

DOI: 10.11779/CJGE20240951

重力式挡土墙抗倾覆稳定系数计算公式存在的问题

张永康

(中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 现行各行业规范所载重力式挡土墙抗倾覆稳定计算方法还存在问题。为指明该问题, 首先利用合力矩定理推导出合理的抗倾覆稳定计算公式, 然后举例用推导的公式和规范所载公式分别计算, 将计算结果列图表进行对比, 结果表明: 按现行规范方法计算俯斜式、直立式及小角度仰斜式挡土墙抗倾覆稳定性, 当墙高较小时工程偏保守, 会造成浪费, 而墙高较大时工程又偏危险; 计算大角度仰斜式挡土墙时工程偏危险。最后据此提出修正规范公式的建议。

关键词: 重力式挡土墙; 抗倾覆稳定性; 公式; 问题

中图分类号: TU432 文献识别码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-2425-06

作者简介: 张永康(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事路基、岩土工程勘察设计工作。E-mail: 175534500@qq.com。

Doubts on the formula for the anti overturning stability coefficient of gravity retaining walls

ZHANG Yongkang

(Northwest Research Institute Co., Ltd of C.R.E.C, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The recommended calculation method for the anti-overturning stability of gravity retaining walls in the current technical specifications of various engineering industries is problematic. In order to clarify this issue, the resultant moment theorem is adopted to derive the correct formula for anti-overturning stability calculation. Then, the derived formula and the formula recommended by the specifications are used as examples for calculation, and the calculation results are presented in graphs and tables for comparison. The results show that according to the methods of current technical specifications for calculating the anti-overturning stability of forward inclined, vertical, and small angle backward inclined retaining walls, when the wall height is small, the result tended to be conservative, which could cause waste, and when the wall height is large, the project would fall into a dangerous situation; When calculating large angle backward inclined retaining walls, the project might be in a dangerous situation. Finally, based on this, suggestions for revising the formula of current technical specifications are proposed.

Key words: gravity retaining walls; anti-overturning stability; formula; doubts

0 引言

重力式挡土墙作为基础设施建设当中重要的支挡结构, 由于其材料来源丰富、就地取材方便、施工方法简单等优点, 被大量应用于中小型边坡支挡工程, 铁路、公路、工民建等行业为了规范重力式挡土墙的设计, 均制定了相应规范供工程人员遵照执行。实践表明, 重力式挡土墙因抗滑能力不足而失稳的情况较少见, 因抗倾覆能力不足而失稳的案例却屡见不鲜^[1]。现行各行业规范中重力式挡土墙的抗倾覆稳定计算方法均将主动土压力分解为竖向和水平向分力分别放入公式的分子和分母进行计算, 致使倾覆力矩的合算和分算结果不等, 得出错误的结果。本文将对规范方法

展开进一步讨论, 并对规范公式提出修正意见。

1 理论分析

目前各行业规范中所载一般工况下重力式挡土墙抗倾覆稳定计算公式基本形式为(如图1)

$$K_0 = \frac{GZ_G + E_y Z_y + E_p Z_p}{E_x Z_x} \quad (1)$$

式中: K_0 为抗倾覆稳定系数; G 为挡土墙每延米自重; E_a , E_x , E_y 分别为主动土压力及其水平、竖向分力; E_p 为墙前被动土压力; Z_G , Z_x , Z_y , Z_p 分别为 G , E_x , E_y , E_p 对墙趾的力臂。各行业仅在墙前被动土压力的处理上有所不同:《铁路路基支挡结构设计规

范: TB10025—2019》及《铁路工程设计技术手册·路基》(修订版)计入了被动土压力的有利作用^[2-3];《公路路基设计规范: JTG D30—2015》仅考虑了30%的被动土压力有利作用^[4];《建筑地基基础设计规范: GB50007—2011》及《公路与城市道路设计手册》(第二版)未考虑墙前被动土压力,仅作为安全储备^[5-6]。

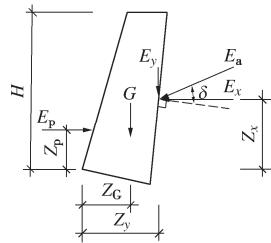


图 1 重力式挡土墙计算图示

Fig. 1 Calculation diagram of gravity retaining wall

从上式结合图1,在不考虑地震作用和浸水条件下,墙后主动土压力被分解为水平力和竖向力,并将水平分力产生的力矩作为倾覆力矩放在分母上作加,将竖向分力产生的力矩作为抗倾覆力矩放在分子上作加(也就是说,抗倾覆力矩由挡墙自重、墙前被动土压力、主动土压力产生的顺时针分力矩等组成),然后按公式求得抗倾覆稳定系数,再将该稳定系数与规范的规定进行比较以确定挡土墙设计是否安全(称该方法为规范法)。

但是,这样处理会使倾覆力矩的合算和分算结果不相等,不符合合力矩定理^[7]。正确的处理方式应该是将主动土压力的水平分力产生的倾覆分力矩和竖向分力产生的抗倾覆分力矩相减合成一个倾覆合力矩。可表示为如下公式(如图2):

$$E_a d = E_x Z_x - E_y Z_y \quad (2)$$

主动土压力作为一个作用力,应该只有一个合力矩(墙趾O点到E_a方向线的垂直距离d乘以E_a),即使分解成两个分力并得到两个分力矩,其合力矩的大小应该不变,且应为

倾覆力矩=合力矩=倾覆分力矩-抗倾分力矩。

如图2,A为墙后主动土压力E_a的作用点,O为墙趾,E_a与竖直方向的夹角为θ,E_a分解为水平分力E_x和竖向分力E_y,E_a、E_x和E_y对O的力臂分别为d、Z_x和Z_y,AO的斜距为Z₀,AO与水平方向的夹角为ω。由图2可知,β+ω+θ=180°,β=180°-(ω+θ),则由E_a产生的倾覆力矩合算和分算的关系如下:

$$\begin{aligned} \text{合力矩 } E_a d &= E_a Z_0 \cos \beta \\ &= -E_a Z_0 \cos(\omega + \theta) \\ &= -E_a Z_0 (\cos \omega \cos \theta - \sin \omega \sin \theta) \\ &= -E_a Z_0 \cos \omega \cos \theta (1 - \tan \omega \tan \theta) \\ &= -E_a Z_0 \frac{Z_y}{Z_0} \frac{E_y}{E_a} \left(1 - \frac{Z_x}{Z_y} \frac{E_x}{E_y} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= E_x Z_x - E_y Z_y \\ &= \text{分力矩之差} \quad (3) \end{aligned}$$

可见,E_yZ_y虽有抗倾覆效应,但只是主动土压力产生的倾覆力矩E_ad的一部分,不应将其放在抗倾覆计算公式的分子上作加。

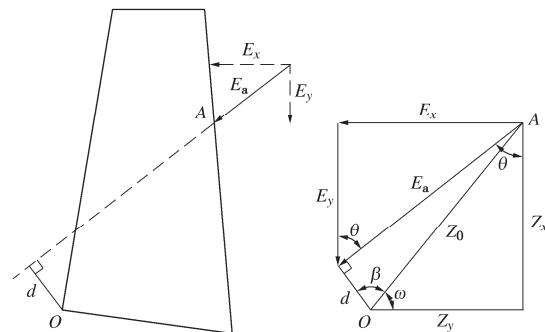


图 2 E_a产生力矩合算与分算图示

Fig. 2 Diagram of combined and separate calculation of torque generated by E_a

正确的做法(称之为建议法)是:首先计算主动土压力E_a产生的倾覆分力矩和抗倾覆分力矩之差,如结果为正,则应放在分母作倾覆力矩;如结果为负,则应取绝对值后加入分子中作为抗倾覆力矩的一部分作加。实际上,当结果为负时,仅有抗倾覆力矩,挡土墙不会绕墙趾倾覆,是稳定的。

由于上述分析不涉及墙背倾角,故本结论适用于墙背俯斜、直立、仰斜等各种情形。

2 两种方法举例计算及对比分析

为了对比前文所述两种方法对计算结果产生的影响,且考虑到下文公式在α-δ<90°与α-δ>90°时正负不同,本文分3种情况分别举例进行计算分析:
①α-δ<90°,此时竖向分力方向向下,适用于墙背俯斜、直立、仰斜角度较小的情况;
②α-δ>90°,此时竖向分力方向向上,适用于墙背仰斜角度较大的情况;
③α-δ=90°,此时分力为零,是①和②的临界情况。

2.1 α-δ<90°时

为了清楚地反映墙高这一单变量对计算结果的影响,举例计算时对挡土墙型式、计算参数做出下列设定与简化:如图3所示俯斜式挡土墙,顶宽固定为a=2 m,墙高H,基底水平,胸坡直立,墙背与竖向夹角α'=10°,墙背与水平方向夹角α=80°,墙体圬工重度γ_c=22 kN/m³。墙后填筑无黏性土,填土顶面水平,土体重度γ=19 kN/m³,黏聚力c=0 kPa,内摩擦角φ=25°,墙背与土体之间的摩擦角δ=10°。不考虑地震作用、浸水条件、墙前被动土

压力及其他附加荷载，也不考虑墙高较大时的土压力增大系数。

另外，当墙高较小时，通常抗倾覆稳定性较高，实际应用中高度超过 12 m 的挡墙极少见，因此将计算范围限定在墙高 6~12 m。

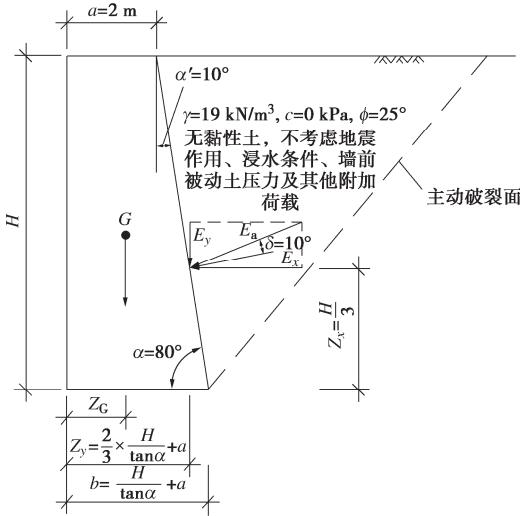


图 3 $\alpha - \delta < 90^\circ$ 计算图示

Fig. 3 Calculation diagram when $\alpha - \delta < 90^\circ$

根据库仑主动土压力系数公式

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi - \alpha')}{\cos^2 \alpha' \cos(\alpha' + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha' + \delta) \cos(\alpha' - \beta)}} \right]^2}$$

代入上述参数，求得 $K_a = 0.448$ ；再根据下列公式按照不同的墙高分别求得 E_a 、 E_x 、 E_y 、 Z_x 、 Z_y 、重力 G 、重力臂 Z_G 、重力矩 M_G 、土压力水平分力矩 M_{E_x} 、土压力竖向分力矩 M_{E_y} 、规范方法抗倾覆稳定系数 K_0 _规、本文建议方法抗倾覆稳定系数 K_0 _建 等值，并列表进行对比。

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a , \quad (4)$$

$$E_x = E_a \sin(\alpha - \delta) , \quad (5)$$

$$E_y = E_a \cos(\alpha - \delta) , \quad (6)$$

$$Z_x = \frac{H}{3} , \quad (7)$$

$$Z_y = \frac{2}{3} \frac{H}{\tan \alpha} + a , \quad (8)$$

$$G = \frac{(a+b)H}{2} \cdot \gamma_c , \quad (9)$$

$$b = a + \frac{H}{\tan \alpha} , \quad (10)$$

$$Z_G = \frac{a^3 - b^3}{3(a^2 - b^2)} , \quad (11)$$

$$M_G = GZ_G , \quad (12)$$

$$M_{E_x} = E_x Z_x , \quad (13)$$

$$M_{E_y} = E_y Z_y , \quad (14)$$

$$K_0 \text{ 规} = \frac{M_G + M_{E_y}}{M_{E_x}} , \quad (15)$$

$$K_0 \text{ 建} = \frac{M_G}{M_{E_x} - M_{E_y}} . \quad (16)$$

根据表 1 计算结果绘制“墙高- K_0 ”曲线（图 4）及“墙高-差值”曲线（图 5）。“墙高- K_0 ”曲线图以墙高为横坐标，以抗倾覆稳定系数为纵坐标，分别绘制 K_0 _规 与 K_0 _建 随挡墙高度变化情况；“墙高-差值”曲线图以墙高为横坐标，绘制 K_0 _规 - K_0 _建 之差值随挡墙高度变化情况，如图 5 所示。

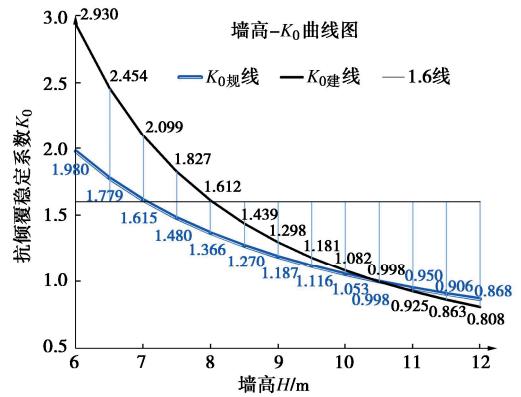


图 4 墙高- K_0 曲线图

Fig. 4 Curves of wall height- K_0

由表 1 以及图 4 可知：

(1) K_0 _规 值与 K_0 _建 值均随墙高的增大而降低，两条曲线的斜率也随墙高的增大而逐渐变小，曲线呈下凹的状态，表明随着墙高的增大，两种方法计算的抗倾覆稳定系数降低的速率逐渐变小。

(2) K_0 _建 曲线陡于 K_0 _规 曲线，在墙高 $H < 10.5$ m 时， K_0 _建 $>$ K_0 _规， K_0 _建 曲线位于 K_0 _规 曲线上方，且两者之间差距逐渐变小；在 $H=10.5$ m 附近 2 条曲线交叉，此时 K_0 _建 = K_0 _规；过了 $H=10.5$ m 之后， K_0 _建 $<$ K_0 _规， K_0 _建 曲线位于 K_0 _规 曲线下方，且两者之间差距逐渐扩大。这表明按规范方法设计挡墙，当墙高较小时偏保守，可能造成浪费，当墙高较大时则偏危险。

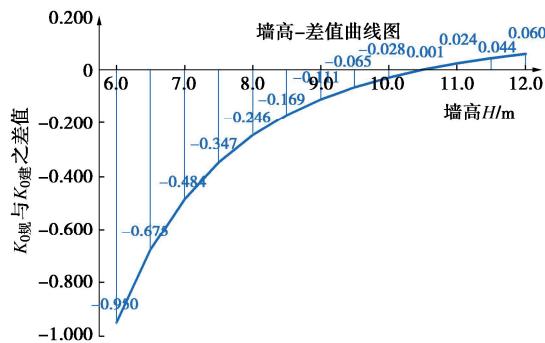
(3) 如果规定 $K_0 = 1.6$ 为安全线，那么 K_0 _建 线在墙高 $H=8.0$ m 略微靠右侧开始低于安全线，而 K_0 _建 线在墙高 $H=7.0$ m 略靠右侧开始低于安全线，这表明当墙高 $H \leq 7.0$ m 时，挡土墙尺寸还可以进一步优化减小，如采用本文建议的公式，优化空间更大；当 $7.0 \text{ m} < H \leq 8.0 \text{ m}$ 时，由于 K_0 _规 线低于安全线，如按规范规

表 1 两种方法抗倾覆稳定计算结果列表

Table 1 List of results of two methods for anti overturning stability calculation

墙高 <i>H/m</i>	$E_a/$ (kN·m ⁻¹)	$E_x/$ (kN·m ⁻¹)	$Z_x/$ m	E_y (kN·m ⁻¹)	$Z_y/$ m	$M_G/$ (kN·m·m ⁻¹)	$M_{E_x}/$ (kN·m·m ⁻¹)	$M_{E_y}/$ (kN·m·m ⁻¹)	$K_{0\text{规}}$	$K_{0\text{建}}$	$K_{0\text{规}} - K_{0\text{建}}$
6.0	153.2	144.0	2.00	52.4	2.71	428.3	287.9	141.7	1.980	2.930	-0.950
6.5	179.8	168.9	2.17	61.5	2.76	481.2	366.0	170.0	1.779	2.454	-0.675
7.0	208.5	195.9	2.33	71.3	2.82	537.2	457.2	201.3	1.615	2.099	-0.484
7.5	239.4	224.9	2.50	81.9	2.88	596.3	562.3	235.9	1.480	1.827	-0.347
8.0	272.3	255.9	2.67	93.1	2.94	658.6	682.4	273.9	1.366	1.612	-0.246
8.5	307.4	288.9	2.83	105.2	3.00	724.3	818.6	315.4	1.270	1.439	-0.169
9.0	344.7	323.9	3.00	117.9	3.06	793.3	971.7	360.5	1.187	1.298	-0.111
9.5	384.0	360.9	3.17	131.4	3.12	865.8	1142.8	409.4	1.116	1.181	-0.065
10.0	425.5	399.9	3.33	145.5	3.18	941.9	1332.9	462.2	1.053	1.082	-0.028
10.5	469.2	440.9	3.50	160.5	3.23	1021.7	1543.0	519.0	0.998	0.998	0.001
11.0	514.9	483.8	3.67	176.1	3.29	1105.1	1774.1	579.9	0.950	0.925	0.024
11.5	562.8	528.8	3.83	192.5	3.35	1192.4	2027.2	645.2	0.906	0.863	0.044
12.0	612.8	575.8	4.00	209.6	3.41	1283.6	2303.3	714.8	0.868	0.808	0.060

定的公式计算, 挡墙需增大尺寸以保安全, 而此时 $K_{0\text{建}}$ 线仍高于安全线, 因此挡墙增大的部分就会造成浪费; 当墙高 $8.0 \text{ m} < H \leq 10.5 \text{ m}$ 时, $K_{0\text{建}}$ 线与 $K_{0\text{规}}$ 线均低于安全线, 表明均需增大挡墙尺寸, 由于 $K_{0\text{建}}$ 线高于 $K_{0\text{规}}$ 线, 表明按规范方法计算需增大的相对较多, 仍可能造成一定浪费; 挡墙高 $H > 10.5 \text{ m}$ 时, $K_{0\text{建}}$ 线与 $K_{0\text{规}}$ 线均低于安全线, 表明均需增大挡墙尺寸, 由于 $K_{0\text{建}}$ 线低于 $K_{0\text{规}}$ 线, 表明按规范方法增大尺寸后仍偏危险。

图 5 墙高- K_0 差值曲线图Fig. 5 Curve of wall height and K_0 difference

由表 1 以及图 5 可知, $K_{0\text{规}} - K_{0\text{建}}$ 的差值曲线形状上凸, 且差值曲线随挡墙高度的增加斜率逐渐减小, 在墙高 $H \leq 10.5 \text{ m}$ 时差值曲线位于 0 线下方, 表明在此阶段 $K_{0\text{规}}$ 小于 $K_{0\text{建}}$ 且两者差距逐渐缩小, 缩小的趋势逐渐变得平缓; 在墙高 $H > 10.5 \text{ m}$ 时差值曲线位于 0 线以上, 表明在此阶段 $K_{0\text{规}}$ 大于 $K_{0\text{建}}$ 且两者差距又开始逐渐扩大, 但扩大的趋势逐渐变得平缓。这也再次说明墙高 $H \leq 10.5 \text{ m}$ 时规范方法比本文建议的方法保守, 墙高 $H > 10.5 \text{ m}$ 时规范方法比本文建议的方法危险。

2.2 $\alpha - \delta > 90^\circ$ 的情况

如图 6 所示仰斜式挡土墙, 顶宽固定为 $a = 2 \text{ m}$, 墙高 H , 基底水平, 胸坡、背坡与竖向夹角均为

$\alpha' = -20^\circ$, 其余条件均与 2.1 节相同。

根据库仑主动土压力系数公式计算得 $K_a = 0.256$, 再根据下列公式按照不同的墙高分别求得 Z_y , G , Z_G , M_G 等值, 其余数据计算参考本文第 2.1 节算例, 并列图表进行对比。

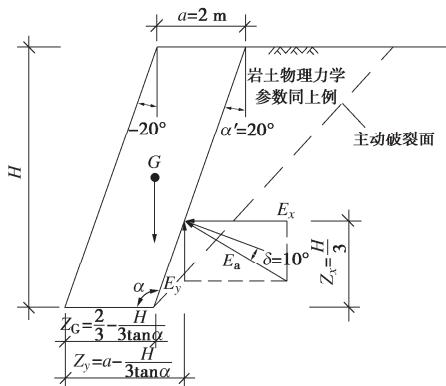
$$Z_y = a - \frac{H}{3 \tan \alpha}, \quad (17)$$

$$G = aH \cdot \gamma_c, \quad (18)$$

$$Z_G = \frac{a}{2} - \frac{H}{2 \tan \alpha}, \quad (19)$$

$$M_G = GZ_G. \quad (20)$$

同样绘制“墙高- K_0 ”曲线(图 7)及“墙高-差值”曲线(图 8)。

图 6 $\alpha - \delta > 90^\circ$ 计算图示Fig. 6 Calculation diagram when $\alpha - \delta > 90^\circ$

由表 2 以及图 7 可知:

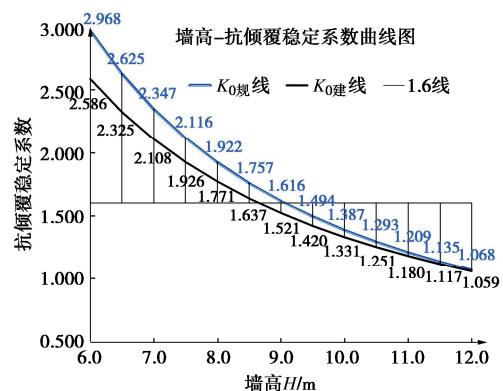
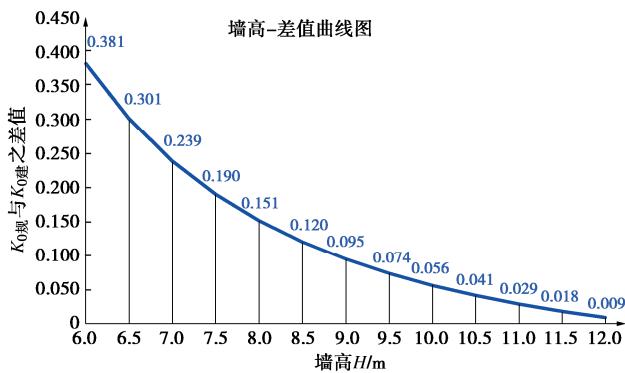
(1) $K_{0\text{规}}$ 值与 $K_{0\text{建}}$ 值均随墙高的增大而降低, 两条曲线的斜率也随墙高的增大而逐渐变小, 曲线呈下凹的状态, 表明随着墙高的增大, 两种方法计算的抗倾覆稳定系数降低的速率逐渐变小。

(2) $K_{0\text{规}}$ 曲线高于 $K_{0\text{建}}$ 曲线, 表明按规范方法计算的抗倾覆稳定系数偏大, 工程偏危险; 两线之间差距随墙高的增加逐渐缩小, 表明墙高越小偏危险程度

表 2 两种方法抗倾覆稳定计算结果列表

Table 2 List of results of two methods for anti overturning stability calculation

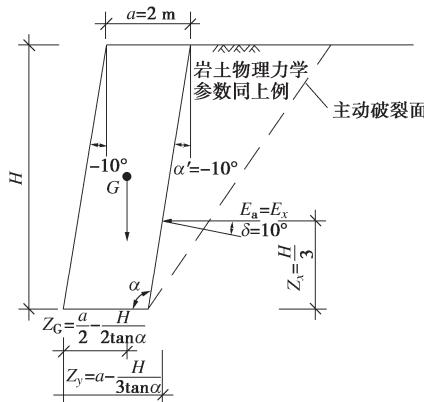
墙高 <i>H/m</i>	$E_a/$ (kN·m ⁻¹)	$E_x/$ (kN·m ⁻¹)	$Z_x/$ m	E_y (kN·m ⁻¹)	$Z_y/$ m	$M_G/$ (kN·m·m ⁻¹)	$M_{E_x}/$ (kN·m·m ⁻¹)	$M_{E_y}/$ (kN·m·m ⁻¹)	K_0 规	K_0 建	K_0 规- K_0 建
6.0	87.4	86.1	2.00	-15.2	2.73	552.3	172.1	-41.4	2.968	2.586	0.382
6.5	102.6	101.0	2.17	-17.8	2.79	624.3	218.9	-49.7	2.625	2.325	0.300
7.0	119.0	117.2	2.33	-20.7	2.85	700.4	273.4	-58.9	2.347	2.108	0.239
7.5	136.6	134.5	2.50	-23.7	2.91	780.4	336.2	-69.0	2.116	1.926	0.190
8.0	155.4	153.0	2.67	-27.0	2.97	864.5	408.1	-80.2	1.922	1.771	0.151
8.5	175.4	172.7	2.83	-30.5	3.03	952.5	489.5	-92.3	1.757	1.637	0.120
9.0	196.7	193.7	3.00	-34.1	3.09	1044.6	581.0	-105.6	1.616	1.521	0.095
9.5	219.1	215.8	3.17	-38.0	3.15	1140.7	683.3	-120.0	1.494	1.420	0.074
10.0	242.8	239.1	3.33	-42.2	3.21	1240.7	797.0	-135.5	1.387	1.331	0.056
10.5	267.7	263.6	3.50	-46.5	3.27	1344.8	922.6	-152.2	1.293	1.251	0.042
11.0	293.8	289.3	3.67	-51.0	3.33	1452.9	1060.8	-170.1	1.209	1.180	0.029
11.5	321.1	316.2	3.83	-55.8	3.40	1565.0	1212.1	-189.3	1.135	1.117	0.018
12.0	349.6	344.3	4.00	-60.7	3.46	1681.1	1377.2	-209.8	1.068	1.059	0.009

图 7 墙高- K_0 曲线图Fig. 7 Wall height- K_0 curve图 8 墙高- K_0 差值曲线图Fig. 8 Curve of wall height and K_0 difference

越大，且当墙高大于 9 m 时两线差距变得微小，而实际工程中 $H < 9$ m 的挡墙最常见，应引起足够重视。由表 2 以及图 8 可知， K_0 规 - K_0 建 的差值曲线形状下凹，且曲线随挡墙高度的增加斜率逐渐减小。再次说明如按规范方法设计挡墙，墙高越小偏危险程度越大。

2.3 $\alpha - \delta = 90^\circ$ 的情况

$\alpha - \delta = 90^\circ$ 时为上述 2 例之间的临界情况，此时主动土压力方向水平，如图 9 所示。由式 (6) 可知 $E_y = 0$ ，又由式 (15)，(16) 可知 K_0 规 = K_0 建。

图 9 $\alpha - \delta = 90^\circ$ 计算图示Fig. 9 Calculation diagram when $\alpha - \delta = 90^\circ$

3 结论及建议

(1) 当前各行业规范中重力式挡土墙抗倾覆稳定计算方法欠合理。虽然挡土墙抗倾覆稳定计算值还与墙身尺寸、墙后岩土物理力学参数以及外部环境密切相关，但“墙高- K_0 ”曲线图中 K_0 建 线与 K_0 规 线总的趋势应是一致的。

(2) 俯斜、直立及小角度仰斜式挡土墙高度较小时，用规范方法设计的挡墙偏保守，会造成一定的浪费，而挡土墙高度较大时用规范方法设计的挡墙则偏危险，工程存在失败可能。

(3) 大角度仰斜式挡土墙用规范方法计算的挡墙偏危险，工程存在失败可能。

综上所述,本文认为将主动土压力分解的竖向分力产生的抗倾覆分力矩放在公式的分母去抵消水平分力产生的倾覆力矩,才是科学合理的算法,建议对规范方法进行相应的修正。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

参考文献:

- [1] 王成华. 挡土墙倾覆稳定验算之辨正[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(4): 72-76. (WANG Chenghua. Discrimination of checking calculation of overturning stability of retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(4): 72-76. (in Chinese))
- [2] 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019. (Hot Rolled Products of Structural Steels-Part 3: Technical Delivery Conditions for Normalized/Normalized Rolled Weldable Fine Grain Structural Steels: TB 10025—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019. (in Chinese))
- [3] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册-路基[M]. 修订版. 北京: 中国铁道出版社, 1992. (The First Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. Technical Manual for Railway Engineering Design-Subgrade[M]. Revised ed. Beijing: China Railway Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [4] 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [5] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012. (Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese))
- [6] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 公路与城市道路设计手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2016. (Science and Technology Committee of Shanghai Housing and Urban Rural Development Management Commission. Handbook of highway and urban road design[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese))
- [7] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学- I [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2002. (Theoretical Mechanics Teaching and Research Office of Harbin Institute of Technology. Theoretical Mechanics- I [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))