

文章编号: 1000-4750(2017)Suppl-0263-06

基于 OpenSees 的钢筋混凝土梁粘结滑移数值分析

祝 双¹, 张沛洲¹, 古 泉², 欧进萍^{1,3}

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁, 大连 116024; 2. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建, 厦门 361005;

3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150090)

摘 要: 粘结滑移性能的数值分析是钢筋混凝土结构研究的热点, 该文在总结现有粘结滑移本构关系的基础上, 采用分离式思想在 OpenSees 中建立粘结滑移精细化分析模型, 并通过拉拔试件与 RC 梁构件的数值分析研究梁中钢筋与混凝土的粘结滑移作用, 同时考虑箍筋量对构件滑移分布的影响。经过该文分析可知, 该数值分析模型具有一定的合理性, 能较准确的反映出粘结应力、滑移等分布的规律; 通过梁构件数值分析可知, 其整体性能受到粘结性能、钢筋滑移量大小及箍筋配置等的影响, 箍筋的配置对构件局部滑移会产生一定的影响, 但对滑移的整体分布影响并不显著。

关键词: 粘结滑移; 截断 D-P 模型; 分离式建模; 实体单元; OpenSees

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.04.S052

NUMERICAL ANALYSIS OF BOND-SLIP BEHAVIOR IN RC BEAMS BASED ON OPENSEES

ZHU Shuang¹, ZHANG Pei-zhou¹, GU Quan², OU Jin-ping^{1,3}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract: Many scholars have done a lot of research on bond-slip behavior in reinforced concrete structures. Besides experiments, numerical analysis is also important. In this paper, on the basis of summarizing bond-slip models nowadays, a refined model in OpenSees according to the method of discrete model is built and then the bond-slip behavior between rebar and concrete is studied through analyzing a pull-out specimen and RC beam component. The influence of stirrup on bond stress and slip distribution is considered. From the analytical results, it is found that the numerical model is reasonable to reflect the bond stress and its change law. At the same time the phenomena of beam simulation show that many factors have effects on its whole performance such as the bond stress, slip of rebar and ratio of stirrups which can affect the bond-slip distribution. The stirrups affect the slip in part of the beam but in general it has little effect.

Key words: bond-slip; Truncated D-P; discrete model; bulk element; OpenSees

钢筋混凝土结构在土木工程结构中应用广泛, 大量学者对其之间如何协同工作等方面做了很多研究。当钢筋混凝土构件受力后会在钢筋与混凝土

接触面产生分布力, 通常称为粘结应力, 这种应力主要由化学胶着力、摩擦力和机械咬合力组成, 通过粘结作用可实现应力传递, 使两种材料变形协

收稿日期: 2016-04-06; 修改日期: 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51261120376, 91315301-12)

通讯作者: 欧进萍(1959), 男, 湖南人, 博士, 教授, 院士, 从事结构监测、控制与防灾减灾领域的研究(E-mail: oujinping@dlut.edu.cn).

作者简介: 祝 双(1990), 女, 黑龙江人, 硕士生, 从事建筑结构抗震性能分析研究(E-mail: shuang_zhu1580@163.com);

张沛洲(1987), 男, 宁夏人, 博士生, 从事建筑结构抗震性能分析研究(E-mail: zp_z_87@163.com);

古 泉(1974), 男, 新疆人, 教授, 博士, 从事结构可靠度、土结相互作用及高层和桥梁抗震分析研究(E-mail: quangu@xmu.edu.cn).

调，随着荷载增大钢筋和混凝土之间会产生滑移。一般通过 4 类试验方法可研究粘结滑移关系，主要包括拉拔试验、梁式试验、中心拉伸试验及柱式拉伸试验^[1]。众多学者针对钢筋混凝土粘结滑移关系已展开大量研究，Tepfers^[2]等 1979 年研究了拉拔试件的开裂破坏，Eligehausen 等^[3]在大量研究基础上提出一种钢筋局部粘结滑移本构模型且应用广泛，1992 年 Malvar^[4]研究了影响滑移曲线的因素，发现约束条件对于粘结滑移曲线裂缝后期的影响很大。针对该类问题常用有限元模拟方法包括弥散式、嵌入式和分离式。

本文分别以拉拔试验与梁构件为分析对象，采用数值分析与试验对比，基于 OpenSees 建立分离式数值分析模型研究粘结滑移对钢筋混凝土受弯构件性能的影响。

1 分离式数值分析模型与方法

1.1 分离式模型单元选取

本文在 OpenSees 中针对粘结滑移问题建立三维分离式数值分析模型，如图 1 所示，其中混凝土单元采用三维块体 bbarBrick 单元^[5]，钢筋采用桁架单元，两者间粘结滑移关系利用零长度连接单元模拟。该方法可实现三维钢筋与混凝土间粘结滑移问题，同时便于精细化分析混凝土细部开裂等问题。

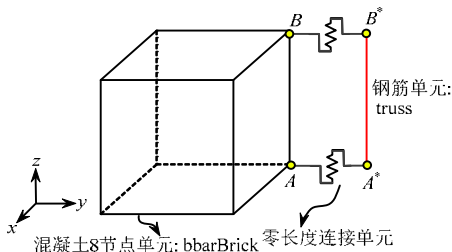


图 1 三维分离式建模示意图

Fig.1 Description of a three-dimensional discrete model

1.2 混凝土与钢筋材料本构选取

上述分离式模型主要包括三种材料本构关系，其中钢筋材料采用双线性随动强化模型，所需参数包括屈服强度 f_y ，弹性模量 E ，泊松比 ν 等，而混凝土材料选取三维截断 D-P 模型^[6]，该模型分别由受剪屈服面 $f_1(\sigma) = 0$ 及受拉屈服面 $f_2(\sigma) = 0$ 组成，如图 2 所示，两屈服函数表达式均为线性，仅考虑受拉与受剪引起的材料屈服，两屈服函数定义分别如式(1)与式(2)所示：

$$f_1(\sigma) = \|s\| - (\alpha + \lambda I_1) = 0, \quad I_1 \leq T \quad (1)$$

$$f_2(\sigma) = T - I_1, \quad I_1 \leq T \quad (2)$$

其中： I_1 为应力第一不变量； $\|s\|$ 为应力偏量第二不变量； α 表示材料不受荷时的抗剪强度； λ 为斜率； T 表示材料受拉破坏强度。式(2)中仅当 $I_1 = T$ 时，才满足此屈服条件。该模型塑性流动法则如下式所示：

$$\dot{\varepsilon}^p = \sum_{i=1}^2 \dot{\gamma}_i \frac{\partial f_i}{\partial \sigma} \quad (3)$$

式中： $\dot{\gamma}_i (i=1,2)$ 为塑性应变增量率大小；塑性应变 ε^p 的增量方向与屈服面的外法线方向 $\partial f_i / \partial \sigma$ 是一致的。当应力点处于弹性区域时，即 $f_i(\sigma) < 0 (i=1,2)$ ，则不产生塑性应变，相应 $\dot{\gamma}_i = 0$ ；当进行塑性加载时，最多有两个屈服面被“激活”，如 $f_j(\sigma) = 0, j \in \{1,2\}$ ，此时塑性应变增量率 $\dot{\gamma}_j > 0$ 。该截断模型需要确定的参数包括混凝土密度 ρ 、剪切刚度 G 、体积模量 K 、斜率 λ 、参数 α 及 T 等。

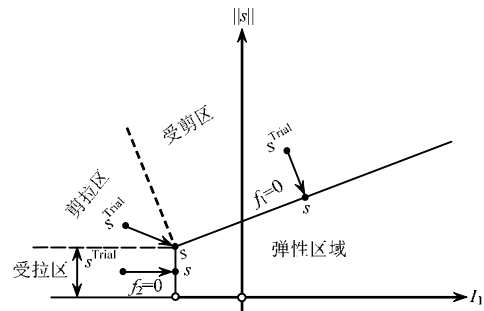


图 2 截断 D-P 模型

Fig.2 Truncated D-P model

2 拉拔试验数值分析

2.1 拉拔试件分析

以文献[7]中的拉拔试验为分析对象，通过本节分析选取合适的粘结滑移本构关系，并通过网格尺寸等参数分析研究粘结应力分布及其影响。该试件为直径 914 mm，高 540 mm 的圆柱体，直径为 36 mm 钢筋的置于其中，包括自由加载段、粘结段及无粘结段，如图 3 所示，其中粘结段长度 PQ 为 180 mm，其余部分用 PVC 管包裹使之无粘结。本文依据等面积原则将该试件简化为长宽为 810 mm，高 180 mm 的钢筋混凝土试件，且分析中仅模拟钢筋与混凝土粘结部分，模型中混凝土弹性模量为 3.55×10^4 MPa， $G = 1.53 \times 10^4$ MPa， $K = 1.74 \times 10^4$ MPa。

图 3 中拉拔力作用于 O 点，文献[7]中的拉拔试验为研究大直径钢筋与混凝土之间的滑移作用，并将其试验结果与 Eligehausen 模型^[3]进行对比，如图 4 所示，因此选其作为本文分离式模型的粘结滑移本构。

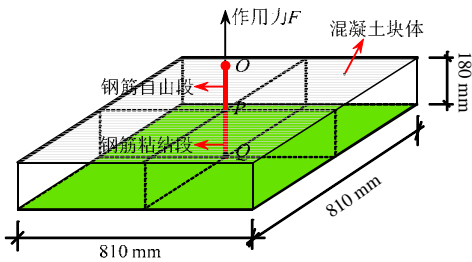


图3 拉拔分析简化模型

Fig.3 Description of pull-out model

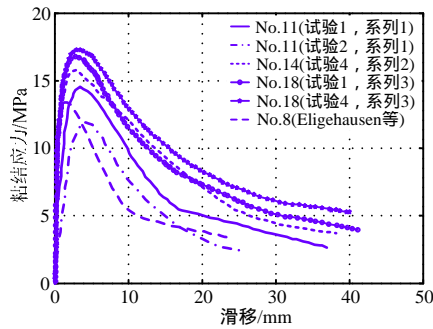


图4 文献[7]中各种试验结果对比图

Fig.4 Test results in reference [7]

在等荷情况下记录的 P 点位移随作用力变化与图4中曲线 No.11 的走势基本一致，如图5所示，表明采用 Eligehausen 本构模型应用到此分析中基本合理，可在一定程度上反映粘结滑移产生的影响。

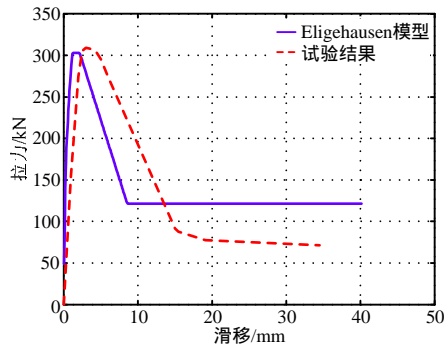


图5 受力点位移与力的关系

Fig.5 Force-slip curve

2.2 网格尺寸参数分析

在有限元分析中，网格数量直接影响计算精度和计算时耗，数量增加会提高计算精度，但同时也会增加计算时耗，因此确定网格数量时应进行权衡。考虑到本文重点关注钢筋与混凝土之间的粘结滑移，表1中3种工况主要加密沿高度方向的网格密度，以分析网格尺寸对滑移及粘结应力分布的影响。

在上述分析工况中，将钢筋沿长度分为3个、6个、9个单元，计算结果如图6所示，由图可知工况A与工况B计算结果有较大差别，但随着网格

密度增加，工况B和工况C的计算结果已经相近，表明随网格尺寸减小分析结果逐渐趋于一致。

表1 单元划分表

Table 1 Element mesh

工况	单元个数	长度划分	宽度划分	高度划分
A	300	10	10	3
B	600	10	10	6
C	900	10	10	9

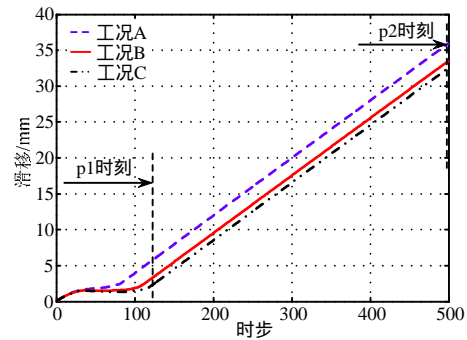


图6 网格尺寸对滑移量的影响

Fig.6 Influence of mesh size on slippage

为进一步精细化分析网格尺寸对模拟钢筋与混凝土之间粘结应力的影响，从图6中取 p_1 和 p_2 两个不同时刻以分析粘结应力沿钢筋的分布(见图7)。由图7可知 p_1 时刻工况B和工况C的粘结应力沿钢筋分布几乎一致，但工况C中从图3中 Q 点到 P 点的应力增长相对更平缓，说明网格尺寸越小可使粘结应力沿钢筋分布更加均匀，但对比两条曲线可知粘结应力分布对网格尺寸并不敏感。在加载结束 p_2 时刻，工况B和工况C中 P 点与 Q 点的粘结应力基本相等并达到 3.5 MPa 左右，说明在加载后期粘结滑移关系曲线已经进入下降软化段，表明试件已发生粘结破坏。

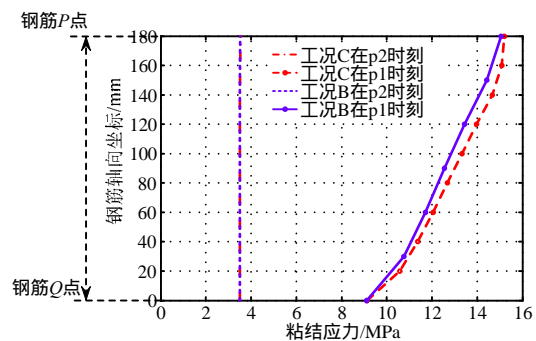


图7 网格尺寸对粘结应力分布的影响

Fig.7 Influence of mesh size on bond stress distribution

图8为 p_1 、 p_2 时刻 P 点和 Q 点在粘结本构上的相对位置，在 p_1 时刻 P 点的应力达到最大值，而 Q 点此时的应力值还处在上升阶段，到达 p_2 时

刻 P 点与 Q 点均已到达最大滑移处,说明在拉拔过程中 P 点处粘结应力率先进入下降段,然后传递至 Q 点,最终粘结应力急剧降低,钢筋粘结段全部发生破坏。

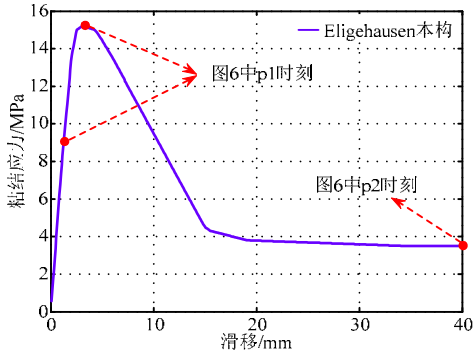


图 8 不同步 P 点和 Q 点的粘结滑移状态
Fig.8 Bond-slip states of P and Q at different steps

3 钢筋混凝土梁构件粘结滑移分析

3.1 试件参数及模型介绍

本文选取文献[8]中开展的钢筋混凝土梁试验为分析对象,该试件长 1900 mm,横截面尺寸为 200 mm×120mm;混凝土弹性模量 $E=3.0\times 10^{10}$ Pa,泊松比 0.16;上部纵筋弹性模量 $E=2.1\times 10^{11}$ Pa, $f_y=2.35\times 10^8$ Pa;下部纵筋弹性模量 $E=2.1\times 10^{11}$ Pa, $f_y=3.35\times 10^8$ Pa。横截面下部纵筋直径 $D=14$ mm,上部纵筋直径 $D=10$ mm,主筋混凝土保护层厚度为 25 mm,用位移控制法进行计算分析。建模方式依然与前文拉拔试验一致,如图 1,混凝土采用前文所述三维块体单元,本构为截断 D-P 材料,钢筋采用 truss 单元,本构为双线性随动强化模型,粘结滑移关系采用 Eligehausen 等提出的本构,当有限元模型考虑钢筋锈蚀时,钢筋的局部粘结滑移关系依据文献[8]确定。此外,梁中箍筋节点与混凝土节点各自由度完全耦合。两集中力相距 500 mm,其网格划分方式如图 9 所示。

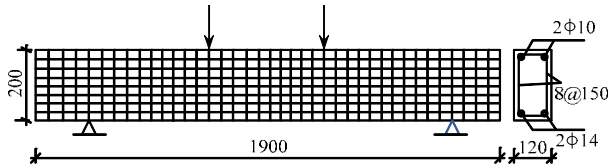


图 9 RC 梁构件有限元模型
Fig.9 Finite element model of RC beam

3.2 粘结滑移分布及影响分析

本节主要研究粘结滑移对受弯构件性能的影响,由于粘结滑移受到很多因素影响,如:混凝土强度、钢筋类型、箍筋的影响等,为单一化考虑影

响因素,只将箍筋设为变量进行分析比较,以分析梁体不同位置滑移量大小(见图 10)、粘结力分布(见图 11)及钢筋应力分布(见图 12)。由图 10 可知梁跨中几乎无滑移量,最大滑移量在距梁端 500 mm 处,结合图 10 和图 11 可知粘结应力与滑移量呈正相关关系,表明在当前荷载水平下粘结良好并未破坏,由于滑移与粘结力大小相对于梁跨中是对称分布的,考虑到方向图中分布均为反对称。

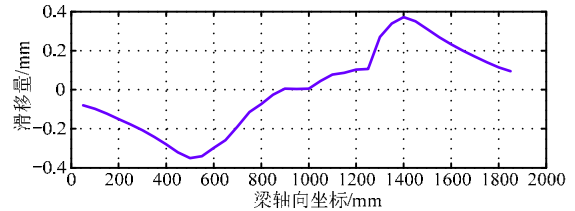


图 10 滑移量随梁轴向分布

Fig.10 Slippage distribution along RC beam

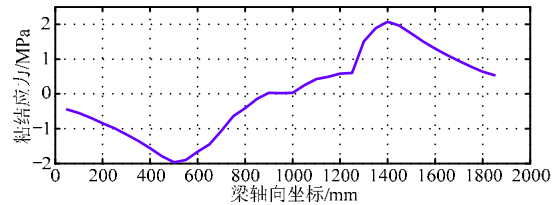


图 11 粘结应力随梁轴向分布

Fig.11 Bond stress distribution along RC beam

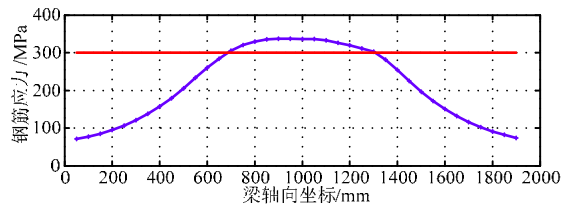


图 12 梁下排钢筋受拉应力分布图

Fig.12 Stress distribution of rebar at bottom of beam

此外,由图 12 可知钢筋沿梁轴向的应力呈对称分布,跨中最大、梁端最小且均屈服(300 MPa),经分析此时大部分混凝土单元已进入塑性阶段,如跨中混凝土主应力与偏应力状态已达到图 13 中三维截断 D-P 模型的材料屈服面,表明该区域混凝土已发生不同程度破坏。

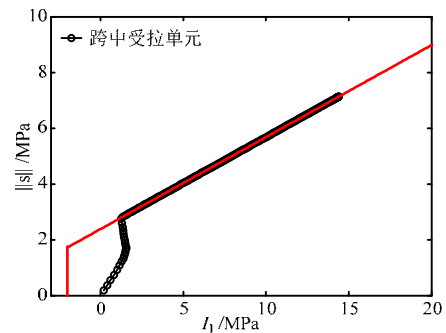


图 13 跨中混凝土应力状态

Fig.13 Concrete stress state at middle of beam

3.3 试验与模拟分析结果

结合前文分析为进一步说明粘结滑移对该类梁构件受弯性能等的影响,比较模型的计算承载能力和试验结果,从图 14 可以看出模拟结果和试验结果在跨中挠度 2 mm 前较接近,随挠度增大模拟承载力较试验有一定差距,但两者最大承载力相近,分别为 54.3 kN 和 54.0 kN。

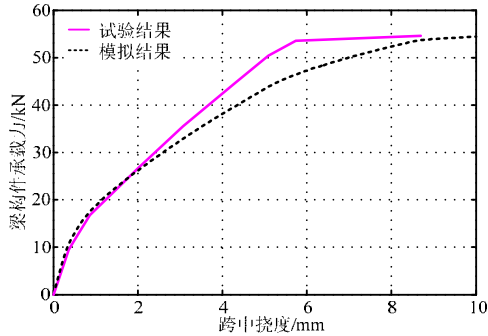


图 14 模拟与试验结果承载力对比

Fig.14 Analytical and experimental results

3.4 锈蚀情况对于粘结滑移的影响

根据试验结果^[8]分别对 5% 和 10% 锈蚀情况进行模拟,试验中采用恒电流法^[9]对混凝土内钢筋进行锈蚀。承载能力如图 15,5% 锈蚀下梁仍然是适筋延性破坏,而 10% 锈蚀下梁已进入脆性破坏。如图 16,在 10% 锈蚀情况下滑移量上升了 35%,说明当钢筋发生锈蚀时,钢筋混凝土中的粘结滑移更加明显,对于梁的性能影响加剧。

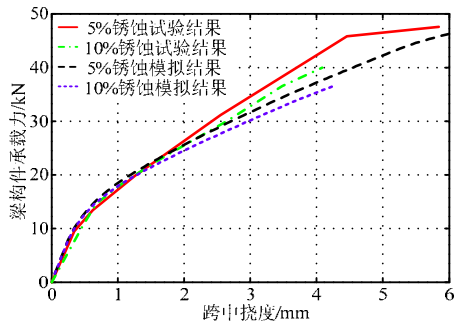


图 15 锈蚀模拟与试验结果对比

Fig.15 Analytical and experimental results

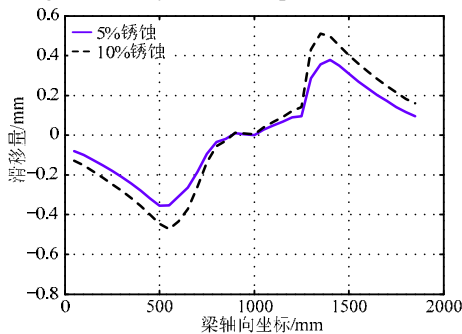


图 16 不同锈蚀情况下滑移量的对比

Fig.16 Effect of rebar corrosion on slippage

3.5 箍筋及配箍量对粘结滑移影响

本节分析考虑箍筋直径及不同箍筋分布对粘结滑移性能影响,具体分析工况如表 2 所示,以分析不同箍筋布置情况下模型的滑移量的区别。本模型中箍筋模拟方法采用完全粘结方法,与文献[10]中的建模方式相似,即箍筋节点与混凝土节点共节点且完全耦合,以考虑和模拟箍筋在梁模型中发挥的约束等效应。

表 2 箍筋布置列表

Table 2 Arrangement of stirrups

分析工况	布置	箍筋直径/mm	箍筋间距/mm
工况 1	无箍筋	无	无
工况 2	6@150	6	150
工况 3	8@150	8	150
工况 4	8@200	8	200

图 17 给出不同配箍量情况下钢筋与混凝土间滑移量的分布,可知在一定用钢量的情况下箍筋布置间距比直径大小对构件滑移量的影响可能更明显;随着配箍量增大,梁中跨与 3/4 跨之间的滑移逐步减小,表明箍筋的配置对局部滑移会产生一定的影响,但滑移沿梁体的整体分布趋于一致,影响并不显著。

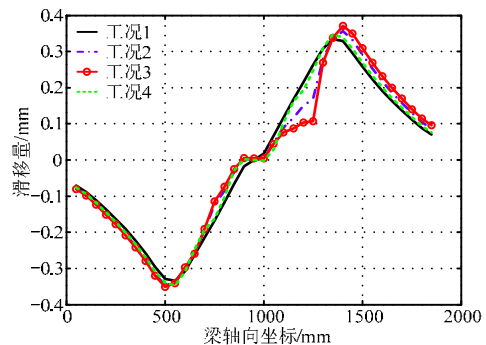


图 17 滑移量沿梁长的变化

Fig.17 Slip distribution along beam

4 结论

基于众多学者针对钢筋与混凝土间粘结滑移本构关系做的大量研究,本文采用分离式建模的思路,基于 OpenSees 软件建立粘结滑移精细化分析模型,并通过拉拔试件与梁构件的数值分析研究梁中钢筋与混凝土的粘结滑移作用,同时考虑了箍筋量对构件承载力、粘结力与滑移分布的影响,经过本文分析可得到如下结论:

(1) 基于分离式建模思路建立的粘结滑移数值分析模型具有一定的合理性,能较准确的反映出粘结应力分布及其变化规律,随网格加密,粘结力分

布趋于一致,但对网格尺寸敏感性较小。

(2) 通过梁构件分析可知,即使在滑移量较小的情况下,粘结滑移对 RC 构件承载能力仍有一定影响,据此可知对于粘结性能较差或滑移显著的构件在分析模型中需特别考虑其影响。

(3) 经本文对配箍参数化分析可知,箍筋的配置对构件局部滑移会产生一定的影响,但对滑移的整体分布影响并不显著。

由本文分析可知,在滑移量较小的情况下,粘结滑移作用对钢筋混凝土结构或构件的承载力与延性会产生一定影响,但当钢筋锈蚀后,这种影响可能会更加显著,针对钢筋锈蚀及粘结性能退化等问题有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 郑晓燕, 吴胜兴. 钢筋混凝土粘结滑移本构关系建立方法的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(1): 1-2. Zheng Xiaoyan, Wu Shengxing. Research of building constitutive relation of reinforced concrete bond-slip [J]. Sichuan Construction Science Research, 2006, 32(1): 1-2. (in Chinese)
- [2] Tepfers R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars [J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31(106): 3-12.
- [3] Eligehausen R, Popov E P, Bertero V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations in Report UCB [R]. Berkeley, California, US: Earthquake Engineering Research Center: University of California, 1983: 20-30.
- [4] Malvar H S. Signal processing with lapped transforms [M]. Artech House, Inc., 1992, 40(40): 2703-2714.
- [5] Elgamal A, Yang Z, Parra E. Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(4): 259-271.
- [6] 邱志坚. 几类经典岩土类材料弹塑性本构模型及其敏感性分析方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 98-100. Qiu Zhijian. Some classic geotechnical material elastic-plastic constitutive model and their sensitivity analysis method study [D]. Xiamen: Xiamen University, 2015: 98-100. (in Chinese)
- [7] Juan Murcia-Delso, Andreas Stavridi, Benson Shing P. Bond strength and cyclic bond deterioration of large-diameter bars [J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(54): 3-4.
- [8] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 1-5. Yuan Yingshu, Jia Fuping, Cai Yue. Structure performance degradation model of corroded reinforced concrete beam [J]. Journal of Civil Engineering, 2001, 34(3): 1-5. (in Chinese)
- [9] Uomoto T, Misra S. Deteriation of concrete beams and columns caused by corrosion of reinforcing steel bars [C]. Singapore: 4th International Conference on Durability of Building Materials & Components, 1987: 420-426.
- [10] 丁季华, 李永和, 胡险峰, 等. 箍筋锈蚀钢筋混凝土梁数值模拟[J]. 工业建筑, 2008, 36(增刊 1): 884-886. Ding Jihua, Li Yonghe, Hu Xianfeng. Numerical simulation of stirrup corroded reinforced concrete beam [J]. Industrial Building, 2008, 36(Suppl 1): 884-886. (in Chinese)