

文章编号:1673-2049(2011)03-0093-08

# 锚固钢筋粘结-滑移性能的滞回模型

张 川<sup>1</sup>, 谭 璐<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 资产与后勤管理处, 重庆 400030)

**摘要:**基于FEAPpv有限元分析平台,采用分离式模型,自定义一个粘结-滑移滞回模型,模拟二维钢筋混凝土构件中锚固钢筋的粘结-滑移性能;自定义模型以滕智明等的滞回规则为基础,参考了Eligehausen等关于锚固钢筋在反复荷载作用下粘结-滑移滞回关系的试验结果,修改了滕智明等的模型滞回路径中某些控制点的取值;对端部反复加载的锚固钢筋进行分析,验证本文粘结-滑移滞回模型模拟锚固钢筋和混凝土界面性能的有效性。结果表明:该模型能有效反映锚固长度对钢筋加载端力-位移曲线的影响。

**关键词:**反复荷载;锚固钢筋;混凝土;粘结-滑移滞回模型;有限元分析

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

## Bond-slip Hysteretic Model of Anchored Rebar

ZHANG Chuan<sup>1</sup>, TAN Lu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Department of Assets & Logistic Management, Chongqing Univeristy, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A new bond-slip hysteretic model was presented and nested in the FEAPpv finite element analysis platform which was used in the discrete model to simulate bond-slip behavior of anchored rebar in two-dimensional reinforced concrete members. The new model was based on the hysteretic model presented by Teng Zhi-ming, et al, but some parameters in the model were calibrated by the cyclic testing results of bond-slip hysteretic relationships under reversed cyclic loading obtained by Eligehausen, et al. The efficiency of the new model was justified, by means of anchored rebar with reversed cyclic loading on the loading tip, to simulate bond behavior at the interface between concrete and anchored rebar. The model can satisfactorily simulate effect of anchored length on force-displacement curve at the loading tip of the rebar.

**Key words:** reversed cyclic loading; anchored rebar; concrete; bond-slip hysteretic model; finite element analysis

## 0 引 言

有限元分析的准确性在很大程度上取决于所采用的本构模型的真实性和准确性,因此,准确揭示锚固钢筋与混凝土界面上的粘结-滑移关系对于钢筋混凝土粘结性能的有限元分析至关重要。现有的粘结-滑移

滞回模型较少,且非常复杂,很难应用于分离式模型的有限元分析中。

本文中笔者参考 Eligehausen 等<sup>[1]</sup>的试验结果,对滕智明等<sup>[2]</sup>的粘结-滑移滞回模型作了一定的修改和补充。以 FEAPpv 为分析平台,在用户自定义的单元和材料模块上,添加了联结单元以及自定

收稿日期:2011-05-21

基金项目:重庆市科委自然科学基金重点项目(CSTC2007BA7006)

作者简介:张 川(1965-),男,江西南昌人,教授,工学博士,E-mail:nj87@163.com。

义的粘结-滑移滞回模型,采用分离式模型对试件中锚固钢筋的受力特性进行模拟。

1 分析模型

本文模型在分析锚固钢筋粘结-滑移性能时,把分布钢筋弥散到混凝土中,划分为连续均匀的钢筋混凝土四节点等参单元,这部分采用整体式模型。将纵筋单独采用两节点杆单元模拟,在纵筋和混凝土单元之间插入两节点联结单元,考虑纵筋与混凝土接触面之间的粘结-滑移作用,这部分采用分离式模型。

1.1 混凝土的分析模型与破坏准则

Darwin 等<sup>[3]</sup>提出的建立在等效单轴应变概念基础上的增量正交异性模型的应力-应变增量表达式为

$$\begin{bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1E_2} & 0 \\ \nu\sqrt{E_1E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2)G' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为主应力; $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  为主应变; $\tau_{12}$ 、 $\gamma_{12}$  分别为剪应力和剪应变; $E_1$ 、 $E_2$  分别为对应于主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  方向的应力-等效单轴应变曲线的切线模量; $\nu$  为泊松比,取值方法详见文献<sup>[3]</sup>;  $G'$  为剪切模量,设  $G'$  在坐标轴转动时为不变量,所以  $G' = (E_1 + E_2 - 2\nu\sqrt{E_1E_2})/[4(1-\nu^2)]$ 。

裂缝的处理采用弥散裂缝模型 (Smeared Cracking Model),混凝土开裂后,泊松比  $\nu=0$ ,假定混凝土的抗剪能力全部丧失,此时  $G'=0$ ,参见文献<sup>[4]</sup>。在计算每级荷载增量产生的等效单轴应变增量时,需要考虑由于混凝土各向异性、裂缝开闭及反复周期加载等因素引起的主应力轴方向的转动<sup>[5]</sup>。

对于混凝土的破坏准则,采用得到公认的 Kupfer 等给出的双轴应力状态下的强度包络线。

1.2 混凝土的滞回规则与钢筋的本构模型

混凝土的受压基准线采用 Popovics 模型,加卸载路径如图 1 所示,其中, $\sigma_c$ 、 $\sigma_t$ 、分别为压应力和拉应力, $\epsilon_c$ 、 $\epsilon_t$  分别为压应变和拉应变。

分析采用 Seckin 钢筋滞回本构模型<sup>[6]</sup>。和混凝土模型一样(图 2)<sup>[7]</sup>,钢筋的包络线也与单调骨架曲线一致,卸载段采用直线,其中, $f_s$ 、 $f_y$  分别为钢筋应力和钢筋屈服点应力, $\epsilon$  为钢筋应变, $f_m$ 、 $\epsilon_m$  分别为钢筋卸载点对应的应力和应变, $E_0$  为钢筋屈服前弹性模量, $E_{sh}$  为钢筋强化阶段模量, $E_{sr}$  为钢筋

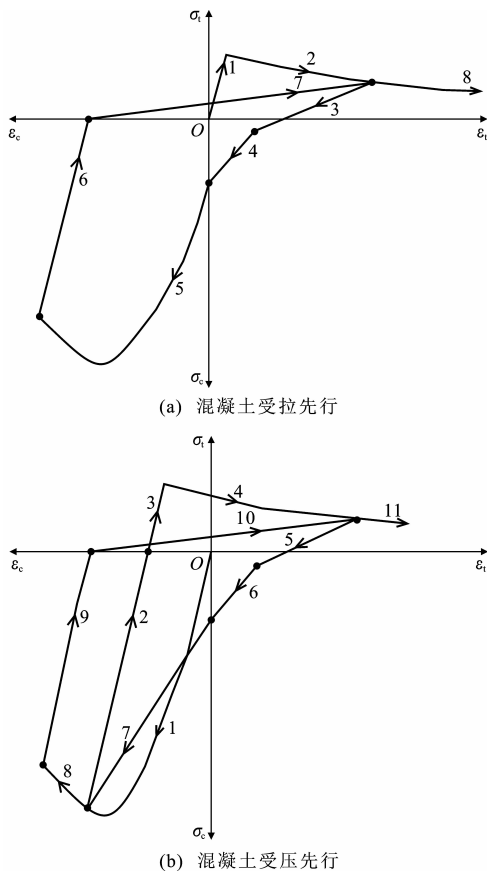


图 1 反复荷载作用下混凝土的应力-应变曲线  
Fig. 1 Stress-strain Curves of Concrete Under Reversed Cyclic Loading

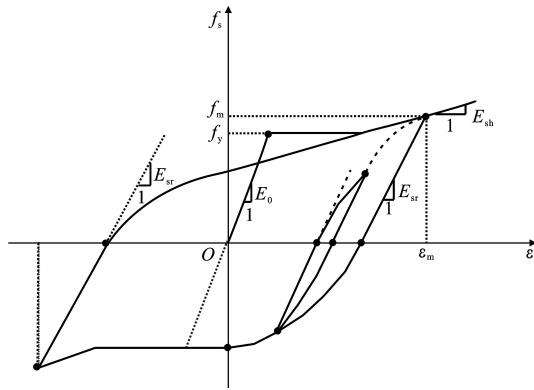


图 2 Seckin 钢筋滞回本构模型  
Fig. 2 Seckin's Hysteresis Constitutive Model for Rebar  
滞回曲线下降段斜率。

1.3 粘结-滑移模型

1.3.1 联结单元

在纵筋和混凝土单元分界面上插入弹簧单元,该联结单元在整体坐标系和局部坐标系下的示意图 3,其中, $U_j$ 、 $V_j$  分别为  $j$  点  $x$  方向位移和  $y$  方向位移, $U_i$ 、 $V_i$  分别为  $i$  点  $x$  方向位移和  $y$  方向位移, $X_j$ 、 $Y_j$  分别为  $j$  点  $x$  方向和  $y$  方向的坐标, $X_i$ 、 $Y_i$

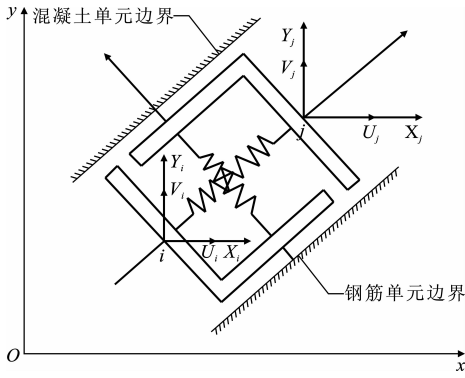


图 3 两节点联结单元

Fig. 3 Two-node Link Element

分别为  $i$  点  $x$  方向和  $y$  方向坐标,局部坐标系下的单元节点恢复力  $F_h$ 、 $F_v$  列阵为

$$\begin{bmatrix} F_h \\ F_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_h & 0 \\ 0 & K_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_h \\ \epsilon_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $K_v$ 、 $K_h$  分别为与钢筋径向和轴向有关的刚度系数;  $\epsilon_v$ 、 $\epsilon_h$  分别为钢筋径向和轴向应变。

本文模型不考虑钢筋的销栓作用,取  $K_v = 0.01K_h$ 。

### 1.3.2 粘结-滑移滞回本构

在本文模型中单调粘结-滑移关系直接采用 Eligehausen 等提出的四段式模型,如图 4 所示,其中,  $s$  为滑移量,  $s_r$ 、 $\tau_f$  分别为摩擦段起始点对应的滑移量和应力,  $\tau$  为粘结应力,  $\tau_{\max}$ 、 $s_0$  分别为单调加载的峰值粘结应力及对应的滑移量。滞回本构的编制过程中,主要参考了滕智明等所建议的粘结-滑移滞回规则,在此基础上,综合考虑了 Eligehausen 等的试验结果和定参原则,修改了滕智明等的模型粘结-滑移滞回本构控制点取值。

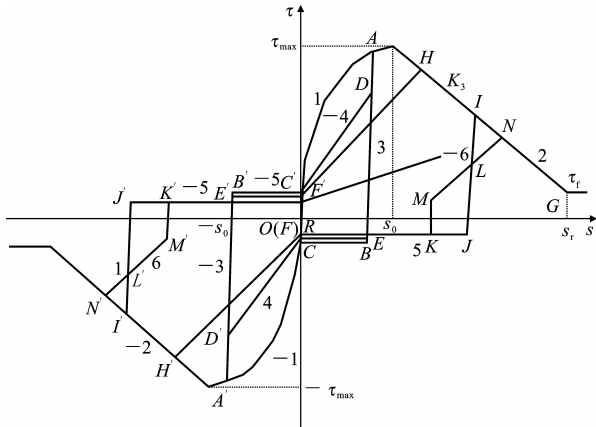


图 4 本文中的粘结-滑移滞回模型

Fig. 4 Bond-slip Hysteretic Model in the Paper

本文的粘结-滑移滞回模型中曲线下降段斜率  $K_3$  没有采用 5 MPa 这一固定值,而是根据粘结应

力峰值点的坐标 ( $s_0$ ,  $\tau_{\max}$ ) 和摩擦段起点  $G$  的坐标 ( $s_r$ ,  $\tau_f$ ) 求得这一斜率。

最大粘结应力  $\tau_{\max}$  与摩擦段起点对应的应力  $\tau_f$  分别为

$$\tau_{\max} = (20 - \frac{d_b}{4}) \sqrt{\frac{f_c}{30}}, s_0 = \sqrt{\frac{f_c}{30}} \quad (3)$$

$$\tau_f = (5.5 - 0.07 \frac{S'}{H_b}) \sqrt{\frac{f_c}{27.6}}, s_r = S' \quad (4)$$

式中:  $S'$  为钢筋横肋间距;  $H_b$  为钢筋横肋高度;  $d_b$  为钢筋直径;  $f_c$  为混凝土强度。

滞回本构再加载控制点  $D$  的粘结应力  $\tau_D$  不是在所有情况下都以同方向卸载点  $A$  的粘结应力  $\tau_A$  为参照。如同一圈循环中,若反方向的  $|s_{\min}|$  小于正方向的  $|s_{\max}|$  ( $|s_{\min}|$ 、 $|s_{\max}|$  分别为同一圈循环中反方向最大滑移量和正方向最大滑移量的绝对值),则正方向再加载控制点的  $\tau_D$  值以正方向卸载点的  $\tau_A$  值为参照;若反方向的  $|s_{\min}|$  大于正方向的  $|s_{\max}|$ ,则正方向再加载控制点的  $\tau_D$  值以反方向卸载点  $A'$  的粘结应力  $\tau_{A'}$  为参照,反之亦然(图 4)。这样规定的原因是,在一个方向加载引起的粘结破坏也会对相反方向加载的粘结作用产生影响,粘结破坏的程度始终取决于滑移量较大的那个方向。再加载路径上卸载点的粘结应力  $\tau_D$  为

$$\tau_D = \begin{cases} \alpha_d \tau_A & |s_{\min}| \leq |s_{\max}| \\ \alpha_d \tau_{A'} & |s_{\min}| > |s_{\max}| \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_d$  为粘结应力退化系数,  $\alpha_d = 1 - \sqrt{n/45}$ ,  $n$  为荷载的循环次数。

本文中采用的模型在滕智明等模型的基础上,分别添加了在路径 5 和 -5 上发生卸载所对应的路径 -6 和 6,以此模拟发生在  $s_{\max}$  和 0 之间或  $s_{\min}$  和 0 之间的半圈循环。假定荷载反向的瞬间摩擦抗力反向,但大小不变,随后遵循再加载规则,故路径 -6 和 6 分别和再加载路径 -4 和 4 规则一致,则

$$\left. \begin{aligned} \tau_M &= -\tau_K \\ s_M &= s_K \\ \tau_L &= \alpha_d \tau_I \\ \tau_{L'} &= \alpha_d \tau_{I'} \\ s_L &= s_I - (\tau_I - \tau_L)/K_4 \\ s_{L'} &= s_{I'} - (\tau_{I'} - \tau_{L'})/K_4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:  $\tau_K$ 、 $\tau_M$  为摩擦段荷载反向瞬间对应的粘结应力;  $s_K$ 、 $s_M$  为摩擦段荷载反向瞬间对应的滑移量;  $K_4$  为再加载曲线对应的斜率;  $s_L$ 、 $s_{L'}$  分别为再加载路径与卸载路径交点对应的滑移量(图 4 中的  $L$ 、 $L'$  点);

$s_I$ 、 $s_I'$  为卸载点对应的滑移量(图 4 中  $I$ 、 $I'$  点);  $\tau_I$ 、 $\tau_I'$  为卸载点对应的粘结应力;  $\tau_L$ 、 $\tau_L'$  分别为加载路径与卸载路径交点对应的粘结力(图 4 中  $L$ 、 $L'$  点)。

回路  $I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow M \rightarrow N$  代表后续循环至新的滑移量  $s_N$  ( $s_N > s_K$ ) 的  $\tau$ - $s$  关系。点  $N$  及  $N'$  的坐标可由解直线方程的交点求得。

本文中编制的粘结-滑移滞回本构还参考了 Eligehausen 等锚固钢筋试件的试验结果, 考虑了在第 1 次加载过程中卸载点位置不同引起的再加载路径的区别: 若第 1 次加载过程中, 卸载发生在上升的曲线段, 与 Eligehausen 等的试验结果相同; 若卸载点的应力小于包络线上最大粘结应力的 80%, 反方向再加载时, 与反方向包络线重合。这是因为滑移量较小, 混凝土只发生弹性变形, 在卸载过程中可恢复, 未造成混凝土内部损坏, 故粘结应力不削弱; 若卸载点的应力大于包络线上最大粘结应力的 80%, 或卸载发生在包络线的下降段, 反向再加载曲线斜率与比前一次有所降低。因为在第 1 次加载过程中, 钢筋的滑移量较大, 钢筋横肋之间的部分混凝土被压碎, 并伴随横肋间混凝土变形不可恢复。

## 2 基于 FEAPpv 平台的模型流程

本文中利用了 FEAPpv 平台数值求解方面的优势, 但 FEAPpv 源模型自带单元内部各子函数之间的数据传递非常复杂, 且源模型没有提供本文研究所需单元模型和滞回本构, 不能满足本文研究的需要, 也不便于后续研究的开展, 因此本文中利用 FEAPpv 平台所提供的接口对所需采用的单元和材料进行自定义: 添加了钢筋混凝土单元、钢筋杆单元、联结弹簧单元; 在自定义材料模块上, 添加上述 3 个部分的本构模型。在 FEAPpv 中成功地实现了 3 个部分的整合, 采用源模型提供的支座位移控制加载进行求解。

## 3 算例分析

### 3.1 文献[1]的研究

Eligehausen 等的试验研究了多个参数和不同的加载历史对粘结-滑移反应的影响, 这个试验是对框架梁-柱节点中梁纵筋锚固段粘结-滑移规则的研究。由于钢筋的锚固长度非常短, 所以假定粘结应力沿锚固长度均匀分布是合理的。锚固长度有限, 粘结作用沿钢筋总长度提供的粘结应力之和较小, 钢筋一直处于弹性阶段, 所以可排除钢筋屈服的情况, 且钢筋加载端和卸载端的滑移量不会相差很大,

因此, 用测得的滑移量代表钢筋埋长中点的局部滑移量是足够准确的, 但严格地说, 这样得到的不是局部粘结应力-滑移关系而是平均值。Eligehausen 等提供的试验数据包含多种单调和循环反复加载下变形钢筋的粘结-滑移关系以及不同钢筋直径和混凝土强度的粘结-滑移关系<sup>[8-15]</sup>。

#### 3.1.1 试验结果与分析结果的对比

##### (1) 系列 2

为验证粘结-滑移本构在受拉、受压加载下是否一致, 选用系列 2.1 单调受拉加载和系列 2.2 单调受压加载为研究对象。图 5 为钢筋和混凝土接触面上的粘结应力-滑移关系单调受拉和单调受压试验曲线与分析结果的对比。为方便结果的对比, 系列 2.2 负方向的粘结应力取绝对值。模型中单调受拉和单调受压都采用相同的粘结计算模型, 由于系列 2.1 和系列 2.2 材料参数都相同, 所以该模型的计算结果取绝对值后完全一致。

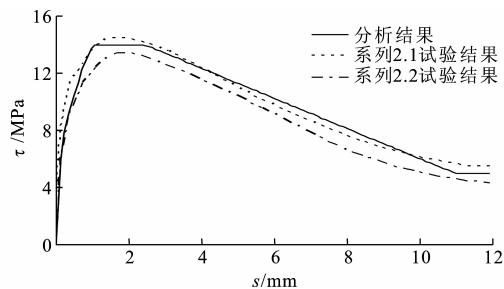


图 5 单调受拉和单调受压  $\tau$ - $s$  关系

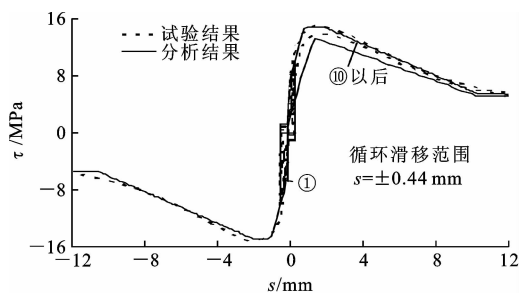
Fig. 5  $\tau$ - $s$  Relationships Under Monotonic Pull and Push

为了验证本文中的粘结-滑移模型能反映第 1 次卸载点位置对再加载曲线的影响, 选取系列 2.4、2.6、2.8 为研究对象, 模拟滑移增量  $\Delta s = 0$  的反复加载。这 3 个试验的钢筋在给定最大滑移量之间反复循环 10 次。本文中只给出了第 1 圈、第 2 圈和第 10 圈的试验和分析曲线, 同时给出了对应的单调曲线便于对比, 如图 6 所示, 其中①、②、⑩分别表示循环 1、2、10 圈。

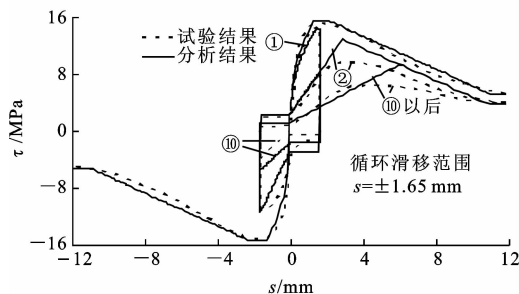
为了研究滑移增量  $\Delta s \neq 0$  的循环反复加载的粘结-滑移滞回规则, 选用系列 2.19 为研究对象, 如图 6(d)所示。在每个给定的循环最大滑移量  $s_{\max}$  之间循环 5 次后, 下一循环的最大滑移量  $s_{\max}$  在前一个的基础上增加  $\Delta s$ 。为便于对比, 只给出了第 1 圈、第 5 圈、第 10 圈、第 15 圈和第 20 圈的曲线, 同时也给出了相应的单调曲线便于对比。

##### (2) 系列 3

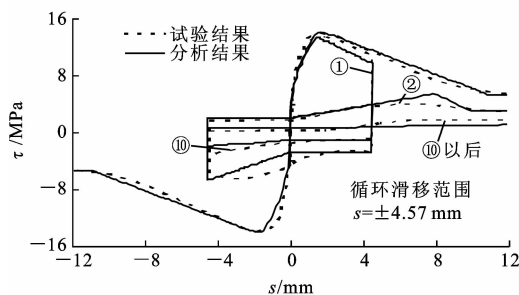
为验证本文中的粘结-滑移本构能反映钢筋直



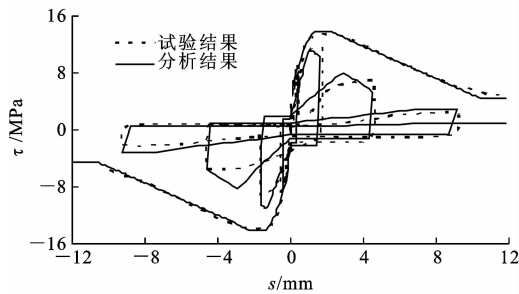
(a) 系列2.4



(b) 系列2.6



(c) 系列2.8



(d) 系列2.19

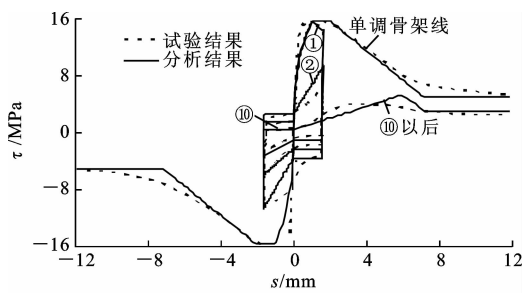
图 6 系列 2 的  $\tau$ - $s$  滞回关系

Fig. 6  $\tau$ - $s$  Hysteretic Relationships of Series 2

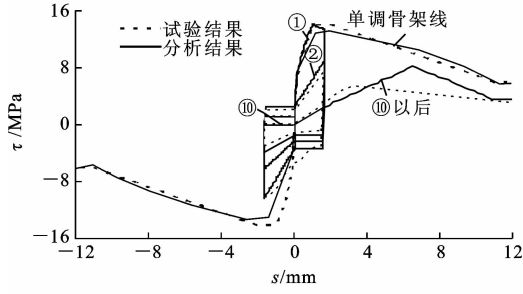
径对粘结-滑移关系的影响,试件的钢筋包含了 3 种在结构抗震设计中采用较多的型号。图 7 为系列 3 的  $\tau$ - $s$  滞回关系。图 7 中,对于系列 3.4,钢筋直径  $d_b=19$  mm;对于系列 3.5, $d_b=25$  mm;对于系列 3.6, $d_b=32$  mm。

### (3) 系列 4

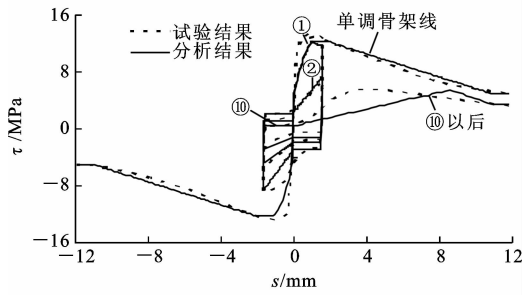
为验证本文中的粘结-滑移模型能反映混凝土强度对粘结-滑移关系的影响,选取系列 4.1、4.2 为研究对象,把试件的混凝土强度等级从之前采用的 30 MPa 提高到了 55 MPa,如图 8 所示。图 8 中,对



(a) 系列3.1、3.4



(b) 系列3.2、3.5



(c) 系列3.3、3.6

图 7 系列 3 的  $\tau$ - $s$  滞回关系

Fig. 7  $\tau$ - $s$  Hysteretic Relationships of Series 3

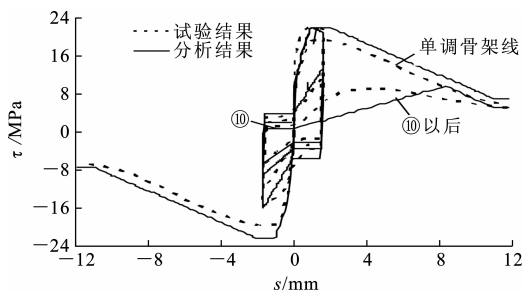


图 8 系列 4 的  $\tau$ - $s$  滞回关系

Fig. 8  $\tau$ - $s$  Hysteretic Relationships of Series 4

于系列 4.2, $f'_c=54.6$  MPa。

### 3.1.2 结果分析

#### (1) 系列 2

试验结果表明,单调加载试件系列 2.1(钢筋受拉)和系列 2.2(钢筋受压)的粘结-滑移关系相差不大,因此对于钢筋受拉和钢筋受压的情况,模型采用相同的粘结-滑移本构模型。模型的分析结果与系列 2.1(钢筋受拉)和系列 2.2(钢筋受压)的试验结果都比较接近,由于试验本身还有不可避免的离散

性,因此在钢筋不屈服的情况下,假定钢筋受拉和受压的粘结-滑移关系一致是合理的。

系列 2.1(钢筋受拉)和系列 2.2(钢筋受压)分析结果表明:单调计算本构模型的上升段取一曲线和一小段斜率为 0 的水平直线;下降段取一斜率为负的直线和一斜率为 0 的水平直线,可以较准确地模拟单调粘结-滑移关系。单调加载下粘结-滑移关系的典型特征:粘结应力-滑移曲线上升段的初始刚度很大,随滑移量的增大,刚度逐渐降低,当滑移量大约为 1.5 mm 时达到最大粘结应力,此时刚度减小为 0,此后随滑移量增大,粘结应力开始逐渐退化。当滑移量  $s \approx 11 \sim 12$  mm 时,这个值大约等于钢筋横肋间的净距,此后随滑移量的增大,粘结应力几乎保持不变,进入摩擦抗力阶段。

系列 2.4、2.6、2.8 试验结果与分析结果的对比,主要验证本文模型可模拟出不同加载历史下的粘结-滑移滞回关系,对比不同加载历史下粘结-滑移滞回关系的区别,同时验证模型对这些区别的反映情况。

系列 2.4 在第 1 次卸载时,  $s_{\max} = 0.44$  mm,对应的粘结应力小于  $80\% \tau_{\max}$ 。在给定滑移量  $s_{\max} = 0.44$  mm、 $s_{\min} = -0.44$  mm 之间循环加载 10 次后,粘结退化不明显[图 6(a)]。

系列 2.6 在第 1 次卸载时,  $s_{\max} = 1.65$  mm,对应的粘结应力大于  $80\% \tau_{\max}$ ,但没有超过单调粘结-滑移曲线的峰值点。在给定滑移量  $s_{\max} = 1.65$  mm、 $s_{\min} = -1.65$  mm 之间循环加载 10 次时,粘结应力-滑移关系上表现出较明显的粘结退化[图 6(b)]。

系列 2.8 在第 1 次卸载时,  $s_{\max} = 4.57$  mm,对应的粘结应力已经超过单调粘结-滑移曲线的峰值点,处于粘结-滑移曲线的下降段。在给定滑移量  $s_{\max} = 4.57$  mm、 $s_{\min} = -4.57$  mm 之间循环加载 10 次时,会导致反方向再加载过程中发生严重的粘结退化[图 6(c)]。

通过系列 2.4、2.6、2.8 加载历史的对比可以看出:

系列 2.4 卸载粘结应力小于  $80\% \tau_{\max}$ ,第 1 次反方向再加载过程中的粘结退化很小,可以忽略,因此在这种加载情况下,模型规定的反方向再加载路径与反方向的包络线上升段重合[图 6(a)]。系列 2.6 卸载粘结应力大于  $80\% \tau_{\max}$ ,系列 2.8 卸载粘结应力已经超过单调粘结-滑移曲线的峰值点,这 2 种情况下反方向再加载过程中都有明显的粘结退化,模型规定的反方向再加载路径参见第 2 节中介绍的路径 4,再加载曲线比原始包络线上升段斜率小。

粘结-滑移再加载曲线上刚度的退化程度主要取决于其中某个方向的历史最大滑移量  $s_{\max}$ ,因此从系列 2.4 第 2 圈循环再加载开始,系列 2.6、2.8 第 1 圈反向再加载开始,模型规定的再加载路径由滑移量较大那个方向的卸载点存储的历史变量确定。这种再加载路径能准确地反映出循环加载过程中粘结强度及刚度的退化。循环过程中,滑移摩擦段应力  $\tau_f$  的大小取决于卸载点滑移量  $s_{\max}$  和荷载循环次数  $n$ 。

通过分析可以看出,循环反复荷载作用下荷载循环次数  $n$  和荷载循环的峰值滑移量之差  $s_{\max} - s_{\min}$  都是影响粘结退化程度的因素。在最初几次循环过程中粘结退化程度最大,粘结应力的降低速率随滑移反复次数的增加而减慢,荷载反复 5 次后基本趋于稳定。粘结应力退化率  $\lambda$  与荷载循环次数  $n$  的关系用回归方程表示为

$$\lambda = 0.67 \frac{0.43}{n} \quad (7)$$

在滑移量达到循环所对应的峰值滑移量  $s_{\max}$  后继续增大的过程中,分析曲线与试验曲线在后续单调粘结应力-滑移关系上差异较大,模型所采用的再加载路径在这种加载历史下还不能得到非常满意的结果,其主要原因是模型规定的再加载路径没有反映出再加载过程中刚度的变化情况。

## (2) 系列 3

系列 3 的分析结果表明:本文中的粘结-滑移本构模型能反映粘结应力  $\tau_{\max}$  随钢筋直径  $d_b$  增大而减小;随钢筋直径  $d_b$  减小而增大的趋势。粘结应力  $\tau_{\max}$  与  $1/d_b$  成正比,钢筋直径越小,粘结应力越大,这就是截面设计配筋时尽量采用较小直径钢筋的原因。

## (3) 系列 4

系列 4 说明本文中的粘结-滑移本构模型能反映粘结应力  $\tau_{\max}$  随混凝土强度  $f'_c$  增大而增大的趋势,且粘结应力  $\tau_{\max}$  与  $\sqrt{f'_c}$  成正比,因此,粘结-滑移本构模型中,取粘结应力  $\tau_1 = (20 - d_b/4) \sqrt{f'_c/30}$  是能够真实地反映实际情况的。

## 3.2 文献[8]的研究

Viathanatepa 等试验所采用的试件类似于框架内节点中的约束混凝土和钢筋。试件包含 1 根锚固在混凝土中的变形钢筋,名义直径为 25 mm,锚固长度较大,为 635 mm,约束钢筋由横向和纵向钢筋组成,体积配箍率为 2%。试件厚度为 254 mm,具有足够的混凝土保护层厚度,可保证不发生劈裂

破坏。计算模型中的纵筋单元、钢筋混凝土单元和联结单元之间的关系如图 9 所示,其中, $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为钢筋拉拔端位移。图 9 中钢筋端部 22 号节点的力-位移( $P$ - $S$ )关系曲线如图 10 所示。

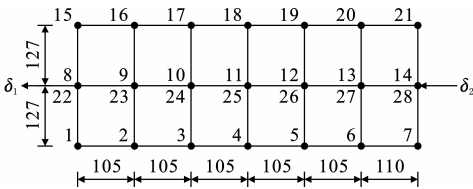
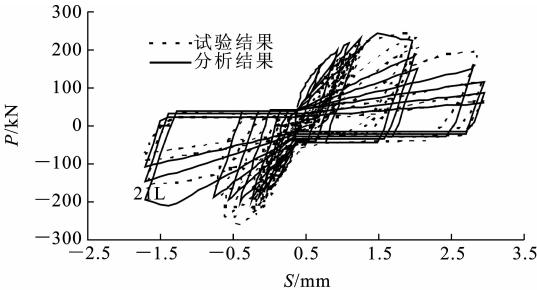
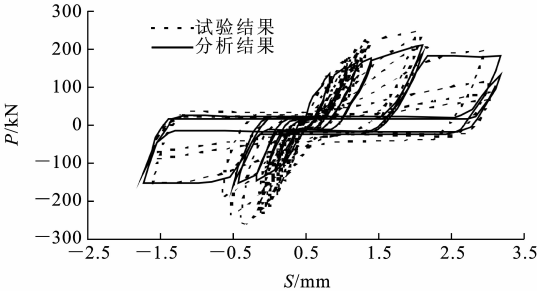


图 9 有限元模型的单元划分(单位:mm)

Fig. 9 Mesh Division of Finite Element Model (Unit:mm)



(a) 本文模型与试验结果的对比



(b) Eligehausen等模型与试验结果的对比

图 10 钢筋端部  $P$ - $S$  滞回关系曲线的对比

Fig. 10 Comparisons of  $P$ - $S$  Hysteretic Relationships at Rebar End

模型所采用的模型反映出荷载循环过程中发生的粘结破坏以及钢筋的强度和刚度的损失,由于锚固长度较长,钢筋屈服,加载端的  $P$ - $S$  曲线呈现一定的钢筋受力特性。图 10 为采用本文中的本构模型得出的计算结果与采用 Eligehausen 等的本构模型所得计算结果与试验结果的对比。采用本文中的粘结-滑移本构模型比采用 Eligehausen 等模型得到的结果在曲线形状上更接近真实情况,再加载刚度更接近试验结果。本文中的模型反映出随着荷载循环次数的增加,再加载过程中钢筋刚度的退化。

4 结 语

通过试验结果和分析结果的对比,从整体和局

部 2 个层次上验证了本文模型中采用的粘结-滑移滞回模型,能够有效地预测反复荷载作用下,锚固钢筋与混凝土界面上的粘结-滑移特性。锚固长度较长时,钢筋会屈服,模型可反映出加载端的  $P$ - $S$  曲线表现出一定的钢筋受力特性;锚固长度较短时,提供的粘结应力不足以使钢筋屈服,模型可反映出加载端的  $P$ - $S$  曲线表现出明显的粘结-滑移特性。滕智明等建议的退化系数  $\alpha_d$  比 Eligehausen 等模型中的破坏因子要简便得多,模拟结果表明,该退化系数  $\alpha_d$  也能较好地反映荷载循环过程中的粘结作用的退化。

参考文献:

References:

[ 1 ] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local Bond Stress-slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations [R]. Berkeley: University of California, 1983.

[ 2 ] 滕智明, 邹湘湖. 反复荷载下钢筋混凝土构件的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 1996, 29(2): 19-27.

TENG Zhi-ming, ZOU Li-xiang. Nonlinear Finite Element Analysis of RC Members Under Reversed Cyclic Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2): 19-27.

[ 3 ] DARWIN D, PECKNOLD D A. Analysis of RC Shear Panels Under Cyclic Loading [J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(2): 355-369.

[ 4 ] 朱伯龙, 董振祥. 钢筋混凝土非线性分析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.

ZHU Bo-long, DONG Zhen-xiang. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.

[ 5 ] MANSOUR M Y, LEE J Y, HINDI R. Analytical Prediction of the Pinching Mechanism of RC Elements Under Cyclic Shear Using a Rotation-angle Softened Truss Model[J]. Engineering Structures, 2005, 27(8): 1138-1150.

[ 6 ] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.

LU Xi-lin, JIN Guo-fang, WU Xiao-han. Nonlinear Finite Element Theory and Application of Reinforced Concrete Structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.

[ 7 ] PALERMO D. Behaviour and Analysis of Reinforced Concrete Walls Subjected to Reversed Cyclic Loading [D]. Toronto: University of Toronto, 2002.

- [8] VIWATHANATEPA S, POPOV E P, BERTERO V V. Effects of Generalized Loading on Bond of Reinforcing Bars Embedded in Confined Concrete Blocks [R]. Berkeley: University of California, 1979.
- [9] 陈 峰, 郑建岚. 自密实混凝土与老混凝土的粘结-滑移性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(6): 56-60.  
CHEN Feng, ZHENG Jian-lan. Bond-slip Relationship Between Self-compacting Concrete and Old Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(6): 56-60.
- [10] 黄一杰, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 方钢管混凝土粘结强度试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 43-48.  
HUANG Yi-jie, XUE Jian-yang, ZHAO Hong-tie, et al. Experimental Study of Bond Strength of Concrete-filled Square Steel Tube[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 43-48.
- [11] 刘永健, 刘君平, 郭永平, 等. 钢管混凝土界面粘结滑移性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(2): 53-57.  
LIU Yong-jian, LIU Jun-ping, GUO Yong-ping, et al. Bond-slip Mechanics Behaviors of Structures Concrete Filled Steel Tubes[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 53-57.
- [12] 胡 波, 王建国. 钢管与混凝土粘结-滑移相互作用的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 84-91.  
HU Bo, WANG Jian-guo. Numerical Simulation on Bond-slip Behavior of Concrete-filled Steel Tubes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 84-91.
- [13] 程永春, 李春良, 刘寒冰, 等. 碳纤维与混凝土界面粘结应力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 46-49.  
CHENG Yong-chun, LI Chun-liang, LIU Han-bing, et al. Computation Method of Interfacial Stresses Between CFRP and Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 46-49.
- [14] 顾兴宇, 王文达. 水泥混凝土桥面粘结层抗剪性能要求及简化计算[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(2): 43-48.  
GU Xing-yu, WANG Wen-da. Shear Property Demands of Binding Layer on Concrete Bridge Pavement and Simplified Calculation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(2): 43-48.
- [15] 傅恒菁. 低周反复荷载作用下月牙钢筋粘结性能试验研究[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1986, 18(1): 10-19.  
FU Heng-jing. Experimental Study on Bond Behavior of Crescent-shaped Deformed Bars Subjected to Low Frequency Cyclic Loads[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1986, 18(1): 10-19.

## 《建筑结构学报》2012 年征订通知

《建筑结构学报》是由中国科学技术协会主管, 中国建筑学会主办的国家一级学术性刊物, 创刊于 1980 年, 自 1992 年起入选为中文核心期刊, 2007 年起被美国《工程索引》(Ei Compendex) 收录, 期刊影响因子连续多年在国内同类期刊中名列前茅。

《建筑结构学报》旨在报道和交流建筑结构领域中代表我国学术水平的最新研究成果, 反映本学科发展最新动态和趋势, 推动国内外的学术交流。主要刊登建筑结构、抗震减振、地基基础等学科的基础理论研究、应用研究和科学实验技术的学术论文、研究报告及最新进展动态, 为我国建筑科学技术研究的发展服务。

《建筑结构学报》读者对象为相关专业的高等院校师生和科研、设计、施工单位的工程技术人员, 以及相关科技工作者。

《建筑结构学报》为月刊, 大 16 开本, 144 页, 每期定价 25 元, 全年共 300 元。欢迎您直接汇款至《建筑结构学报》编辑部订阅本刊, 通过编辑部订阅全年杂志可享受九折优惠并免收邮寄费。

欢迎国内外读者订阅!

地 址: 北京市三里河路 9 号住房和城乡建设部内

邮 编: 100835

电 话: (010) 58933734

网 址: jzjgxb.chinaasc.org

E-mail: ascjgxb@126.com