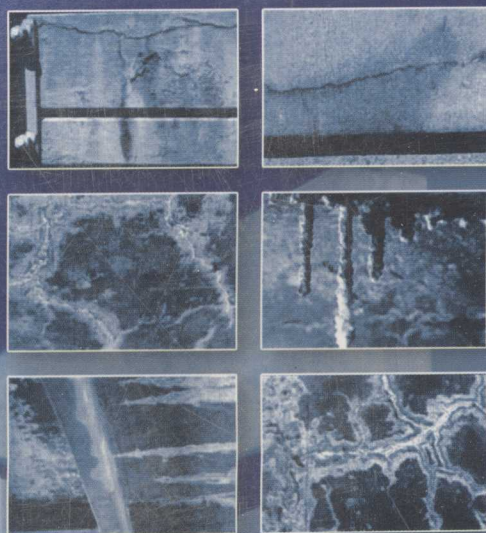


混凝土的 可见与不可见裂缝

The Visible and Invisible Cracking of Concrete

[美] 理查德·W·伯罗斯 著
廉慧珍 覃维祖 李文伟 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

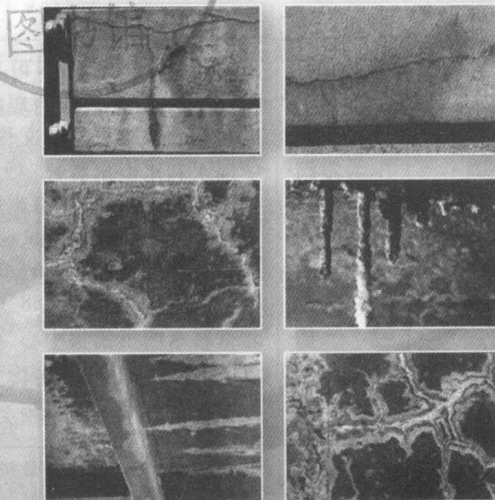
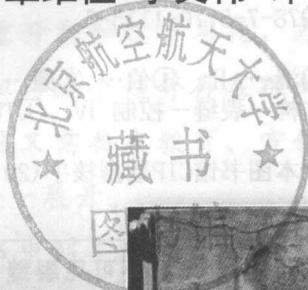
013069306

TU755.7
02

混凝土的 可见与不可见裂缝

The Visible and Invisible Cracking of Concrete

[美] 理查德·W·伯罗斯 著
廉慧珍 覃维祖 李文伟 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



北航

C1677644

TU755.7
02

内 容 提 要

本书通过对大量工程的观察、实测、研究和分析,指出水泥颗粒粉磨偏向磨细、水化趋向加快,以及混凝土设计强度等级不断提高,尤其是早期强度发展的加快,是混凝土结构早期出现严重开裂和过早劣化,乃至破坏的根源,是影响混凝土开裂和耐久性的因素,并提出了改善措施和建议,有独到的观点和看法,对现代混凝土工程的质量控制和技术发展有重要的启发作用。

本书内容丰富,资料翔实,图文并茂,有很强的实用性,可供从事土木工程和水工混凝土材料及耐久性研究的技术与管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土的可见与不可见裂缝 / (美) 伯罗斯著; 廉慧珍, 覃维祖, 李文伟译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013.7

书名原文: The visible and invisible cracking of concrete

ISBN 978-7-5170-1115-6

I. ①混… II. ①伯… ②廉… ③覃… ④李… III. ①混凝土结构—裂缝—控制 IV. ①TU755.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第180949号

书 名	混凝土的可见与不可见裂缝
作 者	[美] 理查德·W·伯罗斯 著 廉慧珍 覃维祖 李文伟 译
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.25印张 172千字
版 次	2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

译者前言

本书作者 Burrows 从 1946 年开始在美国垦务局 (United States Bureau of Reclamation, USBR) 从事混凝土耐久性研究, 并在科罗拉多州的青山坝对 104 块混凝土实验面板进行了长达 53 年的观察、实测和研究, 根据大量的实践, 提出了不少独特的观点、看法和改善混凝土耐久性的措施和建议, 对现代混凝土工程的质量控制和技术发展有重要的启发作用。当然, 混凝土材料和工程是非常复杂的, 下面提出译者的几点看法, 希望引起讨论。

(1) 混凝土的强度。全书贯穿的一个主题, 是作者用大量工程实例表明: 20 世纪 30 年代以来混凝土设计强度等级不断提高, 尤其是早期强度发展的加快, 是混凝土结构早期出现严重开裂和过早劣化, 乃至破坏的根源。我们赞同这个观点, 但同时也感到要扭转这个趋势存在很大的困难, 首先它涉及人们观念、设计理论的更新, 而这又需要在教育、宣传上付出; 同时, 它还涉及方方面面很多问题, 此处不一一展开。

(2) 矿物掺和料的作用。书中列举的实例表明了实验室的试验结果与现场的情况存在很大差异, 作者表达的这个观点我们十分赞同。但是, 任何材料在混凝土中的使用效果不仅和它本身的性质有密切关系, 同时还在很大程度上取决于使用的环境条件。例如, 文中所引掺粉煤灰混凝土的数据是在几十年前的技术条件基础上得到的, 大量的工程实践表明, 作者对粉煤灰等矿物掺和料在混凝土中作用的评价值得商榷。

(3) 关于养护。作者根据工程的实践指出在干燥环境, 尤其是干旱、刮风地区, 且暴露面积又大的混凝土工程, 长时间的湿养护反而会带来副效应, 弊大于利的新颖论点发人深思, 确实需要针对不同的工程和环境条件, 采用相适应的湿养护方式和养护期。

(4) 早期温度裂缝。尽管作者在多处肯定了德国慕尼黑工业大学 Springenschmid 教授在避免混凝土早期温度裂缝方面所做的开拓性工作, 但由于作者本人所做工作的局限性 (主要涉及干燥收缩引起的开裂), 而对于近几十年

来导致混凝土结构开裂和劣化的主因，即温度变形及产生应力的影响认识不足，使本书的整体作用和意义受到了局限。

十年前我们阅读了由美国混凝土学会（American Concrete Institute, ACI）发表的专题文献《The Visible and Invisible Cracking of Concrete》（混凝土的可见与不可见裂缝），之后经常将作者的观点介绍给国内同行，进行了内部交流，引起了强烈反响，大家希望能将此专题文献翻译出版，以扩大影响。经反复校译修改并获得版权后，我们终于完成了翻译工作，并正式出版而成此书。

译者 廉慧珍 覃维祖 李文伟

2013年1月18日

摘 要

当混凝土劣化时,通常都归咎于养护、骨料、外加剂和质量控制,水泥则很少受指责。或许这是因为人们相信,只要通过了标准测试,所有相同品种的水泥都是等同的。然而,品种相同但来自不同厂家的水泥,在延伸性(抗裂性)上却会有大幅度的差异。

现代水泥的组成和细度发生了很大变化,这是建筑业需求的反映;现代混凝土是70年来采用水化趋向加快、用量趋向加大的水泥的最终结果。这种趋势导致混凝土强度很高但也容易开裂,造成今天115000多座桥面板的劣化。桥面板和停车库是首先出现大量损坏的混凝土应用场合,因其体积变化处于较大的约束下,又受到较剧烈的温湿度变化。这种混凝土强度较高、弹性模量大,缺乏对因温度收缩、自生收缩和干缩引起的自应力松弛的能力。

对这些产生自应力的三个成因进行讨论,在关于水泥用量、水灰比、水泥细度、碱和外加剂及其他因素方面,本报告收集了自1905年ACI诞生以来,由大约300个研究者工作获得的数据。ACI的期刊为本报告提供了大量信息。

本报告对混凝土受约束开裂的试验方法现状进行了综述,这些试验对解决桥面板的问题是必要的。所提出的解决方案是通过这样的试验去选择延伸性良好的水泥,而且用量尽可能少。低细度、低碱和低 C_3A (铝酸三钙)的水泥表现出最优异的抵抗由于自生应力而开裂的性能。在德国的高速公路上,此方法已应用于290多米长、无大梁、无施工缝桥面板的施工。

水泥用量过少的混凝土会透水,而水泥用量太多的混凝土则脆性大,这是个两难的问题。为了得到高抗渗性而加入足够的水泥,水灰比为0.45,则混凝土就易于开裂。为解决这一难题,有人提出了一种方案:采用致密的、低水灰比、延伸性好的胶凝材料配制混凝土,类似于丹麦一些至今仍在使用的旧路(1934年)。

我们不要再没完没了地把眼光总盯在采用替代物、外加剂和钢筋及塑料增强等治疗办法上,而直接着眼于把石头粘在一起的胶结料——水泥吧!

关键词: 骨料; 碱; 碱—骨料反应; 自生收缩; 桥面板; 水泥—骨料反应; 水泥成分; 开裂; 徐变; 养护; 干缩; 细度; 粉煤灰; 高性能混凝土(High-Performance Concrete, HPC); 渗透性; 环收缩试验; 强度; 温度收缩; 水灰比。

前 言

以往混凝土因崩溃而劣化，现在则因开裂而劣化。

65 年前，McMillan (1931 年) 和 Young (1931 年) 调查了混凝土的状况，1931 年他们在 ACI 例会上发表了 40 幅照片，其中没有一幅是描述龟裂、网状开裂、不同类型收缩引起的开裂或碱—硅酸反应 (Alkali - Silica Reaction, ASR) 造成的开裂。照片主要显示崩溃和渗漏产生的问题，如下表：

1931 年 McMillan 和 Young 调查的混凝土状况	照片数量
剥落*	9
渗漏	7
捣固不良	5
劣质粗骨料	4
表面裂缝富集	2
腐蚀性水	1
软弱层 (水下浇筑)	1
良好的混凝土实例	11
网状开裂或干缩裂缝	—
碱—硅酸反应 (ASR)	—
总计	40

* 可能包括冻融。

McMillan 和 Young 的照片中两个突出的地方是：只用两袋水泥拌制的保持外形相当好的两处混凝土，以及建造于 1918 年的混凝土船 Faith 的几张照片。这艘船暴露于软水环境 13 年后，钢筋没有发生锈蚀，尽管混凝土保护层只有 12.7mm。

20 世纪 20 年代混凝土破坏是由于崩溃，90 年代则因为开裂。是什么发生了变化了呢？显然是水泥及其使用方法。在 20 年代，使用的是用量较低、水化慢的水泥，有时根本不进行水养护。在 1931 年，标准混凝土按 ACI 第 506 号

规范配制，水灰比为 0.66，28d 标准强度才 14MPa 左右。今天，桥面板的水灰比为 0.30，28d 强度有时超过 56MPa，尽管桥梁的设计强度约为 12.6MPa，桥面板获得了不太好的开裂名声。估计有超过 115000 座桥面板出现间距很小、贯穿的横向裂缝 (Kuauss 和 Rogalla, 1996 年)。

从混凝土崩溃到开裂的转变，开始于水泥制造商以快硬水泥满足公众需要的 1928 年。C₃S (硅酸三钙) 和水泥细度都开始增大，水泥用量也开始增加，最终导致现今桥面板开裂。

这表明我们为了追求强度已走得太快了。极具讽刺意义的是，按照 Mehta 的说法 (1996 年)：“……应用高强混凝土 (High-Strength Concrete, HSC) 75% 以上是为了耐久性，而不是强度”。

1931 年 McMillan 和 Young 的混凝土强度	照片编号
1	9
2	7
3	5
4	4
5	2
6	1
7	1
8	11
9	—
10	—
11	—
12	—
13	—
14	—
15	—
16	—
17	—
18	—
19	—
20	—
21	—
22	—
23	—
24	—
25	—
26	—
27	—
28	—
29	—
30	—
31	—
32	—
33	—
34	—
35	—
36	—
37	—
38	—
39	—
40	—

McMillan 和 Young 的照片中两个突出的地方是：(1) 用高水灰比混凝土配制的桥面板，以及 (2) 1918 年配制的混凝土。此外，照片中还显示了桥面板的开裂情况。这些照片是在 1931 年拍摄的，当时桥面板的开裂问题已经非常严重。照片中的桥面板是由水泥和沙子制成的，没有使用任何钢筋。这些桥面板的开裂是由于水泥的收缩和膨胀引起的。在 1931 年，水泥的收缩和膨胀是一个非常严重的问题。在 1931 年，水泥的收缩和膨胀是一个非常严重的问题。在 1931 年，水泥的收缩和膨胀是一个非常严重的问题。

目 录

译者前言

摘要

前言

混凝土开裂简历	1
干燥对混凝土的 6 种作用	4
混凝土何时何地干燥	8
徐变及其 70 年来向零徐变发展的趋势	10
湿养护	12
碱的影响——青山坝的经验	14
碱和早期水化物形貌的关系	20
碱的影响——Blaine、Arni 和 Evans 的工作 (1969 年和 1971 年)	21
Blaine 圆环收缩试验的可信度	24
推荐评价水泥的试验方法	25
其他开裂试验综述	26
水泥细度的影响	28
C_3A 的作用	31
C_2S (硅酸二钙) 和 C_3S 的作用	32
SO_3 的作用	33
水灰比和水泥用量的作用	33
高强混凝土	37
高性能混凝土	40
水灰比对碱—硅酸反应 (ASR) 的影响	41
低强混凝土的实例	42
贫混凝土耐久吗	44
早强剂	46
缓凝剂	46
骨料对收缩的影响	46
自生收缩	49
硅灰对 4 类收缩的影响	51
温度收缩	52
应当用什么方法检测开裂	56

自生收缩、干缩与温度收缩的相对大小	57
桥面板的开裂	57
安全系数过大的问题	61
建造耐久混凝土桥面板的处方	63
停车场	64
钢筋的锈蚀	65
除冰盐剥蚀	74
ASR 的误诊	75
解释水泥—骨料反应的假说	77
粉煤灰	78
建议的试验项目	81
混凝土对大气侵蚀作用的适应	83
解决混凝土耐久性问题	85
四点声明	89
建议	89
附录一 Springenschmid 的信	90
附录二 Jbebbington 的信	93
参考文献	94

混凝土开裂简历

下面所选事件涉及水泥细度、水泥含碱量、水泥用量、水灰比、强度和源自温度收缩、自生收缩和干缩的体积变化。

1905 年 混凝土用粗磨水泥、低 C_3A 和 C_3S 、0.60~1.00 的水灰比制成。由于需要 1 周才能达到足够的强度，在寒冷气候下很难操作。为了能在冬季施工，增加了水泥用量，有时还掺盐。这种状况由于增加 C_3A 含量而改善（在法国由 Jules Bied 发明）。通常不采用水养护，混凝土任由大气中的湿气来养护，不会因开裂而破坏，但可能会因冻融和盐蚀而崩溃。

1928 年 水泥以新的粉磨技术磨得较细，并增大了 C_3S 含量。Merriman 曾通过洗出水泥中的可溶碱解决了因水泥含碱而可能在硬化后不安定的问题。后来（1938 年），他为纽约城市供水署指定了低碱水泥，在那之前两年，Tom Stanton 发现了碱—硅酸反应（ASR）。

1931 年 ACI 颁布了第 506 号规范，要求基准混凝土水灰比为 0.66，（HPC）水灰比为 0.53，当时认为 14~28MPa 已足够了，而且对大多数应用也会是足够的。

1940 年 诊断出派克坝由于骨料中的蛋白石和水泥中的碱发生了反应而开裂（大部分都是硫酸钾，为什么将其称做碱？），确定了钠当量不得超过 0.60 以避免碱—硅酸反应（ASR）。Meissner 注意到干缩对派克坝在起作用，后来的实验表明，即使没有活性的骨料，碱也会引起开裂。他规定无论骨料有无活性，USB 的工程要使用低碱水泥。加利福尼亚州也采用了这项规定。

1941 年 公路局的 Jackson 报道在得克萨斯州公路路面采用 3~4 袋（每袋约 42.7kg）水泥的拌和物（水灰比约 0.70）10 年后外形保持极好，而芯样强度发展到 35MPa。

1942 年 麻省理工学院的 Carlson 发明了圆环收缩试验装置测量抗干缩开裂性能。他发现延长养护时间会使混凝土更易于开裂。后来 Powers、Neville 和 Mather 也说过这话。那时水胶比的范围是 0.50~0.80。

1943 年 波特兰水泥协会（Portland Cement Association, PCA）用 27 种水泥配制了混凝土在伊利诺伊州的 Scokie 进行了长达 25 年的暴露试验研究。他们发现（1968 年）水灰比高达 0.79 的混凝土，饱水并暴露在严酷的冻融条件下 25 年未受影响；他们还报道了水泥细度和化学成分也没有影响。然而，同样的水泥用于青山坝混凝土，并暴露在干燥的佛罗里达州气候中，结果由于高细度和高碱造成了严重的收缩裂缝，而此结果已由 Carlson 的圆环收缩试验所预测到。该裂缝被错误地归咎于碱—硅酸反应（ASR）。

1946 年 Jackson 调查了 137 座桥，发现其中建造于 1930 年以前的桥有 33% 正在劣化；而 1930 年以后建造的桥，则有 73% 在劣化。他认为这可能是由于 1930 年以前使用的是粗磨水泥。USB 对此予以确认。Brewer 和本书作者于 1951 年发表的一项研究，并由 Mather 所鉴定。该研究成果在参考文献中未列入，因为没有人想听到关于强度增长缓慢的水泥，即使是掺入粉煤灰时强度增长慢的信息。

1953年 国家标准局的 Blaine 开始了一个测试 199 种水泥的项目,其发表于 1965~1971 年间的^[1]数据表明:在圆环收缩试验中,水泥的含碱量和细度对干缩开裂影响很大。

1954年 PCA 的 Woods 报道:水泥组分和细度对引气混凝土的抗冻融性没有影响。USBR (Backstrom 和 Burrows) 则相反,用数据表明高细度和碱的有害影响,即使是引气混凝土。

1969年 Lemish 根据依阿华公路劣化的一项研究报道:强度增长慢的混凝土性能良好。Houk 等人首先进行了关于自收缩的研究,表明添加细颗粒的胶凝材料后混凝土自收缩增大,这是现今发现磨细矿渣和硅灰这种作用的前身。

1973年 是对耐久混凝土最不利的一年。那年批准了一个新规范,把 7d 最低强度从 17.4MPa 提高到 19.6MPa,从而把像青山坝使用的水化慢、效果却最好的 13 号水泥废弃了。道路工程师协会 (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) 把用于桥面板的最大水灰比降到 0.445;最低强度从 21MPa 提高到 31.5MPa。

再有,开始使用环氧涂层钢筋,而忽视会导致黏结强度损失 35% 的后果,结果造成了一些混凝土结构开裂。

1974年 Howard 展示了在 1966 年把最低强度从 21MPa 提高到 28MPa 后,弗吉尼亚桥面板开裂加剧的证据。

1979年 Carlson 说:由于温升高和干缩大,增加水泥用量对变形能力是没有好处的。他不了解自生收缩,当时这还没成为问题。

1982年 由 Carlson 在 1942 年发明, Douglas 和 McHenry 在 1943 年,以及 Blaine 在 1953 年采用的受约束混凝土开裂试验,由 Springenschmid 等人在慕尼黑工业大学得到改进后采用。目前在法国、以色列、加拿大、日本和美国都采用了这类方法。至今,美国只进行了约 40 个试验,而慕尼黑工业大学已进行了约 800 个试验。该试验正用于研究混凝土由于温度收缩、自收缩和干缩产生的自应力引起的开裂。

1986年 Novokschenov 观察了埃及和阿拉伯地区承包商用贫拌和物建造的别墅,表明几乎没有开裂现象,而同时由国际承包商建造的建筑物则开裂了。Mehta 在 1998 年对此予以确认。

1989年 在法国, Paillere 用改进的慕尼黑装置进行试验,首次报道了使用硅灰的低水灰比混凝土因自收缩和干缩叠加作用的易裂性。那些年里,另一些人也研究了硅灰的副作用,他们是 Wiegrink 等, Bloom 和 Bentur, Tazawa 和 Miyazawa, Schrag 和 Summer, Jensen 和 Hansen, Kompe, 以及 Springenschmid。

1992年 Cannon 等人说,是时候认清使用过高强度混凝土会引起开裂的问题了,应停止使用。他们讨论了安全系数怎样不合理以及规范如何导致过量水泥的使用。

1994年 Springenschmid 和他的同事指出:水泥含碱和高细度模数会加剧温度收缩和开裂。在所试验的 17 种水泥中,只有 7 种通过了他们的测试,而 6 种是低碱水泥。他们为德国高速公路上一座未设置施工缝的长达 292.6m 的桥设计了一种不易开裂的混凝土——一种贫拌和物 (水泥约 $280\text{kg}/\text{m}^3$, 粉煤灰约 $60\text{kg}/\text{m}^3$); 他们用 RILEM TC 119 的开裂架试验来选择水泥。

1995 年 对堪萨斯州 29 座桥开展了研究, Schmitt 和 Darwin 报告说: 约 45MPa 的混凝土比约 31MPa 的混凝土裂缝多 3 倍; Bloom 和 Bentur 发现: 低水灰比混凝土更易开裂; Kronlof 发现: 低水灰比混凝土更易产生塑性收缩开裂; Hasan 和 Rameriz 发现: 抗压强度从 36.7MPa 降低到 32.9MPa 可使其与环氧涂层钢筋的黏结强度比从 0.68 增大到 0.82。现在使用硅灰和高效减水剂 (High - Range Water - Reducing Admixtures, HR-WRA) 能使水灰比降到 0.2。Tazawa 量测到掺用 10% 硅灰, 水灰比为 0.2 的混凝土自生收缩可达 700×10^{-6} 。

1996 年 Krauss 和 Rogalla 关于 NCHRP 12-37 桥面板的研究 (TRB 第 380 号报告) 建议使用尽可能低的水泥用量和水化慢、延伸性较好的水泥, 以减少横向开裂。而 Goodspeed、Vanikar 和 Cook 在联邦公路管理局 (Federal Highway Administration, FHWA) 上演讲中的建议正好与其相反。

1998 年 Goodspeed、Vanikar 和 Cook 在 FHWA 宣称: 强度高的混凝土比较耐久。这与前述的 60 个实例大相径庭。在 1997~1998 年发表了 8 篇以上的论文指出高强混凝土的易裂性。在科罗拉多的丹佛及其附近, 有 7 座 HSC 桥梁在开裂; 3 座高性能混凝土示范桥、德克萨斯的卢埃特和圣安吉洛以及丹佛的 I-25 示范桥和 Yale 大街也已经开裂。很久以前, Springenschmid 的技术 (RILEM Test TC 119) 就已在美国应用。德克萨斯运输部的 Mary Lou Ralls 正在开发一种类似 Springenschmid 的开裂试验架, 来研究使用强度高的混凝土而开裂得更严重的卢埃特桥。

本书由 Celik Ozyildirim 所领导的集团进行评议。

70 年来, 水灰比的变化是趋向于减小徐变和增大温度收缩、自收缩和干缩导致的高自应力。图 1 的中心, 在水灰比为 0.58 处, 表示多年来实践的平均水平。图 1 向今天的混凝土技术专家们表明: 从发展的观点来看, 水灰比为 0.58 的情况不会就此为止。使早期强度高但耐久性差的另外三个趋势是由于高水泥细度、高 C_3S 和高碱含量。而高碱含量正是由于 20 世纪 70 年代发生能源危机, 水泥生产需要提高能效而带来的后果。

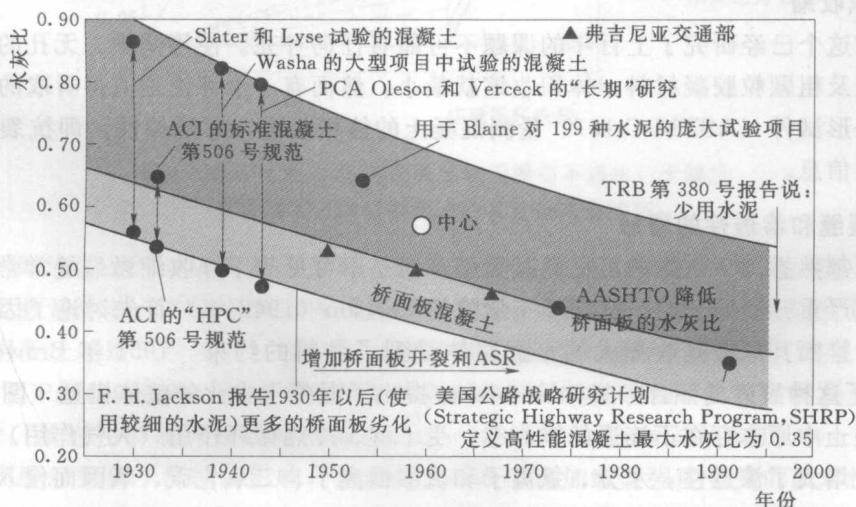


图 1 混凝土开裂简历

干燥对混凝土的 6 种作用

混凝土受干燥作用产生的 6 个作用是：塑性收缩开裂、体积收缩、微裂缝和渗透性增大、水泥—骨料黏结弱化、抗拉强度约降低 30% 以及如果再受潮会受折散力作用产生膨胀的倾向。

1. 塑性收缩开裂

新铺筑的混凝土表面因水分蒸发太快会产生收缩裂缝。1985 年 Paul Kraai 提出一种量测新铺混凝土板开裂的试验方法。与对照板相比较，它可以测试一些参数，例如掺加聚丙烯纤维的效果。该试验采用两台电扇在两块板上方吹风，然后通过计算进行对比。他并不知道在那之前 60 年 ACI 裂缝委员会主席 Bates (1925 年) 就从事过同一试验。现在提起此事是因为那时 Bates 曾令人惊讶地说过：“向潮湿试件的顶面吹风以造成快速蒸发，无论如何也不会增大开裂的趋势。”

为什么 Kraai 的试验产生了开裂，而 Bates 的试验却没有呢？这是因为 1928 年的粗磨水泥的黏性较小，不易开裂。与海滩上的淤泥和沙子类似，细颗粒的淤泥晒干后呈现出图案式的裂缝，而砂子就不会。那时的粗水泥像沙子般的偏粗，所以不容易产生塑性收缩裂缝。

混凝土拌和物中细颗粒增加时，塑性收缩开裂的趋势也会增大。水泥用量过高、水泥粉磨过细，以及掺入硅灰、磨细矿渣等细颗粒，增大了塑性收缩开裂的倾向。硅灰的这种作用在 1995 年被 Bloom 和 Bentur 所证实。

2. 体积收缩

笔者对这个已经研究了上百年的课题不可能有任何补充。使用坚固、无孔的骨料和最少量的水以及粗颗粒胶凝材料，体积收缩就最小。然而有一个评论是值得听取的：采用不受约束的条形试件 (ASTM C 157) 量测混凝土的体积收缩，对延伸性，即抗裂性并没有提供足够的信息。

3. 微裂缝和渗透性的增加

每个人都熟悉图 2 所示的可见裂缝类型，但是不可见的干燥收缩微裂缝常常是出现可见裂缝与更严重开裂的开始。麻省理工学院的 Carlson (1942 年) 首先讨论了因干缩造成的微裂缝，推断其原因是收缩大的水泥浆体受到了骨料的约束。1951 年 Brewer 和 Burrows 发表了这种裂缝的照片。1994 年 Mehta 提出了混凝土劣化的整体模型 (图 3)。该模型假定混凝土中原本存在不连通的微裂缝，受干湿、冷热循环作用 (大气作用) 而扩展并互相连通，增大了渗透性，水分、氯离子和硫酸根离子、二氧化碳、氧因而侵入，造成混凝土受冻融和其他机理引起的最终破坏。Brewer 和 Burrows 在 1951 年，Valenta 在 1968 年也曾叙述过这个假说。

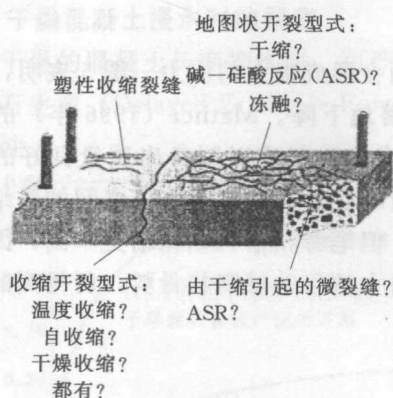


图2 可见的和不可见的裂缝图

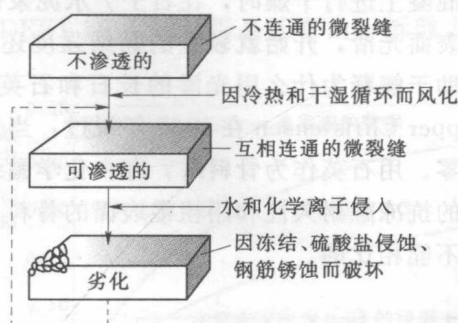


图3 Mehta教授的整体模型

T. C. Powers 在 1954 年, Backstrom 和 Burrows 在 1955 年曾论证干燥引起渗透性的增大。Powers 尝试量测水泥浆体的渗透性, 发现在干燥时它要开裂。后来采用尽可能缓慢的干燥过程, 将浆体在相对湿度 79% (干燥始于 80%) 下干燥了 3 年, 发现即使是非常缓慢的干燥, 低压水对浆体的渗透性也增大了 70 倍。他断定凝胶结构已经被破坏, 虽然在显微镜下没有观察到任何裂缝。Backstrom 和 Burrows 的试验表明 (图 4): 根据 Mehta 的模型, 水灰比为 0.35 的混凝土在干燥前是不透水的, 干燥使其变得透水, 且容易遭受冻融破坏。

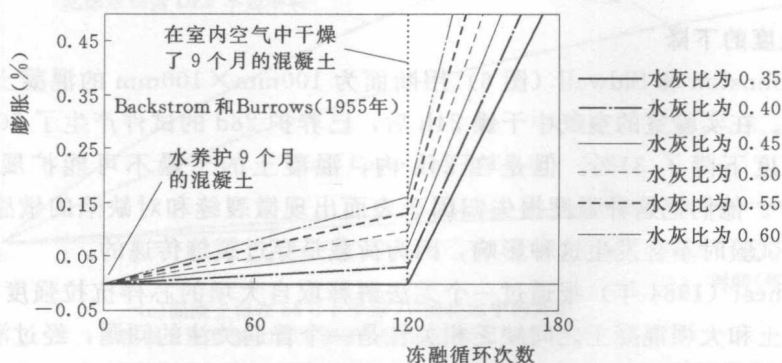


图4 水灰比为 0.35 的混凝土在干燥前不透水, 干燥后变得透水, 内部微裂缝使其易遭冻融破坏

Bager 和 Sellevold (1996 年) 发现, 缓慢干燥 (失去 42% 的蒸发水) 使小孔数量减少, 而大孔数量增加, 产生了较多网状连通孔。Sugiyama 等人 (1996 年) 发现由于含水量减少, 混凝土的透气性增大。Neville (1996 年) 报道, 烘干了的混凝土透气性增大 100 倍。Cady 和 Pu (1976 年) 在混凝土试件顶部用红外线加热表面, 发现当混凝土含水量低于 60% 时, 浸泡在甲基丙烯酸酯中吸入深度可达 89mm。Samaha 和 Hoover (1992 年) 研究了微裂缝对氯离子传输的影响, 发现烘干混凝土比加载至强度丧失的破坏性更大。

最后, 笔者制备并养护了水灰比为 0.40 的水泥浆体试件, 然后在 32℃ 条件下干燥。当把这 100mm 高的圆柱体放进 12.7mm 深的水中后, 5d 内就将水吸到顶部。

4. 水泥—骨料间黏结的削弱

当混凝土进行干燥时，在石子 / 水泥浆体的界面会形成很大的应力。图 5 表明，如果骨料的表面光滑，开始就较差的黏结强度还会更显著地下降。Mather (1996 年) 的这些实验有助于解释为什么用光滑的长石和石英颗粒组成的骨料难以制备出质量良好的混凝土。Nipper Christensen 在 1965 年说过：当表面光滑时，长石和水泥浆体之间的黏结力实际上为零。用石英作为骨料时，存在化学黏结作用，但笔者相信机械黏结更牢固，因为用石英时的抗冻融耐久性和用粗糙表面的骨料，如来自大峡谷的蜂窝状骨料，所得到的高耐久性是不能相比的。

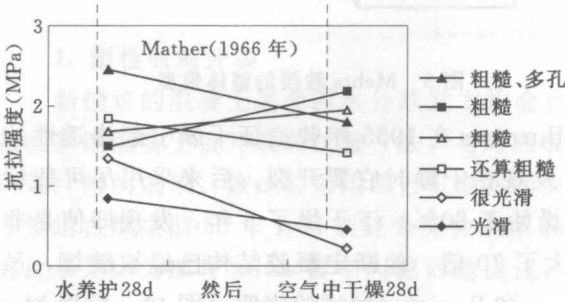


图 5 采用表面光滑的骨料时，水泥浆体-骨料界面不良的黏结会因干燥而进一步削弱。

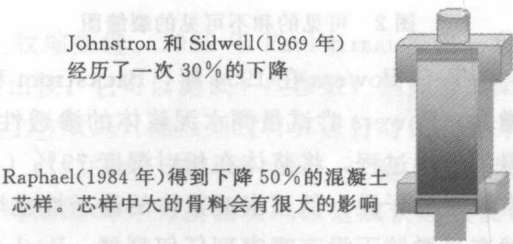


图 6 因短时间干燥出现的浅表裂缝和对缺陷的敏感性而造成抗拉强度显著下降

5. 抗拉强度的下降

1969 年 Johnston 和 Sidwell (图 6) 用断面为 100mm×100mm 的混凝土条形试件进行了拉伸试验。在实验室的空气中干燥 24h 后，已养护 28d 的试件产生了 50 个微应变的收缩，抗拉强度下降了 31%。但是在 24h 内，混凝土的干燥不可能扩展到表面以下 1.6mm 的地方。他们把这种强度损失归因于表面出现微裂缝和对缺陷的敏感性，并且认为在进行抗压试验时不会发生这种影响，因为荷载是穿过裂缝传递的。

J. M. Rapheal (1984 年) 报道过一个无法解释取自大坝的芯样抗拉强度损失的疑团。在实验室混凝土和大坝混凝土之间缺乏相关性是一个普遍关注的问题，经过漫长的调查之后，发现芯样在运往实验室期间，稍许的干燥和表面裂缝造成抗拉强度下降高达 50%。

一方面，Cady 等人 (1972 年) 把混凝土进行不同程度的干燥，发现中等程度的干燥使抗拉强度下降 32% (图 7)。由于在接近完全干燥时试件强度恢复，Cady 把这个结果归因于湿度梯度对抗拉强度的影响。另一方面，Johnston 和 Sidwell 将其归咎于对缺陷的敏感。两种现象可能都有。Wood (1992 年) 发现当混凝土小梁由于得克萨斯州的干旱而干燥时，抗折强度降低了 30%。

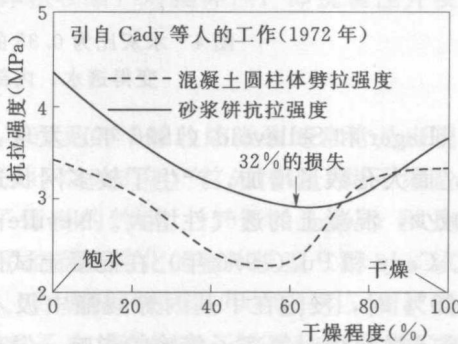
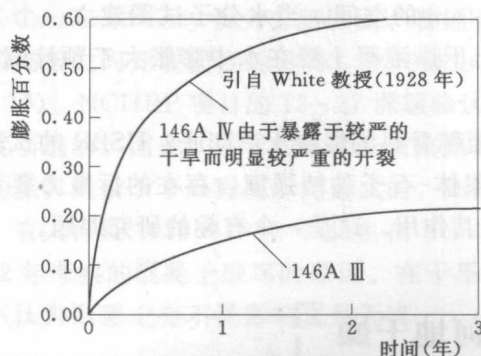


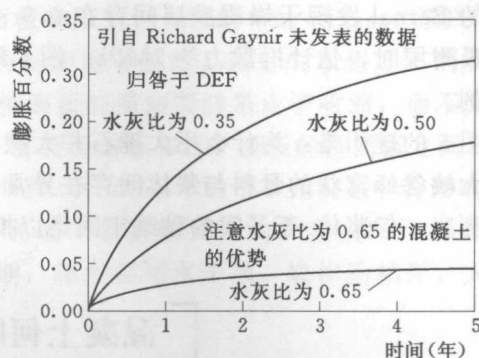
图 7 将混凝土含水量适中时抗拉强度下降 32% 归因为湿度梯度引起不同的拉应力

6. 干燥混凝土浸水时的膨胀

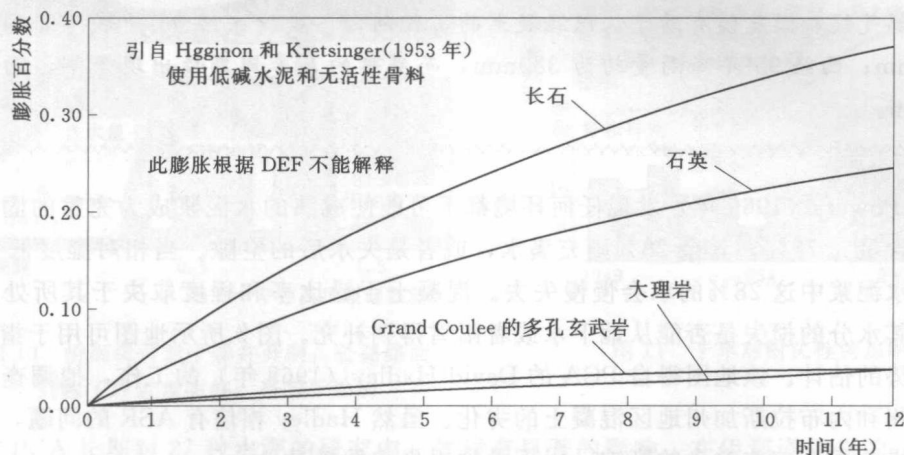
当干燥的混凝土长期饱水时,可产生远大于初始吸水时的膨胀。这种膨胀可归因于延迟钙矾石生成(Delayed Ettringite Formation, DEF)或ASR,但是还有由于拆散力引起的可能性。



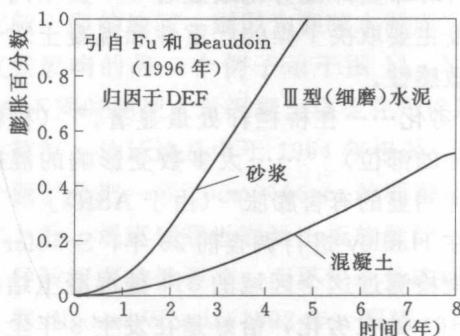
(a) 在 14 多年间 20 次湿干循环后水泥浆体在水中的膨胀



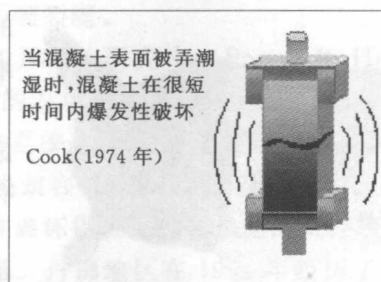
(b) 混凝土在 38°C 下干燥 400d 后在水中湿养护 28d 的膨胀



(c) 混凝土棒在 55°C 下干燥 7d 后在水中的膨胀
混凝土在雾室 21°C 下养护 28d 加上 55°C 下养护 7d



(d) 86°C 蒸养, 干燥后置于水中



(e) 107°C 下干燥, 加载到应力—应变比为 0.51

图 8 干燥的水泥、砂浆和混凝土接触水时膨胀, 这种现象有时归因于延迟钙矾石的形成, 但笔者认为可能很简单, 是由于拆散力撑宽了干燥收缩所形成的微裂缝