

高强混凝土及其应用

陈肇元 朱金铨 吴佩刚



清华大学出版社

高强混凝土及其应用

陈肇元 朱金铨 吴佩刚

清华大学出版社

内 容 简 介

本书介绍高强混凝土及其应用。书中较系统地反映了国内外的最新研究成果,内容包括高强混凝土的配制方法与材料的物理、力学性能,配筋构件在各种受力状态下的工作性能与计算方法,高强混凝土结构工程的应用实践,并提出了高强混凝土结构的设计与施工建议。

本书重在应用,实用性强。可供土木、建筑部门的设计施工人员,混凝土工厂的技术、管理人员,以及大专院校有关专业的师生应用参考。

(京)新登字 158 号

高强混凝土及其应用

陈肇元 朱金铨 吴佩刚

责任编辑 曹淑贞

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京人民文学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.25 字数: 215 千字

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数: 0001—6000

ISBN 7-302-01155-9/TU·71

定价: 8.00 元

前 言

混凝土是现代土建工程中最主要的建筑材料。据估计,我国的混凝土年用量已达 2 亿立方米,但强度等级普遍较低,因此带来很多工程质量问题,其经济损失也十分惊人,这已成为我国土建技术水平落后于世界的重要标志。

高强混凝土是混凝土技术的一个重要发展方向,它适应现代工程结构向大跨、高耸、重载发展和承受恶劣环境条件的需要,符合现代施工技术采用工业化生产(工厂预拌混凝土,工厂预制构件)的要求。由于高强混凝土在用料和配制技术与低强混凝土之间不存在根本差异,所以推广应用高强混凝土技术必将有利于逐步改变我国低强混凝土占统治地位的落后面貌。高强混凝土在世界范围内已是一项比较成熟的技术,对我国来说,试验室内的研究也已达到了一定的水平。目前,摆在我们面前的首要问题是应该把研究的主要力量投到推广应用上去,为设计施工人员提供有关的知识和可资遵循的规程或条例,这也正是我们编写本书的初衷。

自 70 年代以来,清华大学土木工程系就一直对高强混凝土进行持续的研究,在高效减水剂的生产、材料和配筋构件的性能,以及高强混凝土结构的应用等方面都取得了比较系统的研究成果;最近几年来并致力于施工技术的研究;F 矿粉作为高强混凝土的外加混合料,以及高效减水剂载体的研制成功还获得了发明奖。本书综合国内外在高强混凝土领域所取得的最新成就,并着重介绍清华大学土木工程系的成果和经验,所引资料已在文中予以注明,以便于读者进一步查询,其中与清华大学土木系有关的报告或论文见本书附录。

本书共分七章,初稿的撰写人为:第一、五章陈肇元、吴佩刚;第二、三、六章陈肇元;第四章陈肇元、朱金铨;第七章吴佩刚、朱金铨。全书由朱金铨校审定稿。

为了推动高强混凝土技术在我国的发展和应用,中国土木工程学会混凝土与预应力混凝土学会已决定成立高强混凝土委员会,我们谨以本书的出版对此表示祝贺。

编者于清华大学土木工程系

1991年12月

主要符号

材料性能

$C20$	表示边长 150mm 立方体强度标准值为 20MPa 的混凝土强度等级 (GBJ10—89 规范);
$R20$	表示边长 200mm 立方体强度标准值为 20MPa 的混凝土标号 (公路桥涵规范 JTJ023—85, 铁路桥涵规范等);
f'_c	表示 $\phi 150 \times 300$ mm 圆柱体强度标准值的混凝土强度级别 (美国 ACI 规范, 欧州 CEB—FIP 规范, 日本规范); 当用于标志试验数据时, 为混凝土圆柱体抗压强度;
f_{cu}	边长 150mm 的混凝土立方体抗压强度;
$f_{cu,10}, f_{cu,20}$	边长 100mm、及 200mm 的混凝土立方体抗压强度;
f'_c, R_a	混凝土轴心抗压强度, 当用于设计时为设计强度;
f_{cm}, R_w	混凝土弯曲抗压强度;
f_t, R_t	混凝土轴心抗拉强度, 当用于设计时为设计强度;
$f_{t,s}$	混凝土劈拉强度;
$f_{t,j}$	混凝土弯折抗拉强度;
f_y, R_g	钢筋抗拉强度, 当用于设计时为设计强度;
f'_y, R'_g	钢筋抗压强度, 当用于设计时为设计强度;

$f_{c,c}$	约束混凝土的抗压强度；
ϵ_0	混凝土与抗压强度相应的应变值；
ϵ_u	混凝土的极限应变；
E_c	混凝土弹性模量，一般指变形模量；
E_s	钢筋弹性模量；
E_c^f	混凝土疲劳变形模量；
f_t^f	混凝土抗拉疲劳强度；
τ_c^f	混凝土抗剪疲劳强度；
f_{yv}	钢箍抗拉强度，当用于设计时为设计强度；

作用和作用效应

N	轴向力；
M	弯矩；
T	扭矩；
V	剪力；
M_{cr}	受弯构件正截面开裂弯矩；
M_y	受弯构件正截面受拉钢筋屈服时弯矩；
M_u	受弯构件正截面极限承载力，设计时为受弯承载力设计值；
V_c	构件斜截面上混凝土的受剪承载力；
V_{cs}	构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力，设计时为受剪承载力设计值；
T_{cr}	受扭构件开裂扭矩；
T_u	受扭构件极限承载力，设计时为受扭承载力设计值；

几何参数

c	混凝土保护层厚度；
C	截面中和轴高度；
e_0	轴向力对截面重心的偏心距；

目 录

主要符号	VI
第一章 绪论	1
一、混凝土的强度级别	1
二、高强混凝土的优点及不利条件	4
三、高强混凝土的发展及应用范围	5
四、高强混凝土在我国	17
第二章 原材料及配合比	21
一、高效减水剂	21
1. 高效减水剂的选用	23
2. 高效减水剂对拌合料的影响	27
3. 高效减水剂对硬化混凝土的影响	29
二、水泥	32
1. 水泥的成份	33
2. 水泥用量	35
3. 水及水灰比	38
三、骨料	39
1. 粗骨料	39
2. 细骨料	43
四、粉煤灰	43
1. 粉煤灰的成份和用量	44
2. 粉煤灰对高强混凝土性能的改善作用	46
五、硅粉	51
1. 硅粉的用量及水灰比	52
2. 硅粉高强混凝土的特点	54
六、粒化高炉矿渣	55

七、F 矿粉	60
八、高强混凝土配比示例	62
第三章 高强混凝土的物理力学性能	69
一、高强混凝土的强度标准	69
二、单轴抗压性能	73
1. 应力应变曲线	74
2. 变形模量	76
3. 极限应变与泊桑比	79
4. 持久荷载下的性能与徐变	80
5. 早期与后期强度	84
三、抗拉强度	91
四、复杂应力下的强度	97
1. 双轴受压下的性能	97
2. 压剪和扭转性能	98
3. 三轴受压下的性能	101
4. 粘结力	102
五、约束状态下的抗压性能	103
1. 箍筋约束混凝土	103
2. 钢管混凝土	109
3. 焊接网片混凝土	111
4. 箍筋约束混凝土应力应变曲线的数学表达式	112
六、动力性能	114
1. 疲劳强度	114
2. 快速变形下的动力强度	118
七、收缩	120
八、耐久性	123
1. 抗渗性能	123
2. 抗冻融性能	124
3. 抗磨性能	125
4. 钢筋锈蚀	126
九、耐高温、低温性能	127

第四章 配筋构件的力学性能及计算方法	131
一、受弯构件	131
1. 暂时荷载下的性能	131
2. 截面的应力应变计算图形	133
3. 开裂弯矩、屈服弯矩与极限弯矩	135
4. 界限配筋率及合理配筋范围	137
5. 延性	139
6. 压区纵筋和横向钢筋	141
7. 刚度、裂缝和长期变形	145
8. 反复荷载下的性能	147
二、轴压构件	148
1. 普通钢筋混凝土柱	148
2. 约束混凝土矩形截面柱	149
3. 螺旋箍筋柱	152
三、偏压构件	153
1. 偏压构件按平截面假定的计算方法	155
2. 小偏压构件的另一算法	156
3. 偏压长柱的承载能力	157
四、抗剪强度	158
五、抗扭强度	162
六、局部承压	164
七、框架柱和剪力墙的抗震性能	167
1. 框架柱	167
2. 剪力墙	172
八、框架梁柱节点的抗震性能	177
九、预应力混凝土构件	181
十、疲劳强度	182
第五章 高强混凝土施工中的若干问题	187
一、试配	187
二、环境温度和水化热的影响	191
三、质量控制与质量保证	199

四、泵送混凝土	204
第六章 高强混凝土结构设计施工建议	208
一、对现行设计规范的评估	208
1. 高强混凝土材料的设计强度	208
2. 关于 GBJ10—89 规范	212
3. 关于 JTJ 023—85 规范	215
4. 构造措施的重要性	216
二、高强混凝土结构设计建议	217
1. 工业与民用房屋及一般构筑物	217
2. 公路桥涵	225
三、高强混凝土工程施工建议	227
第七章 高强混凝土应用的工程经验	232
一、在高层建筑中的应用	232
1. 辽宁省工业技术交流馆	232
2. 北京新世纪饭店	235
3. 辽宁省农业银行综合楼	238
二、在桥梁工程中的应用	240
1. 红水河铁路斜拉桥	240
2. 京津塘高速公路北京段凉水河大桥	241
三、在特殊工程中的应用	242
1. 拱形防护门	242
2. 煤矿钻井井壁工程	244
主要参考文献	245
附录：清华大学土木工程系有关高强混凝土研究的论文和报告索引 ...	247
一、正式出版的著作与论文	247
二、硕士论文	250
三、研究报告	250

第一章 绪 论

一、混凝土的强度级别

本书所指的高强混凝土,是用常规的水泥、砂石作原材料,使用常规的制作工艺,主要依靠外加高效减水剂,或同时外加一定数量的活性矿物材料,使拌合料具有良好的工作度,并在硬化后具有高强性能的水泥混凝土。

混凝土强度级别在我国一直用标号 R 表示,但在建工部门近来已改用强度等级 C 表示,而公路、铁路、港口等部门目前仍沿用标号作为混凝土强度分类的标准。混凝土的强度等级或标号所指的都是具有一定保证率的标准尺寸立方试件的抗压强度,测定时的试件龄期为 28 天,并经标准养护和采用标准的加载方法。强度等级所用的标准试件边长为 15cm,取强度的保证率为 95%;而标号所用的标准试件边长为 20cm,取强度保证率约 85%。所以同一种混凝土,当用强度等级或标号表示时,二者在数值上稍有差异(表 1-1)。比如,过去标号为 500 的 500 号混凝土(由于强度的单位

表 1-1 混凝土强度不同表示值之间的近似对应关系

中国	强度等级	C20	C30	C40	C50	C60	C70	C80	C90	C100	C110	C120
	标号 ()*	23 (220)	33 (320)	43 (420)	53 (520)	63 (620)	73 (715)	83 (815)	93 (910)	103 (1005)	112 (1100)	122 (1200)
美国	ACI 规范 设计强度 f'_c	16 MPa	24	32	40	50	60	70	80	90	100	110

- * 1. 括号内数值为过去采用 kg/cm^2 单位时的标号。
2. 表中数字考虑了在高强混凝土中混凝土的变异系数趋于减少,以及圆柱体标准试件强度与立方标准试件强度的比值随混凝土强度而变因素。

从过去的 kg/cm^2 改为现在的 MPa 或 N/mm^2 , 则 500kg/cm^2 等于 51MPa , 现在应称为标号 51, 近似为标号 50), 相当于强度等级 C48。我们在以下的介绍中, 对混凝土的强度主要用强度等级表示而不用标号。

混凝土强度达到多高才算高强? 这在目前尚无明确标准。所谓高强是相对的, 是与当前混凝土技术的一般水平相比较而言的。长期以来, 我国现场施工现浇混凝土的强度等级普遍低于 C30, 预制构件普遍低于 C40, 尽管在混凝土结构设计规范中对混凝土强度最高定为 C60 或标号 60, 但规范中的一些计算公式却是根据较低强度的混凝土构件试验数据得出的, 有的明显不适合于强度较高的 C50 或更高等级的混凝土^[1]。另外从混凝土的制作技术来看, C50 及以上等级的混凝土在施工时需有严格的质量管理制度, 这包括原材料的选择、保管以及从配料到养护的每一工序。虽然这种混凝土施工时所用的材料和机具与较低强度混凝土并无根本差别, 但终究对生产和施工部门提出了不同的要求。所以, 从我国当前的设计施工技术水平出发, 认为强度等级达到或超过 C50 (如用标号, 则为达到或超过标号 50) 的混凝土为高强混凝土是比较合适的*。相对而言, 可以将 C25 及以下的混凝土称为低强混凝土, C30 到 C45 之间的为中强混凝土。对于轻骨料混凝土, 则可认为 C30 及以上即为高强, 但本书将不讨论轻骨料混凝土。

由于混凝土强度等级是具有 95% 保证率的立方试件抗压强度, 所以要高于保证率为 50% 的平均强度。如果设计要求的是 C50, 则制作时实际应达到的立方试件抗压强度的平均值已接近 60MPa 。

* 我国一些工具书如《建筑材料辞典》(中国建筑工业出版社, 1981 年), 《混凝土手册》(吉林科学技术出版社, 1985 年), 也都定义抗压强度 500kg/cm^2 以上的混凝土为高强混凝土。

在美国,混凝土强度以直径 6 英寸、高度 12 英寸($\phi 15 \times 30\text{cm}$)圆柱体试件抗压强度的特征值(或设计强度)表示,后者也是具有 95% 保证率的强度。日本,还有欧洲混凝土学会的 CEB—FIP 规范也都采用这一标准。美国的混凝土学会 ACI 提出以设计强度 f'_c 超过 6000psi(41MPa)的混凝土为高强混凝土,圆柱体强度 41MPa 换算到我国的 15cm 边长立方体强度约为 52MPa,所以 f'_c 等于 6000psi 的混凝土与我国的 C50 大体相当。

除了掺加高效减水剂这一技术途径外,还有多种途径可以获得高强度的混凝土,如在成型工艺上采用挤压、振动加压;在养护工艺上采用高压蒸养;在骨料选用上采用活性骨料以至金属骨料;此外,还有利用振动-真空技术将混凝土拌合料中的多余水份吸去而提高混凝土的强度。但这些方法在制作工艺及装备上均非常规,有的仅适用于预制混凝土制品的生产。至于用水溶性聚合物替代部分水泥的聚合物水泥混凝土,用树脂作为砂石胶结料的树脂拌合混凝土,以及将普通混凝土经过聚合物浸渍处理的塑料浸渍混凝土等,虽然都获得很高的强度,尤其是塑料浸渍混凝土很容易达到 150MPa 以上的抗压强度,并已有超过 300MPa 的纪录,但这些材料终因在制作工艺上过于复杂或者造价过于昂贵,而只能用于一些特殊的场合。

相对来说,利用高效减水剂使混凝土获得高强的手段要经济和方便得多。它与普通强度混凝土制作技术的差别仅在于具体细节。通过仔细选择水泥、骨料及合适的配比,采用高效减水剂可使混凝土的强度达到 C80;如果再掺加粉煤灰, F 矿粉等活性材料,强度上限可达到 C90;如掺加硅粉则更易获得高强,有可能达到 C140 的量级。高强混凝土的单位体积造价比普通强度混凝土略贵,但材料的用量却因强度提高得以减少,最终仍能做到比普通强度混凝土还要便宜。可是应用高强混凝土的主要好处并不在于材料造价而在于下面所讲的综合效益上。

二、高强混凝土的优点及不利条件

高强混凝土的重要特点是耐久、强度高、变形小,能适应现代工程结构向大跨、重载、高耸发展和承受恶劣环境条件的需要。用高效减水剂配制的高强混凝土一般具有坍落度大和早强的性能,因而便于浇注和加快模板周转速度。

高强混凝土的抗压强度很高,能使钢筋混凝土柱子和拱壳等受压构件的承载能力大幅度增加,而在相同的荷载下则可使构件的截面减少。高强混凝土同样能给钢筋混凝土受弯构件带来很大好处,尽管提高混凝土强度并不能明显增加构件的抗弯能力,但是它能降低受弯构件截面的压区混凝土高度,提高构件的延性,允许有较高的配筋率,进而通过提高配筋率来增加构件的抗弯能力或降低构件的截面高度。高强混凝土还由于变形较小,使构件的刚度得以提高,这对某些由变形控制截面尺寸的梁板来说特别有利。至于预应力钢筋混凝土构件,则能从高强混凝土获得三重好处,可以施加更大的预应力,可以更早地施加预应力,以及因徐变较小而导致较低的预应力损失。

对于结构物来说,减小截面尺寸意味着降低结构自重。当结构物自重占全部荷载的主要部分时,应用高强混凝土就有着特殊的意义,并且能减轻地基基础的负担。减小截面尺寸,对房屋建筑来说还意味着增加使用面积或有效空间;对桥梁建筑来说意味着增加桥下净空或降低两岸路堤标高;对地下建筑来说意味着减少岩土开挖量。另外,在工程中同时使用不同强度混凝土,可以尽量统一构件尺寸,为划一施工模板提供了条件。所有这些间接的好处远比节约结构本身的材料用量或降低造价来得更为重要。

高强混凝土材料致密坚硬,抗渗抗冻性能均优于普通强度混凝土。所以露天的、遭海水侵蚀的、受高速流体冲刷的、或易遭碰撞损害的工程构筑物,均宜采用高强混凝土。尤其是基础设施工程,

有的需要有 100~120 年的使用寿命,所以常选用高强混凝土作为结构材料。

但是高强混凝土也有其不利条件和不足之处。首先是对各种原材料有严格的要求,并不是所有场合都能获得合适的水泥和骨料;其次是生产施工的每一环节都要仔细规划和检查,并不是所有预拌厂和施工现场都具有相应的质量管理水平。当没有现成的预拌混凝土(商品混凝土)可以供应,需要工地自行配制高强混凝土时,则需经过专门的试验和人员训练。

高强混凝土的质量特别容易受到生产、运输、浇注和养护过程中环境因素的影响,尤其是过高的气温、远距离的运输以及水化热等问题更应引起注意。

在材料的性能上,高强混凝土的缺点是延性比普通强度混凝土差,素混凝土的延性随着强度增加而降低。但是材料的延性与配筋构件或结构的延性并不等同,通过适当的配筋构造措施,用高强混凝土制作的构件或结构的延性一样可以满足设计要求。另外,高强混凝土的抗拉和抗剪强度虽然也随混凝土抗压强度的增长而增长,但抗拉或抗剪强度与抗压强度的比值却会随之降低,所以在讨论高强混凝土的力学性能时,如果只用单轴抗压强度一个指标,并按低强混凝土中的概念进行推论,有时就会出错。

高强混凝土为世界各地所接受还是近十来年的事。在推广过程中曾遇到过一些问题,比如在美国就曾引起过一些争议。我们应该承认,在高强混凝土领域中尚有不少有待探讨和改善的课题,因此在设计、生产和施工过程中都要慎重对待,特别是混凝土的强度等级达到 C80 以上时更要注意。

三、高强混凝土的发展及应用范围

从本世纪 30、40 年代以来,随着水泥品种的改善以及化学外

加剂(普通减水剂、引气剂等)的使用,工程中普遍应用的混凝土强度在国际范围内得到稳步的增长。到 60 年代,美国已有强度相当于我国 C50 到 C60 的商品混凝土,在工程中大量应用的混凝土强度已达到相当于 C30~C35。在此以前,也有少量工程的混凝土强度达到相当高的水平,如早在 40 年代日本就曾有抗压强度达到 100MPa 的高强混凝土用于工程的报导。1960 年前后,我国也曾用立方强度高达 100MPa 的混凝土在北京建成跨度为 18m 的预应力屋架,用于 6000m² 的工业厂房建筑,从而使屋架自重减轻了 40%。但是这些高强混凝土都是干硬性的,施工相当困难,无法普遍推广。作为现代工程结构中可以普遍应用的混凝土,应该具有工厂生产预拌混凝土的基本要求,具有良好的工作度,必要时可以泵送。美国在 60 年代通过应用普通减水剂和外加粉煤灰等技术,制出工作度较好的高强混凝土,但能达到的强度上限还比较低。如 1967 年在芝加哥建成的最早应用高强混凝土的高层建筑——Lake Point 塔楼,总高 197m,共 70 层(图 1-1),底层柱的混凝土强度相当于 C65。在同一时期美国还有用相当于 C70 的高强混凝土修建核电站工程的报导。

尽管普通减水剂也能用来制造强度较高的混凝土,可是只有高效减水剂的问世,才使混凝土技术跨向了一个新的时代。高效减水剂使混凝土的高强和高流态变得相当容易^[3],使高强混凝土的广泛应用有了可能。

用高效减水剂配制普通工艺的高强混凝土是 1964 年在日本首先兴起的。到 70 年代末期,当时的日本工地已能获得强度相当于 C80~C90 的高强混凝土。1972 年起德国等西欧国家也陆续应用高效减水剂,但更多的是用来配制流态混凝土而不是高强混凝土。大约从 1976 年起,北美才采用高效减水剂,并成功的配制出高强混凝土用于当时兴建的蒙特利尔奥林匹克体育馆的 5000 个预制构件中,以后则广泛地用于高层建筑中。近年来,美国和加拿大