

# 坝坡基坑岩土非线性压力破坏下应力敏感性试验研究

Experimental Study on Pressure Sensitivity of Dam Slope Foundation Pit under Nonlinear Pressure Failure

高静, 张起

(河南省地质矿产勘查开发局第三地质矿产调查院, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 以某地水库大坝基坑岩土为研究对象, 进行坝坡基坑岩土非线性压力破坏下应力敏感性试验研究。基于岩土渗透率和渗透系数指标, 利用非线性破坏规则分析坝坡基坑岩土的应力敏感性。结果表明: 岩土非线性参数对坝坡基坑地基承载力影响较大, 随着岩土曲率系数增大, 承载力系数逐步降低, 其中重度影响系数对岩土极限承载力的影响不敏感; 渗透率与孔隙流体内压成正比, 且围压较大时岩土渗透率受内压影响变化较小, 应力不敏感, 相反, 围压较小时岩土应力敏感性较强; 在围压不同阶段, 渗透系数对含石率变化的敏感系数曲线, 随着含石率的增加呈现先降低后上升再下降的总体态势, 含石率为60%时, 岩土渗透系数对含石率变化敏感性最高, 应力敏感性最高。

**关键词:** 坝坡基坑岩土; 非线性压力; 敏感系数; 应力敏感性; 围压测试; 渗透率

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 05-0076-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.014

GAO Jing, ZHANG Qi

(The Third Geological and Mineral Investigation Institute of Henan Bureau of Geology  
and Mineral Exploration and Development, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Taking the rock and soil of a reservoir dam foundation pit as the research object, a stress sensitivity test was conducted on the rock and soil of the dam slope foundation pit under nonlinear pressure failure. Based on the indicators of rock and soil permeability and permeability coefficient, the stress sensitivity of the rock and soil in the dam slope foundation pit is analyzed using nonlinear failure rules. The results show that the nonlinear parameters of rock and soil have a significant impact on the bearing capacity of the foundation pit of the dam slope. As the curvature coefficient of the rock and soil increases, the bearing capacity coefficient gradually decreases. Among them, the severe influence coefficient is not sensitive to the ultimate bearing capacity of the rock and soil; The permeability is directly proportional to the internal pressure of the pore fluid, and when the confining pressure is high, the permeability of the rock and soil is less affected by the internal pressure and less sensitive to stress. On the contrary, when the confining pressure is low, the stress sensitivity of the rock and soil is stronger; At different stages of confining pressure, the sensitivity curve of permeability coefficient to changes in rock content shows an overall trend of first decreasing, then increasing, and then decreasing with the increase of rock content. When the rock content is 60%, the sensitivity of rock and soil permeability coefficient to changes in rock content is the highest, and the stress sensitivity is the highest.

**Keywords:** rock and soil of dam slope foundation pit; non linear pressure; confining pressure test; pressure bearing sensitivity; sensitivity coefficient; permeability

## 0 引言

大坝具有蓄水、防洪、发电等功能<sup>[1]</sup>，其中土石坝是应用最广泛的坝型。土石坝包括坝顶、坝坡、基坑等部分。坝坡是土石坝重要组成部分<sup>[2]</sup>，可起到巩固大坝，防止水土流失的作用。在坝坡建设工程中，可按照坝坡防护要求和坝坡基坑施工图，选取适合的基坑防护类型。基坑防护可设置基坑壁支护方法，提高土坡稳定性，避免坝坡出现滑坡现象<sup>[3]</sup>。

岩土作为基坑主要材料，岩土性能直接影响基坑的安全性。岩土包括强度、内摩擦角、土抗剪强度、黏聚力等物理力学性能，这些性能间接影响坝坡基坑的稳定性，同时非线性压力破坏下也会使坝坡基坑岩土承压能力降低，直接影响坝坡基坑的稳定性。因此相关学者展开大量坝坡基坑岩土在非线性压力破坏下的承压试验研究。在以往研究中，郭院成等<sup>[4]</sup>研究挡墙平动模式下邻近长-短桩复合地基基坑土压力试验，通过分析基坑土压力曲线得出附加荷载对基坑土压力影响较大，并利用压力的简化求解方法，求出基坑土压力等于桩间的附加应力。但因该算法计算复杂，导致研究效率比较慢；而喻昭晟等<sup>[5]</sup>研究土压力系数非线性分析与计算方法，通过引入邓肯-张模型构建土压力系数非线性计算压力参数，分析各压力参数的敏感性。以上研究未从非线性破坏准则角度分析应力敏感性，基于此，通过非线性破坏准则对坝坡基坑岩土非线性压力破坏下的应力敏感性展开试验研究，为坝坡基坑工程建设提供科学性的参考。

## 1 试验研究

### 1.1 材料制备

试验用的坝坡基坑岩土选自水库大坝土体。混凝土板护坡位于大坝迎水面，大坝坝顶为混凝土路面，采用抛石防护措施。水库蓄水位为 158 m，在大坝坝坡挖深度为 146.3 m 的基坑，该地区地下水位在 145~150 m。在基坑工程完成后，地下水会渗入基坑内。基坑内土层主要以黏土、岩土、细沙组成，其中岩土含量最多。基坑岩土土层的物理性质见表 1。

表 1 坝坡基坑岩土的物理性质

Table 1 Physical properties of rock and soil in dam slope foundation pit

密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c$ /kPa	弹性模量 $E$ /MPa	内摩 擦角 $\varphi$ /°
26	0.29	22	6 000	39

为增加试验的科学性，取该地区坝坡基坑不同岩土土层的土壤，分别制备含石率为 20%、40%、60%、80% 岩土，在岩土制备中，按照土石比例混合均匀，加入适量水，充分搅拌均匀，并装入制样容器里，放进养护箱，养护时长为 30 d。4 种不同含石率岩土的颗粒分布特征指标见表 2。在进行试验前，对岩土实施老化处理。岩土老化处理过程：在进口压力 4~55 MPa 区间内，重复循环 2 次升降压试验后，实现岩土老化处理。

表 2 岩土的颗粒分布特征指标

Table 2 Particle distribution characteristics of rock and soil

含石率 /%	土/石 阈值	土样不均匀 系数	土样曲率 系数
20	0.66	9.39	1.33
40	4.29	59.82	0.26
60	6.93	75.89	8.21
80	7.49	49.32	11.62

### 1.2 非线性破坏规则

非线性破坏规则：当坝坡基坑岩土遭受压力破坏时的最大主应力与最小主应力的关系是非线性的<sup>[6]</sup>。在应力空间  $(\kappa, \theta_a)$  内，非线性破坏规则表达式为：

$$\kappa = G_0 \left( 1 + \frac{\theta_a}{\theta_i} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1)$$

式中： $\theta_i$  为表面负载； $b$  为土样曲率系数； $G_0$  为截距； $\theta_a$  为正应力为； $\kappa$  为剪应力。

将式 (1) 绘制成曲线，如图 1 所示。

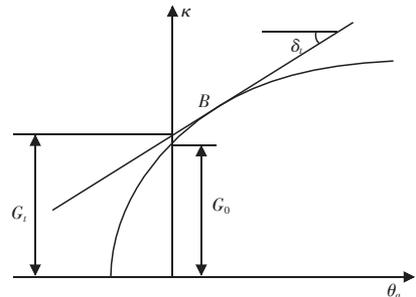


图 1 非线性破坏规则曲线及其切线

Fig. 1 Nonlinear failure rule curve and its tangent line

当  $b=1$  时， $B$  点的切线方程如下：

## 岩土力学

$$\kappa = \theta_a \tan \delta_i + G_i \quad (2)$$

式中:  $\tan \delta_i$  为斜率;  $G_i$  为切线的截距。  $G_i$ 、 $\tan \delta_i$  的计算公式为:

$$\begin{cases} G_i = \theta_i \tan \delta_i + G_0(b-1)b^{-1}[(b\theta_i \tan \delta_i)/G_0]^{1/b} \\ \tan \delta_i = d\kappa/d\theta_a = G_0 b^{-1} \theta_i^{-1} (1 + \theta_a/\theta_i)^{1/b} \end{cases} \quad (3)$$

按照非线性破坏规则分析坝坡基坑岩土在非线性压力破坏下的极限承载力  $P_u$  和重度、黏聚力以及表面负载三种承载力影响系数进行分析, 衡量坝坡基坑岩土在非线性压力破坏下的承压敏感性。

### 1.3 承压敏感性试验指标

#### 1.3.1 岩土的渗透率

岩土应力敏感性与有效应力有关。因为岩土上覆压力使岩土的孔隙结构发生改变, 导致岩土储集层里渗流通道发生改变, 引起岩土渗透率降低<sup>[7]</sup>, 为此可通过坝坡基坑岩土渗透率衡量其承压敏感性。

坝坡基坑岩土的渗透率表达式为:

$$h = QP_a \mu L / 5D(p_1^2 - p_2^2) \quad (4)$$

式中:  $p_2$  为出口压力;  $h$  为渗透率;  $L$  为试验岩土体积;  $P_a$  为大气压;  $Q$  为体积流量;  $p_1$  为进口压力;  $D$  为岩土横截面积;  $\mu$  为黏度。

#### 1.3.2 渗透系数对岩土含石率变化的敏感性

渗透系数对含石率变化敏感系数  $E_k$ , 表达式为:

$$E_k = \Delta k / [\Delta (rbp) k] \quad (5)$$

式中:  $\Delta k$  为渗透系数差值绝对值;  $k$  为不同含石率岩土渗透系数;  $\Delta (rbp)$  为含石率差值。  $E_k$  值越小表明渗透系数对含石率变化敏感性低, 表明此时岩土的承压敏感性较低<sup>[8]</sup>。

通过非线性拟合描述围压与渗透系数关系, 表达式如下:

$$k = k_0 e^{-\gamma p_c} \quad (6)$$

式中:  $p_c$  为围压;  $\gamma$  为拟合参数;  $k$  为样本渗透系数;  $k_0$  为围压为 0 时渗透系数;  $e$  为指数函数。

## 2 试验分析

### 2.1 非线性破坏准则对坝坡基坑岩土承载力的影响

为了便于分析非线性破坏准则对坝坡基坑岩土承载力的影响, 设置坝坡基坑岩土介质和承载系数均需服从该准则, 抗剪强度指标分别为  $G_i$ 、 $\delta_i$ 。

以上述制备的坝坡基坑岩土为试验对象, 坝坡基坑

岩土重度  $\lambda = 20 \text{ kN/m}^3$ , 岩土材料参数  $G_0 = 95 \text{ kPa}$ ,  $\theta_i = 247.4 \text{ kPa}$ , 岩土材料参数  $b$  取值范围为 1.0 ~ 12.0。分析表 3 可知, 随着参数  $b$  增大, 坝坡基坑岩土极限承载力逐渐降低。在参数  $b$  相同时, 坝坡基坑基底光滑极限承载力小于坝坡基坑基底粗糙极限承载力; 随着参数  $b$  增大, 两者之间的极限承载力差值在逐渐减小。当  $b = 12.0$  时差值仅为 0.3, 说明此时不受坝坡基坑基底材料影响。

表 3 极限承载力  $P_u$  和参数  $b$  的关系  
Table 3 Relationship between ultimate bearing capacity  $P_u$  and parameter  $b$

参数 $b$	极限承载力 $P_u/\text{kPa}$		
	基底粗糙	基底光滑	差值
1.0	1 786.7	1 744.1	42.8
1.4	1 065.4	1 055.8	9.7
1.8	863.4	858.6	4.9
2.2	770.1	767.1	3.1
2.6	716.7	714.5	2.3
2.8	697.7	695.7	2.1
3.2	681.1	680.3	1.8
12.0	560.1	559.8	0.3

在坝坡基坑基底光滑时, 参数  $b$  对三种承载力系数的影响结果, 如图 2 所示。三种承载力系数曲线随着参数  $b$  增大呈下降趋势。当  $b > 2.2$  时, 三种曲线变化幅度较小。此时重度影响系数近似于 0, 因此在求解极限承载力时, 参数  $b$  最大时不用研究重度影响系数对极限承载力的影响, 即在基底光滑时, 随着参数  $b$  的增大, 重度影响系数对非线性破坏准则下坝坡基坑岩土极限承载力的影响不敏感。

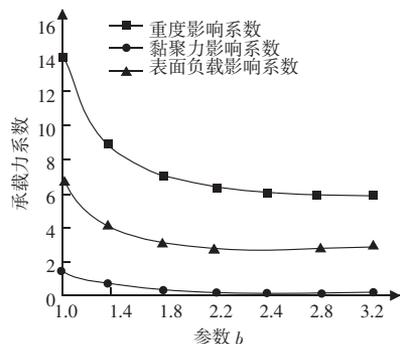


图 2 参数  $b$  和三种承载力系数的关系  
Fig. 2 Relationship between parameter  $b$  and three types of bearing capacity coefficients

### 2.2 渗透率应力敏感性试验

选取含石率为 20% 的岩土为试验对象, 在岩土经过老化处理保证渗透率趋于稳定后, 在恒温条件

下,进行渗透率应力敏感性试验。在不同围压下升降内压和渗透率的变化率情况,如图3和表4所示。

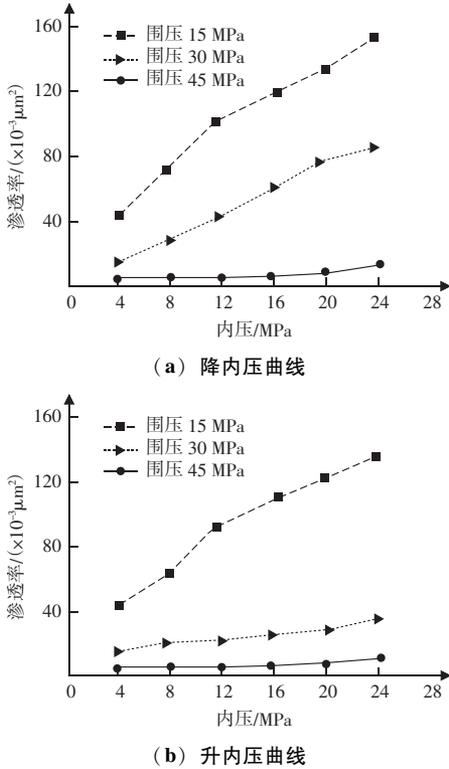


图3 升降内压时渗透率-内压曲线  
Fig.3 Permeability internal pressure curve during rise and fall of internal pressure

表4 不同围压回路下渗透率的变化率  
Table 4 Change rate of permeability under different confining pressure circuits

围压 /MPa	升降方式	渗透率/ ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}$ )		渗透率变化率/%
		最大值	最小值	
15	降内压	155.00	47.2	11.66
	升内压	135.00	46.3	10.98
30	降内压	90.00	7.33	6.24
	升内压	32.00	7.72	5.17
45	降内压	2.46	1.86	1.53
	升内压	2.33	1.87	1.26

渗透率与内压成正比,当内压升高时,渗透率也随之上升。当围压为45 MPa 时,在升降压力下渗透率变化率分别是 1.26%、1.53%。对比在低围压时的渗透率变化率,此时其渗透率变化率降低幅度较大,且渗透率较小,变化趋于平稳。说明在此时岩土出现微裂缝,但该裂缝在高压下可能发生闭合现象,此时渗透率变化趋于平稳态势。鉴于岩土结构一致、试验温度恒定,为此岩土渗透率变化主要受外力影响,微裂缝的存在提高了岩土渗流作用,

同时渗透率随压力的变化而变化,围压较大时岩土渗透率受内压影响变化较小,即应力不敏感,相反,围压较小时,岩土应力敏感性较强。

### 2.3 渗透系数对含石率变化的敏感性分析

不同围压加载、卸载时渗透系数对含石率变化的敏感系数曲线,如图4所示。在围压不同阶段,随着岩土含石率的增加,渗透系数对含石率变化的敏感系数曲线总体呈现出先降低后上升再下降的趋势。在围压卸载时,含石率在20%~40%时,岩土的敏感系数下降,说明敏感性比较低;含石率由40%增加至60%时岩土敏感性极高,而在80%含石率时敏感系数又出现大幅度降低。但在围压加载时,围压为0.13 MPa 时,系数曲线与总体趋势有区别,曲线波动比较大。含石率由40%增加至60%时,岩土的敏感性最大。经分析得出,含石率在20%~40%时,土占岩土比例较大,岩土孔隙度低、密度大,而含石率的上升提高土体对岩土渗透系数影响效果,则此时岩土应力敏感性降低;在含石率40%增加至60%时,岩石占岩土比例较大,随着含石率变大岩土孔

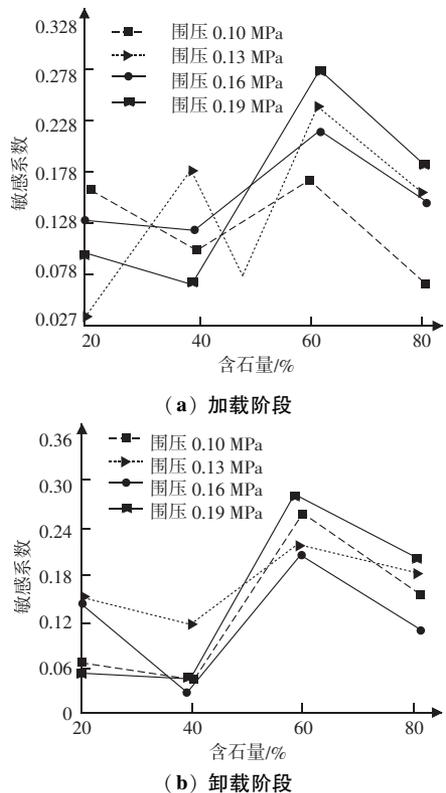


图4 渗透系数对含石率变化的敏感系数曲线  
Fig.4 Sensitivity coefficient curve of permeability coefficient to changes in stone content

## 岩土力学

隙度也随之增大,则此时岩土应力敏感性最大;当含石率增加至 80% 时,岩石占岩土比例最大并起到核心作用,但此时对孔隙度的影响微乎其微,则岩土应力敏感性降低。

### 2.4 渗透系数和围压函数关系

不同围压加载卸载时,岩土渗透系数和围压函数关系拟合曲线如图 5 所示,拟合结果见表 5。曲线平均拟合度高于 96%,说明拟合效果不错。经计算在围压为 0.19 MPa 时,由此可知,两个阶段拟合曲线具有良好的闭合性,因此围压函数能够表示对不同含石率岩土的渗透系数和围压关系。

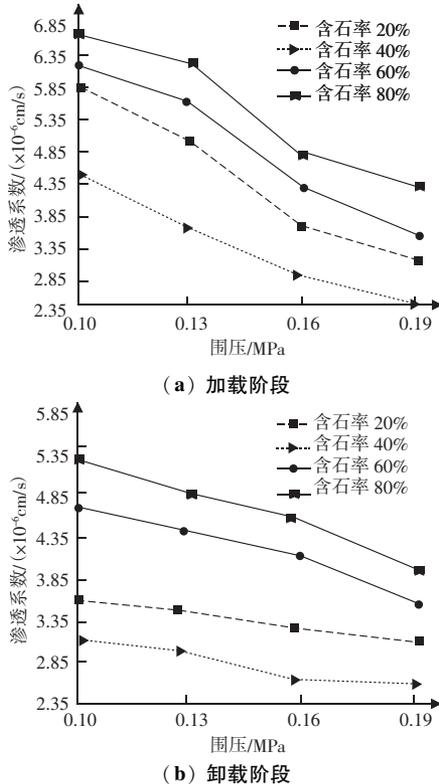


图 5 岩土渗透系数-围压关系拟合曲线  
Fig. 5 Fitting curve of sample permeability confining pressure relationship

表 5 岩土渗透系数与围压指数函数拟合结果  
Table 5 Fitting results of sample permeability coefficient and confining pressure index function

含石率 /%	加载阶段 拟合参数 /(cm/s)		加载阶段 拟合度 /%	卸载阶段 拟合参数 /(cm/s)		卸载阶段 拟合度/%
	$i_{0加}$	$y_{加}$		$i_{0卸}$	$y_{卸}$	
20	11.29	7.02	98.74	4.11	1.83	96.73
40	7.66	6.02	96.96	3.67	2.12	93.03
60	10.84	6.13	98.16	6.31	3.51	92.22
80	10.98	5.52	99.38	7.02	3.37	94.26

### 3 结论

在坝坡基坑开挖前需充分研究岩土的基本物理特性和影响岩土承载力的原因,减少施工中因岩土承压能力不足导致基坑滑坡或坍塌事故的发生,提高大坝的整体稳定性。制备不同含石率的坝坡基坑岩土,通过非线性破坏规则分析非线性压力破坏下岩土应力敏感性,得到结论如下:

(1) 非线性破坏准则对坝坡基坑岩土承载力的影响主要表现在岩土非线性参数对坝坡基坑地基影响较大,随着非线性参数增大,承载力逐步降低;当非线性参数最大时,承载力受土体重度系数的影响最小。

(2) 围压较大时岩土渗透率受升降内压影响变化较小,即岩土应力敏感性较弱;相反,围压较小时,岩土应力敏感性较强。

(3) 渗透系数对含石率变化的敏感性系数曲线随含石率的增加呈现先降低后上升再下降的总体趋势。

(4) 在围压不同阶段,指数函数可表示岩土渗透系数与围压的关系。

### 参考文献

- [1] 应宏伟,王迪,许鼎业,等.波动承压水作用下基坑底部弱透水层超静孔压试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(3):732-738.
- [2] 张治国,叶铜,张成平,等.Stokes二阶波作用下斜坡海床中盾构隧道周围砂土渗流压力响应分析[J].岩土力学,2022,43(6):1635-1659.
- [3] 王建新,杨贵,刘汉龙,等.地震作用下混凝土-堆石组合坝墙体位移及动土压力研究[J].工程科学与技术,2020,52(2):103-109.
- [4] 郭院成,谷少闯,魏艳卿,等.挡墙平动模式下邻近长-短柱复合地基基坑土压力试验研究[J].工业建筑,2022,52(5):174-178.
- [5] 喻昭晟,陈晓斌,张家生,等.粗颗粒土的静止土压力系数非线性分析与计算方法[J].岩土力学,2020,41(6):1923-1932.
- [6] 侯天顺,杨凯旋.挡土墙后EPS颗粒混合轻填土填料静止土压力特性模型试验研究[J].岩土力学,2021,42(12):3249-3259,3270.
- [7] 张乐,党发宁,高俊,等.线性加载条件下考虑应力历史的饱和黏土一维非线性固结渗透试验研究[J].岩土力学,2021,42(4):1078-1087.
- [8] 曾志远,何雄君,仵卫伟.桁架梁工字钢腹杆承压试验及模型修正研究[J].武汉理工大学学报,2022,44(5):68-75.