

水泥混凝土的塑性收缩及聚丙烯纤维阻裂增韧机理探讨

亢景付

(天津大学建工学院,天津 300072)

[摘要] 本文介绍了水泥混凝土早期塑性收缩的发展过程,约束状态下塑性收缩变形及收缩应力的量测方法,聚丙烯纤维的尺寸和掺量对改善塑性收缩裂缝的影响,并尝试着对聚丙烯纤维阻裂增韧的机理进行了初步探讨。

[关键词] 水泥混凝土; 塑性收缩; 聚丙烯纤维

[中图分类号] TU528.01

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-3550(2003)01-0010-03

1 引言

脆性和塑性收缩裂缝是阻碍高强混凝土在工程上广泛应用的两大因素,近年来围绕如何改善高强混凝土的脆性和减少塑性收缩裂缝的科学研究如火如荼,取得了一大批有应用价值的科研成果,其中最具有代表性的是钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土。

相比之下,钢纤维混凝土的研究比较深入,无论从增强增韧机理,制作工艺、技术特性还是工程应用,现在都有比较成熟完善的理论甚至施工操作规程。聚丙烯纤维混凝土在我国的应用是近几年的事情,虽然其有效抑制塑性开裂,改善抗冲磨、抗冲击的性能已被人们所认识并开始在地面、墙面、桥梁和地下工程中推广应用,但对聚丙烯纤维混凝土阻裂增韧机理却知之甚少,很难从国内所发表的刊物中找到有关机理性研究的技术文献。本文在总结分析国外有关研究成果^[1~8]的基础上,尝试着对聚丙烯纤维混凝土阻裂增韧机理进行初步的探讨,目的在于抛砖引玉,使聚丙烯纤维混凝土的研究更加深入和完善。

2 研究意义

虽然几百年前人们就知道用添加纤维(麻刀)的方法来提提高室内抹灰的抗裂性能,但至今饰面砂浆的裂缝问题仍未得到有效解决,如果注意观察周围楼房的干粘石饰面和建筑涂料饰面,随处可见纵横交错的细小裂纹。这些裂纹不仅直接影响建筑装饰的美观,而且影响饰面的耐久性和使用寿命。近年来高性能混凝土得到了快速发展与应用,但人们发现,以低水胶比、高胶凝材料和超细矿物掺合料、大坍落度为基本特征的高性能混凝土,不仅存在备受关注的自收缩问题,而且塑性开裂出现的时间比常规混凝土还要早^[1]。聚丙烯纤维能显著改善砂浆和混凝土的早期塑性开裂和抗冲磨、抗冲击的性能,但作用机理是什么?聚丙烯纤维的长度、用量及表面形态对改善塑性裂缝有何影响和规律?在混凝土材料耐久性问题越来越被重视的今天,开展对塑性收缩机理和改善方法的研究显然具有重要的现实意义。

3 水泥混凝土的塑性收缩

塑性收缩裂缝起源于混凝土的体积收缩。所谓塑性收缩是指混凝土在完全凝结硬化前的半流态或塑性阶段所产生的

收缩,根据收缩原因和时间的不同,可将塑性收缩划分为以下四个阶段^[2]。

I:塑性沉降阶段(Plastic Settlement)。新拌混凝土的固体颗粒之间完全被水所充满,浇筑后固体颗粒下沉,水分上升,在混凝土表面形成泌水薄层。这一阶段混凝土的体积变化一般很小。

II:主要塑性收缩阶段-泌水收缩阶段(Bleeding Contraction)。混凝土表面水在热、风的作用下逐渐蒸发,当水分蒸发速度大于泌水速度时,混凝土出现体积收缩。这一收缩贯穿于凝结硬化的整个过程,通常认为是由于水分蒸发使毛细管压力增大所致。该阶段为主要塑性收缩阶段,收缩值可大于数千微应变。

III:自收缩阶段(Autogeneous Shrinkage)。随着水泥水化反应的进行,水化产物形成并包裹和填充固体粒子之间原来为水所充满的空间,水化反应使无水的水泥矿物变成水化产物,同时伴随着水化热的释放和绝对体积的化学减缩。在这个阶段中,塑性沉降和泌水收缩逐渐减弱,自收缩逐渐发展。虽然化学减缩最大值可达水泥与水总体积的8%~10%^[3],但在塑性阶段自缩量并不大,通常小于几百个微应变。混凝土的自收缩主要发生在凝结硬化以后。

IV:次要塑性收缩阶段(Secondary Plastic Shrinkage)。此阶段混凝土开始硬化,水泥水化速度减慢,塑性收缩逐渐停止,混凝土强度开始增长。

通常观察到的塑性收缩是上述塑性沉降、泌水收缩和自收缩的总和,当塑性收缩受到来自混凝土内部和外部的约束时就会产生拉应力,进而导致混凝土开裂。

4 约束状态下塑性收缩与收缩拉应力的量测方法

塑性收缩通常会受到内部和外部两种约束,内部约束来自粗细骨料及其所形成结构骨架,约束应力一部分在内部相互平衡,一部分做功形成混凝土内部为数众多的微裂缝。外部约束来自基础如路面、墙体或老混凝土。约束的结果是混凝土表面出现塑性收缩裂缝。

由于混凝土尚处于塑性阶段,应力量测非常困难,因而这方面的资料很少。Kovler^[4]设计了一种用于量测单轴约束状态下混凝土塑性收缩应力的试验装置,骨料最大粒径可为25mm。其基本思路是,成型两个尺寸与材料完全相同的哑铃

[收稿日期] 2002-07-01

形试件,一个用于量测单轴约束状态下塑性收缩应力,另一个用于量测自由状态下塑性收缩变形。试件长 1000mm,中间段断面尺寸为 76.2mm×76.2mm,端部为 203mm×76.2mm,端部与中间段通过半径为 40mm 的圆弧连接,试验装置的示意图如图 1 所示。

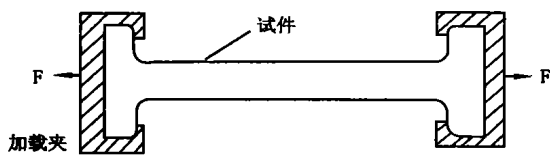


图 1 试件及加载夹

单轴约束的模拟方法是,首先根据试件长度设定一个限制临界值 $5\mu\text{m}$,试件浇筑后的塑性变形监测由计算机控制,当收缩变形量达到 $5\mu\text{m}$ 时,通过试件端部的加荷装置平稳施加拉力,使试件恢复到原来的长度。试件的塑性变形继续发展再次达到 $5\mu\text{m}$ 时,再施加拉力使试件恢复到原来的长度。如此反复数次直至试件断裂。从而得出试件断裂时的拉应力和约束收缩值。

通过把自由状态下与单轴约束状态下试件收缩的结果进行比较,即可计算出约束状态下的徐变应变,如图 2 所示。约束收缩值等于变形恢复次数与限制临界值的乘积。这样,任意时刻的弹性变形就等于徐变变形与收缩变形之和。据报道,该装置的试验结果重演性很好,徐变和收缩的误差小于 10%,收缩应力的误差小于 5%。

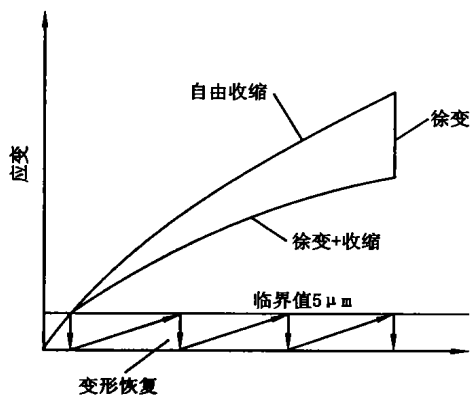


图 2 塑性收缩与徐变变形

Altoubat^[1]等人用这种装置研究了普通混凝土、掺硅粉的高性能混凝土、钢纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土的塑性变形特性,他们发现:

①自由收缩状态下,素混凝土试件在浇筑后的几个小时内由于水化热的缘故既无收缩也无膨胀,然后进入快速收缩阶段,50 小时后收缩速度减慢,当水灰比为 0.5、0.4 和 0.32 时,50 小时时的塑性收缩分别 $100\mu\epsilon$ 、 $125\mu\epsilon$ 和 $160\mu\epsilon$,是断裂时的 46.8%、50.4% 和 76.2%,说明随着水灰比的减小,塑性收缩速度加快。

②自由收缩状态下,纤维的掺入对混凝土的塑性收缩影响很小。钢纤维的影响几乎为零,聚丙烯纤维的掺入则使塑性收缩略有增加。

③在约束状态下,混凝土的水灰比越低,试件开裂的时间越早。钢纤维的掺入有助于延缓试件的开裂时间,聚丙烯纤维的掺入则表现在使试件的拉伸徐变有所增大从而减小早期收

缩应力。

④收缩变形受到约束导致拉应力的产生和发展,拉应力的产生和发展又使试件产生徐变,徐变是混凝土塑性变形的重要组成部分,其作用是松弛收缩拉应力。无论水灰比大小如何,试件开裂时的约束收缩与自由收缩的比值都在 0.5 左右。也就是说,徐变变形使试件抵抗开裂的能力提高了一倍。

⑤塑性收缩应力的大小是评价试件开裂的重要指标但不是唯一指标。收缩应力的发展过程对塑性开裂的时间具有重要影响。试验发现,水灰比为 0.32 和 0.50 的两个试件,在浇筑后 70 小时的约束收缩应力基本相同,并且前者的抗拉强度高于后者,但前者在 70 小时出现开裂,而后者则在 150 小时后才出现开裂。经分析发现,两者在浇筑后 24 小时内的收缩应力发展过程具有明显区别,前者由于水灰比小,早期收缩应力发展快,24 小时已达 1.0MPa,而后者由于水灰比大,早期收缩应力发展慢,24 小时仅为 0.30MPa。

⑥在评价混凝土早期的收缩、徐变和塑性开裂时,养护方法具有重要意义。表面密封养护既不能消除早期塑性收缩,也不能提高纤维对塑性收缩和徐变的改善作用,相反还会增加在密封养护后的干燥过程中发生开裂的危险,干湿交替的养护方法可显著降低收缩应力峰值的出现时间,使塑性开裂的时间得以延迟,还可减小养护费用,便于实际工程施工。干湿交替的养护方法对塑性收缩应力发展过程的影响如图 3 所示。

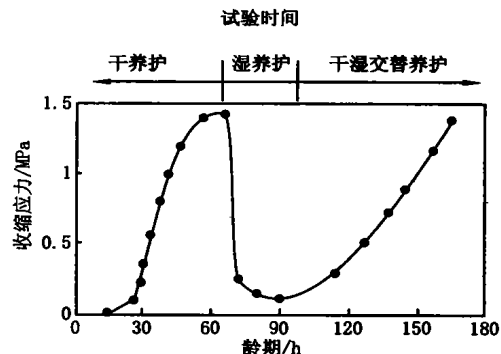


图 3 干湿交替的养护方法对收缩应力的减缓作用

5 聚丙烯纤维对塑性收缩的改善

聚丙烯纤维能显著减少塑性收缩裂缝是大家公认的事实。Banthia 等人^[5]用高强混凝土板(尺寸为 980mm×95mm×40mm)模拟约束条件,在板上浇筑最大骨料粒径 10mm、厚度为 60mm 的混凝土薄层,来研究聚丙烯纤维的长度和掺量的影响。试验选用四种纤维($l/d=19/15$ 、 $25/15$ 、 $25/38$ 、 $50/63$,长度 l 的单位为 mm,等效直径 d 的单位为 0.01mm),四个体积掺量(0.1%、0.3%、0.5%、0.7%)。试件成型后立即放入试验箱内,试验箱的温度、湿度和风速由计算机控制。连续观察和记录裂缝出现的时间、顺序、发展过程、以及每条裂缝位置、宽度和长度。他们发现,裂缝面积 A_c 和最大裂缝宽度 W_{max} 与纤维的长径比 l/d 成反比,即:

$$A_c = \alpha(l/d) \quad W_{max} = \beta(l/d)$$

但比例系数 α 和 β 随纤维掺量的不同而不同。单位体积内纤维的总表面积 S_f 也可作为反映裂缝面积和最大裂缝宽度的参数,但它们之间是指数关系。

$$A_c = \alpha e^{-b S_f} \quad W_{max} = A e^{-B S_f}$$

比较起来,特征参数为 19/15 和 25/15 的纤维改善塑性收

缩裂缝的效果更好些,体积掺量为 0.7% 的 50/63 纤维可将大于宽度为 1mm 的裂缝减小至 0.40mm,而同样掺量的 19/15 纤维则可将宽度大于 1mm 的裂缝完全消除。

6 聚丙烯纤维改善塑性收缩裂缝的机理

Kejin Wang^[2]等人在研究聚丙烯纤维改善塑性收缩裂缝的机理时,考察了不同纤维掺量的水泥浆试件的累计水分损失和孔隙结构,试件的尺寸为 100mm×100mm×8mm,水灰比为 0.55,成型时底部铺在砂纸上模拟约束条件。试件置于温度 40℃、风速 3km/h~5km/h、相对湿度 18% 的环境中。他们发现,掺入纤维后试件的累计水分损失比不掺时要小,而且孔隙结构也出现了明显的变化。与不掺纤维的试件相比,孔隙结构中多了一组直径较大的孔。并且纤维掺量越大,较大毛细孔的数量越多。他们认为,可能是试件成型后在聚丙烯纤维表面形成了吸附水膜,聚丙烯纤维的存在堵塞了渗水通道或使渗水通道的曲折性增加,从而使累计水分损失减小和较大毛细孔数量的增多。一方面聚丙烯纤维使试件的韧性增强,另一方面较大毛细孔使毛细孔压力减小,二者的综合作用使聚丙烯纤维混凝土表现出显著的抗塑性收缩裂缝的能力。

7 小结

塑性收缩是水泥基材料的一个老问题,同时也是至今尚不能从理论上完全解释清楚的问题。在混凝土材料耐久性问题越来越被重视的今天,开展对塑性收缩机理和改善方法的研究显然具有重要的现实意义。由于国内这方面的研究资料较少,本文介绍了国外的一些研究方法和研究成果,希望能对我们的研究工作有所启迪和帮助。

[参考文献]

[1] Salah A. Altoubat and David A. Lange, Creep, Shrinkage, and Crac-

king of Restrained Concrete at Early Age, ACI Materials Journal, V98, No. 4, July-August, 2001, pp. 323 - 331.

- [2] Kejin Wang, Surendra P. Shah and Pariya Phuaksuk, Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials-Influence of Fly Ash and Fibers, ACI Materials Journal, V98, No. 6, Nov. -Dec. , 2001, pp45 - 464.
- [3] Alvarado A. M. Wittmann F H. , Shrinkage and Cracking of Normal and High Performance Concrete, HPC, Materials properties and Design, 1995.
- [4] Kovler, K. , Testing System for Determining the Mechanical Behavior of Early Age Concrete under Restrained and Free Uniaxial Shrinkage, Materials and Structures, V. 27, 1994, pp. 324 - 330.
- [5] Nemkumar Bantbia and Cheng Yan, Shrinkage Cracking in Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, V. 97, No. 4, July-August 2000.
- [6] Cohen, M. D. , Olek, J. , and Dolch, W. L. , Mechanism of Plastic Shrinkage Cracking in Portland Cement-Silica Fume Paste and Motar, Cement and Concrete Research, V. 20, No. 1, 1990, pp. 103 - 119.
- [7] Kolver, K. , Jgarashi, S. , and Benture, A. , Tensile Creep Behavior of High Strength Concrete at Early Ages, Materials and Structures, V. 11, No. 1, Feb. , 1999, pp. 383 - 387.
- [8] Balaguru, P. , Contribution of Fiber to Crack Reduction of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period, ACI Masterials Journal, V. 91, No. 3. , May-June, 1994, pp. 280 - 288.
- [9] Bloom, R. , and Bentur, A. , Free and Restrained Shrinkage of Normal and High Strength Concrete, ACI Materials Journal, V. 92, No. 2, Mar-Apr, 1995, pp. 211 - 217.
- [10] Bissonnette, B. , and Pigeon, M. , Tehsile Creep at Early Ages of Ordinary, Silica Fume and Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, V. 25, No. 5, 1995, pp. 1078 - 1085.

[作者简介] 亢景付(1955-),男,工学博士,天津大学建工学院土木系。

[单位地址] 天津市天津大学新园村 1-6-403(300195)

[联系电话] 022-87894373

Shrinkage of concrete at early age and approach on the anti-cracking mechanism of polypropylene fiber

KANG Jing-fu

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper introduces the development of concrete shrinkage at early age and the monitoring methods of plastic shrinkage, tensile creep and elastic stress, as well as the influences of polypropylene dosage and characters on the concrete shrinkage cracking based on the relative studies conducted abroad. The author suggests a preliminary explanation for the anti-cracking mechanism of polypropylene fiber in the paper.

Key words: concrete; plastic shrinkage; polypropylene fiber

·上接第 6 页·

Study on the deterioration and destruction and its countermeasures for high way bridges along the coast in ShanDong

FENG Nai-qian, CAI Jun-wang, NIU Quan-lin, ZHANG Shu-he

(Tsinghua university, civil engineering department, Beijing 100084, China)

Abstract: The high way bridges along the coast in ShanDong have been wrecked by neutralization, freezing and thawing, chloride attack and sulfate attack during ten years. The deterioration is accelerated because the strength grade of concrete is too low, depth of cover too thin, and drain off water unsuitable. The main coutermeasures are durable design for concrete construction

Key words: chloride attack and sulfate attack; freezing and thawing; neutralization; cover; durable