

混凝土结构的干缩应力研究综述

梅明荣,任青文

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:综述了混凝土干缩及干缩应力研究的现状,扼要介绍了干缩及干缩机理的几种理论,详细地介绍了近10年来国内外此方面的发展,特别是干缩应力研究在混凝土浇注块、混凝土材料的表面修复、高性能混凝土等方面的运用,最后讨论了混凝土干缩应力的数值计算方法。

关键词:干缩;湿度;混凝土;结构应力

中图分类号:TU37

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2002)03-0059-03

1 问题的提出

混凝土由于其水分的损失,如蒸发、干燥等过程引起的体积缩小变形,称之为干缩。干缩是混凝土材料的一个重要特性,对混凝土结构的长期性能有着十分重要的影响^[1]。

处于养护阶段的混凝土是接近水分饱和的,其相对湿度约为100%。拆模后,混凝土中的水分会向周围较干燥的空气中扩散。混凝土结构中会产生不均匀的湿度变化而引起干缩应力。许多研究表明,混凝土结构表面出现的各种网状表面裂缝,绝大多数是由于干缩引起的。在以往的研究中,往往认为干缩影响深度很小,可以不予理会^[2]。但近来的一些研究表明,这种表面干缩所产生的干缩应力是相当大的,据有关文献报道^[1,3],当混凝土完全干燥时,线收缩可达10000微应变,也曾实测到4000微应变线收缩应变值。同时,由于干缩引起的裂缝虽开始时限于表层,但在不利因素下,则很可能进一步扩展。

高性能混凝土(HPC)、高强混凝土(HSC)是近10多年来发展起来的新型混凝土,其材料的力学性能还不为人们全面认识^[4]。高强混凝土的水泥用量比普通混凝土高,一般认为,高强混凝土水灰比低,结构较为密实,其干燥过程线要大幅降低。事实上,高强混凝土的干缩值在养护期28d内便可达到甚至会超过0.03%。产生这一现象的原因是内源干燥。很多实例表明高强混凝土因快速干燥而导致混凝土结构出现严重的早期开裂现象。

在水利工程中,重力坝加高的混凝土其表面积与体积之比比一般浇筑块来得大,因而加厚层内的

水分散发量也较大。同时,新浇筑层中的水分还会向老浇筑层中扩散。因此,混凝土结构中会产生不均匀的湿度和自由干缩应变场,但由于老混凝土对新混凝土的约束,使得自由干缩应变实际上不能发生,混凝土内会产生不均匀的干缩应力场。这种表面干缩所产生的干缩应力是相当大的。其次,新混凝土浇筑块也只有2~4m厚,加上老混凝土的约束,其开裂的情形也要比一般情况严重。故研究混凝土的湿度场和干缩应力,对于重力坝加高的混凝土显得尤为必要。

随着商品混凝土的使用与普及,很多工程采用泵送混凝土施工工艺,与普通混凝土相比,它具有较大的水灰比和含水量。因此,相比普通混凝土,收缩开裂是商品混凝土施工中一个比较突出的问题^[5,6]。另一方面,在大面积的表面铺设衬砌底板、薄表面修复、隧洞喷射衬砌等工程中,暴露表面占全部材料的比例高,而老混凝土或岩石对新混凝土有很强的约束作用,因此受环境温度和湿度影响就比较大,容易出现早期开裂。干缩开裂严重影响结构补强后的耐久性、耐火性和抗渗性。

2 干缩机理

一种被普遍接受的想法是混凝土的收缩、徐变特性是由一些共同的基本因素所决定的。徐变是在应力作用之下产生的,而收缩的产生则与应力无关,其中干缩与水分迁移有关。混凝土的收缩分为自发收缩、碳化收缩、温度收缩和干燥收缩。其中:①自发收缩是在没有水分转移下的收缩,其原因是水泥水化物的体积小于参与水化反应的水泥和水的体积,

是水泥水化反应所产生的固有收缩;②碳化收缩是混凝土中的水泥水化物与空气中的二氧化碳发生化学反应的结果;③温度收缩,即温升、降温引起的混凝土收缩.本文将着重讨论干缩机理及其理论.

关于干燥收缩的机理主要有以下几种理论^[1,7,8]:

a. 表面张力理论.干缩是水泥胶凝分子间的表面张力结果,是表面自由能的产物.张力随着水分子被吸收而减小,但当水分子消失,分子间的应力增加时趋于收缩.

b. 毛细管张力理论.干燥收缩过程与毛细管中水的弯液面有关,在毛细管水蒸发过程中,混凝土处于不断增强的压缩状态,导致体积缩小.20世纪80年代后期有人认为这种毛细管张力只在高湿度下才对干缩起作用.

c. 劈张力理论.开始干燥时所损失的自由水并不引起混凝土的收缩,干燥收缩的主要原因是吸附水的消失.因为当水泥浆中胶凝质点间的距离小于10个水分子的厚度时,则吸附在其间的水分子就会产生一种劈张力来平衡胶凝质点间的分子引力,当吸附水消失时,造成材料的体积收缩.

d. 层间水理论.有学者认为层间水作用也是干缩的一个重要原因.硅酸盐材料(C-S-H)被认为是一种具有层状结构的材料,而层间水的变化是其体积变化的主要原因.该学说和劈张力理论相似.

关于收缩机理还有其他解释.近些年一些学者尝试用微观力学方法解释收缩及其发展过程,将在下面讨论.文献[3,9]指出,混凝土的收缩往往持续很长时间,甚至在28年以后也还在继续收缩,但收缩速度则随时间急剧衰减.影响混凝土收缩(包括干缩)的因素很多,而且随机性也特别大.主要因素有水泥品种、水灰比、水泥用量、含水量、集料的大小、养护条件、加劲水泥混合物、外加剂等.

3 干缩应力的研究现状

3.1 基础研究

美国西北大学Bazant教授在徐变和干缩的机理以及计算模型等方面作出了许多开拓性的贡献^[7,10,11].近年来随着研究的深入,特别是在试验成果的基础上,不少学者提出了新的研究成果.Man Yop Han等^[12]给出了混凝土内的含水量与干缩变形之间关系的数学表达式,指出干缩变形曲线的规律与大小都与水泥成分、集料含量、结构的孔隙率有关.Torrenti^[13]经过长达数年的试验观察,得出了干缩变形随环境条件变化的表达式.指出混凝土干缩变形正比于材料的相对湿度.Majorana^[14]提出了考

虑混凝土相对湿度与温度耦合变化的结构徐变与干缩应力的计算模式,采用Prony-Dirichlet级数表示应力松弛函数,这样就用不着记忆这个应变历史.就总体而言,笔者认为近10年这方面的研究没有突破性的进展.

3.2 混凝土浇筑块干缩应力

牛焱洲等^[15]采用有限元方法,根据混凝土的水分扩散方程,求出湿度场和自由干缩应力.借用与混凝土徐变类似的方法,导出计算混凝土浇筑块的干缩应力的递推公式,并讨论了环境湿度对浇筑块应力的影响.但是作者没有考虑相对湿度与温度的相关性.王同生^[16]采用解析方法,求解混凝土圆筒的随机干缩应力.以上的研究均是在线性范围内进行的,特别是应力计算与实际情况有较大的差距,而Wittmann^[4]等则采用非线性有限元求解扩散问题.在进行应力计算时,当应力低于抗拉强度时假定成弹性,当应力一旦到达抗拉强度时就采用虚拟裂缝模型的分散裂缝公式来描述开裂,比较好地模拟了干缩现象.

3.3 钢筋混凝土结构修补

混凝土结构修补工作已越来越为工程技术人员所关心.袁迎曙^[17]通过试验提出了收缩应力发展的力学模型经验公式,其中涉及与时间有关的非线性方法,研究结果表明,收缩应力不仅与修复材料的性能有关,而且与本体结构的刚度和连续性有关.不过作者提出的模型经验公式只是单向应力状态,与三向应力状态有差距.Rahman^[18],Asad^[19]等在混凝土修复工程中计算干缩与徐变应力时,考虑湿度场扩散系数随湿度变化的非线性扩散方程,采用Galerkin加权余量法(Galerkin weighted residual method)求解,并进一步考虑干缩变形与湿度的非线性关系.

严格地说混凝土早期开裂并不是由个别因素造成的,而是多个因素共同影响的结果.即使从裂缝的开展过程来看,也不是某个因素自始至终都是起主要决定作用的.因此,需要我们辩证地、多角度地研究混凝土的开裂现象.研究混凝土的干缩应力并不能彻底揭开混凝土开裂的原因,但可以定性或部分定量地给出干缩在混凝土开裂过程中所起的作用,特别是早期混凝土.

3.4 干缩应力的微观力学模型

微观力学以及小尺度研究目前是比较热门的,属于前沿性的.Shimomura等^[20]从微观的角度研究干缩应力,建立了混凝土微观力学模型,从模拟孔隙中水的力学和热动力性能,来研究干缩随时间和空间的变化.Granger等^[21]在亚微观—微米级研究干缩.作者将实验所得的干缩曲线作为由于干燥引起

体积减小的函数,结合选取的亚微观力学模型,揭示混凝土结构的干缩变形.事实上,微观研究已从微米级发展到纳米级.如果说前面所举的收缩机理只能定性说明收缩的性质,那么微观力学方法不仅定性、还可以定量给出各物理量之间的关系.这对于分析收缩机理是很有意义的.

这方面研究目前存在的问题是实验设备还不能提供纳米级的直观的微观结构物象,因为光学显微镜、电子显微扫描仪(SEM)以及较先进的周界电子显微扫描仪(ESEM)也只能提供微米级的结构物象.

3.5 水泥基复合材料干缩应力研究

随着新材料、新水泥基复合材料的不断出现,参考有关杂志近 10 年的文献,可以发现研究干缩应力逐步由普通混凝土(OPC)转向高强混凝土、高性能混凝土以及各种纤维混凝土等等. Wittmann 等^[4]认为:基于 OPC 干燥收缩机理而建立的设计规范不再适用高强混凝土. Khan 等^[22]通过试验比较了普通、中强和高强三种混凝土的早期、干缩以及温度变形,指出高强混凝土早期干缩与温度变形比中强的要大,而中强的又比普通的大.在发展过程上,高强混凝土早期收缩值比普通混凝土大,而后期则小于普通混凝土.高强混凝土浆体含量大,因此塑性收缩比较大;水胶比低,内部结构密实,则早期产生很大的自收缩. Tazawa 等^[23]指出水泥的类型、水灰比以及集料量对混凝土的自收缩是有影响的,它与水泥中的 C_3A 有关,还与粉煤灰有关. Whiting 等^[24]认为硅粉对干缩有明显的影响作用,特别是养护条件越差收缩就越大. Lim 等^[25]对 GGBFS (ground-granulated blast-furnace slag) 高性能混凝土测试结构表明:50% 替代量的 GGBFS 在 90 d 达到最大的强度,也达到最大的自收缩,而且抗压强度越快达到,混凝土的自收缩就越大. Benthia 等^[26]介绍了纤维混凝土(PFRC)产生收缩并由此引起的开裂情况.

4 结构干缩应力的数值计算

4.1 湿度场的计算

湿度场与温度场、干缩应力与温度徐变应力问题的性质是相似的.要了解混凝土干缩应力的分布状态,首先要了解混凝土内湿度变化的基本规律及变形与相对湿度的关系.文献[27]认为:混凝土内相对湿度的规律和温度一样,可以较好地服从扩散方程,而描述湿度扩散场的具体数学表达式与温度场完全相似,因此热传导边值问题的解法可以套用到湿度扩散场的求解.而事实上,湿度扩散系数随湿度变化而变化,根据费克氏第二定理,湿度在水泥材料中的扩散满足下列非线性方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[D(C)\text{grad}(C)] \quad (1)$$

在 $t = 0$ 时, $C(x, 0) = C_0$. 其中: $C(x, t)$ 为与时间有关的相对湿度; C_0 为材料初始相对湿度; $D(C)$ 为相对湿度扩散系数,该参数随混凝土内的相对湿度和孔隙率而变化,根据试验成果,采用以下经验公式:

$$D(C) = D_0 + a\left(\frac{C}{1-C}\right)^b \quad (2)$$

式中: D_0 为干燥时的扩散系数; a, b 为衰减常数. 相比混凝土的温度场与温度应力,有关混凝土的湿度场及其干缩应力,人们了解还很少,特别是有关参数及边界条件往往不易确定或难以找出相对准确的范围.这样,在实用的角度上对于干缩变形与应力的分析,通常采用估算方法来进行^[1,3].

4.2 收缩的估算方法

在实际工程中,很难将干缩变形与其他收缩变形区分开,在特定的实验室条件下或者忽略某些次要因素,将收缩曲线作为干缩曲线处理.混凝土收缩表达式是表示混凝土收缩变形与龄期关系的数学方程式,一般是通过实测试验数据回归分析得出.这样可以避开通过湿度变化得到变形值.常用的有双曲线函数式、指数函数式和对数函数式.比如根据有关研究,对于高强混凝土收缩变形采用指数形式所得的相关系数比较高,其形式如下:

$$\epsilon_s(t) = \epsilon_{s,\infty}(1 - ae^{-bt}) \quad (3)$$

式中: $\epsilon_{s,\infty}$ 为实验室标准条件下收缩终值; a, b 为试验常数; t 为收缩时间.

在实际工程中,运用上述表达式时还要考虑许多影响混凝土收缩的因素,如环境温度、湿度、混凝土配合比、养护方法、结构的表面积以及结构的配筋率等因素,通过乘上相应的修正系数,可得到实际混凝土结构的收缩值.

4.3 本构关系

和徐变分析类似,确定合适的本构关系也是干缩应力分析的关键.这里涉及两个问题:一是能正确反映干缩变形全过程的本构方程,如微分型、积分型和级数型,并通过实验确定其有关参数;二是实用的计算方法.文献[27,28]采用线弹性方法计算干缩应力,当相对湿度为单调变化时,由相对湿度引起的变形与相对湿度变化成线性关系.因此,可以将收缩应力作为等效的温度应力进行分析.但在很多情况下,相对湿度引起的变形与相对湿度并不成线性关系,且相对湿度引起的变形也不是完全可逆的.这与实际差别较大,过高估计了干缩应力.应采用符合实际情况的非线性应力应变关系计算干缩应力.

5 结 语

本文综述了混凝土干缩及其干缩应力研究的现状.讨论了干缩机理以及描述干缩的几种理论,介绍了干缩应力研究在混凝土浇注块、混凝土材料的表面修复、高性能混凝土等方面的运用.讨论了混凝土湿度场、干缩应力的计算方法以及研究干缩应力的微观力学模型.这有助于在前人研究基础上进一步探究混凝土干缩的内在本质,在计算方法上找到有效的手段.

参考文献:

- [1] Neville A M. Properties of Concrete [M]. London: Pitman Publishing Limited, 1981. 374 ~ 395.
- [2] 蔡正咏. 混凝土性能 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979. 64 ~ 87.
- [3] 周履, 陈永春. 收缩·徐变 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994. 32 ~ 60, 72 ~ 83.
- [4] Wittmann F H, Schwesinger P. 高性能混凝土——材料特性与设计 [M]. 冯乃谦译. 北京: 中国铁道出版社, 1998. 77 ~ 101.
- [5] 黄士元. 混凝土早期裂纹的成因及防治 [J]. 混凝土, 2000 (7): 3 ~ 5.
- [6] 李家河, 刘铁军. 高强混凝土收缩及补偿措施研究 [J]. 混凝土, 2000 (2): 28 ~ 30.
- [7] Bazant Z P, Xi Y. Drying creep of concrete: constitutive model and experiments separating its mechanisms [J]. Materials and Structure, 1994, 27: 3 ~ 14.
- [8] Gardner N J, Zhao J W. Creep and shrinkage revisited [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90 (3): 236 ~ 246.
- [9] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土的收缩 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990. 2 ~ 13, 67 ~ 71, 97 ~ 118.
- [10] Bazant Z P. Mathematical models for creep and shrinkage of concrete [A]. In: Bazant Z P, Wittmann F H eds. Creep and shrinkage in concrete structure [C]. New York: John Wiley & Sons 1982. 163 ~ 256.
- [11] Bazant Z P, Wu S T. Rate type creep law of aging concrete based on maxwell chain [J]. Materials and Structure (RILEM, Paris), 1974, 7 (37): 45 ~ 60.
- [12] Man Yop Han, Lytton R L. Theoretical prediction of drying shrinkage of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7 (4): 204 ~ 207.
- [13] Torrenti J M, Granger L, Dirny M, et al. Modeling concrete shrinkage under variable ambient conditions [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96 (1): 35 ~ 39.
- [14] Majorana C E, Vitaliani R. Numerical modeling of creep and shrinkage of concrete by finite element method [A]. In: Bicanic N, Mang H eds. Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structure, Proceedings of SCI-C Second International Conference Held in Zell am See [C]. Austria, 1990. 773 ~ 784.
- [15] 牛焱洲, 涂传林. 混凝土浇注块的湿度场与干缩应力 [J]. 水力发电学报, 1991 (2): 87 ~ 95.
- [16] 王同生. 混凝土结构的随机温度应力 [J]. 水利学报, 1985 (1): 23 ~ 31.
- [17] 袁迎曙. 钢筋混凝土结构局部补强的收缩应力分析 [J]. 土木工程学报, 1996, 29 (1): 33 ~ 40.
- [18] Rahman M K, Baluch M H, Al-Gadhib A H. Modeling of shrinkage and creep stresses in concrete repair [J]. ACI Materials Journal, 1999, 96 (5): 542 ~ 549.
- [19] Asad M, Baluch M H, Al-Gadhib A H. Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems [J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49 (181): 283 ~ 293.
- [20] Shimomura T, Maekawa K. Analysis of the drying shrinkage behaviour of concrete using a micromechanical model based on the micropore structure of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49 (181): 303 ~ 322.
- [21] Granger L, Torrenti J M, Acker D. Thoughts about drying shrinkage: experimental results and quantification of structural drying creep [J]. Materials and Structures, 1997, 30 (12): 588 ~ 598.
- [22] Khan A A, Cook W D, Mitchell D. Creep, shrinkage, and thermal strains in normal, medium, and high-strength concrete during hydration [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94 (2): 156 ~ 163.
- [23] Tazawa E, Miyazawa S. Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials [J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49 (178): 15 ~ 22.
- [24] Whiting D A, Detwiler R J, Lagergren E. Cracking tendency and drying shrinkage of silic fume concrete for bridge deck application [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97 (1): 71 ~ 77.
- [25] Lim S N, Wee T H. Autogenous shrinkage of ground-granulated blast-furnace slag concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97 (5): 587 ~ 593.
- [26] Benthia N, Yan C. Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97 (4): 432 ~ 437.
- [27] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. 298 ~ 305.
- [28] 王铁梦. 建筑物的裂缝控制 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 17 ~ 34.

(收稿日期: 2001-04-27 编辑: 熊水斌)

