

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0016-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.004

PFC2D 中平行粘结参数对直剪强度参数的影响研究

曹雪山^{1, 2}, 赖喜阳¹, 额力素¹, 李国维^{1, 2}, 袁俊平², 吴建涛^{1, 2}

(1. 河海大学 道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 100084)

摘要: 为了解 PFC2D 模拟室内直剪试验时平行粘结参数和直剪强度参数间的关系, 以引江济淮试验工程中泥岩崩解后的颗粒级配建立模型, 通过控制变量法对 PFC2D 中平行粘结参数对泥岩直剪强度参数的影响进行研究。结果表明: 平行粘结参数对直剪强度参数的影响不具有单调性, 应划分为不同的区间进行讨论; 平行粘结参数对粘聚力和内摩擦角的敏感程度不同。

关键词: PFC2D; 平行粘结参数; 直剪强度参数; 敏感程度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Study on the Influence of Parallel Bond Parameters in PFC2D on the Direct Shear Strength Parameters

CAO Xueshan^{1, 2}, LAI Xiyang¹, E Lisu¹, LI Guowei^{1, 2}, YUAN Junping², WU Jiantao^{1, 2}

(1. Institute of Road and Railway Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dyke Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, 100084, China)

Abstract: In order to understand the relationship between the parallel bond parameters in the PFC2D and the direct shear strength parameters when simulating laboratory direct shear test, a model was established based on the particle size distribution after the disintegration of mudstone in the Jianghuai test project. The influence of the parallel bond parameters in the PFC2D on the strength parameters of mudstone direct shear was studied by using the control variable method. The results show that the effects of the parallel bond parameters on the shear strength parameters are not monotonic and should be divided into different sections for discussion. The sensitivity of parallel bonding parameters to cohesion and internal friction Angle is different.

Key words: PFC2D; parallel bonding parameters; direct shear strength parameters; sensitive degree

在使用 PFC 进行模拟时, 平行粘结参数的标定一直是一个难点。相关方面的学者在微观平行粘结参数和宏观参数关系上作了大量研究^[1-4], 但都集中于单轴和三轴压缩试验模拟, 三轴压缩尽管也能得出直剪强度参数的值, 但三轴试验较室内直剪试验复杂, 且室内直剪试验应用广泛。故本文通过模拟泥岩的室内直剪试验, 以平行粘结参数对泥岩直剪强度参数的影响为研究内容, 找出平行粘结参数对泥岩直剪强度参数的影响规律, 为以后科研人员模拟直剪试验时平行粘结参数的标定提供参考。

1 直剪模型的建立

1.1 建立初始模型

本文取引江济淮试验工程的泥岩经过 7 次^[5]干湿循环后的颗粒级配为初始建模级配(表 1), 初始模型见图 1。

1.2 模型修正

直接使用初始建模级配建立的模型颗粒数量庞大, 计算效率过低, 故本文采用“等质量逐级替换

收稿日期: 2019-03-26

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0404801, 2017YFC0404804); 引江济淮试验工程项目(20168011716)

作者简介: 曹雪山(1970-), 男, 江苏海门人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事非饱和土固结、地基与基础工程等教学与研究工作。

表 1 初始建模级配
Tab.1 Initial modeling hierarchy

粒组 /mm	<0.075	0.075 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 2
含量 /%	25.2	20.1	24.2	22.8	7.7

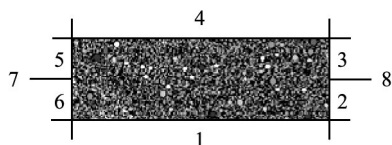


图 1 初始模型 (1—8 表示墙体)
Fig.1 The initial model(one to eight represents the wall)

最细颗粒”法^[3]进行级配修正,得到最终用于建模的颗粒级配,如表 2 所示:

表 2 最终建模级配
Tab.2 Final modeling gradation

粒组 /mm	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 2
含量 /%	44.3	41.7	14.0

按照最终建模级配对模型进行修正,模型修正后,颗粒数量从 173 082 减少到 5 716,计算效率大大提高。

2 实验方案

PFC2D 中平行粘结参数众多,但对直剪强度参数有影响的主要参数有以下 6 个:线性部分弹性模量 E 、法向刚度与切向刚度比 k 、平行粘结部分弹性模量 pb_E 、平行粘结部分法向刚度与切向刚度比 pb_k 、法向胶结抗拉强度 pb_ten 、切向胶结抗剪强度 pb_coh 。故本文只讨论这 6 个主要平行粘结参数对直剪强度参数的影响规律。

采用控制变量法进行探讨,首先根据文献 [6-8] 明确 6 个参数的数量级,确定一组基准值,然后在保持其他 5 个参数为基准值的情况下,改变要研究

的参数,参数的取值如表 3 所示,参数的基准值为 1。

3 参数影响分析

3.1 线性弹性模量 E

由图 2 可知:(1)粘聚力和线性弹性模量的关系分为三个区间。在 I 区间,粘聚力随着线性弹性模量的增加而降低,降低了 20%;在 II 区间,粘聚力随着线性弹性模量的增加成线性增加;在 III 区间,粘聚力增加幅度较小,说明在该区间内线性弹性模量对粘聚力的影响敏感性弱。(2)内摩擦角和线性弹性模量的关系分为三个区间。在 I 区间,内摩擦角随着线性弹性模量的增加而增加,增加幅度为 27.18%;在 II 区间,内摩擦角随着线性弹性模量的增加而降低,降低幅度为 9.28%;在 III 区间,内摩擦角随着线性弹性模量的增加而增加,增加幅度为 12.21%。

3.2 线性刚度比 k

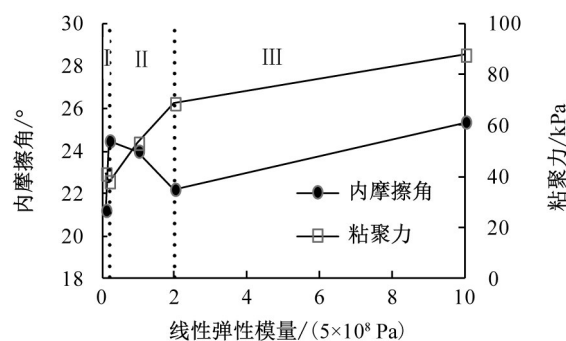


图 2 粘聚力、内摩擦角与线性弹性模量的关系
Fig.2 The relationship between cohesion, internal friction Angle and linear modulus of elasticity

表 3 参数取值表
Tab.3 Parameter value table

$E/(5 \times 10^8 \text{ Pa})$	k	$pb_E/(5 \times 10^8 \text{ Pa})$	pb_k	$pb_ten/(5 \times 10^5 \text{ Pa})$	$pb_coh/(5 \times 10^5 \text{ Pa})$
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
10	10	10	10	10	10

由图3可知:(1)粘聚力随着线性刚度比的增加变化幅度很小,说明线性刚度比对粘聚力的影响敏感性极弱。(2)内摩擦角随着线性刚度比的增加变化幅度不大,说明线性刚度比对内摩擦角的影响敏感性极弱。

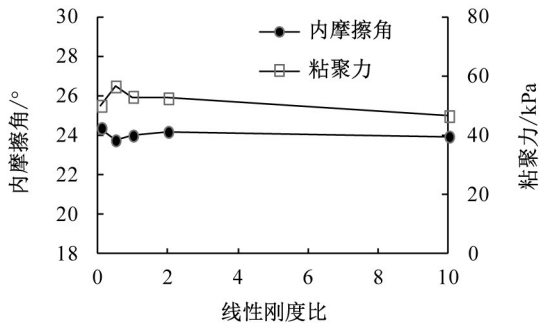


图3 粘聚力、内摩擦角与线性刚度比的关系

Fig.3 The relationship between cohesion, internal friction Angle and linear stiffness ratio

3.3 平行粘结弹性模量 pb_E

由图4可知:(1)在整个区间内,粘聚力随着平行粘结弹性模量的增加而减小。在I区间,平行粘结弹性模量对粘聚力影响极弱;在II区间,粘聚力下降幅度为36.90%;在III区间,粘聚力下降速度变慢。(2)内摩擦角和平行粘结弹性模量的关系分为三个区间。在I区间,内摩擦角呈下降趋势,下降幅度为11.24%;在II区间,内摩擦角随着平行粘结弹性模量的增加而增加,增加幅度为7.39%;在III区间,内摩擦角受平行粘结弹性模量的影响敏感性极弱。

3.4 平行粘结刚度比 pb_k

由图5可知:(1)粘聚力和平行粘结刚度比的关系分为两个区间。在I区间,粘聚力随平行粘结刚度比的增加而增加;在II区间,粘聚力随着平行粘

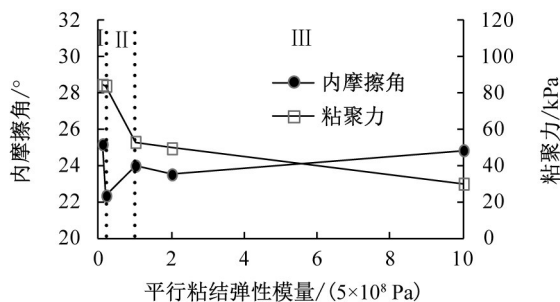


图4 粘聚力、内摩擦角与平行粘结弹性模量的关系
Fig.4 The relationship between cohesive force, Angle of internal friction and modulus of elasticity of parallel bond

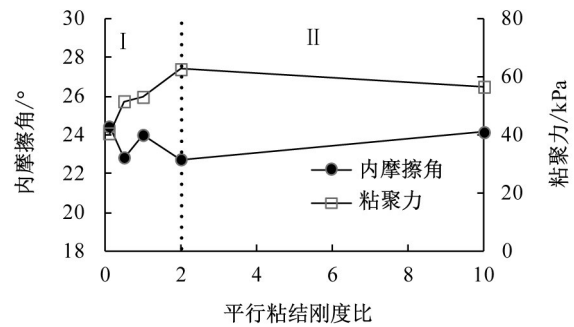


图5 粘聚力、内摩擦角与平行粘结刚度比的关系

Fig.5 The relationship between cohesion, internal friction Angle and parallel bond stiffness ratio

结刚度比的增加略有下降。总体上来看,粘聚力受平行粘结刚度比的影响敏感性弱。(2)内摩擦角随着平行粘结刚度比的变化波动幅度较小,说明平行粘结刚度比对内摩擦角的影响敏感性弱。

3.5 胶结抗拉强度 pb_ten

由图6可知:(1)在整个区间内,粘聚力随着胶结抗拉强度的增加而增加,增加幅度为1022%,说明粘聚力对胶结抗拉强度敏感性极强。(2)内摩擦角和胶结抗拉强度的关系分为两个区间。在I区间,内摩擦角随胶结抗拉强度的增加而降低,降低幅度为16.82%;在II区间,内摩擦角随胶结抗拉强度的增加而增加,增加幅度为29.95%。

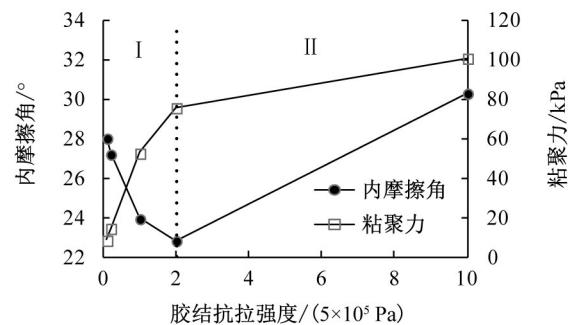


图6 粘聚力、内摩擦角与胶结抗拉强度的关系

Fig.6 The relationship between cohesion, internal friction Angle and tensile strength

3.6 胶结抗剪强度 pb_coh

由图7可知:(1)粘聚力和胶结抗剪强度的关系分为两个区间。在I区间,粘聚力随胶结抗剪强度的增加近似成线性关系增加;在II区间,粘聚力基本保持水平,说明在该区间内,胶结抗剪强度对粘聚力的影响敏感性极弱。(2)内摩擦角和胶结抗剪强度的关系分为两个区间。在I区间,内摩擦角随胶

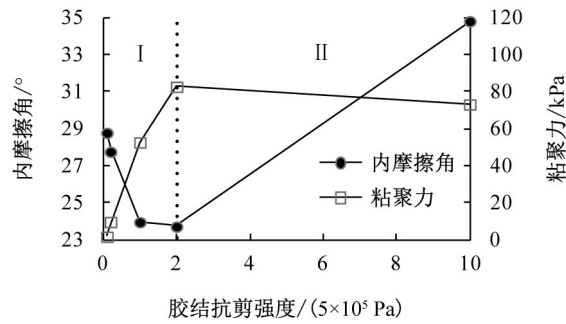


图 7 粘聚力、内摩擦角与胶结抗剪强度的关系
Fig.7 The relationship between cohesion, internal friction Angle and shear strength

结抗剪强度的增加而降低，降低幅度为 17.6%；在Ⅱ区间，内摩擦角随胶结抗剪强度的增加而增加，增加幅度为 46.7%。

3.7 参数敏感性分类

根据粘聚力和内摩擦角变化的最大幅度对平行粘结参数定义敏感性分类标准 (SCC) 如下：

3.7.1 根据粘聚力的变化幅度进行分类

I 类：敏感性强——粘聚力增加幅度为 200% 以上或降低幅度在 70% 以上；Ⅱ类：敏感性一般——粘聚力增加幅度为 100% 以上或降低幅度在 40% 以上；Ⅲ类：敏感性弱——粘聚力增加幅度为 50% 以上或降低幅度在 20% 以上；Ⅳ类：敏感性极弱——粘聚力增加幅度为 50% 以下或降低幅度在 20% 以下。

3.7.2 根据内摩擦角的变化幅度进行分类

I 类：敏感性强——内摩擦角变化幅度为 30% 以上；Ⅱ类：敏感性一般——内摩擦角变化幅度为 20% 以上；Ⅲ类：敏感性弱——内摩擦角变化幅度为 10% 以上；Ⅳ类：敏感性极弱——内摩擦角变化幅度为 10% 以下。

根据上文统计出粘聚力和内摩擦角随各个平行粘结参数变化时的最大、最小值，如表 4、表 5 所示。

根据表 4、表 5 及敏感性分类标准可得：平行粘结参数对粘聚力的影响按敏感程度可分为四类：

I 类：敏感性强——胶结抗拉强度、胶结抗剪强度；Ⅱ类：敏感性一般——平行粘结弹性模量、线性弹性模量；Ⅲ类：敏感性弱——平行粘结刚度比；Ⅳ类：敏感性极弱——线性刚度比。

平行粘结参数对内摩擦角的影响按敏感程度可分为四类：I 类：敏感性强——胶结抗剪强度；Ⅱ类：敏感性一般——胶结抗拉强度、线性弹性模量；Ⅲ类：敏感性弱——平行粘结弹性模量；Ⅳ类：敏感性极弱——线性刚度比、平行粘结刚度比。

按照 SCC 进行分类，可以发现，所有的参数均符合 SCC，说明 SCC 是合理的。

4 结论

1) 平行粘结参数对直剪强度参数的影响不具有单调性，应划分为不同的区间进行讨论。

表 4 粘聚力随平行粘结参数变化表
Tab.4 Table of variation of cohesive force with parallel bonding parameters

粘聚力	平行粘结参数					
	E	k	Pb_E	Pb_k	Pb_ten	Pb_coh
粘聚力最小值 /kPa	38	46.5	30	40.5	9	2
粘聚力最大值 /kPa	87.5	56.5	84.5	62.5	101	83
粘聚力增加幅度 /%	130	22	182	54	1 022	4 050
粘聚力降低幅度 /%	57	18	64	35	91	98

注：增加幅度 = (最大值 - 最小值) / 最小值 × 100%；降低幅度 = (最大值 - 最小值) / 最大值 × 100%。

表 5 内摩擦角随平行粘结参数变化表
Tab.5 Table of variation of internal friction Angle with parallel bonding parameters

内摩擦角	平行粘结参数					
	E	k	Pb_E	Pb_k	Pb_ten	Pb_coh
内摩擦角最小值 /°	19.24	23.75	22.34	22.73	23.34	23.75
内摩擦角最大值 /°	24.91	24.37	25.17	24.42	30.33	34.84
内摩擦角增加幅度 /%	29	3	13	7	30	47
内摩擦角降低幅度 /%	23	3	11	7	23	32

2) 平行粘结参数对粘聚力的影响按敏感程度从强到弱为: 胶结抗拉强度 = 胶结抗剪强度 > 平行粘结弹性模量 = 线性弹性模量 > 平行粘结刚度比 > 线性刚度比。

3) 平行粘结参数对内摩擦角的影响按敏感程度从强到弱为: 胶结抗剪强度 > 胶结抗拉强度 = 线性弹性模量 > 平行粘结弹性模量 > 线性刚度比 = 平行粘结刚度比。

参考文献:

- [1] 刘畅, 陈晓雪, 张文, 等. PFC 数值模拟中平行粘结细观参数标定过程研究 [J]. 价值工程, 2017, 36(26): 204-207.
- [2] 许强, 黄曼, 马成荣. 基于颗粒流的模拟岩石结构面细观参数敏感性研究 [J]. 科技通报, 2018, 34(1): 72-

78.

- [3] 曹智. 砂泥岩及其颗粒料力学特性 PFC 模拟方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [4] 王誉霖. 近似级配条件下砂土力学性质差异及其 PFC 分析方法的研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [5] 周赛. 引江济淮试验工程崩解岩的强度特征及防护措施研究 [D]. 南京: 河海大学, 2018.
- [6] 李德. 基于宏观实验数据的岩土材料细观参数反演 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [7] 何树江. 基于颗粒流的灰岩细观力学参数标定方法及其敏感性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [8] 邢炜杰, 余湘娟, 高磊, 等. 基于颗粒流离散元的黏性土三轴剪切试验数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 119-124.

(责任编辑 李新)

(上接第 10 页)

部, 两端应力相对较小; 同时, 新型钢管铅芯阻尼器两端应力分布更加均匀。表明优化后的阻尼器可以有效防止端部应力集中。

3) 本次有限元建模能较好地模拟两种钢管铅芯阻尼器的实际耗能能力, 参数分析较为准确。同时, 改进后的钢管双铅芯阻尼器耗能能力较好, 塑性耗能能力优于传统单铅芯阻尼器, 延性有较大幅度的提升, 为以后钢管铅芯阻尼器的应用提供可靠的有限元分析数据与模拟结果。

参考文献:

- [1] 李松瑞. 铅及铅合金 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [2] 周云. 金属耗能减震结构设计 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2013: 8.
- [3] ROBINSON W H, GREENBANK L R. An extrusion energy absorber suitable for the protection of structures during an Earthquake [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1976, 4(3): 251-259.

- [4] 刘明明, 李宏男, 付兴. 一种新型自复位 SMA- 剪切型铅阻尼器的试验及其数值分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(6): 52-57.
- [5] 彭凌云, 闫维明, 何浩祥. 板式剪切型铅阻尼器的试验研究及有限元分析 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 183-187.
- [6] 周云, 卢德辉, 邓雪松, 等. 钢管铅阻尼器的性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 28(6): 1-15.
- [7] 周锡元, 阎维明, 杨润林. 建筑结构的隔震、减振和振动控制 [J]. 建筑结构学报, 2002(2): 2-12.
- [8] 史三元, 郭维光, 陈鑫, 等. 高层钢结构抗震消能体系的力学性能分析 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2008, 25(4): 1-3.
- [9] 卢德辉, 周云, 邓雪松, 等. 钢管铅阻尼器耗能机理研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(12): 45-51.
- [10] JG/T 209—2012, 建筑消能阻尼器 [S].
- [11] 卢德辉, 周云, 邓雪松. 钢管铅芯阻尼器性能分析研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 215-221.

(责任编辑 王利君)