



土木工程精品系列

# 混凝土与 混凝土结构的耐久性

冯乃谦 邢锋 编著

刘崇熙 审

Durability of Concrete and  
Concrete Structure



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

土木工程精品系列

# 混凝土与混凝土结构的耐久性

Durability of Concrete and Concrete Structure

冯乃谦 邢 锋 编著

刘崇熙 审



机械工业出版社

混凝土与混凝土结构的耐久性在当今世界,尤其是进行大规模建设的中国土木工程界的重大课题。对这一课题的研究不仅关系到当前的国计民生,更会对社会的可持续发展产生不可估量的影响。本书作者根据数十年来对此问题的关注、研究和实践,同时借鉴国内、国际在耐久性问题上的最新和最前沿的研究成果,倾数年之心血完成了本书的撰写,可谓当今国内关于耐久性的扛鼎之作。

本书立足于科学性、实用性和先进性,全书共分16章,全方位、多角度地阐述了混凝土与混凝土结构耐久性的核心问题,在实践和探讨中给读者提供了关于耐久性的新认识、新思维和新方法。

本书适合于土木工程界中的施工、设计及科研人员,同时对于相关专业高校的师生亦多有借鉴参考之处。

## 图书在版编目(CIP)数据

混凝土与混凝土结构的耐久性/冯乃谦,邢锋编著. —北京:机械工业出版社,2009.1

(土木工程精品系列)

ISBN 978-7-111-25293-1

I. 混… II. ①冯…②邢… III. 混凝土结构—耐用性 IV. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第157403号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:薛俊高 责任编辑:薛俊高 责任校对:陈延翔

封面设计:张静 责任印制:李妍

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·46.5印张·2插页·881千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25293-1

定价:68.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)68327259

封面无防伪标均为盗版

# 序

人类在营建生活、生产家园的建筑过程中，发现可利用的几种主要工程材料，一是土、岩石、木材等天然建筑材料；二是在古罗马建筑时期创造发明的一种水泥混凝土人造石材。混凝土利用之势，从此席卷全球、装点江山，为之一新，成无可替代之势。

公元 72 年至公元 80 年，由罗马皇帝韦斯巴西亚诺父子建造的古罗马建筑群，历史上曾辉煌一时。如斗兽场（Colosseo，其复原图，见插图所示），规模宏大，可以说前无古人。若论后有来者，当数今日中国承建的本届奥运竞技场。再论 Colosseo 的建筑技艺，那是巧夺天工，人间至上。究罗马人的成功，是古罗马人巧用罗马盛产的火山灰、煨烧石灰和取之不尽的当地大理石岩碎屑；与水混合，成为火山灰混合物，即混凝土，能自动水硬化成为人造石材。这种火山灰混凝土，依模板设计形式，自动硬固塑造成任何形式，浇筑建造成古罗马建筑群，豪迈、繁华一时。公元 1084 年日耳曼人入侵罗马，罗马被洗劫一空，像 Colosseo 等古建筑，遂毁于兵燹，仅剩残迹，供后人怀古兴叹。后人惊叹道，火山灰混凝土的力量竟然会如此的强大。

人类的文明史，经历着石器时代、青铜器时代、铁器时代等四个文明特征时代。但人类文明并不仅因钢铁工业发展而止步。人类文明的发展借助古罗马建筑文明的余辉，创造发明出水泥混凝土。二次世界大战后，用水泥混凝土修复战争的创伤，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，这预示水泥混凝土文明时代的到来。这是第五个人类文明时代，即混凝土文明时代。可能有许多人对人类的“水泥混凝土文明时代”持有争议，尤其是历史学家更难接受这个命名。但人们只要信步于这个地球表层空间，从原野到乡村，从江海到城镇，那里的居民、学校、商埠、娱乐城、政府大厦、道路、机场、摩天大楼、江湖的河工建筑，等等，无不是由水泥混凝土塑造的艺术。水泥混凝土改变了这个世界，塑造出一个新世界，这就是水泥混凝土文明时代的功能。勿谓言之不实。

这个星球，经历 19~20 世纪工业化的洗礼，水泥工业成为各国国民经济体系中仅次于钢铁冶炼工业规模的支柱产业。中国水泥工业的年产量 2007 年超过

13 亿 t。由此生产的水泥混凝土，2007 年的年产量国内超过 30 亿  $m^3$ 。这个时代，是没有其他材料能够替代的。

中国是一个发展中国家，凡是发展中国家，水泥混凝土消耗量总是逐年上升，发达国家也不例外。这是水泥混凝土时代文明所赋予的特征。混凝土建筑铸就了人类的财富。但人类财富的永恒，有赖于水泥混凝土的耐久性。如果混凝土耐久性低下，人类文明就将湮灭在混凝土腐蚀反应的耗散中，最后荡然无存。

试观 20 世纪 50 年代中国第一个五年计划的 141 项著名工程，现在残存的又有多少？基本上都湮灭在腐蚀的废墟中。继后的几个五年计划的工程建筑物，或者老态龙钟，或者支离破碎。由此可见，提高混凝土的耐久性已是战略性的课题。

当前，我们需要一部立论混凝土耐久性的经典著作。用它的理论铸就混凝土建筑物耐久性提升几个等级，那将是功莫大焉。当下冯乃谦教授的专著，正是吾辈和后人伫立望之。往后我国的五年计划硕果，可以代代相传。

后“十一·五”的中国土木建筑工程，将日益高涨。2010 年我国水泥年产量可望达到 15 亿 t，按每吨水泥配制  $4m^3$  混凝土，2010 年我国混凝土建筑工程将达  $60 亿 m^3$  的规模。设单位  $m^3$  混凝土工程投资平均为 1000 元，混凝土建筑物投资总量约 6 万亿元。如混凝土的耐久性水平低下，那么少则 5 年，多则 20 年，混凝土建筑物的年修复补强的费用，将令人瞠目结舌。

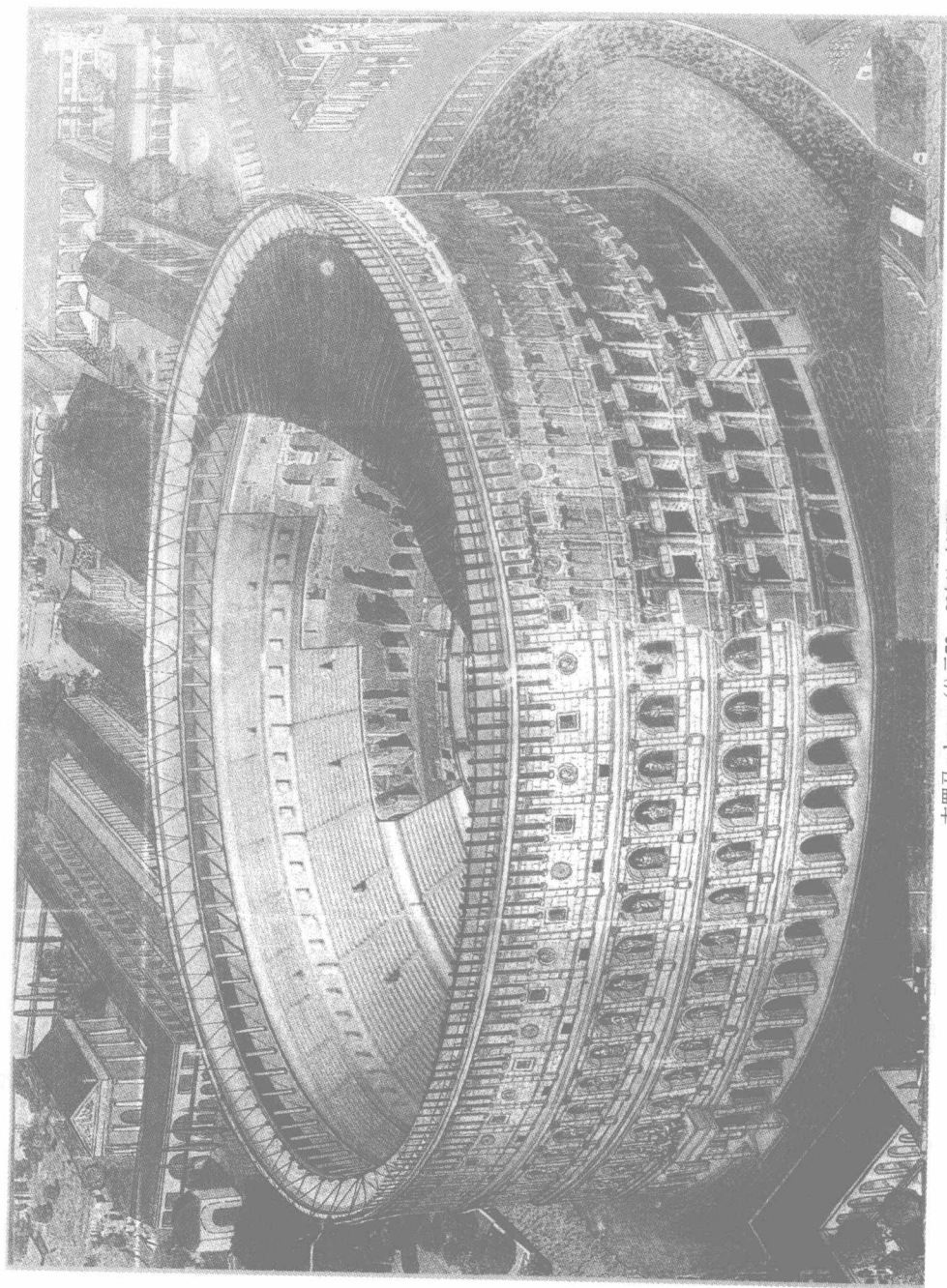
所谓混凝土的“耐久性”一词，是混凝土“经久耐用”的同义语。混凝土建筑物与周边环境共存，混凝土将接受环境的挑战，混凝土将面临“四害”的侵袭。这“四害”就是冻害、盐害、裂害（如 AAR 破坏、温度应力破坏等）和劣害（材质劣变）。据闻，日本鹿岛建设公司，正邀请一些高级专家研制“万年混凝土”。一旦这一开发成果投放建筑市场，其对市场的垄断力度，将所向无敌。

本书是一部混凝土耐久性专著，或者可命名为“混凝土坚固学”。作者是国内外知名度很高的清华大学冯乃谦教授。冯乃谦教授著作丰硕，已出版混凝土材料专著 10 余种，是一位多产专家，无可伦比。本书共 16 章，开场论述了混凝土的进化，引出了万年混凝土技术；进而论述了共性问题，及有关个性问题，再收敛论述混凝土材料的病害综合症；最后论述混凝土耐久性设计以及病害的调研方法，并介绍了国内新建重大工程的耐久性的有关内容。这本书立论新颖，实验成果翔实，每个问题都归纳出理论解释，同时又辅以工程实践印证。本书在文字编辑上，结构严谨，衔接严密，全书自成体系。本书集实用性、先进性、科学性为一体，是部难得的专著。

谨此祝贺本书的出版社。

刘崇熙





古罗马colosseo(公元72~80年)复原图

# 前 言

混凝土与混凝土结构的耐久性，是当今混凝土工程中的重大课题。

混凝土结构除了有足够的承载能力之外，还要不断遭受所处环境下各种劣化因子的侵蚀作用。如大气中的  $\text{CO}_2$  的作用，冻融作用，氯盐、硫酸盐的侵蚀作用，表面的磨耗与磨损，以及碱-集料反应等。除了各种劣化因子的单独作用外，更重要的是这些劣化因子的综合作用，也就是耐久性病害综合症。各种劣化因子作用的相互叠加与促进，使混凝土结构因耐久性失效而迅速劣化破坏，承载能力也就随之而完全失效。

研究混凝土结构的耐久性，首先是要了解各种劣化因子侵蚀的原因与作用机理，找出相应的对策，最终达到混凝土结构的耐久性设计要求，以保证结构的使用年限。

混凝土结构的使用寿命，是在结构物使用过程中不断劣化与修复中达到的。结构物的及时检测与维修也是保证耐久性与长寿命的重要措施。

本书共分 16 章，力图从实用性、科学性与先进性出发，全面阐述混凝土与混凝土结构的耐久性问题，使读者从本书中得以受益。但限于作者水平，有不尽之处，望读者批评指正。

在编著本书的过程中得到了社会上有关单位和朋友的支持和帮助。在山东潍坊恒建监理公司、大元公司的大力支持和帮助下，使笔者能带领 3 名博士研究生结合东营黄河公路钢筋混凝土大桥工程，开展混凝土耐久性的研究，并将研究成果应用于该项工程中。中建三局混凝土公司及新疆西部建设股份有限公司，从人力、物力和工程任务上给笔者以极大的帮助和支持，召开了国内、国际多次研讨会、交流会，为作者博览百家的观点创造了机会，为完成本书的编著创造了条件。清华大学老科协的支持和鼓励，给作者完成此书的撰写注入了新的活力。

我的博士研究生冷发光在深圳大学进行博士论文课题的研究时，深圳大学建材试验室提供了试验设备和材料的试验条件，使冷发光的博士论文研究工作得以顺利完成。其后，笔者又在该试验室进行了荷载作用下混凝土抗硫酸盐腐蚀的在线测定的研究。这些成果都反映在本书的有关章节中。对此，要感谢邢锋教授的支持和帮助。

在编写本书过程中，还参考引用了庄青峯、丁建彤、郝挺宇、冷发光、封孝信、牛全林和李崇智等的博士论文中的某些成果和试验数据，在此表示深深的谢意。

日本大学的笠井芳夫教授、鳥取大学的西林新藏教授和琉球大学的大城武教授等来华的学术交流和学术报告，给笔者编著本书提供了重要的参考。对此表示衷心感谢。

谢永江、丁宏及徐文彬等均为笔者提供了宝贵的资料，使本书添加了许多新的内容，在此一并表示深深谢意。

本书由冯乃谦编著，并由刘崇熙主审；邢锋参加了部分编写工作。

冯乃谦

2008.4.10 日

于清华大学



# 目 录

## 序 前言

<b>第 1 章 混凝土的进化——万年混凝土给人们的启示</b> .....	1
1.1 寿命万年的混凝土 (E1EN, 永远) .....	1
1.2 能够弯曲的混凝土 (ECC) .....	6
1.3 超高强高性能混凝土 (HS/HPC) 的开发与应用 .....	10
1.4 与环境共生的混凝土 (自然对应型的混凝土) .....	13
1.5 结束语 .....	17
<b>第 2 章 混凝土的体积变化</b> .....	18
2.1 早期的体积变化 .....	18
2.2 硬化过程中的体积变化 .....	21
2.3 硬化混凝土 (长龄期) 的体积变化 .....	28
2.4 小结 .....	55
<b>第 3 章 混凝土结构的开裂、剥离与剥落</b> .....	58
3.1 裂缝的类型 .....	58
3.2 开裂与耐久性 .....	62
3.3 国内外技术标准中裂缝的允许宽度 .....	71
<b>第 4 章 混凝土与混凝土结构中性的劣化破坏</b> .....	75
4.1 中性的劣化与混凝土的 pH 值 .....	75
4.2 由于中性化混凝土结构的早期劣化 .....	79
4.3 钢筋混凝土结构物的中性化和钢筋腐蚀及其耐用年数 .....	89
4.4 影响中性化的因素 .....	100
4.5 混凝土碳化深度的决定 .....	108
4.6 混凝土结构中性的对策 .....	111

<b>第 5 章 氯盐对混凝土结构的劣化破坏</b> .....	114
5.1 引言 .....	114
5.2 混凝土结构内部的氯盐 .....	119
5.3 外部侵入的氯盐 .....	123
5.4 $\text{Cl}^-$ 扩散渗透进入混凝土的机理 .....	130
5.5 混凝土中 $\text{Cl}^-$ 迁移过程的主要影响因素 .....	132
5.6 外部 $\text{Cl}^-$ 对混凝土结构物的劣化过程 .....	140
5.7 $\text{Cl}^-$ 扩散系数 .....	145
5.8 混凝土中钢筋锈蚀机理 .....	148
5.9 混凝土中钢筋发生腐蚀的 $\text{Cl}^-$ 含量 .....	152
5.10 钢筋腐蚀与结构劣化破坏 .....	156
5.11 混凝土中 $\text{Cl}^-$ 扩散系数的试验方法 .....	158
5.12 $\text{Cl}^-$ 含量的定量分析 .....	172
5.13 $\text{Cl}^-$ 在砂浆和混凝土中的扩散 .....	175
5.14 砂浆与混凝土 $\text{Cl}^-$ 扩散性的关系 .....	184
5.15 荷载作用下混凝土中 $\text{Cl}^-$ 的扩散 .....	188
5.16 荷载作用下钢筋混凝土中 $\text{Cl}^-$ 的扩散 .....	194
5.17 小结 .....	202
<b>第 6 章 盐害环境中混凝土结构的耐久性设计</b> .....	204
6.1 外部 $\text{Cl}^-$ 向混凝土结构内部扩散渗透的有关参数 .....	204
6.2 对混凝土结构盐害性能的检验和查证的方法 .....	209
6.3 跨海大桥百年供用期的耐久性设计和施工应用 .....	218
6.4 钢筋混凝土码头状况审核及海事环境混凝土设计研究 .....	228
6.5 西班牙马德里建筑水泥研究所的研究 .....	235
6.6 小结 .....	236
<b>第 7 章 混凝土结构的化学腐蚀与对策</b> .....	238
7.1 引言 .....	238
7.2 硫酸盐对混凝土腐蚀研究工作的进展 .....	243
7.3 硫酸盐侵蚀混凝土的劣化机理 .....	248
7.4 硫酸盐侵蚀的影响因素 .....	271
7.5 混凝土在荷载作用下的硫酸盐腐蚀 .....	287
7.6 检验和评价硫酸盐腐蚀的有关标准 .....	295
<b>第 8 章 冻融对混凝土结构的劣化破坏</b> .....	299
8.1 引言 .....	299
8.2 水泥石中孔隙溶液的冻结 .....	304

8.3	受冻破坏机理 .....	308
8.4	混凝土冻融过程中宏观特性的变化 .....	314
8.5	高强度高性能混凝土的抗冻融性能 .....	320
8.6	混凝土早期抗冻害性能 .....	331
8.7	融雪剂(除冰盐)对混凝土冻害时表层剥离的影响 .....	336
8.8	混凝土在冻融与硫酸盐溶液同时作用下的复合劣化 .....	342
8.9	冻融循环作用下混凝土表面颜色的变化 .....	346
8.10	混凝土抗冻融/除冰盐冻融的影响因素 .....	351
8.11	抗冻融/除冰盐冻融的试验方法 .....	376
8.12	在工程建设上要注意的问题 .....	387
8.13	具有高抗冻性或高抗除冰盐性能混凝土的技术前提 .....	389
8.14	冻害——原因与对策 .....	390
<b>第9章 混凝土的耐热性与耐火性 .....</b>		
9.1	水泥石受热的行为 .....	392
9.2	集料受热的行为 .....	395
9.3	混凝土受热的行为 .....	395
9.4	普通混凝土与高强混凝土的高温力学性能 .....	406
9.5	现有耐火试验方法综述 .....	417
9.6	混凝土火灾劣化与对策 .....	418
<b>第10章 混凝土表面劣化与污染 .....</b>		
10.1	引言 .....	421
10.2	混凝土内部排出物的污染 .....	423
10.3	混凝土的“冰溜子” .....	425
10.4	碱—集料反应排出物(碱硅凝胶)的污染 .....	426
10.5	混凝土中铁锈渗漏的污染 .....	427
10.6	混凝土表面粘着物的污染 .....	429
10.7	微生物粘附造成的污染与腐蚀 .....	432
10.8	表面磨蚀 .....	438
<b>第11章 电流对钢筋混凝土的腐蚀 .....</b>		
11.1	电流腐蚀机理 .....	450
11.2	电蚀使混凝土变质及钢筋发生腐蚀 .....	451
11.3	电蚀的防止 .....	451
<b>第12章 碱—集料反应 .....</b>		
12.1	历史背景 .....	453

12.2	碱—集料反应的种类与机理	454
12.3	碱—集料反应的检测与评价方法	466
12.4	碱—硅反应及其抑制	470
12.5	天然沸石及其他矿物质掺和料对碱—硅反应 (ASR) 抑制的研究	499
12.6	钢筋混凝土中 ASR 膨胀的研究	524
12.7	碱—碳酸盐反应的研究与对策	533
12.8	碱—集料反应的工程检测	566
12.9	碱—集料反应造成工程劣化与修补	579
12.10	预防碱—集料反应的对策	583
<b>第 13 章 混凝土强度劣化与耐久性</b> 587		
13.1	普通强度混凝土、高强混凝土与高性能混凝土	587
13.2	混凝土的强度与抗渗性	587
13.3	混凝土的强度与抗硫酸盐腐蚀性能	590
13.4	混凝土的强度与抗中性化	591
13.5	混凝土的强度与抗冻性	592
13.6	混凝土的强度劣化	594
13.7	日本港湾空港技术研究所长期暴露试验	599
13.8	混凝土强度劣化的试验研究	601
13.9	各种水泥混凝土的长期抗压强度与抗弯强度	604
13.10	小结	619
<b>第 14 章 混凝土耐久性病害综合症与对策</b> 620		
14.1	引言	620
14.2	耐久性病害综合症	621
14.3	碳化、盐害与硫酸盐侵蚀的综合作用	635
14.4	混凝土耐久性病害综合症对策的实际应用	638
14.5	抵抗耐久性病害综合症的新思路	640
14.6	小结	643
<b>第 15 章 我国新建大型工程项目中混凝土结构的耐久性</b> 644		
15.1	青藏铁路混凝土结构的耐久性	644
15.2	目前世界上最长的跨海大桥——杭州湾跨海大桥	660
15.3	首钢搬迁、曹妃甸钢铁项目建设混凝土结构耐久性设计	670
15.4	广州珠江新城西塔项目高性能混凝土工程的特点	677
<b>第 16 章 混凝土结构修补的特殊工法</b> 686		
16.1	钢筋腐蚀程度对钢筋性能和结构物性能的影响	687

---

16.2 电化学法检验钢筋腐蚀状况 .....	689
16.3 特殊工法 .....	693
16.4 盐腐蚀混凝土结构物的修补实例（电化学防腐蚀工法的应用） .....	701
16.5 $\text{Cl}^-$ 吸附剂抑制氯盐腐蚀的研究 .....	712
<b>参考文献</b> .....	<b>724</b>

# 第1章 混凝土的进化

## ——万年混凝土给人们的启示

从1824年水泥的发明至今100多年的过程中,水泥混凝土材料和技术,经历了巨大的变化。从新拌混凝土的性能来说,由最初的大流动性,到塑性、干硬性;由于高效减水剂的出现,新拌混凝土又朝着流动性和大流动性发展,相应的泵送施工技术又迅速发展起来。从硬化的混凝土性能来看,由普通强度发展到高强度,当今又进一步发展到高强度高性能混凝土,强度超过150MPa的高强度高性能混凝土在10多年前已有人开发研究,并已应用于超高层的钢筋混凝土大厦的结构中。据说强度为230MPa的HS/HPC也早已用于工程中。

HS/HPC的最大特点除具有高强度以外,还有很高的耐久性,结构寿命可达百年以上。但是万年寿命的混凝土,具有更长的耐久性。笔者于2007年3月参观了鹿岛建设(株)中央研究所,该研究所对各种特性混凝土的研究,取名为混凝土的进化。这是对混凝土材料和技术高度的概括,对发展混凝土新材料、对混凝土与混凝土结构耐久性的提高与寿命的延长,会给我们更大的参考与思考。摘要介绍如下:

### 1.1 寿命万年的混凝土(EIEN,永远)

#### 1.1.1 古罗马的化学反应

混凝土的历史可以追溯到古罗马时代。在神殿(图1-1)、竞技场、水道桥等大规模的建设结构物中,都采用了混凝土。但是,大约2000年前的古代混凝土和现在的混凝土是有所不同的。

当时罗马帝国的“波佐利的灰尘”,被称之为火山灰,降落积聚起来,得到火山灰混合材料。波佐利是那不勒斯西部的地名。这一带降落积聚起来的火山灰和石灰混合以后被称之为古代的混凝土,也就是古罗马混凝土。火山灰和石灰混合的物质发生化学反应,生成一种具有一定强度的物质,在自然界里是没有的。这对建设技术的发展,对创建城市地基起了作用。

现在,混凝土中采用的掺和料(普浊里)就是“波佐利(意)”的派生语,是古代遗留下来的名称。



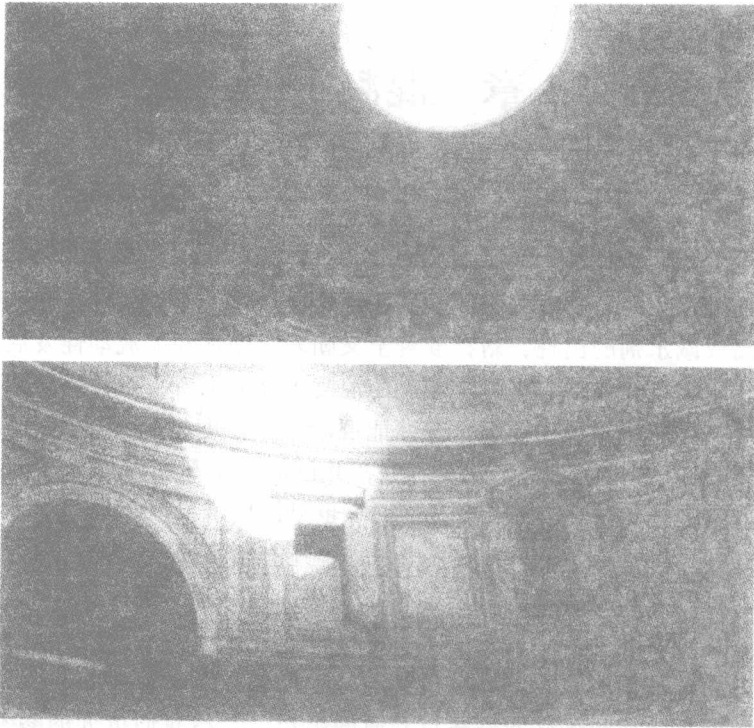


图 1-1 古罗马神殿（采用了古罗马的混凝土）

### 1.1.2 大地湾遗址和世界上最古老的“混凝土”

在近年的调查中，从中国大地湾遗址中，发掘出了与古罗马相似的混凝土。这种大约 5000 年前的混凝土，以原始状态遗留下来。其具有令人吃惊的耐久性的秘密，根据调查的数据分析，是由于碳酸物的化学反应之故。

现代的混凝土寿命大约是 100 年。建设工程中采用的一般混凝土，长时间受到地下水的作用时，钙的组分从表面溶出，这也称之为劣化进行。但这种劣化从结构物表面是看不出缺陷的。

但是，在中国挖掘出来的混凝土，因为表面碳酸钙的形成，好像大理石一样平滑。可以说，由于表面的坚硬、致密，防止了水及腐蚀性介质向内部的侵蚀。大地湾遗址位于天水市秦安县东北五营乡邵店村，距天水市 102km，为我国重点文物保护单位。这是目前发现较完好的一处原始社会新石器时代古文化遗产，距今 4900~8120 年。大地湾遗址之一角如图 1-2 所示。截至 1984 年，共发掘面积 13700m<sup>2</sup>，遗址总面积为 110 万 m<sup>2</sup>。出土房址 238 座，灰坑 357 个，墓葬 79 座，窑 38 座，灶台 106 座，防护和排水用的壕沟 8 条，各种骨、石、蚌、

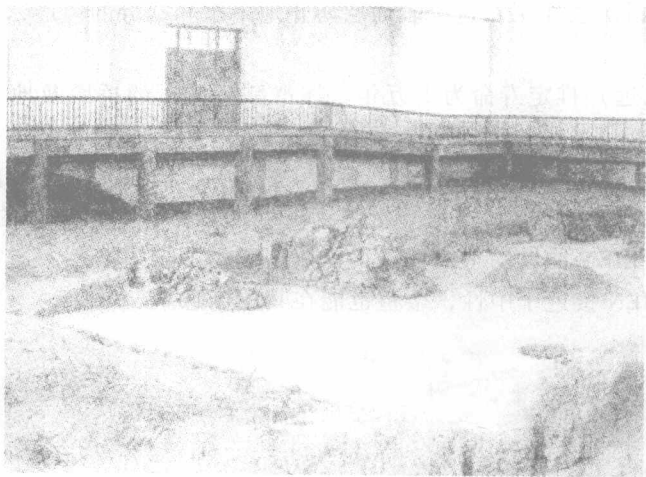


图 1-2 大地湾遗址之一角

陶器、装饰器和生活器物共计 8034 件。大地湾遗址最早距今 7800 年，最晚距今 4800 年，有 3000 年文化的连续，其规模之大、内涵之丰富，在我国考古史上亦属罕见。除陶器、骨角器、石器、蚌器、原始雕塑等艺术珍品外，特别值得提出的是大地湾的房屋建筑遗址，不仅规模宏伟，而且形制复杂。尤其是属于仰韶文化晚期（距今约 5000 年前）的大房子，是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  $150\text{m}^2$ ，平地起建，采用木骨泥墙，其复原图为四坡顶式房屋。这一房屋的规模在我国新石器时代考古学文化中可以说是独一无二的。大地湾遗址的房屋，多采用白灰面，多种柱基础的建筑方法，充分显示了当时生产力的提高和建筑技术的发展。

在大地湾遗址中，还发现了中国最早的也是世界上最古老的“混凝土”地面。面积达  $130\text{m}^2$  的宫殿式建筑主室，全部为礞石和砂石混凝而成类似现代水泥的地面。这与古罗马人用火山灰制成的混凝土同属世界上最古老的混凝土。至今这些混凝土的表面仍像大理石一样致密，为研究古代建筑材料提供了珍贵的资料，为人们研究混凝土技术和永久性混凝土提供了新的技术途径。

### 1.1.3 抽出古代遗址物的精髓，开发万年混凝土（EIEN）

应用古罗马混凝土和中国大地湾遗址中的混凝土这种化学原理，鹿岛公司（株）和日本电气化学工业、石川岛建材工业等共同开发了新型混凝土，取名为 EIEN，即永远的意思。

EIEN（永远）是拌和特殊材料制成的混凝土，表面和碳酸根离子反应，制

造出很细腻平滑的表面层。这个表面层防止地下水和盐分的渗透，使混凝土的耐久性提高。

EIEN（永远）推定寿命为1万年。在严酷环境下的桥墩及地下结构物，不仅修补次数大幅度减少；而且由于碱度接近于低中性，与自然环境很相容，也适宜于与生物共存。如图1-3所示，把EIEN敷设于水槽底面上，与普通混凝土敷设的水槽底面相比，由于普通混凝土中钙成分的溶出，其水槽中的水变得浑浊，透明度差；而EIEN铺设的水槽，一目了然，里面看得很清楚。通常混凝土是强碱性的，但EIEN接近于中性，金鱼也能在其中栖息。



图1-3 普通混凝土铺设的水槽和EIEN铺设的水槽对比图

### 1.1.4 混凝土的岁月

这次能推测出EIEN具有1万年的寿命，是以中国大地湾遗迹调查挖掘得到的古代混凝土为依据，收集经过长时间测定的混凝土的相关数据，通过计算机分析而确立的。在此基础上能在短时间内、高精度地预测1万年后混凝土的状态。

严格地说，古代混凝土并不是现代建材中应用的混凝土的直接祖先。我们大家都了解，至今混凝土的历史还没有超过200年。这次通过计算机分析的方法，预测混凝土的寿命为1万年仍然是一个未知的谜。

但是，根据这个成果，追溯混凝土耐久性之道，这个奥妙很快就打开了。按其名为“EIEN（永远）的建筑基础结构”诞生的日子可能也不会太远了。

关于混凝土EIEN的试验与应用如图1-4所示。

开发长寿命化的混凝土，要在材料中加入特殊矿物，用碳酸气使表面碳化，再现挖掘出来的古代材料的性状，防止水分和盐对内部钢筋的腐蚀，从而使耐久性提高。