

小浪底工程碱骨料反应控制

蒋素芬

(水利部小浪底工程咨询有限公司, 河南 济源 454681)

摘要:小浪底混凝土工程约 337 万 m^3 , 采用黄河连地滩天然砂砾石作骨料, 经勘查活性骨料占 47% 以上. 为有效控制混凝土原材料的碱与骨料中活性成分发生碱骨料反应, 采用低碱水泥和掺 20% ~ 30% 低钙、低碱 II 级粉煤灰的方法, 使混凝土的含碱量低于 3 kg/m^3 的控制标准, 有效地控制了碱骨料反应.

关键词:混凝土碱骨料反应; 混凝土碱含量; 小浪底水利枢纽

中图分类号: TV42+2

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2003)05-0041-02

碱骨料反应是混凝土原材料中的水泥、外加剂、混合材和水中的碱 (Na_2O 或 K_2O) 与骨料中的活性成分反应, 其反应是一种缓慢过程, 在混凝土浇注成型后若干年逐渐反应, 生成物吸水膨胀体积可增大 3 倍, 使混凝土产生内应力, 膨胀开裂、崩坏, 导致混凝土失去设计性能. 混凝土的碱骨料反应类型大体分三种: 碱-硅酸反应、碱-碳酸盐反应、碱-硅酸盐反应. 迄今为止, 世界各国发生的碱骨料反应绝大多数为碱-硅酸反应, 通称为碱骨料反应 (简称 AAR).

AAR 导致混凝土建筑物的开裂破坏, 在国内外已有许多实例. 较有名的美国派克坝 (PARTER DAM) 是 1938 年建成的一座 98m 高的混凝土拱坝, 建成 2 年后, 即在 1940 年就发现大坝产生严重裂缝. 这引起了美国工程界和科学界的充分重视, 并进行了大量的研究工作, 结果证实, 大坝的破坏是由于采用安山岩等具有活性的砂石料和含碱量较高的波特兰水泥, 这些活性骨料与水泥中的碱产生化学反应, 引起了混凝土恶性膨胀, 从而造成了大坝的裂缝. 从此将混凝土中的活性骨料与水泥中碱的化学反应正式称为 AAR. 在以后的英国、法国、前苏联、加拿大、南非等国家的水工建筑物也都有 AAR 的报道. 据 1985 年全国水工混凝土耐久性调查, 在我国已建的大型水电站混凝土大坝中, 存在有活性骨料的有 4 座, 占调查工程总数的 12.5%. 如丰满电站, 建坝已 40 多年, 经查明, 当时采用的粗骨料组成中, 活性骨料有流纹岩、安山岩、凝灰岩、闪长岩等, 占骨料的 14% ~ 35%, 而使用的水泥主要是当时大同洋灰公司 (现在的松花江水泥厂) 生产, 含碱量在

0.95% ~ 1.57%, 属于高碱水泥, 40 年以后钻取混凝土芯样观察分析, 发现了骨料与砂浆结合处产生了 AAR, 但试验证实, 因为活性骨料引起的膨胀率很小, 所以至今仍未发现大坝混凝土整体的膨胀破坏, 只是在坝前水位变化区有局部混凝土表面脱落现象, 但还需长期观测.

由上述可以看出, AAR 问题在国外和国内都存在, 有些工程已经出现了 AAR 的破坏. 因此 AAR 问题是水工混凝土耐久性的一个重要问题, 必须给予充分重视.

1 小浪底工程 AAR 试验

一般, 发生 AAR 必须具备三个条件: ①混凝土中的骨料具有活性, 并超过一定数量; ②混凝土中有一定数量的可溶性碱; ③具有潮湿的环境. 三个条件缺一不可. 一旦混凝土的原材料中含有一定量的活性骨料, 又使用高碱水泥而又没有采取什么措施, 那么对水工建筑物来说, AAR 是不可避免的.

在小浪底工程初步设计阶段, 选定黄河连地滩天然砂砾石作混凝土骨料场 (距坝址 9 km), 岩相法鉴定结果表明, 连地滩料场中活性骨料和可疑活性骨料有 13 种, 占连地滩骨料总量的 47.3%, 活性骨料主要有石英砂岩、玄武岩、安山岩、流纹岩等, 属于 ASR 类型, 通过不掺与掺加粉煤灰对比试验, 粉煤灰对活性骨料膨胀有明显的抑制效果. 在小浪底工程上游 130 km 处, 同在黄河上的三门峡水利枢纽工程是 1960 年建成的混凝土重力坝, 两个工程都在豫西地区, 地质背景基本相同, 工程上所用的砂石料成分

基本相似.三门峡混凝土重力坝内部掺用 30% 的优质粉煤灰(占胶凝材料总量的百分数),大坝已建成 40 余年,经调查至今未发现危害性碱骨料反应.实践证明在混凝土中掺一定数量的优质粉煤灰,对控制碱骨料反应产生的破坏是有效的.因此在合同文件中提出,允许在混凝土中掺 20%~40% 不低于 II 级的粉煤灰.

主体工程开工后,通过施工开采,为满足级配中中小石和粗砂的不足,使用开采出的 80~150mm 粒径卵石破碎补充,因而各级配活性骨料比例有所增加,同时当活性骨料的粒径变小,其表面积越大,则碱硅酸反应越充分,引起的膨胀量也越大.为此又委托长江科学院作骨料碱活性补充论证试验,重点在 II 标成品料堆分三种粒径取样.岩相法鉴定结果表明,石英砂岩、玄武岩、流纹岩、安山岩等含有活性二氧化硅,为活性骨料.工地常用的(美国标准)一级配(5~19 mm)、二级配(19~38 mm)、三级配(38~63 mm)3 种骨料活性成分含量为 62.3%~68%.

长江科学院又采用美国 ASTM C1260—94 砂浆棒的快速法,对工程实际使用的混合骨料不掺和掺粉煤灰进行对比试验.试验的评定标准为:14 d 的砂浆膨胀率小于 0.1%,则骨料为无害;膨胀率大于 0.2%,则表明骨料具有潜在碱活性;膨胀率在 0.1%~0.2% 之间属可疑骨料,需要进行其它必要的辅助实验.骨料的砂浆棒快速法试验结果见表 1^①.

表 1 II 标成品堆料场骨料砂浆棒快速法试验结果

试样编号	水泥及掺和料	不同龄期膨胀率/%			结果评定
		3 d	7 d	14 d	
98-51	洛普 525 号水泥碱含量 1.1%	0.028	0.118	0.279	活性
98-52	洛普 525 号水泥掺粉煤灰 20%, 硅粉 6%, VZ 减水剂 0.5%	0.014	0.020	0.032	抑制为非活性
98-55	洛普 525 号水泥掺粉煤灰 30%	0.008	0.014	0.019	抑制为非活性
98-57	洛普 525 号水泥掺粉煤灰 40%	0.001	0.001	0.005	抑制为非活性

注:表中试样骨料组成均为石英砂岩 35%,长石砂岩 30%,玄武岩 25%,石英岩 5%,流纹岩 3%,安山岩 2%.

由表 1 可见,工程实际使用的混合骨料,也属活性骨料,当掺入 20% 的粉煤灰时,砂浆棒的膨胀率降低 87%,抑制为非活性骨料,当掺 40% 的粉煤灰,砂浆棒基本不膨胀,这又一次证明工程所用的焦作热电厂低钙($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 当量为 82.6% > 70%)、低碱(Na_2O 当量为 1.2% < 1.5%) II 级粉煤灰对抑制 AAR 的效果是非常显著的.

2 小浪底工程对 AAR 控制措施

小浪底混凝土工程设计强度较高, C30 以上的混凝土方量居多,其中还有 C70 高强混凝土约 30 万 m^3 ,水泥用量也较多.小浪底技术委员会提出按混凝土总碱含量控制,即每方混凝土总碱含量不应超过 3 kg/m^3 .为此小浪底工程采取以下措施:①要求水泥供应厂家的 525 号普通水泥碱含量不应超过 0.6%,而 425 号普通水泥不应超过 0.8%,对厂家改制低碱水泥增加的投入业主适当给予费用补偿;②要求各承包商的混凝土配合比设计要掺 20%~40% 的 II 级粉煤灰.

混凝土中碱含量的估算,以往对纯水泥粗略估计就是水泥中碱含量乘每方混凝土水泥用量即可.小浪底工程使用的水泥属于中热水泥,也掺加了活性混合材.对于掺活性混合材料的水泥,由于考虑到活性混合材料能降低碱的浓度,抑制 AAR,混凝土的单位碱含量可采用式(1)计算^[1]:

$$\text{碱含量}(\text{kg}/\text{m}^3) = \text{中热水泥碱含量}(\%) \times \text{水泥用量}(\text{kg}/\text{m}^3) + 0.2 \times \text{粉煤灰碱含量}(\%) \times \text{粉煤灰用量}(\text{kg}/\text{m}^3) + \text{外加剂碱含量}(\%) \times \text{外加剂用量}(\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1)$$

小浪底现场抽检碱含量结果见表 2.利用式(1)时,为安全计碱含量值均采用表 2 中上限值.现选取 II 标具有代表性的现场使用的配合比,其混凝土单位碱含量计算结果见表 3.

表 2 水泥、粉煤灰抽检结果

品 种	平均碱含量(Na_2O 当量)/%
洛普 525 号水泥	0.60~0.64
洛普 425 号水泥	0.78~0.80
焦作 II 级粉煤灰	1.00~1.20

表 3 不同强度等级混凝土碱含量计算结果 kg/m^3

设计强度等级	水泥	粉煤灰	混凝土碱含量
C70	380	90	2.65
C40	350	85	2.44
C30	272	68	1.90
C25	230	100	1.71
C15	171	57	1.50

注:①外加剂掺量小,计算时未计入;②除 C15 采用洛普 425 号水泥,其余均采用洛普 525 号水泥.

通过以上计算可见,混凝土的强度与碱含量成正比.但各强度等级的混凝土,其碱含量都在 3 kg/m^3 的控制标准以内.应该指出,以往混凝土中碱含量通常指的是水泥中的碱分.近年来,法国根据查姆班大坝 AAR 事例最新研究成果指出:火成岩、变质岩、沉积岩等含有长石、云母组分的岩体中都含有可溶性碱,因此用作骨料时,必须化验它们的可溶

①长江科学院.黄河小浪底水利枢纽混凝土骨料碱活性试验报告.1998.7~8.

- [6] Streeter V L, Lai C. Waterhammer analysis including fluid friction[J]. J of the Hydr Division, ASCE, 1983, 88(3): 79 ~ 112.
- [7] Gray C A M. Analysis of waterhammer by characteristics[J]. Transactions, ASCE, 1995, 119: 1176 ~ 1194.
- [8] Propson T P. Discussion of unsteady flow calculation by numerical methods[J]. J of Basic Engrg, ASME, 1972, 94(2): 457 ~ 466.
- [9] Laushey L M, Kalaitjis M, Tollett R M. New finite-difference equations for waterhammer[A]. 17th Congress, IAHR, Baden-Baden[C]. IAHR, 1977, Vol. 5. 193 ~ 200.
- [10] 叶宏开. 水击计算中摩擦项的处理[J]. 水利学报, 1987(6): 40 ~ 45.
- [11] Anderson A, Arfaie M. Pipe-friction in waterhammer computation[A]. 25th Congress, IAHR[C]. IAHR, 1992, Vol. D. 23 ~ 31.
- [12] Zielke W. Frequency-dependent friction in transient pipe flow[J]. J of Basic Engrg, ASME, 1968, 90(1): 109 ~ 115.
- [13] Funk J E, Wood D J. Frequency response of fluid lines with turbulent flow[J]. J of Fluids Engrg, 1974, 96(2): 365 ~ 369.
- [14] Ohmi M, Kyomen S, Usui T. Numerical analysis of transient turbulent flow in a liquid line[J]. Bulletin of JSME, 1985, 28(3): 799 ~ 806.
- [15] Suo L, Wylie E B. Impulse response method for frequency-dependent pipeline transients[J]. J of Fluids Engrg, 1989, 111(4): 478 ~ 483.
- [16] Jelve I. The damping of flow and pressure oscillations in waterhammer analysis[J]. J of Hydr Research, 1989, 27(1): 91 ~ 114.
- [17] Brunone B, Golia U M, Greco M. Some remarks on the momentum equation for fast transients[A]. Int Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation, 9th Round Table[C]. IAHR, Valencia, Spain, 1991. 140 ~ 148.
- [18] Eichinger P, Lein G. The influence of friction on unsteady pipe flow[A]. Proc of the Int Conf on Unsteady Flow and Fluid Transients[C]. Durham, UK, 1992. 41 ~ 50.
- [19] Vardy A E. Unsteady flows: fact and friction[A]. Proc 3rd Int Conf on Pressure Surges[C]. BHRA, Canterbury, England, 1980. 15 ~ 26.
- [20] Vardy A E, Hwang Kuo-Lun. A characteristic model of transient friction in pipes[J]. J of Hydr Research, 1991, 29(5): 669 ~ 684.
- [21] Silva-Araya W F, Chaudhry M H. Computation of energy dissipation in transient flow[J]. J of Hydr Engrg, ASCE, 1997, 123(2): 108 ~ 115.

(收稿日期: 2002-10-17 编辑: 熊水斌)

(上接第 42 页)

性碱含量. 现将化学分析结果^[2]摘录于表 4.

表 4 几种作骨料岩石碱量分析结果 %

骨 料	K ₂ O	Na ₂ O	总碱量 (Na ₂ O 当量计)	其中可 溶性碱
玄武岩	1.72	3.41	4.54	0.47
花岗岩	5.31	3.41	6.52	0.03
流纹岩	5.10	2.15	5.50	0.04
片麻岩	6.80	2.55	7.02	0.06

表 4 中的数据表明, 有些种类的骨料可溶性碱还是较高的, 如玄武岩骨料可溶性碱达 0.47%, 即使一些岩类含可溶性碱低, 但骨料占的比例较大, 同样不可忽视. 因此, 近年来国外对混凝土采用的骨料进行了碱含量检测, 并提出混凝土总碱含量中应包括骨料中的可溶性碱含量. 小浪底工程骨料是由火成岩、变质岩和沉积岩组成, 因没有做过可溶性碱含量分析, 表 3 中混凝土碱含量不包括这部分, 据了解国内也没有这方面的研究成果.

3 结 语

a. 试验表明小浪底工程选用的连地滩砂石料活性骨料碱含量较高. 但使用低碱水泥和掺集作低钙、低碱 II 级粉煤灰对抑制 AAR 是有效的、可行的. 根据国外最新研究成果, 建议对小浪底工程混凝土总含量做进一步的检测和分析.

b. 采用单位混凝土中碱含量控制 AAR 比较合理, 目前国内这方面标准和测试方法不统一, 因此建议设计、施工、科研等单位组成调研小组, 对混凝土总含碱量的检测项目、方法、内容以及有效碱含量的计算规定等制定一系列标准; 根据建筑物等级, 所处环境条件等制定出混凝土中安全含碱量统一界限值, 以便指导设计和施工.

参考文献:

- [1] DL/T5144—2001, 水工混凝土施工规范[S].
- [2] 马赛尔·阿罗德. 法国硅碱骨料反应的最新研究[J]. 中国三峡建设, 1998(增刊): 60 ~ 62.

(收稿日期: 2002-12-05 编辑: 张志琴)

