

隧道聚丙烯纤维混凝土抗渗性能分析及试验比较

向阳开¹, 蓝祥雨²

(1. 重庆交通大学 土建学院, 重庆 400074; 2. 中煤国际工程集团重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘要:作为一种新型隧道防水衬砌材料,聚丙烯纤维混凝土的抗渗研究大多还仅局限于抗渗机理的定性解释上。为进一步揭示其抗渗性能,结合断裂力学原理和细观结构的力学分析,推导出了混凝土内部裂纹处的纤维闭合力及其应力强度因子,提出了纤维对张开型裂纹扩展的阻碍效应解析式,并在此基础上,通过数值计算,对聚丙烯纤维混凝土的抗渗性能给出了合理解释;另一方面,为将其与传统的微膨胀混凝土的抗渗性能进行比较,开展了 4 组不同类型混凝土的抗渗性能试验,通过比较发现,工程中常用掺量的聚丙烯纤维混凝土的抗渗性能优于微膨胀混凝土,而合理双掺(聚丙烯纤维和微膨胀剂)可使混凝土的抗渗性能达到最佳。

关键词:聚丙烯纤维;微膨胀剂;混凝土;抗渗;断裂

中图分类号: TQ172.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)05-0114-05

Analysis of Impervious Performance about Tunnel Polypropylene Fiber Concrete and the Experimental Comparison

XIANG Yang-kai¹, LAN Xiang-yu²

(1. Chongqing jiaotong university, Chongqing, college of civil engineering & architecture, 40074, P. R. China;
2. Sino-coal international engineering group, chongqing design & research institute, 400016, P. R. China)

Abstract: Recently, most impermeability studies of polypropylene fiber concrete, as a new sort of tunnel lining waterproof material, are limited to the impervious mechanism and unable to be satisfied with the engineering need. On the basis of fracture mechanics and the micro-structure mechanics, the resistance of fiber to the crack extension inside concrete and its SIF were deduced, the analytical formula of fiber resistance effect to the opening mode crack extension was presented as well. Meanwhile, the impervious performance of polypropylene fiber concrete was explained reasonably by the numerical calculation of the resistance effect. On the other hand, for comparing the impervious performance of polypropylene fiber concrete with that of UEA concrete, the impervious performance experiments of four groups of different types of concrete were carried out, it is presented that the former is superior to the latter. More than that, adding double polypropylene fiber and UEA to the concrete with proper proportion will make the impervious performance much better.

Key words: polypropylene fiber; UEA; concrete; impervious; cracking

随着公路等级的不断提高,隧道建设的数量也越来越大,特别是西南省份等山岭重丘地区,隧道几乎成了高速公路不可或缺的组成部分。作为 1 个长

期困扰工程界的问题之一,如何有效地进行隧道抗渗也就成为更加紧迫的任务。

普通混凝土抗渗能力低的根本原因在于其内部

收稿日期:2010-03-28

作者简介:向阳开(1964-),男,副教授,博士,主要从事桥梁隧道等工程结构及材料的力学性能分析研究,
(E-mail) xiangyangkai@163.com。

本身存在着许多毛细孔道和微裂缝等缺陷,为水提供了渗漏通道,同时,在地下水等产生的压力作用下,这些微裂缝还将继续扩展,甚至导致混凝土开裂^[1]。为了提高混凝土的抗渗性能,以往工程中广泛采用的办法是在混凝土中掺加微膨胀剂^[2-4],近年来聚丙烯纤维作为外掺材料更得到了越来越多的应用^[5]。目前,对聚丙烯纤维混凝土和微膨胀混凝土的抗渗机理进行研究的较多,也取得了不少成果^[6-9]。但是,聚丙烯纤维混凝土作为一种新型隧道抗渗材料,对其抗渗能力的定量研究却还十分缺乏,主要体现在聚丙烯纤维的阻裂作用大小及其影响因素、合理的聚丙烯纤维掺量、以及与传统的微膨胀混凝土的抗渗能力优劣之比较等方面都还不甚明了。这种研究的缺乏不仅造成了理论上的不足,与聚丙烯纤维混凝土的应用相比,也已形成了滞后,直接影响了其在工程上的合理使用。鉴于此,结合细观结构的力学分析和断裂力学原理,推导了纤维对张开型裂纹扩展的阻碍效应解析式,并结合数值计算对聚丙烯纤维混凝土的抗渗性能作出了合理解释。同时,为了揭示聚丙烯纤维混凝土与微膨胀混凝土之间抗渗性能优劣的关系,还分别开展了掺加有微膨胀剂、不同掺量的聚丙烯纤维、双掺微膨胀剂和聚丙烯纤维的混凝土的抗渗性能试验。

1 基于内部裂纹处反向应力场的聚丙烯纤维阻碍效应分析

由断裂力学可知,I型裂缝极易导致构件的低应力断裂,实际构件中即使存在复合裂缝,I型裂缝也常常占有主导作用。因此,为研究方便而又不失一般性,可采用I型裂纹来研究纤维的阻裂机理。

从水的渗漏通道角度来看,聚丙烯纤维混凝土的抗渗能力就表现为聚丙烯纤维抑制混凝土裂纹扩展的能力。事实上,张开型裂纹的扩展实际上是驱动作用 K_I 和抑制作用 K'_I 2 个方面共同作用的结果。为研究聚丙烯纤维对裂纹扩展的阻碍,可引用阻碍效应^[10]的形式来表达 K_I 和 K'_I 共同作用结果:

$$\phi_I = (K_I - K'_I) / K_I \quad (1)$$

1.1 力学模型的建立

针对聚丙烯纤维混凝土,假定在无限宽纤维混凝土板中存在一穿透裂纹,板体受单向拉伸(拉应力 σ_0),且纤维混凝土板足够薄,即使纤维混凝土板处于平面应力状态,有 N 根纤维穿过裂纹,第 i 根纤维与裂纹方向呈 θ_i 角。纤维的作用相当于对裂缝面上施加了 N 对单位厚度上的集中力 P_i ,由于纤维与混凝土的分离界面很小,可认为集中力 P_i 正好作用在裂缝面上。由此可将此具有穿透裂缝的无限宽纤

维混凝土板的受力状态分解为单向拉伸和集中力 P_i 作用之和,即其力学模型如图 1 所示。

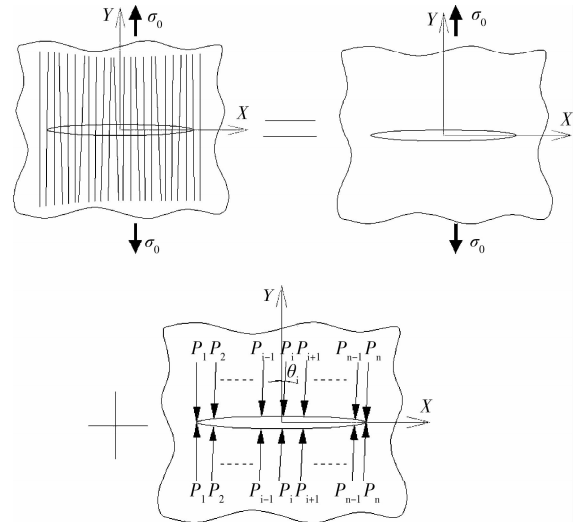


图 1 具有穿透裂缝的无限宽纤维混凝土板单向拉伸示意图

此时,拉应力 σ_0 产生的应力强度因子即 $K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a} = E_m \epsilon_0 \sqrt{\pi a}$,而纤维施加的 N 对集中力 P_i 将对裂缝产生一个与拉应力 σ_0 相反的应力强度因子,即 K'_I 。式中, E_m 为混凝土弹性模量, ϵ_0 为相应于 σ_0 的应变, a 为裂纹半宽。

1.2 内部裂纹处纤维形成的应力强度因子 K'_I

具有中心穿透裂纹的无限板,在其裂纹面上作用一对闭合力(见图 2)时,裂纹右端 A 的应力强度因子为:

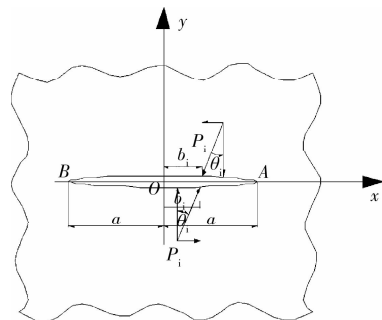


图 2 中心穿透裂纹面上作用一对闭合力 P_i

$$K'_{IA} = \frac{P_i \sin \theta_i}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{\frac{a+b_i}{a-b_i}} \quad (|b_i < a|) \quad (2a)$$

式中, b_i 为裂纹中心距第 i 根纤维中点距离; a 为裂纹半宽。

裂纹左端 B 的应力强度因子为:

$$K'_{IB} = \frac{P_i \sin \theta_i}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{\frac{a-b_i}{a+b_i}} \quad (|b_i < a|) \quad (2b)$$

由叠加原理, N 根纤维对裂纹表面施加的 N 对闭合力 P 产生的应力强度因子为每对闭合力 P_i 产

生的应力强度因子之和,即:

$$K'_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \sum_{i=1}^N P_i \sin \theta_i \sqrt{\frac{a - |b_i|}{a + |b_i|}} \quad (|b_i| < a) \quad (3)$$

1.3 纤维闭合力 P_i

从式(3)可知,欲求 K'_I 则需求得纤维对裂纹面施加的单位厚度集中力 P_i , P_i 等于纤维在裂纹面处断面所受拉力的大小,即:

$$P_i = \sigma_i \pi r_0^2 \quad (4)$$

式中, σ_i 为纤维的轴向拉应力; r_0 为纤维半径。

从纤维混凝土中取出一半径为 R 的圆柱体(见图 3),其中沿中心轴含有一根半径为 r_0 ,长为 $2L$ 的纤维,设纤维的轴向拉应力为 σ_f ,纤维与混凝土界面的剪应力为 τ_e 。

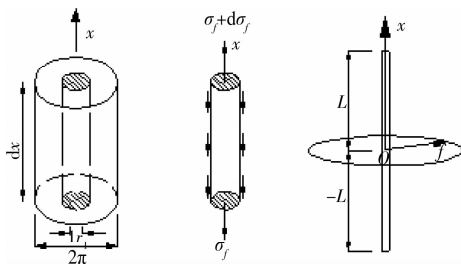


图 3 纤维混凝土单元及坐标示意图

由剪滞法原理^[11-12],可得到平衡方程:

$$(\pi r_0^2) \sigma_f + (2\pi r_0 dx) \tau_e = (\pi r_0^2) (\sigma_f + d\sigma_f) \quad (5)$$

对上式两边取关于 x 的微分后,根据边界条件: $x = L$ 和 $x = -L$ 时, $\sigma_f = 0$ (聚丙烯纤维横截面积很小,且往往由于应力集中使纤维末端与基体界面脱粘,因此可以忽略纤维末端的轴向应力 σ_f),解得:

$$\sigma_f = E_f \epsilon_0 \{ 1 - \text{ch}(nx/r_0) / \text{ch}(ns) \} \quad (6)$$

$$n^2 = \frac{4G_m}{\ln(\pi/v_f) E_f}; s = L/r_0.$$

式中, E_f 为纤维弹性模量; ϵ_0 为纤维混凝土材料外加应变; G_m 为混凝土剪切模量; v_f 为纤维体积掺量。

设裂纹面距第 i 根纤维中点距离为 c_i ,则第 i 根纤维对裂缝面施加的集中力为:

$$P_i = E_f \epsilon_0 \{ 1 - \text{ch}(nc_i/r_0) / \text{ch}(ns) \} \pi r_0^2 \quad (7)$$

当纤维中点位于裂缝面上时,纤维对裂缝面施加的单位集中力为:

$$P_0 = E_f \epsilon_0 [1 - \sec h(ns)] \pi r_0^2 \quad (8)$$

1.4 聚丙烯纤维阻碍效应数值计算

为简单起见,假设裂缝范围内的 N 根 ($N = [2a/R] + 1$) 纤维均匀分布,且纤维在混凝土中的分布呈正方形,这时纤维的体积含量可以认为等于纤维的面积含量,即 $v_f = r_0^2/R^2$, $R = \sqrt{r_0^2/v_f}$ 。式中, r_0 为纤维半径, R 为纤维间距。

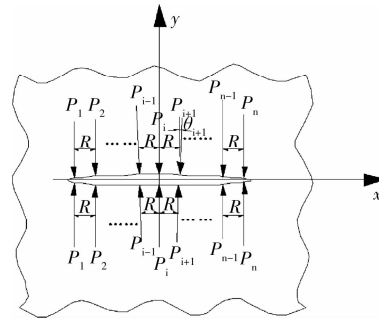


图 4 裂纹面内含有偶数根纤维

当 N 为偶数时(见图 4), $b_i = (2i - 1)R/2$,有:

$$K'_I = \frac{2\sqrt{\pi} r_0^2}{R\sqrt{a}} \sum_{i=1}^{N/2} \sin \theta_i E_f \epsilon_0 \{ 1 - \text{ch}(nb_i/r_0) / \text{ch}(ns) \} / \sqrt{1 - ((2i-1)/2)^2 (R/a)^2} \quad (9a)$$

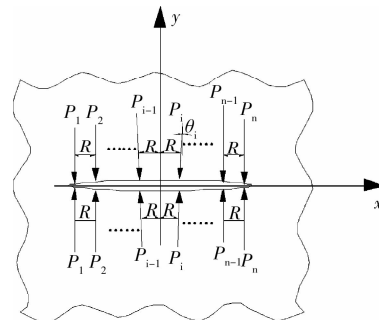


图 5 裂纹面内含有奇数根纤维

当 N 为奇数时(见图 5), $b_i = iR$ 。

$$K'_I = \frac{\sqrt{\pi} r_0^2}{R\sqrt{a}} \{ \sum_{i=1}^{(N-1)/2} \sin \theta_i E_f \epsilon_0 \{ 1 - \text{ch}(nb_i/r_0) / \text{ch}(ns) \} (2 / \sqrt{1 - i^2 (R/a)^2} + 1) \} \quad (9b)$$

将式(9)和式(2)代入式(1)得纤维对基体裂纹扩展的阻碍效应解析式为:

N 为偶数时:

$$\Phi_I = 1 - \frac{2E_f r_0^2}{E_m R a} \sum_{i=1}^{N/2} \sin \theta_i \{ 1 - \text{ch}(nb_i/r_0) / \text{ch}(ns) \} / \sqrt{1 - ((2i-1)/2)^2 (R/a)^2} \quad (10a)$$

N 为奇数时:

$$\Phi_I = 1 - \frac{E_f r_0^2}{E_m R a} \{ \sum_{i=1}^{(N-1)/2} \sin \theta_i \{ 1 - \text{ch}(nb_i/r_0) / \text{ch}(ns) \} (2 / \sqrt{1 - i^2 (R/a)^2} + 1) \} \quad (10b)$$

根据实验所用材料,混凝土弹性模量 $E_m = 20$ GPa,混凝土剪切模量 $G_m = 8$ GPa;聚丙烯纤维弹性模量 $E_f = 3793$ MPa,半径 $r_0 = 0.024$ mm,长度 $2L = 19$ mm,体积掺量 $v_f = 0.01$ 。

由式(1)可知 ϕ_l 值越小,纤维对裂纹扩展的阻碍越大,裂纹扩展越困难。当纤维中点位于裂缝面上,裂纹长 20 mm 时,将上述参数代入式(10)计算得 $\phi_l = 99.6\%$;裂纹长 200 mm 时,计算得 $\phi_l = 98.2\%$;裂纹面内的纤维数量越多,其值就越小,裂纹扩展就越困难。而纤维无限靠近裂纹尖端时,由式(10)可知纤维的阻碍效应迅速增大,当纤维位于裂纹尖端时纤维的阻碍效应为无穷大。因此,聚丙烯纤维对裂纹扩展的阻碍效应主要来源于裂纹尖端处的纤维,裂纹在扩展到纤维时,将遇到极大的阻碍,裂纹要继续扩展就得增大外加应力使其绕过纤维、或拉断纤维、或拔出纤维。由于聚丙烯纤维在混凝土中数量多、纤维间距小(平均约为 0.42 mm),而裂纹每扩展到一根纤维处时都要受到极大的阻碍,裂纹要继续扩展除要增大外加应力外,裂纹的扩展方向也要发生改变,这使得混凝土中裂纹不易相互贯通。

由此可见,聚丙烯短纤维的锚固力能有效地减小应力强度因子,使裂缝扩展受阻,从而减少了混凝土中的渗水通道,提高了混凝土的抗渗能力。

2 抗渗性能对比试验及分析

聚丙烯纤维与工程上以往使用较多的微膨胀剂在理论上都能不同程度地提高混凝土的抗渗能力,但两者抗渗性能到底孰劣孰优,目前并不十分清楚;同时,聚丙烯纤维不同掺量的影响以及双掺(微膨胀剂和聚丙烯纤维)的情况如何,都尚值得研究。为此,开展了抗渗对比试验。为更具针对性,微膨胀剂和聚丙烯纤维在试验中均选用工程中常用的掺量^[13-14],即:微膨胀剂掺量为 10%,等量代替砂中的水泥用量,聚丙烯纤维掺量分别为 0.9 kg/m³ 及 1.2 kg/m³。

2.1 试验材料及试件

试验所用材料分别为:拉法基牌普通硅酸盐 42.5 级水泥、达华牌 U-818B 型膨胀剂、渠河特细沙、5~20 连续级配碎石、达华牌 NNO 高效减水剂、山东泰安砵伴牌 TB-19 单丝聚丙烯纤维;

混凝土试件设计强度为 C30,根据特细混凝土配置要求,将配合比^[15]设为:水泥:砂:石:水:减水剂=1:0.74:2.77:0.43:0.05,水泥用量 484 kg/m³。

抗渗试验共分 4 组:

A 组:掺加 UEA-H 膨胀剂(掺量为 10%,等量代替砂中的水泥用量);

B 组:掺加聚丙烯纤维(0.9 kg/m³);

C 组:掺加聚丙烯纤维(0.9 kg/m³)和 UEA-H

(掺量为 10%,等量代替砂中的水泥用量);

D 组:掺加聚丙烯纤维(1.2 kg/m³)。

2.2 试验结果分析

试验方法参照文献[16],试件在室内环境下成型 24 h 后拆模,拆模后放在水池养护至 28 d,然后进行抗渗试验。混凝土抗渗试验试件断面及渗水高度结果见图 6,试验数据见表 1。

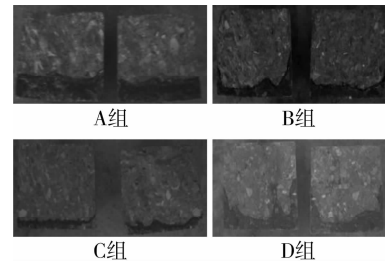


图 6 混凝土渗透比较

表 1 4 组混凝土的抗渗性能

试件名称	恒压压力/ MPa	恒压时 间/h	平均渗透高 度/mm
A 组	2.5	30	41.65
B 组	2.5	30	36
C 组	2.5	30	23.01
D 组	2.5	30	56.06

由表 1 可见,此次试验所有 4 组试件在 2.5 Mpa 的压力下恒压 30 h 均未出现渗漏,表明 4 组试件都具有较好的抗渗性能,这说明微膨胀剂和聚丙烯纤维都能在一定程度上减少混凝土内部的众多毛细孔道和微裂缝。但由于 UEA-H 使混凝土自身膨胀,故它是通过限制体(如基础、墙体等)对混凝土产生压应力,从而减少拉应力 σ_0 产生的应力强度因子 K_I 而达到减小裂缝宽度和扩展程度的;而从前面的聚丙烯纤维阻碍效应分析可知,对于掺有聚丙烯纤维的混凝土而言,当裂缝扩展到聚丙烯纤维处时将受到极大的阻碍,聚丙烯短纤维的锚固力能有效地减小应力强度因子,从而减缓了裂缝的扩展以及相互之间的贯通。即微膨胀剂和聚丙烯纤维虽都可减少混凝土中裂缝的扩展,但一个是主动的,一个是被动的;由此可知,如果要被动和主动 2 方面阻碍都能发挥,应可同时掺加微膨胀剂和聚丙烯纤维。这一推论恰好被试验结果印证:同时掺加聚丙烯纤维和 UEA-H 的混凝土(即 C 组)的抗渗能力最好。

4 组混凝土试件的抗渗性能从高到低依次为:C 组 > B 组 > A 组 > D 组。即双掺(掺加聚丙烯纤维 0.9 kg/m³ 和 10% UEA-H)的混凝土抗渗性能最好,掺加聚丙烯纤维(0.9 kg/m³)的次之,掺加 UEA-H 膨胀剂的再次之,而掺加比例为 1.2 kg/m³ 的聚丙烯纤维最差。由此可见,工程中常用掺量

的聚丙烯纤维混凝土的抗渗能力优于微膨胀混凝土,但从 D 组试验数据也可见:虽然掺加聚丙烯纤维能有效地提高混凝土的抗渗性能,但并不是掺得越多越好,过量的掺量反而会降低混凝土的抗渗能力,究其机理应是聚丙烯纤维在混凝土内分布过密,纤维之间没有足够的塑性浆体,从而增加了混凝土内部的微裂缝。

3 结语

该文对聚丙烯纤维防水混凝土的抗渗性能进行了理论分析,并通过抗渗试验揭示了聚丙烯纤维混凝土与以往工程中广泛采用的微膨胀混凝土之间抗渗性能的优劣关系,得出以下结论:

1)为研究方便而又不失一般性,聚丙烯纤维阻碍效应可表示为:

当裂纹面内含有偶数根纤维时:

$$\phi_l = 1 - \frac{2E_f r_0^2}{E_m Ra} \sum_{i=1}^{N/2} \sin\theta_i \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch}(nb_i/r_0)/\operatorname{ch}(ns)}{\sqrt{1 - \left(\frac{2i-1}{2}\right)^2 \left(\frac{R}{a}\right)^2}} \right\};$$

当裂纹面内含有奇数根纤维时:

$$\phi_l = 1 - \frac{E_f r_0^2}{E_m Ra} \left\{ \sum_{i=1}^{(N-1)/2} \sin\theta_i \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch}(nb_i/r_0)/\operatorname{ch}(ns)}{2/\sqrt{1 - i^2 \left(\frac{R}{a}\right)^2 + 1}} \right\} \right\}.$$

2)聚丙烯纤维的对裂纹扩展的阻碍效应主要来源于裂纹尖端处的纤维。

3)工程中常用掺量的聚丙烯纤维混凝土的抗渗能力优于微膨胀混凝土,但双掺适量膨胀剂和聚丙烯纤维的效果最好。

4)过量的聚丙烯短纤维掺量反而会降低混凝土的抗渗能力,以每立方米混凝土中掺加 0.9 kg 左右的聚丙烯短纤维为宜。

参考文献:

- [1] 李蓉,李伟. 大伙房输水工程长大隧洞衬砌结构自防水混凝土技术研究[J]. 中国建筑防水, 2010(2): 27-32.
LI RONG, LI WEI. Study of self-waterproofing concrete technology in lining structure of the long and big tunnel of Dahuofang water conveyance project[J]. China Building Waterproofing, 2010(2): 27-32.
- [2] 游宝坤,赵顺增,韩立林,等. 补偿收缩混凝土在奥运工程中的应用[J]. 中国建筑防水, 2008(7): 13-16.
YOU BAO-KUN, ZHAO SHUN-ZENG, HAN LI-LIN, et al. Application of shrinkage compensated concrete in Olympic projects [J]. China Building Waterproofing, 2008(7): 13-16.
- [3] LI HUO-XIANG, TANG CHU-NAN, XIONG JIAN-

MIN, et al. The impermeability mechanism of self-compacting water proof concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2005, 20(1): 121-125.

- [4] GERARD B, BREYSSE D, AMMOUCHE A, et al. Cracking and permeability of concrete under tension[J]. Materials and Structures, 1996, 29(3): 141-151.
- [5] ANKIT BHARGAVA, NEMKUMAR BANTHIA. Permeability of concrete with fiber reinforcement and service life predictions[J]. Materials and Structures, 2008, 41(2): 363-372.
- [6] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Modelling creep and shrinkage of concrete by means of effective stresses[J]. Materials and Structures, 2007, 40(6): 579-591.
- [7] LU HAI-LIN, ZHANG MING-YUAN, LI ZHONGXIAN. Experimental study on the effect of steel-fibre in concrete thick cap[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2007, 22(2): 371-375.
- [8] BINDIGANAVIL V, BANTHIA N. Generating dynamic crack growth resistance curves for fiber-reinforced concrete[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(2): 112-122.
- [9] BANTHIA N, GUPTA R. Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays[J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 567-579.
- [10] Malika Bongué Boma, Maurizio Brocato. A continuum model of micro-cracks in concrete [J]. Continuum Mechanics and Thermodynamics, 2010, 22(2): 137-161.
- [11] ELKADI A S, M VAN MIER J G. Experimental investigation of size effect in concrete fracture under multiaxial compression [J]. International Journal of Fracture, 2006, 140(1/2/3/4): 55-71.
- [12] FERREIRA L E T. Fracture analysis of a high-strength concrete and a high-strength steel-fiber-reinforced concrete[J]. Mechanics of Composite Materials, 2007, 43(5): 479-486.
- [13] PAN HAO, LINGNU, ZHANG LUO. The parameters fitting in high-strength concrete mix proportion experiment [J]. Journal of Wuhan University of Technology Materials Science Edition, 2005, 20(1): 102-103.
- [14] KHEDER G F, ASSI D K. Limiting total internal sulphates in 15 - 75 MPa concrete in accordance to its mix proportions[J]. Materials and Structures, 2010, 43(1-2): 273-281
- [15] DB 50/5028-2004. 特细砂混凝土应用技术规程[S].
- [16] JTJ/T 270—98. 水运工程混凝土试验规程[S].

(编辑 胡 玲)