

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.018

碱硅酸反应对水泥基材料力学性能的影响

陈 达, 杨一琛, 冯兴国, 欧阳峰

(河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室; 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098)

摘 要:通过对比活性不同的两种砂制备的砂浆试样在碱硅酸反应中的膨胀率, 结合三轴抗压测试研究了碱硅酸反应前后水泥基材料的力学性能变化, 分析了碱硅酸反应后材料微观结构演变与力学性能间的关系。结果表明碱惰性砂制备的砂浆试样中骨料周围局部区域形成少量针状凝胶相, 由于碱硅酸反应速率较慢且凝胶相较少, 因而其膨胀率较小且对水泥基材料力学性能的影响较小。碱活性砂制备的砂浆试样中, 骨料周围易生成大量针状凝胶层, 且随着碱硅酸反应的进行凝胶相膨胀加剧, 促进水泥基材料中骨料周围的水泥浆体中形成大量裂纹, 进而明显影响水泥基材料的力学性能。研究表明, 三轴抗压测试中, 除膨胀率外, 极限抗压强度和应变率也可以作为评价水泥基材料碱硅酸反应水平的参量。

关键词:碱硅酸反应; 水泥基材料; 抗压强度; 力学性能。

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2014)01-0119-06

Influence of Alkali-Silica Reaction on Mechanical Properties of Cementitious Materials

Chen Da, Yang Yichen, Feng Xingguo, Ouyang Feng

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education;

College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: The expansion rate of mortars, prepared with active sand and non-active sand, under alkali-silica reaction (ASR) was recorded. The effects of ASR on mechanical properties of cementitious materials were studied by triaxial compression test. The relation between the microstructure of cementitious materials and the mechanical properties was investigated as well. The results showed that there was a little blade crystals gel formed in a local region near the aggregate in materials prepared with non-active sand. For the quantity of formed gel is small, the expansion effects of ASR are limited. Whereas, thick blade crystals gel layers formed near the aggregate when the active sand prepared materials subjected to ASR. Moreover, the reactive products would lead to cracks and then significantly affects the mechanical properties of mortars. Additionally, the results showed that besides the expansion rate, the ultimate compressive strength and the strain are also effective indexes to estimate the influence of ASR.

Key words: alkali-silica; cementitious materials; compression strength; mechanical properties.

碱骨料反应是影响混凝土结构耐久性的重要因素之一, 在各种碱骨料反应中, 碱硅酸反应(ASR)是最为普遍的类型^[1], 因而近年来出现了大量关于碱

硅酸反应的报道。刘晨霞等^[2]在研究温度对碱硅酸反应的影响时发现试样的膨胀率与碱硅酸反应时间之间存在双曲线关系, 且随着温度的升高试样的膨

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201301052); 江苏省基础研究计划重点研究专项(BK2011026)

作者简介: 陈达(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性、水工新材料开发研究, (E-mail) chenda@hhu.edu.cn。

胀速率明显增加,但其对最终膨胀量无明显影响。Lu 等^[3]研究了不同种类的碱液对混凝土碱骨料反应的影响,结果表明在相同的碱浓度下,NaOH 溶液中混凝土试样的硅酸反应最强烈,KOH 溶液次之,LiOH 溶液中的混凝土试样的碱硅酸反应最弱。此外,研究表明在 LiOH 溶液中,骨料周围生成的低膨胀性含 Li 反应产物可以阻碍碱硅酸反应的进一步进行,因而 LiOH 有抑制混凝土中碱硅酸反应的作用。Théodore 等^[4]研究了 Al 离子对混凝土碱硅酸反应的影响,发现 Al 离子吸附在 SiO₂ 表面可降低其溶解速率,因而可对碱硅酸反应起到抑制作用。Cyrille 等^[5]研究了骨料粒径对碱硅酸反应引起的膨胀率的影响,结果表明经碱硅酸反应后,骨料粒径在 4~8 mm 的混凝土试样的膨胀率最大,其次是骨料粒径在 8~16 mm 的混凝土试样。此外还发现混凝土的膨胀率在碱硅酸反应早期由骨料的破裂方式决定,而后期的膨胀率由浆体相的破裂方式决定。Smaoui 等^[6]研究了 NaOH 对混凝土微观结构的影响,发现添加较多 NaOH 的混凝土更容易形成多孔洞的网状结构。近年来,出现了一些用粉煤灰等矿物添加剂抑制混凝土碱硅酸反应的报道^[7-9]。李北星等^[7]研究了粉煤灰对混凝土碱硅酸反应的影响机理,发现粉煤灰在消耗水泥浆体中 Ca(OH)₂ 的同时,反应生成的碱硅铝凝胶不具有膨胀性,因而可有效抑制碱硅酸反应。此外,也有学者^[8]认为粉煤灰对水泥浆体中的碱有物理稀释作用,粉煤灰中酸性颗粒对 Na⁺、K⁺ 和 OH⁻ 的吸附、滞留等多重作用,能够有效抑制碱硅酸反应。Aydin^[9]等研究了研磨过程对含粉煤灰的混凝土试样力学性能的影响,结果发现添加研磨后的粉煤灰的混凝土试样其力学性能将得到显著改善。

工程结构中的混凝土所处的应力状态复杂,材料往往承受三向应力。研究表明^[10-12]水泥基材料的力学特征与围压状态相关,随着围压的增加,塑性应变成为材料最主要的力学特征。为了更好了解水泥基材料,掌握其在多向应力下尤其是三轴围压下的力学特性具有重要意义。然而,目前关于碱硅酸反应的研究多数集中在反应机理以及抑制碱硅酸反应等方面^[1-8],而关于碱硅酸反应后水泥基材料的力学性能^[9,13-14]的研究较少,尤其是碱硅酸反应对水泥基材料的三轴抗压性能方面的影响则鲜有报道。本文以活性不同的砂制备的砂浆为试验材料,研究了碱硅酸反应对其三轴抗压性能的影响,并结合微观结构的演变讨论了碱硅酸反应引起水泥基材料力学性能变化的机理。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

采用活性不同的两种砂样制备砂浆试样,一种由石灰岩组成,对碱反应不敏感,即碱惰性砂,其制备的砂浆试样简称为 NR 试样;另一种由硅质灰岩组成,对碱反应呈潜在活性,即碱活性砂,其制备的砂浆试样简称为 R 试样。制备砂浆试样前,两种砂进行粉碎、筛分、冲洗去除极细颗粒和干燥处理,且选取 25% (V. %) 细砂(粒径 0.08~0.16 mm)、50% 中砂(粒径 0.63~1.25 mm)和 25% 粗砂(粒径 2.5~4 mm)。本文以高碱水泥(碱含量(Na₂O_{eq}) 1.11%)、去离子水和筛选的砂按照一定比例搅拌制备砂浆试。水胶比对水泥基材料的性能有明显的影[15-16],周述光等^[15]的实验结果表明,当水胶比在 0.3~0.5 的范围内,各砂浆试样在经过碱硅酸反应后的膨胀率虽有一定的差异,但不同水胶比试样膨胀率的演变规律却相似。因此,为突出碱硅酸反应与水泥基材料力学性能劣化间的关联,将灰砂比和水灰比分别设定为 1:3 和 1:2 以制备砂浆试样,即各种材料含量为:砂 1 613.4 kg/m³,水泥 537.8 kg/m³,去离子水 268.9 kg/m³。关于水胶比对碱硅酸反应后水泥基材料力学性能的影响,将在后续的实验中进行研究。为加速砂浆中的碱硅酸反应,制作砂浆试样时以 11.7 kg/m³ 的比例加入 NaOH 颗粒以增加砂浆的碱性。

两种砂浆均制备了一系列的 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试样和 φ36 mm×72 mm 圆柱体试样。其中棱柱体试样用于膨胀率测定;圆柱体试样用于三轴抗压测试,每个数据均为 3 个试样的平均值。所有砂浆试样在浇注后以塑料薄膜覆盖表面养护 3 d 后拆模,然后将拆模后的试样放入防水袋中室温养护至 28 d。此后,将部分砂浆试样放入温度为 60°C、相对湿度为 95% 的恒温箱中进行加速碱骨料反应。

1.2 实验方法

以养护 28 d 的棱柱体砂浆试样长度为基准,每隔 6 d 测量试样的长度,根据《水工混凝土试验规程》(SL 352-2006)中的砂浆干缩(湿胀)试验的规程计算砂浆试样的膨胀率。

以 TOP INDUSTRIE 水泥基材料三轴流变仪分别在围压为 0.5 和 15 MPa 条件下对圆柱体砂浆试样进行三轴加载试验。以位移控制模式进行轴向加载,轴向压缩位移速率为 2 μm/s。试验通过加载—卸载—加载的循环方式评估试样在加载过程中弹

性模量的变化。需要说明的是由于设备径向变形测量环的特殊性,围压为 0 时无法进行径向变形测量。以 JSM-6490A 扫描电子显微镜对碱骨料反应前后的砂浆试样进行微观形貌观察。

2 实验结果与讨论

2.1 碱硅酸反应对膨胀变形的影响

从图 1 中 2 种砂浆试样的膨胀率随着时间的变化曲线可以看出,由碱性砂制备的 NR 砂浆试样的膨胀率在整个碱硅酸反应过程中维持在一个较低的水平,始终保持在 0.02% 左右。而由碱活性砂制备的 R 砂浆试样的膨胀率在开始的 20 d 内几乎呈线性增长;随着碱硅酸反应的进行,在随后的一段时间内 R 砂浆试样的膨胀率仍有所增加,但增加速率明显降低;在反应 50 d 后,R 砂浆试样的膨胀率趋于稳定,保持在 0.4% 左右。Dunant^[5] 也曾报道过混凝土的膨胀速率随着碱硅酸反应的进行而降低的现象。这是因为初期的碱硅酸反应速度较快,因而膨胀率迅速增加;随着碱硅酸反应的进行,其生成的反应产物一定程度上阻碍了骨料的进一步溶解^[3],降低了碱硅酸反应速率,使得水泥基材料的膨胀速率降低并逐渐趋于稳定。

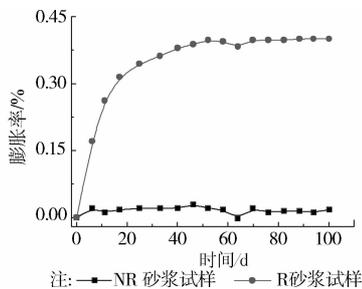


图 1 砂浆试样的膨胀率随着碱骨料反应时间的变化

2.2 碱硅酸反应对砂浆力学性能的影响

对养护 28 d 的砂浆试样和放入恒温箱中进行 100 d 碱硅酸反应的 2 种砂浆试样分别在 0、5 和 15 MPa 的围压下进行压缩试验。各砂浆试样在不同围压情况下的偏应力-应变关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,2 种砂浆试样的应力-应变关系均呈现出明显的非线性特征。在较小的应变下,应力随着应变线性增加,余自若等^[14]认为在此阶段,材料在应力作用下被压实,但未导致材料中大量裂纹的生成和扩展,因而偏应力随着应变呈线性增加。当应变进一步增加,应力增加速率将明显降低,应力-应变偏离线性关系。Giaccio 等^[13]和余自若等^[14]认为这种应力软化现象与砂浆内部大量裂纹的形成密切相关,由于压应力增加较大以致材料内

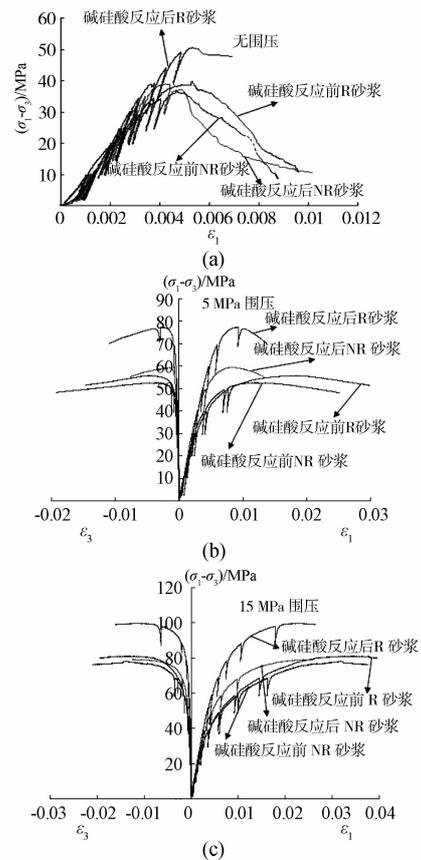


图 2 碱硅酸反应前后的 2 种砂浆在不同围压下的压缩试验偏应力-应变变化曲线

部产生大量裂纹,且裂纹间相互作用增强,进而导致该阶段材料的应力-应变曲线呈现出非线性特征。当应变进一步增加以致偏应力达到峰值强度后试样开始破坏,偏应力-应变曲线开始转为下降段。从图 2 还可以发现,偏应力-应变曲线随着围压的增加而变得更加平缓,材料的塑形特性愈加明显,张研和邵建富^[17]认为这是由于水泥基材料中的孔隙在围压作用下的收缩所致。

图 3 是 2 种砂浆试样在碱硅酸反应前后其峰值强度随着围压的变化结果,可以发现各砂浆试样的峰值强度随着围压的增加而明显提高。此外,在围压为 0、5、15 MPa 下,碱硅酸反应后 R 砂浆试样的峰值强度比反应前分别增加了 13、20 和 19 MPa;而相同围压下碱硅酸反应后 NR 砂浆试样的峰值强度仅比反应前的分别增加了 2、5 和 3 MPa,可见碱硅酸反应后 R 砂浆试样的峰值强度增加比 NR 试样显著。在自由状态下,由于碱硅酸反应产物填充到砂浆内部的孔隙中增加了砂浆致密度^[14,18],因而砂浆试样的峰值强度随着碱硅酸反应的进行而有所增加。本文中由于 R 砂浆试样的碱硅酸反应比 NR 砂浆更加剧烈,其生成更多的反应产物使 R 砂浆更加

致密,因而其峰值强度增加更加明显。因此,极限抗压强度是评价碱硅酸反应的重要参量,即相同围压下碱硅酸反应越强烈,其极限抗压强度增加越明显。

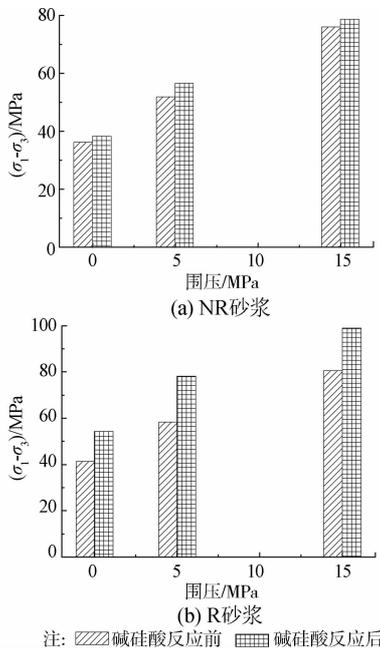


图 3 2 种砂浆试样碱硅酸反应前后偏应力强度与围压关系曲线

图 4 是碱硅酸反应前后的砂浆试样在 50 MPa 偏应力和在不同围压下的轴向应变变量(ϵ_1)的变化情况。从图中可以发现,当围压从 5 MPa 提高到 15 MPa 时,各试样的应变变量都有明显增加,表明随着围压的增加,砂浆试样存在明显的软化现象。同时,进一步观察发现同碱硅酸反应前相比,碱硅酸反应后砂浆试样在相同偏应力下的应变变量明显降低,且碱硅酸反应更加强烈的 R 砂浆试样的应变变量降低更加明显。因为碱硅酸反应的产物增加材料的致密性^[14],进而弱化了水泥基材料在三轴抗压试验中的软化。因此,三轴抗压测试中的应变变量(ϵ_1)也可以作为评价碱硅酸反应的参量。

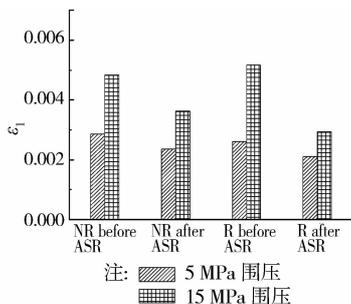


图 4 不同围压下 50 MPa 偏应力作用下主应变的变化

图 5 是各种砂浆试样在加载过程中弹性模量比(E/E_0 , 加载过程中的弹性模量 E 和初始弹性模量 E_0

之比)随着相对应力(f/f_c , 加载过程中的应力和应力峰值之比)的变化曲线。从图 5 可以看出,不同围压作用下,在初始阶段各砂浆试样的 E/E_0 都随着相对应力的增加而增加;当弹性模量比增加到一定程度后随着相对应力的增加反而降低。进一步观察可以发现随着围压的增加,弹性模量比 E/E_0 逐渐降低,即再次印证了随着围压的增加水泥基材料有明显的软化趋势。此外,相同的相对应力下,碱硅酸反应后的砂浆试样的 E/E_0 比碱硅酸反应前的高,这与碱硅酸反应的产物增加砂浆的致密度密切相关。

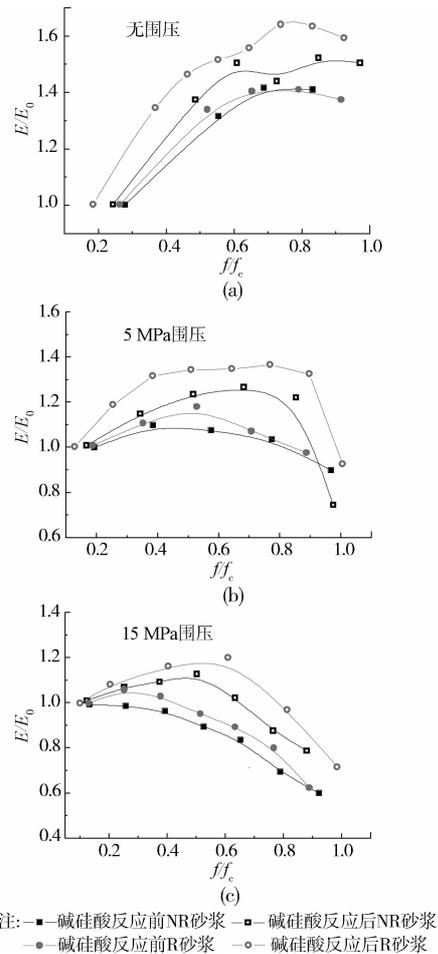


图 5 砂浆试样碱硅酸反应前后在不同围压下 E/E_0 与相对应力 f/f_c 的关系曲线

2.3 碱硅酸反应对砂浆微观结构的影响

图 6 和图 7 是 2 种砂浆试样碱硅酸反应前后的微观结构。碱硅酸反应前的 2 种砂浆试样的表面形貌(图 6(a)、(b))无明显区别。但从内部结构(图 6(c)、(d))的对比可以看出,在室温条件下养护 28 d 后,2 种砂浆试样的微观结构已有明显区别,由碱活性砂制备的 R 砂浆试样内生成了相当数量的针状凝胶相,说明在 28 d 的养护

期内,R 砂浆试样发生了一定程度的碱硅酸反应。Lu 等^[3]也曾报道在 KOH 溶液中碱硅酸反应后的混凝土中观察到这种针状凝胶相,且发现这种针状凝胶相通常存在于骨料周围的孔隙中,因而增强混凝土的致密度。

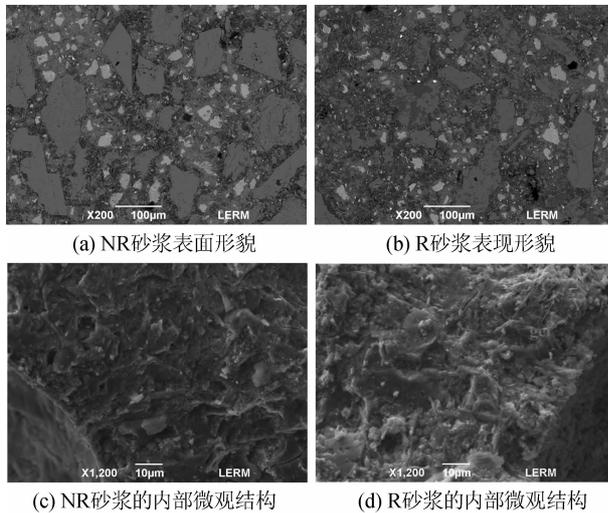


图 6 2 种砂浆试样碱硅酸反应前的微观结构

在恒温箱中碱硅酸反应 100 d 后,2 种砂浆试样的微观结构都发生了明显的变化。从表面看(图 7 (a)、(b)),碱硅酸反应后的砂浆试样中都出现了明显的裂纹。对比观察可以发现,碱活性砂制备的 R 砂浆试样(图 7(b))的裂纹明显比 NR 砂浆试样(图 7(a))多,且前者的裂纹的宽度也明显大于后者。观察砂浆内部微观结构可以发现,碱硅酸反应后 NR 砂浆中(图 7(c))也生成了少量凝胶相。而碱硅酸反应后的 R 砂浆试样中形成了大量的凝胶相,尤其是在孔隙处,形成了大量针状凝胶层(图 7(d)),这也印证了 Lu 等^[3]的报道,即针状凝胶相通常填充在骨料周围的孔隙中。此外,进一步观察碱硅酸反应后的 NR 砂浆(图 7(a))和 R 砂浆(图 7(b))的微裂纹可以发现,微裂纹多数沿着骨料的边界形成,这同 Lu 等^[3]和 Giaccio 等^[13]所观察到的碱硅酸反应后水泥基材料中裂纹分布形态相一致,即在骨料周围形成环状反应带,反应生成的凝胶相填充到骨料周围的孔隙中,随着碱硅酸反应的进行,大量凝胶相的生成导致体积膨胀加剧,进而在骨料周围首先形成裂纹。

2.4 碱硅酸反应中微观结构的变化对力学性能的影响

从砂浆试样碱硅酸反应前后的微观结构可以得知,反应生成的针状凝胶相通常填充到骨料周围的孔隙中,且随着反应的进行其产物的体积膨胀加剧,使强度增高的同时在已硬化的混凝土结构内形成较

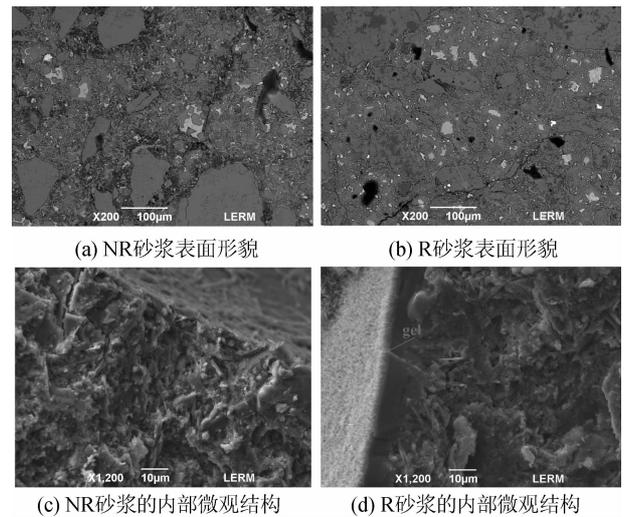


图 7 2 种砂浆试样碱硅酸反应后的微观结构

大的内应力,进而导致骨料周边裂纹的形成。碱性砂在碱硅酸反应的过程中,由于碱硅酸反应速率缓慢且反应产物较少,因而由碱硅酸反应引起的膨胀有限。而在碱活性砂制备的砂浆试样中,骨料周围的环状反应带中生成大量凝胶相,因而骨料周围有大量微裂纹生成,进而显著影响其力学性能。

由于碱硅酸反应产物通常填充到骨料周围的孔隙中,一定程度上增加水泥基材料的致密度^[13,16],因而其在三轴抗压测试中的抗压强度比未经碱硅酸反应的水泥基材料高,且围压越高其抗压强度增加越明显。此外,三轴抗压测试中,材料随着围压的增加有软化的趋势,而碱硅酸反应会显著降低材料的软化,使材料在相应偏应力作用下的应变率降低。因此,除膨胀率外,极限抗压强度和应变率(ϵ_1)也可以作为评价碱硅酸反应水平的参量。

3 结论

1) 由活性砂制备的 R 砂浆试样的膨胀率在开始的一段时间内随着碱硅酸反应时间呈线性增加,然后膨胀率增加速率降低,最终维持在 0.4% 左右;而惰性砂制备的砂浆试样的膨胀率始终维持在 0.02% 左右。

2) 同碱硅酸反应前的砂浆试样相比,碱硅酸反应使得抗压强度明显增加,但试样在相同偏应力下的应变率却明显降低。这是由于碱硅酸反应生成的凝胶相一定程度增加了砂浆的致密性,减弱了三轴抗压测试中砂浆试样的软化趋势。因此,除膨胀率外,应变率和抗压强度均可作为评价水泥基材料碱硅酸反应的指标。

3) 微观分析发现,碱活性砂制备的砂浆试样中

易形成大量针状凝胶层,随着碱硅酸反应的进行,凝胶相的膨胀加剧,进而在骨料周围的水泥浆体中形成大量裂纹,显著影响砂浆的力学性能。碱惰性砂制备的砂浆试样中只在局部区域形成少量针状凝胶相,因而碱硅酸反应对砂浆的力学性能影响相对较小。

参考文献:

- [1] 周莉桦. 碱骨料反应对混凝土耐久性影响研究 [J]. 工业建筑, 2011, 41(Suppl): 759-762.
Zhou L H. Research on influences of alkali-aggregate reactions on durability of concrete [J]. Industrial Construction, 2011, 41(Suppl): 759-762.
- [2] 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, 191(3): 1-4.
Liu C X, Chen G X, Ji G J, et al. The effect of temperature on alkali-silica reaction of mortar-bar [J]. China Concrete and Cement Products, 2012, 191(3): 1-4.
- [3] Lu D Y, Mei L B, Xu Z Z, et al. Alteration of alkali reactive aggregates autoclaved in different alkali solutions and application to alkali-aggregate reaction in concrete (II) expansion and microstructure of concrete microbar [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(6): 1191-1200.
- [4] Théodore C, Scrivener K L. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(12): 1645-1649.
- [5] Dunant C F, Scrivener K L. Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(6): 745-751.
- [6] Smaoui N, Bérubé M A, Fournier B, et al. Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(2): 203-212.
- [7] 李北星, 文梓芸, 李双艳. 粉煤灰对砂岩碱硅酸反应的抑制及机理研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(5): 40-44.
Li B X, Wen Z Y, Li S Y. Effect of fly ash on inhibiting alkali-silica reaction of sandstone and its mechanism [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(5): 40-44.
- [8] 刘彬, 王军, 杨文. 粉煤灰抑制碱硅酸反应的机理研究评述 [J]. 混凝土世界, 2012, 33(3): 85-87.
Liu B, Wang J, Yang W. The review of mechanism for fly ash inhibiting alkali-silica reaction [J]. China Concrete, 2012, 33(3): 85-87.
- [9] Serdar A, Aglayan K, Bülent B. The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars [J]. Powder Technology, 2010, 197(1/2): 68-72.
- [10] Ismail Y, Nicolas B, Frédéric S. Triaxial mechanical behaviour of mortar: Effects of drying [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(7): 1131-1143.
- [11] Helmut K, Hilsdorf H K, Hubert R. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. ACI, 1969, 66(8): 656-666.
- [12] Michael D K, John B N. Mathematical description of deformational behavior of concrete under generalized stress beyond ultimate strength [J]. International Journal of Engineering Science, 1980, 77(5): 340-346.
- [13] 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(7): 993-1004.
- [14] 余自若, 秦鑫, 安明喆. 活性粉末混凝土的常规三轴压缩性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 38-42.
Yu Z R, Qing X, An M Z. Experimental research on the conventional triaxial compressive properties of reactive power concrete [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 38-42.
- [15] 周述光, 张洵安. 水胶比对碱骨料抑制措施的影响 [J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 501-504.
Zhou S G, Zhang X N. Effect of water binder ratio on the suppression of alkali-aggregate reaction [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 501-504.
- [16] 王文娇. 混凝土碱骨料反应综合抑制措施的研究 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [17] 张研, 邵建富. 水泥基材料在宽围压范围的本构模型 [J]. 固体力学学报, 2011, 32(3): 293-298.
Zhang Y, Shao J F. A constitutive law of cement-based material at large range of confining pressure state [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(3): 293-298.
- [18] 刘晨霞, 陈改新, 王秀军, 等. 碱-硅酸反应对混凝土力学性能的影响 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(2): 105-111.
Liu C X, Chen G X, Wang X J, et al. The effect of ASR on concrete mechanical properties [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(2): 105-111.

(编辑 胡玲)