

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.06.020

## 水泥稳定碎石早期收缩应变有限元分析

靳佩佩<sup>1</sup> 高俊启<sup>1</sup> 安平<sup>2</sup> 盛余祥<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 日照公路建设有限公司, 日照, 276826)

**摘要:**为了得出水泥稳定碎石基层早期温度场以及收缩应变的变化规律,借助 ABAQUS 有限元软件,对水泥稳定碎石基层结构建立三维有限元模型,并与某已建公路试验路段的测量数据对比,确定模型的可靠性。结果表明:水泥稳定碎石收缩应变在 7 d 后基本与温度负相关,温度降低,收缩应变增加;水泥稳定碎石基层厚度的变化对基层温度场和收缩应变的影响较大;基层层顶与层底的温度差随着厚度的增加逐渐增大;基层内的平均收缩应变随着厚度的增加逐渐减小。

**关键词:**道路工程;水泥稳定碎石基层;现场试验;数值模拟;温度场;收缩应变

**中图分类号:**U416.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)06-0866-05

## Finite Element Analysis of Shrinkage Strain of Cement Stabilized Crushed Stone in Early Age

JIN Peipei<sup>1</sup>, GAO Junqi<sup>1</sup>, An Ping<sup>2</sup>, SHENG Yuxiang<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;  
2. Rizhao Highway Construction Co. Ltd., Rizhao, 276826, China)

**Abstract:** To obtain the variation rule of temperature field and shrinkage strain for cement stabilized crushed stone base in early age, a three-dimensional finite element model of cement stabilized gravel structure is established by using ABAQUS finite element software. The reliability of the model is determined by comparing the measured data of a certain highway. The results show that the strain of cement stabilized crushed stone is negatively correlated with temperature after seven days, and the shrinkage strain increases with the decreasing temperature. The change of the cement stabilized crushed stone base thickness has a great influence on the temperature field and shrinkage strain. The difference of temperature between top and bottom of base is increased with the increase of base thickness. The average of the shrinkage strain in base is decreased with the increase of base thickness.

**Key words:** road engineering; cement stabilized crushed stone base; field test; numerical simulation; temperature field; shrinkage strain

水泥稳定碎石基层结构在早龄期已出现开裂现象,基层的开裂直接影响沥青面层的路用性能,因此,对水泥稳定碎石基层结构早龄期变形进行监测与分析是非常必要的。由于基层内温度和湿度的变化,早龄期的水泥稳定碎石基层内部会产生温度场和湿度场,从而产生收缩应变,包括干缩应变

和温缩应变。

目前,对半刚性基层收缩应变的监测方法有室内试验、现场试验和数值模拟 3 类方法。现场试验主要是通过埋入振弦式应变传感器来测量半刚性基层的收缩应变,如:王国杰等<sup>[1]</sup>采用振弦式应变计监测混凝土结构早龄期的应力相关应变,测试结

**基金项目:**中国博士后科学基金(2013M541666)资助项目;江苏省博士后科研资助计划(1302138C)资助项目。

**收稿日期:**2017-04-07;**修订日期:**2018-10-03

**通信作者:**高俊启,男,博士,副教授,E-mail:junqi\_gao@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**靳佩佩,高俊启,安平,等.水泥稳定碎石早期收缩应变有限元分析[J].南京航空航天大学学报,2018,50(6):866-870. JIN Peipei, GAO Junqi, An Ping, et al. Finite element analysis of shrinkage strain of cement stabilized crushed stone in early age[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(6): 866-870.

果表明:使用振弦式应变计可以是混凝土结构应力相关应变计算更加简便、精确,还有助于揭示混凝土早龄期水化、变形等方面的相互关系和应力相关应变的形成机理。吕惠卿等<sup>[2]</sup>将振弦应变计埋入混凝土梁试件和真实混凝土路面,进行了相关的室内和室外力学试验,以验证振弦式应变计在混凝土路面的力学性能测试应用中的可行性,为其在野外真实水泥混凝土路面使用性能的长期检测应用提供了理论依据和实践经验。吴跃红等<sup>[3]</sup>在混凝土试件中埋入振弦式应变计测试混凝土的线膨胀系数,得到了混凝土线膨胀系数随龄期变化的规律,即混凝土线膨胀系数在早龄期(2~3 d)变化较为剧烈,后期趋向均匀,并略有减小。室内试验如张鹏等<sup>[4]</sup>通过室内试验研究聚丙烯纤维水泥稳定碎石的收缩性能,试验结果表明:在一定的纤维掺量范围内,聚丙烯纤维水泥稳定碎石具有良好的抗收缩性能,应用于路面基层可提高路面的抗裂性能。数值模拟一般是借助大型通用软件 ABAQUS 等,如王艳等<sup>[5-6]</sup>借助 ABAQUS 建模分析不同水泥剂量的水泥稳定碎石基层结构内和不同开裂状态的水泥稳定碎石基层沥青路面因失水或降温引起的收缩应力,结果表明:水泥剂量增加会增大基层内的收缩应力;对于新铺筑的基层,因失水引起的收缩应力较温差的影响更为显著。

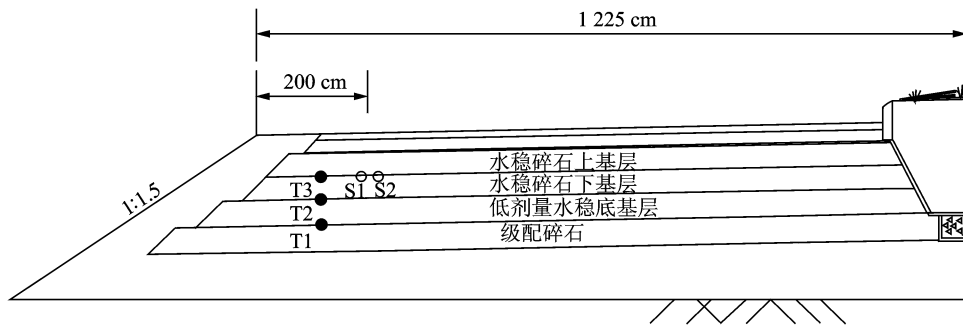


图1 应变传感器布置图

Fig. 1 Arrangement of strain sensor

利用 ABAQUS 软件,按照上述实际路面结构建立三维有限元模型,模型的大小为  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。由于水泥稳定碎石基层铺设完成后一个月才开始面层的铺设,为了与实际情况一致,模型中未加入面层(见图2)。其中, $z$ 方向为行车方向, $y$ 方向为结构深度方向, $x$ 方向为横向。为了简化问题的分析计算,假设路面各结构层连续且各向同性;层与层之间不考虑热阻问题。

## 1.2 温度场分析参数的确定

在路面结构材料参数的取值上参考李辉<sup>[7]</sup>和

目前对半刚性材料的干缩和温缩进行了大量的研究,并取得了一定的成果,但对早龄期水泥稳定碎石的研究成果有限。鉴于以上研究方法的可行性,本文利用 ABAQUS 有限元软件对半刚性基层结构进行建模,并结合现场测量的数据,对水泥稳定碎石基层的早期收缩应变进行分析。结合现场试验路段实际测量的温度,对三维模型施加温度荷载,得出并分析基层结构的早期温度场以及收缩应变的变化规律,为半刚性基层沥青路面结构的基层设计提供一些参考意见。

## 1 有限元模型

### 1.1 基层有限元模型的建立

本文有限元模型的建立基于山东省一条试验路段的路面结构。试验路段的路面结构为 18 cm 级配碎石+18 cm 底基层+18 cm 下基层+18 cm 上基层+透层、封层+6 cm AC-20C+粘层+4 cm AC-13C,基层为底基层、下基层、上基层 3 层连铺,施工中无时间间隔,见图1。试验路段铺设于 2014 年 10 月 19 日。为详细记录养生阶段基层温度、应变的变化,在路面结构中埋设了温度、应变传感器,T1,T2,T3 是水稳碎石基层、底基层中的温度传感器所埋设的位置,每层埋设 2 个温度传感器,3 层共埋设 6 个温度传感器;S1,S2 是水稳碎石基层的振弦式应变传感器。

蒋默识<sup>[8]</sup>的研究数据,确定了几种热分析参数,即

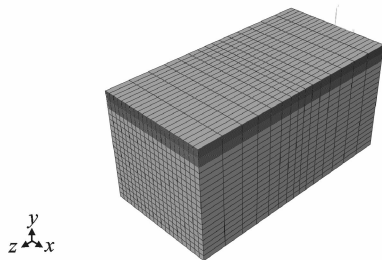


图2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

热传导率、比热容以及密度,材料热分析参数见表1。前人在研究温度场时还会考虑外部温度、气候条件、路面与空气的热交换以及太阳辐射,通过编辑子程序进行模拟分析,本文旨在研究基层早期一段时间内的收缩应变,需要不同龄期的数据,为了保证模拟更加接近实际环境,上基层底面的温度数据采用试验路段已经测得的 T3 处温度数据,即给定温度边界条件。试验路段温度传感器 T1, T2, T3 测得的不同龄期的温度数据见图 3,其中图中温度传感器 T1, T2, T3 的数据为平均值,其最大标准差分别为 0.094, 0.125 和 0.110 °C,可见实测的温度数据较为准确。

表1 半刚性基层的温度场参数

Tab. 1 Temperature field parameters of semi-rigid base

结构层	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	热传导率/ ( $\text{J}\cdot(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )
水泥稳定碎石基层	2 200	134 784	911.7
低剂量水泥稳定碎石底基层	2 100	123 552	900
级配碎石	1 800	74 400	921.1
土基	1 800	134 784	1 040

表2 收缩应变参数

Tab. 2 Shrinkage strain parameters

结构层	弹性模量/ MPa	泊松比	温缩系数/ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	干缩系数/ ( $10^{-6}/\%$ )
水泥稳定碎石基层		0.15	6.7	130
低剂量水泥稳定碎石底基层	1 000	0.2	5	
级配碎石	500	0.35	1	
土基	60	0.35	20	

表3 基层模量取值

Tab. 3 Modulus values of base course

时间	龄期/d	水泥稳定碎石基层弹性模量/MPa
2014-10-19	1	253
2014-10-21	3	1 240
2014-10-23	5	2 227
2014-10-25	7	3 214
2014-10-26	8	3 708
2014-11-02	15	3 708
2014-11-18	31	3 708

## 2 结果分析

### 2.1 不同龄期温度场的分布

由于水泥稳定碎石基层早期的干缩变形主要由材料失水引起,无外在荷载施加,所以干缩变形的产生一般是通过降低温度来模拟。温度模拟是否准确直接影响到水泥稳定碎石早期收缩应变发展规律的分析。为验证温度模拟的准确性,以上基层底面的温度 T3 为温度边界条件,模拟计算了基层底面温度 T2 和底基层底面温度 T1。实测温度值 T1, T2 与有限元模拟值见图 3。经过 T1, T2 模拟值与 T1, T2 实测值对比可知,实际测量和数值模拟的计算结果误差在 5% 以内,由此验证了数值模拟温度场分析的可靠性。

由于试验路段位于山东,铺设于 2014 年 10 月 19 日,此时正处于北方的秋季,天气越来越冷,环境温度逐渐降低。由图 3 可见,无论是 T1, T2 还是 T3,其温度均随着时间的增加逐渐降低。到 2014 年 11 月 18 日(龄期 31 d)时, T1 下降了 11.4 °C, T2 下降了 14 °C, T3 下降了 16.4 °C。这表明路面温度的变化趋势和环境温度变化趋势相同,随气温变冷,路面温度降低。另外还可以看出,由于路面深度不同,路面温度降低的程度不同。T1 位于底基层底面,温度降低了 11.4 °C; T2 位于下基层底面,温度降低了 14 °C; T3 位于上基层底面,温度降低了 16.4 °C。这表明,当环境温度降低时,路面内部越浅,其温度降低越大,路面内部越深,其温度降低越小。即随着基层深度增加,温度逐渐升高, T1 位置比 T2 位置深, T1 的温度比 T2

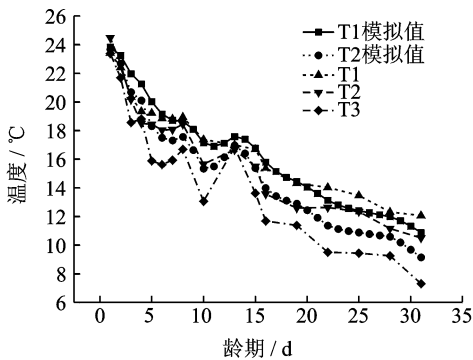


图3 基层内各深度处温度的实测值与模拟值

Fig. 3 Measured and simulated values of temperature at various depths in the base

### 1.3 收缩应变分析参数的确定

半刚性基层收缩应变的分析基于其湿度场和温度场的耦合分析,主要需要弹性模量、泊松比、温缩系数以及干缩系数 4 个参数。半刚性基层材料不同龄期的回弹模量不同,根据顾吟等<sup>[9]</sup>的研究,采用拟合方程,见式(1),确定基层材料的弹性模量。拟定的参数见表 2, 3。

$$E = 493.57d - 240.57 \quad (1)$$

式中:  $E$  为回弹模量;  $d$  为龄期。

根据相关研究,水泥稳定碎石材料在早期一个月内的总失水率约为 3.5%,根据应变相等原则将干缩转化为相应的降温幅度施加在模型上。

的温度高,下基层的温度要高于上基层的温度。造成这种现象的原因主要是随深度增加,路面材料的热量损失越来越小,热传递过程长,热传递较慢。

另外,由图 3 还可以看出,基层表面温度的变化,影响其内部温度的变化。当基层表面降温时,基层内部的温度也会随之降低。从第 1 天至第 3 天,温度持续降低,层间的温度差也逐渐加大;第 10 天至第 13 天,基层层顶的温度升高,基层层间的温度差逐渐减小。即基层层顶的温度降低时的层间温度差比基层层顶的温度升高时的层间温度差要大。这说明,温度的降低比温度的升高对半刚性基层内温差变化的影响大。

### 2.2 基层厚度对温度场的影响

基层内温度分布梯度的增大,会使基层所产生的拉应力逐渐增大,从而影响沥青面层的路用性能,因此需对不同基层厚度内的温度场进行分析研究。

本文给定 3 种不同的下基层厚度,分别为 18, 28 和 38 cm,其他结构保持不变。计算所得的温度场结果见图 4。

由图 4 可知,基层厚度的变化对基层的温度场影响较大。随着基层厚度的增加,基层层顶与基层层底间的温度差逐渐增大。基层受温度场影响的一个月内,下基层厚度为 18 cm 时,层间平均温差为 1.55 °C;下基层厚度为 28 cm 时,层间平均温差为 2.35 °C;下基层厚度为 38 cm 时,层间平均温差为 3.10 °C。这意味着,基层厚度每增加 1 cm,基层层顶与层底的温度差平均增加 4.5%。

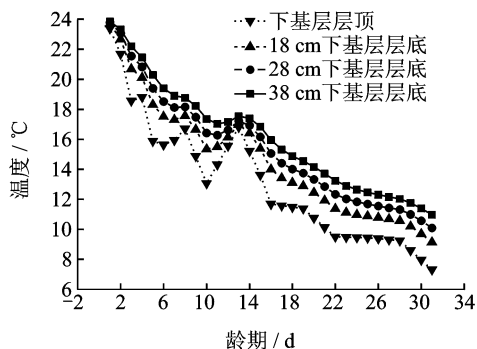


图 4 不同基层厚度的基层温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of base with different base thickness

### 2.3 不同龄期收缩应变的变化

试验路段铺设于 2014 年 10 月 19 日,监测时间从 2014 年 10 月 20 日至 2014 年 11 月 18 日,总共一个月的时间,监测水泥稳定碎石基层早期收缩应变发展规律。现场应变传感器测量结果以及数值模拟分析结果见图 5,其中试验路段测得的

收缩应变为两个振荡式传感器的平均值,其最大标准差为 1.873 $\mu\epsilon$ ,可见实测数值较为准确。

由图 5 可知,现场实测和数值模拟的结果基本保持一致,两者之间的平均误差在 5% 以内,故数值模拟分析结果较为准确。

水泥稳定碎石基层的收缩应变在水泥稳定碎石基层铺设完成后的一个月不断变化。基层铺设完成的第 1 天测得的收缩应变作为基准点,视为 0 应变;第 3 天至第 4 天,由于基层内失水量的增加和温度的降低,基层的收缩应变迅速增大;其后,基层内的失水量减少,干缩对基层收缩应变的影响逐渐减小,基层内的收缩应变基本随温度的变化而变化。

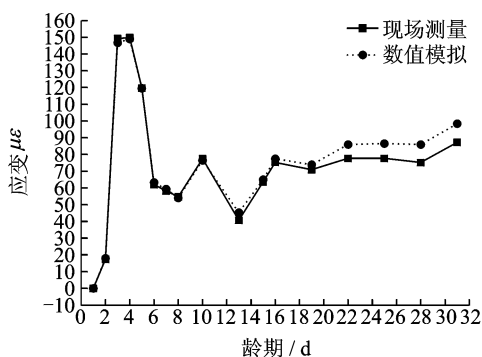


图 5 现场测量与数值模拟所得的基层早期收缩应变

Fig. 5 Shrinkage strain of base measured by field and numerical modeling in early age

### 2.4 基层厚度对收缩应变分布的影响

基层厚度沿用 2.2 节中的下基层的厚度,即 18, 28 和 38 cm,分析其对收缩应变的影响。数值模拟结果见图 6。

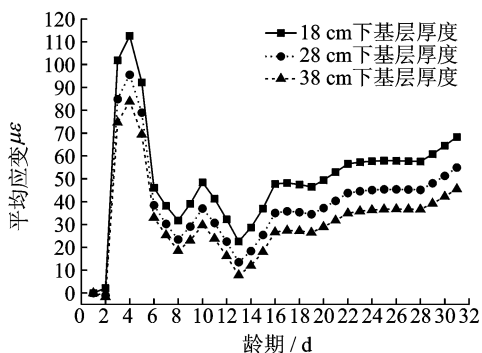


图 6 不同基层厚度的基层平均收缩应变分布图

Fig. 6 Average shrinkage strain distribution of base with different base thickness

由图 6 可知,不同的基层厚度对基层本身的收缩应变有一定的影响。基层厚度的增加,使得基层内平均收缩应变逐渐减小。当基层的厚度从 18 cm 增加到 28 cm 时,基层的厚度每增加 1 cm,

其平均收缩应变减小 2.23%；当基层厚度从 28 cm 增加到 38 cm 时,基层厚度每增加 1 cm,其平均收缩应变减小 1.91%。

### 3 结 论

(1)基层的收缩应变在基层铺设结束的前 7 天受干缩影响较大,其后与温度呈负相关,即基层内温度降低,其收缩应变增大,反之亦然。

(2)温度的降低比温度的升高对水泥稳定碎石基层内温差变化的影响大。当基层层顶温度升高时,基层层顶与层底的温度差逐渐减小;当基层层顶的温度降低时,基层层顶与层底的温度差逐渐增大。

(3)基层层顶和基层层底的温度差随着基层厚度的增加而逐渐增大。当基层的厚度在 18~38 cm 时,基层厚度每增加 1 cm,基层层顶与层底的温度差增加 4.5%。

(4)基层厚度的增加,基层内平均收缩应变减小,但是随着基层厚度的增大,基层收缩应变随深度的变化幅度逐渐减小。当基层的厚度从 18 cm 增加到 28 cm 时,基层的厚度每增加 1 cm,其产生的平均收缩应变减小 2.23%；当基层厚度从 28 cm 增加到 38 cm 时,基层厚度每增加 1 cm,其产生的平均收缩应变减小 1.91%。

### 参考文献:

- [1] 王国杰,郑建岚. 混凝土结构早龄期应力相关应变现场监测与分析[J]. 工程力学,2009,26(6):61-73.  
WANG Guojie, ZHENG Jianlan. In situ monitoring and analysis for stress-dependent strains of early age concrete structures[J]. Engineering Mechanics, 2009,26(6):61-73.
- [2] 吕惠卿,张湘伟,张荣辉,等. 振弦式应变计在水泥混凝土路面力学性能测试中的应用[J]. 公路交通科技,2007(2):61-63.  
LV Huiqing, ZHANG Xiangwei, ZHANG Ronghui, et al. Application of vibrating wire strain gauge in the test of mechanical properties of cement concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(2):61-63.
- [3] 吴跃红,曾世东. 振弦式应变计测试混凝土膨胀系数的研究[J]. 交通标准化,2014,42(23):78-81.  
WU Yuehong, ZENG Shidong. Linear expansion coefficient of concrete tested by vibrational chord strain gauge[J]. Transportation Standardization, 2014, 42(23):78-81.
- [4] 张鹏,李清富,黄承速. 聚丙烯纤维水泥稳定碎石收缩性能[J]. 交通运输工程学报,2008,8(4):30-34.  
ZHANG Peng, LI Qingfu, HUANG Chengkui. Shrinkage properties of cement stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008,8(4):30-34.
- [5] 王艳,倪富强,李强,等. 水泥稳定碎石基层横向收缩裂缝控制研究[J]. 公路交通科技,2008,25(2):45-49.  
WANG Yan, NI Fujian, LI Qiang, et al. Study on controlling of transverse shrinkage cracking in cement stabilized macadam base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008,25(2):45-49.
- [6] 王艳,倪富强,马翔. 不同基层开裂状态的沥青路面应力对比[J]. 交通运输工程学报,2008,8(6):34-39.  
WANG Yan, NI Fujian, MA Xiang. Stress comparison of asphalt pavements with different base crack states[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008,8(6):34-39.
- [7] 李辉. 沥青路面车辙形成规律与温度场关系研究[D]. 南京:东南大学,2007.  
LI Hui. Research on the relationship between rutting and temperature field of asphalt pavements [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [8] 蒋默识. 水泥稳定碎石基层热物性参数研究[D]. 西安:长安大学,2012.  
JIANG Moshi. Research on thermal physical parameters of cement stabilized macadam base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [9] 顾吟,方辉,王金昌. 水泥稳定碎石基层早期力学监测及数值模拟分析[J]. 公路交通科技,2013,30(8):51-53.  
GU Yin, FANG Hui, WANG Jinchang. Early mechanical monitoring and numerical simulation analysis of cement stabilized crushed stone base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013,30(8):51-53.

(编辑:夏道家)