

碱集料反应及其预防措施

吴岳新¹, 杨长辉²

(1. 湖南省岳阳市路桥公司, 湖南岳阳 414100; 2. 重庆大学B区 材料系, 重庆 400045)

摘要: 论述了碱集料反应的特点及其对混凝土工程的危害, 概述了国内外有关碱集料反应的标准及试验方法, 分析了预防碱集料反应的主要技术措施, 并结合重庆地区资源和环境条件, 提出了预防碱集料反应的建议。

关键词: 碱集料反应; 膨胀; 矿物掺合料; 抑制

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

1 碱集料反应及其危害

碱集料反应(Alkali-Aggregate Reaction, 简称 AAR)是指混凝土中的碱(K_2O 、 Na_2O)与活性集料之间发生的化学反应。碱集料反应包括两种主要类型: 碱硅酸反应(Alkali-Silica Reaction, 简称 ASR)和碱碳酸反应(Alkali-Carbonate Reaction, 简称 ACR), 其中, 碱硅酸反应较为普遍, 因而也是研究最多的碱集料反应类型(本文除特别说明外主要讨论碱硅酸反应)。

与混凝土中胶凝材料的水化反应过程不同, 碱集料反应的结果不是提高和改善混凝土的结构, 而是在混凝土中产生膨胀应力, 至一定程度后引起混凝土开裂或混凝土结构破坏。碱集料反应是混凝土的重要耐久性指标之一, 由于具有反应过程缓慢、影响因素十分复杂、引起混凝土开裂的时间难预测且一旦发生破坏几乎无法修补等特点, 素有混凝土“癌症”之称。早期发现的碱集料反应膨胀破坏主要集中在水工工程中, 但随着时间的推移, 碱集料反应破坏逐渐扩展到了混凝土路面、桥梁、隧道涵洞、铁路轨枕、机场跑道等工程领域, 日本、美国、南非、加拿大、英国等尤其突出, 造成了巨大的经济损失。以加拿大为例^[1], 该国有 30 万根预应力钢筋混凝土轨枕系蒙特利尔地区一构件厂于 1974~1977 年间生产, 价值约 400 万加元, 后因碱集料反应破坏, 重换破坏轨枕需耗资 3 400 万加元(合人民币 1.53 亿元)。可见碱集料反应破坏付出的昂贵代价。我国有关碱集料反应的研究起步较晚, 但在集料碱活性检验方法以及碱集料反应的防治方面进行了大量卓有成效的工作, 二十世纪八十年代以来, 我国相继在桥梁、道路、机场等混凝土工程中发现碱集料反应破坏, 地域涉及华北、华东以及东北; 我国北方寒冷地区, 防冻盐与碱集料反应的协同作用引起混凝土路面破坏的问题较突出, 虽然所造成的损失不大, 但由于单位混凝土总碱含量因水泥碱含量呈增长趋势以及含碱外加剂的应用而有所提高, 工程出现碱集料反应破坏的可能性增大, 这一问题已引起工程界的广泛重视。

2 碱集料反应的影响因素

碱集料反应所以倍受工程界的广泛关注, 重要原因之一是碱集料反应受多种因素的影响而难以控制。碱集料反应发生必须同时具备三个方面的条件: 足够数量的碱(以 Na_2O 当量计)、活性集料和水。与之相关, 影响碱集料反应的主要因素包括两个方面: 来自混凝土内部的因素和来自工程

· 收稿日期: 2001-03-05

作者简介: 吴岳新(1966-), 男, 湖南岳阳人, 工程师, 主要从事路桥工程施工研究。

应用的环境因素,前者包括碱含量、活性集料种类和含量、混凝土中掺合料的种类和数量,后者主要指环境的湿度、温度和侵蚀介质。

2.1 碱对碱集料反应的影响

碱是混凝土碱集料反应的内在根源之一,不含碱或碱含量过低,混凝土不会发生碱集料反应破坏。引起碱集料反应的碱不是通常化学意义上的碱,而是指碱金属钾、钠的化合物形式存在的碱,以氧化钠当量计。碱主要来源于水泥、外加剂、掺合料、集料以及拌合水 and 环境介质。混凝土中碱的含量不仅影响碱集料反应的速率,而且还影响碱集料反应产物—碱硅凝胶的组成(主要是碱硅比和钙硅比两个参数),进而,影响反应产物的膨胀能力。其它条件一定时,碱含量提高,碱集料反应膨胀增大,当碱含量提高到某一水平后(对应于该水平的碱含量称为临界碱含量),由于反应产物的碱硅比增大,碱硅凝胶的粘度降低,膨胀能力下降,致使碱含量提高,碱集料反应膨胀反而降低。图1是砂浆碱集料反应膨胀的影响曲线^[2]。

值得说明的是,混凝土中各组分带入的碱并不都是碱集料反应的有效碱,对于掺合料而言,硅灰带入的有效碱为其酸溶碱的量,矿渣带入的有效碱为其酸溶碱总量的50%,而粉煤灰贡献的有效碱仅为其酸溶碱总量的17%^[3]。

2.2 活性集料

活性集料是碱集料反应的必需反应物之一,活性集料对碱集料反应的影响主要体现在其种类、含量和粒径三个方面。引起碱碳酸反应的活性集料主要是石灰质白云石,目前已发现的由这类活性集料引起的碱集料反应较少,大量碱集料反应是由含活性二氧化硅的集料引起的。这类集料包括蛋白石、玉髓、隍石、玛瑙、磷石英、方石英、微晶石英,具有较强波状消光的石英和火山灰玻璃体等,虽然它们均参与碱硅酸反应,但由于其内部结构差异较大,使其碱活性差别较大,一般,蛋白石、玉髓的碱活性较高。

活性集料含量对碱集料反应膨胀的影响规律与碱含量的影响类似,存在一个最不活性集料含量(活性集料品种不同,相对应的最不活性集料含量也不同),当含量低于这一值时,活性集料含量提高,碱集料反应膨胀增大,超过这一含量时,活性集料含量提高,碱集料反应膨胀降低。活性集料含量对砂浆碱集料反应膨胀的影响规律如图2所示^[2]。

其它条件相同时,活性集料的粒径分布对混凝土或砂浆碱集料反应的膨胀也有一定影响,粒径分布主要影响碱集料反应的活性点数量和速率。研究表明^[4],碱集料反应膨胀随活性集料粒径的增大而降低,当活性集料粒径在0.03~0.05 mm之间时,碱集料反应膨胀最大。

2.3 水

水或潮湿环境的存在是碱集料反应发生的必要条件之一。碱集料反应膨胀的发生主要来源于反应产物的吸水膨胀。如果混凝土或砂浆中不能提供反应产物吸水的条件,即使碱与活性集料发生了化学反应,反应产物也不会膨胀。这也是采取物理措施如对结构表面进行防水处理防止碱集料反应膨胀破坏的技术

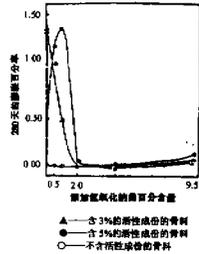


图1 掺氧化钠砂浆碱集料反应膨胀的影响

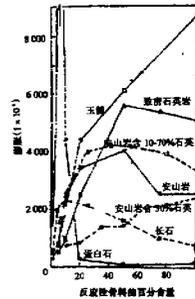


图2 反应性骨料含量对膨胀的影响

基础。根据研究^[2],砂浆的膨胀量与砂浆中自由水的含量呈线性关系(如图3)。

2.4 掺合料

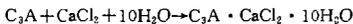
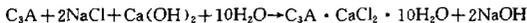
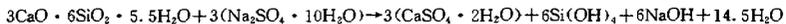
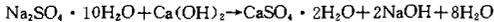
掺合料的种类和数量对混凝土碱集料反应有重要影响,通常,矿物掺合料对碱集料反应具有抑制作用。具体情况在本文后部分说明。

2.5 温度

如同其它化学反应,温度对碱集料反应有一定影响,温度对碱集料反应速率的影响符合阿仑尼乌斯定律。但温度对碱集料反应膨胀的影响具有自身特点。研究表明^[5],其它条件相同时,砂浆的碱集料反应膨胀率随温度的变化呈现如下次序:40℃>80℃>20℃。

2.6 其它因素的影响

在寒冷地区,水泥混凝土路面通常使用防冻盐以确保交通安全。通常使用的防冻盐有氯化钙和氯化钠。此外,含硫酸钠早强剂以及含该组份的复合外加剂的应用较为普遍。根据研究^[6],当混凝土中含有活性集料时,存在如下化学反应:



上述反应表明,无论是硫酸钠还是防冻盐均与混凝土中的碱集料反应之间相互协同作用,促进碱集料反应,加速混凝土性能的劣化。目前,有关硫酸钠、防冻盐与混凝土碱集料反应协同作用的机理尚有待进一步研究。

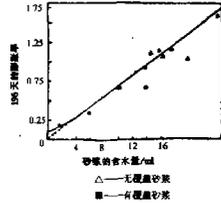


图3 砂浆中含水量与膨胀之间的关系

3 碱集料反应的检验方法

碱集料反应是混凝土中的碱与活性集料之间的化学反应,虽然是一种无机化合物之间的化学反应,但其反应过程受诸多因素的影响,进程缓慢,发生破坏的时间难以预测。碱与活性集料之间发生反应可以在混凝土拌合后的几天(8~10 d左右)开始,而膨胀破坏往往在几年甚至几十年后发生。由于碱集料反应的上述特点,在判断混凝土是否发生碱集料反应时,不能完全按实际条件模拟,一般采用快速试验方法予以评定。快速试验方法通常采用下列措施:采用高碱拌合物或将试样浸入碱溶液以增加碱的浓度;将试样置于较高的温度环境如38℃、80℃或采用压蒸处理;将试样置于高压环境;将试样置于高湿度或水溶液中;将集料破碎成粉末或砂粒状以提高其比表面积。

各国标准对碱集料反应的试验规定有所差别,具体试验过程可以查阅相关技术文献。总体而言,碱集料反应的分析、评定和鉴别主要包括以下方法:

- 岩相法;
- 化学法^[7~9]——包括 ASTM C289、溶出法、渗透膜法、化学收缩法等;
- 岩石柱法——ASTM C586^[10];
- 砂浆棒法^[11~14]——ASTM C227、AFNOR P18-85、CCA 砂浆法、压蒸法等;
- 混凝土棱柱体法^[14~17]——CAN/CSA A23.2-14A、AFNOR P18-587、南非试验法、BS1812法、压蒸法等。

4 碱集料反应的抑制与预防

实践证明,混凝土工程一旦发生碱集料反应膨胀破坏,几乎无法修补。由于具有上述特点,有关预防和抑制碱集料反应的研究倍受工程和学术界的重视。预防和抑制碱集料反应的措施包括两大类:物理措施和化学措施,前者主要通过混凝土表面进行防水处理、选择不含活性组分的集料和使用低碱水泥等,后者包括使用矿物掺合料和掺加化学外加剂等,虽然原理有所不同,但实际应用中往往采用几种途径综合处理。具体途径包括:

4.1 使用非活性集料

活性集料是碱集料反应的基本组分,如果集料不具有碱活性,碱集料反应自然不会发生。使用非活性集料可以根治碱集料反应,其实施需要有良好的资源和可靠的检验方法为基础。但在有些地区,使用非活性集料需要付出昂贵的经济代价。

4.2 使用低碱水泥

使用低碱水泥,从而将混凝土的总碱量控制在足够低的水平,可以有效防止碱集料反应破坏的发生。通常所说的低碱水泥是指其碱含量低于水泥重量0.6%(以氧化钠当量计)的水泥。目前,在碱集料反应较严重的国家或地区如南非、美国、日本、加拿大等,均将使用低碱水泥作为预防碱集料反应的重要措施。

4.3 限制混凝土的总碱量

一定碱量是混凝土发生碱集料反应的必要条件之一,因此,限制混凝土中碱的总量可以预防碱集料反应。该措施与使用低碱水泥的目标一致,但它将混凝土中各组分所带入的总碱量作出规定,控制条件更严格,技术上也更合理。根据资源、环境的具体条件,许多国家均规定了预防碱集料反应时单位体积混凝土允许的最高碱含量(以氧化钠当量计,以下同)^[2],如英国—4 kg/m³,澳大利亚约—2 kg/m³,新西兰—5 kg/m³,美国—3.3 kg/m³,日本—3 kg/m³,南非—2.1 kg/m³。

4.4 使用矿物掺合料

使用矿物掺合料是目前国内外广泛应用的、最经济有效的抑制碱集料反应的技术措施。通常使用的矿物掺合料有硅灰、矿渣、粉煤灰和沸石粉。矿物掺合料之所以能有效抑制或延缓碱集料反应,主要在于其部分替代水泥后的稀释作用、二次水化反应降低反应产物中氢氧化钙的含量并形成较多能吸附一定量碱的低碱性水化硅酸钙。矿物掺合料对碱集料反应的抑制效果与其组成和性能有关,相对而言,在几种常用矿物掺合料中,对碱集料反应抑制能力的强弱次序为:硅灰—粉煤灰—矿渣—沸石,这与它们对碱的滞留能力强弱一致。

一般,硅灰的有效掺量约10~15%,但有研究认为,硅灰只能延缓碱集料反应而不能抑制碱集料反应的发生。

当集料碱活性较高时,矿渣掺量越大,对碱集料反应的抑制效果更好。对于矿渣抑制碱集料反应的有效掺量,目前没有一致结论,各国标准规定的矿渣掺量范围为40%~80%^[12],一般认为应大于50%,此时,混凝土的安全碱含量可达8.5 kg/m³,当矿渣掺量达80%时,即使混凝土总碱含量高达10 kg/m³,混凝土也不会发生AAR膨胀,这些研究结果与Smolozky理论模型相符^[1](矿渣掺量超过72%后,混凝土的有效碱量为零)。

粉煤灰对碱集料反应有良好的抑制作用,其有效掺量范围为30~50%,目前,粉煤灰掺量大于30%的混凝土发生碱集料反应破坏的事例尚未见报道。

由于对混凝土强度及工作性的影响,抑制碱集料反应时,沸石的掺量一般控制在水泥用量的20~40%,且经500℃热处理的沸石粉具有更好的抑制碱集料反应的功效^[13]。

4.5 表面处理

在混凝土表面涂敷涂层以阻止外界介质特别是水和侵蚀介质向混凝土的渗透,可以有效预防混凝土的碱集料反应。这是一种物理措施,虽然有效,但保护层往往易于老化,需经常修补。

4.6 使用化学外加剂

碱集料反应是一种化学反应,其过程可以通过掺加化学外加剂予以抑制。研究表明^[20],含碱金属锂的盐类如硝酸锂、氢氧化锂以及氟硅酸钠、磷酸盐、部分硝酸盐等对碱集料反应具有一定抑制作用。通过高压注入方式使外加剂溶液渗透到混凝土内部可以治理已经发生碱集料反应的混凝土结构,外加剂也可以在拌制混凝土时加入。目前,这一技术措施的应用受两方面因素制约:一方面,这些外加剂价格昂贵,在较大程度上提高了混凝土的生产成本;另一方面,外加剂对碱集料反应的抑制效果与活性集料的种类有关,且其长期抑制效果尚有待进一步研究证实。

5 重庆地区预防碱集料反应的建议

实践证明,混凝土一旦发生碱集料反应破坏几乎无法修补,重建费用往往比新建相同建筑物高出几倍。因此,工程界应重点加强碱集料反应的预防。我国在进行工程建设特别是重点和重大工程建设时采纳有关专家的意见和建议,对可能出现碱集料反应的混凝土工程采取了必要的预防措施,因此,碱集料反应所造成的经济损失相对较小。虽然如此,近年来,我国相继发生多处碱集料反应破坏的事例再次为工程建设敲响了警钟。针对重庆地区资源和环境条件,提出如下建议,以预防碱集料反应的发生。

5.1 加强重庆地区集料碱活性的调查研究

虽然我国越来越重视碱集料反应的预防工作,但目前关于重庆地区混凝土工程用集料是否具有碱活性、集料碱活性的程度及其分布状况,没有详细可靠技术资料。1997年重庆市建委立项,重庆市建筑科学研究院曾对重庆部分地区的天然细集料进行了调查研究。该研究认为^[21],所调查的天然细集料碱活性程度低(部分集料的化学分析结果显示具有碱活性,砂浆棒法结果显示基本没有碱活性),这一研究结果对重庆地区工程建设具有重要参考价值,但由于受时间和其它条件的限制,调查范围有限,对人造集料的碱活性特别是碳酸盐集料的碱活性问题涉及极少,而重庆地区花岗岩集料和人造碳酸盐集料的用量较大,且呈增长趋势,必须引起足够重视,开展进一步系统调查研究。这是有效预防碱集料反应的重要基础。

5.2 加强集料碱活性的检验

重庆市正进行大规模基础设施建设,大部分为混凝土、钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土结构,确保这些重要基础设施达到设计使用寿命对维持重庆市社会经济的可持续发展具有重要意义。另一方面,重庆地区低碱水泥产量低,多数水泥的碱含量约0.8%(以 Na_2O 当量计),部分集料经快速压蒸法检验具有一定碱活性,而重庆是一个典型的湿热地区,平均湿度超过75%,这些不利条件组合在一起,极可能使混凝土工程发生碱集料反应破坏。因此,除应加强水工工程混凝土用集料的碱活性检验外,还应特别加强重点和重大工程混凝土用集料碱活性的检验,这是确定有效预防措施的基本要求。

5.3 推广使用矿物掺合料

如前所述,掺矿物掺合料是目前国内外应用最广、已被实践证明为最经济有效的预防碱集料反应的技术措施,这一措施对重庆地区预防碱集料反应同样适用。此外,改善混凝土综合性能特别是延长建设工程的耐久性迫切需要推广应用高性能混凝土,而矿物掺合料是配制高性能混凝土的基本组分。可见,推广应用矿物掺合料对于提高重庆地区建筑技术水平和混凝土工程的质量以及预防碱集料反应均具有重要意义。从资源的角度而言,重庆地区具有较丰富的粉煤灰和水淬高炉矿渣资源,推广应用矿物掺合料具有良好的资源条件。

5.4 建立相关标准或规程

为预防混凝土工程发生碱集料反应破坏,我国部分地区如北京对混凝土外加剂引入的碱进行了明确规定。重庆有其特定的资源和环境条件,根据本地区的具体条件,制订适合该地区资源环境

条件的技术标准或规范,对于持久有效地预防碱集料反应破坏十分必要,这也是实现技术规范化管理的必然趋势。

6 结语

碱集料反应问题十分复杂,对工程的危害极大,因此,预防碱集料反应破坏是一项长期的技术工作,需要工程技术界从对重庆社会、经济发展以及建设工程质量负责的高度,通过相关管理部门和科研、设计、施工各方面的共同努力完成。

参考文献:

- [1] 唐明述. 从国内外碱集料反应的现状建议我国应采取的对策和研究方向[J]. 当代水泥, 1991, (2): 1-7.
- [2] 川村满纪, 柳物重正著. 碱-硅石反应的机理及预防措施[J]. 武汉建材学院译丛, 1987, (1): 25-30.
- [3] 杨长辉. 碱性水泥系统的碱集料反应研究[D]. 重庆建筑大学博士学位论文, 1997.
- [4] 张承志. 集料碱活性的评定与混合材对碱集料反应膨胀有效性的评定[D]. 南京化工大学博士学位论文, 1996. 6.
- [5] J. Metso. The alkali-aggregate reaction of alkali-activated Finnish blast furnace slag[J]. Silica Industries, 1982(4/5), 123-128.
- [6] 杨德斌. 裹掺混合材体系抑制碱集料反应及其与防冻盐、硫酸盐的协同作用[D]. 南京化工大学博士学位论文, 1996.
- [7] ASTM C289-87. Standard Test Method for Potential Reactivity of Aggregates (Chemical Method). 1991 Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Mineral Aggregates(CR). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA. 161-167..
- [8] German Committee for Reinforced Concrete. Guidelines for Alkali-Aggregate Reactions in Concrete[S]. German Building Standards Committee of the Deutches Institute fur Normung eV, Subject Speciality VII, 1986..
- [9] Knudsen T., Eriksen K.. The Chemical Shrinkage Method of Assessing the Alkali-Silica Reaction of Aggregates(CC). 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Kyoto, Japan, 1989. P6.
- [10] ASTM C-586-69. Standard Test Method for Potential Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregates (Rock Cylinder Method)(S). 1991 Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Mineral Aggregates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA. 287-290.
- [11] ASTM C227-87. Standard Test Method for Potential Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar Bar Method)(S). 1991 Annual Book of ASTM Standards. 04.02 Concrete and Mineral Aggregates. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, 126-130.
- [12] AFNOR P18-585. Granulats-Stabilite dimensionnelle en milieu alcalin(A). Essai sur mortiers(C). Association Francaise de Normalisation (FRNOR). December 1990. P15.
- [13] Hobbs, D. W. Alkali-Silica Reaction in Concrete[M]. Thomas Telford Publisher, London, UK. 1986. 183.
- [14] 南京化工学院无机非金属材料研究所. 砂、石碱活性快速试验方法(CECS48(93)) [S]. 中国工程建设标准化协会, 1993.
- [15] Canadian Standard Association. Standards CAN/CSA A23.1-M90(Concrete Materials and Methods of Concrete Construction). and CAN/CSA A23[S]. 1-M90(Methods of Test for Concrete), CSA, Rexdale (Toronto), Ontario, Canada. 273.
- [16] Rogers, C. A. Interlaboratory Study of the Concrete Prism Expansion Test for the Alkali-Carbonate Reaction (CR). In: Canadian Developments in Testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregate Reactivity. Ministry of Transportation of Ontario, Report EM-92, 1990, 136-149.
- [17] British Standard Institution. Alkali-Silica Reactivity: Concrete Prism Method. Technical Committee C&B/2 - Aggregates(S). Draft BS 812 Testing Aggregates. Part 123: Section 123.1, 1988.16.

- [18] M D Connel, D D Higgins. Effectiveness of mineral grounded blast furnace slag in preventing alkali-silica reaction. Proc(M). 10th ICAAR. Australia. 1996. 530-537.
- [19] R. Sersale, G. Frigine. Portland - zeolite - cement for minimizing alkali - aggregate expansion(J). Cem. Concr. Res., Vol. 17. 1987. 404-410.
- [20] Peter. P. et al. Treatments and additives for controlling alkali-reactivity(J). Cement and Concrete Composites. 1993, (15):21-26.
- [21] 李丹, 孟昭富, 等. 重庆市集料碱活性调查研究(Z). 鉴定资料, 重庆市建筑科学研究院, 1998. 5.

Alkali-Aggregate Reaction and Its Preventive Measures

WU Xue-xin¹, YANG Chang-hui²

- (1. Yueyang Roads and Bridges Company, Hunan Province, Yueyang 414100, China;
2. Department of Material Science and Engineering, Chongqing University B. Chongqing
400045, China)

Abstract: In this paper the characteristics of alkali-aggregate reaction (AAR) and its harm to concrete engineering is discussed. Specifications and test methods for AAR at home and abroad are summarized. Preventive measures for AAR are analyzed and measures for preventing AAR of concrete are suggested.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction; expansion; mineral admixture; prevention