

文章编号: 1002-0268 (2008) 02-0045-05

# 水泥稳定碎石基层横向收缩裂缝控制研究

王 艳, 倪富健, 李 强, 李再新  
(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为比较不同水泥稳定碎石基层材料的强度和收缩性能, 寻求减少水泥稳定碎石基层因收缩而产生的横向裂缝量的方法, 借助有限元方法建模分析不同水泥剂量的水泥稳定碎石基层结构内因失水或降温引起的收缩应力, 采用不同水泥剂量的水泥稳定碎石材料进行室内强度试验并铺筑试验路。有限元分析和室内、外试验结果表明: 随水泥剂量的增加, 基层内部的收缩应力增大; 水泥剂量仅为 2.5 % 时, 材料的 7 d 无侧限抗压强度就满足规范要求; 在满足强度的基础上可以通过适当降低水泥剂量来减少水泥稳定碎石基层裂缝的产生, 但水泥剂量越低, 强度变异性越大, 需改善施工工艺以减少施工变异性。

**关键词:** 道路工程; 水泥稳定碎石基层; 有限元方法; 裂缝控制; 收缩应力

**中图分类号:** U416.214

**文献标识码:** A

## Study on Controlling of Transverse Shrinkage Cracking in Cement Stabilized Macadam Base

WANG Yan, NI Fu-jian, LI Qiang, LI Zai-xin

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Transverse shrinkage crack in cement stabilized macadam base and reflecting crack due to shrinkage are one of most severely damage in semi-rigid asphalt pavement. To compare strength and shrinkage performance of various cement-treated materials and find out method to reduce transverse shrinkage crack, finite element method were used to analyze shrinkage stress in different cement-treated base when water loses or temperature changes, cement-treated materials with different cement dosage were used to carry out indoor strength test and build test-road. The finite element analysis and test results show that shrinkage stress in base rises with cement dosage increased; unconfined compression strength for seventh day of cement-treated materials satisfies specification requirement only possess of 2.5 percent cement; lessen cement dosage of base materials as long as strength meet requirement to reduce shrinkage crack in base is feasible, variability for base strength will increase when cement dose decreased yet, therefore, to improve construction method is quite necessary.

**Key words:** road engineering; cement treated macadam base; finite element method; crack control; shrinkage stress

理论分析和实践都表明, 由于道路横向尺寸比较小, 结构收缩时横向几乎没有约束, 而纵向可以认为是无限长, 所以在温度场和湿度场的共同作用下, 路面易于形成横向裂缝, 因此, 通车一段时间后的沥青路面往往先产生横向裂缝, 初期裂缝的间距较大, 在荷载与环境因素的进一步作用下, 横向裂缝的间距逐

渐减小, 并逐步产生各种新的路面病害。

施工刚结束时, 由于水分散失和昼夜温差的共同作用, 基层材料开始收缩, 由于下基层的约束作用, 基层板体中将产生收缩应力, 若板体与下层之间没有相互约束作用, 完全光滑, 则不会产生应力。假定在基层某一横断面处, 板体沿断面两侧受到的摩擦力相

收稿日期: 2006-10-31

作者简介: 王艳 (1979-), 女, 湖南浏阳人, 博士研究生, 从事路基路面工程研究. (wangyan\_seu@gmail.com)

等, 则在该断面处应力最大。对于向两侧延伸的足够长板体, 由于收缩引起的应力大于基层板体的抗拉强度, 因此, 板体产生开裂。从理论上讲, 裂缝最初产生在某个应力最大的中轴断面。随着干缩变形量的增加, 在半幅长度的板体中由摩擦力引起的应力也随之增加, 超过板体抗拉强度时产生第2次开裂, 依此递推, 产生第3次开裂、第4次开裂、..., 直至收缩应力小于板体的抗拉强度。

路面体铺设完成以后, 在温度场、湿度场以及荷载场的进一步作用下, 水泥稳定碎石基层中的裂缝将向面层结构内发展, 形成反射裂缝, 严重影响路面的使用性能。因此, 有必要对水泥稳定基层内的收缩开裂进行深入研究。

### 1 基层收缩应力的有限元分析

对于水泥稳定碎石基层, 水泥剂量与水稳基层的各项性能息息相关。通过有限元软件计算不同水泥剂量情况下, 水稳基层结构内部因失水和温度变化所产生的最大应力, 并将其与材料的抗拉强度进行比较。

面层铺筑之前, 基层的收缩就已经开始, 采用未加铺面层的结构进行有限元计算。基层和底基层的结构类型、厚度采用铜汤高速公路设计方案。结构基本参数如表1所示。

表1 有限元分析中的基本参数选择

Tab. 1 Primary parameter selected in finite element analysis

| 结构层        | 厚度/cm | 模量/MPa      |
|------------|-------|-------------|
| 基层 (水稳碎石)  | 38    | 随水泥剂量的不同而变化 |
| 底基层 (级配碎石) | 20    | 250         |
| 土基         | 142   | 40          |

不同水泥剂量的水泥稳定碎石基层材料相应的干、温缩系数<sup>[1,2]</sup>如表2所示。

表2 不同水泥剂量水稳碎石材料相应的收缩系数

Tab. 2 Shrinkage coefficients of cement stabilized macadam with different cement contents

| 水泥剂量/%                                             | 4    | 5    | 6     |
|----------------------------------------------------|------|------|-------|
| 干缩系数/ $(\times 10^{-6} \cdot \%^{-1})$             | 52.0 | 70.4 | 111.4 |
| 温缩系数/ $(\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ | 7.4  | 7.7  | 9.7   |

干缩结束时, 路面结构内的湿度场将由基层的最佳含水量状态变化为基层表面的含水量为2%, 基层底部的含水量为3%的状态<sup>[3]</sup>, 干缩计算中采用此标准, 并根据应变相等原则将干缩转化成相应的降温幅度施加在模型上, 路面板长度取值分别为10、20、50、100 m, 计算结果如图1所示。

从图1中可以看出, 基层内最大干缩应力随路面

长度增加而迅速增大; 路面长度大于20 m后, 干缩应力增长变缓; 路面长度大于50 m后, 干缩应力趋于稳定。计算规律与使用弹性半空间体地基板以及温克勒地基板温度应力解析解所得规律一致。

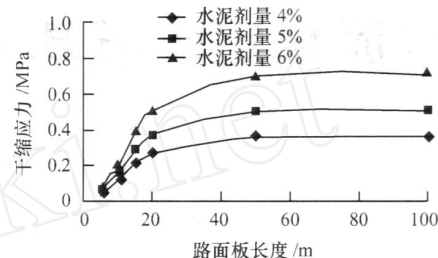


图1 干缩应力与结构长度和水泥剂量的关系

Fig. 1 Relationships of dry shrinkage stress, model length and cement dosage

水泥稳定碎石基层的低温收缩裂缝, 主要由气温骤降引起。基层施工完成且尚未加铺面层时, 若气温短时间内急剧下降, 由于变温周期较短, 基层顶面直接受温差变化的作用, 而基层底面受到基层保护, 温度变化相对较小, 因此, 形成自上而下的温度梯度。基层板内同时存在温缩应力和温度翘曲应力, 水泥稳定碎石基层的温度收缩应力应为两者之和。此次建立的有限元模型考虑了这两种应力的综合作用。

图2为气温骤降20℃时, 水稳基层内的最大温度应力随路面长度的变化规律。随着路面板长度的增加, 板内温度应力逐渐增大; 特别是路面长度小于20 m时, 温度应力随板长增大而迅速增加; 路面长度大于20 m后, 干缩应力增长缓慢, 直至稳定。这与干缩应力的变化规律类似。

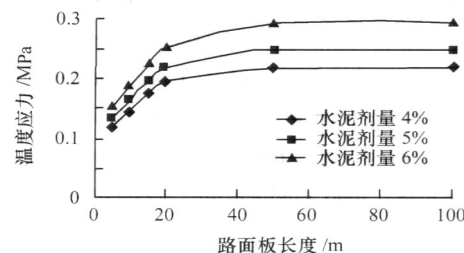


图2 温度应力与结构长度和水泥剂量的关系

Fig. 2 Relationships of thermal stress, model length and cement dosage

结合图1和图2可以看出, 随着水泥剂量的增加, 结构内部的干、温缩应力增加; 随着结构长度的增加, 干、温缩应力也增加, 当长度增加到一定值时, 应力随长度而增加的幅度明显减小。

实际上, 水稳碎石基层中的干缩和温缩不是单独进行的, 基层收缩是温度与湿度相互作用的综合效

应。但是, 不能将最大的干缩和温缩应力简单相加作为收缩应力极值, 因为基层内的干、温缩最大应力并不同时发生。温缩应力达到最大值时, 干缩应力已产生一部分松弛; 而干缩应力达到最大值时, 温缩应力往往没有出现极值。

综合考虑温度场的变化规律<sup>[4]</sup>和湿度场的叠加情况, 出现最大温度应力时, 考虑干缩应力的松弛, 将干缩应力乘以 90%, 最大温差取 20℃。计算所得的综合收缩应力考虑 95% 的可靠度水平, 结果如图 3 所示。

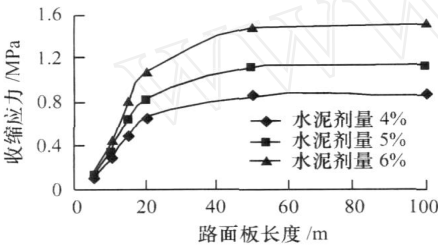


图 3 收缩应力与结构长度和水泥剂量的关系  
Fig. 3 Relationships of shrinkage stress, model length and cement content

由图 3 可见, 随水泥剂量的增加, 基层内部的收缩应力增大。同时, 综合收缩应力也随着路面板长度的增加而增加; 当路面板长度增加到 50 m 之后, 收缩应力随着板长的增加几乎不再增长, 这与单独计算的干、温缩应力具有相同的规律。由此可知, 若相应水泥剂量的水稳基层材料强度足够大, 就可以大大增加收缩开裂的间距, 从而减少基层收缩裂缝的产生。

2 试验分析

2.1 混合料室内强度试验

室内试验选用水泥剂量为 2.5%~5.0%, 规范中值级配混合料进行强度试验, 包括 7、28、60、90 d 无侧限抗压强度, 60、90 d 劈裂强度。在成型试件之前, 根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTJ 057-94)<sup>[5]</sup>采用重型击实法确定不同混合料的最佳含水量和最大干密度。在最佳含水量下成型试件后, 用塑料薄膜封闭, 放入标准养护室养护, 直到试验前一天放入水中浸泡 24 h, 第 2 天进行无侧限抗压强度试验或劈裂强度试验。结果列于表 3 和表 4。

表 3 7 d 无侧限抗压强度试验结果

| Tab. 3 Results of unconfined compressive strength test for 7 days |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 水泥剂量/%                                                            | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 |
| 强度/MPa                                                            | 2.9 | 3.3 | 3.5 | 3.7 | 4.1 | 4.4 | 6.1 |

表 4 不同龄期的无侧限抗压强度试验结果

| Tab. 4 Results of unconfined compressive strength test for various ages |                          |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|
| 龄期/d                                                                    | 不同水泥剂量 (%) 试件的抗压强度均值/MPa |     |     |     |
|                                                                         | 5.0                      | 4.5 | 3.5 | 2.5 |
| 7                                                                       | 6.1                      | 4.4 | 3.7 | 3.3 |
| 28                                                                      | 7.5                      | 6.7 | 5.2 | 4.0 |
| 60                                                                      | 8.1                      | 7.5 | 5.8 | 4.3 |
| 90                                                                      | 8.5                      | 8.1 | 6.2 | 4.4 |

劈裂强度试验在材料试验机 MTS810 上进行, 试验结果如表 5 所示。

表 5 劈裂强度试验结果

| Tab. 5 Results of splitting tensile strength test |                         |      |      |      |
|---------------------------------------------------|-------------------------|------|------|------|
| 龄期/d                                              | 不同水泥剂量 (%) 混合料劈裂强度值/MPa |      |      |      |
|                                                   | 5.0                     | 4.5  | 3.5  | 2.5  |
| 60                                                | 0.69                    | 0.64 | 0.45 | 0.30 |
| 90                                                | 0.80                    | 0.73 | 0.49 | 0.40 |

室内试验结果表明, 水泥剂量仅为 2.5% 时, 7 d 无侧限抗压强度即满足规范要求。因此, 在满足规范要求的基层强度的基础上, 通过减少水泥剂量来控制基层的收缩是可行的。

水泥剂量对强度起着最主要的作用。水泥剂量增加, 混合料无侧限抗压强度基本呈线性增长。劈裂强度也随水泥剂量的增加而增长, 当水泥剂量超过 4% 后, 劈裂强度随水泥剂量的增加而增长较少。由有限元计算结果可知, 水泥剂量增加, 收缩应力增长较快, 而试验表明劈裂强度的增长有限, 因此, 水泥剂量较高时更易产生收缩裂缝。

图 4 是对不同龄期的两种强度试验数据进行回归分析的比较。随着龄期增加, 斜率有所增长, 说明在后期, 抗压强度增长速率有所降低。

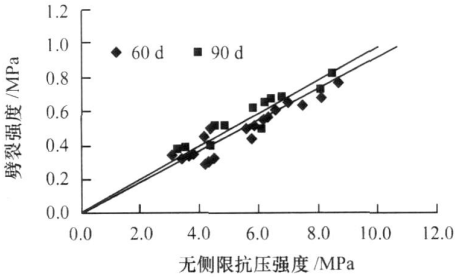


图 4 不同龄期劈裂强度与抗压强度的相关关系

Fig. 4 Relationship between splitting tensile strength and unconfined compressive strength for various ages

2.2 现场强度试验

根据室内的强度试验结果, 选取淮盐高速公路 21 标作为试验段, 铺筑低剂量水泥稳定碎石底基层试验路, 桩号为 K48+948~K49+877。选取 4 种水

泥剂量分段进行铺筑。施工时对水泥剂量进行严格控制,但实际结果显示,设计水泥剂量与实际的水泥剂量有一定的偏差。

施工完成后,15 d和75 d时分别对试验路不同分段进行钻芯取样,并切成标准试件测其无侧限抗压强度,结果如表6所示。由检测结果可知,现场强度发展规律与室内试验的相似,强度随水泥剂量增加而线性增加,随着龄期的增加,强度也增长。从强度变异性来看,水泥剂量越低,其变异系数越大,说明水泥剂量较低时,更易存在强度的薄弱环节,通过降低水泥剂量来减少基层的收缩裂缝时,要求提高施工均匀性以保证足够的基层强度。

表6 现场不同龄期无侧限抗压强度值

Tab. 6 Results of unconfined compressive strength on site for various ages

| 水泥剂量/% | 15 d     |           |        | 75 d     |           |        |
|--------|----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|
|        | 强度均值/MPa | 强度代表值/MPa | 变异系数/% | 强度均值/MPa | 强度代表值/MPa | 变异系数/% |
| 4.8    | 8.4      | 6.3       | 16     | 12.6     | 8.8       | 18     |
| 4.2    | 6.9      | 5.1       | 16     | 10.5     | 8.7       | 10     |
| 3.7    | 4.4      | 2.4       | 28     | 8.6      | 5.7       | 21     |
| 2.9    | 3.3      | 1.2       | 38     | 6.8      | 4.9       | 17     |

通过对室内抗压强度结果进行回归再做插值计算,得出与现场实测水泥剂量相同的混合料试件在标准养护条件下的强度值,并与现场钻芯测得的强度进行比较,结果如表7所示。

表7 室内外无侧限抗压强度的比较

Tab. 7 Comparisons of unconfined compressive strength between on site and lab test

| 水泥剂量/% | 15 d 无侧限抗压强度/MPa |     | 75 d 无侧限抗压强度/MPa |      |
|--------|------------------|-----|------------------|------|
|        | 室内               | 现场  | 室内               | 现场   |
| 4.8    | 6.4              | 8.4 | 8.2              | 12.6 |
| 4.2    | 5.6              | 6.9 | 7.2              | 10.5 |
| 3.7    | 4.9              | 4.4 | 6.4              | 8.6  |
| 2.9    | 3.8              | 3.3 | 5.0              | 6.8  |

可以看出,施工完成初期,水泥剂量较低时,现场强度等于或低于室内强度;而水泥剂量较高时,现场强度高于室内强度。原因可能在于施工期间温度较低,水泥水化速度减慢,造成早期强度较低,而由于水泥水化速度变化带来的强度降低对水泥剂量低的基层影响更为明显。

随着龄期的增加,现场强度逐渐增长,到75 d时,混合料现场强度均大于室内强度,比室内强度大30%~50%。这是由于随着时间的推移,基层内水泥充分水化,胶结物逐渐生成,胶结物对材料颗粒的约束增强,强度增大;另一方面,现场采用多遍振动压

路机压实,而室内为静压成型,振动压实通过施加激振力使集料颗粒发生“液化”重组而到达密实,现场压实度通常高于室内压实度,更有利于形成强度。

采用室内试验得出的劈裂强度与无侧限抗压强度的回归关系计算出现场不同剂量水泥稳定碎石基层的劈裂强度,如表8所示。

表8 现场劈裂强度值(推算)

Tab. 8 Results of splitting tensile strength on site (calculated)

| 龄期/d | 不同水泥剂量(%) 混合料劈裂强度值/MPa |      |      |      |
|------|------------------------|------|------|------|
|      | 4.8                    | 4.2  | 3.7  | 2.9  |
| 15   | 0.67                   | 0.53 | 0.38 | 0.30 |
| 75   | 1.06                   | 0.95 | 0.72 | 0.66 |

由计算结果可知,现场劈裂强度值略高于室内测定值,这是由于采用了与室内试验分析相同的回归公式,而实测无侧限抗压强度值大于室内试验值的结果;另一方面,劈裂强度随水泥剂量和龄期的变化规律与无侧限抗压强度相似。

### 3 结果分析

将有限元计算得到的不同水泥剂量的基层内部的收缩应力和室内、外劈裂强度试验结果进行比较,如图5所示。

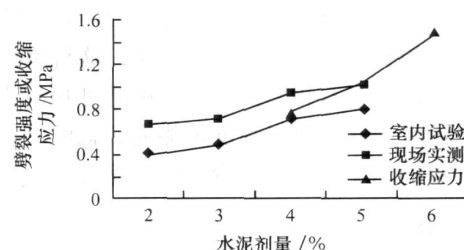


图5 收缩应力与劈裂强度的比较

Fig. 5 Comparison of shrinking stress and splitting strength

从图5中可以看出,其他条件一致的情况下,随着水泥剂量的增加,室内试验测得的劈裂强度值、现场实测劈裂强度值及基层内部的收缩应力都明显增加,但收缩应力增加的速率远远大于强度增长的速率,水泥剂量为6%时的收缩应力比水泥剂量为4%时高出约一倍之多。当收缩应力大于材料强度时,基层就会产生收缩裂缝,甚至收缩应力尚未达到材料强度,就从基层的薄弱处开裂。

水泥剂量小于5%时,对应一定的水泥剂量,计算得到水泥稳定碎石基层的开裂强度后,可通过改善级配、增加密实度等方法来提高混合料强度,而这些因素对于收缩应力的增加幅度远小于水泥剂量的影响<sup>[6]</sup>,从而可以减少基层收缩裂缝的形成。

由计算可知, 水泥稳定碎石基层内的收缩应力随着结构长度的增加而增加, 因此, 一定水泥剂量的基层均存在收缩开裂的路面临界长度。另一方面, 由于收缩应力随着水泥剂量的增大而迅速增长, 因此, 水泥剂量越低, 基层横向收缩开裂的临界长度越长, 从而一定长度路段上的开裂频率越低, 减少横向收缩开裂的同时也将减少反射裂缝的产生。

#### 4 结论

(1) 室内强度试验结果显示, 水泥剂量仅为 2.5%, 7 d 无侧限抗压强度即满足规范要求, 现场实测的早期强度略低于室内测定值, 但后期强度均高于室内测定值, 目前施工中采用的水泥剂量通常在 4% 以上, 说明通过降低水泥剂量减少基层横向收缩裂缝有较大的余地。

(2) 水泥用量是影响水泥稳定碎石基层收缩应力的主要原因。水泥剂量降低到一定程度, 结构内部产生的收缩应力可能等于或小于材料强度, 理论上不会产生收缩裂缝; 水泥剂量越低, 强度变异性越大, 结构内部将存在更多的薄弱环节, 并不利于收缩裂缝的控制。因此, 改善施工工艺以减少施工变异性、减少基层内部强度薄弱点的出现也是横向收缩裂缝控制的重要环节。

(3) 结合有限元计算和室内、外试验结果可知, 水泥剂量控制在 3%~4%, 甚至更低, 可以在满足强度的基础上, 有效控制水泥稳定碎石基层横向收缩裂缝的产生。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 东南大学. 水泥稳定碎石基层合理强度指标与反射裂缝防治技术深化研究 [R]. 南京: 东南大学, 2006.  
Southeast University. Research on Reasonable Strength Indexes of Cement-treated Base and Technology of Reflective-crack Prevention and Management [R]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [2] 杨文丁. 半刚性基层材料收缩性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.  
YANG Wen-ding. Research on Shrinkage Performance of Semi-rigid Base Materials [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [3] 李强. 半刚性基层沥青路面反射裂缝控制指标研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.  
LI Qiang. Research on the Design Indexes of Reflective Cracking in Semi-rigid Base Asphalt Pavements [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [4] 吴赣昌. 半刚性路面温度应力分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.  
WU Gan-chang. Temperature Stress Analysis of Semi-rigid Pavement [M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [5] JTJ 057-94, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S].  
JTJ 057-94, Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering [S].
- [6] 张嘎吱. 考虑抗裂性的水泥稳定类材料配合比设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2001.  
ZHANG Ga-zhi. Research on Mix Ratio Design Method of Cement-treated Materials Considering Anti-cracking Performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.
- [7] 黄煜镔. 水泥稳定碎石基层沥青路面裂缝防治研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.  
HUANG Yu-bin. Research on Crack Prevention and Management for Cement-treated Macadam Base Asphalt Pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [8] 胡力群, 沙爱民. 半刚性基层材料温缩系数测定影响因素研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (1): 17 - 20.  
HU Li-qun, SHA Ai-min. Research on Influence Factor in Semi-rigid Base Course Material Temperature Shrinkage Coefficient Test Using Strain Gauge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (1): 17 - 20.
- [9] 倪富健, 徐皓, 刘清泉, 等. 排水性沥青表面层半刚性基层路面温度场分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (10): 15 - 19.  
NI Fu-jian, XU Hao, LIU Qing-quan, et al. Analysis of Temperature Fields of Semi-rigid Pavement with Porous Asphalt Course [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (10): 15 - 19.
- [10] 顾兴宇, 董侨, 倪富健. 连续配筋水泥混凝土路面裂缝发展规律研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (6): 37 - 40.  
GU Xing-yu, DONG Qiao, NI Fu-jian. Research on Crack Progression of Continuously Reinforced Concrete Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (6): 37 - 40.