

粒间胶结接触力学特性的三维试验研究

蒋明镜^{1,2}, 金树楼^{1,2}, 刘 蔚^{1,2}, 刘 俊^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 为实现结构性砂土离散元接触模型合理性的三维试验验证, 设计了一套可用于三维半球形理想胶结颗粒成型及实现不同加载条件下的接触力学特性测试装置, 制备了一定胶结尺寸的环氧树脂半球形颗粒胶结试样, 在一系列辅助加载装置中初步开展了不同加载条件(拉伸、压缩、剪切、弯转、扭转)下的力学性能测试。结果表明, 该装置可用于实现三维情况下胶结颗粒接触力学特性测试; 不同加载条件下的实测试验结果与二维试验成果基本一致; 峰值剪切、弯矩、扭矩随着法向荷载的增大呈现先增大后减小的趋势, 存在一个相同的临界法向荷载。

关 键 词: 离散元法; 颗粒胶结; 三维接触; 试验研究

中图分类号: TU 443; O 241.83

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0009-05

Three-dimensional experimental study of mechanical behaviors of bonded granules

JIANG Ming-jing^{1,2}, JIN Shu-lou^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, LIU Jun^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to verify contact model and parameter rationality for structured sand in discrete element simulation, a set of apparatus for specimen preparation and tests on contact mechanical behaviors of idealized hemispherical bonded granules are designed. Throughout the specimen preparation devices, two aluminum hemispheres with the same size were cemented together by adhesive in a size-controlled mode. Then, a series of tests were conducted, including tension test, compression test, shear test, bending test and torsion test, using secondary loading devices. The results show that the apparatus are able to investigate the contact mechanical behaviors of two bonded hemispheres. The consequences are in good agreement with those extracted from the achievements of 2D tests in references. The peak shear force, bending moment, torque of two bonded hemispheres increase to a peak value with the normal force firstly, and then decrease with the normal force. In addition, the critical normal forces in different loading conditions are almost the same.

Keywords: discrete element method; bonded granules; three-dimensional contact; experimental study

1 引 言

结构性砂土由于其力学特性不同于室内试验常用的净砂, 近年来备受岩土工程界的关注。随着科技的进步, 人们逐渐意识到结构性砂土的特殊力学特性主要来源于微观结构的差异, 包括颗粒排列结构和粒间胶结物。砂土的力学特性不仅取决于应力历史和密实度, 同时受到颗粒胶结作用影响, 沈珠

江院士提出结构性土体本构模型的建立将成为 21 世纪土力学研究的核心问题^[1]。

离散单元法最早由 Cundall^[2]提出, 为天然土体结构性的研究提供了一条新的途径。它将土体视为离散颗粒的堆积体, 通过给定合理的颗粒间微观接触模型来模拟颗粒堆积体的宏观力学行为。国内外不少学者通过微观模型试验的方法来定量描述颗粒间的胶结作用, 从室内试验实测结果出发, 提炼出

颗粒间接触模型, 实现颗粒材料宏观力学特性的模拟。2004 年, Delenne 等^[3]率先通过室内试验和离散元数值模拟研究了胶结颗粒材料的力学特性, 通过对由环氧树脂胶结的 2 根铝棒进行简单的拉、压、剪、扭作用下力学测试并将结果引入到离散元接触模型中, 模拟了胶结颗粒堆积试样的无侧限压缩试验。2006 年, Brockel 等^[4]设计了一套能够测试毫米级双颗粒系统粒间结晶胶结物的拉伸荷载的试验仪器。Kirsch 等^[5]在其基础上改进了试验装置, 测得了双颗粒系统中粒间结晶胶结的峰值剪切及扭转荷载, 并将试验实测结果引入离散元接触模型中实现了数值模拟研究。

国内学者蒋明镜等^[6-12]在 Delenne 的基础上自行设计了一套可用于胶结颗粒成型及辅助加载装置, 制备了不同胶结尺寸、不同胶结物类型的胶结试样, 并进行了简单及复杂加载路径下的粒间胶结接触力学特性测试, 随后将试验实测结果引入离散元胶结接触模型, 实现了结构性砂土宏观力学特性的模拟, 并与室内试验结果对比, 探究了由粒间接触力学测试实测结果抽象而来的接触模型的合理性。

本研究基于蒋明镜二维平面应变情况下的试验结果^[6, 11-12], 设计了一套可用于三维情况下半球形理想颗粒胶结成型及辅助加载装置, 前者主要用于制备特定尺寸下物理化学性质稳定的胶结试样, 后者用于实现胶结颗粒在不同加载条件(拉伸、压缩、剪切、弯转、扭转)下的接触力学特性测试, 测定了三维情况下球形颗粒胶结试样的力-位移、力矩-转角关系, 为建立离散元三维微观接触模型奠定初步基础。

2 试验设计

2.1 试样制备

在前人试验成果下考虑加工工艺以及试验可操作性, 将土颗粒理想化为铝球(LY-11 型), 铝合金的密度和杨氏模量与实际砂土颗粒较为相近, 与二维情况圆柱形状不同, 试验前将铝合金原材料加工成半球形, 其直径 $D = 40 \pm 0.05$ mm, 通过胶结成型装置将两个半球在指定位置处进行胶结, 制备出模型试验所需的三维理想胶结试样模型如图 1 所示, 成型装置见图 2, 其中胶结材料为由国防科大研制的 KD-504A 型环氧树脂胶, 其对铝材平面粘结强度为 $140 \sim 260$ kg/cm², 胶结厚度 $H = 2 \pm 0.05$ mm, 胶结宽度 $B = 10 \pm 0.05$ mm。

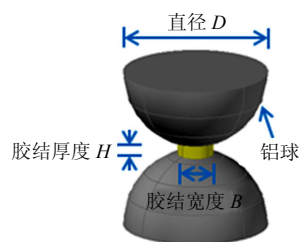


图 1 理想颗粒胶结试样模型
Fig.1 Idealized model of bonded granules



图 2 胶结成型装置
Fig.2 Devices for bonded specimen preparation

2.2 试验方案

试验中制备好的环氧树脂胶结试样均匀性良好、物理化学性质稳定, 并将之置于一定温度、一定湿度的养护槽中养护 10 d。采用同济大学岩石双轴流变仪对养护好的环氧树脂胶结试样进行加载, 为测试特定尺寸下三维胶结试样的接触力学特性, 试验过程中对半球形理想胶结试样设计了一系列简单加载方式, 包括拉伸、压缩、剪切、弯转、扭转, 最终获得了不同法向压力作用下不同加载条件下胶结试样的峰值强度以及力-位移关系、力矩-转角关系, 具体加载方案如图 3 所示。

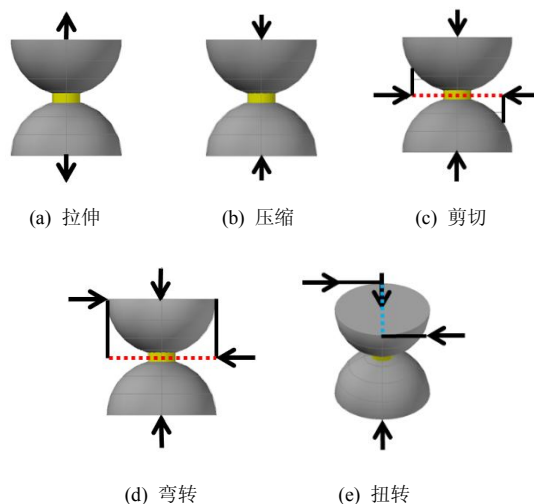


图 3 试验加载方案
Fig.3 Loading scheme of tests

由于试样形态的特殊性（形状与尺寸），试验过程中需要特定的辅助加载装置，如图 4 所示，从而实现不同加载条件下胶结试样接触力学特性测试。



图 4 辅助加载装置

Fig.4 Auxiliary loading devices

3 试验结果分析

考虑到试验系统误差，本研究中任一加载条件下的试验结果分析均采用重复可靠、破坏模式相似的试验数据点，控制试验结果误差在 10%~15%。

3.1 拉伸试验

图 5 为环氧树脂胶结试样的拉伸荷载与拉伸位移的典型关系曲线。从图中可以看出，随着拉伸位移的逐渐增大，环氧树脂胶结试样的拉伸荷载呈近似线性增大，当达到峰值拉伸荷载后，拉伸荷载直接跌落至零，呈现出脆性破坏特性。

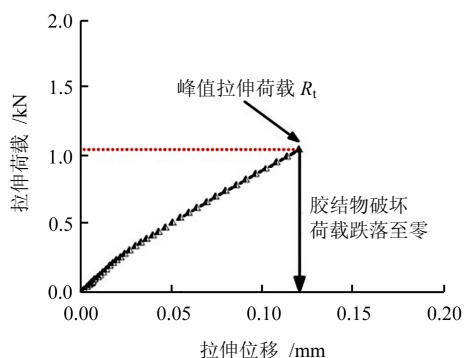


图 5 拉伸试验结果

Fig.5 Results of tension test

经过计算可知，环氧树脂胶结试样的拉伸刚度 $k_t = 0.93 \times 10^7$ N/m，峰值抗拉荷载 $R_t = 1.05$ kN，相比 Delenne 等的测试结果，拉伸荷载与拉伸位移关

系曲线的变化规律基本相同，但由于本试验为三维胶结试样，拉伸刚度与峰值拉伸荷载均小于 Delenne 等的成果（拉伸刚度 $k_t = 1.08 \times 10^7$ N/m，峰值抗拉荷载 $R_t = 1.5$ kN）。

3.2 压缩试验

图 6 为环氧树脂胶结试样的压缩荷载与压缩位移的典型关系曲线。从图中可以看出，随着压缩位移的增大，环氧树脂胶结试样压缩荷载先线性增大至第一个峰值拐点，初始压缩刚度 $k_{n1} = 1.56 \times 10^7$ N/m，峰值压缩荷载 $R_c = 6.379$ kN。随后胶结物开始发生破坏但未被挤出，因此压缩荷载随压缩位移的增大继续增大，但刚度却小于初始刚度，逐渐达到另一峰值拐点；随着压缩位移的继续增大，胶结物开始由内向外挤出，胶结物的减少，表现为压缩荷载的降低，在挤压作用下铝球间的环氧树脂厚度逐渐减小至残余厚度，此时压缩荷载降到最小，同时与胶结物接触的球面不再是曲面，在法向荷载作用下变成了近似平面，由此判断球体开始接触，且压缩荷载随着压缩位移的增大重新开始增大，其压缩刚度 $k_{n2} = 2.4 \times 10^7$ N/m，基本上等于铝球材料刚度。

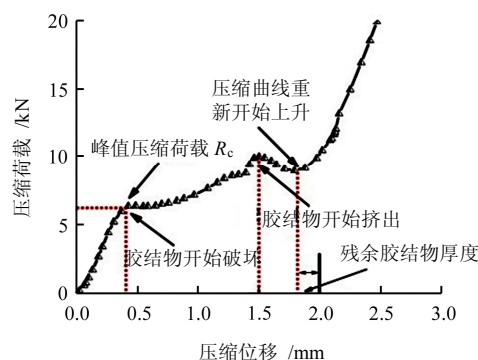


图 6 压缩试验结果

Fig.6 Results of compression tests

3.3 剪切试验

图 7 为环氧树脂胶结试样在不同法向压力下的剪切荷载与剪切位移关系曲线。从图中可见，对于环氧树脂胶结试样，不同法向压力下，随着剪切位移的增大，剪切荷载先线性增大至峰值后，进入应变软化阶段，随后剪切荷载跌落至残余强度阶段。

图 8 为胶结试样峰值剪切荷载与法向荷载之间的关系曲线。从图中可以看出，环氧树脂胶结试样的峰值剪切荷载随着法向荷载的增大，呈现先增大后减小趋势，存在与二维情况相似的临界法向荷载

F_{ncr} 。这是因为试样剪切强度由胶结和摩擦两部分承担,当试验开始后,胶结强度先增大至峰值后逐渐减小为零,而摩擦不断增大,由非主导地位转为主导地位,当胶结和摩擦等效时,法向荷载达到临界状态;法向荷载继续增大,胶结部分破坏,剪切强度受摩擦控制。

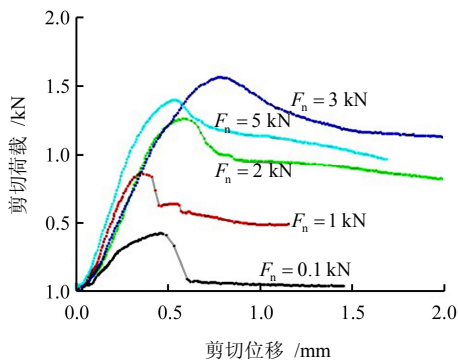


图 7 剪切荷载与剪切位移关系曲线
Fig.7 Relationships between shear force and shear displacement

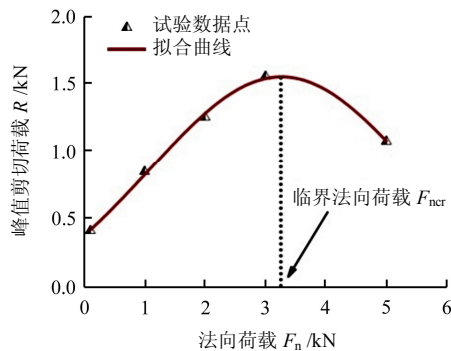


图 8 峰值剪切荷载与法向荷载关系曲线
Fig.8 Relationship between peak shear force and normal force

3.4 弯转试验

图 9 为环氧树脂胶结试样在不同法向压力下的弯矩与转角的关系曲线。由图可知,随着转角的增大,不同法向压力下的环氧树脂试样的弯矩在达到峰值强度后,均进入了应变软化阶段,且随着转角的继续增大,弯矩逐渐减小,一直持续到加载结束,整个试验过程中弯矩-弯转角曲线呈现弹塑性软化特性,与二维试验成果一致。

图 10 为胶结试样峰值弯矩与法向荷载之间的关系曲线。从图中可以看出,环氧树脂胶结试样的峰值弯矩先随着法向荷载增大而增大,后随着法向荷载增大而减小,存在一个临界的法向荷载,这与

压剪试验相似,且两种加载方案下的临界荷载值基本相等。

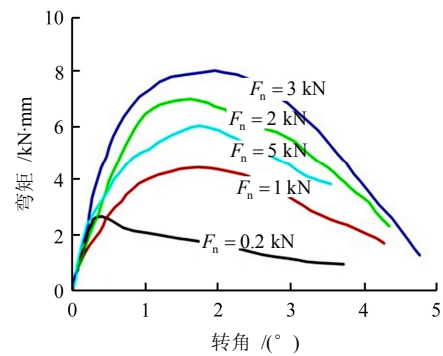


图 9 弯矩与转角关系曲线
Fig.9 Relationships between bending moment and angle

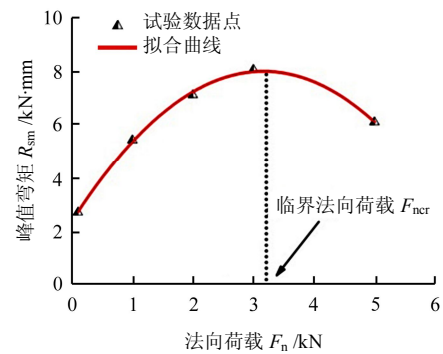


图 10 峰值弯矩与法向荷载关系曲线
Fig.10 Relationship between peak bending moment and normal force

3.5 扭转试验

图 11 为环氧树脂胶结试样在不同法向压力下的扭矩与转角的关系曲线。由图可知,随着转角的增大,不同法向压力下的环氧树脂试样的扭矩在达到峰值强度后,发生应变软化,当法向压力较低时,

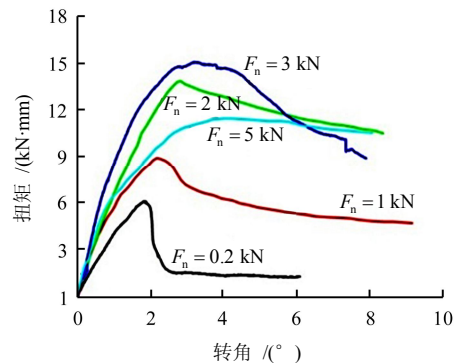


图 11 扭矩与转角关系曲线
Fig.11 Relationships between torque and angle

扭矩达到残余强度, 随着法向压力的增大, 应变软化趋势减弱, 且当法向压力较大时, 随着转角的持续增加, 扭矩逐渐减小, 一直持续到试验加载结束。试验过程中胶结试样扭矩-扭转角曲线亦呈现弹塑性软化特性。

图 12 为胶结试样峰值扭矩与法向荷载之间的关系曲线。环氧树脂胶结试样的峰值扭矩随着法向荷载的增大, 先增大后减小, 界限法向荷载 $F_{ncr} = 3.25$ kN, 与剪切、弯转试验成果基本一致。

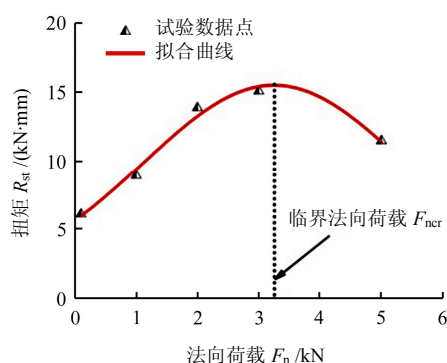


图 12 峰值扭矩与法向荷载关系曲线

Fig.12 Relationship between peak torques and normal forces

4 结 论

(1) 设计的试验装置可以用于三维理想颗粒模型简单加载条件(拉伸、压缩、剪切、弯转、扭转)下的力学特性测试。

(2) 三维胶结试样接触力学特性与二维试验成果基本一致, 即抗拉特性表现出弹脆性, 抗压特性表现为弹塑性硬化, 抗剪特性表现为弹脆塑性软化, 抗弯、抗扭特性均表现为弹塑性软化。

(3) 法向荷载对胶结颗粒力学特性有很大影响: 随法向荷载的增大, 峰值剪切荷载、弯矩、扭矩均呈现先增大后减小的趋势, 存在一个临界法向荷载。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型-21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95—97.
SHEN Zhu-jiang. The mathematical model for the structured soils—The key problem of soil mechanics in the 21st century[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(1): 95—97.
- [2] CUNDALL P A, STRACK O D L. The discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47—65.
- [3] DELENNE J Y, YOUSSEFI M S E, CHERBLANC F, et al. Mechanical behavior and failure of cohesive

- granular materials[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(15): 1577—1594.
- [4] BROCKEL U, WAHL M, KIRSCH R, et al. Formation and growth of crystal bridges in bulk solids[J]. *Chem. Eng. Technol.*, 2006, 29: 691—695.
- [5] KIRSCH R, BROCKEL U, BRENDL L, et al. Measuring tensile, shear and torsional strength of solid bridges between particles in the millimeter regime[J]. *Granular Matter*, 2011, 13: 517—523.
- [6] JIANG M J, SUN Y G, XIAO Y. An experimental investigation on the mechanical behavior between cemented granules[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(5): 678—690.
- [7] 蒋明镜, 白闰平, 刘静德, 等. 岩石微观颗粒接触特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1121—1128.
JIANG Ming-jing, BAI Run-ping, LIU Jing-de et al. Experimental study of inter-granular particles bonding behaviors for rock microstructures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1121—1128.
- [8] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 胶结颗粒接触力学特性测试装置研制[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 309—315.
JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang, LI Li-qing. Development of experimental apparatus for contact behaviour of bonded granules[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 309—315.
- [9] 蒋明镜, 孙渝刚, 李立青. 复杂应力下两种胶结颗粒微观力学模型的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 354—360.
JIANG Ming-jing, SUN Yu-gang, LI Li-qing. Experimental study on micro-mechanical model for two different bonded granules under complex stress conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(3): 354—360.
- [10] 蒋明镜, 肖俞, 孙渝刚, 等. 水泥胶结颗粒的微观力学模型试验[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1293—1300.
JIANG Ming-jing, XIAO Yu, SUN Yu-gang, et al. Experimental investigation on a micro-mechanical model of cement-bonded particles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1293—1300.
- [11] 蒋明镜, 周雅萍, 陈贺. 不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1264—1273.
JIANG Ming-jing, ZHOU Ya-ping, CHEN He. Experimental study of mechanical behaviors of bonded granules under different bond thickness[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1264—1273.
- [12] 蒋明镜, 张宁, 金树楼. 不同胶结宽度粒间胶结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 928—936.
JIANG Ming-jing, ZHANG Ning, JIN Shu-lou. Experimental study on the mechanical behaviors of bonded granules under different bond width[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 928—936.