

基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析

王佳宇, 曹文贵, 王雨波, 张慧姐

An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces

WANG Jiayu, CAO Wengui, WANG Yubo, and ZHANG Huijie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

王恒利, 邹正盛, 刘京敏, 王新宇 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 64-71

无侧限压缩条件下黏性土磁各向异性研究

A study of anisotropy of magnetic susceptibility of cohesive soil under unconfined compression

孙茜, 阎长虹, 刘羊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 123-130

无黏性土的压缩特性及模型

Compression characteristics and models of cohesionless soil

马露 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 72-77

考虑竖向附加应力作用的一维垂直土柱仪研制与应用

Research and application of stress-controllable soil column instrument

张林, 张登飞, 陈存礼, 庞腾腾, 孙佩娜 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 112-119

基于应力修正的土体抗剪强度影响因素分析

An analysis of the factors affecting shear strength parameters of soils based on stress correction

龚琰, 朱建群, 陈浩锋 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 95-95

岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究

Experimental research on water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass

郭永春, 许福周, 许嘉伦, 屈智辉 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 86-92



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103006

基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析

王佳宇, 曹文贵, 王雨波, 张慧姐
(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 墙背粗糙导致墙后土体应力方向发生偏转, 目前, 黏性土中考虑土体应力方向偏转对土压力影响的研究较少。为此, 本文首先在探讨墙后土体主应力偏转规律的基础上, 采用沿主应力迹线分层形成曲线薄层单元。然后, 通过分析曲线薄层单元的受力情况, 建立曲线薄层单元的静力平衡方程, 推导出平动模式下黏性土体土压力沿墙高分布的公式, 进而获得黏性土土压力分析新方法。最后, 将本文方法与实测结果和现有理论进行对比验证和参数分析, 验证本文方法的可靠性和合理性。研究表明: 考虑墙土摩擦效应的计算结果更能准确反映黏性土体土压力沿墙高的分布规律; 土压力大小随黏聚力增大而减小; 随着墙土摩擦角的增大, 土压力合力逐渐减小, 作用点高度缓慢升高。

关键词: 挡土墙; 黏性土; 主动土压力; 土拱效应; 主应力迹线

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0081-08

An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces

WANG Jiayu, CAO Wengui, WANG Yubo, ZHANG Huijie
(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: The rough back of a wall causes the deflection of the soil stress direction behind the wall. At present, there are few studies on the influence of the deflection of the soil stress direction on the earth pressure in cohesive soils. For this reason, this paper firstly discusses the deflection law of the principal stress of the soil behind the wall, and adopts a layered formation of curved thin-layer elements along the principal stress trace. By analyzing the force of the curved thin-layer element, the static balance equation of the curved thin-layer element is established, and the formula for the distribution of the earth pressure of the cohesive soil along the wall height in the translational mode is derived, and the new analysis method of the cohesive earth pressure is obtained. Finally, the method in this paper is compared with the actual measurement results and the existing theory and the parameters are analyzed to verify the reliability and rationality of the method in this paper. The research results show that the calculation results considering the effect of wall-soil friction can more accurately reflect the distribution law of cohesive soil along the wall height; the magnitude of earth pressure decreases with the increasing cohesion. With the increase of wall-soil friction angle soil, the pressure resultant force gradually decreases, and the height of the point of application increases slowly.

Keywords: retaining wall; cohesive soil; active earth pressure; soil arching effect; principal stress traces

挡土墙后土压力的计算一直是土力学的重点问题, 明确作用于挡土墙上土压力的大小和分布,

对于挡土墙设计具有重要的工程实际意义。自从 18 世纪朗肯和库仑土压力方法理论创建以来, 其凭借

收稿日期: 2021-03-01; 修订日期: 2021-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(751202001225)

第一作者: 王佳宇(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: 1906944118@qq.com

通讯作者: 曹文贵(1963-), 男, 教授, 博士(后), 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: cwglyp@hnu.edu.cn

参数清晰、计算模型简单等优点被广泛使用,并逐渐成为土压力分析研究中的两大经典理论。但经典理论并不完美,存在明显的不合理之处,朗肯理论假定墙背竖直光滑得到墙后土体沿墙高呈线性分布的规律,没有考虑墙土摩擦角对土压力的影响;库仑理论对于整体土楔体建立平衡方程,仅能得到土压力合力,无法获得土压力沿墙高的分布,该理论也不适用于黏性填土。

针对经典理论的不足,众多学者对土压力问题进行了大量的后续研究工作。目前研究挡土墙后黏性土土压力主要有两种思路:其一,基于库仑块体极限平衡理论,考虑墙背接触面和滑裂面上黏聚力的影响,对滑动土体建立整体静力平衡方程,求解得到复杂情况下墙后土体土压力的合力表达式^[1-5]。但该方法仍无法获得土压力沿墙高的分布规律;其二,考虑土拱效应的影响,基于薄层微分单元研究土压力分布的规律。目前,运用最多的分层方法是水平分层^[6-15],将墙后土体划分为无数水平薄层,假定层面上分布等效均匀竖向应力,通过对薄层单元进行受力分析,进而得到土压力分析方法。这类方法计算模型简单直观,得到了土压力非线性分布的表达式,但该方法忽略水平层上下截面的剪应力、假定竖向应力均匀分布,存在明显的不足。通过对土拱效应的深入研究, Li 等^[16]和 Cao 等^[17]提出了沿主应力迹线割线分层的新理论,近似认为主应力迹线为倾斜直线,在分层截面上只分布主应力,没有剪应力,简化了受力分析,但该方法只是一种近似处理,不符合实际受力情况。Cao 等^[18]在此基础上提出沿主应力迹线分层的方法对土压力进行平衡分析。由于薄层单元是按主应力轨迹进行划分的,所以层间只作用大主应力而没有剪应力,有效避免了直线分层的不足,为土压力分析开拓了新的思路,经验证取得更为合理的结果。但是,目前基于主应力迹线分层方法还仅局限于无黏性土的研究,不适用于黏性填土的分析,且主应力迹线几何形状、几何参数确定较为复杂,这正是本文研究的主要内容。

综上所述,本文基于主应力迹线分层的土压力分析方法,充分考虑了黏聚力对土压力分析的影响,取曲线薄层微分单元为研究对象,合理分析曲线单元受力情况,建立静力平衡关系,推导得到黏性土土压力的分布、合力及作用点高度计算的新方法。

1 应力偏转规律及应力状态分析

1.1 基本假定

如图 1 所示,挡土墙高为 H , ABG 是处于主动极限状态下的三角形土楔体,土体为黏性土,靠近墙顶附近区域的土体 $ABCD$ 在自身黏聚力和内摩擦角的作用下保持稳定,土体内部形成张拉裂缝,裂缝深度为 z_0 。鉴于实际挡土墙土压力问题的复杂性,为了方便研究,进行以下假定:

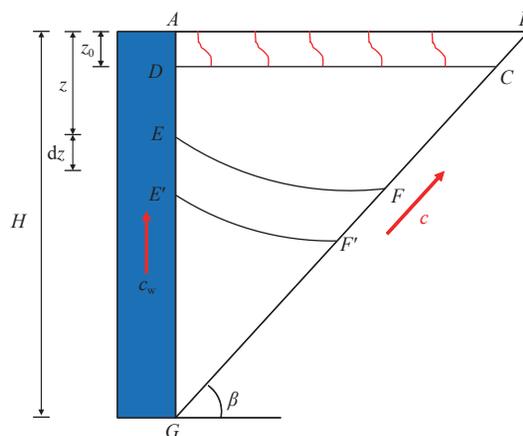


图 1 土楔体及主应力迹线模型

Fig. 1 Soil wedge and principal stress trace model

(1) 挡土墙竖直,墙背粗糙,填土面水平且无附加荷载,墙土摩擦角为 δ ;

(2) 挡土墙后土体为黏性土,内摩擦角为 φ ,墙土接触面处黏聚力为 c_w ,土体黏聚力为 c ,且满足 $c_w = \eta c$,其中 $\eta = \tan \delta / \tan \varphi$;

(3) 挡土墙背离土体发生平动位移时,靠近墙顶附近区域土体内部形成张拉裂缝,其深度可用下式计算^[1-5]:

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma \tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (1)$$

式中: γ ——土体重度。

(4) 假定挡土墙后土体主动极限状态下滑裂面为直线,倾角为 β ,大小依据文献 [1] 的理论结果进行计算:

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right) = \frac{(1 + \eta) \tan \varphi + \sec \varphi \sqrt{1 + \eta}}{\eta \tan^2 \varphi - 1} \quad (2)$$

(5) 为了方便研究黏性土土体应力状态变化的情况,引进文献 [15] 中坐标平移的方法。将图 2 所示莫尔应力圆中的纵坐标 τ 向左偏移 $c \cot \varphi$ 距离,新旧坐标系之间的关系可表示为:

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma + c \cot \varphi \\ \tau' = \tau \end{cases} \quad (3)$$

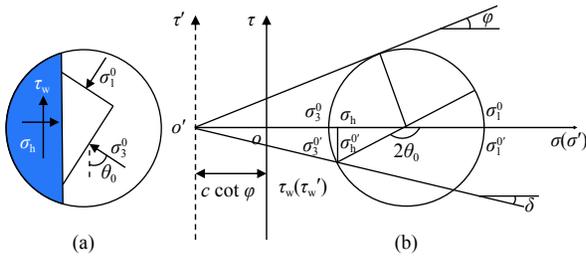


图 2 墙土接触面受力分析和莫尔圆情况

Fig. 2 Deflection of the principal stress and Mohr circle at the contact surface of the wall back

式中: σ 、 τ ——旧坐标系中的横、纵坐标轴;

σ' 、 τ' ——新坐标系中的横、纵坐标轴。

1.2 应力偏转及应力状态分析

实际挡土墙工程中不存在绝对光滑的情况, 墙土之间的摩擦力导致墙土接触面主应力方向发生偏转, 进而引发其他土体微分单元的主应力发生偏转, 直到土体破裂面处停止。Handy^[6] 基于土拱效应把土拱形状定义为主应力迹线, 认为即使主应力方向发生偏转, 土体内仍存在相互垂直的大小主应力迹线。由于本文研究主动极限状态下土压力变化规律, 故引入小主应力迹线模型, 如图 1 所示。

在墙背粗糙的影响下, 主应力方向发生了偏转。

图 2(a) 表示深度为 z 时墙土接触面 E 点处土体单元受力状态。两直角边上分别作用有最大主应力 σ_1^0 和最小主应力 σ_3^0 , 最小主应力方向由原来的水平偏转为与竖直方向呈 θ_0 角度; 斜边与墙背重合, 作用有正应力 σ_h 和剪应力 τ_w 。假设墙土接触面处于极限平衡状态, 则该点土体的大小主应力满足以下关系:

$$\frac{\sigma_3^0}{\sigma_1^0} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (4)$$

根据图 2(b) 莫尔应力圆可得应力表达式为:

$$\sigma_h' = \frac{\sigma_1^0}{1 + \sin \varphi} (1 + \cos 2\theta_0 \sin \varphi) \quad (5)$$

$$\tau_w' = \frac{\sigma_1^0}{1 + \sin \varphi} \sin 2\theta_0 \sin \varphi \quad (6)$$

$$\tau_w' = \sigma_h' \tan \delta = \sigma_h \tan \delta + c_w \quad (7)$$

式中: σ_3^0 、 σ_1^0 、 σ_h' 、 τ_w' ——表示新坐标系下应力。

联立式(5)(6)(7)可得墙土接触面小主应力偏转角表达式为:

$$\begin{cases} \theta_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\Delta_0}{2} \\ \Delta_0 = \arcsin\left(\frac{\sin \delta}{\sin \varphi}\right) - \delta \end{cases} \quad (8)$$

图 3 所示为滑裂面 F 点处土体单元受力状态。两直角边上分别作用有最大主应力 σ_1^1 和最小主应力 σ_3^1 , 最小主应力方向偏转为与竖直方向呈 θ_1 角度。当土体达到极限平衡状态时, 大主应力作用面与滑裂面夹角为 $\psi = 45^\circ + \varphi/2$, 因此主应力偏转角 θ_1 表达式为:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4} + \beta - \frac{\varphi}{2} \quad (9)$$

由式(8)(9)可知墙背接触面和滑裂面上主应力偏转角 θ_0 、 θ_1 与埋深无关, 只与墙土本身的属性有关, 即在墙上任意深度处, 主应力偏转角均相等。但在同一条主应力迹线上的不同位置处, 主应力偏转角不同。

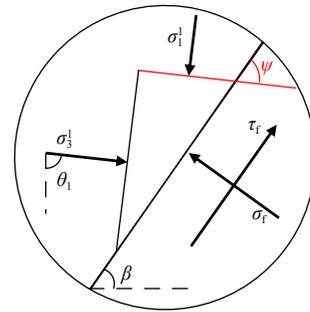


图 3 滑裂面处主应力偏转情况

Fig. 3 Deflection of the principal stress at the slip surface

2 土压力公式计算

2.1 主应力迹线几何形状、参数确定

为深入分析挡墙后土拱效应对土压力的影响, 众多学者针对主应力迹线形状进行了探讨, 分别有假设主应力迹线形状为悬链线、圆弧、抛物线、对数螺旋线等。应宏伟等^[8] 经过理论推导、对比分析发现, 主应力迹线形状对土压力强度大小及分布影响较小。为简化研究思路, 本文采用圆弧小主应力迹线形式, 土楔体在墙背摩擦角的作用下主应力发生偏转, 土体内形成无数圆弧主应力迹线, 取其中一段微分单元 $EFF'E$ 为研究对象, 如图 4 所示。圆弧上 E 点与圆心的连线与水平方向的夹角为 θ_0 , F 点与圆心的连线与水平方向的夹角为 θ_1 , 主应力迹线 i 位置处与圆心的连线与水平方向的夹角为 θ_i 。为了获得曲线微分单元 $EFF'E$ 的受力分析, 首先需要确定圆弧的几何位置和参数, 求解圆弧半径过程如下:

建立直角坐标系: G 为原点, 竖直方向为 z 轴, 水平方向为 x 轴, E 点坐标为 $(0, H-z)$, 设 F 点横坐标为 x_0 , 根据直线方程可知其纵坐标 $z_0 = x_0 \tan \beta$, 圆弧主应力迹线上 E 、 F 两点满足下列几何关系:

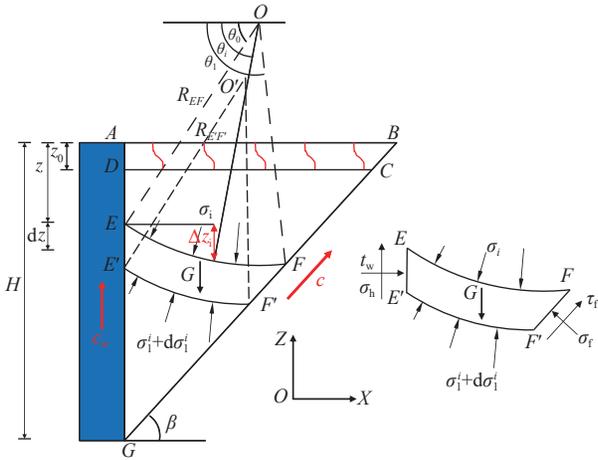


图 4 主应力迹线分层模型及薄层单元受力分析

Fig. 4 Layered model of the principal stress trace and force analysis of thin-layer elements

$$H - z + R_{EF} \sin \theta_0 = x_0 \tan \beta + R_{EF} \sin \theta_1 \quad (10)$$

$$R_{EF} \cos \theta_0 - x_0 = R_{EF} \cos \theta_1 \quad (11)$$

式中: R_{EF} ——圆 O 的半径。

联立式(10)(11)可得曲线薄层单元上表面 \widehat{EF} 的半径表达式为:

$$R_{EF} = \frac{H - z}{t_1 + t_2 \tan \beta} \quad (12)$$

式中: t_1 、 t_2 ——参数,其表达式为:

$$t_1 = \sin \theta_1 - \sin \theta_0 \quad (13)$$

$$t_2 = \cos \theta_0 - \cos \theta_1 \quad (14)$$

同理,按照相同的方法可以求出曲线薄层单元下表面 $\widehat{E'F'}$ 的半径表达式:

$$R_{E'F'} = \frac{H - z - dz}{t_1 + t_2 \tan \beta} \quad (15)$$

式中: dz ——薄层单元厚度。

2.2 主动土压力强度计算

曲线薄层微分单元 $EFF'E$ 受力分析如图 4 所示,由于其处于极限平衡状态,故在 X 、 Z 方向上受力平衡:

$$\begin{aligned} \Sigma F(X) = 0: \\ F_x^{EE'} - F_x^{EF} + F_x^{E'F'} + F_x^{FF'} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Sigma F(Z) = 0: \\ F_z^{EE'} - F_z^{EF} + F_z^{E'F'} + F_z^{FF'} - G = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $F_x^{EE'}$ 、 F_x^{EF} 、 $F_x^{E'F'}$ 、 $F_x^{FF'}$ 、 $F_z^{EE'}$ 、 F_z^{EF} 、 $F_z^{E'F'}$ 、 $F_z^{FF'}$ ——各截面上 X 、 Z 方向的分力作用力;

G ——单元体自重。

墙土接触面 AG 上直线微段 EE' 均匀分布有正应力 σ_h 和剪应力 τ_w , 则截面受力为:

X 方向分力为:

$$F_x^{EE'} = \sigma_h dz \quad (18)$$

Z 方向分力为:

$$F_z^{EE'} = \tau_w dz \quad (19)$$

圆弧薄层单元截面 EF 上只分布有沿圆弧法向方向的最大主应力。在主应力迹线上 i 位置处,对应最大主应力为 σ_1^i , 则截面上受力为:

X 方向分力为:

$$F_x^{EF} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sigma_1^i R_{EF} \cos \theta_i d\theta_i \quad (20)$$

Z 方向分力为:

$$F_z^{EF} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} \sigma_1^i R_{EF} \sin \theta_i d\theta_i \quad (21)$$

在前文研究中已知主应力迹线上不同位置处,埋深不同,主应力大小和偏转角均发生变化。采用文献[18]中的假定,即假定不同埋深处最大主应力的大小满足如下关系:

$$\sigma_1^i = \sigma_1^0 + \gamma \Delta z_i \quad (22)$$

式中: Δz_i ——主应力迹线上 i 位置处的点与 E 点的高度差,可表示为:

$$\Delta z_i = R_{EF} (\sin \theta_i - \sin \theta_0) \quad (23)$$

同理,圆弧薄层单元截面 $E'F'$ 上分布只有沿圆弧法向方向的最大主应力。在对应 i 位置处,最大主应力增量为 $d\sigma_1^i$, 则截面上受力为:

X 方向分力为:

$$F_x^{E'F'} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} (\sigma_1^i + d\sigma_1^i) R_{E'F'} \cos \theta_i d\theta_i \quad (24)$$

Z 方向分力为:

$$F_z^{E'F'} = \int_{\theta_0}^{\theta_1} (\sigma_1^i + d\sigma_1^i) R_{E'F'} \sin \theta_i d\theta_i \quad (25)$$

滑裂面 BG 上直线微段 FF' 分布有指向滑裂面法向方向的正应力 σ_f 和沿滑裂面切向方向的剪应力 τ_f , 则截面上受力为:

X 方向分力为:

$$F_x^{FF'} = l_{FF'} (-\sigma_f \cos \beta + \tau_f \sin \beta) \quad (26)$$

Z 方向分力为:

$$F_z^{FF'} = l_{FF'} (\sigma_f \sin \beta + \tau_f \cos \beta) \quad (27)$$

式中: $l_{FF'}$ ——曲线薄层单元上线段 FF' 的长度。

根据图 4 几何关系可得:

$$l_{FF'} = l_{GF} - l_{GF'} = \frac{\sec \beta}{(t_1 + t_2 \tan \beta) t_2} dz \quad (28)$$

式中: l_{GF} 、 $l_{GF'}$ ——线段 GF 、 GF' 的长度。

圆弧微分单元自重等于土体重度乘以其面积,单

元体面积由上下2个相同圆心角的圆弧和2条直线段围成,属于不规则图形。目前,很难用现有求面积的方法对其进行求解,故采用近似的方法,将不规则的图形近似看做梯形,梯形的上下两边是弧长,高为 $dz\sin\theta_0$,则单元体自重 G 表达式为:

$$G = \frac{(l_{\widehat{EF}} + l_{\widehat{E'F'}})\sin\theta_0}{2} dz \quad (29)$$

式中: $l_{\widehat{EF}}$ 、 $l_{\widehat{E'F'}}$ —— \widehat{EF} 、 $\widehat{E'F'}$ 的弧长,弧长等于圆心角乘以半径。

$$l_{\widehat{EF}} = (\theta_1 - \theta_0)R_{EF} \quad (30)$$

$$l_{\widehat{E'F'}} = (\theta_1 - \theta_0)R_{E'F'} \quad (31)$$

将各个分量代入 X 、 Z 方向受力平衡表达式(16)(17)中,整理可得曲线薄层微分单元 $EFF'E'$ 的主应力微分方程为:

$$\frac{d\sigma_1^0}{dz} - \frac{A_1}{H-z}\sigma_1^0 + \gamma A_2 + \frac{cA_3}{H-z} = 0 \quad (32)$$

式中:

$$A_1 = 1 - \frac{f_1 f_3 f_6}{f_5}$$

$$A_2 = \frac{f_9}{f_1 f_5}$$

$$A_3 = \frac{(f_1 f_7 + f_8)}{f_5}$$

$$f_1 = t_1 + t_2 \tan\beta$$

$$f_2 = (\theta_1 - \theta_0) \sin\theta_0$$

$$f_3 = \frac{1 + \cos 2\theta_0 \sin\varphi}{1 + \sin\varphi}$$

$$f_4 = \frac{\theta_1 - \theta_0}{2} - \frac{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_0}{4} - t_2 \sin\theta_0$$

$$f_5 = t_2(\tan\varphi - \tan\beta) - t_1(1 + \tan\varphi \tan\beta)$$

$$f_6 = \tan\delta(\tan\varphi - \tan\beta) - (1 + \tan\varphi \tan\beta)$$

$$f_7 = \frac{f_3 f_6 + (1 + \tan\varphi \tan\beta)}{\tan\varphi}$$

$$f_8 = t_2[\tan\beta(\tan\varphi - \tan\beta) - (1 + \tan\varphi \tan\beta)]$$

$$f_9 = t_1^2(1 + \tan\varphi \tan\beta) - (2f_4 + f_1 f_2)(\tan\varphi - \tan\beta)$$

求解式(32)微分方程,解得:

$$\sigma_1^0 = M(H-z)^{-A_1} + \frac{\gamma A_2}{1+A_1}(H-z) + \frac{cA_3}{A_1} \quad (33)$$

联立式(3)(5)(33)可得挡土墙侧向土压力强度为:

$$\sigma_h = M f_3 (H-z)^{-A_1} + K_1 (H-z) + c K_2 \quad (34)$$

式中:

$$K_1 = \frac{\gamma A_2 f_3}{1+A_1}$$

$$K_2 = \frac{A_3 f_3}{A_1} + \cot\varphi(f_3 - 1)$$

式中: M ——待定常数。

根据边界条件可知,在临界深度 $z = z_0$ 处, $\sigma_h = 0$,代入式(34)可解得常数为:

$$M = -\frac{[K_1(H-z_0) + cK_2]}{f_3} * (H-z_0)^{A_1} \quad (35)$$

将式(35)代入式(34)可得挡土墙侧向主动土压力强度为:

$$\sigma_h = K_1 \left[(H-z) - (H-z_0)^{1+A_1} (H-z)^{-A_1} \right] + cK_2 \left[1 - (H-z_0)^{A_1} (H-z)^{-A_1} \right] \quad (36)$$

2.3 土压力合力及其作用点高度计算

临界深度以上的土体在自身黏聚力和内摩擦角作用下保持稳定,不对墙体产生任何作用力,因此在计算土压力合力时应该从临界深度开始对式(36)积分,可得挡土墙主动土压力合力为:

$$E_a = \int_{z_0}^H \sigma_h dz = \frac{K_1(A_1+1)}{2(A_1-1)}(H-z_0)^2 + \frac{cK_2A_1}{A_1-1}(H-z_0) \quad (37)$$

同理,从临界深度开始土压力对墙脚处取矩可得弯矩为:

$$M_a = \int_{z_0}^H \sigma_h (H-z) dz = \frac{K_1(1+A_1)}{3(A_1-2)}(H-z_0)^3 + \frac{cK_2A_1}{2(A_1-2)}(H-z_0)^2 \quad (38)$$

合力作用点距离墙脚的竖直距离为:

$$h = \frac{M_a}{E_a} \quad (39)$$

当 $c=0$, $\delta=0$ 时, $h=1/3H$,与朗肯土压力理论一致。

3 实例验证与参数分析

3.1 实例验证

为了验证本文方法的正确性,选取文献[19]中的实验数据对本文结果进行验证。该实验墙背竖直,墙高为4 m,土的天然重度为 $\gamma=18.95 \text{ kN/m}^3$,不排水三轴快剪指标为内摩擦角 $\varphi=16.6^\circ$,土与墙间摩擦角 $\delta=8.3^\circ$,黏聚力 $c=4.6 \text{ kPa}$ 。

图5给出了本文方法与实测数据和其他理论方法

的对比结果。由图 5 可知,本文方法和文献 [11][12] 均得到了土压力强度沿墙高呈非线性分布的规律,在接近墙脚位置处的应力值发生突变。本文方法和文献 [12] 计算结果始终小于朗肯理论计算值,文献 [11] 在挡土墙上面一部分略大于朗肯理论计算值,偏于保守,下面一部分小于朗肯理论计算值。从数据对比分析来看,本文方法计算结果无论从大小还是分布均与实测结果更加吻合,验证了本文方法的合理性及优越性。

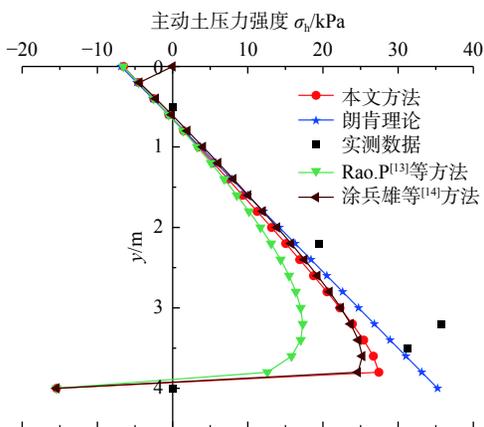


图 5 主动土压力对比分析
Fig. 5 Comparative analysis of active earth pressure

3.2 参数分析

为了更深入地探讨各参数对黏性土主动土压力分布的影响,选取工程中常用的参数范围,通过控制变量法,从定性的角度总结墙土摩擦角-内摩擦角(δ - φ)、黏聚力 c 等因素对土压力强度分布的影响规律。

图 6 表示墙土摩擦角 δ 对土压力分布的影响,由图 6 可知,随着 δ 增大,土压力逐渐减小。 δ 值较小时,土压力近似呈线性分布,在接近墙踵处突变为负值。 δ 逐渐变大,土压力分布从近似直线变为曲线分布,应力突变点逐渐提高。如图 7 所示,始终保持 $\delta/\varphi=2/3$,随着 φ 增加,土压力不断减小,塑性临界深度逐渐增大。图 8 表示黏性土黏聚力对土压力分布的影响,随着土体黏聚力 c 增加,土压力逐渐减小,塑性临界深度逐渐增大。

图 9 表示土体内摩擦角对侧向土压力合力的影响,朗肯理论合力表达式只与 φ 相关,当 φ 为定值时,合力即为定值;随着 δ 增加,本文方法与文献 [7] 方法合力逐渐减小,这是由于墙土间摩擦力可抵消一部分土压力,因此合力减小,与实际情况相符合。图 10 表示墙土摩擦角对合力作用点高度的影响,随着 δ 增大,本文合力作用点高度缓慢升高,挡土墙整体稳定

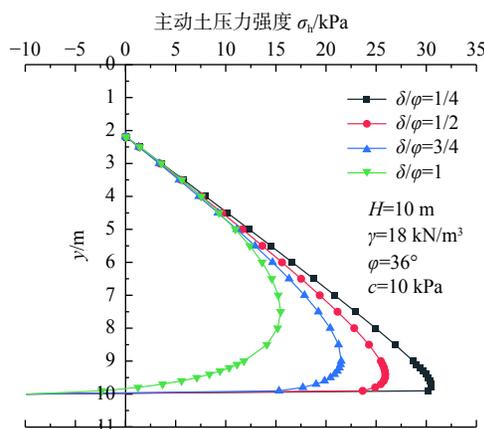


图 6 墙土摩擦角 δ 对土压力分布的影响
Fig. 6 Influence of the wall-soil friction angle on earth pressure distribution

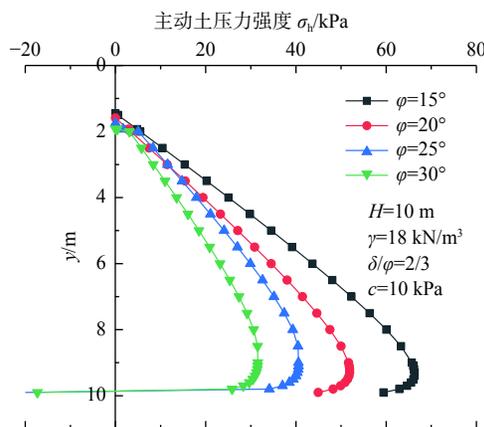


图 7 土体内摩擦角 φ 对土压力分布的影响
Fig. 7 Influence of the friction angle in soil on the distribution of earth pressure

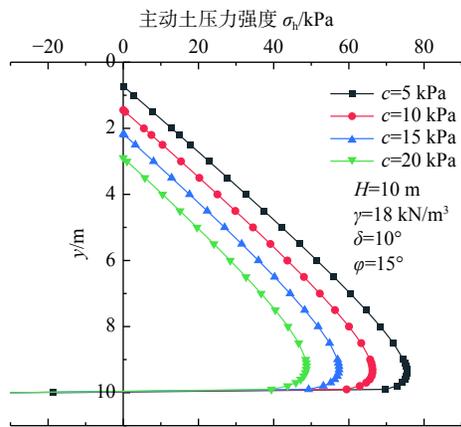


图 8 黏聚力 c 对土压力分布的影响
Fig. 8 Influence of cohesion on the distribution of earth pressure

性变差;而文献 [7] 合力作用点近似直线上升趋势,与朗肯理论作用点结果偏差太大,故本文计算结果更加

具有合理性。

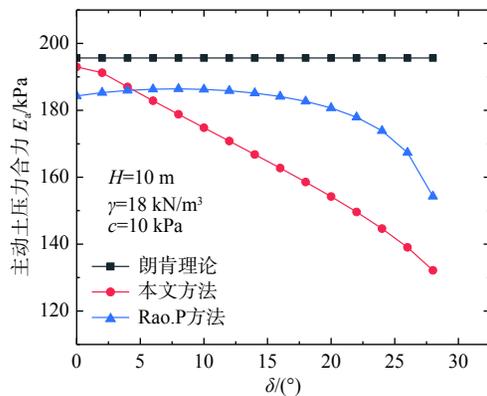


图9 墙土摩擦角 δ 对土压力合力的影响

Fig. 9 Influence of wall-soil friction angle on the resultant force of earth pressure

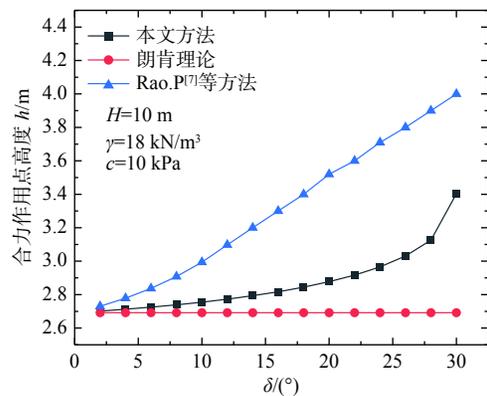


图10 墙土摩擦角 δ 对土压力合力作用点高度的影响

Fig. 10 Influence of wall-soil friction angle on the height of the resultant point of earth pressure

4 结论

(1) 通过与实测数据和现有的理论方法进行土压力大小和分布规律的对比分析, 验证本文方法的合理性及优越性; 从定性的角度分析了墙土摩擦角、土体内摩擦角、黏聚力等因素对土压力强度分布的影响规律及影响程度。

(2) 研究结果表明: 黏聚力对土压力大小有明显的影响, 随着黏聚力的增加, 土压力逐渐减小; 墙土摩擦角 δ 较小时, 土压力线性分布特征越明显, 随着 δ 增大, 土压力合力逐渐减小, 合力作用点缓慢提高, 土压力分布逐渐减小且非线性分布特征越明显。

(3) 由于本文研究中假定张拉裂缝为朗肯裂缝, 没有考虑墙背粗糙程度对裂缝深度的影响, 比实际工程测得的裂缝高度偏低一点, 对研究结果的适用性有一定的影响, 因此对裂缝深度的计算还需有进一步的

研究。

参考文献 (References) :

- [1] 赵恒惠. 挡土墙后粘性填土的土压力计算[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 134 - 146. [ZHAO Henghui. The computation of earth pressure of cohesive backfill on retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 134 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 胡晓军. 粘性土主动土压力库仑精确解的改进[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1049 - 1052. [HU Xiaojun. Improvement on Coulumb accurate solution of active earth pressure to cohesive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1049 - 1052. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 卢廷浩. 考虑粘聚力及墙背粘着力的主动土压力公式[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 470 - 473. [LU Tinghao. A formula of active earth pressure including cohesion and adhesion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4): 470 - 473. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈庆, 刘小丽, 曹勉励. 黏性土主动土压力计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1180 - 1184. [CHEN Qing, LIU Xiaoli, CAO Mianli. On the computation methods of active earth pressure of cohesive soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1180 - 1184. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李巨文, 王翀, 梁永朵, 等. 挡土墙后粘性填土的主动土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 650 - 652. [LI Juwen, WANG Chong, LIANG Yongduo, et al. Computation of earth pressure of cohesive backfill on retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 650 - 652. (in Chinese with English abstract)]
- [6] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302 - 318.
- [7] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 643 - 653.
- [8] 应宏伟, 蒋波, 谢康和. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 717 - 722. [YING Hongwei, JIANG Bo, XIE Kanghe. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 717 - 722. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [9] 胡卫东, 曹文贵, 曾律弦, 等. 考虑摩擦条件下临近既有建筑物的有限土体土压力上限解[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 73 - 79. [HU Weidong, CAO Wengui, ZENG Lyuxian, et al. Upper bound solution of earth pressure for limited soils adjacent to existing buildings considering friction energy consumption[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 73 - 79. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡卫东, 曾律弦, 刘晓红, 等. 放坡状态有限土体刚性挡土墙主动土压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 63 - 70. [HU Weidong, ZENG Lyuxian, LIU Xiaohong, et al. Active earth pressures against rigid retaining walls for finite soil under the grading condition[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 63 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [11] RAO P P, CHEN Q S, ZHOU Y T, et al. Determination of active earth pressure on rigid retaining wall considering arching effect in cohesive backfill soil[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2016, 16(3): 04015082.
- [12] 涂兵雄, 贾金青. 考虑土拱效应的黏性填土挡土墙主动土压力研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 1064 - 1070. [TU Bingxiong, JIA Jinqing. Research on active earth pressure behind rigid retaining wall from clayey backfill considering soil arching effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 1064 - 1070. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 魏汝龙. 库伦土压力理论在粘性土中的应用(英)[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(3): 80 - 84. [WEI Rulong. Application of Coulomb's theory to cohesive soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(3): 80 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 林智勇, 戴自航, 苏美选. 复杂条件下挡土墙主动土压力解析解[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(4): 555 - 559. [LIN Zhiyong, DAI Zihang, SU Meixuan. Analytical solution of active earth pressure acting on retaining walls under complicated conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(4): 555 - 559. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 朱建明, 赵琦. 考虑土拱效应的挡土墙主动土压力与被动土压力统一解[J]. *岩土力学*, 2014, 35(9): 2501 - 2506. [ZHU Jianming, ZHAO Qi. Unified solution to active earth pressure and passive earth pressure on retaining wall considering soil arching effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(9): 2501 - 2506. (in Chinese with English abstract)]
- [16] LI J P, WANG M. Simplified method for calculating active earth pressure on rigid retaining walls considering the arching effect under translational mode[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(2): 282 - 290.
- [17] CAO W G, LIU T, XU Z. Estimation of active earth pressure on inclined retaining wall based on simplified principal stress trajectory method[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(7): 06019011.
- [18] CAO W G, ZHANG H J, LIU T, et al. Analytical solution for the active earth pressure of cohesionless soil behind an inclined retaining wall based on the curved thin-layer element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 128: 103851.
- [19] 顾慰慈, 武全社, 陈卫平. 挡土墙背填土中滑裂体形状的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(2): 49 - 56. [GU Weici, WU Quanshe, CHEN Weiping. Study on filling sliding shape back of the retaining wall[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 10(2): 49 - 56. (in Chinese)]

编辑: 张明霞