



# 码头面层混凝土干燥收缩试验研究

王成启

(中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 为满足码头面层混凝土抗裂性要求, 开展了码头面层混凝土干燥收缩试验研究。试验结果表明: 在水灰比一定的情况下, 码头面层混凝土的单位体积用水量宜 $<165 \text{ kg/m}^3$ ; 在用水量一定情况下, 水灰比较大的混凝土具有较小的干燥收缩, 且控制混凝土的水灰比, 水灰比不宜过低, 水灰比宜控制在 $0.45 \sim 0.55$ ; 混凝土的单位体积水泥用量宜 $<360 \text{ kg/m}^3$ , 宜控制在 $300 \sim 360 \text{ kg/m}^3$ 。

**关键词:** 抗裂性; 干燥收缩; 用水量; 水灰比; 胶凝材料用量

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0062-05

## Experimental study of drying shrinkage of wharf surface concrete

WANG Cheng-qi

(China Communications Shanghai Third Harbor Engineering Science and Technology Research Institute Co.,Ltd.,  
Shanghai 200032,China)

**Abstract:** To satisfy crack resistance of wharf surface concrete, the drying shrinkage of wharf surface concrete is studied by experiment. Experimental results show that when the water-cement ratio is constant, unit-volume water content for the wharf surface concrete shall be less than  $165 \text{ kg/m}^3$ ; when the water content is constant, concrete of larger water-cement ratio bears less drying shrinkage, and the water-cement ratio shall be controlled to  $0.45 \sim 0.55$ ; the unit-volume cement content for concrete shall be less than  $360 \text{ kg/m}^3$ , and better limited to  $300 \sim 360 \text{ kg/m}^3$ .

**Key words:** crack resistance; drying shrinkage; water content; water-cement ratios; content of cementitious materials

收缩是由混凝土性质决定的, 其过程是一个包含多种因素作用下的物理化学过程, 几乎可以说是不可避免的。混凝土是由不同材料组成的非均匀体, 内部存在着固、液体的各向异性非均质复合多元材料, 混凝土中的胶凝材料水化过程会产生收缩, 收缩引起的变形受约束也是复杂的。码头面层边界条件有其特殊性, 收缩一旦受到抑制, 就会出现裂缝, 据统计收缩裂缝约占混凝土裂缝的80%。

混凝土收缩可分为化学收缩、塑性收缩、温度收缩、干燥收缩、碳化收缩、自收缩<sup>[1-4]</sup>。化学

收缩是胶凝材料的固有特征, 只要水泥(胶凝材料)发生水化就会产生化学收缩。水泥水化热的放热周期比较长, 但大部分热量是在3 d以内, 特别是在水泥浆发生凝结与硬化初期放出。码头面层属板状结构, 水化热向外传递较快, 混凝土内外温差相差不大, 温度收缩影响不大。对服役16 a左右的海港码头构件碳化情况进行调研表明, 混凝土构件的碳化深度在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ , 碳化收缩不大<sup>[5]</sup>。碳化收缩与空气湿度等环境条件密切相关, 而码头面层混凝土早期养护的湿度相对较大, 且比城市中心地区的 $\text{CO}_2$ 浓度要低, 在短期内也不易

收稿日期: 2012-01-11

作者简介: 王成启(1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事工程材料研发工作。

出现较大碳化收缩现象。码头面层大多采用掺入纤维的普通混凝土进行浇筑,混凝土耐久性要求不高,且水灰比或水胶比不太低,自收缩影响也较小。码头面层混凝土受风的影响比较大,使混凝土产生失水,易于产生塑性收缩和干燥收缩。因此,码头面层混凝土收缩裂缝的产生主要与塑性收缩和干燥收缩密切相关。笔者已开展了研究码头面层混凝土塑性收缩,提出了改善码头面层塑性收缩的方法<sup>[6-7]</sup>。本文开展码头面层混凝土干燥收缩的试验研究,以提出码头面层混凝土配合比设计方法。

## 1 试验过程

### 1.1 试验原材料

1) 水泥:采用上海水泥厂生产的42.5普通硅酸盐水泥,安定性合格,其力学性能指标如表1所示,其性能指标达到强度等级42.5普通硅酸盐水泥的质量标准。

2) 细骨料:细骨料为细度模数为2.5的中砂。

抗折强度		抗压强度	
3 d	28 d	3 d	28 d
5.1	8.5	23.6	48.2

表2 混凝土干燥收缩试验配合比

系列	编号	水泥/(kg·m <sup>-3</sup> )	砂/(kg·m <sup>-3</sup> )	石/(kg·m <sup>-3</sup> )	用水量/(kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂/(kg·m <sup>-3</sup> )	水灰比
系列1	B1	513	697	1 045	195	3.08	0.38
	B2	487	711	1 067	185	2.44	0.38
	B3	434	740	1 111	165	3.04	0.38
	B4	395	762	1 143	150	4.35	0.38
	B5	382	768	1 155	145	4.58	0.38
系列2	B6	415	716	1 074	195	2.08	0.47
	B7	394	728	1 093	185	3.15	0.47
	B8	351	754	1 130	165	3.51	0.47
	B9	319	772	1 159	150	3.51	0.47
	B10	308	779	1 168	145	3.70	0.47

## 2 试验结果讨论与分析

混凝土的工作性测试结果如表3所示。从表3可以看出,拌制的混凝土和易性均较好,对于水灰比为0.38和0.47两个系列混凝土,随着用水量降低,混凝土减水剂用量增加,且混凝土坍

3) 粗骨料:5~31.5 mm的连续级配的碎石。

4) 拌合水:城市自来水。

5) 减水剂:采用上海麦斯特外加剂公司生产的SP-8CN高效减水剂。

### 1.2 试验方法

干燥收缩、弹性模量、抗压强度以及劈拉强度试验均按JTJ 270—1998《水运工程混凝土试验规程》的有关规定进行。干燥收缩的试件尺寸为100 mm×100 mm×515 mm,弹性模量试件的尺寸为100 mm×100 mm×300 mm,抗压强度和劈拉强度试件的尺寸均为100 mm×100 mm×100 mm。按照规范要求成型混凝土试件,拆模后进行标准养护,到规定龄期进行混凝土干燥收缩、弹性模量、抗压强度以及劈拉强度的试验。

### 1.3 混凝土配合比

用水量对码头面层混凝土的干燥收缩产生重要影响。为研究用水量对码头面层混凝土收缩的影响,分别设计了水灰比为0.38和0.47两个系列混凝土配合比,用水量分别为145, 150, 165, 185, 195 kg/m<sup>3</sup>,具体混凝土配合比设计如表2所示。按有关规范试验要求成型混凝土试件,放置在温度为(20±2)℃,相对湿度为(60±5)%的干燥室内进行干燥收缩试验。

落度具有减小的趋势,混凝土的表观密度也有所下降。

表4为系列1和系列2混凝土抗压强度测试结果,从表4抗压强度测试结果可以看出,当水胶比保持在0.38和0.47情况下,随着用水量和水泥用量

减小，混凝土抗压强度具有降低趋势。

表3 混凝土工作性测试结果

系列	编号	和易性	减水剂掺量/%	坍落度/mm	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
系列1	B1	较好	0.6	190	2 440
	B2	较好	0.5	155	2 435
	B3	较好	0.7	105	2 420
	B4	较好	1.1	85	2 410
	B5	较好	1.2	95	2 400
系列2	B6	较好	0.5	115	2 420
	B7	较好	0.8	100	2 415
	B8	较好	1.0	135	2 355
	B9	较好	1.1	100	2 345
	B10	较好	1.2	95	2 340

表4 混凝土抗压强度测试结果

系列	编号	1 d	3 d	7 d	28 d
系列1	B1	30.6	42.8	50.8	65.1
	B2	30.9	41.1	50.1	62.9
	B3	30.2	41.0	49.0	62.8
	B4	29.8	40.7	48.1	60.7
	B5	28.8	38.8	47.7	58.8
系列2	B6	25.1	39.5	48.1	56.5
	B7	24.1	38.1	47.0	55.1
	B8	21.1	37.7	45.1	53.7
	B9	19.4	37.1	45.0	52.0
	B10	18.5	35.5	44.1	51.8

表5 混凝土干燥收缩试验结果

系列	编号	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	45 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d
系列1	B1	107.4	191.1	249.0	286.8	417.0	478.0	521.5	571.8	610.2	618.1	621.2
	B2	97.3	175.1	214.5	265.4	388.1	461.1	501.1	551.5	554.3	581.1	588.3
	B3	91.5	166.7	204.1	237.8	338.9	418.9	481.1	512.5	521.8	531.1	548.3
	B4	88.5	155.4	182.4	235.2	295.1	400.5	441.2	449.1	451.3	459.1	460.1
	B5	75.6	149.1	170.1	221.3	285.1	381.1	415.1	425.8	428.9	429.5	430.1
系列2	B6	82.6	175.4	227.8	271.8	396.9	421.6	490.1	509.3	547.2	548.9	549.8
	B7	80.1	165.9	200.1	256.5	370.1	410.1	461.1	482.3	522.2	526.7	531.1
	B8	75.1	155.1	185.5	225.1	300.1	381.1	400.1	425.7	471.2	485.5	495.5
	B9	63.9	149.1	171.1	216.7	280.1	320.1	341.9	355.7	378.9	400.5	428.2
	B10	59.9	141.1	168.1	219.1	271.1	303.3	315.9	334.9	359.1	378.9	379.8

表5为混凝土的干燥收缩的测试结果。根据表5的干燥收缩的测试结果，可绘制系列1和系列2的混凝土收缩与龄期的关系，分别如图1和图2所示。从图1和图2可以看出，随着龄期的增长，混凝土的干燥收缩不断增加，混凝土的早期收缩增加较为显著，60 d的收缩比1 d的收缩增长了5倍多。当龄期为120 d（4个月）后，混凝土的收缩增长相对较小。

根据表5的测试结果，可绘制混凝土单位体积水泥用量和用水量与180 d干燥收缩的关系，分别如图3和图4所示。从图3可以看出，随着单位体积水泥用量的增加，系列1和系列2混凝土的干燥收缩均不断增加，几乎呈线性增加，当水泥用量从382 kg/m<sup>3</sup>增加到513 kg/m<sup>3</sup>时，系列1混凝土干燥收缩增加了44.4%，当水泥用量从308 kg/m<sup>3</sup>增加到415 kg/m<sup>3</sup>时，系列2混凝土干燥收缩增加了44.8%。此外，从2个系列混凝土比较看，水泥用量相近混凝土，系列2混凝土的干燥收缩小于系列1混凝土，这主要是混凝土单位体积用水量差别。从图4可以看出，随着混凝土的用水量的增加，混凝土的干燥收缩不断增加，也几乎呈线性增加的关系。

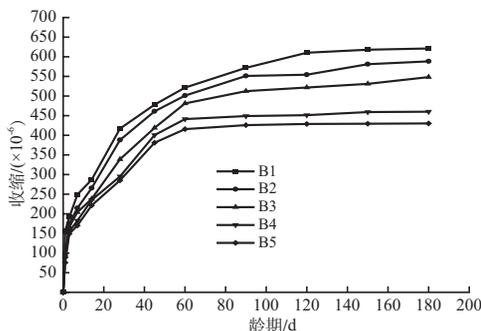


图1 系列1的不同龄期混凝土干燥收缩

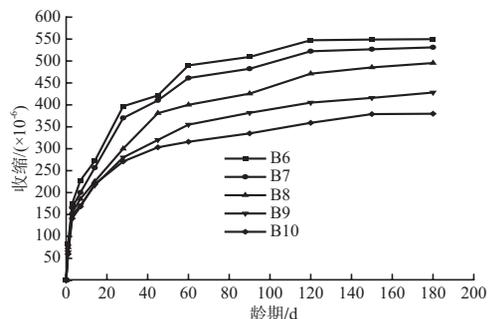


图2 系列2的不同龄期混凝土干燥收缩

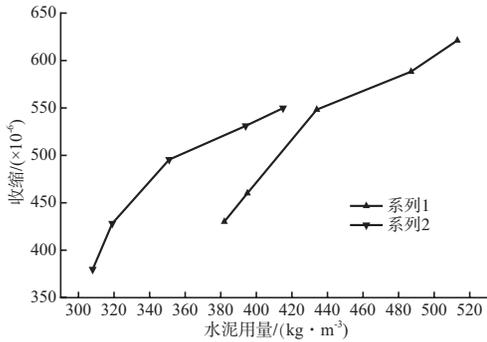


图3 水泥用量与180 d干燥收缩关系

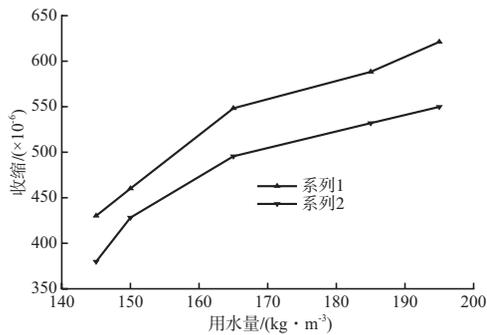


图4 用水量与180 d混凝土干燥收缩关系

系, 当用水量从195 kg/m<sup>3</sup>减小到145 kg/m<sup>3</sup>, 系列1混凝土的180 d干燥收缩减小30.8%, 系列2混凝土的180 d干燥收缩减小30.9%。比较2个系列混凝土的收缩可以看出, 在用水量相同的情况下, 水灰比较大的系列2混凝土干燥收缩小于系列1的混凝土干燥收缩。可见, 混凝土单位体积水泥用量、单位体积用水量以及水胶比是控制码头面层混凝土的干燥收缩的配合比参数, 为控制混凝土的干燥收缩, 应适当控制混凝土的单位体积水泥用量、单位体积用水量和水灰比。

因此, 为减小混凝土的干燥收缩应控制用水量并适当控制水灰比, 根据工程的具体情况, 采用合适的单位体积用水量、单位体积水泥用量和水灰比, 以满足码头面层混凝土强度、耐久性和控制干燥收缩的质量要求。为减小和控制码头面层混凝土的干燥收缩, 应采用较低单位体积用水量, 但为满足码头面层混凝土施工的工作性要求, 也不采用过低的单位体积用水量, 码头面层混凝土的单位体积用水量宜<165 kg/m<sup>3</sup>。为控制码头面层混凝土的收缩, 应采用较低的单位体积水泥用量, 但为保证混凝土结构耐久性, 应控制混凝土最低水泥用

量, 《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》<sup>[8]</sup>要求, 北方混凝土最低水泥用量300 kg/m<sup>3</sup>, 南方混凝土最低水泥用量360 kg/m<sup>3</sup>, 且掺入掺合料水泥用量可相应减小, 掺外加剂时, 南方混凝土水泥用量可适当减小, 码头面层混凝土的单位体积水泥用量宜<360 kg/m<sup>3</sup>, 宜控制在300~360 kg/m<sup>3</sup>。同时, 应控制混凝土的水灰比, 水灰比不宜过低, 按照《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》<sup>[8]</sup>要求, 水灰比最大允许值为0.55, 码头面层混凝土水灰比宜控制在0.45~0.55。

混凝土的干燥收缩产生的原因主要是由于饱和的水泥浆露置于低湿度的环境中, 水泥浆体中的水化硅酸钙(C-S-H)因毛细孔和胶孔中水分蒸发, 而失去物理吸附水所导致的收缩应变。研究表明<sup>[9-11]</sup>, 普通混凝土的收缩( $\varepsilon_h$ )与水泥净浆的收缩和骨料的含量存在如下的关系:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_c(1-a)^n \quad (1)$$

式中:  $n$ 为经验数值, 1.2~1.7;  $a$ 为骨料的含量;  $\varepsilon_c$ 为水泥净浆的收缩。

混凝土的干燥收缩主要与水泥净浆收缩、骨料的含量有关, 而混凝土中产生干燥收缩的主要组分是水泥石, 减少混凝土中水泥石相对含量即可减小收缩。在一定水灰比条件下, 增加用水量, 混凝土中水泥浆体的含量不断增加, 混凝土干燥收缩不断增加, 因此, 系列1和系列2均随着混凝土的用水量不断增加, 混凝土干燥收缩显著增加。

在用水量一定的条件下, 随着水灰比的增加, 混凝土中胶凝材料用量相对减小, 水泥浆体含量相对较小, 水泥浆体的水化产物较少, 混凝土的干燥收缩也相对减小。此外, 混凝土干燥收缩的大小和发展速度与其孔径大小、分布及孔隙结构相关。水灰比较低的混凝土孔径细, 湿扩散系数小, 净湿含量较低, 失水速度慢, 但混凝土内部相对湿度小, 失水产生的毛细管张力大, 混凝土长期收缩大。当水灰比较高时, 尽管水化相孔隙率大, 湿扩散系数大, 但失水产生的毛细管张力小, 混凝土长期干燥收缩较小, 表现为水灰比为0.38的系列1混凝土干燥收缩>0.47的系列2混凝土。但水灰比也不宜过大, 过大的水灰比将

导致混凝土水化相空隙大、孔径粗，湿扩散系数大，经过一定时间，尽管失水空隙仍主要是较粗孔隙、内部相对湿度大，净湿含量较大，表现为混凝土长期收缩变形较大。

### 3 结论

码头面层混凝土的干燥收缩与外部环境湿度、湿度和混凝土结构尺寸密切相关，混凝土的配合比也对混凝土干燥收缩产生重要影响。本文开展了码头面层混凝土干燥收缩的试验研究。在水灰比一定的情况下，用水量对混凝土干燥收缩有很大影响，用水量较小的混凝土具有较小的干燥收缩。在用水量一定情况下，水灰比较大的混凝土具有较小的干燥收缩。码头面层混凝土的单位体积用水量宜 $<165 \text{ kg/m}^3$ ，混凝土的单位体积水泥用量宜 $<360 \text{ kg/m}^3$ ，宜控制在 $300 \sim 360 \text{ kg/m}^3$ ；且控制混凝土的水灰比，水灰比不宜过低，水灰比宜控制在 $0.45 \sim 0.55$ 。

### 参考文献:

[1] 桂海清, 葛炜, 钱晓倩. 高强高性能混凝土的体积稳定

性[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(3): 460-463.

[2] 张巍, 杨全兵. 混凝土收缩研究综述[J]. 低温建筑技术, 2003(5): 4-6.

[3] 黄国兴, 惠国炎. 混凝土的收缩[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.

[4] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[5] 中交上海三航科学研究院有限公司. 华东地区海工工程混凝土结构耐久性调查[R]. 上海: 中交上海三航科学研究院有限公司, 2009.

[6] 王成启. 混凝土塑性收缩的试验研究[J]. 工程质量, 2008(2): 40-43.

[7] 王成启. 改善码头面层混凝土塑性收缩的方法[J]. 水运工程, 2009(5): 77-81.

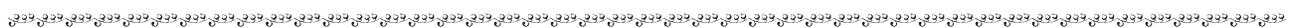
[8] JTJ 27—2000 海港工程混凝土结构防腐技术规程[S].

[9] 东南大学. 混凝土学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.

[10] 李迎春, 游有赐, 钱春香. 混凝土组成成分对收缩性能的影响. 混凝土, 2003(2): 40-44.

[11] 肖瑞敏, 张雄, 张小伟. 混凝土配合比对其干缩性能的影响. 混凝土, 2003(7): 38-40.

( 本文编辑 郭雪珍 )



( 上接第61页 )

### 参考文献:

[1] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究. 水利学报, 2003 (1): 21-27.

[2] 沈珠江. 桩的抗滑阻力和抗滑桩的极限设计[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 51-56.

[3] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. 岩土力学, 2006, 6(27): 100-104.

[4] 唐晓松, 刘明维, 叶海林. 基于ABAQUS的抗滑桩三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010(6): 1 614-1 618.

[5] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].

[6] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].

[7] 张建华, 谢强, 张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (4): 699-703.

[8] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 174-178, 184.

[9] 王元战, 祝振宇, 张宝华, 等. 高桩码头岸坡稳定有限元分析[J]. 海洋工程, 2006 24(4): 27-31.

[10] 吴文峰. 堆载-被动桩-上部结构共同作用[D]. 上海: 同济大学, 2007.

( 本文编辑 郭雪珍 )