

DOI: 10.11779/CJGE202012019

# 岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板的研制及初步应用

王艳丽, 程展林, 潘家军, 徐 晗, 王君雄

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘 要:** 针对粗粒土三轴试验中存在的端部约束问题, 基于土体与加载板之间的接触由“整体接触变为分散式接触、滑动摩擦变为滚动摩擦”的减摩新方法, 研制了岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板。详细介绍了该装置的研制思路、结构原理和细部构造, 并通过数值计算进一步论证了分散式接触代替整体接触的减摩措施效果。利用该装置和应力应变式大型三轴仪对典型砂土进行了常规和端部减摩的固结排水三轴剪切试验, 研究砂土在端部正常约束和端部自由(微摩擦)条件下的强度和变形特性, 分析端部约束对砂土应力应变特性的影响规律。结果表明, 端部约束是试样出现鼓胀的根本原因, 常规试验方法高估了试样的峰值强度, 易使偏应力应变曲线表现软化, 并使试样的体变曲线更突出表现出剪胀性。该装置有效解决了三轴试验的端部约束问题, 提高了三轴试验结果的可信性。

**关键词:** 微摩擦荷载传力板; 三轴试验; 整体接触; 分散式接触; 端部约束

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)12-2316-06

**作者简介:** 王艳丽(1981—), 女, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事粗粒土力学特性与宏细观模拟方法等方面的研究。E-mail: wyldhh@126.com。

## Development and preliminary application of a microfriction load-transfer plate for triaxial tests in geotechnical engineering

WANG Yan-li, CHENG Zhan-lin, PAN Jia-jun, XU Han, WANG Jun-xiong

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of end restraint in triaxial tests on coarse-grained soils, based on a new friction reduction method in which the contact between soils and loading plates is changed from the integral contact to the distributed one and the sliding friction to the rolling one, a load-transfer plate with microfriction loads for triaxial compression tests in geotechnical engineering is developed. The development idea, structural principle and detailed structure of the apparatus are introduced, and the effects of the friction-reducing measures of the distributed contact instead of the integral one are further demonstrated by numerical calculation. By use of this apparatus and a large-scale stress-strain triaxial apparatus, the consolidated drainage triaxial shear tests on the conventional and end friction reduction of typical sand are carried out. The strength and deformation characteristics of sand under normal end restraint and end free (micro-friction) are studied, and the effects of end restraint on stress-strain characteristics of sand are analyzed. The results show that the end restraint is the basic reason for the swelling of the specimen, the peak strength of the specimen is overestimated by the conventional test method, the deviatoric stress-strain curve is softened easily, and the volumetric strain curve of the specimen shows more prominent dilatancy. The apparatus effectively solves the problem of end restraint in triaxial tests and improves the accuracy of triaxial tests.

**Key words:** microfriction load-transfer plate; triaxial test; integral contact; distributed contact; end restraint

## 0 引 言

目前, 一般采用室内三轴试验来分析粗粒土的强度和变形特性<sup>[1]</sup>, 然而三轴试样在受力变形过程中, 由于端部刚性试样帽(底座)的约束作用, 在试样帽(底座)与试样之间存在摩擦应力, 限制了试样在端部区域的径向变形, 当试样接近破坏时, 不是被压成“鼓形”

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51779017); 国家自然科学基金-雅砻江联合基金重点项目(U1765203); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017023/YT& CKSF2019394/GC)

**收稿日期:** 2020-03-09

就是被挤成“颈状”, 这种现象被称为三轴试验中的端部约束问题<sup>[2]</sup>。端部约束会造成三轴试样内的应变和应力的不均匀性, 进而影响到试样的应力应变特性, 孔隙水压力或体积变化, 剪切带分布和强度特性<sup>[3]</sup>。受端部约束效应的影响, 三轴试验结果并不能真实反映粗粒土的力学特性。为了使三轴土体受力状态与天然土体状态更加接近, 有效提高试验的精度, 国内外学者相继对土体的端部减摩方法进行了大量的研究, 试图减小端部约束效应的影响。根据 Timoshenko<sup>[4]</sup>的记载, 早在 1900 年, Foppal 在压缩试验中在固体试件的端部涂石蜡来减小端部效应的影响, 得出不同高径比时试件的破坏形式和应力分布的规律。1964 年, Rowe 等<sup>[5]</sup>首先在三轴试验中成功地使用了无约束作用的试样帽(底座)。这种试样帽由压力板、润滑剂和橡皮膜组成。Blight<sup>[6]</sup>以试样相同的土块作为过渡性垫块, 在垫块表面浸泡一层乳胶橡皮膜, 以消除垫块本身的体积变化或孔隙水压力的影响。程展林等<sup>[7]</sup>设计了一种测试端部摩阻力试验设备, 探讨了界面摩阻力的试验方法、粗粒料界面摩阻力大小和减小摩阻力措施。邵龙潭等<sup>[8-9]</sup>、王助贫等<sup>[10]</sup>、董建军等<sup>[11]</sup>采用数字图像测量技术, 直接量测试样的轴向变形和径向变形, 定量分析端部约束对三轴试验土样的影响。

由上可知, 目前试验中主要采取两种方法减轻端部效应的影响: ①第一是改进试验加载设备, 如采用抛物线形或者锥体试样帽、增加过渡性垫块和采用润滑试样帽等方法, 其中广泛采用的便是润滑试验帽法; ②第二种是改进试验观测设备, 如采用数字图像测量方法等。润滑试样帽虽然能较有效地减小端部效应, 但同时也带来一些如试样侧溜等负面作用。数字图像测量方法通过测量试件中部 1/3 区域来回避端部效应的影响, 并不能有效消除端部约束效应的影响。

针对粗粒土三轴试验中存在的端部约束问题, 提出了土体与加载板之间的接触由“整体接触变为分散式接触、滑动摩擦变为滚动摩擦”的减摩新方法, 在此基础上, 研制了岩土工程三轴压缩试验微摩擦荷载传力板, 并在粗粒土三轴试验中进行了初步应用, 有效解决了三轴试验的端部约束问题, 提高了三轴试验精度。

## 1 微摩擦荷载传力板的研制

### 1.1 研制思路

目前, 三轴试验中主要采用润滑试样帽的方法来减小端部约束的作用<sup>[12]</sup>, 虽然能减小端部约束效应, 但程度有限。最主要的原因就是这种方法仍旧保持了试样与加载板的整体接触, 试样与加载板之间的摩擦仍旧是滑动摩擦, 只是加了一定的润滑作用。分散式

微摩擦荷载传力板同时解决了这两个问题, 变整体接触为分散式接触、滑动摩擦为滚动摩擦, 可使试样与加载板之间的摩擦系数大幅降低, 有效解决加载板与试样接触面的摩擦力过大的关键技术难题, 为三轴试验的减摩技术开辟了新的思路。

#### (1) 整体接触改为分散式接触

图1为试样和加载板之间整体接触与分散式接触的示意图, 由图可知, 端部土体想要发生径向变形, 必须克服试样与加载板之间的切向应力。由于力的叠加作用, 当加载板只是一块板整体与试样接触时, 界面之间的切向应力要远远大于多块板与试样接触。为了尽可能的减小界面摩擦力, 减摩板由之前的一块板整体接触, 改为多个滑块组成的分散式接触, 达到加载板与试样在径向协同变形的效果, 较大程度地减小了界面之间的摩擦力。

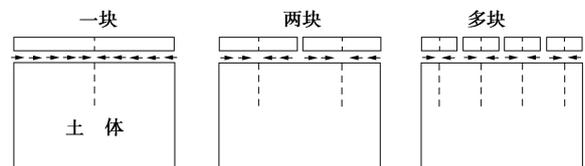


图 1 整体接触与分散式接触示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integral and distributed contacts

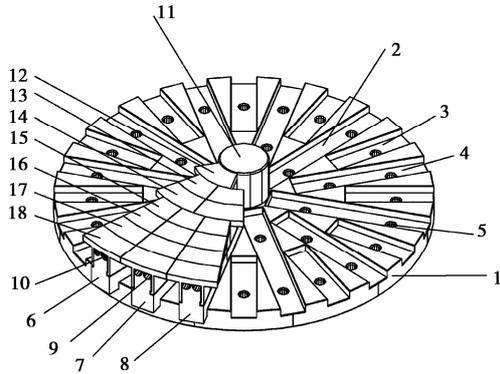
#### (2) 滑动摩擦改为滚动摩擦

众所周知, 界面之间的滚动摩擦要远远小于滑动摩擦。在分散式接触的基础上, 为进一步减小界面摩擦力, 在滑块与承载板之间设置钢珠, 变滑动摩擦为滚动摩擦。这样就使试样端部与加载板接触面切线方向上没有摩擦力或者摩擦力极小, 试样端部在切线方向上可以自由变形, 尽可能提高试验精度。

### 1.2 结构原理

根据上述“整体接触变为分散式接触、滑动摩擦变为滚动摩擦”的减摩新方法, 研制了岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板<sup>[13]</sup>。其结构示意图见图2所示, 实物照片见图3所示。该传力板为直径300 mm的圆盘, 由圆形承载板、滑块止动棒、导轨、钢珠、滑块几部分组成。圆形的承载板中间设有滑块止动棒, 圆形的承载板沿圆周方向呈放射状均匀分布有24个矩形凹槽。在各个矩形凹槽中分别对应地嵌入带有弧形凹槽的导轨, 弧形凹槽中设有钢珠, 在导轨上布置沿圆形承载板径向的多圈滑块, 滑块通过钢珠和导轨接触, 能够在导轨上沿径向自由滑动。通过上述结构, 轴向荷载可以通过多圈自动滑块施加在试样上, 同时滑块和圆形承载板之间通过钢珠来连接, 将滑动摩擦变为滚动摩擦, 在试样与荷载传力板界面接触面切线方向上没有摩擦力或者摩阻力极小(微摩擦), 从而使试样

在接触面切线方向上可以自由变形,有效解决了试样端部约束问题。



1—圆形承载板, 2—第一矩形凹槽, 3—第二矩形凹槽, 4—第三矩形凹槽, 5—螺栓孔, 6—第一导轨, 7—第二导轨, 8—第三导轨, 9—弧形凹槽, 10—钢珠, 11—滑块止动棒, 12—第一滑块, 13—第二滑块, 14—第三滑块, 15—第四滑块, 16—第五滑块, 17—第六滑块, 18—第七滑块

图2 岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板结构示意图

Fig. 2 Structural sketch of load-transfer plate under micro-friction in triaxial tests in geotechnical engineering



图3 岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板实物照片

Fig. 3 Physical photo of load-transfer plate under micro-friction in triaxial tests in geotechnical engineering

### 1.3 细部构造

#### (1) 导轨与承载板的连接

如图2所示,圆形承载板1中心设有滑块止动棒11,圆形承载板1沿圆周方向呈放射状均匀分布有6个第一矩形凹槽2,第一矩形凹槽2的一端与滑块止动棒11接触,另一端延伸至圆形承载板1边缘。相邻的两个矩形凹槽2的中间设有第三矩形凹槽4,第三矩形凹槽4的一端与邻近的第一矩形凹槽2抵靠,另一端延伸至圆形承载板1边缘。第一矩形凹槽2与邻近的第三矩形凹槽4之间设有第二矩形凹槽3,第二矩形凹槽3的一端与邻近的第三矩形凹槽4抵靠,另一端延伸至圆形承载板1边缘。

第一矩形凹槽2、第二矩形凹槽3以及第三矩形凹槽4分别对应地嵌入有第一导轨6、第二导轨7、第三导轨8,同时第一导轨6、第三导轨8沿环向均匀分

布各6个,第二导轨7沿环向均匀分布有12个,并通过螺栓与承载板1固定连接。螺栓依次穿过导轨上的固定孔、凹槽上的螺栓孔将导轨锁固于圆形承载板1上。

#### (2) 滑块与导轨的连接

图4所示为导轨与滑块截面示意图。如图4(a)所示,导轨(6,7,8)包括一截面为凸字形的导轨本体,导轨本体顶部间隔设有两个向下凹陷的弧形凹槽9,每一个弧形凹槽9内布满钢珠,导轨本体两侧一边为台阶面19,另一侧台阶面竖直侧壁上设有滑槽20。如图3(b)所示,滑块(12~18)包括一扇形本体21,扇形本体21下部设有竖直的第一滑条22和第二滑条23,第二滑条23设有对应导轨上滑槽20的凸起24,第一滑条22与台阶面19接触,第二滑条23的凸起24插入到导轨的滑槽20内,以此来实现滑块与导轨的连接。在凹槽9内布满钢珠,这样就避免了滑块与导轨的直接接触,改滑动摩擦为滚动摩擦,显著地减小滑块滑动的摩擦力,从而实现滑块在导轨上以较小的摩擦力沿承载板径向向外滑动。

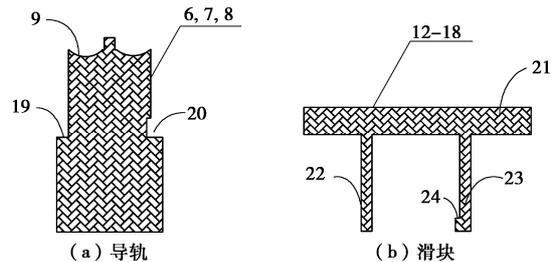


图4 导轨与滑块截面示意图

Fig 4 Section sketch of guide and slide block

#### (3) 自动滑块布置

沿圆形承载板的径向依次设有七圈滑块,如图5所示。由内向外依次为第一、二、三、四、五、六、七滑块(12~18)。第一滑块12与中心滑块止动棒11相邻,第一滑块至第七滑块(12~18)沿圆形承载板1的径向依次布置在第一导轨6上,第四滑块—第七滑块(15~18)沿径向依次布置在第二导轨7上,第二滑块—第七滑块(13~18)沿径向依次布置在第三导轨8上。如上所述,第一滑块有6个,第二滑块和第三滑块分别有12个,第四滑块—第七滑块分别有24个,总共有126个滑块和滑块止动棒组成一个拼盘,用于直接与试样接触。

## 2 数值模拟

为验证分散式微摩擦荷载传力板的有效性,采用ABAQUS有限元软件,建立微摩擦荷载传力板和三轴试样的整体三维数值模型,见图6所示。数值模拟的

难点是如何正确反映微摩擦荷载传力板上滑块的自由变形, 采用在滑块之间设置间隙单元来模拟, 间隙单元赋予较小的弹性模量, 加载板与试样之间设置接触, 计算参数见表 1 所示。

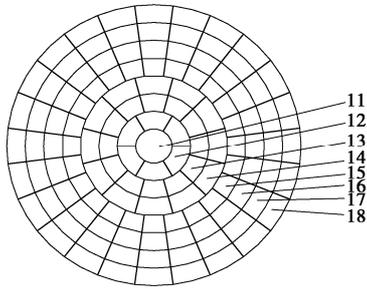


图 5 滑块分布

Fig. 5 Distribution of blocks

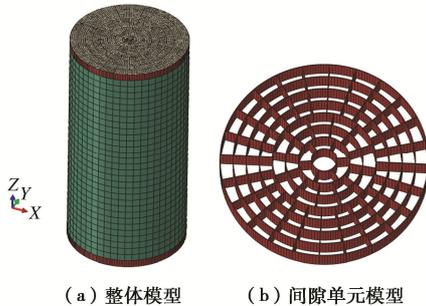


图 6 数值模型

Fig. 6 Numerical model

表 1 计算参数

Table 1 Computational parameters

材料	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量 /MPa	泊松比
土体	2.00	30.0	0.300
传力板	7.84	200000.0	0.167
间隙单元	0.00	0.1	0.000

对数值模型施加围压与轴压, 量值均为 1 MPa, 其中轴向压力施加在传力板顶部, 水平向压力施加在试样上, 加载板上滑块与试样的摩擦系数设定为 0.3, 考虑整体接触 (间隙单元赋予滑块单元的参数) 和分散式接触 (间隙单元和滑块单元分别赋予相应参数) 两种情况, 分别计算了试样的应力变形。图 7, 8 给出了试样 X, Y 和 Z 3 方向的应力和变形分布。由图可知:

(1) 整体接触情况下, 试样在 3 个方向上的应力变化幅值较大, 试样 X 方向应力变化范围为 0.52~1.03 MPa, Y 方向应力变动范围为 0.52~1.03 MPa, Z 方向应力变化范围是 0.74~1.15 MPa, 最大变动幅度为 49%, 且土体的变形在水平向与轴向变形极度不均匀, 尤其在试样与加载板接触处, 存在明显的约束效应。

(2) 分散式接触情况下, 试样在 3 个方向上的应

力变化幅值较小, 试样 X 方向的应力变化范围为 0.81~1.13 MPa, Y 方向应力变动范围为 0.81~1.17 MPa, Z 方向应力变化范围是 0.92~1.09 MPa, 最大变动幅度为 19%, 应力的变化主要分布在顶端, 是顶部滑块移动后存在微小间隙引起的土体局部应力改变, 且土体的变形在水平向与轴向变形比较均匀, 证明了分散式接触可以较大程度地降低试样与加载板之间的摩擦力。

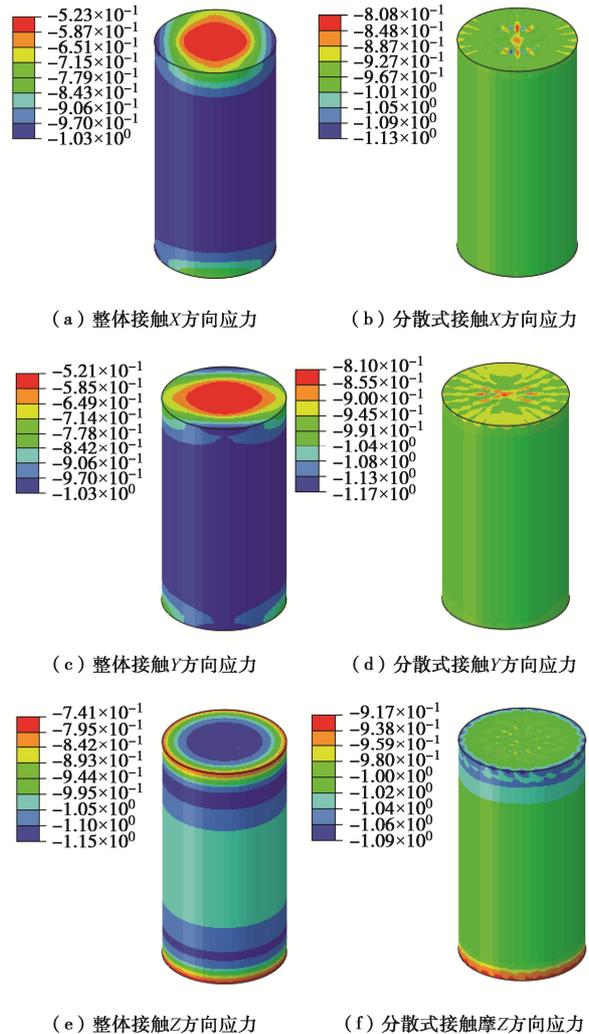
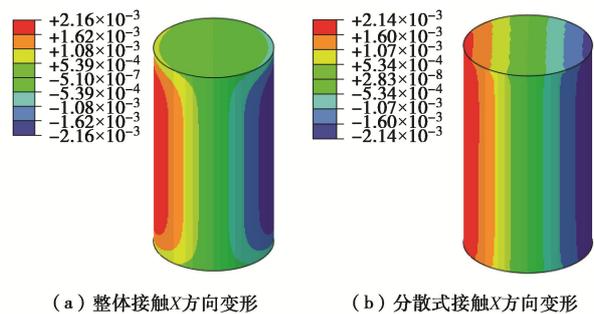


图 7 整体接触与分散式接触试样应力分布

Fig. 7 Stress distribution of specimen with integral and distributed contacts



(a) 整体接触X方向变形

(b) 分散式接触X方向变形

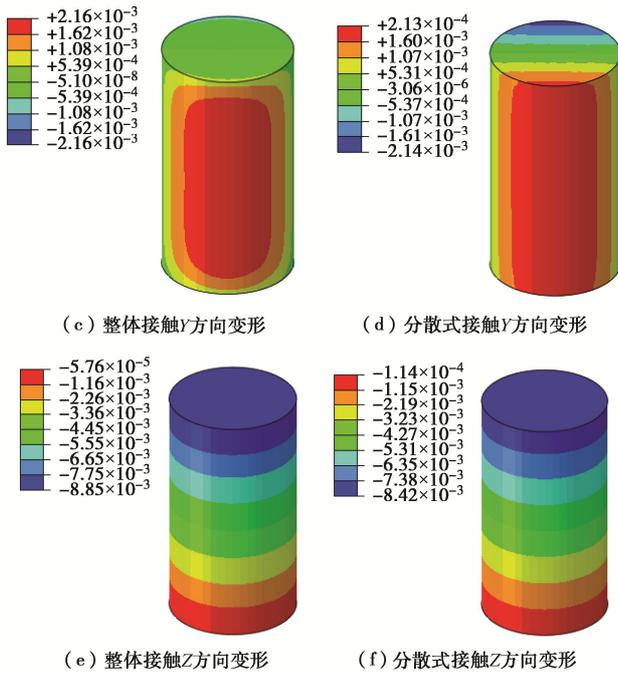


图8 整体接触与分散式接触试样变形分布

Fig. 8 Deformation distribution of specimen with integral and distributed contacts

### 3 应用实例

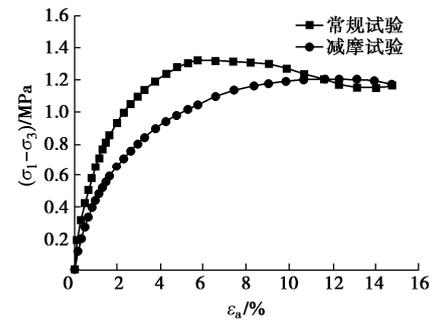
#### 3.1 试验概况

为验证微摩擦荷载传力板的适用性和可行性,以粒径为 0.25~0.5 mm 砂土为研究对象,首先进行最大、最小干密度试验,  $\rho_{dmin}=1.36 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{dmax}=1.64 \text{ g/cm}^3$  控制其相对密度为 0.8, 换算出试验控制干密度  $1.56 \text{ g/cm}^3$ 。利用微摩擦荷载传力板和应力应变式大型三轴仪对典型砂土进行了常规和端部减摩的固结排水三轴剪切试验, 试样直径为 300 mm, 高 600 mm, 采用水头法饱和, 固结围压为 0.4 MPa, 剪切速率为 0.45 mm/min, 获得两种条件下试样的应力应变曲线和体变应变曲线, 从而探讨端部约束对典型砂土强度变形特性的影响规律。

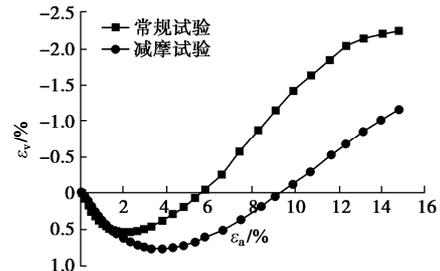
#### 3.2 结果初步分析

分别整理典型砂土常规试验与减摩试验的偏应力与轴向应变曲线、体变与轴向应变曲线, 如图 9 所示。结果表明, 不同端部约束条件下砂土的应力应变曲线和体变应变曲线显著不同, 端部约束会增大同一围压下的峰值强度, 使偏应力峰值提前到来, 且易使偏应力应变曲线表现软化。受到端部约束的影响, 常规试验的体变曲线更突出表现出剪胀性。图 10 是试验结束后试样变形形态对比, 可以明显的看出端部约束限制了常规试样端部的径向变形, 试样中间部分的径向变形明显大于试样端部, 表现出鼓胀。经过减摩处理的试样则均匀的多。同时, 也证明了分散式微摩擦

荷载传力板的有效性。



(a) 应力与轴向应变关系曲线



(b) 体变与轴向应变关系曲线

图9 不同端部约束条件下砂土典型三轴试验曲线的对比 ( $\sigma_3=400 \text{ kPa}$ )

Fig. 9 Comparison of typical triaxial test curves of sand under different end restraint conditions ( $\sigma_3=400 \text{ kPa}$ )

图10 试验结束后试样变形形态对比 ( $\sigma_3=400 \text{ kPa}$ )

Fig. 10 Comparison of deformation morphologies of specimen after tests ( $\sigma_3=400 \text{ kPa}$ )

### 4 结 论

(1)在对土体端部减摩方法国内外研究现状深入调研的基础上, 针对粗粒土三轴试验中存在的端部约束问题, 研制了岩土工程三轴压缩试验微摩擦荷载传力板。该装置有效解决了三轴试验的端部约束问题, 提高了三轴试验结果的可信性。

(2)详细介绍了岩土工程三轴试验微摩擦荷载传力板的研制思路、结构原理和细部构造, 并通过数值计算进一步论证了分散式代替整体式接触的减摩措施效果。

(3)利用该装置和应力应变式大型三轴仪对典型

砂土进行了常规和端部减摩的固结排水三轴剪切试验, 结果表明, 端部约束是试样出现鼓胀的根本原因, 常规试验方法高估了试样的峰值强度、且易使偏应力应变曲线表现软化, 并使试样的体变曲线更突出表现出剪胀性。

#### 参考文献:

- [1] WEI X X, CHAU K T. Finite and transversely isotropic elastic cylinders under compression with end constraint induced by friction[J]. *International Journal of Solids and Structures* 2009, **46**: 1953 - 1965.
- [2] 李云龙. 土工三轴试验中端部接触和端部约束影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (LI Yun-long. Study on the Influence of End Contact and End Constraint in Geotechnical Triaxial Test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [3] DUNCAN J M, DUNLOP P. The significance of cap and base restraint[J]. *J Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1968, **94**(1): 271 - 290.
- [4] TIMOSHENKO S P. *History of Strength of Materials*[M]. New York: Dover Publications Inc., 1983.
- [5] ROWE P W, BARDEN L. Importance of free ends in triaxial testing[J]. *J Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1964, **90**(1): 1 - 27.
- [6] BLIGHT G E. Shear stress and pore pressures in triaxial testing[J]. *Proc ASCE JSMFD*, 1965, **91**(SM6): 5 - 16.
- [7] 程展林, 左永振, 姜景山, 等. 粗粒料试验中界面摩阻力的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(3): 331 - 334. (CHENG Zhan-lin, ZUO Yong-zhen, JIANG Jing-shan, et al. Experimental research on interface friction in granular materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(3): 331 - 334. (in Chinese))
- [8] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(2): 159 - 163. (SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu. Digital image processing technique for measurement of the local deformation of soil specimen in triaxial tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(2): 159 - 163. (in Chinese))
- [9] 邵龙潭, 孙益振, 王助贫, 等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(1): 29 - 34. (SHAO Long-tan, SUN Yi-zhen, WANG Zhu-pin, et al. Application of digital image processing technique to triaxial test in soil mechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(1): 29 - 34. (in Chinese))
- [10] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(3): 363 - 368. (WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan. Research on influence of end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(3): 363 - 368. (in Chinese))
- [11] 董建军, 邵龙潭. 考虑端部效应影响的非饱和压实土三轴试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(9): 1937 - 1944. (DONG Jian-jun, SHAO Long-tan. Study of unsaturated compacted soil considering influence of end effect by triaxial test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(9): 1937 - 1944. (in Chinese))
- [12] 陆晓平, 孙明辉, 陈浩锋, 等. 粗粒土三轴试样端部约束影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(增刊 1): 236 - 240. (LU Xiao-ping, SUN Ming-hui, CHEN Hao-feng, et al. Effects of end restraint in triaxial tests on coarse-grained soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(S1): 236 - 240. (in Chinese))
- [13] 程展林, 王艳丽, 潘家军, 等. 岩土工程三轴压缩试验微摩擦荷载传力板: 中国 CN201410333749.8[P]. 2014-07-14. (CHENG Zhan-lin, WANG Yan-li, PAN Jia-jun, et al. A micro-friction load transfer plate in triaxial compression test of geotechnical engineering: Chinese, CN201410333749.8[P]. 2014-07-14. (in Chinese))