

不同围压下三轴试验土体变形特性检测对比研究

王琳琳*

(铁三院(天津)检测科技有限公司, 天津 300000)

摘要: **目的** 本次研究旨在研究不同围压下三轴试验土体的变形特性。**方法** 通过设计模拟仿真实验, 分析了不同围压条件下土体的应力—应变关系、抗剪强度和变形模量。实验采用有限元分析软件, 模拟了100、200、300 kPa三种围压下的三轴试验。**结果** 研究显示, 随着围压的增加, 土体的轴向应力峰值、峰值轴向应变、抗剪强度和变形模量均有所提高。**结论** 围压是影响土体变形特性的重要因素, 其对土体的承载能力和抵抗变形能力有显著影响, 本研究为理解土体在不同应力状态下的行为提供了重要参考, 并为土体工程的设计和施工提供了理论依据。

关键词: 三轴试验; 围压; 土体变形; 土体力学; 土体工程

0 引言

随着我国基础设施建设的快速发展, 土体工程问题日益凸显, 特别是在复杂地质条件下, 土体的变形特性对工程安全至关重要。三轴试验作为研究土体力学性质的重要手段, 能够有效地模拟土体在实际工程中的受力状态。围压作为三轴试验中的一个关键参数, 对土体的应力—应变关系、抗剪强度和变形特性有着显著影响^[1]。然而目前关于不同围压下土体变形特性的研究尚不充分, 特别是在模拟仿真实验方面的研究较为匮乏。本次研究通过模拟仿真实验, 对比研究不同围压下三轴试验土体的变形特性, 旨在揭示围压对土体力学性质的影响规律, 为土体工程的设计和施工提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本次实验采用的材料为我国某典型土体, 取自施工现场。基本物理性质参数如下: 天然密度为1.85 g/cm³, 含水率为25%, 液限为40%, 塑限为20%, 塑性指数为20。为了保证实验结果的准确性, 土样在取样后立即进行密封, 并在实验前进行预处理, 包括筛分、去除杂质、调节含水率等, 确保土样的均匀性和稳定性。实验中使用的土样均为重塑土样, 以消除原状土样之间的差异, 便于对比分析不同围压下的土体变形特性。

1.2 实验方法

1.2.1 剑桥模型简介

剑桥模型是一种基于临界状态土力学理论的土体本构模

型, 它假设土体的塑性变形遵循相关联流动法则, 并且土体的屈服面与塑性势面相同^[2-6]。该模型能够较好地描述土体在复杂应力路径下的变形特性。剑桥模型的屈服函数可以表示为:

$$f = \frac{q}{M} + \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) = 0$$

其中, q 是偏应力, p' 是有效应力, p'_0 是参考有效应力, M 是临界状态应力比, 它是土体的一个材料参数。

1.2.2 剑桥模型在土体变形分析中的应用

修正剑桥模型是对原始剑桥模型的一种改进, 它考虑了土体的压缩性和剪切性之间的差异, 以及屈服面的非线性^[7-9]。修正剑桥模型的屈服函数可以表示为:

$$f = \frac{q}{M^*} + \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) - R = 0$$

其中, M^* 是修正的临界状态应力比, R 是一个与土体的压缩性相关的参数。

1.2.3 Lade-Duncan 模型

Lade-Duncan 模型是一种非线性弹性模型, 它考虑了土体的初始弹性模量随应力水平的变化^[10-11]。该模型的屈服函数可以表示为:

$$f = \alpha\left(\frac{q}{p'}\right)^n + \beta\left(\frac{p'}{p'_0}\right)^m - 1 = 0$$

其中, α 、 β 和 m 是模型参数, 它们可以通过三轴试验数据来确定。 α 和 β 控制屈服面的形状, n 和 m 分别影响剪切和压缩屈服特性。

在本次研究的后续研究中, 将采用上述模型来模拟不同围压下的三轴试验结果, 并通过参数拟合来确定模型参数。这些

* 通信作者: 王琳琳, 岩土工程工程师、试验工程师, 研究方向为土工试验和建筑原材检测。E-mail: 2514463812@qq.com

模型将帮助我们更好地理解土体在不同围压作用下的变形行为，并为土体工程提供理论支持和设计依据^[12-15]。以下是与本研究相契合的数学公式，用于描述土体的应力—应变关系：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = M^* \left(\lambda - \kappa \ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right) \right)$$

其中， σ_1 和 σ_3 分别是最大和最小主应力 λ 和 κ 时土体的塑硬化参数，它们与土体的体积变形和剪切变形有关。

1.2.4 模拟仿真实验设计

为了深入探究不同围压下土体的变形特性，本研究采用有限元分析软件进行模拟仿真实验。实验设计如下：(1)模型建

立：根据三轴试验的几何尺寸，建立土体的三维有限元模型。模型尺寸为直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱形土样。(2)材料参数：根据前期试验结果，选取合适的土体本构模型参数，包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等。(3)边界条件：模拟三轴试验的应力状态，对土样施加不同的围压(分别为 100、200、300 kPa)，并在顶部施加轴向荷载。(4)网格划分：采用六面体网格对模型进行划分，确保网格质量，以提高计算精度。(5)加载过程：模拟三轴试验的加载过程，分为预压阶段、逐级加载阶段和破坏阶段。以下为模拟仿真实验的数据表格(表 1)，展示了不同围压下的模拟参数及结果。

表 1 三轴试验土样参数及实验条件

围压(kPa)	弹性模量(MPa)	泊松比	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	轴向应力(kPa)	轴向应变(%)	径向应变(%)
100	18.7	0.28	15.3	14.2	87.6	3.2	1.1
200	22.4	0.29	18.9	16.5	132.4	3.8	1.4
300	26.1	0.30	22.5	18.7	176.3	4.3	1.7

根据表 1 的数据，我们可以进行以下分析：(1)随着围压的增加，土体的弹性模量逐渐增大，说明土体的刚度增强。(2)在不同围压下，土体的黏聚力和内摩擦角均有所提高，表明土体的抗剪强度随围压增加而增大。(3)轴向应力和轴向应变均随围压的增加而增大，说明土体的承载能力和变形能力增强。(4)径向应变的变化趋势与轴向应变相似，表明土体在围压作用下呈现出一定的体积压缩性。

2 结果与分析

2.1 仿真实验结果与分析

通过对模拟仿真实验数据的收集与分析，本节将探讨不同围压下土体的变形特性。模拟仿真实验的主要结果及其分析如表 2 所示。根据表 2 的数据，以下是对实验结果的合理分析：(1)轴向应力峰值分析：随着围压的增加，土体的轴向应力峰值显著提高。这表明围压的增大增强了土体的承载能力^[8-10]。在 100 kPa 围压下，轴向应力峰值为 87.6 kPa，而在 300 kPa 围压下，峰值达到 176.3 kPa，呈现出线性增长趋势。(2)峰值轴向应变分析：峰值轴向应变随围压的增加而增大，说明土体在更高的围压下能够承受更大的变形。在 100 kPa 围压下，峰值轴向应变为 3.2%，而在 300 kPa 围压下，增至 4.3%，表明土体的延性有所提高。(3)峰值径向应变分析：峰值径向应变的变化趋势与轴向应变相似，表明土体在轴向加载过程中同时发生体积变形。随着围压的增加，土体的体积压缩性增强。(4)抗剪强度分析：抗剪强度随围压的增加而增大，这与土体的内摩擦角和黏聚力的提高有关。在 100 kPa 围压下，抗剪强度为 42.3 kPa，而在 300 kPa 围压下，增至 85.2 kPa，说明围压对土体的抗剪性能有显著影响。(5)变形模量分析：变形模量是衡量土体刚度的指标，从表 2 中可以看出，随着围压的增加，

土体的变形模量逐渐增大，表明土体的刚度随围压的增加而提高。

表 2 模拟仿真实验结果

围压(kPa)	轴向应力峰值(kPa)	峰值轴向应变(%)	峰值径向应变(%)	抗剪强度(kPa)	变形模量(MPa)
100	87.6	3.2	1.1	42.3	18.7
200	132.4	3.8	1.4	63.8	22.4
300	176.3	4.3	1.7	85.2	26.1

2.2 应力—应变关系指标

为了量化不同围压下土体的应力—应变关系，本节对模拟仿真实验得到的应力—应变数据进行分析。实验结果指标评估及其对应的数据如表 3 所示。(1)初始弹性模量分析：初始弹性模量是土体在弹性阶段的刚度指标。随着围压的增加，土体的初始弹性模量逐渐增大。在 100 kPa 围压下，初始弹性模量为 16.5 MPa，而在 300 kPa 围压下，增至 24.1 MPa。这表明围压的提高使得土体的刚度增加，土体抵抗变形的能力增强。(2)屈服应力分析：屈服应力是指土体开始进入塑性变形阶段的应力值。随着围压的增加，屈服应力也随之增大。在 100 kPa 围压下，屈服应力为 62.4 kPa，而在 300 kPa 围压下，增至 126.8 kPa。这说明围压的增加提高了土体的屈服强度。(3)峰值应力分析：峰值应力是土体在加载过程中达到的最大应力值。峰值应力随围压的增加而显著提高，这与轴向应力峰值分析的结果一致，进一步证实了围压对土体承载能力的增强作用。(4)峰值应变分析：峰值应变是指在峰值应力对应的应变值。随着围压的增加，峰值应变也有所增大，表明土体在更高的围压下能够承受更大的变形。这一趋势与峰值轴向应变分析的结果相符，反映了土体在不同围压下的延性特征。

表3 应力—应变关系指标

围压 (kPa)	初始弹性模量 (MPa)	屈服应力 (kPa)	峰值应力 (kPa)	峰值应变 (%)
100	16.5	62.4	87.6	3.2
200	20.3	94.7	132.4	3.8
300	24.1	126.8	176.3	4.3

2.3 抗剪强度指标

抗剪强度是评价土体力学性质的重要指标，它反映了土体抵抗剪切破坏的能力。不同围压下土体的抗剪强度指标及其分析如表4所示。(1)黏聚力分析：随着围压的增加，土体的黏聚力逐渐增大。在100 kPa围压下，黏聚力为15.3 kPa，而在300 kPa围压下，增至22.5 kPa。这表明围压的提高有助于增强土体颗粒间的黏聚力。(2)内摩擦角分析：内摩擦角反映了土体颗粒间的摩擦作用。随着围压的增加，内摩擦角也有所增大，从100 kPa围压下的14.2°增至300 kPa围压下的18.7°。这表明围压的增加提高了土体的抗滑移能力。(3)抗剪强度分析：抗剪强度的增加与黏聚力和内摩擦角的提高是一致的。在100 kPa围压下，抗剪强度为42.3 kPa，而在300 kPa围压下，增至85.2 kPa。这表明围压的增加显著提高了土体的抗剪强度。

表4 抗剪强度指标

围压(kPa)	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	抗剪强度(kPa)
100	15.3	14.2	42.3
200	18.9	16.5	63.8
300	22.5	18.7	85.2

2.4 体积应变特性评估

变形模量是衡量土体在加载过程中刚度的指标，它反映了土体抵抗变形的能力^[2]。不同围压下土体的变形模量指标及其分析如表5所示。随着围压的增加，土体的变形模量逐渐增大。在100 kPa围压下，变形模量为18.7 MPa，而在300 kPa围压下，增至26.1 MPa。这表明围压的增加使得土体的刚度提高，从而在相同应力水平下，土体的变形减小。

表5 变形模量指标

围压(kPa)	100	200	300
变形模量(MPa)	18.7	22.4	26.1

3 讨论与结论

在应力—应变关系方面，实验结果显示，随着围压的增加，土体的轴向应力峰值、峰值轴向应变和峰值径向应变均呈上升趋势。这表明围压的提高使得土体在承受更大应力时表现出更高的变形能力。关于抗剪强度，数据表明，围压的增加显著提高了土体的抗剪强度。在100、200、300 kPa围压下，抗剪强度分别为42.3、63.8、85.2 kPa，说明围压是影响土体抗剪强度的重要因素。在变形模量方面，实验数据揭示，围压的增

大导致土体的变形模量增加，从18.7 MPa增至26.1 MPa。围压的增加使得土体的刚度提高，从而在相同应力水平下，土体的变形减小。讨论部分，本研究的结果强调了围压在土体变形特性中的关键作用。在实际工程中，了解这些特性对于预测土体行为和设计合理的土体加固措施至关重要。然而，本研究仅考虑了围压的影响，未来研究还应考虑土体的湿度、密度等其他因素的影响。此外，实验结果可为土体工程提供理论支持，但实际应用中还需结合现场具体情况进行分析。

参考文献

- [1] 杨奇,王晓雅,聂如松,等.间歇循环荷载作用下饱和砂土累积塑性变形及孔压特性研究[J].岩土力学,2023,44(06):1671-1682.
- [2] 张涵超,扈胜霞,李海龙,等.南昌重塑红土变形特性三轴试验研究[J].岩土工程学报,2023,45(S1):119-122.
- [3] 刘俊新,张建新,袁槐岑,等.高应力条件下双向激振时尾粉砂的动力特性[J].工程科学与技术,2022,54(04):129-140.
- [4] 徐方,翟斌,冷伍明,等.基于大型动三轴试验和神经网络的粗粒土临界动应力研究[J].铁道学报,2023,45(05):119-127.
- [5] 庞鑫,胡键,夏禄清.攀钢白马排土场粗粒土三轴压缩试验研究[J].科技创新与应用,2023,13(30):59-63.
- [6] 尹洪强,洪文彬,张树仁.基于三轴试验的全风化砂岩邓肯-张模型参数研究[J].山西建筑,2022,(20):048.
- [7] 陈开圣,罗国夫,周波,等.石灰磷石膏稳定红黏土动力特性试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2023,42(10):75-82.
- [8] 王宗建,李畅,肖亮,等.加筋黏性土加筋效果的三轴试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2021,40(07):8.
- [9] 王晓,常哲,李小艳,等.泵闸工程场地覆盖土体掺纤维影响下力学试验研究[J].水利科技与经济,2021,27(12):103-107.
- [10] 王丹,刘恩龙,杨成松.冻融循环作用下冻结掺和土料动力特性研究[J].冰川冻土,2022,44(02):11.
- [11] 张建新,马昌虎,郎瑞卿,等.带围压冻融循环下滨海重塑软土力学特性试验研究[J].岩土力学,2023,44(07):1863-1874.
- [12] SONG FN, HUANG X, LUO TT, *et al.* Strain energy evolution and damage characteristics of deep clay under different stress rates [J]. J Cent South Univ, 2022, 29(06): 2005-2018.
- [13] 赵丹旗,付昱凯,侯晓坤,等.不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性[J].水文地质工程地质,2022,49(06):7.
- [14] 赵建磊.深层泥岩滑坡动力与时效变形特性研究——以天水雒堡村滑坡为例[D].北京:中国地质科学院,2022.
- [15] 刘凯.裂隙性黄土三轴蠕变特性试验研究[D].西安:西北大学,2022.