

纤维增强混凝土局部抗压性能试验

王伟¹, 蒙朝美², 蔡良才¹, 张罗利³

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军第二后勤训练基地, 山东泰安, 271000;
3. 空军后勤部工程代建办公室, 北京, 100030)

摘要 基于斜向预应力混凝土道面锚固区应力复杂、混凝土抗裂性能差的特点,开展了纤维混凝土试件局部抗压性能试验,得到了纤维混凝土试件在局部荷载作用下的典型破坏模式,分析了支撑状态、纤维掺量对开裂强度和极限抗压强度的影响,揭示了纤维混凝土在局部受压条件下的破坏机理,并基于拉一压杆模型得到了带孔纤维增强混凝土局部受压承载力提高系数。结果表明试件支撑状态和纤维掺量均显著影响局部抗压承载力和破坏模式;对于相同的支撑状态,随着纤维掺量的增大,试件局部抗压能力逐渐增大;对于相同的纤维掺量,底部完全支撑时试件局部抗压承载力显著高于底部部分支撑状态下的承载力;局部受压面积比、预留孔道尺寸显著影响纤维混凝土试件的局部承载力提高系数。

关键词 预应力结构;局部抗压承载力;纤维混凝土;纤维掺量;支撑条件

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.04.016

中图分类号 TU528 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)04-0104-07

Research on Local Compressive Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete

WANG Wei¹, MENG Chaomei², CAI Liangcai¹, ZHANG Luoli³

(1. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. The Second Air Force Logistics Training Base, Taian 271000, Shandong, China;
3. Air Force Logistics Engineering Office, Beijing 100030, China)

Abstract In view of the characteristics of complex stress and high tensile stress in anchorage zone of cross-tensioned prestress concrete pavement, the experimental study on local compressive performance of fiber reinforced concrete is carried out, and the typical failure mode of fiber reinforced concrete under local compressive load is obtained. Furthermore, the influence of the supporting conditions and fiber content on the cracked and ultimate strength is analyzed. The failure mechanism of fiber reinforced concrete under local compressive load is revealed. Additionally, the enhancement coefficient of local compressive bearing capacity of fiber reinforced concrete with ducts is obtained based on the pull-rod model. The results show that the supporting conditions and fiber content of fiber reinforced concrete have significantly influence on its local compressive bearing capacity and failure mode. The local compressive bearing capacity of fiber reinforced concrete increases gradually with the increase of fiber content for the same support condition. The

收稿日期: 2020-11-10

作者简介: 王伟(1997—),男,湖北武汉人,硕士生,研究方向:机场规划设计与管理。E-mail:596564345@qq.com

通信作者: 蒙朝美(1990—),男,重庆云阳人,博士,研究方向:机场规划设计与管理。E-mail:neu_mengchaomei@163.com

引用格式: 王伟,蒙朝美,蔡良才,等.纤维增强混凝土局部抗压性能试验[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(4):104-110.
WANG Wei, MENG Chaomei, CAI Liangcai, et al. Experimental Research on Local Compressive Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(4): 104-110.

local compressive bearing capacity of the fiber reinforced concrete under full supporting condition is significantly higher than that under partial supporting condition for the same fiber content. The ratio of local compressive area and the size of reserved ducts significantly influence the enhancement coefficient of local bearing capacity.

Key words prestress structure; local compressive bearing capacity; fiber reinforced concrete; fiber content; supporting condition

无黏结预应力混凝土结构的锚固区具有传递和分散应力的作用,从而实现混凝土内部预应力的均匀分布,同时锚固区的应力复杂,存在较大的压应力、劈裂应力和剥落应力。对于无黏结斜向预应力混凝土道(路)面而言,由于斜向布置预应力筋,预应力筋的作用在锚固区存在纵向分力,从而增大了锚固区的拉应力。纤维混凝土可显著提高混凝土的抗拉能力和韧性,改善锚固区的受力性能,避免锚固区的破坏;然而目前针对纤维混凝土局部抗压承载力的研究较少。

随着材料科学的发展,高强混凝土和高性能混凝土在工程中大量使用,高性能混凝土优异的抗拉强度和抗压强度,可显著改善锚固区的承载力和抗裂性能,高强混凝土^[1-3]和超高性能混凝土也逐步应用于锚固区。赵勇等^[4]开展了局部承压试件的单调加载和循环加载试验,研究结果表明提高混凝土强度、加大锚垫板面积可有效提高锚固区极限承载力。周威等^[5]开展了高强螺旋筋约束活性粉末混凝土局部承压试验研究,分析了局部承压比和配筋率对局部承载力的影响效应,表明试件初裂强度较小,但是开裂后表面裂缝发展缓慢、变形大。Choi等^[6]开展了螺旋式塑料纤维增强混凝土的局部承载力研究,表明螺旋式塑料纤维可以显著提高混凝土在局部荷载作用下的极限承载力和变形性能。Haroon等^[7]采用试验的方法分析了端勾型钢纤维代替锚固区螺旋钢筋和表层钢筋的有效性,表明掺加钢纤维可减少锚固区螺旋钢筋和表层钢筋的数量,当端勾型钢纤维掺量超过1%时锚固区可不设构造钢筋。Zhou

等^[8]开展了预留孔道纤维活性粉末混凝土棱柱体试件局部抗压承载力试验,表明纤维活性粉末混凝土试件的开裂强度与破坏强度相当,预留孔道影响纤维活性粉末混凝土的局部承压强度。李立峰等^[9]开展了纤维增强活性粉末混凝土的局部承载力研究,表明在活性粉末混凝土中添加纤维可明显提高其局部承载力,但随着纤维掺量的增大,提高效果减弱。

综上所述,针对纤维混凝土局部抗压性能的研究主要集中在纤维的增韧效果,关于纤维掺量和支撑条件的影响研究较少。因此,本文通过开展预留孔道纤维混凝土试件局部抗压强度试验,讨论纤维掺量和支撑条件对其局部抗压承载力的影响效应,借助拉-压杆模型和摩尔库伦准则导出纤维混凝土局部抗压承载力提高系数。

1 局部受压试验方案

1.1 混凝土配合比

为了得到较好的抗裂性能,参考C50混凝土配合比,水灰比取0.3,通过调节砂率和减水剂的掺量保证混凝土的和易性,水泥采用P.O 42.5,细骨料采用河沙,细度模数为2.58,粗骨料采用石灰岩,最大粒径为20 mm,纤维采用端勾型钢纤维,长度为35 mm、直径为0.75 mm,减水剂采用高效聚羧酸液态减水剂。混凝土的坍落度控制在50~70 mm。纤维体积掺量分别取0.8%、1.0%、1.2%和1.4%,并设置了相同配合比的普通混凝土作为对照组,各掺量下的配合比见表1。

表1 纤维混凝土配合比

组别	水灰比	水泥/kg	水/kg	中砂/kg	石子/kg		纤维掺量/%	纤维/kg
					4.75~10 mm	10~20 mm		
A	0.3	533	160	659.1	296.6	692.1	1.4	109.2
B	0.3	533	160	665.4	299.4	698.6	1.2	93.6
C	0.3	533	160	671.6	302.2	705.2	1.0	78.0
D	0.3	533	160	677.8	305.0	711.7	0.8	62.4
E	0.3	533	160	702.8	316.3	737.9	0.0	0.0

1.2 试件支撑条件

当斜向预应力混凝土道面锚固区采用预制结构时,预制模块装配通过企口连接,企口缝可能存在缝

隙,缝隙的存在将降低预制模块的承载力。因此,局部受压试件的支撑条件分全支撑和部分弱支撑两种工况,如图1所示,其中部分弱支撑试件的支撑端采

用阶梯形式,阶梯高度为1~2 mm、宽度为试件宽度的一半,用于模拟企口缝弱支撑状态。

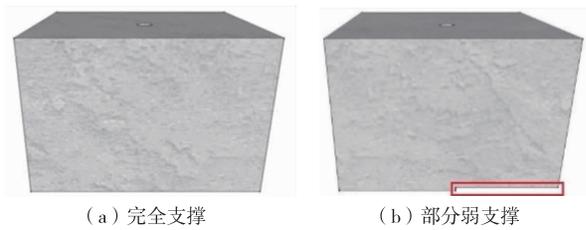


图1 试件支撑状态

2 试验结果与分析

根据纤维掺量和底部支撑状态共分10组,每组浇筑3个混凝土试件,共浇筑了30个试件,每组纤维掺量的混凝土同时浇筑3个立方体试件。试件室温洒水养护28 d后进行局部抗压试验,试验参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》执行,加载速率取5~8 kN/s。

2.1 试验结果

纤维混凝土试件的局部强度通过圆形锚垫板施加,如图2所示,压力机直接作用于锚垫板上,从而实现局部荷载的施加,锚垫板的直径为100 mm、厚度为10 mm、中心开孔直径为20 mm。在局部强度作用下的试验结果如表2所示,其中开裂强度是指试件侧面开始出现可见裂纹时所对应的局部抗压强度,F系列试件代表试件底部处于全支撑状态,P系列试件代表试件底部处于部分弱支撑状态。试件破坏后的典型破坏形态如图3所示。



图2 锚垫板位置及形状

表2 底部不同支撑条件局部抗压试验结果

MPa

纤维掺量	完全支撑				部分弱支撑					
	试件编号	开裂强度	平均值	极限强度	平均值	试件编号	开裂强度	平均值	极限强度	平均值
0%	F0-1	37.5		76.0		P0-1	19.3		38.4	
	F0-2	38.5	37.5	72.8	72.8	P0-2	21.5	21.2	40.8	40.6
	F0-3	36.4		69.4		P0-3	22.9		42.6	
0.8%	F8-1	44.0		77.6		P8-1	32.5		61.3	
	F8-2	42.4	44.1	79.6	79.6	P8-2	31.7	32.4	60.3	61.7
	F8-3	45.8		81.7		P8-3	33.1		63.4	
1.0%	F10-1	47.8		81.9		P10-1	35.6		69.1	
	F10-2	46.5	47.8	83.7	83.3	P10-2	36.8	36.9	69.8	70.6
	F10-3	49.3		84.4		P10-3	38.3		72.7	
1.2%	F12-1	49.3		83.4		P12-1	40.8		77.2	
	F12-2	50.5	50.8	86.0	85.5	P12-2	39.9	40.7	78.0	78.0
	F12-3	52.7		87.0		P12-3	41.5		78.7	
1.4%	F14-1	53.4		87.8		P14-1	42.3		79.6	
	F14-2	51.9	53.1	84.2	87.1	P14-2	43.4	42.5	80.3	80.7
	F14-3	53.9		89.3		P14-3	41.9		82.3	

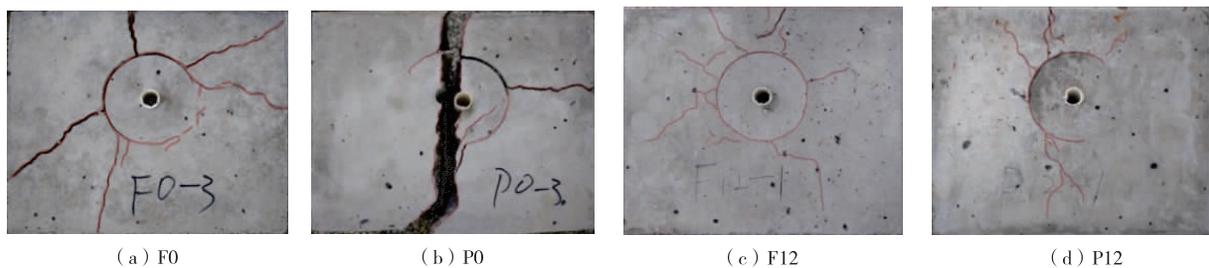


图3 试件受压面典型破坏模式

2.2 结果分析与讨论

图4给出了不同纤维掺量条件下混凝土试件的极限抗压强度与开裂强度,由图可知随着纤维掺量的增大极限抗压强度和开裂强度均增大,但纤维掺

量对强度的增长速度的影响存在一定差异。

2.2.1 纤维掺量的影响

由图4可知,对于F(底部处于全支撑状态)系列试件,随着钢纤维掺量的增大,开裂强度和极限抗

压强度均增大,钢纤维掺量为 1.2%的试件开裂强度和极限抗压强度较基准组(未掺加钢纤维)分别提高了 35.4%和 17.5%;但当钢纤维掺量超过 1.2%时,开裂强度和极限抗压强度增长速度明显减小。对于 P(底部处于半支撑状态)系列试件,开裂强度和极限抗压强度也是随着钢纤维掺量的增大而增大,钢纤维掺量为 1.2%的试件开裂强度和极限抗压强度较基准组分别提高了 91.7%和 91.9%。结果表明:对于 F 系列试件,钢纤维掺量对开裂强度的影响更为显著,其原因是钢纤维主要改善了混凝土的抗拉和抗裂性能,因而主要影响混凝土的开裂强度;对于 P 系列试件,钢纤维掺量的增加,试件的开裂强度和极限抗压强度均显著增大,其原因是 P 系列试件处于部分支撑状态,在台阶处存在应力集中现象,在混凝土中加入纤维可以显著改善混凝土的变形性能,而部分支撑的台阶高度较小,当混凝土变形增大时试件的支撑状态转化为全支撑,因而对于 P 系列试件,掺加纤维也可显著提高混凝土试件的极限强度。

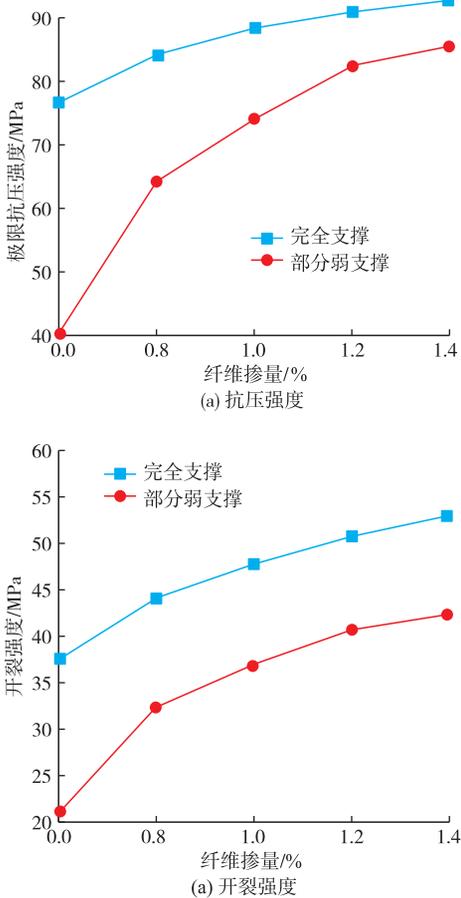


图 4 纤维掺量对强度的影响

2.2.2 支撑状体的影响

由图 4 可知,混凝土试件底部支撑状体显著影响其局部抗压能力,试件底部部分弱支撑时,开裂强度和极限抗压强度均显著低于处于完全支撑状体的

试件。

由表 2 可知,当纤维掺量分别为 0、0.8%、1.0%、1.2%和 1.4%时,试件底部部分弱支撑时的极限抗压强度为底部完全支撑时的 56.5%、73.5%、77.2%、80.1%和 80.1%,开裂强度分别为 55.8%、77.4%、84.7%、91.2%、92.6%;随着纤维掺量的增加,试件底部支撑状态对试件的局部承载力影响减小,当纤维掺量大于 1.2%时,底部支撑状态影响的减弱。其原因是在混凝土中引入抗拉强度高的端勾型钢纤维,混凝土与钢纤维具有良好的黏结强度,显著提高了混凝土的抗拉强度和变形性能,因而当纤维掺量较大时,开裂强度和极限抗压强度受底部支撑状态的影响较小,而对于对比组(未掺纤维),开裂强度与极限抗压强度均受支撑状态的影响较大。

2.2.3 典型破坏模式分析

图 3 中试件的破坏形态表明,对于相同的支撑状态,随着纤维掺量的增大,试件破坏时,裂纹数量增多,但裂纹宽度减小。其原因是混凝土在局部受压荷载作用下发生剪切破坏^[10],破坏面基本处于骨料与水泥浆体的界面处,如图 5(a)所示,随着破坏面的贯穿,混凝土试件达到极限承载力;当向混凝土中引入乱向分布的钢纤维后,乱向分布的钢纤维增强了混凝土骨料界面的薄弱环节,从而提高了混凝土在局部受压荷载作用下的开裂强度,当混凝土内部产生剪切破坏面后,无数钢纤维贯穿剪切破坏面,如图 5(b)所示,具有桥接和约束作用,从而限制了裂纹的发展速度,混凝土的变形性能增强。



(a) F12



(b) P12

图 5 试件开裂截面

对比分析 F 系列和 P 系列试件的裂纹分布情况, P 系列试件的裂纹数量明显少于 F 系列试件, 但裂纹宽度却明显大于 F 系列试件, 表明 P 系列试件在局部受压荷载作用时存在明显的应力不均匀现象。此外, 在试验过程中能观察到裂纹的发展规律, 对于 F 系列试件, 裂纹首先出现在局部受压区(锚垫板)周围, 随着强度增大, 裂纹逐渐向外扩散, 试件侧面裂纹从受压面逐渐向支撑面扩散; 而对于 P 系列试件, 裂纹侧面裂纹从支撑面快速向受压面扩展, 且裂纹少而宽; 由此表明试件的支撑方式显著影响其破坏模式和承载能力, 因此在预制模块的装配过程中应避免明显接缝的存在。

2.3 破坏机理分析

对纤维混凝土试件进行破坏加载试验, 得到混凝土的破坏面, 如图 5 所示, 可见混凝土在承压板下会形成一个圆锥形破坏面, 但纤维混凝土试件破坏角(破坏面与竖直方向的夹角)更大, 其形成机理可用楔劈理论进行解释^[10], 如图 6 所示。

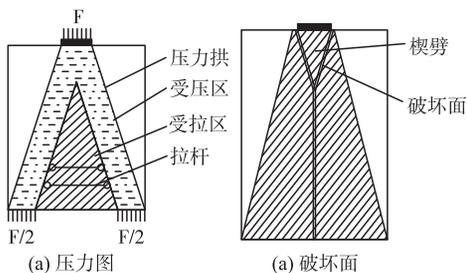


图 6 拉拱与楔劈模型示意图

在局部受压荷载作用下, 压力拱承受和传递纵向应力, 承压板下核心混凝土还承受侧向压力, 处于三向受压状态, 故其承载力增大; 拉杆承受水平拉力, 如图 6(a) 所示。随着承压板压力增大, 受拉区的横向拉应力超过混凝土的抗拉强度, 从而出现纵向裂纹; 紧邻承压板的核心区混凝土在剪应力作用下, 破坏面贯穿试件形成楔形锥面, 如图 6(b) 所示, 试件达到极限承载力状态。

为了进一步分析带孔纤维混凝土在偏心荷载作用下的局部受压破坏机理, 图 7 给出了纤维混凝土局部受压的数值模拟结果(等效应力云图)。由图可知, 在局部荷载作用下, 承压板周围有显著的应力梯度, 从而导致混凝土产生剪切破坏, 随着破坏面沿圆周连通, 承压板的压力全部转移到楔劈顶部, 导致有效应力梯度显著向远离承压板移动, 从而加速楔劈的形成, 如图 7(b) 所示, 且随着破坏面的增大, 纵向荷载减小, 但由于纤维混凝土的韧性得到明显改善, 试件的变形性能增大, 如图 7(b) 所示。

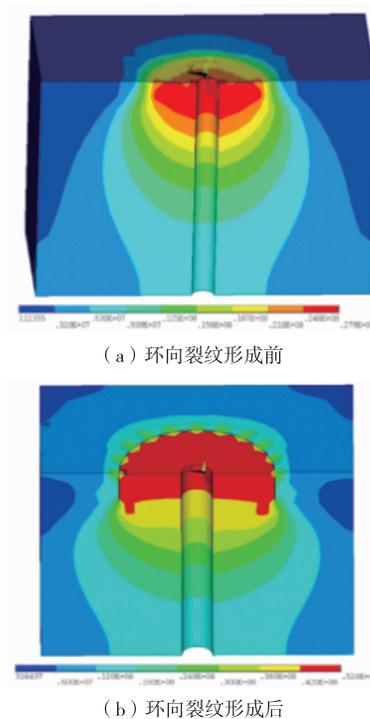


图 7 局部抗压试件等效应力云图

上述分析表明混凝土在承压板作用下发生剪切破坏, 承载力极限状态以破坏面贯穿作为标志, 利用摩尔库伦强度准则, 可以得到混凝土局部抗压承载力提高系数。

2.4 承载力提高系数

假定在极限破坏状态下, 圆形承压板下部楔形锥体高度范围内的混凝土处于三向受压状态, 纵向压应力为第一主应力(σ_1), 侧向压应力分别为第二和第三主应力(σ_2 和 σ_3), 根据摩尔库伦强度准则, 忽略中间主应力的影响, 由此可得图 8 所示模型示意图。极限承载力状态下, 其潜在破坏面上的抗剪强度可用摩尔库伦强度准则描述, 即:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中: τ 潜在破坏面上的抗剪应力; C 为材料的黏聚力; σ 为破坏面上的正压应力; ϕ 为材料内摩擦角。

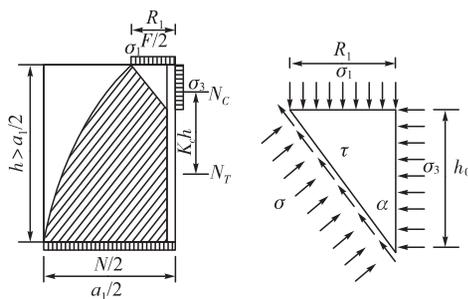


图 8 楔锥力学模型

混凝土材料试验结果表明: 混凝土的内摩擦角不仅与其材料的性质有关, 而且还与剪切面上的正压力的大小有关, 其值介于 $30^\circ \sim 50^\circ$, 吕西林等^[11]按均值原则推荐取 40° 。

利用摩尔应力圆,如图 9 所示,可导出材料内摩擦角与主应力间的关系。

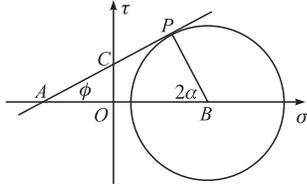


图 9 不同局压面积比下的承载力提高系数

$$\sigma_1(1 - \sin \phi) - \sigma_3(1 + \sin \phi) = 2C \cos \phi \quad (2)$$

令 $k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$, $R_C = \frac{2C \sin \phi}{1 - \sin \phi}$, 得:

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + R_C \quad (3)$$

由破坏角 α 与内摩擦角间的关系可得系数 k 与 α 的表达式:

$$k = \frac{1}{\tan^2 \alpha} \quad (4)$$

在极限状态下,楔形锥体的平均侧压应力为:

$$\sigma_3 = \frac{N_C}{A_0} = \frac{N_C}{2R_1 h_0 - 2R_2 h_0} = \frac{N_C}{\frac{2R_1}{\tan \alpha} (R_1 - R_2)} \quad (5)$$

当试件处于完全支撑状态时,根据平衡条件可得压力 N_C 的表达式:

$$N_C = \frac{\frac{N}{2} e_N - \frac{F}{2} e_F}{K_C h} \quad (6)$$

式中: e_N 和 e_F 分别为合力中心与对称面的距离; $K_C h$ 为内力偶臂,临近破坏时参考实验结果,取 K_C 大小为 0.55。

其中 e_F 的表达式为:

$$e_F = \frac{\frac{\pi R_1^2}{2} \frac{4R_1}{3\pi} - \frac{\pi R_2^2}{2} \frac{4R_2}{3\pi}}{\frac{\pi R_1^2}{2} - \frac{\pi R_2^2}{2}} = \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)} \quad (7)$$

同理可得 e_N 的表达式:

$$e_N = \frac{\frac{a_1 b_1}{2} \frac{a_1}{4} - \frac{\pi R_2^2}{2} \frac{4R_2}{3\pi}}{\frac{a_1 b_1}{2} - \frac{\pi R_2^2}{2}} = \frac{3a_1 b_1 - 16R_2^3}{12(a_1 b_1 - \pi R_2^2)} \quad (8)$$

联立式(5)、式(6)、式(7)和式(8)可得:

$$\sigma_3 = \frac{F \left[\frac{3a_1^2 b_1 - 16R_2^3}{12(a_1 b_1 - \pi R_2^2)} - \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)} \right]}{4K_C h \frac{R_1}{\tan \alpha} (R_1 - R_2)} \quad (9)$$

联立式(3)和式(9)可得:

$$\sigma_1 = \frac{kF \left[\frac{3a_1^2 b_1 - 16R_2^3}{12(a_1 b_1 - \pi R_2^2)} - \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)} \right]}{4K_C h \frac{R_1}{\tan \alpha} (R_1 - R_2)} + R_C \quad (10)$$

假设施加在承压板上的压应力为 p , 则有:

$$F = \pi(R_1^2 - R_2^2) p \quad (11)$$

记纤维混凝土无侧限抗压强度为 f_c , 则有 $\sigma_1 = f_c$, $\sigma_3 = 0$, 则根据摩尔应力圆有:

$$f_c = \sigma_1 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (12)$$

联立式(4)、式(10)、式(11)和式(12)可得:

$$p = \frac{f_c}{1 - \frac{\pi \left[\frac{3a_1^2 b_1 - 16R_2^3}{12(a_1 b_1 - \pi R_2^2)} - \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)} \right] (R_1^2 - R_2^2)}{4K_C h R_1 (R_1 - R_2) \tan \alpha}} \quad (13)$$

令 $p = \lambda f_c$, λ 为局部抗压承载力提高系数。

$$\lambda = \frac{1}{1 - \frac{\pi \left[\frac{3a_1^2 b_1 - 16R_2^3}{12(a_1 b_1 - \pi R_2^2)} - \frac{4(R_1^3 - R_2^3)}{3(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)} \right] (R_1^2 - R_2^2)}{4K_C h R_1 (R_1 - R_2) \tan \alpha}} \quad (14)$$

式(14)表明,局部抗压承载力提高系数不仅与承压板的面积有关,还与底面支撑面积和孔道尺寸有关,图 10 给出了局部抗压承载力提高系数随局压面积比的关系,其中 $r = 10 \text{ mm}$, $K_C = 0.55$ 。

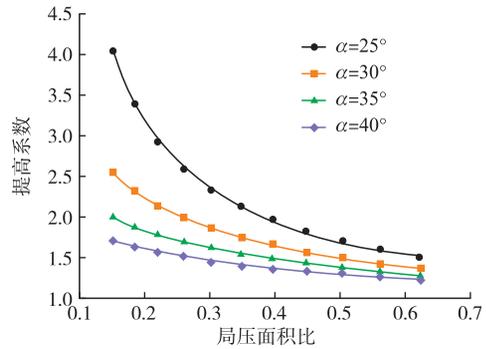


图 10 不同局压面积比下的承载力提高系数

由图 10 和式(14)可知,对于相同的内摩擦角(破坏角相同),随着局压面积比值的增大,局部承载力系数减小。而对于相同的局压面积比,材料内摩擦角越大,局部承载力提高系数越小;对于纤维混凝土而言,由于钢纤维增强了混凝土的黏聚力,使得纤维混凝土在剪切破坏瞬间摩擦效应变小,纤维混凝土的内摩擦角较普通混凝土小^[12];因而局部承载力系数增大;此外,在混凝土中引入钢纤维,能够增大楔形锥体的侧压力从而使钢纤维混凝土的抗裂强度和韧性明显提高,因而,纤维增强混凝土局部抗压能力明显优于普通混凝土。

3 结论

针对锚固区混凝土的受压性能,进行了不同纤维掺量和支撑条件下纤维混凝土的局部抗压承载力试验,对比分析了纤维混凝土在局部荷载作用下的

典型破坏形式和承载力及其影响因素,揭示了纤维混凝土在局部荷载作用下的破坏机理,构建了混凝土承载力提高系数预测模型,得出以下结论:

1)随着钢纤维掺量的增加,试件的极限抗压强度和开裂强度都得到明显提高,尤其钢纤维的掺入使得P系列试件的开裂强度和极限抗压强度得到大幅度提高。

2)当钢纤维掺量相同时,F系列试件的开裂强度和极限抗压强度均大于P系列试件;在混凝土中引入端勾型钢纤维可显著改善不完全支撑条件下混凝土的受力性能。

3)从典型破坏形式来看,钢纤维能显著提高混凝土的变形性能,并有效延缓裂纹的扩展速率;试件的支撑方式显著影响其受压条件下的破坏模式和承载能力。

4)纤维混凝土局部承载力提高系数预测模型表明;承载力提高系数随着局压面积的增大而减小,掺入钢纤维减小了混凝土的内摩擦角,增大了混凝土的黏聚力,且混凝土破坏面的正压力增大,从而提高了混凝土的抗裂和承载能力,局部承载力提高系数增大。

参考文献

- [1] 李晓琴,陈保洪,杜茜,等. 混凝土 SHPB 动态抗压试验数值模拟研究[J]. 机械强度,2018,40(4):901-907.
- [2] 黄辉辉. 不封口钢管混凝土柱脚支撑混凝土局部受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(5):161-169.
- [3] KIM J S, KIM T H. A Stress Analysis of the Post-Tensioned Anchorage Zones Using UHPC [J]. Key Engineering Materials, 2017, 737:500-504.
- [4] 赵勇,李东彬,程志军,等. 采用铸造垫板的预应力混凝土锚固区传力性能试验[J]. 土木工程学报,2011,44(6):55-62.
- [5] 周威,胡海波,郑文忠. 高强螺旋筋约束活性粉末混凝土局压承载力试验[J]. 土木工程学报,2014,47(8):63-72.
- [6] CHOI M, INELL T J. Behavior of Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Anchorage Zones for Post-Tensioned Concrete Structure [J]. ACI Structure Journal, 2004, 101(5): 625-632.
- [7] HAROON S, YAZDANI N, TAWFIQ K. Posttensioned Anchorage Zone Enhancement with Fiber-reinforced Concrete [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 566-572.
- [8] ZHOU W, HU H B, ZHENG W Z. Bearing Capacity of Reactive Powder Concrete Reinforced by Steel Fibers[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48:1179-1186.
- [9] 李立峰,李文全,石雄伟,等. 不同养护条件下活性粉末混凝土局压承载力试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(2):50-61.
- [10] 刘永颐,关建光,王传志. 混凝土局部承压强度及破坏机理[J]. 土木工程学报,1985,18(2):53-65.
- [11] 吕西林,张颖,年学成. 钢纤维高强混凝土在单调和重复荷载作用下轴压应力-应变曲线试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38:135-143.
- [12] 王志亮,阳栋,吴立朋. 超短钢纤维增强混凝土压剪破坏试验研究[J]. 混凝土,2010,4(11):101-103.

(编辑:姚树峰)