

我见到的碱—集料反应

吴中伟

中国建筑材料科学研究院

1991 年 1 月

提 要

本文用 25 张图片来说明 AAR 的存在、规律、特征和危害性。其中大多数是在美国、日本和国内亲眼所见。文中还解释我国为何直到最近才发现 AAR。

Dam. 最后又到加州公路研究所进行短期学习。当时，认为碱活性集料只是含燧石、玉髓、蛋白石三种活性组份，采用岩相和砂浆棒测长法鉴定。如必须采用碱活性集料，则水泥中当量 $\text{Na}_2\text{O} > 0.6\%$ ，或掺加 25% 火山灰质混合材。当时还认为 AAR 问题已经得到解决。后来世界各国 AAR 事例不断发生，损失巨大。AAR 问题至今仍未完全弄清。碱活性集料扩大到火成岩粒沉积岩与变质岩皆有。

1953 年我国第一座砼高坝（佛子岭）开工，我应邀在工地短期研究解决技术问题，对技术人员和实习生举办讲座，曾讲过一次 AAR，立即受到水利水电部门的重视。在后来三门峡工程与三峡规划中列入 AAR 课题，在长江科研院建立 AAR 研究组。建材部也研究推广低碱大坝水泥，在三门峡、刘家峡等工程（还掺粉煤灰）应用。水利水电部门并制定规程，集料必先通过 ASTM 集料碱活性检验，迄今我国重要水工建筑中尚未发生过 AAR 事故。遗憾的是，其他水中或潮湿环境中的工程建设却很少或没有对 AAR 进行必要的预防。各大水工建筑的集料勘察结果表明，我国长江（三峡附近）沱江、汉水、嘉陵江（安康附近）、广西红水河等地区均存在碱活性的卵石和砂；又据南京化工学院等调查试验，新疆塔城地区、江苏仪征以及北京等地都有碱活性集料分布；又据刘崇熙博士推测燕山造山运动对岩石的影响，认为我国华北地区可能有较多碱

活性集料的分布，所以 AAR 问题必须成为我国工程界立即重视的问题。

日本到 70 年代才对 AAR 给予重视，已发生多雨地区和沿海房屋建筑开裂、海港桥梁道路遭到破坏，图 3 房屋外墙 AAR 裂缝在东京、广岛、千葉、大阪均有发现。

图 3.多雨地区房屋外墙 AAR 裂缝

80 年代初开始建筑的大阪—神户高速公路，在松原段高架桥发现 AAR 开裂，有些破坏程度较大，距浇筑时间不过二三年，有的缝经用环氧或聚氨酯封堵，但未满一年，裂缝继续发展。阪神公路 AAR 破坏对日本工程界是一次震动。图 4—16 是松原段 AAR 破坏的照片。

图 4.阪神桥柱裂缝观察

图 5.阪神桥柱裂缝图

图 6.阪神桥柱裂缝与钢筋严重锈蚀

图 7.阪神桥柱严重裂锈 (<5 年), AAR 先裂或加速破坏

图 8.阪神桥墩支承轴下剪坏, AAR 加速荷载破坏

图 9.阪神桥梁腹裂缝

图 10.阪神桥梁腹裂缝, 泌出白色和棕色物

图 11.阪神桥梁腹裂缝 (剥开)

图 12.阪神桥梁裂缝分布图 (前、底、左、右视), 由于荷载 (如纵向由下向上) 与 AAR (如端部、横向) AAR 可能先裂或降低砼强度, 加速荷载的破坏作用。

图 13.阪神桥面板、荷载、冲击与 AAR 相互加剧破坏

图 14.阪神松原段砼芯 (白点为泌出物)

图 15.阪神砼集料泌出物 SEM 照片 (胶体)

图 16.阪神砵集料泌出物能谱分析 (钾、钠)

图 17.阪神砵集料内部裂缝与反应环

在承建公司 (鸿池组) 专设的 AAR 暴露试验场, 有很多大块, 上部向下部开裂, 因当地多雨, 顶部水多先裂。

在分析大量 AAR 破坏现象后, 得出 AAR 破坏的特征有四, 可据此来作初步判断。

1.潮湿环境或水的特征, 水是 AAR 发生和发展的必要条件。同样砵建筑在干湿不同的部位出现不同程度的破坏或不湿处全无破坏, 就应考虑 AAR。潮湿或水中部分早期就出现开裂钢锈, 例如阪神公路桥都在桥面板接缝下漏水部位开裂, 北京某机场跑道的地下水道一侧普遍开裂疏松并呈淡黄色, 而另一侧砵仍很艰固 (图 18)

图 18.北京某机场跑道

又北京建国门立交桥, 三元里立交桥漏水与积水部位有大量裂缝与泌出物 (图 19,20)

图 19.北京建国门立交桥

图 20.北京三元里立交桥北引桥

三元里立交桥建成不过 5 年，引桥横梁砼 C30，桥面板接缝下漏水潮湿部位严重剥落，白色物积聚，钢筋锈露，近处有地图裂缝，而其他干燥部位，砼完好。

2.膨胀特征 AAR 裂缝是因膨胀引起，不同于常见的砼干缩，冷缩或荷载裂缝。根据限制变形的规律，膨胀裂缝与限制力方向相同，因此都系顺筋开裂，在限制力均布或很小的部位则呈地图形或方格形（见上面诸图）。又由于集料是膨胀源，近表面的粗集料膨胀，使表层砼脱空、剥落，露出钢筋。北京某机场表面砼松脱现象见图 21。

图 21.北京某机场跑道表面砼可用手挖起

阪神公路桥柱也因小粒集料膨胀，保护层剥落露筋（图 22）

图 22.阪神桥柱局部剥落

表面砼脱落后可见到集料露出，最初可见乳状泌出物，干时呈白色。

下图上海铁路轨枕板的裂缝，很能说明限制膨胀的特征，顶面裂缝平行主筋，端头则呈地图状（图 23），以及集料界面脱开（图 24）

图 23.上海轨枕板顶面，端面裂缝

图 24.上海轨枕板开裂

3.速度特征 AAR 破坏速度常较其他耐久性破坏快，甚至快得多。上述事例证明，有的不到 2 年，有的 3—5 年。密实和足够的保护层下钢筋不会在几年内生锈，更不会锈裂，C30 砼不可能 50 次冻融破坏。发生这些问题，就可考虑 AAR 及其加速破坏的作用。

4.多因素叠加作用，而 AAR 常是先导的特征，这与速度特征有关，在其他耐久性破坏因素共存时，AAR 发生发展得更快，例如在海水中，日本冲绳海港防浪突锥体很快开裂（图 25）

图 25.日本冲绳海港防浪突锥体

我国秦皇岛海港也曾发生同样事例，当时未考虑 AAR，也可能是叠加作用引起的破坏。又 1988 年通辽电厂凉水塔构件未滿一冬即严重破坏，已查明系蒸养制度不当引起质量缺陷，加速冻融破坏，现证明也与 AAR 有关。

对于上述四特征进行全面考虑，有助于找出砼破坏的真正原因。如果确实有 AAR 问题，则 AAR 常常会是破坏的主因或导因。

AAR 的最终判定是钻取砼芯样，观察集料周围或内部有无裂缝、反应环和白色胶状物（干后为白粉），用 X 射线等方法鉴定有无 K，Na。有时取出的芯样未见异状，但一二天后就出现裂缝与泌出物。取出集料要进行碱活性检验。

1988 年以前我国未发现 AAR 破坏事例，1988 年春，日本京都大学组织交流讲学，大阪中央建筑研究所田村博在北京西安等砼工厂取些石子回日检验，发现多数属于碱活性可疑，引起了注意。1989 年北京傅坯兴高工，南化唐明述教授等发现北京内燃机厂、某些立交桥、轨枕板等有 AAR 裂缝的可能（现已由南化试验证实）。

我国地大岩种多，解放后砼工程数量巨大，而对集料质量很少注意，更谈不上碱活性。水泥厂不报碱含量，北方厂碱量偏高。为何久未出现 AAR 破坏事故？可能的解释有五：

1.普遍掺加活性混合材，如琉璃河水泥厂水泥中 $\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$ 常超过 1.2%，但多年大量掺加矿渣超过 40%。

2.习惯用中低标号砼，提倡节约水泥，使单方砼中碱含量不超过限值，如 3 公斤 / m^3 。

3.现场掺加粉煤灰、沸石岩粉、硅灰等活性掺料。

4.大量水工砼因及早预防，使最可能引起 AAR 破坏的工程得以避免。

5.另一主要原因是对 AAR 缺少认识，将许多 AAR 裂缝与破坏归因于其他常见的耐久性破坏因素，如冻融钢筋锈蚀、盐蚀等，掩盖了主因或导因的 AAR，也象当年美国加州公路、铁路出现 AAR 破坏时，各方专家的调研分析结论有：水泥安定性、水泥有害组分、环境温差大、砂子质量、养护不足、各组成材料的线胀系数的差异，电流影响、设计不当、断面不足、超负荷等等。直到加州公路研究所 1949 年得出 AAR 结论，意见才得到统一。据此类推，我国也可能早有了 AAR 破坏，只是未被认知罢了！因此未加警惕。

正确对待 AAR 的态度是：1.工程部门对潮湿环境的砼建筑，为了预防 AAR 破坏，规定集料必须通过碱活性检验，如有活性，必须限制水泥中的碱量和其他来源的碱量，或掺加足量的活性细掺料。水泥厂应提供含碱量数据。集料碱活性可用 ASTM 法检定，

也可用南化提出的小试件快速法，此法已被日本、法国、加拿大采用，适用于碱—硅酸反应。

2.对具有上述 AAR 破坏特征的砼建筑，进行检查鉴定，提出处理方案。

3.对已发生 AAR 破坏的建筑，不必惊慌失措。如能阻绝水源，应即封堵，可以阻缓破坏进程。因 AAR 破坏是渐进的，有足够时间筹措对策。在事故多发生地区，也不要引起恐慌。

增产优质水泥节约大量能源

(我国发展材料方针的商榷)

建材院 吴中伟 1980. 12

建材工业能够为国家节约大量能源。不仅因为建材工业内部降低能耗的潜力很大，同样重要的是它能够提供更低能耗的材料来代替高能耗材料。优质水泥便是明显的例子，用以代替钢材，能够收到很大的节能效果。

水泥、混凝土能耗低

。。。。。。。。

根据国内外大量分析统计材料，生产1吨水泥全部能耗还不到生产1吨钢材的 $1/5$ ，或生产1吨铝合金的 $1/25$ ，仅及1吨有机高分子材料（例如聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等）的 $1/13$ ，与1000块红砖相比。其能耗还低35%。如以同样的使用效果来比：由于水泥中掺入3到9倍的砂、石集料制成混凝土。而集料的采运加工能耗只有水泥的 $1/30 \sim 1/50$ 。因此水泥混凝土结构（计入配进的钢筋）比相同荷载能力的钢结构的总耗能量要低得多。1980年9月日本水泥混凝土杂志比较了30、35、40米跨度的一级桥梁结构的总耗能量，结果表明：用予应力混凝土结构比钢结构分别节省48.5，50.5，52.9%；又比较了10000，15000，20000米³的贮罐的总耗能量，结果表明：予应力混凝土罐比钢罐分别节省59.2，

58.5, 56.3%。从上述日本最新资料中选取一个节能最少的工程来分析, 那是跨度为30米的一级桥梁, 用予应力混凝土结构代替钢结构, 全部能耗折合石油前者为25,455升, 后者则为49,428升, 前者比后者节省48.5%。如以单位代用量来比, 为了少用1吨型钢需要多用1吨优质水泥(制成2.4米³混凝土), 结果在工程中节约能耗48.5%。如按1吨钢的能耗为1000公斤标准煤估计, 则多用1吨水泥少用1吨钢可以为国家节约485公斤标准煤。假如我们用1000万吨优质水泥来代替钢材, 1000万吨水泥按先进的单位能耗指标170公斤标准煤/吨计, 其耗能量为170万吨标准煤, 1000万吨钢材同样按先进的单位能耗指标1000公斤标准煤/吨计, 其耗能量为1000万吨标准煤。按上述节能48.5%计算, 可为国家节能485万吨标准煤。也就是生产1000万吨优质水泥总的耗能量为170万吨标准煤, 因为代用了钢材, 换来了485万吨标准煤的节约。现在用水泥混凝土代替钢材等耗能多的材料的做法已经很多, 例如用混凝土压力管、樁来代替钢管、铸铁管和钢桩, 还有地下建筑、防水建筑、海上砦探采油平台、液化石油气运输船、高压容器等, 用混凝土代钢的趋势已十分肯定。现在科研方面正从水泥与混凝土材料科学、结构理论、予应力等新技术进行探索, 以充分挖掘材料本身的潜力, 提高水泥的节能效果。总之这是一条值得重视的节能途径。如果计入钢结构的维修能耗与混凝土结构的使用

寿命，则节能数值还要高得多。当然我国目前还不可能有1000万吨钢材被水泥代用的条件，但可以预见，10年以后当水泥产量超过1亿吨，而又有足够的配筋材料供应时，使用年产量 $\frac{1}{10}$ 的优质水泥代用钢材，还是可能的。

在大量城乡住宅建筑中代替粘土砖瓦也是一条巨大的节能途径。当然现在水泥紧张，而砖瓦则能够大量就地生产。但是，我们必须从节能来看发展。一万块砖的能耗总量为1.1吨标准煤，土窑烧砖更高达2~3吨，不管当地用什么燃料，总是构成能耗。根据河南省小型砌块代替粘土砖的经验，每10000米²建筑面积，如用红砖耗能总量为485.5吨标准煤，如用小型砌块耗能总量为195.4吨标准煤，节约达59.8%，至少能节约40%。根据高世雄同志的统计，加气混凝土比砧的生产能耗降低47.1%；20厘米厚的无砂陶粒大孔混凝土复合外墙比三七砧墙降低能耗28.6%，而在使用中长期节约能源的数量更要大得多。将来我国水泥产量增加较多以后，城乡用水泥砌块加气混凝土与水泥瓦等代替粘土砧瓦将会得到普遍推广。从我国能源的形势来看，这样做非但有利，而且还可能是必要的。

现在世界水泥总产量已超过9亿吨。包括第三世界在内每人年的平均产量为230公斤，而日本则超过700公斤。世界混凝土总产量约达60亿吨，人年平均接近1.5吨，可算是产量最大的人造材料。近年来有两个趋势十分明显：一是水泥产量比钢产量的增长速度

快。见下表。

表 1 历年世界水泥与钢产量比的变化

年 份	1950	1955	1960	1965	1970	1976
水泥/钢	0.7	0.8	0.92	0.95	1.05	1.09

1975年以前世界水泥产量多年徘徊于5~6亿吨上下,此后就迅速上升,1978年达85,900万吨,1979年超过9亿吨。二是工业较不发达国家的水泥增产速率大,尤其在1979年,一年之内印度从1936万吨增加到2600万吨,净增⁶⁶⁴~~444~~万吨,南朝鲜从1547万吨增加到2030万吨,净增483万吨,波兰从2168万吨增加到2640万吨,净增472万吨。其它如土耳其、北朝鲜、南斯拉夫也各增加二、三百万吨之多。工业较不发达国家的水泥与钢产量之比多超过1.2,有的高达2以上(如印度、西班牙)。说明在我们工业不发达国家中,发展水泥比发展钢材为有利。上述现象都与能源形势密切相关。

我国需要大量优质水泥

现在我国与外国可比的优质水泥产量不到3000万吨,折算为人年平均产量,约为25公斤,只及世界人年平均值的1/9。今后要满足城乡住宅和四化建设的需要和用来代替钢材节约能源,必须大量增产优质水泥。

参考苏、日、美、西德等国达到国民平均产值人年1000美元时的水泥产量约为250到300公斤。如果按200公斤计算，到2000年我国需要年产优质水泥2·4亿吨，比现在增加2亿吨。平均每年需增加产量达1000万吨以上。考虑到我国钢铁短缺和节能的重要性，这个估计数字可能还是比较合理的。

在发展能耗低的干法生产工艺的同时，必须重视发展机械化立窑生产优质水泥

现在，采用以带分解炉和悬浮予热器的迴转窑为中心的干法生产工艺作为发展水泥工业的主要技术路线已被大家所接受。但是在1990年以前用来达到每年增产水泥1000万吨的可能性是不存在的。从现在起我们必须为1990年以后实现这一增产指标作好规划，在资源、技术力量、设备制造等方面作好准备。

从历史上看，我国大中型水泥的最高年增产量不过二、三百万吨（1962—1965），而小水泥的年增产量曾超过600万吨（1976—1978）。因此，在近10年内要迅速提高产量就必须较多地发展机械化立窑，并逐步提高其产品质量，使大部分水泥能够达到425号的优质水平。

机械化立窑水泥厂具有投资少，上马快，设备制造维修方便等优点，在采用合理措施（如原料、生料的均化，正确配煤，提高成球质量和操作技术等）和加强技术管理后是能够生产425号优质水泥的。