

新型混凝土技术

XINXINGHUNNINGTUJISHU

与

YU

施工工艺

SHIGONGGONGYI

李继业 编著



中国建材工业出版社

新型混凝土技术与施工工艺

李继业 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型混凝土技术与施工工艺 / 李继业编著. — 北京:
中国建材工业出版社, 2002. 12

ISBN 7 - 80159 - 353 - 7

I. 新... II. 李... III. ①混凝土-基本知识②混凝土施工 IV. ①TU528②TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 094705 号

新型混凝土技术与施工工艺

李继业 编著

*

中国建材工业出版社

(北京海淀区三里河路 11 号 邮编 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

北京丽源印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 开 印张: 18.375 字数: 450 千字

2002 年 12 月第一版 2002 年 12 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 36.00 元

ISBN 7 - 80159 - 353 - 7/TU·169

序

进入 21 世纪,我国建筑业飞速发展,给混凝土科学技术的发展带来欣欣向荣的景象,各种现代化的建筑如雨后春笋,新型混凝土技术和施工工艺不断涌现,并在工程应用中获得巨大的经济效益和社会效益,为我国社会主义建设插上了腾飞的翅膀。

新型混凝土种类很多,各自具有其特殊的技术性能和施工方法,又分别适用于某一特殊领域。随着我国基本建设规模的不断扩大,有些新型混凝土技术与施工工艺已在工程中广泛应用,并积累了丰富的施工经验;有些新型混凝土技术与施工工艺正处于探索和研究阶段,纵观未来它们都具有广阔的发展前景。

我们根据一些工程的实践和科研项目,参考国内外有关专家的研究成果,编写了这本《新型混凝土技术与施工工艺》,目的是通过介绍这些新型混凝土的发展历史、物理力学性能、配合比设计、施工工艺等,大力推广应用、发展新型混凝土技术,为我国的建设事业做出更大的贡献。

本书由李继业担任主编并负责全书统稿,刘经强、周翠玲担任副主编,李树枫、段洪祥、王仲发、宋洪波参加了编写。具体分工为:李继业撰写第一章、第二章;刘经强撰写第四章、第五章;周翠玲撰写第六章、第七章;李树枫撰写第三章、第九章;段洪祥撰写第八章;王仲发撰写第十二章;宋洪波撰写第十章、第十一章。

本书在编写的过程中,注重实践与理论相结合,突出其应用性,为施工企业应用创造条件。由于新型混凝土技术发展很快,加上编著者水平有限和掌握的资料不全,我们很难编写出一本比较完整、先进的技术参考书。因此,错误和不妥之处在所难免,敬请专家和读者提出宝贵意见。本书可以作为设计和施工技术人员的技术参考书,也可以作为建筑类高等院校教师和学生的教科书。

编著者

2002 年 12 月

3AP22/05

目 录

第一章 高强混凝土	1
第一节 概述	1
第二节 高强混凝土的原材料	4
第三节 高强混凝土的配合比设计	12
第四节 高强混凝土应用实例	16
第五节 高强混凝土的施工	19
第二章 泵送混凝土	31
第一节 概述	31
第二节 泵送混凝土的原材料及配比	34
第三节 泵送混凝土施工	42
第三章 大体积混凝土	55
第一节 概述	55
第二节 控制温度裂缝的技术措施	59
第三节 大体积混凝土结构施工	69
第四节 大体积混凝土温度裂缝控制工程实例	75
第四章 喷射混凝土	84
第一节 概述	84
第二节 喷射混凝土的原材料与配合比	87
第三节 喷射混凝土的性能	96
第四节 喷射混凝土的施工	99
第五节 钢纤维喷射混凝土	104
第五章 膨胀混凝土	106
第一节 概述	106
第二节 膨胀混凝土的技术性能	112
第三节 补偿收缩混凝土	116
第四节 自应力混凝土	121
第五节 自应力混凝土压力管的设计与施工	125
第六章 流态混凝土	133
第一节 概述	133
第二节 流态混凝土的流化剂	134
第三节 流态混凝土的原材料	138
第四节 流态混凝土拌合物的性质	141
第五节 流态混凝土的配合比设计	144

第六节	流态混凝土的物理力学性能	152
第七章	轻质混凝土	156
第一节	概述	156
第二节	轻骨料的性能	159
第三节	轻骨料混凝土的配合比设计	163
第四节	轻骨料混凝土的性能	171
第五节	轻骨料混凝土施工	174
第六节	加气混凝土	177
第七节	无砂大孔混凝土	180
第八章	聚合物混凝土	185
第一节	概述	185
第二节	聚合物浸渍混凝土	185
第三节	聚合物水泥混凝土	193
第四节	聚合物混凝土	197
第九章	防射线混凝土	205
第一节	概述	205
第二节	防射线混凝土的原材料	206
第三节	防射线混凝土的配合比设计	209
第四节	防射线混凝土的物理力学性能	219
第五节	防射线混凝土的施工	222
第十章	纤维混凝土	223
第一节	概述	223
第二节	纤维混凝土的增强机理	224
第三节	钢纤维混凝土	226
第四节	玻璃纤维混凝土	235
第五节	聚丙烯纤维混凝土	238
第十一章	防水混凝土	242
第一节	概述	242
第二节	普通防水混凝土	244
第三节	外加剂防水混凝土	251
第四节	膨胀水泥防水混凝土	261
第五节	防水混凝土的施工	262
第十二章	道路混凝土	264
第一节	概述	264
第二节	水泥混凝土对材料的要求	267
第三节	道路混凝土的配合比设计与制备	272
第四节	道路混凝土的施工	277
第五节	施工注意问题及新技术	283
参考文献		287

第一章 高强混凝土

第一节 概 述

随着建筑业的飞速发展,提高工程结构混凝土的强度,已成为当今世界各国土木建筑工程界普遍重视的课题,它既是混凝土技术发展的主攻方向之一,也是节省能源、资源的重要技术措施之一。近年来,世界各国使用的混凝土,其平均和最高抗压强度都在不断提高。大量的工程实践证明,在建筑工程中采用高强混凝土,不仅可以减小结构断面尺寸、减轻结构自重、降低材料用量、有效地利用高强钢筋,而且能增加建筑的抗震能力,加快施工进度,降低工程造价,满足特种工程的要求。因此,在结构工程中推广应用高强混凝土具有重大的技术经济意义。

一、国际高强混凝土的研究和应用

在国际上,高强混凝土的研究和应用得到了各国政府的高度重视。1978年6月,在挪威召开了“第一次高强混凝土应用国际学术讨论会”;同年12月,在美国芝加哥伊利诺斯大学,第一次召开了国际“高强混凝土专题讨论会”;1990年5月,在美国 Berkeley 加州大学,召开了“第二次高强混凝土应用国际学术讨论会”;1993年6月,在挪威召开了“第三次高强混凝土应用国际学术讨论会”;1996年5月,在法国巴黎召开了“第四次高强混凝土应用国际学术讨论会”;以后将每三年举行一次国际学术讨论会。

美国在高强混凝土研究和应用方面领先于其他工业发达国家。其使用的混凝土平均强度已超过40MPa,其中预应力混凝土强度已超过70MPa。芝加哥市20世纪70年代就将高强混凝土用于工程结构,其中1975年建造的79层超高层建筑——高水塔广场大厦,高达262m,从地下室至第50层,混凝土的平均强度超过了C70,至今仍然是世界第一。1989年,在西雅图建成的 Pacific First Center 大厦,采用的钢管混凝土柱,平均强度达到140MPa。据有关资料报道:到本世纪末,美国将生产出强度为200MPa的商品混凝土。

日本是极其重视高强混凝土研究与应用的国家。日本从60年代就开始应用80MPa的高强混凝土,其建设厅于1988年设立了一项简称“新RC”的研究计划,以巨大的投资专门研究高强混凝土和高强钢筋在建筑工程中的应用,取得了许多突破性的进展,成为世界上高强混凝土研究与应用的先进国家。1965年,日本已能生产80MPa的混凝土桩,并在预应力桥上采用了C60~C80的高强混凝土;1992年,日本集中精力研究60~70层房屋的试设计和抗震分析,认为C110级混凝土建造这类高层建筑是可行的,柱子断面可以控制在1m×1m之内;最近几年,日本一家公司用120~150MPa高强混凝土创造了足尺的梁柱试件,对混凝土的配制方法及施工工艺作了模拟,准备用于高层建筑上;日本现在正在努力研究高强塑性混凝土,预计强度可达243MPa。

加拿大是美国的邻邦,高强混凝土技术很快传入,并得到高度重视和迅速发展。1989

年,加拿大政府提出了一个协作网研究计划,从158项提议中评选出15项,高强高性能混凝土研究就是其中的一项,1990年资助经费500万美元,有七个大学进行了四年的研究。1994年,原来的15个项目有10个项目继续得到支持,其中还有高强高性能混凝土研究,又资助经费550万美元。1975年,在多伦多市建造的75层商业银行、1978年建造的33层大楼、90年代建造的56层大楼等都采用了高强混凝土,取得了良好的社会效益和经济效益。

目前,俄罗斯所采用的混凝土的平均强度已超过30MPa,并开始大量采用C40~C50的混凝土,C60~C80的混凝土用量也逐渐增加,有的已达到100MPa;俄罗斯科学家预言,21世纪混凝土的强度将达到150~200MPa。美国混凝土学会预言,21世纪初可望建造600~900m高度的钢筋混凝土建筑、跨度为500~600m的混凝土桥梁、海上浮动城市及地下城等,届时将使用抗压强度为140MPa以上的混凝土。德国使用的混凝土的平均强度为C30和C50,其用量各占一半左右。另外,挪威、法国、澳大利亚等国家,在高强混凝土研究和应用方面也做出了不懈努力,取得了很大进展,为高强混凝土的发展贡献了力量。

二、国内高强混凝土的研究和应用

我国政府对高强混凝土的研究和应用也非常重视。1986~1990年,国家自然科学基金委员会和建设部,将“高强混凝土的配制、结构设计和施工方法”课题列为重点科研项目;1987~1991年,全国钢筋混凝土标准技术委员会组织了《混凝土结构设计规范》第四批课题“高强混凝土结构性能及设计方法”的研究;1992~1996年,全国钢筋混凝土标准技术委员会,又组织了《混凝土结构设计规范》第五批课题“高强混凝土结构基本性能”的研究,并列入了工程建设国家标准重点科研计划;1994~1997年,国家自然科学基金重点资助了“高强与高性能材料的结构与力学性能研究”项目;1996年,国家计委资助800万元,重点扶持“重大工程中混凝土安全性”研究课题,其中也包括高强高性能混凝土的内容。由此可见,高强混凝土在我国的研究开展虽然较晚,党和政府却给以高度重视,使该项工作取得较大进展。

早在1959年,由北京市建工局第二建筑公司、建工研究所、北京工业设计院、建研院、建材院、冶建院等单位合作,对唐山市18m高强预应力混凝土屋架进行了1000号高强混凝土的试验研究。采用比表面积达到 $5000\text{cm}^2/\text{g}$ 的硅酸盐水泥,水灰比控制在0.22~0.25范围内,选择的砂率为24%~26%,加入水泥质量1.5%的 CaCl_2 和0.3%塑化剂,混凝土的配合比(C:S:G)为1:0.53:1.50,混凝土的强度达到 $1028\text{kg}/\text{cm}^2$ 。经过1976年的唐山大地震,这个高强预应力混凝土屋架完好如初,为高强混凝土的发展树立了信心。

20世纪70年代以来,由于高效减水剂和高标号水泥的生产,为在普通工艺条件下制备高强混凝土提供了技术条件,促进了我国对高强混凝土的应用。1976年,海军工程设计院和清华大学合作,在连云港海军基地成功地施工了C60级混凝土防护门;1986年,衡广复线花县的江村南桥,用C80级混凝土浇筑了跨度40m的T型简支梁,28d的强度实际达到92.8MPa;1992年以来,我国应用高强混凝土建造的高层(大于100m)建筑近40座,普及全国各大城市;目前世界第三、亚洲第一高层建筑——上海金茂大厦,88层、420.5m,其钢柱加混凝土,就是采用的C60高强混凝土;1995年11月,北京财税大楼首层四根柱子施工中,采用C110级商品预拌混凝土,实际施工混凝土强度为124~131MPa,平均达到127.5MPa;1990~1996年,北京城建集团总公司在供应的150万 m^3 的商品混凝土中,C50~C60高强混凝土占20%,达30万 m^3 。

三、高强混凝土的定义

高强混凝土的概念,并没有一个确切的定义,在不同的历史发展阶段,高强混凝土的涵义是不同的。由于各国之间的混凝土技术发展不平衡,其高强混凝土的定义也不尽相同;既使在同一个国家,因各个地区的高强混凝土发展程度不同,其定义也随之改变。正如美国的 S·Shah 教授所指出的那样:“高强混凝土的定义是个相对的概念,如在休斯敦认为是高强混凝土,而在芝加哥却认为是普通混凝土。”

日本京都大学教授六车熙指出:20 世纪 50 年代,强度在 30MPa 以上的混凝土称为高强混凝土;20 世纪 60 年代,强度在 30~50MPa 之间的混凝土称为高强度混凝土;20 世纪 70 年代,强度在 50~80MPa 之间的混凝土称为高强混凝土;20 世纪 80 年代,强度在 50~100MPa 之间的混凝土称为高强混凝土;至 20 世纪 90 年代,一些工业发达国家将强度在 80MPa 以上混凝土称为高强混凝土。实际上,在 20 世纪 60 年代,美国在工程中大量应用的混凝土强度已达 30~50MPa,并且已有强度为 50~90MPa 的高强混凝土;到 20 世纪 80 年代末期,美国在西亚图商业大楼的框架柱上,采用了设计强度为 100MPa 的现浇高强混凝土。

我国自 20 世纪 70 年代开始,用高效减水剂配制高强混凝土的研究,清华大学土木工程系研制成功的 NF 高效减水剂后,为推广应用高强混凝土创造了有利条件,并使高强混凝土迅速用于建筑工程中。1988 年,31 层的北京新世纪饭店地下 2 层及地上 10 层的柱子,首次采用了泵送 C60 级高强混凝土,28d 实际强度超过 70MPa;同期,18 层的辽宁省工业技术交流馆柱子,采用了吊斗施工 C60 级混凝土,比原设计的 C30 级混凝土柱子断面减小了 56%,整体造价降低了 1.2%。1992~1993 年,上海东方明珠电视塔总高 454m,高程 0m~180m 段采用了 C60 级混凝土,高程 180m~225m 段采用了 C50 级混凝土,高程 225m~350m 段也专门试验了 30m³ 的 C60 级泵送混凝土,28d 强度达到 62.5MPa。1993 年,哈尔滨森融大厦成功地采用了强度为 50MPa 的负温泵送混凝土。我国一些单位在试验室条件下已配制出 100MPa 以上的混凝土,在普通施工条件下采用优质骨料、减水剂,也能较容易获得 C60~C80 混凝土。通过以上可以充分说明,我国在高强混凝土的研究与应用方面,已经取得了巨大成绩,高强混凝土在建筑工程中具有美好的前景。

在《高强混凝土结构设计施工指南》(HSCC93—1)中,具体给出了采用水泥、砂、石原料按常规工艺配制强度为 50~80MPa 的高强混凝土的技术规定。从我国目前平均的设计施工技术实际出发,将强度在 45MPa 以上的混凝土称为高强混凝土,强度在 30~40MPa 的混凝土称为中强混凝土,强度在 25MPa 以下的混凝土称为低强混凝土,是符合中国国情的。因此,多数建筑专家认为,在工程中一般应采用 50~80MPa 的高强混凝土,也是比较实际的。1998 年,中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会以 30 余个工程应用实例出版了《高强混凝土工程应用》论文集,表明我国在高强混凝土工程应用水平已经达到国际先进水平,为编制“高强混凝土结构设计施工规程”创造了条件,这将进一步推动我国高强混凝土的应用及发展。

第二节 高强混凝土的原材料

高强混凝土的原材料主要包括胶凝材料、砂石骨料、化学外加剂、矿物掺合料和水等。原料的选择是否正确,是配制高强混凝土的基础和关键,必须引起足够的重视。

一、胶凝材料

胶凝材料是影响混凝土强度的主要因素。从观察和研究混凝土的破坏过程可知,对于采用优质骨料配制的混凝土,其破坏常常发生在水泥石与骨料的界面处,实质上混凝土的强度主要取决于水泥石与骨料之间的粘结力。因此,在配制混凝土时,选择适宜的胶凝材料是非常重要的,它不仅要把松散的骨料粘结成一个整体,而且本身硬化后具有较高的强度和耐久性,并能承受设计荷载。骨料能否发挥作用,也与胶凝材料的本身强度和粘结力有很大关系。

水泥是高强混凝土中的主要胶凝材料,也是决定混凝土强度高低的首要因素。因此,在选择水泥时,必须根据高强混凝土的使用要求,主要考虑如下技术条件:水泥品种和水泥标号;在正常养护条件下,水泥早期和后期强度的发展规律;在混凝土的使用环境中,水泥的稳定性;水泥的其它特殊要求,如水化热的限制、凝结时间、耐久性等。

1. 水泥的品种与强度等级

配制高强混凝土,不一定采用快硬水泥,因为早期强度高不是目的。过去,配制高强混凝土是比较困难的,所选水泥的强度等级往往是混凝土的 0.9~1.5 倍。也就是说,水泥的强度等级一般应高于相应混凝土的强度等级,有时也可以略低于混凝土的强度等级。在我国,现阶段随着材料性质及工艺方法的改善,尤其是外加剂的广泛应用,配制高强混凝土也就更加容易。

根据《高强混凝土工程应用》的工程实践证明,配制高强混凝土的水泥,宜选用强度等级为 52.5MPa 或更高强度等级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥;当混凝土强度等级不超过 C60 时,也可以选用强度等级为 42.5MPa 硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。无论何地产的水泥,必须达到强度满足、质量稳定、需水量低、流动性好、活性较高的要求。

2. 水泥的矿物成分

水泥熟料的矿物成分和细度是影响高强混凝土早期强度和后期强度的主要因素。对硅酸盐系水泥来讲,其熟料中的主要矿物成分为 C_3S 、 C_2S 、 C_3A 和 C_4AF 。 C_3S 对早期和后期强度发展都有利; C_2S 的水化速度较慢,但对后期强度起相当大的作用; C_3A 的水化速度最快,主要影响混凝土的早期强度; C_4AF 的水化速度虽较快,但早期和后期的强度都较低。

由以上可以看出,如果早期强度要求较高,应使用 C_3S 含量高的水泥;如果对早期强度无特殊要求,应使用 C_2S 含量高的水泥。由于 C_3A 、 C_4AF 的早期和后期强度均比较低,所以用于高强混凝土的水泥中, C_3A 、 C_4AF 含量应严格控制。高细度的水泥能获得早强,但其后期强度很少增加,加上水化热严重,利用单纯增加水泥细度提高早期强度的方法,也是不可取的。水泥的细度一般为 $3500\sim4000\text{cm}^2/\text{g}$ 比较适宜。

3. 水泥的用量

生产高强混凝土,胶凝物质的数量是至关重要的,它直接影响到水泥石与界面的粘结

力。从便于施工角度加要求,也应具有一定的工作度。从理论上讲,为了增加砂浆中胶凝材料的比例,提高混凝土的强度和工作度,国外水泥用量一般控制在 $500\sim 700\text{kg}/\text{m}^3$ 范围内。

根据我国上海金茂大厦、广州国际大厦、海口 868 公寓、深圳鸿昌广场大厦、青岛中银大厦等著名的超高层建筑工程实践,高强混凝土的水泥用量一般在 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 左右,最多不超过 $550\text{kg}/\text{m}^3$ 。其具体数量主要与水泥的品种、细度、标号、质量有关,另外还与混凝土的坍落度大小、混凝土强度等级、外加剂种类、骨料的级配与形状、矿物掺合料等密切相关。日本的一项资料表明:当采用高效减水剂配制高强混凝土时,如果水泥用量超过 $450\text{kg}/\text{m}^3$,对混凝土强度增长的作用并不显著。由此可见,配制高强混凝土的水泥用量应当适宜,不能将增加水泥用量作为提高混凝土强度的唯一途径。

根据国内外大量的试验表明:如果混凝土中掺加水泥过多,不仅使其产生大量的水化热和较大的温度应力,而且还会使混凝土产生较大的收缩等质量问题。工程成功经验证明:在配制高强混凝土时,如果高强混凝土的强度等级较低(C50~C80),水泥用量宜控制在 $400\sim 500\text{kg}/\text{m}^3$;如果混凝土的强度等级大于 C80,水泥用量宜控制在 $500\sim 550\text{kg}/\text{m}^3$,另外可通过掺加硅粉、粉煤灰等矿物料来提高混凝土强度。

经验表明,应通过对各种水泥进行试配,以科学的数据确定制备高强混凝土所用水泥的种类和数量。在满足既定抗压强度的前提下,经济适用是选择水泥的依据。为了使水泥用量最小,要求骨料有最佳级配,并在拌制过程中保持均匀。

二、骨料

骨料是混凝土的骨架、重要组成材料,占混凝土总体积的 $75\%\sim 80\%$,它在混凝土中既有技术上的作用,又有经济上的意义。英国著名学者悉尼·明德斯在《混凝土》中曾明确指出:“高强混凝土的生产,要求供应者对影响混凝土强度的三个方面提供最佳状态:(1)水泥,(2)集料,(3)水泥——集料粘结。”由此可以看出集料在混凝土中的重要作用。从总的方面,要求配制高强混凝土的骨料,应选用坚硬、高强、密实而无孔隙和无软质杂质的优良骨料。

1. 粗骨料

粗骨料是混凝土中骨料的主要组成,在混凝土的组织结构中起着骨架作用,一般占骨料的 $60\%\sim 70\%$,其性能对高强混凝土的抗压强度及弹性模量起决定性的作用。粗骨料对混凝土强度的影响主要取决于:水泥浆及水泥砂浆与骨料的粘结力、骨料的弹性性质、混凝土混合物中水上升时在骨料下方形成的“内分层”状况、骨料周围的应力集中程度等。因此,如果粗骨料的强度不足,其它采取的提高混凝土强度的措施将成为空谈。对高强混凝土来说,粗骨料的重要优选特性是抗压强度、表面特征及最大粒径等。

(1)粗骨料的抗压强度

混凝土在其它条件相同的情况下,粗骨料的强度越高,配制的混凝土强度越高。为了配制高强混凝土,要优先采用抗压强度高的粗骨料,以免粗骨料首先破坏。当骨料的强度大于混凝土强度时,骨料的质量对混凝土的强度影响不大,但含有多量的软质颗粒和针、片状骨料时,混凝土的强度会大幅度下降。

在许多情况下,骨料质量是获取高强混凝土的主要影响因素。所以,在试配混凝土之前,应合理地确定各种粗骨料的抗压强度,并应尽量采用优质骨料。优质骨料系指高强度骨

料和活性骨料。按规定,配制高强混凝土时,最好采用致密的花岗岩、辉绿岩、大理石等作骨料,粒型应坚实并带有棱角,骨料级配应在要求范围以内。粗骨料的强度可用母岩立方体抗压强度和压碎指标值表示。

①立方体抗压强度 即用粗骨料的母岩制成 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的立方体试块,在水中浸泡 48h(达饱和状态),测其极限抗压强度,即为粗骨料的抗压强度。配制高强混凝土所用的粗骨料,一般要求标准立方体的骨料抗压强度与混凝土的设计强度之比值(岩石抗压强度/混凝土强度等级)应大于 1.5~2.0。

②压碎指标值 即在国家规定的试验方法条件下,测定粗骨料抵抗压碎的能力,从而间接推测其相应的强度。在实际操作上,对经常性的工程及生产质量控制,采用压碎指标值比立方体抗压强度更为方便。粗骨料的压碎指标值可参考表 1.1 采用。

表 1.1 粗骨料压碎指标值

岩石品种	混凝土强度等级	压碎指标值(%)	
		碎石	卵石
火成岩	C40~C60	10~12	≤ 9
变质岩或深成的火成岩	C40~C60	12~19	12~18
喷出的火成岩	C40~C60	≤ 13	不限

从表 1.1 中可以看出,碎石的压碎指标值比卵石的高,卵石配制的高强混凝土强度明显小于碎石,因此,一般应采用碎石配制高强混凝土。若配制强度大于 C60 的混凝土,粗骨料的压碎指标值还应再小些。

(2)粗骨料的最大粒径

试验研究表明,用以制备高强混凝土的粗骨料,其最大粒径与所配制的混凝土最大抗压强度有一定的关系。

在普通混凝土施工中,在施工条件允许和强度满足的前提下,粗骨料的粒径可以尽量选得大些,不仅可降低水化热和水泥用量,而且可以对提高混凝土强度有利。但是,对高强混凝土来讲,加大骨料尺寸反而降低混凝土强度,这是由于粗骨料是脆性材料、大颗粒骨料存在薄弱弊端所致;较小的骨料能够增加与水泥浆的强度,混凝土的强度能有所提高。

《普通混凝土配合比设计规程》(征求意见稿 1994)建议:对 C60 及 C60 以上强度等级的混凝土,粗骨料的粒径不宜超过 31.5mm。工程试验表明,大于 25mm 的粗骨料不能用于配制抗压强度 70MPa 以上的高强混凝土,骨料的粒径为 12~20mm 时能获得最高的混凝土强度。因此,配制高强混凝土的粗骨料最大粒径一般应控制在 20mm 以内;如果岩石强度较高、质地均匀坚硬,或混凝土强度等级在 C40~C55 以下时,20~30mm 粒径的骨料也可以采用。

(3)异形颗粒的含量

异形颗粒的骨料主要指针、片状骨料。对于中、低强度的混凝土,异形颗粒的含量要求较低,一般不超过 15%~25%,但对高强混凝土要求很高,一般不宜超过 5%。

(4)粗骨料的表面特征

混凝土初凝时,胶凝材料与粗骨料的粘结是以机械式啮合为主,所以要配制高强混凝土,应采立方体的碎石,而不能用天然砾石。同时,碎石的表面必须干净而无粉尘,否则会影响混凝土内部的粘结力。

(5)各种杂质的含量

各种杂质主要包括粘土、云母、轻物质、硫化物及硫酸盐、活性氧化硅等。粘土附着于粗骨料的表面,不仅会降低混凝土拌合物的流动性或增加用水量,而且大大降低骨料与水泥石间的界面粘结强度,从而使混凝土的强度和耐久性降低。所以,在配制高强混凝土时,要认真对粗骨料进行冲洗,严格控制含泥量在1%以内。

硫化物及硫酸盐的含量,应采用比色法试验鉴别,颜色不得深于国家规定的标准色。

骨料中含有的活性氧化硅易与水泥中的碱(Na_2O 或 K_2O)发生反应,生成一层复杂的碱-硅酸凝胶($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$),体积膨胀大约三倍以上,易使混凝土开裂破坏。这种碱-集料反应(简称 AAB),还会大幅度加剧冻融、钢筋锈蚀、化学腐蚀等因素对混凝土的破坏作用,更会导致混凝土迅速恶化。因此,在配制高强混凝土时,一定要尽量选择无碱-骨料反应的粗骨料。

(6)粗骨料的坚固性

粗骨料的坚固性是反映骨料在气候、环境变化或其它物理因素作用下抵抗破坏的能力。骨料的坚固性是用硫酸钠饱和溶液法检验,即以试棒经过5次循环浸渍后,骨料的损失质量占原试棒质量的百分率。粗骨料的坚固性要求与混凝土所处的环境有关,个体标准见表1.2。

(7)颗粒级配

骨料的颗粒级配是否良好,对混凝土拌合物的工作性能和混凝土强度有着重要的影响。良好的颗粒级配可用较少的加水量制得流动性好、离析泌水少的混凝土混合料,并能在相应的施工条件下,得到均匀致密、强度较高的混凝土,达到提高混凝土强度和节约水泥用量的效果。

表 1.2 粗骨料的坚固性指标

混凝土所处的环境	在硫酸钠饱和溶液中的 循环次数	循环后的质量损失 不宜> (%)
在干燥条件下使用的混凝土	5	12
在寒冷地区室外使用,并经常处于潮湿或干湿交替状态下的混凝土	5	5
在严寒地区室外使用,并经常处于潮湿或干湿交替状态下的混凝土	5	3

在配制高强混凝土时,最好采用连续级配的粗骨料,即不大于最大粒径的石子都占一定比例,然后通过试验从中选出几组容重较大的级配进行混凝土试拌,选择和易性符合要求、水泥用量较少的一组作为采用的级配。配制高强混凝土的粗骨料颗粒级配范围,见表1.3。

表 1.3 碎石、卵石的颗粒级配范围(JGJ5—92)

级配 情况	公称粒级(mm)	累计筛余,按质量计(%)						
		筛孔尺寸(圆孔筛,mm)						
		2.50	5.00	10.0	16.0	20.0	25.0	31.5
连续 级配	5~10	95~100	80~100	0~15	0	—	—	—
	5~16	95~100	90~100	30~60	0~10	0	—	—
	5~20	95~100	90~100	40~70	—	0~10	—	—
	5~25	95~100	90~100	—	30~70	—	0~5	—
	5~31.5	95~100	90~100	70~90	—	15~45	—	0~5

2. 细骨料

高强混凝土对细骨料(砂)的要求与普通混凝土基本相同,在某些方面稍高于普通混凝土对细骨料的要求。砂中的有害物质主要有:粘土、淤泥、云母、硫化物、硫酸盐、有机质以及贝壳、煤屑等轻物质。粘土、淤泥及云母影响水泥与骨料的胶结,含量多时使混凝土的强度降低;硫化物、硫酸盐、有机物对水泥均有侵蚀作用;轻物质本身的强度较低;会影响混凝土的强度及耐久性。因此,配制高强混凝土最好用纯净的砂,起码有害杂质含量不能超过国家规定的限量。

细骨料的级配要符合要求。在高强混凝土组成中,细骨料所占比例同样要比普通强度混凝土所用的量要少些。

根据工程实践经验证明,配制高强混凝土时,对有害杂质应按以下标准严格控制:含泥量(淤泥和粘土总量)不宜超过2%;云母含量按质量计不宜大于2%;轻物质含量按质量计不宜大于1%;硫化物及硫酸盐(折算成 SO_3)含量按质量计不宜大于1%;有机质含量按比色法评价,颜色不应深于标准色。

采用的砂子的细度模数应大于2.4,最好控制在2.7~3.1范围内。

三、外加剂

配制高强混凝土掺加一定量的高效减水剂,这是改善混凝土性能不可缺少的重要措施之一。大量的工程实践证明,高效减水剂掺量虽较少,但在改善混凝土性能,尤其在混凝土强度增长方面,显示出十分显著的效果,已成为高强混凝土中重要的材料。1964年日本首先进行了掺加高效减水剂配制普通工艺高强混凝土技术的研究工作,并在工程中获得成功。我国于20世纪70年代初期开始研制和生产高效减水剂,1977年清华大学研究成功的萘系NF高效减水剂,大大促进了我国高效减水剂的迅速发展,为高强混凝土的发展打下了良好的基础。

1. 高效减水剂的类型

根据我国混凝土外加剂的质量标准,高效减水剂的减水率必须大于12%。按化学成分不同高效减水剂可分为萘系、多羧酸系、三聚氰胺系和氨基磺酸盐系四大类,目前最常用的是萘系和三聚氰胺系高效减水剂。

萘系减水剂是以煤焦油中分馏出的萘及萘的同系物为原料,经磺化缩合而成,对水泥具有强烈的分散作用,减水、增强效果均优于普通减水剂。目前国内生产的品种主要有NF、UNF、FDN、HN等,减水率一般为20%~30%。三聚氰胺系高效减水剂也称为树脂系减水剂,其主要成分为三聚氰胺甲醛缩合物,属阴离子表面活性剂。目前国内生产的品种主要有SM,减水率最高可达30%~60%,是一种极好的早强、非引气型高效减水剂,是配制高强混凝土的首选外加剂。

2. 高效减水剂的选择

在普通工艺的施工条件下,高强混凝土离不开高效减水剂,究竟选用哪一种高效减水剂,并不是一个简单的问题,必须科学、合理、慎重地选择,才能达到预期的目的。

配制强度等级较高的高强混凝土时,应首先选用非引气型高效减水剂,常用的商品牌号有SM、NF、UNF、FDN等。它们的用量一般为水泥用量的0.5%~1.5%,减水率可达20%~30%。

配制强度等级不太高的高强混凝土时,同时混凝土有较高的抗冻性或较好的可泵性要求,可选用引气型高效减水剂,常用的牌号有 MF、建 1、JN、AF 等,另外还有低引气型的 FA、CRS 等,也可以采用高效减水剂和引气剂复合的方式。

高效减水剂可以配制高强混凝土,但也易产生混凝土拌合物坍落度损失的问题,这对运输距离较长的商品混凝土、大体积混凝土、泵送混凝土的现场施工都是不利的。为了解决这个难题,可以采用缓凝剂与高效减水剂复合使用的方法;也可以将高效减水剂混入具有一定活性的某种载体中,使其缓慢溶解释放,从而延缓坍落度的损失;还可以采用掺加保塑剂,减少坍落度的损失。

配制高强混凝土时,在一定的初始坍落度下,高效减水剂的掺量越大,坍落度提高的越多,但超过一定限度后,多掺加反而效果不显著,这就需要在实际施工前一定要通过试验确定高效减水剂的最佳用量。

目前,我国生产的高效减水剂品种很多,它们都存在着一个与水泥品种相容的问题。在水泥品种确定的条件下,必须通过试验选择适宜的高效减水剂品种。工程实践证明:如果水泥熟料中含 C_3A 较多,由于 C_3A 对减水剂的吸附作用大,减水剂的作用无法充分发挥;特别当高效减水剂中含有较多的游离硫酸盐时,遇到 C_3A 含量高的水泥,就会加快水泥的凝结硬化,使混凝土拌合物坍落度的损失增大。

从以上所述可以看出,高效减水剂不仅能增加混凝土拌合物的流动性,而且能大幅度地提高混凝土的强度和弹性模量,对减少徐变、提高混凝土的耐久性也非常有利。但是,在选择高效减水剂时,既要考虑到工程特点、施工条件、耐久性要求,也要考虑到高效减水剂的种类、用量、水泥品种、高强混凝土的强度等等。

四、矿物掺合料

水泥的水化反应是一个漫长的过程,有的持续几十年,甚至几百年。试验证明:28d 龄期时,水泥的实际利用率仅为 60%~70%。因此,高强混凝土中有相当一部分水泥仅起填充料的作用,混凝土中掺加过量的水泥,不仅无助于进一步提高混凝土强度,而且给工程带来巨大的浪费。在高强混凝土的配制中,若加入适量的活性掺合料,既可促进水泥水化产物的进一步转化,也可收到提高混凝土配制强度、降低工程造价、改善高强混凝土性能的效果。《高强混凝土结构与施工指南》建议采用的活性掺合料有粉煤灰、沸石粉、硅粉等。

1. 粉煤灰

粉煤灰是一种人工火山灰材料,是燃煤电厂煤粉炉烟道中收集的细颗粒粉末。粉煤灰作为一种优良的活性掺合料用于混凝土中已有多年历史,但在工程结构混凝土中的应用,直到 20 世纪 70 年代以后才有较大的发展。现在,粉煤灰常常被作为混凝土的第六组成部分,被用于配制高强混凝土、高流态混凝土和泵送混凝土。

应用粉煤灰配制高强混凝土,不仅可以有利于环境保护、降低建筑能耗、降低工程成本,而且可以达到改善混凝土性能、提高工程质量和混凝土强度的目的。因此,合理利用粉煤灰配制高强混凝土,是我国建设部“九五”年推广应用的一项新技术,它将获得良好的社会效益和经济效益。

(1) 粉煤灰的等级划分及化学成分

按照国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB1596—79)规定,国产的粉煤灰分为

I、II、III三个等级,见表1.4。

配制高强混凝土所用的粉煤灰,对化学成分的要求是比较严格的。国内的粉煤灰其主要化学成分包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 SO_3 、 Na_2O 及 K_2O 等,其中 SiO_2 为 40%~60%、 Al_2O_3 为 17%~35%,它们是粉煤灰活性的主要来源,两者的含量越高,粉煤灰对混凝土的增强效果就越好。配制高强混凝土的粉煤灰, SiO_2 和 Al_2O_3 的总含量要求超过 70%。我国规定的 I 级粉煤灰品质标准,与国际上优质粉煤灰的质量基本相同,完全可以作为配制高强混凝土用粉煤灰。

表 1.4 我国粉煤灰品质标准(GB1596—79)

项 目	品 质 标 准		
	I	II	III
细度(0.08mm 筛余%) $\leq$	5	8	25
烧失量(%) $\leq$	5	8	15
需水量比(%) $\leq$	95	105	115
三氧化硫(%) $\leq$	3	3	3
含水率(%) $\leq$	1	1	不作规定

(2)粉煤灰在高强混凝土中的作用

优质粉煤灰中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,它们是活性较强的氧化物,掺入水泥中能与水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行二次反应,生成稳定的水化硅酸钙凝胶,具有明显的增强作用。根据试验研究证明,优质粉煤灰同减水剂一样,也具有一定的减水作用,如 I 级粉煤灰的颗粒较细,在混凝土中能够均匀分布,使水泥石中的总孔隙降低,硬化混凝土更加致密,混凝土的强度也有所提高。由此可见,粉煤灰的主要作用是能提高混凝土的强度。

在优质粉煤灰中含有 70% 以上的球状玻璃体。这些球状玻璃体表面光滑、无棱角、性能稳定,在混凝土中类似于轴承的润滑作用,减小了混凝土拌合料之间的磨擦阻力,能显著改善混凝土拌合料的和易性,泵送高强混凝土掺入粉煤灰后能提高拌合料的可泵性。

在配制高强混凝土时掺加适量的粉煤灰,由于强度大幅度提高,孔结构进一步细化,孔分布更加合理,因此,也能有效地提高混凝土的抗渗性、抗冻性,混凝土的弹性模量也可提高 5%~10%。

2. 沸石粉

天然沸石粉是一种特殊的火山灰质材料,也是一种含有很多微孔的骨架状硅酸盐结晶矿物。天然沸石粉不仅具有一定的水硬性,而且还具有很大的内表面积,这是区别于一般火山灰质材料的特点所在。在混凝土中大量应用的是斜发沸石和丝光沸石,其化学成分与粉煤灰基本相同,其中 SiO_2 的含量为 66%~70%, Al_2O_3 的含量为 11%~13%。

我国自 1978 年以来,曾对“沸石在水泥水化中作用机理”、“混凝土掺加沸石粉的各项性能”做了系统研究,实践证明:用沸石粉作为混凝土的掺合料,不仅能配制出抗渗性、和易性良好的混凝土,而且能配制高强混凝土和泵送混凝土。

(1)沸石粉的作用机理

①提高水泥水化程度

日本山崎先生曾经提出,矿物粒子与水泥粒子聚集在一起,为水泥产物的填充提供了外部空间。因此,利用矿物粉料与水泥颗粒尺寸相同的特点,置换混凝土中部分水泥,能提高水泥水化程度。尤其是沸石粉,因其内表面积巨大,为水泥水化可提供大的空间;加上沸石

粉本身具有一定的水硬性,在水泥熟料激发下能产生一定的强度。

②与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CSH 相

在水泥水化反应的过程中,将生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,而 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是以片状结晶存在,对水泥石的强度作用微弱。掺加一定量的沸石粉后,大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被吸收,由原来的片状结晶变为 CSH 相,从而也提高了混凝土的强度。

③改善水泥石孔结构

美国加州大学 Mehta 教授曾对希腊火山灰水泥进行研究,证明孔径分布对强度、干缩、抗硫酸盐性及碱-集料反应均有显著影响。他认为改变孔级配,加上火山灰本身的活性,对提高混凝土的强度和耐久性将起重大作用。掺加沸石粉的水泥与纯水泥相比,水泥水化产物增加,内部微孔增多,水泥石的强度和抗渗性得到改善。

④改善混凝土界面结构

经 EDXA 分析和 X 射线层分析表明,用沸石粉取代 10% 水泥的混凝土,其界面过渡层中取向明显比纯水泥-集料界面过渡层取向减弱,取向范围的减少,使整个过渡结构不均性减弱,界面性能得到改善。

(2) 掺加沸石粉的强度效应分析

①以配合比 1:0.35:1.12:2.414(水泥:水:砂:碎石)配制的高强混凝土,其 3d、7d、28d 的强度分别为 47.5、59.5、70.8MPa;以沸石粉取代 10% 水泥配制的混凝土,其 3d、7d、28d 的强度分别为 52.4、67.0、80.0MPa;以粉煤灰取代 10% 水泥配制的高强混凝土,其 3d、7d、28d 的强度分别为 43.1、54.7、66.9MPa;以矿渣粉取代 10% 水泥配制的高强混凝土,其 3d、7d、28d 的强度分别为 41.0、51.6、66.1MPa。从以上掺加不同矿物粉料的强度比较,掺加沸石粉的混凝土,3d、7d、28d 强度均比纯水泥混凝土提高 10% 以上;而掺加粉煤灰、矿渣粉的混凝土,3d、7d、28d 强度均比纯水泥混凝土降低 6%~14%。

②沸石粉不同细度与混凝土强度的关系

天然沸石粉经振动磨细,平均粒径分为 6.8、6.4 及 5.6 μm 三个等级,其细度不同对混凝土强度的影响也不同。在其它材料配合比不变的条件下,日本曾对掺加不同粒径的沸石粉对强度的影响进行过试验,试验结果表明:混凝土拌合料的坍落度变化甚小,混凝土的含气量稍有变化;而对强度的影响很大。沸石粉平均粒径为 6.8 μm 的混凝土,3d、7d、28d 强度分别为 49.0、65.5、77.9MPa;平均粒径为 6.4 μm 的混凝土,3d、7d、28d 强度分别为 51.3、66.6、77.9MPa;沸石粉平均粒径为 5.8 μm 的混凝土,3d、7d、28d 强度分别为 51.3、68.4、80MPa。由此可以看出,沸石粉平均粒径小者强度增长较大。

③沸石粉的不同掺量与混凝土强度的关系

以沸石粉取代水泥量分别为 10%、15%、20% 配制混凝土,混凝土 28d 强度分别为 77.9、74.3、70.8MPa。其中沸石取代水泥量 15% 的混凝土,比纯水泥混凝土强度提高 4.9%;沸石粉取代水泥量 20% 的混凝土,与纯水泥混凝土强度基本相同。实践证明:采用硅酸盐水泥配制混凝土时,沸石粉取代水泥以 15% 为宜;采用普通水泥配制混凝土时,沸石粉取代水泥以 10% 为宜。

(3) F 矿粉的应用

F 矿粉是清华大学土木系开发的一种新型火山灰质细粉料,它以天然沸石粉为主要成分,配以少量的其它无机物经磨细而成。据成功工程经验介绍,用 F 矿粉置换 10% 等量的