

UNNINGTU
GONGCHENGZHILIANGKONGZHI

混凝土

工程质量控制

■ 曲德仁 主编

中国建筑工业出版社



混凝土工程质量控制

曲德仁 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土工程质量控制/曲德仁主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005
ISBN 7-112-07692-7

I. 混... II. 曲... III. 混凝土施工-工程质量-质量控制 IV. TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 096999 号

本书以混凝土工程质量控制为主线, 用简明通俗语言、动态变化观点、层次思维逻辑, 采取了总体概括、内容浓缩、重点深化展开的方式, 将规范规定、基本理论、工程经验有机结合, 对质量要素的影响表现、作用机理及相应的控制措施进行了较为全面、系统的分析阐述。本书共分 11 章: 第 1~第 4 章主要说明混凝土结构工程质量目标及目标如何通过设计、施工、验收进行程序的过程控制; 第 5、第 6 章重点讨论分析混凝土结构裂缝控制与混凝土结构工程防水; 第 7~第 11 章分别讨论混凝土碱骨料反应及预防、高性能混凝土、混凝土冬期施工、混凝土外加剂及混凝土结构的原材料控制。

本书适宜设计、施工、监理等单位工程技术人员与工程管理人员参照使用。

责任编辑: 岳建光 张幼平

责任设计: 刘向阳

责任校对: 刘 梅 关 健

混凝土工程质量控制

曲德仁 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17¼ 插页: 1 字数: 306 千字

2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 45.00 元

ISBN 7-112-07692-7

(13646)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

自从 19 世纪初波特兰水泥问世以来，由于混凝土与钢筋两种材料性能优势的互补，由于现代科学技术迅速发展的牵动，由于人类社会经济腾飞的促进，钢筋混凝土结构在工程建设中已经显示了经久不衰的强大生命力；一片片宏伟壮观的钢筋混凝土建筑群拔地而起，构成了现代文明城市的光辉景象；由建筑工程产品塑造的一幅幅生动画面，已经展示了人类历史进程的时代象征。

建筑工程产品与其他一般产品相比较，具有不同的特点：建筑规模大、投资数额高、建设使用周期长、土建、水、暖、电专业配套制约因素多、建筑结构各构件间质量相互影响的相关性强。在混凝土结构中，混凝土与钢筋相匹配，由于二者之间的粘结力、基本相同的温度线膨胀系数及混凝土对钢筋的保护作用；根据二者不同的受力性能，混凝土抗压强度高，抗拉强度低，钢筋抗压、抗拉强度均很高，将钢筋设置在受拉区；使混凝土结构受力性能好、承载能力大、整体刚度强、施工成型方便，又具有较高的工程耐久性。

我国水泥产量大，居世界首位，约占世界总量 1/3，1995 年统计 4.3 亿 t，砂、石骨料就地取材，工程造价低；混凝土结构广泛地应用于现代各种工程建设，应用地量大面广，1995 年我国的混凝土用量高达 15 亿 m^3 。建筑工程百年大计，重大工程质量事故仍时有发生，使建筑结构毁坏倒塌，耐久性严重劣化，并造成人员伤亡和财产损失。无论从建筑工程的产品特点，或是从混凝土结构的广泛应用，还是从已经出现重大工程质量事故及结构耐久性提前失效的惨痛深刻教训，均已充分说明了混凝土工程质量的重要性。尤其在住房已经商品化的现代社会，建筑工程产品质量不仅是自身功能与价值的体现，同时也是社会信誉与效益的标志，而且已经成为市场竞争与进攻的武器；工程质量直接牵动着千家万户人民群众的切身利益，工程质量控制也是代表人民根本利益、构建和谐社会的重要表现；如何保证混凝土工程质量具有特殊的重要意义。

我国正处于基本建设高峰期，作为国家支柱产业的建筑业，必须确立“质量兴业、科技推动、管理保证”的建设方针。国家通过制定实施《中华人民共和国建筑法》、《建设工程质量管理条例》及一系列相关的技术法规与指

导性文件，将建筑工程的质量与执行过程纳入法律化、规范化、程序化、标准化管理控制，体现了国家对建筑工程质量的重视，并为建设行为的实施制定了准则与方法。为了保证混凝土结构工程的设计与施工验收质量，做到安全适用、技术先进、经济合理，2001~2002 年国家先后修订颁发了《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）、《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204—2002）、《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2001）、《地下工程防水技术规范》（GB 50108—2001）、《地下防水工程质量验收规范》（GB 50208—2002）、《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）、《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）、《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2002）等系列规范与标准。

建筑工程规模大、建设周期长、使用功能要求高、所含质量要素多、多专业多工种多工序交叉配合，使工程建设的组织协调管理最复杂，积各类科学知识专业技术最广泛。建筑工程的精心设计、有序施工、严格验收应当构成一个大的质量保证体系，要从总体过程进行宏观控制并进行有机协调，要从分解过程进行微观控制并进行操作实施。这就要求每个建设者首先要提高自身的科技水平，不仅要在自身工作岗位的专业技术知识有纵向深度，还要有向周边相关专业、相关过程辐射扩展的横向广度。作为一个好的设计师应当了解施工与验收，一个好的施工管理、工程技术人员应当熟悉设计与验收，一个好的监理工程师必须熟悉设计与施工。

本书根据新颁发实施的规范与建筑工程大的质量保证体系实施要求，以应用技术出发，从建筑总体高度说明了混凝土工程质量要素：结构安全性，适应性，耐久、抗震性，耐火性，工程美观性，环保性各自包含的内容及相互间的相关关系；从工程建设程序角度说明了质量六要素在设计、施工、验收三个执行程序中如何进行控制及程序间相互的制约关系；对工程建设执行过程中所碰到的具体工程实际问题，有针对性地作专题性讨论分析；在专题讨论中对大体积混凝土温控养护、地下防水工程基础底板厚度、截面底部纵向受拉钢筋最小配筋率、冷轧带肋钢筋的使用、结构主体防水刚柔相济原则的外防水层设置、后浇带间距确定条件、防水外加剂减少收缩作用与补偿收缩作用的相关关系等问题，提出了分析看法与意见，可能与传统的认识与作法有所不同，尽管错误难免，还是大胆地提出探讨。

本书集编者长期在高校任教多学科的教学理论，近 10 余年在建设、施工、监理各单位工程实践的工作经验，学习领会国家新近颁发实施的标准规范规定并吸取近期新的科研信息成果，以混凝土工程质量控制为主线，用简明通俗语言、动态变化观点、层次思维逻辑，采取了总体概括、内容浓缩、

重点深化展开的方式，将规范规定、基本理论、工程经验有机融合，对质量要素的影响表现、作用机理及相应的控制措施进行了较为全面系统的分析阐述。本书适宜设计、施工、监理等单位工程技术人员与工程管理人员参照借鉴。

本书内容共分 11 章：第 1～第 4 章主要说明混凝土结构工程质量目标及目标如何通过设计、施工、验收进行程序的过程控制，其中重点阐述了混凝土结构施工与耐久性质量控制。第 5、第 6 章重点讨论分析混凝土结构裂缝控制与混凝土结构工程防水。后 5 章分别讨论混凝土碱骨料反应及预防、高性能混凝土、混凝土冬期施工、混凝土外加剂及混凝土结构的原材料质量控制。

本书由曲德仁(大连理工大学)主编，参加编写工作的有赵玉起、唐永胜(中国港湾建设总公司)，张大伟(长春中山实业集团有限公司)、王新民(北京大胡子混凝土外加剂有限公司)、张鹰(长春龙家堡机场建设指挥部)、李晓庆(营口市规划和国土资源局)、惠凯(大连市港口与口岸局)、宫本命(大连市云翔建设集团有限公司)、夏敬臣(鞍山市民用建筑设计研究院)、刘景玉(葫芦岛市建设工程质量监督站)、田虹(营口市建设工程质量监督站)。

本书的编写要感谢大连理工大学王清湘教授的帮助。由于作者水平有限，时间仓促，谬误之处在所难免，敬请建筑界专家、同行、读者批评指正，提出宝贵意见，并致以诚挚的谢意。

曲德仁

2005 年 6 月于大连

目 录

第 1 章 混凝土工程质量目标	1
1.1 混凝土结构工作特性	1
1. 受力性能	1
2. 粘结力	3
3. 结构刚度	5
4. 变形特点	6
5. 环境影响	7
1.2 混凝土工程质量目标	8
1. 工程质量目标	8
2. 全面质量管理基本特征	9
3. 全面质量管理实施	9
4. 质量目标提高	10
1.3 分项质量目标	10
1. 安全性	10
2. 适用性	10
3. 耐久性	11
4. 抗震性、耐火性	11
5. 美观性	11
6. 环保性	12
1.4 民用建筑工程室内环保性控制	13
1. 室内环境污染	13
2. 室内环境污染控制	13
第 2 章 混凝土结构设计质量控制	20
2.1 新规范的特点	20
2.2 结构安全性设计	21
1. 设计表达式	21
2. 术语概念	22
3. 控制标准	23
2.3 结构适用性设计	24
1. 验算表达式	24
2. 裂缝控制	24
3. 变形控制	25
2.4 结构抗震设计	26
1. 地震概念	26

2. 地震灾害	27
3. 抗震设计	27
2.5 结构设计质量问题	29
第3章 混凝土结构耐久性控制	31
3.1 耐久性损害表现	31
3.2 不重视耐久性后果严重	32
3.3 影响因素与作用机理	34
3.4 耐久性控制的管理对策与技术措施	35
1. 管理对策	35
2. 材料选用与合理配比	36
3. 提高混凝土强度等级	36
4. 提高水泥强度等级	37
5. 保护层应有足够厚度	37
6. 限制氯离子含量	38
7. 减少冻融破坏措施	40
8. 预防化学侵蚀	43
9. 掺加矿物掺合料	45
10. 使用性能良好的外加剂	54
11. 采取有利的构造措施	54
12. 施工管理与技术措施	55
13. 耐久性控制的专题讨论	56
3.5 规范的耐久性规定	56
1. 耐久性设计原则	56
2. 设计使用年限 50 年的混凝土结构	57
3. 设计使用年限 100 年的混凝土结构	58
4. 混凝土的抗冻性与抗渗性	59
3.6 混凝土结构耐久性质量控制框图	60
第4章 混凝土结构施工质量控制	62
4.1 施工质量控制概述	62
4.2 施工组织设计	63
1. 组织机构	63
2. 施工准备	65
3. 施工部署	65
4. 施工工艺	67
5. 施工管理	68
4.3 施工质量控制体系	68
4.4 施工工艺作业控制	68
1. 模板工程	68
2. 钢筋工程	71
3. 混凝土工程	76
4.5 施工注意事项	79

4.6 施工技术方案	84
1. 施工方案的作用	84
2. 某工程地下室基础底板施工方案	85
3. 某水厂清水池混凝土施工浇筑方案	91
4.7 检查验收控制	100
1. 检查与验收	100
2. 验收单元与程序	101
3. 验收项目与标准	102
4.8 施工监理控制	107
1. 监理机构	107
2. 监理规划	107
3. 监理职责	108
4. 监理质量控制	108
4.9 混凝土结构施工过程质量控制程序框图	111
第5章 混凝土裂缝控制	112
5.1 裂缝的基本概念	112
1. 裂缝的广义概念	112
2. 裂缝的种类	113
3. 裂缝的分布与形式	115
5.2 混凝土的收缩与徐变	116
1. 混凝土的收缩变形	116
2. 混凝土的徐变变形	118
5.3 变形约束	120
1. 变形裂缝的动态理解	120
2. 变形约束	121
3. 混凝土的不裂条件	124
5.4 荷载裂缝	125
1. 拉弯构件一般试验分析	125
2. 裂缝最大宽度计算	126
3. 实际工程可能出现最大裂缝宽度讨论	127
5.5 收缩变形裂缝	129
1. 自约束裂缝	129
2. 外约束裂缝	130
5.6 温度变形裂缝	132
1. 温度变形与温度应力	132
2. 混凝土的水化热	133
3. 大体积混凝土温度裂缝	134
4. 季节降温引起裂缝	135
5. 突然降温引起裂缝	136
6. 应力集中引起裂缝	136
5.7 大体积混凝土温度裂缝控制措施	137

1. 混凝土强度等级	137
2. 材料选择	137
3. 外加剂选用	138
4. 强度龄期	138
5. 浇筑时间	138
6. 温控措施	138
7. 养护措施	139
8. 冷却水管	140
9. 构造措施	140
10. 减小约束措施	140
11. 施工要求	140
12. 表面处理	140
5.8 地基不均匀沉降引起裂缝	141
5.9 混凝土变形裂缝控制框图	141
第6章 混凝土结构工程防水	143
6.1 结构渗漏原因分析	143
1. 结构孔洞漏水	143
2. 构造孔隙渗水	144
3. 混凝土裂缝渗水	146
4. 薄弱工程部位渗漏	146
6.2 地下工程防水设计与施工	147
1. 防水等级与防水设防要求	147
2. 防水混凝土	148
3. 细部构造防水	151
4. 刚柔相济防水	155
5. 某供水厂水池伸缩缝堵漏处理方案	158
6.3 后浇带的取消与间距确定条件	161
1. 兼作沉降缝的取消条件	161
2. 作为伸缩缝的间距确定条件	162
3. 加强带	166
4. 关于某大学教学楼地下工程结构后浇带设置的建议	167
第7章 混凝土碱骨料反应及预防	171
7.1 碱骨料反应	171
7.2 碱骨料反应条件	172
1. 混凝土的碱含量	172
2. 骨料的碱活性	173
3. 环境条件的工程分类	173
7.3 碱骨料反应的预防措施	173
1. 工程类别规定	174
2. 工程材料规定	174
3. 工程责任规定	174

4. 工程验收规定	175
第 8 章 高性能混凝土	176
8.1 高强混凝土	176
1. 原材料选择	176
2. 配合比设计	177
3. 高强混凝土的施工	178
8.2 泵送混凝土	178
1. 原材料要求	179
2. 配合比要求	180
3. 设备选择与布置	181
4. 混凝土泵送与浇筑	187
第 9 章 混凝土工程冬期施工	190
9.1 冬期施工的技术措施	190
1. 原材料与配比及外加剂选用	190
2. 原材料保温与加热	190
3. 混凝土的搅拌、运输、浇筑、振捣及拆模	191
4. 综合蓄热法	191
5. 测温要点	192
9.2 大石桥市天富广场冬期施工	193
1. 工程概况	193
2. 冬施技术措施	193
3. 结果与分析	194
第 10 章 混凝土外加剂	196
10.1 外加剂定义与功能	196
10.2 外加剂分类	197
10.3 减水剂	197
1. 减水剂作用	197
2. 减水剂作用机理	198
3. 减水剂品种	199
10.4 外加剂的质量标准	201
1. 国家标准《混凝土外加剂》	201
2. 国家建材行业标准《砂浆、混凝土防水剂》	204
3. 国家建材行业标准《混凝土防冻剂》	211
10.5 外加剂选用	212
1. 外加剂选用原则	212
2. 关于补偿收缩混凝土的讨论	216
第 11 章 普通混凝土结构原材料质量与配合比设计	219
11.1 材料组成及质量要求	219
1. 细骨料质量(砂)	219
2. 粗骨料质量(石子)	223
3. 拌合与养护用水质量	228

11.2 水泥技术性质	228
1. 硅酸盐水泥的生产及矿物组成	229
2. 硅酸盐水泥的凝结硬化机理	231
3. 硅酸盐水泥的技术性质	233
4. 混合材料及其他品种水泥	234
11.3 混凝土的主要技术性质	238
1. 混凝土拌合物的和易性	238
2. 混凝土强度	242
11.4 混凝土配合比设计	247
1. 概念术语	247
2. 配合比设计方法步骤	249
3. 配合比设计实例	254
11.5 钢筋质量	257
1. 钢筋种类	257
2. 钢筋的力学性能	258
11.6 产品型原材料质量控制	261
附图 1 混凝土工程质量动态控制框图	
附图 2 产品质量保证体系动态管理框图	
参考文献	263

第 1 章 混凝土工程质量目标

建筑工程是指建设单位的具有确定质量标准、投资限额及建设时间约束条件，经规划、勘察、设计、施工、验收等有关人员物化劳动形成具有特定使用功能空间的物质的载体，并使其达到预定建设目标的一次性建设活动。这种建设活动必须遵循国家的基本建设程序与有关的建设法律法规、技术规范标准，最终形成具有商品性质的建筑产品。在此，建筑工程具有建筑工程产品与建筑工程产品形成的建筑活动双重含意。

在一个工程建筑中，承受荷载并起骨架作用的部分称为结构。结构是由构件单元通过一定连接方式组成，构件单元根据支承情况与相互的线性刚度比，一般可分为铰接、刚接、固接 3 种连结方式。一般房屋建筑是由屋盖、楼盖、墙、柱、基础 5 部分组成。当建筑载体的基础与主体结构采用混凝土为建筑材料，称为混凝土结构，普通钢筋混凝土结构还要配置一定数量的受力与构造钢筋；混凝土结构还应包括预应力混凝土结构、少筋或无筋素混凝土结构。混凝土结构工程一般称为混凝土工程，本书主要讨论整体现浇的普通钢筋混凝土结构，在工业与民用房屋建筑中，其主要结构型式包括框架结构、剪力墙结构、框架剪力墙结构、筒体结构、框架筒体结构。

1.1 混凝土结构工作特性

混凝土结构的建筑使用特点和使用过程的工作特性是确定混凝土结构工程质量目标及为实现质量目标而进行控制的依据。混凝土结构工作特性与组成结构的混凝土及钢筋材料特性，结构形式及构件截面的几何、配筋特征，作用荷载性质、大小及结构所处的使用工作环境有关。

1. 受力性能

混凝土的抗拉强度一般为抗压强度的 $1/15 \sim 1/10$ ，混凝土承受的拉应力一旦超过抗拉强度就要产生裂缝，混凝土只适于作受压构件，对于拉弯构件，如果在受拉区放置钢筋，就能使破坏性质改变，承载能力加大。

【例】 图 1-1 所示为一根混凝土强度等级 C20、截面 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、

跨长 2500mm 的简支梁，当为素混凝土时，只能承受 13.4kN 跨中集中荷载，当受拉区放 2 ϕ 12 钢筋后，破坏荷载提高为 87kN，承载能力提高 6.5 倍，而破坏由无先兆的脆性变为有先兆的塑性，发生了质的变化，这对人生安全具有重要意义。

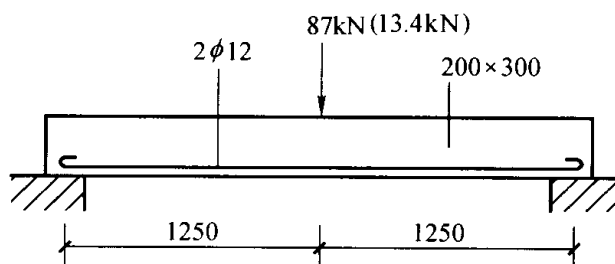


图 1-1 混凝土梁配筋后承载能力的提高

为了保证钢筋混凝土结构的承载力与破坏时的延性，设计规范对各种受力构件，尤其是受弯构件，规定了最小、最大配筋率的构造要求(如梁受拉钢筋最小配筋率 $\rho_{\min} = A_s / bh_0 = 0.2\%$)；其中最小配筋率的限值是保证梁的破坏发生在适筋梁的塑性范畴，保证承载能力，避免出现少筋脆性破坏，最大配筋率往往用相对界限受压区高度 ξ_b 表示($\xi_b = \beta_1 / (1 + f_y / E_s \epsilon_{cu})$)，用以限制纵向受拉钢筋最大用量，避免钢筋在屈服前受压区混凝土被压坏的超筋脆性破坏。同时，为了增加结构延性，规范对按一、二级抗震等级设计的框架结构的钢筋材性提出要求，钢筋抗拉强度的实测值与屈服强度的实测值的比值不应小于 1.25，钢筋屈服强度实测值与强度标准值的比值不应大于 1.30，其目的是保证强柱弱梁，使梁端出现塑性铰之后有足够的转动变形能力，达到结构充分吸收地震能量裂而不倒的目的。

钢筋的另外一个作用是抑制混凝土的收缩变形。对于受弯构件，放在受拉区的钢筋在弯矩作用下能与混凝土共同承受拉力，当混凝土一旦开裂，拉力可由钢筋承受，减缓了裂缝向上的延伸；同时由于裂缝出现，在裂缝截面两侧产生的局部粘结应力也约束了裂缝的扩展，使裂缝每隔一定间距产生，对裂缝起到分散作用。随着配筋率的增加，钢筋直径的变细及表面形状的凹凸变化的粘结力增加，分散作用加强，裂缝间距减小，裂缝宽度也相应减小。裂缝间距小的窄缝相对于裂缝间距大的宽缝其工程危害程度要小得多，特别是对地下防水工程，窄缝渗水程度小，即使渗水也有可能碳化愈合；为此，对板式构件在非传力方向(如单向板长跨方向)或厚度较大时，规范也规定了构造配筋要求；同时，构造配筋与受力钢筋也能形成钢筋骨架，便于受力钢筋的安装绑扎与混凝土的浇筑成型。

2. 粘结力

混凝土构件受力之后，在混凝土与钢筋接触表面产生的剪应力称为粘结应力，粘结强度是指钢筋与混凝土之间发生粘结破坏时所能承担的最大剪应力。粘结应力与粘结强度一般统称为粘结力，粘结力是由混凝土与钢筋之间在受力状态下的化学胶结力、接触面摩擦力、钢筋表面横肋机械咬合力 3 部分组成。粘结力是混凝土与钢筋相匹配，共同承受荷载、共同协调变形、保证构件承载能力、减小混凝土裂缝开展宽度的合作基础。

(1) 粘结应力：粘结应力根据产生原因可分为弯曲粘结应力与局部粘结应力。

① 弯曲粘结应力：由构件受弯截面的弯矩变化产生，如图 1-2 所示，其作用是保证钢筋与混凝土共同变形，将混凝土的受力传递给钢筋，使二者共同工作。弯曲粘结应力沿梁长的变化与弯矩的变化率 dM/dx (即剪力 V) 成正比，对一般梁式受弯构件，最大粘结应力产生在支座附近的最大剪力处，如图 1-3 所示。

② 局部粘结应力：由构件开裂后混凝土恢复弹性变形的回缩产生，如图 1-4 所示，其作用是约束了裂缝截面两侧混凝土的回缩滑移，限制了裂缝开展宽度，使裂缝每隔一定间距产生。受弯构件在支座弯矩最大处一旦产生裂缝，只要粘结强度与锚固长度保证，抗弯的受拉钢筋不会被拔出，使受拉钢筋的强度得到充分发挥，如图 1-5 所示。

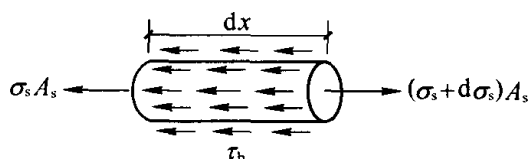


图 1-2 弯曲粘结应力的产生

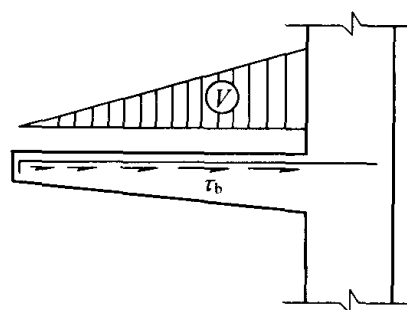


图 1-3 弯曲粘结应力分布



图 1-4 裂缝局部粘结应力

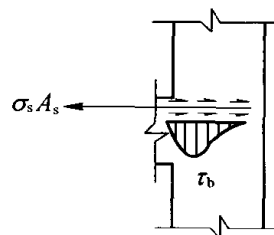


图 1-5 梁支座局部粘结应力

(2) 粘结强度：粘结强度一般通过钢筋拔出试验测定，粘结强度大小取决于混凝土强度等级、钢筋表面形状与保护层厚度。混凝土强度高，保护层厚度大，钢筋表面凹凸不平，粘结强度就大。一般 C20~C60 混凝土，光圆钢筋粘结强度 $\tau_u = (1.5 \sim 3.5) \text{MPa}$ ，螺纹钢筋 $\tau_u = (2.5 \sim 6.0) \text{MPa}$ 。

(3) 为了保证粘结力，工程设计与施工应采取如下措施：

① 锚固、搭接长度：受力钢筋在混凝土内要有一定的锚固与搭接长度，钢筋达到屈服时最小锚固长度为：

$$l_a = \frac{d f_y}{4 \tau_u} \quad (1-1)$$

式中 f_y ——钢筋屈服强度；

τ_u ——粘结强度；

d ——钢筋直径。

将 τ_u 、 f_y 代入，对一般热轧钢筋 $L_a = (20 \sim 40)d$ ，这就是原规范 GBJ 10—89 查表给出的纵向受拉钢筋最小锚固长度。新规范考虑到钢筋强度不断提高，结构形式多样化，再用查表方式很难确切表达，根据近年系统试验与可靠度分析，相应给出了纵向受拉钢筋锚固长度计算公式，对普通热轧钢筋为：

$$l_a = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad (1-2)$$

式中 f_y ——钢筋抗拉强度设计值；

f_t ——混凝土抗拉强度设计值，反映了粘结强度的影响，当混凝土强度等级高于 C40 时，按 C40 取值；

α ——钢筋表面形状系数，光圆钢筋取 0.16，带肋钢筋取 0.14。

此式说明，钢筋的最小锚固长度 l_a 与钢筋的直径、设计强度、表面形状及混凝土强度等级 4 个因素有关；为了使 l_a 不至于太长，而影响钢筋在构件端部不易锚固，工程设计采用的钢筋直径不宜太粗，一般直径不宜超过 25mm，直径过粗可能导致限裂构件正常使用时的裂缝开展宽度加大。

纵向受拉钢筋的抗震锚固长度 l_{ae} ，一、二级抗震等级 $l_{ae} = 1.15 l_a$ ，三级抗震等级 $l_{ae} = 1.05 l_a$ ，四级抗震等级 $l_{ae} = l_a$ 。非抗震绑扎搭接长度 $l_l = \zeta l_a$ ， ζ 为大于 1 的修正系数，由纵向钢筋搭接接头面积百分率确定，抗震搭接长度 $l_{le} = \zeta l_{ae}$ ，工程设计时，各种工况下纵向受力钢筋的锚固与搭接长度已根据上述计算由相应国家标准图集列表给出。

② 混凝土强度：粘结强度一般与混凝土强度成正比，为了保证粘结力，混凝土应具有一定强度，规范规定混凝土强度等级不低于 C15；当采用 HRB335、HRB400、RRB400 级钢筋时混凝土强度等级不低于 C20；预应力

混凝土结构不低于 C30。

③ 钢筋表面与端部处理：对强度较高的 HRB335、HRB400、RRB400 级钢筋表面轧制成螺纹带肋。对 HPB235 级光圆钢筋受拉时末端作成 180° 弯钩，平直段长度不小于 $3d$ ，对高强度钢丝采取小直径且表面刻痕或做成螺旋肋。

④ 保护层厚度：为了保证粘结力，受力钢筋要有一定保护层厚度，保护层厚度一般不小于纵向受力筋的直径，一般的板、梁、柱分别不小于 15、25、30mm。

通过上述构造措施，在一般情况下，混凝土结构或构件的弯曲粘结应力都不会超过粘结强度；即不会发生粘结破坏，也就是构件受力后钢筋不会在混凝土内产生相对滑移，保证了共同工作。应当指出：在施工阶段对受弯构件在混凝土没有达到一定设计强度之前过早拆模，由于混凝土抗拉强度很低，在自重及施工荷载作用下受拉区容易开裂，又由于粘结强度不大，一旦开裂又容易扩展加大裂缝宽度。对悬挑构件如拆模过早，很可能因粘结强度或锚固长度不足而发生钢筋被拔出的倒塌破坏事故。

3. 结构刚度

混凝土结构刚度是指结构在荷载作用下抵抗竖向与水平变位的能力。结构刚度包括构件刚度、节点连结刚度及构件通过节点连结形成的结构整体刚度；结构构件间的节点连结形式和相互的线性刚度比，决定了荷载、变形传递与内力分配；结构刚度是保证结构受荷后，减小变形，满足使用要求，合理传递荷载分配内力的前提；现浇混凝土结构刚度的作用表现如下：

(1) 水平结构在竖向荷载作用下抗弯刚度较大，可减少弯曲变形，主要指梁板结构在竖向荷载作用下产生的挠度较小。

(2) 竖向结构在水平荷载作用下抗侧移刚度较大，可减少水平位移，主要指高层建筑的墙、柱、筒体在水平地震或风荷载作用下的层间位移较小。

(3) 墙柱与楼板整体现浇保证结构整体性。结构整体刚度对结构抗震整体受力协调与整体变形协调具有重要意义。整体现浇楼板能使竖向构件墙、柱、筒体在水平地震荷载作用下，协调变形，整体工作，使地震剪力能按构件侧移刚度分配，保证了高层建筑结构筒体、剪力墙在水平荷载作用下的抗剪作用。同时地下室顶板与其他各楼层现浇板对竖向结构也起到嵌固与加肋作用，增加了结构稳定性。

(4) 梁柱节点的刚接实现结构形式的转变及结构由单层向多层的跨越。

【例】 图 1-6 所示为节点刚度对结构形式影响。

(A) 杆件节点全部铰接，在平面内为几何可变体系，不能承受荷载，无使用价值。