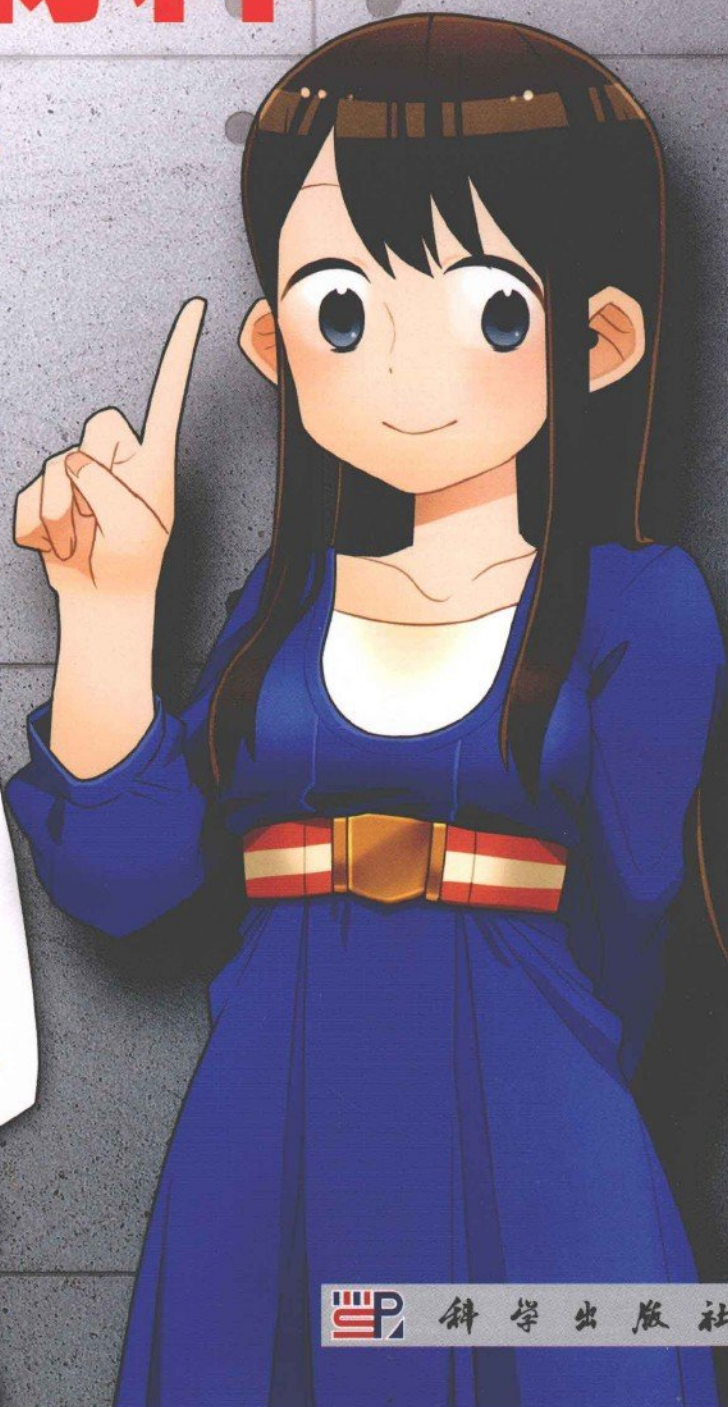


欢姆社学习漫画

爱淘书
www.itaobooks.com

漫画工程材料 之混凝土

(日) 石田 哲也/著
(日) はるお/漫画绘制
(日) トレンド・プロ/漫画制作
单美玲/译



科学出版社

(TB-0384.0101)

责任编辑：张丽娜 赵丽艳

责任制作：董立颖 魏 谨

封面制作：泊 远

用漫画这种形式讲数学、物理和统计学，十分有利于在广大青少年中普及科学知识。

周恩来、邓颖超秘书，周恩来邓颖超纪念馆顾问
中日友好协会理事，《数理天地》顾问，全国政协原副秘书长

用漫画和说故事的形式讲数学，使面貌冷峻的数学变得亲切、生动、有趣，使学习数学变得容易，这对于提高全民的数学水平无疑是功德无量的事。

《数理天地》杂志社 社长 总编
“希望杯”全国数学邀请赛组委会 命题委员会主任

用漫画的形式，讲解日常生活中的数学、物理知识，更能让大家感受到数学殿堂的奥妙与乐趣。

《光明日报》原副总编辑
中华炎黄文化研究会 常务副会长

科学漫画是帮助学习文科的人们用形象思维的方式掌握自然科学的金钥匙。

中国人民大学外语学院日语专业 主任
大学日语教学研究会 会长

在日本留学的时候，我在电车上几乎每次都能看到很多年轻的白领看这套图书，经济实惠、图文并茂、浅显易懂，相信这套图书的中文版也一定会成为白领们的手中爱物。

大连理工大学 能源与动力学院 博士 副教授

我非常希望能够在书店里看到这样的书：有人物形象、有卡通图、有故事情节，当然最重要的还有深厚的理工科底蕴。我想这样的书一定可以大大提升孩子们的学习兴趣，降低他们对于高深的理工科知识的恐惧感。

北京启明星培训学校 校长

书中的数学知识浅显实用，漫画故事的形式使知识贴近生活，概念更容易理解。

北京大学 数学科学学院 博士

媒体支持：

sino 新浪文化·读书

腾讯读书
BOOK.QQ.COM

joyo 卓越
amazon.cn

搜狐读书
book.sohu.com

www.sciencep.com

科学出版社 东方科龙
联系电话：010-82840399
E-mail: boktp@mail.sciencep.com
有关网址：http://www.okbook.com.cn

销售分类建议：科普

ISBN 978-7-03-034563-9



定 价：32.00 元

欧姐

漫画工程材料之混凝土

〔日〕石田 哲也 著
〔日〕はるお 漫画绘制
〔日〕トレンド・プロ 漫画制作
单美玲 译



科学出版社

北京

资源分享网
PDG

内 容 简 介

你是不是正在学习工程材料中的混凝土知识？你是不是对司空见惯却又不太为人所熟知的混凝土很感兴趣呢？那么，对你来说，这本书再合适不过了。这是世界上最简单易学的混凝土教科书与普及读物，它通过漫画式的情境说明，让你边看故事边学知识，每读完一篇就能理解一个概念，只要你跟着主人公的思路走，那么你肯定能在较短的时间内掌握混凝土的相关知识！

有趣故事情节、时尚的漫画人物造型、细致的内容讲解定能让你留下深刻的印象，让你过目不忘。不论你是学生、上班族还是已经自己创业的“老板”，活学活用混凝土知识，定会给你的学习、工作与生活增添更多的便利。

图书在版编目（CIP）数据

漫画工程材料之混凝土/（日）石田哲也著；（日）はるお漫画绘制；（日）トレンド・プロ漫画制作；单美玲译。
—北京：科学出版社，2012
（欧姆社学习漫画）
ISBN 978-7-03-034563-9
I.漫… II.①石…②は…③ト…④单… III.混凝土—普及读物 IV.TV528-49
中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第111978号

责任编辑：张丽娜 赵丽艳 / 责任制作：董立颖 魏 谨
责任印制：赵德静 / 封面制作：泊远

北京东方科龙图文有限公司 制作
<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京市四环路双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2012年7月第一次印刷 印张：12 1/2

印数：1—5 000 字数：195 000

定价：32.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

数字资源
PDG

Original Japanese language edition
Manga de Wakaru Concrete
By Tetsuya Ishida and TREND-PRO
Copyright © 2011 by Tetsuya Ishida and TREND-PRO
This Chinese version published by Science Press, Beijing
Under license from Ohmsha, Ltd.
Copyright © 2012
All rights reserved

マンガでわかる コンクリート
石田 哲也
オーム社 2011

著者简介

石田 哲也

工学博士，毕业于东京大学。1971年出生于山梨县山梨市，1994年毕业于东京大学工学系土木工程专业，1996年取得东京大学研究生院工学系研究专业社会基础工学专业硕士学位，1999年取得东京大学研究生院工学系研究专业社会基础工学专业博士学位。

历任东京大学工学系研究专业社会基础工学专业助手、讲师、副教授，现任副教授。专业是混凝土工学、地圈环境工学、多孔体热力学。

主要获奖经历：土木学会论文奖、土木学会出版文化奖、土木学会吉田奖、日本混凝土工学会论文奖、前田工学奖、fib Awards、IABSE Prize等。

主要著作：

Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, K, Maekawa, T. Ishida and T. Kishi, 2008, Taylor and Francis

《城市资本的持续再生》藤野阳三、野口贵问编著，2007，技报堂出版（担任第11章写作任务）

株式会社トレンド・プロ

1988年创立。公司灵活利用漫画为报纸、杂志制作广告专刊，并承接政府、大型企业及社会团体等的广泛领域内的漫画广告制作。近年来，公司利用数字化内容积极参与广告制作和出版策划工作。

关于公司的更多详情请参见公司官方网站：<http://www.ad-manga.com/>

akino 脚本制作

はるお 漫画绘制

株式会社イーフィールド DTP

序 言

本书是关于建筑材料中最常用的混凝土的相关知识的入门书。混凝土在日常生活中是必不可少的，也是随处可见的，但令人意外的是人们对混凝土并不熟悉。当初次见面的人问我在大学里研究什么时，我都会告诉他们：“我在进行关于混凝土方面的研究”，此时对方大多会露出惊讶的表情。混凝土是低科技产品的代表“选手”，它的存在在日常生活中并不太引人注目，大多数人都不太了解它属于什么学术领域，有着怎样的研究内容。

虽然人们从数千年前的远古时代就已经开始使用混凝土，现在每天仍在进行着各种各样的技术开发，但为了能实现其多样化用途，而且为了制造更加坚固且持久耐用的混凝土，关于材料、设计、施工、维护管理等方面的研究仍在进行。混凝土领域主要分为“混凝土材料”与“混凝土结构”两大部分，本书主要讲述“混凝土材料”这一部分，并整理了使用混凝土的工程领域与目前研究的精华。

读者对象设想如下：

• 大学或职业高中、职业高等专科学校等的土木、建筑、建设工程专业中想学习混凝土入门知识的人

- 对建筑物、土木工程、基础设施知识感兴趣的人
- 对周围常见但并不被人了解的混凝土知识感兴趣的人

本书从混凝土材料的概略、历史，讲到新鲜混凝土及若干材龄混凝土的性质和特性、硬化过程、初始缺陷直到耐久性、劣化等，基本涉及了有关混凝土材料的全部知识，所以不仅对入门者，而且对那些已经学习过混凝土知识的人，通过阅读本书都应该能够达到整体学习和复习的目的。而且，本书还收录了相当一部分东京大学工程系社会基础学系开设的“混凝土工程”这一课程的讲义中所涉及的内容，因此也可作为参考书来使用。

本书共6章。各章原则上的构成为：

- 漫画部分
- 补充漫画部分的文字说明部分

即使只阅读漫画部分也可以大概了解混凝土的相关知识，想深入了解的读者可以阅读补充的文字说明部分。

在此，我要对给予我此次执笔机会的欧姆社开发局的诸位编辑表示感谢，而且特别对在策划阶段就给予各种指教、在编辑工作阶段给予支持和帮助的各位负责人表示感谢。同时也向负责漫画制作工作的トレンド・プロ公司的相关工作人员、负责脚本创作的 akino 与负责漫画绘制的是るお先生深表谢意。

希望看完本书后，能有更多的人深切地感受到作为“无名英雄”的混凝土的存在和重要性。

石田 哲也

2011 年 9 月

目 录

序 章	突如其来的邂逅	1
-----	---------	---

第 1 章	混凝土是什么	9
-------	--------	---

1	混凝土是由什么构成的	12
2	关于骨料	19
3	关于水泥	22
4	身边常见的混凝土	25
↗	补充说明	31
●	混凝土是什么	31
●	“与时俱变”的混凝土	31
●	混凝土的配合(调和)	32
●	混凝土的优点与缺点	33
●	混凝土的力学特性	34
●	混凝土是混合体	34
●	关于骨料	36
●	关于波特兰水泥	36

第 2 章	混凝土是从何时开始使用的	39
-------	--------------	----

1	混凝土的起源	42
2	古代罗马的混凝土	45
3	日本的混凝土使用	48
4	混凝土的长期耐久性	50
↗	补充说明	55
●	古代混凝土	55
●	混凝土中混合材料的使用	57
●	日本混凝土的黎明——小樽港筑港与百年耐久性试验	57
●	混凝土的长期耐久性	59

第3章

新鲜混凝土的性质与水合反应 61

- 1 新鲜混凝土的性质 65
- 2 水合反应的原理 73
- 3 补充说明 79
 - 新鲜混凝土的性质与混凝土的施工 79
 - 混凝土的坍落度 81
 - 混凝土的施工性能 82
 - 自充填混凝土 83
 - 高性能 AE 减水剂 84
 - 水泥的水合反应 85
 - 水合反应的温度依赖性 87

第4章

混凝土的成长与初始缺陷 89

- 1 混凝土的成长 94
- 2 温度裂缝 98
- 3 干燥收缩裂缝 102
- 4 减少裂缝的方法 104
- 5 补充说明 109
 - 水泥固化体内部的微观结构 109
 - 水合的过程与强度表现 111
 - 水合放热引起的裂缝 113
 - 收缩引起的裂缝 114

第5章

混凝土结构物的耐久性 117

- 1 混凝土结构物的劣化 120
- 2 钢筋生锈的理由① 氯离子 122
- 3 钢筋生锈的理由② 中性化 125

4	保护钢筋不生锈的方法	128
5	混凝土本身的劣化	130
➤	补充说明	140
	● 混凝土结构物的耐久性	140
	● 钢筋的腐蚀现象	140
	● 劣化进程	141
	● 氯离子向混凝土内部的渗透	144
	● 混凝土的中性化(碳酸化)	146
	● 碱硅反应	149
	● 冻结融解	150
	● 化学侵蚀	151


第 6 章

各种各样的混凝土

153


1	具有高强度、变形性的混凝土	157
2	水下使用的混凝土	160
3	创造丰富的水边环境的混凝土	162
4	作为外壁材料使用的混凝土	164
5	有修复力的混凝土	165
6	月球使用的混凝土	167
➤	补充说明	177
	● 各种各样的混凝土	177
	● 超高强度混凝土——纤维增强混凝土	177
	● 多孔混凝土	179
	● 裂缝自愈合混凝土	180
	● 月球混凝土	180
	● 温故知新——吉田德次郎博士的最高强度混凝土	181

突如其来的邂逅

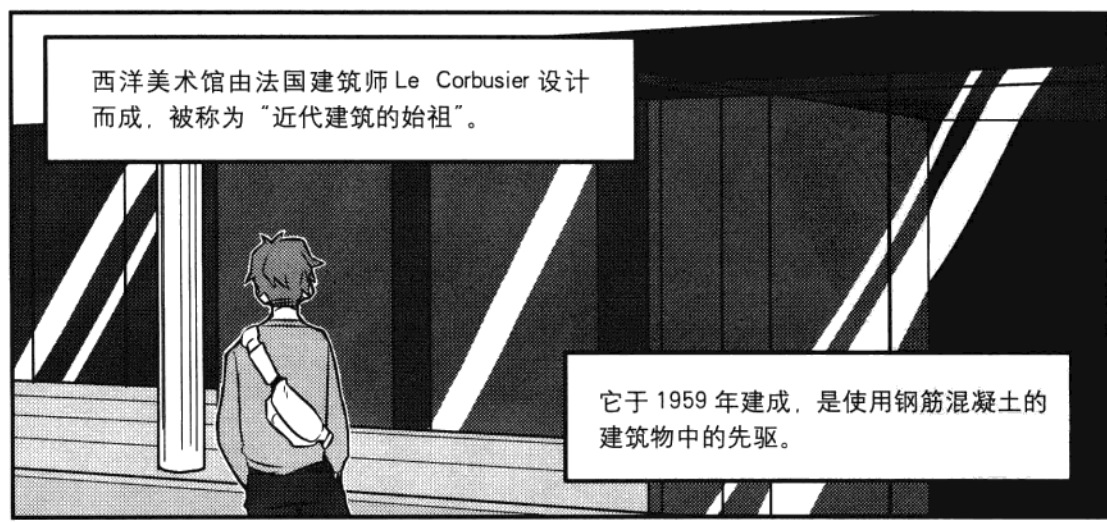


邂逅是突如其来的……

春季考入大学建筑专业的
我来到了国立西洋美术馆



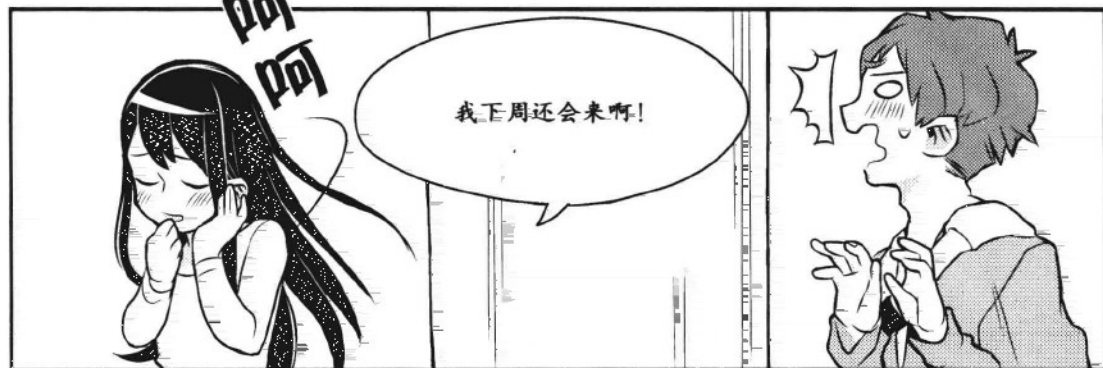
我是来参观建筑物的，
并不是来看展品的。



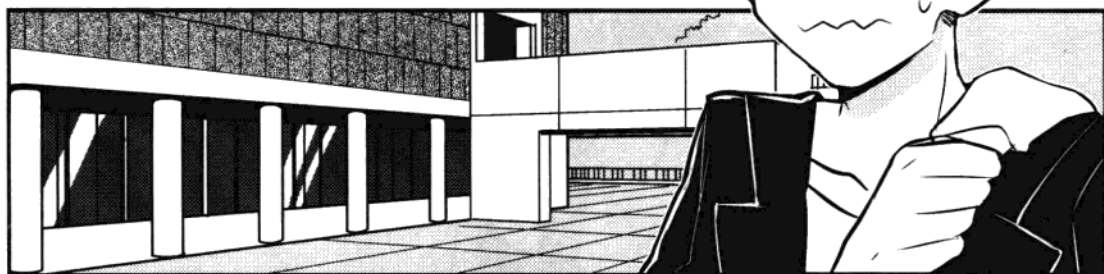
西洋美术馆由法国建筑师 Le Corbusier 设计
而成，被称为“近代建筑的始祖”。

它于 1959 年建成，是使用钢筋混凝土的
建筑物中的先驱。





第二天



咦？你上周不是在这里对我说
“我喜欢你”吗？

那不是对我
说的吗？

啊！！

什么？

呆愣

对不起……

我特别喜欢混凝土，

因此我有时会不知不觉
就对混凝土制成的物体
说话。


哈哈哈！

我是对混凝土
说的。

混凝土!?

我这人很怪吧。

是吗？




没有那回事儿。我也喜欢建筑，
我就是来这里参观建筑物的。




哦

哦，是吗！？



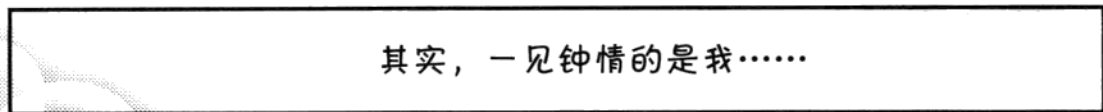
虽是这样说，
其实……

我刚刚进入建筑专业，
并不了解得很详细。



如果是有关混凝土的，
什么都可以问我。

我下周打算去御茶之水
的圣桥呢。



第1章

混凝土是什么

1 混凝土是由什么构成的

2 关于骨料

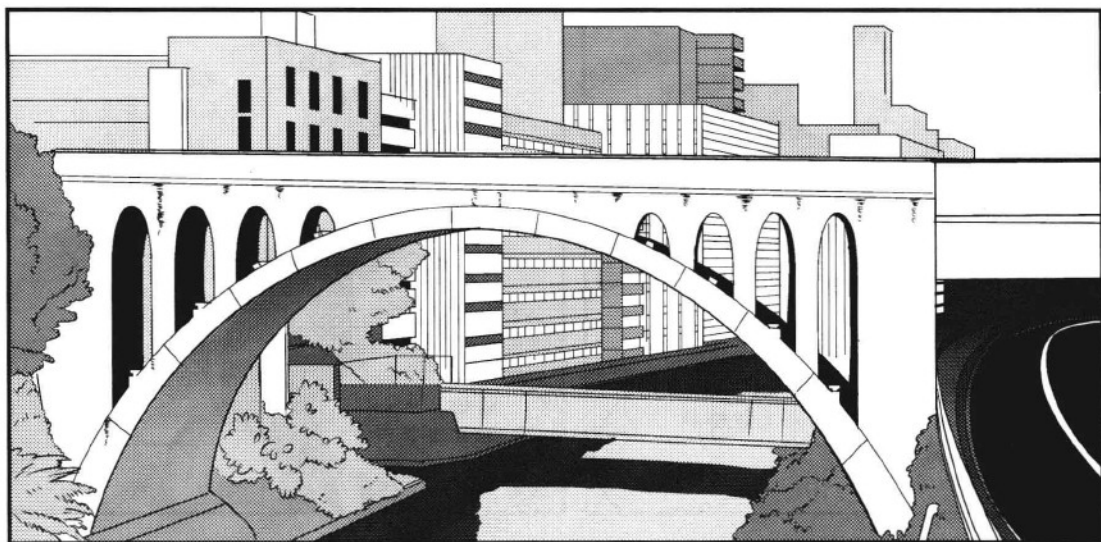
3 关于水泥

4 身边常见的混凝土

5 补充说明

- 混凝土是什么
- “与时俱变”的混凝土
- 混凝土的配合（调和）
- 混凝土的优点与缺点
- 混凝土的力学特性
- 混凝土是混合体
- 关于骨料
- 关于波特兰水泥





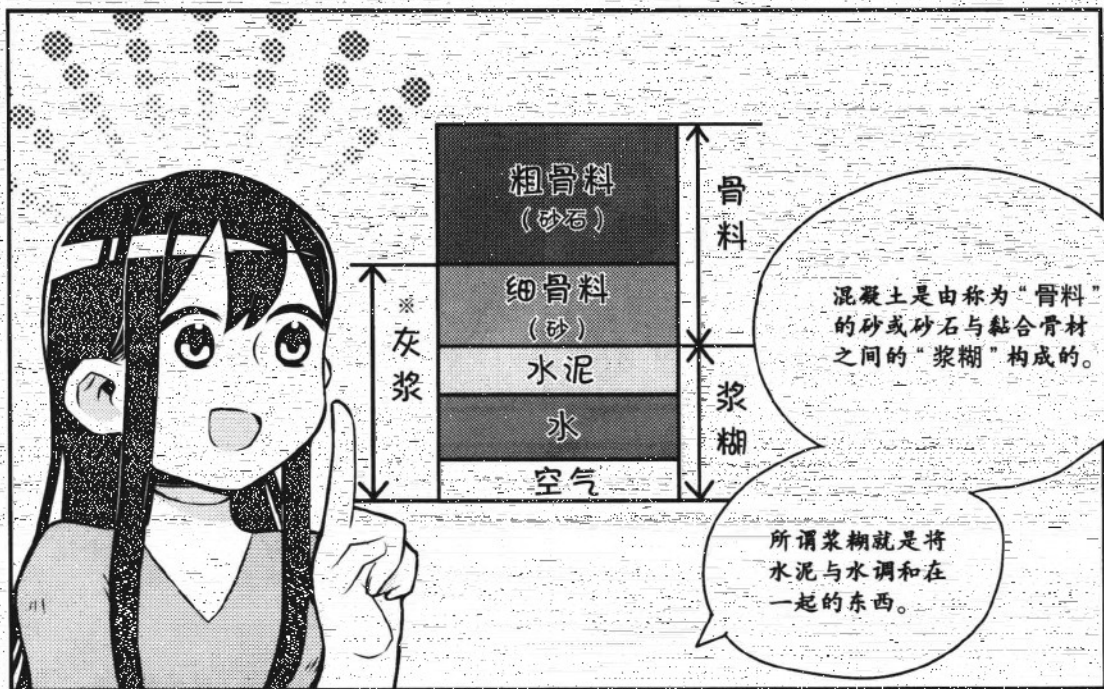
圣桥——

由毕业于东京帝国大学
土木工程系的成瀬胜武
与毕业于同一个大学建
筑专业的建筑家山田守
两人共同设计的。

它是关东大地震后
得以重建的众多桥
梁中的一座，建成
于1927年。







刚搅拌均匀的混凝土一般称为“新鲜混凝土”。

也就是所谓的“新混”。

搅拌

搅拌

猫偶尔会留下脚印呢！

呵呵，是啊。

过一会儿，浇灌到模板里的混凝土材料逐渐固化。

就是说，硬度和强度在逐渐增加。

砰

固化后的混凝土在很长时间内会受到各种各样的环境作用，慢慢脆弱，因性能降低而老化。

它是一种性能随着时间发生变化的“有生命的材料”。



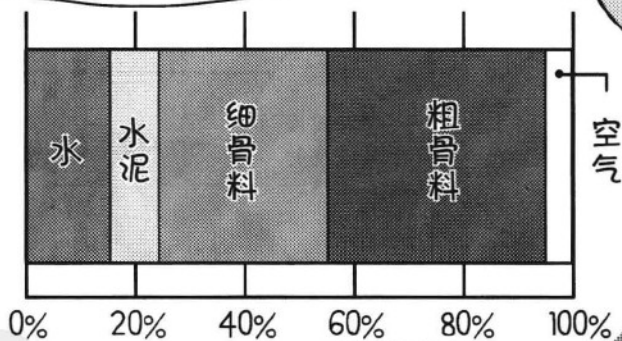


混凝土的使用期限一般非常长，


但在此期限内，为了更好地发挥其各种各样的性能，需要选择材料并确定它们的比例。

也就是说，随便选择材料后任意混合是不行的。


外观看起来都一样的混凝土，但是实际上根据用途的不同，具有各种各样的性质与功能。




用体积比来表示构成混凝土的材料的比例就是这样。



作为骨料的砂或砂石约占混凝土整体的80%呢。




骨料是混凝土坚固与稳定的基础，所以确实是混凝土的“骨”的部分。



水与水泥形成的浆糊承担着接合骨的作用。




浆糊




咕咚
咕咚

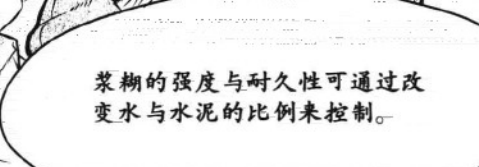
浆糊内部含有水时， $\text{pH}=12\sim 13$ ，呈强碱性。



同时，它对周围的湿度或温度的变化也很敏感。



完全融入角色



浆糊的强度与耐久性可通过改变水与水泥的比例来控制。



② 关于骨料

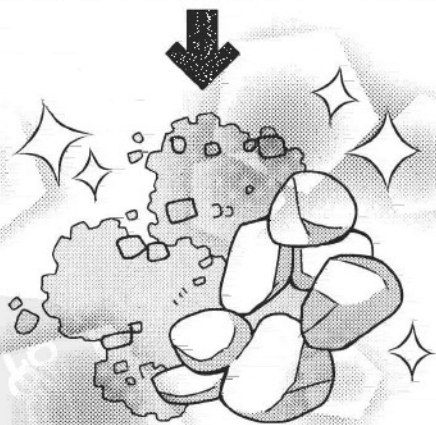




人们在尝试利用从废弃的混凝土中提取而来的“再生骨料”。

骨料也要进入环保时代了。

从拆毁的混凝土中



提取骨料

骨料的种类不同，其形状和强度等物理特性也不同，

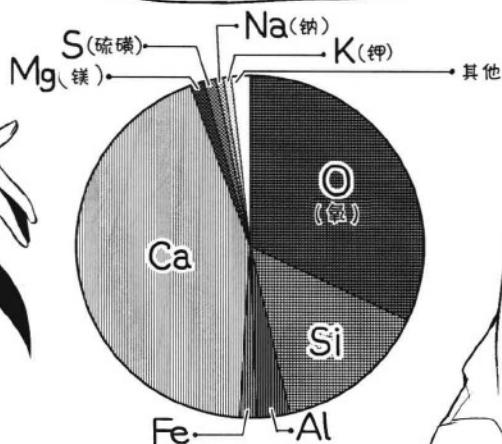
而与碱或酸的反应等化学性质也是不一样的，所以需要充分考虑骨料在成为混凝土时会产生怎样的影响。

③ 关于水泥



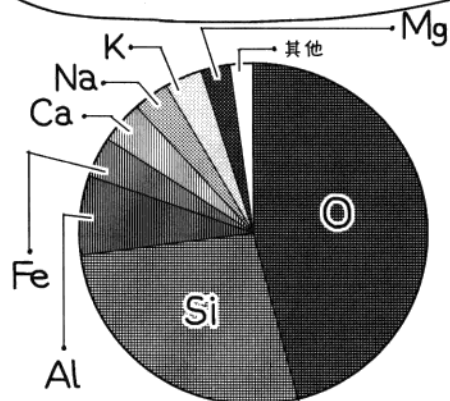
水泥正式名称为“波特兰水泥”，其主要成分为钙 (Ca)、硅 (Si)、铝 (Al)、铁 (Fe) 等。

你不觉得这些成分像某种物质吗？



嗯？突然这么问我，我想不出来。

除去钙，
它类似于地壳成分的构成比例呀。



就是说，水泥由地球上均匀分布的元素形成，不同于石油、稀有金属、稀土等资源，它没有因地域不同而有所不同。



正是如此。



水泥是怎么制造出来的啊？



将原料的石灰石、硅石、黏土做成粉末后投进 1450℃ 高温的窑中烧制后形成称为烧结块的烧结物。

将米粉团形状的烧结块用冷却装置速冻，再与石膏混合后将其粉碎就形成了水泥。

顺便说一下，从煤炭火力发电厂排出的“烟灰”或制造钢铁产品时产生的废物“高炉熔渣”等也可用作水泥的原料，对工业废物的有效利用作出了贡献。



噢

并且，最近还有以城市垃圾焚烧灰等为原料制成的水泥，称为“环保水泥”。

由于融入各种各样的技术方法，因此有些性能不输于由原始材料制成的水泥。


这可是日本开发的最尖端的技术啊。

哦，这很厉害啊！

④ 身边常见的混凝土


混凝土存在于我们身边，它建成了桥梁、隧道、水库、堤坝等土木建筑物或住宅以及高楼大厦等。

随处可见混凝土建成的建筑物。



确实如此。

如果没有混凝土我们的生活可能无法继续。




实际上，混凝土是世界上使用量仅次于水的资源。


其原因在于，它用任何地方都有的材料就可以制成。

将自然界中原有的东西进行再构筑。

并且，其价格为1立方米不足10日元，是非常经济的材料。



当然，作为建筑材料正合适呢。



不过，做好的混凝土的性能或品质因设计与施工的不同会有很大差异。

因为水、水泥、砂与砂石等这些简单的构成材料，根据配合或混合方法、施工方法的不同，品质会大有不同吧！



而且，从外观很难判断混凝土的好坏。



是啊！

怎样才能制造美观、坚固且耐用的混凝土呢？



为什么会出现那样的品质差异呢？

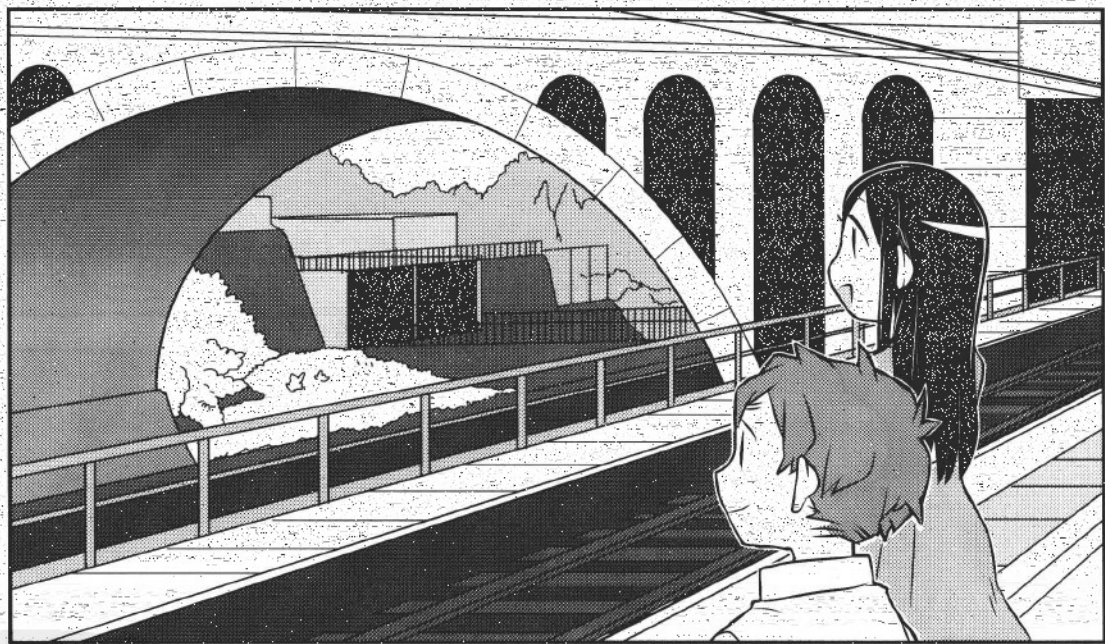
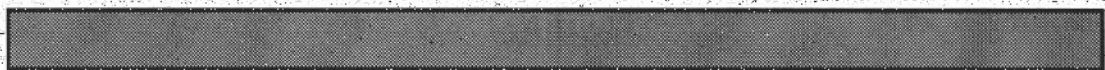
并且，至今为止还没有的全新的混凝土材料是什么呢？


我想说的内容还有好多呢！！

啊











梓瑠小姐对混凝土真的
很熟悉啊!

因为我非常喜欢。




我拥有混凝土主任技
师、混凝土诊断师和
一级土木技术人员的
资格呢。

太厉害了!




那些资格好像是需要参
加实际业务考试的?

这么说，
梓瑠小姐是专业的……



我们下次再一起
去哪里吧!!



当，
当然好了!

补充说明

● 混凝土是什么

混凝土是由水、水泥、细骨料（砂）、粗骨料（砂石）混合而成的被世界最广泛应用的一般性建筑材料，包括在工程工地制造出的混凝土（工地搅拌的混凝土）、从混凝土工厂运到工地的新生混凝土（预拌混凝土，ready mixed concrete，即预先搅拌混合的混凝土的意思）以及在二次产品工厂作为混凝土构件而制造的混凝土等。

建筑工地附近制造混凝土的设备称为配料机。由储存材料的储藏库、计量材料的设备还有搅拌混凝土的搅拌机构成。重力式混凝土水坝等建筑大量使用混凝土时，设置配料机来制造混凝土，这是因为用工地的配料机来制造混凝土是不需要花费运输等费用的最经济的方式。

在人们使用混凝土之初，以工地搅拌混凝土为主流，随着搅拌机车的发展，人们开始能够运输品质稳定的混凝土，在1955年以后，日本对新生混凝土的使用率越来越大。被称为预拌混凝土的新生混凝土，由于经济高速发展而需求大增，生产量也急速增加。即使施工工地不设置制造混凝土的搅拌机，那么打一个电话就可以叫来“新生混凝土”。其便利性相当高，现在依然被广泛使用。

预制产品是指在称为二次产品工厂的专业工厂制造出的混凝土构件，包括建设盾形隧道时使用的隧道段（见第3章）、预制地板（见第6章），以及箱形涵洞或防护墙，还有电线杆等。因为是在工厂内制造，所以其优点在于施工的过程容易管理且可制造出品质稳定的混凝土。

● “与时俱变”的混凝土

混凝土在材料刚被混合搅拌之后是柔软的，所以装入指定的模板内就可以制成各种各样的形状。在变硬之前的柔软的混凝土称为新鲜混凝土。将混凝土装入模板的工序称为“浇灌、浇注”。浇灌后的几个小时内，慢慢进行着水泥与水的化学反应（水合反应），混凝土从而固化。这时，因化学反应，水泥产生了结合力，混凝土在强度

增高的同时，密度也有所增加。一般混凝土的情况是，经过4周后，70%~80%程度的水合反应会完成。与人们在成长过程中如何度过少年时期和青年时期会很大程度上影响性格形成一样，浇灌混凝土后不到一个月的这段期间，如何成长（固化）会影响混凝土的性质。适当进行能够稳定推进混凝土固化的“养护”决定着混凝土的“人生”（持久或快速损坏）。它并不是只要混合并浇灌指定的材料后就结束了，在那之后还需要踏实地亲手精心养护。从柔软的新鲜混凝土开始，到形成坚固的骨骼并发挥强度的材料，再到由于长年使用而逐渐损坏的状态，随着时间的流逝，材料性质和性能会发生变化（图1.1）。这样的混凝土作为与时俱变的材料，可以说具有其他工业材料所没有的特征。

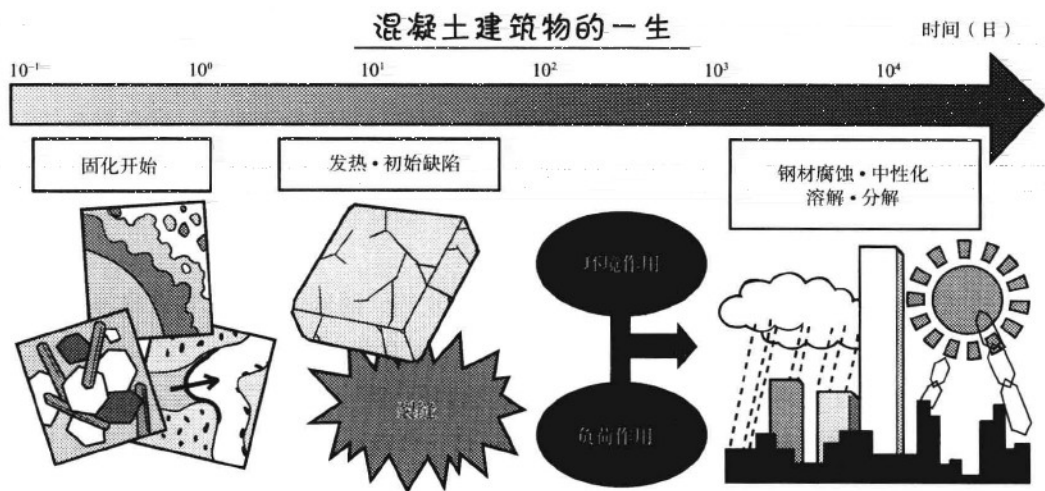


图1.1 “有生命的材料”——混凝土

● 混凝土的配合（调和）

混凝土的性质由水、水泥、砂、砂石、空气的比例决定。这个比例在土木领域称为配合，在建筑领域称为调和，决定比例的作业称为配合（调和）设计。综合考虑对新鲜混凝土要求的性能和对固化混凝土要求的性能而进行配合（调和）设计是非常重要的。这时，并不是只考虑其中一个侧面（性能），而是要满足多个性能进行设计，这是极其重要的。有时，必须考虑同时满足两个相互冲突的性能，即所谓二律背反的混凝土的配合。若遇到这种情况，可以说恰好是显示混凝土技术人员最拿手技术的的地方。考虑到新鲜混凝土的流动性和材料分离的抵抗性，同时需要确保建筑物具有必要的强度以及在使用环境下

不会劣化的耐久性，这样进行配合（调和）是非常重要的。

配合（调和）用体积为 1m^3 混凝土的质量（称为单位量）的平均值来表示（表 1.1）。特别是水和水泥的量会很大程度上影响混凝土的性质和价格。水的单位量称为“单位水量”，水泥的单位量称为“单位水泥量”。这些是在使用混凝土时经常使用的术语，还是掌握下来较好。

表 1.1 混凝土的配合（调和）

水灰比 / %	空气量 / %	单位量 / (kg/m^3)			
		水	水泥	细骨料	粗骨料
52.1	4.0	150	288	832	1040

水与水泥的混合物称为水泥浆，在水泥浆内加入细骨料的物质称为灰浆，在灰浆中加入粗骨料的物质就是混凝土。如表 1.1 所示的水灰比是表示构成水泥浆的水与水泥的比例的数值，是直接关系到混凝土的强度和耐久性的最重要的指标。水灰比越低，意味着水泥浆中水泥的浓度越高，在强度增加的同时，耐久性也会有所提高。空气量表示在混凝土中含有的空气比例。这里所说的空气是指具有直径大小为数十至 $200\mu\text{m}$ 的独立气泡，通过使用称为 AE 减水剂的混合剂（药）可控制混凝土中被带走的气泡量。因为有独立的气泡，可提高混凝土的耐久性（特别对抗冻害）。但是，混凝土中含有的空气如果过多，也会导致强度的降低。一般范围设定为 $4.0\% \sim 7.0\%$ 。

● 混凝土的优点与缺点

那么，在这里我们来整理一下混凝土的特征吧。其优点可列举出：

- 价格便宜
 - 可自由成型
 - 富于耐久性与耐火性
- 另一方面缺点有：
- 密度大
 - 不容易拆除
 - 能抵抗压缩却经不起拉伸
 - 完全消除裂缝很困难
 - 结构物的性能（特别是耐久性）受到施工条件影响很大等

这不仅局限于混凝土，凡事都可能缺点变优点或者优点变缺点。刚才提到的密度大

的缺点，例如重力式混凝土水坝，正是利用混凝土的重量来抵抗水压的，此时混凝土的重量反而是作为优点来有效利用的。建筑物或桥梁的上部（横梁等）在施工时，如果强度一样，则构件轻的是比较经济的结构物。例如，在重力式混凝土水坝那样的沉重而安稳的构造物的情况下，较重的材料则是最理想的。因为混凝土的配合（调和）和构成材料的密度不同，混凝土的密度（比重）也会变化。但 1m^2 混凝土的平均重量大约为 2.3t 。混凝土中体积分数最大的骨料（砂以及砂石）的密度不同，混凝土重量会有很大变化，所以通过使用称为轻质骨料的软骨料，也使减少重量的轻质混凝土等得到了实际应用。

● 混凝土的力学特性

一般被广泛使用的混凝土的压缩强度为 $20\sim 40\text{MPa}$ 。近年来，具有高达 200MPa 的极高强度的混凝土也得到了实际应用。所谓 200MPa 意味着 1cm^2 的混凝土可以负重 2t 。这样的超高强度混凝土用于超高层的钢筋混凝土结构物。超高层建筑物因为其自重，施加在支柱上的压力也会增大，而且因支柱粗会导致居住空间减少等原因，极高强度混凝土得以开发并实际应用。此外，与压缩强度相比，混凝土的拉伸强度较弱，受到大约其 $1/10$ 的力就会损坏。因此，通过组合，抗压强的混凝土与抗拉强的加强材料（钢筋）形成了发挥各自长处的钢筋混凝土（reinforced concrete, RC）。

最近对于谁发明了钢筋混凝土的疑问众说纷纭。其中作为最初的说法而比较权威的是法国的花匠在灰浆中加入网状钢丝制成花盆而成为钢筋混凝土的雏形。而且，混凝土的压缩强度与水灰比的倒数（灰水比）成正比关系早就为人熟知。例如，美国的 D. A. Abrams 博士早在 20 世纪 20 年代就发现混凝土的强度与灰水比有关系，并在美国混凝土工学协会的杂志上发表了论文^[1]。近年来，人们提议把水泥的复杂的水合反应和混凝土的微小组织关联起来并制造高精度预测强度的模型。

● 混凝土是混合体

那么，这里我们稍微改变一下对表 1.1 的认识，来看一下各种材料所占体积的比例吧。为了简便，将其设定为水的密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ，水泥的密度为 $3.2\text{g}/\text{cm}^3$ ，细骨料与粗骨料的密度为 $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。体积可由质量除以密度计算得到，用体积分数表示则如表 1.2 所示。

如表 1.2 所示，混合细骨料与粗骨料的骨料整体平均 1m^3 为 720L ，也就是说占整体

表1.2 体积分数表示的混凝土的配合(调和)

水灰比 体积分数 (%)	空气量 (%)	单位量 / (L/m ³)			
		水	水泥	细骨料	粗骨料
167	4.0	150	90	320	400

体积的 72%。一般使用的混凝土中, 骨料整体占体积的 70%~80% 的情况较多, 根据混凝土种类的不同, 骨料量也多少会有变化。第 3 章将要讲述的自充填混凝土(高流动性混凝土), 因为骨料想避免互相接触(咬合), 所以设定得比普通混凝土少添加一点骨料量。同时, 在想减少水合热或干燥收缩的情况时, 减少水泥量并尽量增加作为稳定性源头的骨料的混凝土则是最理想的。在这里, 我们讨论一下增加多少骨料量合适呢?

在思考这个问题时最重要的物性是称为骨料的“实际体积率”的指标。在自由的空体内, 将骨料最大限度充填的体积率称为实际体积率。弹子球那样的球形粒子的实际体积比为 74% (致密充填结构)。实际体积比因粒度(粒径分布)与粒子的几何形状不同而变化。在这里我们来思考一下粗骨料与细骨料这个大颗粒与小颗粒的集合体。为了简便起见, 我们将细骨料的实际体积比 (S_{lim}) 与粗骨料的实际比率 (G_{lim}) 都设为 60%。最初将粗骨料慢慢地致密填充到再也加不进去为止(图 1.2)。在这种状态下, 骨料没占到的体积比(空隙率), 根据定义为 $(1.0-G_{lim})$ 。粗骨料的实际体积比为 60%, 所以空隙率为 40%。接着在填满粗骨料的状态下填充细骨料。可填充细骨料的空间是粗骨料没有进入的空间(也就是空隙), 所以就是 $(1.0-G_{lim})$ 的部分。因此, 在剩余的空间满满地填充细骨料的体积比为 $(1.0-G_{lim}) \cdot S_{lim}$ 。由上可以得出最大限度填充粗骨料与细骨料时的体积比为

$$G_{lim} + (1.0-G_{lim}) \cdot S_{lim} = 0.6 + 0.4 \times 0.6 = 0.84 \text{ (84\%)}$$

在由粗骨料与细骨料构成的二相混合体系中, 同只有粗骨料或者只有细骨料形成的体系相比, 可了解到它更有效地填充着固体。只有细骨料或者粗骨料时只能填入 60%, 而两者共存时则可将体积率提高到 84%。这种计算的意义在于显示了适当调整骨料的粒度并有效地安置各种大小的颗粒, 在制造密实且良好的混凝土方面是十分重要的。

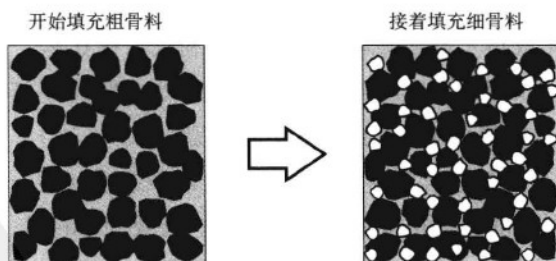


图1.2 细骨料与粗骨料的最大填充体积比

● 关于骨料

骨料可粗略地分为天然骨料与人工骨料。天然骨料顾名思义，是从自然中取得的骨料，包括从河川采集的河砂、河砂石，从河底隆起而形成的山地或陆地采集的物质（山砂、山砂石、土砂、土砂石），从河口或大海中采集的海砂等。近年来因为环境等问题人们已经很难获得天然骨料，因此人们大多采用打碎山里的岩石（碎砂、碎石）等而形成的人工骨料。同时，也有为了制造轻质混凝土而使用的人工轻质骨料。这种骨料是将膨胀页岩烧结后采用人工方法制造的物质。普通骨料的密度为2.6，而人工轻质骨料的密度为1.3~1.7，所以它可以减轻混凝土本身的重量。

那么，前面我们在漫画部分提到了，骨料从尺寸来说，可分为细骨料（0.15~5mm的砂）与粗骨料（5mm以上的砂石）。那么粗骨料使用多大的物质呢？混凝土结构物的断面小时，如果使用了过大的骨料，则不能很好地浇灌。同时在配置钢筋的情况下，如果粗骨料比钢筋与钢筋之间的空隙大，混凝土就不能被密实地填充。因此，日本土木学会混凝土标准说明书规定，粗骨料的尺寸在构件最小尺寸的1/5以下或钢筋空隙的3/4以下。一般广泛使用的是最大尺寸为25mm或20mm的粗骨料。同时像混凝土水坝那样的大断面的情况则使用最大尺寸为80~150mm的粗骨料。

因为骨料占混凝土体积的80%，所以强度与硬度（弹性系数）、吸水率、形状、粒度以及化学稳定性等骨料的代表特性会在很大程度上影响混凝土本身的性质。根据骨料性质的不同，混凝土初期的新鲜特性和干燥收缩还有耐久性会有差异，这一点需要注意。同时根据采集的地方或场所的不同，骨料特性会发生变化，在使用混凝土时要牢记这一点。

● 关于波特兰水泥

作为混凝土材料之一的水泥又称波特兰水泥。所谓“波特兰”是因为水泥硬化之后的颜色与硬度同英国的波特兰海峡采集的石材相似而得名的。另外，一位名叫J.阿斯普丁的英国人在1824年取得了制造波特兰水泥的专利权。在日本，全国各地散布着出产纯度高且优质的石灰石的矿山，可以说这在世界范围也是资源丰富的地域。因此，单就制造水泥来讲，日本是原料可100%自给自足的国家。

波特兰水泥这种简便又便宜的材料从发明至今也不过200年，目前，我们已经建设了许多使用水泥-混凝土的建筑物或基础设施。在这里，我们来看看一年水泥的消耗数据。图E3显示了1950~2005年，日本、新加坡、韩国、泰国、中国的人均水泥消耗量的变化。

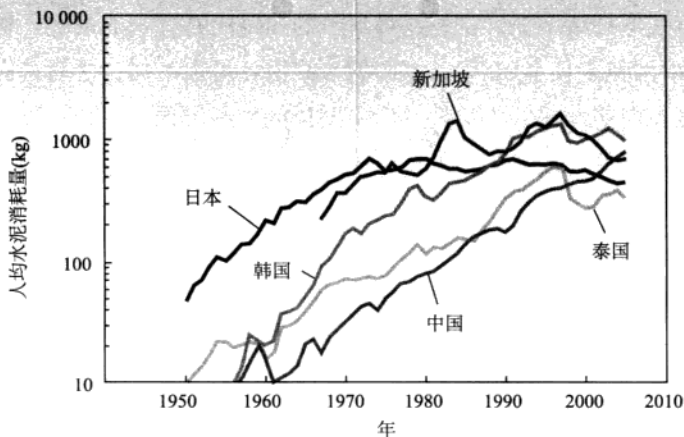


图1.3 人均水泥消耗量^[2] (由日本高知工科大学 大内雅博博士提供)

根据这个统计数据我们可以总结出几点很有意思的结论。

日本高知工科大学的大内博士利用水泥消耗量的统计数据经过分析后,指出水泥消耗量可粗略换算为混凝土的生产量。如表 1.1 所示的配合那样,假设一般的混凝土平均 1m^3 使用约 300kg 的水泥,则可推算出大约可生产出的混凝土的量。混凝土的“用武之地”为高楼等建筑物,还有道路、铁路、水坝、港湾、堤坝等社会基础设施,粗略来说,每年全部的水泥消耗总量(流通量)可看成建造出的建筑物以及基础设施的积蓄量(储存量)。

如果看日本的数据,1950~1970年几乎都是在直线增加。需要注意的一点是纵轴为对数刻度,意味着它并不是成比例地扩展,而是指数性增加。也就是说,水泥消耗量每年增加的比率大致相同(百分之十几)。到1970年初为止,人均水泥消耗量持续增加到1950年的近20倍。从那之后,每年会稍有增加或减少,但仍保持人均 $400\sim 600\text{kg}$ 的水泥消耗量。我们可以猜想,在国家发展到建筑物和社会基础设施达到一定量之后,为了维持我们的文明生活,也需要继续建设各类基础设施并重建损坏后的建筑。改变一下话题,分子生物学领域知名的福冈伸一先生在其著作《动平衡》一书中,对于“所谓生命是什么”的根源性疑问进行了论述。根据福冈先生所述,“乍一看并看不出有什么变化,实际上却在不断活动并反复进行分解与再生,在改造自己”这是生命本身的形态。支撑文明生活的都市或社会基础也与人类一样,一边在不断重复着损坏与改造,一边继续着新陈代谢,为了维持这些活动,在发达的日本所需要的人均水泥消耗量为 $400\sim 600\text{kg}$,换算成混凝土大约为 2m^3 。这些数值的意义对今后的状态分析更重要,我认为这才是令人很感兴趣的事实。

另外,其他国家是什么样的趋势呢?韩国、泰国与中国等其他国家与日本一样,水

泥消耗量也呈直线形持续增加，正好是将日本的曲线向右移动的情况。韩国大约晚于日本 15 年，同时中国晚于日本 30 年，他们的水泥消耗量在增加，之后趋向稳定。我们可以看到国家与城市向前发展并成长都是沿着同样的发展过程。现在，日本社会面临少子高龄化、基础设施高龄化或老化及怎样对这些设施进行维修管理的问题。以水泥消耗量的统计数据来看，我们可预想，亚洲各国将来也会面对与日本同样的问题。率先应对问题的日本如果能够迅速地想出解决方案，那不仅对日本而且对其他国家也是很有帮助的。我认为，水泥的统计数据会告诉我们很多信息。

参考文献：

- [1] D. A. Abrams, Proportioning Concrete Mixtures, ACI Journal, V. 18 (2), 174~181, 1922
- [2] 大内雅博：アジア諸国は何年前の日本？、土木学会誌、Vol. 92、No. 5、58~59、2007. 5

第2章

混凝土是从何时开始使用的

1 混凝土的起源

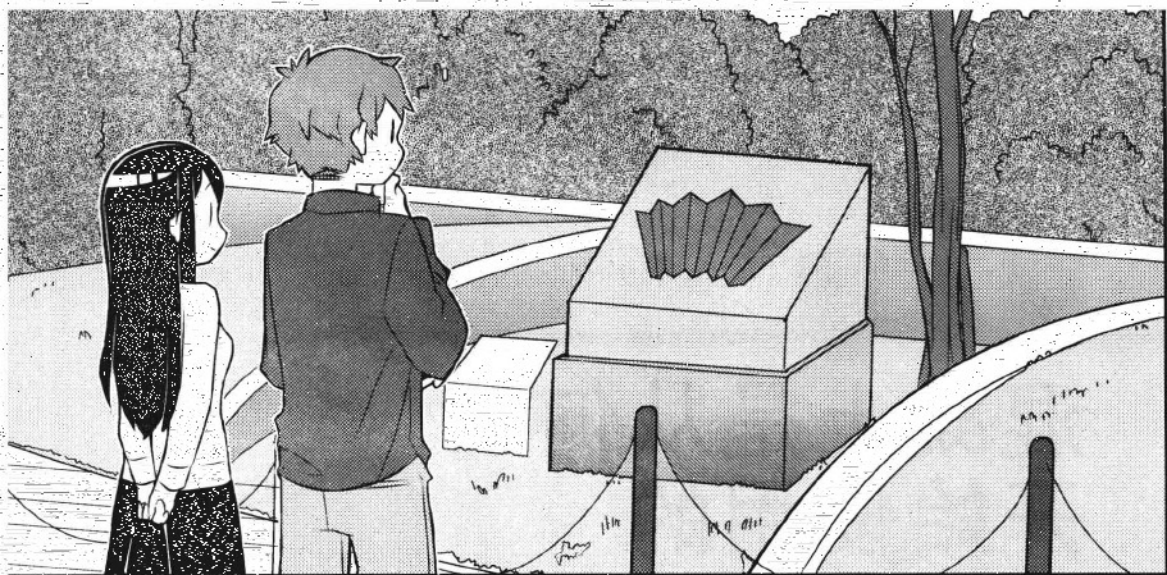
2 古代罗马的混凝土

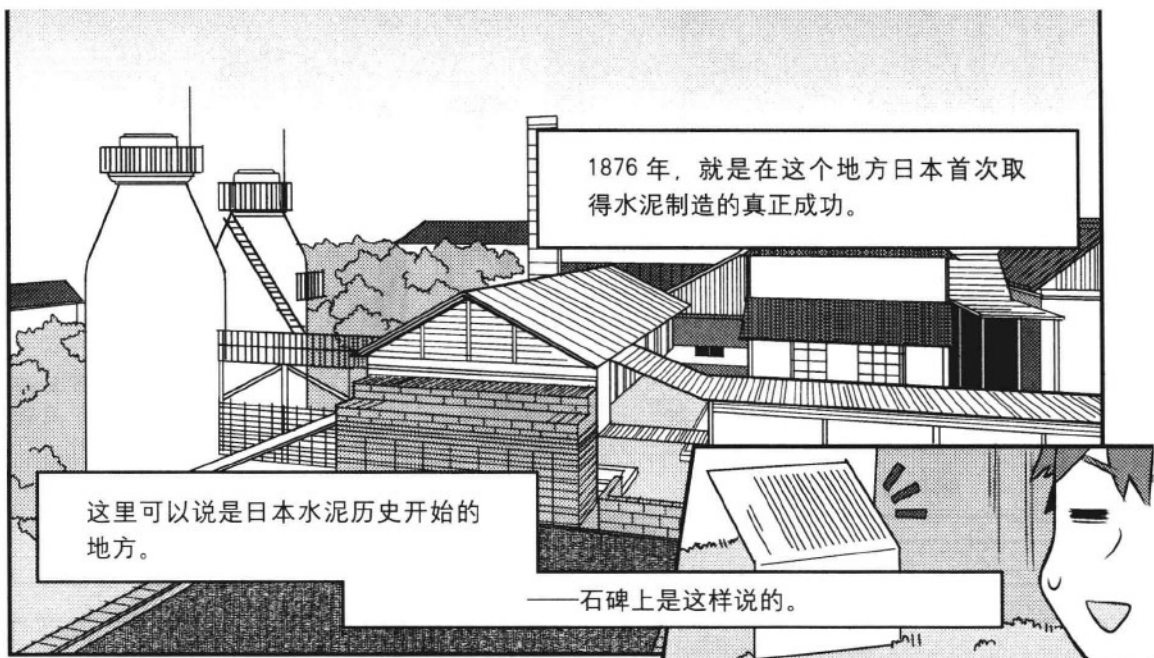
3 日本的混凝土使用

4 混凝土的长期耐久性

5 补充说明

- 古代混凝土
- 混凝土中混合材料的使用
- 日本混凝土的黎明——小樽港筑港与百年耐久性试验
- 混凝土的长期耐久性





1876年，就是在这个地方日本首次取得水泥制造的真正成功。

这里可以说是日本水泥历史开始的地方。

——石碑上是这样说的。



生活中不可或缺的混凝土和水泥，因为我们一步一步的积累才有了今天的面貌。

我们今天来讲一下这个内容，好吗？

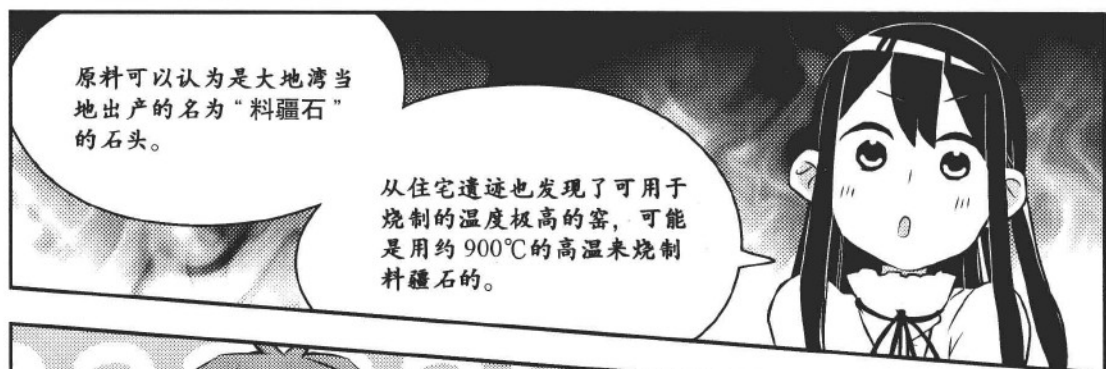


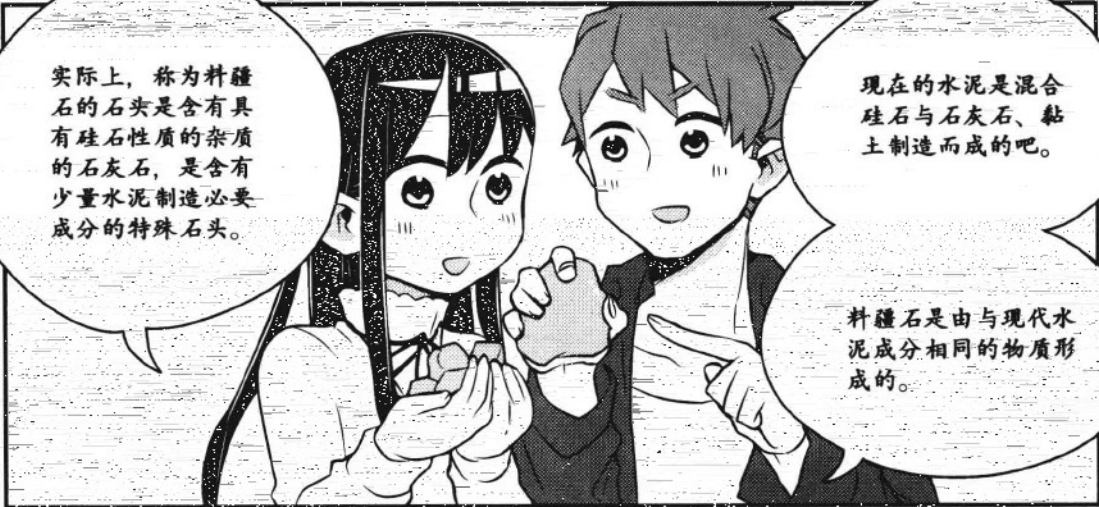
辛苦你了！

但是在外边站着说不太好，我们要不去附近的公园吧？

好，好啊！







实际上，称为料疆石的石头是含有具有硅石性质的杂质的石灰石，是含有少量水泥制造必要成分的特殊石头。


现在的水泥是混合硅石与石灰石、黏土制造而成的吧。

料疆石是由与现代水泥成分相同的物质形成的。



对于其性质，根据我调查的结果，它竟然有可能是由与现在的低热波特兰水泥*相同的物质形成的。

*参考第86页内容。




5000年前竟然使用了与现在一样的混凝土，感觉好浪漫啊!!

是，

是啊!

② 古代罗马的混凝土




时代稍微向后移，古代罗马人正式开始使用混凝土。

根据盐野七生先生所写的《罗马人的传说》*，


※盐野七生著《罗马人的传说》新潮社。

听说罗马人将其作为“人类为了像人一样的生活而必须开展的大事业”而建设了社会基础设施。



实际上，古代罗马人在道路、桥梁或航路设施、剧场、浴池、个人住宅等，

各种各样的建筑物中都使用着混凝土，现在也有很多作为遗迹而被保存下来。



如果有一天能与梓瑠小姐一起去罗马旅行的话……

嘿
嘿





③ 日本的混凝土使用

是的，日本混凝土的推广使用是在明治维新以后引进近代波特兰水泥的技术之后实现的。

以近代国家为目标的日本为了富国，在明治维新以后修建了很多土木结构建筑物。

就是说日本混凝土的历史是进入近代后才开始的。

当时作为重大项目之一的是以广井勇博士为总指挥的小樽港筑港项目。

这个项目在混凝土领域里，作为不朽的项目是非常有名的啊。

是啊？

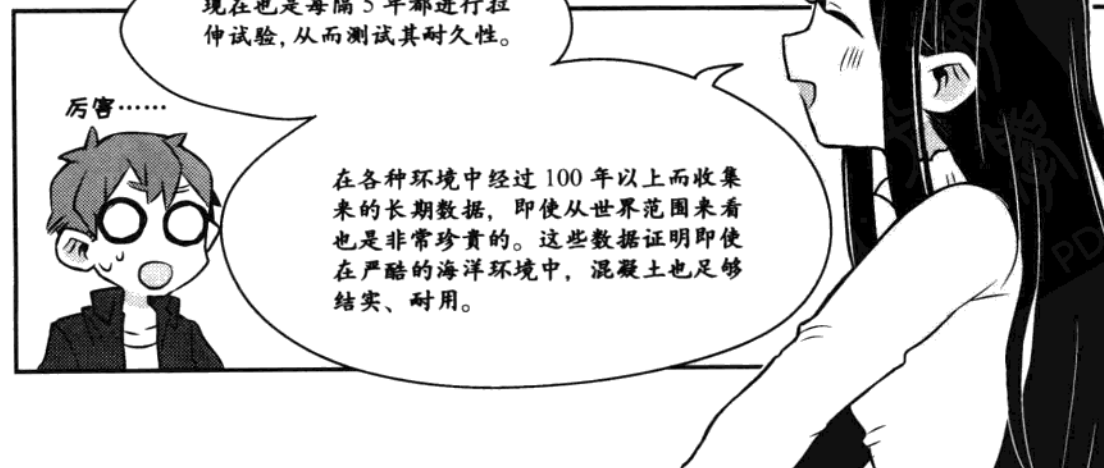


是的。它在完成了日本首个混凝土制造的较长的防波堤的同时，



为了用事实证明水泥系列材料的长期耐久性，建设了约6万个“砂浆试块”（试样）的试体。

6万是个惊人的数字啊!!



现在也是每隔5年都进行拉伸试验，从而测试其耐久性。

厉害……

在各种环境中经过100年以上而收集来的长期数据，即使从世界范围来看也是非常珍贵的。这些数据证明即使在严酷的海洋环境中，混凝土也足够结实、耐用。

④ 混凝土的长期耐久性





因此，在最新的研究中，人们尝试通过利用数学模型的数值分析与加速试验来预测几万年后水泥和混凝土的状态。



预测

的确无法花费几万年进行实验啊……



虽然这样，我认为对经过几千年时间的混凝土本身进行详细分析与学习，也是证明长期耐久性的重要方法。

嗯嗯

正所谓温故而知新嘛。

新学网
PDG



反过来说，
只有混凝土才会那样
长期支撑着人们的生
活啊！



是啊！



我希望寄托我情怀
的混凝土能够永留
世间！！





怎么会，哪里的话啊！

我还从你那里学到了
很多东西呢。



太好了！

砂原先生是第一个这样与我一起交流的人，所以我很高兴！



我，我毕业后也要
成为优秀的建筑师。

哇，
我支持你！

噢

我发誓为了能够与梓瑠小姐并肩工作，要认真学习混凝土的知识。

补充说明

● 古代混凝土

正如漫画部分介绍的，20世纪80年代在中国甘肃省大地湾发现的遗迹是了解古代混凝土的重要线索。从5000年前的住宅遗迹中，人们明确了解到当时的地板已使用了类似于混凝土的材料。在遗迹中也发现了可烧制水泥的窑。混凝土中的水泥可能是由以碳酸钙与黏土为主成分的料疆石制成的，据此，浅贺喜与志博士等尝试使用料疆石为原料再现了古代混凝土^[1]。将大地湾附近采集的料疆石的原石，用与5000年前相同条件的800~1000℃烧制8h而形成水泥，通过对其化学成分进行仔细分析，从中了解到它含有波特兰水泥的主成分硅酸二钙（ C_2S ）。并且，使用再现的古代混凝土进行强度试验的结果显示，随着时间流逝，混凝土的压缩强度缓慢地增加，这明显具有类似于含有很多硅酸盐的低热波特兰水泥的特征（关于低热波特兰水泥以及硅酸盐会在第3章详细说明）。

索马火山 (Somma Vesuviana) 遗迹
古代罗马混凝土 (1500 ~ 2000 年前)

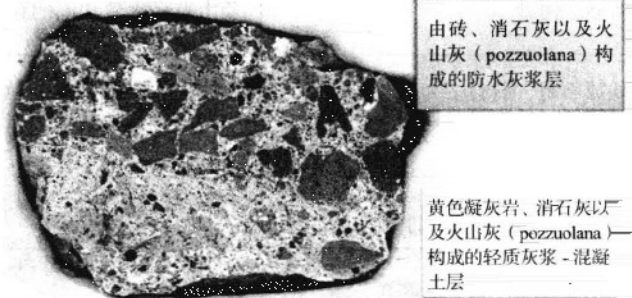


图2.1 从索马火山遗迹中发掘的古代罗马混凝土^[3]
(由东京工业大学坂井悦郎教授提供)

此外，正式作为建筑材料而开始使用混凝土的正是古代罗马人。古代罗马帝国将社会基础设施（infrastructure）的充实作为“人类能像人一样的生活所必须开展的大事业”^[2]，建造了街道、桥梁、港口、神殿、礼堂、广场、航路等各种各样的结构物，它支撑了丰富的文明生活，即使在现代的我们来看也是令人钦佩的。同时，据说直到罗马帝国衰败为止，这些社会基础设施都在持续地进行着维护。正如“罗马非一朝一夕建成”、“条条大路通罗马”这些谚语所表现的。支撑古代罗马文明的正是他们发明的混凝土材料（古代罗马混凝土，图 2.1），由此建成的很多建筑群遗迹遍布整个欧洲。

古代罗马混凝土与现代混凝土的区别是怎样的呢？日本土木学会混凝土委员会整理的报告书^[3]比较了两种混凝土的特征（表 2.1）。古代罗马混凝土使用的水泥以及混合材料比现代材料的水合反应慢。也就是说，古代罗马混凝土特征在于主要利用火山灰反应，这点与现代混凝土不同。所谓火山灰反应是指二氧化硅（ SiO_2 ）、氧化铝（ Al_2O_3 ）与氢氧化钙的反应。这种反应的特征在于反应很缓慢但却是持续的，因此混凝土通过火山灰反应来增加长期强度与长期耐久性。现代混凝土有时也使用从煤炭火力发电厂排出的烟灰为混合材料，烟灰与古代罗马混凝土一样，也是通过火山灰反应来固化的材料。

表 2.1 古代罗马与现代的材料比较(引用参考文献[3];有部分修改)

	古代罗马	现代
水泥	以烧制石灰石而生成的生石灰进行水合反应后的消石灰为主要原料。 利用消石灰与骨料之间产生的缓慢火山灰反应与消石灰的碳酸化固化	以硅酸三钙（ C_3S ）与硅酸二钙（ C_2S ）为主要成分。 利用硅酸钙（ C_3S 、 C_2S ）的水合反应，水泥本身固化
细骨料	山砂、海砂、河砂	砂、碎砂、人工轻质骨料、矿渣骨料以及由粒径大致相同的粒子形成的材料。大体为 5mm 以下的材料
粗骨料	使用砖块或石材。石材多为凝灰岩性质的材料。而且规定最低为可手握大小以上的石材，也使用直径超过 10cm 的大型骨料	大体以 5mm 以上粒径的材料为主要组成的骨料。在 JIS 标准中对 20mm、25mm、40mm 的材料制定了基准
混合材	· 火山灰 用于硬性需要高耐久性与水下施工等的情况	根据目的利用各种高炉熔渣微粉末、烟灰、二氧化硅烟雾等
混合剂	· 油 在需要持续的情况下利用延迟剂	根据目的使用减水剂、分散剂、延迟剂、增黏剂等

火山灰反应的词源为古代罗马混凝土的混合材料所使用的火山灰。火山灰是那不勒斯近郊的波佐利出产的优质火山灰，通过混入这种火山灰，可制造出强度高、不透水性强的混凝土。由此了解到火山灰含有大量二氧化硅，它是火山灰的主要成分。

● 混凝土中混合材料的使用

前面提到了有效利用火山灰反应的火山灰或烟灰的话题，在这里对混合材料也稍微讲解一下。所谓混合材料是指以改善新鲜混凝土的施工性能并降低水合热（见第3章）及提高混凝土固化强度与耐久性，以及最近以降低环境负荷为目标而混合在混凝土中的粉末或药剂。使用量多且在混凝土的配合（调和）中可计算其体积的粉末等称为“混合材”，使用量小的减水剂等药剂称为“混合剂”。现在广泛使用的代表性混合材包括：将高炉制造生铁时产生的副产品——高炉熔渣速冻并将其微粉末化而形成的“高炉熔渣微粉末”，火力发电厂收集煤炭灰进行再利用的“烟灰”，电子炉精炼硅铁等过程中产生的超微粒子“硅石烟雾”以及使正在固化的混凝土具有膨胀性的“膨胀材料”等。这些混合材可替代一部分水泥。高炉熔渣微粉末或烟灰等本来是生产铁或进行火力发电时所产生的副产品，若发挥结合型材料的特征并得以灵活运用，可减少在材龄初期产生的水合热或提高混凝土的耐久性。因此，即使本来是废弃物，也可以是有利于环境且提高混凝土性能的优质“资源”。

综上所述，烟灰或硅石烟雾通过火山灰反应进行固化。原因在于它们是与波特兰水泥的水合反应生成的氢氧化钙发生反应而进行固化的。而高炉熔渣微粉末具有潜在的水硬性，通过碱等刺激剂而发生反应，同样通过与水泥形成的氢氧化钙反应生成水合物而固化。与波特兰水泥的反应相比，烟灰的火山灰反应和基于潜在水硬性的高炉熔渣微粉末的水合反应，速度相对比较缓慢，因此为了发挥材料本来的性能，需要好好地进行养护。

● 日本混凝土的黎明——小樽港筑港与百年耐久性试验^[4]

相对于欧洲的“石文化”而言，日本是“木文化”，日本建筑物传统上以木结构为中心。混凝土使用扩大是在明治以后引进近代波特兰水泥的技术之后。为了追赶欧美发达国家，以富国强兵、振兴产业为目标，日本快速充实了铁路与港湾等社会基础设施。以广井勇博士为总指挥的小樽港筑港是国家项目之一。广井博士在札幌农学院与内村鑑三和新渡户稻造同期学习，之后历任札幌农学院教授、北海道厅技师、东京大学教授，是被称为“港湾工程之父”的伟大工程师。

最早开始的小樽港北防波堤的工程动工于1897年。在此之前建设的横滨港和佐世保军港中的混凝土预制板出现了缺陷（裂缝），而且小樽港是日本首个面向远洋的防波

堤的建设项目，因此广井博士进行了细致的调查、计划、设计、施工。通过重型设备将混凝土预制板倾斜装载而建造的防波堤的总长达到 1289m，最大水深约 15m，工期 10 年，是日本一个不朽的大事业。与此同时，为了证实水泥系材料的长期耐久性，广井博士制造了约 6 万个试体（砂浆试块）（图 2.2）并定期进行实证试验，从而实现了源于预期想象力的伟大项目（图 2.3）。

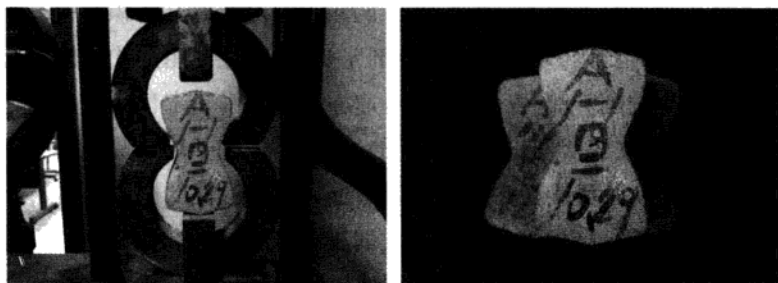


图2.2 砂浆试块的试体（笔者摄影）

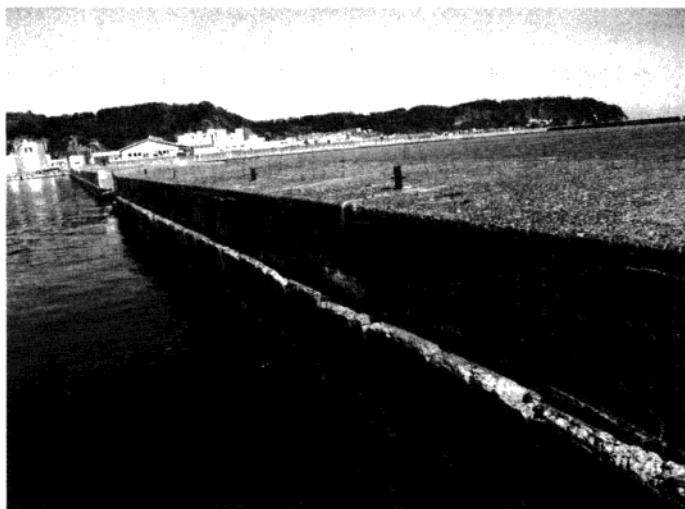


图2.3 小樽港北防波堤（笔者摄影）

砂浆试块为葫芦形状，可通过抓住其凹下的部分进行抗张力试验（拉伸试验）（图 2.4）。在制造砂浆试块之际，使用 13 种水泥、10 种细骨料、15 种火山灰等，分别将其保存在大气、淡水、海水中。使用火山灰的理由在于确保被海水冲刷的混凝土的耐久性，而且，它可替代当时的高级品水泥而削减成本。其后的长期耐久性试验，明确了使用火山灰的砂浆试块拉伸强度（最大抗张力）较大，并证实了有效利用火山灰可使混凝土抵抗严酷海洋环境的能力大大增强。这也可以说证实了广井博士的卓越见识吧。

混凝土的长期耐久性

我们在这章通过大地湾发掘的古代中国遗址、欧洲随处可见的古代罗马的社会基础设施以及日本在明治时代进行的 100 年耐久试验等讲解了有关混凝土的内容。了解古代人使用什么样的材料来建造建筑物并过着怎样的生活，这些事实本身却让人很感兴趣，通过详细讲解古代混凝土会给我们思考将来的生活提供很宝贵的信息。

混凝土建筑物在自然灾害中保护人类且支撑着我们的生活，它是实现现代快捷便利生活的社会基础设施。社会基础设施在各种各样的环境中，可持续使用短则几十年，长则几百年。因此，制造出结实且持久的混凝土可让我们的子孙乃至后代继承优质的社会基础设施，抵抗如小樽港那样的严酷自然环境，现在仍稳固的混凝土中隐藏着实现长期耐久性的重要启示。希望将这些见解应用到最新的研究和设计中。

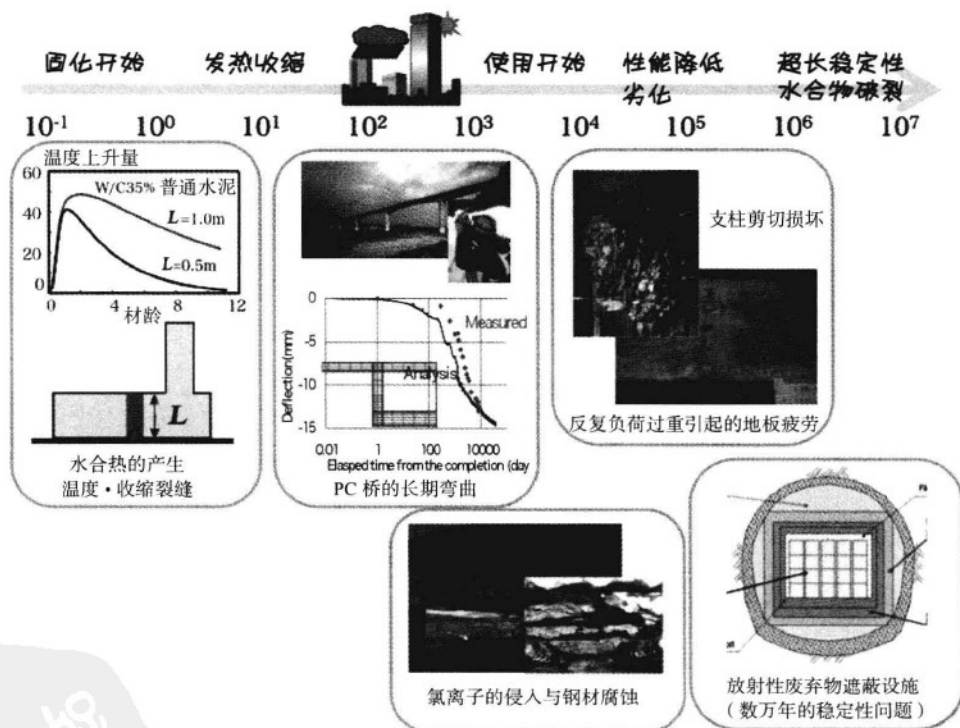


图 2.4 预测混凝土结构性能的分析模型的举例⁵⁾

最近为了对从核电站等排出的放射性废弃物进行地层处理，开始探讨计划利用水泥系材料建设具有屏蔽功能的设施。混凝土作为液态水或水合物，内部含有很多水分，本来对放射线的遮蔽能力就高，但必须在数千年至数万年的时间内将放射性物质与人类隔离，因此它需要具有超长的耐久性。在数万年的时间内，钙从称为 C-S-H 水合物的水泥固化体组织中慢慢消失，类似于人类的骨质疏松症，这种现象在数百年的时间内不会成为问题，但仍需要在设计时考虑进去。虽然，为了预测数万年后的混凝土状态，人们进行着理论性的模型研究与基于此的分析模拟^[1]，以及基于加速试验的数据验证等。这种研究的重要性是毋庸置疑的，但实际经历了数千年时间的古代中国水泥或罗马发掘的混凝土是实证长期耐久性的珍贵资料。通过多方面分析，这些混凝土结合最新的理论或模型，实现混凝土的超长耐久性可以说是今后的重要研究课题。

参考文献：

- [1] 浅贺喜与志、大門正機、幸最雄、古澤端彦：5000年前のセメントの再現について、セメント・コンクリート論文集 No. 53, pp. 205-212, 1999
- [2] 塩野七生：すべての道はローマに通ず ローマ人の物語X、新潮社、2001
- [3] 古代ローマコンクリート ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析、コンクリートライブラリー 131、土木学会、2009
- [4] 長瀬重義監修：コンクリートの長期耐久性 小樽港百年耐久性試験に学ぶ、技報堂出版、1995
- [5] Koichi MAEKAWA, Tetsuya ISHIDA, Toshiharu KISHI: Multi-scale modeling of structural concrete, Taylor and Francis, 2009

第3章

新鲜混凝土的性质与水合反应

1 新鲜混凝土的性质

2 水合反应的原理

3 补充说明

- 新鲜混凝土的性质与混凝土的施工
- 混凝土的坍落度
- 混凝土的施工性能
- 自充填混凝土
- 高性能 AE 减水剂
- 水泥的水合反应
- 水合反应的温度依赖性

那天，我与梓瑠小姐参观学习了首都高速中央环形品川线的建设现场。

啊！

这好像是在建设秘密基地一样啊！

呵呵呵！

进到里面，我的心扑通扑通地跳呢！

咚咚咚咚咚咚咚咚

这很深呢……

这个工地的气氛，实在是难以形容啊。



是的。

它像立体迷宫呢。

隧道是由工厂制造的称为“混凝土组件”的部件装配而成的。

隧道本身使用混凝土组件，但路面部分是由混凝土浇注而成的。

噢，是这样啊。

瞧，那里有运送新鲜混凝土的“搅拌车”。





全国各地都有新混凝土工厂，也是因为考虑到可以尽快运送到建筑工地吧。

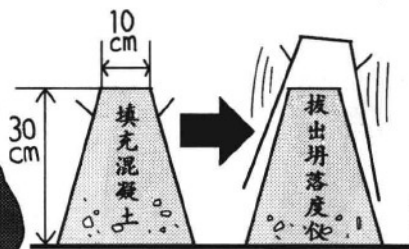
运送新鲜混凝土到工地后要怎么做呢？

是的！

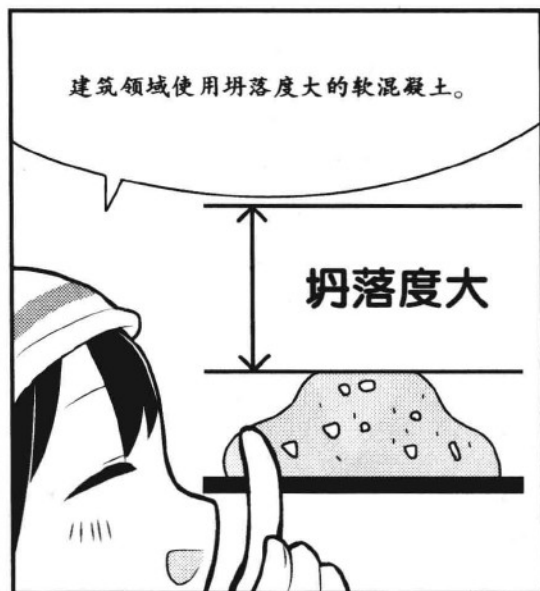
首先，要进行作为“收货检查”的“坍落度试验”^{*}。


^{*} 坍落度试验之外，也要进行强度或空气含量的测定，有时也要进行单位水量的试验。

所谓坍落度试验是指，在称为“坍落度仪”的筒内装满混凝土，正上方拔出坍落度仪后，测量混凝土堆崩塌的高度。




哦！







土木结构物多为大型且使用期限长的建筑，所以考虑到强度和耐久性曾使用过硬混凝土。



“使用过”是说现在不一样吗？



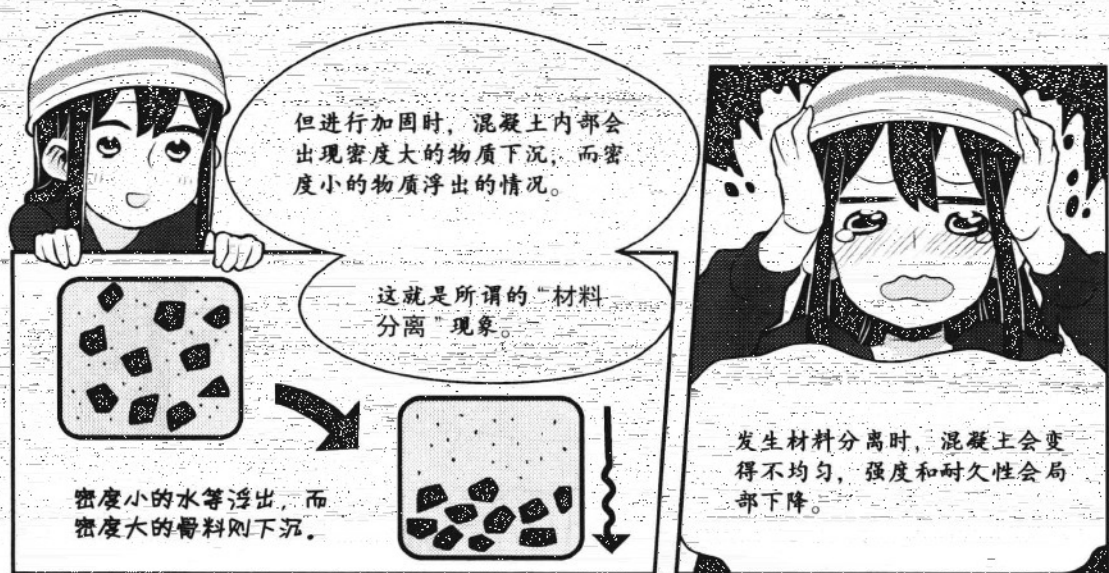
最近，为了提高抗震性能，人们开始在其中配置很多钢筋，即使是具有较大断面的土木结构物，也出现了不易将以前的硬混凝土填充到模板的情况。




还有各种各样的情况呢！

“收货检查”结束后才浇注混凝土吧？

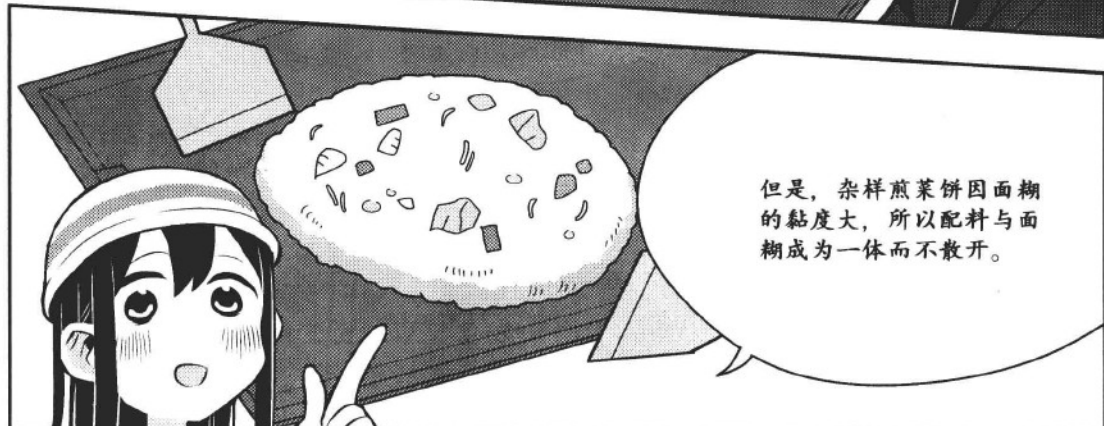




※ 文字烧：日本关东地区特色食品，由面糊和各种食材混合后浇在烧热的铁板上烤制而成。——译者注



文字烧因面糊中小麦粉含量很少，所以面糊与圆白菜等配料容易分离。



但是，杂样煎菜饼因面糊的黏度大，所以配料与面糊成为一体而不散开。



啊，原来如此！

混凝土的情况也是一样的，如果黏度变大，骨料等则不易下沉，这样可以防止材料分离，对吗？



是的。

但是，与文字烧相比，正如杂样煎菜饼很难在铁板上摊开一样，混凝土也很难流动。

是啊！

咕噜咕噜

肚子饿了呢



流动性

混凝土容易流动，专业上称为“流动性”，如果流动性下降则浇注作业会变得困难。

作业的简便性也必须考虑呢。

最近，使用了名为“高性能AE减水剂”，通过分散水泥的粒子，即使只有少量水也可以使混凝土具有流动性。

哦，如果那样，无论是材料分离的问题还是流动性的问题，看起来都可以解决了吧！

是的！

从而开发出了具有高流动性，同时不会发生材料分离的“自填充混凝土”。

这种混凝土不需要加固，只依靠其自身重力就可以流动到模板的各个角落，它是划时代的材料。

自填充混凝土

② 水合反应的原理

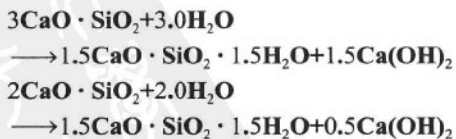


通过之前所说的水合反应，浇灌的混凝土会凝固。

混凝土不是因为干燥而凝固的啊。

水与水泥互相接触就会发生称为“水合反应”的化学反应，从而结合起来。具体来说主要是钙硅酸盐与水反应而生成名为“C-S-H凝胶”的水合生成物和氢氧化钙。

与水反应就是说需要的不是干燥条件，而是水分吗？





混凝土没有马上凝固是因为没有马上反应的缘故吗？

是的！

水与水泥一混合，钙离子从水泥中溶解出来而做好反应的准备。

这个时期称为“诱导期”，在诱导期的几个小时内混凝土不会凝固。

诱导期

在诱导期内可进行作业吧。

经过几个小时后，反应变得活跃，放出水合热，同时凝固下去。

顺便说一下，因水泥所含化学物质的比例不同，反应速率也有差异。

是吗？

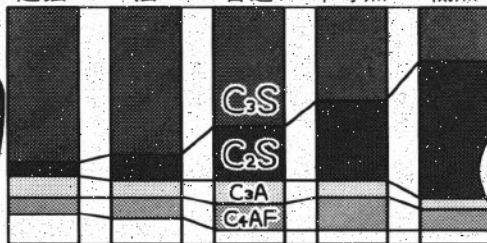


※ 在化学领域中提到水泥时各字母含义如下 C : CaO, S:SiO₂, A:Al₂O₃, F:Fe₂O₃。



相对于硅酸三钙，硅酸二钙的反应比较缓慢，若含有很多硅酸二钙，则可抑制水合热。

超强 强 普通 中等热 低热



通过改变矿物构成的比例就可制成具有不同特征的水泥吧。

呼呼呼呼呼呼

哇哇哇哇哇哇 那边是隧道的前端！

正是在进行挖掘的时候呀！

听，好像有什么机械的声音呢！

我们居然能看到盾形机械操作的场景，真是幸运啊！！



补充说明

● 新鲜混凝土的性质与混凝土的施工

混凝土在刚混合搅拌水、水泥以及骨料等之后，还是泥状，可自由变形。这种状态的混凝土称为新鲜混凝土。新鲜混凝土的性质会根据混凝土各材料的配合、使用材料的种类、外部气温等不同而时时刻刻发生变化。为了建造结实且耐久的美好结构物，恰当地准确地施工混凝土是关键。因此，在扎实把握新鲜混凝土性质的基础上，进行适当的材料选择与配合（调和）设计是十分重要的，而制定恰当的施工计划也是必不可缺的。

混凝土的施工顺序为混凝土的制造、搬运、浇灌、加固、完工和养护。混凝土的原材料在被搅拌后几个小时内，还是保持柔软状态而不凝固。在街上见到的搅拌车中装有新鲜混凝土，但如果陷入交通堵塞等而耽误运送则是严重的事情。因为搅拌后如果时间过得太久，混凝土的品质会发生变化。全国各地都有新生混凝土工厂，也是为了在规定的时间内迅速将其送达各地的建设工地。在混凝土标准说明书（施工篇）^[1]中，从搅拌到浇注为止的允许时间定为：在 25℃ 以下时为 2 小时以内，在 25℃ 以上则为 1.5 小时以内。

将混凝土浇注到模板的作业称为浇注。在浇注混凝土之际，为了得到均质混凝土，需要将浇注面几乎保持水平，同时需要振动器进行同步的振动加固。混凝土浇注的一层高度一般为 40~50cm，需要连续性地浇注。浇注某层后，暂时放置片刻后再开始浇注混凝土，则会形成称为冷连接的不连续面（图 3.1）。最先浇注的那层固化后，因受到上一层冲击，所以混凝土的一体性受损。为了防止冷连接的形成，在说明书中规定了称为“允许重复浇注的时间间隔”，表示在下层混凝土的浇注 - 加固完成后，加上放置直到上层混凝土的浇注为止的时间，定为外部气温在 25℃ 以下时为 2.5 小时，而超过 25℃ 时则为 2 小时。

为了使混凝土遍布模板的各个角落而进行的作业则是加固。充分进行适当的加固在确保混凝土的品质方面是极其重要的。一般的情况是在浇注后的混凝土中插入棒状的内部振动器来进行振动加固，也有在模板上安装称为模板振动器来进行加固的情况。加固作业不充分是产生名为蜂窝板的缺陷的原因（图 3.2）。

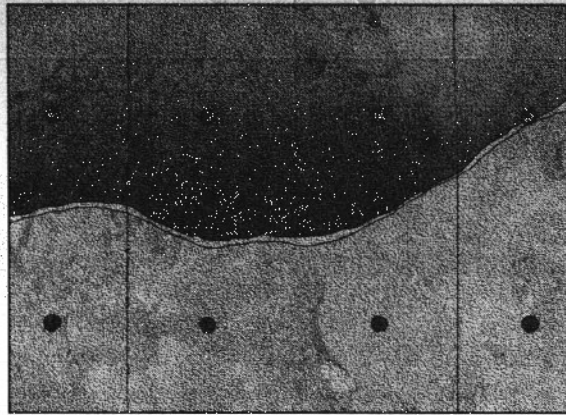


图3.1 冷连接的举例

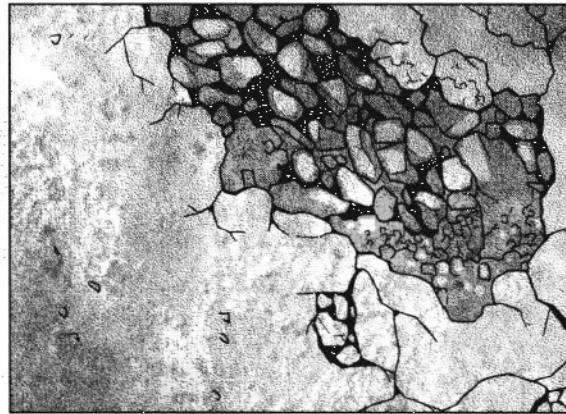


图3.2 蜂窝板的举例

通过水合反应来适当推进混凝土成长时间的工序就是养护。为了持续进行水合反应且得到所期望的强度与耐久性，混凝土保持湿润状态极其重要。为了防止干燥，应避免混凝土受到日光直射或风吹，并用浸湿的垫子或布等来覆盖或者洒水、蓄水，则可保证混凝土在规定的时间内保持湿润状态。

● 混凝土的坍落度

混凝土的坍落度是表示混凝土对变形或者流动的抵抗性，称为一致性。从前，在土木领域一般使用坍落度为 8cm 的混凝土，而建筑领域则一般使用坍落度为 12cm 的混凝土。使用坍落度大的混凝土，因流动性的增加，混凝土的浇注则变得容易，但坍落度大则一般意味着单位水量的增加，考虑到耐久性，最好还是使用坍落度小的混凝土。因此，平衡施工性、耐久性、经济性的标准混凝土应符合坍落度为 8cm 或 12cm 的要求。

但是，近年来围绕混凝土结构物的环境发生了各种各样的变化。例如，根据 1995 年发生于兵库县南部的阪神 - 淡路大地震的受灾情况，要求混凝土结构物提高抗震性能。与之前的混凝土相比，开始使用大量钢材使结构物具有韧性。图 3.3 表示了建设中的某结构物的梁 - 柱接合部分，可以看到装配着非常密实的钢筋。这样的地方如果使用以前的混凝土，施工会很困难。结合混凝土施工的快速化来考虑，浇注坍落度为 8cm 的凝滞混凝土变得困难。



图3.3 柱-梁接合部分的钢筋配置状态的举例

另外，材料供给状况也发生了变化，就是很难获取到天然骨料。为了得到同样 8cm 的坍落度，也有在骨料状况不好的地域不得不增加单位水量的情况，这个数据说明了为了得到同一强度以及坍落度，混凝土的单位水量也会因地域而不同。即使坍落度相同的混凝土，根据地域不同，单位水量也不同，因此，干燥收缩量、中性化速度系数以及抗盐分渗透性也发生变化。

在这种状况下，由于高性能 AE 减水剂等的开发，即使不增加影响到耐久性的单位水量，也可制造出流动性较好（坍落度增加）的混凝土。使用高性能 AE 减水剂的新技术，根据浇灌构件的尺寸或钢筋配置的状态以及所使用骨料和水泥等材料的种类，可制造出适当的混凝土。可以说正是由于新技术的开发使混凝土混合材料的选择面得以扩展，从而使能够平衡施工性、耐久性、力学特性、经济性等各种性能的混凝土的制造得以实现。

要求新鲜混凝土具备的重要性能中有“施工性能”。所谓施工性能，是表示混凝土施工的简便性，是与搅拌、运送、浇注、加固、完工等所有过程相关联的特性。在土木学会混凝土标准说明书的施工篇^[1]中，施工性能可表现为充填性、泵压性、凝固特性。

所谓充填性是表示混凝土在振动加固后没有引起材料分离，通过钢筋之间密实地充填到各个角落的性能。充填性是由振动加固后的“流动性”与“抗材料分离性”决定的。因此在混凝土标准说明书中，流动性与抗材料分离性的相互平衡决定着充填性的好坏（图 3.4）。

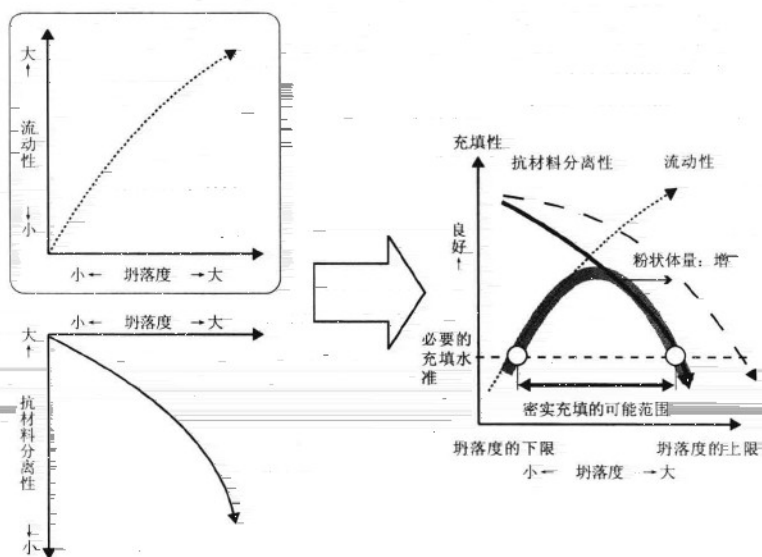


图3.4 达到密实充填的混凝土的理论依据

混凝土的流动性一般根据坍落度的大小来判断。坍落度大则意味着它是柔软且具有良好的流动性的混凝土。同时坍落度小则表示它是坚硬而缺乏流动性的混凝土。另外，通过增加单位水量来加大坍落度则意味着透气性增加或水泥浆的黏性降低，混凝土则容易发生材料分离。因此，在考虑混凝土的“充填性”方面，可以说增加坍落度对流动性是有利的，对抗材料分离性则是不利的。也就是如图 3.4 所示，为了满足必要的填充量，需要确定坍落度的范围。

钢筋配置密实地交叉在一起，或者结构物的断面呈复杂的形状，这对施工要求是非常严格的，需要提高混凝土的充填水准。这样的情况则需要扩大如图 3.4 中所示的密实充填的可能范围。那怎样做才好呢？如漫画部分提到的那样，将食谱从材料分离大的文字烧改变为材料分离少且保持一体性的杂样煎菜饼就可以了。也就是说，增加水泥量，则抗材料分离性会增加。因为水泥浆的黏性增加，可尽量降低材料分离的程度。但是，增加水泥量，会使水合热增加且温度裂缝的风险增高等令人忧虑的问题。因此，需要使用发热量少的烟灰、高炉熔渣微粉末或者石灰石微粉末等几乎不反应的“粉状体”。这里我们来对“单位水泥量”、“单位结合材量”、“单位粉状体量”的用法进行补充说明。所谓单位水泥量是配合中含有的波特兰水泥或混合水泥的量，所谓单位结合材量是添加到水泥量中的烟灰或高炉熔渣微粉末等有助于水合反应的材料的量，所谓单位粉状体量是结合材中包含的非活性材料（无助于水合反应）石灰石微粉末等的量。

● 自充填混凝土

1988 年，在东京大学工学系土木工程专业（现在是社会基础专业）的混凝土研究室，由冈村甫博士、前川宏一博士、小泽一雅博士开发了颠覆传统概念的全新混凝土“自充填混凝土”^[2]。这种混凝土是兼具高流动性与抗材料分离性的划时代的材料，不需要加固只通过自身重力就可将混凝土浇灌到模板的各个角落。

自充填混凝土被开发出来的契机是 20 世纪 80 年代成为社会问题的混凝土建筑物的过早老化问题。很多建筑建成后不到 20 年就明显劣化而需要维修，由此对混凝土结构物的耐久性的研究变得活跃起来。因施工不良是引起混凝土结构物劣化的一个重要原因，冈村博士由此着手开发“无需加固混凝土”（自充填混凝土），从而避免因为施工的好坏特别是影响较大的加固作业等人为因素而左右混凝土的品质。

综上所述，混凝土为了具有较高的充填性，不仅是高流动性，同时还需要具备较强的抗材料分离性。这是为了防止粗骨料粒子在混凝土流动中堵塞在钢筋等障碍物附近。为使混凝土具有高流动性与抗材料分离性，在自充填混凝土的配合中，设定了比普通混凝土多的粉状体且少的骨料量（图 3.5）。为提高水泥浆的黏性而设定很多粉状体量，同时为减少骨料相互冲突或接触的频率，骨料量要比普通混凝土少。随着粉状体的增加，高性能 AE-减水剂的量也增加，也有为增加黏性而添加增黏剂的情况。

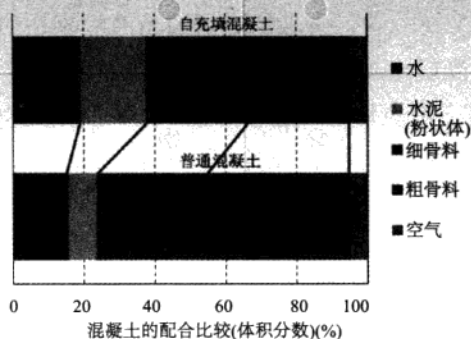


图3.5 混凝土的配合比较

● 高性能 AE 减水剂

为制造自充填混凝土代表的具有高流动性的混凝土，使用高性能 AE 减水剂是必不可少的。高性能 AE 减水剂根据其主要成分可分为多种，这里我们介绍一下氨基磺酸系与聚羧酸系两种。另外，高性能 AE 减水剂的前身萘系高性能减水剂是由服部健一博士在 1962 年发明的。

高性能 AE 减水剂的作用在于分散水泥的粒子。在水与水泥搅拌的状态中，通过水泥粒子的凝集作用而包围水，有助于流动性的水量明显减少（图 3.6）。在这样的情况下，如果水泥分散，通过水泥粒子凝集而被包围的水得以释放，所以即使在单位水量少时也可能具有高流动性。

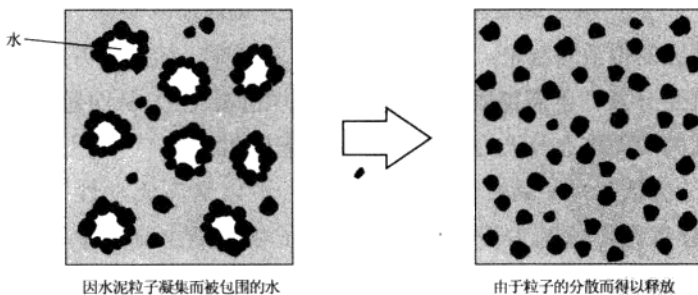


图3.6 高性能AE减水剂的作用

分散水泥的原理一般通过静电排斥力与立体排斥效应来说明（图 3.7）。水泥粒子带有正电荷，而带有负电荷的减水剂吸附在水泥粒子表面，则表面会出现带电层而使粒子互相排斥，由此水泥得以分散。氨基磺酸系的高性能 AE 减水剂具有分散效果

因静电排斥力而产生。另外，聚羧酸系则产生基于减水剂本身的化学结构。相对于氨基磺酸系因电力作用而分散，聚羧酸系如锁一样的化学结构通过物理的立体排斥作用，而达到分散水泥粒子的效果。

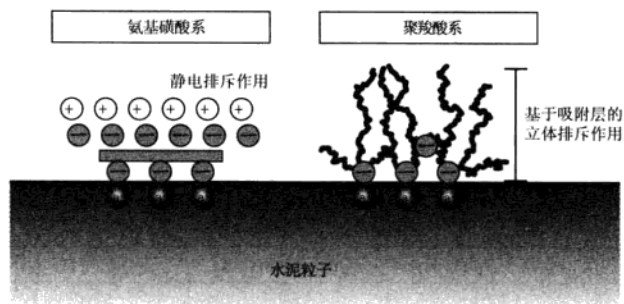


图3.7 高性能AE减水剂的分散原理

● 水泥的水合反应

水泥开始与水接触，则出现伴随着发热的反应。通过这种反应生成的物质是含水的水合物，因此水泥与水的反应称为水合反应。水合反应程度可通过测量发热量来把握。图 3.8 是发热速度的变化示意图。水泥与水刚接触时，在非常短的时间内会出现急剧的发热反应。之后，称为“诱导期”的反应产生于暂时停滞期。因为诱导期持续几个小时，混凝土没有马上凝固，因此能确保其作业性。诱导期之后，开始进入反应活跃且发热速度急速上升的加速期，反应在迎来顶峰后，逐渐开始减速。

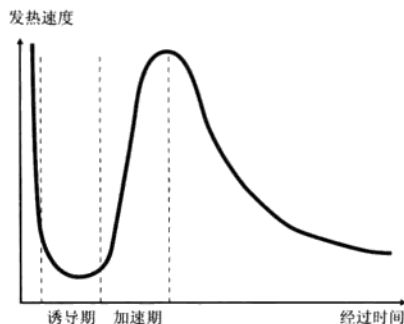


图3.8 波特兰水泥的水合发热

构成波特兰水泥的化学物质称为矿物构成，包括名为硅酸三钙（ C_3S ）、硅酸二钙（ C_2S ）、铝酸钙（ C_3A ）、铁酸钙（ C_4AF ）等4种物质。在水泥化学领域中，使用C、S、A、F分别代表CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 。整理各自的特征则如表3.1所示。波特兰水泥的主角是硅酸三钙和硅酸二钙，占整体的80%左右。抑制水合热的低热波特兰水泥含有大量水合反应缓慢且发热量少的硅酸二钙。同时，铝酸钙与铁酸钙是称为间隙物质的矿物。用偏光显微镜观察水泥熔块，它们填满了硅酸三钙与硅酸二钙之间的空隙，所以称为间隙物质。水泥与水接触后，瞬间释放大量的热，同时急速反应的是铝酸钙成分。人们为了控制这种急剧的反应而在波特兰水泥中添加石膏。

表3.1 矿物的特征

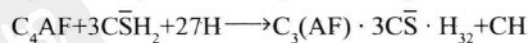
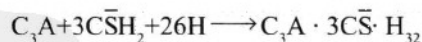
	硅酸三钙 (C_3S)	硅酸二钙 (C_2S)	铝酸钙 (C_3A)	铁酸钙 (C_4AF)
发热量 (kcal/g)	120	62	207	100
水合速度	快	慢	非常快	快
普通波特兰水泥 (%)	50~60	15~25	不足 10	不足 10
低热波特兰水泥 (%)	15~25	40~60	不足 5	不足 5

硅酸三钙与硅酸二钙的水合反应可由以下的化学反应式来表现。



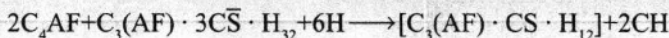
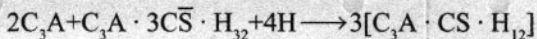
其中，CH为氢氧化钙 $[Ca(OH)_2]$ 。也就是说如果硅酸三钙与硅酸二钙发生反应，则生成钙硅酸盐水合物（C-S-H）与氢氧化钙。氢氧化钙是结晶状物质，而钙硅酸盐水合物因生成条件的不同，CaO、 SiO_2 、 H_2O 各自的构成比例发生变化，是缺乏结晶性的物质。因为钙硅酸盐水合物不具有特定的化学构成，一般称为“C-S-H”或“C-S-H凝胶”。

接着，铝酸钙与铁酸钙会发生以下的反应。水泥中添加的二水石膏与水反应，会生成名为钙铝矾的针状结晶。



式中， \bar{C} 为 SO_3 。

全部的二水石膏用于反应时，剩余的矿物与钙铝矾反应而转化为名为单硫酸盐的物质。



关于 C-S-H 凝胶或钙铝矾等各自水合物的形态会在第 4 章详细说明。

● 水合反应的温度依赖性

水合反应的速度具有很强的温度依赖性。也就是说，温度上升则水合反应的速度增加。由于水泥的水合放热而温度上升，由此反应加速，导致放热进一步增多，在这样的情形下，水合速度得以加快。在户外温度高的状态下浇注混凝土时，或者建筑物的断面过大而热量容易积存在内部时，水合放热引起的温度裂缝的风险增高。关于温度裂缝会在第 4 章详细说明。

不仅是水泥的水合反应，一般的化学反应速率都是依照“阿伦尼乌斯定律”进行的。首先，化学反应从 A+B 的反应系统移向 AB 的生成系统，必须经过高能量的活性状态（图 3.9）。这时，促使分子处于活性状态（容易反应的状态）而所必需的能量称为活化能。在发生化学反应之际，参与反应的分子会互相冲突。这时，具有活化能以上的运动能量的分子则参与反应。分子的运动能量可由图 3.10 所示的玻尔兹曼分布来表示。如图 3.10 所示，温度上升则具有高能量的分子会呈指数性增加，因此反应速率会伴随温度上升而增快。由此，阿伦尼乌斯公式表示了反应速率常数 k 与热力学温度 T 之间有如下关系。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

式中， A 为常数（频率因素）； E 为活化能； R 为摩尔气体常量； T 为热力学温度。上面的公式换成如下自然对数的形式。

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln A$$

因为这个公式是直线公式，所以在直角坐标系中以横轴为温度 T 的倒数、纵轴为反应速率常数 k 的自然对数来绘图可得到直线关系（图 3.11）。这个图称为阿伦尼乌斯图。同时绘图得到的直线斜率为 $-E/R$ ，由此可求得化学反应中固有的活化能。

硅酸盐水泥不是单一的化学物质，而是多种矿物混合在一起，所以如上公式所示，不能用相同的常数、相同的活性能来单纯表现。但是，通过观察每个矿物的反应且依照阿伦尼乌斯定律将各自反应定型，通过建立模型可一般性地预测水泥的水合放热速度^[3]。

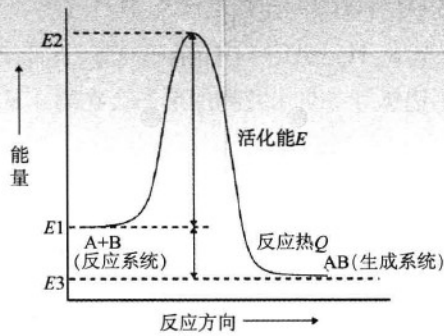


图3.9 化学反应与活化能

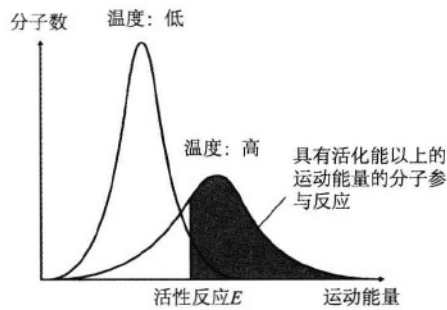


图3.10 分子的运动能量与化学反应

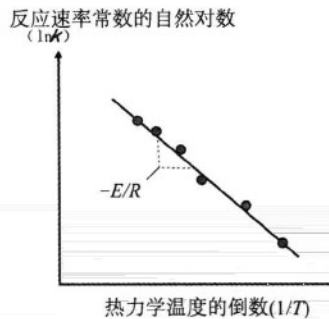


图3.11 阿伦尼乌斯图

参考文献:

- [1] 土木学会コンクリート標準示方書【施工編】2007
- [2] 岡村甫、前川宏一、小沢一雅: ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [3] Koichi Maekawa, Tetsuya ISHIDA, Toshiharu Kishi: Multi-scale modeling of structural concrete, Taylor and Francis, 2009.

第4章 混凝土的成长与 初始缺陷

1 混凝土的成长

2 温度裂缝

3 干燥收缩裂缝

4 减少裂缝的方法

5 补充说明

- 水泥固化体内部的微观结构
- 水合的过程与强度表现
- 水合放热引起的裂缝
- 收缩引起的裂缝



哇，太厉害了
太厉害了，太厉害了!!


真是雄伟啊!

那天，我们参观了神奈川县的宫之濑水坝。

高度为156米，总储水量达
2亿立方米。

它不愧为关东地区最
大的水坝啊!





宫之瀨水坝使用了大量的混凝土，依靠水坝自身重力就可抵抗水压，这就是所谓的“重力式混凝土水坝”之一吧？

是的！

它是最坚固的水坝模式，可抗地震或洪水。

这是适合日本的水坝结构形式呢。



是啊！

在重力式混凝土水坝领域中，日本开发了很多独有的技术。

宫之瀨水坝使用的RCD（roller compacted dam）施工方法是可以降低建设成本且缩短工期的技术，是日本经过多年的努力而取得的技术成果。



RCD
施工方法
Roller
compacted
dam





① 混凝土的成长

像前面讲过的那样，水泥如果与水接触，通过称为“水合反应”的放热反应而形成新的物质。

是吗？

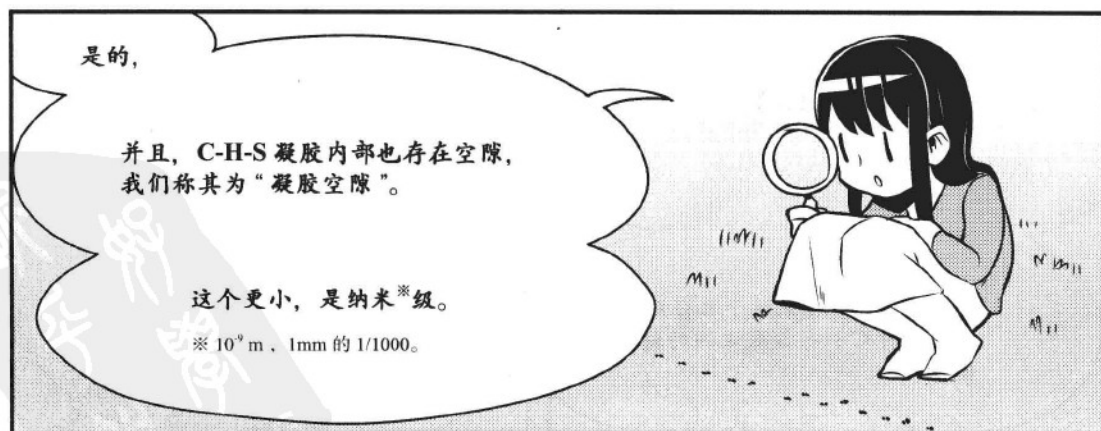
氢氧化钙、钙铝矾、单硫酸盐等结晶状物质与……

被 C-H-S 凝胶围绕的氢氧化钙的结晶，

钙铝矾的结晶

形成称为 C-S-H* 凝胶的含水物质“水合物”。

* 见第 109 页。





真是非常微观的世界的内容啊。

是啊。
但这个微观问题却会影响混凝土的强度呢。

唉!



能否形成强混凝土取决于起连接骨料的浆糊作用的水泥浆的强度。

而水泥浆的强度取决于水合反应形成的 C-H-S 凝胶之间的结合力。



浆糊若强，则骨料牢牢地、紧密地粘在一起而形成强混凝土。

简单来说，若毛细管空隙多，
则黏合力变弱。

原来如此！

因此，减少毛细管空隙是很
重要的。

使劲

在水泥浆中提高水泥的浓度
则能缩短水泥粒子之间的距
离。

具体要怎么做呢？

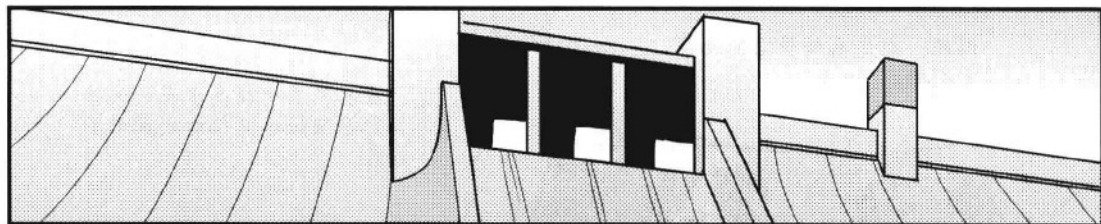
水泥粒子之间的距离变窄，
无用的空间减少，从而可
填满间隙。



通过适当地养护来提供充
分的水分并进行水合反应
是很重要的。



我明白了。



② 温度裂缝

混凝土通过水合反应凝固从而
得以成长，但在使用前或刚使
用的阶段，有时会产生裂缝。

这就是称为“初始缺陷”
的现象。



结构物在使用前产生
裂缝是最糟糕的。

是呀

初始缺陷主要有温度裂缝
与干燥收缩裂缝。

温度裂缝

干燥收
缩裂缝

两者都是因混凝土体积变化
而产生的裂缝，首先我从温
度裂缝开始说起吧。

辛苦你了!



于是浇注后的混凝土构件的温度上升。



而表面却因户外空气而冷却。



因此内部与外表面会出现温度差吧。

是的！



混凝土与其他物质一样，遇热膨胀，遇冷收缩。因表面收缩而内部膨胀，表面附近就会产生张力。混凝土对拉伸没有抵抗力，所以裂缝才会产生。

原来是这样！



③ 干燥收缩裂缝

干燥收缩裂缝是由干燥引起的裂缝，在建筑物等中也是常见的裂缝。

这种裂缝为什么会出现在呢？

如刚才所说的，混凝土有从微米直到纳米级的空隙。

是的！

哇啊

那些空隙间的水由于干燥而消失，则出现水的表面张力和 C-H-S 凝胶的表面张力，混凝土从而收缩。

要点是因为干燥而收缩的吗？



干燥收缩产生裂缝的原理

干燥

由水的毛细管张力或凝胶的表面张力等起作用

收缩应力 $\propto 1 / \text{空隙水量}$

a与b中因收缩量不同而产生裂缝

混凝土若干燥，水分从外部逸出，表面周围的部分会收缩，但中间部分不太会收缩。由于这个差异，表面张力起作用而产生裂缝。

④ 减少裂缝的方法



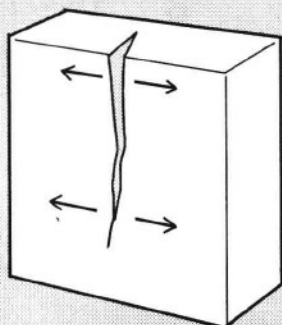


如果在与裂缝垂直交叉的方向配置钢筋，即使发生裂缝也可控制其范围。

就是通过配置钢筋来防止裂缝扩大的意思吧？

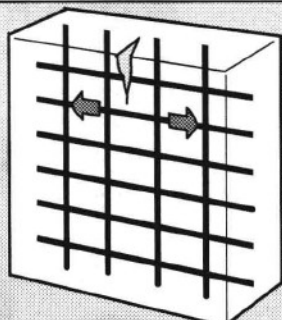


没有配置钢筋



裂缝扩大

配置了钢筋



钢筋抵抗张力，可减小裂缝

这是以产生裂缝为前提来考虑的啊……

钢筋与混凝土互相粘在一起后，钢筋可抵抗张力，因此裂缝范围会减小，但如果只有混凝土，裂缝会随着时间流逝逐渐扩大。



同时，为了控制裂缝的发生场所，
有时也特意建造集中压力的区域。



通过集中裂缝的区域来保
护其他区域吧！



是的！

正是如此！

防止或控制裂缝使混凝土
持久的方法有很多啊。

是的！

与健次先生这样交流，
非常开心，时间一瞬间
就过去了。





补充说明

● 水泥固化体内部的微观结构

在刚被搅拌后，水所占的空间随着水泥的水合反应渐渐被水合物填满。图 4.1 给出了水泥固化体在水合进程中变化的情况。水泥周围生成水合物，水存在的自由空间减少，接下来犹如互相伸出手而紧握在一起那样，水合物相互结合，固化得以发展。水合物中占大部分的是 C-S-H，余下的部分由氢氧化钙、钙铝矾、单硫酸盐等结晶状的物质构成。

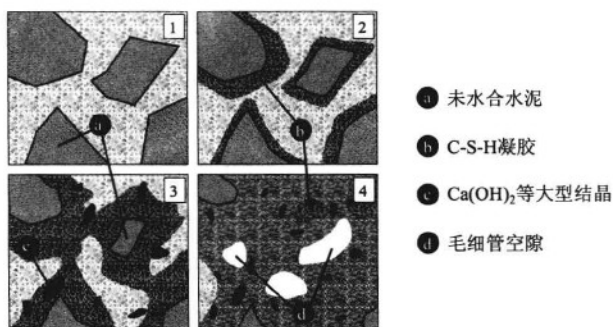


图4.1 水合反应的进程与固化体的形成

水泥与水接触，则矿物从水泥中溶解到水中而发生反应，水合物沉淀下去。与此同时，周边的水向水泥粒子渗透，在水泥粒子的内部也发生反应。在原来水泥粒子的外部生成的水合物称为外部水合物，而与渗透进来的水反应且在水泥内部生成的水合物称为内部水合物（图 4.2）。

水泥外部不存在水合物的粗大空间为毛细管空隙。它原本是有水的地方，在水泥固化体中具有微米级的较大结构。但是，即使说大，微米为 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}$ ，也就是说 1m 的百万分之一，所以是用我们的肉眼无法看到的微观世界的结构。再者，将 C-S-H 内部扩大来看，则展现了更小的世界。在具有层状结构的 C-S-H 水合物内部，有称为凝胶空隙的空间，还有存在于 C-S-H 的层与层之间的称为层间空隙的空间。据说凝胶空隙相当于纳米级的空间（ $1.0 \times 10^{-9} \text{m}$ ，也就是 1m 的 10 亿分之一），是非常微小的空隙。同时层间

空隙间隔着 1 个水分子，是更微小的空间，其范围约为 $0.3\text{nm}(3\text{\AA})$ ，这里存在的水称为层间水。因为层间水存在于层状结构的层与层之间极其微小的空间内，所以层间水从固体表面受到强力，在常温下不会因为干燥而消失。

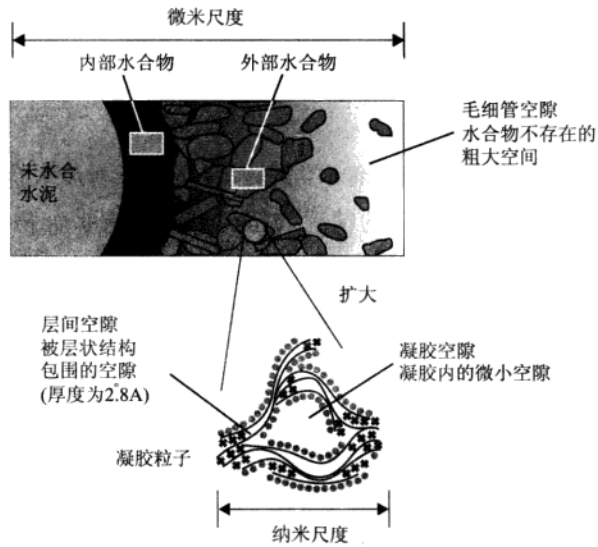


图4.2 水泥固化体结构的模式图

这样，水泥固化体中存在着从纳米到毫米等各种尺寸的空隙 (图 4.3)，包括相当于水分子大小的超微小空间、微米级的毛细管空隙，还有用肉眼也能看到的裂缝等。多孔结构的混凝土性能或性质也与这些空隙结构有着密切的关系。例如，混凝土的强度一般取决于连接骨料的水泥浆的强度。水泥浆的强度则取决于水合反应形成的 C-S-H 凝胶之间的结合力，但如果有毛细管空隙这样比较粗大的空间，就有了容易损坏的弱点。因此，如何用水合物充填自由空间这一点是很重要的。同时为了提高混凝土结构物的耐久性，防止导致劣化的来自外部有害物质的渗透并控制劣化反应速率是关键，因此，减少物质移动的路径和劣化反应场所的粗大空隙 (毛细管空隙) 也是有效的。为了减少毛细管空隙，提高水泥浆中的水泥浓度 (降低水灰比)，缩短水泥粒子的距离，还有适当地进行养护是非常重要的。降低水灰比可缩短水泥粒子的距离，则初期配置中的粗大空隙减少，可有效地填满空隙，此外，通过提供水分来充分推进水合反应，从而通过水合物可得到空隙较少的固化体。

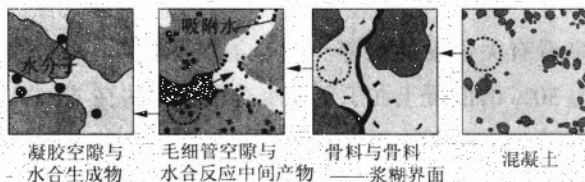
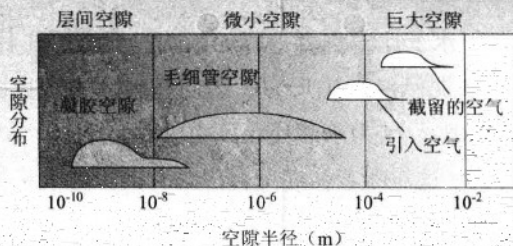


图4.3 混凝土的各层

● 水合的进程与强度表现

近年来，计算机可精确地模拟出各种条件下水泥的水合进程、空隙结构的形成以及强度的增加等^[1]。计算机再现直径为10cm、高度为20cm的圆柱形的混凝土试体，根据模型计算水合进程的例子，如图4.4所示。它是在3种模式的温度（10℃、20℃、30℃）条件下，对水灰比分别为30%与50%的两种混凝土养护的计算。图4.4纵轴的水合度意味着多少百分比的水泥发生了反应。横轴是用对数表示的材龄天数。

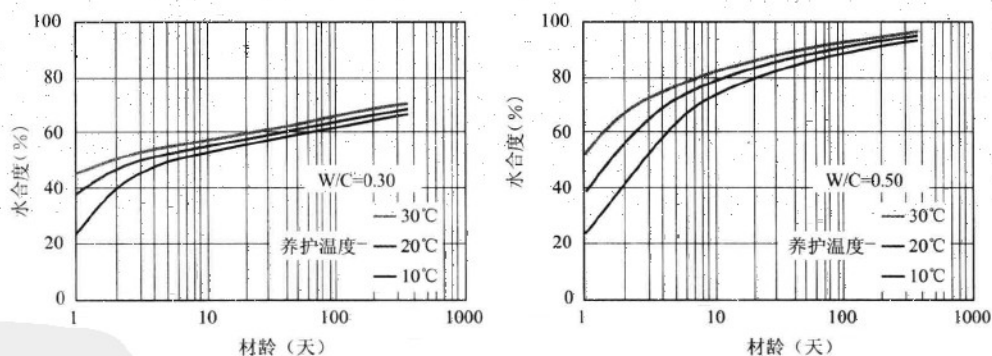


图4.4 基于分析模型的水泥的水合进程

首先，我们来看一下养护中的温度影响（混凝土所放置的环境温度的影响）吧。在水灰比为30%与50%的两个情况下，水合反应的程度根据养护温度不同而不同。如第3章所说明的，水合反应具有很强的温度依赖性，温度在30℃时水合过程快速进行，而在10℃时水合过程则发展得很缓慢。

接下来,我们来看一下水灰比对水合进程的影响。根据图 4.4,水灰比为 50% 的混凝土,1 年后 90% 以上的水泥已经发生反应,与此相对,水灰比为 30% 的混凝土,经过 1 年后水合度还没达到 70%。因为水灰比小,也就是说水泥/水的值大,水合需要的水分不足而水泥的反应停滞。这意味着初期配合中含有的水量无法维持水泥的全部反应。水灰比低的混凝土,因未水合的水泥粒子留在内部,若水分供应等条件齐备,仍保留着继续水合反应的余力。

接下来,我们来看有关强度的内容。同等条件下计算的情况如图 4.5 所示。从水合度来看,水灰比为 30% 的混凝土在 1 年后水合度仍停留在 70% 以下,但与水灰比为 50% 的混凝土相比,强度约为后者的两倍。也就是说,混凝土的强度并不只取决于水合度,也由其形成的微小结构的特性决定。如前所述,如果水灰比小,毛细管空隙等粗大空隙会减少,这样的混凝土才是具备高强度的材料。

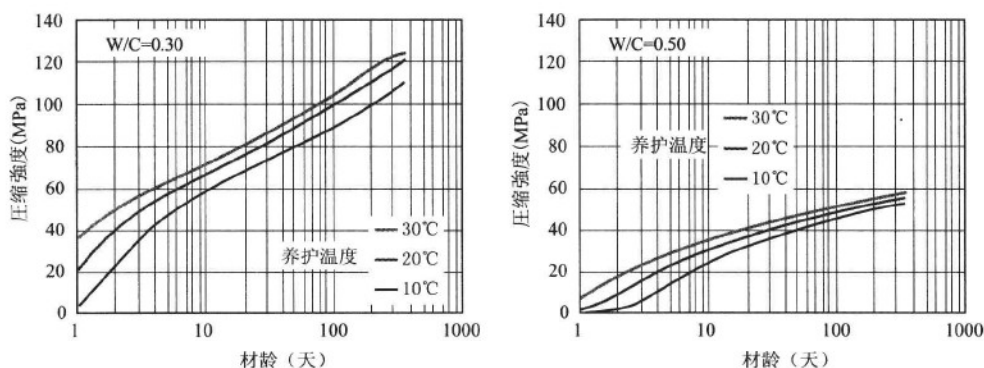


图4.5 基于分析模型的混凝土的强度表现

到现在为止的模拟条件是以覆盖养护为前提,也就是用包装薄膜等将混凝土覆盖,在防止水分向外逸出的状况下进行计算的。接下来,通过计算再现了在材龄初期因干燥而水分向外逸出的状况。制造水灰比为 50% 的混凝土,并比较放置 1 天摘下包装薄膜、放置 7 天摘下包装薄膜,还有直到放置 28 天才摘下包装薄膜的充分进行覆盖养护的 3 种模式。模拟的结果如图 4.6 所示,只 1 天就结束覆盖养护的混凝土,其强度最大值刚超过 20MPa,而养护 28 天的混凝土的强度最大值是其两倍以上。因为材龄初期内部保有水分,所以水合反应充分。这个结果告诉我们,为了使混凝土材料固化且充分发挥其性能,养护是非常重要的。

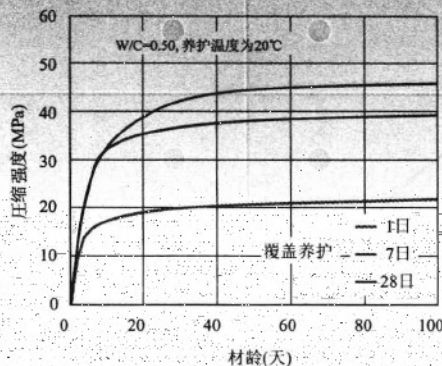


图4.6 养护对强度的影响

● 水合放热引起的裂缝

由于水泥的水合放热,结构物会有产生裂缝的情况,称为温度裂缝,它是损坏结构物的耐久性、使用性以及美观的原因。温度裂缝是混凝土由于温度变化导致体积变化(长度变化)而引起的。

固体物质的温度每改变 1°C 时,其长度的变化和它在 0°C 时的长度之比,称为“线膨胀系数”。混凝土根据使用的水泥种类和骨料种类的不同,线膨胀系数会发生变化,但一般来说,温度上升 1°C ,混凝土会产生大约 10μ 的膨胀形变(温度形变)。所谓形变,就是原来长度为 l 的物体,在长度变化 Δl 时,定义 $\Delta l/l$ 为物体的形变。线膨胀系数定为 $10\mu/^{\circ}\text{C}$,长度为 1m 的混凝土构件在温度上升 50°C 时,会产生 $1\text{m}\times 500\mu$ (500×10^{-6}) $=5.0\times 10^{-4}\text{m}=50\text{mm}$ 的拉长。也许你可能想 50°C 却只有 50mm 的变化,因为混凝土是非常坚硬的材料,正如拉直硬弹簧会产生很大的力量那样,坚硬的混凝土若发生膨胀、收缩,在结构物内部会产生很大的力量。钢筋的线膨胀率也与混凝土数值相同,约为 $10\mu/^{\circ}\text{C}$ 。假设钢筋与混凝土的线膨胀率不同,在温度变化之际,钢筋与混凝土会产生不同的温度形变。这样,即使是同样的温度变化,钢筋与混凝土之间会出现变形的差异,这就关系到裂缝等损坏。钢筋与混凝土的线膨胀率碰巧是相同的,可以说这是非常幸运的事实,人们才得以使用钢筋混凝土这样优良的结构系统。

温度裂缝的模式可笼统分为内部限制起因与外部限制起因两种。内部限制起因于结构物内部产生的温度差。因水泥的水合反应产生热,中心部分温度增高,而接近空气的部分因散热,与中心部分相比温度降低。也就是说,外部与内部因温度变化产生的形变出现差异。这时,虽然有形变,但构件整体要保持平面(假设平面保持不变),因温度产生的形变受到限制,而无法产生预期那样的变形,其结果是表面产生张力而内部产生

压缩力。这就是基于内部限制产生裂缝的原理(图4.7)。

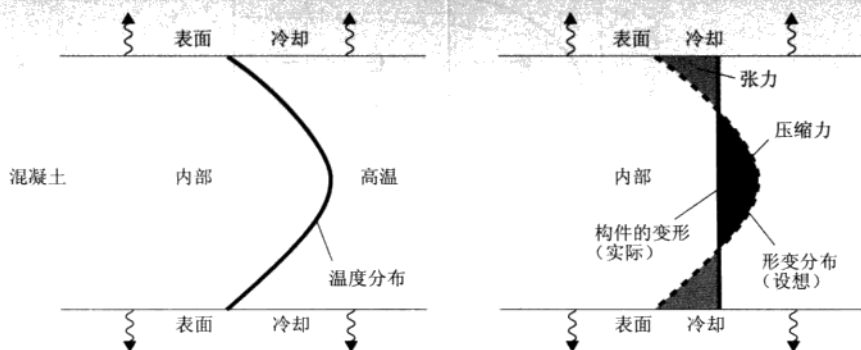


图4.7 基于内部限制的力的发生原理

接下来,外部限制是指,因水合放热产生的混凝土温度形变受到外部物质限制,混凝土无法自由变形而产生力从而引起裂缝的情况。例如,在地基或岩盘等根基上,或固化完成的原有混凝土材料上,新浇注混凝土时,放热引起的体积变化会因为这些外部物质受到限制。如图4.8的左图那样,原有混凝土与新鲜混凝土之间如果没有被限制(如允许伸展、收缩、滚轮等存在于原有一新鲜混凝土之间的情况),新鲜混凝土因可以自由变形则不会产生力。但通常因为原有混凝土与新鲜混凝土为一体而使变形受到限制,新鲜混凝土构件内部会产生力从而产生裂缝。

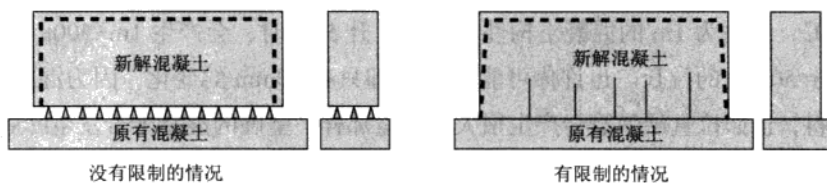


图4.8 基于外部限制温度裂缝的发生原理

为减少温度裂缝,在材料、设计、施工上采取措施是必要的。从材料的观点来看,使用水合热较少的低热波特兰水泥,或者使用烟灰等放热量少的混合材是非常有效的。同时在混凝土施工之际,可以利用预先冷却材料的预先冷却方法。这时,为了冷却材料,可使用冰或液体氮。也可以利用通过在结构物中贯通管道流入冷水控制温度上升的管道冷却的方法。

● 收缩引起的裂缝

结构物导致裂缝产生的其他因素有源于内部水分状态的混凝土收缩。混凝土为内部

具有很多微小空隙的多孔材料, 由于干燥失去水分, 从而体积收缩。这种收缩称为干燥收缩。同时, 水灰比低的混凝土, 初期配合的水分不足以满足水合反应的需要。这时, 即使不是因为养护不周而导致水分逸出, 混凝土内部也会因水合反应而出现干燥现象, 这称为自干燥, 由此产生的收缩称为自收缩。至今为止, 广泛使用水灰比为 50% ~ 60% 的混凝土, 自收缩的量并不太多, 但水灰比低的高强度混凝土, 因自收缩引起的体积变化显著, 这些需要在设计等过程中加以考虑。

关于引起混凝土收缩的结构原理, 到现在为止包括以下几种假设。在相对湿度高的环境中, 因表面张力产生的毛细管张力引起收缩。在壁面距离小的空隙中, 通过水的表面张力作用形成称为凸凹透镜的曲面, 由此产生引起内部收缩的毛细管张力(图 4.9 左)。同时, 拥有较大表面积 of C-S-H 水合物的表面吸附着水分子。空隙内部因干燥成为低湿度环境后, 这些水分会逸出, 从而因为凝胶表面的能量增加而引起收缩(图 4.9 右)。因吸附在表面的水分消失, C-S-H 本身收缩。同时, 存在于层状结构内的称为层间水的水分若逸出, 就会导致 C-S-H 层状结构的局部变形, 这也会产生混凝土收缩。存在于混凝土中的水分, 虽然都是水, 却有着各种各样的形态, 包括毛细管空隙中存在的冷凝水, 吸附在空隙壁面的水分, 以及存在于极其微小空间的称为层间水的水等。因此, 由于干燥, 空隙内部的相对湿度下降, 各种水在不同的时间逸出、消失, 因多个不同的原理而引起收缩。

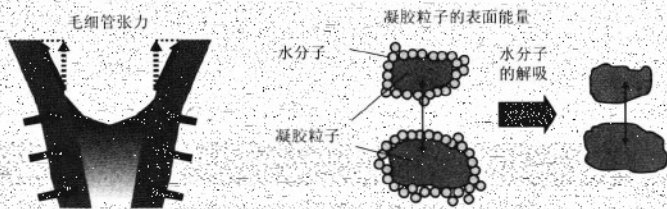


图4.9 导致收缩的原理

混凝土干燥则水分从表面逸出, 所以表面部分收缩幅度较大, 另外, 内部收缩幅度较小。这时如图 4.7 所示, 根据平面保持的假设, 构件变形要保持平面, 因此因水量而发生的收缩形变受到限制, 表面附近产生张力, 根据与温度裂缝同样的原理而产生裂缝。抑制收缩裂缝的有效方法包括, 进行适当养护以防止材龄最初期的干燥以及使用称为减少收缩剂或膨胀剂的材料。

参考文献

- [1] Koichi MAEKAWA, Tetsuya ISHIDA, Toshiharu KISHI: Multi-scale modeling of structural concrete. Taylor and Francis, 2009

第5章

混凝土结构物的耐久性

1 混凝土结构物的劣化

2 钢筋生锈的理由①氯离子

3 钢筋生锈的理由②中性化

4 保护钢筋不生锈的方法

5 混凝土本身的劣化

6 补充说明

- 混凝土结构物的耐久性
- 钢筋的腐蚀现象
- 劣化进程
- 氯离子向混凝土内部的渗透
- 混凝土的中性化（碳酸化）
- 碱硅反应
- 冻结融解
- 化学侵蚀



啊, 瞧,

那里就是三井物产横滨大厦呀!

设计者是远藤千菟, 这是1911年建成的日本最古老的钢筋混凝土的建筑物之一啊。


你果然了解很多呢。

没, 没有, 没有!




当时, 为了获得外汇而出口了大量生丝, 其库房就在隔壁。

装饰少、质朴而且有重量感的建筑啊。



现在，它还在被
人们使用着呢！


三井物产横滨大厦的
建筑保留着非常详细
的浇注、加固、养护
等记录。




因为在横滨这样离海近的
地方，有着“盐害”等混
凝土劣化的问题。



的确是这样。



今天我们来说一下
包括盐害在内的混
凝土劣化的内容吧。



那么，附近有山下公
园，我们去那里吧。



好的！

① 混凝土结构物的劣化

钢筋混凝土是组合了抗张力强的钢筋与抗压缩强的混凝土的物质。

可以说它是有效利用各自优点的结构系统。

即使这样也会有劣化的情况吗？

混凝土不仅物理与化学性质稳定，而且在抗劣化和耐久性方面也是优良的材料呢！

混凝土中填满的钢筋在不易生锈的状态下也是很稳定的。

是啊！

它被钢筋混凝土具有的强碱环境所保护，在钢材表面形成称为“钝化膜”的细密氧化膜。



但是，

如果混凝土的品质差，则结构物的劣化会比估计的要发展得快。

品质问题，是吗？



而且，在严酷的环境中
使用混凝土时，
需要设法抑制其劣
化速度。

混凝土结构物出现劣
化是什么情况呢？



大体可以分为

中间钢筋生锈、

混凝土本身劣化两种模式。

② 钢筋生锈的理由① 氯离子

那么，首先从内部钢筋生锈的劣化开始说起吧。

为什么混凝土中应该稳固的钢筋会生锈呢？

那是因为保护铁生锈的“钝化膜”失效了。

那为什么会失效呢？

钝化膜

主要原因有两个。

一个是受到卤离子的攻击，

卤离子

卤离子

碱性

碱性

另外一个失去碱性。



离海边近的地方，多见因盐害而劣化的建筑物。

特别是日本海沿岸和冲绳地区，季风或台风会给当地带来很多盐粒，盐害更加严重。

原来如此！

若是远离海的地方则没有盐害的担心吗？


不是，即使在内陆部分，在寒冷时期撒在道路上的防冻剂中含有的氯离子，也是盐害产生的原因。

这就是说需要考虑环境带来的影响吧。

嗯。

那里的长椅没有人，我们坐会儿吧？


啊，好的！



接下来，我们说一下混凝土失去碱性的内容吧。

好的！


③ 钢筋生锈的理由② 中性化



碱性失去的主要原因是大气中的二氧化碳。

二氧化碳吗？


有点意外……



二氧化碳溶解于水则变成称为碳酸的酸。

它是碳酸饮料中含有的那个碳酸吗？

是的！



混凝土中的氢氧化钙与碳酸反应形成碳酸钙。

那时，碱性就失去了。

这种现象称为混凝土的“中性化”。

哦!

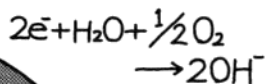
中性化发展下去，则钝化膜被破坏。

中性化

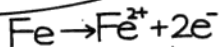
由于氯离子或中性化作用，钢筋的锈加重，则混凝土中会有电流动。

咦?

瞧，你从前没有学过伏打电池吗？原理与那个相同。



腐蚀电流



钢筋


锈

阳极

阴极

$2e^-$

这称为“腐蚀电池”，流动的电力称为“腐蚀电流”。



这样的电力化学反应发展的结果就是钢筋发生氧化。

你可能看过生锈的钢筋变红并向外露出的情况，那是因为氧化反应会产生氧化铁。

是吗？

氧化铁与生锈之前相比，体积有所增加。

其结果是混凝土出现裂缝且钢筋裸露出来，从而混凝土剥落。

原来是这样！

④ 保护钢筋不生锈的方法

为了防止钢筋生锈，怎么做才好呢？



因此“保护层”是非常重要的。

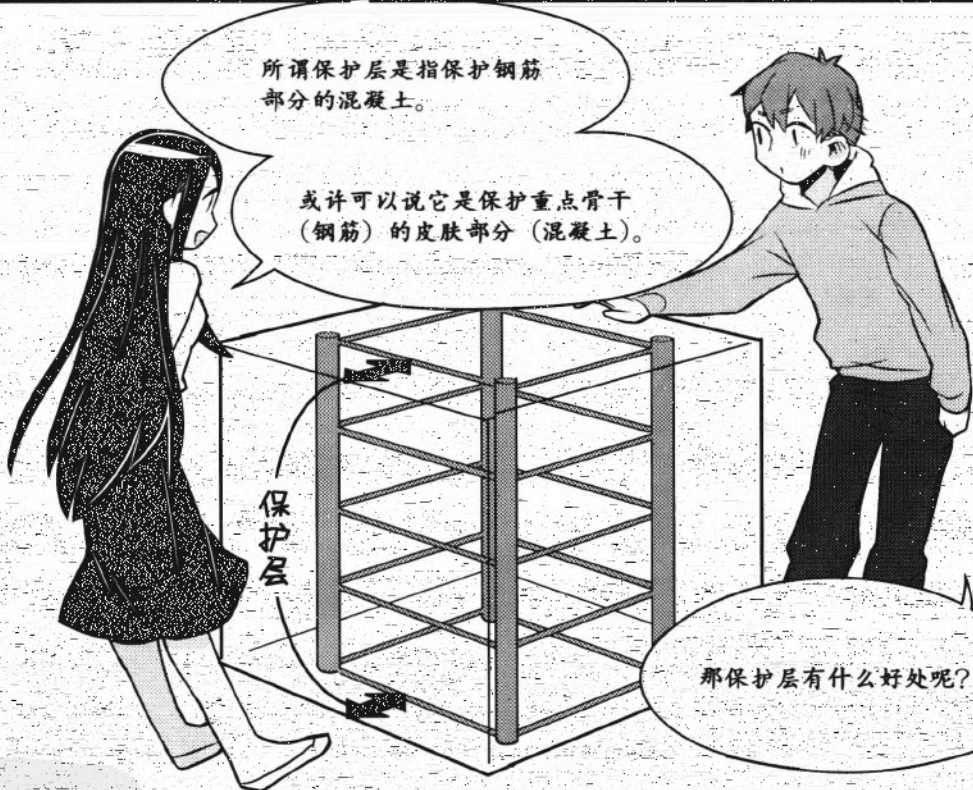
啊？

帽子？



所谓保护层是指保护钢筋部分的混凝土。

或许可以说它是保护重点骨干（钢筋）的皮肤部分（混凝土）。




那保护层有什么好处呢？

保护层的混凝土品质好，则氯离子或二氧化碳等物质进入内部的速度会减慢，就会防止钢筋生锈。

重要的还是混凝土的品质啊。







为提高混凝土保护层的品质，减少空隙，特别是毛细管空隙是非常重要的。

而且，增加保护层本身的厚度也是有效的。

如果氯离子等侵入混凝土中后应怎么做好呢？




那时，使用“电气防腐”的方法来抑制劣化。



那是怎样的方法呢？

看起来好厉害的样子……



在钢筋生锈时，利用形成的腐蚀电池特性，通过加入与使钢筋生锈方向相反的电流来抑制锈加重的方法。

⑤ 混凝土本身的劣化

接下来是混凝土本身劣化的内容。

碱硅反应
(碱骨料反应)

这种劣化之一是称为“碱硅反应”(碱骨料反应)的情况。

那是什么情况啊？

水泥中的碱分与某种反应性骨料长期发生化学反应而引起异常膨胀。

哇

其结果就是混凝土出现不规则的裂缝而劣化。



同时还有的劣化是因为混凝土多次经历冷暖温差，其组织慢慢地受到损坏。

又开始做了



这是“冻结融解作用”引起的劣化现象。



是吗？

水变成冰后，体积会增加，因此发生劣化吧！

是的



水泥固化体内部的水分反复冻结或融化会严重打击内部的微小组织。

在寒冷的地方，还要必须注意冻结、融解作用啊。





在温泉等地方，混凝土遭受到高温的酸（硫酸）的作用。

因此混凝土会有溶解的现象，需要采取对策。

日本因为温泉多，所以需要采取对策的地方看起来相当多。



说到温泉，下次我也想去温泉啊！

啊，那与混凝土也没有什么关系呀！

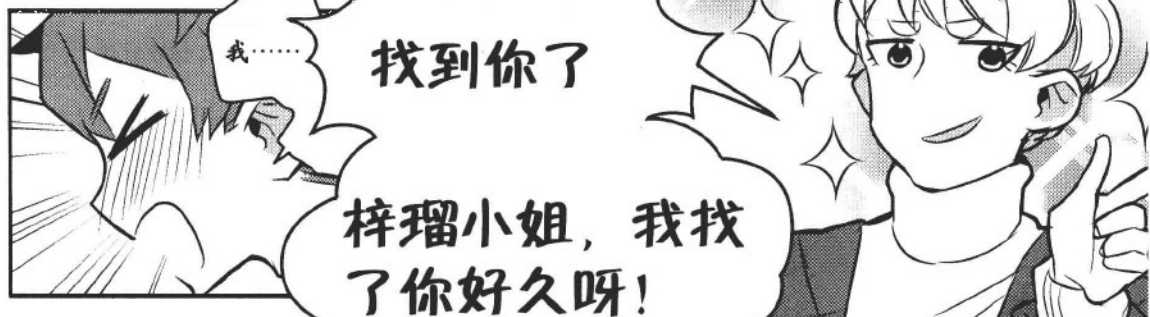
哦，温泉？



一，一定要去啊！！

与梓瑠小姐在一起，无论去哪里我都愿意。









请等一下!!!



砰 砰



我,我,

我喜欢梓璐小姐!



啊?

什么!!



谁也不会听你在那里胡说。

其实我在听。



我,我……

我早就想说了。

什么?



关于未婚妻的事情，那是很早之前父母之间随便决定的。

我应该也有自己选择的权利。

你在说什么呢？
那种家伙怎么能跟我比呢？

哈哈
哈哈



请至少让我提出条件……



还有条件？



如果可以的话，我希望你们两人能进行一场比赛……



补充说明

● 混凝土结构物的耐久性

混凝土本来就是物理、化学性质都比较稳定且抗劣化性很强的优质材料。而且使用钢筋混凝土时，混凝土内部的钢筋不易生锈而且性质稳定，从而保护其不被腐蚀。混凝土具有强碱性是因为钢材表面会形成致密的氧化膜（称为钝化膜）。但是如果混凝土的品质差，结构物会在短时间内快速劣化。由于是在严酷的环境条件下使用的结构物，如果劣化发展得很快，就需要采取各种对策。混凝土结构物的劣化问题大体分为两种情况：一是结构物内部配置的钢筋生锈；二是混凝土本身由于某些原因而劣化。

● 钢筋的腐蚀现象

钢筋受到氯离子等卤离子攻击或者在钢材四周的碱性环境无法维持的条件下，保护钢材不被腐蚀的钝化膜处于不稳定状态而被破坏。在钝化膜失效的状态下，若提供适度的水分或氧，铁会进行氧化反应（铁的氧化反应、腐蚀反应）。这时，混凝土内部形成称为腐蚀电池的电路（图 5.1）。它分为离子从钢筋溶解到空隙水中的阳极区与氧被还原且生成氢氧根离子的阴极区，电流从良导体的钢筋中开始流动。

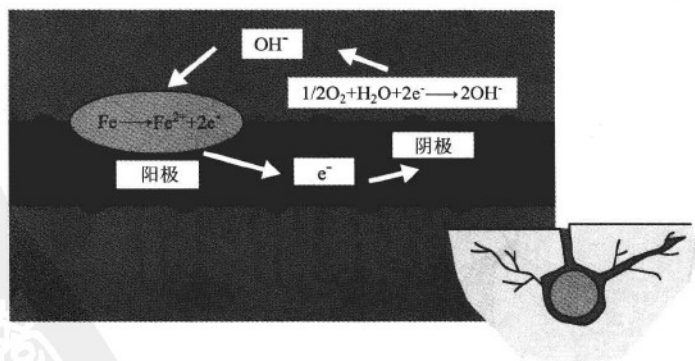


图5.1 腐蚀电池的形成

钢材腐蚀的形态分为微观电池腐蚀和宏观电池腐蚀两种。微观电池腐蚀是在阳极区与阴极区非常近的位置形成电路并进行反应,这时,钢筋腐蚀均匀地扩展到整体。另外,宏观电池腐蚀则是阳极区与阴极区相对远离而形成,其特征在于钢筋的腐蚀状况会因位置不同而不同。宏观电池腐蚀因为钢筋四周的氯离子量的不同,或者水分和氧的供给量的不同而发生。例如,存在很多氯离子的部分是阳极,而水分和氧的供给量充分的地方为阴极,因为各自远离,所以会形成大尺寸的电路(宏观电池)。一般与微观电池腐蚀相比,宏观电池腐蚀的腐蚀速度更快。

钢筋被氧化会形成氧化物 Fe_2O_3 , 这称为红锈,是在混凝土的钢筋中常见的氧化铁形态。未水合的 Fe_2O_3 在其组织完全紧密时,会显现出未氧化的铁 2 倍左右的体积膨胀。另外,含有水合物时,氧化物成为多孔结构的物质,其体积可达到原来的 10 倍。因体积增加,钢筋周围产生膨胀压,在混凝土的保护层上会出现裂缝(腐蚀裂缝),最终导致保护层的剥落。一旦腐蚀裂缝出现,氯离子、水分、氧等腐蚀性物质则加速渗透(图 5.2)。



图5.2 从海飞来的盐分(飞来盐分)引起结构物劣化的举例

● 劣化过程

图 5.3 显示了混凝土内部的钢材从开始腐蚀、腐蚀发展、然后混凝土出现裂缝、直到结构物(构件)的力学性能-承载力降低的过程。它显示的是盐害的事例。日本土木学会混凝土标准说明书将劣化发展的过程分为潜伏期、发展期、加速期、劣化期 4 个阶段^[1]。

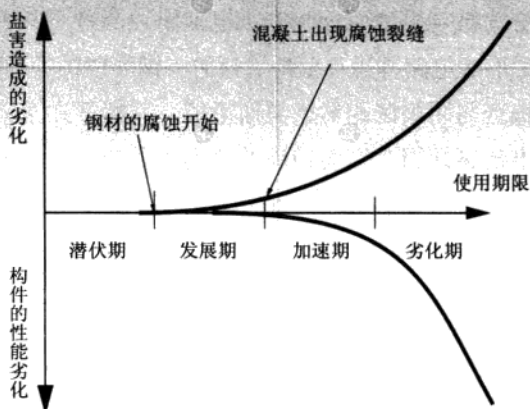


图5.3 劣化过程的概念图

首先潜伏期是内部钢材保持健全的状态。在盐害情况下，氯离子慢慢渗透到混凝土内部，由于保护钢材的“保护层”存在，氯离子不会马上到达钢材所在的位置。因此，直达到开始腐蚀所需的量，需要花费一段时间。这个期间称为潜伏期。用人类来说，相当于虽说感染病原体但还没病发的状态。从外面观察潜伏期的混凝土结构物也看不出特别的变化。

在潜伏期内，从外部持续供应氯离子，穿过保护层到达钢材四周的氯离子在超过某“临界值”时，钢材的腐蚀就开始了。这个阶段称为发展期。钢材腐蚀开始的临界值称为腐蚀的临界氯离子浓度。关于腐蚀的氯离子浓度的临界值，从过去各种各样的研究逐渐得以明确，后由腐蚀离子的 Cl^- 与防腐离子 OH^- 的平衡分子的比值，也就是混凝土毛细孔溶液中的 Cl^-/OH^- 值来控制。在土木学会的混凝土标准说明书中，基于暴露在实际环境中的实际结果，设定其安全数值为 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。若平均 1 m^3 混凝土含有 1.2kg 以上的氯离子，则可以看成钢材腐蚀开始发展。

加速期是混凝土的保护层出现腐蚀裂缝的阶段。因钢材腐蚀形成的氧化铁（锈）体积与原来的钢材相比有所增加，而产生膨胀压，其结果是混凝土保护层中产生张力。那之后，混凝土表面出现浮起、剥落、裂缝。浮起或剥落出现的情况，有时眼睛无法判断，用锤等敲打混凝土表面可简单地辨别出来。在敲打完好的混凝土建筑时会发出高扬而清澈的声音，如果出现浮起或剥落，则是沉闷的声音。裂缝出现且呈称为锈液的红褐色时，则眼睛很容易发现内部钢筋在生锈。

劣化期是构件性能因腐蚀裂缝引起的混凝土劣化或内部钢材腐蚀而明显降低的阶段。当钢材的腐蚀加重，见到较大断面缺损时，钢筋无法继续承受张力，承载力下降。

更进一步，由于腐蚀裂缝的出现，钢筋与混凝土的一体性受损（钢筋失去固定的情况）时承载力明显下降。

维修腐蚀劣化的结构物的方法有：

- 断面修复施工方法
- 表面处理施工方法
- 电防腐施工方法
- 脱盐施工方法
- 再碱化施工方法等

断面修复施工方法是指剔除含有氯离子的混凝土或中性化了的混凝土，使用称为断面修复材的无收缩水泥浆、聚合物水泥浆来修复剔除部分断面的方法。目的在于维修后抑制氯离子或二氧化碳、水分等的劣化因子再次渗透到混凝土内部。进行部分断面修复，在氯离子或水的渗透量因地方不同而大不相同的情况下，需要加以注意，以避免发生宏观电池腐蚀。

表面处理施工方法有表面遮盖施工方法和表面浸渗施工方法。两个施工方法都是为了抑制劣化因子从混凝土表面渗透。表面遮盖施工方法使用树脂系或聚合物水泥系的材料来覆盖表面。而表面浸渗施工方法将硅烷系表面浸渗材或硅酸盐系表面浸渗材等物质从表面渗透，使物质通路的表层部分的细孔结构能够更致密。

电防腐施工方法是指使钢材生锈时形成的腐蚀电池失效的电化学对策的施工方法。电防腐的方式有外部电源方式与阳极电流方式两种。外部电源方式通过直流电源装置形成防腐电流，持续供应电流给混凝土中的钢材来抑制腐蚀，而阳极电流方式则是利用离子化倾向的容易生锈的差异来防止钢材腐蚀的方法，也就是说牺牲离子化倾向大的亚铅等易锈金属（牺牲阳极）且形成新的电池电路来抑制钢材生锈。

脱盐施工方法是在混凝土表面设置含有电解质溶液的阳极材料，以混凝土内部的钢材为阴极来流入直流电流的施工方法。混凝土内部存在的氯离子因具有负电荷而被吸引到表面的阳极区（正极区），由此可除去内部的氯离子。同时，再碱化施工方法是设置含有碱性溶液的阳极材，与脱盐施工方法一样，将混凝土内部的钢材作为阴极来流入电流的施工方法。具有正电荷的碱离子渗透到混凝土内部，所以混凝土的碱性得以恢复。

拥有很长海岸线的日本，在海洋附近建设了大厦或房屋等建筑物，还有道路、铁路、机场、港湾等很多重要的社会基础设施。栈桥或沿海建设的道路、铁路等的桥墩以及海底隧道等，因为海水直接接触混凝土，所以氯离子渗透到结构物内部，会出现盐害引起的钢材腐蚀。同时，即使是稍微远离海岸的结构物，也会面临盐害问题。因为浪花四溅而带来的盐粒随风而附着在结构物表面，这种粒子称为飞来盐分，其直径为几十微米的非常小的粒子，所以可随风被带到很远的地方。

据说在日本的日本海沿岸和冲绳地区，飞来盐分的量很大。日本海沿岸在冬季经常受到来自西部的季候风侵袭，由于浪花四溅而产生的盐粒会经常被吹来而附着在结构物上，而冲绳则是夏天多有台风，由此带来飞来盐分的量很大。

到达混凝土表面的氯离子慢慢地向内部渗透。混凝土是拥有从微米大小（ μm ，1mm的千分之一）到毫微米大小（ nm ， $1\mu\text{m}$ 的千分之一）空隙的多孔体。相对较大的微米大小尺寸的毛细管空隙是氯离子的移动路线，所以如果存在很多毛细管空隙，氯离子则快速向内部渗透。这是钢材腐蚀早期发生的条件。

混凝土中的氯离子由称为“扩散”与“平流”的原理来控制。所谓“扩散”是物质从浓度高的地方向低的地方移动的现象。最简单的能表现这种现象的是由以下公式表示的 Fick 第一法则。

$$J = -D \nabla C \quad (1)$$

式中， J 为流速，表示物质在平均单位时间、平均单位面积通过的量； D 为扩散系数，与浓度 C 的差（ ∇C 、浓度梯度）呈比例关系，表示流速的增加。氯离子移动快的混凝土，其扩散系数则变大。如前所述，具有毛细管空隙等粗大空隙的混凝土显现出较大的扩散系数的数值。另外，具有密实微小组织的混凝土，其扩散系数则小。混凝土内部总保持湿润状态且很多空隙被水充满时，溶解在毛细孔内部水分中的氯离子会扩散移动，可由式（1）确切表现实际发生的现象。

接着对平流进行说明。混凝土结构物在反复遭受到干燥或湿润环境时，不仅是“扩散”而且称为“平流”的原理更明显。盐水对干燥后的混凝土发生作用时，混凝土本身会吸收盐水。这时通过吸水时产生的水分本身的移动而将氯离子带到内部，这种现象称为平流引起的氯离子渗透。因涨落之差等潮位的变动，混凝土因海水淋湿或干燥时，或者盐水或飞来盐分作用于干燥后的混凝土时，根据浓度梯度引起的扩散与水分的输送引起的平流这两个原理，氯离子向混凝土内部渗透。

那么,对于导致混凝土结构物劣化的盐害,在最新的设计中是怎样预防的呢?在混凝土标准说明书设计篇中整理了在结构物的设计耐用期限内检查是否停留在潜伏期(没进展到发展期)的结构原理^[2]。例如,我们来思考一下使用长达100年的混凝土结构物的情况。考虑到结构物的使用环境,设计中明确钢材位置的氯离子浓度即使在100年后也不会引起腐蚀的氯离子浓度。设计中写明耐用年数,并明确满足其耐久性能(核查)的设计方法称为性能核查设计法。2007年版中的核查性能的标准方法如式(2)所示。

$$C_d = \gamma_{cl} C_0 [1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 c}{2\sqrt{D_d t}} \right)] \quad (2)$$

式中, C_0 为混凝土表面的氯离子浓度 (kg/m^3); t 为抗氯离子渗透的耐用年数 (a); D_d 为抗氯离子的设计扩散系数 (cm/a); c 为保护层的期待值 (mm); γ_{cl} 为考虑到钢材位置的氯离子浓度的设计值 C_d 偏差的安全系数; erf 为误差函数。式(2)显示了 Fick 扩散法则 (Fick 的第二法则) 的内容。如上所述,混凝土内部发生的实际氯离子移动现象不仅由扩散,还由平流支配,为了简便,按式(2)简单化。为了区别于由浓度梯度驱动的物理现象的扩散,用 D_d 记述的宏观扩散系数称为“可见扩散系数”。

混凝土表面的氯离子浓度因结构物所在的条件变化而发生变化。在混凝土标准说明书中,使用式(2)可简便地得到设计答案,根据实测数据表示为表5.1。越接近海岸,或者飞来盐分越多的地区,提供较大的表面氯离子量来计算氯离子浓度的数值。当然,表面氯离子量大的结果是渗透到内部的氯离子的量就多。

表5.1 混凝土表面的氯离子浓度 C_0 (kg/m^3)

		飞沫带	离海岸的距离 /km				
			海岸线附近	0.1	0.25	0.5	1.0
飞来盐分多的地区	北海道、东北、北陆、冲绳	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飞来盐分少的地区	关东、东海、近畿、中国、四国、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

式(2)中的设计扩散系数 D_d 是混凝土内部氯离子的渗透难易度的参数。水灰比越低或者越是恰当进行养护的密实混凝土, D_d 越小。扩散系数小的混凝土,在相同的设计耐用期限,相同的表面氯离子浓度(相同的环境条件)的情况下,因为可设定较小的保护层,所以可建造更加经济的结构物。

混凝土的中性化（碳酸化）

大气中的二氧化碳进入到混凝土内部，溶解于空隙中存在的水分而形成碳酸（图 5.4）。溶解的碳酸成为碳酸根离子，与同样溶解在空隙水中的钙离子发生反应而生成碳酸钙。这时主要消耗的是水泥水合物中溶解度最高的氧化钙。从化学性质上来说，碳酸化反应是强盐基的氧化钙水溶液与弱酸的碳酸的中和反应。因此，氧化钙因碳酸化被慢慢地消耗掉，细孔溶液的 pH 则降低。碱性的混凝土向中性变化，所以碳酸化现象称为中性化。环境中原有的酸不仅有碳酸，还有来自于温泉或酸性雨的硫酸或硝酸等，而混凝土的中性化一般指碳酸化反应。

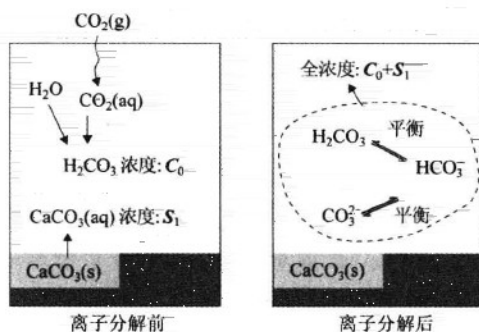


图 5.4 细孔溶液内的二氧化碳的溶解与离子平衡

从热力学的观点来看，可以说碳酸化反应是必须进行的反应。也就是说，因为在二氧化碳存在的环境下，碳酸钙是自由能量比氧化钙低且稳定存在的化合物。在烧制水泥之际，从原料石灰岩（碳酸钙）获取 CO_2 （烧制中放出 CO_2 ），而形成水泥（氧化钙等构成的烧结矿物）。碳酸化反应缓慢地从大气中夺回制造水泥之际短时间内放出的 CO_2 ，可以说它是将水泥返回到烧制水泥之前的状态（石灰岩）的反应。

混凝土的中性化是导致钢筋混凝土结构物内部钢材腐蚀的重要原因，从确保结构物耐久性的意义来看是很重要的课题。为了研究日本最古老混凝土的中性化与钢筋腐蚀的关系，佐野利器博士在 1907 年进行了暴露试验^[3]。当时，这个项目制造了数百个试样，可以说是关于耐久性的先驱性研究。之后内田祥三博士、滨田稔博士继承了佐野的研究，对水灰比与混凝土的中性化发展进行了理论性的研究^[4]。

在分析抗中性化的混凝土耐久性之际，因为混凝土暴露在自然条件下，所以获得想要的结果需要很长时间，因此多次进行了促进中性化试验的室内试验。为了加速

自然环境中慢慢发展的现象，在高浓度的二氧化碳环境中放置混凝土试样，计算中性化从表面进行到什么程度（中性化深度）的试验，这称为促进中性化试验。为了求得中性化深度，一般使用酚酞溶液进行判断。酚酞溶液因为遇碱显粉色，而在中性环境下无色，所以通过割裂试体来滴入酚酞溶液，碳酸化的结果即中性化后的区域可通过颜色来辨别。



图5.5 通过酚酞判断中性化深度

至今为止，很多研究明确了控制碳酸化的原理，同时建议在各种条件下预测混凝土碳酸化发展的技巧。预测基于碳酸化的中性化发展最为简便的工学方法如以下的公式所示。根据经验得知，中性化深度与暴露时间的平方根成正比，所以提供与暴露时间的平方根成比例关系的比例系数 a (中性化速度系数) 则可预测中性化的发展状态。

$$X_c = a\sqrt{t} \quad (3)$$

式中， X_c 为中性化深度； a 为中性化速度系数； t 为暴露时间。中性化速度系数根据混凝土的材料种类、配合（调和）、二氧化碳浓度、外气温度、相对湿度、有无水供应等因素而发生变化。以过去的研究为基础，日本建筑学会、土木学会各自提出了如下提供中性化速度系数的方法。

(a) 日本建筑学会、钢筋混凝土建筑物的耐久设计施工指针（终稿）的中性化速度系数^[5]

$$a = k\alpha_1\alpha_2\alpha_3\beta_1\beta_2\beta_3 \times 10 \quad (4)$$

式中, k 为岸谷式中系数为 1.72, 白山式中系数为 1.41; α_1 为依据混凝土种类 (骨料种类) 的系数, 普通混 1.0, 轻质混 1 类 1.2, 轻质混 2 类 1.4; α_2 为依据水泥种类的系数, 普通 1.0, 快强 0.85, 高炉 A 类 1.25, 高炉 B 类 1.4, 高炉 C 类 1.8, 烟灰 B 类 1.8; 依据调和 (水灰比 W/C) 的系数, β_1 为依据气温的系数, 东京 1.0, 札幌 0.83, 仙台 0.91, 大阪 1.01, 鹿儿岛 1.05; β_2 为依据湿度的系数, 东京 1.0, 札幌 0.82, 仙台 0.79, 大阪 0.98, 鹿儿岛 0.79; β_3 为依据 CO_2 的系数, 屋外 1, 屋内 2。

(b) 土木学会、混凝土标准说明书设计篇的中性化速度系数^[2]

$$\alpha_c = \beta_c (-3.57 + 9.0 W/B) \quad (5)$$

式中, W/B 为有效水结合材比 $W/(C_p + k A_d)$; W 为平均单位体积的水的质量; B 为平均单位体积的有效结合材的质量; C_p 为平均单位体积的波特兰水泥的质量; A_d 为平均单位体积的混合材的质量; α_c 为表示环境影响的系数: 易干燥的环境 $\beta_c = 1.6$, 难干燥的环境 $\beta_c = 1.0$; k 为表示混合材影响的系数: 烟灰 $k = 0$, 高炉熔渣微粉末 $k = 0.7$ 。

一般水灰比越大, 中性化速度系数越大。水灰比增大, 混凝土的空隙增加, 二氧化碳从外部容易进入, 因此反应容易发展到内部。同时, 水灰比大则意味着水泥量少。水泥量少, 则水合反应形成氧化钙的量则少, 因此对碳酸化反应的抵抗性变小而碱容易消失, 从而中性化速度加快。混凝土的二氧化碳是气体 (gas) 状态与溶解在细孔溶液中的状态 (溶解二氧化碳) 的两相保持平衡而共存的物质。碳酸化反应需要溶化在细孔溶液中的溶解二氧化碳, 但为了从外部供应二氧化碳, 气体移动对反应来说是主导的。因为与溶解二氧化碳的移动相比, 气体的扩散移动速度绝对更快。气体通过混凝土的条件是空隙不被水分充满的不饱和状态。因此, 在相对湿度为 40%~60% 的中湿度地域, 碳酸化发展得最快。

碳酸化反应本身除掉细孔溶液的 pH 降低, 并不会导致混凝土材料劣化。虽然有“中性化导致混凝土劣化”这种说法, 但在多数情况下都是误解。中性化导致内部钢筋腐蚀, 因膨胀压产生裂缝时, 混凝土本身确实会出现损伤。而且后述的硫酸等引起中性化、混凝土溶解时, 混凝土本身劣化。但是混凝土只产生碳酸化的情况时, 有时强度反而增加。如前所述, 碳酸化反应生成的碳酸钙作为稳定的化合物存在。因此, 最近利用碳酸化反应作为固定大气中增加的二氧化碳的方法, 或者以基于碳酸化的性能提高为目标摸索开发新材料等, 人们进行着新可能性的探讨研究。

所谓碱硅反应是指水泥供应的碱分 (Na^+ 或 K^+) 与某种骨料含有的反应硅长期发生化学反应, 引起异常膨胀的情况。如图 5.6 所示, 在骨料的外周部分颜色发生变化。这是膨胀性的凝胶生成物。碱硅反应发生时的特征是可观察到不规则的龟甲状的裂缝。膨胀性的凝胶生成物若吸收水分会更加膨胀, 因此, 在外部提供水分的情况下, 裂缝的产生会更加严重。过去也有报道过碱硅反应导致混凝土膨胀扯断 (折断) 内部钢筋的事例。

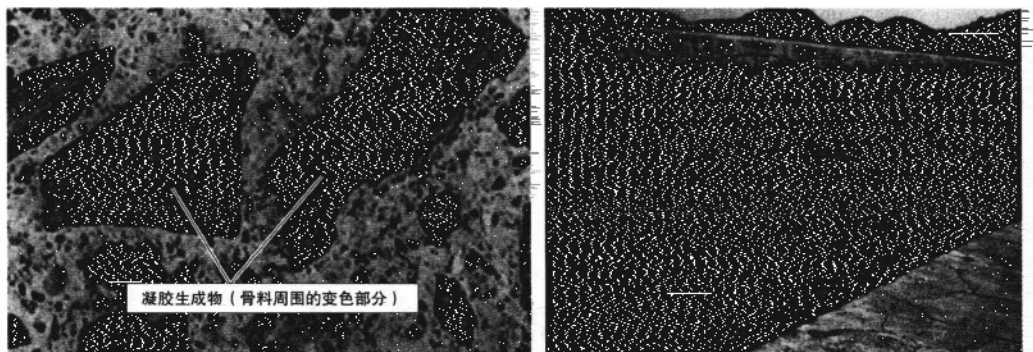


图 5.6 碱硅反应的举例

抑制水分的渗透, 则可某种程度地抑制碱硅反应的速度。同时生成的碱硅凝胶若吸收水分则膨胀, 所以一旦切断外部的水供应, 就会降低膨胀量。作为抑制水分渗透的方法, 包括在出现裂缝的部分注入水泥系或者树脂系的材料来堵塞裂缝的方法, 表面覆盖涂膜的方法或者使用浸渗材等对策方法。但是, 碱硅反应一旦发生, 实际情况则是很难完全抑制劣化的发展。因此, 在制造混凝土之际, 选择碱硅反应较小的材料或设计抑制反应的配合 (调和) 是很重要的。这里的要点可列举如下。

- 不使用反应性骨料
- 限制混凝土中的碱量

为了限制碱量, 使用低碱型波特兰水泥或者通过反应消耗碱的混合材料是有效的。

那么假设使用了那样的材料, 有没有方法可估计实际碱硅反应引起的劣化等发展到什么程度呢? 骨料的碱硅反应性根据 JIS A F145 规定的化学法或者 JIS A F146 规定的灰浆棒法进行试验来检测。另外, 混凝土的碱硅反应性有这样的试验方法, 即通过制作混凝土试体并进行加快养护试验来迅速检查碱硅反应的有无以及反应程度。但有报告说有

时实际结构物的劣化状况与室内试验的结果有差异，因此需要注意。

冻结融解

混凝土因多次经历冷暖差，出现混凝土组织会慢慢损坏的劣化，这称为冻结融解作用引起的劣化现象。液体水成为固体冰时，体积约增加 9%，水泥固体内部存在的液状水如果也被冷却，混凝土因冻结而膨胀，这时会出现局部性裂缝等损坏。水泥固体中冻结的水分若温度上升，会再次溶化为液状水，但一旦发生损伤则无法恢复。温度若下降则内部水分再次冻结。这样，水泥固体中存在的水分反复地冻结与融解，微小组织的破坏慢慢发展的劣化现象就是冻结融解引起的劣化。

冻结融解发展时，常见的现象是出现表面剥落（scaling）（图 5.7）。为了防止冻结融解引起混凝土劣化，使混凝土中含有适量的气泡是有效的。独立的气泡适度分散，在混凝土中起着缓和水冻结引起的膨胀压的作用。在因为膨胀压力增加而破坏细孔组织之前，气泡起着缓冲作用，防止产生微观裂缝。为了含有气泡，使用 AE 剂（air entrained，引入空气的意思）的物质。

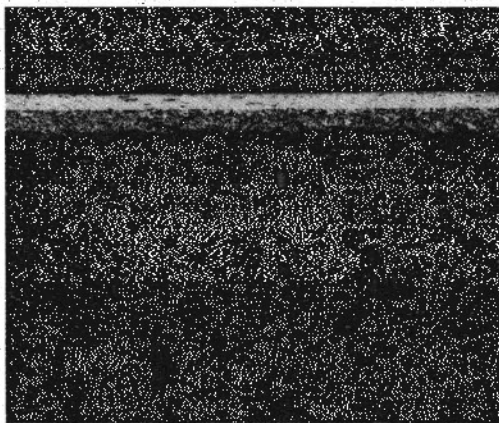


图5.7 冻结融解引起的墙壁栏杆的表面剥落
（照片提供：八户工业大学 阿波稔博士）

细孔中的水分即使在冰点以下也不冻结。这是因为极其微小的空隙内部存在的水分，通过与固体表面的相互作用而产生称为热力学的凝固点降低的现象。也就是说，大气压中的纯水一般在 0°C 冻结，从水向冰转变，但细孔溶液中的水分即使在冰点以下依然是以液状水的状态存在。越是存在于小空隙中的水（越接近空隙壁面之间的距

离), 水与固体表面的相互作用越大, 从水向冰转变的温度则越低。也就是说, 水灰比小的配合等具有直径小的细孔结构的混凝土即使受到冷却作用, 水泥固化体内部的水分也很难冻结。为了提高抗冻结融解性能, 降低水灰比或适当进行养护而形成密实的组织结构是很重要的。

● 化学侵蚀

混凝土是碱性, 因受到来自自然的酸的作用, 出现混凝土本身溶解, 或混凝土因形成膨胀性的生成物而被破坏的劣化现象, 这称为化学侵蚀。温泉地带、酸性河川、酸性硫酸盐土壤等, 因受到酸的作用而劣化, 因此需要采取对策。特别是日本温泉地带很多, 在这样的地方会遭受高温硫酸的作用, 混凝土的侵蚀更严重(图 5.8)。

在下水管中, 也有硫酸造成混凝土劣化的事例。初次报告下水道相关设施的硫酸引起的劣化事例为 1900 年拉斯维加斯的下水管道。当时人们认为混凝土从表面开始损坏的下水管腐蚀的起因是下水道中的物质引起的化学反应, 之后确认为下水管道内腐蚀的原因是微生物使结构氧化, 从而产生硫酸。



图5.8 温泉地带的混凝土劣化

下水道内存在硫磺还原细胞等的嫌气性细菌, 还原下水道中的硫磺成分并生成硫化氢。劣化原理在于产生的硫化氢溶解在下水道内侧面的结露水等中, 好气性细菌的硫磺氧化细菌与硫化氢反应而生成硫酸(图 5.9)。

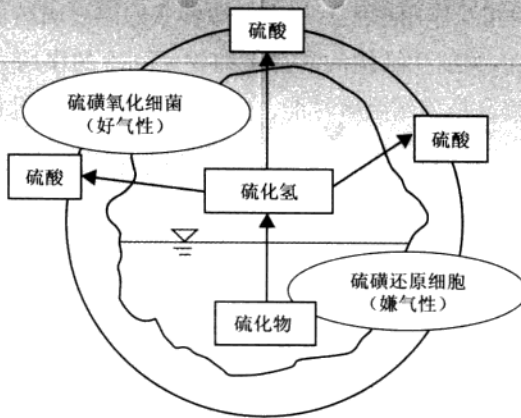


图5.9 下水道中的细菌引起的硫酸生成

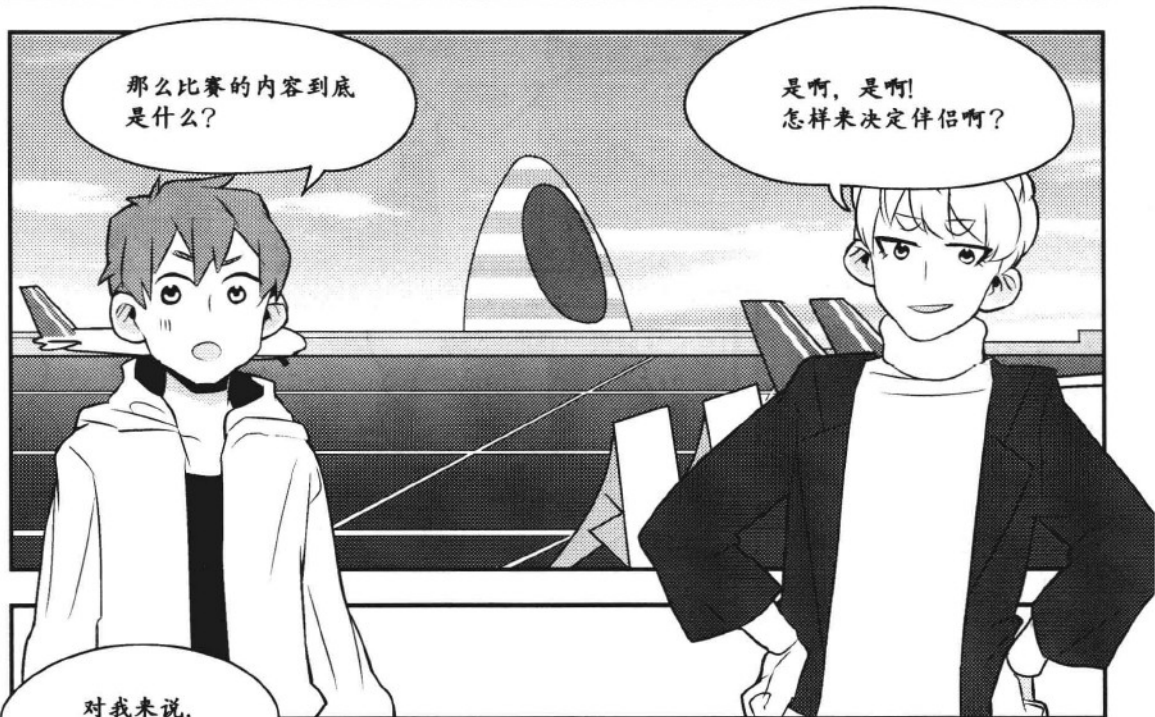
参考文献：

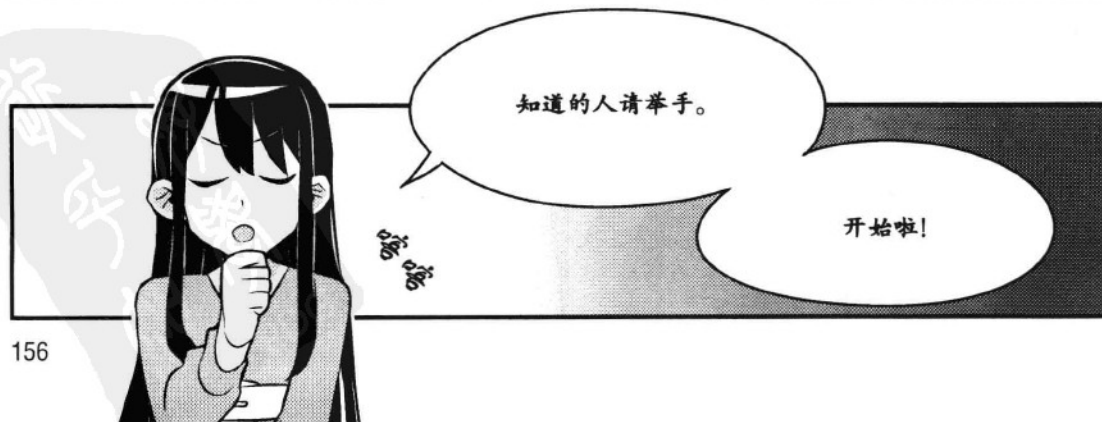
- [1] 土木学会、コンクリート標準示方書【維持管理編】、2007
- [2] 土木学会、コンクリート標準示方書【設計編】、2007
- [3] 佐野利器：鋼材腐食試験（第1回報告）、震災予防調査会報告、第74号、1911
- [4] 内田祥三、浜田 稔：鋼およびコンクリートの耐久試験：建築雑誌、第516号、pp. 1287-1303、1928
- [5] 日本建築学会、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説、2004
- [6] 土木学会、コンクリートライブラリー124号 アルカリ骨材反応対策委員会報告書 -鉄筋破断と新たな対応-

各种各样的混凝土

- 1 具有高强度、变形性的混凝土
 - 2 水下使用的混凝土
 - 3 创造丰富的水边环境的混凝土
 - 4 作为外壁材料使用的混凝土
 - 5 有修复力的混凝土
 - 6 月球使用的混凝土
- 补充说明
- 各种各样的混凝土
 - 超高强度混凝土——纤维增强混凝土
 - 多孔混凝土
 - 裂缝自愈混凝土
 - 月球混凝土
 - 温故知新——吉田德次郎博士的最高强度混凝土







① 具有高强度、变形性的混凝土



D 跑道等所在的中央部分使用了普通混凝土形成的预制 PC 地板。

那么下面是问题了。
在外周部分约 20 万 m^2 的大面积中使用的是什么混凝土呢？



我，我！

什么？

请回答！

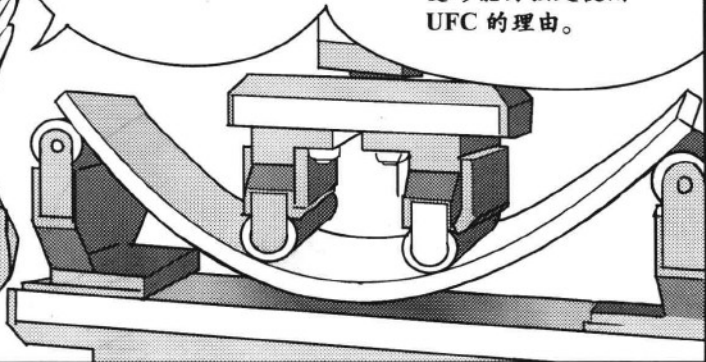
那是“超高强度纤维
加强混凝土”(UFC)。

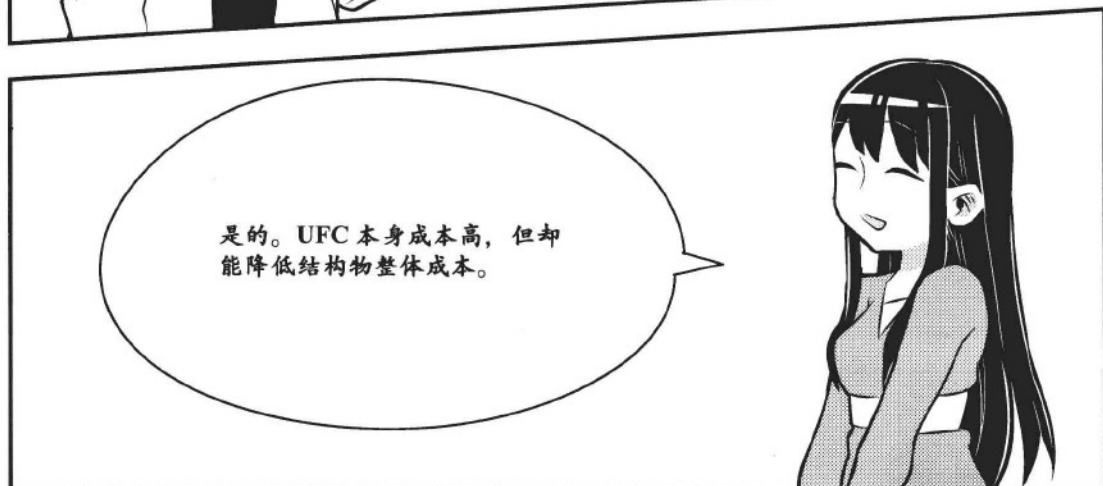
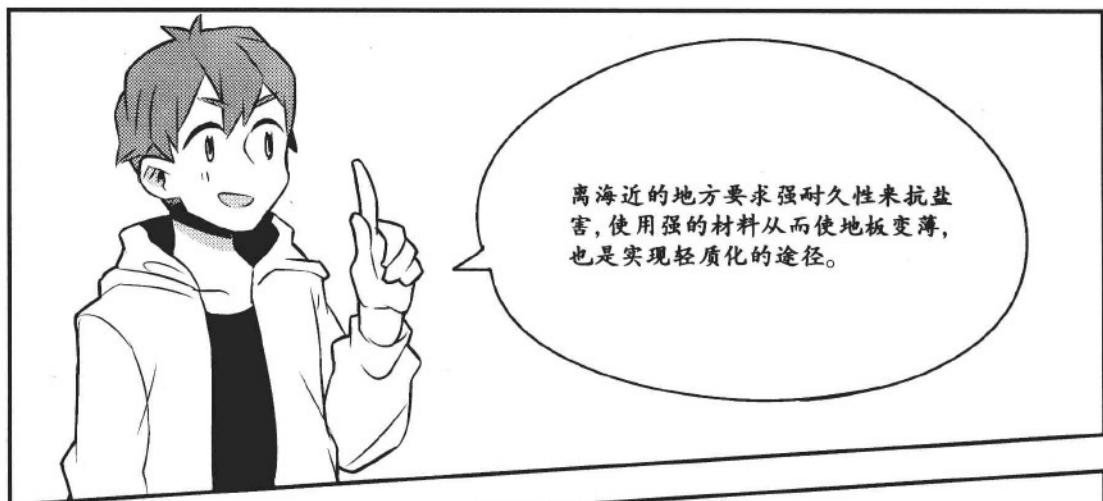
对吗？

回答正确！

普通的混凝土材料
若受到张力，会出
现裂缝而损坏。

但是UFC即使出
现裂缝，纤维也会
分散裂缝而防止构
件倒塌。
变形能力强是使用
UFC的理由。





② 水下使用的混凝土

那么，第2题，
在修建关西国际机场连接桥或明
石海峡大桥等海洋结构物之际

我，我！

“水下不分
离混凝土”。

啊，

回答正确！

哼，哼！

刚才那道题是我大意了，因
为我们公司也经营各种各样
的混凝土呀！

浇注混凝土到海中时，使用的是水
下不分离混凝土。一般将新鲜混凝
土投到水下，水泥或骨料会溶解到
水下而零乱。

这样，并不只是混凝土
很难使用，也会出现水
质污浊等环境问题啊。



③ 创造丰富的水边环境的混凝土

那么，第3题，

说到有关水边的
混凝土……

我！

超级堤坝！

不，不是！
答错了！

怎么可以……

那么，日比谷先生
等于摸错了一次牌，
所以这次由健次先
生来回答。

那么，重新一题。

说到有关用于水边的混凝土，可修建
防水灾的堤坝等，同时有益于创造良
好的水边环境的混凝土是什么呢？

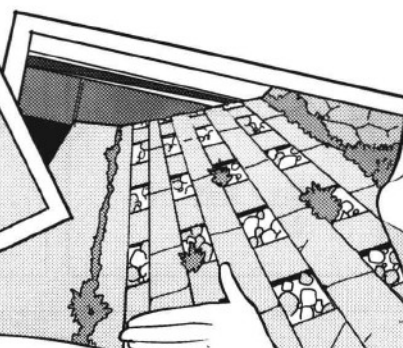
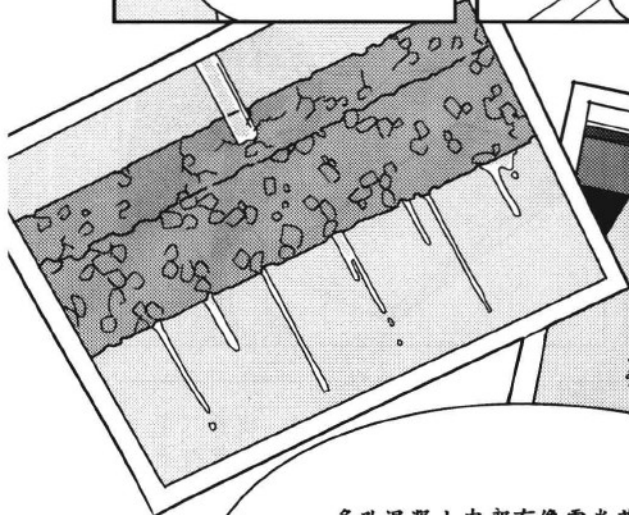


那是……



“多孔混凝土”!?

是的，回答正确!



多孔混凝土内部有像雷米花糖那样大的孔，植物在此空隙扎根或生物在此定居。



哼，我也是知道的，只要将问题听到最后的话……

哼哼

哼哼

④ 作为外壁材料使用的混凝土

那么，开始第4个问题。

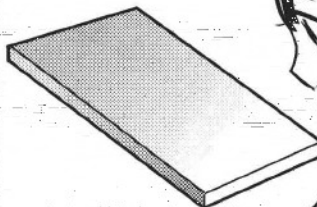
与多孔混凝土一样，中间有大孔的混凝土中主要用于外壁镶板等的混凝土是什么？



我！

那是“轻质气泡混凝土”。

回答正确。正式名称为“ALC”。



180°C

10个大气压

混合发泡剂的铝粉末使内部产生大量气泡。之后在高温高压环境下进行10h的养护，称为“高压蒸气养护”。

因为含有很多气泡，重量只有普通混凝土的约1/4，但与普通混凝土相比，具有约10倍的绝热性能。

因为绝热性强，所以才用于外壁镶板吧。





其原理在于裂缝产生则细菌开始活动，因细菌呼吸产生的二氧化碳会形成碳酸钙，由此裂缝闭合。



太厉害了！如果是自己能矫正的混凝土，耐久性也会提高，养护也会变得简单呢。




⑥ 月球使用的混凝土

余下的2个问题，


内容一下子跳到宇宙。

宇宙！？






使用用于开发月球的混凝土即称为“月球混凝土”的材料来建造基地。



那么，这种月球混凝土是怎样制造出来的呢？



怎么会，月球上使用的混凝土……

我

这个问题，我在书中读到过。



你说什么？





是的……

那是最后的问题!



什么?




在无水的月面如何制造月球混凝土的呢?

混帐!

我!

什么?



地球运来氢并从月球上的岩石内部提取氧，从而形成水。







啊

什么？

你又追着梓瑠小姐来到
这种地方！！

我不是说偶尔你要到
工地露个面吗！！



老，老爸……

可是，梓瑠小姐，我的未婚妻就要被别人抢走了呀！

什么，
说什么未婚妻？

你还在说那么早的事情呀？



什么？







事情解决了吗？



嗯。

看起来是啊！



可是，

我成为梓瑠小姐的伴侣，好吗？



嘻，嘻！

哇！



我喜欢你！



啊！？



我喜欢你……

真，真的吗？



当然！实际上根本没有比赛的必要。

但我想如果不这样做，对方不会信服。



原来是这样啊！



我，我也是一直非常喜欢梓璐小姐的。

我好开心！

补充说明

● 各种各样的混凝土

混凝土虽然与我们的生活息息相关，但其详细情况却并不被人所熟知，本书介绍了其基本内容。使用水泥与骨料等源于自然的材料或者身边的材料，通过材料选择、材料配合（调和）设计、结构设计以及施工等方法，混凝土构筑了拥有多种用途且多种功能的社会基础设施或建筑物，包括古代混凝土，它们是实际使用时间已经长达几千年的建筑材料。人们近年来仍在进行着有关混凝土各种各样的技术开发。

本章涉及的是显示混凝土新的可能性的几个事例。

● 超高强度混凝土——纤维增强混凝土

正如第1章的讲解所说的，至今广泛使用的原有型混凝土的压缩强度，其范围一般为 $20\sim 40\text{N/mm}^2$ 。与此相对，近年来开发出超高强度混凝土，压缩强度为 200N/mm^2 ，达到原先混凝土的10倍之高^[1]。为了实现非常高的强度，超高强度混凝土中设定水灰比为极其低的20%以下的同时，使用直径仅为 $0.1\mu\text{m}$ 的称为硅石烟雾的超微小粒子。水泥粒子的平均大小一般为 $10\sim 20\mu\text{m}$ ，因此硅石烟雾相当于水泥粒子的 $1/100\sim 1/50$ 。通过将这样的超微小粒子配置在水泥与骨料的空隙或者水合物的空隙，它们可以有效地填充到水泥固体中的微小空隙，因此获得极高强度成为可能。而且因为硅石烟雾的主要成分是二氧化硅（ SiO_2 ），因此会呈现与烟灰一样的火山灰活性，从而有助于成分本身的强度表现。

超高强度混凝土的用途之一是用于超高层 RC 建筑的支柱等。超高层建筑自身重力会增加，因此低层支柱会受到很大的压缩力。为了抵抗压缩力，扩大支柱的断面是有效的，但对于建筑物，支柱粗则意味着牺牲了使用空间。因此，超高层办公室、超高层塔楼等的超高层 RC 建筑物的1层支柱都有超高强度混凝土，虽没有扩大支柱断面，却可承受自身重力带来的较大压缩力。另外，越是往上的楼层，支柱承受的负荷越小，所以使用相对强度低的混凝土。同时，相对于土木结构物，桥梁的横梁也有使用高强度

混凝土的事例（图 6.1）。使用超高强度混凝土减少横梁数量且保持纤细的同时，因为可加长横梁的跨距，所以可减少桥墩的根数。可以说由于开发了超高强度混凝土这样的新材料，新的结构形式的桥梁得以出现，而且桥梁设计的新可能性也在逐渐扩大。



图6.1 使用高强度混凝土的人行过街天桥
（照片提供：鹿岛建筑有限公司）

混凝土本来就是抗压缩力强而抗张力弱的材料。人们进行着新材料开发来克服混凝土具有的本质弱点，那就是称为高韧性水泥复合材料的材料^[2]。原来的混凝土材料一旦张力起作用，一般就显示出了脆性（具有脆弱的性质）破坏，其表现是张力导致裂缝出现，由此无法承受其张力而很快损坏。与此相对，高韧性水泥复合材料不使用粗骨料即砂石，而是混合水泥、水、砂的物质，就是说在灰浆中加入纤维，在张力作用下裂缝出现后，应力并没有降低，它是具有所谓的“形变硬化特性”的材料。使用的纤维包括直径十至几十微米的聚乙烯纤维或维尼纶纤维等有机纤维以及钢纤维，其在混凝土中所占体积分数为1%~2%。因为高韧性水泥复合材料在受力时具有多数细裂缝分散的性质，所以它是表现高变形性能的材料（图 6.2）。

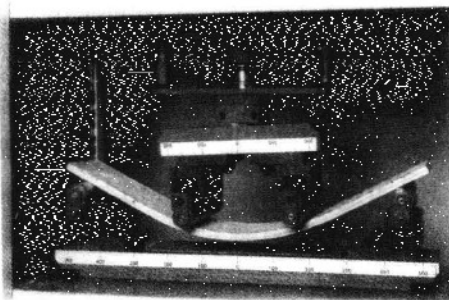


图6.2 高韧性水泥复合材料的优异变形性能
（照片提供：鹿岛建筑有限公司）

为了防止海啸或洪水影响我们的生活，人们在海岸或河岸修建了堤坝、防潮堤、防波堤等建筑物。这些混凝土建筑物作为在自然灾害中保护生命与财产的盾牌发挥了很大的作用。另外，我们能听到“混凝土巩固护岸”这样的说法，也有可能听到“冰冷的无机质人造物破坏自然”的说法。在河川改修中，混凝土覆盖两岸与河床的称为“三面覆盖”的方法在管理河川方面发挥了卓越的效果，但对原来动植物的生息环境来说确实产生了负面影响。在这样的背景下，近年来人们进行着混凝土的技术开发，以达到保护原有的自然环境与发挥护岸功能并存的目的。一般是指内部使用具有较大空隙（孔）的混凝土，即多孔混凝土。这种混凝土内部有着粗大的连续空隙，看起来形状类似米花糖。与表面光滑的普通混凝土相反，多孔混凝土的表面形状呈较大的凹凸。因此，使用多孔混凝土，水生昆虫或水生小动物可定居在内部的较大空隙中，而且土壤容易从表面进入到空隙，所以植物可扎根生长在混凝土上。可以说它是可以恢复水边本来拥有的多样生态系并创造丰富环境的混凝土（图 6.3）。



图6.3 使用环境考量型的多孔混凝土而形成的植被
(照片提供：鹿岛建筑有限公司)

近年来，因为城市化或世界性气候变化的影响等，局部性骤雨袭击城市的次数有所增加。用原来的沥青或混凝土铺路时，因为这些材料的透水系数低，雨水很难向路面下的地面渗透。其结果是地表面积水量增加，发生洪水或浸水的风险增高。与此相对，使用多孔混凝土替代从前的材料来铺路，雨水因容易渗透到地下，在洪水或浸水风险减少的同时，也有利于培育丰富的地下水。另外，据说因为混凝土内部可保持较多水分，在白天温度上升之际，水分从内部蒸发，也可防止因汽化热引起的热岛现象的温度上升。日本自古以来使用的方法是洒水，在庭院或道路洒水来获得夏天的清凉感，这是同样的原理。多孔混凝土可将降水存在多孔混凝土内部，气温上升时通过汽化热来降低温度，

我们期待这种做法能够缓和城市的热环境问题，即热岛现象。

● 裂缝自愈合混凝土

我们的生命体即使患上轻伤或疾病，通过自身所具备的修复能力或治愈能力也可恢复到原来的健康状态。例如，小的伤口会形成疮痂来阻止出血，并使外部细菌无法侵入，这些都是生命体本身具备的基于自然的修复能力，即自然治愈能力。混凝土因温度变化或收缩等体积变化而出现裂缝时，如果与人类一样可用自己的力量来医治伤口（裂缝），混凝土建筑物的耐久性会显著提高，而且维修管理也会非常容易。

通过混凝土自身的力量来修复出现的裂缝等，这听起来可能像是虚无缥缈的。但是，早就为人所知的现象则是，若是微小裂缝，混凝土内部存在的未水合水泥与外部进入的水发生反应，由此裂缝可自然闭合。这就可理解为混凝土具备自我修复的性质。1990年下半年，一种能感知外部刺激，能判断并适当处理且本身可执行的新型功能材料，即智能材料（也称机敏材料）得以推广，人们掀起了新材料的开发热潮^[3]。现在，犹如生命体一样的“裂缝自愈合混凝土”，有效利用了这种结构原理并在逐步实现中。其中之一就是东京大学生产技术研究所的岸利治教授进行开发的裂缝自愈合混凝土^[4]。这种混凝土在出现裂缝后若从外部供应水分，装在混凝土中的膨胀材、膨润材等材料在裂缝部位发生反应而使裂缝修复。若在固化后出现0.2mm左右的裂缝部位，裂缝会在约3日内愈合，那之后也能稳定地使裂缝最终闭合。特别在出现裂缝漏水问题的结构物中，期待裂缝自愈合的混凝土发挥着很大作用。利用其他原理的技术提案有，检查到裂缝出现后，将发热传感器嵌入混凝土内部，维修材料沿热溶解形成的管道来到裂缝处，从而完成自我修复^[5]。而且世界上还有这样的提议，预先将在混凝土内部的强碱环境中也能生存的细菌拌进混凝土中，若出现裂缝则细菌开始活动，通过细菌呼吸产生的二氧化碳形成碳酸钙来修复裂缝。

● 月球混凝土

国内外各种研究机构以月球作为宇宙开发据点并开发月面存在的资源以及探讨在月面建设基地。其实不仅仅是月球计划，在宇宙开发方面最重要的是尽量在当地供应宇宙活动所必需的物资。这是因为从地球运送物资的费用极高，而且有效利用地球外资源也是宇宙开发的目的之一。从此观点来看，作为建筑结构物所需的建筑材料，实际上最受

瞩目的就是混凝土。

在 NASA（美国航空航天局）的阿波罗计划中，历史上人类首次登月的同时，也成功采集到了月球的岩石。根据 NASA 的分析，其岩石所含的主要矿物有灰长石、橄榄石、辉石、钛铁矿等。月面因陨石冲撞等变成粉末的称为表层土，它被砂层覆盖，表层土中含有较多水泥原料的灰长石。这表明若使用太阳光能烧制灰长石，可能制造出与波特兰水泥或矾土水泥成分相近的水泥^[7]。所谓矾土水泥是以氧化铝酸钙为主要成分的水泥，是固化速度非常快的材料。而且，加工月球的岩石或砂则可能很容易制造出骨料。

但是因此，制造混凝土所必需的另一材料是“水”。非常遗憾，月球不存在水，而且也几乎没有构成水元素的氢。所以在制造混凝土之际，只需要从地球运送氢，运来的氢与月球岩石内部提取的氧可形成水。具体来说，就是利用月球上存在的丰富钛铁矿。钛铁矿用化学式表示为 FeTiO_3 ，是铁与钛的氧化物。通过地球运来的氢进行还原来提取钛铁矿含有的氧并制造水的方法是最为合理的^[8]。有人提出这样的建议，使用以上方法生产出的混凝土，制造出呈六角形的混凝土模块来构筑混凝土制造的月球基地（图 6.4）。

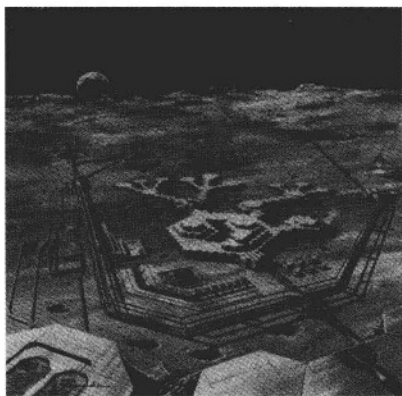


图6.4 使用月球混凝土的月球基地的概念图
(照片提供：清水建筑有限公司)

● 温故知新——吉田德次郎博士的最高强度混凝土

正如本章开头所讲的，由于混凝土技术的惊人进步，近年来人们开发出了压缩强度超过 200N/mm^2 的超高强度混凝土。这样介绍的话大家可能会认为直到最近才制造出了超高强度混凝土，实际不是这样的，东京大学教授吉田德次郎博士在 70 年前就制造了压缩强度超过 100N/mm^2 的高强度混凝土^[9]。虽然强度水平不及 21 世纪出现的超高强度

混凝土,但在无法使用高性能 AE 减水剂的时代,使用当时一般材料就得到那样的高强度,这一事实足以令现代人大为吃惊。

当时,据说一般使用的混凝土的压缩强度是在材龄 28d 为 $10\sim 30\text{N/mm}^2$,可看成高强度的是 $30\sim 40\text{N/mm}^2$ 。使用当时的普通波特兰水泥时,因为水泥浆的强度是在材龄 28d 最高为 $100\sim 120\text{N/mm}^2$,所以具有这样压缩强度的混凝土可认为是最高压缩强度,吉田德次郎博士将其命名为“最高强度混凝土”^[9]。他详细研究了波特兰水泥或骨料等材料的选定、配合、混合水量、浇灌、加固、养护等所应考虑的所有项目,并极其细致地配制试样,通过多次试验,从获得高强度的方法中选择出了最为简单的方法。

最高强度混凝土的强度表现状态如图 6.5 所示。现在使用 SI 单位系 (N/mm^2),当时使用的是 MKS 重力单位系 (kgf/cm^2),因此为了方便说明,以后的图表都使用 MKS 重力单位系 (kgf/cm^2)。因为 $1\text{kgf}=9.8\text{N}$,则粗略地换算得到 $1000\text{kgf/cm}^2 \approx 100\text{N/mm}^2$ 。最高压缩强度的混凝土中水灰重量比为 $22.0\%\sim 22.8\%$,水泥、细骨料、粗骨料的配合体积比定为 $1:1:2$ 。图 6.5 给出了 3 个试体压缩试验结果的平均值,压缩强度在材龄 3d 时超过 1000kgf/cm^2 ,1 年后达到 1200kgf/cm^2 。即使从现代的眼光来看,那也是成功获得了非常高的压缩强度。这里需要考虑的一点是在没有高性能 AE 减水剂的时代,他是如何制造出约 20% 水灰比的混凝土的。

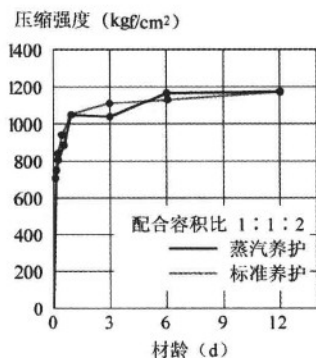


图 6.5 最高强度混凝土的强度表现^[9]

其制造方法如下。首先用捣砂杆捣实混凝土,在振动器加以振动的基础上,从模板的两端各自施加 100kgf/cm^2 的压力 8min。施加压力后,水从模板空隙浸出,用布擦干净浸出的水,测量布的重量则可求得浸出的水量。也就是说,其想法是在为得到充填模板的施工性能而加入某种程度的水分基础上,填满模板后,通过施加压力去除多余的水分。这样,即使不使用高性能 AE 减水剂来减少初期的单位水量,实际混凝土中含有的水被强制向外排出而达到低水灰比。它记录了制造 1 个试体需要花费约 1 小时 50 分钟。

这是花费大量的劳力才实现低水灰比的混凝土。

据说在那之后主导自充填混凝土开发的冈村甫博士发现最高强度混凝土与自充填混凝土的配合极其类似的事实，这让他感到非常惊讶^[10]。如果在吉田博士的论文中所显示的配合中添加高性能 AE 减水剂，令人吃惊的是竟然形成了自充填混凝土。图 6.6 是横轴为骨料容积率而纵轴为压缩强度的坐标图。图中的○将细骨料与水泥的体积比定为 1.5，●是同样将体积比定为 1.0 的试体。通过实验研究慢慢增加粗骨料对压缩强度产生的影响。如图 6.6 所示，在粗骨料增加骨料容积率超过 0.6 左右时，压缩强度急剧下降。因为骨料若增加，骨料之间互相接触，所以外部施加的压缩力不会到达浆糊部分，而无法挤出浆糊中含有的多余水分。考虑固化后的混凝土品质，并且在最大限度内确保骨料量的基础上得到最高强度，可以说强度急剧下降之前的那点也就是骨料容积率稍微低于 0.6 是最合适的。

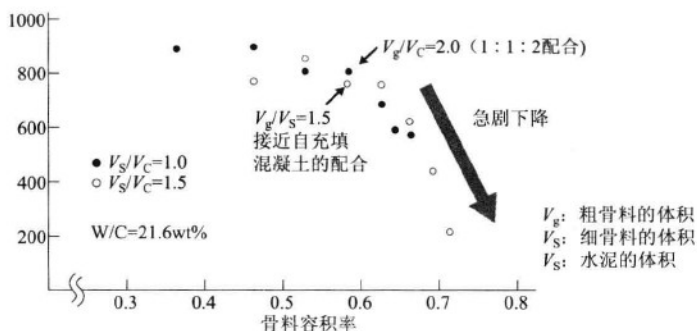


图6.6 骨料容积率的差异引起压缩强度的变化^[10]

另外，由图 6.6 可知，自充填混凝土的配合也同样相当于在强度即将开始下降之前的配合。实现自充填混凝土的配合与实现最高强度混凝土的配合是一致的，实际上这有其必然性。自充填混凝土在作为新鲜混凝土流动时，骨料之间不产生咬合或接触的骨料量则变得很重要。施加力的方式虽然有所不同（最高强度混凝土是体积力，自充填混凝土是剪切力），但考虑到骨料与浆糊之间产生力的接触，根据同样原理可决定最适合的配合。感觉在这里看到了超越时空的混凝土工学的普遍原理。

实施最高强度混凝土的开发是以用于“国铁”（当时）的关口隧道工程的混凝土组件为对象的。据说本来是通过盾构掘进法进行挖掘的计划，但预想到物资（铁）不足，人们开始着手研究用于混凝土组件的高强度混凝土以便替代铸铁组件。吉田博士的研究成果被充分、有效地利用，直到 1943 年的关口隧道完成。RC 组件的设计压缩强度是 600kgf/cm^2 ，1 个组件的混凝土分 5 次浇注，花费 2.5h 进行细致的加工。报告显示，实际的混凝土压缩强度在 1 年内就达到了 1080kgf/cm^2 ^[11]。那之后，它也被有效利用在日

本国内各地的地铁盾形组件或钢筋混凝土板桩的制造上，称霸混凝土强度 30 年以上的世界纪录，是它辉煌的成果^[12]。

吉田博士的论文^[9]提到，为了制造最高强度混凝土应具备以下条件。

- 水泥优良且具有高强度。
- 骨料是无杂质且强硬，具有混凝土中水泥浆以上的强度，形状是接近球或立方体，表面粗糙，与水泥浆的附着力大，空隙率小，具有适度的粒度以便得到适应制造作业的施工性能。

- 在混凝土发挥作用的范围，配合中增大水泥使用量。
- 在适应混凝土制造的范围內，尽量减少混合水量。
- 使用混合水量少的混凝土的基础上制造密度大的混凝土，需要进行充分的加固。
- 进行充分养护。

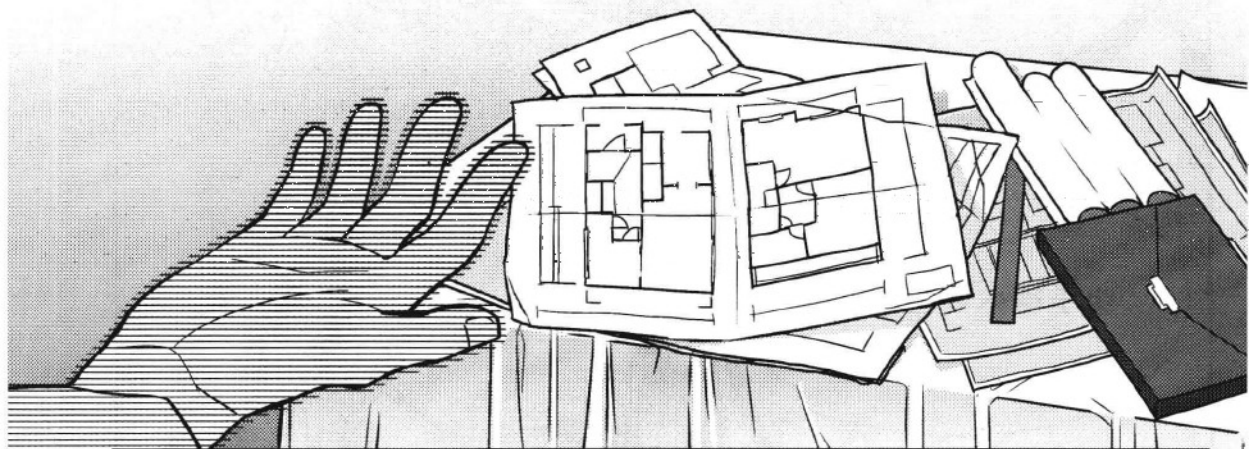
如上所述制造出的混凝土有相当高的强度，为了得到更高的早期高强度，以促进化学反应为目的需要进行高温养护。

对以上项目需要加以注意的是不要只停留在最高强度混凝土的制造上。吉田博士的经验告诉我们，这是制造耐久性强且品质好的混凝土的一般原则，可以说在现代也是应该遵守的普遍原则。

参考文献：

- [1] 三井健郎、小島正朗、米澤敏男、菅田昌宏、三橋博三：設計基準強度150~200N/mm²超高強度纖維補強コンクリートの開発と実構造物への適用、日本建築学会技術報告集 第16巻 第32号、21~26、2010年2月
- [2] 土木学会：コンクリートライブラリー 127号「複数微細ひび割れ型纖維補強セメント複合材料設計・施工指針（案）」
- [3] 岸利治：ハイポテンシャルコンクリートの実現に向けたひび割れ自己治癒技術の開発、コンクリート工学、49（5）、74~77、2011.5
- [4] Tae-Ho Ahn and Toshiharu Kishi: Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures, Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), 171-186, 2010.6
- [5] T. Nishiwaki, H. Mihashi, B. K. Jang and K. Miura: Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(2), 267-275, 2006
- [6] S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan and S.S. Bang: Remediation of Concrete Using Micro-Organisms, ACI Material Journal, 98(1), 3-9, 2001
- [7] Mishulovich, A. T.D. Lin, and S.W. Tresouthick: Lunar Cement Formulation, ACI, SP-125 pp.255-264 1991
- [8] Kanamori, H., et al.: A Cost Study of Concrete Production on the Moon, Space 90/ Engineering, Construction, and Operations in Space, ASCE, Albuquerque, Aug. 1990.
- [9] 吉田徳次郎：最高強度コンクリートの製造に就いて、土木学会誌第26巻第11号、pp.997~1006、1940.11
- [10] 岡村甫、小沢一雅：自己充填コンクリートの配合設計法の現状と課題、土木学会論文集No.496/V-24、pp.1~8、1994.8
- [11] 朝倉俊弘、久楽博、鶴英樹、瀧口将志：関門鉄道トンネル、特集/あの構造物は、今…、コンクリート工学、46（9）、71~79、2008.9
- [12] 國分正胤：吉田徳次郎先生の御遺稿 “最高強度コンクリートの製造に就いて” に関連する世界の反響、吉田徳次郎先生の御遺徳を偲んで、pp.69、社団法人土木学会吉田賞選考委員会、平成5年

后来，时光流逝……







[General Information]

书名 = 漫画工程材料之混凝土

作者 = (日) 石田哲也著

丛书名 = 欧姆社学习漫画

页数 = 187

SS号 = 13055952

出版日期 = 2012.07

出版社 = 科学出版社

尺寸 = 26cm

原书定价 = 32.00

参考文献格式 = (日) 石田哲也著. 欧姆社学习漫画 漫画工程材料之混凝土. 北京市: 科学出版社, 2012.06.

内容提要 = 本书以轻松有趣、通俗易懂的漫画及讲解的方式将我们身边经常会看到的知识融会其中, 让人们在看漫画, 听故事的过程中就能了解相关知识。