

文章编号:1006-7329(2003)02-0077-05

## 水灰比对混凝土塑性收缩裂缝的影响\*

杨长辉, 王川, 吴芳

(重庆大学 建筑材料工程系, 重庆 400045)

**摘要:**试验研究了水灰比对新拌混凝土塑性收缩裂缝面积和水分蒸发速率的影响。结果表明,水泥和集料用量一定的条件下,在0.35-0.65范围内,混凝土拌合物的水分蒸发速率随水灰比的增加而增大;混凝土塑性收缩面积最大值对应的水灰比约为0.5,当水灰比小于0.5时,混凝土塑性收缩面积随水灰比的提高而增大,当水灰比大于0.5时,混凝土塑性收缩面积随水灰比的提高而减小。

**关键词:**塑性收缩;塑性收缩裂缝;蒸发速率

**中图分类号:**TU528.0

**文献标识码:**A

塑性收缩是发生在水泥浆、砂浆、灰浆或者混凝土凝结前的收缩。产生塑性收缩的原因有毛细管压力、塑性沉降、早期化学收缩和自收缩等,而其中以毛细管压力作用为主。塑性收缩发生在混凝土(或浆体)处于塑性状态期间,其持续的时间较短,开始于混凝土表面光泽消失时,结束于混凝土凝结<sup>[1]</sup>。毛细收缩产生的微应变可达数千之多<sup>[2]</sup>。新拌混凝土在塑性阶段引起的裂缝即所谓的塑性收缩裂缝。

Wittman<sup>[3]</sup>已用实验证实了毛细管压力和塑性收缩之间的相互作用,它们之间存在着直接的比例关系。Wittman只是对引起塑性收缩裂缝的参数之一——塑性收缩进行了测试,并未直接测试塑性收缩裂缝;且其试验中所选用的混凝土类型并不代表目前市场上比较普遍的拌合物类型,即拌合物中不含有减水剂、超塑化剂等等。预拌混凝土由于泵送的要求,往往加入高效减水剂而获得所需要的流动性。因此,研究水灰比对掺外加剂的大流动性混凝土塑性收缩裂缝的影响更具有现实意义。

### 1 实验方法及原材料

#### 1.1 实验环境条件及实验方法

约束应力强烈地受到混凝土试件的几何形状、约束条件以及材料和环境因素影响。本实验所用约束塑性收缩装置如图1所示。端约束生成器提供端约束,中心应力生成器促使裂缝在试件的中部形成。试件成形后置于温度为30℃、相对湿度为60%、风速为8 m/s的环境中。

测试水分蒸发所用钢制模具表面积为225 cm<sup>2</sup>、深7.0 cm,称量用电子天平(最小感量0.1 g),测量裂缝宽度用刻度放大镜(放大100倍)。

试件成形后观察记录表面出现第一裂缝的时间及裂缝的发展情况,测试5 h后的水分损失(计算蒸发速率)、裂缝最大宽度及裂缝总面积。

\* 收稿日期:2003-02-15

作者简介:杨长辉(1965-),男,博士,教授,主要从事建筑材料研究。

## 1.2 原材料

水泥为重庆腾辉水泥集团所生产的 42.5 级普通硅酸盐水泥,比表面积为  $3\ 300\ \text{cm}^2/\text{g}$ ,表观密度为  $3.08\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。

细集料为四川简阳中砂(细度模数 2.4);粗集料石灰石碎石(粒径  $5\sim 20\ \text{mm}$ ),其中粒径  $5\sim 10\ \text{mm}$  碎石占粗集料总量的 30%(质量百分比), $10\sim 20\ \text{mm}$  的碎石占粗集料总量的 70%。

减水剂为重庆江北特种建材厂生产的 FDN-0 型高效减水剂。试验中各组拌合物通过调整减水剂掺量使坍落度控制在相当的水平( $200\sim 250\ \text{mm}$ )。

## 2 结果与讨论

混凝土的原材料、配合比及相关性能见表 1。拌合物水份蒸发速率、裂缝发展及裂缝面积测试结果分别见表 2、图 2、图 3。图 4 为 5 h 后用数码相机拍摄的 1D 组各拌合物的裂缝照片。

图 2a 反映了混凝土塑性收缩裂缝总面积( $A_a$ )随水灰比( $w/c$ )的变化规律。由图可见,水灰比一定时,混凝土塑性收缩面积随水泥用量和配合比的变化而变化,胶结料(水泥)与集料之比最低者(图 2a 中 1B)塑性收缩裂缝面积最小。单位体积混凝土水泥和集料用量一定时,混凝土塑性收缩裂缝面积随水灰比的变化曲线呈现近似规律,即水灰比由小增大时, $A_a$  曲线存在一定最大值,该值对应的水灰比均在 0.5 左右;当  $w/c < 0.5$  时, $A_a$  随  $w/c$  的提高而增大,当  $w/c > 0.5$  后, $A_a$  随  $w/c$  的提高反而降低。

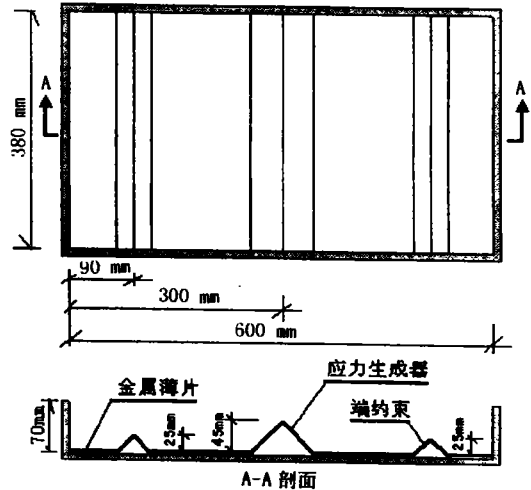


图 1 测量塑性收缩裂缝用的约束试验装置

表 1 配合比设计及流动性、28 d 强度测试结果

编号	配合比( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) C:S:G:W:FDN	水灰比 ( $w/c$ )	单方混凝土 水泥浆量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	胶集比 ( $c/a$ )	坍落度 ( $\text{cm}$ )	流动度 ( $\text{cm}$ )	28 d 强度 ( $\text{MPa}$ )
1A	463:684:1 116:162:5.56	0.35	0.312	0.257	22.3	$52.6 \times 57.0$	59.8
	463:684:1 116:185:3.70	0.40	0.335		23.2	$61.0 \times 59.0$	54.8
	463:684:1 116:208:2.32	0.45	0.358		22.3	$52.3 \times 49.0$	46.0
	463:684:1 116:232:0.93	0.50	0.382		23.2	$54.0 \times 53.0$	37.0
	463:684:1 116:241:0.46	0.52	0.391		23.4	$52.5 \times 51.0$	35.8
	463:684:1 116:278:0	0.60	0.428		25.3	$55.5 \times 48.0$	34.9
1B	400:684:1 116:160:4.80	0.40	0.290	0.222	22.5	$44.0 \times 39.6$	58.1
	400:684:1 116:200:1.20	0.50	0.330		22.5	$54.6 \times 45.5$	46.9
	400:684:1 116:208:0.80	0.52	0.338		22.3	$52.1 \times 50.0$	41.0
	400:684:1 116:240:0.10	0.60	0.370		22.0	$56.0 \times 52.0$	32.6
1C	500:660:1 020:175:3.50	0.35	0.337	0.298	24.3	$59.0 \times 52.5$	64.0
	500:660:1 020:225:1.0	0.45	0.387		22.4	$48.0 \times 43.0$	44.2
	500:660:1 020:250:0	0.50	0.412		22.3	$41.5 \times 40.0$	36.5
	500:660:1 020:290:0	0.58	0.450		24.3	$66.8 \times 61.0$	29.9
1D	430:694:1 086:151:5.59	0.35	0.291	0.242	20.4	$45.3 \times 43.5$	64.0
	430:694:1 086:172:2.15	0.40	0.312		21.8	$50.0 \times 47.2$	54.2
	430:694:1 086:194:1.29	0.45	0.334		21.3	$42.3 \times 40.5$	49.5
	430:694:1 086:215:0.65	0.50	0.355		20.6	$36.0 \times 34.0$	47.5
	430:694:1 086:258:0	0.60	0.398		21.3	$42.5 \times 42.0$	37.0
	430:694:1 086:280:0	0.65	0.420		25.4	$67.8 \times 59.2$	27.3

图 2b 是混凝土塑性收缩裂缝面积与单位体积混凝土水泥浆量之间的关系曲线。与图 2a 相比,两种曲线有相似性,即塑性收缩裂缝面积变化过程中均存在一个最大值。不同之处在于,裂缝

面积随水泥浆用量变化时最大裂缝面积所对应的水泥浆用量不在同一水平,而是随混凝土配合比的不同处于不同水平。本研究条件下,最大裂缝面积对应的水泥浆用量在 0.33 ~ 0.43 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 混凝土之间波动。

表2 蒸发速率及裂缝测试结果

编号	蒸发速率 (kg/m <sup>2</sup> ·h)	出现第一条裂缝的时间 (h:min)	裂缝发展情况	最大裂缝宽度 (mm)	裂缝总面积 (mm <sup>2</sup> )	
1A	1	0.451	2:40	开裂后即较快地发展	0.25	53.5
	2	0.572	1:50	开裂后缓慢发展,3:30后较快	0.46	163.7
	3	0.620	1:00	开裂后缓慢发展,3:40后较快	0.73	213.8
	4	0.668	0:50	开裂后缓慢发展,2:15后较快	1.32	354.4
	5	0.683	0:40	开裂后缓慢发展,3:50后较快	0.64	182.3
	6	0.730	0:30	开裂后缓慢发展,3:30后较快	0.51	173.3
1B	1	0.476	2:00	开裂后缓慢发展,3:00后较快	0.34	109.2
	2	0.572	1:30	开裂后缓慢发展,3:10后较快	0.55	169.9
	3	0.610	1:40	开裂后缓慢发展,3:45后较快	0.30	85.4
	4	0.728		无可见裂缝	0	0
1C	1	0.479	2:30	开裂10 min后即较快地发展	0.68	222.4
	2	0.634	0:40	开裂后缓慢发展,2:50后较快	0.84	308.6
	3	0.681	0:30	开裂后缓慢发展,2:40后较快	0.95	327.0
	4	0.743	0:20	开裂后缓慢发展,3:00后较快	0.76	239.3
1D	1	0.412	1:30	开裂30 min后即较快地发展	0.51	177.5
	2	0.495	0:45	开裂后缓慢发展,2:40后较快	0.92	291.0
	3	0.599	0:40	开裂后缓慢发展,2:45后较快	0.96	333.8
	4	0.627	0:30	开裂后缓慢发展,2:40后较快	1.20	349.6
	5	0.705	0:10	开裂后缓慢发展,2:30后较快	0.93	300.6
	6	0.761	0:30	开裂后缓慢发展,2:50后较快	0.70	203.7

水灰比较低时,粒子之间的距离相对较小,虽然按照表面化学原理( $P_c = \sigma(1/R_1 + 1/R_2)$ ,式中: $P_c$ 为毛细管压力; $\sigma$ 为液体表面张力; $R_1$ 和 $R_2$ 为主曲率半径)计算的毛细管压力较大,但在较小粒子间距下,塑性收缩仅能产生相对较小的压密作用;且水灰比较低时,在水泥用量一定的情况下,未水化的水泥粒子较多,按照中心质假说<sup>[4]</sup>,未水化的水泥粒子在粒子间距较小时会产生有利的中心质效应,有利的中心质效应减少了界面过渡层的薄弱环节,使其更能抵抗较大的毛管压力。此外,水灰比较低时,拌合物体系的整体性和粘聚性较好,产生的塑性沉降较小。因此,在上述各种因素的综合作用下,水灰比较低时,塑性收缩裂缝宽度及总面积均较小。

水灰比较高(水泥浆量较大)时,拌合物中可用于蒸发的水分较多,达到毛细管压力临界值(破坏压力)的时间得以延长,即毛细管压力在较长一段时间内以较小的速率发展,当达到破坏压力时,

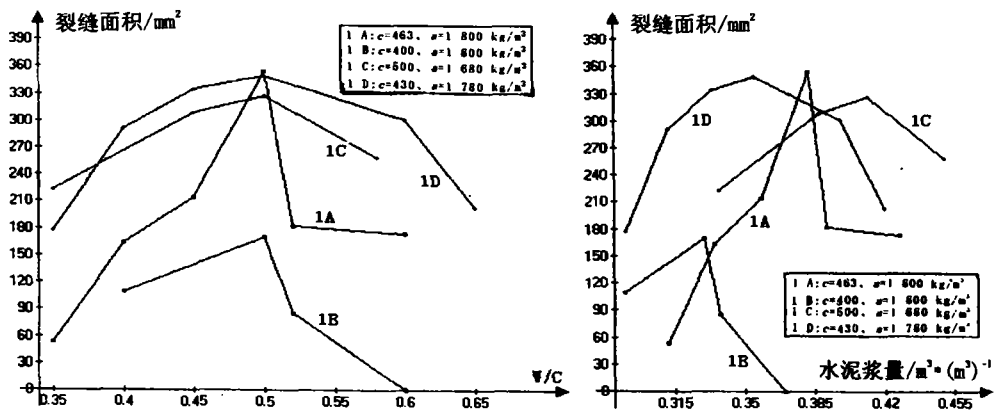


图2 水灰比和水泥浆量对混凝土塑性收缩裂缝面积的影响

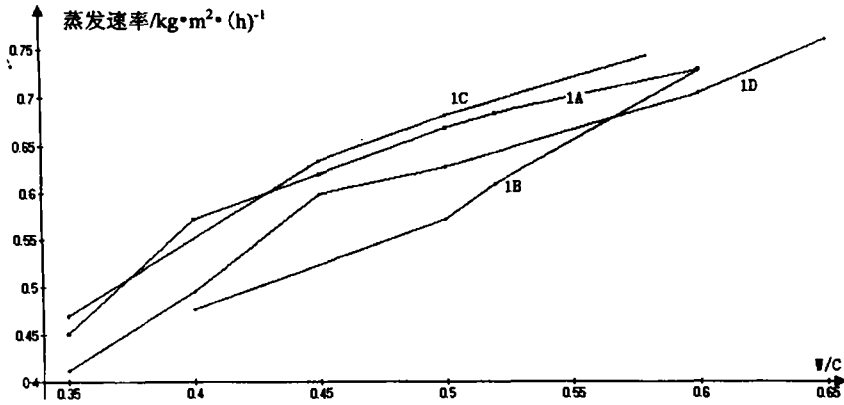


图3 水灰比对混凝土初期水份蒸发速率的影响

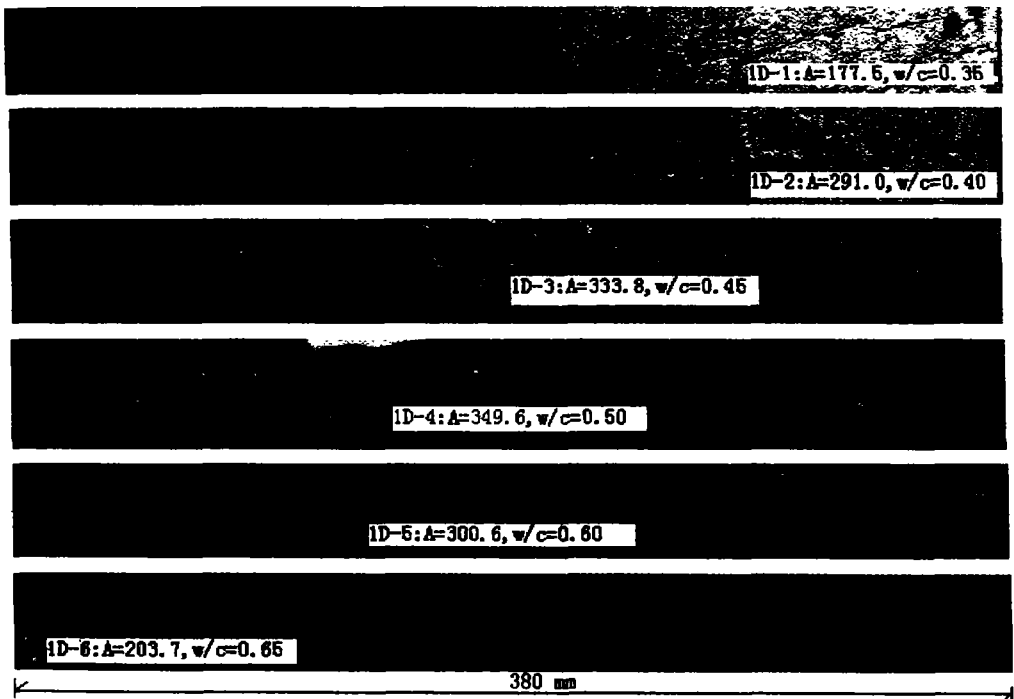


图4 1D组各拌合物裂缝照片图

混凝土已获得一定的强度足以抵抗此时的破坏压力；且在此情况下，粒子间距离较大，即毛细孔径较大，失去较大毛细孔中的自由水所产生的体积变化较小。另外，水泥浆量较大时，虽然早期溶解和水化收缩相对值较大，但绝对值较小，且其发生的时间较早，对塑性阶段裂缝的形成和发展影响不大。这是水灰比较高时形成的塑性收缩裂缝宽度及总面积均较小的主要原因。

由图3可以看出，在研究的水灰比变化区间，混凝土拌合物早期水份蒸发速率随水灰比的增加而提高，呈现良好线性相关关系。将这一结果与图2a测试结果对照分析，可推断，当 $w/c \leq 0.5$ 时，裂缝面积随水份蒸发速率的提高而增大； $w/c > 0.5$ 时，裂缝面积随水份蒸发速率的提高而减小。

试验中同时测试了出现第一条裂缝的时间和裂缝的发展情况，如表2所示。可看出，出现第一条裂缝的时间以及裂缝的发展时间与水灰比有关，低水灰比（小于0.4）的混凝土拌合物出现第一

条裂缝的时间与裂缝较快发展的时间基本一致,大致在 2 h - 2 h30 min 左右;高水灰比(大于 0.4)的混凝土拌合物成形后在 0.5 ~ 1 h 左右即出现第一条裂缝,之后裂缝基本无发展,且有部分愈合的现象,2 h30 min - 3 h30 min 后裂缝才较快地发展。

高水灰比时较早地出现裂缝是由于试验模具的不连续性和集料本身克服了水泥浆体的可塑性(可变形性)而在集料附近产生差异沉降和运动所致,但其破坏作用有限。低水灰比时的开裂时间与裂缝发展时间基本一致,这一时间应该与毛细管压力达到其临界值(破坏压力)是吻合的,这也说明了在此之前低水灰比拌合物的塑性沉降较小。

塑性收缩裂缝是混凝土塑性收缩的结果。本研究结果表明,为有效预防混凝土工程出现早期塑性收缩裂缝,除需要精心选择原材料外,还应重视混凝土的配制。水灰比对混凝土的强度有决定性影响,在满足设计强度等级要求的前提下,应尽可能避免将水灰比确定在出现最大塑性收缩面积对应的最不利水平。此外,施工中应及时做好早期养护,以避免混凝土因早期水份快速蒸发而引起较大面积的塑性收缩开裂。

### 3 结论

1) 水灰比对混凝土拌合物塑性收缩裂缝面积的影响存在一最不利值,该值约为 0.5,低于 0.5 时,塑性收缩裂缝面积随水灰比的提高而增大,大于 0.5 后,塑性收缩裂缝面积随水灰比的提高而减小。

2) 单位体积水泥浆量对混凝土塑性收缩裂缝面积的影响规律与水灰比的影响类似,与最大塑性收缩裂缝面积对应的水泥浆量在  $0.33 \sim 0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$  砵之间。

3) 在 0.35 ~ 0.65 范围内,混凝土拌合物水份蒸发速率随水灰比的提高而增大,两者之间有良好的线性相关性。

### 参考文献:

- [1] 杨长辉,王川,吴芳,混凝土塑性收缩裂缝成因及防裂措施研究综述[J].混凝土,2002,(5):33-36.
- [2] Kejin Wang, Surendra P. Shah, Pariya Phuaksuk. Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials - Influence of Fly Ash and Fibers[J]. J. ACL/Material Journal 2001, 1998, (6):458-464.
- [3] F.H. Wittmann, on the Action of Capillary Pressure[J]. CCR, 1976, (6):49-56.
- [4] 吴中伟,严慧珍.高能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.

## Effects of Water - Cement Ratio on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete

YANG Chang - hui, WANG Chuan, WU Fang

(Department of Building Materials, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China)

**Abstract:** The effects of water - cement ( $w/c$ ) ratio on area of plastic shrinkage cracking and rate of water evaporation of concrete were investigated. The experimental results indicate that the rate of water evaporation of concrete mixture increases as the water cement ratio increases in range of 0.35 ~ 0.65 with the total amount of cement and aggregate in concrete kept constant, the water cement ratio corresponding to the maximum area of plastic shrinkage cracking is about 0.5, and the area of plastic shrinkage cracking of concrete mixture increases as  $w/c$  increases in case of  $w/c$  lower than 0.5 and the area of plastic shrinkage cracking of concrete mixture decreases as  $w/c$  increases in case of  $w/c$  higher than 0.5.

**Keywords:** plastic shrinkage; plastic shrinkage cracking; rate of evaporation