

文章编号:1671-8879(2014)04-0031-07

新成型水泥混凝土路面板内水分及 气体竖向分布

郭寅川, 孟祥龙, 申爱琴

(长安大学 教育部特殊地区公路工程重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:为分析影响水泥混凝土路面板路用性能的深层次原因,寻找改善路用性能的方法,以硬化前路面板内水分与气体的竖向分布为切入点,通过改变道路混凝土中的用水量、水泥用量、砂浆体积分数及引气剂掺量,进行了模拟成型的水泥混凝土路面板的含水量、含气量竖向分布规律研究,并利用扫描电镜进行了微观形貌分析。研究表明:成型后水泥混凝土路面板表面砂浆层的含水量和含气量均高于面板内部;含水量的增加会导致结构内部孔隙率的提高及大孔数量的增加,这将降低混凝土的抗渗性能;而较高的含气量虽然使混凝土的孔隙率增大,但只增加了小孔数量,使孔径分布更加均匀,改善了微观孔结构,有利于水泥混凝土的耐久性。

关键词:道路工程;水泥混凝土;模拟试验;含水量;含气量;竖向分布

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Vertical distribution of water and air in new molding cement concrete pavement slab

GUO Yin-chuan, MENG Xiang-long, SHEN Ai-qin

(Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of the Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the underlying causes which affect pavement performance of cement concrete pavement slab and find the way to improve pavement performance, the vertical distribution of water and air in concrete pavement slab was taken as key point and the distribution of water and air in cement concrete pavement slab was researched by changing the amount of water, amount of cement, volume fraction of mortar and volume of air-entraining admixture. SEM was used to analyze the micro-structure of mortar layer of cement. The results show that: the contents of water and air inside the cement concrete pavement slab are less than that in the surface; pore fraction and the number of big pores of cement structure are increased by higher water content, which will reduce the impermeability of cement; higher air content increases pore fraction of cement structure too, but it just increase the number of small pores, which makes pore sizes distribution more uniform and improves the micro-structure. Thus the durability of cement concrete is improved. 8 tabs, 11 figs, 12 refs.

Key words: road engineering; cement concrete; simulation test; moisture content; air content; vertical distribution

收稿日期:2013-06-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(00009-2014G1211010)

作者简介:郭寅川(1983-),男,江西九江人,讲师,工学博士,E-mail:silver007007@163.com。

0 引 言

在水泥混凝土路面施工过程中,通常需要采取振动提浆工艺使混凝土表面形成一层具有一定厚度的砂浆层^[1]。施工人员可以通过该砂浆层来调整路面平整度,同时通过该砂浆层为路面提供抗滑构造。然而在施工过程中,偏心振动轴会使表面砂浆的含水量和含气量发生变化,从而导致道路混凝土表面的孔结构和孔隙率变化,对道路混凝土的耐久性产生影响^[2-4]。

水泥混凝土的耐久性 is 近年来研究的热点,20 世纪 90 年代后,英国的《建筑物及建筑构件、产品与组件的耐久性指南》、日本的《建筑物使用寿命规划原理指南》和加拿大的《建筑耐久性指南》都对水泥混凝土的耐久性进行了大量研究^[5]。中国以中国工程院陈肇元院士为代表,出版了《混凝土结构耐久性与施工指南》(CCES 01—2004),在混凝土的耐久性方面做了大量工作^[6]。这类研究大多是从混凝土的材料、级配等宏观方面进行分析。在微观孔结构方面,英国 Thomas 进行了混凝土的孔结构研究^[7];日本帝京科学大学的 Asaga 等研究了碳化过程中大水灰比水泥浆体孔结构的变化^[8];中国建筑材料科学研究院李永鑫等研究了磨细矿物掺合料对水泥硬化浆体孔结构及砂浆强度的影响^[9];北京工业大学的金珊珊等进行了水泥砂浆孔结构分形特征的研究^[10];北京航空航天大学黄新等进行了水泥粒径分布对水泥石孔结构与强度的影响研究^[11]。这些研究主要针对混凝土内部的孔结构,却忽略了水泥混凝土表面的砂浆层。水泥混凝土路面施工过程中的振捣和提浆工艺会造成混凝土的外分层现象,导致水分和气体上浮至表面砂浆层,改变砂浆层的孔结构,从而影响水泥混凝土路面的耐磨性和抗渗性^[12]。

为此,本文以硬化前路面板内水分与气体的竖向分布为切入点,通过改变道路混凝土中的用水量、水泥用量、砂浆体积分数及引气剂掺量,进行了模拟成型的水泥混凝土路面板的含水量、含气量竖向分布规律研究,并利用扫描电镜进行微观形貌分析,研究含水量、含气量竖向分布规律对水泥砂浆层内部孔结构的影响。

1 试验

1.1 原材料

选用在西北地区销量最大的秦岭牌普通硅酸盐

42.5[#] 水泥;试验用水为自来水;细集料为西安灞河河砂;粗集料为泾阳碎石;减水剂为陕西恒升牌高效减水剂,减水率为 16%~25%,掺量为 0.8%~1.2%;引气剂为 Sky 型高效引气减水剂,掺量 0.006%~0.015%。

1.2 试验配比

材料组成与施工工艺构成了影响道路混凝土水分与气体竖向分布的两大要素。为了研究相同施工条件下材料组成对二者分布的影响,对分别改变用水量、水泥用量、砂浆体积分数、引气剂掺量的 4 个批次共 26 组道路混凝土进行试验研究,试验配比如表 1~表 4 所示。其中,W/C 表示水灰比。

表 1 改变用水量试验配比

Tab. 1 Mixture of test by changing water content

编号	XW ₁	XW ₂	XW ₃	XW ₄	XW ₅
W/C	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46
用水量/(kg·m ⁻³)	137	144	151	158	166

表 2 改变水泥用量试验配比

Tab. 2 Mixture of test by changing cement content

编号	XC ₁	XC ₂	XC ₃	XC ₄	XC ₅	XC ₆
W/C	0.48	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38
水泥用量/(kg·m ⁻³)	323	337	352	369	388	408

表 3 改变砂浆体积分数试验配比

Tab. 3 Mixture of test by changing volume fraction of mortar

编号	TT ₁	TT ₂	TT ₃	TT ₄	TT ₅	TT ₆
W/C	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
水泥用量/(kg·m ⁻³)	151	151	151	151	151	151
砂浆体积分数	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60
编号	TT ₇	TT ₈	TT ₉	TT ₁₀	TT ₁₁	TT ₁₂
W/C	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
水泥用量/(kg·m ⁻³)	158	158	158	158	158	158
砂浆体积分数	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60

表 4 改变引气剂试验配比

Tab. 4 Mixture of test by changing volume of air-entraining admixture

编号	TQ ₁	TQ ₂	TQ ₃
W/C	0.40	0.40	0.40
引气剂掺量/10 ⁻⁴	0	0.6	1.2

1.3 试验方法

1.3.1 水泥混凝土路面板模拟成型

采用自主开发的试验槽及试验方法,如下页图 1 所示。试验槽的主要功能是模拟滑模施工,通过该试验槽在试验室内成型混凝土路面板,成型时需配合使用手持式振捣棒及平板式振动器等。

试验槽使用方法:先将试验槽放于平整的地面上,然后将试槽 4 面的 4 个侧壁插板插入试槽中,在



图1 模拟施工试验槽

Fig. 1 Test equipment for construction simulation

4个侧壁插板的板面上进行涂油润滑。将新拌混凝土注入试槽中,采用手持式振捣棒对试槽中的混凝土进行振实。振实结束后,用手持式平板振动器对试槽内的混凝土进行提浆及表面修饰处理,然后用抹子对表面进行精细修整,使表面光滑平整。成型后可将侧壁插板拔出,从成型试件上表面和侧壁即可提取表面砂浆和内部混凝土试样。

1.3.2 体积法测定表面砂浆含气量

为研究新成型水泥混凝土路面板内的竖向含气量差异,使用自行设计并申请专利的表面砂浆含气量测定装置,对模拟成型的水泥混凝土路面板表面砂浆进行含气量测定。含气量测定仪内部结构如图2所示。将带有螺旋式搅拌桨叶的搅拌轴,通过支撑架固定于筒体上。搅拌轴的外端由手轮固定,筒体下端面由底盖通过内六方螺钉和防水垫圈进行密封,通过注水口像筒内注水,使用带刻度管的旋帽进行体积测量。

表面砂浆含气量测定装置利用体积法对砂浆含气量进行测定。通过气体排出后旋帽上刻度管的液面变化来读取气体含量。使用时,在施工现场提取适量水泥混凝土表面砂浆试样注入筒体内,注水后记录刻度管内的液面高度 H_1 ,对筒内的被测砂浆进行搅拌,砂浆中的气体从旋帽的刻度管逸出,这时刻度管内液面会随之下降,当液面不再发生下降时停止搅拌,记录此时刻度管内的液面高度 H_2 。根据搅拌前后刻度管内两液面高度差 $H_1 - H_2$,即可算出水泥混凝土砂浆试样的气体含量。

1.3.3 燃烧法测定砂浆含水量

为定量研究新成型水泥混凝土路面板内竖向含水量差异,采用自行设计的酒精燃烧法,通过燃烧前后砂浆的质量差,对在不同部位提取的表面和内部砂浆含水量进行测算。

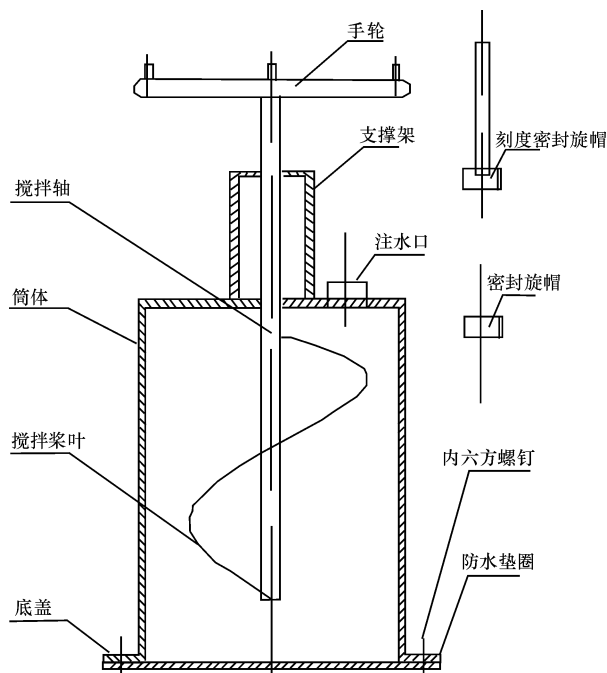


图2 砂浆含气量测定仪实物

Fig. 2 Test equipment for air content of mortar

(1)试验方法。分别提取表面和内部砂浆备用,表面砂浆直接用抹子在成型试件表面取得;内部砂浆通过筛成型试件内部的混凝土获得,所用筛孔尺寸为4.75 mm。取3个铝质试验盒,分别称重记为 m_1 、 m_2 、 m_3 。用抹子取部分砂浆放于试验盒中,砂浆体积以达到试验盒1/3为宜。将装有砂浆的试验盒称重,分别记为 m_1' 、 m_2' 、 m_3' 。将酒精倒入试验盒,点燃酒精进行燃烧。当砂浆质量不再变化时停止燃烧。将试验盒进行称重,分别记录为 m_1'' 、 m_2'' 、 m_3'' 。

(2)数据处理。含水量计算式为

$$w_1 = \frac{m_1' - m_1''}{m_1' - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$w_2 = \frac{m_2' - m_2''}{m_2' - m_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$w_3 = \frac{m_3' - m_3''}{m_3' - m_3} \times 100\% \quad (3)$$

$$w = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3} \quad (4)$$

式中: m_1 、 m_2 、 m_3 分别为试验盒质量(g); m_1' 、 m_2' 、 m_3' 分别为装砂浆的试验盒质量(g); m_1'' 、 m_2'' 、 m_3'' 分别为水分蒸发后的试验盒质量(g); w_1 、 w_2 、 w_3 为含水量; w 为平均含水量。

1.3.4 压汞法及电镜扫描测定微观形貌

采用压汞法测试道路混凝土的孔结构,应用Autoscan 60水银压汞仪,测孔范围30 Å~150 μm。

采用 Quanta200 环境扫描电镜进行照片拍摄,其分辨率为 3.5 nm,最大放大倍数为 10^5 倍。

2 测试结果及讨论

2.1 含水量试验结果

2.1.1 改变用水量

试验结果如图 3 所示。图中,表内差为表面砂浆含水量与内部砂浆含水量的差。

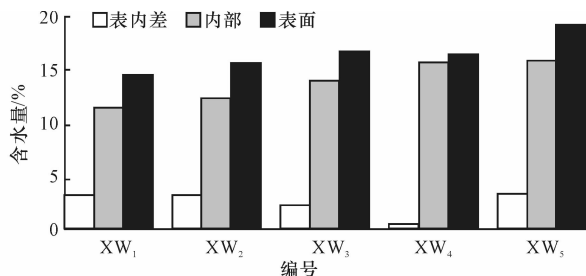


图 3 改变用水量时的砂浆含水量

Fig. 3 Water content of mortar when water content changed

随着道路水泥混凝土用水量的增加,测得表面砂浆及内部砂浆的含水量均为增加。当用水量由 137 kg/m^3 增至 166 kg/m^3 时,表面砂浆含水量在 $14\% \sim 18.6\%$ 之间波动,内部砂浆含水量在 $11\% \sim 15.6\%$ 之间波动。其中,表面砂浆含水量增加了 32.9% ,内部砂浆含水量增加了 41.8% 。随着用水量的增加,测得表面砂浆含水量增加幅度低于内部砂浆含水量增加幅度。

图 3 表明,表面砂浆含水量高于内部砂浆含水量,当水灰比由 0.38 增至 0.44,即用水量由 137 kg/m^3 增至 158 kg/m^3 时,表面及内部砂浆含水量的差值逐渐降低,且当水灰比达到 0.44 时差值达到最低。也就是说,随着用水量的增加,测得混凝土表面及内部的水分分布趋于均匀,有利于避免含水量差异性的产生。总体看来,测得道路水泥混凝土表面及内部含水量差异在 $0.4\% \sim 3\%$ 之间波动。按试验配比中各组分的关系及砂浆含水量百分数可换算出,表面砂浆与混凝土内部水灰比差异在 $0.01 \sim 0.09$ 之间波动变化。

2.1.2 改变水泥用量

试验结果如图 4 所示。分析试验结果可知:随着水泥用量的增加,测得道路混凝土的表面砂浆含水量和内部砂浆含水量均呈现出先小幅度增加而后下降的趋势。当水泥用量在 $323 \sim 408 \text{ kg/m}^3$ 之间变化时,测得表面砂浆含水量在 $12.5\% \sim 13.6\%$ 之间波动,内部砂浆含水量在 $10.2\% \sim 13.2\%$ 间波动,二者波动范围均小于由用水量变化引起的波动范围。

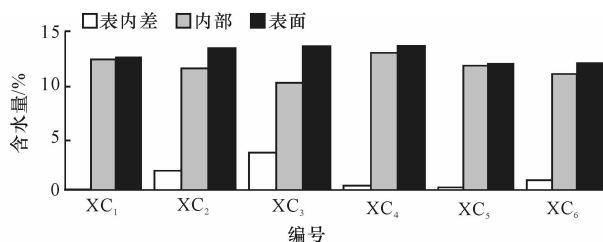


图 4 改变水泥用量时的砂浆含水量

Fig. 4 Water content of mortar when cement content changed

当水灰比在 $0.48 \sim 0.38$ 之间变化,即水泥用量在 $323 \sim 408 \text{ kg/m}^3$ 之间变化时,测得道路水泥混凝土表面及内部含水量差值在 $0 \sim 3.4\%$ 之间波动,折算水灰比为 $0 \sim 0.2$;当水灰比为 0.44、水泥用量为 352 kg/m^3 时,表内差达到最大为 3.4% ,当水泥用量继续增加时,表内差逐渐减小。根据试验结果认为,水灰比在 $0.46 \sim 0.42$ 、水泥用量在 $337 \sim 369 \text{ kg/m}^3$ 范围内波动时,比较容易产生含水量的变异性。

2.1.3 改变砂浆体积分数

砂浆体积分数是道路混凝土的体积组成中,由水泥、矿物外掺料、细集料、引入空气和水组成的砂浆占混凝土总体积的比率分数。试验结果如图 5、图 6 所示。

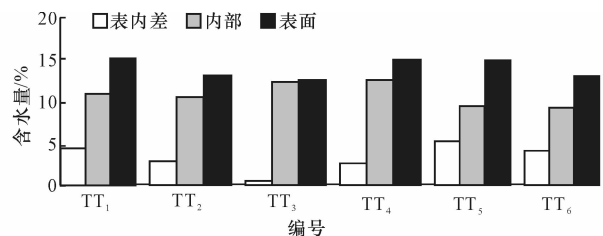


图 5 改变砂浆体积分数时的砂浆含水量 ($W/C=0.42$)

Fig. 5 Water content of mortar when volume fraction of mortar changed ($W/C=0.42$)

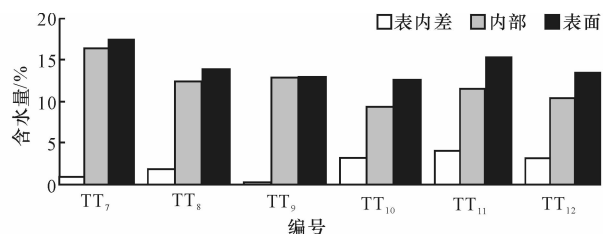


图 6 改变砂浆体积分数时的砂浆含水量 ($W/C=0.44$)

Fig. 6 Water content of mortar when volume fraction of mortar changed ($W/C=0.44$)

分析试验结果可知:随着砂浆体积分数的增加,表面和内部砂浆含水量均出现波动变化。水灰比为 0.42、砂浆体积分数由 0.5 增至 0.6 时,测得表面和内部砂浆含水量分别在 $12.7\% \sim 15.3\%$ 和 $9.0\% \sim 12.4\%$ 之间波动变化,其中水灰比的表

内差值最高达 0.07。水灰比为 0.44、砂浆体积分数由 0.5 增加至 0.6 时,测得表面和内部砂浆含水量分别在 12.7%~17.5%和 9.3%~16.4%之间波动变化。

由图 5、图 6 中表内差与砂浆体积分数变化可知,随着砂浆体积分数的增加,表内含水量差异均出现最低值,即存在 1 个最佳砂浆体积分数使测得含水量变异性达到最低。如图 5 所示,当砂浆体积分数为 0.54 时,表内差含水量达到最低;图 6 所示情形与图 5 相似,也是当砂浆体积分数为 0.54 时含水量达到最低。两图显示,表内差均在砂浆体积分数为 0.58 时达到峰值。因此,砂浆体积分数对水泥混凝土路面板内的水分分布有重要影响,根据试验结果,砂浆体积分数为 0.54 时有助于降低表面与内部含水量差异。

2.2 含气量试验结果

含气量试验结果如图 7 所示。

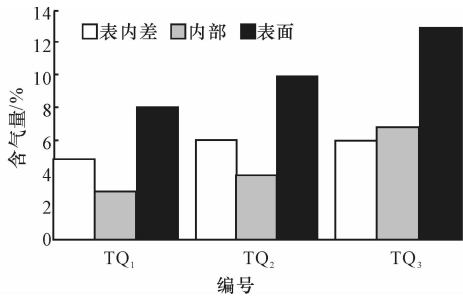


图 7 改变引气剂掺量时的含气量
Fig. 7 Air content when volume of air-entraining admixture changed

分析试验结果可知,成型的道路混凝土面板,其表面砂浆含气量高于内部混凝土的含气量。随引气量的增加,表面砂浆含气量在 8%~13%之间波动变化,混凝土内部含气量在 3%~7%之间波动变化。表面砂浆层含气量能高出混凝土内部含气量 1 倍多,验证了含气量变异性的存在,且随着引气剂掺量的增加,气体分布差异基本维持在一个固定水平。

2.3 微观形貌分析

水分和气体分布会对微观孔结构造成影响,描述孔结构形态时常用的表征参数是通过压汞试验所得的临界孔径和最可几孔径。临界孔径反映了混凝土中孔隙的连通性和渗透性路径的曲折性,对渗透性的影响最为重要。最可几孔径则表示出现几率最大的孔径,反映了孔径分布情况。研究通过压汞试验配以 SEM 照片,对不同水分及气体含量被测试件的微观结构进行分析。

2.3.1 水分竖向分布对微观结构的影响

压汞试验得到的孔径特征参数如表 5、表 6 所示。

表 5 含水量不同时孔结构特征参数测试结果

Tab. 5 Results of structure parameters of pore test when water content changed

试样	W/C	孔隙率/(mL·g ⁻¹)	平均孔径/nm	临界孔径/nm
1	0.40	0.24	9.43	10.87
2	0.46	0.31	11.23	12.13

表 6 含水量不同时不同孔径范围的孔数量

Tab. 6 Number of pores in different diameters when water content changed

试样	W/C	各孔径范围内的孔所占百分率/%			
		<50 nm	50~100 nm	100~200 nm	>200 nm
1	0.40	87.39	5.97	3.41	3.23
2	0.46	83.57	3.87	5.93	6.63

将试验中不同含水量的砂浆试件放大 2 000 倍后得到 SEM 照片,如图 8、图 9 所示。

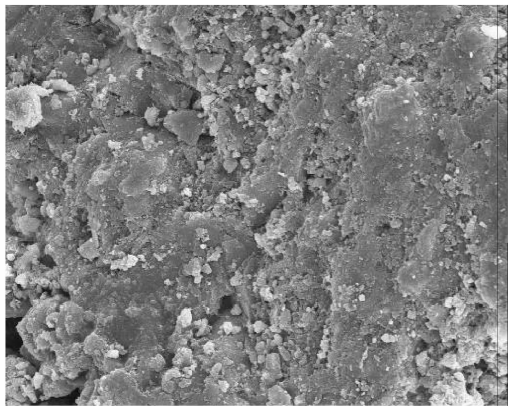


图 8 2 000 倍 SEM 照片(W/C=0.40)

Fig. 8 Mortar magnified to 2 000 times by SEM (W/C=0.40)

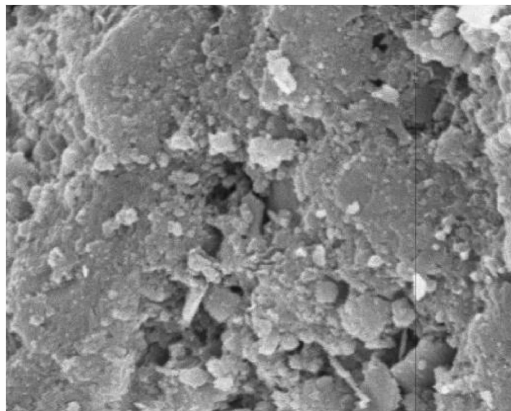


图 9 2 000 倍 SEM 照片(W/C=0.46)

Fig. 9 Mortar magnified to 2 000 times by SEM (W/C=0.46)

分析表 5 可知,随着水分含量的增加,道路水泥混凝土孔隙率、平均孔径、临界孔径总体上均呈上升

趋势。当水灰比从 0.40 增至 0.46 时,以上 3 种特征参数分别提高 29%、19%、12%。

从表 6 中的数据可以看出,随着混凝土内水分含量的增加,道路混凝土中小于 100 nm 的孔数量减少,分别减少了 4%(<50 nm)和 35%(50~100 nm);道路水泥混凝土中大于 100 nm 的孔数量增加,分别增加了 74%和 1.1 倍。孔隙率的提高、大于 200 nm 孔数量的大幅度增加都将降低混凝土的抗渗性能。

对比分析图 8、图 9 可知, $W/C=0.46$ 试样的内部孔隙明显增大,水泥水化产物难以形成连续的空间网状结构,裂缝宽度较大,大大增加了混凝土内部孔隙之间的连通性,导致其抗冻及抗渗性降低。随着含水量的增大,表面砂浆内部出现明显的薄弱区,薄弱区结构松散、多孔,存在较宽的裂缝,在车轮荷载反复作用下,该区域极易受力不均匀而引起破坏,从而导致水泥混凝土路面表面耐磨性的降低。

以上分析表明,水泥混凝土路面施工过程中造成的水分上浮,会对表面砂浆层的孔结构产生重要影响,从而影响水泥混凝土路面的耐久性。水泥混凝土路面的表面砂浆层直接与车轮及水分接触,是抵抗车轮磨耗及水分侵入的第一道屏障。水分在表面砂浆层的富集,使表面砂浆层成为提高水泥混凝土路面板耐久性的薄弱环节。

长期以来,很多室内抗冻性优良的混凝土配合比在实体工程中表现不佳,主要是由于施工过程中导致了外分层的出现,使混凝土路面砂浆层的实际含水量远高于设计水灰比,导致密实性较差也更为薄弱,因此抗盐冻剥蚀能力远远不能达到设计目标。这就要求设计人员进行水泥混凝土路面耐久性设计时,在掌握水分竖向分布规律即表面砂浆层含水量与设计水灰比存在差别的基础上,以较为薄弱的表面砂浆层作为设计要点,充分考虑其水分真实含量对水泥混凝土路面整体耐久性的影响,从而降低水泥混凝土路面外分层对其耐久性设计的影响。

2.3.2 气体竖向分布对微观结构的影响

压汞试验得到的孔径特征参数如表 7、表 8 所示。

表 7 含气量不同时孔结构特征参数测试结果

Tab. 7 Results of structure parameters of pore test when air content changed

试样	引气剂 掺量/%	孔隙率/ (mL·g ⁻¹)	平均孔 径/nm	临界孔 径/nm
3	3.5	0.28	10.42	12.01
4	4.8	0.30	9.58	10.56

表 8 含气量不同时不同孔径范围的孔数量

Tab. 8 Number of pores in different diameters when air content changed

试样	引气剂 掺量/%	各孔径范围内的孔所占百分率/%			
		<50 nm	50~100 nm	100~200 nm	>200 nm
3	3.5	76.60	7.76	9.39	6.26
4	4.8	82.06	6.56	7.38	4.01

将试验中不同含气量的砂浆试件放大 2 000 倍后得到 SEM 照片,如图 10、图 11 所示。

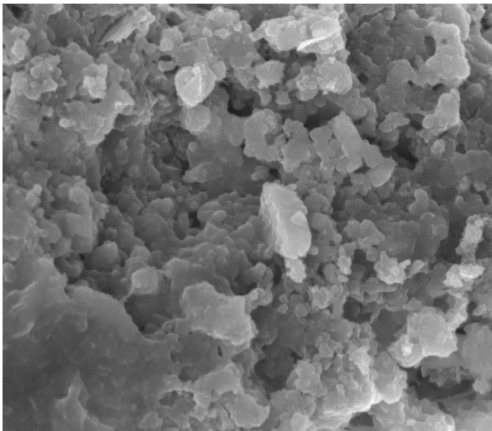


图 10 2 000 倍 SEM 图片(引气剂掺量 3.5%)

Fig. 10 Mortar magnified to 2 000 times by SEM (air content 3.5%)

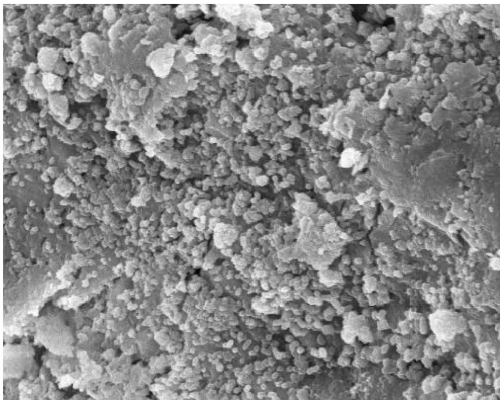


图 11 2 000 倍 SEM 图片(引气剂掺量 4.8%)

Fig. 11 Mortar magnified to 2 000 times by SEM (air content 4.8%)

分析表 7 可知,随着引气剂掺量的增加,混凝土总孔隙率增加,平均孔径和临界孔径下降。当引气剂掺量由 3.5% 上升至 4.8% 时,孔隙率增加 7%,平均孔径和临界孔径分别下降 8%和 12%。

从表 8 中的数据可知,孔级配中:小于 50 nm 的孔数量随着引气剂掺量的增加而增加,增加幅度为 7%;大于 50 nm 孔数量随着引气剂掺量的增加而降低,下降幅度分别为 15%(50~100 nm)、21%(100~200 nm)、36%(>200 nm)。掺入引气剂虽然使混凝土的孔隙率增大,但只增加了小孔数量,使

孔径分布更加均匀,孔级配合理,改善了微观孔结构,从而能够提高抗冻融能力。因此,水泥混凝土路面表面砂浆层的高含气量将有助于改善水泥混凝土路面的耐久性。

3 结 语

(1)表面砂浆含水量高于混凝土内部含水量,并随着水灰比的变化,含水量差值也发生变化。

(2)含气量在混凝土内部存在变异性,表面砂浆含气量高于原混凝土含气量,通过本研究开发的试验装置即初步的研究显示,表面砂浆含气量比原混凝土含气量可高出1倍多。

(3)表面砂浆层含水量的增大,导致道路混凝土中小于100 nm的孔数量分别减少了4%(<50 nm)和35%(50~100 nm);道路水泥混凝土中大于100 nm的孔数量分别增加了74%和1.1倍。孔隙率的提高、大于200 nm孔数量大幅度增加,都将降低混凝土的抗渗性能。

(4)含气量的增加,导致孔隙率增加了7%,平均孔径和临界孔径分别下降8%和12%。孔级配中,只增加了小孔数量,大于50 nm孔数量随着引气量的增加而降低,下降幅度分别为15%(50~100 nm)、21%(100~200 nm)、36%(>200 nm)。这使孔径分布更加均匀,孔级配合理,改善了微观孔结构,从而能够提高抗冻融能力。

参考文献:

References:

- [1] 申爱琴.水泥与水泥混凝土[M].北京:人民交通出版社,2004.
SHEN Ai-qin. Cement and cement concrete[M]. Beijing:China Communications Press,2004. (in Chinese)
- [2] 长安大学.道路水泥混凝土组成设计研究-道路水泥混凝土耐久性评价指标研究分报告[R].西安:长安大学,2008.
Chang'an University. Research of road cement concrete design-research on durability evaluation of road cement concrete[R]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [3] 长安大学.道路水泥混凝土组成设计研究-道路水泥混凝土施工流变性能研究分报告[R].西安:长安大学,2008.
Chang'an University. Research of road cement concrete design-research on rheological behaviors of road cement concrete[R]. Xi'an: Chang'an University,

2008. (in Chinese)

- [4] 长安大学.道路水泥混凝土组成设计研究-道路水泥混凝土微观结构与性能研究分报告[R].西安:长安大学,2008.
Chang'an University. Research of road cement concrete design-research on microstructure and properties of road cement concrete[R]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [5] BS 7543—1992, Guide to durability of building and building elements, products and components[S].
- [6] CCES 01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
CCES 01—2004, Guide to durability design and construction of reinforced structures[S]. (in Chinese)
- [7] Comite euro-international du beton. Durable concrete structures-design guide[M]. London: Thomas Telford Services Publisher, 1992.
- [8] Asaga K S, Ito S S. Change in pore structure of hardened body with large water cement ratio by a carbonation process [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(9): 1671-1676.
- [9] 李永鑫, 陈益民. 磨细矿物掺合料对水泥硬化浆体孔结构及砂浆强度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 575-579.
LI Yong-xin, CHEN Yi-min. Influence of ground mineral admixtures on pore structure of hardened cement paste and strength of cement mortar [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 575-579. (in Chinese)
- [10] 金珊珊, 张金喜, 陈春珍, 等. 水泥砂浆孔结构分形特征的研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(1): 92-97.
JIN Shan-shan, ZHANG Jin-xi, CHEN Chun-zhen, et al. Study of pore fractal characteristic of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(1): 92-97. (in Chinese)
- [11] 黄新, 袁润章, 龙世宗, 等. 水泥粒径分布对水泥石孔结构与强度的影响研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(7): 888-891.
HUANG Xin, YUAN Run-zhang, LONG Shi-zong, et al. Influence of cement particle size distribution on pore structure and strength of cement paste [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(7): 888-891. (in Chinese)
- [12] Wong G S, Alexander A M, Haskins R, et al. Portland-cement concrete rheology and workability: final report[R]. Vicksburg: Structures Laboratory USAE Research and Development Center, 2000.

