

文章编号: 1673-2049(2009)02-0046-06

T型钢与混凝土黏结滑移本构关系试验

李红¹, 马洪宝², 吴涛¹, 刘伯权¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 甘肃省城乡规划设计研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对T型钢与混凝土黏结滑移的问题,进行了8个T型钢混凝土试件的推出试验,主要考虑混凝土强度、混凝土保护层厚度、横向配箍率3个因素的影响,得到了型钢应变、黏结强度、滑移沿锚固深度的分布规律以及不同锚固深度处的黏结滑移曲线。综合考虑这3个影响因素,统计回归出了特征黏结强度和特征滑移值的计算公式;引入2个位置函数,建立了考虑位置函数的黏结强度-滑移本构关系。试验结果表明:混凝土强度、混凝土保护层厚度、横向配箍率均对黏结强度有显著影响。

关键词:型钢混凝土结构;黏结滑移;本构关系;推出试验;黏结强度;横向配箍率

中图分类号: TU392.1 **文献标志码:** A

Experiment on Bond and Slip Constitutive Relation Between T-section Steel and Concrete

LI Hong¹, MA Hong-bao², WU Tao¹, LIU Bo-quan¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Gansu Urban & Rural Planning and Design Institute, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Considering the influences of three main factors including concrete strength, thicknesses of concrete cover as well as transverse stirrup ratios, the push-out tests of 8 specimens on the bond and slip behaviors between T-section steel and concrete were carried out to obtain the regularities of distribution of steel strain, bond strength and slip along the embedded position and bond and slip curves in different embedded positions. Synthetically considering the three factors, a set of calculative formulas of three characteristic bond strengths and three characteristic slippage values were presented by regression analysis, meanwhile, two position functions were introduced to build bond strength and slip constitutive relations. The experimental results show that the three main factors have obvious influence on bond strength.

Key words: steel reinforced concrete structure; bond and slip; constitutive relation; push-out test; bond strength; transverse stirrup ratio

0 引言

型钢与混凝土之间黏结作用对型钢混凝土构件变形和承载力的计算理论、型钢混凝土节点中剪力传递的计算、有限元分析中型钢混凝土黏结滑移的

数值模拟、型钢混凝土结构锚固可靠度分析及剪力连接件的设置都有重要的理论意义和工程应用价值^[1-2]。各国学者已经做了大量的试验,但是由于考虑的因素、试验的方法不同,型钢与混凝土之间的黏结强度、黏结破坏机理、试件的破坏形态表现出很大

收稿日期: 2009-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50608004); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060710004)

作者简介: 李红(1965-), 女, 山东龙口人, 副教授, 工学硕士, E-mail: lihong@chd.edu.cn.

的差异性,不能明确型钢混凝土黏结滑移的主要影响因素;另外,由于没有充分考虑型钢翼缘内侧、型钢翼缘外侧以及腹板黏结应力作用的差异性,也没有考虑黏结应力以及滑移沿锚固深度变化的情况,建立的黏结滑移本构关系也存在很大的局限性和不合理性,因此得到的结论存在很大分歧,不能形成一套合理的型钢混凝土黏结滑移理论。鉴于此,笔者参照各国型钢与混凝土^[3-6]以及光圆钢筋与混凝土^[7-9]的黏结试验,完成了 8 个 T 型钢混凝土试件的推出试验,分析了混凝土强度、混凝土保护层厚度、横向配箍率 3 个因素对型钢混凝土黏结滑移性能的影响,得出了 T 型钢与混凝土之间的黏结强度和相对滑移的大小及其分布规律,回归出了特征黏结强度和特征滑移值的计算公式,建立了考虑位置函数的 T 型钢混凝土黏结滑移本构关系。

1 试验概况

试验中,T型钢由 2 块 8 mm 钢板焊接而成,翼缘开槽(6 mm×3 mm),槽内每间隔 50 mm 贴 1 个电阻应变片,共设置 5 个,测量型钢沿锚固深度上的应变,既而推算出黏结强度沿锚固深度的分布;在型钢混凝土试件的加载端设置电子位移计,测量型钢与混凝土受力后的相对滑移,如图 1 所示,试件参数见表 1。

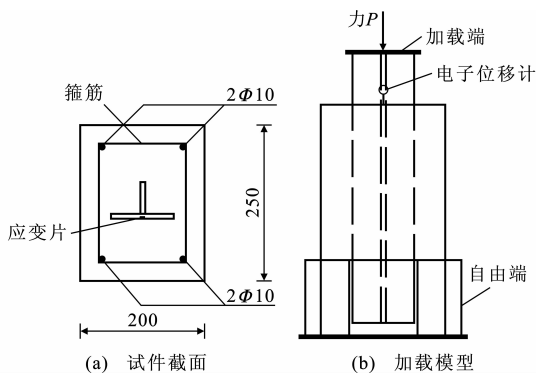


图 1 加载模型(单位:mm)

Fig. 1 Loading Model (Unit: mm)

2 试验结果分析

2.1 型钢应变沿锚固深度的分布规律

由图 2 可知,型钢应变沿锚固深度呈指数分布, $\epsilon_{ss} = A_1 e^{-x/B_1} + C_1$,其中,系数 A_1 、 B_1 、 C_1 与荷载有关; ϵ_{ss} 为型钢应变; x 为锚固深度。曲线随荷载的增大越加陡峭饱满,而型钢一直处于弹性阶段。

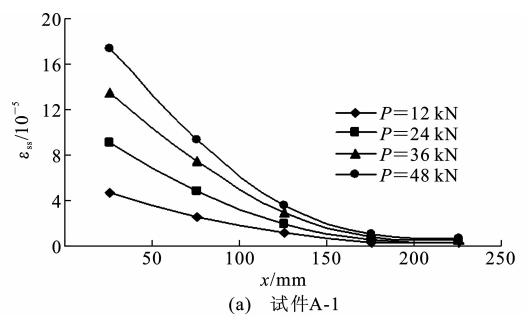
2.2 黏结强度沿锚固深度的分布规律

在加载端(x 为 0~25 mm)的区段上,试件受力

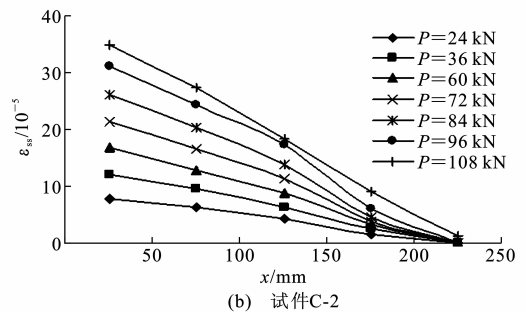
表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

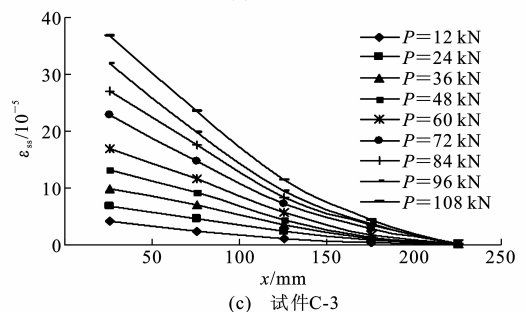
试件编号	混凝土强度	锚固深度/mm	混凝土保护层厚度/mm	箍筋类型	横向配箍率/%	配筋率/%
A-1	C25	250	100			1.6
A-2	C30	250	100			1.6
A-3	C35	250	100			1.6
B-1	C30	250	50			2.0
B-2	C30	250	150			1.2
C-1	C30	250	100	Φ6@50	0.38	1.6
C-2	C30	250	100	Φ6@100	0.19	1.6
C-3	C30	250	100	Φ@200	0.09	1.6



(a) 试件A-1



(b) 试件C-2



(c) 试件C-3

图 2 ϵ_{ss} - x 曲线

Fig. 2 Relations of ϵ_{ss} and x

复杂,型钢与混凝土之间的黏结强度表现出很大的奇异性,本文中暂不作考虑,只对距加载端 25 mm 之后的区段进行分析研究。型钢与混凝土之间的黏结强度为型钢应变的 1 阶导数。由图 3 可知,黏结强度 τ 沿锚固深度近似呈指数分布,黏结强度 τ 的最大值出现在距加载端 25 mm 的区段上,且随着荷载的增大,黏结强度 τ 也相应地增大。

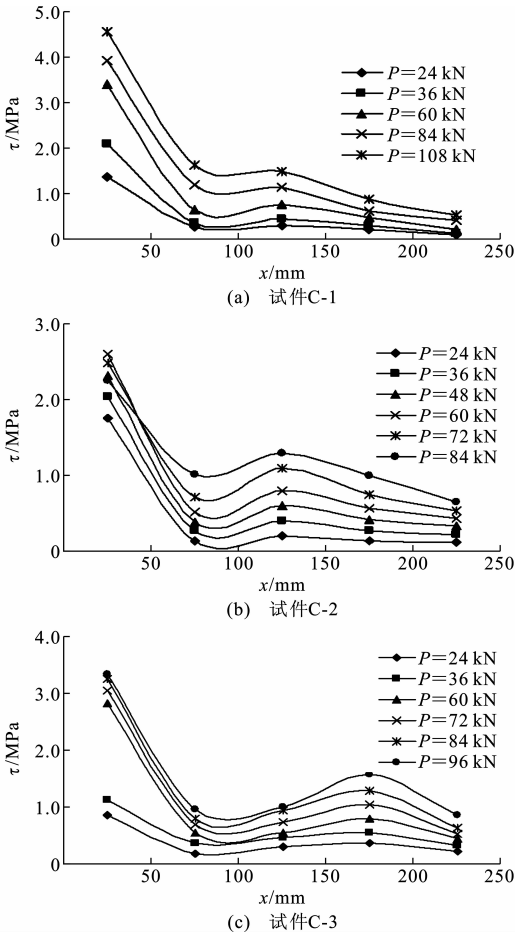


图3 τ-x曲线

Fig. 3 Relations of τ and x

2.3 滑移沿锚固深度的分布规律

由型钢应变和加载端滑移推算出型钢与混凝土之间的相对滑移 S 的公式为

$$S = S_1 - \left(1 - \frac{E_{ss}A_{ss}}{E_c A_c}\right) \int_0^x \bar{\epsilon}_{ss} dx \quad (1)$$

式中： S_1 为加载端滑移； E_{ss} 、 A_{ss} 分别为型钢的弹性模量和截面面积； E_c 、 A_c 分别为混凝土的弹性模量和截面面积； $\bar{\epsilon}_{ss}$ 为锚固深度 x 处的型钢平均应变。

由式(1)得到的滑移沿锚固深度分布曲线近似呈指数分布，如图4所示。

3 典型的平均黏结强度-加载端滑移曲线

图5为典型的平均黏结强度-加载端滑移($\bar{\tau}-S_1$)曲线模型，根据模型曲线定义3个特征平均黏结强度和3个特征滑移值：初始黏结强度 $\bar{\tau}_s$ 、极限黏结强度 $\bar{\tau}_u$ 、残余黏结强度 $\bar{\tau}_r$ 、初始滑移值 S_s 、极限滑移值 S_u 、残余滑移值 S_r 。

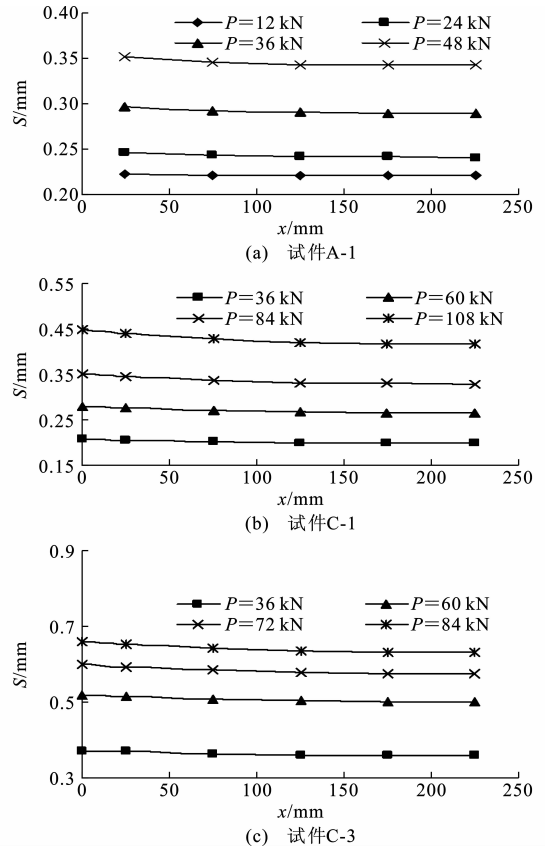


图4 滑移沿锚固深度的分布规律

Fig. 4 Distribution Regularity of Slip Along Embedded Position

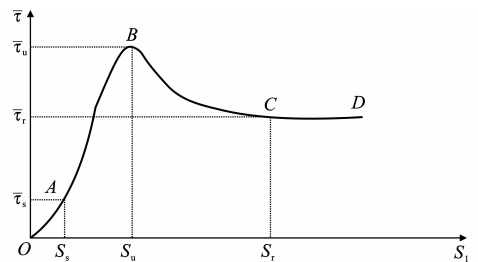


图5 典型的 $\bar{\tau}-S_1$ 曲线

Fig. 5 Typical Relations of $\bar{\tau}$ and S_1

3.1 受力阶段的划分

根据图5典型 $\bar{\tau}-S_1$ 曲线的特点，可以将型钢混凝土推出试验加载过程分为4个阶段：

(1)初始滑移阶段(OA)。加载初期，加载端发生了微滑移，荷载与加载端滑移呈线性增长，自由端无滑移产生。

(2)滑移破坏阶段(AB)。当荷载加载到10.25%~16.85%的极限荷载时，加载端处荷载与滑移呈非线性增长；当荷载大于80%的极限荷载时，加载端出现纵向裂缝，自由端开始产生滑移。

(3)下降段(BC)。当荷载达到极限荷载时，加

载端和自由端滑移加快,裂缝沿纵向全面发展,荷载明显下降。

(4)残余段(CD)。当荷载下降到一定程度,趋于水平残余值时,交界面上的混凝土晶体已基本被磨碎,试件被徐徐推出。

3.2 特征黏结强度和特征滑移值的统计回归

由试验结果分析可知,混凝土强度、混凝土保护层厚度以及横向配箍率均对特征黏结强度有显著影响,近似呈线性关系。综合考虑这 3 个因素,统计回归出了特征黏结强度以及相应的特征滑移值的计算公式。

特征黏结强度的计算公式为

$$\bar{\tau}_s = (0.006\ 1 + 0.018\ 5C_{ss}/h)f_t \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_u = (0.169\ 6 + 0.084\ 6C_{ss}/h + 57.43\rho_{sv})f_t \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_r = (0.088\ 6 + 0.041\ 1C_{ss}/h + 76.85\rho_{sv})f_t \quad (4)$$

式中: C_{ss} 为混凝土保护层厚度; h 为型钢截面高度; ρ_{sv} 为横向配箍率; f_t 为混凝土轴心抗拉强度。

特征滑移值的计算公式为

$$S_s = 0.077\ 9f_t \quad (5)$$

$$S_u = -0.025\ 2 + 0.125f_t + 0.080\ 2C_{ss}/h + 77.36\rho_{sv} \quad (6)$$

$$S_r = 0.616\ 6 + 0.278\ 3f_t + 0.214\ 6C_{ss}/h + 132.78\rho_{sv} \quad (7)$$

4 黏结滑移的位置函数

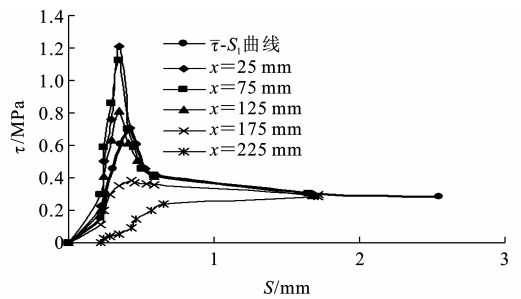
4.1 不同锚固深度处的 τ - S 曲线

$\bar{\tau}$ - S_1 曲线只能反映平均黏结强度的规律,而无法反映某一点处黏结强度的规律。因此,需要测出每一点的黏结强度 τ 和滑移 S ,得到沿锚固深度 x 变化的黏结滑移本构关系^[10-15]。由试验得到的黏结强度和滑移的结果,做出不同锚固深度处的 τ - S 曲线,结果如图 6 所示。

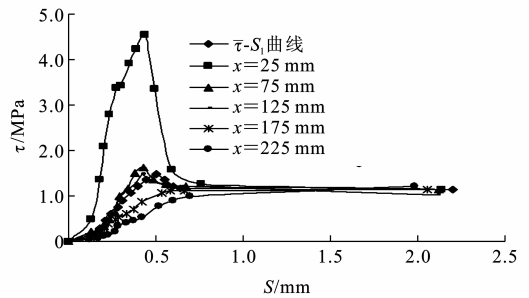
把图 6 中 τ - S 曲线沿锚固深度的分布与图 5 中 $\bar{\tau}$ - S_1 曲线模型进行对比可知,二者相似。考虑到黏结强度和滑移沿锚固深度的变化,分别引入了 2 个位置函数 $F(x)$ 和 $G(x)$ 来反映这种变化规律。为简化推出试件黏结滑移曲线族 $\tau = \tau(S, x)$ 数学表达式,以 $\bar{\tau}$ - S_1 曲线为基本曲线,利用二者的相似性,假定黏结曲线族 $\tau = \tau(S, x)$ 与 $\bar{\tau}$ - S_1 曲线具有如下关系

$$\frac{\tau_s}{\bar{\tau}_s} = \frac{\tau_u}{\bar{\tau}_u} = F(x) \quad (8)$$

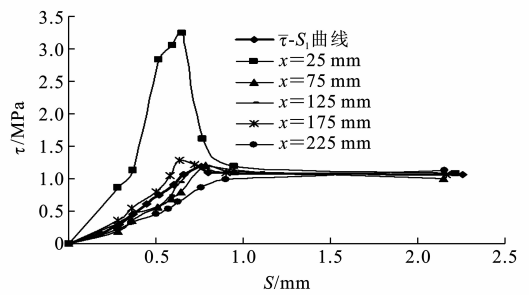
$$\frac{S_s}{\bar{S}_s} = \frac{S_u}{\bar{S}_u} = G(x) \quad (9)$$



(a) 试件A-1



(b) 试件C-1



(c) 试件C-3

图 6 τ - S 曲线随锚固深度的变化

Fig. 6 Variations of τ and S Relations Along Embedded Positions

$$\tau_r = \bar{\tau}_r \quad (10)$$

$$S_r = \bar{S}_r \quad (11)$$

式中: \bar{S}_s 、 \bar{S}_u 、 \bar{S}_r 分别为初始平均滑移值、极限平均滑移值和残余平均滑移值。

4.2 位置函数的确定

4.2.1 $F(x)$ 的确定

由式(8)确定的位置函数 $F(x)$ 曲线如图 7 所示,曲线基本呈指数分布,统计回归出位置函数 $F(x)$ 的近似表达式为

$$F(x) = 0.676\ 22 + 26.497\ 62e^{-\frac{x/l_a}{0.034\ 87}} \quad (12)$$

4.2.2 $G(x)$ 的确定

由式(9)确定的位置函数 $G(x)$ 曲线如图 8 所示,曲线呈指数分布,曲线在上限曲线与下限曲线之间波动。现取中间曲线进行研究,其函数表达式为

$$G(x) = 0.947\ 64 + 0.052\ 92e^{-\frac{x/l_a}{0.405\ 4}} \quad (13)$$

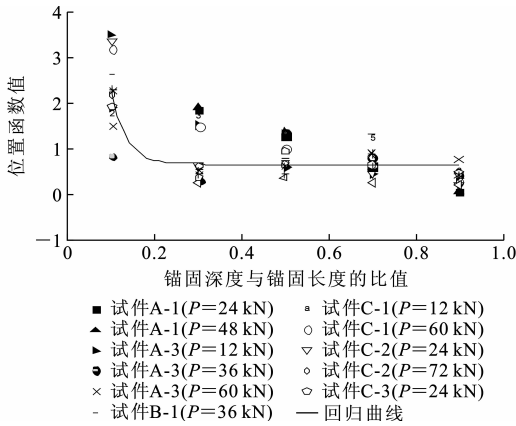


图7 位置函数 $F(x)$ 的回归曲线

Fig. 7 Regression Curve of Position Function $F(x)$

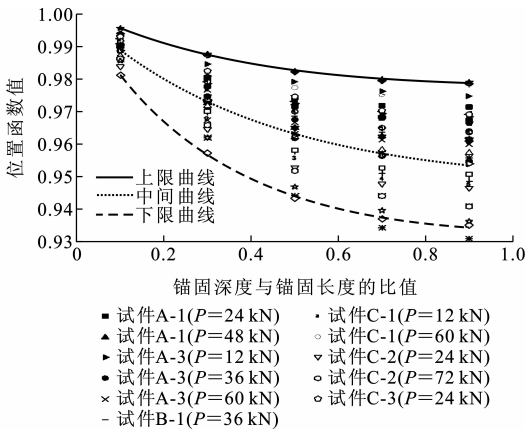


图8 位置函数 $G(x)$ 的回归曲线

Fig. 8 Regression Curves of Position Function $G(x)$

5 考虑位置函数的黏结滑移本构关系

黏结性能随锚固深度变化的黏结滑移曲线模型如图9所示,由3个特征黏结强度确定的3个特征点,将黏结滑移曲线分成3段,每段用相应的数学表达式定义,建立黏结强度和滑移的本构模型,其本构关系的数学表达式为:

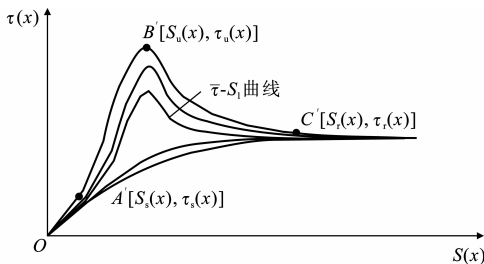


图9 τ - S 曲线随锚固深度的变化模型

Fig. 9 Changing Models of τ and S Relations Along Embedded Positions

(1) OA' 段 $[0 < S(x) \leq S_s(x)]$ 。加载端发生了

微滑移, $\tau(x)$ 与 $S(x)$ 呈线性增长, 数学表达式为

$$\tau(x) = a(x)S(x) + b(x) \quad (14)$$

式中: $a(x)$ 、 $b(x)$ 为与锚固深度 x 相关的系数。

(2) $A'B'$ 段 $[S_s(x) < S(x) \leq S_u(x)]$ 。 $\tau(x)$ 与 $S(x)$ 呈非线性增长, 可以用双曲线描述, 数学表达式为

$$\tau(x) = \frac{p(x)}{S(x)} + q(x) \quad (15)$$

式中: $p(x)$ 、 $q(x)$ 为与锚固深度 x 相关的系数。

(3) $B'C'$ 段 $[S_u(x) < S(x) \leq S_r(x)]$ 。黏结强度突降并趋于水平残余值, τ - S 曲线用双曲线描述为

$$\tau(x) = \frac{m(x)}{S(x)} + n(x) \quad (16)$$

式中: $m(x)$ 、 $n(x)$ 为与锚固深度 x 相关的系数。

由式(8)~(11)确定特征点的值为 $\tau_s(x) = F(x)\bar{\tau}_s$, $\tau_u(x) = F(x)\bar{\tau}_u$, $\tau_r(x) = \bar{\tau}_r$, $S_s(x) = G(x)S_s$, $S_u(x) = G(x)S_u$, $S_r(x) = S_r$, 代入到式

(14)~(16)中, 可确定系数 $a(x) = \frac{F(x)\bar{\tau}_s}{G(x)S_s}$, $b(x) =$

$$0, p(x) = F(x)G(x)\frac{\bar{\tau}_s - \bar{\tau}_u}{S_u - S_s} S_s S_u, q(x) =$$

$$F(x)\frac{\bar{\tau}_u S_u - \bar{\tau}_s S_s}{S_u - S_s}, m(x) = \frac{F(x)\bar{\tau}_u - \bar{\tau}_r}{S_r - G(x)S_u} G(x)S_u S_r,$$

$$n(x) = \frac{\bar{\tau}_r S_r - F(x)G(x)\bar{\tau}_u S_u}{S_r - G(x)S_u}, \text{平均黏结强度 } \bar{\tau}_s, \bar{\tau}_u,$$

$\bar{\tau}_r$ 和加载端滑移值 S_s 、 S_u 、 S_r 可以由式(2)~(7)计算确定。

τ - S 曲线连续,但在各个特征临界点处斜率不连续,这是因为在每个特征临界点处黏结刚度发生了突变,反映为 τ - S 曲线的转折。

利用 τ - S 本构关系可以合理地确定型钢混凝土不同锚固深度处的黏结滑移性能,能改进和完善型钢混凝土结构设计计算理论,可以优化剪力连接件的设置,大大简化施工并减少施工费用,缩短现场施工工期,从而取得显著的经济效益;同时,也为复杂型钢混凝土结构的有限元分析建立合理的黏结单元,确定合理的黏结刚度。

6 结语

(1)通过试验观察以及结果分析,得到了型钢应变、黏结强度以及滑移沿锚固深度的分布规律。

(2)由试验结果分析得出了混凝土强度、混凝土保护层厚度、横向配箍率3个因素均对黏结强度有显著的影响,近似呈线性关系。综合考虑这3个影响因素,统计回归出3个特征黏结强度以及相应的

特征滑移值的计算公式。

(3)根据试验得到了黏结应力和滑移的结果,做出不同锚固深度处的 $\tau = \tau(S, x)$ 曲线族;考虑到黏结强度和滑移沿锚固深度的变化,分别引入2个位置函数 $F(x)$ 和 $G(x)$,并建立了考虑位置函数的 τ - S 本构关系。

参考文献:

References:

- [1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社,2001:77-226.
ZHAO Hong-tie. Steel-concrete Composite Structures [M]. Beijing: Science Press, 2001: 77-226.
- [2] 周起敬,姜维山,潘泰华. 钢与混凝土组合结构设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.
ZHOU Qi-jing, JIANG Wei-shan, PAN Tai-hua. Design and Construction Handbook for Steel Reinforced Concrete Composite Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [3] 李红. 型钢与混凝土黏结基本性能的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,1994.
LI Hong. An Experimental Investigation on Bond Behavior Between Steel and Concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 1994.
- [4] XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, YANG Yong, et al. Analysis on the Behaviors of Bond-slip Between the Shape Steel and the Concrete by Push-out Test[J]. Xi'an University of Architecture & Technology, Natural Science Edition, 2007, 39(3): 320-326.
- [5] CHARLES W R, ROBERT C. Shear Connector Requirements for Embedded Steel Sections[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(2): 142-152.
- [6] 杨勇. 型钢混凝土黏结滑移基本理论及应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.
YANG Yong. Study on the Basic Theory and Its Application of Bond-slip Between Steel Shape and Concrete in SRC Structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2003.
- [7] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003:146-162.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Theory and Analysis of Reinforced Concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 146-162.
- [8] 徐有邻. 钢筋与混凝土黏结锚固的分析研究[J]. 建筑科学, 1992(4): 18-24.
XU You-lin. Analytical Study on Bond-anchorage Between Bar and Concrete [J]. Building Science, 1992(4): 18-24.
- [9] 徐有邻. 钢筋混凝土黏结滑移本构关系的简化模型[J]. 工程力学, 1997, 14(增2): 34-38.
XU You-lin. Simplified Model of Bond-slip Constitutive Relation Between Bar and Concrete [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(S2): 34-38.
- [10] 杨勇,赵鸿铁,薛建阳. 型钢混凝土黏结机理与黏结强度的研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2001, 33(2): 103-107.
YANG Yong, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang. Analysis of Mechanism and Strength of Bond Between Steel and Concrete in SRC Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2001, 33(2): 103-107.
- [11] 李红,姜维山. 型钢与混凝土黏结本构关系的试验研究[J]. 西北建筑工程学院学报, 1995(3): 16-22.
LI Hong, JIANG Wei-shan. An Experiment Investigation of Bonding Constitutive Relation on Steel Shapes and Concrete [J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering, 1995(3): 16-22.
- [12] 杨勇,赵鸿铁,薛建阳,等. 型钢混凝土黏结-滑移本构关系理论分析[J]. 工业建筑, 2002, 32(6): 60-63.
YANG Yong, ZHAO Hong-tie, XUE Jian-yang, et al. Theoretical Analysis on Bond-slip Constitutive Relation on Steel and Concrete Interface in SRC Structures [J]. Industrial Construction, 2002, 32(6): 60-63.
- [13] 马生强. 钢筋混凝土墩柱加固滞回耗能试验[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(5): 65-67.
MA Sheng-qiang. Energy-intensive Test of Reinforced Concrete Pier Column Reinforcing [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(5): 65-67.
- [14] 张淑云,白国良,李红星,等. 钢筋混凝土框架异型节点抗剪承载力研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(2): 170-174.
ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Anti-shear Capacity of Abnormal Joints of RC Frame [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(2): 170-174.
- [15] 李世秋,汪厚植,胡新民. 桥梁预应力钢筋混凝土结构耐久性影响因素及对策[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6): 41-43.
LI Shi-qiu, WANG Hou-zhi, HU Xin-min. Influencing Factors on Durability and Counter Measure of Bridge Prestressed Concrete Structure [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6): 41-43.