

# 型钢混凝土粘结滑移力学性能研究及基本问题\*

赵鸿铁 杨 勇 薛建阳 王彦宏 林艺勇

西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055

**摘 要** 根据国内外关于型钢混凝土粘结性能的理论 and 试验研究成果, 对型钢混凝土粘结滑移力学性能的研究发展和现状进行了全面地综述分析. 首先, 阐述了型钢混凝土粘结滑移性能研究的主要问题及理论和实际意义; 其次, 介绍了型钢混凝土粘结滑移的基本概念、基本方程、基本机理及相关理论, 并详尽概括了型钢混凝土粘结滑移性能研究的发展和已有成果, 对现有研究的不足以及亟待解决的问题和研究前景进行了分析和总结. 本文着重介绍了型钢混凝土粘结强度的国内外研究现状, 并对型钢混凝土粘结滑移本构关系研究中目前存在的问题进行了综合分析.

**关键词** 型钢混凝土结构, 粘结滑移性能, 粘结强度, 粘结滑移本构关系

## 1 型钢混凝土粘结性能研究的意义

型钢混凝土 (steel reinforced concrete, SRC) 结构是指在混凝土中主要配置型钢, 配有一定的构造钢筋及受力筋的结构, 是钢与混凝土组合结构的一种主

要形式. 根据不同的配钢形式, 型钢混凝土结构可以分为实腹式配钢型钢混凝土和空腹式配钢型钢混凝土两大类. 目前在抗震结构中多采用实腹式配钢型钢混凝土构件, 常用的实腹式型钢混凝土柱、梁和节点等构件截面形式, 见图 1<sup>[1~5]</sup>.

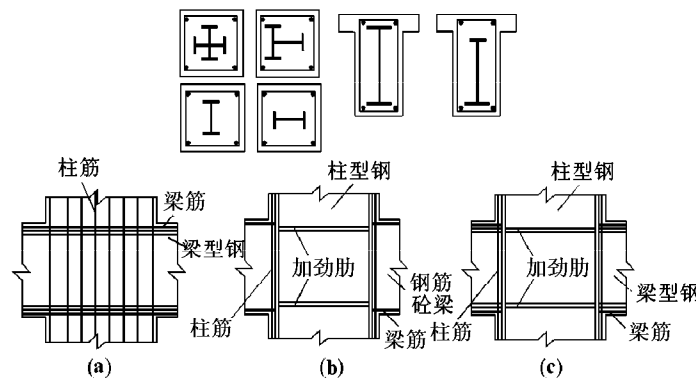


图 1 型钢混凝土梁、柱和节点截面形式

型钢混凝土结构具有承载力高、刚度大以及延性和耗能性能良好的优点, 由型钢混凝土构件组成的结构具有良好的抗震性能, 因此特别适用于地震区, 尤其是地震区的高层及超高层建筑中采用型钢混凝土结构更具优越性, 在欧美国家, 型钢混凝土柱的应用非常广泛<sup>[6~11]</sup>.

型钢混凝土结构中型钢与混凝土之间的自然粘结或剪切连接件是保证型钢混凝土结构或构件中型钢与混凝土整体共同工作的基础, 是型钢混凝土结构承载受力的前提. 正是由于型钢混凝土之间的粘结作用, 型钢才能与混凝土共同工作、共同承担荷载, 成为一种真正的“组合”结构, 见图 2<sup>[4]</sup>. 国内外型钢混

收稿日期: 2001-11-02, 修回日期: 2002-04-27

\* 国家自然科学基金 (50108013), 陕西省教育厅自然科学基金专项基金 (01JK173) 资助项目

凝土有关试验研究表明, 设置足够数量的剪切连接件的实腹式型钢混凝土构件, 从加荷直到构件破

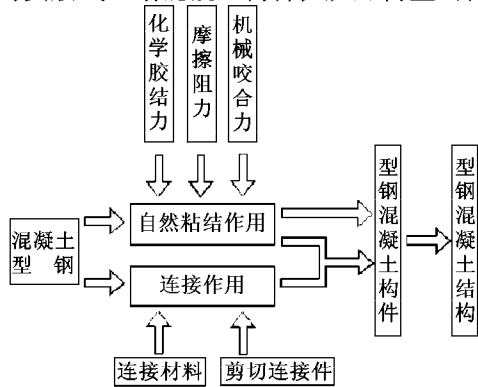


图 2 型钢混凝土结构的构成示意图

坏, 基本能保证构造的整体共同工作; 未设置剪切连接件的构件, 在荷载约达到极限荷载的 80% 之前, 型钢与混凝土共同工作, 在 80% 极限荷载以后, 二者间有较大的相对滑移产生, 变形不能协调一致<sup>[1~4]</sup>。但是加设剪切连接件会加大现场施工工作量、延长施工工期、提高工程造价。因此, 合理的确定型钢混凝土的粘结性能, 在设计中考虑型钢混凝土之间的粘结作用, 采取合理的设计计算理论, 减少 (或尽量避免) 剪切连接件的设置, 会大大简化施工并减小施工费用, 极大地缩短现场施工工期, 在经济上定将取得显而易见的效益<sup>[1]</sup>。

型钢与混凝土之间的粘结性能是影响型钢混凝土构件的受力性能、破坏形态、承载能力、裂缝和变形的主要因素。同时, 有限单元法的发展和完善, 为各种复杂的型钢混凝土结构和构件的分析提供了新的手段, 但是也相应地提出了一些亟待解决的问题, 其中之一就是型钢与混凝土的粘结滑移问题<sup>[6]</sup>。与钢筋混凝土结构中钢筋与混凝土之间的粘结的数值模拟相似, 型钢混凝土之间粘结的数值模拟非常重要, 主要表现在建立合理的粘结单元和确定合理的粘结刚度。因此, 对于型钢混凝土结构, 要合理地建立一整套的强度、刚度、变形和裂缝开展程度的精确计算理论和分析方法, 并采用有限元法对复杂结构进行准确的分析计算, 就必须对型钢混凝土的粘结性能进行深入的研究。总而言之, 型钢与混凝土的粘结是型钢混凝土结构理论中最基本的重要问题, 也是工程界较为关心的问题, 对型钢混凝土结构中型钢与混凝土之间的粘结问题亟待深入研究。

## 2 型钢混凝土粘结滑移研究的基本问题

型钢混凝土结构中, 两种性能不同的材料能够共同受力是由于它们之间存在粘结作用, 这种作用使型钢混凝土连接面上型钢与混凝土能够实现应力传递, 从而在型钢与混凝土中建立起结构承载所需的工作应力。伴随粘结作用, 型钢与混凝土之间还会产生沿连接面上的相对滑移, 这是由二者的变形差引起的。型钢与混凝土之间的粘结作用是型钢混凝土结构承载受力的基本前提, 粘结滑移性能是型钢混凝土结构理论中最重要的基本问题。在型钢混凝土结构中, 与粘结滑移性能相关的主要问题有: (1) 型钢混凝土构件计算理论; (2) 型钢混凝土构件中剪切的传递; (3) 有限元分析中的型钢与混凝土粘结作用的数值模拟; (4) 考虑粘结滑移的型钢混凝土结构中的锚固问题。

### 2.1 型钢混凝土结构和构件计算理论

型钢混凝土结构与钢筋混凝土结构的显著区别之一是型钢与混凝土的粘结作用远远小于钢筋 (尤其是变形钢筋) 与混凝土的粘结作用。国内外的试验研究表明, 型钢与混凝土的粘结作用只相当于光圆钢筋与混凝土的粘结作用的 45%<sup>[1]</sup>, 因此在钢筋混凝土构件中都认为钢筋与混凝土共同工作直至构件破坏, 而在型钢混凝土结构中, 由于粘结滑移的存在将直接影响到构件的受力性能、破坏形态、构件承载能力、裂缝和变形计算。而正是由于对型钢混凝土粘结滑移的不同考虑, 各国关于型钢混凝土结构的规范和规程存在较大的差异。日本的规范《钢骨钢筋混凝土结构计算标准及解说》<sup>[12]</sup> 是基于累加强度的设计方法, 它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, 并且当型钢不对称时, 计算精度不高。中国的行业标准《钢骨混凝土结构设计规程》(YBJ9082-97)<sup>[13]</sup> 类似于日本的规范。而前苏联规范——苏联劲性钢筋混凝土结构设计指南 (С И 3-78) 所采用的计算方法与钢筋混凝土结构相同, 它将型钢离散为钢筋, 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为止, 忽略了型钢混凝土结构在受力后期表现相当明显的粘结滑移现象, 而按完全协同工作考虑, 计算显然不安全。我国新颁布的行业标准《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138-2001)<sup>[14]</sup> 也是基于型钢与混凝土完全协同工作考虑的, 并用钢筋混凝土的公式计算强度。而欧美主要是以试验与数值分析为基础的经验公式。英国 CP110 规范、美国钢

结构协会 (AISC)1986 年荷载和抗力系数法 (LRFD) 和欧洲共同体标准 (EUROCODE4) 中关于组合柱的计算方法就是基于试验和数值分析方法建立的, 由于可靠度水准、材料基本强度取值不同, 有些公式仅适用于对称截面, 并且精度较低。

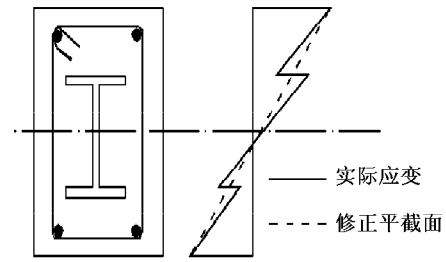


图 3 修正平面截面假定示意图

我国自 20 世纪 80 年代开始, 对型钢混凝土结构进行了一系列研究, 西安建筑科技大学在 1985 年~1991 年期间进行了型钢混凝土梁、柱及节点等 112 个试件的试验<sup>[15~19]</sup>, 这些试件除了梁端配置少量剪切连接件 (栓钉) 外, 基本上都是未设置剪切连接件的试件, 对型钢混凝土梁、柱及节点正截面和斜截面承载力计算等内容进行了研究, 并进行了非线性全过程分析. 研究表明, 型钢混凝土构件破坏时平截面假定不再成立. 冶金部建筑研究总院也对型钢混凝土梁和柱进行了试验研究, 指出当荷载达到极限荷载的 80% 以前, 型钢与混凝土之间的粘结滑移相对较小, 之后则出现较大的粘结滑移, 平截面假定显然不能成立. 此外中国建筑科学研究院、清华大学、郑州工学院、西南交通大学<sup>[20]</sup>、东南大学<sup>[21~25]</sup> 和湖南大学等科研单位也对型钢混凝土结构进行了开拓性的研究工作, 并取得较多的研究成果. 他们在研究中都普遍承认型钢与混凝土之间存在滑移, 而且对型钢混凝土构件受力性能有显著影响。

虽然国内外对于型钢混凝土结构的研究较为重视, 但由于开展时间较短, 取得的成果多集中于构件的强度、刚度等的近似计算, 特别对在承载能力后期型钢与混凝土之间较为明显的粘结滑移机理, 由于其极为复杂, 研究难度较大而很少有人探究, 所提出的设计计算方法也没有较好地考虑粘结滑移的影响, 仍采用平截面假定或稍加以修正 (图 3), 而没有充分的理论依据. 应该看到这与实际情况是有较大区别的, 因此, 通过试验研究, 合理确定型钢混凝土之间的相对滑移, 对受荷后期的受力性能、破坏形态、承载能力、计算假定、裂缝和变形计算采用考虑滑移的计算理论, 建立一套合理的型钢混凝土计算理论和方法, 是很有必要的。

## 2.2 型钢混凝土构件中剪切传递

在高层和超高层建筑的型钢混凝土框架结构中, 作用在梁上的竖向荷载 (包括恒载和活荷载) 是通过型钢与混凝土之间的粘结作用将剪切传递到混凝土中, 最终共同承载受力, 见图 4. 梁上的内力也是通过粘结作用传递到节点与柱的混凝土中. 为了充分发挥混凝土的承载作用, 就应该保证型钢与混凝土之间的粘结作用足够大, 足以使梁端的剪切能够充分地传递到混凝土中. 因此, 合理地确定型钢混凝土的自然粘结强度, 并根据试验研究和计算分析所确定的型钢混凝土结构中不同位置对粘结强度的不同要求, 定量地确定型钢的锚固长度, 以及剪切连接件的设置部位、设置方式和设置数量具有较大的理论意义和实用价值。

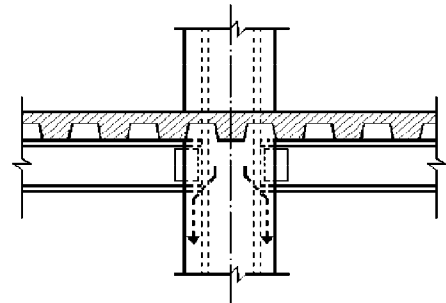


图 4 典型的梁柱传力示意图

## 2.3 有限元分析中的粘结滑移本构关系

与钢筋混凝土有限元分析相似, 在型钢混凝土有限元分析中, 为了考虑型钢与混凝土之间存在的粘结滑移性能, 须在二者引入连接单元 (link element)<sup>[26~36]</sup>. 型钢与混凝土之间的连接单元类型有弹簧单元、厚度为零的节理单元以及考虑一定厚度滑移层的节理单元<sup>[37~39]</sup>, 见图 5. 无论是采用何种形式的连接单元, 都须有型钢混凝土粘结破坏的强度准则, 同时必须有型钢混凝土的粘结滑移本构关系, 这是型钢混凝土有限元分析中的关键问题. 因此, 采用合理的试验量测手段, 得出型钢混凝土连接面上内部相对滑移和粘结应力, 并建立相应的粘结滑

移本构关系和粘结破坏强度准则,对于型钢混凝土有限元分析是必须的,这是型钢混凝土研究的一个重要课题。

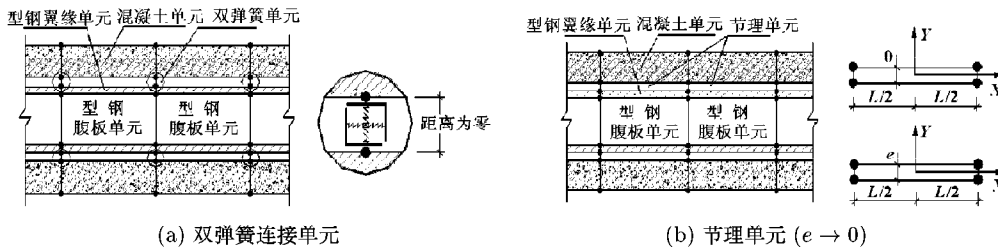


图 5 连接单元 (link element) 类型

切连接件的办法加强型钢混凝土构件的锚固作用(图6),而没有充分考虑型钢混凝土之间的粘结作用。因此,研究型钢混凝土构件中的粘结作用,并建立剪切连接件的构造和设计计算理论,对粘结锚固进行可靠度分析,优化结构设计,使设计更加经济和合理。

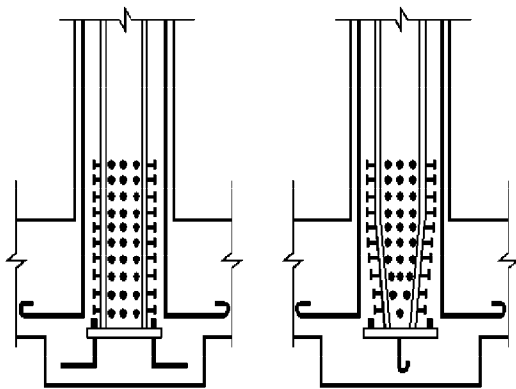


图 6 埋入式柱脚锚固示意图

### 3 型钢混凝土粘结滑移的基本机理

国内外对钢筋混凝土的粘结滑移性能的试验研究开展较早,而且研究的内容很广泛,取得了比较成熟的研究成果<sup>[40~49]</sup>。国内外关于型钢混凝土粘结滑移性能的研究还相对较少,目前取得的研究成果主要集中于型钢混凝土粘结强度和粘结机理的研究。

已有研究成果表明,型钢与混凝土之间的粘结和光圆钢筋与混凝土之间的粘结相类似,主要由三部分组成:混凝土中水泥胶体与型钢表面的化学胶结力,型钢与混凝土接触面上的摩擦阻力和型钢表面粗糙不平的机械咬合力。化学胶结力主要存在于型钢与混凝土表面发生相对粘结滑移之前,当连接面上发生相对粘结滑移后,水泥晶体被剪断或挤碎,化学胶

### 2.4 型钢混凝土结构中的粘结锚固

对于型钢混凝土结构,锚固问题主要存在于型钢混凝土梁柱节点、柱脚、简支梁梁端以及剪切墙中。在目前的设计应用中,都是按照构造要求采用加设剪

结力大大降低,对于型钢而言,化学胶结力在总粘结力中的比重远远大于在光圆钢筋中的比重。当化学胶结力退出工作后,粘结力就主要依靠摩擦阻力和机械咬合力来维持,摩擦阻力主要取决于型钢与混凝土界面上的正应力和摩擦系数,主要与型钢混凝土构件的受力和横向约束(混凝土凝固时的内收缩、构件的混凝土保护层厚度和横向配箍率等)及型钢的表面特性有关。机械咬合力则主要取决于型钢表面状况。

由于型钢混凝土构件中型钢的几何形状与受力性能的特殊性,粘结性能又表现出很大的特殊性和复杂性。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,型钢混凝土之间的粘结严格地讲,必须考虑三个方向(纵向、横向和法向)的粘结作用。同时,由于混凝土对型钢翼缘和腹板的握裹性能存在较大的差别,相应的型钢翼缘和腹板的粘结滑移本构关系也存在差异,因此在有限元分析中,型钢翼缘和腹板与混凝土之间的粘结滑移本构关系应该分别给出。国内外试验研究表明,与钢筋混凝土相似,同一方向的粘结滑移刚度沿着型钢混凝土的锚固长度方向存在变化,即粘结滑移刚度随位置的变化而变化。在有限元分析中,一般是设法得到纵向的粘结滑移本构关系,然后考虑一定的相互关系,确定横向和法向的粘结滑移刚度,对型钢混凝土粘结滑移进行二维或三维模拟<sup>[1]</sup>。因此,型钢混凝土粘结滑移本构关系主要是指型钢混凝土连接面上的纵向剪应力 $\tau$ 和纵向相对滑移 $S$ 之间的相互关系。由于型钢混凝土的粘结滑移刚度随锚固位置发生变化,因此,为了确定不同锚固位置的粘结滑移刚度,就必须首先研究粘结应力 $\tau$ 和相对滑移 $S$ 的大小及分布规律,从而建立考虑位置变化的粘结滑移本构关

系.

## 4 型钢混凝土粘结滑移的基本概念

### 4.1 平均粘结强度

在型钢混凝土粘结滑移试验研究中,一般取外加荷载在型钢与混凝土连接面的平均值为粘结应力,对应的取外加荷载达到极限荷载时的粘结应力为型钢混凝土的粘结强度,由于型钢混凝土的实际粘结应力沿锚固长度方向是变化的,因此,这一粘结强度实际为沿锚固长度上的型钢混凝土的平均粘结强度,但在工程应用中,一般以此强度作为型钢混凝土粘结强度<sup>[50~55]</sup>.

### 4.2 局部最大粘结强度

由于型钢混凝土粘结应力沿锚固长度是变化的,所以一般取局部的最大粘结应力值为局部最大粘结强度,这主要是作为粘结裂缝开展的控制条件,可用于计算粘结破坏的开裂荷载<sup>[54]</sup>.

### 4.3 残余粘结强度

型钢混凝土结构中的粘结强度在型钢与混凝土之间的化学胶结力完全丧失后,只有摩擦阻力和机械咬合力作贡献,粘结强度保持一定的残余值,并不随粘结滑移的发展而降低,习惯上称此粘结强度为残余粘结强度.

### 4.4 粘结滑移本构关系

型钢混凝土结构和构件在受力后,由于粘结内裂缝以及混凝土劈裂裂缝的存在,型钢混凝土粘结破坏的机理较为复杂,在型钢混凝土的连接面区域内,应力应变状态非常复杂.为便于分析,一般都把型钢周围的这一具有特殊力学性质的混凝土层(滑移层)的变形归为型钢混凝土连接面上的相对滑移,并根据粘结应力 $\tau$ 和粘结滑移 $S$ 的对应关系,建立型钢混凝土的粘结滑移的本构关系,即粘结滑移的 $\tau$ - $S$ 关系,粘结应力是指型钢表面积上的剪应力,滑移则是型钢与连接面上对应位置混凝土的相对位移.粘结滑移本构关系是型钢混凝土有限元分析的关键.

## 5 型钢与混凝土粘结滑移研究现状

国内外关于钢与混凝土粘结性能的研究大都是集中于研究变形钢筋与混凝土的粘结性能,而变形

钢筋与混凝土之间的粘结和型钢与混凝土之间的粘结相差很大,只有早期的一些关于光圆钢筋与混凝土的粘结性能的试验研究可以为型钢与混凝土的粘结滑移机理的分析提供一些借鉴.自上世纪中期,随着型钢混凝土结构的发展和应用,关于型钢混凝土粘结性能的研究也逐渐得到了开展.

### 5.1 钢板与混凝土粘结强度的研究

日本的坪井善胜等<sup>[50]</sup>在1950年为了配合日本规范《钢筋钢筋混凝土结构设计标准及解说》的编制,采用钢板拉拔试验对型钢与混凝土之间的粘结强度进行了研究.在试验中考虑了混凝土强度、混凝土保护层厚度、横向配箍率和纵向钢筋数量等4个因素,文献<sup>[50]</sup>得出型钢混凝土粘结强度较低的结论,并建议在规范中不考虑型钢混凝土的粘结作用.

西安建筑科技大学李红进行了4组钢板拉拔梁式试件的试验<sup>[51]</sup>,试验考虑了混凝土强度等级、混凝土保护层厚度、横向配箍率和纵向配钢率4个因素对粘结强度的影响.通过试验结果的统计回归,提出了型钢混凝土的平均粘结强度、极限粘结强度和残余粘结强度的计算公式,并通过对比计算,得出钢板与混凝土的粘结强度较小,相当于光圆钢筋的60%和螺纹钢筋的30%的结论.

### 5.2 型钢与混凝土粘结强度的研究

自1962年Bryson & Mathey<sup>[52]</sup>开始,国内外进行了很多关于型钢混凝土粘结性能的试验研究<sup>[44~58]</sup>,但是由于在欧美国家,型钢混凝土主要是用于柱构件,所以大多数研究又都主要注重于型钢混凝土柱中的剪切传递能力,即粘结强度的研究,而很少涉及粘结滑移本构关系的研究.

国内外关于型钢混凝土粘结强度的研究试验主要有两种类型:压入试验(push-out test),见图7(a)和短柱试验(short-column test),见图7(b).短柱试验虽然更接近于型钢混凝土柱的真实受力情况,但是压入试验能够更好地模拟粘结滑移的受力状态,而且能够较好地确定型钢混凝土粘结滑移刚度和粘结强度,是型钢混凝土粘结滑移试验研究中较常用的试验方法.

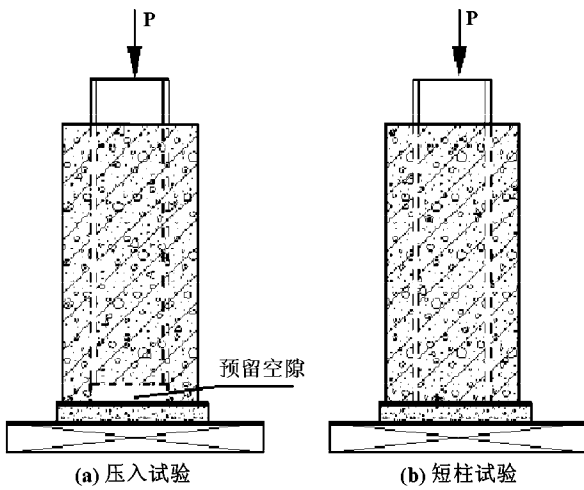


图 7 型钢混凝土粘结强度主要试验形式

最早的压入试验 (Bryson 和 Mathey 1962)<sup>[52]</sup> 主要研究了型钢表面状况对型钢混凝土粘结强度的影响. 试验结果表明, 现场喷砂 (让型钢在空气中暴露 1 个月后再喷砂处理)、喷砂后生赤锈 (喷砂后一个月后用盐溶液使型钢表面锈蚀) 两种型钢表面的平均粘结强度很接近, 但比普通锈蚀 (保持型钢表面的热轧氧化皮并在空气中自然锈蚀) 的型钢表面的平均粘结强度高 30% 左右. 但是当型钢与混凝土之间发生较大相对粘结滑移后 (自由端滑移量为 0.0254 mm), 三种表面状况的粘结强度又非常接近.

Hawkins<sup>[53]</sup> 于 1973 年进行的型钢混凝土压入试验则主要考虑混凝土浇注位置、型钢截面尺寸和横向配箍率对型钢混凝土粘结强度的影响. 试验结果表明: (1) 水平浇筑的型钢混凝土构件的粘结强度要比垂直浇筑的型钢混凝土构件的粘结强度小; (2) 在型钢混凝土发生较大的相对滑移前, 横向配箍率的大小对型钢混凝土的粘结强度影响不大, 但是当型钢混凝土发生粘结滑移后, 随着横向配箍率的增加, 型钢混凝土的粘结强度能相应地增加; (3) 当型钢锚固长度与型钢高度的比值保持不变, 型钢截面尺寸对型钢混凝土粘结性能没有明显影响.

Roeder<sup>[54]</sup> 在 1984 年所进行的型钢混凝土压入试验研究中, 首次考虑了粘结应力沿型钢锚固长度上的变化, 并在试验中通过在型钢翼缘密布电阻应变片的方法, 见图 8. 根据粘结应力与型钢翼缘应力的相互关系, 得出粘结应力的分布规律, 见图 9.

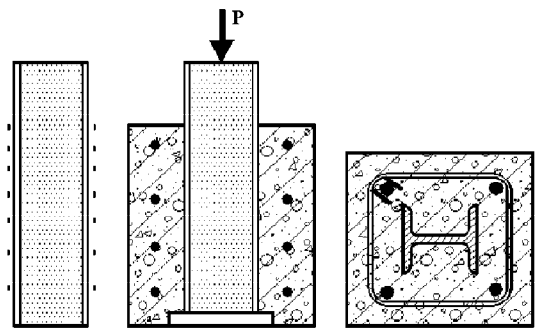


图 8 Roeder 压入试验方案

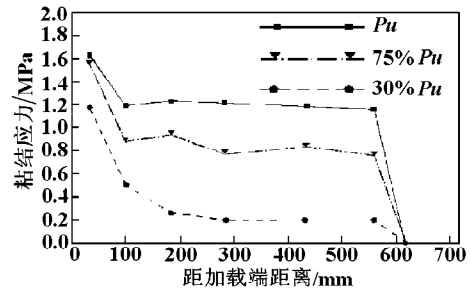


图 9 粘结应力分布规律

Roeder 的试验结果表明:

(1) Roeder 根据对 Bryson and Mathey 和 Hawkins 的试验结果进行对比分析, 并用其本人的试验结果进一步验证, 提出型钢混凝土粘结主要由翼缘与混凝土的粘结贡献的假定.

(2) 在使用荷载作用下, 型钢混凝土粘结应力在不同的锚固深度处不是相同的, 而是呈指数分布的, 随着荷载的逐步增加, 型钢混凝土粘结应力逐渐增大, 而且在型钢混凝土连接面上出现粘结裂缝并逐渐向自由端扩张. 正是由于这种粘结裂缝的开展, 当外加荷载达到极限荷载时, 型钢混凝土粘结应力沿锚固长度的分布趋于一个常数, 此时型钢混凝土沿锚固长度的粘结应力的平均值达到极限粘结强度, 但是这一极限粘结强度要比型钢混凝土连接面上的局部最大粘结强度要小, 见图 9. 这与光圆钢筋与混凝土在轴向荷载作用和扭转荷载作用下粘结试验结果很相似.

(3) 根据试验结果, 得出按翼缘与混凝土接触面积平均的局部最大粘结强度  $\tau_{bf}$  与混凝土圆柱体抗压强度  $f'_c$  的增大而增大的规律. 并得出相应的粘结应力公式

$$\tau_{bf} = 0.09 f'_c$$

考虑数据离散性, 建议了一个保守计算公式

$$\tau_{bf} = 0.09 f'_c - 0.655$$

式中,  $\tau_{bf}$  为型钢翼缘的最大粘结应力值。

(4) 为了考察型钢混凝土在风荷载和地震作用下的粘结滑移性能, Roeder 还对两个自由端已经发生滑移的试件进行了重复加载试验, 试验结果表明, 已经发生的滑移对重复加载后的试件的粘结应力分布规律影响很大, 重复加载的粘结强度比首次加载时所达到的粘结强度要降低 28%~45%。

郑州工学院孙国良<sup>[55]</sup> 为了考察型钢混凝土柱端部轴力的传递性能, 进行了一批压入试验, 在试验中主要考察了栓钉、配箍率和混凝土保护层厚度对型钢混凝土粘结强度的影响。通过对其中 4 个不设栓钉的试件的粘结强度试验结果分析, 发现当混凝土保护层厚度较小时, 粘结强度随保护层厚度的增加而增加; 而当混凝土保护层厚度较大时, 保护层厚度对粘结强度的影响不明显。并从混凝土保护层是否开裂的角度, 根据粘结应力的扩散原理建立了一个型钢混凝土临界保护层厚度

$$C_{cre} = b_f/3$$

式中  $b_f$  为型钢的翼缘宽度。

Richard Furlong<sup>[56]</sup> 将保护层混凝土视为一上下端受压而左右两边为铰支边的薄板, 并根据薄板的弹性稳定理论, 考虑混凝土受荷后期的弹塑性性能, 将混凝土切线模量  $E_t$  取一很小的值,  $E_t = 0.7 \text{ MPa}$ , 推导出型钢混凝土柱的临界保护层厚度为

$$\left(\frac{b_f}{C_{ss}}\right)_{cre} = \frac{18}{\sqrt{f'_c}}$$

式中  $f'_c$  为混凝土的圆柱体受压强度。文献 [57,58] 在对文献 [3] 的试验数据的统计回归的基础上, 系统地分析了影响粘结的主要因素, 根据粘结应力的扩散原理建立了混凝土临界保护层厚度

$$C_{cre} = 0.250 b_f \sqrt{f_t}$$

式中  $f_t$  为混凝土的受拉强度, 并且建立了型钢混凝土压入试验的局部破坏荷载和极限荷载的计算方法。文献 [59] 对型钢混凝土保护层厚度进行了综合的探讨和分析比较, 提出了混凝土临界保护层厚度的理论计算公式, 但均需进一步的试验验证。

以上关于型钢混凝土粘结性能的试验研究均表明, 型钢混凝土粘结强度随混凝土的强度增加而增加, 与混凝土强度有着密切的关系。

Hamdan 和 Hunaiti<sup>[60]</sup> 于 1991 年进行的型钢混凝土压入试验着重考察了混凝土强度、型钢表面状况和横向配箍率对型钢混凝土粘结强度的影响作用。试验结果表明混凝土的强度对型钢混凝土粘结强度没有明显的影响, 而增大横向配箍率和对型钢表面进行喷砂处理可以提高型钢混凝土的粘结强度。

Wium<sup>[61]</sup> 在 1992 年先后进行了型钢混凝土的压入试验和短柱试验。Wium 和 Lebet 在试验中着重考察了型钢混凝土的保护层厚度、横向配箍率、型钢的截面尺寸和混凝土的内收缩等 4 个因素对型钢混凝土粘结强度的影响。通过对试验结果进行统计分析, 并采用 ADINA 程序对各因素进行了有限元分析, 得出以下结论:

- (1) 混凝土保护层厚度对粘结强度有显著影响。
- (2) 型钢混凝土中的横向配箍率对化学胶结力丧失以后的剪切传递有较大的影响。
- (3) 型钢截面尺寸大的试件比截面尺寸较小的试件开裂严重, 粘结强度相应减小。
- (4) 混凝土的徐变会减小型钢混凝土的粘结强度, 型钢翼缘与混凝土的粘结强度在 6 个月大约会降低 10%。

Roeder 和 Robert Chmielowski 在文献 [62] 中对型钢混凝土粘结性能的有关试验研究进行了综合分析。对以往的有关型钢混凝土粘结性能的试验研究结果进行了统计, 对混凝土强度、型钢表面情况、横向配箍率、型钢锚固长度与截面高度比、混凝土截面与型钢截面面积比等因素对型钢混凝土粘结强度的影响进行了综合比较, 并相应地制出各种统计图表, 图 10 为文献 [62] 统计的混凝土强度和型钢表面状况与粘结强度的关系, 可以看出由于各试验研究的试验条件不尽相同, 图表中所统计的数据离散性较大, 得不出明显的规律, 所得结论也不具有足够的说服力。

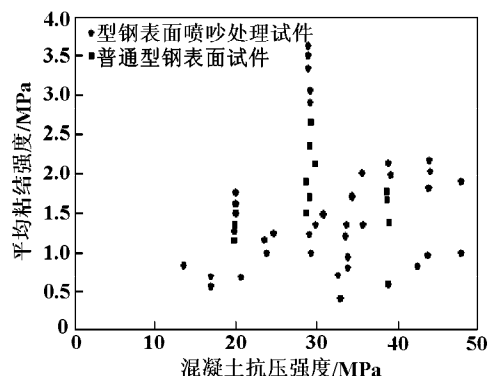


图 10 混凝土强度和型钢表面状况与粘结强度的关系

Roeder 和 Robert Chmielowski<sup>[62]</sup> 通过以上归纳和分析, 进行了 18 个试件的压入试验, 并着重考虑了混凝土保护层厚度、横向配箍率和配箍形式、型钢截面尺寸、型钢锚固长度、偏心加载、剪切连接件等对粘结强度的影响. 试验结果表明:

(1) 图 11 为一典型试件的外加荷载  $P$  与加载端相对滑移  $S$  的  $P-S$  曲线, 从图中可以看出, 在外加

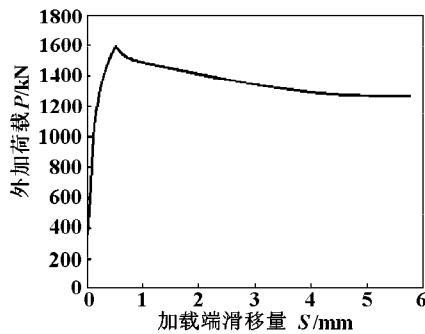


图 11 荷载 - 滑移曲线

荷载达到 25%~40% 的极限荷载前, 型钢与混凝土之间几乎不发生相对滑移; 但是当荷载继续增加超过这一临界值后, 在加载端首先发生相对滑移并逐渐向试件的自由端扩张, 当加载端的滑移达到 0.5 mm 左右时, 外加荷载达到极限荷载值, 相应的型钢混凝土平均粘结强度也达到最大值; 随后粘结滑移发展很快, 而外加荷载值也逐渐下降, 当粘结滑移达到最大值时, 对应的外加荷载与极限荷载相比大约降低 20%~60%, 而对应的配箍越弱的试件, 荷载降低相应的越大, 这说明配箍能加强型钢混凝土的残余粘结强度.

(2) 在滑移前的荷载作用下, 粘结应力沿锚固长度是呈指数分布的, 而当荷载达到极限荷载时, 粘结应力在锚固长度上接近于常数, 这与以往试验结果是一致的.

(3) 在反复加载条件下, 极限荷载没有明显减小, 但是局部粘结性能却退化很明显. 表明在反复荷载作用下, 应控制外加荷载不大于局部滑移发生时临界荷载值.

(4) 剪切连接件的加设不但没有像预想的结果那样加强型钢混凝土的粘结强度, 反而降低型钢混凝土的平均粘结强度、减弱试件的延性、尤其在发生粘结滑移后粘结强度大大削弱. 这是因为剪切连接件在受力过程中的变形, 会加大混凝土的破坏. 因此在设计中应该单独考虑自然粘结力或剪切连接件, 而不能将二者的粘结强度进行简单叠加.

(5) 偏压试件比轴压试件的平均粘结强度要小.

(6) 型钢混凝土粘结强度主要决定于型钢锚固长度  $L$  与型钢截面高度  $d$  之比  $L/d$  和型钢截面面积  $A_s$  与构件截面面积  $A_t$  之比  $\rho = A_s/A_t$ .

同济大学<sup>[63]</sup> 对高强混凝土的粘结滑移性能进行了一批推出试验和短柱试验, 试验研究结果表明:

(1) 粘结应力分布规律为指数分布, 随荷载增加, 也不会趋于常数分布.

这与以往的研究结果的结论不同, 通过比较, 原因在文献 [63] 中的混凝土保护层厚度较小, 不能保证粘结应力沿锚固长度充分发展, 在极限荷载时达到均匀分布.

(2) 型钢翼缘外表面的粘结应力均高于相应翼缘内表面和腹板表面的粘结应力值, 约为 2 倍左右, 对混凝土保护层厚度较大的试件, 这种差异也越明显.

这说明沿着型钢截面的周长, 粘结应力的分布并不是均匀的, 这也说明文献 [54] 中假定腹板对粘结应力的贡献可以忽略不计是不准确的. 因此, 在型钢混凝土结构中, 腹板与翼缘对粘结的贡献应该分别考虑, 同时, 型钢翼缘与腹板的粘结滑移本构关系也应分别确定.

(3) 随混凝土强度的提高, 最大粘结应力 (粘结强度) 也相应提高.

(4) 混凝土保护层厚度对粘结性能的影响主要是通过型钢横向变形的约束来体现, 在一定范围内, 混凝土保护层厚度越大, 型钢混凝土连接面上的横向约束力越大, 粘结应力也提高的越大.

(5) 箍筋的作用与混凝土保护层基本相同, 也是通过增强对型钢的横向约束力来提高型钢混凝土的粘结强度, 而且对试件的开裂和劈裂破坏起到约束作用, 同时, 对于混凝土保护层厚度较小的试件, 配箍率的增加对粘结强度的影响更加明显.

(6) 随着最大滑移量的增加, 剪切连接件对混凝土的横向挤压力提高, 从而能显著提高型钢混凝土的粘结强度, 但是对于滑移量较小的试件, 剪切连接件对粘结强度的提高作用不显著.

通过对上述试验研究的综合分析, 可以看到, 型钢混凝土粘结滑移性能是一个复杂的课题. 从 1962 年 Bryson and Mathey<sup>[52]</sup> 到 1999 年 Roeder 和 Robert Chmielowski<sup>[62]</sup> 的试验研究, 其中有多国家的专家学者, 但是, 这些研究成果仍存在较大的分歧, 未曾形成定论, 同时型钢翼缘与腹板的粘结强



度、粘结滑移本构关系的区别还未曾系统研究。因此，型钢混凝土粘结强度的研究还有待于进一步的深入和完善。

### 5.3 型钢与混凝土粘结滑移本构关系的研究

在有限元分析中应该给出沿型钢混凝土锚固长度变化的粘结滑移本构关系曲线<sup>[57,58]</sup>，但由于型钢混凝土连接面上的内部滑移比较难测定，因此，大多数试验和研究中都是采用型钢混凝土平均粘结应力与型钢混凝土外部（加载端或自由端）的滑移之间的 $\tau$ - $S$ 关系曲线，见图12。重庆建筑大学<sup>[64]</sup>通过型钢混凝土压入试验，并参考国内外有关资料，拟合出工字钢和混凝土平均粘结应力与端部滑移之间的 $\tau$ - $S$ 关系曲线

$$\tau = 0.759 + 1.315 S - 1.343 S^2 + 0.140 S^3 - 1.556 S^4 \quad (1)$$

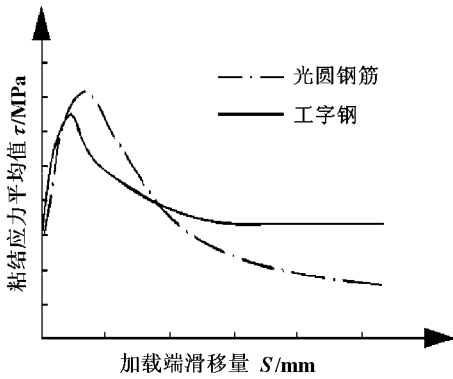


图12 典型的 $\tau$ - $S$ 曲线

式中 $\tau$ 为平均粘结应力( $N/mm^2$ )； $S$ 为加载端相对滑移量(mm)。这一本构关系只给出平均粘结应力 $\tau$ (外加荷载 $P$ 在型钢面积上的平均值)与型钢混凝土压入试验加载端的滑移量 $S$ 之间的相互关系，这种粘结滑移本构关系无法反映出粘结滑移刚度沿型钢锚固长度退化这一实际现象，同时，也不能反映出腹板和翼缘的粘结滑移刚度的差别，因此具有较大的局限性。因为钢筋混凝土的粘结滑移本构关系的研究较为成熟，在国内型钢混凝土有限元分析中，型钢混凝土的粘结滑移本构关系也有直接采用钢筋混凝土的粘结滑移本构关系进行分析的，其中考虑粘结滑移刚度的一定的折减，带有明显的局限性。国外关于型钢混凝土的粘结主要侧重于粘结强度的研究，对粘结滑移本构关系的专门研究很少。

## 6 型钢混凝土粘结滑移基本方程

粘结作用在型钢混凝土中引起的应力状态是比较复杂的。一般主要分析沿锚固长度上型钢和混凝土的纵向应力、应变以及连接面上的相互作用。从工程结构中截取受力型钢及其周围的握裹混凝土，可得到典型的考虑粘结滑移的型钢混凝土构件断面，见图13。在轴心受力条件下，在锚固深度为 $x$ 处引起型钢翼缘、腹板的应力 $\bar{\sigma}_{sf}(x)$ ， $\bar{\sigma}_{sw}(x)$ 和应变 $\bar{\varepsilon}_{sf}(x)$ ， $\bar{\varepsilon}_{sw}(x)$ 。由于连接面上的粘结应力 $\bar{\tau}_f(x)$ ， $\bar{\tau}_w(x)$ 的存在，混凝土中产生应力 $\bar{\sigma}_{cf}(x)$ ， $\bar{\sigma}_{cw}(x)$ 和应变 $\bar{\varepsilon}_{cf}(x)$ ， $\bar{\varepsilon}_{cw}(x)$ ，型钢翼缘及腹板与混凝土之间的变形差分别引起相对滑移 $\bar{S}_f(x)$ ， $\bar{S}_w(x)$ ，由于考虑到型钢混凝土结构的截面尺寸较大，以上所有变量均取平均值。这样，共有基本未知量12个，且值均随锚固深度 $x$ 变化。取 $x$ 处微段 $dx$ 分析其受力和变形情况，可以得到10个基本方程和2个应变协调条件(型钢翼缘与腹板连接处的应变协调方程及滑移协调)，根据这两变形协调条件，本文提出相应的2个假定。10个方程为

平衡方程

$$4\bar{\tau}_f(x)(b_f - b_w) + 2\bar{\tau}_w(x)h_w = 2b_f h_f \frac{d\bar{\sigma}_{sf}}{dx} + h_w b_w \frac{d\bar{\sigma}_{sw}}{dx} \quad (2)$$

$$4\bar{\tau}_f(x)(b_f - b_w) + 2\bar{\tau}_w(x)h_w = A_c \bar{\sigma}_c(x) \quad (3)$$

式中 $A_c = B \times H - (2 \times b_f \times h_f + b_w \times h_w)$ ， $\bar{\sigma}_c(x)$ 是混凝土的平均应力值； $b_f$ ， $h_f$ ， $b_w$ ， $h_w$ 分别为型钢翼缘和腹板的宽度、高度； $B \times H$ 为型钢混凝土试件截面总面积。

变形方程

$$dS_f(x) = (\bar{\varepsilon}_{sf}(x) - \bar{\varepsilon}_{cf}(x))dx \quad (4)$$

$$dS_w(x) = (\bar{\varepsilon}_{sw}(x) - \bar{\varepsilon}_{cw}(x))dx \quad (5)$$

型钢的本构方程

$$\bar{\sigma}_{sf} = f_1(\bar{\varepsilon}_{sf}) \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_{sw} = f_1(\bar{\varepsilon}_{sw}) \quad (7)$$

混凝土的本构方程

$$\bar{\sigma}_{cf} = f_2(\bar{\varepsilon}_{cf}) \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_{cw} = f_2(\bar{\varepsilon}_{cw}) \quad (9)$$

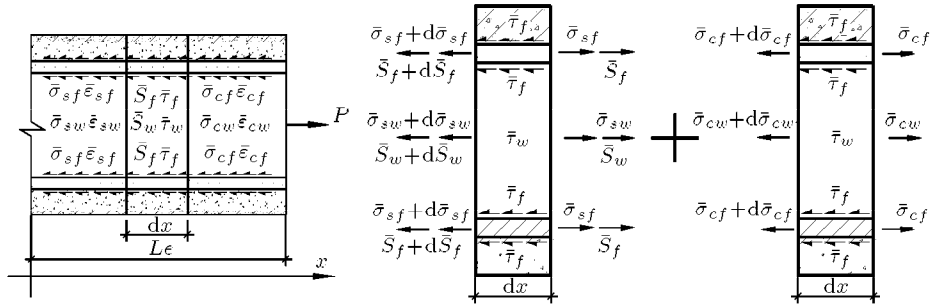


图 13 型钢混凝土粘结滑移基本量及相互关系示意图

粘结滑移的本构方程

$$\bar{\tau}_f = f_3(\bar{S}_f) \quad (10)$$

$$\bar{\tau}_w = f_4(\bar{S}_w) \quad (11)$$

基本假定:

(1) 型钢翼缘与腹板的粘结应力存在关系

$$\frac{\bar{\tau}_w(x)}{\bar{\tau}_f(x)} = A(x, P) \quad (12)$$

(2) 型钢翼缘与腹板的相对滑移存在关系

$$\frac{\bar{S}_w(x)}{\bar{S}_f(x)} = B(x, P) \quad (13)$$

式中  $A(x, P)$ ,  $B(x, P)$  是考虑荷载和锚固深度的变化的函数, 由于型钢翼缘和腹板与混凝土的粘结机理基本上是相似的, 所不同的只是应力状态的区别, 这主要是由于锚固深度和外加荷载所决定的, 所以引入函数  $A(x, P)$ ,  $B(x, P)$  是可行的, 函数  $A(x, P)$ ,  $B(x, P)$  可以在相关的对比试验中予以确定。

国内外大多试验表明, 型钢腹板对型钢混凝土粘结的贡献相对型钢翼缘<sup>[45~55]</sup>很小, 即  $A(x, P) \rightarrow 0$ , 因此在很多的试验研究中忽略型钢腹板的粘结作用, 即不考虑型钢腹板的作用, 型钢腹板的粘结滑移本构关系无法考虑, 而且所得型钢翼缘与混凝土的粘结强度和粘结滑移本构关系也不准确, 这与实际情况存在较大差别, 文献 [56] 中的试验研究结果也反映出腹板对粘结的贡献不能简单地忽略不计。因此, 通过试验研究, 对型钢翼缘与腹板的粘结滑移性能分别考虑, 得出函数  $A(x, P)$  与  $B(x, P)$ , 可以更加真实、明确地得到型钢混凝土的粘结滑移性能。

## 7 目前存在的主要问题

从上述分析可以看到, 国内外对型钢混凝土的粘结滑移研究还不是很深入和完善, 对型钢混凝土

粘结滑移本构关系的研究开展很少, 大部分研究都是局限于型钢混凝土粘结强度的研究, 未曾得出确定性的结论。由于关于型钢混凝土粘结性能的试验研究很有限, 型钢混凝土粘结性能的目的研究成果还存在较多的不统一, 未能形成一套完整的型钢混凝土粘结滑移理论。在以下几方面还存在较多的问题。

### 7.1 型钢混凝土粘结机理的揭示

根据型钢与光圆钢筋和混凝土粘结的相似性, 推论出型钢与混凝土的粘结作用主要由化学胶结力、摩擦阻力和机械咬合力三部分组成, 这是被普遍认同的, 也是很符合实际情况的。但是, 这三部分在整个型钢混凝土粘结作用中分别占多少比重, 是如何工作的, 分别受到什么因素的影响, 如何加强型钢与混凝土的自然粘结强度, 粘结的破坏机理、破坏过程是如何? 都需要进一步的试验研究和分析论证。

### 7.2 影响型钢混凝土粘结性能的主要因素确定

结合光圆钢筋与混凝土的粘结性能和上述的试验研究和分析可以初步得出: 在型钢混凝土结构中, 可能影响型钢混凝土粘结性能的因素主要有: 混凝土强度、混凝土保护层厚度、型钢表面状况、横向配箍率、型钢锚固长度与截面高度比、型钢与混凝土截面面积比、混凝土浇注位置。但是国内外的相关试验所得到的结论却存在很大分歧, 很不完善, 具体表现在:

#### (1) 混凝土强度和粘结强度的关系

一方面, Bryson 和 Mathey (1962), Hawkins (1973), Roeder (1984), 孙国良 (1989), 李红, 坪井善勝等<sup>[50~55]</sup>都得出型钢混凝土粘结强度和混凝土强度有着直接的关系, 其他的有关外包钢与混凝土粘结性能<sup>[65]</sup>、钢管混凝土粘结性能<sup>[66~68]</sup>、钢筋与混凝土粘结性能的试验研究也均表明, 钢与混凝土的粘结与混凝土的强度有密切的关系。另一方面, Roeder 和 Robert Chmielowski 在文献 [62] 中通过统计有关

文献的试验研究结果,得到混凝土强度对型钢混凝土粘结强度无明显影响的结果,但是由于各试验研究的结果本身存在的不可避免的误差,而且各试验研究在试验条件上不尽相同,并且图中的数据具有较大的离散性,所以,文献 [62] 中的结论不具有完全的说服力.

### (2) 型钢表面状况与粘结性能的关系

Bryson 和 Mathey(1962) 在文献 [52] 中专门研究了型钢表面状况对粘结强度的影响情况,发现经过喷砂处理的型钢表面,其与混凝土的粘结性能有较大提高,但是在文献 [62] 的试验结果的综合中,却又得不到相似的结论,这也有待于进一步试验研究.

### (3) 横向配箍率与粘结性能的关系

大多数试验研究都得到横向配箍率虽然不能明显提高型钢混凝土在滑移前的粘结强度,但能大大提高滑移发生后的粘结强度.但是,横向配箍率和型钢混凝土滑移发生后的粘结强度的确定关系却没有明确的结论,而且,关于配箍形式对粘结强度的影响的研究也很少.

### (4) 混凝土保护层厚度与粘结性能的关系

孙国良在文献 [55] 中发现,当混凝土保护层厚度较小时,粘结强度随保护层厚度的增加而增加,型钢混凝土保护层厚度对粘结强度有较大的影响;而当混凝土保护层厚度较大时,保护层厚度对粘结强度的影响不明显.李红在文献 [51] 中也得出相似的结论.但是,文献 [55] 及 [51] 建立的两个型钢混凝土临界保护层厚度计算公式都未曾考虑混凝土强度、横向配箍率等因素的影响,存在一定的缺陷,文献 [57,58] 中建立的临界保护层厚度也有待于进一步试验研究.

### (5) 剪切连接件对型钢混凝土强度的影响以及优化设置

孙国良在文献 [55] 中,得出粘结强度由于剪切连接件的设置能有效提高,并提出设置剪切连接件的型钢混凝土粘结强度的计算公式. Roeder 在文献 [62] 中提出剪切连接件的加设不但没有像预想的结果那样加强型钢混凝土的粘结强度,反而降低型钢混凝土的平均粘结强度、减弱试件的延性、尤其在发生粘结滑移后粘结强度大大削弱.这是因为剪切连接件在受力过程中的变形,会加大混凝土的破坏.李辉在文献 [63] 中,提出随着最大滑移量的增加,剪切连接件对混凝土的横向挤压力提高,从而能显著提高型钢混凝土的粘结强度,但是对于滑移量较小的试件,

剪切连接件对粘结强度的提高作用不显著.因此,在型钢混凝土结构设计中,剪切连接件的设置应该考虑粘结应力的分布规律,并综合考虑自然粘结力或剪切连接件对粘结强度的作用,而不能将二者的粘结强度进行简单叠加.

### (6) 影响型钢混凝土粘结性能的其他因素

除了混凝土强度、型钢表面状况、横向配箍率、混凝土保护层厚度和剪切连接件这些研究较普遍的 5 个因素对型钢混凝土粘结强度的影响没有最终形成定论外,对其他因素的研究也较少,比如,型钢截面尺寸、型钢锚固长度、混凝土浇注位置、混凝土的水灰比、骨料级配、龄期等等,而这些因素在个别试验研究中却表现出对型钢混凝土粘结性能有较大的影响.

## 7.3 型钢混凝土粘结滑移本构关系的确定

由于型钢混凝土连接面上的内部滑移比较难测定,因此,以往试验和研究中都只得到型钢混凝土平均粘结应力与型钢混凝土外部(加载端或自由端)的滑移之间的  $\tau$ - $S$  关系曲线,并以此作为型钢混凝土有限元分析的粘结滑移本构关系.这种粘结滑移本构关系无法反映出粘结滑移刚度沿型钢锚固长度退化这一实际现象,同时,也不能反映出腹板和翼缘二者粘结滑移刚度的差别,具有较大的局限性.因此,建立一个完善的型钢混凝土粘结滑移本构关系是非常迫切和具有理论与实际意义的.

## 8 结 语

综上所述,虽然国内外对于 SRC 结构的研究较为重视,但由于开展时间较短,仍处于初级阶段,取得的成果多集中于构件的强度、刚度的近似计算,特别对在承载能力后期型钢与混凝土之间较为明显的粘结滑移机理,由于其较为复杂,研究难度大而很少探究,所提出的设计计算方法也没有较好的考虑粘结滑移的影响,仍采用平截面假定或稍加以修正,而没有充分的理论依据,测定型钢与混凝土粘结滑移关系的试验方法和测试技术也未见资料.通常用于钢筋混凝土有限元分析中的粘结滑移本构模型很难再适用于具有高度不均匀性及粘结非线性的 SRC 结构中,因此不仅是全过程分析无法得出理想的结果,又由于平截面假定不再符合,所以包括构件承载能力、刚度变形、裂缝计算方法都不能令人满意.目前的经

验公式较多,实用计算也处理得过于简单和粗糙,还没有从本质上反映 SRC 结构存在粘结滑移这一重要特点,在设计剪切连接件时也没有考虑各部位粘结力的分布规律.因此,只有将型钢与混凝土之间的粘结滑移性能搞清楚,才能真正解决 SRC 结构的最基本问题,并可将其应用于有限元分析中,使结构和构件计算更为准确可靠,结构安全性和适用性得到保障,才能改进和完善 SRC 结构计算理论和有限元分析方法,为形成一套有我国自己特色的高质量 SRC 结构规范提供可靠的理论依据和实用方法,并配合建筑行业的蓬勃发展的良好形势,完成理论向实际的转化,促进 SRC 结构在我国的高层、超高层建筑中的推广应用,发挥其独特的优势.

## 参 考 文 献

- 1 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构. 北京: 科学出版社, 2001. 77~226
- 2 赵鸿铁, 潘泰华, 姜维山, 周起敬. 型钢混凝土构件的强度计算. 建筑结构学报, 1991, 12(5): 12~24
- 3 周起敬, 姜维山, 潘泰华主编. 钢与混凝土组合结构设计施工手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- 4 白国良, 秦福华著. 型钢钢筋混凝土原理与设计. 上海: 科学技术出版社, 2000
- 5 叶列平, 方鄂华. 钢骨混凝土构件的受力性能研究综述. 土木工程学报, 2000, 33(5): 1~11
- 6 Roeder C W. Composite and Mixed Construction. New York: ASCE, 1984
- 7 Johnson R P. Composite Structures of Steel and Concrete, Volume 1-Beams, Slabs, Columns and Frames for Building. 2nd ed. OXFORD: Blackwell Scientific Publications, 1995. 115~230
- 8 Lee S L, Shanmugan N E. Composite steel structures—recent research and development. In: Proceedings of the International Conference on Steel and Aluminum Structures, London & New York: Elsevier Applied Science, 1991. 23~39, 157~168
- 9 Moore W P. Composite Construction in Steel and Concrete. New York: ASCE, 1987
- 10 Ivan M V, Joseph P C. Composite Construction Design for Buildings. New York: McGraw-Hill Co-published by ASCE, 1997
- 11 ECCS. Composite Structures. London and New York: the Construction Press, 1981
- 12 日本建筑学会. 钢骨钢筋混凝土结构计算标准及解说. 冯乃谦, 叶列平等译. 北京: 能源出版社, 1998
- 13 中华人民共和国行业标准 YBJ 9082-97. 钢骨混凝土结构设计规程. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- 14 中华人民共和国行业标准 JGJ 138-2001. 型钢混凝土组合结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- 15 元辉. 劲性钢筋混凝土构件受力性能研究——抗剪强度、裂缝间距、裂缝宽度、刚度. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1989
- 16 于澍. 型钢钢筋混凝土柱正截面承载能力研究. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1991
- 17 刘细林. SRC 梁受力性能的试验研究. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1991
- 18 刘玉擎. 劲性钢筋混凝土框架节点抗震性能的试验研究. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1988
- 19 白国良. 型钢钢筋混凝土 (SRC) 结构的基本受力行为及设计方法. [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1997
- 20 陈家夔, 赵世春. 劲性混凝土构件正截面强度计算. 建筑结构学报, 1991, 12(2): 33~40
- 21 徐澄. 劲性钢筋混凝土梁刚度的试验研究. [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 1989
- 22 叶列平. 钢骨混凝土柱的设计方法. 建筑结构, 1997, 5: 8~12
- 23 叶列平. 钢骨混凝土梁的设计方法. 建筑结构, 1997, 10: 33~35
- 24 叶列平, 方鄂华, 赵树红. 钢骨混凝土构件正截面承载力计算. 工程力学, 1999, 16(2): 29~36
- 25 欧阳坚, 丁大钧, 蓝宗建. 劲性钢筋混凝土受弯构件短期刚度与裂缝宽度的试验研究. 工程力学, 1993, 10(3): 87~96
- 26 朱伯芳. 有限单元法原理与应用. 北京: 中国水利水电出版社, 1998
- 27 王传志, 滕智明主编. 钢筋混凝土结构理论. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
- 28 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析. 北京: 清华大学出版社, 1993
- 29 Park R, Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York: A Wiley Interscience Publication, 1975
- 30 宋启根, 单炳梓, 金芷生, 朱万福编著. 钢筋混凝土力学. 南京: 南京工学院出版社, 1986
- 31 过振海. 钢筋混凝土原理. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 32 Bangash M Y H. Numerical Modeling of Bond and Bond-Slip. Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications. London, New York: Elsevier Applied Science, 1985
- 33 Bazant Z P, et al. Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. State-of-the Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete. New York: ASCE, 1982
- 34 Ngo D, Scordelis A C. Finite element analysis of reinforced concrete members. *Journal of ACI*, 1967, 64(3): 411~416
- 35 Nilsson A H. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method. *Journal of ACI*, 1968, 65(9): 757~766
- 36 Bathe K J, Ramaswamy S. On three-dimensional analysis of concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 1974, 28: 42~75
- 37 乔玉. SRC 框架节点受力性能及非线性有限元分析. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1995
- 38 刘永军. 型钢混凝土柱正截面承载力有限元分析. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1998
- 39 江建华. 型钢混凝土 (SRC) 构件抗剪性能非线性有限元分析. [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1998
- 40 Fercuson P. ACI Committee 408: Bond stress—the state of the art. *Journal of the ACI*, 1966(11): 1161~1188
- 41 Brown C B. Bond Failure between steel and concrete. *Journal of the Franklin Institution*, 1966, 282(5): 271~290
- 42 徐有邻. 变形钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究. [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1990
- 43 Lutz L A, Gergely P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. *Journal of ACI*, 1967, 64(11): 711~721

- 44 Lutz L A. Analysis of stresses in concrete near a reinforcing bar due to bond and transverse cracking. *Journal of ACI*, 1970, 67(10): 778~787
- 45 Mirza S M, Houde J. Study of bond-stress-slip relationship in reinforced concrete. *Journal of ACI*, 1979, 76(1): 19~46
- 46 Nilson A H. Internal measurement of bond-slip. *Journal of ACI*, 1972, 69(7): 439~441
- 47 Womersley W D. Bond between concrete and steel, *Concrete and Construction Engineering*, 1927, 22(2): 153~159
- 48 Bartos P. Bond in Concrete. London: Applied Science Publishers LTD, 1982
- 49 Manfred K, Gerhard M. Finite Element models for bond problems. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1987, 113(10): 2160~2173
- 50 坪井善勝, 若林満. 钢筋钢筋混凝土结构的实验研究. 日本建筑学会论文报告集第 57 号, 1956(7): 549~552
- 51 李红. 型钢与混凝土粘结性能的试验研究. [硕士论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 1995
- 52 Bryson J O, Mathey R G. Surface condition effect on bond strength of steel beams in concrete. *Journal of ACI*, 1962, 59(3): 397~406
- 53 Hawkins N M. Strength of concrete encased steel beams. *Civil Engineering Transaction of the Institution of Australia Engineer*, 1973, CE15(1): 39~46
- 54 Roeder C W. Bond Stress in Embedded Steel Shapes in concrete. *Composite and Mixed Construction*. New York: ASCE, 1984
- 55 孙国良, 王英杰. 劲性砼柱端部轴力传递性能的试验研究与计算. *建筑结构学报*, 1989(6): 40~49
- 56 Furlong R. Binding and bonding to composite columns. *Composite and Mixed Construction*. New York: ASCE, 1984. 330~336
- 57 杨勇, 薛建阳, 赵鸿铁. 型钢混凝土结构粘结强度分析. *建筑结构*, 2001, 31(7): 31~34
- 58 杨勇, 赵鸿铁, 薛建阳. 型钢混凝土粘结机理与粘结强度的研究. *西安建筑科技大学学报*, 2001, 33(2): 103~107
- 59 杨勇, 赵鸿铁, 王彦宏. 型钢混凝土保护层弹塑性屈曲分析. *西安建筑科技大学学报*, 2001, 33(3): 207~211
- 60 Hamdan M, Hunaiti Y. Factors effecting bond strength in composite columns. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Fukuoka, Japan. 1991. 213~218
- 61 Wium J A, Lebet J P. Simplified calculation method for force transfer in composite columns. *Journal of Structural Division*, 1992, 120(3): 728~745
- 62 Roeder C W, Robert C. Shear connector requirements for embedded steel sections. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1999, 125(2): 142~151
- 63 李辉. 劲性钢筋高强混凝土结构粘结性能和梁柱中节点抗剪性能的试验研究. [硕士论文]. 上海: 同济大学, 1998
- 64 王祖华, 钟树生. 劲性钢筋混凝土梁的非线性有限元分析. 见: *混凝土结构基本理论及其应用第二届学术讨论会论文集*. 1990. 609~616
- 65 Hunaiti Y. Bond Strength in battened composite columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 117(3): 699~714
- 66 Khalil H S. Push-out Strength of Concrete-Filled Steel Hollow Sections. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1993, 71(13): 230~233
- 67 Khalil H S. Resistance of Concrete-Filled Steel Tubes to Push-out Forces. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1993, 71(13): 234~243
- 68 姜绍飞, 韩林海等. 钢管混凝土中钢与混凝土粘结问题初探. *哈尔滨建筑大学学报*, 2000, 33(2): 24~28

## A REVIEW ON THE BOND-SLIP MECHANICAL BEHAVIORS OF SRC STRUCTURES\*

ZHAO Hongtie    YANG Yong    XUE Jianyang    WANG Yanhong    LIN Yiyong  
Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China

**Abstract** In this paper, the experimental researches on bond-slip behaviors of steel reinforced concrete, at home and abroad are reviewed. Researches of the bond strength were stressed, and researches on bond-slip constitutive relations and the mechanism of bond-slip of SRC structures were discussed together with their theoretical and practical significance, the basic problems, and the basic equations, as well as the basic theories.

**Keywords** SRC structures, bond-slip behaviors, bond-slip relations, bond strength

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(50108013) and Natural Science Foundation of Education Department of Shan'xi Province(01JK173)