

TECHNOLOGY  
OF HPC & UHPC

# 高性能与超高性能 混凝土技术

冯乃谦 编著

中国建筑工业出版社



# 高性能与超高性能混凝土技术

TECHNOLOGY OF HPC & UHPC

冯乃谦 编著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高性能与超高性能混凝土技术/冯乃谦编著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2015. 6  
ISBN 978-7-112-18014-1

I. ①高… II. ①冯… III. ①高强混凝土-研究  
IV. ①TU528. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 070058 号

混凝土技术随着社会的发展和进步而不断更新, 不断前进。高性能混凝土与超高性能混凝土从强度与耐久性方面把混凝土技术推向了一个新的高度, 使混凝土技术有了突破性的进展。今后, 将引领混凝土技术向更高的层次发展。

本书作者长期从事混凝土材料研究, 结合生产实际, 前后经历了两年才完成本书的写作, 从多方面论述了高性能、超高性能及多功能混凝土技术。全书共分 28 章, 主要内容包括: 混凝土技术的历史与发展; 粉体技术与高性能超高性能混凝土的发展; 高性能超高性能混凝土对水泥的选择; 骨料; 新型高效减水剂的研发与应用; 天然硅质掺合料; 天然沸石; 偏高岭土超细粉; 粉煤灰; 微珠超细粉; 硅粉; 水淬矿渣超细粉(矿粉); 混凝土用膨胀材料; 造纸白泥的应用; 石灰石细粉; 其他的无机细粉; 水下不分散混凝土; 自密实混凝土的研发与应用; 多功能混凝土技术的研发和应用; 普通混凝土高性能化的研究与应用; 免蒸压免蒸养(双免) C80 管桩的研发与生产; 超高强、超高性能混凝土的研制与应用; 混凝土的超高泵送技术; 混凝土耐久性病害综合症及特种混凝土技术; 新建钢筋混凝土结构物的耐久性; 钢管混凝土; 绿色(生态)混凝土; 工业废弃物资源化与混凝土应用的研究; 混凝土技术的展望。

本书适用于高等院校的有关师生, 同时也可供有关工程技术人员参考!

责任编辑: 郭 栋 辛海丽  
责任设计: 李志立  
责任校对: 陈晶晶 赵 颖

## 高性能与超高性能混凝土技术 TECHNOLOGY OF HPC & UHPC

冯乃谦 编著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)  
各地新华书店、建筑书店经销  
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版  
北京画中画印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 32½ 字数: 635 千字  
2015 年 6 月第一版 2015 年 6 月第一次印刷

定价: 78.00 元

ISBN 978-7-112-18014-1  
(27256)

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)

## 前 言

混凝土技术是随着社会的发展和进步而不断提高的。从我国大地湾遗址中，发掘出的与古罗马相似的混凝土，这种大约 5000 年前的混凝土，具有令人吃惊的耐久性。日本鹿岛公司、日本电气化学工业和石川岛建材等，利用了我国大地湾遗址混凝土的基本原理，共同研发出来的 EIEN（永远）的混凝土技术，预测寿命可达一万年，故这种混凝土也称为“万年混凝土”。20 世纪 70 年代，挪威人为了提高海上钢筋混凝土钻井平台的耐久性，在普通混凝土中掺入了硅灰，其结果不单混凝土的耐久性提高，而且强度也提高，流动性也得到了改善。这种混凝土是不能以某一种性能来衡量的，后来被命名为高性能混凝土。在粉体技术的提高和减水剂技术发展的基础上，又由高性能混凝土进一步发展为超高性能混凝土。现在，日本已将强度为 180MPa 的超高性能混凝土应用于超高层建筑的底层柱中。在美国，强度为 250MPa 的超高性能混凝土已商业化；在欧洲，强度为 200~250MPa 的超高性能混凝土已用于桥梁及特殊结构中。加拿大的魁北克，已有 250MPa 的超高性能混凝土用于桥面板等。挪威的混凝土专家指出：“超高性能混凝土是混凝土技术突破性的进展”。

我们在原有高性能混凝土的基础上，把强度等级拓宽，由 C30 扩展到 C130，并掺入了多孔微晶无机粉体及特种添加剂，使混凝土具有自密实，自养护，低收缩，低水化热，高保塑和高耐久性等多种功能。这样，就改变了混凝土的生产控制和出厂监控、改变了现场施工工艺和养护技术，更重要的是混凝土的质量得到了保证，使混凝土结构的使用寿命得以延长。这是一种省力化、省资源、省能源的低碳绿色混凝土，我们把这种混凝土称之为多功能混凝土。现在这种多功能混凝土已有 C30、C50 及 C60 等强度等级的用于楼板、梁及柱等建筑结构中；C40 的多功能混凝土已用于自密实成型的钢筋混凝土下水管试产中；C130 的多功能混凝土曾在广州东塔项目工程中试验泵送至 510m 的高度。

混凝土技术和其他方面的技术一样，其发展是不断更新，不断前进的。多功能混凝土的研发和应用，虽然取得了阶段性的成果，但是要变成一套完整可用的混凝土技术，仍有很长的路要走。希望得到社会同仁更多的指导和帮助！

本书共分 28 章。第 1 章阐述了混凝土技术的历史与发展；第 2 章阐述了粉体技术与高性能超高性能混凝土的发展；第 3 章阐述了高性能超高性能混凝土对水泥的选择；第 4 章阐述了高性能超高性能混凝土用的骨料；第 5 章阐述了新型高效减水剂的研发与应用；第 6 章~第 16 章阐述了粉体技术和掺合料与高性能

超高性能混凝土技术的关系；第 17 章阐述了水下不分散混凝土；第 18 章阐述了自密实混凝土的研发与应用；第 19 章阐述了多功能混凝土技术的研发和应用；第 20 章阐述了普通混凝土高性能化的研究与应用；第 21 章阐述了免蒸压免蒸养（双免）C80 管桩的研发与生产；第 22 章阐述了超高强、超高性能混凝土的研制与应用；第 23 章阐述了混凝土的超高泵送技术；第 24 章～第 25 章阐述了混凝土与混凝土结构的耐久性 & 特种混凝土技术；第 26 章阐述了钢管混凝土；第 27 章、第 28 章阐述了绿色（生态）混凝土技术。书中的内容从多方面论述了高性能、超高性能及多功能混凝土技术；有一部分内容是作者长期结合生产实际的研究成果；国际友人来华的讲座、报告也摘译了有关内容，作为本书的一部分；国内外杂志、专著作为本书的主要参考。前后经历了两年才完成本书的写作。

在本书编写前后，作者曾长期担任中建混凝土公司、广州天达混凝土公司、深圳建工集团公司的顾问，作者得到了这些单位的多方关照，特别是吴文贵先生对问题深入交谈和工作的开创精神，给予作者很大的激励和推动。作者还参与以中建四局为主的西塔、东塔和京基大厦三栋超高层建筑专家委员会，除了能从中学习以外，还指导了多项混凝土技术的研究。在此过程中，得到了叶浩文先生的大力支持！此外，陈乐雄先生、傅军先生等朋友也给予作者支持和帮助，对此表示衷心的感谢！

向井毅、笠井芳夫教授是作者在日本留学时的导师和朋友，虽已与世长辞，但他们治学严谨，待人诚恳的精神，作者终生难忘。西林新藏和阿部良弘两位教授来华讲学和交流，为编写本书注入了更多先进、科学的内容。对日本朋友表示衷心感谢！

本书可供高等院校的有关师生参考，也可供有关工程技术人员参考！书中常有错误和问题，望批评指正。

冯乃谦

于清华大学

# 目 录

<b>第 1 章 混凝土技术的历史与发展</b> .....	1
1.1 超高性能混凝土 (UHPC)——混凝土技术突破性进展.....	1
1.2 世界上最古老的混凝土.....	4
1.3 古罗马的火山灰混凝土.....	4
1.4 普通混凝土.....	5
1.5 高性能混凝土 (HPC).....	8
1.6 超细粒子密实填充的水泥基材料.....	9
1.7 新型高效减水剂的应用使 HPC 和 UHPC 获得更高强度和性能.....	9
1.8 世界各国对 HPC 的技术标准.....	10
1.9 超高性能混凝土 (UHPC) 的发展.....	10
1.10 低碳技术混凝土材料与制品.....	11
<b>第 2 章 粉体技术与高性能超高性能混凝土的发展</b> .....	12
2.1 超细粉在 HPC 与 UHPC 中的功能与效果.....	12
2.2 超细粉与高效减水剂双掺的流化效果.....	13
2.3 水泥基材料硬化体的孔隙和强度.....	15
2.4 水泥基材料的两个模型.....	16
<b>第 3 章 高性能超高性能混凝土对水泥的选择</b> .....	18
3.1 引言.....	18
3.2 低热硅酸盐水泥.....	19
3.3 硅粉混合水泥.....	22
3.4 调粒水泥 (改善颗粒的粒度分布, 降低孔隙率).....	23
3.5 球状水泥.....	29
3.6 小结.....	42
<b>第 4 章 骨料</b> .....	43
4.1 引言.....	43
4.2 骨料与水泥浆的粘结强度.....	44
4.3 骨料的表观密度与吸水率对 HPC 与 UHPC 抗压强度的影响.....	48
4.4 骨料对混凝土强度及变形性能的影响.....	49
4.5 粗骨料的体积用量, 粒径对 HPC 和 UHPC 抗压强度影响的数学模型.....	52

4.6	粗骨料对混凝土耐久性的影响	56
4.7	粗骨料的最大粒径的选择	56
4.8	粗骨料的细度模量与质量系数	57
4.9	HPC 与 UHPC 对骨料的选择	58
4.10	骨料的现状与问题	59
<b>第5章</b>	<b>新型高效减水剂的研发与应用</b>	<b>61</b>
5.1	概述	61
5.2	高效减水剂的分类	61
5.3	高效减水剂的作用和效果(高效减水机理)	62
5.4	高效引气型减水剂	64
5.5	接枝共聚物高效减水剂	69
5.6	氨基磺酸盐系高效减水剂的生产与应用	75
5.7	萘系及三聚氰胺系减水剂的混凝土坍落度损失及其抑制机理	79
5.8	缩合度低的分散剂控制坍落度损失	83
5.9	沸石减水保塑剂的研发与应用	83
5.10	在混凝土中掺入减水剂的方法及其效果	90
5.11	聚羧酸减水剂合成工艺的新进展	92
<b>第6章</b>	<b>天然硅质掺合料</b>	<b>96</b>
6.1	天然火山灰	96
6.2	火山灰与水泥反应	98
6.3	天然火山灰质材料研制的非烧结陶粒	99
<b>第7章</b>	<b>天然沸石</b>	<b>102</b>
7.1	引言	102
7.2	中国的天然沸石资源	102
7.3	沸石的化学、物理性质	103
7.4	天然沸石粉载气体的研究与应用	109
7.5	气体载体多孔混凝土	118
7.6	气体载体多孔轻骨料混凝土	120
7.7	沸石载气体多孔轻骨料混凝土内部结构与增强机理	123
7.8	天然沸石多孔混凝土隔墙板的生产应用	125
7.9	沸石陶粒的研制与应用	127
7.10	沸石陶粒混凝土的强度模型	129
7.11	原材料的数量与质量对混凝土强度的影响	130
7.12	天然沸石抑制碱-骨料反应及其机理	132

<b>第 8 章 偏高岭土超细粉</b> .....	147
8.1 引言 .....	147
8.2 偏高岭土超细粉的物理化学特性 .....	148
8.3 偏高岭土对水泥砂浆强度的影响 .....	150
8.4 偏高岭土对水泥混凝土强度的影响 .....	151
8.5 偏高岭土 (MK) 混凝土的耐久性 .....	154
<b>第 9 章 粉煤灰</b> .....	159
9.1 概述 .....	159
9.2 粉煤灰的化学成分 .....	161
9.3 粉煤灰的矿物组成 .....	162
9.4 粉煤灰的物理性质 .....	164
9.5 粉煤灰的火山灰活性 .....	166
9.6 火山灰反应的机理 .....	166
9.7 粉煤灰的技术标准 .....	168
9.8 粉煤灰混凝土 .....	170
9.9 粉煤灰混凝土的耐久性 .....	175
9.10 高性能碱-粉煤灰混凝土 (中国苏州混凝土研究院) .....	177
<b>第 10 章 微珠超细粉</b> .....	181
10.1 微珠的物理性质.....	181
10.2 微珠水泥浆体的流动性与强度.....	184
10.3 微珠高性能混凝土.....	191
10.4 微珠超高性能混凝土 (UHPC) 的试验.....	192
10.5 微珠混凝土的耐久性.....	192
10.6 微珠高性能与超高性能混凝土的微结构.....	193
10.7 萘系-氨基磺酸系-超细粉体 (微珠) 复合的高效减水剂 .....	197
10.8 结论.....	197
<b>第 11 章 硅粉</b> .....	199
11.1 引言.....	199
11.2 硅粉的生产、种类与产量.....	201
11.3 硅粉的物理化学性质.....	203
11.4 硅粉的技术标准.....	206
11.5 硅粉混凝土.....	208
11.6 硅粉混凝土的微观结构.....	213
<b>第 12 章 水淬矿渣超细粉 (矿粉)</b> .....	216
12.1 引言.....	216



12.2	矿渣超细粉的特性和用途	217
12.3	矿粉的性质	219
12.4	矿粉的技术标准	222
12.5	矿粉混凝土的性能	224
12.6	矿粉混凝土的耐久性	229
12.7	矿粉的应用及注意的问题	234
<b>第 13 章</b>	<b>混凝土用膨胀材料</b>	<b>236</b>
13.1	概述	236
13.2	膨胀剂的性质和水化膨胀机理	238
13.3	膨胀剂的设计制造	239
13.4	膨胀剂的作用和用途	240
13.5	膨胀混凝土构件的应用	247
<b>第 14 章</b>	<b>造纸白泥的应用</b>	<b>249</b>
14.1	引言	249
14.2	造纸白泥的物理化学性质	249
14.3	造纸白泥水泥混合砂浆	252
14.4	造纸白泥普通混凝土	254
14.5	造纸白泥 C30 多功能混凝土	255
14.6	造纸白泥 C60 多功能混凝土的研发	258
14.7	生产应用	260
14.8	结论	263
<b>第 15 章</b>	<b>石灰石细粉</b>	<b>264</b>
15.1	引言	264
15.2	石灰石细粉的性能	264
15.3	石灰石细粉的技术标准	266
15.4	用石灰石粉为掺料的混凝土	267
<b>第 16 章</b>	<b>其他的无机细粉</b>	<b>269</b>
16.1	碎石粉	269
16.2	下水道污泥煅烧后的灰渣	272
16.3	环境净化的掺合料(光触媒)	276
<b>第 17 章</b>	<b>水下不分散混凝土</b>	<b>280</b>
17.1	引言	280
17.2	水下不分散化学外加剂及其效果	281
17.3	水下不分散混凝土的配比	283
17.4	掺入水下不分散剂的混凝土的性能	284

17.5	硬化混凝土的性能	288
17.6	用途	291
<b>第 18 章</b>	<b>自密实混凝土的研发与应用</b>	<b>293</b>
18.1	引言	293
18.2	自密实混凝土的技术特点	293
18.3	自密实新拌混凝土的特性	295
18.4	C30 的自密实混凝土的配制	300
18.5	C60 自密实混凝土的配制与施工应用	302
18.6	C80 自密实混凝土的研发及应用	303
18.7	C100 自密实混凝土的研发及其应用	305
18.8	试验研究	308
18.9	自密实清水混凝土	313
18.10	小结	316
<b>第 19 章</b>	<b>多功能混凝土技术的研发和应用</b>	<b>317</b>
19.1	引言	317
19.2	C80 钢筋混凝土剪力墙生产施工中的裂缝	318
19.3	多功能混凝土的实验室研发	319
19.4	多功能混凝土模拟试验	322
19.5	结构模拟试验	328
19.6	实体结构模拟试验	331
19.7	多功能混凝土在东塔工程中的应用	334
19.8	C30 和 C60 多功能混凝土在住宅项目中的应用	338
19.9	本章试验研究总结	341
<b>第 20 章</b>	<b>普通混凝土高性能化的研究与应用</b>	<b>343</b>
20.1	问题的提出与技术背景	343
20.2	混凝土高性能化的技术途径和内容	344
20.3	总结与归纳	348
20.4	普通混凝土高性能化的实际应用	349
20.5	小结	350
<b>第 21 章</b>	<b>免蒸压免蒸养（双免）C80 管桩的研发与生产</b>	<b>351</b>
21.1	引言	351
21.2	太阳能养护棚的构造与养护工艺	351
21.3	混凝土内部结构与性能	353
21.4	C80 混凝土太阳能养护工艺的试验研究	356
21.5	模拟管桩太阳能养护试验	364

21.6	试验室研发的 C80 混凝土的可信度 .....	365
21.7	双免 C80 混凝土管桩的生产 .....	367
21.8	管桩力学性能检测报告 .....	371
21.9	打桩试验报告 .....	372
21.10	结论 .....	373
<b>第 22 章</b>	<b>超高强、超高性能混凝土的研制与应用 .....</b>	<b>375</b>
22.1	引言 .....	375
22.2	超高强度混凝土 (抗压强度超过 $100\text{N}/\text{mm}^2$ ) .....	375
22.3	强度超过 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 的高强混凝土配比实例 .....	377
22.4	混凝土强度的发展 .....	379
22.5	其他强度特性 .....	382
22.6	自收缩 .....	384
22.7	爆裂问题 .....	386
22.8	结束语 .....	388
<b>第 23 章</b>	<b>混凝土的超高泵送技术 .....</b>	<b>390</b>
23.1	引言 .....	390
23.2	不同类型混凝土在泵管中运送的特点 .....	390
23.3	泵送时摩擦阻力与泵送速度关系 .....	391
23.4	混凝土泵送时与管壁摩擦阻力的测定 .....	392
23.5	普通混凝土泵送时泵机的选择 .....	393
23.6	高强度高性能混凝土的泵送 .....	394
23.7	UHP-SCC 的超高泵送 .....	396
<b>第 24 章</b>	<b>混凝土耐久性病害综合症及特种混凝土技术 .....</b>	<b>408</b>
24.1	引言 .....	408
24.2	混凝土的耐久性病害 .....	408
24.3	钢筋混凝土的劣化 .....	409
24.4	单因子的劣化与对策 .....	409
24.5	硫酸盐侵蚀和碳化对氯离子扩散的影响 .....	410
24.6	混凝土耐久性病害综合症的对策 .....	415
24.7	高耐久性混凝土 .....	415
24.8	耐海水侵蚀的混凝土 .....	419
24.9	电化学防腐蚀 .....	423
24.10	氯离子固化剂配制的抗海水混凝土 .....	432
24.11	抗硫酸盐侵蚀的混凝土 .....	438
24.12	万年混凝土 .....	441

<b>第 25 章 新建钢筋混凝土结构物的耐久性</b> .....	445
25.1 引言 .....	445
25.2 耐久性 .....	446
25.3 混凝土的耐久性设计 .....	448
25.4 新设建筑构造物的高耐久理化 (日本建筑学会钢筋混凝土工程) (JASS-5) 2009 .....	449
<b>第 26 章 钢管混凝土</b> .....	455
26.1 引言 .....	455
26.2 用于钢管柱的混凝土 .....	456
26.3 高强度钢管填充混凝土的配合设计 (特别是使用材料) .....	461
26.4 施工应用实例 .....	470
<b>第 27 章 绿色 (生态) 混凝土</b> .....	476
27.1 引言 .....	476
27.2 再生混凝土生产的骨料 .....	476
27.3 再生骨料透水砖 .....	479
27.4 再生骨料混凝土 .....	481
27.5 生态混凝土 .....	486
27.6 结束语 .....	490
<b>第 28 章 工业废弃物资源化与混凝土应用的研究</b> .....	491
28.1 引言 .....	491
28.2 火山岩边角料碎石混凝土 .....	491
28.3 白色垃圾的资源化及应用的研究 .....	492
28.4 生活垃圾发电厂炉渣的处理与应用 .....	497
28.5 小结 .....	500
<b>混凝土技术的展望</b> .....	501
<b>参考文献</b> .....	503

# 第 1 章 混凝土技术的历史与发展

混凝土是当前世界上应用最大宗的建筑工程材料，年产量人均约 1t 左右，也即全世界混凝土年产量约 65 亿~70 亿 t 左右，其中，中国的产量最大，约占总产量的一半以上。

现代混凝土技术的历史，从 1824 年水泥的发明开始，到 1835 年左右出现了混凝土。虽然水泥混凝土的历史还不到 200 年，但是混凝土已经历了许多深层次高新技术的发展。回顾混凝土材料和技术发展和应用的历史，可以概括为：原始社会的混凝土，古罗马的火山灰混凝土，普通混凝土，高性能混凝土，超高性能混凝土，多功能混凝土与低碳技术的绿色混凝土等。特别是高性能混凝土、超高性能混凝土的兴起，使混凝土技术发生了突破性的进展。

## 1.1 超高性能混凝土 (UHPC)——混凝土技术突破性进展

在第七届高强度/高性能混凝土 (HS/HPC) 的国际会议上，M. Schmid 和 E. Fehling 在主题报告中指出：“在混凝土技术方面的一种突破性进展就是超高性能混凝土。这种混凝土的强度高达  $250\text{N/mm}^2$ ，而且耐久性比高性能混凝土明显的提高”。

超高性能混凝土完全可以代替钢材用于结构中，而且具有比钢结构更高的耐久性，说明了混凝土材料和技术已进入了高科技时代！

现在国际上对 UHPC 或 HS/HPC 的应用，概略如表 1-1 所示。

UHPC 或 HS/HPC 的应用

表 1-1

年份	强度 (N/mm <sup>2</sup> )	应用	国家
1993~1999 年	100(N/mm <sup>2</sup> )	高层超高层住宅	日本
2001 年	200(N/mm <sup>2</sup> )	酒田未来桥	日本
2004 年	130(N/mm <sup>2</sup> )	高层超高层住宅	日本
1990 年	105(N/mm <sup>2</sup> )	Japan Center Office Frankfurt	德国
1997 年	200(N/mm <sup>2</sup> )	Serbrooke. Pedestrian/bikeway bridge, Quebec	加拿大

在美国，HS/HPC 多用于超高层建筑的梁、柱、和剪力墙。

1987 年，在美国西雅图的 Two Union Square，采用了 131MPa 的 UHPC，获得了高弹性模量。

1988年,在美国的芝加哥建造的225West Wacker Drive,底层柱采用了97.3MPa的UHPC,大大缩小了柱子尺寸。

2008年前,美国已生产应用了强度达250MPa(36000Psi)的UHPC。日本的太平洋水泥集团于2003年开发了100MPa的高强度水泥;2008年,又发表了应用于超高性能混凝土强度为200MPa级的特种水泥,根据日本建筑基准法第37条,可以配制80~120MPa(最高达150MPa)的超高性能混凝土。我国在许多工程中也试用了C100~C120强度等级的UHPC,如北京财税大楼首层柱子,使用了C110的HS/HPC。沈阳大西电业园、沈阳富林大厦,也使用了C100的UHPC。广州西塔工程项目部2008年完成了C100的UHPC和UHP-SCC的研究,并泵送至411m。深圳京基大厦研发和应用了C120的UHPC,并在工程中试验应用,泵送到了416m的高度。国内外的经验表明,UHPC的技术经济效果十分明显(表1-2)。

高强度高性能混凝土的技术经济效果

表 1-2

混凝土强度	效 果
60MPa 代替 30~40MPa	降低 40%混凝土量; 降低 39%钢材用量; 降低工程造价 20%~35%
80MPa 代替 40MPa	构件体积、自重均缩减 30%
150MPa 代替 60~80MPa	柱子断面缩小,梁跨度增大,建筑物可利用空间增大,见图 1-2

以C150代替C60~C80的混凝土时,建筑结构体系不但发生变化,而且耐久性提高,氯离子扩散系数甚低,外部氯离子基本上不会渗透扩散到结构内部;快速冻融300次,超高性能混凝土的质量无损失,相对动弹模 $>90\%$ ,抗硫酸盐腐蚀及抗磨损性能很高。说明UHPC不但强度高,而且耐久性能好,是一种低碳,省资源,省能源的新型混凝土。图1-1说明了应用这种混凝土使结构体系的变化。

HPC和UHPC比普通混凝土具有如此优越的特性,故研究者和设计者都有一股动力来推动UHPC的发展。

在美国,20世纪50年代,抗压强度34.8MPa的混凝土,就认为是高强混凝土,20世纪60年代抗压强度52.1MPa的混凝土,20世纪70年代抗压强度62MPa的混凝土,才认为是高强混凝土。而今天,ACI318和AASHTO的设计标准中,抗压强度已达125.1MPa。最近,在美国已能生产应用250MPa的UHPC,在超高层建筑中的柱子和剪力墙,UHPC提供了一种最经济的材料,去承受压荷载,而且在使用上,又能得到较大的空间。

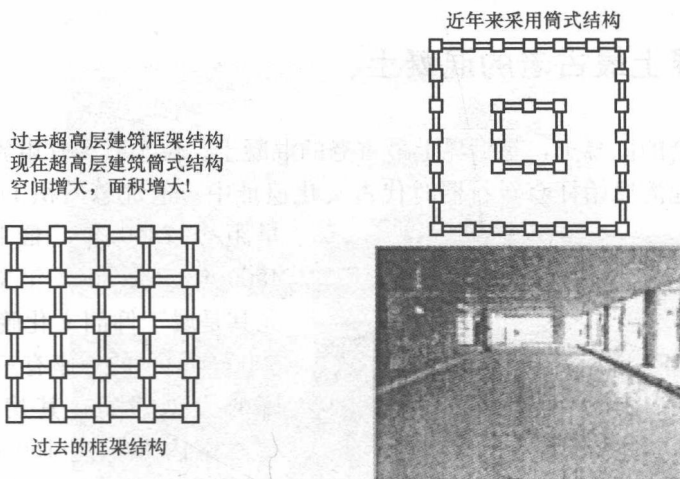


图 1-1 粗柱短梁的框架结构，过渡到细柱长梁的筒式结构

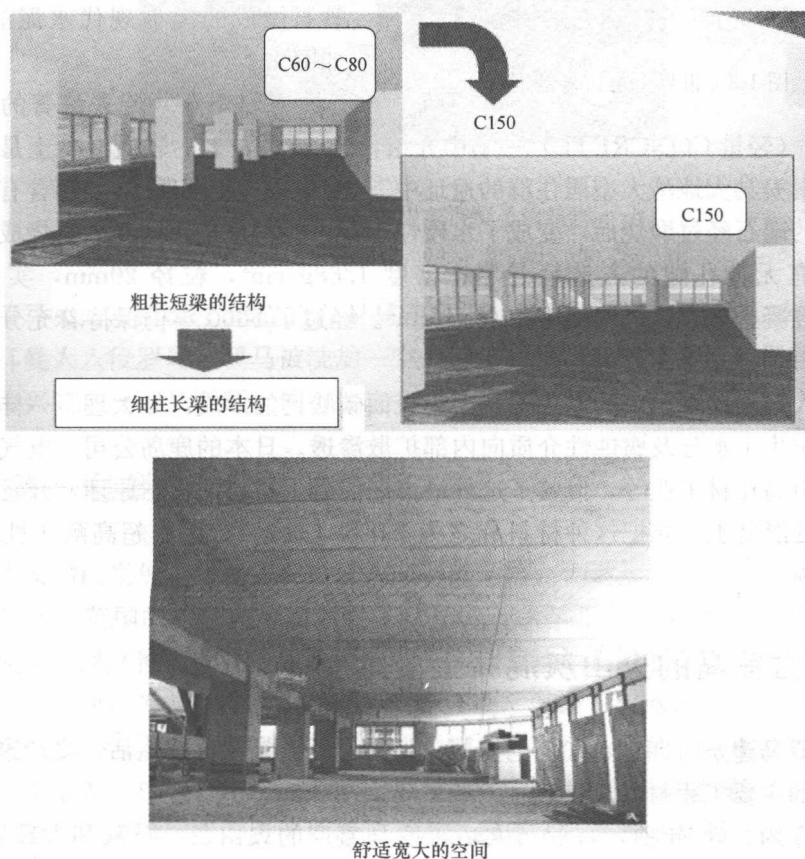


图 1-2 C150 代替 C60~C80 的混凝土结构变化  
(柱子变细，梁的跨度增大，室内可利用的面积和空间增大)

## 1.2 世界上最古老的混凝土

原始社会的混凝土，是世界上最古老的混凝土。位于我国甘肃省天水市秦安县境内，大地湾原始社会新石器时代古文化遗址中。遗址总面积 110 万  $\text{m}^2$ ，最



图 1-3 世界上最古老的混凝土

早距今 7800 年，最晚距今也有 4800 年，有 3000 年文化的连续。尤其是属于仰韶文化晚期（距今约 5000 年前）的一座有三门开和带檐廊的大型建筑；其房址面积 270  $\text{m}^2$ ，室内面积达 150  $\text{m}^2$ 。平地起建，面积达 130  $\text{m}^2$  的 F901 宫殿式建筑主室，全部地面材料为礞石和砂石做成的类似现代水泥的地面。如图 1-3 所示。

在日本笠井芳夫编著的“轻质混凝土”（轻量 CONCRETE）一书中介绍，“世界最古老的轻质混凝土是在中国甘肃省秦安县大地湾大型居住群的遗址中”。书中进一步阐明了：“用含有碳酸钙和黏土的礞石经过煅烧后，变成了水硬性水泥，骨料也是用同样礞石烧成的，变成了具有无数孔隙的人造轻骨料；密度  $1.68\text{g}/\text{cm}^3$ ，粒径 20mm，实体积率 67%；混凝土立方体抗压强度  $110\text{kgf}/\text{cm}^2$ 。经过了 5000 年仍保持着充分强度的结构材料。”

在大地湾挖掘出来的混凝土，因为表面碳酸钙的形成，如大理石一样的致密平滑，防止了水分及腐蚀性介质向内部扩散渗透。日本的鹿岛公司、电气化学工业、石川岛建材工业等，借鉴了这种最古老混凝土材料的化学原理，开发出了万年寿命的混凝土。并把这种材料称之为 EIEN（永远），用于超高耐久性的混凝土结构中。

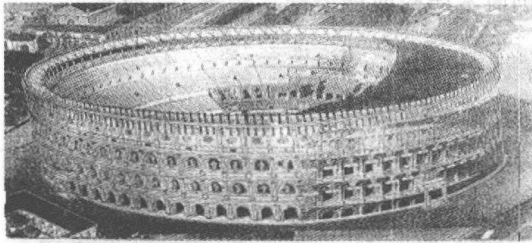
## 1.3 古罗马的火山灰混凝土

古罗马建筑时期创造发明的混凝土材料，是人类在营建生活，生产家园建造过程中的主要工程材料之一。

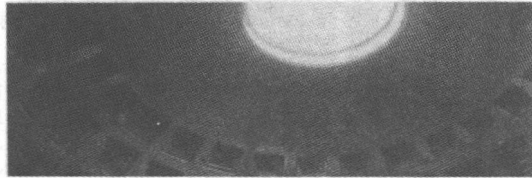
距今约 2000 年前，古罗马人巧用罗马盛产的火山灰，石灰和大理岩碎屑，与水混合，成为火山灰混合物，也就是混凝土；能自动水硬化成为混凝土。古罗马人用这种材料建造了古罗马建筑群，如斗兽场，教堂及万神庙等，历史上曾



辉煌一时!如图1-4所示。



(a)



(b)

图1-4 古罗马火山灰混凝土建筑物

(a) 古罗马 COLSSEO (公元72~80年) 复原图; (b) 古罗马神殿

古罗马火山灰混凝土建造的古罗马建筑群, 豪迈, 并繁华一时。公元1084年, 日耳曼人入侵罗马, 罗马被洗劫一空, 许多古建筑遂毁于兵燹, 仅剩残迹供后人怀古兴叹。火山灰混凝土的力量之大, 让后人惊叹!

## 1.4 普通混凝土

人类文明的发展, 借助古罗马建筑文明的余晖, 创造发明了水泥混凝土。

1824年, 英国的约瑟夫·阿斯普丁 (Joseph Aspdin) 获得了制造波特兰水泥的专利权。因这种水泥硬化后的颜色与英国的波特兰石的颜色相似, 故有此命名。水泥的出现, 为普通混凝土的诞生奠定了物质基础。以水泥: 砂: 石 (卵石或碎石)=1: 2: 4, 然后根据施工需要加水拌合, 硬化后得到了早期的混凝土。

第二次世界大战后, 用水泥混凝土修复战争创伤, 不仅老建筑物得以修复, 新的宏伟建筑群像雨后春笋般耸立起来。这预示着水泥混凝土文明时代的到来。

1835年, 一名罗马水泥制造商约翰·巴斯雷-怀特 (John Bazley-White) 修建了第一座全混凝土的房屋; 采用了混凝土墙体, 屋瓦, 窗棂以及装饰物, 甚