

# 高填方渠堤土体强度差异对比分析

杨家宁

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月9日; 发布日期: 2024年11月20日

## 摘要

南水北调工程是解决我国水资源分布不均匀, 促进地方经济发展和社会进步的一项重大举措。选取南水北调中线某高填方渠段的两种不同土体, 分别进行了不同含水率下的直接剪切实验。对比分析了两种土体在相同含水率下抗剪强度、粘聚力和内摩擦角的差异性。结果表明: 两种土体的强度均随含水量的降低而增大, 而水泥改性土在含水率较高下的强度小于渠基弱膨胀土的强度, 在含水率较低的情况下则相反。

## 关键词

水泥改性土, 弱膨胀土, 直剪, 抗剪强度, 强度对比

# Comparative Analysis of the Strength of High Fill Embankment

Jianing Yang

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Oct. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 9<sup>th</sup>, 2024; published: Nov. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The south-to-north water Diversion project is a major measure to solve the uneven distribution of water resources in China and promote the local economic development and social progress. Two different soils from a high fill canal of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project were selected to perform direct cut experiments at different water content. The difference of the shear strength, cohesion and internal friction angle at the same water content were analyzed. The results show that the strength of both kinds of soil increases with the decrease of water content, while the strength of cement modified soil is less than that of weak expanded soil, while the opposite is true.

文章引用: 杨家宁. 高填方渠堤土体强度差异对比分析[J]. 土木工程, 2024, 13(11): 2060-2065.  
DOI: 10.12677/hjce.2024.1311224

## Keywords

Cement Modified Soil, Weak Expansion Soil, Straight Shear, Shear Strength, Strength Comparison

Copyright © 2024 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

南水北调工程，作为全球最大规模的跨流域调水项目，是一项具有划时代意义的战略基础设施。它有效地缓解了我国水资源在南北方向上的不平衡分布，不仅将南方充沛的水资源转化为经济动力，还确保了华北地区居民生活和经济发展的可持续性[1]。在该工程中线部分，膨胀土渠段的总长度达到 346.85 公里，占整个中线总干渠长度(1266.495 公里)的约 27%。本文选取中线某高填方渠段的弱膨胀土(以下简称“渠基土”)以及渠坡水泥改性土(以下简称“渠坡改性土”)两种不同的土体进行研究。

土体的强度是指其在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。其中，抗剪强度是衡量土体抵抗剪切破坏的极限能力，也是评估土体稳定性的关键指标。众多学者已经对抗剪强度对土体稳定性的影响进行了深入研究。李云鹏[2]等人通过对不同含水率的膨胀土进行反复直剪试验发现，强膨胀土的抗剪强度指标随着含水率的增长而降低，竖向应力相同时，强度随含水率的增长而降低。沈荣[3]等人对掺入了不同长度、不同掺量的超高分子量聚乙烯纤维的膨胀土进行直剪试验后发现，超高分子量聚乙烯纤维的掺入大幅提高膨胀土的抗剪强度。王闯[4]等人的实验结果显示，非饱和残积坡土的抗剪强度随着含水率的增加而整体下降，特别是在接近液限含水率时，抗剪强度的下降尤为显著。然而，一旦达到液限含水率，抗剪强度的变化就变得非常小。任可意[5]等人的研究则发现，在粘土中添加石墨烯可以有效提高粘土的黏聚力，但对粘土内摩擦角的影响相对较小。胡豹[6]等人进行了掺入不同比例高分子化合物砂浆胶和水泥混合物的膨胀土直剪试验，结果发现膨胀土的内摩擦角和粘聚力随砂浆胶和水泥的掺入以及养护天数的增加而出现明显的增加。孟庆云[7]等人通过控制膨胀土的干密度和含水率，进行了不同竖向压力下的直接剪切试验。他们的研究发现，提高土体的干密度可以显著提升膨胀土的土体峰值强度。杨庆[8]等人对大量的重塑膨胀土进行了抗剪强度试验，得出了黏聚力与内摩擦角随着土体含水量增加而减小的结论。张海明[9]等人对不同含水率的重塑非饱和粉土进行了大型直接剪切试验，发现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[10]等人通过对不同含水率的重塑膨胀土进行直接剪切试验，也发现了类似的趋势，即随着含水率的增加，抗剪强度会出现先增大后减小的现象。

本文通过对比分析两种土体的抗剪强度及其参数，来研究其在强度上的差异性。

## 2. 土的基本物理性质

Table 1. Basic physical properties of the soil body

表 1. 土体基本物理性质

| 土样类型  | 最优含水率/% | 最大干密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 液限/% | 塑限/% | 塑限指数 |
|-------|---------|---------------------------|------|------|------|
| 渠基土   | 23.3    | 1.60                      | 46.5 | 25.4 | 21.1 |
| 渠坡改性土 | 24.8    | 1.52                      | 45.0 | 26.5 | 14.1 |

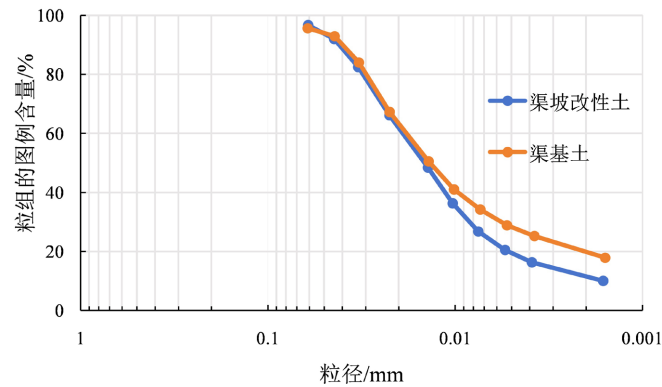


Figure 1. Particle grading curve of cement modified soil and canal foundation soil  
图 1. 水泥改性土与渠基土的颗粒级配曲线

本实验所采用的土样源自南水北调中线工程的一个高填方渠堤。其中，渠坡改性土呈黄褐色，而渠基土则呈现较浅的黄褐色。对这两种土体各自开展了液塑限试验、土的击实试验以及颗粒分析等基础土工试验，旨在获得它们的基本物理特性和颗粒级配情况。具体结果如表 1 及图 1 所示。

### 3. 直剪试验

#### 3.1. 直接剪切试验方案

直接剪切的式样采用控制干密度的方法制备，根据击实试验的结果，用  $1.52 \text{ g/cm}^3$  作为本次试验渠坡改性土的干密度，试样的含水率设定了五种不同的值，即 6%、12%、18%、24%和 32.89% (处于饱和状态)；依照击实试验的结果，把渠基土的干密度设定为  $1.60 \text{ g/cm}^3$ ，相应地，试样的含水率也分为 6%、12%、18%、24%和 29.30% (达到饱和状态)。将两种土的每种含水率算作一组，每组中又包含五个试样，共计十组五十个式样，分别在 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa 的竖向荷载下进行土的直剪试验。使用 FDJ-ZO 型非饱和土直剪仪进行试验，根据规范设定剪切速率为 0.8 毫米每分钟。若在 6 毫米的剪切位移内出现峰值，则该峰值即为该竖向荷载下的抗剪强度；若无峰值出现，则以 4 毫米剪切位移时的剪应力作为该垂直荷载下的抗剪强度。

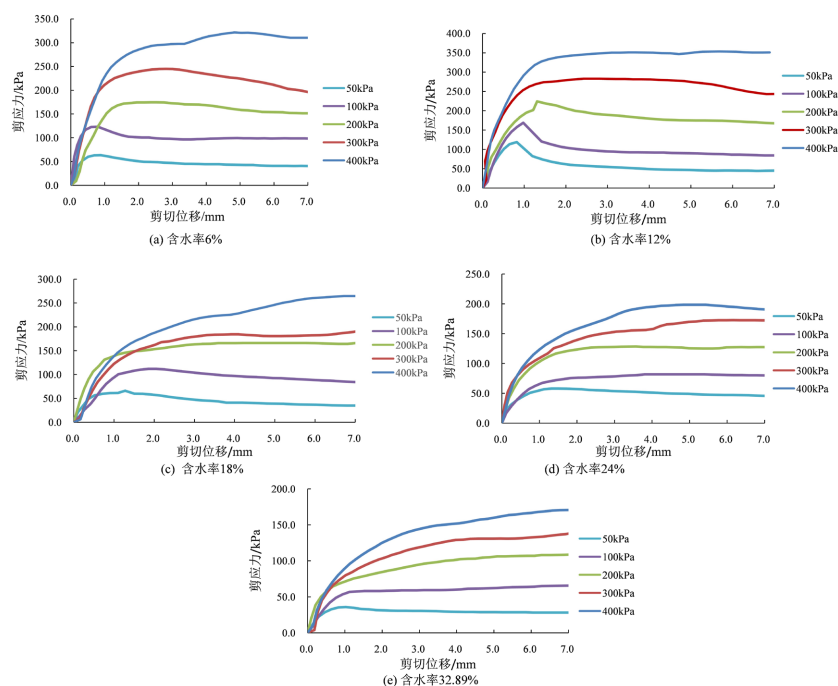
#### 3.2. 应力与剪切位移的关系

不同含水率下渠坡改性土和渠基土的应力和剪切位移的关系曲线如图 2 和图 3 所示。

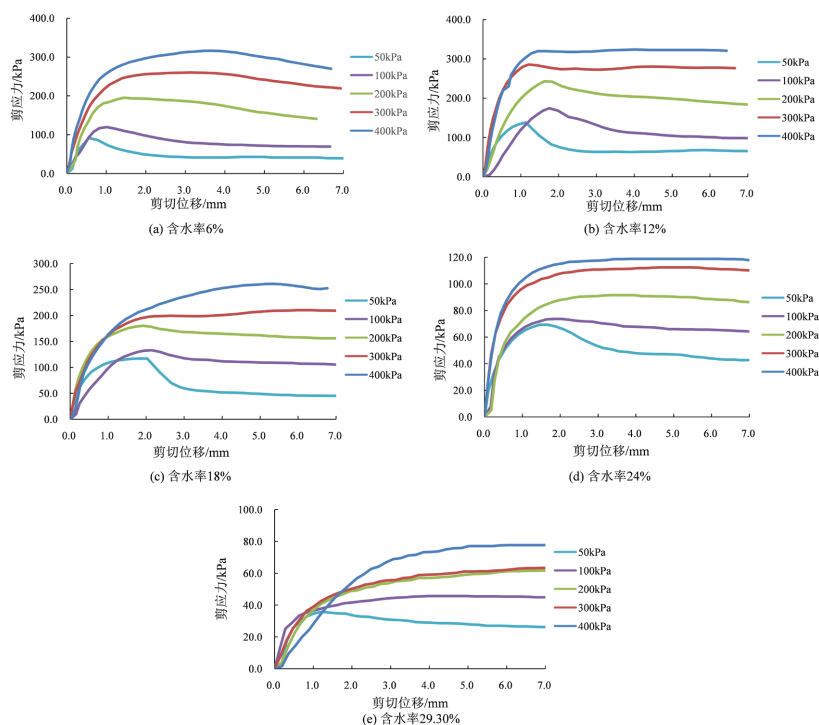
从图 2 和图 3 可以观察到，土体的含水率显著影响着剪切应力与剪切位移的关系。对于渠坡改性土和渠基土来说，当含水率低于 18%时，剪切应力在达到峰值后会急剧下降，最终稳定在一个较低水平，显示出剪切软化的行为；相反，当含水率超过 18%时，剪切应力随剪切位移的增加而持续上升，呈现出剪切硬化的特征。这是因为：当土体中的含水率较低时，土体的基质吸力较大，当土体发生破坏时，基质吸力的存在会产生一种抵抗破坏的力，从而呈现出抗剪强度增大的现象，当土体破坏时，基质吸力提供的抵抗破坏的力就会消失，强度也会随之下降，出现软化现象；而在土体含水率较高时，土体的基质吸力较小，提供的抵抗土体破坏的力就较小，在土体发生破坏时强度的下降程度也较小，所以呈现出硬化现象。

在渠坡改性土中，一旦含水率超过 18%，在不同竖向荷载作用下，剪应力与剪切位移的关系均呈现出剪切硬化的特征。然而，当含水率低于 18%时，随着竖向荷载的不断增大，剪应力与剪切位移的关系会由软化型逐渐向硬化型发生转变。相比之下，渠基土的行为略有不同。即使含水率超过 18%，渠基土的剪应力 - 剪切位移关系并不完全表现为剪切硬化型。例如，在 24.0%的含水率和 50 kPa 的竖向荷载下，其关系曲线仍然显示出剪切软化型的趋势。唯有当含水率小于 12%时，渠基土在所有竖向荷载情况下，

剪应力与剪切位移的关系均一致地显现为剪切软化型特征。而当含水率大于 12% 时, 随着竖向荷载的增加, 其关系曲线才开始逐渐表现为剪切硬化型。



**Figure 2.** Stress and strain curves under different water content of modified soil of canal slope  
**图 2.** 渠坡改性土不同含水率下的应力应变曲线



**Figure 3.** Stress and strain curves at different moisture content of canal foundation soil  
**图 3.** 渠基土不同含水率下的应力应变曲线

## 4. 实验结果分析

### 4.1. 相同含水率下两种土体抗剪强度的差异性

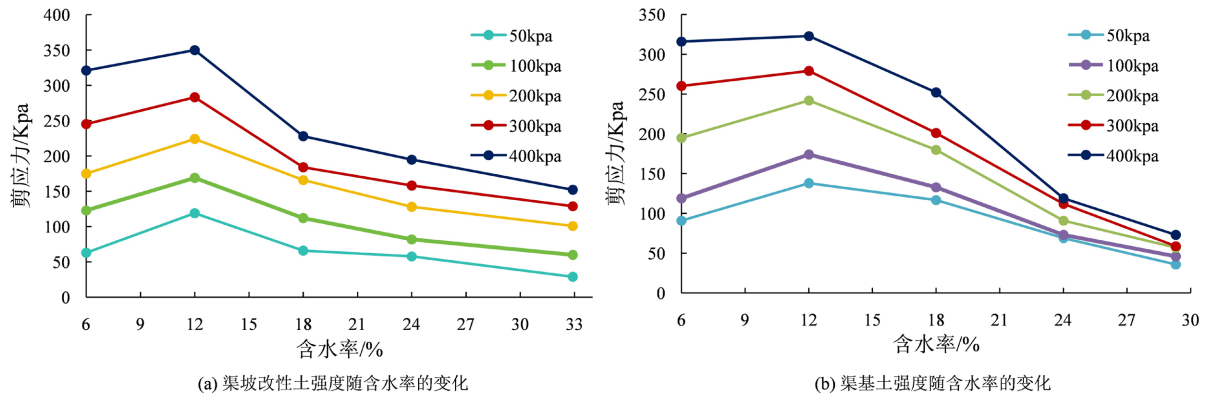


Figure 4. Change of soil strength with water content

图 4. 土体强度随含水率的变化

从图 4 中我们可以明显看出两种土体随含水率的变化均不是线性的，均呈现出随含水率的增大先增大后减小的趋势，在含水率达到塑限含水率后抗剪强度下降速度明显变缓。在相同含水率下随着竖向压力的增大两种土体的抗剪强度均在增大。

### 4.2. 相同含水率下两种土体粘聚力和内摩擦角的差异性

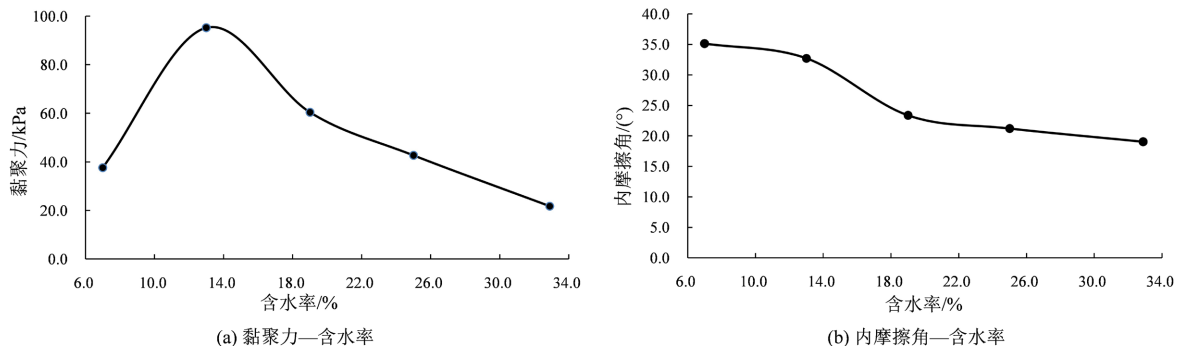


Figure 5. Relationship between shear strength parameters and water content of modified soil on canal slope

图 5. 渠坡改性土抗剪强度参数与含水率的关系

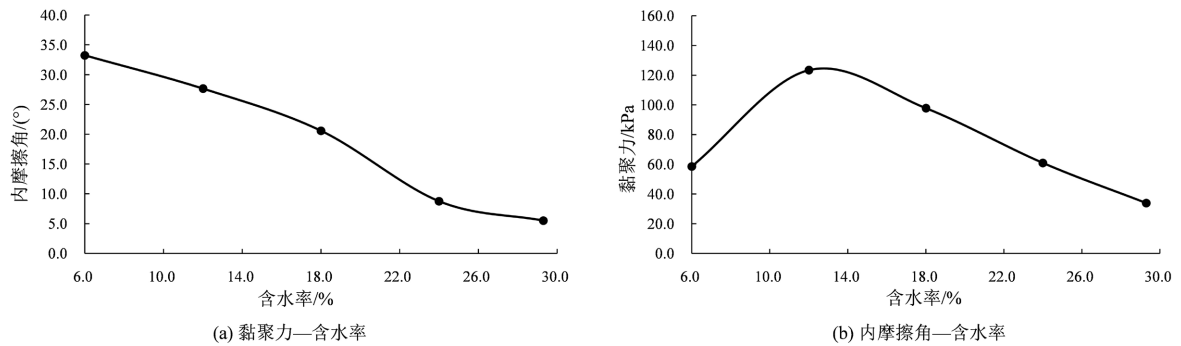


Figure 6. Relationship between shear strength parameters and water content of canal base soil

图 6. 渠基土抗剪强度参数与含水率的关系

通过图 5 与图 6 我们可以明显看出, 随着含水率的变化两种土体的内摩擦角和粘聚力的变化均不是线性的, 其中粘聚力随含水率的变化均是随含水率的升高的先升高后降低, 其具体变化趋势可以用二次曲线来拟合。具体拟合公式如下: (a)  $c = -0.1841w^2 + 5.827w + 22.9$ ; (b)  $c = -0.4279w^2 + 13.242w + 4.2902$ 。式中  $c$  为土体的黏聚力, kPa;  $w$  为土体含水率, %。

同样可以看出内摩擦角随含水率的变化也不是线性的, 两种土体均呈现出随含水率的增大, 内摩擦角不断减小的趋势, 其中渠坡改性土的下降幅度为  $16.115^\circ$ , 渠基土的下降幅度为  $27.7471^\circ$ 。

## 5. 结论

- 1) 相较于水泥改性膨胀土, 渠基土的颗粒级配曲线较为平缓, 表明其颗粒级配更优。
- 2) 在低含水率条件下, 渠基土的应力应变曲线比改性土表现出更明显的软化特征; 而在高含水率条件下, 水泥改性土的应力应变曲线则表现出较明显的硬化特征。
- 3) 随着含水率的增加, 水泥改性土和渠基土的黏聚力先增加后减少, 达到塑限含水率后下降速度减缓, 这一过程可以用二次曲线进行拟合。同时, 两种土的内摩擦角随含水率的增加而减小, 但渠基土的减小幅度更大, 而改性土的变化较为平缓。

## 参考文献

- [1] 吴海峰. 论南水北调中线工程相关区域协调发展[J]. 中国国土资源经济, 2010, 23(10): 21-23+27+54-55.
- [2] 李云鹏, 林一芄, 张晶旭, 等. 基于反复直剪试验的强膨胀土强度特性研究[J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(1): 86-91.
- [3] 沈荣, 王桂尧, 邹全, 等. 超高分子量聚乙烯纤维改良膨胀土试验研究[J]. 重庆建筑, 2023, 22(4): 60-63.
- [4] 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.
- [5] 胡豹, 王保田, 周锐, 等. 砂浆胶-水泥改良膨胀土试验研究[J]. 水力发电, 2024, 50(4): 95-101+107.
- [6] 任可意, 高磊, 余湘娟, 等. 石墨烯改性粘土的剪切强度特性研究[J]. 河北工程大学学报, 2018, 35(2): 62-66.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王晓燕, 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): 70-74.