

# 不同胶结物粒间胶结三维仿微观力学试验

蒋明镜<sup>1,2,3</sup>, 卢厚华<sup>1,2,3</sup>, 李涛<sup>1,4</sup>, 金树楼<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 天津大学 土木工程系, 天津 300072)

**摘要:** 离散单元法被广泛应用于颗粒材料的力学特性研究, 建立合理的胶结微观接触理论对实现胶结型岩土材料宏观、微观力学特性的数值分析显得尤为重要。首先通过室内三维接触试验方法制备由环氧树脂和高铝水泥胶结的铝球试样, 并使用辅助加载装置进行拉伸、压缩、剪切、弯曲及扭转 5 种加载方式下的接触力学特性测试, 为建立三维微观接触模型奠定试验基础。结果表明, 胶结铝球颗粒的接触力学响应及强度包线与胶结物类型有关。在峰值前, 胶结铝球的力-位移与力矩-转角变化关系曲线表现为线弹性; 在峰值后, 表现为环氧树脂偏塑性、高铝水泥偏脆性; 法向作用力对胶结接触力学特性有重要影响, 不同胶结铝球的抗剪、抗弯、抗扭能力随着法向作用力的增大呈现先增大后减小趋势, 存在临界法向应力比; 在不同荷载空间下, 不同胶结铝球颗粒的归一化峰值强度包线(剪切强度、弯矩、扭矩-法向荷载)近似呈抛物线型。

**关键词:** 胶结铝球; 微观模型试验; 环氧树脂; 高铝水泥

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

## Three-dimensional Experimental Study on Mechanical Behavior of Cemented Granules by Different Bond Agents

JIANG Mingjing<sup>1,2,3</sup>, LU Houhua<sup>1,2,3</sup>, LI Tao<sup>1,4</sup>, JIN Shulou<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The distinct element method had been widely used to study the macro & micro mechanical behaviors of granular

materials, and hence it became more and more important to introduce a reasonable and accurate contact model, which can be applied in a 3D simulation of structured soils. The micro model test method was adopted to analyze the inter-particle bond contact responses. Two types of bonded granules glued together with epoxy adhesive or aluminous cement were firstly prepared by a novel self-designed apparatus, and then a series of tests, including tension, compression, shear, bending and torsion tests, were subsequently carried out using a rock rheological testing machine and some specific auxiliary loading devices. Test results show that the inter-granular bond mechanics and strength envelopes are closely related to the cement agents. The force-displacement and the moment/torque-rotational angle relationships are approximately linearly in the pre-failure stage, while they are different in the post-failure stage for different cement agents, as plastic for epoxy and brittle for cement. Normal force performs a significant influence on the mechanical behaviors of inter-hemisphere bond; both the critical normal force and stress ratio vary with the cement agent. Under different load space, the shapes of the strength envelopes, where the peak shear strength (shear strength, moment and torque versus normal force) appear near-parabolic.

**Key words:** cemented aluminum spheres; micro model test; epoxy adhesive; aluminous cement

在自然条件下, 胶结广泛赋存于天然结构性砂土、黏土、深海能源土及生物胶结土等颗粒材料中, 胶结作用对颗粒材料的压缩、屈服、剪切及变形等宏观力学特性有着重要的影响<sup>[1-3]</sup>。

离散单元法 1979 年由 Cundall 等<sup>[4]</sup>首次提出, 近年来广泛应用于岩土、化工、水利、海洋等不同工程领域, 其基于离散介质理论, 通过给定颗粒间的胶

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2014CB046901); 国家自然科学基金重点项目(51639008); 同济大学土木工程防灾国家重点实验室项目(SLDRCE14-A-04)

第一作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为天然结构性黏土、砂土、太空土、深海能源土、非饱和土的宏观微观试验、本构模型和数值分析。E-mail: mingjingjiang@tongji.edu.cn

结接触模型,可以研究微观胶结作用对颗粒材料宏观力学特性的影响。

结合接触力学理论,粒间接触模型定义了接触力与接触相对位移间的关系.当颗粒间不考虑黏着力时,通过 Hertz 理论<sup>[5]</sup>和 Mindlin-Deresiewicz 理论<sup>[6]</sup>分别确定法向和切向接触作用力;当颗粒间存在黏着力时,通过 JKR 理论<sup>[7]</sup>和 Thornton 理论<sup>[8]</sup>分别确定法向和切向接触作用力.蒋明镜等<sup>[9-10]</sup>考虑了颗粒和胶结抗转动作用,提出了干颗粒接触模型以及复杂胶结接触模型,并实现了准静态情况下结构性砂土的宏微观力学特性的数值模拟. Shen 等<sup>[11]</sup>通过离散元方法对由 2 个大颗粒和若干小颗粒组成的胶结球体进行了不同加载方式下的数值试验研究,分析了胶结尺寸对强度包线和破坏准则的影响。

此外,由于上述方法多存在理论假定,室内三维接触试验研究便显得尤为必要. Delenne 等<sup>[12]</sup>率先进行了环氧树脂胶结铝棒在简单加载条件下的接触力学试验研究. Brockel 等<sup>[13]</sup>和 Kirsch 等<sup>[14]</sup>测试了颗粒间结晶的不同强度指标,研究了毫米级颗粒间的接触力学特性. 蒋明镜等<sup>[15-20]</sup>通过开展胶结铝棒接触力学试验,分析了法向作用力及胶结尺寸对接触力学特性的影响,并抽象出了胶结接触模型,实现了胶结砂土的离散元数值模拟<sup>[21]</sup>。

由于颗粒间的相对运动具有多重维度,因此胶结铝棒接触力学试验研究存在局限性,难以完全实现胶结铝球在扭转方向下的接触力学特性测试.为此,本文采用胶结铝球试样,且考虑到颗粒间存在分离、碰撞、滑动以及转动等相对运动方式,与之对应,通过拉伸、压缩、剪切、弯曲和扭转等加载方式对特定尺寸下胶结铝球的接触力学响应和强度包线变化规律进行模型试验研究,为粒间三维胶结接触理论的建立奠定试验基础。

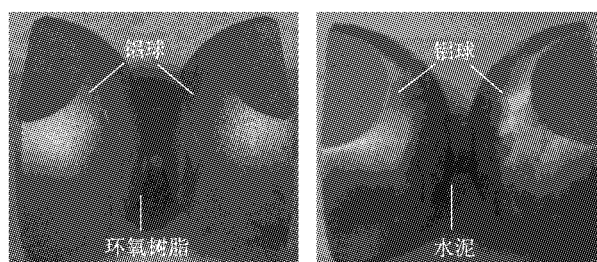
## 1 试验设计

对于颗粒的材质本文选用铝合金是考虑到铝合金(LY-11 型)的密度及杨氏模量与实际砂土颗粒比较相似.考虑到实际加载仪器的限制及试验操作的可行性及可重复性,本试验将铝合金原材料加工成直径  $D=(40\pm 0.05)$  mm 的铝半球,同时为了尽量减小尺寸效应,本文选取了试样的胶结厚度  $H=2$  mm、胶结直径  $d=10$  mm,使得试验中铝半球与胶结物质的尺寸之比介于实际土颗粒尺寸与胶结尺寸

比值的范围之内.胶结材料选用了环氧树脂 AB 胶与 CA-50A-700 型高铝水泥 2 种典型的塑性与脆性材料,一般实际结构性土体中胶结材料的脆塑性介于这 2 种材料之间.为了消除铝球表面粗糙度的影响,在制取铝球时尽量保证铝球的表面光滑程度一致.在制样之前,先用丙酮将铝球表面擦干净,然后在胶结物质与铝球接触的地方涂上均匀薄层的强力胶,避免铝球与胶结物质在接触面处产生薄弱的接触,影响试验的进行.其制样步骤分别如下。

(1) 环氧树脂. ①组装成型模块;②均匀搅拌体积比为 1:1 的环氧魔力 AB 胶,将之薄薄地涂抹在表面擦拭干净的铝半球胶结位置处以提高接触界面强度;③在 40 °C 水浴环境下均匀搅拌体积比为 1:1 的环氧树脂 AB 胶,将之快速注入模型中;④静置 5 min 后,将之放入 100 °C 烘箱中烘烤 1.5 h 后取出,室温冷却 1 h 后拆开,标记形态完美的环氧树脂胶结铝球,将之放入密闭养护瓶中恒温恒湿条件下养护 20 d。

(2) 高铝水泥. 步骤①和②同上;③均匀搅拌水灰比为 0.34 的水泥浆 3 min 后,在 2 min 内迅速将其注入模型中;④静置 5 min 后,放入养护瓶(温度  $(20\pm 1)$  °C,湿度  $(80\pm 1)\%$ )中养护 24 h 后拆开,标记形态完美的高铝水泥胶结铝球,继续放入密闭养护瓶中养护 28 d.最终制得试样如图 1 所示。



a 环氧树脂胶结铝球

b 高铝水泥胶结铝球

图 1 胶结铝球实物

Fig. 1 Hemispheres cemented with different agents

试验过程中加荷设备主要采用同济大学岩石双轴流变试验机<sup>[19]</sup>.由于胶结铝球形态特殊,区别于室内常规加载试样,试验需采用辅助加载装置才能实现不同加载方式(拉伸、压缩、剪切、弯转、扭转)下胶结铝球的接触力学特性测试,如图 2 所示.图 2b 的压缩装置由两部分组成,即外面的套筒及里面的滑筒.将试样放入套筒里面,然后在试样顶部放入滑筒,通过两者的相对运动来压缩试样。

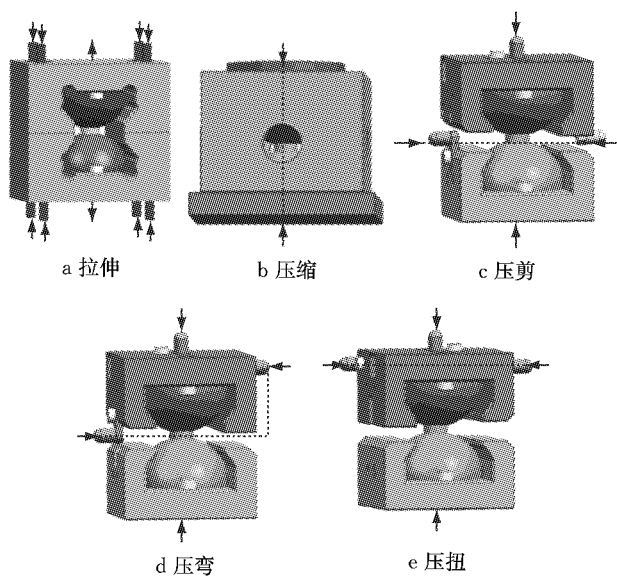


图 2 辅助加载装置

Fig. 2 Schematic diagrams of auxiliary loading devices

## 2 试验结果

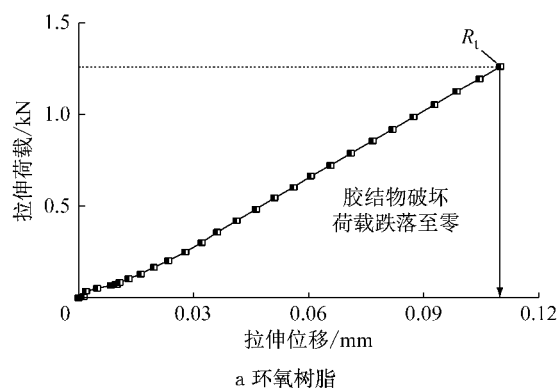
### 2.1 拉伸试验

由图 3 胶结铝球拉伸荷载随拉伸位移变化关系可知,当拉伸位移小于 0.02 mm 时,随着拉伸位移的增加,拉伸荷载呈非线性增大趋势,这是由于加载初始铝球与辅助拉伸装置构件间接触不完全造成的;当拉伸位移大于 0.02 mm 时,拉伸荷载随着拉伸位移的增加先近似线性增大至峰值,后瞬间跌落为零,表现为脆性破坏特征。

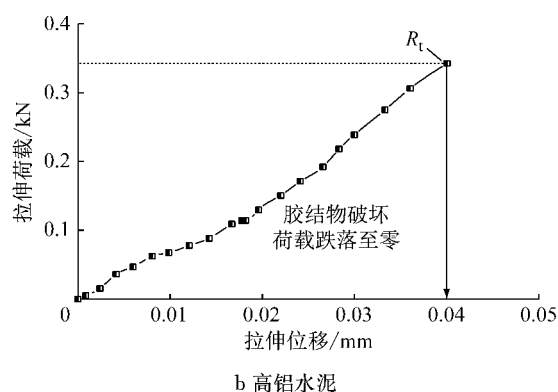
对比分析环氧树脂和高铝水泥胶结铝球的接触力学特性,在拉伸试验条件下,接触力-位移的变化规律基本一致,均表现为脆性破坏。胶结铝球的峰值拉伸荷载与胶结材料本身的抗拉强度有关,具体表现为环氧树脂高于高铝水泥。

### 2.2 压缩试验

图 4a 为胶结铝球的压缩荷载随压缩位移变化关系。由图可知,对于环氧树脂胶结铝球,力-位移曲线分为 5 个阶段:①初始加载阶段,压缩荷载随着压缩位移的增加呈非线性增大趋势,压缩刚度较小;②线性加载阶段,随着压缩位移增加( $>0.1$  mm),压缩荷载随压缩位移增加呈线性增大趋势,压缩刚度明显大于初始刚度;③塑性软化阶段,压缩荷载达到峰值即达到峰值压缩荷载,环氧树脂进入塑性变形阶段,压缩荷载趋于稳定;④塑性硬化阶段,环氧树脂发生鼓状变形,压缩荷载随压缩位移增加非线性增大;⑤再接触阶段,压缩荷载达到最大值,塑性变



a 环氧树脂



b 高铝水泥

图 3 胶结铝球拉伸荷载随拉伸位移变化关系

Fig. 3 Relationship between tensile force and displacement of cemented granules

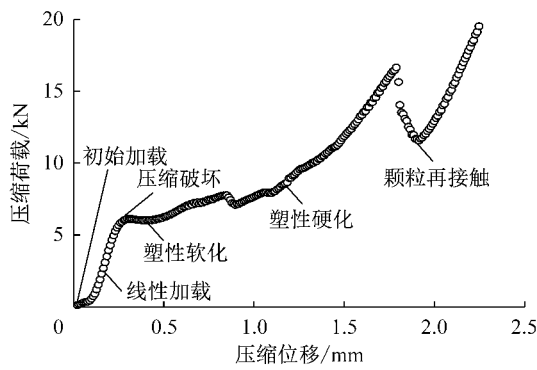
形达到极限,环氧树脂发生破坏,且逐渐被挤出,压缩荷载减小,当铝球接触后,压缩荷载随压缩位移再次线性增大。

图 4b 为水泥胶结铝球压缩荷载-压缩位移关系。由图可知,力-位移曲线分为 3 个阶段:①线性加载阶段,压缩荷载随着压缩位移增加线性增大;②塑性软化阶段,压缩荷载线性增大到峰值后,逐渐减小至残余荷载,水泥内部出现裂纹,且逐渐被挤出;③再接触阶段,伴随粒间残留的水泥粉末,铝球开始接触,压缩荷载随着压缩位移的增加由非线性转变为线性增大。

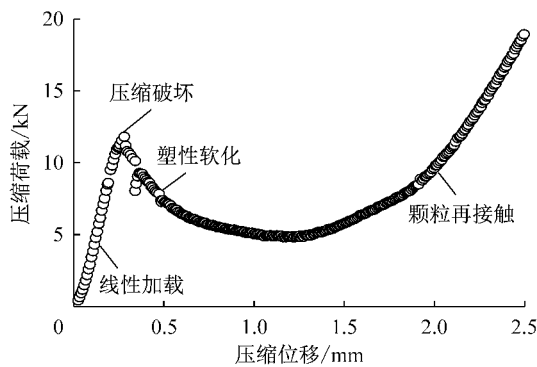
对比环氧树脂和高铝水泥胶结铝球的接触力学特性,在压缩试验条件下,胶结铝球的接触力-位移关系曲线在压缩荷载达到峰值前的变化规律一致,均随着压缩位移的增加呈现线性增大趋势,而在峰值后环氧树脂胶结铝球的接触力学响应表现为塑性硬化,高铝水泥胶结铝球的接触力学响应表现为塑性软化。胶结铝球的峰值压缩荷载与胶结材料的抗压强度有关,具体表现为高铝水泥高于环氧树脂。

### 2.3 压剪试验

图 5 为环氧树脂和高铝水泥 2 种胶结铝球的剪切荷载随剪切位移变化关系曲线。由图 5a 可知,在



a 环氧树脂



b 高铝水泥

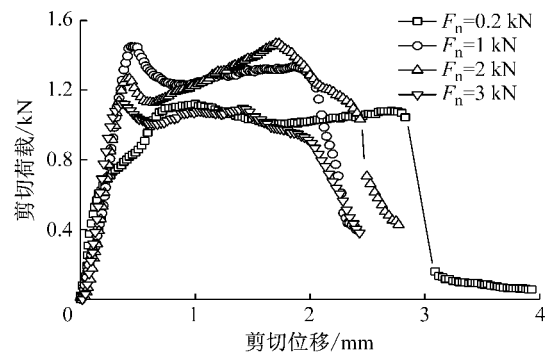
图 4 胶结铝球压缩荷载随压缩位移变化关系

Fig. 4 Relationship between compressive strength and displacement of bonded granules

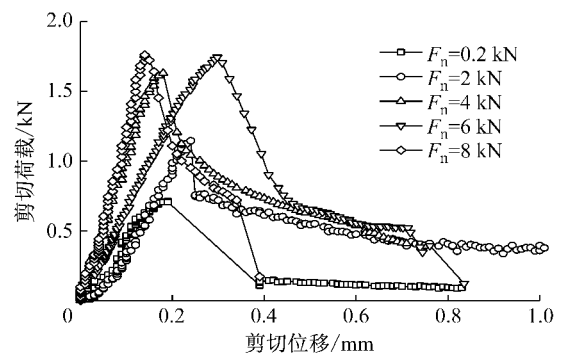
不同法向荷载( $F_n=0.2, 1, 2, 3$  kN)作用下,环氧树脂胶结铝球的剪切荷载随剪切位移的增加线性增大,随法向荷载的增大,剪切荷载达到峰值后,力-位移关系曲线先从塑性软化向塑性硬化转变,剪切荷载从峰值减小至残余后再次增大。

图 5b 为不同法向荷载作用下( $F_n=0.2, 2, 4, 6, 8$  kN)高铝水泥胶结铝球剪切荷载随剪切位移变化关系曲线。由图可知,在剪切试验过程中,胶结铝球剪切荷载随剪切位移的增加先线性增大至峰值,后逐渐减小至残余荷载,表现为弹脆性。不同法向荷载作用下的接触力-位移关系曲线剪切刚度基本相等,但在法向荷载较小时,水平向剪切荷载随剪切位移逐渐增大,当其大于法向荷载时,辅助加载装置的上部会绕着胶结铝球中心发生转动,在竖直方向上与胶结铝球上侧产生不均匀间隙,导致剪切荷载-位移曲线刚度偏小。

图 6 为胶结铝球的归一化峰值剪切荷载( $S_s$ )随法向应力比( $f_n$ )变化关系曲线。其中, $S_s = R_s / (R_{nc} + R_{nt})$ , $f_n = (F_n + R_{nt}) / (R_{nc} + R_{nt})$ , $R_s$  为剪切荷载, $F_n$  为法向荷载, $R_{nc}$  为峰值压缩荷载, $R_{nt}$  为峰值拉伸荷载,是对法向应力的一种归一化。由图可



a 环氧树脂



b 高铝水泥

图 5 胶结铝球剪切荷载随剪切位移变化关系

Fig. 5 Relationship between shear force and shear displacement of bonded granules

知,环氧树脂、高铝水泥 2 种胶结铝球的归一化峰值剪切荷载均随着法向应力比的增加先增大后减小,存在临界法向应力比  $f_{ncr}$ 。通过式(1)分别拟合 2 种胶结铝球的压剪试验结果。

$$S_s = m_{s1} \times f_n + m_{s2} \times f_n \times \left[ \ln\left(\frac{1}{f_n}\right) \right]^{m_{s3}} \quad (1)$$

式中: $m_{s1}$ 、 $m_{s2}$ 、 $m_{s3}$  为拟合参数。拟合得到:①环氧树脂, $m_{s1} = -0.002$ , $m_{s2} = 0.658$ , $m_{s3} = 0.870$ , $R^2 = 0.980$ ( $R^2$  为相关系数);②高铝水泥, $m_{s1} = 0.003$ , $m_{s2} = 0.380$ , $m_{s3} = 0.620$ , $R^2 = 0.949$ 。对比可知,在压剪试验条件下,2 种胶结铝球的剪切荷载-位移关系曲线变化规律表现为:在峰值前基本一致,均呈线性增大趋势;而在峰值后具有明显差异,其中环氧树脂偏弹塑性,高铝水泥偏弹脆性。在剪切荷载-法向荷载空间下,2 种胶结铝球的归一化峰值强度包线近似呈抛物线状,由于不同胶结材料压缩力学特性存在差异,临界法向应力比表现为环氧树脂小于水泥,使得归一化峰值强度包线几何形态表现为:偏左(环氧树脂)、偏右(高铝水泥)。

### 2.4 压弯试验

图 7 为环氧树脂和高铝水泥 2 种胶结铝球的弯矩随转角变化关系曲线。其中,弯矩通过水平向荷载

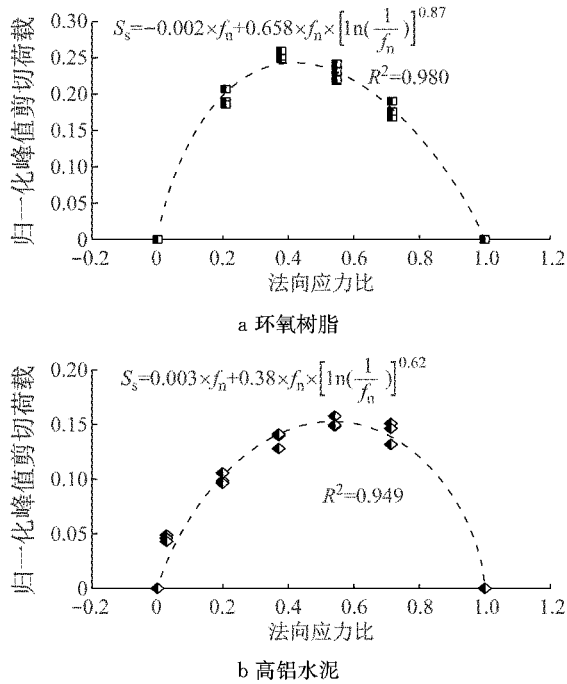


图 6 胶结铝球归一化峰值剪切荷载随法向应力比变化关系  
Fig. 6 Relationship between normalized peak shear force and normal stress ratio of bonded granules

与两侧加载端竖向偏心距相乘得到;转角通过竖向位移传感器读数与传感器轴心距胶结物中心的相对距离相除得到。

由图 7a 可知,在不同法向荷载( $F_n=0.2, 1, 2, 3$  kN)作用下,随着弯转角的增加,环氧树脂胶结铝球的弯矩非线性增大至峰值后逐渐减小;在不同法向荷载作用下的力矩-转角关系曲线表现为明显的弹塑性,在峰值前,弯矩随转角非线性增大;处于峰值时,环氧树脂开始破坏;在峰值后,不同于拉伸试验的脆性破坏,弯矩随弯转角的增加而逐渐减小,说明法向荷载对环氧树脂峰后抗弯能力有很大影响。

图 7b 为不同法向荷载( $F_n=0.2, 2, 4, 6, 8$  kN)作用下高铝水泥胶结铝球在弯曲条件下的力矩-转角关系曲线。由图可知,胶结铝球的弯矩随着转角的增加线性增大至峰值后逐渐减小。在纯弯( $F_n=0.2$  kN)条件下,峰后存在残余力矩,力矩-转角关系曲线表现为理想弹塑性;而当  $F_n=2, 4, 6, 8$  kN 时,力矩-转角关系曲线表现为弹塑性,且随着法向荷载的增加,塑性软化特征趋于明显。这是由于水泥胶结铝球发生弯曲破坏后,在较大法向荷载的作用下,会被压裂压碎,导致破坏后的粒间胶结物质被挤出,不再产生抗力;在不同法向荷载作用下,弯矩达到峰值前刚度基本相等。

图 8 为胶结铝球的归一化峰值弯矩( $S_r$ )随法向应力比( $f_n$ )变化关系曲线。其中,  $S_r = R_r / [R_A \times$

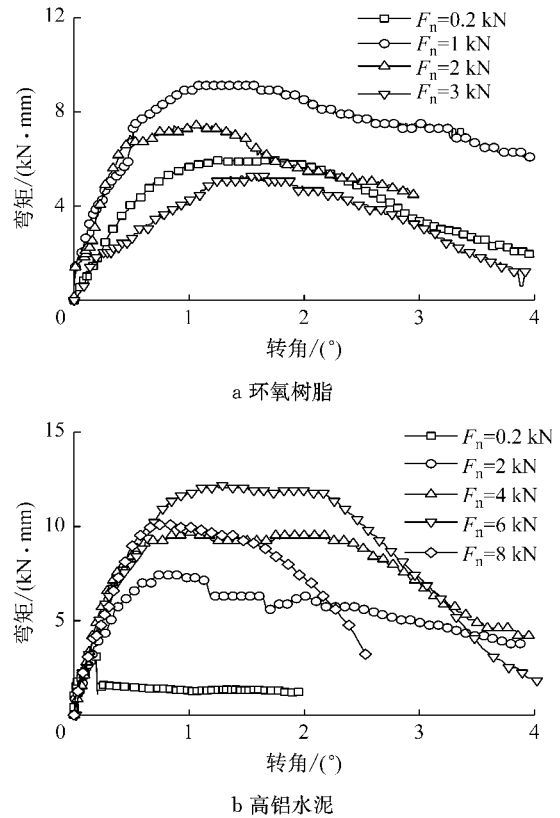


图 7 胶结铝球弯矩随转角变化关系  
Fig. 7 Relationship between bending moment and rotational angle of bonded granules

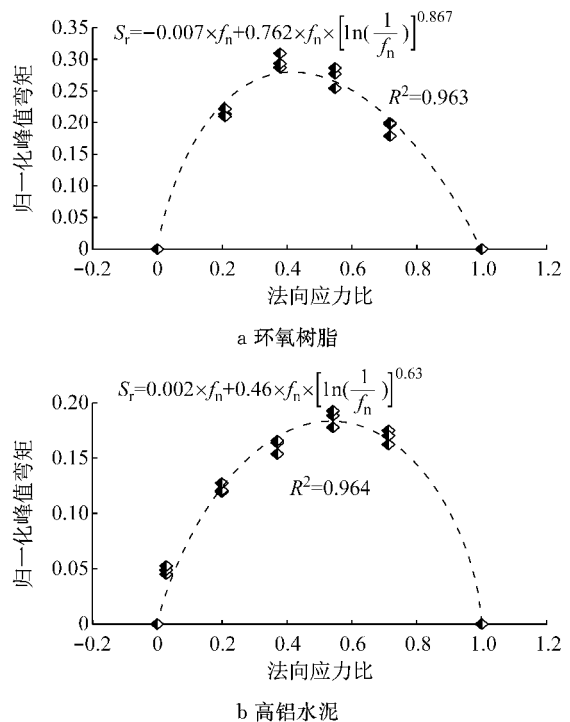


图 8 胶结铝球归一化峰值弯矩随法向应力比变化关系  
Fig. 8 Relationship between normalized peak bending moment and normal stress ratio of bonded granules

$(R_{nc}+R_{nt})]$ ,  $R_t$  为峰值弯矩,  $R_A$  为粒间胶结物的半径. 由图可知, 与剪切试验结果类似, 环氧树脂、高铝水泥胶结铝球的归一化峰值弯矩随着法向应力比的增加均呈现先增大后减小趋势, 存在临界法向应力比. 通过式(2)分别对环氧树脂、水泥胶结铝球峰值弯矩-法向荷载关系曲线进行拟合:

$$S_t = m_{r1} \times f_n + m_{r2} \times f_n \times \left[ \ln\left(\frac{1}{f_n}\right) \right]^{m_{r3}} \quad (2)$$

式中:  $m_{r1}$ 、 $m_{r2}$ 、 $m_{r3}$  为拟合参数. 拟合得到: ① 环氧树脂,  $m_{r1} = -0.007$ 、 $m_{r2} = 0.762$ 、 $m_{r3} = 0.867$ ,  $R^2 = 0.963$ ; ② 高铝水泥,  $m_{r1} = 0.002$ 、 $m_{r2} = 0.46$ 、 $m_{r3} = 0.63$ ,  $R^2 = 0.964$ .

对比可知, 在压缩试验条件下, 2 种胶结铝球的力矩-转角关系曲线变化规律均表现为弹塑性软化特征. 在弯矩-法向荷载空间下, 2 种胶结铝球的归一化峰值强度包线亦近似呈抛物线状, 归一化峰值强度包线中临界法向应力比数值与剪切试验结果相近, 环氧树脂小于高铝水泥, 归一化峰值强度包线几何形态分别表现为: 偏左(环氧树脂)、偏右(高铝水泥).

### 2.5 压扭试验

图 9 为环氧树脂和高铝水泥 2 种胶结铝球的扭矩随转角变化关系曲线. 其中, 扭矩通过水平向荷载与两侧加载端水平向偏心距相乘得到, 转角通过水平向位移传感器读数与传感器轴心距胶结物中心相对距离相除得到.

由图 9a 可知, 在不同法向荷载( $F_n=0.2, 1, 2, 3$  kN)作用下, 环氧树脂胶结铝球的扭矩随转角的增加非线性增大至峰值后, 逐渐减小至残余力矩, 力矩-转角关系曲线表现为弹塑性软化; 随着法向荷载的增加, 峰值前转动向刚度逐渐增大, 峰值力矩和残余力矩均呈先增大后减小趋势, 塑性软化明显.

图 9b 为不同法向荷载( $F_n=0.2, 2, 4, 6, 8$  kN)作用下高铝水泥胶结铝球在扭转条件下的力矩-转角关系曲线. 由图可知, 随着转角的增加, 高铝水泥胶结铝球的扭矩非线性增大至峰值后逐渐减小, 力矩-转角关系曲线表现为弹塑性软化. 值得注意的是, 当法向荷载较小时, 存在残余力矩, 当法向荷载较大时, 无残余力矩; 随着法向荷载的增大, 峰值前转动向刚度基本相等, 峰值扭矩先增大后减小, 且塑性软化趋势趋于明显.

图 10 为胶结铝球的归一化峰值扭矩( $S_t$ )随法向应力比( $f_n$ )变化关系曲线. 其中,  $S_t = R_t/[R_A \times (R_{nc} + R_{nt})]$ ,  $R_t$  为峰值扭矩. 由图可知, 与压剪、压弯试验结果类似, 2 种胶结铝球的归一化峰值扭矩

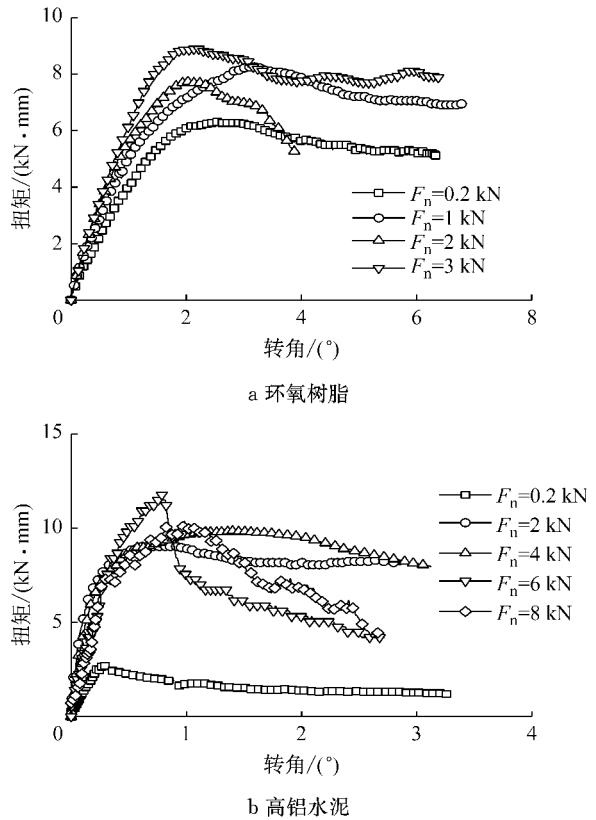


图 9 胶结铝球扭矩随转角变化关系

Fig. 9 Relationship between torque and torsional angle

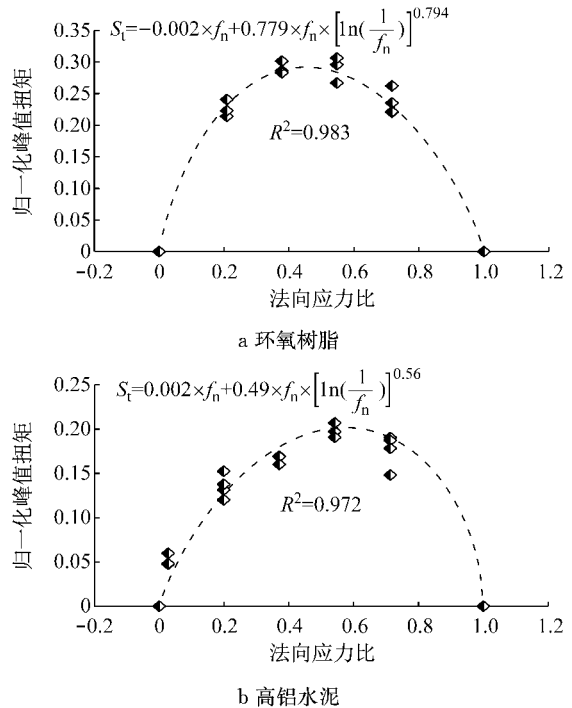


图 10 胶结铝球归一化峰值扭矩随法向应力比变化关系  
Fig. 10 Relationship between normalized peak torque and normal stress ratio of bonded granules

随着法向应力比的增加亦呈现先增大后减小趋势, 存在临界法向应力比. 通过式(3)拟合试验数据:

$$S_t = m_{t1} \times f_n + m_{t2} \times f_n \times \left[ \ln\left(\frac{1}{f_n}\right) \right]^{m_{t3}} \quad (3)$$

式中: $m_{t1}$ 、 $m_{t2}$ 、 $m_{t3}$ 为拟合参数。拟合得到:①环氧树脂, $m_{t1} = -0.002$ 、 $m_{t2} = 0.779$ 、 $m_{t3} = 0.794$ 、 $R^2 = 0.983$ ;②高铝水泥, $m_{t1} = 0.002$ 、 $m_{t2} = 0.49$ 、 $m_{t3} = 0.56$ 、 $R^2 = 0.972$ 。由对比可知,在压扭试验条件下,2种胶结铝球的力矩-转角关系曲线变化规律表现为:在峰值前近似线性增大,在峰值后塑性软化,环氧树脂、高铝水泥均呈现弹塑性软化特征。在扭矩-法向荷载空间下,归一化峰值强度包线均近似呈抛物线状,临界法向应力比数值与剪切、弯曲试验结果相近,环氧树脂胶结铝球小于高铝水泥胶结铝球,归一化峰值强度包线几何形态表现为:偏左(环氧树脂)、偏右(高铝水泥)。

综合上述试验结果,高铝水泥和环氧树脂胶结铝球的接触力学响应表现为峰前基本相似,峰后存在差异。在不同荷载空间下,胶结铝球的归一化峰值强度包线均近似呈抛物线状,环氧树脂的临界法向应力比较小(偏左);高铝水泥的临界法向应力比较大(偏右)。

### 3 结论

由于颗粒间的相对运动方式存在多重维度,已有试验成果无法实现含扭转条件的接触力学特性测试,通过设计胶结铝球成型装置和辅助加载装置,初步实现了不同加载方式(拉伸、压缩、剪切、弯曲、扭转)下的胶结接触力学特性测试,并对比分析了不同胶结材料的胶结铝球接触力学特性,结果表明:

(1) 环氧树脂、高铝水泥胶结铝球在拉伸试验加载方式下接触力学响应均表现为峰值前线弹性,峰值后脆性破坏。

(2) 环氧树脂胶结铝球的接触力学响应在压缩、压剪条件下呈现出弹塑性软化-硬化,在压弯、压扭条件下呈现出弹塑性软化特征;高铝水泥胶结铝球的接触力学响应在压缩、压剪、压弯、压扭条件下均呈现出弹塑性软化特征。

(3) 法向荷载对胶结铝球的抗剪、抗弯、抗扭能力具有很大影响,且同一加载条件下不同种胶结铝球的临界法向应力比不等,在不同加载条件下同一种胶结铝球的临界法向应力比基本相等。

(4) 在不同荷载空间下,胶结铝球的归一化峰值强度包线均近似呈抛物线状,几何形态受胶结材料压缩特性影响,表现为:偏左(环氧树脂)、偏右(高铝水泥)。

本文从室内三维接触试验角度首次进行了胶结铝球在拉伸、压缩、剪切、弯曲及扭转等方式下的胶结接触力学试验研究,并对比分析了胶结材料对胶结接触力学响应和归一化峰值强度包线变化规律的影响。而对比前人试验成果,本文仅作为三维微观接触力学试验研究的开端,后期会补充复杂加载条件下的试验,并进一步考虑胶结尺寸变化对粒间胶结接触力学性质的影响。实际中的颗粒及胶结物质处于毫米级别以下,由于目前试验条件的不足,真实情况中是否存在尺寸效应有待试验条件具备时进一步论证。

### 参考文献:

- [1] ROTTA G V, CONSOLI N C, PRIETTO P D M, *et al.* Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(5): 493.
- [2] AIREY D W. Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(9): 1379.
- [3] MALANDRAKI V, TOLL D G. Drained probing triaxial tests on a weakly bonded artificial soil[J]. *Géotechnique*, 2000, 50(2): 141.
- [4] CUNDALL P A, STRACK O D L. The distinct numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1): 47.
- [5] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper[J]. *Journal Für Die Reine und Angewandte Mathematik*, 1882, 92: 156.
- [6] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1953, 20: 327.
- [7] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids[C]//*Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. London: The Royal Society, 1971, 324(1558): 301-313.
- [8] THORNTON C. Interparticle sliding in the presence of adhesion[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1991, 24(11): 1942.
- [9] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance [J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(5): 340.
- [10] JIANG M J, SHEN Z F, WANG J F. A novel three-dimensional contact model for granulates incorporating rolling and twisting resistances[J]. *Computers and Geotechnics*, 2015, 65: 147.
- [11] SHEN Z F, JIANG M J, WAN R G. Numerical study of interparticle bond failure by 3D discrete element method [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, 40(4): 523.
- [12] DELENNE J Y, EL YOUSOUFI M S, CHERBLANC F, *et al.* Mechanical behaviour and failure of cohesive granular materials [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2004, 28(15): 1577.