

组合支挡结构有限土体土压力计算方法分析

罗文浩

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年2月5日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月25日

摘要

对于由重力式挡土墙与桩板墙组成的组合支挡结构而言, 其土压力计算是一个复杂的过程。在有限土体部分, 采用经典土压力求解理论往往导致计算结果偏大, 从而引起工程资源的浪费。为解决这一问题, 本文基于平行墙理论对组合支挡结构中的有限土体区域建立了计算模型, 并进行了受力分析, 推导出了土压力计算公式。通过室内模型试验验证了该方法的准确性, 为更精准地计算组合支挡结构土压力提供了一种可行的解决方案。

关键词

组合支挡结构, 有限土体, 土压力

Analysis of the Calculation Method of Earth Pressure in Limited Soil of Combined Retaining Structure

Wenhao Luo

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 5th, 2024; accepted: Mar. 14th, 2024; published: Mar. 25th, 2024

Abstract

For a combined retaining structure consisting of gravity retaining wall and sheet pile wall, the calculation of soil pressure is a complex process. In limited soil regions, employing classical soil pressure theories often leads to overestimated results, causing unnecessary utilization of engineering resources. To address this issue, this paper establishes a computational model based on the parallel wall theory for the limited soil zone within the combined retaining structure. Force analysis is conducted, resulting in the derivation of a soil pressure calculation formula. The accuracy of this method

文章引用: 罗文浩. 组合支挡结构有限土体土压力计算方法分析[J]. 土木工程, 2024, 13(3): 250-256.

DOI: 10.12677/hjce.2024.133028

is validated through indoor model experiments, providing a feasible solution for a more precise calculation of soil pressure in combined retaining structures.

Keywords

Combined Retaining Structure, Limited Soil, Soil Pressure

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/>



1. 引言

组合支挡结构在路基帮宽工程中的广泛应用为城市建设和交通基础设施提供了坚实的支撑，而土压力的准确计算则是组合支挡结构设计的关键一环。随着组合支挡结构的出现，其结构的多样性和复杂性使得对土压力的准确分析愈发具有挑战性。传统的土压力计算方法建立在半无限土体假定之上，在应对组合支挡结构中有限土体区域时可能存在适用性不足的问题[1]。

对于有限土体土压力计算，目前已取得众多研究成果，如胡卫东等[2]考虑挡土墙与填土之间及建(构)筑物与填土间的摩擦作用、挡土墙墙背倾角及填土顶面竖向荷载的影响建立了有限宽度土体在主动极限状态和被动极限状态下的土压力计算模型并给出了有限土体土压力计算方法。王崇宇等[3]利用无粘性砂进行了室内模型试验，研究了刚性墙后有限宽度土体滑裂面特征。杨明辉等[4]利用水平微分单元法建立了墙后有限宽度土体的主动土压力合力及强度的理论表达式并与室内试验数据及前人方法对比表明，该方法得到的土压力值具有较好合理性。应宏伟等[5]对不同宽度的深基坑进行了数值模拟，得到坑底潜在隆起滑裂面的分布规律，并提出了考虑基坑宽度影响的基坑坑底抗隆起稳定分析模式，基于有限土体的被动土压力研究，修正了狭窄基坑被动侧的被动土压力系数。刘忠玉[6]以墙背和稳定岩质坡面间为有限无黏性填土的刚性挡土墙为研究对象，假定在平面应变条件下，墙体平移使得墙后土体在极限平衡状态时出现通过墙踵的直线形或折线形滑裂面，且其中形成圆弧形土拱，考虑滑动土楔内水平土层间存在的平均剪应力，引入水平层分析法，得到非线性分布的主动土压力表达式。廖俊展等[7]基于极限分析法的上限定理，推导了有限宽度土体的土压力计算公式。李斌[8]基于平行墙理论推导了遮帘式桩板码头结构土压力计算方法。张志军[9]推导了平行挡土墙侧向土压力系数和侧向土压力计算公式并进行模型试验验证了平行挡土墙的侧向土压力理论计算方法的可行性。本文组合支挡结构由于两墙距离在土体滑裂面内且两墙相对位移较小，对于两墙间有限土体部分采用平行墙理论进行受力分析。

2. 组合支挡结构模型

在路基帮宽升级改造工程中，原有的重力式挡土墙虽然服役年限较短，但其结构完整且利用价值较大，因此决定保留该结构。为了满足路基加宽的需求，选择在原有挡土墙后边坡采用新建桩板墙进行路基边坡的收坡处理和支护。通过这种方式，形成了一种组合支挡结构，见图1，既充分利用了已有结构，又引入了新技术，以提高整体路基的稳定性和安全性。

对于传统单一支挡结构已经拥有成熟的设计计算理论可以参照，但对于组合支挡结构多是借助于现有理论进行设计计算，关于其土压力计算部分多是利用经典朗肯土压力计算理论或者经典库伦土压力计算理论计算。但是朗肯土压力理论和库伦土压力理论是基于墙后土体为无限土体时进行分析计算，对于

组合支挡结构而言，其部分区域土体为有限土体，使用经典土压力计算理论将导致计算结果偏大，造成不必要的工程浪费。

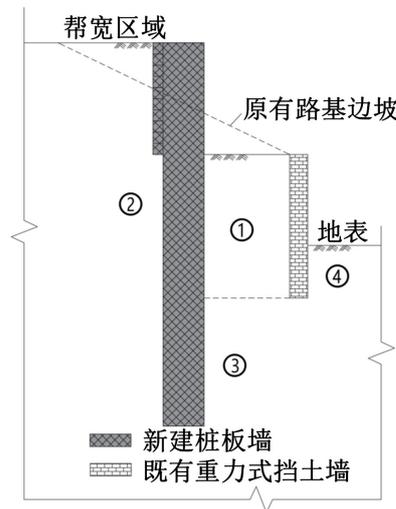


Figure 1. Schematic diagram of combined retaining structure
图 1. 组合支挡结构示意图

本文研究以平行墙理论为切入点，在之前的研究中，平行墙理论常用于遮帘式结构土压力计算方法研究中。本文将平行墙理论代入重力式挡土墙与桩板墙组合支挡结构进行受力分析，并基于该理论推导了路基帮宽中组合支挡结构所受土压力计算公式。

3. 组合支挡结构有限土体平行墙理论受力分析

平行墙是指两相互平行的刚性挡土墙，两墙之间具有相对较小的位移，并且两墙距离在土体滑裂面以内。采用平行墙理论是计算组合支挡结构有限土体侧向土压力的有效途径，为了得到某一深度处的侧向土压力强度，取单位长度墙微元体进行受力分析并建立平衡方程，求解平衡方程从而得到该微元体的法向应力。将该应力乘以侧压力系数，我们便得到了任意深度的侧向土压力强度。

如图 1 所示，为了综合研究组合支挡结构各区域土压力分布情况以及其承载特性，根据不同位置将重力式挡土墙与桩板墙组合支挡结构分为重力式挡土墙与桩板墙组合支挡结构有限土体区域①、桩板墙后区域②、桩板墙前底部区域③、重力式挡土墙回填区域④。

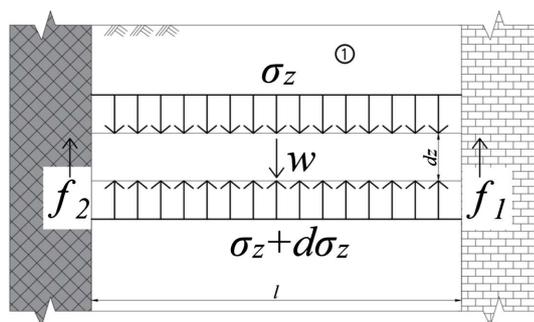


Figure 2. Schematic diagram of theoretical force analysis of parallel walls of limited soil
图 2. 有限土体平行墙理论受力分析示意图

如图 2 所示, 有限土体区域①, 基于平行墙理论在两支挡结构之间取长度为单位长度 1 的微元体, 微元受上下土体竖向应力、自身重力、两墙对其提供的摩擦力。不考虑粘聚力的影响, 对区域①微元体列出平衡方程如下:

$$\sigma_z \cdot l + w = (\sigma_z + d\sigma_z) \cdot l + (f_1 + f_2) \cdot dz \quad (1)$$

式中:

σ_z ——某一深度处微元土体所受竖向应力;

l ——组合支挡结构两墙间距;

f_1 和 f_2 ——土体与两墙之间的摩擦力。

其中, $f_1 = f_2 = K\sigma_z \tan \delta$, 将 $w = \gamma l dz$ 代入公式(1)得到:

$$\sigma_z \cdot l + \gamma l dz = l\sigma_z + l d\sigma_z + 2K\sigma_z \tan \delta \cdot dz \quad (2)$$

将公式(2)化简移项可得:

$$\left[\gamma - \frac{2K \tan \delta}{l} \sigma_z \right] dz = d\sigma_z \quad (3)$$

令 σ_z 为函数 $y(z)$ 、 $\gamma = a$ 、 $\frac{2K \tan \delta}{l} = b$, 则公式(3)可写作:

$$a - b \cdot y = y' \quad (4)$$

由于组合支挡结构有限土体区域地表无附加荷载, 即地表竖向应力为零, 因此得到边界条件为 $z = 0$ 时 $y = 0$ 、 $y' = a$, 代入该边界条件对公式(4)求解微分方程可得组合支挡结构有限土体某深度处竖向应力:

$$\sigma_z = \frac{\gamma l \left(1 - e^{-\frac{2K \tan \delta}{l} z} \right)}{2K \tan \delta} \quad (5)$$

式中, γ 为土体重度; δ 为土体与结构间摩擦角, 取 $\delta = \frac{1}{3}\varphi$, φ 为土体内摩擦角; K 为平行墙间侧向土压力系数, 其取值与土体内摩擦角和土体与结构间摩擦角有关, 参考表 1 [10]。

Table 1. Lateral soil pressure coefficients

表 1. 侧向土压力系数

δ	φ										
	15°	18°	21°	24°	27°	30°	33°	36°	39°	42°	45°
0°	0.5888	0.5279	0.4724	0.4217	0.3755	0.3333	0.2948	0.2596	0.2275	0.1982	0.1716
3°	0.5916	0.5298	0.4737	0.4227	0.3762	0.3338	0.2952	0.2599	0.2277	0.1984	0.1717
6°	0.6007	0.5359	0.4779	0.4257	0.3784	0.3354	0.2963	0.2607	0.2283	0.1988	0.1720
9°	0.6183	0.5472	0.4856	0.4310	0.3822	0.3381	0.2983	0.2622	0.2294	0.1996	0.1725
12°	0.6517	0.5663	0.4978	0.4393	0.3880	0.3422	0.3012	0.2643	0.2309	0.2007	0.1733
15°	0.7836	0.6005	0.5173	0.4518	0.3964	0.3481	0.3053	0.2672	0.2330	0.2021	0.1744
18°		0.7333	0.5513	0.4710	0.4085	0.3562	0.3110	0.2711	0.2357	0.2041	0.1758
21°			0.6823	0.5040	0.4270	0.3679	0.3187	0.2764	0.2394	0.2067	0.1775
24°				0.6312	0.4585	0.3853	0.3296	0.2836	0.2442	0.2100	0.1798
27°					0.5805	0.4149	0.3457	0.2936	0.2507	0.2143	0.1827
30°						0.5307	0.3733	0.3084	0.2598	0.2201	0.1866
33°							0.4822	0.3338	0.2733	0.2282	0.1917
36°								0.4351	0.2964	0.2403	0.1988

续表

39°	0.3899	0.2611	0.2095
42°		0.3466	0.2280
45°			0.3056

则桩前锚固区侧向土压力强度为： $\sigma_x = K\sigma_z$ 。

对于区域②、区域③、区域④侧向土压力而言，由于墙后无遮挡可看作无限土体，判断其极限平衡状态采用经典土压力求解理论进行设计计算。

4. 模型试验验证

为研究组合支挡结构土压力分布情况以及验证理论分析的准确性进行室内模型箱试验，试验箱的内部净尺寸为 1.2 m (长) × 1.2 m (宽) × 1.2 m (高)。在两支挡结构间沿深度方向均匀布置土压力盒，见图 3。

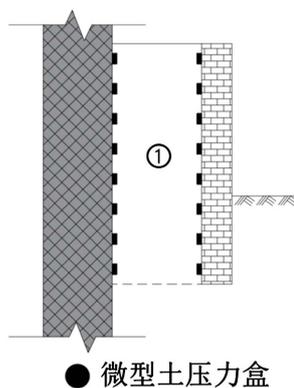


Figure 3. Schematic diagram of layout of the soil pressure box for the model test
图 3. 模型试验土压力盒布置示意图

将模型试验有限土体区域土压力实测值与本文方法计算值进行对比，区域①桩板墙侧向土压力大于重力式挡土墙侧向土压力，且两者均与本文方法计算值有较好的吻合性，见图 4、图 5。

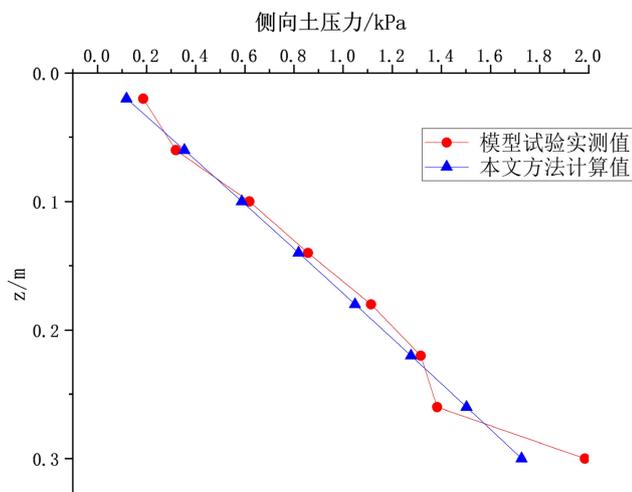


Figure 4. Schematic diagram of comparison of the soil pressure on the side of the sheet pile wall
图 4. 桩板墙侧土压力对比示意图

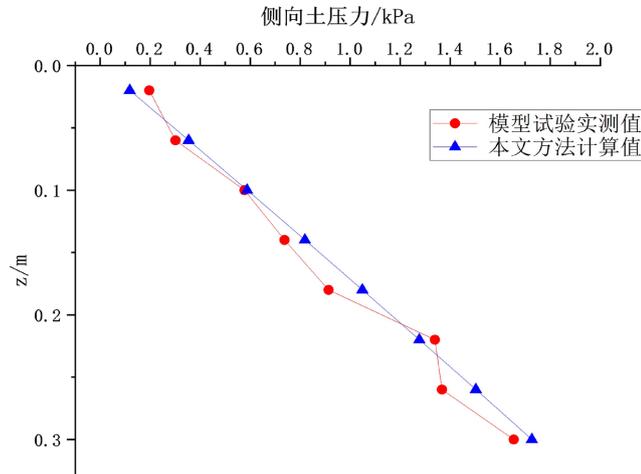


Figure 5. Schematic diagram of comparison of the soil pressure on the side of the gravity retaining wall
图 5. 重力式挡土墙侧土压力对比示意图

将本文方法与经典土压力求解理论(库伦、朗肯)进行对比分析,可以看出本文方法计算值小于经典土压力求解理论计算值,更符合工程实际,且组合支挡结构有限土体区域越深,库伦、朗肯方法计算值与本文方法计算值差值就越大,见图 6。

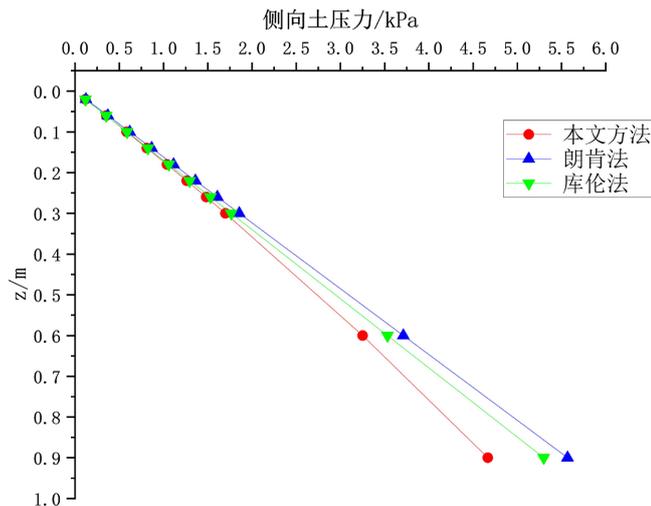


Figure 6. Schematic diagram of comparison of calculation results of different methods
图 6. 不同方法计算结果对比示意图

5. 结论

本文依据对重力式挡墙与桩板墙组合支挡结构滑裂面是否受限分为有限土体区域和无限土体区域,对于无限土体区域采用经典土压力求解理论进行设计计算,本文重点对有限土体区域进行研究,得出如下结论:

- 1) 本文基于平行墙理论推导出了组合支挡结构有限土体区域土压力计算方法并进行了室内模型试验,试验结果表明,本文提出的计算方法与模型试验实测值吻合较好,验证了本文计算方法的准确性。
- 2) 对于组合支挡结构有限土体区域采用本文方法得到的土压力计算值小于采用朗肯法和库伦法时

的计算值,更符合实测值,由于本文模型试验尺寸较小,组合支挡结构有限土体区域深度较浅,实测土压力与朗肯法、库伦法计算值差异性较小。对于工程实际而言,其深度较大,采用朗肯法、库伦法计算得到土压力较实际土压力差值较大,因此采用本文方法进行计算更接近实际土压力,可有效避免工程浪费。

特别指出的是,本文在研究分析组合支挡结构土压力计算方法时,对有限土体区域采用平行墙理论进行受力分析,建立模型时统一看作重力式挡土墙与桩板墙桩结构之间的平行墙模型。而实际上,对于该区域而言,由于桩板墙桩间土体的移动会导致水平卸荷拱的存在,进而导致重力式挡墙所受土压力在桩区域和桩间土区域是有所不同的,仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 高印立. 有限土体土压力的计算探讨[J]. 建筑科学, 2000, 16(5): 53-56.
- [2] 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+85.
- [3] 王崇宇, 刘晓平, 曹周红, 等. 刚性墙后有限宽度土体主动滑裂面特征试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 2943-2952.
- [4] 杨明辉, 吴志勇, 赵明华. 挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 19-27.
- [5] 应宏伟, 王小刚, 张金红. 考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 118-124.
- [6] 刘忠玉. 有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 154-164.
- [7] 廖俊展, 苗峰. 基于上限分析法的有限宽度土体土压力计算[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(z2): 577-581.
- [8] 李斌. 遮帘式板桩码头结构土压力算法及承载特性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] 张志军. 考虑土拱效应的平行挡土墙土压力计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [10] 蒋波. 挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2005.