

基于CAVF法的高寒地区水泥稳定碎石基层设计及其性能

荆强强¹,李传海²,张荣华³,乔鸿超³

1. 山东高速基础设施建设有限公司,山东 济南 250014;2. 山东高速工程检测有限公司,山东 济南 250002;
3. 山东高速建设管理集团有限公司,山东 济南 250014

摘要:为提高水泥稳定碎石基层在高寒地区的适用性,提出一种适用于高寒地区水泥稳定碎石的主骨料空隙填充(coarse aggregate voids-filling,CAVF)法。通过击实试验、无侧限抗压强度试验、冻融循环试验和温缩试验验证CAVF法设计水泥稳定碎石混合料的力学性能、抗冻性能和温缩性能。结果显示:水泥稳定碎石混合料的最佳含水率和最大干密度均随水泥稳定碎石混合料设计空隙率绝对值的增大而增大;力学性能试验结果显示设计空隙率绝对值从0增至10%,水泥稳定碎石混合料的7d无侧限抗压强度提高23.5%;采用CAVF法设计的水泥稳定碎石混合料的残留抗压强度比均超过90%,且随设计空隙率绝对值的增大而提高;在温度为-20~40℃内,水泥稳定碎石混合料的温缩系数变化较小,可有效避免水泥稳定碎石基层发生温缩开裂。调整设计空隙率的CAVF法可用于设计水泥稳定碎石混合料,提高路用性能。

关键词:水泥稳定碎石;主骨料空隙填充法;无侧限抗压强度;抗冻性能;温缩性能

中图分类号:U416.214

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)04-0090-06

引用格式:荆强强,李传海,张荣华,等.基于CAVF法的高寒地区水泥稳定碎石基层设计及其性能[J].山东交通学院学报,2022,30(4):90-95.

JING Qiangqiang, LI Chuanghai, ZHANG Ronghua, et al. Design of cement stabilized in alpine area based on CAVF method and its performance[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(4): 90-95.

0 引言

水泥稳定碎石基层广泛应用于我国高等级公路沥青路面结构的承重层^[1-2]。我国各地气候差异较大,尤其在海拔寒冷地区,对水泥稳定碎石材料的抗冻性能与温缩性能要求较高^[3]。通常在水泥稳定碎石混合料中加入早强剂提高水泥稳定碎石的早期力学性能和抗裂性能^[4-5]。但掺入过多早强剂易导致水泥稳定碎石产生后期强度倒缩、开裂等病害,又因水泥稳定碎石收缩较大,基层易开裂,导致路面出现反射裂缝,降低路面使用寿命^[6-8]。

为有效减少基层开裂现象,黄祯敏等^[9]、雷力^[10]、邹桂莲等^[11]、葛折圣等^[12]在级配设计方面提出了填充式大粒径水泥稳定碎石混合料设计方法,此方法结合柔性基层与半刚性基层的优点,又克服了二者的缺点,对解决基层开裂现象效果明显。但填充式大粒径水泥稳定碎石混合料的填充料与粗集料的级配(粒径)及二者间的质量比均根据工程经验判断,影响该材料的推广应用效果,现场施工需要二次拌和,施工效率低。

本文通过调整并优化主骨架空隙填充(coarse aggregate voids-filling method,CAVF)法中的设计空隙等参数设计水泥稳定碎石混合料,研究通过新型级配设计方法获得的水泥稳定碎石混合料的力学性能、抗冻性能和温缩性能,为后期工程应用提供参考。

收稿日期:2022-06-15

基金项目:山东省企业技术创新项目(202160101273)

第一作者简介:荆强强(1980—),男,山东平度人,工程师,主要研究方向为土木工程,E-mail:lich_hispeed@163.com。

1 材料与方

1.1 材料

1.1.1 水泥

胶凝材料采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,技术指标如表1所示。

表1 水泥技术指标

项目	初凝时间/min	终凝时间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		密度/(g·cm ⁻³)
			3 d	28 d	3 d	28 d	
试验结果	245	450	4.5	7.3	27.3	46.9	3.14
指标要求	≥180	360~600	≥3.5	≥6.5	≥17.0	≥42.5	

1.1.2 集料

取自某新建高速公路的集料粒径分别为20~30、>3~5(即2.36~4.75)、0~3(即0~2.36)mm,表观密度分别为2.745、2.731、2.703 g/cm³,粒径为20~30mm集料的紧装密度为1.586 g/cm³。按照文献[13]测得不同粒径范围集料的级配结果,如表2所示。

表2 不同粒径范围集料的级配

筛孔直径/mm	37.5	31.5	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
20~30mm粗集料通过率/%	100	100	89.6	10.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
>3~5mm细集料通过率/%	100	100	100	100	100	100	98.7	15.7	3.3	2.5	0.8	0.8	0.8
0~3mm细集料通过率/%	100	100	100	100	100	100	100	84.3	54.5	33.3	21.1	14.6	10.7

集料的空隙率

$$V_{CA} = 1 - \rho_{SC} / \rho_C \times 100\%$$

式中: ρ_C 为粗集料的表观密度, ρ_{SC} 为粗集料的紧装密度。

经计算,粗集料的空隙率为42.22%。先确定2种粒径范围细集料的质量比,采用旋转压实法确定不同细集料质量比混合后的最小空隙率,结果如表3所示。根据试验结果,最终确定>3~5mm、0~3mm两档细集料间的比例为3:7。

表3 不同细集料比例间的空隙率

>3~5mm与0~3mm 细集料的质量比	压实密度/(g·cm ⁻³)	合成表观密度/(g·cm ⁻³)	$V_{CA}/\%$
2:8	2.217	2.694	17.72
3:7	2.223	2.699	17.62
4:6	2.203	2.703	18.49
5:5	2.173	2.708	19.77
6:4	2.087	2.712	23.05
7:3	1.985	2.717	26.94
8:2	1.777	2.722	34.72

1.2 配合比

根据经验确定水泥用量和混合料空隙率,粗集料、细集料质量分数的计算公式为

$$q_c(V_{CA}-V_v)/(\rho_{sc}\times 100\%)=(q_f/\rho_f)+(q_s/\rho_s), \quad (1)$$

式中: q_c 、 q_f 、 q_s 分别为粗集料、细集料、水泥的质量分数, V_v 为水泥稳定碎石混合料设计空隙率, ρ_f 、 ρ_s 分别为细集料、水泥的表观密度。

通过式(1)计算粗集料、细集料的质量分数。在水泥稳定碎石混合料体系中,水泥作为胶结料与水发生反应,未参与反应的水在水泥稳定碎石混合料中形成空隙。设计水泥稳定碎石混合料时需优化 V_v ,减小水泥稳定碎石混合料的空隙,使其更加密实。初选水泥质量分数为4%条件下, V_v 分别为0、-5%、-10%,得到不同设计空隙率下不同粗、细集料质量比的3种水泥稳定碎石混合料,分别记作JP-0、JP-5、JP-10,3种水泥稳定碎石混合料20~30、>3~5、0~3 mm 粒径集料的质量比分别为:67:7:26、64:7:29、61:8:31,级配曲线如图1所示。

1.3 击实试验

不同设计空隙条件下水泥稳定碎石混合料的击实曲线如图2所示。

由图2可知:水泥稳定碎石混合料的最佳含水率和最大干密度均随水泥稳定碎石混合料设计空隙率绝对值的增大而增大。JP-0级配水泥稳定碎石混合料最佳含水率为3.7%,最大干密度为2.410 g/cm³;与JP-5和JP-10相比,JP-0中细集料较少,不能填充粗集料形成的骨架,混合料内部有较多空隙,JP-0的最大干密度均小于JP-5和JP-10。细集料比粗集料吸水率更高,随设计空隙率绝对值的增大,粗集料用量减少,细集料用量增加,水泥稳定碎石混合料最佳含水率增大^[14]。

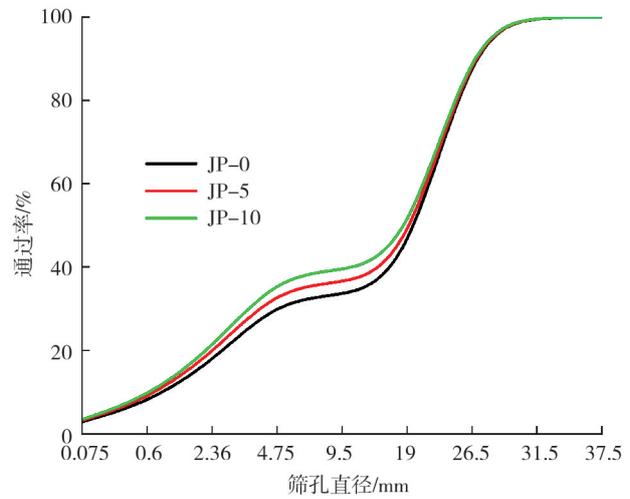


图1 不同设计空隙率的水泥稳定碎石混合料级配曲线

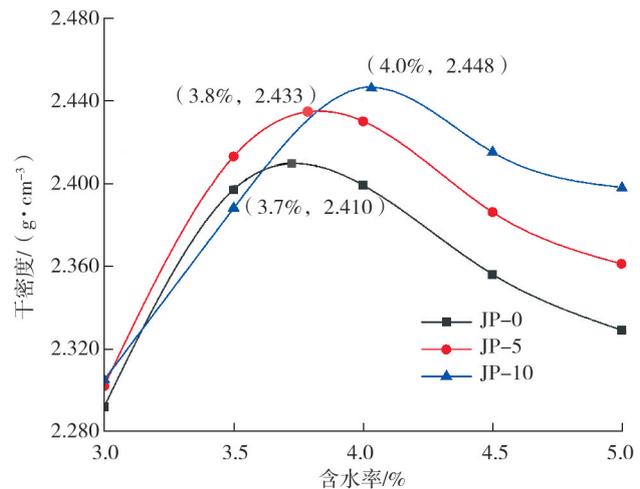


图2 不同级配混合料的击实曲线

2 试验结果分析

2.1 力学性能

根据第1章结果成型 $\Phi 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 圆柱体试件,压实度为98%。JP-0、JP-5、JP-10的7 d无侧限抗压强度分别为6.8、7.5、8.4 MPa。

随设计空隙率绝对值的增大,细集料掺加量增大,水泥稳定碎石混合料体系密实度增大。相较于JP-0,JP-10的7 d无侧限抗压强度提高23.5%。在此水泥稳定碎石混合料体系中,骨架嵌挤效应在抗压强度中起主要作用^[15-16],粗集料的嵌入效果较好,说明颗粒间嵌入更稳定,水泥稳定碎石混合料的无侧限抗压强度更高。与嵌挤效应相比,细集料的填充效应对提高抗压强度有辅助作用。当水泥稳定碎石混合料体系的骨架稳定时,增大细骨料的质量比可使水泥稳定碎石混合料更致密,力学性能更好。

试件7 d无侧限抗压强度试验的破型外观如图3所示。由图3可知:试件破坏以粗集料的压碎为主,说明按照CAVF法设计的水泥稳定碎石混合料可发挥粗集料间石-石骨架嵌挤作用;随细集料掺量的增加,细集料和水泥浆体填充粗骨料间隙,试件的整体结构更密实,可进一步保证水泥稳定碎石混合料的力

学性能^[17]。

2.2 抗冻性能

按照无侧限抗压强度试验方法,成型 $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体试件分别养护 7、28 d 后,放入 $(-18 \pm 3)^\circ\text{C}$ 低温箱内 15~17 h,再移至 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ 水槽中放置 8~10 h,重复上述步骤 5 次,采用冻融前、后的抗压强度比 E_{BDR} 评价混合料的抗冻性能,计算公式为

$$E_{\text{BDR}} = R_{\text{DC}} / R_{\text{C}} \times 100\% ,$$

式中: R_{DC} 为冻融循环后的抗压强度, R_{C} 为冻融循环前的抗压强度。

不同养护龄期试件的冻融强度比如表 4 所示。

由表 4 可知:养护 7 d 的试件在冻融循环后的抗压强度略有增长,强度增大 1.03%~2.36%。养护 28 d 的试件经冻融循环试验后力学性能均出现不同程度的降低。因养护周期较短,养护 7 d 后的水泥稳定碎石混合料中的水泥未完全水化,随冻融循环周期的延长,水泥不断进行水化反应,水化产物增多,试件内集料间的黏结力提高, E_{BDR} 均大于 1。此阶段内,相比冻融循环作用,水泥水化产物的黏结作用对力学性能的影响占主要作用^[18]。养护 28 d 后,水泥水化速度降低,力学强度增大较缓慢,冻融循环作用对力学性能的影响占主导地位,试件内的空隙水经循环结晶膨胀作用影响体系的力学性能。对比 3 种混合料,随设计空隙的减小,试件的 E_{BDR} 小幅提高,主要原因是细集料质量比增大使水泥稳定碎石混合料更密实,水泥稳定碎石混合料内自由水的质量分数降低,水-冰晶体转化的膨胀效应减弱,对水泥稳定碎石混合料力学性能的影响减少。

2.3 温缩性能

采用静压法成型 $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试件,压实度为 98%。按照规程试件养护 7 d 后放入 105°C 烘箱内干燥至恒重,测量试件原始长度 L_0 。设定温度区间为 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$,降温梯度为 10°C ,先将试件放置于 40°C 环境中保温 3 h,其中仪器降温速度控制为 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$,降至设定温度后保温 3 h,保温结束前最后 3 min 读取数据,以此类推,直到温度降至 -20°C 。

第 i 个温度区间的温缩应变

$$\varepsilon_i = (l_i - l_{i+1}) / L_0 ,$$

第 i 个温度区间的温缩系数

$$\alpha_i = \varepsilon_i / (t_i - t_{i+1}) ,$$

式中: l_i 为第 i 个温度区间百分表读数之和的平均值; t_i 为温度控制程序设定的第 i 个温度区间,区间范围为 10°C 。

不同级配混合料的温缩系数随温度的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知:在高于 0°C 时,各个级配混合料的温缩系数均随温度的降低而逐渐减小。即水泥稳定碎石混合料在高温区间,集料粒径对温度变化的敏感性较大,在 $-10 \sim 0^\circ\text{C}$ 内,水泥稳定碎石混合料的温度敏感性最小。相同温度区间内,随设计空隙率的增大,水泥稳定碎石混合料的温缩



图 3 破型试件外观

表 4 不同养护龄期试件的 E_{BDR} %

试件	7 d	28 d
JP-0	101.03	93.40
JP-5	102.09	95.80
JP-10	102.36	96.30

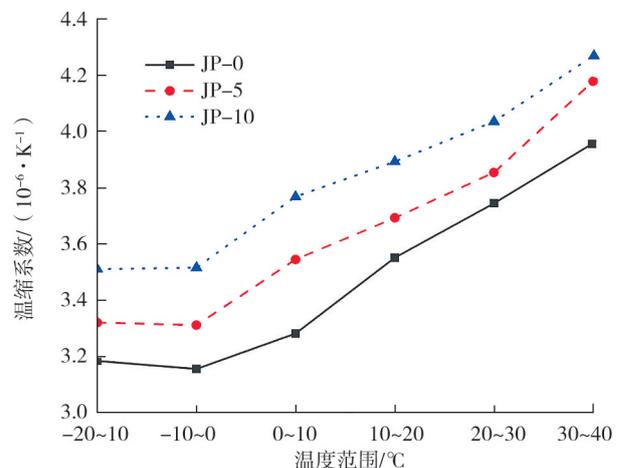


图 4 不同级配混合料的温缩试验结果

系数减小。在高温环境下,水泥稳定碎石混合料试件发生热膨胀,体积较常温有所增加,为后续冷却过程提供了收缩空间。当温度开始下降时,试件体积变化迅速,收缩较大。在收缩过程中,骨料与胶结料越来越紧密,黏结强度逐渐增加。随温度的降低,水泥稳定碎石混合料试件内部的材料接触更紧密,体积变小。这是因为骨料和胶结料间的接触点增多,导致强度更高,可接受的收缩空间更小。温度越低,水泥稳定碎石混合料的收缩越小^[19]。

3 结论

1)水泥稳定碎石混合料的7 d无侧限抗压强度试验结果表明,采用优化空隙率等参数的CAVF法设计水泥稳定碎石混合料可行。设计空隙率绝对值为0~10%时,水泥稳定碎石混合料的力学性能与设计空隙率绝对值呈正相关。

2)随设计空隙率绝对值的增大,水泥稳定碎石混合料的抗冻性能逐渐提高,设计空隙率为-5%、-10%的水泥稳定碎石混合料试件养护28 d的冻融强度比不小于95%,抗冻性能优异。

3)温缩试验结果表明,采用CAVF法设计的水泥稳定碎石混合料可有效避免基层发生温缩开裂,在0~-10℃内,水泥稳定碎石混合料的温度敏感性最小。

参考文献:

- [1]沈卫国,郑小平,李洪震,等.路面基层材料的分类及其服役状况综述[J].武汉理工大学学报,2021,43(9):1-5.
SHEN Weiguo, ZHENG Xiaoping, LI Hongzhen, et al. Review on classification and service status of road base course[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(9): 1-5.
- [2]LÜ S, PENG X, YUAN J, et al. Stress path investigation of fatigue characteristics of cement stabilized macadam[J]. Construction and Building Materials, 2021, 292(5):123446.
- [3]张立群,张学峰,崔宏环.寒区再生集料水泥稳定碎石路基的力学和温缩性能[J].冰川冻土,2022,44(2):506-514.
ZHANG Liqun, ZHANG Xuefeng, CUI Honghuan. Mechanical and temperature shrinkage properties of recycled aggregate cement stabilized macadam subgrade in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022,44(2):506-514.
- [4]杨洁.超早强水泥稳定碎石路用性能研究[D].西安:长安大学,2005.
YANG Jie. Research on road performance of aggregate mixture stabilized by super rapid strength cement[D]. Xi'an:Chang'an University, 2005.
- [5]盛燕萍,李亮亮,关博文,等.高寒地区水镁石纤维早强型水泥稳定碎石的路用性能研究[J].冰川冻土,2018,40(2):355-361.
SHENG Yanping, LI Liangliang, GUAN Bowen, et al. Study on the performance of gravel road stabilized by early strength agent and brucite fibers in alpine regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 355-361.
- [6]ZHAO K, ZHAO L, HOU J, et al. Impact of mixing methods and cement dosage on unconfined compressive strength of cement-stabilized Macadam[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16(1):1-16.
- [7]MOU G, SHEN A, LÜ Z, et al. Effect of early strength anti-cracking materials on drying shrinkage of recycled cement stabilized macadam[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022: 1-13.
- [8]ZHANG P, LI Q, WEI H. Investigation of flexural properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(12): 1282-1287.
- [9]黄祯敏,肖敏,彭波,等.基于细集料填充系数的水泥稳定碎石性能研究[J].公路,2017,62(3):29-35.
HUANG Zhenmin, XIAO Min, PENG Bo, et al. Study of cement stabilized macadam properties based on fine aggregate filling coefficient[J]. Highway, 2017, 62(3): 29-35.
- [10]雷力.大粒径集料嵌锁型材料的防裂扩展机理及应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
LEI Li. Study on crack propagation mechanism and application of large-size aggregate interlocking materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [11]邹桂莲,张肖宁,王绍怀,等.富沥青混合料的CAVF法设计[J].公路,2002(3):76-79.
ZOU Guilian, ZHANG Xiaoning, WANG Shaohuai, et al. Design of full asphalt mixture by CAVF method[J]. Highway,

- 2002 (3): 76-79.
- [12] 葛折圣, 张肖宁, 高俊合, 等. 富沥青混合料设计方法的改进[J]. 公路交通科技, 2007, 24(11):48-50.
GE Zhesheng, ZHANG Xiaoning, GAO Junhe, et al. Improvement of FAC designing method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(11):48-50.
- [13] 公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [14] 于新, 杜银飞. 考虑集料吸水率的水泥稳定碎石最大干密度及最佳含水量理论计算方法[J]. 公路交通科技, 2012, 29(3):17-21.
YU Xin, DU Yinfei. Theoretical calculation method of maximum dry density and optimum water content of cement stabilized macadam considering aggregate water absorption[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(3):17-21.
- [15] ZHANG M, ZHONG K, SUN M, et al. Study on mechanical properties of cement stabilized macadam with different admixtures[M]. Functional Pavements, CRC Press, 2020: 349-353.
- [16] LIU Z, WEI X, WANG D, et al. Performance of cement-stabilized macadam roads based on aggregate gradation interpolation tests[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2019, 16(4): 2371-2390.
- [17] XU B, YANG Z, ZHAO L, et al. Study on the antifreeze performance of porous cement stabilized macadam[J]. Construction and Building Materials, 2019, 208(30):13-22.
- [18] 陈柯, 孙芬, 梁爽, 等. 基于振动搅拌技术高寒地区基层抗冻性与抗裂性试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊1): 291-296.
CHEN Ke, SUN Fen, LIANG Shuang, et al. Experimental study on frost resistance and crack resistance of bases in cold areas based on vibration mixing technology[J]. Materials Reports, 2021, 35 (Suppl. 1): 291-296.
- [19] LI W, LANG L, LIN Z, et al. Characteristics of dry shrinkage and temperature shrinkage of cement-stabilized steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134(1):540-548.

Design of cement stabilized in alpine area based on CAVF method and its performance

JING Qiangqiang¹, LI Chuanhai², ZHANG Ronghua³, QIAO Hongchao³

1. Shandong Hi-Speed Infrastructure Construction Co., Ltd., Jinan 250000, China;

2. Shandong Hi-Speed Engineering Test Co., Ltd., Jinan 250002, China;

3. Shandong Hi-Speed Construction Management Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: In order to improve the applicability of cement stabilized macadam base in alpine areas, a coarse aggregate void-filling (CAVF) design method is proposed. The mechanical properties, frost resistance and temperature shrinkage properties of the cement stabilized crushed stone mixture designed by CAVF method are verified by compaction test, unconfined compressive strength test, freeze-thaw cycle test and temperature shrinkage test. The results show that, the optimal water content and maximum dry density of the cement stabilized macadam both increase with the increase of the absolute value of the design porosity. The mechanical properties test results show that, the absolute value of the design void ratio increases from 0 to 10%, and the seven-day unconfined compressive strength of the cement stabilized macadam increases by 23.5%. In the temperature range from $-20 \sim 40$ °C, the temperature shrinkage coefficient of the cement stabilized macadam changes slightly, which could effectively avoid the thermal shrinkage cracking of the cement-stabilized macadam base. Therefore, the CAVF method of adjusting the design porosity could be used to design the cement-stabilized macadam.

Keywords: cement stabilized macadam; CAVF method; unconfined compressive strength; frost resistance; temperature shrinkage property

(责任编辑:王惠)