

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221347

基于离散元模拟的混凝土直剪试验细观参数研究

覃 茜^{1,2}, 徐千军²

(1. 长江科学院材料与结构研究所, 湖北 武汉 430010;
2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 非均质材料混凝土的剪切性能十分重要, 为揭示混凝土抗剪性能和破坏机理, 采用颗粒离散元的平行黏结模型模拟混凝土的直剪试验过程, 通过控制变量法, 研究了接触模量、接触刚度比、颗粒摩擦系数、抗拉强度、黏聚强度与抗拉强度比、接触摩擦角等细观参数对混凝土直剪试验结果的影响。结果表明, 试件抵抗剪切变形能力与接触弹模有显著的线性关系, 接触刚度比对剪切试验结果的影响较小; 颗粒摩擦系数、接触抗拉强度、黏聚强度与抗拉强度比、接触摩擦角对剪切强度参数的摩擦系数和粘聚力影响显著; 接触抗拉强度、黏聚强度与抗拉强度比、接触摩擦角影响剪切应力与水平位移关系曲线的峰值后形式。研究结果为混凝土试件直剪试验的颗粒离散元模拟提供了参考。

关键词: 混凝土; 离散元模型; 细观参数; 剪切强度; 破坏形式

中图分类号: TV311, TV32+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0156-05

1 引言

混凝土是非均质材料, 常受剪切荷载左右, 因此有必要分析混凝土的剪切破坏性能。近年来, 颗粒离散元数值仿真方法常用于岩石和混凝土等结合密实的非均匀准脆性材料的剪切性能模拟。CUNDAL P A 等^[1-2] 提出用颗粒流数值模拟程序模拟大位移非连续体的破坏变形行为; POTYONDY D O 等^[3] 发展了线性接触的离散元模型, 提出了考虑颗粒接触点间不仅可以承受压力还可以承受拉力、甚至力矩的平行黏结接触; CHO N 等^[4] 采用离散元方法研究了脆性复合岩体的室内直剪试验, 发现试验加载中主要产生雁型拉裂纹破坏; 雷建俊等^[5] 采用 PFC^{2D} 研究了随机骨料分布的混凝土模型; 崔激等^[6] 通过三维扫描技术获得粗骨料的真实形态, 采用黏结颗粒模型从细观上研究了粗骨料破碎对混凝土变形和破坏特性的影响。此外, 还利用离散元方法研究了二维自密实混凝土单轴压缩试验^[7]、新老混凝土黏结试块双面剪切试验及直接剪切试验破坏的裂缝扩展机理^[8]。离散元的平行黏结模型常用来分

析混凝土和岩石等脆性材料的力学行为, 但对混凝土剪切行为的模拟较少。鉴此, 本文基于颗粒离散元模拟, 采用平行黏结模型, 考虑内部颗粒的随机分布, 研究混凝土的直接剪切行为, 确定细观参数对宏观剪切性能的影响, 了解混凝土剪切过程中裂纹的发展情况, 丰富了各种性能混凝土剪切破坏行为的离散元模拟内容。

2 数值模型

2.1 直剪试验几何模型

模型采用随机位置和大小颗粒构建混凝土试件。由于在离散元三维模拟中试件内部颗粒数量与颗粒尺寸的导数呈立方正相关, 颗粒尺寸小计算用时长, 而颗粒尺寸过大会导致仿真结果的离散性大。因此, 先根据最简单的无侧限单轴抗压试验中泊松比和弹性模量参数的稳定性确定离散元模型的颗粒几何参数, 即最小颗粒半径 R_{\min} 和最大颗粒半径与最小颗粒半径之比 R_{\max}/R_{\min} 。考虑颗粒密度 $\rho=2\ 500\text{ kg/m}^3$, 不考虑颗粒与加载墙体之间的摩擦。抗压试验采用边长 150 mm 的立方体试件, 通过顶部、底部墙体施加相对的竖

收稿日期: 2022-07-01, 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009011, 52090084); 湖北省自然科学基金项目(2021CFB154); 武汉市科技知识创新项目(CKSD2023556/CL)

作者简介: 覃茜(1993-), 女, 博士、工程师, 研究方向为混凝土与水工结构等, E-mail: qinxi93@163.com

通讯作者: 徐千军(1967-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为混凝土与水工结构等, E-mail: qxu@mail.tsinghua.edu.cn

向速度 0.01 m/s 约束加载,模型见图 1。根据上下加载墙体之间的位移变化与试件原始高度的比值确定试件加载方向的应变,由墙体的荷载反力与试件截面积确定加载方向的正应力,得到压缩试验的应力与应变曲线,由该曲线确定线性加载段的弹性模量 E ,由该曲线上的最大正应力确定抗压强度 σ_c 。同时监测模型试件四周最外侧颗粒 x 、 z 方向的位移变化,得到侧向平均应变,根据线性加载段侧向平均应变与加载方向应变的比值确定泊松比 ν 。

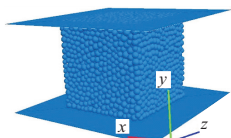


图 1 无侧限单轴抗压模型

Fig. 1 Unconfined uniaxial compressive model

2.1.1 最小颗粒半径

由于颗粒半径较大时离散元模拟所得宏观性能参数不稳定,离散元模型不能正确模拟出结构材料的宏观性能。因此,需要确定能得到稳定数值结果可接受的最大 R_{\min} 。此处保持 R_{\max}/R_{\min} 不变,并固定其他细观参数, R_{\min} 在 1.5~13.0 mm 范围内,进行无侧限单轴抗压数值试验,得到宏观参数泊松比 ν ,弹性模量 E 和抗压强度 σ_c 。为对比各 R_{\min} 情况下宏观参数,取 $R_{\min} = 1.5$ mm 时的 ν_1 、 E_1 、 σ_{c1} ,进行参数归一化后,分析 ν/ν_1 、 E/E_1 、 σ_c/σ_{c1} 随 R_{\min} 的变化见图 2(a)。由图 2 可看出,整体上 R_{\min} 越大,宏观参数都有变小的趋势。当 $R_{\min} > 6$ mm 时, ν/ν_1 波动大;当 $R_{\min} > 6.5$ mm 时, E/E_1 随 R_{\min} 的变化有所波动;当 $R_{\min} > 6.5$ mm 时, σ_c/σ_{c1} 随 R_{\min} 增大的变幅增加,且有所波动。因此,为了保证数值模拟得到相对稳定的宏观参数,取 R_{\min} 的最大值为 6 mm。

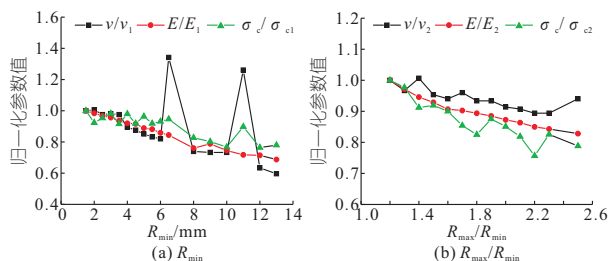


图 2 R_{\min} 、 R_{\max}/R_{\min} 对无侧限单轴抗压试验宏观参数的影响

Fig. 2 The influence of R_{\min} and R_{\max}/R_{\min} on the macro parameters of unconfined uniaxial compression test

2.1.2 最大最小颗粒半径比

由于颗粒半径的比值对宏观参数也有影响,仅对 R_{\max}/R_{\min} 在 1.2~2.5 范围内变化进行模

拟试验。取 $R_{\max}/R_{\min} = 1.2$ 时各宏观参数为 ν_2 、 E_2 、 σ_{c2} ,参数归一化后 ν/ν_2 、 E/E_2 、 σ_c/σ_{c2} 随 R_{\max}/R_{\min} 的变化见图 2(b)。由图 2(b)可看出,整体上宏观参数随 R_{\max}/R_{\min} 的增大而减少。 R_{\max}/R_{\min} 小于 1.9 时, ν/ν_2 有所波动。在 R_{\max}/R_{\min} 为 1.6~1.7 时, E/E_2 几乎不变。 R_{\max}/R_{\min} 在 1.4~1.9 之间变化时 σ_c/σ_{c2} 波动最小。因此,模拟中 R_{\max}/R_{\min} 取 1.7。

2.2 直剪试验加载方式

在可承受的计算时耗内,为更加接近边长 150 mm 立方体试件的性能,模拟中选择颗粒几何模型的 R_{\min} 为 4 mm, R_{\max}/R_{\min} 为 1.7,生成直剪模型见图 3。试件周围设置 8 个加载墙体,加载分三步进行,先对顶面 wall4 和底面 wall3 进行伺服加载至固定的正压力;再对 wall4、wall7、wall9、wall10 从速度 0 分级加载到 0.008 m/s,以避免突然加速使墙体周围产生冲击裂纹;最后上部墙体 wall4、wall7、wall9、wall10 保持 x 轴正方向水平位移的 0.008 m/s 速度加载,直至试件的剪切应力与位移曲线进入相对平滑段,或剪切面内裂缝增多,几乎覆盖整个剪切面,混凝土完全被剪坏,终止数值试验。根据图 3 中上下部竖直加载墙体的剪切反力和,算出水平剪切面所受剪切力,并由试件的剪切面积算出水平剪切应力。再由 wall9 的剪切位移确定试件的水平剪切位移,得到剪切应力与位移曲线。同时监测试验过程中拉、剪裂缝的数量变化过程。

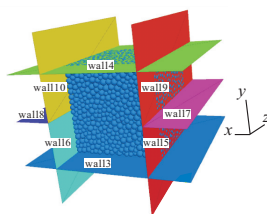


图 3 直接剪切试验模型

Fig. 3 PFC^{3D} model of direct shear test

3 细观接触参数对宏观参数的影响

离散元模拟的宏观特性受接触模型细观参数的影响。采用控制变量法研究平行黏结模型的 8 个重要细观参数(线性接触模量 E^* 、线性接触刚度之比 $\kappa^* = k_n/k_s$ 、颗粒摩擦系数 μ 、平行黏结接触模量 \bar{E}^* 、平行黏结接触刚度之比 $\bar{\kappa}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$ 、平行黏结接触抗拉强度 $\bar{\sigma}_c$ 、平行黏结接触黏结强度 \bar{c} 、平行黏结接触摩擦角 $\bar{\phi}$)对 2、3、4 MPa 正应力下混凝土直剪试验应力位移曲线和直剪强度参数的影响,即三个正压力下的应力位移曲线平

均初始斜率 $slope$, 2 MPa 下的最大剪切强度 τ_{max} , 粘聚力 c , 摩擦系数 f 。研究中假定 $\bar{E}^* = E^*$, $\bar{\kappa}^* = \kappa^*$, 以减少细观参数的变化个数。各参数的变化范围为 E^* 为 [1, 16] GPa, $\kappa^* = k_n/k_s$ 为 [1, 2.25], μ 为 [0.1, 1.6], $\bar{\sigma}_c$ 为 [5, 10] MPa, $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 为 [0.5, 2.0], $\bar{\phi}$ 为 [8°, 78°]。

3.1 对最大剪切强度的影响

为了对比各参数的影响程度, 将最大剪切强度 τ_{max} 按各细观参数变化范围内第一个剪切强度 τ_{max1} 进行归一化处理。2 MPa 正应力下归一化的 τ_{max} 随各细观参数的变化见图 4(a)~(c)。细观参数中 E^* 、 κ^* 对 τ_{max} 的影响最小。 μ 、 $\bar{\phi}$ 对 τ_{max} 的影响稍大, 随着 μ 的增大, τ_{max} 不断增大, 直到 μ 大于 0.8 时 τ_{max} 几乎不再随 μ 变化。当颗粒摩擦系数 μ 较小时, 增大 μ 就提高了颗粒间抵抗剪切滑移的能力, τ_{max} 增加; 而当 μ 大于 0.8 后继续增加, 虽然提高了颗粒接触的抗剪能力, 但

此时颗粒接触间抗拉强度仍较低, 产生较多的拉裂纹, 因此 μ 继续增加而 τ_{max} 几乎不变。 $\bar{\phi}$ 对 τ_{max} 的影响复杂, 由于颗粒间的接触同时存在线性接触和平行黏结接触, 在 $\bar{\phi}$ 小于 40° 时, $\bar{\phi}$ 越大 τ_{max} 越大, 但变化幅度较小; $\bar{\phi}$ 大于 40° 时, $\bar{\phi}$ 越大 τ_{max} 越小。 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 对 τ_{max} 的影响最为显著, 当 $\bar{\sigma}_c = \bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 时, $\bar{\sigma}_c$ 越大 τ_{max} 越大, 有线性关系:

$$\tau_{max} = 1.1705 \bar{\sigma}_c + 2.8807 \quad (1)$$

$\bar{\sigma}_c$ 与 τ_{max} 的相关系数为 0.9991, 相关性很高。 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 对 τ_{max} 的影响也较为显著, 此处保持 $\bar{\sigma}_c$ 不变, $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 越大, τ_{max} 越大。 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 主要是通过影响剪切破坏形式而影响剪切强度, 而 $\bar{\sigma}_c$ 与 τ_{max} 呈线性正相关。

3.2 对斜率的影响

为了对比各参数的影响程度, 将参数斜率按各细观参数变化范围内的第一个曲线线性段斜率进行归一化处理。分析在归一化的三个正应力下

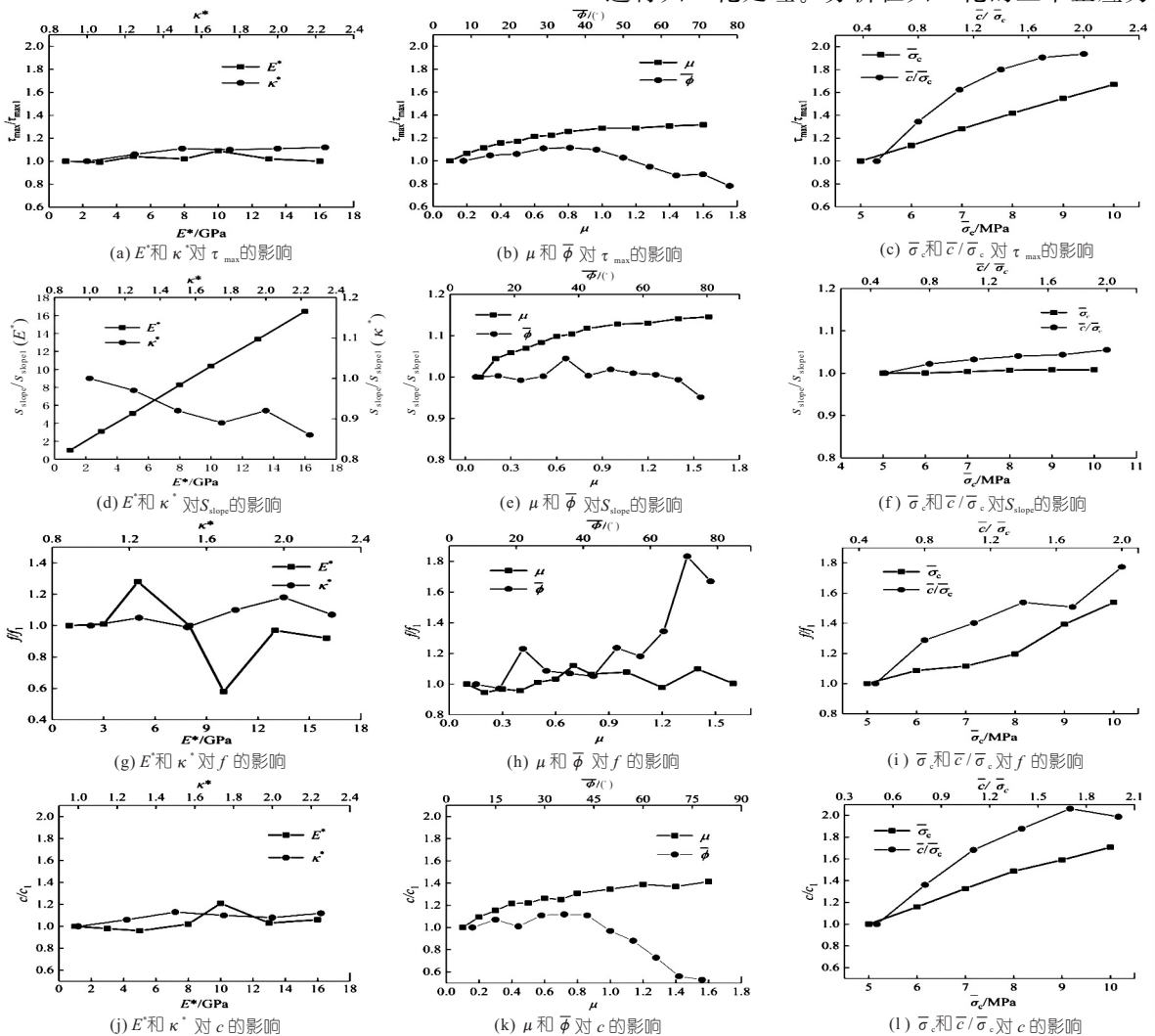


图 4 细观参数对最大剪切强度、斜率、摩擦系数、粘聚力的影响

Fig. 4 The influence of micro parameters on maximum direct shear strength, slope of stress-displacement curve, friction coefficient and cohesive strength

平均斜率 S_{slope} 随各细观参数的变化,如图 4(d)~(f)所示。 E^* 对 S_{slope} 的影响远大于其他细观参数, E^* 与 S_{slope} 之间有线形关系:

$$S_{slope} = 5.8126E^* - 0.0649 \quad (2)$$

式中, S_{slope} 为应力位移曲线平均初始斜率值。

式(2)相关系数为 0.9999,相关性很高。

3.3 对摩擦系数的影响

同样对摩擦系数 f 进行归一化处理,分析模型试件归一化的 f 随各细观参数的变化,见图 4(g)~(i)。由图 4(g)~(i)可得, E^* 在整个变化范围内对试件直剪试验的 f 影响较小,但在中间范围内 f 出现较大波动。 μ 和 κ^* 对试件 f 的影响较小,而 $\bar{\phi}$ 、 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 对试件 f 的影响相对较大,整体有各细观参数越大 f 越大的趋势。

3.4 对粘聚力的影响

模型试件归一化的粘聚力 c 随各细观参数的变化情况见图 4(j)~(l)。 E^* 和 κ^* 对 c 的影响不明显, μ 对 c 影响较大。 $\bar{\phi}$ 、 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 对 c 影响相对较显著。 $\bar{\phi}$ 小于 40° 时对 c 的影响较小,大于 40° 后 c 随 $\bar{\phi}$ 的增加而减少。试件整体的粘聚力 c 随 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 的增大而增大。

3.5 对破坏形式的影响

各种参数变化情况下数值试验结果表明, E^* 和 κ^* 对试件破坏形式没有明显的影响, μ 对试件破坏形式的影响较小。 $\bar{\phi}$ 、 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 对试件破坏时拉剪裂纹比例和应力位移曲线形式影响显著。细观参数的不同情况表现出峰后突降型和峰后缓降型两种应力位移曲线形式。

典型的峰后突降型应力位移曲线和拉剪裂纹数与水平位移曲线,见图 5。图 5(a)中的黑线是剪切应力与水平位移的关系曲线,在其上取 A、B、C 三个观测点,观测已生成的裂纹。结果表明,即将达到峰值的 A 点仅在中间剪切面的加载边界处发生少数裂纹;在峰后临近点 B 剪切面产生贯通的裂纹面,试件完全剪切破坏,拉压裂纹数几乎相同;而峰后远点 C 中间面产生的裂纹逐渐向上下侧扩展,产生几乎等量的拉压裂纹。

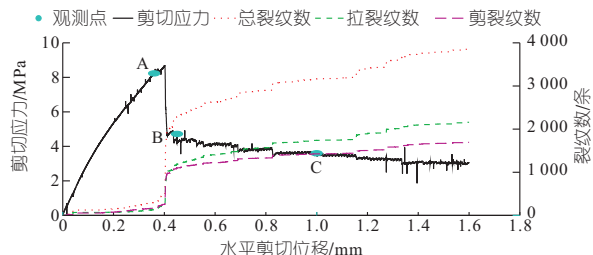


图 5 典型峰后突降型曲线直剪试验结果

Fig. 5 The result of direct shear test with typical post-peak sudden dip curve

同理,典型的峰后缓降型的应力位移曲线和拉剪裂纹与水平位移曲线见图 6。分析表明,在即将达到峰值的 A 点仅在中间面的加载边界处发生极少数裂纹,A 点前曲线具有非常好的线性性质;在峰后临近点 B 中间面产生贯通的裂纹面,极大部分裂纹是剪切裂纹;在峰后远点 C 中间面产生的裂纹逐渐向上下侧扩展,产生裂纹数增多,其中主要增加的是剪切裂纹。

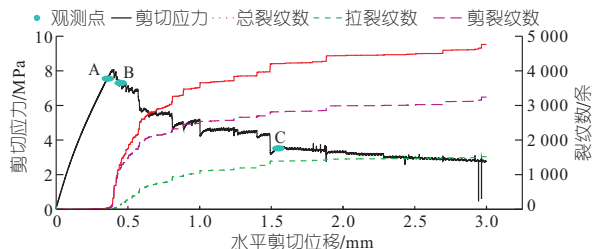


图 6 典型峰后缓降型直剪试验结果

Fig. 6 The result of direct shear test with typical post-peak slowly dip curve

4 数值与室内试验对比

针对边长 150 mm 立方体试件的室内直接剪切试验,采用水科院自主设计的混凝土抗剪仪,在 2 MPa 正压力下,以 0.008 m/s 速度进行位移控制加载,得到剪切应力与位移关系曲线见图 7,初始斜率为 24.45 MPa/mm;2 MPa 正压力下的最大剪应力为 8.03 MPa,最终残余强度为 2.78 MPa;剪切强度参数中粘聚力为 5.03 MPa,摩擦系数为 1.55。从细观接触参数对宏观参数的影响分析中,可以看出接触弹模 E^* 对 τ_{max} 、 f 、 c 和破坏形式的影响很小,对 S_{slope} 的影响显著,因此由式(2)确定 E^* 。 τ_{max} 受 $\bar{\sigma}_c$ 和 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c$ 的影响显著,暂取 $\bar{c}/\bar{\sigma}_c = 1$,由式(1)确定 $\bar{\sigma}_c$ 。因为室内剪切试验的应力位移关系曲线属于峰后缓降型,需选择较大的 $\bar{\phi}$ 值。经过多次调整,最终确定混凝土直剪试验的离散元模拟参数值,其中 R_{min} 为 4 mm, R_{max}/R_{min} 为 1.7, μ 为 0.7, E^* 为 4.1 GPa, κ^* 为

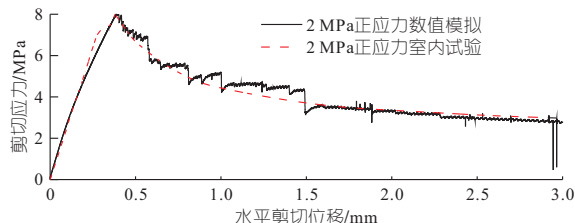


图 7 2 MPa 正应力下室内直剪试验和 PFC 数值模拟应力位移曲线

Fig. 7 The curves of direct shear stress and horizontal shear displacement of indoor direct shear test and PFC numerical simulation

1.7, $\overline{E^*}$ 为 4.1 GPa, $\overline{\kappa^*}$ 为 1.7, $\overline{\sigma_c}$ 为 7 MPa; \overline{c} 为 7 MPa, $\overline{\phi}$ 为 67。根据所得细观参数,在 2 MPa 正应力下直剪试验得到的应力位移曲线见图 7, 两曲线的拟合程度较好。混凝土离散元模型试件在 2、3、4 MPa 正应力下的摩擦系数 1.51、粘聚力 5.01 MPa, 与室内试验数据的误差分别为 2.58%、0.40%, 表明利用颗粒离散元程序模拟的混凝土直剪试验结果接近室内试验值。

5 结 论

a. 各细观参数对直剪试验结果的影响程度不同。剪切应力位移曲线的斜率(抵抗剪切变形的能力)受接触弹模的影响最大,具有显著的线性关系;接触刚度比对剪切试验结果的影响较小。

b. 颗粒摩擦系数、接触抗拉强度、粘聚力与抗拉强度比、接触摩擦角对剪切强度参数(c 、 f)的影响显著。其中平行黏结接触抗拉强度与最大剪切强度呈线性正相关,与试件剪切强度系数呈非线性正相关。

c. 接触弹模和刚度比对剪切应力与水平位移关系曲线的峰值后的形式没有明显影响,颗粒摩擦系数对试件破坏形式的影响较小。接触抗拉强度、粘聚力与抗拉强度比、接触摩擦角影响剪切应力与水平位移关系曲线的峰值后的形式,其中平行黏结接触粘聚力与抗拉强度比对试件受力过程

中产生的拉裂纹和剪切裂纹比例影响显著。

参 考 文 献:

- [1] CUNDALL P A, HART R D. Numerical modelling of discontinua[J]. Engineering computations, 1992.
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [3] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [4] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2008, 45(8): 1335-1346.
- [5] 雷建俊, 魏良针, 林天干, 等. ITZ 强度对混凝土裂隙扩展影响的 DEM 模拟研究[J]. 人民长江, 2022, 53(6): 217-221, 227.
- [6] 崔激, 魏杰, 李国栋. 考虑粗骨料破碎的混凝土力学特性细观模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 50-56.
- [7] 王晓琴, 杨名超, 肖明, 等. 自密实混凝土单轴压缩试验细观模拟[J]. 中国科技论文, 2020, 15(12): 1410-1416.
- [8] 姜仲洋, 李志华, 张聪. 基于颗粒流的新老混凝土加固构件轴压性能细观研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(2): 342-349.

Research on Meso Parameters of Concrete Direct Shear Test Based on Discrete Element Simulation

QIN Xi^{1,2}, XU Qian-jun²

- (1. Department of Material and Structure, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;
2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The shear performance of heterogeneous concrete is very important. In this paper, the parallel bonding model of particle discrete element was used to simulate the direct shear test process of concrete to reveal the shear characteristic and failure mechanism of concrete. The impacts of meso parameters, such as contact modulus, contact stiffness ratio, particle friction coefficient, tensile strength, ratio of cohesive strength to tensile strength, and contact friction angle, on the results of concrete direct shear test results were studied by controlling the variable parameters. The shear deformation resistance of specimen has a significant linear relationship with the contact elastic modulus. The contact stiffness ratio has little impact on the shear test results. Particle friction coefficient, contact tensile strength, ratio between cohesion strength and tensile strength, and contact friction angle have a significant effect on the shear strength parameters. Contact tensile strength, ratio between cohesion strength and tensile strength, and contact friction angle could affect the curve form after peak of shear stress vs. horizontal displacement. This paper provided a reference for particle discrete element simulation of direct shear test of concrete specimens.

Key words: concrete; discrete element model; meso parameters; shear strength; damage form