



# 疏浚砂混凝土的压剪性能和破坏准则的试验研究

孙立国<sup>1</sup>, 韩旭<sup>2</sup>, 谢发祥<sup>2</sup>

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 以长江下游疏浚砂为原材料, 制备了 4 种不同疏浚砂掺量的混凝土试件, 对疏浚砂混凝土试件的压剪复合性能进行研究。1) 进行了 5 种不同轴压比下的压剪复合试验。试验结果表明: 疏浚砂混凝土的压剪界面摩擦系数在疏浚砂含量较高时会下降, 而试件内部黏聚力则随疏浚砂含量的增加而增加; 同时试件压剪峰值位移随疏浚砂含量的增加呈现先增大后减小的趋势。2) 对试件破坏界面进行 SEM 形貌分析, 研究疏浚砂影响试件性能的微观机制。3) 结合试验结果和已有文献研究, 提出了基于八面体空间应力和基于 Ottosen 模型的破坏准则, 并给出了准则方程中的拟合参数。试验数据与拟合结果吻合程度良好。

**关键词:** 疏浚砂; 压剪性能; 微观机制; 破坏准则

**中图分类号:** U 642

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)12-0048-07

## Experiments of compression-shear performance and failure criterion of dredged sand concrete

SUN Li-guo<sup>1</sup>, HAN Xu<sup>2</sup>, XIE Fa-xiang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper selected dredged sand from the lower reaches of the Yangtze River as raw material and prepared four concrete specimens with different dredged sand contents to study the compression-shear performance of the concrete specimens. 1) The paper carried out compression-shear tests under five different axial pressure ratios, and the test results show that the friction coefficient of the compression-shear interface of dredged sand concrete decreases when the dredged sand content is high, while the internal cohesion of the specimens increases as the dredged sand content improves. In addition, the peak value of the compression-shear displacement of the specimens increases first and then decreases as the dredged sand content rises. 2) The paper analyzed the morphology of the damaged interface of the specimens through a scanning electron microscope (SEM) and studied the micro-mechanism of the dredged sand affecting the specimen performance. 3) According to test results and existing literature, the paper proposed a failure criterion based on the octahedral spatial stress and the Ottosen model and presented fitting parameters for the criterion equation. Furthermore, the experimental data are in good agreement with the fitting results.

**Keywords:** dredged sand; compression-shear performance; micro-mechanism; failure criterion

近年来, 随着社会经济和基建工程的快速发展, 作为混凝土重要原料的砂石的需求越来越高,

而江河湖泊中的总砂量逐渐减少, 砂石供需矛盾日益突出。寻找可替代传统砂石作为混凝土骨料

**收稿日期:** 2022-05-11

**作者简介:** 孙立国 (1978—), 男, 博士, 高级实验师, 研究方向为混凝土力学性能研究。

的材料成为亟需解决的问题。为加强航道建设,改善航道条件,长江航道部门每年的疏浚量约 8 000 万 m<sup>3</sup><sup>[1]</sup>。传统航道疏浚砂的处理方法一般是将其抛入长江深槽水域,或直接抛入疏浚地点附近的深槽,这种处理方法不仅会对附近的生态环境造成不良影响,还会影响疏浚效果<sup>[2]</sup>。若能实现疏浚砂的上岸综合利用,不仅能够保护长江生态环境、提高航道疏浚效率,还可以在在一定程度上缓解砂石供需矛盾,促进地方经济社会发展。

国内外许多学者都对疏浚砂的综合利用展开研究,由于其粒径极细,可以填充一些较小的孔隙,因此在铺路填方工程中得到了重视,而直接用疏浚砂当原材料制备混凝土的研究则较少。利用风积砂、海洋中的沉积砂作为原材料制备混凝土的研究已经在快速发展中<sup>[3-7]</sup>,与这些特细砂相比,疏浚砂的粒径更细,所以直接利用疏浚砂作为原材料制备混凝土的研究较少。

笔者对不同疏浚砂掺量的疏浚砂混凝土(Dredged Sand Concrete,DSC)进行了单轴抗压、劈裂抗拉以及双轴压剪性能试验,通过试验结果分析疏浚砂的掺入对混凝土力学性能的影响;采用扫描电子显微镜对疏浚砂混凝土进行 SEM 形貌分析,从微观角度解释掺入疏浚砂对混凝土的影响;利用试验数据和其他文献数据拟合提出了适用于疏浚砂混凝土的基于八面体空间应力的破坏准则以及基于 Ottosen 模型的破坏准则。

## 1 试验

### 1.1 疏浚砂混凝土配合比

对于试验配制的疏浚砂混凝土,水泥采用 P II 52.5 硅酸盐水泥;粉煤灰为 II 级粉煤灰,密度为 235 kg/m<sup>3</sup>,需水量为 102%。粗骨料采用粒径 5~10 mm 的石子;细骨料部分采用机制砂,粒径为 0.3~5.0 mm,细度模数为 4.27;另外从长江下游航道取样得到疏浚砂,粒径为 0.15~0.30 mm,细度模数为 0.5,粒径分布见表 1,分别以质量比取代率  $\lambda=0\%$ 、20%、40% 和 60% 取代机制砂,

分别命名为 DSC-0%~DSC-60%。试件配合比见表 2。

表 1 机制砂与疏浚砂粒径分布

砂种类	筛网孔径/mm	累计筛余/%	细度模数
机制砂	5	0	4.27
	2.5	49.12	
	1.25	83.49	
	0.63	97.97	
	0.3	98.21	
疏浚砂	0.3	0	0.5
	0.15	50.05	
	0.075	77.82	

表 2 疏浚砂混凝土配合比

分组	配合比/(kg·m <sup>-3</sup> )						
	水泥	水	石料	机制砂	疏浚砂	粉煤灰	减水剂
DSC-0%	172	156	800	825	0	228	4.4
DSC-20%	172	156	800	660	165	228	4.4
DSC-40%	172	156	800	495	330	228	4.4
DSC-60%	172	156	800	330	495	228	4.4

疏浚砂混凝土的浇筑方法为:先按照不同配合比加入骨料和胶凝材料,搅拌 20 s 后加入水和减水剂搅拌 3 min;搅拌均匀后倒入模具振捣 1 min;在温度(20±2)℃、湿度>90%的环境下养护 24 h 后脱模,在同样的环境养护 28 d 后取出进行试验。

### 1.2 试验工况

力学试验包括单轴抗压试验、劈裂抗拉试验以及双轴压剪试验。预制试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm,每组 3 个试件。在压剪试验中采用不同的轴压比,根据试件设计强度,采用的轴向压力分别为 15、30、45、60、75 kN。单轴抗压和劈裂试验采用应力控制加载方式,按照 GB/T 50081—2019 的要求完成。压剪复合试验采用定侧向加载方式,首先竖直轴以 0.5 kN/min 加载速率加载至设定竖向压力,并保持 1 min;然后水平轴上预加载 0.5 kN,保持 2 min;最后采用位移控制方式施加横向剪切荷载至 6.5 mm。横向位移在 2 mm 以下时,加载速率为 0.1 mm/min;2 mm 以上时为 0.3 mm/min。

2 试验结果和分析

2.1 DSC 的单轴强度

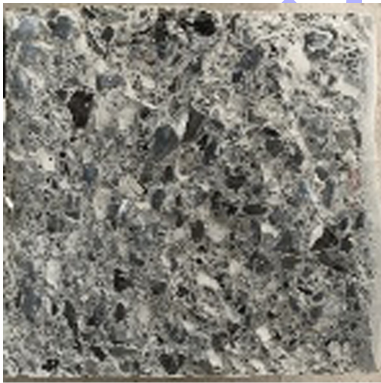
疏浚砂混凝土的抗压、劈裂抗拉强度见表 3。由表 3 可见，在混凝土中掺入疏浚砂会对混凝土单轴强度造成一定影响，其中抗压强度随疏浚砂取代率的增大呈现先增大后减小的趋势，这与文献[8-9]研究结果一致。这是因为掺入粒径较小的疏浚砂可以填补混凝土内部骨料之间的缝隙，

使 DSC 变得更加密实<sup>[10]</sup>。同时由于和机制砂相比，疏浚砂比表面积更大、需水量更多，在拌合过程中会吸附更多的水，使真实水灰比下降。因此当疏浚砂掺量过多时会导致混凝土流动性不足、振捣不密实，使得试件内部产生较大孔隙，从而导致试件抗压强度下降。综合抗压强度和劈裂抗拉强度来看，疏浚砂的最优取代率为 20% 左右。

表 3 不同配合比疏浚砂混凝土单轴强度

样本	抗压强度/MPa				劈裂强度/MPa			
	Test 1	Test 2	Test 3	平均值	Test 1	Test 2	Test 3	平均值
DSC-0%	42.0	47.1	46.2	45.1	3.2	2.8	2.9	3.0
DSC-20%	48.7	45.5	50.7	48.3	3.1	3.2	2.7	3.0
DSC-40%	39.0	40.8	44.4	41.4	2.8	3.3	3.4	3.2
DSC-60%	40.1	36.7	40.0	39.0	3.5	3.0	3.1	3.2

图 1 为 DSC 的破坏断裂面，可以看出 DSC-0%的破坏面较为平整，可以看到许多骨料间微小的缝隙；DSC-20%中大部分缝隙已经被填补，破坏面更加平整；而对于 DSC-60%，其断裂面呈现凹凸不平的情况，可以看到试件内部有很多较大的孔隙，这是导致试件强度下降的主要原因。



a) DSC-0%



b) DSC-20%



c) DSC-60%

图 1 DSC 破坏面

2.2 DSC 的压剪复合强度

图 2 为不同配合比的 DSC 在压剪复合试验中的荷载-位移曲线。从图 2 可以看出，不同配合比 DSC 试件的压剪强度有所差别，但荷载-位移曲线的形式大致相同。曲线较为平滑、没有明显拐点，荷载-位移曲线峰值随着轴向压力的增大而升高。同时可以注意到随着疏浚砂取代率的提高，峰值受到轴向力影响的变化程度逐渐减小。这是因为在双轴压剪试验中，试件内部被轴向力压实，原来的细微缝隙减少，从而使试件的抗剪强度提升。而掺入疏浚砂的 DSC 试件由于一些内部孔隙被小粒径的疏浚砂填补，因此轴向力的影响并不明显。

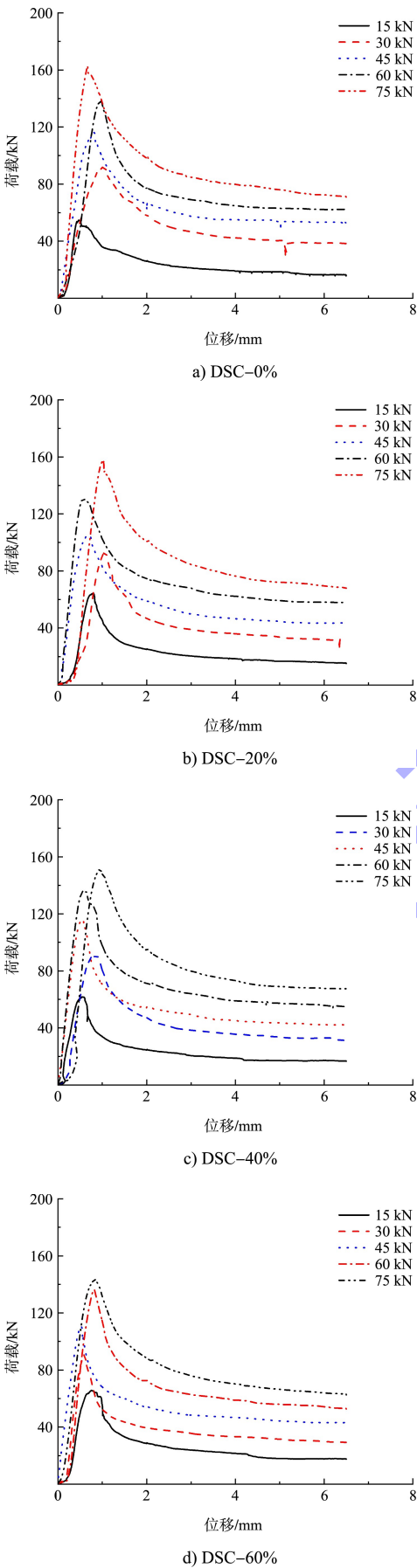


图 2 DSC 的压剪试验荷载-位移曲线

从 DSC 压剪复合作用下的荷载-位移曲线中提取峰值荷载和位移，计算出不同配合比 DSC 在不同轴向力作用下的峰值剪应力 $\tau_f$ 应变 $\varepsilon$ ，见表 4。

表 4 不同配合比 DSC 试件压剪复合试验特征值

试样	$\tau_f/\text{MPa}$	$\varepsilon/10^{-3}$
DSC-0%-15 kN	59.21	4.28
DSC-0%-30 kN	95.55	8.04
DSC-0%-45 kN	112.66	7.00
DSC-0%-60 kN	126.31	8.14
DSC-0%-75 kN	157.42	7.13
DSC-20%-15 kN	65.95	8.29
DSC-20%-30 kN	91.34	10.96
DSC-20%-45 kN	108.20	8.01
DSC-20%-60 kN	129.63	6.94
DSC-20%-75 kN	158.47	9.66
DSC-40%-15 kN	63.56	7.38
DSC-40%-30 kN	97.02	6.90
DSC-40%-45 kN	114.83	5.85
DSC-40%-60 kN	126.54	8.38
DSC-40%-75 kN	147.22	9.48
DSC-60%-15 kN	64.67	6.94
DSC-60%-30 kN	89.78	6.85
DSC-60%-45 kN	107.67	5.78
DSC-60%-60 kN	133.07	8.23
DSC-60%-75 kN	140.73	9.17

在轴向压力较小的情况下，水泥基材料的压剪复合强度与轴向压力成线性关系，即不同轴向压力作用下的剪切强度和轴向应力可以用下式表达：

$$\tau_f=\mu\sigma+c\tag{1}$$

式中： $\tau_f$ 为压剪强度； $\sigma$ 为轴向应力； $\mu$ 为摩擦系数； $c$ 为黏聚力。

利用表 4 的数据可以计算出不同配合比 DSC 的 $\mu$ 、 $c$ ，见表 5，将试验值和拟合曲线绘制在图 3 中。

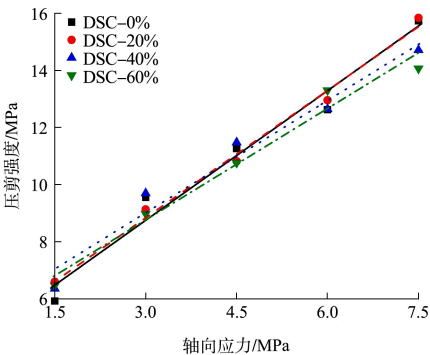


图 3 压剪强度与轴向应力关系



表 5 DSC 剪切摩擦系数和黏聚力

试样	剪切摩擦系数 $\mu$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	$R^2$
DSC-0%	1.51	4.21	0.962 6
DSC-20%	1.49	4.37	0.990 4
DSC-40%	1.31	5.08	0.955 9
DSC-60%	1.30	4.86	0.970 1

从表 5 可以看出，DSC 摩擦系数会随疏浚砂取代率的增加小幅度减小，其中 DSC-60% 的摩擦系数与 DSC-0% 相比减小了 13.9%。这是因为机制砂表面粗糙，尖锐多棱角，在混凝土内部可以增加粗骨料的咬合力，疏浚砂粒径极细，当其附着在骨料上时，会使骨料之间的接触面变得相对光滑，在试件受到剪切时降低试件内部摩擦力。

2.3 DSC 压剪位移

提取表 4 中的数据，可以获得 DSC 在压剪作用下的位移值，见图 4。从图 4 可以看出，随着疏浚砂取代率的增加，DSC 的峰值剪切位移总体上呈现先增大后减小的趋势，且在轴向力较小时，这种变化趋势较为明显。在疏浚砂取代率 20% 时，剪切位移达到最大值，这说明适量的疏浚砂对 DSC 的剪切峰值位移有一定的提高作用，而当疏浚砂取代率过大时，剪切位移反而会下降。这是由于适量的疏浚砂可以填补试件内部孔隙，改善孔隙结构。而当疏浚砂掺量过多时会使混凝土流动性下降，不易振捣密实，反而会导致试件内部产生较大的孔隙。由于内部缺陷的增加，导致 DSC 的剪切峰值位移下降。

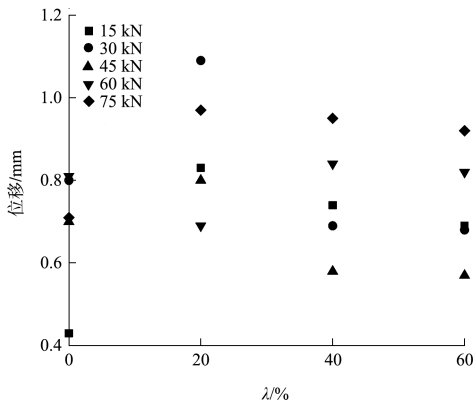
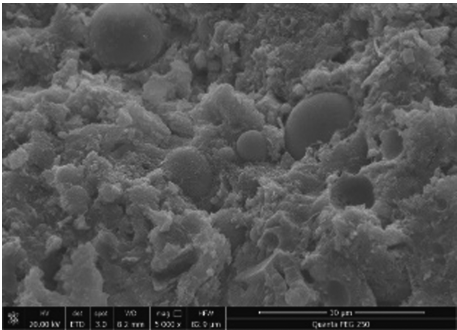


图 4 DSC 疏浚砂取代率入与剪切峰值位移关系

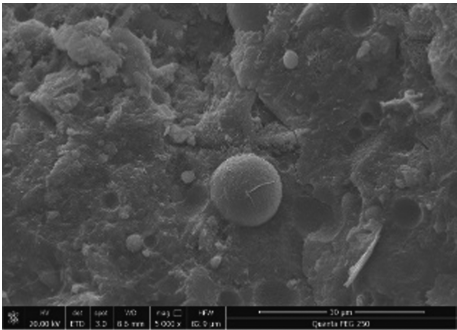
2.4 DSC 压剪微观机制

提取压剪试验中试件破坏界面的 DSC 试样，采用扫描电子显微镜对其进行 SEM 形貌分析。图 5 为 DSC 的微观形貌照片。

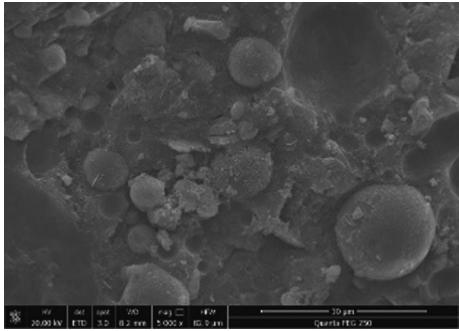
从图 5a) 可以看到，DSC-0% 试件内部骨料与基体之间结合较为松散，有很多裂缝和孔隙。同时可以观察到随着疏浚砂取代率的提高，试件内部的孔隙和裂缝明显减少，基体和骨料之间结合更加紧密，这是因为加入粒径极细的疏浚砂可以有效填补原来骨料之间的缝隙，这也是使材料强度有所提高的原因。图 5a) 中可以看到许多絮状的凝胶体，这是混凝土的水化产物，这些凝胶体可以改善骨料与基体的黏结强度，间接提高混凝土的强度。但通过对比可以发现，随着疏浚砂掺量的增加，水化产物逐渐减少，在图 5d) 中，DSC-60% 内部水化产物非常少，却有很多未反应的粉煤灰颗粒。这是因为与机制砂相比，疏浚砂的比表面积较大，在搅拌过程中会吸附大量的水，导致混凝土水化反应的程度降低，这也是疏浚砂掺量过多导致混凝土强度下降的一个原因。



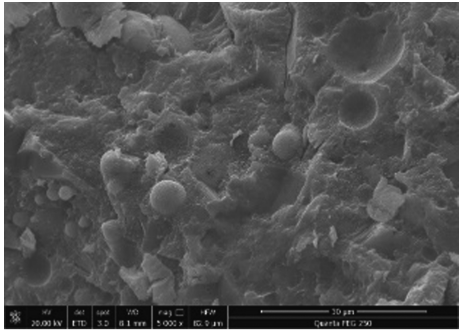
a) DSC-0%



b) DSC-20%



c) DSC-40%



d) DSC-60%

图 5 DSC 的微观形貌照片

2.5 DSC 破坏准则

2.5.1 基于八面体空间的 DSC 破坏准则

根据弹性理论，在压剪复合作用下，不同疏浚砂取代率的 DSC 的压应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  可以转化为 3 个主应力：

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2} \\ \sigma_2 = 0 \\ \sigma_3 = \frac{\sigma}{2} - \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Bresler 等<sup>[11]</sup>针对组合应力下的混凝土，提出了基于八面体应力空间的强度破坏准则模型，此模型可以很好地表达混凝土在复杂应力下的破坏规律。混凝土的八面体正应力和剪应力为：

$$\begin{cases} \sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ \tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \end{cases} \quad (3)$$

根据表 4 的数据，利用式(2)(3)计算出各试件的八面体正应力和剪应力，见表 6。

表 6 不同配合比 DSC 的八面体应力

试样	$\sigma_{oct}/\text{MPa}$	$\tau_{oct}/\text{MPa}$
DSC-0%-15 kN	-0.50	4.89
DSC-0%-30 kN	-1.00	7.92
DSC-0%-45 kN	-1.50	9.44
DSC-0%-60 kN	-2.00	10.69
DSC-0%-75 kN	-2.50	13.33
DSC-20%-15 kN	-0.50	5.44
DSC-20%-30 kN	-1.00	7.59
DSC-20%-45 kN	-1.50	9.09
DSC-20%-60 kN	-2.00	10.95
DSC-20%-75 kN	-2.50	13.42
DSC-40%-15 kN	-0.50	5.24
DSC-40%-30 kN	-1.00	8.05
DSC-40%-45 kN	-1.50	9.61
DSC-40%-60 kN	-2.00	10.71
DSC-40%-75 kN	-2.50	12.22
DSC-60%-15 kN	-0.50	5.33
DSC-60%-30 kN	-1.00	7.47
DSC-60%-45 kN	-1.50	9.05
DSC-60%-60 kN	-2.00	11.23
DSC-60%-75 kN	-2.50	12.02

根据基于八面体空间的混凝土压剪破坏准则的相关文献<sup>[12]</sup>，破坏准则模型可用简洁的线性函数表达：

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c} = A + B \cdot \frac{\sigma_{oct}}{f_c} \quad (4)$$

根据试验数据，通过数学回归拟合可得到八面体应力空间破坏准则的方程，拟合时发现各配合比的  $B$  差距不大，因此将  $B$  固定为平均值 -3.63。然后通过数学回归分析拟合得到压剪复合作用下 DSC 的破坏准则，见图 6。

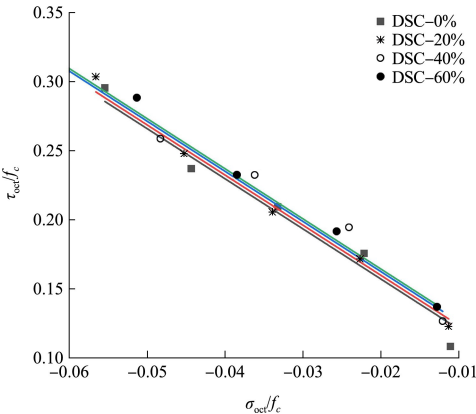


图 6 基于八面体应力空间的 DSC 破坏准则

不同疏浚砂取代率的 DSC 试件的参数  $A$  与取代率  $\lambda$  之间的关系见图 7，可以看到取代率与  $A$

呈现良好的线性关系，其线性关系表达式为：

$$A=0.000\ 12\lambda+0.084\ 64\tag{5}$$

将式(5)代入式(4)中，可得到疏浚砂混凝土基于八面体应力空间的破坏准则的表达式：

$$\frac{\tau_{oct}}{f_c}=(0.000\ 12\lambda+0.084\ 64)-3.630\ 01\cdot\frac{\sigma_{oct}}{f_c}\tag{6}$$

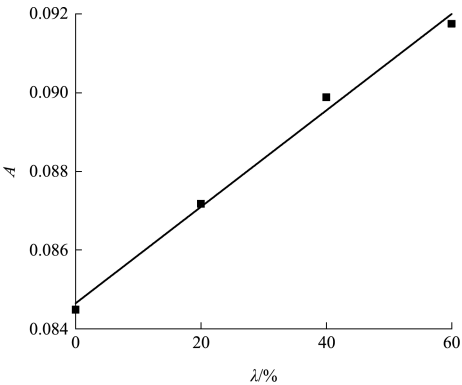


图 7 疏浚砂取代率 λ 和参数 A 的关系

2.5.2 基于 Ottosen 模型的 DSC 破坏准则

1977 年 Ottosen<sup>[13]</sup>通过薄膜比拟法模拟混凝土破坏包络面的形状变化，提出了一种适用范围较广的四参数破坏准则。以 Ottosen 模型为基础的破坏准则表达式如下：

$$F(I_1,J_2,\cos3\theta)=A\cdot\frac{J_2}{f_c^2}+\lambda\cdot\frac{\sqrt{J_2}}{f_c}+B\cdot\frac{I_1}{f_c}-1=0\tag{7}$$

$$\begin{cases} \lambda=k_1\cos\left\{\frac{1}{3}\arccos\left[k_2\cos(3\theta)\right]\right\} & (0^\circ\leq\theta\leq30^\circ) \\ \lambda=k_1\cos\left\{\frac{\pi}{3}-\frac{1}{3}\arccos\left[-k_2\cos(3\theta)\right]\right\} & (30^\circ<\theta\leq60^\circ) \end{cases}\tag{8}$$

式中：A、B、k<sub>1</sub>、k<sub>2</sub>为拟合参数，其中 A>0、B>0、0<k<sub>2</sub><1；I<sub>1</sub>、J<sub>2</sub> 分别是应力不变量；θ 为罗德角。

参考文献[14-17]的研究成果，结合本文的试验数据，根据式(7)进行数学拟合分析，得到适用于 DSC 的破坏准则，参数拟合结果为：A=0.55，B=4.76，k<sub>1</sub>=16.04，k<sub>2</sub>=0.98。

把本文 DSC 拟合曲线与 Ottosen 关于普通混凝土的破坏准则曲线一同绘制在图 8 中，图中实线为 DSC 破坏准则曲线，虚线为 Ottosen 普通混凝土的破坏准则曲线，从图 8 中可以看出 DSC 曲线光滑外凸，能够较好地描述 DSC 的破坏包络面。与普通混凝土相比，DSC 的破坏子午面有一定的偏

转，在同样的八面体正应力条件下，DSC 的八面体剪应力大于普通混凝土。

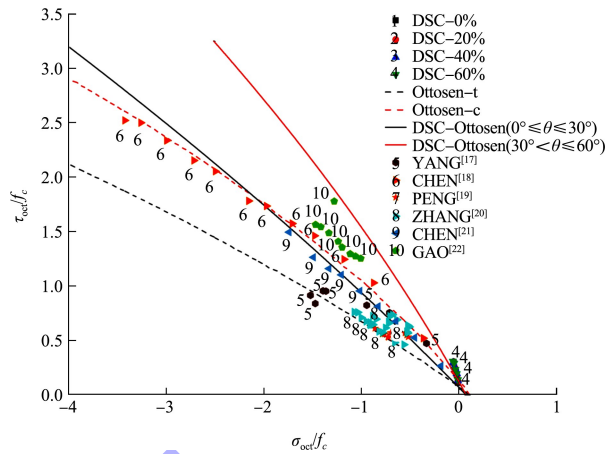


图 8 DSC 破坏准则与 Ottosen 对比

3 结 论

1) 疏浚砂混凝土的单轴强度与疏浚砂的取代率有关，随着疏浚砂取代率的增大，单轴抗压强度呈现先增大后减小的趋势。这是因为适量的疏浚砂可以填补缝隙，改善混凝土内部孔隙结构，但疏浚砂取代率过高会使混凝土流动性下降，反而导致试件内部出现较大的孔隙。

2) 在压剪复合作用下，DSC 的压剪强度随着轴向应力的增大而线性增加。其中摩擦系数在疏浚砂取代率较高时会下降，黏聚力会随疏浚砂取代率的增大而增大。

3) DSC 的压剪峰值位移随着取代率的增加呈现先增大后减小的趋势，这是由于适量的疏浚砂减少混凝土内部孔隙，对混凝土的变形能力有一定的提高作用，但疏浚砂过多时混凝土内部大孔隙增多，反而降低了混凝土的变形能力。

4) 通过对 DSC 破坏界面的微观形貌分析可知，一定量的疏浚砂可以改善试件内部孔隙结构，使骨料之间结合得更加紧密。疏浚砂取代率过高会对混凝土搅拌过程中的水化反应产生不利影响，导致混凝土水化程度的降低。

5) 利用试验数据提出了基于八面体空间和基于 Ottosen 模型的破坏准则，并给出了准则方程中的拟合参数，试验数据与拟合结果的吻合程度较高，可用于 DSC 破坏阶段的计算。