

# 基于 PFC2D 的黄土轴向压裂试验 细观参数敏感性分析

贾乐琪<sup>1</sup>, 严松宏<sup>1,2</sup>, 孙纬宇<sup>1,2</sup>, 欧尔峰<sup>1,2</sup>, 张建<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 黄土的低抗拉能力是黄土地区工程建设中病害频发的重要原因。采用离散元程序 PFC2D 对黄土轴向压裂试验进行数值模拟, 通过控制变量法改变单个细观参数取值, 分析其对黄土抗拉特性的影响, 并结合正交试验, 对各细观参数进行了敏感性分析。结果表明: 黄土的抗拉强度与黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  呈对数递减关系, 与黏结强度  $\bar{\sigma}_c$ 、半径乘子  $\bar{\lambda}$  呈线性递增关系; 黄土的抗拉刚度与黏结刚度比呈对数递减关系, 与半径乘子呈线性递增关系; 半径乘子对抗拉强度的影响最强, 黏结刚度比对抗拉刚度的影响最强, 粒径比  $r^*$  对抗拉强度、抗拉刚度的影响均最弱。研究可为黄土轴向压裂试验数值模拟中细观参数的标定提供参考。

**关键词:** 黄土轴向压裂; 数值模拟; 抗拉强度; 细观参数; 敏感性分析; PFC2D

中图分类号: TV16

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0194-08

## Sensitivity analysis of meso-parameters of loess in axial fracturing test based on PFC2D

JIA Leqi<sup>1</sup>, YAN Songhong<sup>1,2</sup>, SUN Weiyu<sup>1,2</sup>, OU Erfeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The low tensile strength of loess is one of the important causes of the frequent occurrence of hazards in the engineering construction in loess area. Regarding to this problem, the numerical simulation of loess axial fracturing test is carried out using the discrete element program PFC2D, with which the influence of single meso-parameters on the tensile properties of loess is studied by variable-control method, and the sensitivity of each meso-parameter is analyzed by orthogonal test. The results show that the tensile strength of loess decreases logarithmically with the  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  ratio of bonding stiffness, and increases linearly with the bonding strength  $\bar{\sigma}_c$  and radius multiplier  $\bar{\lambda}$ . Moreover, The tensile stiffness of loess decreases logarithmically with the  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$  ratio, and increases linearly with the  $\bar{\lambda}$ . Furthermore, the radius multiplier has the strongest influence on the tensile strength, the bonding stiffness ratio has the strongest influence on the tensile stiffness, and the particle size ratio  $r^*$  has the weakest influence on the tensile strength and the tensile stiffness. The study can provide some reference for the selection of meso-parameters in the numerical simulation of loess axial fracturing tests.

**Key words:** axial fracturing of loess; numerical simulation; tensile strength; meso-parameter; sensitivity analysis; partial flow code in two demensions(PFC2D)

## 1 研究背景

随着西部大开发战略的持续推进, 黄土地区的

工程问题也日益凸出。传统土力学认为黄土的抗拉强度较小, 因而工程建设中常常不予考虑, 但黄土地区诸多工程病害的孕育和发展均与黄土抗拉强度不

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208392、52168058); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA309); 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室开放基金课题(GSDQ-KF2020-5); 中国博士后科学基金项目(2021M693843)

作者简介: 贾乐琪(1999—), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事黄土及黄土隧道方面的研究。

通讯作者: 孙纬宇(1988—), 男, 甘肃天水人, 博士, 讲师, 主要从事隧道与地下结构抗震方面的研究。

足有关<sup>[1-2]</sup>。目前,针对黄土抗拉特性的研究已取得诸多成果,胡海军等<sup>[3]</sup>采用标准击样法和击实仪法制取不同的黄土单轴拉伸试样,研究了两种制样方法对黄土抗拉强度的影响;吕东东等<sup>[4]</sup>基于巴西劈裂试验对比了原状、重塑黄土破坏时的形态,并分析了黄土劈裂抗拉强度与拉伸抗拉强度的相关性。轴向压裂法是方晓阳等<sup>[5]</sup>提出的一种测定土体抗拉特性的新方法,与单轴拉伸、巴西劈裂试验相比,轴向压裂法因其仪器简单且易于操作而得到了较为广泛的应用。如李春清等<sup>[6]</sup>研究了黄土轴向压裂试验中加载速率和试样的高径比、制样方法对抗拉强度的影响;吴旭阳等<sup>[7-8]</sup>分析了不同干密度、含水率对原状和重塑黄土拉应力-贯入深度关系曲线的影响;孙纬宇等<sup>[9-10]</sup>通过无侧限抗压和轴向压裂试验研究了加载速率对原状与重塑黄土抗压强度、抗拉强度的影响,并分析了加载柱直径、试样高径比与黄土抗拉强度的关系。

离散元方法因在细观机理方面独特的优势而受到诸多学者的青睐<sup>[11-14]</sup>,颗粒细观参数的标定是颗粒流模拟的关键。孙闯等<sup>[15]</sup>基于 PFC2D (particle flow code in two dimensions) 软件,建立了 Ball 和 Clump、可变半径比例 Clump 两种模型,分析了不同细观参数对花岗岩拉压比的敏感性;丛宇等<sup>[16]</sup>分别对岩石的常规三轴试验、加轴压卸围压试验进行了二维数值模拟,研究了岩石宏观参数与细观参数之间的等量关系;张志华等<sup>[17]</sup>利用 PFC2D 对粗粒土三轴固结排水试验进行模拟,分析了土体抗剪强度、摩擦角与细观参数之间的相关性;尹成薇等<sup>[18]</sup>结合了莫尔-库伦破坏准则与 PFC2D 软件,研究了砂土的宏观力学特性与细观参数的函数关系;董建鹏等<sup>[19]</sup>利用回归分析的方法研究了各细观参数对黄土直剪试验数值模拟结果的影响。

综上所述,岩土体数值模拟中细观参数对宏观力学特性具有重要影响。本文基于 PFC2D 对黄土轴向压裂试验进行数值模拟,分析各细观参数对黄土抗拉特性的影响,并结合正交试验设计对细观参数进行敏感性分析,为黄土轴向压裂试验数值模拟中细观参数的标定提供参考。

## 2 颗粒流的基本原理

颗粒流模型将岩土体颗粒假设为刚性圆盘(球),颗粒间的接触力大小与刚度和“重叠”量呈正相关。运用牛顿第二定律不断更新颗粒(墙体)间的“重叠”量,再利用力-位移法更新颗粒间的接触

力,以此反复迭代,达到平衡状态。

### 2.1 线性平行黏结模型

线性平行黏结模型的两个颗粒通过胶结板连接到一起,胶结板在加载作用下能够产生变形并传递颗粒间的拉应力,模型示意图如图 1 所示。图 1 中  $k_n$ 、 $k_s$  为颗粒的法向刚度与切向刚度, N/m;  $\bar{k}_n$ 、 $\bar{k}_s$  为平行黏结的法向刚度与切向刚度, Pa/m;  $\bar{\sigma}_c$  为法向黏结强度, kPa;  $g_s$  为颗粒表面间距, mm;  $\bar{c}$  为平行黏聚力, kPa;  $\bar{\varphi}$  为平行黏结内摩擦角, (°);  $\mu$  为摩擦系数。颗粒间的作用力由线性力、阻尼力与黏结力三者构成,黏结力矩由弯曲和扭曲力矩组成。黏结力  $\bar{F}$  与黏结力矩  $\bar{M}$  是胶结板发生变形时作用于颗粒上的力与力矩,其计算公式如下:

$$\bar{F} = -\bar{F}_n \hat{n}_c + \bar{F}_s \quad (1)$$

$$\bar{M} = \bar{M}_t \hat{n}_c + \bar{M}_b \quad (2)$$

式中:  $\bar{F}_n$ 、 $\bar{F}_s$  分别为法向黏结力和切向黏结力, N, 法向和切向黏结力的大小与黏结刚度密切相关;  $\hat{n}_c$  为接触力的法向向量;  $\bar{M}_t$ 、 $\bar{M}_b$  分别为扭曲力矩和弯曲力矩, N·m, 在二维中颗粒未发生扭曲, 即  $\bar{M}_t = 0$ 。

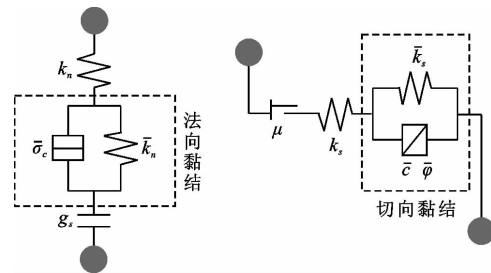


图 1 颗粒接触模型示意图

### 2.2 强度破坏准则

线性平行黏结模型的法向黏结强度与切向黏结强度分别为  $\bar{\sigma}_c$  和  $\bar{\tau}_c$ , 文中细观参数黏结强度即为法向黏结强度, 切向黏结强度根据模型强度破坏包线计算得到, 计算公式如下:

$$\bar{\tau}_c = \bar{c} - \bar{\sigma} \tan \bar{\varphi} \quad (3)$$

式中:  $\bar{\sigma}$  为法向黏结应力, kPa;  $\bar{c}$  为平行黏聚力, kPa;  $\bar{\varphi}$  为平行黏结摩擦角, (°)。

颗粒黏结处的应力大于黏结强度时, 平行黏结发生破坏, 线性平行黏结模型退化为线性接触模型, 当  $\bar{\sigma}_{\max} > \bar{\sigma}_c$  时发生拉伸破坏; 当  $\bar{\tau}_{\max} > \bar{\tau}_c$  时发生剪切破坏。最大应力的计算与法向黏结力、切向黏结力以及平行黏结半径密切相关, 平行黏结半径计算公式如下:

$$\bar{R} = \min(R_1, R_2) \bar{\lambda} \quad (4)$$

式中: $R_1$ 与 $R_2$ 为模型中两个相接触颗粒的半径,mm; $\bar{\lambda}$ 为半径乘子,二维中平行黏结半径即为胶结板宽度的一半。

### 3 基于 PFC2D 黄土轴向压裂试验模拟

维数不同时,试样的细观力学特性与结构演化规律具有显著差异,二维模型相较三维模型其颗粒之间的约束减少,且试样的应力达到峰值时的应变与试样的破裂范围均有所增大,但两者的抗剪强度大小相近<sup>[20]</sup>。本文采用二维颗粒流软件进行数值模拟。

#### 3.1 模型建立

在 PFC2D 中建立模型分为下列几个步骤:

(1)在矩形墙体内生成一定数量的颗粒集合,赋予颗粒初始参数,颗粒相对运动后达到平衡状态,本文一共生成了 8 007 个颗粒,共 17 197 个连接。

(2)删除矩形墙体,在试样模型上、下位置生成加载柱。

(3)设置颗粒的接触模型和主要的细观参数。模型示意图如图 2 所示,模型高度  $H = 62.5$  mm,直径  $b = 61.8$  mm;加载柱的直径  $a = 15.45$  mm。

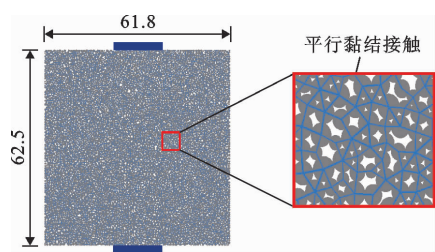


图 2 土样线性平行黏结模型示意图(单位:mm)

#### 3.2 参数验证

利用试错法确定模型的细观参数,对细观参数进行反复调制,最终使得数值模拟结果与室内试验结果相吻合,即数值模拟所得拉应力-贯入深度曲线与室内试验所得曲线相一致,以文献[21]中黄土拉应力-贯入深度曲线作为校核对象,确定主要的细观参数如表 1 所示。运用 PFC2D 对黄土轴向压裂试验进行数值模拟时,抗拉强度的理论计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$\sigma_t = \frac{0.5P}{H \cdot C - 0.5a} \quad (5)$$

式中: $P$ 为轴向施加的载荷,N;试样的高径比近似为 1.0,根据常数  $C$  的推荐值<sup>[23]</sup>, $C$ 取值为 1.0。

本文数值模拟与文献[21]中的拉应力-贯入深度曲线对比如图 3 所示。分析图 3 可知,由公式(5)计算得到黄土抗拉强度模拟值为 34.4 kPa,极

限贯入深度模拟值为 1.7 mm;文献[21]中室内试验所得到的黄土抗拉强度为 35.6 kPa,极限贯入深度为 1.8 mm;与试验值相比,模拟值抗拉强度偏差为 3.4%、极限贯入深度偏差为 5.5%;拉应力达到峰值前两者的曲线走势大致相同,达到峰值之后两曲线均迅速降低,试样均为脆性破坏。模拟结果与试验结果高度吻合,说明利用 PFC2D 对黄土轴向压裂试验进行数值模拟具有一定的准确性和可行性,可对黄土轴向压裂试验在细观层面作进一步研究与分析。

表 1 黄土试样主要细观参数

参数	取值	参数	取值
颗粒最小半径/mm	0.2	颗粒黏结模量/MPa	0.21
半径乘子	0.7	平行黏结摩擦角/(°)	60
颗粒摩擦系数	0.4	平行黏结刚度比	0.9
颗粒模量/MPa	0.16	平行黏结强度/kPa	9.8
颗粒刚度比	0.8	平行黏聚力/kPa	400

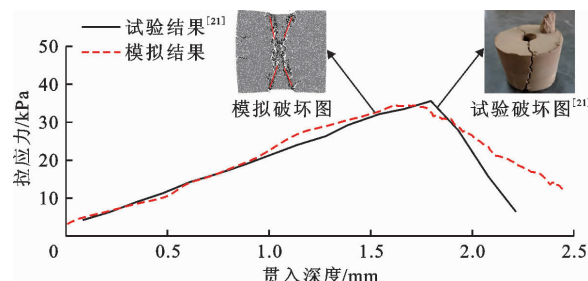


图 3 土样拉应力 - 贯入深度曲线数值模拟与试验结果对比

#### 3.3 数值模拟过程

根据相关研究及本文第 2 节的介绍可知,黏结刚度比  $\bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、黏结强度  $\bar{\sigma}_c$ 、半径乘子  $\bar{\lambda}$ 、粒径比  $r^*$  以及摩擦系数  $\mu$  对土体宏观力学特性有重要影响,运用控制变量法对不同细观参数条件进行轴向压裂试验数值模拟,细观参数的取值水平如表 2 所示。采用应变控制式的方法,对上、下加载柱施加大小为 0.1 mm/min 且方向相反的速度,并通过 FISH 程序遍历加载板的接触力,达到应变条件后停止加载。

表 2 轴向压裂试验数值模拟中细观参数取值水平

水平编号	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	$\bar{\sigma}_c$ /kPa	$\bar{\lambda}$	$r^*$	$\mu$
1	0.9	5.8	0.5	1.26	0.2
2	5.9	7.8	0.7	1.55	0.4
3	10.9	9.8	0.9	2.04	0.6
4	15.9	11.8	1.1	2.97	0.8
5	20.9	13.8	1.3	5.47	1.0

### 4 数值模拟结果与分析

轴向压裂试验中黄土呈脆性破坏,用抗拉刚度<sup>[24]</sup>来反映轴向压裂过程中土体对压裂破坏的抵抗能力,黄土的抗拉刚度为其拉应力峰值与对应的贯入深度的比值,用  $K$  表示,单位为  $\text{kPa}/\text{mm}$ 。

#### 4.1 单个细观参数对黄土抗拉特性影响的模拟结果

图 4 为黄土各细观参数与其抗拉强度、抗拉刚度的变化关系模拟结果。

从图 4(a)可以看出,黄土抗拉强度随着黏结刚度比的增大而迅速降低,当黏结刚度比增大至 5.9 后,抗拉强度的衰减速度逐渐减小,最终趋于平缓,当黏结刚度比从 0.9 增大到 5.9 时,抗拉强度从 34.4  $\text{kPa}$  降低到 23.5  $\text{kPa}$ ,降低幅度为 31.7%;黏结刚度比取值为 0.9 ~ 10.9 时,黄土抗拉刚度大幅度降低,黏结刚度比大于 10.9 之后,抗拉刚度趋于平稳,当黏结刚度比从 0.9 增大到 10.9 时,抗拉刚度从 20.5  $\text{kPa}/\text{mm}$  降低到 10.7  $\text{kPa}/\text{mm}$ ,降低幅度为 47.8%。由图 4(b)可知,随着黏结强度的增大,黄土抗拉强度始终以较快速率增长,但黄土抗拉刚

度却只是在 19 ~ 22  $\text{kPa}/\text{mm}$  之间波动;当黏结强度从 5.8  $\text{kPa}$  增大到 13.8  $\text{kPa}$  时,抗拉强度从 22.7  $\text{kPa}$  增大到 42.8  $\text{kPa}$ ,抗拉刚度从 19.7  $\text{kPa}/\text{mm}$  增大到 21.9  $\text{kPa}/\text{mm}$ ,增长幅度分别为 88.5%、11.2%。由图 4(c)变化关系可知,随着半径乘子的增大,黄土抗拉强度和抗拉刚度均呈快速增长的趋势,当半径乘子从 0.5 增大到 1.3 时,抗拉强度从 25.3  $\text{kPa}$  增大到 57.8  $\text{kPa}$ ,抗拉刚度从 16.7  $\text{kPa}/\text{mm}$  增大到 31.6  $\text{kPa}/\text{mm}$ ,增长幅度分别为 128.5%、89.2%,半径乘子通过改变平行黏结半径、截面面积以及截面惯性矩的大小来影响黄土颗粒间的黏结力与弯曲力矩,进而影响其抗拉强度和抗拉刚度。由图 4(d)可知,粒径比对抗拉强度和抗拉刚度的影响较弱,当粒径比从 1.26 增大到 5.47 时,抗拉强度在 32 ~ 37  $\text{kPa}$  之间波动,抗拉刚度在 19 ~ 23  $\text{kPa}/\text{mm}$  之间波动。图 4(e)表明,摩擦系数同样对黄土抗拉特性影响较弱,当摩擦系数从 0.2 增大到 1.0 时,抗拉强度从 32.8  $\text{kPa}$  增大到 35.5  $\text{kPa}$ ,抗拉刚度从 18.6  $\text{kPa}/\text{mm}$  增大到 22.2  $\text{kPa}/\text{mm}$ ,增长幅度分别为 8.2%、19.4%。

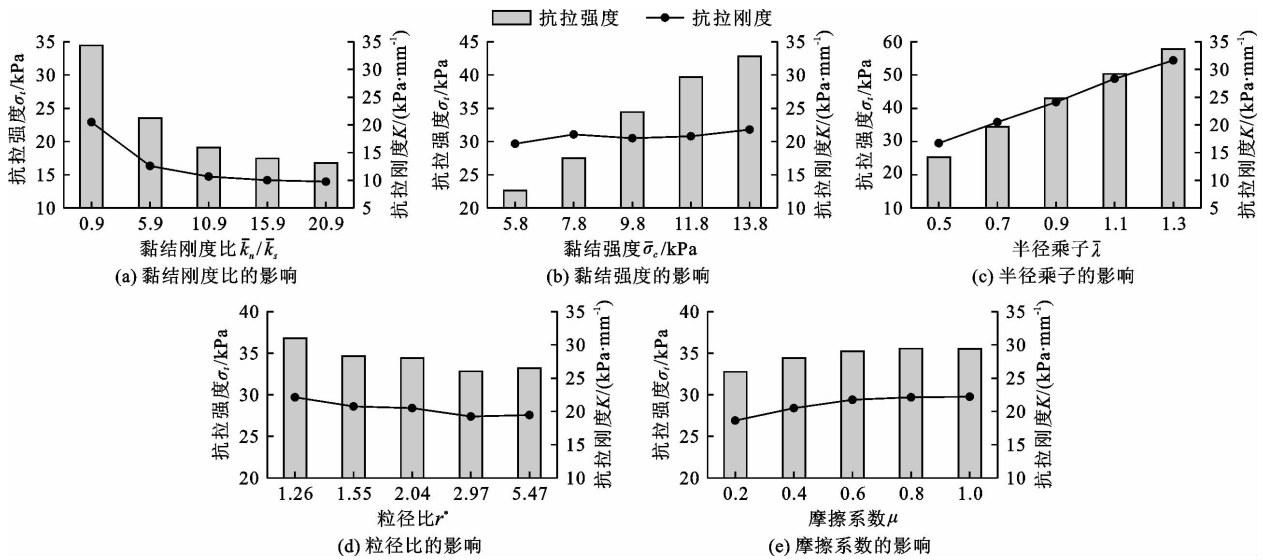


图 4 黄土各细观参数与其抗拉强度、抗拉刚度的变化关系模拟结果

对各细观参数与黄土抗拉强度、抗拉刚度进行函数拟合,拟合关系如表 3 所示。

由表 3 可知黏结刚度比与抗拉强度、抗拉刚度的模拟值均呈对数递减关系,相关系数  $R^2$  均大于 0.97;黏结强度只与黄土抗拉强度有明显的线性函数关系,而与抗拉刚度并无明显函数关系;半径乘子与抗拉强度、抗拉刚度的模拟值均呈线性函数关系,且相关系数  $R^2$  均大于 0.99;而粒径比、摩擦系数与

黄土抗拉强度、抗拉刚度均无明显的函数关系。

通过上述分析可知,黏结强度对黄土抗拉强度、抗拉刚度的影响相较于其他细观参数具有一定的特殊性,下面将通过试样的黏结力分布与裂纹演化规律对黏结强度的影响机理作进一步的研究与分析。

图 5 为不同黏结强度下拉应力峰值时的黏结力分布云图,由图 5 可看出,颗粒间的黏结力主要分布在上、下加载板之间,并在加载板位置处出现黏结力

集中。图中黑色表示裂纹,当黏结强度为 5.8 kPa 时,试样出现了交叉型的贯穿裂纹,且试样的变形较小;黏结强度增大到 13.8 kPa 时,只有试样的中部产生裂纹,同时试样的变形明显。

表 3 黄土各细观参数与其抗拉强度、抗拉刚度的拟合函数关系

细观参数	函数关系式	R <sup>2</sup>
黏结刚度比	$\sigma_t = -5.793 \ln x + 33.687$	0.995
	$K = -3.536 \ln x + 19.691$	0.977
黏结强度	$\sigma_t = 7.705 + 2.623x$	0.987
	$K = 18.811 + 0.199x$	0.656
半径乘子	$\sigma_t = 5.702 + 40.5x$	0.998
	$K = 7.297 + 18.839x$	0.999
粒径比	$\sigma_t = 36.097 - 0.646x$	0.495
	$K = 21.767 - 0.510x$	0.563
摩擦系数	$\sigma_t = 32.7 + 3.333x$	0.807
	$K = 18.404 + 4.395x$	0.843

图 6 为不同黏结强度下试样的裂纹数量随贯入

深度的变化曲线。图 6 表明,在加载初期试样未产生裂纹,当贯入深度达到一定数值后,裂纹数量开始快速增长,不同黏结强度下裂纹数量的变化具有相同的趋势。黏结强度为 5.8 kPa 时试样最先出现裂纹,且裂纹数量在相同贯入深度时最大。随着加载柱相对运动,土体颗粒的法向黏结力逐渐增大,当试样黏结强度越小时,颗粒间的黏结应力越容易达到强度破坏值,则黏结键越早断裂而产生裂纹,试验达到应变条件后试样所产生的裂纹数量也随之增多。图 6 中的标记点为拉应力峰值时所对应的裂纹数目,裂纹数目随着黏结强度的增大呈减小趋势,黏结强度由 5.8 kPa 增大至 13.8 kPa 时,裂纹数目的减幅为 69.3%,黏结强度的增大使得颗粒间的黏结键更难被破坏,试样的抗拉强度也随之增大,各黏结强度下试样的峰值拉应力所对应的贯入深度分别为 1.15、1.31、1.68、1.91 和 1.96 mm,黏结强度从 5.8 kPa 增大到 13.8 kPa 时,贯入深度的增长幅度为 70.4%,与抗拉强度的增长幅度相近,两者相互抵消,因此黄土抗拉刚度变化较小。

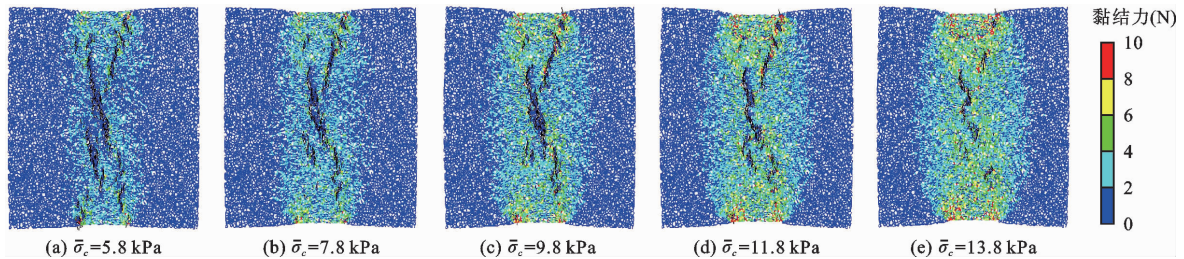


图 5 黄土试样不同黏结强度下拉应力峰值时的黏结力分布云图

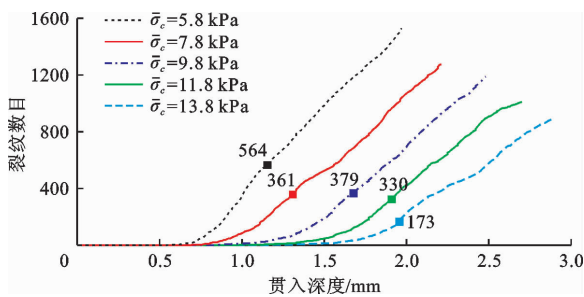


图 6 不同黏结强度下黄土试样的裂纹数量随贯入深度的变化曲线

4.2 正交试验设计与结果分析

黄土轴向压裂试验过程中,各细观参数对黄土抗拉特性的影响并不是单一化的而是相互交错的。基于 L<sub>25</sub>(5<sup>6</sup>) 正交设计表,开展轴向压裂试验数值模拟中黏结刚度比、黏结强度、半径乘子、粒径比、摩擦系数 5 个细观参数对黄土抗拉强度、抗拉刚度的敏感性分析,共进行 25 组数值模拟计算,计算结果如

表 4 所示。

根据表 4 中所得抗拉强度和抗拉刚度模拟值,对试验结果进行极差分析,分析结果如表 5 所示,根据极差值的大小判断各因素对黄土抗拉特性的敏感程度,极差的计算公式如下:

$$R_i = \max K_i - \min K_i \tag{6}$$

式中:R<sub>i</sub> 为极差值; i 为影响因素,依次对应黏结刚度比、黏结强度、半径乘子、粒径比、摩擦系数; max K<sub>i</sub>、min K<sub>i</sub> 分别为 i 因素在不同取值水平下模拟结果的最大平均值和最小平均值。

由表 5 可知,半径乘子、黏结刚度比、黏结强度对黄土抗拉强度的极差值是摩擦系数和粒径比极差值的 2 ~ 4 倍,则半径乘子、黏结刚度比、黏结强度对抗拉强度的影响更大,各细观参数对抗拉强度的敏感性由大至小依次为半径乘子、黏结刚度比、黏结强度、摩擦系数、粒径比。

表 4 轴向压裂试验正交设计数值模拟结果

试验号	细观参数取值水平					计算结果	
	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	$\bar{\sigma}_c/\text{kPa}$	$\bar{\lambda}$	$r^*$	$\mu$	$\sigma_t/\text{kPa}$	$K/(\text{kPa}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	0.9	5.8	0.5	1.26	0.2	18.96	15.51
2	0.9	7.8	0.7	1.55	0.4	28.89	18.07
3	0.9	9.8	0.9	2.04	0.6	43.47	25.91
4	0.9	11.8	1.1	2.97	0.8	58.00	27.03
5	0.9	13.8	1.3	5.47	1.0	60.98	35.34
6	5.9	5.8	0.7	2.04	0.8	16.53	13.55
7	5.9	7.8	0.9	2.97	1.0	29.28	16.83
8	5.9	9.8	1.1	5.47	0.2	33.68	16.93
9	5.9	11.8	1.3	1.26	0.4	52.51	20.97
10	5.9	13.8	0.5	1.55	0.6	25.67	11.84
11	10.9	5.8	0.9	5.47	0.4	16.45	11.96
12	10.9	7.8	1.1	1.26	0.6	31.22	17.86
13	10.9	9.8	1.3	1.55	0.8	40.40	18.94
14	10.9	11.8	0.5	2.04	1.0	17.48	10.92
15	10.9	13.8	0.7	2.97	0.2	24.82	10.68
16	15.9	5.8	1.1	1.55	1.0	22.23	15.98
17	15.9	7.8	1.3	2.04	0.2	24.41	13.42
18	15.9	9.8	0.5	2.97	0.4	12.66	7.53
19	15.9	11.8	0.7	5.47	0.6	24.09	11.83
20	15.9	13.8	0.9	1.26	0.8	37.90	15.47
21	20.9	5.8	1.3	2.97	0.6	21.80	15.67
22	20.9	7.8	0.5	5.47	0.8	11.50	8.15
23	20.9	9.8	0.7	1.26	1.0	24.16	13.82
24	20.9	11.8	0.9	1.55	0.2	23.27	11.48
25	20.9	13.8	1.1	2.04	0.4	32.36	14.86

黄土试样抗拉特性与各因素水平的关系变化曲线如图 7 所示(图中 A、B、C、D、E 分别代表黏结刚度比、黏结强度、半径乘子、粒径比、摩擦系数,下标 1~5 表示 5 个取值水平)。由图 7(a)中黄土抗拉强

度的变化趋势可以看出,黏结刚度比与黏结强度、半径乘子对抗拉强度具有相反的影响效果;对于粒径比和摩擦系数,随其因素水平的增大,抗拉强度分别呈降低与升高的趋势,但变化幅度远小于其他 3 个因素。由黄土抗拉刚度的极差值大小(表 5)可知,各细观参数的影响程度为黏结刚度比 > 半径乘子 > 摩擦系数 > 黏结强度 > 粒径比,黏结刚度比、半径乘子对抗拉刚度的极差值约为粒径比的 7 倍,说明粒径比对抗拉刚度的影响较小,黏结强度在抗拉刚度中也表现出较小的影响性。由图 7(b)中黄土抗拉刚度变化趋势可以看出,黏结刚度比与半径乘子对抗拉刚度仍呈相反的影响效果;随着黏结强度和摩擦系数因素水平的变化,抗拉刚度的变化趋势相同;粒径比取值水平在 D<sub>2</sub> ~ D<sub>4</sub> 范围内,抗拉刚度模拟值基本相同。

表 5 正交设计数值模拟结果极差分析

项目	A $\bar{k}_n/\bar{k}_s$	B $\bar{\sigma}_c/\text{kPa}$	C $\bar{\lambda}$	D $r^*$	E $\mu$
$K_{1a}$	42.06	19.19	17.25	32.95	25.03
$K_{2a}$	31.53	25.06	23.70	28.09	28.57
$K_{3a}$	26.07	30.87	30.07	26.85	29.25
$K_{4a}$	24.26	35.07	35.50	29.31	32.86
$K_{5a}$	22.62	36.35	40.02	29.34	30.83
$K_{1b}$	24.37	14.54	10.79	16.73	13.60
$K_{2b}$	16.02	14.87	13.59	15.26	14.68
$K_{3b}$	14.07	16.63	16.33	15.73	16.62
$K_{4b}$	12.85	16.45	18.53	15.55	16.63
$K_{5b}$	12.80	17.64	20.87	16.84	18.58
$R_a$	19.44	17.15	22.77	6.10	7.84
$R_b$	11.58	3.10	10.08	1.58	4.97

注:a 代表抗拉强度;b 代表抗拉刚度。

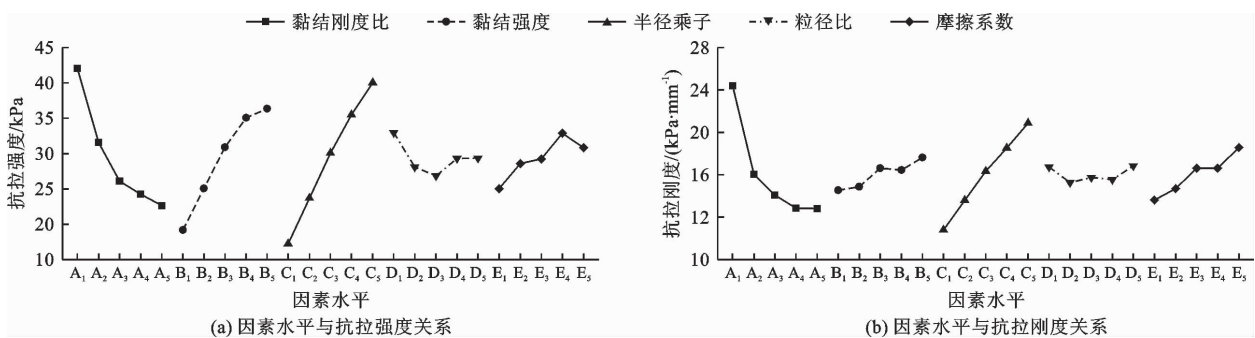


图 7 黄土试样抗拉特性与各因素水平的关系变化曲线

综上所述可知,黏结刚度比与抗拉强度、抗拉刚度呈负相关;半径乘子与抗拉强度、抗拉刚度呈正相

关;黏结强度与抗拉强度呈正相关,但对抗拉刚度影响较弱;粒径比与摩擦系数对抗拉强度、抗拉刚度的

影响均较小,且无明显的相关性。这进一步验证了分析所得到的结论。

## 5 讨论

由上文可知,细观参数黏结刚度比、黏结强度、半径乘子对黄土轴向压裂试验宏观力学特性的影响较大,而粒径比和摩擦系数的影响相对较弱。以下对黄土抗拉特性受各细观参数影响的细观机理作进一步讨论。

黄土轴向压裂试验中,紧贴上、下加载柱的一定范围内会各产生一个锥形区域,与图5中黏结力所集中的位置相近,锥形体是在拉剪共同作用下产生的;在轴向力作用下锥形体相对运动,同时挤压周边土体颗粒使其向外扩展,因黄土抗拉强度较低,试样沿轴线位置破坏;黏结强度的增大,提升了黏结键抵抗拉伸破坏的能力,因此在黏结强度较大时,裂纹主要在试样中部产生,而锥形体位置裂纹数目较少。半径乘子控制着颗粒间胶结板的大小,对抗拉特性有着重要的影响,文献[19]中指出,半径乘子同样对黄土抗剪强度具有极强的影响。关于颗粒刚度比的研究较多,而平行黏结模型中的黏结刚度比同样对模拟结果具有重要影响,当法向黏结刚度一定时,随着黏结刚度比的增大,切向黏结刚度减小,试样抵抗切向变形的能力降低,上、下锥形体越容易产生,上、下锥形体的高度也随之减小;文献[23]通过试验得到锥尖距离在一定范围内时,锥形体间土体的拉应力作用分布均匀,但锥尖距离过大或过小时拉应力作用不充分或相互交错,从而影响土体抗拉特性;随着黏结刚度比的增大,上、下锥形体锥尖之间的距离逐渐增大,土体的拉应力作用越发不充分,使得土体的抗拉强度降低。摩擦系数对黄土抗拉特性的影响较小,这与许江波等<sup>[25]</sup>对黄土抗剪强度敏感性分析的结果不同,摩擦系数的增大,提升了颗粒间的咬合作用和摩擦作用,常规三轴试验比轴向压裂试验试样的变形量大,因此咬合、摩擦作用的变化对试验结果的影响更大。诸多研究中,最小粒径在0.1~1.0 mm范围时,粒径比对土体宏观力学特性影响均较弱,随着粒径比的增大,其对于土体的影响也会增大;粒径比增大时,颗粒间的孔隙增大,使得颗粒间的咬合摩擦作用减弱,不利于颗粒间力的传递,导致试样的抗拉强度减小。

运用PFC2D模拟单元试验及工程实例时,细观参数的标定是模拟结果能否真实反映土体力学特性的关键,直接对模型的细观参数进行标定的工作量

巨大,不利于研究工作的推进,因此首先对细观参数进行敏感性分析,有助于提高数值模拟效率。

## 6 结论

(1)黄土抗拉强度随黏结刚度比的增大呈对数规律减小,随黏结强度、半径乘子的增大呈线性增长,黏结刚度比、黏结强度通过改变颗粒的破坏形态来影响抗拉强度,而半径乘子则直接改变颗粒的黏结力大小,进而影响抗拉强度。

(2)黄土抗拉刚度随黏结刚度比的增大呈对数规律减小,随半径乘子的增大呈线性增长,黏结强度、粒径比和摩擦系数与抗拉刚度均无明显的函数关系。

(3)细观参数对黄土抗拉强度的敏感性排序为半径乘子>黏结刚度比>黏结强度>摩擦系数>粒径比;对黄土抗拉刚度的敏感性排序为黏结刚度比>半径乘子>摩擦系数>黏结强度>粒径比。

### 参考文献:

- [1] 孙萍,彭建兵,陈立伟,等.黄土拉张破裂特性试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(6):980-984.
- [2] 党进谦,李靖,张伯平.黄土单轴拉裂特性的研究[J].水力发电学报,2001,25(4):44-48.
- [3] 胡海军,蒋明镜,赵涛,等.制样方法对重塑黄土单轴抗拉强度影响的初探[J].岩土力学,2009,30(S2):196-199.
- [4] 吕东东,李彦荣,赵金贵.山西晋中马兰黄土劈裂特性及抗拉强度研究[J].河南理工大学学报,2021,40(2):173-178.
- [5] 方晓阳,陈孚华,朱孝勇.测定土的抗拉强度的新方法[J].国外公路,1981(5):40-43.
- [6] 李春清,梁庆国,吴旭阳,等.重塑黄土抗拉强度试验研究[J].地震工程学报,2014,36(2):233-238+248.
- [7] 吴旭阳,梁庆国,牛富俊,等.兰州九州重塑黄土的抗拉变形破坏机理[J].冰川冻土,2017,39(4):842-849.
- [8] 吴旭阳,梁庆国,罗从双,等.原状与重塑黄土抗拉强度差异性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(5):1362-1370.
- [9] 孙纬宇,梁庆国,欧尔峰,等.陕西延安Q2原状与重塑黄土抗拉强度对比试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S2):53-58.
- [10] 孙纬宇,梁庆国,严松宏,等.陕西延安Q2原状黄土抗拉强度试验研究[J].地质力学学报,2015,21(3):386-392.
- [11] 田文岭,杨圣奇,黄彦华.非共面闭合裂隙巴西圆盘试验与颗粒流模拟研究[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):537-545.
- [12] 李现宾.裂隙岩石直接拉伸断裂破坏的颗粒流模拟分析[J].水电能源科学,2016,34(3):124-127.

- [13] 骆旭锋. 砂土和粘土直剪试验的颗粒流数值模拟与湿颗粒吸力研究[D]. 南宁:广西大学,2019.
- [14] 叶功勤,曹函,高强,等. 颗粒对比对岩石力学特征影响的数值模拟研究[J]. 地质力学学报,2019,25(6): 1129-1137.
- [15] 孙闯,敖云鹤,张家鸣,等. 花岗岩细观破裂特征及宏观尺度效应的颗粒流研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(9):1687-1695.
- [16] 丛宇,王在泉,郑颖人,等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1031-1040.
- [17] 张志华,张国栋,李泯蒂,等. 颗粒流模型中细观参数对粗粒土宏观力学特性的影响分析[J]. 水利学报,2014,45(S2):215-220.
- [18] 尹成薇,梁冰,姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏-细观参数关系分析[J]. 煤炭学报,2011,36(S2):264-267.
- [19] 董建鹏,李辉. 黄土颗粒流宏细观对应关系与参数标定方法研究[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(4):180-191.
- [20] 周杰. 模型维数对岩土离散元试验影响的宏-微观研究[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):84-88+97.
- [21] 吴旭阳,徐峰,任明洋,等. 基于轴向压裂法的重塑黄土抗拉试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S2):747-751+778.
- [22] 吴旭阳. 黄土拉、压异性及冻融过程对边坡剥落病害的影响研究[D]. 兰州:中国科学院大学(兰州),2018.
- [23] 尹思雨. 基于轴向压裂试验重塑黄土抗拉强影响因素与破坏模式研究[D]. 西安:西安科技大学,2021.
- [24] WU Xuyang, NIU Fujun, LIANG Qingguo, et al. Study on tensile strength and tensile-shear coupling mechanism of loess around Lanzhou and Yanan City in China by unconfined penetration test[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23: 2471-2482.
- [25] 许江波,曹宝花,余洋林,等. 基于PFC3D的黄土三轴试验细观参数敏感性分析[J]. 工程地质学报,2021,29(5):1342-1353.

(上接第193页)

- [15] GUO Yutao, TAO Muxuan, NIE Xin, et al. Experimental and theoretical studies on the shear resistance of steel-concrete-steel composite structures with bidirectional steel webs[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(10): 2-5.
- [16] 张爱军. 膨胀土地区综合管廊基坑支护新技术研究结论报告[R]. 西安:机械工业勘察设计研究院有限公司,2020.
- [17] 麦桂林. U型钢板桩墙抗弯刚度试验研究与数值分析[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [18] 李广信. 基坑支护结构上水土压力的分算与合算[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):348-352.
- [19] 刘维宁,张弥,华成. 开挖作用对基坑周围地层工程性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(1):60-64.
- [20] 游锦坚. U型钢板桩弯曲力学特性试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [21] 刘磊. U型组合钢板桩抗弯性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [22] 刘德用. 深基坑钢板桩支护体系力学特征研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2021.
- [23] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667-692.
- [24] 邵羽,江杰,陈俊羽,等. 基于HSS模型与MCC模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报,2015,46(S1):231-235.
- [25] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学,2010,31(1):258-264+326.
- [26] 赵志孟,郑伟锋. HUC组合钢板桩的受力性能分析[J]. 施工技术,2017,46(S2):270-274.