

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0309-07

胶结颗粒接触力学特性测试装置研制

蒋明镜^{1,2}, 孙渝刚^{1,2}, 李立青^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 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)

摘 要: 为验证天然结构性砂土离散元模拟中接触模型及其参数的合理性, 设计了一套用于理想胶结颗粒成型及实现不同加载条件下接触力学特性测试装置。通过胶结颗粒成型装置在两大相同尺寸的铝棒间形成具有特定几何尺寸的胶结物, 随后, 采用一系列辅助加载装置实现简单及复杂加载条件下胶结颗粒接触力学特性的测试。试验结果表明: 该装置可用于胶结颗粒在不同加载条件下接触力学特性的测试, 实测胶结颗粒接触力学响应与天然砂土离散元中接触模型基本相符, 且其抗剪和抗扭强度均随着法向压力的增大而增大, 在三维应力空间中胶结颗粒强度包线呈椭圆抛物面状。

关 键 词: 胶结颗粒; 接触力学特性; 复杂加载条件; 试验装置

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Development of experimental apparatus for contact behaviour of bonded granules

JIANG Ming-jing^{1,2}, SUN Yu-gang^{1,2}, LI Li-qing^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An apparatus for specimen preparation and test on contact behaviour of idealized bonded granules is designed, which can be applied into the verification of contact model and parameter rationality for natural structured sand in the discrete element method (DEM). By using the specimen preparation devices, two aluminum rods with the same size are glued together by adhesive in a pre-defined mode. By using the auxiliary loading devices, the mechanical behaviours of contact between the bonded rods are obtained under simple and complicated conditions. The results show that the apparatus can be used effectively in test on contact behaviour of the bonded rods. The mechanical behaviours of contact between bonded rods agree well with the bonded materials contact model implemented by the discrete element method. The peak shear and rotational strength of the bonds increase with the increasing of normal force. The strength envelope in the normal-torsion-shear stress space is an elliptic paraboloid shell.

Key words: bonded granules; contact behaviour; complex loading condition; experimental apparatus

1 引 言

沈珠江院士^[1]曾指出: 土的结构性本构模型的建立将成为 21 世纪土力学的核心问题。天然结构性土由于颗粒间胶结作用的存在, 其力学特性与重塑土室内试验结果存在较大的差异^[2-4]。国外学者 Cuccovillo 和 Coop^[5]通过电镜扫描技术 (SEM) 给出了天然砂土中胶结物的形态。王庶懋和高玉峰^[6]通过对砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土细观结构的研究指出: 不同水泥掺量 (即颗粒间胶结物的数量)

是影响土体结构性的主要因素。然而, 目前的试验手段尚无法对砂土中胶结特性进行定量研究。相比土工试验, 离散元数值模拟技术为天然砂土中胶结效应研究提供了一条新的途径, 离散单元法最早由 Cundall^[7]提出, 并用于分析颗粒材料的力学特性, 它将土体视为离散颗粒的堆积体, 通过给定颗粒间微观接触模型来模拟颗粒堆积体的宏观力学特性。为推广离散元法, Cundall 还进一步推出了商业软件 PFC2D 与 PFC3D (particle flow code)。周健等^[8]采用 PFC2D 对净砂的一系列细观力学特性进

收稿日期: 2010-03-30

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 51025932); 国家自然科学基金 (No. 10972158)。

第一作者简介: 蒋明镜, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太空气、深海能源土、天然结构性黏土、砂土、非饱和土宏观观测试验、本构模型和数值分析研究以及土体渐进破坏分析。E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

行了研究,但未考虑天然砂土间的胶结作用。蒋明镜等^[9]通过将自定义的胶结接触模型引入离散元中,实现了对天然结构性砂土力学特性的模拟。

然而,与有限元数值模拟相似,在天然砂土的离散元模拟中,其微观接触模型及参数确定的合理性必须通过试验验证。目前,国外已有极少数学者试图通过模型试验的方法来定量地描述颗粒间胶结作用。如法国的 Delenne 等^[10]通过对由环氧树脂胶结的两根铝棒进行一系列的简单加载试验,从而测定出铝棒间胶结物在拉伸、压缩、剪切、扭转作用下的强度指标,随后将这些强度指标引入离散元接触模型中用以模拟天然砂土中粒间胶结效应。然而,Delenne 等所设计的模型试验较为简单,即主要针对简单加载情况下胶结颗粒接触力学特性,而未考虑复杂加载条件,忽略了法向压力对胶结颗粒抗剪和抗转强度指标的影响。本文针对上述不足,开展研究。

为研究胶结颗粒接触力学特性,本试验研制了一套用于胶结颗粒成型及辅助加载的装置,前者主要用于保证所制备的胶结颗粒间胶结物具有基本相同的物理及化学性质;后者主要用于实现胶结颗粒在简单和复杂加载条件下接触力学特性的测试,包括:拉伸、压缩、剪切、扭转、压剪、压扭和压剪扭等加载条件。与前人的研究成果不同^[10],本文着重考虑了法向应力对胶结颗粒接触力学特性的影响,并给出胶结颗粒在三维应力空间中(法向压力-扭矩-剪力)的强度包线。

2 试验装置研究

在文献[10]的研究基础上,研究人员经过反复试验,逐步改进,研制出一套用于胶结颗粒成型及实现不同加载条件下接触力学特性测试装置,测试结果将直接用于验证天然结构性砂土离散元模拟中接触模型及其参数的合理性。为便于比较,下面简要介绍一下蒋明镜等^[9]提出的用以模拟天然砂土胶结效应的离散元接触模型,如图 1 所示。

图中法向、切向和转动接触模型在达到峰值强度前均为线弹性,除压缩特性无峰值外,其余峰值过后均出现应力跌落。对于法向接触模型拉伸应力跌落无残余抗拉强度;对于切向接触模型其残余抗剪强度由颗粒胶结部位的摩擦系数决定;对于转动接触模型,其残余抗扭强度的理论解为一曲线,如图 1(c)所示,但为简化数值计算过程,笔者等将其简化为理想的弹脆塑性,其残余强度可根据具体颗粒材料形状和荷载类型来确定。

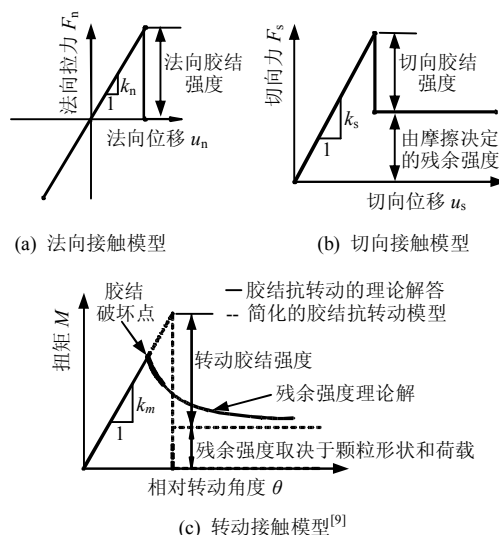


图 1 胶结接触模型
Fig.1 Bonded contact models

下面针对具体的试验装置进行详细介绍。

2.1 胶结颗粒成型装置

众所周知,试样的制备对于试验结果具有重要的影响。因此,胶结试样的制备是其接触力学特性测试中一个十分重要的环节,其制备过程需要较高的技巧和耐心,使所制备的试样间胶结物的物理、化学性质基本保持一致,从而保证同一批试样间具有基本相同的力学特性。本文所采用的胶结试样由两根物理性质基本相同(直径 12 mm,长度 50 mm)的圆柱形铝棒在指定位置处进行胶结而成,如图 2 所示。试样间胶结物的长度为 50 mm,宽度为 3 mm,在两铝棒中心点连线处胶结物的厚度趋近于 0,即两铝棒为线接触关系,用以模拟天然砂土中胶结物在颗粒间接触点周围形成。

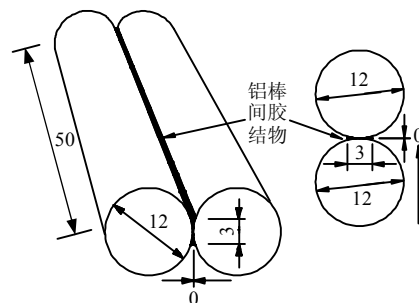


图 2 理想胶结颗粒模型(单位: mm)
Fig.2 Idealized model of bonded granules (unit: mm)

颗粒胶结成型装置是为了确保所制备出的胶结试样具有一致性而专门设计加工的,如图 3 所示,该装置已申请国家专利(申请号: 200710046138.5)。该装置由上下对称的两部分构成,每部分均由 10

道半圆形凹槽组成，可同时制备 5 对胶结试样，凹槽几何尺寸与图 2 中胶结铝棒试样相匹配。此外，为满足试样制备过程中精度及刚度要求，成型装置采用 GCr15 高碳铬轴承钢经锻打、热处理和线切割工艺制成，其机械加工精度 ≤ 0.02 mm，洛氏硬度指标 HRC ≥ 50 。制备过程中通过上下两部分的挤压、定型作用来获得特定几何尺寸的胶结物。

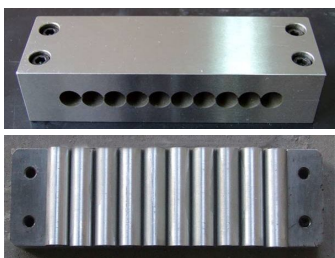


图 3 胶结颗粒制备装置

Fig.3 The device for preparing pairs of bonded granules

2.2 胶结颗粒制备过程

除胶结颗粒成型装置外，试样制备过程所需原材料还包括铝棒和胶结材料。试验过程对上述材料的具体要求如下：①铝棒由直径为 14 mm 的 1y11 铝合金原材经机械加工而成，其直径为 (12.00 ± 0.05) mm，长度为 (50.0 ± 0.1) mm。此外，为去除机械加工过程中残留在铝棒表面的各种油渍，同时为防止铝棒表面长时间与空气接触而发生氧化，在正式制备前，铝棒需浸没在盛有丙酮溶液的密封容器中。②胶结材料为 KD-504A 型环氧树脂，该产品由国防科技大学研制，分为甲、乙两组试剂，当二者以一定比例混合即可形成胶结物。为减小同种试剂不同批次产品间的差异性，需将数管甲、乙两种试剂，分别置于不同的容器内进行混合，混合过程可进行适当的搅拌使其均匀化，但应尽量避免气泡的产生。

胶结试样制备的具体步骤及注意事项如下：

(1) 首先将铝棒从丙酮溶液器中取出，用干净的纯棉手帕擦拭铝棒表面，将铝棒置于垫有聚乙烯薄膜的成型装置下半部分中备用。薄膜的作用即防止制备过程中环氧胶在铝棒和成型装置间形成胶结。

(2) 从分别装有甲、乙两种胶结试剂的容器中按甲、乙质量比 2:1 取出至同一容器中进行混合，并通过适当地搅拌使甲、乙两种试剂化学反映充分，搅拌过程中应尽量避免气泡的产生。

(3) 将混合充分的胶结物均匀地涂抹在铝棒表面拟进行胶结的区域，涂抹过程应尽量做到细致，以保证胶体具有良好的均匀性、和易性，同时应尽

量避免气泡的产生；随后将涂有胶结物的两根铝棒进行对接，并缓慢地放入垫有薄膜的成型装置下半部分的凹槽中，采用同样的方法完成另外 4 对胶结试样的涂胶和对接；将垫有聚乙烯薄膜的成型装置上半部分缓慢地覆盖在这 5 对胶结试样上，并通过逐步施压使铝棒间多余的胶结物从成型装置的两侧挤出；最后，通过螺栓将成型装置的上下两部分固定以完成胶结物的成型。

(4) 为确保甲、乙两种胶结试剂的化学反应充分，并使胶结物尽快达到其早期强度，需将成型装置送入 100℃ 的烘箱内，加热 30 min 后取出，在室温条件下冷却约 30 min 后，拆开成型装置，将胶结试样取出并进行试样的编号。最后，将所制备的铝棒试样在室温条件下养护 20 d 后，对其进行一系列力学特性的测试。

2.3 试验加载及数据采集装置

胶结试样接触力学特性的测试均在岩石双轴流变试验仪下完成，如图 4 所示。该仪器能够提供稳定的位移控制和伺服控制双轴加载条件。此外，试验过程所需的数据采集装置主要包括：力传感器、应变传感器、位移传感器及相应的数据采集系统 (DH3818)，传感器的具体参数如表 1 所示。表中除位移传感器外，其余均为作者根据本文所设计的模型试验的具体测试要求，自行设计并委托传感器生产厂加工定制而成。



图 4 岩石双轴流变试验仪

Fig.4 Rock biaxial rheological testing system

表 1 试验测试用传感器种类

传感器名称	量程	灵敏度	用途
YBY-5K型压力传感器	5 kN	179 $\mu\epsilon$ /kN	水平剪力及法向拉力的测试
YBY-0.2K型压力传感器	200 N	1.61 $\mu\epsilon$ /N	扭转试验中两侧水平作用力的测试
GBY-50型工具式表面应变传感器	± 3 mm	2 250 $\mu\epsilon$ /mm	剪切应变及法向拉伸应变的测试
YWC-10型位移传感器	10 mm	227 $\mu\epsilon$ /mm	扭转试验中转动线位移的测试

2.4 辅助加载装置

辅助加载装置是为了实现将双轴加载仪所提供的外荷载合理地转换到试样间的胶结部位而专门设计的, 包括: 拉伸辅助装置、压缩辅助装置和复杂应力装置。其中, 复杂应力装置具有对胶结试样同时施加水平剪力、法向压力和转动力矩的功能, 即可测定出试样在复杂加载条件下的力学特性。

2.4.1 拉伸辅助装置

胶结试样拉伸辅助装置如图 5 所示。由于双轴加载仪不便于直接施加拉伸荷载, 因此, 辅助装置必须将外部压缩荷载转换成胶结铝棒间的拉伸荷载的功能, 如图 5 所示。该装置由相互咬合的上下两部分组成, 每部分均包含一道圆弧形卡槽, 将铝棒固定其中, 通过压缩荷载将该装置的两部分分离, 即现实对装置中胶结铝棒抗拉特性的测试。

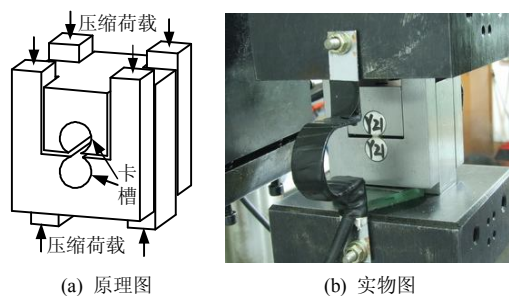


图 5 胶结铝棒拉伸测试装置
Fig.5 Tension test device of bonded rods

2.4.2 压缩辅助装置

胶结试样压缩辅助装置如图 6 所示。在压缩过程中, 应避免辅助装置的上下两部分发生相对水平位移而导致法向力作用线偏离胶结物中心的现象, 即偏心压缩。因此, 在施加法向压力的同时, 还需施加侧向约束力, 从而有效限制压缩辅助装置上下两部分间的相对水平位移。然而考虑到侧向约束装置与压缩辅助装置间的摩擦力对试验结果的影响, 在正式试验前, 需对侧向约束装置与压缩辅助装置间的摩擦系数进行测定, 测试结果表明, 两装置间的摩擦系数约为 0.1。

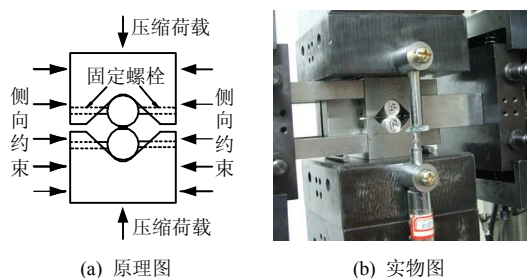


图 6 胶结铝棒压缩测试装置
Fig.6 Compression test device of bonded rods

2.4.3 复杂应力装置

胶结试样复杂应力装置如图 7 所示。通过将外力作用在复杂应力装置不同导槽位置处, 即可实现剪切、扭转、压剪、压扭和压剪扭等不同加载条件下试样接触力学特性的测试。该装置目前已申请国家专利 (申请号: 200820154375.3)。具体来说, 当不考虑法向压力时, 当两水平力同时作用在装置两侧的剪切力导槽上, 即可实现剪切加载, 而两水平力同时作用在两侧扭转力导槽时, 试样将仅受扭矩作用, 即为扭转加载; 当上述两种情况同时伴随有一竖向力作用在法向力导槽时, 即可分别实现压剪和压扭加载。此外, 当一水平力作用在图 7 右侧的剪切力导槽, 而另一水平力作用在图 7 左侧的复杂应力导槽时, 由于两水平力间初始偏心距的存在, 在加载过程中试样将同时受到剪切和扭转作用, 若此时法向压力非 0, 即为压剪扭复杂加载条件。下面将针对压剪、压扭和压剪扭 3 种试验工况中的注意事项进行说明。

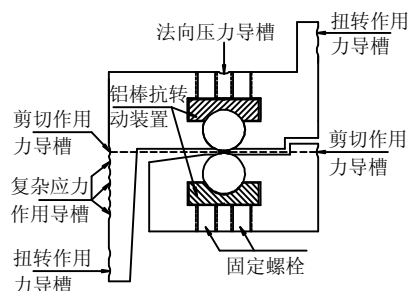


图 7 胶结铝棒复杂应力装置原理图
Fig.7 Schematic diagram of complex stress device

(1) 压剪试验工况如图 8 所示, 在压剪试验中, 需要注意以下两个问题: ①水平及法向作用力的对中问题, 即理想情况下的压剪加载, 法向压力和两侧的剪切力作用线均应通过胶结物的中心位置。然而, 由于试样安装等误差影响, 试验中不可避免地存在初始偏心影响。为此必须不断改进试样的安装技巧以提高安装精度, 除安装过程需在具有 3 个相互垂直平面的特殊平台内完成外, 还必须以游标卡尺对安装好的试验装置进行定位校核。②试验过程中铝棒与复杂应力装置间不得有相对转动产生, 否则将极大的影响试验结果。作者在前期试验方案中, 采用 Delenne 等^[10]提出的定位螺栓方法来约束铝棒与装置间的相对转动, 然而试验结果并不理想。为此, 作者在复杂应力装置中加入了铝棒抗转动装置, 如图 7 所示。从而使原方案中定位螺栓与铝棒的点接触变为定位螺栓通过抗转动装置与铝棒进行面接触, 有效地防止了铝棒的转动问题。

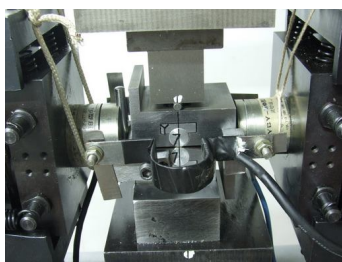


图 8 胶结铝棒压剪测试装置
Fig.8 Compression-shear test device of bonded rods

(2) 压扭试验工况如图 9 所示, 在扭转试验中, 直接量测的试验数据为两侧扭力值和特定位置处试样的转动线位移, 因此, 在后续试验数据处理时, 需将上述测量值分别转换成扭矩和转角值, 而在转换过程中, 应注意扭力的作用力臂是随着转角的增大而增大的。由实测试验数据可知, 压扭试验所测得的两侧扭力值均较小 ($\leq 200\text{ N}$), 因此, 在较高的法向压力作用下, 应尽量减小测试装置间水平向摩阻力对两侧扭力测量值的影响。试验中通过在竖直方向安放多排滚珠轴承并辅以黄油处理的方式, 来减少水平向摩阻力的影响, 实测结果表明, 该方法可将水平向等效摩擦系数控制在 0.002 左右, 基本满足试验测试精度的要求。

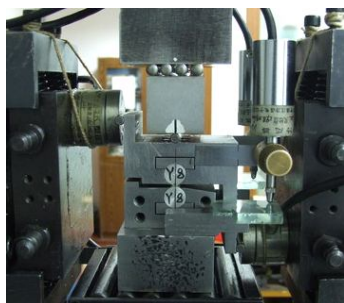


图 9 胶结铝棒压扭测试装置
Fig.9 Compression-torsion test device of bonded rods

(3) 压剪扭试验工况如图 10 所示, 通过将水平向作用力分别作用在装置两侧的剪切力导槽和复杂应力导槽上, 在加载过程中扭矩将随着剪力的增加而等比例增加, 故又可称为等比例加载试验, 其比例因子与两侧水平力间的初始偏心距有关。通过不同初始偏心距的等比例加载试验, 即可获得二维应力 (扭矩-剪力) 平面内胶结试样的强度包线, 进一步由不同法向压力下的不同初始偏心距的等比例加载试验结果, 即可绘制出三维应力 (法向压力-扭矩-剪力) 空间内胶结试样的强度包线。此外, 与压剪工况类似, 试样安装过程同样须具备较高的安装精度, 以保证两侧水平力间的实际偏心距与试验方案所设计的初始偏心距基本一致。

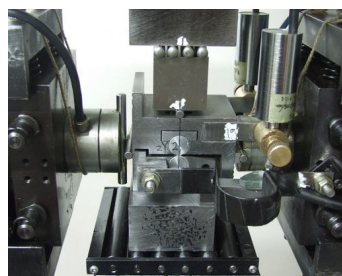


图 10 胶结铝棒复杂应力测试装置
Fig.10 Complex stress device of bonded rods

3 测试结果

通过对胶结试样进行的一系列的加载试验, 可获得胶结试样在不同加载条件下的力学响应。

3.1 拉伸试验结果

胶结试样拉伸试验曲线如图 11 所示。可见试验曲线在达到破坏前, 近似呈线性变化, 拉伸刚度约为 $8.0 \times 10^7\text{ N/m}$, 破坏后, 应力值跌落为 0, 位移趋于无穷大, 峰值抗拉强度为 $2\ 100\text{ N}$, 试验曲线呈脆性, 与图 1(a) 中法向接触模型力学响应基本一致。相比 Delenne 等^[10]的测试结果, 二者试验曲线的规律基本一致, 然而其峰值抗拉强度 ($1\ 500\text{ N}$) 和刚度 ($1.08 \times 10^7\text{ N/m}$) 均小于本文测试结果。

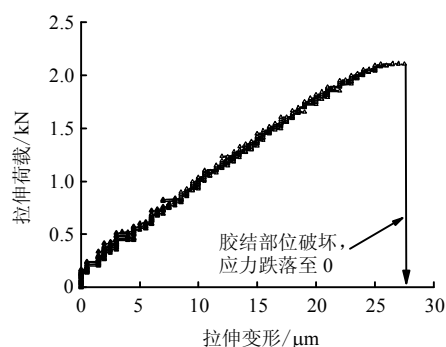


图 11 胶结铝棒拉伸试验数据
Fig.11 Tensile test data of bonded rods

3.2 压缩试验结果

胶结试样压缩试验曲线如图 12 所示。与拉伸试验曲线相似, 胶结铝棒压缩曲线在其初始阶段也近似呈线性关系, 压缩刚度约为 $2.6 \times 10^8\text{ N/m}$, 当压缩变形接近 $300\ \mu\text{m}$ 时, 胶结物发生破坏, 峰值抗压强度为 $6.43 \times 10^4\text{ N}$ 。但由于铝棒间的线接触影响, 压缩曲线呈塑性硬化特性, 压缩曲线的斜率较初始阶段显著减小, 然而随着胶结物逐渐从铝棒间挤出, 两铝棒间接触面积开始增大, 压缩曲线的斜率又开始逐渐回升。可见, 胶结试样压缩破坏对试验曲线的影响并不十分显著, 因此在图 1(a) 法向接触模型

中假设压缩力学响应无破坏是基本可行的,且在 Delenne 等^[10]的测试结果中也假设压缩加载条件下试样无破坏,其法向压缩刚度为 2.0×10^8 N/m,与本文测试结果基本一致。

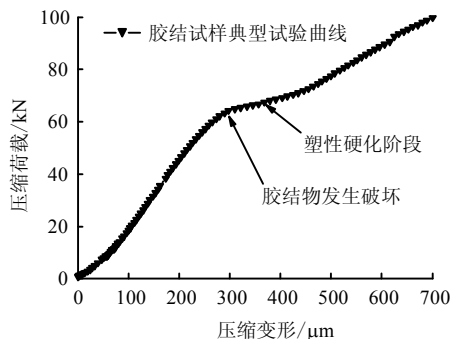


图 12 胶结铝棒压缩试验数据
Fig.12 Compression test data of bonded rods

3.3 压剪试验结果

不同法向压力下的剪切试验曲线如图 13 所示,由图可见试样的抗剪强度和剪切刚度均随法向压力的增大而增大,相比抗剪强度,剪切刚度随法向压力的变化趋势较不明显,该现象与蒋明镜等^[9]提出的胶结颗粒微观接触模型基本一致,然而 Delenne 等^[10]的研究却忽略了法向应力对于胶结颗粒抗剪强度的影响。当法向压力为 0 时,胶结试样在达到峰值抗剪强度后,应力即跌落至 0,而当法向压力非 0 时,试样在达到峰值后,进入应变软化阶段,但这一阶段相对较短,随后应力即跌落至残余强度。因此,在图 1(b)的切向接触模型中,假设剪切力学响应呈弹脆塑性是基本可行的。此外,当法向压力低于 10 kN 时,试样的残余抗剪强度随法向压力的增大而增大,而当法向压力达到 10 kN 时,随着剪切位移开展,法向力作用线与胶结物中心将逐渐发生偏离,这种偏离在较高的法向压力下将极易诱发试样的压扭破坏,故无残余抗剪强度。

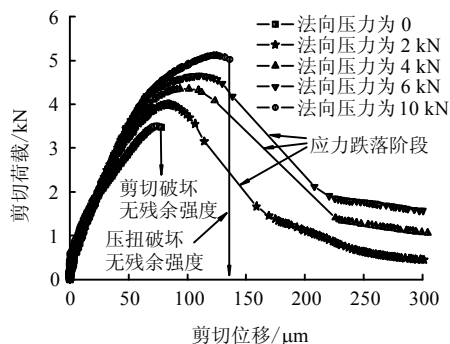


图 13 胶结铝棒压剪试验数据
Fig.13 Shear test data under different normal forces

3.4 压扭试验结果

不同法向压力下扭转试验曲线如图 14 所示。与压剪试验类似,试样的峰值抗扭强度和残余强度均随法向压力的增大而增大,而试样的抗转动刚度基本不随法向压力变化。此外,与压剪试验不同,试样在到达峰值抗扭强度后,随即进入软化阶段,且该阶段一直持续到加载结束,整个加载过程中均无明显的应力跌落阶段,即使在法向压力为 0 时,试验曲线仍呈弹塑性软化特性,该现象与图 1(c)中离散元转动接触模型力学响应基本一致。

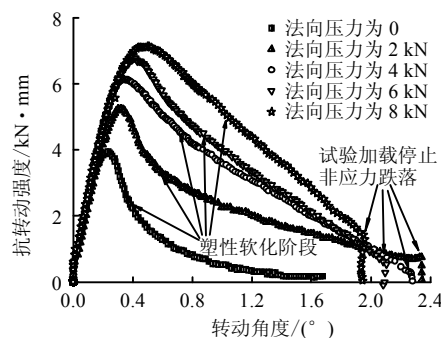


图 14 胶结铝棒压扭试验数据
Fig.14 Torsion test data of bonded rods under different normal forces

3.5 复杂应力试验结果

胶结铝棒试样复杂应力试验结果如表 2 所示。表中给出了不同法向压力作用下,以不同初始偏心距进行等比例加载试验,测得的峰值剪切强度以及通过初始偏心距换算出的峰值扭矩。通过将上述结果与压剪和压扭试验中峰值强度联立,可绘制出不同法向压力下,扭矩-剪力平面内胶结试样的强度包线,如图 15 所示。当进一步考虑试样抗拉及抗压强度特性,则可绘制出三维应力空间(法向压力-扭矩-剪力)试样的峰值强度包线,如图 16 所示,强度包线呈椭圆抛物面状,抛物面顶点位于法向压力为 -2.1 N 处(即试样的抗拉强度)。可见,法向应力对于胶结试样的强度特性影响显著,Delenne 等将忽略法向应力影响的胶结试样力学试验结果引入到离散元分析软件中是存在一定局限的。

表 2 胶结试样复杂应力试验结果
Table 2 Complex stress test data of bonded rods

法向压力 /kN	初始偏心距 1.0 mm		初始偏心距 2.3 mm	
	峰值剪力 /kN	峰值扭矩 /(N·mm)	峰值剪力 /kN	峰值扭矩 /(N·mm)
0	2.700	2.700	1.550	3.565
2	3.268	3.268	2.000	4.600
4	3.646	3.646	2.350	5.405
6	4.079	4.079	2.545	5.854
8	4.291	4.291	2.800	6.440
10	4.410	4.410	2.879	6.622

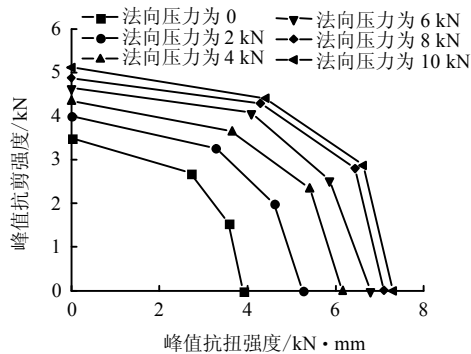


图 15 扭矩-剪力平面内胶结铝棒强度包线
Fig.15 Strength envelope of bonded rods in shear force-torque plane

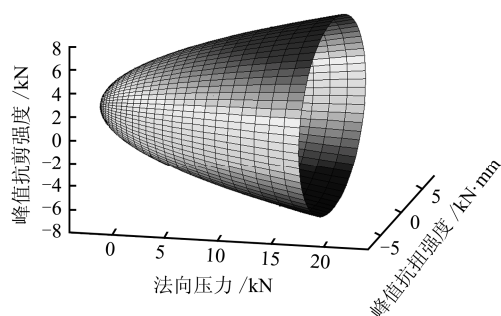


图 16 三维应力空间中胶结铝棒强度包线
Fig.16 Strength envelope of bonded rods in shear-torsion-normal stress space

4 结 论

为验证离散单元法中接触模型及其参数的合理性,并为离散单元法模拟天然结构性土提供理论依据,本文通过自行设计的一套胶结颗粒成型和辅助加载的装置,对理想胶结颗粒进行了一系列的模型试验研究,结果表明:

(1) 本文所设计的试验装置可以用于理想胶结颗粒模型简单及复杂加载条件下的力学性能测试。

(2) 胶结试样的抗拉特性呈弹脆塑性,而其压缩试验曲线呈塑性硬化特性,在剪切及扭转试验中,试验曲线分别呈弹脆塑性和弹塑性软化特性。胶结颗粒力学模型试验实测力学响应与蒋明镜提出的用以模拟天然砂土的微观接触模型基本相符。

(3) 法向压力对胶结颗粒强度特性影响显著,其抗剪和抗扭强度均随法向压力的增大而增大。Delenne 等将不考虑法向力影响的力学模型试验结果引入离散元中是具有一定局限的。

(4) 在三维应力空间(法向压力-扭矩-剪力)中胶结试样的峰值强度包线呈椭圆抛物面状。

致谢: 感谢刘芳老师对试验方案所提出的宝贵意见,以及颜海滨硕士和肖俞硕士对试验过程所提供的帮助。

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] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 329—378.
- [3] LEROUEIL S, VAUGHAN P R. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks[J]. **Géotechnique**, 1990, 40(3): 467—488.
- [4] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性粘土剪切带的微观分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 102—108.
JIANG Ming-jing, SHEN Zhu-jiang. Microscopic analysis of shear band in structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 102—108.
- [5] CUCCOVILLO T, COOP M R. Yielding and pre-failure deformation of structured sands[J]. **Géotechnique**, 1997, 47(3): 491—508.
- [6] 王庶懋, 高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)细观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2137—2142.
WANG Shu-mao, GAO Yu-feng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS beads soil (LSES) using CT[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2137—2142.
- [7] CUNDALL P A, STRACK O D L. The discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Géotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [8] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 901—906.
ZHOU Jian, CHI Yong. Mesomechanical simulation of sand mechanical properties[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 901—906.
- [9] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2006, 30(7): 723—761.
- [10] DELENNE J Y, YOUSSEFI M S E, 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—1594.