

Safety Analysis of Retaining Wall Structure in Honeycomb Block

Xiong Zhang¹, Xiaoping Zhang², Xuanbo Qi³, Nansheng Li³

¹Department of Polymer Materials, School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai

²Engineering Construction Branch, Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan Hubei

³Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: linansheng@tongji.edu.cn

Received: Mar. 13th, 2019; accepted: Mar. 28th, 2019; published: Apr. 4th, 2019

Abstract

Retaining wall in Honeycomb block is an ecological retaining wall. It combines the advantages of gravity retaining wall and cantilever retaining wall from the structural point of view. It has the advantages of quick and convenient construction, controllable quality and beautiful appearance, and excellent ecological effects and other advantages. In this paper, the finite element method is used to analyze the nonlinear contact stress distribution between the soil and the structure of the retaining wall in honeycomb block to confirm the structural stability of the ecological retaining wall. The results show that the soil arching phenomenon occurs in the soil pressure behind the retaining wall of the honeycomb block. The soil pressure near the height of 1/3 retaining wall is higher than the active earth pressure, but the combined force of the soil pressure and the action point and the Coulomb active earth pressure are basically the same. The stress distribution of the wall is similar to that of the cantilever beam, and stress concentration occurs at the joint of the block.

Keywords

Retaining Wall in Honeycomb Block, Soil Pressure, Contact Stress, Soil Arching Phenomenon

蜂巢砌块挡土墙结构安全性分析

张 雄¹, 张晓平², 齐宣博³, 李南生³

¹同济大学材料科学与工程学院, 高分子材料系, 上海

²长江勘测规划设计研究有限责任公司工程建设分公司, 湖北 武汉

³同济大学土木工程学院水利工程系, 上海

Email: linansheng@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年3月13日; 录用日期: 2019年3月28日; 发布日期: 2019年4月4日

文章引用: 张雄, 张晓平, 齐宣博, 李南生. 蜂巢砌块挡土墙结构安全性分析[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 447-456.

DOI: 10.12677/hjce.2019.83052

摘要

蜂巢砌块挡土墙是一种生态型挡土墙，从结构上来看它结合了重力式挡墙和悬臂式挡墙的优点，具有施工快速简便、质量可控、外形美观，而且具有极佳的生态效应等优点。本文应用有限元法分析蜂巢砌块挡土墙墙背土和结构之间的非线性接触压力分布，从而确认这种生态挡墙的结构稳定性。结果表明，蜂巢砌块挡土墙墙背土压力会发生土拱现象，1/3高度附近土压力高于主动土压力，但是土压力合力以及作用点和库伦主动土压力基本一致。墙体应力分布和悬臂梁受弯类似，砌块拼接处会发生应力集中。

关键词

蜂巢砌块挡土墙，土压力，接触应力，土拱现象

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

在河道治理中，传统的浆砌石挡墙与混凝土挡墙仅仅起到了防洪治理和阻止水土流失的作用，几无生态方面的考量，因此造成岸坡植被消失，水生生物生活环境改变，尤其是城市地区的河道挡墙，如果色彩单调，不但影响景观不美化，而且也破坏了生态环境。现在挡墙设计已逐步从单纯的防洪维稳的设计理念，转向在考虑防洪治理的同时，考虑到生态工程及绿化景观布设的需要，美化城市环境。蜂巢砌块挡土墙作为一种新型的重力式透水结构，兼顾了生态美化需求，在河道治理中实现了防洪、生态、美观三方面的完美结合。更重要的是将蜂巢结构引入到挡墙结构工程中，优化了挡墙的力学性能，减少混凝土等材料用量。

在挡土墙设计中需要验算抗滑稳定性、抗倾覆稳定性、墙身截面强度、地基承载力等内容[1] [2]。经典土压力理论由其基本假定得到的土压力为近似解，这些假定与实际情况不尽相同，无法体现挡土墙、地基、回填土之间的位移协调关系[3]。随着有限元技术的发展，利用有限元数值模型成为分析挡土墙结构稳定性的一种有效途径。在诸如悬臂式挡墙[4] [5]、悬锚式挡墙[6]等新型挡墙形式的稳定性分析中，有限元得到了广泛的应用。对于蜂巢砌块挡土墙这种异形的生态挡墙，传统的挡墙分析方法已经不可采用，本文从蜂巢挡土墙的物理实质出发，通过一般化的有限元法和接触力学理论，分析蜂巢砌块挡土墙在工程应用中墙背土压力的分布规律，探寻蜂巢挡土墙结构的最不利承受土体作用位置，进而提供蜂巢挡墙的稳定性分析结果和工艺改进措施，为生态式挡墙结构设计提供参考。

2. 工程概况

蜂巢砌块挡土墙是一种结合重力式挡土墙和悬臂式挡土墙受力特点的新型结构形式。蜂巢砌块是由六个混凝土块通过键槽啮合形成的中空对称六边形，利用六边形蜂巢砌块将土体箍在筒中，利用土体代替混凝土来提高自身重力。同时，上下砌块之间采用钢筋穿结与底板锚固形成一个整体，利用底板上方填土的重量进一步提升自身的稳定性。

蜂巢生态挡土墙砌块为工厂化生产、采用高频振压成型的挡土墙砌块，块体基本单元为Y形三肢结构，辅以弧形砌块完成墙体结构的组成，如图1所示。

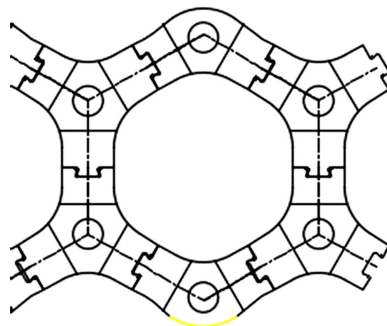


Figure 1. The cross section of honeycomb block
图 1. 蜂巢砌块挡墙平面结构

在实际工程应用中,蜂巢砌块挡墙可以将弧形砌块替换为 Y 形砌块,完成双筒甚至多筒的设计,以适应不同工程的要求。砌块之间采用凸隼连接,彼此错落排列。如图 2 所示,本文将以 2.3 m 双筒挡土墙为例,对其墙背土压力分布和墙体应力分布进行有限元分析。按照现行重力式挡土墙设计规范,在考虑水位骤降工况下计算得出该挡墙的抗滑移和抗倾覆安全系数分别为 1.786 和 1.658。

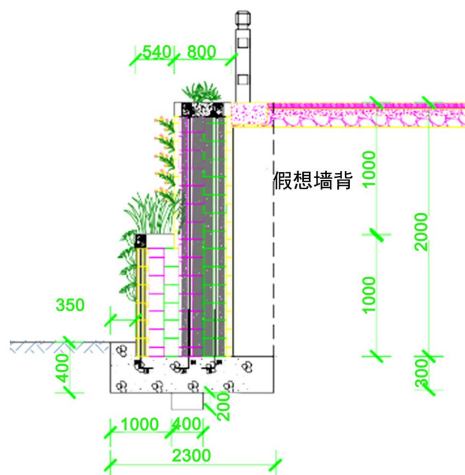


Figure 2. The cross section of retaining wall
图 2. 挡墙截面形式

3. D-P 系列屈服准则

1900 年摩尔教授(O. Mohr)提出了著名的 Mohr-Coulomb 强度理论(简称 M-C 强度理论),能够较好的描述岩土材料的强度特性,在岩土工程中得到了广泛的应用。但是, M-C 准则在三维空间的屈服面为 π 平面上的不等角六边形,给数值计算带来了很大的困难。

Drucker-Prager 屈服准则(简称 D-P 准则)通过改变 π 平面中 Mises 圆的大小来逼近 M-C 准则,便于进行数值计算[7]。

在 M-C 准则表达式中引入应力洛德角参数:

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \left(\cos \theta_\sigma - \frac{1}{3} \sin \theta_\sigma \sin \varphi \right) \sqrt{J_2} - c \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中 I_1 为应力张量第一不变量, J_2 为应力偏量的第二不变量, θ_σ 为应力洛德角(取值范围为 $-\pi/6 < \theta_\sigma < \pi/6$)。D-P 准则在此基础上考虑了平均应力,将其推广为:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (2)$$

式中:

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}(\sqrt{3} \cos \theta_\sigma - \sin \theta_\sigma \sin \varphi)} \quad (3)$$

$$k = \frac{\sqrt{3}c \sin \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta_\sigma - \sin \theta_\sigma \sin \varphi} \quad (4)$$

$$\theta_\sigma = a \tan \left(\frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \right) \quad (5)$$

c 和 φ 为材料的粘聚力和内摩擦角, θ_σ 则反映了材料的受力状态。由于逼近的准则不同, D-P 准则有很多不同的修正准则: 外角点外接圆准则(DP1)、内角点外接圆准则(DP2)、内切圆准则(DP3)、等面积圆准则(DP4)、M-C 匹配 DP 圆准则(DP5)。D-P 准则在对应的应力洛德角在与材料受力状态一致或者相近时能够得到理想的结果。在单向压缩及常规三轴压缩状态下($\theta_\sigma = \pi/6$), DP1 和 M-C 准则是相匹配的; 单向拉伸及常规三轴拉伸状态下($\theta_\sigma = -\pi/6$), DP2 和 M-C 相匹配; 平面应变条件的关联流动法则下($\theta_\sigma = a \tan \left(-\frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}} \right)$), DP3 和 M-C 相匹配; 非关联流动法则下($\theta_\sigma = 0$), DP5 与 M-C 相匹配[8]。

4. 计算模型设计

4.1. 模型建立

利用有限元软件建立数值分析模型, 沿墙身方向截取一段作为建立模型, 挡墙总高度为 2.3 m, 底板厚度为 0.3 m, 并设置有 0.4 m×0.2 m 的防滑凸隼。在挡墙的四周各延伸 6 m 的范围设置为土体的计算范围。整体模型如图 3 所示, 蜂巢砌块挡土墙模型如图 4 所示。

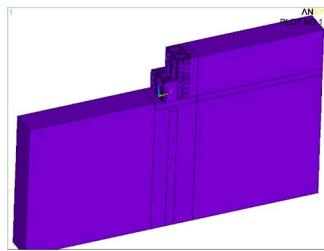


Figure 3. Calculation model of retaining wall in honeycomb block
图 3. 模型整体结构

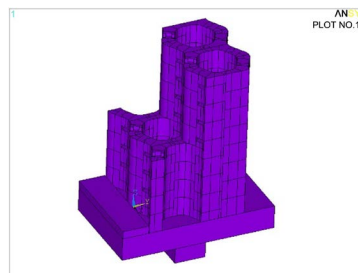


Figure 4. The real retaining wall in honeycomb block
图 4. 蜂巢砌块挡墙

4.2. 模型参数

模型中土体、墙体、钢筋参数如表 1 中所示。施工场地内主要为粘土、杂填土，考虑到墙后填土发生扰动，对土体的粘聚力和内摩擦角做适当的折减。每列砌块穿结的钢筋为直径 10 mm 的 HRB335。

Table 1. Material parameters

表 1. 材料参数

种类	弹性模量(MPa)	密度 Kg/m ⁻³	泊松比	内摩擦角(°)	粘聚力 kPa
土体	7	1800	0.3	15	5
墙体	30,000	2400	0.2	-	-
钢筋	200,000	7850	0.3	-	-

4.3. 模型单元选择

由于结构形式比较特殊，为了能够模拟真实工作环境，墙体和土体均采用 SOLID45 实体单元，并且选用八节点六面体单元，土体使用 D-P 准则进行分析。挡土墙底板以及部分与墙体接触的土体形状不规则，因此筒内土体、墙背土体和底板使用四面体单元划分，并使用金字塔单元过渡。除筒内土体和砌块之间进行粘结之外，其余土体和墙体之间均设置为面面接触，墙背光滑。钢筋采用 LINK180 单元进行模拟，同周围砌块粘结。为了模拟砌块之间的相互作用，水平面内砌块之间也设置为面面接触。

4.4. 模型边界条件

该模型的位移边界为挡土墙两侧设置为对称边界，顶部为自由边界，其余边界均限制法向位移。模型的力学边界为整体模型施加挡土墙自重荷载以及土体自重荷载。

5. 计算结果分析

5.1. 挡墙墙后土压力

对水平土压力进行整理，如图 5 所示，距墙远端土压力分布同库伦土压力理论分布规律一致，模型具有一定的正确性。

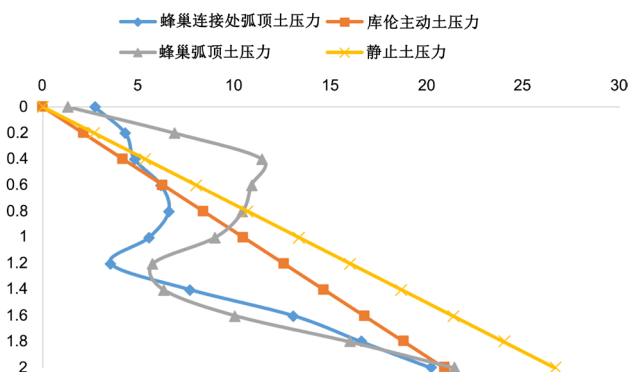


Figure 5. Horizontal earth pressure

图 5. 水平土压力

墙后水平土压力的分布情况为：在距离墙顶 1/3 高度范围内，墙后水平土压力出现急剧上升，六边形蜂巢连接处墙背土压力稍小，与主动土压力相近；六边形蜂巢顶点墙背土压力变化剧烈，甚至超过了

静止土压力。随后，水平土压力在墙高 1/3 到 2/3 范围内快速减小，降至主动土压力以下，之后同经典土压力理论分布规律相同持续增大，达到主动土压力峰值。图 6 为水平土压力在土体中的分布云图。

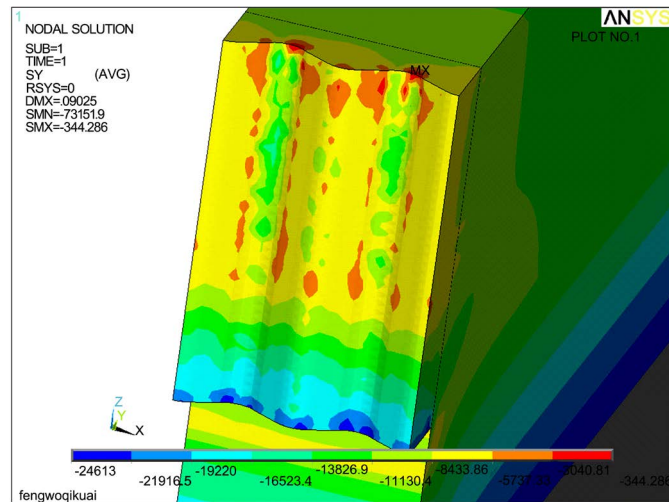


Figure 6. The earth pressure contours in the horizontal direction
图 6. 水平土压力分布云图

蜂巢式挡土墙的墙背形式具有抗滑桩群桩[9]的特点，在挡土墙墙顶至 2/3 高度范围内，发生了明显的土拱现象[10] [11]。土体依靠剪切作用，将荷载传递到六边形蜂巢上，形成拱脚，拱脚处土压力发生明显增大。两个六边形蜂巢的连接处本来因为在拱顶的位置，土压力会由于形成土拱而减小，但是由于附近挡墙呈弧形对土体有侧向约束，使得连接处的土压力得到一定程度上的增强，且远小于拱脚处的土压力。

5.2. 挡墙位移分析

挡土墙的水平、竖向位移如图 7、图 8 所示，墙体整体发生了后倾，最大位移出现在顶部为 11 mm，竖向的沉降是该工况下挡土墙位移的控制因素。该种形式的挡墙整体重心靠近墙踵一侧，能提供很大的抗倾覆力矩，因此前倾的趋势较弱，并且墙踵附近承载了大部分墙体自重和底板上方的土体自重，故墙踵处的沉降要大于墙趾，沉降位移差为 14 mm，所以挡墙发生了后倾的现象。

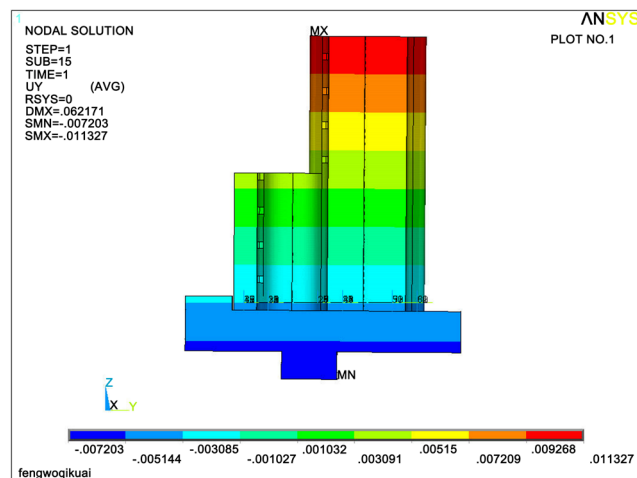


Figure 7. The displacements of retaining wall in the horizontal direction
图 7. 挡土墙水平位移

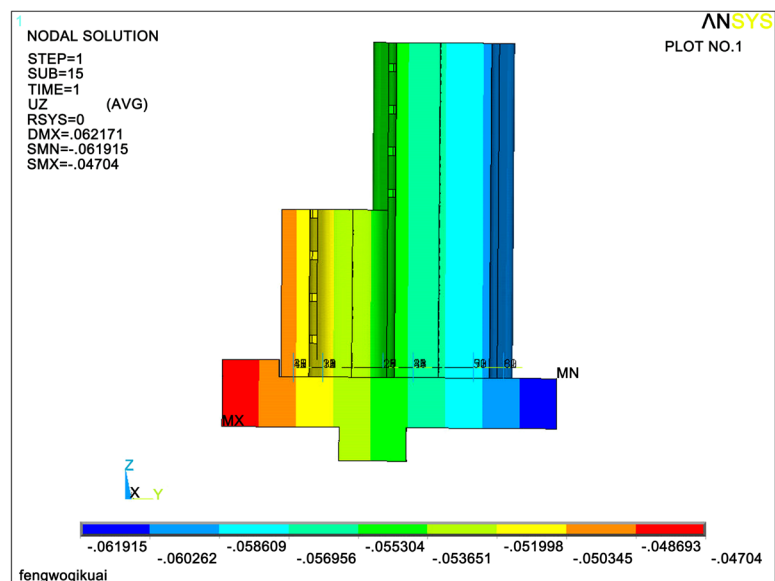


Figure 8. The displac of retaining wall in the vertical direction
图 8. 挡土墙竖直位移

以整体稳定性的最小安全系数作为优化参数，得到该种形式挡土墙在当前土体条件下的最大高度为 6 m，图 9 和图 10 为最大高度挡土墙水平位移和竖直位移分布。挡土墙最大沉降出现在靠水一侧，为 114 mm，整个底板的沉降位移差为 10 mm~12 mm。挡土墙在水平方向的位移整体从上向下逐渐递减。最大水平位移出现在顶部为 89 mm，最小水平位移出现在底板处为 42 mm，上下位移差为 47 mm。此时挡土墙由于墙背土压力的增大，倾覆力矩及滑移力增大，挡土墙有向前倾覆的趋势，而且整体又向前发生滑移的倾向。但是在极限高度的情况下，蜂巢砌块挡土墙发生的倾覆位移和滑移位移仍然较小，在工程中具有良好的整体稳定性。

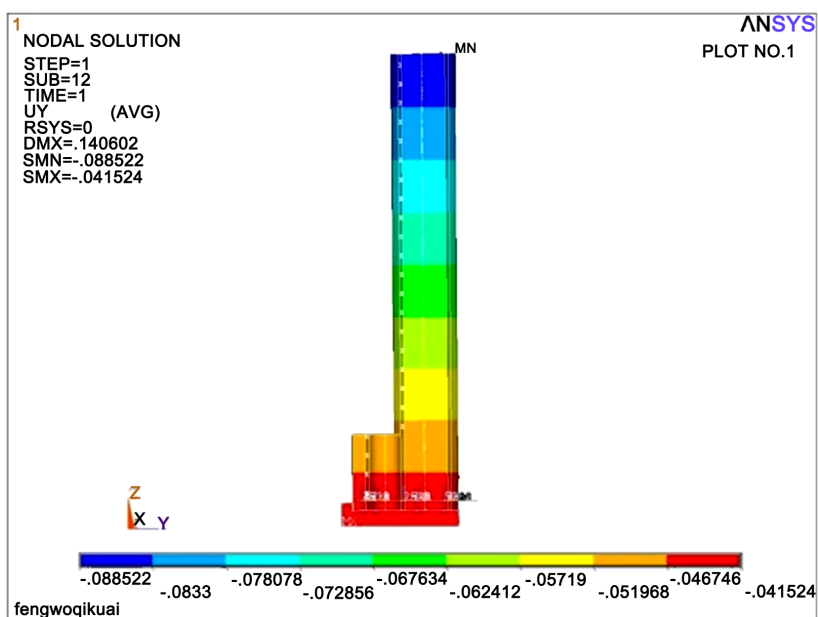


Figure 9. Horizontal displacement of the retaining wall with the height
图 9. 沿高度变化的挡土墙水平位移

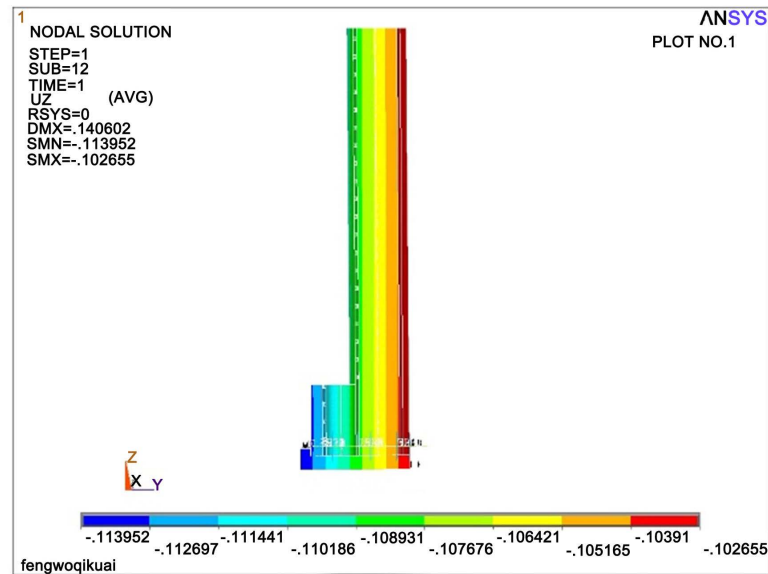


Figure 10. Vertical displacement of the retaining wall with the height
图 10. 沿高度变化的挡土墙竖直位移

尽管极限高度下挡土墙有着良好的抗倾覆和抗滑移能力，考虑到感官安全，仍然建议前后筒高差不宜过大。固在实际工程应用中，该种挡土墙属于偏心结构，由自重引起的不均匀沉降是设计中需要重点关注的因素。

5.3. 挡墙应力分析

挡土墙整体受力形式类似于悬臂梁受弯。墙背一侧主要以竖直方向的拉应力为主，拉应力从墙顶向底板逐渐增大，最大拉应力发生在底板与砌块的结合处(图 12)。竖向砌块之间采用钢筋注浆拉结，钢筋同砌块自重共同作用减小了砌块之间的拉应力，使墙背砌块实际拉应力处于较小的范围内，从而避免结构破坏。墙面一侧以受压为主，最大压应力出现在底板上(图 11)。

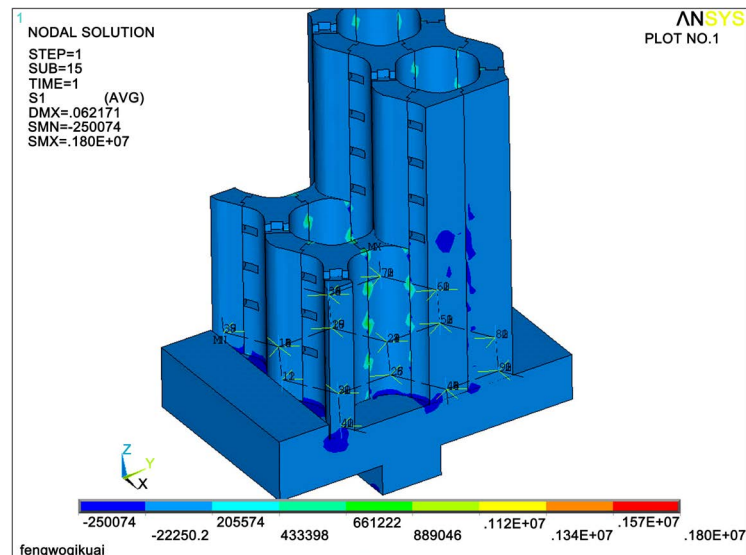


Figure 11. The distribution of first principal stress on the front of retaining wall
图 11. 挡墙墙面第一主应力分布

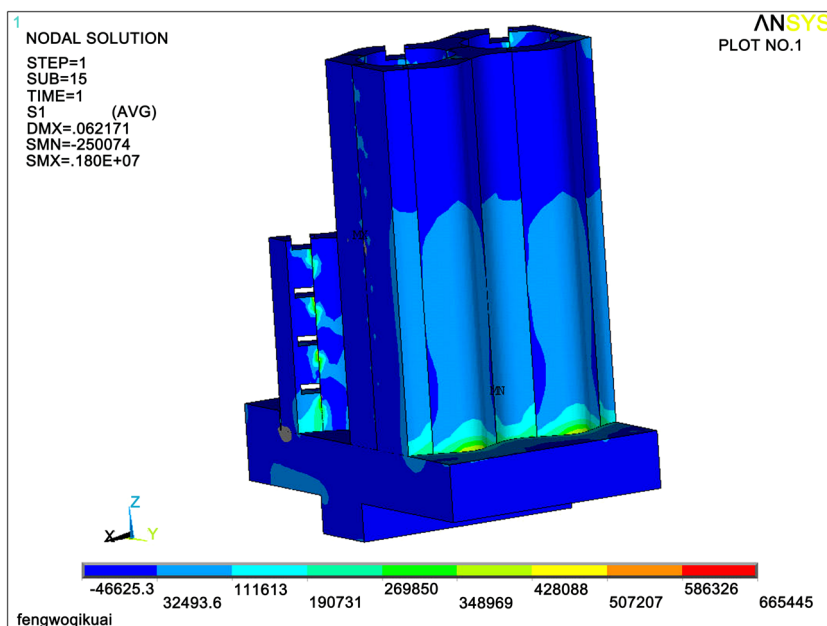


Figure 12. The distribution of first principal stress on the back of retaining wall
图 12. 挡墙墙背第一主应力分布

砌块与砌块接触的部分往往会出现应力集中的现象，一般表现为较大的拉应力，但基本在 C20 混凝土的设计值范围之内。超过设计值的部分实际作用范围不超过 15 mm，且发生在砌块角点附近，不至于影响结构整体的稳定性，设计时可以注意这部分采取适当的补强措施。

6. 结论

1) 蜂巢砌块挡墙的墙背水平土压力由于土拱效应的影响呈倒 S 形分布，土压力合力要小于等于库伦主动土压力合力，且作用点位于距离底部 0.34 H 的地方。所以实际工程中仍然可以按照库伦土压力理论进行设计计算，出于安全考虑可以在库伦主动土压力的基础上乘以 1.2 的安全系数。

2) 挡土墙整体重心靠近墙踵，虽然可以提供较大的抗倾覆力矩，但是也会带来基础应力偏心距较大而造成不均匀沉降的危险，设计截面时要注意墙体重心的位置，可以适当提高墙面筒的高度或者延长底板进行平衡。

3) 挡墙受力形式类似于悬臂梁受弯，主要危险点在墙背受拉和砌块拼接部分的应力集中。在实际工程中，需要注意在砌块中穿结的钢筋和底板的锚固以及砌块拼接部分进行适当的补强。

参考文献

- [1] SL379-2007. 水工挡土墙设计规范[S].
- [2] 吕凤梧. 深基坑施工过程多支撑挡土墙动态可靠度计算[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 1-5.
- [3] 邢肖鹏. 挡土墙土压力有限元模拟分析[J]. 山西水利科技, 2002, 146(4): 1-3.
- [4] 苏利亚. 二级悬臂式挡土墙的力学分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(5): 10-11.
- [5] 施小平. 悬臂式挡土墙抗滑稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 108-112.
- [6] 陈忠达, 汪东升. 悬臂式挡土墙有限元分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(1): 38-41.
- [7] 邓楚建, 何国杰. 基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 736-739.

-
- [8] 王先军, 陈明祥. Drucker-Prager 系列屈服准则在稳定分析中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3734-3738.
- [9] 王国田, 罗雪贵. 滑坡-抗滑桩土拱效应三维数值模拟研究[J]. 路基工程, 2018, 199(4): 90-94.
- [10] 吴昌将, 张子新. 边坡工程中抗滑桩群桩土拱效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(7): 1305-1333.
- [11] 王诚, 石少卿. 基于法向应力突变的组合式钢管抗滑桩土拱效应模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(10): 1671-1815.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org