

## 机场水泥混凝土道面成型阶段早期开裂成因与控制技术

高志斌, 李克非

(清华大学土木水利学院, 北京 100084)

**摘要:**在机场水泥混凝土道面板浇筑成型的早期阶段,如果混凝土结构体内部存在裂缝缺陷,在变形作用下微裂缝会逐渐扩展成为可见裂缝,甚至发展成道面病害。为控制早期微裂缝持续扩展,本文通过结合某机场道面工程,从水泥混凝土道面材料、道面板设计、道面施工3个方面分析道面板开裂成因及对应的控制措施。本研究可为需要控制早期混凝土微裂缝的类似工程提供参考。

**关键词:**机场水泥混凝土道面;早期开裂;开裂成因;控制技术

中图分类号:V351.11 文献标志码:A 文章编号:1674-5590(2024)05-0066-07

## Causes and control technology for early age cracking during the formation stage of airport cement concrete pavement

GAO Zhibin, LI Kefei

(School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** During the early stages of pouring and forming cement concrete pavement panels at airports, if there are crack defects inside the concrete structure, under the action of deformation, the micro cracks will gradually expand into visible cracks and even develop into pavement diseases. To control the continuous expansion of early micro cracks, this article analyzes the causes of cracking and corresponding control measures of pavement panels from three aspects including material of cement concrete pavement, pavement panel design and pavement construction, by combining with a certain airport pavement project. This study can provide a reference for similar projects required to control early micro cracks in concrete.

**Key words:** airport cement concrete pavement; early age cracking; cracking cause; control technology

由于施工过程、水泥混凝土(简称混凝土)质量控制和环境等因素,机场混凝土道面板在浇筑成型的早期阶段易产生微裂缝<sup>[1-3]</sup>。文献[4]研究了混凝土开裂因素,并得出约束条件下温度收缩和自收缩叠加是导致混凝土早期收缩开裂的主要原因。文献[5]研究了混凝土早期绝热温升及其发展速率,并通过采取配合比优化措施,减少了混凝土收缩。文献[6]研究了混凝土温度应变对抗裂性的影响,发现掺硅粉的高性能混凝土或低水胶比混凝土在升温与降温阶段,其温度与应变存在线性关系。文献[7]根据混凝土早期性能快速变化和孔隙负压、水化度等耦合影响,建立收缩开裂模型,提出15~40 kPa的临界孔隙负压和单分子膜水分蒸发抑制材料,可以减少塑性阶段水分蒸发问题。文献[8]结合工程实践,运用综合分析法研究工程结构裂缝

(含早期裂缝),提出了多系数简易计算法,可以计算出伸缩缝间距,确定取消永久性伸缩缝的条件。文献[9]通过比较不同强度等级、不同养护条件下混凝土干缩性能的差别,分析了路面混凝土干缩作用机理,探讨了混凝土干缩变形随龄期的发展规律,获得了混凝土干缩变形-龄期的回归方程。文献[10]评估了绝热温升、自收缩及功能材料对混凝土早期收缩开裂行为的影响,通过对混凝土温度和全过程收缩变形的共同控制,达到抑制侧墙混凝土早期收缩开裂的效果。

现有机场道面研究和设计规范未明确混凝土收缩应力和道面板尺寸等因素对浇筑道面板早期裂缝的影响。本文结合机场道面工程,从道面材料、道面板设计、道面施工3个方面分析混凝土道面板早期微裂缝的开裂成因,并提出机场道面微裂缝控制技术,防止

道面微裂缝进一步扩展,减少有害物质侵入混凝土内部,从而达到提高机场道面耐久性的目的。

## 1 机场混凝土道面板早期开裂机理

在混凝土道面板浇筑成型的早期硬化和湿养护阶段,水泥水化反应最激烈,混凝土分子链在逐渐形成过程中会产生塑性沉降收缩、温度收缩、毛细孔拉应力收缩、干燥收缩和自收缩等收缩行为。混凝土道面板在振捣成型和重力作用下,因原材料相对密度差异,粗骨料相对下沉产生塑性沉降收缩。水泥水化释放热量,使混凝土短期快速升温,混凝土道面板随后进入降温收缩阶段。当混凝土表面的水分蒸发率大于泌水率时,毛细孔中形成凹液面,混凝土微观孔隙中产生毛细孔拉应力,导致收缩,如图 1 所示。混凝土凝结硬化过程中,由于含水孔隙失水会导致其体积干燥收缩,如图 2 所示,3 d 可观察到水泥石的形成和收缩,7 d 可见水泥石收缩产生的微细裂缝。水泥和水的水化产物体积小于反应前水泥和水的体积之和,混凝土发生自收缩。在约束状态下,道面板早期阶段受到各种收缩的综合作用,导致混凝土结构体内产生收缩应力,由于混凝土早期阶段的抗拉强度、变形模量、拉伸变形性能等都比较弱,当收缩应力产生的应变超过混凝土早期极限变形能力时,将在混凝土内部或表面产生收缩开裂<sup>[7]</sup>,塑性收缩开裂不完全遵守胡克定律

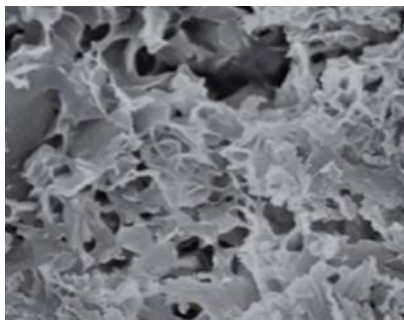
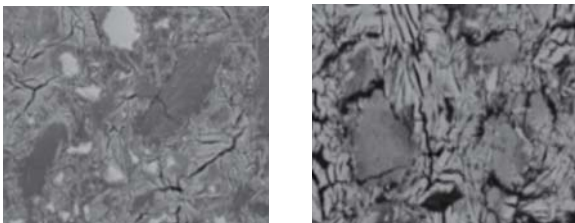


图 1 道面板混凝土微观孔隙

Fig.1 Microscopic pore in concrete of pavement panel



(a)背散射电子图像(3 d)

(b)背散射电子图像(7 d)

图 2 道面板水泥石微细裂缝(1 000 倍)

Fig.2 Micro crack in cement stone of pavement panel (1 000 x)

(Hooke' law),收缩产生的微裂纹不能完全复原,开裂后裂痕一直存在。

本文结合机场除冰坪道面工程开展相关研究,分析了由材料、设计及施工引起的道面早期开裂成因,从而对影响道面板早期收缩的相关因素进行合理控制,通过控制早期收缩应力,缓解和降低道面板早期开裂的程度,使混凝土道面板获得更健康的结构体。

## 2 道面板早期开裂成因及控制措施

### 2.1 从材料方面分析道面板早期开裂成因

#### 2.1.1 道面板早期总温差

总温差包括混凝土水化热温差、收缩当量温差和环境气温变化温差<sup>[8]</sup>。总温差超过限值混凝土早期产生微裂缝的重要因素之一。在混凝土成型早期阶段,水泥水化释放出热量使道面板呈现先升温后降温的状态。道面板在升温阶段产生微膨胀,混凝土结构处于受压状态,一般情况下,道面板升温微膨胀不会产生温度裂缝。当道面板达到最高温后进入降温收缩阶段,由于受到地基水平阻力、板内部层间结构约束、徐变松弛应力、随硬化时长不断增强的弹性模量和抗拉强度等因素影响,产生约束应力和应变,道面板内部呈现受拉状态,当收缩超过极限拉应变时会产生收缩裂缝。水化热温差取决于水泥水化热的绝热升温、内部最高温度和环境温度。绝热升温计算公式为

$$T_{\max} = \frac{W \cdot Q}{C \cdot \gamma} (1 - e^{-m}) \quad (1)$$

式中: $T_{\max}$ 为绝热升温,即道面板 6 个侧面在无任何散热和热损耗的条件下,水泥与水化合后产生的反应热全部转化为升温后的最高温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $W$ 为每立方米混凝土中水泥的实际用量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),道面板水泥用量为  $330 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $Q$ 为水泥水化热,本文取 42.5 号普通硅酸盐水泥的 28 d 水化热,为  $375 \text{ kJ}/\text{kg}$ ;  $C$ 为混凝土的比热,取  $0.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\gamma$ 为混凝土的质量( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),取  $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $m$ 代表水泥品种,普通硅酸盐水泥取 0.4;  $t$ 为时间参数。

某机场除冰坪道面工程按照 E 类飞机的使用要求进行设计。道面设计混凝土 28 d 的弯拉强度不应小于  $5.0 \text{ MPa}$ ,道肩、服务车道及设备停放区面层设计混凝土 28 d 的弯拉强度不应小于  $4.5 \text{ MPa}$ ,考虑到除冰坪道面工作环境的恶劣性,混凝土抗冻指标均应不低于 F300,水泥碱含量不大于 0.6%。道面分块基本采用  $5.0 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ 、 $5.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$  的尺寸。道面板厚度为  $0.4 \text{ m}$ 。

通过对混凝土材料进行温度测量可知,混凝土道面板内部最高温度在浇筑成型 24 h 左右达到温度峰值,道面板通过上下表面持续散热,逐渐降温直至接近环境温度。通过式(1)计算可得,道面板绝热升温最高温度  $T_{max} = 53.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当地气温为  $25\sim 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,混凝土入模温度  $T_0$  为  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,经过 3 d 养护后,实测混凝土内部最高温度为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

混凝土收缩当量温差是将混凝土早期收缩产生的变形值换算成引起等量变形所需要的温差。收缩当量温差计算公式为

$$\begin{cases} T_i = \frac{\varepsilon_i}{\alpha} \\ \varepsilon_i = 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01i}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  天混凝土收缩当量温差,一般在  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内;  $\varepsilon_i$  为第  $i$  天道面表面的相对收缩变形;  $\alpha$  为早期降温阶段线膨胀系数<sup>[11]</sup>,取  $10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

温差引起的二维状态下最大拉应力计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_{i,max} = -\frac{E_i \alpha T_i}{1-\mu} \left\{ 1 - \frac{1}{\text{ch}(\beta \frac{L}{2})} \right\} H(t, \tau) \\ E_i = E_0 (1 - e^{-0.09i}) \\ \beta = \sqrt{\frac{C_x}{h E_i}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E_i$  为混凝土硬化第  $i$  天弹性模量;  $E_0$  为混凝土弹性模量标准值;  $T_i$  为第  $i$  天总温差,升温为正,降温为负;  $\mu$  为水泥混凝土道面板泊松比,取 0.2;  $\text{ch}()$  为双曲余弦函数;  $\beta$  为模量系数;  $L$  为道面板长;  $H(t, \tau)$  为徐变松弛系数,取 0.65;  $C_x$  为地基的水平阻力系数,对于水泥稳定碎石基层,  $C_x$  取  $0.6\text{ N/m}^3$ ;  $h$  为混凝土道面板厚度,取  $0.4\text{ m}$ 。

第  $i$  天内温差引起的拉应力计算公式为

$$\sigma_i = -\frac{E_i \alpha T_i}{1-\mu} \left\{ 1 - \frac{1}{\text{ch}(\beta \frac{L}{2})} \right\} \quad (4)$$

结合当日实验环境的平均气温  $T_h$  和总温差  $T_{total}$ ,对不同龄期的试件进行抗拉强度实验,实验结果如表 1 所示。试验表明,随着龄期的增长,混凝土试件抗拉强度不断增长;温差不同,其引起的二维状态下最大拉应力相差也较大。龄期为 3 d 时,在环境温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,总温差为  $15.96\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况下,道面早期总温差引起的二维状态下最大拉应力  $\sigma_{i,max}$  已达到混凝土抗拉强度  $f_i$  的 52.80%,进一步表明需要控制好混凝土早期总温差变化,避免温度应力超过抗拉强度限值而产生微裂缝。

### 2.1.2 道面板早期阶段最易开裂的时间段

以道面混凝土抗拉强度标准值进行验算,在常温

表 1 计算不同龄期试件温差与应力

Tab.1 Calculation of temperature difference and stress of specimens at different ages

龄期/d	$T_h / ^{\circ}\text{C}$	$T_{total} / ^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{i,max} / \text{MPa}$	$f_i / \text{MPa}$	$(\sigma_{i,max} / f_i) / \%$
3	25	15.96	0.618	1.17	52.80
6	25	10.89	0.495	2.82	17.55
9	26	6.79	0.327	3.45	9.48
12	25	7.66	0.379	3.81	9.95
15	22	11.51	0.580	4.53	12.80
18	24	10.34	0.527	4.82	10.93
28	23	11.91	0.617	5.39	11.45

气候环境下施工,当  $\sigma_i < f_i$  时,道面板不会开裂。 $\sigma_{i,max} / f_i$  应力比曲线如图 3 所示,总温差产生的最大拉应力  $\sigma_{i,max}$  与混凝土抗拉强度  $f_i$  之比随着混凝土龄期的增长先下降后趋于平缓,说明混凝土耐温差能力逐渐增强,早期收缩应力占比最大,在龄期 3 d 时强度比值超过 50%,说明早期温度应力在总收缩应力中起重要作用。在道面板施工前,要按照龄期 3 d 时的总温差产生的收缩应力复核道面板长度,前 3 d 是混凝土道面板早期最易开裂的时间段,控制总温差是重要手段。当混凝土抗拉强度增长率大于收缩应力增长率时,道面板不会开裂,因此控制降温速率是关键,实践中降温速度控制在不大于  $2\text{ }^{\circ}\text{C/d}$  时不会发生开裂。通过式(4)可以计算出,3 d 时道面板不开裂且能够承受的最大温差为  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,假设在第 3 d 突然降温  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,环境温度为  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,则总温差等于  $33.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_3 = 1.19\text{ MPa} > f_3 = 1.17\text{ MPa}$ ,道面板会开裂,所以 3 d 时道面板总温差宜控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。龄期 28 d 时道面板能够承受的平均总降温差为  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑徐变松弛系数,成龄期混凝土道面板能够承受的最大温差为  $71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对于天津地区,冬季道面平均最低气温为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夏季道面平均气温为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,季节性平均温差为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,道面板能够承受温差变化而不被破坏。

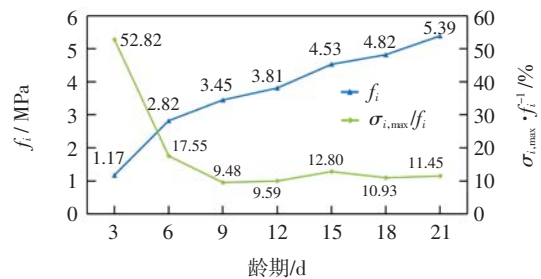


图 3  $\sigma_{i,max} / f_i$  等时线图

Fig.3 Isochronous plot of  $\sigma_{i,max} / f_i$

### 2.1.3 道面板早期干缩变形量

理论上水泥完全水化的化学结合水用量约占水

泥质量的 23%,通过实验发现使水泥完全水化并具有最低毛细孔隙率的水灰比为 0.44。在不添加减水剂时,混凝土具备足够的施工和易性时需要的水灰比大于 0.5。在混凝土道面板浇筑成型后,化学结合水之外的自由水大部分通过表面蒸发等途径流失,28 d 蒸发量约占用水量的 24%,部分水长期残留在混凝土内部。混凝土在养护过程中,水泥石强度的增长是与毛细孔中水分的丧失同时发生的,在失水过程中,孔径 50 nm 以上的毛细孔在自由水失去后留下孔洞,降低了混凝土的抗渗能力。而 5~50 nm 的毛细孔失水时,空隙负压达到 70 kPa 及以上时<sup>[4]</sup>,就会引起混凝土收缩。随着相对湿度的降低,水泥浆体的干缩增大,其线性收缩系数达到  $1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$ ,干缩量可达体积的 1%,混凝土干燥收缩主要由毛细孔和凝胶孔吸附水失水引起。相对于干燥条件,湿养护条件下水泥浆体颗粒水化更完全、更均匀。随着混凝土龄期的增长,混凝土的干缩也在增大,28 d 时混凝土干缩变形量已达到 540 d 的 60%<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.4 材料方面采取的控制措施

早期裂缝控制技术以提高混凝土极限拉伸率和抗拉性能为研究方向。结合道面工程控制原材料质量,并通过大量实验研究来优化混凝土道面板的配合比,最终确定韧性能力强的混凝土配合比,选用弹性模量与水泥石相近的骨料。

##### 1) 优选主要原材料

本文选取的案例工程采用 42.5 号普通硅酸盐低碱水泥,该水泥由天津蓟州区优质碳酸钙等原材料烧制而成,收缩性小、耐磨性强,碱含量低于 0.6%、比表面积在 300~400 m<sup>2</sup>/kg 之间,经控制混凝土内部最高温度,水泥 3 d 水化热不大于 250 kJ/kg。细集料选用遵化市产细度模数为 2.83 的优质天然水洗中粗河砂,严禁含杂物,严格控制骨料级配及含泥量,含泥量控制在 1.6% 以内。粗集料在玄武岩和碳酸钙粗骨料之间选择了相对弹性模量较低的碳酸钙骨料,采用遵化市生产的坚硬耐磨、最大粒径不超 31.5 mm、抗收缩性好的石灰岩碎石,粗骨料含泥量为 0.5%,经碱集料反应试验后,在试验龄期内的膨胀率小于 0.1%。

##### 2) 试验确定施工配合比

设定 38 组配合比对比试验,通过平板法开展早期开裂测试试验,确定韧性能力强、开裂程度最弱的施工配合比,严格控制水泥用量和砂率,合理提高弹性模量与水泥石相近的粗骨料含量,提高混凝土的中后期强度。试验最终确定的配合比:水泥用量优化为 330 kg/m<sup>3</sup>;水灰比为 0.4;中粗砂用量为 604 kg/m<sup>3</sup>;粗

骨料用量为 1 408 kg/m<sup>3</sup>;外加剂采用聚羧酸减水剂为 6.6 kg/m<sup>3</sup>;选择密度分别为 1.2、1.4、3.0 kg/m<sup>3</sup> 的 CF 纤维、FC 纤维和 BF 纤维进行对比试验,其裂缝降低率计算公式为

$$\eta = \frac{D_{\text{基准}} - D_{\text{纤维}}}{D_{\text{基准}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\eta$  为裂缝降低率; $D_{\text{基准}}$  为基准混凝土裂缝平均宽度(mm); $D_{\text{纤维}}$  为纤维混凝土裂缝平均宽度(mm)。24 h 裂缝宽度和裂缝降低率计算结果如表 2 所示。

表 2 不同种类混凝土 24 h 裂缝平均宽度和裂缝降低率

Tab.2 Average crack width and crack reduction rate of different types of concrete in 24 h

种类	24 h 平均裂缝宽度/mm	裂缝降低率/%
基准混凝土	0.50	0
CF 纤维混凝土	0.40	20
FC 纤维混凝土	0.25	50
BF 纤维混凝土	0.33	34

#### 3) 混凝土材料拌合质量控制

在混凝土拌合质量控制中,应加强数字化监控,确保拌合质量。

(1) 搅拌时间和稠度控制:混凝土搅拌时间不少于 70 s,维勃稠度控制在 11~20 s 之间,使混凝土充分搅拌均匀,满足稠度要求,确保混凝土的强度和均匀性。

(2) 采用数字化监控,通过安装传感器和监控设备,对混凝土搅拌站内砂石材料的温湿度等各种数据进行采集,远程监测搅拌站运行状况。通过采集到的数据,对混凝土理论配合比进行优化,保证搅拌混凝土混合料的质量稳定。

## 2.2 从设计方面分析道面板早期开裂成因及控制措施

### 2.2.1 道面板早期开裂成因(设计方面)

机场道面板板块结构设计不当,易引发混凝土道面早期开裂。除冰坪道面板结构从上表面至下基层依次为 400 mm 厚水泥混凝土道面板、土工膜、2 层 200 mm 厚水泥稳定碎石层、土工格栅,结构体总厚度为 800 mm。混凝土道面板设计与温度应力有关,道面板结构总温差越大,温度应力越大,道面板越长;温度应力导致的挠度越大,道面板变形就越大。为了控制温度应力,需要控制道面板的长厚比,以确保混凝土道面板不受季节变化导致的温度应力破坏<sup>[12]</sup>。

混凝土道面板浇筑完成后,板块内部存在总温差,选取 20~30 ℃ 这一区间,以极限应变等参数作为控制条件,设计无裂缝道面板的最大板长计算公式为

$$L_{\text{max}} = 2 \sqrt{\frac{E_c h}{C_x}} \operatorname{arcch} \frac{|\alpha T_{\text{total}}|}{|\alpha T_{\text{total}}| - \varepsilon_p} \quad (6)$$

式中:  $\operatorname{arch}()$  为反双曲正切函数;  $\varepsilon_p$  为混凝土极限拉伸率, 取 0.000 1。

当总温差为 20 °C 时, 道面板无裂缝板长最长为 12 260 mm; 当总温差为 30 °C 时, 道面板无裂缝板长最大为 8 960 mm。将 28 d 内收缩当量温差设为 10 °C, 可以得出: 水化热温差和气温差控制在 20 °C 之内, 道面板不会开裂。采用道面板和水泥稳定碎石之间设置沥青砂推移层的设计方法, 减小地基水平阻力系数, 当  $C_x$  减小到 0.3 N/mm<sup>3</sup> 时, 在总温差 30 °C 情况下, 板长可以由 8 960 mm 增加到 12 670 mm。

表 3 为混凝土道面板总温差为 20 °C 和 30 °C 两种状态时, 不同龄期不同弹性模量  $E$  对板长的影响。图 4 为不同龄期不同弹性模量对板长的影响曲线, 从表 3 和图 4 中可以看出, 混凝土龄期与板长呈正相关; 在早龄期, 相同板长的道面板, 龄期越早越容易开裂; 总温差越大, 越容易开裂。

表 3 不同龄期试件弹性模量与板长关系

Tab.3 Relationship between elastic modulus and plate length for specimens at different ages

龄期/d	$E/\text{MPa}$	$L_{\max}^{①}/\text{mm}$	$L_{\max}^{②}/\text{mm}$
3	7 690	5 964	4 358
6	13 561	7 920	5 788
9	18 042	9 135	6 676
12	21 463	9 963	7 281
15	24 075	10 552	7 711
18	26 068	10 980	8 024
28	29 885	11 757	8 592
成龄期	32 500	12 260	8 960

注: ①当总温差为 20 °C 时道面板的最大长度; ②当总温差为 30 °C 时道面板的最大长度。

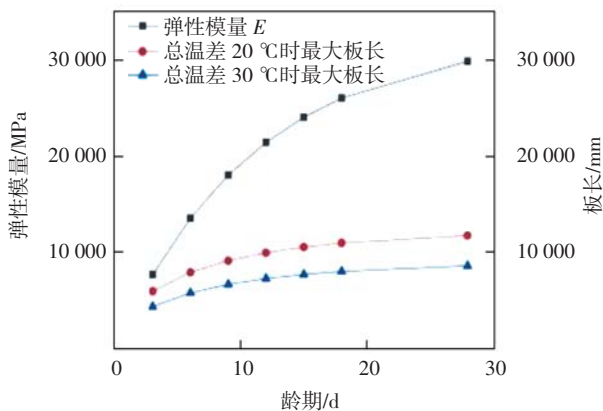


图 4 不同龄期不同弹性模量对板长的影响曲线

Fig.4 The influence curve of different elastic modulus and different age on plate length

### 2.2.2 设计规范因素

根据民航规范<sup>[13-14]</sup>的规定, 对于飞机荷载作用下

的道面板设计, 仅限制在临界荷位产生的最大应力, 未明确提出针对温度应力的设计要求, 也未规定道面混凝土的抗裂性能标准。考虑安全系数为 1.15 的情况下早龄期混凝土承受的最高总温差  $T_{\max}$ , 通过实验测定和式(3)、式(4)计算结果可得不同龄期的最高温差如表 4 所示, 从表 4 中可以看出, 随着混凝土龄期的增长, 混凝土承受温差的能力越来越强, 28 d 后基本能够承受一般环境温度变化, 且道面板不会出现开裂。

表 4 考虑安全系数的混凝土不同龄期最高温差

Tab.4 Maximum temperature difference of concrete at different ages considering safety factor

龄期/d	$E/\text{MPa}$	$\beta$	$\operatorname{ch}(\beta \frac{L}{2})$	$\varepsilon_i/10^{-4}$	$(f_i/1.15)/\text{MPa}$	$T_{\max}/\text{°C}$
3	7 690	0.000 441 6	1.674	0.096	1.017	26
6	13 561	0.000 332 6	1.366	0.189	2.452	31
9	18 042	0.000 288 3	1.271	0.279	3.000	33
12	21 463	0.000 264 4	1.226	0.366	3.313	35
15	24 075	0.000 249 6	1.201	0.451	3.939	37
18	26 068	0.000 239 9	1.185	0.534	4.191	38
28	29 885	0.000 224 0	1.161	0.791	4.687	40
成龄期	32 500	0.000 215 0	1.148	1.000	4.687	40
成龄期 <sup>①</sup>	32 500	0.000 215 0	1.148	1.000	4.687	61

注: ①成龄期混凝土道面, 当徐变松弛系数为 0.65 时, 混凝土道面板可以承受 61 °C 高温。

### 2.2.3 设计方面采取的技术措施

在道面面层和底基层之间设计上可采取设置沥青稳定碎石层的措施, 其厚度约为 5 cm, 具有隔离、防水、应力缓冲等作用的功能, 可以降低道面板底的摩擦系数, 减小约束, 降低早期开裂率。

## 2.3 从施工方面分析道面板早期开裂成因及控制措施

施工因素是机场道面产生早期开裂的重要原因。控制要点是振捣工艺、道面做面工艺、切缝时间、缝处理工艺、养护技术。

### 2.3.1 道面板早期开裂成因(施工方面)

道面施工采用自行式高频排式振捣机振捣成型的施工工艺, 混凝土拌合料在振动液化过程中, 不同密度的颗粒相对运动速度不同, 粗集料下沉速度相对较快, 水泥浆和水分相对粗集料上浮, 骨料与胶合材料之间产生不均匀的沉缩变形, 在骨料表面产生粘着裂缝, 在胶合材料水泥石中产生微裂缝。控制技术可以通过做面工艺, 提高面层混凝土均匀密实程度, 消除 3~5 mm 宽度面层的微裂缝。

### 2.3.2 道面混凝土早期开裂的施工控制技术

为减少水泥混凝土道面早期开裂带来的危害, 机场除冰坪工程采取如下一系列控制技术。

### 1) 混凝土运输、浇筑、做面、拉毛环节的技术要点

(1) 运输环节技术要点包括采用自卸混凝土运输车,短时间内平稳运输。运输过程中避免剧烈颠簸,避免混凝土离析,要在 30 min 内及时平稳安全送达摊铺现场。

(2) 浇筑环节技术要点包括分段分层浇筑、控制浇筑时间、控制沉落度。试验段采取分段分层浇筑法浇筑混凝土,施工现场温度为 20~30 ℃,从浇筑至做面最长时间控制在 75 min 之内,施工摊铺时预留 10%~15% 沉落度,辅以人工找平。

(3) 做面工艺环节技术要点包括振捣整平、辊轴揉浆、人工做面。某机场除冰坪道面板人工做面和拉毛施工情况如图 5 所示。做面工艺是控制和消除微裂缝的最关键工艺,在混凝土处于塑形状态下,道面板首先采用全幅式机械振动行夯进行振捣整平,伴随辊轴反复揉浆提浆,排除混凝土内部气泡,消除混凝土表层孔隙,使表层混凝土进一步密实紧致,直至道面板表层平整度达标。将道面板表面的水和浮浆清除后,采用人工做面,施工中应不少于 3 道木抹、2 道钢抹并配合铝合金刮平尺施工,前两道用木抹搓揉拍打,将砂子压入板面、擀出表面泌水,进一步挤出气泡,密实面层混凝土,消除孔隙等缺陷;然后用木抹进一步整平,使混凝土表面均匀分布 3~5 mm 厚泛浆;最后两道钢抹进行压砂收浆,消除砂眼,使板面密实,并消除板面残留的不平整印痕,消除不平整板面。采取合理的做面工艺将有效消除塑形收缩产生的裂缝。



(a) 人工做面



(b) 拉毛

图 5 混凝土道面板人工做面和拉毛工艺

Fig.5 Manually surfaced and brushed process of concrete pavement panel

(4) 拉毛工艺技术要点包括拉毛时机、压力和速度、纹理深度。观察道面板面水分蒸发情况,把握拉毛时机,采用 2.5 mm 粗的尼龙丝编制毛刷,边压边拉毛刷,控制压力和速度,表面纹理深度一次成型,拉毛过程中用尺子检查道面板块两端拉毛纹理线型与道面接缝的距离,确保二者平行。

### 2) 混凝土混合料中增加聚丙烯和聚酯纤维

在一些特殊环境条件下,特别是气温高于 30 ℃ 或者存在 3 级以上大风的情况下浇筑道面混凝土,在混合料中添加聚丙烯和聚酯纤维材料,可有效减少道面混凝土表面产生早期塑性裂缝的可能。

### 3) 养护环节技术要点

养护技术要点包括喷洒养护剂、覆盖土工布、布设测温表、湿润养护和养护时长。道面混凝土养护示例如图 6 所示。养护技术是控制水泥混凝土道面早期开裂的关键要素,目的是维持面层潮湿状态和避免温差变化过大,使混凝土在避免失水环境下促进水泥水化。覆盖保温保湿措施具有减小内外温差、控制降温速率、降低收缩应力的作用,且不同养护条件下混凝土微观结构差别较大,机场混凝土道面板应按照场道设计规范采取合适的温度和湿度进行道面板养护。道面板成型后 4 h 内,手指轻压表面不显痕迹时,先喷洒养护剂再覆盖土工布进行湿润养护和布设测温表,混凝土道面板内外温差控制在 20 ℃ 之内。养护期间应根据具体的工程情况,采取加强养护覆盖措施的控制技术。覆盖材料的传热系数要远小于混凝土传热系数,



(a) 覆盖土工布



(b) 湿润养护

图 6 道面混凝土养护

Fig.6 Maintenance of pavement concrete

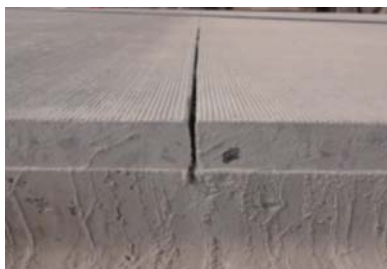
以大幅减小向环境散热的速度,降低外界环境对道面板的影响,在满足养护 14 d 的基础上尽量延长养护时间,高温环境时湿润养护时长应不少于 28 d。应设置专人定点定时进行湿润养护并及时覆盖,禁止漏盖和缺水。道面板侧模拆除后应立即回填或再覆盖保护,同时预防气温骤降引起的激烈收缩使道面板开裂。

4)切缝技术要点

切缝技术要点包括接缝类型、硬切缝、控制参数、最佳切缝时机。除冰坪道面接缝类型包括纵缝、横向施工缝、板块分割缝等。新浇筑混凝土道面板如出现断板,则必须破除断裂道面板,重新浇筑新道面板,因此,掌控切缝时机是防止混凝土道面板开裂断板的关键。所有的接缝槽口采用硬切缝法施工,当混凝土达到一定强度并在板中产生不均匀缩裂之前,及时用切缝机在混凝土表面切缝,按照切缝时间与混凝土平均温度之积作为控制参数,或以抗压强度达到 6~7 MPa 为宜,拆模后立即切缝,如图 7 所示。除冰坪道面施工时间在 5~10 月份,平均气温 18~37 ℃,因此,切缝时机控制在 8~16 h 较为合理。



(a)人工切缝



(b)切缝效果

图 7 机场道面板机械切缝

Fig.7 Mechanical cutting of airport pavement panel

5)硅烷浸渍工艺技术要点

硅烷浸渍工艺技术要点包括表面干燥清洁、单位面积用量和检测硅烷浸渍效果。为降低道面板混凝土表面吸水率,减少有害物质以溶解水方式通过微裂缝进入混凝土,在养护 28 d 后,对混凝土表面进行清洁处理并保持干燥时,严格按照浸渍工艺对道面板表面均匀无漏点喷涂,每平方米用量不少于 240 mL,两遍喷涂之间间隔大于 4 h,现场钻心取样检测硅烷浸渍效

果。机场硅烷浸渍施工过程如图 8 所示。



(a)表面清洁和喷涂



(b)浸渍效果

图 8 硅烷浸渍

Fig.8 Silane impregnation

6)道面板接缝处理技术要点

道面板接缝处理技术要点包括机械切割、缝清理、硅酮密封。若道面板的接缝处理不当,雨水、除冰液等液体将通过缝隙渗入地基,长时间浸泡地基后会导致地基承载力下降、道面板断裂等病害的产生。为防止此类病害,接缝处理方式是采用 8 mm 锯片机械切割缝隙,缝隙深 30 mm,随后将缝清理干净后,用直径为 10 mm 的泡沫塑料垫条塞入缝底,最后用硅酮进行密封填缝处理,硅酮密封不仅可以有效地阻止液体的渗透,还能提供持久的耐候性和耐磨性,从而延长道面板的使用寿命。

3 结语

道面板早期开裂主要与原材料质量、混凝土配合比、道面板结构设计、总温差应力、收缩应力、环境变化、施工工艺、养护技术等因素相关。机场道面板早期开裂控制技术的关键点如下。

(1)前 3 d 是混凝土道面板早期最易开裂时间段,总温差宜控制在 25 ℃以内。

(2)通过平板开裂试验确定韧性能力强的施工配合比,严格控制水泥用量,控制砂率,合理提高弹性模量与水泥石相近的粗骨料含量,可以提高混凝土的中后期强度。比如纤维混凝土可以显著降低第 24 h 时的裂缝宽度,裂缝宽度降低率明显。

(下转第 82 页)