

JG 3046—1998《冷轧扭钢筋》宣贯资料
冷轧扭钢筋基本性能及其应用

《冷轧扭钢筋》编制组 编

中国标准出版社

目 录

- | | |
|----|---------------------------|
| 1 | 冷轧扭钢筋基本性能及其应用 |
| 26 | 附录一 主要相关标准内容选编 |
| 33 | 附录二 冷轧扭钢筋砼及应用技术 地方标准目录 |
| 35 | 主要参考文献 |

冷轧扭钢筋基本性能及其应用

《冷轧扭钢筋》(JG 3046—1998)将作为强制性行业标准自 1998 年 5 月 1 日起实施。相应的《冷轧扭钢筋砼构件技术规程》(JG J115—97)也将作为行业标准于 1998 年 7 月 1 日起实施。它标志着冷轧扭钢筋及其应用技术在我国进入一个新的发展阶段。也必将为我国的基本建设作出更大的贡献。为此,本书将就冷轧扭钢筋的基本性能及其应用作简要的阐述,以供推广应用参考。

1 冷轧扭钢筋及其应用技术在我国发展

冷轧扭钢筋及其应用技术是结合我国国情,于 80 年代初自行研制开发的一种钢筋冷加工新产品和钢筋砼实用性技术之一。因为它具有材料综合性能优良、加工工艺简便、实用性强、节材省工等许多优点,有着显著的经济与社会效益,较符合我国当前建筑业工业化发展需要。分别于 1990 年和 1996 年列入建设部科技成果重点推广项目之一。

然而,冷轧扭钢筋的研制开发是经历了较长一段曲折艰难的道路。自 80 年代初首先在北京研制并用于工程实践后,由于其材料的塑性较低(伸长率与冷拔低碳钢丝相同,仅为 3%),以及加工工艺和机械装备等多方面原因使其应用受到很大限制而未得以推广和发展。由此,在人们的思想中留下了“冷轧扭钢筋与冷拔低碳钢筋一样是伸长率很低的脆性材料”的概念。使冷轧扭钢筋的推广应用跌落低潮。直到 80 年代末期,经山东、浙江、广东等省在加工工艺、机械装备、材料性能优化等方面不断改进和完善,使得冷轧扭钢筋性能得到较大提高,其伸长率由 $\delta_{10} \geq 3\%$ 提高到 $\delta_{10} \geq 4\%$,规格也由最大为 $\phi 10$ 扩大到 $\phi 12$,应用也进一步得到扩大。至 1993 年底全国已有山

东、北京、浙江、广东、湖南、福建、江苏等省市颁发了地方性冷轧扭钢筋砼构件技术规程或暂行规定,对推动冷轧扭钢筋及其应用技术的发展起到积极作用。但是,由于各地区材料供应、设计和施工的水平 and 习惯、机械装备的条件等多方面原因,使得在冷轧扭钢筋的定名、规格尺寸、性能指标以及试验方法等都存在差异。其结果就又影响了在全国大范围的推广应用。

为了进一步总结交流冷轧扭钢筋及其应用技术,在全国规范和统一。由北京、浙江等省市倡议并得到建设部重视和支持,于1993年11月在浙江宁波市北仑开发区召开了第一届全国冷轧扭钢筋及其应用技术研讨会。来自全国15个省市和解放军的代表和建设部有关部门的领导、专家教授80余名参加了会议。会议回顾总结和交流了十多年来冷轧扭钢筋及其应用的经验和教训,进一步明确了冷轧扭钢筋要发展,必须尽快制订全国统一的标准。对此,建设部有关部门和领导十分重视,经深入调查研究和科学论证后,先后于1994年、1995年下达编制冷轧扭钢筋应用工程标准和产品标准的任务。

在此期间,一些省市建委(建设厅)都充分发挥政府职能作用,以各种不同形式积极进行宣传推广工作,使得冷轧扭钢筋及其应用技术又得到较大的发展。据不完全统计,全国已有200多条生产线,遍布20多个省市,已在2000多万平方米建筑中应用,用钢量超过10万吨,为国家节约钢材四万吨以上,节省基本建设投资上亿元。不仅在一般工业与民用建设中应用,还在电力、广播电视等输扭工程和北京首都机场新航站楼等国家重点工程中应用。可以说,冷轧扭钢筋的推广应用自下而上已是量大面广,形成一定规模,有着一定的广度和深度。随着行业标准的颁发,它的推广应用必将又有新发展。

2 冷轧扭钢筋的基本性能

冷轧扭钢筋的基本性能也与其自身的发展一样,经历了几个重要的发展阶段。尤其是在标准编制过程,以提高材性为目的,从工艺参数到装备性能进行多方面试验研究,以求达到材料强度和塑性的

优化。在标准编制的二年多时间里,对冷轧扭钢筋的轧扁厚度、节距等工艺参数先后作四次优化试验和调整。在最后选定的工艺参数基础又从全国三种有代表性机型(浙江嘉兴、河北邢台、深圳)和应用较广泛的几个地区:浙江、北京、广东、广西、河北、河南、山东、上海、江苏等地随机抽取 2 000 多个试样,又分别在杭州、北京、上海、郑州、南宁、江门、邢台等地分散和集中试验并最后汇总。因此,编制组所获得的数据无论从地区或加工机械装备、试验手段等多方面都具有代表性和权威性。

在进行工艺参数优化的同时,还对加工装备进行改进,使轧制的规格扩大到 $\phi 12$ 和 $\phi 14$,还增加了菱形截面冷轧扭钢筋,进一步提高了钢筋的耐久性,拓宽了应用范围。因为参数的改进,装备的完善,使得加工工艺更加合理了,可操作性也加强了,产品的质量和稳定性也都提高了。最终使冷轧扭钢筋的性能得到很大提高。因此,现在的冷轧扭钢筋基本性能远非开发初期所能比的。其性能指标和应用技术,在小规格冷加工钢筋中已独树一帜。

2.1 冷轧扭钢筋加工工艺和特点

冷轧扭钢筋加工工艺的发展最早可以追溯到 50 年代中期,当时我国由冶金系统专门生产一种热轧带耳钢条(也可成卷)(有冶金工业部部颁标准 YB 115—61)。将热轧带耳钢条在特制的冷扭机上扭制成扭耳钢筋(其抗拉强度可达 500 MPa 以上)。由于当时加工装备、工艺和材料性能等原因,扭耳钢筋未得应用和发展。直至 80 年代初,由北京建筑工程研究院根据国内外资料,结合国情,构思并提出了钢筋经冷拉调直、冷轧、冷扭三位一体的钢筋冷加工新工艺,并配以自动剪切机构,将钢筋生产和加工有机合一。其基本工艺流程如图 1 所示。

这一工艺过程不仅提高了钢筋强度,并以其连续螺旋状的截面形式改善了与砼的粘结性能,为钢筋高强度的正常发挥提供了保证,达到节约钢筋的目的。同时还将传统的不连续手工式钢筋加工过程变为连续机械化生产过程,大幅度简化钢筋加工工序和减少重复搬

运次数,将钢筋的生产(作为原材)和钢筋加工(作为产品)科学地统一起来。

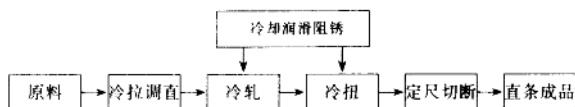


图 1 冷轧扭钢筋加工工艺框图

如今冷轧扭钢筋的基本加工工艺虽然与开发初期没有本质变化,但是工艺过程的一些环节都有了新的改进和完善。主要反映在两个方面:其一是冷拉调直机构的改进。过去冷拉调直机构的功能仅仅是盘圆钢筋的调直除锈。现在增加了调节辅助装置,使调直机构可以根据原材料碳含量不同或直径偏差不同而调整冷拉幅度,以控制冷轧扭钢筋的强度和塑性关系。例如当原材料碳的含较高时或直径偏大时,要减少冷拉调直量,反之要增加冷拉调直量。这一调整过程可通过调直机构可调滚轮来调整原材料张紧程度来达到。其二是充分利用冷扭工艺对材料性能的影响。通过调整扭转滚轮的位置和与对轧辊之间距离便可以获得矩形或菱形截面的冷轧扭钢筋。这些改进和完善都对提高冷轧扭钢筋性能,尤其是优化强度和塑性的关系有着重要的作用。

2.2 冷轧扭钢筋的原材料选用

凡冷加工钢筋,其原材料质量和性能都直接影响产品的性能和质量。相对来讲冷轧扭钢筋对原材料的要求不如其他冷加工钢筋(例如冷轧带肋钢筋)那样严格。所以原材料的供应范围较宽。凡符合 GB 701 低碳钢热轧圆盘条质量要求的 Q215、Q235 系列钢筋均可用来作原材料。当然,应该首先使用质量稳定的高速线材。

根据冷轧扭钢筋加工工艺特点,由试验结果分析可知,原材料中化学成分(主要是碳含量的高低)对冷轧扭钢筋的加工和材料性能影响颇大,表 1 所列比较可以说明问题。相同的加工工艺和参数指标、

同一台装备用不同原材料轧制的冷轧扭钢筋其强度和塑性相差较大。

表 1 原材料碳含量对冷轧扭钢筋材性影响

| 钢材 牌号 | 化学成分, % | | | 钢筋 形式 | 主要性能指标 | |
|----------|---------|------|------|----------|----------------|------------|
| | C | Si | Mn | | 抗拉强度平均值 MPa | 伸长率均值 % |
| A3 | 0.23 | 0.27 | 0.54 | 原材料 | 415 | 23 |
| | | | | 冷轧扭 | 697 | 3.5 |
| A3F | 0.22 | 0.29 | 0.50 | 原材料 | 405 | 27 |
| | | | | 冷轧扭 | 688 | 4.0 |
| A3F | 0.20 | 0.32 | 0.46 | 原材料 | 409 | 28 |
| | | | | 冷轧扭 | 676 | 4.0 |
| Q235A | 0.20 | 0.27 | 0.55 | 原材料 | 389 | 34 |
| | | | | 冷轧扭 | 666 | 4.6 |
| Q235AF | 0.18 | 0.30 | 0.48 | 原材料 | 385 | 40 |
| | | | | 冷轧扭 | 649 | 4.9 |
| Q235B | 0.15 | 0.24 | 0.42 | 原材料 | 380 | 42 |
| | | | | 冷轧扭 | 628 | 5.4 |
| Q215A | 0.15 | 0.27 | 0.44 | 原材料 | 379 | 44 |
| | | | | 冷轧扭 | 622 | 5.9 |

因此,在原材料的选用时,碳的含量要低些,有利于加工质量的保证,当然过低碳含量又要影响加工成型工艺,一般其主要化学成分(熔炼分析)应符合表 2 的要求为宜。

表 2 原材料的牌号和化学成分

| 牌号 | 化学成分, % | | | | |
|------|-----------|-------|-----------|-------|--------|
| | C | Si | Mn | P | S |
| Q215 | 0.12~0.15 | ≤0.30 | 0.25~0.65 | ≤0.65 | ≤0.045 |
| Q235 | 0.14~0.22 | | 0.30~0.65 | | |

2.3 冷轧扭钢筋的工艺参数指标

作为一种冷加工钢筋产品,其工艺参数指标是较为简便实用。一项是轧扁厚度,另一项是截面位置连续螺旋状变化的周期(以二分之一周期为一个节距)。鉴于轧扁厚度和节距又都直接影响材性指标,所以在编制标准过程中重点对这两项指标进行多次优化调整试验,从优化材料强度与塑性关系、材料耐久性考虑确定了标准规定的参数。又考虑我国钢材直径偏差现状,对参数指标只规定了上限或下限,既有利于性能质量的保证又方便检验。参数指标调整比较列于表 3。

表 3 冷轧扭钢筋工艺参数指标及比较

| 规格 | 原 规 定 | | | | 现 行 标 准 | | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|------|------|------|------|------------|
| | φ5 | φ6.5 | φ8 | φ10 | φ6.5 | φ8 | φ10 | φ12 | φ14 | φ12 (I) |
| 轧扁厚度 mm | 3.0± 0.1 | 3.5± 0.1 | 4.0± 0.1 | 5.0± 0.1 | ≥3.7 | ≥4.2 | ≥5.3 | ≥6.2 | ≥8.0 | ≥8.0 |
| 节距 mm | 70~ 80 | 65~ 80 | 70~ 100 | 100~ 120 | ≤75 | ≤95 | ≤110 | ≤150 | ≤145 | ≤170 |

将原来 $\phi 5$ 规格取消,扩大了 $\phi 12$ 、 $\phi 14$ 、 $\phi 12(\text{I})$ 等规格,普遍增加了轧扁厚度。收效颇大,使材料性能和稳定性均有较大提高。又使钢筋的规格系列化,从 $\phi 6.5$ 到 $\phi 14$ 共六档便于设计者自由选用。

从钢筋冷加工面缩率来讲,是目前国内几种主要小规格冷加工钢筋中最少的。表 4 列出了它们的比较结果。

表 4 几种钢筋冷加工产品的面缩率 %

| 钢筋名称 | 冷轧带肋钢筋 | 冷拔低碳钢丝 | 冷轧扭钢筋 | 冷拔螺旋肋钢筋 |
|------|--------|--------|-------|---------|
| 面缩率 | 35~40 | 35~40 | 10~20 | 35 |

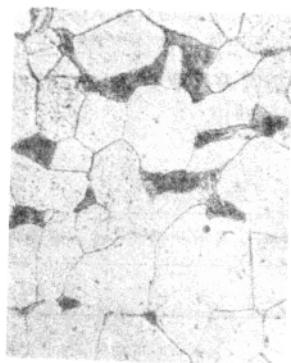
很显然,在材料性能相近的前提下,冷加工面缩率越低,能耗也就越低。

2.4 冷轧扭钢筋基本性能

2.4.1 冷轧扭钢筋的显微组织和表现硬度

通过对原材料、冷轧加工以及冷轧扭加工三种不同状态下材料金相分析,得到如图 2 所示结果。无论是原材料还是经冷加工(包括冷轧和冷轧扭)后钢筋,其基本组织均为铁素体和珠光体。但是晶体形态冷加工后有了改变:中心组织为铁素体和珠光体,晶粒呈纤维状,沿轧制变形方向伸长;边缘组织也仍是铁素体和珠光体,晶粒为等轴晶粒且较中心部位大。而对于冷轧和冷轧扭两种不同冷加工状态,则冷轧状态的晶界较模糊,而冷轧扭状态的晶界较明晰且晶粒也较大。这一微观分析结果与宏观测定(伸长率等)结论是相吻合的。即冷扭的作用有助于提高冷轧扭钢筋的塑性。

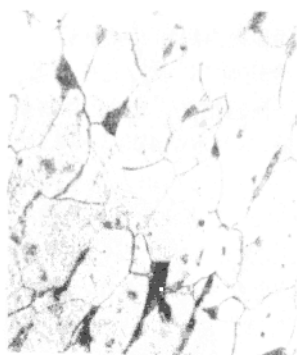
钢筋表面硬度测定结果从原材料开始,经冷轧再冷轧扭状态依次序增加。增加的幅度随原材料中珠光体而异,多者硬度高。表 5 列出一级试验结果供参考。



a



b



c

a—原材料;b—冷轧加工;c—冷轧扭加工.

图2 金相分析

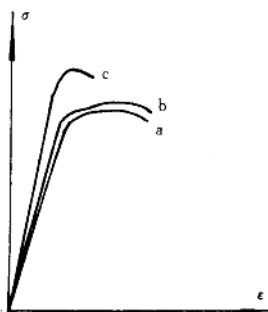
表 5 不同状态钢筋表面硬度(HB)

| 序号 | 原材料 | 冷轧加工 | 冷轧扭加工 |
|----|------|------|-------|
| 1 | 99.9 | 158 | 177 |
| 2 | 103 | 188 | 219 |

综合分析,原材料中碳含量的多少对冷轧扭钢筋性能影响颇大,一般宜控制碳的含量在 0.14%~0.22%之间为宜。

2.4.2 冷轧扭钢筋的应力应变曲线

经优化后冷轧扭钢筋的应力应变曲线及比较见图 3 所示。



a 冷轧扭钢筋; b 冷轧带肋钢筋; c 冷拔低碳钢丝

图 3 钢筋应力-应变曲线

从图 3 分析可见,冷轧扭钢筋、冷轧带肋钢筋以及冷拔低碳钢丝虽均属同强度级别的冷强化无明显屈服点钢材,其 σ - ϵ 曲线,除冷拔低碳钢丝表现为一旦应力达到极限很快就拉断破坏外,冷轧扭钢筋与冷轧带肋钢筋基本相同。均表现有一段较长的非弹性变形过程(即曲线平缓变形段),尤其是冷轧扭钢筋菱形截面,这段非弹性变形值可达 2% 以上。因此,现在的冷轧扭钢筋绝不是像冷拔低碳钢丝那样很容易脆断。

2.4.3 冷轧扭钢筋的抗拉强度

2.4.3.1 冷轧扭钢筋的抗拉强度标准值

冷轧扭钢筋属无明显屈服点钢材,根据国家标准规定,其极限抗拉强度值即为抗拉强度标准值(对有明显屈服点钢材,例如 I 级钢,其屈服强度为强度的标准值)。编制标准过程除收集几千个有关试验数据作参考外,按工艺参数又进行了多次试验并最终确定有关参数(主要是轧扁厚度和节距)后,在全国有代表性地区和加工机型生产的冷轧扭钢筋中随机抽取 2 000 多个试样,按分散和集中试验相结合取得有效试验数据 1 000 多个,经统计分析列于表 6。

表 6 冷轧扭钢筋抗拉强度统计

| 规格 | | $\phi 6.5$ | $\phi 8$ | $\phi 10$ | $\phi 12$ | $\phi 12$ (I) | $\phi 14$ | 不分规格 |
|-------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
| 强度 N/mm ² | 范围 | 570~ 756 | 588~ 786 | 576~ 774 | 573~ 720 | 570~ 725 | 574~ 672 | 558~ 786 |
| | U_1 | 682.07 | 673.45 | 680.24 | 658.62 | 615.52 | 604.86 | 665.87 |
| | σ_s | 45.65 | 55.47 | 45.45 | 41.79 | 14.82 | 19.79 | 45.04 |
| | σ_{s-1} | 45.72 | 55.57 | 45.53 | 41.98 | 14.90 | 19.90 | 45.13 |
| | $U_1-1.645\sigma_s$ | 606.97 | 582.20 | 605.48 | 589.87 | 519.15 | 572.30 | 591.78 |
| | n | 312 | 285 | 217 | 112 | 97 | 397 | 1 164 |

为了便于比较,现将原各地方标准中的试验结果统计分析列于表 7。

表 7 各地方标准抗拉强度统计分析

| 地区 | 项目 | $\phi 5.5$ | $\phi 6.5$ | $\phi 8$ | $\phi 10$ | $\phi 12$ | 不分规格 |
|----|---------------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------|
| 浙江 | U_1 | 696 | 684 | 689 | 697 | 681 | 690 |
| | σ_s | 52 | 36 | 47 | 41 | 40 | 43 |
| | $U_1-1.645\sigma_s$ | 610 | 624 | 611 | 629 | 615 | 619 |
| | 样本数 | 361 | 493 | 224 | 511 | 312 | 1 901 |
| 北京 | U_1 | — | 671 | 738 | 617 | — | 675 |
| | σ_s | — | 41 | 28 | 19 | — | — |
| | $U_1-1.645\sigma_s$ | — | 604 | 692 | 583 | — | — |

续表

| 地区 | 项目 | $\phi 5.5$ | $\phi 6.5$ | $\phi 8$ | $\phi 10$ | $\phi 12$ | 不分规格 |
|----|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|-----------|-------|
| 广东 | U_i | 669.1 | 679.9 | 699.7 | 672.5 | — | 680.6 |
| | σ_s | 17.1 | 66.1 | 40.4 | 20.7 | — | 40.7 |
| | $U_i - 1.645\sigma_s$ | 640.9 | 571.1 | 633.2 | 638.4 | — | 610.3 |
| 湖南 | U_i | — | 652 | 808.5 | 703.2 | — | 732.2 |
| | σ_s | — | 29.1 | 60.6 | 69.4 | — | 69.7 |
| | $U_i - 1.645\sigma_s$ | — | 604.1 | 708.6 | 588.9 | — | 617.5 |
| 河南 | U_i | — | — | — | — | — | 681.6 |
| | σ_s | — | — | — | — | — | 42.77 |
| | $U_i - 1.645\sigma_s$ | — | — | — | — | — | 611.2 |

从表 6、表 7 比较可知,经工艺参数优化后的冷轧扭钢筋,其抗拉强度已降低了,统计的标准差已明显变小,说明材质趋于稳定。尤其是大规格($\phi 12$ 、 $\phi 14$ 、 $\phi 12(\text{I})$)的冷轧扭钢筋更接近其特征值。

根据试验结果的统计分析,抗拉强度标准值不同取值和保证率列于表 8。

表 8 冷轧扭钢筋抗拉强度标准值和保证率

| 抗拉强度标准值, N/mm^2 | 保证率, % |
|---------------------------------|--------|
| 590 | 95.25 |
| 580 | 97.00 |

2.4.3.2 冷轧扭钢筋的强屈比(或屈强比)

鉴于冷轧扭钢筋属无明显屈服点钢材,在结构设计中往往以 $\sigma_{0.2}$ 作为条件屈服点(即以应变为 0.2% 时所对应的应力作为条件屈服强度)。根据试验结果,由 $\sigma-\epsilon$ 曲线得到一组(试样 61 个)冷轧扭钢筋极限抗拉强度和条件屈服强度值以及它们的比值,列于表 9。

表 9 冷轧扭钢筋抗拉强度和条件屈服强度及比值

| 抗拉强度 f_u N/mm^2 | | 条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ N/mm^2 | | $f_u/\sigma_{0.2}$ | | $\sigma_{0.2}/f_u$ | |
|--------------------------------------|-----|---|-----|--------------------|------|--------------------|-------|
| 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 |
| 558~786 | 665 | 496~710 | 601 | 1.05~ 1.20 | 1.11 | 0.95~ 0.83 | 0.905 |

从表 9 比较可知,冷轧扭钢筋不分规格统计其屈强比平均值为 0.905,略优于冷轧带肋钢筋 LL550 级的 0.91 值。而且随着冷加工面缩率的减少,屈强比也随之降低,所以进一步开发菱形截面的冷轧扭钢筋是很有前景的。

2.4.3.3 冷轧扭钢筋的抗拉强度设计值和材料分项系数

由《冷轧扭钢筋砼构件技术规程》(JG J115—97)可知,冷轧扭钢筋抗拉强度的标准为 580 N/mm^2 ,冷轧扭钢筋的抗拉(抗压)强度设计值均为 360 N/mm^2 。因此,其材料分项系数按 GB J68—84 规定应为 $r_s = f_{sk}/f_y = 580/360 = 1.61$ 。

需说明的,在 GB J10—89 的说明中对无明显屈服点钢筋规定了:在构件承载力设计时,本规范取用 $0.8\sigma_b$ (σ_b 为国家标准规定的极限抗拉强度)作为设计上取用的条件屈服点。因此,其材料分项系数又可以规定为 $r_s = 0.8\sigma_b/f_y = 0.8 \times 580/360 = 1.29$ 。这只是从两个不同角度分析取值,但抗拉强度的设计值是一致的。

为了便于比较了解,现将强度级别相近的冷加工钢筋的强度特征值和材料分项系数列于表 10。

表 10 各钢筋抗拉强度特征值和材料分项系数

| 钢筋种类 | | 抗拉强度标准值 N/mm^2 | 抗拉强度设计值 N/mm^2 | 材料分项系数 | |
|--------|-------|----------------------------|----------------------------|----------|------------|
| 冷轧扭钢筋 | | 580 | 360 | 1.61 | |
| 冷轧带肋钢筋 | LL550 | 550 | 360 | 1.53 | |
| | LL650 | 650 | 430 | 1.51 | |
| | LL800 | 800 | 530 | 1.51 | |
| 冷拔低碳钢丝 | 甲级 | φ4 | 700(650) | 460(430) | 1.52(1.51) |
| | | φ5 | 650(600) | 430(400) | 1.51(1.50) |
| | 乙级 | 焊接 | 500 | 320 | 1.72 |
| | | 绑扎 | 500 | 250 | 2.20 |

从表 10 比较可知,除将淘汰的冷拔低碳钢丝乙级外,冷轧扭钢筋的材料分项系数最大,加上抗拉强度标准值取值的 97% 保证率,

说明冷轧扭钢筋有着较大的强度储备。

2.4.4 冷轧扭钢筋的伸长率

2.4.4.1 冷轧扭钢筋的拉断伸长率

在钢筋伸长率测定中,对原始标距取用时有三种形式。一种是长比例标距,即通常指的以 10 倍钢筋直径为原始标距,表示为 δ_{10} ;另一种是短比例标距,以 5 倍钢筋直径计,表示为 δ_5 。这两种形式分别以 $11.3\sqrt{F}$ 和 $5.6\sqrt{F}$ 的计算结果为依据的(其中 F 为被测钢筋的横截面面积,以 mm^2 计)。第三种称为定标距,以 100 mm 或 200 mm 为原始标距,标志为 δ_{100} 或 δ_{200} 。

鉴于冷轧扭钢筋试样为非机加工全截面试件,若取短比例标距,按目前量测手段势必给测量结果增加误差。又因为冷轧扭钢筋规格已较多,不宜用定标距形式。故冷轧扭钢筋的原始标距采用长比例标距计算后取整。即以 $l_0=11.3\sqrt{F}$ 的计算结果取整后为标距。各规格冷轧扭钢筋的伸长率测定用原始标距计算值和取值及比较列于表 11。

表 11 原始标距计算值和取值及比较

| 规格 标距值 | $\phi 6.5$ | $\phi 8$ | $\phi 10$ | $\phi 12$ | $\phi 14$ | $\phi 12(\text{II})$ |
|-----------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| 计算值 mm | 61.38 | 75.21 | 92.34 | 109.16 | 130.17 | 111.75 |
| 取值 mm | 70 | 80 | 100 | 120 | 140 | 120 |
| 取用增值 % | 14.04 | 6.36 | 8.29 | 9.93 | 7.55 | 6.87 |

所以对 $\phi 10$ 来讲,普通钢筋 δ_{10} 的标距计算值为 100.12 mm,取用值为 100 mm,其误差仅在 0.12%。而冷轧扭钢筋来讲取用值要比计算值大 8.27%。因此,同样取用长比例标距时,实测计算结果冷轧扭钢筋的伸长率是偏于安全的。

根据全国有代表性机型和地区 1000 多个试样有效试验结果伸长率的统计分析列于表 12。

表 12 冷轧扭钢筋伸长率试验结果统计分析

| 规格 | | φ6.5 | φ8 | φ10 | φ12 | φ12(I) | φ14 | 不分规格 |
|--|------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 伸 长 率 % 1.645σ _n n | 范围 | 4.23~ 10.00 | 4.40~ 8.75 | 4.21~ 8.03 | 4.40~ 9.16 | 4.76~ 7.60 | 5.07~ 7.88 | 4.21~ 10.00 |
| | U ₁ | 5.811 4 | 5.499 4 | 5.372 7 | 5.329 2 | 6.024 4 | 6.609 3 | 5.676 3 |
| | σ _n | 0.736 5 | 0.567 4 | 0.493 1 | 0.448 7 | 0.620 5 | 0.620 7 | 0.705 9 |
| | σ _{n-1} | 0.738 2 | 0.568 6 | 0.494 22 | 0.450 8 | 0.623 8 | 0.623 9 | 0.707 3 |
| | U ₁₋ | 4.599 8 | 4.566 1 | 4.578 0 | 4.591 1 | 5.003 6 | 5.588 3 | 4.515 1 |
| | | | | | | | | |
| | | | 215 | 278 | 218 | 110 | 95 | 98 |

当取不同保证率时的伸长率指标列于表 13。

表 13 不同伸长率和保证率

| 伸长率, % | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 保证率, % | 99.12 | 95.21 | 83.10 | 53.79 | 27.00 |

以 95% 保证率计, 冷轧扭钢筋的拉断伸长率为 $\delta_{10} \geq 4.5\%$ 。但是实际目前全国各地所生产的冷轧扭钢筋伸长率检测结果均已达到 $\delta_{10} \geq 5\%$ 。尤其是上海市的冷轧扭钢筋砼构件规程, 已将拉断伸长率提高到 $\delta_{10} \geq 6\%$ 。说明冷轧扭钢筋的塑性(以伸长率表征)的确已在不断改进和完善工艺、装备中得到提高和发展, 从原来的 $\delta_{10} \geq 3\%$ 到地方标准的 $\delta_{10} \geq 4\%$, 又提高到全国行业标准的 $\delta_{10} \geq 4.5\%$, 现在发展较快的地区又根据自身所具备的条件, 又将伸长率提高到 $\delta_{10} \geq 6\%$ 。这种逐步提高标准的做法较符合事物客观发展的规律, 也有利于冷轧扭钢筋的推广应用。

然而, 值得一提的是: 冷轧带肋钢筋在标准制订时将 LL550 级的伸长率定为 $\delta_{10} \geq 8\%$, 无疑这是经过大量试验研究所获得, 从技术角度的确是一较先进的指标, 也反映了该种钢筋性能的良好。但是由于没有充分考虑我国小规格钢筋原材料性能的实际差异和冷轧带肋

加工装备技术水平和差别等原因。从标准 92 年颁发至今,至使 LL550 级的伸长率水平一直在 $\delta_{10}=6\% \sim 7\%$ 之间(当然也有部分产品达到标准要求)徘徊。结果反而影响了它的推广应用。当然这个问题最终将会解决,使 LL550 级冷轧带肋钢筋的伸长率达到 $\delta_{10} \geq 8\%$ 的要求。但是这种“先乱再治”的做法实在不可取。况且,一种钢筋是否可以推广应用并非单凭伸长率一项指标来决定,而是要综合考虑它的技术和经济指标来衡量。过份强调伸长率高低往往是片面的。因为热轧钢筋的伸长率总比冷加工钢筋高,问题的关键是多大的伸长率可以满足工程应用的需要,使所形成的砼结构具有足够的延性。以冷轧扭钢筋为例。

由试验可知,冷轧扭钢筋砼受弯构件(主要是板类构件)在达到极限破坏状态时实测受压区砼极限应变在 $1\ 800 \times 10^{-6} \sim 2\ 600 \times 10^{-6}$,其平均值为 $2\ 400 \times 10^{-6}$;冷轧扭钢筋的极限拉应变值为 $9\ 800 \times 10^{-6} \sim 15\ 000 \times 10^{-6}$,平均值为 $11\ 000 \times 10^{-6}$ 。经统计分析,冷轧扭钢筋的极限拉应变 ϵ_{su} 和其伸长率 δ_{10} 的关系大致为:

$$\delta_{10} = 3.64\epsilon_{su} \quad (1)$$

根据平截面假定,应变协调并考虑配筋率影响,可得到截面上钢筋和砼应变关系:

$$\epsilon_{cu}/\chi = \epsilon_{su}/(h_0 - \chi) \quad (2)$$

或

$$\xi = \chi/h_0 = u f_y / f_{cm} \quad (3)$$

式中: ξ ——截面含钢特征系数;

χ ——砼受压区高度;

h_0 ——截面有效高度;

ϵ_{cu} ——砼极限压应变;

ϵ_{su} ——冷轧扭钢筋极限拉应变;

u ——构件截面的配筋率;

f_y ——冷轧扭钢筋抗拉强度设计值;

f_{cm} ——砼弯曲抗压强度设计值。

将(3)式代入(2)式并运算得到:

$$\epsilon_{cu}/\epsilon_{su} = \chi/(h_0 - \chi) = \xi/(1 - \xi) \quad (4)$$