

PVA 纤维水泥稳定碎石力学性能及 耐久性能研究

冯仲文

(中铁十八局集团第五工程有限公司,天津 300453)

摘要: 为改善水泥稳定碎石力学及耐久性能,研究了不同 PVA 纤维长度与掺量下水泥稳定碎石系列力学性能,确定了 PVA 纤维最佳掺配长度及掺量。在此基础上,借助冻融循环与疲劳试验,研究了普通水泥稳定碎石与 PVA 纤维水泥稳定碎石耐久性能差异。结果表明:随着 PVA 纤维长度或掺量的增大,PVA 纤维水泥稳定碎石系列力学性能均先增大后减小;长度 12 mm、掺量 0.9 kg/m^3 的 PVA 纤维水泥稳定碎石综合性能最佳;28 d 龄期时,在冻融 5、10、15 次后,长度 12 mm、掺量 0.9 kg/m^3 的 PVA 纤维水泥稳定碎石抗压强度保持率为 90.21% ~ 84.39%;长度 12 mm、掺量 0.9 kg/m^3 的 PVA 纤维水泥稳定碎石在应力强度比为 0.7 ~ 0.8 下,疲劳寿命提升了 135.29% ~ 175.01%。

关键词: 道路工程;PVA 纤维;水泥稳定碎石;力学性能;耐久性能

中图分类号: TU414

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.06.009

Study on the Mechanical Properties and Durability of PVA Fiber Cement Stabilized-macadam

FENG Zhongwen

(China Railway 18th Bureau Group No.5 Engineering Co.,Ltd.,Tianjin 300453,China)

Abstract: To improve the mechanical and durability properties of cement stabilized-macadam, the evolution law of series mechanical properties of cement stabilized-macadam with different PVA fiber length and dosage were investigated, and the optimum length and dosage of PVA fiber were determined. On this basis, the difference in durability between ordinary cement-stabilized macadam and PVA fiber cement-stabilized macadam was studied by means of freeze-thaw cycle and fatigue test. The results show that the series mechanical properties of PVA fiber cement stabilized-macadam increase and then decrease with the increase of PVA fiber length or dosage. Compared with the other test schemes, the comprehensive performance of PVA fiber cement stabilized-macadam with 12 mm length and 0.9 kg/m^3 dosage is the best. At 28 d, after 5, 10 and 15 freeze-thaw cycles, the compressive strength retention rate of PVA fiber cement stabilized-macadam with 12 mm length and 0.9 kg/m^3 dosage is 90.21% ~ 84.39%. The fatigue life of PVA fiber cement stabilized-macadam with 12 mm length and 0.9 kg/m^3 dosage increases by 135.29% ~ 175.01% under 0.7 ~ 0.8 stress intensity ratio.

Key words: road engineering;PVA fiber;cement stabilized-macadam;mechanical property;durability

水泥稳定碎石基层在强度、抗冻性等方面颇具优势,但其刚度偏大,变形能力较差,在行车荷载作用下,路面易产生裂缝,严重制约道路服役性能及寿命周期^[1-3]。近年来,部分学者在水泥稳定碎石中添加 PVA 纤维以改善其抗裂性能的研究引起了广泛关注^[4-6]。

现阶段关于 PVA 纤维水泥稳定碎石研究主要集中于 PVA 纤维长度及掺量等因素对水泥稳定碎石力学及耐久性能的影响,而合理的材料组成是提高水泥稳定碎石性能与经济效益兼具的关键。Yuan 等^[7]设计了系列 PVA 纤维掺量下水泥稳定碎石劈裂试验,当纤维掺量为 0.9 kg/m^3 时,其 28 d 劈裂强度达 0.59 MPa ,是普通水泥稳定碎石的 1.3 倍。Zhao 等^[8]研究了系列 PVA 纤维长度下水泥稳定碎石力学性能,当纤维长度为 $12 \sim 24 \text{ mm}$ 时,PVA 纤维水泥稳定碎石的抗压强度和劈裂强度增幅达到最大。Zhao 等^[9]探究了系列水泥掺量对 PVA 纤维水泥稳定碎石弯曲拉伸强度的影响,发现水泥掺量为 3.6% 时,其弯曲拉伸强度是普通水泥稳定碎石的 1.05 倍。Tan 等^[10]探究了 PVA 纤维水泥稳定碎石的低温残余韧性,发现其残余抗弯强度是普通水泥稳定碎石的 1.03 倍。熊延华等^[11]探究了 PVA 纤维水泥稳定碎石疲劳性能,发现掺入 PVA 纤维的水泥稳定碎石疲劳性能获得显著改善。李燕军^[12]开展了不同温度区间下 PVA 纤维水泥稳定碎石温缩试验,发现掺入 PVA 纤维后,水泥稳定碎石温缩系数降低了 26.1% ~ 52.3%。袁龄卿等^[13]研究了 PVA 纤维分散性对水泥稳定碎石性能的影响,发现粉煤灰能够优化 PVA 纤维的分散程度,这对提升其性能具有积极作用。俞靖洋等^[14]研究了 PVA 纤维水泥稳定碎石疲劳性能,发现当层间摩擦系数为 0.5 时,其疲劳寿命是普通水泥稳定碎石的 134.5%。曹源文等^[15]建立了 PVA 纤维在水泥稳定碎石中分散性的评价方法,发现图像处理技术能够准确、有效地评价 PVA 纤维均匀性。综上所述,很多学者已探究了 PVA 纤维长度及掺量等因素对水泥稳定碎石性能影响规律,并取得了一定成果,但水泥稳定碎石用 PVA 纤维长度及掺量有待明确,且针对 PVA 纤维水泥稳定碎石耐久性能的研究有待深入。

本文探究不同 PVA 纤维长度与掺量下水泥稳定碎石系列力学性能演变规律,明确 PVA 纤维最佳掺配长度及掺量。在此基础上,借助冻融循环及疲劳试验,研究普通水泥稳定碎石与 PVA 纤

维水泥稳定碎石耐久性能差异,以期 PVA 纤维水泥稳定碎石基层进一步推广应用奠定基础。

1 试验部分

1.1 试验材料

选用 P·O 42.5 级硅酸盐水泥,集料采用石灰岩,PVA 纤维相关技术参数见表 1。采用溴环丙烷对 PVA 纤维进行改性处理,以调控其与水泥稳定碎石基体间的作用力。

依据 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》^[16],水泥稳定碎石级配采用 C-B-3。根据试验结果,其最大干密度为 2.3 g/cm^3 ,最佳含水率为 4.2%。

表 1 PVA 纤维相关参数

Table 1 Parameters of PVA fiber

颜色	直径/ μm	弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa
淡黄色	1.30	≥ 35	≥ 1200

1.2 试验方法

1.2.1 力学性能试验方法

依据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[17]中的 T0805—1994、T0808—1994 与 T0806—1994 试验方法,测试不同工况下水泥稳定碎石试件的无侧限抗压强度、抗压回弹模量、劈裂强度。

1.2.2 耐久性能试验方法

依据文献^[17]中的 T0858—1994 与 T0856—1994 试验方法,测定冻融循环后水泥稳定碎石试件抗压强度和不同应力水平下水泥稳定碎石试件疲劳寿命。

2 结果与讨论

2.1 PVA 纤维水泥稳定碎石力学性能

2.1.1 PVA 纤维长度对力学性能影响

为明晰不同 PVA 纤维长度工况下水泥稳定碎石系列力学性能差异,设计 PVA 纤维掺量为 0.9 kg/m^3 ,优选 6、12、24 mm 三种 PVA 纤维长度,并增设普通水泥稳定碎石作为试验对照组,基于系列力学性能试验,探究不同 PVA 纤维长度下水泥稳定碎石力学性能变化规律。

1) 无侧限抗压强度

为研究不同 PVA 纤维长度下水泥稳定碎石无侧限抗压强度演变规律,测定 7、28、90 d 龄期

下无侧限抗压强度,结果如图 1 所示。

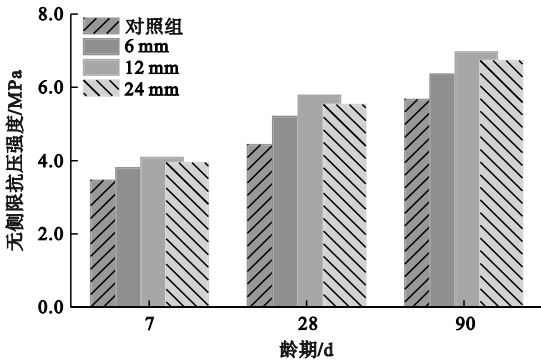


图 1 PVA 纤维长度对水泥稳定碎石无侧限抗压强度影响

Fig. 1 Effect of PVA fiber length on unconfined compressive strength of cement stabilized-macadam

由图 1 可知,各龄期下,普通水泥稳定碎石的无侧限抗压强度均由于掺入不同长度 PVA 纤维而获得不同程度提升。以 7 d 龄期为例,PVA 纤维长度分别为 6、12、24 mm 时,无侧限抗压强度分别为 3.81、4.08、3.95 MPa,相较于普通水泥稳定碎石,PVA 纤维水泥稳定碎石无侧限抗压强度分别提升了 10.42%、18.35%、14.51%。若将其作为沥青路面底基层材料和基层材料,可满足 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[18]中高速公路和一级公路中轻交通无侧限抗压强度 3~5 MPa 的要求。分析认为,PVA 纤维在水泥稳定碎石承载变形过程中起传递应力和减缓变形的作用,从而提高了水泥稳定碎石无侧限抗压强度。此外,相较于 6、24 mm PVA 纤维,12 mm PVA 纤维抗压强度提升程度最大。这是因为 PVA 纤维较短或较长时,其桥接作用存在局限或分散性较差,出现团聚现象,导致其对水泥稳定碎石无侧限抗压强度提升程度有限。

2) 抗压回弹模量

为研究不同 PVA 纤维长度下水泥稳定碎石抗压回弹模量演变规律,测定 7、28、90 d 龄期下抗压回弹模量,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,各龄期下,普通水泥稳定碎石的抗压回弹模量均由于掺入不同长度 PVA 纤维而获得不同程度提升。以 28 d 龄期为例,PVA 纤维长度分别为 6、12、24 mm 时,抗压回弹模量较普通水泥稳定碎石分别提高了 11.53%、16.21%、13.84%,表明 PVA 纤维有效改善了水泥稳定碎石变形能力。原因是 PVA 纤维在水泥稳定碎石中的桥接作用可以抵抗部分荷载,且 PVA 纤维具有高强高模特性,可在应力消失时增强水泥稳定

碎石恢复变形能力,从而提高荷载作用下的变形恢复能力。28 d 时,12 mm PVA 纤维较其余长度纤维,其水泥稳定碎石抗压回弹模量更高。由此可得,12 mm PVA 纤维能保证 PVA 纤维在水泥稳定碎石中桥接作用的充分发挥,使水泥稳定碎石表现出较强的抗压恢复变形能力。

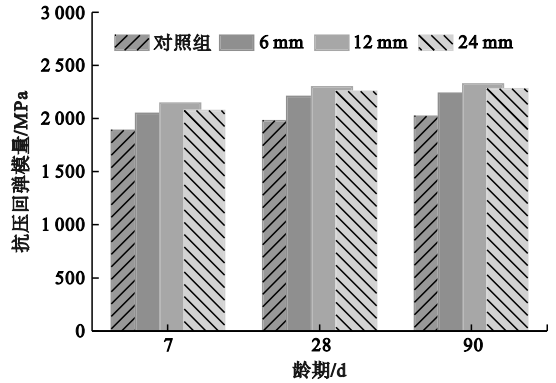


图 2 PVA 纤维长度对水泥稳定碎石抗压回弹模量影响

Fig. 2 Effect of PVA fiber length on compressive resilient modulus of cement stabilized-macadam

3) 劈裂强度

为研究不同 PVA 纤维长度下水泥稳定碎石劈裂强度演变规律,测定 7、28、90 d 龄期下劈裂强度,结果如图 3 所示。

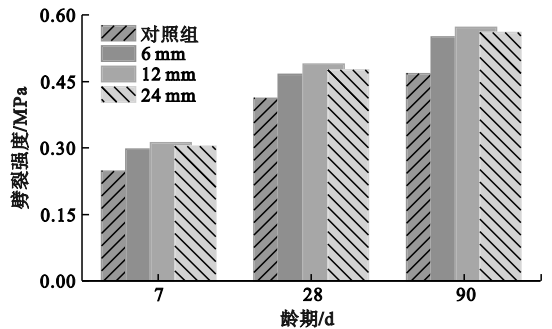


图 3 PVA 纤维长度对水泥稳定碎石劈裂强度影响

Fig. 3 Effect of PVA fiber length on splitting strength of cement stabilized-macadam

由图 3 可知,PVA 纤维的掺入使得水泥稳定碎石劈裂强度显著提升,且提升规律与抗压强度类似。以 90 d 龄期为例,6、12、24 mm PVA 纤维水泥稳定碎石劈裂强度分别为普通水泥的 1.18 倍、1.22 倍、1.20 倍。这是因为 PVA 纤维在水泥稳定碎石结构中与水泥石基体间的摩擦阻力大大提升了材料间接抗拉应力,且 PVA 纤维的高强高模特性可以有效缓解应力,使得水泥稳定碎石在长期环境因素及行车荷载下的间接抗拉能力显著改善,具有良好的抗拉破坏能力。其次,与

6、24 mm PVA 纤维水泥稳定碎石劈裂强度相比, 12 mm PVA 纤维水泥稳定碎石劈裂强度增幅最大, 达 22.12%。因此, 在设计 PVA 纤维水泥稳定碎石的材料组成时, 应优选适宜的 PVA 纤维长度, 避免出现 PVA 纤维团聚等不良现象, 促进 PVA 纤维与水泥稳定碎石基体形成有效粘界面, 保证 PVA 纤维对水泥稳定碎石劈裂强度起到正面作用。

2.1.2 PVA 纤维掺量对力学性能影响

为研究不同 PVA 纤维掺量工况下水泥稳定碎石系列力学性能差异, 固定 PVA 纤维长度为 12 mm, 分别选取 0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m³ 四种 PVA 纤维掺量, 并增设普通水泥稳定碎石作为试验对照组, 基于系列力学性能试验, 探究不同 PVA 纤维掺量下水泥稳定碎石力学性能演变规律。

1) 无侧限抗压强度

为研究不同 PVA 纤维掺量下水泥稳定碎石无侧限抗压强度演变规律, 分别测定 7、28、90 d 龄期下无侧限抗压强度, 结果如图 4 所示。

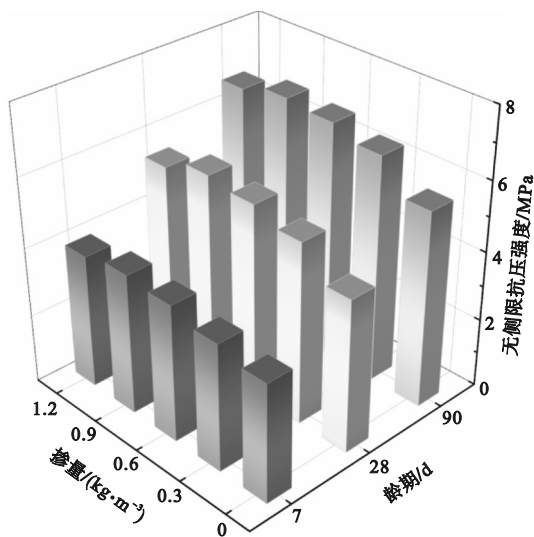


图 4 PVA 纤维掺量对水泥稳定碎石无侧限抗压强度影响

Fig. 4 Effect of PVA fiber dosage on unconfined compressive strength of cement stabilized-macadam

由图 4 可知, PVA 纤维水泥稳定碎石无侧限抗压强度随 PVA 纤维掺量增大先增大后减小。以 7 d 龄期为例, 相较未添加 PVA 纤维的水泥稳定碎石, 当 PVA 纤维掺量为 0.3、0.6、0.9、1.2 kg/m³ 时, 无侧限抗压强度分别提升了 7.32%、15.45%、18.35%、12.72%。说明水泥稳定碎石的 PVA 纤维掺量存在临界值, 高于或低于临界值均无法最大程度提升水泥稳定碎石抗压性能。这是由于低于临界值时, PVA 纤维的桥接作

用无法充分发挥; 高于临界值时, PVA 纤维因分散困难易团聚, 产生消极作用, 且易增大材料成本。因此, 应基于系列试验优选最佳 PVA 纤维掺量, 以保证 PVA 纤维水泥稳定碎石基层具备较强承载能力。

2) 抗压回弹模量

为研究不同 PVA 纤维掺量下水泥稳定碎石抗压回弹模量演变规律, 分别测定 7、28、90 d 龄期下抗压回弹模量, 结果如图 5 所示。

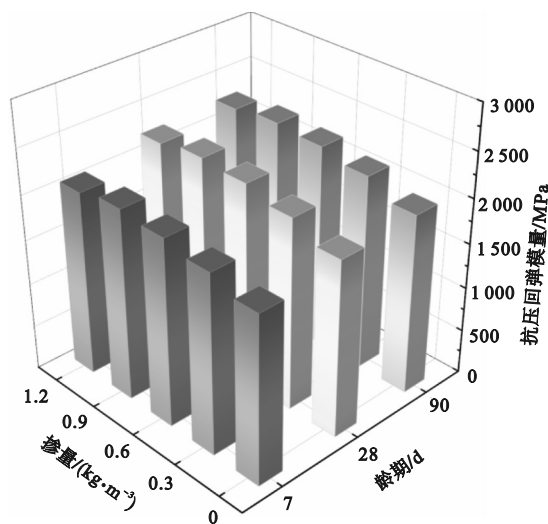


图 5 PVA 纤维掺量对水泥稳定碎石抗压回弹模量影响
Fig. 5 Effect of PVA fiber dosage on compressive resilient modulus of cement stabilized-macadam

由图 5 可知, 不同 PVA 纤维掺量工况下, 水泥稳定碎石抗压回弹模量演变规律与抗压强度具有相似性, 表现为 PVA 纤维掺量存在临界值。其中, 掺量从 0.3 kg/m³ 提升到 0.9 kg/m³ 时抗压回弹模量逐渐提升, 28 d 抗压回弹模量最大增幅为 16.21%, 而当掺量提升到 1.2 kg/m³ 时, 增幅下降至 12.75%。结果表明, 只有当 PVA 纤维掺量最佳时, 才能保证其均匀分散于水泥稳定碎石基体中, 进而充分发挥受荷时的协同受力、传递应力、协调变形作用, 最终增强水泥稳定碎石抗压恢复变形能力。

3) 劈裂强度

为研究不同 PVA 纤维掺量下水泥稳定碎石劈裂强度演变规律, 分别测定 7、28、90 d 龄期下劈裂强度, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着 PVA 纤维掺量的逐渐增大, 水泥稳定碎石劈裂强度得到不同程度的提升, 但并非一直逐渐增大。相较于未添加 PVA 纤维的普通水泥稳定碎石, 当 PVA 纤维掺量为 0.9 kg/m³ 时, 各龄期下水泥稳定碎石劈裂强度

提升程度均最大。这是因为不合适的 PVA 纤维掺量无法保证水泥稳定碎石在受劈裂应力时充分抑制和限制水泥稳定碎石基体裂缝发展的速度和尺寸,未能最大程度保证水泥稳定碎石结构的一致性与整体性,使得水泥稳定碎石的抗拉破坏能力提升存在局限性。

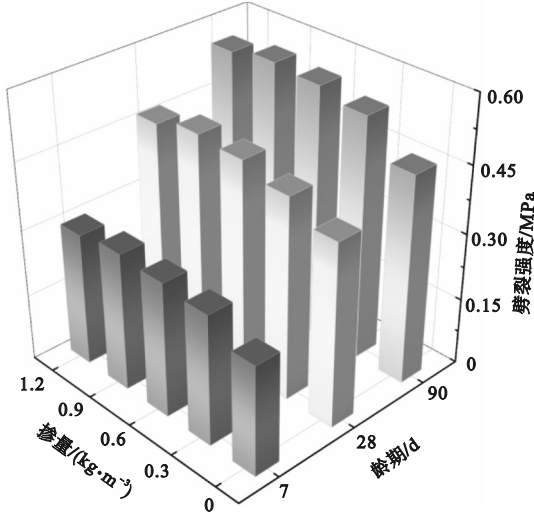


图 6 PVA 纤维掺量对水泥稳定碎石劈裂强度影响
Fig. 6 Effect of PVA fiber dosage on splitting strength of cement stabilized-macadam

综上所述, PVA 纤维长度为 12 mm、掺量为 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,其水泥稳定碎石能够满足相关规范对基层抗压强度的要求,同时具有良好的承载能力与变形能力,且各龄期性能稳定,综合应用效果最佳。

2.2 PVA 纤维水泥稳定碎石耐久性能

2.2.1 抗冻性能

为揭示冻融循环作用下长度 12 mm、掺量 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的 PVA 纤维水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石抗压强度衰减规律,分别测定 28、90 d 龄期下冻融 5、10、15 次后的残留抗压强度,并计算相应的冻稳系数,结果如图 7、图 8 所示。

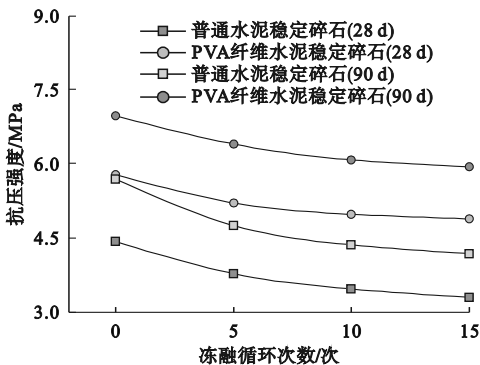


图 7 抗压强度衰减规律

Fig. 7 Attenuation law of compressive strength

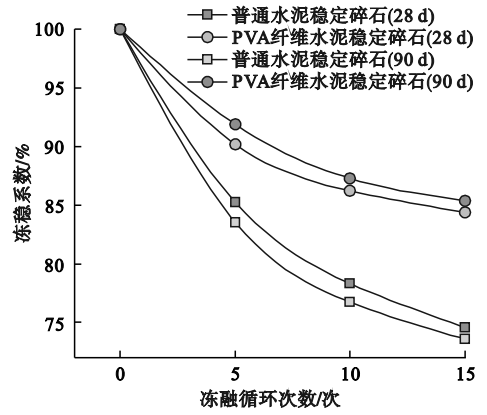


图 8 冻稳系数演变规律

Fig. 8 Evolution law of freezing stability coefficient

由图 7 可知,各龄期下,普通水泥稳定碎石与 PVA 纤维水泥稳定碎石抗压强度均随冻融循环次数的增加逐渐下降,且冻融初期大幅衰减,冻融后期衰减程度减缓。以 28 d 龄期为例,在冻融 5、10、15 次后,普通水泥稳定碎石抗压强度保持率分别为 85.23%、78.36%、74.54%,而 PVA 纤维水泥稳定碎石抗压强度保持率则分别为 90.21%、86.24%、84.39%。可见,水泥稳定碎石由于掺入 PVA 纤维,其抗冻性能大幅提升,这对削弱水泥稳定碎石基层在服役期间因水分侵蚀和季节性冻融循环导致的损坏具有积极作用。

由图 8 可知,同一龄期下, PVA 纤维水泥稳定碎石冻稳系数始终大于普通水泥稳定碎石。以 28 d 龄期为例,在冻融 5、10、15 次后, PVA 纤维水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石冻稳系数差值分别为 4.98%、7.88%、9.85%。说明随着冻融循环次数的增加,普通水泥稳定碎石与 PVA 纤维水泥稳定碎石间的抗冻性能差距增大, PVA 纤维在养生后期的增韧增强效果更显著。

2.2.2 疲劳性能

为阐明长度 12 mm、掺量 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的 PVA 纤维水泥稳定碎石与普通水泥稳定碎石疲劳性能差异,基于疲劳试验,测定 90 d 龄期下在 0.70、0.75、0.80、0.85 应力强度比下的疲劳次数,并借助威布尔分布函数对疲劳试验结果进行回归分析,结果如图 9、图 10 所示。图 9 中纵坐标为疲劳寿命对数 $\lg N$,横坐标为应力强度比 σ/S ;图 10 中纵坐标为疲劳寿命 N 。

由图 9 和图 10 可知,不同应力强度比下,普通水泥稳定碎石及 PVA 纤维水泥稳定碎石疲劳寿命拟合直线相关性系数 R^2 均大于 0.993,说明疲劳寿命与应力强度比相关性较大,且 PVA 纤维

水泥稳定碎石疲劳寿命曲线总是位于普通水泥稳定碎石上方。在 0.7 ~ 0.8 应力强度比条件下, PVA 纤维水泥稳定碎石疲劳寿命相较于普通水泥碎石, 提升了 135.29% ~ 156.55%, 且在 0.85 的高应力强度比条件下, 提升程度最大, 达到 175.01%。可见, PVA 纤维的掺入可明显减小水泥稳定碎石的疲劳损伤, 这可能是 PVA 纤维具有桥接作用, 发挥了“界面增强”和“加筋阻裂”的双重作用, 改善了水泥稳定碎石的内部结构, 优化了水泥稳定碎石结构的应力分布, 从而有效地抑制了荷载作用下水泥稳定碎石内部裂缝的形成与发展。具体表现为, 水泥稳定碎石的疲劳寿命对应力强度比的敏感性降低, 即在相同应力强度比条件下, 添加 PVA 纤维的水泥稳定碎石表现出更高的疲劳寿命。

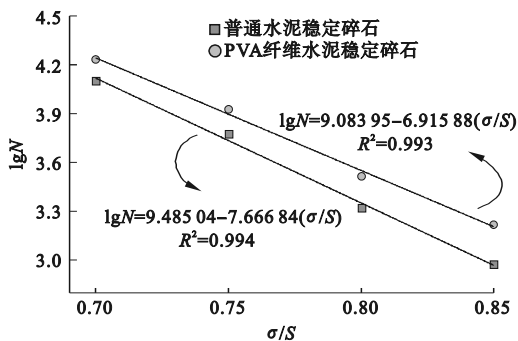


图9 应力强度比与疲劳寿命对数的拟合关系

Fig. 9 Fitting relationship between stress intensity ratio and logarithm of fatigue life

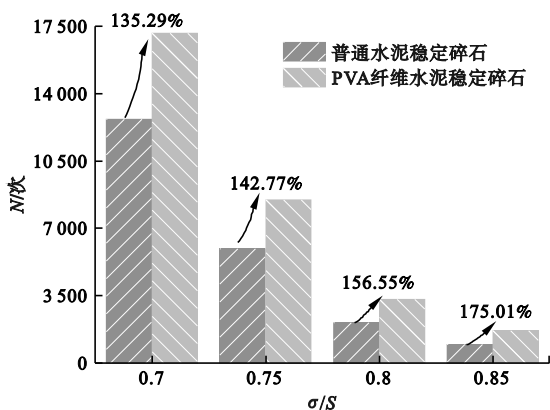


图10 各应力强度比下疲劳寿命对比

Fig. 10 Comparison of fatigue life under different stress intensity ratios

3 结论

本文研究了不同 PVA 纤维长度与掺量下水泥

稳定碎石系列力学性能及普通水泥稳定碎石与 PVA 纤维水泥稳定碎石耐久性能差异, 得到如下结论。

1) 不同工况下 PVA 纤维水泥稳定碎石力学性能演变规律类似, 随着 PVA 纤维长度或掺量的增大, 系列力学性能均先增强后减弱。

2) 相较于其余 PVA 纤维长度及掺量, 长度 12 mm、掺量 0.9 kg/m^3 的 PVA 纤维水泥稳定碎石综合应用效果最佳。

3) 长度 12 mm、掺量 0.9 kg/m^3 的 PVA 纤维水泥稳定碎石耐久性能比普通水泥稳定碎石得到明显提升。

参考文献 (References):

- [1] ZHAO G F, HOU X K, WANG X Q, et al. Modeling the mechanical behavior of cement stabilized macadam with defects based on particle flow theory [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2024, 160: 104659.
- [2] YAN S, LU H A, ZHOU Z, et al. A polymer latex modified superfine cement grouting material for cement-stabilized macadam-Experimental and simulation study [J]. Construction and Building Materials, 2024 (1): 134893.
- [3] 兰雪江, 张翕, 王永宝, 等. 水泥稳定再生碎石物理力学性能研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (2): 69 - 80.
LAN X J, ZHANG X, WANG Y B, et al. Research progress on physical and mechanical properties of cement stabilized macadam incorporating recycled aggregate [J]. Materials Reports, 2024, 38 (2): 69 - 80. (in Chinese)
- [4] 耿志晨, 崔子鹏, 邓玉姣, 等. 低温玄武岩纤维混凝土抗冲击性能研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2023, 42 (3): 75 - 81.
GENG Z C, CUI Y P, DENG Y J, et al. Study on impact resistance of low temperature basalt fiber concrete [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2023, 42 (3): 75 - 81. (in Chinese)
- [5] 邓永刚, 杨元品. 基于混凝土切割面统计方法的纤维取向分布研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43 (2): 71 - 76.
DENG Y G, YANG Y P. Study on the distribution and orientation of fibers based on statistics method of concrete cutting section [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024, 43 (2): 71 - 76. (in Chinese)
- [6] CHEN G H, LIU A, XU Z, et al. Optimum design of mixture proportion and microscopic analysis of cement-stabilized macadam by rubber powder and fiber [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2024, 52 (2): 1280 - 1293.
- [7] YUAN L Q, LIANG N X, ZHAO C H. Analysis on influence of the dispersion degree of PVA fibers on pavement performance of cement-stabilized macadam [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 5127015.
- [8] ZHAO C H, LIANG N X, ZHU X L, et al. Fiber-reinforced cement-stabilized macadam with various polyvinyl alcohol fiber contents and lengths [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (11): 04020312.
- [9] ZHAO Y, YANG X, ZHANG Q Y, et al. Crack resistance and mechanical properties of polyvinyl alcohol fiber-reinforced cement-stabilized macadam base [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 6564076.

(下转第 66 页)