structures*, **39**, 482-495. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.050>
- [6] Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y. (2017) Ductility Considerations for Mechanical Reinforcement Couplers. *Structures*, **12**, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.08.007>
- [7] Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y. (2018) Monotonic and Cyclic Performance of Threaded Reinforcement Splices. *Structures*, **16**, 358-372. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.009>
- [8] 李向民, 王玉兰, 高润东, 等. 高强钢筋机械连接接头力学性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 148-151.
- [9] 冯俊, 熊浩, 余少乐, 等. HRB600 钢筋机械连接接头力学性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1217-1221.
- [10] 胡晓依. 新型超高强钢筋连接套筒的性能试验与研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(2): 299-302.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T163-2017 钢筋机械连接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T197-2018 普通螺纹公差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ107-2016 钢筋机械连接技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.