

文章编号:1672-9331(2021)03-0008-08

振动搅拌水泥稳定碎石的强度及其形成机理

李雪连¹, 宁佐飞¹, 叶峻宏¹, 王文强², 张显安³

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山 528000;
3. 湖北交通工程检测中心有限公司, 湖北 武汉 443000)

摘要: 为揭示振动搅拌技术对水泥稳定碎石强度的影响及作用机理, 进行了基于传统搅拌和振动搅拌技术的水泥稳定碎石无侧限抗压强度和间接拉伸强度试验, 并开展了扫描电镜下的细观作用机理分析。结果表明: 振动搅拌技术可提高水泥稳定碎石的无侧限抗压强度和间接抗拉强度, 降低变异系数, 提高均匀性, 缩短强度稳定时间, 对低水泥剂量下强度的改善效果更明显; 在龄期为 7, 28 d 时, 振动搅拌水泥稳定碎石的水化物明显较多, 且分布更均匀, 在混合料内部形成了大量韧性较好的网状结构, 有利于提高强度; 在龄期为 90 d 时, 钙矾石晶体成柱状并嵌入集料内部, 使结构更致密, 强度更高。

关键词: 道路工程; 水泥稳定碎石; 振动搅拌; 强度

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

Strength and its formation mechanism of vibration mixing cement stabilized macadam

LI Xue-lian¹, NING Zuo-fei¹, YE Jun-hong¹, WANG Wen-qiang², ZHANG Xian-an³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Foshan Highway and Bridge Construction Co., Ltd., Foshan 528000, China;
3. Hubei Traffic Engineering Testing Center Co., Ltd., Wuhan 443000, China)

Abstract: In order to reveal the effect and mechanism of vibration mixing technology on the strength of cement stabilized macadam, the unconfined compressive strength and indirect tensile strength tests of cement stabilized macadam based on the traditional and vibration mixing technologies were carried out. Then, the mesostructure of the cement stabilized macadam was analyzed by the scanning electron microscope. The results show that the unconfined compressive strength and indirect tensile strength of cement stabilized macadam are improved by the vibration mixing technology, while the variation coefficient is decreased, and the homogeneity is improved. Moreover, the stabilization time of the strength is shortened, and the improvement of the strength at low cement content is more obvious. At the ages of 7, 28 d, the hydrate is much more and distributes more uniformly in the vibration mixing cement stabilized macadam, and mang network structures with high toughness are formed, which will improve its strength. At the age of 90 d, columnar ettringite crystals go into the aggregate, making the structures denser and the strength higher.

Key words: road engineering; cement stabilized macadam; vibration mixing; strength

收稿日期: 2021-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308075)

通讯作者: 李雪连(1978—), 女, 副教授, 主要从事道路工程材料方面的研究。E-mail: lixuelian@csust.edu.cn

水泥稳定碎石基层凭借着自身强度高、稳定性和耐久性好以及使用寿命长等众多优点在我国和非洲一些国家得到了广泛的应用。强度是水泥稳定碎石的重要指标,也是施工质量的控制依据,决定着道路的质量和寿命^[1-2]。在实际工程中,为了达到设计强度要求,一般会增大水泥用量或延长搅拌时间。但增大水泥用量容易使基层开裂;反之,则可能造成基层强度不足^[3]。延长搅拌时间不仅影响施工效率,而且实际效果不佳^[4]。

近年来,为提高水泥稳定碎石的强度,国内外许多学者尝试使用振动搅拌技术,并取得了一些研究成果^[5-6]。徐周聪等^[7]发现振动搅拌可使混合料中的细料和水泥处于震颤状态,避免了细料和水泥之间的结团,增强了水泥与水的扩散,从而提高了水泥稳定碎石的均匀性。张飞龙等^[8]进行了无侧限抗压强度试验,发现振动搅拌会明显提高无侧限抗压强度且降低变异系数,使水泥稳定碎石分布更加均匀。张海涛等^[9]对振动搅拌机的原理进行了分析,发现振动搅拌可明显提高水泥稳定碎石的强度。冯西宁等^[10]发现振动搅拌混合料龄期 7 d 的抗压强度均有不同程度的提高。DONG 等^[11-12]发现水泥稳定碎石抗压强度随振动强度的增大呈现先增大、后减小的趋势。施洲辉等^[13]分析了采用振动搅拌技术后,级配、龄期、水

泥剂量等对混合料强度的影响,发现振动搅拌混合料抗压强度比传统搅拌的高,在低水泥剂量下即可满足要求。在强度形成机理方面,卓吉^[14]分析了水泥稳定碎石的强度机理和不同试验因素对水泥稳定碎石材料强度的影响。张雪强^[15]进行了水泥稳定碎石的宏观结构组成和微观强度形成机理分析,认为固体结构单元和孔结构单元是水泥稳定碎石的强度基础。可见,现有研究成果关于振动搅拌水泥稳定碎石的强度及其形成机理已有初步认识,但一般只分析了抗压强度这个单一强度指标,且对强度形成过程中的细观作用机理尚不明确。

本研究对比分析了传统和振动两种搅拌方式下水泥稳定碎石的无侧限抗压强度、间接抗拉强度,并用扫描电镜分析了振动搅拌强度形成的细观机理,研究结果对于振动搅拌技术在水泥稳定碎石施工中的推广和应用具有一定的参考价值。

1 原材料及试件制备

1.1 水泥

采用海螺牌 P. C32. 5R 缓凝型水泥,其技术指标见表 1。从表 1 可以看出,该水泥各项技术指标均满足文献[16]中的要求。

表 1 水泥技术指标
Table 1 Technical indexes of cement

检测项目		试验结果	技术要求	试验方法
细度		7	≤10	T 0502—2005
凝结时间/min	初凝	337	≥180	T 0505—2005
	终凝	402	≥360,且≤600	
安定性(试饼法)		体积变化均匀	均匀	T 0505—2005
抗折强度/MPa	3 d	4.1	≥3.5	T 0506—2005
	28 d	—	≥6.5	
抗压强度/MPa	3 d	20.0	≥17.0	T 0506—2005
	28 d	47.5	≥42.5	

1.2 集料

按照文献[17]中的方法对集料的各项技术指标进行检测,发现粗集料的各项技术指标均满足

文献[16]中的要求。但细集料的含泥量略高,因此在使用前应对细集料进行清洁。集料技术指标见表 2。

表 2 集料技术指标

Table 2 Technical indexes of aggregate

集料	技术指标	检测结果	技术要求	试验方法
粗集料	压碎值/%	22.4	≤26	T 0316—2005
	软石含量/%	3.8	≤5	T 0320—2000
	针片状颗粒含量/%	18.9	≤22	T 0312—2005
	颗粒分析	满足要求	满足级配要求	T 0302—2005
	10~30 mm	0.91		
	含水量/%	1.11	—	T 0306—1994
	5~10 mm	1.03		
	10~30 mm	0.58		
	含泥量/%	1.13	≤2.0	T 0310—2005
	5~10 mm	1.56		
细集料	含水量/%	2.23	—	T 0332—2005
	小于 0.075 mm 颗粒含量	10.6	≤15	T 0327—2005
	颗粒分析	满足要求	满足级配要求	T 0327—2005

1.3 级配

本研究所使用的集料共分为 4 档,分别为 10~30 mm 碎石、10~20 mm 碎石、5~10 mm 碎石

和 0~5 mm 石屑。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTGT F20—2015)^[16]中关于 C-B-3 的推荐级配范围确定级配。集料级配曲线如表 3 所示。

表 3 试验级配

Table 3 Gradation of aggregate

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率							/%
	0.075	0.6	2.36	4.75	9.5	19	31.5	
工程粒径	0~5 mm	10.6	33.6	60.9	87.0	100.0	100.0	100.0
	5~10 mm	1.0	1.0	1.0	5.2	99.9	100.0	100.0
	10~20 mm	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	54.5	100.0
	10~30 mm	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	2.4	100.0
合成级配(推荐)	0.0~3.0	8.0~15.0	16.0~28.0	22.0~32.0	38.0~58.0	68.0~86.0	100.0	
合成级配	3.6	12.1	21.0	28.9	43.4	70.3	100.0	

1.4 试件制备与养护

采用德通 DT60ZBW 型小型振动搅拌机在室内对混合料进行拌和,拌和时间为 120 s。振动搅拌时同时开启拌和装置与振动装置,传统搅拌时仅开启拌和装置。搅拌时,振幅 A 为 1.0 mm,振动圆频率 ω 为 201.1 rad/s,振动强度为 $4.13A\omega^2/g$,其中 g 为重力加速度。根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[18]制备圆柱形试件,试件尺寸均为 $\phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,压实频率为 30 Hz。试件成型后,均在温度 $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和湿度不小于 95%的养护室进行不同龄期

的标准养护。

2 强度试验

2.1 无侧限抗压强度

强度是无机结合料稳定材料质量的主要控制指标,也是水泥稳定碎石基层的主要性能指标。本研究分别对龄期为 7,28,90,180 d 的两种搅拌方式的水泥稳定碎石进行无侧限抗压强度试验,每种搅拌方式各龄期分别成型 13 个试件,加载速度为 1 mm/min。试验结果见图 1~2。

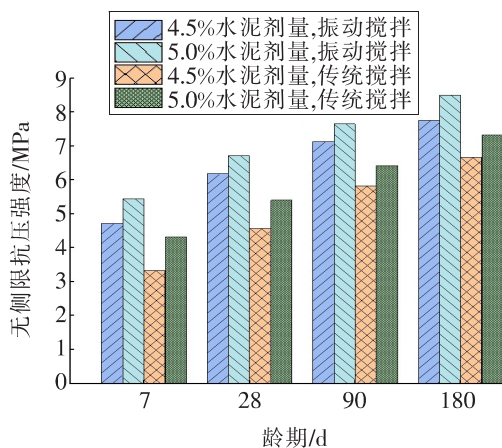


图 1 无侧限抗压强度与龄期的关系

Fig. 1 Relationship between unconfined compressive strength and age

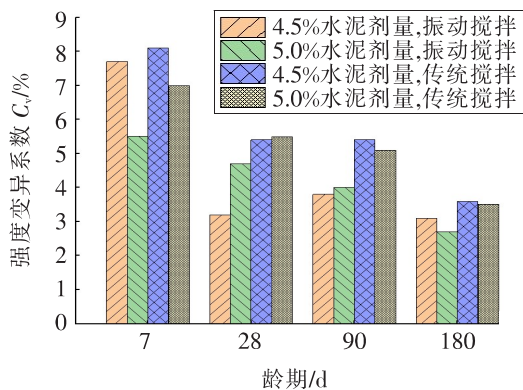


图 2 强度变异系数与龄期的关系

Fig. 2 Relationship between variation coefficient of strength and age

从图 1~2 可知,当水泥剂量及龄期相同时,与传统搅拌相比,振动搅拌水泥稳定碎石的无侧限抗压强度明显更高,强度变异系数 C_v 更小,即均匀性更好。这主要是因为振动搅拌使水泥水化更充分,且水化产物分布更均匀,从而提高了混合料的强度^[9]。我国规范要求水泥稳定碎石基层的设计强度为 4.0 MPa^[18],采用振动搅拌时,水泥剂量为 4.5% 就可满足要求,而传统搅拌需 5.0% 才可满足要求,即振动搅拌技术可节约 0.5% 的水泥用量,降低成本。

在低水泥剂量时,振动搅拌技术对无侧限抗压强度的提升作用更明显。例如,在龄期 28 d、水泥剂量分别为 4.5% 和 5.0% 时,振动搅拌水泥稳定碎石的无侧限抗压强度比传统搅拌水泥稳定碎石的分别提高了 35.0% 和 24.1%。这与赵利军等^[19]的研究结论一致。随着水泥剂量的继续增加,振动搅拌水泥稳定碎石的强度增幅略有降低。

振动搅拌水泥稳定碎石的早期强度更高,在

更短时间内即可满足文献[18]中的要求。因此,采用该工艺可适当缩短养护时间,这对于加快水泥稳定碎石基层施工进度及提高施工效率具有重要意义^[20]。

2.2 间接抗拉强度

在进行沥青路面设计时,无机结合料稳定层层底拉应力是设计指标之一。本研究分别对龄期为 7, 28, 90, 180 d 的两种搅拌方式的水泥稳定碎石进行间接抗拉强度试验,每种搅拌方式各龄期均成型 13 个试件,加载速度均为 1 mm/min,具体结果如图 3~4 所示。

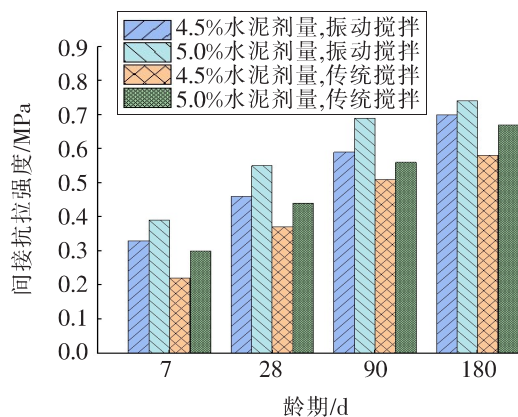


图 3 间接抗拉强度与龄期的关系

Fig. 3 Relationship between indirect tensile strength and age

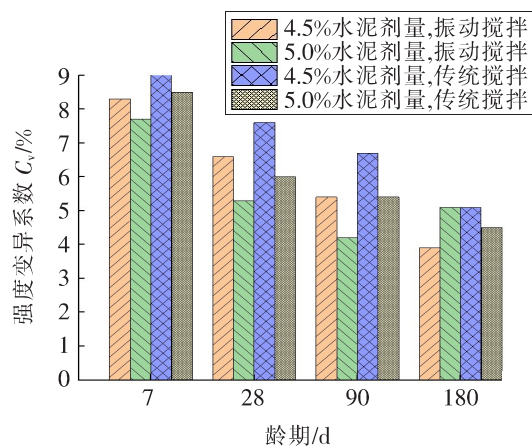


图 4 强度变异系数与龄期的关系

Fig. 4 Relationship between variation coefficient of strength and age

在图 3~4 中,当水泥剂量及龄期相同时,与传统搅拌相比,振动搅拌水泥稳定碎石的间接抗拉强度更高,变异系数 C_v 更小。另外,振动搅拌水泥稳定碎石的强度在早期形成得更快,这与无侧限抗压强度的规律一致,即振动搅拌技术可提高施工效率,加快施工进度。

与间接抗拉强度相比,振动搅拌技术对水泥稳定碎石的无侧限抗压强度的提升效果更明显。在龄期为 28 d、水泥剂量为 4.5% 时,与传统搅拌相比,振动搅拌的无侧限抗压强度提高了 35%,但间接抗拉强度仅增大了 23%。这主要是因为水泥稳定碎石的抗拉强度主要来源于水泥水化产物的胶结作用,而抗压强度不仅来源于水化产物的胶结作用,还受集料之间嵌锁作用的影响^[21]。

3 细观作用机理

采用 EVO MA 25 扫描电镜对粗集料与水泥水化产物间的界面进行观察,对不同龄期水泥稳定碎石的细观结构进行对比分析。用精密切割机将碎片切割成 3 mm 薄片,并放在 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘干,用导电胶将制备好的试件粘贴在盛样底座上,用 S150RTL-1 离子溅射仪在试件表面喷洒金属粉末,以提高试件表面的导电性,增强成像效果。喷金完成后即可使用扫描电镜对试件进行观察,放大倍数分别为 500 倍和 3 000 倍,具体结果见图 5~7。

分析发现,图 5(b)中振动搅拌水泥的水化产物明显比图 5(a)中传统搅拌水泥的多,且分布更均匀,这使得集料与水化产物之间黏结更紧密,试件也更致密。在图 5(d)中,振动搅拌产生了大量

纤维状钙矾石晶体和板状晶体,纤维状钙矾石晶体表面粗糙,与板状晶体之间相互吸附、铆合,形成了三维网状结构^[22],提高了混合料强度。在图 5(c)中,由于传统搅拌使水化产物之间存在大量裂缝与孔洞,结构整体性较差,在受力时易发生破坏。因此,振动搅拌的强度明显比传统搅拌的高。

在图 6(a)中,与龄期 7 d 相比,传统搅拌水泥的水化产物明显增多,虽然产生的水化产物填充了部分裂缝,但依然有裂缝存在。而在图 6(b)中,水化产物进一步增多,结构中未发现裂缝或孔洞,混合料强度进一步提高。

在图 6(c)中,水化产物依然未形成网状结构,且水泥水化形成凝胶后存在明显的分层现象。当受力时,水化产物易产生层间破坏,并产生许多微裂缝,这些微裂缝逐渐贯通形成大裂缝,最终产生破坏,混合料强度降低。在图 6(d)中,振动搅拌的水化产物明显增多,部分纤维状钙矾石的一端已经嵌入集料中,另一端穿插在板状晶体结构中,使集料与水化产物之间黏结更紧密,混合料抗变形能力更强。因此,振动搅拌水泥稳定碎石的强度明显较高。

在图 7(a)~7(b)中,传统搅拌水泥的水化产物依旧未能均匀分布。而振动搅拌水泥的水化产物分布均匀,水化产物与集料之间的界限已难以分辨,粗集料逐渐与水化产物联结成一个紧密的

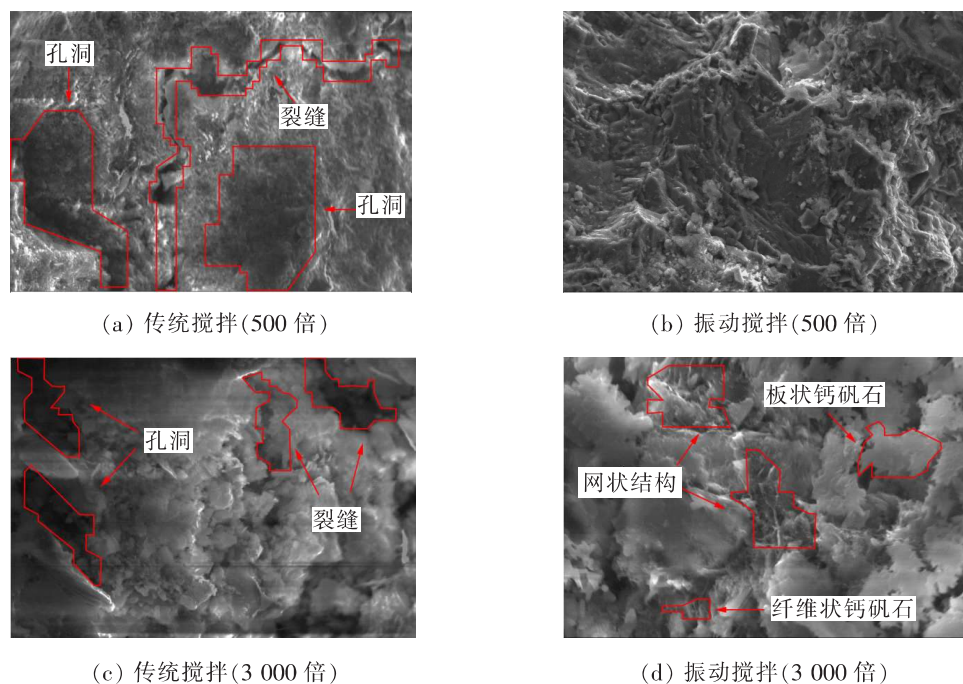


图 5 7 d 龄期的细观结构图

Fig. 5 Mesostructure images at age of 7 d

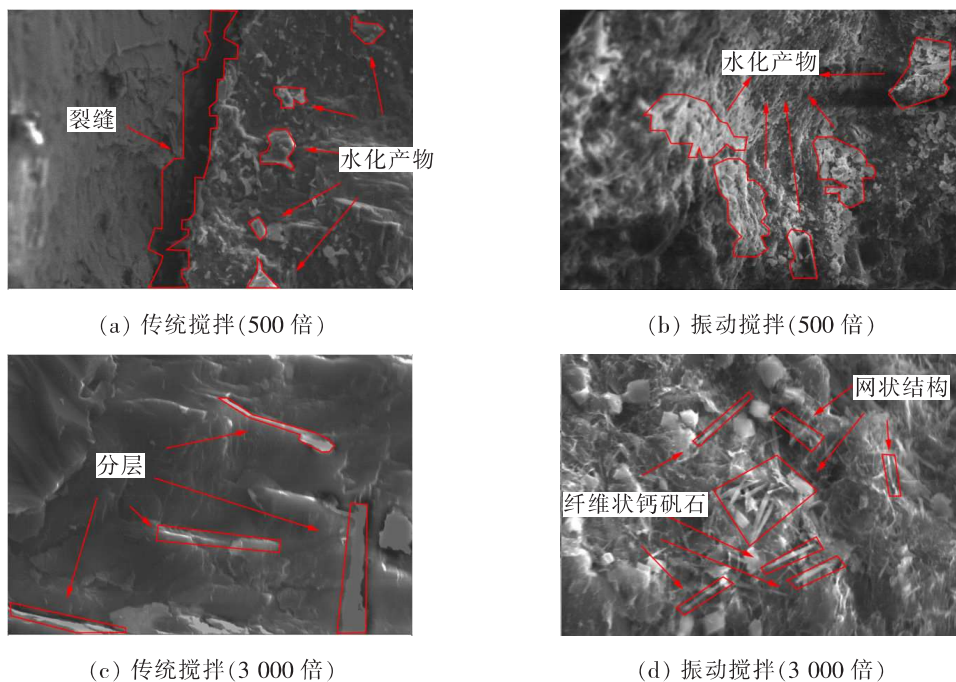


图 6 28 d 龄期的细观结构图

Fig. 6 Mesostructure images at age of 28 d

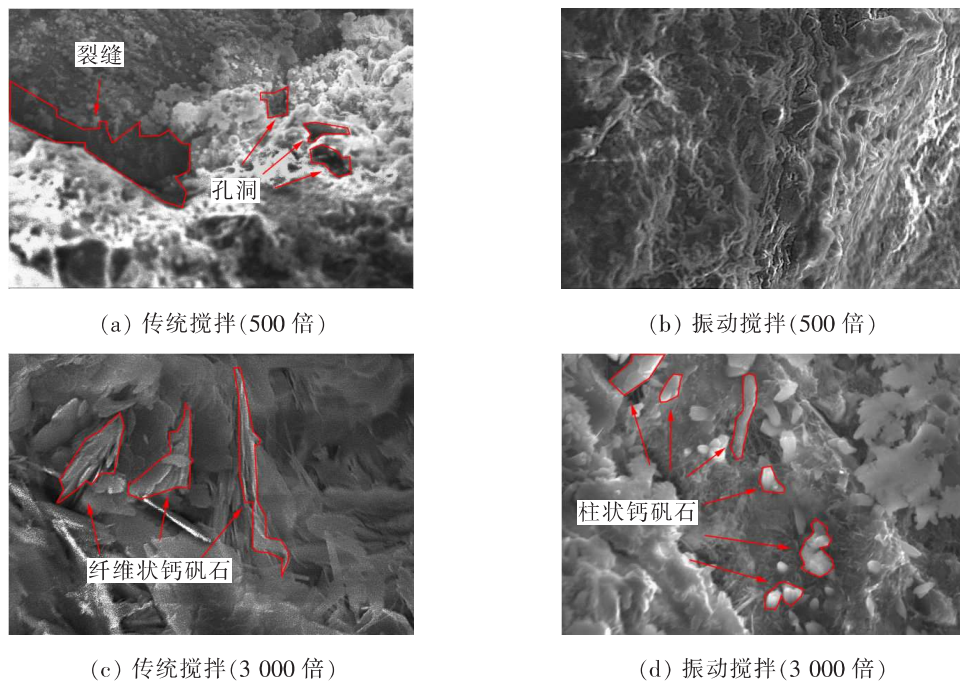


图 7 90 d 龄期的细观结构图

Fig. 7 Mesostructure images at age of 90 d

整体。在受外力作用时,整体受力均匀,故振动搅拌水泥稳定碎石的强度更高。在图 7(c)中,传统搅拌混合料内部生成了部分纤维状钙矾石,钙矾石与板状晶体之间依然未形成网状结构,其内部细观结构的致密程度也较低。而在图 7(d)中,振动搅拌的纤维状钙矾石已增大成柱状,这些柱状钙矾石已完全嵌入集料内部,其细观结构比龄期 28 d 时更致密。在受外力作用时,这些柱状钙矾石将大幅提高水泥稳定碎石的强度。对比 7~

28 d 和 28~90 d 这两个龄期阶段,可以明显看出,在龄期为 28 d 时,两种搅拌方式下的水泥稳定碎石结构骨架都已基本形成,即这一时期强度变化最大,这也与前面的强度分析结果一致。

4 结论

1) 振动搅拌技术可提高水泥稳定碎石的无侧限抗压强度和间接抗拉强度,使混合料更均匀,且

对前者的影响比后者更大。在低水泥剂量时,该技术的提升作用更明显。

2) 振动搅拌水泥稳定碎石的强度在早期形成更快,即振动搅拌技术可缩短强度稳定时间,有利于施工。

3) 在龄期为 7 d 时,在振动搅拌水泥稳定碎石内,水泥水化充分,粗集料与水化产物之间界限模糊;在龄期为 28 d 时,部分纤维状钙矾石的一端已经嵌入集料中,集料与水化产物之间黏结紧密;在龄期为 90 d 时,粗集料表面的钙矾石晶体更多、更均匀,形成了大量韧性较好的网状结构,钙矾石晶体呈柱状并嵌入集料内部,使振动搅拌水泥稳定碎石具有更高的强度。

〔参考文献〕

- [1] 李蒙强,靳斌,喻敏,等. 多孔水泥混凝土力学性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(4):23-31.
LI Meng-qiang, JIN Bin, YU Min, et al. Effect of aggregate type and gradation on the performance of porous cement concrete [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 23-31.
- [2] 杨瑞华,许志鸿,李宇峙,等. 水泥稳定碎石基层级配研究[J]. 公路工程,2007(4):76-78.
YANG Rui-hua, XU Zhi-hong, LI Yu-zhi, et al. Research on aggregate gradation of cement stabilized crush stone [J]. Highway Engineering, 2007(4): 76-78.
- [3] 应荣华,黎凯,胡恒武. 水泥稳定碎石搅拌方式研究[J]. 公路与汽运,2018(5):61-64,68.
YING Rong-hua, LI Kai, HU Heng-wu. Research on mixing mode of cement stabilized macadam [J]. Highways & Automotive Applications, 2018(5): 61-64, 68.
- [4] 李立寒,黄璞,刘栋. 旋转与静压成型对水泥稳定碎石性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(6):17-25.
LI Li-han, HUANG Pu, LIU Dong. Impact on performance of cement stabilized macadam mixtures between gyratory compaction and static compaction methods[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 17-25.
- [5] 刘新海,彭小林. 水泥粉煤灰稳定碎石力学参数影响因素研究[J]. 交通科学与工程,2020,36(1):38-43.
LIU Xin-hai, PENG Xiao-lin. Study on influence factors of mechanical parameters of cement fly ash stabilized crushed stone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 38-43.
- [6] 张海涛,梁爽,杨洪生,等. 粉煤灰对振动拌和水泥稳定碎石力学性能的影响[J]. 公路工程,2019,44(5):176-179.
ZHANG Hai-tao, LIANG Shuang, YANG Hong-sheng, et al. Influence of fly ash on performance of cement stabilized crushed stone based on vibratory mix technology [J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 176-179.
- [7] 徐周聪,但路昭,吕少辉,等. 基于振动拌和工艺的水泥稳定碎石混合料强度及拌和均匀性分析[J]. 公路交通技术,2017,33(6):4-8.
XU Zhou-cong, DAN Lu-zhao, LYU Shao-hui, et al. Strength and mixture uniformity analysis of cement stabilized gravel mixture based on vibratory mixing technology [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33(6): 4-8.
- [8] 张飞龙,李凯,张红杰. 基于振动搅拌的水泥稳定碎石强度研究[J]. 施工技术,2018,47(S4):800-802.
ZHANG Fei-long, LI Kai, ZHANG Hong-jie. Study on the strength of cement stabilized crushed stone based on vibration mixing [J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 800-802.
- [9] 张海涛,梁爽,杨洪生,等. 基于室内振动搅拌的水泥稳定碎石性能研究[J]. 中国公路学报,2018,31(8):58-65.
ZHANG Hai-tao, LIANG Shuang, YANG Hong-sheng, et al. Study on performance of cement-stabilized crushed stone based on indoor vibration mixing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 58-65.
- [10] 冯西宁,冯忠绪,王卫中. 混凝土振动搅拌技术研究的回顾[J]. 中国工程机械学报,2007(1):113-116.
FENG Xi-ning, FENG Zhong-xu, WANG Wei-zhong. Review on concrete vibratory mixing techniques [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007(1): 113-116.
- [11] DONG W, FENG Z, ZHAO L. Experimental research on the influence of vibration intensity on performance of cement stabilized macadam [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 283: 012011.
- [12] DONG W, FENG Z, ZHAO L, et al. Comparative