

基于灰靶决策优化的玄武岩纤维混凝土配合比设计及其阻裂增韧性能评价

边旭辉¹, 申爱琴², 连城¹, 李悦², 杜清鑫²

(1. 陕西省高速公路建设集团公司古镇高速公路建设管理处, 陕西 汉中 723500;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室)

摘要:为得到阻裂增韧性能优异的玄武岩纤维桥梁混凝土,在配合比设计时,基于灰靶决策优化理论对玄武岩纤维混凝土进行力学与抗裂性能的初步材料性优选,同时通过平板抗裂、干燥收缩、三点弯曲韧性试验研究玄武岩纤维在混凝土塑性阶段、养生期内的阻裂抑缩及后期承荷时的增韧作用规律,综合分析得出在混凝土中阻裂增韧性能最优的玄武岩长度、掺量。试验结果表明:玄武岩纤维能有效延缓塑性裂缝开展时间、降低裂缝面积,对降低失水收缩和改善脆性开裂也极为有利,长度为12 mm、掺量为0.06%的玄武岩纤维混凝土阻裂增韧性能综合最优。

关键词:玄武岩纤维;混凝土;灰靶决策理论;阻裂增韧;收缩

改善水泥混凝土易开裂、抗拉强度低、韧性差的材料缺陷是学者们致力攻克的技术难题之一。现有研究资料表明,将适量纤维掺入混凝土中能改善混凝土脆性,提高抗裂性能。根据纤维在混凝土中的作用可将其分为阻裂纤维和增韧纤维两类。低模量纤维如聚丙烯纤维能在混凝土塑性及早期养护阶段提高其抗拉强度、降低早期开裂的可能性,发挥阻裂效果;高模量纤维如钢纤维在混凝土中主要在后期承荷阶段通过传递和分散内部拉应力、降低裂缝尖端处应力强度因子,起到增韧作用。

玄武岩纤维是一种无机硅酸盐纤维,它具有化学稳定性优异、与水泥混凝土相容性优良、抗拉强度高等突出优势。同时,玄武岩纤维模量与强度介于钢纤维与合成纤维之间,理论上兼具阻裂与增韧能力。Wonsiri发现玄武岩纤维的掺入能有效降低干缩变形率,究其原因主要在于纤维的微集料效应对内部微结构的改善作用;王新忠采用平板开裂试验评价了不同玄武岩纤维长度及掺量下的混凝土早期抗裂性能,结果表明掺入玄武岩纤维能有效降低裂缝宽度和面积,长度18 mm、掺量0.02%的玄武岩混凝土已基本无裂缝;邱英勤通过早期开裂试验对玄武岩纤维高性能混凝土的抗裂性能进行研究,发现玄武岩纤维的掺入能

延长初裂时间和裂缝贯穿时间,裂缝面积最高可降低59.29%;董进秋从吸能与能量释放角度对玄武岩纤维混凝土抗冲击韧性机理进行阐明,总结为玄武岩纤维能通过桥联裂缝延缓裂缝开展的驱动作用,同时还能将新裂缝开展释放的能量有效传递和分散;Arslan基于三点弯曲试验探究了掺入玄武岩纤维对混凝土弯曲韧性的影响,得出最优纤维掺量为1.2 kg/m³。

目前,关于玄武岩纤维的阻裂与增韧共同作用的系统研究较少,而且在玄武岩混凝土配合比设计时多仅考虑力学与工作性能。基于此,该文将抗裂指标与力学指标共同作为评价参数,在配合比设计时基于灰靶决策理论对玄武岩纤维混凝土进行长度及掺量初步优选。同时,通过早期塑性开裂、干燥收缩、三点弯曲试验系统分析长度及掺量对玄武岩纤维混凝土抗裂及弯曲韧性的影响规律,综合得到力学及阻裂增韧效果最优的玄武岩纤维混凝土。

1 试验概况

1.1 原材料

试验用水泥为普通硅酸盐水泥(42.5R),粗集料为4.75~9.5、9.5~19 mm的天然碎石,试验用砂为

Ⅱ类中砂,细度模数为 2.62,外加剂为 KTPCA 聚羧酸高性能减水剂。

玄武岩纤维选用短切玄武岩纤维,其主要物理性能指标见表 1。

表 1 玄武岩纤维物理力学性能指标

单丝直径/ μm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
21	4 100~4 800	93~110	2 650

1.2 配合比

C40 玄武岩纤维混凝土配合比见表 2。水泥:细集料:粗集料:水:外加剂(质量配合比)=1:1.59:2.59:0.36:0.011。

表 2 C40 玄武岩纤维混凝土配合比

组成材料/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$					水灰比
水泥	细集料	粗集料	水	外加剂	
439	697	1 136	158	4.83	0.36

1.3 试验方案

1.3.1 塑性收缩试验

采用平板约束试验测试玄武岩纤维混凝土在塑性阶段的抗裂性能,塑性收缩装置参考中国西部交通建设项目《道路混凝土组成设计研究》,如图 1 所示。此装置通过在平板底部设置角钢实现对混凝土的开裂诱导作用。试验步骤如下:成型玄武岩纤维混凝土,抹面后在试件表面覆盖保鲜膜 2 h,去除保鲜膜后将整个装置置于温度为 $(25\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 $55\%\pm 5\%$ 的环境中,观测裂缝发展过程。

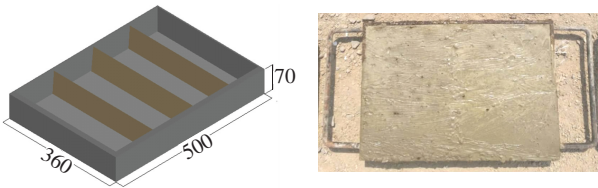


图 1 塑性收缩装置图(单位:mm)

1.3.2 干燥收缩试验

混凝土早期干燥收缩试验参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》。为避免人为测量误差,且能连续采集玄武岩纤维混凝土养生期内的干缩变形值,采用应变采集装置测试混凝土的收缩变形。试验具体步骤如下:拆模养护 3 d 后将混凝土置于温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 60%

$\pm 5\%$ 的环境中,连续监测其收缩变形值。每组混凝土设置 3 个平行试件,收缩变形数据取平均值且变异性需控制在 15%以内。

1.3.3 三点弯曲韧性试验

参考 CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标准》采用三点弯曲试验测试玄武岩纤维混凝土的弯曲韧性,试件为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 的无切口梁,加载装置为静态三思液压式压力试验机,加载速率为 0.02 mm/min 。

2 基于灰靶决策理论的玄武岩纤维长度及掺量优选

表 3 为 3 种玄武岩纤维长度、3 种掺量的玄武岩纤维混凝土的力学及抗裂性能测试结果,其中 28 d 干缩降低率为玄武岩纤维混凝土 28 d 干缩值与基准混凝土干缩值之差除以基准混凝土的干缩值所得,裂缝面积降低率计算同理。

表 3 基准及玄武岩纤维混凝土力学及抗裂性能测试结果

纤维长度/ mm	纤维掺量/ $\%$	28 d 抗压强度/ MPa	28 d 抗折强度/ MPa	28 d 干缩降低率/ $\%$	裂缝面积降低率/ $\%$
0	0	43.40	6.32	0	0
	0.04	53.29	6.41	10.24	50.66
6	0.06	55.08	6.66	12.31	57.83
	0.08	56.44	6.70	10.05	60.29
	0.04	55.21	7.21	9.89	59.87
	0.06	57.18	7.80	11.95	69.29
	0.08	57.93	7.68	9.67	64.57
	0.04	57.24	7.23	3.79	45.24
18	0.06	59.52	7.50	3.22	40.81
	0.08	57.16	7.44	1.64	33.25

由表 3 可知:与基准混凝土相比,玄武岩纤维的掺入能有效提高混凝土的抗压、抗折强度,降低其由失水引起的塑性及干燥收缩,对提高混凝土的抗裂性极为有利。

以 28 d 抗压强度、28 d 抗折强度、28 d 干缩降低率及平板裂缝面积降低率为评价指标对 9 组玄武岩纤维混凝土进行基于灰靶决策理论的长度、掺量优选,计算步骤如下:

(1) 确定决策矩阵

令 r_i 为多极性指标序列, $r_i^{(j)}$ 为模式 i 指标 j 的数据, 即 $r_i^{(j)} = [r_i^{(1)}, r_i^{(2)}, \dots, r_i^{(n)}]$, 其中, $i = 1, 2, 3, 4, \dots, 9, j = 1, 2, 3, 4$ 。其中, 28 d 抗压、抗折强度及干缩降低率、裂缝降低率等参数均具有极大值极性, 因此 $r_0 = \max(r_i^{(j)}) = (59.52, 7.80, 12.31, 69.29)$ 。

则决策矩阵 $R = (r_i^{(j)})_{(n+1) \times m}$ 为:

$$R = \begin{bmatrix} r_0(1) & r_0(2) & r_0(3) & r_0(4) \\ r_1(1) & r_1(2) & r_1(3) & r_1(4) \\ r_2(1) & r_2(2) & r_2(3) & r_2(4) \\ r_3(1) & r_3(2) & r_3(3) & r_3(4) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_9(1) & r_9(2) & r_9(3) & r_9(4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 59.52 & 7.80 & 12.31 & 69.29 \\ 53.29 & 6.41 & 10.24 & 50.66 \\ 55.08 & 6.66 & 12.31 & 57.83 \\ 56.44 & 6.70 & 10.05 & 60.29 \\ 55.21 & 7.21 & 9.89 & 59.87 \\ 57.18 & 7.80 & 11.95 & 69.29 \\ 57.93 & 7.68 & 9.67 & 64.57 \\ 57.24 & 7.23 & 3.79 & 45.24 \\ 59.52 & 7.50 & 3.22 & 40.81 \\ 57.16 & 7.44 & 1.64 & 33.25 \end{bmatrix}$$

(2) 对决策矩阵进行无量纲化处理

利用初值法对决策矩阵进行无量纲化处理, 处理结果为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.8953 & 0.8218 & 0.8318 & 0.8403 \\ 0.9254 & 0.8538 & 1 & 0.9592 \\ 0.9483 & 0.8589 & 0.8164 & 1 \\ 0.9276 & 0.9244 & 0.8034 & 0.9930 \\ 0.9607 & 1 & 0.9708 & 1.1493 \\ 0.9733 & 0.9846 & 0.7855 & 1.0710 \\ 0.9617 & 0.9269 & 0.3079 & 0.7504 \\ 1 & 0.9615 & 0.2616 & 0.6769 \\ 0.9603 & 0.9538 & 0.1332 & 0.5515 \end{bmatrix}$$

(3) 计算靶心距

靶心距计算公式为: $SD = \sqrt{(r_i^1 - r_0^1)^2 + (r_i^2 - r_0^2)^2 + \dots + (r_i^j - r_0^j)^2}$; 靶心距计算结果见表 4。

由表 4 可知: 纤维长度 12 mm、掺量 0.06% 的玄武岩纤维混凝土靶心距最小, 兼具力学与抗裂性能。在后续的研究中, 将在最优掺量的基础上小幅变化掺量, 深入研究不同玄武岩纤维长度、掺量下混凝土的塑

性收缩、干燥收缩性能及弯曲韧性, 综合评价玄武岩纤维的掺入对混凝土的抗裂性能与韧性改善效果。

表 4 不同玄武岩纤维混凝土靶心距计算结果

纤维长度/mm	纤维掺量/%	SD
6	0.04	0.310 648
	0.06	0.169 090
	0.08	0.237 216
12	0.04	0.222 850
	0.06	0.157 110
	0.08	0.222 840
18	0.04	0.740 370
	0.06	0.806 940
	0.08	0.977 830

3 玄武岩纤维混凝土阻裂增韧性能评价

3.1 玄武岩纤维混凝土早期塑性开裂性能

通过平板试验开展不同玄武岩纤维长度及掺量下混凝土的早期塑性开裂试验, 如图 2 所示。结合 Matlab 软件对裂缝图像进行二值化处理并计算裂缝面积, 裂缝宽度采用裂缝对比卡测量得到。玄武岩纤维早期塑性开裂试验特征参数如表 5 所示。

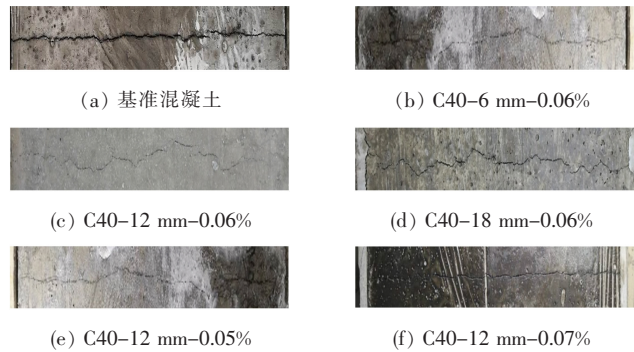


图 2 基准与玄武岩纤维混凝土早期裂缝开展图

结合图 2 及表 5 中基准混凝土与玄武岩纤维混凝土的裂缝图片及特征参数分析可知: 掺入玄武岩纤维能显著降低裂缝宽度和裂缝面积, 这主要是由于在塑性阶段, 混凝土自身强度还未形成, 随机分散的玄武岩纤维能提高凝结硬化期内混凝土的抗拉强度, 降低开裂的可能。

由表 5 可知: 玄武岩纤维的掺入能延缓初裂及裂缝贯穿时间, 还能显著降低裂缝宽度及裂缝总面积。分析原因在于混凝土塑性开裂主要为表面水分蒸发速

表 5 基准及玄武岩纤维混凝土早期裂缝开展特征参数

混凝土类型	初裂 时间/ min	裂缝贯 穿时 间/min	最大裂 缝宽 度/mm	裂缝总 面积/ mm ²
C40-J	108	214	2.1	1185
C40-6 mm-0.06%	135	244	0.7	499
C40-12 mm-0.06%	147	265	0.5	364
C40-18 mm-0.06%	122	239	1.1	701
C40-12 mm-0.05%	130	251	0.7	590
C40-12 mm-0.07%	141	259	0.9	618

度超过了内部泌水速度,造成了混凝土内部毛细孔压力增大。玄武岩纤维由于表面亲水,水分可沿纤维表面输送至混凝土表面,即增加了水分输送通道数量,因此改善了塑性开裂性能。同时,相同玄武岩纤维掺量下,随着纤维长度增大,纤维混凝土的裂缝宽度及总面积均呈现先降低后升高的趋势。长度为 12 mm 的玄武岩纤维混凝土降低塑性开裂效果最优,其裂缝总面积可降低至基准混凝土的 69.29%。相同掺量下,增加纤维长度至 18 mm,纤维数量减少,同时纤维搭接缠绕会减少水分传输路径长度,因而阻裂效果会小幅下降。固定纤维长度为 12 mm,随着纤维掺量的增加,玄武岩纤维混凝土初裂时间及裂缝贯穿时间延长,裂缝宽度和裂缝总面积相差不大。总体来说,玄武岩纤维的掺入对减少混凝土由于表面水分蒸发过快引起的塑性收缩效果显著。

3.2 玄武岩纤维混凝土干燥收缩性能

不同玄武岩纤维长度及掺量下混凝土的收缩变形发展曲线如图 3 所示。

由图 3(a)可以看出:混凝土的收缩变形曲线随养护时间增加逐渐趋于平缓,说明干燥收缩主要发生在养护前期。相同掺量下,纤维长度 12 mm 的混凝土收缩变形最小,其次为 6 mm,长度为 18 mm 的玄武岩纤维混凝土收缩变形值最大。造成这一现象的原因主要在于相同掺量下,纤维长度越小,数量则越多。由于玄武岩纤维表面能值较大,极易吸附水分子,在混凝土受到外部环境变化造成水分迁移时,部分自由水被吸附在纤维表面,引起更大的收缩变形。而 18 mm 的玄武岩纤维由于长度较长,在混凝土中易发生无效搭接和缠绕,造成纤维分散收缩应力作用减弱,因而收缩变形值相应较大。

由图 3(b)可以看出:随纤维掺量增加,混凝土 28 d 收缩变形总量呈现先降低后升高的趋势。当玄武岩

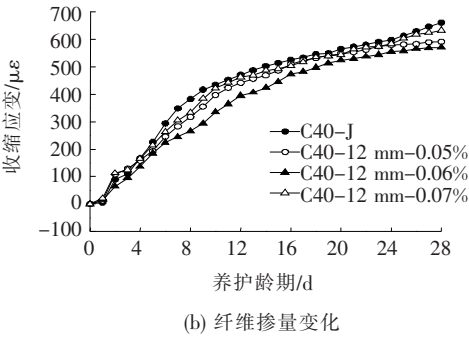
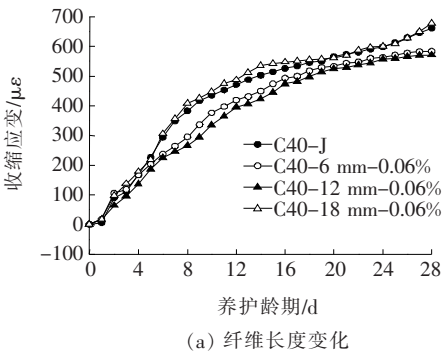


图 3 玄武岩纤维混凝土干燥收缩变形

纤维掺量由 0.05% 升至 0.06% 时,在混凝土内部起到分散收缩应力的有效纤维数量增加,继续增加掺量至 0.07%,纤维吸附自由水量增加,因而整体收缩值相应增加。

3.3 玄武岩纤维混凝土弯曲韧性

玄武岩纤维混凝土弯曲韧性试验结果见图 4、表 6。

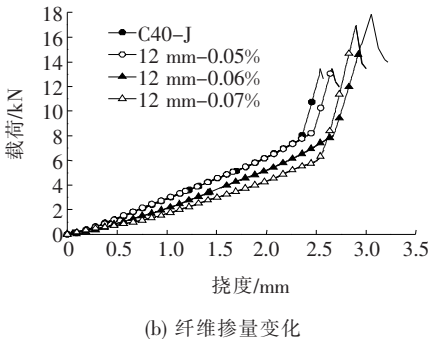
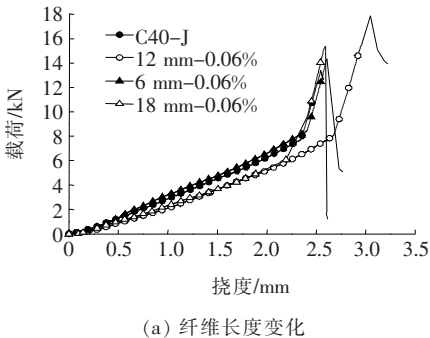


图 4 基准及玄武岩纤维混凝土荷载—挠度曲线

表6 基准及玄武岩纤维混凝土荷载—挠度曲线特征参数

混凝土类型	峰值荷载/kN	峰值挠度/mm
C40—J	13.43	2.54
12 mm—0.05%	13.30	2.75
12 mm—0.06%	17.85	3.05
12 mm—0.07%	16.91	2.90
6 mm—0.06%	14.40	2.65
18 mm—0.06%	15.37	2.59

由图4可以看出:①随荷载不断增加,玄武岩纤维混凝土变形曲线发展缓慢,充分证明了玄武岩纤维在混凝土中的吸能作用,在达到峰值荷载后,基准混凝土迅速下降,而玄武岩纤维混凝土的曲线下降段斜率趋于延缓;②玄武岩纤维的加入能提高混凝土破坏的峰值荷载、增大混凝土在峰值破坏荷载下的挠度变形,提高混凝土的弯曲韧性。由表6可知:相同纤维掺量下,随着纤维长度增加,混凝土的峰值荷载呈现先升高后降低的趋势,其中12 mm玄武岩纤维长度的混凝土所能承受的峰值破坏荷载最大,较基准组提高约32.9%。长度为18 mm的玄武岩纤维混凝土的弯曲韧性优于6 mm的纤维混凝土,这主要是由于纤维长度过短难以在混凝土中形成网状结构,其桥接裂缝、传递分散应力及能量的作用相应减弱。当纤维长度固定为12 mm时,随着纤维掺量增加,混凝土峰值荷载同样呈现先增大后降低的趋势,掺量为0.07%的玄武岩纤维混凝土的峰值荷载稍有下降,但整体与掺量为0.06%的纤维混凝土相差不大。

4 结论

- (1) 基于灰靶决策对玄武岩纤维长度、掺量进行力学与抗裂性能优选,得到最优玄武岩纤维长度、掺量分别为12 mm、0.06%。
- (2) 玄武岩纤维的掺入对混凝土早期塑性和干缩裂缝均有显著降低作用,随纤维长度及掺量增加,玄武岩纤维混凝土裂缝宽度、总面积及干缩应变均呈现先减低后升高的变化规律。
- (3) 玄武岩纤维的掺入能延缓混凝土到达峰值荷

载后的破坏过程,提高混凝土受弯拉时的峰值荷载及破坏挠度。

(4) 综合分析不同玄武岩纤维长度、掺量的混凝土的塑性开裂、干缩性能及弯曲韧性,得到阻裂增韧效果最优的玄武岩纤维长度、掺量分别为12 mm、0.06%。

参考文献:

[1] Ralegaonkar R,Gavali H,Aswath P,et al. Application of Chopped Basalt Fibers in Reinforced Mortar: A Review [J]. Construction and Building Materials,2018,164:589—602.

[2] 冯仲仁,黄隆洋,郭蒙蒙,等. 不同钢纤维掺入率的混凝土疲劳试验研究[J]. 中外公路,2018(2).

[3] 于景超. 合成纤维与膨胀剂对桥梁流态高性能混凝土初期开裂的控制作用[J]. 公路,2012(9).

[4] Akcay B,Tasdemir M A. Mechanical Behaviour and Fibre Dispersion of Hybrid Steel Fibre Reinforced Self—Compacting Concrete[J]. Construction & Building Materials, 2012,28(1):287—293.

[5] Wonsiri P,Wunchock K,Adam S,et al. Mechanical Properties, Microstructure and Drying Shrinkage of Hybrid Fly Ash—Basalt Fiber Geopolymer Paste[J]. Construction and Building Materials,2018,186:62—70.

[6] 王新忠,李传习,凌锦育,等. 玄武岩纤维混凝土早期裂缝试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017(11).

[7] 邱英勤,陈峰. 玄武岩纤维高性能混凝土早期抗裂性能试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017(4).

[8] 董进秋,杜艳廷,闻宝联,等. 玄武岩纤维混凝土力学性能与增韧机理研究[J]. 工业建筑,2011(S1).

[9] Arslan,Emin M. Effects of Basalt and Glass Chopped Fibers Addition on Fracture Energy and Mechanical Properties of Ordinary Concrete: CMOD Measurement[J]. Construction and Building Materials,2016,114:383—391.

[10] Branston J,Das S,Kenno S Y,et al. Influence of Basalt Fibres on Free and Restrained Plastic Shrinkage[J]. Cement and Concrete Composites,2016,74:182—190.

[11] 展宏图,柳力. 玄武岩纤维/橡胶复合改性沥青胶浆路用性能研究[J]. 中外公路,2020(1).

[12] 樊兴华,薛振华. 大温差地区掺玄武岩纤维低标号沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2020(5).