

压实土不固结不排水单剪、直剪试验对比

吴 明¹, 傅旭东², 夏唐代¹, 徐德馨², 汪 君², 刘永明²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对国内外单剪、直剪试验装置进行调研, 总结、分析单剪和直剪试验的优缺点。结合具体填方工程中的压实土体, 利用一种类似 NGI 单剪仪的仪器, 进行不固结不排水情况下单剪和直剪试验, 并将结果进行对比。研究发现, 压实土的黏聚力值, 单剪比直剪低 20.3%, 内摩擦角低 5°。结合国内外的研究成果, 详细分析试验结果的差异所在。

关键词: 土力学; 单剪试验; 直剪试验; 强度参数; 压实土; 不固结不排水剪

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 4147 - 06

COMPARISON BETWEEN UNCONSOLIDATED UNDRAINED SIMPLE AND DIRECT SHEAR TESTS ON COMPACTED SOIL

WU Ming¹, FU Xudong², XIA Tangdai¹, XU Dexin², WANG Jun², LIU Yongming²

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;*

2. *College of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China*)

Abstract: The purpose of this investigation is to ascertain the proper strength parameter(UU) of compacted soil of Wushan high embankment and is to calculate the stability of the compacted soil reasonably. Some findings in simple and direct shear tests are analyzed to summarize the drawbacks and strongpoints of the simple and direct shear devices. By utilization of a simple equipment like NGI simple shear device, unconsolidated undrained simple and direct shear tests are conducted to determine and compare the strength properties of the compacted soil of Wushan high embankment. The shear test samples are made to simulate the real compacted soil of embankment. The optimum water content is 12% and the coefficient of compaction is not less than 0.95. The results of the simple and direct shear are compared. The results show that the cohesion of the simple shear test is lower than that of the direct test by up to 20.3%; and the internal friction angel of the simple shear is 5° lower than that of the direct shear. Based on the predecessors' achievements, the differences of the results obtained are analyzed in detail.

Key words: soil mechanics; simple shear test; direct shear test; strength parameter; compacted soil; unconsolidated undrained shear

1 引 言

实验室的试验设备, 总是尽可能地使土体模拟

实际运行中的破坏方式, 这样确定的土体应力 - 应变特性、强度参数才有应用价值。实际中直剪试验和三轴试验应用最广泛, 除了简单实用外, 直剪和三轴试验确实能反映一些土体的实际破坏问题。但

收稿日期: 2005 - 12 - 31; **修回日期:** 2006 - 02 - 21

作者简介: 吴 明(1979 -), 男, 2005 年于武汉大学土木建筑工程学院获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: ming_eagle@163.com

是实际中很多土体都处于单剪状态下，如地震时地下面处于向上传播的剪切波中的土体单元、受载时桩身的应力状态。Wroth 认为单剪试验是唯一能恰当模拟实际工程破坏的试验^[1]。实际上，单剪状态存在于平面应变问题的滑面上，边坡短期稳定性分析的参数应该用单剪试验来确定，如图 1 所示。研究^[2]发现，单剪试验的强度参数，比三轴试验更符合十字板现场试验和反分析结果。然而，很少有人应用单剪试验来分析土的强度参数，特别是国内，当然这和单剪仪较复杂、单剪机制不完善有关。结合巫山县高填方工程，作者进行了压实土体不固结不排水单剪、直剪试验，并对比分析本文试验结果差异所在。

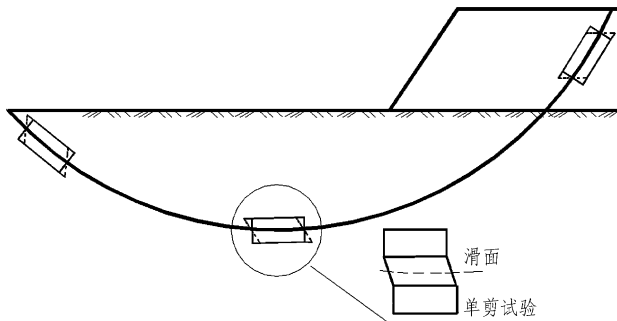


图 1 沿滑面的单剪状态^[1]
Fig.1 Simple shear condition along a slip surface^[1]

2 直剪仪优缺点

直剪试验是测试土体强度的一种常用方法，由于其简单实用，为广大技术人员接受。但是该试验方法存在许多缺点：

(1) 中间主应力的方向虽然不变，但大、小主应力的方向却发生变化，如图 2 所示。根据破坏时的法向压力和剪应力，可以大致算出大、小主应力值，但中间主应力是无法确定的。

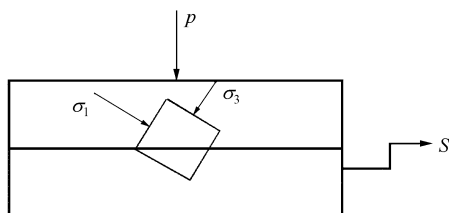


图 2 直剪试样中的主应力
Fig.2 Principal stresses of direct shear sample

(2) 如图 3 所示，当试样被剪破时，靠近剪力盒边缘的应变最大，而试样中间部分的应变相对小得多。此外，剪切面附近的应变又大于试样顶部和底部的应变。所以，据此算出的剪应变是相差很大的剪应变的综合值。同样，试样中的剪应力也是很均匀的。

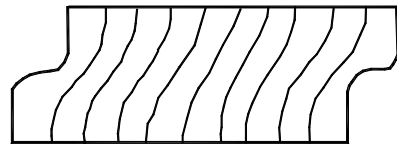


图 3 直剪试样实际变形
Fig.3 Realistic deformation of direct shear sample

(3) 理想的剪切形式是最初产生均匀的剪切变形，然后沿着剪切面破坏，如图 4(a)所示。由于应力复杂，最后形成如图 4(c)所示的剪切区。压应力越小，所形成的剪切区越大，则试验所推求的 τ_f 实际值偏差越大。反之，压应力愈大， τ_f 愈接近真值，导致 φ 值偏小， c 值偏大。

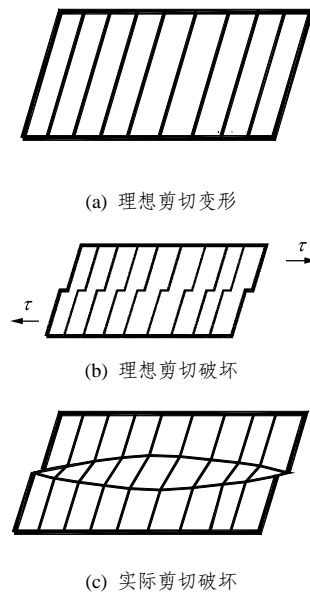


图 4 简化的直剪试样变形
Fig.4 Simplified deformation of direct shear sample

(4) 直剪仪的另一缺点是不能控制试样的排水，只能通过快速剪切或慢速剪切分别来达到不排水和完全排水的目的。慢速剪切可以达到完全排水的目的，但快速剪切就不一定能达到完全不排水的目的。中国水利水电科学研究院曾对塑性指数为 27% 的黏土试样进行不同剪切速率的直剪试验，结

果认为, 对于正常压密的土来说, 由于试样在剪切时产生正的孔隙压力, 所以剪切时间越长, 孔隙压力消散越多, 强度也越大。相反, 对于超压密的土, 由于试样在剪切时产生负的孔隙压力, 所以剪切时间越长, 强度越小。这些现象说明, 直剪仪中的试样是排水的, 即使是剪破时间仅有 3~4 min 的快剪试验, 仍有一定程度的排水。

(5) 另外, 当剪切开始时, 上、下盒发生相对位移, 试样上、下被剪两部分随之发生相对位移。这样的位移, 使原来轴向的正压力变为偏轴压力, 从而使试样发生斜剪, 也会影响试验结果。而且在剪切过程中, 试样的有效剪切面积也会不断减小, 所对应的 τ_f 值也偏小, 从而使得 φ 值偏小, c 值偏大^[3~5]。

(6) 直剪试验中, 由于剪切盒内壁摩擦的影响, 在试样发生剪胀的情况下, 只能沿垂直方向膨胀。由 Taylor 的剪胀模型可知, 体积膨胀要靠剪力做功来提供。所以, 测得的剪切强度比实际要高。

刘斯宏和徐永福^[6]对此问题进行了深入研究, 并提出了直剪仪中修正剪胀对强度影响的公式。本文试验中的单剪仪的剪切盒由一些叠环组成, 允许试样从叠环中间膨胀, 从而减小了剪胀对强度测试的影响, 势必使测得结果比直剪所得结果低。

直剪试验虽然有很多缺点, 但是由于其易于操作, 而且提供的抗剪强度也能反映问题, 所以在实践中应用较多。

3 单剪仪优缺点

单剪仪是直剪仪的改良型式, 至今已有 3 种不同样式的单剪仪, 分别是在瑞典、挪威和英国首先研制并应用的。目前常用的是挪威岩土研究所单剪仪(NGISSD)和剑桥 Rosceo 单剪仪(CAMSSD)。

早在 1936 年瑞典岩土研究所就研制了如图 5(a) 所示的仪器。试样在侧向用橡皮膜包围, 橡皮膜外面有若干个重叠的铝环防止试样受压后侧向膨胀, 使试样处于 K_0 固结状态, 但受剪力作用时这些环可以互相错动。剪力施加在顶盖上, 均匀分布于试样, 橡皮膜能防止排水。其后, 挪威岩土研究所制做了类似的仪器, 如图 5(b) 所示, 试样是圆柱状, 侧向用绕有刚弦的橡皮膜包围, 刚弦直径 0.2 mm, 螺距 0.5 mm, 其目的是防止试样受到压力作用后发生侧向膨胀, 达到 K_0 固结状态。

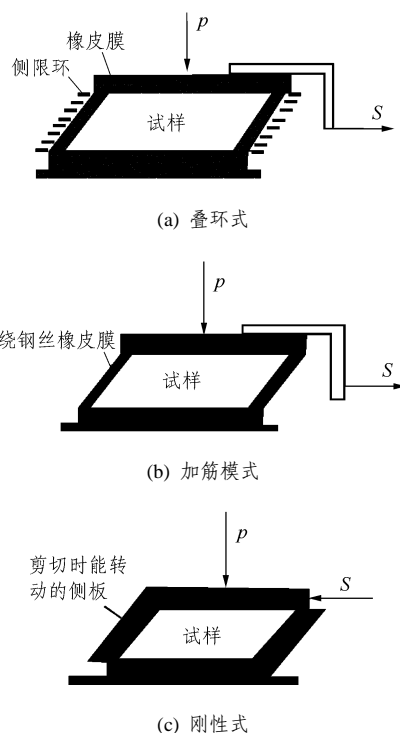


图 5 3 种基本单剪仪

Fig.5 Three kinds of basic simple shear devices

瑞典 - 挪威型的单剪仪的优点是: 试样中各部分的应变比直剪仪中的均匀, 而且试样的排水受到橡皮套的限制。缺点是: 当试样中出现正的孔隙压力时, 它会促使橡皮套鼓胀, 因此达不到完全不排水的目的, 只有当试样中出现负的孔隙压力时, 才能保证试样不吸水。

英国剑桥大学利用图 5(c) 所示的刚性式单剪仪进行研究。试样为方形, 剪切时在剪力方向的侧板可以转动, 但互相平行, 保持试样的长度不变。用这种方法使试样的剪应变均匀, 而且不发生侧向膨胀。但是剑桥型单剪仪构造比前 2 种复杂, 试样封闭也困难, 不宜用于常规试验, 处于研究应用中^[7]。

K. H. Roscoe^[8], J. M. Duncan 和 P. Dunlop^[9]分别假定试样为弹性体和弹塑性体, 分析了剑桥型单剪仪中试样的应力状态, 发现试样中间部分的应力比较均匀, 但两侧的应力却很很不均匀。但是, 如果假定软土试样中的应力是均匀的, 则单剪仪给出的应力 - 应变关系和抗剪强度还是能代表一些实际情况的。K. H. Roscoe^[8]指出, 单剪仪剪切中的应力不均匀是由于试样垂直面缺少应力补偿, 而剑桥型单剪仪的优点就在于侧面板可以提供应力补偿, 比其他几种仪器高级, 然而这也造成了试样应力复杂。他认为, 试样顶面核心处的应力分布较均匀(如图 6

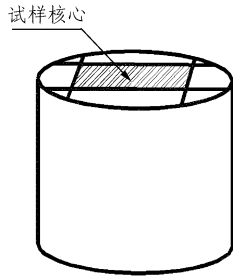


图 6 挪威岩土研究所试样
Fig.6 Norwegian Geotechnical Institute sample

所示)。随后，许多学者对单剪仪中的应力状态做了试验和数值研究，所有成果认为，试样中的应力状态分布不均匀(其实，直剪、三轴试验中都有应力分布不均匀现象)，测试结果比较吻合 K. H. Roscoe^[8] 的弹性解。

D. W. Airey 和 D. M. wood^[2]总结了前人的单剪仪研究成果发现，塑性黏土试样中的应力分布较砂土中的应力分布均匀得多，利用该试样测出的结果较可信。单剪中的应力状态不能完全确定，只能测出水平面上的正应力和剪应力，计算不出整个应力状态来，阻碍了单剪试验结果和莫尔圆联系起来。

通常，直剪试验和单剪试验测试结果不同。为此，M. C. Matthews^[10]提出了许多有意义的结果。用直剪和单剪(NGI)在排水和不排水情况下测试重塑 Cowden 土的强度参数，结果发现，对于达到破坏时的应力比(τ_{xy}/σ_y)，测量平均应力的单剪试验比直剪试验低 25%，比三轴试验低 28%。G. T. Dounias 和 D. M. Potts^[11]通过假设土体为各向同性的弹塑性体，在平面应变下通过数值模拟单剪和直剪试验，也得出类似的结果，但是试样测量核心处(见图 6)应力的结果较符合理想单剪试验，其应力比 - 变形曲线如图 7 所示。

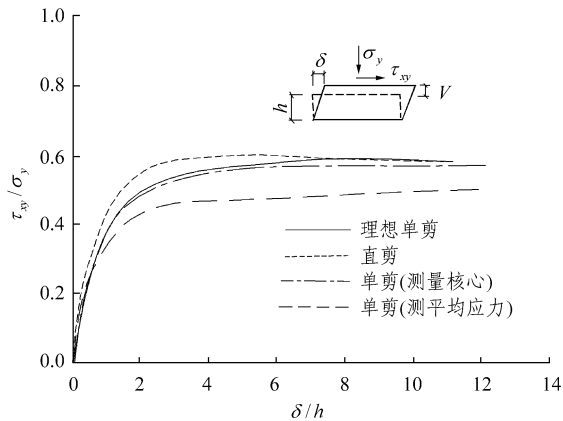


图 7 应力比 - 变形曲线^[11]
Fig.7 Stress ratio-deformation curves^[11]

国内较早应用单剪仪的研究者如范恩琨、钱征、陈宗基等人，早在 20 世纪 60 年代就已采用单剪仪对软黏土进行了流变试验研究。

总之，单剪试样比直剪仪试样剪应变较均匀，克服了直剪仪不能控制排水条件以及预先规定剪切面位置等缺点。单剪仪可以测排水或不排水条件下的强度与剪切模量。应力条件较直剪好，而且试样高度小，比三轴、直剪试样易于固结。但是，在和莫尔圆联系上还需要进一步的工作，虽然目前已有许多改良型的单剪仪和一些研究成果^[1, 9, 10]

4 试验仪器

本试验采用应力控制式单剪仪，该仪器主要由水平剪力系统、垂直加力系统、测量系统、剪切盒 4 部分组成，如图 8 所示。剪切盒由 16 个 6 mm 厚的叠环、1 个 12 mm 的叠环、加压盖板和底座组成，如图 9 所示。12 mm 厚的叠环放在试样中部(上下对称，均匀变形)，水平剪力通过钢丝绳作用在该叠环上，该叠环带动整个试样变形。击实完试样后，放上加压盖板，盖板和底座形状一样，都有突出的齿，齿嵌入土样内，能更好地约束试样。然后加上钢珠，垂直压力通过支架、钢珠和盖板施加到试样上，保证垂直压力均匀。

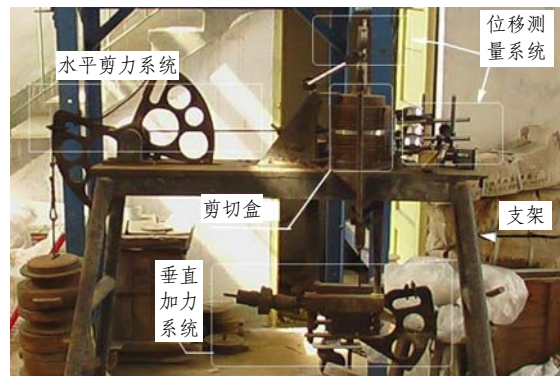


图 8 应力控制式单剪仪
Fig.8 Simple shear device controlled by stress

测量系统由 5 个百分表组成。试样制备完成后，百分表由磁性表座固定在合适的位置测量水平位移和垂直位移，如图 9 所示。直剪仪采用常规直剪仪，改装成应力控制式，以便和单剪仪对比。

5 试验土料

试验土料取自重庆市巫山污水处理厂高填方

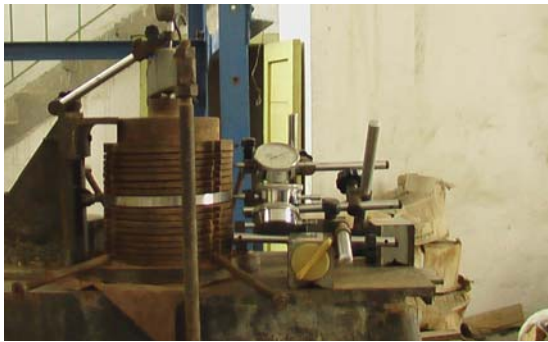


图 9 变形测量装置

Fig.9 Deformation gauge device

料场(巴二料场), 土料为红黏土。土料经晒干, 用木槌击成细小颗粒, 洒水壶均匀洒水, 人工搅拌, 配置到最优含水量 12%, 然后用塑料膜密封, 静置 3 d。

试验试样模拟填方体土样, 填方体碾压后的压实度为 95%, 强夯后为 98%。试验试样保证压实系数 $\lambda > 95\%$ 。巴二土最大干密度为 $\rho_{dmax} = 1.95 \text{ g/cm}^3$, 压实系数 $\lambda = \rho_d / \rho_{dmax}$, 则 $\rho_d = 0.95\rho_{dmax}$, 压实土的密度为 $\rho = \rho_d(1 + 0.01w)$ 。

取 w 为最优含水量 12%, 得 $\rho = 2.072 \text{ g/cm}^3$, 单剪仪剪切盒体积 $1\ 742 \text{ cm}^3$, 算得每个试样需土 3.61 kg。每次称量 3.61 kg 的土, 分层放入剪切盒内, 每层 30~50 mm, 每层 56 击, 层与层之间刨毛, 同时保证所有称量的土体最后都放入剪切盒, 以保证压实度达到 95%。试样制备好以后, 直径为 128.6 mm, 高 134 mm。

6 剪切过程

剪切过程为快速剪切, 不考虑排水问题。分级加荷, 至少 10 级, 每级水平剪力按 $0.1P$ (P 为垂直压力) 施加。开始时加载步可以大些, 待到剪应变增量明显时, 可以逐渐减小, 按 $0.05P$ 加载, 临界破坏时减至最小。快剪主要是求剪切时不排水条件下的抗剪强度。因此水平剪力施加要快, 使其在较短的时间内减损, 但减速过快时, 可能产生较大的塑性阻力及其他影响, 常规试样要求试样在 3~5 min 内剪损。本试验的试样尺寸较一般常规试验尺寸大得多, 变形也大(最大变形达 8 mm)。在刚开始的 6, 7 级加荷中, 变形较小, 但是随后的加载中, 有最长达 8 min 时试样才破坏。如果按照 3~5 min 内加载, 则可能造成测得较小的剪切位移和较大的剪

切力。临近破坏时, 试样的变形大, 且变形持续时间长, 在 100 和 200 kPa 下试样往往被拉断。但在 300 和 400 kPa 时, 试样不会被拉断, 只是变形很大, 出现开裂。直剪试验限于剪切盒尺寸, 采用环刀内静压密实, 然后推入剪力盒中。直剪试验按照《土工试验规范》(SL237 - 1999)操作, 加载过程同上。

7 试验结果分析

本文共进行了 2 组单剪试验和 3 组直剪试验, 结果见表 1, 2。通过对比发现: 黏聚力单剪比直剪低 20.3%, 内摩擦角相差 5° 左右。

表 1 不固结不排水试验所得剪应力结果

垂直压力	kPa				
	单剪试验		直剪试验		
	剪应力(I)	剪应力(II)	剪应力(I)	剪应力(II)	剪应力(III)
100	170	160	230	230	240
200	280	260	300	290	300
300	300	280	390	380	360
400	350	340	450	450	440

表 2 不固结不排水试验所得抗剪强度参数

试验类型	组别	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
单剪试验	I	135	31.38
	II	120	29.25
直剪试验	I	155	36.87
	II	150	36.89
	III	170	33.42

对于该差异分析如下:

(1) 试样中难免存在一些人为误差及仪器的误差。

(2) 试验尺寸效应。本试样单剪试样直径和高度远大于直剪试验, 但是 M. Vucetic 和 S. Lacasse^[12]通过对不同尺寸的单剪试样的对比发现, 确实存在尺寸效应, 但是影响不是很大。

(3) 正如前文所述, 单剪试验中, 测量核心处应力的结果较吻合理想单剪状态, 而测得整个试样面的平均应力和理想单剪相差比较大, 与直剪相差

25%，比三轴试验低 28%。而由于试验所限，本文只能测量这个试样面的平均应力，当然和直剪试验结果差的比较远。这也是主要差距。

(4) 由于是模拟填方体土样，由于单剪和直剪的剪力盒所限，试样制备方法不一样，单剪试样采用标准击锤击实，直剪试样采用静压。不同制备方法压实土的结构不一样，结构性差异导致强度发展和最终强度特性也是不同的。

(5) 本文试验压实土在剪切时会剪胀，而在直剪试验中，由于剪切盒内壁的限制，剪胀会影响结果，根据 Taylor 的剪胀原理会提供过大的剪切强度参数。而本文单剪试验允许试样发生侧向膨胀，减小部分剪胀的影响，测得的结果比直剪低，比较接近真实土体破坏。

8 结论与展望

本文调研了国内外单剪试验仪器，总结了单剪和直剪试验的优缺点，并组织了单剪和直剪试验，进行了结果对比，发现不排水下黏聚力单剪比直剪低 20.3%，内摩擦角低 5°，同时结合国内外的研究成果，分析本文试验的差异所在。本文试验仅仅是测量的不固结不排水指标，即快剪，考虑应用于填方体竣工稳定验算，要想应用于土力学理论发展和实践中，还需要有更好的试验设备、大量的试验和对试样合理的应力分析。

参考文献(References):

[1] Frydman S, Talesnick M. Simple shear of isotropic elasto-plastic soil[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1991, 15(4): 251 - 270.

[2] Airey D W, Wood D M. Evaluation of direct simple shear tests on clay[J]. Geotechnique, 1987, 37: 25 - 35.

[3] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 中国水利水电出版社,

1981.(Huang Wenxi. Soil Engineering Property[M]. Beijing: China Water Power Press, 1981.(in Chinese))

[4] 三木五三郎. 日本土工试验法[M]. 陈世杰译. 北京: 中国铁道出版社, 1985.(Shinichirou M. Soil Test Method in Japan[M]. Translated by Chen Shijie. Beijing: China Railway Publishing House, 1985.(in Chinese))

[5] 窦宜, 盛树馨, 马梅英. 土工实验室测定技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.(Dou Yi, Sheng Shuxin, Ma Meiyang. Measurement Technique in Soil Laboratory[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987.(in Chinese))

[6] 刘斯宏, 徐永福. 粒状体直剪试验的数值模拟与微观考察[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 288 - 292.(Liu Sihong, Xu Yongfu. Numerical simulation for a direct box shear test on granular material and microscopic consideration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(3): 288 - 292.(in Chinese))

[7] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.(Group of Teachers Interested in Soil Mechanics, Huadong College of Water Conservancy. Soil Mechanics Theory and Calculation[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984.(in Chinese))

[8] Roscoe K H. An apparatus for application of simple shear to soil samples[A]. In: Proc. the 3rd Int. Conf. Soil Mech. Foun. Eng.[C]. [s.l.]: [s.n.], 1953. 186 - 191.

[9] Duncan J M, Dunlop P. Behavior of soils in simple shear tests[A]. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation[C]. Mexico: [s. n.], 1969. 101 - 109.

[10] Matthews M C. Engineering application of direct and simple shear testing[J]. Ground Engineering, 1988, 21(2): 13 - 21.

[11] Dounias G T, Potts D M. Numerical analysis of drained direct and simple shear tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(12): 1 870 - 1 891.

[12] Vucetic M, Lacasse S. Specimen size effect in simple shear test[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(12): 1 567 - 1 585.

[13] Saada A S, Townsend F C. State of the art: laboratory strength testing of soils[J]. ASTM Spec. Tech. Publ., 1981, 740: 7 - 77.