



型钢混凝土粘结滑移理论 及其工程应用

薛建阳 赵鸿铁 著

2



科学出版社

www.sciencep.com

TU375.01/4

2007

型钢混凝土粘结滑移理论 及其工程应用

薛建阳 赵鸿铁 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统研究和探讨了型钢混凝土结构中型钢与混凝土之间的相互作用和粘结滑移机理,以及型钢混凝土粘结滑移理论在有限元数值模拟和工程设计方面的应用。全书共分八章,主要内容包括:型钢混凝土构件的推出试验,型钢混凝土偏心受压柱的粘结滑移性能试验,型钢高强混凝土柱的低周反复加载试验及其分析,动力作用下粘结滑移性能的退化规律;分析了影响型钢与混凝土粘结滑移的内在本质因素,建立了粘结强度的统计计算公式和各受力构件的粘结滑移本构关系;基于大型通用程序 ANSYS 平台,研究了型钢混凝土结构考虑粘结滑移效应的数值模拟技术;从工程实用的角度出发,提出了粘结锚固可靠度分析方法、型钢混凝土柱保护层厚度及正截面承载能力计算方法,以及型钢高强混凝土柱的轴压比限值和受剪承载力计算方法等。

本书可作为高等院校教师、研究生的教学辅助用书,也可供土木建筑科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

型钢混凝土粘结滑移理论及其工程应用/薛建阳,赵鸿铁著.

—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019122-9

I. 型… II. ①薛…②赵… III. ①型钢—钢筋混凝土结构—研究
IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 087539 号

责任编辑:童安齐 庞海龙 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

信浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张:13 1/4

印数:1—2 500 字数:255 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

型钢混凝土(SRC)结构在我国还是一种新型结构,兼有钢结构和钢筋混凝土结构共同的优点,具有较高的承载力、刚度和良好的抗震性能,已开始广泛应用于大跨结构和地震区的高层、超高层建筑。

日本、欧美和前苏联对型钢混凝土结构的研究较早,应用也较为普遍。但是,日本的设计方法忽略了型钢与混凝土之间的共同工作,而前苏联则按照型钢与混凝土完全协同工作考虑,两者都不符合型钢混凝土构件实际的受力情况。欧美的设计规范主要给出的是以试验和数值分析为基础的经验公式,它也避开了型钢混凝土结构中实质的、也是难于处理的型钢与混凝土之间的粘结滑移问题,而没有进行深入的探讨。

粘结滑移的研究是型钢混凝土理论研究中的重要课题,也是困扰工程界的一个难题。我国学者自20世纪80年代开始,对型钢混凝土结构进行了一系列研究,取得了一些成果,但他们的研究重点均放在构件强度、刚度和抗震承载力的近似计算方面,在研究中虽普遍承认型钢与混凝土之间存在粘结滑移,而且对型钢混凝土构件受力性能有显著影响,但都没有从机理方面作进一步的分析和理论上的总结概括。目前的两部行业标准《钢筋混凝土结构设计规程》(YB 9082-97)和《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138-2001)都没有较好考虑粘结滑移的影响,因而提出的计算方法并不完善。有鉴于此,著者于2001年申请并获得国家自然科学基金等科研课题的资助,对型钢与混凝土的粘结滑移关系进行了一系列系统的试验研究。我们通过采用合理的测试手段和方法,获得了型钢与混凝土之间的粘结滑移分布及其规律,进一步揭示了粘结滑移作用机理及各影响因素,建立了粘结滑移本构关系和非线性有限元数值分析方法,为最终建立一套完整的型钢混凝土结构设计计算理论、促进型钢混凝土结构在我国的推广和应用起到了积极的推动作用。

本书第二、四、五、六章由薛建阳执笔,第一、八章由赵鸿铁执笔,第三、七章由杨勇执笔,薛建阳对全书修改定稿。在本课题的研究中,王彦宏、李俊华博士等做了大量的试验和理论分析工作,仵建斌博士绘制了

部分插图。此外,本课题得到了国家自然科学基金(资助号:50108013)、陕西省自然科学基金(编号:2002E₂13)和陕西省教育厅自然科学研究专项基金(编号:01JK173)的资助,在此一并表示衷心的感谢。

鉴于著者的水平有限,不妥之处欢迎广大读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 型钢混凝土结构的特点	1
1.2 型钢混凝土粘结滑移的基本概念	2
1.3 型钢混凝土粘结滑移性能研究的意义	3
1.4 型钢混凝土粘结滑移研究的基本问题	4
1.4.1 型钢混凝土结构和构件计算理论	4
1.4.2 型钢混凝土构件中的剪力传递问题	5
1.4.3 型钢混凝土结构中的粘结锚固问题	5
1.4.4 有限元或界面应力元分析中的粘结滑移本构关系问题	6
1.5 型钢混凝土粘结滑移研究概况	7
1.5.1 钢板与混凝土粘结强度的研究	7
1.5.2 型钢与混凝土粘结强度的研究	7
1.5.3 型钢与混凝土粘结滑移本构关系的研究	13
1.6 目前存在的主要问题.....	14
1.6.1 型钢混凝土粘结机理的揭示	14
1.6.2 影响型钢混凝土粘结性能的主要因素确定	14
1.6.3 型钢混凝土粘结滑移本构关系的确定	16
第二章 型钢混凝土推出试验及其分析	17
2.1 推出试验研究方案.....	17
2.1.1 试件的设计与制作	17
2.1.2 试验测试方案	18
2.1.3 试验加载方案	19
2.2 推出试验研究结果.....	20
2.2.1 试验过程分析	20
2.2.2 试验 P - S 曲线及其特征	20
2.2.3 裂缝形态及发展过程	21
2.2.4 型钢应变测试结果及分析.....	23
2.2.5 滑移测量.....	24
2.2.6 对比试验的试验结果	27

第三章 型钢混凝土粘结强度分析	30
3.1 已有试验研究成果介绍	30
3.1.1 Roeder 的试验	30
3.1.2 孙国良试验	32
3.2 作者的推出试验结果	32
3.2.1 $P-S_l$ 曲线的特征点	32
3.2.2 粘结强度的主要影响因素	35
3.2.3 特征粘结强度的统计分析	38
3.3 粘结强度计算公式的修正	40
3.3.1 计算公式的验证	40
3.3.2 建议的粘结强度计算公式	43
第四章 型钢混凝土偏心受压柱的粘结滑移性能试验及其分析	44
4.1 概述	44
4.2 试件设计及制作	44
4.3 加荷程序及量测方案	48
4.3.1 试验加载方案	48
4.3.2 测点布置及量测方案	48
4.4 试验结果及分析	49
4.4.1 试验过程及破坏形态	49
4.4.2 极限承载力及变形	51
4.4.3 应变分析	52
4.4.4 侧向挠度分析	54
4.5 粘结滑移的测试结果与分析	55
4.5.1 型钢与混凝土连接面上粘结应力的分布	55
4.5.2 型钢与混凝土交界面的滑移分布	57
第五章 反复荷载下型钢高强混凝土柱抗震性能及粘结滑移退化关系	60
5.1 概述	60
5.2 试件设计及制作	60
5.3 加载方案及测试内容	62
5.4 试验结果及分析	63
5.4.1 试验过程及破坏形态	63
5.4.2 滞回曲线	65
5.4.3 耗能性能	67
5.4.4 强度衰减	68
5.4.5 骨架曲线	70

中国工程科学 第10卷 第1期 2008年1月

5.4.6	延性	71
5.4.7	粘结应力的分布	73
5.4.8	反复荷载下粘结应力的退化	77
5.4.9	反复荷载下的滑移特性	81
第六章	型钢混凝土粘结滑移本构关系	86
6.1	平均粘结强度与加载端滑移的 $\bar{\tau}$ - S_1 本构关系	86
6.1.1	特征滑移值的统计分析	86
6.1.2	$\bar{\tau}$ - S_1 本构模型的描述	87
6.2	考虑位置函数的粘结滑移本构关系	89
6.2.1	不同锚固深度处的 τ - S 曲线	89
6.2.2	位置函数 $F(x)$ 和 $G(x)$ 的确定	92
6.2.3	考虑位置变化的 τ - S 本构关系	94
6.3	型钢混凝土偏心受压柱的粘结滑移本构关系	96
6.3.1	粘结滑移曲线的特征	96
6.3.2	粘结滑移本构模型	97
6.3.3	考虑位置变化的粘结滑移曲线	100
6.4	反复荷载下型钢高强混凝土柱的粘结滑移本构关系	101
6.4.1	柱根位置的粘结滑移本构关系	102
6.4.2	粘结滑移曲线	107
6.4.3	考虑位置变化的粘结滑移曲线	108
6.4.4	粘结滑移恢复力模型	109
第七章	型钢混凝土构件的 ANSYS 数值模拟	113
7.1	概述	113
7.2	推出试验的数值模拟	113
7.2.1	几何形状及尺寸	113
7.2.2	材料性质	114
7.2.3	单元类型	115
7.2.4	型钢混凝土粘结滑移模拟	115
7.2.5	试件计算参数	124
7.2.6	考虑位置函数的推出试件 ANSYS 模拟	125
7.3	型钢混凝土偏心受压柱的数值模拟	134
7.3.1	模型建立	134
7.3.2	计算结果分析	136
7.4	型钢混凝土梁的数值模拟	148

7.4.1	型钢混凝土梁的截面尺寸和几何参数	148
7.4.2	有限元模型的建立	148
7.4.3	计算结果分析	151
7.4.4	小结	162
第八章	型钢混凝土粘结滑移理论的工程应用	164
8.1	粘结锚固可靠度分析	164
8.1.1	极限状态方程和统计资料	164
8.1.2	可靠指标和可靠度分析	166
8.2	型钢混凝土柱的混凝土保护层厚度分析	170
8.2.1	临界保护层厚度的确定	170
8.2.2	两个方向混凝土保护层厚度的关系	171
8.3	考虑粘结滑移效应的偏心受压柱正截面承载力计算	172
8.3.1	概述	172
8.3.2	修正平截面假定的理论计算	172
8.3.3	型钢应力分析	175
8.3.4	偏心受压柱承载力的计算模型	177
8.4	型钢高强混凝土柱的轴压比限值	179
8.4.1	概述	179
8.4.2	剪跨比 $\lambda \geq 2.0$ 的型钢高强混凝土柱的轴压比限值	180
8.4.3	剪跨比 $\lambda < 2.0$ 的型钢高强混凝土柱的轴压比限值	184
8.4.4	配箍率对轴压比限值的影响	184
8.5	型钢高强混凝土柱的受剪承载力计算	185
8.5.1	影响型钢高强混凝土柱受剪承载力的主要因素	185
8.5.2	型钢高强混凝土柱受剪承载力计算	187
参考文献		196

第一章 绪 论

1.1 型钢混凝土结构的特点

型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)结构是指在混凝土中主要配置型钢,并配有一定横向箍筋及纵向受力钢筋的结构,是钢与混凝土组合结构的一种主要形式。型钢混凝土结构在日本被称为钢骨钢筋混凝土(鉄骨鉄筋コンクリート)结构,在欧美国家称之为混凝土包钢(steel encased concrete)结构,在前苏联则被称为劲性钢筋混凝土结构。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和空腹式配钢两大类。实腹式配钢主要有工字钢、槽钢和 H 型钢等,空腹式配钢一般是由角钢组成的空间桁架。在实腹式配钢构件中,为防止混凝土的局部剥落,加强对核心混凝土的约束作用,以及抵抗温度、收缩等引起的应力和变形,在外包混凝土中要配置箍筋和一定数量的纵向钢筋。在空腹式配钢的构件中,可以不设纵向钢筋与横向箍筋。

目前在抗震结构中多采用实腹式配钢形式,常用的结构构件,如柱、梁、剪力墙和节点的典型截面形式见图 1.1。

型钢混凝土结构具有承载能力高、刚度大及抗震性能好等优点,已普遍应用于大跨结构和地震区的高层建筑,尤其是超高层建筑。SRC 结构比钢结构可节省大量钢材,克服了钢结构耐火性、耐久性差及易屈曲失稳等缺点,而且增大了截面刚度,即使在高层钢结构中,底部几层也往往采用 SRC 结构形式。与普通钢筋混凝土(RC)结构相比,它具有更高的强度和良好的延性,使结构的抗震性能得到明显改善,并且可以有效地减小构件截面尺寸,降低结构高度,使建筑净空要求更易满足。在施工上,钢骨架可作为施工时的自承重体系,获得很好的技术经济效益和社会效益。在日本, SRC 结构经历了 1923 年的关东大地震而基本保持完好,其优越的抗震性能逐渐被人们所认识;1978 年,宫城县冲地震后的调查统计显示,在层数为 7~17 层的 SRC 建筑中,仅有少量结构(主要是空腹式配钢 SRC 结构)发生主体轻微损坏,因此日本将 SRC 结构与钢结构、木结构、钢筋混凝土结构并称为四大结构。我国也是一个多地震国家,绝大多数地区为地震区,甚至位于高烈度区,因此在我国推广和发展 SRC 结构具有非常广阔的前景。

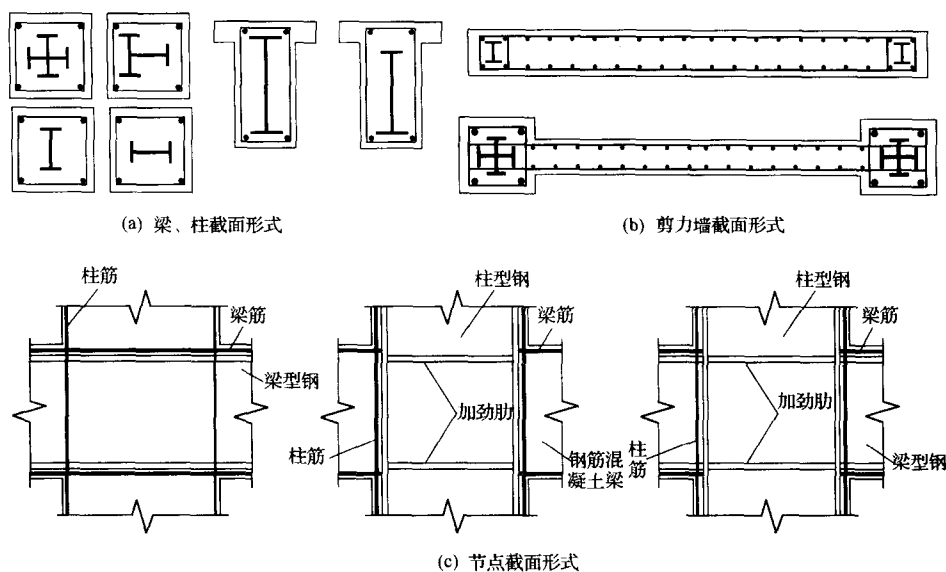


图 1.1 型钢混凝土构件典型截面形式

1.2 型钢混凝土粘结滑移的基本概念

型钢混凝土结构中,型钢与混凝土这两种性能不同的材料能够共同工作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之间能实现应力传递,从而在型钢与混凝土中建立起结构承载所需的工作应力。在粘结力作用的同时,型钢与混凝土连接面之间会产生变形差,从而引起二者的相对滑移。与粘结滑移相关的基本概念主要包括以下几个。

1. 平均粘结强度

在型钢混凝土粘结滑移推出试验研究中,一般取外加荷载除以型钢与混凝土连接面的总表面积作为粘结应力,相应地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。试验结果表明,由于型钢混凝土的实际粘结应力沿型钢埋置长度是变化的,因此此粘结强度实际为沿型钢埋置长度上型钢混凝土的平均粘结强度,在工程中,一般以此强度作为型钢混凝土的(平均)粘结强度。

2. 局部最大粘结强度

一般取型钢埋置长度上各点处的最大粘结应力值为局部最大粘结强度,它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时的开裂荷载。

3. 残余粘结强度

在型钢与混凝土之间的化学胶结力完全丧失后,粘结力中只有摩擦阻力和机械咬合力做贡献,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. 粘结滑移本构关系

型钢混凝土结构和构件在受力后,由于内部粘结裂缝以及混凝土劈裂裂缝的存在,在型钢与混凝土的连接区域内,应力应变分布非常复杂。为便于分析,一般都将型钢周围的这一具有特殊力学性质的混凝土层(滑移层)的变形归结为型钢混凝土连接面上的相对滑移,并根据粘结应力 τ 和滑移 S 的对应关系,建立型钢混凝土的粘结滑移本构关系,一般简称为粘结滑移的 τ - S 关系,粘结应力是指连接面上型钢表面的剪应力,滑移为型钢与对应位置混凝土间的相对错位。

1.3 型钢混凝土粘结滑移性能研究的意义

型钢混凝土结构中型钢与混凝土之间的粘结作用是保证型钢与混凝土共同工作的前提,正是由于这种粘结作用,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。

国内外有关型钢混凝土的试验研究结果表明,对于设置足够数量剪切连接件的实腹式配钢型钢混凝土构件,从开始加荷直到构件破坏,其整体共同工作基本都能得到保证;未设置剪切连接件的构件,在荷载约达到极限荷载的80%前,型钢与混凝土基本上能共同工作,在荷载达到80%极限荷载以后,二者间产生较大的相对滑移,变形不能协调一致。在实际工程中,加设剪切连接件会加大现场施工工作量、增加施工工期、提高工程造价。因此,合理地确定型钢混凝土的粘结性能、在设计中主要考虑型钢混凝土的自然粘结作用,并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,大大缩短现场施工工期,取得显而易见的经济效益。

型钢与混凝土之间的粘结滑移性能直接影响到型钢混凝土结构的受力性能,如构件的破坏形态、承载能力、裂缝和变形以及耐久性等。同时,有限单元法和界面应力元法的发展和完善,为各种复杂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。与钢筋混凝土结构中钢筋与混凝土之间粘结的数值模拟相类似,型钢与混凝土之间粘结滑移的数值模拟非常重要,主要表现在建立合理的粘结单元,确定合理的粘结刚度以及粘结滑移本构模型。因此,要改进和完善现行型钢混凝土结构计算理论,采用有限元法或界面应力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滑移性能进行深入的研究。可以说,型钢混凝土粘结滑移性能的研究是型钢混凝土结构理论中最基本的问题,也是关键问题。

1.4 型钢混凝土粘结滑移研究的基本问题

1.4.1 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之间的粘结作用远远小于钢筋(尤其是变形钢筋)与混凝土之间的粘结作用。国内外的试验研究表明,型钢与混凝土的粘结作用大约只相当于光圆钢筋与混凝土粘结作用的45%。在钢筋混凝土构件中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,各国对型钢与混凝土之间粘结滑移性能的认识是不同的,因而各自的型钢混凝土结构技术规范或规程存在较大差异。日本的规范《鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説》是基于累加强度(主要是单侧累加强度)的设计方法,它忽略了混凝土与型钢共同工作的有利影响,计算结果偏于保守,并且当型钢或截面不对称时,计算精度不高。我国原冶金工业部行业标准《钢骨混凝土结构设计规程》(YB 9082-97)基本靠近日本规范。而前苏联规范《劲性钢筋混凝土结构设计指南》(CH3-78)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骨架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,计算偏于危险。我国建设部行业标准《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138-2001)与前苏联规范基本属同一体系。欧美国家主要给出了以试验和数值分析为基础的经验公式。经验公式主要包括两种,一种是以钢结构计算方法为基础,根据型钢混凝土结构的大量试验结果,经数值计算,引入一定的参数加以调整,得到相应的经验公式,英国 CP110 规范、美国钢结构协会(AISC)的荷载和抗力系数法(LRFD)中关于型钢混凝土组合柱的计算就采用这样的方法;另一种是在型钢混凝土构件试验研究的基础上,通过大量的数值计算直接拟合试验结果,得出近似经验公式,欧洲共同体标准(EC4)中关于组合柱简易设计方法的 N_u-M_u 相关曲线的近似经验公式就是这样建立的。由于可靠度水准、材料基准强度取值不同,有些公式仅适用于对称截面,并且精度较低。

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 ~ 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(这些试件除了梁端配置少量剪切连接件外,基本上都是未设置剪切连接件的试件),对型钢混凝土梁、柱及节点承载力和变形计算等内容进行了研究,并进行了非线性全过程分析。研究结果表明,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,平截面假定显然已经不能成立。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、东南大学、重庆建筑大学和湖南大学等科研单位也对型

钢筋混凝土结构进行了一些开拓性的研究工作,并取得较多的研究成果。他们在研究中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现象,由于其作用机理极为复杂,试验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,而没有充分的理论依据,这与实际情况是有较大差别的。因此,只有通过深入细致的试验研究,揭示型钢混凝土粘结滑移的本质关系,才能建立包括构件承载能力、刚度变形、裂缝宽度和耐久性等指标的合理的计算和评估方法,为形成一套有我国自己特色的高质量的型钢混凝土结构技术规范提供可靠的理论依据和实用方法。

1.4.2 型钢混凝土构件中的剪力传递问题

在型钢混凝土框架结构中,作用在梁上的竖向荷载(包括静荷载和活荷载)通过型钢与混凝土之间的粘结作用,进行内力的重新分配,最终使型钢与混凝土共同承载受力(见图 1.2),梁上的内力也是通过型钢与混凝土的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,就应保证型钢与混凝土之间足够大的粘结作用,使得梁端的剪力能够可靠地传递到柱的混凝土中。因此,合理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,得出型钢的锚固长度就具有较大的理论意义和实用价值。当某些部位的自然

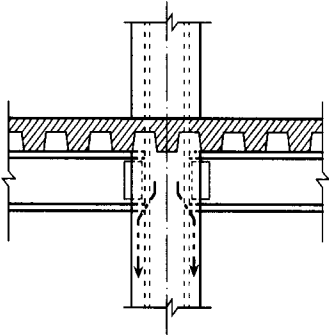


图 1.2 典型的梁柱传力示意图

粘结强度不能满足应力传递要求时,应根据粘结滑移关系,确定剪切连接件的设置方式并进行连接件数量的设计计算。

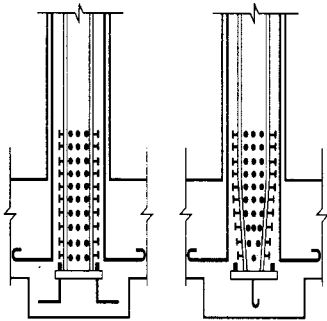


图 1.3 埋入式柱脚锚固示意图

1.4.3 型钢混凝土结构中的粘结锚固问题

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、型钢混凝土柱脚、型钢混凝土简支梁的梁端以及型钢混凝土剪力墙中。在目前的设计应用中,都是按照构造要求、采用加设剪切连接件的办法加强型钢混凝土构件的锚固作用(见图 1.3),而没有充分考虑型钢与混凝土之间粘结力的分布和粘结滑移关系。因此,研

究型钢混凝土构件中的粘结作用,并进行粘结锚固可靠度分析,可以建立剪切连接件的优化设计计算理论,使型钢混凝土结构设计更加安全、经济、合理。

1. 4. 4 有限元或界面应力元分析中的粘结滑移本构关系问题

在型钢混凝土有限元或界面应力元分析中,为了考虑型钢混凝土之间的粘结滑移性能,就必须在型钢与混凝土之间引入连接单元(link element)。连接单元类型一般有弹簧单元、接触单元、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(图 1. 4)。不管是采用何种形式的连接单元,都必须给出型钢混凝土粘结滑移本构关系,这是型钢混凝土有限元或界面应力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各点的相对滑移和粘结应力分布规律,并建立型钢混凝土的粘结滑移本构模型及其粘结失效的强度准则,是型钢混凝土研究中的重要课题。

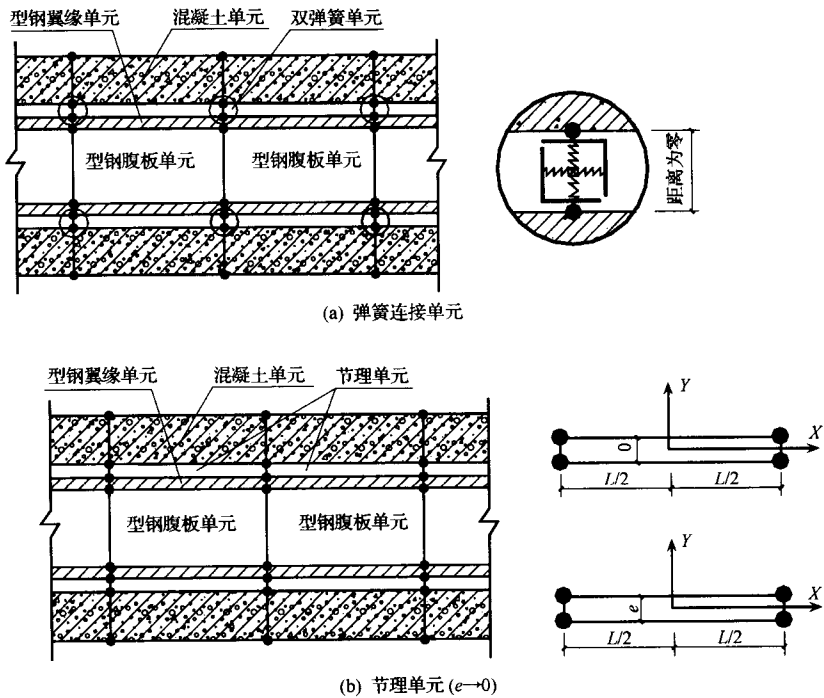


图 1. 4 连接单元类型

1.5 型钢混凝土粘结滑移研究概况

1.5.1 钢板与混凝土粘结强度的研究

日本的坪井善勝、若林実和末永保美在 20 世纪 50 年代为了配合日本规范《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四个因素,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。堀田久人等对有横向约束的钢板与混凝土的粘结性能进行了试验研究,以钢板的表面状况、混凝土的抗压强度和横向约束应力为设计参数,进行了钢板的拉拔试验。钢板的表面状况分为不做任何表面处理和除去表皮、将钢板在盐水中反复浸泡、干燥两周,使其表面生赤锈两种情况。试验结果表明,不做表面处理的钢板在承受较高横向约束力时,它与混凝土之间的粘结强度与混凝土的抗压强度无关,但是与达到粘结强度时的约束应力具有线性关系,即 $\tau_{\max} = 0.283\sigma_c + 23.4(\text{kgf/cm}^2)^*$, 其中 $\sigma_c(\text{kgf/cm}^2)$ 为横向约束应力;表面生赤锈时钢板与混凝土的粘结特性并不劣于钢板表面不做任何处理时的情形,甚至还有所提高。

西安建筑科技大学李红进行了四组钢板梁式试件的拉拔试验,试验中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四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,相当于光圆钢筋与混凝土粘结强度的 60% 和螺纹钢筋与混凝土粘结强度的 30% 的结论。

1.5.2 型钢与混凝土粘结强度的研究

自 1962 年开始,包括 Bryson 和 Mathey 在内的国内外学者进行了很多关于型钢混凝土粘结性能的试验研究,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注重于型钢混凝土柱中的剪力传递能力,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试验主要有两种类型,即推出试验(push-out test)[图 1.5(a)]和短柱试验(short-column test)[图 1.5(b)]。短柱试验虽然更接近于型钢混凝土柱的真实受力情况,但是推出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

* $1\text{kgf/cm}^2 = 9.80665 \times 10^4\text{Pa}$,下同。

凝土粘结滑移试验研究中较常用的试验方法。

Brgson 和 Mathey 于 1962 年进行了最早的推出试验,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,在现场喷砂(让型钢在空气中暴露一个月后再喷砂处理)、喷砂后生赤锈(喷砂后一个月内用盐溶液使型钢表面锈蚀)两种情况下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。当型钢与混凝土之间发生较大相对滑移(自由端滑移量为 0.0254mm)后,三种表面的粘结强度又很接近。

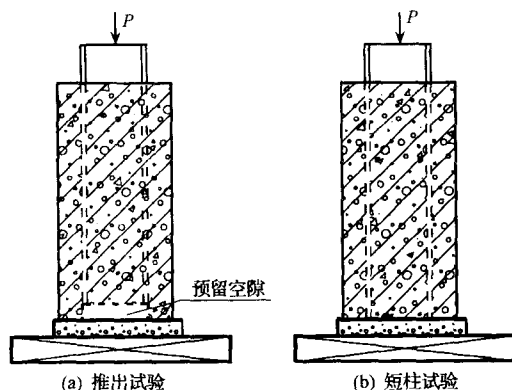


图 1.5 型钢混凝土粘结强度的两种主要试验形式

Hawkins 于 1973 年进行的型钢混凝土推出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在型钢与混凝土发生较大相对滑移之前,横向配箍率的大小对粘结强度的影响不大,但是当型钢混凝土发生粘结滑移之后,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时,型钢截面尺寸对型钢混凝土粘结性能没有明显影响。

Roeder 在 1984 年所进行的型钢混凝土推出试验中,首次考虑了粘结应力沿型钢锚固长度的变化,并在试验中通过在型钢翼缘密布电阻应变片的方法(见图 1.6),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 1.7)。

Roeder 的试验结果如下所述。

1) 通过与 Bryson、Mathey 和 Hawkins 的试验结果进行对比分析,并用自己的试验结果进一步验证,提出型钢与混凝土之间的粘结主要靠翼缘与混凝土的粘结作用,而腹板与混凝土之间的粘结作用很小,可以忽略。

2) 在使用荷载作用下,型钢混凝土的粘结应力在锚固长度上不同位置处的分