

# 膨胀土膨胀性及强度特性分析

孙啸宇

沧州水利勘测规划设计院有限公司, 河北 沧州

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月17日; 发布日期: 2025年6月27日

## 摘要

本文所用土壤取自南水北调中线工程邓州段, 通过自由膨胀率试验得出所用的膨胀土为弱膨胀土, 其有荷膨胀率随时间的增长先快速增大后趋于稳定, 随荷载的增大不断减小; 在无侧限抗压试验中, 九种含水率下土体的应力应变曲线均为软化型, 其应力应变曲线可以分为弹性阶段 - 裂纹稳定扩展阶段 - 裂纹快速扩展阶段 - 和裂纹完全贯通阶段; 膨胀土的无侧限抗压强度随含水率的增大不断下降; 在直接剪切试验中以18%含水率为分界线, 含水率小于18%时应力应变曲线为软化型, 含水率大于18%时为硬化型, 抗剪强度随含水率增大先增大后减小, 粘聚力随含水率的变化规律也是随含水率的增大先增大后减小, 内摩擦角则是随含水率的增大不断减小。

## 关键词

膨胀土, 膨胀率, 强度

# Expansion and Strength Characterization of Expansive Soils

Xiaoyu Sun

Cangzhou Water Resources Survey, Planning and Design Institute Co. Ltd., Cangzhou Hebei

Received: May 25<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The soil used in this paper is taken from the Dengzhou section of the South-to-North Water Diversion Project, and the expansion soil used is a weakly expanding soil through the free expansion rate test, and its loaded expansion rate increases rapidly with time and then tends to stabilize, and then decreases with the increase of load; in the unconfined compression test, the stress-strain curves of the soil body under the nine water contents are all of the soft type, and the stress-strain curves can

be divided into elasticity stages Stable crack expansion stage-Rapid crack expansion stage—and complete crack penetration stage; The unconfined compressive strength of expansive soil decreases with the increase of water content; In the direct shear test, 18% water content is used as the dividing line, and the stress-strain curves are of softening type when the water content is less than 18%, and the stress-strain curves are of softening type when the water content is greater than 18%. In direct shear test, the stress-strain curve is softening type when the water content is less than 18%, and hardening type when the water content is more than 18%, the shear strength increases and then decreases with the increase of water content, the change rule of cohesion with the increase of water content also increases and then decreases, and the angle of internal friction is decreasing with the increase of water content.

## Keywords

Expansive Soil, Expansion Ratio, Strength

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

膨胀土是一种具有特殊性质的土体，它的膨胀性和强度随含水率会发生很大的变化，这些变化在实际工程中会带来很大的问题，给实际工程带来巨大困扰。对膨胀土的膨胀性和强度特性有一个具体的认识有助于避免带来财产损失。本文所用土体为典型的膨胀土，许多学者对膨胀土的膨胀性和强度特性进行了研究，吴广水等[1]通过恒体积法和核磁共振技术，揭示了宁明膨胀土的地域性力学特性；Tan B 等[2]对膨胀土的膨胀力进行了研究，研究了干密度、初始含水率和荷载对膨胀力的影响；李儒天等[3]进行了水泥改性膨胀土和粉煤灰水泥改性土的无侧限抗压试验，试验发现水泥和粉煤灰等物质均会明显提升膨胀土的无侧限抗压强度，且养护后的提升效果更为明显；陈圣甜等[4]研究了不同水泥掺量和不同养护周期下水泥土的无侧限抗压强度，研究发现水泥土的无侧限抗压强度与水泥掺量和养护周期呈正，王闯等[5]通过试验得出非饱和残积土的抗剪强度随含水率的增加，整体呈现出下降的趋势；孟庆云等[6]通过控制膨胀土的干密度和含水率对膨胀土进行不同竖向压力下的直接剪切试验，研究发现提高土体的干密度可以显著提高膨胀土的土体峰值强度；杨庆等[7]通过对大量的重塑膨胀土进行抗剪强度试验，得出黏聚力与内摩擦角随着土体含水量的增大而减小；张海明等[8]对不同含水率的重塑非饱和粉土进行大型直接剪切试验，得到重塑非饱和粉土的内摩擦角和黏聚力随着土体含水率的升高均呈现出先增大后减小的趋势；王晓燕[9]等通过对不同含水率的重塑膨胀土进行直接剪切试验发现随着含水率的增加抗剪强度会出现先增大后减小的趋势。詹良通等[10]使用非饱和土三轴仪进行了不同吸力下的三轴压缩试验，分析了吸力对非饱和膨胀土剪切强度的影响；侯雅东等[11]人研究了不同基质吸力下非饱和粉土的强度，结果表明随着基质吸力的增大，非饱和粉土的抗剪强度也在不断增大；王欢等[12]研究了不同吸力下粉煤灰的抗剪强度，研究发现粉煤灰的应力应变曲线类型与基质吸力密切相关；陈国强[13]等人提出了“微观结构表征 → 持水机制解析 → 理论模型关联”的研究路径，揭示了压实大理石废粉从孔隙分布到持水性能的内在规律，证明了微观孔隙结构是土水特征的本质驱动因素，而土水特征曲线是微观结构的宏观力学响应综合体现；丁小刚[14]等人通过压汞试验和滤纸法，系统分析了非饱和和重塑弱膨胀土的微观孔隙结构(如孔径分布、孔隙形状、分形维数等)与土-水特征曲线(SWCC)的内在联系。

## 2. 土体的基本物理性质与矿物成分分析试验

### 2.1. 基本物理性质试验

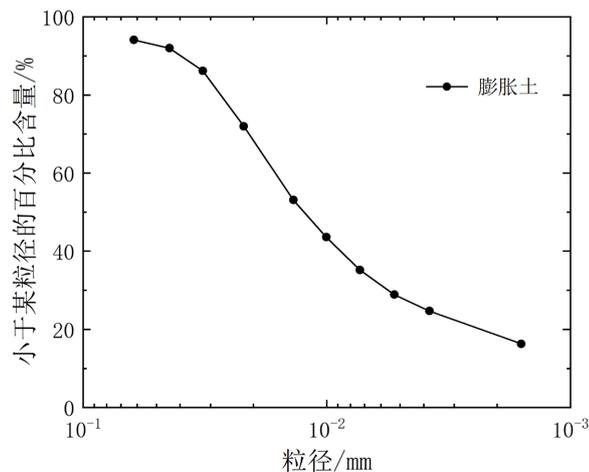
本文用土取自南水北调中线工程邓州段，膨胀土的取土深度在 1.6 m 处，所取土体的基本物理性质如表 1 所示，表中的参数通过现场试验和室内试验综合测得。

**Table 1.** Basic physical property parameters

**表 1.** 基本物理性质参数

序号	试验内容	测定参数	测试结果
1	土粒比重试验	比重	$G_s = 2.7$
2	含水率试验	天然含水率	$w = 18\%$
3	颗粒分析试验	颗粒级配	较好
4	天然密度试验	密度	$\rho = 1.91 \text{ cm}^3$ $\rho_d = 1.62 / \text{cm}^3$
5	击实试验	最大干密度和最优含水率	$\rho_{d\max} = 1.65 / \text{cm}^3$ $w_{Op} = 21.5\%$
6	界限含水率试验	液限，塑限	$w_L = 49.8\%$ ; $I_L = 0.3$ $w_P = 22.8\%$ ; $I_P = 27.1$

图 1 为本论文所用土体的颗粒级配曲线，通过级配曲线可以看出该膨胀土的级配曲线较为平缓，颗粒均匀，级配良好。



**Figure 1.** Particle grading curve of expanded soil

**图 1.** 膨胀土颗粒级配曲线

### 2.2. 矿物成分试验

为进一步对三种土体展开研究，本文采用 XRD 衍射法对三种土体内的矿物成分和矿物类型和含量展开研究。XRD 衍射法原理是 X 射线穿过材料晶体时发生的衍射光波，衍射光波会发生叠加，叠加结果

会形成衍射花样，根据花样可以确定土体内部的晶体结构。膨胀土的矿物主要分为粘土矿物和非粘土矿物，不同地区内的膨胀土由于地域等因素的影响而存在着较大的差异。本文所用膨胀土的矿物成分如表 2 所示。

**Table 2.** Expansion soil mineral composition content

**表 2.** 膨胀土矿物成分含量

矿物名称	伊利石	石英	斜长石	钾长石
百分含量/%	49.27	37.24	9.09	4.30

### 3. 膨胀特性分析

#### 3.1. 自由膨胀率

自由膨胀率为松散的烘干土粒在水中和空气分别自由堆积的体积之差与在空气中自由堆积的体积之比，以百分数表示，用以判定无结构力的松散土粒在水中的膨胀特性。是反应膨胀土膨胀性的重要指标。在实际工程中对膨胀土的胀缩等级进行正确划分对评估土体的工程特性具有十分重要的意义。本文根据《土工试验方法标准》进行自由膨胀率试验，将得出的试验结果根据表 3 进行划分。

**Table 3.** Grading index of expansion and contraction characteristics

**表 3.** 胀缩特性分级指标

分级指标	弱膨胀土	中等膨胀土	强膨胀土
自由膨胀率(%)	40~60	60~90	≥90
塑性指数 $I_p$ (%)	15~28	28~40	≥40

通过试验得出本文所用的膨胀土的自由膨胀率为 42.22%，塑性指数为 27.0，属于弱膨胀土。粘性土呈现出胀缩性是由于土体内含有大量的粘粒，这些粘粒的比表面积大，且吸附能力也较强，所以导致土体在水的作用下表现出明显的胀缩性。土体中粘性颗粒的数量与土体的塑性指数也是密切相关的，从而可以得出土体的胀缩性和土体的自由膨胀率也是密切相关的，故上文在对膨胀土的膨胀性进行分级时，使用自由膨胀率和塑性指数两种参数对膨胀土进行分级。

#### 3.2. 有荷膨胀率

有荷膨胀率是指在一定的压力作用下，膨胀土吸水之后的体积与原始体积之比，它所反映的是膨胀土在实际工程中受到荷载时的胀缩特性。对其进行研究有助于为膨胀土的工程利用和改良提供依据。

根据室内的击实试验得出的膨胀土的最大干密度和最优含水率试验以及现场的天然含水率试验和天然干密度试验，设置膨胀土的干密度为  $1.62 \text{ g/cm}^3$ ，含水率设置为 14%，18%，22%，根据上述设置的干密度和含水率制备直径 61.8 mm，高度 20 mm 的标准环刀样。将制备完成的环刀样置于固结仪中，给试样分别施加 12.5 kPa、25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa，施加荷载后，每隔 1 h 读记百分表读数一次，待间隔 2 h 的两次读数相差不超过 0.01 mm 时，记录此次读数，并在水槽中注入纯净水，直至水面高出试样顶部 5 mm，注水后，按 1、3、6、12 h 读数，12 h 后每间隔 12 h 记录百分表读数一次，直至连续两次读数相差不超过 0.01 mm 时停止试验，并记录此次读数，数据记录完成后根据公式(1)进行有荷膨胀率的计算。

$$\delta_{ep} = \frac{R_e + \lambda - R_{0b}}{h_0 + R_{0b} + R_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:

- $\delta_{ep}$ —土的有荷膨胀率, %;
- $h_0$ —试样初始高度, mm;
- $R_0$ —百分表初始读数, mm;
- $R_{0b}$ —加荷后百分表稳定读数, mm;
- $\lambda$ —预订荷载下仪器压缩变形, mm;
- $R_e$ —膨胀稳定时百分表读数, mm。

### 3.2.1. 有荷膨胀率随时间的变化

将计算的结果绘入图2, 通过图2我们可以得出有荷膨胀率随时间的增长呈现出先快速增长后趋于稳定的趋势。出现这种现象的原因是土体进行注水后, 在初始阶段土的渗透速度和吸水速度都很快, 土颗粒吸水膨胀, 所以有荷膨胀率快速增长, 随着时间的增长, 土体达到平衡态, 此时土颗粒不再吸水膨胀, 故而呈现出平衡状态。

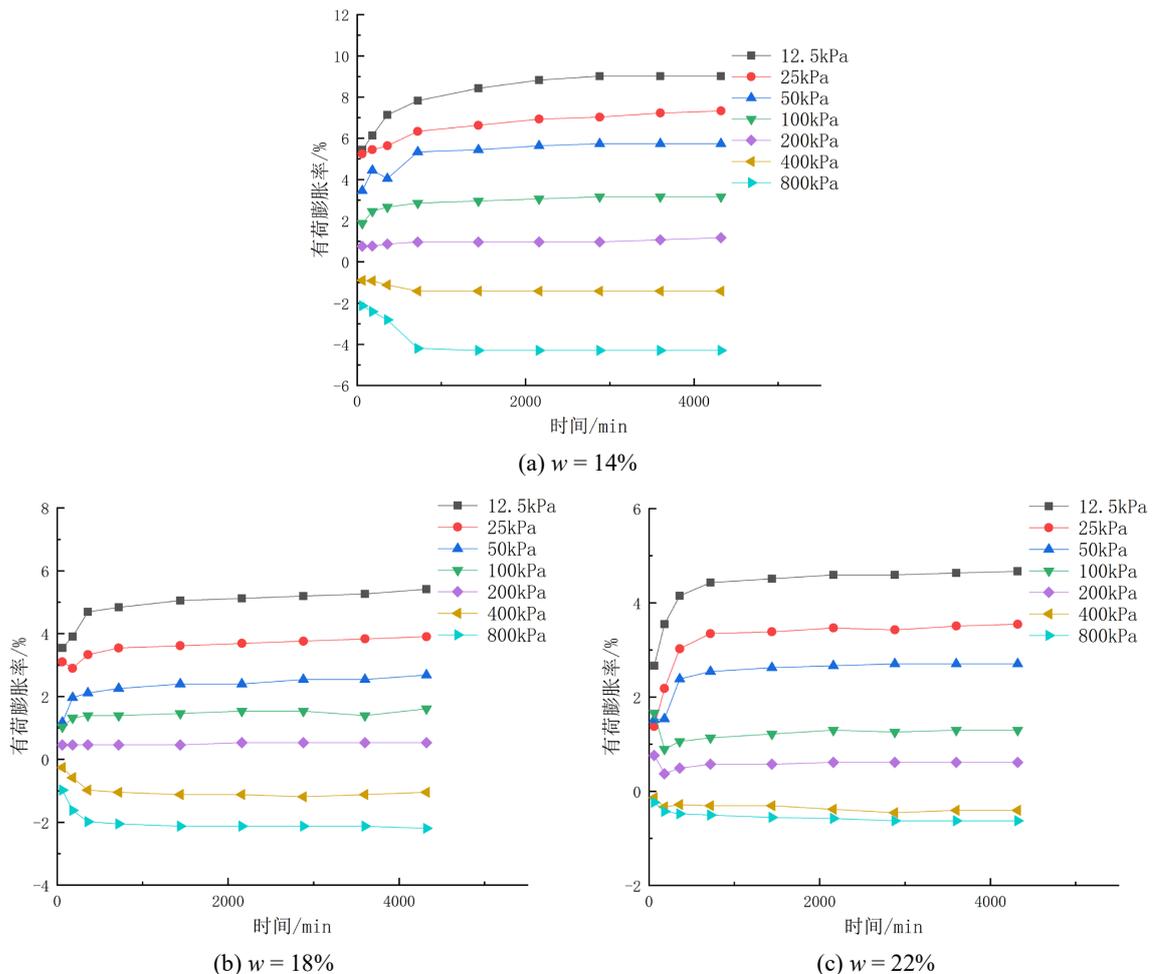


Figure 2. Variation of loaded expansion rate with time for expansive soil

图2. 膨胀土有荷膨胀率随时间的变化

### 3.2.2. 有荷膨胀率随荷载的变化

不同含水率下膨胀土的有荷膨胀率随荷载的变化如图 3 所示, 通过图中我们可以看出当上覆荷载一定时, 随着含水率的增加, 有荷膨胀率在不断减小, 这是由于当土体的初始含水率较大时, 土颗粒表面会吸附较多的水分, 使得土颗粒之间的粘结力和静摩擦力减小, 从而使得膨胀土的膨胀性降低。通过观察图 2 和图 3 我们发现, 当上覆荷载高于某一界限值时, 有荷膨胀率会出现负数, 这是上覆荷载太大, 膨胀土吸水膨胀产生的内部膨胀力无法承担上覆荷载造成的。

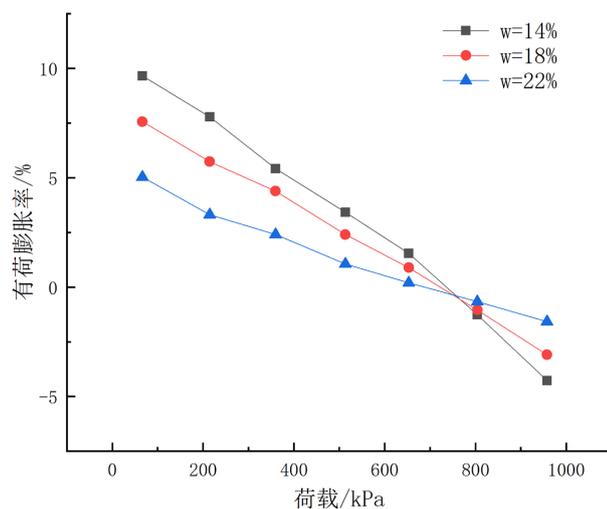


Figure 3. Variation of loaded expansion rate of expansive soil with overlying load at different water contents  
图 3. 膨胀土有荷膨胀率在不同含水率下随上覆荷载的变化

## 4. 膨胀土强度分析

### 无侧限抗压强度分析

无侧限制抗压强度是评价土体强度特征的最为直观的参数。根据《水利水电土工试验规范》, 使用击实法分三层制备高度为 76 mm, 直径为 38 mm 的标准圆柱样, 在制样过程中膨胀土控制干密度  $1.62 \text{ g/m}^3$ , 含水率分别为 6.0%, 9.0%, 12.0%, 15.0%, 18.0%, 21.0%, 24.0%, 27.0%, 30.18% (饱和), 制样所用的土为烘干粉碎后过 2 mm 筛的膨胀土。试样制备完成后在不对试样施加侧向荷载的情况下分别对九种含水率的膨胀土试样进行无侧限抗压试验。试验在 CRB-III 型数显承载比试验仪上进行, 轴向位移速度为 1.1 mm/min, 当仪器出现峰值时, 再测读 3% 左右的应变停止; 当仪器没有峰值出现时, 试验应进行到应变达到 18% 左右。试验结束后, 卸去轴向压力, 取出试样。试样的轴向应变计算公式见公式(2)。

$$\epsilon_1 = \Delta h / h_0 \times 100 \quad (2)$$

$\epsilon_1$  —— 轴向应变, %;

$h_0$  —— 试样初始高度, cm;

$\Delta h$  —— 试样轴向变形量, cm。

试样校正面积计算公式见公式(3):

$$A_a = A_0 / (1 - 0.01\epsilon_1) \quad (3)$$

$A_a$  —— 试样校正面积,  $\text{cm}^2$ ;

$A_0$  —— 试样初始面积,  $\text{cm}^2$ 。

试样轴向应力的计算公式见公式(4):

$$\sigma = CR/A_a \times 10 \quad (4)$$

$\sigma$  ——轴向应力, kPa;

$C$  ——测力计率定系数, N/0.01mm;

$R$  ——测力计读数, 0.01 mm。

图 4 为不同含水率下膨胀土的应力应变曲线, 通过图中我们可以看出, 九种含水率下的膨胀土的应力应变曲线均为软化型, 即随着应变的增加无侧限抗压强度先增大, 在达到峰值后迅速降低, 最后趋于稳定。试样在加载完成后发生明显的鼓胀破坏。以含水率 15% 时为例, 我们可以将应力应变曲线分为四个阶段, 见图 5, 曲线的 O-A 为试样的弹性阶段, 在此阶段试样发生弹性变形, 其应力应变曲线接近直线, 服从于胡克定律, 试样在此时也产生初始微裂纹; 曲线的 A-B 阶段试样的裂纹稳定发展, 导致应力的增加速度变慢, 弹性模量也逐渐减小, 在 B 点以后裂纹的发展变得更为迅速, 即使发生较大的应变应力的增加也很小, 此种情况一直持续到峰值点 C, 在峰值点 C 以后, 应力开始快速下降, 试样的内部也已经发生严重破坏; D 点以后为稳定阶段, 应力随应变的增加的下降速度变缓, 此时试样内部的裂纹已经完全贯通, 此时呈现出的轴向应力是由土样间的摩擦力所提供。在试验过程中吸力较大的试样随着应变的增加, 有土颗粒从试样上脱落, 造成此种现象的原因是膨胀土的胶结性较弱。

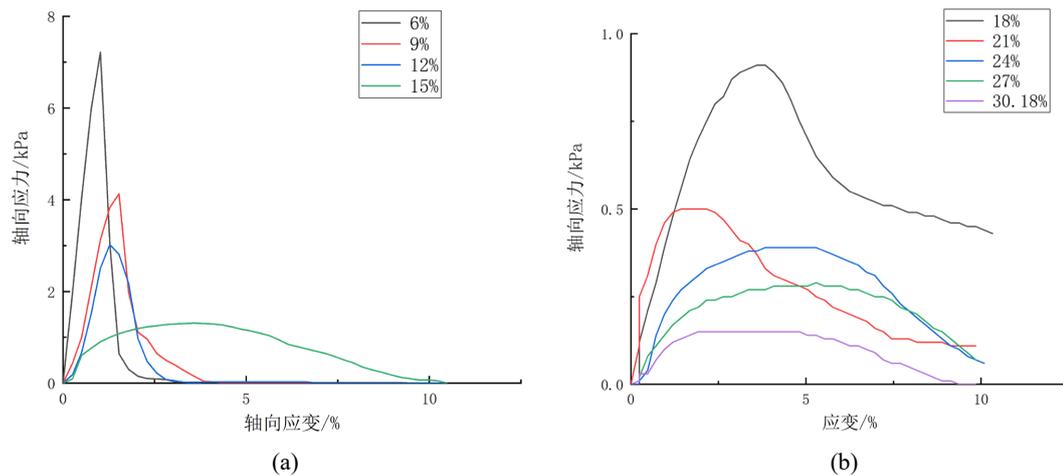


Figure 4. Axial stress-axial strain curves under different water contents of expanded soil. (a) 6~15 percent moisture content, (b) 18~30.18 percent moisture content

图 4. 膨胀土不同含水率下轴向应力 - 轴向应变曲线。(a) 含水率 6%~15%, (b) 含水率 18%~30.18%

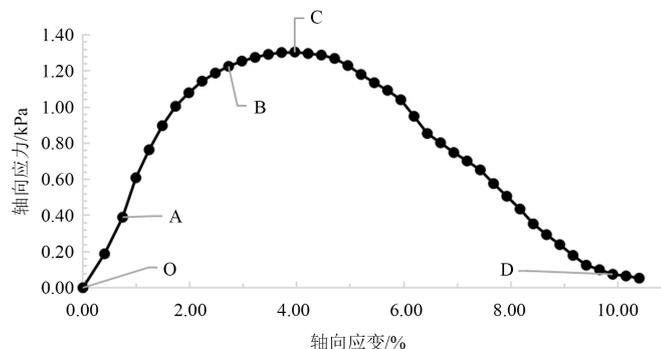


Figure 5. Stress-strain curve of 15% water content specimen of expanded soil

图 5. 膨胀土含水率 15% 试样的应力 - 应变曲线

图 6 为不同含水率下膨胀土试样的无侧限抗压强度，通过图 6 我们可以看出不同含水率下膨胀土的无侧限抗压强度不同，但整体呈现出随着含水率的升高，试样的无侧限抗压强度不断降低。

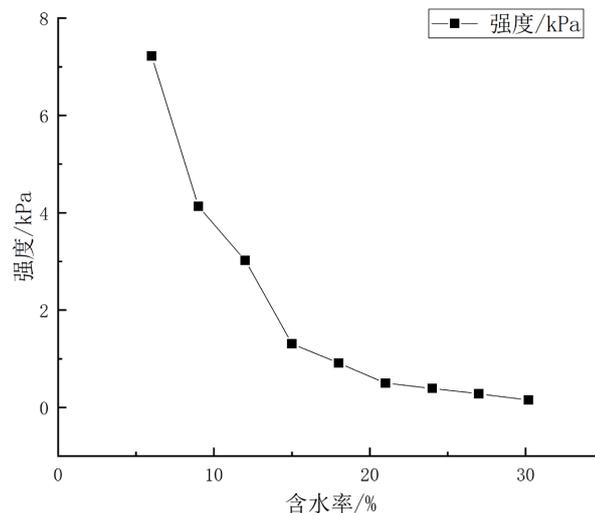


Figure 6. Variation of unconfined compressive strength of expanded soil with moisture content  
图 6. 膨胀土无侧限抗压强度随含水率的变化

## 5. 结论

1) 通过膨胀土的涨缩特性指标分级将所用膨胀土定为弱膨胀土；膨胀土的有荷膨胀率随时间先快速增大，后趋于稳定；随荷载的增大不断减小。

2) 在膨胀土的无侧限抗压实验中，无论土体处于何种含水率应力应曲线均为剪切软化型，其应力应变曲线可以分为四个阶段，分别为服从胡克定律的弹性阶段 - 裂纹稳定发展阶段 - 裂纹快速发展阶段 - 裂纹完全贯通的稳定阶段。膨胀土的无侧限制抗压强度随含水率的增大不断减小。

## 参考文献

- [1] 吴广水, 王书齐, 祝婷梅, 等. 初始含水率和干密度对膨胀土膨胀力影响的试验研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2023, 35(4): 29-32, 50.
- [2] Tan, B., Pan, Z.A., Xu, L. and Wang, J. (2024) Laboratory Investigation of Lateral Swelling Pressure of Nanning Grey-White Expansive Soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **60**, 521-527. <https://doi.org/10.1007/s11204-024-09924-4>
- [3] 李儒天. 不同改性材料改良膨胀土无侧限抗压强度的比较试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(3): 56-60.
- [4] 陈圣甜, 梁文广, 闫宏锦, 等. 基于无侧限抗压强度试验的不同养护环境对水泥土强度影响研究[J]. 市政技术 2024, 42(2): 40-44.
- [5] 王闯, 董金玉, 王明龙, 等. 含水率对残坡积土强度特性的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2016, 37(5): 88-92.
- [6] 孟庆云, 杨果林. 重塑膨胀土直剪试验中的应力-应变曲线特性[J]. 中南公路工程, 2007(3): 11-15, 20.
- [7] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425.
- [8] 张海明, 姚爱军, 王兆辉, 等. 非饱和粉土力学特性的大型直剪试验[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2014, 33(10): 1352-1356.
- [9] 王晓燕, 高峰, 胡建林, 等. 冀北地区重塑膨胀土抗剪强度影响因素分析[J]. 河北建筑工程学院学报, 2023, 41(1): 69-74.
- [10] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006(2): 196-201.

- 
- [11] 候雅东, 王锋, 谢东武. 含水率和基质吸力变化对非饱和粉质土的影响分析[J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(5): 71-77.
- [12] 王欢, 陈群, 王红鑫, 等. 不同压实度和基质吸力的粉煤灰三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 224-230.
- [13] 陈国强. 压实大理石废粉的微观结构及持水特性[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [14] 丁小刚, 马丽娜, 张戎令, 等. 非饱和重塑弱膨胀土微观结构及土-水特征曲线试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 350-360.