



非极限状态下挡土墙主动土压力及土拱数值计算*

田超, 李永刚

(太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 利用有限元分析方法, 研究平动位移模式、非极限状态刚性挡土墙的土压力和小主应力拱。结果表明, 非极限状态下, 墙后土体存在梯形状相对位移区, 其大小随墙体位移增大而增大。非极限状态挡土墙土压力呈凸曲线分布, 墙体位移大, 总土压力小, 总土压力作用点到墙底的高度为 0.28~0.36 倍墙高。非极限状态下墙后土体的主应力拱曲线为指数曲线: 墙体位移小, 曲线曲率较大; 墙体位移大, 曲线较平缓。

关键词: 挡土墙; 非极限状态; 主动土压力; 土拱

中图分类号: TU 432

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0167-04

Earth pressure and soil arching on retaining wall under non-limit state

TIAN Chao, LI Yong-gang

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on finite element analysis, we research the active earth pressure and soil arching on the retaining wall under non-limit state. The results show that there is a relative displacement region shaped as trapezoid behind the retaining wall and it increases as the displacements of the retaining wall increases under the non-limit state. The active earth pressure behind the wall presents a convex curve distribution. As increasing of the displacement of the wall, the integrity of active earth pressure increases and the distance from the action point of the integrity of the active earth pressure to the wall heel is about 0.28 to 0.34 times high of the wall. The curve of the soil arching behind the wall under the non-limit state is an exponential function: the base and the curvature decreases with the increase of the wall's displacement.

Keywords: retaining wall; non-limit state; active earth pressure; soil arching

在土力学中, 挡土墙上的主动土压力是一个古老的课题, Coulomb 与 Rankin 讨论了极限状态的土压力, 并假定土压力线性分布。Terzaghi^[1-3] 通过大规模的模型试验对经典土压力理论提出了质疑, 认为只有当土体水平位移达到一定值、土体产生剪切破坏时, 经典的库伦与朗肯土压力值才几乎正确。Fang^[4-5]、周应英^[6] 对刚性挡墙主动土压力进行模型试验, 表明土压力分布与墙体变位

模式有关。Bang^[7] 认为土体从静止状态到极限状态是一个渐变的过程, 即存在大量的非极限状态。Handy^[8]、Paik^[9] 以及国内学者李永刚^[10]、谢康和等^[11]、卢坤林等^[12] 引进土拱概念进行土压力的研究, 提出极限状态下的土拱表达。挡土墙非极限状态下的土压力和土拱研究越来越受到工程界的关注。本文用有限元数值分析方法研究平移刚性挡土墙非极限状态下的土压力变化规律及其土拱形状。

收稿日期: 2015-11-15

*基金项目: 山西省自然科学基金重点项目 (2012011025-2)

作者简介: 田超 (1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。

1 刚性挡土墙非极限状态土压力有限元分析

有限单元法作为一种强有力的数值计算手段，可以兼顾土体的应力应变关系以及模拟挡土墙的位移等多种复杂工况。以其快捷、高效、计算结果可靠等的优势备受工程界青睐，在许多大型工程中^[13-15]都有应用。

本文采用 ANSYS 有限元软件，研究挡土墙平时非极限下的填土位移场、土压力分布及小主应力拱。根据挡土墙的受力特点，将挡土墙土压力计算作为平面应变问题处理。为贴近工程实际，模拟取墙高 H 为 4.5 m 的混凝土重力挡土墙，墙背垂直，墙顶宽 0.5 m，底宽 1.5 m (1/3 墙高)。挡土墙底部地基深度取 1 倍墙高，挡土墙回填土取 5 倍墙高作为计算域 (图 1)，左、右两侧地基和填土边界面位移为零、底边界位移为零。

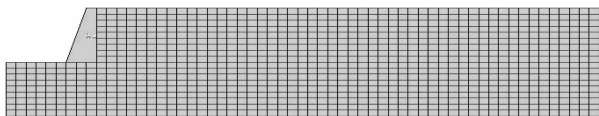


图 1 计算网格

土体和墙体及地基均采用 PLAN42 单元，墙体和填土、地基和填土、墙体和地基之间的界面采用 TARGE169、CONTA172 接触单元。考虑挡土墙和地基近似为刚性，回填物为无黏性砂。回填土体用 Druker-Prager 模型，墙体和地基用弹性模型。主要参数见表 1。令墙土摩擦角 δ 等于填土内摩擦角 φ 。挡土墙与填土、地基与填土、挡土墙与地基之间摩擦系数均取 0.46，即墙土摩擦角 $\delta = 25^\circ$ 。

表 1 有限元模型参数

研究对象	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量/Pa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	凝聚力/ MPa
墙后土体	18	7.00×10^6	0.30	25	0
地基	23	9.62×10^8	0.25		0
挡土墙	25	2.80×10^{10}	0.17		0

填土模式采用一次填筑，通过分段位移约束方法分别给予墙体不同的位移，以研究不同墙体位移下墙后主动土压力的分布、大小和填土中的土拱曲线等。挡土墙的水平位移值与墙高的比之为墙体位移比 (表 2)。

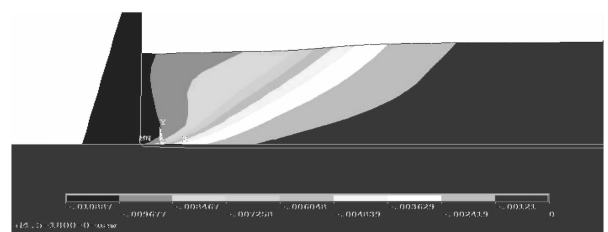
表 2 挡土墙平动位移

挡土墙位移/m	0	0.002	0.005	0.01	0.015	0.019
墙体位移比 $x/\%$	0	0.044	0.11	0.22	0.33	0.42

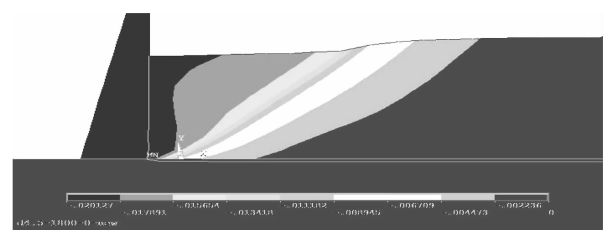
2 计算结果分析

2.1 墙后填土位移场

墙体位移时，墙后一梯形区域的土体具有渐变的移动和沉降，称其为相对位移区 (图 2)。从墙体附近最大位移的土体逐渐过渡到位移为零的稳定土体，区域内相邻的土体均发生相对位移和相对沉降，稳定侧的土体对墙体侧土体具有向上、向后 (向稳定侧) 的摩擦作用，并产生土压力的转移—土拱效应，稳定侧土体充当拱脚的作用。墙体位移越大，相对位移区的范围越大，墙体位移比分别为 0.22% H 、0.42% H 时，对应的梯形相对移动区的顶边长分别约为 1.78、1.89 倍的墙高。



a) 位移比为0.22%



b) 位移比为0.42%

图 2 墙后土体位移

2.2 墙体土压力

墙体不同位移时的土压力分布见图 3，土压力沿墙高呈凸曲线分布。在相对位移区，稳定侧土体的位移和沉降相对较小，相邻的墙体侧土体位移和沉降较大，前者对后者具有减荷作用，相对位移区土体的层层减荷和土压力传递作用，导致随土体埋深逐渐增大而挡土墙的土压力增长慢慢减缓。靠近墙底时，地基和稳定土体的共同向后 (向稳定土体侧) 摩擦使得墙底的土压力减小很多，墙背

最大土压力至墙底的距离 (0.10 ~ 0.15) H 。

墙体位移大, 相对位移区大, 其土体的层层减荷和土压力传递作用发挥越多, 挡土墙背上的土压力小。总土压力 E_{mx} 随墙体位移比的变化见图 4, 可由式(1)表示。墙体位移比超过 0.42% 之后, 土压力大小几乎不发生变化, 此时的土压力就是极限主动土压力。据图 3 可知, 土压力小, 其作用点高。不同位移比的土压力合力作用点到墙底的高度 H_{mx} 可由式(2)计算。

$$E_{mx} = 45.40 + 19.40e^{-\frac{x}{0.1}} \quad (1)$$

$$H_{mx} = 0.36 - 0.03e^{-\frac{x}{0.09}} \quad (2)$$

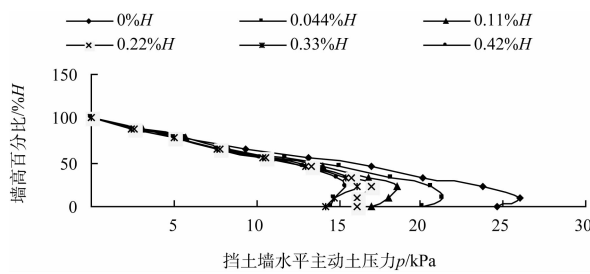


图 3 位移-挡土墙主动土压力分布

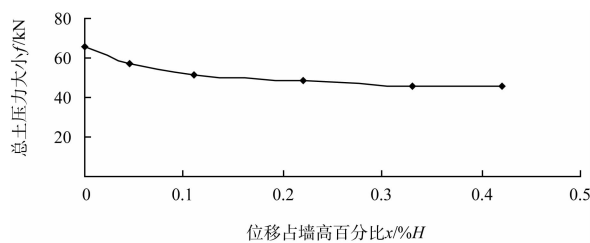


图 4 位移-挡土墙主动土压力

2.3 非极限状态下的小主应力拱

非极限状态下挡土墙后土体中各点的小主应力矢量如图 5 所示。观察土体中小主应力矢量的走势, 根据相关各应力矢量的斜率和坐标, 反算并拟合可得小主应力矢量轨迹线——小主应力拱(曲线)(图 6)。远离墙体的土体处于自由土压力场, 小主应力水平; 墙背对土体的向上摩擦, 土体的小主应力偏转, 倾斜的小主应力经过 (3 ~ 4) H 的距离逐渐过渡至水平状态, 形成指数曲线的小主应力拱曲线, 如式(3)。墙体位移加大, 墙土相互作用、摩擦减弱, 墙背处的小主应力偏转、倾斜减小, 拱曲线平缓。不同墙体位移时的小主应

力拱参数见表 3, 参数 A 逐渐减小并趋于稳定, t 逐渐增大并趋于稳定。

$$y = Ate^{(-x/t)} \quad (3)$$

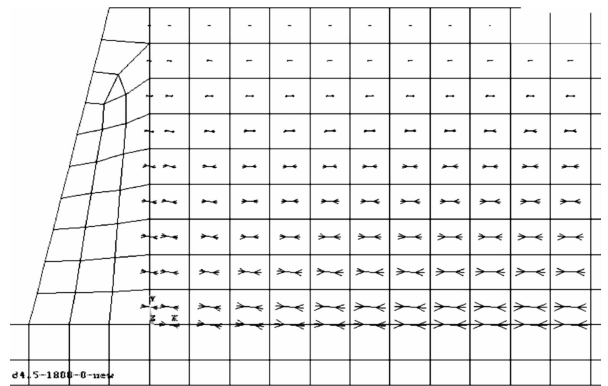


图 5 位移比 0.22% 墙后土体小主应力矢量

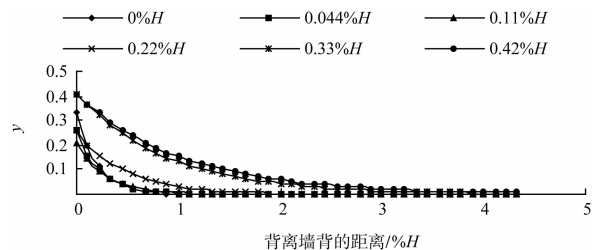


图 6 不同位移下的土拱曲线

表 3 不同位移下的土拱曲线参数

墙体位移比/%	A	t
0	0.37	0.91
0.044	0.25	1.06
0.110	0.17	1.23
0.220	0.12	2.11
0.330	0.10	3.96
0.420	0.09	4.57

3 结论

1) 挡土墙在非极限状态下, 墙后土体存在梯形状相对位移区, 墙体位移大, 相对位移区大, 该区内土体的位移逐渐变化, 稳定侧土体的位移较小, 具有拱脚作用。

2) 挡土墙非极限状态下, 相对位移区的土体层层摩擦和减荷, 使墙背土压力呈凸曲线分布, 最大土压力距墙底 (0.10 ~ 0.15) H 。墙体位移越大, 总土压力越小。为拱参数接近的挡土墙土压力计算提供参考。

3) 非极限状态下墙后土体的小主应力拱曲线

为指数曲线，墙背处拱曲线的斜率最大，经过 3 ~ 4 倍墙高的距离逐渐过渡至水平状态。墙体位移小，曲线曲率较大；墙体位移大，曲线较平缓。

参考文献：

[1] Terzaghi K. Record earth pressure testing machine [J]. Engineering News Record, 1932, 109(29) : 365-369.

[2] Terzaghi K. Large retaining wall test I-pressure of dry sand[J]. Engineering News Record, 1934, 112 (1): 136-140.

[3] Terzaghi K. Large retaining wall test II-pressure of saturated sand [J]. Engineering News Record, 1934, 112(22) : 256-262.

[4] Fang Y S, Ishibashi I. Static earth pressures with various well movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112 (3) : 317-333.

[5] Fang Y S, Chen T J , Wu B F. Passive earth pressure with various wall movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120 (8) : 1 307-1 323.

[6] 周应英,任美龙. 刚性挡土墙主动土压力试验研究[J] 岩土工程学报, 1990, 12(2) : 19-26.

[7] Bang S. Active earth pressure behind retaining walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 112 (6) : 626-645.

[8] Handy R L. The arch in soil arching [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3) : 302-318.

[9] Park I K, Davis E H. The behavior of anchor plates in clay [J]. Geotechnique, 2003, 32(1) : 9-23.

[10] 李永刚,白鸿莉. 垂直墙背挡土墙土压力分布研究[J]. 水利学报, 2003, 34 (6) : 101-105.

[11] 蒋波,谢康和,应宏伟. 挡土结构土拱效应及土压力理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

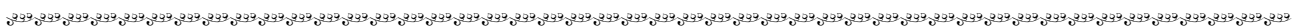
[12] 卢坤林,朱大勇,杨扬. 考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法[J]. 中国公路学报, 2010(23) : 20-25.

[13] 杨树耕,孟昭瑛. 有限元法在三盛公拦河闸安全水头研究中的应用[J]. 人民黄河, 1994(10) : 37-39.

[14] 李莹,杜志友,张海森. 有限元法在浑河闸钢闸门安全检测中的应用[J]. 水利电力机械, 2005(5) : 16-18.

[15] 奚肖亚,刘海祥,叶小强,等. 划子口河闸弧形钢闸门三维有限元分析与安全评估[J]. 水利水电工程学报, 2012(5) : 36-40.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 156 页)

4 结 语

1) 针对丙寅洲河漫滩滩面低且宽、前缘陡而高的特点，提出护坎的概念及守护特点。护坎结构基本保留其坎状的外部形态；护坎与滩面衔接区域植被枯萎且流速较大，应采取守护措施。

2) 为了减小削坡工程量，提出斜坡护岸与格宾挡墙相结合的混合式护坎结构方案。计算分析表明，挡墙设置在坡底的方案开挖量小，但地基应力相对较大且分布不均匀；坡顶挡墙方案则对地基的适应性相对较好。

3) 通过分析计算和相关模型试验研究，丙寅洲护坎推荐方案采取坡顶设 3 m 高挡墙、下部为 1:3 斜坡式护岸结构。护坎与滩面衔接区建议采取三维立体网垫或散抛片石等守护措施。

参考文献：

[1] 余文畴,卢金友. 长江河道崩岸与护岸[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[2] 龙慧,严光云,段光磊. 荆江河段近岸河床演变规律及崩岸机理[J]. 人民长江, 2006, 37(12) : 75-77.

[3] JTJ 300—2000 港口及航道护岸工程设计与施工规范[S].

[4] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].

[5] 赵志舟,彭凯,高辰龙,等. 大马洲水道演变特点与丙寅洲守护方案研究[J]. 水利水电工程学报, 2014(2) : 8-16.

[6] 余文畴,卢金友. 长江河道演变与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

[7] 赵志舟,彭凯,汪魁,等. 长江中游荆江河段航道整治工程大马洲至砖桥水道护坎结构形式专题研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.

[8] 冷玉龙,韦一心. 中华字海[Z]. 北京: 中华书局、中国友谊出版公司, 1994.

[9] 谢鉴衡. 河床演变及治理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013.

[10] 李义天,唐金武,朱玲玲,等. 长江中下游河道演变与航道整治[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[11] SL 379—2007 水工挡土墙设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)