

水工混凝土的碱-硅反应抑制

蔡跃波^{1,2}, 丁建彤^{1,2}, 白 银^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:我国水利水电工程建设中越来越多地使用碱活性骨料,为了确保工程的安全性和兼顾经济性,需采取合理可靠的碱骨料反应抑制措施. 提出用粉煤灰的比表面积与综合化学成分组合得到的物化因子作为评价粉煤灰品质的指标,以全面反映粉煤灰掺和料的化学、矿物、物理特性对抑制碱-硅反应效果的影响. 水工混凝土对碱骨料反应已具备一定的自免疫力,这包括采用含碱活性石粉的人工砂时石粉起到的分散应力的作用,以及引气起到的消纳膨胀产物的作用. 砂浆棒快速法高估了粉煤灰对水工混凝土碱-硅反应的抑制效果,混凝土棱柱体法由于配合比、骨料粒径均与实际水工混凝土差距较大,还无法真实反映抑制措施对水工混凝土碱-硅反应的抑制效果,需开发能够反映水工混凝土骨料粒径大、胶凝材料用量低、水胶比高等特点的碱-硅反应抑制效果评价试验方法.

关 键 词:水工混凝土; 碱-硅反应; 粉煤灰; 自免疫力; 试验方法

中图分类号: TU528.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0059-08

随着我国水利水电工程建设的进行,一些重大工程由于缺乏运距较近的优质骨料料源,有时为了利用工程开挖料以尽量减少弃料对环境的破坏,越来越多地使用碱活性骨料. 为了确保工程的安全性,并适当兼顾经济性,需采取合理可靠的碱骨料反应抑制措施. 掺加粉煤灰是水工混凝土中广泛使用的抑制碱-硅反应的有效措施,但有的工程对粉煤灰的 CaO 含量、碱含量、等级等提出了要求,限制了可用的粉煤灰料源,对于原材料需求量非常庞大的水工混凝土而言,由此可能会明显影响工程经济性. 粉煤灰化学组成影响抑制碱-硅反应的效果,如粉煤灰的 CaO 及碱含量较高都不利于碱-硅反应的抑制^[1-3];但粉煤灰的主要化学组成是 SiO₂, Al₂O₃ 和 Fe₂O₃, 它们的总含量一般超过 70%, 而这些成分是有利于抑制碱-硅反应的^[4]. 笔者曾提出以综合考虑化学成分的一个因子来代替单一的化学成分,作为筛选粉煤灰的指标^[5]. 粉煤灰的细度也是影响其抑制碱-硅反应效果的重要因素, Bérubé 等认为用颗粒粒径分布表示的粉煤灰细度对粉煤灰抑制碱-硅反应的效果有显著影响^[6]; Obla 等也表明粉煤灰的细度对抑制碱-硅反应效果影响较大, 粒径约 3 μm 的超细粉煤灰在 CaO 含量约 11.8% 时仍然可以有效地抑制碱-硅反应^[7]. 由于粉煤灰的化学成分是以玻璃体、石英、莫来石等不同的矿物成分形式存在的,而这些矿物的溶解度有别,因此,可以认为粉煤灰的矿物成分对其抑制碱-硅反应的效果也有影响. Kawabata 等曾用 8 种粉煤灰研究了掺量、非晶态 SiO₂ 含量、比表面积、碱含量对抑制碱-硅反应效果的影响^[8], 结果表明单独用非晶态 SiO₂、比表面积或者碱含量都不能表达粉煤灰对碱-硅反应的抑制效果,用掺量×比表面积×非晶态 SiO₂/碱含量则可以较好地反映粉煤灰的品质. 总之,在上述研究的基础上,有必要综合考虑粉煤灰的物理、化学、矿物特性对其抑制效果的影响,提出合理评价粉煤灰品质的指标.

水工混凝土与普通混凝土有着显著区别,王爱勤等^[9]详细讨论了其区别所在,如水工混凝土的骨料粒

收稿日期: 2009-09-09

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)

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: ybcail@nhri.cn

径大、强度等级低、胶凝材料用量少、长期处于潮湿环境、使用寿命长等,并且认为水工混凝土中的碱骨料反应(AAR)比普通混凝土有更大的危险性;笔者也针对大坝混凝土的特殊性,指出大坝混凝土中的活性石粉、引气剂等对 AAR 有一定的“自免疫力”^[10],这种免疫力会在一定程度上降低 AAR 破坏的风险,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.

目前国内的行业规范和国家规范中还没有建立用混凝土试件评价水工混凝土碱-硅反应抑制效果的方法,仅有的“抑制骨料碱活性效能试验”方法^[11]是用高活性的石英玻璃砂成型砂浆棒试件来评价抑制措施效果的,无论从骨料活性、胶凝材料用量、骨料粒径还是配合比组成而言,该方法都与实际水工混凝土有很大差别,根据该方法得出的结论不一定适用于水工混凝土.国内外也有参照砂浆棒快速法和混凝土棱柱体法进行抑制措施有效性评价的,如 ASTM C1567、ASTM C1293 等,但这些方法都是基于大量普通混凝土试验建立起来的,与水工混凝土的长期性能不一定有对应性.因此,需开发能够反映水工混凝土骨料粒径大、胶凝材料用量低、水胶比高等特点的碱-硅反应抑制效果评价试验方法.

1 基于碱-硅反应抑制效果的粉煤灰品质评价

笔者曾用 22 种粉煤灰研究影响抑制碱-硅反应效果的因素^[12].粉煤灰的 CaO 和碱含量并不能决定抑制碱-硅反应的效果,粉煤灰 CaO 含量即使略高(18%),当掺量为 30% 时,砂浆棒快速法测试 28 d 膨胀率仅 0.05% (不掺粉煤灰的空白组 28 d 膨胀率为 0.266%),效果仍然很好^[5].粉煤灰的玻璃体含量、玻璃态 SiO₂ 含量、玻璃态 Al₂O₃ 含量对抑制碱-硅反应效果影响不明显,并且矿物成分测试繁琐,精度也不如化学成分测试.因此,不宜采用矿物组成来优选粉煤灰.粉煤灰的比表面积对抑制效果有影响,比表面积越大,抑制碱-硅反应的能力越强.粉煤灰细度的影响不如化学成分明显,不宜单独作为评价粉煤灰品质的指标.

综上,就粉煤灰的化学成分、矿物成分和细度对其碱-硅反应抑制效果的研究,提出采用如下的表达式综合评价粉煤灰的品质:

$$C = \frac{\text{CaO} + X_1\text{R}_2\text{O} + X_2\text{MgO} + X_3\text{SO}_3}{X_4\text{SiO}_2 + X_5\text{Al}_2\text{O}_3 + X_6\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot \text{SSA}^{X_7} \quad (1)$$

式中:CaO, R₂O, MgO, SO₃, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 分别为粉煤灰各化学成分的质量百分数;SSA 为粉煤灰的比表面积;X₁ ~ X₆ 为各成分的分项系数,宜通过回归分析得出.由于各成分并非自由变化,存在一定的内部约束,所以各成分前的系数只有数学意义,不代表该成分作用的大小.拟合结果见图 1,相关系数 R² 达 0.99.修正后的表达式既包含粉煤灰的化学特性,又包含粉煤灰的物理特性,称为物化因子,以 C 表示.

根据上述拟合结果,C 的表达式为:

$$C = \frac{\text{CaO} + 1.0997\text{R}_2\text{O} - 1.7050\text{MgO} - 1.8916\text{SO}_3}{0.0467\text{SiO}_2 - 0.00751\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.4064\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot \text{SSA}^{-2.7112} \quad (2)$$

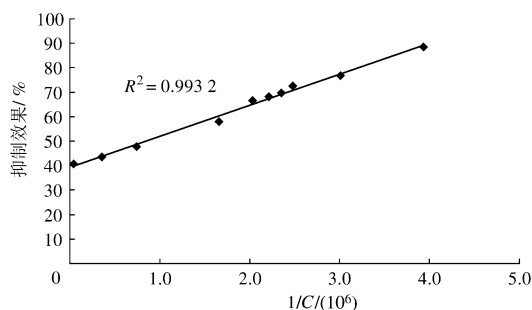


图 1 物化因子 C 与碱-硅反应抑制率之间的关系

Fig. 1 Relationships between physical-chemical index C and ASR suppressing effectiveness

2 大坝混凝土对碱-硅反应的自免疫力

2.1 引 气

水工混凝土普遍通过掺加引气剂,引入 2% ~ 6% 的微小气泡.这些气泡均匀分布在水泥石中,对于碱-硅反应膨胀有一定的抑制效果^[13,14].Jensen 等用 35 种不同碱活性砂进行的试验表明,4% 的引气量可以将碱-硅反应的膨胀率减少 35%,扫描电镜观察表明,碱-硅反应的产物填充到气孔中^[15],也就是说,引气剂引入的气孔对碱-硅反应膨胀起到了“缓冲气囊”的作用.朱蓓蓉等^[16]也得出类似的结论:当混凝土含气量为 4.

5%时,可以将碱-硅反应膨胀率减小约57%。

利用锦屏一级水电站大奔流沟的碱活性砂岩砂,按照 AMBT 法试验了砂浆引气对碱-硅反应的抑制效果。选择4个不同厂家生产的4种引气剂,通过调整掺量分别为0.01%、0.02%和0.03%,获得3.5%~18.3%的砂浆棒含气量。砂浆棒28 d 膨胀率降低百分比与含气量的关系见图2。可见,碱-硅反应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%。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2对应,相应砂浆的碱-硅反应膨胀率减小40%左右。

2.2 活性石粉

采用人工骨料时,如果骨料具有碱活性,则人工骨料(尤其是人工砂)自然就会引入相当数量的碱活性石粉。《水工混凝土施工规范》(DL/T 5144-2001)要求,常态混凝土中细骨料的石粉含量为6%~18%^[17]。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用量的20%~80%。这部分石粉将均匀地分布在水泥石中,其作用主要有两个方面:(a)与浆体中的碱发生反应。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,这就可以消耗浆体中的碱;(b)虽然石粉与碱发生了反应,但由于石粉分布均匀,且颗粒很小,不会像骨料界面区发生的碱-硅反应那样形成局部应力集中,而是使得碱-硅反应膨胀力弥散从而避免开裂,对碱-硅反应可以达到“以毒攻毒”的效果^[18,19]。Carles-Gibergues 等的试验中,4种碱活性骨料的石粉在60℃混凝土棱柱体法试验中都减少了碱-硅反应所产生的表面裂纹^[20]。

采用锦屏一级水电站大奔流沟的碱活性砂岩砂,磨细成勃氏比表面积358 m²/kg的石粉(这种人工砂中实际所含未磨细石粉的勃氏比表面积为212 m²/kg),分别取代水泥质量的10%、20%和30%,同时保持浆体体积不变;所选骨料为砂岩砂;采用 AMBT 法测试28 d。为了避免碱活性石粉掺入以后导致的“稀释效应”,即水泥用量减少对碱-硅反应膨胀率的影响,另外成型了掺入非碱活性大理岩石粉(比表面积为780 m²/kg)的试件作为对照组。试验结果见图3。

可见,随着碱活性石粉掺量的增加,碱-硅反应膨胀率明显减小。当石粉掺量为胶凝材料质量的20%时,掺石粉试件28 d 膨胀率为0.192%,与同龄期膨胀率为0.327%的对比试件相比,免疫效果为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%。因此,对于碱活性石粉质量相当于胶凝材料总用量的20%~80%的水工混凝土,石粉对碱-硅反应的免疫效果将相当可观。掺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%和0.295%,与含碱活性石粉的试件膨胀率相比大得多,说明碱活性石粉的免疫效果主要不是稀释效应产生的。

3 评价水工混凝土碱-硅反应抑制效果的试验方法

3.1 不同试验方法对粉煤灰抑制效果的评价差异

采用砂浆棒快速法(AMBT)和快速混凝土棱柱体法(ACPT)^[21]考察13种粉煤灰对碱-硅反应的抑制

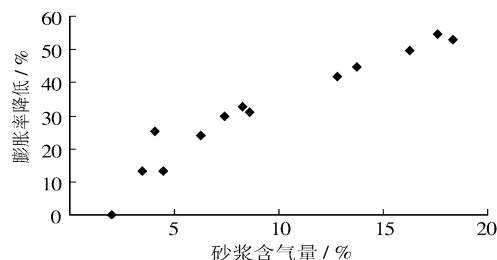


图2 砂浆引气对碱-硅反应的抑制效果

Fig. 2 Suppressing effect of air content of mortar on ASR

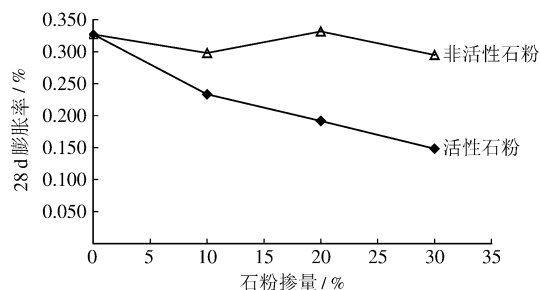


图3 不同掺量的碱活性砂岩石粉对碱-硅反应的抑制效果

Fig. 3 Suppressing effect of alkali-reactive stone powder on ASR

效果,发现同一种粉煤灰在不同试验方法中的表现有比较明显的差异.如图4所示,在30%掺量下,用砂浆棒快速法测出的各种粉煤灰的抑制率为75%~90%,抑制效果良好,并且各种粉煤灰之间的差异比较小;而在ACPT试验中,各种粉煤灰的抑制率却为40%~88%,不仅抑制效果略低,而且相互之间的差异也较大.

扫描电镜观察的结果见图5.可见,粉煤灰在80℃,1 mol/L NaOH并饱和石灰水的溶液中浸泡14 d后,颗粒溶解非常严重,生成的产物附着在颗粒表面,形成多孔、不规则的颗粒.X射线衍射分析见图6,可见,产物中结合了相当数量的 Na^+ ,生成P型沸石.这种P型沸石是一种多孔结构,在其它领域常被看作分子筛,在常温下是不容易生成的^[22-24].由此可见,粉煤灰在砂浆棒快速法中结合 Na^+ 的能力以及反应程度都远高于在快速混凝土棱柱体法中的情况.

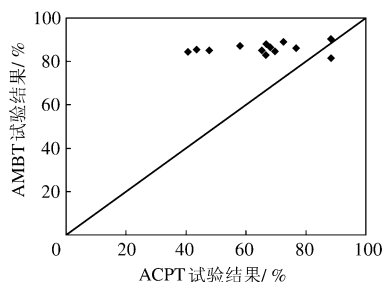
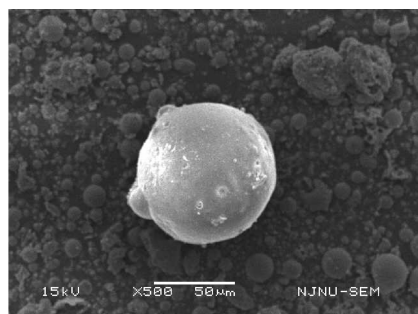
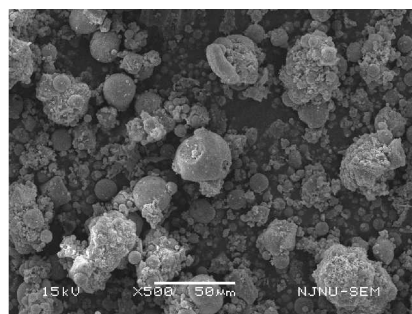


图4 砂浆棒快速法与快速混凝土棱柱体法试验效果比较

Fig. 4 Effect of fly ash tested by AMBT is different from that by ACPT



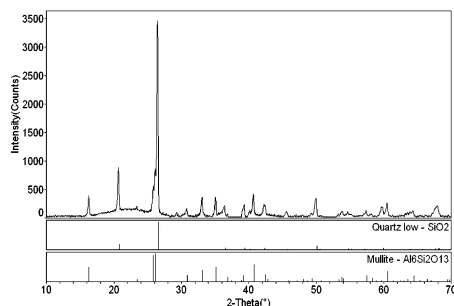
(a) 浸泡之前



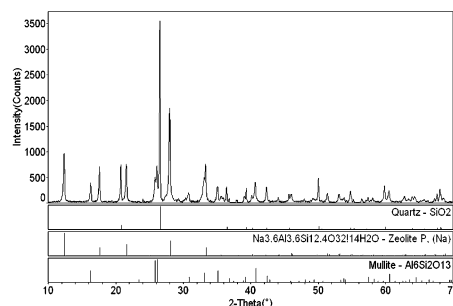
(b) 浸泡 14 d

图5 粉煤灰浸泡之前和浸泡 14 d 后的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photographs of raw fly ash particles and those particles after immersed in 80℃ 1 mol/L NaOH solution for 14 d



(a) 浸泡之前



(b) 浸泡 14 d

图6 粉煤灰浸泡之前和浸泡 14 d 后的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of raw fly ash particles and those particles after immersed in 80℃ 1 mol/L NaOH solution for 14 d

综合分析,用砂浆棒快速法会夸大粉煤灰的抑制效果,不宜单独作为评价粉煤灰抑制效果的试验方法,宜采用与工程实际更为接近的混凝土试件进行试验.

3.2 水工混凝土的特殊性

评价碱-硅反应抑制措施效果的混凝土棱柱体法,所采用的配合比为水胶比 0.42~0.45,单方胶凝材料用量为 420±10 kg,骨料最大粒径为 20 mm,而水工混凝土的典型配合比为水胶比 0.40~0.65,单方胶凝材料用量为 200 kg 左右,骨料最大粒径为 80~150 mm,使用高效减水剂和引气剂等外加剂.二者的差别很明

显,这些差别也使得用混凝土棱柱体法测试得出的结论与水工混凝土实际表现不一致。

3.2.1 水胶比 改变水胶比不仅会改变孔隙中碱的浓度,还会改变混凝土内部的孔结构. Grattan-Bellew^[25]指出最有利于碱-硅反应发生的水胶比是 0.4~0.6,具体取值与骨料的性质有关. Fournier 和 Bérubé^[26]采用砂浆棒法进行的研究表明,当水胶比小于 0.5 时,随着水胶比的增大,碱-硅反应引起的膨胀会增大;当水胶比大于 0.5 时,则相反. 笔者也曾结合西南某大坝工程考察了水胶比对碱-硅反应膨胀率的影响(见图 7),0.47 水胶比试件 28 d 的膨胀率比 0.40 水胶比的试件高出约 35%. 由此可见,水胶比带来的影响不容忽视。

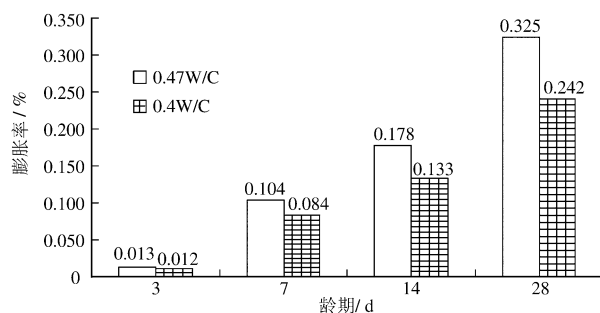


图7 水灰比对碱-硅反应的影响(砂浆棒快速法)

Fig. 7 Effect of W/C on ASR (tested by AMBT)

鉴于水工混凝土强度要求低,水胶比一般较高,采用 0.42~0.45 水胶比的混凝土试件进行试验,可能会低估碱-硅反应导致的膨胀。

3.2.2 单方胶凝材料用量 胶凝材料用量(或浆骨比)小是水工混凝土的显著特点. 碱骨料反应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^[27-30]. 在水工混凝土中,骨料占到混凝土质量的 80% 左右,胶凝材料中的碱不足以使全部骨料发生破坏性 AAR 膨胀. 使用同样碱活性程度的骨料,水工混凝土膨胀量仅为普通混凝土的 20%~25% 左右^[10]. 国外的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^[28,31].

另一方面,也有研究认为胶凝材料作为连续相,对 AAR 膨胀起到约束作用,随着胶凝材料用量的增加,AAR 膨胀率会降低^[32]. 在砂浆或混凝土总体积保持不变的情况下,胶凝材料用量的增加意味着碱活性骨料用量的减小,最终碱骨料反应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 1 M 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,所以可能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,胶凝材料用量少会对水工混凝土碱-硅反应膨胀产生明显影响,影响的方向还需要进一步验证。

3.2.3 最大骨料粒径 水工混凝土的最大骨料粒径一般都比较大(80~150 mm),施工期间由于沉降、泌水等原因,混凝土中的浆体会上浮,而大骨料容易阻止上浮的水分,导致骨料下方形成水囊^[33]. 水囊作为一种微环境,满足了 AAR 发生的 3 个必要条件,对于 AAR 来说是非常好的发育平台. 因此,骨料粒径越大,AAR 破坏的风险也就越大. 笔者用扫描电镜分析了直径分别为 150,40 及 20 mm 的骨料下方裂缝情况(见图 8). 从图 8 中可以清晰地看出骨料粒径越大,骨料下方的裂缝越宽。

测试碱-硅反应抑制效果的标准试验方法中采用砂浆进行试验,无法考虑大骨料带来的差异. 即使参照混凝土棱柱体法进行试验,所用最大骨料粒径为 20 mm,也与水工混凝土的实际情况相差较远,单从骨料粒径的影响看,现行试验方法会低估水工混凝土中碱骨料反应的风险。

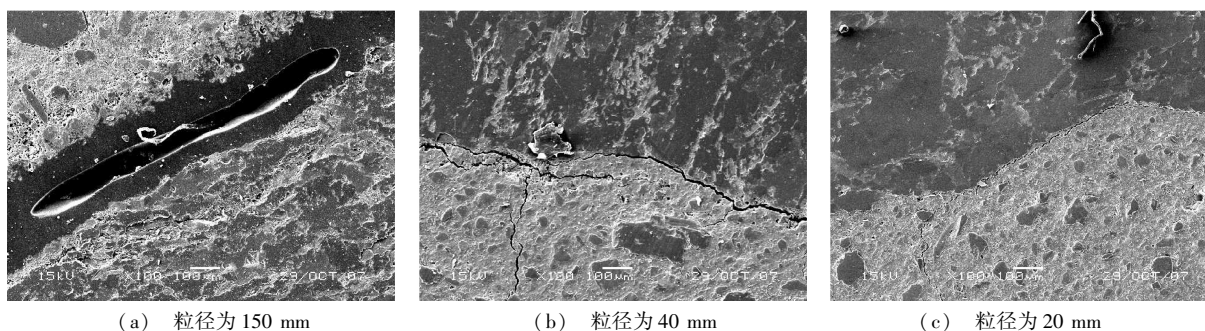


图 8 不同粒径骨料下方开裂情况

Fig. 8 Cracks with aggregates of different sizes

4 结 语

基于以上分析,对于需求量庞大、配合比又与普通混凝土有着显著差异的水工混凝土而言,应注意以下问题:

(1) 为了全面反映粉煤灰的化学、矿物、物理特性对其抑制碱-硅反应效果的影响,建议以粉煤灰的比表面积与综合化学成分组合得到的物化因子作为评价粉煤灰品质的指标;

(2) 水工混凝土对碱骨料反应已经具备一定的自免疫力,这包括采用含碱活性石粉的人工砂时石粉起到的分散应力作用,以及引气起到的消纳膨胀产物的作用. 应重视这种自免疫力;

(3) 砂浆棒快速法高估了粉煤灰对水工混凝土碱-硅反应的抑制效果,混凝土棱柱体法由于配合比、骨料粒径均与实际水工混凝土差距较大,还无法真实反映抑制措施对水工混凝土碱-硅反应的抑制效果,需开发能够反映水工混凝土骨料粒径大、胶凝材料用量低、水胶比高等特点的碱-硅反应抑制效果评价试验方法.

参 考 文 献:

- [1] 吴定燕, 方坤河, 曾 力, 等. 粉煤灰抑制碱骨料反应研究[J]. 云南水力发电, 2001, 17(3): 34-37. (WU Ding-yan, FANG Kun-he, ZENG Li, et al. Research on AAR suppression with fly ash[J]. Yunnan Water Power, 2001, 17(3): 34-37. (in Chinese))
- [2] CARRASQUILLO R L, SNOW P G. Effect of fly ash on alkali-aggregate reaction in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1987, 84(4): 299-305.
- [3] 唐国宝, 丁 珣, 张 恬, 等. 低钙粉煤灰与高钙粉煤灰对碱集料反应抑制作用的试验比较[J]. 粉煤灰, 2002(3): 3-6. (TANG Guo-bao, DING Li, ZHANG Tian, et al. Experimental comparison between inhibiting effects of low calcium fly ash and high calcium fly ash on alkali aggregate reaction[J]. Coal Ash, 2002(3): 3-6. (in Chinese))
- [4] MALVAR L J, LENKE L R. Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction based on chemical composition[J]. ACI Materials Journal, 2006, 103(5): 319-326.
- [5] 丁建彤, 白 银, 蔡跃波. 基于碱-硅反应抑制效果的粉煤灰品质评价指标[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 130-135. (DING Jian-tong, BAI Yin, CAI Yue-bo. Evaluation index of fly ash quality based on its effectiveness against alkali-silica reaction[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(2): 130-135. (in Chinese))
- [6] BéRUBé, M A, CARLES, A, DUCHESNE, J, et al. Influence of particle size distribution on the effectiveness of type-F fly ash in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity[C]//MALHOTRA V M. Fifth CANMET/ACI International Conference, Farmington Hill ;American Concrete Institute, 1995: 177-192.
- [7] OBLA K H, HILL R L, THOMAS M D A, et al. Properties of concrete containing ultra fine fly ash[J]. ACI Materials Journal,

- 2003, 100(5): 426-433.
- [8] KAWABATA Y, YAMADA K, MATSUSHITA H. Evaluation of character of fly ash related to suppressing effect on alkali-silica reaction[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu E, 2007, 63(3): 379-395.
- [9] 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, 34(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, 34(2): 117-121. (in Chinese))
- [10] 蔡跃波, 丁建彤, 白银. 大坝混凝土对碱骨料反应的自免疫力[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(11): 1610-1613. (CAI Yue-bo, DING Jian-tong, BAI Yin. Self-immunity of dam concrete to alkali-aggregate reaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(11): 1610-1613. (in Chinese))
- [11] SL 352-2006, 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352-2006, Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [12] 白银. 锦屏一级水电站大坝混凝土 ASR 抑制措施研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (BAI Yin. Suppressing measures against alkali-silica reaction in the dam concrete for the Jinping-I Hydroelectric Project[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [13] RAMACHANDRAN V S. Alkali aggregate expansion inhibiting admixtures[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20: 149-161.
- [14] American Concrete Institute, ACI 221.1R State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity[R]. Farmington Hills, MI USA, 1998.
- [15] 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.
- [16] 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))
- [17] DL/T 5144-2001, 水工混凝土施工规范[S]. (DL/T 5144-2001, Specifications for hydraulic concrete construction[S]. (in Chinese))
- [18] 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]//TANG Ming-shu, DENG min. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing: Academic Publishers, 2004: 617-624.
- [19] PEDERSEN B, MORTEL E, JENSEN V. Effects of alkali-reactive crushed fillers on expansions due to ASR[C]//TANG Ming-shu, DENG min. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing: Academic Publishers, 2004: 764-772.
- [20] CARLES-GIBERGUES, André C. A simple way to mitigate alkali-silica reaction[J]. Materials and Structures, 2008, 41(1): 73-83.
- [21] RILEM TC-106. Alkali-aggregate reaction-accelerated tests[J]. Materials and Structures, 1996, 29(190): 323-334.
- [22] 谭宏斌, 熊海涛, 甄宝勤. 粉煤灰水热法提硅合成沸石工艺研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(1): 13-18. (TAN Hong-bin, XIONG Hai-tao, ZHEN Bao-qin. Study on zeolite synthesised using silicon extracted from fly ash by hydrothermal method [J]. Non-Metallic Mines, 2008, 31(1): 13-18. (in Chinese))
- [23] HIDEKAZU T, YASUHIKO S, RYOZI H. Formation of Na⁺ A and -X Zeolites from waste solutions in conversion of coal fly ash to zeolots[J]. Materials Research Bulletin, 2002(37): 1878-1882.
- [24] KEKA O, NARAYAN C P, AMAR N S. Zeolite from fly ash: synthesis and characterization[J]. Bull Mater Sci, 2004, 27(6): 555-564.
- [25] GRATAN-BELLEW P E. Test methods and criteria for evaluating the potential reactivity of aggregates[C]//KIYOSHI O, SHENZO N, MITSUNORI K. Proc 8th Int Conf Alkali-Aggregate Reaction, London & New York: Elsevier Applied Science, 1989: 279-294.
- [26] FOURNIER B, Bérubé M A. Application of the NBRI accelerated mortar bar test to siliceous carbonate aggregates produced in the St Lawrence lowlands (Quebec, Canada). Part 2: proposed limits, rates of expansion, and microstructure of reaction products[J]. Cement and Concrete Research, 1991(21): 1069-1082.

- [27] RAMYAR K, TOPAL A. Effects of aggregate size and angularity on alkali-silica reaction[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(11): 2165–2169.
- [28] WIGUM B J, PEDERSEN L T, GRELK B. State-of-the-art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction[R/OL]. 2006. [2008-08-08]. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Partner/Report2.1-Final-A06018.pdf>.
- [29] 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]//TANG Ming-shu, DENG min. Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing: Academic Publishers, 2004: 736–743.
- [30] 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)[R/OL]. 2003. [2008-08-08]. <http://www.cca.org.nz/shop/downloads/TR03.pdf>.
- [31] SWAMY R N. The alkali silica reaction in concrete[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992: 74–75.
- [32] 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))
- [33] 覃维祖. 初龄期混凝土的泌水、沉降、塑性收缩与开裂[J]. 商品混凝土, 2006(1): 1–9. (QIN Wei-zu. Bleeding, segregation, plastic shrinkage and cracking of concrete at early age[J]. Ready-Mixed Concrete, 2006(1): 1–9. (in Chinese))

Inhibition of alkali-silica reaction of hydraulic concrete

CAI Yue-bo^{1,2}, DING Jian-tong^{1,2}, BAI Yin^{1,2}

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The reactive aggregates are used more and more in water conservancy and hydropower engineering construction in China. For ensuring the safety and the economy of the projects, reasonable and reliable measures are needed to inhibit alkali-aggregate reaction. Derived from specific surface area and synthesized chemical composition, the Physical-Chemical Index of fly ash, which is the mostly used mineral admixtures to suppress ASR, is presented to evaluate the character of fly ash and is applied to integrally reflect the influence of the chemical, mineral and physical properties of fly ash on the suppressing effect of ASR. Hydraulic concrete already has some self-immunity to the ASR. On one hand, reactive stone powder contained in artificial sand disperses the concentrated stress of ASR, and on the other hand, air bubbles entrained by air-entraining agent can supply space to accommodate the products of ASR. The accelerated mortar bar test method overestimates the inhibition effect of fly ash on ASR. Because the mix proportion and the aggregate size of concrete prism are much different from practical hydraulic concrete, concrete prism test method also can not truly reflect the effect of suppressing measures. Considering the special characteristics of hydraulic concrete, such as bigger aggregate size, lower cementitious material content and higher W/C ratio, a new test method for evaluating the suppressing effect of ASR needs to be developed.

Key words: hydraulic concrete; alkali-silica reaction; fly ash; self-immunity; testing method