

《规范》GB50010-2002 和 ACI318-2005 钢筋焊接网搭接长度的比较

张云 林振伦 刘秀火

星联钢网（深圳）有限公司

[摘要] 本文对《规范》GB50010-2002、《规程》J276-2003 和《规范》ACI318-2005 关于钢筋焊接网搭接长度进行了较全面的比较,包括锚固和搭接机制、影响因素、实际应用等方面的比较。两规范关于搭接长度规定的原则基本相同,影响因素的描述有些差别。后者在钢筋的混凝土保护层、钢筋间距、横向钢筋的作用等方面规定的较为具体。按《规程》J276-2003 的规定计算的搭接长度较《规范》ACI318-2005 略大一些。

[关键词] 钢筋焊接网搭接长度 搭接长度 搭接 锚固 比较

1 概述

在钢筋焊接网的应用中广泛地了解国外的有关规定是有益的。钢筋焊接网的搭接是钢筋焊接网技术的重要内容之一,进行钢筋焊接网搭接长度的比较是必要的。目前手中仅有美国《混凝土结构建筑规范》ACI318-2005^[3] (简称《规范》ACI318-2005) 建筑规范,因此只对我国《混凝土结构设计规范》GB50010-2002^[2] (简称《规范》GB50010-2002) 和《混凝土结构建筑规范》ACI318-2005 的搭接长度进行比较。

搭接是钢筋焊接网钢筋连接的一种形式。搭接处的钢筋所受的力是通过钢筋的混凝土锚固力传递的,搭接长度常用钢筋锚固长度乘以计算系数来表达。钢筋焊接网的锚固长度是搭接长度的基础,需先进行锚固长度的分析。《规范》GB50010-2002 不包括钢筋焊接网。另有《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》J276-2003^[1] (简称《规程》J276-2003) 用于钢筋焊接网。因此以《规范》GB50010-2002 和《规程》J276-2003,与《规范》ACI318-2005 进行比较。本文在引用上述标准的条款、公式和符号时,仍用上述标准的编号和符号,引用的条款也在括号中列出,以便于查对。《规范》ACI318-2005 公式(12-2)以后的公式(12-3)~(12-5)为本文增加的。

2 钢筋锚固长度

钢筋在混凝土内的锚固长度为自构件计算截面计算的锚入混凝土内的长度。《规范》ACI318-2005 中钢筋锚固长度用 development length of bar (或 length of bar to develop f_y),以区别于锚固件的埋置深度 embedment depth of anchor。

钢筋锚固长度的影响因素较多,如混凝土强度、混凝土特性、混凝土施工条件、钢筋强度、钢筋外形和尺寸、钢筋连接形式、钢筋位置、钢筋涂层等。主要影响为钢筋强度、混凝土强度和钢筋外形和尺寸。这些因素均在锚固长度计算公式中或在附加说明中反映。

2.1 钢筋锚固长度

锚固长度的主要影响因素常反映于计算式中,其它因素或反映于计算式中,或反映于附加的说明中。

2.1.1 《规范》GB50010-2002 公式

《规范》GB50010-2002 给出了反映钢筋强度、混凝土强度和钢筋外形等主要影响因素的锚固长度计算公式。应用时,由计算所得基本锚固长度 l_a ,再乘以对应于不同锚固条件的修正系数加以修正。其计算式为

$$l_a = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (9.3.1-1)$$

式中 l_a ——受拉钢筋的基本锚固长度；
 f_y ——钢筋抗拉强度设计值；
 f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值，混凝土强度等级高于 C40 时，仍按 C40 考虑；
 d ——钢筋的公称直径；
 α ——钢筋的外形系数。

附加的条件如下：

1. 当 HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋的直径大于 25mm 时，其锚固长度应乘以修正系数 1.1（第 9.3.1-1 条）；
2. HRB335、HRB400 和 RRB400 级的环氧树脂涂层钢筋，其锚固长度应乘以修正系数 1.25（第 9.3.1-2 条）；
3. 当钢筋在混凝土施工中易受扰动（如滑模施工）时，其锚固长度应乘以修正系数 1.1（第 9.3.1-3 条）；
4. 当 HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋中锚固区的混凝土保护层厚度大于钢筋直径的 3 倍且配有箍筋时，其锚固长度应乘以修正系数 0.8（第 9.3.1-4 条）；
5. 除构造需要的锚固长度外，当纵向受力钢筋的实际配筋面积大于其设计计算面积时，如有充分依据和可靠措施，其锚固长度可乘以设计计算面积（ A_p ）与实际配筋面积（ A_p ）的比值。但对有地震设防要求及直接承受动力荷载的结构构件，不得采用此项修正系数（第 9.3.1-5 条）；
6. 各项修正系数可以连乘，但出于构造要求，修正后的最小锚固长度不小于公式(9.3.1)的 0.7 倍，且不小于 250mm。
7. 当 HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋纵向受拉钢筋末端采用机械锚固措施时，包括附加锚固端头在内的锚固长度可取为公式（9.3.1-1）计算锚固长度的 0.7 倍（第 9.3.2 条）。

2.1.2 《规范》ACI185 -2005

《规范》ACI318-2005 的钢筋锚固长度计算公式基本上将所有的影响因素反映到锚固长度的基本计算公式（12-1）中（第 12.2.3 条）。

$$l_d = \frac{3}{40} \frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{\left(\frac{C_b + K_{tr}}{d_b} \right)} d_b \quad (12-1)$$

和
$$K_{tr} = \frac{A_{tr} f_{yt}}{1500sn} \quad (12-2)$$

$$1/\psi_{tr} = (C_b + K_{tr})/d_b \quad (12-3)$$

式中 l_d ——锚固或搭接长度，in.（吋=2.504mm，下同）.；
 f_y ——钢筋屈服强度，psi（磅 / 吋²=7.0897E-3N/mm²，下同）；
 f_c' ——混凝土抗压强度，psi；
 ψ_t ——钢筋位置修正系数，通常取 $\psi_t=1.0$ ；
 ψ_e ——钢筋环氧树脂涂层修正系数，无涂层 $\psi_e=1.0$ ；
 ψ_s ——钢筋尺寸修正系数，No.6（ $d=0.75$ in.=18.78mm，下同）或小于 No.6（=18.8mm）钢筋 $\psi_s=0.8$ ，No.6 以上取 $\psi_s=1.0$ ；
 ψ_{tr} ——钢筋保护层、钢筋间距和横向钢筋有关的修正系数，按公式的（12-3）定义计算其值，《规范》ACI318-2005 无此系数；

- λ ——混凝土特性修正系数，轻质混凝土取 $\lambda=1.3$ ，常规混凝土取 $\lambda=1.0$ ；
- $\sqrt{f'_c}$ ——混凝土抗压强度的平方根，psi；
- d_b ——钢筋直径，in.；
- C_b ——(a) 钢筋轴线至最近混凝土表面的距离，或 (b) 需锚固钢筋的中心距；
- K_{tr} ——横向钢筋指数(index)，钢筋间距较大时，为简化计算，即使有横筋存在，可取 $K_{tr}=0$ ；
- A_{tr} ——钢筋搭接范围内间距为 s 的横向钢筋面积，in.²；
- f_{yt} ——横向钢筋的屈服强度 f_y ，psi；
- s ——纵向钢筋、横向钢筋中心距，in.；
- n ——钢筋搭接范围内钢筋数。

ψ_t 为常规钢筋位置系数，反映钢筋位置对钢筋锚固的不利影响。水平钢筋在锚固钢筋以下 20in. 时取 $\psi_t=1.3$ ，其它情况 $\psi_t=1.0$ 。 ψ_e 为钢筋环氧树脂涂层的影响。环氧树脂涂层钢筋的混凝土保护层厚度小于 $3d_b$ ，或钢筋净间距小于 $6d_b$ ， $\psi_e=1.5$ ，其它情况 $\psi_e=1.2$ ，无涂层 $\psi_e=1.0$ 。 $\psi_t \psi_e$ 之积的限值为 1.7。 ψ_s 反映小直径钢筋的有利影响。No.6 或小于 No.6 钢筋取 $\psi_s=0.8$ 。No.7 (0.875in.=21.91mm) 或大于 No.7 钢筋取 $\psi_s=1.0$ 。 λ 反映轻质混凝土较低抗拉强度导致的抗开裂性能降低而需增加锚固长度的系数 $\lambda=1.3$ ，指定 f_{ct} 时 $\lambda=6.7 \sqrt{f'_c}/f_{ct}$ ，但不小于 1.0。

ψ_{tr} 中， C_b 为钢筋侧面及上侧的保护层厚度，或钢筋间距（中对中）。 K_{tr} 为跨越潜在开裂面中钢筋的贡献。在具体的钢筋间距和保护层厚度，以及有侧限钢筋（如箍筋和联系筋等）时，钢筋最小保护层为 d_b 和净间距为 $2d_b$ ，和最小净间距为 $2d_b$ 和最小箍筋的组合， $1/\psi_{tr}=(C_b+K_{tr})/d_b$ 至少为 1.5；最小保护层厚度 C_b 为 d_b 时， $1/\psi_{tr}=1.0$ 。公式 (12-1) 简化为表 1 中的公式。2 行为 $1/\psi_{tr}=1.5$ 情况，3 行为 $1/\psi_{tr}=1.0$ 情况（即其它情况）。 $1/\psi_{tr}$ 最大限制为 2.5。 $1/\psi_{tr}$ 小于 2.5 时，开裂破坏可能会发生，大于 2.5 时会发生拔出破坏。因此 $1/\psi_{tr}>2.5$ ，即使增加保护层厚度和横向钢筋亦不能增加锚固能力。

表 1 公式 (12-1) 的简化式

1	钢筋布置情况	ψ_{tr}	钢筋直径	
			等于或小于 No.6, $\psi_s=0.8$	等于或小于 No.7 $\psi_s=1.0$
2	s 不小于 d_b ，保护层不小于 d_b ， l_d 的箍筋或联系筋不小于规定最小值。 或 s 不小于 $2d_b$ ，保护层不小于 d_b ，	1.5	$l_d = \left[\frac{f_y \psi_t \psi_e \lambda}{25 \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$l_d = \left[\frac{f_y \psi_t \psi_e \lambda}{20 \sqrt{f'_c}} \right] d_b$
3	其它情况	1.0	$l_d = \left[\frac{3 f_y \psi_t \psi_e \lambda}{50 \sqrt{f'_c}} \right] d_b$	$l_d = \left[\frac{3 f_y \psi_t \psi_e \lambda}{40 \sqrt{f'_c}} \right] d_b$

2.1.3 计算实例

《规范》ACI318-2005 的编制说明中给出了变形钢筋锚固长度的几个控制性算例的计算结果，如表 2。钢筋为 60 级 ($f_y=60000\text{psi}$ ，相当于 425N/mm^2 级) No.7 (21.91mm) 钢筋，常规配筋， $\psi_s=1.0$ 。混凝土为 $f'_c=4000\text{psi}$ 级（相当于 28.4N/mm^2 级）普通混凝土。采用的计算系数为 $\psi_t=\psi_e=\lambda=1.0$ 。还计算了钢筋 No.6 (18.78mm) 及 No.6 以下情况，结果如表 2 第 3、6 行。同时还计算了按 C25、C30， $f_y=400\text{N/mm}^2$ （按《规范》50010-2002 常用的相应钢筋和混凝土的性能）情况及按上述级别钢筋和混凝土的强度换算成英制代入公式 (12-1)。计算结果如表 2 第 4、5 行 (C25) 和第 7、8 行 (C30)。

表 2 《规范》ACI318-2005 不同 $1/\psi_{tr}=(C_b+K_{tr})/d_b$ 的锚固长度

配筋	计算条件	$(C_b+K_{tr})/d_b=1.5$	$(C_b+K_{tr})/d_b=1.0$	$(C_b+K_{tr})/d_b=2.5$
----	------	------------------------	------------------------	------------------------

		保护层 = d_b 钢筋间距 = $2d_b$ 侧限钢筋	保护层 < d_b 钢筋间距 < $2d_b$ 侧限钢筋	保护层 $\geq 2d_b$ 钢筋间距 $\geq 4d_b$ 侧限钢筋
$\psi_s=1.0$	$f_c'=4000\text{psi}, f_y=60000\text{psi}$ $\psi_f = \psi_e = \lambda = 1.0$	$47.4 d_b$	$71.2 d_b$	$28.5 d_b$
	C25 $f_c'=3526\text{psi},$ $f_y=5642\text{psi}.$	$47.5 d_b$	$71.3 d_b$	$28.5 d_b$
	C30 $f_c'=4231\text{psi},$ $f_y=5642\text{psi}.$	$43.4 d_b$	$65.0 d_b$	$26.0 d_b$
$\psi_s=0.8$	$f_c'=4000\text{psi}, f_y=60000\text{psi}$ $\psi_f = \psi_e = \lambda = 1.0$	$37.9 d_b$	$57.0 d_b$	$28.5 d_b$
	C25 $f_c'=3526\text{psi},$ $f_y=5642\text{psi}.$	$38.0 d_b$	$57.0 d_b$	$22.8 d_b$
	C30 $f_c'=4231\text{psi},$ $f_y=5642\text{psi}.$	$34.7 d_b$	$52.0 d_b$	$20.8 d_b$

2.2 焊有横筋的锚固

2.2.1 《规范》GB50010-2002（《规程》J276-2003）

《规范》GB50010-2002 无关于焊有横筋的钢筋锚固长度的规定。《规程》J276-2003 沿用了《规范》GB50010-2002 关于机械锚固措施中钢筋端头焊有钢筋的规定，即公式 (9.3.1-1) 计算的 l_d 乘以 0.7 的修正系数。锚固长度符合图 1a 和图 1b 的规定。

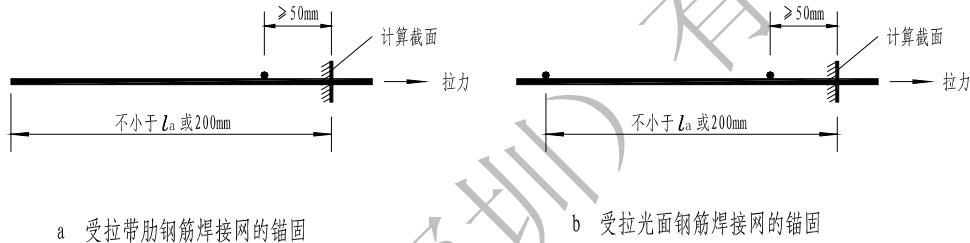


图 1 钢筋焊接网的锚固

2.2.2 《规范》ACI318-2005 规定

1. 焊有横筋的变形钢筋锚固长度为公式 (12-1) 计算的 l_d 乘以焊接横向钢筋修正系数 ψ_w 来表达。修正系数为 ψ_w 为

$$\frac{(f_y - 35000)}{f_y} \text{ 与 } 5d_b/s \quad (12-4)$$

的大者，但不大于 1.0，且不小于 8in。锚固长度可用第 12.2.5 条超配筋的规定折减（第 12.7.2 条）。

2. 焊接光面钢筋的屈服强度由两根焊接横筋提供，其中之一距计算截面不小于 2in。（图 1b）。其 l_d 用公式 (12-5) 计算（第 12.8 条）。

$$l_d = 0.27 \frac{A_b}{s} \left(\frac{f_y}{\sqrt{f_c'}} \right) \lambda \quad (12-5)$$

式中 A_b ——单根钢筋面积；

s ——钢筋间距。

公式 (12-5) 的结果可用第 12.2.5 条关于超筋的规定，但修正后的 l_d 不小于 6 in。当 s 为 $5d_b$ 时，公式 (12-3) 计算出的 l_d 相当于表 1 相应条件的 l_d 。更大的 s ， l_d 会更小。

2.3 比较

2.3.1 锚固机制

《规范》GB50010-2002 和《规范》ACI 185-2005 关于钢筋锚固机制的描述，如前所述，基本上是相同的。钢筋在混凝土中的锚固力主要取决于钢筋和混凝土的强度，《规范》GB50010-2002 以 f_y/f_t 来表达，《规范》ACI 185-2005 则以 $f_t/\sqrt{f_c'}$ 来表达。 $1/f_t$ 和 $1/\sqrt{f_c'}$ 的变化是双曲函数和指数函数的

变化规律的差别，它们在 C25~C40 范围内变化的差别不大， $(1/\sqrt{f_c'})/(1/f_t) = f_t/\sqrt{f_c'}$ 的变化对锚固长度的影响约为 ±2%。如表 3。

表 3 $(f_y/\sqrt{f_c'})$ 和 (f_y/f_t) 的比较

序号	混凝土			钢筋	$f_t/\sqrt{f_c'}$	
	标号	抗拉强度设计值 f_t	f_c'	$\sqrt{f_c'}$		f_y
1	C25	1.27 N/mm ²	3526.2 psi	59.38 psi.	400N/mm ² ,56420psi.	0.0214
2	C30	1.43 N/mm ²	4231.5 psi	65.05 psi	400N/mm ² ,56420psi.	0.0220
3	C35	1.57 N/mm ²	4936.7 psi	70.26 psi	400N/mm ² ,56420psi.	0.0220
4	C40	1.71 N/mm ²	5642.0 psi	75.11 psi	400N/mm ² ,56420psi.	0.0226

2.3.2 修正系数

为适应钢筋锚固的各种条件，钢筋和混凝土性能以外的影响因素以文字或修正系数反映于钢筋锚固计算公式中。《规范》J276-2003 和《规范》ACI318-2005 变形钢筋锚固长度计算修正系数如表 4。

表 4 钢筋锚固长度计算修正系数

序号	项 目	《规范》GB50010-2002	《规范》ACI 185-2005
1	公式	$l_d = (\alpha f_y/f_t)d_b$	$l_d = [(f_y \psi_t \psi_e \psi_s \lambda)/(20 \psi_{tr} \sqrt{f_c'})] d_b$
2	钢筋外形 α	光面 $\alpha = 0.16$, 带肋 $\alpha = 0.14$	无此系数
3	钢筋涂层	$\psi_e = 1.25$	$c = 3d_b, s = 3d_b$ 时, $\psi_e = 1.5, \psi_t \psi_e \leq 1.7$
4	钢筋尺寸	受拉钢筋直径 $\leq 28\text{mm}$	$\leq \text{No.6}$ 时, $\psi_s = 0.8$, $\geq \text{No.7}$ 时, $\psi_s = 1.0$
5	混凝土边界, 横向钢筋	$c \geq 3d_b$ 时, l_d 乘以 0.8	$c = d_b, s = 2d_b$, 最小侧限钢筋 $\psi_{tr} = 1/1.5$ $c < d_b, s < 2d_b$, $\psi_{tr} = 1.0$ $c \geq 2d_b, s \geq 4d_b$, 无侧限钢筋, $\psi_{tr} = 1/2.5$
6	机械锚固	=0.7	机械锚固可与钢筋锚固长度结合使用
7	混凝土性质	无规定	$\lambda = 1.3$, 指定 f_{cr} 时 $\lambda = 6.7 \sqrt{f_c'}/f_{cr}$, 但不小于 1.0.
8	地震及施工易扰动	1.1	限制使用
9	超配筋	乘以 A_r/A_p	乘以 A_r/A_p
10	系数连乘	系数可连乘, 但乘积 ≤ 0.7 及 $l_d \geq 250\text{mm}$	系数可连乘, $l_d \geq 10\text{in.}$

注: c 为混凝土保护层厚度, s 为钢筋间距; A_r 为计算的配筋面积, A_p 为实际配筋面积;
 $1/\psi_{tr} = (C_b + K_{tr})/d_b$.

《规范》ACI318-2005 变形钢筋锚固长度计算修正系数的设置的主要特点为设置的系数较具体，特别是关于混凝土边界和横向钢筋的修正系数的规定较细致，各系数连乘的结果只有最小锚固长度的限制。

2.3.3 变形钢筋和光面钢筋

如上所述，《规范》GB50010-2002 没有关于焊接横向钢筋方面的规定，而用了钢筋端头钢筋的机械锚固措施的修正系数为 0.7 的规定。变形钢筋和光面钢筋锚固长度分别用了 $\alpha = 0.14$ 和 $\alpha = 0.16$ 的钢筋形状系数。

《规范》ACI318-2005 在焊接钢筋方面，变形钢筋和光面钢筋关于 l_d 的计算有些差别。见公式 (12-1) 和 (12-4)。

考虑到钢筋焊接网的特殊条件（钢筋间距 s 总大于 $5d_b$ ），变形钢筋焊接系数在 $5d_b/s$ 取为 1.0，且 ψ_{tr} 总可取为 1/2.5，因此由公式 (12-1) 得 $l_d = 0.03 (f_y/\sqrt{f_c'}) d_b$ 。对焊有横筋的光面钢筋， $A_b = 0.785 d_b^2$ 。当 $s = 5d_b$ 时，由公式 (12-4) 得 $l_d = 0.042 (f_y/\sqrt{f_c'}) d_b$ 。此时变形钢筋的 l_d 较光面钢筋的为小。当 $s \geq 7d_b$ 时，光面钢筋的 l_d 较变形钢筋的为小。例如 $\phi 12@100$ 时其锚固长度为 $l_d = 0.025 (f_y/\sqrt{f_c'}) d_b$ ，

远较变形钢筋小。

2.3.4 锚固长度比较

按《规范》GB50010-2002 和《规范》ACI318-2005 的规定计算了 CRB400 级钢筋及 C25~C40 混凝土的变形钢筋的锚固长度，包括不同保护层厚度及间距的情况。结果如表 5。

表 5 锚固长度比较

规 范	GB50010-2002		ACI 185-2005		
计算公式	$l_d = (\alpha f_y / f_t) d_b$		$l_d = [(f_y \psi_t \psi_e \psi_s \psi_{tr} \lambda) / (20 \sqrt{f'_c})] d_b$		
计算(修正)系数	$\alpha = 0.14$		$\psi_t = \psi_e = \psi_s = \lambda = 1.0$		
钢筋保护层厚度及钢筋间距	$c \leq 3d_b$ $\psi_{tr} = 1.0$	$c > 3d_b$ $\psi_{tr} = 0.8$	$c < d_b, s < 2d_b$ $1 / \psi_{tr} = 1.0$	$c = d_b, s = 2d_b$ $1 / \psi_{tr} = 1.5$	$c \geq 2d_b, s \geq 4d_b$ $1 / \psi_{tr} = 2.5$
CRB400 级 C25	$f_y = 400 \text{N/mm}^2, f_t = 1.27 \text{N/mm}^2$		$f_y = 56420 \text{psi}, f'_c = 3526 \text{psi}$		
锚固长度 l_d	$44.1d_b$	$35.3d_b$	$57.0d_b$	$38.0d_b$	$22.8d_b$
CRB400 级 C30	$f_y = 400 \text{N/mm}^2, f_t = 1.43 \text{N/mm}^2$		$f_y = 56420 \text{psi}, f'_c = 4231 \text{psi}$		
锚固长度 l_d	$39.2d_b$	$31.3d_b$	$52.0d_b$	$34.7d_b$	$20.8d_b$
CRB400 级 C35	$f_y = 400 \text{N/mm}^2, f_t = 1.57 \text{N/mm}^2$		$f_y = 56420 \text{psi}, f'_c = 4937 \text{psi}$		
锚固长度 l_d	35.7	28.6	52.1	32.1	19.3
CRB400 级 C40	$f_y = 400 \text{N/mm}^2, f_t = 1.71 \text{N/mm}^2$		$f_y = 56420 \text{psi}, f'_c = 5642 \text{psi}$		
锚固长度 l_d	32.6	26.1	45.2	30.1	18.0

由表 5 可见，钢筋焊接网常使用较小钢筋直径和较大钢筋间距的条件下，即 $1 / \psi_{tr} = 2.5$ 时，由《规范》ACI318-2005 计算得的锚固长度较《规范》GB50010-2002 计算得的锚固长度小。

3. 钢筋搭接长度

3.1 《规范》GB50010-2002

钢筋搭接长度是以钢筋锚固长度为基础的。《规范》GB50010-2002 规定的搭接长度按下式计算

$$l_l = \zeta l_a \quad (9.4.3)$$

式中 l_l ——钢筋搭接长度；

l_a ——钢筋基本锚固长度；

ζ ——纵向受拉钢筋搭接长度的修正系数，为 1.2~1.6，由钢筋搭接处搭接接头面积的百分率确定（表 9.4.3）。

《规范》GB50010-2002 还规定，当受拉钢筋的直径 $d > 28 \text{mm}$ 及受压钢筋的直径 $d > 32 \text{mm}$ 时，不宜采用绑扎搭接接头。

3.2 《规范》ACI 185-2005

当 $A_s/A_r \geq 2.0$ ，及在搭接长度上搭接钢筋面积为钢筋总面积的一半或少于一半时，受拉钢筋的搭接长度取为 $1.0l_d$ ，其它情况为 $1.3l_d$ 。 l_d 按第 12.2 条计算。搭接长度不小于 12in.。

搭接不用于大于 No.11 (35.3mm) 钢筋。受弯构件不接触搭接的横向间距不小于搭接长度的 1/5，和 6in.。

4. 钢筋焊接网的搭接

钢筋焊接网的搭接是在焊接有横向钢筋的基础上进行的。焊有横筋钢筋的锚固已于本文第 2.2 节讨论。

4.1 钢筋焊接网的搭接

钢筋焊接网有几种搭接形式：叠搭、平搭和扣搭。每种搭接形式的受力钢筋的位置及横向钢筋的位置是不同的。这些条件会影响搭接钢筋间的力的传递和对搭接长度的要求，不同规范的规定也

有所不同。

叠搭是常规的搭接方法，是将需搭接的两片焊接网按所要求的搭接长度搭接。通常每片焊接网在搭接处焊有一根或多根横筋。搭接处两片网片受力钢筋间有一根横筋的间距。平搭的两片网片中有一片网片在搭接处未焊横筋，两片网片的搭接受力钢筋是在同一平面内，且紧贴在一起。扣搭是将搭接网片之一翻面，搭接受力钢筋在横筋两侧，且横筋紧扣在一起。详细说明各搭接形式的目的：一是两搭接受力钢筋之间的混凝土可形成的“斜向杆”有利于受力钢筋间的力的传递；二是受力筋的不接触搭接（如叠搭），其间距总小于搭接长度的 1/5 和 6in.，可以发挥“斜向杆”的作用。但两《规范》都没有明说考虑了混凝土“斜向杆”的作用，想必已在搭接修正系数中考虑到。

4.2 搭接长度的规定

4.2.1 《规范》GB50010-2002（《规程》J276-2003）搭接长度的规定

《规范》GB50010-2002 不涉及钢筋焊接网，《规程》J276-2003 关于钢筋焊接网搭接长度的规定如图 2。

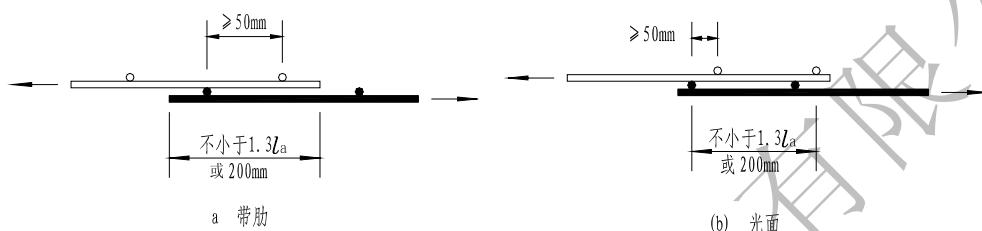


图 2 钢筋焊接网搭接

4.2.2 《规范》ACI 185-2005 的规定

《规范》ACI 185-2005 关于钢筋焊接网搭接长度的规定如图 3。

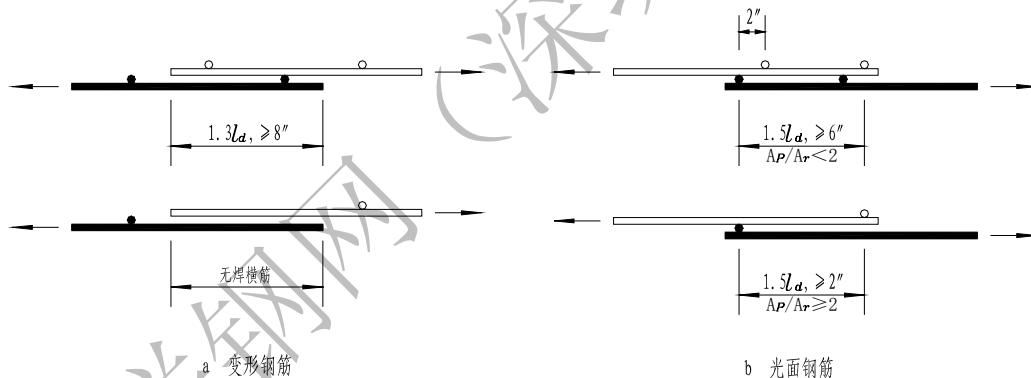


图 3 ACI185 钢筋焊接网搭接

4.3 搭接长度对搭接条件的考虑

4.3.1 《规范》GB50010-2002

《规程》J276-2003 应用了《规范》GB50010-2002 中有机锚固措施（焊有端头横筋）的锚固条件作为其焊有横筋的钢筋锚固，分别规定了有横筋和无横筋的锚固长度，用于叠搭（含扣搭）和平搭的搭接长度计算中。

4.3.2 《规范》ACI318-2005

《规范》ACI318-2005 锚固条件考虑了两种锚固情况：钢筋锚固和焊有横筋的钢筋锚固。后者也用于钢筋焊接网搭接长度的确定。

钢筋锚固长度 l_d 是用公式（12-1）计算的（第 12.2、12.3 条）。与钢筋焊接网有关的锚固条件主要为钢筋直径、保护层厚度、钢筋间距等，具体体现在 ψ_s 和 ψ_{rr} 中。钢筋焊接网常用小于 No.6 的

钢筋，取 $\psi_s=0.8$ 。与 ψ_{tr} 有关的参数有 C_b 、 s 和 K_{tr} 。 K_{tr} 为与横向钢筋有关，适用于绑扎钢筋、焊接网平搭的无焊接横筋的钢筋、焊有横筋的钢筋（需另加修正系数）等有横筋的情况。

焊有横筋的钢筋锚固是在公式 (12-1) 的基础上乘以焊接横筋的修正系数 (≥ 1.0) (第 12.7 条)。钢筋焊接网中焊接横筋修正系数总是 < 1.0 ，实质上仍用公式 (12-1) 计算。光面钢筋 l_d 用公式 (12-5) 计算 (第 12.8 条)。

钢筋搭接长度为钢筋锚固长度乘以一系数 ζ_w ， $A_p/A_r < 2.0$ ，搭接钢筋数少于总钢筋数的 50% 时， $\zeta_w=1.0$ ；其它情况 $\zeta_w=1.3$ 。搭接长度的规定如图 4a 和图 4b。

变形钢筋焊接网的搭接长度 $\zeta_w=1.3$ ，光面钢筋焊接网的搭接长度 $\zeta_w=1.5$ 。

4.4 搭接长度计算

4.4.1 《规范》GB50010-2002

GB50010-2002 没有专门的关于钢筋焊接网搭接的规定，《规程》J276-2003 钢筋焊接网搭接长度计算沿用了 GB50010-2002 的公式 (9.4.3) 关于钢筋搭接长度的计算公式，但 ζ 取为 1.3。

4.4.2 《规范》ACI 185-2005

《规范》ACI318-2005 应用的钢筋焊接网搭接计算方法也是以锚固长度乘以搭接系数的计算方法，但锚固长度的计算略有不同。

1. 焊接变形钢筋的最小搭接长度（两网片端间距）不小于 $1.3l_d$ 与 $8in.$ 的大者，且各网片最外侧横筋间的间距不小于 $2in.$ 。 l_d 按第 12.7 条（本文第 2.2.2 节）计算。如图 4a。
2. 受拉焊接光面钢筋 $A_p/A_r < 2.0$ 时的最小搭接长度为横向钢筋间距加 $2in.$ 、 $1.5l_d$ 和 $6in.$ 的大者， l_d 按第 12.8 条（本文第 2.2.2 节）计算。 A_p/A_r 至少为 2.0 时，搭接长度至少为 $1.5l_d$ 和 $2in.$ 。

《规程》J276-2003 和《规范》ACI 185-2005 关于焊接钢筋搭接长度的计算见表 6。

表 6 搭接长度公式比较

序号	标准	GB50010-2002 (J276-2003)	ACI 185-2005
1	公式	$l_l = \zeta l_a$	$l_l = \zeta_w l_d$
2	$1/\psi_{tr}$	1.0	1.0, 1.5, 2.5
3	ζ (或 ζ_w)	变形	1.3(1.6)
		光面	1.3(1.6)
4	l_a (或 l_d)	变形	J276 表 5.1.7
		光面	J276 表 5.1.8
5	l_l	变形	$1.3 l_a$
		光面	$A_p/A_r \leq 2$ 时, $1.5l_d, s+2in., 6in.$ 的大者 $A_p/A_r > 2$ 时, $1.5 l_d$ 及 $2in.$ 大者
6	最小 l_l	变形	200mm
		光面	300mm

注: 1. ψ_{tr} 为钢筋保护层厚度、钢筋间距、横向钢筋等的修正系数。
2. GB50010-2002 竖列之括号内数值为钢筋锚固的 ζ 值。

4.5 搭接长度比较

4.5.1 搭接长度验算

按《规范》GB50010-2002 和《规程》J276-2003 的规定，计算了钢筋焊接网较具有代表性的配筋：C30， $f_y=400N/mm^2$ ，配筋为 $\Phi^R7@150$ ，保护层厚度 $C=15mm$ 和 $\Phi^R12@100$ ， $C=15mm$ 的搭接长度。并将上述条件换算成英制，按《规范》ACI 185-2005 的规定计算相应的搭接长度。

《规范》GB50010-2002 无钢筋焊接网的规定，所列的搭接长度为钢筋的锚固长度乘以 $\zeta=1.6$ ，作为未焊横筋的搭接长度，列于“钢筋锚固”列内。《规程》(J276-2003) 表 5.1.7 和 5.1.8 中给出的

钢筋焊接网的锚固长度（已按 $f_y=400\text{N/mm}^2$ 修正），乘以 $\zeta=1.3$ ，列于“焊接网”列内。上述两种验算配筋对搭接长度无影响。计算结果列入表7中。

《规范》ACI 185-2005的钢筋焊接网的搭接长度用式 $l_l=\zeta_w l_d$ 计算，变形钢筋的锚固长度 l_d 用公式（12-1）计算。根据钢筋焊接网的特点，取 $\psi_r=\psi_e=\lambda=1.0$ ， $\psi_s=0.8$ 。钢筋间距和保护层厚度的影响反映在 $1/\psi_{tr}=(C_b+K_{tr})/d_b$ ， $K_{tr}=(A_{tr}f_{yt})/(1500sn)$ 中。在 $C_b<d_b$ ， $s<2d_b$ ； $C_b=d_b$ ， $s=2d_b$ 和 $C_b>2d_b$ ， $s>4d_b$ 时， $1/\psi_{tr}$ 分别取为1/1.0、1/1.5和1/2.5。取 $\zeta_w=1.3$ 。光面钢筋焊接网 $l_d=0.27\lambda(A_b/s)(f_y/\sqrt{f'_c})$ ，取 $\zeta_w=1.5$ ，分别按两种配筋计算。

对验算的两种配筋，计算了它们的 $1/\psi_{tr}$ 。 $\Phi^R7@150$ ， $C=15\text{mm}$ 时， $C_b=2$ ， $s=21.4d_b$ ， $1/\psi_{tr}>2.5$ ，取 $1/\psi_{tr}=2.5$ 。 $\Phi^R12@100$ ， $C=15\text{mm}$ 时，假定连续双向板短跨净跨为6m，中间1/3跨为2m，搭接长度为400mm， $C_b=1.75d_b$ ， $s=8.33d_b$ ，得 $1/\psi_{tr}=2.5$ 。上述两种配筋的 $1/\psi_{tr}$ 按为2.5计算，列于 $1/\psi_{tr}\geq 2.5$ 的列中。同时亦进行了 $1/\psi_{tr}=1.0$ 、1.5的计算，列于 $1/\psi_{tr}=1.0$ 、1.5的列中，用于比较。与《规程》（J276-2003）搭接长度列于括号中。验算结果如表7。

表7 不同规范搭接长度比较

标准		《规范》GB50010-2002 《规程》（J276-2003）		《规范》ACI 185-2005		
公式		$l_l=\zeta l_a$		$l_l=\zeta_w l_d$ ， $\psi_s=0.8$		
材料		C30， $f_y=400\text{N/mm}^2$		$f'_c=4231.5\text{psi}$ ， $f_y=56420\text{psi}$		
锚固类别		钢筋锚固	焊接网锚固	焊接网锚固		
$1/\psi_{tr}$		1.0	1.0	1.0	1.5	≥ 2.5
ζ 或 ζ_w	变形	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3
	光面	1.6	1.3	1.5	1.5	1.5
l_a 或 l_d	变形	39.2(1.53)	25.6	52.0(2.03)	34.7(1.36)	20.8(0.81)
	光面	44.8(1.35)	33.3	92.8(2.79)	46.0(1.38)	$\Phi^R7@150$ 8.5(0.26) $\Phi^R12@100$ 22.1(0.66)
l_l	变形	62.7(1.88)	33.3	67.6(2.03)	45.1(1.35)	27.1(0.81)
	光面	71.7(1.66)	43.3	139.2(3.21)	69.0(1.59)	$\Phi^R7@150$ 12.8(0.30) $\Phi^R12@100$ 33.2(0.77)
最小 l_l	变形	250mm		8in		
	光面			6in		
注：1.《规范》GB50010-2002项内，钢筋锚固列为按《规范》GB50010-2002的计算值，焊接网列为按《规程》（J276-2003）的计算值； 2.《规范》ACI 185-2005项括号内数值为与《规程》（J276-2003）计算值之比， $1/\psi_{tr}=2.5$ 列光面钢筋项计算值为按具体配筋的计算值。 3.钢筋锚固和焊接网锚固列中为锚固长度，单位为 d ，括号数值为上述锚固长度的比值。						

4.5.2 搭接长度比较

1. 与《规程》（J276-2003）比较，《规范》GB50010-2002的钢筋的搭接长度较大，但接近于（略大于）端头焊有横筋的搭接长度。

2. 在钢筋焊接网正常配筋情况（ $1/\psi_{tr}\geq 2.5$ ）下，《规范》ACI 185-2005的变形钢筋焊接网搭接长度较小，约为《规程》（J276-2003）的0.8倍。主要原因是对钢筋焊接网有利影响因素，如钢筋直径、钢筋保护层厚度、钢筋间距、焊接横向钢筋等考虑得较具体。如果《规范》GB50010-2002保护层厚度的限制也是 $2d_b$ ，系数连乘没有0.7的限制，其搭接长度与《规范》ACI 185-2005的搭接长度基本相同。

3. 《规范》ACI 185-2005的焊接变形钢筋锚固长度中有乘以焊接钢筋系数的规定，见式（12-4）。在钢筋焊接网条件下，焊接钢筋系数总是小于1.0，而常取为1.0。即不影响钢筋焊接网的搭接长度。

4.《规范》ACI318-2005 光面钢筋焊接网锚固长度用的是另一套计算公式。公式中钢筋间距的影响很大。在钢筋焊接网条件下，锚固长度较短，虽 ζ_w 取为 1.5，搭接长度仍较小。

《规范》ACI318-2005 的搭接长度仅为《规程》J276-2003 的 $0.30(\Phi^R7@150)$ 和 $0.77(\Phi^R12@100)$ 。这可能是美国建筑和材料系统的标准与我国标准略有不同的结果。光面钢筋的焊点抗剪力约取为钢筋屈服强度的 0.5 倍，同时搭接长度的定义和焊接网搭接处每片网须有两根横筋的规定，搭接长度大为缩短。 s 的影响如此之大，似有规定其适用范围的必要。

5.《规程》J276-2003 规定了关于焊接网平搭的适用条件，即 l_a 用无横筋的锚固长度。《规范》ACI 185-2005 只规定了搭接处两片网均无横筋时用钢筋的搭接长度，平搭时一片有横筋另一片无横筋的情况未作规定。按关于横筋的作用（限制混凝土裂缝的产生），焊有横筋的网片的横筋似对无横筋网片也有限制作用，平搭似可直接用钢筋锚固条件（即用公式（12-1））计算搭接长度。

5. 结语

(1)《规范》GB50010-2002（《规程》J276-2003）和《规范》ACI《规范》185-2005 关于搭接机制、考虑的搭接工作条件等基本上是一致的。但《规范》ACI《规范》185-2005 对搭接的工作条件，包括施工条件，较为具体和细致一些，搭接长度的适用条件的规定较细，有的适用条件的搭接长度较小一些，《规范》ACI318-2005 约为《规范》GB50010-2002（《规程》J276-2003）0.80 倍。

(2)《规范》GB50010-2002 和《规范》ACI 185-2005 均为混凝土规范，《规范》GB50010-2002 虽有《规程》J276-2003 的补充，混凝土规范对各种混凝土构件的考虑是主要的，大面积板构件的似考虑得较少。在钢筋焊接网搭接长度的计算时，应突出钢筋焊接网的特点，尤其是薄构件用的钢筋焊接网的小直径、大间距、搭接长度的特殊规定等特点。钢筋焊接网搭接长度的比较，亦应在相同的条件下进行，即在钢筋直径、间距、保护层厚度大致相同的条件下进行比较较为合理。

(3) 钢筋焊接网搭接长度的讨论多为关于板结构的讨论，也涉及了一些关于墙的讨论。钢筋焊接网还广泛应用于限制混凝土裂缝的开展、增加混凝土的耐磨性、钢筋混凝土构件表面的保护等方面，这些构件的钢筋焊接网的搭接长度应有相应的方法确定。

参 考 文 献

- [1] 钢筋焊接网混凝土结构技术规程. JGJ276-2003.北京：建筑工业出版社，2003
- [2] 混凝土结构设计规范.GB50010-2002.北京：建筑工业出版社，2003
- [3] 混凝土结构建筑规范.ACI318-2005