

# 土岩混合边坡侧向岩土压力分布规律研究

李寒雨<sup>1</sup>, 周海清<sup>1</sup>, 汪原野<sup>2</sup>

<sup>1</sup>重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

<sup>2</sup>洛阳栾川钼业集团股份有限公司, 河南 洛阳

收稿日期: 2026年8月11日; 录用日期: 2026年9月5日; 发布日期: 2026年9月16日

## 摘要

本文将以红黏土-灰岩土岩混合边坡为对象, 充分考虑土层和岩层之间可能存在的相互作用, 通过改变土岩分界面形态、土岩比、外倾结构面, 利用Flac3d有限差分软件, 对具有不同地层结构的红黏土-灰岩土岩混合边坡的岩土压力分布规律进行系统的研究。主要成果如下: 在红黏土-灰岩土岩混合边坡中, 支护结构所承受的岩土压力随着土层厚度比例增大, 桩后侧向压力总值显著增大, 整体上表现出“R”形分布特征, 土压力在土岩界面处发生回收现象, 这种回收现象随着土层厚度的增加而变得更加明显; 土岩分界面顺倾时, 随着土岩分界面坡率的增大, 上部土层土压力整体表现为先降低再增加再降低的趋势, 且随着土岩分界面坡率增加至0.2, 上部土层土压力由“C”形分布逐渐变为近似梯形的分布形式; 当岩层存在外倾结构面时, 岩层自身稳定性降低, 桩后岩土体之间的错动变形减弱, 岩层对土体的限制作用减弱, 从而弱化了界面处的土压力回缩现象, 土层土压力整体趋势演变为三角形分布。

## 关键词

土岩混合边坡, 土压力, 分布规律

# Study on the Lateral Soil and Rock Pressure Distribution of Mixed Soil-Rock Slopes

Hanyu Li<sup>1</sup>, Haiqing Zhou<sup>1</sup>, Yuan Ye Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

<sup>2</sup>CMOC Group Limited, Luoyang Henan

Received: August 11, 2026; accepted: September 5, 2026; published: September 16, 2026

## Abstract

This article focuses on red clay-limestone mixed soil-rock slopes, fully considering the possible interaction between soil layers and rock layers. By changing the shape of the soil-rock interface, the

文章引用: 李寒雨, 周海清, 汪原野. 土岩混合边坡侧向岩土压力分布规律研究[J]. 交叉科学快报, 2026, 10(5): 1325-1334. DOI: 10.12677/isl.2026.105156

soil-rock ratio, and the outward-inclined structural plane, and using Flac3d finite difference software, the study systematically examines the stress distribution patterns of red clay-limestone mixed soil-rock slopes with different geological structures. The main findings are as follows: In red clay-limestone mixed soil-rock slopes, the geotechnical pressure on the support structures increases significantly as the proportion of soil thickness grows, and the total lateral pressure behind the piles shows an overall “R”-shaped distribution. Soil pressure is recovered at the soil-rock interface, and this recovery becomes more noticeable as the soil layer thickens. When the soil-rock interface is inclined in the direction of the slope, as the slope rate of the soil-rock interface increases, the upper soil layer initially decreases, then increases, and finally decreases in pressure. When the slope rate reaches 0.2, the upper soil layer pressure distribution changes from a “C” shape to an approximately trapezoidal form. When there is an outward-inclined structural plane in the rock layer, the stability of the rock layer decreases, the relative displacement deformation between the rock and soil behind the pile diminishes, and the rock’s restriction on the soil weakens, thereby reducing the soil pressure recovery at the interface. Overall, the soil pressure in the soil layer evolves into a triangular distribution trend.

## Keywords

Mixed Soil-Rock Slopes, Soil Pressure, Distribution Pattern

Copyright © 2026 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. 前言

边坡通常定义为土体表面完全临空或土体裸露的地质岩土体,其组成为坡顶、坡面、坡脚和其下基岩层。根据地层条件分类,上部由土体、下部为基岩组成的边坡被称作土岩混合结构边坡。随着人类频繁利用土地进行建造活动和极端地质、气候现象出现的频率越来越大,边坡稳定性问题越来越成为制约土木、水利、公路、市政等行业工作的重要因素[1]。处于不安全状态的边坡常常会导致滑坡灾害的发生,如崩塌、滑坡、泥石流等,对周边人员的财产和生命安全造成极大威胁。因此加强边坡治理规律与方法的研究是确保人民生命财产安全的迫切需要。其中,土岩混合边坡由于岩层与土层在强度和变形模量等特性上都存在较大差异,侧向岩土压力分布规律比单一的土质边坡或岩质边坡更为复杂。

目前,关于土岩混合边坡的侧向岩土压力分布规律探究及计算的研究相对较少,高永平等[2]认为边坡侧压力的变化情况与支护时间点存在联系,合理的支护时间和支护方案是工程设计中最为重要的考虑因素。彭亚敏等[3]针对某水库库岸土岩混合边坡扶壁式挡土墙工程,提出了一项创新的土压力计算方法,采用三维数值方法和强度折减法相结合,准确地估算土岩混合边坡的受力情况,包括土压力的大小和作用方向。黄永金[4]发现,对于基岩面水平的土岩混合边坡,土压力的分布呈现出一个特定的“R”形分布,即上部土层土压力逐渐增大,然后逐渐减小,最终呈现出一个“R”形状分布趋势。寿凌超[5]针对基坑工程中的土岩混合边坡地层情况展开研究,研究发现,开挖深度在土岩界面以上时,主动土压力呈现出三角形分布;而土岩界面以下时,主动土压力的分布形状逐渐演变为“R”型。

然而,不同地理区域、不同地质条件下的土岩混合边坡可能存在较大差异,这些差异对侧向岩土压力的分布规律与土岩间的相互作用都会产生关键影响。同时现有研究对于“R”形特殊的岩土压力分布形式的产生机理尚未研究清楚。因此很有必要针对不同的地区性土岩混合边坡进行岩土压力分布规律的进一步研究。本文将重庆南山某红黏土-灰岩土岩混合边坡为对象,深入研究其侧向岩土压力分布规律。

## 2. 破坏模式

### 2.1. 类型

边坡的破坏模式多种多样，且与土岩混合边坡岩土压力分布规律密切相关。因此，需要全面了解土岩混合边坡的破坏模式，并分析破坏模式对土岩混合边坡岩土压力分布规律的影响。

土岩混合边坡的破坏模式主要有三种类型，第一种上部土体发生破坏，其破坏形式与土质边坡的破坏类型相同。由于上部土体强度较低，边坡破坏发生在上部土层中，为滑动破坏模式。根据滑面的形状不同，可以分为直线形、圆弧形、折线形。第二种是上部土层沿着土岩分界面发生滑移破坏。土岩分界面不稳定时，上部土体沿着土岩分界面向临空面发生滑移。在拉应力的作用下，滑面后缘可能会出现拉裂现象。滑移破坏模式有平面滑移-拉裂破坏、沿土岩分界面平面滑移破坏、平面-圆弧破坏。滑面形状有直线形、折线形、直线-圆弧形等。第三种是下部岩体发生破坏，下部岩体破坏后，上部土体也随之发生滑移破坏[4] [6] [7]。此类破坏模式与岩质基坑破坏模式有许多相同点。其主要破坏模式包含以下几种[8]-[10]：平面滑动破坏；弧面滑动；楔体(块体)滑动破坏；倾倒破坏；溃曲破坏[11]。

### 2.2. 影响因素

土岩混合边坡的破坏模式或变形是多种内外因素综合作用的结果。边坡的形态结构、土体性质、岩石性质、地层组成等因素对其变形与破坏产生重要影响，是导致边坡失稳的内在因素。外在因素包括降雨、地震、人类活动等外部环境的作用，这些外在要素通过对内在要素的影响直接导致边坡的失稳和变形。

(1) 地层特性：地层特性对边坡稳定性具有重要影响。不同性质的岩土体和组合会直接影响边坡的稳定性。

(2) 边坡高度：边坡的整体自重随着高度增加而增加，导致土体的土压力或滑动推力增加，从而降低了边坡的稳定性。在坡脚处会产生应力集中现象，随着这一区域的扩大，滑坡规模也会增大。

(3) 土岩分界面坡率：坡率大小影响着边坡内部应力和应变的传递关系，尤其是在边坡开挖过程中土岩分界面在某一步开挖施工中出现在支护结构的悬臂段后，引起土岩相互作用的变化，影响着边坡整体的稳定性。

(4) 外倾结构面：对于地层岩性较稳定的岩层边坡来说，外倾结构面的存在是影响岩层变形与破坏的主要控制因素，在上部土体荷载的作用下，岩层沿着外倾结构面发生破坏，整体上联合土体发生混合变形破坏。

对于红黏土-灰岩土岩混合边坡的研究，本文首先针对土岩混合边坡土岩界面形态进行分类，不同类型的土岩混合边坡具有不同的破坏模式，同时土岩相互作用机理也不尽相同，体现在支挡结构后的岩土压力分布规律也会不同。根据土岩分界面形态，下文将土岩混合边坡分为“界面水平-岩层无外倾、界面水平-岩层外倾、界面顺倾-岩层无外倾、界面顺倾-岩层外倾”四类。

## 3. Flac3d 数值模拟

本文数值模拟做出如下假设：

- (1) 上层土体与下层岩体假定为弹塑性材料；
- (2) 抗滑桩与挡土板假定为弹性材料；
- (3) 岩层、土层、支护结构材料均质各向同性；
- (4) 不考虑降雨与地下水的作用。

在 Flac3D 中需对相应的 Mohr-Coulomb 本构模型与弹性本构模型材料赋予物理力学参数,包括密度、弹性模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角等。根据实际工程地勘报告,本次数值模拟材料力学参数如下表 1 和表 2 所示:

**Table 1.** Physical and mechanical parameters of rock and soil  
**表 1.** 岩土物理力学参数表

| 名称    | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa)            | 泊松比  | 粘聚力(kPa) | 内摩擦角(°) |
|-------|------------------------|----------------------|------|----------|---------|
| 红黏土   | 1730                   | 5                    | 0.35 | 25       | 12.5    |
| 中风化灰岩 | 2700                   | 45 × 10 <sup>3</sup> | 0.25 | 1500     | 35      |

**Table 2.** Physical and mechanical parameters of sheet-pile wall  
**表 2.** 桩板墙物理力学参数

| 名称   | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 弹性模量(MPa)            | 泊松比  | 粘聚力(kPa) | 内摩擦角(°) |
|------|------------------------|----------------------|------|----------|---------|
| 混凝土桩 | 2500                   | 25 × 10 <sup>3</sup> | 0.30 | —        | —       |
| 混凝土板 | 2500                   | 25 × 10 <sup>3</sup> | 0.30 | —        | —       |

在 Flac3D 中,建立桩、土、岩接触面时需要设置包括接触面粘聚力、摩擦角、法向刚度、切向刚度以及抗拉强度等一系列参数。法向与切向刚度为 Flac3D 模拟软件内置参数,需要由材料物理参数进行换算,法向刚度和切向刚度的计算公式如下,本次数值模拟中接触面具体参数如下表 3 所示。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \tag{1}$$

$$K_n = K_s = 10 \max \left[ \frac{\left( K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta Z_{\min}} \right] \tag{2}$$

式中:  $K_n$  ——法向刚度;  
 $K_s$  ——切向刚度;  
 $K$  ——体积模量;  
 $E$  ——弹性模量;  
 $G$  ——剪切模量;  
 $\nu$  ——泊松比;  
 $\Delta Z_{\min}$  ——接触面单元相邻的实体单元相连最小尺寸。

**Table 3.** Mechanical parameters of contact surface  
**表 3.** 接触面力学参数表

| 类型       | 法向刚度(MPa/m)           | 切向刚度(MPa/m)           | 粘聚力(kPa) | 内摩擦角(°) |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------|---------|
| 土 - 岩接触面 | 1.8 × 10 <sup>3</sup> | 1.8 × 10 <sup>3</sup> | 25       | 12.5    |
| 桩 - 土接触面 | 1.8 × 10 <sup>3</sup> | 1.8 × 10 <sup>3</sup> | 25       | 12.5    |
| 桩 - 岩接触面 | 2 × 10 <sup>3</sup>   | 2 × 10 <sup>3</sup>   | 1500     | 35      |

### 3.1. 土岩分界面水平下土岩混合边坡的开挖模拟分析

根据土层和岩层相对厚度的不同,分别建立了三种类型数值模型(土岩比 1:1、土岩比 2:1、土岩比 1:2)。桩板墙结构计算模型信息如下:桩长 17 m、桩径 1.2 m、嵌固段深度 5 m、悬臂段 12 m。

以土岩比 1:1 的红黏土-灰岩土岩混合边坡地质模型为例,通过从模型中提取的应力和岩土侧压力曲线数据,分析不同土岩厚度比例对岩土压力分布规律的影响。

从图 1 开挖过程中水平应力云图变化可以看出,整体上土层与岩层之间仍存在明显的分层现象,土层与岩层的侧向压力随着开挖均呈减小趋势。

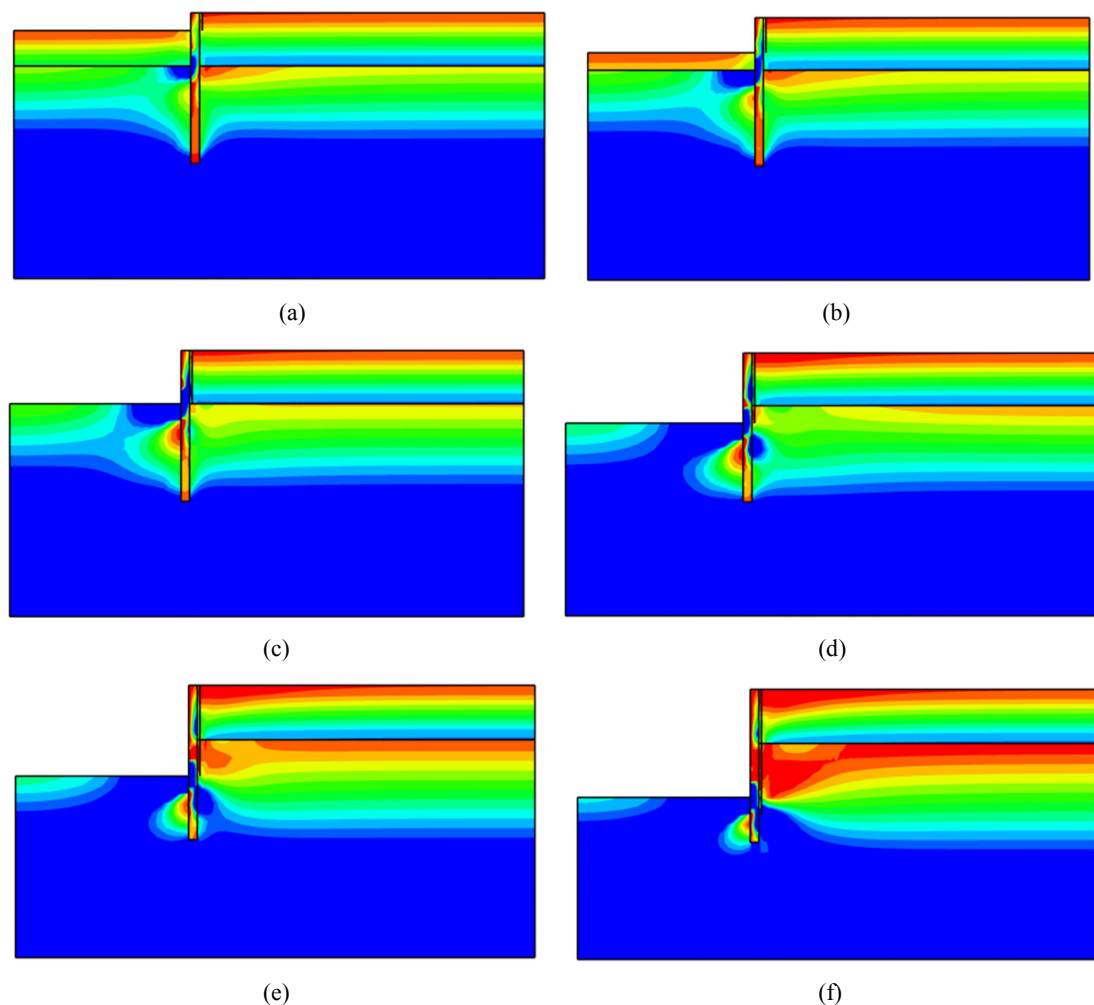
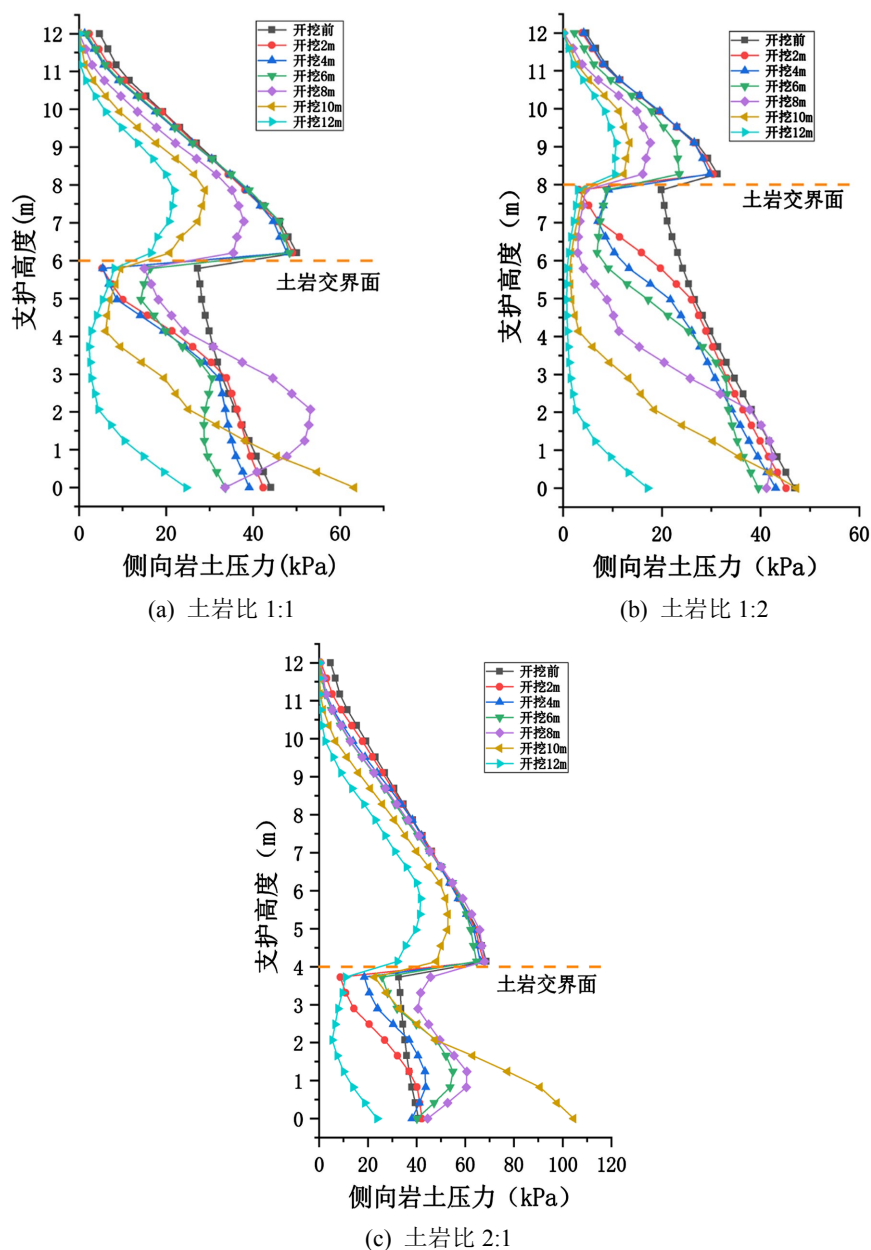


Figure 1. Nephogram of Horizontal Stress Variation with Excavation

图 1. 随开挖变化的水平应力云图

为了更加准确地分析红黏土-灰岩土岩混合边坡侧向岩土压力变化规律,绘制支护桩后三种不同土岩比的土岩混合边坡随开挖进行的侧向岩土压力变化曲线,如图 2 所示。

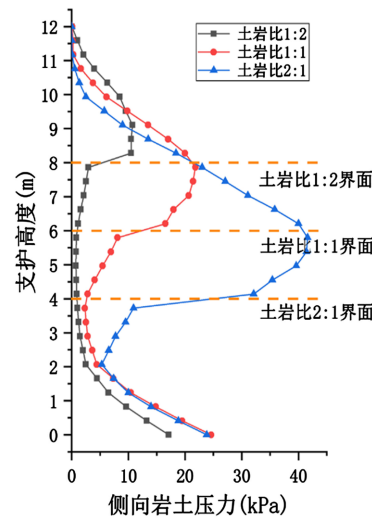
根据图 2 可得,整体上,岩土压力随开挖进行呈现减小的趋势,随着开挖的进行,开挖侧的岩土体逐渐被移除,支护结构失去反力,在岩土压力的作用力逐步发生位移。在此过程中,桩后的土体状态从静止土压力状态逐渐转变为主动土压力状态,故土层与岩层侧向压力整体上呈现出逐渐减小的趋势。



**Figure 2.** Distribution Diagram of Lateral Rock and Soil Pressure During Excavation  
**图 2.** 随开挖进行的侧向岩土压力分布图

在土岩界面以上开挖时, 桩悬臂段后为纯土层, 桩后土压力分布规律符合库仑和朗肯土压力理论, 整体上呈现出近似三角形的分布形式。当开挖的深度达到土岩界面(三种模型分别为 6 m、4 m、8 m)时, 桩悬臂段后为土岩混合层, 土压力分布逐步由三角形过渡为近似的“C”形分布, 在靠近土岩界面处发生了压力回收现象。总体来看, 边坡开挖完成后, 土岩混合边坡的桩后岩土压力呈现出“R”形分布特征。

对比三种土岩比下土岩混合边坡在开挖完成后侧向压力分布曲线如图 3 所示, 随着土层比例增大, 桩后侧向压力总值显著增大, 说明土层在土-岩二元边坡总岩土压力中起主导作用。此外, 发现在土层接近土岩界面处时, 三种土岩比的模型的侧压力分布曲线都呈现出侧压力的回收现象, 这种回收现象随着土层厚度的增加而变得更加明显。



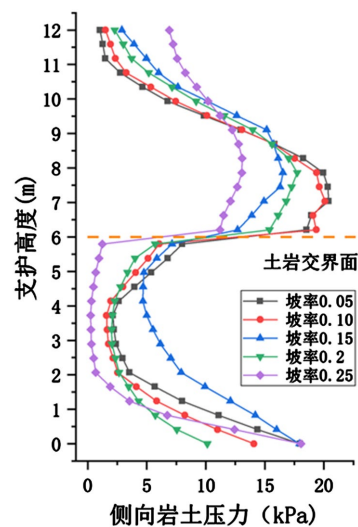
**Figure 3.** Comparison of lateral rock-soil pressure with different soil-rock ratios

**图 3.** 不同土岩比侧向岩土压力对比

### 3.2. 土岩界面顺倾下土岩混合边坡的开挖模拟分析

在实际工程中,很多土岩混合边坡的土岩界面并不是水平的,而是呈现出一定的倾斜角度。因此,模拟界面顺倾的土岩混合边坡开挖可以更真实地反映实际工程中的地质条件。界面顺倾会改变边坡土体的受力状态,从而影响滑坡推力或主动土压力的方向和大小。通常在界面顺倾的情况下,支挡结构土压力荷载的设计值要综合考虑主动土压力与滑坡推力的大小,选择两者中较大值作为支挡结构的设计荷载。但没有考虑到土岩相互作用的影响。因此,研究分析土岩相互作用影响下土岩界面顺倾的红黏土-灰岩土岩混合边坡的岩土压力分布规律是相当有必要的。

在土岩比 1:1 的情况下建立土岩分界面不同坡率(0.05~0.25)的土岩混合边坡模型,记录桩后侧压力随土岩分界面坡率改变土压力分布规律的变化。



**Figure 4.** Lateral rock and soil pressure distribution of binary slope with different slope rates

**图 4.** 不同坡率二元边坡侧向岩土压力分布

侧向岩土压力曲线图 4 展示了在支护高度范围内支护桩受到的岩土压力分布情况。对于土层部分而言,当土岩界面的坡率从 0.05 增加到 0.1 时,整体土压力呈现下降趋势;当坡率从 0.1 增加到 0.15 时,整体土压力仍然继续下降;而当坡率从 0.15 增加到 0.2 时,整体土压力则呈现出增加的趋势;进一步增大坡率至 0.25 时,整体土压力再次呈现下降趋势。因此,整体趋势表现为先降低,再增加,再降低的规律。观察整体土压力分布曲线发现,随着坡率的增加,土压力曲线逐渐从“R”形分布转变为上部近似矩形分布,而下部岩层侧压力呈现非线性增加分布形式。

3.3. 外倾结构面影响下的开挖模拟分析

在土岩比 1:1 的情况下,在下部岩层设置楔状体滑块,并在楔状体滑块与基岩之间设置接触面,用以模拟外倾滑块沿外倾结构面的下滑与错动;外倾滑块与岩层间接触面物理参数设定为土层抗剪性能指标 0.8 倍(见下表 4),模拟外倾结构面与下部岩层之间存在软弱夹层的影响,分步开挖、筑板,并记录岩土压力变化规律。

Table 4. Physical parameters of contact surface of extroversion structural plane

表 4. 外倾结构面接触面物理参数

| 类型     | 法向刚度(MPa/m)       | 切向刚度(MPa/m)       | 粘聚力(kPa) | 内摩擦角(°) |
|--------|-------------------|-------------------|----------|---------|
| 结构面接触面 | $1.8 \times 10^9$ | $1.8 \times 10^9$ | 20       | 10      |

从图 5、图 6 可以得出,作用在桩后的侧向岩土压力呈现明显的三段式分布特征,其中土层部分的土压力随深度呈线性增加,呈现为三角形分布。在楔状滑体处,由于楔状滑体沿着外倾结构面滑动,在外倾结构面影响下,该处岩层的侧压力明显增大,在(3~6 m)处呈近似的梯形分布。在外倾结构面下基岩部分,岩石压力出现第二次拐点,岩石压力在外倾结构面下(3 m)处开始减小,接下来(0~3 m)小幅度线性增加。

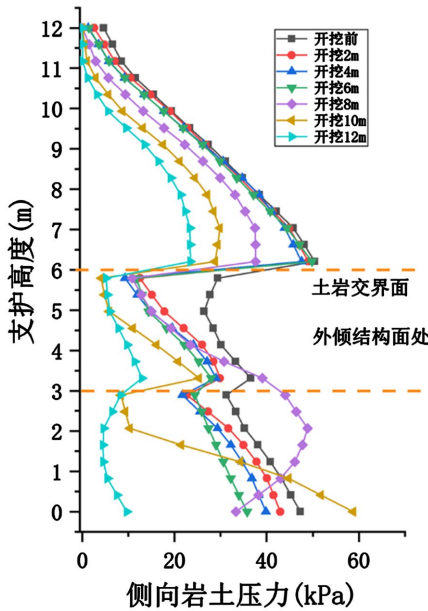
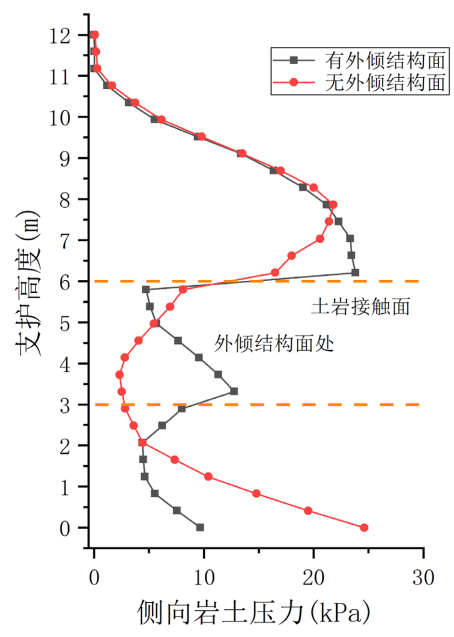


Figure 5. The distribution curve of rock and soil pressure under the influence of extroversion  
图 5. 外倾影响下的岩土压力分布曲线



**Figure 6.** Comparison of rock and soil pressure with and without extraversion structural plane  
**图 6.** 有无外倾结构面岩土压力对比

4. 研究局限性与展望

本文针对红黏土 - 灰岩混合边坡的侧压力分布进行研究分析，得出了不同地层条件下的边坡侧向岩土压力分布规律，并利用水平层析法结合库仑法给出了红黏土 - 灰岩混合边坡的侧压力数值解，但研究仍有许多不足。本文研究对象和得出的结论均针对红黏土 - 灰岩强度条件下的混合边坡，该规律是否适用于广泛的土 - 岩类混合边坡还需继续研究。

5. 总结

在土岩分界面水平的情况下，支护结构所承受的岩土压力整体上表现出“R”形分布特征，侧向岩土压力在土岩分界面处发生回收现象，且这种回收现象随着土层厚度的增加而变得更加明显，反映了土层和岩层之间变形协调相互作用。

在土岩分界面顺倾时，由于土岩分界面坡率的增大，土层的下滑力逐渐超过岩层对土层的限制的极限，上部土层土压力整体表现为先降低再增加再降低的趋势；在岩土压力分布上，随着土岩界面坡率增加至 0.2，上部土层土压力由“C”形分布逐渐变为了近似梯形的分布形式。

在岩层存在外倾结构面时，由于外倾结构面的存在，岩层自身稳定性降低，桩后岩土体之间的错动变形减弱，岩层对土体的限制作用减弱，从而弱化了界面处的土压力回缩现象，土层土压力整体趋势演变成了三角形分布。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2520747)。

参考文献

[1] Evans, S.G. and DeGraff, J.V. (2002) Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms. Geological Society of America.

- 
- [2] 高永平, 张天友, 周栋梁. 岩质边坡侧压力的形成机理浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1466-1469.
  - [3] 彭亚敏, 沈振中, 沈心哲, 等. 天然土岩分层边坡扶壁式挡土墙的土压力及稳定分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 136-139.
  - [4] 黄永金. 土岩组合边坡抗滑桩支护结构受力机理研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
  - [5] 寿凌超. 土岩组合地层深基坑桩撑式围护结构的土压力和力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江科技学院, 2021.
  - [6] 寿凌超, 王立峰, 王珂, 等. 土岩组合地层地铁深基坑土压力实测研究[J]. 浙江科技学院学报, 2021, 33(3): 248-253+260.
  - [7] 雷建海. 贵州岩溶地区层状岩质基坑失稳机理及稳定性评价理论研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
  - [8] 孟江. 基于 GA-BP 的基坑施工引起隧道隆起变形预测研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2521-2529.
  - [9] 吕凡恩. 土岩组合地层地铁车站深基坑变形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2020.
  - [10] 庞浩, 郑玉元. 基于 Midas/GTS 的岩土混合边坡稳定性分析[J]. 贵州科学, 2015, 33(1): 30-33.
  - [11] 陈育民, 徐鼎平. FLAC3D 基础与工程实例[M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.