

西安长安区南郊原状黄土边坡稳定性研究与分析

张程翔, 李 豪

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月19日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年1月30日

摘 要

随着降雨量不断北移, 导致西北地区边坡稳定性降低。本文对西安长安区原状黄土进行地勘取样并进行室内三轴压缩试验, 获得土样抗剪强度 c 、 φ 值, 结合工程实际案例建立模型, 利用Abaqus软件的强度折减法验证边坡稳定性系数。对西北地区边坡稳定性分析以及防护措施有着重要意义。

关键词

原状黄土, 安全系数, 抗剪强度, 边坡稳定性

Study and Analysis on the Stability of Undisturbed Loess Slope in the Southern Suburb of Chang'an District, Xi'an

Chengxiang Zhang, Li Hao

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 19th, 2023; accepted: Jan. 22nd, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

With the continuous northward movement of rainfall, slope stability decreases in northwest China. In this paper, geological prospecting and sampling of undisturbed loess in Chang'an District of Xi'an were carried out and indoor triaxial compression tests were conducted to obtain the c and φ values of the shear strength of the soil samples. A model was established based on practical engineering cases, and the strength reduction method of Abaqus software was used to verify the sta-

bility coefficient of the slope. It is of great significance for slope stability analysis and protection measures in northwest China.

Keywords

Undisturbed Loess, Safety Factor, Shear Strength, Slope Stability

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. 概述

21 世纪以来, 在西部大开发和“一带一路”战略背景下, 国家对西部地区交通基础设施的建设力度逐渐加大。但是西北地区黄土崩梁沟壑区工程地质条件复杂, 黄土湿陷性等级高, 再加上大面积的土方开挖, 导致大量高陡路堑边坡工程问题。随着雨带不断北移, 西北地区降雨量明显增多。西北地区广泛分布的黄土作为一种典型性非饱和土, 降雨对边坡稳定性的影响应引起广泛重视。边坡由于自身土体力学性质的特殊性, 容易出现边坡失稳的问题。由《全国地质灾害通报》可知: 全国发生的地质灾害接近 4000 起[1], 65%属于滑坡, 给全国带来的直接经济损失达 3.5 亿元。西北地区尤其西安地区的黄土不仅厚度较大, 还具有湿陷性等特殊性质, 其力学性质和水文性质与其他土壤有很大的不同。黄土在含水量少具有很高的抗剪强度; 随着水分的增加, 其强度大幅度降低。这就导致西北地区的多级边坡的治理难度越来越大。有效控制西北黄土边坡的稳定性, 防止边坡失稳情况, 已经成为岩土工程界迫在眉睫的问题。

2. 土样来源与试验方案

黄土地区因其特殊的地质特征而引起岩土工程领域的广泛关注。黄土边坡稳定性问题涉及多个因素, 包括物理力学性质、水文地质特征以及孔隙水压力等。为了更好地理解和解决黄土边坡稳定性问题, 研究者们进行了大量的研究和实践, 从地质特征到防治措施, 形成了一系列的研究进展。黄土地区的工程地质特征是黄土边坡稳定性问题的基础。通过野外调查、室内试验等手段, 研究者深入研究了黄土的物理力学性质、水文地质特征等因素, 为后续的研究提供了可靠的地质基础; 通过野外和室内试验, 研究者模拟了黄土边坡的力学行为, 获取了其力学参数。同时, 对实际工程中的黄土边坡进行监测, 收集实测数据, 为验证和修正试验结果提供了可靠的依据。

2.1. 地质构造

研究区域位于西安市长安区常宁新区。以黄土(Q_3^{2eol}): 风积黄土, 黄褐色, 硬塑, 具虫孔及大孔, 含少量蜗牛壳碎片、植物根系及铁锰质斑点。层底埋深 8.70 m~12.30 m, 层厚 6.30 m~10.30 m, 层底高程 461.07 m~466.59 m。该场区位于渭河断陷盆地中段, 西安凹陷和骊山凸起的过渡地带。距离拟建场地最近的断裂为长安 - 临潼隐伏断裂, 其沿黄土塬前部及西安市城郊东北向展布, 主要由三条阶梯状断裂组成($F_{4.1}$ ~ $F_{4.3}$):

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) (2016 年版)4.1.7 规定[2], 本拟建场地距离断裂的距离均大于 200 m, 且土层覆盖厚度大于 60 m, 断裂构造对建设场地影响较小[3]。

2.2. 现场原位试验

2.2.1. 标准贯入试验

本次勘察在钻孔内进行了标准贯入试验, 成果如“表 1 所示”。

Table 1. Statistical table of standard penetration test results

表 1. 标准贯入试验成果统计表

地层编号	岩性	地层时代 及成因	统计频数	范围值	平均值	标准差	变异系数
			n	击	φ_m	δ	σ_m
②	黄土	Q ₃ ^{2eol}	143	3~18	7.9	2.72	0.35
③	古土壤	Q ₃ ^{1el}	49	16~36	19.9	3.62	0.18
④	黄土	Q ₂ ^{2eol}	137	4~19	10.0	1.96	0.20
⑤	古土壤	Q ₂ ^{2el}	46	7~31	18.0	4.85	0.27
⑥	黄土	Q ₂ ^{2eol}	43	8~15	10.1	4.88	0.46
⑦	古土壤	Q ₂ ^{2el}	16	16~21	18.6	1.62	0.09
⑧	黄土	Q ₂ ^{2eol}	17	5~11	9.2	1.82	0.20
⑨	古土壤	Q ₂ ^{2el}	6	13~21	16.2	-	-
⑩	黄土	Q ₂ ^{2eol}	10	7~11	8.6	1.35	0.16
⑪	古土壤	Q ₂ ^{1el}	4	15~20	17.8	-	-
⑫	黄土	Q ₂ ^{1eol}	-	-	-	-	-
⑬	古土壤	Q ₂ ^{1el}	6	14~20	17.0	-	-
⑭	黄土	Q ₂ ^{1eol}	6	8~11	9.8	-	-
⑮	古土壤	Q ₂ ^{1el}	6	8~15	12.7	-	-
⑯	黄土	Q ₂ ^{1eol}	1	12	-	-	-

2.2.2. 地基承载力特征值

根据土工试验结果及现场原位测试成果, 按《工程地质手册》第五版表 4-5-70、4-5-72、表 4-5-80 和表 4-5-86 确定粘性土地基承载力特征值, 并结合地区工程经验[4], 综合给出场地主要地基土承载力建议值, 如“表 2 所示”。

Table 2. Characteristic and suggested values of foundation bearing capacity (kPa)

表 2. 地基承载力特征值及建议值表(kPa)

确定方法	② 黄土	③ 古土壤	④ 黄土	⑤ 古土壤	⑥ 黄土	⑦ 古土壤	⑧ 黄土 (水下)	⑨ 古土壤 (水下)
标贯法(特征值)	180	510	230	480	230	490	200	420
物理指标法(基本值)	250	310	200	285	240	330	230	330
建议值 f_{ak}	150	200	200	240	200	240	180	220

续表

地层编号	⑩ 黄土 (水下)	⑪ 古土壤 (水下)	⑫ 黄土 (水下)	⑬ 古土壤 (水下)	⑭ 黄土 (水下)	⑮ 古土壤 (水下)	⑯ 黄土 (水下)
标贯法(特征值)	190	460		450	200	330	200
物理指标法(基本值)	280	280	250	280	250	300	250
建议值 f_{ak} (标准值) (kPa)	200	220	200	220	210	220	210

2.3. 三轴压缩试验

2.3.1. 黄土材料

本次研究所采用的黄土样品于2023年10月14日从陕西省西安市长安区南郊某建筑施工基坑内获取。取土深度范围为4.5~5 m, 位于湿陷性黄土层。土类型为马兰黄土, 呈现褐黄色, 质地坚硬而均匀。在取样时, 将整块黄土切割成约40 cm × 40 cm × 40 cm的土样, 并使用塑料袋及胶带紧密包裹, 标记土样上、下部。

搬运过程中尽量控制土样扰动, 小心稳妥地将土样运回实验室, 于通风干燥处静置。制样时, 按照GB/T50123-2019《土工试验方法标准》的规定, 制取了高度为100 mm、直径为50 mm的圆柱试样, 用于开展三轴剪切试验[5]。如“表3所示”、“表4所示”。

Table 3. Physical properties of loess in the study area

表 3. 研究区黄土的物理性质

土粒比重 G_s	干密度 ρ_d (g/cm ³)	天然含水率 (%)	密度 ρ (g/cm ³)	塑限 w_p (%)	液限 w_L (%)	孔隙比 e
2.71	1.55	21.8	1.71	22.2	35.4	0.7

Table 4. Suggested values of physical and mechanical parameters of rock and soil at each layer

表 4. 各层岩土物理力学参数建议值表

地层 编号	岩性	天然	天然	干密度	孔隙比	饱和度	液限	塑限	塑性	液性	快剪		压缩	压缩
		含水量	密度								粘聚力	内摩擦角		
		ω	ρ	ρ_d	e	S_r	W_L	W_p	I_p	I_L	c	φ	a_{1-2}	E_{s1-2}
	%	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%			kPa	°	MPa ⁻¹	MPa		
②	黄土	21.8	1.78	1.46	0.849	70.5	33.5	21.4	12.1	0.05	24.5	22.2	0.31	7.1
③	古土壤	19.6	1.93	1.61	0.677	78.8	35.2	22.0	13.2	<0	27.2	23.2	0.18	9.7
④	黄土	22.3	1.71	1.40	0.933	65.1	33.8	22.2	11.7	0.05	24.7	21.4	0.32	6.4
⑤	古土壤	20.8	1.87	1.55	0.745	75.9	35.4	22.2	13.3	<0	27.3	22.4	0.20	9.2
⑥	黄土	22.8	1.81	1.48	0.833	75.0	33.9	22.2	11.7	0.05	25.3	21.8	0.28	7.5
⑦	古土壤	23.1	2.01	1.63	0.654	94.3	36.2	22.1	14.2	0.07	25.9	22.6	0.20	9.4
⑧	黄土	26.6	1.97	1.55	0.739	96.7	33.6	21.2	12.4	0.43	22.5	21.1	0.30	6.0
⑨	古土壤	23.9	2.04	1.65	0.644	98.2	36.9	22.9	14.0	0.07	27.3	22.4	0.20	9.4
⑩	黄土	25.7	2.00	1.59	0.698	98.3	34.3	22.3	12.0	0.28	24.2	20.6	0.27	6.4

续表

⑪	古土壤	25.6	1.99	1.59	0.710	97.7	35.3	22.4	12.9	0.26	27.5	22.2	0.21	9.0
⑫	黄土	26.3	2.00	1.58	0.707	99.8	33.5	19.9	13.6	0.47	24.5	22.1	0.22	8.4
⑬	古土壤	23.3	2.03	1.65	0.649	97.4	36.0	22.9	13.1	0.03	29.0	23.3	0.20	9.5
⑭	黄土	26.1	1.98	1.57	0.715	98.3	32.6	20.0	12.6	0.47	25.0	21.7	0.22	8.5
⑮	古土壤	24.5	2.02	1.63	0.671	98.6	35.6	21.8	13.7	0.19	24.1	21.5	0.18	10.0
⑯	黄土	23.0	2.06	1.67	0.616	100.0	33.7	22.5	11.2	0.02	27.5	23.2	0.20	9.5

2.3.2. 试验过程

利用三轴削样器制备 50 mm 直径, 100 mm 高的圆柱体试样, 初始含水率为 5%、10%、15%、25%, 将试样剪切破坏或设置规定轴向破坏应变, 然后将数据根据 Mohr-Coulomb 强度准则, 在一个坐标系中绘制不同围压下的摩尔圆, 并以试样的粘聚力 c 表示摩尔圆切线与 Y 轴的截距, 试样的内摩擦角 φ 表示摩尔圆切线与 Y 轴的夹角[6]。试验步骤如下:

1) 将防渗板放置在压力室的底座上, 放置样品、防渗板和样品盖的顺序是从下往上; 2) 将乳胶膜从里面放到带圆筒的薄膜上, 然后小心地将样品通过气泵放入带圆筒的薄膜中, 然后从带圆筒的薄膜中取出乳胶膜, 放在底座上将气闸的两端用橡皮筋连接起来, 防止压力室内的水进入到乳胶膜内; 3) 缓慢的安装压力室盖以防止活塞与试样接触, 然后拧紧压力室与底座的螺丝, 观察顶部活塞是否对准土样中心, 最后校准轴向测力计; 4) 打开承压水阀, 同时打开蒸馏水压力室的排气孔, 当排气口关闭时有水从排气口漏出; 5) 分流阀体, 关闭孔压阀, 开启常压阀; 6) 利用电脑操控试验仪器, 将围压施加至测试要求; 7) 用电脑操纵试验仪器, 使压力室缓慢上升, 暂停条件是活塞与试样刚接触时(轴向测力计开始读数), 然后将测得的轴向位移调整为零; 8) 剪切速率应根据规范应选择应变控制, 速率为 0.05%~0.10%/min, 故本试验剪切速率设置为 0.08%/min, 因为试样高度为 100 mm, 所以设置剪切速率为 0.08 mm/min。不同围压下的试样平行试样在相同应变剪切速率下测试。9) 试验开始后设置每产生 0.5% 轴向应变时, 记录一次应力-应变曲线上的点, 对于无峰值强度的试样时, 应选择试轴向变形的 15% 为破坏应变, 本次试验设置为 15 mm。

常规三轴试验中, 土体所受的偏应力与其轴向应变之间的关系一般有应变硬化型和应变软化型 2 种。对于应变硬化型的土体, 在破坏前, 其偏应力随着轴向应变的增加有着逐渐上升的趋势; 而对于应变软化型的土体, 其偏应力随着轴向应变的增加而达到某一峰值后转为下降的曲线。应变软化曲线取峰值点作为破坏偏差应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 。应变硬化曲线取轴向应变值(15%)所对应的偏差应力作为破坏偏差应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 。如“图 1~3 所示”不同含水率高黄土的三轴试验应力-应变曲线(图中 σ_3 表示围压)。可以看出, 当含水率分别为 10%、15% 和 25% 时, 不同围压下, 应力应变曲线破坏点是不同的[7]。根据应力应变曲线画出莫尔圆, 如“图 4、图 5 所示”算出 c 、 φ 值。

3. Abaqus 强度折减法模拟

边坡稳定性分析一直是岩土工程中最重要研究领域。目前边坡稳定性的分析方法丰要可以分极限平衡法和有限元(或有限差分)方法两大类[8] [9] [10]。极限平衡分析方法以安全系数来评价边坡的稳定性, 其原理简单, 物理意义明确, 是最重要、最常用和最直观的稳定性评价指标。在以往的有限元分析中, 通常都是根据边坡的位移场、应力场塑性区等来间接评价边坡稳定性, 或者根据有限元计算出应力分布之后再搜索滑动面根据滑动面上的单元应力计算结果计算安全系数。强度折减法[11] (Shear strength reduction technique)可直接通过有限元分析获得一个安全系数, 不仅保持了有限元在模拟复杂问题上的优

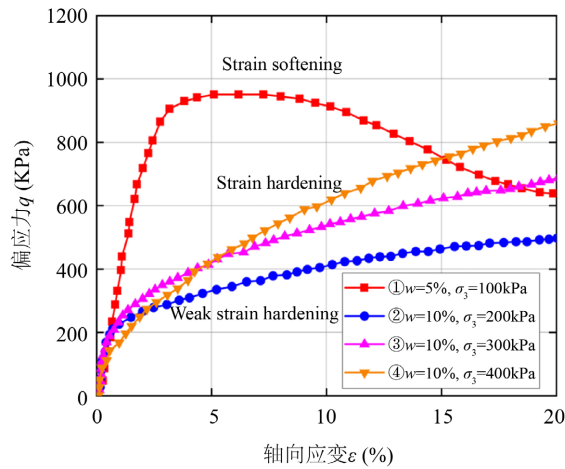


Figure 1. Stress-strain curve at 10% water content
图 1. 含水率为 10% 时的应力 - 应变曲线

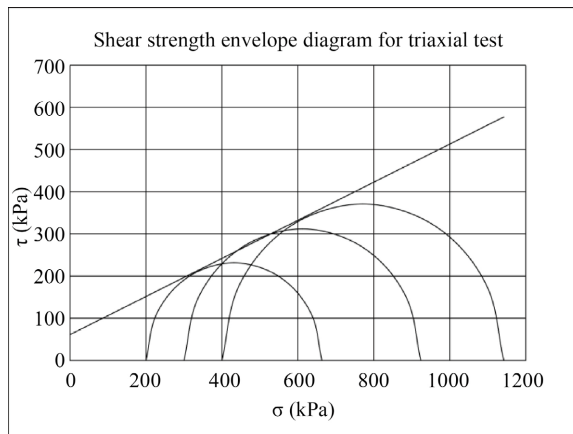


Figure 2. The corresponding strength envelope when the moisture content is 10%
图 2. 含水率为 10% 时对应的强度包线

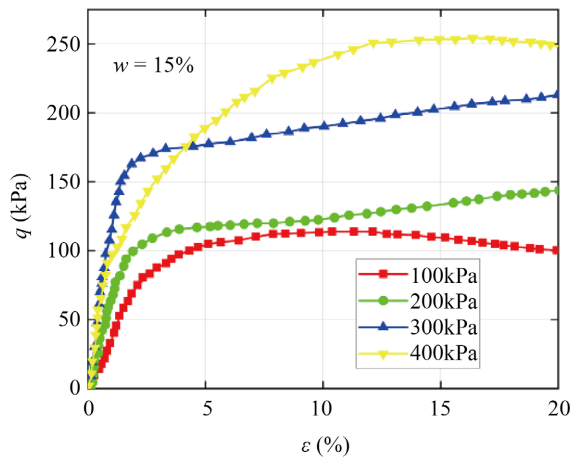


Figure 3. Stress-strain curve at 15% water content
图 3. 含水率为 15% 时的应力 - 应变曲线

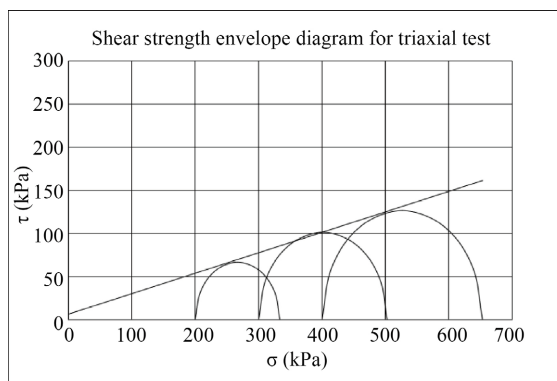


Figure 4. The corresponding strength envelope when the water content is 15%

图 4. 含水率为 15% 时对应的强度包线

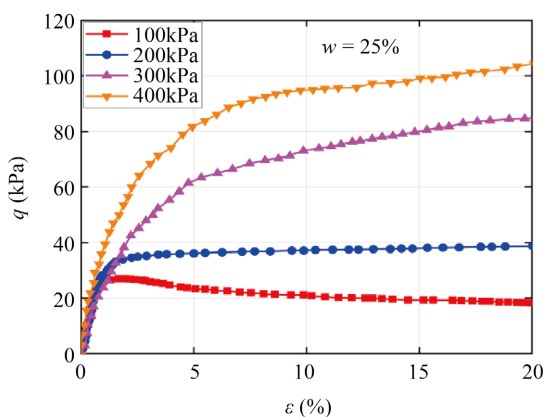


Figure 5. Stress-strain curve at 25% water content

图 5. 含水率为 25% 时的应力 - 应变曲线

点, 而且概念明确, 结果直观, 在工程中得到了越来越多的应用本章主要介绍强度折减法在 ABAQUS 中如何实现, 并结合二维和三维的算例进行详细介绍。

3.1. 强度折减法的基本原理

强度折减法最早由 Zienkiewicz 等提出, 后被许多学者采用。研究均质、连续、各向同性的完整土体的稳定性, 提出了一个抗剪强度折减系数(SSRF: Shear Strength Reduction Factor)其基本思想是在外荷载保持不变的情况下, 边坡内土体所能提供的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。在极限状态下, 外荷载所产生的实际滑动力与土体内部所产生的最低抗剪强度是按照实际强度指标折减后所确定的、实际中发挥的抗剪强度相等。当假定边坡内部所有土体抗剪强度的相同时, 抗剪强度系数相当于传统意义上的边坡整体稳定安全系数 F_s , 即强度储备安全系数。与极限平衡法中所计算出的稳定安全系数概念是一致的。

在强度折减法中, 岩石的强度参数(如内聚力 c 和内摩擦角 φ)被折减, 折减后的强度用于计算新的应力分布。如果新的应力分布导致土体的破坏, 则可以认为该折减系数是安全的。反之, 如果没有破坏, 则可以认为该折减系数是不安全的。通过逐渐增加折减系数, 直到临界状态土体破坏, 此时的折减系数即为安全系数。目前判断编批达到临界破坏的评价标准有: (1) 有数值计算收敛或发散, 与有限元算法有关。

(2) 以特征部位的位移拐点作为评价标准。(3) 是否形成连续的贯通区作为评价标准。

折减后抗剪强度参数表达式为

$$c_m = c/F_r$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi/F_r)$$

式中: F_r ——强度折减系数;

c_m 和 φ_m ——土体实际发挥的抗剪强度;

c 和 φ ——土体所能提供的抗剪强度。

通过这种方法,可以得到边坡的稳定性系数,即安全系数。这种方法不仅可以得到边坡的应力分布,还可以得到边坡的位移场和塑性区分布。此外,这种方法还可以考虑各种复杂的边界条件和非线性性质。因此,强度折减法在边坡稳定性分析中具有广泛的应用价值。

3.2. 强度折减法在 Abaqus 的实现

Abaqus 软件是目前应用较为广泛的有限元软件之一,他有着较为丰富的模型类型、不同的单元选用、荷载布置以及设置边界等的各种功能,不仅可以求解很多静力的难题、还可以分析很多动力的难题,特别是求解非线性的难题时,十分高效,在边坡工程有较好的适用性。其对应的岩土体材料库提供了较多的本构模型,比如摩尔库伦(Mohr-Coulomb)模型、线弹性模型、德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)模型等。ABAQUS 有着强大的图形交互式界面。Part (部件)模块的主要功能是创建、编辑和管理部件。Mesh (网格)模块主要用于单元的类型、网格划分密度设置等。Job (任务)模块的主要功能是创建和编辑分析作业、提交计算及监控任务的运行状态等。Visualization (可视化)模块,其主要功能是获得模型处理结果信息,进行多种云图以及 X-Y 曲线图的后处理。流程如“图 6 所示”。

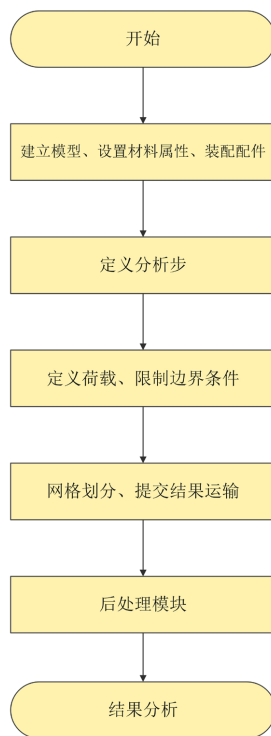


Figure 6. Flow chart

图 6. 流程图

3.3. 工程实际案例一模拟

现场土坡高 $H = 8\text{ m}$, 坡角 $\beta = 47^\circ$, 重度 $\gamma = 27\text{ KN/m}^3$, 黏聚力 $c = 61.4\text{ KPa}$, 摩擦角 $\varphi = 24.31^\circ$, 按照极限平衡法土坡稳定安全系数为 1.0。如“图 7 所示”。

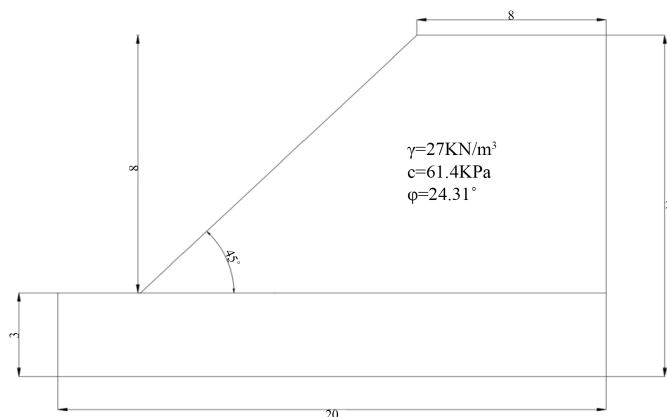


Figure 7. Project overview diagram
图 7. 工程概况图

评价结果

如“图 8~11 所示”，该区域边坡工况图边坡稳定安全系数稳定，对工程危害性小。

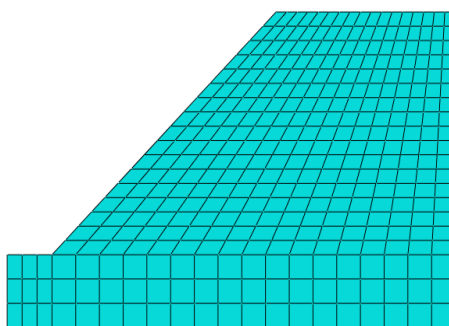


Figure 8. Grid division
图 8. 网格划分

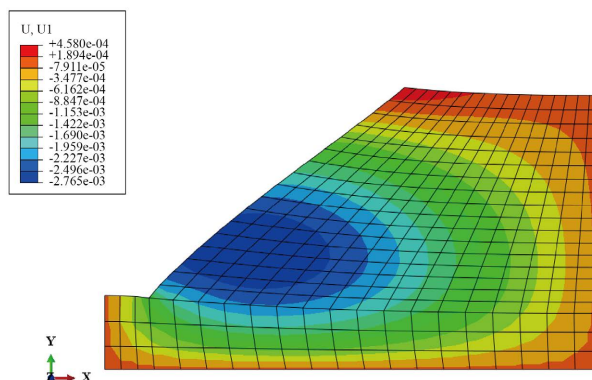


Figure 9. Displacement contour cloud map
图 9. 位移等值线云图

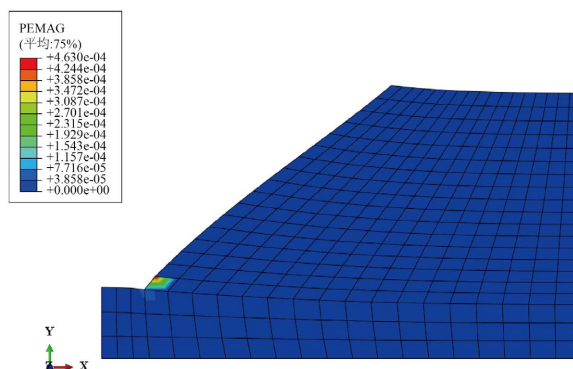


Figure 10. $t = 1$, the plastic region is obtained

图 10. $t = 1$ 时得塑性区

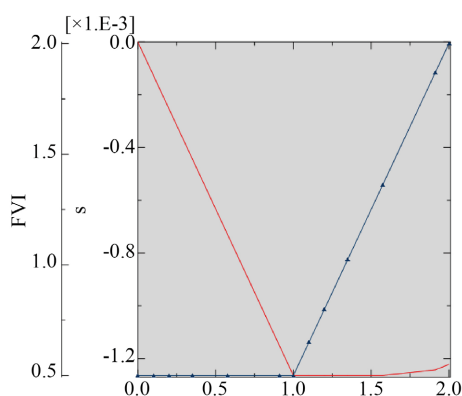


Figure 11. FVI changes with displacement

图 11. FVI 随位移的变化

4. 结论

在实际工程中, 我们都知道黄土的强度会随着含水率的增大而减低, 通过三轴试验我们可以得出:

- ① 不同的含水率土样, 黏聚力不一样, 但土样的破坏线是沿水平面大约为 45° 。
- ② 随着含水率的增大, c 值越来越小, 摩擦角越来越大, 偏差应力也不同。
- ③ 通过强度折减法有限元软件进行模拟, 该边坡工程处于安全稳定状态, 但也需要观察水量的变化。

参考文献

- [1] 赵会兵. 边坡地质灾害治理工程施工分析[J]. 江西煤炭科技, 2023(4): 116-119+125.
- [2] 丁荣武. 含水量对边坡稳定性的影响分析[J]. 云南水力发电, 2023, 39(11): 77-79.
- [3] 程辉, 许锐, 王广璐, 等. 延安新区黄土高填方边坡稳定性研究[J]. 中国煤炭地质, 2023, 35(10): 52-57.
- [4] 豆换换, 张彦洪, 邵峰, 等. 基于改进的灰色关联度分析法的黄土边坡稳定性分析[J]. 水利规划与设计, 2023(10): 94-96+145.
- [5] 朱赛楠, 赵慧, 魏云杰, 等. 不同含水率与围压下伊犁高温冻土三轴力学试验特性研究[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 140-150.
- [6] 刘忠玉, 朱少培, 张家超, 等. 固化黄土力学特性三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1156-1160+1205.
- [7] 邵帅, 邵生俊, 高梦洁, 等. 水-力耦合非饱和黄土的弹塑性模型适用性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(S1): 436-442.

- [8] 白伟, 卞海丁, 魏进, 等. 陕北 Q2 黄土入渗模型优化及边坡稳定性分析[J]. 路基工程, 2023(2): 36-42.
- [9] 豆换换, 张彦洪, 田泽润, 等. 降雨对黄土边坡稳定性的影响研究[J]. 水利规划与设计, 2023(4): 95-98.
- [10] 刘仁兵, 许巧. 基于 ABAQUS 数值模拟法降雨条件下的边坡稳定性分析[J]. 江西建材, 2023(7): 152-154+157.
- [11] 周薛淼. 基于强度折减有限元法分析边坡稳定性[J]. 山西建筑, 2023, 49(11): 89-92+96.