

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.007

型钢混凝土应力传递与黏结破坏机理分析

伍凯¹, 曹平周¹, 薛建阳², 赵鸿铁², 葛鸿鹏³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 中国建筑西北设计研究院, 陕西 西安 710003)

摘要:以型钢混凝土标准推出试验为基础, 分析型钢与混凝土之间的黏结性能与应力传递。在考虑型钢与混凝土之间三维空间黏结作用效果的基础上, 建立推出试验的力学桁架模型, 该桁架模型可以较好地反映型钢混凝土各种黏结破坏形态的破坏机理。混凝土强度、型钢翼缘的保护层厚度、配箍率、型钢的锚固长度是影响型钢与混凝土之间黏结强度的主要因素, 利用桁架模型分析了这些因素对黏结强度的影响, 得出以下结论: 黏结强度随着混凝土强度的增大而提高; 随着型钢翼缘保护层厚度的增加, 混凝土保护层所能承担的拉力逐渐增大, 极限荷载和黏结强度相应提高; 配箍率的增加可以有效提高黏结破坏后的残余黏结力; 随着型钢锚固长度的增加, 试件能承受的极限荷载增大, 型钢与混凝土接触面的黏结强度减小。

关键词: 型钢混凝土; 应力传递; 黏结应力; 黏结破坏机理; 桁架模型

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)01-0037-05

Analysis of stress transfer and bond failure mechanism of steel reinforced concrete

WU Kai¹, CAO Pingzhou¹, XUE Jianyang², ZHAO Hongtie², GE Hongpeng³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
3. China Northwest Building Design Research Institute, Xi'an 710003, China)

Abstract: Bond performance and stress transfer between steel and concrete were analyzed based on the standard push-out test of steel reinforced concrete specimens. A mechanical truss model, which was put forward based on the three-dimensional bond effect, was established and used to illuminate various bond failure patterns of push-out specimens. Strength of concrete, the depth of the concrete cover of steel flange, the reinforcement ratio, and the anchorage length of shaped steel are the main factors that affect the bond strength between steel and concrete. The mechanical truss model was utilized to analyze the influences of these factors. The results show that the bond strength increases with the strength of concrete; the bond strength and the ultimate load are enhanced with the increase of the depth of the concrete cover of steel flange; the arrangement of more stirrups can improve the residual bond strength after bond cracking, which is mainly due to the restriction of stirrups on cracks; and the ultimate load of specimens increases, while the bond strength decreases, with the increase of the anchorage length of shaped steel.

Key words: steel reinforced concrete; stress transfer; bond stress; bond failure mechanism; truss model

型钢混凝土结构是由力学性能截然不同的2种材料组成, 黏结作用使两者能够共同受力^[1-2]。这种作用实现了混凝土与型钢之间的应力传递, 从而在型钢与混凝土中建立起结构承载所需的工作应力。外荷载作

收稿日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51208175, 50978217); 江苏省建设厅科技项目(2006-12); 中国博士后基金(2012M511186); 中央高校基本科研业务费专项(2011B07714)

作者简介: 伍凯(1980—), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事钢与混凝土组合结构研究。E-mail: wukai19811240@yahoo.com.cn

用下,混凝土与型钢之间会产生由两者变形差引起的相对滑移。与钢筋混凝土结构相似,型钢与混凝土之间的黏结作用是型钢混凝土结构承载受力的基本前提,黏结滑移性能是型钢混凝土结构理论中最重要的基本问题。黏结裂缝的出现与发展不仅会降低构件的受力性能,而且会导致混凝土的严重损伤^[3-6]。

出于对型钢混凝土黏结滑移的不同考虑,各国关于型钢混凝土结构的规范与标准存在较大差异:日本的规范是基于累加强度的设计方法,它完全忽略混凝土与型钢共同工作的有利影响,计算结果偏于保守;前苏联所采用的计算方法是将型钢离散为钢筋,认为由型钢构成的劲性钢筋能与混凝土共同工作直到构件破坏,忽略了型钢混凝土结构在受力后期明显的黏结滑移现象,计算结果偏于不安全;欧美的设计规范主要是以试验与数值分析为基础的经验公式。笔者以型钢混凝土标准推出试验为基础,研究型钢与混凝土之间的黏结性能与应力传递。

1 推出试验的应力传递分析

一般认为型钢与混凝土的黏结作用主要由化学胶结力、摩擦阻力和机械咬合力 3 部分组成。与钢筋相比,型钢与混凝土的接触面积大,且为空间构件,截面形状相对复杂,因此型钢与混凝土之间的黏结必须考虑 3 个方向(纵向、横向和法向)的作用,而现有的研究主要集中在纵向的黏结作用,没有或很少考虑接触面法向与横向的相互作用^[7-9]。笔者通过标准推出试验(push-out test)建立型钢混凝土的应力传递模型,用于分析型钢与混凝土之间的黏结作用。

图 1 为推出试验的应力传递模型。当轴向压力较小时,型钢与混凝土尚未产生滑移,型钢与混凝土的接触面上存在沿纵向的相对运动趋势,此时化学胶结力发挥作用(这里的化学胶结力包括接触表面的静摩擦阻力);随着轴向压力的增大,型钢与混凝土之间产生相对滑移,此时化学胶结力失效,机械咬合力产生,接触表面的静摩擦阻力由滑动摩擦阻力取代。型钢在轴向压力作用下的泊松效应将在型钢和混凝土之间产生相互挤压作用,而挤压力的存在是产生摩擦阻力和机械咬合力的重要条件。型钢通过接触面上纵向的黏结力 τ 与法线方向的挤压力 σ_c 在混凝土内部形成具有一定倾角的压应力流,外部荷载通过压应力流由型钢传递到混凝土并最终达到底部支座,与底部的支撑力平衡。型钢沿纵向逐步将轴向压力传递到混凝土,因此型钢的泊松效应自上而下逐步减小,型钢与混凝土的挤压作用也呈现从上到下递减的现象,这必然导致压应力流沿纵向存在着较为严重的不均匀性,靠近上端部(荷载施加端)的压应力流较大,靠近底部支座压应力流较小。压应力流的不均匀性也反映出在整个推出试验过程中黏结应力分布不均匀。国内外关于型钢混凝土黏结性能的试验研究均表明,在推出受力状态下,型钢的应变沿锚固长度呈指数分布,型钢应力达不到屈服强度,一般处于弹性阶段,型钢应力呈指数分布。黏结应力是型钢应力的微分,同样呈指数分布,但是当荷载增大到一定程度时,黏结应力沿锚固长度的分布趋于常数^[10-11]。

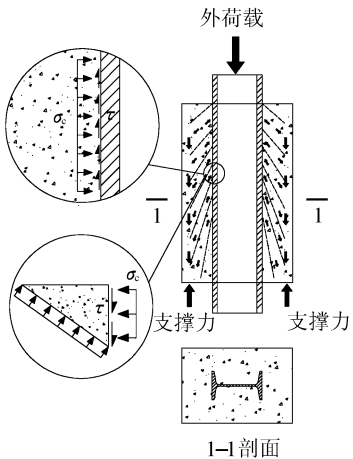


图 1 标准推出试验应力传递模型
Fig. 1 Stress transfer model in standard push-out test

2 型钢混凝土的黏结破坏过程及其破坏机理

2.1 黏结破坏过程

以型钢混凝土推出试验来表述型钢混凝土的黏结破坏过程。试验开始阶段,荷载值相对较小,加载端和自由端均无滑移产生。当荷载增大到最大荷载的 40% ~ 80% 时,加载端出现滑移,翼缘混凝土保护层厚度较小的试件在加载端侧面出现裂缝,而保护层较大的试件未出现裂缝。继续增加荷载,加载端滑移得到充分发展,裂缝迅速扩展,从加载端贯通至自由端,并且在加载端和自由端形成细小的分支裂缝,而其他侧面则出现新的纵向劈裂裂缝。当达到最大荷载时,荷载突然下降 20% ~ 40%,加载端滑移迅速发展,自由端也开始滑移。随着加载端和自由端滑移的迅速增加,荷载下降却相对缓慢,最后趋于水平,形成一个明显的台阶,此时裂缝发展迅速,裂缝宽度逐渐加大,侧面的分支裂缝相互贯通,最后加载端角部混凝土出现大片剥落。

2.2 黏结破坏机理

对于型钢混凝土黏结破坏时的裂缝形态主要有图 2 所示的 5 种方式。为了更好地说明型钢混凝土黏结破坏机理,图 3 在应力传递模型的基础上给出了推出试验的桁架模型,以压杆表示压应力流,箍筋作为拉杆,而纵筋在不同位置表现出不同的拉压特性。纵筋的应力由两部分组成:型钢顶面的轴心压力与混凝土底部的支持力形成力偶,因此混凝土承担一定的弯矩,这使纵筋具有一定的拉应力 σ_{st} ;压应力流在竖向的分力使纵筋承担了一定的压应力 σ_{sc} , σ_{sc} 在混凝土顶面为 0,自上而下逐渐增大, $\sigma_{st}-\sigma_{sc}$ 即为纵筋的实际应力。靠近加载端, σ_{sc} 较小, $\sigma_{st}-\sigma_{sc}>0$,纵筋受拉并表现出“悬吊”作用,此时同截面混凝土沿轴线方向同样承担拉应力,导致试件由加载端开始滑移;靠近支撑端, σ_{sc} 增大, $\sigma_{st}-\sigma_{sc}<0$,纵筋受压,相应位置处的黏结滑移相对滞后。图 3 给出了横截面上钢与混凝土的相互挤压以及由此产生的截面应力,压应力流由型钢翼缘外侧传递到箍筋的角点,使型钢外侧混凝土沿 2 个正交的水平方向产生拉力,拉力是混凝土黏结开裂的主要原因。混凝土开裂前主要由型钢外侧混凝土充当拉杆的作用,而开裂后则主要由箍筋承担。

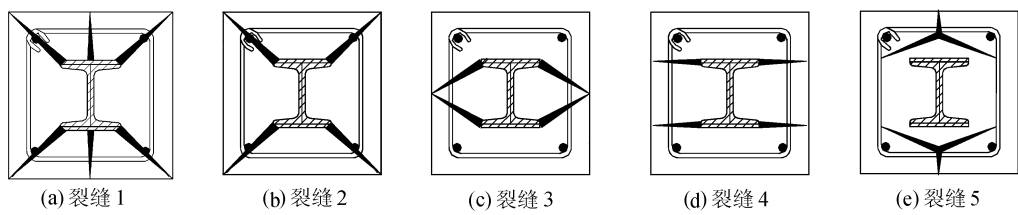


图 2 型钢混凝土黏结破坏裂缝
Fig. 2 Bond cracks of steel reinforced concrete

黏结破坏的产生与型钢和混凝土接触面上纵向黏结力的大小有直接的关系。如果纵向黏结力 $\tau=0$,此时型钢与混凝土相互之间没有任何约束,当压力作用在型钢顶面时,型钢和混凝土可以自由地相互运动,这时不存在 σ_c ,也不存在因相互挤压作用而产生的水平拉应力,因此不会导致黏结破坏的产生;随着型钢与混凝土黏结作用的增强,纵向黏结力 τ 增大,如果不考虑由于 τ 的增大而导致压应力流角度的改变,那么 σ_c 线性增大,水平拉应力相应增大,更容易导致黏结破坏的发生。由于压应力流沿纵向存在着较为严重的不均匀性,由压应力流产生的水平方向的拉力沿纵向同样是不均匀的。靠近加载端的压应力流较大,型钢外侧混凝土的 2 个正交方向有较大的拉力,因此推出试件的破坏多产生在加载端,混凝土达到抗拉强度而产生的劈裂是破坏的主要原因。

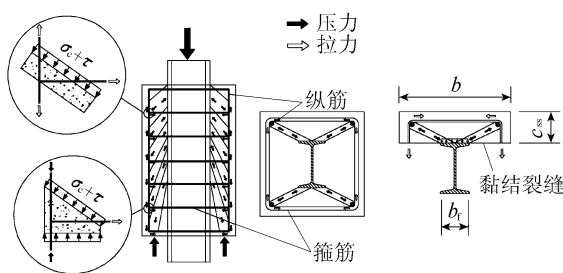


图 3 推出试验的桁架模型
Fig. 3 Truss model of bond failure

桁架模型可以合理说明型钢混凝土黏结破坏的 5 种方式:在型钢翼缘肢尖与截面相应角点的连线方向,混凝土在水平方向处于双向受拉的应力状态,是黏结裂缝发展的主要方向,而此方向黏结裂缝的充分发展正是导致角部混凝土剥落的主要原因,如图 2(a)(b)所示;型钢翼缘与混凝土接触面的黏结作用(更准确地说应该是型钢与混凝土之间沿翼缘法线的黏结力)相对于混凝土抗拉强度较小,如果将其忽略不计,则此界面上单侧实际承担拉力的混凝土截面宽度仅为 $(b-b_f)/2$,其中 b 为截面宽度, b_f 为翼缘宽度。由于承担拉力的截面较小,此截面更容易产生黏结破坏,应力状态最为复杂的翼缘肢尖成为黏结裂缝的起始位置,图 2(a)到图 2(d)的黏结破坏均由翼缘肢尖处的黏结开裂导致;在正交的另一个方向上,单侧承担拉力的截面宽度为翼缘的保护层厚度 c_{ss} ,其厚度决定了这个方向是否会产生黏结裂缝,这就是型钢翼缘混凝土保护层厚度较小的试件加载端侧面较早出现裂缝的原因,而保护层较厚的试件很少出现裂缝。假定压应力流在 2 个正交方向上产生的拉力相等,则当 $c_{ss}<(b-b_f)/2$ 时存在型钢翼缘外侧混凝土保护层受拉开裂的可能,如图 2(a)(e)所示。

3 黏结强度的主要影响因素

在型钢混凝土黏结滑移试验研究中,一般取外加荷载在型钢与混凝土连接面总面积上的平均值为黏结

应力,对应的取外加荷载达到最大荷载时的黏结应力为型钢混凝土的黏结强度。由于型钢混凝土的实际黏结应力沿锚固长度方向是变化的,因此所谓的黏结强度实际为型钢与混凝土的平均黏结强度,但在工程应用中,一般以此强度作为型钢混凝土黏结强度。混凝土强度、型钢翼缘的保护层厚度、配箍率、型钢的锚固长度是影响黏结强度的主要因素^[12-13]。下面以型钢混凝土的黏结破坏机理分析和解释不同因素对黏结强度的影响。

a. 混凝土强度。型钢混凝土的黏结破坏主要由型钢外侧混凝土的受拉破坏控制,型钢外侧混凝土所能承受的拉力决定了最大荷载的大小,因此型钢混凝土黏结强度与混凝土抗拉性能存在密切关系,随着混凝土强度的增大而提高。

b. 型钢翼缘的保护层厚度。型钢翼缘的保护层厚度决定了混凝土对型钢的握裹作用。随着型钢翼缘保护层厚度的增加,混凝土保护层所能承受的拉力逐渐增大,极限荷载和黏结强度相应提高。当保护层增加到一定程度将不会产生沿型钢翼缘外侧的混凝土受拉破坏,黏结破坏的裂缝形态发生变化。

c. 配箍率。在混凝土受拉开裂之前,配箍率对黏结应力的作用不明显。在混凝土受拉开裂后,箍筋同未开裂的混凝土共同承担拉力,在一定程度上延缓了裂缝的发展并保证了混凝土对型钢的握裹作用,因此配箍率的增加可以有效提高黏结破坏后的残余黏结力。

d. 型钢锚固长度。随着型钢锚固长度的增加,试件能承受的极限荷载增大,而钢与混凝土接触面的黏结强度减小。随着型钢锚固长度的增加,在更大范围内存在黏结作用,沿纵向有更多的压应力流产生,因此最大荷载增大;另一方面,应压力流的不均匀性随型钢锚固长度的增加而更加严重,导致黏结应力沿纵向分布不均匀,更多的接触面积在黏结破坏时无法充分发挥黏结作用,因此即使最大荷载增大,黏结强度也会降低。

4 结 语

a. 型钢与混凝土之间的黏结作用是型钢混凝土结构承载受力的基本前提。为了更好地说明型钢与混凝土之间的黏结作用,建立了标准推出试验的应力传递模型,型钢通过接触面上切线方向的黏结力与法线方向的挤压力在混凝土内部形成具有一定倾角的压应力流,外部荷载通过压应力流由型钢传递到混凝土并最终达到底部支座。

b. 在应力传递模型的基础上给出了推出试验的桁架模型,利用桁架模型研究了型钢混凝土黏结破坏机理,分析了型钢混凝土黏结破坏5种裂缝形态的成因。混凝土内部的压应力流使型钢外侧混凝土沿2个正交的水平方向产生拉应力,而拉应力的产生是混凝土黏结开裂并最终导致黏结破坏的主要原因。

c. 混凝土强度、型钢翼缘保护层厚度、配箍率、型钢的锚固长度是影响黏结强度的主要因素,通过型钢混凝土黏结破坏机理分析了这些因素对黏结强度的影响,得出以下结论:黏结强度随着混凝土强度的增大而提高;随着型钢翼缘保护层厚度的增加,极限外荷载和黏结强度相应提高;配箍率的增加可以提高黏结破坏后的残余黏结力;黏结强度随着型钢锚固长度的增加而降低。

参考文献:

- [1] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [2] 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土黏结滑移理论及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [3] 何建涛, 马怀发, 陈厚群, 等. 混凝土损伤本构理论研究综述[J]. 水利水电科技进展,2010,30(3):89-94. (HE Jiantao, MA Huaifa, CHEN Houqun, et al. Research review on concrete damage constitutive theory[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(3):89-94. (in Chinese))
- [4] XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, YANG Yong, et al. Analysis on the behaviors of bond-slip between the shape steel and the concrete by push-out test[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology:Nature Science Edition, 2007, 39(4): 320-326.
- [5] BRYSON J, MATHEY R G. Surface condition effect on bond strength of steel beams embedded in concrete[J]. Journal of ACI, 1962, 59(3): 397-406.
- [6] 赵鸿铁, 杨勇, 薛建阳, 等. 型钢混凝土黏结滑移力学性能研究及基本问题[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 74-86. (ZHAO Hongtie, YANG Yong, XUE Jianyang, et al. A review on the bond-slip mechanical behaviors of SRC structures[J]. Advanced in Mechanics, 2003, 33(1): 74-86. (in Chinese))

[7] LI Junhua, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie. Experimental study on slip behavior between shaped steel and concrete in SRC columns under cyclic reversed loading[J]. Journal of Xi' an University of Architecture and Technology :Nature Science Edition, 2008, 40(3) : 348-353.

[8] 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.

[9] 王彦宏. 型钢混凝土偏压柱黏结滑移性能及应用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004.

[10] 杨勇, 郭子雄, 薛建阳, 等. 型钢混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4) : 1-9. (YANG Yong, GUO Zixiong, XUE Jianyang, et al. Experiment study on bond slip behavior between section steel and concrete in SRC strcutures[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4) : 1-9. (in Chinese))

[11] 刘加荣, 胡夏闽, 薛伟. 型钢混凝土黏结滑移研究综述[J]. 钢结构, 2008, 23(8) :26-30. (LIU Jiarong, HU Xiamin, XUE Wei. Study on the bond-slip of SRC structures[J]. Steel Construction, 2008, 23(8) : 26-30. (in Chinese))

[12] 李俊华. 低周反复荷载作用下型钢高强混凝土柱受力性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.

[13] ROEDER C W, ROBERT C. Shear connector requirements for embedded steel sections[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(2) :142-152.

· 简讯 ·

河海大学新增一支长江学者创新团队

河海大学继刘汉龙教授和余钟波教授分别领衔的两支团队入选教育部“长江学者创新团队发展计划”之后,又新增一支长江学者创新团队。

在教育部近日公布的 2012 年度“长江学者创新团队发展计划”入选名单中,河海大学以长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者戴会超教授为学术带头人申报的“长江上游大型水库群生态环境效应与调控”团队入选,成为河海大学第三支长江学者创新团队。

由戴会超教授领衔的创新团队是一支多学科交叉融合的高水平学术团队,将瞄准世界水利学科发展的前沿和趋势,针对近年来我国水利水电工程建设和运行中的生态环境问题开展基础性、前瞻性的创新研究,以提升我国在该领域的整体水平。

(本刊编辑部供稿)