

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0151-07

# 考虑挡墙位移效应的被动侧土压力计算方法

宋 飞<sup>1,2</sup>, 张建民<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 挡土结构上土压力的计算是土力学和岩土工程领域的基本研究课题之一。实际工程中的土压力通常是介于主动土压力和被动土压力之间的某一值, 墙后填土由于碾压具有较高的密实度。经典的朗肯和库仑土压力理论只能计算极限状态下的土压力, 没有考虑挡墙的位移以及剪切过程中密砂的强度从峰值强度降低到残余强度这一强度变化特性对于土压力的影响。给出了考虑挡墙位移效应的被动侧土压力计算方法, 该方法能够同时考虑剪切过程中密砂的强度从峰值强度降低为残余强度这一强度变化特性对被动土压力的影响。通过土压力模型试验结果对计算方法进行了初步验证, 计算结果和试验结果吻合较好, 表明了该方法的有效性。

**关 键 词:** 土压力; 挡墙位移; 被动侧; 密砂; 强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

## Computational method of earth pressure at passive side considering wall displacement effect

SONG Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-min<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Computation of earth pressure acting on retaining structures constitutes an important research subject in the field of geotechnical engineering. In many engineering practices, the retaining wall displacement causing the backfill yield sufficiently cannot take place so that the earth pressure may fall anywhere between active and passive earth pressures. Besides, due to compaction, the backfill is always dense and its shear resistance will decrease from peak resistance to residual state during shear. However, classic Rankine and Coulomb earth pressure theories can only evaluate the earth pressure at the active and passive state. And they cannot consider the effect of reduction of post-peak shear soil resistance on earth pressure. The development of earth pressure at the passive side with wall displacement is studied. On the basis a new methodology is developed to evaluate earth pressures at the passive side under any boundary strain constraint for a rigid retaining structure with translational movement. It can take into account the effect of wall displacement and the strength characteristic of dense sand on earth pressure. The agreement of calculated results with the experimental ones confirms the correctness of the proposed method.

**Key words:** earth pressure; wall displacement; passive side; dense sand; strength

## 1 引 言

土压力问题是土木工程中广泛存在的问题。土压力的理论和应用研究一直是土力学和岩土工程领域的一个基本课题。Terzaghi、Matsuo、Sherif 等、Fang 等的土压力模型试验结果表明, 墙后填土的土压力大小和分布与挡墙的位移量及位移模式有密切关系<sup>[1-5]</sup>。达到主动土压力的挡墙位移量的数量级约为  $0.001H$  ( $H$  为挡土墙高度); 达到被动土压力

时的挡墙位移量的数量级约为  $(0.01 \sim 0.1)H$ 。实际工程中使得墙后填土达到被动极限平衡状态的墙体位移量常常不会发生。大量存在的城市建筑物地下边墙、浅埋结构物、桥墩上所作用的土压力通常是介于主动土压力和被动土压力之间的某一值。并且墙后填土由于碾压具有较高的密实度。研究表明, 密砂在剪切过程中强度会从峰值强度降低到残余强度。Fang 等的试验结果表明, 密砂的这一强度变化特性会对土压力的大小产生显著影响, 采用

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目 (No. 2010JQ7002); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20100471591)。

第一作者简介: 宋飞, 男, 1980 年生, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究。

峰值强度指标会高估被动土压力的大小,造成结构设计偏于危险,而用残余强度指标则可能会低估被动土压力的大小<sup>[6]</sup>。经典的朗肯和库仑土压力理论仅能计算极限状态下的土压力,没有考虑挡墙的位移以及剪切过程中密砂的强度变化特性对于土压力的影响。Chang、徐日庆等、蒋波等基于Fang等的土压力模型试验结果,用曲线拟合的方法给出了填土强度和墙背摩擦角随挡墙位移变化的计算公式,在此基础上推广了库仑理论和水平层分析法,得到了考虑挡墙位移影响的土压力计算方法<sup>[7-9]</sup>。卢国胜、杨泰华等用函数拟合了土压力随挡土墙位移变化的关系曲线,得到考虑位移效应的土压力计算公式,进而求解了考虑位移效应的非极限状态下的土压力<sup>[10-11]</sup>。但以上方法均缺乏对于土压力形成的物理机制的认识,且对于被动侧土压力的计算误差较大。张建民等在沿不同常应变增量比路径三轴加载试验的基础上得到了依赖于应变增量比的土压力系数,从而提出了一种可以解决任意边界应变约束条件下的土压力计算方法<sup>[12-13]</sup>。该方法有明确的理论基础,物理概念清楚,数学模型简单。与试验结果的对比表明,该方法对于主动侧土压力的计算较为准确,但在被动侧土压力计算分析中采用平面滑动面的假定,对于被动侧土压力的计算误差相对较大,并且没有考虑密砂的强度变化特性对于被动土压力的影响。

本文基于张建民等的研究成果,在对Fang等的土压力模型试验结果的分析基础上给出了被动一侧填土的侧向应变约束条件与挡墙位移量之间的关系,在被动一侧的计算分析中采用平面——对数螺旋曲面的组合滑动面,将文献[13]的直边三角形中间滑楔体的概念扩展为曲面中间滑楔体,给出了刚性挡墙平动模式下被动侧土压力计算方法。该方法能够计算从 $K_0$ 状态到被动状态之间的任意侧向变形下的土压力,并且能够考虑剪切过程中密砂的强度从峰值强度降低为残余强度的特性对于被动土压力的影响。最后通过Fang模型试验对上述方法进行了验证分析,初步表明了其有效性和合理性。

## 2 计算方法的建立

张建民等认为,挡墙位移实质上是导致了墙后填土的应变约束条件发生了变化,从而引起土压力系数的变化<sup>[12]</sup>。基于这样的认识,他们采用土单元体的应变增量比(小主应变增量与大主应变增量的比值,记为 $R_e = \Delta\epsilon_3 / \Delta\epsilon_1$ )来表述土的应变约束条件。其研究表明,挡墙从 $K_0$ 状态到被动状态的

运动过程中, $R_e$ 不是单调变化的,为了表述方便,张建民等给出应变约束参数 $R$ 用以描述填土的侧向变形,它与 $R_e$ 的关系如下<sup>[12]</sup>:

$$R = \begin{cases} R_e & (K \leq 1) \\ 2 - R_e & (K \geq 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $K$ 为土压力系数。

### 2.1 应变约束条件与挡墙位移量的关系

本文基于对Fang等的土压力模型试验结果<sup>[5-6]</sup>的分析给出如下的公式描述在被动一侧挡墙位移量和应变约束参数 $R$ 之间的关系:

$$R = \frac{\Delta / \Delta_p}{a(1 - \Delta / \Delta_p) + \Delta / 3\Delta_p} \quad (0 \leq \Delta \leq \Delta_p) \quad (2)$$

式中: $\Delta$ 为挡墙位移量; $\Delta_p$ 为墙后填土达到被动状态所需的挡墙位移量; $a$ 为表征应变约束参数与挡墙位移量之间关系的一个参数,取值范围一般约为0.015~0.030,通常取为0.025。砂土越密, $a$ 值越小。

由(2)式计算得到得应变约束参数 $R$ 与挡墙位移量之间的关系如图1所示。从图中可以看出,当挡墙位移量较小时, $R$ 值迅速达到2,此后随挡墙位移量的增大, $R$ 值由2缓慢增大到3。

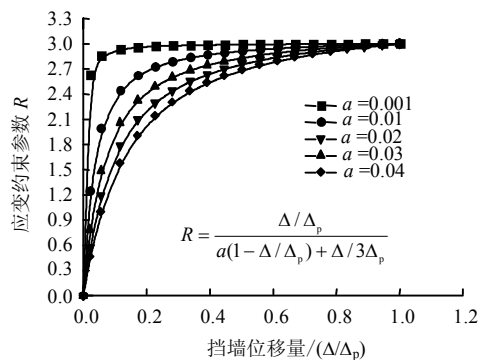


图1 应变约束参数 $R$ 与挡墙位移 $\Delta$ 的关系

Fig.1 Relationships between lateral strain constraint parameter  $R$  and wall displacement  $\Delta$

### 2.2 曲面中间滑楔体的概念

Rowe、Narain、James 和 Bransby 等的试验结果表明:对于墙背摩擦角较大的情况,当填土处于被动状态时,墙后填土的滑裂面通常为一直面<sup>[14-16]</sup>。Terzaghi 的研究结果表明,当 $\delta > \phi'/3$ 时平面滑动面会过高地估计被动土压力的大小,计算中采用曲面滑动面更为合理<sup>[17]</sup>。因此,当墙后填土处于被动一侧时,本文将文献[13]直边三角形中间滑楔体的概念推广为曲面中间滑楔体,采用平面——对数螺旋曲面的组合滑动面求解被动侧的土压力,在靠近

墙底的部位滑动面为对数螺旋曲面, 在接近填土表面的部位为一平面。曲面中间滑楔体和被动滑楔体如图2所示。

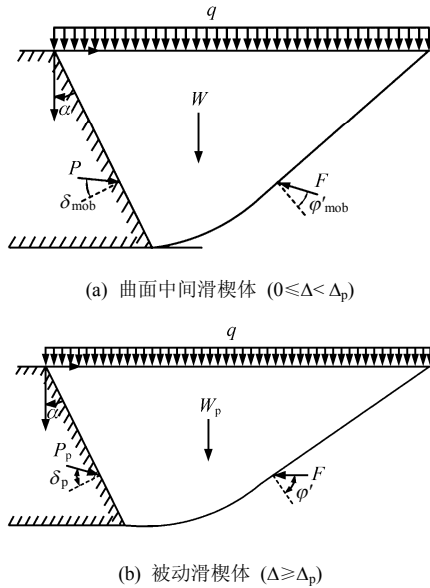


图2 随挡墙位移量变化的被动侧滑楔体示意图  
Fig.2 Variations of soil wedge with wall displacement at the passive side

从图2可以看出, 当挡墙位移量 $\Delta$ 大于等于填土达到被动状态所需的位移量 $\Delta_p$ 时, 墙后填土的强度和墙背摩擦角完全发挥, 填土中形成被动滑楔体, 当挡墙的位移量 $\Delta$ 小于填土达到被动状态时所需的位移量 $\Delta_p$ 时, 填土的强度和墙背摩擦角没有完全发挥, 假定填土中存在中间滑楔体, 此时在滑裂面和墙背上发挥的是土的起动内摩擦角 $\varphi'_{mob}$ 和起动墙背摩擦角 $\delta_{mob}$ 。中间滑楔体的尺寸和重量取决于填土的侧向应变约束条件, 而填土的侧向应变约束参数与挡墙位移量密切相关, 可根据式(2)确定。

张建民等在对不同常应变增量比的应变路径试验结果的分析基础给出了表述土的起动摩擦角 $\varphi'_{mob}$ 随应变约束参数 $R$ 变化的数学表达式<sup>[12]</sup>:

$$\varphi'_{mob} = \arcsin \left[ \frac{\sin \varphi' (1 - R)}{2 - \sin \varphi' (1 + R)} \right] \quad (-1 \leq R \leq 1) \quad (3)$$

$$\varphi'_{mob} = \arcsin \left[ \frac{\sin \varphi' (R - 1)}{2 - \sin \varphi' (3 - R)} \right] \quad (1 \leq R \leq 3) \quad (4)$$

并且给出了墙背与填土之间的起动摩擦角 $\delta_{mob}$ 随应变约束条件 $R$ 的变化关系如下<sup>[12]</sup>:

$$\delta_{mob} = \left( \frac{1 - R}{2} \right)^{k_1} \delta \quad (-1 \leq R \leq 1) \quad (5)$$

$$\delta_{mob} = \left( \frac{R - 1}{2} \right)^{k_2} \delta \quad (1 \leq R \leq 3) \quad (6)$$

式(5)、(6)式中 $k_1$ 和 $k_2$ 为由试验确定的常数, 若假定 $\delta_{mob}$ 随 $R$ 线性变化, 则可取 $k_1 = k_2 = 1$ 。式中 $\delta$ 为墙后填土达到极限状态时的墙背摩擦角。式(3)~(6)假定土的摩擦强度和墙土之间的摩擦强度同时发挥至最大值。

### 2.3 密砂的强度变化特性对被动土压力的影响

以上给出的砂土的起动摩擦角随挡墙位移的变化规律仅适用于松砂和正常固结土。剪切过程中砂土的强度随剪切变形的增加而增加, 最终达到一稳定值, 应力-应变关系呈应变硬化型。因此, 被动侧土压力也随挡墙位移量的增加而增加, 最终达到一稳定值。然而, Holtz 和 Kovacs 的研究结果表明, 剪切过程中密砂和超固结土的强度随着剪切变形的增大而增大, 很快达到峰值, 随着剪切变形的进一步增大, 强度会从峰值强度降低为残余强度, 应力-应变关系呈应变软化型<sup>[18]</sup>。密砂和松砂的应力-应变关系曲线如图3所示。

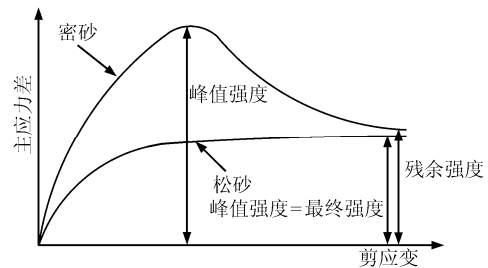


图3 三轴试验中松砂和密砂的应力-应变关系  
(Holtz 和 Kovacs, 1981 年)

Fig.3 Stress-strain relationships between loose and dense sands in triaxial test (Holtz and Kovacs, 1981)

Fang 的土压力模型试验结果表明, 砂土的密度对于被动侧土压力具有很大影响<sup>[6]</sup>。图4给出了Fang的不同密度的砂土的试验结果, 试验中砂土的密度分别为38%、63%、和80%。从图4可以看出, 对于松砂, 被动侧土压力随着挡墙位移的增加而增加, 在挡墙位移量约为17% $H$ 时被动土压力达到峰值, 并基本保持不变。对于密砂和中密砂, 被动侧土压力随着挡墙位移的增加而迅速增加, 在挡墙位移量分别约为1.5% $H$ 和3% $H$ 时, 被动侧土压力达到峰值, 随着挡墙位移量的增加, 由于中密砂和密砂强度的减小, 被动土压力逐渐减小; 当挡墙位移量超过12% $H$ 时, 被动土压力最终减小到一个稳定值, 这个稳定值与砂土的初始密度无关。

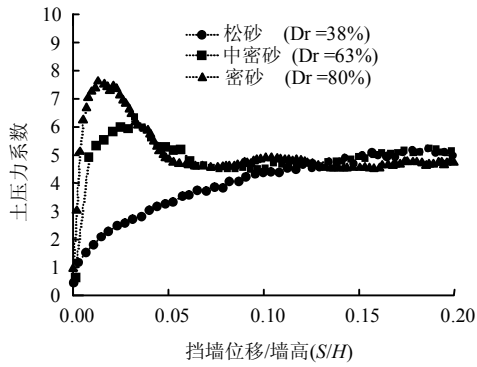


图4 不同密度砂土的土压力系数随挡墙位移量的变化  
Fig.4 Variations of  $K_h$  with wall movement for loose, medium dense and dense sands

上述试验结果表明,被动土压力的大小随挡墙位移量的变化而变化,中密砂和密砂在剪切过程中强度变化特征对被动土压力具有较大影响。如何在被动土压力分析方法中选择合适的强度指标具有十分重要的意义。本文借鉴 Lesniewska 和 Mroz 描述应变软化的方法,将他们给出的起动内摩擦角随挡土结构位移量变化的函数关系式改写成如下的形式<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} \varphi'_{\text{mob}} = \varphi'_p - (\varphi'_p - \varphi'_r) \frac{\Delta - \Delta_p}{\Delta_r - \Delta_p} & (\Delta_p \leq \Delta \leq \Delta_r) \\ \varphi'_{\text{mob}} = \varphi'_r & \Delta \geq \Delta_r \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varphi'_p$  和  $\varphi'_r$  分别为砂土的峰值强度和残余强度,  $\Delta_p$  和  $\Delta_r$  分别为砂土达到被动土压力的峰值和最终值所需的挡墙位移量。

如图5所示,由峰值强度指标  $\varphi'_p$  确定的滑楔体较大,由残余强度指标  $\varphi'_r$  确定的滑楔体较小,因此当沿由峰值强度确定的滑动面滑动较为困难。挡墙位移量  $\Delta = \Delta_p$  时,由峰值强度  $\varphi'_p$  确定填土中的土楔。随着挡墙位移量的增大,填土的强度降低,由于沿由峰值强度确定的滑动面滑动较为困难,滑动面可能会发生调整。在  $\Delta_p \leq \Delta \leq \Delta_r$  范围内,可根据式(7)计算得到的  $\varphi'_{\text{mob}}$  确定实际可能出现的滑楔体。当挡墙位移量  $\Delta = \Delta_r$  时,由残余强度  $\varphi'_r$  确定填土中的土楔。

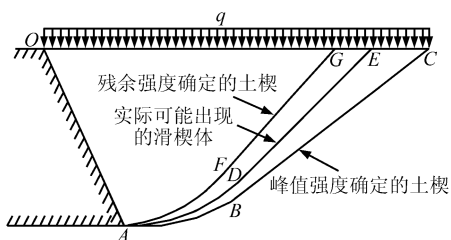


图5 由不同强度参数确定的滑楔体示意图  
Fig.5 Soil wedges determined respectively by peak, residual and mobilized friction angle

## 2.4 计算方法

在建立了被动一侧填土的应变约束条件与挡墙位移量之间的关系、计算分析中采用曲面中间滑楔体的概念、并且考虑密砂和中密砂的强度变化特性对于被动土压力的影响之后,本文给出了被动侧土压力计算方法。

图6所示的挡土墙,墙高为  $H$ ,墙面  $OA$  倾斜,与竖直线之间的夹角为  $\alpha$ 。墙后填土为无黏性土,其重度为  $\gamma$ ,填土表面水平,其上作用均布荷载  $q$ 。

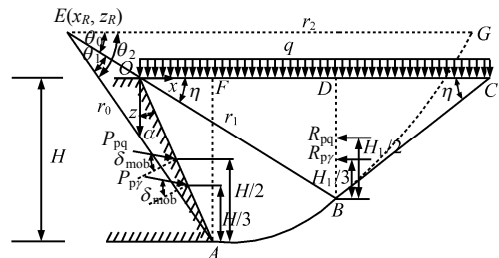


图6 曲面滑楔体受力分析示意图  
Fig.6 Forces acting on soil wedge with curved sliding surface

当挡墙向着挤压填土的方向运动时,随着挡墙位移量  $\Delta$  逐渐增大,土的摩擦强度以及墙土之间的摩擦强度逐渐发挥,当  $0 \leq \Delta < \Delta_p$  时,墙后填土中形成曲面中间滑楔体,滑动面上土的起动摩擦角  $\varphi'_{\text{mob}}$  和墙土之间的起动摩擦角  $\delta_{\text{mob}}$  可以由式(3)~(6)确定。当  $\Delta = \Delta_p$  时,填土中出现被动滑楔体,滑楔体内土体达到被动状态,假定土的摩擦强度和墙土之间的摩擦强度同时发挥至最大值,则  $\varphi'_{\text{mob}} = \varphi'_p$ ,  $\delta_{\text{mob}} = \delta$ 。当  $\Delta > \Delta_p$  时,对于松砂等应变硬化型的砂土,由于强度不再发生变化,仍有  $\varphi'_{\text{mob}} = \varphi'_p$ ,  $\delta_{\text{mob}} = \delta$ 。但对于密砂等应变软化型的砂土,由于随着剪切变形的进一步增大,其强度逐渐从峰值强度减小为残余强度。因此,当  $\Delta_p \leq \Delta \leq \Delta_r$  时,可由式(7)确定填土发挥的摩擦角  $\varphi'_{\text{mob}}$ ,而墙背摩擦角仍为  $\delta$ 。

现在对图6所示的挡土墙结构及滑动土楔进行受力分析。对于如图所示的滑楔体  $OABC$ ,  $AB$  段为对数螺旋线,  $BC$  段为直线,对数螺旋线  $AB$  与直线  $BC$  在  $B$  点相切。作用在滑楔体  $OABD$  上的力包括:(1)土楔  $OABD$  的重力;(2)填土面  $OD$  上的堆载  $q$ ;(3)土楔重力引起的土压力  $P_{py}$ ;(4)  $OD$  面上的堆载  $q$  引起的土压力  $P_{pq}$ ;(5)土楔  $DBC$  的重力在  $DB$  面上引起的土压力  $R_{py}$ ;(6)  $DC$  面上的堆载  $q$  在  $DB$  面上引起的土压力  $R_{pq}$ ;(7)对数螺旋曲面  $AB$  段以下部分的土体对滑动楔体  $OABD$  的法

向力 $\sigma$ 和切向力 $\sigma \tan \varphi'$ 的合力。由于 $AB$ 面为对数螺旋曲面,在曲面 $AB$ 上作用的法向力和切向力的合力通过对数螺旋线的极点,因此,它对极点的力矩为0。Fang等、徐日庆等的土压力模型试验结果表明平动模式下由填土重度引起的被动侧土压力沿墙高为线性分布<sup>[5, 20]</sup>,因此,这部分土压力的作用点位置距离墙踵的高度为 $H/3$ ;假定堆载产生的土压力沿墙高均匀分布,即其合力作用点距离墙踵的高度为 $H/2$ 。

根据力矩平衡条件,(1)、(3)、(5)3部分力对于对数螺旋线 $AB$ 的极点的力矩之和为0可以求得由填土重度产生的土压力 $P_{py}$ 。(2)、(4)、(6)3部分力对于对数螺旋线 $AB$ 的极点的力矩之和为0可以求得由填土表面的堆载 $q$ 产生的土压力 $P_{pq}$ 。当挡墙位移量不同时,填土的起动摩擦强度和墙背摩擦角发挥的程度均不同,因此,滑楔体的尺寸不同,作用于墙背的土压力也不同。计算一定挡墙位移量的土压力时应采用该位移量对应的土的起动摩擦角和起动墙背摩擦角。限于篇幅,具体的数学公式推导过程在此不详细给出。

总土压力为

$$P = P_{py} + P_{pq} \quad (8)$$

改变对数螺旋线的极点 $(x_R, z_R)$ 的位置,分别求得 $P_{py}$ 和 $P_{pq}$ 的极小值,即所求的土压力。土压力系数的计算公式分别如下:

$$K_{py} = \frac{2P_{py}}{\gamma H^2} \quad (9)$$

$$K_{pq} = \frac{P_{pq}}{qH} \quad (10)$$

对于密砂和中密砂,由于振动或击实会增加填土的密度,在填土中形成残余土压力,从而使得土压力增大,有关这部分土压力随应变约束条件的变化规律及其评价方法可参阅文献[13]和[21]。

根据上述计算方法编制相应的计算程序,可以求解被动侧土压力。图7给出了平面滑楔体和曲面滑楔体计算的被动侧土压力的比较。计算中 $\varphi' = 45^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$ 。从图中可以看出,当墙背摩擦角 $\delta = 0$ 时,基于平面滑楔体与曲面滑楔体的计算结果是相同的。然而当墙背摩擦角不等于0时,随着墙体位移量的增大,即应变约束参数的增大,土的摩擦强度以及墙背与填土之间的起动摩擦角逐渐发挥,此时基于平面滑楔体计算的误差会逐渐增大。当 $\delta > \varphi'/2$ 及 $R > 2.4$ 时,两种方法计算的土压力差

别较大。此时如采用平面滑动面计算被动侧土压力系数,则需进行一定程度的折减。

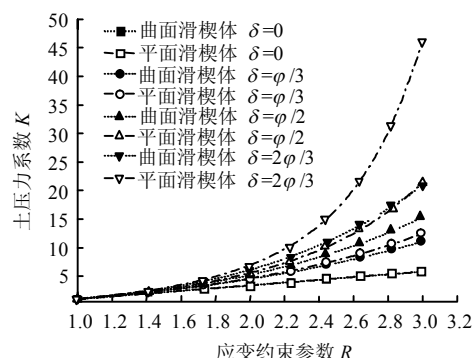
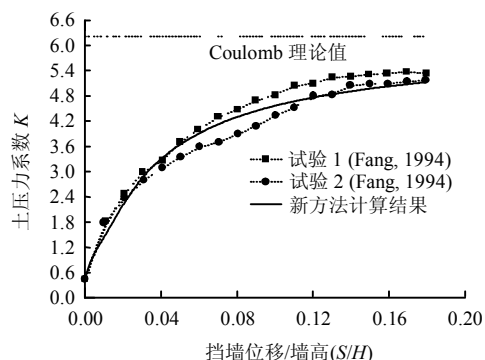


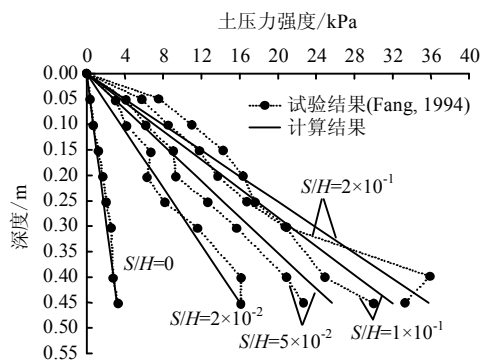
图7 平面滑楔体与曲面滑楔体计算结果的比较  
Fig.7 Comparisons of earth pressure coefficients obtained by different methods

### 3 计算方法的试验验证

图8给出了本文被动侧土压力计算方法的计算结果与Fang的土压力模型试验结果<sup>[5]</sup>的对比。



(a) 土压力系数与挡墙位移的关系



(b) 土压力分布

图8 计算结果与试验结果(Fang, 1994年)的对比  
Fig.8 Comparisons between calculation results and test results of Fang (1994)

计算中的参数为 Fang 给出的试验参数:  $\gamma = 15.5 \text{ kN/m}^3$ ,  $\varphi' = 30.9^\circ$ ,  $\delta = 19.2^\circ$ ,  $\Delta_p = 0.18H$ 。表

征应变约束参数  $R$  随挡墙位移变化的参数  $a$  取为 0.025, 从图中可知, 计算结果与试验结果基本一致, 验证了计算方法的有效性。而库仑理论估计的被动土压力值偏大。

本文通过 Fang 的试验结果<sup>[6]</sup>对上述超固结土的被动土压力计算方法进行了验证。计算参数见表 1。图 9 给出了计算结果与 Fang 的土压力模型试验结果的对比。表征应变约束参数  $R$  随挡墙位移变化

的参数  $a$  取为 0.025。

表 1 计算参数

| 填料  | 重度<br>$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$ | 相对<br>密度<br>$D_r / \%$ | 峰值强<br>度指标<br>$\phi'_p / (^\circ)$ | 残余强<br>度指标<br>$\phi'_r / (^\circ)$ | 墙背摩<br>擦角<br>$\delta / (^\circ)$ | $\Delta_p$<br>( $S/H$ ) | $\Delta_r$<br>( $S/H$ ) |
|-----|-----------------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 松砂  | 15.7                                    | 38                     | 33                                 | 31.5                               | 9.8                              | 0.17                    | 0.17                    |
| 中密砂 | 16.3                                    | 63                     | 38.3                               | 31.5                               | 12.6                             | 0.03                    | 0.08                    |
| 密砂  | 16.8                                    | 80                     | 42.1                               | 31.5                               | 14.0                             | 0.015                   | 0.055                   |

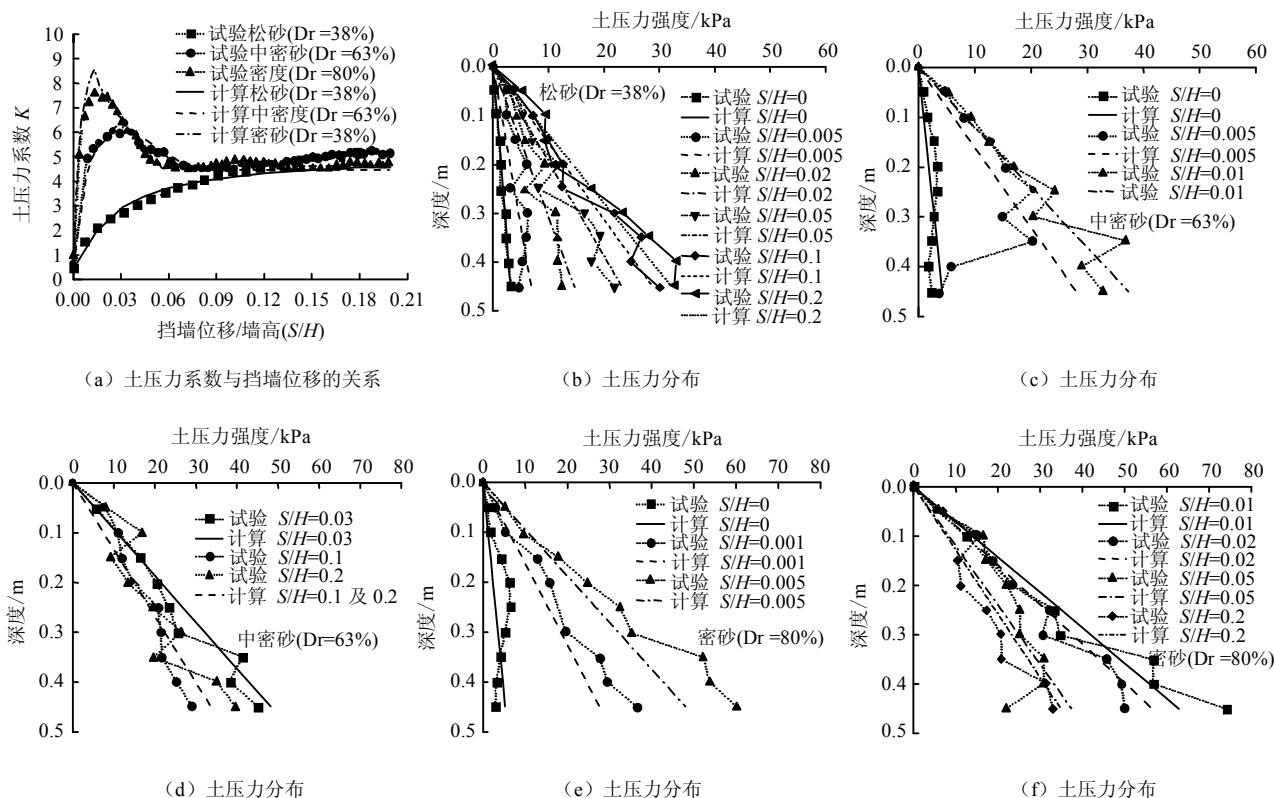


图 9 计算结果与试验结果 (Fang, 2002 年) 的对比

Fig.9 Comparisons between calculation results and test results of Fang (2002)

由图 9 可见, 计算结果与实测结果基本一致。从图 9 (a)、(d) 和 (f) 可知, 对于密砂和中密砂, 当挡墙位移量增大到一定程度时被动侧土压力达到峰值, 随着挡墙位移量的继续增加, 由于其强度从峰值强度逐渐减小到残余强度, 被动侧土压力也逐渐减小, 最终达到一稳定值。对于密砂, 在被动极限状态附近, 计算结果和试验结果相差较大, 主要是由于砂土的各向异性造成的。由于击实的缘故, 密砂的结构性较强。而对于被动侧土压力, 大主应力是水平向应力, 作用方向沿着沉积面。此时强度参数应该用大主应力平行于沉积面的试验来确定, 这样更加合理。而在计算中用的强度参数是大主应力垂直于沉积面的试验得到的。因此强度较高, 计算得到的被动土压力也偏大。

### 3 结 语

本文在被动侧土压力计算中采用曲面中间滑楔体的概念, 建立了在被动一侧填土的侧向应变约束条件与挡墙位移量之间的关系, 考虑了密砂的强度变化特性对于土压力的影响。在此基础上给出了被动侧土压力的计算方法。该方法能够考虑挡墙的位移量以及密砂的强度变化特性对于被动侧土压力的影响。计算结果表明, 当墙背摩擦角较大及挡墙位移量较大的情况下, 平面滑楔体会过高估计被动侧土压力的大小。通过土压力模型试验的结果对所提计算方法进行了验证, 计算结果与试验结果基本一致, 初步表明了方法的有效性和合理性。本文方法对于挡土墙的设计和被动侧土压力验算具有一定

的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] TERZAGHI K. Large retaining wall tests[J]. **Engineering News Record**, 1934: 136—140.
- [2] MATSUO M, KENMOCHI S, YAGI H. Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests[J]. **Soils and Foundations**, 1978, 18(3): 27—41.
- [3] SHERIF M, ISHIBASHI I, LEE C D. Earth pressures against rigid retaining walls[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1982, 108(GT5): 679—695.
- [4] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1986, 112(3): 317—333.
- [5] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressures with various wall movements[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(8): 1307—1323.
- [6] FANG Y S, HO Y C, CHEN T J. Passive earth pressure with critical state concept[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 127(3): 248—257.
- [7] CHANG M F. Lateral earth pressure behind rotating walls[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, (34): 498—509.
- [8] 徐日庆, 龚慈, 魏刚, 等. 考虑平动位移效应的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 119—122.  
XU Ri-qing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Theory of earth pressure against rigid retaining walls considering translational wall movement effect[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2005, 39(1): 119—122.
- [9] 蒋波, 应宏伟, 谢康和, 等. 平动模式下挡土墙非极限状态主动土压力计算[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 24—27.  
JIANG Bo, YING Hong-wei, XIE Kang-he, et al. Computation of active earth pressure under non-limit state for retaining wall with mode of translation[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2005, 18(2): 24—27.
- [10] 卢国胜. 考虑位移的土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 586—589.
- LU Guo-sheng. A calculation method of earth pressure considering displacement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 586—589.
- [11] 杨泰华, 贺怀建. 考虑位移效应的土压力计算理论[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3635—3639.  
YANG Tai-hua, HE Huai-jian. Earth pressure calculation theory considering displacement effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3635—3639.
- [12] ZHANG J M, SHAMOTO Y, TOKIMATSU K. Evaluation of earth pressure under any lateral deformation[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(1): 15—33.
- [13] ZHANG J M, SHAMOTO Y, TOKIMATSU K. Seismic earth pressure theory for retaining walls under any lateral displacement[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(2): 143—163.
- [14] ROWE P W, PEAKER K. Passive earth pressure measurements[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(1): 57—79.
- [15] NARAIN J, SARAN S, NANDAKUMARAN P. Model study of passive pressure in sand[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1969, 95(SM4): 969—984.
- [16] JAMES R G, BRANSBY P L. Experimental and theoretical investigation of a passive earth pressure problem[J]. **Geotechnique**, 1970, 20(1): 17—37.
- [17] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.
- [18] HOLTZ R D, KOVACS W D. An introduction to geotechnical engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- [19] MROZ L D. Limit equilibrium to study the evolution of shear band systems in soils[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(5): 521—536.
- [20] 徐日庆, 陈页开, 杨仲轩, 等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 569—575.  
XU Ri-qing, CHEN Ye-kai, YANG Zhong-xuan, et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on a rigid wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 569—575.
- [21] SHERIF M A, FANG Y S, SHERIF R I.  $K_a$  and  $K_0$  behind rotating and non-yielding walls[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1984, 110(1): 41—56.