

DOI: 10.11779/CJGE20240854

纤维加筋珊瑚砂力学特性及非共轴角计算模型

蔡燕燕¹, 宣章清¹, 张小燕², 刘家顺³, 薛鹏¹, 朱要亮⁴, 俞缙¹

(1. 华侨大学福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 2.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083;
3. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 4. 福建江夏学院工程学院, 福建 福州 350018)

摘要: 为研究纤维加筋珊瑚砂的强度和变形性质, 开展不同密实度和聚丙烯纤维掺量的珊瑚砂常规三轴试验和空心扭剪试验及非共轴角计算模型研究。结果如下: ①相比素珊瑚砂, 聚丙烯纤维珊瑚砂强度有显著提升, 且最佳纤维掺量在 0.3%左右, 密实度为 65%时纤维加筋珊瑚砂强度提升效果较好; ②主应力轴旋转下, 加筋珊瑚砂剪应变随密实度的增大而减小, 旋转 90°后珊瑚砂体积略微膨胀, 非共轴角总体表现为先减小后增大的趋势, 密实度越高, 珊瑚砂共轴性越强; ③建立了一种考虑共轴和非共轴耦合变形的纤维加筋珊瑚砂非共轴角计算模型, 试验数据验证了纤维加筋珊瑚砂非共轴角计算模型的准确性。

关键词: 聚丙烯纤维; 珊瑚砂; 非共轴角计算; 纤维掺量; 密实度

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2025)12-2551-08

作者简介: 蔡燕燕(1982—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学与工程方面的科研及教学工作。E-mail: yycai@hqu.edu.cn。

Mechanical characteristics and non-coaxial angles calculation model of fibre reinforced coral sand

CAI Yanyan¹, XUAN Zhangqing¹, ZHANG Xiaoyan², LIU Jiashun³, XUE Peng¹, ZHU Yaoliang⁴, YU Jin¹

(1. Fujian Engineering Technology Research Center for Tunnel and Underground Space, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 4. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To study the strength and deformation properties of fibre-reinforced coral sand, conventional triaxial and hollow torsional shear tests and non-coaxial computational modelling of coral sand with different densities and polypropylene fibre dosage are carried out. The results show that: (1) Compared with the coral sand, the strength of polypropylene fibre coral sand is significantly improved, and the best fibre doping is around 0.3%, and the strength of fibre-reinforced coral sand is better when the densification is 65%. (2) Under the rotation of the main stress axis, the shear strain of the reinforced coral sand decreases with the increase of compactness, and the volume of the coral sand slightly expands after the rotation of 90°, and the non-coaxial angle generally shows a tendency of decreasing and then increasing, and the higher the compactness is, the stronger the coral sand coaxiality is. (3) A non-coaxial angle calculation model of fibre-reinforced coral sand is established by considering the co-axial and non-coaxial coupling deformation, and the test data verify the accuracy of the non-coaxial angle calculation model of fibre-reinforced coral sand.

Key words: polypropylene fiber; coral sand; non-coaxial angles calculation; fibre content; compactness

0 引言

由于陆源砂等基础建材的运输成本较高, 珊瑚砂

作为各国海域平台的主要组成成分, 引起了国内外学者的高度关注。然而, 珊瑚砂内部孔隙率高、棱角分

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U2444220); 国家自然科学基金项目(52374090, 42077254); 福建省科技计划引导性项目(2022Y0029); 福建省自然科学基金项目(2023J011105) This work was supported by Project of the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China for Geology (Grant No. U2444220), National Natural Science Foundation of China Projects (Grant Nos. 52374090, 42077254); Fujian Provincial Science and Technology Plan Guiding Project (Grant No. 2022Y0029); and Fujian Provincial Natural Science Foundation Project (Grant No. 2023J011105).

收稿日期(Received): 2024-08-26 **修回日期(Revised):** 2025-01-10 **接受日期(Accepted):** 2025-02-25 **网络出版日期(Online):** 2025-02-26

明且酸性较强, 这些特性导致其工程性质较差, 成为制约中国岛礁建设的一大难题^[1]。

针对珊瑚砂的不同特性, 国内外学者进行了相应地研究, 包括珊瑚砂级配、细颗粒含量以及液化特性等方面^[2-4]。为了提高珊瑚砂的承载力, 加筋是目前提高砂土类材料强度较常采用的处理手段之一^[5]。常见的加筋材料有土工织物、土工格栅^[6]和纤维等。然而, 土工格栅等加筋材料通常以一定的方向分布在砂土中, 导致砂土各向异性显著且易形成潜在滑移面。实际工程中较多采用聚丙烯纤维、玻璃纤维和碳纤维^[7-8]等纤维材料均匀散布于砂土体中, 形成空间网络, 削减砂土体的各向异性, 使得加筋砂土各向强度较为均衡。在各种常用纤维加筋材料中, 聚丙烯纤维强度高、韧性足、成本低, 可抑制砂土开裂变形, 表现出良好的市场应用前景^[9]。试验表明未考虑主应力轴旋转下非共轴特性的浅基础设计缺乏足够的安全性^[10], 而砂土的应力方向旋转普遍存在于岩土工程中^[11], Coletti 等^[12]、Liu 等^[13]研究发现, 主应力轴旋转下土的非共轴角变化呈现波动式变化。砂土受载荷下的非共轴角变化大小反映了砂土的非共轴特性的强弱^[14], 严佳佳等^[15]针对软黏土提出了应力旋转下非共轴角计算方法。陈星耀等^[16]提出了软黏土的简易指型非共轴角计算模型。田雨等^[17]认为砂土的各向异性是引起非共轴现象的根本原因, 流动方向(即塑性势面)与屈服面不完全重合可以体现非共轴特性, 但都缺乏考虑主应力轴旋转下共轴与非共轴性的相互影响。

以聚丙烯纤维作为加筋材料开展珊瑚砂的三轴试验和主应力轴旋转试验。通过试验研究了加筋珊瑚砂的强度、变形特性以及非共轴角的变化规律, 并建立了相应的加筋珊瑚砂非共轴角计算模型, 期望改善珊瑚砂的强度和黏结性能。

1 试验材料及试验方案

1.1 材料成分及参数

试验所用的珊瑚砂采自南海某岛礁。珊瑚砂原状表观密度为 2.02 g/cm^3 , 孔隙率高达 48%, 矿物成分主要为石灰岩, 含量高达 95%以上。通过物理性质指标试验得出珊瑚砂不均匀系数 $C_u=3.93$, 曲率系数 $C_c=1.02$, 级配不良。最小孔隙比为 0.860, 最大孔隙比为 1.505。为保持试样粒径分布的一致性采用统一配比法, 如表 1 所示。选用的加筋材料聚丙烯纤维为束装单丝, 纤维长度为 9 mm, 直径为 $0.018 \sim 0.048 \text{ mm}$, 密度为 0.91 g/cm^3 , 抗拉强度 480 MPa, 弹性模量 4.8 GPa, 拉伸极限 15%。

1.2 试验仪器和方案

常规三轴固结排水试验所采用仪器为英国 GDS

公司研究生产的动三轴仪(DYNTTS)。将配制好的干砂试样提前浸泡饱和 12 h, 聚丙烯纤维分 5 次加入与砂样进行充分搅拌, 按《土工试验方法标准: GB/T50123—2019》中的压样法进行装样, 最终得到直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体试样, 之后对试样进行三轴排水剪切试验。固结围压为 100 kPa, 纤维掺量分别为 0, 0.1%, 0.3%, 0.5% (质量分数), 密实度 D_r 为 50%, 65%, 80% 共进行 12 种不同工况的试验, 每种试验条件下进行 3 组平行试验, 加载过程采用应变控制法, 加载速率为 0.05 mm/min。

表 1 砂样粒径配比表

Table 1 Grain size ratio of sand sample

粒径/mm	占比/%
2.36~4.75	20
1.18~2.36	20
0.6~1.18	30
0.3~0.6	20
0.15~0.3	7
0.075~0.15	3

主应力旋转下珊瑚砂的非共轴特性研究采用空心扭剪仪 GDS-HCA。试验系统可施加独立控制的轴力 W 、扭矩 M_T 、内压 P_i 及外压 P_0 。空心圆柱试样外径为 100 mm, 内径为 60 mm, 高度 h 为 200 mm。在主应力轴旋转试验中保持偏应力不变, 通过 3 个应力分量的大小实现大主应力轴以 $1^\circ/\text{min}$ 的速率进行旋转, 偏应力取值分别为 40, 60 kPa, 具体试验步骤请参考文献[13]。

2 三轴剪切试验结果

图 1 为不同密实度珊瑚砂偏应力-应变关系曲线和体积应变曲线。 $D_r=50\%$, 纤维掺入量较低时软化现象不明显。对比不同纤维掺量的偏应力峰值, 发现试样峰值强度在纤维掺量为 0.3% 时达到峰值, 当纤维掺量增加到 0.5% 时, 试样强度反而有不同程度下降。说明无纤维掺入时, 颗粒之间没有形成约束变形的完整网状结构; 而掺量过大时, 多余纤维局部堆积, 纤维间摩擦力小于纤维与颗粒间的摩擦力, 减小了局部纤维的拉力作用。因此, 加筋强度在聚丙烯纤维掺量为 0.3% 时最优, 这与文献[13]结果相一致。掺入纤维的试样峰值强度在密实度 65% 时最大, 说明珊瑚砂颗粒较密实时, 纤维受到挤压而发生弯曲变形, 导致其应力损失。因此工程中采用纤维加筋复合地基时, 应考虑砂土孔隙率的影响。

体应变曲线表明试样先剪胀后剪缩。随着纤维掺量的增加, 剪胀现象更为明显。因为聚丙烯纤维与珊瑚砂颗粒相互黏结产生的拉力作用, 阻止了颗粒与颗

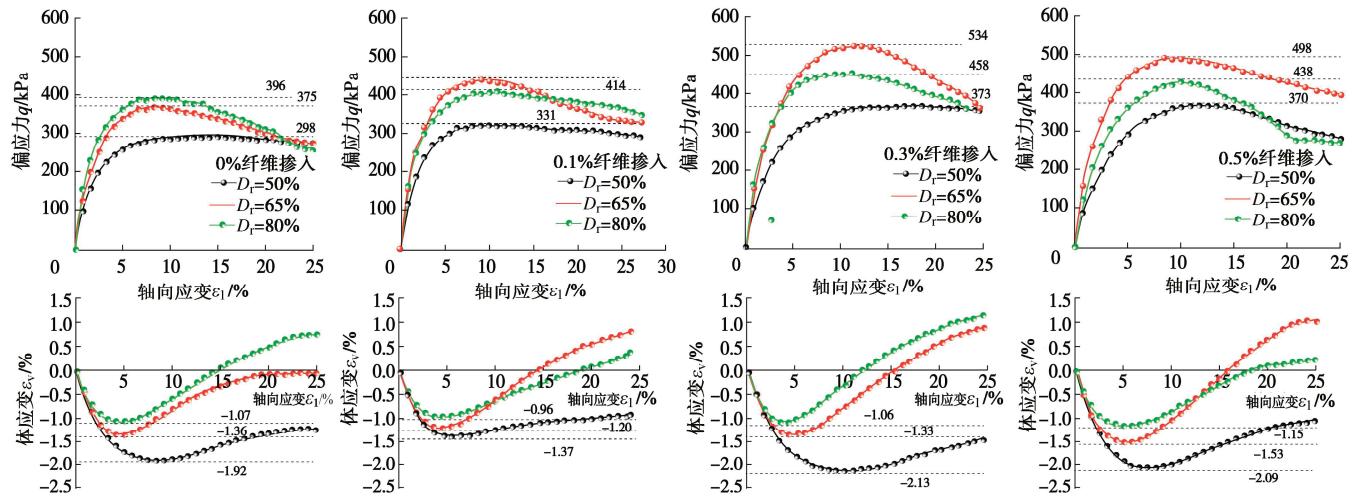


图1 不同密实度纤维加筋砂的应力-应变和体变曲线

Fig. 1 Stress-strain and volume strain curves of fiber reinforced sand with different compactness degrees

粒相对位置的改变, 外力作用下试样被不断压密, 其阻碍作用随着纤维掺量的增加而增强, 剪胀现象就愈加明显。各试样体积回弹所对应的轴向应变均为 5% 左右, 密实度越大, 越有利于珊瑚砂产生剪胀行为。

表2反映了密实度为 50% 时素珊瑚砂和掺入 0.3% (最优) 纤维的珊瑚试样强度与主应力方向的关系曲线。两组试样在受压状态下 ($\alpha = 0^\circ$) 强度均最高。掺入纤维后的珊瑚砂峰值强度均有所提高, 在大主应力方向角 α 等于 45° 时珊瑚砂强度提高最显著, 此时, 纤维与珊瑚砂的接触面积和相互作用力达到最优状态, 提高了整体的力学性能。三轴试验中, 主要在峰前观察到了应变增量与主应力轴不同步的非共轴现象^[17]。

表2 珊瑚砂强度与主应力方向角变化表

Table 2 Table of coral sand strength and principal stress direction

主应力方向角/ ($^\circ$)	0	45	75	90
偏应力/kPa	434	207	182	220
480	327	230	280	

3 纤维加筋珊瑚砂非共轴特性

3.1 珊瑚砂主应力轴旋转各应变分量变化

轴向应变 ε_z 、径向应变 ε_r 、环向应变 ε_θ 、剪应变 $\gamma_{\theta z}$ 以及体积应变 ε_v 随主应力轴旋转变化规律如图 2 所示。 ε_z 和 ε_θ 为一对相反的应变分量, ε_z 减少则 ε_θ 增大, 当应力主轴从垂直方向旋转到水平方向时, σ_z 不断减小, σ_θ 不断增大, 进而导致轴向应变与径向应变异位。在主应力轴旋转过程中, 当 $D_f=50\%$ 时, 纤维掺量分别为 0%, 0.1%, 0.3% 的峰值剪应变依次为 0.44%, 0.31%, 0.2%, 因此, 峰值剪应变随着纤维掺量的增加而减小。此外, 剪应变随主应力轴旋转的变化趋势表现为先增大后减小。当纤维掺量为 0.3% 时,

随着密实度的增加, 剪应变逐渐减小, 显示出可恢复的弹性变形特征。当珊瑚砂试样纤维掺量和密实度都较高时, 主应力轴旋转 90° 后试样体积较初始状态略有膨胀, 应变分量值的变化都相对较小。

非共轴角 β 的定义为

$$\beta = \alpha_{de} - \alpha \quad . \quad (1)$$

式中: α_{de} 为主应变增量方向角。

偏应力为 40 kPa 时, 不同密实度下素珊瑚砂的非共轴角的变化趋势如图 3 (a) 所示。当主应力轴开始旋转时, 主应变沿着不同的角度增加。由文献[17]可知, 砂土在主应力轴旋转下应变沿 90° 呈现周期波动, 珊瑚砂非共轴角随主应力轴从 0° 旋转到 90° 整体表现为先减小后增加的趋势, 最小值在 $45^\circ \sim 50^\circ$, 而最大值在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 。 D_f 为 50%, 65%, 80% 非共轴角度均值分别为 36° , 28° , 17° , 说明增加试样密实度可以使得试样共轴性明显好转。

主应力轴旋转下最优纤维掺量珊瑚砂的非共轴角变化规律如图 3 (b) 所示。密实度达到 80% 时, 非共轴角区间缩小幅度较大。对比图 3 (a) 发现, 纯主应力轴旋转应力路径下, 纤维的掺入对非共轴角的变化规律影响显著。具体表现为非共轴角的平均值减小, 与大主应力方向的关联性较弱。主应力轴的旋转时, 素珊瑚砂试样非共轴角波动更显著。随着密实度的增加, 非共轴角的变化区间逐渐减小。

3.2 加筋珊瑚砂非共轴角计算模型

主应力轴旋转下纤维加筋珊瑚砂的非共轴角计算模型方法如图 4 所示 (d 表示增量), 其中纤维加筋珊瑚砂破坏面的形式是用应变表示, 故素珊瑚砂的应变破坏面在纤维加筋珊瑚砂的外围。

通过流动法则确定破坏边界面和应变增量方向角, 图中的圆和椭圆曲线分别表示偏应力平面内应力

旋转路径以及应变平面内纤维加筋破坏边界和素珊瑚砂破坏边界。对于应力旋转路径上任意点 A 引起的应变增量方向, 可通过 A 点处应力增量方向与破坏边界的交点连线指向原点的方向来确定, 破坏边界

面上应变映射点 B 或 B' 与坐标原点之间连线的角度即为两倍的应变增量方向角 $2\alpha_{d\epsilon}$ 。

应力旋转平面内主应力轴纯旋转的应力路径方程为(任意旋转应力路径都可以表示为 x 和 y 的函数):

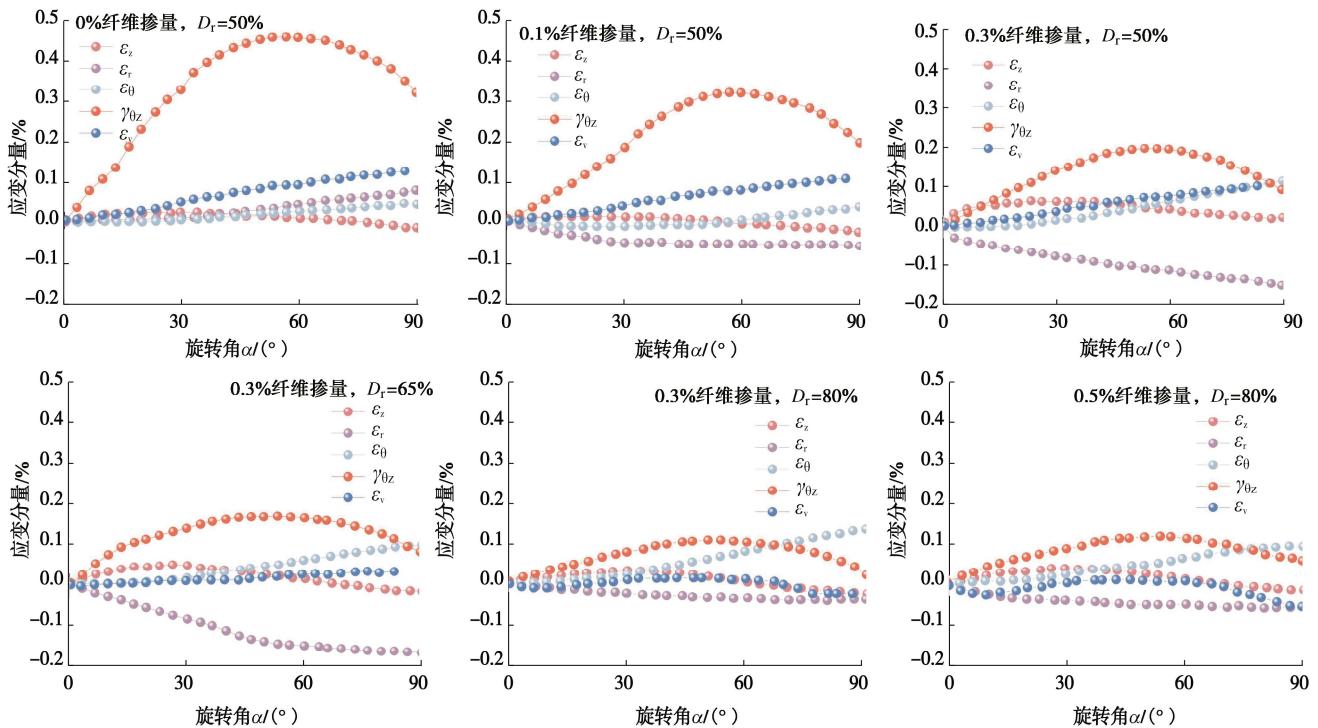


图 2 不同条件下应变分量变化

Fig. 2 Variation of strain component under different conditions

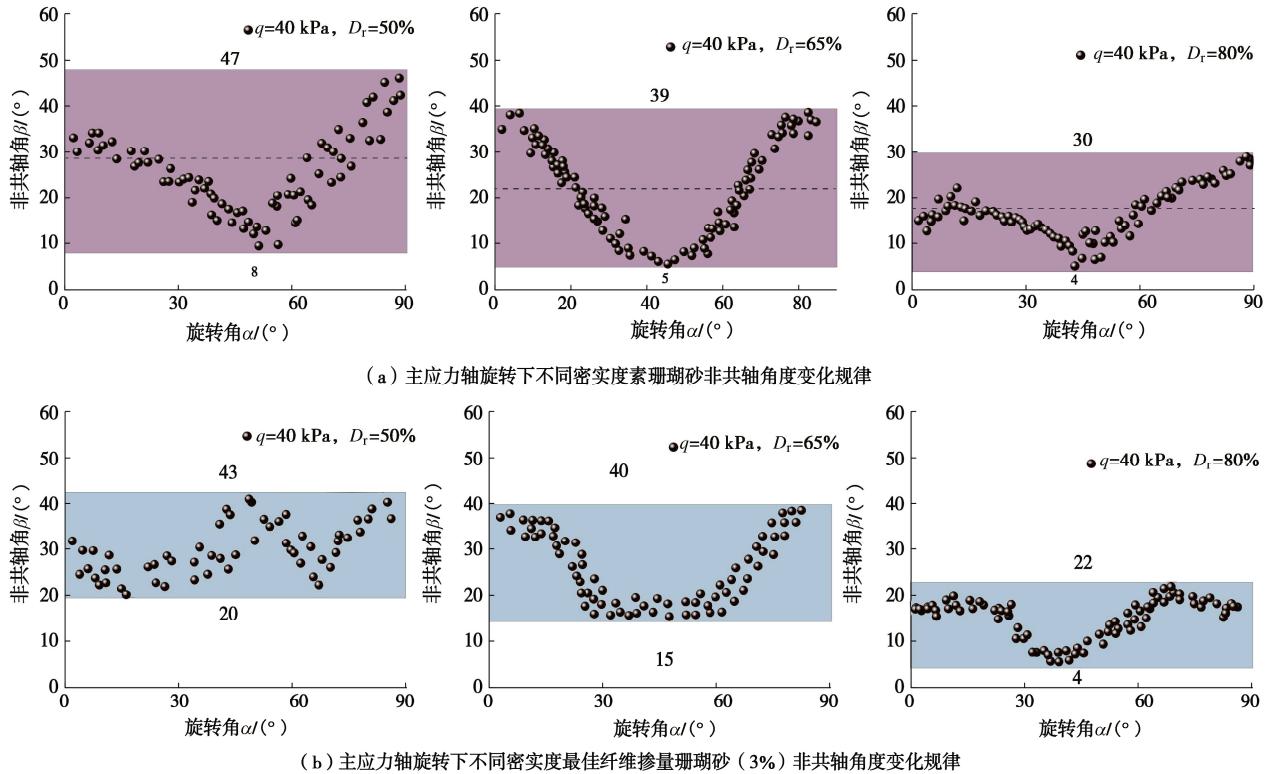


图 3 主应力轴旋转下不同密实度珊瑚砂非共轴角度变化规律

Fig. 3 Non-coaxial angle variate rules of different compactness under principal stress axis rotation

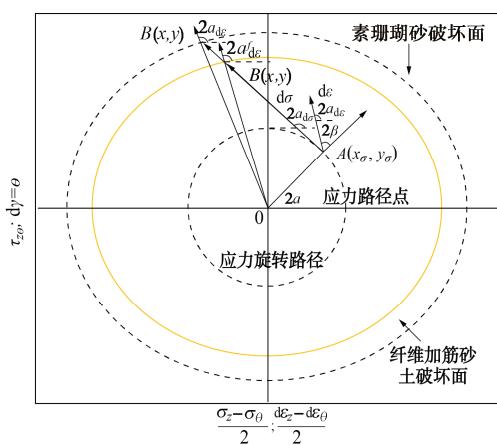


图 4 应力旋转下非共轴角计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of non-coaxial angle calculation under stress rotation

$$\left. \begin{aligned} x_\sigma &= \frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2} = q_\sigma \cos 2\alpha, \\ y_\sigma &= \tau_{z\theta} = q_\sigma \sin 2\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: q_σ 为任意应力路径点到原点的距离, 而应力增量的直线方程为

$$y = \frac{-1}{\tan 2\alpha} (x - x_\sigma) + y_\sigma \quad . \quad (3)$$

将砂土的变形分为共轴部分和应力旋转导致的非共轴部分,分别称为旋转分量和共轴分量,由于主应力轴旋转在一个平面内,将该平面内两个方向主应变进行分解,如图 5 所示,旋转平面内,两个主应变方向对应的方位为 N_1 和 N_2 。则主应变可分解为

$$\varepsilon = (N_1 \quad N_2) \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} = S_1 A S_1^T \quad \circ \quad (4)$$

$$\text{式中: } S_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}; \quad S_1^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}.$$

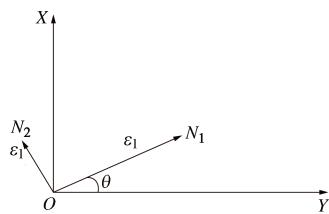


图 5 应力旋转路径下的主应变分解图

Fig. 5 Principal stress decomposition diagram under stress rotation path

在应变表示的坐标系下, 共轴部分应变增量 $d\varepsilon_c$, 矩阵的正对角元素不为零, 而副对角线元素为零, 此时式(4)中矩阵 S_1 和 S_1^T 为常数阵, 只有对角元素的 ε_1 和 ε_3 变化,

$$d\mathbf{e}_c = d(S_l A S_l^T) = S_l (dA) S_l^T = S_l \begin{bmatrix} d\mathbf{e}_1 & 0 \\ 0 & d\mathbf{e}_3 \end{bmatrix} S_l^T \quad (5)$$

旋转部分应变增量 $d\varepsilon_r$ 是由主应变轴旋转角增量 $d\theta$ 所产生, 其主应变值不变, 主应变轴方向变化导致的应变增量。此时式 (4) 中对角阵为常数阵, 矩阵 S_1 和 S_2 改变,

$$d\varepsilon_r = d(S_1 \Lambda S_2^T) = dS_1 \Lambda S_1^T = S_1 \Lambda dS_1^T \quad , \quad (6)$$

$$S_1^T d\mathcal{E}_r S_1 = S_1^T (dS_1 A S_1^T + S_1 A dS_1^T) S_1 \\ = \begin{bmatrix} 0 & d\theta(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \\ d\theta(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

因此, 应变增量可分解为共轴部分分量 $d\varepsilon_c$ 和旋转部分应变分量 $d\varepsilon_r$,

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}_c + d\boldsymbol{\varepsilon}_r = S_1 \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_3 \end{bmatrix} S_1^T + S_1 \begin{bmatrix} 0 & K_2 \\ K_2 & 0 \end{bmatrix} S_1^T. \quad (8)$$

式中: $K_1 = d\varepsilon_1$, $K_2 = d\varepsilon_3$, $K_3 = d\theta(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ 。

定义共轴与非共轴之比 $f = \frac{d\varepsilon_c}{d\varepsilon_r}$ 量化珊瑚砂的非共轴度。

补充素珊瑚砂和加筋珊瑚砂破坏边界面方程即可求得应力增量方向角, 将主应力轴旋转下的体积应变出现剪胀或者偏应力峰值处应变作为破坏边界的应变, 如图 6 所示 (其中 y 轴下部分是通过试验数据对称映射的虚拟点, 偏应力 $q=60 \text{ kPa}$ 的数据用于对模型进行验证而不参与边界的拟合)。由于纤维加筋珊瑚砂破坏边界面是由应变表示的, 故纤维加筋珊瑚砂的破坏面在内部。

以应变表示的破坏边界各点的应变坐标为

$$\left. \begin{aligned} x &= \left(\frac{\mathcal{E}_z - \mathcal{E}_\theta}{2} \right)_f, \\ y &= (\gamma_{z\theta})_f \end{aligned} \right\} \quad . \quad (9)$$

通过试验所得到纤维加筋下的非共轴角变化规律,结合珊瑚砂破坏边界的形式和考虑非共轴程度建立纤维加筋下破坏边界面方程:

$$B_\sigma = \sqrt{\left[\cos 2\alpha (\varepsilon_c + \varepsilon_a) + \frac{f}{M_b} \right]^2 + (\varepsilon_a \sin 2\alpha)^2 + \frac{\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{\varepsilon'_c + \varepsilon_c}}, \quad (10)$$

$$M_b = \frac{1}{2} |K_{d\sigma}| \exp^{-n_b D_r} \circ$$

式中: ε_a 为各主应力方向下的剪切时砂体的极限应变; ε_c 为 0° (强度最大值) 时素珊瑚砂剪切应变; ε'_c 为 0° 时纤维加筋下的珊瑚砂剪切应变; M_b 为砂的组构状态函数, 用以表征珊瑚砂的内在组成的影响; $K_{d\sigma}$ 为应力增量的直线斜率; n_b 为纤维掺量; D_r 为珊瑚砂密实度。该模型考虑了珊瑚砂的密实度、纤维掺入量

和珊瑚砂共轴与非共轴耦合的影响。当珊瑚砂无纤维掺入时, $\varepsilon'_c=0$, $n_b=0$, 破坏边界面方程退化为素珊瑚砂时的破坏边界面方程。

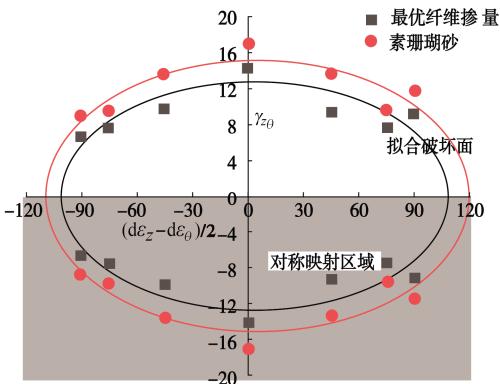


图 6 珊瑚砂拟合破坏边界面

Fig. 6 Fitting destroy boundary surface of coral sand

对 3 个参数进行归一化处理如图 7 所示:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{n_{bi} - n_{b0}}{n_{bn} - n_{b0}}, \\ D_2 &= \frac{D_{ri} - D_{r0}}{D_{rn} - D_{r0}}, \\ D_3 &= \frac{f_i - f_0}{f_n - f_0} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: D_1 , D_2 , D_3 分别为珊瑚砂的纤维掺入量、密实度和非共轴度的归一化变量; n_{b0} , D_{r0} , f_0 分别为与前述变量依次对应的初始变量; n_{bi} , D_{ri} , f_i 分别为中间状态变量; n_{bn} , D_{rn} , f_n 分别为末变量。

拟合发现珊瑚砂密实度和纤维掺入量与非共轴度 f 呈线性关系。由于破坏边界面是轴对称的, 应力旋转路径平面内加筋珊瑚砂的破坏边界面方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2} &= (\varepsilon_c + \varepsilon_\alpha) \cos 2\alpha + \frac{f}{M_b}, \\ \tau_{z\theta} &= \varepsilon_\alpha \sin 2\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

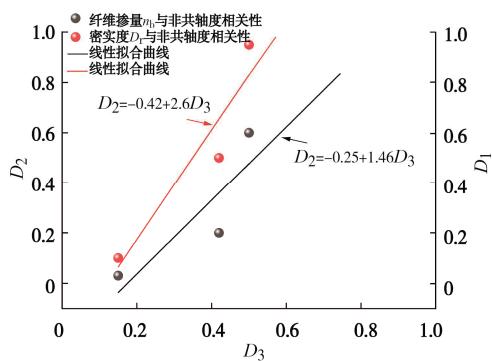


图 7 参数相关性分析

Fig. 7 Parametric correlation analysis

3.3 非共轴角计算模型验证与讨论

根据加筋珊瑚砂和素珊瑚砂下破坏边界面方程形

式, 通过应力路径上各点的坐标确定破坏边界面上映射的应变增量坐标, 得到应力旋转下的应变增量方向角。通过拟合破坏边界面确定各个参数的取值, 其中 $\varepsilon_c=8\%$, $\varepsilon'_c=18\%$, $n_b=0.3\%$, 预测 $D_r=50\%$, $q=60 \text{ kPa}$ 情况下的非共轴角变化 (该组数据不参与前文模型的建立)。按照主应力轴旋转试验下各个象限的对称性得到 α_{dc} , 其表达式为 $\alpha_{dc}=0.5 \arctan(y/x)$ 。按照试验应力路径, 计算得到的偏应力为 60 kPa 主应力旋转下素珊瑚砂和最优纤维加筋珊瑚砂非共轴角试验点与计算曲线的对比结果, 如图 8 所示。

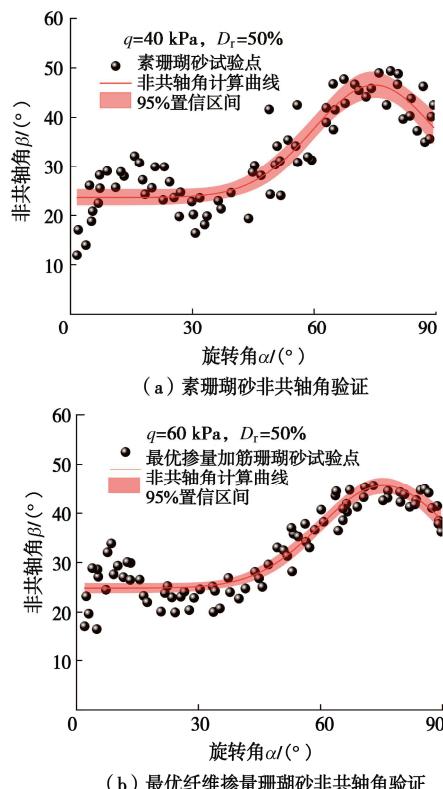


图 8 非共轴角试验值和计算值对比

Fig. 8 Comparison of test values and calculated values of non-coaxial angle

偏应力为 60 kPa 下对最优纤维掺量加筋的珊瑚砂非共轴角进行计算, 并与试验值进行对比。结果显示, 计算曲线与试验点总体较吻合, 95%置信区间进一步验证了模型的高置信度。该模型能够有效反映剪应力水平、应力旋转角以及非共轴程度等关键因素对非共轴角的影响。此外, 该模型所需的额外参数较少, 仅需通过常规三轴试验即可确定破坏边界面, 因此具备良好的应用价值。

所建立的模型适用于交通、波浪和地震荷载的作用下主应力轴偏转较大的情况, 尤其是珊瑚砂颗粒这种本身强度不高, 且颗粒大小不均匀的砂, 在作为建筑材料的时候, 必须考虑其受力主轴的方向性变化。

4 结 论

文章开展了聚丙烯纤维加筋珊瑚砂的三轴以及主应力轴旋转试验, 并建立了纤维加筋珊瑚砂非共轴角计算模型, 得到 3 点结论。

(1) 纤维的加入对珊瑚砂的抗剪强度有显著增强作用, 最优掺量为 0.3%。当密实度为 65% 时, 纤维加筋珊瑚砂的强度较高。试样破坏强度和加载方向相关, 在主应力轴 0° , 75° 方向进行加载时获得最大和最小破坏强度。

(2) 纯主应力轴旋转时, 峰值剪应变随着纤维掺量的增大而增大。非共轴角的变化规律为先减小后增大, 且最小值出现在主应力轴旋转角在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 内。密实度越大, 非共轴角的变化区间越小。

(3) 通过试验结果建立一种考虑非共轴度的纤维加筋珊瑚砂非共轴角计算模型, 并且归一化处理得到模型不变量, 同时验证了珊瑚砂的非共轴角度变化预测效果, 说明了模型的准确性。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 宣章清和蔡燕燕参与研究内容设计, 俞缙和蔡燕燕提供试验指导, 薛鹏和宣章清完成试验和分析, 张小燕, 刘家顺和朱要亮参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by XUAN Zhangqing and CAI Yanyan. The experiments were supervised by CAI Yanyan and YU Jin. The experiments and analyses were conducted by XUAN Zhangqing and XUE Peng. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Xiaoyan, LIU Jiashun and ZHU Yaoliang. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 旷杜敏, 龙志林, 周益春, 等. 珊瑚礁岩土材料的物理力学性能研究综述[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2018, 40(5): 108-126. (KUANG Dumin, LONG Zhilin, ZHOU Yichun, et al. A review of the physical and mechanical properties of coral reef[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2018, 40(5): 108-126. (in Chinese))
- [2] 蔡正银, 陈元义, 朱 涣, 等. 级配对珊瑚砂颗粒破碎与变形特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 661-670. (CAI Zhengyin, CHEN Yuanyi, ZHU Xun, et al. Influences of gradation on particle breakage and deformation characteristics of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 661-670. (in Chinese))
- [3] 吴 杨, 崔 杰, 李 晨, 等. 细粒含量对岛礁吹填珊瑚砂最大动剪切模量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 205-216. (WU Yang, CUI Jie, LI Chen, et al. Experimental study on the effect of fines on the maximum dynamic shear modulus of coral sand in a hydraulic fill island-reef[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 205-216. (in Chinese))
- [4] 杨铮涛, 秦 悠, 吴 琦, 等. 循环加载频率对饱和珊瑚砂液化特性的影响[J]. 岩土力学, 2023, 44(9): 2648-2656. (YANG Zhengtao, QIN You, WU Qi, et al. Influence of cyclic loading frequency on liquefaction behaviors of saturated coral sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2648-2656. (in Chinese))
- [5] 杨宇曦. 钢筋与纤维增强珊瑚混凝土的黏结性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021. (YANG Yuxi. Study on Bond Performance between Steel Bar and Fiber Reinforced Coral Concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021. (in Chinese))
- [6] 骆赵刚, 丁选明, 欧 强, 等. 土工格栅加筋珊瑚砂的强度及变形特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 1053-1064. (LUO Zhaogang, DING Xuanming, OU Qiang, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of coral sand reinforced by geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 1053-1064. (in Chinese))
- [7] 严荣富, 尹升华, 刘家明, 等. 掺聚丙烯纤维粗骨料膏体流变性能及计算模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1450-1460. (YAN Rongfu, YIN Shenghua, LIU Jiaming, et al. Rheological properties and calculation models of coarse aggregate paste with polypropylene fiber[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1450-1460. (in Chinese))
- [8] 鲍成志, 洪成雨, 孙德安, 等. 增材制造碳纤维 FBG 土压力传感器的研发与验证[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106002. (BAO Chengzhi, HONG Chengyu, SUN Dean, et al. Development and verification of carbon fiber based FBG earth pressure sensors using additive manufacturing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106002. (in Chinese))
- [9] QIN Y, XU D S, ZHANG S S, et al. Dynamic behavior of carbon nanotubes and basalt fiber reinforced coral sand cement mortar at high strain rates[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127396.
- [10] 姚仰平, 刘 林, 罗 汀. 砂土的 UH 模型[J]. 岩土工程

- 学报, 2016, **38**(12): 2147-2153. (YAO Yangping, LIU Lin, LUO Ting. UH model for sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(12): 2147-2153. (in Chinese))
- [11] 刘家顺, 张向东, 孙嘉宝, 等. 主应力轴旋转下 K_0 固结饱和粉质黏土孔压及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(8): 2787-2794, 2804. (LIU Jiashun, ZHANG Xiangdong, SUN Jiabao, et al. Experimental study on the pore pressure and deformation of saturated silty clay under K_0 consolidation and principal stress axis rotation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(8): 2787-2794, 2804. (in Chinese))
- [12] COLETTI G, BALMER E M, BIALIK O M, et al. Microfacies evidence for the evolution of Miocene coral-reef environments in Cyprus[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, **584**: 110670.
- [13] LIU J S, ZHU K X, SHEN Y, et al. Experimental investigation on the deformation and noncoaxial characteristics of fiber-reinforced aeolian soil under traffic load[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, **22**(5): 04022054.
- [14] DU Z B, SHI Z H, QIAN J G, et al. Constitutive modeling of three-dimensional non-coaxial characteristics of clay[J]. Acta Geotechnica, 2022, **17**(6): 2157-2172.
- [15] 严佳佳, 林清辉, 傅了一. 应力旋转条件下软黏土非共轴角计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, **47**(9): 3117-3124. (YAN Jiajia, LIN Qinghui, FU Laozi. Calculation of non-coaxial angle of soft clay under stress rotation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, **47**(9): 3117-3124. (in Chinese))
- [16] 陈星耀. 基于复杂应力路径饱和砂土动力试验的本构模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (CHEN Xingyao. Study on Constitutive Model of Saturated Sand Based on Complex Stress Path Dynamic Test[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [17] 田雨, 姚仰平, 罗汀. 从各向异性的角度解释和模拟土的非共轴特性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(6): 2035-2042. (TIAN Yu, YAO Yangping, LUO Ting. Explanation and modeling of non-coaxiality of soils from anisotropy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(6): 2035-2042. (in Chinese))