

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.013



# 高性能混凝土板式构件的早期收缩特性及预测模型

李国栋<sup>1,2</sup>, 王宗林<sup>2</sup>

(1. 内蒙古大学交通学院, 呼和浩特 010070; 2. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**以桥面板等高性能混凝土板式构件为研究对象,通过实验测试了板式构件不同截面厚度位置处早期收缩分布情况,探讨混凝土早期收缩变形与温度、湿度发展过程。结果表明,混凝土板式构件的内部厚度方向不同位置处的相对湿度随龄期都呈现逐渐减小趋势,并呈现两阶段特征,同时,混凝土板式构件早期收缩变形厚度方向不同步,导致板式构件表面产生拉应力,当拉应力大于当时混凝土的抗拉强度时,混凝土表面就会出现浅层裂缝,这与实际工程中发现的板式构件表面开裂情况相吻合。混凝土板式构件早期收缩变形与相同配合比混凝土的早期自由收缩变形进行比较,引入相对约束度并建立了混凝土板式构件早期收缩变形的预测模型,并验证了该模型的准确性,其特点是能预测高性能混凝土板式构件不同截面厚度位置的早期收缩变形,对控制混凝土桥梁板式结构的早期收缩裂缝具有实际意义。

**关键词:**高性能混凝土板式构件;早期收缩变形;相对约束度;预测模型

**中图分类号:**TU375.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0093-08

## Prediction model and shrinkage character of high performance concrete plate component at early age

Li Guodong<sup>1, 2</sup>, Wang Zonglin<sup>2</sup>

(1. Institute of Transportation, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, P. R. China;

2. School of Transportation Sciences and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150050, P. R. China)

**Abstract:** Shrinkage distribution on the early-age in different height of high performance concrete plate component and the developing process of early-age shrinkage, temperature and humidity with age are investigated. The results showed that relative humidity is decreased and presenting two stage features with age in different height of high performance concrete plate component. At the same time, the early-age shrinkage is out-sync along different height of high performance concrete plate component, what generates surface tensile stress of plate component. When the tensile stress is larger than the tensile strength of concrete, it products surface shallow cracks in plate component. This is the same as surface cracking situations found in actual engineering. Meanwhile, by comparing the early-age shrinkage of concrete plate

**收稿日期:**2016-06-04

**基金项目:**国家自然科学基金(51568053);内蒙古自治区自然科学基金(2015BS0507)

**作者简介:**李国栋(1983-),男,博士,主要从事混凝土桥梁裂缝控制和加固研究,(E-mail)lgd567@imu.edu.cn。

**Received:**2016-06-04

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51568053); Natural Science Foundation of the Inner Mongolia Autonomous Region of China (No. 2015BS0507).

**Author brief:** Li Guodong(1983-), main research interest: crack control and strengthening of concrete bridge, (E-mail) lgd567@imu.edu.cn.

components and the early-age free shrinkage of the same concrete, prediction model of early-age shrinkage of plate components introducing degree of relative constraint is established, and the accuracy of the prediction model is verified. This model can predict the early-age shrinkage deformation in different height of high performance concrete plate component. This result has practical significance to control the early-age shrinkage crack of concrete bridge plate.

**Keywords:** high performance concrete plate component; the early-age shrinkage; degree of relative constraint; prediction model

混凝土早期收缩变形一般指未受荷时的变形,自从混凝土收缩现象被发现以来,从宏观表象层次上进行了大量的试验研究,得到了一些混凝土早期均匀收缩变形估算公式和收缩预测模型<sup>[1]</sup>,其中,最具代表性的有 ACI 模型、CEB-FIP 模型、B-P 模型、B3 模型和 GL2000 模型等<sup>[2]</sup>,中国应用较多的是王铁梦模型和建研院(86)模型。在桥梁工程中,由于构件的几何尺寸较大,不同位置处的尺寸又不一致,在收缩过程中,受到环境条件和约束的影响,混凝土构件的早期干燥收缩是从混凝土的表面开始,然后逐步向内部发展,导致混凝土构件在同截面上发生的收缩变形一定不均匀<sup>[3]</sup>。混凝土构件的不均匀收缩变形可以造成不同层面间的相互自约束而产生内应力,当内应力大于当时混凝土的抗拉强度时,混凝土就会开裂<sup>[4]</sup>。

现代桥梁工程中,受到桥梁结构和工期的影响,其上部结构的混凝土强度等级已经提升为 C50 以上,具有早期强度高、胶凝材料的单位用量多、流动性大等特点,由于水灰比降低和单位胶凝材料用量多等原因加剧了高性能混凝土的早期水化反应,加速了内部水分的散失,增加了高性能混凝土早期收缩变形量和变形速率,导致高性能混凝土桥梁结构的早期收缩开裂几率大于普通混凝土结构。因此,为了控制混凝土桥梁结构的早期收缩裂缝,研究和探讨桥梁高性能混凝土早期不均匀收缩变形的特点是本文的重点。

因此,基于王宗林等<sup>[5]</sup>提出的高性能混凝土自由收缩的预测模型基础上,主要针对桥面板等高性能混凝土板式构件,研究板式构件厚度方向不同位置处早期收缩分布情况,探讨混凝土早期收缩变形与温度、湿度发展过程,并与自由收缩变形对比引入相对约束度概念,建立高性能混凝土板式构件的不均匀收缩预测模型,为桥面板等高性能混凝土板式构件早期裂缝控制提供可靠依据。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

所用水泥为哈尔滨水泥厂生产的天鹅牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰为黑龙江呼兰电厂生产的一级高钙灰;粗集料为破碎玄武岩,级配为 9.5~19.5 mm 和 4.75~9.5 mm 两级粗骨料配合的连续级配碎石;细骨料为松花江天然中河砂;根据《混凝土外加剂》(GB 8076)和《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119)的规定,采用的外加剂为聚羧酸高效减水剂,其减水率为 30%。其中,原材料的物理学和质量指标详见表 1~5。

试验室通过最大理论密度确定集料的最优级配,并结合体积法和混凝土的工作性能确定了高性能混凝土配合比,设计坍落度为 160~200 mm,混凝土的设计强度为 C50,是桥梁工程中常用的混凝土强度等级。表 6 是桥梁高性能混凝土的配合比结果,表 7 是混凝土的力学性能。

表 1 水泥物理性能

Table 1 The physical properties of cement

标准稠度/%	比表面积/ ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	凝结时间/min		安定性 (煮沸法)	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝		3 d	28 d	3 d	28 d
28	2 470	3.17	58	350	合格	4.6	8.7	19.8	49.5

表 2 水泥化学成分

Table 2 Chemical composition of cement %

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	烧失量
21.08	5.47	3.96	62.28	1.73	2.63	0.95	1.61

表 3 粉煤灰质量指标

Table 3 The quality index of fly ash %

质量指标	细度	烧失量	含水量	需水量比	SO <sub>3</sub>
I 级指标	12	5	1	95	3
实测指标	10	0.35	0.1	88	0.68

表 4 粗骨料(碎石)的物理力学性质

Table 4 The physical and mechanical properties of coarse aggregate

压碎值/%	岩石强度/MPa	模量/GPa	表观密度/(Kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
13	105	70	2 660	0.167

表 5 细骨料(中砂)的物理力学性质

Table 5 The physical and mechanical properties of fine aggregate

细度模数	含泥量/%	密度/(Kg·m <sup>-3</sup> )	吸水率/%
2.78	1.14	2 600	0.76

表 6 桥梁高性能混凝土配合比设计

Table 6 The mix proportion of high performance concrete used for bridge kg

水泥	粉煤灰	碎石	中砂	水	外加剂
360	90	1 120	747	126	7.20

表 7 混凝土的物理力学性能

Table 7 The physical and mechanical properties of concrete

初凝时间/min	扩展度/mm	坍落度/mm	含气量/%	抗压强度/MPa			
				3 d	7 d	14 d	28 d
240	520	190	2.57	32.5	40.5	45.5	51.1

1.2 试验方法

1.2.1 混凝土早期均匀收缩变形测试方法 根据试验内容,混凝土收缩试验的测量时间是从混凝土初凝时间到 28 d。混凝土在初凝阶段强度较低不能脱模,收缩变形受到模具约束的影响较大。为了把模具约束的影响降到最低,收缩试验选用柔性波纹管作为模具。柔性波纹管的轴向变形能力远大于径向变形能力,图 1 是波纹管作为模具测试混凝土收缩变形的原理示意图,在忽略了波纹管径向变形的情况下,波纹管的体积变形可以用长度变形来代替。同理,混凝土初凝阶段的体积变形可以用长度变形代替。波纹管的波纹是三角锯齿形式,这种结构形式可最大程度的降低与测试平台的约束,同时,能增加混凝土和模具的内部约束,保证混凝土变形和模具变形的一致性。波纹管尺寸 100 mm×400 mm,用千分表测试收缩变形。

混凝土收缩试件成型完毕后,等到混凝土硅胶

硬化后,大约成型后 40 min,把混凝土试件和模具一起移到测试平台,然后把 PVC 管从平台上移除,同时调整波纹管位置,让一侧的铝合金探针与平台的支撑点接触,波纹管另一侧的铝合金探针与安装的千分表接触,然后调整千分表让指针指向最大刻度。实际工程中混凝土浇筑后需要进行 3 d 的养护,并且 3 d 后模板拆除。试验模拟混凝土浇筑后的环境条件,混凝土初凝时间到 3 d 测试自收缩变形,3 d 后拆除波纹管模具,进行干燥收缩测试,每隔 2 h 记录混凝土收缩变形。为了消除波纹管和平台的摩阻力对测试结果的影响,将测试平台向上倾斜 3 度,试件重力沿测试平台方向分力的大小可以抵消波纹管和平台的摩阻力,并且每组混凝土有 3 个平行试件,来增加测试结果的准确性。测试时间持续 30 d,试验室的环境温度为 25 ℃±1 ℃,相对湿度为 60%±2%。其中,考虑了水胶比、粉煤灰掺量、含气量、集浆比等参数对混凝土早期均匀收缩变形的影响确定了 18 组混凝土配合比,详见表 8。

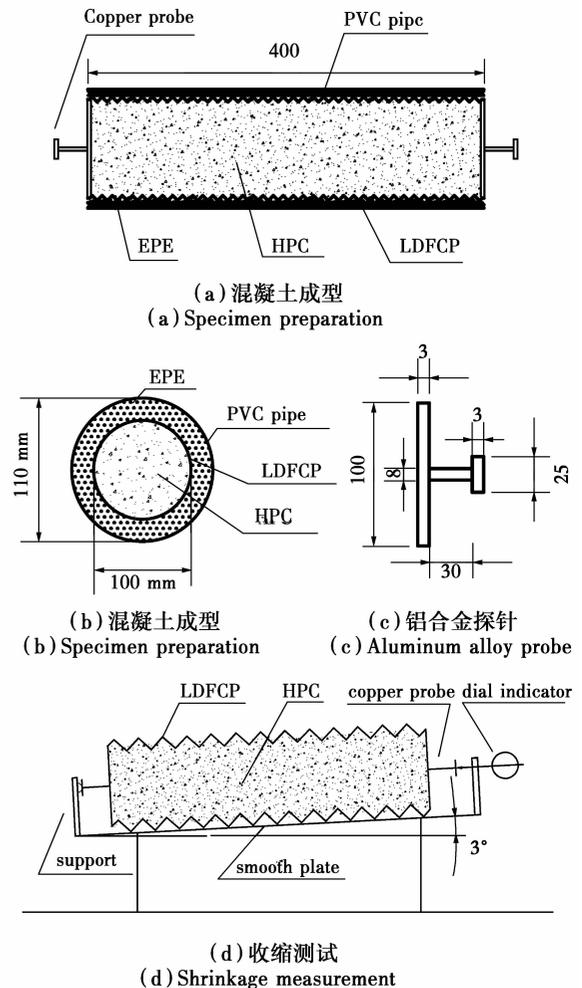


图 1 收缩试件成型和测试示意图(单位:mm)  
Fig. 1 Specimen preparation and schematic diagrams

表8 桥梁高性能混凝土配合比设计

Table 8 The mix proportion of high performance concrete used for bridge

序号	水泥	粉煤灰	碎石	中砂	水	外加剂
1	360	90	1 120	747	126	7.20
2	360	90	1 110	740	144	6.30
3	360	90	1 110	740	144	6.30
4	360	90	1 110	740	144	6.30
5	360	90	1 110	740	144	6.30
6	360	90	1 110	740	144	6.30
7	360	90	1 100	733	162	4.50
8	360	90	1 090	727	180	3.60
9	360	90	1 077	718	203	2.25
10	320	80	1 150	767	128	5.20
11	384	96	1 086	724	154	6.24
12	400	100	1 070	713	160	7.50
13	440	110	1 029	686	176	8.25
14	450	0	1 110	740	144	6.80
15	405	45	1 110	740	144	6.00
16	315	135	1 110	740	144	5.70
17	270	180	1 110	740	144	5.40
18	225	225	1 110	740	144	5.30

1.2.2 混凝土板式构件早期不均匀收缩变形测试方法 为了反映混凝土构件的早期不均匀收缩效应,同时考虑结构尺寸和构件制作,本次试验构件的尺寸设计为 $1\ 000\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。混凝土的收缩应变和早期温度采用预埋应变传感器和温度传感器进行测量,为了降低传感器定位附件对混凝土收缩变形的影响,采用细钢丝固定在两侧模板上来定位传感器位置,混凝土终凝后剪断两侧模板处细钢丝,各种传感器具体布置位置如图2所示。混凝土温湿度测量采用数字式温湿度传感器,湿度测量范围为 $0\%\sim 100\%\text{ RH}$ ,精度为 $\pm 2\%$ ,温度测试范围为 $-40\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。收缩变形测量采用埋入式振弦应力传感器,量程为 $\pm 1\ 500\ \mu\text{E}$ ,精度为 $2.5\%\text{ F.S.}$ 。温湿度和收缩应变的数值信号均通过计算机采集和存储,采集频率为 $1\text{ 次/h}$ 。

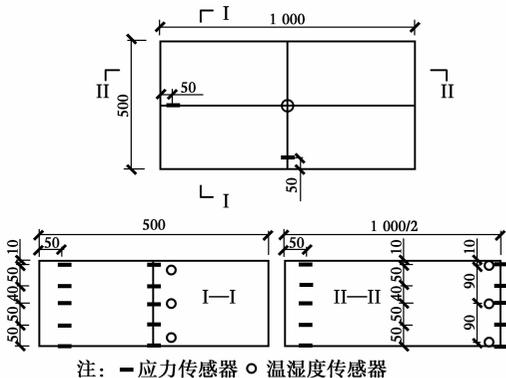


图2 不均匀收缩测试布置图(单位:mm)

Fig. 2 Nonuniform shrinkage test plan(mm)

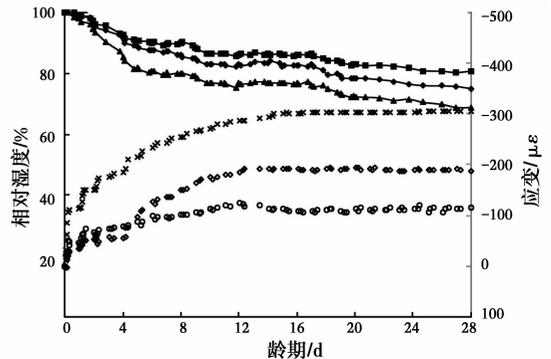
混凝土收缩变形的测试时间为浇筑后5个h(也就是混凝土初凝时间),混凝土浇筑时温度为 $20.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;测试周期内,室内环境温度为 $22.3\sim 25.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $59.5\%\sim 65.1\%\text{ RH}$ 。

## 2 结果与分析

在试验过程中为了降低混凝土测试数据的离散性,每组试验都采用3个平行试件,最后试验结果取3个试件的平均值。

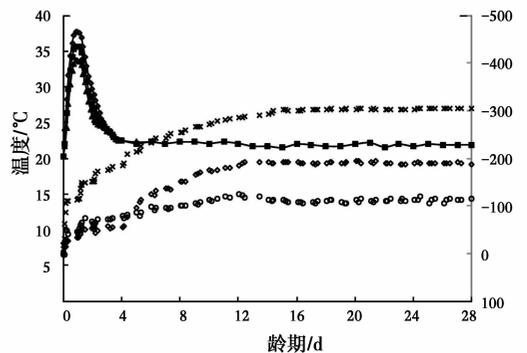
### 2.1 混凝土早期收缩变形与温度、湿度发展过程

试验测得了C50混凝土板式构件不同位置从混凝土初凝(时间为浇筑后5h)到28d内收缩变形和内部温湿度随龄期发展曲线,如图3所示,其中,图3(a)为收缩变形与湿度的变化曲线;图3(b)为收缩变形与温度的变化曲线。



(a) 总收缩变形-相对湿度

(a) The total shrinkage Relative humidity



(b) 总收缩变形-温度

(b) The total shrinkage Temperature

注: — 中心-温度 — 底面-温度 — 表面-温度  
× 表面-变形 ○ 中心-变形 ○ 底面-变形

图3 28d不同位置处收缩变形与温湿度随龄期发展曲线

Fig. 3 Developing curve of shrinkage and temperature-humidity along with age in different location

从试验曲线可得出,混凝土板式构件的内部沿厚度方向不同位置处的相对湿度随龄期都呈现逐渐减小趋势,并呈现两阶段特征,第I阶段是混凝土内部相对湿度下降加速阶段,第II阶段是混凝土内部

相对湿度下降缓和阶段。其中,第 I 阶段是从混凝土初凝期到混凝土浇筑完毕后第 4 d 左右,混凝土初凝期内部湿度相对饱和,随着龄期的增长,由于混凝土自身的水化反应和与周围环境交换导致板式构件的表面和内部湿度降低,并且,第 I 阶段内由于水化反应导致混凝土的内部温度升高,又促使混凝土的水化反应加速,从而导致第 I 阶段内混凝土内部的湿度下降较快;混凝土浇筑 4 d 后,混凝土的抗压强度达到 28 d 强度的 70% 左右,混凝土内部湿度与环境的交换趋于缓慢以及水化反应同时也进入衰减期,导致第 II 阶段混凝土内部相对湿度降低趋于缓和。这与混凝土板式构件的收缩变形曲线趋于一致。

同时,图 3 呈现了单面干燥下混凝土板式构件不同高度的早期收缩变形随龄期的变化趋势,高度方向不同位置的混凝土收缩变形随龄期都在增加,但增加幅度不同。形成很大的内表湿差和干缩变形梯度。混凝土板式构件的早期不均匀收缩会形成相互约束,从而在表面产生拉应力,相对于早期混凝土的低强度而言这种应力很大,足以直接导致表面浅层裂缝的出现。对于厚度为 0.2 m 的混凝土板式构件,浇筑 4 d 后由于混凝土的不均匀收缩产生的相互约束,极容易导致混凝土的表面早期开裂,这种裂缝在混凝土桥面板的预制过程中是时常发生的,所以,单面干燥对混凝土构件的早期裂缝控制是不利的。

图 3(a) 所示,在干燥初期混凝土表面湿度迅速下降,混凝土收缩变形也在快速增长,混凝土板式构件表面的收缩变形最大,沿着高度方向逐渐减小,混凝土的收缩变形发展与相对湿度的下降之间呈高度相关性<sup>[6-10]</sup>。

图 3(b) 所示,混凝土的浇筑温度为 20.2 °C,由于早期水化反应产生的水化热导致混凝土构件内部温度随龄期不断的升高,浇筑 1 d 后构件的表面温度达到最高为 33.4 °C,中心温度为 37.7 °C,底面温度为 35.2 °C。然后随着混凝土的水化反应减缓和混凝土向环境散热导致混凝土构件内部的温度不断降低,浇筑 4 d 后混凝土的温度与环境温度一致,达到 22.5 °C。对于混凝土板式构件,大量水泥在第 I 阶段发生水化反应导致试件加速升温,随着水泥水化反应进入衰减期,混凝土构件自温峰进入降温阶段,同时与外部环境进行温度交换,直至与环境温度吻合。

## 2.2 分离混凝土温度收缩

根据热力学原理,温度的变化必然导致构件的

变形,所以混凝土板式构件的早期总收缩变形包括由湿度变化和温度变化引起的两部分变形,如式(1)所示。

$$\epsilon = \epsilon_T + \epsilon_W \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为试验获得混凝土的总收缩变形, $\epsilon_T$  为温度变化引起的收缩变形, $\epsilon_W$  为湿度变化引起的收缩变形。为了保证混凝土收缩变形测试的精确度,应剔除温度变形,温度变化引起的变形( $\epsilon_T$ )可按式(2)计算。

$$\epsilon_T(t) = \int_{T_0}^T \alpha dT \quad (2)$$

式中: $\epsilon_T$  是温度变形, $\alpha$  是混凝土的热膨胀系数, $T$  是  $t$  时刻混凝土的温度, $T_0$  是混凝土浇筑时的温度。研究表明混凝土早期的热膨胀系数不是一个定值,其随龄期的发展可按式(3)计算<sup>[11-15]</sup>

$$\alpha = 132 \exp\left(-\frac{0.3t_{eq}}{d}\right) + 7 \quad (3)$$

$$t_{eq} = \int_0^t \exp\left(\frac{1}{R}\left(\frac{U_{ar}}{293} - \frac{U_{aT}}{273+T}\right)\right) dt \quad (4)$$

$$U_a = (42\ 830 - 43T) \exp((-0.000\ 17T)t) \quad (5)$$

式中: $t_{eq}$  是混凝土的等效龄期,考虑了温度变化对水泥水化的影响计算见式(4); $T$  是混凝土的养护温度; $R$  是气体常数,取 8.314 J/(mol·K); $U_{ar}$  为参考温度时的水泥水化反应活化能; $U_{aT}$  为温度为  $T$  时的反应活化能。其中  $U_a$  是时间和温度的函数,可由式(5)近似表达<sup>[16-17]</sup>。

从图 3b 可以看出,混凝土浇筑初期升温阶段的变形出现的膨胀变形,分离温度变形后混凝土由湿度引起的变形比总变形有所增大。图 4 是混凝土板式构件分离温度影响前后的收缩变形。鉴于早期混凝土热膨胀系数随水化时间变化规律的试验获取十分复杂<sup>[18-19]</sup>,加上早期混凝土自由变形的复杂性和多变性,精度欠佳。

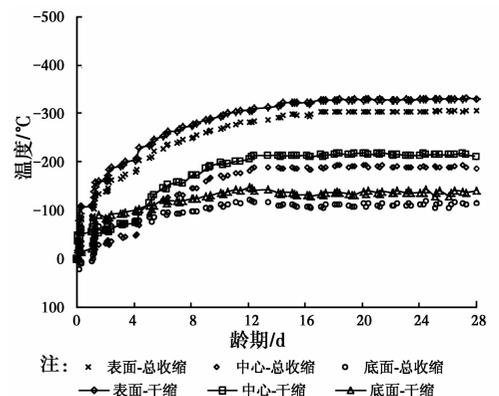


图 4 分离温度变形前后对比

Fig. 4 Before and after separating temperature deformation

### 3 预测模型建立

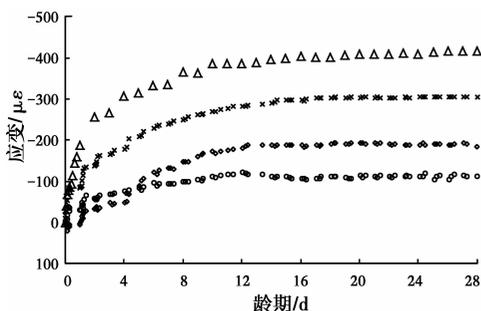
#### 3.1 相对约束度

根据试验需要,对相同配合比的混凝土进行均匀自由收缩试验,混凝土收缩试验的测量时间是从混凝土初凝时间到 28 d。混凝土在初凝阶段强度较低不能脱模,收缩变形受到模具约束的影响较大。为了把模具约束的影响降到最低,参照王宗林等<sup>[5]</sup>收缩试验选用柔性波纹管作为模具,波纹管尺寸  $\phi 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,用千分表测试收缩变形。

如图 5 所示,相同配合比混凝土的均匀收缩变形和板式构件不均匀收缩变形随龄期的发展趋势一致,但是均匀收缩变形量远大于混凝土板式构件的收缩变形量,说明构件尺寸效应对混凝土早期收缩变形影响显著,通常实验室测试混凝土的均匀收缩变形量并不能准确表征混凝土构件的实际收缩变形量,而如何两者之间建立关系也是研究的出发点。在桥梁工程中,由于构件的几何尺寸较大,不同位置处的尺寸又不一致,在收缩过程中,受到环境条件和约束的影响,混凝土构件的早期干燥收缩是从混凝土的表面开始,然后逐步向内部发展,导致混凝土构件在同截面上发生的收缩变形一定不均匀,为了更准确描述实际混凝土板式构件的收缩变形,有必要建立混凝土均匀收缩变形和板式构件收缩变形的关系,因此,引入相对约束度  $D$ ,具体表达式如式(6)所示。

$$D = \frac{\epsilon_j - \epsilon_B}{\epsilon_j} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $D$ 为混凝土板式构件收缩变形相对约束度, $\epsilon_j$ 为混凝土均匀收缩变形, $\epsilon_B$ 为混凝土板式构件不同位置处的收缩变形。



注: × 表面变形 · 中心变形 ◦ 底面变形 Δ 均匀收缩变形

图 5 是混凝土自由收缩和不均匀收缩变形

Fig. 5 Free shrinkage and nonuniform shrinkage

在图 5 中取 28 d 混凝土的收缩变形,并利用式(6)计算出混凝土板式构件沿厚度方向,不同位置处的 28 d 收缩变形的相对约束度,如图 6 所示,表面

相对约束度小于内部相对约束度,通过对测试数据的整理和分析回归,混凝土板式构件的相对约束度从表面到内部呈指数增加,同时,图 5 表明混凝土表面收缩变形大于内部的收缩变形,说明混凝土板式构件早期收缩变形高度方向不同步,导致板式构件表面产生拉应力,当拉应力大于当时混凝土的抗拉强度时,混凝土表面就会出现浅层裂缝,这与实际工程中发现的板式构件表面开裂情况相吻合。

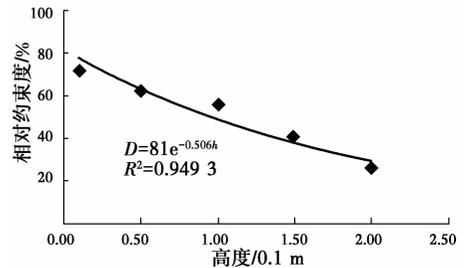


图 6 相对约束度的回归曲线

Fig. 6 Regression curve of relative constraint degree

通过以上分析,混凝土板式构件早期收缩变形的相对约束度和高度的表达式详见表 9。

表 9 混凝土 28 d 收缩应变的表达式和判定系数  
Table 9 Expressions and determination coefficient of shrinkage strain for concrete at 28 d

影响参数	表达式	判定系数 $R^2$
相对约束度	$D = 81e^{-0.506h}$	0.9493

#### 3.2 预测模型

王宗林等<sup>[5]</sup>测试了 18 种不同桥梁高性能混凝土配合比的早期自由收缩变形,并结合桥梁高性能混凝土的特点和试验结果对 Kawai 等<sup>[19]</sup>提出的收缩模型进行修正,同时考虑了龄期、水胶比、粉煤灰取代率、含气量和集浆比对混凝土早期自由收缩变形的影响,该模型表达式见式(7)~(12)所示,并得到了验证。

$$\epsilon(t) = \alpha \cdot (1 + \gamma) \cdot \eta \cdot \epsilon_{28} \left( \frac{w}{cm} \right) \cdot \beta(t) \quad (7)$$

其中

$$\epsilon_{28} \left( \frac{w}{cm} \right) = 100 \exp \left[ -3.2 \left( \frac{w}{cm} \right) \right] \quad (8)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp(-qt^p) \quad (9)$$

$$\gamma = a(AC)^2 + b(AC) + c \quad (10)$$

$$\alpha = 1 - k(FA) \quad (11)$$

$$\eta = n(J)^m \quad (12)$$

式中: $\epsilon_{AS}(t)$ 是混凝土在龄期  $t$  时刻的收缩应变, $\mu\epsilon$ ; $\epsilon_{28}(w/cm)$ 为 28 d 时混凝土的收缩应变,通过试验结果和数值回归确定的,其表达式为式(2~9),其中

$w/cm$  表示混凝土水和胶凝材料的比值; $\beta(t)$ 表示的是混凝土的收缩应变随龄期的发展系数; $\gamma$ 是含气量对混凝土收缩应变的影响系数; $AC$ 表示混凝土的含气量; $a, b$ 和 $c$ 是常数,与胶凝材料和引气剂种类有关; $\alpha$ 是水泥类型和粉煤灰的影响系数, $FA$ 表示混凝土中粉煤灰的取代率; $q$ 和 $p$ 是常数,与水泥和粉煤灰有关; $\eta$ 是集浆比影响系数; $m$ 和 $n$ 是常数,与胶凝材料与骨料有关; $t$ 是混凝土龄期, $d$ 。

在此高性能混凝土自由收缩预测模型的基础上,在所有混凝土原材料相同的条件下进行板式构件的早期收缩变形测试,并根据测试数据整理结果引入相对约束度的概念,建立混凝土板式构件不同位置处的早期收缩变形预测模型,预测模型表达式见式(13)。

$$\epsilon(t) = D \cdot \alpha \cdot (1 + \gamma) \cdot \eta \cdot \epsilon_{28} \left( \frac{w}{cm} \right) \cdot \beta(t) \quad (13)$$

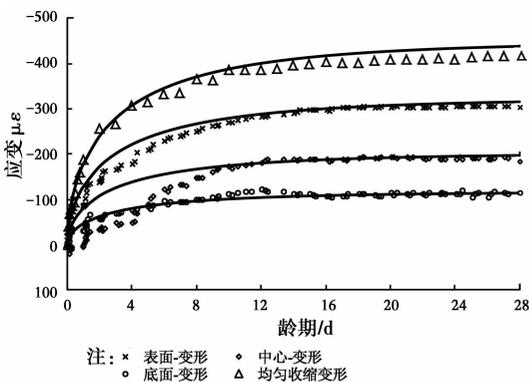


图 7 混凝土板式构件早期收缩预测模型

Fig. 7 The prediction model of concrete plate component at early-age shrinkage

图 7 是该预测模型和实测值的比较结果,可以看出该预测模型从宏观层次上可以准确的预测高性能混凝土板式构件早期收缩变形的发展趋势。该预测模型具有以下特点:1)混凝土的初凝时间是收缩应变测试的开始时间;2)该模型考虑了板式构件截面高度方向不同位置处早期收缩变形;3)该模型考虑了水胶比、粉煤灰取代率、含气量、集浆比等参数对混凝土收缩变形的影响,能较全面的反映影响混凝土收缩变形的因素;4)用 28 d 的收缩应变值代替混凝土的长期收缩变形值;5)该模型是在一定的环境条件下(环境温度为  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为  $60\% \pm 2\%$ )提出来的,应该考虑环境条件的变化对该模型的影响。

该模型最大特点是考虑了实际混凝土板式构件尺寸效应的影响,能预测板式构件不同位置的收缩

变形,为控制混凝土桥梁板式结构的早期收缩裂缝具有实际意义。

## 4 结论

通过试验测试了混凝土板式构件的早期收缩变形,分析了混凝土板式构件早期收缩变形、温度和湿度的发展过程,分离了温度变形的影响,并比较了相同配合比混凝土的自由收缩变形,引入相对约束度并建立了预测模型。

1)混凝土板式构件的内部截面厚度方向不同位置处的相对湿度随龄期都呈现逐渐减小趋势,并呈现两阶段特征,第 I 阶段是混凝土内部相对湿度下降加速阶段,第 II 阶段是混凝土内部相对湿度下降缓和阶段。

2)混凝土板式构件早期收缩变形厚度方向不同步,导致板式构件表面产生拉应力,当拉应力大于当时混凝土的抗拉强度时,混凝土表面就会出现浅层裂缝,这与实际工程中发现的板式构件表面开裂情况相吻合。

3)混凝土板式构件比较了相同配合比混凝土的自由收缩变形,引入相对约束度并建立了混凝土板式构件早期收缩变形的预测模型,模型最大特点是考虑了实际混凝土板式构件尺寸效应的影响,能预测板式构件截面厚度方向不同位置的收缩变形,为控制混凝土桥梁板式结构的早期收缩裂缝具有实际意义。

## 参考文献:

- [1] 朱岳明,刘有志,曹为民,等. 混凝土湿度和干缩变形及应力特性的细观模型分析[J]. 水利学报, 2006, 36(10): 1162-1168.  
ZHU Y M, LIU Y Z, CAO W M, et al. Analysis of concrete moisture dry shrinkage and stress based on mesoscopic model[J]. Shuili Xuebao, 2006, 36(10): 1162-1168. (in Chinese)
- [2] DENEK Z, BAZANT P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3 [J]. Materials and Structures, 1995, 28: 357-365.
- [3] JIANG L, GUAN Y. Pore structure and its effect on strength of high-volume fly ash paste [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 631-633.
- [4] 李国栋,王宗林. 间歇浇筑板式混凝土的早期约束收缩效应分析[J]. 工业建筑, 2014, 4: 73-77.  
LI G D, WANG Z L. Analysis of restrained shrinkage of intermittent casting concrete slab in the early age [J]. Industrial Construction, 2014, 44(4): 73-77. (in

- Chinese)
- [5] WANG Z L, LI G D. A Prediction model for autogenous shrinkage of high-performance concrete in bridge engineering[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(22): 1325-1335.
- [6] 张武满, 孙伟. 粗骨料对高性能混凝土早期自收缩的影响[J]. 硅酸盐学报(英文版), 2009, 37(4): 631-636.  
ZHANG W M, SUN W. Effect of coarse aggregate on early age autogenous shrinkage of high performance concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(4): 631-636. (in Chinese)
- [7] WENYAN Z, MOHAMED Z, YUKIO H. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 500-510.
- [8] 李凤兰, 罗俊礼, 赵顺波. 不同骨料高强混凝土自收缩试验研究[J]. 港工技术, 2009, 46(1): 35-37.  
LI F L, LUO J L, ZHAO S B. Experimental study on autogenous shrinkage of high strength concrete of different aggregates[J]. Port Engineering Technology, 2009, 46(1): 35-37. (in Chinese)
- [9] KIYOSHI E, KOHJI T. Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (3): 483-493.
- [10] HOBBS D W. The dependence of the bulk modulus, young's modulus, creep, shrinkage and thermal expansion of concrete upon aggregate volume concentration [J]. Materials and Structures, 1971, 4 (2): 107-114.
- [11] ZHANG J, HUANG Y, QI K. Calculation of moisture distribution in early age concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2009, 135 (8): 871-880.
- [12] 尹自立. 高性能混凝土早龄期自收缩与开裂敏感性的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012: 40-47.  
YIN Z L. Study on the autogenous shrinkage and cracking sensitivity of high performance concrete at early ages [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006: 40-47. (in Chinese)
- [13] LOUKILI A, CHOPIN D, KHELIDJ A, et al. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 915-922.
- [14] 马新伟, 钮长仁. 混凝土硬化早期热膨胀的量化方法研究[J]. 低温建筑技术, 2005(2): 8-9.  
MA X W, NIU C R. Quantification of thermal dilation of concrete at early age [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2005(2): 8-9. (in Chinese)
- [15] 张君, 祁锲, 侯东伟. 基于混凝土绝热温升实验的早龄期混凝土温度场的计算[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 155-160.  
ZHANG J, QI K, HOU D W. Calculation of temperature fields in early age concrete based on adiabatic test [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (8): 155-160. (in Chinese)
- [16] PANE I, HANSEN W. Concrete hydration and mechanical properties under no isothermal conditions [J]. ACI Material Journal, 2002, 99(6): 534-542.
- [17] 高原, 张军, 韩宇栋. 混凝土超早期收缩试验与模拟[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1088-1094.  
GAO Y, ZHANG J, HAN Y D. Tests and simulations on shrinkage of concrete at early-age [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, 40(8): 1088-1094. (in Chinese)
- [18] TURCRY P, LOUKILI A, BARCELO L, et al. Can the maturity concept be used to separate the autogenous shrinkage and thermal deformation of a cement paste at early age [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1443-1450.
- [19] KAWAI M, MIYAZAWA S. Prediction model for autogenous shrinkage of concrete (department of civil engineering [J]. Research Reports, 2004, 38: 29-36.

(编辑 胡玲)