

文章编号: 0451-0712(2006)01-0164-04

中图分类号: U414.01

文献标识码: B

# 原材料引起的水泥混凝土路面耐久性问题分析

姚佳良, 张起森

(长沙理工大学 长沙市 410076)

**摘 要:** 在调查国内外水泥混凝土路面耐久性现状的基础上, 详细阐述了路面水泥混凝土中的原材料: 水泥、集料、外加剂、水和粉煤灰对水泥混凝土耐久性的影响, 并提出了相应的控制措施。

**关键词:** 水泥混凝土路面; 耐久性; 水泥; 集料; 外加剂; 粉煤灰

路面水泥混凝土由于其薄板特征、动载作用以及使用中经历比其他土建结构更复杂、严酷的自然环境, 由此造成耐久性不足而非力学强度不够遭破坏的水泥路面实例越来越多。目前, 美国高速公路网中, 水泥混凝土路面占 49% 左右。经过多年使用, 州际公路和干线公路水泥混凝土路面都已进入修复期。调查表明, 除正常疲劳损坏外, 造成混凝土路面耐久性不足的主要原因与使用的材料有关。与发达国家相比, 我国开始进行大规模公路工程施工的时期还非常短, 但已暴露出的工程耐久性问题非常突出。

如笔者在参与编写交通部“公路工程混凝土结构防腐蚀指南”调查研究中发现, 黑龙江省有一高等级公路, 仅经过一个冬季就因盐冻而遭受大面积损坏。调查中还发现一些水泥混凝土路面及混凝土路缘石使用几年即出现严重开裂、蜂窝、坑洞等病害。诚然, 水泥混凝土路面病害过早发生、耐久性不足与现今车辆超载严重密不可分, 但将上述病害单纯归因于车辆超载则是片面的, 这不能从根本上解决混凝土路面发生过早损坏的问题。为了保证路面使用寿命、本文拟从路面的耐久性出发, 从混凝土原材料方面分析这个问题。

混凝土的主要组成材料有: 水泥、集料、掺合料、外加剂或水, 其中任一种材料的有害性质都会使混凝土损坏, 同时材料也可与环境中的化学的或物理的因素结合使混凝土损坏, 从而导致路面混凝土结构使用寿命的降低, 引起耐久性问题。希望以其引起施工设计管理人员的重视, 正确选择和使用原材料, 确保路面寿命。

## 1 水泥

### 1.1 水泥成分

硅酸盐水泥熟料主要有 4 种成分, 即硅酸三钙( $C_3S$ )、硅酸二钙( $C_2S$ )、铝酸三钙( $C_3A$ )和铁铝酸四钙( $C_4AF$ ), 不同的水泥或同品种同强度的水泥这些成分也不一定相同, 因而水泥的性质也会产生差别, 同时导致混凝土耐久性的不同。Fagerlund<sup>[1]</sup>研究表明, 水泥  $C_3A$  含量高可增大混凝土盐剥落量和试件间的离散度。Fagerlund 把高  $C_3A$  的有害影响归于它们对引气机理的影响。如会增大气泡间距等。此外, 有  $SO$  存在时,  $C_3A$  会转化成膨胀性的水泥硫铝酸钙。同时  $C_3A$  的水化热最高, 其水化热数倍于其他矿物成分, 且其收缩率是  $C_2S$  收缩率的 3 倍, 是  $C_4AF$  的 5 倍。因此  $C_3A$  含量较大的水泥由于其早期

收稿日期: 2005-08-11

repairing engineer project several issues of production proportion adjustment are discussed such as transporting material through cold material storehouse, vibrant sieve setting and Marshall test. A conclusion is taken that only these steps attached importance can the test data reliability be increased and can the control production run level be improved.

**Key words:** asphalt mixture; production proportion adjustment



的温度收缩、自收缩和干燥收缩而引发的开裂机率增大,从而导致对混凝土结构耐久性的不利影响。且由于 $C_3S$ 吸附能力强,会降低加入的外加剂的效果,从而导致需水量增加,也会降低混凝土耐久性。 $C_3S$ 的水化热虽然比 $C_3A$ 小很多,但其初期放热量却远远高于 $C_2S$ ,并且因其含量大,对早期开裂影响也大。

### 1.2 水泥含碱量

水泥混凝土路面施工规范中规定:在特重、重交通路面,水泥中碱的含量应满足 $Na_2O + 0.658K_2O \leq 0.6\%$ ;无碱活性集料时 $\leq 1.0\%$ 。对水泥含碱量的控制,众所周知主要是为了抑制碱—集料反应,但工程实践表明,不管是否有活性集料存在,碱的影响首先表现在增加混凝土的开裂倾向<sup>[2]</sup>。美国恩务局的R·Burrows对此做过大量的工程调查和试验研究,并发现在有的露天混凝土开裂板中,尽管有活性集料且水泥具有高含碱量,但开裂处却没有碱—集料反应产物,混凝土也并没有膨胀,说明这种开裂首先是由于高含碱量引起混凝土收缩所致而不是碱集料反应。Fagerlund<sup>[1]</sup>的研究也表明高含碱量水泥也会增大盐冻时的剥落量。

### 1.3 水泥的细度

比较新水泥标准与原标准,水泥细度从比表面积平均 $300\text{ m}^2/\text{kg}$ 增加到平均 $330\text{ m}^2/\text{kg}$ 。这一改变使得水泥早期强度提高,但随之也提高了水化热,增大了早期收缩,从而易产生早期裂纹,加快了混凝土的劣化。清华大学廉慧珍等的研究表明,随水泥比表面积的增加,与相同高效减水剂的相容性变差,饱和点提高<sup>[3]</sup>。为减小流动度损失需要增加更多掺量的高效减水剂,不仅增加施工费用,而且可导致混凝土中水泥用量的增加,影响混凝土的耐久性。

### 1.4 水泥的生产

对特重和重交通水泥混凝土路面施工规范中明确规定应采用旋窑水泥,二、三级公路宜采用旋窑水泥。主要理由是立窑水泥的游离氧化钙和氧化镁含量较高,水泥性能稳定性较差。立窑水泥在烧成过程中,窑中间和边缘、上部与下部的烧成温度不同,温度不均,导致水泥成分差别,性能不稳定。研究表明<sup>[4]</sup>,即使安定性合格的水泥,水泥中的游离氧化钙和氧化镁含量对路面混凝土的耐动载交通条件下的疲劳循环周次有3~5倍的影响,构成影响混凝土路面使用寿命能否达到30年的关键因素。

## 2 集料

集料一般占混凝土体积的四分之三,集料的质量将显著影响混凝土的强度、变形和耐久性。在实际工程中,对承受繁重交通的高等级水泥混凝土路面,当集料级配不好、强度过低、风化程度大和含不良成分时,水泥混凝土路面将提早破坏。

### 2.1 集料的级配和粒径

集料中各级粒径颗粒的分配情况称为集料的级配。一般来说,较好的集料级配应当是:第一,集料的空隙率要小,以节约水泥用量;第二,形成较好嵌挤状态,产生较大的内摩阻力;第三,满足良好的工作性要求,如总表面积较小可减少需水量。因此,良好级配集料可用较少的加水量制得流动性好、离析泌水少的混合料,并能在相应的成型条件下,得到均匀密实的混凝土,同时可少用水泥。一方面降低成本,另一方面可减少混凝土中不稳定的组分含量。实践证明,粗集料级配不好,对于控制混凝土变形,提高混凝土路面抗裂性,防止断板是相当不利的。

集料的最大粒径将影响混凝土成型性能,集料颗粒越大,单位质量集料需润湿的表面积越小,从而可降低拌和物的用水量,当达到某一和易性时可以降低水灰比,其强度可以随之提高。但粒径过大,不利于提高混凝土抗弯强度,会增大混凝土离析和塌边现象,会加剧摊铺机的磨损;更重要的是,粒径增大,混凝土中水泥石与集料形成的界面层越厚,会降低混凝土的抗冻性、耐磨性和耐疲劳性。

### 2.2 集料中有害矿物

#### 2.2.1 膨胀性矿物

膨胀性矿物指自身吸水后体积膨胀的矿物。这种矿物用于水泥混凝土中,可能与水泥产生反应,也可能不反应。但不论反应与否,由于自身吸水膨胀特点,这种集料用于混凝土中均会产生膨胀性破坏。这种破坏所涉及的范围可以从局部剥落和所谓的突然爆裂直到大量的表面开裂和相当深度的碎裂,近年来在水泥混凝土路面中出现的局部坑洞、桥梁隧道工程中产生的局部混凝土崩落事故很多就属于这种情况,而且出现不少,其危害也很严重。

#### 2.2.2 硫化物、硫酸盐

硫化物或硫酸盐能与水泥或石灰膏中钙离子作用,生成硫酸钙和硫铝酸钙,体积发生膨胀,这种反应发生在浆体硬化后,当膨胀应力超过混凝土强度后,混凝土即产生裂缝,同时还会引起钢筋锈蚀和加剧碱集料反应。水泥路面施工规范规定Ⅰ级粗集料



和细集料  $\text{SO}_3$  含量不大于 1%。

### 2.2.3 粘土矿物

粘土矿物泛指一大类层状的含水的铝硅酸盐的总称,包括蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石等。许多集料中不同程度地含有粘土矿物。通常在干燥状态下的粘土是粘结的硬块,但吸水率很高,吸水后体积增大较多,失水后又收缩变硬,这种变化比温度引起的胀缩要大得多。粗骨料中混入粘土矿物时,将会引起严重质量问题,如增加混凝土需水量,使混凝土收缩增大、强度降低、可能发生膨胀性破坏、路面抗磨、抗冻性降低,从而影响路面的使用寿命。基于此,水泥路面施工规范中明确规定含泥量不得超过规定。集料开采时应避免山皮土混入,应选择晴天破碎,利于泥土、石粉与集料的分离。

### 2.2.4 活性集料

所谓活性集料即在碱性环境中能与水泥中碱发生反应的集料,这种反应一般在水泥混凝土硬化后进行,反应生成物具有膨胀破坏特点。其机理和分析可参见有关专题,本文不再详述。目前确定含有活性氧化硅的集料有蛋白石、黑硅石、安山岩、流纹岩和凝灰岩等,一些国家如加拿大、英国、美国、日本等绘出了全国活性集料分布图,基本建立了结构破坏事例分布图,这些可为我国土木界借鉴。当怀疑粗集料有碱活性集料时,应进行碱集料反应检验,确认无碱集料反应后,方可使用。这是防止因混凝土路面碱集料反应而膨胀酥化破坏所采取的必要措施。

### 2.3 集料的渗透性

集料由多孔岩石破碎形成时,此类混凝土在冻融循环下表现的性能主要与集料尺寸、数量、以及孔的连续状况(孔的分布和渗透性)有关。高强度低渗透性集料,受冻时不会产生开裂。中渗透性集料中,含有一定量的 $\leq 500\text{ nm}$ 的孔,易于饱和及保水。冻融产生的压力值及其发展,主要取决于温度降低速率和压力水卸压的距离。对给定的孔分布、渗透性、含水率和降温速度,大尺寸集料易被冻坏,而小尺寸集料则难于冻坏甚至不会冻坏。高渗透性集料中存在大量的孔,易导致耐久性问题,因为集料表面与水泥浆体的过渡区(界面)会由于集料中的水在压力作用下排出而被损伤。此时集料仍可能保持完好。集料的渗透性具有双重影响:它不仅决定了给定时间内集料的饱和程度或吸水率;还决定了冻融压力下水从集料中排出的速率<sup>[5]</sup>。水泥混凝土路面使用砂岩或石灰石集料时会在冻融影响下产生上述可能的

冻融破坏,通常表现为D字形状的裂纹。

## 3 水

凡是一般能饮用的水及洁净的天然水,都可以作为拌制混凝土的用水。但不得使用含油类、酸、糖、有机杂质的水、工业废水及海水,否则将影响混凝土正常硬化,降低混凝土强度及影响耐久性。水对耐久性的影响主要为水中所含硫酸盐或氯盐等与水泥水化产物发生膨胀性破坏反应,或破坏混凝土中钢筋的钝化膜。水中不良成分也可能来源于养护覆盖物,养护过程中初期混凝土不密实时,这些不良成分极易随养护水进入混凝土中。

## 4 外加剂

外加剂作为混凝土的第五种组分,其掺量不到水泥质量的5%,对混凝土的改性作用则十分明显。目前水泥混凝土路面中使用的外加剂主要有早强剂、引气剂、减水剂、缓凝剂。外加剂使用所引起的工程质量问题甚至质量事故常有发生,以下各项均会引起质量缺陷及耐久性问题。

### 4.1 外加剂品种

水泥混凝土路面由于所处地理条件、施工方式、材料组成和环境因素不同,需采用不同外加剂品种。甚至同一种工程性质,由于水泥的不同,也需采用不同外加剂,即我们通常所说的外加剂与水泥的适应性。外加剂应用不当与对外加剂性质不了解、工程性质不明或发货贮存时品种混淆有关,或使用中缺乏必要的试验验证。

如硬石膏调凝水泥(硬石膏也可能由于二水石膏在水泥磨内因温度过高脱水形成)使用木钙减水剂,硬石膏( $\text{CaSO}_4$ )在木钙粉微酸性溶液中会迅速沉淀,以致水泥矿物铝酸三钙迅速水化,导致水泥迅速凝结,从而引起施工期间混凝土断板。目前已经明确的普通减水剂,如木钙、木镁、木钠、糖密、糖钙等对水泥所使用的石膏调凝剂中的硬石膏、萤石膏、镁石膏、工业石膏渣、半水石膏(水泥磨机温度较高时,会使二水石膏脱水为半水石膏)基本上均存在化学上的不适应问题,使用后不是减少单位用水量,而是增加了用水量,甚至如本文前述的断板现象。另外,水泥混凝土路面板为薄板结构,薄板结构中不宜使用早强剂。因为加入早强剂使混凝土早期具有高弹模,因此在温度变化一定或干缩量相同时,产生较高的应力(可近似地看成了弹模与应变的乘积),当拉



应力超过混凝土间抗拉强度时,路面出现开裂,开裂的混凝土必然会降低其耐久性。

#### 4.2 外加剂有害成分

外加剂中某些成分在混凝土中会引起水泥混凝土路面质量缺陷或耐久性问题,这些成分即为外加剂有害成分,这时必须严格控制掺入量或禁止使用。如氯离子型外加剂会引起钢筋混凝土路面中钢筋腐蚀、硫酸盐型外加剂会加大碱集料反应的产生和可能与水泥水化产物(水化铝酸钙)继续反应,导致混凝土强度和耐久性降低。

#### 4.3 外加剂加入方法及贮存

试验证明掺加方法不同,作用效果明显不同。不良掺加方法可能还会导致混凝土质量的不均匀及其质量问题。如外加剂中含有不溶物及溶解度较小的盐类时,必须以粉剂掺加,不得以溶液掺加,否则难于拌和均匀,而引起混凝土中局部外加剂含量过高,致使局部变形过大或局部缓凝等质量问题。外加剂的贮存应防止受潮结块,结块后加入混凝土中将影响均匀性,影响混凝土的变形性能、耐久性能。如干粉状外加剂(如 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )颗粒受潮结块后直接加入混凝土中,由于结块颗粒遇水后体积膨胀,将使混凝土表面局部爆裂或鼓包开花,引起路面坑洞,因此,贮存时应保护干燥状态。如已结块,应烘干、碾碎,在孔径0.6 mm的筛上过筛后使用;如已失效则禁止使用。贮存时,应注意按不同品种分别堆放,以免混淆而引起质量问题。

### 5 粉煤灰

质量合格的粉煤灰加入路面混凝土中适量时会改善路面性能,提高耐久性;但加入过量则会增大变形,抗裂性降低,早期强度偏低,断板机率增加,且因为混凝土路面面积大,养生条件相对试验室较差,尽管内部强度较高,但表面易失水干燥,造成耐磨性不足,降低路面耐久性。

此外,使用湿粉煤灰时会导致新拌混凝土中粉煤灰结团结块,造成局部混凝土强度低,并使路面出现许多坑洞,影响水泥混凝土路面耐久性,因此工程中不得直接加入湿粉煤灰。

### 6 结语

综合文中分析,原材料是实现水泥混凝土路面耐久性的基础,实际工程中原材料应满足现行规

范要求,另外,从耐久性方面考虑,还应满足下列要求。

#### (1)水泥。

配制耐久混凝土一般应选用品质稳定的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥或矿渣硅酸盐水泥,水泥等级不宜低于32.5(R)强度等级。对于严重腐蚀环境作用下的混凝土,宜采用纯硅酸盐水泥或低热微膨胀水泥,否则应详细了解或检测水泥生产中加入的矿物掺和料的品种、掺量。

在严重腐蚀环境作用下,水泥中的 $\text{C}_3\text{A}$ 含量不宜超过8%,水泥细度(比表面积)不宜超过 $350\text{ m}^2/\text{kg}$ ,游离氧化钙不宜超过1.5%。尽可能采用 $\text{C}_2\text{S}$ 含量较高的水泥,如低热水泥。水泥的含碱量(等效 $\text{Na}_2\text{O}$ )一般不宜超过水泥重的0.6%,以改善混凝土的抗裂性。

#### (2)粉煤灰。

配制耐久混凝土所用的粉煤灰,应品质稳定、来料均匀、来源固定且掺量适宜。

#### (3)集料。

高速公路、一级公路及有抗冰(盐)冻性要求的三、四级公路混凝土路面所选集料应不低于Ⅱ级。

#### (4)外加剂。

鉴于目前外加剂生产稳定性差,应选有严格质量控制措施生产厂家的合格产品,同时应控制外加剂的类型、副作用、掺量和存贮时间。

### 参考文献:

- [1] Fagerlund G. Effect of air-entraining and other admixtures on the salt-scaling resistance of concrete [A]. In: International seminar on Some Aspects of Admixtures and Industrial By-products on the Durability of Concrete [C]. Sweden: Gothenburg, 1986, 33.
- [2] 中国工程院土木水利与建筑学部工程结构安全性与耐久性研究咨询项目组. 混凝土结构耐久性设计与施工指南[M]. 北京:中国建筑业出版社,2004.
- [3] 廉惠珍,梁文泉. 水泥的品质和混凝土质量的关系 [EB/OL]. <http://www.Chinacements.com/tech/showtech.asp?id=541>,2003-04-11.
- [4] 傅智,罗翥. 公路工程混凝土结构耐久性新规定[J]. 公路,2003,(2).
- [5] 蒋亚清. 混凝土外加剂应用基础[M]. 北京:化学工业出版社,2004.



文章编号: 0451-0712(2006)01-0168-03

中图分类号: U414.03

文献标识码: B

# 二灰稳定碎石级配的研究

王东耀, 张宗涛

(陕西省高速公路建设集团公司 西安市 710054)

**摘 要:** 用贝雷法级配参数对二灰碎石级配组成进行了分析, 根据贝雷法和禹阎高速公路工程实践, 对二灰碎石的级配进行了修正, 提出了推荐级配, 并对二灰碎石的配合比设计提出若干建议。

**关键词:** 二灰碎石; 贝雷法; 级配

截至 2004 年年底, 我国公路通车总里程已达 185.6 万 km。其中, 高速公路里程已达 3.42 万 km, 其中以无机结合料稳定粒料(土)类为基层, 沥青混凝土为面层的半刚性基层沥青路面被大量应用于高等级公路。半刚性基层材料具有较高的抗压强度、刚度和一定的抗弯拉强度, 而且强度随龄期增长不断增长, 因此半刚性基层沥青路面通常具有较小的变形和较强的荷载扩散能力; 另外, 半刚性基层刚度大、整体性强, 使得其上沥青面层弯拉应力值较小, 从而提高了沥青面层抵抗行车荷载疲劳破坏的能力, 甚至可以认为半刚性基层上的沥青面层不会产生行车疲劳破坏。二灰碎石基层除具有以上优点外, 还能大量利用粉煤灰, 既变废为宝, 又减少了环境污染, 有利于我国环保事业的发展, 具有很大的经济、社会效益。

已建成的高速公路使用调查表明, 半刚性基层

路面裂缝问题日益突出, 并已成为该结构的主要缺陷。不论是南方还是北方, 通车后一年或第二年均有裂缝产生。初期产生的裂缝对行车并无明显影响, 但随着表面雨水或雪水的侵入, 在大量行车荷载反复作用下, 产生冲刷和唧泥现象, 使裂缝加宽, 裂缝两侧的沥青面层碎裂, 从而加速了沥青路面的破坏, 影响了沥青路面的使用性能。

为了减少二灰碎石等半刚性基层的裂缝, 人们对半刚性基层的配合比做了大量的研究工作, 研究实践表明, 较强的骨架对于改善混合料的早期强度, 抵抗干缩和温缩引起的裂缝有较明显的作用。本文结合陕西禹门口至阎良高速公路二灰碎石施工的工程实际, 对二灰碎石的级配进行了一些初步的分析。

## 1 工程概况

禹门口至阎良高速公路是国道主干线二连浩特

收稿日期: 2005-08-11

## Analysis of Durability Problems of Cement Concret Pavements Caused by Raw Materials

YAO Jia-liang, ZHANG Qi-sen

(Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** On the basis of the painstaking investigations on the present situations of the durability of the cement concrete pavements both at home and abroad, the influences on the durability of cement concrete imposed by various components of cement concrete raw materials are expounded such as cement, aggregate, admixture, water, fly ash, etc. Meanwhile, the corresponding effectively preventing measures are provided.

**Key words:** cement concrete pavement; durability; cement; aggregate; admixture; fly ash