

基于 PFC 的全长灌浆锚固系统渐进失效过程模拟

刘秀军^{1,2}, 马占国¹

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 深圳市勘察测绘院(集团)有限公司, 深圳 518028)

摘要:随着岩土锚固技术的飞速发展,锚固系统的变形破坏机理仍是当前的热点问题。鉴于 PFC 软件在模拟岩土体裂隙发育、扩展、失稳等非连续现象方面具有较明显的优越性,文章基于 PFC5.0 软件建立了全长灌浆锚固系统颗粒流计算分析模型,并根据室内试验和现场拉拔试验结果对模型细观参数进行了标定,从位移场演化规律、应力场演化规律、裂隙扩展规律、组构变化规律以及能量变化等 5 个方面,系统地总结了全长灌浆锚固系统在拉拔荷载作用下的渐进失效特征。研究表明:PFC 能够很好地应用于全长灌浆锚固系统等离散介质的模拟分析中,锚固系统内的位移场、应力场、裂隙、组构及能量等的变化规律均能反映其承载性能状况。

关键词:颗粒流软件(PFC); 全长灌浆锚固系统; 拉拔试验; 渐进失效; 数值模拟

中图分类号:TU470+.3

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)10-0007-09

doi:10.13402/j.gejs.2024.10.126

Simulation of progressive failure process of fully grouted anchorage system based on PFC

LIU Xiujun^{1,2}, MA Zhanguo¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of

Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China ;2. Shenzhen Geotechnical Investigation

& Surveying Institute (Group) Co., Ltd., Shenzhen 518028, Guangdong, China)

Abstract: With the rapid development of geotechnical anchoring technology, the deformation and failure mechanism of anchoring systems remains a current hot topic. Given the significant superiority of PFC software in simulating discontinuous phenomena such as the development, expansion, and instability of rock and soil fractures, a particle flow calculation and analysis model for a fully grouted anchorage system was established based on PFC 5.0 software. The micro parameters of the model were calibrated based on indoor and on-site pull-out test results, and the progressive failure characteristics of the fully grouted anchorage system under pull-out load were systematically summarized from five aspects: displacement field evolution law, stress field evolution law, crack propagation law, constitutive change law, and energy change. This research has shown that PFC can be well applied in the simulation analysis of discrete media such as fully grouted anchorage systems. The variation patterns of displacement field, stress field, cracks, composition, and energy within the anchorage system can all reflect its load-bearing performance.

Key words: particle flow code (PFC); fully grouted anchorage system; pullout test; progressive failure process; numerical simulation

众所周知,灌浆锚固系统中除筋体之外,灌浆体和岩土体均是由散体介质胶结或堆积而成,

通过颗粒介质间的相互作用承受并传递荷载。现场拉拔试验可以从宏观的角度揭示全长灌浆锚固

收稿日期: 2023-11-13

作者简介: 刘秀军(1983—),男,博士,正高级工程师,注册土木工程师(岩土),从事岩土工程检测等方面研究工作。

系统的承载及变形特性。然而,在拉拔荷载作用下,灌浆锚固系统除了会在锚固界面发生滑移脱粘外,灌浆体和岩土体自身在剪拉作用下也会存在变形、裂隙发育甚至破坏的情况,受现有现场拉拔试验和观测技术手段的限制,目前还无法全面捕捉到这些重要信息,因此需借助数值仿真手段进行模拟分析。

近年来,数值模拟软件不断进步,目前的数值模拟方法可分为连续介质分析与非连续介质分析两种。其中,连续介质分析方法有有限单元法、有限差分法、边界元法等,非连续介质分析方法有块体离散元法、关键块体理论、颗粒离散元法、不连续变形分析(DDA法)等^[1]。宋宏伟^[2]利用 ANSYS 建立 3D 模型,分析了锚杆的横向作用机理,获得了非连续岩体与锚杆间的相互作用规律以及岩体和锚杆的变形规律;江文武等^[3]基于 FLAC^{3D} 软件,建立了锚杆拉拔数值仿真模型,研究了锚杆锚固力的主要影响因素以及锚杆拉拔过程中的整体失稳规律;林健等^[4]采用 ANSYS 对锚杆外形与锚杆锚固性能之间的关系进行了研究,提出锚杆外形相关参数的合理值。

由于岩土工程的复杂性、多样性及离散性,常规的连续介质分析方法在分析大变形及岩土破坏问题时均带有局限性,而由 Itasca 公司推出的 PFC 软件(Particle Flow Code)因其能较为逼真地模拟真实材料的力学响应特征,在各类岩土工程中获得了大量尝试与应用。该软件在模拟岩土体裂隙发育、扩展、失稳等非连续现象方面具有较明显的优越性^[5]。本文借助 PFC5.0 软件建立了全长灌浆锚固系统计算分析模型,从细观的角度分析了全长灌浆锚固系统在拉拔荷载下的承载机理及渐进破坏过程。

1 模型建立

《深圳市锚杆试验与检测技术标准》编制组在深圳市坪山新区海普瑞建设用地上主导了一场灌浆锚索的大型综合性试验(简称“深坪锚索试验项目”),该试验主要以采用多种方法测试岩土锚固系统的力学特性、长度及试验方法为主要目的。试验场地经精心挑选,在锚索长度范围内地层单

一,均为残积砂质黏性土。试验锚索共 9 种约 180 条,试验加卸载设备采用高精度自动控制系统以及实时无线数据传输技术,部分试验锚索采用分布式光纤测试灌浆体应变。



图 1 试验现场

1.1 模型及边界条件

以“深坪锚索试验项目”锚固长度为 6 m 的全长灌浆型试验锚索为原型,建立同尺寸的 PFC 数值模型,如图 2 所示(x 轴正方向水平向右)。

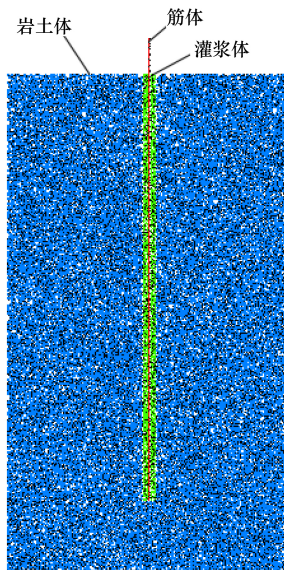


图 2 数值计算模型

由于三维模型颗粒数量庞大,导致计算机无法正常计算,因此本文所建立的模型为二维模型,如图 2 所示。其中:筋体长度为 6.5 m(含外露段 0.5 m),采用由 200 个粒径为 33 mm 的颗粒所组成的柔性簇 cluster 来模拟。张思峰^[6]、赵同彬等^[7]曾采用刚性簇 clump 模拟过锚杆,得出了一些重要结论,但实际上这些模拟工作并不严谨。刚性簇 clump 内部颗粒没有相对变形,外力再大也不会发生破坏,这显然与实际情况不符。与刚性簇 clump 不同的是,柔性簇 cluster 内部颗粒可以发生相对变形,当外力足够大时可以发生破坏,因此采用柔性簇 cluster 来模

拟锚固系统筋体是较为合理的。灌浆体长为 6 m, 直径为 180 mm, 由半径为 8~12 mm 的颗粒组成, 岩土体高度为 7 m, 宽度为 4 m, 由半径为 20~30 mm 的颗粒组成, 整个模型生成 15 446 个颗粒。模型上侧为自由边界, 左右侧及下侧采用刚性墙约束, 刚性墙的法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 均取 1×10^9 N/m, 摩擦系数取 0.5。

1.2 接触模型的选取

PFC 软件中提供了 10 种内嵌的颗粒接触模型, 包括空模型、线性模型、线性接触黏结模型、线性平行黏结模型、赫兹接触模型、滞回阻尼模型、光滑节理模型、平节理模型、抗滚动线性接触模型以及伯格斯蠕变模型等。其中: 线性平行黏结模型可以用来模拟胶结强度较高的材料, 被众多学者认为最适合模拟钢筋、岩石、混凝土等材料; 而由于土体的特点是抗压、抗剪, 不抗拉或抗拉强度很低, 一般选用线性模型或线性接触黏结模型用来模拟土体^[1]。因此, 在本文模型中, 筋体和灌浆体部分的颗粒接触模型采用线性平行黏结模型, 岩土体部分的颗粒接触模型采用线性接触黏结模型。线性平行黏结模型包括线弹性界面和线弹性黏结界面两种平行接触界面。其中: 线弹性界面可承受压力和摩擦力, 无法承受张拉力和扭转力; 线弹性黏结界面在黏结时能抵抗扭矩, 其法向和切向刚度恒定, 因此可传递力和力矩。这种力和力矩作用与胶结材料在黏结键周围的最大正应力和剪应力有关, 当应力超过界面上相应黏结强度极限时, 黏结键就会断裂, 此时线性平行黏结模型便退化为线性模型^[1]。

线性接触黏结模型的接触界面无法抵抗相对转动, 且只能是黏结或未黏结两种情况之一。黏结时, 该界面不能承受摩擦力, 其接触性状始终是线弹性的, 直至荷载超过黏结强度极限后黏结键断裂; 未黏结时, 其接触性状仍是线弹性的, 但此时该界面可以承受摩擦力, 即可以在剪切力满足库伦准则时承载滑动, 此时的线性接触黏结模型同样也退化为线性模型^[1]。

1.3 荷载施加过程的模拟

确定好颗粒接触模型, 并对各接触模型进行参数赋值后, 即可进行运算求解。按每循环 cycle

一次施加 5 N 荷载的方式, 对筋体顶端颗粒施加向上的力, 以此来模拟锚固系统拉拔过程。同时, 为了能够直观地看到锚固系统加载过程中的渐进破坏过程, 本文数值计算模型还修改并调用了 PFC 软件内置的 Fish 语言程序 “fracture. p2fis”, 用以模拟锚固系统拉拔过程中裂隙的生成、扩展及失稳破坏。值得一提的是, 本数值计算模型中岩土体的颗粒接触模型之所以选择线性接触黏结模型, 而未选择线性模型, 也是因为线性模型无法模拟裂隙的生成发育过程, 而线性接触黏结模型和线性平行黏结模型均可实现。

2 参数标定

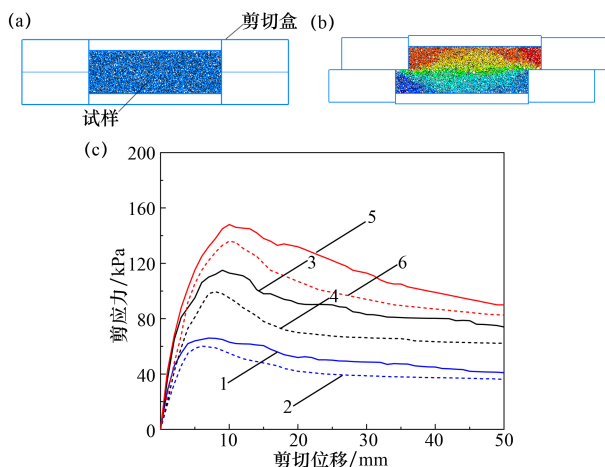
PFC 数值计算模型中颗粒自身的力学参数以及颗粒间的接触模型参数, 直接影响着模型整体的宏观力学性质。根据实际尺寸建立数值模型, 以实际试验结果为目标来校准数值模型的计算参数, 可使数值模型的计算结果尽可能地逼近实际试验结果^[8]。因此, 在数值模拟分析前需对各模型参数进行标定。

首先, 建立岩土体直剪试验数值计算模型, 采用岩土体室内直剪试验统计结果标定岩土体线性接触黏结模型的主要细观力学参数, 如图 3 所示。

其次, 建立灌浆体单轴抗压强度试验数值计算模型, 采用灌浆体室内抗压强度试验统计结果, 标定灌浆体线性平行黏结模型的主要细观力学参数, 如图 4 所示。由图 3(c) 和图 4(c) 可以看出, 岩土体直剪试验数值计算模型和灌浆体单轴抗压强度试验数值计算模型模拟的结果曲线均与室内试验的结果曲线有较好的一致性。

最后, 将前面所标定的岩土体线性接触黏结模型参数与灌浆体线性平行黏结模型参数赋值于图 2 所示的数值计算模型中进行运算, 采用 “深坪锚索试验项目” 锚固长度为 6 m 的全长灌浆型试验锚索的现场拉拔试验 (极限试验) 数据, 来标定模型中筋体部分的线性平行黏结模型的主要细观力学参数, 同时对模型中岩土体线性接触黏结模型参数与灌浆体线性平行黏结模型参数进行微调, 如图 5 所示。

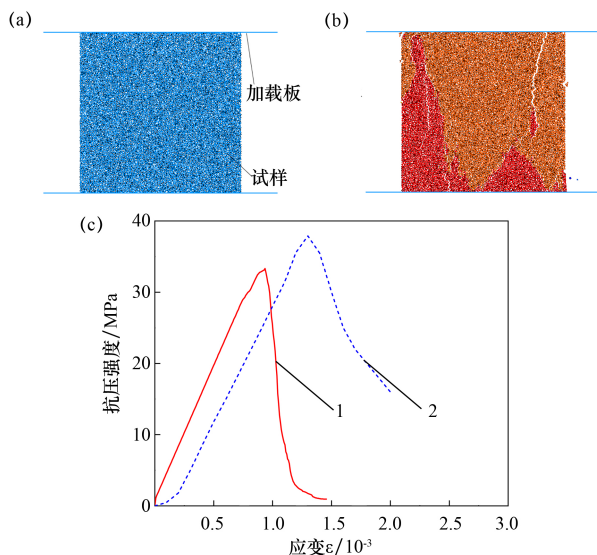
由图 5 可以看出, 整个数值计算模型所模拟



(a) 加载前; (b) 加载后; (c) 试验曲线

1—数值模拟 (垂直压力为 100 kPa); 2—室内试验 (垂直压力为 100 kPa); 3—数值模拟 (垂直压力为 200 kPa); 4—室内试验 (垂直压力为 200 kPa); 5—数值模拟 (垂直压力为 300 kPa); 6—室内试验 (垂直压力为 300 kPa)。

图 3 直剪试验



(a) 加载前; (b) 加载后; (c) 试验曲线

1—数值模拟; 2—室内试验。

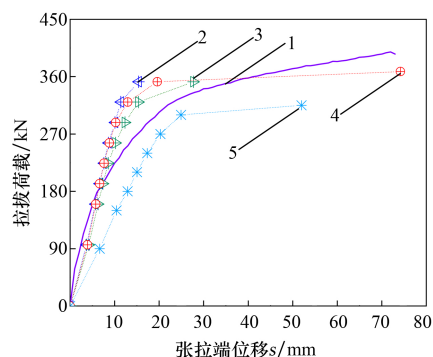
图 4 单轴抗压强度试验

的拉拔试验荷载位移曲线与锚固长度为 6 m 的 4 根全长灌浆型试验锚索的现场拉拔试验荷载位移曲线均比较吻合, 说明数值模型参数标定比较成功。最终模型的细观力学参数如表 1 所示。

3 拉拔荷载下渐进失效过程模拟

3.1 位移场演化规律分析

图6显示了模型在拉拔荷载分别为100、200、



1—数值模拟; 2—现场试验 (A6-a);

3—现场试验 (A6-b); 4—现场试验 (A6-c);

5—现场试验 (A6-d)。

图 5 拉拔试验

300、400 kN 下的竖向位移云图。可以看出: 当拉拔荷载为 100 kN 时, 锚固系统的竖向位移场与有限元分析软件或弹性理论的计算结果较为接近, 呈现为“左右对称, 中部位移大、两侧位移逐步减小, 浅部位移大、深部位移逐步减小”的现象, 说明此时锚固系统近似处于弹性变形阶段, 锚固界面未发生脱粘或解耦的现象, 灌浆体和岩土体未发生明显的剪切变形破坏; 当拉拔荷载为 200 kN 时, 锚固系统的竖向位移场已开始呈现为“不对称, 灌浆体浅部位移与周边岩土体位移不协调”的现象, 说明此时锚固系统处于弹塑性变形阶段, 浅部锚固界面已发生脱粘或解耦, 灌浆体和岩土体浅部已发生剪切变形破坏; 当拉拔荷载为 300 kN 时, 锚固系统的竖向位移场“云图”现象几乎消失, 整个灌浆体的位移明显大于周边岩土体的位移, 说明此时锚固系统处于塑性变形阶段, 大部分灌浆体-岩土体界面已发生脱粘或解耦, 灌浆体和岩土体已发生明显的剪切变形破坏; 当拉拔荷载为 400 kN 时, 锚固系统的竖向位移场“云图”现象完全消失, 浅部岩土体已发生“隆起”, 灌浆体浅部已露出地面, 灌浆体底部明显脱空, 说明此时锚固系统处于脱粘失效阶段, 整个灌浆体-岩土体界面已完全脱粘或解耦, 灌浆体已被拔出。

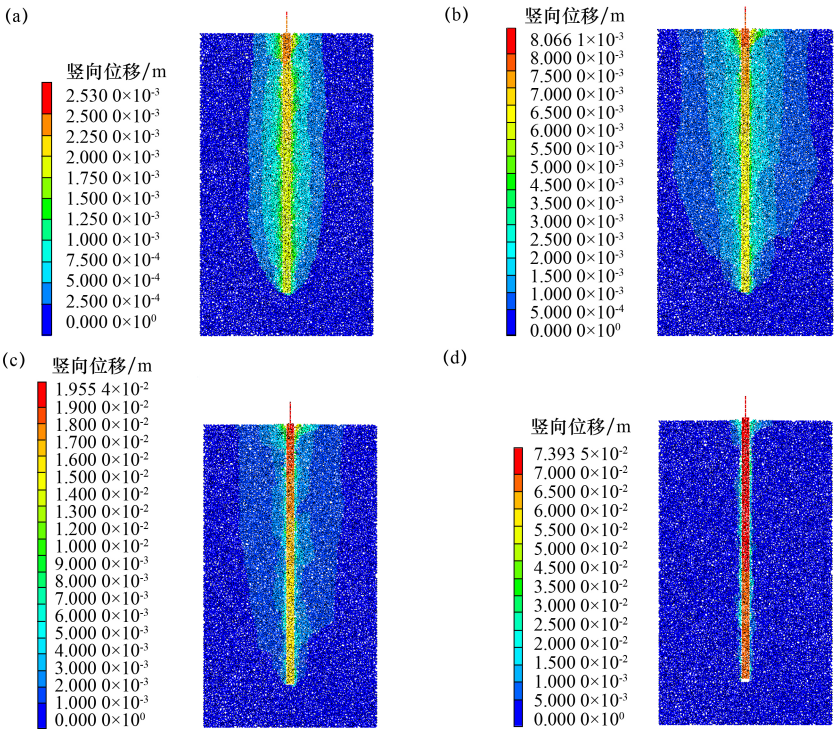
3.2 应力场演化规律分析

为观测锚固系统在拔出过程中的应力演化规律, 分别在筋体-灌浆体界面 (第一界面) 和灌浆体-岩土体界面 (第二界面) 上 1、2、3、4、5 m

表 1 数值模型细观力学参数

材料名称	接触模型	细观参数	经验值	缩放系数	模型值
筋体	平行黏结模型	颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850.0	—	7 850.0
		有效模量/GPa	210.0	30.3	6.9
		刚度比	2.0	—	2.0
		黏结强度/MPa	1 860.0	30.3	61.4
		抗拉强度/MPa	1 860.0	30.3	61.4
		摩擦系数	0.5	—	0.5
灌浆体	平行黏结模型	颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 500.0	—	2 500.0
		有效模量/GPa	20.0	41.6 ~ 62.5	0.4
		刚度比	2.0	—	2.0
		黏结强度/MPa	10.0	41.6 ~ 62.5	0.2
		抗拉强度/MPa	8.0	41.6 ~ 62.5	0.2
		摩擦系数	0.5	—	0.5
岩土体	接触黏结模型	颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 800.0	—	1 800.0
		有效模量/MPa	6.0	16.7 ~ 25.0	0.2
		刚度比	2.0	—	2.0
		剪切强度/kPa	10.0	16.7 ~ 25.0	0.5
		抗拉强度/kPa	2.0	16.7 ~ 25.0	0.1
		摩擦系数	0.5	—	0.5

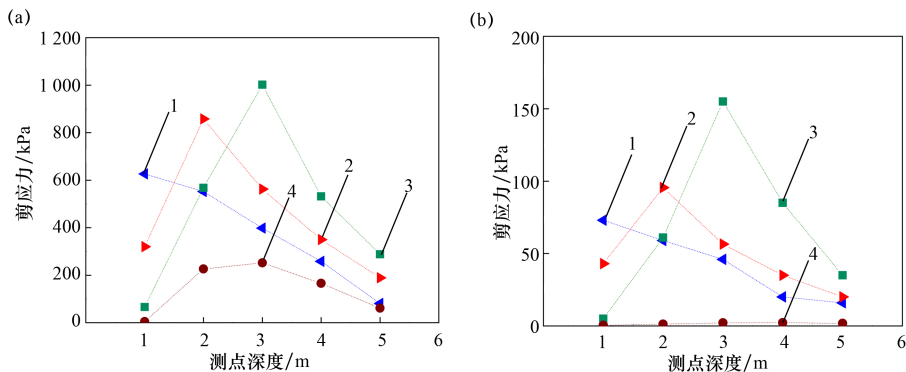
注：本文数值计算模型为二维模型，其与三维模型或者实际工况在计算模量、强度等与颗粒接触面积相关的参数时存在差异，二维模型在模型平面法向方向的尺寸默认为 1 m，而三维模型或者实际工程在此方向的尺寸为颗粒直径。因此，在二维模型中与颗粒接触面积相关的参数，需由三维模型或者实际工况值除以一个缩放系数，缩放系数 = 1/二维模型颗粒直径。



拉拔荷载/kN: (a) 100; (b) 200; (c) 300; (d) 400。

图 6 不同拉拔荷载下的位移场演化规律

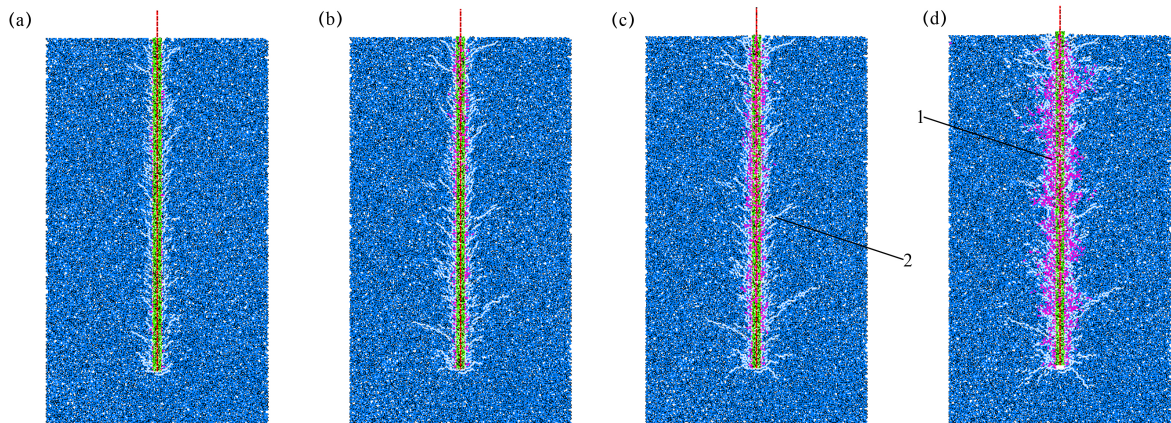
深度处布设了测量圆, 监测锚固界面处剪应力随拉拔荷载的变化规律, 如图 7 所示。可以看出: 随着拉拔荷载的增加, 两个锚固界面的剪应力峰值均逐渐由浅部向深部转移; 随着拉拔荷载的增加, 两个锚固界面上某一深度处的剪应力均呈现先增大后减小的规律; 在同一荷载下、同一深度处, 第一界面上的剪应力远大于第二界面上的剪应力, 印证了剪应力由筋体到灌浆体再到岩土体的传递规律; 第二界面上出现了明显的脱粘或解耦现象, 随着拉拔荷载的增加, 脱粘或解耦段逐渐增大, 当拉拔荷载达到 400 kN 时, 第二界面完全脱粘失效, 其上的剪应力近乎呈直线分布, 且均接近于 0; 由于第二界面产生了明显的脱粘现象, 因此, 虽然第一界面上的剪应力分布曲线呈现了脱粘的效果, 但并不能足以判定第一界面也发生了脱粘。



(a) 第一界面; (b) 第二界面

拉拔荷载/kN: 1—100; 2—200; 3—300; 4—400。

图 7 不同拉拔荷载下锚固界面剪应力变化规律



拉拔荷载/kN: (a) 100; (b) 200; (c) 300; (d) 400

1—剪切裂隙; 2—张拉裂隙。

图 8 不同拉拔荷载下的裂隙扩展规律

3.3 裂隙扩展规律分析

图 8 显示了模型在拉拔荷载分别为 100、200、300、400 kN 下的裂隙分布图。可以看出: 全长灌浆锚固系统在拉拔荷载作用下, 系统内部的裂隙可分为张拉裂隙和剪切裂隙两种; 张拉裂隙主要分布在岩土体内, 而剪切裂隙大部分分布在灌浆体—岩土体界面周边的剪切带内, 少部分分布于灌浆体内部及筋体—灌浆体界面上, 且张拉裂隙的扩展范围比剪切裂隙的扩展范围要大很多; 张拉裂隙可分为长裂隙和微裂隙两种, 长裂隙是由贯通的微裂隙组成, 沿着深度方向几乎等间距的分布在灌浆体周边的岩土体内, 且与锚固界面法向的夹角近似呈 45° 。除锚固界面上的剪切裂隙之外, 岩土体内部的剪切裂隙全部为微裂隙, 并未形成贯通的长裂隙; 当剪切带内的各种裂隙贯通时, 整个锚固界面即脱粘或解耦, 进而表现为锚

固系统被拔出破坏;在拔出过程中,本文模型的两个锚固界面均会出现不同程度的解耦现象,但灌浆体-岩土体界面是其薄弱锚固界面。

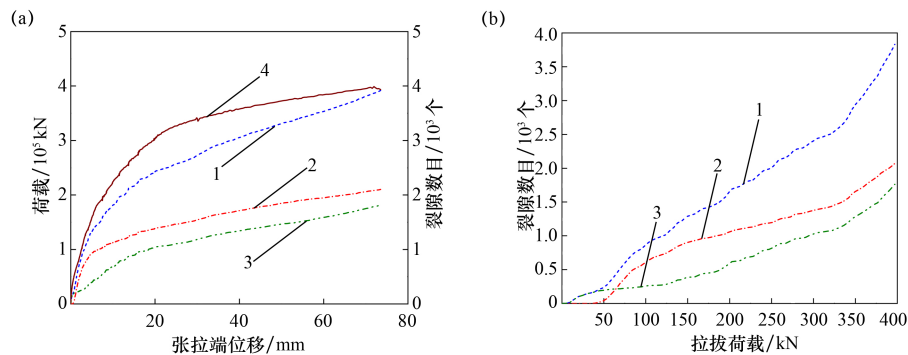
图 9 显示了在模拟拉拔过程中模型裂隙数目的变化曲线,其中:图 9(a)为裂隙数目及拉拔荷载随着张拉端位移的变化曲线,图 9(b)为裂隙数目随着拉拔荷载的变化曲线。

由图 9(a)可以看出:张拉裂隙、剪切裂隙及总裂隙数目均随着张拉端位移先快速增长然后再缓慢的增加,总裂隙数目与拉拔荷载的变化曲线有相对较好的一致性;张拉裂隙曲线的“突变点”大约对应张拉端位移 5 mm 左右,剪切裂隙曲线的“突变点”约对应张拉端位移 20 mm 左右,因此总裂隙数目曲线在对应张拉端位移 5 mm 和 20 mm 左右也存在两个“突变点”;当张拉端位移小于 5 mm 时,拉拔荷载与张拉端位移基本呈线性关系,当张拉端位移超过 5 mm 但小于 20 mm 时,拉拔荷载与张拉端位移开始呈现明显的非线性关系,当张拉端位移大于 20 mm 后,随着张拉端位移的快速增加,拉拔荷载又近乎线性地增加,且增长速率非常小,说明当张拉端位移超过 20 mm 时锚固系统就呈现了破坏迹象;当张拉端位移超过 20 mm 后,张拉裂隙与剪切裂隙数目随着张拉端位移的变化速率比较接近,值得一提的是,在张拉端位移约 30 mm 时,张拉裂隙、剪切裂隙及总裂隙数目曲线均有微弱的增长趋势(图 9(b)可以较明显的看到),说明张拉端位移介于 20~30 mm 之间时,锚固系统有一个微弱的稳定区间。张拉端位移 20 mm 时对应拉拔荷载约 320 kN,张拉端位移 30 mm 时对应拉

拔荷载约 350 kN,同样说明锚固系统的极限拉拔力介于 320~350 kN 之间,当拉拔荷载大于 320 kN 时,锚固系统出现破坏迹象,但只要拉拔荷载不超过 350 kN,那么锚固系统可能仍会恢复到平衡状态,而当拉拔荷载超过 350 kN 后,锚固系统则会加速破坏。

由图 9(b)可以看出:张拉裂隙和剪切裂隙数目随着拉拔荷载的增加,均呈现了“先快速增加,之后缓慢增加,最后再快速增加”的变化趋势;当拉拔荷载在 50 kN 之内时,剪切裂隙随着拉拔荷载的增加近乎线性地增加,此时几乎没有张拉裂隙产生;当拉拔荷载介于 50~150 kN 时,随着拉拔荷载的增加,张拉裂隙数目快速增加,而剪切裂隙数目增速却变得非常缓慢;当拉拔荷载介于 150~350 kN 时,随着拉拔荷载的增加,张拉裂隙数目增速变缓,而剪切裂隙数目增速却有所增加;当拉拔荷载超过 350 kN 时,随着拉拔荷载的增加,张拉裂隙和剪切裂隙数目的增速均突然增加,说明此时锚固系统处于加速破坏状态;可以预见的是,当拉拔荷载增加到某一定值后,总裂隙数目肯定会趋于稳定,不再增加,此时锚固系统将处于完全破坏状态;当拉拔荷载小于等于 200 kN 时,锚固系统内裂隙主要以张拉裂隙为主,剪切裂隙较少,随着拉拔荷载的逐渐增加,剪切裂隙产生速率超过了张拉裂隙的产生速率,剪切裂隙数目逐渐接近于张拉裂隙数目。

声发射响应在一定程度上反映了锚固系统的细观承载特性,分析锚固系统拉拔过程中的声发射响应特征有助于更好地理解锚固系统的拉拔力

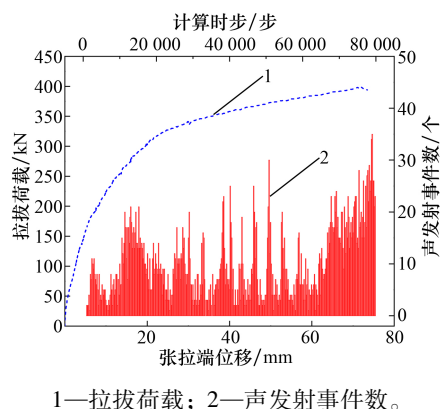


(a) 随张拉端位移变化; (b) 随拉拔荷载变化

1—裂隙总数; 2—张拉裂隙数; 3—剪切裂隙数; 4—拉拔荷载。

图 9 拉拔过程中裂隙数目变化曲线

学行为和承载机理。锚固系统在拉拔过程中,并不是一次性破坏完成,而是有一个渐变破坏的过程,每一次的破坏就会发出类似“咔嚓”的破坏声,一个声音就是一个事件数,对应锚固系统内部也就是一次微裂隙的产生。传统的声发射响应监测是通过专用仪器设备来采集单位时间内的事件数,本文通过对单位时间内产生的裂隙数进行整理统计来模拟锚固系统在拉拔过程中的声发射响应特征,如图 10 所示。



1—拉拔荷载; 2—声发射事件数。

图 10 拉拔过程中声发射响应模拟

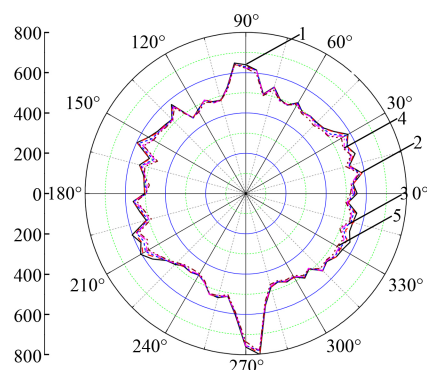
由图 10 可以看出,随着运算时步(Step)的增加,拉拔荷载和张拉端位移均在逐渐增加,而声发射事件数则呈现了 3 种不同的变化阶段:第 I 阶段(0~30 000 步),对应拉拔荷载 0~150 kN、张拉端位移 0~5 mm,该阶段内的声发射事件数相对比较密集且个数相对较少,根据前述分析可知此阶段为弹性变形阶段;第 II 阶段(30 000~60 000 步),对应拉拔荷载 150~300 kN、张拉端位移 5~20 mm,该阶段内的声发射事件数相对较为分散且个别时段内事件数较多,对应锚固系统的弹塑性变形阶段;第 III 阶段(60 000~80 000 步),对应拉拔荷载 300~400 kN、张拉端位移 20~74 mm,该阶段内的声发射事件数不仅集中且个数很多,对应锚固系统的拔出破坏阶段。

图 9、10 表明,在拉拔过程中,锚固系统自身的裂隙扩展及变化规律,能够反应其承载性能状况。

3.4 组构变化规律分析

组构是指接触在空间的排列特性,具体是指与模型 x 轴正向不同夹角方向上的颗粒接触数。图 11 显示了模型在拉拔荷载分别为 100、200、300、400 kN

下的组构变化图。可以看出:在 100 kN 的拉拔荷载下,加载前后的组构变化差异很小,说明此时锚固系统处于弹性变形阶段;当拉拔荷载达到 200 kN 时,30°(210°)和 150°(330°)方向上颗粒接触数明显变少,说明在该方向上产生了较为明显的裂隙(对应图 8(b)中的几条长裂隙);当拉拔荷载增大至 300 kN 时,30°(210°)和 150°(330°)方向上颗粒接触数继续变少,同时在 0°(180°)方向上颗粒接触数也出现了微弱的减小,说明此时锚固界面上已产生剪切破坏迹象;当拉拔荷载达到 400 kN 时,0°(180°)、30°(210°)以及 150°(330°)方向上颗粒接触数明显变少,说明此时锚固界面已出现裂隙贯通迹象。图 11 表明,锚固系统拉拔过程中组构的变化规律与裂隙扩展规律是一致的。



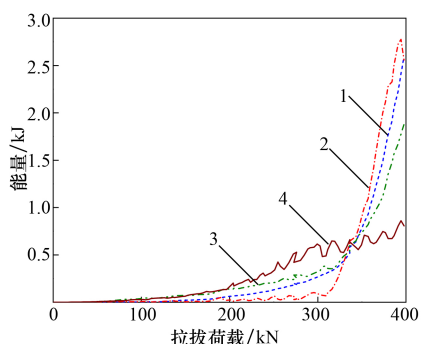
1—加载前; 2—拉拔荷载 100 kN;
3—拉拔荷载 200 kN; 4—拉拔荷载 300 kN;
5—拉拔荷载 400 kN。

图 11 不同拉拔荷载下的组构变化规律

3.5 能量分析

理想状态下,锚固系统在加载前是处于静止状态的,因此其内部的能量为 0。在拉拔过程中,拉拔荷载的持续做功是锚固系统的外部能量输入,忽略阻尼的情况下,这些外部能量主要可转化为内部颗粒的动能、颗粒间线性接触产生的应变能、颗粒间胶结接触产生的胶结能以及颗粒间摩擦所产生的摩擦能等能量。图 12 显示了模型在拉拔过程中颗粒动能、接触应变能、接触胶结能以及摩擦能的变化曲线。可以看出:随着拉拔荷载的增加,颗粒动能、接触应变能、接触胶结能以及摩擦能均在逐步增加;当拉拔荷载在 320 kN 之内时,颗粒动能、接触应变能以及摩擦能变化幅度均较小,尤其是颗粒动能几乎接近于 0;当拉拔荷

载超过 320 kN 时,颗粒动能迅速增加,当拉拔荷载增加至约 350 kN 时,接触应变能和摩擦能也迅速增加,说明此时锚固系统内部已发生较大的变形,锚固系统已开始破坏,接触应变能和摩擦能的突变状态略微滞后于颗粒动能的突变状态;当拉拔荷载在 350 kN 之内时,接触胶结能均要大于颗粒动能、接触应变能以及摩擦能,而当拉拔荷载超过 350 kN 时,接触胶结能又均要小于其它 3 种能量。随着拉拔荷载的增加,虽然接触胶结能会呈现轻微的“振荡”现象,但其总体变化幅度并不大,尤其是在锚固系统呈现破坏迹象后。图 12 表明,在拉拔过程中,锚固系统内部的能量变化曲线,也能够反应其承载性能状况。



1—摩擦能; 2—动能; 3—应变能; 4—胶结能。

图 12 拉拔过程中能量变化曲线

4 结 语

(1) 锚固系统在拔出过程中会依次经历弹性变形、弹塑性变形以及塑性变形 3 个阶段。

(2) 随着拉拔荷载的增加,锚固界面上的剪应力峰值会逐渐由浅部向深部转移,同一深度处的剪应力会呈现先增大后减小的规律,即脱粘或解耦现象。在同一荷载下、同一深度处,第一界面上的剪应力远大于第二界面上的剪应力,印证了剪应力由筋体到灌浆体再到岩土体的传递规律。

(3) 在拉拔荷载作用下,锚固系统内部的裂隙可分为张拉裂隙和剪切裂隙两种,张拉裂隙主要分布在岩土体内,而剪切裂隙大部分分布在灌浆体-岩土体界面周边的剪切带内,少部分分布于灌浆体内部及筋体-灌浆体界面上,且张拉裂隙的扩展范围比剪切裂隙的扩展范围要大很多。

(4) 组构反映了颗粒接触在空间的排列特性,锚固系统在拉拔过程中组构的变化规律与裂隙扩展规律是一致的。

(5) 随着拉拔荷载的增加,锚固系统内部的颗粒动能、接触应变能、接触胶结能以及摩擦能均在逐步增加。当拉拔荷载接近于锚固系统极限承载力时,颗粒动能、接触应变能和摩擦能迅速增加,说明此时锚固系统内部已发生较大的变形,锚固系统已开始破坏,接触应变能和摩擦能的突变状态略微滞后于颗粒动能的突变状态。锚固系统在发生破坏之前,接触胶结能均大于颗粒动能、接触应变能以及摩擦能,而当锚固系统发生破坏之后,接触胶结能均小于其它三种能量。

(6) 在拉拔荷载作用下,锚固系统内部的位移场、应力场、裂隙、组构及能量等的变化规律均能反映其承载性能状况。

(7) 颗粒流(PFC)能够很好的应用于全长灌浆锚固系统等离散介质的模拟分析中,可以从细观的角度分析其在拉拔荷载下渐进破坏过程。

参考文献:

- [1] 石崇,张强,王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] 宋宏伟. 非连续岩体中锚杆横向作用的新研究[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(2):161-164.
- [3] 江文武,徐国元,马长年. FLAC^{3D}的锚杆拉拔数值模拟试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(10):129-133.
- [4] 林健,任硕. 树脂全长锚固锚杆外形尺寸优化数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(2):273-278.
- [5] 陈森. 断续节理岩体破坏力学特性及锚固控制机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [6] 张思峰,周健,李艳梅. 砂固结预应力锚杆锚固性能的颗粒流数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,(增刊1):2921-2926.
- [7] 赵同彬,尹延春,谭云亮,等. 锚杆界面力学试验及剪应力传递规律细观模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(2):220-224.
- [8] 安衍培. 全长粘结穿层锚固体界面响应特征及岩体承载强化机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.