

不同类型水泥稳定碎石温缩系数对比试验

张怀志,杨帆,杨野

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究水泥质量分数、级配类型和拌和方式对水泥稳定碎石材料温缩性能的影响. 方法 对传统应变片法进行了优化,拟合温度-应变关系式,求导得温度-补偿系数关系式,建立了采用微晶玻璃作为补偿材料的高精度温缩系数测量方法. 结果 常规拌和条件下,抗裂级配(骨架-嵌挤密实型)水泥稳定碎石的温缩系数高于常规级配(骨架密实型);振动拌和条件下,抗裂级配水泥稳定碎石的温缩系数低于常规级配水稳碎石,降低幅度约为10%. 常规级配条件下,振动拌和工艺对水泥稳定碎石的温缩系数影响较小,温缩系数平均值降低约3%;抗裂级配条件下,经振动拌和后的水泥稳定碎石的温缩系数显著低于常规拌和,降低幅度在60%以上. 结论 采用优化后的温缩系数测量方法能够有效降低试验误差,而且抗裂型级配水泥稳定碎石抗温缩性能的好坏与拌和工艺之间的关系非常密切,在实际工程中在使用抗裂型级配水泥稳定碎石材料的同时应采用振动拌和工艺,以保证基层材料的抗温缩性能.

关键词 水泥稳定碎石;温缩系数;应变片法;振动拌和;微晶玻璃

中图分类号 TU528;U414

文献标志码 A

Temperature Shrinkage Coefficient Comparative Test of Cement Stabilized Macadam with Different Types

ZHANG Huaizhi, YANG Fan, YANG Ye

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The effect of cement mass fraction, gradation and mixing method on the temperature shrinkage performance of cement stabilized macadam materials was studied. The tests were carried by the traditional strain gauge method optimized and the temperature-compensation coefficient relationship was derived by the temperature-strain relationship fitted. A high-precision temperature shrinkage coefficient measurement method has been established by using glass-ceramics as a compensation material. Under normal mixing conditions, the crack-resistant gradation (skeleton-embedded compacted) cement stabilized macadam has a higher temperature shrinkage coefficient

收稿日期:2019-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276);辽宁省博士科研启动基金项目(20170520212)

作者简介:张怀志(1982—),男,副教授,博士,主要从事沥青路面结构与养护方面研究.

than that of conventional gradation (compact skeleton type); under the condition of vibration mixing, the temperature shrinkage coefficient of crack-resistant grading cement stabilized macadam is lower than that of water-stable macadam with conventional gradation, and the reduction is about 10% . Under normal grading conditions, the vibration mixing process has a small effect on the temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam, and the average temperature shrinkage coefficient is reduced by about 3% ; under the condition of crack resistance gradation, the temperature shrinkage coefficient of cement stabilized macadam after vibration mixing is significantly lower than that of conventional mixing, and the reduction range is more than 60% . The optimized temperature shrinkage coefficient measurement method can effectively reduce the test error, and the temperature shrinkage resistance of the crack resistance graded cement stabilized macadam has a very close relationship with the mixing process. In reality projects while using the crack-resistant-type grading cement stabilized crushed stone material vibration mixing process should be used to ensure that the anti-temperature shrinkage properties of base material.

Key words: cement stabilized macadam; temperature shrinkage coefficient; strain gauge method; vibration mixing; glass-cera

水泥稳定碎石是一种半刚性材料,在温度发生变化时会产生温度应力^[1]. 当温度应力达到材料自身所承受的极限应力时会产生开裂,对路面造成破坏^[2],而温缩系数这一参数可以直接表征水泥稳定碎石材料的温缩性能. 因此,准确地测出水泥稳定碎石材料的温缩系数对减少路面病害有着重大意义^[3]. 《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中确定了测定无机结合料稳定材料温度收缩系数有应变片法和仪表两种方法^[4]. 相对于仪表法来说,应变片法精度高,但是操作更加复杂,对试验结果影响的因素较多,而且即便材料相同,步骤相同,得出的结果也会有很大的不同. 因此传统的试验方法不利于对温缩系数规律的总结,这给水泥稳定碎石材料抗裂设计指标的进一步实际应用带来很大困难^[5].

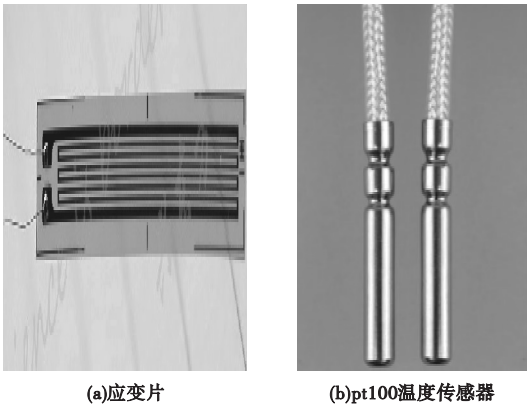
由于原有的温缩系数测量方法对试验材料和要求的过程不够明确,导致不同机构测量出的温缩系数存在很大偏差^[6]. 因此笔者对应变片法测量水泥稳定碎石材料的温缩系数进行了进一步的改进和完善. 对比分析了不同补偿片材料对试验结果的影响,并且对《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中的“T0855—2009 无机

结合料稳定材料温缩试验方法”中的温度补偿公式进行了线性拟合,得出了拟合度较高的温缩系数补偿公式,建立了较精确和系统的温缩系数测量方法,然后利用温缩系数较为固定的 6061 铝合金对结果进行验证,确保该试验方法的准确性. 并对不同类型的水泥稳定碎石材料温缩系数进行测试,分析影响因素.

1 试 验

1.1 试验设备

温度传感器采用 pt100,精度为 0.1℃,采集仪为德国进口 HBM 采集系统,可以同时采集应变和温度(见图 1).



(a)应变片 (b)pt100温度传感器

图 1 温度测量采用的传感器类型

Fig. 1 Sensor used for temperature measurement

试验保温箱为 LMT - 2 试验机环境箱,所采用的应变片类型为混凝土应变测量专用应变片 - BX120 - 100AA 康铜应变片,长度为 100 mm,量程较之《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)推荐的 80 mm 应变片测量结果更为稳定,应变片采用 502 胶水粘结。

1.2 温度补偿系数确定方法

试验温度分布在 -25 ~ 15 ℃,在温度区间内,恒温时间为 3 h,采用自动采集仪记录应变和温度.温缩系数关系为

$$\alpha_t = \frac{\sum \Delta \varepsilon_i}{t_{i+1} - t_i} + \beta_s. \tag{1}$$

式中: $\Delta \varepsilon_i$ 为第 t_{i+1} 到 t_i 温度区间的应变变化量; t_{i+1} 为恒温箱的第 $(i + 1)$ 个温度,℃; t_i 为试件当前的温度,℃; α_t 为温缩系数, $10^{-6} \cdot \text{℃}^{-1}$; β_s 为温度补偿试件的补偿系数, $10^{-6} \cdot \text{℃}^{-1}$.

由于恒温箱的温度不能准确代表试件真实温度^[7],所以试验将温度探头直接粘贴在试件表面获取温度并且恒温 2 ~ 3 h^[8],当温度应变趋于稳定时停止试验。

以微晶玻璃为例来说明温度补偿系数确定方法.首先分别测出 16 ℃、11 ℃、6 ℃、0 ℃、-6 ℃、-11 ℃、-16 ℃、-26 ℃温度节点对应的补偿片应变数据,且每个温度节点做 3 次试验取平均值,共得到 8 组温度 - 应变试验结果,然后对其进行线性拟合(见图 2).最后得到温度 - 补偿片应变的关系:

$$\varepsilon(t) = 126.329\,44 - 3.113\,67t - 0.1064t^2. \tag{2}$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为当温度为 t 时,对应的补偿片应变; t 为微晶玻璃温度,℃.

当 $R^2 = 0.998\,45$,拟合精度较高.将温度 - 应变关系式进行求导得到温度 - 补偿系数关系:

$$\beta_s(t) = -3.113\,67 - 0.212\,8t. \tag{3}$$

式中: $\beta_s(t)$ 为当温度为 t 时,对应的补偿片补偿系数, $10^{-6} \cdot \text{℃}^{-1}$.

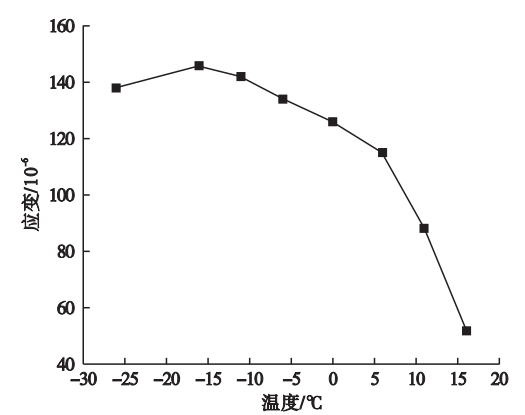


图 2 温度 - 应变拟合曲线

Fig. 2 Temperature-strain fitting curve

1.3 补偿片材料的确定

应变片法温度补偿的目的是测得应变片电阻因温度引起的误差^[9].《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中对温度补偿片的种类没有严格要求,只是说明一般采用人工合成的无机硅酸盐材料.由于种类繁多,且对试验结果有重要的影响^[10],故试验将陶瓷片和微晶玻璃分别进行试验,找出补偿片的种类对温缩系数试验结果的影响.不同补偿片的温缩系数及误差如表 1 所示.

表 1 不同补偿片的温缩系数及误差

Table 1 Temperature shrinkage coefficients and errors of different compensators

温度/℃	微晶玻璃		陶瓷片	
	温缩系数/ 10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	相对误差/%	温缩系数/ 10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹	相对误差/%
15 ~ 10	23.71	0.47	23.25	1.48
10 ~ 5	23.97	1.57	23.79	0.81
5 ~ 0	23.11	2.08	23.19	1.74
0 ~ -5	23.20	1.70	23.55	0.21
-5 ~ -10	23.99	1.65	24.63	4.36
-10 ~ -15	23.76	0.68	24.70	4.66
-15 ~ -20	23.82	0.93	24.64	4.41

从表 1 可以看出,采用微晶玻璃作为补偿片测得的铝合金温缩系数误差在 0.47% ~ 2.08%,平均误差为 1.30%;而采用陶瓷片作为温度补偿材料的温缩系数误差在 0.21% ~ 4.66%,平均误差也达到了 2.52%.说明微晶玻璃补偿的效果优于陶瓷片。

2 结果与分析

由于6061铝合金的温缩系数较为固定,因此通过试验测得的6061铝合金的温缩系数和理论上的温缩系数为 $23.6 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 进行比较来验证试验误差,而补偿片类型对于水泥稳定碎石温缩系数试验本身来说属于外界影响因素^[11],无论试件是铝合金还是水泥稳定碎石都会有良好的降低误差的效果^[12].因此,温度补偿片采用微晶玻璃,计算式按照新的温缩系数补偿式(3)对不同水泥质量分数、不同级配和不同成型方式水泥稳定碎石材料进行温缩系数试验.

试件制备和养护按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的中“T0844—2009 无机结合料稳定材料试件制作方法(梁式)”制备.选取的梁式试件长宽高为100 mm×100 mm×400 mm(见图3).



图3 部分水泥稳定碎石试件

Fig. 3 Cement stabilized gravel specimen

为了研究水泥稳定碎石材料温缩系数的影响因素,级配采用骨架密实型常规级配和骨架-嵌挤密实型抗裂级配水泥稳定碎石,拌和方式分别采用振动拌和常规拌和两种,水泥质量分数分别为2.5%、3.0%、4.0%、5.0%和6.0%.然后脱模放入养护箱,养生龄期大于90 d,最后将达到龄期的试件放入温度为105℃的烘箱中烘12 h至恒量.水泥稳定碎石级配如表2所示.

表2 水泥稳定碎石级配

Table 2 Gradation of cement stabilized macadam

粒径/ mm	骨架密实型 质量分数/%		骨架-嵌挤密实 型质量分数/%	
	规范范围	试验级配	规范范围	试验级配
37.5	100	100	100	100
31.5	100	100	85~100	97.5
19	68~86	85	57~72	69
9.5	38~58	39.5	38~48	38.5
4.75	22~32	23	28~36	28.5
2.36	16~28	19.8	16~28	27.3
0.6	8~15	10.7	7~16	11.7
0.075	0~3	0	0~5	0

2.1 水泥质量分数对温缩性能的影响

水泥是水泥稳定碎石材料不可缺少的胶结料^[13],水泥掺量的大小对温缩系数有着很大的影响^[14-15],因此试验对不同水泥质量分数的水泥稳定碎石材料的温缩系数进行了对比试验,不同水泥质量分数的温缩系数如图4所示.

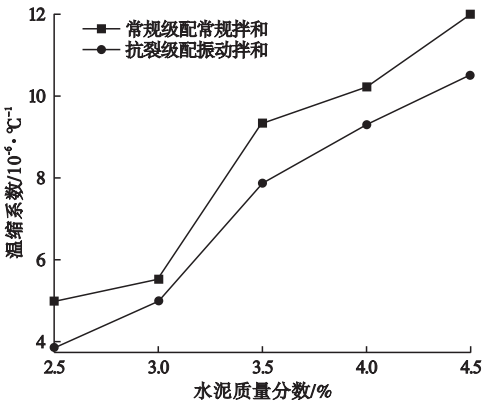


图4 不同水泥质量分数的温缩系数

Fig. 4 Temperature shrinkage coefficient of different cement mass fraction

从图4可以看出,在常规拌和常规级配的条件下,随着水泥质量分数的增加,温缩系数逐渐增大.当水泥质量分数为2.5%时,温缩系数为 $4.82 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;当水泥质量分数为6.0%时,温缩系数为 $11.70 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,温缩系数随着水泥质量分数的增加呈线性上升趋势;在振动拌和抗裂级配的条件下,随着水泥质量分数的增加,温缩系数也逐渐增大.

2.2 级配类型对混合料温缩性能的影响

试验温度分为 8 个区间,每个温度区间做 3 组试验,结果取平均值(见表 3)。在每个温度区间条件下,恒温时间为 3 h,水泥质量分数均为 3.0%。

表 3 温缩系数试验的温度区间

Table 3 Temperature range of temperature shrinkage coefficient test

编号	温度/℃
1	-25 ~ -20
2	-20 ~ -15
3	-15 ~ -5
4	-5 ~ 0
5	0 ~ 5
6	5 ~ 15
7	15 ~ 20
8	20 ~ 25

为了验证不同级配对水泥稳定碎石温缩性能的影响,试验对骨架-嵌挤密实型和骨架密实型级配分别进行了温缩系数试验(见图 5)。

由图 5(a)可以看出,在振动拌和条件下,抗裂型水泥稳定碎石各温度区间的温缩系数均低于常规级配水稳碎石,抗裂型水稳碎石的平均温缩系数为 $5.17 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,常规级配水稳碎石的平均温缩系数为 $5.76 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,温缩系数降低幅度为 10%。说明抗裂型水稳碎石的抗温缩性能优于常规级配水稳碎石。

但在常规的拌和条件下(见图 5(b)),常规级配水稳碎石的温缩系数平均值为 $5.93 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,而抗裂型水稳碎石的温缩系数平均值为 $8.31 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,抗温缩性能显著低于常规级配,降低幅度达 28%。

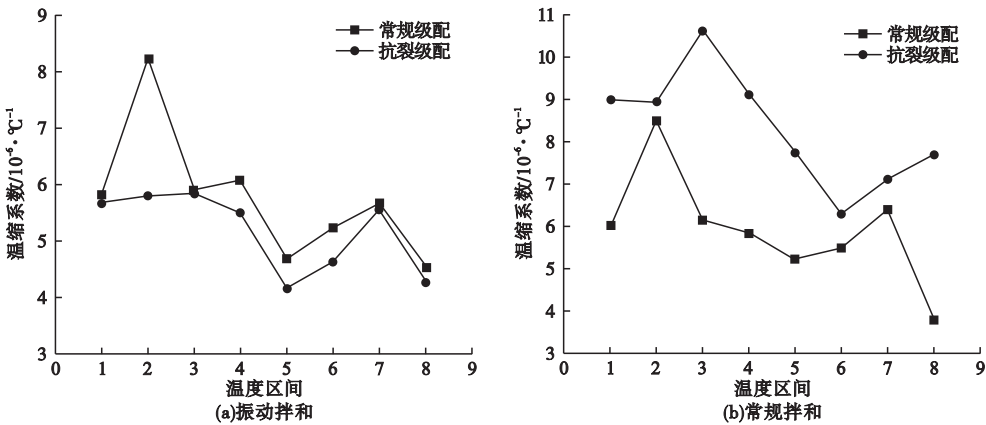


图 5 不同拌和条件下两种级配的温缩系数

Fig. 5 Temperature-shrinkage coefficient of two gradation under different mixing conditions

2.3 拌和方式对混合料温缩性能的影响

水泥稳定碎石材料在搅拌过程中会经常出现搅拌不均匀的情况^[16-18],水泥、水、集料等原材料得不到充分的结合^[19],对水泥稳定碎石材料的性能造成影响^[20],因此,试验通过振动拌和的方式成型了试件,并且和常规拌和方式成型的试件进行了温缩性能对比试验(见图 6)。

从图 6(a)可以看出,常规级配水稳碎石在不同的拌和方式下温缩系数相差不大,总

体上振动拌和工艺对水稳碎石的抗温缩性能有所改善,温缩系数平均值降低约 3%,其中 0 ~ 20 ℃,温缩系数降低幅度相对较大,降低幅度约为 9%。

但抗裂型水泥稳定碎石受拌和工艺影响十分显著(见图 6(b)),经振动拌和后的抗裂型水稳碎石各温度区间的温缩系数均显著低于常规拌和工艺。抗裂型水稳碎石在振动拌和工艺和常规拌和条件下的平均温缩系数分别为 $5.17 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $8.31 \times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,

说明抗裂型水稳碎石材料经振动拌和后抗温缩性能提升达60%以上.同时由图6(b)可以看出经振动拌和的水稳碎石材料温缩系数

相对稳定,说明混合料对不同的温度区间温度敏感性较为一致,有利于提高基层材料的抗裂性能.

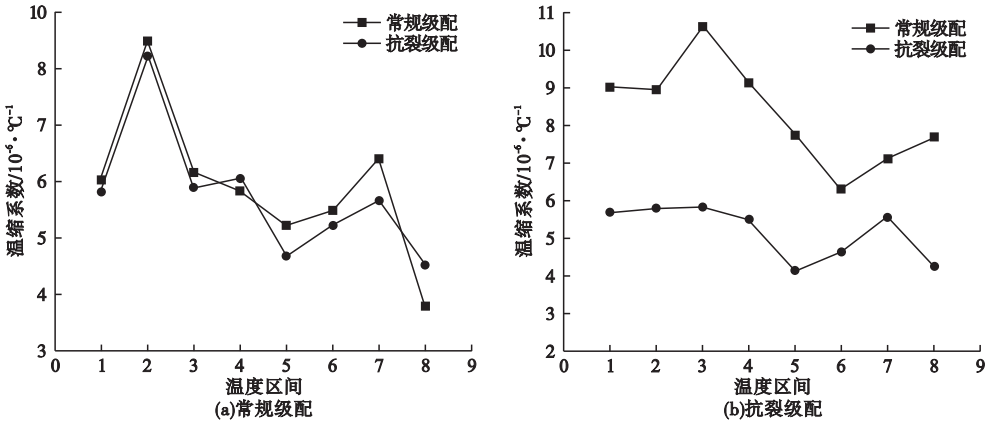


图6 不同级配下两种拌和方式的温缩系数

Fig. 6 Temperature-shrinkage coefficient of two mixing methods under different gradation

3 结 论

(1)建立了精度较高的水泥稳定材料温缩系数测量方法,误差低于3%,并且拟合了温度-应变关系式,求导得到温度-补偿系数关系式.

(2)随着水泥质量分数的增加,无论是抗裂级配振动拌和还是常规级配常规拌和的水泥稳定碎石材料,温缩系数都逐渐增大.

(3)常规拌和条件下,抗裂级配水泥稳定碎石的温缩系数高于常规级配,而在振动拌和条件下,抗裂型水泥稳定碎石的温缩系数低于常规级配水稳碎石,降低幅度为10%.

(4)常规级配水稳碎石材料在不同的拌和方式下温缩系数相差不大,总体上振动拌和工艺对水稳碎石的抗温缩性能有所改善,温缩系数平均值降低约3%.抗裂型水泥稳定碎石受拌和工艺影响十分显著,经振动拌和后的抗裂型水稳碎石的温缩系数均显著低于常规拌和,抗温缩性能提升达60%以上.

(5)抗裂型级配水稳碎石抗温缩性能的好坏与拌和工艺之间的关系非常密切,因此在采用抗裂型级配水稳碎石材料时应同时采

用振动拌和工艺,以保证基层材料的抗温缩性能.

参考文献

[1] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008(1): 1-5.
(SHA Aimin. Materials characteristics of semi-rigid base[J]. China journal of highway and transport, 2008(1): 1-5.)

[2] 马士宾, 徐文斌, 刘昊杨, 等. 半刚性基层沥青路面结构可靠性分析[J]. 中外公路, 2017, 37(6): 77-80.
(MA Shibin, XU Wenbin, LIU Haoyang, et al. Reliability analysis of semi-rigid base asphalt pavement structure [J]. China and foreign highway, 2017, 37(6): 77-80.)

[3] 郭寅川, 王礼根, 申爱琴, 等. 甘肃半刚性沥青路面结构的温度场及温度应力三维有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 27-32.
(GUO Yinchuan, WANG Ligen, SHEN Aiqin, et al. 3D finite element analysis of temperature field and temperature stress of semi-rigid asphalt pavement structure in Gansu province[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science edition), 2016, 35(3): 27-32.)

[4] 臧国帅, 孙立军. 基于FWD的半刚性基层开裂状况无损评价模型[J]. 土木工程学报, 2019, 52(1): 115-121.
(ZANG Guoshuai, SUN Lijun. A nondestructive evaluation model based on fwd for semi-rigid base cracking condition [J]. Journal of civil engineering, 2019, 52(1): 115-121.)

[5] 郭学东, 孙明志, 韩硕, 等. 沥青混凝土温度应力影响因素分析[J]. 公路, 2015, 60(11): 31-37.

- (GUO Xuedong, SUN Mingzhi, HAN Shuo, et al. Analysis of factors affecting asphalt concrete temperature stress [J]. Highway, 2015, 60(11): 31 – 37.)
- [6] HU X H, HUANG E N, BARRINGER S R, et al. Factors affecting alicyclobacillus acidoterrestris growth and guaiacol production and controlling apple juice spoilage by lauric arginate and polylysine [J]. Lwt, 2020, 119: 159 – 161.
- [7] DAI Lei, XIA Zhao, GAO Yuanyuan, et al. Visible-light-driven n-heterocyclic carbene catalyzed γ - and -alkylation with alkyl radicals [J]. Angewandte chemie (international ed. in english), 2019, 58(50): 23 – 26.
- [8] MELITA M D, PAPALIOZOU J C B. Apse-alignment in narrow-eccentric ringlets and its implications for the ϵ -ring of uranus and the ring system of (10199) chariklo [J]. Icarus, 2020, 335: 1112 – 115.
- [9] ASSOGBA O C, TAN Yiqiu, ZHOU Xingye, et al. Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect [J]. Construction and building materials, 2020, 235: 36 – 39.
- [10] WANG Yiqi, TAN Yiqiu, GUO Meng, et al. Study on the dynamic compressive resilient modulus and frost resistance of semi-rigid base materials [J]. Road materials and pavement design, 2016, 18(3): 11 – 16.
- [11] 王正道, 赵立中, 途志华, 等. 应变片法测量低温下材料线膨胀系数 [J]. 低温工程, 1999(1): 18 – 21.
(WANG Zhengdao, ZHAO Lizhong, TU Zhihua, et al. Thermal expansion measurement at low temperature using strain gauges [J]. Cryogenics, 1999(1): 18 – 21.)
- [12] 邓阳春, 陈钢, 杨笑峰. 消除电阻应变片大应变测量计算误差的算法研究 [J]. 实验力学, 2008(3): 227 – 233.
(DENG Yangchun, CHEN Gang, YANG Xiaofeng. Algorithm study of eliminating calculation errors in large strain measurement with strain gages [J]. Journal of experimental mechanics, 2008(3): 227 – 233.)
- [13] 黄跃军. 混凝土桥梁检测过程中应变测量温度补偿问题研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
(HUANG Yuejun. Studies on the problem of temperature compensation of strain measurement in the detection process of concrete bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2015.)
- [14] 郑大为, 刘畅, 李翱翔. 水泥稳定碎石收缩性能试验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2017, 36(3): 292 – 296.
(ZHENG Dawei, LIU Chang, LI Aoxiang. Research on shrinkage deformation properties of cement-stabilized macadam [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science edition), 2017, 36(3): 292 – 296.)
- [15] 丁向群, 徐晓婉. 矿物掺合料对硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥复合体系凝结时间及强度的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2018, 34(3): 498 – 504.
(DING Xiangqun, XU Xiaowan. Effect of mineral admixture on setting time and strength of portland-sulphoaluminate composite cement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2018, 34(3): 498 – 504.)
- [16] 郭远新, 李秋义, 单体庆, 等. 再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2017, 33(6): 1029 – 1038.
(GUO Yuanxin, LI Qiuyi, SHAN Tiqing, et al. Simplified design method for mix proportion of recycled coarse aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2017, 33(6): 1029 – 1038.)
- [17] 郭明磊, 肖佳, 左胜浩. 水泥-石灰石粉胶凝材料孔结构多重分形特征以及与渗透性的关系 [J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 617 – 624.
(GUO Minglei, XIAO Jia, ZUO Shenghao. Multifractal analysis on pore structure of cement-based materials blended with ground limestone and its relationship with permeability [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2019, 47(5): 617 – 624.)
- [18] 李丽慧, 马金柱. 含砖再生水泥稳定碎石基层配合比组成设计 [J]. 公路, 2019, 64(2): 44 – 48.
(LI Lihui, MA Jinzhu. Composition design of recycled cement stabilized macadam base containing brick [J]. Highway, 2019, 64(2): 44 – 48.)
- [19] 张敏江, 高双. 农村公路沥青路面病害分析及典型结构推荐 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2017, 33(6): 1048 – 1054.
(ZHANG Minjiang, GAO Shuang. The disease analysis and typical structure recommendation of rural highway asphalt pavement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2017, 33(6): 1048 – 1054.)
- [20] 闻洋, 陈伟. 聚乙烯醇纤维混凝土早期抗裂抗渗性能试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2018, 34(2): 267 – 274.
(WEN Yang, CHEN Wei. Effect of polyvinyl alcohol fiber on anti-cracking and impermeability of concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition), 2018, 34(2): 267 – 274.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)