

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201900045



本刊网刊

风积沙混凝土轴心受压力学性能研究

董 伟¹, 肖 阳¹, 苏 英¹, 申向东²

(1.内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:风积沙混凝土的力学性能是表征风积沙混凝土性能优劣的重要指标, 国内外学者对风积沙混凝土的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度及微观作用机制进行了广泛研究。关于混凝土轴心受压力学性能研究成果较少, 而混凝土棱柱体受压更加接近于工程实际。因此, 试验设计风积沙(替代率为0~40%)和粉煤灰(替代率为10%~20%)内掺替代等质量的河砂及水泥, 制备了10组风积沙-粉煤灰混凝土, 进行60 d风积沙-粉煤灰混凝土轴心抗压试验, 开展风积沙-粉煤灰混凝土轴心受压破坏形貌、微观结构、应力-应变关系、轴心抗压强度、峰值应变、弹性模量、泊松比等内容的试验研究。结果表明: 弹性阶段各掺量风积沙混凝土应力-应变曲线基本趋于一致, 进入弹塑性阶段后, 风积沙混凝土较基准混凝土应力增长较快, 混凝土脆性增加。轴心抗压强度、弹性模量及泊松比随风积沙掺量增加呈现先增大后减小的变化趋势, 随粉煤灰掺量增加在降低。最后, 对过镇海经典模型上升段本构参数A进行二次演化, 建立了本构参数与轴心抗压强度和风积沙掺量之间的演化模型, 得出风积沙混凝土应力-应变上升段本构方程, 其计算模型对风积沙混凝土的研究应用具有一定借鉴。

关键词:风积沙-粉煤灰混凝土; 轴心受压; 本构参数

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)03-0086-07

Study on Axial Compression Performance of Aeolian Sand Concrete

DONG Wei¹, XIAO Yang¹, SU Ying¹, SHEN Xiangdong²

(1.College of Civil Eng., Inner Mongolia Univ. of Sci. and Technol., Baotou 014010, China; 2.College of Water Conservancy and Civil Eng., Inner Mongolia Agricultural Univ., Hohhot 010018, China)

Abstract: Mechanical properties of aeolian sand concrete, are important indicators to characterize the performance of aeolian sand concrete. Domestic and foreign scholars have extensively studied the cubic compressive strength, splitting tensile strength and microscopic mechanism of aeolian sand concrete, but there are few researches on the mechanical properties of concrete under axial compression, while the compression of concrete prism is closer to the engineering practice. Therefore, 10 groups of aeolian sand-fly ash concrete were prepared by mixing aeolian sand (replacement rate was 0~40%) and fly ash (replacement rate was 10%~20%) with river sand and cement of equivalent quality. The 60-day-old aeolian sand-fly ash concrete axial compression test was carried out, and the axial compression failure morphology, microstructure, stress-strain relationship, axial compressive strength, peak strain, elastic modulus and Poisson's ratio of the aeolian sand-fly ash concrete were tested. It was found that the stress-strain curves of aeolian sand concrete with different amounts of aeolian sand in the elastic stage are basically consistent. After entering the elastic-plastic stage, the stress of aeolian sand concrete increases faster than that of the reference concrete, and the brittleness of concrete increases. The axial compressive strength, elastic modulus and Poisson's ratio showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of aeolian sand content, and decreased with the increase of fly ash content. Finally, the constitutive parameter A of the rising section of Guo Zhenhai's classic model was subjected to secondary evolution, and an evolution model between the constitutive parameter and axial com-

收稿日期:2019-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51569021; 51769025); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2017BS0505); 内蒙古科技大学创新基金项目(2019QDL-B48)

作者简介:董 伟(1987—), 男, 讲师, 博士. 研究方向:绿色建筑材料. E-mail: dw617@126.com

网络出版时间:2020-04-17 08:55:19 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200416.1138.003.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

pressive strength and aeolian sand content was established. The constitutive equation of the stress-strain rising section of aeolian sand concrete was obtained. The calculation model had certain reference for the research and application of aeolian sand concrete.

Key words: aeolian sand-fly ash concrete; axial compression; constitutive parameters

中国是世界上受沙漠化危害最严重的国家之一,荒漠化土地和沙化土地面积高达 $1.721\ 2\times 10^6\text{ km}^2$,占国土资源面积的近20%^[1]。如何治理沙漠化成为人类改善生存环境的首要问题。风积沙是沙漠沙被风吹自然搬运到冲积平原的一种硅质材料。风积沙取代普通河砂制备混凝土已被诸多工程技术人员与专家学者所研究。风积沙混凝土的出现,不仅可以有效开发丰富的沙漠资源,缓解沙害利于环保,而且可以解决建筑材料日益紧缺的问题。将风积沙变害为利,运用实践,促进建筑行业的发展。

何静等^[2]对风积沙砂浆进行微观结构研究,得出风积沙的填充效应与活性效应对砂浆的抗压强度有促进作用;董伟等^[3-4]研究了风积沙轻骨料混凝土的力学性能,表明风积沙在混凝土中具有双重作用,风积沙在混凝土中的掺量为20%~30%比较合适;Ahmad等^[5]采用当地的风积沙取代细石英砂和石英粉配制超高性能混凝(UHPC),并对其力学性能和耐久性能进行研究,结果表明风积沙所配制的超高性能混凝土具有良好的性能。

以上研究主要集中在风积沙混凝土部分力学性能与耐久性能方面,有关风积沙混凝土轴心受压的研究较少,本构关系不够清楚。同时研究表明^[6-7]:粉

煤灰作为矿物掺合料掺入混凝土中具有可以改善混凝土拌合物的和易性、抑制碱骨料反应、减小混凝土的徐变等优点。秉持就地取材、变废为宝的原则,作者选取风积沙与粉煤灰这两种废弃物作为试验对象,探究二者对混凝土轴心受压的影响规律,为风积沙混凝土的实际应用提供理论基础。

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:蒙西牌P·O42.5水泥,各项性能指标符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)规范要求;粉煤灰:选用Ⅱ级粉煤灰,由包头市新型粒源粉煤灰有限公司提供,其性能符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)要求;风积沙:鄂尔多斯库布齐沙漠表层特细砂,含泥量0.9%,细度模数0.75,表观密度 $2\ 550\text{ kg/m}^3$,堆积密度 $1\ 520\text{ kg/m}^3$;天然河砂:Ⅱ区中砂,颗粒级配良好,含泥量2.8%,细度模数2.9,表观密度 $2\ 630\text{ kg/m}^3$,堆积密度 $1\ 550\text{ kg/m}^3$;石子:5~25 mm碎石,连续级配,堆积密度 $1\ 550\text{ kg/m}^3$,表观密度 $2\ 680\text{ kg/m}^3$;外加剂:萘系高效减水剂,减水率22%;水:当地自来水。风积沙与天然河砂主要化学成分见表1。

表1 风积沙与天然河砂主要化学成分

Tab. 1 Chemical composition of aeolian sand and normal sand

原料	w(SiO ₂)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	w(CaO)/%	w(Fe ₂ O ₃)/%	w(K ₂ O)/%	w(Na ₂ O)/%	w(C)/%	w(MgO)/%	w(其他)/%
天然河砂	76.4	6.8	5.6	2.3	1.4	2.2	2.1	1.4	1.8
风积沙	74.2	9.0	4.0	3.1	1.9	2.0	1.8	1.2	2.8

1.2 风积沙-粉煤灰混凝土配合比设计

风积沙属于特细砂,比表面积大,配制混凝土时需要水泥量较多,需水量增多,拌合物比较黏稠、容易离析、泌水,造成混凝土配制比较困难^[8]。试验采用粉煤灰与减水剂双掺技术来改善风积沙混凝土拌合物的和易性能。试验混凝土设计强度等级为C40,胶凝材料总量一定,内掺粉煤灰等质量替代水泥,替代率分别为10%和20%(粉煤灰替代率为30%时所测得的立方体抗压强度损失较大,实用意义较小,所以不进行30%替代率下混凝土轴心受压分析)。调整后混凝土的配合比如表2所示,表2中A、B分别表示粉煤灰掺量为10%、20%,其后面的数字表示风积沙掺量百分率。

1.3 试验设计

本试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标

准》(GB/T 50081—2019)执行,采用150 mm×150 mm×300 mm的棱柱体试件进行风积沙混凝土60 d(由于配合比中掺有矿物掺合料,所以适当延长了试验龄期)单轴受压试验,每组混凝土成型3个试件,共30个试样。由于混凝土破坏时脆性较大,普通压力试验机等应力速度加载时,因变形试验机中聚集大量的弹性应变能,当应力达到峰值时,混凝土破坏不足以吸收大量的应变能而导致突然脆性破坏,难以采集到曲线下降段。所以试验采用在普通液压试验机上附加刚性元件,当荷载达到一定程度时刚性元件与混凝土试件共同受力,从而提高试验装置的整体刚度。作者采用液压千斤顶做辅助刚性元件以增加试验机的刚度。因采集到少量试件下降段,所以只对应力-应变曲线上升段进行研究。试件垂直位置粘贴两个应变片,如图1所示。

表 2 风积沙混凝土配合比及基本性能指标

Tab. 2 Mix proportion and basic performance index of aeolian sand concrete

编号	混凝土配合比/(kg·m ⁻³)							坍落度 /mm	轴心抗压强度 f_{cu} /MPa	
	水泥	粉煤灰	沙	风积沙	石子	水	掺合剂		7 d	28 d
A0	342	38	800	0	1 060	160	7.6	165	37.2	44.9
A10	342	38	720	80	1 060	160	7.6	175	40.0	46.3
A20	342	38	640	160	1 060	160	7.6	210	41.4	49.5
A30	342	38	560	240	1 060	160	7.6	175	38.4	46.7
A40	342	38	480	320	1 060	160	7.6	165	36.4	45.5
B0	304	76	800	0	1 060	160	7.6	200	30.3	43.0
B10	304	76	720	80	1 060	160	7.6	210	31.9	44.3
B20	304	76	640	160	1 060	160	7.6	220	33.1	46.6
B30	304	76	560	240	1 060	160	7.6	180	32.0	46.7
B40	304	76	480	320	1 060	160	7.6	170	31.7	46.6



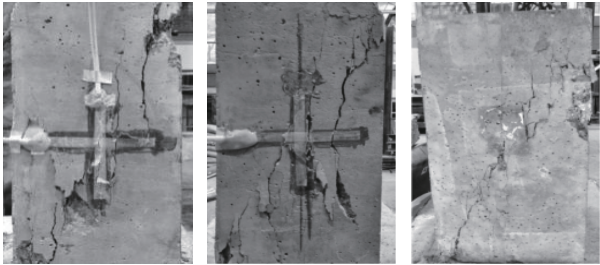
图 1 实验加载装置

Fig. 1 Experimental loading device

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏过程与形态

混凝土单轴受压破坏形态如图2所示。



(a) 普通混凝土 (b) 风积沙混凝土

图 2 混凝土单轴受压破坏形态

Fig. 2 Concrete uniaxial compression failure patterns

由图2可见，风积沙混凝土单轴受压破坏形貌与普通混凝土相似。当应力较小时，试件处于弹性阶段，并没有明显的微裂缝出现，在达到峰值应力前，由于微裂缝处应力集中使得试块表面中间出现少量短而细的竖向裂缝，与受力方向平行；随着荷载继续加大，应力超过峰值后，出现多条纵向不连续短裂缝，且应力下降较慢。接着在短时间内快速发展为贯通斜裂缝，并伴有劈裂声响，试件被压坏，属于典型的剪切滑移破坏。主斜裂缝与荷载垂线夹角为58°~

64°。从破坏形态可以看出风积沙混凝土较普通混凝土裂缝细小且试块整体性较好。

2.2 风积沙混凝土微观结构分析

为了深入分析风积沙混凝土与普通混凝土的区别，选取龄期为60 d的A0、A20、A40、B0、B20、B40 6组试件进行SEM扫描电镜试验如图3所示。

由图3(a)可见，水泥石与普通河砂胶结不够紧密，有明显的裂缝和孔洞，界面区富集了大量的六角形片层状Ca(OH)₂晶体。由图3(b)可以看到，风积沙与水化产物紧密结合在一起，界面区几乎看不到裂缝的存在，水化生成的网状C-S-H凝胶和针棒状AFt交织在一起形成空间网络结构填充于风积沙与水泥石界面之间。由图3(c)可以看到，风积沙与水泥石界面区连接较为紧密，但可以明显看到有多条裂纹的存在，水化产物相对较少，密实性相对较差。片层状的Ca(OH)₂晶体自身强度和稳定性要小于网状C-S-H凝胶和针棒状AFt，宏观表现为A20组强度大于A0组。由于可见风积沙表面比较光滑，比表面积大于普通河砂，所以需要更多的水化产物对其进行包裹，A40风积沙掺量为40%，水化产物不足以对风积沙有效包裹，导致A40组强度小于A20组。

图3(d)、(e)、(f)组粉煤灰掺量均为20%，从图3中可以看到有大量球状和半球状粉煤灰颗粒的存在。一部分粉煤灰表面不再光滑，且片层状的Ca(OH)₂晶体明显减少，表明粉煤灰已经参与到水泥的二次水化反应当中，形成了强度和稳定性更好的网状C-S-H凝胶；另外一部分粉煤灰填充于水泥石的孔洞和空隙当中，发挥了粉煤灰的填充效应^[9]。粉煤灰的火山灰效应和填充效应降低了混凝土内部微裂纹和孔隙率，增强了混凝土密实度。

2.3 应力-应变曲线分析

粉煤灰风积沙应力-应变曲线如图4、5所示。

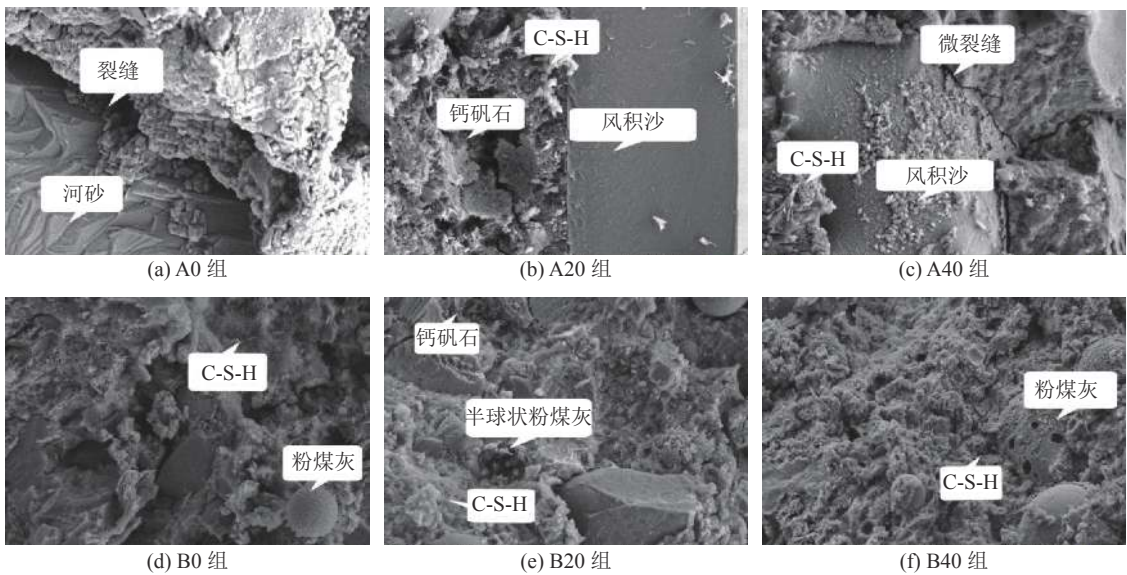


图 3 各组试件60 d的SEM图

Fig. 3 SEM images of sample groups at 60 d

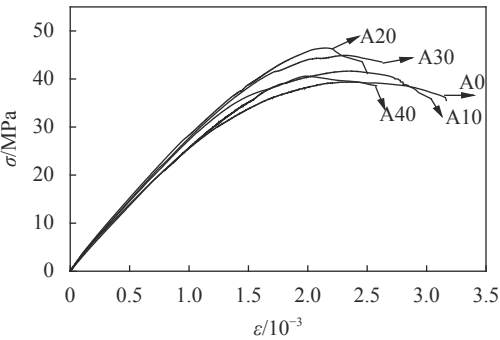


图 4 粉煤灰掺量10%风积沙混凝土应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of aeolian sand concrete with fly ash content of 10%

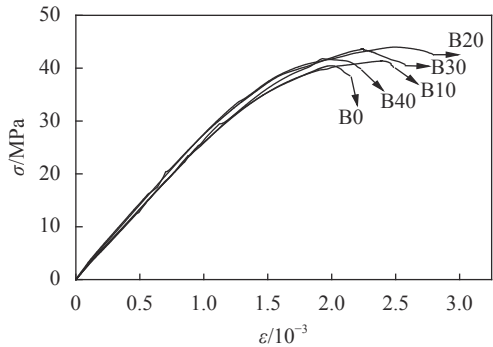


图 5 粉煤灰掺量20%风积沙混凝土应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of aeolian sand concrete with fly ash content of 20%

从图4中可以看出,当粉煤灰掺量相同时,不同风积沙掺量混凝土应力-应变曲线有所不同。弹性阶段各掺量风积沙混凝土应力-应变曲线基本一致,因为混凝土在弹性阶段裂缝还未发展。进入弹塑性阶段后,风积沙混凝土较基准混凝土应力增长较快,应

力-应变曲线越来越陡,即相同应力下,风积沙混凝土应变小于基准混凝土,且随着风积沙掺量增加应变呈先减小后增大的变化趋势。主要原因是风积沙的掺入提高了混凝土强度,使得其应变降低,脆性增大。

由图5可以看出,粉煤灰掺量增加到20%时,各掺量风积沙混凝土应力-应变曲线基本重合。主要是因为粉煤灰对混凝土后期强度贡献较大,本试验对60 d龄期的试件进行测试,不同风积沙掺量混凝土的轴心抗压强度差距较小,各组混凝土应力-应变曲线极其接近。但仍能看出风积沙混凝土峰值应力均高于基准组。由此可见随着粉煤灰掺量增加,风积沙混凝土变形能力有所提高。

2.4 轴心抗压强度、峰值应变、弹性模量

图6为风积沙混凝土轴心抗压强度与风积沙掺量的关系。

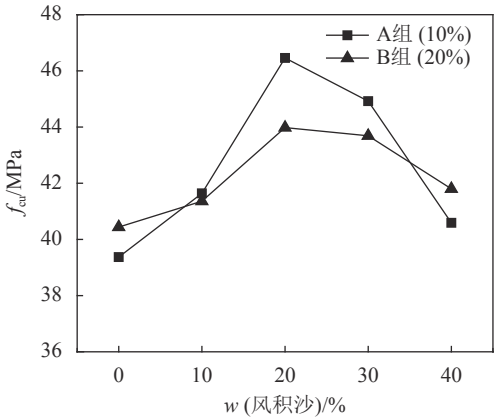


图 6 风积沙掺量与轴心抗压强度关系

Fig. 6 Relationship between aeolian sand content and axial compressive strength

由图6可以看出,无论A组还是B组,随着风积沙掺量增加,混凝土轴心抗压强度先增加后减小,且均在风积沙掺量为20%时强度达到最大值。粉煤灰掺量相同时,A组各掺量风积沙混凝土轴心抗压强度较基准组由3.0%增至18.0%,B组增幅由2.3%至8.7%。由此可见,风积沙的掺入可以提高混凝土轴心抗压强度。风积沙含量相同,A组较B组轴心抗压强度分别提高-2.6%、0.7%、5.6%、2.8%、-2.9%。风积沙掺量10%、40%B组超过A组,且A组与B组之间的差距在缩小。主要是因为粉煤灰加入促进了混凝土后期强度的发展。

风积沙混凝土的应变峰值如图7所示。

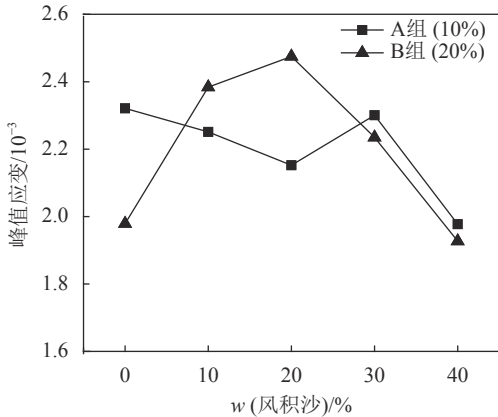


图 7 风积沙掺量与峰值应变关系

Fig. 7 Relationship between aeolian sand content and peak strain

从图7可以看出,峰值应力与轴心抗压强度的变化规律基本一致,当粉煤灰掺量为10%时,风积沙混凝土峰值应变较基准混凝土有不同程度的降低,主要是掺入风积沙后,提高了混凝土的轴心抗压强度,增加了混凝土脆性,降低混凝土应变峰值;当粉煤灰掺量增加到20%时,各掺量风积沙混凝土峰值应变呈先增大后减小的变化趋势。主要是粉煤灰掺量增加了混凝土轴向变形能力^[10]。粉煤灰对峰值应变的影响程度大于风积沙。

弹性模量是计算混凝土结构变形、温度应力和裂缝开展的主要参数之一,其值是应力-应变曲线在原点切线的斜率。混凝土割线模量是由应力-应变曲线上任一点割线的斜率所确定。应力-应变曲线在弹性阶段近似成直线,弹性模量与割线模量相等。因此取应力-应变曲线上任一点及 $0.4f_c$ 点间的割线模量作为风积沙混凝土的弹性模量,如图8所示。

由图8可知,相同粉煤灰掺量时弹性模量随风积沙掺量增加先增大后减小,主要是因为风积沙的掺入提高了混凝土轴心抗压强度,因而使弹性模量增大,风积沙掺量对混凝土弹性模量的影响主要是改变轴心抗压强度来实现。同一风积沙掺量下,随着粉煤灰掺量增加,混凝土弹性模量有所降低。原因是粉

煤灰中存在大量玻璃微珠,可以置换水泥颗粒间自由水,即提高了有效水灰比,使得水化产物被稀释,砂浆与骨料界面之间的连接变的脆弱,导致弹性模量降低。

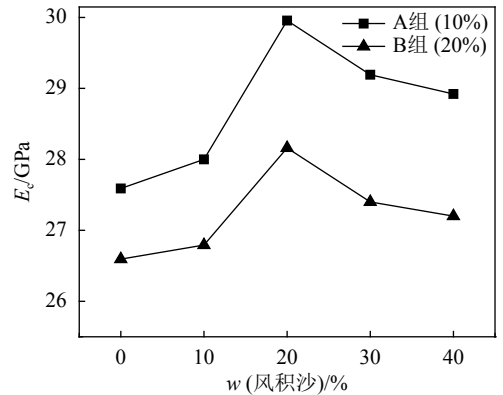


图 8 不同风积沙掺量与弹性模量的关系

Fig. 8 Relationship between the content of different aeolian sand and elastic modulus

2.5 泊松比

轴心受压应力-应变比例极限内,纵向荷载作用下横向应变与纵向应变的比值为混凝土的泊松比,其是反映混凝土变形的重要参数。泊松比能够较好地反映混凝土内部裂缝开展过程,对混凝土结构或构件的设计与计算起到重要作用。不同粉煤灰与风积沙掺量混凝土泊松比见图9与10。

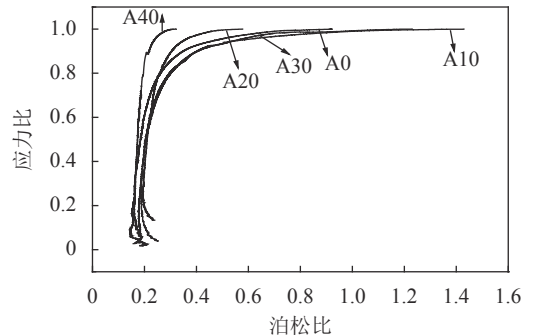


图 9 粉煤灰掺量10%时不同风积沙掺量混凝土泊松比

Fig. 9 Poisson ratio of concrete with different aeolian sand content when the amount of fly ash is 10%

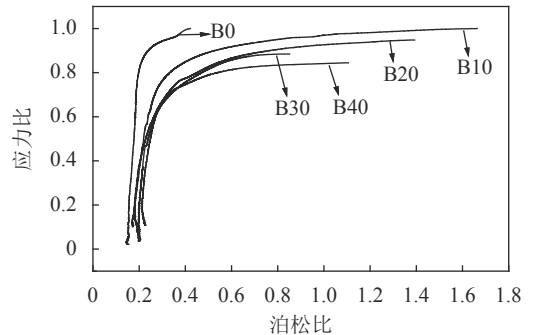


图 10 粉煤灰掺量20%时不同风积沙掺量混凝土泊松比

Fig. 10 Poisson ratio of concrete with different aeolian sand content when the amount of fly ash is 20%

如图9、10所示:泊松比随着应力比增加而增加,应力比在0~0.65时,泊松比的变化幅度很小,说明混凝土试块纵向变形较大;随着荷载增大,应力比为0.65~0.80时,泊松比开始增加。当泊松比为0.5时,此时应力比达到0.8~0.9。主要原因是混凝土内部微裂缝开始较大发展,此后应力比增长放缓,而泊松比快速发展,混凝土横向应变增大,逐渐有可见裂缝出现在混凝土表面。

由于横向应变受纵向裂缝影响较大,使得泊松比离散性大,且弹性变形阶段泊松比较稳定,因此取应力比为0.4时泊松比作比较。粉煤灰掺量10%,各掺量风积沙混凝土泊松比分别为0.17、0.19、0.20、0.20、0.17,粉煤灰掺量20%,泊松比分别为0.20、0.20、0.23、0.22、0.17。由此看出,随着风积沙掺量增加,风积沙混凝土泊松比呈先增长后下降的变化趋势,增加粉煤灰可以提高混凝土横向变形。

3 受压本构方程上升段推导

混凝土单轴受压应力-应变曲线是图像化的本构关系,为混凝土结构和构件受力性能研究与分析提供了材性方面的依据和基础^[11]。从图4、5可以看出,风积沙混凝土受力与变形过程与普通混凝土相似。基于国内外专家对混凝土单轴受压本构关系的研究成果,选取过镇海^[12]提出的本构模型,建立风积沙混凝土单轴受压上升段本构方程。

3.1 受压本构方程上升段数学模型

采用无量纲化对实测应力-应变曲线进行简化: $x=\varepsilon/\varepsilon_c$, $y=\sigma/\sigma_c$ (x 、 y 分别为无量纲化应力应变曲线横坐标和纵坐标; ε 、 σ 分别为应变和应力; ε_c 、 σ_c 分别为峰值应变和峰值应力)。

应力-应变曲线上上升段采用多项式函数模型,如式(1)所示^[12]:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3, \quad x \leq 1 \tag{1}$$

上升段曲线满足以下几个特征:1)当 $x=0$ 时, $y=0$;2)当 $0 \leq x \leq 1$ 时, d^2y/dx^2 上升段斜率单调减小,无拐点;3)当 $x=1$ 时, $y=1$,曲线有单峰值点(1,1)。

将边界条件代入式(1)得式(2):

$$a_0 = 0, a_2 = 3 - 2a_1, a_3 = a_1 - 2 \tag{2}$$

根据式(1)可知, $x=0$ 时, $dy/dx=A$,由各符号定义可知:

$$a_1 = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{d(\sigma/\sigma_c)}{d(\varepsilon/\varepsilon_c)} \right|_{x=0} = \frac{d\sigma/d\varepsilon|_{x=0}}{\sigma_c/\varepsilon_c} = \frac{E_0}{E_p} = A \tag{3}$$

式中, $E_0 = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{x=0}$ 和 $E_p = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c}$ 分别为风积沙混凝土初始切线弹性模量与峰值割线变形模量。可见,参数 A 有明确的物理和几何意义,即曲线初始斜率和峰值点割线斜率之比。本构参数 A 反应材料的性能,且与材料成分的变化密切联系^[12]。 A 越小, E_0 与 E_p 越接近,

将式(2)代入式(1)得到曲线上上升段方程^[12]:

$$y = Ax + (3 - 2A)x^2 + (A - 2)x^3, \quad x \leq 1 \tag{4}$$

3.2 受压本构方程上升段参数拟合

根据已确定的本构曲线数学模型,对试验测得数据散点运用最小二乘法原理进行非线性拟合,得到不同粉煤灰与风积沙掺量下所对应的混凝土本构参数值 A 。通过标准差 σ 、残差均方差 χ^2 、相关系数 R^2 这3个指标来评价本构方程显著性、质量与可靠度。A0组混凝土试验数据和拟合结果如图11所示。

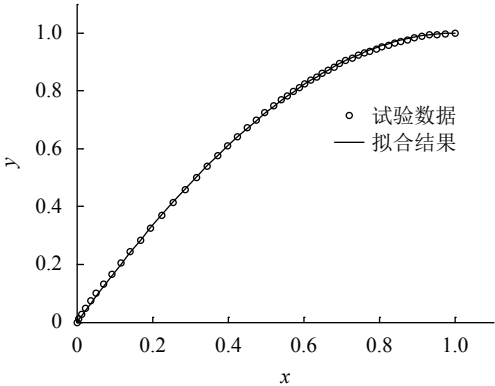


图11 A0组混凝土本构方程拟合

Fig. 11 Fitting of constitutive equations of A0 group concrete

由图11可见,试验数据围绕在拟合曲线周围,表明拟合结果较好。其他各组拟合结果见表3。

表3 风积沙混凝土本构参数

Tab. 3 Constitutive parameters of aeolian sand concrete				
编号	A	σ	$\chi^2/10^{-4}$	R^2
A0	1.799	0.000 8	0.140 6	0.999 9
A10	1.590	0.000 6	0.122 5	0.999 8
A20	1.196	0.005 2	3.292 1	0.996 7
A30	1.204	0.001 4	0.203 9	0.999 7
A40	1.371	0.004 2	1.711 1	0.998 0
B0	1.120	0.005 7	2.718 1	0.997 6
B10	1.766	0.003 5	1.202 3	0.998 9
B20	1.832	0.004 4	2.071 4	0.997 6
B30	1.502	0.002 3	0.867 7	0.999 0
B40	0.945	0.008 1	3.498 3	0.995 9

上升段曲线拟合的标准差 σ 范围为0.000 6~0.005 2,平均值为0.003 6,残差均方差 χ^2 范围为0.122 5~3.498 3,平均值为1.583 8,拟合度 R^2 范围为0.995 9~0.999 9,平均值为0.998 3。从指标数据结果来看,曲线拟合效果比较理想,表明本文选用单轴受压应力-应变曲线上上升段数学模型的科学性与合理性及不同粉煤灰与风积沙掺量本构参数值的可靠度。

由式(3)可知,本构参数 A 是混凝土初始切线弹性模量(E_0)与峰值割线变形模量(E_p)的比值。由表3可见轴心抗压强度、风积沙掺量等对本构参数取值有很大影响。为找到轴心抗压强度、风积沙掺量与本

构参数之间的关系,对过镇海^[12]给出的本构参数公式进行二次演化,可得:

$$\alpha_a = 2.4 - 0.01 f_c \quad (5)$$

式中: α_a 为本构参数; f_c 为混凝土轴心抗压强度, MPa。

对本构参数 A 与风积沙掺量、风积沙混凝土轴心抗压强度数据进行拟合,得到拟合关系如下:

$$A_{10} = \alpha_a (3.670 7 m_a^2 - 2.071 5 m_a + 0.918 3), R^2 = 0.922 1 \quad (6)$$

$$A_{20} = \alpha_a (-10.331 m_a^2 + 3.840 1 m_a + 0.577 2), R^2 = 0.983 3 \quad (7)$$

式中, A_{10} 、 A_{20} 为粉煤灰掺量 10% 和 20% 的本构参数, m_a 为风积沙掺量。

根据式 (4)、(6)、(7) 得到不同粉煤灰与风积沙掺量混凝土单轴受压应力-应变曲线上阶段本构方程:

$$\sigma = f_c \left[A_i \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} + (3 - 2A_i) \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^2 + (A_i - 2) \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right)^3 \right], \varepsilon \leq \varepsilon_c \quad (8)$$

4 结 论

1) 弹性阶段各掺量风积沙混凝土应力-应变曲线基本一致, 进入弹塑性阶段后, 风积沙混凝土较基准混凝土应力增长较快, 随着风积沙掺量增加, 应变呈先减小后增大的变化趋势, 混凝土脆性增加; 随着粉煤灰掺量增加, 混凝土应力-应变曲线非常接近, 强度降低幅度较小, 变形能力有所提高。

2) 随着风积沙掺量增加, 混凝土轴心抗压强度、弹性模量先增加后减小。粉煤灰掺量的增加降低了混凝土弹性模量。

3) 相同粉煤灰掺量下, 混凝土泊松比随风积沙替代率的增加而先增加后降低, 随粉煤灰掺量增加而增加, 泊松比范围为 0.17~0.23。

4) 对风积沙混凝土单轴受压应力-应变上升段曲线试验数据进行拟合得到了本构参数 A , 通过多元非线性拟合建立了本构参数与轴心抗压强度和风积沙掺量之间的关系式, 得出了风积沙混凝土应力-应变上升段本构方程。

参考文献:

- [1] Liu Q, Shen X, Wei L, et al. Grey model research based on the pore structure fractal and strength of NMR aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2019, 72(1): 536-543.
- [2] He Jing, Shen Xiangdong, Dong Wei. Experiment research

of aeolian sand cement mortar frost resistance in saline solution[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(4): 1159-1163. [何静, 申向东, 董伟. 在盐溶液下风积沙水泥砂浆的抗冻性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(4): 1159-1163.]

- [3] Dong Wei, Shen Xiangdong, Lin Yanjie, et al. Impact of mixed aeolian sand on the properties of pumice lightweight aggregate concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(8): 2089-2094. [董伟, 申向东, 林艳杰, 等. 风积沙的掺入对浮石轻骨料混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(8): 2089-2094.]
- [4] Dong W, Shen X D, Xue H J, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of Aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction & Building Materials*, 2016, 123: 792-799.
- [5] Ahmad S, Hakeem I, Maslehuddin M. Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 20(9): 1-21.
- [6] Lu Lihua, Pan Guisheng, Chen Sili, et al. Strength of concrete with different contents of fly ash[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2009, 31(1): 107-111. [鲁丽华, 潘桂生, 陈四利, 等. 不同掺量粉煤灰混凝土的强度试验[J]. *沈阳工业大学学报*, 2009, 31(1): 107-111.]
- [7] Zhang Wuman, Ba Hengjing, Gao Xiaojian, et al. Influence of fly ash and stress level on permeability of concrete[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(4): 356-359. [张武满, 巴恒静, 高小建, 等. 粉煤灰与应力水平对混凝土渗透性的影响[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(4): 356-359.]
- [8] Zhang Guoxue, Yang Jiansen. Research on engineering characteristics of Tenggeli desert sands[J]. *Highway*, 2003 (Supp1): 131-134. [张国学, 杨建森. 腾格里沙漠砂的工程性质试验研究[J]. *公路*, 2003(增刊1): 131-134.]
- [9] Dong Wei, Lv Shuai, Xue Gang. Effect of aeolian sand and fly ash content on mechanical properties of concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(7): 2320-2325. [董伟, 吕帅, 薛刚. 风积沙与粉煤灰掺量对混凝土力学性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(7): 2320-2325.]
- [10] Zeng Rong, Chen Mujie, Huang Meiling, et al. Stress-strain characteristics of high-volume fly-ash concrete[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2015, 35(1): 86-90. [曾榕, 陈慕杰, 黄美玲, 等. 大掺量粉煤灰混凝土应力-应变关系[J]. *桂林理工大学学报*, 2015, 35(1): 86-90.]
- [11] Zhang Zichao. Experimental study on constitutive relation of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. [张梓超. 钢纤维混凝土单轴受压本构关系试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.]
- [12] 过镇海. 混凝土的强度和变形: 试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(编辑 黄小川)

引用格式: Dong Wei, Xiao Yang, Su Ying, et al. Study on axial compression performance of aeolian sand concrete[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3): 86-92. [董伟, 肖阳, 苏英, 等. 风积沙混凝土轴心受压力学性能研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3): 86-92.]