

混凝土技术

HUNNINGTU JISHU

刘秉京 编著

(第二版)

人民交通出版社

混凝土技术

(第二版)

刘秉京 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是在混凝土技术(第一版)的基础上修订、增补而成的。本书的主要内容包括:水泥,集料,外加剂,粉煤灰、矿渣和硅灰,混凝土配合比设计,混凝土施工基本原理,混凝土质量控制,新拌混凝土和早龄期混凝土性能,混凝土结构,混凝土的强度,弹性与徐变,混凝土的变形,裂缝和耐久性,高强混凝土,高性能混凝土,以及大体积混凝土等。

本第二版按新国家标准改写了水泥标准,补充了新品种混凝土外加剂,增加了新一代高效减水剂 SP-8 和 MIGHTY3000,同时增加了高效减水剂与水泥适应性的内容,在原有粉煤灰的基础上增加了磨细矿渣,补充了硅灰等辅助胶凝材料。

本书内容丰富全面,可供相关专业的工程技术人员参考使用。

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,
2004.3

ISBN 7-114-04983-8

I.混... II.刘... III.混凝土施工—施工技术
IV.TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 014352 号

Hunningtu Jishu

混凝土技术

(第二版)

刘秉京 编著

正文设计:孙立宁 责任校对:宿秀英 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64299025)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:850×1168 1/32 印张:21.5 字数:566 千

1998 年 7 月 第 1 版

2004 年 3 月 第 2 版

2004 年 3 月 第 2 版 第 1 次印刷 总计第 4 次印刷

印数:7001—10000 册 定价:48.00 元

ISBN 7-114-04983-8

第一版序言

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1h水分蒸发速度达到 $1.0\text{kg}/\text{m}^2$ 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4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 $400\text{kg}/\text{m}^3$,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离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

第二版序言

本书出版以来,混凝土技术有了长足的进展,我国对水泥标准进行了修订,无论是水泥或是在混凝土中都应用了磨细矿渣,更好地利用了矿渣的活性,国外广泛地应用了聚羧酸高效减水剂,由于其性能优良,部分国家已经取代萘系高效减水剂成为更广泛应用的外加剂品种,我国已经在部分工程中应用了聚羧酸和氨基磺酸盐高效减水剂。

自密实混凝土是一种高流动性具有适当粘度的混凝土,能够流过钢筋填满模板内所有空间在重力作用下自行密实,自密实混凝土减少了对熟练工人的需求,它的自流密实的高施工性能保证了浇筑工程质量,得到世界各国的广泛的研究和应用。

长期以来,混凝土耐久性与结构的使用寿命是世界各国研究的重大课题,欧共体6个国家12个大学,研究机构和公司经过几年的调查研究,提出了“新建和现有混凝土结构耐久性设计指南”,我国润扬长江大桥和杭州湾跨海大桥都提出了100年使用寿命的要求。

本书第二版按新国家标准改写了水泥标准,补充了新品种混凝土外加剂,增加了新一代高效减水剂 SP—8 和 MIGHTY3000,同时增加了高效减水剂与水泥适应性的内容,在原有粉煤灰的基础上增加了磨细矿渣,补充了硅灰,这些是广泛应用的和制造高性能混凝土的辅助胶凝材料。

钢筋非常密集或者人工无法浇筑的混凝土结构,其混凝土的浇筑需要应用自密实混凝土,自密实混凝土不仅易于浇筑,工程质量易于保证,施工速度快,其应用领域也很广泛,从预制构件到悬索桥的锚碇都得到成功的应用,本书用一章的篇幅介绍了自密实混凝土。

高性能混凝土广泛地用来提高混凝土的耐久性,延长结构使用寿命,钢筋锈蚀是混凝土结构破坏最主要的因素之一,海工结构、受到除冰盐作用的公路桥梁使用一个短时期后均因钢筋锈蚀遭到破坏,在这一版中,增加了抗氯盐侵蚀高性能混凝土,有助于提高上述结构的耐久性,延长使用寿命。

粉煤灰和矿渣都是工业废渣,高掺量矿渣粉煤灰混凝土、高掺量矿渣混凝土和高掺量粉煤灰混凝土,性能优良,尤其适用于某些耐久性要求的结构,这种混凝土可以减少 CO_2 的排放,减少对环境的污染和资源的消耗,降低成本,是一种可持续发展的绿色混凝土。

此外有一些内容也按最新资料进行了补充,如混凝土的自干缩,混凝土的开裂温度和大体积混凝土温控工程实例等,

在附录中,介绍了氯离子扩散系数快速试验方法(NTbuild492)和两种高效减水剂工艺等。

刘秉京

2003 年 8 月

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、火山灰水泥、粉煤灰水泥	15
1.3 复合硅酸盐水泥	19
第 2 章 集料	21
2.1 集料的性质	21
2.2 集料的选择	38
2.3 集料的运输与储存	40
第 3 章 外加剂	42
3.1 外加剂发展简史	42
3.2 外加剂类别与应用	46
3.3 外加剂标准	52
3.4 早强剂	54
3.5 缓凝剂和超缓凝剂	62
3.6 减水剂	76
3.7 高效减水剂(超塑化剂)	102
3.8 引气剂	146
3.9 膨胀剂	159
3.10 防冻剂	168
3.11 水下混凝土不离析外加剂	170
3.12 减缩剂	179
3.13 超早强剂	185
3.14 高效减水剂与水泥的适应性	188
第 4 章 粉煤灰、矿渣和硅灰	205
4.1 粉煤灰	205

4.2	矿渣	231
4.3	硅灰	237
第5章	混凝土配合比设计	247
5.1	设计原则	248
5.2	配合比设计原理	253
5.3	配合比设计举例	265
第6章	混凝土施工基本原理	282
6.1	拌和	282
6.2	运输	284
6.3	浇筑	286
6.4	震动捣实	287
6.5	缺陷	289
6.6	养护	290
第7章	混凝土质量控制	294
7.1	混凝土强度的变异	294
7.2	正态分布	298
7.3	统计计算	299
7.4	施工配制强度	302
7.5	混凝土强度合格标准	306
7.6	质量控制图	312
7.7	试验误差	313
7.8	质量保证	313
第8章	新拌混凝土和早龄期混凝土性能	316
8.1	和易性	316
8.2	离析与泌水	333
8.3	塑性收缩	335
8.4	凝结	337
8.5	新浇混凝土对模板的侧压力	339
第9章	混凝土结构	345
9.1	混凝土的表层	346

9.2	竖向结构的分层现象	350
9.3	混凝土的各向异性	352
9.4	混凝土的微观结构	354
第 10 章	混凝土的强度	367
10.1	抗压强度	368
10.2	抗拉强度	387
10.3	冲击强度	390
10.4	耐磨性	391
10.5	粘结强度	394
10.6	疲劳强度	394
10.7	结构中的混凝土强度	395
第 11 章	弹性与徐变	399
11.1	静弹性模量	399
11.2	泊松比	404
11.3	徐变	404
第 12 章	混凝土的变形	411
12.1	干燥收缩	411
12.2	影响混凝土干缩的因素	413
12.3	干缩的计算	417
12.4	碳化收缩	418
12.5	热变形	420
12.6	自干缩	422
第 13 章	混凝土中的裂缝	426
13.1	新浇混凝土的裂缝	426
13.2	硬化混凝土的裂缝	427
13.3	影响开裂的因素	434
13.4	裂缝的防止与控制	435
13.5	裂缝的修补	436
第 14 章	混凝土耐久性	438
14.1	渗透性	438

14.2	冻融破坏	442
14.3	钢筋锈蚀	448
14.4	硫酸盐侵蚀	467
14.5	碱—集料反应(AAR)	479
14.6	环境水的侵蚀	482
14.7	海水中的混凝土	484
14.8	高效减水剂与混凝土耐久性	502
第 15 章	高强混凝土	516
15.1	前言	516
15.2	材料选择	516
15.3	混凝土配合比	520
15.4	高强混凝土施工	522
15.5	高强混凝土性能	523
15.6	高强混凝土的应用	526
第 16 章	流动混凝土与泵送混凝土	529
16.1	流动混凝土	529
16.2	泵送混凝土	533
16.3	工程实例	540
第 17 章	高性能混凝土	544
17.1	概述	544
17.2	高性能混凝土的性能	545
17.3	高性能混凝土的材料	548
17.4	高性能混凝土的配合比	553
17.5	高性能混凝土的施工	555
17.6	工程实例	558
17.7	抗氯盐侵蚀高性能混凝土	563
17.8	几座跨海大桥的高性能混凝土	572
17.9	沉管隧道混凝土技术	575
第 18 章	大体积混凝土	586
18.1	定义	586

18.2	大体积混凝土的开裂	587
18.3	防止混凝土开裂	593
18.4	温控措施研究	598
18.5	工程实例	599
18.6	开裂架与温度—应力试验仪	612
18.7	混凝土成分对开裂的影响	616
第 19 章	自密实混凝土	620
19.1	概述	620
19.2	新拌混凝土自密实性能	621
19.3	试验方法	625
19.4	自密实混凝土配合比设计	631
19.5	混凝土的物理力学性能	633
19.6	耐久性	644
19.7	工程应用	652
19.8	钢纤维自密实混凝土	656
19.9	引气自密实混凝土	658
第 20 章	绿色混凝土和可持续发展	661
附录 1	氯离子扩散系数试验方法(RCM)	670
附录 2	二种高效减水剂工艺	674

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,国外称为波特兰水泥。

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。石灰石和粘土等原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。

我国硅酸盐水泥强度等级分为 42.5、42.5R、52.5、52.5R、62.5、62.5R 共 6 种,普通水泥强度等级分为 32.5、32.5R、42.5、42.5R、52.5、52.5R 共 6 种,硅酸盐水泥早期强度较高,适用于高强混凝土,高性能混凝土,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掺加不超过水泥质量 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质量 5% 的窑灰或不超过水泥质量 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质量的 10%。

我国国家标准(GB 175—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	强度等级	抗 压 强 度		抗 折 强 度	
		(MPa)		(MPa)	
		3 天	28 天	3 天	28 天
硅酸盐水泥	42.5	17.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	22.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	23.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	27.0	52.5	5.0	7.0
	62.5	28.0	62.5	5.0	8.0
	62.5R	32.0	62.5	5.5	8.0
普通水泥	32.5	11.0	32.5	2.5	5.5
	32.5R	16.0	32.5	3.5	5.5
	42.5	16.0	42.5	3.5	6.5
	42.5R	21.0	42.5	4.0	6.5
	52.5	22.0	52.5	4.0	7.0
	52.5R	26.0	52.5	5.0	7.0

注: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 $300\text{m}^2/\text{kg}$,

普通水泥 $80\mu\text{m}$ 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 6.5h;

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%。