

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.06.008

水工混凝土干缩应力分析和干缩试验探讨

王同生

(太湖流域管理局,上海 200434)

摘要 回顾了水工混凝土水分扩散系数和干缩系数的非线性特性及其在徐变干缩应力分析中的应用,并对水工混凝土现行干缩试验方法中存在的问题进行探讨,指出按现行方法测定的干缩变形包含了自生体积变形,扣除后才能得到真正的干缩变形。对干缩变形实用计算法的适用条件和局限性进行了讨论。

关键词 水分扩散 ;干缩应力 ;干缩试验 ;水工混凝土

中图分类号 :TV431 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)06-0030-03

On shrinkage stress analyses and shrinkage tests on hydraulic concrete//WANG Tong-sheng (Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China)

Abstract :The nonlinear characteristics of moisture diffusion coefficient and shrinkage coefficient of hydraulic concrete and their application in creep shrinkage stress analyses were reviewed. The problems in the existing test methods for shrinkage of hydraulic concrete were discussed. It was put forward that the shrinkage deformation determined by the existing methods included the inherent volume deformation, and the actual shrinkage deformation was achieved by subtracting it. Finally, the applicable conditions and limitations of practical methods for shrinkage of hydraulic concrete were investigated.

Key words :moisture diffusion ; shrinkage stress ; shrinkage test ; hydraulic concrete

混凝土在失去水分时就会收缩,这一过程称为干缩。混凝土内水分扩散的速度很慢,大约是温度传导速度的 1/1 000。对于一面暴露于相对湿度为 50% 的空气中的混凝土,干燥深度达到 7 cm 需要 1 个月,达到 70 cm 则需要将近 10 年^[1-2]。

干缩常常在混凝土表面引起细而浅的表面裂缝。达到一定宽度和深度的干缩裂缝会引起钢筋混凝土结构中钢筋的锈蚀,在不利条件下会引起结构的渗漏,影响结构的耐久性。不同形式的结构干缩裂缝的影响程度不相同。大体积混凝土不但尺寸大,且常常是无筋混凝土,受干缩裂缝影响小,基本上可以忽略,涵闸的底板和闸墩虽然平面尺寸也很大,但厚度较小,只有 1~3 m,为较大体积混凝土,且常常是配钢筋的,受其一定的影响,需要加以注意;工业和民用建筑中的薄壁结构采用钢筋混凝土材料,且断面尺寸很小,厚度只有几十厘米,所受影响最大,更需要引起注意。

1 水分扩散过程和干缩应力分析

为了求解干缩应力,先要分析混凝土水分扩散过程。试验证明,混凝土内水分扩散和湿度变化与热传导和温度变化一样,都可归结为求解抛物线型偏微分方程^[2]。

设混凝土湿度为

$$U = \frac{V}{\rho} \tag{1}$$

式中: U 为混凝土湿度,即单位质量混凝土所含水分,kg/kg; V 为混凝土含水量,kg/m³; ρ 为混凝土密度,kg/m³。

则 U 满足以下湿度扩散方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

在与空气接触的边界上,边界条件为

$$k \frac{\partial U}{\partial n} = \beta (U_F - U_B) \tag{3}$$

式中: k 为水分扩散系数,即在单位含水量梯度和单位时间内通过单位面积的水分质量,m²/h; U_F 为湿

作者简介 王同生(1935—),男,江苏泰县人,教授级高级工程师,从事混凝土温度和收缩应力以及流域规划和管理研究。E-mail :zhouhw999@sohu.com

凝土表面湿度, kg/kg ; U_B 为混凝土的平衡湿度, kg/kg ; β 为表面水分交换系数, 即混凝土表面含水量与平衡含水量之差为 1 kg/m^3 时, 单位时间内通过单位面积所散发的水分质量, m/h ; n 代表表面法线方向; t 为时间, d 。

与混凝土平衡含水量相当的平衡湿度, 是指当周围空气相对湿度为某一固定值时, 混凝土表面经水分扩散后所能达到的湿度。当混凝土表面达到平衡湿度后, 混凝土表面与空气之间不再发生水分转移。平衡湿度与周围空气的相对湿度和混凝土本身特性等因素有关, 当空气湿度降低 $20\% \sim 36\%$ 时, 平衡湿度约降低 1% [1]。

与热传导问题相比较, 不难发现水分扩散系数与热传导方程中的导温系数相当。将 β 与 k 同乘以 ρ 后, $\beta\rho$ 与放热系数相当, $k\rho$ 与导热系数相当。由于湿度扩散边值问题与热传导问题大体上相同, 可参考热传导问题的有关解法求解。

在求得湿度场的解并取得混凝土内湿度变化情况, 为了计算干缩应力, 还需要设定干缩变形与湿度变化之间的关系。其后, 与在求得温度场后再求解温度徐变应力的方法大体相同, 在用有限单元法求解时步骤也是相同的。

在早期研究收缩应力的文献中, 虽已考虑到平衡湿度这个因素, 但为了便于计算, 采用了水分扩散系数为常量以及湿度变形与湿度变化之间存在线性关系(即收缩系数为常量)等简化假定, 此外也没有考虑徐变对应力的影响。计算成果虽阐明了一些规律, 但与实际相差较大。

在近 20 年来, 收缩应力的研究取得了一些进展。较早在干缩徐变应力分析中考虑水分扩散系数非线性特性的是文献[3-5], 设定水分扩散系数 k 为时间(龄期)的函数, 采用了 2 种表达式:

$$k = c_0(c_1 + c_2 t^{-c_3}) \quad (4)$$

$$k = p t^{-m} \quad (5)$$

式中: c_0, c_1, c_2, c_3, p, m 均为常数。

对采用不同表达式的干缩应力计算结果进行了比较。文献[3-5]在干缩应力分析中计入了徐变, 但没有考虑湿度变形与湿度变化之间的非线性关系, 即假设收缩系数是常量。

文献[6]考虑了平衡湿度、水分扩散系数和收缩系数的非线性特性, 其中, 设定水分扩散系数是湿度 U 的函数:

$$k = k_0 + c \left(\frac{U}{1-U} \right)^d \quad (6)$$

式中: k_0 为完全干燥条件下混凝土的水分扩散系数; c 和 d 为常数。

干缩变形 ϵ_{sk} 与湿度变化的关系采用了以下经验公式:

$$\epsilon_{sk} = \frac{M^{2.5}}{195 + M^{2.5}} \epsilon_{sk}^0 \quad (7)$$

式中: M 为湿度损失百分比, $\%$; ϵ_{sk}^0 为最终极限收缩。

文献[6]只进行了弹性干缩应力分析, 没有计入徐变。文献[7]着重考虑了水分扩散系数以及湿度变形与湿度变化的非线性关系。在分析了影响因素并参考有关研究成果后, 采用了以下水分扩散系数与时间的关系式:

$$k = D e^{-A t^B} \quad (8)$$

式中: D 为饱和状态下的水分扩散系数; A, B 为常数。

认为表面水分交换系数也是随时间变化的, 并采用了类似于式(8)的表达式。对于湿度变形与湿度变化的关系, 与文献[6]相同, 也采用了式(7)。文献[7]没有计入徐变, 也只进行了弹性干缩应力的计算, 对于平衡湿度也没有涉及。

混凝土湿度变形与湿度变化之间的关系受到水泥和骨料品种以及配合比等多种因素的影响。文献[6-7]都没有对经验公式(7)的适用条件和不同影响因素时极限收缩的取值做出进一步说明, 同时, 均没有进行徐变应力分析。

从以上几篇具有一定代表性的文献看, 混凝土干缩应力分析的研究已取得了不少进展, 但还不能满足实际工程的需要, 需要从理论和试验 2 个方面继续加强研究。

2 干缩试验的讨论

为了取得已选定配合成分和配合比混凝土的干缩变形, 就要进行干缩试验。现行 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》4.12 节有对混凝土干缩(湿胀)试验方法的规定, 但该项试验方法有需商榷之处。该试验方法规定, 混凝土干缩试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$, 试件成型后即送进养护室养护, 48 h 后拆模, 拆模后即送干缩室测量其长度, 作为基准长度, 然后将试件放在干缩室发生干缩, 干缩室内恒温恒湿, 要求室温控制在 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $60\% \pm 5\%$ 。干缩龄期包括 3 d, 7 d, 14 d, 28 d, 60 d, 90 d, 180 d 或其他指定龄期, 每个龄期测长 1 次, 测长仪器可用弓形螺旋测微计、比长仪、千分表、传感器或混凝土干缩仪。每个龄期测长的方法和方向应与测量基准长度时相同。将某一龄期的试件长度与基准长度的差值除以试件基准长度就可以得到其干缩率。

该规程第 4.12.1 节认为“本试验用于测定混凝土在无外荷载和恒温条件下由于干、湿引起的轴向长度变形,以比较不同混凝土的干缩和湿胀性能”。这里可以指出 2 点:首先,结构内混凝土的湿度 $U(x,y,z,t)$ 和干缩变形 $\epsilon_{sk}(x,y,z,t)$ 都是空间坐标和时间的函数,取决于结构形状、尺寸以及初始条件和边界条件,也与混凝土的水分扩散系数、表面水分交换系数以及干缩系数等有关。因此,对于以上按照一定试件尺寸和外界湿度得到的试验成果,这里指出只能作为不同混凝土干缩和湿胀特性相互比较之用,无疑是正确的也是必要的。但该规程第 4.12.1 节认为试验可“用于测定混凝土在无外荷载和恒温条件下由于干、湿引起的轴向长度变形”,这就有问题了。由于混凝土中水泥在水化的过程中将发生 2 种反应,即水泥水化热和自生体积变形,因为试件断面尺寸很小,水化热温升也很小,由水化热温升引起的试件温度变形可以忽略不计,但自生体积变形不能忽略不计。因此,即使在无荷载和实验室恒温条件下,试验成果中不仅反映了干缩或湿胀变形,同时还包含了自生体积变形,只有从上述试验成果中扣除了自生体积变形,才能得到真正的干缩和湿胀变形。当然,此成果仍只能供不同混凝土之间比较之用。

笔者建议按该规程第 4.13 节规定,进行同一配合比的混凝土的自生体积变形陪比试验,然后从第 4.12 节规定方法得到的试验成果中扣除同龄期的自生体积变形的陪比试验成果,就可以得到真正的干缩或湿胀变形。

自生体积变形随水泥品种而变化,可以是收缩,也可以是膨胀。如为收缩,则按该规程第 4.12 节方法测得的干缩值将偏大,因为其中包括了自生体积收缩;如为膨胀,则测得的干缩值将偏小,因为其中包含的自生体积膨胀抵消了一部分干缩。以下用试验数据对此做具体说明,2000 年在修建淮河入海水道二河闸时对强度等级为 C25 的混凝土同时做了干缩变形和自生体积变形试验,试验都是按《水工混凝土试验规程》的规定进行的。C25 混凝土的配合比为:水胶比 0.45、用水量 144 kg/m^3 、水泥 240 kg/m^3 、粉煤灰 80 kg/m^3 、砂 678 kg/m^3 、石子 $1\,260\text{ kg/m}^3$ 和外加剂 JM0.7%。不同龄期的干缩和自生体积变形试验结果见表 1^[8]。混凝土采用了普通硅酸盐水泥,测得的自生体积变形为收缩,与一般普通硅酸盐水泥混凝土自生体积变形为收缩的特性相符。因此,需从按规程测得的干缩值中扣除自生体积变形,扣除的结果也列于表 1。由表 1 可见,28d 龄期按规程测定的干缩变形为 264×10^{-6} ,扣除了同龄期的自生体积变形 115×10^{-6}

之后,真实的干缩变形为 149×10^{-6} 。

表 1 干缩与自生体积变形试验结果

项 目	变形/ 10^{-6}											
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
按规程测定的干缩变形	27	49	60	79	91	98	110	175	226	264		
自生体积变形	18	33	44	52	57	61	66	91	106	115		
真实干缩变形	9	16	16	27	34	37	44	84	120	149		

笔者建议在以上试验基础上,进一步开展混凝土干缩系数的试验,以填补该规程这方面试验方法的空白,具体方法如下:在第 4.12 节规定方法的试验过程中,在试件拆模并测量其基准长度的同时,测量试件的质量,称之为基准质量;试件在干缩室发生水分扩散和干缩的过程中,在每一干缩龄期测量试件长度的同时测量其质量,将基准质量与各龄期质量相比较,就可得试件的水分损失和湿度降低值;将扣除自生体积变形后各龄期的真正干缩率除以同龄期的湿度降低值,就可以得到干缩系数。

以上试验基本上可在原来的实验室利用原有试验仪器进行,所要增加的仅是 1 台精度较高的混凝土试件称重设备。

3 干缩变形实用计算法的讨论

文献[9]建议用以下指数函数计算干缩变形过程,即

$$\epsilon_y(t) = \epsilon_y^0 M_1 M_2 \cdots M_{10} (1 - e^{-bt}) \tag{9}$$

式中: $\epsilon_y(t)$ 为经过时间 t 收缩后的收缩变形; b 为与养护条件有关的系数,一般取 0.01,养护条件较差时取 0.03; $M_1, M_2, \cdots, M_{10}$ 为考虑各种干缩条件的修正系数,其中 M_8 为结构断面尺寸的修正系数,各修正系数的取值大体在 1.0 上下变动,详见文献[9]; ϵ_y^0 为标准状态下的极限收缩,即干缩过程结束后的干缩变形。所谓标准状态是指混凝土采用 275 号普通水泥、标准磨细度(比表面积为 $2\,500 \sim 3\,500\text{ cm}^2/\text{g}$)、滑料为花岗岩碎石、水灰比为 0.4、水泥浆质量分数为 20%、混凝土振动捣实、自然硬化;试件断面尺寸为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 、测定收缩前养护 7 d、周围空气湿度为 50%。对于非标准状态, ϵ_y^0 可通过系数 $M_1 \sim M_{10}$ 来修正得到。

公式(9)主要用于小断面尺寸的建筑构件,文献[9]也曾提到这类经验公式具有一定的局限性。笔者认为:

a. 在一定的外界湿度条件下,对于选定水泥、骨料和配合比的混凝土,其收缩过程主要取决于构件断面尺寸和形状。对于断面尺寸和形状不同的构件,其收缩过程和持续时间都不同,即其收缩变形过程线的形状也不尽相同。(下转第 47 页)

坝枢纽工程的反调节作用,三峡大坝至葛洲坝两坝间河段的水位日变化率、小时变化率、流速大小及水面比降均满足万吨级船队的航行条件。

洪水期两坝间碍航段主要位于水田角、莲沱弯道、喜滩、狮子脑、石牌弯道及偏脑等处。在现有 2.5 m/s 航速的通航标准及葛洲坝坝前水位 66.00 m 的情况下,水田角河段的通航限制流量约为 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。当葛洲坝坝前水位降至 63.00 m 运用时,通航流量减小到 $25\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。对于单船上行限制流速 3.5 m/s 的情况,两坝间通航限制流量可提高到 $40\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

参考文献：

[1] 舒荣龙,陈桂馥,杜宗伟.提高三峡-葛洲坝两坝间通航能力试验研究[J].人民长江,2005(7) 31-33.
[2] 舒荣龙,周小平,杜宗伟.三峡-葛洲坝两坝间河段通航技术研究[J].水运工程,2005(3) 62-65.
[3] 潘家铮.三峡工程从根本上改变了川江航运面貌[J].中

国三峡建设,2004(4) 10-12.

[4] 姚仕明,张超,王龙,等.分汊河道水流运动特性研究[J].水力发电学报,2006,25(3) 49-52
[5] 姚仕明.三峡葛洲坝通航水流数值模拟及航运调度系统研究[D].北京 清华大学,2006
[6] 王远航.两坝间长河段冲淤过程数值模拟[D].北京 清华大学,2005.
[7] 姚仕明,王兴奎,张超,等.曲线同位网格的三维水流数学模型[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(3) : 336-340.
[8] 姚仕明,王兴奎,张超,等.两坝间河段通航水流条件的三维数值模拟[J].水科学进展,2007,18(3) 374-378.
[9] 孙尔雨,李发政.三峡工程提前兴建地下电站日调节运行对两坝间及葛洲坝下游通航的影响试验报告[R].武汉 长江科学院,1997.
[10] 西南水运工程科学研究所,长江科学院.两坝间(葛洲坝—三峡)通航水流技术标准试验研究[C]//水利部科技教育司.长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集.武汉 武汉工业大学出版社,1993.

(收稿日期 2010-01-23 编辑 骆超)

(上接第 32 页)

由式(9)可以看出,决定收缩变形过程的是指数函数 $1 - e^{-bt}$,且参数 b 与构件尺寸和形状无关。因此,即便通过各项修正系数进行修正,其收缩过程线的形状也均为指数函数,同时最终收缩持续时间也相同。可见,仅就断面尺寸而言,如实际构件断面尺寸与标准状态的 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 相差越大,其计算结果与实际相比相差越大。有的涵闸工程用这类公式对涵闸底板和闸墩进行计算,由于其断面尺寸均在 $1 \sim 2\text{ m}$ 范围,甚至更大,因此计算结果会有较大误差。

b. 即使对于断面尺寸为 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的构件,其断面上的湿度和干缩变形分布也是不均匀的,式(9)的计算结果实际上代表构件断面上的平均干缩变形,利用这个结果只能做一些外界约束应力的简单计算分析。由于没有进行湿度场分析,不能反映构件内湿度的不均匀分布,也就不能确切地说明由于构件自身约束产生的干缩应力,不能解释混凝土表层干缩受到内部约束而产生的干缩应变和表面裂缝现象。

参考文献：

[1] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力和温度控制[M].北京 水利电力出版社,1976 373-376.
[2] CARLSON R W. Drying shrinkage of large concrete member

[J]. Journal of the American Concrete Institute,1937,33(1) : 327-336.

[3] BAZANT Z P, WANG T S. Spectral analysis of random shrinkage in concrete structure [J]. J of the Eng Mech Division, ASCE,1984,110(2) :173-186.
[4] 王同生.混凝土结构的随机温度应力[J].水利学报,1985(1) 23-30.
[5] 王同生.混凝土结构的干缩应力[J].土木工程学报,1985,18(1) 16-28.
[6] 刘勇军.水工混凝土温度与防裂技术研究[D].南京 河海大学,2000.
[7] 马跃先,陈晓光.水工混凝土的湿度场及干缩应力研究[J].水力发电学报,2008,27(3) 38-42.
[8] 南京水利科学研究院材料结构研究所.淮河入海水道近期工程二河枢纽工程混凝土试验研究报告[R].南京 南京水利科学研究院材料结构研究所,2000.
[9] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京 中国建筑工程出版社,1997 20-25.

(收稿日期 2009-11-20 编辑 骆超)

