

■ 高丹盈 赵军 朱海堂 编著

GANGXIANWEIHUNNINGTU

SHEJIYUYINGYONG

钢纤维混凝土设计与应用

中国建筑工程工业出版社

钢纤维混凝土设计与应用

高丹盈 赵 军 朱海堂 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢纤维混凝土设计与应用/高丹盈等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2002
ISBN 7-112-05363-3

I. 钢… II. 高… III. 金属纤维-纤维增强混凝土
IV. TU528.572

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 080385 号

本书详细介绍了各类钢纤维的几何特征、物理力学性能、与混凝土的粘结性能, 钢纤维混凝土的配合比设计与工艺性能, 混凝土和钢纤维混凝土的基本性能, 钢纤维混凝土构件的设计计算方法; 重点论述了钢筋钢纤维混凝土基本构件的计算原理和设计方法; 总结了作者近年来在钢筋钢纤维增强部分混凝土梁、钢筋钢纤维混凝土牛腿受力性能方面的研究成果以及钢纤维混凝土的有关结构设计和在建筑、水利、交通等工程领域的应用现状和方法。

本书是一部面向科学研究、工程设计和施工技术人员的专业书, 可供建筑、水利、交通等工程领域的技术人员参考使用, 也可作为各相关专业的研究生教材和本科生的选修课教材使用。

钢纤维混凝土设计与应用

高丹盈 赵 军 朱海堂 编著

*

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

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 272 千字

2002 年 12 月第一版 2002 年 12 月第一次印刷

印数: 1—2,000 册 定价: 15.00 元

ISBN 7-112-05363-3

TU·4701 (10977)

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

钢纤维混凝土是一种新型复合建筑材料。与普通混凝土相比,钢纤维混凝土以其优良的抗拉、抗弯、抗剪、抗裂、阻裂、耐冲击、抗疲劳、高韧性等性能受到国内外学术界和工程界的极大重视。近年来,钢纤维的生产技术不断发展,用剪切法、铣削法、熔抽法、钢丝切断法生产的钢纤维的成本逐步降低;钢纤维混凝土及其配筋构件和结构性能的试验研究、理论分析、数值模拟、设计方法日趋完善;钢纤维混凝土的工程应用如火如荼,应用领域涉及道路桥梁工程、建筑工程、水利工程、港口工程、铁路工程、矿山工程、军事工程等。这些理论研究和工程应用表明,钢纤维混凝土可以满足工程中的高拉应力、复杂受力、抗裂、阻裂、增强和增韧等普通混凝土难以达到的受力性能要求,具有良好的社会效益、经济效益和广阔的应用前景。随着对钢纤维混凝土研究和应用的不断深入,有关钢纤维混凝土的科研成果层出不穷,其工程应用范围不断扩大,为进一步推动钢纤维混凝土理论研究和实际应用奠定了基础,积累了经验。

作者在国家自然科学基金、河南省杰出青年基金、河南省重点攻关项目以及其他一些工程应用项目的资助下,近年来不断收集和学习与钢纤维混凝土有关的论文、论著和研究成果,继续从事与钢纤维混凝土有关的科学研究和应用推广工作。在科学研究和工程实践中,作者认识到应该把我们在钢筋钢纤维增强部分混凝土梁、钢筋钢纤维混凝土牛腿受力性能的研究工作进行阶段总结,也十分有必要把《钢纤维混凝土结构设计施工规程》(CECS38:92)颁布以来,我们在钢纤维混凝土基本构件和结构设计方法等方面的学习体会进行归纳与概括,达到与国内外同行沟通交流、为研究生和本科生提供了解新知识和新方法的机会的目的。遗憾的是,目前正处于新旧规范更新交替、修订完善的特殊时期,国家标准《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)于2002年4月1日开始实施,《钢纤维混凝土结构设计施工规程》(CECS38:92)正在修订,将修订完善为《纤维混凝土技术规程》,在这种情况下,本书的出版只能是在思路、方法上与读者商讨,具体应用时还需要结合对新规范的学习不断完善。

本书分四部分,共14章。1~5章为第一部分,详细介绍各类钢纤维的几何特征、物理力学性能、与混凝土的粘结性能,钢纤维混凝土的配合比设计与工艺性能,混凝土和钢纤维混凝土的基本性能,钢纤维混凝土构件的设计计算方法;6~10章为第二部分,重点论述钢筋钢纤维混凝土基本构件的计算原理和设计方法;11~12章为第三部分,主要总结近年来我们在钢筋钢纤维增强部分混凝土梁、钢筋钢纤维混凝土牛腿受力性能方面的研究成果;13~14章为第四部分,包括与钢纤维混凝土有关的结构设计以及钢纤维混凝土在建筑、水利、交通等工程领域的应用现状和方法。

本书由高丹盈、赵军、朱海堂、张启明合作编写,具体分工为:第1、2、3、4章由高丹盈、朱海堂、赵军合作编写;第5、6、7、8、9、10章由高丹盈编写;第11、12章由高丹盈、赵军、朱海堂、张启明合作编写;第13、14章由赵军编写;赵军和张启明还

负责书中例题的编写工作，全书由高丹盈统稿。研究生徐磊、李趁趁、谢丽、汤寄予参加了有关的试验研究、理论分析和打印、绘图等工作。

本书注重理论、设计、应用三者的有机结合，力求反映钢纤维混凝土的最新研究动态与应用成果，是一部面向科学研究、工程设计和施工技术人员的综合性专著，可供建筑、水利、交通等工程领域的技术人员参考使用，也可作为各相关专业的研究生教材和本科生的选修课教材使用。

限于水平，书中可能存在许多不足，甚至错误，欢迎同行专家和广大读者批评指正。

编著者

2002 年 4 月于郑州

目 录

第 1 章	钢纤维的基本性能	1
第 1 节	钢纤维的生产方法	1
第 2 节	钢纤维的类型	2
第 3 节	钢纤维的几何及体积参数	3
第 4 节	钢纤维的性能	4
第 2 章	混凝土的基本性能	5
第 1 节	混凝土的特性及破坏	5
第 2 节	混凝土的强度	6
第 3 节	混凝土强度的影响因素	11
第 4 节	混凝土的变形	13
第 3 章	钢纤维混凝土的配合比设计及工艺性能	16
第 1 节	钢纤维混凝土的组成材料	16
第 2 节	钢纤维混凝土拌合料的性质	18
第 3 节	钢纤维混凝土的配合比设计	24
第 4 节	钢纤维混凝土的工艺性能	33
第 5 节	钢纤维混凝土质量检验	35
第 4 章	钢纤维混凝土的基本性能	38
第 1 节	钢纤维混凝土增强机理	38
第 2 节	钢纤维混凝土抗压强度	41
第 3 节	钢纤维混凝土抗拉强度	42
第 4 节	钢纤维混凝土抗折强度	44
第 5 节	钢纤维混凝土抗剪强度	45
第 6 节	钢纤维混凝土粘结强度	47
第 7 节	钢纤维混凝土弹性与韧性	49
第 5 章	钢纤维混凝土构件设计与承载力计算	52
第 1 节	计算原理	52
第 2 节	受压构件	53
第 3 节	受弯构件	55
第 4 节	局部受压	56
第 6 章	钢筋钢纤维混凝土受弯构件正截面设计与承载力计算	60
第 1 节	计算原理	60
第 2 节	单筋矩形截面	61
第 3 节	双筋矩形截面	69
第 7 章	钢筋钢纤维混凝土受弯构件斜截面设计与承载力计算	76
第 1 节	计算原理	76

第2节 斜截面设计	79
第8章 钢筋钢纤维混凝土受压构件设计与承载力计算	82
第1节 计算原理	82
第2节 小偏心受压构件	84
第3节 大偏心受压构件	86
第9章 钢筋钢纤维混凝土受拉构件设计与承载力计算	93
第1节 计算原理	93
第2节 轴心受拉构件	94
第3节 小偏心受拉构件	95
第4节 大偏心受拉构件	96
第10章 钢筋钢纤维混凝土构件正常使用极限状态的计算方法	101
第1节 计算原理	101
第2节 抗裂验算	102
第3节 裂缝宽度验算	103
第4节 挠度验算	107
第11章 钢筋钢纤维混凝土牛腿	110
第1节 概述	110
第2节 试验研究	111
第3节 受弯性能	116
第4节 受剪性能	125
第12章 钢筋钢纤维增强部分混凝土梁	136
第1节 浅梁受弯性能	137
第2节 浅梁受剪性能	144
第3节 深梁	149
第13章 钢纤维混凝土特定结构的设计	156
第1节 钢纤维混凝土抗震节点	156
第2节 钢纤维混凝土公路路面和机场道面	158
第3节 钢纤维混凝土工业建筑地面	159
第4节 钢纤维混凝土公路和城市道路桥面	160
第5节 钢纤维混凝土刚性防水屋面	161
第6节 预应力钢纤维混凝土轨枕	161
第7节 钢纤维混凝土局部增强预制桩	162
第8节 钢筋钢纤维混凝土冲切板	162
第9节 钢筋钢纤维混凝土构件局部受压	163
第14章 钢纤维混凝土应用实例	164
第1节 水利工程	164
第2节 建筑工程	166
第3节 交通工程	168
第4节 铁路工程	169
参考文献	172

第1章 钢纤维的基本性能

第1节 钢纤维的生产方法

钢纤维是用钢质材料加工制成的短纤维。钢纤维的生产方法主要有以下几种（见图1-1）：

1. 钢丝切断法

直径为0.4~0.8mm的冷拔钢丝，按照规定的长度用切刀、冲床或旋转刀具切断成短纤维。冷拔钢丝制作的钢纤维的抗拉强度可达1000~2000MPa。但是它的表面较光滑，与混凝土或水泥砂浆基体粘结强度较差。为了增强钢纤维与基体的粘结强度，通常可改变钢纤维的外形，即生产异型钢纤维的方法加以解决。其常用的方法有：

（1）压棱法。在切断钢丝前，用进给钢丝的夹送辊在钢丝上压出棱形凹坑后再切断。

（2）波形法。在切断钢丝前，用进给钢丝的夹送辊压出波形后再切断。

（3）弯钩法。在切断钢丝前，用进给钢丝的夹送辊等距离压出弯钩后再切断。

用冷拔钢丝切断法生产的钢纤维成本较高。工程中有时利用废旧钢丝绳拆开洗净，切断加工成钢纤维，则成本可以降低。

用钢丝切断法制成的钢纤维断面为圆形。也可以沿长度方向对钢纤维进行变形处理，加工成大头纤维。

2. 薄钢板剪切法

用冷轧薄钢板剪切而成。剪切前，用特制的小型纵剪机将冷轧薄钢板剪成带钢卷，其宽度与钢纤维的长度相同，然后将带钢卷连续送入旋转刀具或普通冲床切断成矩形截面的钢纤维。钢纤维的长度以带钢的宽度而定，钢纤维截面以切削时的进刀量与带钢卷的厚度而定。一般带钢卷的厚度要求在0.4~0.8mm，切削进刀量为0.4~0.6mm。旋转刀具的轴与薄板进给方向相互垂直或成一定角度，因此，薄钢板剪切法生产的剪切钢纤维一般都扭成一定的角度。薄钢板剪切法使用的原材料一般采用退火的冷轧钢板，为提高强度，也可使用未退火的冷轧钢板。由于冷轧钢板的成本较高，常采用边角料作为原材料以降低成

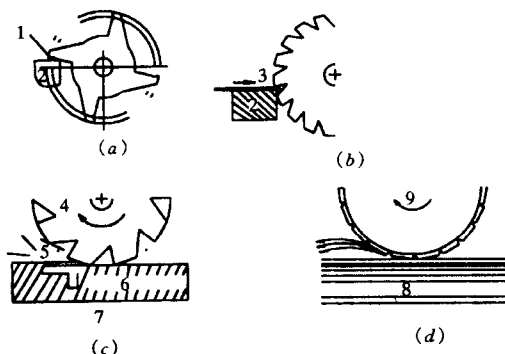


图1-1 钢纤维的生产工艺

（a）钢丝切断法；（b）薄钢板剪切法；

（c）铣削法；（d）熔钢抽丝法

1—钢丝；2—胎具；3—薄钢板；4—切

削刀轮；5—钢纤维；6—钢锭；7—运

送；8—熔钢；9—熔抽轮

本。

薄钢板剪切法生产的钢纤维截面为矩形。沿长度方向，也可制成弯钩形、波形等异型钢纤维。目前，我国生产的剪切钢纤维品种繁多，主要有：直角矩形截面，在长度方向稍有扭曲的剪切钢纤维；端部呈弯曲形的弯钩剪切钢纤维；表面凸压痕状的刻痕钢纤维；波形带钢剪切而成的压波钢纤维以及集束钢纤维。集束钢纤维是由几个甚至几十个纤维并排在一起，掺入拌合料时，与水以及砂、石搅拌，使集束钢纤维均匀分散在混凝土中。

3. 厚钢板铣削法

用旋转的平刃铣刀对厚钢板或钢锭进行铣削而成。铣削时钢纤维产生很大的变形，轴向扭曲，截面为月牙形，与混凝土或水泥砂浆基体的粘结性能良好。

4. 熔钢抽丝法（简称熔抽法）

用电炉将回收的废钢融成 1500~1600℃ 的钢液，然后在钢液表面，以一个高速旋转的熔抽轮接近钢液，熔抽轮上按照所需要的钢纤维尺寸的要求，刻出许多槽子。当熔抽轮下降到钢液面时，钢液被槽刮出，以高速旋转的离心力抛出，以极快的速度冷却成形。熔抽轮内必须通水，以保持冷却速度。

熔抽法生产的钢纤维的原材料为废钢，来源广泛，成本低，制造工艺简单，生产效率高，价格较低。同时，熔抽法利用电炉将废钢熔成钢液时，还可以调整钢液的化学成分，生产出不同材质的钢纤维。改变熔抽轮上刻槽的尺寸及熔抽轮的转速，可改变钢纤维的尺寸。

由于熔抽法甩出成型钢纤维时，全部暴露在空气中，过热的钢水易氧化，形成一层强度很低的氧化层，削弱了钢纤维的截面，对钢纤维与混凝土的粘结强度有一定影响。

第 2 节 钢纤维的类型

钢纤维的类型，可按外形、截面形状、生产工艺、材料品质、施工用途划分^[1]。

1. 按钢纤维的外形分

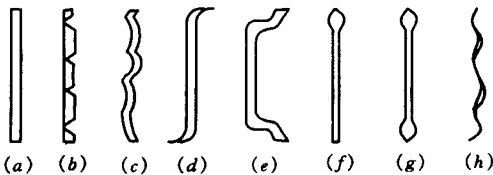


图 1-2 钢纤维的外形

如图 1-2 所示，有长直形 (a)、压痕形 (b)、波浪形 (c)、弯钩形 (d、e)、大头形 (f、g)、扭曲形 (h) 等。

2. 按钢纤维的截面形状分

如图 1-3 所示，有圆形 (a)、矩形 (b)、月牙形 (c) 及不规则形 (d) 等。

3. 按钢纤维的生产工艺分

如图 1-1 所示，有切断型钢纤维 (a)、剪切型钢纤维 (b)、铣削型钢纤维 (c) 以及熔抽型钢纤维 (d) 等。

这四种钢纤维的基本特征见表 1-1。

4. 按钢纤维的材质分

有普通碳钢钢纤维、不锈钢钢纤维。其中以普通碳钢钢纤维用量居多。

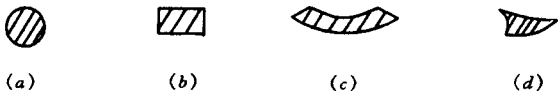


图 1-3 钢纤维的截面形状

5. 按钢纤维的施工用途分

有浇筑用钢纤维和喷射用钢纤维。

四种钢纤维的基本特征

表 1-1

类型	截面形状	表面状况	提高粘结力方法	抗拉强度 (MPa)
切断型钢纤维	圆 形	冷拔表面较光滑	压痕、折弯	600~2000
剪切型钢纤维	矩 形	切断面较粗糙	扭转、折弯	380~800
铣削型钢纤维	三角形	铣削面粗糙	扭转、折弯	380~800
熔抽型钢纤维	月牙形	氧化皮膜	两端较粗	380~800

第 3 节 钢纤维的几何及体积参数

表示钢纤维几何及体积的参数有钢纤维长度、直径（或等效直径）、长径比、体积率、钢纤维含量特征参数等。

钢纤维长度指钢纤维两端点间的直线距离，用 l_f 表示。钢纤维长度 (l_f) 不能太小，否则将影响其增强效率，但也不能过长，因为钢纤维太长不仅难以在混凝土中均匀分散，而且会在搅拌过程中结团，影响钢纤维作用的发挥。当钢纤维长度 (l_f) 大于其临界长度 (l_{fcr}) 时，钢纤维将产生拉断破坏，虽其强度得到了充分发挥，但增韧效果变差。因此，在选定钢纤维长度时，应使 $l_f < l_{fcr}$ ，这样才能对混凝土产生增强与增韧双重效果。钢纤维长度可为 15~60mm，常用的是 25~30mm。

钢纤维截面的直径或等效直径（当钢纤维为非圆形截面时，其截面积相当于圆形截面积时计算所得到的直径）用 d_f 表示。钢纤维与周围混凝土粘结面积与截面周界长度成正比，而拉力与截面面积成正比，二者的比值 ($4/d_f$) 与钢纤维的直径有关，反映了钢纤维与混凝土的相对粘结面积。直径较大的钢纤维的相对粘结面积减小，不利于极限粘结强度的改善。通常钢纤维直径为 0.3~1.2mm。

钢纤维的长径比指钢纤维的长度与直径或等效直径之比，即 l_f/d_f 。钢纤维长径比 (l_f/d_f) 越大，对混凝土的增强效果越好，但如果 $l_f/d_f > l_{fcr}/d_f$ ，钢纤维的破坏不是拔出而是拉断，影响增韧效果；另外，过长过细的钢纤维与混凝土的拌合过程中容易结团弯折，使钢纤维难以均匀分布和配向良好。若 l_f/d_f 太小，钢纤维易于拔出，其承载力下降，对混凝土的增强作用降低。因此， l_f/d_f 应小于 l_{fcr}/d_f 并大于一定数值，通常为 30~100，用得最多的是 50~70。影响 l_{fcr}/d_f 的主要因素为钢纤维混凝土界面粘结强度和钢纤维自身抗拉强度，界面粘结强度越高，其值相应减小，钢纤维本身抗拉强度越高，其值相应增大。

钢纤维体积率指钢纤维所占钢纤维混凝土体积的百分数，用 ρ_f 表示。钢纤维体积率的大小，决定了对混凝土增强增韧的程度以及破坏形态。但是钢纤维体积率也不能过大，钢纤维过多将使施工拌合更加困难，钢纤维不可能均匀分布，甚至严重结团；同时包裹在每根钢纤维周围的水泥胶体少，钢纤维混凝土就会因钢纤维与基体间粘结不足而过早破坏。因此，为了钢纤维作用的有效发挥，用钢纤维增强普通和高强混凝土基体的钢纤维体积率 ρ_f 不宜低于 0.5%，也不宜大于 3%，以 0.6%~2% 为宜。

钢纤维含量特征参数是钢纤维体积率与长径比的乘积，用 λ_f 表示，即 $\lambda_f = \rho_f l_f / d_f$ 。

在钢纤维体积率和长径比的一定范围内, 可以用 λ_f 反映 ρ_f 和 l_f/d_f 的综合影响。

第 4 节 钢纤维的性能

1. 抗拉强度

为使钢纤维混凝土具有良好的力学性能, 要求钢纤维具有一定的抗拉强度。根据钢纤维的材质和生产工艺不同, 其抗拉强度也有所区别。试验表明, 用冷拔钢丝切断的钢纤维抗拉强度较高, 一般为 600~1000MPa, 剪切型、熔抽型和铣削型钢纤维的抗拉强度一般为 380~800MPa。由于普通钢纤维混凝土主要是由于钢纤维拔出而破坏, 并不是因为钢纤维拉断而破坏, 钢纤维在破坏时承受的最大拉应力为 100~300MPa, 因此, 只要钢纤维的抗拉强度在 380MPa 以上, 一般能满足使用要求。

2. 弹性模量

钢纤维的弹性模量为 200GPa, 极限延伸率为 0.5%~3.5%。

3. 粘结强度

由于钢纤维混凝土的破坏主要是因钢纤维拔出引起的, 因此提高钢纤维与混凝土基体界面的粘结强度是十分重要的。粘结强度的提高除与基体的性能有关外, 就钢纤维本身来说, 应该从改进钢纤维表面和形状来改善它与基体的粘结性能。常用的方法有: 使钢纤维表面粗糙化, 截面呈不规则形状, 增加与基体的接触面积和摩擦力; 将钢纤维表面压痕, 或压成波形, 增加机械咬合力; 使钢纤维两端异型化, 将两端制成弯钩或大头形等, 以提高其锚固力或抗拔力。

4. 硬度

各种钢纤维的表面硬度较高, 在与混凝土一起搅拌时, 一般不易发生弯折现象。但有时由于钢纤维的材质较脆, 搅拌时也易发生折断, 影响增强效果。

5. 耐腐蚀性

浇筑在钢纤维混凝土内部的钢纤维, 只要捣固密实, 与空气隔绝, 钢纤维一般不发生锈蚀现象。暴露于混凝土表面或在裂缝宽度超过 0.25mm 时, 跨越裂缝处的钢纤维易锈蚀。

第2章 混凝土的基本性能

钢纤维和混凝土基体的性能是决定钢纤维增强、增韧效果以及钢纤维混凝土的破坏形式、强度和变形的主要因素。例如，混凝土基体特征对纤维—基体界面粘结和应力传递过程有很大的影响，对钢纤维混凝土的压缩性能起决定作用。另外，钢纤维混凝土结构构件的设计需要混凝土的强度指标。因此，在研究钢纤维混凝土性能及结构设计之前有必要对混凝土的基本性能作简单介绍。

第1节 混凝土的特性及破坏

普通混凝土由水泥、砂、石和水所组成。在混凝土中，砂、石起骨架作用，称为骨料；水泥与水形成水泥浆，包裹在骨料表面并填充其空隙。在硬化前，水泥浆起润滑作用，使混凝土拌合料具有一定的和易性，便于浇筑、施工。水泥浆硬化后，将骨料凝结成整体，共同承力、变形。混凝土材料的结构具有下列基本特点^[2]。

1. 多相性

混凝土材料是由基相与分散相以及结合面组成的三相复合材料，其力学性能受基相和分散相及其结合面力学性能的制约和影响。

2. 多孔性

水泥水化所需要的水远小于混凝土制配时满足和易性所要求的水。因此，加入混凝土中的水在混凝土硬化后，一部分与水泥水化，一部分残留在混凝土内，一部分挥发于空气中使混凝土形成许多微细的空隙。另外，混凝土结硬时，水泥砂浆收缩，当水泥砂浆收缩较大时，在骨料与水泥石的粘结面以及水泥石内部有可能产生细微的裂缝。因此，混凝土是一种多空隙、不均质的材料。

3. 裂缝和缺陷分布的随机性

由于混凝土骨料颗粒大小、形状、分布是随机的，因而其结合面上存在的裂缝的形状、尺寸、分布也是随机的。即使是硬化水泥浆中所包含的未被水化的水泥颗粒和孔隙，其位置、形状、大小的分布也具有随机性。

4. 时变性

混凝土拌合后，因水化作用，水泥浆在可能经历几个月、几年或几十年的过程中发生了一系列的化学变化和物理变化后，使得水泥浆体最终硬化。因此混凝土材料结构随着水泥水化过程而变化，其诸多物理和力学性能需要延续较长一段时间才能稳定，并且将受环境条件（如温度、湿度）的改变而变化。

混凝土材料结构的基本性能决定了在外力作用下，其裂缝开展或破坏过程呈以下三个阶段。

1. 预裂阶段

由于化学收缩、毛细管收缩及干燥收缩,在水泥石基材中预先就存在着许多微孔和原始裂缝;由于泌水作用、干燥作用、骨料与基材刚度的不一致,在骨料和基材交界面上也会出现许多尺度更大一些的孔洞和裂缝;构件成型时未排尽的气泡以及未水化的水泥颗粒表面也会成为原始裂缝存在于混凝土中,使混凝土在加荷前预裂。

2. 稳定发展阶段

当材料受荷后,由于界面区域比较薄弱,裂缝首先从该处引发。随着荷载的增大,这些裂缝在界面上延伸,并有一部分裂缝伸入基材。但是由于荷载所提供的能量不够大,材料中的裂缝阻挡单元足以阻挡或滞缓裂缝的扩展,因而裂缝生长缓慢。此阶段一般发生在破坏荷载的 85%~90% 以下,从外观上看,材料主要发生了弹性变形和部分塑性变形。

3. 失稳扩展阶段

当荷载继续增大时,若裂缝前沿的集中应力超过了一定数值,则应力强度因子达到其临界值, $K \geq K_c$, 或材料释放的能量达到了增加单位新表面积所需要的表面能数值,即应变释放率达到其临界值时, $G \geq G_c$ (能量判据),则裂缝失去稳定,快速地扩展开来,并很快相互贯通,导致整体的破坏。 K_c 、 G_c 就是材料由缓慢开裂到快速失稳的转折点时需要达到的临界值。

第 2 节 混凝土的强度

混凝土的强度和耐久性是混凝土最重要的物理力学性能。而混凝土的耐久性与混凝土的强度之间有密切的联系。一般来说,混凝土强度愈高,其刚性、密实性、抗渗性、抗风化和抗侵蚀介质的能力愈好;另一方面,混凝土强度愈高,脆性也愈大。因而,通常用混凝土强度来评定和控制混凝土的质量,并用混凝土强度反映基体对钢纤维混凝土强度的影响和贡献。

一、混凝土的抗压强度

1. 立方体抗压强度 f_{cu}

当前,世界各国确定混凝土强度等级的方法尚未统一。国际标准化组织 (ISO)、欧洲混凝土 (CEB)、国际预应力学会 (FIP) 以及美国、日本、加拿大等组织和国家规定采用直径为 150mm、高 300mm 的圆柱体,作为测定混凝土抗压强度的标准试块。俄罗斯、英国、德国和我国,以边长为 150mm 的立方体作为测定混凝土抗压强度的标准试块。

我国规范规定用边长为 150mm 的标准立方体试块,在标准养护条件 (温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 相对湿度不小于 90%) 下养护 28d,对混凝土强度等级低于 C30,以每秒 $0.3 \sim 0.5\text{N}/\text{mm}^2$,对强度等级等于或高于 C30,以每秒 $0.5 \sim 0.8\text{N}/\text{mm}^2$ 的速度在试验机上加压至破坏,所得的平均极限压应力作为混凝土的立方体抗压强度,用 f_{cu} 表示。即

$$f_{cu} = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

式中 f_{cu} ——混凝土立方体试块抗压强度 (MPa);

P ——破坏荷载 (N);

A ——试件承压面积 (mm^2)。

由于混凝土抗压强度与试块的尺寸和形状等因素有关,当试件的上、下表面不加润滑

剂加压时，立方体的尺寸越小，试块与压力机加压板之间摩擦力作用的影响就越大，测得的极限强度值越高，反之则越低。因此，当采用边长为 200mm 和 100mm 的非标准立方体试块时，应将立方体抗压强度的试验值分别乘以抗压强度“尺寸效应”换算系数 1.05 和 0.95 换算成标准尺寸混凝土试块的立方体抗压强度。

混凝土强度等级的定义为：边长为 150mm 的立方体试块，按照标准方法制作并养护 28d，用标准方法所测得的具有 95% 保证率的抗压强度，用 $f_{cu,k}$ 表示，即：

$$f_{cu,k} = \mu_{f_{cu}} - 1.645\sigma_{f_{cu}} = \mu_{f_{cu}}(1 - 1.645\delta_{f_{cu}}) \quad (2-2)$$

式中 $\mu_{f_{cu}}$ ——边长为 150mm 混凝土立方体试块抗压强度的平均值；

$\sigma_{f_{cu}}$ ——边长为 150mm 混凝土立方体试块抗压强度的标准差；

$\delta_{f_{cu}}$ ——边长为 150mm 混凝土立方体试块抗压强度的变异系数。

按照混凝土立方体抗压强度标准值，规范规定的混凝土强度等级为：C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60 共 12 个等级。强度等级的数值即为 $f_{cu,k}$ 值，例如 C40 即表示 $f_{cu,k} = 40\text{N/mm}^2$ 的混凝土。

2. 轴心抗压强度 f_c

试验表明，同样边长的混凝土试件，随着高度的增加（即由立方体变为棱柱体），其抗压强度将下降。但当高宽比 h/b 超过 3 以后降低幅度很小。通常认为，用高宽比为 2~3 的棱柱体测得的抗压强度与以受压为主的混凝土构件中的混凝土抗压强度基本一致，将它作为以受压为主的混凝土结构构件的抗压强度，称为轴心抗压强度或棱柱体抗压强度，用 f_c 表示，即：

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (2-3)$$

式中 f_c ——混凝土轴心抗压强度 (MPa)；

P ——破坏荷载 (N)；

A ——试件承压面积 (mm^2)。

我国采用 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 棱柱体作为混凝土轴心抗压强度试验的标准试件，按照标准方法测得的强度总体分布具有 95% 保证率的抗压强度，用 f_{ck} 表示，即：

$$f_{ck} = \mu_{f_c}(1 - 1.645\delta_{f_c}) \quad (2-4)$$

式中 δ_{f_c} ——混凝土轴心抗压强度变异系数。

采用非标准尺寸试件测得的轴心抗压强度值应乘以尺寸换算系数，其值为：对于 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 截面试件为 1.05，对于 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 截面试件为 0.95。

二、混凝土的抗拉强度 f_t

混凝土抗拉强度远小于其抗压强度，一般只有抗压强度的 $1/9 \sim 1/18$ ，且不与抗压强度成线性关系。混凝土构件的抗裂、抗剪、抗扭、收缩、粘结、混凝土强度破坏理论等问题的研究与应用都与混凝土抗拉强度有关。

测定混凝土抗拉强度的方法分为两类。一类为直接测试方法，一般采用的轴心抗拉试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$ （见图 2-1），两端分别对中设置埋长为 150mm 的变形钢筋，用试验机夹头夹住两端外伸的钢筋对试件施加拉力。试件将在中部不配筋区段内被拉断，其平均拉应力即为混凝土的轴心抗拉强度，用 f_t 表示。即：

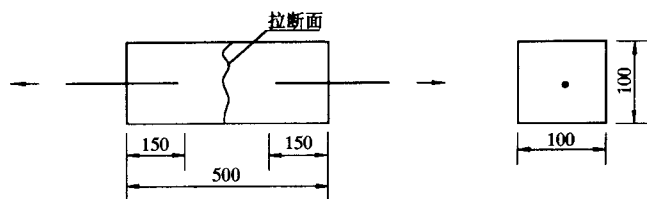


图 2-1 混凝土轴心抗拉试件

$$f_t = \frac{P}{A} \quad (2-5)$$

式中 f_t ——混凝土轴心抗拉强度 (MPa);

P ——破坏荷载 (N);

A ——试件承压面积 (mm^2)。

这种形式下的试验对试件尺寸及钢筋位置要求较严。与混凝土抗压强度类似,混凝土轴心抗拉强度的标准值为:

$$f_{tk} = \mu_{f_t}(1 - 1.645\delta_{f_t}) \quad (2-6)$$

式中 δ_{f_t} ——混凝土轴心抗拉强度变异系数。

另一类为间接测试方法,如劈裂试验、弯折试验等。劈裂试验如图 2-2 所示,所采用的试件与确定混凝土强度等级的试件相同。在我国,标准试件为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的立方体,美国等为 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的圆柱体,通过上下压板与试件之间各垫以圆弧形钢垫条及垫层对试件纵向中间截面施加压力。

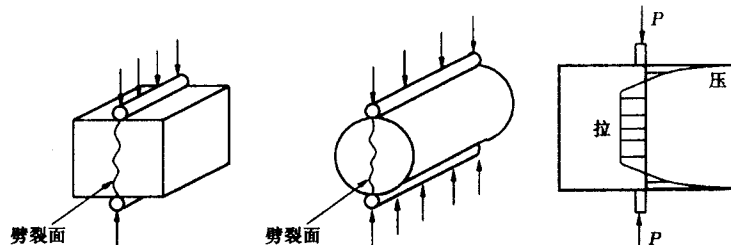


图 2-2 劈裂试验

由弹性力学分析可知,在试件的垂直中面上除加力点附近的局部区域外,将产生均匀的水平拉应力,当拉应力增大到混凝土抗拉强度时,试件沿垂直中面被劈裂成两半。如果采用立方体试件时,混凝土的劈裂强度可按下列公式计算:

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi A} = 0.637 \frac{P}{A} \quad (2-7)$$

式中 f_{ts} ——混凝土劈裂抗拉强度 (MPa);

P ——破坏荷载 (N);

A ——试件劈裂面面积 (mm^2)。

试验表明,试件尺寸愈小,劈裂强度愈高。另外垫条的大小、形状和材料性能对劈裂试验结果均有影响,如加大垫条的截面尺寸,可提高试件的劈裂强度。因此,我国规范规定,必要时可采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 非标准尺寸的立方体试件。采用 $100\text{mm} \times$

100mm×100mm 非标准试件取得的劈裂抗拉强度值, 应乘以尺寸换算系数 0.85, 并且非标准试件混凝土所用骨料的最大粒径不应大于 20mm。

如采用圆柱体试件, 混凝土的劈裂强度按下式计算:

$$f_{ts} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (2-8)$$

式中 d ——圆柱体的直径;

l ——圆柱体的长度。

对于弯折试验, 采用 150mm×150mm×600 (550) mm 小梁作为标准试件, 三分点对称加载见图 2-3。试件破坏时如折断面位于两个集中荷载之间时, 以弹性理论为依据可按式计算混凝土的抗折强度, 即:

$$f_{tf} = \frac{PL}{bh^2} \quad (2-9)$$

式中 f_{tf} ——混凝土抗折强度 (MPa);

P ——破坏荷载 (N);

L ——支座间距, 即跨度 (mm);

b ——试件截面宽度 (mm);

h ——试件截面高度 (mm)。

试验表明, 抗折强度随试件高度的减小而增大, 这主要是由于截面上应变梯度的影响, 梁高愈小, 应变梯度愈大, 受拉区混凝土塑性发展愈充分, 抗折强度就愈大。为考虑尺寸效应的影响, 我国规范规定采用 100mm×100mm×400mm 非标准试件时, 梁的抗折强度值应乘以尺寸换算系数 0.85, 同时, 混凝土中骨料的最大粒径不应大于 30mm。

三、混凝土有关的强度标准值与混凝土强度等级的关系

混凝土的强度等级是衡量混凝土质量好坏的重要标志, 但是一般并不直接参与结构计算。这是因为用于确定混凝土强度等级的混凝土立方体, 其形状和受力特性与实际结构并不相同。为了使结构构件的计算结果能够反映结构的实际情况, 需要采用混凝土的其他强度指标, 如混凝土的轴心抗压强度、弯曲抗压强度和轴心抗拉强度等。

1. 轴心抗压强度 f_{ck}

根据混凝土轴心抗压强度和立方体抗压强度的对比试验结果, 统计分析得两者的平均值之间的关系式为:

$$\mu_{f_c} = 0.76\mu_{f_{cu}} \quad (2-10)$$

实际构件中混凝土的受力情况和棱柱体试块的受力情况是不同的。考虑这一差别, 根据工程经验和试验结果, 尚需乘以一个 0.88 的修正系数。因此结构中混凝土轴心抗压强度的平均值 μ_{f_c} 与立方体抗压强度平均值 $\mu_{f_{cu}}$ 的关系式为:

$$\mu_{f_c} = 0.88 \times 0.76\mu_{f_{cu}} = 0.67\mu_{f_{cu}} \quad (2-11)$$

根据混凝土强度标准值的取值标准, 同时假定 $\delta_{f_c} = \delta_{f_{cu}}$, 可得到结构中混凝土轴心抗压强度标准值的计算公式为:

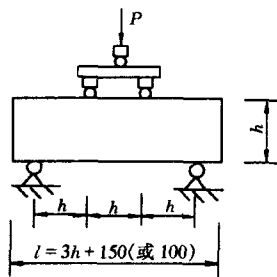


图 2-3 弯折试验

$$f_{ck} = \mu_{f_c}(1 - 1.645\delta_{f_c}) = 0.67\mu_{f_{cu}}(1 - 1.645\delta_{f_{cu}})$$

$$= 0.67 \frac{f_{cu,k}}{(1 - 1.645\delta_{f_{cu}})}(1 - 1.645\delta_{f_c}) = 0.67f_{cu,k} \quad (2-12)$$

2. 弯曲抗压强度 f_{cmk}

在受弯和偏心受压、偏心受拉构件中，受压区临近破坏时混凝土压应力图形为非线性分布。为了简化计算，用一个等效的矩形压应力图代替实际的复杂压应力图，此时的等效矩形压应力图上混凝土的应力定义为混凝土的弯曲抗压强度。因此，弯曲抗压强度只是一种折算强度，不是混凝土的实际强度。我国规范 GBJ10—89 根据试验结果取：

$$f_{cmk} = 1.1f_{ck} \quad (2-13)$$

美国、加拿大、英国等许多国家以及我国规范 GB 50010—2002 和 SL/T 191—96 等均取 $f_{cmk} = f_{ck}$ 。

3. 轴心抗拉强度 f_{tk}

根据轴心抗拉强度和立方体抗压强度的对比试验结果，经统计分析，可得轴心抗拉强度平均值 μ_{f_t} 与立方体抗压强度平均值 $\mu_{f_{cu}}$ 的关系式为：

$$\mu_{f_t} = 0.26\mu_{f_{cu}}^{2/3} \quad (2-14)$$

考虑到实际构件的受力情况和试块受力情况的不同，需进行修正，近似取与轴心抗压强度相同的修正系数 0.88，得到结构中混凝土轴心抗拉强度平均值 μ_{f_t} 的计算公式为：

$$\mu_{f_t} = 0.88 \times 0.26\mu_{f_{cu}}^{2/3} = 0.23\mu_{f_{cu}}^{2/3} \quad (2-15)$$

根据混凝土强度标准值的取值原则，并假定 $\delta_{f_t} = \delta_{f_{cu}}$ ，得到结构中混凝土轴心抗拉强度标准值的计算公式为：

$$f_{tk} = \mu_{f_t}(1 - 1.645\delta_{f_t}) = 0.23\mu_{f_{cu}}^{2/3}(1 - 1.645\delta_{f_t})$$

$$= 0.23 \left[\frac{f_{cu,k}}{1 - 1.645\delta_{f_{cu}}} \right]^{2/3} (1 - 1.645\delta_{f_t}) = 0.23f_{cu,k}^{2/3}(1 - 1.645\delta_{f_{cu}})^{1/3} \quad (2-16)$$

考虑到高强混凝土的脆性特点和工程经验不足，我国规范 GBJ10—89 对 C45、C50、C55 和 C60 混凝土抗压、抗弯和抗拉强度标准值，除按式 (2-12)、式 (2-13)、式 (2-16) 计算外，还应分别乘以脆性折减系数 0.975、0.95、0.925 和 0.90，便可得到规范 GBJ10—89 中混凝土的各种强度标准值，见表 2-1。

混凝土强度标准值 (N/mm²)

表 2-1

强度种类	符 号	混 凝 土 强 度 等 级											
		C7.5	C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心抗压	f_{ck}	5.0	6.7	10	13.5	17	20	23.5	27	29.5	32	34	36
弯曲抗压	f_{cmk}	5.5	7.5	11	15	18.5	22	26	29.5	32.5	35	37.5	39.5
抗 拉	f_{tk}	0.75	0.9	1.2	1.5	1.75	2	2.25	2.45	2.6	2.75	2.85	2.95

四、混凝土的强度设计值

一般地，对钢筋和混凝土，材料强度设计值定义为：

$$\text{材料强度设计值} = \frac{\text{材料强度标准值}}{\text{材料强度分项系数}}$$