

文章编号:1003-1995(2025)05-0070-06

高铁预制箱梁焊网钢筋拉伸试验及不确定度分析

张志国¹ 张学泽¹ 林维江² 赵志国² 刘红峰³ 刘红良³

1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 大西铁路客运专线有限公司, 太原 030027;
3. 北京经纬信息技术有限公司, 北京 100081

摘要 根据高铁预制箱梁钢筋装配式部品化施工需要,开展 HRB400E 焊网钢筋静力拉伸试验研究。为模拟箱梁焊网工艺及受力,设计十字型电阻焊试件,纵筋直径分别取 12、16、18、20、22 mm,横筋直径统一取 12 mm。每种直径焊网制作 6 组试件,同时选取母材钢筋作为对照组进行静力拉伸试验,记录抗拉强度、屈服强度、弹性模量等力学指标。结果表明:焊网钢筋静力性能与母材钢筋基本一致,均符合规范对 HRB400E 母材钢筋性能的要求,且试件断口位置均在焊缝外,表明焊网钢筋性能良好。对强度试验结果进行了不确定度评定,给出了 95% 置信概率下的静力强度容许值。

关键词 高铁预制箱梁;焊网钢筋;静力拉伸试验;静力强度;不确定度分析

中图分类号 U448.21*3 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1003-1995.2025.05.12

引用格式:张志国,张学泽,林维江,等.高铁预制箱梁焊网钢筋拉伸试验及不确定度分析[J].铁道建筑,2025,65(5):70-75.

随着高铁预制箱梁智能建造水平的提升,钢筋已经逐渐从传统的人工绑扎方式向机械化绑扎、焊接装配式方向发展^[1]。当采用焊接成型方式时,由于钢筋直径比常用的网片钢筋大,焊接对钢筋力学性能的影响可能会更明显。顶板中的普通钢筋按受力钢筋进行设计,有必要通过试验研究焊网钢筋的力学性能,检验是否满足规范及设计要求。

HRB400E 钢筋已普遍应用于高铁预制简支箱梁。马蔚^[2]通过 10 组 16 mm 直径 HRB400E 钢筋静力拉伸试验得到其抗拉强度,并计算了不确定度,发现重复检测、试验设备精度、数值修约对抗拉强度不确定度影响较大。张延祥^[3]通过 10 组 18 mm 直径 HRB400E 钢筋静力拉伸试验,计算抗拉强度相对标准不确定度及相对扩展不确定度,为试验评定提供了依据。岳亮亮等^[4]通过两组 14 mm 直径 HRB400E 焊网钢筋静力拉伸试验,分别计算了抗拉强度、屈服强度、断后伸长率的相对标准不确定度及相对扩展不确定度,为室温拉伸试验测量不确定度评定提供了参考。顾万黎等^[5]通过 CRB550 焊网钢筋静力及疲劳试验发现焊网钢筋静力试验断口与母材相同,呈颈缩状,而疲劳断口相

对齐平。李铖^[6]通过 6 组 9 mm 直径 CRB550 焊网静力性能试验,得到了抗拉强度、屈服强度、伸长率等力学性能,并计算了相对标准不确定度及相对扩展不确定度。

综上,关于 HRB400E 钢筋静力拉伸试验及不确定度分析的研究较多,主要针对其中一种直径进行试验,关于较大直径焊网钢筋系统的研究还较少,且样本量总体偏小,不足以为高铁预制梁焊网钢筋分析评定提供支撑。为配合高铁钢筋部品化推广应用,本文结合高铁预制箱梁普通钢筋配置情况,共选 5 种直径焊网钢筋进行静力拉伸试验及不确定度评定。

1 焊网静力拉伸试验

1.1 试件设计

依据标准图钢筋直径交叉分布情况,设计 12、16、18、20、22 mm 共五种直径十字型钢筋试件,与其焊接的钢筋直径均为 12 mm。每种直径共取 6 组焊网钢筋试件进行静力拉伸试验。焊网钢筋骨架见图 1,试件大样见图 2。直径 12 mm 的横筋长度为 40 mm,根据 GB/T 1499.3—2010《钢筋混凝土用钢 第 3 部分:钢筋焊接网》^[7]要求,纵向钢筋长度需保证夹具之间距离(l)不小于 20 倍试样公称直径(d)或 180 mm,取两者中较大者。根据试验纵向钢筋直径情况,结合试验机条件,纵向钢筋长度统一取 500 mm。同时选取母材钢筋

收稿日期:2024-12-05;修回日期:2025-02-25

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技开发计划(K2023G004)

第一作者:张志国(1971—),男,教授,博士。

E-mail:826714992@qq.com

作为对照组按照相同试验条件进行拉伸试验, 母材直径同样选取 12、16、18、20、22 mm 共五种, 长度为 500 mm; 每种直径取 3 组母材试件。



图 1 焊网钢筋骨架

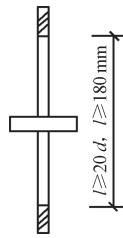


图 2 试样大样

试验钢筋材料与预制梁实际使用材料相同, 采用 HRB400E 钢筋, 弹性模量为 2.0×10^5 MPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7.86 g/cm^3 , 钢筋的化学成分及力学性能见表 1 和表 2。

表 1 HRB400E 钢筋化学成分质量百分比限值 单位: %

C	Si	Mn	P	S
0.250	0.800	1.600	0.045	0.045

表 2 HRB400E 钢筋力学性能

R_{el}/MPa	R_m/MPa	最大力总延伸率/%	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}
≥ 400	≥ 540	≥ 9	≤ 1.25	≤ 1.30

注: R_{el} 为屈服强度; R_m 为抗拉强度; R_m^o 为实测抗拉强度; R_{el}^o 为实测下屈服强度。

钢筋网片采用电阻焊成型, 该焊接方法是将被焊钢筋叠交并压紧在两电极之间, 利用电阻热熔化母材金属, 在压力作用下使二者紧密结合形成牢固焊点。电阻焊不需要额外开坡口及填充熔池金属, 具有污染小、生产效率高、焊件变形小、容易实现自动化等优点。电阻焊焊接性能主要受电极压力、焊接电流、焊接时间等参数影响, 焊接参数取值与被焊钢筋直径有关。试件焊接参数与焊网生产线加工参数一致, 对较小直径 12、16、18 mm 钢筋采用电极压力 8 500 N, 焊接电流分别为 18 500、19 500、20 000 A, 焊接时间分别为 0.30、0.36、0.40 s; 对较大直径 20、22 mm 钢筋采用电极压力 9 000 N, 焊接电流分别为 21 000、22 000 A, 焊接时间分别为 0.42、0.44 s。

1.2 试验过程

焊网钢筋静力拉伸试验采用 WES-300B 型电液伺

服万能材料试验机, 最大负荷为 300 kN, 准确度等级为 1 级。加载完毕后在软件中导出焊网钢筋静力拉伸试验数据, 包括抗拉强度、下屈服强度、弹性模量; 记录试件断口位置。焊网钢筋典型断口位置如图 3 所示。观察试件断口发现: 断口在焊接位置以外, 断口处有明显颈缩, 且与钢筋长度方向呈 45° 左右夹角, 与无焊接时母材钢筋断口特征相似。

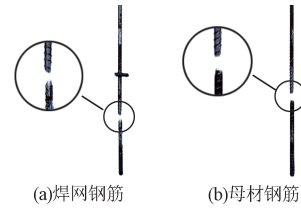


图 3 试件断口位置

1.3 试验数据与分析

由于试验数据量较大, 仅取 12、18、22 mm 焊网钢筋静力拉伸试验结果, 见表 3—表 5; 母材钢筋试验结果见表 6—表 8。GB/T 1499.2—2018《钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋》^[8]关于 HRB400E 抗震钢筋的力学性能规定: HRB400E 钢筋抗拉强度应不小于 540 MPa, 屈服强度不小于 400 MPa, 弹性模量不小于 200 GPa, R_m^o/R_{el}^o 不小于 1.25, R_{el}^o/R_{el} 不大于 1.3。分析表 3—表 8 可知: 所有焊网钢筋抗拉强度、屈服强度、弹性模量、 R_m^o/R_{el}^o 及 R_{el}^o/R_{el} 均符合规范要求。

表 3 12 mm 直径焊网钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m/MPa	R_{el}/MPa	E_p/GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}	断裂位置
1	12.04	675	497	210	1.36	1.24	焊缝外
2	12.09	673	495	240	1.36	1.24	焊缝外
3	12.12	671	496	210	1.35	1.24	焊缝外
4	12.01	673	499	220	1.35	1.25	焊缝外
5	11.98	670	492	250	1.36	1.23	焊缝外
6	11.99	673	497	200	1.35	1.24	焊缝外
平均值	12.04	672.5	496.0	222	1.36	1.24	
标准差	0.056	1.761	2.366				

注: E_p 为弹性模量。

表 4 18 mm 直径焊网钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m/MPa	R_{el}/MPa	E_p/GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}	断裂位置
1	18.21	650	471	230	1.38	1.18	焊缝外
2	18.13	645	474	210	1.36	1.19	焊缝外
3	17.85	645	473	220	1.36	1.18	焊缝外
4	17.97	655	477	200	1.37	1.19	焊缝外
5	18.06	645	476	220	1.36	1.19	焊缝外
6	18.10	645	474	200	1.36	1.19	焊缝外
平均值	18.05	647.5	474.2	213	1.37	1.19	
标准差	0.127	4.183	2.137				

表 5 22 mm 直径焊网钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m /MPa	R_{el} /MPa	E_p /GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}	断裂位置
1	22.11	622	461	200	1.35	1.15	焊缝外
2	21.86	625	464	200	1.35	1.16	焊缝外
3	21.95	621	465	220	1.34	1.16	焊缝外
4	22.07	625	468	210	1.34	1.17	焊缝外
5	22.25	618	463	200	1.33	1.16	焊缝外
6	22.02	622	464	210	1.34	1.16	焊缝外
平均值	22.04	622.2	464.2	207	1.34	1.16	
标准差	0.135	2.639	2.317				

表 6 12 mm 直径母材钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m /MPa	R_{el} /MPa	E_p /GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}
1	12.06	670	490	210	1.37	1.23
2	12.08	676	495	230	1.37	1.24
3	12.10	673	498	220	1.35	1.25
平均值	12.08	673.0	494.3	220	1.36	1.24

表 7 18 mm 直径母材钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m /MPa	R_{el} /MPa	E_p /GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}
1	18.04	635	470	200	1.35	1.18
2	17.98	630	470	210	1.34	1.18
3	18.06	635	455	200	1.40	1.14
平均值	18.03	633.3	465.0	203	1.36	1.16

表 8 22 mm 直径母材钢筋静力拉伸试验结果

试验编号	直径/mm	R_m /MPa	R_{el} /MPa	E_p /GPa	R_m^o/R_{el}^o	R_{el}^o/R_{el}
1	22.04	625.0	455.0	220	1.37	1.14
2	22.02	621.0	450.0	200	1.38	1.13
3	21.99	622.0	460.0	200	1.35	1.15
平均值	22.02	622.7	455.0	207	1.37	1.14

对焊网断裂位置进行统计,发现 30 根试件均断裂在焊缝以外,说明采用电阻焊成型工艺以及所选焊接参数对钢筋静力学性能基本无影响。在试验机软件中可直接导出焊网钢筋典型静力拉伸曲线,见图 4。可知,试验过程可以划分为弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、颈缩破坏四个阶段,表现出良好的静力性能。

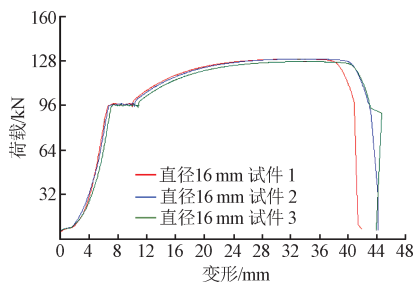


图 4 焊网钢筋典型静力拉伸试验曲线

统计不同直径焊网钢筋与其母材抗拉强度、屈服强度试验结果的平均值,见图 5。

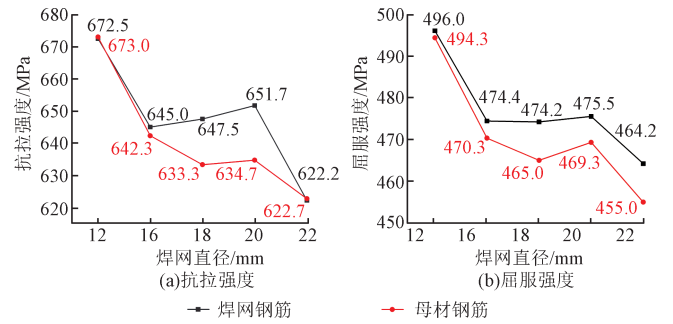


图 5 不同直径焊网钢筋、母材钢筋抗拉强度与屈服强度对比

由图 5 可知,与母材钢筋相比,焊网钢筋的静力强度并未下降,且略高于母材钢筋,说明焊网钢筋具有良好的静力性能。母材钢筋与焊网钢筋的屈服强度、抗拉强度随直径增加呈明显的规律变化:直径为 12 mm 时焊网钢筋与其母材钢筋的抗拉强度、屈服强度最高;与直径 12 mm 相比,直径为 16 mm 时抗拉强度与屈服强度明显下降,焊网钢筋分别下降 4.09%、4.35%,母材钢筋分别下降 4.56%、4.85%;直径为 16~20 mm 时焊网钢筋、母材钢筋的性能变化不明显;与直径 20 mm 相比,直径为 22 mm 时抗拉强度与屈服强度明显下降,焊网钢筋抗拉强度及屈服强度分别下降 4.46%、2.38%,母材钢筋分别下降 1.89%、3.05%。表明钢筋直径对钢材的抗拉强度及屈服强度有显著影响,且随直径增加呈下降趋势。这一规律与规范中根据钢材直径进行强度分组的规定吻合。

2 静力强度不确定度计算与分析

2.1 测量不确定度组成

在焊网钢筋拉伸试验中存在人为操作、试验器具等因素造成的误差,实际的测量值很难达到完全精确。为了使试验结果更精确可靠,需要对试验结果进行误差分析。文献[9]指出被测量值的准确性可以根据不确定度来表示。在 JJF 1059—2012《测量不确定度评定与表示》^[10]中,不确定度越大,试验结果准确度越低;反之准确度越高,越接近真实值。规范中将不确定度共分为 3 种类型:标准不确定度、合成不确定度和扩展不确定度。标准不确定度是通过标准偏差倍数来表示测量不确定度的,具体分为 A 类与 B 类标准不确定度。A 类标准不确定度为试验结果经统计分析得到的不确定度,其产生的方式主要是重复性测量;B 类标准不确定度是指实际测量时误差由试验设备或测量工具产生,此类误差的不确定度不能通过统计分析,需要根据相应规范标准采用非统计分析进行评定。合成不确定度是将试验所产生的所有不确定度分项进行正交合成。扩展不确定度是通过不同的

置信概率来表示的,将合成不确定度乘以相对应置信概率下的置信区间系数,得到扩展不确定度。根据焊网钢筋静力拉伸试验数据,计算出不同焊网直径下的抗拉、屈服强度的扩展不确定度,得到不确定度报告,即可对试验数据的离散程度及可信度进行评价。

本文共进行了30组焊网钢筋试样的静力试验,以22 mm焊网钢筋抗拉强度试验结果为例,取置信概率 $P = 95\%$ 进行扩展不确定度计算。

2.2 抗拉强度不确定度的评定

根据CSM 01010201—2006《金属材料室温拉伸试验测量结果不确定度评定》标准^[11],建立抗拉强度数学模型,即

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (1)$$

$$u_{\text{crel}}(R_m) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(F_m) + u_{\text{rel}}^2(S_0) + u_{\text{rel}}^2(r)} \quad (2)$$

式中: F_m 为最大拉力; S_0 为原始截面面积; r 为重复性参数; u_{rel} 为不确定度分项; u_{crel} 为合成不确定度。

2.2.1 R_m 的A类标准不确定度分项

根据表5可以得到抗拉强度的平均值(\bar{R}_m)为622.2 MPa,标准差 $[S(R_m)]$ 为2.639 MPa。每组试验共进行6次重复性测量,重复性测量引入A类标准不确定度分项 $u_{\text{rel}}(r)$,则有 $u(r) = S(R_m)/\sqrt{6} = 1.077$, $u_{\text{rel}}(r) = u(r)/\bar{R}_m = 0.173\%$ 。

2.2.2 F_m 的B类标准不确定度分项

1) 试验机示值误差带来的标准不确定度 $[u_{\text{rel}}(F_1)]$

试验所使用的电液伺服万能材料试验机准确度等级为1级,示值误差为1%,按照CSM 01010201—2006的要求,分布方式为均匀分布,置信因子 $k = \sqrt{3}$,则有 $u_{\text{rel}}(F_1) = 1\%/\sqrt{3} = 0.577\%$ 。

2) 试验机检定带来的标准不确定度 $[u_{\text{rel}}(F_2)]$

试验机所采用的标准测力仪准确度为0.3,因此通过测力仪检定所带来的误差为0.3%,按照CSM 01010201—2006取置信因子 $k = 2$,则有 $u_{\text{rel}}(F_2) = 0.3\%/2 = 0.15\%$ 。

3) 计算机数据采集系统的标准不确定度 $[u_{\text{rel}}(F_3)]$

根据JJF 1103—2003《万能试验机计算机数据采集系统评定》^[12],计算机数据采集系统所引入的标准不确定度 $u_{\text{rel}}(F_3) = 0.2\%$ 。

4) F_m 的B类标准不确定度分项 $[u_{\text{rel}}(F_m)]$

将上述三种B类不确定度分项进行正交合成,则 $u_{\text{rel}}(F_m) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(F_1) + u_{\text{rel}}^2(F_2) + u_{\text{rel}}^2(F_3)} = 0.629\%$ 。

2.2.3 测量面积的标准不确定度分项

根据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法》^[13],使用游标卡尺测量焊网钢筋的纵筋直径。试验所用游标卡尺量分度值为0.01 mm,根据JJG 30—2012《通用卡尺》^[14]中相应的测量误差为0.03 mm。本文计算钢筋的标准直径为22 mm,测量精确度为0.136%。按照均匀分布考虑置信因子 $k = \sqrt{3}$,则焊网直径的测量不确定度为 $u_{\text{rel}}(d) = 0.136\%/\sqrt{3} = 0.0785\%$ 。

由于焊网钢筋原始横截面积与测量直径的平方相关,因此, S_0 标准不确定度分项为2倍的直径测量不确定度,即 $u_{\text{rel}}(S_0) = 2u_{\text{rel}}(d) = 0.157\%$ 。

2.2.4 抗拉强度合成不确定度

抗拉强度不确定度分项见表9。

表9 抗拉强度不确定度分项

标准不确定度分项	不确定度来源	标准不确定度%
$u_{\text{rel}}(r)$	重复性测量	0.173
$u_{\text{rel}}(F_m)$	最大拉力	0.629
$u_{\text{rel}}(S_0)$	原始截面面积	0.157

根据式(2)合成抗拉强度不确定度 $u_{\text{crel}}(R_m) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(F_m) + u_{\text{rel}}^2(S_0) + u_{\text{rel}}^2(r)} = 0.671\%$ 。

2.2.5 抗拉强度扩展不确定度

根据CSM 01010201—2006取置信概率 $P = 95\%$,置信区间 $k = 2$,则扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(R_m) = k \cdot U_{\text{crel}}(R_m) = 2 \times 0.671\% = 1.342\%$,95%置信概率下标准不确定度 $U(R_m) = U_{\text{rel}}(R_m) \cdot \bar{R}_m = 622.2 \times 1.342\% = 8.35 \text{ MPa}$ 。

2.3 屈服强度不确定度的评定

屈服强度的不确定评定与抗拉强度的计算方法相同,区别是将最大拉力改为屈服力(F_{el})。屈服强度不确定度分项见表10。

表10 屈服强度不确定度分项

标准不确定度分项	不确定度来源	标准不确定度%
$u_{\text{rel}}(r)$	重复性测量	0.204
$u_{\text{rel}}(F_{el})$	屈服力	0.629
$u_{\text{rel}}(S_0)$	原始截面面积	0.157

根据式(2)合成屈服强度不确定度 $u_{\text{crel}}(R_{el}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(F_{el}) + u_{\text{rel}}^2(S_0) + u_{\text{rel}}^2(r)} = 0.680\%$ 。

同样取置信概率 $P = 95\%$,置信区间 $k = 2$,则扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(R_{el}) = k \cdot U_{\text{crel}}(R_{el}) = 2 \times 0.680\% = 1.360\%$,95%置信概率下标准不确定度 $U(R_{el}) = U_{\text{rel}}(R_{el}) \cdot \bar{R}_{el} = 464.2 \times 1.360\% = 6.31 \text{ MPa}$ 。

2.4 全部直径焊网钢筋的扩展不确定度

不同纵筋直径焊网的扩展不确定度见表 11。

表 11 不同纵筋直径焊网的扩展不确定度

纵筋直径/mm	抗拉强度扩展不确定度	屈服强度扩展不确定度
12	$R_m = 672.5 \text{ MPa}$ $U = 10.09 \text{ MPa}, k = 2$	$R_{el} = 496.0 \text{ MPa}$ $U = 7.13 \text{ MPa}, k = 2$
16	$R_m = 645.0 \text{ MPa}$ $U = 8.96 \text{ MPa}, k = 2$	$R_{el} = 474.7 \text{ MPa}$ $U = 6.41 \text{ MPa}, k = 2$
18	$R_m = 647.5 \text{ MPa}$ $U = 9.18 \text{ MPa}, k = 2$	$R_{el} = 474.2 \text{ MPa}$ $U = 6.48 \text{ MPa}, k = 2$
20	$R_m = 651.5 \text{ MPa}$ $U = 9.13 \text{ MPa}, k = 2$	$R_{el} = 475.5 \text{ MPa}$ $U = 6.39 \text{ MPa}, k = 2$
22	$R_m = 622.2 \text{ MPa}$ $U = 8.35 \text{ MPa}, k = 2$	$R_{el} = 464.2 \text{ MPa}$ $U = 6.31 \text{ MPa}, k = 2$

根据表 11 中数据得到在置信概率 $P = 95\%$, 置信区间 $k = 2$ 时, 直径 12 mm 焊网钢筋的抗拉强度为 $(672.5 \pm 10.09) \text{ MPa}$, 屈服强度为 $(496.0 \pm 7.13) \text{ MPa}$; 直径 16 mm 焊网钢筋的抗拉强度为 $(645.0 \pm 8.96) \text{ MPa}$, 屈服强度为 $(474.7 \pm 6.41) \text{ MPa}$; 直径 18 mm 焊网钢筋的抗拉强度为 $(647.5 \pm 9.18) \text{ MPa}$, 屈服强度为 $(474.2 \pm 6.48) \text{ MPa}$; 直径 20 mm 焊网钢筋的抗拉强度为 $(651.5 \pm 9.13) \text{ MPa}$, 屈服强度为 $(475.5 \pm 6.39) \text{ MPa}$; 直径 22 mm 焊网钢筋的抗拉强度为 $(622.5 \pm 8.35) \text{ MPa}$, 屈服强度为 $(464.2 \pm 6.31) \text{ MPa}$ 。

工程中偏保守设计, 一般取静力强度下限值, 即 95% 置信度下的静力强度容许值, 见表 12。可知, 焊网钢筋能够满足 HRB400E 钢筋静力强度要求, 且试验结果可信度较高, 能够用于试验结果评定分析。

表 12 全部焊网钢筋静力强度容许值 ($P = 95\%, k = 2$)

纵筋直径/mm	抗拉强度容许值/MPa	屈服强度容许值/MPa
12	662.41	488.87
16	635.82	468.29
18	638.47	467.72
20	642.37	469.11
22	614.15	457.89

3 结论及展望

1) 静力拉伸试验结果均满足规范对 HRB400E 钢筋的指标要求, 且焊网钢筋静力强度试验结果略高于母材钢筋, 断口位置均在焊缝以外。表明采用电阻焊工艺成型焊网及实际产线的焊接参数不会降低钢筋的静力性能, 采用的焊接工艺能够满足钢筋网片加工要求。

2) 焊网直径对焊网钢筋抗拉强度及屈服强度有显著影响, 总体随直径增加呈降低趋势, 这一规律与

规范中根据钢材直径进行强度分组的规定吻合。

3) 对不同直径焊网钢筋抗拉强度与屈服强度进行不确定度计算与分析, 得到了不同直径焊网钢筋 95% 置信概率下抗拉强度与屈服强度的可信区间, 可作为对静力试验结果进行评定的依据。

高铁简支预制梁采用纵向单向配筋设计, 其中顶板横向未配置预应力束, 在列车作用下顶板钢筋属于受力钢筋。在列车反复作用下, 存在疲劳控制设计问题, 还需要进行焊网钢筋试件疲劳试验研究。

参 考 文 献

- [1] 张少朋, 张上, 牛远志, 等. 高铁预应力混凝土简支箱梁钢筋骨架部品装配化设计研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(12): 97-101.
- [2] 马蔚. 带肋钢筋抗拉强度比对试验不确定度分析[J]. 中国新技术新产品, 2023(10): 94-96.
- [3] 张延祥. 钢筋抗拉强度检测结果不确定度的探讨分析[J]. 江西建材, 2021(7): 49-51.
- [4] 岳亮亮, 杨智. 钢筋拉伸试验测量结果不确定度的评定与分析[J]. 安徽建筑, 2021, 28(6): 148-151.
- [5] 顾万黎, 朱爱萍. 钢筋焊接网疲劳 S-N 曲线试验研究[J]. 施工技术, 2017, 46(4): 71-74, 103.
- [6] 李铖. 钢筋网片焊接节点疲劳性能试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用钢 第 3 部分: 钢筋焊接网: GB/T 1499.3—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 钢筋混凝土用钢 第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB 1499.2—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [9] 乔新愚. 对测量不确定度定义的探讨[J]. 焦作大学学报, 2020, 34(2): 97-99.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国计量出版社, 2013.
- [11] 中国金属学会分析测试分会. 金属材料室温拉伸试验测量结果不确定度评定: CSM 01010201—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 万能试验机计算机数据采集系统评定: JJF 1103—2003[S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 通用卡尺: JJG 30—2012[S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.

Tensile Test and Uncertainty Analysis of Welded Steel Fabric of High Speed Railway Precast Box Girder

ZHANG Zhiguo¹, ZHANG Xueze¹, LIN Weijiang², ZHAO Zhiguo², LIU Hongfeng³, LIU Hongliang³

1.School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2.Datong-Xi'an Passenger Railway Line Co. Ltd., Taiyuan 030027, China;

3.Beijing Jingwei Information Technologies Co. Ltd., Beijing 100081, China

Abstract In response to meet the needs of prefabricated componentization construction of high speed railway prefabricated box girder, the static tensile test of HRB400E welded steel fabric was carried out. To simulate the welding process and stress of box girder, the cross-type resistance welding specimen was designed. The diameter of the longitudinal reinforcement was 12、16、18、20、22 mm respectively, and the diameter of the transverse reinforcement was 12 mm. Six specimens were made for each diameter welded steel fabric, and the base metal reinforcement control group was selected for static tensile test. The mechanical indexes such as tensile strength, yield strength and elastic modulus were recorded. The results show that the static properties of the welded steel fabric are basically consistent with those of the base metal steel reinforcements, both meeting the requirements of the specifications for the properties of HRB400E base metal steel reinforcements. Moreover, the fracture positions of all specimens are outside the welds, indicating good performance of the welded steel fabric. The uncertainty of the strength test results is evaluated, and the allowable values of static strength under a 95% confidence probability are given.

Key words high speed railway precast box girder; welded steel fabric; static tensile test; static strength; uncertainty analysis

Citation format: ZHANG Zhiguo, ZHANG Xueze, LIN Weijiang, et al. Tensile Test and Uncertainty Analysis of Welded Steel Fabric of High Speed Railway Precast Box Girder[J]. Railway Engineering, 2025, 65(5): 70-75.

(编辑:郑冰 校对:苗蕾)