

文章编号 :1002-0268(2006)08-0028-05

慢裂型水泥稳定碎石基层材料的设计方法

徐宏, 邓学钧

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 在传统的、以强度为设计指标的基础上, 提出了水泥稳定碎石的新设计指标——抗裂指数, 并认识到在进行混合料组成配合比设计时, 在满足强度要求的前提下, 如能控制抗裂指数接近于或小于1, 则能明显提高水泥稳定碎石混合料的缓裂或抗裂性能, 从而设计出缓裂型的水泥稳定碎石。在室内试验研究的基础上, 通过试验路的铺筑, 提出原材料及其用量控制: 在苏南及水环境、温度条件类似的地区宜控制水泥用量小于等于5%; 宜控制集料中4.75 mm筛的通过量在29%~39%之间。

关键词: 道路工程; 设计方法; 抗裂指数; 水泥稳定碎石; 缓裂型

中图分类号: U416.214

文献标识码: A

Design Method of Slow Cracking Cement-stabilized Aggregates

XU Hong, DENG Xue-jun

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

Abstract: Based on the traditional strength index used in design, a new design index—anti-cracking index was brought forward for the design of cement-stabilized aggregate. If strengths were sufficient and furthermore anti-cracking indexes were close to or less than 1, the performances of cement-stabilized aggregates in slowing or resisting crack growth would be improved obviously, when the mixture ratio of cement-stabilized aggregate materials was designed. Therefore, a kind of cement-stabilized aggregate to delay the cracking could be designed. Based on the test and research in laboratory, the field test road was constructed, and accordingly it brought forward the controlling of original materials and their dosages: In the South of Jiangsu Province and areas with the similar water environment and temperature condition, the cement dosage of the cement-stabilized aggregate ought to be controlled at 5% or less and the percentage passing through 4.75 mm's sieve of aggregate gradations ought to be controlled over 29%~39%.

Key words: road engineering; design method; anti-cracking index; cement-stabilized aggregate; delaying the cracking

据统计, 我国高等级公路中90%以上是半刚性基层沥青路面, 而半刚性基层中水泥稳定碎石占很大的比例。无论是我国南方还是北方, 半刚性基层沥青路面的开裂现象都比较普遍。沈大高速公路鞍山段, 1987年3月和1988年5月的两次调查, 裂缝率增加21.4%; 广佛高速公路建成的第2年, 即1990年2月全线15 km出现180多条贯通横缝^[1]。在国外, 裂缝问题同样是各国工程界的一个难题。

英国道路委员会调查了M4高速公路上92 km路段(半刚性基层沥青路面)的表面反射裂缝, 发现多数路段上有密集横缝, 平均间距4.5 m^[1-3]。

在我国《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034-2000)^[4]中, 对水泥稳定碎石基层的强度作了规定, 但对抗裂则没有相应的规定。然而干、温缩引起的早期开裂已严重影响了高等级公路所要求的优良路用性能。

收稿日期: 2005-12-25

基金项目: 交通部公路司1999年度公路建设标准、规范、定额等编制、修订工作计划

作者简介: 徐宏(1966-)男, 江苏滨海人, 研究员级高工, 博士研究生, 研究方向为路基路面工程。(xh@yniec.com)

1 国内外对水泥稳定类基层材料抗裂问题的研究状况

水泥稳定类基层材料以其较高的强度、较好的稳定性以及较强的抗冲刷性能，被各国道路工程所广泛采用。然而这种材料的收缩并产生裂缝，进而反射到面层，形成的路面反射裂缝，影响了路面的使用品质^[1,5-7]。

目前对水泥稳定材料的抗裂研究，主要集中在以下几个方面：针对水泥稳定材料本身，在保证混合料强度的基础上，通过调整 and 比较，选用收缩性小的混合料配合比，和(或)掺入缓裂外加剂；研究针对基层反射裂缝的防治措施，在水泥稳定基层与沥青面层之间设置隔离中间层或应力吸收层等；

就沥青面层，采用高性能沥青层或厚沥青层，阻止或减轻水泥稳定基层产生的反射裂缝。

在广大道路科技工作者的不懈努力下，通过大量试验研究和工程实践，在以下几个方面取得了成果：水泥稳定基层混合料强度、收缩性能的影响因素研究；水泥稳定基层材料收缩的微观分析；

水泥稳定基层材料开裂的防治措施：选择干、温缩性能较好的混合料组成、研制可显著降低收缩的外加剂、设置中间层、预制微裂纹、预切缝；收缩裂缝的施工控制：适当减少水泥稳定基层混合料的水泥用量（控制小于 5%）、控制水泥稳定基层混合料的含水量、加强基层养生、注意对施工离析的控制^[1,5-9]。

2 以抗裂指数为控制指标的水泥稳定碎石混合料的新设计方法

我国 10 多年来的水泥稳定碎石基层的工程实践表明，如果仅以强度为指标进行混合料组成配合比设计，则会导致级配不合理、粒料偏细、粘土含量过多等，从而引起通车初期裂缝偏多。因此，必须在强度指标的基础上再找到一个抗裂指标，以定量地控制所设计混合料的开裂。

2.1 水泥稳定碎石干、温缩开裂及抗裂设计的力学机理分析

断裂力学认为，裂缝扩展有 3 种模式：张开、剪切和撕开，如图 1 所示。干、温缩应力对半刚性基层裂缝的影响模式为张开模式。行车荷载对反射裂缝的影响模式是张开和剪切模式。当车轮驶经裂缝的正上方时，以张开模式引起反射裂缝，当车轮在裂缝之前和之后位置时，主要以剪切模式引起反射裂缝。撕开模式一般不发生在半刚性基层路面开

裂过程中^[9]。

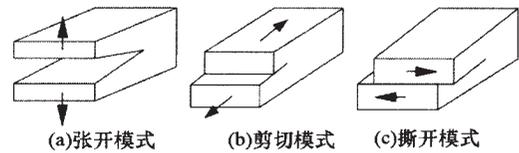


图 1 裂缝扩展的 3 种模式

Fig.1 Three kinds of crack-expansion patterns

下面以张开模式来分析水泥稳定碎石干、温缩开裂及抗裂设计的力学机理。根据断裂力学理论，对于裂缝扩展的张开模式，其尖端应力强度因子为：

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sqrt{2r} \sigma_x), \tag{1}$$

式中，r、 σ_x 的含义如图 2 所示。

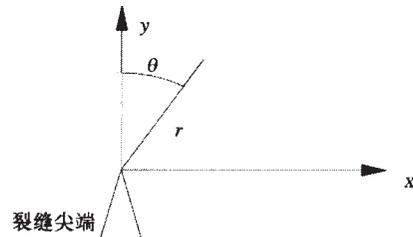


图 2 裂缝尖端的坐标系统

Fig.2 Coordinate system of the crack tip

应力强度因子 K_I 是裂缝尖端应力奇异性程度的标志，亦是衡量裂缝尖端附近应力衰减速度的重要标志。如果应力强度因子小，则应力衰减速度快，裂缝不容易扩展；如果应力强度因子大，则裂缝容易扩展。

为了了解半刚性基层干、温缩开裂及由此引起的反射裂缝的发展机理，采用 4 层弹性层状体系，取坐标系如图 3，x 轴为路长方向，y 轴为垂直向下方向， E_i 为各层的弹性模量， α_i 为各层的干或温缩系数， h_i 为各层的厚度，h 为裂缝长度。

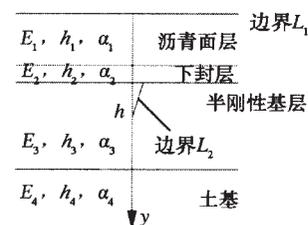


图 3 4 层弹性层状体系的坐标系

Fig.3 Coordinate system of the layered system with four elastic layers

根据弹性力学理论建立 σ_x 与半刚性基层干或温缩系数、弹性模量、厚度；沥青面层干或温缩系数、弹性模量、厚度等性能参数的关系式，代入式 (1) 可得应力强度因子 K_I 与上述性能参数的关系式。分

析这些关系可知：应力强度因子 K_I 随着半刚性基层和(或)沥青面层干或温缩系数、弹性模量的增大而增大，随着厚度的增大而减少。由此可见，采取有效措施减少半刚性基层干或温缩系数是控制或延缓其开裂的有效手段，在条件许可时也可以通过增加厚度来控制或延缓其开裂。当然用柔性基层代替半刚性基层也可以控制或延缓基层开裂。另外，通过增加沥青面层的厚度或采用更低弹性模量的沥青面层可以有效地控制或延缓反射裂缝。

2.2 以抗裂指数为指标的混合料组成设计基本理论

(1)水泥稳定碎石耐用性系数

水泥稳定碎石耐用性系数分为耐湿性系数和耐温性系数。

将材料可经受多少含水量([W])和温度([T])变化的最大范围定义为耐湿性系数和耐温性系数。

$$[W]=\frac{R_w}{E_w \times \mu_d} = \frac{\mu_m}{\mu_d}, [T]=\frac{R_w}{E_w \times \mu_t} = \frac{\mu_m}{\mu_t} \quad (2)$$

式中， R_w 为材料的极限抗弯拉强度，MPa； E_w 为材料的抗弯拉回弹模量，MPa； μ_m 为材料的极限拉应变， μ ， μ_m 为 R_w/E_w ； μ_d 为干缩系数， $\mu / \%$ ； μ_t 为温缩系数， $\mu / \%$ 。

(2)水泥稳定碎石的耐用性指数

半刚性基层材料如果内部的干、温缩应变大于材料的极限拉应变，便开裂。因此，半刚性基层的抗裂或缓裂设计就要保证在最不利状况下，半刚性基层材料的收缩总应变小于或接近于材料极限拉应变。据此，将半刚性基层材料的耐用性系数与当地最不利状况的自然环境条件相联系，建立耐用性指数公式：

$$S_d = \frac{W_m}{[W]} < 1, S_t = \frac{T_m}{[T]} < 1, \quad (3)$$

式中， W_m 、 T_m 为设计年限内，在最不利状况下当地半刚性基层含水量、温度最大变动范围 $\%$ ； S_d 、 S_t 为抗干、温缩耐用性指数， S_d 、 $S_t < 1$ 则说明在当地环境条件下，这种半刚性基层材料不会出现干、温缩裂缝，否则不然。 W_m 、 T_m 应结合当地气候、地质情况通过调查确定。

(3)抗裂指数

半刚性基层在实际工作过程中，干、温缩是同时发生的。夏季高温季节，基层由于日夜温差产生温缩的同时伴随着混合料的干缩；冬季，在我国北方地区，基层混合料一方面在温差作用下产生温缩，

另一方面北方干燥的冷风使混合料产生风干，干、温缩也是同时作用。故应同时考虑混合料的抗干缩耐用性指数和抗温缩耐用性指数，以抗裂指数作为混合料的抗裂设计指标。

$$I = S_d + S_t \quad (4)$$

式中， I 为抗裂指数； S_d 为抗干缩耐用性指数； S_t 为抗温缩耐用性指数； μ_d 为混合料干缩权重系数， $\mu_d < 1$ ； μ_t 为混合料温缩权重系数， $\mu_t < 1$ 。式(4)中 μ_d 、 μ_t 与半刚性基层所处的自然区划有关，南方地区混合料收缩中干缩相对较为严重， μ_d 应取大值；而北方地区温缩较为严重， μ_t 应取大值， μ_d 、 μ_t 应结合当地气候情况通过调查确定，在没有经验的地区为安全起见应取大值，且无论什么情况，总应保证 $\mu_d + \mu_t > 1$ 。

2.3 水泥稳定碎石混合料组成的新设计方法

(1)混合料组成设计步骤

设计准备：根据以往道路修建的经验，确定目标配合比的大致范围。调查总结相当长一段时期内的气候状况、地质条件，确定当地最不利状况下半刚性基层混合料的含水量、温度变化的最大范围 W_m 、 T_m ，以及干、温缩权重系数 μ_d 、 μ_t 的经验数值。

混合料配合比初步确定：参照以往该地区公路建设的经验，初步确定水泥稳定碎石混合料中水泥剂量、集料的类别及其级配组成、外加剂和(或)粉煤灰的掺配比例。考虑实际施工偏差，允许水泥含量有 $\pm 0.5\%$ 的偏差。针对实际应用中的几个集料料堆，根据集料级配范围要求及各料堆筛分试验结果初定几种配合比，以此来进行相关的室内试验。

击实试验：按初定的几种混合料配合比，分别制备不同的混合料，按照 JTJ 057-94 的方法，进行击实试验，以确定这几种混合料的最佳含水量和最大干密度。

无侧限抗压强度试验：以击实试验所得的最佳含水量和最大干密度为标准，按 JTJ 057-94 的方法进行试验，并按 JTJ 034-2000 的相关要求进行检验。

抗弯拉强度试验：在最佳含水量、最大干密度时，以 98%的压实度静压成型 100 mm×100 mm×400 mm 的梁式抗弯拉强度试件，在标准条件下养护到达规定龄期。抗弯拉强度的测试采用三分点加载法，承压板支距为 100 mm，跨距为 300 mm。各级荷载梁式试件中部底面的拉应力为：

$$\sigma_s = \frac{P_i L}{bh_2} \quad (5)$$

式中, σ_s 为对应于 P_i 时梁中底面的拉应力, Pa; P_i 为各级荷载值, N; L 为梁支点距离, m; h 、 b 为梁的高度、宽度, m。本试验的目的是通过测试混合料的最大抗弯拉能力来评价混合料的抗拉强度。

抗弯拉回弹模量试验:在梁中底部粘贴 80 mm 标距、阻值 120 Ω 应变片。试验过程中,当压力到达一定初始荷载(如 1.0 kN)时,将静态应变处理仪调零,然后逐级加荷至 $0.5P_0$ (P_0 为抗弯拉强度),按式 (6) 计算抗弯拉回弹模量。

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (6)$$

式中, E_s 为抗弯拉回弹模量, MPa; σ_s 为弯拉应力, Pa; ϵ_s 为弯拉应变, μ 。

干缩系数测定 通过混合料干缩试验,得出对应混合料含水量条件下的干缩应变和干缩试验结束时的最大应变,由此得到该混合料的平均干缩系数。

温缩系数测定:通过混合料温缩试验,得出其温缩应变和温缩系数。

(2)混合料抗裂性能评价

由试验得到水泥稳定碎石的干、温缩系数 α_t , 极限拉应变 ϵ_m , 以及当地含水量、温度最大变化范围 W_m 、 T_m , 按式 (3) 计算出抗干、温缩耐用性指数 S_d 、 S_t , 并查表(该表由当地有经验的人员根据气候条件提出)得出权重系数 α_d 、 α_t , 按式 (4) 计算 I , 如能满足 $I < 1$ 或接近 $I < 1$ (即 $I < 1.5$), 就达到抗裂或缓裂设计的目的, 否则应回到 , 调整配合比重新进行上述试验与评价。

2.4 算例

笔者于 2003 年 5 月对某高速公路拟使用的 2 种水泥稳定碎石混合料分别进行了无侧限抗压强度、抗弯拉强度、抗弯拉回弹模量及干、温缩试验。2 种配合比分别是: A、外掺 5% 水泥, 集料比: 1# 2# 3# 4#=38 22 15 25; B、外掺 5% 水泥+6% 缓凝阻裂剂(占水泥用量)^[9], 集料比: 1# 2# 3# 4#=38 22 15 25。

表 1 试验结果表

Tab.1 Table of test results

试验项目	配合比 A	配合比 B
无侧限抗压强度/MPa	4.44	4.12
抗弯拉强度/MPa	1.05	1.16
抗弯拉回弹模量/MPa	1.21×10^4	1.30×10^4
干缩系数/($\mu \cdot \%^{-1}$)	30.2	23.7
温缩系数/($\mu \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	22.64	20.84

根据经验,在苏南及水环境、温度条件类似地区,水泥稳定碎石混合料含水量最大变化范围

W_m 3%、温度最大变化范围 T_m 10 $^\circ\text{C}$;干缩权重系数 $\alpha_d=0.8$, 温缩权重系数 $\alpha_t=0.3$ 。2 种配合比的水泥稳定碎石混合料的抗裂性能分析如下。

(1) 配合比 A

计算混合料的极限弯拉应变

$$\epsilon_m = R_w / E_w = 1.05 / 1.21 \times 10^4 = 86.8 \mu$$

计算混合料耐湿、温性系数

$$[W] = \frac{\epsilon_m}{\alpha_d} = \frac{86.8}{30.2} = 2.874, [T] = \frac{\epsilon_m}{\alpha_t} = \frac{86.8}{22.64} = 3.834$$

计算抗干、温缩耐用性指数

$$S_d = \frac{W_m}{[W]} = \frac{3}{2.874} = 1.000$$

$$S_t = \frac{T_m}{[T]} = \frac{10}{3.834} = 2.608$$

计算抗裂指数

$$I = \alpha_d S_d + \alpha_t S_t = 0.8 \times 1.000 + 0.3 \times 2.608 = 1.582$$

(2)配合比 B

计算混合料的极限弯拉应变

$$\epsilon_m = R_w / E_w = 1.16 / 1.30 \times 10^4 = 89.2 \mu$$

计算混合料耐湿、温性系数

$$[W] = \frac{\epsilon_m}{\alpha_d} = \frac{89.2}{23.7} = 3.764, [T] = \frac{\epsilon_m}{\alpha_t} = \frac{89.2}{20.84} = 4.280$$

计算抗干、温缩耐用性指数

$$S_d = \frac{W_m}{[W]} = \frac{3}{3.764} = 0.800$$

$$S_t = \frac{T_m}{[T]} = \frac{10}{4.280} = 2.336$$

计算抗裂指数

$$I = \alpha_d S_d + \alpha_t S_t = 0.8 \times 0.800 + 0.3 \times 2.336 = 1.341$$

由上述算例可知,配合比 B 的抗裂指数相对较小,但仍不能满足 $I < 1$ 的要求,仅达到 $I < 1.5$,说明这种配合比虽然抗裂性能相对较好(慢裂),但开裂仍然是不可避免的,故称其为慢裂型水泥稳定碎石混合料。

3 试验路跟踪检测与效果评价

苏南某地水泥稳定碎石试验路设置, D1: C-5%、级配中值、最佳含水量、7% 粉煤灰; D2: C-5%、级配中值、最佳含水量、6% 外加剂; D3: C-5%、级配中值、最佳含水量; D4: C-5%、4.75 mm 通过量为 29%、最佳含水量; D5: C-5%、级配中值、最佳含水量+2%; D6: C-5%、级配中值、最佳含水量-2%; D7: C-6%、级配中值、最佳含水量; D8: C-7%、级配中值、最佳含水量。其中粉煤灰含

量为内掺，外加剂掺量为占水泥用量的百分比。

3.1 路表弯沉

试验路 8 个试验段由于水泥稳定碎石基层混合料的差异，路表弯沉呈现很大的差别，图 4 为 8 个试验路段 2 次弯沉检测的对比图。

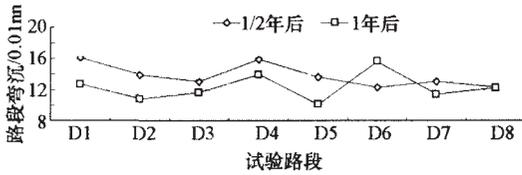


图 4 路表弯沉对比图

Fig.4 Contrast figure of road surface deflection

由图 4 可见，1/2 年后的路表弯沉检测中，D1 的代表弯沉最大，D8 的代表弯沉最小。由此，路面的整体综合回弹模量依次为：D8>D6>D3>D7>D5>D2>D4>D1。而 1 年后的检测中，D6 的弯沉最大，D5 的弯沉最小。此时各路段综合回弹模量大小依次为：D5>D2>D7>D3>D8>D1>D4>D6。

通过综合回弹模量的分析对比，可得出：掺加粉煤灰路段初期的综合回弹模量要显著小于其他路段，可能诱发荷载裂缝及车辙病害。但后期的综合回弹模量的增长较快，说明粉煤灰能提高水泥稳定碎石的后期强度。1/2 年后的弯沉检测表明，混合料在最佳含水量+2%下压实的路段 D5 综合回弹模量较小。但 1 年后再次检测，综合回弹模明显增大，表明在略大于最佳含水量条件下成形的混合料随龄期的增长整体强度较高。虽然 1/2 年后的检测中，D6 段的代表弯沉最小，但 1 年后代表弯沉最大，可见水泥稳定碎石在略小于最佳含水量的条件下成型是不可取的。掺加 HNF-6B 外加剂的混合料 (D2 段) 的综合回弹模量在 8 个试验段 2 次弯沉检测的降低值大小仅次于外掺粉煤灰的路段 (D1)，可见外加剂能提高基层的后期承载能力。掺加 6%、7%水泥的 D7、D8 段一般认为其综合回弹模量应最大，但结果不是这样，究其原因是因为这两个路段裂缝较多，虽然强度高，但整体承载能力却不是最好。

3.2 面层裂缝

该水泥稳定碎石试验路 2002 年 5 月通车，在 2002 年 11 月调查时，仅发现 D8 有一处明显的横缝，长约 5.6 m，宽约 0.3 cm；2003 年 5 月调查，发现 D8、D7 各有 4 道横缝，D6 有 2 道横缝，D3、D5 各有 1 道横缝，D4、D2、D1 没有裂缝；2004 年 5

月调查，发现 D8、D7 各有 4 道横缝，D6、D3、D5 各有 3 道横缝，D4、D2、D1 仍然没有裂缝。调查结果表明，水泥用量太大是造成水泥稳定碎石开裂的主要原因，且成形时含水量偏低对抗裂也不利；而在水泥稳定碎石中掺入 HNF-6B 外加剂或粉煤灰，或者采用较粗的集料级配对抗裂是有利的。

4 结语

(1) 提出了水泥稳定碎石的新设计指标——抗裂指数。在满足强度要求的前提下，若能保证抗裂指数接近或小于 1，则能明显提高混合料的缓裂或抗裂性能。该成果对半刚性基层设计和施工具有指导意义，并可供有关规范修订时参考。

(2) 水泥稳定碎石基层宜采用强度等级适中的水泥，在苏南及水环境、温度条件类似的地区宜控制水泥用量小于等于 5%；集料级配宜控制在 4.75 mm 的通过量在 29%~39%之间；粉煤灰掺量宜控制在 4%~7%之间，HNF-6B 或类似的外加剂掺量宜控制在水泥用量的 6%左右，其他类型外加剂的掺量应由室内试验确定。

(3) 应加强水泥稳定碎石基层缓裂设计的地区差异性研究，建立全国各主要片区的水泥稳定碎石基层含水量、温度最大变化范围 W_m 、 T_m ，干、温缩权重系数 α_t 的经验数据表；着手沥青碎石基层的研究及其在高速公路的推广应用。

参考文献：

- [1] 沙庆林. 高等级公路半刚性基层沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [2] MEGAT JOHARI, MEGAT LOLD NOOR. Durability and Strength Characteristics of Cement Stabilized Modified Melaka Series [J]. Journal of Islamic Academy of Sciences, 1994, 7(2).
- [3] LILLEY A A, WILLIAM RIT. Cement-stabilized Materials in Great Britain [J]. Highway Research Recommendation, 1973, (442).
- [4] JTJ 034-2000, 公路路面基层施工技术规范[S].
- [5] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [6] 同济大学道路与交通工程研究所. 半刚性基层沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [7] 李超龙. 沥青路面水泥稳定碎石基层探讨 [J]. 华东公路, 1994, (3):79- 82.
- [8] 黄学文, 张正峰. HNF-6 高效缓凝阻裂剂在水泥稳定碎石基层中的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2001, (2): 13- 15.
- [9] 彭妙娟, 张登良, 夏永旭. 半刚性基层沥青路面的断裂力学计算方法及其应用 [J]. 中国公路学报, 1998, (2): 30- 38.