

沙漠沙地聚合物纤维混凝土参数优化 及抗压试验研究

张天贺¹,任庆新²,王庆贺¹,路林翰³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 佛山大学交通与土木建筑学院,
广东 佛山 528225;3. 沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 确定沙漠沙地聚合物混凝土最佳配合比,为沙漠沙 EGC 的研究和工程应用提供一定思路。方法 进行 12 组沙漠沙 EGC 的立方体抗压强度试验和 4 组沙漠沙 EGC 柱轴心受压试验,量化了沙漠沙取代率、NaOH 溶液浓度、水玻璃模数、PE 纤维掺量对沙漠沙 EGC 抗压强度的影响;进一步分析了轴心受压应力-应变曲线,并提出适用于沙漠沙 EGC 的本构关系模型。结果 EGC 最大抗压强度在沙漠沙取代率 50% 时取得;而全沙漠沙取代率下,NaOH 溶液浓度取 20%,水玻璃模数取 1.1,PE 纤维体积掺量取 2%,为沙漠沙 EGC 最优配合比。结论 掺入沙漠沙制备 EGC 方法是可行的;提出的轴心受压本构模型可较好预测沙漠沙 EGC 单轴受压行为。

关键词 地聚物复合材料;沙漠沙;地聚物;抗压强度;单轴受压本构模型;纤维

中图分类号 TU528.572

文献标志码 A

引用格式:张天贺,任庆新,王庆贺,等. 沙漠沙地聚合物纤维混凝土参数优化及抗压试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):930-937. (ZHANG Tianhe, REN Qingxin, WANG Qinghe, et al. Parameter optimization and compressive test study of dune sand engineered geopolymer composite [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):930-937.)

Parameter Optimization and Compressive Test Study of Dune Sand Engineered Geopolymer Composite

ZHANG Tianhe¹, REN Qingxin², WANG Qinghe¹, LU Linhan³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation, Foshan University, Foshan, China, 528225; 3. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To determine the optimal mix of dune sand in Engineered Geopolymer Composite (EGC), this study provided insights for subsequent research and engineering applications involving dune sand EGC. Twelve groups of cubic specimens of dune sand EGC underwent compression tests, and four groups of axial compression tests of dune sand EGC were conducted. The observed

收稿日期:2023-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52078309);沈阳市科技计划项目(21-108-9-34)

作者简介:张天贺(1998—),女,博士研究生,主要从事高性能混凝土等方面研究。

failure modes and recorded compressive strengths were analyzed. The effects of dune sand replacement ratio, NaOH solution concentration, water-glass modulus, and PE fiber content on the compressive strength of dune sand EGC were quantified. Furthermore, further analysis was conducted on the stress-strain curves under axial compression, and a constitutive relationship model suitable for dune sand EGC was proposed. The maximum compressive strength of EGC was achieved when the dune sand replacement ratio was 50%. Under complete dune sand replacement, a NaOH solution concentration of 20%, a water glass modulus of 1.1, and a PE fiber content of 2% were selected as the optimal combination for dune sand EGC compressive strength. The study affirmed the feasibility of preparing EGC by incorporating a specific proportion of dune sand, and this proposed constitutive model accurately predicts the uniaxial compressive behavior of dune sand EGC.

Key words: EGC; dune sand; geopolymer; compressive strength; uniaxial compressive constitutive model; fiber

工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite, ECC) 以其高韧性和耐损伤性被认为是土木工程领域的前沿材料^[1], 具有广泛应用前景^[2]。常采用超细硅砂作为 ECC 骨料^[3], 但硅砂在提取、生产和运输中消耗能源较大, 且会对环境产生不利影响^[4]。沙漠沙资源丰富且分布广泛^[5], 采用沙漠沙替代硅砂制备 ECC, 合理利用资源, 不仅能解决工程建设需求, 还能节约建设成本。有关对沙漠沙 ECC 力学性能的研究结果存在差异, J. Che 等^[6-7]研究发现沙漠沙取代率为 40% 且钢纤维掺量为 2% 时试件抗压性能最佳; 继而研究了碱激发剂模数对 ECC 力学性能的影响规律, 发现碱激发剂模数为 1.5 和 2 时高水胶比和低水胶比的 ECC 能获得最大抗压强度。E. S. Seif 等^[8]研究发现混凝土和水泥砂浆抗压强度随沙漠沙取代率的增加呈先增后降趋势, 沙漠沙取代率为 50% 时试件抗压强度最高。Y. Liu 等^[9]研究了低掺量沙漠沙砂浆的抗压强度, 发现 20% 取代率时试件抗压强度最高。张朵^[10]研究发现沙漠沙 ECC 抗压强度可达到河砂 ECC 的 1.16 倍。由此看出, 目前的关于沙漠沙对 ECC 抗压强度的研究结果不一致, 因此仍需深入研究。碱激发胶凝材料的研究为建筑可持续发展和环境保护提供了新的思路^[11-12]。J. Davidovits^[13]提出利用碱性溶液

激发富含硅铝元素的化合物作为胶凝材料, 应用于混凝土中, 在降低造价的同时改善了环境污染。M. S. Morsy 等^[14]发现水玻璃与 NaOH 的比例是影响粉煤灰地聚物强度的主要因素, 当两者比例为 1 时地聚物强度最高。刘进琪^[15]研究发现提高碱激发剂浓度可有效提高地聚物纤维超韧混凝土的抗压强度, 当碱激发剂浓度为 37.5% 且水玻璃模数为 1.1 时提升效果最为明显。

基于此, 笔者利用沙漠沙作为细骨料、以地聚物作胶凝材料制备沙漠沙地聚物复合材料 (Engineered Geopolymer Composite, EGC) 进行试验研究, 分析沙漠沙取代率、NaOH 溶液浓度、水玻璃模数、PE 纤维掺量和养护龄期对沙漠沙 EGC 试件破坏形态和抗压强度影响规律, 并进行棱柱体单轴受压试验, 对单轴受压应力-应变全曲线进行分析, 进而提出沙漠沙 EGC 单轴受压本构模型, 为后续沙漠沙 EGC 研究和应用提供理论参考。

1 试验

1.1 材料性能

沙漠沙取自沈阳市康平县境内沙漠, 参照《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[16]测得水洗后沙漠沙含泥量 Q_c 为 2.76%; 硅砂和沙漠沙平均粒径分别为 448 μm 和 223 μm , 颗粒级配见图 1。试验采

用F类I级粉煤灰和S95级高炉矿渣,其平均粒径分别为35 μm和95 μm,密度分别为2.55 g/cm³和3.10 g/cm³,具体化学成分见表1。试验采用纤维材质为聚乙烯(PE),纤维长度为12 mm,直径为24 μm,弹性模量为116 GPa,抗拉强度为3 Gpa,密度为0.97 g/cm³。碱性激发剂由NaOH溶液和水玻璃溶液混合而成,NaOH溶液的配制采用试剂级NaOH颗粒,水玻璃溶液的初始模数为2.23,密度为1.53 g/cm³,Na₂O和SiO₂的含量分别为14.34%和32%;外加剂采用减水率28%的高

效聚羧酸减水剂。

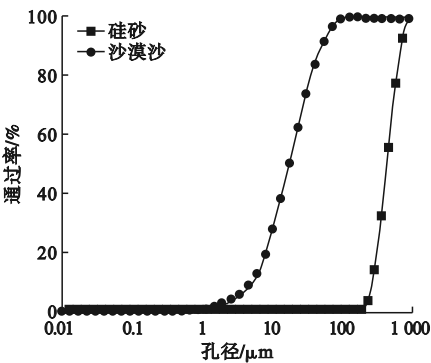


图1 硅砂与沙漠沙粒径分布曲线

Fig. 1 Grading curves of silica sand and dune sand

表1 粉煤灰、高炉炉渣和沙漠沙的化学组成

Table 1 Chemical composition of fly ash and blast furnace slag and dune sand							%
类别	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(CaO)	w(K ₂ O)	w(SO ₃)	w(MgO)
粉煤灰	53.8	30.9	4.1	4.1	2.3	2.2	0.6
高炉矿渣	25.7	13.1	0.5	49.5	0.4	2.3	5.6
沙漠沙	85.8	7.4	0.6	0.6	3.7	0.1	0.2

1.2 试验设计

按照不同配合比,设计12组EGC混合物,每组制作3个试件。沙漠沙取代率分别为25%、50%、100%,NaOH溶液质量浓度分别

为14%、17%、20%、23%,水玻璃模数分别为0.8、1.1、1.3、1.5,PE纤维体积掺量分别为1.5%、2%、2.5%;水胶比为0.35,砂(沙)胶比为0.36,保持恒定不变,具体配合比见表2。

表2 EGC配合比

Table 2 Mix proportion of EGC									kg/m ³
试件编号	粉煤灰	矿渣	硅砂	沙漠沙	水玻璃	水	NaOH	减水剂	纤维
DS ₀ -EGC20-1.1-2	557.5	557.5	401.4	0	290.2	234.5	58.9	22.3	19.4
DS ₂₅ -EGC20-1.1-2	557.5	557.5	301.1	100.3	290.2	234.5	58.9	22.3	19.4
DS ₅₀ -EGC20-1.1-2	557.5	557.5	200.7	200.7	290.2	234.5	58.9	22.3	19.4
DS ₁₀₀ -EGC20-1.1-2	557.5	557.5	0	401.4	290.2	234.5	58.9	22.3	19.4
DS ₁₀₀ -EGC14-1.1-2	569.3	569.3	0	409.9	229.4	275.5	46.5	22.8	19.4
DS ₁₀₀ -EGC17-1.1-2	566.2	566.2	0	407.7	255.6	252.4	51.9	22.7	19.4
DS ₁₀₀ -EGC23-1.1-2	551.7	551.7	0	397.2	319.7	214.7	65.1	22.1	19.4
DS ₁₀₀ -EGC20-0.8-2	565.5	565.5	0	407.1	204.7	285.7	71.5	22.6	19.4
DS ₁₀₀ -EGC20-1.3-2	552.2	552.2	0	397.6	348.5	199.9	49.7	22.1	19.4
DS ₁₀₀ -EGC20-1.5-2	546.6	546.6	0	393.5	409.9	162.9	40.5	21.9	19.4
DS ₁₀₀ -EGC20-1.1-1.5	557.5	557.5	0	401.4	290.2	234.5	58.9	22.3	14.6
DS ₁₀₀ -EGC20-1.1-2.5	557.5	557.5	0	401.4	290.2	234.5	58.9	22.3	24.3

注:以DS₁₀₀-EGC20-1.1-2为例,DS₁₀₀表示沙漠沙取代率为100%,EGC20中20表示NaOH溶液质量浓度为20%,1.1表示水玻璃模数为1.1,最后的2表示纤维掺量为2%。

1.3 试件制备及试验方法

依据《纤维混凝土试验方法标准》(CECS 13—2009)^[17],每个配合比下制备100 mm×100 mm×100 mm立方体试块用于立方体抗压试验,制作100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件,进行单轴抗压试验。分别测定试件的3 d、7 d、14 d、28 d立方体抗压强度。

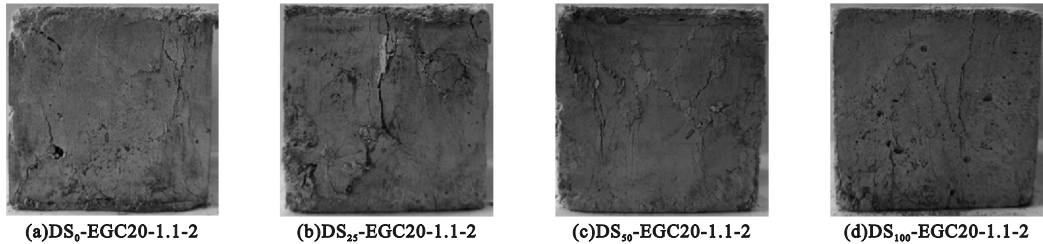


图2 典型试件最终破坏形态

Fig. 2 Typical final failure modes of the specimens

2.2 抗压强度影响分析

2.2.1 沙漠沙取代率

图3为不同沙漠沙取代率对EGC抗压强度影响。

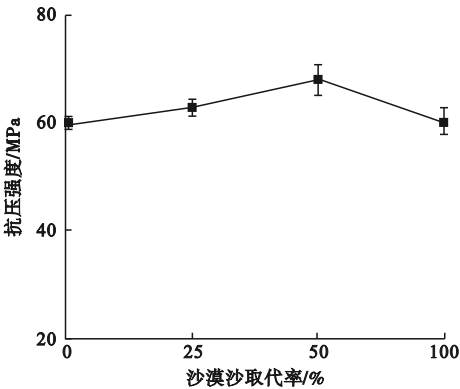


图3 沙漠沙取代率对抗压强度影响

Fig. 3 Effect of dune sand replacement ratio on compressive strength

随取代率的增加,抗压强度呈先升后降趋势。沙漠沙取代率由0增至25%和50%,抗压强度分别提高了4.98%和13.68%,这是因为沙漠沙粒径较小、呈球形,掺入少量沙漠沙具有填充效应和颗粒堆积效应,优化了骨料颗粒级配,且沙漠沙具有一定火山灰活性,具有活性的SiO₂会与水化产物中OH⁻

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

图2为典型试件的最终破坏形态。所有试件均表现为抗压延性破坏和多重开裂行为,这是由于纤维的桥接作用对混凝土产生了横向约束,导致试件在受压过程中形成紧密间隔微裂缝,使试件在峰值荷载后仍保持完整。

发生二次水化反应,形成致密胶体,优化了基体孔隙结构,从而提高了复合材料的抗压强度。取代率为100%时,抗压强度相较于50%取代率下降了11.23%,但相较于硅砂EGC仍提高0.92%。抗压强度的降低是由于沙漠沙比表面积较大^[10],搅拌过程中吸附更多水分,使胶凝材料无法完全包裹沙粒,增加了闭合孔隙,造成界面处相对薄弱,从而降低了试件的强度。尽管存在负面影响,但沙漠沙所带来的积极影响仍占主导,因此使用沙漠沙制备EGC是可行的。

2.2.2 NaOH溶液质量分数

图4为不同NaOH溶液质量分数对沙漠沙EGC抗压强度影响。NaOH溶液质量分数由14%增至17%和20%,抗压强度提高了8.03%和12.11%。NaOH溶液质量分数上升加速了体系硅铝相的溶解,粉煤灰和矿渣中的SiO₂和Al₂O₃能够与NaOH溶液反应,生成N—A—S—H凝胶。此外,沙漠沙火山灰反应在碱性条件下被进一步激活,致使聚合反应加速进行,促使沙漠沙EGC强度提高。当NaOH质量分数由20%增至23%,抗压强度下降了7.06%。NaOH溶液质量分

数过高,地聚物电负性较高^[14],对 EGC 混合物内部稳定性和晶体的结构造成破坏,导致试件密实度下降。此外,过量的 NaOH 溶液与空气中 CO₂ 发生反应,也会导致沙漠沙 EGC 抗压强度降低。

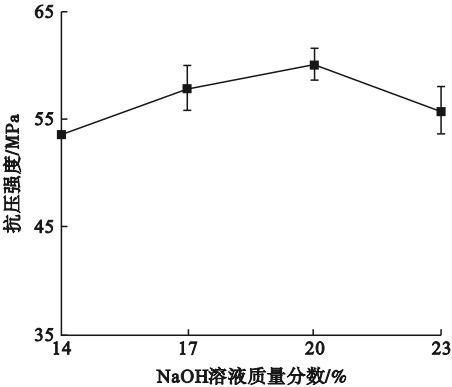


图4 NaOH 溶液浓度对抗压强度影响
Fig. 4 Effect of NaOH solution concentration on compressive strength

2.2.3 水玻璃模数

图5 为不同水玻璃模数对沙漠沙 EGC 抗压强度影响。

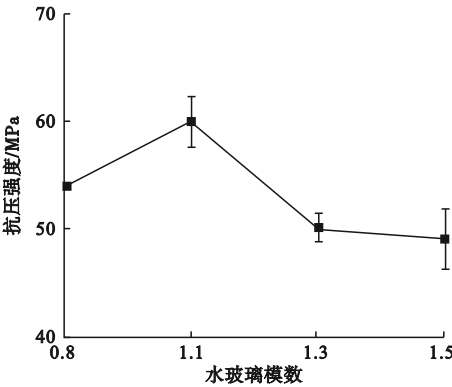


图5 水玻璃模数对抗压强度影响
Fig. 5 Effect of water-glass modulus on compressive strength

随水玻璃模数增加,抗压强度呈先增加后减少趋势,水玻璃模数由 0.8 增至 1.1 时,抗压强度提高了 11.23%,当水玻璃模数为 1.1 时试件抗压强度最高,为 60.04 MPa。水玻璃模数的提高,增加了体系中 Si⁴⁺ 含量,聚合反应更加充分,从而提高了试件抗压强度,水玻璃模数由 1.1 增至 1.3 和 1.5,抗压

强度分别下降了 16.49% 和 18.18%,这是由于水玻璃模数过大,水化所需碱性环境弱化,阻碍了 SiO₃²⁻ 离子聚合物中 Si—O 键的断裂,减缓了硅铝酸盐的溶解,不利于 N—A—S—H 凝胶形成,进而削弱了沙漠沙 EGC 抗压强度。

2.2.4 纤维掺量

图6 为纤维掺量对沙漠沙 EGC 抗压强度影响。纤维掺量由 0 增至 1.5% 和 2%,抗压强度分别提高了 13.55% 和 17.07%。纤维在基体中形成“骨架”结构,限制荷载作用下试件的横向变形,对微裂纹发展和延伸起到抑制作用,从而提高抗压强度。纤维掺量由 2% 增至 2.5%,抗压强度下降了 9.15%。纤维掺量过高,搅拌不均匀,易出现交叉和成团等不均匀分布现象,试件内部薄弱界面增加,微裂缝逐渐发展,导致沙漠沙 EGC 抗压强度的降低。

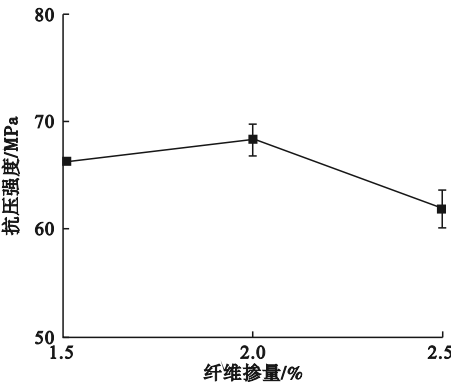


图6 纤维掺量对抗压强度影响
Fig. 6 Effect of fiber content on compressive strength

2.2.5 不同龄期抗压强度

图7 为不同龄期试件的抗压强度。所有试件抗压强度均随养护龄期增长不断提高,早强性能非常显著。沙漠沙 EGC 3 d、7 d、14 d 平均抗压强度分别可达 28 d 强度的 48.02%、78.56%、88.59%。沙漠沙 EGC 强度在 3 ~ 7 d 增长最快,平均增长速度为 4.87 MPa/d,14 ~ 28 d 强度增长有所减缓,平均增长速度为 0.51 MPa/d。这是因为矿渣中 CaO 的存在促进了早期强度的提升,在

14~28 d,NaOH 的大量消耗,导致水化环境碱性下降,反应速率降低,从而沙漠沙 EGC 强度增长也随之减慢。

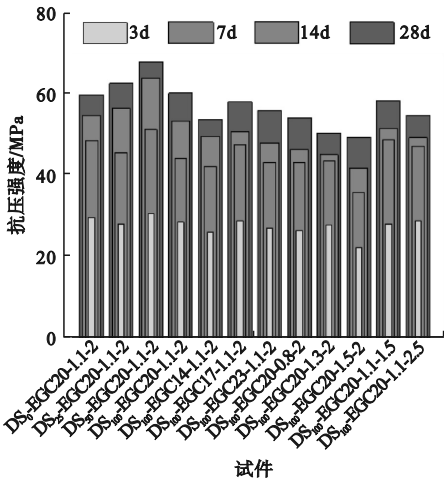


图7 不同龄期试件的抗压强度

Fig. 7 Compressive strength of specimens of different ages

2.3 轴心受压力学性能

2.3.1 破坏模式

试件表现出延性剪切破坏特征,随沙漠沙取代率增加,细密裂缝增多,主裂缝变窄,且裂纹发展多,纤维桥接作用抑制裂缝发展。

2.3.2 轴心受压应力-应变曲线

图8为不同沙漠沙取代率下EGC典型轴心受压应力-应变曲线。

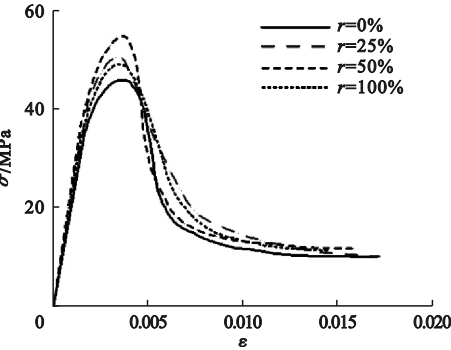


图8 不同沙漠沙取代率的轴心受压应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of different dune sand replacement ratio under axial compression

曲线分为线性上升阶段、非线性上升阶段和下降阶段三个阶段,沙漠沙取代率对试件轴心受压应力-应变曲线走势影响有限。

加载初期,轴心受压应力-应变曲线呈线性发展,试件表面无明显裂缝,基体承担外力。荷载增至峰值应力的60%~70%,应力上升速率降低,此阶段,应力-应变曲线逐渐呈非线性发展,基体逐渐开裂,由于纤维桥接作用,纤维与基体共同受力,裂缝扩展受限。峰值应力过后,基体逐渐退出工作,裂缝宽度继续增大,试件应力迅速降低。

2.3.3 轴心抗压强度

相比于立方体抗压强度,轴心抗压强度更为准确地反应试件的实际受力情况。图9为沙漠沙EGC轴心抗压强度 f_c 和立方体抗压强度 f_{cu} 拟合结果。可以看出,试验值与拟合曲线拟合良好,立方体抗压强度与轴心抗压强度间近似满足线性关系:

$$f_c = 0.80374 f_{cu} \tag{1}$$

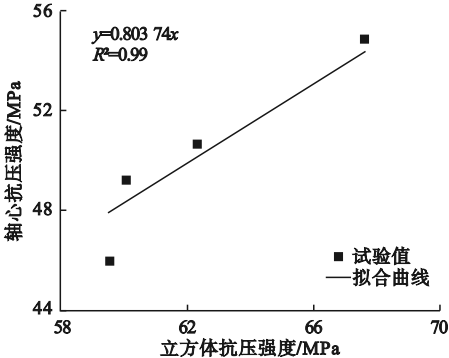


图9 轴心抗压强度与立方体抗压强度关系

Fig. 9 Relationship between axial compressive strength and cubic compressive strength

2.3.4 轴心受压应力-应变曲线模型

采用分段函数描述轴心受压应力-应变曲线,对曲线进行无量纲处理:

$$x = \varepsilon / \varepsilon_0, \tag{2}$$

$$y = \sigma / \sigma_0. \tag{3}$$

式中: σ_0 为峰值应力; ε_0 为峰值应力对应的应变。

参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[18],提出混凝土受压应力-应变曲线方程:

$$\begin{cases} y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, & 0 \leq x < 1; \\ y = x / [b(x - 1)^2 + x], & x \geq 1. \end{cases} \tag{4}$$

式中: a 和 b 分别为轴心受压应力-应变曲线上升段和下降段参数值。

以不同取代率典型试件为例,验证应力-应变曲线方程及参数计算的精准性,理论曲线的系数取值见表3,图10为理论值与试验值对比。结果表明,棱柱体轴压强度理论值与试验值吻合较好,总体趋势一致。上升段,理论值与试验值几乎完全重合, R^2 接近1.0,在下降段,虽有个别拟合结果较差,但 R^2 值很好,最小在0.92以上。由此看出,

提出的本构模型可较好地预测沙漠沙EGC的单轴抗压力学行为。

表3 不同取代率试件的系数及 R^2 取值

Table 3 Values of the coefficients and the R^2 values of specimens with different replacement ratios

试件编号	上升段		下降段	
	a	R^2	b	R^2
DS ₀ -EGC20-1.1-2	2.49	0.995	3.45	0.929
DS ₂₅ -EGC20-1.1-2	2.34	0.994	2.24	0.989
DS ₅₀ -EGC20-1.1-2	2.13	0.991	5.24	0.937
DS ₁₀₀ -EGC20-1.1-2	2.12	0.985	2.26	0.977

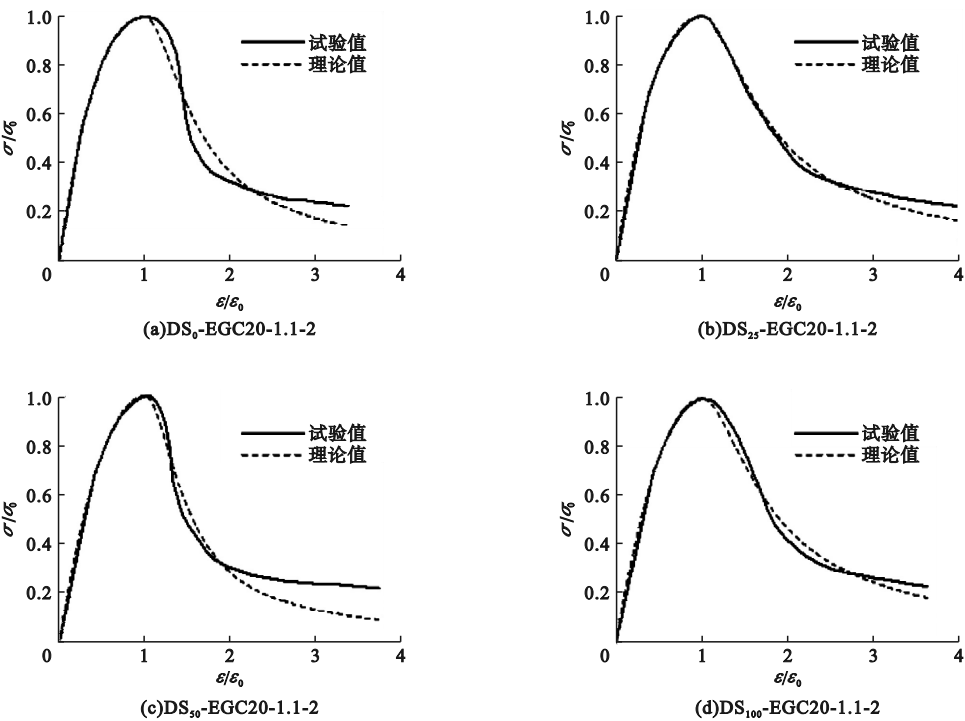


图10 试件的理论与试验值对比

Fig. 10 Comparison between theoretical and experimental values of the specimens

3 结 论

(1)EGC 的抗压强度随沙漠沙取代率的增加呈先增后降趋势,沙漠沙取代率由0增至25%和50%,EGC 抗压强度分别提高4.98%和13.68%,取代率由50%增至100%,EGC 抗压强度降低11.23%,EGC 最大抗压强度在沙漠沙取代率50%时取得。

(2)全沙漠沙取代率下,NaOH 溶液质量

分数取20%,水玻璃模数取1.1,纤维体积掺量取2%,为沙漠沙EGC 抗压强度最优配合比;适当浓度的NaOH 溶液和水玻璃模数有利于N-A-S-H 凝胶的形成,从而提升EGC 抗压强度。

(3)基于现有混凝土本构模型理论,得出适用于沙漠沙EGC 的轴心受压本构模型,应力-应变全曲线计算结果与实测值吻合良好,可较好地预测沙漠沙EGC 单轴受压力学行为。

参考文献

- [1] ARCE G A, NOORVAND H, HASSAN M M, et al. Feasibility of low fiber content PP-ECC for jointless pavement application [J]. Construction and building materials, 2020, 121131.
- [2] DING Y, YU K, LI M. A review on high-strength engineered cementitious composites (HS-ECC): design, mechanical property and structural application [J]. Structures, 2022, 35 (1): 903–921.
- [3] LI V C. Integrated structures and materials design [J]. Materials and structures, 2007, 40 (4): 387–396.
- [4] ADESINA A, DAS S. Mechanical performance of engineered cementitious composite incorporating glass as aggregates [J]. Journal of cleaner production, 2020, 260: 121113.
- [5] SHI Z. Green manufacturing of silicate materials using desert sand as a raw-material resource [J]. Construction and building materials, 2022, 338: 127539.
- [6] CHE J, GUO Z, LI Q, et al. Mechanical properties of desert-sand-based steel-pp hybrid fiber reinforced engineered cementitious composites (H-DSECC) [J]. Ksce journal of civil engineering, 2022, 26(12): 5160–5172.
- [7] CHE J, YANG R, WANG J, et al. Research on basic mechanical properties of different modulus alkaline excited ECC [J]. Physics and chemistry of the earth, 2022, 128: 103233.
- [8] SEIF E S, SONBUL A R, HAKAMI B A, et al. Experimental study on the utilization of dune sands as a construction material in the area between Jeddah and Mecca, Western Saudi Arabia [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2016, 75(3): 1007–1022.
- [9] LIU Y, LI Y, JIANG G. Orthogonal experiment on performance of mortar made with dune sand [J]. Construction and building materials, 2020, 264: 120254.
- [10] 张朵. PE 纤维/沙漠砂工程水泥基复合材料制备及基本力学性能研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
(ZHANG Duo. Study on preparation and basic mechanical properties of PE fiber/desert sand engineering cementitious composites [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.)
- [11] 童国庆, 张吾渝, 高义婷, 等. 碱激发粉煤灰地聚物的力学性能及微观机制研究[J]. 材料导报, 2022, 36(4): 129–134.
(TONG Guoqing, ZHANG Wuyu, GAO Yiting, et al. Mechanical properties and micromechanism of alkali-activated fly ash geopolymer [J]. Materials reports, 2022, 36(4): 129–134.)
- [12] 李黎, 委玉杰, 李宗利, 等. 基于纤维增强指数的碱激发砂浆物理力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2212–2220.
(LI Li, WEI Yujie, LI Zongli, et al. Properties of alkali activated mortar fresh and properties based on fiber reinforced index [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2022, 50 (8): 2212–2220.)
- [13] DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials [J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2005, 37(8): 1633–1656.
- [14] MORSY M S, ALSAYED S H, SALLOUM Y A, et al. Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder [J]. Arabian journal for science and engineering, 2014, 39 (6): 4333–4339.
- [15] 刘进琪. 超高韧性地聚物基复合材料制备及力学性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
(LIU Jinqi. Experimental research on the preparation and mechanical properties of engineered geopolymers composites [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2020.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土用砂, 石质量及检验方法标准: JGJ52—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
(Ministry of Housing and Urban – Rural Development of the People's Republic of China. Standard of technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for ordinary concrete: JGJ52—2006 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2006.)
- [17] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土试验方法标准: CECS 13—2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
(China Engineering Construction Standardization Association. Standard test methods for fiber reinforced concrete: CECS 13—2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)