

文章编号: 1673-9469(2019)03-0062-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.012

端部约束对三轴排水剪试验影响的数值分析

刘思远^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对三轴排水剪试验的端部约束问题, 利用有限元软件 ABAQUS 模拟三轴排水剪试验, 研究在不同的围压下, 不同的端部约束条件对三轴排水剪试验软土剪切特性的影响。结果表明, 端部完全光滑时, 试样的整体应力应变关系能很好地代表材料本构模型; 端部约束的存在导致了试样内部应力应变分布不均匀, 约束程度越大, 不均匀性越明显; 小应变条件下, 端部约束对于试样整体应力应变关系的影响并不大, 而大应变条件下, 端部约束的影响则不可忽视, 约束程度不同影响程度一致。

关键词: 端部约束; 三轴试验; 有限元; 修正剑桥模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Numerical Analysis of the Effects of the End Restraint on the Drained Triaxial Test

LIU Siyuan^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the end restraint in the drained triaxial test, the program ABAQUS is used to simulate the drained triaxial test to study the effects of different end restraints on the behavior of soft soil under different confining pressures. The results show that without the end restraint, the stress-strain behavior of the specimen can well represent the constitutive model of soil. The end restraints lead to the non-uniformity of stress and strain in the specimen, and the greater the degree of end restraint is, the more obvious the inhomogeneity becomes. The effects of end constraint on the behavior of specimen is not great when the strain is small, but the effects under large strain condition can not be ignored, and the effects of different degrees of end restraint are the same.

Key words: end restraint; triaxial test; finite element; the modified Cam clay model

理想的三轴试验假定试样在变形过程中内部应力均匀, 但实际情况试样内部的应力应变往往是不均匀的^[1]。常规三轴试验更多反映的是试样的受力变形性质而非真正的材料性质^[2]。三轴排水剪试验中造成试样应力应变不均匀的原因有很多, 比如端部约束、不完全排水、橡皮膜约束和自重等等^[3-9]。但以往的研究对不同的端部约束对于三轴排水剪试验软土的剪切特性的影响并未涉及, 而且实际试验

过程中端部约束是不可能完全消除的, 且约束程度难以控制, 通过试验研究的方式并不可行。

针对存在的问题, 本文利用 ABAQUS 有限元分析软件, 通过数值模拟的方法模拟不同的端部约束条件, 从宏观和微观的角度研究在不同的围压下, 不同的端部约束条件对三轴排水剪试验软土剪切特性的影响。

收稿日期: 2019-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578213)

作者简介: 刘思远 (1995-), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为地基基础工程。

1 有限元计算模型

1.1 软土本构模型及模型参数

本模型试样为软土，软土本构模型采用修正剑桥模型。ABAQUS 中的临界状态塑性模型是修正剑桥模型的推广^[10-11]。试样选用文献 [12] 中的福建莆田地区的软黏土，本构模型参数见表 1。

表 1 修正剑桥模型参数^[12]
Tab.1 Cam-clay model parameters^[12]

参数	值	参数	值
λ	0.129 7	$k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5×10^{-9}
κ	0.032 2	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.4
M	1.344	β	1
ν	0.3	Γ	1.878

1.2 模型形式尺寸与网格划分

考虑三轴试验土样为轴对称的圆柱形试样及加载方式的轴对称性，所以对试样进行轴对称建模分析。Lee^[5] 总结得出三轴试验长径比 $l/d = 1.5 \sim 3.0$ ，得出的结果是可靠的，结合标准三轴试验的土样尺寸，取模型试样高 $H = 80 \text{ mm}$ ，直径 $d = 40 \text{ mm}$ ，高径比 $H/d = 2$ ，符合要求。

ABAQUS 中处理固结问题采用了流固耦合分析，有限元单元具有孔压自由度，因此将模型划分成 100 个 8 节点轴对称四边形孔压单元 (CAX8RP)。单元尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ，为了控制最小时间步长的大小，防止孔压的异常波动，以及非线性计算中的收敛困难，不宜将单元尺寸划分的过大，并且通过敏感性分析确定该单元尺寸是合理的。具体数值计算模型见图 1。

1.3 边界条件及加载状况

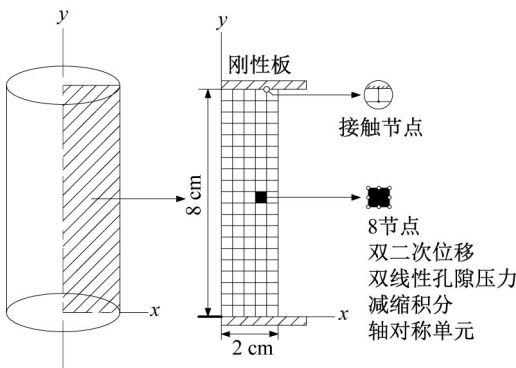


图 1 数值模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of numerical model

为了研究不同端部约束条件对三轴排水剪试验软土的剪切特性的影响，将与试样端部接触的试样帽及底座视为刚性板，试样视为变形体。在刚性板的表面与变形体的表面之间引进特殊的接触单元，刚性板表面与变形体表面的单元节点之间允许有限的滑动，正应力可以无限大。具体形式见图 1。

为了模拟不同的端部约束条件，试样与试样帽和底座之间设置三种接触方式：

- (1) 完全光滑接触 (SC)，即试样与试样帽和底座之间是完全光滑的接触，摩擦系数 $\mu = 0$ ；
- (2) 摩擦接触 (FC)，即试样与试样帽和底座之间的滑动接触满足库伦定律，摩擦系数 $\mu = 0.5$ ；
- (3) 完全粗糙接触 (RC)，即试样与试样帽和底座之间不允许滑动，摩擦系数 μ 趋向无穷大。

模型试样对称轴不允许水平位移 δ_x ，允许竖向位移 δ_y ；试样帽不允许水平位移 δ_x ，允许竖向位移 δ_y ；底座水平位移 δ_x 和竖向位移 δ_y 均不允许，视为固定端；土样上表面设为透水边界，单面透水。具体形式见图 2。

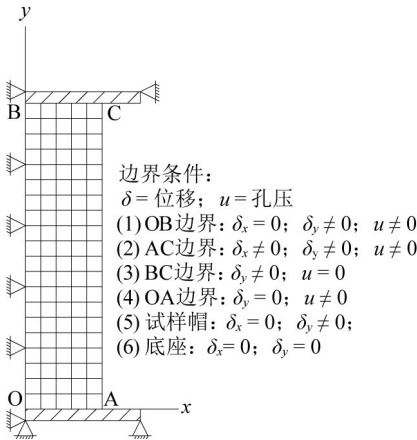


图 2 模型边界条件
Fig.2 Boundary conditions of the model

参照三轴试验过程，在模型土样上表面和侧表面施加 100、200、400 kPa 的均布荷载模拟围压，Geostatic 分析步中实现地应力平衡，省略固结分析步，然后在模型试样帽顶面施加位移荷载模拟剪切 shear 分析步，位移荷载为线性施加，达到 $\epsilon_a = 50\%$ 时完成模拟过程，选择如此大的应变目的是为了观察土样达到极限状态时的剪切特性。

最后确定剪切 shear 分析步时间总长为 100 d，初始时间增量步为 8 640 s，位移加载速率为 $4.63 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。

1.4 应力应变测量方法

针对端部约束引起的三轴试样的不均匀性, Sheng 在文献 [3] 中提到了几种整体应力应变测量方法: AGSM、EGSM、RGSM。其中 EGSM 方法为一般试验中常用的方法, 即等效应力应变测量方法, 将非均匀的变形体通过体积相等等效为圆柱体计算应力应变的方法。

2 计算模型验证

文献 [13] 中基于修正剑桥模型理论, 给出了单一土单元在三轴排水剪对应的应力路径下的 q - ε_a 关系的数值计算方法。该方法计算过程如下:

(1) 已知有效应力路径 $dq = 3dp'$, 基于修正剑桥模型计算得到破坏时偏应力 q_f , 平均有效应力 p'_f , 见式 (1)~(2)。

$$q_f = \frac{3Mp'_0}{3-M} \quad (1)$$

$$p'_f = \frac{3p'_0}{3-M} \quad (2)$$

式中 p'_0 为初始平均有效固结应力, M 为临界状态线斜率。

(2) 将应力路径平均分成 n 段, 计算每一段的应力比 $\eta_i = q_i / p'_i$, 并计算应力比增量 $d\eta_i = \eta_{i+1} - \eta_i$, $0 \leq i \leq n-1$;

(3) 由式 (3)~(4) 计算体积应变增量 $d\varepsilon_v$ 、剪应变增量 $d\varepsilon_s$, 并累加得到体积应变 ε_v 、剪应变 ε_s 。

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e} \left[\frac{dp'}{p'} + \left(1 - \frac{k}{\lambda}\right) \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right] \quad (3)$$

$$d\varepsilon_s = \frac{\lambda - k}{1+e} \left(\frac{dp'}{p'} + \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2} \right) \left(\frac{2\eta}{M^2 - \eta^2} \right) \quad (4)$$

(4) 计算轴向应变 $\varepsilon_a = \varepsilon_v / 3 + \varepsilon_s$, 得出 q - ε_a 关系。

为了验证计算模型的合理性, 通过 ABAQUS 模拟三轴排水剪试验, 围压设置为 200、300、400 kPa, 轴向应变设置为 $\varepsilon_a = 40\%$, 端部约束设置为完全光滑接触, 得到模型试样整体的 q - ε_a 关系, 与上述数值计算方法得出的土单元的 q - ε_a 关系进行对比, 如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 200、300、400 kPa 三个围压下试样整体的 q - ε_a 关系曲线, 与土单元的 q - ε_a 关系曲线有较好的一致性。尽管前期偏应力的发展的最大偏差为 10%, 但可认为结果可信。一方面, 我们可以得出在端部约束为完全光滑接触条件下,

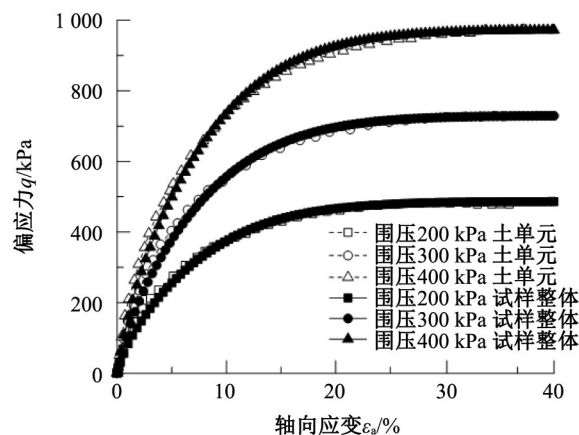


图 3 土单元与整体试样 q - ε_a 曲线

Fig.3 q - ε_a curves of soil element and sample

模型试样的整体应力应变可以很好地代表材料本构模型; 另一方面, 修正剑桥模型理论计算方法假定弹性剪切应变增量 $d\varepsilon_s^e = 0$, 而 ABAQUS 进行数值计算是考虑到弹性剪切应变增量的, 即 $d\varepsilon_s^e \neq 0$, 由此可以看出是否考虑弹性剪切应变 $d\varepsilon_s^e$ 对最后结果的影响并不是很大, 验证了理论计算方法简化假设的合理性。

3 模拟结果分析

3.1 围压 100 kPa 下端部约束对试样局部剪切特性的影响

在 100 kPa 的围压下, SC、FC、RC 三种约束条件下模拟三轴排水剪切试验, 剪切完成时模型试样剪应力的等值线图如图 4 所示。可以看出, 由于端部约束的存在导致了模型土样剪应力 τ_{xy} 的分布不均匀, 剪应力分布的不均匀性从土样端部开始发展, 集中在边界处, 径向和轴向均表现出不均匀性, 由于模型及受力的对称性, 剪应力的分布关于试样中心截面对称, 中心截面上剪应力为 0。在端部约束为摩擦接触 (FC) 和完全粗糙接触 (RC) 条件下, 最大剪应力的位置关于中心截面对称, 最大剪应力的数值 RC 条件下完全相等, FC 条件下有 2% 的误差, 可认为在误差范围内, 近似相等。相同围压下约束的程度越大, 剪应力分布不均匀性越明显, 最大剪应力也越大。

3.2 不同围压下端部约束对试样整体剪切特性的影响

分别在 100、200、400 kPa 的围压下, SC、FC、RC 三种约束条件下模拟三轴排水剪切试验,

剪切至 $\varepsilon_a=50\%$ 时结束。

用上述提到的整体试样的应力应变测量方法进行计算, 得到 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线、 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 关系曲线如图 5、图 6 所示。

从图 5 可以看出, 在相同围压、不同端部约束条件下, 试样的 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线在 $\varepsilon_a<10\%$ 的小应变条件下基本吻合。随着轴向应变的增大, FC 和 RC 条件下的 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线依旧吻合, 但 FC 和 RC 条件下的偏应力 q 的增长速度超过了 SC 条件下 q 的增长速度, 最大偏应力 q 相差约 3%。另外在剪切后期, 轴向应变 $\varepsilon_a>40\%$ 时, FC 和 RC 条件下试样会出现应变软化的现象。在不同的围压下均呈现相同的规律。

从图 6 可以看出, 试样的 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 关系曲线与试样的 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线所呈现的规律一致。端部约束存在导致了更大的体积应变, 意味着试样的固结程度更大, 试样的偏应力 q 也随之越大; 在轴向应变

$\varepsilon_a>40\%$ 时, FC 和 RC 条件下试样的应变软化的现象与图中的剪胀性现象相一致。端部约束的程度对于结果并无影响。在不同的围压下均呈现相同的规律。

上述模拟结果表明, 小应变条件下的试验研究, 端部约束对于试样整体应力应变关系的影响并不大。但是大应变条件下的试验研究, 端部约束的影响则不可忽视, 而不同的约束程度影响一致。

4 结论

1) 端部约束为完全光滑条件下, 常规三轴排水试验土样的整体应力应变关系可以很好地代表材料本构模型。

2) 端部约束的存在导致了试样内部应力应变分布不均匀, 约束程度越大, 不均匀性越明显。

3) 小应变条件下的试验研究, 端部约束对于试

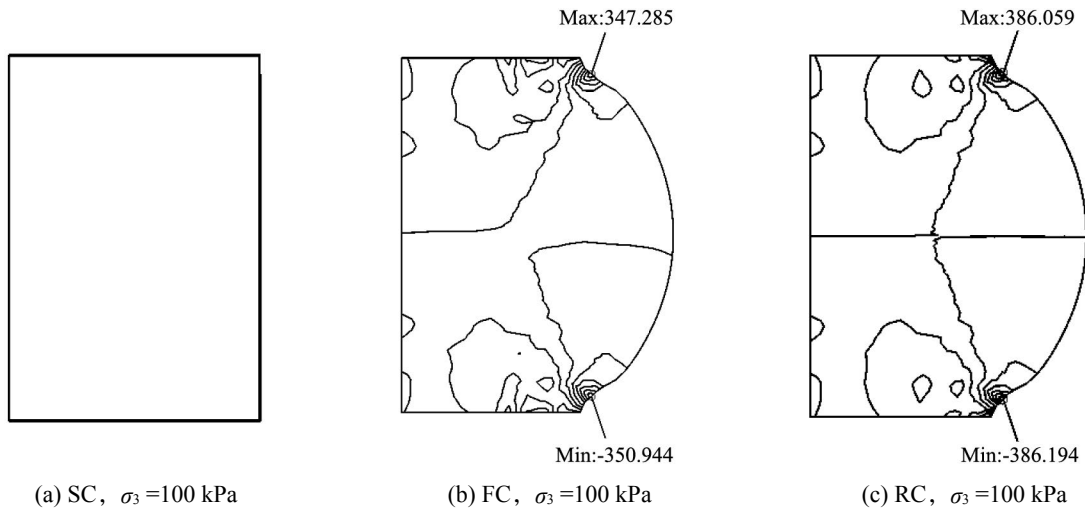


图 4 模型试样局部剪应力 τ_{xy} 等值线图 (单位: kPa)

Fig.4 Isoline diagram of local shear stress τ_{xy} of sample

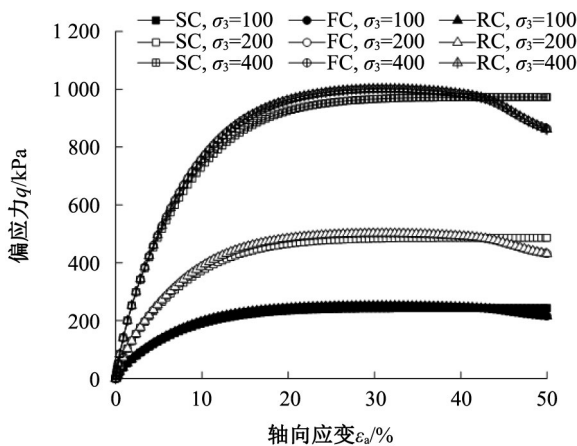


图 5 试样整体 $q-\varepsilon_a$ 关系曲线图

Fig.5 $q-\varepsilon_a$ curves of sample

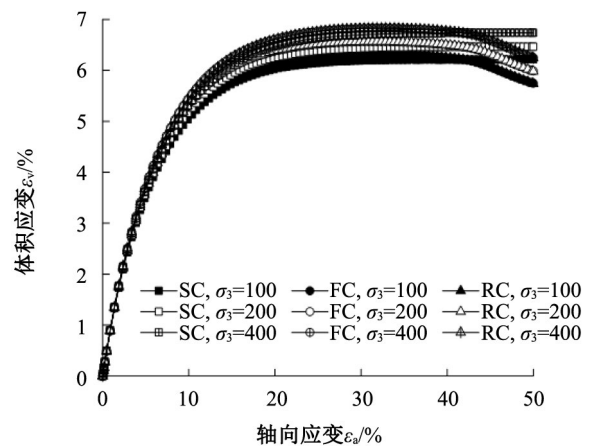


图 6 试样整体 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ 关系曲线图

Fig.6 $\varepsilon_v-\varepsilon_a$ curves of sample

样整体应力应变关系的影响并不大,但是大应变条件下的试验研究,端部约束的影响则不可忽视,而不同的约束程度影响一致。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MURARO S, JOMMI C. Implication of end restraint in triaxial tests on the derivation of the stress-dilatancy rule for soils having high compressibility[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2018, 56(6): 840-851.
- [3] SHENG D, WESTERBERG B, MATTSSON H, et al. Effects of end restraint and strain rate in triaxial tests[J]. Computers & Geotechnics, 1997, 21(3): 163-182.
- [4] BISHOP A W, GREEN E G. The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil[J]. Géotechnique, 1965, 15(3): 243-266.
- [5] LEE. End restraint effects on undrained static triaxial strength of sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering Divisions, ASCE, 1978, 104: 687-703.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ROWE P W. The stress dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proc Royal Society, 1962(269): 500-527.
- [9] BLIGHT G E. Shear stress pore pressures in triaxial testing[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, ASCE, 1965, 91(SM6): 25-39.
- [10] 费康. ABAQUS 在岩土工程中应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [11] VERMEER P A, VERRUIJT A. An accuracy condition for consolidation by finite elements[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 5(1): 1-14.
- [12] DAI Z H, QIN Z Z. Numerical and theoretical verification of modified cam-clay model and discussion on its problems[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(11): 3305-3313.
- [13] HELWANY S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications[M]. John Wiley & Sons, 2007.

(责任编辑 李新)