

挡土墙倾覆稳定验算之辨正

王成华

(天津大学土木工程系)

一、挡土墙倾覆稳定验算概况

挡土墙设计必须满足抗倾覆稳定要求。现行倾覆稳定验算方法是：假定墙在主动土压力作用下绕墙趾外倾，求出各力对墙趾的抗倾覆力矩及倾覆力矩，定义前者与后者之比为抗倾覆安全系数，要求其不小于1.5^[1]，抑或达2.0以上^[2]。我国原工民建地基基础设计规范规定，对图1所示的挡土墙，需满足下列抗倾覆条件^[3]：

$$K_q = \frac{Wa + E_y b}{E_x h} \geq 1.5 \quad (1)$$

式中 K_q 为绕墙趾的抗倾覆安全系数； W 为墙的自重； E_x 、 E_y 分别为主动土压力 E_a 的水平及竖向分量； a 、 h 、 b 分别为 W 、 E_x 、 E_y 对墙趾 o 点的力臂。

在新颁的地基基础设计规范中，挡土墙倾覆稳定验算在原理上未做变动^[4]。

在实际工程当中，很少见到挡土墙因滑动而失稳，而多数失稳属于倾覆失稳。规范规定挡土墙抗滑稳定安全系数不小于1.3^[3,4]，而以往按旧规范^[3]设计的挡土墙在抗滑方面仍有较高的安全度^[5]。这说明用于倾覆稳定验算的主动土压力计算是基本合适的。文献[5]未说明抗倾覆安全系数高于抗滑安全系数而倾覆失稳仍较多的缘故。笔者认为：挡土墙滑动失稳的机理比较简单，抗滑原理明确，故容易控制；相比之下倾覆失稳的机理比较复杂，有待深入研究。目前，仅根据墙身可能绕墙趾转动，按式(1)进行倾覆稳定验算，而未考虑挡土墙实际倾覆机理的复杂性，因而是比较粗略和片面的，这是倾覆失稳较多的重要原因之一。

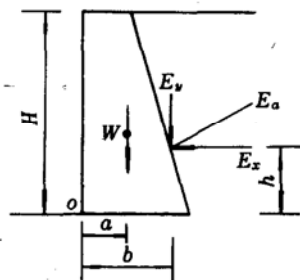


图1 挡土墙的倾覆稳定验算^[3]

二、挡土墙失稳机理分析

为简单起见，本文只研究重力式刚性挡土墙的主动失稳机理。图2中简要归纳了挡土墙在自重及外力作用下的运动失稳状态。挡土墙失稳的一般形态如图2(a)所示，兼有滑动、沉陷及倾覆三者。挡土墙平移造成滑动失稳如图2(b)所示，其机理比较简单；下沉过大造成

地基失稳如图2(c)所示,这方面已有较多的研究;对挡土墙转动造成的倾覆失稳则缺乏深入研究。挡土墙倾覆有三种可能情况:①绕墙趾倾覆,如图2(d)所示。当挡土墙地基很坚硬并具有足够抗滑力时,可能出现这种情况;②绕墙踵倾覆,如图2(e)所示。当挡土墙地基很软、具有高压缩性时,可能出现这种情况;③绕墙底内一点转动,如图2(f)所示,而且在转动过程中,转动中心可能逐渐朝墙背方向移动,最终造成倾覆破坏,这种情况较为常见。上述三种情况可通过模拟试验来证实。

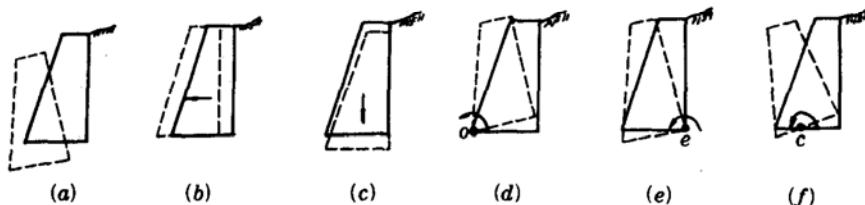


图2 挡土墙失稳形态与机理

由上述分析可知:在挡土墙倾覆时,若转动中心在墙趾以内,甚至可达墙踵,则抗倾覆安全性能会因绕墙趾的抗倾覆力矩转化为倾覆力矩而降低。因此,按式(1)计算的安全系数一般不属于最危险情况;且其下界值为1.5,对于重型、高大挡土墙来讲是偏低的,因而可能造成失稳事故。总之,现行的挡土墙倾覆稳定验算方法存在着严重缺陷,应予以改进。

三、抗倾覆安全系数的一般式

在验算倾覆稳定时,通常考虑主动土压力及墙身自重两个力。如图3所示,挡土墙绕墙趾o点的抗倾覆安全系数 K_{to} (脚标o表示绕墙趾o点转动)可定义为

$$K_{to} = \frac{W \cdot n}{E_a \cdot m} \quad (2)$$

式中 m , n 分别为土压力 E_a 及墙身自重 W 对墙绕o点的力臂。

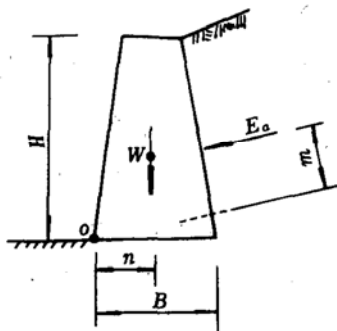


图3 绕墙趾倾覆情况

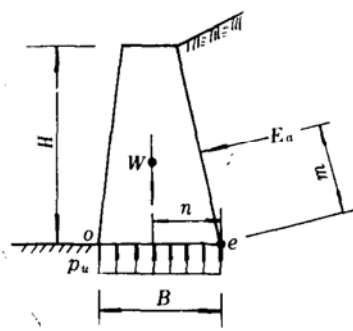


图4 绕墙踵倾覆情况

式(2)中未考虑挡土墙底面处的地基反力是合理的。若考虑挡土墙绕墙踵向下转动情况,则不能忽略地基反力作用。事实上,此时墙重已完全是倾覆力(墙背俯斜式挡土墙例外),而只有地基反力起抗倾覆作用。挡土墙绕墙踵倾覆时,墙趾必陷入地基,且很深,使地基发挥出极限承载力。按图4得

$$K_{te} = \frac{\frac{1}{2} p_u B^2}{E_a m + W n} \quad (3)$$

式中 K_{te} 为抗倾覆安全系数, 脚标 e 表示绕墙踵转动; B 为挡土墙底宽; p_u 为挡土墙地基极限承载力, 通常采用太沙基理论公式计算^[2], 即

$$p_u = \frac{1}{2} \gamma B N_r + q N_q + c N_c \quad (4)$$

式中 γ 为地基土重度; q 为墙前基底面上的超载; c 为土的粘聚力; N_r , N_q 及 N_c 为太沙基地基承载力系数; 其它符号意义同前。

上述两种情况, 转动中心易于确定; 而对于挡土墙绕基底内一点转动情况, 其转动中心则依各挡土墙具体条件而定。一旦已知转动中心位置, 并不难验算其抗倾覆安全系数。如图 5 所示, 墙重分为 W_1 及 W_2 两部分, 分别起倾覆及抗倾覆作用, 而地基只在墙趾 o 至转动中心 C 之间一段提供抗倾覆力。此时地基极限承载力可仍按式 (4) 计算, 但需以挡土墙的计算底宽 B_0 代替其中的实际底宽 B 。按图 5 可得出挡土墙绕内点 C 的抗倾覆安全系数为

$$K_t = \frac{\frac{1}{2} p_u B_0^2 + W_2 n_2}{E_a m + W_1 n_1} \quad (5)$$

式中 W_1 , W_2 分别为转动中心 C 前后部分墙重; n_1 及 n_2 分别为 W_1 及 W_2 对 C 点的力臂; B_0 为墙趾 o 至 C 点距离即墙底计算底宽; 安全系数脚标 C 省略, 其它符号意义同前。

很显然, 式 (5) 为倾覆稳定验算的一般式。当墙绕墙趾转动时, $B_0 = 0$, $W_1 = 0$, $W_2 = W$; 当墙绕墙踵转动时, $B_0 = B$, $W_1 = W$, $W_2 = 0$ 。

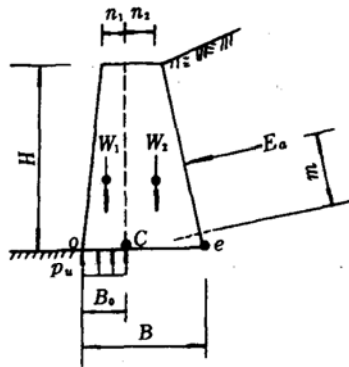


图5 绕墙底内点倾覆情况

四、挡土墙倾覆稳定性分析

本文结合一具体算例分析挡土墙在不同转动情况下的抗倾覆稳定性能。取图 6 所示之挡土墙 (不失一般性), 墙背直立、光滑。墙后为砂土, 土顶面为水平面, 不考虑地下水。其内摩擦角 $\phi = 30^\circ$, 重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, 墙高 $H = 6 \text{ m}$, 底宽 $B = 2.5 \text{ m}$, 顶宽 $A = 0.5 \text{ m}$, 墙体材料重度 $\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$ 。地基土为无粘性土, 内摩擦角 $\phi_s = 24^\circ \sim 45^\circ$, 重度 $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$ 。分别取从墙趾起 x 坐标为 $x/B = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 及 1.0 的六个转动中心, 按式 (5) 计算挡土墙对应的抗倾覆安全系数。计算结果见图 7。

由图 7 可见: 无论地基软硬程度如何, 绕墙趾的抗倾覆安全系数为一个定值 (本例为 1.62)。当设计满足规范要求 ($K_{t0} \geq 1.5$) 时, 即判为安全^[4]。如此判别除非地基坚硬才符合实际, 一般情况下, 墙身绕基底内一点转动时, 抗倾覆安全系数很可能低于界限值 1.5 而不能满足稳定要求。

对一具体挡土墙, 绕墙底内各点的抗倾覆安全系数的变化规律是: 从墙趾开始, 安全系数 K_t 随着转动中心向内移动, 即随 x 增大而由大变小, 达到某一位置 ($\bar{x} = \eta B$) 出现最小值 $K_{t\min}$, 而过此位置安全系数又逐渐提高。如以 $K_t = 1.5$ 为界限值, 可认为图 7 中虚线以下 $K_t < 1.5$ 的部分是偏于危险的, 如这些位置对应的安全系数过低, 可能导致倾覆。

对应于安全系数小于界限值的部分可称为危险范围, 而最小安全系数对应的点 $\bar{x}$ 可称为最危险点。分析图 7 还发现: 地基土越软, 危险范围越大, 最危险点距墙趾越远, 最小安全

系数越小。因而,挡土墙设计应尽量减少危险范围并控制最小安全系数使之满足稳定要求。

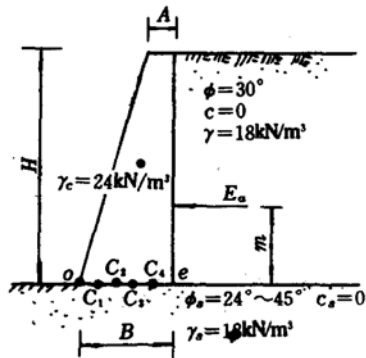


图6 绕不同点的倾覆稳定计算

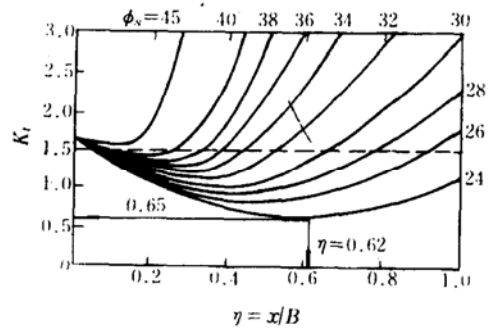


图7 K_t 随 $\frac{x}{B}$ 及 ϕ_s 的变化

尚应指出:对挡土墙抗滑稳定而言,墙越重越安全,但对地基稳定越不利,而对抗倾覆稳定则应具体分析,并非如式(1)所示墙越重越有利。据式(5)可推断:墙体重心的位置是首要的,重量是次要的;墙重心靠近墙踵会比靠近墙趾更利于抗倾覆稳定。

众所周知,影响挡土墙倾覆稳定的因素还有很多,诸如墙的类型、填土性质、排水条件、土压力大小、分布及施工质量等。它们的作用机理尚有待于进一步研究。

五、结论与建议

根据前文的研究与探讨,提出以下初步结论和建议:

1. 挡土墙地基的软硬程度对其倾覆失稳的机理有根本的影响。现行挡土墙倾覆稳定验算方法没有考虑墙身倾覆机理的复杂性,无视墙底与地基间的相互作用,只考虑绕墙趾转动情况,无从知道其它可能成为转动中心的点所对应的安全度,因而是比较粗略和片面的,这不能不是挡土墙倾覆失稳多于滑动失稳的一个重要原因。

2. 对一具体挡土墙,绕基底不同位置的抗倾覆安全系数是不同的。通常存在一个危险范围,并有一个对应最小安全系数 K_{tmin} 的最危险点。地基越软,危险范围越大,最危险点距墙越远,最小安全系数也越小。

3. 建议挡土墙倾覆稳定验算应考虑一般可能的情况,分析绕基底不同位置的抗倾覆性能,并确定出危险范围,找出最危险点及对应的最小安全系数 K_{tmin} 。

4. 考虑到挡土墙倾覆机理的复杂性,建议挡土墙抗倾覆安全系数的界限值为:①对一般挡土墙,墙高 $H \leq 6$ m时, $K_{t0} \geq 1.5$ 且 $K_{tmin} \geq 1.3$;②对高大、重型挡土墙,墙高 $H > 6$ m时, $K_{t0} \geq 2.0$ 且 $K_{tmin} \geq 1.5$ 。

5. 迄今为止,对挡土墙土压力计算已有较多的研究,但对墙身失稳尤其是倾覆失稳的机理却研究很少,建议加强这方面的研究和探讨。

参 考 文 献

- [1] Winterkorn H F, Fang H Y (ed). Foundation Engineering Handbook. van Norstrand Reinhold Company, New York, 1975: 410~412.

-
- [2] Das B M (ed). Principles of Foundation Engineering. Brooks / Cole Engineering Division, Monterey, California, 93940, 1984: 240~246.
- [3] 中华人民共和国国家标准:《工业与民用建筑地基基础设计规范》, TJ 7 -74. 中国建筑工业出版社, 1974: 38~42。
- [4] 中华人民共和国国家标准:《建筑地基基础设计规范》, GBJ7-89. 中国建筑工业出版社, 1989: 35~37.
- [5] 中国建筑科学研究院主编. 建筑地基基础设计规范, GBJ7-89[条文说明]. 辽宁科学技术出版社, 沈阳, 1989: 51~55.