

结构型钢纤维对单轴受压下混凝土渗透性及损伤的影响

丁一宁*, 朱昊, 李冬

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 利用改进的渗透试验装置,研究了混凝土(NC)单轴受压时结构型钢纤维(SF)掺量和荷载等级对其渗透系数的影响,并对数据进行拟合分析;同时还利用超声检测研究了不同荷载等级对 SF/NC 造成的损伤。分析表明: NC 单轴受压时,其渗透性与荷载等级有关,且存在阈值现象,当荷载等级大于渗透阈值时,渗透系数迅速增大。结构型 SF 的加入可以推迟渗透阈值的出现,渗透阈值随 SF 掺量的提高而增大,当掺量为 0、20、40、60 kg/m³ 时,渗透阈值分别约为 0.6、0.7、0.7、0.8。试件超声波速随荷载等级变化规律与渗透系数的变化规律有一定相似性,可以用来评价 NC 单轴受压时的渗透性能。

关键词: 结构型钢纤维;混凝土;荷载等级;阈值;超声检测

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2019)12-2942-08

Effect of macro steel fiber on permeability and damage of concrete under uniaxial compression

DING Yining*, ZHU Hao, LI Dong

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Using an improved permeation test device, the effect of macro steel fiber(SF) content and load level on the permeability of concrete(NC) subjected to uniaxial compression was studied, and the data of test were fitted and analyzed. The effect of load level on damage of SF/NC was studied by ultrasonic testing. The results indicate that the permeability of NC is related to the load level, and there exists a threshold value for the applied load level. The addition of macro SF delays the threshold value, and the threshold value increases with fiber content within a certain range. When the fiber content is 0, 20, 40 and 60 kg/m³, the threshold value is about 0.6, 0.7, 0.7 and 0.8, respectively. The effect of load level on the ultrasonic pulse velocity of NC is similar to permeability coefficient, which can be used to evaluate the permeability of NC under uniaxial compression.

Keywords: macro steel fiber; concrete; load level; threshold value; ultrasonic testing

抗渗性能作为评价混凝土(NC)耐久性的重要指标,其相关研究受到了越来越多的关注;而目前评价 NC 渗透性的标准及方法主要适用于未承受外荷载、未开裂的 NC,如渗水高度法、逐级加压法、透气法、抗渗标号法、直流电通量法和氯离子扩散法等^[1-3]。而在实际工程中,NC 结构会受到各种荷载作用,因此上述方法并不能真实反映在正常使用阶段 NC 结构的渗透性。

为了表征 NC 在荷载作用下的渗透性,国内外学者进行了一些研究:Hoseini 等^[4]发现 NC 渗透性受荷载水平影响,且存在渗透阈值现象;Banthia 等^[5-8]研究了压应力水平与 NC 渗透性的关系,发现受荷历史对渗透性影响显著;Saito 等^[9]开展了单调和循环压荷载作用于 NC 的试验,发现相对于单调压荷载,循环荷载对混凝土氯离子渗透性影响更显著,且荷载水平大于 60%后,氯离子渗透性会

收稿日期: 2018-12-20; 录用日期: 2019-01-15; 网络出版时间: 2019-03-19 17:20

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190314.004>

基金项目: 国家自然科学基金(51578109)

通讯作者: 丁一宁, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能混凝土 E-mail: ynding@hotmail.com

引用格式: 丁一宁, 朱昊, 李冬. 结构型钢纤维对单轴受压下混凝土渗透性及损伤的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2942-2949.
DING Yining, ZHU Hao, LI Dong. Effect of macro steel fiber on permeability and damage of concrete under uniaxial compression [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2942-2949 (in Chinese).

明显增大; Choinmska M. 等^[10]研究了温度及压力耦合作用下 NC 的渗透性, 发现当应力水平超过 80% 时, NC 渗透性迅速增大。李庆华等^[11]通过直接拉伸试验对超高韧性水泥基复合材料(Ultra high toughness cementitious composites, UHTCC)板预制不同宽度的裂缝研究其渗透性能, 发现 UHTCC 在微裂缝阶段具有极好的抗渗性。而结构型纤维在 NC 基体中主要起到改善裂缝形态、限制裂缝扩展、提高韧性的作用^[12-13]。NC 开裂后渗透性与裂缝形态有关^[14], 结构型纤维能够提高开裂 NC 裂缝的曲折度, 从而降低渗透系数, 且在一定范围内, 纤维掺量越高, NC 渗透性降低效果越明显^[15]。但是, 目前关于结构型纤维对单轴受压条件下 NC 渗透性影响的公开报道还相对较少。

在不同介质中, 超声波速存在明显差异, 在 NC 和空气中的传播速度分别为 4 000 m/s 和 340 m/s, 利用超声波速的变化可以反映 NC 内部微裂缝的扩展情况。超声检测作为无损探伤的常见方法, 在结构耐久性评估、建筑物检测及材料力学性能分析等方面已得到广泛应用^[16-18], 然而利用超声技术对 NC 渗透性能进行研究鲜有公开报道。

本文利用自行设计组装的试验装置, 研究了结构型钢纤维(SF)掺量、荷载等级对 NC 渗透性能的影响; 利用超声检测法测得超声波速、损伤变量随荷载等级的变化关系, 并探讨利用超声检测来评价 NC 渗透性能的可行性。

1 实验方法

1.1 原材料及试件制备

本文所采用的原材料有: 普通硅酸盐水泥(P·O42.5R); I 级粉煤灰; 石英砂(0~5 mm); 碎石(5~10 mm); 聚羧酸类高效减水剂(SP), 水胶比为 0.5, 基准配合比见表 1。所用结构型 SF(长度>30 mm 称为结构型纤维)见图 1, 物理性质见表 2, 掺量分别为 0 kg/m³、20 kg/m³、40 kg/m³和 60 kg/m³。依据 SF 掺量进行编号, 如 NC 代表素混凝土试件, CSF20/NC 代表 SF 掺量为 20 kg/m³ 的 SF/NC。

表 1 混凝土(NC)基准配合比

Table 1 Basic mix proportion of concrete(NC) kg/m ³						
Cement	Fly ash	Gravels	Sand	Water	SP	w/b
390	155	848	822	272.5	7.6	0.5

Notes: SP—Superplasticizer; w/b—Water cement ratio.

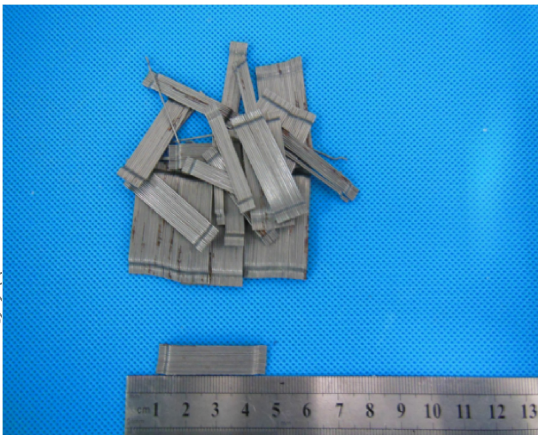


图 1 结构型钢纤维(SF)
Fig.1 Macro steel fiber(SF)

渗透试验所用试件为高为 200 mm、外径为 100 mm、内径为 50 mm 的空心圆柱, 制备过程如下: 预先浇筑 NC 板, 在饱和石灰水养护 6 天后, 再进行钻心取样(见图 2), 完成后在饱和石灰水中继续养护, 直至 28 天龄期试验开始。超声波检测及抗压强度试验所用试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm, 28 天标准养护。试验机加载速率为 0.5 MPa/s。

表 2 结构型 SF 性能参数
Table 2 Properties of macro SF

Density/(g·cm ⁻³)	Length/mm	Length-diameter ratio	Tensile strength/MPa	Mass/kg
7.85	35	65	1 345	14 500



图 2 SF/NC 空心圆柱试件制备
Fig.2 Preparation of SF/NC hollow cylinder specimens

表 3 为各组 3 个试件标准养护 28 天抗压强度平均值及标准差。可得, 当 SF 掺量为 0~60 kg/m³ 时, 结构型 SF 对 NC 的抗压强度无明显影响, 变化幅度均在 5% 以内。

表 3 SF/NC 28 天立方体抗压强度

Table 3 Compressive strength at 28 days of SF/NC

Specimen	Compressive strength/MPa	Standard deviation
NC	36.4	1.3
CSF20/NC	35.9	2.1
CSF40/NC	37.9	1.2
CSF60/NC	35.6	1.7

Note: CSF*x*/NC—SF/NC, fiber content is *x* kg/m³.

1.2 渗透试验

本试验采用改进的试验装置(图 3),通过布置水压表和荷载传感器,达到实时监控、校正所施加水压和荷载值,并利用质量传感器和 IMC 系统,实现水量数据的连续采集,渗透装置简图见图 4。具体操作如下:将试件放入渗透试验装置,加压至指定荷载等级 $\lambda(\lambda=F/F_u, F_u$ 为试件的极限压荷载),向装置内充水至水压达到 0.7 MPa,进行测试,每个荷载等级下收集渗水质量达到 10 g 终止。

根据达西定律及柱坐标下拉普拉斯方程(结合边界条件 $r=R_0, H=H_0; r=r_0, H=h_0$)可得空心圆柱试件在稳流时渗透系数的计算公式:

$$K = \frac{Q}{2\pi l(H_0 - h_0)} \ln \frac{R_0}{r_0} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数(m/s); Q 为水渗流量(m³/s); H_0 为外侧水头高度(m); h_0 为内侧水头高度(m); l 为试件高度(m); R_0 为试件的外径(m); r_0 为试件的内径(m)。



图 3 渗透试验装置
Fig. 3 Permeation equipment

1.3 超声试验

本试验测定了不同荷载等级下立方体试件的超声波速,分析并对比各组试件在不同荷载等级下超声波速的变化规律,超声波测量设备为日本 TICO 超声波检测仪,试验设备见图 5。

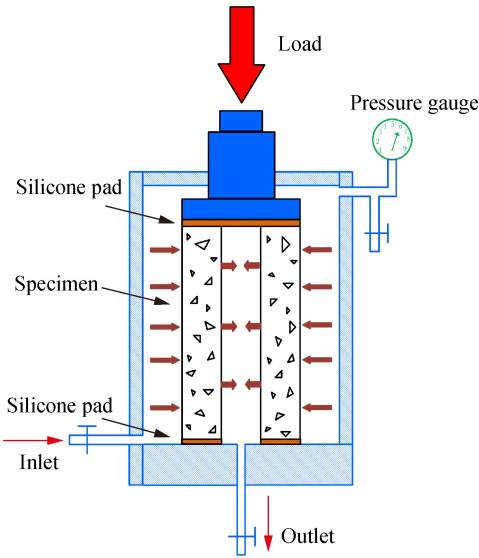


图 4 渗透装置简图
Fig. 4 Schematic diagram of permeation equipment



图 5 NC 超声测量装置
Fig. 5 Ultrasonic measurement of NC

参考损伤力学中的损伤变量 D , 可得 D 与超声波速之间的关系:

$$D = 1 - \frac{v_t^2}{v_0^2} \quad (2)$$

式中: v_0 为 NC 未受压时的超声波速; v_t 为试件在不同荷载等级下的超声波速(忽略加载过程对密度和泊松比的影响)。

通过 D 反映 NC 中微裂缝在不同荷载等级下的扩展情况, NC 初始状态损伤为 0, 破坏时损伤变量为 1^[18-19]。

2 SF/NC 试验结果

2.1 SF/NC 渗透系数

图 6 为 NC、CSF20/NC、CSF40/NC 及 CSF60/NC 试件渗透系数随荷载等级的变化曲线。可见,

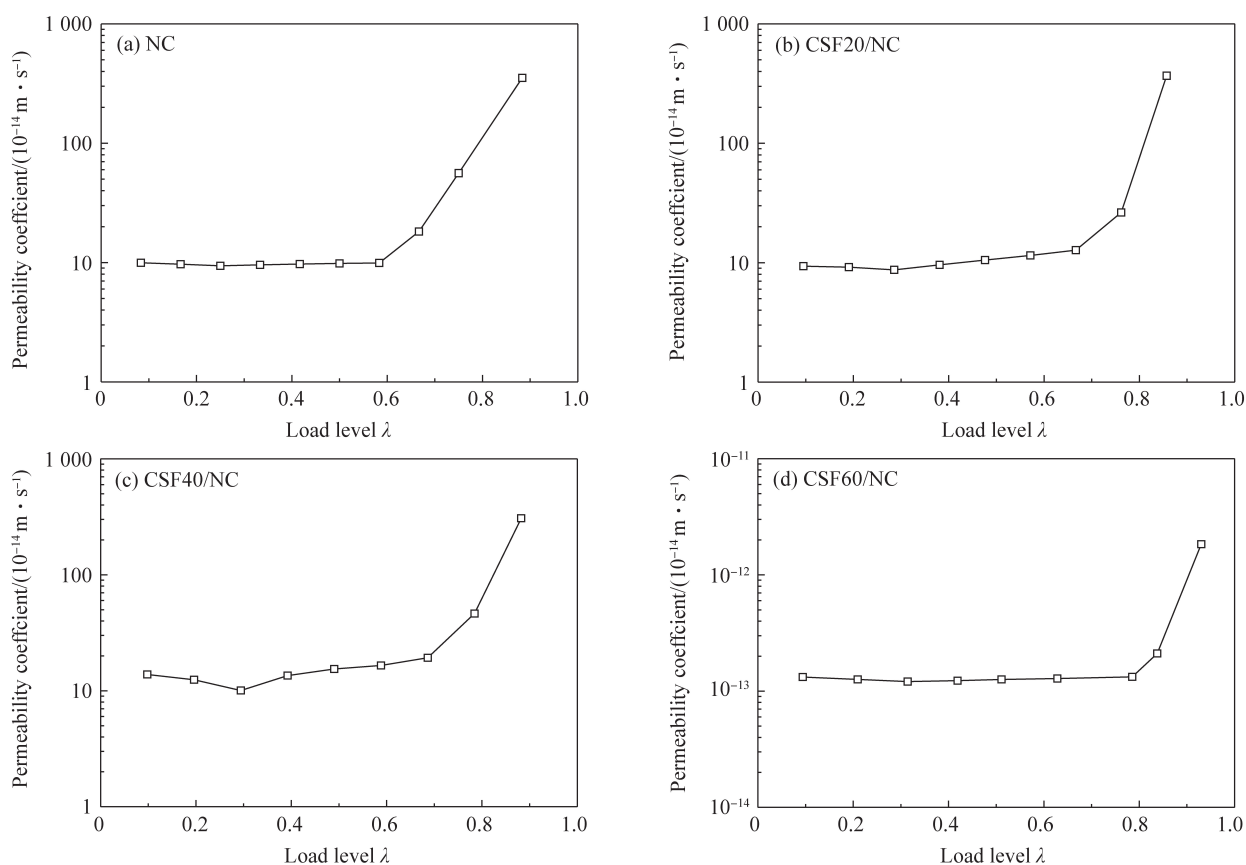


图 6 SF/NC 渗透系数随荷载等级的变化曲线

Fig. 6 Relationship between permeability coefficient and load level of SF/NC

各组试件在不同荷载等级下渗透系数的变化规律相似，均对荷载等级存在阈值，但随着 SF 掺量的变化，出现不同的阈值。

以 CSF60/NC 试件为例，分析渗透系数随荷载等级的变化规律，从图 6(d)可以看出，当荷载等级 λ 为 0.1 时，CSF60/NC 试件的渗透系数为 $1.32 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ 。当 λ 小于 0.79 时，随着 λ 的增大，CSF60 试件的渗透系数先略微减小后缓慢增大，当 λ 等于 0.30 时，渗透系数达到最小值 $1.21 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ ，但此阶段 NC 渗透系数变化幅度并不明显；当 λ 超过 0.79 后，试件的渗透系数开始迅速增大，即 CSF60/NC 试件荷载等级的阈值约为 0.80。当 λ 为 0.93 时，渗透系数为 $1.8 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ ，较 λ 为 0.1 时的渗透系数增大大约 13 倍。

不同荷载等级下 SF/NC 试件渗透系数的变化规律与其内部微裂缝的形成与扩展过程有关，NC 单轴受压应力-应变曲线如图 7 所示，主要可分为图示的 4 个阶段^[20]。在进行渗透试验时，压荷载方向垂直于渗透方向（见图 4），压荷载将促进试件中平行于荷载方向的微裂缝的进一步扩展及宏观裂缝

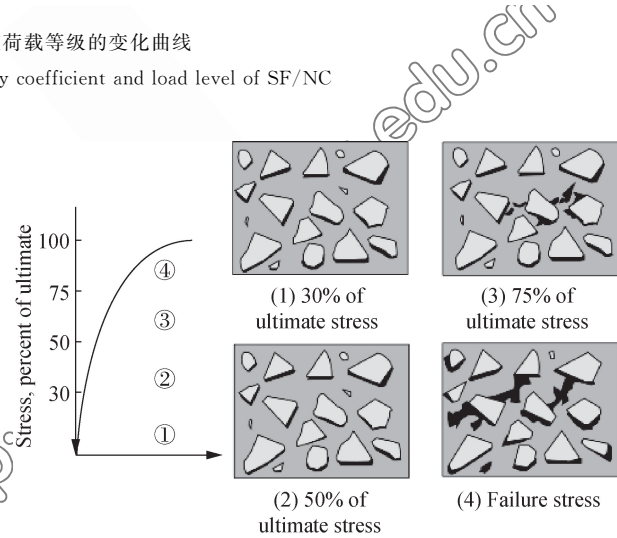


图 7 NC 单轴压缩应力-应变关系^[20]

Fig. 7 Stress-strain behavior of NC under uniaxial compression^[20]

的产生，而垂直于荷载方向的微裂缝在荷载作用下将在一定程度上被“压合”。在这两种作用的综合影响下，试件在单轴受压条件下的渗透系数呈现出了图 6 所示的变化规律。

以 NC 试件为例，分析 NC 渗透系数变化规律与其内部微裂缝扩展过程的关系。由于收缩及弹性

模量的差异,粗骨料与水泥基体之间的界面过渡区在受外荷载之前就已有薄弱区产生,当荷载等级 λ 小于30%时,界面薄弱区处于稳定状态,但在外荷载的“压合”作用下,试件渗透系数略微降低;当 λ 在30%~60%时,界面薄弱区出现微裂缝,微裂缝的发展仍较稳定,但是微裂缝的数量开始逐渐增多,尺寸也逐渐增大(此阶段基体的开裂可忽略不计)^[20],试件渗透系数缓慢增大;当 λ 大于阈值时,微裂缝继续扩展、交汇形成基体中的贯通裂缝,随着荷载的继续增加,宏观裂缝继续扩展,此时渗透系数迅速增大。

由图6可知,NC、CSF20/NC、CSF40/NC及CSF60/NC试件所对应荷载等级的渗透阈值(λ_s)分别约为0.60、0.70、0.70、0.80,说明掺加结构型SF可以推迟试件渗透阈值的出现,从而降低NC试件的渗透系数,提高其抗渗性。当掺量为0~60 kg/m³时,渗透阈值随着SF掺量的提高而增大。

2.2 SF/NC 渗透系数数据拟合分析

对各组试件渗透系数关于荷载等级的试验数据进行拟合,荷载等级低于阈值阶段采用三次函数(式3)进行拟合,拟合曲线见图8,拟合结果见表4。荷载等级高于阈值阶段采用一阶指数函数(式4)进行拟合,拟合曲线见图9,拟合结果见表5。

$$K_0 + A_1\lambda + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^3 \quad (0 \leq \lambda \leq \lambda_s) \quad (3)$$
$$Be^{-\lambda/t} + y_0 \quad (\lambda < \lambda \leq 1) \quad (4)$$

式中: K_0 的物理意义为试件未受压时渗透系数; λ_s 为阈值; A_1 、 A_2 、 A_3 、 B 、 t 、 y_0 分别为回归系数。

由图8可见,当 λ 约为0.3时,各组试件渗透系数达到最小值,但是结构型SF对低于阈值阶段

渗透系数的影响并不显著。由表4可得,当 λ 小于阈值时,渗透系数与荷载等级的相关系数 R^2 均大于0.90,此函数与试验数据拟合良好,渗透系数与荷载等级满足较好的三次函数关系。

当荷载等级 λ 大于阈值时,NC内部裂缝将进一步扩展,而结构型SF在NC基体中通过滑移作用可以起到限制裂缝扩展的作用,从而降低其渗透性。由图9可见,SF掺量越高,渗透系数越小。由表5可得,各组试件的拟合决定系数均为0.99,拟合效果良好,此函数可以用来预测荷载等级 λ 大于阈值时SF/NC渗透系数的变化规律。

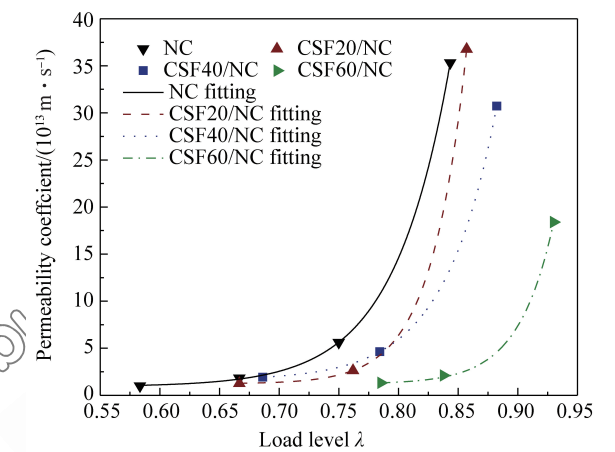


图9 SF/NC 荷载等级高于阈值阶段拟合曲线
Fig. 9 Fitting curves of SF/NC in the stage of load level higher than threshold value

表4 SF/NC 荷载等级低于阈值阶段拟合结果

Table 4 Fitting results of SF/NC in the stage of load level lower than threshold value

	$K_0/(10^{-13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_1/(10^{13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_2/(10^{13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_3/(10^{13} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	R^2
NC	1.07	-1.11	3.10	-2.45	0.93
SF20	1.06	-1.70	4.63	-2.40	0.99
SF40	1.92	-6.97	1.82	-1.18	0.93
SF60	1.11	-1.45	2.98	-1.68	0.96

Notes: K_0 —Permeability coefficient of uncompressed specimen; A_1 , A_2 , A_3 —Regression coefficient; R^2 —Coefficient of determination.

表5 SF/NC 荷载等级高于阈值阶段拟合结果

Table 5 Fitting results of SF/NC in the stage of load level higher than threshold value

	$B/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	t	$y_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	R^2
NC	5.45×10^{-20}	-0.05	9.27×10^{-14}	0.99
SF20	9.23×10^{-25}	-0.03	1.22×10^{-13}	0.99
SF40	4.06×10^{-21}	-0.04	4.06×10^{-13}	0.99
SF60	2.74×10^{-26}	-0.03	2.74×10^{-13}	0.99

Note: B , t , y_0 —Regression coefficient.

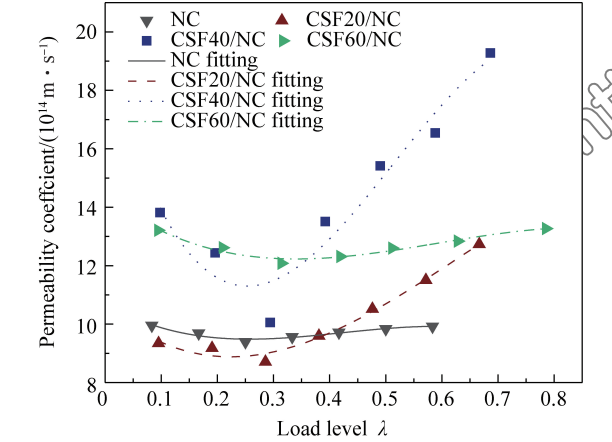


图8 SF/NC 荷载等级低于阈值阶段拟合曲线
Fig. 8 Fitting curves of SF/NC in the stage of load level lower than threshold value

2.3 SF/NC 超声波速与损伤变量

图 10 和图 11 分别为试件单轴受压过程中超声波速与损伤变量随荷载等级的变化关系, 可见荷载等级对 NC 试件超声波速和损伤变量存在阈值, 当荷载等级 λ 小阈值时, 试件超声波速和损伤变量均无明显变化, 当 λ 大于阈值时, 试件超声波速才逐渐降低。

以 NC 试件为例, 当 λ 为 0.62 时, 超声波速为 4 250 m/s, 当 λ 小于 0.62 时, 超声波速无显著变化, 当 λ 大于 0.62 时, 超声波速急速下降, 即阈值约为 0.62。 λ 为 0.86 时的超声波速为 3 260 m/s, 与 λ 等于 0.62 时相比降低了 23%。不同荷载等级下 SF/NC 试件超声波速的变化规律与 NC 相近, 存在阈值现象, 且在一定范围内, 随着 SF 掺量的提高, 阈值逐渐增大。

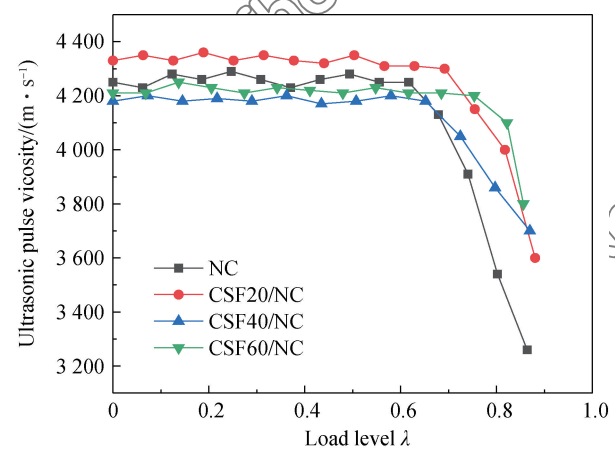


图 10 SF/NC 超声波速随荷载等级的变化关系
Fig. 10 Relationship between ultrasonic pulse velocity and load level of SF/NC

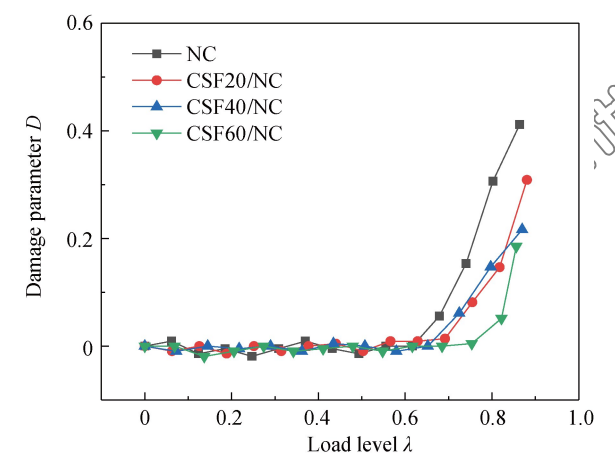


图 11 SF/NC 损伤变量随荷载等级的变化关系
Fig. 11 Relationship between damage variable and load level of SF/NC

由图 11 可知, SF 掺量在 0~60 kg/m³ 时, 随着 SF 掺量的增加, 损伤变量发生突变的荷载等级及阈值越大。且荷载等级大于阈值时, 在相同荷载等级下, 损伤变量越小。由于结构型 SF 可以限制裂缝扩展, 提高了试件损伤变量发生显著变化所对应的荷载等级, 降低了压荷载对 NC 造成的损伤。

为对比分析试件渗透系数和超声波速随荷载等级的变化规律, 以初始荷载等级下的超声波速和渗透系数为基准, 得到各荷载等级下渗透系数和超声波速的变化率, 如图 12 所示。

以 NC 试件为例, 当荷载等级 λ 小于 0.6 时, 渗透系数先略微减小后缓慢增大, 但变化率波动很小, 而超声波速变化率未出现显著变化; 当 λ 大于 0.6 时, 随着荷载等级的提高, 试件的渗透系数逐渐增大, 超声波速逐渐降低。说明 NC 试件渗透系数与超声波速发生显著变化所对应的荷载等级基本一致, λ 约为 0.6。由图 12 可得, 单轴受压时, NC、CSF20/NC、CSF40/NC 及 CSF60/NC 试件损伤变量变化率和渗透系数变化率发生显著变化的荷载等级分别约为 0.60、0.70、0.70、0.80, 与渗透试验得到的结果一致, 因此不同 SF 掺量的试件渗透系数和损伤变量随荷载等级的变化规律具有一定的相似性。

3 结 论

对单轴受压下钢纤维(SF)/混凝土(NC)进行渗透试验及超声试验。

(1) SF/NC 单轴受压时, 结构型 SF 对其渗透性的影响与荷载等级有关, 且存在渗透阈值。NC 和 3 种 SF/NC, 即 CSF20/NC、CSF40/NC 和 CSF60/NC 试件, 所对应荷载等级的阈值分别约为 0.60、0.70、0.70、0.80。结构型 SF 能够提高 NC 的渗透阈值, 当掺量为 0~60 kg/m³ 时, 渗透阈值随着掺量的提高而增大。

(2) 荷载水平低于渗透阈值阶段, 渗透系数与荷载水平满足较好的三次函数关系。荷载水平大于渗透阈值阶段, 渗透系数与荷载水平满足较好的一阶指数函数关系。

(3) NC 单轴受压时, 结构型 SF 对试件超声波速和损伤变量的影响与荷载等级有关, 均存在阈值现象。当掺量为 0~60 kg/m³ 时, SF 掺量越高, 阈值越大。

(4) NC 单轴受压时, 各组试件渗透系数及超

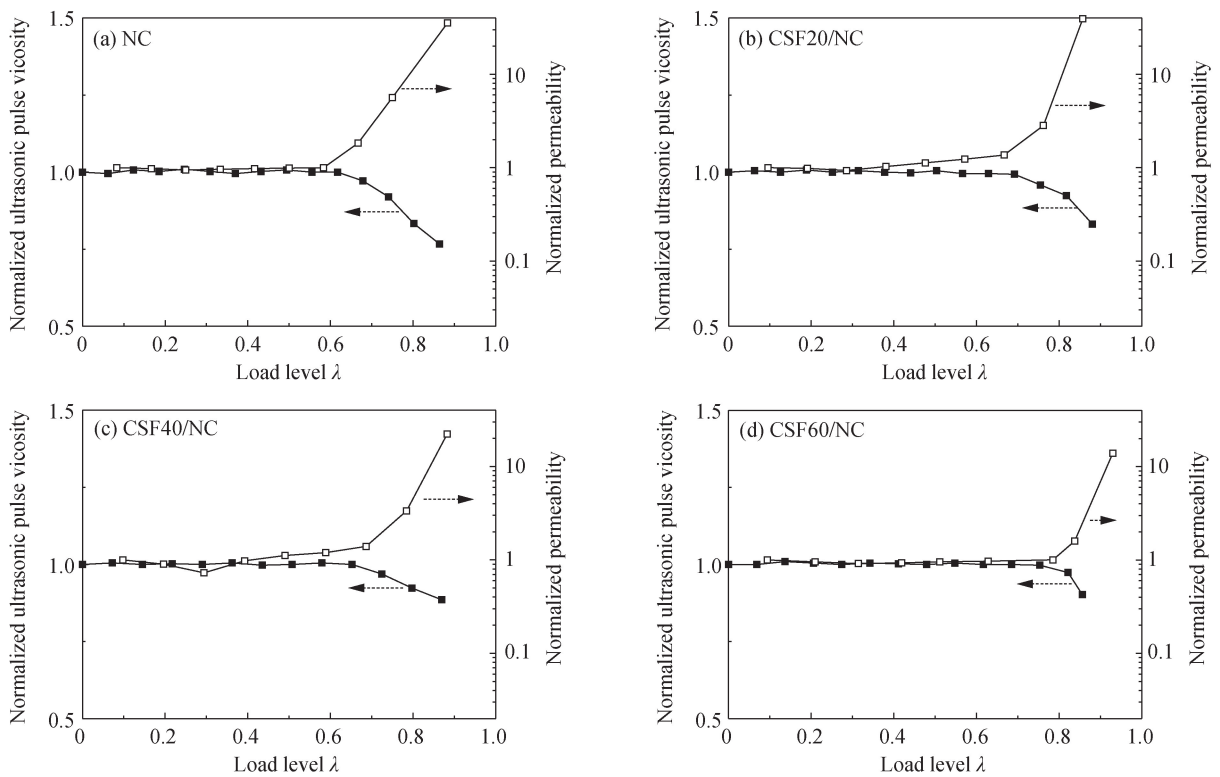


图 12 荷载等级对 SF/NC 超声波速与渗透系数变化率的影响

Fig. 12 Effect of the load level on the ultrasonic pulse velocity and permeability coefficient of SF/NC

声波速变化率随荷载等级的变化规律一致。采用超声波检测法来评价 NC 单轴受压时的渗透性能具有一定可行性。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GT50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods for long-term performance and durability of ordinary concrete: GT50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009 (in Chinese).

[2] ASTM. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes: ASTM C 1585[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[3] ASTM. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: ASTM C 1202[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.

[4] HOSEINI M, BINDIGANAVILE V, BANTHIA N. The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(4): 213-220.

[5] BANTHIA N, BIPARVA A, MINDESS S. Permeability of concrete under stress[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(9): 1651-1655.

[6] 方永浩, 李志清, 张亦涛. 持续压荷载作用下混凝土的渗透性[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(10): 1281-1286.
FANG Yonghao, LI Zhiqing, ZHANG Yitao. Permeability of concrete under sustained compressive load[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(10): 1281-1286 (in Chinese).

[7] 洪雷, 危行财, 汪明刚. 单轴压荷载下掺合料对混凝土渗透性的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 143-146, 152.
HONG Lei, WEI Xingcai, WANG Minggang. Influence of mineral admixtures on permeability of concrete under sustained uniaxial compressive load[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 143-146, 152 (in Chinese).

[8] 王中平, 吴科如, 阮世光. 单轴压缩作用对混凝土气体渗透性的影响[J]. 建筑材料学报, 2001(2): 127-131.
WANG Zhongping, WU Keru, RUAN Shiguang. Study of gas permeability of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2001(2): 127-131 (in Chinese).

[9] SAITO M, ISHIMORI H. Chloride permeability of concrete under static and repeated compressive loading[J]. Cement

- and Concrete Research, 1995, 25(4): 803-808.
- [10] CHOINSKA M, KHELIDJ A, CHATZIGEORGIOU G, et al. Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(1): 79-88.
- [11] 李庆华, 高栋, 徐世烺. 超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)的水渗透性能试验研究[J]. 水利学报, 2012, 43(S1): 76-84.
- LI Qinghua, GAO Dong, XU Shilang. Study on water permeability of UHTCC[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S1): 76-84 (in Chinese).
- [12] 易成, 谢和平, 高伟. 钢纤维对混凝土裂纹的抑制及其对渗性能的影响[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 19-25.
- YI Cheng, XIE Heping, GAO Wei. Effects of steel fiber on the restraining for propagation of concrete crack and on the permeability of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3): 19-25 (in Chinese).
- [13] DING Y, ZHANG Y, THOMAS A. The investigation on strength and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 448-452.
- [14] AKAHAVAN A, SHAFATIAN S M H, RAJABIPOUR F. Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(2): 313-320.
- [15] 丁一宁, 郝晓卫, 门旭. 纤维对混凝土裂缝宽度、曲折度及渗透性的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 491-497.
- DING Yining, HAO Xiaowei, MEN Xu. Effect of fiber on the crack width, tortuosity and permeability of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 491-497 (in Chinese).
- [16] 刘卫东, 张东芹, 王依民. 混凝土结构抗冻性超声检测方法的研究[J]. 水利学报, 2003(3): 125-128.
- LIU Weidong, ZHANG Dongqin, WANG Yimin. Investigation on coefficient of saturation recovery of non-uniform suspended load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(3): 125-128 (in Chinese).
- [17] QASRAWI H Y, MARIE I A. The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2017-2021.
- [18] 王怀亮, 宋玉普. 不同尺寸混凝土试件受压状态下超声波传播特性研究[J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(1): 90-94.
- WANG Huailiang, SONG Yupu. Ultrasonic pulses behavior in various size concrete specimens under compression[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(1): 90-94 (in Chinese).
- [19] HOSEINI M. Effect of compressive loading on transport properties of cement-based materials[D]. Edmonton: University of Alberta, 2013.
- [20] KUMAR M P, MONTEIRO P. Concrete: Microstructure, properties, and materials (Third Edition)[M]. New York: McGraw-Hill Publishing, 2006.