

文章编号:1671-6833(2004)03-0065-05

商品混凝土收缩性能的试验研究

吕艳梅¹, 刘立新², 罗卫华³

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 3. 郑州新世纪住宅有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要:通过连续 180 d 对 24 组 99 个商品混凝土收缩试件收缩应变的量测, 分析提出商品混凝土在标准条件下的收缩应变计算公式, 利用多系数叠加法分析提出非标准条件商品混凝土的多系数收缩应变计算公式 $\epsilon(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5$, 并根据本试验数据, 参考国内外收缩试验资料, 给出各影响系数的确定方法. 此外, 将试验所提出的收缩应变计算公式与 ACI 收缩公式、中国建筑科学研究院收缩公式、王铁梦收缩公式进行了分析比较, 结果表明: 本文所给公式更适用于商品混凝土收缩应变的计算.

关键词:商品混凝土; 收缩; 试验研究

中图分类号: TU 352 **文献标识码:** A

0 引言

商品混凝土以其进度快、质量好、劳力省、消耗低、技术先进、施工现场文明等诸多优点, 已成为城市建筑业不可缺少的组成部分, 越来越受到人们的欢迎, 是国家建设部重点推广项目, 已列入建设部“十五”发展规划. 目前我国许多城市都已制定了限制现场搅拌, 推广使用商品混凝土的强制性措施, 这给商品混凝土的发展带来了很大机遇. 然而, 由于商品混凝土使用要求流动性大, 配合比中水泥和细骨料比例偏大、粗骨料比例偏小, 使得商品混凝土收缩偏大, 容易出现裂缝. 据统计, 在混凝土结构的裂缝中, 有 70% 以上为非荷载裂缝, 其中就包括混凝土材料本身在收缩过程中产生的裂缝. 如何找出混凝土的收缩机理, 从而更好的控制收缩裂缝, 是有待解决的问题. 本文通过对 24 组商品混凝土试件收缩应变的量测, 分析建立了商品混凝土在非标准条件下的多系数收缩应变计算公式, 为控制商品混凝土收缩裂缝提供了依据.

1 试验方案

1.1 试件设计

本试验的收缩试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 515 mm, 共计 24 组 99 个. 试件的主要变化参数

为: 混凝土的强度等级 (C 20、C 40 和 C 60); 钢筋的直径 4 mm、6 mm、8 mm 和 12 mm; 钢筋的形状 (光圆、月牙纹和螺旋肋) 和养护条件 (标准养护和自然养护), 其中标养条件为温度 20 ± 3℃, 相对湿度 ≥ 95%. 构件试验设计见表 1. 试件放置于不吸水的搁架上, 底面架空, 每个构件之间留有 30 mm 的间隙. 对应于每组试件, 各预留 6 个混凝土试块进行强度测试, 试块尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm.

1.2 试验量测

试件在拆模后即采用混凝土收缩膨胀仪进行初值的量测, 随后量测 1 d、2 d、3 d、5 d、7 d、10 d、14 d、20 d、28 d、45 d、90 d、120 d、150 d、180 d 的收缩值. 该收缩仪器标准杆为 540 mm, 端部装有精度为 0.01 mm 的百分表. 在量测混凝土试件收缩值的同时, 还记录了每天 10:00 和 15:00 的温度、相对湿度的数据和每天的最高温度、最低温度, 以分析温度和相对湿度对混凝土收缩的影响.

2 试验结果分析

2.1 量测值与收缩应变之间的转换

将所测得试验数据带入混凝土收缩应变计算公式^[1], 得出混凝土的收缩值.

$$\epsilon_{st} = \frac{L_0 - L_1}{L_b} \quad (1)$$

收稿日期: 2004-04-01; 修订日期: 2004-06-16

基金项目: 国家混凝土结构设计规范资助项目

作者简介: 吕艳梅 (1978-), 女, 河南省永城市人, 湖南大学博士研究生, 主要从事土木工程方面的研究.

其中： ϵ_t 为试验期为 t 天时的混凝土收缩应变； L_b 为试件的测量标距； L_0 为试件长度的初始读数， L_t 为试件在试验龄期为 t 时测得的长度读数。

2.2 收缩基本公式

混凝土基本收缩方程式的推导采用双曲方程

$$\epsilon(t)_0 = \frac{L}{a + bt} \tag{2}$$

进行回归分析，选取 C40 混凝土构件在标养条件下的收缩应变作为基准，得混凝土收缩基本公式

$$\epsilon(t)_0 = \frac{L}{45.4 + 6.9t} \times 10^{-3} \tag{3}$$

按式 (3) 得出在标准条件下的普通混凝土标准收缩值列于表 2，其特征曲线见图 1。

表 1 试件设计一览表

Tab.1 Specimens table

序号	试件编号	混凝土强度	配筋直径/mm	钢筋根数	试件个数	序号	试件编号	混凝土强度	配筋直径/mm	钢筋根数	试件个数
1	S2	C20	—	—	6	13	1S4L5	C60	4	4	6
2	S4	C40	—	—	6	14	1S6G6	C60	6	4	6
3	S6	C60	—	—	6	15	1S6Y8	C60	8	4	6
4	4N2	C20	—	—	6	16	1S2	C20	—	4	1
5	5N4	C40	—	—	6	17	1S2Y8	C20	8	4	1
6	6N6	C60	—	—	6	18	1S2Y12	C20	12	4	1
7	S2G4	C20	4	4	6	19	1S4	C40	—	4	1
8	S2Y6	C20	6	4	6	20	2S4Y8	C40	8	4	1
9	S2L9	C20	8	4	6	21	2S4Y12	C40	12	4	1
10	1S4Y4	C40	4	4	6	22	2S6	C60	—	4	1
11	1S4L7	C40	6	4	6	23	2S6Y8	C60	8	4	1
12	1S4G8	C40	8	4	6	24	2S6Y12	C60	12	4	1

说明 S 表示标准养护；N 表示自然养护；G 表示光圆钢筋；Y 表示月牙纹钢筋；L 表示螺旋肋钢筋； $n_1 n_2 Y n_3$ 中， n_1 表示组号； n_2 表示混凝土强度等级； n_3 表示钢筋直径。

表 2 混凝土标准收缩应变

Tab.2 Standard shrinkage strain of concrete

龄期/d	3	7	14	28	60	90	120	150	180
收缩应变/ 10^{-6}	45	75	99	117	131	135	137	139	140

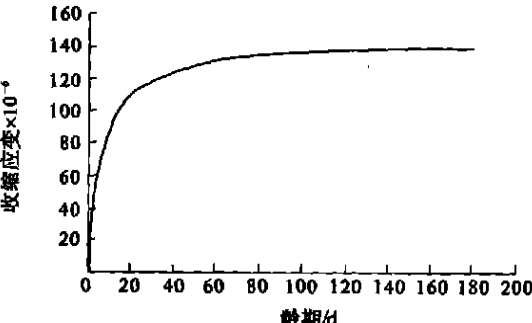


图 1 混凝土收缩特征曲线

Fig.1 Characteristic curve of concrete shrinkage

从图 1 可见，混凝土的收缩应变随时间的增长而增加，应变—时间曲线呈上升趋势，前期收缩较快，随着时间的增长，收缩越来越慢。商品混凝土的收缩大部分在前 3~6 个月内完成，各国试验^[2,3]及本试验表明混凝土收缩速率可估计为：2 周内完成 20 年收缩的 25% 左右，3 个月内完成 20 年收缩的 60% 左右，1 年完成 20 年收缩的 75% 左右。

2.3 影响因素分析

(1) 混凝土的强度等级对混凝土收缩有一定

的影响，试验结果表明其变化规律为：随着强度等级的提高混凝土收缩有所增加。总的来说，C40 级的混凝土构件比 C20 级约增加 13%，但是 C60 级比 C40 级只略有增加（6%）左右。图 2 给出标养条件下不同强度等级混凝土试件的收缩应变曲线。

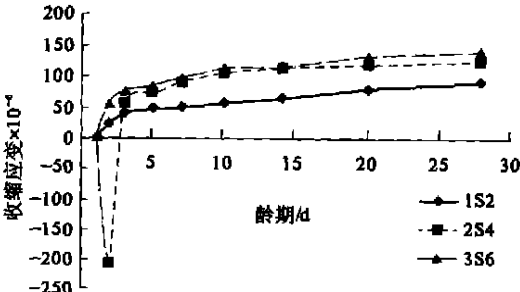


图 2 不同强度等级混凝土的收缩应变曲线

Fig.2 Shrinkage strain of different strength concrete

(2) 温度和相对湿度是影响混凝土收缩的最主要的外界因素之一。在温度不变的情况下，养护介质的相对湿度越低，混凝土与周围介质的湿交换越激烈，混凝土失水越多，收缩变形越大；在相

对湿度不变的情况下,由于混凝土水化时内部产生水化热,环境温度越低,内外温差越大,失水越快,收缩变形越大.这种现象早期最为明显^[3].

(3) 不同的养护方法不仅影响混凝土的强度,而且对混凝土收缩也有很大影响.这主要是因为不同温湿度养护条件下,混凝土内部结构形成与破坏的状态不同所引起的^[4].由于试验条件限制,并考虑了工程实际的需要,试验选用了标准养护和自然养护两种方法,如图3所示.总的来说标准养护混凝土大约是自然养护混凝土收缩应变的70%.

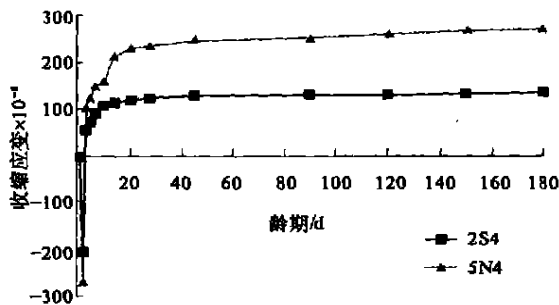


图3 不同养护条件下的收缩应变曲线

Fig.3 Shrinkage strain curve of different curing condition

(4) 从材料上讲,收缩是混凝土材料本身的性质,与配筋无关.但是从直观上看,混凝土收缩,钢筋不收缩,钢筋和混凝土要协同变形,致使钢筋处于受压应力状态混凝土处于受拉应力状态^[5].因而配有钢筋的混凝土比同等条件的素混凝土收缩应变要小得多.配筋可将素混凝土试件本可出现的贯穿性干缩裂缝分散到不可见或无意义的微细程度.配有光圆钢筋的试件收缩应变相对较大,其次是月牙纹钢筋,螺旋肋钢筋试件的收缩应变最小.另外,从正交试验方法^[9]分析结果来看,相同配筋率,钢筋越细越密,收缩应变越小.配筋对收缩应变的影响如图4所示.

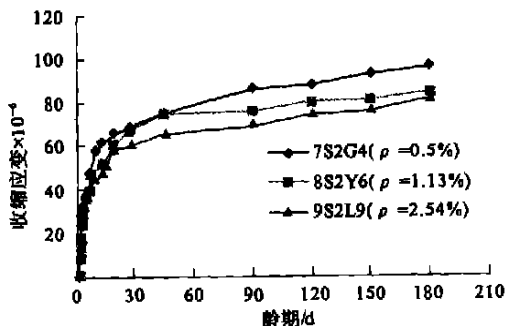


图4 不同配筋率混凝土收缩应变曲线

Fig.4 Shrinkage strain curves of concrete laid different ratio steel bar

2.4 混凝土收缩多系数方程

分析在非标准条件下的各影响因素对混凝土收缩的影响.利用多系数乘积的叠加原理,给出商品混凝土在非标准条件下收缩应变的多系数数学表达如式(5).

$$\epsilon(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \quad (4)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为任意时间 t 时混凝土的收缩应变;

$\epsilon(t)_0$ 为混凝土基本收缩方程 $\epsilon(t)_0 = \frac{t}{45.4 + 6.9t} \times 10^{-3}$; β_1 为混凝土强度影响系数(C20时取0.87;C40时取1;C60时取1.15); β_2 为温湿度影响系数($\beta_2 = 1/(0.01T + 0.009H)$),其中, T 为温度, $H\%$ 为相对湿度); β_3 为养护方法影响系数(标养时取1;自然养护时取1.3); β_4 为构件尺寸影响系数(当构件截面为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 时体积比表面积为 2.5 cm ,取1); β_5 为配筋率(含弹模)影响系数(当 $\rho = A\%$, $n = E_s/E_c$ 时, $\beta_5 = 0.9917 - 0.0804nA$).

3 关于收缩的计算方法

3.1 ACI 209 委员会方法^[3]

随时间发展的混凝土应变按下式进行计算:

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{t}{35+t} \epsilon_{sh} \quad (5)$$

式中: t 为干燥持续时间; ϵ_{sh} 为普通养护条件下的终极收缩值,且 $\epsilon_{sh} = 780 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \beta_6 \beta_7 \times 10^{-6}$. 其中, β_1 为养护时间影响系数; β_2 为相对湿度影响系数; β_3 为构件有效厚度影响系数; β_4 为混凝土稠度影响系数; β_5 为细集料含量影响系数; β_6 为水泥含量影响系数; β_7 为空气含量影响系数.

3.2 中国建筑科学院方法^[4]

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \quad (6)$$

式中: t 为受荷龄期(天); $\epsilon(t)_0$ 为混凝土基本收缩方程,且 $\epsilon(t)_0 = t \times 10^{-3} / (176 + 2.4t)$; β_1 为环境湿度影响系数; β_2 为混凝土组成影响系数; β_3 为尺寸影响系数; β_4 为混凝土强度等级影响系数.

3.3 王铁梦方法^[4]

$$\epsilon(t) = 3.24 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.01k}) M_1 M_2 \dots M_n \quad (7)$$

式中: M_1, M_2, \dots, M_n 为考虑各种非标准条件的修正系数. M_1 为水泥品种影响系数; M_2 为水泥细度影响系数; M_3 为骨料影响系数; M_4 为水灰比影响系数; M_5 为水泥浆量影响系数; M_6 为初期养护时间系数; M_7 为相对湿度影响系数; M_8 为尺寸影响系数; M_9 为配筋率影响系数.

3.4 本文推荐计算公式

$$\epsilon(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5 \tag{4}$$

式中： $\epsilon(t)$ 为任意时间 t 时混凝土的收缩应变； $\epsilon(t)_0$ 为混凝土基本收缩方程； β_1 为混凝土强度影响系数； β_2 为温湿度影响系数； β_3 为养护方法影响系数； β_4 为构件尺寸影响系数； β_5 为配筋率（含弹模）影响系数。

表 3 19S4 组实测收缩应变与各公式计算收缩应变比较

Tab. 3 Comparison between measure strain and calculate strain of 19S4 group

龄期/d	收缩应变×10 ⁻⁶					龄期/d	收缩应变×10 ⁻⁶				
	实测值	本文推荐公式	ACI 公式	建研院公式	王铁梦公式		实测值	本文推荐公式	ACI 公式	建研院公式	王铁梦公式
1	0	18	6	6	3	15	72	76	62	70	38
2	30	30	11	11	16	16	73	77	65	74	40
3	42	40	16	16	8	17	75	78	68	78	43
4	48	47	21	21	11	18	77	79	71	81	45
5	53	52	26	26	13	19	80	80	73	85	47
6	57	57	30	31	16	20	82	81	76	89	49
7	59	60	35	36	18	21	84	82	78	92	52
8	63	63	39	41	21	22	88	82	80	95	54
9	63	66	43	45	23	23	90	83	83	99	56
10	63	68	46	50	26	24	90	83	85	102	58
11	65	70	50	54	28	25	90	84	87	105	60
12	65	72	53	58	31	26	92	84	89	108	62
13	67	74	56	62	33	27	94	85	91	111	64
14	70	75	60	66	36	28	94	85	93	114	67

表 4 各公式计算收缩应变与实测应变比值的分析结果

Tab. 4 The ratio of each formula compute strain and actual strain analytical result

项目	本文推荐公式	ACI 公式	建研院公式	王铁梦公式
\bar{X}	1.000	0.782	0.887	0.485
δ	0.063	0.252	0.302	0.342

说明：表中 \bar{X} 为各公式计算收缩应变与实测收缩应变比值的均值； δ 为比值的变异系数。

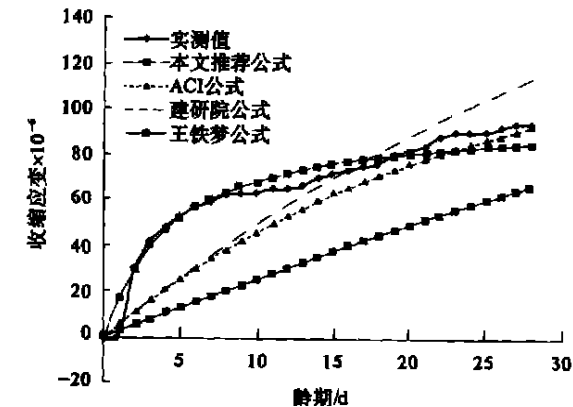


图 5 各收缩公式计算收缩应变与实测应变比较

Fig. 5 Comparison of measure strain and calculate strain

由以上图表分析可知，本文所给计算公式与试验结果符合较好，ACI 公式、建研院公式、王铁

4 各收缩公式计算结果比较分析

由于试验试件较多，为节省篇幅起见，现仅将第 19 组试验 28d 实测值与各公式计算结果的比较列于表 3 和图 5，各公式计算结果与实测应变比值的平均值和变异系数列于表 4。

梦公式早期计算曲线均接近直线，与试验结果相差较大。究其原因，主要是上述公式不是建立在商品混凝土试验基础上的，因而不适用于商品混凝土，但并不是说与一切试验结果都不符合；也可能为试验规范建议龄期为 3d 时开始收缩量测，而混凝土从初凝就开始了收缩，并且初凝、终凝前后，收缩值急剧增加，以前的试验没能反映该特点。从实测曲线来看，如果从龄期 3d 开始做收缩曲线，则接近于直线，与以上公式计算结果相近。

另外，计算方法中 ACI 公式、建研院公式没能反映配筋对混凝土收缩的影响，王铁梦公式虽反应了配筋对混凝土收缩的影响，但其配筋影响系数过小，与本试验结果及有关资料结果符合不是很好。总之，这一现象也说明了混凝土收缩性能的复杂性，本文所给公式更能反映商品混凝土早期收缩的实际情况。

5 结论

(1) 提出了在非标准条件下商品混凝土收缩的多系数数学方程表达式 $\epsilon(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5$ ，与各收缩计算公式比较得出本文所

给公式更适用于商品混凝土.

(2) 给出了混凝土强度等级、构件尺寸、养护方法、温湿度以及配筋等影响混凝土收缩因素的确定方法.

(3) 试验从混凝土试件拆模即开始测量其收缩值,将混凝土时随收缩应变曲线的原点提前到拆模时.

参考文献:

[1] GBJ 82—1985, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验

方法[S].

[2] 王铁梦·工程结构裂缝控制[M]·北京:中国建筑工业出版社,1991.17~25.
[3] PARK R, PAULAY T· Reinforced Concrete Structures [M] ·New York John Wiley & Sons Inc , 1975.
[4] 中国建筑科学研究院·混凝土收缩与徐变的试验研究[R]·北京:中国建筑科学研究院,1987.
[5] 富文权,韩素芳·混凝土工程裂缝分析与控制[M]·北京:中国铁道出版社,2002.26~33.
[6] 苏清洪,加筋混凝土收缩徐变的试验研究[J]·桥梁建设,1994,4(2):11~19

Experimental Study on Shrinkage Characteristic of Merchandise Concrete

LV Yan —mei ¹, LIU Li —xin ², LUO Wei —hua ³

(1. College of Civil Engineering ,Hunan University ,Changsha 410082,China ;2. College of Civil Engineering ,Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China ; 3.Zhengzhou New Century House Company Limited ,Zhengzhou 450002,China)

Abstract : Through the measurement of the shrinkage strain of 99lumps of merchandise concrete in 24groups in succeeding 180days ,this paper analyses and works out the computing formula about shrinkage strain of merchandise concrete under standard condition . Multi —coefficient computing formula about shrinkage strain of merchandise concrete under nonstandard conditions $\epsilon(t) = \epsilon(t)_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \beta_5$ is given with the multi —coefficient superposition method , and at the same time , how to determine each influence coefficient is given .At last ,this paper makes an analysis and comparison of the formula proposed in this paper ,ACI formula and Wang Tieneng formula ,which shows that this new formula works better for the merchandise concrete .

Key words : merchandise concrete ; shrinkage ; experimental research