

混凝土技术

HUNNINGTU JISHU

刘秉京 编著

人民交通出版社

TU528
L-151

混 凝 土 技 术

Hunningtu Jishu

刘秉京 编著

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土技术/刘秉京编著.-北京:人民交通出版社,

1998

ISBN 7-114-02892-X

I. 混… II. 刘… III. 混凝土施工-技术 IV. TU55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 01898 号

混凝土技术

刘秉京 编著

版式设计:崔凤莲 责任校对:杨 杰

责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京京东印刷厂印刷

开本:850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张:17.5 字数:470 千

1998 年 7 月 第 1 版

1998 年 7 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—3000 册 定价:25.00 元

ISBN 7-114-02892-X

U · 02063

内 容 提 要

本书内容包括混凝土材料、施工基本要点、混凝土结构与性能和几种特种混凝土，重点介绍了10多年来国内外对混凝土外加剂、辅助胶凝材料、混凝土结构、新拌混凝土性能、混凝土耐久性以及几种特种混凝土，包括高性能混凝土的科学研究和工程应用的成果。本书取材新颖，内容丰富，附有大量图表及混凝土工程实例。可作为大专院校、研究和工程单位的研究人员、土木工程师以及广大从事混凝土施工人员的重要参考书。

序 言

混凝土的一生——从材料与成分选择,拌和成混凝土、形成结构、发展强度,到投入工作,在使用环境中破坏——100多年来人们对它进行了广泛和深入的研究,使混凝土成为土木工程中用量最大、应用最广的主要建筑材料。

经过拌和,水泥浆体包裹粗细集料形成粘聚性堆集材料,在繁重的浇筑捣实后,混凝土中的固体颗粒下沉,水分携带微细粒子上浮,在新浇混凝土的水平表面形成浮浆层,在粗集料与钢筋下方形成滞水,以后成为孔隙。

捣实抹面后形成结构。已经完工的混凝土表面看来平静,实则混凝土内进行着一系列有时是很激烈的水化反应,水泥加水后反应生成新的水化物使混凝土凝结、硬化、增加强度,这一反应一直可以持续到10多年以上。

新浇混凝土的水平表面水分蒸发太快时会产生塑性收缩裂缝,在高温、干燥、大风天气,水分蒸发很快,当水分蒸发速度达到 $1.0\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ 左右时,混凝土表面就有开裂的危险,应采取措施降低混凝土表面的水分蒸发速度,保持混凝土表面有足够的湿度。

保持有足够的水分才能使混凝土充分水化。由于表面水分的蒸发、水化反应不完全,一般情况下,大约离面层 15cm 以内仍保持80%左右的湿度,水化继续,强度发展。水灰比小于0.4的混凝土必须从外界补充水分,使水化得以顺利进行。水泥的四种矿物成分经过连续的水化之后,生成的水化产物中,水化硅酸钙大约占固体体积的50%~60%,硫铝酸钙占15%~20%,氢氧化钙约占20%~25%,还有未水化的水泥颗粒。

由于固体颗粒下沉,水分在浇筑过程中不断上升,在竖向结构

中产生了分层现象,上部混凝土的密实性低于下部混凝土,混凝土水平表面疏松多孔。由于水分滞留于粗集料下部,混凝土竖向与水平方向的物理力学性能也产生了差异。这样避免和减少混凝土拌和物的离析与泌水,保持混凝土的匀质性,就显得很重要了。

水泥水化产生热量,一般结构尺寸不大,水化发热的同时,热量就散失到周围的大气中。在大体积混凝土中,由于结构尺寸很大、热量不易散失,水化热使混凝土温度上升很高,内外温差较大,热量的变化引起混凝土体积的变化,在各种约束条件下,混凝土结构会产生表面裂缝与贯穿性裂缝。一次浇筑的混凝土结构尺寸大于 0.6m 且水泥用量大于 400kg/m^3 ,或结构尺寸大于 0.8m 且水化热引起混凝土温度升高与环境温度之差大于 25°C 时,就应采用水化热较低的水泥或采取其他降温措施。

混凝土处于不同的环境中,会受到各种侵蚀介质的破坏作用,我国北方海工与水工混凝土建筑物的冻融破坏,南方海工钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀破坏,水工大体积混凝土裂缝与渗漏引起的溶出性侵蚀,此外还有硫酸盐侵蚀与碱——集料反应破坏等。混凝土中钢筋锈蚀是一种常见的破坏现象,是钢筋混凝土结构主要的破坏类型,在较恶劣的海水环境中,钢筋混凝土结构使用 10 多年就可能遭到破坏。

混凝土其缺点是:它需要复杂而笨重的施工过程使混凝土结构成型,需要时间使强度逐渐增长达到设计要求,混凝土湿胀干缩、热胀冷缩容易使混凝土结构开裂,混凝土是一种脆性材料,抗拉强度大大低于其抗压强度,以至于结构不得不依靠钢筋承受其拉应力。大部分侵蚀破坏来自外界,而混凝土表面质量往往较差,如果有一个坚实耐久的外壳,许多混凝土结构的使用年限可以大大延长。

虽然如此,混凝土确是一种优良的建筑材料,它可以根据需要成型为各种形状的工程结构,它还是一种造价低廉的大宗建筑材料,可以就地选取粗细集料,可以做成坚固耐久的建筑物。随着材料科学与工艺技术的发展,混凝土性能日益改善。

本书第1章至第4章介绍了混凝土材料,第5章至第9章介绍了混凝土施工基本要点,新拌混凝土性能与混凝土结构,第10章至第14章介绍了混凝土力学性能、变形性能与耐久性能,第15章至第18章介绍了几种特种混凝土。

在混凝土材料中,外加剂与辅助胶凝材料的开发与应用引人注目。引气剂、膨胀剂、高效减水剂与水下不崩析混凝土外加剂无疑对混凝土性能与混凝土工艺作出了重要贡献。高效减水剂的开发与应用是外加剂发展的一个重要阶段,是几十年来混凝土工艺发展的重要成果,高效减水剂的应用出现了高强度混凝土,流动混凝土与高性能混凝土,在桥梁和港口工程中的大体积混凝土,强度较高,采用大流动度泵送混凝土施工。应用高效减水剂不仅增加强度与改善和易性,更主要是可以应用高效减水剂减少水泥用量来作为避免混凝土开裂的一种温控措施。

混合材料或辅助胶凝材料是制造优质混凝土必不可少的成分,是制造高性能混凝土的有效成分,粉煤灰、矿渣和硅灰一般可以增加混凝土的抗渗性。增加强度,增加混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能,减少碱——集料反应的危害,可以降低水化热,降低成本,改善混凝土和易性等,掺加上述辅助胶凝材料可以降低混凝土的氯离子渗透性,有利于制造高耐久性混凝土。

只有优质的新拌混凝土,优质的施工,才能制造出优质的混凝土结构,这需要适宜的和易性或高和易性、稳定而匀质的新拌混凝土、正确的施工和充分的养护。

随着工程建设的发展,对混凝土的耐久性与结构的可靠度提出了更高的要求,要求混凝土结构的使用期限为50年到100年甚至更长,要求结构有可靠的功能,在这些要求下便出现了高性能混凝土。由于混凝土工程质量不良,耐久性低下,使许多混凝土结构投入使用后十几年、二十几年便受到破坏,大量的修复费用和停止运营的经济损失,超过了建造优质结构所增加的费用。用高性能混凝土即用高施工性能,高强度,高耐久性混凝土建造的混凝土结构具有较长的使用年限,可用于修筑高速公路,建造桥梁,高层建筑,

高塔,广场和海工混凝土结构。例如我国东南沿海钢筋混凝土结构,由于氯盐作用,混凝土中钢筋迅速锈蚀导致结构破坏。如果研制一种降低氯离子渗透性的高性能混凝土,辅以阻锈剂和织物模板,可以把海工钢筋混凝土结构使用期限提高到50年以上。

土木工程中常有尺寸较大的钢筋混凝土结构,如基础、承台、桥墩、塔柱、锚碇和船坞等,它们的特点是结构尺寸大,混凝土强度高,采用泵送施工需要大流动度,因水化热使混凝土最高温度很高,防止水化热引起的热裂缝是一个比较突出的问题,要采用一种或许多种温控措施,如应用低热水泥,减少水泥用量,控制浇筑温度、分层分块浇筑,水管冷却以及采用保温措施等以避免过高的温度、过大的温差引起混凝土开裂。

混凝土品种与工艺众多,应用领域广阔,研究日益发展,新技术不断出现,作者力图让读者对混凝土材料,混凝土结构,混凝土性能和几种特种混凝土的基本状况和目前国内外发展的新成就有深入的了解,本书内容丰富,引用了很多科研院所的研究报告和有关参考文献,谨此对这些作者表示诚挚的感谢。

刘秉京

1995年3月18日武汉

目 录

第 1 章 水泥	1
1.1 硅酸盐水泥和普通水泥	1
1.2 矿渣水泥	15
1.3 火山灰水泥	17
1.4 粉煤灰水泥	18
第 2 章 集料	19
2.1 集料的性质	19
2.2 集料的选择	37
2.3 集料的运输与储存	39
第 3 章 外加剂	40
3.1 外加剂发展简史	41
3.2 外加剂类别与应用	44
3.3 外加剂标准	51
3.4 早强剂	51
3.5 缓凝剂和超缓凝剂	61
3.6 减水剂	75
3.7 高效减水剂(超塑化剂)	104
3.8 引气剂	145
3.9 膨胀剂	158
3.10 防冻剂	166
3.11 水下混凝土不离析外加剂	167
第 4 章 粉煤灰 硅灰 水	178
4.1 粉煤灰	178
4.2 硅灰	204

4.3 水	209
第5章 混凝土配合比设计	211
5.1 设计原则	212
5.2 配合比设计原理	218
5.3 配合比设计举例	230
第6章 混凝土施工基本原理	247
6.1 拌和	247
6.2 运输	249
6.3 浇筑	251
6.4 震动捣实	253
6.5 缺陷	254
6.6 养护	255
第7章 混凝土质量控制	259
7.1 混凝土强度的变异	259
7.2 正态分布	262
7.3 统计计算	264
7.4 施工配制强度	267
7.5 混凝土强度合格标准	271
7.6 质量控制图	277
7.7 试验误差	278
7.8 质量保证	279
第8章 新拌混凝土和早龄期混凝土性能	282
8.1 和易性	282
8.2 离析与泌水	299
8.3 塑性收缩	302
8.4 凝结	303
8.5 新浇混凝土对模板的侧压力	306
第9章 混凝土结构	311
9.1 混凝土的表层	312
9.2 竖向结构的分层现象	317

9.3	混凝土的各向异性	317
9.4	混凝土的微观结构	320
第 10 章	混凝土的强度	334
10.1	抗压强度	335
10.2	抗拉强度	355
10.3	冲击强度	358
10.4	耐磨性	358
10.5	粘结强度	361
10.6	疲劳强度	362
10.7	结构中的混凝土强度	363
第 11 章	弹性与徐变	367
11.1	静弹性模量	367
11.2	泊松比	372
11.3	徐变	372
第 12 章	混凝土的变形	379
12.1	干燥收缩	379
12.2	影响混凝土干缩的因素	381
12.3	干缩的计算	385
12.4	碳化收缩	386
12.5	热变形	388
第 13 章	混凝土中的裂缝	391
13.1	新浇混凝土的裂缝	391
13.2	硬化混凝土的裂缝	392
13.3	影响开裂的因素	399
13.4	裂缝的防止与控制	401
13.5	裂缝的修补	401
第 14 章	混凝土耐久性	403
14.1	渗透性	403
14.2	冻融破坏	408
14.3	钢筋锈蚀	413

14.4	硫酸盐侵蚀	433
14.5	碱—集料反应(AAR)	445
14.6	环境水的侵蚀	448
14.7	海水中的混凝土	450
14.8	高效减水剂与混凝土耐久性	464
第15章	高强混凝土	478
15.1	前言	478
15.2	材料选择	478
15.3	混凝土配合比	482
15.4	高强混凝土施工	484
15.5	高强混凝土性能	485
15.6	高强混凝土的应用	488
第16章	流动混凝土与泵送混凝土	492
16.1	流动混凝土	492
16.2	泵送混凝土	497
16.3	工程实例	504
第17章	高性能混凝土	508
17.1	概述	508
17.2	高性能混凝土的性能	509
17.3	高性能混凝土的材料	512
17.4	高性能混凝土的配合比	517
17.5	高性能混凝土的施工	520
17.6	工程实例	522
第18章	大体积混凝土	527
18.1	定义	527
18.2	大体积混凝土的开裂	528
18.3	防止混凝土开裂	534
18.4	温控措施研究	540
18.5	工程实例	540
附录	英制单位换算表	547

第 1 章 水 泥

1.1 硅酸盐水泥和普通水泥

凡以适当成分的生料,烧至部分熔融,所得以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料,加入适量的石膏,磨细制成的水硬性胶结材料,称为硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥的原料主要为能提供氧化钙、氧化硅、氧化铝和氧化铁的石灰岩、泥灰岩、黄土和粘土等;同时根据需要加入适当的校正原料,调整原料比例符合要求。石灰石和粘土等厚料磨细混匀便得到生料。

生料经立窑或回转窑煅烧得到熟料,回转窑生产有湿法和干法两种方法,回转窑为一倾斜的钢管炉,沿其斜轴缓慢地转动,生料由回转窑上端加入,煤粉或其他燃料由下端送入,当生料通过回转窑时,温度升高,水和二氧化碳被排掉,当温度到达一定高度时,完成基本反应,控制生料通过速度,使生料在临界温度区停留足够长的时间,烧结成硅酸盐水泥的四种矿物,这种把生料煅烧成要求的产物的过程叫做烧成,由烧成过程得到的熔融或部分熔融的粗糙的团块粒料叫做熟料,熟料和一定数量的石膏共同磨细到规定的细度,便得到硅酸盐水泥。

硅酸盐水泥熟料主要有下述 4 种矿物:

硅酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	简写为 C_3S ;
硅酸二钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	简写为 C_2S ;
铝酸三钙	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	简写为 C_3A ;
铁铝酸四钙	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	简写为 C_4AF 。

此外还有少量游离氧化钙,氧化镁,含碱矿物和玻璃体等。

硅酸三钙通常占 50%左右,可以多至 60%,一般称它为阿利特(Alite)或 A 矿,硅酸三钙凝结时间正常,水化较快,放热较多,抗水性较差,但强度最高,强度增长率也大,28 天抗压强度可达 1 年抗压强度的 80%。

硅酸二钙一般占 20%左右,称之为贝利特(Belite),简称 B 矿,贝利特水化较慢,水化热较低,抗水性较好,早期强度较低,但 1 年后可以赶上阿利特的强度。

铝酸三钙水化迅速,放热多、凝结急、需加石膏调节其凝结速度,强度不高、干缩变形较大、抗硫酸盐性能也较差。

铁铝酸四钙又称才利特(Celite)或简称 C 矿,水化速度介于铝酸三钙和硅酸三钙之间,它的早期强度类似铝酸三钙,后期强度也还能增长,才利特抗冲击性能和抗硫酸盐性能较好。

我国硅酸盐水泥分 425R、525、525R、625、625R、725R 6 个标号。普通水泥分 325,425,425R,525,525R,625,625R 7 个标号。硅酸盐水泥早期强度较高,抗冻性好,宜用于高强混凝土,不适用于大体积混凝土。普通水泥适用于各种混凝土和钢筋混凝土工程。

凡由硅酸盐水泥熟料、0~5%石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为硅酸盐水泥(即国外通称的波特兰水泥)。硅酸盐水泥分两种类型,不参加混合材的称 I 型硅酸盐水泥,代号 P·I。在硅酸盐水泥熟料粉磨时参加不超过水泥重量 5%石灰石或粒化高炉矿渣混合材料的称 II 型硅酸盐水泥,代号 P·II。

凡由硅酸盐水泥熟料、6%~15%混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为普通硅酸盐水泥(简称普通水泥),代号 P·O。

掺活性混合材料时,最大掺量不得超过 15%,其中允许用不超过水泥重量 5%的窑灰或不超过水泥重量 10%的非活性混合材料来代替。

掺非活性混合材料时最大掺量不得超过水泥重量的 10%。

我国国家标准(GB175—92)对硅酸盐水泥和普通水泥的技术要求见表 1.1-1。

硅酸盐水泥与普通水泥

表 1.1-1

品种	标号	抗 压 强 度 (MPa)		抗 折 强 度 (MPa)	
		3 天	28 天	3 天	28 天
硅酸盐水泥	425R	22.0	42.5	4.0	6.5
	525	23.0	52.5	4.0	7.0
	525R	27.0	52.5	5.0	7.0
	625	28.0	62.5	5.0	8.0
	625R	32.0	62.5	5.5	8.0
	725R	37.0	72.5	6.0	8.5
普通水泥	325	12.0	32.5	2.5	5.5
	425	16.0	42.5	3.5	6.5
	425R	21.0	42.5	4.0	6.5
	525	22.0	52.5	4.0	7.0
	525R	26.0	52.5	5.0	7.0
	625	27.0	62.5	5.0	8.0
	625R	31.0	62.5	5.5	8.0

不溶物: I 型硅酸盐水泥中不溶物不得超过 0.75%,

II 型硅酸盐水泥中不溶物不得超过 1.50%。

氧化镁: 水泥中氧化镁的含量不得超过 5.0%, 如果水泥经过压蒸安定性试验合格, 则水泥中氧化镁含量允许放宽到 6.0%。

三氧化硫: 水泥中三氧化硫的含量不得超过 3.5%。

烧失量: I 型硅酸盐水泥中烧失量不得大于 3.0%, II 型硅酸盐水泥中烧失量不得大于 3.5%, 普通水泥中烧失量不得大于 5.0%。

细 度: 硅酸盐水泥比表面积大于 300m²/kg,

普通水泥 80μm 方孔筛筛余不得超过 10.0%。

凝结时间: 硅酸盐水泥初凝时间不得早于 45min, 终凝不得迟于 390min;

普通水泥初凝不得早于 45min, 终凝不得迟于 10h。

安定性: 用沸煮法检验必须合格。

强 度: 水泥标号按规定龄期的抗压强度和抗折强度来划分, 各标号水泥的各龄

期强度不得低于表 1.1-1 中数值。

碱:水泥中的碱含量按 $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值表示,若使用活性集料、用户要求提供低碱水泥时,水泥中的碱含量不得大于 0.6%。

1.1.1 硅酸盐水泥的性能

硅酸盐水泥的密度为 $3.1\sim 3.2$,松散体积密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3\sim 1300\text{kg}/\text{m}^3$,紧密体积密度为 $1400\text{kg}/\text{m}^3\sim 1700\text{kg}/\text{m}^3$ 。

1. 细度

水泥颗粒的大小对于水泥和水的反应速度有很大的影响,对于一定重量的水泥,磨得较细的水泥的表面积大于磨得较粗的水泥的表面积,这会增加水化速度并加快硬化过程。一般来说,水泥粒子小于 $40\mu\text{m}$,具有较高的活性,水泥粒子大于 $100\mu\text{m}$,活性就很小了。如果水泥磨得过细,不仅耗能大,且极细的水泥颗粒易与磨细过程的水蒸汽发生予水化或储存期间易受潮失去胶凝作用。水泥的水化受到水泥颗粒大小的影响,粗颗粒要几年才能水化,很粗的颗粒可能永远不能完全水化。

水泥的细度用 0.080mm 方孔筛的筛余量表示,我国水泥标准 GB 175—92 规定普通水泥 0.080mm 方孔筛筛余不得超过 10%。水泥的细度也可用比表面积表示,根据常压空气穿透水泥层的阻力计算比表面积,硅酸盐水泥的比表面积大于 $300\text{m}^2/\text{kg}$ 。

2. 凝结时间

水泥加水拌和后应该在足够的时间内保持塑性状态;使拌和好的混凝土拌和物能适应各种混凝土工程的施工需要、各种场合的运输、浇筑和捣实过程,便于操作,同时在捣实抹面完毕后又应能够尽快硬化和发展强度。了解水泥的凝结时间对工地质量控制是很必要的。

水泥的凝结时间是用维卡仪测定标准稠度的水泥净浆来确定的,水泥浆的用水量对凝结时间有很大的影响,测定水泥的凝结时间一般均把水泥浆调整到一个标准湿度状态,叫做标准稠度。我国标准规定,用标准稠度测定仪测定标准锥体在锥模净浆内下沉深

度为 $28\text{mm} \pm 2\text{mm}$ 时的用水量为标准稠度用水量。

为了避免应用集料带来的复杂化,测定标准稠度应用水泥净浆,即应用水泥和水的拌和物,测定凝结时间系用标准稠度的水泥净浆,用一定重量的直径为 $1.1\text{mm} \pm 0.04\text{mm}$ 、长 50mm 的钢针沉入净浆的深度确定水泥的初凝和终凝。我国标准规定,水泥的初凝时间不得小于 45min ,终凝时间不得大于 12h 。

如果石膏数量不足,水泥加水后将在几分钟内发生激烈反应并放出大量热量,形成疏松多孔结构。这是由于 C_3A 快速水化,大量生成水化铝酸钙引起水泥快凝。如果磨机温度过高(超过 110°C)或储存时高温,将引起部分石膏脱水生成半水石膏,加水拌和后,半水石膏很快水化,生成二水石膏网状结构,引起水泥浆固化,这种现象叫做假凝。产生假凝现象的水泥浆经剧烈搅拌,破坏二水石膏网状结构后,水泥浆又重新恢复塑性状态,混凝土拌和物可以继续使用,不会有任何坏的影响。

影响凝结速度的因素很多,如水泥的细度、水灰比的大小,温度的高低等都对水泥的凝结速度产生影响,水泥愈细,水灰比愈小,温度愈高时,水泥的凝结速度愈快。

3. 强度

影响水泥强度的因素很多,如水泥的矿物组成、水泥的细度、水灰比、试验方法和养护温度、湿度等都会对水泥强度产生影响,水泥熟料 4 种矿物的单矿物强度见表 1.1-2。

4 种矿物的强度

表 1.1-2

矿物名称	抗压强度 (MPa)			
	3 天	7 天	28 天	180 天
C_3S	29.6	32.0	49.6	62.6
C_2S	1.4	2.2	4.6	28.6
C_3A	6.0	5.2	4.0	8.0
C_4AF	15.4	16.8	18.6	19.6

由表 1.1-2 可知, C_3S 和 C_3A 硬化速度最快, C_3S 的强度最高,故适当提高 C_3S 和 C_3A 的含量,提高粉磨细度,可以得到快硬