

doi:10.3799/dqkx.2015.173

自钻式原位剪切旁压模型 PFC^{3D}细观模拟

张亚飞¹, 徐光黎², 侯天顺¹, 胡焕忠³

1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100
2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
3. 武汉中交岩土工程有限责任公司, 湖北武汉 430052

摘要: 自钻式原位剪切旁压试验(self-boring in-situ shear pressure-meter)以其独特的多级加载方式,能够直接测出土体的强度和变形参数,然而,目前对探头周围土体变形机理研究较少. 为揭示自钻式原位剪切旁压仪试验过程中测定器周围土颗粒变形机理,应用 PFC^{3D}(particle flow code in three dimensions)颗粒程序对自钻式原位剪切旁压试验进行了仿真数值模拟,对多级加载过程中探头周围土体的位移场和应力场发展变化以及数值试样各阶段变形模量和土颗粒运动轨迹进行了分析研究. 试验结果表明:随着剪应力的逐级施加,中间区域颗粒的位移量不断增大,且位移矢量方向性更加显著. 径向应力在探头附近两侧形成近似呈对称分布的数个“应力核”;竖向应力在探头两侧形成扁平状应力带,且在肩部形成应力集中区. 中部区域球颗粒的运动轨迹成台阶状,且随距探头距离的增大由近到远可分为3个特征区域;球颗粒的Z向和XY向位移量亦随之呈负指数形式衰减,Z向位移量衰减速率更快.

关键词: 自钻式原位剪切旁压试验;颗粒流;土体应力;变形模量;运动轨迹;岩土工程;工程地质学.

中图分类号: P64 **文章编号:** 1000—2383(2015)11—1922—11 **收稿日期:** 2015—02—19

PFC^{3D} Mesoscopic Simulation of Self-Boring In-Situ Shear Pressure-Meter Model Test

Zhang Yafei¹, Xu Guangli², Hou Tianshun¹, Hu Huanzhong³

1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. China Communication Geo-Technical Engineering Co. Ltd. Wuhan, Wuhan 430052, China

Abstract: The self-boring in-situ shear pressure-meter test can obtain the strength and deformation parameters directly through its unique multi-level loading mode; however, the deformation mechanism of the soil surrounding the probe has seldom been studied. To reveal the deformation mechanism of the sand sample surrounding the probe of the self-boring in-situ shear pressure-meter (SBISP) during the loading process, the SBISP model test is simulated by PFC^{3D}(particle flow code in three dimensions) program in this study. The development of the displacement and stress field of the soil surrounding the probe, as well as the deformation modulus of each grade of the numerical sample and the motion trails of the soil particles, are studied under multi-level loading process. The results of numerical experiments show that the displacement of particles in central area increases with the shear stress imposed stepwise, and the direction of displacement vector shows a clearly preferred direction. Several radial stress cores of approximately symmetrical distribution have formed near both sides of the probe. At the same time, the vertical stress has formed flat stress zones, and it has produced some stress concentration areas in the shoulder of the probe. The motion trails of the particles are step-like lines in the central area which can be divided into three characteristic zones as the distance to the probe increases. The vertical and horizontal displacements of particles descend in a negative exponential form, but the vertical displacement has a faster attenuation rate.

Key words: self-boring in-situ shear pressure-meter test; particle flow; soil stress; deformation modulus; motion trail; geotechnical engineering; engineering geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41072218);西北农林科技大学博士启动基金项目(No. Z109021507).
作者简介: 张亚飞(1987—),男,讲师,主要从事土体原位测试方面的研究工作. E-mail: zhangyafei00111@163.com

引用格式: 张亚飞,徐光黎,侯天顺,等,2015. 自钻式原位剪切旁压模型 PFC^{3D}细观模拟. 地球科学——中国地质大学学报,40(11): 1922—1932.

随着岩土工程测试技术的发展,人们逐渐认识到获得不扰动或较少扰动土样进行常规室内试验是非常困难的(沈珠江,1996),这促使相关学者研制新型原位测试仪器以排除取样时的扰动作用.新型自钻式原位剪切旁压试验(self-boring in-situ shear pressure-meter,简称 SBISP)是综合了测定变形模量的原位旁压试验与测定抗剪强度的直剪试验的一种组合试验方法.与之前的试验方法相比,它可以同时直接测出土的变形与抗剪强度参数,具有传统测试方法无法比拟的优势. SBISP 能够自钻式掘进成孔,尽可能地减少了对周围土体的扰动;无需采样、制样就可以得到原位土体的实验结果,节省大量时间;特别适合于难采样、易扰动、强度低的土层,如砂土、淤泥质土的强度试验.

关于 SBISP 试验研究较少. 张晓伦等(2007, 2008)首次对 SBISP 的试验装置、试验机理、试验步骤以及在桩基工程中的应用进行了介绍. 徐光黎等(2010)认为 SBISP 粗糙型测定器与土体界面的摩擦强度值可以近似地用来解释土的抗剪强度,并且可以直接作为土的强度参数;通过把 SBISP 现场试验结果与室内试验进行统计分析对比,认为 SBISP 获得的内摩擦角与原状土样的常规三轴试验测得的内摩擦角结果大致相等;其与固结不排水条件下的内摩擦角的结果最为接近. 张亚飞等(2012)运用颗粒程序对 SBISP 的多级加载过程进行了模拟,得到了随着剪切应力逐级施加,测定器周围砂颗粒位移矢量的变化情况. 张亚飞等(2014)进行了不同固结荷载下 SBISP 颗粒流数值试验,但只进行了数值试样半径为 6 倍探头半径时的应力场、位移场变化情况,具有一定的局限性. 以往的研究多集中在对试验方法、试验机理和与其他试验方法的对比验证研究,以及对测定器周围砂颗粒位移矢量变化的分析上,而对探头周围易扰动土在复杂加载条件下的变形过程,以及探头—土相互作用规律则少有关注.

PFC^{3D}程序(particle flow code in three dimensions)自从引入国内以来,已经在模拟岩土体的力学响应方面得到了广泛的应用(Cundall and Strack, 1979;周健等,2000a,2000b,2007;周健和池永,2003). 本文以室内模型试验为基础,建立 PFC^{3D}颗粒流数值模型,模拟了数值试样半径为 10 倍探头半径时自钻式原位剪切旁压试验的复杂加载过程,并对试验结果进行分析. 所建 PFC^{3D}模型不仅可以给出探头周围数值试样的位移场发展变化趋势,还可以得到数值试样中应力的发展变化规律,弥

补了室内模型试验的不足. 同时分析了施加径向应力过程中应力与探头半径之间关系和距探头不同距离处球颗粒的运动轨迹发展变化,重点从探头周围土体来揭示探头—土相互作用规律,从而更全面地理解了探头—土之间相互作用机理.

1 室内模型验证试验简介

室内验证试验是徐光黎等(2009)在日本九州共立大学工学部地盘研究室研制的大型三轴试验槽中进行的,其试验模型如图 1 所示,以便在室内验证自钻式原位剪切旁压仪多级加载方式获取土的强度参数的可行性. 图 1 中 σ_v 表示上覆固结压力, q_v 表示径向应力, q_H 表示剪切应力.

三轴试验腔内径为 900 mm,高度为 1 500 mm;探头直径为 86 mm,测试段高度为 500 mm. 室内试验采用福冈县冈垣镇当地的冈垣干砂. 冈垣砂为级配不良的均匀细砂,主要由石英、长石组成,其物理性质指标如表 1 所示(徐光黎等,2009). 土样采用空中落法生成,试验中的土样干密度 $\rho_d=1.46\text{ g/cm}^3$,孔隙率

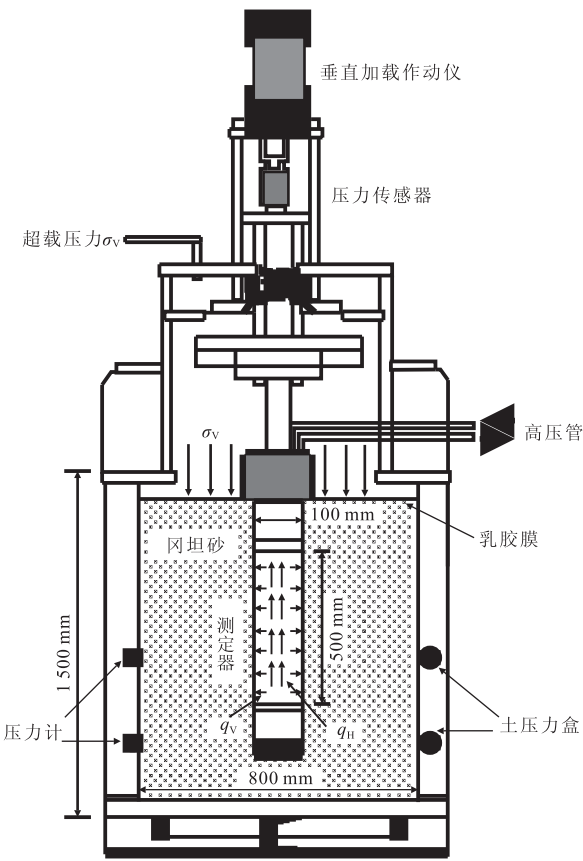


图 1 大型三轴土槽示意

Fig. 1 Sketch of triaxial chamber with probe of SBISP

表 1 冈垣砂物理性质指标
Table 1 Physical property indexes of okagaki sand

项目	颗粒密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50} (mm)	有效粒径 D_{10} (mm)	不均匀系数 U_c	最大孔隙比 $e_{\max}$	最小孔隙比 $e_{\min}$
冈垣砂	2.63	0.26	0.16	2.2	0.94	0.56

$n=0.44$.

三轴土槽能够独立施加超载压力和上拔荷载或下压荷载. 超载压力通过高压空气袋对土体表面施加覆压力 σ_v , 所加最大上覆固结压力为 200 kPa. 上拔荷载通过垂直加载作动仪施加, 腔体内的土压力用压力传感器来监测.

验证试验表明, 所得试验数据可以由张晓伦等(2007)提出的理论分析方法来解释; 并且得到的解释结果与三轴压缩试验和模型桩载试验结果是一致的. 通过验证说明此种新型的试验方法是可以进行实际应用的. 以下的 PFC^{3D} 数值模型是根据此验证试验建立的.

2 PFC^{3D}模型建立

2.1 SBISP 模型边界及探头

本模拟对大型三轴试验槽及探头尺寸适当缩小, 以减少生成的颗粒数目, 提高计算效率. 试验腔半径为 210 mm, 高度为 350 mm, 由 1 个广义圆柱墙(3 号墙)和上下 2 个标准平面墙(5、6 号墙)组成; 探头由 3 个广义圆柱墙(1、7、8 号墙, 其中 7、8 号墙为圆台墙, 圆台的倾斜角度为 45°)组成, 1 号墙初始半径为 15 mm, 高为 180 mm, 其长径比 L/D 为 6; 探杆为 1 个广义圆柱墙(2 号墙), 半径为 15 mm; 模型边界与探头如图 2 所示, XZ 方向如图 2, Y 方向垂直于纸面.

模型中各墙作用简介如下: 6 号墙用于对数值试样施加固结荷载; 分别赋予 1、7、8 号墙径向速度和竖向速度来对数值试样施加各级径向力与剪切力. 探头圆柱墙 1 的法向与切向刚度均为 $1 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 用来模拟坚硬的探头; 而组成探头两端面的 7、8 号圆台墙只赋予其刚度以阻止球颗粒进入探头内部. 因此在此数值模型中, 在计算砂颗粒与探头的相互作用力时, 只需要监测圆柱墙 1 上径向力与剪切力的变化. 组成探头各墙的细观参数见表 2(张亚飞等, 2012).

2.2 PFC^{3D}砂试样模型建立

为了减少颗粒总数量, 在保证计算精度下提高运算速度, 本模拟从中部探头向外分为 2 个环形区,

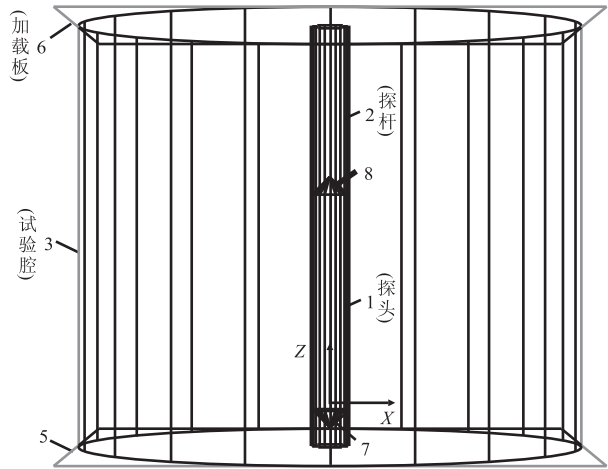


图 2 模型边界及探头示意
Fig. 2 Sketch of the model boundary and probe

分别生成球形颗粒; 其半径采取中间区域小、外部区域大的方法来减少生成的颗粒数量; 中部细颗粒区域半径为探头半径的 10 倍, 其外由粗颗粒包围.

以室内验证试验中砂颗粒粒径为基础生成中间区域的细颗粒, 在不影响数值试验结果的基础上, 为了加快计算速度, 将实际的砂颗粒粒径适当放大来减少数值试样的颗粒数量, 本模拟中将实际土样的平均粒径 D_{50} 放大 20 倍, 数值试样中球颗粒的平均粒径 $D_{50}=5.2 \text{ mm}$. 首先生成外部区域大颗粒, 再生成中心区域细颗粒. 以中心区域细观参数为基础推导外围大颗粒的细观参数值. 根据邓益兵等(2011)所提推算方法, 在球颗粒杨氏模量一定时, 颗粒刚度与颗粒半径有如下关系:

$$\bar{E} = \frac{k_n}{4R}, \tag{1}$$

公式(1)中, $\bar{E}$ 为球颗粒材料的杨氏模量; k_n 为颗粒刚度; R 为球颗粒平均半径.

由公式(1)可知, 当用不同半径的颗粒模拟相同材料时, 颗粒接触刚度与颗粒半径成正比. 因此可根据中部区域的细颗粒刚度来计算出外部区域的大颗粒刚度, 中间区域小颗粒细观参数是通过对比模拟三轴试验得到的. 表 3 中列出了各区域大小、颗粒粒径及细观参数值(张亚飞等, 2012).

数值试样生成步骤为: (1) 在试验腔内生成比大粒径颗粒半径小一定倍数的球颗粒, 然后用半径扩

表 2 模型墙细观参数
Table 2 Meso-parameters of model wall

墙编号	法向刚度 $k_n(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $k_s(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	摩擦系数 f_c
1	1×10^{10}	1×10^{10}	0.6
2、3、5、6、7、8	1×10^{10}	—	—

表 3 数值试样分区及细观参数
Table 3 Partitions and meso-parameters of numerical sample

区域	D 的倍数范围	粒径(mm)	法向刚度 $k_n(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒密度 $\rho_s(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	摩擦系数 f_c
中间区域	1~10	2.0~3.2	2.0×10^5	2 630	1.0
外围区域	10~14	5.0~6.2	4.3×10^5	2 630	1.0

注: D 为探杆直径。

大法使球颗粒粒径增大以使集合体达到目标孔隙率,删去中间圆柱区域大颗粒后迭代至平衡,此时生成的数值试样形状是圆环形;(2)用步骤(1)中的方法生成中间区域小粒径颗粒,使其达到目标孔隙率,删去探杆区域中的小颗粒,迭代到平衡;(3)删去中间区域小颗粒与外围区域大颗粒之间的广义圆柱墙,使内外两区域的大小颗粒相接触;(4)通过循环使试样在重力和摩擦力的作用下迭代至最终平衡状态。

将所有球形颗粒的速度和位移设为 0,把此时试样的状态作为初始状态,这样就建立起了中空的圆柱体球形砂颗粒数值试样,共生成 194 081 个颗粒,数值试样如图 3 所示。此试样的平均孔隙率为 0.398,对应为松砂。

2.3 加载过程模拟

建立 PFC^{3D}数值模型之后,下一步是对数值试样进行加载测试。依据模型试验中的加载过程,设计本模拟中的加载步骤如下:(1)上覆固结荷载 σ_v 通过伺服函数(用 FISH 语言编写的控制函数)控制上

部标准墙(6 号墙)的速度来施加;(2)当固结荷载 σ_v 达到指定值,保持 σ_v 不变,再赋予中部圆柱形探头(1、7、8 号墙)一径向速度来施加第 1 级径向应力 q_{v1} ,使其达到指定值;(3)保持第 1 级径向荷载 q_{v1} 不变,赋予探头竖直向速度,使其以固定的速度提升,对试样施加第 1 级剪应力 q_{H1} ,通过编写 FISH 函数控制剪切应力加载过程,当剪切应力 q_{H1} 达到峰值时自动中止加载;(4)接着施加第 2 级径向应力 q_{v2} ,当达到指定值时,再加第 2 级剪切应力 q_{H2} ,如此 5 次。

本模拟中施加的上覆固结荷载 σ_v 为 80 kPa,各级径向应力分别为 100 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa 和 600 kPa。

2.4 数值模拟结果验证

通过把从颗粒流数值试验中得到的宏观表征曲线与室内验证试验一般曲线进行对比来确定所建立 PFC^{3D}数值模型的合理性。

图 4 为 SBISP 现场试验曲线,曲线表示各级径向应力下的剪切应力与剪切位移关系(徐光黎等,2010)。图 5 给出了采用颗粒流程序 PFC^{3D}模拟 SBISP 试验在上覆固结压力 $\sigma_v=80$ kPa 时的剪切应力与位移曲线。从图 5 可以看出在施加每级剪切应力的初始阶段,均会出现一个陡升陡降段(图 5 中圆框所示)。该现象可以用摩擦定律来解释(马文蔚,1999):把物体放在水平面上,物体尚未滑动时静摩擦力 F_{f0} 随着外力 F 的增大而增大,直到 F 增大到某一数值时,物体相对平面即将滑动,这时静摩擦力达到最大值称为最大静摩擦力 F_{f0m} ,实验表明,最大静摩擦力的值与物体的正压力 F_N 呈正比,即

$$F_{f0} = \mu_0 F_N,$$

(2)

式中: μ_0 为静摩擦系数。当物体在平面上滑动时,受到滑动摩擦力 F_f 的作用,由以下公式得到:

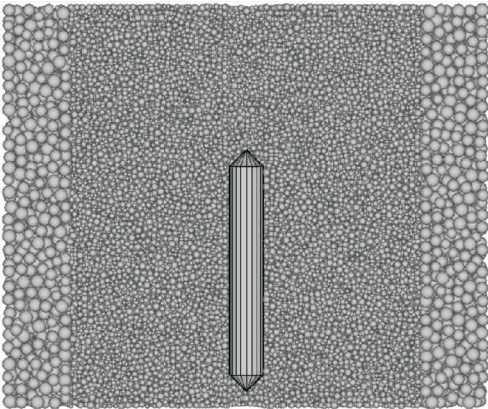


图 3 SBISP 颗粒流数值试样

Fig. 3 PFC^{3D} numerical sample of SBISP

$$F_f = \mu F_N, \tag{3}$$

式中： μ 为滑动摩擦系数。在相对速度不大时，滑动摩擦系数 μ 小于静摩擦系数 μ_0 。此现象也证实颗粒流程序模拟实际物理现象的合理性。

通过对比图 4 和图 5 可以看出，PFC^{3D} 数值模拟得出的应力—变形响应与室内模型试验结果基本一致。随着各级径向应力的增大，各级剪应力峰值也不断增大；在同一级径向应力作用下，剪切应力随着剪切位移的增大，其增长率不断减少，最终趋于峰值。这表明所建立的颗粒流数值模型可以反映砂颗粒在 SBISP 探头作用下的一般规律，所建立数值模型是合理的。

当上覆固结压力 $\sigma_v=80$ kPa 时，对应于每一级径向应力，其峰值剪切应力分别为 91.725 kPa、111.030 kPa、127.820 kPa、143.610 kPa 和 154.900 kPa。

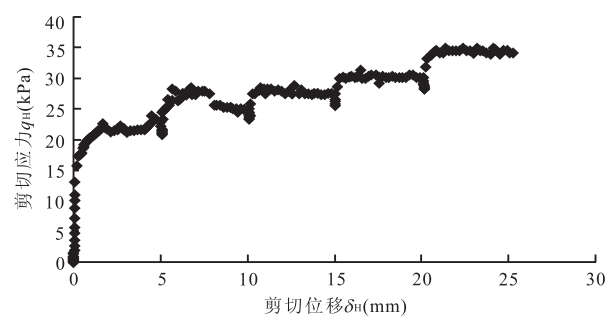


图 4 SBISP 现场试验曲线
Fig. 4 The field test curve of SBISP

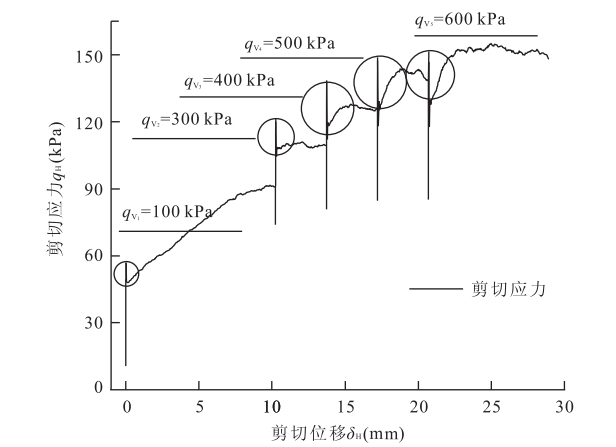


图 5 SBISP 试验颗粒流数值模拟曲线($\sigma_v=80$ kPa)
Fig. 5 Numerical simulation curve of SBISP tests

3 PFC^{3D}数值试验结果分析

3.1 数值试样位移场演化过程分析

在室内验证模型试验中直接观测加载过程中试

样位移场变化较为困难，运用 PFC^{3D} 模拟能够重现砂颗粒中位移场的演化过程，进一步明确加载过程中探头周围土颗粒变形机理。

数值试验过程中监测了探头周围砂颗粒的位移场变化，生成了探头周围砂颗粒位移场变化图及位移等值线图。位移等值线图是为了更加直观地观测探头的膨胀及剪切对周围砂颗粒的影响，把探头周围砂颗粒根据其位移量的大小赋予不同的颜色。根据张亚飞等(2014)所提出方法，确定各球颗粒的位移量并对其进行上色。图 6 为球颗粒位移量与对应颜色关系， D_{max} 为球颗粒的最大位移量。

图 7 为利用上述方法生成的位移等值线，即各级径向压力作用后颗粒位移等值线。需要说明的是，该图 7 中仅监测球颗粒在 XY 平面内的位移量变化。从图 7 中可以看出，随着径向应力的逐级施加，探头不断的膨胀，探头对周围球颗粒的影响范围也逐渐增大，但其影响范围基本上位于探头高度区域内。

图 8a~8c 为各级剪切应力施加后颗粒位移场分布，图 8d~8f 为相应颗粒位移等值线。从图 8a~8c 位移场分布可以看出，在探头径向膨胀及竖向剪切提升作用下，受影响主要区域为中部细颗粒区，而外围的粗颗粒区域基本没有变化；随着径向应力的逐级增加，在各级竖向剪切应力的作用下，中部区域内的颗粒位移量明显增大，且其方向性逐渐增强；在第 1 级剪切应力作用下，探头周围颗粒位移的方向性尚不显著，但在第 3 级和第 5 级剪切应力作用下，探头周围颗粒的位移在探头的带动下呈现明显集体向上的方向性，如图 8b、8c 所示；在第 5 级剪切应力作用下，与探头相接触的一层颗粒的位移矢量基

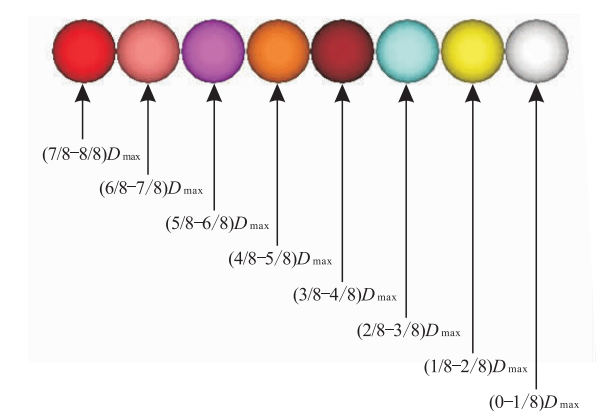


图 6 球颗粒位移量与对应颜色关系
Fig. 6 The corresponding colors for different displacement of particles

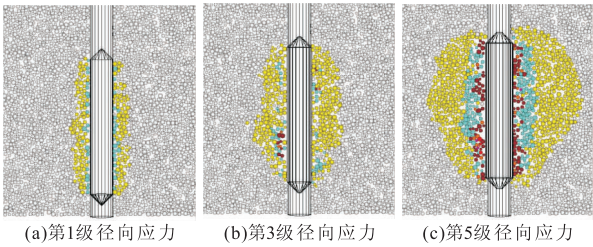


图 7 各级径向应力作用下颗粒位移等值线
Fig. 7 Displacement contour sketch of numerical sample under different radial stresses

本上是竖直向上的,其外侧颗粒在这层颗粒的带动下与竖直方向呈锐角角度向上移动,且锐角角度随距探头距离的增加而增大,在探头的高度上呈现倒锥形区域.图 8d~8f 为各级剪切应力作用下颗粒位移等值线,监测的为球颗粒位移量在 XYZ 平面内的变化.可以看出其与图 8a~8c 基本一致,随着各级剪切应力的施加,受影响的球颗粒范围逐渐增大,主要受影响的区域为距探头一定距离范围中部细颗粒区和探头的高度范围内,受影响区域的形状与位移矢量的方向性分布相似.

3.2 探头周围土体应力

室内或现场试验过程中,由于受测试手段限制,较难获得探头周围土体中应力分布及其变化情况.而在颗粒流数值试验中,可以通过在土体中设置一定数量均匀分布的测量圆来监测土体中各点应力及其变化.

图 9 为输出各测量圆应力绘制成的应力(径向应力和竖向应力)等值线.从图 9 可以看出随着应力的逐级施加,探头周围土体应力逐步增大;图 9a~9c

为各级径向应力作用下数值试样中径向应力等值线,可以看出径向应力在探头两侧附近几乎对称出现了数个应力集中区——“应力核”,“应力核”的范围逐渐扩大,且探头上部“应力核”的扩展速率更快,其影响范围比探头下部“应力核”大(图 9c);图 7c 中在第 5 级径向应力作用下,位移等值线也呈现出上宽下窄的现象,这与在此观察到的现象一致,表明探头下部土颗粒径向移动所受到的阻力更大.

图 9d~9f 为各级剪切应力作用下数值试样中竖向应力等值线,从图 9 中可以看出,竖向应力在探头两侧附近形成了扁平状的应力集中带,且在探头顶端因膨胀而形成的肩部产生了较高应力区,说明探头在提升过程中在此部位受到的阻力最大.

3.3 各阶段变形模量分析

施加各级径向应力的过程中,监测了径向应力与相应探头半径的发展变化.图 10 为各级径向应力与探头半径关系曲线,在这里由于篇幅关系只列出了施加第 1、2、4 和 5 级径向应力时的关系曲线;图 10b、10c 和 10d 曲线的起始部分都有一个转折段(在第 2 级情况下也有此现象),而施加第 1 级径向应力的过程中却没有出现此现象,如图 10a 所示;这与现场原位试验中出现的现象是一致的,图 11 为 SBISP 多级加载 q_v - V 曲线及变形模量实例(张晓伦等,2007),从图 11 中可以看出,后续 4 个阶段都出现了转折部,如图 11 中圆形框内所示,这再次说明了所建模型是正确的;这种现象可能是由于土颗粒在剪切提升之后到达新位置,施加下一级径向应力过程中在新位置与周围颗粒重新接触、排列并相互咬合形成新强度的结果.在数值试验第 1 级径向应

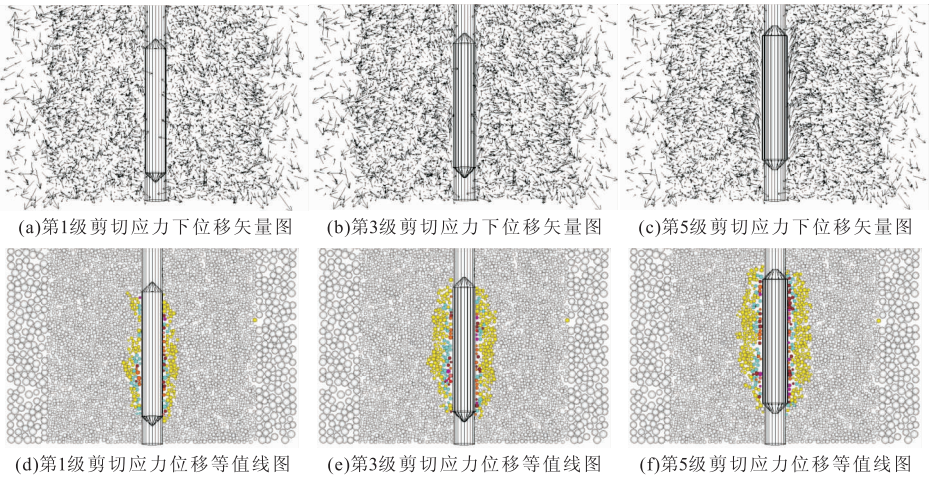


图 8 颗粒位移矢量分布与位移等值线对比
Fig. 8 Comparison of the distribution of displacement vectors of particles and the contour map under shear stress of each grade

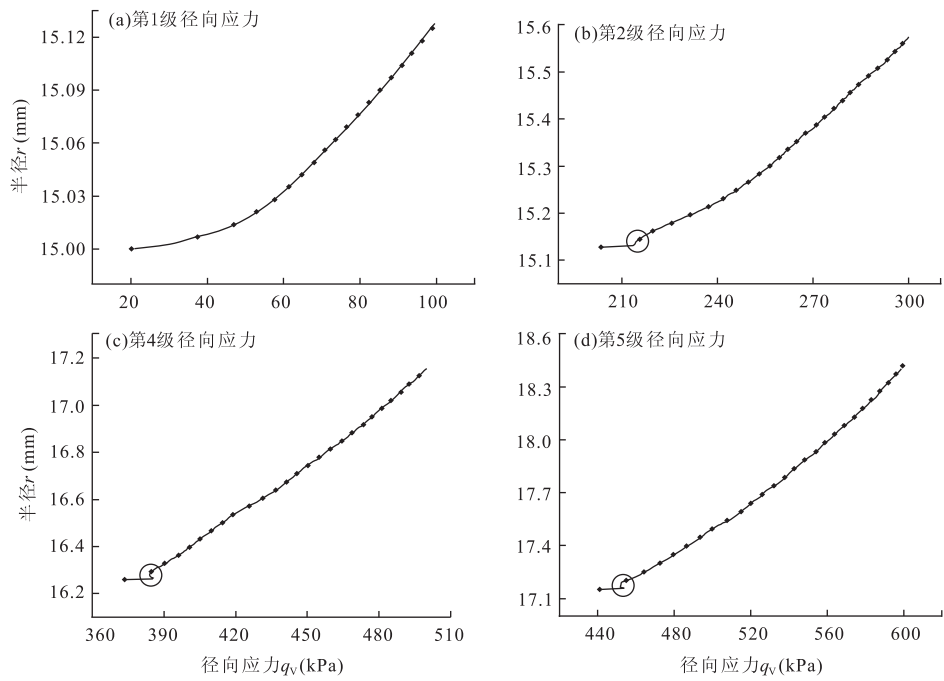


图 10 各级径向应力与探头半径关系

Fig. 10 Relation of the radius of the probes and the radial stress of each grade

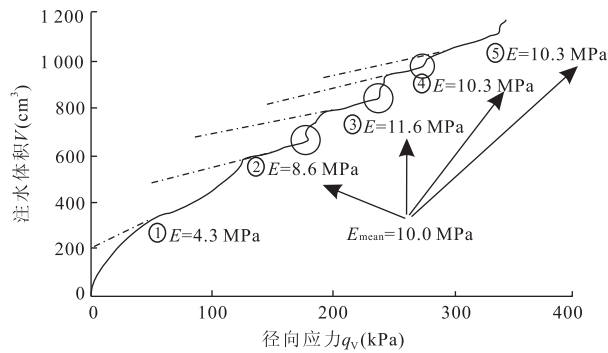


图 11 SBISP 试验变形模量实例

Fig. 11 The deformation modulus example of SBISP field test

力施加过程中没有出现如现场实验起始段的上凸曲线,这是由于在数值试验中没有出现如现场试验中因探头钻入所发生的周围土体的应力释放。

图 10 中各级变形模量值由下式得出(孟高头, 1997):

$$E = (1 + \mu)r \frac{\Delta q_v}{\Delta r}, \tag{5}$$

式中: E 为旁压模量(kPa); μ 为泊松比,此处取 0.2; $\Delta q_v/\Delta r$ 为 q_v-r 曲线上的起始直线段斜率; r 为 q_v-r 曲线上近似直线段中点所对应的旁压孔穴半径。

经计算 $E_1=34.35$ MPa、 $E_2=66.90$ MPa、 $E_3=43.90$ MPa、 $E_4=62.70$ MPa 和 $E_5=60.40$ MPa,第 1 阶段的变形模量值小,后续各阶段的变形模量值大且基本相等,这与现场试验获得的结论相同。

3.4 球颗粒位移轨迹分析

笔者对试验过程中距探头不同距离处球颗粒的位置进行了监测,并生成了各球颗粒在 XYZ 空间中的运动轨迹,XYZ 空间方向见图 2。所选监测球的初始位置基本位于 $Y=0$ 平面上和探头中部,监测球距探杆中心线的距离分别约为 15 mm、30 mm、50 mm、70 mm、90 mm、110 mm、130 mm 和 150 mm,每个距离处在探头的左右两侧选择 2 个球进行监测。限于篇幅,在此只生成了距离约为 15 mm、50 mm、90 mm、110 mm、130 mm 和 150 mm 的 6 个球颗粒运动轨迹(图 12)。各球运动轨迹均从距探头距离较近处向远处移动,也就是从其 X 坐标绝对值的较小处向较大处移动。从图 12 中可以看出球颗粒运动轨迹在 XZ 面上的投影为台阶状,随着探头的膨胀与提升,其周围球颗粒在探头的作用下也不断的沿径向和竖向移动。当距探头较近时,台阶呈尖角状,随着距探头距离的逐渐增加,台阶逐渐呈圆弧状,且圆弧的弧度不断增大,越来越平缓,如图 12a、12b 所示;当距探头距离继续增大达到 90 mm 时,只有后 3 级探头膨胀量与提升量较大时,球颗粒运动轨迹才呈台阶状,而前 2 级运动轨迹则是由多级小型台阶形成的一个近似圆弧(图 12c、12d);当距离达到 130 mm 时,球颗粒的运动轨迹基本上由小型台阶组成,且运动轨迹在起始部分上行一小段距离之后转而向下移动,呈抛物线形(图 12e、12f);

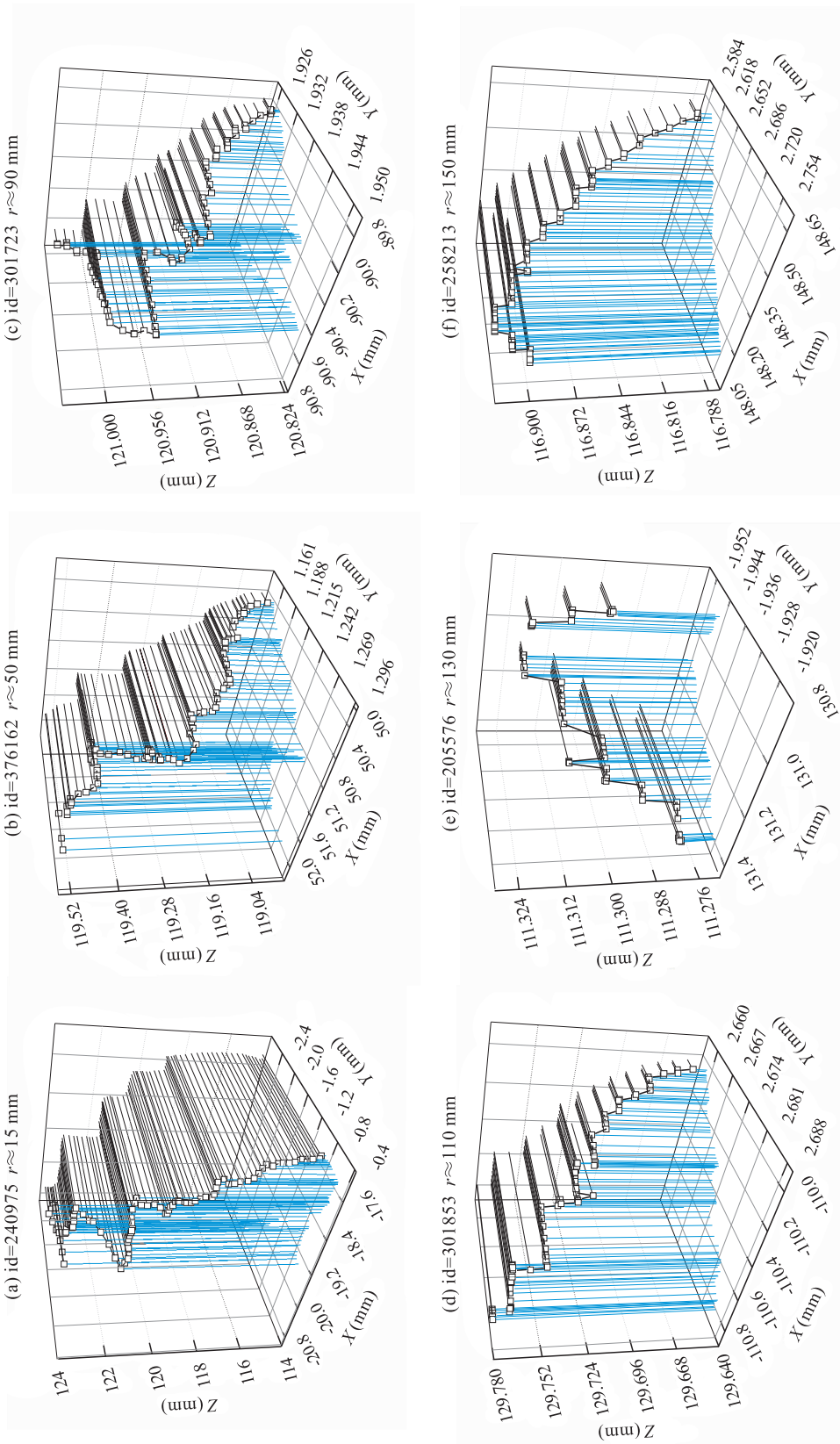


图 12 不同距离处球颗粒运动轨迹

Fig. 12 Motion trails of particles located in different distances

id 表示监测球的编号; r 表示监测球距测定器中心的距离, 各球运动轨迹在 XZ 面上的投影用黑色线表示; 各球运动轨迹在 XY 面上的投影用蓝色线表示

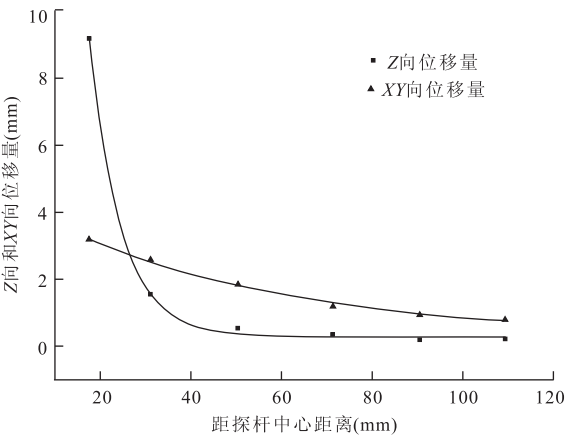


图 13 球颗粒 Z 向和 XY 向位移量变化趋势

Fig. 13 Vertical and horizontal displacement of particles in different distances

这说明距离探头越近,受探头运动影响的程度也会越大,反之,则越小。

而球颗粒在 XYZ 空间中轨迹与其在 XY 面上的投影均为不规则状;但当距离探头较近时,在同一台阶面上,球颗粒轨迹基本上是沿一个方向水平运动的。Gibson and Anderson(1961)提出了第一个解释旁压试验的方法,假设旁压仪是无限长的,则旁压仪周围土体的变形是在轴对称和平面应变条件下发生的。图 12 显示的现象也间接证明了这种假设在一定程度上是合理的。

图 13 为距探杆中心不同距离处球颗粒 Z 向和 XY 向位移量分布,其位移量是各个距离处两球颗粒 Z 向位移的平均值,距探杆中心的距离是两颗粒 X 坐标的平均值。图 13 中没有包含 130 mm 和 150 mm 处球颗粒的位移量。从图 13 中可以看出,随着距探杆中心距离的增大,球颗粒的 Z 向和 XY 向位移量均呈负指数形式衰减,但 Z 向位移量比 XY 向位移量衰减的速率快。

4 结论

(1)在颗粒流数值仿真试验中,剪应力作用对颗粒位移影响呈现分区化特征:中间区域细颗粒受影响较显著,而外围大颗粒基本无影响;随着剪应力的增加,探头高度范围内中间区域颗粒的位移量明显增大,且逐渐呈现一致向上的方向性,至第 5 级剪应力作用时,探头外围影响域内颗粒位移矢量呈“倒锥形”。

(2)所得数值试样的 q_v-r 曲线变化趋势和变形

模量值与现场试验一致,施加后续 4 级径向应力过程中起始段均存在转折部,这可能是由于球颗粒随探头径向移动和竖向提升到达新位置后,在施加下一级径向应力时与周围球颗粒相互之间重排列和咬合形成新强度的结果。

(3)数值试样中径向应力在探头附近两侧近似对称出现数个应力集中区——“应力核”,应力核随径向应力的逐级施加影响范围不断扩大,且其影响范围在探头高度上呈现上宽下窄现象;竖向应力在探头附近形成扁平状应力集中带,并在探头肩部产生较高的应力集中区。

(4)探头周围附近球颗粒的运动轨迹呈台阶状展布,中部区域土颗粒运动轨迹可分为 3 个特征区:当距探头较近时,球颗粒的运动轨迹呈台阶状,台阶形态随距探杆中心距离增大而趋于平缓;当距离继续增大时,前 2 级轨迹呈由多级小型台阶组成的圆弧状;当处于最远区域时,球颗粒的运动轨迹呈先上升再下降的抛物线形;球颗粒的 Z 向和 XY 向位移量成负指数形式衰减,其中 Z 向位移量衰减速率更快。

References

Cundall, P. A., Strack, O. D. L., 1979. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29(1): 47—65.

Deng, Y. B., Zhou, J., Liu, W. B., et al., 2011. PFC Numerical Simulation of Augered Piling of Soil Displacement Screw Piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 33(9): 1391—1398 (in Chinese with English abstract).

Gibson, R. E., Anderson, W. F., 1961. In-Situ Measurement of Soil Properties with the Pressuremeter. *Civil Engineering Public Works Review*, 56: 615—618.

Ma, W. W., 1999. Physics (Volume One). Higher Education Press, Beijing, 38—39 (in Chinese).

Meng, G. T., 1997. The Mechanism, Method and Application of In-Situ Test for Soils. Geological Publishing House, Beijing, 161—204 (in Chinese).

Shen, Z. J., 1996. Soil Sampling on Site or In-Situ Testing—A Preliminary Research on Development of Soil Parameter Test Technology. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 18(5): 90—91 (in Chinese).

Xu, G. L., Zhang, X. L., Wang, C. Y., et al., 2009. The New Self-Boring Shear Pressure-Meter and Its Application. China University of Geosciences Press, Wuhan, 64—75 (in Chinese).

Xu, G. L., Zhang, X. L., Wang, C. Y., 2010. Development and

- Application of Self-Boring In-Situ Shear Pressuremeter. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 32 (6): 950—955 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. L., Xu, G. L., Wang, C. Y., et al., 2007. Development and Application of Self-Boring In-Situ Shear Pressuremeter. *Rock and Soil Mechanics*, 28(Suppl.): 909—913, 918 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. L., Xu, G. L., Wang, C. Y., 2008. Self-Boring In-Situ Shear Pressuremeter and Its Application to Pile Foundation Engineering. *Subgrade Engineering*, 137 (2): 63—65 (in Chinese).
- Zhang, Y. F., Xu, G. L., Shen, Y. J., et al., 2012. PFC Numerical Simulation of Self-Boring In-Situ Shear Pressuremeter Model Test. *Journal of Engineering Geology*, 20 (5): 855—861 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Xu, G. L., Shen, Y. J., et al., 2014. PFC^{3D} Numerical Experiments of Self-Boring In-Situ Shear Pressuremeter Model Test under Different Consolidation Pressures. *Rock and Soil Mechanics*, 35 (2): 591—600 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Chi, Y., Chi, Y. W., et al., 2000a. The Method of Particle Flow and PFC^{2D} Code. *Rock and Soil Mechanics*, 21 (3): 271—274 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Chi, Y. W., Chi, Y., et al., 2000b. Simulation of Biaxial Test on Sand by Particle Flow Code. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 22(6): 701—704 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Chi, Y., 2003. Mesomechanical Simulation of Sand Mechanical Properties. *Rock and Soil Mechanics*, 24 (6): 901—906 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Zhang, G., Zeng, Q. Y., 2007. Model Tests and PFC^{2D} Numerical Analysis of Active Laterally Loaded Piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 29 (5): 650—656 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 邓益兵, 周健, 刘文白, 等, 2011. 螺旋挤土桩下旋成孔过程的颗粒流数值模拟. *岩土工程学报*, 33(9): 1391—1398.
- 马文蔚, 1999. 物理学(上册). 北京: 高等教育出版社, 38—39.
- 孟高头, 1997. 土体原位测试机理、方法及其工程应用. 北京: 地质出版社, 161—204.
- 沈珠江, 1996. 原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向刍议. *岩土工程学报*, 18(5): 94—95.
- 徐光黎, 张晓伦, 王春艳, 等, 2009. 新型自钻式剪切旁压仪及其应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 64—75.
- 徐光黎, 张晓伦, 王春艳, 2010. 自钻式原位剪切旁压仪的开发及应用. *岩土工程学报*, 32(6): 950—955.
- 张晓伦, 徐光黎, 王春艳, 等, 2007. 自钻式原位剪切旁压仪及其工程应用. *岩土力学*, 28(增刊): 909—913, 918.
- 张晓伦, 徐光黎, 王春艳, 2008. 自钻式旁压剪切仪及其应用于桩基工程的讨论. *路基工程*, 137(2): 63—65.
- 张亚飞, 徐光黎, 申艳军, 等, 2012. 自钻式原位剪切旁压模型试验颗粒流模拟. *工程地质学报*, 20(5): 855—861.
- 张亚飞, 徐光黎, 申艳军, 等, 2014. 自钻式原位剪切旁压模型不同固结荷载颗粒流数值试验. *岩土力学*, 35 (2): 591—600.
- 周健, 池永, 池毓蔚, 等, 2000a. 颗粒流方法及 PFC^{2D} 程序. *岩土力学*, 21(3): 271—274.
- 周健, 池毓蔚, 池永, 等, 2000b. 砂土双轴试验的颗粒流模拟. *岩土工程学报*, 22(6): 701—704.
- 周健, 池永, 2003. 砂土力学性质的细观模拟. *岩土力学*, 24 (6): 901—906.
- 周健, 张刚, 曾庆有, 2007. 主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究. *岩土工程学报*, 29(5): 650—656.