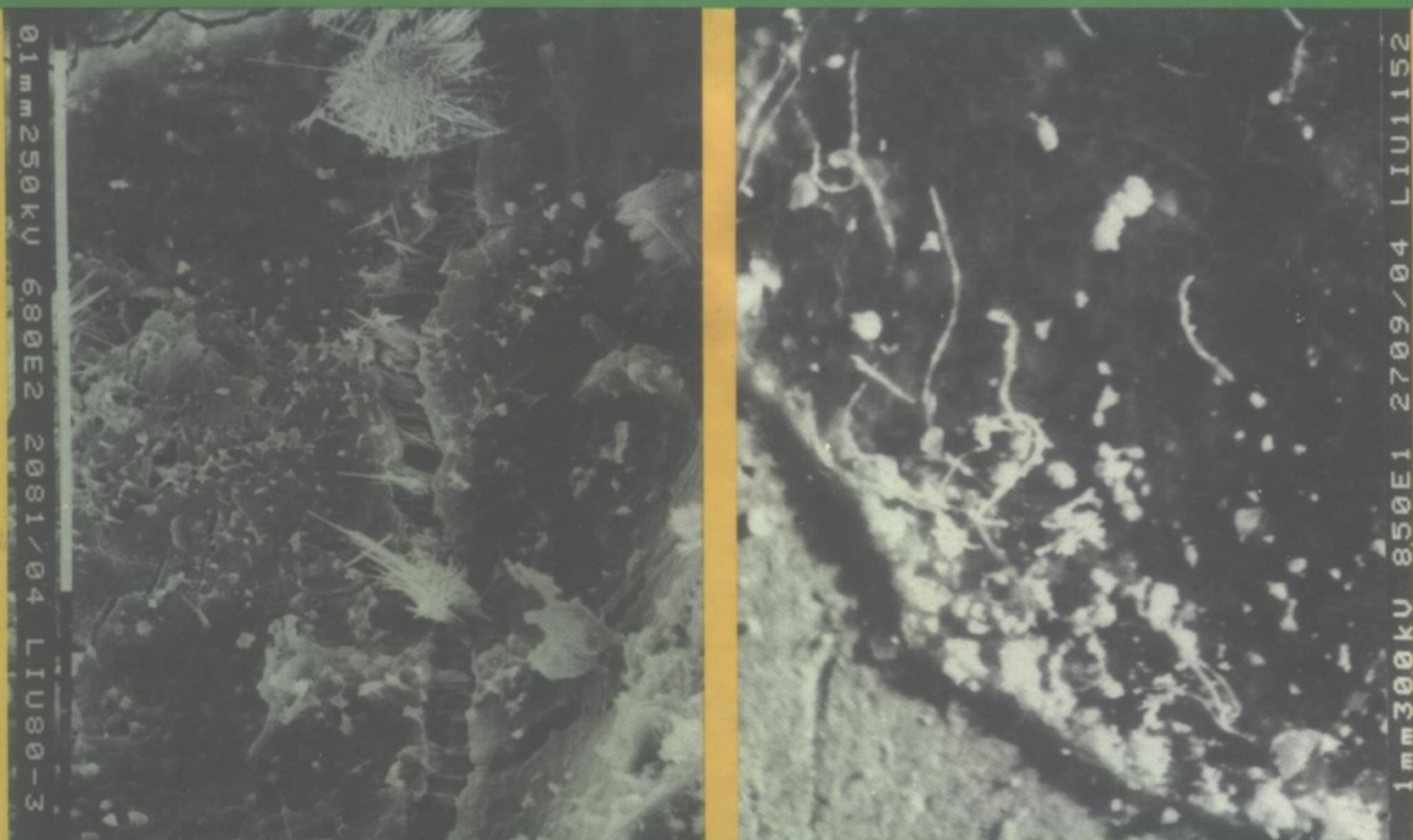


坝工混凝土专论(一)



混凝土碱—骨料反应

刘崇熙 著
文梓芸

华南理工大学出版社

坝工混凝土专论(一)

混凝土碱-骨料反应

刘崇熙 著
文梓芸

华南理工大学出版社
1995

图书在版编目(CIP)数据

混凝土碱-骨料反应/刘崇熙,文梓芸著 责任编辑 李彩英

广州:华南理工大学出版社,1995.12

ISBN 7-5623-0948-5

[坝工混凝土专论(一)]

I. 混 混凝土碱-骨料反应

II. ① 刘崇熙 ② 文梓芸

III. 混凝土坝—耐久性—建筑科学

IV. TU

2w62/2921

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮码 510641)

长委航测中心印刷厂印刷 各地新华书店经销

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

开本: 285×210 1/16 印张: 29 字数: 679千字

印数: 1000册

定价: 83元(精)

谨以此书
敬献
我们的老师

国际工程地质学家
国立巴黎高等矿业学院教授

M. 阿赫诺

地质学家
国立巴黎大学(IV,居里大学)教授

R. 谢斯但克

水泥、混凝土化学家
国立高等师范学院
法国巴黎水硬胶凝材料研究中心 教授

M. -M. 何古赫

矿物学家
国立巴黎路桥研究中心研究员、教授

A. 勒 河

岩石学家
国立巴黎高等矿业学院教授

R. 史图尤

国际水泥化学及反应动力学专家
法国国立布尔高尼大学终身教授

P. 巴 赫

国家博士
法国胶凝材料工业技术协会副总裁

J. 巴 宏

水泥、混凝土化学家
法国国立布尔高尼大学教授

A. 诺 纳

刘崇熙
文梓芸

1995 年圣诞节礼

OFFRONS CE LIVRE A NOTRE PROFESSEURS

Géologue de L'Ingénieur Internationale

Professeur A L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

Marcel ARNOULD

Géologue

Professeur A L'Université de Paris(VI)

R. SIESTRUNCK

Chimiste du Ciment et Béton

Professeur A CERILH-Paris-FRANCE

et A L'Ecole Normale Supérieure de Cachan

Micheline Moranville REGOURD

Minéralogiste

Rechercheur

Professeur

Petrologiste

Rechercheur

Professeur

A Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Andre LE ROUX

A L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris

R. STRUILLOU

Chimiste du Ciment International et Expert

de La Cinétique de Reaction Chimique

Pierre BARRET

Professeur Emerite A L'Université de Bourgogne

Docteur National

Joint-Directeur Général A L'Association Technique et Industrielle
du Liaison Hydraulique

Jacque BARON

Chimiste du Ciment et Béton

Professeur A L'Université de Bourgogne

Andre NONAT

LIU CHONG XI

WEN ZHI YUN

Noël en 1995

序 言

四十多年来,我国大坝工程建设,处于蓬勃发展时期,水能开发利用约达百分之九。展望未来,二十一世纪期间,势必更为辉煌,成千上万的大坝建筑物将星罗棋布,协调河山,兴利除害,造福人民。与此同时,我国坝工混凝土技术也将得到很大发展。为迎接下世纪坝工建设,建立我国坝工混凝土科学,已是当代学者的重要任务。

坝工混凝土一项关键技术是大坝混凝土的耐久性问题。我们这几代人创业的水利水电建设的文明,将通过坝工材料的耐久性而延续下去。如果我们不能把二十世纪,甚至二十一世纪创建的坝工建设保持下去,我们后代子孙,将见不到二十世纪以来创造的文明,那将是当代坝工材料科学工作者的耻辱。

混凝土出现一个自身腐蚀反应问题。这就是混凝土的碱-骨料反应。它是混凝土耐久性的“克星”。国外三十年代兴建的一些混凝土大坝,经过半个世纪的正常运转,突然在八十年代发生膨胀开裂,面临毁坏。大坝建筑物拖着“病害”残躯,连年整治、改造和不正常运转,无穷尽地被卷入巨额维修消耗中。例如美国的 Fontana 坝,加拿大的 Beauhanois 坝,法国的 Chambon 坝,巴西的 Moxoto 坝,等等。这些“前车之鉴”值得我们剖析。

其他非坝工的混凝土建筑物,由于碱-骨料反应引起的毁坏,更是屡见不鲜。丹麦早在五十年代调查了全国 431 座混凝土建筑物,其中 $3/4$ 的建筑物遭受了程度不等的碱-骨料反应的破坏;15% 的建筑物成为彻底毁坏的状态。英国在七十年代以前侥幸地误认为英国不存在混凝土碱-骨料反应。然而,自 1975 年英国发现首例碱-骨料反应的建筑物破坏事例后,迄今的调查统计表明已有数百座建筑物遭受程度不等的碱-骨料反应而导致开裂损坏,而且主要是缓慢反应的碱-硅酸反应。美国在八十年代,按照《全国桥梁目录》重点调查了全国桥梁的工况,统计表明全国约 50 万座公路桥梁中有 20 多万座桥梁已经损坏,每年平均有 150~200 座桥梁部分或完全坍塌。估算整修所有损坏桥梁的费用至少需 900 亿美元。在这些损坏的桥梁中,预计也不乏混凝土碱-骨料反应所引起,加州的桥梁损坏就是典型事例。

值得一提的是,法国 Chambon 坝位于阿尔卑斯运动构造带,许多地层原岩发生了变质,在阿尔卑山区很难找到理想的岩石骨料,只能就地取材利用片麻岩、黑云母片岩等变质岩制造混凝土骨料。法国阿尔卑斯区约有 477 座大坝,预计数十年后可能会“患上”Chambon 坝那样缓慢型碱-硅酸盐反应。据此推论瑞士阿尔卑斯、意大利阿尔卑斯等区域的混凝土工程也可能不能掉以轻心。

据刘崇熙博士在另一部专论——《混凝土碱-骨料反应和碱活性岩石在全球分布规律》——中,认为:斯堪的纳维亚冰川和北美冰川,将燧石、石英岩等活性岩石在冰川蚀区广泛撒播,以碱-

硅酸反应为主导。太平洋东、西两侧分布的岛弧来划分,西侧位于亚洲与澳洲之间在密克罗西亚岛弧线以西,有一条弧形安山岩成分的火山岛弧线;东侧为北美和南美两洲之间的中美洲(加勒比诸国),即大、小安的列斯岛弧和向风、背风群岛,组成中美洲安山岩质火山岩岛弧线,预计以碱-安山岩反应为主导,太平洋东、西两侧各国将是碱-硅酸反应的密集带(如日本国)。地壳的地盾和冈瓦纳古陆,如加拿大地盾、波罗的地盾、巴西地盾等等地区,以砂岩和石英岩为主要活性岩石,碱-硅酸反应占主导地位。在地台区,如俄罗斯地台、北美地台、南非地台等区域,以燧石、正石英岩、硬砂岩、火山岩或花岗岩为主要活性岩石,碱-硅酸反应占主导地位。在地槽区,如北美地槽、阿尔卑斯地槽、海西褶皱带、秦岭地槽等等,活性岩石多样化,各类碱-骨料反应都有分布。勾画出碱-骨料反应在全球分布的发展前景。

碱-骨料反应正发展成为全球性的混凝土工程灾害趋势。自1975年以来,迄今已召开了九次国际碱-骨料反应学术会议,平均每隔两年召开一次国际会议,其他如国际大坝会议、国际水泥化学会议等均设专题讨论,足证这一问题的迫切性和重要性。公开发表的论文约2000多篇。50多年来,国内外迄今仍无一部专著问世,系统化和综合化方面,是一学科领域应加强的工作。

本书是坝工混凝土专论之一:《混凝土碱-骨料反应》,在我国,甚至国外将是第一部混凝土碱-骨料反应系统专著。作者刘崇熙博士和文梓芸博士长期从事混凝土碱-骨料反应研究。以后又在法国巴黎矿业学院、巴黎大学(IV)、布尔高尼大学、国家路桥研究中心等等高等学府和研究机构从事碱-骨料反应的专题研究。他们将长期积累的国内外研究成果,编著成书。本书的特点,首先对各类活性岩石的地质、成岩成因、分布规律进行了探讨;对各类活性岩石的碱活性规律,专章进行了系统论述;对国内外混凝土工程的碱-骨料反应事故作了重点叙述和分析;同时对碱-骨料反应的有关机理问题作了探讨。尤其值得注意的是,书中对缓慢型碱-骨料反应,有较详细的讨论,这对于要求安全使用期很长的大坝与重要建筑物,具有重要意义。书中还附有大量珍贵的图表和数据资料,有很大参考价值。

我国将进入跨世纪的宏伟建设,迫切需要一大批专著问世。本书的出版不仅有益于推动碱-骨料反应问题的研究,对于国内专家学者将宝贵的学识经验汇编成册,出版更多的专著,起到带头作用。

中国工程院院士

姜中伟

1995年11月12日

序 言

公元前 256~251 年间,李冰父子兴建的都江堰灌溉工程,至今仍迸发出智慧和生命的火花。都江堰工程能留给后人二十二个多世纪的“永恒”遗产,究其原因,一是这个工程有极其完整的多学科规划设计体系;二是这个工程的主要建筑材料,是优选耐久的天然岩石,铸造成不朽的工程。

建造一座混凝土大坝,所付出的人力、物力和财力,是很巨大的。它的作用是“功在当代,造福后人”。因此,大坝必须能长期运用,筑坝材料必须是“不朽”的。当代混凝土材料科学工作者,日益重视要从“人工自然”工程的高度上从事研究。

混凝土耐久性问题,涉及到两类物质运动的热力学体系。一类是既有物质交换,又有能量交换的开放体系,这就是混凝土与环境间的相互协调和获得耐久发展的科学问题;另一类是没有物质和能量交换的孤立体系,这就是混凝土自腐蚀的科学问题。混凝土碱-骨料反应是典型的混凝土自腐蚀问题。它导致国内外不少混凝土大坝开裂破损。

混凝土碱-骨料反应被发现以来,已有半个多世纪,它一直是混凝土材料学者主攻的课题,形成混凝土材料学—矿物岩石学—化学相互交叉的独立学科。自 1975 年冰岛首都雷克雅维克召开的第一届混凝土碱-骨料反应国际会议以来,迄今已召开了九届国际会议,发表的论文约有 2000 余篇。但是,半个世纪以来,至今尚未见到一部混凝土碱-骨料反应专著问世。

本书正是一部《混凝土碱-骨料反应》系统专著。书中对八类活性岩石,每类开辟专章论述,理论与实用结合密切。对防止和抑制碱-骨料反应;对碱-骨料反应体系中的反应机理、膨胀机理和抑制机理;这两个方面各辟专章论述。在铺陈和排布上,比较系统和紧密。本书的出版,有助于我国混凝土碱-骨料反应研究的发展。

长江科学院在五十年代即开展碱-骨料反应的实验研究工作,本书作者刘崇熙博士是专题研究的主力,他们系统地研究碱-燧石反应、碱-蛋白石反应、碱-硅酸盐岩石反应,抑制碱-骨料反应。成功地研究出丹江口大坝混凝土用的大坝水泥安全含碱量系统论据。对长江流域内的大坝工程,如葛洲坝工程等等的碱-骨料反应作了系统鉴定。基本解决了这些工程的碱-骨料反应问题。在长江流域内至今未出现一处工程有碱-骨料反应。八十年代,应法国学界的邀请,刘崇熙博士赴法从事专题研究,对法国已倒塌的 Malpasset 大坝混凝土碱反应问题;对阿尔卑斯山区的 Chambon 大坝混凝土的黑云母片岩和片麻岩的骨料,进行了碱活性研究;对法国中央高原蛋白石的碱反应领域,进行了系统的专题研究。受到法国学界很高的评价。本书的另一位作者文梓芸博士,对碱-硅反应的基础性化学问题作了多方面的探讨,取得的成果,两位作者是相互印证的。两位作者的合作,对我国碱-骨料反应研究,起着推动的作用。

本书不仅对坝工混凝土碱-骨料反应起有启示和指导作用,对其他诸如市政混凝土工程、交通混凝土工程、建筑混凝土工程也会达到同样的作用。

中国工程院院士 **文 伏 波**

1995 年 11 月 20 日

坝工混凝土专论(一)

——混凝土碱-骨料反应

前 言

1 概 述

按现代界面化学理论概念,混凝土中水化水泥-骨料的界面之间,并不是一个惰性体系。水化水泥-骨料界面之间仍然发生着化学反应。反应向着两个方向发展:一种是良性反应,即水泥浆-骨料界面间产生胶凝性的化学反应,增强界面之间胶凝能力—握裹力,使混凝土中各组元之间反应形成整体,例如水泥浆-石灰石骨料间的反应。另一种是恶性反应,即水泥浆的碱-骨料界面间产生的化学反应,导致某些岩石骨料中活性 SiO_2 溶解,生成碱-硅络合物,在界面上产生膨胀力,导致混凝土开裂而失去整体性。

这种恶性反应,首先发现的是 1940 年 Thomas E. STANTON。他系统分析了美国 California 州 Ventura 县 Santa Claus 河上 1914—1915 年兴建的几座混凝土桥的开裂原因,证明是水泥中碱与骨料(安山岩)中活性 SiO_2 发生了化学反应,生成一种近似水玻璃成分的凝胶,导致混凝土膨胀开裂。由此建立了混凝土碱-骨料反应(Alkali—Aggregate Reaction—AAR, 或 Alkali—Granulat Reaction—AGR)新的学科。

2 规 模

自 1940 年以后,一些主要国家,如美国、丹麦,以及英国等,相继开展了混凝土建筑工程的普查。美国发现混凝土建筑物由西至东,横贯美国各州大量发生着碱-骨料反应的膨胀开裂,尤其是西部加州最为严重,膨胀开裂的分布规模也最为密集。在丹麦境内,混凝土建筑物更有不同程度遭到膨胀毁坏,尤其是南部岛屿,分布规模最为密集。调查的 431 座混凝土建筑物,其中 3/4 遭受程度不等的碱-骨料反应的破坏。

二次世界大战以前,遭受碱-骨料反应的混凝土建筑物,主要分布于北半球一些发达国家。他们兴建的混凝土工程最多,发生碱-骨料反应的机遇相应增多。

二次大战以后,国际环境出现了和平建设时期,南半球各国开展了大规模的经济建设,混凝土碱-骨料反应相继在南半球不断地出现。

混凝土碱-骨料反应已经成为一个全球性的灾害问题。总的格局是北半球继续增多,例如英国、日本已是屡见不鲜;南半球则不断新生,如澳大利亚、印度、南非、新西兰、赞比亚、……等等。

3 类 型

经过半个世纪的调查研究,归纳碱-骨料反应的类型是:

最主要的是碱-硅反应(Alkali-Silica Reaction—"ASR")

其次是碱-碳酸盐反应(Alkali-Carbonate Reaction—"ACR")

再次的是碱-硅酸盐反应(Alkali-Silicate Reaction—"ASR")

其中:碱-硅反应体系中,活性 SiO_2 岩石有蛋白石、玉髓石族、石英岩、硬砂岩、火山熔岩。

碱-碳酸盐反应体系中,活性碳酸盐岩石,人们专指的是加拿大的 Kingston 粘土质白云石石灰岩。但作者分析认为,危害最普遍的是硅化石灰岩,活性成分是其硅化作用的 SiO_2 。

关于碱-硅酸盐反应,加拿大有此发现,主要是某些砂岩、千枚岩、泥板岩等页状硅酸盐岩石骨料发生的缓慢膨胀开裂。J. E. Gillot 和 E. G. Swenson(Eng. Geol. 7. 181. 1973)分类为碱-硅酸盐反应。有的学者认为这种分类,还有待大量研究工作论证,才能成立。

这种种类型碱-骨料反应(AAR. AGR),按作者的观点,本质上都是碱-硅反应(ASR),随后伴生有钙矾石的膨胀(和黄铁矿 Pyrite 的分解增生 SO_4^{2-} 离子作用)。关于碱-碳酸盐反应中的去白云石化作用(dedolomization),在地质地层中时有发生,主要是减缩反应。

4 活性岩石分布

作者在《坝工混凝土专论(二)》——它是本文的姊妹篇,其中统计了混凝土碱-骨料反应在全球分布规律。发现北美洲混凝土碱-骨料反应分布是:横贯加拿大地盾和北美地槽,并密集于东西海岸褶皱带。南美洲混凝土碱-骨料反应分布于巴西地盾、巴塔哥尼亚陆台,和西部安第斯褶皱带。欧亚大陆的混凝土碱-骨料反应主要是斯堪的纳维亚冰川砂砾沉积区,古火山熔岩区和地槽区。非洲大陆上的碱-骨料反应仅发现非洲南(南非)一冈瓦纳地盾和开普褶皱带,还有东非裂谷两侧—中近东地区。太平洋东西两侧的岛弧群上的混凝土碱-骨料反应,理论上将会是重灾区:东侧的中美洲群岛弧主要是火山安山熔岩质,西侧的岛弧群位于密克罗西亚岛弧线以西,也是火山安山熔岩质,已证明日本的碱活性岩石是安山岩质。

常见的碱活性岩石,见下表。

5 膨胀开裂的程度

混凝土碱-骨料反应的破坏速度、程度,不尽相同。有些可快在 1~2 年内就使建筑物开裂毁坏;有些则延迟到 20~60 年后才突然发生。英国在 70 年代前幸运地认为无碱-骨料反应灾害的国家,可是 70 年代突然发现 20~30 年前兴建的混凝土建筑物面临着碱-骨料反应的侵袭,有些混凝土大坝工程经评审而宣布报废和重建。加拿大有一座混凝土坝,因碱-骨料反应的膨胀破坏,不仅混凝土严重开裂和加速混凝土老化;同时还引起发电机组机座位移和变位,机组无法运行;大坝一端的办公控制室也发生变位倾斜,当开槽扶正时,膨胀应力的释放瞬间,出现巨响的振荡。

6 展 望

碱-骨料反应问题,已是混凝土工程的全球性灾害问题。自 1974 年在 KØge 召开的第一次国际学术会议以来,这 20 年间已召开了 9 次国际学术会议,平均每两年就召开一次国际学术会议。每一届国际学术会议的规模是逐届扩大,由几个人扩大到 300 余人,提供的论文由几

表 常见的碱活性岩石

碱-骨料反应类型	活性岩类型	活性组分
碱-硅反应	I 生物—化学沉积岩 燧石岩类(结核状和层状) 蛋白石岩(原生和次生) 硅化的岩石(次生硅化的岩石) 硅质岩(砂岩,硬砂岩,硅质板岩,石英岩)	无定形 SiO_2 、微晶石英(玉髓) 无定形 SiO_2 、微晶石英(玉髓) 无定形 SiO_2 、微晶石英(玉髓) 无定形 SiO_2 、变形石英
	II 酸性火山喷发岩石 流纹岩,安山岩,凝灰岩等	火山玻璃质,隐晶质硅酸盐,变形石英,鳞石英
碱-碳酸盐反应	I 硅化作用的碳酸盐岩石 (实属碱-硅反应类)	无定形 SiO_2
	II 某些致密的泥质白云灰岩 (如 Kingstone 白云质石灰岩)	无定形 SiO_2 ,黄铁矿、蒙脱石
碱-硅酸盐反应	I 水热变质的岩石 硅化页、片状的岩石(如千枚岩)	无定形 SiO_2 ,页状硅酸盐
	II 接触变质的岩石	变形石英,鳞石英,页状硅酸盐

篇发展到数百篇。其他有关的学术会议也设专门议题讨论,例如水泥化学国际会议,国际大坝会议等,都设有碱-骨料反应的专题。可见这个问题已引起各国工程专家的重视。

展望未来,混凝土碱-骨料反应问题,在下个世纪里仍是一个热门学科研究问题。导致混凝土工程事故,各国都会屡见不鲜,造成的经济损失更为巨大。我国混凝土工程也将难逃厄运、备受苦果。我国的北部、东部地区会演变成为重灾区、高发区。

这本书是作者近 40 年来的一些研究成果,很多成果未予公开发表,同时集作者多年阅录的有关文献书刊,撰成专论。同时鉴于国内外至今尚无一部有关混凝土碱-骨料反应的专著问世,作者不才希望抛砖引玉,引出其他学者纷纷撰述专著问世,共同迎接我国经济建设高潮的到来。

刘崇熙于长江科学院
文梓芸于华南理工大学 1995 年 10 月

目 录

序 言

前 言

第一章 碱-蛋白石反应

第一部分 关于蛋白石的地质	(1)
1 关于硅质岩	(1)
1.1 关于硅质岩的演变	(1)
1.2 地史中硅质岩的建造	(3)
1.3 硅质岩的类型	(6)
1.4 硅质岩分类	(6)
2 蛋白石岩矿性质	(9)
2.1 概述	(9)
2.2 蛋白石质岩石的化学成分	(9)
2.3 蛋白石的结构水	(9)
2.4 蛋白石结构	(11)
2.5 蛋白石理化性质	(16)
2.6 蛋白石一些典型结构	(17)
2.7 硅酸和蒸发环境的化学问题	(19)
2.7.1 硅酸溶液的形成	(19)
2.7.2 硅酸的不同种类的可溶性、溶解速度	(20)
2.7.3 离子、pH 对硅酸溶解度的影响	(22)
2.7.4 硅酸的沉淀	(24)
2.7.5 关于硫酸盐还原和硅酸的沉淀和有机物质的作用	(25)
2.7.6 二氧化硅酸沉淀过程中状态转化的温度与深埋关系	(25)
2.8 岩石组织结构的变化	(26)
第二部分 关于碱-蛋白石反应	(27)
3 碱-蛋白石反应	(27)
3.1 中国蛋白石的碱活性	(27)
3.1.1 蛋白石标本	(27)
3.1.2 蛋白石的活性	(27)
3.1.3 碱-蛋白石的膨胀反应	(27)

3.1.4 硅/碱($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)比关系	(30)
3.1.5 膨胀反应的历程	(33)
3.2 法国蛋白石的碱活性	(35)
3.2.1 蛋白石标本	(35)
3.2.2 蛋白石的化学成分和矿物组成	(35)
3.2.3 碱-蛋白石的膨胀反应	(35)
3.2.4 安全含碱量	(39)
3.2.5 膨胀反应历程及其分类	(39)
3.2.6 危险区毁坏结构的观察	(42)
3.3 澳大利亚蛋白石的碱活性	(50)
3.3.1 蛋白石的组成	(50)
3.3.2 蛋白石的活性	(50)
3.3.3 碱-蛋白石的膨胀历程	(50)
第三部分 本章小结	(52)
参考文献	(53)

第二章 碱-燧石反应

第一部分 关于燧石的地质	(55)
1 燧石的地质	(55)
1.1 综述	(55)
1.2 成因	(56)
1.2.1 关于生物—化学作用	(56)
1.2.2 关于化学作用	(56)
1.2.3 关于硅化作用	(57)
1.2.4 关于硅化交代作用机制	(58)
1.2.5 关于火山活动有关的作用	(59)
1.3 成分	(59)
1.4 分类	(59)
1.5 结构	(60)
1.5.1 硅质生物成因结构	(62)
1.5.2 化学成因结构	(62)
1.5.3 硅质岩的成岩后生作用的结构	(63)
1.5.4 热液硅化交代蚀变结构	(66)
1.5.5 硅化交代与硫酸盐的关系	(67)
1.6 燧石岩中石英(SiO_2)结构的类型	(67)
1.6.1 粗石英结构类型	(68)
1.6.2 微石英或微晶石英结构类型	(70)
1.6.3 纤维石英的结构类型	(75)

1.7 几种燧石的典型结构.....	(82)
1.7.1 巴黎盆地的硅化结构.....	(82)
1.7.2 阿尔卑斯山区的 Eygrieres 地方的玫瑰色泥灰岩中硅质结核	(82)
1.7.3 阿尔卑斯山区 Reillanne 地方的石灰岩乔木状硅化结核	(88)
1.8 燧石中石英晶体粒径大小与 SiO_2 溶解度关系	(91)
第二部分 关于碱-燧石反应	(93)
2 碱-燧石反应	(93)
2.1 中国燧石的碱活性.....	(93)
2.1.1 秦岭概况.....	(94)
2.1.2 秦岭燧石	(94)
2.1.3 燧石的碱活性.....	(96)
2.1.4 燧石碱活性和碱-燧石膨胀反应的关系	(98)
2.1.5 碱-燧石反应的膨胀历程	(106)
2.2 丹麦燧石的碱活性	(106)
2.2.1 丹麦燧石分布概况	(106)
2.2.2 丹麦燧石特征	(107)
2.2.3 丹麦燧石的碱活性	(107)
2.2.4 丹麦燧石的膨胀反应	(108)
2.3 英国燧石的碱活性	(108)
2.3.1 英国燧石的分布	(108)
2.3.2 英国燧石的特征	(109)
2.3.3 英国燧石的碱活性	(110)
2.3.4 教训	(110)
2.4 美国燧石的碱活性	(112)
2.5 澳大利亚燧石的碱活性	(113)
第三部分 本章小结	(116)
参考文献	(117)

第三章 碱-火山熔岩反应

第一部分 关于火山熔岩	(119)
1 火山熔岩地质、地理.....	(119)
1.1 火山、火山活动.....	(119)
1.2 火山的形态和构造	(120)
1.3 侵入岩和侵入作用	(121)
1.4 火山的分布	(122)
2 火山熔岩的结构、构造.....	(123)
2.1 熔岩流的岩体构造、形态.....	(123)
2.2 火山熔岩结构	(123)

2.2.1	火山熔岩结构要素	(123)
2.2.2	火山熔岩的结构	(124)
2.2.3	火山熔岩的构造	(133)
3	火山岩的分类	(137)
3.1	QAPF 分类法	(137)
3.2	TAS 分类法	(138)
3.3	野外分类法	(139)
4	火山碎屑岩的结构和构造	(139)
4.1	火山碎屑岩的一般特性	(139)
4.2	火山碎屑岩的结构	(140)
4.2.1	火山碎屑物的基本形态	(140)
4.2.2	火山碎屑岩的结构	(141)
4.3	熔结火山碎屑岩的结构、构造	(145)
4.3.1	熔结火山碎屑岩的结构	(145)
4.3.2	熔结火山碎屑岩的构造	(145)
4.4	凝灰熔岩、沉凝灰岩的结构	(147)
4.4.1	凝灰熔岩的结构	(147)
4.4.2	沉凝灰岩的结构	(149)
5	火山熔岩中碱活性组分	(149)
5.1	原生高温石英相	(149)
5.2	火山玻璃相	(150)
5.3	火山熔岩蚀变相	(150)
第二部分 碱-火山熔岩反应		(151)
6	碱-火山熔岩反应	(151)
6.1	中国火山熔岩碱活性	(151)
6.2	法国火山熔岩碱活性	(155)
6.3	美国火山熔岩碱活性	(163)
6.4	日本火山熔岩碱活性	(165)
第三部分 本章小结		(172)
参考文献		(172)

第四章 碱-石英岩反应

第一部分 关于石英石的地质		(174)
1	石英岩的成因	(174)
2	石英岩的主要矿物	(180)
第二部分 碱-石英岩反应		(182)
3	美国对碱-石英岩反应的研究	(182)
4	印度对碱-石英岩反应的研究	(184)

5 加拿大对碱-石英岩反应的研究	(186)
第三部分 本章小结	(197)
参考文献	(197)

第五章 碱-砂岩反应

第一部分 有关砂岩的地质	(199)
1 砂岩的一般概念	(199)
1.1 砂岩的沉积环境	(199)
1.2 砂岩的种类	(199)
1.3 砂岩的分类	(200)
1.4 砂岩成熟度	(200)
1.5 砂岩中碎屑物的粒形	(201)
1.6 砂岩中碎屑颗粒	(204)
1.7 砂岩的主要矿物组成	(204)
1.8 砂岩中胶结物	(205)
1.8.1 硅质胶结	(205)
1.8.2 碳酸盐胶结	(208)
1.8.3 铁质胶结	(209)
1.9 砂岩的成岩作用	(211)
1.9.1 结晶成核作用	(211)
1.9.2 压溶作用	(211)
2 正石英岩—石英砂岩	(213)
3 硬砂岩	(216)
第二部分 碱-砂岩反应	(218)
4 概况	(218)
5 加拿大波茨坦砂岩的碱活性	(219)
6 加拿大硬砂岩的碱活性	(223)
第三部分 本章小结	(227)
参考文献	(229)

第六章 碱-硅质碳酸盐反应

第一部分 关于碳酸盐岩石的地质	(230)
1 碳酸盐岩石的分布	(230)
2 碳酸盐岩石的矿物	(231)
3 碳酸盐岩石的化学成分	(232)
4 碳酸盐岩石的成岩作用	(232)
5 碳酸盐岩的分类	(235)
6 碳酸盐岩的结构	(236)