

文章编号: 1001-4888(2023)06-0789-11

# 聚丙烯纤维加筋尾矿剪切特性试验及模型研究\*

易富<sup>1,2</sup>, 周芳颜<sup>3</sup>, 杜常博<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 建筑与交通学院, 辽宁阜新 123000; 2. 北京京能地质工程有限公司, 北京 102300;

3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 为研究聚丙烯纤维加筋尾矿作为路基填料的可行性, 通过大型直剪试验分析不同法向应力下聚丙烯纤维掺量及含水率对尾矿抗剪性能的影响。试验结果表明: 纤维掺量对黏聚力的影响比内摩擦角要大, 加筋尾矿的黏聚力随纤维掺量的增加先增大后减小, 最优掺量为 0.3%; 随含水率增大, 加筋尾矿的黏聚力呈现先增大后减小的趋势, 最优含水率为 7%, 受含水率影响加筋尾矿内摩擦角的变化幅度在 5° 以内。纤维加筋指数可以反映纤维掺量及含水率对加筋效果的影响, 它与黏聚力的关系符合幂函数特征, 对内摩擦角的影响不大。通过引入纤维加筋指数来修正 Duncan-Chang 模型, 建立了模型参数与纤维加筋指数之间的数学关系式, 破坏比和参数  $K$  与纤维加筋指数呈现二次函数的特点, 参数  $n$  受纤维加筋指数影响较小。修正后模型的预测曲线可准确反映加筋尾矿的真实剪切特性, 并能对其在路基工程中的应用提供参考和预测分析。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 尾矿; 直剪试验; 抗剪强度; Duncan-Chang 模型

**中图分类号:** TU411 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-248

## 0 引言

《“十四五”循环经济发展规划》明确要求 2025 年大宗固废利用率要达到 60% 以上, 存量大宗固废有序减少。目前我国固体废弃物存量基数大、综合利用率低, 其中尾矿综合利用率仅为 27.69%<sup>[1]</sup>。为了促进尾矿的综合利用, 本文认为可以在尾矿库所在地附近合理采用尾矿作为路基填料, 这样不仅能减小尾矿的存放量, 降低尾矿库的安全风险, 而且能有效节约公路修筑的成本。根据《公路路基设计规范》<sup>[2]</sup>, 路基填料的安全服役指标主要为压实度和承载比, 高路堤还需额外进行稳定性验算。直接应用尾矿难以满足路基设计的力学要求, 需要通过无机物稳定或者物理加筋的方法来提高其力学特性。纤维加筋技术是一种新型的土体改良技术, 它是通过纤维在土体里的随机分布, 以达到增强土体整体力学性能的目的<sup>[3]</sup>。近年来, Welker<sup>[4]</sup>、Lovisa<sup>[5]</sup> 和 Anagnostopoulos<sup>[6]</sup> 等研究了不同纤维掺量、含水率和平均粒径对纤维加筋砂土抗剪强度的影响, 认为加筋砂土的最佳纤维掺量为 0.2%, 且在低含水率的条件下中密态细砂的加筋效果最好。郑彬彬等<sup>[7]</sup> 通过三轴试验, 系统分析了尾矿干密度、纤维参数对加筋尾矿力学性能的影响, 试验结果表明抗剪强度随干密度的增大而增大, 尾矿颗粒越粗糙, 纤维加筋效果越好。为研究纤维增强土体力学性能的作用机理, 唐朝生<sup>[8]</sup> 和王德银<sup>[9]</sup> 等借助扫描电子显微镜, 从微观的角度分析了纤维在土中的表面形态特征及接触面之间力的产生和传递过程, 发现纤维加筋机理缘于单

\* 收稿日期: 2022-10-04; 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774163); 辽宁省教育厅青年基金资助项目(LJKQZ2021153); 辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(LNTU20TD-12)

通信作者: 易富(1978-), 男, 博士, 教授。主要从事环境岩土工程及道路工程方向的研究。Email: yifu9716@163.com

根纤维的一维拉筋作用以及纤维网三维拉筋作用,且加筋效果取决于筋-土界面应力的的大小。李建等<sup>[10]</sup>通过与传统直线形纤维对比,分析了波形纤维-土界面的力学作用机理,由于波形纤维能和土体互相咬合,相比于直线形纤维,波形纤维能显著提高土体的剪切强度。土体的本构模型是描述土体力学特性的数学表达式,在本构模型研究中,为了考虑某种因素对土体力学性能的影响,研究人员通常引入合适的特性表征参数对已有本构模型进行修正,如冯燕博等<sup>[11]</sup>基于三轴试验结果通过引入结构性量化参数修正了 Duncan-Chang 模型,修正后的模型能够很好地反映混合赤泥随时间的强度增长特性。胡亚元等<sup>[12]</sup>通过三轴试验研究了纤维对淤泥固化土的剪切特性及 Duncan-Chang 模型参数的影响,从而建立了纤维加筋淤泥固化土的 Duncan-Chang E-B 模型。上述研究大多围绕黄土、膨胀土等土体开展,针对尾矿的研究比较鲜见,由于尾矿与天然土两者物理力学性质差异较大,加筋尾矿的研究不能直接采用土体的相关研究成果。鉴于此,本文通过大型直剪试验研究纤维掺量和含水率对聚丙烯纤维加筋尾矿抗剪性能的影响;基于试验结果引入纤维加筋指数来修正 Duncan-Chang 模型,建立了模型参数与纤维加筋指数之间的数学关系式;并通过修正后的 Duncan-Chang 模型来描述加筋尾矿的剪切特性,以供工程参考。

## 1 试样制备与试验方案

### 1.1 试验材料

试验尾矿取于辽宁省阜新市某尾矿库,最大干密度为  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。该尾矿主要物相为石英、赤铁矿,主要化学组成见表 1。通过筛分试验得到其不均匀系数  $C_u=3.3$  和曲率系数  $C_c=0.9$ ,尾矿颗粒均匀属于级配不良砂,级配曲线如图 1 所示。试验加筋材料选用聚丙烯纤维,外观呈乳白色分散的单丝纤维如图 2 所示,它是以丙烯聚合而成的高分子化合物,具有耐腐蚀、韧性好、强度高、不吸水、造价低等特性,物理参数见表 2。

表 1 尾矿的主要化学组成

Tab.1 Main chemical composition of tailings

组分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
含量/%	75.31	12.06	5.60	2.10	1.22

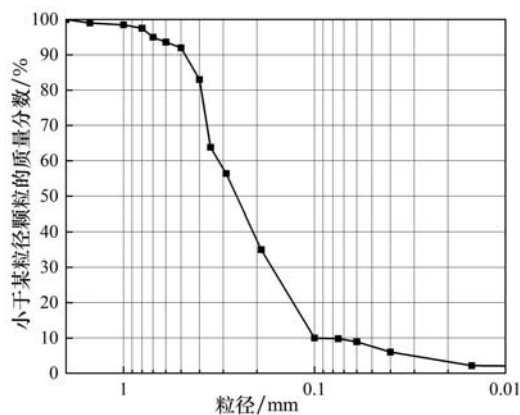


图 1 尾矿砂级配曲线

Fig. 1 The gradation curve of tailings



图 2 聚丙烯纤维

Fig. 2 Polypropylene fibers

表 2 聚丙烯纤维物理参数

Tab.2 Physical parameters of polypropylene fibers

颜色	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	直径/μm
乳白色	469	28.40	4236	0.91	32.70

### 1.2 试验仪器和试验方案

试验采用自主研发的直剪拉拔摩擦试验机,直剪试验设备如图 3 所示。该试验机主要由试验箱、水平拉力系统、竖向加压系统和数码可视设备组成,水平拉力系统采用应变式控制加荷,竖向加压系统通过外接气压加载装置来加荷。试验选用长度为 6mm 的聚丙烯纤维和天然含水率为 10% 的尾矿,将分散后的聚丙烯纤维按尾矿质量百分比的掺量掺入尾矿中共制备 9 组试验的试样,每组试验设置 4 种法向应力,试验直剪速率设置为 2mm/min。通过视频显微镜对加筋尾矿直剪过程进行实时观测,采用 Digital-Camera 软件对图像进行采集和初步处理,试验方案见表 3。



图 3 直剪试验设备

Fig. 3 Direct shear test equipment

表 3 试验方案

Tab. 3 Test scheme

编号	纤维掺量/%	纤维长度/mm	含水率/%	法向应力/kPa
T1-2	0	0	7、10	
T3-6	0.2、0.3、0.4、0.5	6	10	40、80、120、160
T7-9	0.3	6	4、7、13	

## 2 纤维加筋尾矿抗剪性能分析

### 2.1 纤维掺量对加筋尾矿剪切特性的影响

不同纤维掺量加筋尾矿的剪切应力-剪切位移曲线如图 4 所示。素尾矿的剪切应力-剪切位移曲线弹性阶段相对较短,且达到峰值应力后,剪切应力随着剪切位移的持续增加而逐渐变得平缓。而加筋尾矿随着纤维掺量的增加,曲线的弹性阶段明显增长且呈现应变硬化的特征。此现象可归因于随机分布在尾矿中的离散纤维可以提高加筋尾矿在各个方向上的抗剪强度,从而抑制潜在弱平面的进一步发展,增强了尾矿的整体塑性。纤维掺量对加筋尾矿抗剪强度指标的影响如图 5 所示,加筋尾矿的黏聚力随着纤维掺量的增加先增大后减小,在纤维掺量为 0.3% 时达到峰值,即最佳纤维掺量、加筋尾矿的内摩擦角受纤维掺量影响不大。在直剪试验中采用视频显微镜对加筋尾矿的纤维-尾矿界面进行实时观察,

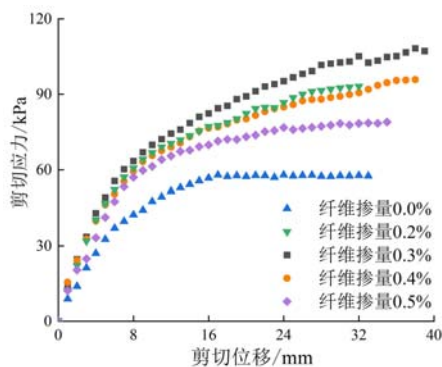


图 4 不同纤维掺量剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves of different fiber content

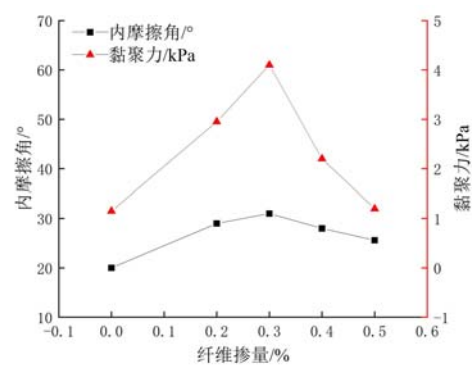


图 5 不同纤维掺量的抗剪强度指标

Fig. 5 Shear strength index of different fiber content

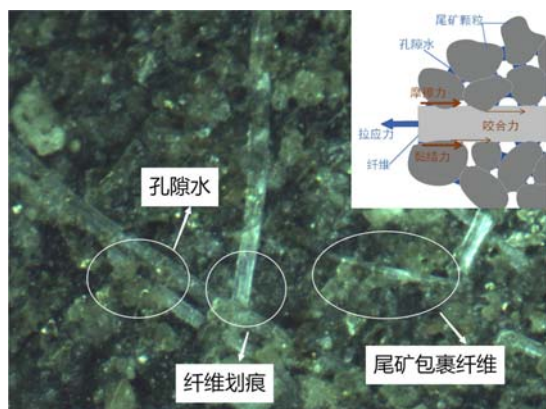


图6 视频显微镜下的纤维

Fig. 6 Fibers under video microscope

纤维在尾矿中的状态及分布如图6所示。随机分布的纤维之间存在着许多交错点,由于纤维周围尾矿的包裹作用,这些交错点逐渐转变为具有一定弹性的铰链结构,这使得纤维在试样中形成空间网状结构,有利于尾矿和纤维之间实现有效的应力传递。当纤维掺量超过0.3%时,纤维在尾矿中的有序排列会越来越明显,导致尾矿中产生潜在的破坏面,从而弱化空间网状结构,使得加筋尾矿更容易因受到外力而破坏。

2.2 含水率对加筋尾矿剪切特性的影响

在纤维掺量为0.3%的条件下,不同含水率加筋尾矿的剪切应力-剪切位移曲线如图7所示,曲线表现出明显的应变硬化特征。加筋尾矿的抗剪强度指标随含水率的变化曲线如图8所示,由图可知黏聚力随着含水率的增加先增大后减小,含水率为7%时黏聚力最大,内摩擦角随含水率的变化范围在5°以内。王德银等<sup>[9]</sup>认为含水率对加筋土内摩擦角的影响较黏聚力小得多。而本文设置含水率从4%增加到7%,黏聚力增长80%,内摩擦角增长8.8%,当含水率从7%增加到13%时,黏聚力减小46.9%,内摩擦角减小了15.6%,也同样验证了含水率对黏聚力影响较大的观点。其原因是内摩擦角主要与尾矿的颗粒级配、大小及密实度等紧密相关,含水率的变化对筋土界面的摩擦系数有一定影响,但对其颗粒级配、大小及密实度等的影响程度不明显<sup>[13]</sup>。当含水率较小时,含水率的增加会使得尾矿之间的胶凝作用增强<sup>[14]</sup>,纤维与尾矿之间的包裹性更好,宏观体现为加筋尾矿抗剪强度的增大。当含水率增加较大时,尾矿间的吸力减小,同时自由水变多导致纤维与尾矿表面形成的水膜加厚(图6),水分子对纤维与尾矿的界面作用有一定的润滑作用,会减小纤维与尾矿之间的摩擦系数,从而导致抗剪强度减小。

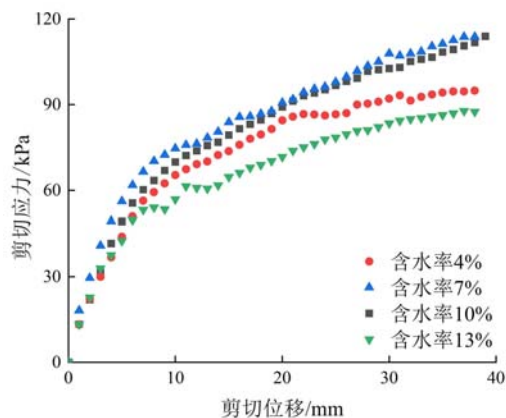


图7 不同含水率剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 7 Shear stress-shear displacement curves with different water contents

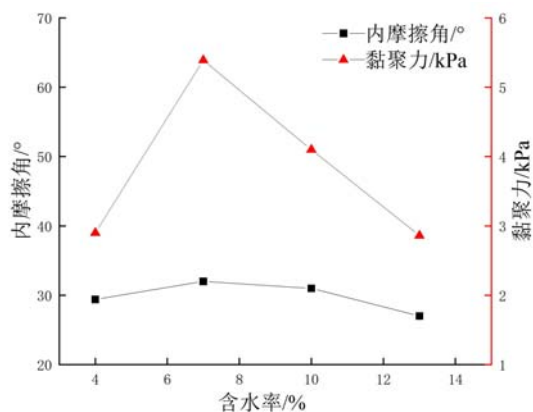


图8 不同含水率的抗剪强度指标

Fig. 8 Shear strength index of different water content

### 3 考虑纤维掺量及含水率的修正 Duncan-Chang 模型

#### 3.1 Duncan-Chang 模型简介

安然<sup>[15]</sup>和王军<sup>[16]</sup>等对 Duncan-Chang 模型进行的修正可以很好地应用到直剪试验中,本节将在此基础上进一步进行研究。由图4和图7可知,加筋尾矿的剪切应力-剪切位移曲线表现出明显的非线性关系,曲线近似为双曲线,故根据 Kondner<sup>[17]</sup>的建议,尾矿剪切应力-剪切位移符合如下关系:

$$\tau = \frac{\delta}{a + b\delta} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为剪切应力, kPa;  $\delta$  为剪切位移, mm;  $a$  为初始切线模量  $E_i$  的倒数,  $\text{kPa}^{-1}$ ;  $b$  为极限剪切强度  $\tau_{ult}$  的倒数,  $\text{kPa}^{-1}$ ,  $a$ 、 $b$  都为模型参数。

由于尾矿的压硬性, 随着法向应力的增加, 初始模量  $E_i$  和极限剪切强度  $\tau_{ult}$  会随之提高。Janbu<sup>[18]</sup> 的研究发现初始切线模量与法向应力之间存在指数关系:

$$E_i = K \cdot Pa \left( \frac{\sigma_n}{Pa} \right)^n \quad (2)$$

式中:  $K$  为初始切线模量基数;  $n$  为无量纲指数;  $\sigma_n$  为法向应力, kPa;  $Pa$  为标准大气压, 取 101.3 kPa。

通过对剪切应力-剪切位移曲线上任意一点求导, 可以得到曲线上该点的瞬时剪切模量。对式(1)进行微分, 得到可用于直剪试验的切线模量  $E_t$  表达式:

$$E_t = K \cdot Pa \left( \frac{\sigma_n}{Pa} \right)^n \left( 1 - \frac{\tau R_f}{\tau_f} \right)^2 \quad (3)$$

破坏时的剪切强度  $\tau_f$  与理论极限剪切强度  $\tau_{ult}$  之比为破坏比  $R_f$ , 公式如下:

$$R_f = \frac{\tau_f}{\tau_{ult}} \quad (4)$$

式中,  $R_f$  取值一般为 0.75~1.0。

### 3.2 Duncan-Chang 模型的修正

基于第2节试验所得结果, 提出一个纤维加筋指数来量化纤维掺量和含水率对加筋尾矿加筋效果的影响<sup>[19]</sup>, 其定义为

$$I_r = \frac{F_r}{F_d} = \frac{\tau_{ft}' / \tau_{ft}}{\tau_{ft} / \tau_{ft}'} \quad (5)$$

式中:  $I_r$  为纤维加筋指数;  $F_r$  为纤维掺量对加筋效果的影响;  $F_d$  为含水率对加筋效果的影响;  $\tau_{ft}$  为素尾矿的抗剪强度, kPa;  $\tau_{ft}'$  为加筋尾矿的抗剪强度, kPa;  $\tau_{ft}$  为最佳含水率条件下素尾矿的抗剪强度, kPa;  $\tau_{ft}'$  为不同含水率条件下加筋尾矿的抗剪强度, kPa。

在纤维加筋指数的表达式中, 分子  $F_r$  的数值越大, 说明加筋尾矿所受剪切应力与素尾矿所受剪切应力差值越大, 加筋尾矿的加筋效果越好, 在纤维掺量为 0% 时分子最小且最小值为 1。分母  $F_d$  的数值越小, 说明在某一含水率条件下加筋尾矿所受的剪切应力与最佳含水率条件下素尾矿所受的剪切应力差值越大, 根据分母表达式可知分母最大值小于 1, 故纤维加筋指数为大于 1 的数。纤维加筋指数随着纤维掺量和含水率的变化而变化, 当分子越大(即处于最佳纤维掺量条件下)时, 分母越小(即处于最佳含水率条件下), 纤维加筋指数最大。9 组试验抗剪强度及纤维加筋指数统计见表 4, 由表可知纤维加筋指数适用于评价不同纤维掺量及含水率的加筋效果, 但不能反映法向应力对加筋效果的影响。

表 4 抗剪强度及纤维加筋指数统计表

Tab. 4 Statistics of shear strength and fiber reinforcement index

法向应力	40kPa		80kPa		120kPa		160kPa	
编号	抗剪强度 /kPa	纤维加筋 指数	抗剪强度 /kPa	纤维加筋 指数	抗剪强度 /kPa	纤维加筋 指数	抗剪强度 /kPa	纤维加筋 指数
T1	15.86	2.05	30.61	1.75	45.47	1.70	59.811	1.80
T2	15.36	1.90	29.52	1.66	43.97	1.62	57.94	1.72
T3	25.11	3.10	48.20	2.71	66.94	2.47	92.51	2.74
T4	30.12	3.72	50.77	2.85	73.63	2.71	102.66	3.04
T5	24.54	3.03	44.47	2.50	63.38	2.33	89.18	2.64
T6	20.69	2.56	39.29	2.21	57.54	2.12	78.36	2.32
T7	25.46	3.15	47.00	2.64	70.50	2.60	92.12	2.73
T8	32.59	4.03	53.50	3.01	77.39	2.85	107.90	3.20
T9	22.57	2.79	44.00	2.47	58.80	2.17	83.42	2.47

根据试验数据可得到加筋尾矿的抗剪强度指标;对试验数据进行分析,可得到纤维加筋指数与加筋尾矿内摩擦角和黏聚力的关系,分别如图9、图10所示。

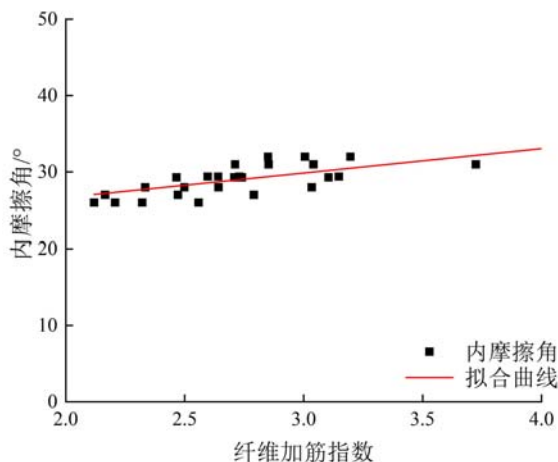


图9 纤维加筋指数与内摩擦角的关系

Fig. 9 Relationship between fiber reinforcement index and internal friction angle

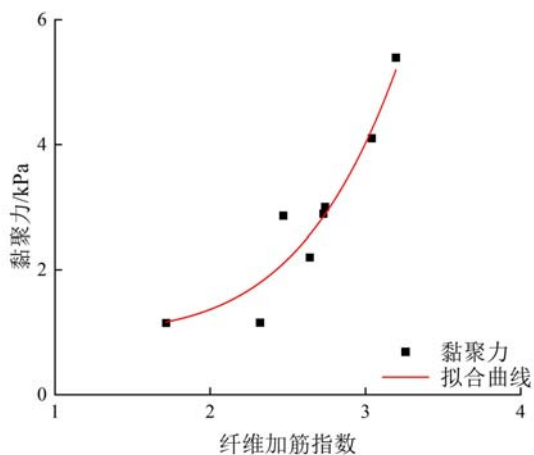


图10 纤维加筋指数与黏聚力的关系

Fig. 10 Relationship between fiber reinforcement index and cohesion

由图10可知,加筋尾矿的黏聚力随着纤维加筋指数的增大而增大,其关系可用幂函数表达:

$$y = AX^B + C \quad (6)$$

式中,拟合参数 A、B、C 的值分别为 0.01、5.47、1。

加筋尾矿的内摩擦角受纤维加筋指数的影响不大,由图9可知,受纤维加筋指数的影响,内摩擦角取值为  $26^\circ \sim 31^\circ$ 。在进行后续计算时,加筋尾矿的内摩擦角近似取  $28^\circ$ ,素尾矿内摩擦角为  $20^\circ$ ,之所以加筋尾矿的内摩擦角高于素尾矿,是因为纤维在试样中的排列方式是随机的,剪切面上大多数纤维与剪切方向之间存在一定角度,这对于增强尾矿和纤维间的咬合摩擦作用是有利的。

对式(2)两边取对数得到

$$\lg \left( \frac{E_i}{Pa} \right) = \lg K + n \cdot \lg \left( \frac{\sigma_n}{Pa} \right) \quad (7)$$

由式(7)可知  $\lg(E_i/Pa)$  与  $\lg(\sigma_n/Pa)$  呈线性关系,可以拟合成斜率为  $n$ 、截距为  $\lg K$  的直线,拟合后的双对数曲线如图11、图12所示。

表5 Duncan-Chang 模型参数

Tab. 5 Duncan-Chang model parameters

编号	$R_f$	$k$	$N$
T3	0.812	0.101	0.658
T4	0.811	0.107	0.503
T5	0.814	0.099	0.664
T6	0.853	0.114	0.569
T7	0.804	0.105	0.511
T8	0.820	0.125	0.528
T9	0.825	0.109	0.658

对试验结果进行整理得出 Duncan-Chang 模型的3个材料参数( $K$ 、 $n$ 和 $R_f$ )见表5。随着纤维加筋指数的增加,参数  $n$  变化幅度为  $0.5 \sim 0.66$ 。参数  $K$  和破坏比  $R_f$  的曲线都随着纤维加筋指数的增加先减小后增大,呈现二次函数的特点。为了更好地探究纤维加筋指数对材料参数的影响,以纤维加筋指数作为自变量,参数  $K$  和破坏比  $R_f$  为因变量,进行回归性分析(图13、图14),得出参数  $K$  的拟合公式见

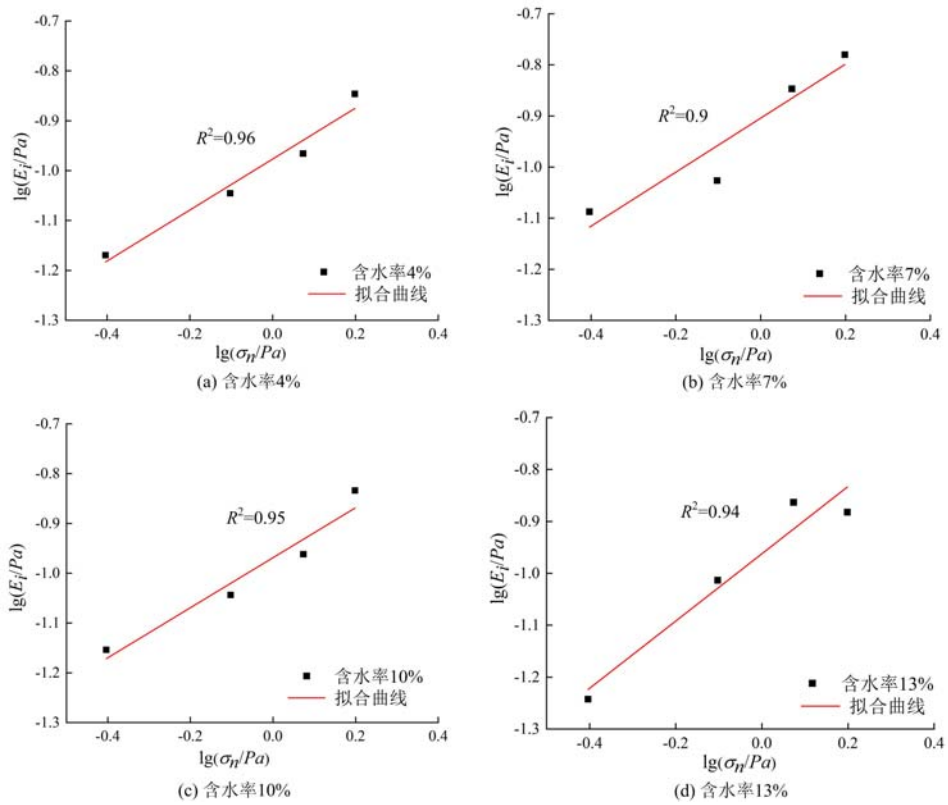


图 11 不同含水率对应的双对数关系拟合曲线

Fig. 11 The fitting curve of double logarithmic relationship corresponding to different water content

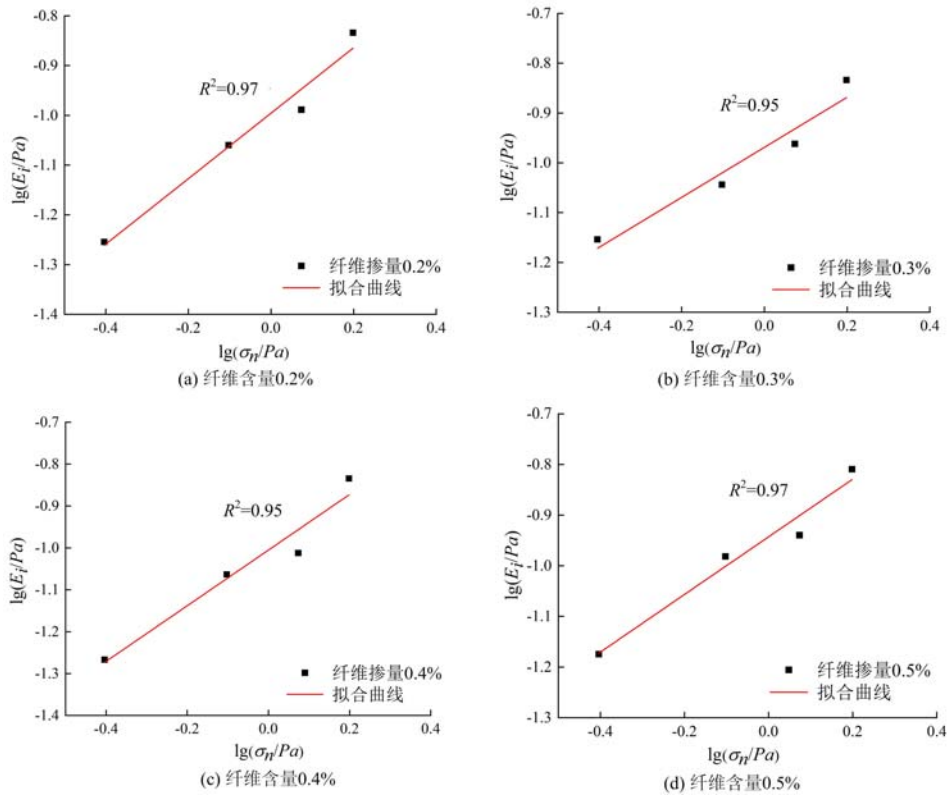


图 12 不同纤维掺量对应的双对数关系拟合曲线

Fig. 12 Double logarithmic relationship fitting curve corresponding to different fiber content

式(8)及破坏比  $R_f$  的拟合公式见式(9)。

$$K = 0.75 I_r^2 - 0.4 I_r + 0.66 \quad (8)$$

$$R_f = 0.127 I_r^2 - 0.738 I_r + 1.877 \quad (9)$$

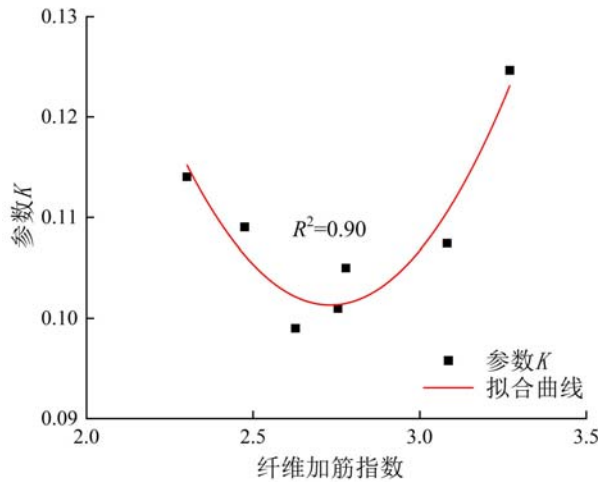


图 13 参数  $K$  与纤维加筋指数的关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between parameter  $K$  and fiber reinforcement index

修正后的 Duncan-Chang 模型能准确反映在不同含水率及纤维掺量下的加筋尾矿剪切应力-剪切位移曲线,修正后的模型不仅有利于加筋尾矿强度预测,同时也能为纤维加筋尾矿的工程设计提供参考依据。据上述推论可得出加筋尾矿本构关系中  $a$  和  $b$  参数的函数表达式为

$$a = \frac{1}{E_i} = \frac{1}{(0.75 I_r^2 - 0.41 I_r + 0.66) Pa (\sigma_n / Pa)^n} \quad (10)$$

$$B = \frac{1}{\tau_{dt}} = \frac{0.53 \sigma_n + AX^B + C}{0.127 I_r^2 - 0.738 I_r + 1.877} \quad (11)$$

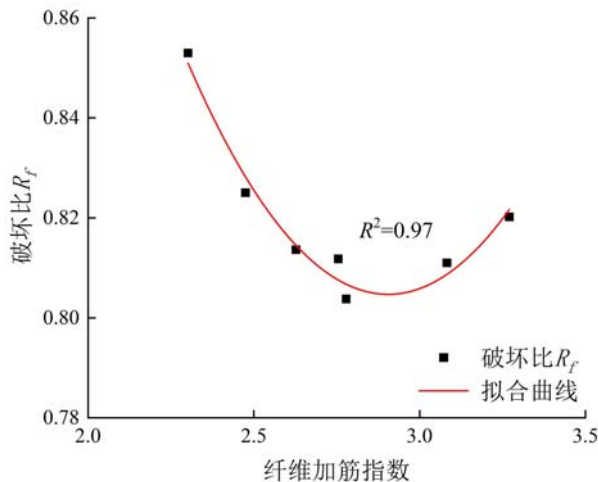


图 14 破坏比  $R_f$  与纤维加筋指数的关系曲线

Fig. 14 Relationship curve between failure ratio  $R_f$  and fiber reinforcement index

### 3.3 Duncan-Chang 模型验证

为验证引入纤维加筋指数修正后 Duncan-Chang 模型的合理性,选取聚丙烯纤维和阜新某尾矿库的尾矿制作纤维掺量为 0.1%、含水率为 6% 和 8% 的试样进行不同法向应力下(40kPa、80kPa、120kPa、160kPa)的大型直剪试验。将所得的试验曲线与本文提出修正后的模型进行比较,实测数据与本文预测值如图 15 所示。

由图 15 可以看出,改进 Duncan-Chang 模型能有效体现加筋尾矿试验曲线应变硬化的规律。当法



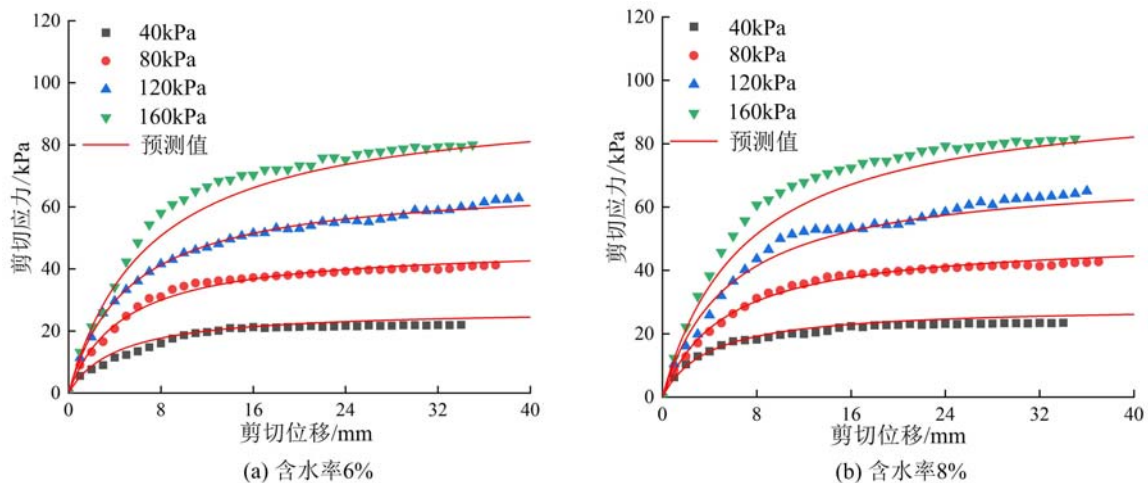


图15 预测值与试验值的对比曲线

Fig. 15 The comparison curve between the predicted value and the experimental value

向应力较小时,预测值更接近试验值,当法向应力较大时,试验曲线弹性阶段比预测曲线更长更陡。当剪切位移为30mm时,试验值与预测值之间的最大误差仅8%,可见,本文提出的改进 Duncan-Chang 模型对不同纤维掺量及含水率影响下加筋尾矿曲线的预测是合理有效的。

#### 4 结论

(1) 聚丙烯纤维作为尾矿的加筋材料,可有效提高尾矿的抗剪强度。加筋尾矿的黏聚力随着纤维掺量和含水率的增加均是先增大后减小呈现二次函数的特点,最佳纤维掺量为0.3%,最佳含水率为7%。而纤维掺量及含水率对加筋尾矿内摩擦角的影响都较小。

(2) 基于聚丙烯纤维加筋尾矿大型直剪试验得出的试验结果,提出了纤维加筋指数的表达式,该表达式能够反映不同纤维掺量及含水率状态下尾矿中掺入纤维的实际加筋效果。纤维加筋指数与加筋尾矿的黏聚力成正比,可采用幂函数拟合两者之间的关系,纤维加筋指数与内摩擦角的相关性较小。

(3) 通过对 Duncan-Chang 模型的材料参数进行回归性分析,建立了模型参数与纤维加筋指数之间的数学关系式,破坏比  $R_f$  和参数  $K$  与纤维加筋指数呈现二次函数特征,参数  $n$  受纤维加筋指数影响较小。由修正后的 Duncan-Chang 模型算出的模拟值与实际值较吻合,说明采用 Duncan-Chang 模型来预测加筋尾矿剪切变形特性是合理的。

#### 参考文献:

- [1] 刘文博,姚华彦,王静峰,等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊1):268-270 (LIU Wenbo, YAO Huayan, WANG Jingfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Materials Reports, 2020, 34(Suppl. 1):268-270 (in Chinese))
- [2] 公路路基设计规范: JTG D30-2004[S]. 北京:人民交通出版社, 2004 (Specification for design of highway subgrades: JTG D30-2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004 (in Chinese))
- [3] 刘宝生,唐朝生,李建,等. 纤维加筋土工程性质研究进展[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4):540-547 (LIU Baosheng, TANG Chaosheng, LI Jian, et al. Advances in engineering properties of fiber reinforced soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4):540-547 (in Chinese))
- [4] Welker A L, Josten N. Interface friction of a geomembrane with a fiber reinforced soil[C]// Geo-frontiers Congress, 2005:1-8.
- [5] Lovisa J, Shukla S K, Sivakugan N. Shear strength of randomly distributed moist fibre-reinforced sand[J]. Geosynthetics International, 2010, 17(2):100-106.
- [6] Anagnostopoulos C A, Papaliangas T T, Konstantinidis D, et al. Shear strength of sands reinforced with polypropylene fibers[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2013, 31(2):401-423.

- [7] 郑彬彬, 张东明, 王浩, 等. 玄武岩纤维增强尾矿力学性能的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3): 114—119 (ZHENG Binbin, ZHANG Dongming, WANG Hao, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber-reinforced tailings[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3):114—119 (in Chinese))
- [8] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4):610—614 (TANG Chaosheng, SHI Bin, GU Kai. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4):610—614 (in Chinese))
- [9] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10):1933—1940 (WANG Deyin, TANG Chaosheng, LI Jian, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10):1933—1940 (in Chinese))
- [10] 李建, 唐朝生, 王德银, 等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9):1696—1704 (LI Jian, TANG Chaosheng, WANG Deyin, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9):1696—1704 (in Chinese))
- [11] 冯燕博, 刘东燕, 杨超, 等. 考虑混合赤泥强度增长特性的修正邓肯-张模型[J]. 实验力学, 2018, 33(4):610—620 (FENG Yanbo, LIU Dongyan, YANG Chao, et al. Modification Duncan-Chang model considering strength growth characteristics of mixed red mud [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):610—620 (in Chinese))
- [12] 胡亚元, 余启致, 张超杰, 等. 纤维加筋淤泥固化土的邓肯-张模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8):1500—1508 (HU Yayuan, YU Qizhi, ZHANG Chaojie, et al. Duncan-Chang model for fiber reinforced silt solidified sludge [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8):1500—1508 (in Chinese))
- [13] 李雪梅, 陈玉明, 袁利伟, 等. 含水率对尾矿抗剪强度影响的试验研究[J]. 黄金, 2016, 37(4):70—73 (LI Xuemei, CHEN Yuming, YUAN Liwei, et al. Experimental study on the influence of water content on shear strength of tailings[J]. Gold, 2016, 37(4):70—73 (in Chinese))
- [14] 易富, 杜常博, 张利阳. 金尾矿与土工格栅界面摩擦特性的试验[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6):2217—2221 (YI Fu, DU Changbo, ZHANG Liyang. Experimental study on the interface friction characteristics between the gold tailings and the geogrid[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6):2217—2221 (in Chinese))
- [15] 安然, 孔令伟, 张先伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9):1723—1732 (AN Ran, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei. Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9):1723—1732 (in Chinese))
- [16] 王军, 林旭, 符洪涛. 砂土-格栅筋土界面特性的本构模型研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2):75—84 (WANG Jun, LIN Xu, FU Hongtao. Study of constitutive model of sand-geogrid interface behavior in geogrid/geotextile reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Suppl.2):75—84 (in Chinese))
- [17] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1963, 89:115—144.
- [18] Janbu N. Soil compressibility as determined by odometer and triaxial tests [C] // Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, 1963:19—25.
- [19] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼, 等. 纤维纱加筋黄土力学变形特性及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3):1059—1072 (CHU Feng, SHAO Shengjun, CHEN Cunli, et al. Mechanical deformation characteristics and constitutive model of fiber yarn reinforced loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3):1059—1072 (in Chinese))

## Experimental and model study on shear characteristics of polypropylene fiber reinforced tailings

YI Fu<sup>1,2</sup>, ZHOU Fangyan<sup>3</sup>, DU Changbo<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. Beijing Jingneng Geological Engineering Co., Ltd., Beijing 102300, China; 3. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of polypropylene fiber reinforced tailings as roadbed filler, the influence of polypropylene fiber content and water content on the shear performance of tailings under different normal stresses was analyzed by large-scale direct shear test. The test results show that: The influence of fiber content on cohesion is greater than that of internal friction angle. The cohesion of reinforced tailings increases first and then decreases with the increase of fiber content, and the optimal content is 0.3%. With the increase of water content, the cohesion of reinforced tailings increases first and then decreases. The optimal water content is 7%, and the variation range of the internal friction angle of reinforced tailings affected by water content is within 5°. The fiber reinforcement index can reflect the influence of fiber content and water content on the reinforcement effect. Its relationship with cohesion conforms to the power function characteristic, and has little effect on the internal friction angle. The Duncan-Chang model is modified by introducing the fiber reinforcement index, and the mathematical relationship between the model parameters and the fiber reinforcement index is established. The failure ratio and the parameter  $K$  are quadratic functions with the fiber reinforcement index, and the parameter  $n$  is less affected by the fiber reinforcement index. The prediction curve of the modified model can accurately reflect the real shear characteristics of reinforced tailings and provide theoretical guidance and prediction analysis for its application in roadbed engineering.

**Keywords:** polypropylene fiber; tailings; direct shear test; shear strength; Duncan-Chang model