

挡土墙主动土压力问题探讨

高青松

(山西高原岩土工程勘察设计研究院有限公司,山西太原 030009)

【摘要】 在一些特定参数情况,按《建筑地基基础设计规范》算出的主动土压力会出现异常。探讨这种情况产生的原因,提出相应的修正公式;并且对挡土墙设计主动土压力计算提出一些建议。

【关键词】 挡土墙;主动土压力

【中图分类号】 U 123.152.2

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2018.03.006

Discussion on Earth Pressure of Retaining Wall

Gao Qingsong

(Shanxi Gaoyuan Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd, Taiyuan 030009, Shanxi, China)

【Abstract】 In some special parameters, the result of active earth pressure calculation according code for design of building foundation is abnormal. The article discuss the reason and suggest modified formula.

【Key words】 retaining wall; active earth pressure

0 引言

《建筑地基基础设计规范》^[1]附录L给出了一般意义上的主动土压力计算公式,公式来源于文献[2]。然而在一些特定的参数情况下,计算出的主动土压力会出现负值,究竟是公式本身出了问题,还是公式的适用范围有限?文献[3]提出了这个问题,但并未完整地解决这个问题,问题究竟出在哪里呢?本文将仔细探讨这个问题产生的原因,并给出相应的建议。

1 猜测和推导

文献[3]给出的例子为:挡土墙高 $h=5$ m,墙背倾角为 $\alpha=74.9^\circ$,填土表面倾角 $\beta=0^\circ$,填土为黄土,黏聚力为 $c=35$ kPa,内摩擦角 $\varphi=17^\circ$,填土对墙背的摩擦角 $\delta=0.5\varphi$,填土表面作用活荷载标准值为 $q=10$ kN/m²,填土重度 $\gamma=18.5$ kN/m³。算出的

结果为 $k_a=-0.1398$ 。《建筑地基基础设计规范》附录L给出的为公式(1)。

经过验证,按公式,计算结果是准确的,那么问题出在何处呢?我们可以假定原公式是正确的,只不过是:一、土沿墙背面出现了拉裂缝;二、墙高在裂缝临界高度范围内,或者说墙高超过裂缝高度范围有限。按公式(2)求出挡土墙主动土压力强度沿墙高的分布,并按原参数画出如图1($z=H$ 为变量)。

从图1可以看到,墙顶主动土压力强度为 $p_0=-34.53$ kPa,墙底主动土压力强度为 $p_1=21.74$ kPa。确实出现了负压力强度,这是不可能的,因为墙背和土的黏结力很小,很小的拉力就会导致土和墙会出现分离。令 $p_a=0$ kPa,可以解出临界裂缝高度为 $h_c=3.077$ m。

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

$$K_a = \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin^2 \alpha \sin^2(\alpha+\beta-\varphi-\delta)} \{ K_q [\sin(\alpha+\beta) \sin(\alpha-\delta) + \sin(\varphi+\delta) \sin(\varphi-\beta)] \\ + 2\eta \sin \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\alpha+\beta-\varphi-\delta) - 2 \{ [K_q \sin(\alpha+\beta) \sin(\varphi-\beta) + \eta \sin \alpha \cdot \cos \varphi] \\ \times [K_q \sin(\alpha-\delta) \sin(\varphi+\delta) + \eta \sin \alpha \cdot \cos \varphi] \}^{1/2} \}$$

$$\left(K_q = 1 + \frac{2q \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\gamma H \sin(\alpha + \beta)}; \eta = \frac{2c}{\gamma H} \right) \quad (1)$$

$$p_a(z) = \frac{dP_a}{dH} \quad (2)$$

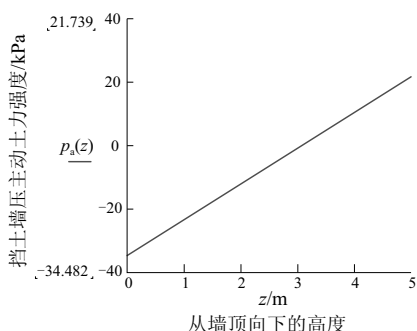


图1 规范挡土墙主动土压力强度

2 验证和结论

《建筑地基基础设计规范》主动土压力公式结果的精确性如何? 可以用广义库仑理论^[4]来验证。根据广义库仑理论^[4], 算出的均布荷载折算高度为 $h = 0.541$ m, 从折算面算起的填土表面开裂深度 $h_c = 3.676$ m, 从墙顶算起的裂缝开裂深度为 3.135 m。对比地基规范公式, 二者很接近。那么地基规范公式和广义库仑理论公式到底有啥差距? 为了更清楚地显示二者的不同, 假定广义库仑理论存在负主动土压力, 可以算出墙顶主动土压力强度为 $p_0 = -35.53$ kPa, 墙底主动土压力强度为 $p_1 = 21.14$ kPa, 画出二者沿墙高的分布如图 2。二条曲线非常接近, 规范公式算出的主动土压力强度略大, 但二者的差距不到 3%。

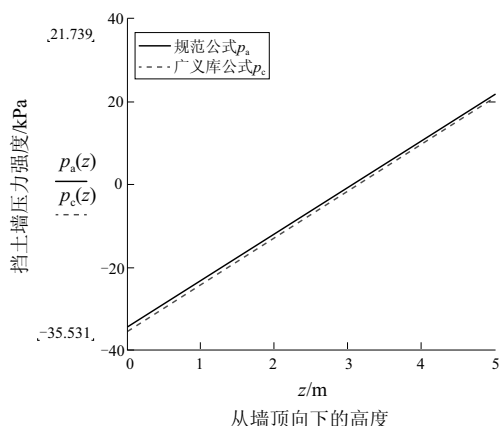


图2 规范和广义库仑主动土压力强度

变更所有可能涉及的参数范围, 经过大量的数

$$h_c = \frac{2c \sin \alpha \cdot \cos \varphi \cdot [1 - \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta)] / \gamma}{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta) - \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) - \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta)} - \frac{q \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\gamma \sin(\alpha + \beta)} \quad (5a)$$

$$h_c = \frac{2c \sin \alpha \cdot \cos \varphi \cdot [1 - \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta)] / \gamma}{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta) - \cos \beta [\sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) - \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta)]} - \frac{q \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\gamma \sin(\alpha + \beta)} \quad (5b)$$

据计算, 发现二者算出的结果非常接近, 因此有理由相信, 规范公式基本是比较准确的, 但是在挡土墙后土体出现裂缝较深的情况下, 算出来的主动土压力有可能不安全, 因为规范公式的总主动土压力是主动土压力强度积分的结果, 而在总公式中却隐含了负压力强度。还有, 规范没有给出主动土压力强度沿墙高的分布, 所以难以根据规范公式推出主动土压力的作用点, 而这恰恰是在挡土墙的抗倾覆验算和挡土结构强度计算中需要的, 因此需要把公式修正一下。

3 修正和推导

3.1 基本的假定

从规范公式算出的主动土压力强度图形可以看出, 主动土压力强度非常接近于线性变化, 而且斜率基本与不考虑黏聚力时的斜率非常接近, 对比朗肯主动土压力强度公式 $p_{ar}(z) = \gamma \cdot z \cdot K_a - 2c \sqrt{K_a}$, 可以假设土压力强度近似公式为 $p_a(z) = \gamma \cdot z \cdot K_a - \text{Const}$ 。为了与库仑主动土压力强度公式相洽: 当 $c = 0$ kPa 时, $\text{Const} = 0$ kPa, 所以 K_a 为公式(3):

$$K_a = \frac{\sin^2(\varphi + \alpha)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (3)$$

Const 究竟是啥? 显然它与临界深度有关。如果已知临界深度为 h_c , 显然 $\text{Const} = \gamma K_a \cdot h_c$ 。变为公式(4)

$$p_a(z) = \begin{cases} \gamma K_a (z - h) & (z \geq h_c) \\ 0 \text{ kPa} & (z < h_c) \end{cases} \quad (4)$$

3.2 临界裂缝高度的计算

重要的是求 h_c 了。如何求 h_c ? 通过广义库仑理论来求, 需要分二种情况讨论, 公式复杂。可以通过另一种方法来求, 即假定规范公式是基本正确的, 求出 h_c 。显然令 $p_a = 0$ kPa, 解出的高度即是 h_c 。但是方程是一个一元五次方程, 不存在解析解, 因此需要一个近似方法。在外荷载很小, 黏聚力较大的情况下, 可以用微积分的微量公式近似, 即可以假定原规范公式中, $K_q \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) = \eta \sin \alpha \cdot \cos \varphi$, $K_q \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) \leq \eta \sin \alpha \cdot \cos \varphi$, 可以导出近似公式(5a)。把例子带入原数据后算, 得 $h_c = 3.114$ m。可以验证, 按公式(5a), 在所有可能影响 h_c 的因素中, β 的影响最为剧烈, 选择一系列参数拟合, 可以把公式修正为(5b)。

进一步,发现公式(5b)的误差随着 φ 的增加而增加了,为了寻找更准确的公式,需要寻求新的解决办法。由于主动土压力强度随墙高近似为线性分布,因此可以认为临界裂缝高度恰为规范公式中 $P_a=0$ kPa时,高度 H 的一半,因为在 H 处,正负压力刚好抵消掉了。令 $P_a(H)=0$ kPa, $h_c=0.5H$,经过进一步演算,得出公式(5c)。(其中 z_1, z_2 无解时不存在裂缝; z_1, z_2 一正一负时,取正值 h_c ; z_1, z_2 都正时,取较小值为 h_c)

把原数据带入公式可以求得 $h_c=3.073$ m。对

比按规范求得的 $h_c=3.077$ m,按广义库仑理论求得 $h_c=3.135$ m,具有很高的精确度。

3.3 土压力强度的验证

可以证明,随着 β, ϕ, δ, c 的增加,新公式与按广义库仑理论求得主动土压力强度相比,误差增加;随着 q 的增加,误差在降低,因为裂缝深度降低了;随着 α 离开直角的程度增加,误差增加;随着挡土墙高度的增加,误差增加。但是,所有的误差均不超过3%。对本文所举例子来说,对比情况见表1、图3。

表1 规范、广义库仑、新公式主动土压力强度对比表

计算方法	临界深度/m	墙顶主动土压力强度/kPa(供对比需要)	墙底主动土压力强度/kPa
规范(强度 p_c)	3.077	-34.53	21.74
广义库仑公式(强度 p_{ag})	3.135	-35.53	21.14
公式(5b)(强度为 p_{x1})	3.114	-35.53[公式(5b)+公式(4)]	21.51[公式(5b)+公式(4)]
公式(5c)(强度 p_{x2})	3.073	-35.05[公式(5c)+公式(4)]	21.98[公式(5c)+公式(4)]

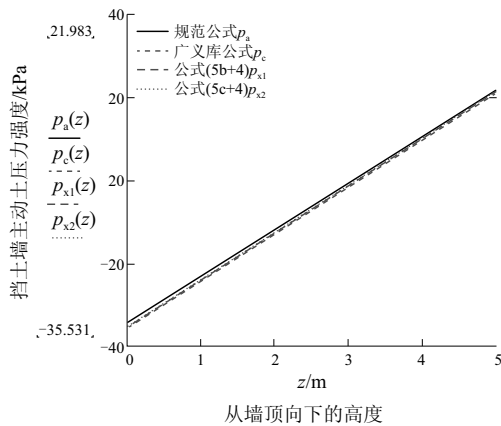


图3 规范、广义库仑、新公式主动土压力强度

规范公式和库仑土压力公式是相洽的,即当 $c=0$ 时,规范公式与库仑土压力公式一致(当 $q \neq 0$ 时,应采用总压力等效法),所以规范公式,本文公式,库仑公式都相洽。

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \delta) + \sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta) \\
 a_2 &= \frac{2q \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\gamma \sin(\alpha + \beta)} \cdot a_1 + \frac{4c \sin \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\alpha + \beta - \varphi - \delta)}{\gamma} \\
 b_1 &= \sin(\alpha + \beta) \sin(\varphi - \beta) \\
 b_2 &= \frac{2q \sin \alpha \cos \beta}{\gamma \sin(\alpha + \beta)} \cdot b_1 + \frac{2c \sin \alpha \cdot \cos \varphi}{\gamma} \\
 b_3 &= \sin(\alpha - \delta) \sin(\varphi + \delta) \\
 b_4 &= \frac{2q \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\gamma \sin(\alpha + \beta)} \cdot b_3 + \frac{2c \sin \alpha \cdot \cos \varphi}{\gamma} \\
 m_1 &= 4b_1 \cdot b_3; m_2 = 2b_1 \cdot b_4 + 2b_2 \cdot b_3 - a_1 \cdot a_2; m_3 = 4b_2 \cdot b_4 - a_2^2 \\
 z_1 &= \frac{-m_2 + \sqrt{m_2^2 - m_1 \cdot m_3}}{2m_1}; z_2 = \frac{-m_2 - \sqrt{m_2^2 - m_1 \cdot m_3}}{2m_1}
 \end{aligned}
 \tag{5c}$$

4 结论

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)附录L给出的主动土压力计算公式基本是准确的,但是由于没有考虑裂缝深度较大的情况,因此当临界裂缝较深时计算出的土压力出现较大误差。当计算出的土压力为负值时,不能贸然取总主动土压力为零,因为墙高可能超过临界裂缝深度,而压力应该为正值。挡土墙高恰好为二倍临界高度时,按规范计算出的主动土压力误差达到最大值。

为了修正规范误差,也为避免规范未给出主动土压力分布而造成的麻烦,本文基于规范的缺陷和广义库仑理论,给出了挡土墙主动土压力分布的近似计算公式;推导出的公式与库仑理论相洽,与规范公式、广义库仑理论的误差很小(在工程允许范围内),可以较大地弥补规范简单公式的缺陷;可以用于工程挡土墙抗倾覆,挡土墙抗剪切抗弯的较为准确的计算。另外,从计算也可以看出,规范应该规定一个挡土墙主动土压力下限值,以保证必要的安全度。

参考文献

[1] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建材工业出版社,2011.

[2] 朱桐浩,刘清瑞. 黏性土主动土压力计算[J]. 四川建筑科学研究,1979(5):48-56.

[3] 高大钊. 岩土工程勘察与设计-岩土工程疑难问题答疑笔记整理之二[M]. 北京:人民交通出版社,2010.

[4] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京:中国建材工业出版社,2005.