

DOI: 10.11779/CJGE201506023

## 关于挡土墙抗倾覆稳定分析的讨论

黄岳文

(广州市水务工程建设管理中心, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 对挡土墙抗倾覆稳定传统分析方法存在的主要问题进行讨论, 指出其存在各种问题的主要原因是理论分析的假定前提不合理。假定挡土墙在倾覆临界状态时受到的竖向荷载与实际受力状态一致, 定义倾覆稳定系数为墙土体系所能提供的最大抗倾覆力矩与墙体实际受到的倾覆力矩之比, 据此通过力学分析, 导出挡土墙倾覆稳定系数  $K_0$  计算公式, 由新公式可知:  $K_0$  随地基极限承载力的增大而增大, 随垂直荷载的增大而变小, 与偏心距成反比。抗倾覆稳定性与基底的应力状态是密切相关的, 通过对各相关规范的地基承载力验算要求与抗倾覆稳定安全系数的对比研究表明, 只要挡土墙地基承载力满足规范要求, 抗倾覆稳定一定满足, 不必再进行抗倾覆验算。

**关键词:** 挡土墙; 抗倾覆稳定; 安全系数; 地基极限承载力; 偏心距

中图分类号: TU476.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)06-1158-07

**作者简介:** 黄岳文 (1973-), 男, 广东潮州人, 高级工程师, 主要从事水务工程技术审查工作。E-mail: huangyuewen1973@163.com。

## Overturning stability of retaining walls

HUANG Yue-wen

(Guangzhou Water Engineering Construction Management Center, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The main defect in the traditional overturning stability analysis for retaining walls is discussed. It is pointed out that the main reason is the irrational premise of its theoretical analysis. A more rational overturning coefficient  $K_0$  is then derived by assuming that the vertical load on the retaining wall at the limit state is the same as the actual state of loading. The overturning stability coefficient is defined as the maximum anti-overturning moment provided by the retaining wall system divided by the overturning moment from the actual soil load. Using the new definition of overturning coefficient, it is shown that  $K_0$  increases with the increase of the ultimate bearing capacity of foundation soil and decreases with the increase of vertical load. It is also inversely proportional to the load eccentricity at the base. The overturning stability of a retaining wall is closely related to the stress state at its base. By comparing the requirements of bearing capacity and overturning stability in China's design codes, as long as the bearing capacity of foundation meets the design requirements, the overturning stability can be guaranteed, and it is not necessary to individually check the overturning stability.

**Key words:** retaining wall; overturning stability; safety factor; ultimate bearing capacity of foundation; eccentric distance

## 0 引 言

挡土墙验算基底抗倾覆稳定性, 旨在保证挡土墙不致向一侧倾倒。现行倾覆稳定验算方法是: 假定墙在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稳定安全系数 (倾覆稳定系数), 即

$$K_0 = M_R / M_S, \quad (1)$$

并要求其值不小于许用安全系数  $[K_0]$ ,  $[K_0]$  值根据工程经验确定, 不同的行业规范有不同的规定<sup>[1-3]</sup>。

在设计计算中, 相对于抗滑稳定, 抗倾覆稳定验算很容易满足。但另一方面, 据统计, 实际工程中挡土墙因滑动而失稳的较为少见, 因倾覆而失稳的工程实例却较为多见<sup>[4]</sup>。这使得很多专家学者反思传统抗倾覆稳定分析的合理性, 研究倾覆破

坏机理。一般认为在挡土墙倾覆破坏前瞬时, 挡土墙基底与地基是相互接触的, 且一般为面接触, 并非点接触, 地基反力的作用线不通过墙趾, 挡土墙的倾覆稳定系数与地基极限承载力有确定关系<sup>[5-8]</sup>。有些学者提出新的倾覆稳定系数定义, 推导新的计算公式。如黄勇<sup>[6]</sup>将挡土墙达到倾覆极限平衡时, 土压力水平分力的增大系数定义为挡土墙的抗倾覆稳定安全系数; 曾革等<sup>[7]</sup>认为该方法未考虑土压力竖向分力的变化对抗倾覆稳定性的影响, 定义挡土墙主动土压力增大到挡土墙达到倾覆极限平衡时的增大系数为倾覆稳定系数; 张国祥等<sup>[8]</sup>定义基底倾覆稳定系数为将作用于基底上的偏心力矩增大到使基础出现

倾覆稳定破坏时作用于基底上的偏心力矩与实际基底上的偏心力矩之比值。改进后的分析方法求得的稳定系数均小于传统算法,而且地基极限承载力越小,稳定系数值越低,甚至按规范计算安全的情况下,新算法得到的稳定系数小于1.0。多数讨论倾覆稳定的文献<sup>[5-9]</sup>均假定出现倾覆破坏时墙趾附近基础底面地基反力为地基极限承载力,此一假定可能符合实际情况,但却超出规范对地基承载力验算的要求。也就是说,在满足规范对地基承载力验算要求的情况下,不可能出现倾覆临界状态。本文在总结前人研究成果基础上,通过力学分析,导出倾覆稳定系数计算式,总结挡土墙倾覆稳定系数的影响因素;并对现行规范对地基承载力验算的要求与倾覆稳定系数的关系进行研究。

## 1 传统抗倾覆稳定分析存在的主要问题

### 1.1 没有考虑地基承载力的影响

对于不同的地基将有不同的地基承载力,由于抗倾覆稳定安全系数  $K_0$  的计算未包含地基承载力的影响,所以按计算得出的相同的安全系数  $K_0$ ,其安全度是不一样的。在  $K_0$  计算值相同的情况下,实际情况是:承载力高且压缩性低的地基实际的抗倾覆安全度偏高,而承载力低且压缩性高的地基实际的抗倾覆安全度偏低<sup>[5-8]</sup>。

### 1.2 转动中心(支点)位置对安全系数的影响

一般认为挡土墙倾覆有3种可能情况<sup>[9-11]</sup>:①绕墙趾倾覆,修建在岩石地基上的挡土墙可能出现这种情况,如图1(a)所示。②绕墙踵倾覆,建在软弱地基上的挡土墙可能出现这种情况,如图1(b)所示。③绕墙底某一点倾覆,如图1(c)所示,在转动过程中,转动中心还可能逐渐朝墙背方向移动,这种情况较为常见。但也有专家<sup>[5]</sup>认为不可能出现绕墙踵倾覆的情况。因此有学者认为挡土墙倾覆稳定分析的核心问题是正确选择转动中心<sup>[12]</sup>,但在具体分析中确定转动中心点位置较为困难。规范中的挡土墙抗倾覆稳定性验算是以墙趾作为支点的,而实际的支点必然在墙趾的内侧,故计算的抗倾覆安全系数不能反映真实的抗倾覆安全度。

### 1.3 对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩存在不同理解

显然对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩的定义理解不同,往往会得出不同的安全系数值,甚至得出不同的结论。对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩的不同理解主要有以下几种:

理解①:抗倾覆稳定力矩为作用于挡土墙上的全部垂直于水平面的荷载对墙趾的力矩之和,即  $M_R = \sum M_V$ ;倾覆力矩为作用于挡土墙上的全部平行于水平面的荷载对墙趾的力矩之和,即  $M_S = \sum M_H$ 。

理解②:抗倾覆稳定力矩为墙身自重等竖向荷载合力、土压力竖向分量、墙前被动土压力对墙趾的力矩之和,即  $M_R = GZ_G + E_y Z_x + E'_p Z_p$ ;倾覆力矩为土压力水平分量对墙趾的力矩,即  $M_S = E_x Z_y$ 。

理解③:抗倾覆稳定力矩为墙身自重等竖向荷载合力对墙趾的力矩,即  $M_R = GZ_G$ ;倾覆力矩为土压力的水平分量对墙趾的力矩 - 土压力的竖向分量对墙趾的力矩 - 墙前被动土压力对墙趾的力矩,即  $M_S = E_x Z_y - E_y Z_x - E'_p Z_p$ 。

水利规范没有给出抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩的具体表达式,由其定义抗倾覆稳定力矩  $\sum M_V$ 、倾覆力矩  $\sum M_H$  的下标可认为采用理解①;《建筑地基基础设计规范》没有考虑墙前被动土压力的影响,也可认为是理解①;《公路路基设计规范》采用理解②;文献<sup>[13]</sup>对规范<sup>[2]</sup>挡土墙倾覆稳定计算方法进行改进,改进后的计算方法对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩实际采用理解③。

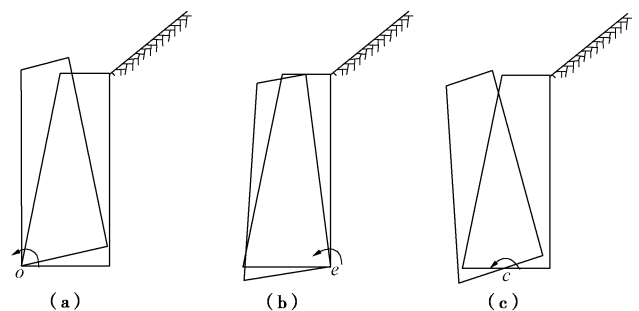


图1 挡土墙的倾覆失稳形态<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Modes of overturning instability for retaining walls

以上3种理解,都不尽合理:对于理解①和②,把倾覆力  $E$  (主动土压力) 的垂直分力  $E_y$  作为抵抗倾覆的作用力,因此倾覆稳定安全数相当于挡土墙产生倾覆的实际土压力的水平分力另予增加的倍数,然而土压力的垂直分力则不予增加,对土压力而言,力的分解与合成原理没有得到遵守。力的分解与合成原理是力平衡的基础,不遵守力的分解与合成原理就意味着不满足对墙趾的力矩平衡方程。这是现行计算方法存在的缺陷。这是不可能也不合理的;对于理解③,式(1)可以写为

$$K_0 = \frac{GZ_G}{E_x Z_y - E_y Z_x - E'_p Z_p} \quad (2)$$

若将土压力的合力作用于墙背,则

$$K_0 = \frac{GZ_G}{EZ_E} \quad (3)$$

当为俯斜挡土墙时,总的土压力的作用线可能通过墙趾之下(图2(b)),  $Z_E$  为负值,则  $K_0$  也为负值,表示墙体处于不稳定状态,这与挡土墙的实际稳定状态是不相符合的。对于俯斜式挡墙,  $Z_E$  为正值时,理解③计算得到的抗倾覆稳定系数要明显大于理解②。

### 1.4 容易形成不正确的安全概念

传统抗倾覆分析尽管对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩存在不同理解,但有一点是一致的,即竖向荷载越大,算出的安全系数越大,给人以竖向荷载越大结构越安全的印象。但事实并非

如此,对于刚度较小的土质地基上的挡土墙,竖向荷载越大,地基变形越大,相应的不均匀沉降越大,挡土墙将相应产生前倾变形,甚至可能因墙趾地基承载力不足而产生倒塌破坏。即使对刚度较大的岩质地基上的挡土墙,当竖向分力很大偏心距也较大,而水平分力很小时,也容易形成不正确的安全概念。

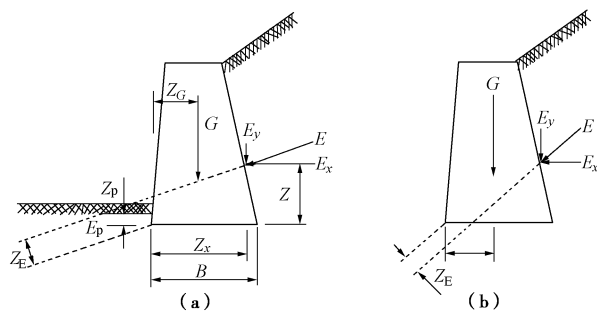


图2 倾覆稳定验算力系图<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Forces for calculating overturning stability

假设结构受竖向荷载  $G$  和水平荷载  $H$ ,  $G$  作用点距前趾的水平距离  $x$ ,  $H$  作用点距前趾的竖向距离  $z$ , 按传统抗倾覆分析有

$$K_0 = \frac{G \cdot x}{H \cdot z} \quad (4)$$

对于任意的  $x$ , 只要  $H$  很小, 可以使  $K_0$  变得相当大。按式 (4), 可以使  $x$  很小, 而保持  $K_0$  相当大, 这时如果出现  $H$  值的偶然相对大的变化 (尽管  $H$  的绝对值仍然很小), 也可能引起不安全或倾倒。在实际工程中, 挡土墙遭遇暴雨或墙前水位骤降均可使得墙后压力突然变大。

此外, 在基底应力图形 (按平面假设) 不变的状态下, 可以有不同的倾覆稳定系数。因为只要合力  $R$  的大小和在验算截面上的位置一定, 则按材料力学平面假设所得之应力图形就确定了。但此时沿合力  $R$  作用线上, 竖向力与水平力可以有无穷多种组合。文献[14]对此进行了讨论, 并给出两个在基底全面积受压时 (无拉应力) 算出的  $K_0$  值较小而不能满足规范要求的算例。事实上, 当基底全截面均受压, 如果地基承载力满足要求, 而认为结构物可能发生倾覆, 显然是说不通的。

## 2 新的抗倾覆稳定分析方法

### 2.1 传统抗倾覆稳定分析假定前提不合理

传统抗倾覆稳定分析之所以存在以上各种问题, 主要是其理论分析的假定前提不合理: ①分析假定挡土墙与地基均为刚体, 而实际上挡土墙与地基不可能为刚体, 特别是地基, 当为土质地基时刚度更小, 因此不可能发生绕墙趾转动。②传统抗倾覆稳定分析没有考虑地基反力的作用, 这是因为分析时假定墙体濒临倾覆破坏, 地基反力作用于墙趾, 而抗倾覆力矩和倾覆力矩均采用实际受力状态的数值。在实际受力状态, 挡土墙

没有发生破坏时, 力系是平衡的, 即  $M_R = M_S$ , 以墙趾为转动中心, 挡土墙实际受到的倾覆力矩应加上地基集中反力的力矩。可见, 传统抗倾覆稳定分析假定前提不合理, 其定义本身存在模糊不清之处, 容易引起误解。

### 2.2 推导新的抗倾覆稳定分析计算公式

实际上倾覆稳定安全系数描述的是墙土体系抗倾覆安全储备的能力, 据此可明确定义倾覆稳定系数为: 墙土体系所能提供的最大抗倾覆力矩  $M_R$  (极限状态) 与墙体实际受到的倾覆力矩  $M_S$  (实际状态) 之比。仍可采用式 (1) 进行计算。显然, 安全系数计算所用到的  $M_R$  和  $M_S$  必须是对同一支点的力矩。只要挡土墙没有发生破坏, 挡土墙的受力是平衡的, 此时对任意点取矩, 挡土墙提供的抗倾覆力矩都等于实际受到的倾覆力矩。假定挡土墙所受的垂直荷载不变, 若将作用于基底上的偏心力矩增大到使基础出现倾覆稳定破坏, 此时作用于基底上的偏心力矩  $M_{\max}$  (极限状态) 等于墙土体系所能提供的最大抗倾覆力矩  $M_R$ , 相应的  $M_S$  为实际基底上的偏心力矩  $M_e$ 。由此可得到与文献[8]相同的倾覆稳定系数定义, 即倾覆稳定系数为将作用于基底上的偏心力矩增大到使基础出现倾覆稳定破坏时作用于基底上的偏心力矩与实际基底上的偏心力矩之比值, 即

$$K_0 = M_{\max} / M_e \quad (5)$$

#### (1) 假定挡土墙与地基均为刚体

假定挡土墙与地基均为刚体, 当合力作用点位于墙趾内时, 挡土墙处于倾覆稳定状态; 当合力作用点位于墙趾时, 挡土墙处于倾覆临界状态, 此时将合力平移至基底中心, 即基底中心作用有一力  $R$  和一力矩  $M_{\max}$ , 见图 3 (a)。对于平衡力系, 对任意点的力矩之和均为零, 对基底中心取矩, 可得

$$M_{\max} = Ns \quad (6)$$

如图 3 (b) 所示, 对基底中心取矩, 实际上挡土墙受到的倾覆力矩为

$$M_e = Ne_0 \quad (7)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (5), 整理可得

$$K_0 = s/e_0 \quad (8)$$

式中  $e_0$  为所有外力的合力  $R$  在验算截面的作用点对基底重心轴的偏心距 (m);  $s$  为在截面重心至合力作用点的延长线上, 自截面重心至验算倾覆轴的距离 (m), 在刚体假定条件下, 其倾覆轴为基础边缘, 对于凹多边形基础, 其倾覆轴为基底截面的外包线。一般情况下挡土墙基底截面重心至合力作用点的延长线垂直于底板前缘线, 此时  $s=0.5B$ , 代入式 (8) 可得

$$K_0 = 0.5B/e_0 \quad (9)$$

式 (8) 为公路和铁路桥涵地基与基础设计规范 (JTG D63—2007 和 TB 10002.5—2005) 规定的桥涵墩台基础抗倾覆稳定计算公式, 相应的许用安全系数值根据不同的荷载组合 JTG D63—2007 分别采用 1.2, 1.3 和 1.5, 而 TB 10002.5—2005 分别采用 1.2 和 1.5。JTG D63—2007 条文说明和文献[14]用其它方式推导出式 (8), 其表现形式可理解为将合力移到验算截面

重心后再对前趾取矩, 稳定力矩与倾覆力矩之比。

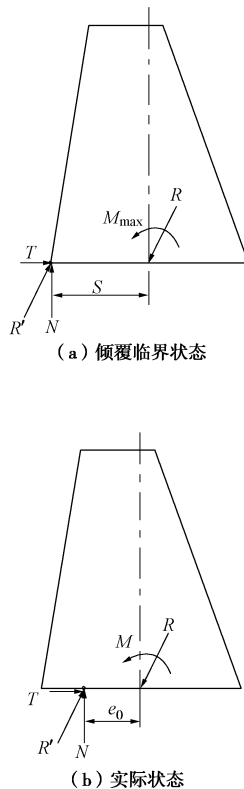


图3 倾覆稳定示意图

Fig. 3 Diagram of overturning stability

(2) 假定出现倾覆破坏时墙趾附近基础面地基反力为地基极限承载力

前面的分析假定挡土墙与地基均为刚体, 而实际上挡土墙与地基不可能为刚体, 特别是地基, 当为土质地基时, 刚度不大, 在发生倾覆破坏前墙趾地基土可能已发生破坏, 因此, 多数讨论倾覆稳定的文献<sup>[5-9]</sup>均假定出现倾覆破坏时墙趾附近基础面地基反力为地基极限承载力。如图4所示, 此时挡土墙最大抗倾覆力矩为  $M_{\max} = P_u s = P_u(B - B_1)/2$ , 实际上  $s$  为结构处于倾覆临界状态时的偏心距, 换句话说,  $s$  为保证结构倾覆稳定时的最大(极限)偏心距, 由式(8)可直接定义倾覆稳定系数为保证基底倾覆稳定时的最大(极限)偏心距与基底实际偏心距之比。此时倾覆稳定系数计算的关键在于确定  $s$  值。

由  $\sum Y = 0 \Rightarrow \sum G = P_u = p_u \cdot B_1 \Rightarrow B_1 = \sum G / p_u$  可得

$$s = (B - B_1)/2 = 0.5(B - \sum G / p_u) = 0.5B(1 - \bar{\sigma} / p_u), \quad (10)$$

式中,  $\bar{\sigma}$  为基底平均压应力,  $\bar{\sigma} = \sum G / B$ 。

将式(10)代入式(8), 可得

$$K_0 = \frac{s}{e_0} = \frac{0.5(B - \sum G / p_u)}{e_0} = \frac{0.5B(1 - \bar{\sigma} / p_u)}{e_0}. \quad (11)$$

由式(11)可知新公式避免了传统抗倾覆稳定分析存在的各种问题: ①按新公式计算倾覆稳定系数, 考虑到地基承载力的影响, 对于同一挡土墙, 地基极限承载力  $p_u$  (地基刚度) 越大,  $K_0$  越大; 岩基的地基极限承载力远大于土基, 当假定  $p_u$

无限大(地基为刚体)时,  $s$  达到最大值,  $s = 0.5B$ 。可见式(9)是式(11)的一个特例。②计算结果与转动中心的选取无关, 而是与实际受力状态的偏心距相关, 倾覆稳定系数与偏心距  $e_0$  成反比。③公式推导过程对力矩的定义清晰, 计算公式本身与力矩无关。④计算得到的安全系数是唯一的, 不会发生误解。垂直荷载  $\sum G$  越大,  $K_0$  越小。

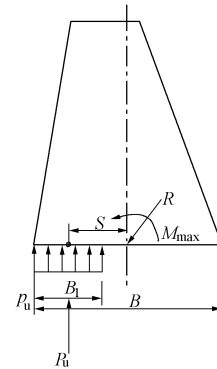


图4 倾覆临界状态示意图

Fig. 4 Schematic of overturning limit state

新公式最大的问题是假定挡墙在极限状态时受到的竖向荷载与实际受力状态一致, 实际上一般情况下该假定并不成立。通常认为影响挡土墙倾覆稳定的荷载主要是主动土压力, 但一般情况下主动土压力并非水平作用于挡墙, 而是与水平面存在一夹角, 因此主动土压力增大也影响到竖向荷载的变化。考虑到主动土压力的竖向分量比水平分量小得多, 占整个挡墙受到的竖向荷载的比例就更小, 为了方便公式推导而做出的这一假定对计算结果的影响并不大。

### 3 新公式的实质是地基承载力状态控制倾覆稳定

实际上, 抗倾覆稳定性与基底的应力状态是密切相关的, 而基底的应力状态可由偏心距反映。由式(9)可得到相应于规定的安全系数许用值的允许最大偏心距(许用值)。也可按式(9)计算出规范规定应力状态下相应的抗倾覆稳定安全系数。

#### 3.1 美国规范地基受力状态与抗倾覆稳定安全系数的关系

《美国公路桥梁设计规范—荷载与抗力系数设计法》(1994)(简称《AASHTO—LRFD》规范)11.6.3.3条, 对于墩台、挡土墙抗倾覆稳定, 规定用偏心距限值表达: 对于土体上的基础, 反力的合力作用位置应位于基底中央的  $B/2$  范围内, 即最大偏心距为  $B/4$ ; 对于岩石上的基础, 反力的合力作用位置应位于基底中央的  $3B/4$  范围内, 即最大偏心距为  $3B/8$ 。可以用式(9)计算出相应的抗倾覆安全系数分别为2(土基)和1.33(岩基)。

美国规范《挡土及防洪墙》(EM 1110—2—2502)的抗倾

覆稳定验算同样不是以安全系数判断,而是以基底受压面积进行判断。对土质地基,一般工况要求基底 100%受压,特殊工况基底最少 75%受压;对岩质地基,一般工况要求基底最少 75%受压,特殊工况基底最少 50%受压;对于地震工况,只要求合力作用在基底。由基底最小受压面积可推算出相应的最大偏心距,再由式(9)可计算出相应的抗倾覆安全系数。整理后可得到《挡土及防洪墙》(EM 1110—2—2502)的挡土墙抗倾覆稳定标准如表 1。

表 1 《挡土及防洪墙》的抗倾覆稳定标准

Table 1 Overturning stability criteria of “retaining and flood walls”						
工 况	基底受压面积		最大偏心距 $e$		抗倾安全系数	
	土基	岩基	土基	岩基	土基	岩基
一般工况	100%	75%	$B/6$	$B/4$	3	2
特殊工况	75%	50%	$B/4$	$B/3$	2	1.5
地震工况	合力在基底		$B/2$	$B/2$	1	1

3.2 国内规范地基受力状态与抗倾覆稳定安全系数的关系

《建筑地基基础设计规范》要求挡土墙地基承载力计算时,基底合力的偏心距不应大于 0.25 倍的基础宽度。由式(9)换算出相应的安全系数为 2,大于该规范要求的 1.6。《公路路基设计规范》要求挡土墙基底合力的偏心距,对于土质地基不应大于  $B/6$ ;对于岩基不应大于  $B/4$ 。由式(9)换算出相应的安全系数为 3 和 2,远大于该规范要求的许用安全系数。因此,按《建筑地基基础设计规范》和《公路路基设计规范》进行挡土墙设计,只要挡土墙地基承载力满足规范要求,抗倾覆稳定一定满足,不必再进行抗倾覆验算。

水利规范对土质地基上挡土墙不同荷载组合的基底应力最大值与最小值之比(不均匀系数)给出规定允许值,可换算出相应的偏心距,再由式(9)换算出相应的安全系数,见表 2。

表 2 基底应力不均匀系数与抗倾覆稳定安全系数的关系

Table 2 Relationship between coefficient of non-uniform basal stress and safety factor of overturning stability						
地基土质	允许的 $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$		最大偏心距 $e$		抗倾安全系数	
	基本组合	特殊组合	基本组合	特殊组合	基本组合	特殊组合
松软	1.50	2.00	$B/30$	$B/18$	15	9
中等坚实	2.00	2.50	$B/18$	$B/14$	9	7
坚实	2.50	3.00	$B/14$	$B/12$	7	6

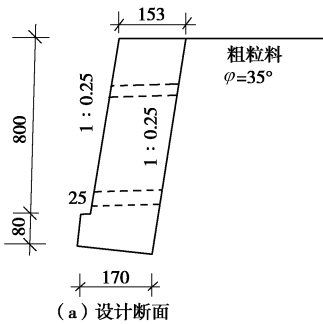
对基底压应力不均匀系数的规定,主要是防止产生过大的不均匀沉降,从而避免挡土结构倾斜事故。由表 2 可知,满足基底应力验算要求的土基上的挡土墙,其抗倾覆安全系数远大于规范要求的安全系数允许值。也就是说,土基上的挡土墙当地基承载力满足规范要求时,根本就不存在发生倾覆的问题。因此,《水闸设计规范》和《堤防工程设计规范》对土基上的挡土墙没有要求进行抗倾覆验算。《水工挡土墙设计规范》规定,当土基上的挡土墙基底应力不均匀系数满足规范要求时,

可不进行抗倾覆稳定计算。但也有专家<sup>[17]</sup>认为:基底的压应力最大值和最小值之比的指标,并不能完整地反映基础不均匀沉降的程度;有时为了满足这条要求,不得不加大结构断面,造成浪费。《水工挡土墙设计规范》要求对土质地基挡土墙进行地基变形核算,以保证墙体发生的整体沉降和倾斜不会危及安全和使用功能。如果整体沉降和基础倾斜较小,为节约工程投资,应可适当放松对基底不均匀系数的要求。

对于岩基上的挡土墙的基底应力验算,考虑到岩基上挡土墙一般不存在由于地基不均匀沉降导致的不良后果,因此规范对不均匀系数不作限制。《水工挡土墙设计规范》规定:在各种计算情况下,最大基底应力不大于地基允许承载力;除施工期和在地震情况外,挡土墙基底不应出现拉应力;在施工期和在地震情况下,挡土墙基底拉应力不应大于 100 kPa。基底不应出现拉应力时相应的最小抗倾覆安全系数为 3。最大基底应力不大于地基允许承载力,确保岩基和底板不会因受力过大而产生破坏,基底合力作用点位于墙趾以内且距离墙趾有一定的距离( $e_0<0.5B$ ),挡土墙不会发生倾覆破坏,但具体的安全系数值因不同的岩基允许承载力而异。当岩基允许承载力小于 500 kPa 时,岩基全风化或岩质较软,其地质条件与土质地基基本相似,按规范要求应按土质地基进行基底应力验算。当岩基允许承载力为 500 kPa,基底拉应力等于 100 kPa 时,偏心距为  $2B/9$ ,相应的抗倾覆安全系数为 2.25,大于规范要求的安全系数值;岩基承载力越大,偏心距越小,安全系数越大。可见对于岩基,当地基承载力满足规范要求时,同样不存在发生倾覆的问题。

3.3 挡土墙不均匀沉降容易被误认为倾覆破坏

文献[18]介绍了一个路肩挡土墙倾覆破坏实例:南平牛头弯至垒丹段 K8+890—K8+902 公路路肩式挡墙,设计图套用交通部挡土墙标准图,见图 5(a))。该挡土墙于 1995 年 12 月初建成,1996 年 4 月中旬发生破坏,墙身向外倾斜,并伴有竖向裂缝。破坏形式见图 5(b))。由于挡土墙竣工后,墙前土未及时回填压实,经过雨季降雨后,雨水下渗,基底黏土浸水湿软、靠近墙趾部分尤为严重。墙趾部分地基承载力不足以支承墙趾应力,基底在外力作用下,产生不均匀沉降,墙趾部分陷入地基(现场开挖后测得墙趾陷入地基内 22 cm 左右),导致挡土墙发生破坏。笔者按倾覆破坏进行研究分析,而事故的实质是地基不均匀沉降引起挡墙严重向前倾斜。



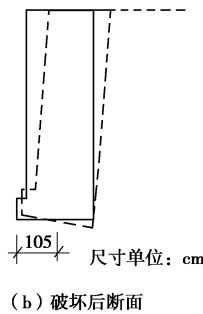


图5 某路肩挡土墙设计图与破坏后断面图<sup>[18]</sup>

Fig. 5 Design section of a retaining wall and section after damage<sup>[18]</sup>

在工程事故调查中,容易出现把地基不均匀沉降引起的严重倾斜事故简单归结为倾覆破坏,这可能是GB 5007—2002《建筑地基基础设计规范》的条文说明中认为“现实工程中倾覆稳定破坏的可能性又大于滑动破坏”的主要原因。GB 5007—2002为了提高挡土墙的抗倾覆稳定性,把许用安全系数由原来的1.5调整成1.6,但更重要的是规范补充要求挡墙基底合力偏心距不应大于0.25倍的基础宽度。

当墙踵压应力刚为0时,相应的安全系数不小于3,远大于规范要求的许用安全系数值,因此,如果只按抗倾覆安全系数设计挡土墙可能会出现墙踵基础与地基脱离接触的情况,若水压力在这一侧,基础的渗透压力会随之增大,可能会出现不利于抗倾覆稳定的恶性循环。抗倾覆安全系数越低,偏心距越大,基底应力越集中向墙趾。如果墙体较高,地基较软,基础前趾下的地基可能因受过大压应力而产生塑性变形,从而使得基础出现较大的不均匀沉降,导致挡墙前倾,挡墙前倾又进一步加大偏心距,从而扩大前趾地基的塑性区,形成恶性循环,最终可能导致墙体发生倾覆破坏。因此,对于土基上的挡土墙设计应避免墙踵基础与地基脱离接触的情况,即偏心距不应大于 $B/6$ 。

## 4 结 论

(1) 传统抗倾覆稳定分析由于其理论分析的假定前提不合理,存在各种问题:倾覆稳定系数与地基承载力(即地基刚度)无关,转动中心位置的选取和对抗倾覆稳定力矩、倾覆力矩的不同理解影响稳定系数计算结果,而且容易形成不正确的安全概念。

(2) 可定义倾覆稳定(安全)系数为保证基底倾覆稳定时的最大(极限)偏心距与基底实际偏心距之比。假定挡土墙在倾覆临界状态时受到的竖向荷载与实际受力状态一致,地基反力为矩形分布,其值为地基的极限承载力,据此可导出挡土墙倾覆稳定系数计算公式,由该式可知: $K_0$ 随地基极限承载力的增大而增大,随垂直荷载的增大而变小,与偏心距成反比。

(3) 抗倾覆稳定性与基底的应力状态是密切相关的,通过对各相关规范的地基承载力验算要求与抗倾覆稳定安全系

数的对比研究表明,只要挡土墙地基承载力满足规范要求,抗倾覆稳定一定满足,不必再进行抗倾覆验算。

## 参考文献:

- [1] SL 379—2007 水工挡土墙设计规范[S]. 2001. (SL 379—2007 Design specification for hydraulic wall[S]. (in Chinese))
- [2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [3] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S]. 2004. (JTG D30—2004 Specification for design of highway subgrades[S]. 2004. (in Chinese))
- [4] 王渭漳, 吴亚中. 墙背土压力分布计算的新理论及其工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996. (WANG Wei-zhang, WU Ya-zhong. New theory and engineering application on earth pressure distribution of wallboard[M]. Beijing: China Communications Press, 1996. (in Chinese))
- [5] 胡玉银. 挡土墙抗倾覆稳定性分析[J]. 同济大学学报, 1993, 23(3): 321 - 323. (HU Yu-yin. Analysis of overturning stability of retaining wall[J]. Journal of Tongji University, 1993, 23(3): 321 - 323. (in Chinese))
- [6] 黄 勇. 挡土墙抗倾覆稳定性分析[J]. 建筑结构, 2002(2): 44 - 45. (HUANG Yong. Analysis on toppling stability for retaining wall[J]. Architectural Structure, 2002(2): 44 - 45. (in Chinese))
- [7] 曾 革, 周志刚. 公路挡土墙抗倾覆稳定性设计方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1154 - 1157. (ZENG Ge, ZHOU Zhi-gang. Design method of toppling stability of highway retaining wall[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1154 - 1157. (in Chinese))
- [8] 张国祥, 刘宝琛. 墩台基底的倾覆稳定系数新定义[J]. 铁道学报, 2001, 23(1): 72 - 75. (ZHANG Guo-xiang, LIU Bao-chen. New definition of safety factor on toppling stability for fondue of pier and abutment[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(1): 72 - 75. (in Chinese))
- [9] 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 Cheng-hua. The discrimination of toppling stability calculation for retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(4): 72 - 76. (in Chinese))
- [10] 余雄飞. 地基软硬程度与挡土墙倾覆稳定性[J]. 岩土工程

- 学报, 1998, **20**(3): 94 - 46. (YU Xiong-fei. Effect of soil compressibility on toppling stability for retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(3): 94 - 96. (in Chinese))
- [11] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路挡土墙设计与施工技术细则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (The Second Highway Investigation and Design Institute Co. Ltd. of PRC. Technical guidelines for design and construction of highway retaining walls[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [12] 余雄飞, 姚 秦. 关于挡墙倾覆稳定分析的核心问题[J]. 华东公路, 1996, **19**(3): 57 - 59. (YU Xiong-fei, YAO Qin. Key problem toppling stability for retaining wall[J]. East China Highway, 1996, **19**(3): 57 - 59. (in Chinese))
- [13] 方玉树. 挡土墙抗倾覆稳定性计算方法的改进[J]. 岩土工程界, 2009, **12**(6): 18 - 20. (FANG Yu-shu. Improvement of calculation method for retaining wall overturning stability[J]. Geotechnical Engineering World, 2009, **12**(6): 18 - 20. (in Chinese))
- [14] 周相略. 关于挡土墙抗倾覆稳定系数计算的讨论[J]. 中南公路工程, 1983(1): 45 - 53. (ZHOU Xiang-lue. Discussion on the retaining wall's overturning stability coefficient calculation[J]. Central South Highway Engineering, 1983(1): 45 - 53. (in Chinese))
- [15] AASHTO. AASHTO-LRFD Bridge Design Specification and Commentary[M]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 1994.
- [16] US Army Corps of Engineers. EM 1110-2-2502 Retaining and Flood Walls[S]. 1989.
- [17] 茹建辉. 对防洪墙安全系数选择问题的商榷[J]. 建筑科学与经济, 2009, **19**(1): 31 - 35. (RU Jian-hui. Discussion for choosing problem on flood wall stability coefficient[J]. The Scientific Technology of Architecture and Economy, 2009, **19**(1): 31 - 35. (in Chinese))
- [18] 郑建荣, 严大照, 王福根. 公路挡土墙稳定问题研究[J]. 森林工程, 1999, **15**(2): 41 - 42. (ZHENG Jian-rong, YAN Da-zhao, WANG Fu-gen. Research on the stability of highway retaining wall[J]. Forest Engineering, 1999, **15**(2): 41 - 42. (in Chinese))
- 

## 本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司  
封 3 北京理正软件股份有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 济南普业机电技术有限公司  
后插 2 台州建元勘察仪器有限公司