文章编号:1673-9469(2022)03-0043-06

DOI:10. 3969/j. issn. 1673-9469. 2022. 03. 007

三轴试样端部约束影响有限元分析

蒯青青¹,高 峰^{1*},褚福永²,孙鹏飞³,朱俊高¹

(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. 丽水学院 工程与设计学院,浙江 丽水 323000;3. 融创房地产集团有限公司,江苏 南京 210019)

摘要: 对某压实黏土和软土分别开展两种端部约束条件下的中三轴三维有限元模拟,对应端部 约束条件分别为完全限制端部径向位移和径向自由(端部无约束,无摩擦力)。对比分析两种端 部约束条件下试样强度和应力应变结果,定量研究了试样端部约束对两种土料强度和应力应变 特性的影响。结果表明,端部约束对土体强度有一定提高,但不会改变轴向偏应力和轴向应变关 系曲线的整体趋势;随着围压的增大,端部约束对强度和应力应变的影响有所降低,但降低幅度 有限;三轴试验中,和试样端部径向自由相比,端部因摩擦力引起的约束会显著增大试样的体积 应变,而且土体的软硬程度对试样的体变影响较大。对压实黏土,端部约束试样剪切破坏时平均 体变 *e*_a 比径向自由增大 17.2%;对软土该值的影响也达到了 5.2%。

关键词: 三轴试验;端部约束;强度;变形特性;有限元 中图分类号:TU41 文献标识码:A

Finite Element Analysis of the Effect of End Restraint on Triaxial Specimen

KUAI Qingqing¹, GAO Feng^{1*}, CHU Fuyong², SUN Pengfei³, ZHU Jungao¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. School of Civil Engineering, Lishui University, Lishui, Zhejiang 323000, China;3. Sunac China Real Estate Development Group Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Three-dimensional finite element simulations of medium triaxial consolidation and drainage shear tests were carried out for a compacted clay and a soft soil under two end restraint conditions, corresponding to fully restricted end radial displacement and radial unconstrained (no end restraint and no friction), respectively. The strength and stress-strain results of specimens under different conditions were compared and analyzed to quantify the effects of end restraint conditions on the strength and stress-strain properties of the two soil materials. The results showed that the end restraint increased the strength of the soil but did not change the overall trend of the relationship curve between the axial deviatoric stress and axial strain, and that the effects of end restraints on the strength and stress-strain show a limited decrease with the increase of the surrounding pressure. In the triaxial test, compared with the radial unconstrained condition, the restraint caused by friction at the end of the specimen significantly increased the volume strain and the degree of softness of the soil had a larger influence on the bulk strain of the test. The average volume strain ε_v at the shear failure of end confined specimens increased by 17.2% for compacted clay soil and increased by 5.2% for soft soil compared to the radial unconstrained condition, respectively.

Key words: triaxial test; end restraint; strength; deformation characteristic; finite element

收稿日期:2022-02-27

基金项目:长江水科学研究联合基金重点支持项目(U2040221);国家自然科学基金雅砻江联合基金资助项目(U1865104)

作者简介: 蒯青青(1998-), 女, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事土体基本性质及本构关系方面的研究。

^{*} 通讯作者:高峰(1995-),男,江苏泰州人,博士研究生,从事土体基本性质及本构关系方面的研究。

三轴试验是研究土体强度和变形特性非常重 要且广泛使用的试验,该试验操作简单,且能反映 土体较复杂应力条件下的力学特性^[1]。然而,端 部约束效应是三轴试验真实存在且几乎无法避开 的问题^[2]。三轴试验本质上是单元体试验,理论 上应该满足试样内部各处应力应变条件相同。但 由于试样帽及试样底座的刚度远大于土体,导致 受荷过程中试样与试样帽(及底座)之间存在摩擦 力,从而一定程度上约束试样端部的变形,造成三 轴试样内部应力和应变不均匀,此即三轴试样端 部约束效应。由于端部约束效应,常规的三轴试 验得到的试验结果并不能反映土体真实强度和变 形特性[3],即试验结果必然存在误差[45]。国内外 学者提出了多种方法试图弱化甚至消除三轴试验 端部约束效应以获得更为准确的试验结果,如在 试样端部增加过渡性垫块^[6]、润滑试样帽^[7]等。 Rowe^[7]设计了一种新型的试样帽(底座),主要由 压力板、润滑剂和橡皮膜组成,因结构简单且能够 有效减小端部约束而被广泛使用。陆晓平[2]等通 过在三轴试样端部布置涂凡士林的乳胶膜来减轻 摩擦力,比较了减摩与不减摩情况下砾石料的应 力应变及强度性质。王君雄^[8]基于将试样与试样 帽间的滑动摩擦转变为滚动摩擦的减摩思路,设 计了一种新型的减摩板,开展了粗粒土的常规和 减摩三轴试验,分析了端部约束对粗粒土强度和 弹性模量的影响。上述这些试验尽管在一定程度 上减轻了端部摩擦力引起的约束效应,但无法完 全消除。王助贫^[9]采用数字图像测量技术,非接 触量测了三轴试样的变形,对比传统方法测量的 变形结果,定量研究了端部约束对变形的影响。 以有限单元法为代表的数值模拟也是研究三轴试 验端部约束效应的重要方法,其优点在于它可模 拟完全无端部约束效应的情况,这是试验手段无 法实现的。李云龙^[10]通过有限元法分析了端部约 束条件对三轴试样剪切过程应变区域的影响,认 为端部约束会导致试样不同区域产生不同的应 变,主要表现为中间区域大于两端。陈浩峰[11]利 用有限元法研究了端部约束条件对三轴试样孔压 和强度的影响,发现端部约束三轴试样加载过程 中孔压变化率大,强度高。刘思远[12] 曾对软土三 轴排水剪试验进行有限元模拟,但没有进行不同 状态下的土体试验比较,而且,对有无端部约束情 况的应力应变及强度特性的差异缺少定量的比较 分析,此法不能研究端部约束对强度性质的影响。

三轴试验可以通过一定方法减轻端部约束的 影响,但无法完全消除。数值模拟则能完全消除 端部约束,定量研究端部约束效应对三轴试样强 度和应力应变性质的影响。目前对端部约束效应 的定量研究有一些报道,但对不同状态下土体端 部约束效应的相关定量研究仍有待深入,为此,本 文针对某压实黏土和软土,进行完全限制端部径 向位移和径向自由两种情况下三轴固结排水剪试 验的有限元模拟,定量分析了端部约束条件对两 种不同软硬程度土料的强度及应力应变性质的影 响程度,可为常规三轴试验的力学参数修正提供 参考。

1 有限元模型与模拟方案

理想的三轴试样是轴对称的,考虑到计算效 率,选取标准中型三轴试样的 1/4 作为研究对象。 图 1 给出了三维有限元模型网格,试样高 200 mm, 半径 50.5 mm,共划分为 480 个 6 面体单元和 714 个结点,试样尺寸参考常规三轴试验的中型三轴 试样(*D*×*H*=101 mm×200 mm)。图 1 中,*T* 表示顶 面,*S* 表示扇形弧面,*BC*1 和 *BC*2 分别表示两个垂 直侧面,*B* 表示底面。

本文针对试样端部有约束效应和端部径向变 形自由的无端部约束情况分别进行模拟。两种情 况的试样约束为:(1)端部有约束时,完全限制端 部径向位移。底面 B 在 X、Y、Z 方向均约束,侧面 BC1 和 BC2 分别仅在 X 方向和 Y 方向约束,顶部 T 在 X、Y 方向约束;(2)端部径向自由(以下亦称 为无端部约束或径向自由),底部 B 仅在 Z 方向约 束,侧面 BC1 和 BC2 分别仅在 X 方向和 Y 方约束, 顶部 T 无任何约束。



Fig. 1 Three-dimensional finite element calculation grid

土体软硬不同,约束效应对应力应变性质影 响程度可能存在差异,为此,对两种土料进行有限



表1 邓肯-张模型参数



元模拟,分别是较硬的压实黏土和软土。计算模 拟中,土体本构模型采用实际工程中应用较广的 邓肯-张模型。两种土料的计算参数如表1所示, 其中,压实黏土的参数取值参考某土石坝工程的 接触黏土,软土的参数借用于文献[13],土质为上 海软土^[13]。

对压实黏土和软土分别对完全限制端部径 向位移的常规三轴排水剪试验(下文以"YS"表示)和径向自由(无端部约束)的常规三轴排水剪 试验(下文以"ZY"表示)进行计算模拟。加载过 程参照常规三轴剪切试验,围压取 100、200 及 400 kPa。

试样上的荷载分两步施加。首先,施加围压, 即在 S 面和 T 面上施加数值等于围压的面力;然 后,在 T 面分 15 级施加向下(向 Z 轴负方向)的位 移,每级荷载下分了 10 个时间步;每级荷载时间内 会产生 1%的轴向应变,即 2 mm 位移,最后一级荷 载时间完成后,试样轴向应变为 15%。

2 端部约束影响分析

2.1 强度特性的影响分析

图 2 给出了压实黏土和软土的轴向偏应力 (σ_1 - σ_3)和轴向应变 ε_a 的关系曲线。可以看出, 无论是压实黏土还是软土,在不同围压下,两种端 部约束条件模拟的(σ_1 - σ_3)- ε_a 关系曲线整体规 律类似,都呈现一直上升的趋势直至破坏,表现为 压硬性。进一步对比($\sigma_1 - \sigma_3$) - ε_a 关系曲线可以 发现,小应变下,两种端部约束条件的应力应变曲 线高度吻合,与陈春霖的砂土试验结果一致^[14]。 当轴向应变较大时,端部约束(YS)试样的曲线都 位于无端部约束(ZY)曲线的上方,同一轴向应变 ε_a 下,有端部约束的($\sigma_1 - \sigma_3$)总大于无端部约束。 说明受端部约束作用,土体强度有所提高,这与董 建军^[3]的试验结论相同。

表 2 列出了在不同围压时, 压实黏土和软土在 两种端部约束条件下, 剪切破坏的峰值(应变 15%)偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)_f及端部约束对强度造成的 相对误差(以" R_{σ} "表示), R_{σ} 为端部约束与径向自 由的峰值偏应力的差值与径向自由峰值偏应力的 比值。可以看出, 端部约束对峰值偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)_f有一定的贡献, 贡献幅度在 2%~6%, 不同围 压下压实黏土和软土 R_{σ} 的平均值分别为 5. 2% 和 2. 1%。

	表 2	2 模	拟的	$ 偏应力(\sigma$	1 <i>-0</i>	-3) _f	峰值	Ĺ
m 1	• •				``	•		

Tab. 2 Teak values of $(O_1 \ O_3)_f$ for simulation					
工約	约束类型 -	围压/kPa			
工件		100	200	400	
正应	YS(有约束)	404	576	875	
压头 私士	ZY(无约束)	381	547	839	
%H ⊥ -	$R_{\sigma}/\%$	6.0	5.3	4.3	
	YS(有约束)	243	424	770	
软土	ZY(无约束)	238	415	754	
	$R_{\sigma}/\%$	2.1	2.2	2.1	

从表 2 还可以看出,有约束与无约束试样 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f差值随着围压的增大而增大,但是, 对压实黏土,相对误差 R_σ 则随围压增大而减 小。由于这里 R_σ 实际上是描述试样因端部约 束而引起的试验结果的误差,因此,应以 R_σ 来 表述约束效应的强弱,而不应用绝对差值来表 示。因此,可以认为,对较硬的土,端部约束对 强度的影响随围压增大而减弱。对于软土, R_σ 几乎不受围压的影响,说明围压对软土端部约 束下强度的影响较小。

2.2 变形特性的影响分析

图 3(a)、(b)分别为压实黏土数值试样在端 部约束和径向自由下轴向应变 *ε*_a 为 15%的网格变 形图。可以看出,端部约束条件下,试样中间部位 有鼓胀,与实际三轴试验变形结果相似;径向自由 条件下,试样各处侧向应变相同,为理想三轴试验 的试样变形结果。





图 4 给出了压实黏土和软土的体积应变(简称体变) ε_a 和轴向应变 ε_a 的关系曲线。可以看出,试样在整个剪切过程中表现为剪缩,围压越大,剪缩变形也越大。在相同 ε_a 下,端部约束试样的体变 ε_a 总体上比径向自由试样大。相同围压下,端部约束试样的体变 ε_a 和轴向应变 ε_a 关系曲线在小应变下比径向自由试样的曲线略陡。随着轴向应变 ε_a 的增大,压实黏土和软土的体变 ε_a 受端部约束影响的程度增大,且压实黏土体变 ε_a 受端部约束的影响程度远高于软土。说明对于不同物理力学性质的土体,端部约束对体变的影响有显著差异。

为定量研究端部约束对压实黏土和软土体 变 ε, 的影响规律,表 3 列出了不同围压下,压实 黏土和软土剪切破坏时的体变 ε, 值及端部约束 对体变造成的相对误差(下文以"R,"表示),R, 表示为土体剪切破坏时,端部约束与径向自由体 变的差值与径向自由体变的比值。可以看出,端 部约束效应对试样体变影响较大,压实黏土围压 100 kPa 时,有约束试样的体变比无约束时增大 了 25%。笔者认为,这种影响已经到了不可忽略 的程度。

表 3 剪切破坏时的体变 ε_{y} 值 Tab. 3 Volume strain ε_{y} value at shear failure

上州	约束类型 -		围压/kPa	
工件		100	200	400
正应	YS(有约束)	0.75	1.43	2.48
压头 私 +	ZY(无约束)	0.60	1.23	2.25
\$\$A _T.	$R_v / \%$	25.00	16.30	10.20
	YS(有约束)	4.37	4.89	5.44
软土	ZY(无约束)	4.13	4.65	5.20
	$R_v / \%$	5.80	5.16	4.62



图 4 两种土料的 $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 关系曲线 4 Belation curves of $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ of two soil motor

Fig. 4 Relation curves of $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ of two soil materials

47

另外,对不同土质,约束效应的影响程度也是不同的。对于压实黏土,端部约束试样剪切破坏时(各单元)平均体变 *ε*。比径向自由增大 17.2%; 对软土该值为 5.2%。

2.3 试样内应力状态分析

三轴试验为单元体试验,理想三轴试样内各 点的应力状态是相同的,各点的大、小主应力值应 该相等。但是,实际三轴试验中,由于端部约束效 应,试样内各处应力分布是不均匀的,其不均匀程 度到底如何,还未见有相关研究,这里进行详细 分析。

图 5(a)、(b)分别给出了围压 400 kPa 情况 下,软土剪切破坏时,两种端部约束条件试样中轴 线位置和试样边缘处的大、小主应力沿着试样高 度方向分布。图 5(c)显示了该试样端部一层单元 内大、小主应力沿径向的分布。

由图 5 可以看出,径向自由(ZY,即无端部约 束)情况,无论是沿高度还是径向,应力分布均匀, 符合理想三轴试验的应力状态。图 5(a)显示,对 试样端部有约束情况(YS),小主应力 σ ,沿高度方 向呈现中间小,两端大的分布规律,端部约束效应 对小主应力影响明显。大主应力 σ_1 沿着试样高 度方向的分布也受到端部约束的显著影响,试样 1/2 高度处及端部 σ_1 值均较小,在 1/5 和 4/5 高 度处 σ_1 值最大,其值比无端部约束情况大 7%。 从图 5(b)可以看出,在试样边缘处,大小主应力沿 高度方向分布的均匀程度明显比试样中轴线处 好,仅仅在试样最端部的一层单元内应力稍大。 从图 5(c)可以看出,有端部约束情况下,试样端部 位置处小主应力沿径向分布表现为随着与中轴线 距离的增大而逐渐减小,而且其值都大于无端部 约束的情况,中轴线处最大,比无约束时大7.2%。

大主应力 σ₁ 沿径向分布也不均匀,其值在靠近试 样边缘位置处大于无端部约束的情况,靠近中轴 线的区域其值反而小于无端部约束的情况。

总之,端部约束会引发试样内部应力分布不 均匀,最终导致三轴试验结果与所期望的理想状 态出现偏差。压实黏土的大小主应力分布规律类 似,不再重复论述。

上节的分析表明,约束效应对试样体变影响 较大。为从力学机理上对其解释,整理了围压 400 kPa下,压实黏土和软土分别在端部约束和径 向自由条件下,试样轴向应变15%时的大主应力、 小主应力及平均正应力*p*,列于表4可以看出,无 论是压实黏土还是软土,端部约束试样的大、小主 应力及平均正应力均大于径向自由的情况。已有 三轴试验的经验表明,围压(小主应力)越大,对应 试验得到的试样体变也越大,而且,已有理论及经 验均表明,体积应变与*p*密切相关,因此,端部约束 试样体变必然大于无端部约束试样的体变。

表 4 围压 400 kPa 的试样应力状态($\varepsilon_a = 15\%$) Tab. 4 Stress state of specimen with confining

pressure of 400 kPa ($\varepsilon_a = 15\%$)					
土料	约束类型	σ_{1}	$\sigma_{_3}$	p	
压实	YS(有约束)	1.277	0.418	0.704	
黏土	ZY(无约束)	1.239	0.400	0.680	
故上	YS(有约束)	1.170	0.412	0.665	
扒上	ZY(无约束)	1.154	0.400	0.651	

3 结论

本文对某压实黏土和软土在完全限制端部径 向位移和径向自由(无端部约束)条件下,进行了常 规三轴试验的有限元模拟,定量研究了端部约束对 强度及应力应变特性的影响,主要结论如下:





Fig. 5 Relationship between major and minor principal stresses of soft soil along sample height and radial direction

1) 端部约束对土体强度有一定提高, 对峰值 偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 有一定的贡献, 两种土料的贡 献幅度均在 2%~6%之间, 但不会改变偏应力和 轴向应变关系曲线的整体趋势; 随着围压的增 大, 端部约束对强度的影响略有降低, 但降低幅 度有限。

2) 端部约束对体变影响显著, 压实黏土 100 kPa 时, 端部约束试样剪切破坏时的平均体变 ε_v 比无 端部约束试样增大了 25%; 随着围压增大, 这种影 响的程度减弱。

3) 对不同软硬程度的土料,端部约束对体变的影响程度差异较大;相比径向自由情况,压实黏 土剪切破坏时的平均体变 ε,增大 17.2%,软土增 大 5.2%;土体越硬,端部约束效应越明显。

4)端部约束会引发试样内部单元应力分布不 均匀,最终导致试样力学特性差异;端部约束引起 试样内部小主应力平均值显著增大是导致端部约 束对体变影响显著的重要原因。

参考文献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007:207-208.
- [2]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(S1):236-240.
- [3]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.

- [4]ZHANG H, GARGA V K. Quasi-Steady State: A Real Behavior? [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (5):749-761.
- [5] DUNCAN J M, DUNLOP P. The Significance of Cap and Base Restraint [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, 1968, 94(1):271-290.
- [6] BLIGHT G E. Shear Stress Pore Pressures in Triaxial Testing[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divison, 1965,91(6):25-39.
- [7] 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.
- [8]王君雄. 粗粒土三轴试验端部约束效应试验研究[D]. 武汉:长江科学院,2017.
- [9] 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(3): 363-368.
- [10]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.
- [11]陈浩锋.三轴试验端部约束与高径比影响试验研究及 有限元分析[D].南京:河海大学,2008.
- [12] 刘思远. 端部约束对三轴排水剪试验影响的数值分析 [J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2019,36(3):62-66.
- [13] 张 云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 上海第四纪土层邓肯-张 模型的参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(1): 19-22.
- [14] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题 [J]. 岩土工程学报, 2000(6):659-663.

(责任编辑 王利君)