

石粉掺量对机制砂混凝土基本拉伸徐变的影响

罗英, 曾俊庆, 杨群敏, 刘东轼

(中建五局土木工程有限公司, 湖南长沙410004)

摘要: 混凝土结构时常发生早期开裂现象,降低混凝土结构的耐久性,拉伸徐变可松弛部分拉应力,降低结构开裂风险。为研究不同石粉掺量(0%、6%、12%、18%和24%)对机制砂混凝土基本拉伸徐变的影响,测试其7d和28d的弹性模量、1d~28d的自收缩和圆环约束下的弹性应变,得到其基本拉伸徐变。研究表明:随着石粉掺量的增加,机制砂混凝土的基本拉伸徐变先减小后增大。当石粉掺量小于18%,石粉掺量的增加,混凝土的界面结构改善,硬化水泥浆体的变形能转移到粗骨料,其基本拉伸徐变减小;石粉掺量大于18%,过多的石粉掺量使混凝土界面结构变得薄弱,硬化水泥浆体的变形较难转移到粗骨料,其基本拉伸徐变增大。因此,掺量为18%时,其基本拉伸徐变最小。

关键词: 机制砂混凝土;石粉;弹性模量;自收缩;基本拉伸徐变

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0049—07

Effects of Stone Powder Content on the Basic Tensile Creep of Manufactured Sand Concrete

LUO Ying, ZENG Junqing, YANG Qunmin, LIU Dongshi

(China Construction Fifth Bureau Civil Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Early-age cracking often appears in concrete structures which could reduce the durability of the concrete structure. Tensile creep relaxes the tensile stresses partially and mitigates the risk of structural cracking. In order to investigate the effects of stone powder content on the basic tensile creep of manufactured sand concrete with different stone powder contents (0%, 6%, 12%, 18% and 24%). The basic tensile creep was obtained by testing the modulus of elasticity at 7 d and 28 d, the autogenous shrinkage from 1 d to 28 d, and the elastic strain of manufactured sand concrete restrained by circular ring. The results show that the basic tensile creep of manufactured sand concrete decreases and then increases as the amount of stone powder increases. When the amount of stone powder is less than 18%, as the amount of stone powder increases, the interface structure of concrete improves, the deformation of the hardened cement paste can be transferred to the coarse aggregate, and its basic tensile creep decreases. The amount of stone powder admixture is greater than 18%, the excess amount of stone powder admixture makes the interface structure of concrete become weak. The deformation of hardened cement paste is more difficult to transfer to the coarse aggregate, and its basic tensile creep increases. Therefore, the basic tensile creep of manufactured sand concrete is minimum at the stone powder content of 18%.

Keywords: manufactured sand concrete; stone powder; elastic modulus; autogenous shrinkage; basic tensile creep

随着我国建设力度的逐渐加大,天然砂资源日渐匮乏,机制砂作为天然砂的替代品,在土木工程、水利水电、交通运输等领域得到广泛应用^[1-2]。但

施工养护过程中,混凝土结构时常发生开裂现象,裂缝缺陷的产生和存在会降低混凝土的抗渗性能,从而降低混凝土结构的耐久性^[3-4]。因此,预防混凝

土结构早期开裂是着重关注的问题^[5-7],而混凝土的拉伸徐变也是影响混凝土开裂的关键因素之一^[8]。

混凝土的徐变是指在持续应力作用下,其应变随时间而持续增长的特性^[9]。对于受约束的混凝土构件,拉伸徐变引起的应力松弛,可减少混凝土内部的约束应力来缓解其早期开裂^[10]。研究表明^[11-12],拉伸徐变能松弛因体积变化而造成的拉应力,有利于提高构件的抗裂性能。许多学者针对混凝土的拉伸徐变进行了大量研究,发现混凝土的拉伸徐变受诸多因素影响,如养护温度-湿度^[8,13-14]、水灰(胶)比^[8,12]、胶凝材料性质^[15-16]、矿物掺合料(粉煤灰和矿渣)和掺合料掺量水平^[16-19]等。机制砂由岩石破碎而成,在生产过程中不可避免地会产生一定量的石粉,这也是机制砂与天然砂最明显的区别之一^[2]。对于机制砂混凝土,适量的石粉掺量有助于提升混凝土的性能,但当其掺量超过限值后,会导致机制砂混凝土性能的劣化等问题^[20-21]。同样,也会影响机制砂混凝土的拉伸徐变。因此,如何合理控制石粉掺量是比较重要的问题。但是,目前大多研究主要集中在石粉掺量对机制砂混凝土的早期抗裂性研究^[22],还未开展关于石粉掺量对机制砂混凝土拉伸徐变影响的研究。

为此,本文通过设计不同石粉掺量(0%、6%、12%、18%和24%,即石粉占水泥、粉煤灰和石粉总量的质量分数)的机制砂混凝土,研究石粉掺量对机制砂混凝土拉伸徐变的影响,揭示机制砂混凝土拉伸徐变的变化规律。

1 试验方案

1.1 原材料

(1) 水泥:采用福建炼石牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,其性能见表 1。

表 1 水泥性能指标

比表面积 $/(m^2 \cdot kg^{-1})$	凝终时间 $/min$	LOI $/\%$	3 d 抗压强度 $/MPa$	28 d 抗压强度 $/MPa$
362	127	1.31	28.5	45.4

(2) 粉煤灰:采用宁德 II 级粉煤灰。

(3) 粗骨料:采用闽侯苏洋采石场所产碎石,颗粒级配见图 1。

(4) 机制砂:采用闽清山友机制砂场生产的机制砂,测得机制砂的性能指标见表 2。

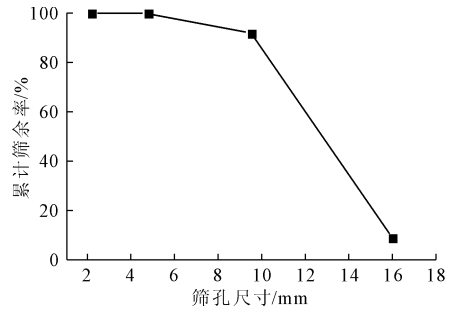


图 1 碎石颗粒级配曲线

表 2 细骨料性能指标

细骨料 类型	紧密堆积密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	表观密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	饱和面干吸 水率/ $\%$	石粉含量 $\%$
机制砂	1693	2655	0.76	0.4
河砂	1606	2632	0.30	0.3

(5) 河砂:采用闽江河砂,测得河砂的性能指标见表 2。

(6) 减水剂:采用福州建筑科学研究院生产的 TW-4 缓凝高效减水剂,减水率 15%~20%,固含量 33%。

(7) 石粉:由亚甲蓝定量分析法^[23]测得石粉中的亚甲蓝值为 0.67。

1.2 试验配合比

基于最少浆体理论设计配合比^[24],平均浆体厚度 APT 为 5 μm 。水灰比(减水剂中水和外加水与水泥质量之比)为 0.47,变化参数为石粉占粉料(水泥+粉煤灰+石粉)的质量分数,即石粉掺量为 0%、6%、12%、18%和 24%,对应的试验编号分别为 A、B、C、D 和 E,见表 3。粉煤灰掺量为 10%,即粉煤灰质量与粉料质量之比。

表 3 机制砂混凝土试验配合比

单位:kg

组别	不同材料用量						
	水泥	粉煤灰	石子	河砂	机制砂	石粉	外加水 减水剂
A	381	43	1154	202	472	0	172 8.449
B	366	44	1154	202	472	26	166 8.732
C	352	46	1154	202	472	55	160 9.034
D	337	47	1154	202	472	84	153 9.358
E	321	49	1154	202	472	116	145 9.706

1.3 研究方案

1.3.1 制备方法

(1) 混合搅拌:先加入水泥、粉煤灰、石子、河砂、机制砂、石粉干拌 30 s,然后缓慢加入搅拌均匀的水和减水剂溶液,再搅拌 120 s。

(2) 浇筑成型:将拌和好的混凝土分别浇筑 100 mm × 100 mm × 400 mm 的试模(弹性模量和自收缩试验)、150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试模(抗压强度)和圆环约束收缩试模(拉伸徐变试件:外径 395 mm,内径 315 mm)中。

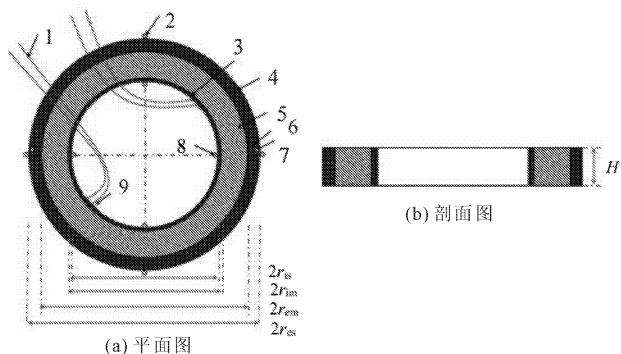
(3) 养护方式:① 抗压强度和弹性模量试块:试块浇筑成型后,采用保鲜膜覆盖养护 24 h 后拆模,放入标准养护室(温度为(20 ± 2)℃、相对湿度 ≥ 95%)内进行养护;② 自收缩试块:浇注完成后,上表面用薄膜覆盖,并放到标准养护室中养护,12 h 左右后拆模,拆模后用石蜡和塑料薄膜进行密封;③ 拉伸徐变试件:混凝土环成型后,将环形约束收缩测试装置放入标准养护室中养护,24 h 后拆去外环和隔板,采用石蜡密封人工砂混凝土环的上表面及周边。

1.3.2 试验方法

(1) 抗压强度和弹性模量试验:参考《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[25](GB/T 50081—2019)的规定进行,测试机制砂混凝土的抗压强度和弹性模量。

(2) 自收缩试验:参考文献[12]中的自收缩测试方法,利用高精度千分表测定混凝土自收缩。同时,试块内部中心测试点布置铂电阻,采用温度记录仪测试温度场变化。

(3) 拉伸徐变试验:采用圆环约束收缩方法^[26]来测试机制砂混凝土的拉伸徐变,如图 2 所示,装置具体尺寸见表 4。应变片贴在内钢环内侧二分之一高度处,两组应变片正对面布置,采用 DH3816 静态应变采集箱采集应变。



注:1 - 电线(连接应变箱);2 - 外钢环固定螺栓(浇筑时固定);3 - 内钢环;4 - 外钢环;5 - 混凝土环;6 - 外钢环固定钳口;7 - 钳口固定螺栓;8 - 内钢环固定钳口;9 - 应变片

图 2 圆环约束收缩装置平面图与剖面图

表 4 圆环约束收缩装置尺寸

分类	$2r_{es}$	$2r_{em}$	$2r_{im}$	$2r_{is}$	H
尺寸/mm	415	395	315	291	100

注: $2r_{es}$ 为外钢环外径; $2r_{em}$ 为混凝土环外径; $2r_{im}$ 为混凝土环内径; $2r_{is}$ 为内钢环内径; H 为混凝土环高度。

1.4 计算理论

1.4.1 动弹性模量

机制砂混凝土在计算每个龄期的徐变时都需要得到对应龄期的动弹性模量。参照欧洲规范来建立混凝土动弹性模量随龄期的函数关系式,见式(1):

$$E_c(t) = \beta_{CT}(t)E_c(28) \quad (1)$$

$$\beta_{CT}(t) = \exp(c_T - c_T \sqrt{28/t}) \quad (2)$$

式中: $E_c(t)$ 为混凝土在龄期 t 时的动弹性模量; $\beta_{CT}(t)$ 为动弹性模量的发展系数; c_T 为与水泥品种等有关的系数; t 为龄期。

采用实际测得的混凝土 7 d 和 28 d 的弹性模量为指标来计算任一龄期的动弹性模量,见式(3):

$$\beta_{CT}(7) = \frac{E_c(7)}{E_c(28)} \quad (3)$$

式中: $E_c(7)$ 和 $E_c(28)$ 混凝土龄期为 7 d 和 28 d 时的动弹性模量。

1.4.2 自收缩

试验可得机制砂混凝土试块 t 时刻的收缩值(含温度应变),见式(4):

$$\varepsilon_{tot}(t) = \frac{l_0 - l_t}{l_b} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{tot}(t)$ 为总收缩; l_b 为试块标距; l_0 为初始值,mm; l_t 为 t 时刻的值,mm。

机制砂混凝土自收缩不包括因温度变化而引起的应变,需总收缩中的温度应变减去,才能得到机制砂混凝土的自收缩,见式(5):

$$\varepsilon_{as}(t) = \varepsilon_{tot}(t) - \varepsilon_T \quad (5)$$

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_{as}(t)$ 为自收缩; ε_T 为由温差引起的收缩值; α 为热膨胀系数; ΔT 为温度差。

1.4.3 拉伸徐变计算方法

在圆环收缩约束实验中,混凝土环的弹性应变 $\varepsilon_e(t)$ 、钢环与混凝土环同步收缩应变 $\varepsilon_{st}(t)$ 、混凝土环的拉伸徐变 $\varepsilon_{cp}(t)$ 以及自收缩 $\varepsilon_{as}(t)$ 之间的关系如图 3 所示。

从图 3 中可以得到混凝土环的弹性应变 $\varepsilon_e(t)$ 、钢环与混凝土环同步收缩应变 $\varepsilon_{st}(t)$ 、混凝土环的拉伸徐变 $\varepsilon_{cp}(t)$ 以及自收缩 $\varepsilon_{as}(t)$ 之间的关系,见

式(7):

$$\varepsilon_{as}(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cp}(t) + \varepsilon_{st}(t) \quad (7)$$

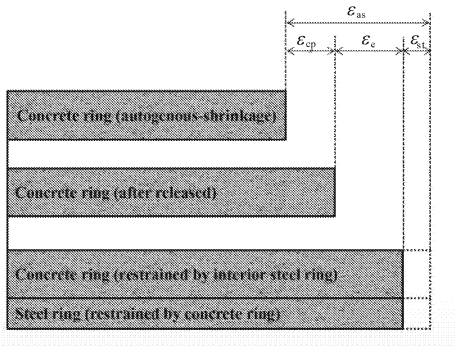


图3 圆环约束收缩试验应变示意图

在圆环约束收缩实验中,假定混凝土环与内钢环之间接触可靠,可同步变形。混凝土环的弹性应变可由式(8)求得:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma_m(t)}{E_c(t)} = \frac{E_{st} h_{st}}{h_m E_c(t)} \varepsilon_{st}(t) \quad (8)$$

$$\sigma_m(t) = \frac{h_{st}}{h_m} \sigma_s(t) = \frac{E_{st} h_{st}}{h_m} \varepsilon_{st}(t) \quad (9)$$

式中: $\sigma_m(t)$ 为混凝土环在龄期 t 时所受到的环向拉应力; $\sigma_s(t)$ 为内钢环在龄期 t 时所受到的环向拉应力; E_{st} 为内钢环的弹性模量(195 GPa); h_{st} 为内钢环厚度; h_m 为混凝土环厚度; $\varepsilon_{st}(t)$ 为内钢环应变。根据公式(7)、式(8)可得到混凝土基本拉伸徐变的计算公式(10):

$$\varepsilon_{cp}(t) = \varepsilon_{as}(t) - \left(\frac{E_{st} h_{st}}{E_c(t) h_m} + 1 \right) \varepsilon_{st}(t) \quad (10)$$

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度试验

试验测得的5组机制砂混凝土28 d的抗压强度如图4所示。由图4可知,随石粉掺量的增加,混凝土28 d抗压强度逐步增大。当石粉掺量为24%时,抗压强度最大,与未掺石粉相比提高了23.5%。石粉具有填充效应,石粉的加入影响水泥浆体微结构的孔径几何分布,改善混凝土内部水泥石细微观结构特征,使其孔隙变细小、均匀,结构更加致密,从而使得混凝土获得更高的强度^[16]。

2.2 弹性模量试验

试验测得各组机制砂混凝土7 d和28 d的弹性模量结果,如图5所示。由图5可知,在各个龄期,机制砂混凝土弹性模量随石粉掺量的增加而增大。当石粉掺量为24%时,机制砂混凝土弹性模量最

高,比不掺石粉时相应龄期的机制砂混凝土弹性模量分别提高了23.71%和36.73%。

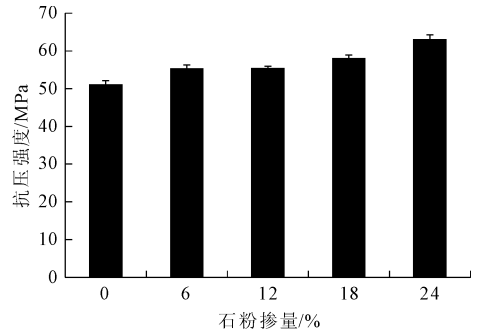


图4 不同石粉掺量机制砂混凝土的抗压强度

已知机制砂混凝土7 d和28 d的弹性模量(见图5),可根据式(3)中计算得到 $\beta_{CT}(7)$ 代入式(2)可得到 c_T ,由式(2)得到动弹性模量发展系数,并将其代入式(1)可得到任意龄期的动弹性模量。图6为混凝土动弹性模量的计算拟合曲线。

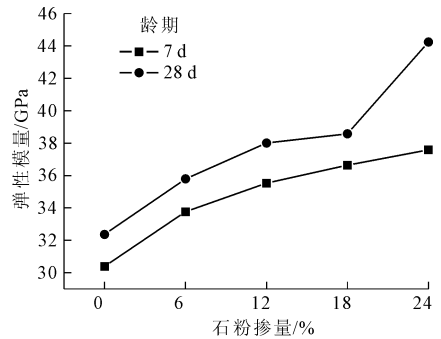


图5 不同石粉掺量机制砂混凝土的弹性模量

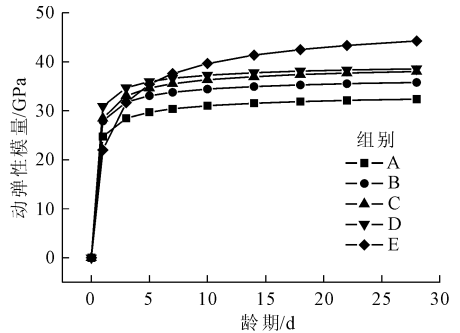


图6 不同石粉掺量机制砂混凝土动弹性模量拟合

2.3 自收缩试验

根据温度传感器测得的机制砂混凝土内部温度场的变化如图7所示。由图7可知,随着龄期的增加,各组机制砂混凝土内部温度场变化趋势基本一致,均是先增大后降低,最后趋于稳定。

已知混凝土内部温度的变化(见图7),根据式(5)可求得不同石粉掺量的机制砂混凝土自收缩,

见图 8。由图 8(a)可知,随着龄期的增加,各组机制砂混凝土的自收缩均增大,主要是因为随着龄期的增加,水泥水化反应逐渐充分,消耗水量逐渐增大,毛细管内部形成弯液面导致的^[27]。

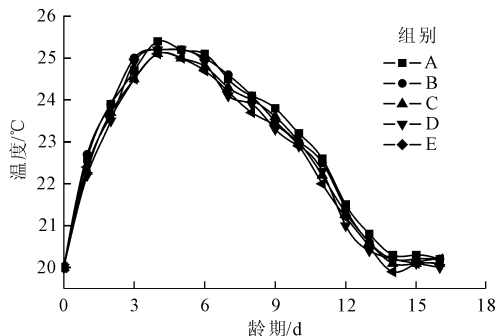
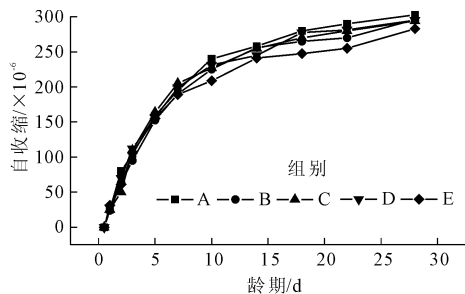
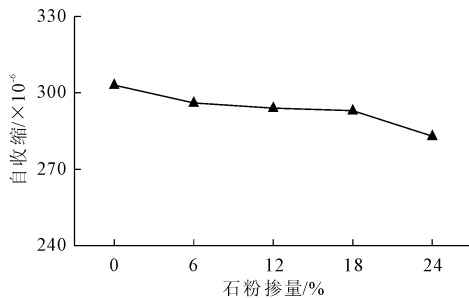


图 7 内部温度场

由图 8(b)可知,随着石粉掺量的增大,龄期为 28 d 时,机制砂混凝土的自收缩呈降低趋势,掺量为 24%,自收缩最小。自收缩的下降主要和以下因素有关:(1) 石粉掺量增加,水泥用量减少,水泥的水化产物数量降低,其化学收缩降低;(2) 石粉的微集料填充作用也会减少毛细孔数量,从而减少机制砂混凝土的自收缩^[28]。



(a) 混凝土自收缩



(b) 石粉掺量对自收缩的影响(28 d)

图 8 不同石粉掺量的机制砂混凝土自收缩

2.4 圆环约束收缩试验

试验采集到不同石粉掺量的机制砂混凝土内钢环应变随龄期的变化规律如图 9 所示。由图 9 可知,内钢环应变在 28 d 龄期内均未出现应变突变,说明机制砂混凝土环未开裂。不同石粉掺量的机制

砂混凝土内钢环应变的变化趋势基本相同,呈现早期发展迅速、后期发展减缓。随着石粉掺量的增加,机制砂混凝土的内钢环压应变先增大后减小,而且石粉掺量为 18% 时,机制砂混凝土的内钢环压应变值最大。

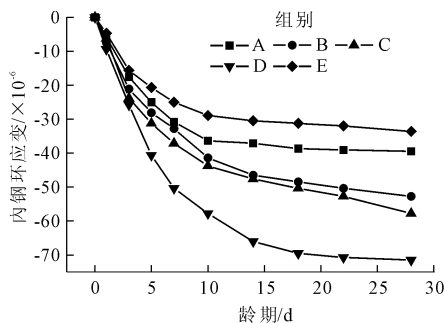


图 9 不同石粉掺量机制砂混凝土的内钢环应变

根据式(9),可由图 9 的内钢环应变求得机制砂混凝土环的环向拉应力(见图 10)。由图 9 可知,机制砂混凝土的环向拉应力的变化规律与内钢环应变相似,随着石粉掺量的增加,机制砂混凝土的环向拉应力先增大后减小,而且任意时刻,机制砂混凝土的环向拉应力大小排序为:D > C > B > A > E。

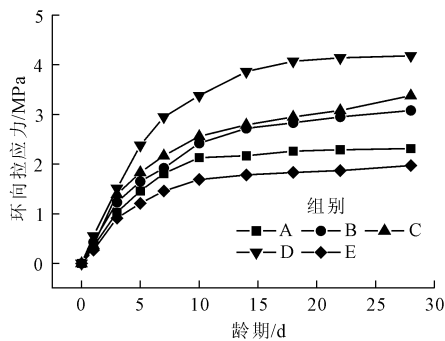


图 10 不同石粉掺量机制砂混凝土的环向拉应力

2.5 机制砂混凝土的基本拉伸徐变

机制砂混凝土自收缩试验和环形约束试验都是在密封条件下进行的,所以研究的是机制砂混凝土的基本拉伸徐变。根据式(8)计算得到圆环约束试验中机制砂混凝土的弹性应变,见图 11。由图 11 可知,不同石粉掺量的机制砂混凝土弹性应变的变化趋势基本相同,呈现早期发展迅速、后期发展减缓。随着石粉掺量的增加,机制砂混凝土的弹性应变先增大后减小,其中石粉掺量为 18% 时,机制砂混凝土的弹性应变最大。

已知机制砂混凝土的弹性应变(见图 11),可根据式(10)计算得到不同石粉掺量机制砂混凝土基本拉伸徐变的变化规律,见图 12。由图 12 可知,不

同石粉掺量的机制砂混凝土基本拉伸徐变的变化趋势与其弹性应变相似,呈现早期发展迅速、后期发展减缓的趋势。

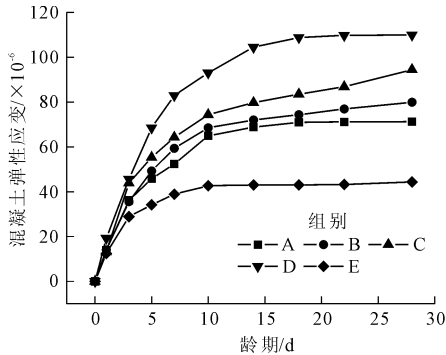


图 11 不同石粉掺量机制砂混凝土的弹性应变

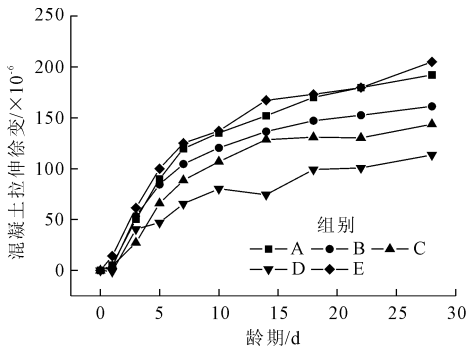


图 12 不同石粉掺量机制砂混凝土的拉伸徐变

同时,随着石粉掺量的增加,机制砂混凝土的基本拉伸徐变先减小后增大,且石粉掺量为 18% 时,机制砂混凝土的基本拉伸徐变最小;石粉掺量为 24% 时,基本拉伸徐变最大,其基本拉伸徐变曲线略高于未掺石粉的机制砂混凝土(A 组)。造成这种现象的原因是:当石粉掺量小于 18% 时,随着石粉掺量的增加,石粉的填充作用改善机制砂混凝土的界面结构和孔结构,根据渗出理论和黏性流动理论,界面结构增强及结构密实度的增强,使硬化水泥浆体的变形能传递到粗骨料,从而降低机制砂混凝土的基本拉伸徐变^[15-16]。石粉掺量大于 18% 时,虽然机制砂混凝土的自收缩减小,但由于石粉掺量过多,使机制砂混凝土界面结构变得薄弱,硬化水泥浆体的变形较难转移到粗骨料,导致机制砂混凝土的拉伸徐变逐渐增大^[15]。

3 结 论

(1) 机制砂混凝土 28 d 弹性模量随石粉掺量的增加而增大,当石粉掺量为 24% 时,机制砂混凝土的弹性模量最大,比未掺石粉的提高了 36.73%。

同样,其抗压强度的变化规律与弹性模量相同,当石粉掺量为 24% 时,抗压强度最大,与未掺石粉相比提高了 23.5%。石粉的掺加,改善了混凝土水泥石的微观结构,使得混凝土的力学性能增强。

(2) 石粉掺量小于 18% 时,随着石粉掺量的增加,混凝土的界面结构改善,硬化水泥浆体的变形能较快转移到粗骨料,其基本拉伸徐变减小;掺量大于 18% 时,石粉掺量过多使机制砂混凝土界面结构变得薄弱,硬化水泥浆体的变形较难转移到粗骨料,其拉伸徐变增大。因此,石粉掺量为 18% 时,其基本拉伸徐变最小。

参考文献:

- [1] 凌建军. 高强度玄武岩机制砂混凝土抗压强度及非线性预测模型研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(3): 124-130.
- [2] 孙胜伟. 石粉含量对 C30 和 C50 机制砂混凝土性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 160-163.
- [3] Kim H J, Kim N W. Enhancement of mechanical property of concrete structure using the macro and micro steel fibers[J]. American Journal of Civil Engineering, 2020, 8(1): 1-9.
- [4] Dang J, Zhao J, Miao W, et al. Effect of superabsorbent polymer on the shrinkage and crack resistance of concrete at early age[J]. Iranian Polymer Journal, 2018, 27(5): 349-358.
- [5] 赵人达, 成正清, 文甜, 等. 早龄期低钙粉煤灰基地聚合物混凝土拉伸徐变特性[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 111-117.
- [6] Khan I, Xu T, Castel A, et al. Early-age tensile creep and shrinkage-induced cracking in internally restrained concrete members[J]. Magazine of Concrete Research, 2019, 71(22): 1167-1179.
- [7] Zhao Z, Wang K, Lange D A, et al. Creep and thermal cracking of ultra-high volume fly ash mass concrete at early age[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 191-202.
- [8] 汪伦焰, 郭磊, 郭利霞. 混凝土早龄期拉伸徐变影响因素敏感性分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 896-900.
- [9] 汪建群, 吕鹏, 许巧, 等. 混凝土徐变计算模型及其实用性评述[J]. 工程力学, 2017, 35(S1): 156-160.
- [10] 赵志方, 钟阳峰, 李新宇, 等. 大坝混凝土早龄期变温条件下拉伸徐变研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(8): 46-54.
- [11] 魏亚, 梁思明, 郭为强. 基于水化度和约束状态下拉伸徐变特征的早龄期混凝土内应力预测[J]. 建筑

