

文章编号:1672-3031(2012)02-0105-07

碱-硅酸反应对混凝土力学性能的影响

刘晨霞, 陈改新, 王秀军, 孔祥芝

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 采用实际工程活性骨料, 并参照工程配合比, 成型混凝土抗压、劈拉、抗弯和轴向拉伸试验试件。经过28d标准养护后, 移入温度 $60\pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度为90%~95%的养护箱中, 使碱-骨料反应加速进行。在混凝土达到不同的膨胀量时取出, 进行力学性能测试。结果表明, 混凝土的劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向抗拉强度随碱-骨料反应膨胀量的增大而降低。用相对动弹性模量表征混凝土的损伤, 根据混凝土力学性能和损伤量的对应关系, 初步得出了ASR混凝土的力学性能衰减模型。

关键词: 碱-硅酸反应; 预测模型; 损伤量

中图分类号: TV431

文献标识码: A

1 研究背景

碱-骨料反应(Alkali Aggregate Reaction简称AAR)是指硬化混凝土中的碱与骨料中的活性矿物发生化学反应, 导致混凝土发生膨胀、开裂甚至破坏的现象。碱-骨料反应类型主要有碱-硅酸反应(Alkali-silica Reaction简称ASR)和碱-碳酸盐反应(Alkali-carbonate Reaction简称ACR)。自20世纪40年代美国首次发现碱-骨料反应(AAR)以来, 先后在加拿大、法国、南非、英国等地区都发现了AAR引起的混凝土裂缝和破坏^[1]。AAR是引起混凝土耐久性下降的主要原因之一, 因为AAR的危害不仅在于使混凝土结构的承载力降低, 而且还引发裂缝, 加剧了环境水及其它介质的腐蚀和冻融等破坏作用, 从而大大缩短混凝土建筑物的使用寿命。AAR被认为是混凝土的“癌症”, 潜伏期长, 一旦发生, 无法治愈, 难于补救处理。

尽管自Stanton^[2]首次发现AAR以来, 各国学者知道了AAR并对其进行了大量研究, 但大部分研究主要是针对AAR的机制和抑制AAR膨胀的措施。而对AAR造成的混凝土损伤及对力学性能影响的研究却非常有限。此外, 大量公开的研究资料主要涉及的是砂浆而非混凝土。由于ACR远没有ASR普遍, 近年来对AAR的研究主要集中在ASR方面。我国混凝土工程使用的骨料中有许多是硅质骨料或含硅质矿物的骨料, 本文所涉及的AAR问题均是关于ASR的。温度是碱-骨料反应的主要影响因素, 作者通过研究碱-硅酸反应速率常数与养护温度之间的关系^[3], 用等效时间公式估算出试验所用砂岩骨料混凝土 60°C 膨胀1个月相当于 20°C 膨胀5年左右。因此, 本文参照工程实际配合比, 成型抗压、劈拉、抗弯和轴向拉伸试验试件, 试件拆模后放在温度为 $20\pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度95%以上的养护室养护28d, 然后移入温度为 $60\pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度为90%~95%的养护箱中, 使AAR加速进行, 在混凝土达到不同的膨胀量时取出, 进行混凝土力学性能试验, 研究AAR膨胀和混凝土损伤及力学性能变化之间的关系, 以期受AAR损害混凝土的老化程度和安全性评估提供基本资料。

2 混凝土原材料和配合比

2.1 原材料 试验所用水泥为42.5中热硅酸盐水泥, 水泥的化学成分见表1。

收稿日期: 2011-09-29

作者简介: 刘晨霞(1977-), 女, 工程师, 主要从事水工材料研究。E-mail: liucx@iwhr.com

表1 水泥的化学成分 (单位: %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	碱含量 (Na ₂ Oeq)
42.5中热水泥	21.28	3.94	5.66	62.87	1.98	2.3	0.21	0.09	0.23

依据《水泥压蒸安定性试验方法》(GB/T 750), 对42.5中热硅酸盐水泥进行了压蒸膨胀率检验, 检测结果为0.023%, 满足《水工混凝土试验规程》(SL 352-2006)“2.37 骨料碱活性检验”中对水泥压蒸膨胀率小于0.2%的要求。

试验所用骨料为人工骨料, 岩性为石英砂岩, 经岩相分析, 骨料中含有约5%~12%的微晶石英。依据SL352—2006《水工混凝土试验规程》中“2.37 骨料碱活性检验(砂浆棒快速法)”对骨料进行了骨料碱活性检验, 28d砂浆膨胀率为0.365%, 根据砂浆棒快速法判定该骨料为具有潜在碱-硅酸反应活性的骨料。粗骨料最大粒径为40mm, 人工砂的细度模数为3.04, 石粉含量为19.7%。

试验所用减水剂为萘系高效减水剂, 引气剂为松香类引气剂。

2.2 配合比 参照工程实际配合比成型各种规格的混凝土试件, 试验配合比见表2。

表2 试验配合比

骨料最大粒径/mm	试验编号	水胶比	砂率/%	外加剂掺量/%		混凝土材料用量/(kg/m ³)			
				减水剂	引气剂	水	水泥	砂	石
40	Sg-45	0.45	38	0.6	0.03	125	278	800	1 305

2.3 试验方法 试件拆模后放在标准养护室养护28d后, 移入温度为60±1℃, 相对湿度为90%~95%的养护箱中, 加速AAR进程。用内埋应变计的φ150mm×450mm圆柱体试件观测混凝土的AAR膨胀变形, 计算得出混凝土的AAR膨胀率。混凝土AAR膨胀变形的观测由计算机自动完成。在混凝土膨胀量达到0.01%、0.03%、0.06%、0.09%和0.12%时取出混凝土试件, 按照SL352—2006《水工混凝土试验规程》, 对不同膨胀量的混凝土进行动弹性模量、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向拉伸等性能试验。

3 试验结果与分析

为研究ASR膨胀所导致混凝土力学性能的变化, 需要对基准混凝土和ASR混凝土的膨胀率进行检测, 检测结果如表3所示。混凝土在60℃潮湿环境中发生碱骨料反应的膨胀曲线如图1所示。J-0.23表示水泥含碱量为0.23%的基准混凝土, JJ-2.0表示水泥含碱量为2.0%(通过外加10%NaOH溶液, 使水泥含碱量达到2.0%)的加碱混凝土。

表3 60℃加速反应条件下混凝土膨胀率 (单位: %)

	60℃加速龄期/d								
	0	4	10	15	20	25	30	35	40
J-0.23	0	0.000 1	-0.000 5	-0.000 4	-0.000 5	-0.000 3	-0.000 3	-0.000 1	-0.000 5
JJ-2.0	0	0.003 7	0.013 5	0.029 6	0.050 1	0.074 1	0.095 6	0.114 6	0.122 3

由表3可以看出, JJ-2.0混凝土在60℃条件下加速反应40d时膨胀率为0.1223%, 相当于混凝土中1 223个微应变。该膨胀量在实际工程中是不可接受的。

由表3和图1可以看出, JJ-2.0在5~35d碱骨料反应较快。J-0.23一直处于微收缩状态, 说明J-0.23在60℃潮湿环境条件下未发生AAR膨胀。图2为混凝土在60℃加速反应35d(JJ-2.0混凝土AAR膨胀率为0.12%)时试件表面微裂纹对比照片, 可以清楚地看出J-0.23混凝土表面基本无微裂纹, JJ-2.0混凝土表面出现明显的网状裂纹, 图中白色网状线是试件中从微裂缝中渗出的反应物, 肉眼可见微裂纹最大宽度为0.2mm。

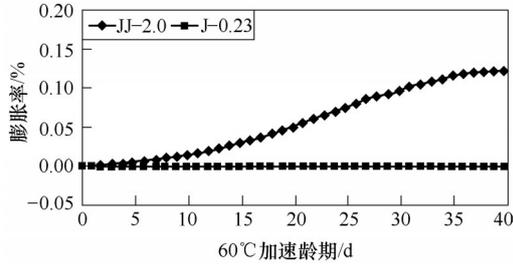


图1 混凝土在60℃加速反应条件下的膨胀曲线

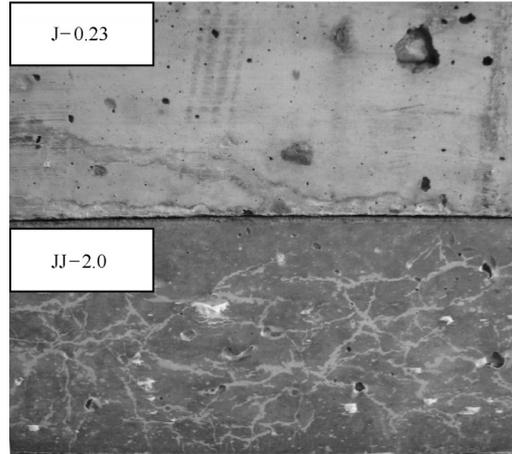


图2 60℃加速反应35d时混凝土的表面微裂纹对比

混凝土在60℃加速反应条件下力学性能测试结果和力学性能相对值如表4所示，力学性能变化曲线如图3所示。

表4 混凝土在60℃加速反应条件下的力学性能测试结果及力学性能相对值

	60℃加速龄期/d						
	0	8	15	22	29	41	
AAR膨胀率/%	0	0.009 9	0.029 6	0.059 7	0.092	0.122 3	
JJ-2.0	抗压强度/MPa	26.1	28.8	30.1	31.7	33.1	34.7
	劈裂抗拉强度/MPa	2.27	2.18	2.11	1.99	1.92	1.91
	抗弯强度/MPa	4.94	4.67	4.46	4.29	4.13	3.82
	轴向抗拉强度/MPa	2.89	2.83	2.65	2.51	2.34	2.21
相对值	抗压强度/%	100	110.3	115.3	121.5	126.8	133
	劈裂抗拉强度/%	100	96	93	87.7	84.6	84.1
	抗弯强度/%	100	94.5	90.3	86.8	83.6	77.3
	轴向抗拉强度/%	100	97.9	91.7	86.9	81	76.5

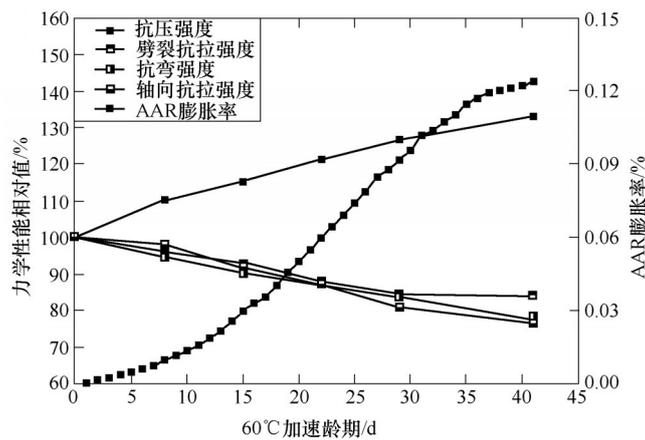


图3 JJ-2.0混凝土的力学性能随时间的变化(60℃)

许多学者对素混凝土和钢筋混凝土的力学性能进行了研究^[4-10]，大多数认为ASR对混凝土抗拉强度和弹性模量影响较大，而抗压强度影响较小，抗压强度的降低值总是小于其他力学性能降低值，抗压强度值有时甚至不受ASR的影响，不降反升^[10]。本文中混凝土抗压强度对AAR引发的微裂缝不敏感，可能是由以下两方面原因造成：第一，混凝土的AAR膨胀率为1 223个微应变，小于其受

压破坏峰值应变,对混凝土抗压强度的影响不明显;第二,试验所采用的水泥为中热硅酸盐水泥,水泥后期仍不断水化,AAR形成的微裂缝对混凝土抗压强度的影响被水泥后期的进一步水化作用所抵消。AAR引起的微裂缝主要分布在骨料与浆体间的界面区周围,使界面黏结力下降,导致混凝土变脆,从而使得混凝土抗拉性能(劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向抗拉强度)下降。

60℃加速反应条件下混凝土的动弹性模量如表5所示,J-0.23和JJ-2.0混凝土的动弹模对比曲线如图4所示。JJ-2.0混凝土在60℃潮湿环境中的动弹性模量和AAR膨胀率的变化曲线如图5所示,第一、二纵坐标分别为动弹性模量和AAR膨胀率。

表5 60℃加速反应龄期的混凝土动弹性模量

60℃加速龄期/d	混凝土动弹性模量×10 ⁴ /MPa	
	J-0.23	JJ-2.0
0	4.49	4.15
7	4.84	3.99
13	4.99	3.92
17	5.04	3.81
22	5.07	3.70
34	5.13	3.50
41	5.12	3.53

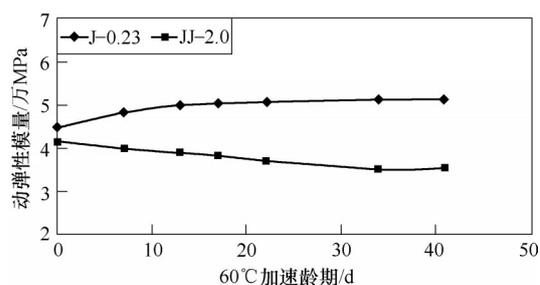


图4 60℃加速反应条件下J-0.23和JJ-2.0混凝土动弹性模量对比曲线

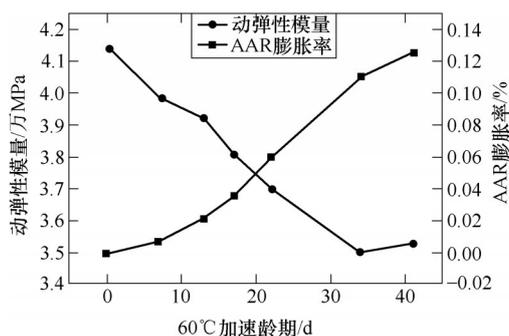


图5 混凝土动弹模和AAR膨胀率的变化曲线

上述试验结果表明,混凝土的劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向抗拉强度在AAR发展比较迅速时基本随AAR膨胀率的增大而迅速降低,后期随着AAR膨胀速率放慢,劈裂抗拉强度降低速率明显放缓。

4 受ASR损伤混凝土的力学性能衰减模型

碱-骨料反应引起混凝土膨胀,造成混凝土内部出现微裂缝和微结构损伤,导致力学性能下降。根据损伤力学理论,将受AAR损伤混凝土的损伤量定义为:

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

式中: E 为受AAR损伤混凝土的动弹性模量(MPa); E_0 为未受AAR损伤时混凝土的动弹性模量(MPa); D 为由AAR引起的累积损伤量。

根据动弹性模量测定结果,可由式(1)计算出JJ-2.0混凝土在不同膨胀率时所对应的损伤量 D 。对损伤量和相应的AAR膨胀率进行数据拟合,结果表明混凝土损伤量与AAR膨胀率呈线性关系。混凝土AAR损伤量与AAR膨胀率的拟合关系如式(2)所示,混凝土损伤量与AAR膨胀率的拟合曲线如图6所示。

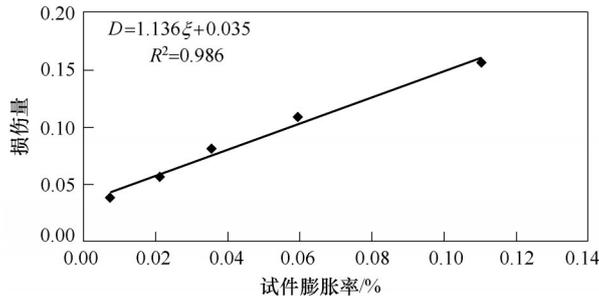


图6 混凝土损伤量与AAR膨胀率的拟合曲线

$$D = 1.136\xi + 0.035 \tag{2}$$

式中： ξ 为混凝土的AAR膨胀率(%)； D 为混凝土AAR膨胀率为 ξ 时的累积损伤量。

在混凝土发生AAR比较迅速的时段，混凝土的劈裂抗拉强度、抗弯强度、轴向抗拉强度等各项力学性能均产生不同程度的降低，为方便研究混凝土性能随AAR发展的变化规律，将不同损伤量下混凝土性能衰减程度采用混凝土相对强度表征，混凝土相对强度为1时表示混凝土性能未发生衰减，当混凝土相对强度为0时表示混凝土完全破坏。将混凝土的相对强度定义为：

$$R = \frac{f}{f_0} \tag{3}$$

式中： R 为混凝土的相对强度； f 为受AAR损伤混凝土的强度； f_0 为未受AAR损伤时混凝土的强度。

根据混凝土AAR膨胀率，由式(2)可以计算出混凝土不同AAR膨胀率所对应的损伤量，由式(3)可以计算出不同损伤量所对应的相对劈裂抗拉强度、相对抗弯强度和相对轴向抗拉强度。AAR混凝土在不同损伤量下的相对强度(相对劈裂抗拉强度、相对抗弯强度、相对轴向抗拉强度)如表6所示。

表6 不同损伤量下AAR混凝土的相对强度

AAR膨胀率/%	损伤量	相对劈拉强度	相对抗弯强度	相对轴向抗拉强度
0.000 0	0.000	1.000	1.000	1.000
0.009 9	0.046	0.961	0.945	0.979
0.029 6	0.068	0.930	0.903	0.917
0.059 7	0.103	0.877	0.868	0.869
0.092 0	0.139	0.846	0.836	0.810

分别将混凝土的相对劈裂抗拉强度、相对抗弯强度和相对轴向抗拉强度表示为损伤量的函数，对试验数据进行拟合，拟合结果显示混凝土相对强度与损伤量呈下式所示的修正幂函数关系

$$y = \frac{1}{1 + bx^c} \tag{4}$$

式中： b 、 c 为方程中的参数； x 为由AAR引起的累积损伤量。

分别对不同损伤量下的相对劈裂抗拉强度、相对抗弯强度和相对轴向抗拉强度试验数据进行非线性数据拟合，分析确定式(4)中参数 b 和 c 的值，回归结果如表7所示，拟合曲线如图7—图9所示。

由式(4)的拟合结果可以看出，受ASR损伤混凝土的相对劈拉强度、相对抗弯强度和相对轴向抗

表7 AAR混凝土性能相对值与损伤量的回归分析结果

	b	c	S	r
相对劈拉强度回归结果	2.261	1.254	0.008	0.996
相对抗弯强度回归结果	1.402	0.984	0.008	0.996
相对轴向抗拉强度回归结果	5.398	1.570	0.015	0.990

注：表中 S 指标准误差， r 指相关系数。

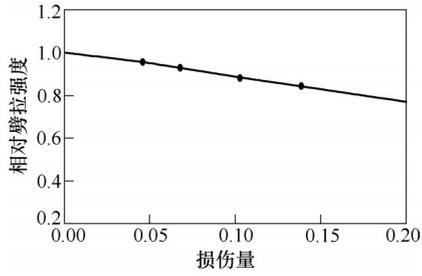


图7 相对劈拉强度与损伤量的关系曲线

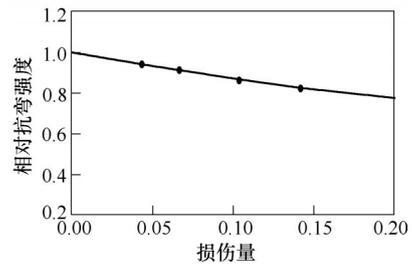


图8 相对抗弯强度与损伤量的关系曲线

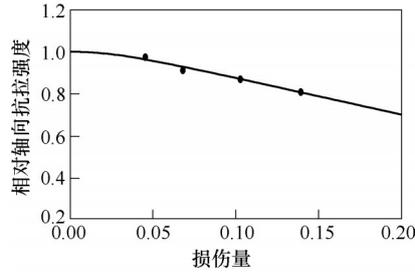


图9 相对轴向抗拉强度与损伤量的关系曲线

拉强度与损伤量之间存在良好的相关性，相关系数分别为 0.996、0.996 和 0.990。据此得出受到 ASR 损伤的混凝土抗拉/抗弯强度的衰减模型，如式(1)和式(5)所示：

$$R = \frac{1}{1 + bD^c} \quad (5)$$

式中： R 为混凝土相对抗拉/抗弯强度； D 为由碱骨料反应引起的累积损伤量； b 、 c 为模型参数。

根据受 ASR 损伤混凝土的相对抗拉/抗弯强度衰减模型，可以计算出由 ASR 引起的不同损伤量下的混凝土相对抗拉/抗弯强度。根据骨料发生 ASR 的程度，运用该模型可以初步预测 ASR 对混凝土抗拉/抗弯强度的影响，评价水工混凝土结构的老化程度和安全状态。

5 结论

(1)在上述试验条件下，当混凝土 AAR 膨胀率为 0.122 3%时，混凝土的劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向抗拉强度分别降至 84.1%、77.3%和 76.5%，而抗压强度则呈现缓慢增长趋势，说明在低膨胀率情况下，碱-硅酸反应对混凝土的劈裂抗拉强度、抗弯强度和轴向抗拉强度的影响比较明显，而对抗压强度影响不大。

(2)根据动弹性模量测定结果，可以计算出混凝土在不同 AAR 膨胀率时的损伤量 D ，对损伤量和相应的 AAR 膨胀率进行数据拟合，结果表明混凝土损伤量与 AAR 膨胀率呈线性关系。

(3)分别将混凝土的相对抗拉/抗弯强度表示为损伤量的函数，对试验数据进行拟合，拟合结果显示损伤量与混凝土相对强度呈修正幂函数关系。据此，可建立受 ASR 损伤混凝土的相对抗拉/抗弯强度衰减模型，运用该模型可以初步预测 ASR 对混凝土抗拉/抗弯强度的影响。由于本文只是针对一种砂岩骨料进行试验所得出的研究成果，衰减模型对其他碱-硅酸反应活性骨料是否试用还需进一步试验研究。

参 考 文 献：

- [1] 沙慧文. 混凝土碱集料反应的鉴定方法及预防措施探讨[J]. 混凝土, 1998(5), 17-23.
- [2] Stanton Thomas E. Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate[C]//Proceedings, American Society of Civil Engineers, Dec. 1940: 1781-1811.

- [3] 刘晨霞, 陈改新, 纪国晋, 等. 不同温度下碱-硅酸反应膨胀规律研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(3): 1-4.
- [4] Monette L, Gardner J, Grattan-Bellew P. Structural effects of the alkali-silica reaction on non-loaded and loaded reinforced concrete beams[C]//Proc. 11th ICAAR, Quebec, Canada, 2000: 999-1008.
- [5] Siemes T, Visser J. Low tensile strength older concrete structures with alkali-silica reaction[C]//Proc. 11th ICAAR, Quebec, Canada, 2000: 1029-1038.
- [6] Jones A E, Clark L A. A review of the Institution of Structural Engineers Report: structural effects of Alkali-silica reaction(1992)[C]//Proc. 10th ICAAR, Melbourne Australia, 1996: 394-401.
- [7] Takemura K, Ichitsubo M, Tazawa E, et al. Mechanical performance of ASR affected nearly full-scale reinforced concrete columns[C]//Proc. 10th ICAAR, Melbourne Australia, 1996: 410-417.
- [8] Koyanagi W, Rokugo K, Uchida Y, et al. Deformation behavior of reinforced concrete beams deteriorated by ASR [C]//Proc. 10th ICAAR, Melbourne Australia, 1996: 458-465.
- [9] Larive C, Laplaud A, Joly M. Behaviour of AAR-affected concrete, experimental data[C]//Proc. 10th ICAAR, Melbourne Australia, 1996: 670-677.
- [10] Giaccio G, Zerbino R, Ponce J M, et al. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 993-1004.

The effect of ASR on concrete mechanical properties

LIU Chen-xia, CHEN Gai-xin, WANG Xiu-jun, KONG Xiang-zhi

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of water cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A kind of reactive aggregate from practical project was used to prepare concrete samples in this paper. Based on practical mix proportion of hydraulic project, concrete was prepared to investigate the effect of ASR on the concrete mechanical properties, including compression strength, splitting tensile strength, bending strength, and ultimate tensile strength. After cured in standard curing room for 28 days, all the concrete samples were moved to the curing room with a curing temperature of $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ and a relative humidity of 90%~95%. At several certain AAR expansion values, mechanical properties were tested. The results showed that the concrete mechanical properties decreased with the increase of damage amount resulting from AAR. The damage of concrete was characterized by relative dynamic modulus of elasticity; according to the relationship between concrete mechanical properties and damage amount, the prediction model about the damage degree of mechanical properties was established.

Key words: ASR; prediction model; damage amount

(责任编辑: 吕斌秀)