

不同墙体位移方式下被动土压力的颗粒流模拟

曾庆有, 周 健

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 用二维颗粒流程序 (PFC2D) 对各种移动模式的刚性挡墙被动土压力进行了模拟。再根据已有的模型试验建立颗粒流模型, 分别让刚性墙体朝土体一侧平移、绕墙体顶部转动和绕墙体底部转动, 给出了这三种情况下墙后被动土压力的分布图形以及相应的竖向应力的分布图形, 同时给出了墙后被动土压力随墙体位移的变化规律。最后, 将计算结果与实验结果进行了对比表明, 颗粒流数值模拟方法不仅使用方便, 而且能较好地模拟墙后被动土压力的分布规律。

关 键 词: 颗粒流 (PFC); 被动土压力; 不同位移方式

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Analysis of passive earth pressure due to various wall movement by particle flow code (2D)

ZENG Qing-you, ZHOU Jian

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The passive earth pressure of rigid wall due to various wall movement was simulated by particle flow code(PFC)2D, which is based on DEM. PFC2D model for this problem was founded by the laboratory model test. The rigid wall translated toward the soils, or rotated about its own top or bottom. Then the horizontal and vertical stresses along the back of the wall were measured. These results were compared with that of the model tests; and it is shown that the PFC2D can simulate the distribution of the earth pressure along the back of the rigid wall conveniently and satisfactorily.

Key words: particle flow code; passive earth pressure; various wall movement

1 前 言

Rankine, Coulomb 以及 Log Spiral 被动土压力理论计算的是土体侧向位移最大时的土压力。它们既没有提供结构物位移与被动土压力的关系, 也没有考虑墙体移动方式对土压力大小与分布的影响, 而实际结构物的位移大小和位移模式、土体的强度和刚度、结构物与土体接触面的摩擦与粘结作用等对被动土压力的大小和分布都有影响^[1, 2], 因此设计时应充分考虑这些因素的影响。

挡土墙压力与墙体位移及墙体移动方式的关系迄今还没有通用的理论计算公式, 目前大量集中于连续介质理论下所建立的方法, 从宏观试验得到分析参数, 应用连续介质力学理论建立分析模型, 其

中, 有限元技术被认为是一种较为严格的计算实际墙体移动状态下的土压力的方法。但是, 有限元在处理此类问题时会遇到诸如土体中的初始应力状态、土体的本构模型及本构模型参数的取值、墙背与土体的接触面处理等主要问题, 因此, 增加了有限元计算土压力的复杂性和结果的不确定性。

土体的宏观表现必然与其内在的细、微观特性相关。随着计算机功能的不断增强, 从细观角度对土体进行模拟研究成为可能。本文用基于离散元的二维颗粒流程序 (PFC2D) 对各种位移模式的刚性挡墙被动土压力进行模拟, 以期得到若干规律性的结论。文中给出了墙体各种移动模式下被动土压力的分布图形以及它随墙体位移的发展规律, 并将计算结果与实验结果进行了对比。

2 颗粒流基本理论

44 PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions) 即二维颗粒流程序, 是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用^[3, 4]。由于一些本构特性可以在模型中自动形成, PFC2D 便成为模拟固体力学和颗粒流动问题的一种有效手段。与连续介质力学问题不同, 在PFC中由于介质一开始就假定为离散体的集合, 故颗粒之间没有变形协调的约束, 但平衡方程需要满足。如果作用于颗粒上的合力和合力矩不等于零, 则不平衡力和不平衡力矩使得颗粒按照牛顿第二定律的规律运动。颗粒的运动不是自由的, 要受到周围接触颗粒的阻力限制, 这种位移和阻力的规律就相当于物理方程。颗粒流方法采用显式时步循环运算规则, 重复应用运动定律于颗粒上, 将力-位移定律应用于接触上, 并且不断更新墙体位置。颗粒与颗粒间的接触或颗粒与墙体之间的接触, 在计算过程中自动形成或破坏。这种计算按照时步迭代并遍布整个颗粒集合体, 直到每一颗粒都不再出现不平衡力和不平衡力矩为止。

3 颗粒流模型的建立

砂土由颗粒形成, 模型箱或挡墙由墙体形成。颗粒与颗粒之间以及颗粒与墙体之间具有法向和切向的变形刚度, 同时给定它们之间的摩擦系数。模型箱高1.013 m, 宽 2 m, 共由 5 段墙体构成。模型箱左侧由两段墙体组成, 下部 0.113 m长的一段在整个计算过程中不动, 而通过控制其上的一段墙体的移动来模拟挡土墙的行为, 共生成砂土颗粒 15 000个, 模型构成参数见表1。模型构成如图1所示。颗粒集合体生成之后在自重应力下平衡 (重力加速度为 9.81 m/s^2), 平衡后的颗粒集合体高度约为 0.613 m, 生成基本计算模型。

表1 PFC 模型基本参数汇总表

Table 1 Parameters for the PFC2D model

类型	颗粒 重度 /kN·m ⁻³	颗粒 半径 /mm	粒径放 大系数	剪切刚度 $k_s/\text{N}·\text{m}^{-3}$	法向刚度 $k_n/\text{N}·\text{m}^{-3}$	摩擦系数 μ
砂土颗粒	26.5	0.7~2.0	2.725	2×10^6	2×10^6	0.58
模型箱				5×10^7	5×10^7	

4 控制挡墙不同移动方式

在颗粒流程序中, 可直接对每一墙体指定线速度或是绕某一转动中心的角速度, 因而很容易控制墙体的移动方式、移动速率及最终位移量的大小。本文对模型箱左侧上部的一段墙体指定平移速率或

是转动速率(同时指定转动中心), 用以模拟挡土墙的不同移动方式和位移大小。挡墙移动控制参数见表2。最大位移为 0.4 m 时的颗粒流模型左侧局部放大图见图1。

表 2 挡墙移动控制参数

Table 2 Parameters controlling the wall movement

方式	转动中心	移动速度率	每一级移 动时步	每一级移动 后平衡时步
平移模式		0.000 1	10	1 000
绕挡墙顶 点转动	(0, 0.613)	0.000 2	10	1 000
绕挡墙底 部转动	(0, 10.113)	0.000 2	10	1 000

注: 平移模式移动速度单位为m/时步, 其他方式的移动速率单位为rad/时步。

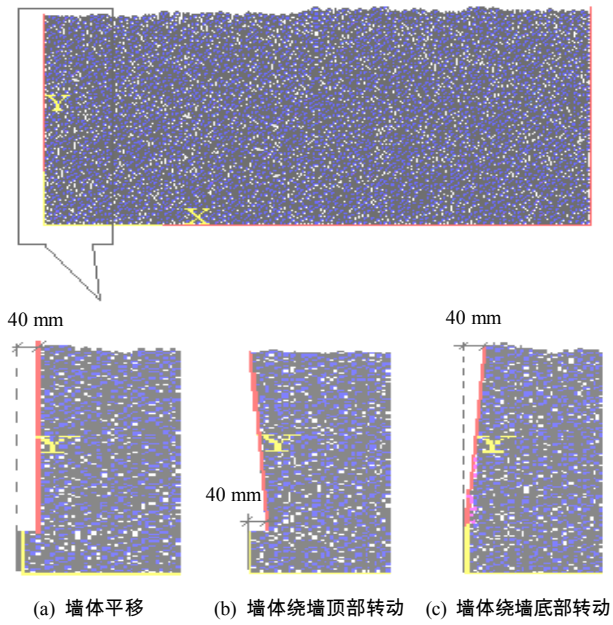


图 1 颗粒流模型图

Fig.1 PFC2D Model

5 土压力的量测

在连续介质中, 应力是一个连续量, 一般定义为作用于单位面积上的力。对于二维问题, 应力则定义为作用于单位线段上的合力。然而, 对于松散介质这种定义是不合适的, 因为颗粒介质是离散的, 在颗粒模型中不存在于每一个点上连续的应力, 而且变化幅度很大。在PFC模型中计算颗粒间接触力和颗粒的位移, 这些量对于在微观上研究材料的特性很有意义, 但不能将这些量直接联系到连续模型中, 需要经过一个平均的过程, 才能从微观传到连续模型中。所以, 采用平均应力概念来表示连续介质中的相应物理量。研究颗粒介质某一区域内的平均应力, 一般是以某一点为圆心作圆划分边界,

计算边界内部的平均应力张量。本文沿挡墙土体一侧布置一系列应力测量圈，半径为0.03 m，量测圈左侧与移动后的墙体相切，上下量测圈也彼此相切，从上到下一共布置了10个应力测量圈。每次墙体移动到指定位置，并充分平衡后，读取量测圈内的水平向应力 σ_x 和竖向应力 σ_y ，水平向应力即为相应深度处的墙后土压力。

6 被动土压力的PFC2D模拟结果

6.1 自重平衡下的水平应力与竖向应力

在生成挡墙及挡墙内土体的PFC模型并在自重下平衡之后，按上述方法量测得到的应力关系如图2所示。由于砂土颗粒是随机生成的，所量测的也是量测圈范围内的平均应力，因此，所有测点应力值并不完全在一条直线上（真实的砂土中的应力也可能如此）。尽管这样，所反应的应力分布规律可认为是相当好的。将量测值进行线性回归，可分别得到竖向应力(kPa)与水平应力(kPa)的随深度的分布关系式：

$$\sigma_y \approx 20h; \sigma_x \approx 10h \quad (1)$$

式中 h 为深度(m)。从基本的应力与深度的关系式可以看出，模拟结果是可信的，这也是进一步模拟挡墙土压力的基础。

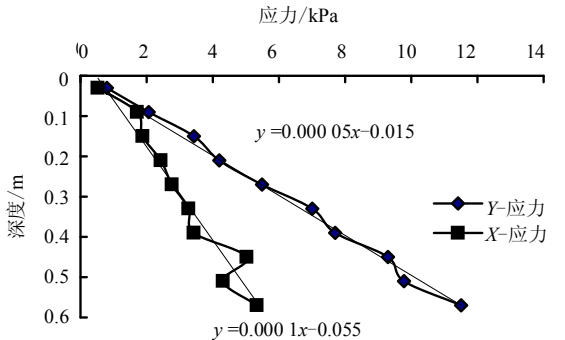


图 2 自重平衡下土体中的水平应力与竖向应力
Fig. 2 Initial horizontal and vertical stresses

6.2 不同墙体位移方式下的墙后应力

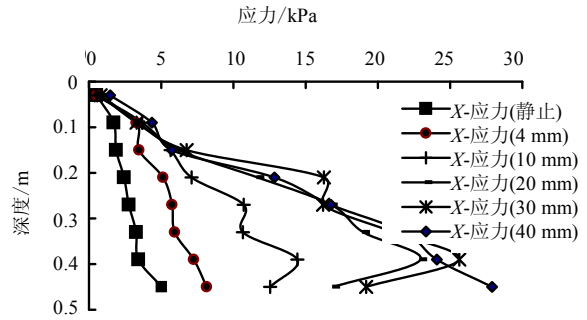
6.2.1 水平应力（墙后被动土压力）

首先，让整个墙体朝土体一侧缓慢平移，墙体位移分别为 0, 4, 10, 20, 30, 40 mm 时的墙后水平应力如图 3(a)所示。在每一级位移情况下，水平应力沿深度基本呈线性分布，且深度上各点几乎同时达到极限土压力值。

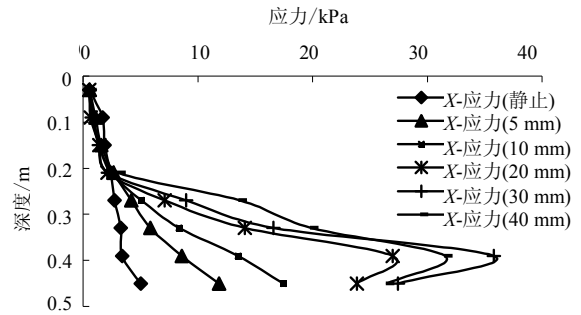
墙体绕自身顶部朝土体一侧缓慢转动后，墙体最大位移分别为 0, 5, 10, 20, 30, 40 mm 时的墙后水平应力如图 3(b)所示。随着位移的增大，上部

的水平应力几乎没有增长，而下部水平应力则迅速增大，应力分布呈现强烈的非线性。

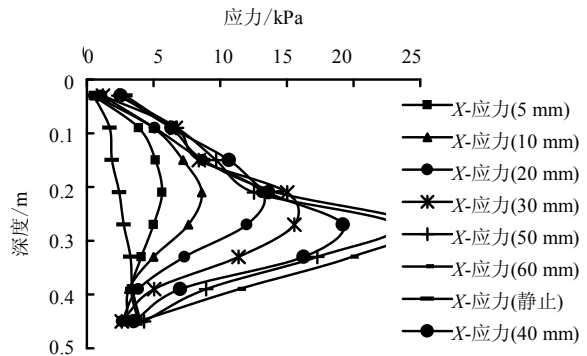
墙体绕自身底部朝土体一侧缓慢转动后，墙体最大位移分别为 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 mm 时的墙后水平应力如图 3(c)所示。随着位移的增大上部土压力增加得比较快，下部则非常缓慢，压力分布呈中间大，两头小的抛物线型。同时可看到，抛物线最大值越来越突出，且有往较深处移动趋势。



(a) 墙体平移



(b) 墙体绕墙顶部转动



(c) 墙体绕墙底部转动

图 3 不同墙体移动方式下土体的水平应力分布

Fig. 3 Distribution of horizontal stress due to various wall movements

6.2.2 竖向应力

PFC2D 不仅能方便地获得水平向应力分布，通过将颗粒接触力向竖向分解，并在量测圈内平均，

可同时很容易地获得竖向应力的分布。上述 3 种情况的竖向应力分布见图 4。可见随着位移的增大，竖向应力呈现与相应情况下水平应力相同的分布形状，但在数值上比水平应力小。

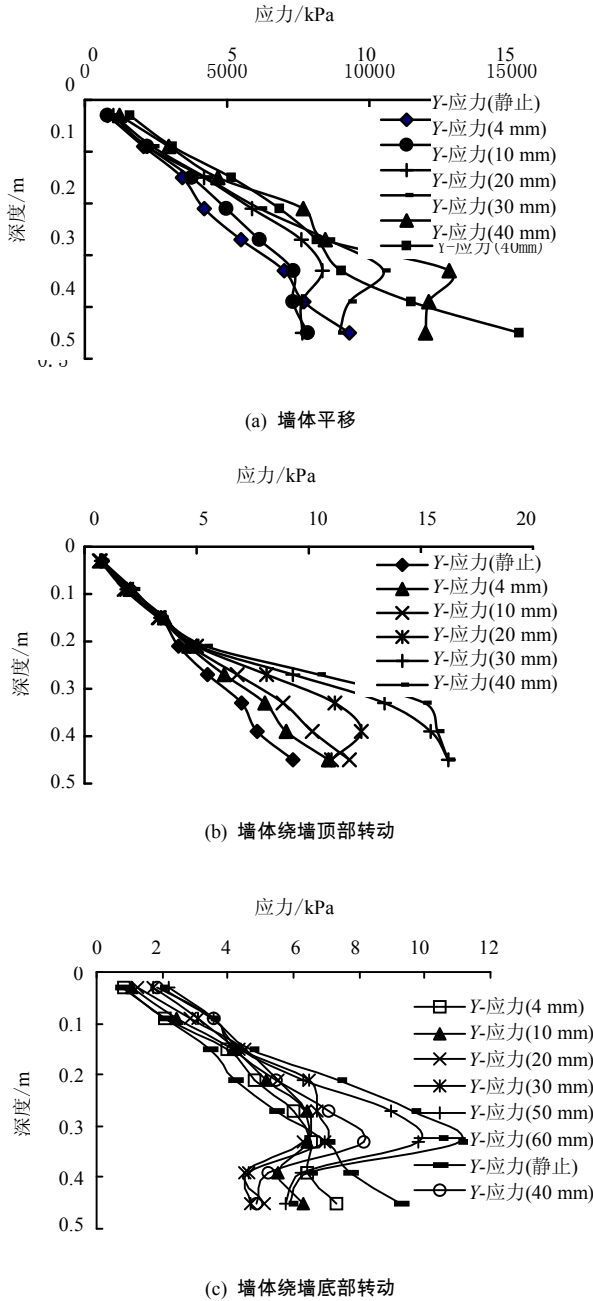


图 4 不同墙体移动方式下土体的竖向应力分布
fig. 4 Distribution of vertical stress due to various wall movements

6.2.3 水平向应力随墙体位移的发展

在墙体各种不同的位移方式下，各深度处水平应力随墙体最大位移的发展如图 5 所示。墙体平移且当墙体最大位移与墙体高度之比 $s/h=0.04$ 时，沿深度各点水平应力几乎同时达到最大值。而当墙体绕顶部转动时，0.15 m 以上测点的应力始终保持不

变，其他各深度处应力达到最大值时的 s/h 也不一样。而在墙体绕底部转动的情况，上下部土体首先达到最大值，而中部土体在 $s/h=0.12$ 时，仍然没有达到最大值。

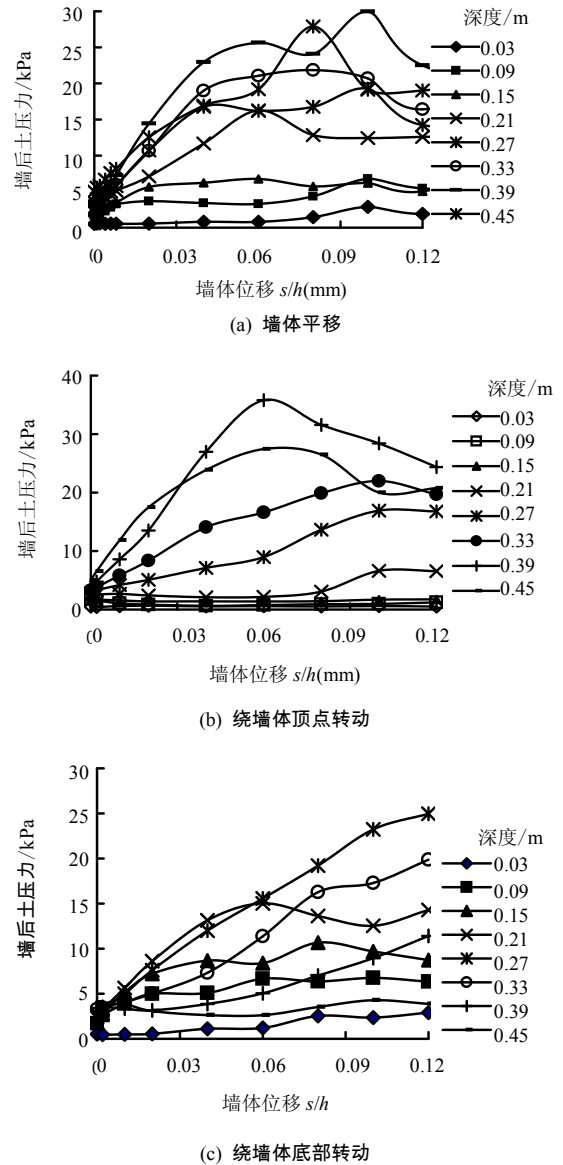


图 5 不同墙体移动方式下墙后土压力随墙体位移变化
Fig. 5 Variation of horizontal stress with various wall movements

7 计算与试验结果的对比

Yung whow Fang 等采用室内试验的方法对墙体在不同移动方式下产生的被动土压力进行了研究（刚性墙，干砂）。首先将墙体的移动模式归纳为 3 种，即平移(T)、绕墙体上方某一点的转动 (RTT) 以及绕墙体下方某一点的转动 (RBT)。后两种方式实际上包含了纯转动以及同时平移与转动等复合移动模式。文中给出了详细的模型试验过程以及土样制备方法等。在墙体平移模式、墙体绕墙顶部转动

以及墙体绕墙底部转动情况下墙后土压力的分布如图 6 所示。对比前文 PFC2D 模拟结果, 可以认为颗粒流程序能很好地模拟刚性挡墙被动土压力的分布规律。

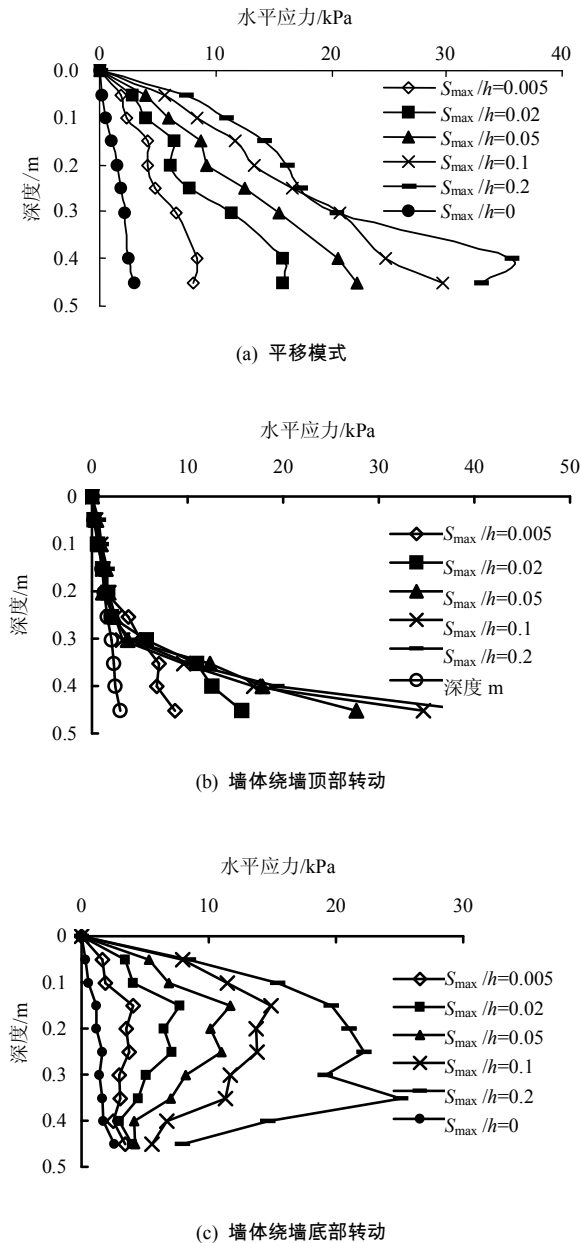


图 6 不同墙体移动方式下土体的水平应力分布^[5]
(模型试验结果来自 Yung Whow Fang 等)

Fig. 6 Laboratory model test results for distribution of horizontal stress due to various wall movements^[5]
(by Yung Whow Fang et al.)

8 结 语

相对于 FEM 等其他数值模拟方法, PFC2D 在处理挡墙土压力问题时的优势在于, 它只需要给定砂土颗粒之间的一些细观基本参数 (如接触刚度和摩擦系数等), 土体的本构关系即可自动形成, 从而避免了本构关系的选取及相应的参数确定的问题, 因而结果更趋于真实。此外, 在处理墙与土体接触面问题时, 只需要给定墙与砂土颗粒之间的摩擦系数即可, 非常简便而且意义明确。本文对被动土压力的计算, 在沿深度的分布规律以及应力随位移增长的规律来看, 可以认为模拟结果是非常令人满意的。在具体数值上, 由于细观参数与宏观模型参数的对应关系尚不明确, 因此难以进行详细地对比, 这是应用颗粒流程序需要进一步研究的课题。

参 考 文 献

- [1] Anthony T C Goh. Behavior of cantilever retaining walls[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119(11): 1 751 - 1 770.
- [2] J Michael Duncan, Robert L Mokwa. Passive earth pressure: theories and tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(3): 248 - 257.
- [3] Itasca Consulting Group. PFC2D Theory and Background [M]. Minneapolis, Minnesota, 1999.
- [4] 池永. 土的工程力学性质的细观研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
CHI Yong. Mesomechanical research on the engineering mechanical property of soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [5] Yung-whow Fang, Tsang-jiang Chen, Bin-ferng Wu. Passive earth pressures with various wall movements[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(8): 1 307 - 1 323.