

文章编号:1671-8879(2014)03-0028-07

基于多元线性回归理论的道路 混凝土干缩预测模型

周胜波,申爱琴,田 丰,江 洲,王 贝,万晨光

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为合理地选择水灰比、胶凝材料掺量、骨料用量等配合比参数,从而达到降低混凝土干缩的目的,采用设计的干燥收缩试验装置,通过改变参数水平,研究了不同因素对道路混凝土早期干缩的影响,并确定了控制干缩的主要配合比参数。通过对比分析现有干缩预测模型的局限性,基于多元线性回归理论,利用 SPSS 软件建立了基于原材料组成的道路混凝土早期干缩预测模型。研究表明:在选定的原料试验范围内,用水量和骨料体积含量是影响道路混凝土干缩率的主要因素,水泥用量次之,粗细集料体积比基本上没有影响;可为道路混凝土抗裂性配合比设计提供理论基础。

关键词:道路工程;道路混凝土;干缩模型;多元线性回归;原料组成

中图分类号:U414.18

文献标志码:A

Drying shrinkage prediction model for pavement concrete based on multivariate linear regression theory

ZHOU Sheng-bo, SHEN Ai-qin, TIAN Feng, JIANG Zhou, WANG Bei, WAN Chen-guang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to decrease the drying shrinkage ratio of concrete, it is essential to make reasonable choices among such parameters as water-cement ratio, binder consumption volume, the amount of coarse and fine aggregate and so on. In the present study, the influences of main factors on the earlier drying shrinkage were investigated by using the self-developed experimental drying shrinkage setup, and the main parameters for controlling drying shrinkage of concrete were determined. Through comparing and analyzing the limitations of existing models for predicting drying shrinkage of concrete, and based on multivariate linear regression theory, the prediction model for earlier drying shrinkage of pavement concrete was established based on raw material mixing proportion of concrete by applying SPSS software. The results show that such factors as water consumption volume and aggregate volume content are main influence factors on the drying shrinkage of concrete while the cement content is minor, and basically aggregate volume ratio has no influence on the drying shrinkage. This study will provide theoretical foundation for designing pavement concrete mixing proportion to resist cracking. 4 tabs, 11 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; pavement concrete; drying shrinkage model; multivariate linear regression; material mixing proportion

收稿日期:2013-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51278059);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G5210010,2013G2313001)

作者简介:周胜波(1979-),男,山东泰安人,工学博士研究生,E-mail:zhoushengbo2005@163.com.

0 引言

混凝土由于收缩产生的裂缝使其宏观性能劣化从而降低其耐久性,而混凝土在硬化过程中的干缩是收缩的重要组成部分。国内外学者采用试验和数值计算方法对建筑、水工等领域用混凝土材料组成与干缩性能间关系进行了深入地研究:Hwang 等对水泥浆体干缩期间产生微裂纹进行了分析^[1];Al-khaja 等研究了含有石灰石的水泥砂浆的干缩和强度之间的关系^[2];Kayali 等研究了含有粉煤灰纤维增强轻集料混凝土干缩^[3];肖志乔等研究了水闸结构中混凝土的干缩应力^[4];王同生等分析了水工混凝土干缩应力^[5];李金玉等针对大坝混凝土的干缩进行了研究^[6]。为了有效预测混凝土的收缩,国内外还提出一些预测模型,包括美国混凝土协会 ACI209 规范干缩模型、Bazant B3 干缩模型、欧洲-国际混凝土协会的 CEB-FIP 模型、王铁梦根据大量试验数据建立的混凝土在标准条件下的干缩预测模型以及 Eguchi 等针对混凝土收缩提出的复合模型等^[7-11]。然而针对道路混凝土早期收缩及其影响因

素的系统研究甚少,且已有的模型研究成果很难直接用于指导道路混凝土工程实践。为此,本文通过对不同原料配比下混凝土干缩试验开展研究,分析各主要影响因素下道路混凝土早期收缩变化规律,对比分析现有的混凝土干缩预测模型,基于原材料配比建立适合道路混凝土的干燥收缩预测模型,从而将材料组成设计与混凝土的收缩性能联系起来,为道路混凝土配合比设计奠定理论基础,这对混凝土工程实践具有重要的现实意义。

1 试验材料及试验方法

1.1 原材料及配合比设计

试验所用水泥采用秦岭 PO 42.5R,细集料采用西安灞桥河砂,其细度模数为 2.6~3.1,粗集料为粒径 4.75~26.5 mm 的陕西泾阳碎石,水是西安市自来水。原材料技术指标依据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)进行测试。为了对常用施工范围内不同原料组成对道路混凝土干缩性能的影响,本文设计的道路混凝土配合比见表 1。

表 1 道路混凝土配合比

Tab. 1 Mixing proportions of pavement concrete

配合比 序号	水泥用量/ (kg·m ⁻³)	用水量/ (kg·m ⁻³)	粗细集料 体积比	骨料体积 分数/%	配合比 序号	水泥用量/ (kg·m ⁻³)	用水量/ (kg·m ⁻³)	粗细集料 体积比	骨料体积 分数/%
1	360	144.0	1.8	73.1	11	298	155.0	1.8	73.1
2		151.2			12	300	126.0		77.6
3		158.4			13	330	138.6		75.3
4		165.6			14	360	151.2		73.1
5		172.8			15	390	163.8		70.8
6		180.0			16	420	176.4		68.6
7	419	155.0	1.2	73.1	17	360	151.2	1.2	73.1
8	388				18			1.5	
9	360				19			1.8	
10	316				20			2.1	

1.2 试验装置和试验方法

目前中国《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》(GB T50082—2009)以及美国材料试验协会标准 ASTM C 341 等规定的干缩试验测量开始时间定为 3 d,对于早于 3 d 尤其是成型 24 h 后的混凝土干缩值测试,还没有统一的标准方法,主要是因为混凝土强度太低使得收缩测量困难。20 世纪 90 年代,Tazawa 使用千分表测定拆模前的混凝土收缩,拆模后用薄铝胶带密封,然后测试试件长度变化^[12]。本文在参考上述方法的基础上,设计如图 1 所示的试验装置用于测试混凝土的早期干燥收缩变形。

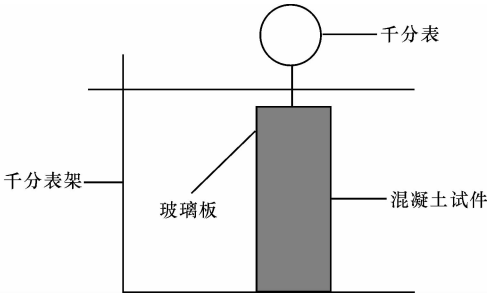


图 1 混凝土干燥收缩测试装置

Fig. 1 Measurement apparatus for drying shrinkage of concrete
针对道路混凝土在 1~7 d 之间的早期干缩进

行试验,同时测量混凝土水分蒸发量,混凝土试件尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,新拌混凝土的坍落度控制在 $30\sim 50\text{ cm}$ 之间。具体试验方法如下:将成型的混凝土试件置于标养条件养护,1 d 后拆模并用塑料薄膜覆盖,将试件移入 SGS-350B 型混凝土干缩试验箱内,温度控制为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、湿度控制为 $(60\pm 5)\%$,然后架设千分表,3 d 之前干缩每隔 2 h 测量一次,3 d 之后干缩每隔 4 h 测量一次;混凝土水分蒸发量通过测试不同龄期混凝土样品的质量变化获得。

2 试验结果及讨论

2.1 不同因素对道路混凝土早期干缩的影响

针对道路混凝土干缩试验,主要考虑了用水量、水泥用量、骨料体积含量以及粗细集料体积比等 4 个主要因素的影响。减水剂的作用主要是降低用水量,因此这里没有单独考虑,干缩试验结果如图 2~图 4、下页图 5~图 9 所示。由图可见,5 d 以前混凝土干缩率和水分蒸发量增加迅速,此后趋于平缓,5 d 之前干缩率占 7 d 总干缩率的 $82\%\sim 94\%$,随着龄期的延长,混凝土内部的自由水分逐渐减少。针对道路混凝土,干缩引发的裂缝主要发生在早期,若加强早期养护,混凝土的干燥收缩变形量可以得到有效控制^[13]。

图 2、图 3 是改变用水量后混凝土干缩和水分蒸发量随时间的变化曲线。干缩率随用水量按照指数方程 $y=ae^{-bt}$ (R^2 大于 0.9) 形式变化,其中 a 、 b 为材料常数, t 为龄期。当用水量由 180 kg/m^3 (配合比 6) 降低到 144 kg/m^3 (配合比 1),相同龄期水分蒸发量逐渐减小,而混凝土干缩率增加;当用水量在 $144\sim 158\text{ kg/m}^3$ 时,混凝土的干缩值差异很小, 1 m^3 混凝土每增加 5 kg 水,7 d 干缩值降低 1.0×10^{-6} ;而当用水量大于 158 kg/m^3 以后,早期收缩变形量显著下降, 1 m^3 混凝土每增加 5 kg 水,7 d 干缩值降低 6.0×10^{-6} 。因此,在保证其他路用性能的前提下,混凝土不宜采用过小的单方用水量。

图 4 和下页图 5 是改变水泥用量对混凝土干缩和水分蒸发量影响曲线。保持用水量 155 kg/m^3 固定不变,增加水泥用量会使得相同龄期混凝土水分蒸发量减少、干燥收缩率增大,干缩率随水泥用量增加按线性方程 $y=ax+b$ ($a>0, R^2>0.95$) 形式变化。混凝土 7 d 总收缩率由 102×10^{-6} (配合比 11) 增加到 126×10^{-6} (配合比 7),每增加 5 kg 水泥,干缩率仅增加 0.9×10^{-6} ,因此在试验范围内水泥用量对干缩影响不是主要因素。水泥用量多则水化需

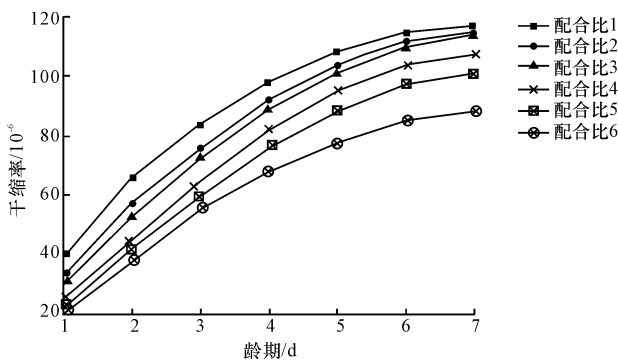


图 2 用水量对混凝土干缩率的影响

Fig. 2 Influence of water consumption volume on drying shrinkage of concrete

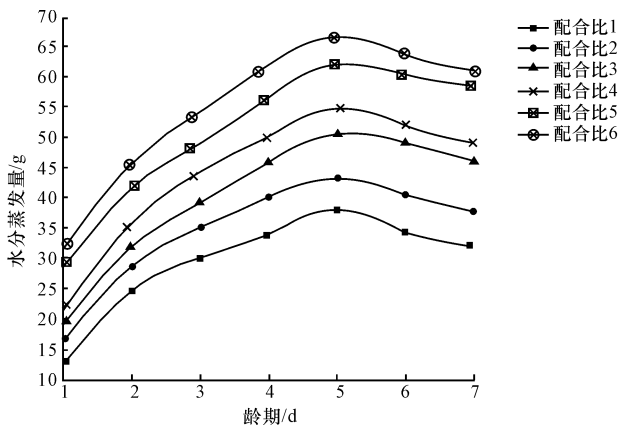


图 3 不同用水量下混凝土水分蒸发量的变化

Fig. 3 Evaporation of water in concrete with different water consumption volumes

要的自由水分增多,相应地可蒸发水分减少,因蒸发形成的大孔会减少,使得其内部微观结构细化^[14]。若水泥用量低于 360 kg/m^3 时,混凝土在次一级结构上无法达到密实状态,混凝土孔隙大且有多连通性,对耐久性不利^[15]。因此,控制水泥用量在 $360\sim 420\text{ kg/m}^3$ 对道路混凝土耐久性适宜的。

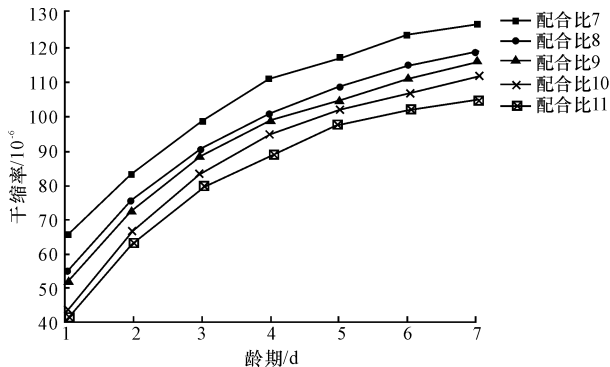


图 4 水泥用量对混凝土干缩率的影响

Fig. 4 Influence of cement content on drying shrinkage of concrete

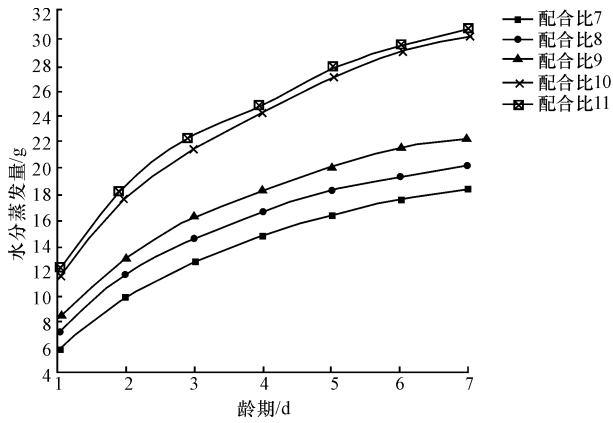


图5 不同水泥用量下混凝土水分蒸发量的变化

Fig. 5 Evaporation of water in concrete with different cement contents

图6、图7是改变骨料体积含量混凝土的干缩和水分蒸发量的变化曲线。可见骨料体积含量增加,水分蒸发量降低,同时混凝土干缩率按照线性方程 $y = -ax + b (a > 0, R^2 > 0.98)$ 形式减少。骨料体积含量由68.6%增加到77.6%,混凝土的7d干缩率由 142×10^{-6} (配合比16)降低到 82×10^{-6} (配合比12)。集料由于刚性较大、体积稳定性好,可以在一定程度上抑制水泥浆体的收缩变形,因此增加集料体积含量可以有效抑制混凝土收缩变形^[16]。骨料体积含量减小,相同龄期混凝土的水分蒸发量增大,当骨料体积含量低于70%时蒸发尤为明显。因此在道路混凝土材料组成设计中,必须严格控制骨料的体积含量及其他参数,以确保混凝土的各项路用性能得到有效协调。

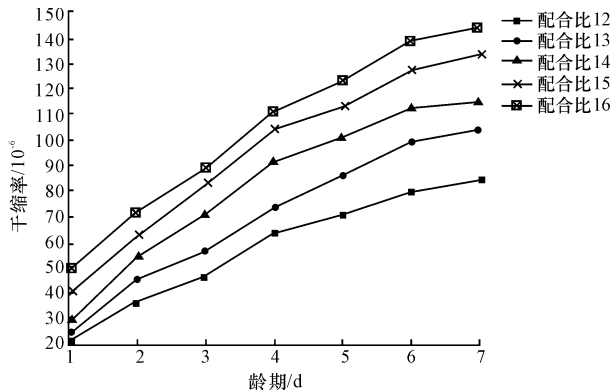


图6 骨料体积含量对混凝土干缩率的影响

Fig. 6 Influence of aggregate volume content on drying shrinkage of concrete

图8、图9是粗细集料体积比变化时道路混凝土干缩和水分蒸发量随时间的变化关系。总体上看,同龄期内混凝土的早期干缩率在粗细集料体积比为1.8时最小,但在1.2~2.1之间变化时干缩率接近,相差不到

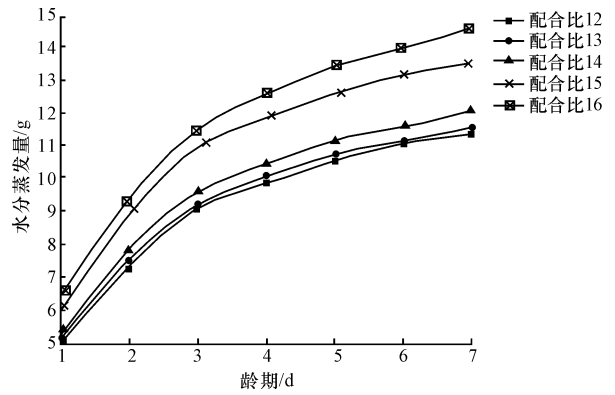


图7 不同骨料体积含量下混凝土水分蒸发量的变化

Fig. 7 Evaporation of water in concrete with different aggregate volume contents

5%,同龄期混凝土的水分蒸发量差异不明显。当保持水灰比一定,除水泥水化所需水分外,可供蒸发的自由水分基本固定,说明在保持混凝土集料体积相同时,改变粗细集料体积比对混凝土早期干缩影响不大,其取值可由其他路用性能决定。

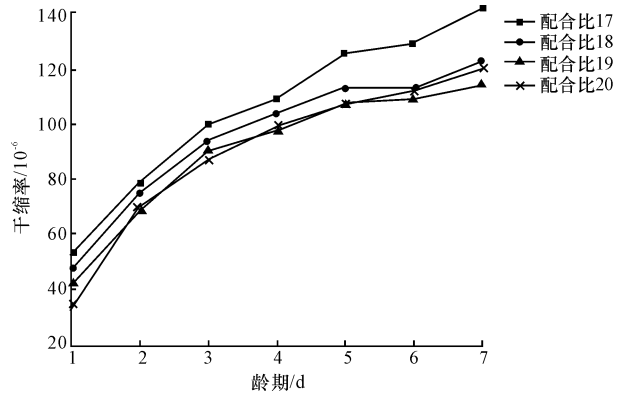


图8 粗细集料体积比对混凝土干缩率的影响

Fig. 8 Influence of aggregate volume ratio on drying shrinkage of concrete

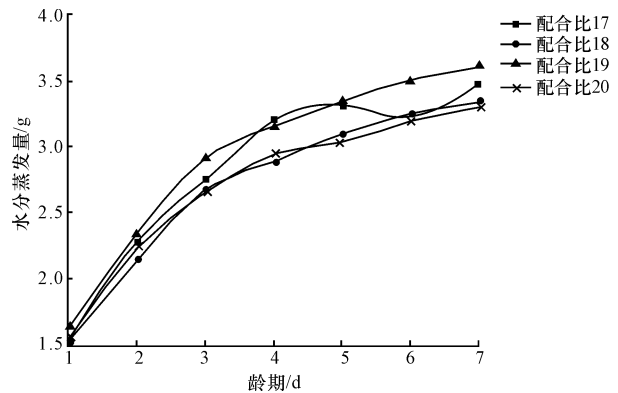


图9 不同粗细集料体积比下混凝土水分蒸发量的变化

Fig. 9 Evaporation of water in concrete with different aggregate volume ratios

2.2 道路混凝土干缩预测模型

水泥用量、用水量、骨料体积含量以及粗细集料比等因素对道路混凝土干缩影响程度不同。为了对道路混凝土配合比及设计提供借鉴,本文针对试验范围内的道路混凝土干缩预测模型进行分析。

2.2.1 基于已有模型预测分析

混凝土干燥收缩的预测一直是大家关注的问题,本文选择目前几个常见的干缩模型对试验数据进行预测,包括美国混凝土协会 ACI 干缩预测模型、针对混凝土各组分对混凝土干缩影响的 Bazant-Panula 模型、针对抗压强度不超过 60 MPa 的混凝土欧洲混凝土协会-国际预应力混凝土协会提出 CEB-FIP 模型,而王铁梦提出收缩计算公式是针对混凝土处于标准条件下的收缩,因此没有选其对道路混凝土干缩进行预测。具体计算见式(1)~式(3)。

(1)ACI 模型

$$\epsilon=(t-t_0)/[35+(t-t_0)\epsilon_\infty]$$
(湿养) (1)

(2)Bazant-Panula 模型

$$\epsilon=\epsilon_\infty\beta_s, \beta_s=\sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}+(t-t_0)}}, \tau_{sh}=\frac{(k_s h)^2}{C_1(t)}$$
 (2)

(3)CEB-FIP 模型

$$\epsilon=\epsilon_\infty\beta_s, \beta_s=\sqrt{\frac{t-t_0}{0.035h^2+(t-t_0)}}$$
 (3)

式中:ε 为收缩应变;t 为龄期;t₀ 为开始干燥的龄期;ε_∞为最大收缩应变;β_s 为混凝土收缩发展因子;k_s 为形状因子,平板取 1.0;h 为截面有效高度;C₁(t)为龄期 t 时混凝土湿度扩散比例因子。

为了判断已有的干缩预测模型对道路混凝土的适用性,本文用上述的 3 种模型进行干缩预测。考虑文章篇幅,只从试验样本中选择 4 组混凝土配合比,对比结果见表 2。考虑到本试验没有测量最大收缩应变,因此选择 2 d 应变作为比较基准,其他龄期应变与其进行比较,从而消除最大收缩应变,预测结果见表 2。由此可知,3 个模型在预测试验范围内道路混凝土干缩是不太适宜的,尤其是 ACI 模型预测误差最大达到 247%,而 Bazant-Panula 模型和 CEB-FIP 模型在预测骨料体积含量对混凝土干缩率的影响误差较小,但是预测其他因素对混凝土干缩影响则会产生较大误差。

表 2 不同干缩模型预测值与真实值比较

Tab. 2 Comparison of predicted values with different prediction models and measured values for drying shrinkage

不同龄期与 2 d 的应变比	配合比 序号	真实值	ACI 预测值	相对 误差/%	Bazant-Panula 预测值	相对 误差/%	CEB-FIP 预测值	相对 误差/%
ε ₃ /ε ₂	1	1.272 7	1.945 9	52.895 8	1.405 7	10.451 0	1.412 2	10.958 8
	7	1.180 7		64.809 7		19.057 6		19.605 0
	12	1.270 3		53.191 5		10.664 6		11.173 5
	17	1.265 8		53.729 7		11.053 5		11.564 1
ε ₄ /ε ₂	1	1.484 8	2.842 1	91.407 1	1.711 5	15.262 9	1.727 1	16.317 4
	7	1.325 3		114.449 8		29.138 9		30.320 4
	12	1.729 7		64.309 2		1.055 1		0.149 9
	17	1.379 7		105.987 4		24.043 0		25.177 8
ε ₅ /ε ₂	1	1.636 4	3.692 3	125.641 0	1.964 7	20.063 9	1.991 5	21.703 2
	7	1.397 6		164.191 0		40.576 4		42.495 8
	12	1.918 9		92.416 0		2.384 8		3.782 8
	17	1.582 3		133.353 8		24.167 9		25.863 3
ε ₆ /ε ₂	1	1.742 4	4.500 0	158.260 9	2.183 9	25.335 5	2.223 4	27.605 8
	7	1.481 9		203.658 5		47.367 3		50.036 7
	12	2.162 2		108.125 0		1.004 3		2.833 9
	17	1.632 9		175.581 4		33.741 3		36.163 8
ε ₇ /ε ₂	1	1.772 7	5.268 3	197.185 7	2.378 6	34.179 6	2.432 2	37.202 6
	7	1.518 1		247.038 3		56.688 1		60.218 2
	12	2.270 3		132.055 7		4.773 4		7.133 8
	17	1.797 5		193.095 2		32.332 7		35.314 1

注:ε₂,ε₃,⋯,ε₇ 分别为 2 d,3 d,⋯,7 d 的应变。

2.2.2 基于多元线性回归分析的干缩预测模型

目前的混凝土干缩预测模型针对的对象都不是道路混凝土,而且模型中不包含原材料组成参数,因此无法直接指导混凝土的配合比设计。本文基于多元线性回归分析方法,以干缩率为因变量,以用水量、水泥用量和骨料体积含量 3 个与道路混凝土干缩率密切相关的影响因素为自变量,建立多元线性回归预测模型来描述它们之间的关系,如式(4)。

$$\epsilon_i = \hat{\epsilon}_i + e_i = a_0 + a_1 W_i + a_2 C_i + a_3 A_i \tag{4}$$

式中: ϵ_i 为实测值; $\hat{\epsilon}_i$ 为预测值; e_i 为残差; $a_0 \sim a_3$ 为

系数; W_i 为用水量; C_i 为水泥用量; A_i 为骨料体积含量。

基于试验数据,利用 SPSS19.0 程序按照如下步骤进行分析:①输入数据建立数据文件;②执行分析→回归→线性命令;③选定因变量和自变量;④选择回归模型中自变量按照“Enter”方式全部进入回归方程;⑤统计项选择估计、模型拟合度以及 Durbin-Watson;⑥输出标准预测值、标准预测值残差等。经过上述步骤,得到混凝土 7 d 干缩率回归分析结果,见表 3、表 4。

表 3 变量间相关性矩阵
Tab.3 Variables correlation matrix

参量		ϵ_7	W_7	C_7	A_7	参量		ϵ_7	W_7	C_7	A_7
Pearson 相关性	ϵ_7	1.000	0.373	-0.088	-0.717	显著性 概率 (单侧)	ϵ_7		0.053	0.356	0.000
	W_7	0.373	1.000	-0.901	-0.107		W_7	0.053		0	0.327
	C_7	-0.088	-0.901	1.000	-0.241		C_7	0.356	0		0.153
	A_7	-0.717	-0.107	-0.241	1.000		A_7	0	0.327	0.153	

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性概率
回归	2 627.876	3	875.959	8.255	0.002
残差	1 697.874	16	106.117		
总计	4 325.750	19			

表 3 表示 4 个变量两两间的 Pearson 相关系数,以及关于相关关系等于 0 的假设单尾显著性检验概率。由表 3 可见,道路混凝土干缩率与用水量、水泥用量、骨料体积含量之间的相关关系系数依次为 0.373、0.088、0.717,反映骨料体积含量和用水量对干缩率有显著影响,而水泥用量在试验范围内对干缩影响较小。表 4 为多元回归模型的方差分析表。由表 4 可知, $F(3,12)=8.255>F(\alpha=0.005)=6.30$,显著性概率为 $0.002<<0.05$,可以认为道路混凝土干缩率与用水量、水泥用量以及骨料体积含量之间存在高度显著的线性关系。根据回归系数表得到最后多元线性回归标准化系数预测模型如式(5),相关系数为 0.779。

$$\epsilon = 491.648 + 0.524W + 0.239C - 0.604A \tag{5}$$

为说明本试验选择的样本的有效性,根据样本数据的计算结果得图 10 和图 11。对图 10 中回归残差直方图与正态分布曲线进行比较,可以认为残差分布不是非常符合正态分布,这是因为用来分析的样本数太少,只有 20 个。而观测累积概率图显示图中的散点密切地分布在均值为 0 的正态分布斜线

附近,说明随机变量残差服从正态分布,从而说明样本是来自于正态总体,因此可以认为残差分布基本上是正态分布的。

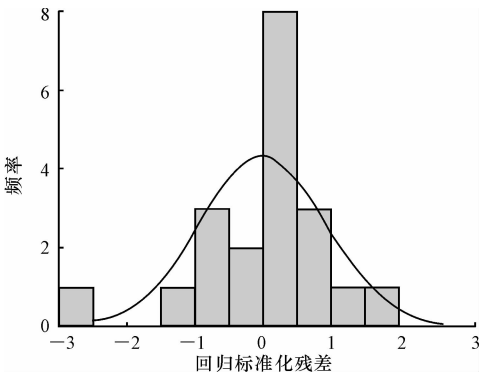


图 10 残差分布直方图
Fig. 10 Residual distribution histogram

3 结 语

(1)用水量和骨料体积含量是影响道路混凝土干缩的 2 个主要因素,干缩率随用水量减少成指数规律增加,随骨料体积含量增加成线性规律减少,水泥含量在本试验范围内,对混凝土干缩率影响较小,而粗细集料比例在 1.2~2.1 之间变化对干缩率基本没有影响。

(2)ACI 模型、Bazant-Panula 模型以及 CEB-FIP 模型都不适合用来预测道路混凝土干缩发展趋势,其中,ACI 模型预测误差最大可达 247%,Bazant-Panula 模型和 CEB-FIP 模型尽管预测骨料体积含量对混凝土干缩率的影响误差较小,但是预测

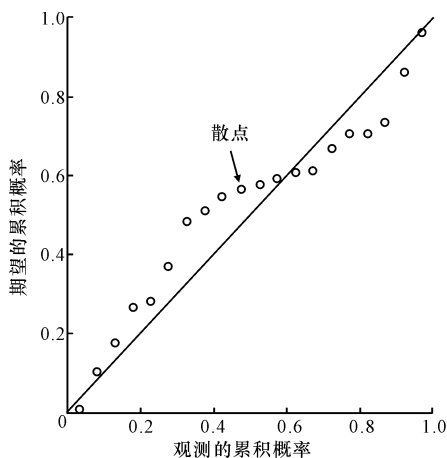


图11 观测量累积分布概率图

Fig. 11 Observation quantity cumulative distribution probability graph

其他因素对干缩率影响会产生较大误差。

(3)基于多元线性回归模型建立的干缩预测模型能很好地反映干缩率与用水量、水泥用量以及骨料体积含量之间的显著线性关系,残差图和累积分布概率图表明建立回归模型用的样本来自于正态分布样本总体。

(4)建立的多元回归干缩模型是以7 d以前干缩试验为基础的,为验证模型的适应性,有必要对更长龄期干缩进行下一步研究。

参考文献:

References:

- [1] Hwang C L, Young J F. Drying shrinkage of Portland cement pastes I: microcracking during drying[J]. Cement and Concrete Research, 1984, 14(4): 585-594.
- [2] Al-Khaja W A, Madany I M, Al-Sayed M H, et al. The mechanical and drying shrinkage properties of cement mortars containing carbide lime waste[J]. Resource, Conservation and Recycling, 1992, 6(3): 179-190.
- [3] Kayali O, Haque M N, Zhu B. Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(11): 1835-1840.
- [4] 肖志乔, 孙嘉华. 水闸结构中混凝土的干缩应力[J]. 混凝土, 2005(10): 80-82.
XIAO Zhi-qiao, SUN Jia-hua. Shrinkage stress of concrete in sluice structure[J]. Concrete, 2005(10): 80-82. (in Chinese)
- [5] 王同生. 水工混凝土干缩应力分析和干缩试验探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 30-32.
WANG Tong-sheng. On shrinkage stress analyses and shrinkage tests on hydraulic concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(6): 30-32. (in Chinese)
- [6] 李金玉, 彭小平, 曹建国, 等. 高贝利特水泥低热高抗裂大坝混凝土性能的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(3): 364-371.
LI Jin-yu, PENG Xiao-ping, CAO Jian-guo, et al. Research of high belite cement dam concrete with low-heat and high crack resistance[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(3): 364-371. (in Chinese)
- [7] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures (ACI209 R-82) [M]. Detroit: American Concrete Institute, 1982.
- [8] Bazant Z P. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3 [J]. Materials and Structure, 1995, 28(1): 357-365.
- [9] Mehta P K, Monteiro P J M. Concrete structure, properties and materials [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1986.
- [10] 王铁梦. 钢筋混凝土结构的裂缝控制[J]. 混凝土, 2000(5): 3-6.
WANG Tie-meng. Prevention of cracks of reinforced concrete[J]. Concrete, 2000(5): 3-6. (in Chinese)
- [11] Eguchi K, Teranishi K. Prediction equation of drying shrinkage of concrete based on composite model[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(3): 483-493.
- [12] Tazawa Ei-ichi. Autogenous shrinkage of concrete [M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [13] Benboudjema F, Meftah F, Torrenti J M. Interaction between drying, shrinkage, creep and cracking phenomena in concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 27(2): 239-250.
- [14] 万在龙, 袁勇, 章勇武. 基于孔结构模型的混凝土干缩变形理论分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(10): 90-92.
WAN Zai-long, YUAN Yong, ZHANG Yong-wu. Analysis of concrete shrinkage based on the micro-pore structure model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2001, 29(10): 90-92. (in Chinese)
- [15] 何俊辉. 道路水泥混凝土微观结构与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
HE Jun-hui. Study on microstructure and properties of road cement concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [16] Grassl P, Wong H S, Buenfeld N R. Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(1): 85-93.

