

文章编号: 1001-7372(2010)01-0019-07

考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法

卢坤林, 朱大勇, 杨 扬

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对平动模式下的刚性挡土墙, 提出了考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法。考虑墙体平动位移对墙后填土内摩擦角与墙土界面上的外摩擦角的影响, 建立了内外摩擦角与位移之间的关系式。对未达到极限位移的挡土墙, 分析墙后小主应力拱的应力状态, 并结合位移与摩擦角之间的关系, 把主动侧土压力系数与挡土墙位移联系起来, 将其用于水平微分单元法求解平动模式下挡土墙非极限主动土压力, 给出了考虑土拱效应的非极限主动土压力分布、合力及作用点的理论公式, 并与不考虑土拱效应的非极限主动土压力计算方法进行了比较。结果表明: 该方法可行有效; 土压力合力大小相等, 但合力作用点与土压力分布存在明显差别; 研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 道路工程; 挡土墙; 主动土压力理论; 土拱效应; 位移; 平动模式

中图分类号: U 417. 11

文献标志码: A

Calculation Method of Active Earth Pressure Under Non-limit State Considering Soil Arching Effects

LU Kun-lin, ZHU Da-yong, YANG Yang

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: Aimed at rigid retaining wall under the mode of translation, a calculation method for active earth pressure under non-limit state, which considered soil arching effect was proposed. Considering the influence of wall translation displacement on the internal friction angle of the backfill soil behind the wall and the outer friction angle on the soil-wall interface, the relationships between the friction angles and the wall displacements were acquired. Stress state of minor principal stress arch behind the retaining wall under non-limit state was analyzed. Then, combined with relation of displacement and friction angle, authors related the coefficient of active earth pressure to displacement of retaining wall. The coefficient in the method of horizontal differential unit was used to compute active earth pressure with the mode of translation under non-limit state. The theoretical formulae of the unit active earth pressure, the resultant force and the action point of the resultant force were derived, which were compared with the calculation method of active earth pressure under non-limit state without considering soil arching. Results show that the method is feasible and effective. The same resultant force can be got by the two methods mentioned in above, but the action point of the resultant force and earth pressure distribution have significant differences. The study results can provide reference for related projects.

收稿日期: 2009-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772172); 抗震工程技术四川省重点实验室开放基金项目(SKZ200905);

合肥工业大学创新基金项目(2009HG XJ0037)

作者简介: 卢坤林(1989), 男, 安徽庐江人, 讲师, 工学硕士, E-mail: lukunlin@hfut.edu.cn.

Key words: road engineering; retaining wall; theory of active earth pressure; soil arching effect; displacement; mode of translation

0 引言

合理确定作用在挡土墙上的土压力的大小与分布一直是土木工程中的一个重要课题。经典的库仑土压力理论与朗肯土压力理论因其计算简单和力学概念明确在工程界得到了广泛应用,但这 2 个理论都建立在墙后填土达到极限平衡状态的基础上,不能反映挡土墙位移对土压力的影响,也就是非极限土压力的计算,各国众多学者对该问题进行了细致的理论与试验研究,取得了丰富的成果^[1-10]。

另外,经典土压力理论得到的土压力为线性分布。而大量的室内试验与现场观测表明:土压力分布呈现明显的非线性^[11-12]。文献[1]中认为是土拱效应的影响。土拱效应是描述土体中应力转移的一种现象,Terzaghi 通过活动门试验证实了土拱效应的存在。随后,挡土墙中土拱效应得到了深入的研究^[13-18],但均假定墙后填土处于极限平衡状态。

实际上,挡土墙的位移与土拱效应同时影响着土压力的大小与分布,已有的研究在讨论位移对土压力大小的影响时,忽略了土拱效应的存在;而在分析土拱效应对土压力分布的影响时,同样不考虑位移的影响。本文中尝试讨论位移与土拱效应同时存在时的主动土压力的计算方法,并与只考虑位移影响的主动土压力计算结果进行了比较,同时该方法得到了模型试验数据的验证。

1 墙体位移对摩擦角的影响

墙后土体从静止状态到极限状态是一个渐变的过程。墙土间外摩擦角 δ_m 与填土的内摩擦角 φ_m 随着挡土墙位移的增大逐渐发挥出来,直至达到最大值。Ichihara 等^[19-20]认为土压力达到极限状态时,墙土间外摩擦角 δ_m 应达到极大值;茅以升^[21]则认为墙土间外摩擦角 δ_m 和填土的内摩擦角 φ_m 不可能同时达到极限值;文献[1]的模型试验结果也表明, δ_m 较 φ_m 先达到最大值。为方便计算,可假设二者同时达到最大值。

图 1 为对平动位移模式下墙体背离填土方向移动时土楔受力机理的简单描述。图 1 中 H 为挡土墙高; W 为滑动楔体的重力; β 为填土的破裂面与水平面夹角; φ_0 、 φ_m 、 φ 和 δ_0 、 δ_m 、 δ 分别为初始、非极限

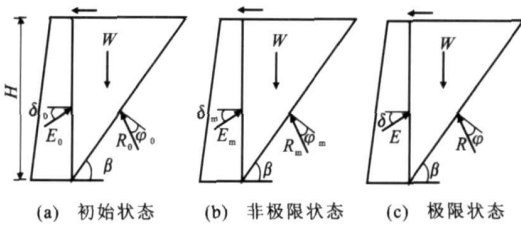


图 1 墙体背离填土平时土楔受力机理

Fig. 1 Force Mechanism on Soil Wedge when Wall Leaves Backfill Under Translation

与极限状态时的内、外摩擦角; E_0 、 E_m 、 E 和 R_0 、 R_m 、 R 分别为初始、非极限与极限状态时的墙背反力与稳定土体反力。

如图 1 所示,在非极限状态下,墙土间外摩擦角 δ_m 处于初始状态外摩擦角 δ_0 与极限状态外摩擦角 δ 之间;同样填土内摩擦角 φ_m 也处于初始状态内摩擦角 φ_0 与极限内摩擦角 φ 之间。它们都是刚性挡土墙位移量 S 的函数,可由式(1)、(2)确定^[22]

$$\tan \varphi_m = \tan \varphi_0 + K_d(\tan \varphi - \tan \varphi_0) \tag{1}$$

$$\tan \delta_m = \tan \delta_0 + K_d(\tan \delta - \tan \delta_0) \tag{2}$$

式中: K_d 为考虑位移对 δ_m 和 φ_m 影响的系数, $K_d = 4\arctan(S/S_c)/\pi$,其中 S 为挡土墙平动位移量, S_c 为内外摩擦角达到最大值时所需的墙体平动位移量,可参考表 1 取值。当静止状态时 $S = 0$,则 $K_d = 0$,墙后填土的内摩擦角和墙土间外摩擦角为 $\varphi_m = \varphi_0$, $\delta_m = \delta_0$;在极限状态时 $S = S_c$,则 $K_d = 1$,墙后填土的内摩擦角和墙土间外摩擦角为 $\varphi_m = \varphi$, $\delta_m = \delta$ 。 δ_m 和 φ_m 值随墙体平动位移 S 的增大而增大。

φ_0 可由改进的库仑方程式(3)求解^[23]

$$\frac{1}{K_0} = \left(\frac{1}{\cos \varphi_0} + \sqrt{\tan^2 \varphi_0 + \tan \varphi_0 \tan \delta_0} \right)^2 \tag{3}$$

式中: K_0 为静止侧压力系数,对于正常固结土, $K_0 = 1 - \sin \varphi$; δ_0 可保守地取为 $\varphi_0/2$ 。

2 墙背土体应力分析与侧土压力系数

当挡土墙背离土体向外移动,在未达到极限位移时,填土的内摩擦角只有部分发挥,不妨假设填土中存在一个准破裂面,同时认为墙土接触面也为准滑动面,其上的外摩擦角也只发挥了一部分。据库仑土压力理论,准破裂面倾角 β 的计算公式为

$$\beta = \arctan[\tan \varphi_m \cdot (1 + \sqrt{1 + \cot \varphi_m \cot(\varphi_m + \delta_m)})] \tag{4}$$

表 1 土体达到主动极限状态所需的位移量

Tab. 1 Soil Displacements Under Active Limit Equilibrium State

土类	所需位移量	备注
密实砂	0.1% H	Terzaghi (1934 年)
粉砂	(0.6% ~ 0.8%) H	Matsuo 等(1978 年)
矿渣	(0.1% ~ 0.3%) H	Matsuo 等(1978 年)
压实粘土	(0.9% ~ 1.0%) H	岳祖润(1992 年)
密实砂	0.4% H	Ishihara (1995 年)
砂土	(0.1% ~ 0.5%) H	彭胤宗等(1997 年)
粘土	0.4% H	Wu(1976 年)
粉质粘土	0.4% H	杨斌等(1999 年)
砂土	0.3% H	杨斌等(1999 年)
中密砂	(0.14% ~ 0.16%) H	陈页开等(2001 年)

注: 位移模式为平动。

由于挡土墙与填土间存在的外摩擦角, 使墙后土体主应力方向发生偏转, 即水平向应力不再是小主应力, 土体中小主应力轨迹将形成一条拱曲线, 称为小主应力拱, 如图 2 中 A 、 C 两点的小主应力轨迹。图 2 中, y_0 为 A 点至挡土墙顶的距离; σ_1 与 σ_3 为大、小主应力; σ_h 与 σ_v 为 A 点水平与竖向正应力; τ_m 为墙与填土间的剪应力; θ_m 为 A 点的大主应力与水平方向的夹角。

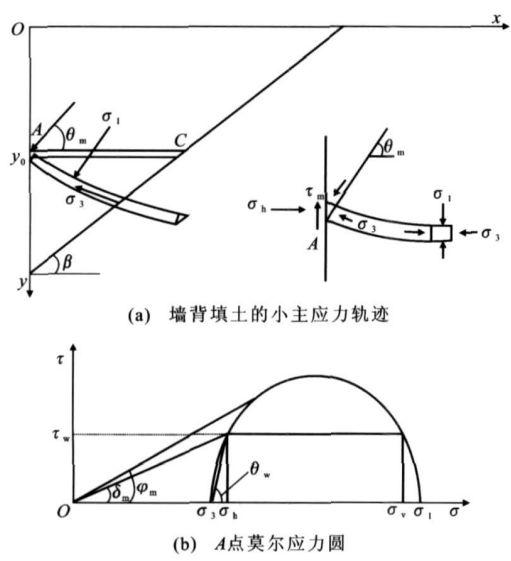


图 2 墙背小主应力拱分析简图与莫尔应力圆

Fig. 2 Minor Principal Stress Arch and Mohr Circle Behind Retaining Wall

A 点的应力状态可用莫尔应力圆表示[图 2(b)]。由此可得 A 点的大主应力与水平方向的夹角为

$$\theta_m = \arctan\{[(1 - K_a) \cot \delta_m + \sqrt{((1 - K_a) \cot \delta_m)^2 - 4K_a}]/(2K_a)\} \quad (5)$$

式中: K_a 为朗肯主动土压力系数, $K_a = \sigma_3/\sigma_1 = (1 -$

$\sin \varphi_m)/ (1 + \sin \varphi_m)$ 。

相应地, A 点的侧压力系数为

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\cos^2 \theta_m + K_a \sin^2 \theta_m}{\sin^2 \theta_m + K_a \cos^2 \theta_m} \quad (6)$$

采用水平微分单元方法计算土压力时, 文献[13]中将主动侧压力系数 K_{am} 定义为墙边水平正应力 σ_h 与该深度处的平均竖向正应力 σ_m 的比值。即

$$K_{am} = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}} = \frac{\sigma_h/\sigma_1}{\sigma_{av}/\sigma_1} = \frac{1}{\sigma_{av}/\sigma_1} (\cos^2 \theta_m + K_a \sin^2 \theta_m) \quad (7)$$

对常见的土质情况, $\varphi = 10^\circ \sim 40^\circ$, 计算得 σ_{av}/σ_1 在 0.94~0.95 之间, 平均值为 0.946(文献[14]); 文献[15]中由式(7)计算得到了对应于不同 φ 与 δ 值的侧土压力系数, 并编制了表格, 如表 2 所示。

利用式(1)、(2)、(7)将挡土墙位移与考虑土拱效应的主动侧压力系数联系起来, 建立了考虑挡土墙位移与土拱效应影响的主动侧压力系数。

若不考虑土拱效应的影响, 可通过对水平微分单元滑裂面中点取力矩平衡得到的仅考虑位移影响的主动侧压力系数

$$K_{aw} = 1/\left[\frac{\sin \beta \cos(\beta - \varphi_m - \delta_m)}{\cos \beta \cos \delta_m \sin(\beta - \varphi_m)} - 2 \tan \delta_m \tan \beta\right] \quad (8)$$

值得指出的是: 在文献[23]中, 也建立了形式与式(8)一致的主动侧压力系数, 但在该文献中假定 β 与 δ_m 无关。

图 3 给出了考虑土拱效应与不考虑土拱效应 2 种情况下, 主动侧压力系数与 S/S_c 的关系曲线。由图 3 可知, 随着 S/S_c 的逐渐增大, 内外摩擦角逐步发挥, 主动侧土压力逐渐减小。另外, 考虑土拱效应得到的主动侧压力系数明显大于不考虑土拱效应的主动侧压力系数。

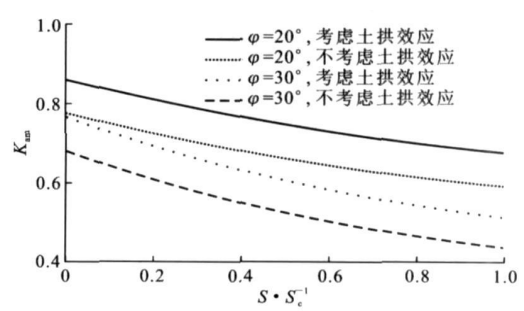


图 3 主动侧压力系数与 S/S_c 的关系曲线

Fig. 3 Relations Between K_{am} and S/S_c

3 考虑土拱效应的非极限主动土压力

3.1 基本方程的建立

在距楔体表面 y 处取一厚度为 dy 的水平微分

表 2 主动侧土压力系数
Tab.2 Coefficients of Active Earth Pressures

$\delta/ (^{\circ})$	不同 $\varphi (^{\circ})$ 对应的土压力系数										
	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45
0	0.588 8	0.527 9	0.472 4	0.421 7	0.375 5	0.333 3	0.294 8	0.259 6	0.227 5	0.198 2	0.171 6
3	0.594 6	0.533 0	0.477 2	0.426 3	0.380 0	0.337 6	0.298 9	0.263 5	0.231 1	0.201 5	0.174 4
6	0.606 1	0.541 3	0.483 3	0.430 9	0.383 5	0.340 3	0.301 0	0.265 1	0.232 3	0.202 4	0.175 2
9	0.626 6	0.555 1	0.493 1	0.438 1	0.388 8	0.344 3	0.304 0	0.267 4	0.234 0	0.203 7	0.176 1
12	0.663 0	0.577 0	0.507 8	0.448 4	0.396 3	0.349 8	0.308 1	0.270 4	0.236 3	0.205 4	0.177 3
15	0.790 0	0.614 3	0.530 0	0.463 2	0.406 6	0.357 2	0.313 5	0.274 4	0.239 2	0.207 5	0.178 9
18		0.744 0	0.567 1	0.485 2	0.421 1	0.367 2	0.320 5	0.279 4	0.242 9	0.210 1	0.180 8
21			0.697 3	0.521 4	0.442 1	0.380 9	0.329 9	0.286 0	0.247 5	0.213 5	0.183 1
24				0.649 9	0.476 9	0.400 9	0.342 7	0.294 6	0.253 5	0.217 6	0.186 1
27					0.602 3	0.433 9	0.361 4	0.306 4	0.261 3	0.222 9	0.189 7
30						0.554 7	0.392 2	0.323 6	0.272 0	0.229 9	0.194 4
33							0.507 4	0.352 1	0.287 5	0.239 5	0.200 5
36								0.460 7	0.313 6	0.253 4	0.208 9
39									0.414 9	0.277 0	0.221 2
42										0.370 4	0.242 2
45											0.327 4

单元, 作用于水平微分单元上的力如图 4 所示。图 4 中, σ_{av} 为作用于顶面的平均竖向应力, $\sigma_{av} + d\sigma_{av}$ 为作用于底面的平均竖向应力, σ_h 为挡土墙的水平反力, τ_1 为墙背与填土间的摩擦力, r 为垂直于滑动面的不动土体反力, τ_2 为不动土体与滑动土体间的摩擦力, dW 为水平微分单元的重力, q 为填土表面荷载, H 为挡土墙高, β 为挡土墙土压力达到最大时的土体准滑裂面倾角, 与填土发挥出来的内摩擦角 φ_m 和墙土间外摩擦角 δ_m 有关, 由式(4)确定。

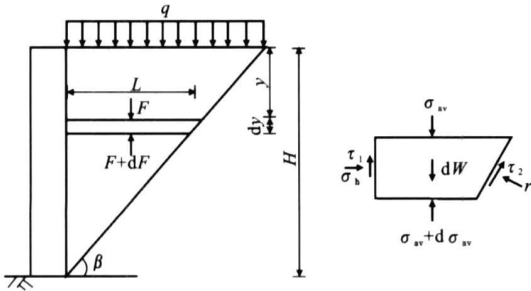


图 4 墙背水平微分单元分析模型

Fig. 4 Analytical Model of Horizontal Differential Unit Behind Retaining Wall

由微分单元水平方向上力的平衡条件可得

$$\sigma_h + \tau_2 \cot \beta - r = 0 \tag{9}$$

由竖向力平衡条件得(忽略二阶微量)

$$\frac{d\sigma_{av}}{dy} = \gamma + \frac{1}{H-y} [\sigma_{av} - r - (\tau_1 + \tau_2) \tan \beta] \tag{10}$$

式中: γ 为填土的重度。

令

$$\tau_1 = \sigma_h \tan \delta_m, \tau_2 = r \tan \varphi_m, \sigma_h = K_{am} \sigma_{av} \tag{11}$$

将式(11)代入式(9), 整理得

$$r = \frac{K_{am} \sin \beta \cos \varphi_m}{\sin(\beta - \varphi_m)} \sigma_{av} \tag{12}$$

将式(11)、(12)代入式(10), 整理得

$$\frac{d\sigma_{av}}{dy} = \gamma + \frac{\sigma_{av}}{H-y} [1 - \frac{\sin \beta \cos(\beta - \varphi_m - \delta_m)}{\cos \beta \cos \delta_m \sin(\beta - \varphi_m)} K_{am}] \tag{13}$$

式(13)即为求解考虑土拱效应的非极限主动土压力基本方程。

3.2 土压力强度

令

$$\alpha_m = \frac{\sin \beta \cos(\beta - \varphi_m - \delta_m)}{\cos \beta \cos \delta_m \sin(\beta - \varphi_m)} \tag{14}$$

则式(13)可表示为

$$\frac{d\sigma_{av}}{dy} = \gamma + \frac{\sigma_{av}}{H-y} (1 - \alpha_m K_{am}) \tag{15}$$

由边界条件 $y = 0, \sigma_{av} = q$, 解式(15)得

$$\sigma_{av} = (q - \frac{\gamma H}{\alpha_m K_{am} - 2}) (\frac{H-y}{H})^{\alpha_m K_{am} - 1} + \frac{\gamma(H-y)}{\alpha_m K_{am} - 2} \tag{16}$$

由 $\sigma_h = K_{am} \sigma_{av}$ 得

$$\sigma_h = K_{am} [(q - \frac{\gamma H}{\alpha_m K_{am} - 2}) (\frac{H-y}{H})^{\alpha_m K_{am} - 1} + \frac{\gamma(H-y)}{\alpha_m K_{am} - 2}]$$

$$\frac{\gamma(H-y)}{\alpha_m K_{am} - 2} \quad (17)$$

式(17)即为考虑土拱效应的非极限土压力计算公式。图 5 给出了不同位移时, 主动土压力的变化关系, 取 $\delta = \varphi = 30^\circ$, $q = 0$ 为例计算, 可以看出, 土压力的分布随着 S/S_c 的增大而逐渐减小; 同时图 5 中给出了未考虑土拱效应的主动土压力分布范围, 可见二者的变化规律一致, 考虑土拱效应得到的土压力分布上部分大于未考虑土拱效应计算结果, 下部分小于未考虑土拱效应计算结果。

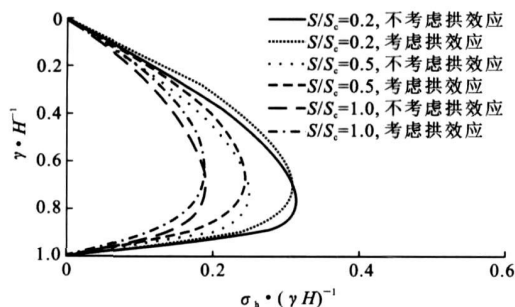


图 5 2 种方法得到的土压力分布比较

Fig. 5 Comparisons of Unit Active Earth Pressures Obtained by Two Methods

3.3 土压力的合力

土压力合力的水平分量为

$$E_{xm} = \int_0^H \alpha_h dy = \frac{1}{\alpha_m} (qH + \frac{1}{2} \gamma H^2) \quad (18)$$

土压力合力为

$$E_m = \frac{E_{xm}}{\cos \delta_m} = \frac{\sin(\beta - \varphi_m) \cot \beta}{\cos(\beta - \varphi_m - \delta_m)} (qH + \frac{1}{2} \gamma H^2) \quad (19)$$

式(19)得到的土压力合力与不考虑土拱效应得到的土压力合力相等, 即 2 种方法不会改变土压力合力的大小, 只改变了土压力的分布。

图 6 中给出了土压力合力随 S/S_c 的变化关系 ($q = 0$, $\delta = \varphi$), 可以看出, 随着 S/S_c 的逐渐增大, 土压力由静止土压力逐渐向主动土压力过渡。

3.4 土压力的合力作用点

土压力对墙底的力矩

$$M_m = \int_0^H (H - y) \sigma_h dy = \frac{K_{am} H^2}{\alpha_m K_{am} + 1} (q + \frac{1}{3} \gamma H) \quad (20)$$

合力作用点距墙底高度

$$H_b = \frac{M_m}{E_{xm}} = \frac{H}{3} \frac{2\alpha_m K_{am} + 3q + \gamma H}{\alpha_m K_{am} + 12q + \gamma H} \quad (21)$$

当地面超载 $q = 0$ 时

$$H_b = \frac{M_m}{E_{xm}} = \frac{H}{3} \frac{2\alpha_m K_{am}}{\alpha_m K_{am} + 1} \quad (22)$$

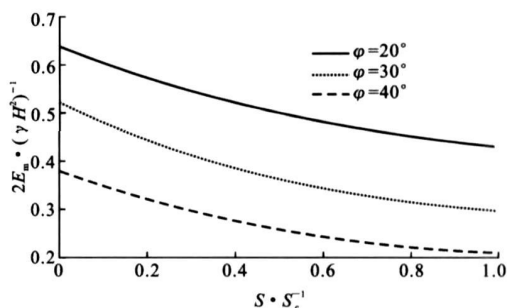


图 6 土压力合力随 S/S_c 的变化关系

Fig. 6 Variational Relations of Resultant Active Earth Pressures and S/S_c

图 7 中给出了土压力合力作用点高度随挡土墙位移的变化关系 ($\delta = \varphi = 30^\circ$, $q = 0$)。可以看出, 考虑土拱效应得到的合力作用点略高于未考虑土拱效应。同时, 作用点随着挡土墙位移量的增大而逐渐提升。

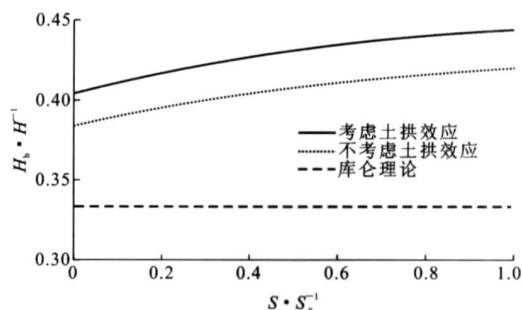


图 7 不同方法得到的合力作用点比较

Fig. 7 Comparisons of Action Points of Resultant Earth Pressure Obtained by Different Methods

4 模型试验验证

4.1 土压力的分布

该模型采用高 $H = 1.04$ m 的刚性挡土墙, 墙背直立, 填土为风干砂土, 填土面水平且无超载, 其物理力学指标为: $\gamma = 15.4$ kN \cdot m $^{-3}$, $\varphi = 34^\circ$, $\delta = 2\varphi/3$ 。图 8 中给出了平动位移模式下, 不同 S/S_c 时所对应的非极限状态主动土压力的分布; 采用本文方法计算得到的土压力分布也绘于图 8 中, 可以看出计算结果与试验数据基本吻合。

4.2 土压力的合力作用点

图 9 中给出了文献[1]模型试验得到的土压力合力作用点位置。由图 7 分析可知, 作用点位置随着挡土墙平移而逐渐提升, 于是本文中给出了作用点位置变化的区间, 如图 9 所示。同时为了便于比较, 还给出了不考虑土拱效应得到的作用点位置变化的区间。试验数据显示, 在平动位移模式下, 土压

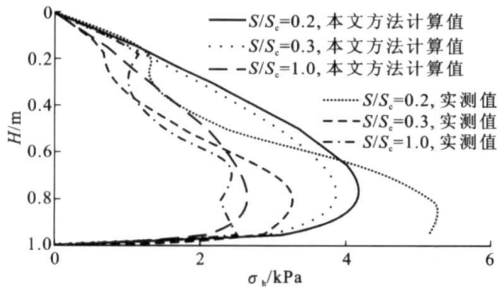


图8 计算土压力分布与试验数据的比较

Fig. 8 Comparisons of Calculated Active Earth Pressure Distributions and Experimental Data

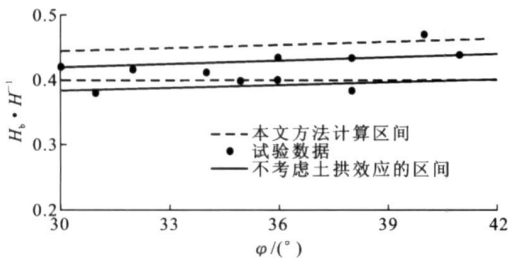


图9 计算土压力合力作用点与试验数据的比较

Fig. 9 Comparisons of Action Points of Calculated Resultant Earth Pressures and Experimental Data

力的合力作用点在距离墙底 $0.38H \sim 0.47H$ 处, 用本文方法得到的作用点位于 $0.40H \sim 0.46H$ 之间, 与试验结果比较一致, 且略高于不考虑土拱效应得到的合力作用点 ($0.39H \sim 0.43H$)。

5 结 语

(1) 挡土墙平动模式下, 同时考虑土拱效应与挡土墙位移对土压力分布的影响, 利用水平微分单元法建立了考虑土拱效应的非极限主动土压力的计算公式。

(2) 用本文方法得到的主动土压力分布范围随着 S/S_e 的增大逐渐减小, 并与模型试验数据基本吻合; 合力作用点位置随着 S/S_e 的增大逐渐提升, 变化范围也与试验数据相一致。

(3) 与不考虑土拱效应的计算结果相比, 用本文方法得到的主动土压力分布上部分较前者大, 下部分较前者小; 合力大小相等, 作用点位置较前者略高一些, 但均高于由库仑理论得到的合力作用点位置。

(4) 同时考虑位移与土拱效应的被动土压力的计算方法, 其整体思路与本文相同, 其他挡土墙位移模式下的计算过程也基本相似。

(5) 挡土墙上的土压力计算是一个非常复杂的问题, 建立精确的数学模型求解是比较困难的。因此, 计算结果与实测数据之间仍存在一定差异, 有待

进一步研究改进。

参考文献:

References:

- [1] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static Earth Pressures with Various Wall Movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317-333.
- [2] 张友葩, 高永涛, 吴顺川, 等. 失稳挡土墙加固数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 17-21.
ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan, et al. Numerical Analysis of Reinforcement for Unstable Retaining Wall [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 17-21.
- [3] 高江平, 石兆旭, 俞茂宏. 网状与条带式加筋土挡墙墙面位移的测试[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(2): 42-45.
GAO Jiang-ping, SHI Zhao-xu, YU Mao-hong. Testing of Surface's Displacement About Netted and Striped Reinforced Wall [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 42-45.
- [4] 高江平, 胡长水, 俞茂宏. 网状及条带式加筋土挡墙加筋应变的测试[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(5): 24-26.
GAO Jiang-ping, HU Chang-shui, YU Mao-hong. Testing of Pulling Strains of Both Striped and Netted Reinforcement Wall [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 24-26.
- [5] 杨斌, 胡立强. 挡土结构侧土压力与水平位移关系的试验研究[J]. 建筑科学, 2000, 16(2): 14-20.
YANG Bin, HU Li-qiang. Test Study on Relationship Between Lateral Earth Pressure Acting on Retaining Structures and Horizontal Displacement [J]. Building Science, 2000, 16(2): 14-20.
- [6] 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: 工学版, 2000, 34(4): 370-375.
XU Ri-qing. Methods of Earth Pressure Calculation for Excavation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2000, 34(4): 370-375.
- [7] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 83-85.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Earth Pressure Calculating Method Considering Displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 83-85.
- [8] 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.
- [9] 陈页开, 汪益敏, 徐日庆, 等. 刚性挡土墙主动土压力数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 989-995.
CHEN Ye-kai, WANG Yi-min, XU Ri-qing, et al. Numerical Analyses of Active Earth Pressure on Rigid Retaining Wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 989-995.
- [10] 卢坤林, 杨 扬. 考虑位移影响的主动土压力近似计算方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 553-557.
LU Kun-lin, YANG Yang. Approximate Calculation Method of Active Earth Pressure Considering Displacement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 553-557.
- [11] BANG S. Active Earth Pressure Behind Retaining Walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 407-412.
- [12] MATSUO M, KENMOCHIS, YAGI H. Experimental Study on Earth Pressure of Retaining Wall by Field Tests[J]. Soils and Foundations, 1978, 18(3): 27-41.
- [13] HANDY R L. Arch in Soil Arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(3): 302-318.
- [14] KINGSLEY H W. Arch in Soil Arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(3): 415-419.
- [15] 蒋 波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(1): 131-136.
JIANG Bo, YING Hong-wei, XIE Kang-he. Analysis on Soil Arching Behind Retaining Wall[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(1): 131-136.
- [16] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of Active Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls Considering Arching Effects[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 643-653.
- [17] 雷胜友, 惠会清. 加筋土挡墙土压力计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 47-50.
LEI Sheng-you, HUI Hui-qing. Earth Pressure Computation Method of Reinforced Earth Retaining Wall[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(2): 47-50.
- [18] 章瑞文, 徐日庆. 土拱效应原理求解挡土墙土压力方法的改进[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1057-1060.
ZHANG Rui-wen, XU Ri-qing. Solution of Problem of Earth Pressure on Retaining Wall Calculated by Method of Soil Arching Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1057-1060.
- [19] ICHIHARA M, MATSUZAWA H. Earth Pressure During Earthquake[J]. Soils and Foundations, 1973, 13(4): 75-86.
- [20] SHERIF M A, ISHIBASHI I, LEE C D. Earth Pressures Against Rigid Retaining Walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(5): 679-695.
- [21] 茅以升. 挡土墙土压力的两个经典理论中的基本问题[J]. 土木工程学报, 1954, 1(3): 249-282.
MAO Yi-sheng. Basic Problems in Classic Theory of Earth Pressure on Retaining Wall[J]. China Civil Engineering Journal, 1954, 1(3): 249-282.
- [22] 徐日庆, 龚 慈, 魏 纲, 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 Movement Effect[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(1): 119-122.
- [23] 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.