

DOI: 10.11779/CJGE2014S2001

# 柔性挡墙的主动土压力计算及分布研究

应宏伟<sup>1,2</sup>, 朱伟<sup>1,2</sup>, 郑贝贝<sup>3</sup>, 王小刚<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江东建筑有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 已有研究表明, 柔性挡墙在不同位移量和位移模式下, 主动土压力的大小和分布均发生变化, 其分布也与刚性挡墙有明显区别。在前人室内试验和数值模拟结果的基础上, 建立了考虑位移变化效应的柔性挡墙土压力计算模型, 采用中间状态系数来统一反映挡墙位移模式和位移量的影响, 提出了任意位移柔性挡墙主动土压力合力系数的计算公式; 在求得合力基础上, 将土体简化为非线性弹簧和刚塑性体的组合体, 提出了任意位移下的土压力分布和合力作用点高度的计算方法。以前人模型试验为算例, 将本文方法与试验结果、已有理论方法的对比表明, 本文方法得到的土压力分布与试验值更接近。研究还发现, 随着柔性挡墙位移量的增大, 土压力合力逐渐减小, 土压力分布的非线性程度逐渐增大; 合力作用点位置随挡墙位移形态的变化而改变; 在典型鼓胀形变位模式下, 土压力呈R形分布。

**关键词:** 柔性挡墙; 位移模式; 位移量; 主动土压力; 分布

中图分类号: TU475 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0001-06

作者简介: 应宏伟(1971-), 男, 博士, 副教授, 从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn。

## Calculation and distribution of active earth pressure against flexible retaining walls

YING Hong-wei<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>1,2</sup>, ZHENG Bei-bei<sup>3</sup>, WANG Xiao-gang<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Southeast Architecture Design Co. Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The previous studies have shown that the resultant and distribution of active earth pressures against flexible retaining walls vary with the modes and magnitudes of wall movement, and the distribution of earth pressures is significantly different from that of rigid walls. Based on the previous experimental and numerical results, a model to calculate the earth pressures on the flexible retaining walls is proposed, which can consider the effect of wall movement. A middle-state coefficient is introduced to reflect the influence of the modes and magnitudes of wall movement. The formulae of the coefficients of the resultant earth pressures on the flexible wall under any lateral deformation are presented. Then the soil behind the wall is simplified as the combination of nonlinear springs and a rigid plasticity object and the unit earth pressures and the heights of points of application of resultant forces are obtained. The comparisons among the proposed formula, previous methods and the experimental observations show that the results of the proposed method are more satisfactory than these of the previous methods. With the increase of the wall movement, the resultant active pressures decrease and the nonlinearity of the distribution of earth pressures augments gradually. The heights of points of application of resultant forces change with the mode of wall movement. The distribution of earth pressures exhibits a “R” shape under the drum deformation of the wall.

**Key words:** flexible retaining wall; mode of movement; magnitudes of movement; active earth pressure; distribution

## 0 引言

挡土墙上的土压力计算是土木水利工程中的古老课题, 经典的库仑、朗肯土压力理论基于刚性挡土墙平动变位模式下提出。实际工程中, 除了重力式挡土墙等刚性挡土墙之外, 基坑工程中的排桩墙、地下连续墙等支护结构, 边坡工程、水利工程中的板桩墙等

结构形式也在广泛应用, 这类挡土结构的厚度与墙体高度相比很小, 墙体会产生明显的挠曲变形, 一般称为柔性挡墙。

对土压力的研究多集中在刚性挡土墙<sup>[1-5]</sup>, 表明墙

体土压力不仅受位移量大小影响, 而且还受墙体变位模式影响, 在非平动模式下土压力为非线性分布, 平动模式下土压力是否为线性分布则尚未取得一致的结论。对柔性挡土墙土压力的研究也取得了一定的进展, 其中 Milligan<sup>[6]</sup>对砂性土内撑式柔性挡土墙滑裂面的发展进行了模型试验, 陆培毅等<sup>[7]</sup>对柔性挡土墙悬臂和单锚两种模式下的土压力分布进行了室内试验, 指出土压力分布并非直线分布, 在拉锚附近土压力出现R形分布。蔡奇鹏<sup>[8]</sup>和王保田等<sup>[9]</sup>分别采用有限元法对柔性挡墙和水泥土围护结构上的土压力分布进行了数值模拟, 应宏伟等<sup>[10]</sup>采用水平层分析法对鼓形变位模式下柔性挡墙的极限状态主动土压力分布进行了理论研究。Zhang 等<sup>[11]</sup>通过三轴试验得到砂土的土压力系数与土体轴向和侧向应变增量比的关系, 给出了任意变位模式的位移统一表达式, 引入内摩擦角发挥值概念, 提出了任意位移状态土压力的计算方法。徐日庆等<sup>[12]</sup>和梅国雄等<sup>[13]</sup>根据主动土压力随位移的变化规律分别提出了反映位移效应的土压力计算公式。

然而, 现有理论研究尚有不足, 如文献[11~13]均对地基中某点的土体在水平向拉伸过程中的应力变化进行分析, 根据该点土压力强度与水平位移的关系提出计算公式, 与朗肯理论一样, 不能考虑相邻深度土体发生相对位移的情况, 严格来说仅适合平动模式挡墙的土压力计算, 得到的土压力分布始终介于静止和主动状态之间, 无法反映室内试验<sup>[1, 7]</sup>和数值模拟<sup>[2~9]</sup>得出的刚性挡墙绕顶转动或柔性挡墙鼓胀形变位引起的土压力重分布, 使得出现墙底附近或墙中部局部区域小于主动值、墙顶附近由于土拱作用而使土压力呈现增大效应甚至超过静止土压力的现象; 文献[10]基于水平层分析法求得的鼓胀形变位柔性挡墙极限主动土压力虽可以考虑相邻深度土体的相对位移, 得到的土压力分析可以反映墙顶附近的土拱现象, 但在墙体位移最大点处土压力出现突降, 墙底处的土压力强度趋于无穷大也不合理, 文献[5]分析 RB 模式刚性挡墙时在墙底附近也得出类似不合理的土压力分布。

本文在前人试验及数值分析的基础上, 提出了任意位移下柔性挡墙主动土压力合力及其分布的计算方法, 计算结果和试验结果吻合较好, 该方法能综合考虑柔性挡墙位移形态以及位移量对土压力合力及分布的影响, 计算方法简单, 便于实际工程应用。

## 1 中间状态的定量化

图 1 为柔性挡墙典型位移曲线。设  $h$  为挡墙高度,  $z$  为计算点深度,  $s_z$  为计算点水平位移值, 该曲线可简化为线性分布位移  $s_{z1}$  和鼓形分布位移  $s_{z2}$  两部分之

和。设  $s_{\max}$  为墙体最大位移值,  $z_m$  则为相应深度,  $s_{\text{ave}}$  为挡墙平均位移值,  $s_a$  为平动模式 (T 模式) 下土体达到主动极限状态的位移值, 填土为无黏性土, 内摩擦角为  $\varphi$ , 墙土摩擦角为  $\delta$ 。

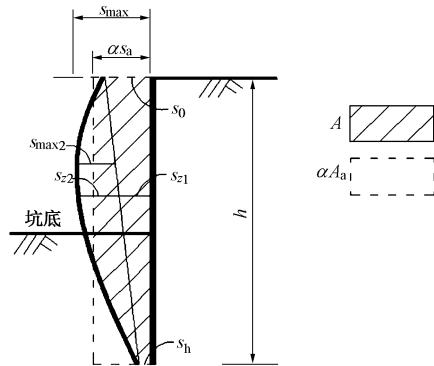


图 1 柔性挡墙典型位移曲线

Fig. 1 Typical deformation curve of flexible retaining wall

对于图 1 中柔性挡墙的任意位移曲线, Zhang 等<sup>[9]</sup>提出可用以下位移方程模拟:

$$s_z = f(z) = s_{z1} + s_{z2} \quad , \quad (1)$$

$$s_{z1} = s_0 - \frac{z}{h}(s_0 - s_h) \quad , \quad (2)$$

$$s_{z2} = s_{\max 2} \frac{(z)^n (h-z)^m}{(z_{m2})^n (h-z_{m2})^m} \quad , \quad (3)$$

式中  $s_0$  和  $s_h$  分别为墙顶和墙底位移。 $s_{\max 2}$  为鼓形分布的最大位移值,  $z_{m2}$  为相应深度,  $m$  和  $n$  为控制曲线形状的参数。

柔性挡墙任意位移曲线都可以用式 (1) ~ (3) 表示成关于深度  $z$  的函数。特别地, 当  $m=0$ 、 $n=0$  时,  $s_z$  退化为刚性挡墙的线性位移模式, 根据不同的  $s_0$  和  $s_h$  值, 位移曲线可退化为刚性挡墙平动 (T)、绕底转动 (RB)、绕顶转动 (RT) 或其它位移模式。

经典土压力理论认为, 当刚性挡墙偏离土体方向平移 (T 模式) 且位移量达到  $s_a$  时, 墙后土体达到主动极限状态, 墙背土压力达到极值 (主动土压力)  $p_a$ , 对应的主动土压力系数为  $K_a$ 。当墙体平移量大于  $s_a$  时, 土压力保持不变。研究表明<sup>[1~2]</sup>, 在 RB 和 RT 模式下, 刚性墙体土压力同样随位移变化, 但砂土达到主动极限状态的界限相对不明显, 给出的极限平均位移  $s_{\text{ave}}$  与 T 模式有区别, 如 RB 模式下土压力趋于稳值所需的挡墙平均位移量约为 T 和 RT 模式下的 2 倍(见表 1)。

刚性挡墙在平动位移模式下, 当平移位移量小于  $s_a$  时, 土压力系数介于静止土压力系数  $K_0$  和  $K_a$  之间, 处于非极限状态 (或称为中间状态), 因墙体各点位移

相等, 描述中间状态的量化标准显然可以直接取  $s/s_a$ ,  $s$  为墙体实际位移。

表 1 刚性挡墙不同模式极限状态平均位移<sup>[2]</sup>

Table 1 Normalized mean wall displacement to reach active state for rigid wall<sup>[2]</sup>

位移模式	$S_{\text{ave}}/h$	
	数值分析	试验结果
T	0.00051	0.00050
RB	0.00100	0.00095
RT	0.00060	0.00050

对于具有更复杂形态的任意位移柔性挡墙, 不妨定义  $\psi$  为中间状态系数, 由下式确定:

$$\psi = \frac{A}{\alpha A_a} , \quad (4)$$

式中,  $A_a$  为 T 模式刚性挡墙主动极限位移沿深度的包络面积, 即  $A_a = s_a \times h$ 。 $\alpha$  为与挡墙位移模式有关的主动极限位移修正系数, Matsuzawa 等<sup>[2]</sup>通过数值模拟研究了不同模式刚性挡墙达到极限状态需要的平均位移, 从表 1 的结果可知, RB 模式取  $\alpha = 2$ , T 和 RT 模式取  $\alpha = 1$ 。笔者认为对于柔性挡墙任意位移曲线, 可以根据位移最大值处的相对深度  $z_m$  来计算  $\alpha$  值, 即  $\alpha = 1 + (h - z_m)/h$ 。 $A$  为墙体实际位移曲线落在矩形  $\alpha A_a$  内的有效面积, 即图 1 中对应的阴影面积。

显然, 中间状态系数  $\psi$  介于 0 和 1 之间, 当  $\psi = 0$  时, 为静止土压力状态, 对应的土压力合力系数为  $K_0$ ; 当  $\psi = 1$  时, 为主动极限状态, 对应的土压力系数为  $K_a$ 。

由几何关系可得

当  $s_{\text{max}} \leq \alpha s_a$  时,

$$\psi = \frac{A}{\alpha A_a} = \frac{\int_0^h f(z) dz}{\alpha s_a h} ; \quad (5)$$

当  $s_{\text{max}} > \alpha s_a$  时,

$$\psi = \frac{A}{\alpha A_a} = \frac{\int_0^h f(z) dz - \int_{z_1}^{z_2} (f(z) - \alpha s_a) dz}{\alpha s_a h} . \quad (6)$$

式中,  $z_1$  和  $z_2$  为方程  $f(z) = \alpha s_a$  的两个解。这样, 柔性挡墙位移对土压力的影响可用中间状态系数  $\psi$  来统一反映。

## 2 土压力合力系数

根据已有试验及数值分析结果<sup>[1, 2, 8]</sup>, 土压力随着位移的增大而减小, 但并非简单的线性关系。文献[11~13]分别提出了某深度土压力强度随位移量变化的非线性表达式。借鉴文献[11], 本文提出不同位移下的主动土压力合力系数公式:

$$K = K_0 - (K_0 - K_a) \times \psi^\beta , \quad (7)$$

式中  $K$  为土压力合力系数,  $\beta$  为反映土压力和位移量之间非线性程度的参数, 本文取  $\beta = 0.5$ 。

结合式(5)~(7), 即可求得任意位移下的土压力系数  $K$ 。表达式清晰简洁, 以相对明确的 T 模式刚性挡墙达到主动状态的极限位移量  $s_a$  和柔性挡墙的整体位移曲线作为判别中间状态的量化标准, 同时反映了  $K$  随位移改变而呈非线性变化的特征。对于较简单的 T 模式, 式(7)可具体表示为

$$K = \begin{cases} K_0 - (K_0 - K_a) \times \left( \frac{s_{\text{max}}}{s_a} \right)^\beta & (s_{\text{max}} < s_a) \\ K_a & (s_{\text{max}} \geq s_a) \end{cases} . \quad (8)$$

显然式(8)反映了 T 模式时土压力合力随位移增加而非线性减小, 土压力系数逐渐趋于稳定并达到主动极限状态的规律。

## 3 土压力分布

彭述权等<sup>[4]</sup>在求解刚性挡墙极限状态土压力时将土体看作是理想刚塑性体和一系列线性弹簧的组合体, 但假定挡墙后侧压力与其水平位移成线性关系, 得到的刚性挡墙在非平动位移模式下的极限主动土压力沿深度呈非线性分布, 与文献[5, 14, 15]采用水平层分析法或其它方法得到的结论一致。本文对文献[4]的方法进行改进, 采用更合理的非线性土弹簧, 与式(7)相仿, 设  $p_z$  为深度  $z$  处的侧土压力强度值, 则

$$p_z = p_{0z} - k_z \times \left( \frac{s_z}{\alpha s_a} \right)^\beta . \quad (9)$$

式中  $p_{0z}$  为深度  $z$  处的静止土压力强度,  $p_{0z} = K_0 \gamma z$ ; 参数  $\alpha$  和  $\beta$  意义同上;  $k_z$  为土体刚度系数, 设沿深度线性分布, 设  $k_z = a(z - b)$ , 即

$$p_z = p_0 - a(z - b) \times \left( \frac{s_z}{\alpha s_a} \right)^\beta , \quad (10)$$

式中,  $b$  为反映墙顶土拱作用范围<sup>[1, 2, 8, 16]</sup>的参数, 刚性挡墙 RT 模式时, 取  $b = h/3$ , T 和 RB 模式时, 则取  $b = 0$ 。而针对柔性挡墙, 可取  $b = z_m/3$ 。

将式(10)沿深度进行积分即可得到合力  $P$ :

$$P = \int_0^h p_z dz = P_{0z} - a \int_0^h (z - b) \left( \frac{s_z}{\alpha s_a} \right)^\beta dz . \quad (11)$$

由式(7)所求的土压力合力系数  $K$  值又可得

$$P = \frac{1}{2} \gamma h^2 K . \quad (12)$$

联立方程(11)、(12)即可解得参数  $a$  值:

$$a = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{K_0 - K}{\int_0^h (z - b) \left( \frac{s_z}{\alpha s_a} \right)^\beta dz} . \quad (13)$$

式(10)即为土压力强度  $p_z$  的通式, 其中  $K$  值按式(7)计算。在求得主动土压力合力分布情况下, 易得合力作用点高度为

$$h_b = \frac{1}{P} \int_0^h p_z (h-z) dz \quad (14)$$

取  $\varphi=30^\circ$ ,  $\delta=20^\circ$ , 则  $K_0=1-\sin\varphi=0.5$ , 由库伦理论得  $K_a=0.30$ , 变换式(2)、(3)中的  $s_0$ ,  $s_h$ ,  $m$  和  $n$  的数值, 按前述方法计算得到的柔性挡墙各种位移模式下的土压力分布见图 2, 3, 合力作用点高度见表 2, 3。

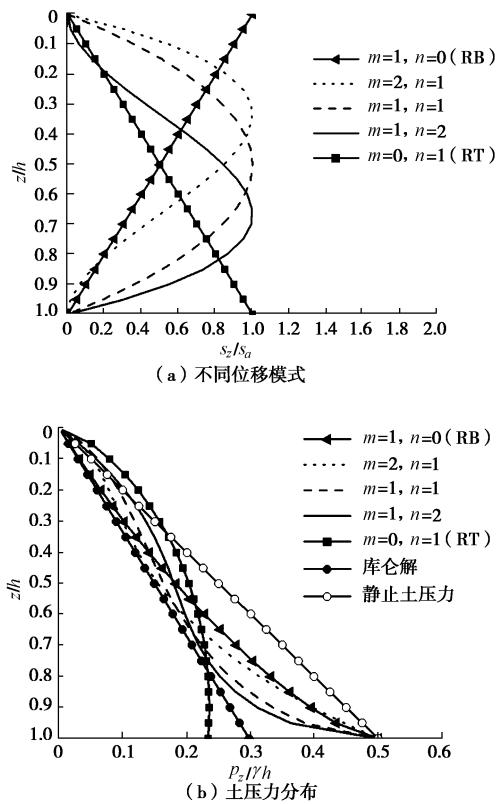


图 2  $s_{\max} = s_a$  时不同位移模式下的土压力分布

Fig. 2 Distribution of earth pressures with different displacement modes when  $s_{\max} = s_a$

表 2  $s_{\max} = s_a$  时不同最大位移发生深度的合力作用点高度

Table 2 Heights of application points of resultant forces with different  $z_m$  when  $s_{\max} = s_a$

$z_m/h$	0	0.3333	0.5	0.6667	1
$h_b/h$	0.3011	0.3056	0.3411	0.3604	0.4354

表 3  $z_m/h = 0.5$  时不同位移量下的合力作用点高度

Table 3 Heights of application points of resultant forces under various deformations when  $z_m/h = 0.5$

$s_{\max}/s_a$	0.5	1	2	5	10
$h_b/h$	0.3365	0.3380	0.3387	0.3391	0.3391

从图 2 可见, 当挡墙最大位移量  $s_{\max} = s_a$  时, 随着发生  $s_{\max}$  的相应深度  $z_m$  的增加, 墙顶附近局部土压

力逐渐增大, 并最终大于静止土压力, 而墙底附近局部土压力则逐渐减小, 并最终小于主动土压力。土压力分布从 RB 模式下的呈向上凹的非线性分布过渡到 RT 模式下的向上凸的非线性分布, 合力作用点高度也逐渐增大(见表 2)。

从图 3 可见, 当挡墙位移模式保持鼓胀型(且  $z_m/h = 0.5$ )的情况下, 随着最大位移量  $s_{\max}$  增加, 挡墙土压力逐渐减小, 非线性程度也逐渐增大, 挡墙中部位移量较大处, 土压力也减小得更加明显, 甚至小于相应深度的库伦主动土压力强度, 土压力分布曲线逐渐呈现 R 形分布。合力作用点高度则变化不明显, 保持在 1/3 墙高附近(见表 3), 与经典土压力理论一致。这一现象可以用土拱效应来解释, 墙体发生鼓胀变位时, 位移沿墙体深度分布不均, 中部最大而墙顶和墙底很小, 位移较小区域的土体对变形较大区域的土体将产生附加剪应力, 从而使位移较大区域的土压力减小, 位移较小区域的土压力增大, 即上下相邻土层出现错动而产生的层间剪应力引起了土压力的重分布。

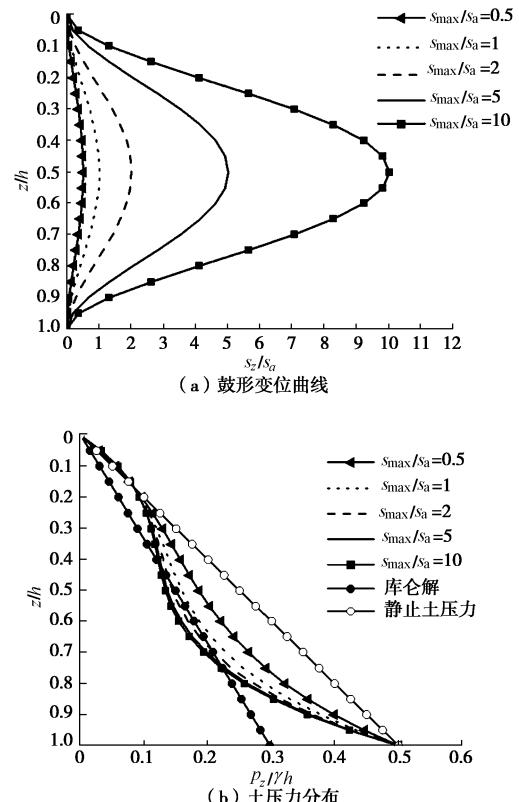


图 3  $z_m/h = 0.5$  时鼓形变位不同位移量下的土压力分布

Fig. 3 Distribution of earth pressures at various displacements under drum deformation when  $z_m/h = 0.5$

#### 4 与模型试验数据和已有方法比较

以陆培毅等<sup>[7]</sup>的模型试验作比较算例, 试验采用

干砂,  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi = 31^\circ$ , 墙背光滑,  $K_0 = 1 - \sin \varphi = 0.485$ ,  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) = 0.3102$ , 单锚柔性模型墙  $h = 2.0 \text{ m}$ , 取  $s_a = 0.0005h = 1 \text{ mm}$ , 得到在不同开挖深度时的墙体实测位移和按式(1)~(3)拟合的曲线如图4所示, 可见各开挖况墙体位移曲线均呈为典型柔性挡墙的鼓胀形。采用本文方法、文献[11, 12]方法及试验测得的不同开挖深度时的土压力分布分别见图5~7。

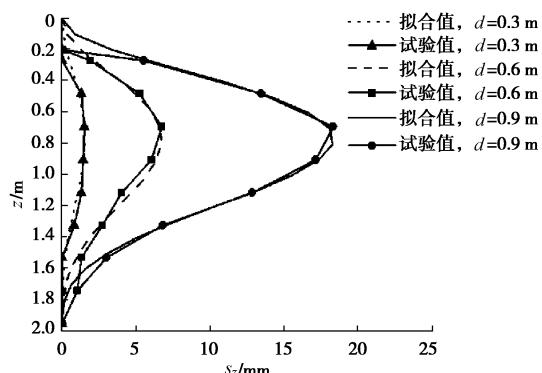


图4 模型墙不同开挖深度下的位移曲线

Fig. 4 Deformation curves of wall at different excavation depths

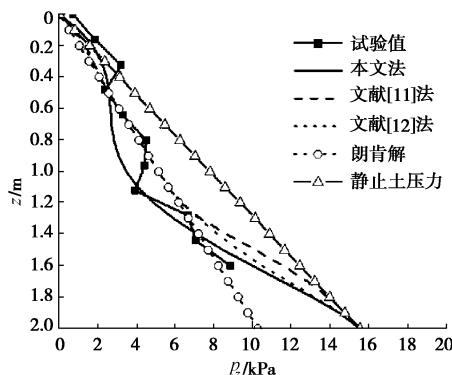


图5 开挖 30 cm 时的土压力分布

Fig. 5 Distribution of earth pressures at excavation depth of 30 cm

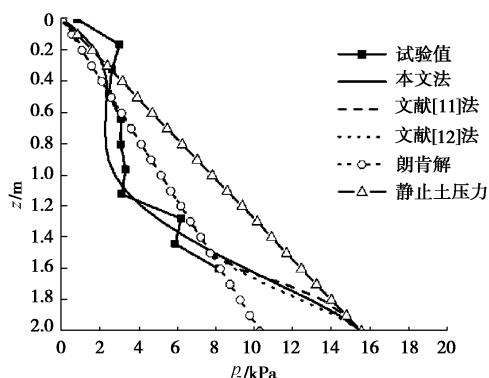


图6 开挖 60 cm 时的土压力分布

Fig. 6 Distribution of earth pressures at excavation depth of 60 cm

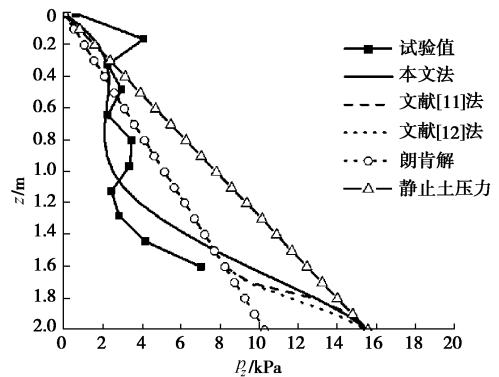


图7 开挖 90 cm 时的土压力分布

Fig. 7 Distribution of earth pressures at excavation depth of 90 cm

从图5~7可知, 在墙体发生鼓形位移时, 本文方法与试验结果更为接近, 墙后土压力均大致呈R型分布。试验数据和本文方法都表明, 随着模型墙鼓胀位移的逐渐增大, 挡墙中部的土压力有持续减小趋势, 甚至小于相应的朗肯主动土压力强度, 而经典理论和文献[11, 12]等其它已有方法均认为, 计算点位移大于平动模式主动极限状态位移后土压力强度保持极限主动土压力不变, 本文方法能更真实地反映鼓胀型变位柔性挡墙由于土拱效应而引起墙顶附近土压力持续增大、墙中部土压力持续减小的现象。从图中同样可发现, 随着位移量的增大, 土压力的非线性程度也越高。

## 5 结 论

(1) 采用中间状态系数 $\psi$ 来统一反映柔性挡墙位移模式和位移量的影响, 提出任意位移下柔性挡墙主动土压力合力系数的计算公式; 将土体看作是理想刚塑性体和一系列非线性弹簧的组合体, 提出了任意位移模式下柔性挡墙主动土压力分布的计算方法。

(2) 随着挡墙最大位移点深度 $z_m$ 的增加, 土压力逐渐从RB模式下呈向上凹的非线性分布过渡到RT模式下向上凸的非线性分布, 合力作用点高度也逐渐增大。鼓胀型变位模式下, 随着最大位移量 $s_{max}$ 增加, 土压力的非线性程度逐渐增强, 土压力逐渐呈现R型分布, 合力作用点高度则变化不明显, 保持在1/3墙高附近。

(3) 以已有模型试验为算例的计算结果表明, 柔性挡墙发生鼓胀型变位时, 与已有方法相比, 本文方法得到的土压力分布和试验结果吻合更好, 更能真实反映由于土拱效应而引起的土压力持续重分布的现象。

## 参考文献:

[1] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various

- wall movements[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, **112**(3): 317 – 333.
- [2] MATSUZAWA H, HARARIKA H. Analyses of active earth pressure against rigid retaining walls subjected to different modes of movement[J]. *Soils and Foundation*, 1996, **36**(3): 51 – 65.
- [3] CHANG M F. Lateral earth pressures behind rotating walls[J]. *Journal of Canadian Geotechnicalal*, 1997, **34**: 498 – 509.
- [4] 彭述权, 刘爱华, 樊 玲. 不同位移模式刚性挡墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(1): 32 – 35. (PENG Shu-quan, LIU Ai-hua, FAN Ling. Active earth pressure for rigid retaining walls with different displacement modes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(1): 32 – 35. (in Chinese))
- [5] 王元战, 李 蔚, 黄长虹. 墙体绕基础转动情况下挡土墙主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 208 – 211. (WANG Yuan-zhan, LI Wei, HUANG Chang-hong. Distribution of active earth pressure with wall movement of rotation about base[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(2): 208 – 211. (in Chinese))
- [6] MILLIGAN G W E. Soil deformations near anchored sheet-pile walls[J]. *Géotechnique*, 1983, **33**(1): 41 – 55.
- [7] 陆培毅, 严 驰, 顾晓鲁. 砂土基于室内模型试验土压力分布形式的研究[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(10): 84 – 88. (LU Pei-yi, YAN Chi, GU Xiao-lu. Sand model test on the distribution of earth pressure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, **36**(10): 84 – 88. (in Chinese))
- [8] 蔡奇鹏. 刚性与柔性挡墙的土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (CAI Qi-peng. A study on the earth pressure against rigid and flexible retaining wall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [9] 王保田, 熊巨华, 朱碧堂. 围护结构变形模式对土压力的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1475 – 1480. (WANG Bao-jian, XIONG Ju-hua, ZHU Bi-tang. Effect of deformation modes of retaining structures on earth pressures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(S0): 1475 – 1480. (in Chinese))
- [10] 应宏伟, 蔡奇鹏. 鼓形变位模式下柔性挡土墙的主动土压力分布[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(12): 1805 – 1810. (YING Hong-wei, CAI Qi-peng. Distribution of active earth pressure against flexible retaining walls with drum deformation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(12): 1805 – 1810. (in Chinese))
- [11] ZHANG J M, SHAMOTO Y, TOKIMATSU K. Evaluation of earth pressure under any lateral deformation[J]. *Soils and Foundation*, 1998, **38**(1): 15 – 33.
- [12] 徐日庆. 考虑位移和时间的土压力计算方法[J]. 浙江大学学报, 2000, **34**(4): 370 – 375. (XU Ri-qing. Methods of earth pressure calculation for excavation[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2000, **34**(4): 370 – 375. (in Chinese))
- [13] 梅国雄, 宰金珉, 徐 建. 考虑变形与时间效应的土压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(增刊1): 1079 – 1082. (MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, XU Jian. Earth pressure computing method lacement and time effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, **20**(S1): 1079 – 1082. (in Chinese))
- [14] 秦四清, 李 晓. 非线性库仑主动土压力分析理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(12): 2399 – 2406. (QIN Si-qing, LI Xiao. Nonlinear theory on coulomb's active earth pressure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(12): 2399 – 2406. (in Chinese))
- [15] 陈昌富, 曾玉莹, 肖淑君, 等. 基于 CSA 和薄层单元法主动土压力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊2): 5292 – 5296. (CHEN Chang-fu, ZENG Yu-ying, XIAO Shu-jun, et al. Calculation method of active earth pressure based on CSA and thin-layer element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(S2): 5292 – 5296. (in Chinese))
- [16] 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 Hong-wei, JIANG Bo, XIE Kang-he. Distribution of active earth pressure against retaining walls considering arching effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(5): 717 – 722. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)