

大坝混凝土对碱骨料反应的自免疫力

蔡跃波, 丁建彤, 白 银

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘 要: 大坝混凝土的碱骨料反应(AAR)是制约许多大型水利水电工程建设的技术经济性的一个重要因素,但目前所采用的标准试验方法不能客观地反映AAR病害给实际工程所带来的安全性风险。提出了大坝混凝土对AAR具备“自免疫力”——大坝混凝土自身已经具备的条件,如具有碱活性的人工砂所带入的碱活性石粉、含气、较低的浆骨比等,使其对AAR具有显著的自免疫力。通过砂浆棒快速法试验表明,掺加20%~30%的比表面积为 $358\sim 812\text{ m}^2/\text{kg}$ 的碱活性石粉,可以将砂岩砂的AAR膨胀率降低41%~58%;大坝混凝土中3.5%~5%的含气量可使AAR膨胀率降低约40%。在客观评价大坝混凝土发生AAR破坏的风险时,应该重视这种自免疫力,并应建立能反映大坝混凝土配合比特点、基于大坝混凝土实际表现的试验方法来正确评价工程中的AAR危害。

关键词: 大坝混凝土; 碱骨料反应; 自免疫力; 碱活性石粉; 引气

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)11-1610-04

作者简介: 蔡跃波(1958-),男,江西铅山人,教授级高级工程师,主要从事水泥基复合与改性材料及大坝安全管理方面的研究。E-mail: ybcai@nhri.cn。

Self-immunity of dam concrete to alkali-aggregate reaction

CAI Yue-bo, DING Jian-tong, BAI Yin

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Alkali-aggregate reaction (AAR) of dam concrete is one of the decisive factors in the technical and economical consideration of many large-scale hydraulic engineering projects, however, the current test standards fail to give an objective appraisal of the impact of AAR on safety risk of practical dam structures. It is pointed out that the self-immunity of dam concrete to AAR, is contributed to by some intrinsic characteristics of dam concrete such as alkali-reactive stone powder brought in by manufactured fine aggregate with alkali-reactivity, air entrainment, and low volume ratio of cementitious paste to aggregates. This self-immunity was demonstrated by rapid mortar bar tests. The existence of 20% to 30% (by mass of binder) of alkali-reactive stone powder with a specific surface area between $358\text{ m}^2/\text{kg}$ and $812\text{ m}^2/\text{kg}$ decreased by 41%~58% the AAR expansion of mortar bars with potentially reactive sand-stone aggregate. An air content of 3.5% to 5% in dam concrete corresponded to about 40% decrease of AAR expansion of mortar. This kind of self-immunity should be considered in the AAR risk analysis of dam concrete in real practice, and thus performance-based test methods reflecting the characteristics of the mixture proportion of dam concrete should be developed and adopted.

Key words: dam concrete; alkali-aggregate reaction; self-immunity; alkali-reactive stone powder; air entrainment

0 引 言

碱骨料反应(AAR)会导致混凝土开裂,尤其是对于服役寿命长的大坝混凝土,因此在近年来的许多大型、特大型水利水电工程建设中,AAR成为一个越来越突出的技术经济制约因素。有的工程甚至干脆不使用实验室测试为碱活性或者潜在碱活性的骨料。这样虽然可以从根本上避免发生AAR,却给原材料的选择带来很大的困难,使建设成本大大提高。例如,建设中的某特大型水电站的高混凝土双曲拱坝需要石料约 500 m^3 ,如果拒绝使用坝址附近的潜在碱活性骨料而从远处运输,则仅骨料成本就会增加约1个亿。

大坝混凝土与普通混凝土有明显的差异,由AAR带来的影响更为突出^[1]。但是,使用碱活性骨料的大坝混凝土自身对AAR膨胀已经具有一定的抑制作用,即“自免疫力”,而这一点尚未得到重视。如果不考虑这种自免疫力,设计就会过分保守、施工成本将显著增加。本文分析了大坝混凝土可能存在的自免疫机理,

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50539040);水利部公益性行业科研专项经费项目(200801057)

收稿日期: 2008-09-08

并通过试验进一步分析这些机理在混凝土中产生的影响, 为客观评价大坝混凝土 AAR 风险提供参考。

1 大坝混凝土对 AAR 的自免疫力

从混凝土的配合比特点来看, 大坝混凝土对 AAR 的自免疫力主要来源于以下 3 方面:

(1) 碱活性石粉。大坝混凝土需要大量使用人工骨料, 如果骨料具有碱活性, 则人工骨料 (尤其是人工砂) 中自然就会引入相当数量的碱活性石粉, 这在施工过程中是不可避免的。

大坝混凝土施工规范要求, 常态混凝土中细骨料的石粉含量为 6%~18%^[2], 碾压混凝土中则宜为 10%~22%^[3]。按照大坝混凝土细骨料用量为 700~800 kg/m³、胶凝材料用量为 200 kg/m³ 估算, 石粉的质量相当于胶凝材料总用量的 20%~80%。如果所用人工砂是碱活性的, 那么石粉也是碱活性的, 这部分石粉可均匀地分布在水泥石中, 作用有两个方面: ①与水泥中的碱发生反应, 由于石粉的比表面积远大于粗细骨料, 它们发生反应的能力更强, 对碱的需求也更大, 这就可以消耗水泥中的碱; ②虽然石粉与水泥中的碱发生了 AAR, 但是由于石粉分布均匀, 且颗粒很小, 不会像骨料界面区发生的 AAR 反应那样形成局部应力集中, 而是使得 AAR 膨胀力弥散从而避免开裂, 对 AAR 可以达到以毒攻毒的效果^[4-5]。

(2) 引气。为了提高大坝混凝土的工作性和耐久性, 一般掺有引气剂, 引入微小气泡, 均匀分布在水泥石中。混凝土中由引气剂引入的微小气泡对于 AAR 膨胀有一定的抑制效果^[6-7]。早在 1984 年丹麦的 Jensen 等就用 35 种不同碱活性砂进行了试验, 结果表明 4% 的引气量可以将 AAR 的膨胀率减少 35%, 扫描电镜观察表明 AAR 的产物填充到气孔中^[8], 也就是说, 引气剂引入的气孔对 AAR 膨胀起到了“缓冲气囊”的作用。国内朱蓓蓉等的研究^[9]也得出类似的结论: 当混凝土含气量为 4.5% 时, 可以将 AAR 膨胀减小 57%。但现有研究尚未考察含气量和引气剂品种的影响。

(3) 很小的浆骨比。大坝混凝土胶凝材料用量一般在 200 kg/m³ 以下, 而骨料用量多在 2000~2200 kg/m³ 之间, 浆骨比远小于普通混凝土的。

AAR 主要是混凝土中的碱与碱活性骨料发生反应, 碱的来源主要是胶凝材料, 因此对于特定含碱量的某种胶凝材料体系而言, AAR 的程度取决于胶凝材料与碱活性骨料的比例关系, 只有浆骨比达到某一合适的比例 (即所谓“最劣比”), AAR 才会最剧烈^[10-13]。在大坝混凝土中, 骨料占到混凝土质量的 80% 左右, 浆骨比变得很小, 换言之, 胶凝材料中的碱不足以使全部骨料发生破坏性 AAR 膨胀, 有限的 AAR 可以通过其它措施来抑制。可以做如下估算: 实验室用混凝

土棱柱体法测试 AAR 时, 水泥用量为 420 kg/m³, 水泥含碱量调整为 1.25%; 骨料用量 1600~1800 kg/m³; 假设这样的水泥用量和骨料用量可以让 AAR 充分发挥。如果是大坝混凝土, 水泥用量为 210 kg/m³, 含碱量为 0.6%; 骨料用量为 2000~2200 kg/m³; 不考虑骨料尺寸和级配的影响, 则大坝混凝土中的水泥含碱量仅够 400~450 kg/m³ 的骨料发生 AAR, 即大坝混凝土与普通混凝土使用同样碱活性程度的骨料, 其膨胀量可能仅为普通混凝土的 20%~25%。

张承志等认为胶凝材料相对 AAR 膨胀起到约束作用, 随着胶凝材料用量的增加 AAR 膨胀率降低^[14]。但在其试验中, 砂浆或者混凝土的总体积保持不变, 则胶凝材料用量的增加意味着碱活性骨料用量的减小, 最终 AAR 膨胀率的降低不能完全归结于水泥用量的增加。尤其是使用快速砂浆棒法时, 砂浆棒浸泡在 1M NaOH 溶液中, 碱的供应充足, AAR 膨胀量完全取决于碱活性骨料的含量, 所以一定会出现随着胶凝材料用量增加、骨料用量的减少、膨胀率减小的现象。因此胶凝材料约束 AAR 膨胀的结论是否准确需要进一步的验证。相关研究表明, 活性骨料含量相同时, 水泥用量的增加将导致 AAR 膨胀的增大^[11, 15]。

目前所有的骨料活性鉴别方法和评价抑制 AAR 效能的方法都没有考虑到大坝混凝土浆骨比很小这一特点, 因此要客观评价实际工程中混凝土的 AAR 风险, 需要同时重视胶凝材料用量带来的正负影响。

这 3 个方面是使用碱活性骨料的大坝混凝土所特有的, 会对 AAR 产生一定抑制作用。

2 试验验证

为了考察大坝混凝土对 AAR 的自免疫力, 设计了碱活性石粉和引气抑制 AAR 的试验。采用 DL/T 5151-2001《水工混凝土砂石骨料试验规程》中抑制骨料碱活性效能的试验方法。

2.1 试验原材料

水泥为四川省江油水泥厂双马牌 P·MH 42.5 中热水泥, 其化学成分见表 1。分别选用西南地区某大坝工程所用的砂岩砂和南京本地购买的天然河砂作为骨料, 按照 DL/T 5151 要求筛分成 5 个粒级。测试表明, 这两种骨料具有潜在碱活性, 14 d 快速砂浆棒法膨胀率为砂岩砂 0.175%、南京砂 0.14%。

2.2 碱活性石粉的免疫作用

碱活性石粉系用上述砂岩砂磨制而成, 按照粉磨时间分为 2, 4, 6 h 等 3 种, 其比表面积分别为 358, 769, 812 m²/kg; 非碱活性石粉系用一种经检验不具有碱活性的大理岩人工砂磨制而成, 粉磨时间为 4 h, 比表面积为 780 m²/kg。由于碱活性石粉掺入以后会导致水泥用量的减少, 可能会对试件 AAR 产生影响,

表 1 水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of cement										单位: %
名称	烧失量	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	SO ₃
水泥	1.41	21.67	61.31	2.88	4.68	4.76	0.51	0.20	0.54	1.98

所以采用掺入非碱活性石粉的方法来作为对照组,以排除这种影响。碱活性石粉掺量情况见表 2。石粉分别取代水泥质量的 10%, 20%, 30%, 保持浆体体积不变掺入石粉;所用水泥含碱量为 0.54%,外加 NaOH 保持水泥含碱量为 1.0%;所选骨料为砂岩砂;采用快速砂浆棒法测试 28 d。

表 2 碱活性石粉对 AAR 的抑制效果试验掺量及细度

Table 2 Replacement level and fineness of stone powder for the AAR suppressing test			
编号	石粉掺量/%	石粉比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	备注
2-0	0	—	基准配合比
2-1	10		
2-2	20	358	碱活性石粉
2-3	30		
4-1	10		
4-2	20	769	碱活性石粉
4-3	30		
6-1	10		
6-2	20	812	碱活性石粉
6-3	30		
c-1	10		
c-2	20	780	非碱活性石粉
c-3	30		

用碱活性石粉对 AAR 的免疫效果验证试验结果如图 1 所示。由图 1 可见:

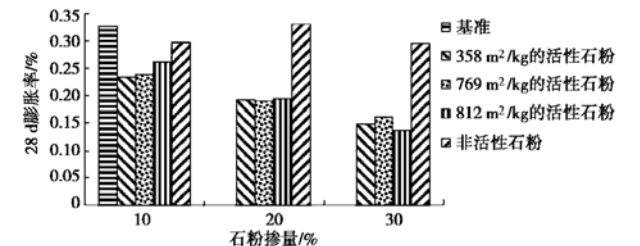


图 1 不同细度和掺量的碱活性石粉对 AAR 的抑制效果
Fig. 1 Suppressing effect of alkali-reactive stone powder on AAR

(1) 随着碱活性石粉掺量的增加,膨胀率呈明显减小趋势。当石粉掺量为胶凝材料质量的 20%时,掺不同细度石粉的试件 28 d 膨胀率分别为 0.192%, 0.190%, 0.193%, 与同龄期膨胀率为 0.327%的基准试件相比,免疫效果分别为 41%, 42%, 41%;当碱活性石粉掺量提高到 30%时,免疫效果进一步提高到 50%~58%。因此,对于碱活性石粉质量相当于胶凝材料总用量的 20%~80%的大坝混凝土,石粉对 AAR 的免疫效果将相当可观。

(2) 不同细度的石粉免疫效果相差不大,看不出抑制效果随细度变化而出现明显的规律。这可能是由于石粉比表面积超过 350 m²/kg 以后,颗粒的表面反应程度差别已不明显。

(3) 掺有非碱活性石粉的试件在 3 种掺量下的 28 d 膨胀率分别为 0.298%, 0.332%, 0.295%, 与含碱活性石粉的试件膨胀率相差很远,且石粉掺量越大,差别越明显;说明碱活性石粉的免疫效果显然不是仅仅由于减少水泥用量引起的。

(4) 值得注意的是,当石粉含量为 30%时,尽管对 AAR 膨胀的免疫效果已达 50%~58%,但 28 d 膨胀率仍均在 0.10%以上,这说明仅仅采用掺加碱活性石粉这一措施还不足以满足充分抑制 AAR 膨胀的要求,还必须同时采用其它措施。

2.3 引气对 AAR 的免疫作用

选择 4 个不同厂家生产的 4 种引气剂(AEA)进行试验,分别标记为 SJA, HJA, JJA, MJA。引气剂掺量与砂浆棒含气量见表 3, 4 种引气剂掺量分别为 0.01%, 0.02%, 0.03%。4 种引气剂的引气效果见表 3, 免疫效果见图 2, 砂浆棒膨胀率与含气量的关系见图 3。可见: AAR 膨胀随着砂浆中含气量的增加而减小。当引气剂掺量为 0.01%时,含气量为 3.5%~17.6%,膨胀率降低约 20%~60%;掺量为 0.03%时,含气量为 12.8%~18.3%,膨胀率降低约 35%~64%。

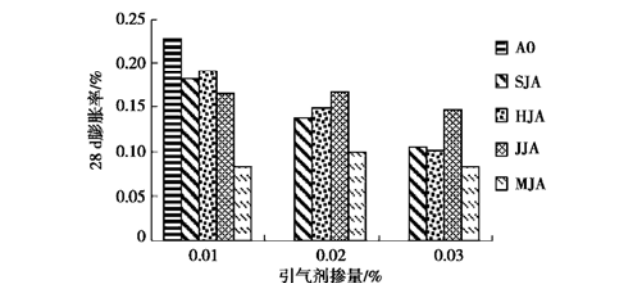


图 2 4 种引气剂抑制 AAR 的效果
Fig. 2 Suppressing effect of four types of AEAs on AAR

表 3 引气剂掺量与砂浆棒含气量
Table 3 AEA dosage and the air content of mortars

编号	AEA 掺量/%	含气量/%	编号	AEA 掺量/%	含气量/%
A0	0.00	2.0	JJA-1	0.01	4.1
SJA-1	0.01	3.5	JJA-2	0.02	6.3
SJA-2	0.02	8.3	JJA-3	0.03	7.4
SJA-3	0.03	12.8	MJA-1	0.01	17.6
HJA-1	0.01	4.5	MJA-2	0.02	16.3
HJA-2	0.02	8.6	MJA-3	0.03	18.3
HJA-3	0.03	13.7			

大坝混凝土一般都有 3.5%~5.0%的含气量,假设粗骨料含量为 60%,则大坝混凝土砂浆含气量为 9%~12%,与图 3 对应,可以看出相应砂浆的 AAR 膨胀减小 40%左右。同时还应注意到,混凝土中的含气量不能无限地增加,其抑制 AAR 膨胀的效果也有限,但是作为混凝土的自免疫力,其效果还是可观的。此

外, 不同品种引气剂的引气效果虽然不同, 但是只要引气量相同, 对 AAR 的免疫效果也基本相同。

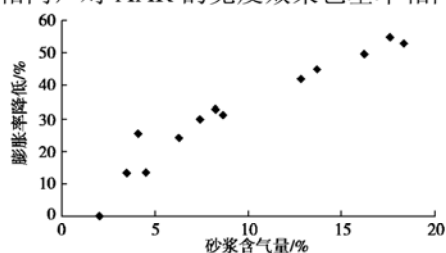


图 3 砂浆含气量与抑制 AAR 效果的关系

Fig. 3 Suppressing effect of air content of mortar on AAR

3 结 语

采用碱活性骨料作为混凝土原料时, 人工砂中引入的石粉以及引气剂引入的气泡对 AAR 膨胀有一定免疫作用; 较低的浆骨比也会使得 AAR 破坏受到限制。由于大坝混凝土自身存在这三个自免疫力, 其效果相互叠加, 有 40%~80% 的 AAR 膨胀得到了抑制, 大坝混凝土中的 AAR 并不像现有室内试验方法表现出的那么严重。

试验室测试骨料碱活性时, 不管是用快速砂浆棒法还是混凝土棱柱体法, 都是将骨料筛分成固定的级配, 不使用实际配比, 试件中不含石粉和引气剂, 这样就忽略了大坝混凝土自身的免疫效果。因此, 建议建立反映大坝混凝土配合比特点、基于大坝混凝土实际表现的试验方法来正确评价实际工程中的 AAR 危害。

参考文献:

- [1] 王爱勤, 张承志. 水工混凝土的碱骨料反应问题[J]. 水利学报, 2003(2): 117 - 121. (WANG Ai-qin, ZHANG Cheng-zhi. Some questions about the alkali-aggregate reaction of the concrete for hydraulic projects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(2): 117 - 121. (in Chinese))
- [2] DL/T 5144-2001 水工混凝土施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002. (DL/T 5144-2001 Construction specifications for hydraulic concrete[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese))
- [3] DL/T5112-2000 碾压混凝土施工规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001. (DL/T5112-2000 Construction specifications for roller compacted concrete[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001. (in Chinese))
- [4] MOISSON M, CYR M, RINGOT E, et al. Efficiency of reactive aggregate powder in controlling the expansion of concrete affected by alkali-silica reaction (ASR)[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China, October 15 - 19, 2004. Academic Publishers, 2004: 617 - 624.
- [5] PEDERSEN B, MØRTSELL E, JENSEN V. Effects of alkali-reactive crushed fillers on expansions due to ASR[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing: Academic Publishers, 2004: 764 - 772.
- [6] RAMACHANDRAN V S. Alkali aggregate expansion inhibiting admixtures[J]. Cement and Concrete Composites, 1998(20): 149 - 161.
- [7] ACI Committee 221. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity (221.1R-98)[R]. Farmington Hills, MI USA: American Concrete Institute, 1998.
- [8] JENSEN A D, CHATTERJI S, CHRISTENSEN P, et al. Studies of alkali silica reaction: part II effect of air entrainment on expansion[J]. Cement and Concrete Research, 1984, 14(3): 311 - 314.
- [9] 朱蓓蓉, 杨全兵, 吴学礼, 等. SJ-2 新型引气剂及其引气混凝土性能[J]. 混凝土, 2001(4): 21 - 24. (ZHU Bei-rong, YANG Quan-bing, WU Xue-li, et al. Properties of concrete with a new type of air-entraining agent (Trademark SJ-2)[J]. Concrete, 2001(4): 21 - 24. (in Chinese))
- [10] RAMYAR K, TOPAL A. Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(11): 2165 - 2169.
- [11] WIGUM B J, PEDERSEN L T, GRELLK B. State-of-the-art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction[EB]. [2008-08-08]. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Partner/Report 2.1 - Final - A06018.pdf>.
- [12] KURODA T, INOUE S, YOSHINO A, et al. Effects of partial size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method[C]// Proceedings of the 12th International Conference on AAR in Concrete Beijing China October 15 - 19, 2004. Beijing: Academic Publishers, 2004: 736 - 743.
- [13] Cement and Concrete Association of New Zealand. TR03 Alkali silica reaction Minimizing the risk of damage to concrete Guidance notes and recommended practice (second edition)[EB]. [2008-08-08]. <http://www.cca.org.nz/shop/downloads/TR03.pdf>.
- [14] 张承志, 王爱勤, 王海生. 关于集料碱活性评定的一些问题[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(1): 6 - 10. (ZHANG Cheng-zhi, WANG Ai-qin, WANG Hai-sheng. Some questions about evaluation of alkali reactivity of aggregates[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(1): 6 - 10. (in Chinese))
- [15] SWAMY R N. The alkali silica reaction in concrete[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992: 74 - 75.